

Разработка макета алмазного детектора положения и интенсивности рентгеновского пучка синхротронного излучения и исследование его нелинейности в интенсивных потоках рентгеновского излучения

Работу выполнил: Шамплетов Никита, студент 213м группы

Научный руководитель: д.ф.—м.н. Васильев Андрей Николаевич

28 мая 2025



Физический факультет МГУ
Кафедра общей ядерной физики

Россия активно занимается развитием синхротронных и нейтронных исследований

Описание федеральной научно-технической программы

Утверждена ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры

- **Старт программы:** в марте 2020 года в целях реализации указа президента от 25 июля 2019г. №356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации» и утверждена ФНТП.
- **Цели:**
 - Обеспечение создания и развития исследовательской инфраструктуры в РФ
 - Комплексное решение задач ускоренного развития синхротронных и нейтронных исследований, необходимых для создания прорывных технологий
- **Объём финансирования:** 453 млрд руб.
- **Срок действия:** до 2030 года и на дальнейшую перспективу.

Создаваемые и/или модернизируемые «мегасайенс-установки» и комплексы ядерной медицины

- **«КИСИ-Курчатов».** Курчатовский специализированный источник синхротронного излучения
- **ЦКП «СКИФ».** Источник синхротронного излучения поколения 4+ «Сибирский кольцевой источник фотонов».
- **«СИЛА».** Принципиально новый перспективный источник, превосходящий по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники синхротронного излучения.
- **«ОМЕГА».** Прототип импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скалывающего типа.
- **«РИФ».** Уникальная научная установка класса «мегасайенс» на о. Русский
- И другие.

Настоящая работа сконцентрирована вокруг проекта «СИЛА»

Утверждена ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры

- **Старт программы:** в марте 2020 года в целях реализации указа президента от 25 июля 2019г. №356 «О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации» и утверждена ФНТП.
- **Цели:**
 - Обеспечение создания и развития исследовательской инфраструктуры в РФ
 - Комплексное решение задач ускоренного развития синхротронных и нейтронных исследований, необходимых для создания прорывных технологий
- **Объём финансирования:** 453 млрд руб.
- **Срок действия:** до 2030 года и на дальнейшую перспективу.

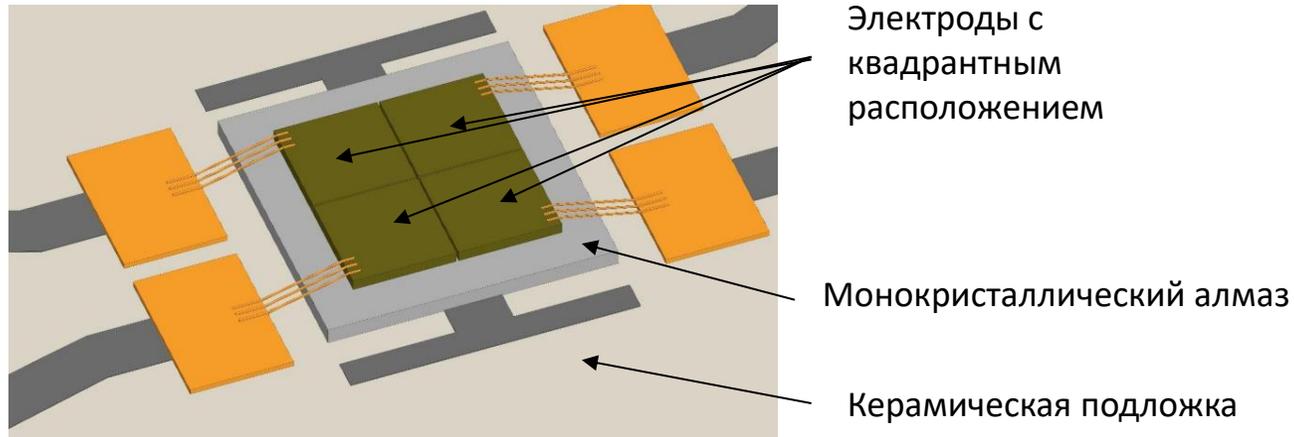
Создаваемые и/или модернизируемые «мегасайенс-установки» и комплексы ядерной медицины

- **«КИСИ-Курчатов».** Курчатовский специализированный источник синхротронного излучения
- **ЦКП «СКИФ».** Источник синхротронного излучения поколения 4+ «Сибирский кольцевой источник фотонов».
- **«СИЛА».** Принципиально новый перспективный источник, превосходящий по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники синхротронного излучения.
- **«ОМЕГА».** Прототип импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скалывающего типа.
- **«РИФ».** Уникальная научная установка класса «мегасайенс» на о. Русский
- И другие.

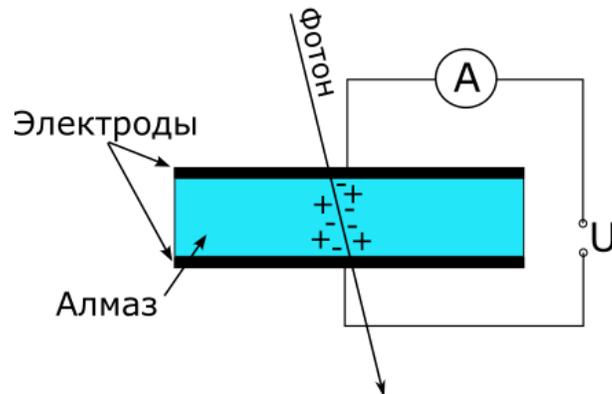
Предмет работы: алмазный детектор рентгеновских лучей

Описание цели работы

Эскиз датчика (нижняя часть не показана)



Принцип работы датчика



Алмазный датчик – полупроводниковый твердотельный датчик.

- Пролетающий сквозь среду датчика фотон рождает электрон-дырочные пары.
- Заряды разносятся полем электродов и детектируются аппаратурой.

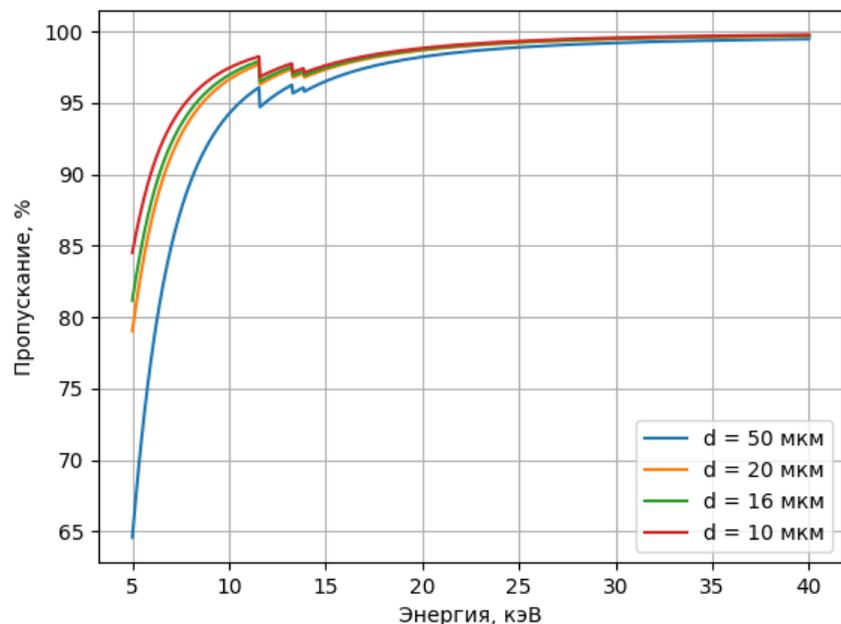
Цель работы

- Разработать прототип позиционно чувствительного детектора рентгеновских лучей на основе монокристаллического алмаза
- Оценить пределы его применимости:
 - Коэффициент пропускания в целевом диапазоне 5 кэВ – 40 кэВ
 - Предельный поток фотонов J [фот./сек]
 - Диапазон генерируемых токов
 - Предельно допустимая концентрация примесей азота n [ppb]
 - Предел линейности датчика J_{\max} [фот./сек]

Имеющиеся технологии не позволяют гарантировать высокий (>90%) коэффициент пропускания на всём диапазоне энергий

Расчёт коэффициента пропускания в пакете Xray-DB

Результаты расчётов



В силу технических причин изготовление пластин тоньше 50 мкм крайне затруднительно!

