

ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНАМИ КРЕМНИЯ СОЕДИНЕНИЙ A^3B^5 **А.В.Желаннов, Б.И.Селезнев*, Д.Г.Федоров****IMPLANTATION OF A^3B^5 COMPOUNDS WITH SILICON IONS****A.V.Zhelannov, B.I.Seleznev*, D.G.Fedorov***ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород***Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Mikhail.Petrov@novsu.ru*

Исследованы характеристики имплантированных ионами $^{28}\text{Si}^+$ слоев нитрида галлия, подвергнутых высокотемпературному фотонному отжигу в среде азота с применением защитных покрытий SiO_2 и Si_3N_4 . Дозы имплантации составляют 10^{14} – 10^{15} cm^{-2} , энергии внедряемых ионов — 50-100 кэВ. Исследуемые образцы GaN были выращены методом MOCVD на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма. Методом вторичной ионной масс-спектрометрии исследовались распределения примеси в объеме полупроводника. Изучена морфология защитных покрытий. Установлены режимы имплантации и отжига с высокой степенью активации примеси. Рассмотрена имплантация кремния на границу раздела гетероструктуры AlGaIn/GaN. Исследованы концентрационные профили носителей заряда, характерные для ИЛС, используемых при изготовлении полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия. Методика измерений поверхностной концентрации заключается в постоянном химическом травлении тонких слоев и измерении поверхностных электрофизических характеристик. Экспериментальные концентрационные профили для GaAs не являются гауссовскими, а имеют широкие хвосты, обусловленные эффектами каналирования в кристаллах. Рассматриваются режимы ионной имплантации, формирующие ИЛС с более резким профилем концентрации носителей заряда в «хвосте».

Ключевые слова: *ионная имплантация, кремний, отжиг, защитные покрытия, нитрид галлия, арсенид галлия, гетероэпитаксиальная структура, концентрационный профиль, «хвосты распределений»*

The characteristics of gallium nitride layers implanted with $^{28}\text{Si}^+$ ions, subjected to high-temperature photon annealing in a nitrogen medium using SiO_2 and Si_3N_4 protective coatings, were studied. The implantation doses are 10^{14} – 10^{15} cm^{-2} , and the energy of the implanted ions is 50-100 keV. The studied GaN samples were grown using MOCVD on a 2-inch diameter sapphire substrate. The distribution of impurity in the volume of a semiconductor was studied by secondary ion mass spectrometry. The morphology of protective coatings is studied. The implantation and annealing modes with a high degree of impurity activation were established. The implantation of silicon on the interface of the AlGaIn/GaN heterostructure is considered. The concentration profiles of charge carriers characteristic of ion-doped layers used in the manufacture of field-effect transistors with a Schottky barrier on gallium arsenide are studied. The method of measuring surface concentration consists in constant chemical etching of thin layers and measurement of surface electrophysical characteristics. Experimental concentration profiles for GaAs are not Gaussian, but have wide tails due to channeling effects in crystals. We consider ion implantation modes that form ion-doped layers with a sharper profile of the concentration of charge carriers in the "tail".

Keywords: *ion implantation, silicon, annealing, protective coatings, gallium nitride, gallium arsenide, heteroepitaxial structure, concentration profile, "distribution tails"*

1. Введение

Нитрид галлия (GaN) как материал для высокотемпературных, высоковольтных, высокочастотных и сильноточных приложений позволяет существенно расширить операционные возможности полупроводниковой техники. Уникальное сочетание физических свойств, включающее большую ширину запрещенной зоны, высокую дрейфовую скорость насыщения электронов, большие напряжения пробоя, высокую теплопроводность, высокую химическую и термическую стабильность, позволяет рассматривать GaN как наиболее перспективный материал для создания микроэлектронных приборов нового поколения. Именно с внедрением GaN в настоящее время связывается прорыв в СВЧ- и сильноточной электронике [1,2].

Использование ионной имплантации для создания микроприборов на нитриде галлия является перспективным методом, дающим возможность точного задания профиля концентрации примеси по глубине и по площади, подвергнутой легированию, и возможность создания тонких инвертированных слоев полупроводников. В работах [3,4] показана перспективность использования ионной имплантации для формирования омических контактов на нитриде галлия.

