

Фотонный отжиг имплантированных кремнием слоев нитрида галлия

© Б.И. Селезнев⁺, Г.Я. Москалев*, Д.Г. Федоров*⁺

* ОАО „ОКБ-Планета“,

173004 Великий Новгород, Россия

⁺ Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого,

173004 Великий Новгород, Россия

E-mail: Boris.Seleznev@novsu.ru.

(Получена 16 ноября 2015 г. Принята к печати 18 ноября 2015 г.)

Проведен анализ условий формирования ионно-легированных слоев на нитриде галлия при внедрении ионов кремния с применением фотонного отжига и защитных диэлектрических покрытий диоксида и нитрида кремния. Установлены режимы формирования ионно-легированных слоев с высокой степенью активации примеси. Исследованы температурные зависимости поверхностной концентрации носителей и подвижности в ионно-легированных слоях GaN для различных температур отжига.

1. Введение

Нитрид галлия — полупроводниковый материал с большой шириной запрещенной зоны, что определяет ряд свойств, позволяющих создавать на его основе мощные приборы с высокими характеристиками. Критическая напряженность электрического поля и в результате пробивное напряжение в GaN выше, чем у кремния, приборы на его основе могут работать при более высоких температурах: полевые транзисторы на GaN — при 300°C, а в вакууме — при 1000°C [1]. Теплопроводность GaN также выше, чем у Si и GaAs. Мощные приборы на нитриде галлия имеют высокие характеристики при относительно низких затратах на их изготовление. Материалы группы III-нитридов отличаются высокой твердостью, стойкостью к воздействию агрессивных сред и радиационному излучению [2]. Использование ионной имплантации для создания микроприборов на основе нитрида 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.

Формирование n^+ -GaN слоев путем имплантации $^{28}\text{Si}^+$ в нитрид галлия, легированный магнием, рассматривалось в работе [3]. Отжиг имплантированных слоев проводился в среде азота при температуре 1000°C без защитных покрытий. Степень активации кремния составила 27%.

Электрические и оптические характеристики имплантированных кремнием слоев нитрида галлия детально исследованы в работе [4]. 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°C в среде азота с применением покрытий AlN. 100%-процентная степень активации была 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

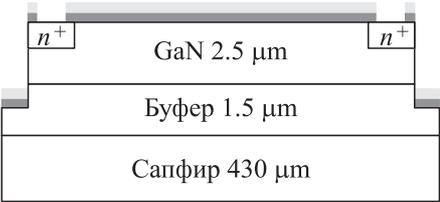
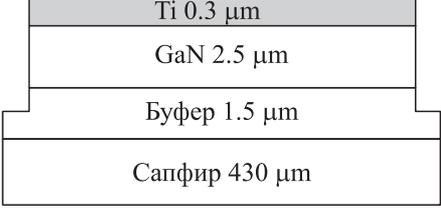
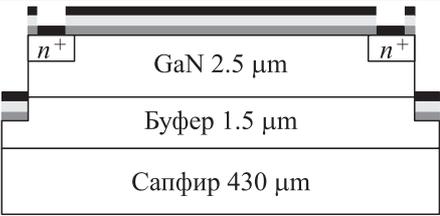
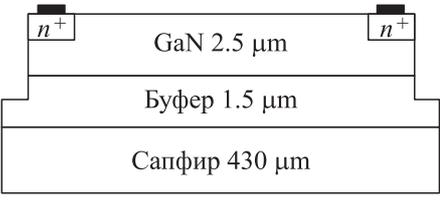
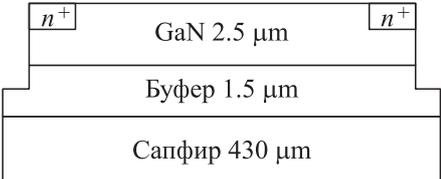
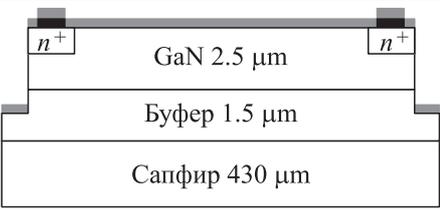
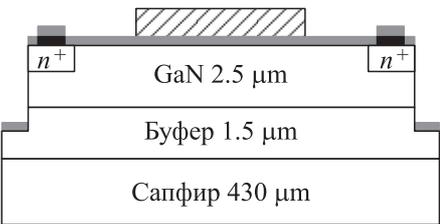
SiO_2 и Si_3N_4 . Выбор в качестве защитных покрытий при отжиге ионно-легированных слоев GaN низкотемпературных пленок SiO_2 и Si_3N_4 обусловлен высокой воспроизводимостью их получения, широким использованием при создании различных микроэлектронных приборов, в том числе диодных структур на нитриде галлия. Кроме того, при использовании фотонного отжига появляется возможность управления структурой пленок SiO_2 , в том числе устранение дефицита по кислороду. В спектрах ИК-пропускания наблюдается исчезновение полосы пропускания в области 883 см^{-1} , обусловленной наличием Si_2O_3 .