Детали расчётов

- Расчёты проводились с использованием программного пакета для Python – XRay DB.
- Структура датчика: Pt(30 нм):Ti(30 нм):Алмаз(50 000 нм):Ti(30 нм):Pt(30 нм)
- Учитываемые эффекты:
 - Фотоэффект
 - Эффект Комптона

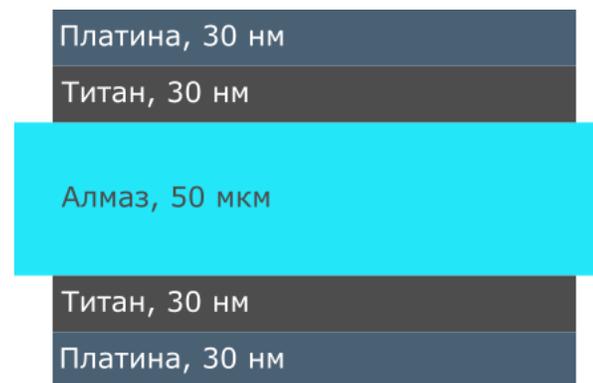


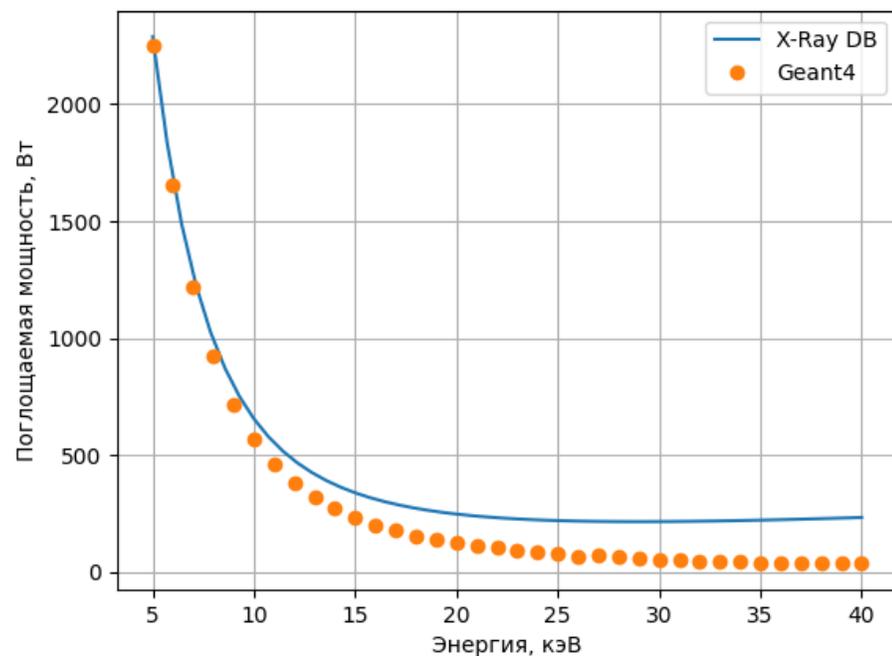
Схема металлизации

Коэффициент пропускания в диапазоне 5 кэВ – 40 кэВ: > 65%.

Получена оценка энерговыделения в кристалле при прохождении сквозь него рентгеновского пучка

Расчёт поглощаемой кристаллом мощности в Geant4

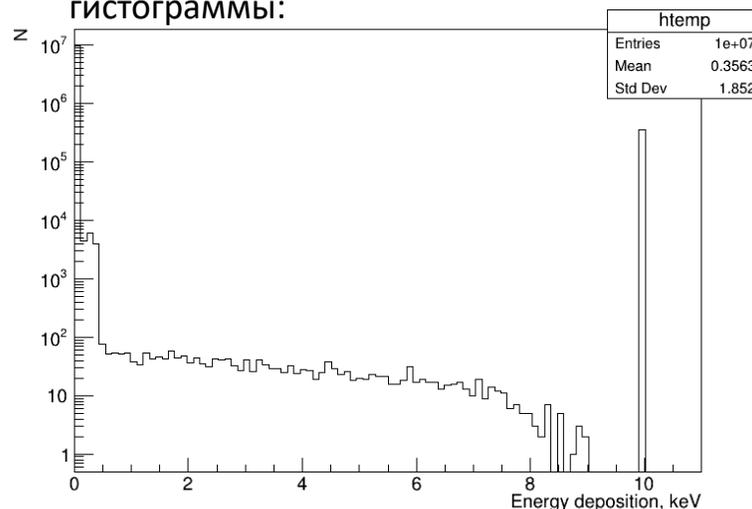
Результаты расчётов



Зависимость поглощаемой мощности от энергии квантов для потока 10^{19} фотонов в секунду.

Детали расчётов

- Для расчёта энерговыделения использовался фреймворк Geant4 v11.2.1.
- В рамках симуляции на пластинку толщиной $d=50$ мкм падало 10^7 фотонов фиксированной энергии.
- Программный код вычислял энерговыделение и позволял получать гистограммы:



- Путём интегрирования полученных гистограмм было получено удельное энерговыделение, позволившее оценить полное энерговыделение для потока 10^{19} фотонов в секунду.

Энерговыделение для потока 10^{19} фот./сек варьируется:

- от 40 Вт для 40 кэВ
- до 2200 Вт для 5 кэВ

Энерговыделение для других потоков получается очевидным образом.

Предельный поток: J_{\max} пробегает значения от 10^{17} до 10^{18} фот./сек

Результат расчёта распределения температуры

Описание модели

Рассмотрена модель **двумерной пластинки** 5x5 мм с **точечным источником тепла** $P_{\text{ист}}$. Основная формула расчётов:

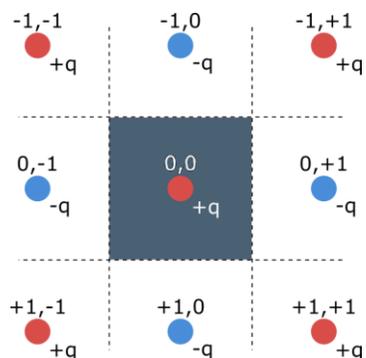
$$\frac{\partial T(\vec{r})}{\partial t} = \frac{\kappa}{c\rho} \Delta T(\vec{r}) + \frac{P_{\text{ист}}}{c\rho d} \cdot \delta(\vec{r})$$

Для случая фиксированной температуры T_0 по краю пластинки получено аналитическое выражение распределения температуры:

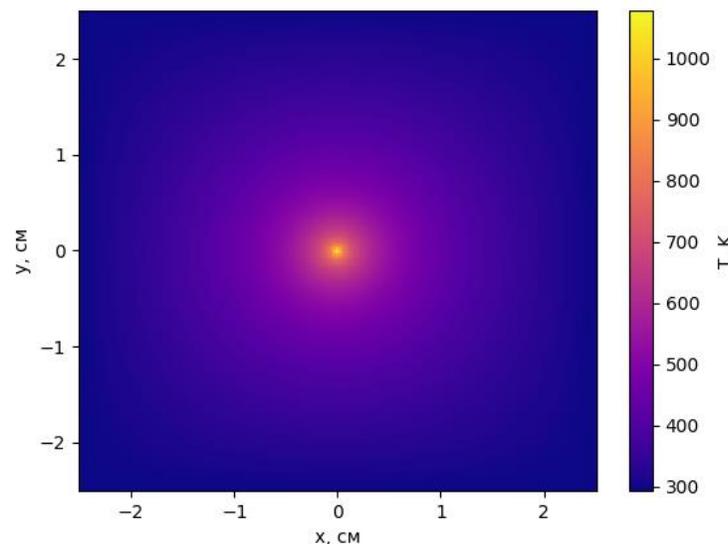
$$T = T_0 - q \sum_{nm} \ln \frac{|\vec{r} - \vec{r}_{nm}|}{r_0} (-1)^{n+m}$$

Где "тепловой заряд" $q = \frac{P_{\text{ист}}}{2\pi\kappa d}$

Пояснительная схема к методу зеркальных отражений:



Результат расчётов



Стационарное распределение температуры для $P_{\text{ист}}=100\text{Вт}$.

Предельный поток

$J_{\max}(5 \text{ кэВ}) \approx 10^{17}$ фот./сек

$J_{\max}(40 \text{ кэВ}) \approx 10^{18}$ фот./сек

Температурное ограничение

При $T > 200^\circ\text{C}$ пластинка начнёт отваливаться от держателя, т.к. её монтаж производится при помощи припоя или токопроводящего клея.