Арсенид-галлиевые полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ) широко используются в различных областях, таких как сотовая телефония, высокоскоростная оптоволоконная связь, беспроводная передача данных, спутниковая связь и радиолокация. Структуры для изготовления этих транзисторов фор-

мируются двумя способами: методом эпитаксиального наращивания активных слоев на полуизолирующей подложке и методом ионной имплантации в подложку. Эпитаксиальные ПТШ характеризуются более высокими параметрами в СВЧ-диапазоне, в то время как ионно-легированные — сравнительной простотой изготовления [5,6]. При разработке мощных твердотельных СВЧ усилителей при помощи ионной имплантации (ИИ) создаются n^+ -легированные слои [7].

2. Имплантация ионов кремния в нитрид галлия

При формировании ионно-легированных слоев n -типа на GaN в качестве примеси чаще всего используется ионы кремния. Помимо ионов кремния существуют также и другие донорные примеси для GaN, такие как O^+ , S^+ , Se^+ и Te^+ . Однако исследования по имплантации данных примесей в GaN показывают, что степень активации этих примесей мала по сравнению с кремнием [8].

Одним из недостатков ионной имплантации является радиационное повреждение, создаваемое во время ионной бомбардировки. Для восстановления кристаллической структуры легированных областей GaN и активации внедренного кремния необходим отжиг. Отжиг следует проводить таким образом, чтобы достичь максимального эффекта за минимальный промежуток времени при минимальной температуре с целью избежать диффузионного размытия профиля [9].

Несмотря на то, что GaN имеет высокую температуру плавления, разложение поверхности начинается уже при 900°C , что приводит к образованию N_2 и, как следствие, к потере азота. Следовательно, необходимо использовать метод отжига, защищающий поверхность GaN от разложения.

Электрические и оптические характеристики имплантированных кремнием слоев нитрида галлия детально исследованы в работе [10]. Ионы $^{28}\text{Si}^+$ имплантировались дозами $D = 1 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ с энергией ионов $E = 200 \text{ кэВ}$. Имплантированные образцы отжигались при температурах $1050 - 1350^\circ\text{C}$ в среде азота с применением покрытий AlN. 100%-я степень активации достигнута при температуре отжига 1350°C .

В настоящей работе исследованы характеристики имплантированных ионами $^{28}\text{Si}^+$ слоев нитрида галлия, подвергнутых высокотемпературному фотонному отжигу в среде азота с применением защитных покрытий SiO_2 и Si_3N_4 [11]. Выбор в качестве защитных покрытий при отжиге ионно-легированных слоев GaN низкотемпературных пленок SiO_2 и Si_3N_4 обусловлен высокой воспроизводимостью их получения, широким использованием при создании различных микроэлектронных приборов, в том числе диодных структур на нитриде галлия [3]. Исследуемые образцы GaN были выращены методом MOCVD на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма. Толщина высокоомного активного слоя GaN составляет 2,5 мкм, буферного слоя — 1,5 мкм (рис.1). Используемые в настоящей работе пленки SiO_2 и Si_3N_4 формировались методом плазмохимического осаждения в индуктивно-связанной плазме на установке Sentech SI 500 D.



Рис.1. Исходная эпитаксиальная структура GaN

Имплантация ионов Si^+ в GaN проводилась в различных режимах. Дозы имплантации составляют $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$, энергии внедряемых ионов — 50-100 кэВ. Для предотвращения эффекта каналирования образцы GaN располагаются под углом 7° к нормали падающего пучка. Для активации примеси использовалась установка высокотемпературного фотонного отжига As-One. Отжиг проводился в диапазоне температур от 1100 до 1350°C в среде азота. Для измерения электрофизических параметров ионно-легированных слоев GaN использовалась установка измерения эффекта Холла HMS-5000/0/55 Т. Методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) исследовались распределения примеси в объеме полупроводника. Распределения кремния в нитриде галлия после имплантации и отжига представлены на рис.2. При данном режиме имплантации и отжига полученные профили имеют максимум концентрации, примерно равный 10^{20} см^{-3} на глубине 0,1 мкм. С повышением температуры отжига наблюдается увеличение пика концентрации примеси.

