

но будет наблюдать в виде перераспределения интенсивностей полос, принадлежащих индивидуальным NH-таутомерам в спектре поглощения.

Данную гипотезу проверили с помощью анализа спектров поглощения двух свободных оснований корролов, исследованных нами ранее [5]. Первый из них –  $\text{H}_3\text{OAlkK}$ , макроцикл которого по всем четырем пиррольным кольцам замещен алкильными группами, являющимися донорами электронной плотности как по  $\pi$ -, так и по  $\sigma$ -связям. Второй –  $\text{H}_3\text{TAlkK}$  содержит такие же алкильные группы, но только в 7, 8, 12 и 13 положениях макроцикла. Совместный анализ спектров показывает, что, действительно, доля таутомера T1 в суммарном спектре  $\text{H}_3\text{TAlkK}$  оказалась большей.

Таким образом, в работе определены контуры  $\pi$ -сопряжения для двух таутомеров коррола, и показано, что они различаются. На основе полученных результатов предложен и экспериментально апробирован способ преимущественной стабилизации одного из таутомеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fliegl, H. Aromatic pathways of porphyrins, chlorins and bacteriochlorins / H. Fliegl, D. Sundholm // J. Org. Chem. – 2012. – Vol. 77, № 9. – P. 3408–3414.
2. Крук, Н. Н. Строение и оптические свойства тетрапиррольных соединений / Н. Н. Крук. – Минск : БГТУ, 2019. – 216 с.
3. Березин, Д. Б. Корролы и их производные: синтез, свойства, перспективы практического применения / Д. Б. Березин, Д. Р. Каримов, А. В. Кустов. – Москва : ЛЕНАНД, 2018. – 303 с.
4. Krygowski, T. M. Aromaticity from the viewpoint of molecular geometry: application to planar systems / T. M. Krygowski [et al.] // Chem. Rev. – 2014. – V. 114. – P. 6383–6422.
5. Ajeeb, Y. H. Spectral and luminescent properties and NH-tautomerism of alkylated corrole free bases / Y. H. Ajeeb [et al.] // Journal of Appl. Spectr. – 2020. – Vol. 87, Issue 3. – P. 421–427.

#### ДАЛЬНЕЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ InGaN

*Н. П. Тарасюк*

*Учреждение образования «Брестский государственный  
технический университет», г. Брест, Республика Беларусь*

Применение гетероструктур InGaN/GaN являются перспективными для создания оптоэлектронных устройств, работающих в ультрафиолетовой – синезеленой области спектра [1, 2].

В данной работе рассчитана полуширина лазерного излучения в дальней зоне различных дизайнов гетероструктур с активной областью, содержащей пять и десять квантовых ям InGaN. Использовалась модель одномерной планарной структуры. Амплитуда напряженности электрического вектора  $E_j$  TE-волны удовлетворяет волновому уравнению:

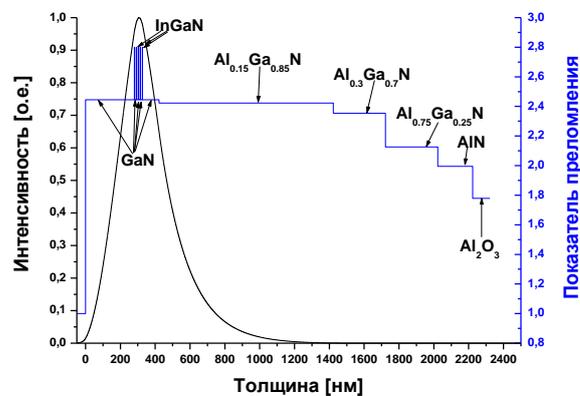
$$\frac{\partial^2 E_j(x)}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_0^2 n_j^2) E_j(x) = 0, \quad (1)$$

где  $\beta$  – проекция волнового вектора  $k_0$  на плоскость гетероструктуры,  $n_j$  – комплексный показатель преломления  $j$ -го слоя. Нахождение  $\beta$  осуществлялось по алгоритму скоростного спуска [3, 4].