Диапазон генерируемых токов: от единиц пА до сотен мА

Результат оценки генерируемых токов

Детали расчётов

- Нет учёта металлизации
- Размер пластинки 5x5 мм
- Толщина 50 мкм
- Нет учёта нелинейных процессов при больших интенсивностях
- Нет учёта наличия «ловушек» заряда: примесей и дефектов

Суть расчётов

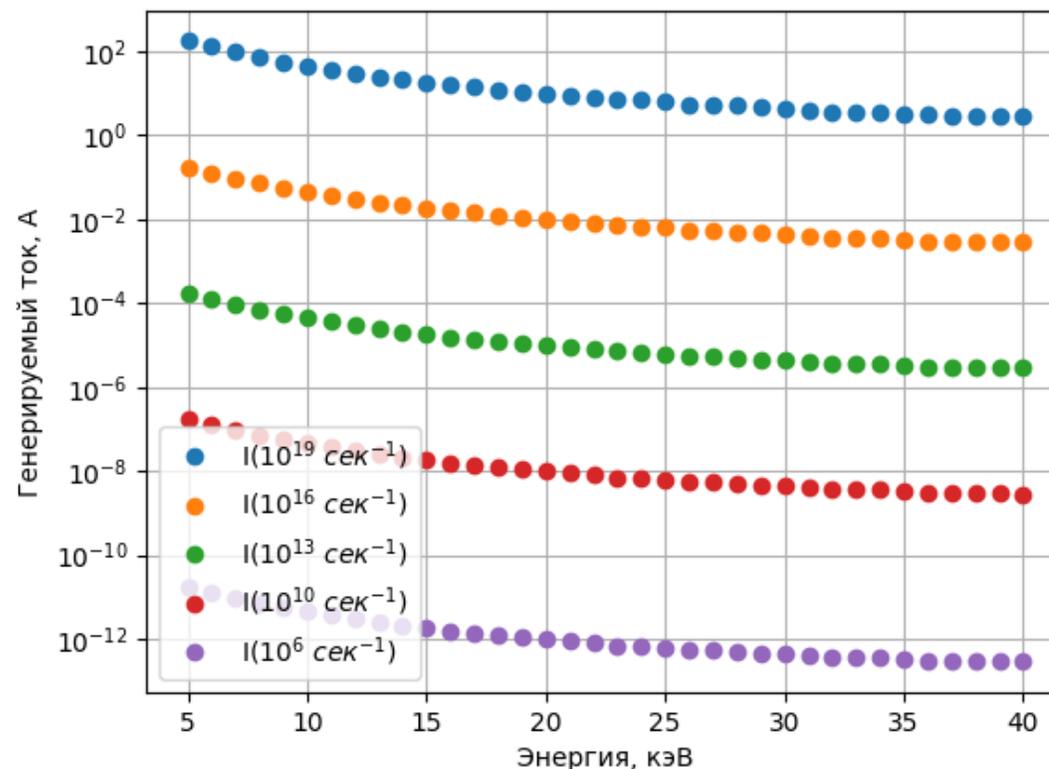
По известному энерговыделению $P(E)$ и средней энергии w , приходящейся на одну электрон-дырочную пару можно оценить темп генерации пар:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{P}{w} \cdot e$$

Где e – модуль заряда электрона, $w = 12.82 \pm 0.13$ эВ*.

Считая, что все заряды добираются до электродов, полученное значение можно отождествить с генерируемым током.

Результаты расчётов



* Jeffrey W Keister, Levent Cibik, Swenja Schreiber, and Michael Krumrey. Characterization of a quadrant diamond transmission x-ray detector including a precise determination of the mean electron-hole pair creation energy. Synchrotron Radiation, 25(2):407–412, 2018.

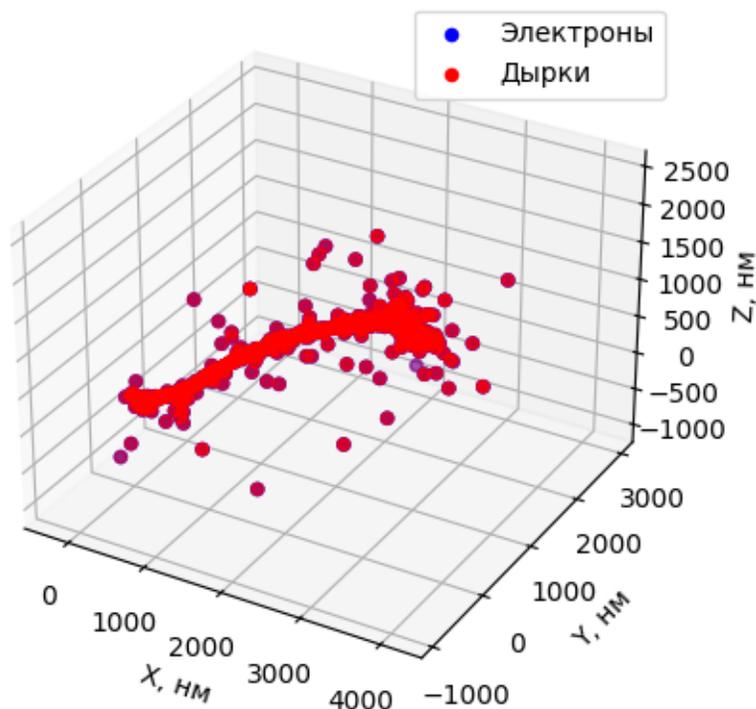
Предел линейности датчика: $n_{\max} \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ нм}^{-3}$

Оценка плотности пар, сгенерированных одним фотоном

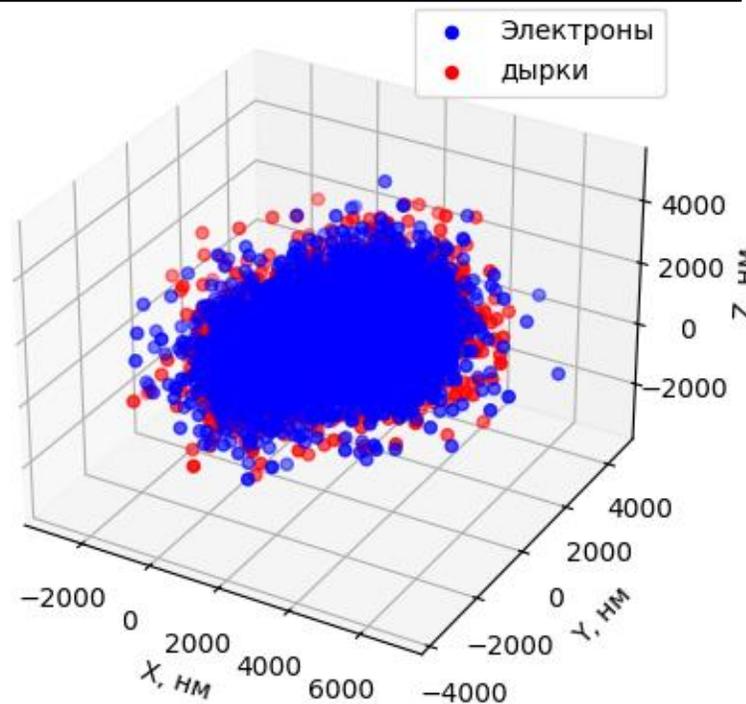
Окончание генерации электронных возбуждений,
~100 фс

Окончание термализации, ~50 пс

Оценка плотность
электрон-дырочных пар



Энергия начального
кванта 50 кэВ



Энергия начального
кванта 50 кэВ

$$n_{\max} \approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ нм}^{-3}$$

Для оценки плотности пар
использовалась формула:

$$n = \frac{N_{\text{пар}}}{V}$$

$$n_{\max} (10 \text{ кэВ}) \approx 2.7 \cdot 10^{-7} \text{ нм}^{-3}$$

$$n_{\max} (50 \text{ кэВ}) \approx 5.5 \cdot 10^{-7} \text{ нм}^{-3}$$

Максимальная плотность
меняется не сильно, поэтому
использовалась средняя оценка.