2. Методика эксперимента

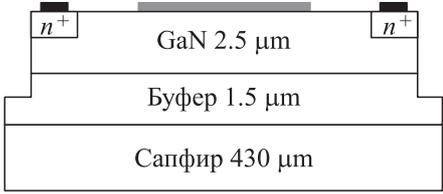
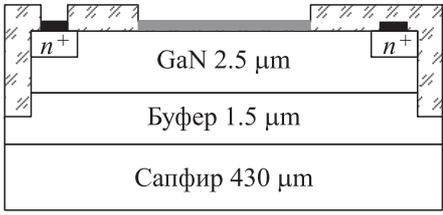
Исследуемые образцы GaN были выращены методом MOCVD (химическое осаждение из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений) на сапфировой подложке диаметром 2 дюйма (см. табл. 1). Толщина высокоомного активного слоя GaN составляла 2.5 мкм, буферного слоя — 1.5 мкм. Объемная концентрация носителей заряда в исходных образцах, по данным холловских измерений, была $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. На рис. 1 представлены исходная эпитаксиальная структура GaN и структура с ионно-легированными слоями.

Имплантация ионов Si^+ в GaN проводилась в различных режимах. Дозы имплантации составляли $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$, энергии внедряемых ионов — 50–100 кэВ. Для предотвращения эффекта каналирования образцы GaN располагались под углом 7° к нормали падающего луча ионов [5]. Для активации примеси использовалась установка высокотемпературного фотонного отжига As-One. Установка способна достигать температуры 1500°C со скоростью набора температуры 200°C в секунду. Отжиг проводился в течение 1 мин в диапазоне температур от 1100 до 1300°C в среде азота. В качестве защитных покрытий при отжиге использовались пленки SiO_2 и Si_3N_4 толщиной 0.4 мкм. По данным вторичной ионной масс-спектрометрии получены профили с максимумом концентрации кремния

Таблица 1. Технология изготовления диодной структуры

№ операции	Технология изготовления диодной структуры Описание	№ операции	Технология изготовления диодной структуры Описание
1	2	1	2
Формирование „меза“ структуры			
1	Напыление Ti толщиной 0.3 μm 	10	Осаждение SiO ₂ , H = 0.4 μm, T = 200°C
2	Фотолитография 1 (ФЛГ) (маска для травления Ti) 	11	Отжиг в среде N ₂ T = 1250°C, t = 1 min
3	Химическое травление Ti до GaN	12	Удаление SiO ₂
4	Удаление фоторезиста 	13	Формирование омических контактов ФЛГ 3 (двухслойная система фоторезиста) 
5	Ионное травление 	14	Напыление металла омических контактов Ti/Al/Ni/Au 
6	Удаление Ti (химическое травление)	15	Удаление фоторезиста „взрыв“
7	ФЛГ 2 формирование маски для ионного легирования	16	
8	Ионная имплантация Si ⁺ (энергия 50 кэВ, доза 10 ¹⁵ см ⁻²)	17	Отжиг омических контактов
9	Удаление фоторезиста 	18	Формирование контакта Шоттки Напыление металлов Ni/Au 
		19	ФЛГ (формирование барьерного контакта) 

Продолжение таблицы

1	2
20	Ионное травление Au/Ni
21	
22	Осаждение SiO ₂ , $H = 0.4 \mu\text{m}$, $T = 200^\circ\text{C}$
23	ФЛГ (вскрытие окон в диэлектрике)
24	Травление SiO ₂
25	Удаление фоторезиста 

около 10^{20} см^{-3} на глубине 0.1 мкм при дозе имплантации 10^{15} см^{-2} , энергии 50 кэВ и температуре отжига 1150°C [6].

