

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ МО

ГОУ ВПО МО  
"КОЛОМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

*А. А. Богуславский*

# **ОДОМАШНЕННАЯ СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА**

**Часть 1**

Коломна  
2009

**УДК 53**  
**ББК 22.3**  
**Б73**

Рекомендовано к изданию редак-  
ционно-издательским советом  
КГПИ

Рецензент:

С. М Соколов, доктор физико-математических наук, профессор

**Богуславский А. А.**

**Б73** Одомашненная современная физика. Ч. 1. / А. А. Богуславский. – Коломна : Коломенский гос. пед. институт, 2009. – 143 с.

Сборник представляет собой попытку ответа на стратегическую образовательную инициативу Нобелевского лауреата академика В. Л. Гинзбурга: предоставить будущему учителю материалы непосредственно связанные с содержанием образовательного процесса по физике, в частности, посвященные теснейшей взаимосвязи так называемой современной физики и мира повседневных высокотехнологичных вещей.

В первой части сборника представлены материалы американского института физики, посвященные использованию достижений физики в научных исследованиях, промышленности и в повседневной жизни. Читателю предоставляется возможность познакомиться с образовательными материалами сайта Нобелевского комитета и популярного сайта «Как работают вещи».

Во второй части сборника описана методика получения иллюстраций (сканограмм) повседневных вещей, в которых использованы достижения классической и современной физики. Представлена коллекция иллюстраций, которая может быть использована в преподавании физики в школе и ВУЗе.

Материал предназначен для широко круга читателей.

**УДК 53**

**ББК 22.3**

© А. А. Богуславский, 2009

© ГОУ ВПО МО «Коломенский государственный педагогический институт», 2009

## Оглавление

Физика на рубеже тысячелетий .....	5
Физика стимулирует промышленность .....	6
Физика создает рабочие места .....	9
Физика объединяет человечество .....	12
Физика сплела всемирную паутину WWW .....	15
Физика сохраняет Ваши деньги .....	18
Физика проектирует будущее .....	22
Физика очищает воздух .....	25
Физика обеспечивает прогресс транспорта .....	29
Физика заполняет Ваш дом .....	32
Физика заботится о здоровье .....	35
Физика создает новый бизнес .....	38
Физика создает дисплей .....	42
Физика защищает людей .....	46
Физика сохраняет жизнь .....	50
Физика расширяет представление о звуке .....	53
Астрофизики создают новые технологии .....	57
Структура материи .....	62
1. Структура материи .....	62
2. Революционные идеи .....	62
3. Вопрос, оставшийся без ответа .....	62
4. Научные приборы .....	63
5. Спин: свойство частиц .....	63
6. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса. ....	64
Сохранение момента импульса .....	64
7. Классификация частиц .....	65
8. Другая характеристика....Странность .....	65
9. Появляется кварк .....	66
10. Дробный заряд и ненаблюдаемость кварков .....	66
11. Цветной заряд .....	66
12. Кварки удерживаются вместе или "кварки находятся в заключении" .....	67
13. Масса, частицы и кварки .....	68
14. Носитель ядерной силы .....	68
15. Можно ли увидеть кварки? .....	69
16. Что можно сказать о дробных зарядах? .....	69
17. Даже кварки распадаются .....	70
18. Пропавшее очарование .....	70
19. Еще кварки? .....	71
20. Возможности Стандартной модели .....	71
21. Открытие топ-кварка .....	72
22. Фундаментальны ли кварки? .....	73

Об атомах – популярно!.....	74
Что такое атомы?.....	74
Интересные факты. ....	77
Как работают полупроводники.....	78
Откроем тайны кремния.....	78
Добавление примесей в кремний – допирование кремния.....	80
Создание диода.....	81
Транзисторы и чипы.....	83
Светит больше – греет меньше.....	84
Как действует светодиод.....	86
Преимущества светодиодов.....	86
Революция в светотехнике.....	87
Развитие полупроводниковых источников света (по американской программе).....	89
Возможно ли «светлое будущее» в России?.....	89
Свет из гетеропереходов (как работают светодиоды).....	91
Лазер: волшебный луч.....	103
Лазерная указка.....	108
Квантовый светоч.....	111
С головы на ноги.....	114
Квантовое усиление света.....	115
Оптический квантовый генератор.....	117
Забывтые отцы лазера.....	119
Как работает лазер?.....	120
Вебер, Дике и Бломберген.....	121
Как работает лазерный принтер и ксерокс.....	127
Стадии печати:.....	131
Как работает лампа-вспышка.....	137
Как создается вспышка света.....	137
Повышение напряжения.....	140
Генератор и конденсатор.....	142

Материалы американского института физики  
([www.webster.aip.org](http://www.webster.aip.org))

## Физика на рубеже тысячелетий

# Физика стимулирует промышленность

**Лазеры** До 1954 года на разработку лазера, который явился предшественником лазера, американские правительственные фонды выделили около 30,000\$. Эти работы велись под руководством физика Чарльза Таунса. Сегодня в отраслях промышленности, в которых не обойтись без лазеров, объемы производства составляют десятки миллиардов долларов. Лазеры применяются в самых разнообразных областях: от хирургии до проигрывателей компакт-дисков и сканеров штрих-кодов на бакалейных складах. Открытие, о котором сначала думали, что оно не найдет практического применения, сделало нашу повседневную жизнь лучше и удобнее. В результате продолжающихся исследований, проводимых в университетах, промышленных и государственных лабораториях, число различных типов лазеров и количество их применений постоянно растет.

## ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА



- Лазеры применяются для сварки, сверления и резания различных материалов – от бумаги и ткани до алмаза и сверхтвердых сплавов.
- На автомобиле "Кадиллак" сварка семнадцати различных панельных сборок выполнена с помощью лазера.
- Лазеры позволяют более точно производить

сверление и сварку, причем инструмент – луч лазера – никогда не изнашивается.

• Первые исследования в области лазерной резки материалов проведены в 1950-е годы по заказу военно-морских и воздушных сил США.

## ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

- Лазеры используются для чтения и записи данных на оптических дисках. Применение лазеров привело к созданию систем хранения информации очень высокой плотности.
- В 1995 г. мировой рынок оптических систем хранения информации составил 3.5 миллиарда долларов.



## ЛАЗЕРНАЯ ХИРУРГИЯ



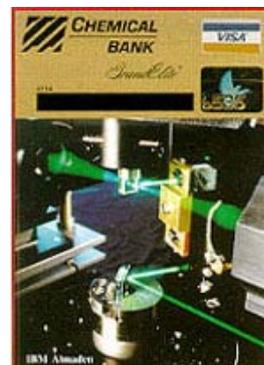
- Лазеры применяются для коррекции зрения, удаления опухолей и коронарных тромбов, для заживления ран.
- Лазерные офтальмологические операции занимают несколько минут и не требуют длительного пребывания в больнице.
- Методы лазерной хирургии позволили уменьшить слепоту, вызванную диабетом, на 60 %.

## Лазеры: от научных разработок до бытового использования

LASER = **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГОЛОГРАММ

- Голограммы, сделанные с помощью лазера, широко используются как средство обеспечения безопасности и защиты от подделок.
- В будущем, вся информация библиотеки конгресса США сможет уместиться на голографическом носителе информации размером с кусочек сахара.



### ЛАЗЕРНЫЙ СКАНЕР



- Лазерные сканеры применяются на складах и в магазинах для считывания штрих-кодов, в качестве датчиков при исследовании окружающей среды, в радарных устройствах, в лотерейных машинах, анализаторах крови и в кассах на скоростных автодорогах.

### ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

- Оптоволоконный кабель действует как проводник лазерного излучения. По одному оптоволокну можно одновременно передавать 80,000 телефонных разговоров.
- Оптоволокно является основой всемирной телекоммуникационной индустрии, стоимость которой оценивается величиной порядка 100 миллиардов долларов.



### УДАЛЕНИЕ ПИГМЕНТНЫХ ПЯТЕН И РОДИНОК



- Средствами лазерной хирургии операции выполняются намного быстрее и точнее, чем скальпелем. В лазерной хирургии меньше потери крови при операции. В ряде случаев оказывается ненужным переливание крови.
- Лазерный луч упрощает удаление шрамов, родинок и татуировок.

## Лазеры: основные исторические даты

*На меня упал великоленный свет*

(Альберт Эйнштейн об открытии лазерного механизма).

**1860** – Дж. Максвелл сформулировал уравнения, описывающие электромагнитные (в том числе световые) волны.

**1900** – М. Планк открыл "квант" света.

**1917** – А. Эйнштейн провел фундаментальное исследование природы света, открыл принципы спонтанного и вынужденного излучения.

**1953** – Физик Ч. Таунс в результате исследований по созданию источника микроволнового излучения для коммуникационных систем создал первый мазер (Нобелевская премия, 1964 г.).

**1958** – Ч. Таунс и А. Шавлов (Лаборатория Белла) приступили к созданию "оптического мазера", который позже назовут лазером.

**1960** – Т. Мэйман использует рубиновый кристалл для создания первого работающего лазера.

**1961-65** – А. Шавлов разделил Нобелевскую премию (1981 г.) с Н. Бломбергенем за работы в области лазерной спектроскопии, которая позволила проводить химический анализ таких веществ, как воздушные аэрозоли. А. Джаван, Д. Херриот и В. Беннетт впервые используют лазер в телекоммуникационных приложениях. Корпорации General Electric, IBM и финансируемая правительством Лаборатория Линкольна объявили о создании полупроводникового лазера. С. Пател разработал лазер на

углекислом газе, который сейчас широко применяется в промышленности для сварки, резки и сверления.

**1968-69** – Агентство NASA запускает первый спутник, оборудованный детектором лазерного излучения. Теперь можно с помощью наземных лазеров передавать информацию на орбитальные спутники. Астронавты размещают лазерные отражатели на Луне.

**1982** – В ответ на значительное увеличение подделок кредитных карточек VISA начинает использовать лазерные голограммы.

**1980-е-90-е** – Лазеры составляют основу многомиллиардной промышленности. Они используются в хирургии, телекоммуникации, навигации, сварке и резке материалов, в торговле для считывания штрих-кодов, в принтерах, для защиты от подделок, в проигрывателях компакт-дисков и в военных системах.

# Физика создает рабочие места

**Компьютеры** Государственные программы поддержки исследований в области физики плазмы, физики полупроводников и магнитных материалов позволили создать одну из самых больших отраслей промышленности в Америке. Правительство продолжает поддерживать лидирующую роль этой промышленности и сегодня. На долю электронной и полупроводниковой промышленности приходится около 6,5% валового производства США (400 миллиардов долларов и 2,6 миллионов рабочих мест). Сегодня компьютеры и микропроцессоры используются повсюду: в персональных компьютерах, в автомобилях, сотовых телефонах, телевизорах, для управления движением транспорта, для управления перекачкой нефтепродуктов и газа, в системах цифровой телефонной связи. Влияние компьютеров и микропроцессоров на нашу повседневную жизнь столь велико, что трудно даже перечислить все области их применения.

- Физические исследования в области магнитных материалов, тонких пленок и электроники привели к созданию компьютерных устройств с большим объемом памяти.



- Один жесткий диск диаметром 3,5" может хранить информации в 1000 раз больше, чем первый жесткий диск.
- Объем производства магнитных устройств памяти составляет 60 миллиардов долларов, тогда как объем производства видео- и аудиокассет менее 40 миллиардов.
- Большие объемы памяти необходимы в различных прикладных областях, например в системе здравоохранения для хранения диагностических изображений.

## ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Исследования в области физики плазмы, полупроводников, литографии и лазеров привели к созданию интегральных схем и микропроцессоров.

- В 1995 году объем мирового производства полупроводников составил 150 миллиардов долларов, в этом производстве было занято 250 000 американцев.
- Стоимость одного мегабайта памяти уменьшилась с 550 000\$ 25 лет назад до 1,5\$ сегодня.
- Чип микропроцессора содержит около 30 миллионов транзисторов и может совершать 500 миллионов операций в секунду.



## ПЕРСОНАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ



- Исследования физиков в области магнитных материалов, тонких пленок и полупроводников привели к созданию компактных и недорогих персональных компьютеров.
- В производстве компьютеров в США занято свыше 1 миллиона человек, ежегодный доход этой отрасли – свыше 100 миллиардов долларов.
- Компании США ежегодно продают 9 миллионов ПК. Компьютеры есть в 32% американских семей
- Производительность микропроцессора на основе кремния за 25 лет увеличилась в 25 000 раз.

*В будущем компьютеры будут весить не больше 1,5 тонн. (Журнал "Popular Mechanics", 1949)*

**1940-е** – Президент фирмы IBM Томас Уотсон предсказал, что "мировой рынок потребует не более пяти компьютеров". Первая цифровая электронная вычислительная машина была разработана исследователями в государственном колледже Айова. ЭНИАК – первая большая ЭВМ, она была разработана по заказу армии США. Ученые из лаборатории Белла – Дж. Бардин, У. Братейн, У. Шокли изобрели полупроводниковый транзистор (Нобелевская премия, 1956).

**1950-е** – В 1956 г. в США было 10 ЭВМ. Первый компьютер, поступивший в продажу – ЮНИВАК. Разработан первый магнитный жесткий диск и первая интегральная схема. Впервые в радиоприемниках использованы транзисторы.

**1960-е – 70-е** – К. Олсон, основатель и президент фирмы DEC заявил: "Нет причин, которые препятствовали бы появлению компьютера в каждом доме". Появились первый

микропроцессор, гибкие магнитные диски и персональные компьютеры. В часах использованы интегральные схемы.

**1980-е – 90-е** – На рынке появились персональные компьютеры фирмы Apple Macintosh и IBM PC. Образован консорциум компаний полупроводниковой промышленности и правительства США – SEMATECH, который помог восстановить лидирующее положение США в этой отрасли. Микропроцессоры используются в системах цифровой связи, в сотовых телефонах и автомобилях.

**БУДУЩЕЕ** – Лазеры используются для передачи больших объемов информации, производительность компьютеров растет. Возможно хранение информации на молекулярном уровне (нанотехнологии), что приведет к уменьшению размеров все более мощных компьютеров. Полупроводниковый рынок станет лидирующей отраслью промышленности, уступая только сельскохозяйственному производству.

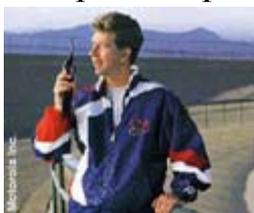
От научных разработок до бытового использования

# Компьютеры



## Миниатюризация

- ЭНИАК – первый компьютер, весил 30 т, занимал площадь свыше 100 м<sup>2</sup> и содержал 19 000 электронных вакуумных ламп.
- Первый кремниевый микропроцессор (1971) размером 5,5×5,5 мм был мощнее ЭНИАКа. В современных ПК используются еще более мощные микропроцессоры.

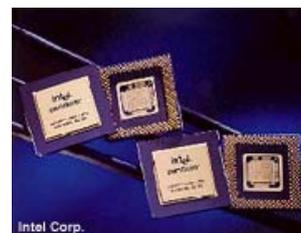


## Повседневные вещи

- Миникомпьютеры управляют памятью и предоставляют возможность программирования в телефонах, автомобилях, телевизорах, весах и т.п.

### Микропроцессор Пентиум®

- В 1978 г. микропроцессор 8086 стоил 360\$.
- В 1996 году микропроцессор стоил 321\$, но его производительность была в 150 раз выше.



## Электроника в автомобилях

- Микрокомпьютеры в автомобиле собирают данные от множества датчиков, что позволяет оптимизировать работу двигателя, уменьшить шум автомобиля и выброс газов в атмосферу.
- Стоимость электроники автомобиля более чем вдвое превышает стоимость "железа".

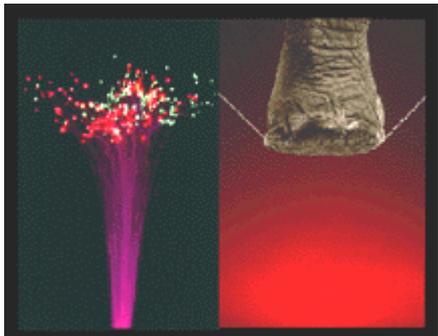


# Физика объединяет человечество

## Телекоммуникации

Телекоммуникационная индустрия, в которой заняты 360 000 американцев, ежегодно зарабатывающая 1,5 триллиона долларов, своим рождением обязана исследованиям физики в области электродинамики, распространения радиоволн и поведения электрических цепей. Современный пример связи физики и телекоммуникаций: Интернет, сначала созданный физиками, работавшими над изучением элементарных частиц, как способ научного общения, а теперь обеспечивающий свыше 50 млн. человек связью, начиная от помощи при землетрясениях до заказов продуктов. Исследования физиков в университетах, государственных и промышленных лабораториях позволяют человечеству обмениваться информацией со все большей скоростью.

## ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА



- Физики разработали новые материалы, электронику и лазеры, которые сделали оптоволоконные линии связи более быстрыми, более дешевыми и с меньшим уровнем шумов по сравнению с медным проводом.
- стоимость трансатлантического телефонного канала уменьшилась с 60 000 долл./год в 1956 г. до 60 долл./год.
- рынок для локальных телекоммуникационных услуг – 100 миллиардов/год.
- Научные исследования (лазеры, теория оптических волокон): 1950-60 гг. Лаборатории армии США, АЕС (теперь DOE)
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.: DARPA, NSF, NIST

## ИНТЕРНЕТ



- Информация в электронном виде передается по всему миру с помощью спутников, волоконной оптике и мощных компьютеров.
- Сеть ARPAnet, предшественник Интернета, представляла собой сеть компьютеров, которая создавалась для обеспечения устойчивой связи в случае ядерной войны.
- В 1971 г. впервые сетью ARPAnet были связаны 23 компьютера. Сегодня сеть Интернет объединяет сотни миллионов компьютеров.
- Научные исследования: 1960-70-ые гг.: DARPA  
Прикладные исследования: 1980-1990 гг.: DARPA, NSF, DOE, NIH, NASA

## ФАКС



Создание современного средства связи – факса стало возможным в результате использования достижений в области высокочастотной электроники, волоконной оптики и телекоммуникаций.

Область промышленности, связанная с производством и эксплуатацией факсов приносит около 3 млрд. долларов ежегодно.

Научные исследования: 1940-1970 гг.: DARPA, NASA.

Прикладные исследования: 1970-1990 гг.: DARPA, NASA

## От научных разработок до бытового использования

### Телекоммуникации

#### Спутники



- В основе спутниковой связи лежат исследования физиков в области электроники, распространения радиоволн, космоса и атмосферы Земли.

- Спутниковая связь позволяет одновременно осуществить до 100 000 телефонных разговора.

#### Портативные телефоны



- Создание радио- и сотовых телефонов стало возможным в результате исследований в области электроники, источников питания и систем приема и передачи радиоволн.

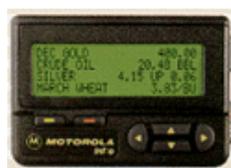
#### Сетевой принтер



- Создание высокоскоростных принтеров, работающих в сети, стало возможным в результате исследований в области высокочастотной электроники и волоконной оптики.

- Доход промышленности по производству печатающих устройств составляет в США 10 млрд. долларов в год.

#### Пейджеры



- Работа пейджера основана на достижениях в области исследования радиоволн и микроэлектроники.

**Телефон имеет слишком много недостатков, которые не позволяют рассматривать его как средство связи. Устройство определено не имеет для нас никакой ценности. (Западный Союз, служебная записка, 1876)**

**1838** – С. Морзе впервые продемонстрировал телеграф.

**1876** – Александр Грэхем Белл впервые разговаривал по телефону.

**1909** – Нобелевская премия по физике присуждена Г. Маркони за его вклад в создании радиосвязи.

**1910-ые** – Титаник после столкновения с айсбергом посылает сигнал бедствия по радио. Правительства различных государств стали выдавать лицензии на использование беспроводных коммуникаций.

**1930-ые** – Принят закон о коммуникациях, создана Федеральная комиссия связи (США). Начались первые регулярные телепередачи.

**1947** – Физики в исследовательских лабораториях изобрели твердотельный транзистор (Нобелевская премия, 1956), с которого ведет отсчет компьютерная и телекоммуникационная революция.

**1960-ые** – Агентство NASA и лаборатория Бэлла запустили первый коммерческий спутник связи. Агентство DARPA начало работу над проектом, который привел к созданию Интернет. Созданы первые коммерческие лазеры. Слова астронавта Нейла Арм-

стронга с Луна на Землю переданы с помощью радиосигналов.

**1970-ые** – Исследователи в фирме Corning Glass разработали первое коммерчески доступное оптическое волокно.

**1980-ые** – Фотографии Сатурна проходят по линиям связи 1 миллиард миль до Земли. Начинается разработка Интернет. Факсы могут быть посланы по обычным телефонным линиям. Разрабатываются переносные и сотовые телефоны.

**1990-ые** – В университете штата Иллинойс разработана программа Mosaic, которая используется для быстрого размещения документов в Интернет.

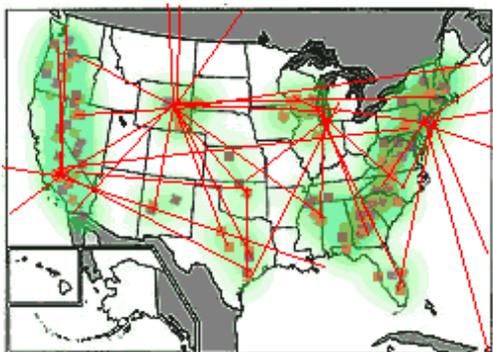
**БУДУЩЕЕ** – Услуги Интернета могут стоить около 13.5 млрд.долларов к 2000 г. Банковские операции, покупки в магазинах, оплата налогов будут выполняться с помощью электроники. Будут сконструированы волоконно-оптические телекоммуникации с большой пропускающей способностью. "Интеллектуальное" программное обеспечение приблизит к нам Интернет и обеспечит нас информацией, доступом к банковским счетам, новостям, развлекательным страницам и т.п.

# Физика сплела всемирную паутину WWW

## *Интернет*

Работы по созданию Интернета начались в США в 1960-х гг. Первоначально Интернет проектировался как компьютерная сеть, способная обеспечить надежную правительственную связь в условиях военных действий. С тех пор Интернет быстро вырос в глобальную мировую сеть, которая революционным образом изменила представления о коммуникациях. В 80-х годах физики, работавшие в области элементарных частиц, в результате поисков наилучших способов передачи информации своим коллегам, изобрели Всемирную паутину (World Wide Web, WWW) – способ совместной передачи графической и текстовой информации через Интернет. Миллионы людей, не выходя из дома, ежедневно пользуются WWW для просмотра электронной почты, для поиска различных документов и статей, для покупок в сетевых магазинах.

## ИНТЕРНЕТ



- Компоненты глобальной инфраструктуры Интернета – орбитальные спутники, оптоволоконные линии связи, суперкомпьютеры и модемы – разработаны на основе фундаментальных физических исследований.
- В 1998 г. Интернет объединял в единую сеть 30 миллионов серверов и 102 миллиона пользователей.

## WORLD WIDE WEB – WWW

- WWW (Web) – это стандарт, описывающий способы передачи гипертекстовой информации через Интернет. В Интернет доступны миллионы компьютеров (сайтов), содержащие документы WWW.
- Физики из международной лаборатории ЦЕРН, работавшие в области исследования элементарных частиц, задумывали WWW как средство для упрощения передачи научной информации между участниками научных проектов в разных странах.



- Сегодня сервис WWW – это одно из самых популярных применений Интернета: только в США более 60 миллионов пользователей WWW.

## НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ПО ПРИМЕНЕНИЮ СУПЕРКОМПЬЮТЕ- РОВ



- В научном центре NCSA была разработана программа Mosaic – первый графический браузер Интернета. Эта общедоступная программа открыла путь в Интернет миллионам новых пользователей.
- Директор NCSA (физик из университета штата Иллинойс) возглавил движение за предоставление через Интернет доступа к суперкомпьютерам исследователям из академических и промышленных организаций.
- Сегодня работы по созданию инфраструктуры компьютерной сети 21-го века продолжаются при финансовой поддержке Национального научного фонда США (NSF), центра NCSA и ряда других организаций.

## Интернет: от научных разработок до бытового использо- вания

### СОВМЕСТНАЯ РАБОТА НА РАССТОЯНИИ



- Ученые, живущие в разных странах и городах, могут создавать "рабочие группы" и эффективно обмениваться видео-, звуковой и текстовой информацией при помощи быстродействующей компьютерной связи.
- Возможность привлечения широкого круга ученых к работе над исследовательскими проектами сокращает время между открытиями и их применениями.

### ПУБЛИКАЦИИ В ИНТЕРНЕТ

- В 1998 г. в Интернет было размещено 320 миллионов Web-страниц.
- Размещение документов в Web дешевле печати на бумаге.
- В отличие от печатных документов, электронные документы Web могут содержать гиперссылки на уточняющие тему документа статьи, дополнительные изображения, видео- и звуковые файлы. Кроме того, Web обеспечивает мгновенную обратную связь.



## ИНТЕРНЕТ-БИЗНЕС



- Услугами Интернет для поиска информации о товарах и услугах (от покупки компьютеров до заказа пиццы) в 1997 воспользовались 28 миллионов человек.
- Объем продаж через Интернет в 1998 году составил примерно 6,2 миллиарда долларов.

## ОБРАЗОВАНИЕ



ми.

- Максимальное количество обращений к сайту с последней информацией о марсоходе Mars Pathfinder – 46 миллионов в день.
- Интернет предоставляет людям самую актуальную учебную информацию, которую было бы затруднительно получить другими способами.

## Телекоммуникации: основные исторические даты

**1876** – А.П. Белл демонстрирует первый телефон.

**1946** – По заказу вооруженных сил США создана первая в мире большая электронно-вычислительная машина общего назначения ЭНИАК.

**1947** – Лаборатория Белла сообщает об изобретении транзистора (Нобелевская премия по физике за 1956 г.).

**1957** – После запуска Советским Союзом первого искусственного спутника в США для обеспечения лидерства в науке и военных технологиях создается Агентство перспективных научных исследований (ARPA, впоследствии переименовано в DARPA).

**1965** – Агентство ARPA финансирует работы по созданию "сети коллективного использования для связи компьютеров, работающих в режиме разделения времени."

**1969** – Министерство обороны США заказало создание физической сети в рамках проекта ARPANET. Передано первое сообщение между двумя подключенными к сети компьютерами.

**1970-е-90-е гг.** – Различные компьютерные сети создаются силами Министерства обороны, Министерства энергетики, космического агентства NASA и фонда NSF.

**1983** – После принятия сетевых протоколов TCP/IP (протокол управления передачей/протокол Интернет) в качестве универсального стандарта межсетевого обмена стала возможной передача данных между различными компьютерными сетями. В результате появился Интернет.

**1985** – В университете штата Иллинойс создан Национальный Центр по применению суперкомпьютеров (NCSA).

**1988** – В ответ на появление сетевого вируса-"червя", который вывел из строя около 10% Интернет-серверов, агентство DARPA создает подразделение компьютерной безопасности. Проложен первый трансатлантический оптоволоконный кабель.

**1990** – В ЦЕРНе создан экспериментальный образец World Wide Web.

**1993** – Центр NCSA выпускает программу Mosaic – первый графический браузер WWW. К Интернет подключены Белый дом и ООН.

**1995** – Впервые официально объявлено, что перехват данных в Интернет позволил контрразведке и агентству по борьбе с наркотиками пре-

дотвратить ряд преступлений. Фонд NSF предоставил многим организациям доступ к самым высокоскоростным сетям, составляющих основу Интернет.

**1997** – Фонд NSF представил перспективные проекты разработки вычислительной сетевой инфраструктуры для следующего столетия.

**БУДУЩЕЕ** – Телефонная связь и телевидение через Интернет, электронная коммерция, повсеместное внедрение высокоскоростных каналов связи для доступа в Интернет.

## Физика сохраняет Ваши деньги

### *Эффективное использование энергии*

Достижения физики позволили сделать наши дома более теплыми, офисы более освещенными, сэконобив при этом миллиарды долларов. Новые тонкопленочные покрытия на окнах предотвращают потерю тепла. Достижения физики плазмы привели к созданию новых экономичных источников света. В США в 1995 г. суммарные финансовые вложения по законопроектам, связанным с производством и потреблением энергии, составили около 500 миллиардов долларов (2000 долларов на каждого американца). Применение энергосберегающих технологий обходится более 2 миллиардов долларов ежегодно, при этом экономия энергии составляет более 5 миллиардов долларов.

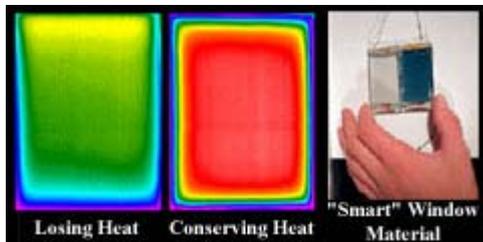
### ЭКОНОМИЧНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ



- Физические исследования новых источников света, преобразователей энергии и тонких пленок привели к созданию более эффективных ламп и способов их крепления.
- Электронные преобразователи улучшили эффективность люминесцентного освещения до 30%. Люминесцентные лампы занимают на рынке источников света около 25%.
- На освещение производственных помещений, зданий, рекламу и освещение улиц расходуется не менее 25% всего объема потребляемой в США электрической энергии.

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ОКНА

- Исследования в области тонких пленок, плазменных источников света, вакуумной технологии, оптики и новых материалов привели к созданию энергосберегающих оконных покрытий, изолирующих слоев и "компенсирующих" окон, которые становятся темными или отражающими в теплую погоду.



При строительстве зданий в США затраты, связанные с энергосберегающими окнами, составляют более 20 миллиардов в год.

С помощью энергосберегающих окон можно предотвратить до 35% нежелательного увеличения температуры внутри помещений (или, наоборот, потери тепла). Ежегодный объем продаж подобных окон – 630 миллиардов долларов, а суммарное сбережение энергии составляет около 760 миллиардов долларов.

## НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ



Тепловые насосы и холодильники, основанные на результатах последних исследований физических процессов в компрессорах и холодильниках, применяются для нагрева и охлаждения помещений, для регулирования влажности. Расход энергии по сравнению с первыми моделями снижен на 35-45%.

Тепловые насосы работают в 3-8 раз эффективнее электрических нагревателей и в 3-14 раз эффективнее газовых нагревателей.

- В США ежегодные расходы на нагрев и охлаждение составляют более 100 миллиардов долларов, из них 42% приходится на всевозможные здания.

## Энергосбережение: от научных разработок до бытового использования

### АЭРОГЕЛИ

- Слой из нового сверхлегкого материала – аэрогеля – толщиной 2,5 см обладает такими же теплоизолирующими свойствами, как и стекловолокно толщиной 25 см или окно с пакетом из десяти обычных стекол.



## КОМПЬЮТЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ



- Методы компьютерного проектирования зданий позволяют точно рассчитать необходимое количество света, тепла и воды, определить пути эффективного сохранения энергии. В целом, автоматизация проектирования в архитектуре позволяет сократить расход потребляемой энергии на 20% по сравнению с тради-

ционными методами проектирования. Ежегодная экономия средств за счет использования компьютерных технологий в архитектуре составляет миллионы долларов.

## **ЭКОНОМИЧНОЕ ОСВЕЩЕНИЕ**

- Исследования в области физики плазмы и микроволновых технологий привели к созданию осветительных ламп, которые потребляют энергии на 66% меньше, чем обычные лампы накаливания.



## **СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**



- Разработки в области высокотемпературных сверхпроводников направлены на создание линий электропередачи с малыми потерями, что приведет к эффективной работе электростанций и уменьшению стоимости электроэнергии.
- Ежегодный расход электроэнергии в промышленности США – 800 миллиардов долларов.

## Технологии энергосбережения: основные исторические даты

*"Мы сделаем электричество настолько дешевым, что только богатый будет жечь свечи"*

(Томас Эдисон, в ответ на вопрос: "Как его лампочка повлияет на производство свечей?")

**1700-1800-ые** – Параллельно развиваются исследования в области термодинамики и разработка эффективных паровых двигателей и мощных механизмов. Изобретена и представлена на рынке электрическая лампа.

**1930-ые** – Изобретены аэрогели, но их массовое производство сталкивается с трудностями. Разработаны люминесцентные лампы и электрические тепловые насосы.

**1950-60-ые** – Электрической энергией пользуется 98% населения США. Рост потребления электричества достигает максимального значения – 8 % в год. Новые высоковольтные линии электропередачи передают энергию к городским центрам. Начинается массовая выработка электроэнергии на атомных электростанциях.

**1970-ые** – Ближневосточное нефтяное эмбарго приводит к четырехкратному росту цен на нефть и демонстрирует, что энергия может быть использована в качестве политического оружия. Исследования в области альтернативных источников энергии получают значительную финансовую поддержку. Впервые на космическом корабле используются солнечные батареи. Возникает дискуссия о безопасности ядерной энергии. Физические исследования позволили создать более эффективные источники осве-

щения и энергосберегающие оконные покрытия.

**1980-ые** – Открыта первая электростанция на солнечных батареях. Разработаны новые материалы для реактивных двигателей, которые позволили сделать двигатели более надежными. Поступили в продажу окна с теплозащитными покрытиями, к концу десятилетия объем продаж подобных окон составил 17 %.

**1990-ые** – Разработаны эффективные способы производства аэрогелей, что открыло путь к их применению в качестве стеновых изоляторов, изоляторов звука и в холодильниках. Электронные схемы управления освещением занимают 25% рынка (в США ежегодно продаются 24 миллиона штук). Потребители с помощью новых осветительных устройств экономят до 400 миллионов долларов в год. Использование светодиодных излучателей в различных указателях приводит к снижению ежегодных расходов с 80 до 5 долларов (по сравнению с расходами на одну лампу накаливания). Общая экономия энергии за счет применения эффективных технологий к 2015 г. будет выражаться величиной порядка десятков миллиардов долларов.

# Физика проектирует будущее

## Новые Материалы

Финансируемые государством исследования в области физики материалов, которые необходимы для целей обороны, привели к созданию различных потребительских товаров, которые изменили нашу жизнь и создали новые отрасли промышленности с доходом в миллиарды долларов. Например, тефлон, который теперь используется, начиная, от сковородок и модной одежды до пересадки органов в медицине, сначала использовался военными в годы второй мировой Войны в качестве высокотемпературных уплотнительных колец. Композитные материалы, которые легче алюминия, но прочнее стали, используются, чтобы для уменьшения разрушений при землетрясениях и при строительстве самолетов, в спортивном оборудовании и в музыкальных инструментах. И все это – только начало революции материаловедения. "Интеллектуальные" материалы в начале 21-го века будут один день учиться "думать" для того, чтобы затем изменять свои свойства в различных изделиях и сооружениях, начиная от зданий и кончая телевизорами. и ответить на их собственный, изменяя все от здания проекта к телевидению.

### ПОЛИМЕРЫ



- Одежда для пожарников, сделанная на основе напряженного полимера тефлона, длительно и стойко защищает от огня.
- Форма для военных США для действий в условиях холодного климата.
- Используются более, чем в 3,5 миллионах медицинских процедурах и операциях, включая искусственные кровеносные сосуды, хирургические швы и ткани для пересадки.
- Научные исследования: 1930-40 гг.
- Прикладные исследования: 1950-90 гг.

### ПЛАЗМЕННОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ ПОКРЫТИЙ



- Двигатели военных и гражданских самолетов используются покрытия из новых материалов, которые имеют высокую износостойкость и устойчивы при высоких температурах.
- Рынок плазменного напыления покрытий составляет около 1-2 млрд. долларов.
- Плазменные покрытия используются в молочных бутылках для детей, Тепловой распыляют покрытия, используются в бутылках младенца, велосипедах и игрушках.
- Научные исследования: 1960-70 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.

## МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ



- Физика полимеров привела к разработке искусственных суставов, кожи, костей, сердечных клапанов, и хрящевых тканей.
- Существуют более, чем 5000 медицинских устройств и диагностических изделий, в которых используются искусственные.
- Затраты на здравоохранение снижены за счет использования нового типа стекла и покрытий для небольших и более дешевых хирургических инструментов. Хирургические операции стали менее сложными, сократилось время пребывания в больнице.
- Научные исследования: 1960-70 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.

## От научных разработок до бытового использования

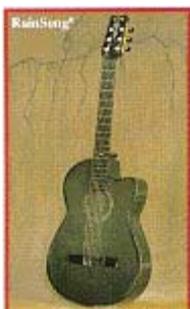
### Новые материалы

#### Высокопрочные автомобильные панели



- Гибкий полимер, используемый в автомобилях фирмы Saturn, прочнее стали, но не будет ржаветь.

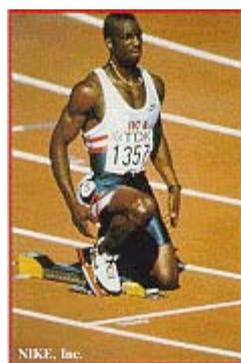
#### Композиты: Гитара из графит-эпоксидной смолы



- В 1995 г. продажи оптического волокна для композитных материалов составили 4,3 млрд. долларов.
- Композиты, разработанные для военных проектов, теперь используются в музыкальных инструментах, спортивном оборудовании, автомобилях и самолетах.

- Композиты на основе графит эпоксидной смолы водостойчивы, легкие, не деформируются и не трескаются.

#### Полимеры для спорта



- Подошвы фирмы NIKE сделаны из полимера, разработанного для износостойчивой обуви, рассчитанной на миллионы миль.
- В 1995 г. фирма NIKE продала обувь на 4 млрд. долларов.

**Майкл Джонсон, олимпийская золотая медаль, 1996 г.**

### Плоские дисплеи

- Цветные дисплеи с активной матрицей изготовлены на базе жидких кристаллов и тонкопленочных кремниевых транзисторов.
- Плоские дисплеи более портативны, имеют лучшее разрешение и потребляют меньше по сравнению с другими дисплеями.



**Любую достаточно передовую технологию трудно отличить от волшебства (Артур К. Кларк, автор научной фантастики).**

**1909** – Впервые использовано термическое напыление для создания покрытий на металле.

**1920-30-е гг.** – Химики фирмы Dupont изобрели нейлон и тефлон.

**1940-е гг.** – Шелк не смог удовлетворить все потребности военного времени. В парашютах, палатках и обмундировании стали использовать нейлон. В военных самолетах стали использовать композитные материалы на основе стеклянного волокна.

**1947 г.** – Дж. Бардин, У. Браттейн, У. Шокли (лаборатория Бэлла) изобрели транзистор на основе германия (Нобелевская премия, 1956 г.). Исследования кремния и других полупроводниковых материалов создали основу промышленной микроэлектроники.

**1960-е гг.** – Фирма Масу продает первую кастрюлю с тефлоновым покрытием по цене 6,94 доллара. Разработаны композитные материалы на основе графита для военных самолетов и космических аппаратов. Создан первый плазменный дисплей. П. Веймар (RCA) создал тонкопленочный транзистор. Нобелевская премия присуждена за исследование свойств высокомолекулярных полимеров.

