

# ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.382.323

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).22-33

ГРНТИ 29.19.22

Специальность ВАК 2.2.2

*Научная статья*

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖПРИБОРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ НА КРЕМНИИ

Боченков Г. М.<sup>1</sup>, Федоров Д. Г.<sup>1</sup>, Желаннов А. В.<sup>1</sup>, Селезнев Б. И.<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород, Россия)<sup>2</sup>Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого  
(Великий Новгород, Россия)

**Аннотация** Рассмотрены различные методики формирования межприборной изоляции на гетероструктурах AlGaIn/AlIn/GaN, выращенные на кремниевых подложках. Показаны способы изоляции с применением технологии ионной имплантации азота (N<sup>+</sup>) и изоляции приборов методом травления мезы. Для оценки удельного сопротивления на поверхности AlGaIn/AlIn/GaN были изготовлены тестовые структуры с омическими контактами, разделёнными полупроводником с известными размерами. Омические контакты формировались методом электронно-лучевого напыления системы металлов Ti/Al/Ni/Au. Меза-изоляция формировалась путём реактивно-ионного травления на установке, оснащённой источником индуктивно-связанной плазмы в хлорсодержащей среде на основе газовой смеси Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub>/Ar. Травление проводилось при мощности источника индуктивно-связанной плазмы 40 Вт и высокочастотной мощности 80 Вт через маску фоторезиста. Удельное поверхностное сопротивление после травления мезы составило  $5.5 \cdot 10^8$  Ом/□. Однако существуют недостатки процесса травления мезы, связанные с ионной бомбардировкой поверхности и профилем боковых стенок. Альтернативный способ изготовления межприборной изоляции – ионная имплантация. Технология планарной ионной имплантации позволяет избежать контакта затвора со слоем двумерного электронного газа на боковых стенках мезы, что приводит к стабильной работе прибора. В качестве имплантируемой примеси для формирования межприборной изоляции методом ионной имплантации были выбраны ионы азота (N<sup>+</sup>). Исследованы дозовые зависимости удельного поверхностного сопротивления межприборной изоляции. Установлены режимы ионной имплантации: энергия внедряемых ионов 125 кэВ, низкие дозы –  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>, имплантация проводится без наличия защитных диэлектрических покрытий. Сопротивление изоляции, полученное методом ионной имплантации азота N<sup>+</sup>, при воздействии температур в диапазоне от 250 до 350°C имеет стабильно высокие значения.

**Ключевые слова:** межприборная изоляция, гетероэпитаксиальная структура AlGaIn/AlIn/GaN, удельное поверхностное сопротивление, травление мезы, ионная имплантация азотом, режимы имплантации, отжиг

**Для цитирования:** Боченков Г. М., Федоров Д. Г., Желаннов А. В., Селезнев Б. И. Формирование межприборной изоляции в нитрид-галлиевых гетероструктурах на кремнии // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 22-33. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).22-33

*Research Article*

## FORMATION OF INTER-DEVICE ISOLATION IN GALLIUM NITRIDE HETEROSTRUCTURES ON SILICON

Bochenkov G. M.<sup>1,2</sup>, Fedorov D. G.<sup>1</sup>, Zhelannov A. V.<sup>1</sup>, Seleznev B. I.<sup>2</sup><sup>1</sup>Joint Stock Company "OKB-Planeta" (Veliky Novgorod, Russia)<sup>2</sup>Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

**Abstract** Various methods of forming inter-device insulation on AlGaIn/AlIn/GaN heterostructures grown on silicon substrates are considered. Methods of isolation using nitrogen (N<sup>+</sup>) ion implantation technology and

isolation of devices by mesa etching are shown. To assess the resistivity on the surface of AlGaN/AlN/GaN, test structures with ohmic contacts separated by a semiconductor with known dimensions were made. The ohmic contacts were formed by electron-beam sputtering of the Ti/Al/Ni/Au metal system. Mesa insulation was formed by reactive ion etching on a plant equipped with an inductively coupled plasma source in a chlorine-containing medium based on a Cl<sub>2</sub>/BCl<sub>3</sub>/Ar gas mixture. The etching was carried out at a power of an inductively coupled plasma source of 40 W and a high-frequency power of 80 W through a photoresist mask. The specific surface resistance after mesa etching was 5.5•10<sup>8</sup>ohms/sec. However, there are disadvantages of the mesa etching process associated with ion bombarding of the surfaces and the profile of the side walls. An alternative method of manufacturing inter-device insulation is ion implantation. The technology of planar ion implantation avoids the contact of the gate with a layer of two-dimensional electron gas on the side walls of the mesa, which leads to stable operation of the device. Nitrogen ions (N<sup>+</sup>) were selected as an implantable impurity for the formation of inter-device isolation by ion implantation. The dose dependences of the specific surface resistance of the inter-device insulation have been investigated. The modes of ion implantation have been established: the energy of the introduced ions is 125 keV, low doses are 3 • 10<sup>13</sup> cm<sup>-2</sup>, the implantation is carried out without the presence of protective dielectric coatings. The insulation resistance obtained by the method of ion implantation of nitrogen N<sup>+</sup>, when exposed to temperatures in the range from 250 to 350 °C, has consistently high values.