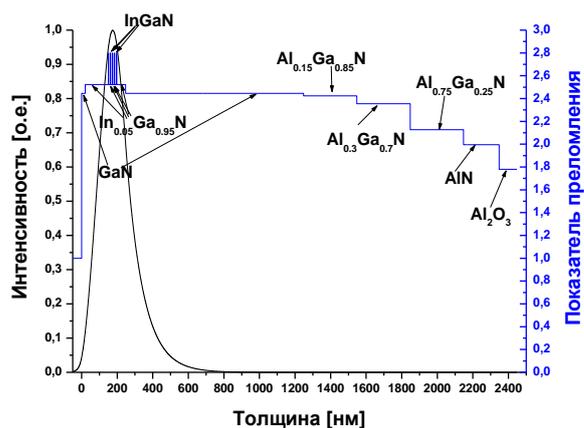
В дальней зоне отношение интенсивности излучения, распространяющегося в направлении, определяемом углом  $\theta$ , к интенсивности излучения в направлении  $\theta = 0$ , равно [5]:

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \frac{|E(\theta)|^2}{|E(0)|^2} = \frac{K^2(\theta) \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x,0) e^{ik_0 x \sin(\theta)} dx \right|^2}{K^2(0) \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_y(x,0) dx \right|^2}, \text{ где } K(\theta) = \cos(\theta). \quad (2)$$

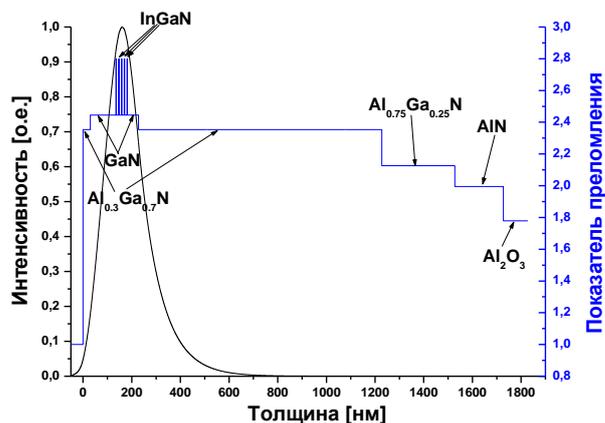
Для расчетов были выбраны 4 дизайна гетероструктур с активной областью из 5 и 10 квантовых ям InGaN. В гетероструктурах дизайна 1 в качестве обкладочных слоев выбирались воздух и  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$  и изменялась толщина волноводных слоев GaN. В гетероструктурах дизайна 2 в качестве обкладочных слоев выбирались GaN и GaN и изменялась толщина волноводных слоев  $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ . В гетероструктурах дизайна 3 в качестве обкладочных слоев выбирались  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  и  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$  и изменялась толщина волноводных слоев GaN. В гетероструктурах дизайна 4 состав аналогичен предыдущей, только волновод формировался из слоев GaN и  $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ . За счет такого волновода улучшается транспорт неравновесных носителей заряда в активную область. При этом толщина слоя  $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  фиксировалась, а изменялась толщина GaN. Значения показателей преломления, соответствующие значениям ширины запрещенной зоны компонентного состава тройных соединений AlGaIn, были взяты из работы [6], значения показателя преломления  $\text{Al}_2\text{O}_3$  из [7]. Дизайны данных гетероструктур представлены на рисунках 1–4. Аналогичные дизайны выбирались для гетероструктур с 10 квантовыми ямами InGaN.



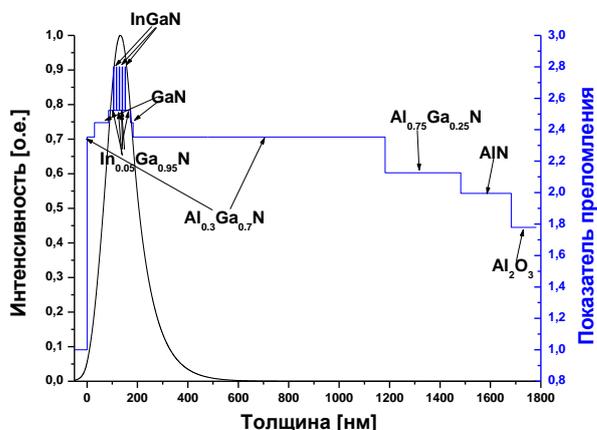
**Рисунок 1 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 1**



*Рисунок 2 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 2*



*Рисунок 3 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 3*



*Рисунок 4 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 4*

Для данных структур рассчитаны полуширина на половине интенсивности и полуширина (на уровне  $1/e^2$  от максимума) лазерного излучения фундаментальной моды в дальней зоне излучения в зависимости от длины волны. Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Зависимость полуширины на половине интенсивности от длины волны

$\lambda$ , нм	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
	5 КЯ	10 КЯ						
400	14.2	15.3	19.0	19.9	19.9	21.1	25.4	25.9
450	11.8	13.4	17.6	18.7	18.0	19.2	20.0	22.3
500	11.1	12.7	16.3	17.8	17.0	18.4	19.8	23.0
550	10.9	12.4	15.7	16.8	16.6	18.0	18.6	20.9
580	11.0	12.4	15.5	16.7	16.4	17.5	18.0	19.3

