

**Квантовый выход гетероструктур  
на основе нитрида галлия с квантовыми ямами GaInN**

*Е.Н. Вигдорович*

*Физико-технологический институт Московского технологического  
университета, г. Москва, Россия*

*evgvig@mail.ru*

Важным параметром светодиодных гетероструктур является величина внешнего квантового выхода. Однако к структурам, используемым при изготовлении кристаллов для синих и белых светодиодов, предъявляется еще одно жесткое требование: длина волны в максимуме спектра излучения и разброс ее величины по всей площади структуры должны составлять  $(460 \pm 5)$  нм. В первую очередь это объясняется тем, что в наиболее применяемой конструкции белых светодиодов используются кристаллы, покрытые слоем люминофора определенного состава, возбуждаемого синим излучением. Отклонение от указанных значений спектральных параметров гетероструктур приводит к резкому ухудшению световых и цветовых характеристик светодиодов.

В настоящей работе решается задача оптимизации конструкции и технологии выращивания активной области излучающей структуры, состоящей из набора квантово-размерных ям  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  и более широкозонных барьеров GaN с определенной длиной волны в максимуме спектра излучения. Проведен расчет изменения критической толщины псевдоморфного слоя для интервала коэффициента Пуассона от 0 до 0,2 для GaAlN и от 0 до 0,4 для GaInN. Длина волны излучения определяется как шириной запрещенной зоны объемного  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ , зависящей от мольной доли In в квантовых ямах, так и толщиной квантовой ямы в квантово-размерных слоях. Из полученных в работе зависимостей определено, что для достижения требуемой длины волны в максимуме спектра излучения 460 нм необходимо, чтобы слои  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  содержали примерно 10,3 % индия и имели толщину ям около 2,5 нм. Исследовано влияние профиля распределения In в квантовых ямах на внешний квантовый выход, однородность распределения значений длины волны излучения в максимуме спектра и однородность распределения мощности излучения по площади структуры. Наилучшие результаты получены при трапециевидном распределении In, так как достигаются наименьший разброс значений длины волны излучения в максимуме спектра и наилучшая однородность распределения мощности излучения по площади структуры.

В результате исследования влияния количества квантовых ям на свойства гетероструктуры получено, что для достижения наибольшей величины внешнего квантового выхода излучения количество квантовых ям должно составлять от 4 до 5. Наилучшая однородность длины волны излучения в максимуме спектра по площади структуры достигается при числе квантовых ям от 5 до 7. Оптимальное количество квантовых ям в активной области гетероструктуры равно 5.

*Ключевые слова:* нитрид галлия GaN; псевдоморфный слой; критическая толщина; вектор Бюргерса; квантовая яма; профиль концентрации.

*Для цитирования:* Вигдорович Е.Н. Квантовый выход гетероструктур на основе нитрида галлия с квантовыми ямами GaInN // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 6. – С. 559–568. DOI: 10.21415/1561-5405-2017-22-6-559-568

## **The Quantum Yield of Heterostructures Based on Gallium Nitride Quantum-Well GaInN**

*E.N. Vigdorovich*

*Physics and Technology Institute of Moscow Technological University,  
Moscow, Russia*

*evgvig@mail.ru*

The most important parameter of the LED heterostructures is the value of the external quantum efficiency. However, for the structures used in the manufacture of crystals for blue and white LEDs there is one more requirement: the wavelength maximum of the emission spectrum and the variation of its magnitude over the entire area of the structure should be  $460 \pm 5$  nm. Primarily, this is due to the fact that the most applied design of white LEDs the crystals covered with a layer of phosphor of a specific composition, excited by blue radiation, are used. The deviation from the above values of the spectral parameters of heterostructures leads to a sharp deterioration of light and color characteristics of LEDs.

In present work the problem of optimizing the design and technology of growing the active region of the radiating structure, consisting of a set of quantum-size Yam  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  and wider bandgap GaN barriers, with a specific wavelength maximum of the emission spectrum, is being solved. The calculation of critical thickness of pseudomorphic layer for a range of Poisson ratio from 0 to 0.2 for GaAlN and from 0 to 0.4 for GaInN. The radiation wavelength is defined by both, by the width of the forbidden zone bulk  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ , that depending on the molar fraction of indium in quantum wells and by the thickness of QW in the quantum-well layers. From the obtained in the work dependences it has been determined that to obtain the desired wavelength at the maximum of the emission spectrum of 460 nm it is necessary to have the  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  layers, containing approximately 10.3% of indium and having pits thickness about 2.5 nm. The influence of the different distribution profile of indium in quantum wells in the external quantum yield, the uniformity of distribution of the radiation wavelength values at the spectrum maximum and the uniformity of distribution of the radiation power on the structure area, have been investigated.