**1970-е гг.** – Фирма Boeing начинает использовать композиты на основе графита в моделях самолетов 727 и 737. Плазменное напыление используется сначала только для создания покрытий на реактивных двигателях и для создания износостойчивых покрытий.

**1980-е гг.** – Полимеры впервые используются при пересадке кожи и для введения лекарств типа нитроглицерина через кожу. Для плоских дисплеев используются жидкие кристаллы и тонкопленочные транзисторы на основе аморфного кремния.

**1990-е гг.** – Нобелевская премия по физике присуждена за исследования физики полимеров и жидких кристаллов. Композиты составляют 10% в конструкции самолета Боинг 777, в три раза больше, чем в предыдущих моделях. Новые биоматериалы и системы введения лекарств спасают многие человеческие жизни. Разработаны светоизлучающие полупроводники и полимеры, "интеллектуальные" материалы изменяют свои свойства при изменениях нагрузки или разрушении.

# Физика очищает воздух

## Окружающая среда

Достижения физики позволяют решать задачи охраны окружающей среды, начиная от разработки методов обнаружения загрязнения до решения конкретных задач. Рынок технологий охраны окружающей среды составляет во всем мире около 400 млрд. долларов. Плазменная физика заменила традиционные методы сгорания угля, используется для более полного извлечения металлов из рудных ископаемых. Фундаментальные исследования в лазерной физике и компьютерных технологиях привели к созданию различных эффективных методов контроля загрязнений окружающей среды, достижения в области материаловедения и проектирования дали новые эффективные методы получения энергии и утилизации отходов. "Дружественные" технологии, в основе которых лежат достижения физики, стали частью нашей повседневной жизни, начиная от нагреваемого солнечной энергией плавательного бассейна на олимпийских играх в Атланте (1996 г.) и автомобиля с солнечными батареями GM EV1.

### ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

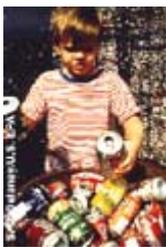


- Более эффективные двигатели и новые легкие материалы для турбин уменьшили затраты на 90 % по сравнению с 1981, стоимость энергии получаемой на ветровых электростанциях стала конкурентоспособной с тепловыми электростанциями.
- мировой рынок ветровых электростанций в 2000 г. составил около 2,4 млрд. долларов, в этой отрасли создано десятки тысяч рабочих мест.
- Научные исследования: 1970 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг. •

### КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ



- Для дистанционного контроля атмосферы используются лазеры и компьютеры. Чувствительность современных методов составляет около 0,0000000001%.
- Исследование компьютерных моделей выброса из дымовых труб, применение электростатических фильтров для очистки воздуха от продуктов сгорания.
- Научные исследования: 1960-е гг.
- Прикладные исследования: 1960-90 гг.



Из мусорного бака – к новому изделию



## УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ

- Следующее поколение автомобилей может быть будет изготавливаться в основном из повторно используемых материалов.
- Улучшение методов обработки материалов и потребности рынка увеличили долю переработанных пластмасс на 600% с 1987 г. до 1993 г.
- В 1993 г. было переработано 63 % алюминиевой тары.
- Научные исследования: 1960 – 70 гг.
- Прикладные исследования: 1980 - 90 гг.

## От научных разработок до бытового использования

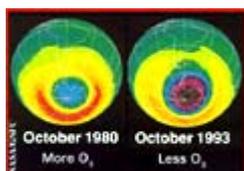
### Окружающая среда

#### Высокоэффективные "чистые" автомобили



- В 1996 г. выпущен легкий автомобиль Dodge Ram Pickup, в котором использовалось альтернативное топливо
- Объединение "Новое поколение автомобилей" предполагает создать автомобиль, который будет в три раза экономичнее существующих. Для этого потребуются новые материалы и топливные системы.

#### Антарктида – озоновая дыра

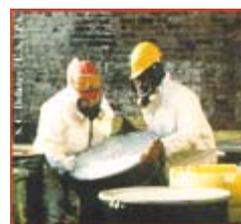


- Спутники из космоса контролируют состояние атмосферы (например, содержание озона), в то время как на

компьютере исследуют модели атмосферы и предсказывают изменения в атмосфере.

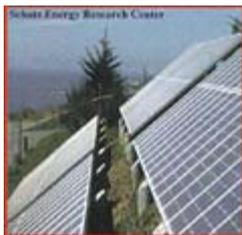
- Толщина озонового слоя в октябре уменьшилась больше, чем на 50% по сравнению с 1970 г.

#### Удаление опасных отходов



- Геофизические методы, которые использовались для контроля радиоактивности, позволили снизить стоимость захоронения радиоактивных отходов.
- По программе Агентства по охране окружающей среды созданы новые технологии утилизации отходов, которые позволили уменьшить расходы на сотни миллионов долларов.

## Солнечная энергия



- Мировой объем продаж солнечных батарей за последние десять лет ежегодно увеличивались на 15%, в то время как затраты уменьшились почти на 90 %.
- Эффективность тонкопленочных солнечных батарей с 1978 г. увеличилась на 500%.

***Бурить в поисках нефти? Вы хотите бурить землю в поисках нефти? Вы сумасшедший! (Бурильщики, которых Эдвин Л. Дрейк пытался завербовать для своего проекта поиска нефти. 1859)***

**1839 г.** – Наблюдалось первое преобразование света в электрическую энергию – начало солнечной энергетики.

**1861 г.** – Первый патент на изобретение мотора, работающего на солнечной энергии.

**1930 г.** – С. Чепмен (S. Chapman) создал первую теорию образования и разложения атмосферного озона.

**1958 г.** – Агентство НАСА впервые использовало солнечные батареи на космических спутниках, а затем в проектах Джемини и Аполло.

**1970-е гг.** – М. Молина (МТИ), Ф.С. Роуланд (Англия, Ирвин) и П. Крутцен (Институт Макса Планка) (M. Molina (MIT), F. S. Rowland (U. C. Irvine), P. Crutzen (Max-Planck Insti-

tute) провели исследование динамики слоя озона в атмосфере. Работа была отмечена Нобелевской премией в 1995 г.

**1973 г.** – Эмбарго на поставки нефти привело к ежемесячному удвоению цен на энергию, что стимулировало интерес к альтернативным источникам энергии.

**1977 г.** – Создано министерство энергетики США.

**1978 г.** – Представлена первая пластмассовая тара для напитков.

**1987** – Двадцать семь стран подписывают Монреальский протокол: соглашение, в соответствии с которым должно постепенно уменьшаться использование некоторых химикатов, разрушающих озоновый слой Земли. К 1994 г. этот протокол подписали 133 страны.

**1990 г.** – Фирмы Кока-Кола и Пепси-Кола начинают использовать переработанную пластмассу для изготовления бутылок. В США приняты поправки к Закону о чистой атмосфере, предусматривающие более жесткие требования к производству химикатов и прекращение производства химикатов, разрушающих озон.

**1994 г.** – Импорт нефти в США впервые превышает 50 % потребности и составляет треть национального торгового дефицита.

**1995** – Продажи солнечных батарей достигают 1 млрд. долларов. Ветровые электростанции обеспечивают энергией миллионы людей, повторное использование энергии (рекуперация) привела к экономии около 5 млрд. долларов. Пластмассовые пакеты стали тоньше на 70%, в результате

технологических достижений стеклянные бутылки для напитков стали весить на 31% меньше, чем в 1970-х гг. Технологии, связанные с охраной

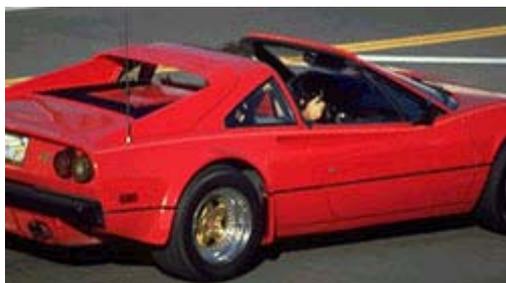
окружающей среды, стали источником многомиллиардного бизнеса и тысяч новых рабочих мест.

# Физика обеспечивает прогресс транспорта

## Транспорт

Физические исследования помогли сделать транспортную индустрию США самой большой в мире. Автомобильная промышленность составляет 4-5% валового национального дохода и в ней занято 2,3 миллиона американцев. Самолестроительная промышленность в следующие двадцать лет поставит более 14 000 транспортных самолетов на сумму около 1 триллиона долларов. Физика позволяет перемещаться в любую точку земного шара за меньшую сумму и более надежно, чем когда-либо прежде. Ее достижения используются, начиная от контроля работы двигателя с помощью компьютера до использования глобальной системы определения местоположения (GPS). Физика сделала возможным идти вокруг угла и поперек мира скорее, за меньшее количество денег и более благополучно чем когда-либо прежде.

### ЭФФЕКТИВНЫЕ АВТОМОБИЛИ



- Современные автомобили создаются с использованием достижений физики в исследовании более легких композитных материалов и полимеров, создании лазеров, программного обеспечения, более эффективных аккумуляторов и топливных элементов.
- Микрокомпьютеры управляют системой зажигания автомобиля для оптимизации сгорания топлива в двигателе и увеличения пробега на единицу расходуемого топлива.

- Расход топлива – 1 галлон/46 миль приведет во всем к многомиллиардной экономии средств потребителей.

### ВОЗДУШНЫЕ МЕШКИ БЕЗОПАСНОСТИ



- Исследования в области интегральных схем и миниатюризации механических переключателей позволили создать воздушные мешки безопасности.
- Электронные датчики реагируют на механическое воздействие, и вырабатывается сигнал на быстрое надувание мешка безопасности.
- После первой демонстрации в 1980-х гг. мешка безопасности, они

были установлены на 50 млн. автомобилях. Мешки сработали в 650 000 авариях и спасли 1 500 жизней.

## САМОЛЕТЫ



- Исследования в области композитных материалов, жидкокристаллических дисплеев, электроники, компьютерной техники, создания эконо-

мичных турбин сделали Боинг 777 одним из наиболее мощных и эффективных самолетов из когда-либо разрабатываемых.

- Использование системы автоматизированного проектирования уменьшило стоимость разработки и сократило время выпуска самолета на рынок.
- В 1995 г. в авиационной промышленности было занято 267 000 человек, аэроавиатика имела прибыль в размере около 25 млрд. долларов.

## От научных разработок до бытового использования

### ТРАНСПОРТ

#### Всепогодные самолеты



- Радары, использование инфракрасного излучения для получения изображения, система GPS (глобальная система навигации и определения положения) позволят самолетам ясно "видеть" при любых погодных условиях.



- Физические исследования в области создания легких, экономичных и перезаряжающихся аккумуляторов позволили сконструировать GM EV1 –

электрический автомобиль, который после зарядки аккумуляторов проходит 70-90 миль.

Интеллектуальная транспортная система (ITS)



- Центральные компьютеры можно использовать для управления движением на основе информации, полученной от электронных датчиков, смонтированных на шоссе. Система GPS может использоваться для выбора лучшего варианта движения автобусов.
- Интеллектуальная транспортная система использовалась во время лет-

них олимпийских игр в Атланте в 1996 г.

*Невозможно создать летающий механизм, который тяжелее воздуха.* (Лорд Келвин, президент Королевского общества, 1895).

**1900-ые гг.** – Компания Форда по производству автомобилей начинает работу, имея в штате 10 служащих.

**1910 – 20 -е гг.** – Появляются первый светофор и скоростное шоссе. Чарльз Линдберг совершает первый трансатлантический полет. Доминирующей формой общественного транспорта становятся автобусы.

**1930 – 40 гг.** – Зарегистрирован патент на "надувное защитное устройство, срабатывающее при авариях". Открывается первый кинотеатр "не выходя из автомобиля". Нормирование топлива во время Второй мировой войны привело к увеличению доли общественного транспорта до 65 %.

**1950 – 60 гг.** – Исследователи показали, что возникновение смога частично связано с выхлопными газами автомобилей. Построены первые пассажирские реактивные самолеты. Создано министерство транспорта США. Впервые использована двухсторонняя радиосвязь между поездами метро и автобусами для контроля и управления транспортными потоками.

**1970-ые гг.** – Закон о чистом воздухе принят с целью уменьшения загрязнения атмосферы. Разработка миниатюрных топливных насосов позволяет создать воздушные мешки безопасности. Ближневосточное нефтяное эмбарго привело к повышению

цен на топливо и показало необходимость в разработке нового типа топлива и более эффективных транспортных средств. Автомобили становятся "компьютерами на колесах", поскольку электронные устройства используются для управления двигателями; компьютеры начинают использоваться в диагностике при ремонте автомобиля и при проектировании транспортных средств.

**1980-ые** – Министерство транспорта США потребовало использовать в автомобилях воздушные мешки безопасности. Магниты на основе редкоземельных элементов, созданные физиками в фундаментальных исследованиях в 1960-ых гг. начали использоваться в тормозных системах, двигателях, датчиках и средствах управления полетами. В автобусах и метро начали использоваться жидкокристаллические дисплеи и управляемые электроникой устройства контроля оплаты проезда.

**1990-2000** – Калифорния приняла постановление о минимальной доле новых автомобилей, которые не загрязняют окружающую среду. Американцы на своих 150 млн. автомобилей проезжают ежегодно почти 2 триллиона миль. Автомобильные выхлопы в США уменьшены на 70-90%. Радарные датчики, установленные в автомобилях могут поддерживать постоянную дистанцию между автомобилями, управляя двигателем и тормозами. Оптоволоконные линии связи передают информацию в центр управления движением для более эффективного управления транспортными потоками.

# Физика заполняет Ваш дом

## *Товары повседневного спроса*

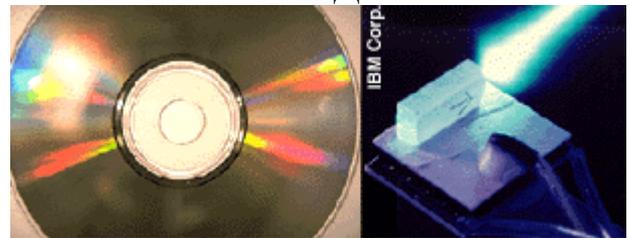
Физические исследования, финансируемые правительством США, позволило повседневные вещи сделать еще более простыми и удобными. Создание современных бритвенных приборов стало возможным на основе использования больших достижений в физике плазмы и лазерной обработке материалов, CD-диски с большим временем звучания потребовали создания новых материалов и лазеров. Изобретение полупроводникового транзистора в 1947 г. навсегда изменило нашу жизнь: крошечные микрокомпьютеры можно найти во многих повседневных вещах: от телефона, радиоприемника телевизора до холодильника, микроволновой печи и автомобиля. Бытовая электроника составляет 11% валовой продукции в США, в этой отрасли промышленности работают миллионы американцев. Улучшение качества жизни настолько разнообразно, что его невозможно рассчитать.

### МИКРОВОЛНОВЫЕ ПЕЧИ



- Разработка радара в годы войны и миниатюризация электроники привели к созданию микроволновых печей. Используются нагрев в инфракрасных лучах и датчики влажности для изучения методов нагрева.
- Научные исследования: 1940-60 гг.
- Прикладные исследования: 1960-90 гг. Ежегодно американские компании продают около 6 млн. микроволновых печей.

### ТЕХНОЛОГИЯ КОМПАКТ-ДИСКОВ



- Разработка компакт-дисков связана с физическими исследованиями в электронике, выращивании монокристаллов полупроводников, тонких магнитных пленок и лазеров
- Научные исследования: 1940-60 гг.
- Прикладные исследования: 1970-90 гг.
- Разработка в университетах, национальных лабораториях и компаниях полупроводниковых лазеров с синим излучением позволит создать компакт-диски с большим объемом аудио- и видеoinформации.

## БРИТВЫ



- Для покрытия лезвий бритвы новыми тонкопленочными материалами используются методы, разрабо-

танные физиками при изучении плазмы. используются лазерные методы упрочнения материала и системы компьютерного зрения для контроля за качеством изделий.

- Научные исследования: 1960-80 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг: Продажи фирмы Gillette в 1995 г. составили 1.1 млрд. долларов.

## От научных разработок до бытового использования

### ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ ТОВАРЫ

#### Непригорающая посуда



- Тефлон, разработанный в результате исследований полимеров, используется как покрытие в кухонной посуде, при изготовлении ковров со стойкой окраской, одежды и материалов для пересадки в медицине.

#### Эффективное освещение



- Физика плазмы и микроволновая технология привели к созданию более мощных ламп освещения с большим сроком службы и меньшим потреблением энергии по сравнению с обычными лампами накаливания.

- Два лампы размером мяча для гольфа заменили 240 ламп накаливания мощностью 175 ватт в строящемся торговом комплексе.

#### Косметика и солнцезащитные крема



- Изучение нанокристаллов, размер которых составляет около одной миллиардной доли метра позволило создать более эффективные солнцезащитные крема и лучшую косметику.

## Цифровое телевидение



- Цифровое телевидение основано на фундаментальных исследованиях волоконной оптике и в электронике, которые обеспечили получение изображения с высоким разрешением и телевизионный доступ в Интернет.
- В США ежегодно продается более 10 млн. телевизоров.

**Нет никаких причин, по которым каждый хотел бы иметь дома компьютер. (Кен Олсон, президент, председатель и основатель корпорации Digital Equipment Corp., 1977)**

**1870-80-ые гг.** Изобретены и стали продаваться электрические лампы накаливания.

**1920-1930-ые гг.** – На фирме Дюпон химики изобрели нейлон и тефлон. Появился первый герметичный холодильник.

**1940-ые** – Исследователи в лаборатории Бэла изобретают твердотельный транзистор (Нобелевская премия, 1956 г.), формируя основу промышленности по выпуску бытовых электроники. При работе над проектом радара для морского флота США П. Спенсер (P. Spencer, Raytheon Co.) обнаружил, что микроволновая энергия может нагревать пищу. Изобретена первая полностью автоматическая стиральная машина.

**1950-ые гг.** – Микроволновые печи весят 750 фунтов и стоят 3000. долла-

ров. Ч. Таунс (штат Колумбия) создал мазер, проект которого финансировался военными (Нобелевская премия, 1964 г.). Эта работа привела к разработке полупроводникового лазера, используемого в проигрывателях компакт-дисков.

**1960-70-ые гг.** – Фирма Мас продает первую кастрюлю с тефлоновым покрытием за 6.94 доллара. НАСА и лаборатория Бэла запускают первый спутник связи. Представлен первый микропроцессор, микроволновые духовки намного меньше и дешевле.

**1980-ые гг.** – Компакт-диски начинают заменять виниловые грампластинки и магнитные ленты. Микропроцессоры начинают применяться в автомобилях, телевизорах, микроволновых печах и портативных телефонах. Начинаются исследования в области "нанокристаллов" появляется новый класс материалов.

**1990-ые гг.** – Разработанные по гранту Национального института стандартов (США) нанокристаллы, которые использовались в солнцезащитных кремах, стали стоить значительно меньше: 10 центов – 1 грамм, до разработки 1 грамм – 1000 долларов. Сформирован "Великий Союз" компаний в области электроники и телекоммуникаций для разработки стандарта телевидения высокого качества (стандарт HDTV). В США продано более чем 100 миллионов CD-плееров и дисков с высокой плотностью записи, в которых используются синие лазеры. Такие диски хранят большее количество музыки и кинофильмов. "Интеллектуальные" материалы и электроника позволят создать домашние приборы, которые управляются речевыми командами.

# Физика заботится о здоровье

## Медицинская физика

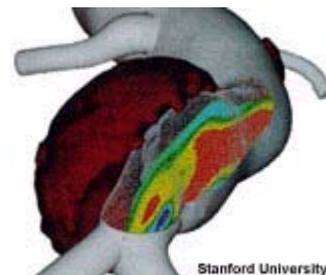
Федеральное правительство финансирует физические исследования, которые направлены на разработку новых методов лечения и новых способов быстрой диагностики. Только за два года использование суперкомпьютеров уменьшили время, необходимое для изучения модели течения крови в венах и артериях, с недель или месяцев до нескольких минут. Пучки частиц и датчики, используемые в физике высоких энергий, привели к развитию новых протонных и нейтронных терапевтических методов лечения раковых заболеваний. Оптоволоконная оптика и средства телекоммуникации позволили использовать новые методы в хирургии и методы обнаружения раковых заболеваний. Физические исследования помогают нам жить здоровыми и дольше.

### ТРЕХМЕРНЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ



- Для получения ультразвуковых трехмерных изображений различных органов, например сердца, в живом организме используются физика ультразвуковых волн, сложные вычислительные методы и самая современная микроэлектроника.
- Научные исследования: 1940-ые гг.
- Прикладные исследования: 1960 - 90 гг.
- Ультразвуковые изображения широко используются в гинекологии, для обнаружения опухолей и сердечных заболеваний.

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРОВЕНОСНЫХ СОСУДОВ



- С помощью компьютеров моделируются физические процессы при протекании крови в венах и сосудах. Исследования моделей привело к новому пониманию сосудистых заболеваний и роли неупорядоченного движения крови. Такие исследования невозможно было провести экспериментально.
- Научные исследования: 1960-80 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.
- Снижение эластичности артерий, которое ведет к сердечным приступам и ударам – главная причина смерти в Западном мире.

## ФИЗИКА ЧАСТИЦ В ТЕРАПИИ РАКОВЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ



- Ускорители частиц, созданные физиками для исследования в области физики высоких энергий, используются

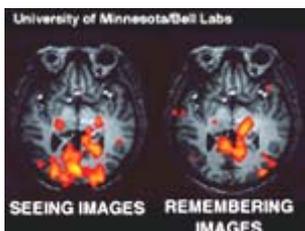
для лечения злокачественных опухолей, на которые не действуют традиционные методы лучевой терапии.

- Научные исследования: 1930-40 гг.
- Прикладные исследования: 1960-90 гг.
- Нейтронная терапия длится на одну треть времени меньше, чем традиционная лучевая терапия; курс лечения длится около 2 недель.

### От научных разработок до бытового использования

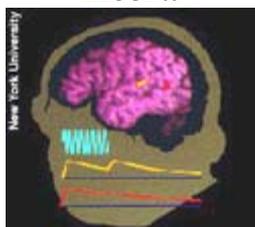
## ЗДОРОВЬЕ

### ЯМР-томография



- Медицинская физика с помощью метода ядерного магнитного резонанса позволяет изучать мозг живого организма – ЯМР-томография.

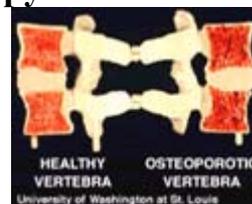
### Сверхпроводники при изучении мозга



- Датчики на основе сверхпроводников позволяют точно определить положение активные центры эпилептических болезней, помогая исследовать

дочерям разрабатывать новые методы лечения.

### Обнаружение остеопороза



- Достижения физики звуковых волн и вибраций используются для более простого и доступного по сравнению с рентгеноскопией метода обнаружения остеопороза.
- Без новых достижений физики половина всех женщин рожденных в США будет ломать кости из-за остеопороза.

## CD-ROM технология обнаружение рака кожи



- Компакт-диски CD-ROM могут эффективно и недорого хранить изображения исходного состояния кожи. При сравнении с кожей пациента они могут показать изменения, позволяющие диагностировать злокачественные заболевания в ранней, потенциально излечимой стадии.
- В 1996 г. в США ожидалось 38 000 случаев заболевания меланомой.

### **Теория Луи Пастера о существовании микробов – смешная беллетристика. (П. Паше, профессор физиологии в Тулузе, 1872)**

1930-ые гг. Сэр Джеймс Чэдвик открыл нейтрон (Нобелевская премия, 1935 г.). Первое использование циклотронов для лечения рака с помощью нейтронов в университете в Беркли. Исследования были прекращены в связи с тем, что циклотрон потребовался для военных целей.

1940-ые гг. – Циклотрон в Гарварде построен для исследований в области ядерной физики. Позже он будет частично использоваться для лечения рака с помощью протонного пучка.

1950-ые гг.- Ультразвуковые устройства, построенные в годы второй мировой войны использованы для получения изображения сердца. По-

строена мощные ускорители протонных пучков для терапевтического лечения рака.

1960-ые гг. – Ультразвук впервые использован для диагностических целей. Показано, что пучок нейтронов может быть использован для лечения некоторых раковых заболеваний. Нейтронное лечение пришло в клиники.

1970-ые гг. – После разработки техники высокого разрешения ультразвуковые методы используются во многих медицинских применениях. Диагностировать заболевания стало дешевле и менее болезненно для пациента. Разработан первый искусственный сустав, имитирующий сложное естественное движение. В лаборатории Ферми создано отделение нейтронной терапии для работы с пациентами.

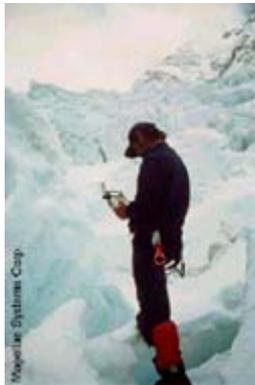
1980-90 гг. – Используются методы получения изображения внутренних органов живого организма с использованием излучения позитронов и на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР-томография). Трехмерный ультразвук дает возможность быстрее и точнее диагностировать опухоли и заболевания сердца. Компьютерное моделирование помогает в диагностике заболеваний, планировании операций, дозировании лекарств, хода лечения. Предполагается, что теория хаоса может быть использована для лечения эпилепсии и регулирования ритма работы сердца, для осуществления более эффективных стратегий прививок, уменьшения распространения инфекционных болезней.

# Физика создает новый бизнес

## Глобальная система навигации – GPS

Система из 24 спутников глобальной системы навигации – GPS передает по радио на специальные приемники координаты местоположения в любом месте Земли. Система GPS помогла вооруженным силам в Персидском заливе пересечь ночью пустыню. Автомобилестроители развивают системы GPS для вывода на дисплей автомобиля карты дорог, GPS используется, чтобы контролировать зоны землетрясения и наблюдать изменения в геологических пластах Земли. GPS может помогать находить потерявшихся людей или попавших в беду, например, в горах или в пещерах. Это исследование, проведенное министерством обороны США, закончилось созданием мощного инструмента для военных целей и привело к рождению многомиллиардной промышленности, рассчитанной на обычного потребителя. Разработка этой системы стала возможной после создания атомных часов, которое финансировалось американским правительством в 1940-ых гг., которые были необходимы для проверки общей теории относительности Эйнштейна. В 1995 г. мировой рынок GPS оценивался в 2.3 млрд. долларов, ежемесячный выпуск – 70 000 систем GPS.

### ВОСХОЖДЕНИЕ НА ЭВЕРЕСТ



- Система GPS была использована в 1993 г. в 40-ю годовщину первого восхождения на Эверест.
- К 2000 г. было создано около 100 000 рабочих мест, связанных с индустрией GPS.
- Точность определения координат с помощью GPS составляет 15-30 футов.

### НАВИГАЦИЯ



- Гарри Джобсон и его команда в соревнованиях на кубок Америки провели свою яхту через пролив Магеллана с помощью GPS.
- Военные применения GPS включают сбор сведений, управление посадкой самолетов, управление антеннами и радарами.
- GPS используется в некоторых автомобилях, выдаваемых напрокат, для того, чтобы помочь туристам в незнакомых городах.

## СПУТНИКИ GPS



- На каждом спутнике установлены атомные часы – 4 экземпляра.
- Точность атомных часов увеличивается в десять раз за десятилетие.
- 24 спутника, вращающиеся вокруг Земли, посылают дважды в день сигналы точного времени на расположенные на Земле приемники.

Научные исследования: 1930-40 гг.

Прикладные исследования: 1950-90 гг.

# От научных разработок до бытового использования

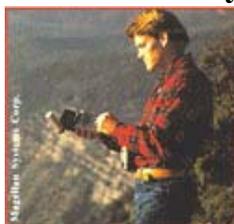
## ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ



Посадка самолетов

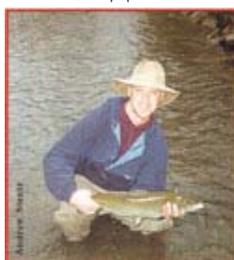
- В некоторых аэропортах GPS используется для навигации, и в некоторых портах при слежении за размещением грузов.

### Мобильность и доступность



- Первый приемник GPS широкого применения в 1984 г. стоил 150 000 долларов. Для его переноски было нужно два человека.
- Сегодня портативные приемники стоят 200 долларов.

### Отдых



- GPS используется для навигации, туризма, автотуризма, охоты, для маркировки лунок при ловле рыбы и маркировки лунок для гольфа.

### Лучшие атомные часы: NIST-7



- Чем точнее часы, тем точнее определяются координаты.
- Ошибка в одну миллиардную секунды дает ошибку в измерении координат в один фут

**Мачта, которой был отмечен Южный полюс, через много лет была перенесена в истинную точку Южного полюса. (Статья об использовании GPS в "Дэйли Телеграф", 2/6/96).**

**1930-ые гг.** А.А. Раби (Штат Колумбия) обнаружил поглощение атомами электромагнитных волн микроволновой частоты, что привело к созданию атомных часов (Нобелевская премия, 1944 г.).

**1940-ые гг.** – Н. Рамзей улучшает точность настройки частот излучения, прокладывая путь к более точному стандарту времени (Нобелевская премия, 1989 г.).

**1950-ые гг.**- Исследователи изобретают оптические методы настройки атомных часов. Эти методы используются и сегодня в США – построены часы NIST-7, наиболее точные часы в мире.

**1958 г.** – Запущен американский спутник.

**1964 г.** – Военно-морской флот США предложил глобальную систему навигации – GPS, состоящую из спутников, оборудованных атомными часами.

**1970-80 гг.** Развитием GPS управляют воздушные силы США. Улучшены спутниковые технологии, технология обработки данных и микроэлектроника. Первый опытный образец запущен в 1978 г.

**1983 г.** После вынужденной посадки корейского самолета 007 Президент Рейган распорядился предоставить GPS для гражданских целей.

**1993 г.** Установлена сеть из 24-х спутников GPS, которая охватывает все часовые пояса Земли.

**1995 г.** – Капитан Скотт О'Гради, пилот военно-воздушных сил США, был сбит в Боснии и спасен специальной командой благодаря приемнику GPS, который был на его запястье.

**1996 г.** Число гражданских приемников GPS превышает военные в 10 раз. В 2000-м году объем продаж систем GPS составит 11,6 млрд. долларов, в этой отрасли промышленности занято 100 000 человек.

# Физика создает дисплей

## *Жидкие кристаллы*

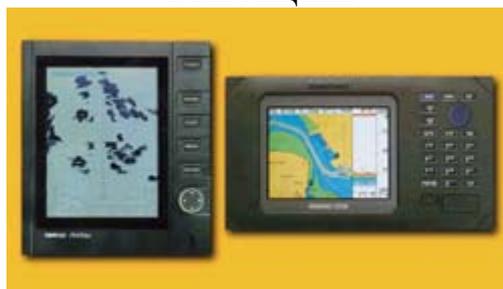
Жидкие кристаллы – материалы, которые имеют свойства кристаллов и жидкости, являются ключевым компонентом в современной технике, так как они обладают уникальными оптическими свойствами. Сегодня – это единственные материалы, которые могут использоваться для маломощных, плоских, портативных дисплеев. Разработка этих материалов финансировалась федеральным правительством, от военно-морского флота до агентства НАСА. Ежегодный мировой рынок для жидких кристаллов в компьютерных изделиях составляет 10 млрд. долларов. Новые технологии включают маломощные телевизоры, цветные дисплеи, перезаписываемые оптические диски.

### **"УМНЫЕ" ОКНА НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ В ПОЛИМЕРЕ.**



- Окна меняют свою прозрачность, если на них подается электрическое напряжение, которое используется в обычных бытовых приборах.
- В основе технологии меняющих прозрачность окон лежат использование полимеров с диспергированными жидкими кристаллами.
- Научные исследования: 1982-1985 гг.
- Прикладные исследования: 1986-1990 гг.

### **ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ ДЛЯ СИСТЕМ НА- ВИГАЦИИ**



- Жидкокристаллические дисплеи - LCD дают четкое изображение даже при солнечном освещении и могут изменять яркость свечения в ночных условиях. Дисплеи безопасны при сложных погодных и морских условиях.
- В цветных жидкокристаллических дисплеях используется тонкопленочная транзисторная технология. Они используются при ловле рыбы, в навигации и для вывода карт и координат в системе навигации GPS.

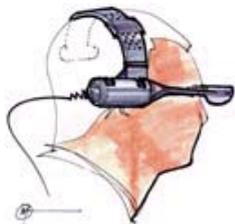
## ПЕРЕНОСНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ



- Жидкие кристаллы позволили создать цветные дисплеи высокого разрешения для переносных - "наколенных" компьютеров.
- В 1999 г. жидкокристаллические дисплеи установлены в 27-и млн. компьютерах.
- Научные исследования: 1970-1980 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.

# От научных разработок до бытового использования

## ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДИСПЛЕИ



- На основе жидких кристаллов можно создать портативные, миниатюрные компьютерные дисплеи, которые можно носить на голове.

- Программное обеспечение позволит компьютеру получать информацию из Интернет с помощью сотового телефона.

## Управление световым потоком



- Эффективное устройство управления яркими световыми пучками является основным элементом телевизионных и электронных проекторов.

- Развиваются новые подходы на основе применения жидких кристаллов для решения этой задачи.

## Гибкие дисплеи



- Дисплеи высокого разрешения на пластиковой основе можно держать в руке, они имеют малый вес и изгибаются подобно бумаге.

- Некоторые типы дисплеев создаются на основе легко доступных и недорогих устойчивых пленок и являются альтернативой дисплеям, использующим стекло.



## Дисплеи для военных целей

- Для военных целей США требуется большое количество LCD

дисплеев с активной матрицей.

- LCD дисплеи занимают немного места, обеспечивают высокое качество работы и универсальны для многочисленных военных применений.

**1988 г.** Австрийский ботаник Фредерик Рейнитцер впервые наблюдал жидкие кристаллы, они немного были изучены учеными на пороге двадцатого века.

**1958 г.** – Дж. Х. Браун опубликовал в журнале *Chem. Reviews* статью о жидких кристаллах, которая инициировала интерес к исследованию во всем мире.

**1965 г.** – Проведена первая международная конференция по жидким кристаллам (Кент штата Огайо), вторая – в 1968 г. С тех пор конференции проводятся через каждые два года.

**1967** – Разработан дисплей на основе нематических жидких кристаллов с twist-элементарной ячейкой. Патентован в 1971 г., изменил наши представления о наручных часах и проложил путь к созданию жидкокристаллических дисплеев для калькуляторов и многих других устройств.

**1970-е гг.** – Жидкокристаллические дисплеи появляются в термометрах, часах, калькуляторах. Разработаны сегнетоэлектрические жидкие кристаллы, быстро реагирующие на электрическое поле.

**1980 гг.** – Появляются дисплеи на основе использования жидких кристаллов с "supertwist" ячейкой и активной матрицы. Они используются в компьютерах, миниатюрных телевизорах и переносных компьютерах.

**1990-ые** – Первая демонстрация концепции электронной газеты, в кото-

рой использована технология отражающего дисплея.

**1991** – Пьер Жене получает нобелевскую премию, в частности за изучение рассеяния света от жидких кристаллов.

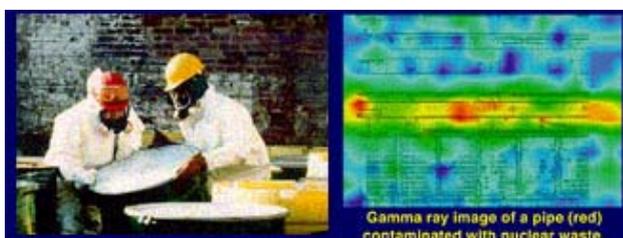
**БУДУЩЕЕ** – Жидкокристаллические дисплеи позволят сделать доступ к информации повсеместно доступным, обеспечивая пользователя изображениями в любом месте Земли в любое время. "Электронная бумага" заменит традиционную бумагу, будет иметь малую стоимость, будет легко доступной и меньше влиять на окружающую среду.

# Физика защищает людей

## Национальная оборона

Физические исследования в США помогают поддерживать американское технологическое превосходство, гарантируя безопасность и способность защиты от военной или террористической угрозы. Например, ядерные методы физики используются для контроля за нераспространением ядерного оружия и обнаружения взрывчатых веществ и наркотиков. Физика помогает сохранять мир и обеспечивает нашу безопасность, начиная от контроля за соглашениями о ядерном оружии до посадки самолетов в плохи погодных условиях.

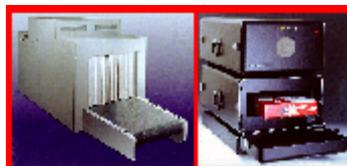
### НЕРАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ



- Физики и астрономы разработали методы получения изображения в гамма-лучах. Этот метод был улучшен на основе чувствительной электроники и оптики и теперь используется для обнаружения и идентификации радиоактивных материалов. Метод используется для проверки соглашений о ядерном оружии, предотвращении контрабанды ядерных материалов, очистки окружающей среды, для получения изображений в медицине.

- Научные исследования: 1960-70 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.
- Изображение в гамма-лучах наиболее безопасный метод при очистке окружающей среды, т.к. позволяет быстро и точно определять точное местоположение ядерных материалов.

### АНТИТЕРРОРИЗМ



- Взрывчатые вещества, мины и наркотики могут быть обнаружены с очень высокой точностью с помощью метода ядерного квадрупольного резонанса, метода похожего на получение ЯМР-изображений в медицине.
- Научные исследования: 1940-70 гг.
- Прикладные исследования: 1980-90 гг.
- В США между 1990 и 1994 гг. было зарегистрировано 3196 случаев применения или попыток применения бомб, которые привели к 306 смертным случаями и материальному ущербу в 1 млрд. долларов.

### "НЕВИДИМЫЕ" САМОЛЕТЫ



- "Ночной ястреб" – Nighthawk уклоняется от сигналов радаров и от

ракет с наведением по тепловому благодаря разработанной на компьютере форме и использования новых композитных материалов и покрытий.

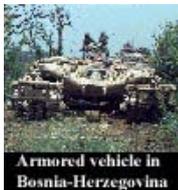
- Бортовые компьютеры каждую секунду делают тысячи операций регулирования, в то время как новые оптические технологии обеспечивают точную навигацию.

- Прикладные исследования: 1970-90 гг.

# От научных разработок до бытового использования

## НАЦИОНАЛЬНАЯ ОБОРОНА

### Новые материалы



- Микроволновые методы обработки материалов, изученные в плазменной физике используются для

изготовления высокотемпературных и стойкой керамики для брони и реактивных двигателей, в то время как новые полимерные соединения могут делать компоненты до 40 % легче.

