

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.372.852.5

## Формирование нанометровых слоев фокусированным ионным пучком

*К.А.Царик, В.В.Лосев, С.В.Бараш*

**Московский государственный институт электронной техники  
(технический университет)**

Разработана методика формирования периодических протяженных (до 30 мкм) нанометровых слоев с характерными поперечными размерами 70 нм и глубиной 2–3 нм. Измерена скорость травления пучком ионов галлия, ускоренных напряжением 30 кВ, таких материалов, как GaAs, AlGaIn, Al и Si, используемых для создания акустоэлектронных преобразователей. Показана возможность полировки ионным пучком поверхности AlGaIn до уровня шероховатости 0,5–0,7 нм.

Использование фокусированных ионных пучков с нанометровыми поперечными размерами открывает новые возможности в создании электронных приборов гигагерцевого диапазона [1]. В первую очередь это автоматизированное получение рабочих областей элементов электроники с топологическими нормами менее 100 нм с высокой точностью работы ионного пучка.

Отработка методики формирования протяженных наноразмерных слоев проводилась с использованием модуля фокусированного ионного пучка (ФИП) и модуля сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) нанотехнологического комплекса «НТК-5 Нанофаб-100» фирмы NT MDT. Модуль ФИП представляет собой источник ионов галлия  $Ga^+$ , ускоренных напряжением до 30 кВ, с возможностью фокусировки ионного пучка до диаметра 13 нм. Таким образом, ФИП является инструментом, способным создать литографический рисунок с минимальным топологическим размером на уровне 13 нм. Такой диапазон размеров характерен для современных нанотехнологических процессов, включая глубокое травление. Травление ионным пучком позволяет получать наноразмерные канавки, не прибегая к использованию фотолитографии и жидкостного травления.

Для проведения экспериментов выбраны четыре пластины диаметром 50,8 мм. Первая пластина из монокристаллического кремния с отполированной поверхностью исходной шероховатостью 0,5 нм, вторая – из монокристаллического арсенида галлия с отполированной поверхностью и исходной шероховатостью 1 нм, третья пластина – из сапфира с выращенной на его поверхности структурой AlGaIn/GaIn, четвертая – из сапфира с нанесенным на него алюминием с помощью термического распыления источника. На основе этих материалов формируют акустоэлектрические элементы электроники. В отличие от кремния, на поверхности и в объеме которого акустоэлектрический эффект слабо выражен [2], арсенид галлия и структура AlGaIn/GaIn более перспективны [3], так как имеют высокую скорость звуковой волны в среде. Что же касается алюминия, то этот материал используется для создания контактных областей к вышеперечисленным материалам при создании акустоэлектрических приборов.

© К.А.Царик, В.В.Лосев, С.В.Бараш, 2008

Образцы поочередно загружались в вакуумную камеру нанотехнологического комплекса «Нанофаб» с фокусированным ионным пучком. Модификация поверхности образца проводилась при давлении  $10^{-8}$  торр. Для контроля модификации использовалось сканирование во вторичных электронах.

Основной проблемой при изготовлении нанозаготовок является шероховатость поверхности материала, на которой создаются наноструктуры. С помощью травления ионным лучом можно понизить шероховатость поверхности материала. Однако для разных материалов глубина травления для шлифовки до требуемой шероховатости различна. Это в первую очередь зависит от кристаллической структуры материала. Пленки алюминия и AlGaIn превысили предел (1 нм) по шероховатости поверхности. На рис.1,а показана морфология поверхности AlGaIn до травления ионным пучком, полученная в атомно-силовом микроскопе (АСМ). Шероховатость поверхности, измеренная АСМ, составила 3–4 нм. На рис.1,б показана морфология поверхности AlGaIn после травления ионным пучком, полученная в АСМ. Шероховатость поверхности, измеренная зондовым микроскопом, составила 0,5–0,7 нм. После чего был проведен эксперимент по травлению канавок.

