

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**  
(СГУ)

Кафедра физики полупроводников

**Исследование глубоких примесных уровней в высокоомных подложках  
эпитаксиальных пластин арсенида галлия марки «САГ-2БК» методом  
туннельной спектроскопии**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 412 группы

направления 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Гордиенко Александра Валерьевича

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.И. Михайлов

инициалы, фамилия

Консультант

зав. лабораторией

должность, ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

И.О. Кожевников

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

А.И. Михайлов

инициалы, фамилия

Саратов 2020

## **ВВЕДЕНИЕ**

Физика поверхностных явлений в данный момент представляется одним из наиболее активно развивающихся разделов науки. Именно на фундаментальных исследованиях по части физики поверхности твердого тела основаны достижения нынешних микро- и нанoeлектроники, гетерогенного катализа, космических технологий и т.п. Изучение электронных, атомных и молекулярных процессов, происходящих на поверхности твердых тел, является важной задачей. И главное желание ученых на протяжении многих лет - конкретное наблюдение за действием отдельных атомов на поверхности твердого тела и исследование процессов при участии одиночных или небольших групп атомов.

Главную роль для понимания параметров каждого объекта имеет изучение его атомной структуры, следовательно определение поверхностных структур - один из важнейших разделов физики поверхности. В течении последних сорока лет микроструктура поверхностей твердых тел усиленно изучалась методами дифракции и рассеяния электронных и ионных пучков, а также с помощью электронной спектроскопии. Впрочем, большая часть данных методов изначально разрабатывалась для исследования объемной структуры твердых тел, следовательно они не всегда подходят для получения данных о структуре поверхности, особенно на атомном уровне. Продолжительное время главным методом исследования структуры поверхностей использовался метод ДМЭ (дифракции медленных электронов). В результате применения ДМЭ произошло открытие атомной реконструкции поверхностей - наличие особого их структурного состояния, которое отличается от объемного, и выявлено большое количество специфических фазовых переходов как на чистых поверхностях, так и на покрытых адсорбированными пленками. По методу дифракции медленных электронов тонкий коллимированный моноэнергетический пучок электронов низкой (порядка десятков электронвольт) энергии устремляется на поверхность исследуемого кристалла. Энергия падающих электронов относительно невелика, поэтому они проникают

на глубину одного-двух атомных слоев, следовательно анализ углового распределения дифракционных рефлексов, создающихся рассеянным пучком, свидетельствует о расположении атомов в поверхностном слое. Эта информация, методически связанная со структурой обратной решетки, усредняется по относительно большой площади поверхности кристалла.

Нужно отметить, что в данный момент имеются приборы, с помощью которых можно отображать отдельные атомы: полевой ионный микроскоп и просвечивающий электронный микроскоп высокого разрешения, хотя оба они имеют значительные ограничения по применимости, связанные с особыми требованиями к форме образцов. В полевом ионном микроскопе образцы должны обладать формой острых игл из токопроводящего материала с радиусом закругления не более 1000 Å, а в просвечивающем электронном микроскопе - тонких полосок толщиной менее 1000 Å. Начальные изображения атомов получены с использованием полевого ионного микроскопа, изобретенного Э. Мюллером в 1951 году. В данном приборе игольчатый образец находится в вакуумной камере напротив флуоресцирующего экрана. Камера заполняется гелием или аргоном до давления 4-10 торр, и при приложении к образцу высокого положительного напряжения рядом с наиболее выступающими участками поверхности возникает полевая ионизация атомов газа за счет туннелирования их электронов в образец. Создавшиеся ионы ускоряются этим же полем и бомбардируют флуоресцирующий экран, отображая с большим увеличением выступающие участки.

Исходя из этого, **цель данной работы:** Исследование глубоких примесных уровней в высокоомных подложках эпитаксиальных пластин арсенида галлия марки «САГ-2БК» методом туннельной спектроскопии.

#### **Задачи:**

Провести сравнение известных методик определения глубоких уровней в полупроводниках.

Выполнить измерение туннельных ВАХ подложек образцов планарных мезоструктур на основе высокомерного GaAs и произвести вычисление туннельных спектров на их основе.

Определить глубину залегания уровней по полученным туннельным спектрам и сравнить ее с теоретическими данными.

**Актуальность темы.**

Повышение стабильности параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем является одной из наиболее важных прикладных задач физики полупроводников, неразрывно связанной с выявлением физических причин нестабильности параметров структур, а также разработкой научно обоснованных технологических решений и надежных методов контроля характеристик материалов и приборов.

## Исследуемая структура

В работе приводится исследование методом туннельной спектроскопии глубоких примесных уровней в высокоомных подложках эпитаксиальных пластин GaAs марки «САГ-2БК».

Параметры исходных пластин марки САГ-2БК, используемых для изготовления эпитаксиальных структур, следующие: концентрация электронов в полуизолирующем слое  $n^- < 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , толщина слоя –  $350 \pm 20 \text{ мкм}$ , концентрация электронов в слое  $n = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , толщина слоя –  $0,3 \pm 0,01 \text{ мкм}$ , концентрация электронов в контактном слое –  $n^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , его толщина –  $0,2 \pm 0,01 \text{ мкм}$ .