In the study of the effect of the number of quantum wells on the properties of heterostructures is shown that to achieve the maximum value of the external quantum yield of radiation, the number of QWS should be from 4 to 5. The best uniformity of the radiation wavelength at the maximum of the spectrum for the square structure is achieved when the number of QW from 5 to 7. Thus, in the present work, the optimum number of quantum wells in the active region of the heterostructure is 5.

*Keywords:* gallium nitride; pseudomorphic layer; the critical thickness; the Burgers vector; quantum well; the concentration profile.

*For citation:* Vigdorovich E.N. The quantum yield of heterostructures based on gallium nitride quantum-well GaInN // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 6. – P. 559–568. DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-6-559-568

**Введение.** Новыми перспективными оптоэлектронными материалами с широким спектром практических применений в качестве активных сред в лазерных диодах, в светодиодах и в СВЧ-технике являются структуры на основе полупроводниковых нитридов (GaN, AlN и некоторые соединения типа GaAlN и GaInN). Одно из направлений оптоэлектроники – создание ярких источников света в коротковолновой (сине-зеленой) области видимого спектра и ближней УФ-области спектра, а также источников белого цвета на основе системы кристалл – люминофор (полупроводниковый кристалл, покрытый люминофором) [1–3]. В настоящее время нитрид галлия GaN помимо оптоэлектронных приборов находит все более широкое применение в твердотельной электронике благодаря уникальному сочетанию физических характеристик. Приборы на основе GaN могут работать в широком диапазоне частот, при высоких температурах, а также с большей выходной мощностью по сравнению с приборами на Si, GaAs, InP или на любом другом освоенном в производстве полупроводниковом материале [4–7].

В настоящей работе решается задача оптимизации конструкции и технологии выращивания активной области излучающей структуры, состоящей из набора квантово-размерных ям  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  и более широкозонных барьеров GaN с определенной длиной волны в максимуме спектра излучения. Важный параметр светодиодных гетероструктур – величина внешнего квантового выхода. Однако к структурам, используемым при изготовлении кристаллов для синих и белых светодиодов, предъявляется еще одно жесткое требование: длина волны в максимуме спектра излучения и разброс ее величины по всей площади структуры должны составлять  $(460 \pm 5)$  нм. В первую очередь это объясняется тем, что в наиболее используемой конструкции белых светодиодов применяются кристаллы, покрытые слоем люминофора определенного состава, возбуждаемого синим излучением. Отклонение от указанных значений спектральных параметров гетероструктур приводит к резкому ухудшению световых и цветовых характеристик светодиодов.

**Критическая толщина квантовой ямы на основе GaInN.** Нитрид галлия – прямозонный полупроводник – относится к группе  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  и в отличие от кубических кристаллов GaAs, InP, AlAs кристаллизуется в гексагональной решетке типа вюрцита (постоянные решетки  $a = 0,318$  нм,  $c = 0,518$  нм), имеет ширину запрещенной зоны  $E_g = 3,5$  эВ. Нелегированные кристаллы GaN имеют большую концентрацию доноров, обуславливающих проводимость  $n$ -типа, и концентрацию электронов  $n = 10^{16} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Кристаллы AlN и InN также гексагональные с сильно различающимися постоянными решеток ( $a = 0,311$  нм,  $c = 0,498$  нм и  $a = 0,354$  нм,  $c = 0,570$  нм соответственно) и являются прямозонными полупроводниками с шириной запрещенной зоны  $E_g = 6,5$  эВ и  $E_g = 1,3$  эВ (в других источниках  $E_g = 0,7...1,8$  эВ) соответственно. Бинарные соедине-

ния допускают образование тройных твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ ,  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ . В ряду твердых растворов  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  можно так подобрать параметр  $x$ , что энергия  $E_g$  будет отвечать фиолетовой, голубой или зеленой области спектра. Отметим, что при формировании гетероструктур на основе GaN все его твердые растворы сильно отличаются по значениям постоянных решетки ( $a$ ,  $c$ ) и поэтому невозможно получать изопериодные (изоморфные) малодефектные гетероструктуры типа GaAs/GaAlAs.