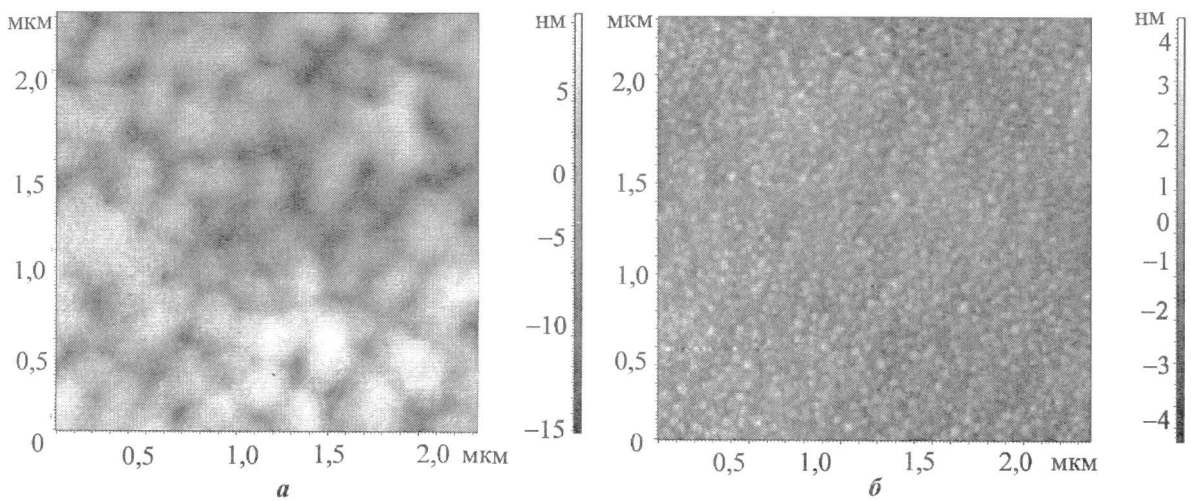


Рис.1. АСМ-изображение поверхности AlGaIn до (а) и после (б) травления ионным пучком

Опыт по полировке поверхности алюминиевой пленки показал, что полировка невозможна в связи с высокой скоростью травления аморфного алюминия ( $\approx 14$  нм/мс). Так как качество поверхности не удовлетворяет условию получения равномерной канавки шириной  $\sim 10$  нм и условию создания равномерной тонкой (порядка 10 нм и менее) пленки в качестве наноразмерных контактов, то исследования данного материала ограничены изучением скорости травления.

Для воздействия на поверхность образца создан файл-шаблон, используемый программой управления ионным пучком. Шаблон представляет собой потоковый файл, содержащий набор координат точек, время воздействия в них и количество проходов. Для создания шаблонов написана программа на языке C++. Для более точного контроля геометрии полученных структур и изучения скорости травления использовался сканирующий зондовый микроскоп, находящийся в другой камере нанотехнологического комплекса «Нанофаб».

Для изучения процессов травления опыты проводились при различных диаметрах пучка, токах пучка, а также временах воздействия пучка ионов. На рис.2 показана скорость травления Si при токах пучка 10 и 100 пА и GaAs при токах пучка 10 и 50 пА.

При травлении остросфокусированным ионным пучком происходит выброс вещества, и чем глубже травление, тем сильнее происходит травление боковых стенок получаемого кратера. Показанные на рисунке области замедления скорости травления связаны с затруднением выхода распыляемого материала [1]. Распыляемые ионным пучком атомы начинают смещаться в сторону и выбивать боковые атомы из материала.

На рис.3 показана скорость травления алюминиевой пленки. Из рисунка видно, что травление алюминия, полученного термическим распылением, на глубину до 110 нм происходит с постоянной скоростью. Это наблюдение позволяет не прибегать к дополнительным исследованиям при большей апертуре.

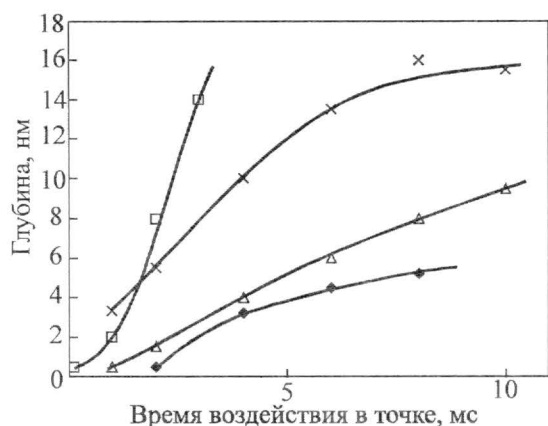


Рис.2. Зависимость глубины полученных канавок на кремнии при токах пучка 10 пА (◇) и 100 пА (□) и арсениде галлия при токах пучка 10 пА (Δ) и 50 пА (×) от времени воздействия в каждой точке

