

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА ЭНЕРГИИ ИОНОВ ДО 500 КЭВ.

Ю.В.Балакшин¹, А.С. Патракеев¹, Д.В.Петров¹, В.С.Черныш¹, А.А. Шемухин¹,
П.Н.Черных¹, А.В. Назаров²

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ; ² Физический факультет МГУ

E-mail: av.nazarov@physics.msu.ru

В Лаборатории ионно-пучковых нанотехнологий НИИЯФ МГУ введен в действие ускоритель ионов «High Voltage Engineering Europe» на энергии ионов до 500 кэВ (рис.1). Ускоритель оснащен тремя линиями пучка (рис.2). Одна из этих линий предназначена для имплантации ионов атомной массы до 250, а другая – для анализа приповерхностных слоев материалов с использованием спектрометрии рассеяния ионов средних энергий (MEIS). Третья линия, находящаяся в завершающей стадии доработки, предназначена для диагностики материалов с помощью метода резерфордовского обратного



Рис. 1. Ускоритель ионов до 500 кэВ



Рис.2. Линии пучка. Справа - линия РОР; в центре – линия имплантации; слева – линия СРИСЭ

рассеяния (РОР) ионов с энергиями до

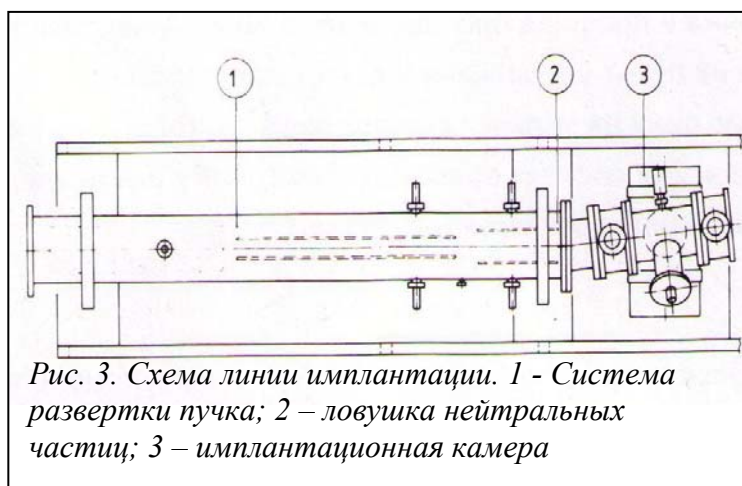
1 МэВ. Эта линия позволит проводить анализ экспериментов *in situ*. Кроме того, предполагается расширить возможности комплекса за счет введения еще одной дополнительной линии пучка: для проведения экспериментов по распылению в сверхвысоком вакууме. Ускоритель оснащен тремя ионными источниками: газоразрядным, твердотельным и дуоплазмотроном, которые позволяют получать широкий набор типов бомбардирующих ионов.

Линия имплантации

Имплантационная линия (рис. 3) позволяет производить имплантацию в мишени площадью до 150x150 мм² с однородностью дозы по этой площади не хуже 99%. Угловое отклонение сканируемого пучка от исходного направления в пределах облучаемой площади невелико. Это позволяет минимизировать, если это необходимо, эффекты каналирования. Камера имплантации оборудована дополнительными оснастками, позволяющими проводить имплантацию в мишени

при температурах от -180°C до 800°C. Остаточное давление в камере в процессе бомбардировки не превышает 4×10^{-6} мбар.

Целью одного из экспериментов, проводимых с помощью имплантационной линии было создание нанокластеров Si в диэлектрической матрице SiO₂. Для проведения экспериментов были подготовлены образцы, вырезанные из пластин монокристаллического (100)Si, на поверхности которых термическим окислением был выращен слой SiO₂. На ускорителе были изготовлены три типа образцов, в различных режимах имплантации. Характеристики этих режимов приведены в таблице 1. После имплантации с помощью методики POE удалось качественно



идентифицировать наличие внедренного кремния в слое SiO₂. После имплантации образцы были подвергнуты термическому отжигу. Образцы каждого типа

Номер образца	Энергия имплантированных ионов Si ⁺ , кэВ	Доза облучения, см ⁻²
1	55	2×10 ¹⁶
2	55	3×10 ¹⁶
3	85	2×10 ¹⁶