## Оборудование и методика измерений

Исследования проводились с помощью СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР II (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР II

В основе работы СЗМ НАНОЭДЬЮКАТОР II (СЗМ – сканирующий зондовый микроскоп) лежит использование зависимости величины взаимодействия между зондом в виде острой вольфрамовой иглы и поверхностью исследуемого образца от величины расстояния зонд-образец. Взаимодействие может быть токовым (за счет туннельного тока) или силовым.

Детектируя туннельный ток, протекающий при постоянном электрическом смещении между зондом и образцом, можно исследовать только проводящие объекты, в то время как, детектируя силу взаимодействия зонд-поверхность, можно исследовать как проводящие, так и диэлектрические образцы. Чем резче зависимость тока или силы от расстояния между зондом и образцом, тем выше пространственное разрешение СЗМ, причем характер этой зависимости определяется физико-химическими свойствами исследуемой поверхности. Пространственное разрешение определяется также радиусом закругления кончика зонда, уровнем механических вибраций и тепловых дрейфов конструкции, а также уровнем электронных шумов измерительной аппаратуры. Кончик вольфрамовой иглы затачивается путем электрохимического травления и имеет радиус закругления вершины менее 100 нм. В СЗМ «НАНОЭДЬЮКАТОР II» игла-зонд закрепляется неподвижно. Образец может перемещаться относительно иглы по трем пространственным координатам:  $X$ ,  $Y$  – в плоскости образца;  $Z$  – по вертикали перпендикулярно плоскости  $XY$ . Результаты получали в режиме, когда зонд неподвижен и измерялись вольт-амперные характеристики, то есть при изменении напряжения измерялся туннельный ток (рисунок 2).

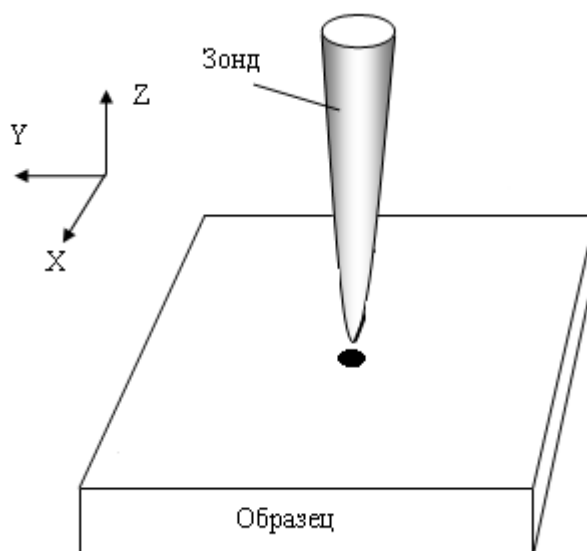


Рисунок 2 – Принцип сканирования

## Эксперимент

Исследуемый образец поместили в СЗМ. Данные снимались в трех точках. В каждой точке выполнялись три серии по 15 измерений в диапазонах  $\pm 1$  В,  $\pm 5$  В и  $\pm 8$  В.

После серии измерений на СЗМ, были выбраны подходящие для исследования вольт-амперные характеристики для первой, второй и третьей точек.

Так как микроскоп не оснащен системой охлаждения, возникают тепловые шумы, которые, в нашем случае, получаются сравнимы с полезным сигналом.

Для исключения шумов были выбраны группы однотипных графиков вольт-амперных характеристик, которые усреднялись. По данным из полученных усредненных графиков было рассчитано отношение дифференциальной проводимости от напряжения к обычной проводимости для построения графика спектра плотности состояний.

Дифференциальная проводимость находилась по формуле:

$$\sigma_d = \frac{dI}{dU} / \frac{I}{U} \quad (1)$$

В области относительно малых напряжений (до двух вольт) результаты зависимости, рассчитанной по формуле (1) пропорциональны локальному спектру плотности состояний в данной точке измерения.

Отделив однотипные ВАХ в разных точках, усреднив их и рассчитав отношение дифференциальной проводимости к нормальной были получены графики спектра плотности состояний, на которых стали видны пики. Если в процессе туннелирования электрон передаёт часть энергии локальному примесному (и не только) состоянию, то открывается дополнит. канал для туннелирования. Включение "туннелирования через примесное состояние" увеличивает проводимость контакта при  $eV = w_0$ , где  $w_0$  - энергия возбуждения примесного центра. На кривой спектра плотности состояний это отражают

дополнительные пики. То есть  $eV$  (или  $q \cdot U$ ) — это энергия в электронвольтах, соответствующая энергии активации примесного уровня.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были сняты серии вольт-амперных характеристик с разных точек высокоомной подложки эпитаксиальных пластин арсенида галлия марки «САГ-2БК». Для избавления от тепловых шумов была применена методика, которая заключалась в отборе однотипных вольт-амперных характеристик (похожих по характеру и величине токов), их усреднению и построению графиков спектров плотности состояний. Из сравнения полученных данных выделялись повторяющиеся пики, которые не связаны с тепловыми шумами. Эти пики обозначают глубокие уровни. В первой точке глубина залегания:  $E_v+0,55\pm 0,05$  эВ, во второй точке:  $E_v+0,66\pm 0,03$  эВ, в третьей точке:  $E_v+0,58\pm 0,05$  эВ. Полученные данные схожи с дефектом EL2, уровень которого:  $E_v+0,52$  эВ.