### Подводные лодки



- Для обнаружения целей используются достижения акустики и физики распространения радиоволн.
- Ядерные реакторы позволяют подводным лодкам работать незамеченными на максимальной мощности длительное время.

### Компьютерное моделирование



- Моделирование на суперкомпьютерах используют для изучения физики взрыва с целью

получения методов безопасной утилизации устаревшего оружия.

- Моделирование используется для оценки надежности и безопасности существующего оружия и делает ненужным проведение ядерных взрывов.

### Ночное видение



- Системы ночного и всепогодного видения преобразуют и усиливают инфракрасное излучение с использованием жидкокристаллических дисплеев и электролюминесцентных дисплейных технологий.

*Самолеты – интересные игрушки, но не представляют никакой военной ценности (Маршал Фердинанд Фоч, профессор стратегии французской военной школы, 1911).*

**1930-40 гг.** – Высокочастотные ультразвуковые волны используются во второй мировой войне для обнаружения подводных лодок. В проекте создания атомной бомбы были заняты много физиков. Создание атомной бомбы возвестило начало ядерного века.

**1950-ые гг.** – Физик Ч. Таунс (Колумбия) создал первый мазер при попытке создания источника микроволн для целей коммуникаций (Нобелевская премия, 1964 г.). Эта работа привела к развитию лазеров, которые используются в системах коммуникаций и в военных целях. Построена первая атомная подлодка, способная без дозаправки пройти 50 000 миль.

**1960-70 гг.** – Спутники используются для получения фотографий в разведывательных целях. Началась работа над системой связи на случай ядерного нападения, которая потом превратится в Интернет. Технология ночного видения впервые использована во Вьетнаме. Ядерный квадрупольный резонанс впервые использован для обнаружения мин.

**1980-90-ые гг.** – Интегральные схемы становятся все более важными для

военного оборудовании, обеспечивая высокоточное наведение, планирование и получение изображения. Истребители Стелс используют высокотехнологическое оборудование для того, чтобы уклониться от иракских радаров в войне в Персидском заливе. Соглашение о нераспространении ядерного оружия продлено на неопределенный срок, в нем участвуют 173 государства. Необходимы более сложные технологии для определения возможных угроз и нарушений соглашений. Методы идентификации голоса и изображений изучаются для возможного создания "интеллектуальных" военных и гражданских применений.

# Физика сохраняет жизнь

## Изображения в медицине

Федеральное финансирование исследований физики твердого тела, в атомной и ядерной физике привело к разработке частной промышленностью современных медицинских устройств получения изображений. Фундаментальные знания того, что происходит на микроскопическом уровне – в царстве физики элементарных частиц, дали ученым мощные инструменты для безопасного изучения человеческого организма. К 1996 г. медицинская промышленность получения изображений произведет, по крайней мере, изделий на 6 млрд. долларов и предоставит 33 000 рабочих мест.

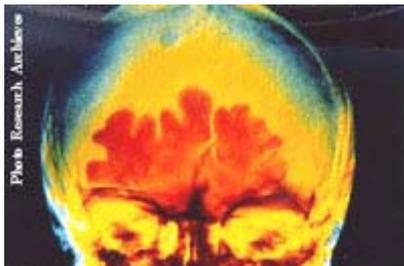
### КОМПЬЮТЕРНАЯ ОСЕВАЯ ТОМОГРАФИЯ – САТ



Изображение тазовой области, полученное методом САТ.

- Для получения изображений используются рентгеновские лучи.
- Научные исследования: 1960-ые гг.
- Прикладные исследования: 1970-80 гг. Продажи САТ-оборудования в США в 1995 г. 500 млн. долларов.
- Рентгеновские лучи просвечивают организм под различными углами, обработка данных на компьютере позволяет получать изображения в поперечном сечении.

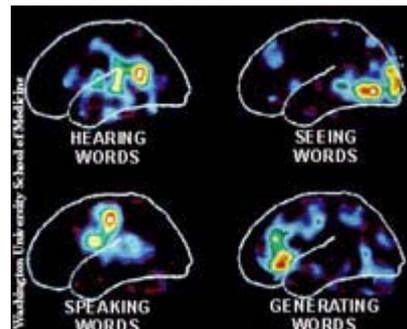
### ЯМР-ТОМОГРАФИЯ



ЯМР-изображения больных пазух носа

- Отображает внутренние структуры тела.
- Работа основана на анализе поведения различных атомов в сильных магнитных полях.
- Использование постоянных магнитов уменьшает стоимость оборудования больше, чем на 50%.
- Научные исследования: 1940-ые гг.
- Прикладные исследования: 1970-90 гг.

### ПОЗИТРОН-ЭМИССИОННАЯ ТОМОГРАФИЯ – ПЕТ

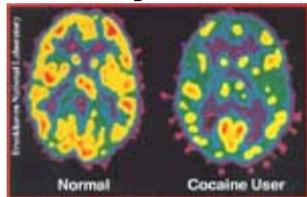


Работа мозга: ПЕТ

- Измеряет активность работы мозга для диагностики нарушений.
- Научные исследования: 1950-ые гг.
- Прикладные исследования: 1960-90 гг.
- Обнаруживает распады радиоактивных меченых атомов в потоке крови для формирования изображений.

# От научных разработок до бытового использования ИЗОБРАЖЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ

## ПЕТ-сканирование мозга



- Метод ПЕТ используется для диагностики изменений активности работы мозга при психических заболеваниях, употреблении наркотиков, при болезни Альцгеймера или Паркинсона.

## Маммография



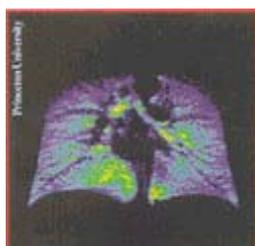
- Для обнаружения рака груди используются маммограммы, полученные при малых дозах рентгена.
- Рак груди – одна из основных причин смертей, связанных с раковыми заболеваниями.

## ЯМР-сканирование мозга



- Ежегодно проводится несколько миллионов ЯМР-сканирований мозга.

## ЯМР-изображение легких



- Половина всех ЯМР-томографов установлено в США.

- Первая ЯМР-томограмма, показывающая работу легких (1995 г.)

*Брюшная полость, грудь и мозг будут навсегда закрыты от вторжения мудрого и гуманного хирурга (Сэр Дж.Е. Эрикссон, хирург королевы Виктории, 1873).*

**1895 г.** – В. Рентген получил первое медицинское изображение в рентгеновских лучах – изображение руки жены (Нобелевская премия, 1901 г.)

**1938 г.** – И.И. Раби (штат Колумбия) предсказал, что информация об атомах может быть получена внутренних магнитных полях на протонах. Это предположение явилось фундаментальной основой современной техники получения изображений методом ядерного магнитного резонанса – ЯМР.

**1946 г.** – Физики Е. Парселл (Гарвард) и Ф. Блох (Стенфорд) обнаружили ядерный магнитный резонанс – ЯМР (Нобелевская премия, 1952 г.)

**1970-ые гг.** – П. Лаутербур (P. Lauterbur (SUNY-Stony Brook) и другие применили метод ЯМР для получения изображений внутренних органов человека.

**1972 г.** – Г. Хаунсфелд получил первое изображение методом компьютерной аксиальной рентгеновской томографии – САТ и разделил Нобелевскую премию 1979 г. с А. Кормаком.

**1970-80-ые гг.** – Проведены первые эксперименты по позитрон-эмиссионной томографии – ПЕТ.

**1980-90-ые гг.** – Быстро распространяется ЯМР-томография. Сверх-

проводящие магниты, быстрые компьютеры и новые детекторы позволили при федеральном финансировании создать быстродействующие ЯМР-томографы с высоким разрешением. Развиваются функциональные возможности ЯМР-томографов: получение изображений мозга с высоким разрешением, изображение активных центров при заболеваниях, например, эпилепсии.

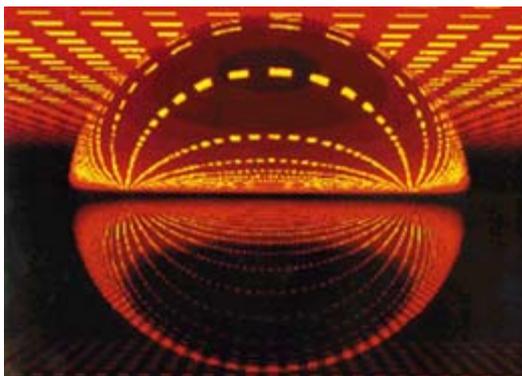
**БУДУЩЕЕ** – Достижения в области ЯМР (Р.Эрнст, Нобелевская премия, 1991 г.) могут привести к возможности прямого наблюдения химического действия лекарств в живом организме.

# Физика расширяет представление о звук

## *Акустика*

Акустика – это наука о звуке. Ученые в области акустики помогают увеличить чистоту музыки в концертных залах, улучшить слуховые аппараты, уменьшить шум от шоссе и самолета. Исследования во время второй мировой войны в области подводной связи в длинноволновом диапазоне привели к созданию ультразвуковых локаторов и ультразвуковой техники связи, которые сейчас распространены очень широко. В технике ультразвуковые локаторы используются в роботах для определения их положения и положения различных объектов. Врачи в США теперь исследуют с помощью ультразвука почти каждую беременность

### АКУСТИКА В ОКЕАНЕ



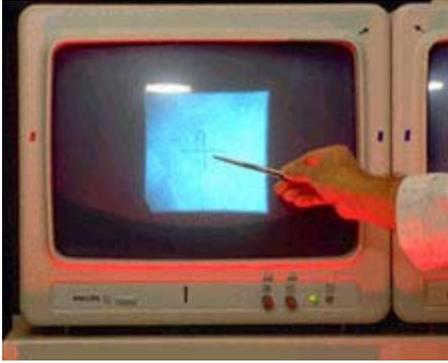
- С помощью звука корабли "видят" другие корабли, дно океана, находят мины и определяют точное положение пятен на поверхности для поиска нефти в океане.
- Измерение скорости распространения звуковых волн в океане помогает контролировать температуру воды в океане и глобальные изменения в окружающей среде.

### КОНТРОЛЬ ШУМА



- Звуковые барьеры уменьшают уровень шума в окрестности шоссе, эффективно уменьшая шум транспортных средств.
- Шумовые барьеры установлены в США примерно вдоль 1400 миль. Только на федеральных дорогах ежегодно барьеры устанавливаются на протяжении 90-100 миль.

## МЕДИЦИНСКАЯ АКУСТИКА



- Ультразвуковые методы используются высокочастотные звуковые волны и их отражение для того, чтобы "увидеть" изображение внутри тела, они используются для разрушения почечных камней и остановки внутреннего кровотечения.
- В 1996 г. в США было проведено почти 15 млн. ультразвуковых экспертиз.
- Установка электронного имплантата – "улитки" в ухо глухого человека частично восстанавливает слух и стимулирует слуховой нерв.

# От научных разработок до бытового использования

## АКУСТИКА

### "Ультразвуковая" химия

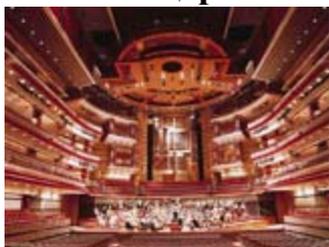


- Звуковые волны могут создавать в жидкостях пузыри с высокой энергией.

- Интенсивный нагрев и быстрое охлаждение этих пузырей увеличивается

скорость химических реакций, которые используются в фармацевтической промышленности.

### Акустика концертных залов



- Для создания залов с наилучшей акустикой используются выдвижные навесы, занавеси и отдельные ложи, которые можно размещать специально для каждого представления.

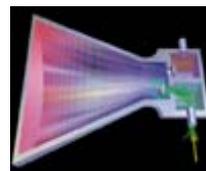
### Неразрушающий контроль материалов



- С помощью звуковых волн можно обнаруживать дефекты в самолетах, мостах, трубопроводах.

- "Акустические микроскопы" позволяют обнаружить дефекты тоньше человеческого волоса.

## Термоакустика



- Так как звуковые волны могут изменять в газах температуру и давление, перспективные в будущем "термоакустические холодильники" смогут охлаждать различные объекты без загрязнения окружающей среды.

*"Все вопросы, связанные с этим предметом должны быть в конечном итоге связаны с ухом, как органом слуха, а потому не может быть очень привлекательным."* (Лорд Релей в книге "Теория звука", 1877 г.)  
**1826 г.** – Дж. Д. Колладон и Дж. К. Ф. Штурм измерили скорость звука в Женевском озере.

**1880-1881 гг.** – Дж. П. Кюри открыл пьезоэлектрический эффект.

**1900 гг.** – Магнитострикционные и пьезоэлектрические устройства используются для получения ультразвуковых волн на определенных задаваемых частотах.

**1915 г.** – П. Ланжевен используется сначала магнитострикционный, а затем кварцевый излучатель для получения ультразвуковых волн в воде. Становится возможным обнаружение подводных лодок.

**1925-1950 гг.** – Г. Бекези используется физические методы в длительном экспериментальном исследовании работы уха. (Нобелевская премия, 1961 г.).

**1940-45-ые гг.** – Открытие "SOFAR"-канала, в котором звуковые волны

распространяются тонком слое океана, что сделало возможным создание коммуникации в океане на звуковых волнах большой длины волны.

**1958 г.** – Дж. Маквикар, А. Дональд и Т.Г. Браун использовали ультразвук для исследования плода при беременности.

**1960-ые гг.** – Первые импланты для уха (А.С. Наус и Ф.Б. Симмонс). Широко используются трассировка лучей и другие сложные методы обработки сигналов.

**1975** – Широко распространяется использование ультразвука для получения изображений плода, почек, мозг и других внутренних органов.

**1985** – Использование сфокусированных ударных волн для разрушения почечных и камней в мочевом пузыре.

**1990** – Детальное изучение механизма получения речи и восприятия речи.

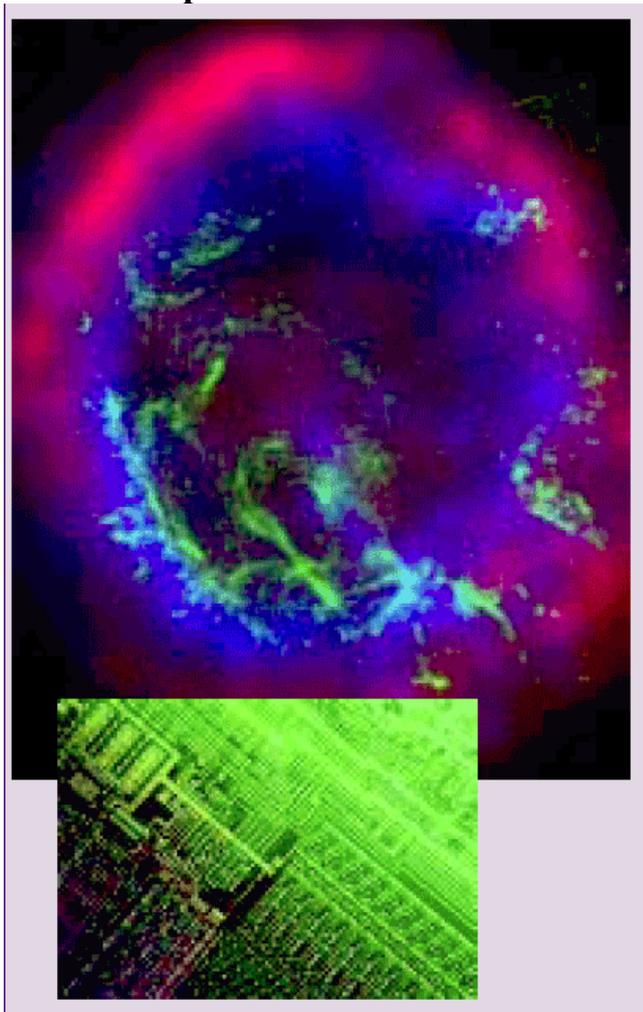
**1997** – Разработана технология получения сверхмощных звуковых волн, которая позволяет заменить механические узлы в некоторых механизмах.

# Астрофизики создают новые технологии

## *Астрономия*

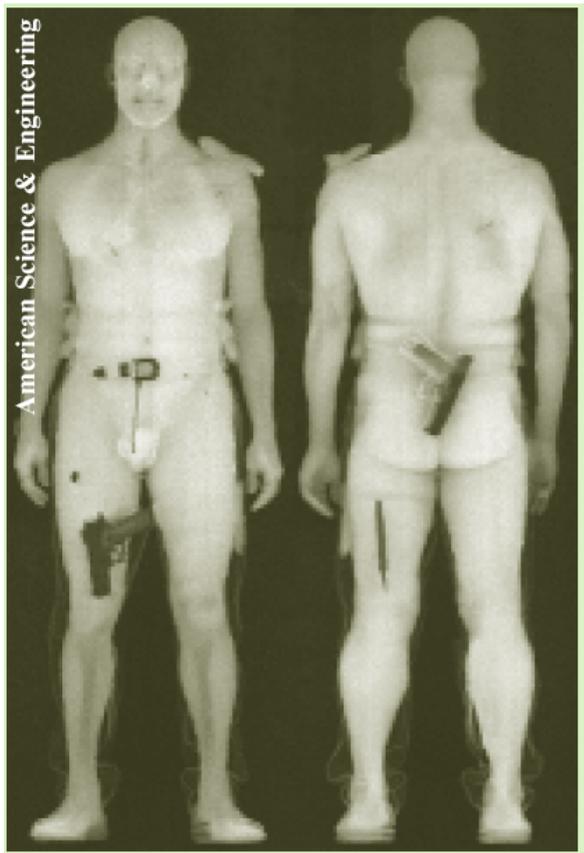
Астрофизики стремятся получить ответы на фундаментальные вопросы о Вселенной: о происхождении Вселенной в результате Большого взрыва, формировании планет, возникновении жизни на Земле и, возможно, на других планетах. Технологии, которые были разработаны физиками для исследования Вселенной, привели к революционным достижениям в самых разных областях науки и техники, включая 6 миллиардов долларов для выпуска медицинских приборов получения изображений, 400 миллиардов долларов в полупроводниковой промышленности и 1,5 триллиона в телекоммуникационной отрасли.

## Полупроводниковая промышленность



- Астрономы разработали «оптику» для рентгеновских и ультрафиолетовых лучей, которая помогла значительно улучшить технику литографии интегральных схем – чипов.
- Производители полупроводниковых приборов используют системы контроля качества, которые включают инфракрасные детекторы, разработанные астрономами.
- Спектрометры для рентгеновского диапазона, которые были разработаны для определения химического состава космической плазмы, теперь используются для определения примесей в процессе изготовления компьютерных чипов.

## Обеспечение безопасности

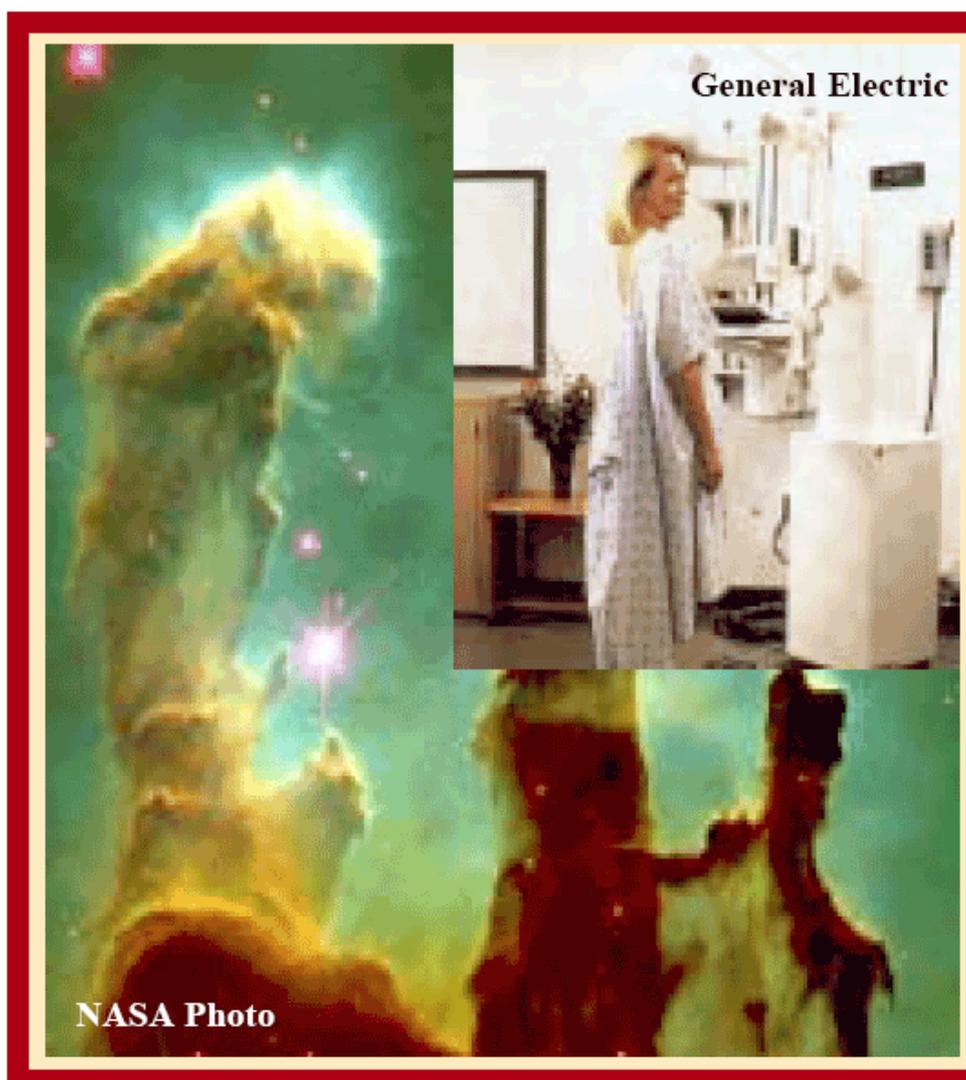


Техника слежения, состоящая из телескопов и обсерваторий, первоначально была создана для обслуживания военных спутников, которые контролировали военные действия на земле.

- Астрономические методы анализа изображений теперь используются для обработки фотографий в полицейской практике.

- В самом распространенном типе сканеров досмотра багажа применяются детекторы, первоначально разработанные для астрономических наблюдений в рентгеновском диапазоне.

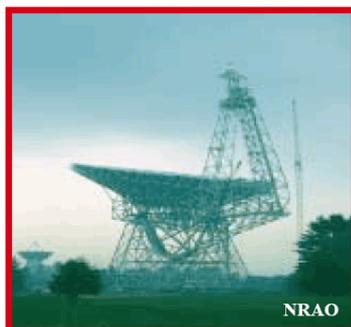
## Получение изображений в медицине



- Приборы с зарядовой связью – ПЗС для ультрафиолетового диапазона, которые разрабатывались для космического телескопа Хаббла, теперь включены в инструменты грудной хирургии (биопсии), что уменьшило хирургическое вмешательство и стоимость операции более, чем на 75%.
- Чувствительные приборы с зарядовой связью для рентгеновского диапазона заменили рентгеновскую пленку в стоматологии и сократили эффект облучения.
- Адаптивная оптика, разработанная для современных телескопов, применяется в хирургии глаза и создании корректирующих линз.

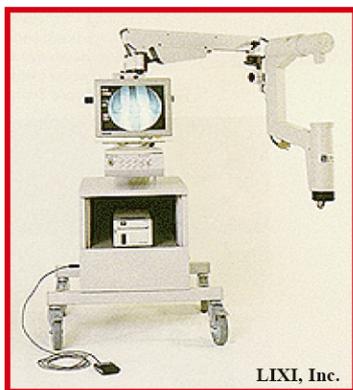
## ОТ НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК ДО ПОВСЕДНЕВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

### Компьютерные решения



- Язык программирования ФОРТ, разработанные для радиоастрономической обсерватории, теперь используется для разработки программ портативных компьютеров в службе ФБР, для автоматических анализаторов, для производства пленки в фирме КОДАК.

### Переносной рентгеновский аппарат



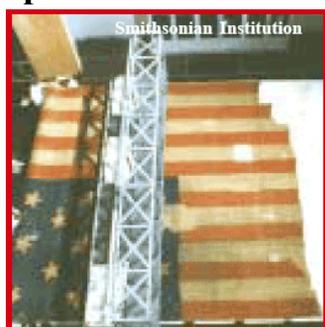
- Переносной рентгеновский аппарат с малоинтенсивным источником рентгеновского излучения (Lixiscop) – второй по объему источник лицензионных платежей NASA. Этот аппарат все чаще применяется при авариях, в спорте и других областях, где быстрое получение рентгеновского изображения является необходимым.

### Высококачественная графика



- Популярный графический пакет с интерфейсом IDL – Interface Definition Language берет свое начало из графического программного обеспечения, написанного для космического аппарата Mariner, исследовавшего поверхность Марса.

### Археология и памятника материальной культуры



- Инфракрасные изображения, полученные астрофизиками, помогают документировать состояние звезд и следить за их эволюцией.
- Изображения Земли, полученные спутниками, помогают археологам, исследующим доисторические города, которые захоронены под песками пустыни.

*“Астрономия заставляет душу смотреть вверх  
и ведет нас от этого мира к другого”*

**Платон (428 до н. э. – 348 до н. э.)**

**10 миллиардов лет до н.э.** – "Большой Взрыв" приводит Вселенную в движение.

**1543** – Коперник разрабатывает гелиоцентрическую модель Солнечной системы.

**1687** – Ньютон издает его " Principia Mathematica ".

**1800** – Уильям Гершель обнаруживает инфракрасное излучение.

**1910-ые** – В полетах на воздушных шарах обнаружено существование внеземного излучения (космические лучи).

**1916** – Карл Шварцшильд предсказывает существование черных дыр. Эйнштейн опубликовал общую теорию относительности.

**1927** – Эдвин Хаббл обнаруживает расширение вселенной.

**1932** – Карл Янски обнаруживает радиоизлучение из центра Млечного пути.

**1949** – Прибор, созданный в Военно-морской научно-исследовательской лаборатории и установленный на борту ракеты V2, обнаруживает рентгеновское излучение Солнца.

**1940-ые** – Джордж Гамов создает модель "Большого Взрыва".

**1960-ые** – В экспериментах, проведенных с помощью ракет ВВС США Aerobee 150, обнаружены космическое рентгеновское излучение, диффузное рентгеновское фоновое излучение, дискретный рентгеновский источник Cygnus X-1.

**1963** – Обнаружены квазары.

**1965** – Обнаружен космический микроволновый фон.

**1969** – Первая «прогулка» человека на Луне.

**1976** – Самый большой интерферометрический радиотелескоп в Новой Мексике начинает собирать данные.

**1978** – Космический аппарат Pioneer достигает Венеры. Результаты пяти сеансов исследования атмосферы при движении в атмосфере Венеры переданы на Землю.

**1985** – Международный космический аппарат Explorer – первый аппарат, пролетевший через хвост кометы.

**1990-ые** – Запущен космический телескоп Hubble – (HST). Космический аппарат для исследования фонового космического излучения – (COBE) дает изображение космического микроволнового фонового излучения и позволяет понять происхождение Вселенной. Обнаружены планеты вне Солнечной системы.

**1994** – Космический телескоп Хаббл подтвердил существование черной дыры в галактике M87.

**2000** – Наблюдения в микроволновом диапазоне, проведенные на воздушных шарах (проект Бумеранга) подтвердили что общее искривление Вселенной равно нулю и что расширение Вселенной ускоряется.

# Структура материи

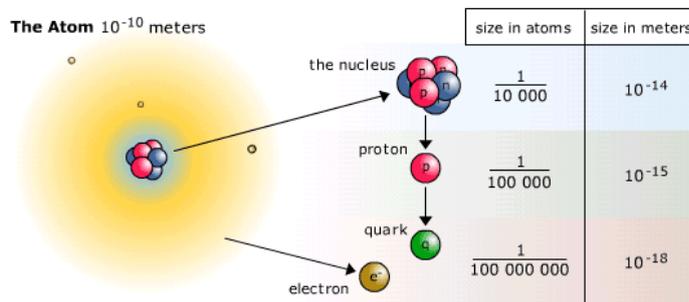
Материалы сайта Нобелевского комитета  
<http://www.nobel.se/physics/educational/matter/12.html>

## 1. Структура материи

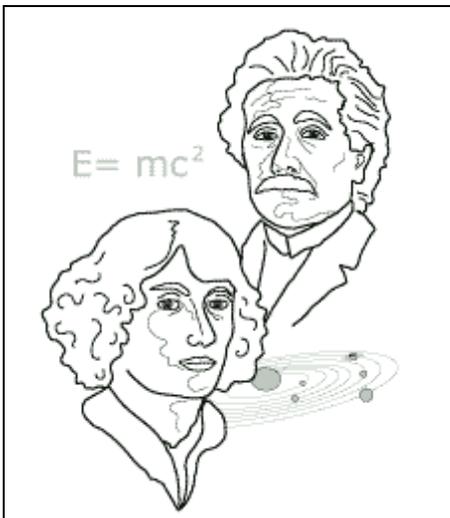
Атомы состоят из ядер, содержащих протоны и нейтроны, и электронного облака. Электроны находятся в постоянном движении вокруг ядра, а протоны и нейтроны двигаются внутри ядра. Каждый нейтрон и протон состоят из трех кварков. С современной точки зрения кварки и электроны являются наиболее фундаментальными формами материи.

Атом  $10^{-10}$  м

Размер в атомах      Размер в метрах



## 2. Революционные идеи



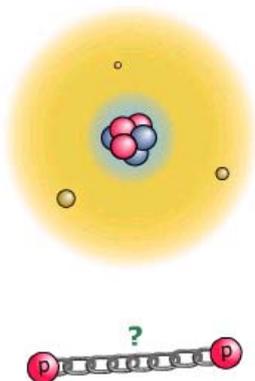
В науке есть периоды, когда дальнейший прогресс может быть достигнут только на основе революционных идей.

Николай Коперник сделал именно такой шаг в неизвестность, когда предположил, что Солнце является центром Солнечной системы.

Альберт Эйнштейн (Нобелевская премия по физике, 1921 г.) совершил такой же шаг, когда поведал миру о том, что скорость света не может быть превышена, и опубликовал свою теорию относительности.

Кварки также требовали революции в мышлении.

## 3. Вопрос, оставшийся без ответа

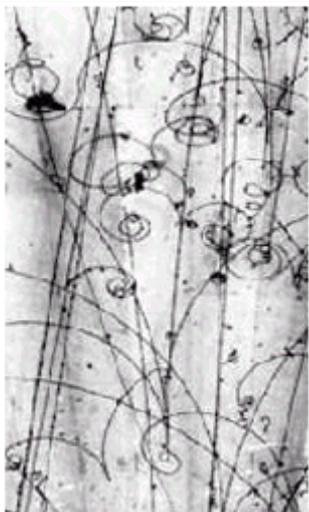


К 1930 году представление об атомах достигло критической стадии. Считалось, что атомы состоят из ядер, содержащих протоны и нейтроны (Джеймс Чэдвик, Нобелевская премия по физике, 1935 г.), и внешнего облака электронов (Джозеф Джон Томсон, Нобелевская премия по физике, 1906 г.). Считалось, что эти три частицы являются фундаментальными составляющими всей материи.

Но оставался вопрос: как внутри ядра удерживаются вместе все протоны, которые отталкиваются друг от друга? Почему ядро стабильно?

Эти вопросы привели к экспериментам на ускорителях заряженных частиц для изучения взаимодействия нейтронов и протонов. Но, помимо ответов на поставленные вопросы, в этих экспериментах было обнаружено много других типов частиц. Это породило в свою очередь большое число новых вопросов, которые в конечном итоге привели к совершенно новому пониманию фундаментальной структуры ядра.

#### 4. Научные приборы



Такие приборы, как пузырьковые камеры (Дональд Глазер, Нобелевская премия по физике, 1960 г.) играли решающую роль в разработке нового взгляда на строение материи. Принцип работы пузырьковой камеры состоит в том, что, когда вы направляете заряженные частицы в жидкость, которая нагрета выше ее температуры кипения (перегретая жидкость), за пролетающей частицей остается след (трек) в виде пузырьков. В камере легко зарегистрировать треки частиц и затем рассчитать такие важные характеристики, как заряд и массу частиц. С помощью таких регистрирующих приборов были открыты многие новые частицы. Перед физиками был поставлен вопрос: "Как эти частицы связаны с протонами, нейтронами и электронами?".

#### 5. Спин: свойство частиц



С помощью пузырьковой камеры и других приборов были открыты сотни новых частиц (Луис Альварес, Нобелевская премия по физике, 1968 г.). Существование трех фундаментальных частиц материи казалось правдоподобным, но сотен? Все это напоминало мозаику, потому что предполагается, что природа устроена просто и элегантно, а не сложно и уродливо.

Пытаясь разгадать эту простоту природы, физики начали классифицировать все частицы в соответствии с их характеристиками (свойствами). Одной из таких характеристик был спин.

Спин – значение углового момента (момента импульса), которым обладают все частицы. Например, если волчок вращается, то он имеет определенный момент импульса. Чем быстрее вращается волчок, тем больше момент импульса. Физики обнаружили, что эта идея справедлива и для частиц, но спин частицы – ее внутренняя, неизменяемая характеристика. Например, электрон имеет и всегда будет иметь спин, равный  $1/2 \hbar$ .

В квантовых теориях момент импульса измеряется в единицах  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \times 10^{-34}$  Дж·с (Макс Планк, Нобелевская премия по физике, 1918 г.).

(Дж·с произносится как Джоуль-секунда, а  $\hbar$  = "аш с чертой")

## 6. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса.

Спин – момент импульса, который является характеристикой частиц. Но момент импульса может быть связан и с вращением одного объекта относительно другого. Например, Земля вращается вокруг Солнца: она имеет момент импульса, обусловленный ее "собственным" вращением и имеет орбитальный момент импульса вследствие вращения вокруг Солнца.



Общий момент импульса, связанный со спином и вращательным движением, является полезной величиной, поскольку эта величина всегда остается постоянной. В ускорителе при соударении частиц возникают другие частицы. Но суммарный момент импульса остается постоянным до столкновения, во время столкновения и после столкновения. Значение углового момента всегда должно быть одни и тем же.

Это утверждение называется законом сохранения момента импульса.

### Сохранение момента импульса

<p>Две частицы (позитрон и электрон) с невероятно большой энергией сталкиваются друг с другом</p>	<p>При аннигиляции частиц возникают две новые частицы</p>	<p>На этом этапе можно предположить, что две частицы со спином 1/2 приведут к созданию частиц со спином, равным нулю. Но куда делся момент импульса? Момент импульса не сохраняется?</p>	<p>Момент импульса тем не менее остается постоянным, но изменяет свою форму. Сначала он был в виде спина, а теперь в форме вращательного момента импульса. Подобно тому, как Земля и Луна, эти частицы имеют момент импульса из-за движения относительно точки столкновения.</p>

Таким образом, момент импульса сохраняется. Спиновый момент импульса преобразуется во вращательный момент импульса, но общая величина момента импульса остается неизменной.

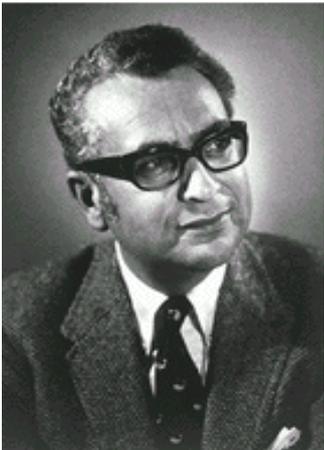
## 7. Классификация частиц

В физических экспериментах столкновение частиц с известным спином используется для получения других частиц. Т.к. физики знали суммарный спин частиц, участвующих в столкновениях, то они использовали закон сохранения момента импульса для определения спина частиц, полученных при столкновении. Физики установили, что спин частиц может быть целым числом  $\hbar$  ( $0\hbar, 1\hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots$ ) или полуцелым числом  $\hbar$  ( $1/2\hbar, 3/2\hbar, 5/2\hbar, \dots$ ).

Большинство вновь открытых частиц относится к известному классу частиц, которые называются адронами. Адроны были классифицированы либо как мезоны с полуцелым значением спина, либо как барионы с целым значением спина.

Мезоны	Барионы

## 8. Другая характеристика....Странность



Мюррей Гелл-Манн,  
Нобелевская премия  
по физике, 1969 г.

Позже была открыта другая важная характеристика. При столкновениях частиц с высокими энергиями было обнаружено рождение большого количества частиц, которые получили название К-мезоны. Но обнаружилось нечто странное с этими частицами. Наблюдение показало, что имеют достаточно большое время жизни. Можно предположить существование некоторого закона, который запрещает К-мезонам распадаться на другие частицы.

Мюррей Гелл-Манн (Нобелевская премия по физике, 1969 г.) предположил, что К-мезоны и некоторые другие частицы имеют неизвестное ранее свойство (характеристику), которое получило название "странность". Затем он идентифицировал эти свойства и модели как часть некоторой математической классификационной схемы.

Однако, эта схема казалась не вполне работающей. Схема предсказывала существование еще не обнаруженной частицы –  $\Omega^-$  (омега-минус). Но это не остановило физиков. Вскоре они обнаружили частицу с массой, которая была предсказана Гелл-Манном. Это и подтвердило всю модель классификации частиц, которая была им создана.

## 9. Появляется кварк



Несмотря на созданную Гелл-Манном модель и классификацию таких частиц либо как барионов, либо как мезонов, физики "застряли" с сотней "фундаментальных" частиц.

Для того чтобы избежать "зоопарка частиц", следующим шагом было выяснение того, могут ли эти модели объясняться, если постулировать, что барионы и мезоны состоят из других частиц. Эти частицы были названы кварками.

Мюррей Гелл-Манн и Георг Цвейг предположили, что барионы – это частицы, состоящие из трех кварков ( $qqq$ ), а мезоны – частицы, состоящие из кварка и антикварка ( $q\bar{q}$ ).

(*up*-кварк (верхний кварк) обозначается буквой *u*, *down*-кварк (нижний кварк) - буквой *d*. Слова *up* и *down* – просто имена кварков и никакого отношения к понятию "верх" или "низ" не имеют).

### 10. Дробный заряд и ненаблюдаемость кварков

Однако кварки не казались вполне совершенным ответом. Гелл-Манн и Цвейг признали, что их идея имеет серьезные проблемы. Одна из них связана с необходимостью дробного заряда кварков, который должен быть связан с известными зарядами мезонов и барионов. Однако, частицы с таким дробным зарядом никогда ранее не наблюдались.

Перед Гелл-Манном и Цвейгом стояли две другие серьезные проблемы, которые нужно было разрешить до принятия их теории. Во-первых, кварки не наблюдались, и никто не мог объяснить этот факт. Во-вторых, можно было предположить различные комбинации кварков, но эти другие комбинации никогда не были обнаружены экспериментально.