**Keywords:** inter-device isolation, AlGaN/AlN/GaN heteroepitaxial structure, specific surface resistance, mesa etching, nitrogen ion implantation, implantation modes, annealing

**For citation:** Bochenkov G. M., Fedorov D. G., Zhelannov A. V., Seleznev B. I. Formation of inter-device isolation in gallium nitride heterostructures on silicon // Vestnik NovSU. 2023. 1(130). 22-33. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).22-33

## Введение

Одно из основных преимуществ GaN заключается в его способности образовывать гетеропереходы с материалами с более широкой запрещенной зоной, такими как нитрид алюминия-галлия (AlGaN) и нитрид алюминия (AlN). При этом формируется канал двумерного электронного газа (ДЭГ), который характеризуется высокой плотностью ( $>10^{13}/\text{см}^2$ ) и подвижностью электронов до 2000 см<sup>2</sup>/В·с. Данное свойство позволяет рассматривать нитрид галлия как материал для изготовления приборов, работающих на высоких частотах. Кроме того, широкая запрещенная зона и высокая теплопроводность GaN делают его пригодным для использования в условиях высоких температур [1].

Всё это делает структуры на основе GaN перспективными для изготовления микроприборов нового поколения. Кроме того, гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN, выращенные на подложках Si имеют большие размеры и меньшую стоимость.

Одним из важнейших этапов в технологическом маршруте изготовления приборов на основе гетероструктур AlGaN/GaN является создание межприборной изоляции. В настоящей работе рассмотрены различные методики формирования межприборной изоляции. Показаны способы изоляции с применением технологии ионной имплантации ионами азота (N<sup>+</sup>) и изоляции приборов методом травления мезы, а также проведен сравнительный анализ удельного сопротивления полученных высокоомных слоёв в гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN. На рисунке 1 схематично представлены транзисторные структуры с межприборной изоляцией, сформированной методом ионной имплантацией (рисунок 1 а) и травления мезы (рисунок 1 б).

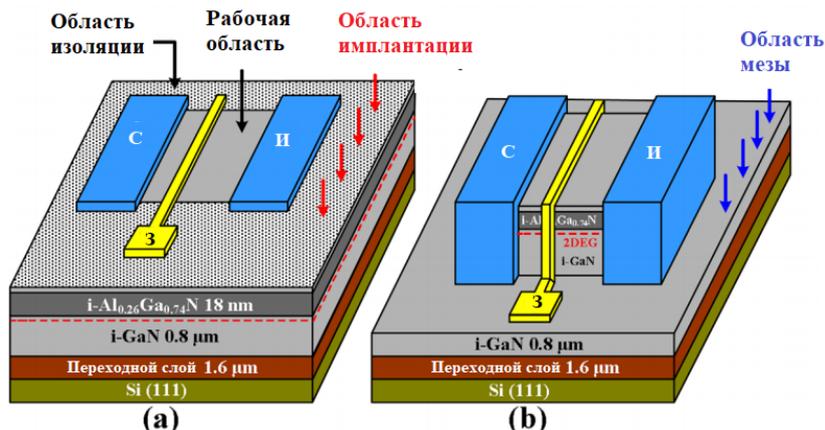


Рисунок 1. Транзисторные структуры с межприборной изоляцией, сформированной ионной имплантацией (а) и травлением мезы (б)

### Изоляция приборных структур методом травления мезы

Меза-изоляция – это наиболее доступный в настоящее время метод обеспечения изоляции устройств. При использовании этого метода активные полупроводниковые слои между устройствами физически удаляются. Барьер вытравливается до изолирующего буферного слоя GaN. В качестве исследуемого образца использовалась эпитаксиальная гетероструктура AlGaN/AlN/GaN, выращенная методом MOCVD на кремниевой подложке. Схематичное изображение эпитаксиальной гетероструктуры AlGaN/AlN/GaN представлено на рисунке 2. В нелегированном буферном слое GaN возникают электронная проводимость за счёт фоновых примесей кислорода, а также вакансий азота, действующие как мелкие доноры. Эти факторы сложно контролировать в процессе роста. Использование легированных углеродом буферных слоёв позволяет подавить фоновую проводимость и обеспечить высокие значения напряжения пробоя.

Основным методом формирования меза-изоляции в эпитаксиальных гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN является метод «сухого» травления. Это связано с тем, что кристаллическая структура нитрида галлия имеет сильные ионные связи, что делает его устойчивым к большинству кислот и оснований. В результате чего классический метод жидкостного травления не подходит для нитридных полупроводников.

Для оценки сопротивления на поверхности AlGaN/AlN/GaN были изготовлены тестовые структуры с омическими контактами, разделёнными полупроводником с известными размерами (рисунок 3). Омические контакты были сформированы методом электронно-лучевого напыления системы металлов Ti/Al/Ni/Au.

