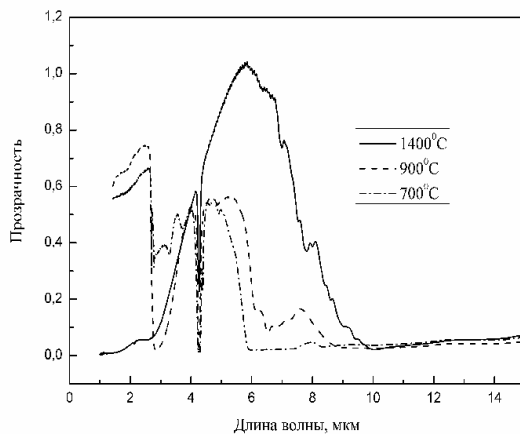


мика на основе поликристаллического АОА имеет более широкую полосу пропускания и выше прозрачность, чем корундовая керамика поликор. Окно прозрачности для такой нанопористой керамики лежит в диапазоне 3,9–8,0 мкм. Показано, что высокотемпературный отжиг сдвигает этот диапазон в длинноволновую часть спектра (от 5,5 мкм при $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 8 мкм при $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$).



**Рисунок 2. – Пропускание различных фаз АОА в ИК диапазоне спектра:
1- аморфный, 2-поликристаллический гамма оксид алюминия,
3 – поликристаллический альфа оксид алюминия**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Thermal radiation shielding by nanoporous membranes based on anodic alumina // E.N. Muratova [et al.] // IOP Conf. Series. –2017. –V.872. –P. 012020.
2. Рассеяние ИК излучения оптически неоднородными пленками нанопористого анодного оксида алюминия / Е.Н. Муратова [и др.] // Неорг. матер. – 2018. – Т. 54, № 6. –С. 593–596.
3. Особенности формирования свободных наноразмерных пористых мембран оксида алюминия из фольги и новые области применения / Е.Н. Муратова [и др.] // ФХС. 2017. – Т.43, №2. – С. 207–215.

ПЕРСПЕКТИВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ СВЕТОДИОДОВ С КВАНТОВЫМИ ДИСКАМИ НА ОСНОВЕ СТОЛБИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР В АВТОМОБИЛЬНОЙ СВЕТОТЕХНИКЕ

Д. В. Балохонов, С. П. Сернов

*Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 63, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: ssernov@bntu.by*

Рассматриваются излучающие столбиковые гетероструктуры на основе многосоставных полупроводниковых соединений, изучается их применимость для создания светодиодов светотехнических изделий транспортных средств. Предлагаются методы, с помощью которых можно добиться уменьшения негативного влияния темпера-

туры на силу света светодиодов на основе гетероструктур для светотехнических изделий транспортных средств.

Ключевые слова: гетероструктура; светодиод; квантовый диск; наностолбиковая Гетероструктура; полупроводниковое соединение; светотехническое изделие транспортных средств.

POSSIBILITIES FOR NANOTECHNOLOGY QUANTUM-DISKS-IN-NANOWIRES HETEROSTRUCTURE-BASED LIGHT-EMITTING DIODES IN AUTOMOTIVE LIGHTING

D. V. Balokhonov, S. P. Sernov

*Belarusian National Technical University, Nezavisimosti av. 63, 220013 Minsk, Belarus,
Corresponding author: S. P. Sernov (ssernov@bntu.by)*

Light-emitting nanowire-based compound semiconductor heterostructures are considered and their usability for vehicle lights light-emitting diodes is studied. Methods to minimize the negative impact of temperature on light-emitting diode luminous intensity are provided.

Key words: heterostructures; light-emitting diode; quantum disk; nanowire heterostructure; compound semiconductor; vehicle lighting device.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в автомобильной светотехнике в качестве источников света широко используются светодиоды, изготовленные с применением гетероструктур на основе различных полупроводниковых соединений, строение которых и определяет спектр излучаемого света. Все эти гетероструктуры имеют как минимум одну квантовую яму, которая и обеспечивает высокий квантовый выход при рекомбинации носителей заряда.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наибольший интерес в настоящее время представляют квантово-размерные структуры на основе арсенида галлия (GaAs) или его твердых растворов разного состава. Различие постоянных кристаллических решеток гетеропары, которое ранее считалось одним из недостатков, реализовалась в технологии получения так называемых самоорганизованных квантовых точек (упорядоченных макроскопических структур, получающихся в результате самоорганизации неравновесных физических систем, при которой ее свободная энергия минимальна) [1].