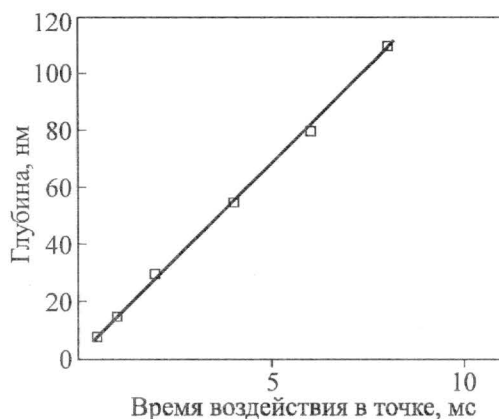


Рис.3. Зависимость глубины полученных канавок алюминия при токе пучка 10 пА от времени воздействия в каждой точке для алюминиевой пленки

При получении канавок ионным травлением имеются трудности на диэлектрических пленках типа AlGaIn. Предельно низкое качество изображения поверхности пленки широкозонного полупроводника во вторичных электронах приводит к необходимости работать на предельной для фокусированной ионной пушки апертуре, которая обеспечивает ток пучка 20 нА. Из рис.4 видно, что при травлении до глубины 160 нм скорость травления имеет линейный характер.

Графики, показанные на рис.5, получены в процессе оптимизирования времени воздействия и тока ионного пучка с целью получения канавок с минимальной шириной. Из графиков видно, что на арсениде галлия GaAs удалось добиться ширины реза в 70 нм при глубине 0,5 нм. Эти значения зависят не только от диаметра пучка, но и от свойств образца: плоскость среза, кристаллическая структура, аморфность и т.д. Например, при тех же параметрах травления на кремнии можно вытравить канавки шириной 45–50 нм и глубиной 2–3 нм.

Замедление травления боковых стен, расстояние между которыми превышает в несколько раз диаметр ионного пучка, связано со свободным вылетом нижележащих атомов из материала без вытеснения вышележащих боковых атомов.

После оптимизации ширины канавок создан потоковый файл, в котором учитывалась величина модифицированной области в точке и величина необходимого шага для получения ширины области между канавками, равной ширине канавок. Однако величина шага в потоковом файле также влияет на перекрытие точек воздействия ионного пучка. Соответственно при увеличении перекрытия точек увеличивается доза излучения [нКл/мкм<sup>2</sup>] и, следовательно, глубина канавки.

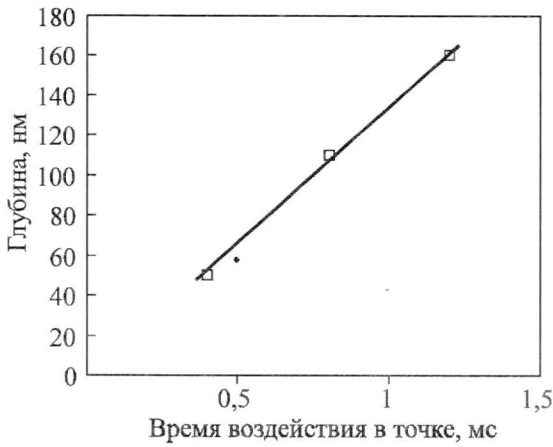


Рис.4. Зависимость глубины травления AlGaIn при токе пучка 20 нА от времени воздействия в каждой точке