**the proton**

up quark charge =  $+\frac{2}{3}$

down quark charge =  $-\frac{1}{3}$

$u \quad u \quad d = p$

$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) = +1$

**the neutron**

up quark charge =  $+\frac{2}{3}$

down quark charge =  $-\frac{1}{3}$

$u \quad d \quad d = n$

$\frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) = 0$

**the pion**

down anti quark charge =  $+\frac{1}{3}$

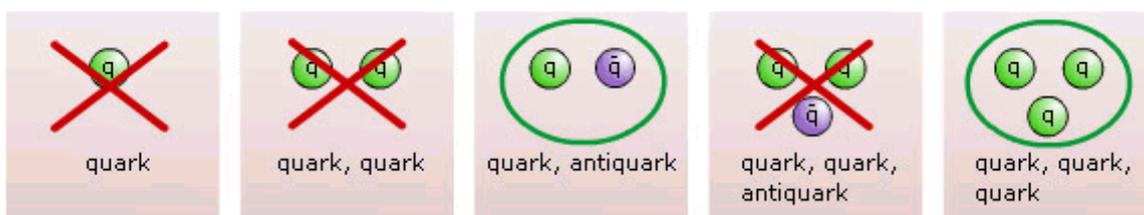
up quark charge =  $+\frac{2}{3}$

$\bar{d} \quad u = \pi^+$

$\frac{1}{3} + \frac{2}{3} = +1$

### 11. Цветной заряд

Нужно было объяснить, например, почему наблюдаются только такие комбинации кварков и антикварков, которые имеют целый заряд, и почему нет, например, таких комбинаций, как  $q, qq, qq\bar{q}$ , или неисчислимо много других комбинаций.



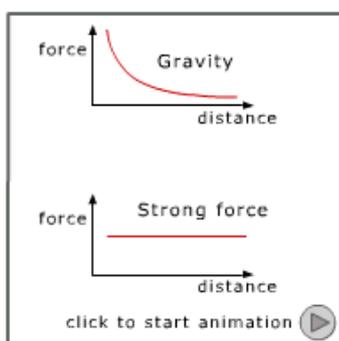
Гелл-Манн и другие исследователи полагали, что ответ лежит в природе сил, связывающих кварки. Эта сила называется "ядерной" и является мерой "сильного" взаимодействия, и новые заряды, которые чувствительны к ядерным силам, были названы "цветными" зарядами, хотя к обычному цвету это не имеют никакого отношения. Ученые предположили, что кварки имеют три цветовых заряда. Этот тип заряда был назван "цветом", т.к. некоторые комбинации цветов кварков будут "нейтральными" по аналогии с комбинацией обычных цветов, которые могут дать белый, т.е. нейтральный цвет.



Подобно тому, как комбинация красного и синего цвета дает пурпурный цвет, комбинация определенных цветов (красный, зеленый, синий) дает белый цвет.

Могут существовать только те частицы, которые имеют нейтральный цвет, т.е. только  $qq\bar{q}$  и  $qqq$ .

## 12. Кварки удерживаются вместе или "кварки находятся в заключении"



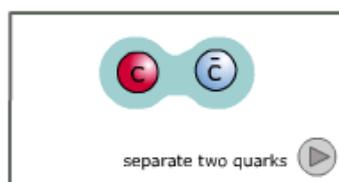
Ядерная сила существенно отличается от гравитационных и электромагнитных сил. Гравитационные и электромагнитные силы по мере увеличения расстояния между объектами или зарядами ослабевают. Однако, для ядерных сил расстояние не имеет значения. Интенсивность сильного взаимодействия между кварками остается постоянной.

Почему возникают только частицы с нейтральным цветом?

Что произойдет, если кварк испытает сильное соударение и примет участие в ядерных реакциях, обусловленных ядерным взаимодействием.

### Кварки удерживаются вместе

Что произойдет, если попытаться разделить два кварка?



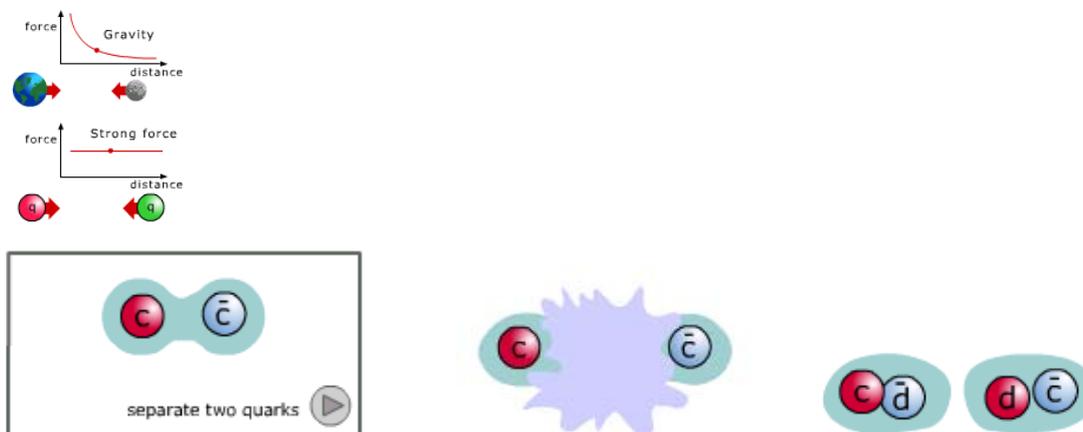
Если кварк каким-либо образом сдвинуть от его соседа, то энергия поля ядерной силы будет увеличиваться. Подобно тому, как при растяжении резиновой ленты, по мере удаления кварков друг от друга все большее количество энергии будет преобразовываться в энергию поля ядерного взаимодействия.

Если энергия поля достигнет определенного значения, произойдет преобразование энергии в новую пару кварк/антикварк –  $q\bar{q}$ .

Энергия поля сохранится из-за преобразования энергии поля в массу новых кварков.

Кроме того, поле ядерной силы вернется в исходное состояние.

**По этой причине кварки нельзя наблюдать в свободном виде по отдельности.**



### 13. Масса, частицы и кварки



Взаимное удержание – конфайнмент кварков демонстрирует взаимозависимость массы и энергии, открытую Эйнштейном. Масса частицы, состоящей из кварков, определяется не только массой отдельных кварков, но и их кинетической энергией.

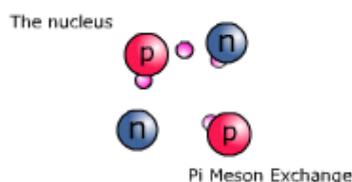
Для протона, только 1,3% его массы определяется массой трех кварков. Это сильно отличается от ядер, масса которого меньше массы составляющих его нуклонов.

Поскольку кварки в протоне или нейтроне имеют очень большую кинетическую энергию, то как они связаны вместе? Почему они не могут вылететь из протона? Так как ядерная сила (в отличие от гравитационной) остается постоянной, то для удаления кварка нужно совершить бесконечно большую работу (работа = сила × расстояние). Поэтому кварк никогда нельзя увидеть свободным.

Это была революционная идея.

### 14. Носитель ядерной силы

С открытием ядерной силы, наконец, стало возможным объяснить, ядро не разлетается.



Хидеки Юкава (Нобелевская премия по физике, 1949 г.) предположил, что ядерное взаимодействие между протонами и нейтронами в ядре возникает из-за обмена пи-мезонами (пи-мезон состоит из кварка и анти-кварка). Но, с более современной точки зрения остается проблема. Ядерная сила действует только между

частицами с цветным зарядом, а протоны и нейтроны имеют нейтральный цветовой заряд.



Физики предположили, что мезоны и барионы, такие как протоны и нейтроны в ядре могут перекрываться. Поэтому, хотя протоны и нейтроны с нейтральным цветом не взаимодействуют друг с другом, это делают их кварки. Ядерное взаимодействие возникает за счет обмена глюонами между кварками соседних протонов

и нейтронов. Этот процесс "склеивает" ("glues") ядро. Процесс очень похож на тот, который удерживает вместе нейтральные атомы в молекулах.

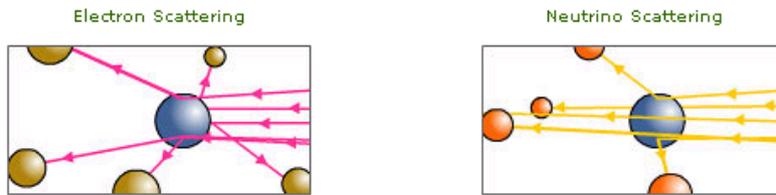
### 15. Можно ли увидеть кварки?

Хотя кварки и нельзя получить в свободном виде, физики нашли способ "увидеть" кварки внутри ядра. Эксперимент Джерома И. Фридмана (Jerome I. Friedman), Генри У. Кендалла (Henry W. Kendall) и Ричарда Е. Тейлора (Richard E. Taylor) (Нобелевская премия по физике, 1990 г.) очень похож на эксперимент Эрнста Резерфорда (Нобелевская премия по химии, 1908 г.). Однако, в их экспериментах мишенями были протоны и нейтроны, а пучок состоял из электронов с энергиями в тысячи раз больше, чем энергия альфа-частиц в пучках, использованных Резерфордом. И снова, изучая углы рассеяния частиц, удалось выйти на новый уровень понимания материи. Глубоко внутри протонов и нейтронов, они нашли экспериментально физическое доказательство существования кварков.

<p>A diagram of a proton, represented as a red sphere containing three green spheres (quarks).</p>	<p>"Смотрим" внутрь протона Используя электроны, ускоренные до высоких энергий, физики смогли "увидеть" кварки внутри протона.</p>
<p>A diagram showing an electron beam (pink arrows) hitting a proton (red sphere) and scattering at small angles.</p>	<p>A diagram showing an electron beam (pink arrows) hitting a proton (red sphere) and scattering at large angles, indicating internal structure.</p>
<p>Если протон – фундаментальная частица без внутренней структуры, то электронный пучок должен рассеиваться на небольшие углы.</p>	<p>Однако, т.к. протон имеет внутреннюю структуру (он состоит из кварков), электронный пучок будет рассеиваться на большие углы.</p>

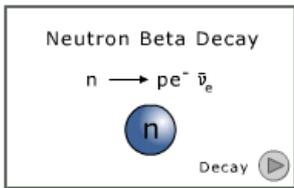
### 16. Что можно сказать о дробных зарядах?

Через несколько лет, другие физики-экспериментаторы изучали рассеяние нейтрино на протонах и нейтронах и изучали интенсивность столкновений. Нейтрино крайне легкие частицы, которые участвуют в слабых взаимодействиях, но не участвуют в электромагнитных взаимодействиях. Сравнение сечения столкновения нейтрино и электронов дало доказательство существования дробного заряда.



### 17. Даже кварки распадаются

Развитие науки характеризуется тем, что старые представления и идеи достаточно редко полностью заменяются, при этом их область применения становится ограниченной. Именно так произошло и с теорией распада нейтрона.



Нейтрон распадается на протон, электрон и нейтрино. Но, как предположили физики, так как нейтрон состоит из кварков, одного верхнего и двух нижних кварков, то сам нейтрон распасться не может. Физики предположили, что распадается один из кварков.

Итак кварки "пролили" свет на действительную природу взаимодействия частиц, которую раньше считалось невозможно объяснить.

	<p>При бета-распаде нейтрона (<math>udd</math>) образуются протон (<math>uud</math>), электрон и антинейтрино.</p>
	<p>Нейтрон не имеет заряда и состоит из одного верхнего кварка (<math>u</math>-кварк) и двух нижних кварков (<math>d</math>-кварк)</p>
	<p>Если нейтрон распадается, то один из нижних кварков преобразуется в верхний кварк. Так как нижний кварк имеет заряд <math>-1/3</math>, а верхний кварк имеет заряд <math>+2/3</math>, то необходимо выполнение закона сохранения заряда. Этот закон будет выполнен, если при распаде появится виртуальная частица – промежуточный векторный бозон <math>W^-</math> заряд которого равен <math>-1</math>.</p>
	<p>Теперь нейтрон становится протоном Как только виртуальная <math>W</math>-частица отталкивается от протона, она преобразуется в электрон и антинейтрино.</p>
	<p>Наконец, протон, электрон и антинейтрино удаляются друг от друга. В действительности весь процесс длится миллиардную долю миллиардной доли секунды, т.е. <math>10^{-18}</math> с.</p>

### 18. Пропавшее очарование

$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
$u$ (up)	$d$ (down)
$c$ (charm)?	$s$ (strange)

Используя все открытые частицы Глэшоу, Салам и Вейнберг создали Стандартную модель, теорию, которая объяснила фундаментальные частицы и силы взаимодействия. В Стандартной модели имеется три кварка, верхний кварк, нижний кварк и странный кварк ( $u$ -,  $d$ - и  $s$ -кварки). Стран-

ный кварк (s-кварк) – частица, имеющая свойство странности.

	<p>Однако трех кварков оказалось недостаточно. Математическая теория, которая лежит в основе Стандартной модели, предсказывает существование четвертого кварка, получившего название очарованный кварк (charm). Однако, ни одной частицы, содержащий такой кварк, не было обнаружено.</p>
<p>Samuel Chao Chung Ting      Burton Richter</p>	

Позже, в 1974 г., в экспериментах, проведенных Самуэлем Тингом (Samuel Ting) и Бэртоном Рихтером (Burton Richter) (Нобелевская премия по физике, 1976 г.) одновременно была найдена частица, которая содержала недостающий очарованный кварк. Один из исследователей назвал ее J- частицей, другой – Ψ. Теперь она известная как J/ Ψ -частица.

### 19. Еще кварки?

<table border="1"> <tr> <td><math>+\frac{2}{3}</math></td> <td><math>-\frac{1}{3}</math></td> </tr> <tr> <td>u (up)</td> <td>d (down)</td> </tr> <tr> <td>c (charm)</td> <td>s (strange)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>b (bottom) ?</td> </tr> </table>	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	u (up)	d (down)	c (charm)	s (strange)		b (bottom) ?	<p>С открытием очарованного кварка, физики задавали себе вопрос, а нет ли еще кварков, кроме этих четырех. Очень скоро на их вопрос появился ответ после того, как Леон Ледерман (Нобелевская премия по физике, 1988 г.) и его группа обнаружили пятый кварк. Он был назван bottom (основным) кварком – b-кварком и имел заряд <math>-1/3</math>.</p>
$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$								
u (up)	d (down)								
c (charm)	s (strange)								
	b (bottom) ?								
	<p>Физики ожидали, что скоро будет найден недостающий кварк с зарядом <math>+2/3</math>. К сожалению, прошло почти 20 лет, прежде, чем был открыт подходящий кварк.</p>								

### 20 Возможности Стандартной модели

<p>The 1999 Nobel Prize in Physics</p>  <p>Gerardus 't Hooft      Martinus J. G. Veltman</p>	<p>Используя математический аппарат Стандартной модели и данные с невероятно большой точностью из многих перспективных экспериментов, оказалось возможным рассчитать массу недостающего кварка. Используя методику расчета, разработанную Джерардусом Хофтом (Gerardus't Hooft) и Мартинусом Дж. Г. Вельтманом (Martinus J. G. Veltman) (Нобелевская премия по физике, 1999 г.), физики смогли рассчитать косвенные эффекты влияния top-кварка (t-кварка) на их экспериментальные измерения. Они обнаружили, что t-кварк должен быть много массивней других кварков, примерно в 20-30 раз массивней самого из массивных известных кварков – b-кварка.</p>
---	---

Эти методы были важны не только для оценок массы t-кварка, но они дали ключ к пониманию полной структуры и непротиворечивости Стандартной модели. До работы Хофта и Вельтмана в 1971 и 1972 гг. никто не знал, как можно

проводить расчеты на основе Стандартной модели, получая не только приближительные ответы.

## 21. Открытие топ-кварка

$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
<b>u</b> (up)	<b>d</b> (down)
<b>c</b> (charm)	<b>s</b> (strange)
<b>t</b> (top) ?	<b>b</b> (bottom)

Только к началу 1990-х годов удалось добиться точности эксперимента, необходимой для расчета массы топ-кварка. В 1995 г. два эксперимента в Ферми-лаборатории подтвердили существование топ-кварка и показали, почему его было так трудно обнаружить. Топ-кварк имел необычно большую массу  $175 \text{ ГэВ}/c^2$ , более, чем в 30 раз больше массы  $b$ -кварка! Такое большое время, потребовавшееся для его открытия по той причине, что для обнаружения такой частицы необходимо было иметь более мощные ускорители.

**Примечание.** Перевод текста к нижеследующей хронологии.

Беватрон начал работать в 1954 г., и в 1955 г. был открыт антипротон.

В 1969 г. была открыта внутренняя структура нуклонов (протонов и нейтронов) на ускорителе в Стенфорде – SLAC.

Открытие  $J/\Psi$  – частицы, построенной из очарованных кварков, в Брук-Хэвене и SLAC в 1974 г.

В 1976 г. в SLAC был открыт тау-лептон.

В 1983 г. были открыты  $W$  и  $Z$ -частицы на ускорителе на встречных пучках (протон-антипротонном коллайдере).

В 1995 г. объявлено о первом прямом доказательстве на Теватроне в Ферми-лаборатории существования топ-кварка.

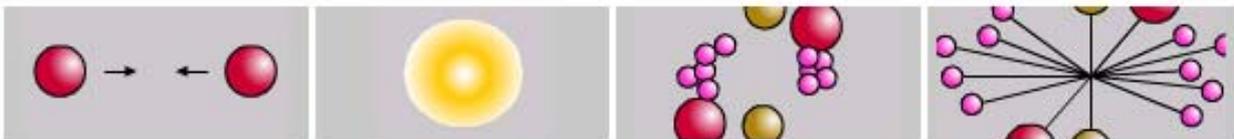


## 22. Фундаментальны ли кварки?

На сегодняшнем поколении ускорителей мы не нашли доказательств того, что кварки имеют внутреннюю структуру или состоят из других частиц. Для того, чтобы исследовать кварки нужны ускорители встречных пучков протонов экстремально высоких значений энергии. Если бы кварки имели внутри себя составляющие меньшего размера, то получившиеся в результате столкновения частицы разлетались бы под значительно большими углами.

Пока изучение этих столкновений устанавливает, что кварк является фундаментальной частицей до крошечного масштаба  $10^{-19}$  м.

Но никто не знает, действительно ли кварки являются фундаментальными частицами. Только будущие исследования на новых ускорителях встречных пучков высокой энергии – коллайдерах помогут открыть этот секрет Природы.



# Об атомах – популярно!

## All About Atoms

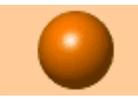
Steve Gagnon.

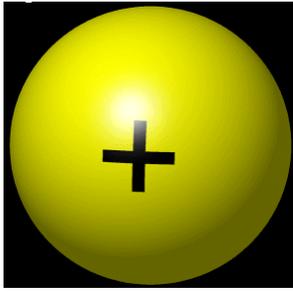
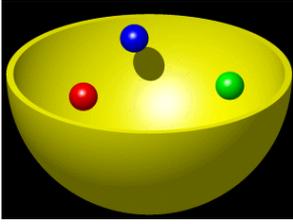
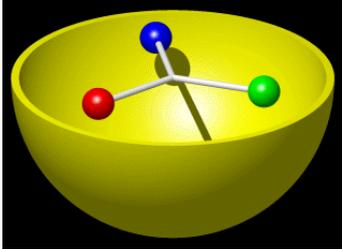
### Что такое атомы?

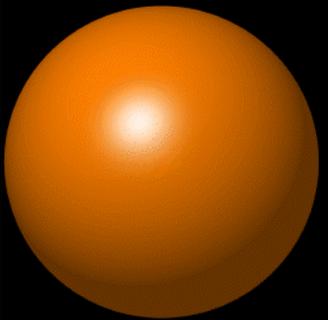
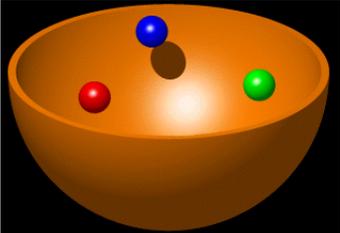
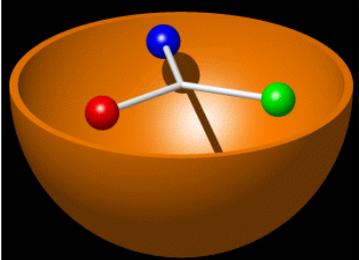
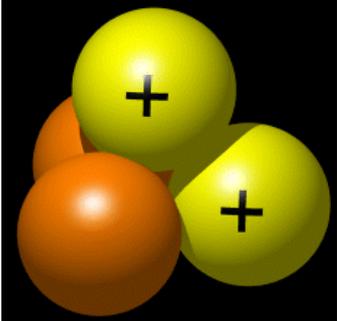
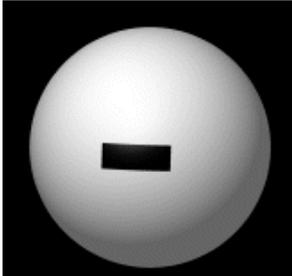
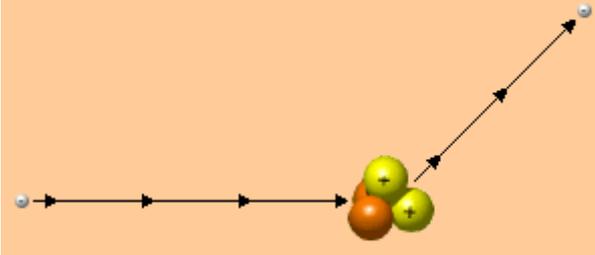
Атомы – это "строительные блоки" вещества, из которого состоят окружающие нас объекты. Стол, воздух и даже Вы сами состоят из атомов.

В природе встречаются 90 различных видов атомов. Ученые в лабораториях смогли получить еще более 25 новых атомов.

Атомы состоят из трех основных частиц:

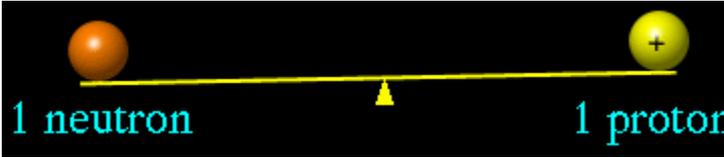
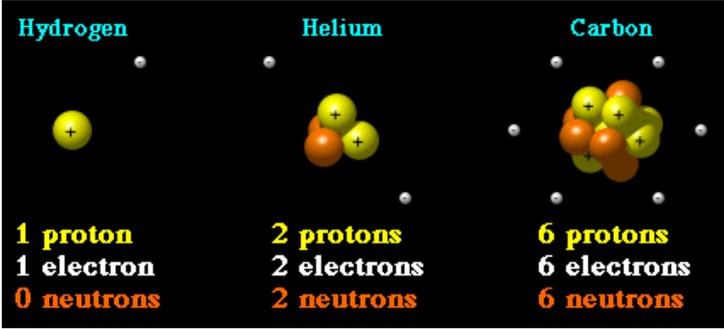
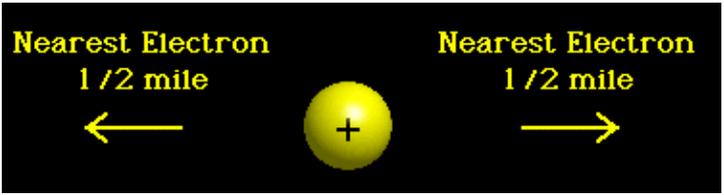
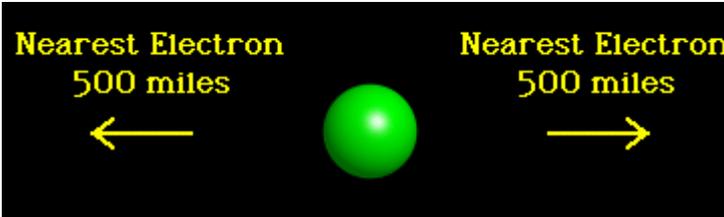
	протоны – имеют положительный заряд
	нейтроны – заряда не имеют
	протоны и нейтроны, соединяясь вместе, образуют ядро – центральную часть атома.
	электроны – имеют отрицательный заряд и двигаются вокруг ядра

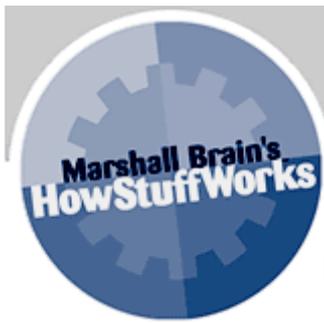
	Ученые думали, что протон является самой маленькой частицей в ядре атома.
	В 1968 году ученые обнаружили внутри протона новые частицы. Эти частицы были названы кварками. Для изучения кварков внутри ядер атомов была построена лаборатория Джефферсона.
	В каждом протоне существуют три кварка. Кварки взаимодействуют друг с другом с помощью других частиц, которые называются глюонами. Взаимодействие носит характер притяжения.

	<p>Нейтрон был открыт в 1932 году. Ученые думали, что нейтрон является элементарной частицей в ядре атома. Были ли они правы?</p>
	<p>В 1968 году ученые обнаружили внутри нейтрона новые частицы. Эти частицы были названы кварками. Для изучения кварков внутри ядер атомов была построена лаборатория Джефферсона.</p>
	<p>В каждом протоне существуют три кварка. Кварки взаимодействуют друг с другом с помощью других частиц, которые называются глюонами. Взаимодействие носит характер притяжения</p>
	<p>Ядро является массивным центром атома. Оно было открыто в 1911 году. Ученым потребовалось провести эксперименты в течение 21 года для того, чтобы определить из каких частиц состоит ядро.</p>
	<p>Электроны очень малы и очень легкие. Их очень легко "оторвать" от атома и затем использовать, например, для передачи электрической энергии или в устройствах типа телевизионных приемников.</p>
	<p>Электроны можно использовать в качестве "зонда" при изучении внутреннего строения атомов. Электроны высокой энергии могут детектировать небольшие области внутри атомов. Ученые узнают о строении атомов по результатам рассеяния электронов внутри атомов.</p>



*Интересные факты.*

 <p>2000 electrons                      1 proton</p>	<p>Если бы электрон весил как монета в 10 центов, то протон весил бы как четыре литра молока!</p>
 <p>1 neutron                                      1 proton</p>	<p>Нейтроны и протоны имеют примерно одинаковую массу.</p>
 <p>Hydrogen                      Helium                      Carbon</p> <p>1 proton                      2 protons                      6 protons  1 electron                      2 electrons                      6 electrons  0 neutrons                      2 neutrons                      6 neutrons</p>	<p>Атомы имеют одинаковое число электронов и протонов. Обычно атомы имеют одинаковое число протонов и нейтронов.</p> <p>При добавлении протона получается новый тип атома!  При добавлении нейтрона получается изотоп того же атома, т.е. более тяжелый "вариант" того же атома!</p>
 <p>Nearest Electron                      Nearest Electron  1/2 mile                                      1/2 mile</p>	<p>Если этот атом водорода нарисовать в масштабе, то нужен экран на расстоянии примерно 1 км, чтобы "увидеть" электрон на орбите</p>
 <p>Nearest Electron                      Nearest Electron  500 miles                                      500 miles</p>	<p>Кварки настолько малы по сравнению с атомом водорода, что его размер должен быть около 2 000 км, чтобы кварк был таким, как показано на рисунке.</p>



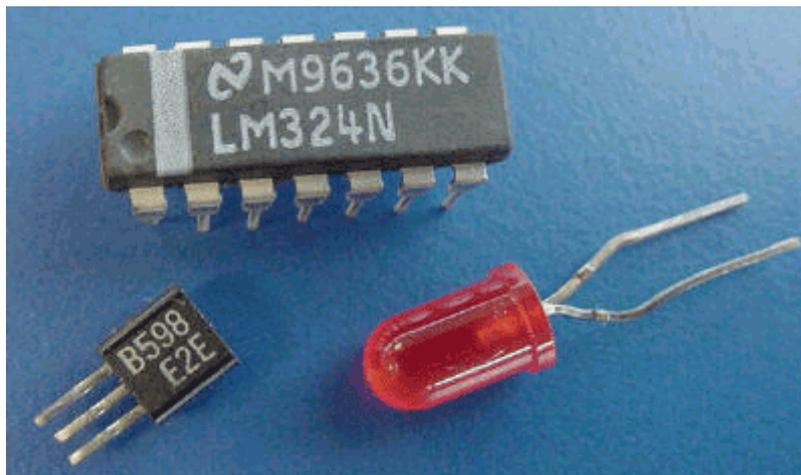
# Как работают полупроводники

## How Semiconductors Work

Marshall Brain

Полупроводники играют решающую роль в жизни современного общества. Вы найдете полупроводники и в "сердце" микропроцессорных чипов, и в транзисторе. Любое устройство, связанное с компьютером или использующее радиоволны, прямо связано с применением полупроводников.

Сегодня, большинство полупроводниковых чипов и транзисторов сделаны на основе кремния. Вы, возможно, слышали такие выражения, как "Кремниевая долина", "кремниевая экономика", "век кремния". И все это по той причине, что кремний является основой любого электронного устройства.



На рисунке показаны (по часовой стрелке сверху): чип, светодиод и транзистор – все они сделаны из полупроводникового материала – кремния.

Самым простым электронным устройством является диод. Поэтому диод можно рассматривать как исходную точку, если Вы хотите понять, как работают полупроводники. В этой статье сайта HowStuffWorks вы узнаете, что такое полупроводник, как влияют на его свойства примеси и как можно, используя полупроводники, создать диод.

### *Откроем тайны кремния*

Кремний – очень распространенный элемент. Например, он является основным элементом в составе песка и кварца. Если Вы посмотрите на положение крем-

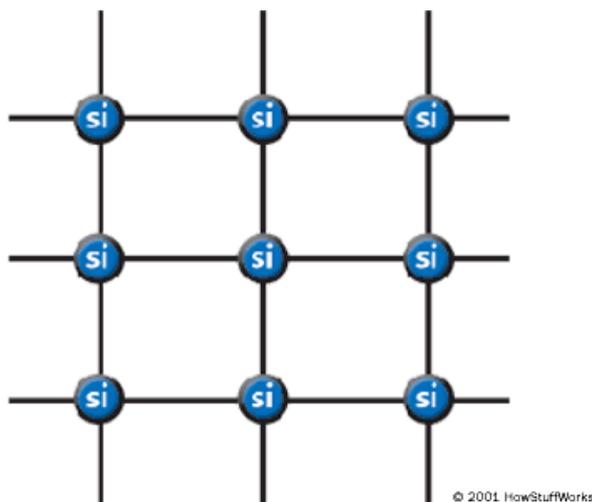
ния – Si в периодической таблице Д.И. Менделеева, то увидите, что он находится за алюминием – Al, ниже углерода – C и выше германия – Ge.

5 B Бор 2.34	6 C Углерод 2.62	7 N Азот 1.251
13 Al Алюминий 2.70	14 Si Кремний 2.33	15 P Фосфор 1.82
31 Ga Галлий 5.91	32 Ge Германий 5.32	33 As Мышьяк 5.72

©2001 HowStuffWorks

Кремний – Si находится за алюминием – Al, ниже углерода – C и выше германия – Ge.

Электронная структура углерода, кремния и германия (германий, как и кремний, является полупроводником) имеет уникальное свойство – каждый из них имеет **четыре электрона на внешней электронной оболочке**. Это свойство определяет возможность получения прекрасных монокристаллов этих элементов. Четыре электрона формируют совершенные ковалентные связи с четырьмя соседними атомами, создавая **решетку**. Углерод, как мы знаем, имеет кристаллическую форму, известную как алмаз. Кристалл кремния – это серебристое, похожее на металл, твердое тело.



В кристаллической решетке кремния все атомы кремния образуют химические связи с четырьмя соседними атомами. При этом в кристалле кремния нет свободных электронов и электрический ток че-

рез кристалл протекать не может, особенно при низких температурах. Поэтому кристалл кремния больше похож на изолятор, а не на проводник.

Металлы, как правило, являются хорошими проводниками электричества, потому что они обычно имеют "свободные электроны", которые могут легко перемещаться между атомами, а электрический ток в этом случае представляет собой поток электронов. В то время, как монокристаллы кремния, внешне очень похожи на металлы, на самом деле они не являются металлами. Все внешние электроны в кристалле кремния образуют **совершенные ковалентные связи** с соседними кристаллами, а потому не могут перемещаться. Кристалл кремния с малым количеством примесей по существу представляет собой **изолятор** – через него при комнатной температуре может протекать очень маленький ток.

### *Добавление примесей в кремний – допирование кремния*

Если в кристалл кремния внести **примеси** – **допировать** кремний, то можно изменить свойства кремния и превратить его в проводник. При допировании кремния в кристалл вносится небольшое количество примеси.

5 B Бор 2.34	6 C Углерод 2.62	7 N Азот 1.251
13 Al Алюминий 2.70	14 Si Кремний 2.33	15 P Фосфор 1.82
31 Ga Галлий 5.91	32 Ge Германий 5.32	33 As Мышьяк 5.72

©2001 HowStuffWorks

Существуют два типа примесей:

***n*-тип** – При внесении примесей *n*-типа в кристалл кремния добавляется небольшое количество фосфора – P или мышьяка – As. На внешней оболочке фосфора и мышьяка находятся пять электронов, которые занимают больше места, чем электроны атома кремния. Пятый электрон не образует связи с соседними атомами кремния и поэтому может свободно двигаться в кристалле. Для того, чтобы создать достаточное количество свободных электронов, необходимых для протекания электрического тока, нужно совсем небольшое количество примеси. Кремний *n* -типа является хорошим проводником. Так как электроны имеют отрицательный заряд – negative charge, то кристалл кремния с такими примесями и называется кремнием *n* -типа.

***p*-тип** – При внесении примесей *p*-типа в кристалл кремния добавляется небольшое количество бора – В или галлия –Ga. На внешней электронной оболочке бора и галлия находятся только три электрона. Когда эти примеси входят в кристалл кремния, они образуют "дырки" в решетке, в которых нет электронов. Отсутствие одного электрона эквивалентно наличию одного положительного заряда – positive charge. (Действительно, можно представить себе, что "нейтрализации" одного электрона, в кристалл следует добавить один положительный заряд). Направленное движение дырок можно рассматривать как электрический ток. Дырка соответствующим образом "захватывает" электрон соседнего атома и, следовательно, дырка перемещается в кристалле. Кремний *p*-типа – хороший проводник.

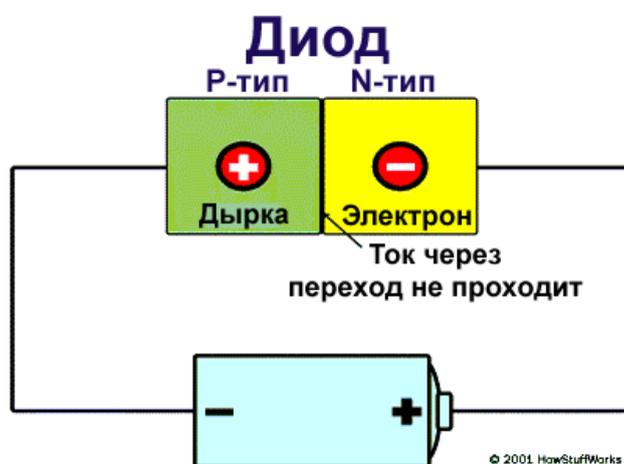
Итак, небольшое количество примесей *n*-типа или *p*-типа превращает кристалл кремния из хорошего изолятора в достаточно хороший проводник (хотя и с малой проводимостью) – это свойство и дало название "полупроводник".

Свойства кремния *n*-типа или *p*-типа не представляют собой ничего особенно удивительного. "Чудо" и очень интересные свойства возникают тогда, когда соединяете вместе кремний *p*-типа и *n*-типа, т.е. при образовании *p – n*-перехода.

### Создание диода

**Диод** – одно из самых простых электронных устройств, которое можно изготовить из полупроводника. Диод пропускает ток только в одном направлении, в другом направлении ток через диод не проходит. Вы, конечно, видели турникеты на стадионе или в метро, через которые люди могут проходить только в одном направлении. Образно говоря, диод – это односторонний турникет для электронов.

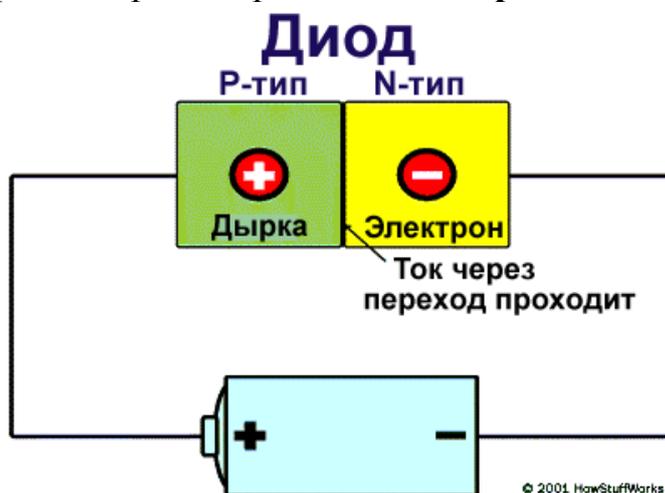
Если вы соедините вместе кремний *p*-типа и *n*-типа так, как показано на рисунке, то произойдет "чудо" – получится диод с его уникальным свойством пропускать ток только в одном направлении.



Несмотря на то, что по отдельности и кремний *n*-типа, и кремний *p*-типа неплохо проводят ток, т.е. являются "плохими проводниками", их комбинация, показанная на схеме, не проводит электрический ток. Отрицательно заряженные

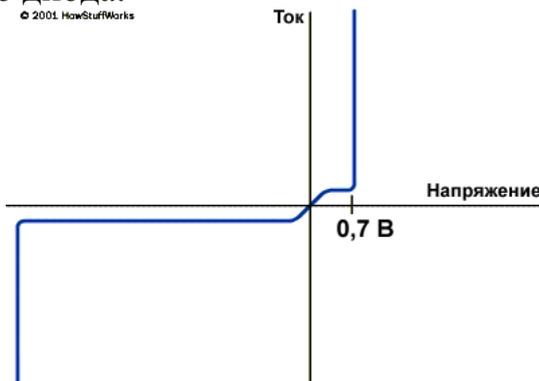
электроны в кремнии *n*-типа притягиваются к положительному полюсу батареи. Положительно заряженные дырки притягиваются к отрицательному полюсу батареи. Через переход между кремнием различного типа – *p-n* – переход при таком подключении батареи ток не протекает, потому что и электроны, и дырки перемещаются в "неправильном" направлении".

