

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Забродин, Ю.М. Методологические проблемы функционального состояния человека-оператора // Вопросы кибернетики. Психические состояния и эффективность деятельности. – М., 1983. – С. 3–25.
2. Журавский, В.И. Программно-аппаратная система для сравнительных исследований эргономики программного обеспечения В.И. Журавский, Д.А. Костюк, О.О. Латий, А.А. Маркина // Информационные технологии и системы 2015 (ИТС 2015): материалы Международной научной конференции. – Минск: БГУИР, 29 октября 2015 г. – С. 252–253.
3. Rebsamen, B. Evaluation of cognitive workload from EEG during a mental arithmetic task / B. Rebsamen, K. Kwok, T.B. Penney // Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. 2011. – Vol. 55. – Iss. 1 – P. 1342–1345.
4. Костюк, Д.А. Инструментальная оценка состояния пользователя в задаче сравнения интерфейсов офисных приложений / Д.А. Костюк, О.О. Латий, А.А. Маркина // XII конференция разработчиков свободных программ. Тезисы докладов. – Калуга, 16–18 октября 2015 г. – М.: Альт Линукс, 2015. – С. 8–12.
5. Костюк, Д.А. Об эффективности использования метафоры ленточного интерфейса / Д.А. Костюк, О.О. Латий, А.А. Маркина // Одиннадцатая конференция «Свободное программное обеспечение в высшей школе»: Материалы конференции. – Переславль, 30–31 января 2016 г. – М.: Альт Линукс, 2016. – С. 17–23.
6. Костюк, Д.А. Исследование эффективности переключения окон в современных графических интерфейсах / Д.А. Костюк, К.Л. Костюк, С.С. Дереченник, К.А. Тавониус, А.В. Шитиков // Вестник БрГТУ. – 2011. – № 5 (71): Физика, математика, информатика. – С. 45–48.
7. Kostiuk, D.A. Approach to evaluate effectiveness of human-computer interaction with contemporary GUI / D.A. Kostiuk, S.S. Derechennik, A.V. Shitikov, O.O. Latiy // Третя Міжнародна науково-практична конференція FOSS Lviv 2013: збірник наукових праць, Львів, 18–21 квітня 2013 р. – Львів, 2013. – С. 85–87.
8. Раскин, Дж. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. – СПб.: Символ-Плюс, 2003. – 272 с.
9. Martini, F. Essentials of Anatomy & Physiology / F. Martini, E. Bartholomew // San Francisco: Benjamin Cummings, 2003. – P. 267.
10. Chen, W. Continuous estimation of systolic blood pressure using the pulse arrival time and intermittent calibration // Medical and Biological Engineering and Computing. – Vol. 38, 2000. – P. 569–574.
11. Гусельников, В.И. Электрофизиология головного мозга. – М: Высшая школа, 1976.
1. Dhali, S. A Study of Brainwave eSensing Activity. Department of Computer Science, Malmo University (electronic publication). <https://www.overleaf.com/articles/bci/mcsvkjwhcfff/viewer.pdf>
12. Sezer, A. An Investigation of University Students' Attention Levels in Real Classroom Settings with NeuroSky's MindWave Mobile (EEG) Device / A. Sezer, Y. Inel, A.Ç. Seçkin, U. Uluçinar // Proc. of IETC 2015 int. conf., May 27–29, Istanbul, Turkey. – P. 88–101.
13. Benedek, M. A continuous measure of phasic electrodermal activity / M. Benedek, C. Kaembach // Journal of Neuroscience Methods – № 190. – 2010. – P. 80–91.

Материал поступил в редакцию 21.02.2017

**KOSTIUK D.A., LATIY O.O., MARKINA A.A. Approach for the biometric evaluation of the graphical user interface ergonomics**

The analysis of the approaches to evaluate human interaction with GUI is carried out. Usage of the contemporary consumer electronic devices with biometric sensors as a human body monitoring equipment is substantiated. Testing schemes are proposed based on the examination of the operator's interaction with a graphical environment. Set of criteria for biometric evaluation of the human-computer interaction effectiveness is formulated.