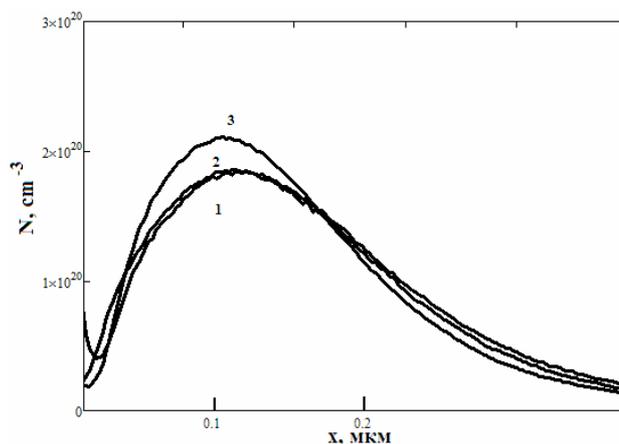
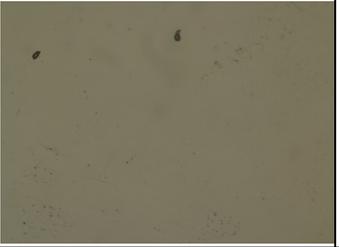
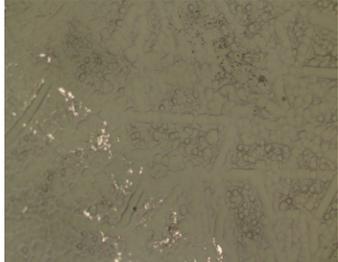
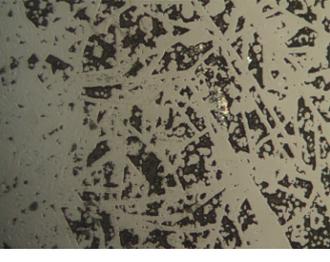


Рис.2. Распределение Si в GaN по данным ВИМС. Режим имплантации: доза 10^{15} см^{-2} , энергия 50 кэВ. Температура отжига — 1150°C , время отжига: 1 — 1 минута, 2 — 5 минут, 3 — 10 минут

При отжиге с защитным покрытием SiO_2 наблюдается высокая степень активации примеси: от 46 до 80% при температуре отжига 1200°C и ~100% при

Влияние температуры отжига на морфологию защитных покрытий

Температура отжига, °С	1100	1200	1300
Защитное покрытие SiO ₂			
Защитное покрытие Si ₃ N ₄			

температуре отжига 1250°C. При температурах отжига, больших 1300°C, происходит разрушение диэлектрических покрытий. При этом, по данным атомно-силовой микроскопии, на поверхности наблюдаются скопления галлия.

Наиболее стабильной в диапазоне температур 80-360 К оказывается поверхностная концентрация для образцов, подвергнутых отжигу при температуре 1250°C и характеризующихся наиболее высокой степенью активации примеси. Так как температура окружающей среды оказывает слабое влияние на параметры полупроводника, то можно предположить, что и приборные структуры будут стабильны в данном температурном диапазоне.

В табл.1 показано, как меняется морфология поверхности защитных пленок после воздействия высоких температур. Пленки Si₃N₄ при использовании их в качестве защитных покрытий разрушаются при температуре отжига свыше 1100°C.

При разрушении защитной пленки происходит диссоциация GaN, азот испаряется из объема полупроводника, а на поверхности наблюдаются скопления галлия. Это накладывает ограничение на использование пленок Si₃N₄ в качестве защитных покрытий при отжиге.

Распределение проекций пробегов внедряемой примеси описывается теорией Линдхарда—Шарфа—Шюгта (ЛШШ) [9]. Профиль торможения имеет вид гауссовской кривой и распределение внедренных ионов в единице объема мишени можно записать следующим образом:

$$N(x) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\left(\frac{x-R_p}{2\Delta R_p}\right)^2\right],$$

где ϕ — доза внедренных ионов, R_p — средний процированный пробег, ΔR_p — среднее нормальное отклонение проекции пробега, x — глубина от поверхности мишени.

Максимум концентрации внедренных ионов отстоит от поверхности мишени на расстоянии R_p , а его величина равна:

$$N_{\max}(x) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}.$$

Распределение проекций пробегов считается гауссовым и достаточно часто используется для прогноза распределения внедренной примеси. Однако для прогнозирования пробегов внедренных ионов в мишенях сложного состава или с большим количеством тонких эпитаксиальных слоев предпочтительно использовать программы моделирования, которые предлагают более точный расчет с учетом влияний больших условий. В данной работе использовалась одна из программ компьютерного моделирования с расчетом методом Монте-Карло для моделирования профилей имплантированных ионов в эпитаксиальные пленки GaN.

Основной задачей является уменьшение контактного сопротивления омических контактов диодных структур на основе AlGaIn/GaN с применением технологии ионной имплантации. Для проведения экспериментов использовалась гетероэпитаксиальная структура AlGaIn/GaN, представленная на рис.3.