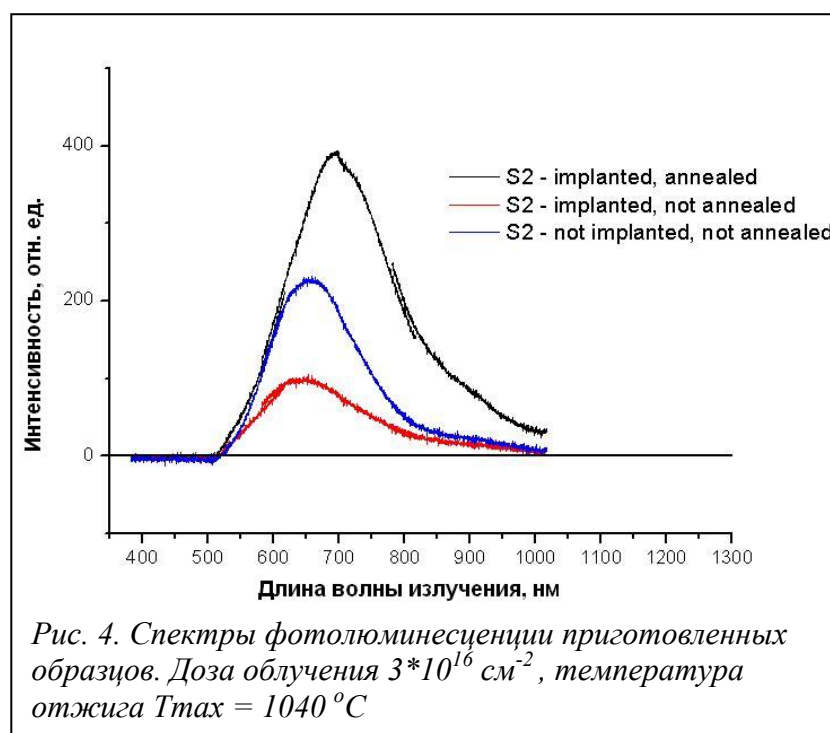
Таблица 1. Использованные режимы имплантации

отжигались в двух разных режимах. Таким образом было получено 6 различных образцов. Время отжига свыше 1000 °С для первой серии составило 10мин, для второй – 40 мин. Отжиг проводился в трубчатой кварцевой печи в атмосфере азота. Измерение спектров фотолюминесценции ионно-имплантированных структур после высокотемпературного отжига проводились на оборудовании ЦКП Физического Факультета МГУ.

Генерация фотолюминисценции (ФЛ) в исследуемых образцах осуществлялась с помощью облучения Ag лазером с длиной волны 488 нм. Регистрация спектров излучения проводилась с использованием спектрографа MS 3504 I (SOLAR TII) и монохроматора МДР 12 (ЛОМО).

Измерения показали, что ФЛ наблюдается лишь для образца, имплантированного ионами Si⁺ при энергии 55 кэВ с дозой облучения 3×10¹⁶ ион/см², отожженного в течение 10 минут (1-я серия отжига). Спектры ФЛ для трех образцов

отжигались в двух разных режимах. Таким образом было получено 6 различных образцов. Время отжига свыше 1000 °С для первой серии составило 10мин, для второй – 40 мин. Отжиг проводился в трубчатой кварцевой печи в атмосфере азота. Измерение спектров фотолюминесценции ионно-имплантированных структур после высокотемпературного отжига проводились на оборудовании ЦКП Физического Факультета МГУ.



отжигались в двух разных режимах. Таким образом было получено 6 различных образцов. Время отжига свыше 1000 °С для первой серии составило 10мин, для второй – 40 мин. Отжиг проводился в трубчатой кварцевой печи в атмосфере азота. Измерение спектров фотолюминесценции ионно-имплантированных структур после высокотемпературного отжига проводились на оборудовании ЦКП Физического Факультета МГУ.

