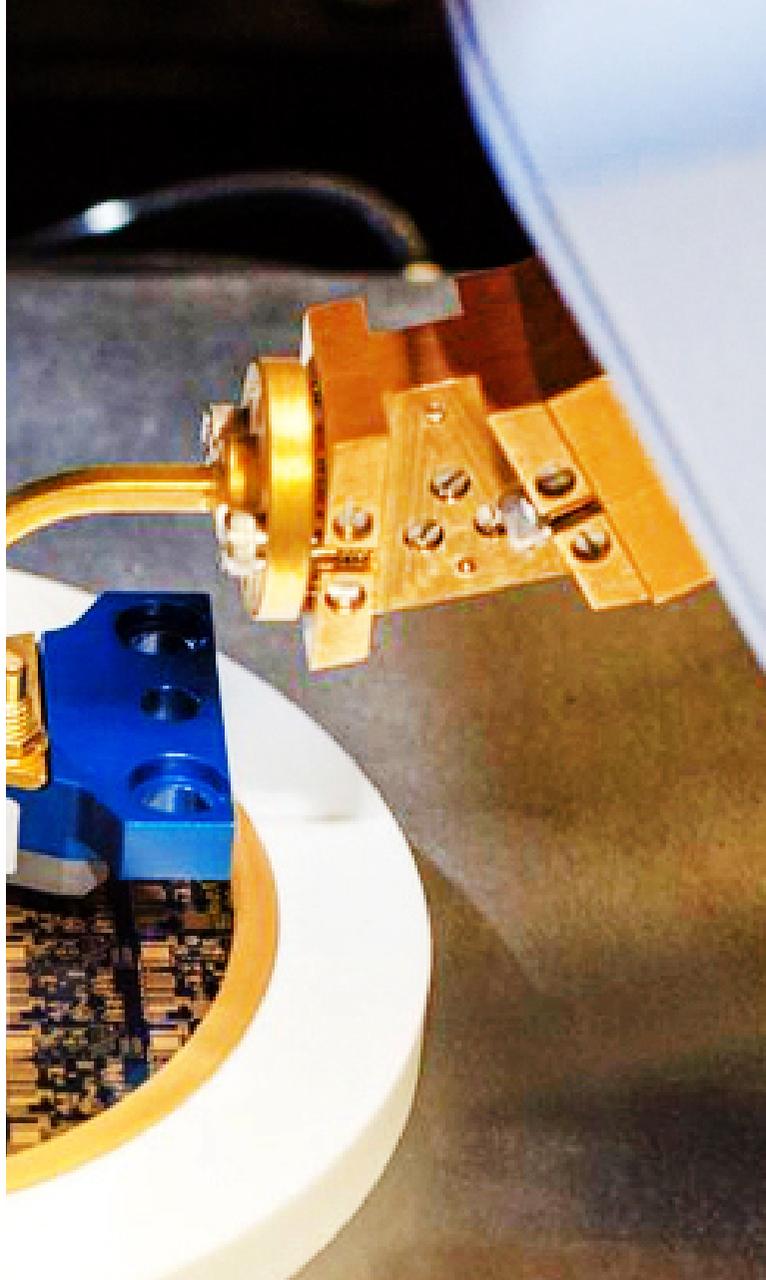


# Нитрид-галлиевая опто-, микро- и СВЧ- электроника

A close-up photograph of a microelectronic device, likely a GaN-based device, mounted on a substrate. The device is being probed by several gold-colored probes. One probe is labeled 'Infinity Probe™'. The device has a complex, multi-layered structure with various components and connections. The background is a blurred laboratory setting.

Нитрид галлия (GaN) и тройные соединения на его основе (InGaN, AlGaN) имеют большие перспективы применения в оптоэлектронике, поскольку являются прямозонными, а диапазон запрещенной зоны системы тройных соединений III-нитридов – самым широким среди всех полупроводниковых соединений, простираясь от InN (0,7 эВ, ближняя инфракрасная область спектра) до GaN (3,4 эВ, средний ультрафиолетовый (УФ)) и до AlN (6,2 эВ, глубокий УФ диапазон спектра). Таким образом, в системе InN–GaN–AlN возможно создание оптоэлектронных приборов с длиной волны от 1800 нм до 200 нм. Кроме того, гексагональная симметрия элементарной ячейки делает эти соединения пьезоэлектриками, что приводит к появлению на их гетеропереходе (например, GaN/AlN) индуцированного поверхностного заряда и, как следствие, – возникновению на нем двумерного газа электронов или дырок, что делает возможным создание на их основе полевых транзисторов. Причем пробивные напряжения за счет большой величины запрещенной зоны настолько велики, что позволяют делать на их основе высоковольтные мощные приборы. Поэтому гетероструктуры на основе системы GaN–AlN перспективны для разработки устройств следующего поколения микроэлектроники и мощных приборов СВЧ-электроники.