УДК 535:621.373.8

**Тарасюк Н.П., Луценко Е.В., Гладыщук А.А.**

**ВЛИЯНИЕ НА ФАКТОР ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, НОМЕРА МОДЫ И ДИЗАЙНА ДЛЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaN/GaN, ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ПОД ФУНДАМЕНТАЛЬНУЮ МОДУ**

**Введение.** Гетероструктуры InGaN/GaN являются перспективными для создания лазерных устройств, работающих в ультрафиолетовой – сине-зеленой области спектра. Благодаря более короткой длине волны синие лазеры обеспечивают более высокую плотность записи данных. Одно из возможных применений лазеров в зеленой области спектров – информационные линии короткой протяженности на пластиковых световодах.

В данной работе проводится оптимизация по фактору оптического ограничения различных дизайнов гетероструктур с активной областью, содержащей пять и десять квантовых ям InGaN.

**Расчет фактора оптического ограничения.** Для моделирования фактора оптического ограничения гетероструктур была использована модель одномерной планарной структуры.

Вычисления фактора оптического ограничения были проведены в приближении плоских волн для ТЕ поляризации излучения [1–3]. Напряженность электрического поля в  $j$ -м слое структуры представляется в виде:

$$\epsilon_y(x, z, t) = \epsilon_{y,j}(x) \exp[i(\omega t - \beta z)]. \quad (1)$$

Амплитуда напряженности электрического поля  $\epsilon_{y,j}(x)$  удовлетворяет волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{y,j}(x)}{\partial x^2} - (\beta^2 - k_0^2 \tilde{n}_j^2) \epsilon_{y,j}(x) = 0, \quad (2)$$

где  $\beta$  – проекция волнового вектора  $k_0$  на плоскость гетероструктуры,  $\tilde{n}_j$  – комплексный показатель преломления  $j$ -го слоя.

Для нахождения  $\beta$  использовался алгоритм скоростного спуска [1]. Фактор оптического ограничения вычислялся по формуле [4]:

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=1}^N \int_{x_{ai}}^{x_{bi}} E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2(x) dx}, \quad (3)$$

где интегрирование в числителе происходит по координатам квантовых ям InGaN.

**Тарасюк Николай Петрович**, доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета

**Луценко Евгений Викторович**, к. ф.-м.н., ст. научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Беларусь, 220072, г. Минск, пр. Независимости, 68.

**Гладыщук Анатолий Антонович**, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика

Результаты расчета фактора оптического ограничения гетероструктур с InGaN квантовыми ямами. Для расчетов 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 AlGaN, были взяты из работы [5], значения показателя преломления  $\text{Al}_2\text{O}_3$  из [6]. Дизайны данных гетероструктур представлены на рисунках 1–4.