Толстые слои GaN имеют различные структурные свойства, в результате чего возникают упругие напряжения, которые при пластической деформации генерируют дислокации несоответствия и приводят к резкому ухудшению свойств слоев. В плоскости (0001) постоянные решетки ( $a$ ) исследуемых материалов имеют следующие значения [8]:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,475 нм; AlN – 0,311 нм; GaN – 0,319 нм; InN – 0,353 нм. В тонких псевдоморфных слоях (при определенной толщине) пластической деформации не происходит. Равновесное значение остаточной упругой деформации для гетероструктуры с заданным рассогласованием кристаллической решетки, согласно модели Мэтьюза [9, 10], можно рассчитать по уравнению

$$\varepsilon_i = \frac{\mu b(1 - \nu \cos^2 \varphi)}{4\pi h(1 + \nu) \sin \varphi \cos \theta} \ln \left( \frac{h}{b \sin \theta} + 1 \right),$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\varphi$  – угол между вектором Бюргерса и линией дислокации несоответствия;  $\theta$  – угол между плоскостью скольжения и межфазной границей;  $h$  – толщина слоя.

Аналогично для деформации кристаллической решетки под действием сил Пайерлса можно написать

$$\varepsilon_f = \frac{\mu}{(1 - \nu)} f,$$

где  $f$  – рассогласование решетки  $\Delta a/a$ .

В псевдоморфном слое  $\varepsilon_i = \varepsilon_f$ , следовательно

$$h = \frac{b(1 - \nu \cos^2 \varphi)(1 - \nu)}{4\pi f(1 + \nu) \sin \varphi \cos \theta} \ln \left( \frac{h}{b \sin \theta} + 1 \right).$$

Дислокации в плоскости скольжения стремятся занять положение с более низкой свободной энергией, вследствие чего они обычно располагаются вдоль направлений с низкими индексами. Главной количественной характеристикой дислокаций является вектор Бюргерса, который определяет величину и направления смещения атомов в кристалле при возникновении дислокации (таблица). Нитриды элементов третьей группы с гексагональной плотноупакованной решеткой в процессе выращивания слоев с ориентацией (0001) при образовании дислокаций несоответствия имеют три основных направления скольжения:  $\langle 0001 \rangle$  ( $c$ -тип),  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  ( $a$ -тип) и  $\langle 11\bar{2}3 \rangle$  ( $a+c$ -тип).

**Значения вектора Бюргерса (Å) для различных систем скольжения [8]**  
**The values of the Burgers vector (Å) for different slip systems [8]**

Система	GaN	InN	AlN
(0001) $\langle 0001 \rangle$	5,18	5,69	4,97
(0001) $\langle 11\bar{2}3 \rangle$	6,08	6,69	5,86
(0001) $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3,19	3,53	3,11

Расчет значения вектора Бюргерса для нитридов показывает, что минимальный вектор Бюргерса, а значит, и минимальную энергию при смещении атома решетки имеет система скольжения  $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . Тогда уравнение для критической толщины слоя  $h$  будет иметь вид

$$h = \frac{b(1-\nu)}{2\pi f(1+\nu)} \ln\left(\frac{h}{b} + 1\right).$$

Уравнение не содержит модуля сдвига и в этом смысле является универсальным, т.е. применимым для любых гетероструктур.

Оценочная критическая толщина псевдоморфного зародышевого слоя для системы  $(0001)\text{GaN}/(0001)\text{Al}_2\text{O}_3$  составляет не более 1 нм. Выращивание зародышевого слоя такой толщины технологически нецелесообразно, и поэтому разрабатываются различные комбинированные способы получения малодефектного зародышевого и буферного слоев. Например, зародышевый слой выращивают на нитридизированной подложке при низкой температуре (500–600 °C), а затем после отжига выращивают буферный слой при высокой температуре (1000–1100 °C).

Расчет критической толщины для твердых растворов проводился с использованием справочных значений постоянных решетки ( $a$ ,  $c$ ) нитридов в предположении выполнения закона Вегарда. На рис.1 приведено изменение критической толщины псевдоморфного слоя от состава твердых растворов. Как видно из используемых для расчета уравнений, на результаты сильное влияние оказывает значение коэффициента Пуассона. Анализ литературных источников и расчеты с использованием опубликованных значений коэффициентов эластичности в предположении идеальности твердых растворов (подчинение закону Вегарда) с учетом отклонения от идеальности показывают сильный разброс значений коэффициента Пуассона от 0 до 0,23 для GaAlN и от 0 до 0,4 для GaInN.