Если Вы **измените полярность** подключения батареи, диод будет прекрасно проводить электрический ток. Свободные электроны в кремнии *n*-типа будут отталкиваться от отрицательного полюса батареи. Дырки в кремнии *p*-типа будут отталкиваться от положительного полюса батареи. В области ***p – n – перехода*** между кремнием *p*-типа и кремнием *n* – типа свободные электроны и дырки встречаются. Электроны заполняют дырки, т.е. происходит явление, которое называется рекомбинация. Электроны и дырки прекращают свое существование, но на их место приходят новые электроны и дырки. В результате рекомбинации через *p – n*-переход протекает **электрический ток**.



Устройство, которое пропускает ток только в одном направлении, но не пропускает в обратном направлении, называет **диодом**. Диоды используются в самых разнообразных устройствах и схемах. Например, устройства, которые используют батареи в качестве источника питания, содержат диод, который защищает устройство при неправильном подключении батарей. Диод просто не пропускает ток, если батарея подключена неправильно, т.е. он защищает в устройстве чувствительную электронику.

Конечно, поведение реального диода отличается от идеального диода, которые мы рассматривали выше. На следующем рисунке показана вольт-амперная характеристика реального диода:



В идеальном диоде при **обратном включении** батареи ток не проходит. В реальном диоде при обратном подключении батареи проходит небольшой ток около 10 мкА – это, конечно, немного, но диод уже не является идеальным. И, если Вы приложите к диоду достаточно высокое обратное напряжение, то произойдет пробой диода и диод выйдет из строя. Обычно, напряжение пробоя намного превышает напряжение, которое есть в электрической цепи, поэтому встретить пробой диода в реальной схеме маловероятно.

Если к диоду прикладывается **прямое напряжение**, то необходимо, чтобы оно превышало некоторую величину, чтобы через диод пошел ток. Для кремниевых диодов это напряжение равно приблизительно 0,7 В. Такое напряжение необходимо для начала процесса рекомбинации электронов и дырок в *p-n*-переходе.

### **Транзисторы и чипы**

Транзистор создается на основе использования **трех слоев** полупроводников, а не двух, используемых в диоде. Вы можете создать транзистор в виде *npn* или *ppn* "бутерброда". Транзистор может работать как **выключатель** или как **усилитель**.

Транзистор напоминает два диода, которые включены навстречу друг другу. Тогда можно подумать, что транзистор не будет проводить электрический ток, так как два встречно включенных диода не пропускают ток ни в одном, ни в другом направлении. И это – правда! Однако когда Вы пропустите небольшой ток через центральный слой транзистора, намного больший ток пройдет через транзистор в целом. Следовательно, транзистор может вести себя как **выключатель**. Небольшой ток может включать и выключать намного больший ток!

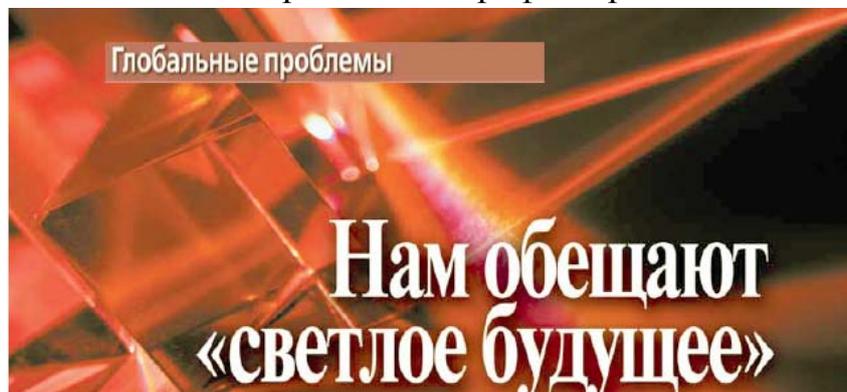
**Кремниевый чип** – небольшая пластинка из кремния, на которой изготовлено большое количество транзисторов – несколько десятков миллионов. С транзисторами, действующими как выключатели, Вы можете создавать логические схемы, на основе которых создаются микропроцессорные чипы.

Естественный процесс развития: кремний – кремний с примесями – транзистор – чип привел к тому, что микропроцессоры и другие электронные устройства стали недорогими и широко распространенными в современном обществе. Фундаментальные научные принципы, которые лежат в основе работы полупроводниковых приборов удивительно просты. Чудом можно считать постоянное инженерное и технологические применение этих принципов для того, чтобы сегодня недорого создать десятки миллионов транзисторов в одном чипе.

# Светит больше – греет меньше

А.Л Юнович

доктор физико-математических наук, профессор МГУ им М.В. Ломоносова,  
Соросовский профессор



Наш журнал обращался к проблеме использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) как альтернативы бесконтрольному сжиганию невозполнимых запасов нефти и газа на планете. Слишком сильно зависит состояние природы на Земле от ее решения, от того, как будет выглядеть энергетика будущего, от того, найдет ли человечество в себе силы сделать энергосбережение одним из главных приоритетов своего развития. Поэтому встреча министров «Окружающая среда для Европы», прошедшая в конце мая в Киеве и немало внимания уделившая проблемам энергетики и энергосбережения, а также недавнее присуждение международной премии «Глобальная энергия» американскому, британскому и российскому ученым за цикл работ по энергосбережению, вновь привлекли внимание общественности к судьбам мировой энергетики.

Первой в истории премии «Глобальная энергия», учрежденной по инициативе лауреата Нобелевской премии Ж.И. Алферова самыми солидными российскими бизнес-структурами и, по мнению учредителей, способной конкурировать в международном научном сообществе по значимости и престижу с Нобелевской, удостоены в этом году Ник Холоньяк, профессор Иллинойского университета (США) «за основополагающий вклад в создание силовой электроники и создание первых светодиодов в видимой области спектра», а также Г.А. Месяц, вице-президент РАН (Россия), и англичанин Ян Смит, старший научный сотрудник научно-исследовательской компании Titan Pulse Sciences Division (США), «за фундаментальные исследования в области мощной импульсной энергетики». Работы, удостоенные этой высокой награды, так или иначе связаны с энергосбережением, которое лежит в основе всех пока еще утопических устремлений человечества к устойчивому развитию. Сегодняшний разговор об энергосбережении начинается статья одного из крупнейших специалистов по светодиодам А.Л. Юновича, большого энтузиаста их применения для решения проблем энергосбережения в нашей стране, где на освещение, увы, все еще расходуется слишком много энергии.



Одни из наиболее ярких примеров преобразований в технике, изменивших жизнь людей, – изобретение транзисторов, развитие полупроводниковой электроники и создание компьютеров. Компьютеризация кардинально изменила характер производств, организацию труда и уклад жизни, стала основой современных средств связи.

Сопоставимые по значению перспективы несколько позже возникли и у той области физики, которая изучает люминесценцию, в связи с созданием новых полупроводниковых источников света – светодиодов.

Первые открытия здесь были сделаны еще в 1923 г. О.В. Лосевым в Ленинградском физико-техническом институте и Нижегородской радиотехнической лаборатории. Однако реализовать эти идеи удалось лишь через 40 лет, когда появились первые светодиоды, и был заложен фундамент новой отрасли техники – оптоэлектроники.

Нельзя не упомянуть о вкладе в это научное направление вице-президента РАН, директора Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, лауреата Ленинской премии, академика Ж.И. Алферова, получившего еще в 70-х годах XX в. Золотую медаль Американского физического общества за исследования гетероструктур (многослойных полупроводниковых структур, слои которых образованы из материалов разного химического состава) на основе арсенида галлия. В 2000 г., когда стало ясно практическое значение этих работ, он получил за них Нобелевскую премию.

В 1990-х наша промышленность выпускала свыше 100 млн. светодиодов в год, мировая – десятки миллиардов. Светодиоды уже в то время начали применять для передачи и визуализации информации: в световых индикаторах, табло, приборных панелях автомобилей и самолетов, рекламных экранах.

Эффективность излучателя света характеризуется светоотдачей – отношением светового потока (в люменах) к потребляемой электрической мощности (в ваттах). У светодиодов она гораздо выше, чем у ламп накаливания, для всех цветов видимого диапазона.

Светодиоды очень перспективны для обычного освещения, поскольку в сочетании с люминофорами дают белый свет. Электроэнергии они потребляют меньше, чем обычные лампы накаливания и люминесцентные лампы, кроме того, они надежнее и безопаснее. Возможно, что к 2007 г. в ряде стран светодиоды полностью заменят лампы накаливания, а к 2012 г. – люминесцентные лампы.

Около 20% всей электроэнергии в мире расходуется на освещение, поэтому энергосбережение в светотехнике – одна из важнейших проблем, как экономических, так и экологических. По прогнозам, светодиоды уменьшат расход электроэнергии для освещения примерно вдвое, что уже в ближайшие 20 лет позволит сэкономить до 120 млрд. долл. Американская программа энергосбережения, рассчитанная до 2010 г., предполагает только за счет перехода на освещение с помощью светодиодов сэкономить столько электроэнергии, сколько производят 100 средних АЭС.

### ***Как действует светодиод***

Светодиод – полупроводниковый кристалл с двумя электрическими контактами, преобразующий энергию электрического тока в световую. Например, в *p-n* переходе, т. е. на границе между дырочной (*p*) и электронной (*n*) проводимостью, при обычной полярности внешнего источника тока («плюс» на контакте у *p*-области и «минус» – у *n*-области) электроны из *n*-области поступают в *p*-область, а дырки (вакансии электронов, т. е. те места, где должны были быть электроны, но их нет) из *p*-области – в *n*-область.

Попавшие в эти области пары «электрон – дырка» рекомбинируют (входящие в них частицы «спариваются» и исчезают), излучая кванты света (излучательная рекомбинация) или передавая свою энергию кристаллической решетке (безызлучательная рекомбинация). Излучение тем вероятнее, чем выше концентрация *p-n* пар, сосредоточенных в области рекомбинации. Но, как правило, ее толщина оказывается слишком велика и определяется средним расстоянием, на которое перемещаются в кристалле носители заряда до рекомбинации, так что концентрация пар в области рекомбинации невелика и, стало быть, обычный полупроводниковый кристалл светит слабо – большая часть «закачанной» в него энергии расходуется на безызлучательную рекомбинацию, иными словами, на нагрев.

Однако в 1960-х Ж.И. Алферову с сотрудниками удалось резко уменьшить толщину этой области в гетероструктурах, многократно повысив тем самым вероятность излучения.

### ***Преимущества светодиодов***

Для эффективного излучения света в кристалле в нем должно быть как можно меньше так называемых дефектов (любых неоднородностей), поскольку они заметно усиливают безызлучательную рекомбинацию – энергия расходуется не на свечение, а на нагрев. Для практики наиболее важно отношение числа излучаемых квантов к числу электронно-дырочных пар в зоне рекомбинации. Оно и определяет эффективность преобразования электрической энергии в световую.

КПД излучателя ограничен еще и потерями на нагрев всех элементов цепи, поэтому их электрическое сопротивление должно быть минимальным. Восприятие же излучения человеком, глаз которого по-разному реагирует на различные участки спектра, диктует дополнительные требования к излучателям. Излучаемый световой поток должен быть сосредоточен в определенном телесном угле и как можно меньше поглощаться внутри устройства.

Малые размеры светодиодов выгодно отличают их от ламп накаливания, диод – почти точечный источник света с площадью около  $10^{-2}$  мм<sup>2</sup>. Излучающий кристалл покрывается выпуклым или плоским пластмассовым колпачком размером в несколько миллиметров. Показатель преломления и конструкция колпачка подбираются так, чтобы сфокусировать излучение в нужном телесном угле 5–45°. Светодиод потребляет минимум энергии: при напряжении 2–4 В и токе 10–30 мА его электрическая мощность составляет 20–120 мВт. При КПД 5–25% излучаемая мощность достигает 1–30 мВт, а соответствующая сила света 1–30 кд (кандела, или свеча – единица силы света СИ). Самая миниатюрная лампа накаливания работает при напряжении около 12 В и токе 50–100 мА, иными словами, потребляемая ею электрическая мощность в десятки раз больше, что немудрено – в лампах накаливания большая часть потребляемой энергии тратится не на освещение, а на нагрев. Светоотдача современных светодиодов достигла 50 лм/Вт (теоретический предел светоотдачи белых светодиодов составляет около 300 лм/Вт). Для получения больших световых потоков сотни светодиодов объединяют в световые панели.

Замена ламп накаливания светодиодами особенно эффективна в светосигнальной аппаратуре. Лампам нужны цветные светофильтры, что уменьшает КПД – часть излучения поглощается фильтрами. Цвет излучения светодиодов может быть любым, фильтры им не нужны.

### ***Революция в светотехнике***

Светодиоды широко применяются уже повсюду. В 2002 г. их выпустили уже на 80 млн. долл., а, по прогнозам, в 2007 г. объем производства превысит 500 млн. долл.

В 1998 г. одиннадцать крупнейших японских компаний разработали программу «Свет в XXI веке» с финансированием на 4 года, но планированием задач до 2010 г. Ее главная цель – к этому моменту полностью заменить традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы светильниками нового типа на основе белых светодиодов. Вслед за этим и в США была принята национальная программа развития освещения «Новое поколение осветительных устройств», рассчитанная до 2020 г. Эта программа была внесена как законопроект в сенат США в 2001 г. Она прошла экспертизу и представлена в 2002 г. для утверждения сенатом и конгрессом. Программа предусматривает до 2011 г. финансирование исследований, разработок и производства светодиодных источников света на уровне 50 млн. долл. в год. Авторы программы сравнивают ее значение для США со знаменитым «Манхэттенским проектом» (программой ядерных исследований и разработки атомного оружия в 40-х годах прошлого века).

Во всем мире специализированные компании появляются, как грибы после дождя. Так, крупнейшие участники рынка электробытовых приборов и осветительных устройств – Hewlett-Packard и Philips – образовали компанию LumiLeds; их не менее значительные конкуренты Siemens и Osram – компанию Osram Optosemiconductors; General Electric и Emcore – компанию Gelcore и т. д. Стоимость «святая святых» светодиода – его полупроводникового «чипа» – за последние несколько лет снизилась от 1 до 0,2 долл. и, по всем прогнозам, будет стремительно падать, что, конечно, ускорит вытеснение ламп светодиодами.

Ну, а что же у нас? Достижения пока скромны. Можно упомянуть фонтан на площади Европы в Москве (у Киевского вокзала), подсвечиваемый 960 светодиодами, меняющими цвет согласованно с музыкальным сопровождением. На перекрестках Москвы к 850-летию города установили 1000 светофоров на светодиодах. На Манежной площади установлен полноцветный экран, состоящий из миллионов светодиодов – уменьшенный аналог того, что смонтирован на одном из небоскребов Таймс-Сквер, центральной площади Нью-Йорка. Постепенно у нас внедряются и железнодорожные светофоры на светодиодах с узкой направленностью излучения, которые пользуются все большей популярностью в мире.

Во всех случаях, когда информацию надо передать световыми сигналами определенного цвета: в автодорожных и железнодорожных светофорах, панелях управления всех видов транспорта, сигнальных огнях на том же транспорте, дорожных световых табло, фонарях аэродромных полос и т. д. – светодиоды имеют огромные преимущества перед обычными лампами. Они не требуют цветных светофильтров, лучше различимы глазом, поскольку близки к монохроматическим источникам света. Уже проектируются телевизоры с размером экрана по диагонали более 70 см, в которых каждая из 100 тыс. светящихся точек, формирующих изображение, образована светодиодами трех цветов – синего, зеленого и красного.

Упомянутая компания Osram Optosemiconductors, специализирующаяся на производстве светодиодов, изготовила потолочный плафон из 14 тыс. голубых, зеленых, желтых, красных и белых светодиодов. Режим их работы устанавливается процессором, поэтому простым выбором тока легко задать освещение того или иного типа: от теплого, близкого к свету ламп накаливания, до холодного, как у люминесцентных ламп. Излучение светодиодов в плафоне сфокусировано так, что свет идет вниз, не рассеиваясь к стенам. Впрочем, для массового применения светодиодов в обычном освещении еще понадобятся серьезные психофизиологические исследования зрительного восприятия человеком излучения светодиодов различных цветов.

## Развитие полупроводниковых источников света (по американской программе)

	Светодиод 2002	2007	2012	2020	Лампа накаливания	Люминесцентная лампа
Светоотдача, лм/Вт	25	75	150	200	16	85
Срок службы, тыс. ч	20	>50	>100	>100	1	10
Световой поток, лм	25	200	1000	1500	1200	3400
Входная мощность, Вт	1	2,7	6,7	7,5	75	40
Стоимость 1 люмена, долл.	200	20	<5	<2	0,4	1,5
Стоимость 1 лампы, долл.	5	4	3	<3	0,5	5
Выход на рынок и конкурентоспособность	Слабое освещение	Замена ламп накаливания	Замена люминесцентных ламп	Любые применения		

	Светодиод 2002	2007	2012	2020	Лампа накаливания	Люминесцентная лампа
Светоотдача, лм/Вт	25	75	150	200	16	85
Срок службы, тыс. ч	20	>50	>100	>100	1	10
Световой поток, лм	25	200	1000	1500	1200	3400
Входная мощность, Вт	1	2,7	6,7	7,5	75	40
Стоимость 1 люмена, долл.	200	20	<5	<2	0,4	1,5
Стоимость 1 лампы, долл.	5	4	3	<3	0,5	5
Выход на рынок и конкурентоспособность	Слабое освещение	Замена ламп накаливания	Замена люминесцентных ламп	Любые применения		

Светодиоды незаменимы для декоративного освещения архитектурных объектов, что наглядно продемонстрировано в Дуйсбурге (Германия) при подсветке моста светильниками, смонтированными в столбах ограды.

Производство светодиодов в последние годы опережает все самые оптимистичные прогнозы на 20—30%. Большинство экспертов сходятся во мнении, что лет через 10 лампы накаливания станут анахронизмом и перестанут использоваться для освещения. Их заменят гораздо более экономичные и функциональные светодиоды.

### Возможно ли «светлое будущее» в России?

*Назрела необходимость в долгосрочной отечественной программе исследований и разработок для создания источников света на светодиодах.*

На ее начальном этапе понадобятся крупные капиталовложения, которые многократно окупятся в дальнейшем. Потребуется и координация (возможно, даже объединение) предприятий электронной и светотехнической промышленности, введение новых специальностей в высших и средних специальных учебных заведениях для подготовки новых кадров, расширение международных научных, технических и промышленно – экономических связей в этой области. Для финансирования программы придется привлечь средства как федерального, так и

региональных бюджетов, а также отечественных и зарубежных частных инвесторов.

Чтобы осуществить такую программу, предстоит создать промышленное производство светодиодов нового поколения из самых современных материалов, другой светотехнической аппаратуры на основе полупроводниковых приборов. Но все эти затраты окупятся сторицей. Ведь неоспоримые преимущества светодиодов обусловлены не только гигантским энергосбережением, но и уменьшением загрязнения окружающей среды, улучшением восприятия света (в конечном итоге – улучшением здоровья населения), невиданной экономией для потребителей.

Увы, пока светодиоды в России выпускают на импортных чипах. Для их производства необходимо дорогое импортное оборудование. Конструирование и производство отечественного оборудования – далекая перспектива, хотя определенный задел в нашей электронной промышленности есть.

*Публикация подготовлена на основе статей автора  
в журналах «Природа» и «Светотехника»*

**Энергия, №4(33)'2003**

# Свет из гетеропереходов (как работают светодиоды)

А.Э.Юнович

Природа, № 6, 2001 г.

*Александр Эммануилович Юнович, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.*

Если говорить о пути от фундаментальных научных идей, основанных на сложных теоретических понятиях, до изобретений, революционизирующих технику и промышленность, то для физики полупроводников этот путь, пожалуй, наиболее краток. Самые яркие примеры таких преобразований в технике, которые качественно подняли уровень жизни людей, – изобретение транзисторов, последующее развитие полупроводниковой электроники и создание компьютеров во второй половине XX в. Компьютеризация кардинально изменила характер высоко технологичных производств, организацию труда на всех уровнях управления, стала основой современных средств связи.

Похожие по своей значимости перспективы возникли в той области физики полупроводников, которая изучает люминесценцию – излучательную рекомбинацию электронов и дырок. Это явление позволило создать полупроводниковые источники света – светодиоды и инжекционные лазеры.

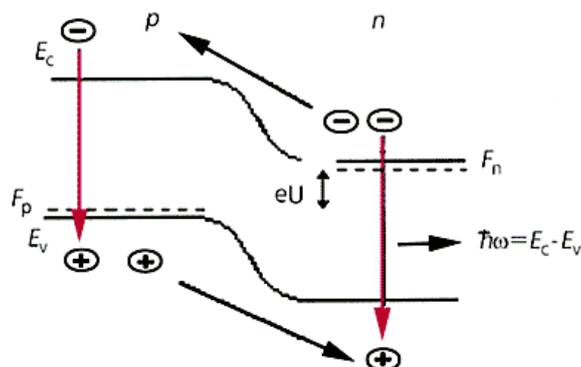
Первые открытия здесь были сделаны в нашей стране еще в 1923 г. О.В.Лосевым, работавшим в Ленинградском физико-техническом институте и Нижегородской радиотехнической лаборатории. Лосев писал: *“У кристаллов карборунда (полупрозрачных) можно наблюдать (в месте контакта) зеленоватое свечение при токе через контакт всего 0.4 мА... Светящийся детектор может быть пригоден в качестве светового реле как безынертный источник света”* [1].

Однако реализованы на практике эти идеи были лишь в 60-70-е годы, после обнаружения эффективной люминесценции полупроводниковых соединений типа  $A^{III}B^V$  – фосфида и арсенида галлия и их твердых растворов. В итоге на их основе были созданы светодиоды и таким образом заложен фундамент новой отрасли техники – оптоэлектроники [2].

Советские ученые внесли в развитие данной области существенный вклад. Ж.И.Алфёров (академик, директор Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе, лауреат Ленинской премии) получил золотую медаль Американского физического общества за исследования гетероструктур на основе  $Ga_{1-x}Al_xAs$  еще в 70-х годах. В 2000 г., когда стало ясно, как велико значение этих работ для развития науки и техники, насколько важны их практические применения для человечества, ему была присуждена Нобелевская премия [3, 4].



Вероятность излучательной рекомбинации пропорциональна концентрации электронно-дырочных пар, поэтому наряду с повышением концентраций основных носителей в  $p$ - и  $n$ -областях желательно уменьшать толщину активной области, в которой идет рекомбинация. Но в обычных  $p$ - $n$  переходах эта толщина не может быть меньше диффузионной длины – среднего расстояния, на которое диффундируют инжектированные носители заряда, пока не рекомбинируют.



Энергетическая диаграмма обычного (гомогенного)  $p$ - $n$  перехода в полупроводнике при прямом смещении  $U$ . Черными стрелками показана инжекция электронов и дырок; цветными – рекомбинация электрона и дырки. В отсутствие смещения ( $U = 0$ ) уровень Ферми (штриховые прямые) одинаков во всем переходе  $F_p = F_n$ , и барьеры для основных носителей выше, чем при прямом включении  $p$ - $n$  перехода, когда уровни раздвигаются на величину  $eU = F_n - F_p$ .

Задача ограничения активной области рекомбинации решена в конце 60-х годов Алфёровым и его сотрудниками. Были предложены и практически изготовлены гетероструктуры, сначала на основе GaAs и его твердых растворов типа AlGaAs, а затем и на основе других полупроводниковых соединений [3, 4]. В гетероструктурах толщина активной области рекомбинации может быть много меньше диффузионной длины.

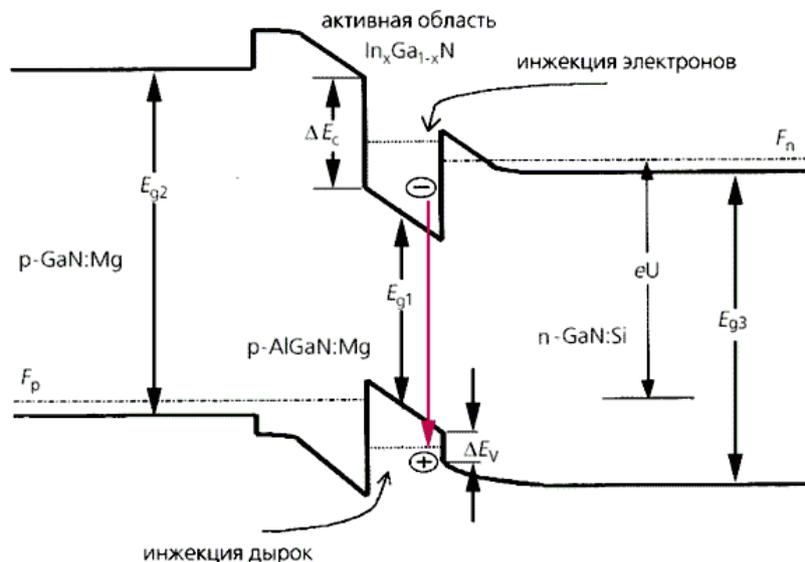
Рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры, в которой между внешними  $p$ - и  $n$ -областями полупроводника с большими величинами ширины запрещенной зоны  $E_{g2}, E_{g3}$  расположен тонкий слой с меньшей шириной  $E_{g1}$ . Толщину этого слоя  $d$  можно сделать очень малой, порядка сотен или даже десятков атомных слоев. Помимо потенциального барьера обычного  $p$ - $n$  перехода на гетерограницах слоя образуются потенциальные барьеры для электронов  $\Delta E_c$  и дырок  $\Delta E_v$ . Если приложить к переходу прямое смещение, возникнет инжекция электронов и дырок с обеих сторон в узкозонный слой. Электроны будут стремиться занять положения с наименьшей энергией, спускаясь на дно потенциальной ямы в слое, дырки устремятся вверх – к краю валентной зоны в слое, где минимальны их энергии.

Широкозонные внешние части гетероперехода можно сильно легировать с обеих сторон, добиваясь больших концентраций в них равновесных носителей. И тогда, даже не легируя активную узкозонную область примесями, удастся достичь при инжекции значительных концентраций неравновесных электронно-

дырочных пар в слое. Отказ от легирования активной области принципиально важен, поскольку атомы примеси, как уже говорилось, могут служить центрами безызлучательной рекомбинации. Попав в яму, инжектированные электроны наталкиваются на потенциальный барьер  $\Delta E_c$ , дырки – на барьер  $\Delta E_v$ , поэтому и те, и другие перестают диффундировать дальше и рекомбинируют в тонком активном слое с испусканием фотонов.

### Задачник для конструктора

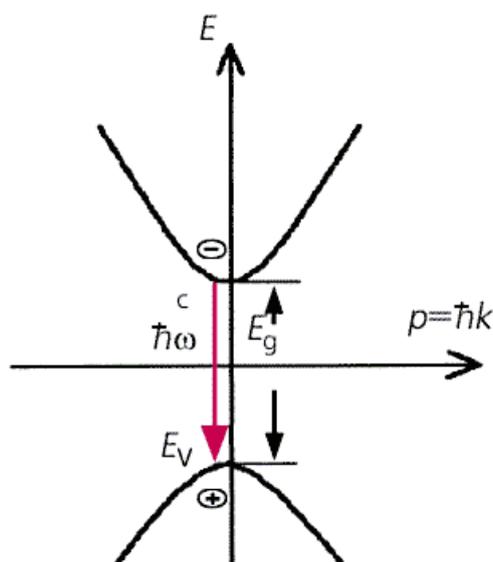
Подытожим: чтобы достичь максимальной эффективности излучения света, необходимо выполнить следующие условия [6]. При оптических переходах электронов из зоны проводимости полупроводника в валентную должен соблюдаться закон сохранения энергии. Поэтому ширина запрещенной зоны  $E_g$  в активной области диода должна быть близка к нужной энергии квантов излучения. Одновременно должен соблюдаться закон сохранения импульса. Точнее – квазиимпульса, так как электрон (и дырка) в кристалле уже не свободная частица – он движется в поле периодически упорядоченных ионных остовов, представляя собой фактически возбужденное состояние твердого тела. Движение этих возбуждений (электронных и дырочных) очень напоминает свободное распространение заряженных частиц, поэтому их называют квазичастицами. И энергии  $\epsilon$  отдельных квазичастиц связаны с их квазиимпульсами  $p$  так же, как у свободных:  $\epsilon = p^2/2m$ , только вместо массы электрона  $m_0 \sim 10^{-30}$  кг фигурируют эффективные массы  $m_n, m_p$  электронов и дырок в данном полупроводнике, которые по величине могут значительно отличаться от массы электрона.



**Энергетическая диаграмма  $p$ - $n$  гетероструктуры типа  $\text{InGaN}/\text{AlGaN}/\text{GaN}$  при прямом смещении  $U$ . Черными стрелками показана инжекция электронов и дырок в активную область  $p$ - $n$  гетероструктуры. Попадая в узкие и достаточно глубокие ямы, электроны и дырки оказываются запертыми в них. Если активный слой (с узкой запрещенной зоной  $E_{g1}$ ) содержит малое количество дефектов, электронно-дырочные пары рекомбинируют с излучением кванта  $E_{g1}$  (цветная стрелка).**

Импульс  $p_\phi$ , уносимый излученным фотоном, пренебрежимо мал по сравнению с квазиимпульсами рекомбинирующих квазичастиц. В самом деле, для фотона  $p_\phi = E_g/c$ , для электрона при рекомбинации  $p = 2m_n E_g$ ; их отношение  $\ll 1$ . Поэтому при излучательной рекомбинации квазиимпульс электронов не меняется, а это возможно только у прямозонных полупроводников, у которых максимум валентной зоны и минимум зоны проводимости располагаются в пространстве квазиимпульсов в центре зоны Бриллюэна (области однозначного задания квазиимпульса в кристалле). Кроме того, кристалл полупроводника должен быть по возможности бездефектным, как и границы между разными слоями, поскольку дефекты на них (дислокации, например) тоже порождают безызлучательную рекомбинацию. Поэтому особого внимания требует подбор пар материалов с точки зрения согласования параметров их элементарных ячеек – на границе несогласованных решеток возникнет много дислокаций. Работы группы Алфёрова показали, что в гетероструктурах соединений типа  $A^{III}B^V$  могут быть созданы практически идеальные границы [4, 7].

Насколько успешно удалось решить все эти задачи, можно судить по значениям ряда параметров. О вероятности излучательной рекомбинации в узкозонном слое говорит внутренний квантовый выход излучения  $\eta_i$  (число излучаемых фотонов на одну электронно-дырочную пару). В гетероструктурах величина  $\eta_i$  может быть близка к 100%. Для практики, однако, важнее внешний квантовый выход излучения  $\eta_e$  – отношение числа излучаемых во внешнюю среду квантов света к числу электронно-дырочных пар, пересекающих  $p$ - $n$  переход. Он характеризует преобразование электрической энергии в световую и, помимо внутреннего квантового выхода ( $\eta_i$ ), учитывает коэффициент инжекции пар в активную область ( $\gamma$ ) и коэффициент вывода света во внешнюю среду ( $\eta_o$ ):  $\eta_e = \gamma \eta_i \eta_o$ .



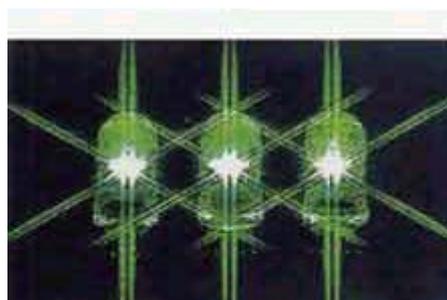
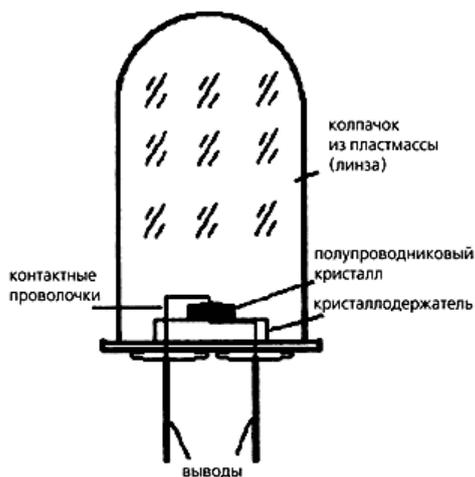
**Зависимость энергии электронов от квазиимпульса для прямозонных полупроводников. Стрелкой показан переход электронов из зоны проводимости в валентную, сопровождающийся излучением кванта.**

Коэффициент полезного действия светоизлучающего прибора ограничивается еще и потерями на джоулево тепло, поэтому сопротивление всех областей структуры и омических контактов на выводах должно быть малым. Восприятие же излучения человеком, глаз которого по-разному воспринимает различные участки оптического спектра (в соответствии с кривой видности), выдвигает свои требования к световым и спектральным характеристикам излучателей.

Излучаемые световые кванты должны выходить во внешнюю среду в заданном телесном угле с минимальным их поглощением внутри прибора. Малые размеры полупроводниковых светодиодов отличают их от ламп накаливания, в противоположность лампам диод – почти точечный источник света с площадью кристалла (0,25x0,25)-(0,5x0,5) мм<sup>2</sup>.

Кристалл покрывается выпуклым или плоским пластмассовым колпачком размерами 3-10 мм. Показатель преломления пластмассы выбирается так, чтобы увеличить коэффициент вывода излучения  $\eta_0$ . Конструкция колпачка обеспечивает фокусировку излучения в нужном телесном угле 5-45°. Держатель кристалла отводит тепло от активной области.

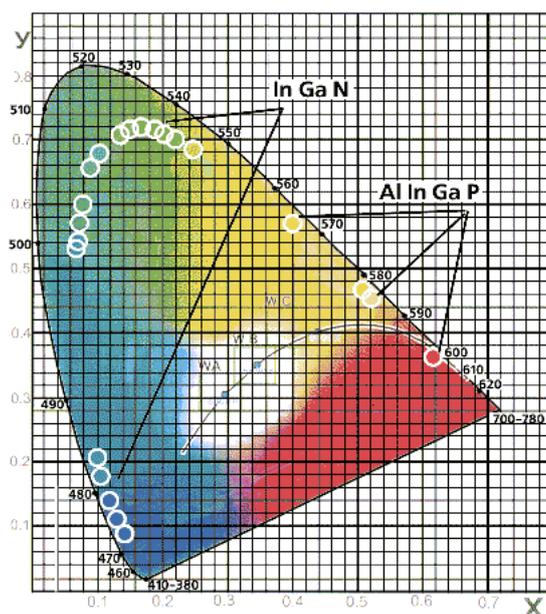
Работая, одиночный светодиод потребляет очень небольшую энергию: при напряжении 2-4 В и токе 10-30 мА, электрическая мощность варьирует от 20 до 120 мВт. При КПД в 5-25% в виде света излучается 1-30 мВт (сила света 1-30 кд). Для сравнения – миниатюрная лампа накаливания работает при напряжении около 12 В и токе 50-100 мА. Для получения больших световых потоков десятки и сотни светодиодов объединяют в световые панели. Возможность фокусировки излучения в каждом элементе позволяет создавать световые панели с направленным излучением.



### Конструкция (слева) и внешний вид светодиодов.

Замена ламп накаливания диодами особенно эффективна в цветной светосигнальной аппаратуре. Лампы должны иметь цветные фильтры, что уменьшает КПД – часть излучения поглощается фильтрами. Цвет оптического излучения полупроводниковых приборов задается энергией квантов в узкой области спектра, фильтры им не нужны. На цветовой диаграмме показано, как из “чистых” цветов, расположенных на внешнем подковообразном контуре, можно полу-

чить любой смешанный. Центр диаграммы соответствует белому цвету, на краях отмечены кружки для разных диодов.



**Цветовой график Международной комиссии по освещению. В центре – область белого цвета, пересекаемая дугой, соответствующей цвету черного тела при разных температурах. Кружками отмечены цветовые координаты разных светодиодов.**

В ходе разработок светодиодов за последние десятилетия перечисленные выше сложные условия выполнялись последовательно для разных длин волн, и вот с какими результатами. Красные диоды на основе твердых растворов арсенидов галлия-алюминия  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  достигли внешнего квантового выхода излучения  $\eta_e$  более 15%. Диоды из фосфида галлия GaP, светящиеся желтовато-зеленым цветом, имеют  $\eta_e \sim 0.1\%$ , но близость спектра излучения к максимуму чувствительности глаза ( $\lambda = 555 \text{ nm}$ ) обеспечила им в 70-90-х годах широкое применение. КПД промышленных образцов красных, оранжево-желтых и желто-зеленых светодиодов на основе гетероструктур из твердых растворов  $\text{In}_y\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$  были доведены к концу 90-х годов до  $\eta_e = 25-55\%$  [5].

Светодиоды в отличие от лазеров – источники спонтанного излучения, их спектральные “линии” имеют заметную ширину: на уровне половины максимальной интенсивности она составляет 20-50 нм, что соответствует средней тепловой энергии электронов.

А вот эффективные светодиоды для зеленовато-голубой, голубой, синей и фиолетовой частей спектра были созданы только в 90-е годы. Сделать их можно на основе полупроводников с большой шириной запрещенной зоны: карбида кремния SiC, соединений группы  $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ , нитридов группы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ . У излучателей на основе ZnSe ( $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ ) большой квантовый выход, но они недолговечны и имеют большое электрическое сопротивление. У карбид-кремниевых излучателей очень мал КПД, так как SiC – непрямозонный полупроводник.

В последние годы был сделан настоящий прорыв в разработках голубых и зеленых светодиодов. В приборах на основе нитрида галлия и его твердых раство-

ров GaN,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  внешний квантовый выход увеличен до  $\eta_e = 9-16\%$  [8-10]. Светоотдача диодных излучателей из разных материалов для всех основных цветов превысила светоотдачу ламп накаливания. Диоды стали приборами и оптоэлектроники, и светотехники.

### Замечательный нитрид

Нитрид галлия GaN, представитель группы  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , в отличие от кубических кристаллов GaAs, InP, AlAs кристаллизуется в гексагональной решетке типа вюрцита (постоянные решетки  $a = 3,18 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,18 \text{ \AA}$ ) и имеет ширину запрещенной зоны  $E_g = 3,5 \text{ эВ}$ . Выращивание монокристаллов этого полупроводника непростая задача, так как температура плавления GaN  $\sim 2000^\circ\text{C}$ , а равновесное давление паров азота должно быть 40 атм.

GaN – прямозонный полупроводник; нелегированные кристаллы GaN имеют большую концентрацию доноров, обуславливающих проводимость  $n$ -типа и концентрацию электронов  $n = 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$  [11].

Кристаллы аналогичных соединений – нитридов алюминия и индия AlN и InN – также гексагональные с сильно различающимися постоянными решеток ( $a=3,11; 3,54 \text{ \AA}$  и  $c = 4,98; 5,70 \text{ \AA}$ ); это – прямозонные полупроводники с  $E_g=6,5$  и  $1,8 \text{ эВ}$  соответственно. Бинарные соединения допускают образование тройных твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ ,  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ . В ряду  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  можно так подобрать параметр  $x$ , что энергия  $E_g$  будет отвечать фиолетовой, голубой или зеленой области спектра.