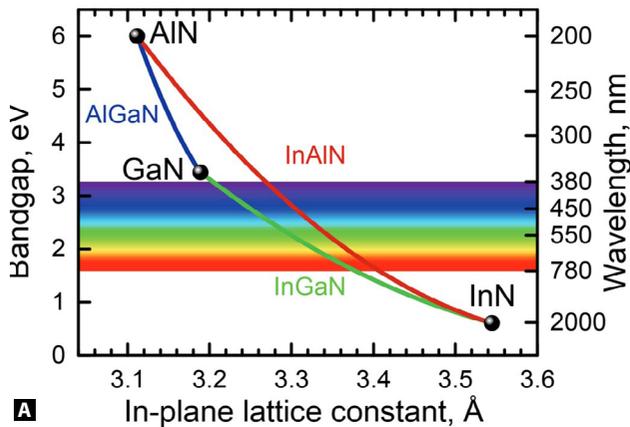
**Евгений Луценко,**  
заведующий Центром  
«Широкозонная нано-  
и микроэлектроника»  
Института физики  
им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси, кандидат  
физико-математических наук

Исследования GaN и тройных соединений на его основе – InGaN и AlGaN – начались в Беларуси в 1996 г. По просьбе профессора К. Хайме из университета RWTH города Аахен (Германия) лаборатория оптики полупроводников Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, имевшая на тот момент большой опыт в исследовании оптических и люминесцентных свойств широкозонных полупроводников, а также лазеров на их основе, была привлечена к изучению оптических свойств GaN. Актуальность этих работ была обусловлена тем, что в институте, возглавляемом профессором К. Хайме, был изобретен новый производственный тип MOCVD-реактора – планетарный, позволяющий осуществлять рост полупроводниковых гетероструктур сразу на большом количестве подложек. Для внедрения этой технологии в промышленность была организована фирма AIXTRON AG, занявшаяся производством реакторов, один из типов которых создавался для роста GaN и гетероструктур на его базе. Белорусские ученые быстро показали при низких температурах наличие экситонного газа, возникающего в слоях GaN, выращенных на подложках сапфира в этих реакторах, что говорило о высоком качестве полупроводниковых слоев. Первая совместная статья, посвященная этой тематике, вышла в 1998 г. [1].

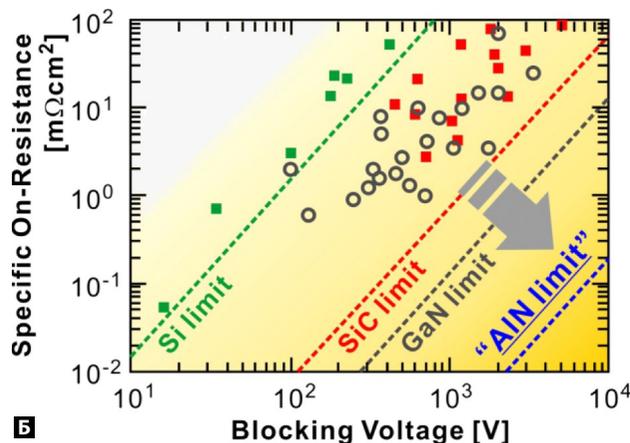
Дальнейшее сотрудничество с RWTH и AIXTRON бурно развивалось в рамках большого количества как немецких, так и международных проектов. Исследовались оптические, люминесцентные и лазерные свойства слоев GaN, InGaN и квантовых ям на их основе [2] для разработки технологии эпитаксии высококачественных гетероструктур для светодиодов и лазеров. Многие результаты были получены впервые в мире. Среди них можно выделить лазерные излучения:

- в синей области спектра InGaN/GaN квантовых ям [3];
- эпитаксиальных слоев GaN на кремнии [4];
- InGaN/GaN квантовых ям на кремнии [5].