Предел линейности: J_{\max} пробегает значения от 10^{21} до 10^{23} фот./см²сек

Описание метода расчётов и их результатов

Детали расчётов

Для оценки плотности пар, создаваемой пучком использовалась формула:

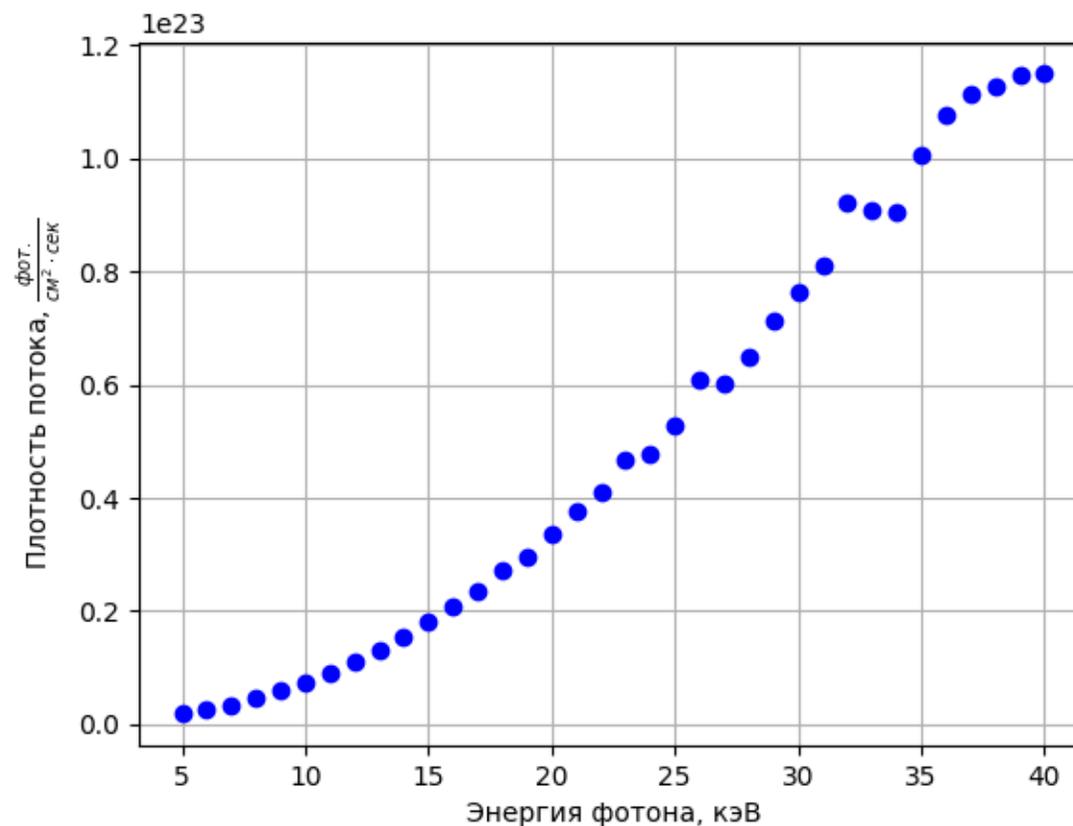
$$n_{\text{пар}} = \frac{E_{\text{уд.}} \cdot \Phi \Delta t_{\text{импульса}}}{Sdw} = E_{\text{уд.}} \cdot \frac{\Delta t_{\text{импульса}}}{dw} \cdot J$$

- $E_{\text{уд}}$ – удельное энерговыделение (на один фотон)
- Φ – поток фотонов
- $\Delta t_{\text{импульса}} = 100$ пс – средняя длительность синхротронного импульса
- S – площадь пучка
- w – средняя энергия, приходящаяся на e⁻-пару
- $d = 50$ мкм – толщина пластинки
- J – плотность потока фотонов

При подстановке $n = n_{\max}$ можем получить J_{\max} .

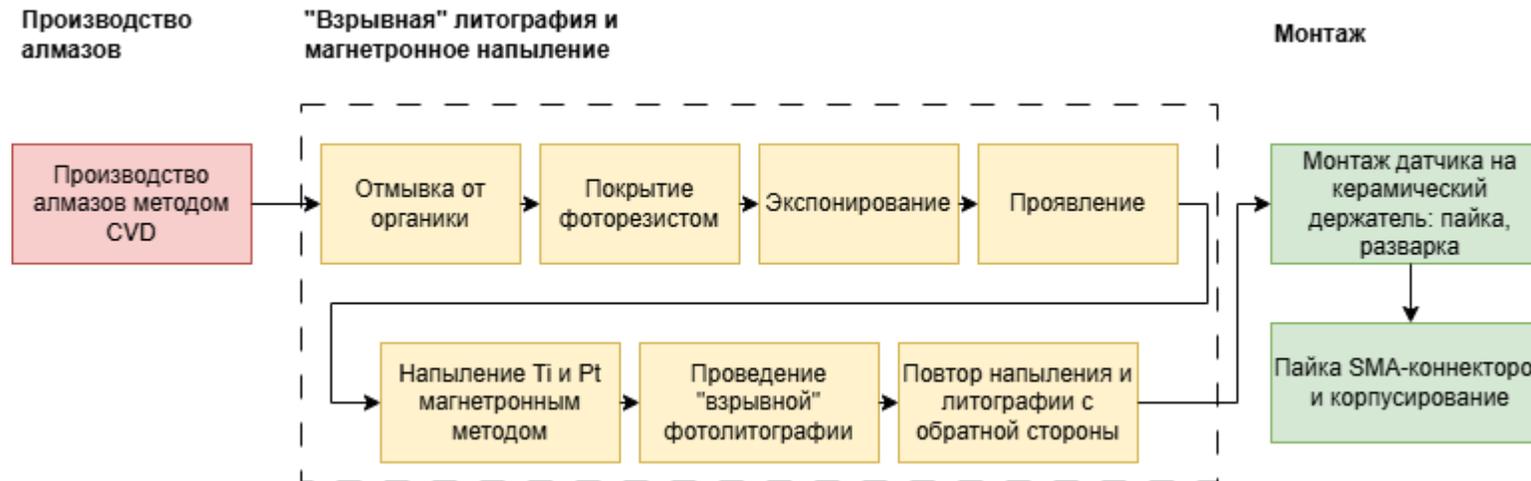
Замечание по поводу излома: излом – следствие малой статистики фотонов, поглощённых кристаллом в симуляции Geant4, в области больших энергий. Т.е. следствие неточности определения $E_{\text{уд}}$.

Результаты расчётов



Разработана схема производства алмазного датчика рентгеновских лучей

Описание этапов производства



Ключевые технологии

Современные методы синтеза монокристаллических алмазов:

- CVD (Chemical Vapor Deposition)
- HPHT (High Temperature, High Pressure)

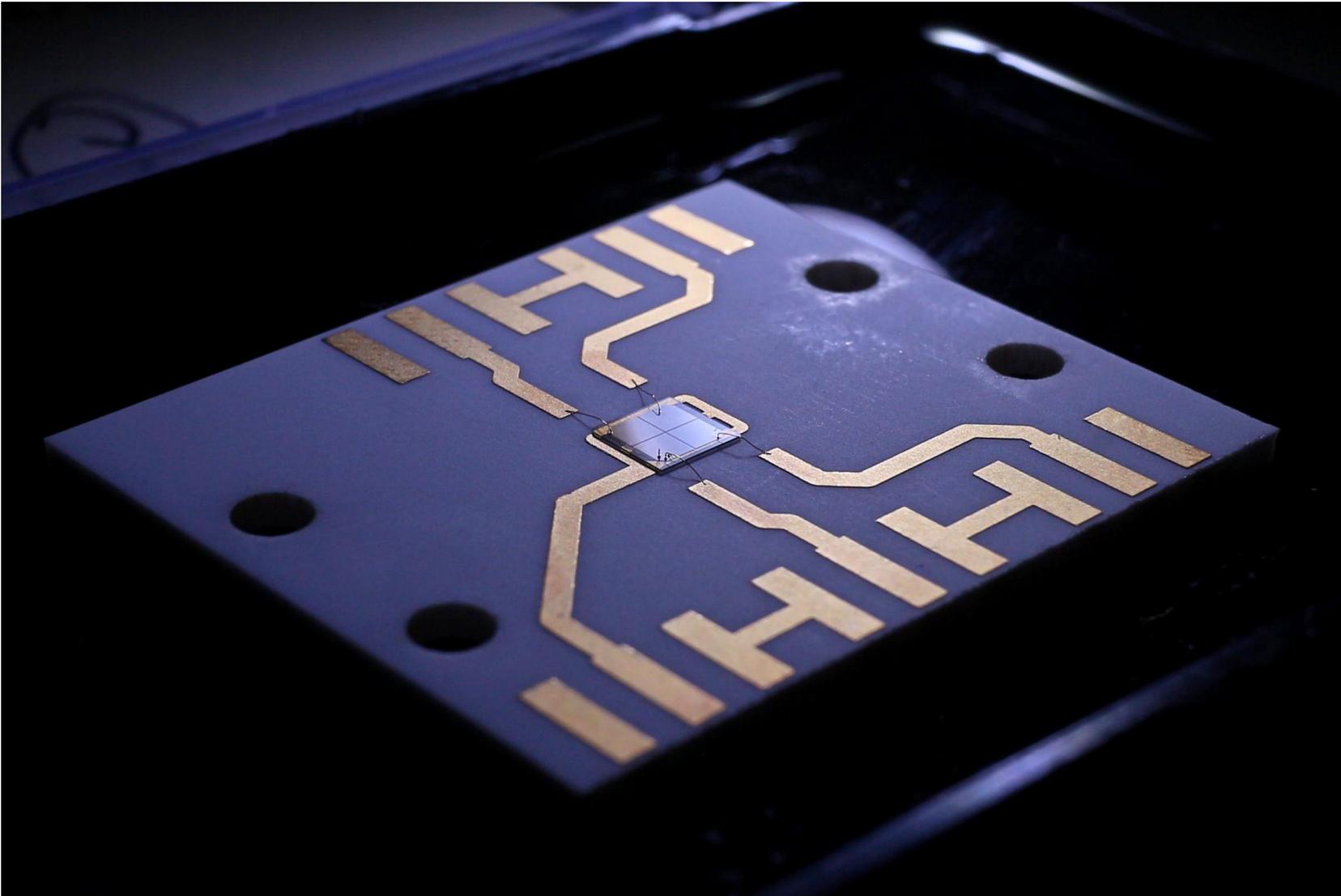
Методы металлизации:

- Термическое напыление
- Магнетронное напыление

Методы литографии:

- Фотолитография
- Лазерная литография
- Электронно-лучевая литография
- Наноимпринтная литография
- «Мягкая» литография и др.

Схему производства удалось запустить и произвести более 10 алмазных датчиков



За время работы
над проектом
было произведено
более 10 датчиков

- CH50-1
 - CH50-2
 - CH50-3
 - CH50-4
 - CH50-5x5-1
 - CH50-5x5-2
 - CH50-5
 - TISNUM-1
 - Sp-19_03-X
 - Sp-19_03-Y
 - Sp59-73-1
 - Sp50-60-1
 - Sp60-70-1
- { Алмазы
Chenguang
Machinery

 { Отечественные
алмазы

Созданные прототипы демонстрируют отклик на рентгеновское излучение

Пример датчика CH50-2. Квадранты отсутствуют.

Детали опыта

Опыты проводились на базе НИЦ
«Курчатовский институт»

- Использовалась рентгеновская трубка компании XOS с молибденовым анодом.
- Максимальная энергия спектра: 50 кэВ.
- Самый интенсивный пик: ≈ 17 кэВ.
- Диаметр пучка ≈ 100 мкм.
- Напряжение смещения: 187 В.

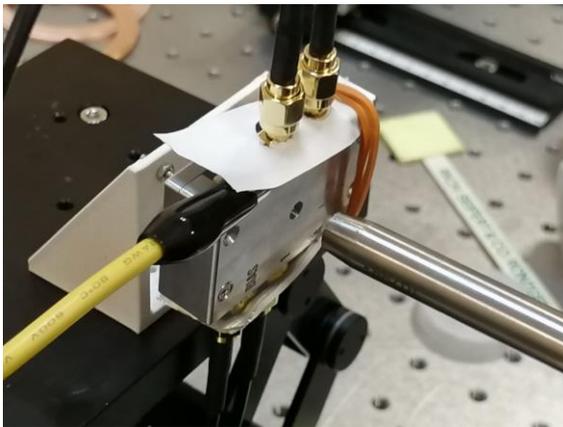
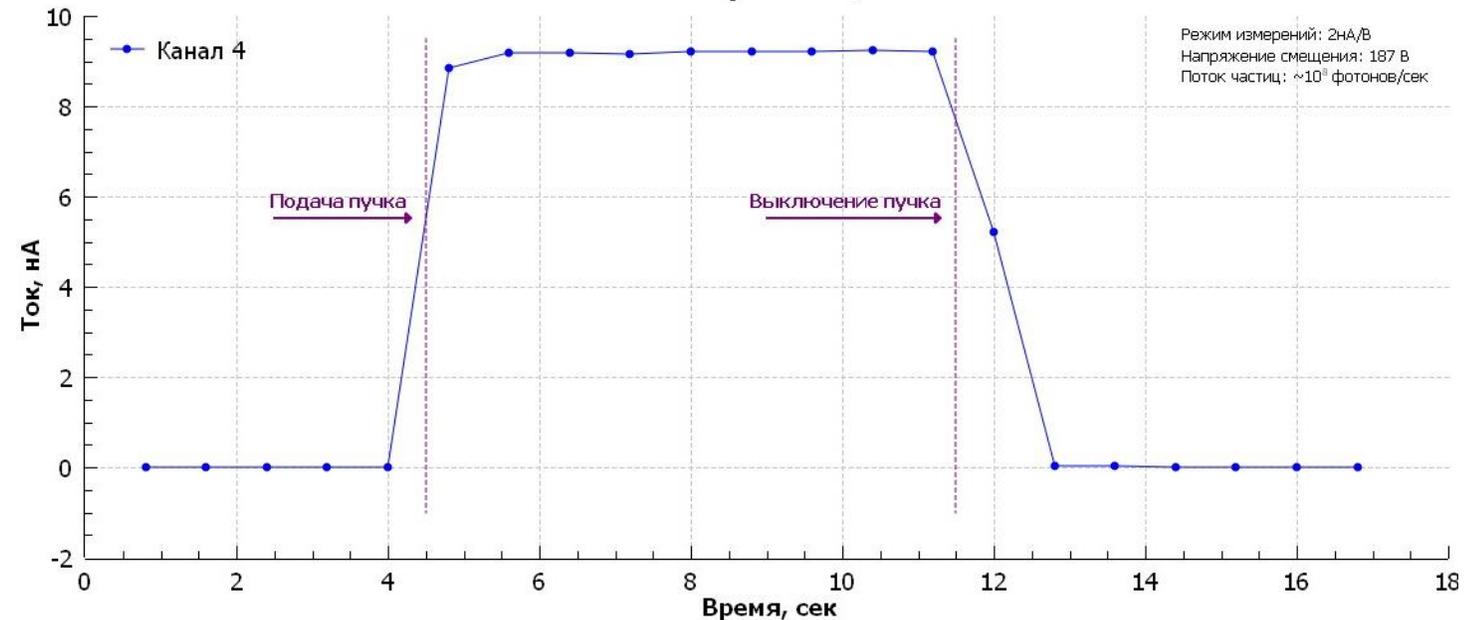


Фото закреплённого датчика.

Результаты эксперимента на примере датчика CH50-2

CH50-2. Зависимость детектируемого тока от времени при облучении рентгеновским пучком интенсивностью 10^8 фотонов/сек



Созданные датчики с трудом применимы для мониторинга положения пучка – высока неоднородность кристалла

Опыт с перемещением датчика относительно оси пучка

Детали опыта

По сравнению с предыдущим добавился двухосевой позиционер STANDA. Датчик равномерно перемещался относительно пучка снизу вверх.

- Скорость перемещения: 5 мкм/сек
- Напряжение смещения: 30 В.