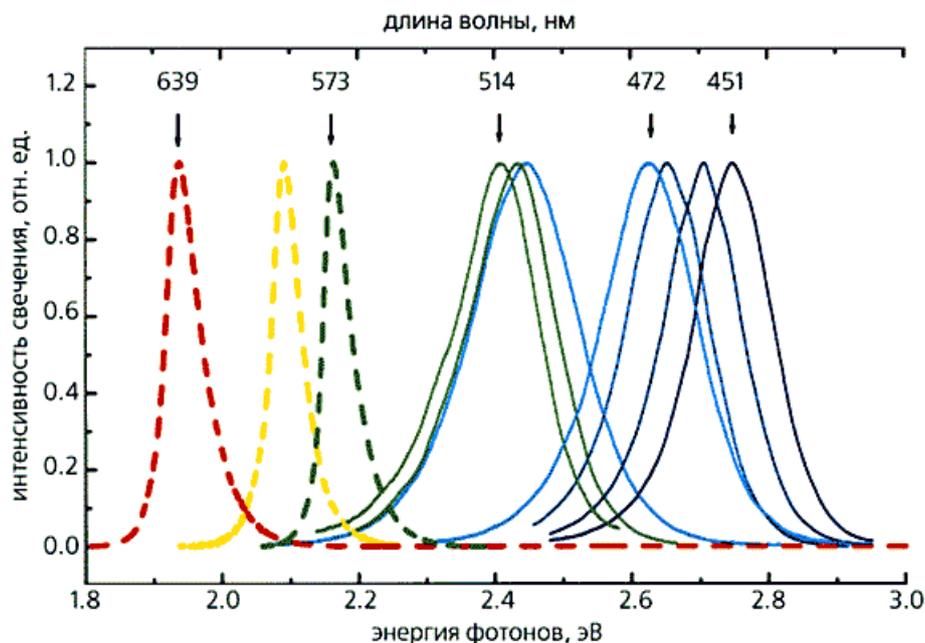
Еще в 70-х годах группа Ж. Панкова из лаборатории компании IBM создала фиолетовые и голубые диоды на основе эпитаксиальных пленок GaN. Квантовый выход был достаточен для практики (доли %), но срок их службы был ограничен. В  $p$ -области  $p$ - $n$  перехода концентрация дырок была мала, и сопротивление диодов оказалось слишком большим, они довольно быстро перегревались и выходили из строя.

В начале 80-х годов Г.В. Сапарин и М.В. Чукичев в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова обнаружили, что после действия электронного пучка образец GaN, легированный Zn, локально становится ярким люминофором. Были предложены устройства оптической памяти с пространственным разрешением 1-10 мкм. Но причину яркого свечения – активацию акцепторов Zn под влиянием пучка электронов – тогда понять не удалось.

Эту причину раскрыли И. Акасаки и Х. Аmano из Нагасакского университета [10]. Дело оказалось в том, что примесные атомы Zn при росте кристалла реагировали с неизбежно присутствующими атомами водорода, образовывали нейтральный комплекс  $\text{Zn-H}^+$  и переставали работать акцепторами. Обработка электронным пучком разрушала связи  $\text{Zn-H}^+$  и возвращала атомам Zn акцепторную роль. Поняв это, японские ученые сделали принципиальный шаг в создании  $p$ - $n$  переходов из GaN. Для аналогичного акцептора – Mg – было показано, что обработкой сканирующим электронным пучком можно  $p$ -слой GaN с примесью Mg сделать ярко люминесцирующим, имеющим большую концен-

трацию дырок, которая необходима для эффективной инжекции дырок в  $p$ - $n$  переход. Авторы заявили патент на эффективное легирование GaN  $p$ -типа.

В 1989 г. Ш. Накамура (компания “Ничия Кемикал”) начал исследования пленок нитридов элементов III группы, выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений. Он пошел дальше Акасаки – заменил обработку электронным пучком нагревом в атмосфере  $N_2$ . Водород взаимодействовал с азотом, образуя  $NH_3$ , и не препятствовал атомам Mg работать акцепторами. Подобранными режимами легирования и термообработки были получены эффективно инжектирующие слои  $p$ -типа с большой концентрацией дырок в GaN-гетероструктурах [8, 9]. В технологии были учтены особенности легирования примесями Mg и Zn. Были выращены при сравнительно низких температурах структуры  $GaN/Ga_{1-y}Al_yN$ ,  $GaN/Ga_{1-x}In_xN$ ,  $Ga_{1-x}In_xN/Ga_{1-y}Al_yN$  с толщиной активных слоев до 10-2 нм и шероховатостью гетерограниц порядка одного атомного слоя [8, 9]. Сначала были созданы светодиоды из двойных гетероструктур  $Ga_{1-x}In_xN/Ga_{1-y}Al_yN$  с активным слоем  $Ga_{1-x}In_xN:Zn$ . Максимумы голубого и зеленого света с яркостями 1 и 2 кд приходились на 460 и 520 нм, а внешний квантовый выход составил 3 и 2%.



**Спектры электролюминесценции светодиодов на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN (сплошные линии) и AlInGaP/GaP (штриховые). Видно, что они перекрывают всю область видимого спектра.**

### Светят квантовые ямы

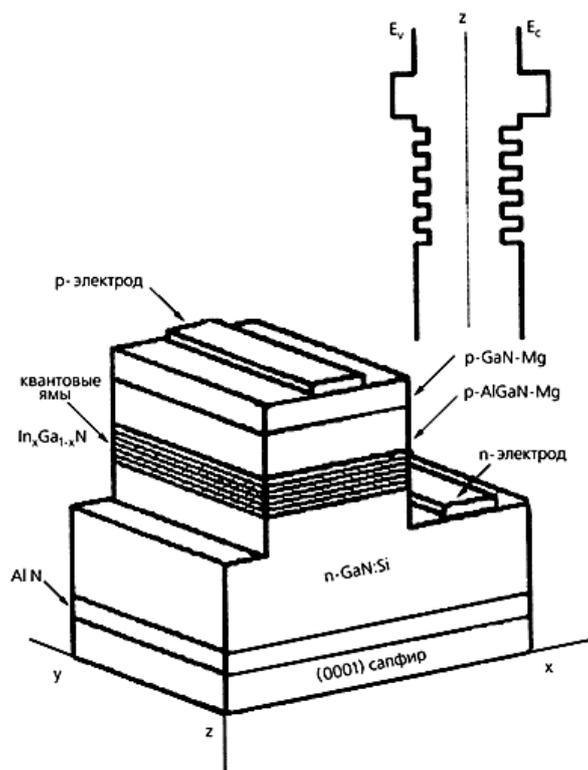
На следующем этапе разработок перешли к многослойным гетероструктурам  $GaN/Ga_{1-x}In_xN$  с нелегированным активным слоем  $Ga_{1-x}In_xN$  толщиной до 2-3 нм. Физические принципы, ранее использованные при создании приборов на основе  $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$  и  $GaAs/In_xAl_yGa_{1-x-y}P$ , послужили применительно к новым структурам [8-10].

В сверхтонких слоях сказываются эффекты размерного квантования – зависимости энергетического спектра электронов и дырок от толщины слоя, когда по-

следняя сравнима с длиной волны де Бройля. Таким образом, открылась возможность регулировать цвет свечения, изменяя не состав полупроводника, а толщину потенциальной ямы, называемой в этих условиях квантовой.

Было очень важно также разработать технологию выращивания новых структур, обеспечивая на границах минимальное число дефектов. Помогло то, что в сверхтонких слоях несоответствие параметров решетки в определенных случаях вызывает на гетерограницах лишь упругую деформацию растяжения или сжатия. А чисто упругая деформация не сопровождается образованием дислокаций и дефектов – центров безызлучательной рекомбинации.

Структура светодиода с множественными квантовыми ямами представляет собой довольно сложный “пирог”. На сапфировой подложке, после буферного слоя AlN (толщиной 30 нм), выращен относительно толстый (4 мкм) слой  $n$ -GaN:Si. Затем идет активный нелегированный слой, состоящий из пяти чередующихся квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  (3-4 нм) и барьеров GaN (4-5 нм). Эффективная ширина запрещенной зоны квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  соответствует излучению от голубой до желтой области (450-580 нм), если состав активного слоя меняется в пределах  $x = 0,2-0,4$ ; она зависит и от толщины  $d$ . Расположенный выше барьерный широкозонный слой  $p$ -Al<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>N:Mg (100 нм) инжектирует дырки и согласует решетку с решеткой верхнего слоя  $p$ -GaN:Mg (0.5 мкм), на который нанесен металлический контакт Ni-Au. Второй металлический контакт (Ti-Al) с нижним слоем  $n$ -GaN создается после травли части структуры.



**Схема светодиода на основе гетероструктур типа InGaN/AlGaN/GaN с множественными квантовыми ямами.**

**Свет в доме и на улице**

В 1999 г. компании “Ничия Кемикал”, “Тойода Госей”, “Хьюлетт-Паккард”, “Крии” выпускали по несколько десятков миллионов голубых и зеленых светодиодов в месяц. В июле 1999 г. Накамура сообщил, что светоотдача этих приборов достигает 60 лм/Вт, а мощность желтых на основе InGaN – 6 мВт [8]. Если голубой диод покрыть желтым люминофором, в котором свет возбуждается голубым излучением, то сложение цветов дает белое свечение. Белые светодиоды выпускают “Ничия” и “Осрам”; пока их светоотдача меньше, чем ламп накаливания, но в проектах разработок на ближайшие годы стоит цель вывести белые полупроводниковые источники света вперед.

Примеры массового применения светодиодов можно найти уже повсюду. На перекрестках Москвы к 850-летнему юбилею города было установлено 1000 светодиодных светофоров; для зеленого света применены элементы на основе нитридов. Сделаны первые светодиодные железнодорожные светофоры с узкой направленностью излучения. На одном из небоскребов Нью-Йорка, на Таймс-Сквер, установлен полноцветный светодиодный экран площадью несколько квадратных метров, смонтированный из 16 млн. элементов; в Москве первый экран (меньших размеров) начал работать на Манежной площади. Проектируются телевизоры с экранами более 70 см по диагонали, в которых каждая из 100 тыс. светящихся точек, формирующих изображение, сделана из светодиодов трех цветов – синего, зеленого и красного.

Компания “Осрам-Оптосемикондакторс”, специально организованная двумя промышленными гигантами “Осрам” и “Сименс” для производства светодиодов, продемонстрировала служебное помещение с плафоном на потолке из 14 тыс. голубых, зеленых, желтых, красных и белых светодиодов. Режим работы устанавливается процессором, поэтому простым выбором тока легко задать освещение того или иного типа от теплого, близкого к свету ламп накаливания, до холодного, как у люминесцентных ламп. Излучение светодиодов в плафоне сфокусировано так, что свет идет вниз, не рассеиваясь к стенам. Светодиоды найдут применение и в декоративном освещении архитектурных деталей, как это уже осуществлено в Дуйсбурге (Германия), при освещении моста полупроводниковыми светильниками, смонтированными в столбах ограды.

Производство светодиодов на основе нитридов за последние пять лет опередило все самые оптимистичные прогнозы на 20-30%. Прибыли производящих компаний в 1999 г. составили 420 млн. амер. долл. и планируются на отметке 4,5 млрд в 2009 г.

Разработка полупроводниковых излучателей еще раз показала, что наука о полупроводниках далеко не исчерпана. Нобелевская премия Ж.И.Алфёрову и Г.Крёмеру – это признание важности исследований гетеропереходов для настоящего и будущего, исследований, которые порождают технику, кардинально улучшающую нашу жизнь.

### **Литература**

1. *Лосев О.В.* У истоков полупроводниковой техники: Избранные труды. Л., 1972.
2. *Коган Л.М.* Полупроводниковые светоизлучающие диоды. М., 1983.

3. Алфёров Ж.И. Физика и Жизнь. СПб., 2000.
4. Конаев Ю.В. Лауреаты Нобелевской премии 2000 г. по физике – Ж.И. Алфёров, Г. Крёмер, Дж. Килби // Природа. 2001. №1. С.3-7.
5. Craford M.G. // MRS Bull. 2000. V.25. №10. P.27-31.
6. Берг А., Дин П. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. М., 1979.
7. Алфёров Ж.И. // Физика и техника полупроводников. 1998. Т.32. №1. С.3-18.
8. Nakamura S., Fasol G. The blue Laser Diode; GaN based Light Emitters and Lasers. Heidelberg, 1997.
9. Nakamura S.et al. // Jap. J. Appl. Phys. Part II. 1999. V.38. №7a. P.3976.
10. Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaki I. // Jap. J. Appl. Phys. 1989. V.28. P.L2112-2114.
11. Group III Nitride Semiconductor Compounds: Physics and Applications / Ed. B.Gil. Oxford, 1998.

# Лазер: волшебный луч

Эрудит, №21 Май 2004 года

Лазер – пожалуй, одно из самых главных открытий 20 века. Где только лазерные устройства не используются! И в промышленности, и в медицине, и в науке. Лазерным лучом режут металл, с его помощью выполняют сложнейшие хирургические операции. По оптоволоконным кабелям с огромной скоростью передаются компьютерные данные – в виде импульсов лазерных излучателей. Благодаря лазеру мы можем рассматривать голограммы – трехмерные, объемные снимки любых предметов. Даже в повседневной жизни мы часто сталкиваемся с работой этого необычного источника света. Лазерный луч считывает компакт-диски в компьютерах, музыкальных центрах и карманных плеерах. В больших магазинах лазерный сканер помогает прочитать штрих-коды и завести в кассовый аппарат информацию о товаре. Даже лазерные указки есть!

Чем же так хорош лазерный луч? Тем, что это очень мощный, собранный в узкий пучок поток световой энергии. Или, точнее, поток сверхмикроскопических частиц света – фотонов. В отличие от света обычного фонаря, лазерный луч почти не рассеивается и может, сохраняя свою энергию, проходить большие расстояния и даже пробивать препятствия на своем пути.

Для получения лазерного луча нужно особое устройство – лазерный генератор, который иногда для простоты называется просто лазером. Надо сказать, что этим полезным изобретением мир во многом обязан нашей стране. За разработку лазерного генератора лауреатами Нобелевской премии по физике стали советские ученые Александр Прохоров и Николай Басов, а также американец Чарлз Таунс. А первую работающую модель рубинового лазера построил сотрудник американской корпорации "Хьюз Эйркрафт" Теодор Мэйман. Случилось это в 1960 году. С тех пор появилось множество разных типов лазерных генераторов, но от того первого, рубинового лазера, об устройстве которого мы сегодня расскажем, они не отличаются главным принципом работы. Что это за принцип? Чтобы понять его нам придется совершить путешествие в микромир.

В основе всего, что есть в нашем мире, находятся мельчайшие частички материи – атомы. Они настолько малы, что даже в капле воды их многие триллионы. Количество атомов во Вселенной и вовсе измеряется числом, трудно поддающимся воображению. Но и на Земле, и во всем безграничном космосе разновидностей атомов не так уж и много – всего чуть больше сотни. Не так много, не правда ли? Однако, соединяясь разными способами и в разных сочетаниях, эта замечательная сотня дает нам бесконечное разнообразие мира. Золотое кольцо состоит из атомов золота, алмаз и графит в карандаше – из атомов углерода. А вот в воде, например, есть атомы двух типов – кислорода и водорода.

Но, что же такое сам атом? Просто невидимая глазом крошечная песчинка? О нет! У атома очень сложное строение, и ученым понадобились долгие годы, чтобы узнать, что внутри у крошечного кусочка мироздания. В центре атома – ядро, состоящее из более мелких частиц – протонов и нейтронов. Ядро окружено электронным облаком – то есть облаком вращающихся вокруг ядра частиц – электронов. Раньше атом рисовали похожим на нашу Солнечную систему. В центре – ядро (Солнце), а вокруг по орбитам – близким и дальним – вращаются электроны (планеты). И хотя сегодня ученые представляют себе строение атома гораздо более сложным, для объяснения принципа действия лазера можно воспользоваться этой упрощенной моделью.

Атомы находятся в постоянном движении. Они вибрируют и вращаются. В это трудно поверить, но даже внутри твердых предметов, например, чугуновой гири или фарфоровой чашки атомы ни на мгновение не прерывают своих микроскопических передвижений. А если к атому приложить большое количество энергии, например, нагреть или направить на него мощный поток света, с ним происходит одно важное превращение. Электроны перемещаются с более низких, то есть более близких к ядру орбит (или, правильнее, орбиталей), на более высокие. Так атом поглощает энергию и переходит, как говорят ученые, из основного состояния в возбужденное состояние.

Однако долго в возбужденном состоянии атом пребывать не может. Он стремится отдать поглощенную энергию. Электрон, "вытянутый" на более высокую орбиту, рвется снова вниз, ближе к ядру. В момент перехода обратно в основное состояние, электрон выбрасывает частичку, или, по-другому, квант света – фотон.

Если кто-то подумал, если все эти приключения атомов, электронов и фотонов происходят в недрах каких-нибудь реакторов или синхрофазотронов, то он или она сильно ошибается. Выброс фотона после перехода атома в основное состояние мы наблюдаем ежедневно. Вот мы включили электротостер, и вскоре его металлическая спираль засветилась красным светом. Это в атомах под действием жара электроны перескочили на верхнюю орбиту, затем вернулись назад и выбросили фотоны красного цвета. То же происходит в обычной лампочке накаливания.

Или, например, на экране телевизора каждое мгновение атомы фосфора переходят в возбужденное состояние, а потом возвращаются в основное, отправляя в путь фотоны разных цветов.



А чем же тогда луч света от лампочки отличается от лазерного луча? Ну, вот первых, тем, что фотоны, излучаемые спиралью лампочки накаливания буквально "разлетаются" в разные стороны, рассеиваются. Лазер выдает узкий точно направленный луч.

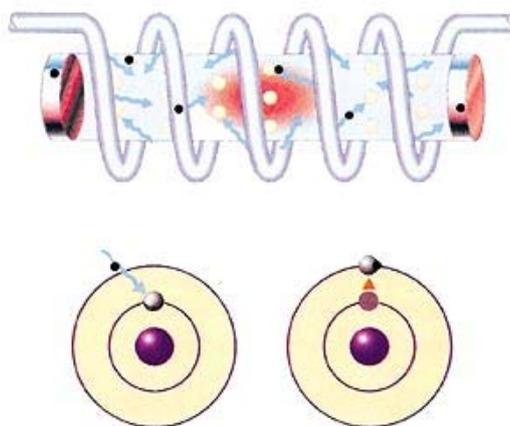
Во-вторых, фотоны обычного луча света – от лампочки или от солнца – имеют разные свойства. В чем-то световые частицы подобны волнам. Так вот у фотонов, испускаемых фонариком, волны эти разные. Одна длиннее, другая короче. Мы в этом убеждаемся каждый раз, когда в небе появляется радуга. Попадая в каплю воды или в призму, фотоны с разной длиной волны расходятся в стороны и мы видим, например, отдельно красный свет (длинная волна) и отдельно зеленый (короткая волна). Лазерный луч состоит из фотонов с одной длиной волны, а значит у него всегда один цвет. Какой? Это зависит от вида лазера.

И еще. Волны фотонов обычного света двигаются как бы "не в ногу". Одна волна только еще набирает силу, а другая уже достигла гребня. Колебания световых частиц в лазерном свете происходят синхронно, как по команде.

Фотоны из фонарика подобны праздной гуляющей разодетой толпе. Кто-то шагает пружинистой походкой, кто-то идет вразвалочку, кто-то надел плащ, а кто-то спортивную куртку, кто-то двигается прямо по бульвару, а кто-то свернул в переулок. Фотоны в лазерном луче похожи на солдат в воинской колонне. Они маршируют в ногу, одетые в одинаковую форму, в точно заданном командиром направлении. Это настоящая сила!

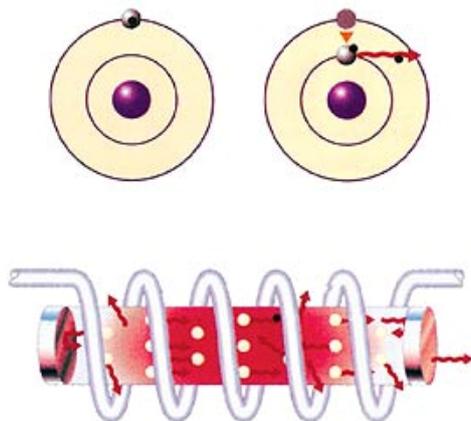
Как же конструкторам лазера удалось заставить фотоны "маршировать" в "боевом строю"? Представь себе, что между двумя круглыми зеркалами вставлен рубиновый стержень. Рубин, как ты знаешь, это такой драгоценный камень, который можно увидеть даже в коронах королей и принцев. В лазерах, конечно, используется не природный рубин, а искусственный, выращенный в лаборатории. Однако по составу своему он практически ничем не отличается от добываемого в природе редкого минерала. В основном кристалл рубина состоит из

атомов алюминия и кислорода и некоторого количества атомов хрома. Именно атомы хрома сыграют в нашем "лазерном шоу" главную роль.



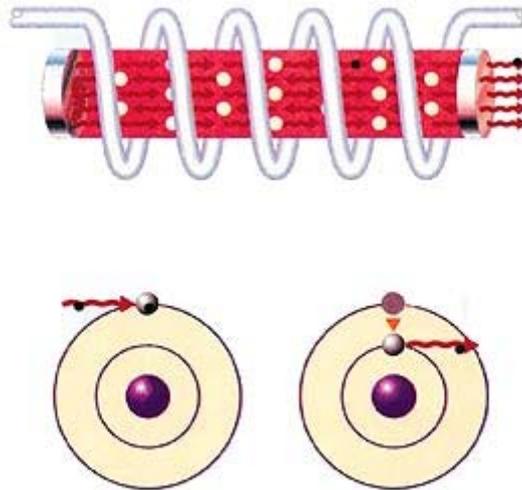
Итак, у нас есть рубиновый цилиндр, оба конца которого упираются в зеркала. Одно зеркало полупрозрачное. Слабый поток фотонов оно отражает, но если поток мощный, часть фотонов проходит сквозь зеркало. Зачем это нужно, ты скоро узнаешь.

Вокруг рубинового цилиндра змеится стеклянная спираль. Это наполненная газом лампа. При прохождении сквозь нее электрического разряда дает мощную вспышку света. От этой вспышки атомы хрома в рубиновом цилиндре переходят в возбужденное состояние. Электроны поднимаются на верхние орбиты, а затем опускаются вниз и выбрасывают фотоны. И вот теперь происходит самое интересное. Часть выпущенных фотонов рассеивается сквозь стенки цилиндра, но другая часть оказывается в западне. Эти фотоны попадают в одно зеркало, отражаются от него, затем несутся к другому, то отбрасывает их назад, к первому, и так далее. Со скоростью света (а как же иначе?) они носятся по абсолютно прямой линии между двумя зеркалами.



Но этого мало! На своем пути от зеркала к зеркалу ударяются в атомы, которые лампа продолжает подкачивать энергией. При ударе фотона, электрон переходит на более низкую орбиту и выбрасывает фотон – точно такой же, что ударил в атом, и несущийся по той же самой прямой вдоль рубинового цилиндра! Нетрудно догадаться, что с каждым мгновением фотонов в потоке между зеркалами становится все и больше. Наконец этот поток "пробивает" полупрозрачное

зеркало и сквозь него прорывается луч. Тот самый лазерный луч, состоящий из потока совершенно одинаковых световых частиц, двигающихся строго в одном направлении.



У этого луча поистине волшебные свойства. Например, лучу лазера хватит силы "добить" до Луны и, ударив в специальные зеркала-отражатели, оставленные там когда-то американскими астронавтами и советским "Луноходом", вернуться на Землю. Конечно, для этого нужен лазер помощнее, чем тот, который стоит в лазерных "указках" или CD-проигрывателях.

# Лазерная указка

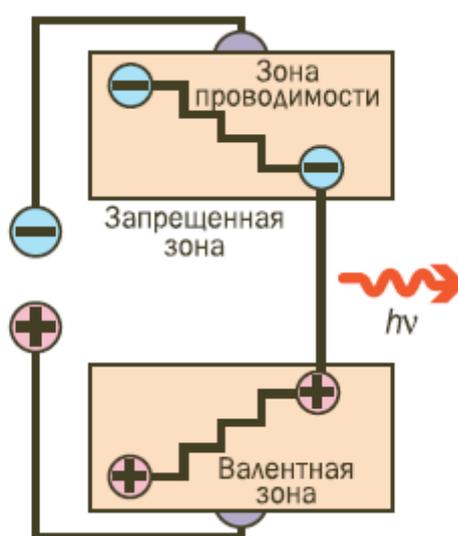
«Наука и жизнь», 9, 2003. 39-40



Лазер, появившийся лет сорок назад как некий таинственный, экзотический лабораторный прибор, сегодня стал настолько привычным инструментом, что его, в виде лазерной указки, сделанной на основе полупроводникового лазера, можно купить даже в ларьках, торгующих разной мелочевкой – игральными картами, брелоками для ключей, газетами и гороскопами на текущий год. Но, несмотря на столь сомнительное соседство, лазер остается результатом глубокого осмысления теории строения вещества и продуктом высоких технологий.

Полупроводниковый лазер придумали в 1962-м независимо и одновременно несколько американских исследователей (Р. Холл, М. И. Нейтен, Т. Квист и др.), хотя теоретическое обоснование его работы дал Н. Г. Басов с сотрудниками еще в 1958 году. Наиболее распространенным лазерным полупроводниковым материалом долгое время оставался арсенид галлия GaAs. Но в последнее время все чаще делают лазеры на гетероструктурах – тонких слоях различных по составу полупроводников. Огромный вклад в их создание внесли работы академика Ж. И. Алферова и его сотрудников (см. «Наука и жизнь» № 4, 2001 г.).

Посмотрим, как работает активное вещество полупроводникового лазера.

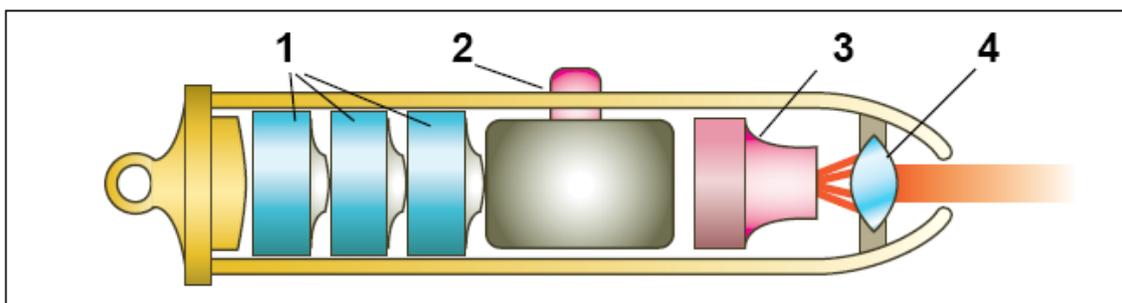


*Активная полупроводниковая среда имеет зону проводимости с избыточным количеством свободных электронов и валентную зону, где недостающие электроны заменены дырками. При рекомбинации электронов с дырками возникает когерентное излучение.*

Электроны в твердом теле занимают широкие энергетические полосы, состоящие из множества непрерывно расположенных уровней. Нижняя полоса, называемая валентной зоной, отделена от верхней – зоны проводимости – так называемой запрещенной зоной, в которой энергетические уровни отсутствуют. В полупроводнике электронов проводимости

мало, подвижность их ограничена, но под действием теплового движения отдельные электроны могут перескакивать из валентной зоны в зону проводимости, оставляя пустое место – дырку. И если электрон с энергией  $E_в$  самостоятельно (спонтанно) возвращается обратно в зону проводимости, происходит его рекомбинация с дыркой, имеющей энергию  $E_д$ . При этом происходит излучение из запрещенной зоны фотона частотой  $\nu = (E_в - E_д)/h$ . Поскольку ширина запрещенной зоны невелика, полупроводниковый лазер излучает в сравнительно узком интервале частот. А применение различных полупроводниковых материалов позволяет получать излучение в диапазоне от ближнего ультрафиолета ( $\lambda = 300$  нм) до инфракрасного света длиной волны более 40 мкм (1 мкм=1000 нм).

Активный элемент полупроводникового лазера представляет собой брусок монокристалла объемом несколько десятков кубических миллиметров, а его излучающая часть – полоску длиной от 100 до 300 микрон. Из-за чрезвычайно малой длины излучателя лазерный луч сильно расходится – на угол до  $40^\circ$ .

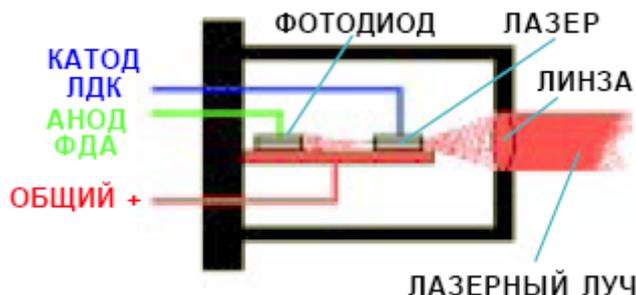


*Устройство лазерной указки. Источником питания (1) служат три соединенные последовательно миниатюрные батарейки с ЭДС 1,2 вольта каждая. Электронная схема (2) с кнопкой включения смонтирована в середине корпуса и подключена к лазерной головке (3). Лазерное излучение имеет длину волны от 630 до 680 нанометров (нм) и мощность менее одного милливатта. Линза (4) фокусирует его в тонкий луч.*

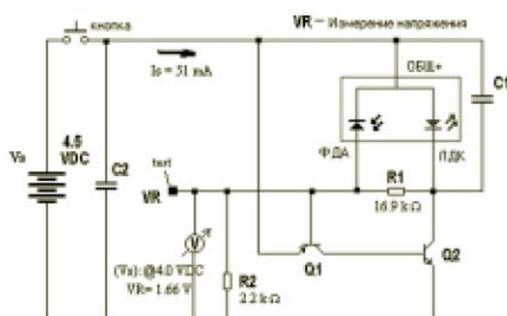
Накачку полупроводникового лазера чаще всего осуществляют постоянным электрическим током напряжением не более 3 вольт (при этом до 50% его энергии превращается в излучение); резонатором обычно служат зеркальные грани кристалла полупроводника (их не полируют, а получают, раскалывая монокристалл).

Миниатюрные размеры полупроводниковых лазеров, долговечность (до 100 тысяч часов безотказной работы) и довольно высокая мощность излучения (1–3 мВт) делают их незаменимыми в устройствах оптической записи и считывания информации, системах оптоволоконной связи, геодезической аппаратуре и других областях техники. Но только лазерная указка дает возможность любому взять в руки это удивительное устройство – полупроводниковый лазер.

В лазерной указке нередко имеются два полупроводниковых диода: сам лазер и свето-диод. Они смонтированы в единый блок с тремя выводами – от катода лазерного диода, анода светодиода и общий. Фотодиод создает отрицательную обратную связь в цепи питания лазера, поддерживая постоянной интенсивность его излучения. Связь эта осуществляется оптически: лазерный луч освещает фотодиод, который вырабатывает ток смещения, управляющий транзистором в цепи питания лазера. Если интенсивность луча возрастает, устройство уменьшает силу тока, проходящего через лазер, если падает – увеличивает ее.



*Лазерная головка. В ней, как правило, кроме самого полупроводникового лазера имеется еще и фотодиод, который вырабатывает сигнал отрицательной обратной связи и стабилизирует интенсивность излучения.*



*Одна из возможных схем лазерной указки. Она была приведена на сайте <http://zpselectronics.com/>.*

На выходе луча стоит линза, компенсирующая его расходимость, поэтому на расстоянии 10—15 метров размер светового пятна оказывается порядка сантиметра.

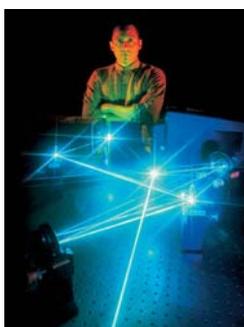
Лазерные указки могут пригодиться не только лекторам и докладчикам. Их используют для демонстрации опытов по интерференции и дифракции света, применяют в самодельных охранных устройствах и линиях оптической связи... или просто играют с кошкой, которая азартно ловит световой зайчик. Но обязательно нужно помнить, что это все-таки не игрушка. Лазерный луч ни в коем случае нельзя направлять в глаза – можно сильно испортить зрение.

## **Квантовый светоч**

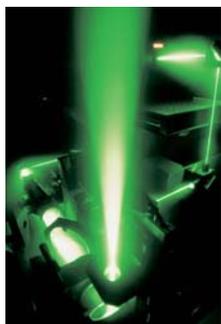
История одного из самых важных изобретений XX века – лазера

Алексей Левин Июнь 2006

**В 1902 году французский химик Жорж Клод изобрел, а в 1910 году показал публике неоновую лампу. Через пару лет какой-нибудь любознательный умелец уже вполне мог бы приделать к ней боковые зеркала и при большом везении методом проб и ошибок изготовить примитивный лазер. Тогда история техники могла бы сложиться иначе.**



Путь от демонстрации «светящихся трубок» Жоржа Клода на Парижской автовывставке до гелий-неонового лазера занял ровно 50 лет.



В наши дни трудно найти такую область науки и техники, где бы не применялись лазеры. Это изобретение XX века навсегда изменило нашу жизнь.

Но мысль исследовать газовые разряды ради наблюдения вынужденного излучения в те времена никому не пришла в голову – ведь ученые даже не подозревали о его существовании.

А в 1913 году Альберт Эйнштейн высказал гипотезу, что в недрах звезд излучение может генерироваться под действием вынуждающих фотонов. В классической статье «Квантовая теория излучения», опубликованной в 1917 году, Эйнштейн не только вывел существование такого излучения из общих принципов квантовой механики и термодинамики, но и доказал, что оно когерентно вынуждающему излучению (то есть имеет одинаковое направление, длину вол-

ны, фазу и поляризацию). А спустя десять лет Поль Дирак строго обосновал и обобщил эти выводы.

### **Первые эксперименты**

Работы теоретиков не остались незамеченными. В 1928 году Рудольф Ладенбург, директор отдела атомной физики Института физической химии и электрохимии Общества кайзера Вильгельма, и его ученик Ганс Копферманн экспериментально наблюдали инверсию населенностей (см. врезку «Квантовое усиление света»), причем именно в опытах с неоновыми трубками. Но вынужденное излучение было очень слабым, и различить его на фоне спонтанного излучения было сложно. До лазера оставался лишь шаг: чтобы усилить вынужденное излучение, в среду необходимо ввести положительную обратную связь, то есть поместить ее в резонатор. Но для этой идеи время еще не настало.

Мало кто занимался усилением оптических сигналов с помощью вынужденного излучения и в 1930–е годы. Наиболее серьезной работой по этой теме была докторская диссертация москвича Валентина Фабриканта, опубликованная в 1940 году. В 1951 году В.А. Фабрикант, Ф.А. Бутаева и М.М. Вудинский подали заявку на изобретение нового метода усиления электромагнитного излучения, основанного на использовании среды с инверсией населенностей. К сожалению, эта работа была опубликована лишь через 8 лет и мало кем замечена, а попытки построить действующий оптический усилитель оказались бесплодными – опять-таки из-за отсутствия резонатора. В 1957 году Фабрикант и Бутаева даже наблюдали квантовое усиление световых волн в опытах с пропусканием электрических разрядов через ртутные пары, однако это так и осталось их личным достижением.

Путь к созданию лазера был найден не оптиками, а радиофизиками, которые издавна умели строить генераторы и усилители электромагнитных колебаний, использующие резонаторы и обратную связь. Им-то и было суждено сконструировать первые квантовые генераторы когерентного излучения, только не светового, а микроволнового.

### **Мазеры**

Возможность создания такого генератора первым осознал профессор физики Колумбийского университета Чарльз Таунс. Эта мысль осенила его весной 1951 года во время прогулки по Франклин-скверу в центре Вашингтона. (Кстати, этому небольшому парку самой судьбой было предназначено войти в историю физической оптики. Именно там 3 июня 1880 года изобретатель телефона Александр Белл впервые испытал устройство, которое он считал своим главным изобретением. Прибор, который Белл назвал фотофоном, передавал звук не по проводам, а по световому лучу. Сегодня белловский фотофон считают предтечей оптоволоконных систем связи.)

Таунс понял, что можно построить микроволновой генератор с помощью пучка молекул, имеющих несколько уровней энергии. Для этого их нужно разделить электростатическими полями и загнать пучок возбужденных молекул в металлическую полость, где они перейдут на нижний уровень, излучая электромаг-

нитные волны. Чтобы эта полость работала как резонатор, ее линейные размеры должны равняться длине излучаемых волн. Таунс поделился этой мыслью с аспирантом Джеймсом Гордоном и научным сотрудником Гербертом Цайгером. На роль среды они избрали аммиак, молекулы которого при переходе с возбужденного колебательного уровня на основной испускают волны длиной 12,6 мм. Изготовить высококачественный объемный резонатор такой величины было не слишком просто, но все же возможно. В апреле 1954-го Таунс и Гордон (Цайгер тогда уже ушел из университета) запустили первый в мире микроволновой квантовый генератор. Этот прибор Таунс назвал мазером (MASER – Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

В Лаборатории колебаний Физического института АН СССР этой же темой занимались старший научный сотрудник Александр Прохоров и его аспирант Николай Басов. В мае 1952 года на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии они сделали доклад о возможности создания квантового усилителя СВЧ–излучения, работающего на пучке молекул все того же аммиака. В 1954 году, вскоре после выхода работы Таунса, Гордона и Цайгера, Прохоров и уже «остепенившийся» Басов опубликовали статью, где были приведены теоретические обоснования работы такого прибора. В 1964 году Таунс, Басов и Прохоров за эти исследования были удостоены Нобелевской премии.

### **От микроволн к свету**

Не будет преувеличением сказать, что в середине 1950-х годов призрак оптического (в отличие от микроволнового) квантового генератора маячил в головах многих физиков – слишком многих, чтобы рассказать обо всех. Фактически не была решена лишь задача усиления вынужденного излучения с помощью положительной обратной связи. Поскольку длины световых волн измеряют десятками долями микрона, изготовление объемного резонатора таких размеров было делом нереальным. Вероятно, возможность генерации света с помощью макроскопических открытых зеркальных резонаторов первым осознал американский физик Роберт Дике, который в мае 1956 года оформил эту идею в патентной заявке. В сентябре 1957 года Таунс набросал в записной книжке план создания такого генератора и назвал его оптическим мазером. Через год Таунс со своим старым другом и шурином Артуром Шавловым и независимо от них Прохоров выступили со статьями, содержащими теоретические обоснования этого метода генерации когерентного света.