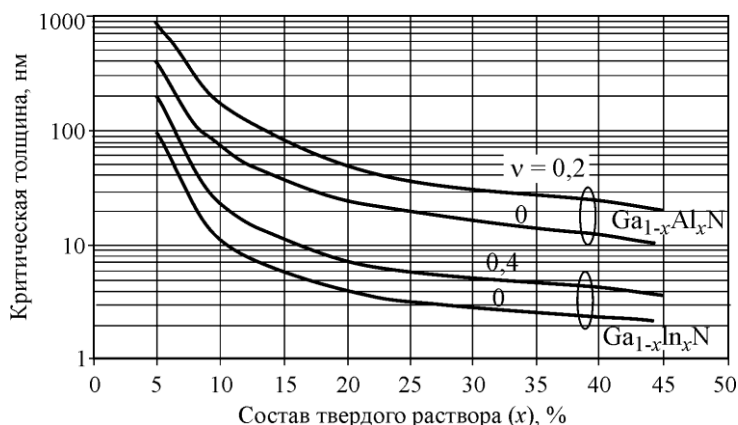


Рис. 1. Зависимость критической толщины псевдоморфных слоев  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  и  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  от состава при разных значениях коэффициента Пуассона  
Fig. 1. Change in critical thickness of pseudomorphic layer of  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  and  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$  composition for different values of Poisson's ratio

Свойства получаемых слоев в процессе эпитаксии могут сильно изменяться, поэтому проведен расчет критической толщины псевдоморфного слоя для интервала коэффициента Пуассона от 0 до 0,2 для GaAlN и от 0 до 0,4 для GaInN (отбросив значения больше 0,4 как нереальные).

**Формирование состава квантово-размерных областей.** Длина волны излучения определяется как шириной запрещенной зоны  $E_g$  объемного  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ , зависящей от мольной доли In в квантовых ямах, так и толщиной квантовой ямы в квантово-

размерных слоях. В квантовой яме эффективная ширина запрещенной зоны  $E_g = E_g(\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}) + \Delta E_{C1} + \Delta E_{V1}$  (где  $E_{C1}$  и  $\Delta E_{V1}$  – энергетическое положение первых уровней размерного квантования для электронов и дырок относительно положения дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в объемном материале). При этом длина волны в максимуме спектра излучения  $\lambda$  (нм) =  $1239/E_g$  (эВ). Содержание In в квантовых ямах и толщину ям определяли по данным измерений кривых качания, полученных с помощью рентгеновской дифрактометрии в трехкристальном режиме.

Слои  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  с контролируемым содержанием In получали при температурах ниже 800 °С. В качестве газа-носителя использовали чистый азот, так как за счет устранения водорода из газовой среды облегчается разложение аммиака при низкой температуре роста. Отношение расходов компонентов V группы (аммиак) и III группы (триметилгаллия (TMG) + триметилиндия (TMI)) поддерживали на уровне 45000 из-за малой степени диссоциации аммиака при температуре роста 725 °С. Давление в атмосфере реактора составляло 200 мм рт.ст, скорость роста активной области равна 1,2 нм/мин. Скорость роста можно увеличить путем увеличения скорости расхода TMG + TMI, однако при этом повысится дефектность слоев в активной области множественных квантовых ям, что подтверждается дифрактометрическими измерениями по уширению кривой касания.

По результатам исследований построены две характерные зависимости: зависимость длины волны в максимуме спектра излучения от содержания In в слоях квантовых ям на основе данных для гетероструктур, имеющих одинаковую толщину слоев, равную 2,5 нм (рис.2,а); зависимость длины волны в максимуме спектра излучения от толщины слоев квантовых ям на основе данных для гетероструктур, имеющих примерно одинаковое содержание In в квантовых ямах вблизи  $x = 10\%$  (рис.2,б). Из представленных зависимостей видно, что для получения требуемой длины волны в максимуме спектра излучения 460 нм необходимо, чтобы слой  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  содержали примерно 10,3 % In и имели толщину квантовых ям около 2,5 нм.