То есть рост эпитаксиальных слоев и квантовых ям был доведен до лазерного качества. Эти результаты показали возможность интеграции GaN-оптоэлектронных приборов с кремниевой электроникой и получили отражение в новостях таких изданий, как Optics, Compound Semiconductors, Laser Focus World и др. Многочисленные исследования позволили оптимизировать рост гетероструктур на основе GaN до такого совершенства, что MOCVD-реакторы



**A**



**B**

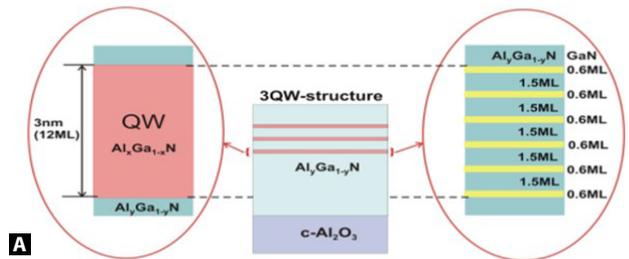
Ширина запрещенных зон вюрцита GaN, AlN и InN и их сплавов в зависимости от их постоянной решетки при 300 K (A), сопротивление в открытом состоянии в зависимости от пробивного напряжения различных материалов

фирмы AIXTRON стали наиболее распространенными в мире. В настоящее время AIXTRON SE – лидер систем MOCVD с долей рынка 82% в 2023 г. В рамках этого сотрудничества в Беларуси также были созданы первые светодиоды и СВЧ-транзисторы на основе GaN на подложках кремния.

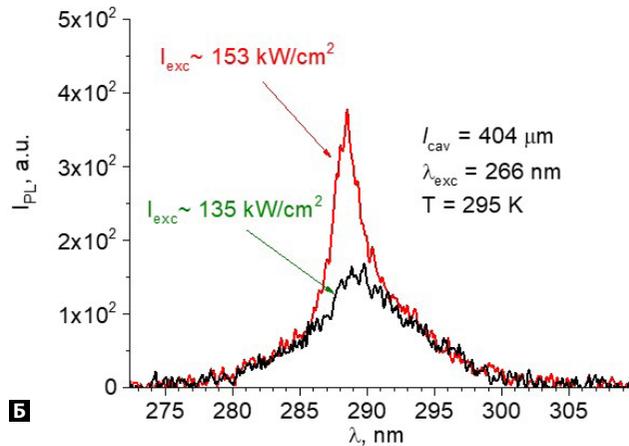
Развитие эпитаксиальных технологий тонких пленок III-нитридов (GaN, AlN, InN) привело к впечатляющему экономическому эффекту. К настоящему времени практически все освещение осуществляется с помощью белых светодиодов, содержащих синий [6] светодиодный кристалл и желтый люминофор для получения белого цвета. Именно «за изобретение эффективных синих светодиодов, которые позволили получить яркие и энергосберегающие источники белого света», то есть фактически за то, какое влияние это оказало на общество, и были удостоены в 2014 г. Нобелевской премии

Standard QW

QW grown by SMDA



**A**



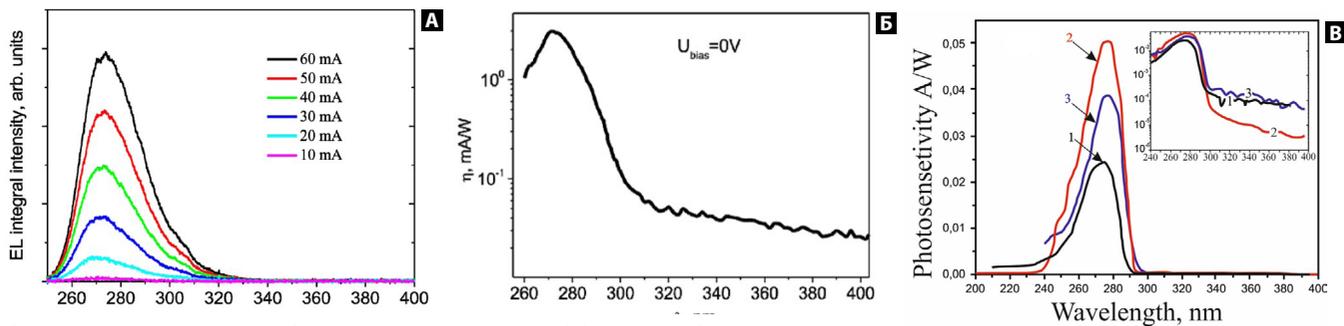
**B**

Дизайн квантовой ямы, состоящей из субмонослойных вставок GaN в AlGaIn матрице (A), спектр излучения с торца резонатора гетероструктуры при двух уровнях возбуждения около порога генерации (Б)

японские ученые И. Акасаки, Х. Аmano и Ш. Накамура, фактически совершившие революцию в области освещения.