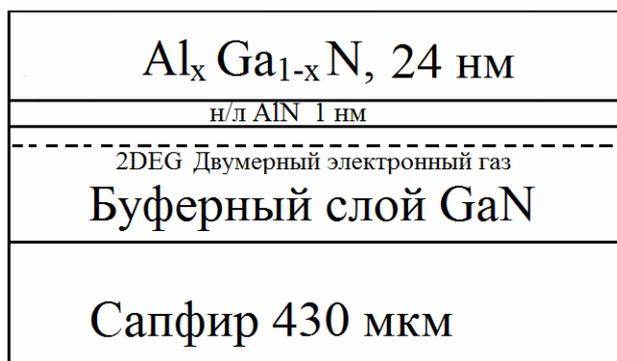


Рис.3. Исходная гетероэпитаксиальная структура

При использовании ионной имплантации необходимо сформировать локальные области сильнолегированного материала. При этом необходимо, чтобы максимум распределения примеси приходился на уровень двумерного электронного газа, формируемого на границе раздела AlGaIn и GaN, т.е. на глубину 25 нм. Расчеты показывают, что при энергии имплантации 50 кэВ максимум распределения Si^+ в GaN приходится на глубину порядка 100 нм. Установка ионной имплантации не позволяет проводить имплантацию ионов с энергией меньше 50 кэВ, поэтому для уменьшения глубины залегания внедренной примеси использовались диэлектрические пленки диоксида кремния разной толщины, служащие маской при проведении процесса легирования.

Создание сильнолегированных слоев проводилось с использованием ионного легирования кремния через предварительно сформированную маску диоксида кремния толщиной 50 и 100 нм. Для определения толщины маски был проведен расчет средней проецированной длины пробега в системе AlGaIn, выполненной в программе расчета SRIM [12].

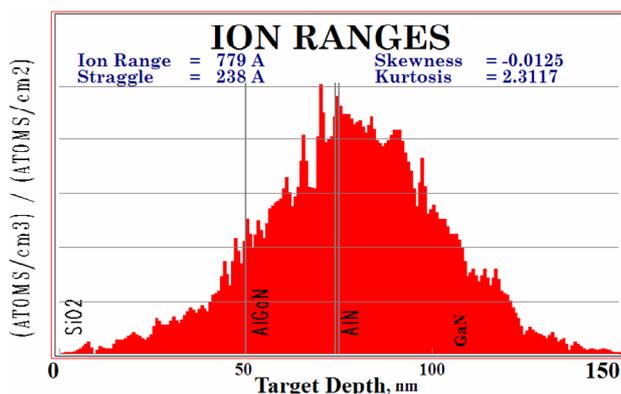


Рис.4. Расчет максимума распределения Si^+ в AlGaIn/GaN. Имплантация через пленку SiO_2 толщиной 50 нм

По данным моделирования, максимум концентрации примеси в процессе ионной имплантации через пленку SiO_2 толщиной 100 нм остается в пленке диоксида кремния. При толщине маски 50 нм максимум Si^+ в AlGaIn/GaN приходится на глубину 25 нм (рис.4), а при проведении имплантации без использования маски максимум концентрации Si^+ располагается на глубине более 40 нм. После легирования структуры подвергались высокотемпературному фотонному отжигу в среде азота с применением защитного покрытия из SiO_2 . Отжиг проводился в течение одной минуты при температуре 1250°C.

Расчет контактного сопротивления омических контактов показал, что применение ионного легирования через пленку диоксида кремния толщиной 50 нм позволяет снизить контактное сопротивление с 1,2 Ом·мм до 0,8 Ом·мм.

3. Имплантация ионов кремния в арсенид галлия

Характеристики ионно-легированного транзистора (ПТШ): ток насыщения, пороговое напряжение, напряжение пробоя и крутизна передаточной характеристики зависят от параметров подложки — концентраций глубоких и мелких примесей, и от параметров профиля легирования: положения пика концентрации легирующей примеси, ширины профиля легирования, концентрации легирующей примеси в максимуме профиля, который формируется с помощью имплантации ионов кремния в подложку [13].

При уменьшении ширины профиля легирования одновременно возрастает и мощность транзистора, и его коэффициент усиления, следовательно, при изготовлении ионно-легированных структур нужно стремиться к получению наиболее узкого и резкого профиля [14].