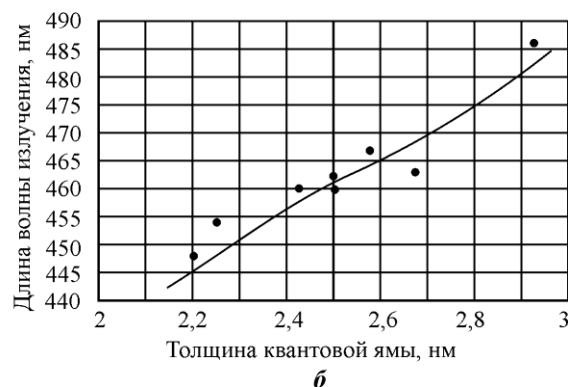
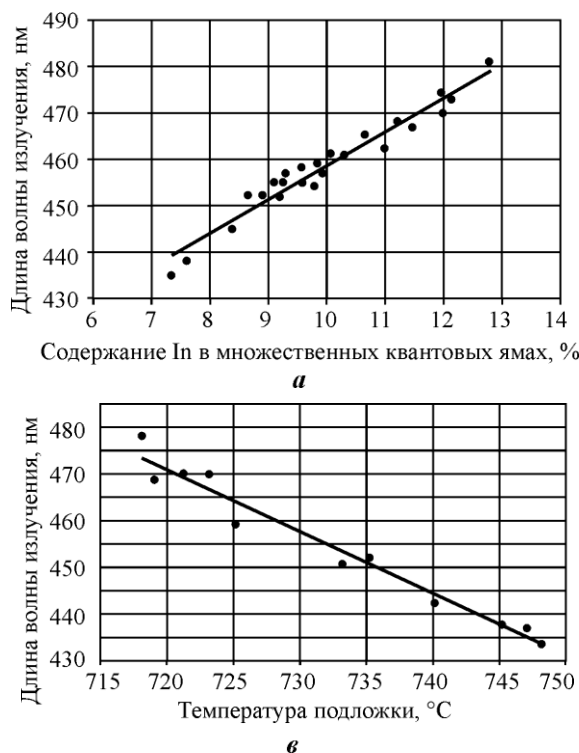


Рис.2. Зависимость длины волны излучения в максимуме спектра от содержания In в множественных квантовых ямах (а), от толщины квантовой ямы (б) и от температуры подложки во время выращивания активной области гетероструктуры при остальных одинаковых условиях роста (в)

Fig.2. The dependence of the wavelength at the maximum of the spectrum from the content In in the quantum wells (a), on the quantum well thickness (b) and on the substrate temperature during growth of the active region of the heterostructure in the same conditions of growth (c)



У изготовленных гетероструктур измерена длина волны излучения в максимуме спектра. Зависимость длины волны излучения от температуры подложки во время выращивания активной области представлена на рис.2,в. Как видно из рисунка, уточненное значение температуры подложки, обеспечивающее значение длины волны излучения в максимуме спектра 460 нм, усредненное по всей поверхности структуры, должно находиться в пределах 725–727 °С. Толщина квантовых ям при этом равна 2,5 нм.

Однако разброс длины волны излучения в максимуме спектра по площади пластины и от процесса к процессу достигал 10–15 нм. Причина этого – неконтролируемые изменения (осцилляции) температуры в диапазоне  $\pm (3-7)$  °С при переходе от выращивания барьера к выращиванию последующей квантовой ямы.

**Влияние профиля распределения индия в квантовых ямах.** Проведено исследование влияния различного профиля распределения In в квантовых ямах на внешний квантовый выход, на однородность распределения значений длины волны излучения в максимуме спектра и однородность распределения мощности излучения по площади структуры. Исследованы три варианта изменения содержания In в твердом растворе  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  по толщине квантовой ямы (рис.4). Речь идет не о реально измеренном распределении содержания индия в квантовой яме, а об экспериментальном количественном изменении скорости расхода TMI в реакторе во время выращивания квантовой ямы. Считалось, что содержание In в твердом растворе  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  линейно растет с увеличением скорости расхода TMI. Максимум содержания In в квантовой яме  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$   $x = 10,3$  %, что соответствует отношению расходов  $\text{TMI}/(\text{TMG} + \text{TMI}) = 0,2$ .

На рис.3 приведены экспериментальные данные по спектрам излучения в различных областях поверхности гетероструктуры для трех профилей распределения In: «прямоугольного» (резкие границы раздела между ямами и барьерами), «трапециевидного» (плавное распределение с градиентом 0,2 об. доли In/нм) и «квазиправильного» (еще более плавное распределение с градиентом 0,12 об. доли In/нм).

Исследования показывают, что наилучшие результаты получены при трапециевидном распределении. При таком распределении In достигаются наименьший разброс значений длины волны излучения в максимуме спектра и наилучшая однородность распределения мощности излучения по площади структуры. Также отметим, что абсолютная величина квантового выхода была на 10–20 % больше, чем при обычно принятом прямоугольном резком распределении In. Это, вероятно, связано с меньшими механическими напряжениями на границах раздела между ямами и барьерами. Очевидные преимущества трапециевидного распределения позволили считать его основным при совершенствовании технологии выращивания светодиодных гетероструктур.