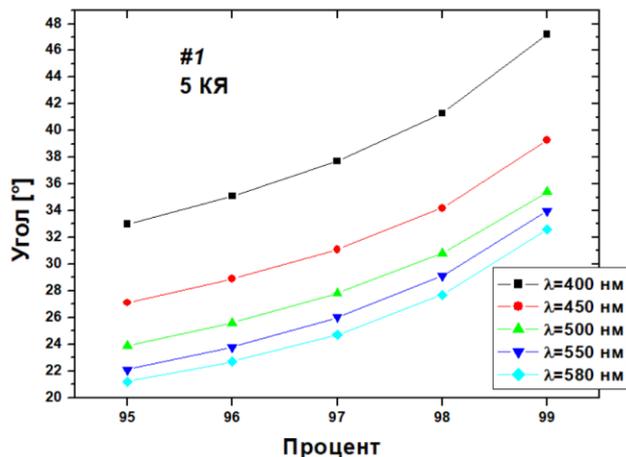
Таблица 2 – Зависимость полуширины от длины волны

$\lambda$ , нм	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
	5 КЯ	10 КЯ						
400	28.7	30.9	36.6	37.6	39.2	40.8	46.2	47.2
450	22.7	26.3	33.8	35.4	35.5	37.3	39.3	42.7
500	20.2	24.2	32.4	34.7	33.4	35.5	37.6	43.0
550	19.2	22.9	31.1	33.2	31.6	34.3	35.7	40.3
580	19.0	22.5	30.5	32.8	31.0	32.6	34.6	38.5

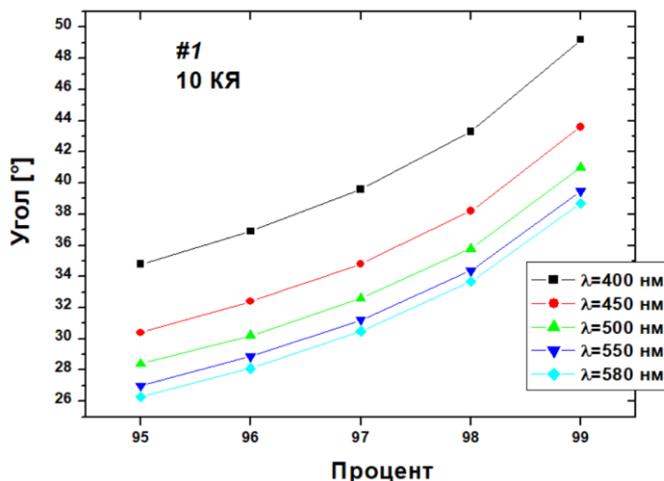
Из таблиц 1 и 2 видно, что полуширины на половине интенсивности и полуширины, соответственно на  $0,5-1,6^\circ$  и  $1,0-5,4^\circ$  больше для гетероструктур с активной областью, содержащей 10 квантовых ям, чем содержащей 5 квантовых ям. Наибольшие значения полуширины соответствуют гетероструктуре дизайна 4, наименьшие – гетероструктуре дизайна 1. У гетероструктур дизайна 4 значения полуширины на половине интенсивности соответственно для 5 и 10 квантовых ям на  $7,0-11,2^\circ$  и  $6,9-10,6^\circ$  больше, чем у гетероструктур дизайна 1. Полуширина у гетероструктур дизайна 4 соответственно для 5 и 10 квантовых ям на  $15,6-17,6^\circ$  и  $16,3-18,8^\circ$  больше, чем у гетероструктур дизайна 1. Значения полуширины уменьшаются с увеличением длины волны излучения. Так, для длины волны равной 400 нм значения полуширины на половине интенсивности для гетероструктур с 5 и 10 квантовыми ямами соответственно на  $3,2-7,4^\circ$  и  $2,9-6,6^\circ$  больше, чем для длины волны равной 580 нм. Значения полуширины для длины волны равной 400 нм для гетероструктур с 5 и 10 квантовыми ямами соответственно на  $6,1-11,6^\circ$  и  $4,8-8,7^\circ$  больше, чем для длины волны равной 580 нм.

Далее по кривым излучения в дальней зоне были определены значения угла, при котором доля интенсивности изменяется от 95 до 99 %. Для расчетов выбраны гетероструктуры с минимальными и максимальными значениями полуширины (дизайны 1 и 4). Результаты расчетов представлены на рисунках 5–8.