Относительно малая масса ионов кремния (Si^{28}), меньшая критичность по сравнению с примесями VI группы периодической таблицы к типу защитного покрытия при отжиге, высокая степень активации внедряемых ионов Si^+ , возможность ионной имплантации без подогрева подложек определили выбор кремния в качестве легирующей примеси при формировании n - и n^+ -слоев на GaAs. Недостатком кремния как легирующей примеси является то, что в подложку наряду с ионами Si^+ могут внедряться равные по массе ионы N_2^+ и CO^+ [15].

Одной из проблем ионной имплантации в GaAs является диссоциация поверхности образцов при обычно используемых температурах отжига от 700 до 900°C. Для предотвращения этого явления применяются защитные покрытия: Si_3N_4 , SiO_2 , AlN, слои полупроводниковых материалов и др. [16]. Отжиг ИЛС без защиты поверхности также получил широкое применение. В этом случае избыточное давление мышьяка предотвращает диссоциацию GaAs.

Для изготовления ПТШ использовались имплантированные структуры n - i и n^+ - n - i -типа. Для создания более резкого распределения имплантированного кремния ионное внедрение проводилось под углом 5-6° к нормали относительно поверхности образца с ориентацией (100). Разработана методика измерения R_s и n_s по глубине ионно-легированного слоя (ИЛС). Методика заключается в постоянном химическом травлении тонких слоев и измерении поверхностных электрофизических характеристик. Концентрационные профили носителей заряда, характерные для ИЛС, используемых при изготовлении ПТШ, приведены на рис.5. При дозе имплантации $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и энергии внедряемых ионов Si^{28} 125 кэВ (n - i -структура) максимальная концентрация носителей заряда в активном слое составляет $\approx 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2), а при дозе $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $E = 50 \text{ кэВ}$ (n^+ -слой) концентрация составляет $\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1). При одноступенчатом режиме ионного легирования (кривая 2) формируется n -слой глубиной $\approx 0,20 \text{ мкм}$, а при двухступенчатом — n^+ -слой с максимальной концентрацией носителей заряда в слое $\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и глубиной $\approx 0,25 \text{ мкм}$ (кривая 3).

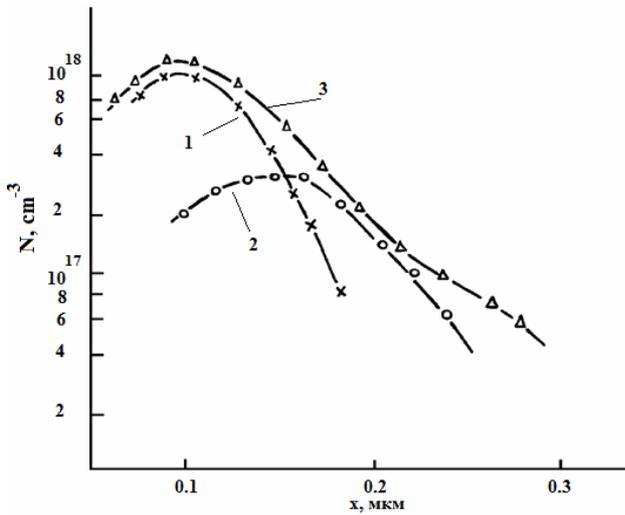


Рис.5. Распределения концентраций носителей заряда при различных режимах имплантации ионов ^{28}Si : 1 — $E = 50$ кэВ, $D = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 2 — $E = 125$ кэВ, $D = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3 — $E_1 = 125$ кэВ, $D_1 = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; $E_2 = 50$ кэВ, $D_2 = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$

В отличие от расчетов методом ЛШШ, экспериментальные профили для GaAs не являются гауссовскими, а имеют широкие хвосты, обусловленные эффектами каналирования в кристаллах. Профили имплантации существенно влияют на электрические характеристики ПТШ. При низких смещениях на затворе крутизна у приборов с профилями распределения атомов кремния, получающимися при имплантации, оказывается меньше, чем у ПТШ с прямоугольными профилями.

Крутизна при низких смещениях может быть увеличена путем введения в подложку акцепторных примесей или формированием заглубленного p -слоя. Глубокое внедрение небольших доз акцепторов $^{24}\text{Mg}^+$ совместно с основной донорной примесью позволяет скомпенсировать «хвостовой» участок распределения электронов. Но для внедрения ионов $^{24}\text{Mg}^+$ требуются высокие энергии, поэтому более эффективной

представляется технология внедрения двухзарядных ионов (более легких) $^{16}\text{O}^{++}$.