Меза-изоляция формировалась методом реактивного ионного травления на установке, оснащенной источником индуктивно-связанной плазмы в хлорсодержащей среде на основе газовой смеси  $Cl_2/BCl_3/Ar$  с расходами газов 20/60/10 sccm, соответственно. Процесс травления проходил при мощности источника индуктивно-связанной плазмы 40 Вт и высокочастотной мощности 80 Вт через маску фоторезиста. Для

обеспечения надежной изоляции травление проводилось до буферного слоя на глубину 130 нм. Далее были проведены замеры удельного поверхностного сопротивления  $R_s$  (Ом/□) на тестовых структурах (таблица 1).



Рисунок 2. Схематичное изображение экспериментальной гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN

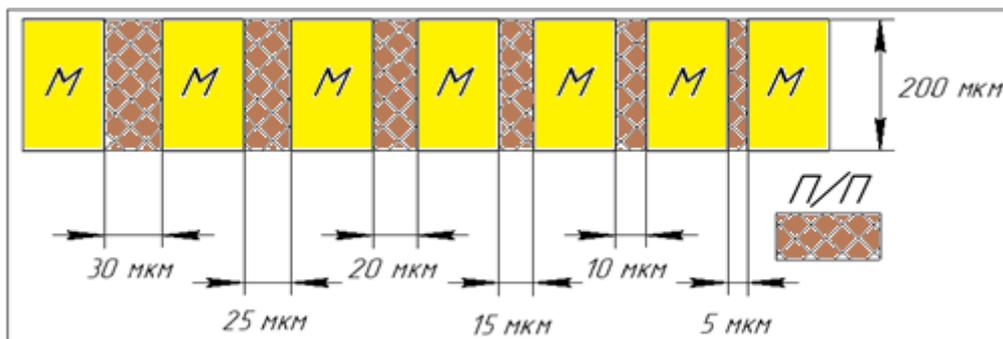


Рисунок 3. Схематичное изображение тестовых структур

Таблица 1. Результаты измерений удельного поверхностного сопротивления после травления мезы

Длина резистора, мкм	30	25	20	15	10	5
$R_s$ (Ом/□)	$5,52 \cdot 10^8$	$5,14 \cdot 10^8$	$1,23 \cdot 10^8$	$1,39 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$3,35 \cdot 10^8$

При травлении удаляется область двумерного электронного газа вокруг транзистора. Однако при травлении, из-за ионной бомбардировки поверхности, образуются вакансии азота, обладающие свойством донорной примеси. Это приводит к высокому поверхностному току утечки. Большой ток утечки вызывает потерю мощности в закрытом состоянии, дополнительные шумы и проблемы с надёжностью. Недостатками процесса травления мезы, связанными с профилем боковых стенок, являются возможность контакта барьерных слоёв с двумерным электронным газом (ДЭГ) эпитаксиальной гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN, что вызывает снижение напряжения пробоя. Вертикальные стенки мезы могут быть причиной разрыва затворной металлизации.

## Формирование межприборной изоляции методом ионной имплантации азота

Альтернативный способ изготовления межприборной изоляции – ионная имплантация. Высокое сопротивление изолирующей области обеспечивается за счёт глубоких уровней ловушек или центров рекомбинации. Такой подход позволяет сохранить плоскую морфологию прибора. Использование ионной имплантации в качестве метода формирования межприборной изоляции в гетероструктурах AlGaN/AlN/GaN позволяет избежать контакта затвора со слоем двумерного электронного газа (ДЭГ) на боковых стенках мезы, что приводит к стабильной работе прибора.

Внедряемые в кристаллическую решетку полупроводника ионы примеси создают различные дефекты в кристаллической структуре полупроводника, которым соответствуют глубокие уровни-ловушки в запрещенной зоне полупроводника, захватывающие свободные носители заряда, в результате чего материал становится изолирующим.

Для создания изоляции необходимого качества требуются равномерные по толщине эпитаксиального слоя распределения дефектов с концентрацией, специфической для типа полупроводника и уровня его легирования. Дозы внедряемых ионов при этом должны соответствовать оптимальной концентрации создаваемых дефектов. При более низких дозах ионного легирования скорость удаления носителей оказывается недостаточной для подавления проводимости; при повышенных дозах плотность дефектов становится настолько высокой, что сопротивление уменьшается из-за включения механизма прыжковой проводимости. Чем выше уровень легирования, тем большая концентрация дефектов требуется для создания изолирующей области.

Таким образом, широкое практическое использование ионной имплантации для формирования изоляции в бинарных и тройных полупроводниковых соединениях возможно только при условии, что для заданных типов полупроводников определены оптимальные параметры ионного легирования и термообработок [2].

