

Селективное формирование высокоплотных массивов вертикальных ННК GaAs с помощью локальной ФИП-обработки подложек Si(111)



Шандыба Н.А.¹, Еременко М.М.¹, Шаров В.А.^{2,3}, Махов И.С.⁴, Черненко Н.Е.¹, Кириченко Д.В.¹, Балакирев С.В.¹, Крыжановская Н.В.⁴, Солодовник М.С.¹

E-mails: shandyba@sfned.ru, solodovnikms@sfned.ru.

¹ЮФУ, 347922, Таганрог, ул. Шевченко, 2

²СПбАУ, 194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3А

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

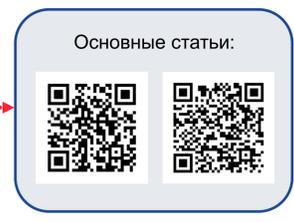
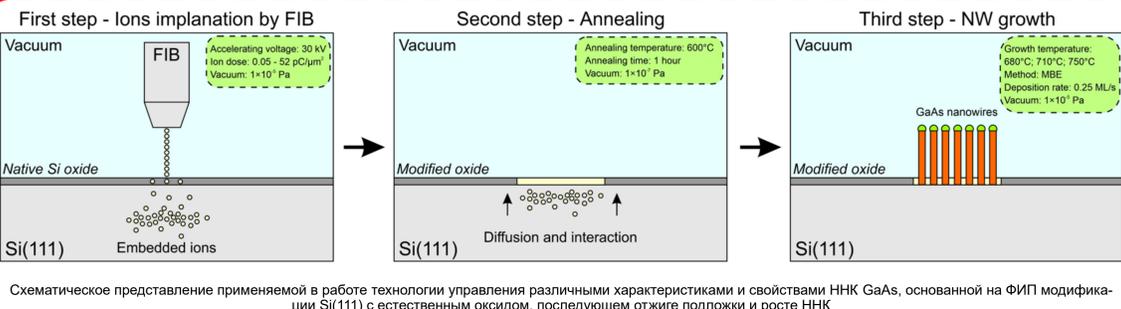
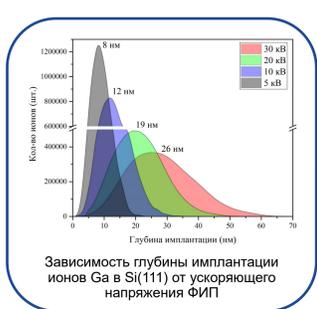
⁴НИУ ВШЭ, 194100, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, 3, корп. 1А



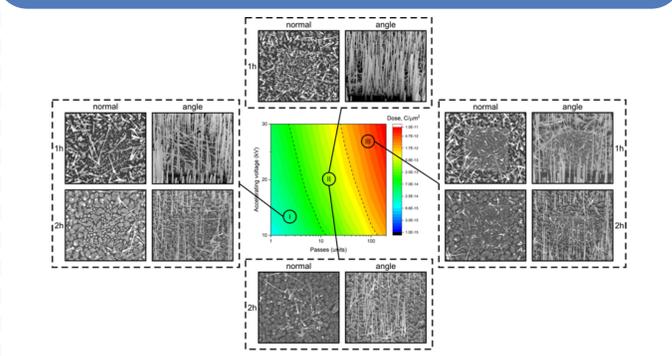
3.23

Аннотация

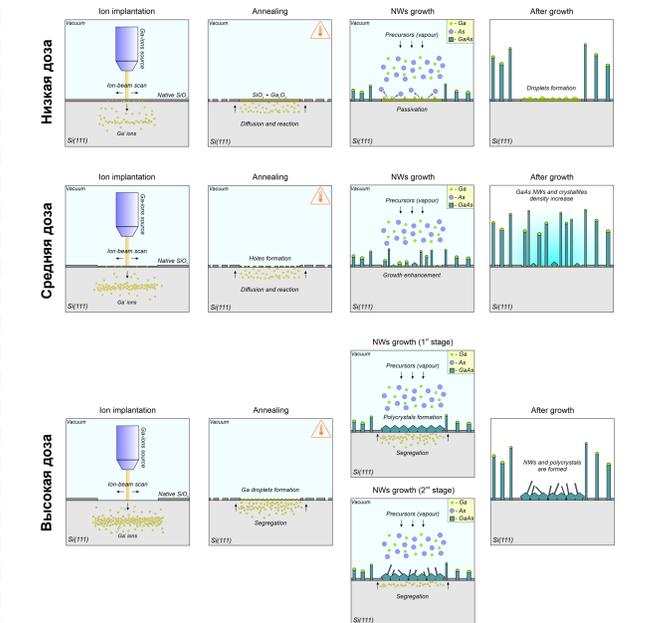
В данной работе представлена простая и недорогая (по сравнению с аналогами) технология, позволяющая формировать локализованные массивы нитевидных нанокристаллов (ННК) GaAs на подложке Si(111) с естественным оксидным слоем на поверхности и управлять различными характеристиками ННК, такими как: плотность, длина, диаметр, вертикальность, структурные и оптические свойства, а также их расположением на поверхности. Это достигается за счет предварительной обработки поверхности Si(111) фокусированным ионным пучком (ФИП) Ga с последующим сверхвысоковакуумным отжигом, в ходе которого происходит модификация оксида, и ростом ННК. В работе показано, что оптимизация режимов ФИП обработки, отжига и роста позволяет формировать на поверхности Si(111) селективные массивы ННК GaAs ультра-высокой плотности (вплоть до 50 мкм⁻²) с практически 100% вертикальностью в единой кристаллической фазе сфалерита (ZB), которые обладают интенсивной фотолюминесценцией.