На рис.6 представлены распределения поверхностной концентрации, полученные при послойном травлении ИЛС для случаев совместной имплантации ионов O^{++} и Si^+ . В случаях совместной имплантации кислорода и кремния наблюдается резкий спад n_s в «хвосте» в отличие от случаев одиночного внедрения ионов кремния. При этом выявляется существенная роль исходного полуизолирующего арсенида галлия в эффектах управления «хвостами» концентрационных профилей. Для пластин слитка АГЧП-2, имеющих существенно меньшие токи утечки, обусловленные наличием глубоких уровней, эффекты в «хвосте» выражены более резко, чем для пластин слитка АГЧП-4, имеющих наряду с большими токами утечки значительные макронеоднородности по пластине. С учетом режимов формирования ИЛС при совместной имплантации ионов $^{16}\text{O}^{++}$ и $^{28}\text{Si}^+$ наиболее вероятным механизмом управления «хвостами» концентрационных профилей носителей заряда является компенсация, связанная с разрушениями, обусловленными внедрением ионов кислорода.

Положительные результаты по управлению «хвостами» концентрационных профилей получены при последовательном внедрении кислорода, а затем кремния. При внедрении кислорода в имплантированные кремнием слои GaAs эффекты управления «хвостами» концентрационных профилей проявляются слабо. Это может быть связано с образованием сложных комплексов с остаточными примесями и дефектами при внедрении кислорода в имплантированные слои, например при замещении кислородом мышьяка. В результате снижается компенсирующая роль разрушений, вводимых при внедрении кислорода. Эффекты управления «хвостами» концентрационных профилей наблюдались и для больших доз внедряемых ионов: $0,75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для кремния и $(1-1,6) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для кислорода.

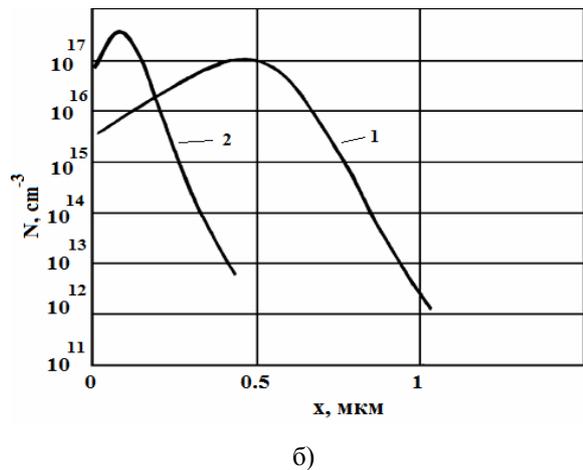
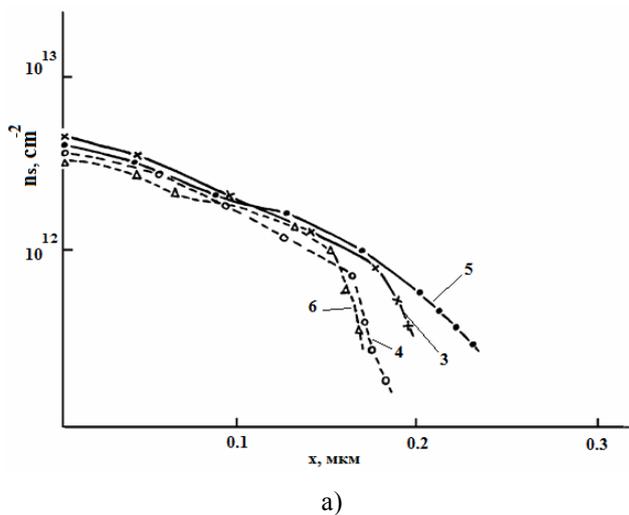


Рис.6. Изменения n_s по глубине ионно-легированных слоев арсенида галлия и расчетные распределения концентраций ионов кремния и кислорода при совместной имплантации: а) экспериментальные распределения, б) расчетные распределения. Режимы имплантации: Si^+ — $E = 100$ кэВ, $D = 3,75 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; O^{++} — $E = 300$ кэВ, $D = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$; $T_{\text{отж}} = 850^\circ\text{C}$; 1 — имплантация O^{++} (расчет); 2 — имплантация Si^+ (расчет); 3, 5 — имплантация Si^+ ; 4, 6 — имплантация $\text{Si}^+ + \text{O}^{++}$; 3, 4 — АГЧП-4 (Ч-793); 5, 6 — АГЧП-2 (Ч-779)

Таким образом, при совместной имплантации кислорода и кремния удается формировать слои с более резким профилем концентрации носителей заряда в «хвосте» с глубиной залегания $\approx 0,2$ мкм, концентрацией носителей заряда в слое $(2-2,5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, подвижностью, большей $3000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Применение совместной имплантации кислорода и кремния приводит к улучшению параметров ПТШ.

