

$\sigma_{\text{сист}}^{\text{gyro}}$. Если $\Delta a_{\text{сист}}$, $\Delta \omega_{\text{сист}}$ – постоянные в данном запуске систематические погрешности гироскопов и акселерометров, то погрешности БИНС могут быть оценены по зависимостям

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta a_{\text{сист}}}{g} (1 - \cos \omega_0 t) + \frac{\Delta \omega_{\text{сист}}}{\omega_0} \sin \omega_0 t, \quad (10)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta a_{\text{сист}}}{\omega_0} \sin \omega_0 t + R \cdot \Delta \omega_{\text{сист}} (\cos \omega_0 t - 1), \quad (11)$$

$$\Delta X = R \left(\frac{\Delta a_{\text{сист}} (1 - \cos \omega_0 t)}{g} + \Delta \omega_{\text{сист}} \left(\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} - t \right) \right). \quad (12)$$

Соотношения (10)–(12) показывают, что погрешности БИНС носят характер колебаний с частотой Шулера. Соотношение (12) содержит, так называемый, «вековой» член, приводящий к неограниченному росту погрешностей БИНС в определении координат. При необходимости, путем разложения в степенные ряды зависимости (10)–(12), можно получить оценки погрешностей БИНС на коротком интервале времени.

УДК 538.9; 537.6/.8; 544.2; 535; 621.37; 621.38

ПЕРСПЕКТИВЫ III-НИТРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ РАЗВИТИЕ В БЕЛАРУСИ

Луценко Е.В.

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены последние достижения в области роста слоев и гетероструктур III-нитридов, а также создания на их основе различных устройств опто-, СВЧ и силовой электроники. Рассматривается текущий уровень таких разработок в Беларуси. Обсуждаются пути развития и перспективы III-нитридной силовой и СВЧ электроники, УФ оптоэлектроники, лазеров, фотоники и акустооптики, возможности сопряжения их с традиционной кремниевой микроэлектроникой.

Ключевые слова: III-нитрид (GaN, AlN, InN), молекулярно-лучевая эпитаксия, УФ-светодиоды, УФ-фотодетекторы, транзисторы.

PROSPECTS FOR III-NITRIDE TECHNOLOGIES AND THEIR DEVELOPMENT IN BELARUS

Lutsenko E.V.

*B.I. Stepanov Institute of Physics, NASB
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The latest achievements in the field of growth of layers and heterostructures of III-nitrides, as well as the creation of various opto-, microwave and power electronics devices based on them, are presented. The current level of such developments in Belarus is considered. The development paths and prospects of III-nitride power and microwave electronics, UV optoelectronics, lasers, photonics and acousto-optics, and the possibility of pairing them with traditional silicon microelectronics are discussed.

Key words: III-nitride (GaN, AlN, InN), molecular beam epitaxy, UV LEDs, UV photodetectors, transistors.

*Адрес для переписки: Луценко Е.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by*

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» [1] светодиодный

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0002.

Литература

1. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие для студ. Вузов / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов; под общ. ред. В.Я. Распопова; Гос. науч. центр РФ ОАО Концерн ЦНИИ «Электроприбор». – СПб, 2009. – 280 с.
2. Навигация летательных аппаратов в околосреднем пространстве / Л.И. Августов [и др.]; под ред. проф. Г.И. Джанжгавы. – М. : ООО «Научтехлитиздат», 2015. – 592 с.
3. Матвеев В.В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В.В. Матвеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 9 (2). – С. 251–267.
4. Матвеев, В.В. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках: учеб. Пособие / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – 225 с.

году Нобелевской премии трое японских ученых И. Акасаки, Х. Аmano и Ш. Накамура.

Однако «революция», произошедшая в освещении, не единственное достижение эпитаксиальных технологий III-нитридов. В настоящее время происходит вторая «революция» (рисунок 1) в источниках электропитания (первая была обусловлена применением транзисторов).