Исследование влияния дозы ионного пучка, ускоряющего напряжения и времени отжига модифицированной подложки Si(111) на процессы роста и характеристики ННК GaAs

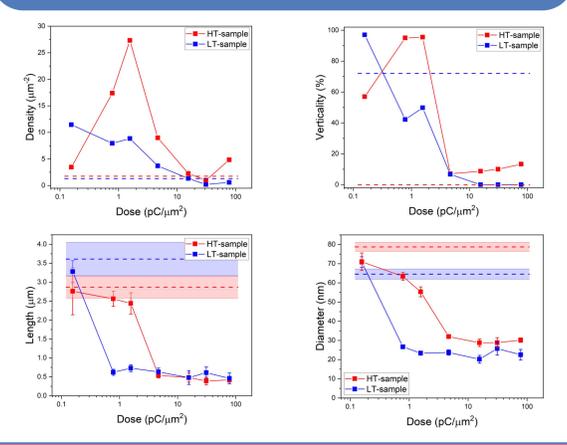


Ключевое влияние на характеристики ННК в данном случае оказывает доза ионного пучка, а ускоряющее напряжение и время сверхвысоковакуумного отжига играют второстепенную роль

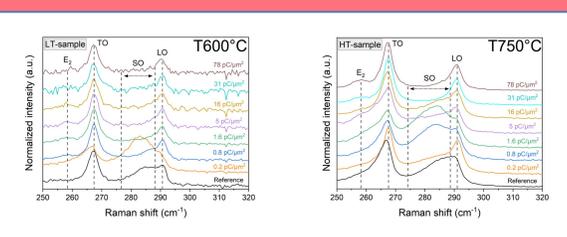


Модуляция свойств поверхностного оксида Si(111) при помощи ионной обработки и отжига позволяет предопределять характеристики формируемых в области ФИП обработки ННК GaAs

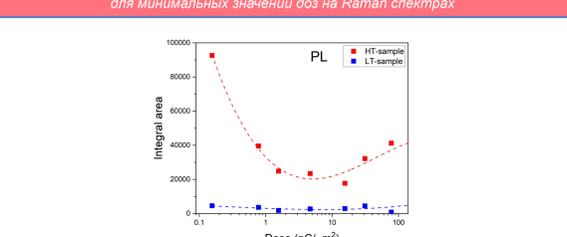
Исследование влияния температуры отжига модифицированной подложки Si(111) на характеристики и структурные и оптические свойства ННК GaAs



Данная технология позволяет формировать на поверхности Si(111) селективные массивы ННК GaAs ультра-высокой плотности (вплоть до 50 мкм⁻²) с практически 100%, а также управлять их длиной и диаметром в широких пределах

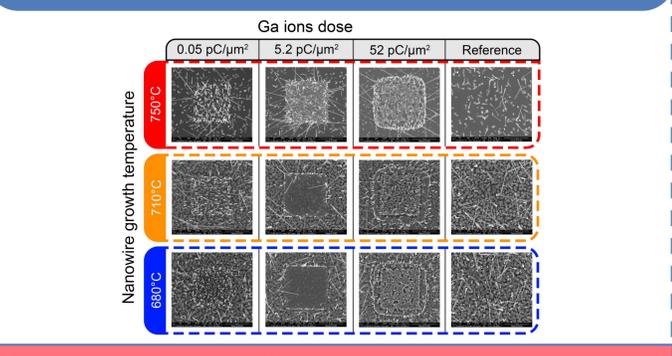


Увеличение температуры отжига на 150°C позволяет расширить диапазон доз, в которых ННК GaAs в области ФИП обработки формируются в единой кристаллической фазе сфалерита (zinc - blende), что подтверждается отсутствием E₂ моды для минимальных значений доз на Раман спектрах