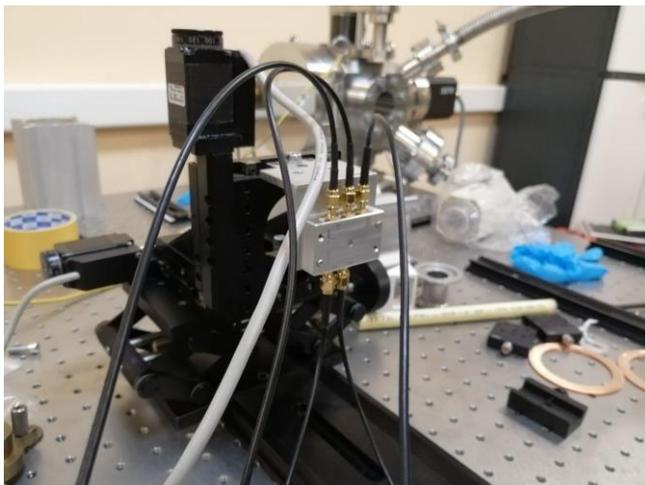
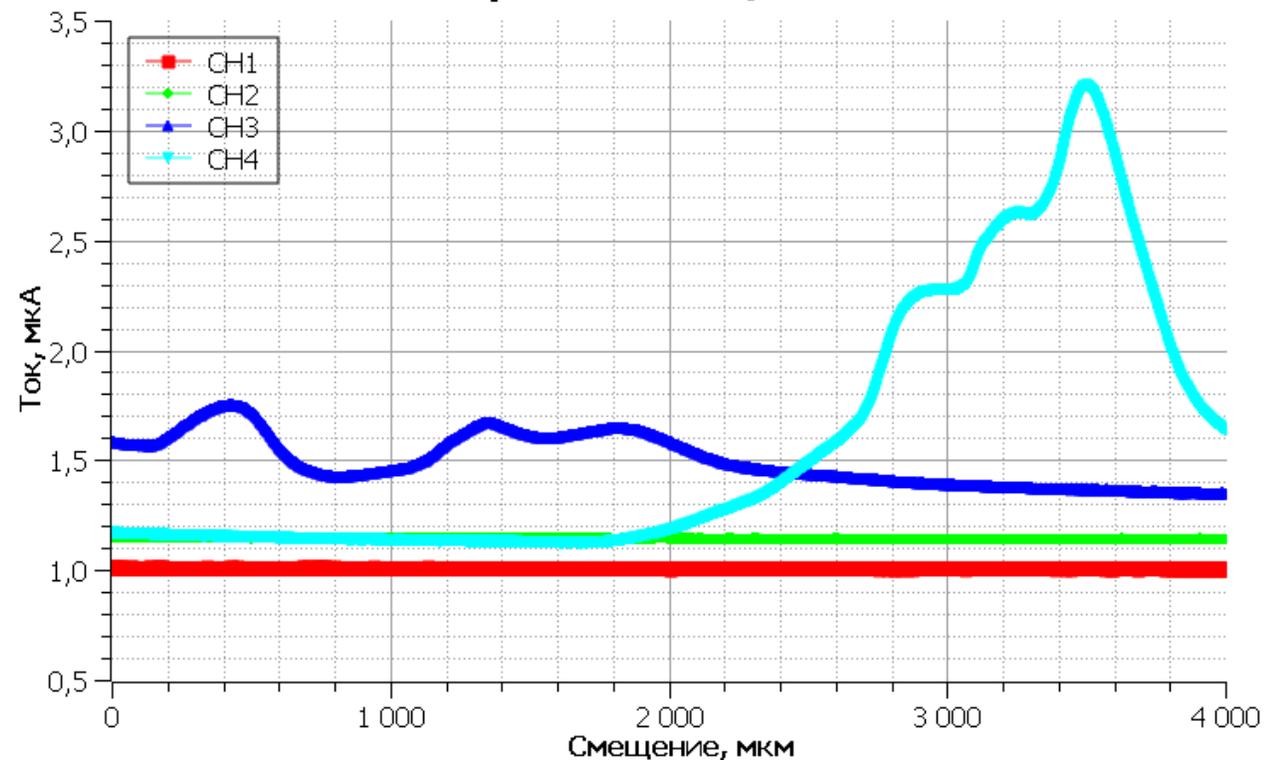


Фото закреплённого датчика и позиционера.

Результаты эксперимента на примере датчика TISNUM-1

**TISNUM-1. Вертикальный подъём датчика со скоростью 5 мкм/с
Напряжение смещения: 30 В.**

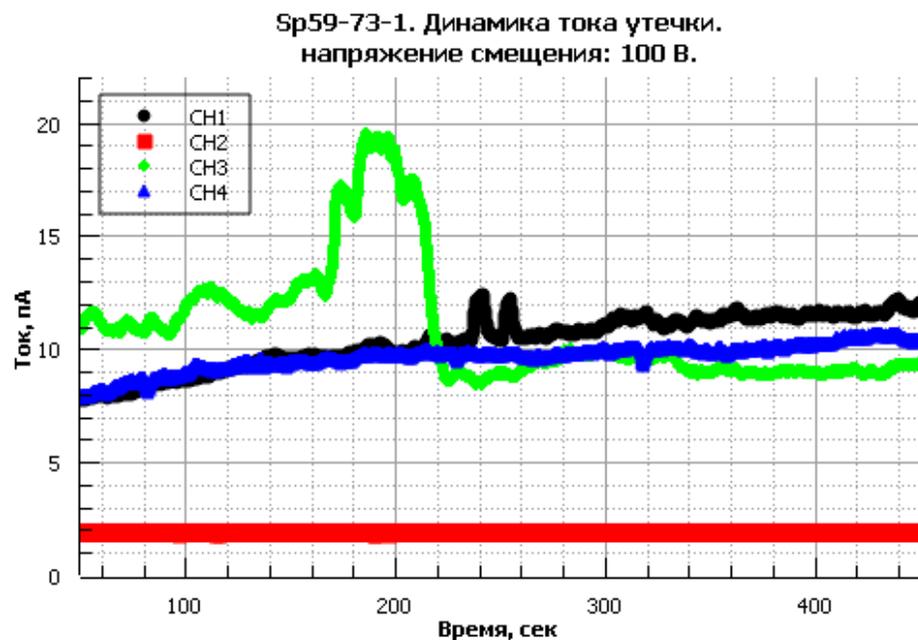


Отсутствие временной стабильности и неоднородность квадрантов не позволяют использовать датчик для прецизионного мониторинга положения пучка

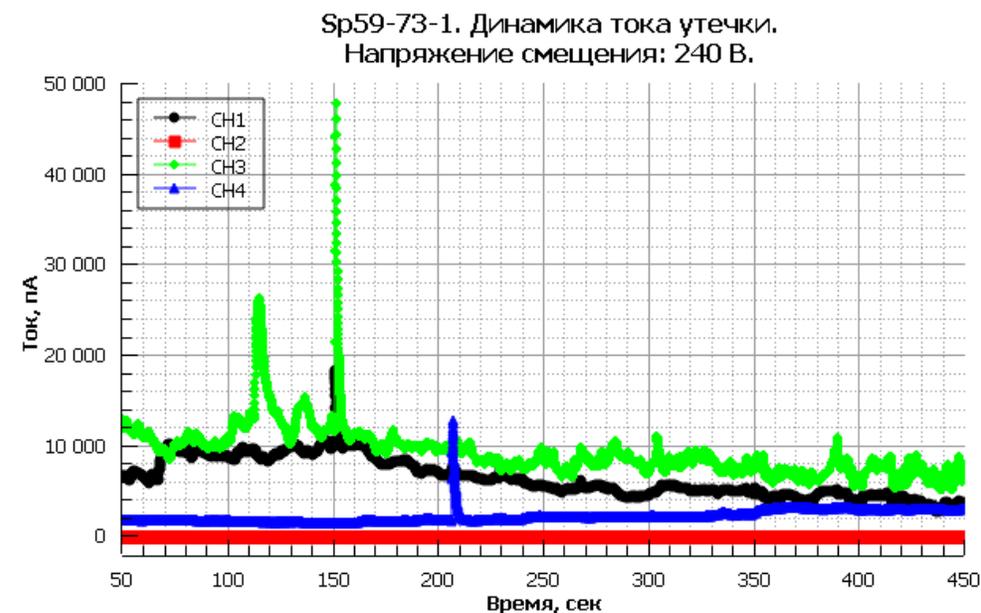
Детали опыта

- На датчик подавалось фиксированное напряжение смещения.
- Рентген отсутствовал.
- Производилась запись токов утечки.

Результат опыта с Sp59-73-1 при 100 В



Результат опыта с Sp59-73-1 при 240 В



Существует серьезная проблема
отсутствия стабильности токов в датчиках

Подведение итогов

Достижения и обнаруженные проблемы

Оценены границы применимости прототипа алмазного детектора

Параметр	Полученное ограничение
Коэффициент пропускания в рабочем диапазоне для $d = 50$ мкм	$> 65\%$
Предельный поток фотонов (с точки зрения перегрева кристалла)	от 10^{17} фот./сек для 5 кэВ до 10^{18} фот./сек для 40 кэВ
Диапазон генерируемых токов	от единиц пА до сотен мА
Предельно допустимая концентрация азота	около 20 ppb
Приемлемое напряжение смещения	около 100 В
Предел линейности датчика	$J(5 \text{ кэВ}) = 2 \cdot 10^{21}$ фот./($\text{см}^2 \cdot \text{сек}$), $J(40 \text{ кэВ}) = 10^{23}$ фот./($\text{см}^2 \cdot \text{сек}$)

Обнаружены существенные проблемы

- Отсутствует временная стабильность токов датчиков
- Существенны неоднородности кристалла

Разработана схема производства



Созданы первые прототипы

Более 10 датчиков: CH50-1, CH50-2, CH50-3, CH50-4, CH50-5, CH50-5x5-1, CH50-5x5-2, TISNUM-1, Sp-19_03-X, Sp-19_03-Y, Sp59-73-1, Sp50-60-1, Sp60-70-1.

В проекте участвовало порядка 10 организаций

Выражаю благодарность всем участникам проекта!