**Оптимальное количество квантовых ям в активной области гетероструктуры.** Согласно теоретическим представлениям в большинстве случаев предполагается, что оптимальное количество квантовых ям равно от 3 до 5. Однако, несмотря на существующие теоретические представления, в литературе не описаны экспериментальные исследования определения оптимального количества квантовых ям. Поэтому важно экспериментально изучить влияние различного числа квантовых ям на излучательные характеристики структур, имеющих одинаковые конструкции и степени легирования слоев, полученных в одинаковых условиях выращивания на данной ростовой установке. Полученные экспериментальные данные представлены на рис.4. Измерены внешний квантовый выход излучения [11] и разброс значений длины волны в максимуме спектра по площади пластины. Измерения проводили при токе 5 мА.

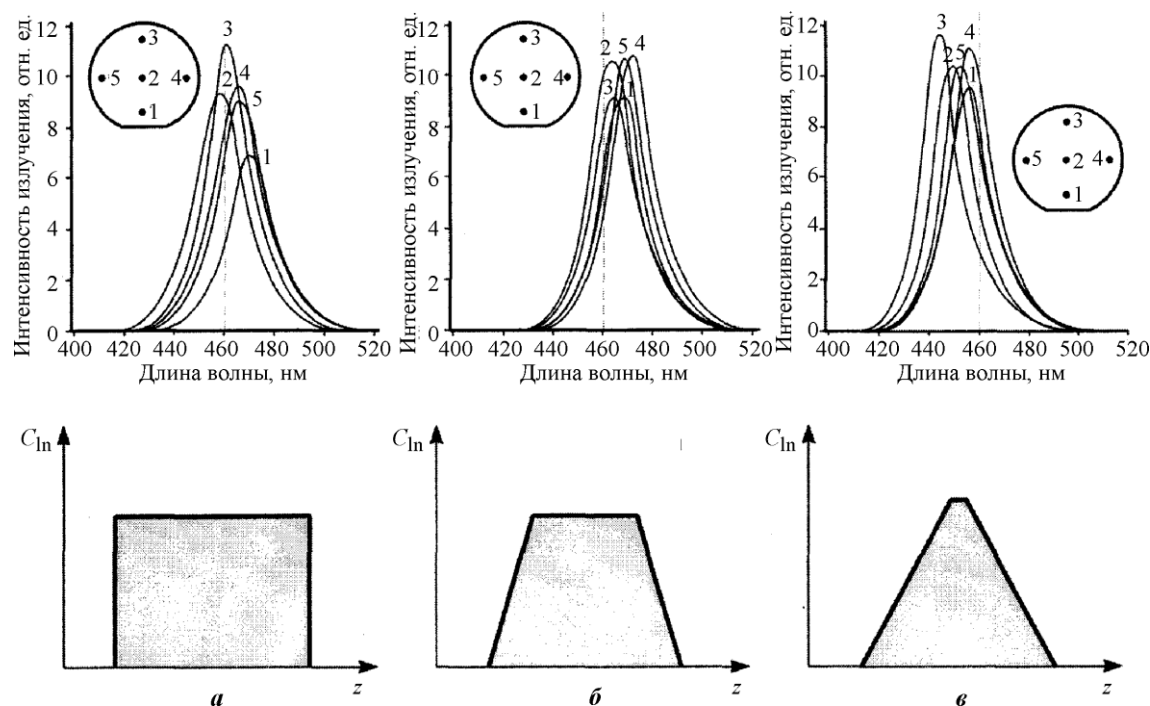


Рис.3. Вид спектров излучения в различных областях гетероструктур 1–5 в зависимости от соответствующих профилей распределения  $In$  по толщине квантовой ямы:  $a$  – прямоугольный;  $b$  – трапециевидный;  $c$  – квазитреугольный ( $C_{in}$  – концентрация  $In$ )

Fig.3. View emission spectra in different areas of the heterostructures 1–5 depending on the relevant distribution profiles  $In$  on the thickness QW:  $a$  – rectangular;  $b$  – trapezoidal;  $c$  – quasitriangular