Спектры ИК-пропускания низкотемпературных пленок SiO₂, полученных различными методами, представлены на рис. 2. В качестве эталонных использовались пленки SiO₂, полученные термическим окислением кремния в хлорсодержащей среде ($T = 1050^\circ\text{C}$). Толщины слоев SiO₂ во всех трех случаях составили величину $\approx 0.4 \mu\text{m}$. Из анализа основной полосы пропускания в области $1060\text{--}1090 \text{ см}^{-1}$, связанной с валентными колебаниями связей Si—O, следует, что пленки, полученные плазмохимическим методом, являются более качественными по сравнению с пленками, полученными окислени-

ем моносилана кислородом. Кроме того, для последних характерна полоса поглощения в области 883 см^{-1} , обусловленная дефицитом по кислороду (Si₂O₃).

Используемые в настоящей работе пленки SiO₂ и Si₃N₄ формировались методом плазмохимического осаждения в индуктивно-связанной плазме на установке Sentech SI 500 D. Предварительная откачка вакуумной камеры производилась до вакуума не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст. Процесс осаждения пленок производился при вакууме не хуже $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

При формировании пленок SiO₂ в качестве прекурсоров использовались моносилан и кислород, газоносителем является аргон. Расходы газов при росте пленок SiO₂ составили 130 сссм моносилана, 126 сссм кислорода и 13 сссм аргона. Процесс проводился при температуре 200°C . Показатель преломления выращенных пленок SiO₂ составил 1.44. При росте пленок Si₃N₄ прекурсорами являлись газы моносилан и аммиак, газоносителем являлся также аргон. При росте пленок Si₃N₄ расходы прекурсоров составили 185 и 5 сссм для моносилана и аммиака соответственно, для аргона — 90 сссм. Рост пленок проводился при температуре 180°C . Показатель преломления пленок Si₃N₄ составил 2.04.

3. Результаты измерений

На имплантированных и отожженных при температурах $1100\text{--}1250^\circ\text{C}$ образцах GaN были проведены измерения электрофизических параметров ионно-легированных слоев — поверхностной концентрации n_s и подвижности μ_s . Для измерения электрофизических параметров ионно-легированных слоев GaN использовалась установка измерения эффекта Холла HMS-5000/0/55 T с магнитостатическим магнитом. Измеряемые образцы имели размеры примерно $10 \times 10 \text{ мм}$. Для измерения параметров образцы помещались на столик измерения установки. Далее зонды установки устанавливались на четырех точечных контактах, сформированных на углах образца. Точечные контакты формировались вплавлением сплава InSn при температуре 400°C .

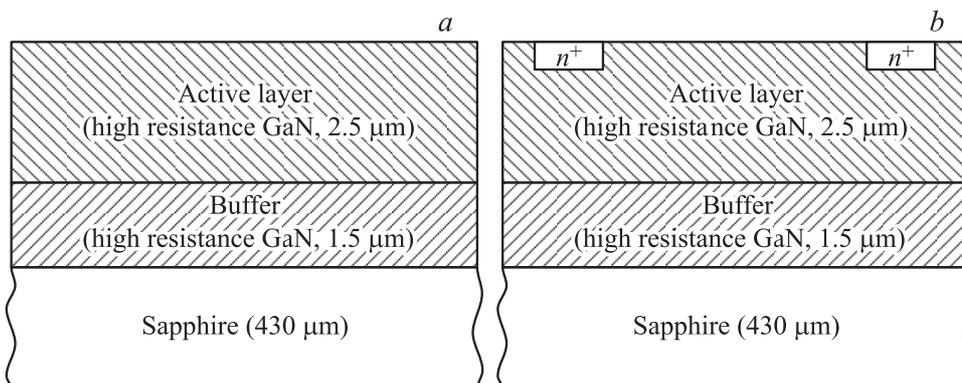


Рис. 1. Эпитаксиальная структура GaN: *a* — исходная эпитаксиальная структура; *b* — ионно-легированная структура.