Для формирования изоляции в зарубежных источниках сообщалось об использовании различных ионов, таких как азот [3], кислород [4], цинк [5], аргон [6], магний [7], бор [8], криптон [9] и железо [10]. Также, в работе [11] сообщалось об эффективности использования ионов водорода, гелия и азота для имплантации. Исследование показывает, что устройства, изготовленные с помощью ионной имплантации, демонстрируют такие же характеристики по постоянному току, что и устройства с меза-изоляцией, но при этом демонстрируют более высокое напряжение пробоя 150 В при том же расстоянии от затвора до стока 10 мкм. В данной работе в качестве имплантируемой примеси для формирования межприборной изоляции методом ионной имплантации были выбраны ионы азота ( $N^+$ ). Азот является безопасным и более технологичным газом для получения потока ионов.

В процессе внедрения ионов азота в кристаллическую решётку GaN создаётся большое количество точечных дефектов, которые возникают в результате замещения

галлия азотом. Такие дефекты формируют стабильные глубокие ловушки в запрещённой зоне GaN для электронов и дырок. Данный эффект позволяет создавать высокоомные области в рабочих слоях гетероструктур на основе GaN [12].

Для оценки сопротивления изоляции на поверхности образцов были сформированы тестовые структуры, как и в случае травления мезы, рисунок 3.

Контакты формировались методом электронно-лучевого напыления системы металлов Ti/Al/Ni/Au толщиной 0.03/0.14/0.03/0.06 мкм, соответственно, на фоторезистивную маску с последующим удалением металлизации методом взрывной фотолитографии [13]. Для удаления металлических и органических загрязнений с поверхности пластины перед напылением образцы были химически обработаны в растворе HCl:H<sub>2</sub>O 1:1 в течение 300 секунд. После создания контактных площадок проводился отжиг металлизации при температуре 800°C в течение 30 секунд.

Для обеспечения надёжной межприборной изоляции методом ионной имплантации, необходимо выбрать такую энергию имплантации, чтобы примесь залегала по всей глубине гетероструктуры до буферного слоя. Для подбора оптимальной энергии при проведении операции ионного легирования было проведено численное моделирование распределения ионов азота в нитриде галлия с использованием алгоритма TRIM (SRIM). Наилучшее качество изоляции наблюдается при расположении максимума распределения в области двумерного электронного газа на гетерогранице AlGaN/GaN. Исходя из результатов моделирования, энергия имплантации составила 125 кэВ. Распределение N<sup>+</sup> после имплантации в гетероэпитаксиальных структурах на основе GaN при энергии 125 кэВ представлено на рисунке 4.

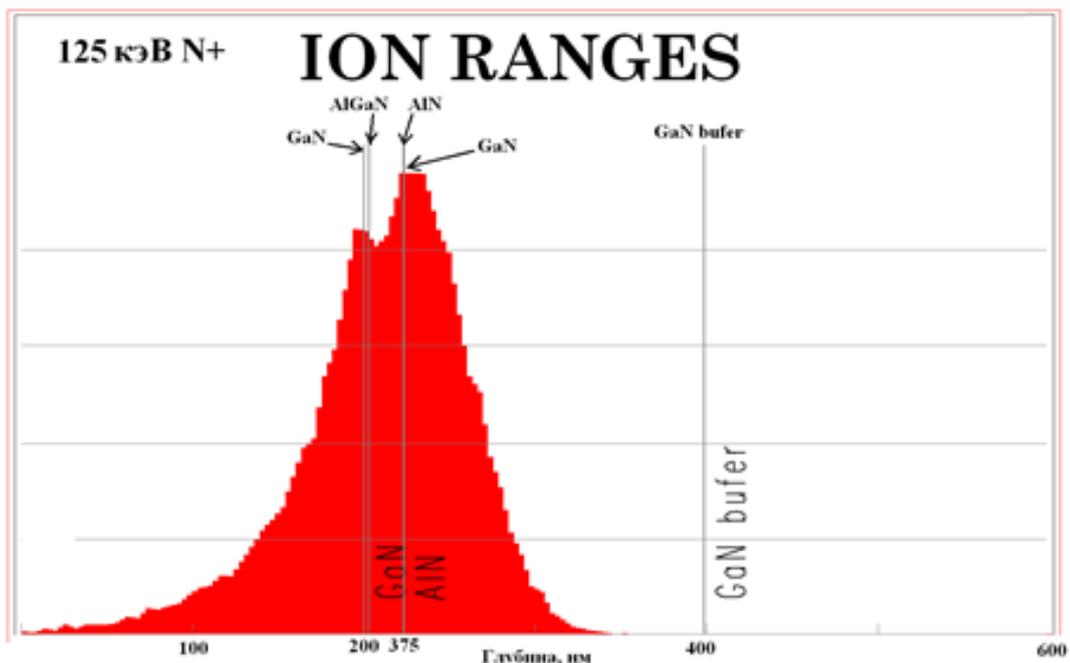


Рисунок 4. Распределение N<sup>+</sup> после имплантации в гетероэпитаксиальных структурах на основе GaN при энергии 125 кэВ

Из данного графика видно, что при энергии 125 кэВ максимум внедренной примеси залегает в рабочих слоях эпитаксиальной структуры AlGaN/AlN/GaN, что положительно сказывается на значениях сопротивления изоляции. На рисунке 4 можно наглядно видеть, как распределяется азот в рабочих слоях гетероструктуры на основе GaN. Видно, что при энергии 125 кэВ максимум концентрации азота приходится на слой двумерного электронного газа, что свидетельствует о более эффективном истощении этого слоя из-за дефектов, создаваемых азотом, а, следовательно, будут более высокими значения сопротивления изоляции.