Однако нитриды – это не только светодиоды, это еще и лазерные диоды, излучающие в видимой области спектра. Они активно применяются в системах проекционного мультимедиа и телевидения, в сверхъярких осветительных системах, а также для накачки других активных лазерных сред, то есть для нового поколения DPSSL-лазеров.

Отрадно отметить, что именно Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси в сотрудничестве с ФТИ им. Иоффе РАН создал первые лазеры с накачкой излучением лазеров на основе GaN. Сначала это было осуществлено излучением оптически накачиваемых InGaIn/GaN квантовых ям на кремнии [7], а затем и лазерных диодов [8], что обусловлено разработкой лазеров на квантовых точках ZnCdSe со сверхнизким порогом генерации при комнатной температуре, менее 1 кВт/см². Это привело к появлению сверхкомпактных полностью полупроводниковых DPSSL-лазеров (лазерных конверторов),



Спектры излучения ультрафиолетовых светодиодов (А), спектры фоточувствительности солнечно-слепых P-I-N (Б) и Шоттки (В) фотодиодов

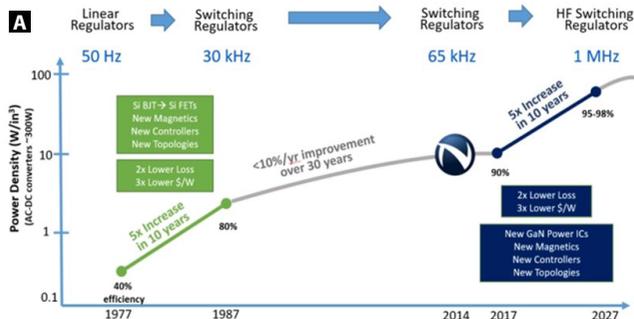
размещающихся в корпусе лазерного диода накачки [9] с длинами волн от синей до оранжевой области спектра [10, 11].

Развитие технологий эпитаксии нитридов позволило получить светодиоды и лазеры, излучающие не только в фиолетовой – зеленой, но и в ультрафиолетовой области спектра на основе гетероструктур AlGaIn. Первые низкопороговые лазеры, светящиеся в глубокой ультрафиолетовой области, были также получены в Институте физики

им. Б.И. Степанова НАН Беларуси [12]. Такой результат стал возможен за счет новой конструкции квантовой ямы, состоящей из субмонослойных вставок GaN в матрице AlGaIn, предложенной ФТИ им. Иоффе РАН совместно с Институтом физики НАН Беларуси. Высокая локализация неравновесных носителей заряда на субмонослойных вставках привела к 70%-ной квантовой эффективности фотолюминесценции при комнатной температуре, что было на три порядка больше по сравнению с AlGaIn. На таких квантовых ямах была получена низкопороговая лазерная генерация на длинах волн от 255 до 320 нм с минимальным порогом 150 кВт/см<sup>2</sup>.

Дальнейшее совершенствование технологий молекулярно-пучковой эпитаксии [13–15] позволило создать на основе гетероструктур AlGaIn ультрафиолетовые светодиоды, солнечно слепые P-I-N фотодиоды и фотодиоды Шоттки [16–18].

Революция, произошедшая в освещении и переключавшаяся в лазеры и ультрафиолетовые светодиоды, – не единственное достижение эпитаксиальных

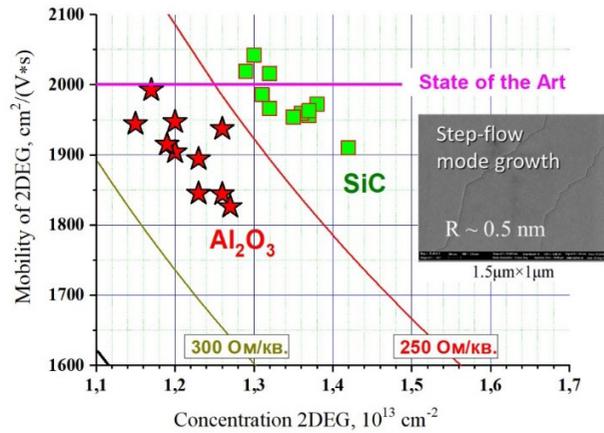


Плотность мощности источников электропитания [20] (1977–1987 – первая, 2017–2027 – вторая революция в силовой электронике) (А), установка молекулярно-пучковой эпитаксии Института физики НАН Беларуси (Б)