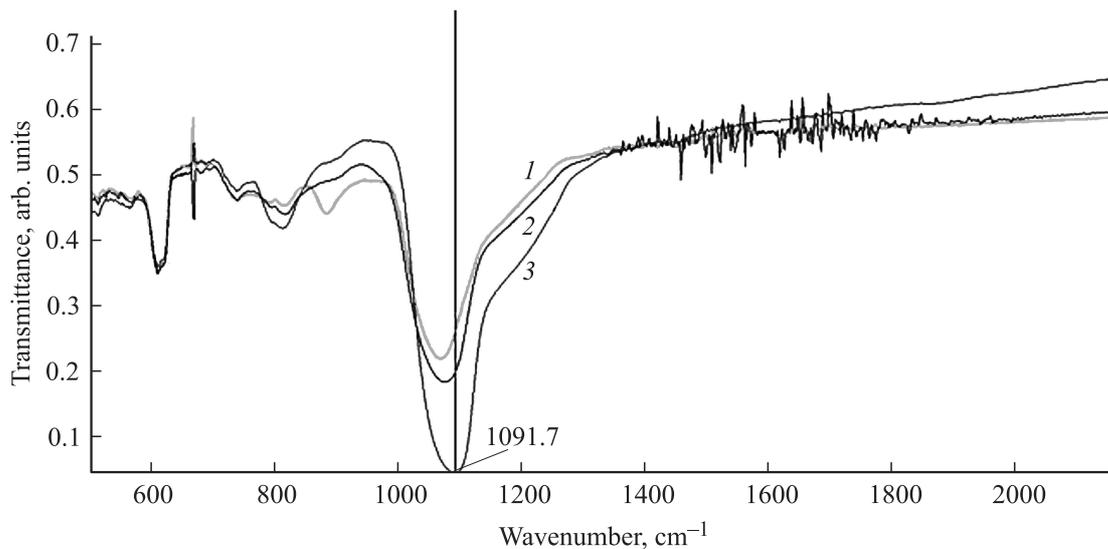


Рис. 2. Спектры пропускания диэлектрических пленок SiO₂ на кремниевой подложке, полученных различными методами: 1 — окисление моносилана кислородом; 2 — плазмохимическое осаждение; 3 — термическое окисление.

Измерения проводились в автоматическом режиме с помощью программного обеспечения, установленного на персональном компьютере установки. Для проверки влияния дефектности подложки на результаты измерения электрофизических параметров ионно-легированных слоев были проведены измерения электрофизических характеристик исходных образцов, подвергнутых в дальнейшем высокотемпературному отжигу.

Качество поверхности структур нитрид галлия—диэлектрик, подвергнутых фотонному отжигу, оценивалось методом атомно-силовой микроскопии. На поверхности образцов, отожженных при температуре 1100°C, дефектов не наблюдалось, но и степень активации оказывалась невысокой. На образцах, отожженных при температуре 1200°C, по данным атомно-силовой микроскопии, наблюдается появление сравнительно небольшого количества куполообразных дефектов в виде выступов высотой до 30 нм и диаметром от 20 до 50 нм. Такого рода дефекты могут быть связаны с скоплениями галлия после испарения атомов азота в процессе отжига [7].

Температура отжига 1300°C является предельной, при данной температуре происходит разрушение диэлектрических покрытий. При этом по данным атомно-силовой микроскопии, на поверхности наблюдаются скопления галлия.

Вследствие процессов дефектообразования на поверхности GaN при температуре отжига 1300°C оказалось невозможным сформировать качественные омические контакты для проведения измерений электрофизических параметров полупроводника.

Учитывая предельные температуры отжига имплантированных кремнием слоев GaN с защитными покрытиями ~ 1300°C, нами проведен детальный анализ изменений электрофизических характеристик ионно-легированных слоев GaN с защитным покрытием SiO₂

при дозе имплантации 10¹⁵ см⁻² до температур отжига 1250°C. Выбор диоксида кремния в качестве защитного покрытия при отжиге обусловлен, согласно данным атомно-силовой микроскопии, его более высокой термической стойкостью по сравнению с нитридом кремния.

Результаты измерений электрофизических параметров образцов нитрида галлия представлены в табл. 2. В силу дефектности исходных подложек нитрида галлия ($n_s = 10^{15}$ см⁻²) высокотемпературные отжики нелегированных структур приводят к значительному изменению поверхностной концентрации (при температуре отжига 1250°C до величин ~ 5.8 · 10¹⁵ см⁻²) и при дозе имплантации 10¹⁴ см⁻² вклад подложки может быть решающим. Поэтому практический интерес представляют данные для доз имплантации, больших 10¹⁵ см⁻². Как следует из таблицы, для температур отжига 1200–1250°C с защитным покрытием SiO₂ наблюдается высокая степень активации примеси.