Для выбора оптимальной дозы имплантации при формировании межприборной изоляции, было проведено несколько процессов ионного легирования с различными дозами и энергией внедряемых ионов  $E=125$  кэВ, определённой с помощью программы «TRIM». Дозы имплантации составили  $6.25 \cdot 10^{11}$  -  $6.25 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. В работе [14] исследовалась имплантация азота через слой нитрида кремния для межприборной изоляции силовых GaN/Si-транзисторов до высоких доз имплантации  $6 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>.

В настоящей работе ионная имплантация N<sup>+</sup> в гетероэпитаксиальные структуры AlGaN/GaN проводилась в незащищенные фоторезистом области на поверхности пластины, как показано на рисунке 5. Процесс проводился в вакууме не хуже  $4 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. на установке ионного легирования «Везувий-1». Данная установка представляет собой ускоритель ионов со ступенчатой регулировкой их энергии от 50 кэВ до 150 кэВ через каждые 25 кэВ с последующим разделением ионов по массам в магнитном масс-сепараторе.

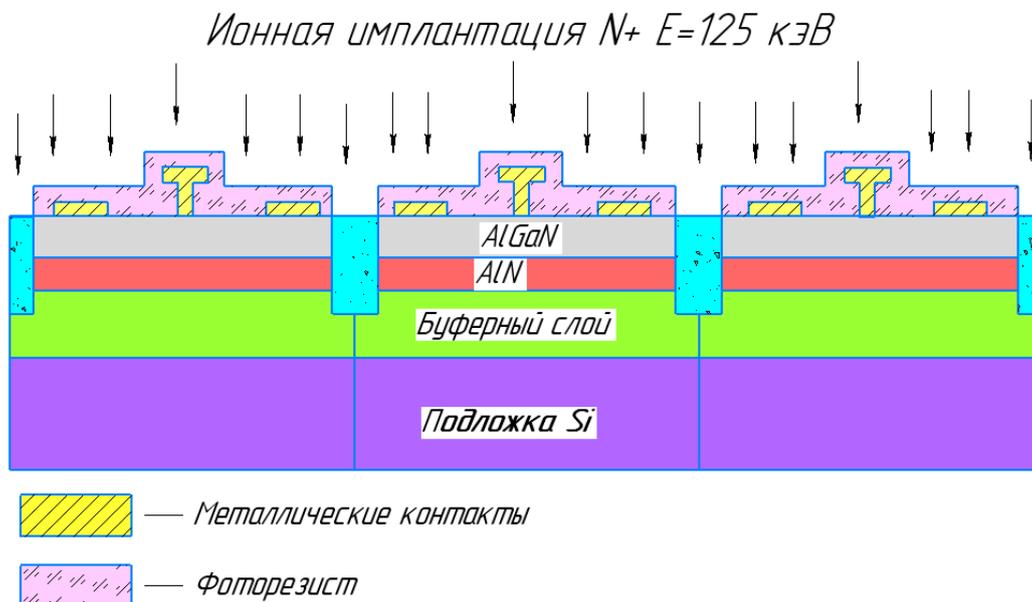


Рисунок 5. Изоляция структуры, сформированная ионной имплантацией азота

После проведения процесса ионной имплантации были проведены замеры удельного сопротивления изоляции на тестовых структурах на резисторе длиной 30 мкм. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений удельного поверхностного сопротивления после ионной имплантации

$D, \text{см}^{-2}$	$R_{\text{уд}}, \text{Ом}/\square$
$6,25 \cdot 10^{11}$	$3,55 \cdot 10^3$
$1,25 \cdot 10^{12}$	$2,60 \cdot 10^4$
$1,87 \cdot 10^{12}$	$3,47 \cdot 10^6$
$2,5 \cdot 10^{12}$	$5,66 \cdot 10^8$
$3,13 \cdot 10^{12}$	$3,20 \cdot 10^{10}$
$3,75 \cdot 10^{12}$	$6,81 \cdot 10^{10}$
$4,37 \cdot 10^{12}$	$7,56 \cdot 10^{10}$
$6,25 \cdot 10^{12}$	$7,47 \cdot 10^{10}$
$3,13 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{11}$
$6,25 \cdot 10^{13}$	$7,27 \cdot 10^{10}$

Из данной таблицы и рисунке 6 видно, что удельное поверхностное сопротивление увеличивается с ростом дозы имплантации и максимальное значение  $R_s$  составило  $1 \cdot 10^{11} \text{ Ом}/\square$  при дозе имплантации  $3,13 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Дальнейшее увеличение значения дозы имплантации не ведёт к увеличению удельного поверхностного сопротивления межприборной изоляции.