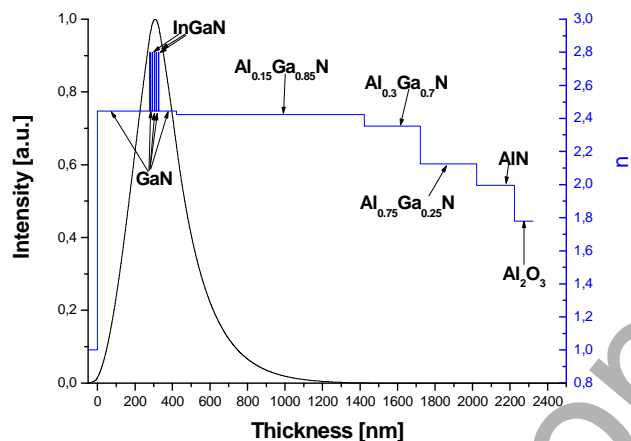


Рисунок 1 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 1

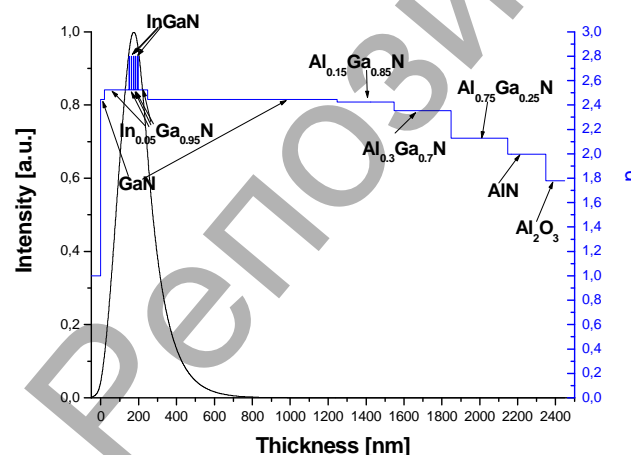


Рисунок 2 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 2

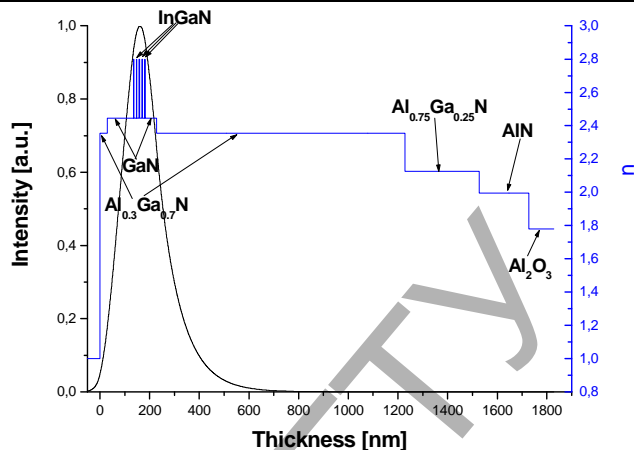


Рисунок 3 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 3

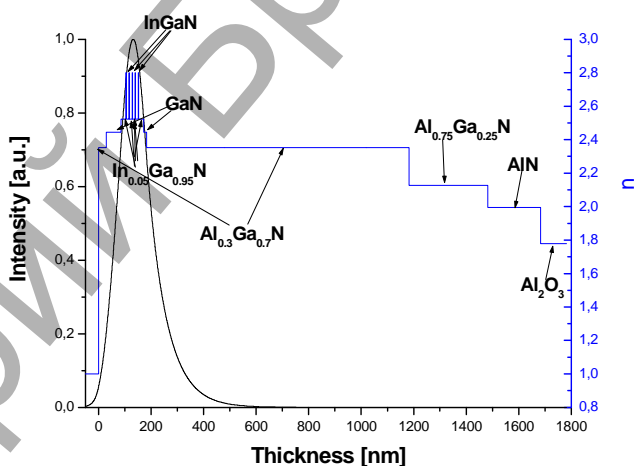


Рисунок 4 – Профили показателя преломления и интенсивности моды нулевого порядка гетероструктуры, содержащей 5 квантовых ям дизайна 4

Для данных структур рассчитан фактор оптического ограничения в зависимости от длины волны и толщин волноводных слоев. Результаты расчетов приведены на рисунке 5 и в таблицах 1 и 2.

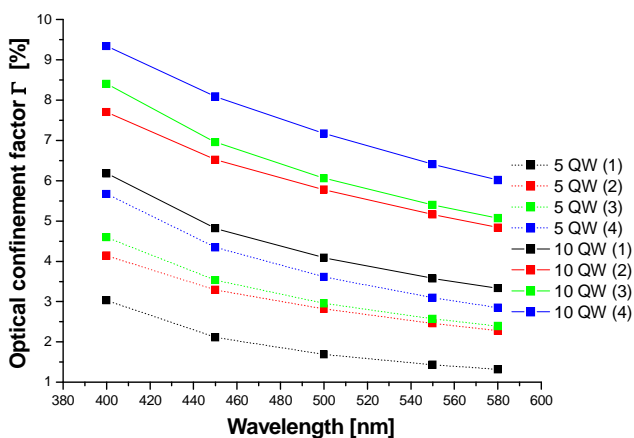


Рисунок 5 – Зависимость фактора оптического ограничения от длины волны гетероструктур с активной областью из 5 и 10 квантовых ям

**Таблица 1** – Зависимость толщины верхнего (dwa) и нижнего (dwb) волноводных слоев гетероструктуры с активной областью из 5 квантовых ям от длины волны