Были также рассмотрены зависимости концентрации и подвижности носителей заряда от температуры отжига. С ростом температуры отжига растет концентрация носителей заряда, степень активации внедренной примеси достигает 100% при температуре отжига 1250°C. Так же, как и в работе [4], с ростом температуры отжига растет и подвижность.

Были проведены холловские измерения n_s и μ_s при изменении температуры окружающей среды от 80 до 360 К. Температурные зависимости концентрации и подвижности для различных температур отжига представлены на рис. 3 и 4.

Из рис. 3 видно, что наиболее стабильной в диапазоне температур 80–360 К оказывается поверхностная концентрация для образцов, подвергнутых отжигу при температуре 1250°C, характеризующихся наиболее высокой степенью активации примеси. Так как температура окру-

Таблица 2. Параметры ионно-легированных слоев GaN

D , см^{-2}	E , кэВ	n_s , см^{-2}	μ_s , $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	T отжига, $^\circ\text{C}$ $t = 1$ мин	Тип защитного покрытия	Активация, %
Нелегированные	Нелегированные	10^{13}	38	—	—	—
Нелегированные	Нелегированные	$5.8 \cdot 10^{13}$	26	1250	SiO_2	—
10^{14}	50	$2.51 \cdot 10^{13}$	16.9	1100	Si_3N_4	25
	75	$7.65 \cdot 10^{13}$	167		SiO_2	76.5
	75	$3.95 \cdot 10^{13}$	70.8		Si_3N_4	40
	100	$1.89 \cdot 10^{13}$	18.8		SiO_2	19
	50	$3.24 \cdot 10^{13}$	20.9	1200	SiO_2	32
	50	$2.42 \cdot 10^{13}$	18.7		Si_3N_4	24
	75	$3.95 \cdot 10^{13}$	70.8		SiO_2	39.5
	75	$3.61 \cdot 10^{13}$	68.7		Si_3N_4	36.1
	100	$2.26 \cdot 10^{13}$	18.8		SiO_2	22.6
	100	$2.26 \cdot 10^{13}$	18.8		Si_3N_4	22.6
10^{15}	50	$4.46 \cdot 10^{14}$	26.0	1100	SiO_2	44
	50	$1.6 \cdot 10^{14}$	11		Si_3N_4	16
	75	$1.45 \cdot 10^{14}$	13.8		SiO_2	14
	100	$2.55 \cdot 10^{14}$	19.6		SiO_2	25
	50	$1.11 \cdot 10^{15}$	47	120	SiO_2	100
	75	$4.6 \cdot 10^{15}$	39.8		SiO_2	46
	100	$8.13 \cdot 10^{14}$	46.5		SiO_2	81
	75	$1.06 \cdot 10^{15}$	39.4		1250	SiO_2

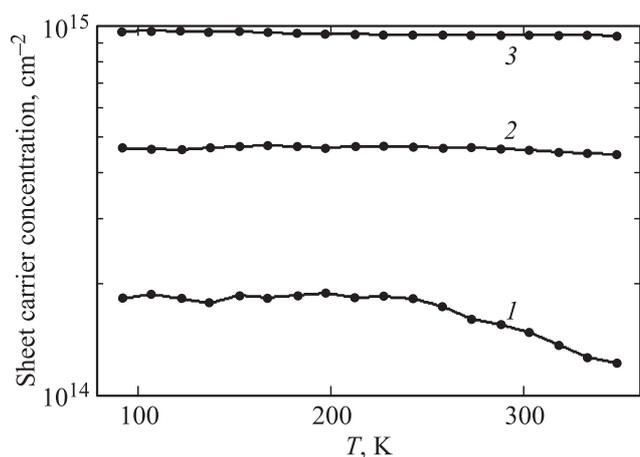


Рис. 3. Зависимости поверхностной концентрации носителей заряда от температуры для различных температур отжига, $^\circ\text{C}$: 1 — 1100, 2 — 1200, 3 — 1250.