Физический факультет



НИЦ
«Курчатовский
институт»



ООО Центр
инженерной
физики МГУ



Институт
радиотехники и
электроники им.
В.А.Котельникова
РАН

**CVD
SPARK**

ООО СВД.Спарк



Институт нанотехнологий
микроэлектроники РАН



Технологический институт
сверхтвердых и новых
углеродных материалов



Институт синтетических полимерных
материалов



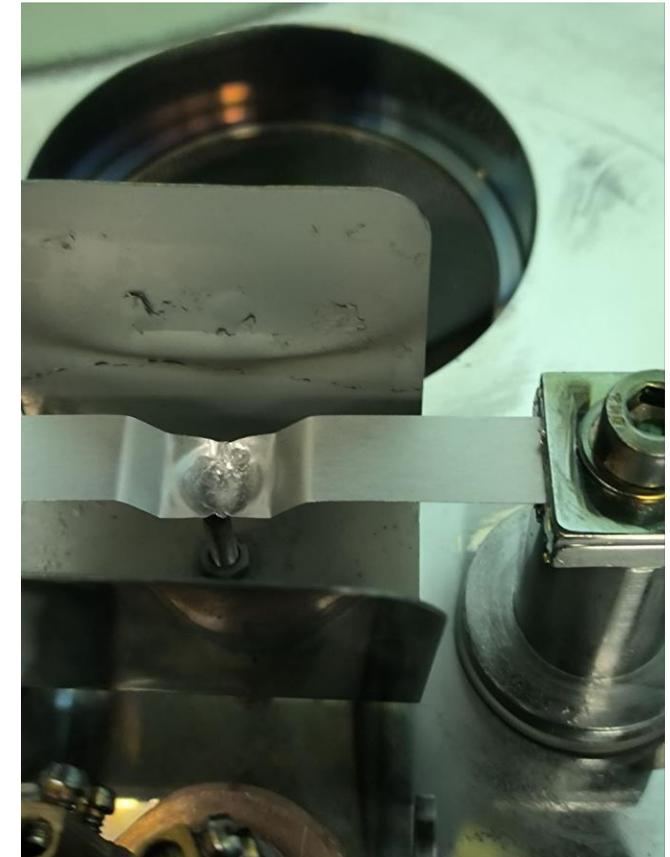
Биологический факультет МГУ

Фотографии установок PVD

Магнетронное и тепловое напыление

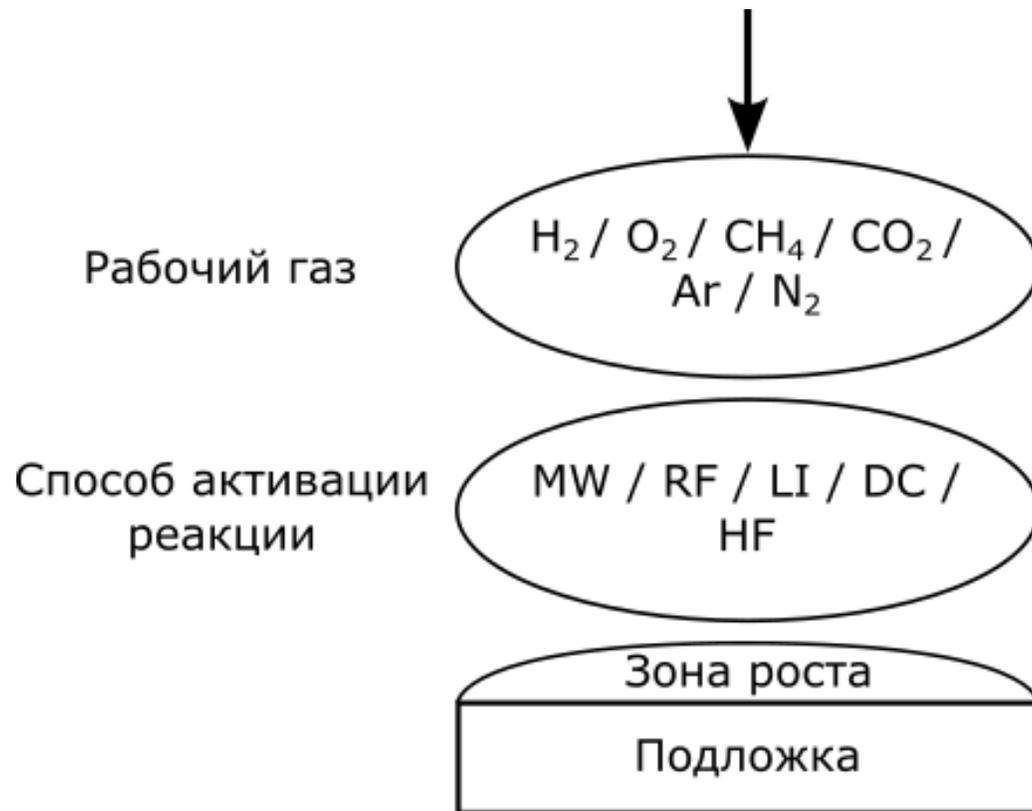


Установка Leybold Z-400, лаборатория физики наноструктур физического факультета МГУ



Установка Tescum AG VSM600-V1, ИСПМ РАН

Схема CVD-метода синтеза алмазов



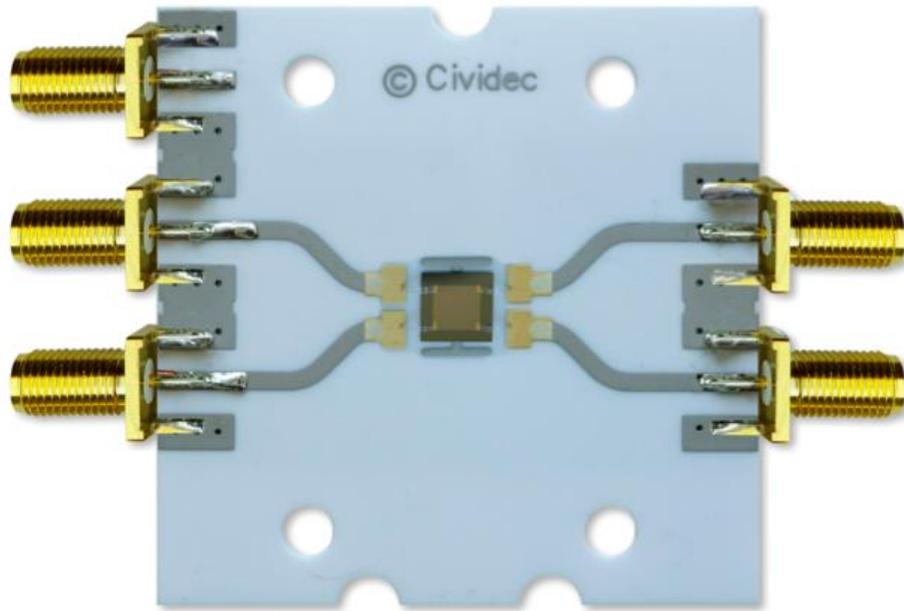
Суть метода CVD

Суть метода заключается в осаждении углерода из газовой фазы на охлаждённую подложку из затравочного алмаза (гомоэпитаксия) или другого материала (гетероэпитаксия). В качестве расходного газа обычно используют смесь метана (CH_4) и водорода (H_2).