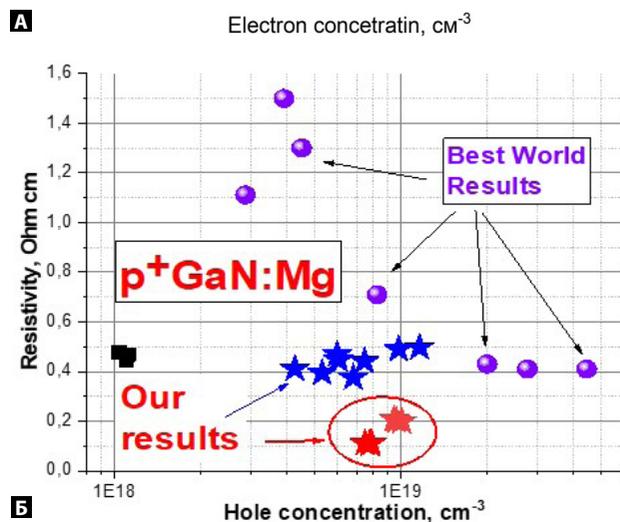
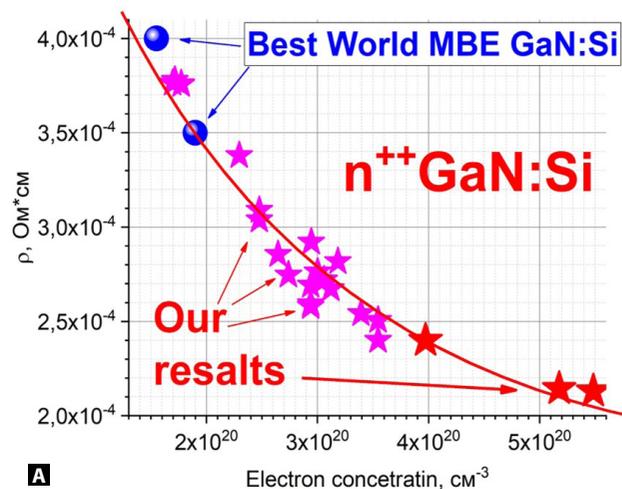
технологий III-нитридов в XXI в. В настоящее время происходит вторая революция в источниках электропитания (первая была обусловлена применением транзисторов). Увеличение быстродействия GaN-транзисторов более чем в 100 раз (по сравнению с кремниевыми) позволяет в разы уменьшить массу и габариты источников питания и контроллеров электродвигателей за счет уменьшения электрических потерь, массы и габаритов индуктивностей и емкостей. Плотности мощности вторичных источников электропитания уже достигают величин более 300 Вт/см<sup>3</sup> (5130 W/in<sup>3</sup>) [19]. Кроме того, высокая подвижность двумерного электронного газа высокой концентрации, возникающего на гетероинтерфейсе GaN/AlN за счет пьезоэффектов, позволяет создавать мощные СВЧ-транзисторы с рабочими частотами вплоть до ультравысоких частот, что особенно актуально в текущий момент для многих применений. Также GaN является механически, радиационно, термически и химически стойким материалом с хорошей теплопроводностью, что делает возможным его применение в экстремальных условиях, в том числе для специальных и аэрокосмических применений.

Именно задачами разработки молекулярно-пучковой эпитаксии транзисторных гетероструктур на основе GaN в основном занимается Институт физики НАН Беларуси сегодня. В 2017 г. нами введена в строй установка молекулярно-пучковой эпитаксии, обладающая возможностью как плазменной, так и аммиачной эпитаксии, а также ионной обработки пластин, что дает новые возможности при росте гетероструктур и позволяет использовать наилучшие ростовые условия. Сотрудники Института физики совместно со специалистами ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» и ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» разрабатывают новое поколение силовых транзисторов и мощных СВЧ-транзисторов на основе GaN. Взаимодействие происходит в рамках инновационно-промышленного кластера «Микро-, опто- и СВЧ-электроника» и Отраслевой лаборатории молекулярно-пучковой эпитаксии нитридных гетероструктур.