жающей среды оказывает слабое влияние на параметры полупроводника, можно предположить, что и приборные структуры будут стабильны в данном температурном диапазоне.

Для более низкой температуры отжига 1100°C поверхностная концентрация уменьшается с ростом температуры, что может быть связано с неполным отжигом дефектов.

Из рис. 4 видно, что подвижность слабо растет с изменением температуры окружающей среды. В исследовании

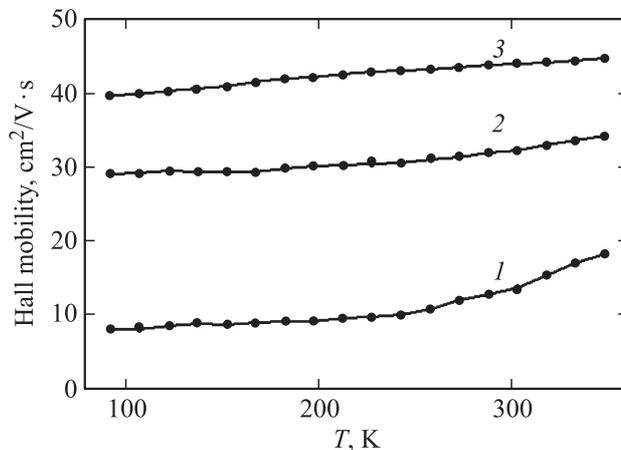


Рис. 4. Зависимости подвижности от температуры для различных температур отжига, $^\circ\text{C}$: 1 — 1100, 2 — 1200, 3 — 1250.

дуюмом диапазоне температур слабый рост подвижности обусловлен рассеянием на ионизированных примесях.

4. Заключение

Проведен анализ условий формирования ионно-легированных слоев на нитриде галлия при внедрении ионов кремния: дозы и энергии внедряемых ионов, температура фотонного отжига, низкотемпературные защитные диэлектрические покрытия SiO_2 и Si_3N_4 . Установлены режимы формирования ионно-легированных слоев с высокой степенью активации примеси: доза 10^{15} см^{-2} , температура отжига 1250°C , защитное покрытие SiO_2 . Исследованы температурные зависимости поверхностной концентрации и подвижности в ионно-легированных слоях GaN для различных температур отжига. Установлено, что в диапазоне температур 80–360 К наиболее стабильна поверхностная концентрация для образцов, подвергнутых отжигу при температуре 1250°C .

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания, проект № 1755.

Список литературы

- [1] М. Гольцова. Электроника. Наука, технология, бизнес, **4**, 86 (2012).
- [2] А. Васильев, В. Данилин, Т. Жукова. Электроника НТБ, **4**, 20 (2007).
- [3] J.K. Sheu, C.J. Tun, M.S. Tsai, C.C. Lee, G.C. Chi, S.J. Chang, J.K. Su. J. Appl. Phys., **91** (4), 1845 (2002).
- [4] J.A. Fellows, Y.K. Yeo, Mee-YI Ryu, R.L. Hengehold. J. Electron. Mater., **34** (8), 1157 (2005).
- [5] П.А. Карасев, А.Ю. Азаров, А.И. Титов, С.О. Кучеев. ФТП, **43** (6), 721 (2009).
- [6] Д.Г. Федоров, Г.Я. Москалев. Вестн. Новгород. гос. ун-та, **1** (75), 132 (2013).
- [7] B. Boratyński, W. Macherzyński, A. Drożdźiel, K. Pyszniaк. J. Electrical Engin., **60** (5), 273 (2009).

Редактор А.Н. Смирнов

Photon annealing of silicon-implanted gallium nitride layers

B.I. Seleznev⁺, G.Ya. Moskalev, D.G. Fedorov*⁺*

* ОАО „OKB-Planeta“,
173004 Veliky Novgorod, Russia
⁺ Yaroslav the Wise Novgorod State University,
173004 Veliky Novgorod, Russia

Abstract The analysis of the formation conditions of the ion-implanted layers on basis of gallium nitride by the silicon ion implantation with the application of the photon annealing and the protective dielectric coating of silicon dioxide and silicon nitride has been carried out. The conditions of the formation of the ion-implanted layers with high dopant activation have been detected. The temperature dependences of the sheet carrier concentration and mobility in the ion-implanted GaN layers for the different annealing temperatures have been investigated.