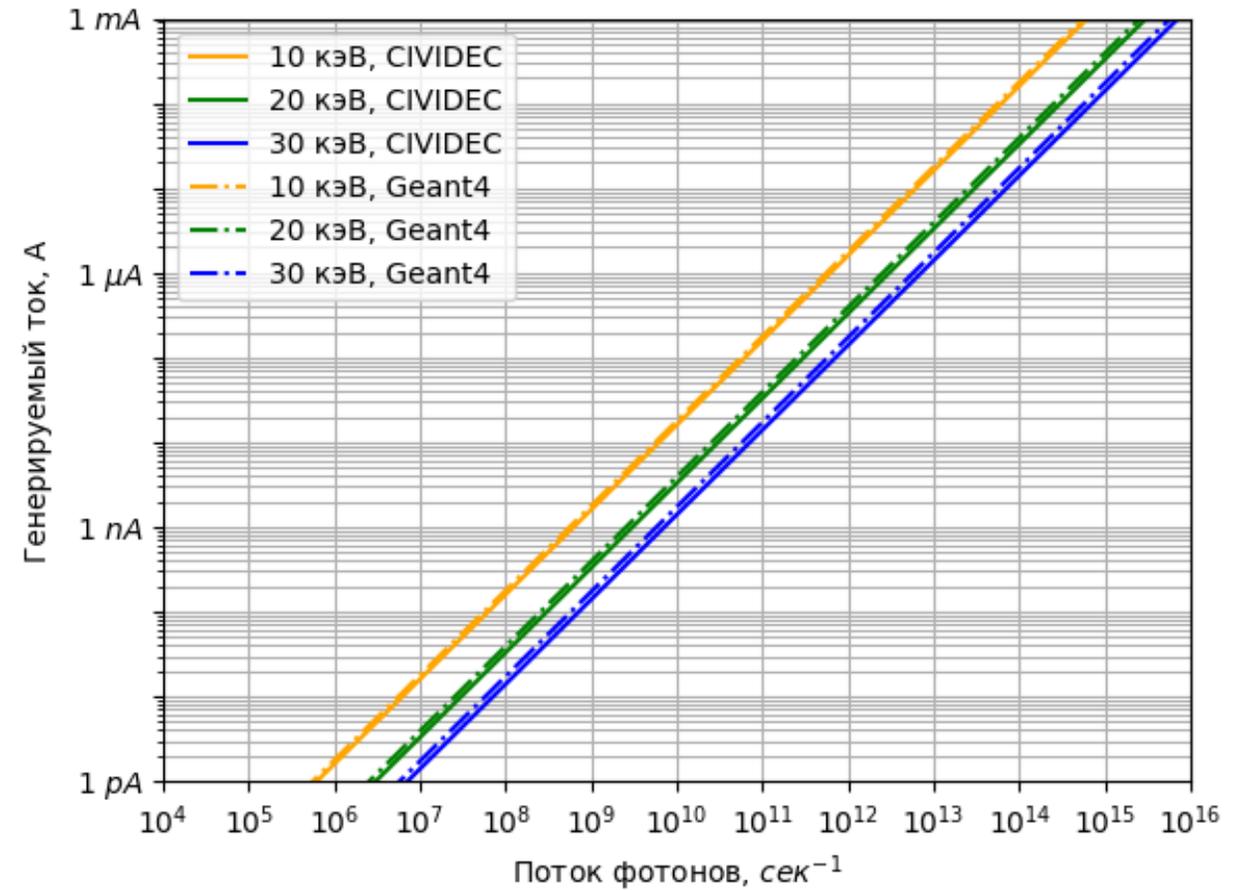
Теоретические расчёты близки к результатам CIVIDEC B9

Сравнение генерируемых токов

CIVIDEC B9



Результаты сравнения



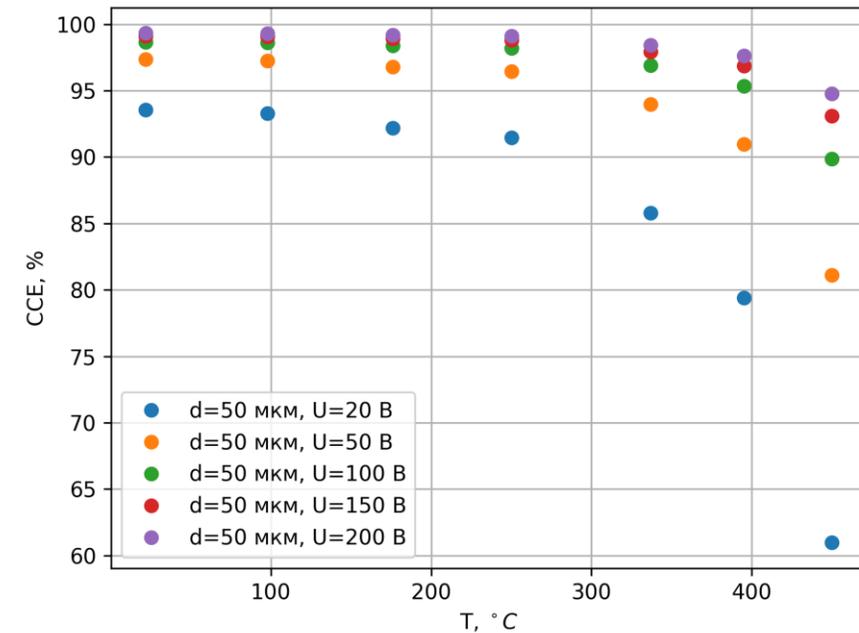
Приемлемое напряжение смещения до T=400°C: 100 В

Теоретическая оценка

Модель Хекта

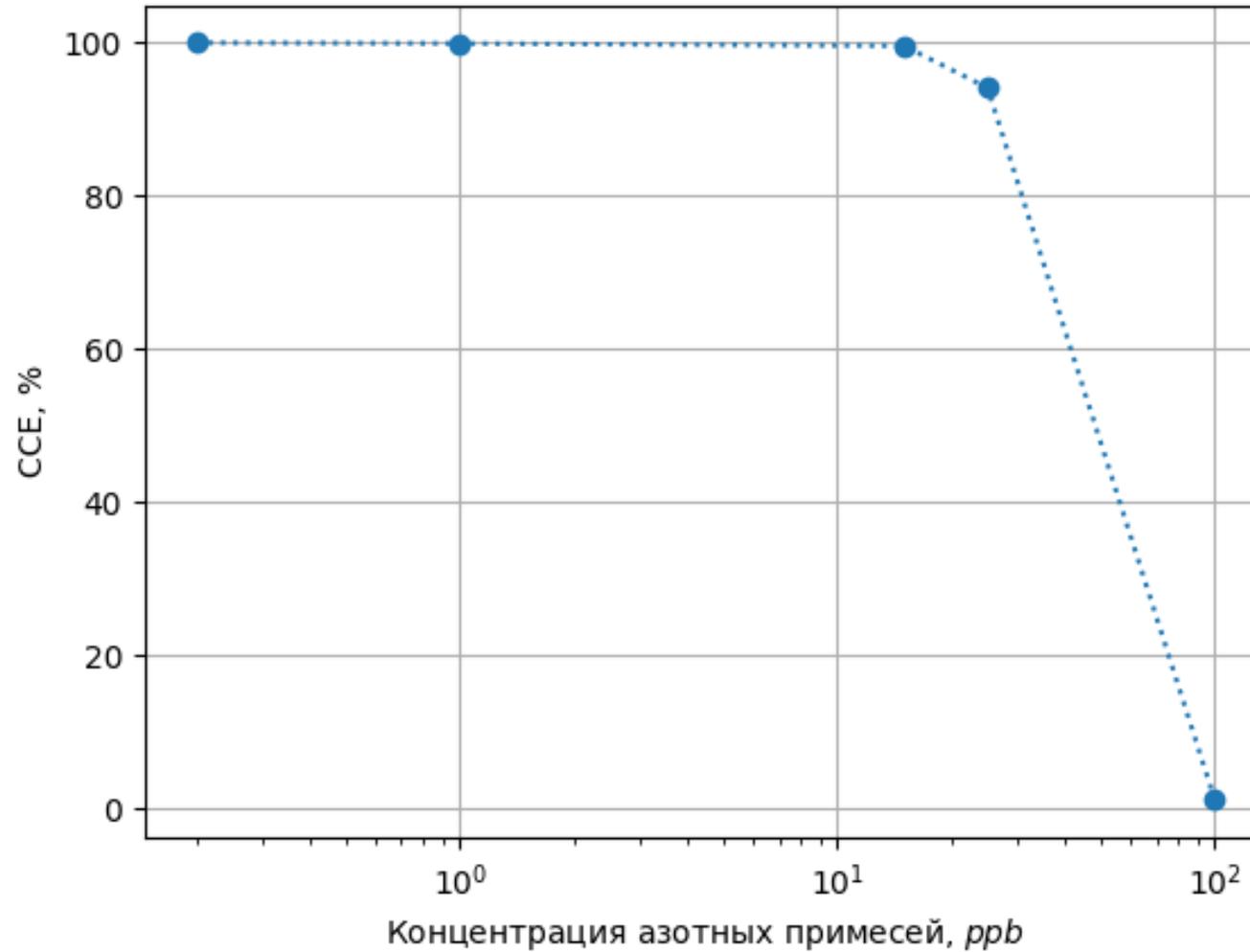
$$CCE(T) = \frac{\mu\tau(T) \cdot E}{d} \left[1 - \exp\left(\frac{-d}{\mu\tau(T) \cdot E}\right) \right]$$

Теоретическая оценка зависимости CCE от T и напряжения смещения



Приемлемая концентрация N в кристалле: ~20 ppb

Теоретическая оценка



Работа на биологическом факультете МГУ

Ну мало ли, вдруг спросят