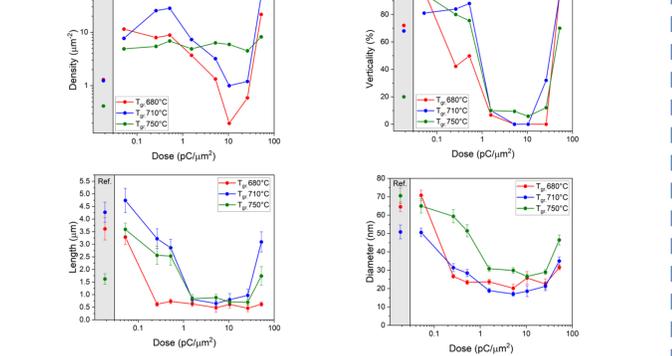


Увеличение температуры отжига приводит к резкому возрастанию фотолюминесценции от ННК GaAs без core-shell структуры на несколько порядков

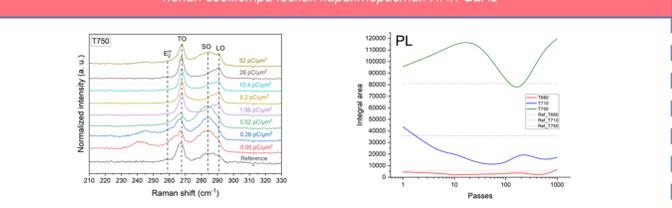
Исследование влияния температуры роста ННК GaAs на модифицированных подложках Si(111) на их характеристики и структурные и оптические свойства



Повышение температуры роста на 70°C позволяет резко увеличить селективность роста ННК

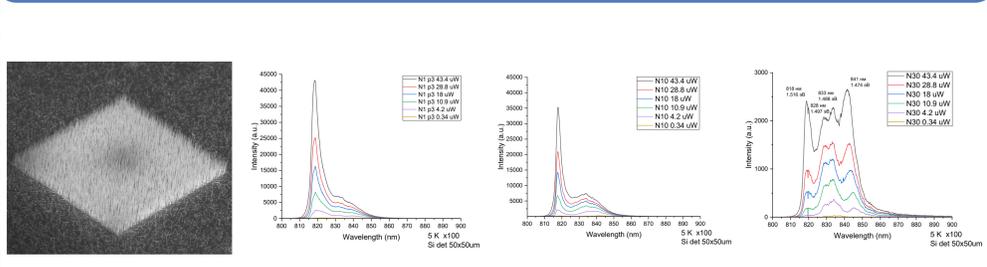


Повышение температуры роста позволяет стабилизировать плотность ННК, расширить диапазон доз, в которых ННК формируются с вертикальностью свыше 80% и увеличить плавность изменения геометрических характеристик ННК GaAs



Увеличение температуры роста приводит к стабилизации параметров каталитизатора на вершине ННК и их формированию в единой фазе сфалерита (zinc - blende) и, соответственно, увеличению фотолюминесценции на несколько порядков по сравнению с T_g 680°C

Формирование core-shell ННК GaAs с оптимальными характеристиками на подложке Si(111) и исследование их оптических свойств



Анализ полученных результатов и оптимизация режимов ФИП обработки, отжига и роста позволяют сформировать селективный массив ННК на Si(111) с естественным слоем оксида, обладающий интенсивной фотолюминесценцией на длине волны GaAs

Вывод

Таким образом, мы впервые показали, что основное влияние на ключевые характеристики и процессы формирования ННК в области ФИП-обработки оказывает доза ионов, при этом ускоряющее напряжение ионного пучка, а также длительность предостового отжига играют второстепенную роль и практически не оказывают влияния на параметры ННК и характер их зависимости от дозы. В то же время, увеличение температуры отжига с 600 до 750°C позволяет расширить диапазон условий, при которых формируются массивы со 100% выходом вертикальных ННК, а также практически полностью устранить вклад вюрцитной фазы в кристаллическую структуру ННК в массиве. Оптимизация режимов ФИП-обработки и увеличение температуры роста с 680 до 750°C обеспечивают селективное формирование высокоплотных (50 мкм⁻²) массивов ННК GaAs со 100% долей вертикально ориентированных ННК со структурой сфалерита, а также минимизировать количество дефектов кристаллической структуры, что подтверждается результатами исследований методами спектроскопии фотолюминесценции и комбинационного рассеяния света. Из анализа полученных данных были предложены механизмы, лежащие в основе такого управления различными свойствами и характеристиками ННК, которые основаны на химическом взаимодействии диффундирующих внедренных ионов к поверхности на этапе отжига с атомами естественного оксида Si(111) и образованием на низких дозах – маскирующего слоя, в области средних доз – массива нанопор и в области высоких – массива капель Ga.



Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ проект № FENW-2022-0034 и FSRM-2023-0007, а также проекта "Зеркальные лаборатории" в НИУ ВШЭ.