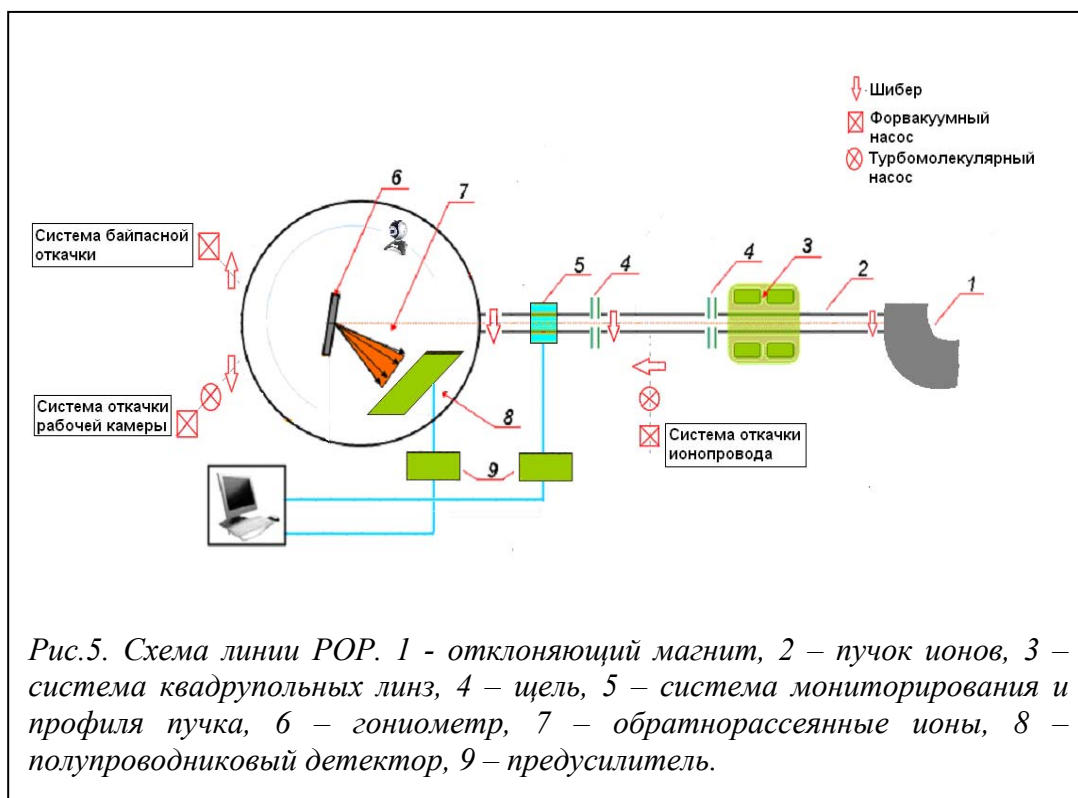
(неимплантированная пленка, имплантированная неотожженная, имплантированная отожженная) представлены на рисунке 4.

Исследовательские линии

Одним из основных методов определения элементного состава модифицированных твердых тел, изучения профилей распределения по глубине примесных или имплантированных атомов, определения состава и толщин слоев в многослойных покрытиях, а также процессов взаимодиффузии в этих слоях является метод резерфордского обратного рассеяния (ROR).

Линия ROR (рис. 5) позволяет проводить исследования, используя ионы водорода или гелия в диапазоне энергий до 1 МэВ. Линия состоит из ионопровода и экспериментальной камеры, которые разделены вакуумным затвором. Откачка камеры рассеяния и ионного тракта производится турбомолекулярным насосом, поддерживающими давление $\sim 10^{-6}$ мбар. Кроме того, камера содержит систему черновой откачки, что позволяет значительно быстрее производить смену образцов. Экспериментальная камера содержит гониометрическую систему для крепления и точного вращения образца, систему мониторинга анализирующего пучка ионов. Угловые перемещения производятся с помощью шаговых двигателей, причём

вращение осуществляется с шагом $0,02^\circ$, а вертикальное перемещение с шагом $0,1\text{мм}$ в диапазоне 20мм . Точность выполнения поворотов на большие углы составляет не хуже 1% . Угловое положение детектора относительно мишени можно изменять в плоскости



рассеяния по окружности, центр которой совпадает с центром вращения гониометра. Точность установки угла рассеяния составляет $0,5^\circ$.

Однако в связи с постоянным уменьшением размеров элементов интегральных схем, диктуемого требованиями современных технологий, стандартный метод ROR не всегда позволяет исследовать такие объекты с необходимым разрешением по глубине.