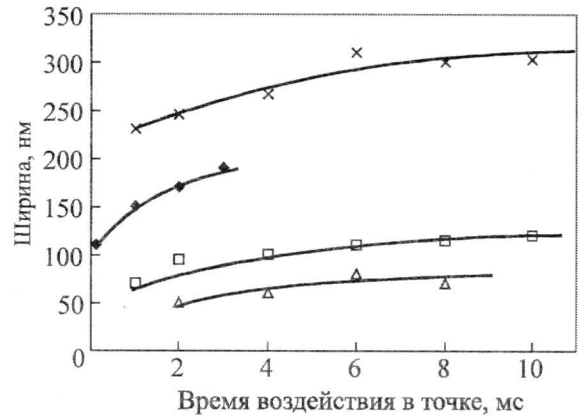


Рис.5. Зависимость ширины полученных канавок на кремнии при токах пучка 10 пА (Δ) и 100 пА (♦) и арсениде галлия при токах пучка 10 пА (□) и 50 пА (×) от времени воздействия в каждой точке

На рис.6 показан результат травления ионным пучком поверхности GaAs образца в форме «змейки» с высокой точностью и периодичностью структуры. Видно, что отсутствует дрейф механической подвижки в плоскости XY, который обычно является серьезной преградой на пути формирования протяженных нанозаполнений. Дрейф удалось избежать благодаря калибровке параметров движения перемещающей подвижки.

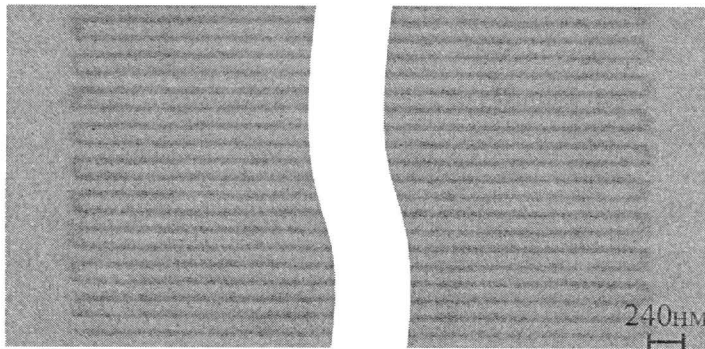


Рис.6. Изображение модифицированной поверхности GaAs во вторичных электронах (ширина канавки и расстояние между канавками примерно 70 нм)

Найдены закономерности формирования наноструктур фокусированным пучком ионов галлия, ускоренных напряжением 30 кВ, на поверхности материалов, которые можно использовать и для создания акустоэлектрических приборов СВЧ-диапазона. Исследования показывают, что скорость травления монокристаллических образцов гораздо меньше, чем аморфных или поликристаллических. Например, при времени воздействия в точке, равном 4 мс, глубина травления кремния и арсенида галлия составляла 3,2 и 4 нм соответственно, а алюминия – 55 нм. Следовательно, при травлении пленки алюминия на подложке арсенида галлия можно избежать излишнего травления арсенида галлия. Использование полирующего эффекта фокусированного ионного пучка позволяет получать поверхности материалов высокого качества, что дает хорошие перспективы для создания эффективных наноструктур на этих поверхностях.

Сведения по скоростям травления материалов и по топологическим размерам полученных элементов дают возможность разрабатывать методики построения прибора на основе акустоэлектрического эффекта.

Авторы благодарят Б.К.Медведева и В.К.Неволина за проявленный интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракты №02.523.12.3013 и №02.513.11.3152).*

### Литература

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Издательский дом «Круглый стол», 2001. – 527 с.
2. Campbell C. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. – San Diego: Academic Press, 1998, CA.
3. Velocity dispersion in GaN-based surface acoustic wave filters on (0001) sapphire substrates / N.Shigekawa, K.Nisimura, H.Yokoyama et al. / IEICE Electronics Express. – 2005. – Vol. 2, N 19. – P. 495–500.

Статья поступила  
18 января 2008 г.

**Царик Константин Анатольевич** – аспирант Учебно-научного центра «Зондовая микроскопия и нанотехнология» МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, нанотехнология и наноэлектроника.

**Лосев Виктор Васильевич** – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры общей физики МИЭТ. *Область научных интересов:* атомно-силовая микроскопия, зондовая нанотехнология.

**Бараи Сергей Владимирович** – магистрант кафедры квантовой физики и наноэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* зондовая микроскопия, наноэлектроника, ионно-лучевая литография.

### Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

С тематическими указателями статей за 1996 - 2007 гг., аннотациями и с содержанием последних номеров можно ознакомиться на нашем сайте:

<http://www.miet.ru/static/je/os.html>