Применение высокотемпературной аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии зародышевых и буферных слоев AlN на подложках сапфира позволило достигнуть роста слоев ступеньками, из двух атомарных слоев, что привело к уменьшению плотности дислокаций и увеличению кристаллического качества слоев AlN. Последующая оптимизация температуры аммиачной эпитаксии слоев AlGaN



Подвижность и концентрация двумерного электронного газа гетероструктур AlGaN/Ga-транзисторов с высокой подвижностью электронов, выращенных на сапфире и карбиде кремния. На вставке показано СЭМ-изображение поверхности слоя AlN



Удельное сопротивление слоев n<sup>++</sup>GaN: Si (А) и p<sup>++</sup>GaN: Mg (Б) в зависимости от концентрации электронов дырок соответственно

и гетероструктур транзисторов с высокой подвижностью электронов AlGaN/GaN обусловили выращивание на сапфире гетероструктуры с двумерным электронным газом на уровне лучших мировых образцов (подвижность  $\sim 2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ , концентрация  $\sim 1,2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) [21–24]. Таким образом, в Институте физики был разработан метод высокотемпературного роста зародышевых и эпитаксиальных слоев AlN и транзисторных планарных наноструктур AlGaN/GaN на подложках сапфира с параметрами электронного газа на мировом уровне. Перенос данной технологии роста на подложку SiC позволил без оптимизации получить концентрации двумерного электронного газа более  $2000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$  при концентрации  $1,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , что соответствует лучшим образцам гетероструктур, полученным технологией MOCVD. Были также оптимизированы параметры эпитаксии зародышевых и эпитаксиальных слоев AlN и GaN, разработаны низкотемпературные методы роста слоев с сурфактантом и с ионным ассистированием, с атомно-слоевым отжигом, развиты методы снижения плотности дислокаций путем модификации режима роста. Качество полученных слоев подтверждено низкими порогами лазерного эффекта, высокой интенсивностью фотолюминесценции и хорошей морфологией поверхности.

Однако для создания электронных приборов необходимо формировать слои с различным типом электрической проводимости. Наши исследования позволили разработать оригинальные технологии эпитаксии для получения *p*-GaN и *n*-GaN с рекордными характеристиками:  $n^+$ -GaN: Si с рекордной концентрацией электронов  $> 5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  и удельным сопротивлением  $\sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ; слоев  $p^+$ -GaN: Mg с концентрацией дырок  $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  и удельным сопротивлением  $\sim 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , что значительно лучше мировых результатов [25, 26].

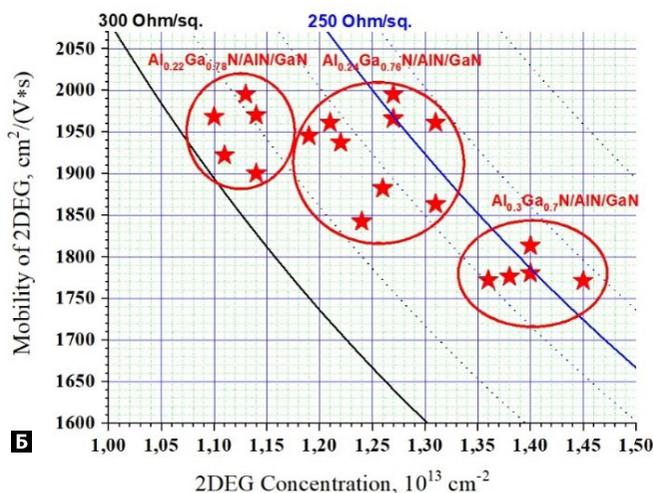
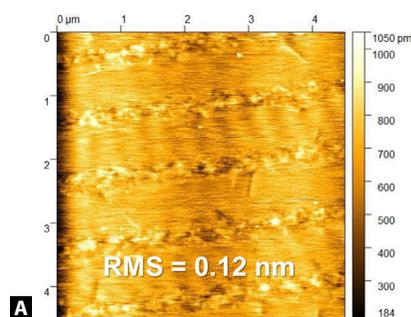
Данные технологии делают возможным получение не только контактных областей транзисторов для формирования сверхнизкоомных нежигаемых омических контактов, но и *p-n*-переходов, в том числе туннельных, что исключительно важно для следующего поколения светодиодов и инжекционных лазеров.

Концентрация электронов более  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  была также достигнута в слоях  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ : Si *n*-типа с  $x=0,8$ . Пьезолегирующее (градиент состава) слоев  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ :Mg *p*-типа позволило получать концентрации дырок  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

В настоящее время идет перенос технологий роста на дешевых подложках сапфира на под-

ложки карбида кремния. На этом пути есть первые значительные успехи – разработана аммиачная молекулярно-пучковая эпитаксия тонких зародышевых слоев AlN на подложках карбида кремния, дающая малую концентрацию дислокаций и минимальную шероховатость поверхности (0,12 нм, близко к шероховатости подложки). Этот результат позволяет значительно уменьшить количество и толщину слоев транзисторной гетероструктуры и тем самым улучшить теплоотвод от активной области, что позволит создавать конкурентоспособную продукцию.

