

# МОЛЕКУЛЯРНО ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN ДЛЯ ТРАНЗИСТОРОВ, ФОТОПРИЕМНЫХ И СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Е.В. Луценко, Н.В. Ржеуцкий

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск

E-mail: [e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by](mailto:e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by)

Нитридные гетероструктуры уже заняли достойное место в жизни общества. Именно на основе нитридных гетероструктур удалось создать высокоэффективные светодиоды, излучающие в синей области спектра, приведшие к «светодиодной революции» в освещении. Признание воздействия нитридных технологий на жизнь общества выразилось в присуждении Нобелевской премии в области физики в 2014 году Isamu Akasaki, Hiroshi Amano и Shuji Nakamura [1]. В настоящее время уже созданы и эффективные светодиоды, излучающие в диапазоне А ультрафиолетового (УФ) спектра [2]. Дальнейшее продвижение в УФ область спектра (диапазоны В и С) в значительной мере сдерживается увеличением энергии активации как акцепторных (Mg) так и донорных (Si) примесей при увеличении энергии ширины запрещенной зоны AlGaN. Однако последние достижения основных производителей в создании светодиодов В и С диапазонов УФ спектра мощностью до нескольких десятков милливольт [3–5] внушают уверенность в быстром развитии этого направления. Кроме того развитие источников УФ излучения ведет к развитию также и УФ фотоприемников для которых нитридные гетероструктуры являются перспективными.

Рост гетероструктур AlGaN с высоким содержанием Al для технологии MOCVD является проблемой вследствие осаждения алюминия на стенки реактора, за счет чего условия роста в реакторе меняются со временем. Для роста AlGaN с высоким содержанием Al перспективны технологии молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ). Именно поэтому в Институте физики был инсталлирована установка молекулярно лучевой эпитаксии (рис. 1), позволяющая растить нитридные гетероструктуры как аммиачной так и плазмоактивированной (ПА) эпитаксией. Такое разнообразие ростовых возможностей позволяет проводить рост при существенно различных температурах и ростовых условиях. Так субмонослойные и монослойные вставки, а также резкие гетерограницы лучше реализовать при низкой температуре роста в металл-обогащенных условиях посредством ПА МЛЭ, а изолирующие слои – аммиачной МЛЭ. На установке проведена оптимизация роста слоев AlN на подложках сапфи-

ра и выращены первые отечественные двух гетеропереходные AlGaN/GaN НЕМТ гетероструктуры с двумерным электронным газом, с характеристиками, достаточными для создания СВЧ транзисторов (подвижность  $1000\text{--}1500\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ , концентрация  $(1\text{--}2)\times 10^{13}\text{ см}^{-2}$ ).



Рис. 1. Установка молекулярно лучевой эпитаксии SemiTeq STE3N2, установленная в Институте физики НАН Беларуси

На основе AlGaN/GaN НЕМТ гетероструктур были созданы металл-полупроводник-металл (MSM) УФ фотоприемники. На рис. 2 представлены характеристики MSM фотоприемников: чувствительность в зависимости от интенсивности освещения при оптимальном напряжении смещения, спектральная чувствительность в зависимости от частоты модуляции оптического сигнала.