4. Заключение

Исследованы характеристики имплантированных ионами $^{28}\text{Si}^+$ слоев нитрида галлия, подвергнутых высокотемпературному фотонному отжигу в среде азота с применением защитных покрытий SiO_2 и Si_3N_4 . Дозы имплантации составляют $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-2}$, энергии внедряемых ионов — $50-100 \text{ кэВ}$. При отжиге с защитным покрытием SiO_2 наблюдается высокая степень активации примеси: от 46 до 80% при температуре отжига 1200°C и $\sim 100\%$ при температуре отжига 1250°C . При температурах отжига больше 1300°C происходит разрушение диэлектрических покрытий. При этом, по данным атомно-силовой микроскопии, на поверхности наблюдаются скопления галлия.

Методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) исследовались распределения примеси в объеме нитрида галлия. При режиме имплантации и отжига: доза — 10^{15} см^{-2} , энергия — 50 кэВ , температура отжига — 1150°C полученные профили имеют максимум концентрации примерно равный 10^{20} см^{-3} на глубине $0,1$ мкм. Представлены распределения Si^+ в AlGaIn/GaN , имплантированного через маску диоксида кремния.

Исследованы концентрационные профили носителей заряда, характерные для ИЛС, используемых при изготовлении полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия. Предложена методика измерений поверхностной концентрации, основанная на химическом травлении тонких слоев и измерении поверхностных электрофизических характеристик. Экспериментальные концентрационные профили для GaAs не являются гауссовскими, а имеют широкие хвосты, обусловленные эффектами каналирования в кристаллах. Рассматриваются режимы ионной имплантации, формирующие ИЛС с более резким профилем концентрации носителей заряда в «хвосте». При уменьшении ширины профиля легирования одновременно возрастает и мощность транзистора, и его коэффициент усиления, следовательно, при изготовлении ионно-легированных структур нужно стремиться к получению наиболее узкого и резкого профиля.

1. Балакирев А., Туркин А. Перспективы нитрида галлия в СВЧ-электронике. Решения компании RFHIC // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 4. С.64–68.
2. Туркин А.Н. Гетероструктуры на основе GaN в СВЧ электронике: обзор работ // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2018. №6. С.70-73.
3. Recht F., McCarthy L., Rajan S. et al. Nonalloyed ohmic contacts in AlGaIn/GaN HEMTs by ion implantation with reduced activation annealing temperature // IEEE Electron Dev. Lett. 2006. Vol.27. №4. P.205-207.

4. Zhelannov A.V., Seleznev B.I. Non-alloyed ohmic Cr/Pt/Au contacts to GaN based structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V.441. P.012045.
5. Селезнев Б.И., Дмитриев В.А., Штейнгарт А.П. Исследование структур СВЧ полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2001. №19. С.101-106.
6. <http://www.macomtech.com>. (дата обращения: 04.03.2019)
7. Сечи Ф., Бужатти М. Мощные твердотельные СВЧ усилители. М.: Техносфера. 2015. 416 с.
8. Wang H. Application of ion implantation to the fabrication of GaN-based devices. National University of Singapore, 2005. P.42.
9. Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния: Практикум. Н.Новгород: ННГУ, 2013. 21 с.
10. Fellows J.A., Yeo Y.K., Ryu M.-Y., Hengehold R.L. Electrical and optical activation studies of Si-implanted GaN // J. of Electronics Materials. 2005. V.34. Issue 8. P.1157-1164.
11. Селезнев Б.И., Москалев Г.Я., Федоров Д.Г. Фотонный отжиг имплантированных кремнием слоев нитрида галлия // Физика и техника полупроводников. 2016. Т.50. Вып.6. С.848-853.
12. <http://www.srim.org/> (дата обращения: 04.03.2019)
13. Полевые транзисторы на арсениде галлия / Пер. с англ.: под ред. Д.В.ДиЛоренцо, Д.Д.Канделуола. М.: Радио и связь, 1988. 496 с. [Пер. с англ.: GaAs FET Principles and Technology, ed. by J.V. DiLorenzo, D.D. Khandelwal (Artech House Inc., 1982)].
14. Шестаков А.К., Журавлев К.С. Влияние профиля легирования на характеристики ионно-легированного полевого GaAs-транзистора с затвором Шоттки // ФТП. 2011. Т.45. Вып. 12. С.1652-1661.
15. Козловский Э.Ю., Селезнев Б.И., Дмитриев В.А., Штейнгарт А.П. Малошумящие СВЧ полевые транзисторы на арсениде галлия для систем связи // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2011. Вып.1,2. С.82-87.
16. Onuma Takashi, Hirao Takashi, Sugawa Toshio. Study Encapsulants for Annealing Si-Implanted GaAs // J. Electrochem. Soc. 1982. V.129. № 4. P.837-840.