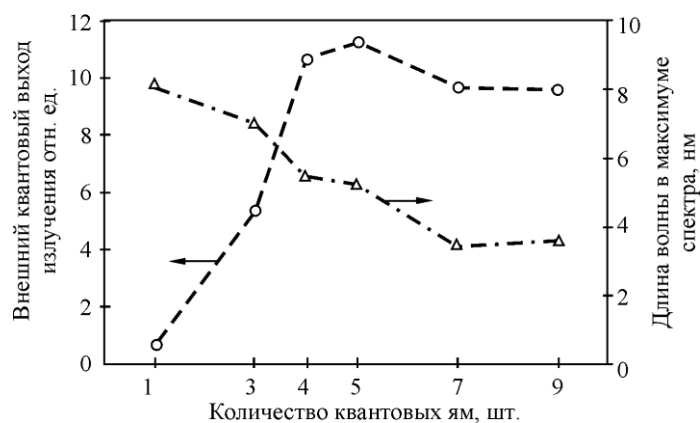


Рис.4. Зависимость внешнего квантового выхода излучения и однородности распределения значений длины волны в максимуме спектра от количества квантовых ям в активной области

Fig.4. The dependence of the radiation power and the homogeneity of the distribution of values of the wavelength at the peak of the spectrum ( $\Delta\lambda$ ) of the number of quantum wells in the active region

**Закключение.** Исследования свойств получаемых слоев в процессе эпитаксии показали, что они могут сильно изменяться. Поэтому расчет критической толщины псевдоморфного слоя проводился для интервала коэффициента Пуассона от 0 до 0,2 для GaAlN и от 0 до 0,4 для GaInN. В реальных экспериментах при выращивании псевдо-



морфных слоев для квантовых ям необходимо ориентироваться на минимальные значения критической толщины.

При исследовании условий формирования состава псевдоморфных слоев показано, что длину волны излучения можно отдельно контролировать как мольной долей металлоорганического соединения In в газовой фазе в квантовых ямах, так и временем получения слоев квантовых ям при одинаковой скорости их роста. Для получения требуемой длины волны в максимуме спектра излучения 460 нм необходимо, чтобы слои  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$  содержали In примерно 10,3 % и имели толщину ям около 2,5 нм.

В гетероструктурах с количеством квантовых ям от 1 до 3, вероятно, достигается слишком высокая концентрация электронов, инжектированных в квантовые ямы. При этом внешний квантовый выход может быть низким по двум причинам. Во-первых, с увеличением концентрации электронов в квантовых ямах влияние безызлучательной рекомбинации Шокли – Холла – Рида уменьшается, но увеличивается их инжекция из квантовых ям в  $p$ -область гетероструктуры. Во-вторых, увеличивается скорость безызлучательной оже-рекомбинации в квантовых ямах. В гетероструктурах с количеством квантовых ям от 6 до 9, по-видимому, достигается слишком низкая концентрация электронов, инжектированных в квантовые ямы. При этом, по мере увеличения количества квантовых ям, концентрация электронов в них будет уменьшаться и внешний квантовый выход будет падать из-за возрастающего вклада безызлучательной рекомбинации Шокли – Холла – Рида, приводящего к уменьшению внутреннего квантового выхода излучения.

При исследовании влияния количества квантовых ям на свойства гетероструктуры показано, что для достижения наибольшей величины внешнего квантового выхода излучения их количество должно составлять от 4 до 5. Наилучшая однородность длины волны излучения в максимуме спектра по площади структуры достигается при числе квантовых ям от 5 до 7. Таким образом, оптимальное количество квантовых ям в активной области гетероструктуры равно 5.

### *Литература*

1. **Юнович А.Э.** Светодиоды на основе гетероструктур из нитрида галлия и его твердых растворов // Светотехника. – 1996. – Вып. 5, 6. – С. 28–33.
2. **Шуберт Ф.Е.** Светодиоды. – М.: ФизМатЛит, 2008. – 496 с.
3. **Кузй Р.** Электроника на основе нитрида галлия: пер. с англ. под ред. А.Г.Васильева. – М.: Техносфера, 2011. – 578 с.
4. **Данилин В.Н., Докучаев Ю.П., Жукова Т.А., Комаров М.А.** Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ-приборы нового поколения на широкозонных гетеропереходных структурах AlGaIn/GaN // Обзоры по электронной технике. Сер.1. СВЧ техника. – 2001. – Вып.1. – 18 с.
5. **Васильев А.Г., Данилин В.Н., Жукова Т.А.** Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов. Через GaN к алмазу // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – №4. – С. 68–76.
6. **Вигдорович Е.Н.** Механизм формирования квантово-размерных слоев гетероструктур AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №4. – С. 322–330.
7. **Крапухин Д.В., Мальцев П.П.** Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57–64 ГГц // Российский технологический журнал. – 2016. – Т. 4. – № 4 (13). – С. 42–53.
8. **Вигдорович Е.Н., Свешников Ю.Н.** Критическая толщина псевдоморфных слоев // Сб.докладов 3-й Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 36–37.
9. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
10. **Mattews J.W.** Defects associated with the accommodation of misfit between crystals // J.Vac. Sci. and Technol. – 1975. – Vol. 12. – No. 1. – P. 123–126.