Рисунок 6. График зависимости удельного поверхностного сопротивления от дозы имплантируемой примеси N+ в AlGaN/AlN/GaN

В работе [14] наименьшие токи утечки на тестовой структуре наблюдались при высокой дозе имплантации  $3,75 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

### Влияние отжига на сопротивление межприборной изоляции, сформированной ионной имплантацией азота

В технологическом маршруте изготовления транзисторных структур присутствуют технологические операции, в процессе которых температура достигает 250°C. Для выявления влияния высоких температур на величину сопротивления межприборной изоляции необходимо проведение испытаний на термостабильность. Для этого образцы, на которых были получены максимальные удельные поверхностные сопротивления, поочередно отжигались при температурах 250°C, 300°C и 350°C в течение 30 мин. После каждого отжига на образцах были повторно проведены измерения удельного сопротивления изоляции. Замеры проводились на полупроводниковом резисторе длиной 30 мкм. Результаты представлены в таблице 3. График зависимости удельного сопротивления изоляции от температуры отжига представленный на рисунке 7.

Таблица 3. Замеры удельного сопротивления изоляции после отжигов

T, °C	До отжига	250	300	350
R <sub>уд</sub> (Ом/□)	1·10 <sup>11</sup>	1,8·10 <sup>11</sup>	8·10 <sup>10</sup>	3,6·10 <sup>9</sup>

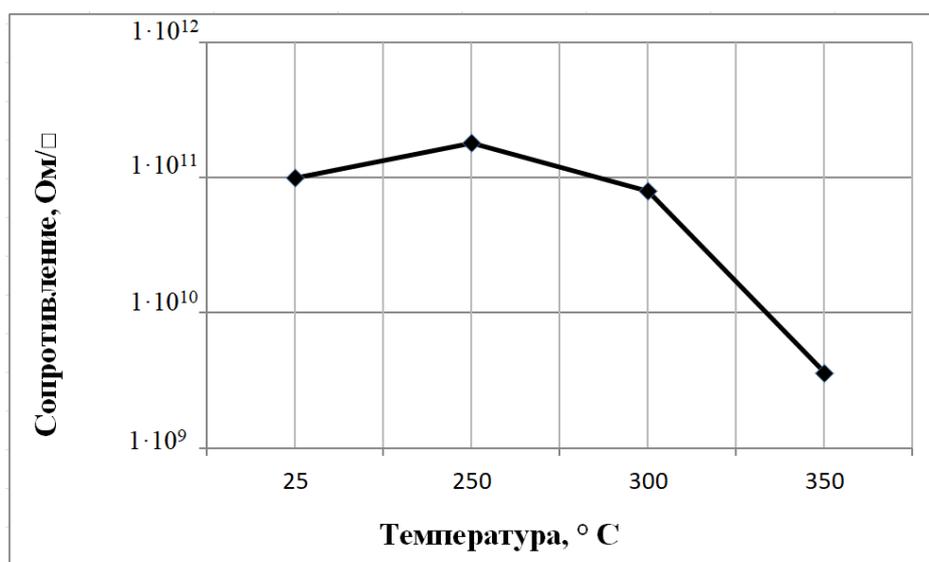


Рисунок 7. График зависимости удельного сопротивления изоляции от температуры отжига

Из данного графика видно, что сопротивление изоляции, полученное методом ионной имплантации азота N<sup>+</sup>, в диапазоне температур отжига от 250 до 350°C имеет стабильно высокие значения.

### Заключение

Гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN, выращенные на кремниевых подложках, обладают уникальными параметрами, имеют большие размеры и меньшую стоимость. Одним из важных этапов в технологическом маршруте изготовления приборов на основе

гетероструктур AlGaIn/GaN является создание межприборной изоляции. Рассмотрены различные методики формирования межприборной изоляции. Показаны способы изоляции с применением технологии ионной имплантации ионами азота ( $N^+$ ) и изоляции приборов методом травления мезы. Для оценки удельного сопротивления на поверхности AlGaIn/AlN/GaN были изготовлены тестовые структуры с омическими контактами, разделёнными полупроводником с известными размерами. Омические контакты формировались методом электронно-лучевого напыления системы металлов Ti/Al/Ni/Au. Меза-изоляция формировалась путем реактивно-ионного травления на установке, оснащённой источником индуктивно-связанной плазмы в хлорсодержащей среде на основе газовой смеси  $Cl_2/BCl_3/Ar$ . Травление проводилось при мощности источника индуктивно-связанной плазмы 40 Вт и высокочастотной мощности 80 Вт через маску фоторезиста. Удельное поверхностное сопротивление после травления мезы составило  $5.52 \cdot 10^8$  Ом/□. Однако существуют недостатки процесса травления мезы, связанные с профилем боковых стенок. Из-за наличия боковой стенки мезы металлический затвор, а также барьерный слой могут контактировать с двумерным электронным газом (ДЭГ) эпитаксиальной гетероструктуры AlGaIn/AlN/GaN, что может вызвать дополнительный ток утечки затвора и снизить напряжение пробоя. Кроме того, вертикальные стенки мезы могут быть причиной разрыва затворной металлизации.