Сам термин «лазер» возник даже раньше. Эту английскую аббревиатуру, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (в дословном переводе «усиление света с помощью стимулированного испускания излучения», хотя лазерами все же принято называть не усилители, а генераторы излучения, замена слова amplification на generation дает непривычное звучание lgser), придумал аспирант Колумбийского университета Гордон Гулд, который совершенно самостоятельно провел детальный анализ методов получения стимулированного излучения оптического диапазона. Поздней осенью 1957 года это слово появилось на страницах блокнота, где он записывал свои размышления и вычисле-

ния. В то время Гулд ничего не публиковал и поэтому не получил признания, которое, бесспорно, заслужил. Правда, в 1970–1980-х он добился утверждения своих патентных заявок и наконец–то стал купаться если не в славе, то в долларах.

## Лазеры

Первый работающий лазер вышел из рук сотрудника корпорации Hughes Aircraft Теодора Меймана, который в качестве активной среды выбрал рубин. Этот минерал представляет собой оксид алюминия с небольшой примесью хрома, который и придает ему красный цвет (чистый оксид алюминия бесцветен). Мейман понял, что разделенные большими промежутками атомы хрома могут «светить» не хуже атомов газа. Для получения оптического резонанса он напылил тонкий слой серебра на полированные параллельные торцы цилиндрика из синтетического рубина. Цилиндр по специальному заказу изготовила фирма Union Carbide, на что ей понадобилось пять месяцев. Мейман поместил рубиновый столбик в спиральную трубку, дающую яркие световые вспышки. Шестнадцатого мая 1960 года первый в мире лазер выдал первый луч. А в декабре того же года в Лабораториях Белла заработал гелий-неоновый лазер (на смеси гелия и неона), созданный Али Джаваном, Уильямом Беннеттом и Дональдом Хэрриотом. По любопытному совпадению произошло это ровно через 50 лет после того, как Клод поразил воображение посетителей Парижской автомобильной выставки своими светящимися трубками. Лазер Джавана и его коллег работал в инфракрасном диапазоне, но через два года Уайт и Ригден заставили гелий-неоновый лазер излучать красный цвет.

Научная ценность и практическая польза лазеров были настолько очевидны, что ими сразу занялись тысячи ученых и инженеров из разных стран. В 1961 году заработал первый лазер на неодимовом стекле, в течение пяти лет были разработаны полупроводниковые лазерные диоды, лазеры на органических красителях, химические лазеры, лазеры на двуокиси углерода. В 1963 году Жорес Алферов и Герберт Кремер независимо друг от друга разработали теорию полупроводниковых гетероструктур, на основе которых позднее были созданы многие лазеры (за эту работу они 6 лет назад получили Нобелевскую премию). К настоящему времени трудно найти такую область науки и техники, где бы не применялись лазеры. Даже простое перечисление различных модификаций лазеров занимает несколько страниц печатного текста. Это, безусловно, одно из важнейших изобретений XX века навсегда изменило нашу жизнь.

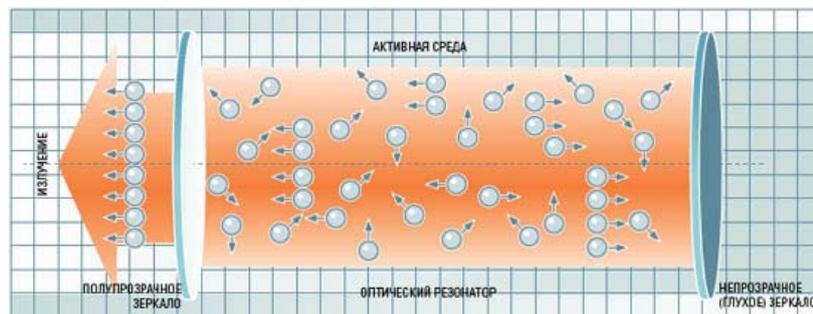
## С головы на ноги



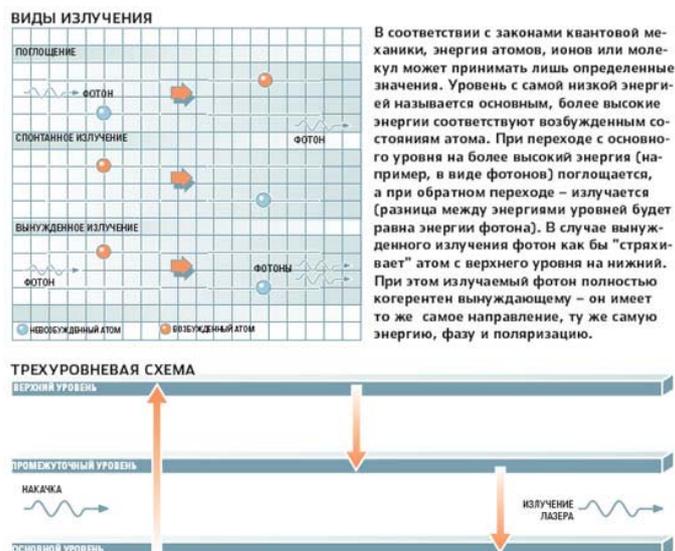
Всегда ли вынужденное излучение непременно требует инверсной среды? Нет, и это было известно изобретателям лазера. Чарльз Таунс в нобелевской лекции особо отметил, что инверсия необходима лишь в том случае, если фазы квантовых волновых функций излучающих частиц совершенно случайны. Если же это не так, есть способы усилить электромагнитные волны и в отсутствие инверсии. О такой возможности долго не вспоминали, однако в 1980-х ей всерьез занялись теоретики. Если вынуждающее излучение одновременно возбуждает несколько когерентных колебаний с близкими частотами, они могут интерферировать друг с другом. Взяв под контроль эту интерференцию, можно выключить взаимодействие излучения с поглощающими атомами, но при этом сохранить вынужденное излучение возбужденных атомов. В таком случае излучение будет усиливаться и без инверсии населенностей (см. след. врезку).

Реальность этого эффекта впервые была доказана в 2000 году в экспериментах с атомарными парами. А совсем недавно физики из Англии и Швейцарии получили аналогичные результаты и на полупроводниковых нанокристаллах с тремя энергетическими уровнями. В этих опытах населенность нижнего уровня в четыре раза превышала общую населенность двух верхних.

## Квантовое усиление света



Оптическая схема лазера



В лампе накаливания электрический ток нагревает вольфрамовую спиральку и возбуждает атомы вольфрама, перебрасывая их внешние электроны в со-

стояния с повышенными значениями энергии. Эти состояния неустойчивы, поэтому электроны возвращаются на основной уровень, излучая фотоны. Никаких особых усилий для этого не требуется, такое возвращение происходит самопроизвольно, спонтанно. Поскольку спонтанные электронные переходы никак не скоррелированы между собой, световые волны с равной вероятностью испускаются во всех направлениях, с разными фазами, поляризациями и энергиями.

Атомы могут излучать фотоны также под действием фотона, энергия которого близка к разнице уровней. Такой фотон как бы «стряхивает» атом с верхнего уровня на нижний – происходит вынужденный переход. При этом излучаемый фотон оказывается полностью когерентен вынуждающему – он имеет то же самое направление, ту же самую энергию, фазу и поляризацию.

Однако в состоянии термодинамического равновесия количество невозбужденных атомов гораздо больше, чем возбужденных. Чтобы возбудить атомы (перевести на верхние уровни), требуется энергия – химическая, световая или любая другая (это называется накачка). Причем нужно удерживать атомы наверху достаточно долгое (по квантовым меркам, конечно) время, чтобы накопить определенный «запас» (в научных терминах – инверсия населенностей). В двухуровневой схеме это затруднительно (хотя и возможно): атомы с верхнего уровня слишком быстро скатываются на основной.

А вот если у нас есть вещество с тремя уровнями, картина меняется. Такую схему в 1955 году предложили Прохоров и Басов. Нужно загнать атомы с помощью накачки на самый верхний из трех энергетических уровней (при поглощении излучения с энергией, соответствующей разности между самым верхним и самым нижним). С верхнего «этажа» большинство атомов быстро спускается на промежуточный уровень и остается там (выбираются активные среды, для которых самопроизвольный переход с промежуточного уровня на нижний запрещен законами квантовой механики). Если запустить в такую среду фотоны с энергией, соответствующей разнице между промежуточным и нижним уровнями, то они инициируют массовый «спуск» атомов на основной уровень и вынужденное излучение, причем все вновь рожденные фотоны будут полностью им когерентны. Более того, двигаясь сквозь среду, все эти фотоны будут вызывать появление все новых и новых одинаковых собратьев. В результате амплитуда исходного светового сигнала многократно возрастет: это и есть усиление света вынужденным излучением, лазерный эффект.

## Оптический квантовый генератор



Однако нам нужно изготовить не усилитель, а генератор света! Для этого необходимо задержать большинство вторичных фотонов в среде с инверсией населенностей и заставить их снова и снова индуцировать излучение своих клонов в самоподдерживающемся режиме. Этого можно добиться с помощью особого устройства – оптического резонатора. Лазер в привычном смысле слова – это совокупность активной среды, источника ее накачки и резонатора.

Попробуем превратить обычную «неонку» в лазер. В простейшем виде неоновая лампа представляет собой прямую стеклянную трубку с парой электродов, заполненную смесью неона и гелия. Если на электроды подать напряжение, то в газе возникнет тлеющий разряд. Высвободившиеся при ионизации газовой смеси электроны разгоняются и сталкиваются в основном с атомами гелия, поскольку их гораздо больше. Возбужденные атомы гелия не избавляются от избыточной энергии, испуская световые кванты, а с легкостью отдают ее атомам неона, в результате образуется среда с инверсией населенностей (три уровня плюс подуровни). Тлеющий разряд в неоновой лампе дает около двух десятков спектральных линий, почти все в ближней инфракрасной области. Но на одном из переходов возникает всем известное оранжево-красное свечение с длиной волны 632,8 нм и с энергией квантов 1,96 эВ. Простоты ради обо всех прочих фотонах говорить не будем.

Понятно, что свет неонки в основном некогерентен. Это ведь не единая инверсная среда, каждый атом неона излучает независимо от всех прочих. Но из этого хаоса можно извлечь согласованное излучение, причем с помощью весьма простого приема. Закроем торцы трубки строго параллельными зеркалами, перпендикулярными ее продольной оси. Абсолютное большинство спонтанно излученных фотонов уйдет сквозь стеклянные стенки наружу (поэтому КПД такого лазера невелик – единицы процентов). Но их очень и очень много (10<sup>19</sup>–10<sup>20</sup> в секунду!). Значит, среди них непременно найдутся фотоны, путь которых лежит строго по осевой линии.

Если такой квант беспрепятственно добрался до правого зеркала, он отразится, отправится обратно вдоль этой же оси и по пути встретится с возбужденным атомом неона. В результате randevу он индуцирует излучение фотона-копии, и в дальнейший путь отправится уже фотонная пара. По дороге к левому зеркалу они могут наплодить еще множество клонов, которые

*дружно отразятся и двинутся в обратном направлении. Цепная реакция пойдет по нарастающей, и пространство между зеркалами заполнится мириадами курсирующих взад и вперед одинаковых фотонов. Зеркала на концах трубки превращают некогерентное спонтанное излучение в когерентное вынужденное: торцовые рефлекторы и есть тот самый оптический резонатор, который необходим для изготовления лазера.*

*Однако как вывести это когерентное излучение за пределы среды? Сделаем одно зеркало полностью отражающим, а второе – полупрозрачным. Через него красный луч когерентного света (напомним, что все фотоны имеют одинаковую энергию, фазу, поляризацию и направление) покидает пределы среды. Лазер запущен и будет работать до тех пор, пока не выключат питание.*

*Конечно, на практике все несколько сложнее. Чтобы инверсия была стабильной, нужно правильно выбрать плотность газовой смеси и электрическое напряжение, а также обеспечить и еще кое-какие технические условия. Но, хотя в целом принцип работы гелиево-неонового лазера не слишком сложен, путь к нему от обычной неоновой лампы занял ровно полвека. Это вновь показывает, что наука развивается отнюдь не по прямой восходящей линии.*

Постоянный

адрес

материала:

<http://www.popmech.ru/part/?articleid=393&rubricid=3>

© Independent Media Sanoma Magazines

==

# Забывтые отцы лазера

Автор: Алексей Левин

[TerraLab](#) Опубликовано 01 июня 2006 года

Каноническая версия истории изобретения лазера проста, изящна и далеко не полна. Выглядит она так. В 1916 г. Альберт Эйнштейн (Albert Einstein) создал теорию взаимодействия излучения с веществом, из которой вытекала принципиальная возможность создания квантовых усилителей и генераторов электромагнитных волн.



В первой половине 50-х годов появился предшественник лазера – аммиачный мазер, квантовый генератор микроволнового излучения, практически одновременно изобретенный и построенный в Нью-Йорке и Москве. В США эту работу выполнили профессор Колумбийского университета Чарльз Таунс (Charles Townes) с ассистентами Джеймсом Гордоном (James Gordon) и Гербертом Цайгером (Herbert Zeiger), в СССР – научные сотрудники ФИАН Александр Прохоров и Николай Басов. В 1958 г. Таунс вместе с канадцем Артуром Шавловым (Arthur Schawlow) и независимо от них Прохоров дали теоретическое обоснование конструкции квантового генератора светового излучения, который тогда назывался не лазером, а оптическим мазером. В мае 1960 г. сотрудник исследовательского центра фирмы Hughes Теодор Мейман (Theodore Maiman) запустил первый в мире лазер на искусственном рубине. Спустя полгода в лабораториях корпорации IBM заработал инфракрасный лазер на фториде кальция с добавкой ионов урана, построенный Питером Сорокиным (Peter Sorokin) и Миреком Стивенсоном (Mirek Stevenson) (этот прибор действовал лишь при температуре жидкого водорода и практического значения не приобрел). Наконец, в декабре того же года исследователи из Bell Laboratories Али Джаван (Ali Javan), Уильям Беннетт (William Bennett) и Дональд Хэрриот (Donald Herriott) продемонстрировали первый в мире газовый лазер на смеси гелия и неона, который повсеместно применяется и в наши дни. После этого физики и инженеры всего мира включились в гонку по созданию всевозможных лазеров, которая идет и по сей день.

Все эти события действительно имели место, но одновременно с ними происходили и другие. В 50-е годы мазерами и лазерами плодотворно занимались физики, чья роль известна сегодня лишь специалистам. Попробуем хотя бы частично заполнить лакуны в истории создания лазера.

## Как работает лазер?

До появления статьи Эйнштейна "Квантовая теория излучения" физики не сомневались, что проникающие в материальную среду фотоны взаимодействуют с электронными оболочками атомов и молекул лишь двумя путями – либо поглощаются и переводят частицы среды на более высокий энергетический уровень, либо испускаются с одновременной потерей этими частицами части своей энергии. Эйнштейн первым понял, что существует еще одна возможность. Допустим, частица вещества уже находится в возбужденном состоянии с энергией  $E_2$ . Тогда при встрече с фотоном, энергия которого равна разности между  $E_2$  и энергией  $E_1$  другого, "нижележащего" состояния этой частицы, частица излучит фотон, а сама перейдет в состояние  $E_1$ . Очень важно, что новорожденный квант полностью тождествен первому – у него такая же энергия  $E_2 - E_1$ , такое же направление движения, такая же поляризация и такая же фаза. Получается, что исходный фотон принуждает частицу "породить" его собственную копию. **Такой тип излучения называется вынужденным (в 1924 г. этот термин первым использовал американский физик Джон ван Флек, John van Vleck).**

В обычных условиях возникновение вынужденного излучения маловероятно. На это есть две причины. Во-первых, энергия затравочных фотонов должна надлежащим образом соотноситься с энергетическим спектром возможных состояний частиц среды, что случается далеко не всегда. Во-вторых (и это важнее), в норме среда пребывает в термодинамическом равновесии, и абсолютное большинство ее частиц находятся в состоянии с минимальным значением энергии (его называют основным).

Падающий фотон имеет неизмеримо больше шансов встретиться именно с такой частицей и поглотиться ею, нежели попасть в окрестность частицы, способной в результате контакта излучить фотон-копию. Поэтому неудивительно, что вынужденное излучение долгое время оставалось лишь теоретическим понятием. Косвенные экспериментальные свидетельства реальности этого явления впервые появились в 1928 г., а прямые – почти двумя десятилетиями позже.

Получить вынужденное излучение заметной интенсивности в принципе несложно. Лучший (но, как сейчас известно, не единственный) рецепт предписывает изготовить среду, которая содержит на верхнем уровне  $E_2$  больше частиц, чем на нижнем  $E_1$ . В этом случае у фотона с энергией  $E_2 - E_1$  больше шансов запустить процесс генерации вынужденного излучения, нежели поглотиться. Среда, которая отвечает этому условию, называется инверсной. Инверсные среды получают искусственно, разными способами, причем все они требуют затраты энергии. Самостоятельно такие среды возникают очень редко – например, это происходит в верхних слоях марсианской атмосферы, где под действием солнечного излучения резко увеличивается доля молекул углекислого газа, находящихся в возбужденном состоянии. Любопытно, что это явление было открыто лишь в 1981 г. – через много лет после появления лазера.

Инверсная среда может быть источником излучения, но, как правило, физически неинтересным. Такая среда всего лишь самопроизвольно (как говорят фи-

зики, спонтанно) излучает по всем направлениям фотоны одинаковых энергий (монохроматический свет). Именно это и происходит на Марсе – вынужденное излучение молекул двуокиси углерода равномерно рассеивается по всем направлениям.

Ситуация радикально изменится, если из инверсной среды извлекать энергию, сконцентрированную в узком пучке. Проще всего это сделать, поместив среду в трубку с зеркалами на концах, перпендикулярными к оси трубки. Поскольку спонтанное излучение распространяется во все стороны, какая-то часть его направится строго вдоль оси трубки. Эти фотоны, и только они, многократно отразятся от зеркал и извлекут из среды свои многочисленные копии. В результате пространство между зеркалами заполнится одинаковыми фотонами, мечущимися в обоих направлениях. Пока воздействие на среду обеспечивает сохранение инверсии, это положение сохраняется. Однако если хоть одно зеркало сделать полупрозрачным, то часть фотонов уйдет наружу (непрерывно или импульсами, в зависимости от того, как именно осуществляется инверсия). В итоге возникнет либо стабильный, либо пульсирующий поток (в случае пары полупрозрачных зеркал – два потока) идентичных фотонов. Подобное излучение называется когерентным. В идеале все когерентные фотоны обязаны двигаться параллельно, но на практике луч все же будет расходиться, хоть и незначительно. Это и есть лазер, квантовый генератор вынужденного когерентного светового излучения.

Выходит, что для работы лазера необходимы три основных компонента: оптическая среда, способная пропускать и излучать фотоны; физический механизм, приводящий ее в состояние инверсии (этот процесс называется накачкой); наконец, устройство для селекции и усиления идентичных фотонов (так называемый оптический резонатор), в данном случае – торцевые зеркала.

Нельзя не упомянуть еще одно важное обстоятельство. До сих пор молчаливо предполагалось, что энергия  $E_1$  отвечает основному состоянию частиц среды. Однако количество частиц в этом состоянии так велико, что создать инверсию практически нереально. Много лучше иметь как минимум три энергетических уровня – основной ( $E_0$ ) и два возбужденных ( $E_1$  и  $E_2$ ), между которыми возможны переходы. В обычных условиях эта пара уровней почти пустует, и если энергетическая подпитка переводит определенную долю частиц на уровень  $E_2$ , то инверсия по отношению к уровню  $E_1$  возникает автоматически, ведь он-то почти не заполнен. Поэтому, как правило, лазеры работают по трех- и даже четырехуровневой схеме.

### **Вебер, Дике и Бломберген**

Путь к квантовым генераторам когерентного излучения занял несколько десятилетий. В 1924 г. американец Ричард Толман (Richard Tolman) первым догадался, что эйнштейновская теория указывает на возможность усилить интенсивность электромагнитного излучения, без которого, как мы сейчас знаем, лазер не может заработать. Через несколько лет немецкие физики Рудольф Ладенбург (Rudolph Laden-burg) и Ганс Копферманн (Hans Kopfer-mann) получили

первые, пока еще косвенные доказательства физической реальности инверсных сред. В 1934 г. американцы Клод Клитон (Claude Cleaton) и Нейл Уильямс (Neil Williams) фактически наблюдали инверсию молекул аммиака, которая, как известно, была положена в основу конструкции первых мазеров. В конце 30-х годов профессор Всесоюзного электротехнического института Валентин Фабрикант выполнил серьезный теоретический анализ методов достижения инверсии в газовом разряде. В 1947 г. американцы Виллис Лэмб (Willis Lamb) и Роберт Резерфорд (Robert Retherford) с помощью вынужденного излучения добились усиления электромагнитных волн, испускаемых молекулами водорода. Эти результаты вкупе с рядом других частично раскрыли возможности, предсказанные теорией Эйнштейна, но в первой половине двадцатого столетия дело дальше не двинулось.

Чарльз Таунс вспоминал, что концепция мазера пришла ему в голову 26 апреля 1951 г. Он был в Вашингтоне на конференции, посвященной обсуждению новых методов генерации волн миллиметрового диапазона для радиолокаторов.

Клистроны, магнетроны и лампы бегущей волны, успешно используемые в роли источников сантиметрового излучения, не слишком хорошо отвечали намеченной цели. Размышление над поиском нестандартного пути решения этой задачи и натолкнуло Таунса на идею прибора, который позже то ли он сам, то ли его ассистенты (мнения расходятся) назвали мазером.

Примерно в то же время или чуть раньше аналогичное озарение посетило и профессора электротехники Мэрилендского университета Джозефа Вебера (Joseph Weber). Как раз тогда он защитил докторскую диссертацию по физике, работая над которой применял электромагнитные волны СВЧ-диапазона для инверсии газообразного аммиака. По ходу дела Вебер глубоко изучил эйнштейновскую теорию и пришел к выводу, что с помощью инверсии можно усилить интенсивность излучения.

Летом 1952 г. он изложил свои соображения на научной конференции в Оттаве, а еще через год обнародовал их в статье, которая стала первой открытой публикацией на эту тему. В ней Вебер показал, как можно построить усилитель микроволнового излучения, использующий термодинамически неравновесный аммиак в качестве инверсной среды. Однако он не подумал о том, что замкнутая металлическая полость (объемный резонатор) превращает этот усилитель в генератор. Как известно, именно это сделали Прохоров с Басовым и группа Таунса. Более того, в отсутствие резонатора расчетный коэффициент усиления прибора получался весьма скромным, посему Вебер и решил, что практического значения такая конструкция иметь не будет. Вскоре он увлекся общей теорией относительности и конструированием первых в мире детекторов гравитационного излучения, что принесло ему в начале 70-х годов мировую известность. Тем не менее Вебера без сомнения можно назвать одним из первоизобретателей квантовых усилителей излучения.

Замкнутая полость не годится для генерации вынужденного околосветового и светового излучения с длинами волн порядка микрона и долей микрона, тут

нужен открытый зеркальный резонатор. Первым об этом догадался профессор Принстонского университета Роберт Дике (Robert Dicke), чрезвычайно разно-сторонний исследователь, получивший множество важных результатов в области физики и астрофизики. В 1956 г. он подал патентную заявку на аппарат для генерации когерентного инфракрасного света, содержащий газообразную активную среду, обрамленную полупрозрачными зеркалами. Правда, Дике почему-то не уточнил, что газ нужно перевести в термодинамически неравновесное инвертированное состояние, но скорее всего лишь потому, что счел эту деталь несущественной для Бюро патентов. Во всяком случае, сам он всегда утверждал, что заслуживает признания как первый изобретатель лазера.

Фактически Дике сделал даже больше, разработав с помощью своего студента Брюса Хокинса (Bruce Hawkins) один из способов получения инверсной среды – облучение ее светом нужного спектра и поляризации. Именно этот способ – метод оптической накачки – позже применил создатель первого в мире лазера Мейман (и его же одновременно с Дике в 1952–53 гг. независимо разработали Альфред Кастлер [Alfred Kastler] с коллегами во Франции). У Дике, превосходного экспериментатора и сильного теоретика, вроде бы были все шансы первым построить действующий лазер. Однако в середине 50-х Дике занялся гравитацией и моделями Вселенной – всерьез и надолго. Он получил исключительно важные для космологии результаты (в частности, переоткрыл давно забытую теорию реликтового микроволнового излучения), но ушел из квантовой микро-электроники.

Еще один из предтеч идеи лазера – переселившийся в США голландский физик Николаас Бломберген (Nicolaas Bloembergen). В 1956 г., работая в Гарварде, он опубликовал статью "Проект твердотельного мазера нового типа", в которой развил теорию трехуровневого возбуждения инверсной среды. Впервые эта идея появилась в короткой заметке Басова и Прохорова, напечатанной зимой 1955 г. в ЖЭТФ. Однако их схема никогда не была реализована, а предложенный Бломбергеном мазер испытали уже через несколько месяцев после публикации его статьи. Позднее он выполнил ряд фундаментальных исследований по лазерной спектроскопии, за что в 1981 г. был удостоен Нобелевской премии (вместе с Шавловым).

Таким образом, в 50-е годы к разработке мазеров и лазеров приложили руку трое талантливейших физиков, которые со временем прославились совсем в других областях науки. Однако никто из них не продумал идею лазера в целом, как это чуть позднее сделали Прохоров и Таунс с Шавловым. Тем более интересно, что независимо от этих классиков практически от начала до конца лазер изобрел никому не известный аспирант Колумбийского университета, который потом тридцать лет добивался (и добился-таки!) признания своего приоритета. Он и станет последним и главным героем этой статьи.

## Одиссея Гордона Гулда



Гордон Гулд (Gordon Gould) родился в 1920 г. Со стороны отца он происходил от одного из пассажиров легендарного "Мэйфлауэра", доставившего в Новую Англию первых колонистов, а по материнской линии – от французского пирата. В 1942-м он защитил магистерскую диссертацию по физике в Йельском университете, преподавал там пару лет, а потом получил место в секретной нью-йоркской лаборатории, разрабатывавшей методы разделения изотопов урана для Манхэттенского проекта. В это время он увлекся коммунистическими идеями и стал посещать собрания партячейки, в результате чего в начале 1945 г. остался и без допуска, и без работы. Прослужив четыре года в частной фирме, он поступил в аспирантуру физического факультета Колумбийского университета. Научный руководитель, будущий Нобелевский лауреат Поликарп Куш (Polykarp Kusch), предложил Гулду заняться спектроскопией метастабильных атомов таллия.

Для изготовления таких атомов Гулд применил совершенно новый для тех времен метод оптической накачки. Постепенно до него дошло, что этим путем можно создавать и инверсные среды. Идея вызревала довольно долго, но в начале ноября 1957 г. Гулд понял, что для получения видимого когерентного света нужно подвергнуть оптической накачке атомарный или молекулярный газ, заключенный в трубку с зеркалами на концах. Он осознал также, что для вывода излучения одно из зеркал должно часть света отражать, а часть пропускать наружу. Годом раньше об этом же догадался и Дике, но Гулду это не было ведомо, ведь Дике ничего не опубликовал. Объединив идею накачки с идеей оптического резонатора, Гулд сконструировал (пока лишь в собственной голове) настоящий лазер.

А потом он повел себя необычно. Интересы научной карьеры требовали немедленно написать статью и послать ее в первоклассный журнал. Однако Гулду было уже 37 лет, он все еще числился аспирантом и мог опасаться, что столпы физического сообщества не поторопятся признать его революционное открытие. Будучи с юности склонен к изобретательству, он чувствовал, что именно эта стезя сулит ему максимум жизненных шансов. Поэтому Гулд решил ничего не публиковать, а добиваться патента. Он заполнил девять блокнотных страниц расчетами, объяснениями и рисунками и 13 ноября засвидетельствовал их у нотариуса. Свое изобретение он назвал лазером – так и появился этот термин. На

тех же страницах Гулд дал целый список возможностей использования лазеров и в каждой строчке попадал прямо в яблочко.

Это было лишь начало. На следующий год Гулд придумал, записал и заверил еще несколько лазерных изобретений – в частности, метод накачки газообразной среды электрическими разрядами. Однако в Бюро патентов он обратился лишь в апреле 1959 г. Первоначально Гулд почему-то считал, что для получения патента надо представить не только описание изобретения, но и работающий прототип, которого у него, естественно, не было. Такое правило и в самом деле существовало, но было отменено еще в 1880 г., будучи оставлено в силе лишь для изобретателей вечного двигателя. Как ни странно, эта информация дошла до Гулда с изрядным опозданием, так что у него появились серьезные конкуренты. Артур Шавлов пришел к идее зеркального резонатора в конце зимы 1958 г.; в июле он и Таунс подали заявку на новый прибор, а в марте 1960-го получили патент. Гулд же тем временем покинул аспирантуру ради работы в фирме TRG, которая решила заняться использованием лазеров для наведения ракет. Министерство обороны выделило под этот проект почти миллион долларов, однако Гулд не смог принять в нем участие, поскольку ему отказали в восстановлении допуска. Через четыре года он получил место преподавателя физики в Бруклинском политехническом институте, потом стал вице-президентом небольшой компании, разрабатывавшей оптоволоконные приборы, а в 1985 г. ушел на пенсию.

Покончив с лазерным изобретательством, Гулд полностью отдался борьбе за утверждение своих патентов, которая продолжалась почти три десятилетия – своеобразный рекорд. Сначала он неизменно проигрывал, но в конце концов добился своего. В 1977 г. Бюро патентов впервые признало его приоритет в разработке метода оптической накачки. Правда, до патента тогда дело не дошло, поскольку конкуренты немедленно подали апелляцию. Заявка Гулда несколько раз подвергалась повторным экспертизам и была окончательно утверждена лишь в сентябре 1986 г.

После первой победы дела пошли в гору. В 1979 г. Гулду были выданы патенты на лазерную резку, на применение лазеров в фотокопировальных машинах и на лазерный поджог термоядерных реакций. *Любопытно, что Гулд догадался о такой возможности еще в 1957 г., когда перспективы управляемого термояда связывались исключительно с магнитным удержанием плазмы. Принято считать, что применение лазерного излучения для нагрева плазмы до термоядерных температур в 1962 г. впервые предложили Басов и еще один будущий академик, Олег Крохин. Как видим, Гулд их значительно опередил.* В 1987 г. он получил патент на создание инверсных сред с помощью газовых разрядов, а еще через год – патент на метод снижения поглощения света с помощью закона Брюстера. Он не смог лишь добиться признания своего приоритета на изобретение зеркального резонатора, и с этим пришлось примириться.

Одержанные победы сделали Гулда очень богатым человеком. Гонорары от промышленного использования его изобретений в конце 80-х годов составляли

не меньше двух миллионов долларов в год, а со временем достигли пяти миллионов. А вот если бы он получил свои патенты без задержки, они принесли бы ему много меньше денег. Объем лазерного рынка сначала был невелик, и к концу 70-х срок действия патентов успел бы истечь. Именно так случилось с патентом Таунса и Шавлова, который отнюдь не обогатил своих держателей. А в 1991 г. судьба сделала Гулду еще один подарок – его имя внесли в реестр Национального Холла Славы изобретателей. Остается добавить, что Гулд скончался в сентябре прошлого года, через четыре месяца после истечения срока своего последнего патента.

*По материалам еженедельника "Компьютерра"*

# Как работает лазерный принтер и ксерокс

Каждый из Вас слышал о лазерных принтерах, в большинстве офисов лазерные принтеры используются для печати документов.

Мы все знаем о **качестве печати лазерного принтера**, но очень немногие смогут ответить на вопросы о принципах работы лазерного принтера:

- Какую роль играет лазер в лазерном принтере?
- В чем разница между лазерным принтером и фотокопировальной машиной (ксероксом)?
- Можно ли использовать одну систему для печати документов с компьютера и делать фотокопии документов?
- В чем преимущества лазерного принтера по сравнению с матричным принтером?

На следующих страницах мы даем ответ на эти и подобные вопросы, рассматриваем физические принципы, которые лежат в основе работы лазерного принтера и ксерокса.

**Лазерный принтер был изобретен корпорацией Ксерокс (Xerox) в 1972 году.** Он впервые дал возможность получить с помощью компьютера документ полиграфического качества.

**Процесс печати разбивается на две стадии:**

Получение информации, которую нужно печатать и передача его изображения на печатающее устройство. В развитии печатающих устройств можно выделить основные этапы:

Печатающая машинка.

Матричный принтер.

Лазерный принтер (параллельно появились струйные принтеры, которые мы не будем рассматривать).

**1. Передача информации из печатающего устройства на бумагу.**

**Фотокопировальная машина (ксерокс) и лазерный принтер**

Существует большое сходство в процессе печати на лазерном принтере и в фотокопировальной машине – ксероксе. В этих системах процессы переноса информации на бумагу одинаковы, основная разница состоит в способах передачи информации на фоточувствительный барабан:

- **В ксероксе** – оптическое изображение содержания документа создается линзовой оптической системой. Движущееся яркое освещение сканирует документ и каждая часть документа отображается на фоточувствительном барабане.



Рис. 1. Фотокопировальная машина ("ксерокс")

- **В лазерном принтере** – информация очень быстро преобразуется на фоточувствительный барабан **по одной точке** с помощью лазерного луча, который сканирует фоточувствительный барабан.



Рис. 2. Лазерный принтер

### *Историческая справка*

В развитии печатающих устройств можно выделить основные этапы:

Печатающая машинка.

Матричный принтер.

Лазерный принтер (параллельно появились струйные принтеры, которые мы не будем рассматривать).

В **печатающей машинке** каждая буква или символ имеют собственную клавишу на клавиатуре.

В первых машинках был простой механизм связи клавиши и рычага, который ударял по ленте с чернилами. В результате на бумаге появлялся знак требуемой формы.

Позже появились машинки со специальным шариком, на котором были нанесены все буквы и знаки. При печати нужного знака шарик поворачивался на соответственный угол и ударял по красящей ленте. Такое нововведение позволяло использовать знаки различной форм и размеров: достаточно было заменить шарик.

**Матричные принтеры** – первый матричный принтер был похож на печатающую машинку. Механическое давление на красящую ленту создавало изображение на бумаге.

Разница состояла в том, что в принтерах не было отдельных знаков и символов. Требуемое изображение создавалось соответствующим набором точек. Стандартное число точек (игловок в печатающей головке) на один символ составляет 9, 18 и 24. **Качество печати увеличивается при увеличении числа игловок.** Для каждой буквы, символа в компьютере имеется специальный код, который передается на принтер. Принтер преобразует этот код в удары игловок для формирования по точкам нужного изображения.

Первые матричные принтеры печатали документ стандартным шрифтом постепенно, строчка за строчкой. Первые компьютеры передавали документ на принтер тоже постепенно, буква за буквой.

В дальнейшем принтеры стали оснащаться **внутренней памятью**, поэтому за один раз компьютер передавал порцию информации, принтер ее сохранял и постепенно печатал.

Сейчас матричные принтеры имеют большой объем внутренней памяти, поэтому они могут печатать разными шрифтами, могут печатать графики, чертежи и письма различной формы. Недостаток матричного принтера состоит в том, что они **печатают очень медленно и очень шумно.**

**В лазерном принтере** существует **собственный процессор**, который контролирует внутреннюю память принтера. Основная часть преобразования информации в виде электрических импульсов, которые приходят из компьютера, в изображение на бумаге выполняется лазерным принтером. Таким образом, компьютер просто посылает нужную информацию на принтер и затем освобождается от процесса печати.

**Процесс переноса информации на бумагу в лазерном принтере очень похож на процесс переноса информации в фотокопировальной машине – ксероксе.** Поэтому мы сначала рассмотрим этот процесс.

### **Объяснение переноса информации на бумагу**

Перенос информации на бумагу в лазерном принтере осуществляется процессом, который называется "**электрофотографией**".

Это название объединяет все процессы создания изображения, которые основаны на **фотоэлектрическом эффекте**. В ксероксах в качестве источников света используются лампы различных типов. В современных фотокопировальных машинах, в которых комбинируются процессы лазерной печати и фотокопирования, в качестве источника света используется лазер.

Так как название электрофотография включает много процессов, мы рассмотрим только наиболее общий процесс, который называется **ксерографией**.

## Процесс ксерографии

Процесс ксерографии создает изображение на бумаге за 5 этапов, которые обозначены на рис. 3.

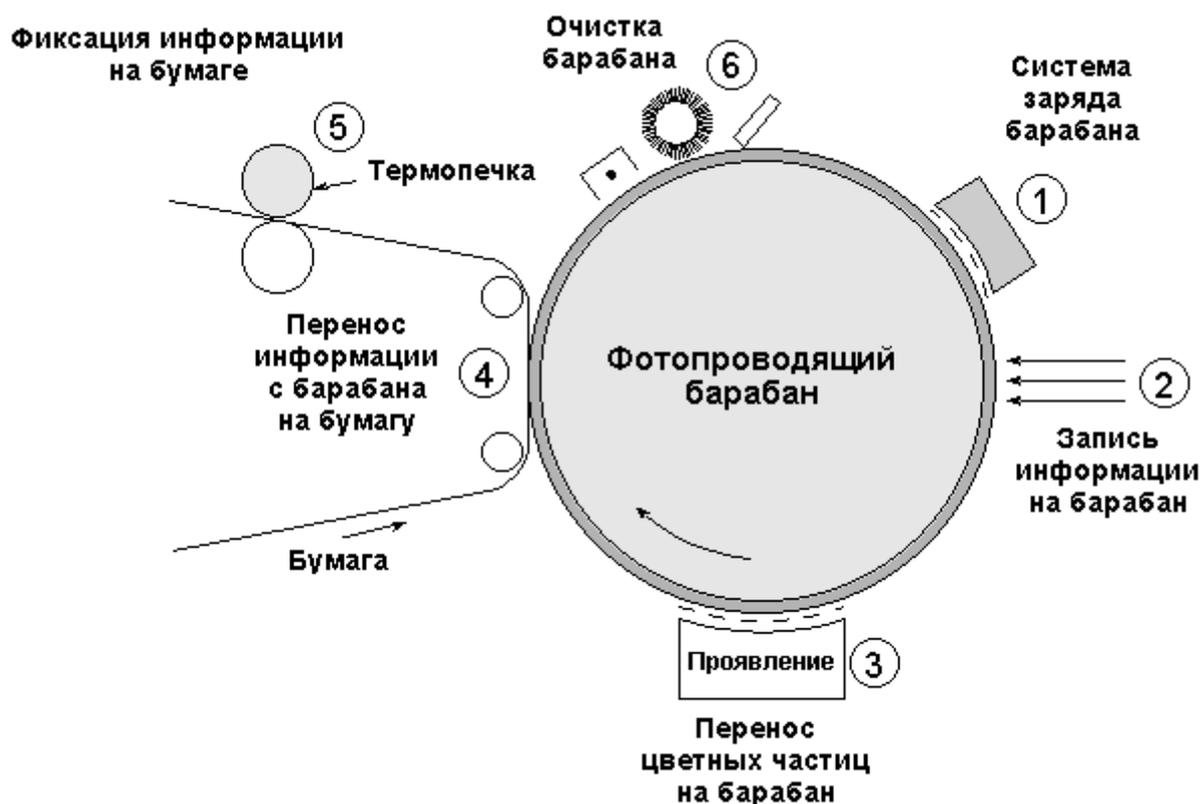


Рис. 3. Основная система ксерографии

Система ксерографии основана на использовании **вращающегося металлического барабана**, который имеет **тонкое фоточувствительное диэлектрическое покрытие**. Это покрытие **чувствительно к облучению светом** и называется **фотопроводником**.