Характеристики квантовой ямы определяют механизм и параметры рекомбинации: например, при рекомбинации по механизму «зона-зона» ширина квантовой ямы может быть настолько малой, что в ней наблюдается квантование уровней энергии, обеспечивающее очень малую ширину спектра излучения на уровне половинной интенсивности излучения даже без легирования активной области.

Квантовые ямы гетероструктур с доминирующим примесным механизмом рекомбинации имеют большую ширину, и для обеспечения эффективной рекомбинации и высокого квантового выхода используют легирование примесями, образующими ре-

комбинационные центры с энергиями в пределах запрещенной зоны активной области.

Для получения излучения белого цвета, которое широко используется как в головном, так и в сигнальном автомобильном светотехническом оборудовании, используются светодиоды на основе полупроводника нитрида галлия GaN, излучающего свет в синем и ультрафиолетовом диапазоне, покрытые слоем люминофора. Поскольку часть излучения GaN отражается от границы раздела слоев, то эффективность светодиодов не слишком высока. Для повышения квантового выхода можно использовать квантово-размерные структуры, в которых квантовые точки расположены внутри синего светодиода с определенной периодичностью [2].

Для повышения эффективности светодиодов также используют гетероструктуры $Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N$ с квантовыми дисками (Qdisks), излучающие в ультрафиолетовом (337 нм) диапазоне. Это позволяет снизить влияние температуры на квантовый выход, так как ширина запрещенной зоны активной области гетероструктуры у этих кристаллов больше. В настоящее время ведутся исследования (например, [3]), в которых предлагается использовать столбиковые гетероструктуры, полученные по методу спонтанного самоупорядочивания наноструктур на подложке из кремния, покрытого титаном. В результате этого получается структура, представленная на рисунке 1.

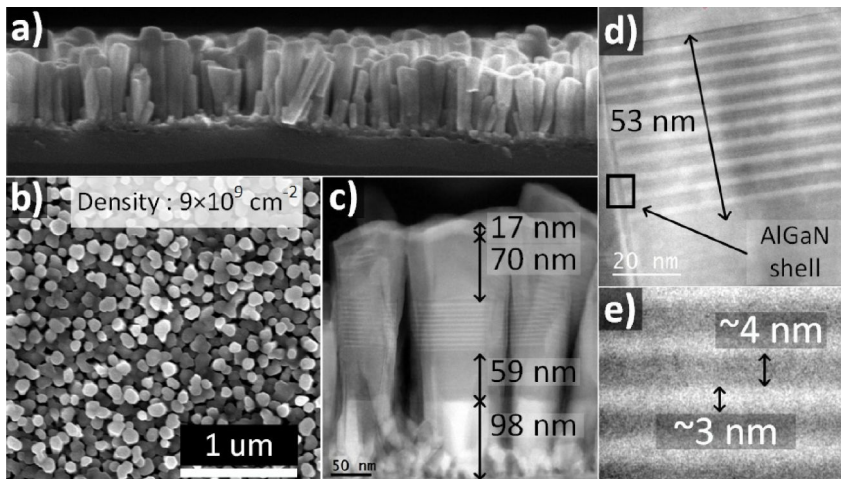


Рисунок 1. – Излучающий кристалл на основе множества наностолбиковых гетероструктур:

- a)* электронно-микроскопическая фотография наностолбиков, вид сбоку;
- b)* электронно-микроскопическая фотография наностолбиков, вид сверху. Плотность столбиков $9 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$;
- c)* электронно-микроскопическая фотография отдельных наностолбиков, вид сбоку. Приведены размеры основных частей гетероструктуры столбиков в нм.
- d)* электронно-микроскопическая фотография области столбика с квантовыми ямами. Квадратом выделена оболочка области из AlGaIn.
- e)* электронно-микроскопическая фотография отдельных слоев активной области гетероструктуры наностолбика. Приведены толщины слоев самоорганизованной структуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подобные технологии позволят создавать более дешевые светодиоды, так как подложки из полупроводниковых соединений заменяются подложкой из кремния, покрытого титаном. Кроме этого, такие технологии более экологичны и безопасны для окружающей среды, так как светодиоды содержат меньше токсичных соединений.