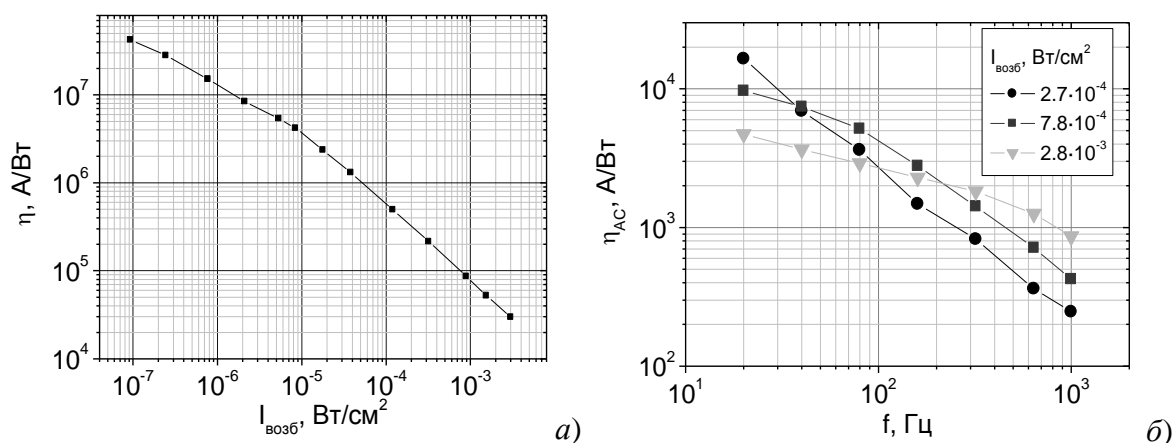


Рис. 2. Чувствительность в зависимости от интенсивности освещения а), чувствительность в зависимости от частоты модуляции оптического сигнала б) на длине волны 325 нм

Установлено, что высокая чувствительность (сопоставимая с чувствительностью ФЭУ) определяется большим временем жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ), обусловленным их разделением во внутреннем поле, образованном на гетероинтерфейсе AlGaIn/GaN. Это также приводит к уменьшению чувствительности с увеличением концентрации ННЗ, за счет экранирования поля, и с увеличением частоты модуляции.

Исследовалась фотолюминесценция, кинетика фотолюминесценции и генерация AlGaIn гетероструктур с сверхтонкими квантовыми ямами (монослой - несколько монослоев) GaIn в AlN матрице и квантовыми ямами состоящими из тунельно связанных субмонослоев GaIn в AlGaIn матрице. Получено стимулированное излучение на длинах волн 255–320 нм. Минимальный порог стимулированного излучения составил 150 кВт/см<sup>2</sup> на длине волны 300 нм. Стимулированное излучение имело ТЕ поляризацию. Таким образом, показана перспективность подобных активных слоев для создания светоизлучающих устройств.

Были исследованы также УФ *p-i-n* фотодиоды и УФ фотодиоды, созданные на основе AlGaIn гетероструктур, которые имели четкие диодные вольт амперные характеристики. Длина волны излучения светодиодов составила 260 и 320 нм. Чувствительность *p-i-n* фотодиодов составляет 50 мА/Вт при напряжении смещения –5В. Небольшая чувствительность *p-i-n* фотодиодов и большие рабочие напряжения фотодиодов указывают на необходимость дальнейшей оптимизации дизайна диодов, режимов роста и конструкции легированных слоев.

1. The 2014 Nobel Prize in Physics – Press Release [Электронный ресурс]. 2014. Режим доступа: [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/press.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/press.html).
2. UV-LED [Электронный ресурс]. 2013. Режим доступа: <http://www.nichia.co.jp/en/product/uvled.html>
3. Nikkiso America Introduces World's Highest Power, Deep UV LEDs. [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: [https://www.ledinside.com/news/2015/2/nikkiso\\_america\\_introduces\\_worlds\\_highest\\_power\\_deep\\_uv\\_leds](https://www.ledinside.com/news/2015/2/nikkiso_america_introduces_worlds_highest_power_deep_uv_leds)
4. RayVio Unveils 60mW UV LED for Disinfection and Sterilization Solutions [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: [https://www.ledinside.com/products/2017/1/rayvio\\_unveils\\_60mw\\_uv\\_led\\_for\\_disinfection\\_and\\_sterilization\\_solutions](https://www.ledinside.com/products/2017/1/rayvio_unveils_60mw_uv_led_for_disinfection_and_sterilization_solutions)
5. LG Innotek Unveils the World's First 70mW UV-C LED. [Электронный ресурс]. 2017. Режим доступа: <https://www.ledinside.com/node/27150>