Технология планарной ионной имплантации позволяет избежать контакта затвора со слоем двумерного электронного газа (ДЭГ) на боковых стенках мезы, что приводит к стабильной работе прибора. В данной работе в качестве имплантируемой примеси для формирования межприборной изоляции методом ионной имплантации были выбраны ионы азота ( $N^+$ ). Азот является безопасным газом и более технологичным для получения потока ионов. Исследованы дозовые зависимости удельного поверхностного сопротивления межприборной изоляции. Установлены режимы ионной имплантации: энергия внедряемых ионов 125 кэВ, низкие дозы –  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>, имплантация проводится без наличия защитных диэлектрических покрытий. Сопротивление изоляции, полученное методом ионной имплантации азота  $N^+$ , в диапазоне температур отжига от 250 до 350°C имеет стабильно высокие значения.

В технологическом маршруте изготовления транзисторных структур присутствуют технологические операции, в процессе которых температура достигает 250°C. Сопротивление изоляции, полученное методом ионной имплантации азота  $N^+$ , в диапазоне температур отжига от 250 до 350°C имеет стабильно высокие значения.

### Список литературы

1. Hsien C., Kao H. L., Chao-Hung C., Fend Tso C. Sidewall defects of AlGaIn/GaN HEMTs evaluated by low frequency noise Analysis // *Microelectronic Reliability*. 2013. 53(12). 1897-1900. DOI: 10.1016/j.microrel.2013.06.015
2. Sharma N., Kumar Dhakad S., Chaturved N., Periasamy C. Refined isolation techniques for GaN-based high electron mobility transistors // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2018. 87. 195-201. DOI: 10.1016/j.mssp.2018.05.015

3. Kasai H., Ogawa H., Nishimura T., Nakamura T. Nitrogen ion implantation isolation technology for normally-off GaN MISFETs on p-GaN substrate // *Physica Status Solidi Current Topics in Solid State Physics*. 2014. 11. 3-4. DOI: 10.1002/pssc.201300436
4. Shiu J.-Y., Desmaris V., Huang J.-C., Chang C.-T. Oxygen ion implantation isolation planar process for AlGaIn/GaN HEMTs // *Electron Device Letters*. 2007. 28(6). 476-480. DOI: 10.1109/LED.2007.896904
5. Oishi T., Nanjo T., Miura N., Suita M. Highly resistive GaN layers formed by ion implantation of Zn along the c axis // *Journal of Applied Physics*. 2003. 94(3).1662-1666. DOI: 10.1063/1.1590412
6. Boudart B., Pesant J. C., Guhel Y., Dhamelincourt P. Raman characterization of Ar<sup>+</sup> ion-implanted GaN // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2002. 33(4). 283-286. DOI: 10.1002/jrs.856
7. Boudart B., Pesant C. J., Guhel Y., Dhamelincourt P. Raman characterization of Mg<sup>+</sup> ion-implanted GaN // *Journal of Physics Condensed Matter*. 2004. 16(2). 49-53. DOI: 10.1088/0953-8984/16/2/006
8. Jiang Y., Li L., Wang Qp, Tamai K. Field isolation for GaN MOSFETs on AlGaIn/GaN heterostructure with boron ion implantation // *Semiconductor Science and Technology*. 2014. 29(5). 29-38. DOI: 10.1088/0268-1242/29/5/055002
9. Arulkumaran S., Rahjan K., Ng Geok-Ing, Saw G. Z. Improved device isolation in AlGaIn/GaN HEMTs on Si by heavy Kr<sup>+</sup> Ion implantation // *Conference: 72nd Device Research Conference, June 22-25, 2014. Santa Barbara (California), The University of California, 2014. 72. 115-120. DOI: 10.1109/DRC.2014.6872324*
10. Umeda H., Anda Y., Takizawa T., Ueda T. High-voltage isolation technique using Fe<sup>+</sup> implantation for monolithic integration of AlGaIn/GaN transistors // *Transactions on Electron Devices*. 2013. 60(2). 771-775. DOI: 10.1109/TED.2012.2230264
11. Binari S., Dietrich H., Kelner G., Rowland L. B., Doverspike K. H, He, and N implant isolation of n-type GaN // *Journal of Applied Physics*. 1995. 78(5). 78-84. DOI: 10.1063/1.360712
12. Tuz Johra F. Effect of light-ions implantation on resistivity of GaN thin // *Electronic Materials Letters*. 2014. 10(4). 699-702. DOI: 10.1007/s13391-013-3160-9
13. Желаннов А. В., Ионов А. С., Петров А. В., Селезнев Б. И. Использование технологии микропрофилирования при формировании приборных структур на основе нитрида галлия // *Нано- и микросистемная техника*. 2017. 19. 7. 399-405. DOI: 10.17587/nmst.19.399-405
14. Егоркин В. И., Оболенский С. В., Земляков В. Е., Зайцев А. А., Гармаш В. И. Исследование ионной имплантации азота через слой нитрида кремния для межприборной изоляции GaN/Si- транзисторов // *Письма в Журнал технической физики*. 2021. 47(18). 15-17. DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51465.18805