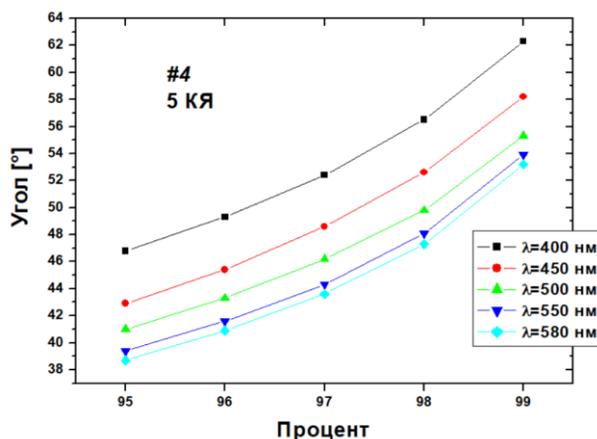
### СЕКЦИЯ 3



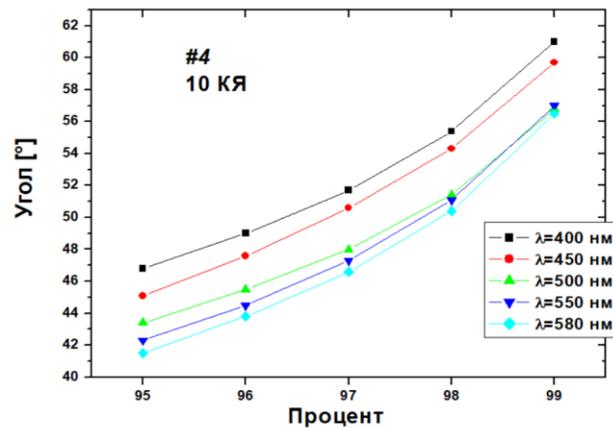
*Рисунок 5 – Значения угла, при котором доля интенсивности изменяется от 95 до 99 % для гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 1*



*Рисунок 6 – Значения угла, при котором доля интенсивности изменяется от 95 до 99 % для гетероструктуры, содержащей 10 квантовых ям дизайна 1*



*Рисунок 7 – Значения угла, при котором доля интенсивности изменяется от 95 до 99 % для гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 4*



**Рисунок 8 – Значения угла, при котором доля интенсивности изменяется от 95 до 99 % для гетероструктуры, содержащей 10 квантовых ям дизайна 4**

Из рисунков 5–8 видно, что значения углов при возрастании доли интенсивности от 95 до 99 % для гетероструктур с 5 и 10 квантовыми ямами увеличиваются соответственно примерно в 1,3–1,5 и 1,3–1,4 раза. При возрастании длины волны от 400 до 580 нм значения углов уменьшаются примерно в 1,1–1,5 раза и 1,1–1,3 раза соответственно для гетероструктур с 5 и 10 квантовыми ямами. Наибольшие значения углов соответствуют гетероструктуре дизайна 4, а наименьшие – гетероструктуре дизайна 1.

Рассчитана полуширина лазерного излучения в дальней зоне различных дизайнов гетероструктур с активной областью, содержащей пять и десять квантовых ям InGaN.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lutsenko, E. V. Optically Pumped InGaN/GaN MQW Wet Etched Lift-Off Lasers Grown on Silicon / E. V. Lutsenko, A. V. Danilchuk, N. P. Tarasuk and etc // Superlattices and Microstructures. – 2007. – № 41. – P. 400–406.
2. Lutsenko, E. V. Laser threshold and optical gain of blue optically pumped InGaN/GaN multiple quantum wells (MQW) grown on Si / E. V. Lutsenko, A. V. Danilchuk, N. P. Tarasuk and etc // Phys. Stat. Sol. (c). – 2008. – Vol. 5, Iss. 6. – P. 2263–2266.
3. Bergmann, M. J. Optical-field calculations for lossy multiple-layer  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  laser diodes / M. J. Bergmann, and H. C. Casey, Jr. // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84, Iss. 3. – P. 1196–1203.
4. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – Москва : Наука, 1978. – 512 с.
5. Casey, H. C. Heterostructure Lasers, Quantum Electronics Principles and Applications / H. C. Casey, M. B. Panish. – N. Y., 1978. – part A.
6. Optical constants of epitaxial AlGaIn films and their temperature dependence. / D. Brunner [et al.] // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 82, № 10. – P. 5090–5096.
7. Weber, M. J. Handbook of Optical Materials. / M. J. Weber. – Boca Raton, Flo. : CRC Press – 2003. – P. 499.