Подобным способом можно создавать светодиоды и в видимом диапазоне света. Например, в работе [4] приводится пример использования светодиода на основе наностолбиковой гетероструктуры из InGaN/AlGaIn на подложке из кремния *n*-типа с ориентацией (111) в волоконно-оптических линиях связи. В процессе изготовления содержание индия в каждом столбике может изменяться, в результате свет, излучаемый каждым столбиком, может иметь практически произвольную длину волны. За счет этого вся структура может генерировать свет любого цвета, в том числе белого.

Однако все светодиоды на основе гетероструктур при повышении плотности тока инжекции нагреваются, что приводит к увеличению интенсивности безызлучательной рекомбинации через побочный минимум в зоне проводимости полупроводникового соединения в активной зоне гетероструктуры, или даже возникновению Оже-рекомбинации с участием дополнительных носителей заряда или фононов.

Из-за этого квантовый выход рекомбинации по току уменьшается с ростом температуры, и зависимость светового потока светодиодов от тока инжекции при заданной температуре имеет выраженный максимум. Данный максимум при повышении температуры уменьшается по величине и смещается в область меньших токов инжекции, что позволяет предположить существование некоторой пороговой удельной теплоты (на единицу массы или объема вещества), при достижении которой либо из-за внешнего нагрева, либо из-за прохождения тока инжекции, либо из-за суммарного влияния данных процессов возникает критическое падение квантового выхода рекомбинации носителей заряда.

Уменьшить утечку носителей заряда можно путем использования гетероструктур, скомпенсированных по поляризации. Зонная диаграмма такой гетероструктуры в сравнении со стандартной структурой схематически изображена на рисунке 2 [5].

Из рисунка 2 видно, что утечка электронов значительно в поляризационно-скомпенсированной структуре меньше, чем в стандартной, так как электроны не имеют того большого запаса энергии, который позволял им ранее просто «пролетать» структуру. Это обусловлено применением в гетероструктуре в качестве *p*- и *n*-слоя материалов, имеющих минимальную контактную разность потенциалов.

Из представленных в настоящее время на рынке серийных светодиодов гетероструктурой указанного строения обладают светодиоды типа Rebel фирмы Philips. Имея такую структуру, светодиоды Rebel позволяют достичь лучшего квантового выхода и поэтому лучше других подходят для применения в светотехническом оборудовании транспортных средств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для улучшения работы светодиодного светотехнического оборудования транспортных средств можно использовать различные методы, среди которых выделяются следующие:

- создание гетероструктур с множественными квантовыми ямами для уменьшения утечек электронов и дырок через побочные минимумы зоны проводимости и валентной зоны
- создание гетероструктур, скомпенсированных по поляризации, так что контактная разность потенциалов между слоями соседних квантовых ям оказывается незначительной, т.е. электроны и дырки теряют возможность преодолевать квантовые барьеры «с наскока», пользуясь повышением своей энергии в результате нагрева гетероструктур;
- применение средств пассивного и активного охлаждения, начиная с простейших радиаторов и заканчивая комплексами микромеханических охладителей, которые заставляют воздух или подводимую специально жидкость циркулировать по каналам, созданным методом плазменного травления прямо в излучающем кристалле;
- выбор оптимального тока инжекции через гетероструктуру с тем, чтобы гетероструктура обеспечивала заданный световой поток даже при достаточно высокой внешней температуре. В настоящее время этим методом в основном пренебрегают, особенно при создании фар на основе белых мощных светодиодов, так как в данном случае основной задачей является достичь максимально-возможного (а не оптимального) светового потока для данного светодиода.