Для исследования этих объектов в нашей лаборатории создан экспериментальный комплекс, основанный на методике спектроскопии ионов средних энергий (Medium Energy Ion Spectrometry, MEIS). Линия MEIS (рис. 6) позволяет исследовать состав и толщину границ разделов многослойных структур с высоким разрешением методом спектроскопии рассеяния ионов средних энергий. Линия состоит из ионопровода и экспериментальной камеры, которые разделены вакуумным затвором, а так же шлюзовой камеры для смены образцов, которая отделена от экспериментальной камеры вакуумным затвором. Диаметр пучка ионов на мишени составляет 4 мм. Экспериментальная камера содержит гониометрическую систему для крепления и точного вращения образца, систему мониторинга анализирующего пучка ионов, электростатический анализатор, набор микроканальных пластин и позиционно чувствительный детектор. Разрешение по элементам данной методики позволяет судить об изотопном составе. Разрешение по глубине вплоть до одного - двух атомных монослоев.

Для демонстрации преимущества этого метода перед стандартным методом РОР были проведены серии экспериментов. В качестве исследовательского образца была рассмотрена тонкопленочная структура $MgO / Fe / BaTiO_3$, созданная методом импульсного лазерного осаждения. На массивной подложке MgO был выращен слой Fe (~12 нм), затем слой $BaTiO_3$ (~5 нм). На рисунках 6 и 7 представлены соответственно РОР и СРИСЭ спектры данной структуры. С помощью методики РОР не удалось разрешить пики Ti и Fe , кроме того, по данному спектру РОР мы можем дать только интегральную оценку количества бария в структуре, так как разрешение по глубине полупроводникового детектора в два раза превышает заявленную толщину слоя $BaTiO_3$. С помощью методики СРИСЭ нам удалось разрешить пики Ti и Fe , а также удалось рассчитать толщину слоя титаната бария, составившую 64\AA .



Рис. 6. Камера линии MEIS

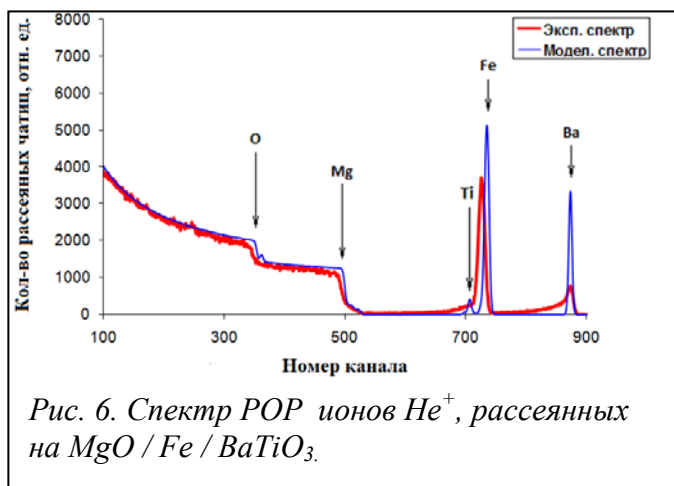


Рис. 6. Спектр РОР ионов He^+ , рассеянных на $MgO / Fe / BaTiO_3$.

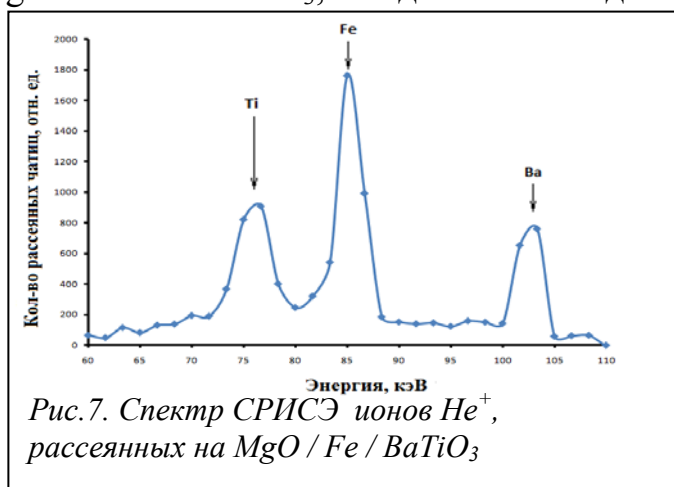


Рис.7. Спектр СРИСЭ ионов He^+ , рассеянных на $MgO / Fe / BaTiO_3$

Резюмируя, можно сказать, что в Лаборатории ионно-пучковых нанотехнологий НИИЯФ МГУ можно как создавать структуры методом ионной имплантации, так и исследовать различные объекты ионно-пучковыми методиками.