Примеры фотопроводниковых материалов: аморфный селен, сульфид кадмия.

- Толщина тонкого диэлектрического слоя равна 20-100 мкм
- Электрическое сопротивление этих материалов в темноте составляет величину порядка  $10^{14}$ - $10^{16}$  Ом-см.

Поэтому электрический заряд на этом диэлектрическом слое остается до тех пор, пока слой не будет облучен светом.

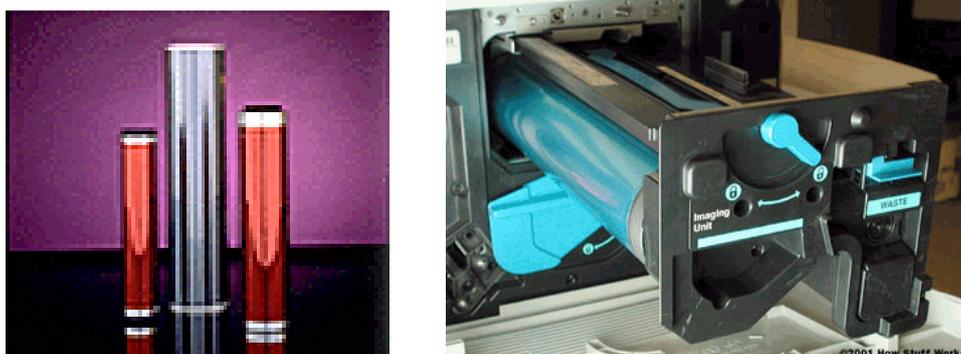


Рис. 4. Фотопроводящие барабаны

**При облучении светом фотопроводящий слой начинает проводить ток.** Это означает, что если мы сначала зарядим фоточувствительный барабан положительным зарядом, а затем осветим только определенные части барабана, то заряд уменьшится только в освещенных областях.

### **Стадии печати:**

**Процесс печати состоит из пяти этапов:**

**1. Вращающийся фоточувствительный барабан заряжается положительно,** плотность заряда на поверхности одинакова. Барабан связан с высоковольтным источником (тысячи вольт), который обеспечивает процесс заряда. Высокое напряжение создает электрический разряд (коронный разряд). В электрическом разряде происходит **ионизация молекул воздуха**, заряженные ионы оседают на барабане.



Рис. 5. Устройство коронного разряда

### **2. Перенос данных на барабан селективным освещением барабана:**

**В лазерном принтере,** информация переносится на барабан с помощью **лазерного луча**, который сканирует область фоточувствительного барабана. Данные переносятся лазерным лучом в процессе управляемой компьютером модуляции (детали этого процесса будут даны позже).

**В фотокопировальной машине** очень яркий свет от галогенной лампы освещает копируемый документ. Копируемый документ является источником света в оптической системе, которая состоит из нескольких линз. Эта система формирует изображение документа на фоточувствительном барабане. Если свет попадает на барабан, происходит уменьшение электрического заряда, т.к. барабан в этом месте становится проводящим. Практически, **электрический заряд остается только на неосвещенных местах барабана**, т.е. на тех местах, где исходный документ имеет черный цвет. Именно эти места и несут информацию на белом листе бумаги.



Рис. 6. Рабочий стол ксерокса с оригиналом документа

### 3. Создание электростатического изображения на вращающемся фоточувствительном барабане.

Вращающаяся поверхность фоточувствительного барабана проходит рядом с контейнером (картриджем), который содержит **цветной порошок (тонер)**.

Цветной порошок состоит из очень мелких частиц, средний диаметр которых равен 10 мкм.

Эти частицы порошка смешиваются с магнитным материалом, который покрыт полимером. Магнитный материал вызывает притягивание этих частиц к магнитной "щетке", которая расположена рядом с фоточувствительным барабаном.

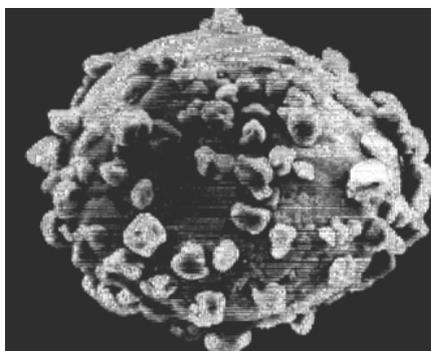


Рис. 7. Частица тонера

Частицы порошка заряжаются (различными, основанными на трении, методами) зарядом, знак которого противоположен знаку заряда фоточувствительного барабана.

Эти заряженные частицы **электростатически притягиваются** к областям, которые остались на поверхности барабана заряженными, оседают на них.

Этот процесс практически создает электростатическое отображение информации.

### 4. Перенос изображения с фоточувствительного барабана на бумагу.

Когда бумага проходит рядом с барабаном (см. рис. 3), ее обратная сторона находится под очень большим электрическим потенциалом. За счет **электростатического притяжения** между заряженными частицами порошка и

этой стороной бумаги происходит перенос цветных частиц тонера с барабана на бумагу.

## **5. Фиксация изображения на бумаге.**

Бумага с цветными частицами проходит через "термопечку", температура которой составляет несколько десятков градусов Цельсия. При высокой температуре частицы порошка фиксируются на бумаге ("вплавляются" в бумагу).

Примером этого процесса может служить прохождение бумаги через два соприкасающихся вращающихся цилиндра, один из которых нагрет до высокой температуры.

Именно по этой причине лист бумаги после лазерного принтера или ксерокса выходит теплым.

Сразу после пятого этапа оставшиеся частицы порошка очищаются с барабана (этап 6 на рис. 3) и барабан снова возвращается к исходному состоянию, т.е. заряжается положительно (этап 1).

Фоточувствительный барабан позволяет до замены сделать несколько тысяч копий.

Описанный процесс используется в большинстве фотокопировальных машин. Обычно эти машины называются "**Ксерокс**", так как первая машина была разработана компанией Хerox. Сейчас такие машины производятся многими фирмами.

Аналогичный процесс, в котором используется не фоточувствительный барабан, а фоточувствительная бумага, называется "**электрофакс**".

### **Вывод**

**Процесс ксерографии – это процесс создания электростатического изображения селективным разрядом предварительно заряженной фоточувствительной поверхности.**

Проявление этого электростатического изображения основано на **физическом процессе** притягивания заряженных цветных частиц (тонер).

В отличие от проявления киноплёнок в фотографическом процессе, в процессе ксерографии не используются химические реакции. Важно, что ксерография принципиально **сухой фотохимический процесс**, в котором не изменяются свойства фоточувствительного барабана и **не требуются химикаты для процесса проявления**. Единственным расходным материалом являются частицы тонера, которые вплавляются в бумагу на заключительном этапе нагрева.

Порошок тонера состоит из оксида цинка с добавлением красящего вещества.

Так как весь процесс основан на селективном освещении фоточувствительного барабана, ясно, что с момента первоначального заряда барабана до переноса частиц на бумагу процесс должен проходить **в полной темноте**, за исключением освещения разрядом.

После анализа процесса создания изображения на бумаге, который является общим для фотокопировальных машин и лазерных принтеров, рассмотрим некоторые особенности работы лазерного принтера.

В лазерном принтере имеется **оптическая система для последовательного точечного освещения фоточувствительного барабана**. Можно сказать, что информация записывается "световой ручкой".

Схема оптической системы лазерного принтера показана на рис. 8.

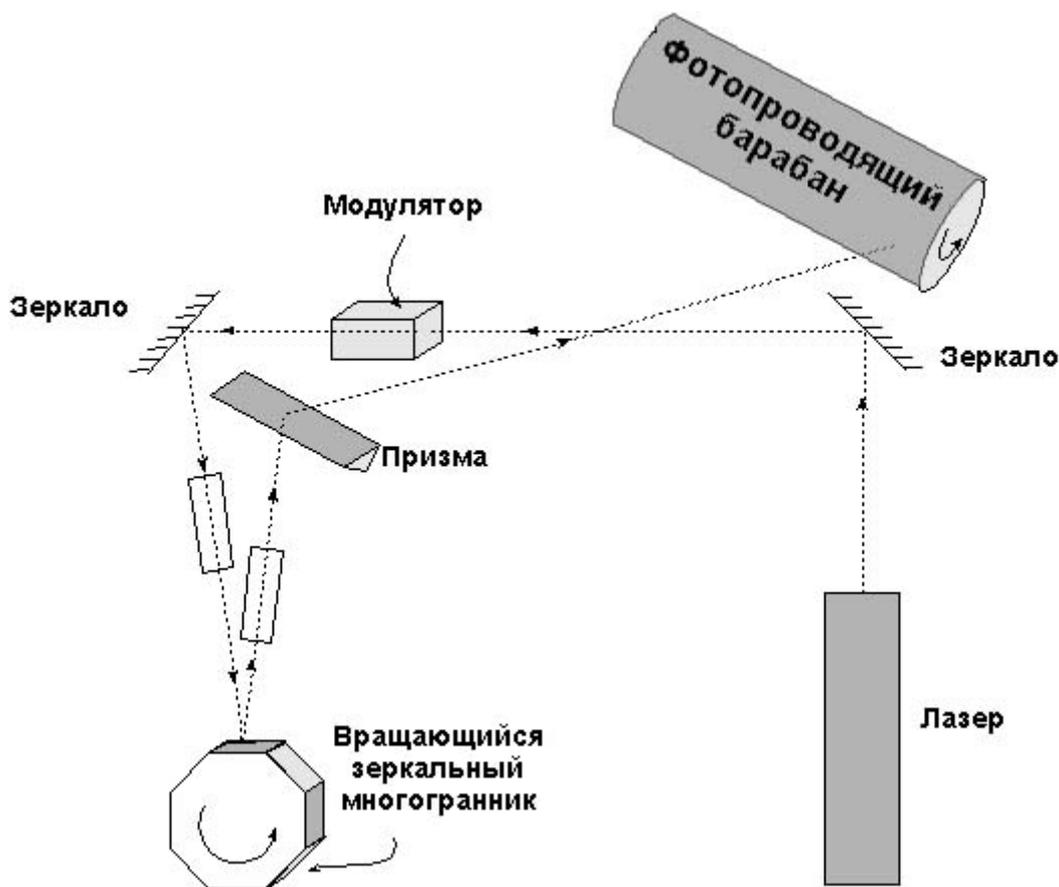


Рис. 8. Схема оптической системы лазерного принтера.

Запись данных осуществляется двумя системами в два этапа:

1. Система для контроля интенсивности лазерного луча, для записи конкретной информации в данную точку.
2. Оптическая сканирующая система, которая перемещает луч для записи информации в каждой точке светочувствительного барабана.

### 1. Модулятор для контроля интенсивности лазерного луча:

Данные для печати хранятся в компьютере и их нужно преобразовать в оптический сигнал. Процесс преобразования данных в оптический сигнал называется **модуляцией**. Важно, что при этом происходит изменение интенсивности лазерного луча, который сканирует фоточувствительный барабан. Именно модулятор определяет информацию, которая записывается в конкретной точке барабана.

В современных лазерных принтерах источником света является **лазерный диод**. Так как при изменении тока изменяется и интенсивность излучения лазерного диода, то специального модулятора не требуется.

Простые и надежные **лазерные диоды излучают** в ближней инфракрасной области – 680-850 нм.

Однако, фоточувствительные барабаны не чувствительны в этой спектральной области. Для лазерных диодов были разработаны специальные органические фоточувствительные барабаны.

Так как интенсивность лазерного диода можно менять непрерывным способом, то можно **освещать фоточувствительный барабан лучом различной освещенности**. Таким образом, на лазерном принтере можно печатать различные оттенки серого (или печатать в различных цветах).

## **2. Оптическая сканирующая система**

Оптическая сканирующая система управляет направлением лазерного луча, который должен попадать в различные точки вращающегося фоточувствительного барабана. Луч сканирует поверхность барабана точку за точкой, линию за линией.

Управление интенсивностью лазерного луча позволяет записывать нужную информацию (различные цвета) в определенные точки фоточувствительного барабана.

Лазерный луч проходит через линзы и попадает на зеркальную призму, которая вращается с постоянной высокой скоростью (см. рис. 8).

### **Объяснение механизма сканирования:**

Лазерный луч распространяется в определенном направлении.

Из-за вращения призмы в каждый момент времени зеркало находится на пути луча. На каждом плоском зеркале лазерный луч отражается в каждый момент в разные направления.

В результате, угол падения и отражения луча непрерывно изменяется.

Каждое вращающееся плоское зеркало призмы создает лазерный луч, который сканирует линию.

После сканирования одной линии на пути лазерного луча появляется новое плоское зеркало, и луч начинает сканировать новую линию.

Для того чтобы не было повторного сканирования линии, фоточувствительный барабан вращается со строго определенной скоростью.

Итак, вращающееся плоское зеркало создает горизонтальную линию, вращающийся барабан обеспечивает вертикальное сканирование (переход с линии на линию).

### **Оптическая система**

Лазерный луч проходит через сложную оптическую систему линз и зеркал на вращающийся **фоточувствительный барабан**.

Для увеличения разрешения изображения необходимо получить на барабане лазерное пятно **минимального размера** (размер ограничивается явлением дифракции). При уменьшении размера пятна, можно получить больше точек для формирования изображения. В этом случае на барабан можно записать более

мелкие детали. Именно это обстоятельство определяет **использование лазера**, а не "обычного" источника света.

Так как интенсивность лазерного излучения изменяется непрерывно, экспозиция барабана происходит с разной интенсивностью и на бумаге можно получить различные оттенки серого цвета (в лазерном принтере – различные цвета).

После переноса информации на фоточувствительный барабан происходит процесс ксерографии, который был рассмотрен ранее.

Существует множество вариантов процесса ксерографии, например, фоточувствительный барабан с отрицательным зарядом и положительно заряженными частицами тонера.

Мы рассмотрели только **основные принципы работы лазерного принтера**.

Так как информация, которая посылается на лазерный принтер, представлена в цифровой форме, то ею **легко управлять**. Например, легко напечатать картинку как черную на белом или наоборот, как белую на черном ("негативное изображение").

### **Будущее лазерных принтеров**

Как мы уже знаем, **процессы печати** в лазерном принтере и ксероксы одинаковы.

Так как в лазерном принтере имеется **оптическая сканирующая система**, то можно одну и ту же систему для выполнения различных функций.

Практически, все новые офисные машины имеют много функций:

1. Лазерный принтер.
2. Фотокопировальная машина.
3. Факс.
4. Оптический сканер.

Если такое устройство соединено с телефонной линией, то мы получаем полную офисную систему.



## Как работает лампа-вспышка

Если вы знаете, как работает фотоаппарат (см., например статью Как работает фотоаппарат – How Cameras Work), то понимаете, что требуется достаточно много *света* для получения яркого изображения на *фото пленке*. При съемке в помещении, когда освещение не слишком яркое, вы должны или увеличить длительность экспозиции, т.е. увеличить "выдержку" или увеличить освещенность на небольшой промежуток времени для получения хорошей фотографии. Увеличение выдержки в ряде случаев не дает хорошего результата, например, при съемке движущихся объектов. В этом случае получаются расплывчатые "смазанные" фотографии.



**Электронная лампа-вспышка** представляет собой простое и дешевое устройство для решения этой характерной проблемы фотографирования. Её единственная задача состоит в том, чтобы излучить короткую вспышку яркого света, в тот момент, когда вы открываете затвор фотоаппарата. Эта вспышка света освещает комнату на долю секунды, когда открыта фотопленка.

В этой статье сайта *HowStuffWorks*, мы выясним точно, как эти устройства выполняют свою важную задачу. Кроме того, на примере лампы-вспышки мы увидим, как работают вместе основные электронные компоненты в простой электронной схеме.

### **Как создается вспышка света**

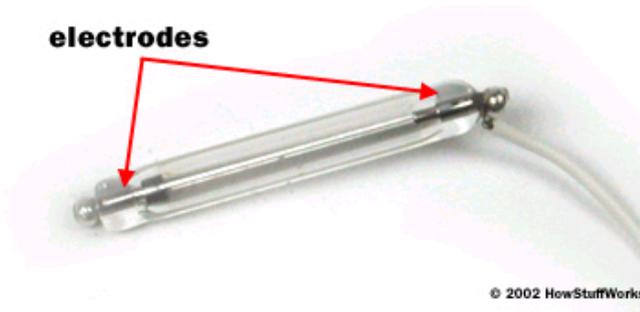
Лампа-вспышка, которой оснащены фотоаппараты типа "щелкнул-снял" состоит из трех главных частей.

- Маленькая батарейка, которая является источником питания.
- Газоразрядная лампа, которая фактически и производит вспышку света.
- Электронная схема (состоит из ряда электронных компонентов – деталей), которая соединяет источник питания с газоразрядной лампой.

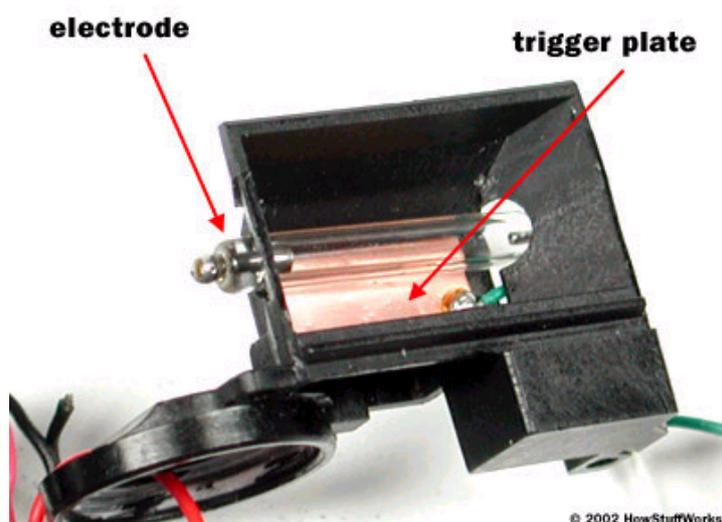
Два компонента на концах системы лампы-вспышки очень просты. Когда Вы подключаете два полюса батарейки к электрической цепи, то электродвижущая сила батарейки вынуждает электроны "протекать" через электрическую схему от одного полюса до другого. Перемещающиеся электроны, другими словами, **электрический ток**, передают энергию различным элементам, включенным в

электрическую цепь (см., например, статью – *How Batteries Work* - Как работают батарейки).

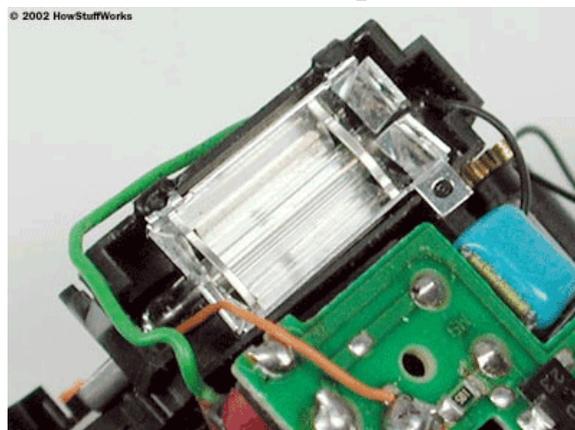
Газоразрядная лампа очень похожа на неоновую или люминесцентную лампу (лампу дневного света). Она представляет собой трубку, заполненную инертным газом – **ксеноном**. На каждом конце лампы имеются электроды, в середине трубки находится **металлическая пластинка – поджигающий электрод**.



**Типичная трубка лампы-вспышки, которая вытаскивается из фотокамеры, напоминает миниатюрную люминесцентную лампу.**



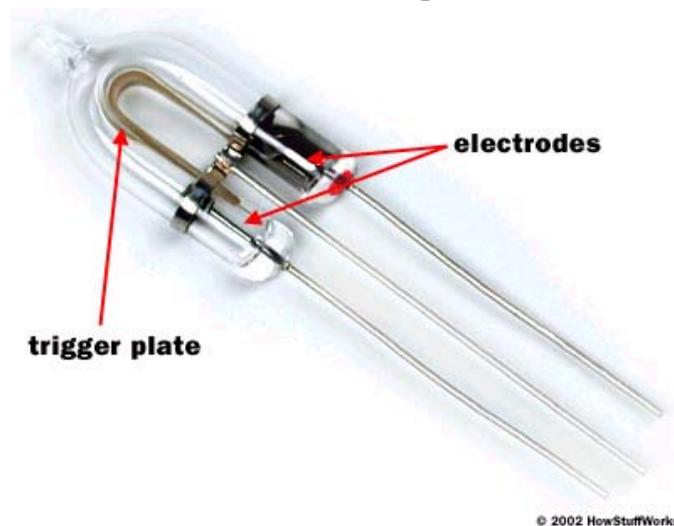
**Рядом с газоразрядной трубкой находится поджигающий электрод**



**Лампа находится внутри отражателя, который направляет свет лампы вперед.**

Для получения вспышки света нужно, чтобы через газ в трубке прошел электрический ток – движущиеся носители заряда (электроны и ионы) от одного электрода до другого. Так как при этом в трубке перемещаются свободные электроны, то они при столкновении переводят атомы ксенона в возбужденное состояние. Затем возбужденные атомы ксенона переходят в основное состояние и при этом излучают фотоны, которые мы воспринимаем в данном случае как белый свет (см., например, *How Light Works* – Как работает свет).

Если газ находится в обычном состоянии, то ток через него не может протекать, т.к. **свободных электронов** в газе практически нет – они все связаны с атомами. В газе почти нет заряженных частиц (при нормальных условиях в каждом кубическом сантиметре газа находится лишь 10-20 ионов). Для того, чтобы сделать газ проводящим, вы должны его ионизировать.



**Другая конструкция лампы-вспышки: в этой изогнутой трубке поджигающий электрод прикреплен прямо на стекло трубки**

Какова роль это поджигающего электрода? Если Вы прикладываете импульсное высокое напряжение к этой пластине, она будет сильно притягивать или отталкивать те свободные электроны, небольшое количество которых всегда есть в газе. Электроны могут разогнаться до такой скорости, что при столкновении с атомами смогут их ионизировать – выбить электроны. Атом, потерявший один или несколько электронов, становится положительным ионом.

Свободные электроны имеют отрицательный заряд. Если электроны свободны, то они будут двигаться к положительно заряженному электроду и удалятся от отрицательно заряженного электрода. Движущиеся электроны сталкиваются с другими атомами, при этом атомы теряют электроны, которые также ионизируют газ. Ускоряющиеся электроны сталкиваются с атомами ксенона и переводят их возбужденное состояние. Затем атомы ксенона переходят в основное состояние и излучают при этом свет (см., например, *How Fluorescent Lamps Work* – Как работает люминесцентная лампа).

Для того чтобы этот процесс осуществился, нужно относительно высокое напряжение. Для того, чтобы электроны двигались между электродами, нужно

около 200 В, но требуется несколько тысяч вольт, чтобы получить достаточное число электронов, которые сделают газ проводящим.

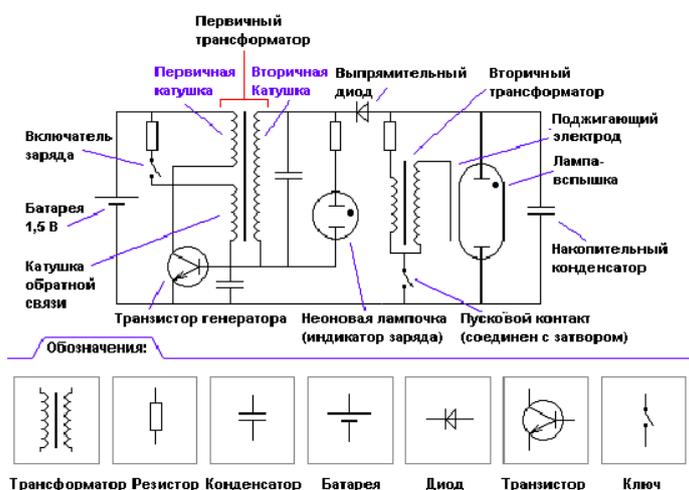
Типичная батарейка лампы-вспышки обеспечивает напряжение только 1,5 В, поэтому электрическая схема должна существенно повысить то напряжение. В следующем разделе мы выясним, как это происходит.

### Повышение напряжения

В прошлом разделе, мы говорили о том, что электрическая схема лампы вспышки должна преобразовать низкое напряжение батарейки в высокое напряжение для того, чтобы зажечь ксеноновую лампу. Существует много способов для того, чтобы создать такую схему **повышения напряжения**, но большинство схем содержат одни и те же компоненты. Работа всех этих компонентов объясняются в других статьях [HowStuffWorks](#):

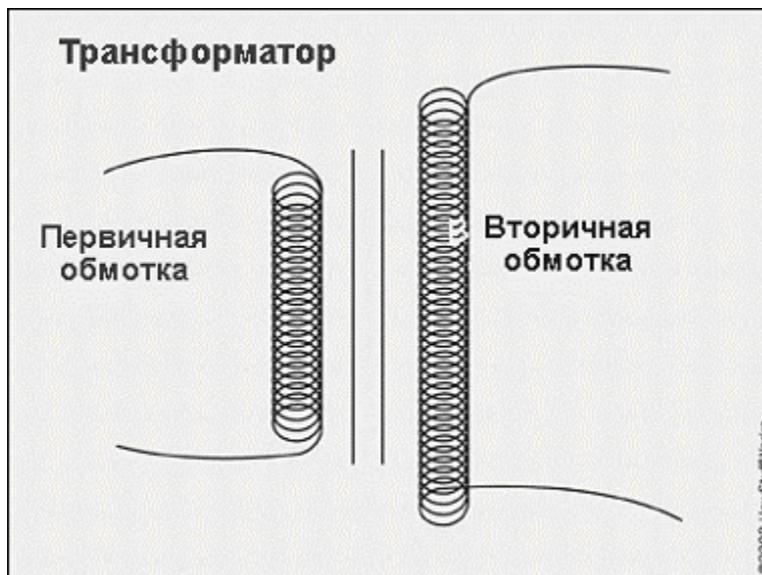
- **Конденсаторы** – устройства, которые хранят энергию, собирая заряды на своих пластинах (см. [How Capacitors Work](#) – Как работают конденсаторы).
- **Катушки индуктивности** – устройства, которые намотаны длинным проводом, хранят энергию, создавая магнитное поле (см. [How Inductors Work](#) – Как работают катушки индуктивности).
- **Диоды** – полупроводниковые устройства, через которые ток проходит только в одном направлении (см. see [How Semiconductors Work](#) – Как работают полупроводники).
- **Транзисторы** – полупроводниковые устройства, которые могут действовать как электрически управляемые выключатели или усилители (см. [How Amplifiers Work](#) – Как работают усилители).

На следующей схеме показано, как все эти элементы включены в основную электрическую схему лампы-вспышки.



Эта схема может показаться достаточно сложной, если ее рассматривать полностью. Для упрощения задачи мы разделим схему на составляющие части и рассмотрим работу каждой из них.

Давайте начнем с "сердца" схемы – главного трансформатора, устройства, которое фактически повышает напряжение. Трансформатор состоит из двух катушек индуктивности, которые находятся друг от друга на небольшом расстоянии (например, можно было бы намотать одну катушку вокруг другой или намотать обе катушки вокруг железного сердечника).



Если вы знаете, как работает электромагнит (например, How Electromagnets Work – Как работает электромагнит), то вы понимаете, что ток, проходящий через катушку из провода, создает магнитное поле. Если вы знаете, как работает катушка индуктивности, (например, How Inductors Work – Как работают катушки индуктивности), то вы понимаете, что переменное магнитное поле, создаваемое переменным электрическим током, будет создавать переменное напряжение в проводнике. Основная идея работы трансформатора состоит в том, чтобы изменять ток в одной катушке индуктивности (первичная обмотка), чтобы изменяющийся магнитный поток, проходящий через другую катушку (вторичная обмотка), создавал напряжение во второй катушке.

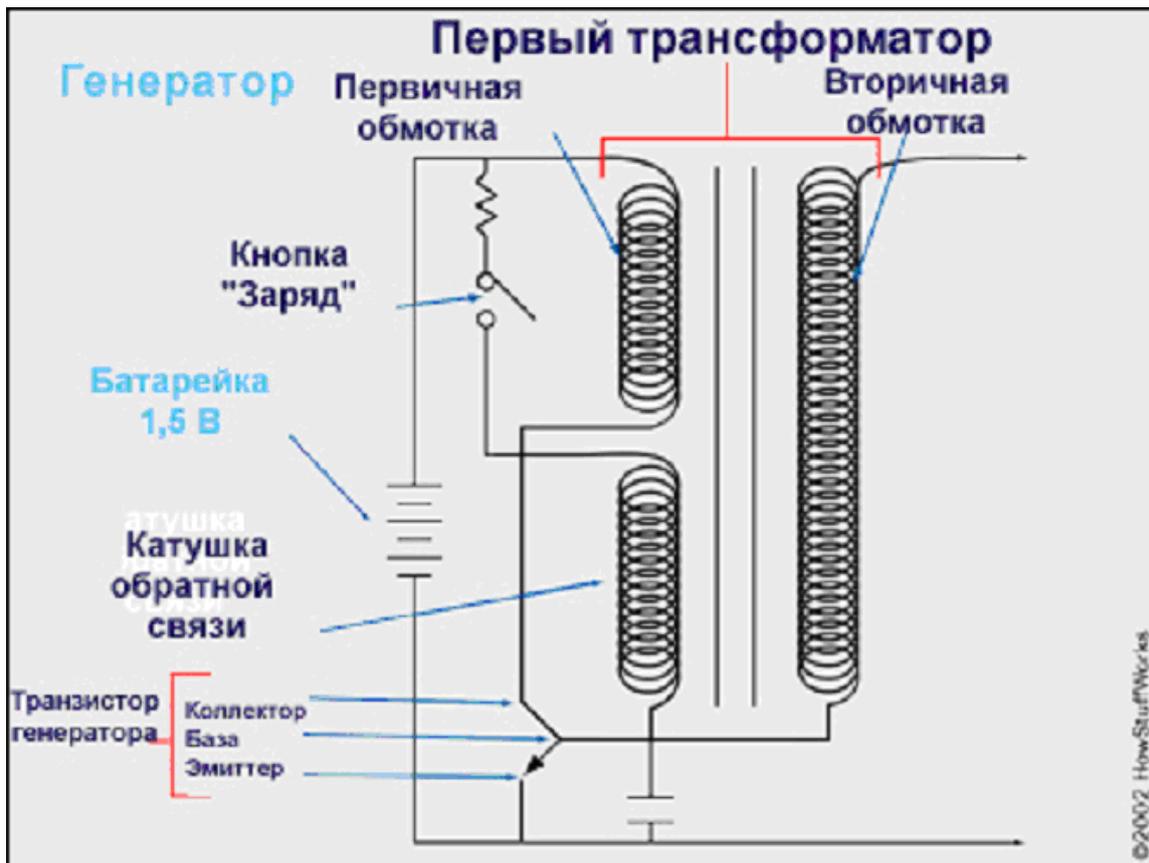
Если Вы будете менять число витков в каждой катушке – Вы можете повышать (или уменьшать) **напряжение** на вторичной обмотке относительно первичной. В повышающем трансформаторе, который используется в электрической схеме лампы-вспышки, вторичная обмотка имеет намного больше витков, чем первичная. В результате, соответственно, **напряжение** на вторичной обмотке намного больше напряжения на первичной обмотке. Но, **сила тока** во вторичной обмотке будет намного меньше, чем сила тока в первичной обмотке.

Для повышения напряжения таким способом нам потребуется изменяющийся ток, похожий на **переменный ток** в электрической проводке в вашем доме. Но, при использовании батарейки в цепи протекает **постоянный ток**, который не изменяется. Магнитное поле в катушках индуктивности изменяется только при первоначальном подключении батарейки, когда происходит установление величины постоянного тока. В следующем разделе мы выясним, как эта проблема решается в электрической схеме лампы-вспышки.

## Генератор и конденсатор

В предыдущем разделе, мы узнали, что для работы трансформаторов необходим меняющийся магнитный поток. Электрическая схема лампы-вспышки обеспечивает изменяющийся магнитный поток, непрерывно прерывая ток, протекающий от батарейки – она пропускает частые короткие импульсы постоянного тока и при этом создается непрерывно изменяющееся магнитное поле.

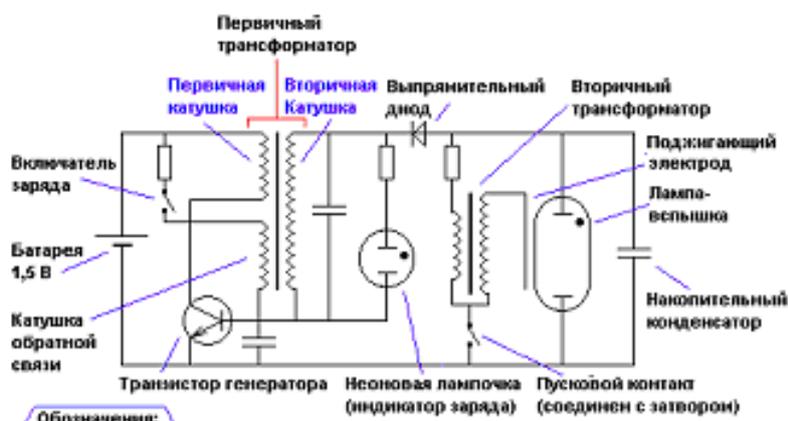
В электрической схеме для этой цели используется простой генератор. Главные элементы генератора – первичные и вторичные обмотки трансформатора, еще одна обмотка (обмотка обратной связи) и **транзистор**, который действует как электрически управляемый выключатель.



Когда Вы нажимаете **кнопку заряда**, короткий импульс тока проходит от батареи через катушку обратной связи к **базе** транзистора. Приложение тока к базе транзистора вызывает прохождение тока от **коллектора** транзистора к **эмиттеру** – транзистор проводит ток (см. How Amplifiers Work – Как работают усилители).

Когда транзистор "включен" таким образом, импульс тока может течь от батареи через первичную обмотку трансформатора. Импульс тока вызывает появление напряжения во вторичной обмотке и в обмотке обратной связи. Это напряжение в обмотке обратной связи вызывает ток через базу транзистора, транзистор снова становится проводящим и процесс повторяется. Электрическая схема продолжает прерывать себя, таким образом, постепенно повышая напряжение на трансформаторе (конденсаторе). Этот периодический процесс проис-

ходит с высокой частотой. Когда происходит заряд, то вы можете услышать звук высокого тона – "завывание".



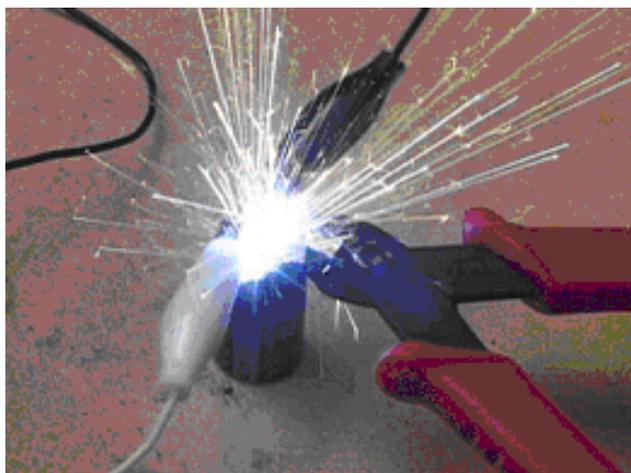
Ток с высоковольтной катушки трансформатора проходит через диод, который действует как **выпрямитель**, т.е. ток протекает только в одном направлении. Меняющийся ток от трансформатора преобразуется в постоянный ток.



### Конденсатор лампы-вспышки обычной фотокамеры типа "щелкнул-снял"

Электрическая схема лампы-вспышки хранит этот электрический заряд в конденсаторе большой емкости при большом напряжении. Подобно батарее конденсатор сохраняет заряд до тех пор, пока он не будет подключен к замыкающей цепи.

Конденсатор все время подключен к двум электродам на трубке лампы-вспышки, но пока ксенон не ионизирован, лампа не может проводить ток и конденсатор не разряжается. Цепь конденсатора связана через резистор с небольшой неоновой лампой. Когда напряжение в конденсаторе достаточно велико, ток проходит через резистор и зажигается небольшая неоновая лампочка. Она работает как световой индикатор и сообщает Вам, когда вспышка готова для использования.



**Конденсатор в типичной схеме лампы-вспышки может хранить достаточно много энергии. Мы заряжали один из конденсаторов, а затем разряжали, соединив вместе два наконечника.**

**(Дети, не пробуйте делать этот опыт дома!)**

**Пуск** лампы-вспышки связан с затвором фотокамеры. Когда Вы делаете снимок, кнопка замыкается, соединяя конденсатор со вторым трансформатором. Этот трансформатор повышает напряжение 200 В конденсатора до 1 000 – 4 000 В и подает высокое напряжение на поджигающий электрод, который находится рядом с лампой-вспышкой. Мгновенное высокое напряжение на поджигающем электроде обеспечивает необходимую энергию ионизации ксенона – газ становится проводящим. Вспышка света происходит синхронно с открытием затвора фотокамеры.

Различные электронные лампы-вспышки могут иметь более сложную схему, чем рассмотренную нами, но большинство из них работает на основе рассмотренного принципа. Задача состоит просто в том, чтобы повысить напряжение батарейки для того, чтобы зажечь небольшую газоразрядную лампу.

### **Ведущая и ведомая лампы-вспышки**

Профессиональные фотографы часто устанавливают несколько ламп вокруг предмета съемки, чтобы достигнуть лучшего эффекта освещения. При этом одна лампа (ведущая) может запускаться затвором фотокамеры, а другая (ведомая) запускается от вспышки света, излучаемого ведущей.

Ведомая лампа имеет небольшой фотоэлемент, который запускает цепь поджига лампы, когда он обнаруживает внезапный импульс света.

*Научно-популярное издание*

автор-составитель

***Богуславский Александр Абрамович***

профессор кафедры теоретической физики КГПИ

## **Одомашненная современная физика**

Часть 1

Компьютерная верстка Богуславского А. А.

Редактор Капырина Т. А.

---

Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная

Сдано в набор

Подписано в печать

Усл. печ. л. 9. Тираж 100 экз.

Заказ №

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в копировально-множительном центре  
ГОУ ВПО МО "КГПИ"

140410, г. Коломна, ул. Зеленая, д. 30. Коломенский госпединститут