### References

1. Chuang H., Kao H., Fend Tso C. Sidewall defects of AlGaIn/GaN HEMTs evaluated by low frequency noise analysis // *Microelectronic Reliability*. 2013. 53(12). 1897-1900. DOI: 10.1016/j.microrel.2013.06.015
2. Sharma N., Kumar Dhakad S., Chaturved N., Periasamy C. Refined isolation techniques for GaN-based high electron mobility transistors // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2018. 87. 195-201. DOI: 10.1016/j.mssp.2018.05.015
3. Kasai H., Ogawa H., Nishimura T., Nakamura T. Nitrogen ion implantation isolation technology for normally-off GaN MISFETs on p-GaN substrate // *Physica Status Solidi Current Topics in Solid State Physics*. 2014. 11. 3-4. DOI: 10.1002/pssc.201300436

4. Shiu J.-Y., Desmaris V., Huang J.-C., Chang C.-T. Oxygen ion implantation isolation planar process for AlGaIn/GaN HEMTs // *Electron Device Letters*. 2007. 28(6). 476-480. DOI: 10.1109/LED.2007.896904
5. Oishi T., Nanjo T., Miura N., Suita M. Highly resistive GaN layers formed by ion implantation of Zn along the c axis // *Journal of Applied Physics*. 2003. 94(3). 1662-1666. DOI: 10.1063/1.1590412
6. Boudart B., Guhel Y., Pesant J. Raman characterization of Ar<sup>+</sup> ion-implanted GaN // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2002. 33(4). 283-286. DOI: 10.1002/jrs.856
7. Boudart B., Guhel Y., Pesant J. Raman characterization of Mg<sup>+</sup> ion-implanted GaN // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2004. 16(2). 49-53. DOI: 10.1088/0953-8984/16/2/006
8. Jiang Y., Wang Q., Tamai K. Field isolation for GaN MOSFETs on AlGaIn/GaN heterostructure with boron ion implantation // *Semiconductor Science and Technology*. 2014. 29(5). 29-38. DOI: 10.1088/0268-1242/29/5/055002
9. Arulkumaran S., Ranjan K., Ng Geok-Ing, Saw G. Z. Improved device isolation in AlGaIn/GaN HEMTs on Si by heavy Kr<sup>+</sup> Ion implantation // *Device Research Conference. 2nd Device Research Conference. June 22-25. 2014. Santa Barbara (California), The University of California, 2014. 72. 115-120. DOI: 10.1109/DRC.2014.6872324*
10. Umeda H., Takizawa T., Anda Y., Ueda T. High-voltage isolation technique using Fe<sup>+</sup> implantation for monolithic integration of AlGaIn/GaN transistors // *Transactions on Electron Devices*. 2013. 60(2). 771-775. DOI: 10.1109/TED.2012.2230264
11. Binari S., Dietrich H., Kelner G., Rowland L. B., Doverspike K. H, He, and N implant isolation of n-type GaN // *Journal of Applied Physics*. 1995. 78(5). 78-84. DOI: 10.1063/1.360712
12. Johra F. Effect of light-ions implantation on resistivity of GaN thin film // *Electronic Materials Letters*. 2014. 10(4). 699-707. DOI: 10.1007/s13391-013-3160-9
13. Zhelannov A. V., Ionov A. S., Petrov A. V., Seleznev B. I. Ispol'zovanie tekhnologii mikroprofilirovaniya pri formirovani pribornykh struktur na osnove nitrida galliya [The use of microprofiling technology in the formation of device structures based on gallium nitride] // *Nano- and microsystems technology*. 2017. 19(7). 399-403. DOI: 10.17587/nmst.19.399-405
14. Egorkin V. I., Obolensky S. V., Zemlyakov V. E., Zaitsev A. A., Garmash V. I. Issledovanie ionnoj implantacii azota cherez sloj nitrida kremniya dlya mezhpribornoj izolycii GaN/Si- tranzistorov [The investigation of ion implantation of nitrogen through a layer of silicon nitride for inter-device isolation of GaN/Si transistors] // *Applied Physics Letters*. 2021. 47(18). 15-17. DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51465.18805

#### **Информация об авторе**

*Боченков Геннадий Михайлович* – инженер-технолог, АО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0009-0008-2704-8545, Gbochenkov@yandex.ru

*Федоров Дмитрий Геннадьевич* – заместитель начальника отдела, АО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-8355-3318, FedorovDG@okbplaneta.ru

*Желаннов Андрей Валерьевич* – кандидат технических наук, руководитель лаборатории, АО «ОКБ-Планета» (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-2444-1770, ZhelannovAV@okbplaneta.ru

*Селезнев Борис Иванович* – доктор технических наук, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0003-2973-2940