References

1. Balakirev A., Turkin A. Perspektivy nitrída galliya v SVCh-elektронике. Resheniya kompanii RFHIC [GaN Prospects for Microwave Electronics. RFHIC's Solution]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2015, no.4, pp.64–68.
2. Turkin A.N. Geterostruktury na osnove GaN v SVCh elektronike: obzor rabot [GaN heterostructures in microwave electronics: scientific papers review]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes, 2018, no.6, pp.70-73.
3. Recht F., McCarthy L., Rajan S. et al. Nonalloyed ohmic contacts in AlGaIn/GaN HEMTs by ion implantation with reduced activation annealing temperature. IEEE Electron Dev. Lett., 2006, vol.27, no.4, pp.205-207.
4. Zhelannov A.V., Seleznev B.I. Non-alloyed ohmic Cr/Pt/Au contacts to GaN based structures. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol.441, p.012045.
5. Seleznev B.I., Dmitriev V.A., Shteyngart A.P. Issledovanie struktur SVCh polevykh tranzistorov s bar'ером Shottki na arsenide galliya [Investigation of the microwave field transistor structures with the Shottka barrier on the gallium arsenide]. Vestnik NovGU. Ser.: Tekhn. Nauki, 2001, no.19, pp.101-106.
6. <http://www.macomtech.com>. (accessed: 04.03.2019)
7. Sechi F., Bujatti M. Solid-State Microwave High-Power Amplifiers. Artech House, 2009 (Rus. ed.: Moshchnye tverdotel'nye SVCh usiliteli. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2015. 416 p.).
8. Wang H. Application of ion implantation to the fabrication of GaN-based devices. National University of Singapore, 2005. P.42.
9. Karzanov V.V., Korolev D.S. Ionnoe legirovanie kremniya: Praktikum [Ion-implanted silicon]. Nizhniy Novgorod, NNGU Publ., 2013. 21 p.
10. Fellows J.A., Yeo Y.K., Ryu M.-Y., Hengehold R.L. Electrical and optical activation studies of Si-implanted GaN. J. of Electronics Materials, 2005, vol.34, iss 8, pp.1157-1164.

11. Seleznev B.I., Moskalev G.Ya., Fedorov D.G. Fotonnyy otzhig implantirovannykh kremniem sloev nitrida galliya [Photon annealing of silicon-implanted gallium nitride layers]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2016, vol.50, iss.6, pp.848-853.
12. <http://www.srim.org/> (accessed: 04.03.2019)
13. GaAs FET Principles and Technology, ed. by J.V. DiLorenzo, D.D. Khandelwal. Artech House Inc., 1982 (Rus. ed.: Poleyve tranzistory na arsenide. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988, 496 p.).
14. Shestakov A.K., Zhuravlev K.S. Vliyanie profilya legirovaniya na kharakteristiki ionno-legirovannogo polevogo GaAs-tranzistora s zatvorom Shottki [Doping profile influence on characteristics of ion-implanted GaAs field effect transistor with the Schottky barrier]. *FTP*, 2011, vol.45, iss. 12, pp.1652-1661.
15. Kozlovskiy E.Yu., Seleznev B.I., Dmitriev V.A., Shteyngart A.P. Maloshumyashchie SVCh polevye tranzistory na arsenide galliya dlya sistem svyazi [Gallium arsenide microwave field-effect low noise transistors for communication systems]. *Sistemy i sredstva svyazi, televideniya i radioveshchaniya*, 2011, iss.1,2, pp.82-87.
16. Onuma Takashi, Hirao Takashi, Sugawa Toshio. Study Encapsulants for Annealing Si-Implanted GaAs. *J. Electrochem. Soc.*, 1982, vol.129, no.4, pp.837-840.