На основе данной технологии тонких зародышевых слоев AlN разработана конструкция и технология роста (аммиачной молекулярно-пучковой эпитаксии) безбуферных тонких (600 нм) гетероструктур AlGaN/GaN для СВЧ и силовых транзисторов с высокой подвижностью электронов с шероховатостью поверхности менее 0,5 нм. Гетероструктуры,



Картина поверхности зародышевого слоя AlN/SiC толщиной 40 нм с низкой плотностью дислокаций, зарегистрированная зондовым микроскопом (А), подвижность и концентрация двумерного электронного газа безбуферных гетероструктур AlGaInN/GaN транзисторов с высокой подвижностью электронов, выращенных на подложках карбида кремния (Б)

в зависимости от состава барьерного слоя AlGaIn, имеют концентрацию двумерного электронного газа от  $1,1 \cdot 10^{13}$  до  $1,45 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , подвижность от 1750 до  $2000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ , слои сопротивление от 240 до 290 Ом/кв, что близко к значениям стандартных гетероструктур толщиной 2–5 мкм. Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых достижений.

Рост канального слоя GaN непосредственно на тонком напряженном зародышевом слое AlN без использования толстых буферных слоев (AlN, AlGaIn, GaN: C, GaN: Fe) обуславливает сверхнизкое тепловое сопротивление за счет приближения канала тепловыделения транзистора к подложке, имеющей высокую теплопроводность, а также позволяет избежать эффектов, связанных с зарядовыми состояниями ловушек, образованных глубокими центрами, созданными примесями углерода и железа. Это в принципе увеличивает на порядок время жизни, на 25% – плотность, мощность, на 10% – КПД транзисторов; снижает эффект памяти и на 50% – коллапс тока транзисторов; обеспечивает лучшую линейность.