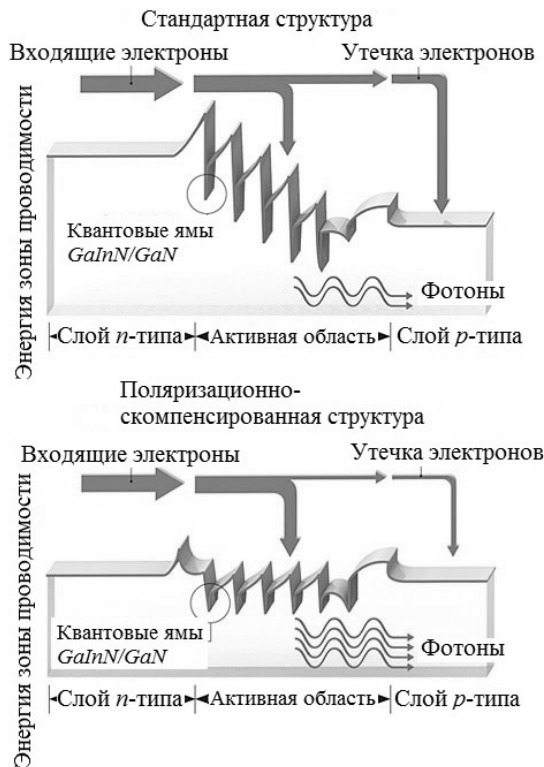


Рисунок 2. – Типичная гетероструктура (сверху) и гетероструктура, скомпенсированная по поляризации (снизу). Пояснения в тексте

Уменьшение эффективности светового потока нейтрализуется путем применения систем активного охлаждения, но это уменьшает ресурс гетероструктуры, так как плотность тока инжекции все равно оказывается выше допустимой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Жмерик, В.А. Молекулярно – пучковая эпитаксия с плазменной активацией оптоэлектронных гетероструктур на основе широкозонных соединений (AlGaIn)N : автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук : 01.04.10 / В.А. Жмерик ; ФТИ им. А. Иоффе РАН. – Спб., 2012. – 38 с.
2. Krishnan, C. Hybrid photonic crystal light-emitting diode renders 123% color conversion effective quantum yield / C. Krishnan, M. Brossard, K.-Y. Lee, J.-K. Huang, C.-H. Lin, H.-C. Kuo, M. D. B. Charlton, P. G. Lagoudakis // OSA Publishing. Optica [Electronic resource].-2016.- Mode of access: <https://www.osapublishing.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-3-5-503&id=340532>.- Date of access: 04.09.2018.
3. Janghua, B. Droop-free Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N quantum-disks-in-nanowires ultraviolet LED emitting at 337 nm on metal/silicon substrates / B. Janghua et al. // Optics Express.– 2017.- Vol. 25, No.2.– PP. 1381 – 1390.
4. Philip, M.R. Phosphor-free III-nitride nanowire white-light-emitting diodes for visible light communication / M.R. Philip et. al. // SPIEDigitalLibrary.org [Electronic resource].-2018.- Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie>. - Date of access: 19.03.2018.
5. Stevenson, R. The LED's Dark Secret / R. Stevenson // IEEE Spectrum [Electronic resource]. – 2009. – Mode of access: <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/the-leds-dark-secret>.- Date of access: 22.06.2018.

ФОРМИРОВАНИЕ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ КРЕМНИЯ

М. И. Маркевич¹, А. М. Чапланов¹, В. И. Журавлева²,
Д. В. Жигулин³, В. Ф. Стельмах⁴

¹⁾ Физико-технический институт НАН Б, e-mail: a.chaplanov@telecom.by,

²⁾ Военная академия Республики Беларусь,

³⁾ ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,

⁴⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,

В работе рассмотрено влияние лазерного воздействия в широком диапазоне энерговкладов на изменение морфологии поверхности поликристаллического кремния, его структуры. Показано, что при абляции в водной среде формируется ансамбль частиц разного размера от 500 нм до 3,5 мкм. Частицы не имеют огранки, что позволяет говорить об их аморфности. Обсуждены возможные механизмы образования частиц.

Ключевые слова: морфология; кратер; структура; лазерное воздействие; наносекундная длительность импульса; плотность мощности; двухимпульсный режим; длина волны.