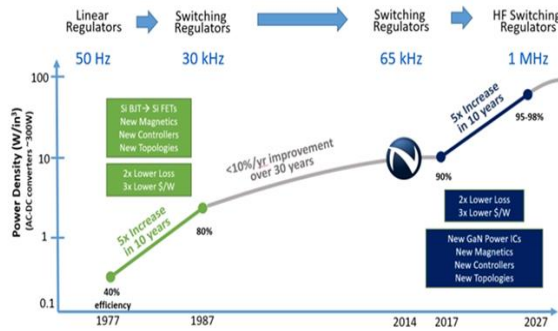


Рисунок 1 – Плотность мощности источников электропитания [2] (1977–1987 первая, 2017–2027 вторая революция в силовой электронике)

Увеличение быстродействия GaN транзисторов более чем в 100 раз (по сравнению с кремниевыми транзисторами) позволяет в разы уменьшить массу и габариты источников питания и контролеров электродвигателей за счет уменьшения электрических потерь, массы и габаритов индуктивностей и емкостей. В настоящее время плотности мощности вторичных источников электропитания уже достигают величин более 300 Вт/см^3 (5130 W/in^3) [3].

Именно задачами разработки молекулярно-пучковой эпитаксии (рисунок 2) транзисторных гетероструктур на основе GaN в настоящее время занимается Институт физики НАН Беларуси.



Рисунок 2 – Установка молекулярно-пучковой эпитаксии нитридных гетероструктур Института физики НАН Беларуси

Институт физики НАН Беларуси совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» а также ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов» разрабатывает новое поколение силовых транзисторов и мощных СВЧ

транзисторов на основе GaN. На этом пути Институт физики достигнуты впечатляющие результаты. Созданы AlGaN/GaN гетероструктуры словым сопротивлением двумерного газа 220 Ом/кВ ., что почти в 2 раза меньше, чем в коммерческих образцах гетероструктур (рисунок 3).

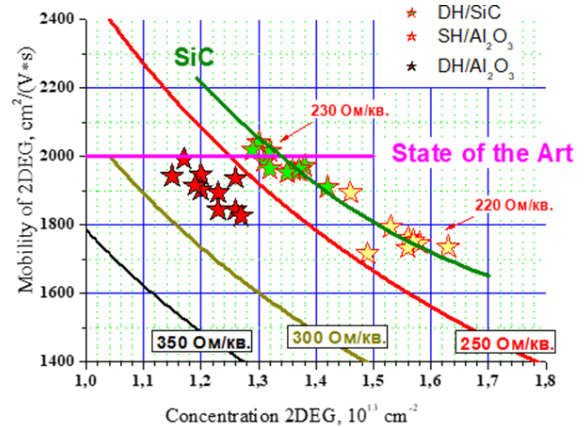


Рисунок 3 – Подвижность двумерного электронного газа транзисторных гетероструктур AlGaN/GaN в зависимости от концентрации

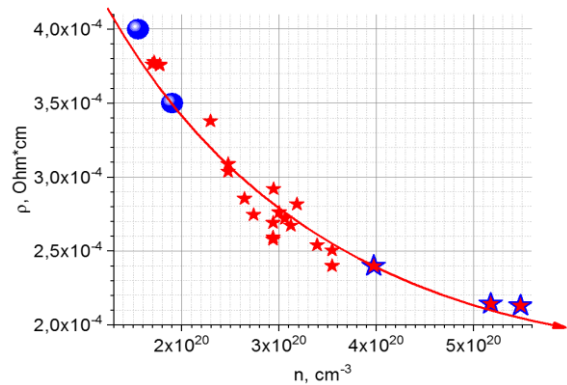


Рисунок 4 – Удельная проводимость эпитаксиальных слоев n^{++} типа GaN:Si в зависимости от концентрации электронов

Разработана эпитаксия контактных слоев n^{++} -типа GaN:Si с концентрацией электронов до $5,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и удельным сопротивлением $\sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что является лучшим в мире результатом для МПЭ (рисунок 4). Этого удалось добиться благодаря оптимизации условий роста из структурных, электрических и фотолюминесцентных измерений. В частности, показано, что понижение температуры роста GaN:Si приводит к уменьшению самокомпенсации примесных доноров Si собственными дефектами и увеличению максимально достижимых концентраций электронов с уменьшением удельной проводимости.