В 2024 г. созданы гетероструктуры транзисторов с барьерным слоем AlInN, у которых концентрация двумерного электронного газа превысила  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при подвижности более  $1000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . На подобных гетероструктурах за счет градиентного состава слоя AlInN, барьера AlN/AlInN и низкой температуры эпитаксии удалось достичь рекордных концентраций двумерного электронного газа – более  $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  без растрескивания гетероструктуры, что является большим достижением. Данные результаты важны для дальнейших шагов по разработке сверхвысокочастотных СВЧ- и силовых транзисторов со сверхвысокой плотностью тока. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yablonskii G.P. Optical properties and recombination mechanism in GaN and GaIn: Mg grown by metalorganic vapour phase epitaxy / G.P. Yablonskii, A.L. Gurskii [et al.] // *Journal of Electronic Materials*. 1998. Vol. 27, №4. P. 222–228.
2. Yablonskii G.P. Luminescence and lasing in InGaIn/GaN multiple quantum well heterostructures grown at different temperatures / G.P. Yablonskii, V.N. Pavlovskii [et al.] // *Applied Physics Letters*. Vol. 85. P. 5158–5160.
3. Yablonskii G.P. Blue InGaIn/GaN multiple quantum well optically pumped lasers with emission wavelength in the spectral range of 450–470 nm / G.P. Yablonskii, E.V. Lutsenko [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2001. Vol. 29, №13. P. 1953–1955.
4. Yablonskii G.P. Luminescence and stimulated emission from GaN on silicon substrates heterostructures / G.P. Yablonskii, E.V. Lutsenko [et al.] // *Physica status solidi (a)*. 2002. Vol. 192, №1. P. 54–59.
5. Lutsenko E.V. Growth, Stimulated Emission, Photo- and Electroluminescence of InGaIn/GaN EL-Test Heterostructures / E.V. Lutsenko [et al.] // *Physica status solidi (c)*. 2002. №1. P. 272–275.
6. The Nobel Prize in Physics 2014 // <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/summary/>.
7. Sedova I.V. Integration of Cd(Zn)Se/ZnSe and GaN-based lasers for optoelectronic applications in a green spectral range / I.V. Sedova [et al.] // *Physica status solidi (c)*. 2004. Vol. 1, iss. 4. P. 1030–1033.
8. S.V. Sorokin. Violet-green electrically pumped laser converter with output power over 150 mW / S.V. Sorokin [et al.] // *Electronic Letters*. 2012. Vol. 48, iss. 2. P. 118–119.
9. Lutsenko E.V. Optically pumped quantum-dot Cd(Zn)Se/ZnSe laser and microchip converter for yellow – green spectral region / E.V. Lutsenko [et al.] // *Quantum Electronics*. 2013. №43 (5). P. 418–422.
10. Vainilovich A.G. Microchip laser converter based on InGaIn laser diode and (Zn)CdSe quantum dot heterostructure / A.G. Vainilovich [et al.] // *Physica Status Solidi (b)*. 2016. Vol. 253. P. 1498–1502.
11. Alyamani A. Internal laser characteristics of optically pumped yellow–orange lasers / A. Alyamani [et al.] // *Physica Status Solidi B*. 2016. №3. Doi 10.1002.
12. Jmerik V.N. Optically pumped lasing at 300.4 nm in AlGaIn MQW structures grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy on c-Al2O3 / V.N. Jmerik [et al.] // *Physica Status Solidi A*. 2010. Vol. 207, iss. 6. P. 1313–1317.
13. Jmerik V.N. Plasma-assisted molecular beam epitaxy of AlGaIn heterostructures for deep-ultraviolet optically pumped lasers / V.N. Jmerik [et al.] // *Physica Status Solidi A*. 2013. №3. P. 439–450.
14. Jmerik V.N. Structural and optical properties of PA MBE AlGaIn quantum well heterostructures grown on c-Al2O3 by using flux- and temperature-modulated techniques / V.N. Jmerik [et al.] // *Journal of Materials Research*. 2015. Vol. 30, iss. 19. P. 2871–2880.
15. Jmerik V. Monolayer-range compositional modulations in AlxGa1-xN (x=0.6–0.75) layers grown using plasma-assisted molecular beam epitaxy under Me-rich conditions with an off-centered spatial distribution of activated nitrogen flux / V. Jmerik [et al.] // *Physica Status Solidi*. 2022. Vol. 219, iss. 6. P. 2100550.
16. Кузнецова Н.В. Солнечно-слепые AlxGa1-xN (x>0,45) p–i–n-фотодиоды с поляризационно-легированным p-эмиттером / Н.В. Кузнецова и др. // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42, вып. 12. С. 57–63.
17. Nechaev D.V. Ultraviolet light-emitting diodes and photodiodes grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy / D.V. Nechaev [et al.] // *Journal of Physics*. 2018. №3.
18. Семенов А.Н. Солнечно-слепые фотодиоды Шоттки на основе AlxGa1-xN (x = 0,55), выращенные методом ПА-МПЭ / А.Н. Семенов и др. // *Письма ЖЭТФ*. 2024. Т. 50, вып. 20. С. 16–19.
19. Lidow A. Efficient Power Conversion // <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/gan-technology-drives-power-density-in-data-centers/>.
20. Oliver S. Fast-Forward to the GaN Data Center // <https://www.powerelectronicsnews.com/fast-forward-to-the-gan-data-center/>.
21. Rzhetski M.V. Ultraviolet Stimulated Emission in AlGaIn Layers Grown on Sapphire Substrates Using Ammonia and Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy / M.V. Rzhetski [et al.] // *Physica Status Solidi A*. 2020. Vol. 217, iss. 14. 1900927.
22. Lutsenko E.V. Investigation of photoluminescence, stimulated emission, photoreflectance and 2DEG properties of double heterojunction AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT heterostructures grown by ammonia MBE / E.V. Lutsenko [et al.] // *Physica Status Solidi A*. 2018. Vol. 215, iss. 9. 1700602.
23. Alyamani A. AlGaIn/GaN HEMT heterostructures grown by NH3 and combined PA-NH3 MBE / A. Alyamani [et al.] // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2019. P. 244–250.
24. Petrov S.I. High temperature ammonia MBE – real way to improve crystal quality of nitride heterostructures / S.I. Petrov [et al.] // *Journal of Crystal Growth*. 2019. Vol. 514. P. 40–44.
25. Луценко Е.В. Развитие и перспективы III-нитридных технологий. VII Конгресс физиков Беларуси. (26–28 апреля 2023): сб. науч. тр. / редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. С. 127–128.
26. Луценко Е.В. Перспективы III-нитридных технологий и их развитие в Беларуси // ПРИБОРОСТРОЕНИЕ – 2023/ Материалы 16-й Междунар. науч.-тех. конф. 15–17 ноября 2023 г., Минск / редкол.: О.К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск, 2023. С. 10–12.