11. Вигдорович Е.Н. Технологическая инфраструктура производства и средства контроля свойств наногетероструктур на основе нитрида галлия // Приборы+автоматизация. – 2012. – №12 (150). – С. 20–26.

Поступила 16.03.2017 г.; принята к публикации 12.09.2017 г.

**Вигдорович Евгений Наумович** – доктор технических наук, профессор кафедры оптических и биотехнических систем и технологий Физико-технологического института Московского технологического университета (Россия, 107076, г. Москва, Стрмынка, 20), evgvig@mail.ru

### References

1. Yunovich A. E. Svetodiody na osnove geterostruktur iz nitrida galliya i ego tverdyh rastvorov [LEDs based on heterostructures of gallium nitride and its solid solutions]. *Svetotekhnika – Svetotekhnika*, 1996, iss. 5, 6. (in Russian).
2. Shubert F.E. *Svetodiody* [Light Emitting Diodes]. Moscow, FizMatLit Publ., 2008. (in Russian).
3. Kuej R. *Elektronika na osnove nitrida galliya* [Electronics based on gallium nitride]. Pod red. A.G.Vasil'eva, Moscow, Tekhnosfera Publ., Moscow, 2011, 78 p.
4. Danilin V.N., Dokuchaev Yu.P., Zhukova T.A., Komarov M.A. Moshchnye vysokotemperaturnye i radiacionno-stojkie SVCH pribory novogo pokoleniya na shirokazonnyh geteroperekhodnyh strukturah AlGaIn/GaN [Powerful high-temperature and radiation-resistant microwave devices of new generation on wide-area geteroperekhodny structures AlGaIn/GaN]. *Obzory po elektronnoy tekhnike, Ser.1. SVCH tekhnika – Reviews on electronic engineering, Ser.1. Microwave engineering*, 2001, iss.1, 18 p. (in Russian).
5. Vasil'ev A., Danilin V.N., Zhukova T.A. Novoe pokolenie poluprovodnikovyykh materialov i priborov. CHerez GaN k almazu [New generation of semiconductor materials and devices. Through GaN to diamond]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 4, pp. 68–76. (in Russian).
6. Vigdorovich E.N. Mekhanizm formirovaniya kvantovo-razmernykh sloev geterostruktur AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN [Mechanism of Forming of Quantum-Size Layers of AlGaIn/GaN/InGaIn/GaN Layers]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol.22, no.4, pp. 322–330. (in Russian).
7. Krapuhin D.V., Mal'cev P.P. Monolitnaya integral'naya skhema maloshumyashchego usilitelya na nitride galliya dlya diapazona 57–64 GGc [Monolithic integrated circuits low noise amplifier on gallium nitride for a range of 57–64 GHz]. *Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal – Russian technology magazine*, 2016, vol. 4, no. 4 (13), pp. 42–53. (in Russian).
8. Vigdorovich E.N., Sveshnikov Yu.N. Kriticheskaya tolshchina psevdomorfnyykh sloev [The critical thickness of pseudomorphic layers]. *Sb. dokladov 3-j Vserossiyskoj konferencii «Nitridy galliya, indiya i alyuminiya-struktury i pribory* [Sb. reports of the 3rd all-Russian conference "Nitrides of gallium, indium and aluminum: structures and devices]. St. Petersburg, SPbGPU Publ., 2004, pp. 36–37. (in Russian).
9. Landau L.D., Lifshchic E.M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 248 p. (in Russian).
10. Matthews J.W. Defects associated with the accommodation of misfit between crystals // *J.Vac. Sci. and Technol. J.Vac.Sci. and Technol.*, 1975, vol.12, no. 1, pp.123–126.
11. Vigdorovich E.N. Tekhnologicheskaya infrastruktura proizvodstva i sredstva kontrolya svoystv nanogeterostruktur na osnove nitrida galliya [The technological infrastructure of production and means of controlling the properties of heterostructures based on gallium nitride]. *Zhurnal «Pribory+avtomatizatsiya» – Journal «Devices+automation»*, 2012, no.12 (150), pp. 20–26. (in Russian).

Submitted 16.03.2017; accepted 12.09.2017.

**Vigdorovich Evgeny N.** – Dr. Sci. (Eng), Prof. of the Optical and Biotechnical Systems and Technologies Department, Physics and Technology Institute of Moscow Technological University (Russia, 107076, Moscow, Stromynka, 20), evgvig@mail.ru