Однако III-нитриды – это еще и изменение ширины запрещенной зоны в системе AlN-GaN-InN от 6,2 до 0,7 эВ, то есть гетероструктуры на твердых растворах перекрывают весь видимый, ультрафиолетовый и ближний инфракрасный диапазон спектра. Большие усилия в мире сейчас

прикладываются к ультрафиолетовым фотоприемникам светодиодам и лазерам. Институт физики НАН Беларуси также начал работы в этой области совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ», ведутся работы и по созданию сверхярких источников излучения совместно с ЦСОТ НАН Беларуси.

Обсуждаются пути развития и перспективы III-нитридной силовой и СВЧ электроники, УФ оптоэлектроники, лазеров, фотоники и акустооптики, возможности сопряжения их с традиционной кремниевой микроэлектроникой.

УДК 006.91

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Козак Ю.В.

*РУП «Белорусский Государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На сегодняшний день значительные ресурсы вкладываются в разработку, модернизацию и поддержание на высоком техническом уровне эталонной базы Республики Беларусь и это важнейшая функция БелГИМ, как национального метрологического института. Постоянное развитие, участие в международных сличениях национальных эталонов, государственных научно-технических программах, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах позволяет в полной мере отвечать современным запросам нашей промышленности.

Ключевые слова: эталонная база Республики Беларусь, измерения, метрологическое обеспечение.

CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF THE ETALON BASE OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Kozak Yu.V.

*Republican Unitary Enterprise "Belarusian State Institute of Metrology"
Minsk, Republic of Belarus*

Annotation. Today, significant resources are invested in the development, modernization and maintenance of the reference base of the Republic of Belarus at a high technical level, and this is the most important function of BelGIM as a national metrological institute. Constant development, participation in international comparisons of national standards, state scientific and technical programs, research and development work allows us to fully meet the modern needs of our industry.

Key words: etalon base of the Republic of Belarus, measurements, metrological support.

*Адрес для переписки: Козак Ю.В., Старовиленский тракт, 93, г. Минск, 220053, Республика Беларусь
e-mail: info@belgim.by*

В 1924 г. была основана Белорусская палата мер и весов. 100 лет – это временной рубеж, за которым можно подвести черту, приостановиться, оценить, насколько продвинулась метрология в целом, начиная с измерений длины, массы, времени заканчивая высокоточными измерениями с использованием сложного, высокотехнологичного исследовательского оборудования. На сегодняшний день значительные ресурсы вкладываются в разработку, модернизацию и поддержание на высоком техническом уровне эталонной базы Республики Беларусь и это важнейшая функция БелГИМ, как национального метрологического института. БелГИМ имеет статус научной организации и является признанным на международном уровне научно-исследовательским, методическим

Литература

1. Нобелевская премия по физике 2014 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/summary/>.
2. Oliver. Fast-Forward to the GaN Data Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.powerelectronicsnews.com/fast-forward-to-the-gan-data-center/>.
3. A. Lidow. Efficient Power Conversion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/gan-technology-drives-power-density-in-data-centers/>.

и практическим центром с современной технической базой, обеспечивающей проведение измерений на наивысшем уровне точности в республике. По состоянию на 5 октября 2023 года опубликованы данные о наилучших калибровочных и измерительных возможностях, которые включают 301 СМС-строку в различных областях измерений.

БелГИМ так же является головной организацией-исполнителем подпрограммы «Эталоны Беларуси», осуществляет ее сопровождение. Подпрограмма «Эталоны Беларуси» 2021–2025 годы является логическим развитием успешно выполненных:

- ГНТП «Стандарты», 1996–1997 годы и на период до 2000 года;
- ГНТП «Эталоны Беларуси», 2001–2003 годы;