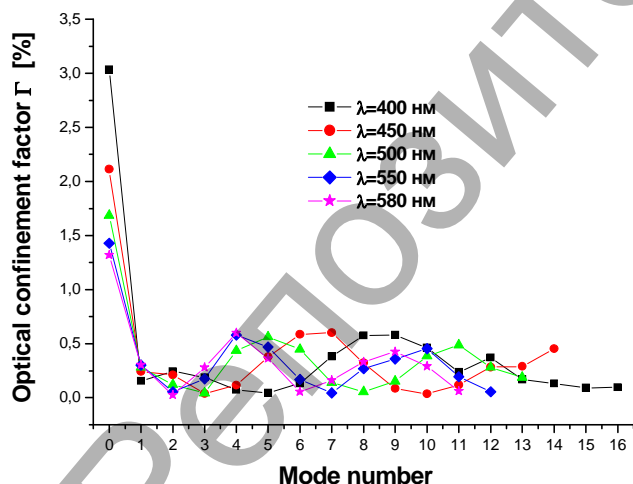
$\lambda$ , нм	1		2		3		4	
	dwa, нм	dwb, нм	dwa, нм	dwb, нм	dwa, нм	dwb, нм	dwa, нм	dwb, нм
400	170	55	85	35	65	30	20	5
450	280	95	130	50	105	45	55	10
500	375	115	160	60	140	60	90	25
550	450	125	195	75	175	70	120	35
580	490	120	215	85	190	80	135	45

**Таблица 2** – Зависимость толщины верхнего (dwa) и нижнего (dwb) волноводных слоев гетероструктуры с активной областью из 10 квантовых ям от длины волны

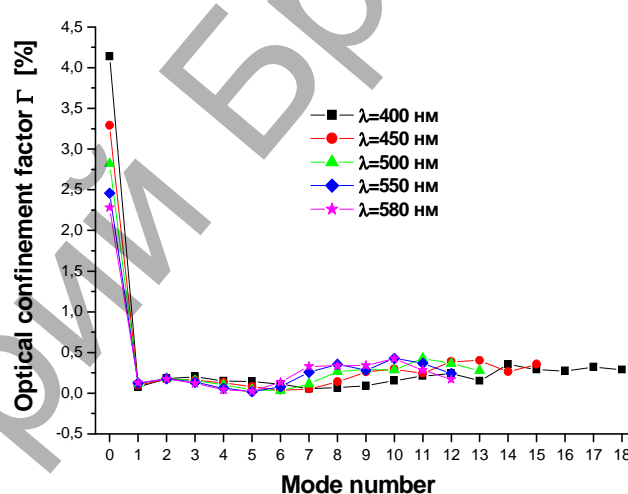
$\lambda$ , нм	1		2		3		4	
	dwa, нм	dwb, нм	dwa, нм	dwb, нм	dwa, нм	dwb, нм	dwa, нм	dwb, нм
400	125	25	60	5	35	5	5	5
450	205	50	90	20	70	15	20	5
500	270	70	115	30	95	25	40	5
550	325	80	145	40	125	35	65	5
580	360	85	160	50	140	40	80	5

Из рисунка 5 и таблиц 1 и 2 видно, что фактор оптического ограничения уменьшается с увеличением длины волны. Максимальное значение фактора оптического ограничения соответствует гетероструктуре дизайна 4 и в 1.9–2.3 раз больше в случае 5 квантовых ям и в 1.5–1.8 раз больше в случае 10 квантовых ям, чем минимальное – у гетероструктуры дизайна 1. Максимальное значение фактора оптического ограничения при изменении длины волны от 400 нм до 580 нм для случаев пяти и десяти квантовых ям соответственно изменяется от 5.673 % до 2.852 % и от 9.344 % до 6.014 %. При этом толщина верхнего волноводного слоя для пяти и десяти квантовых ям соответственно изменяются от 20 нм до 135 нм и от 5 нм до 80 нм, а нижнего – от 5 нм до 45 нм и от 5 нм до 5 нм. Длина диффузии неравновесных носителей заряда в слоях на основе Al-GaN примерно равна 100 нм [7], что позволяет использовать данные гетероструктуры для лазеров с оптической накачкой.

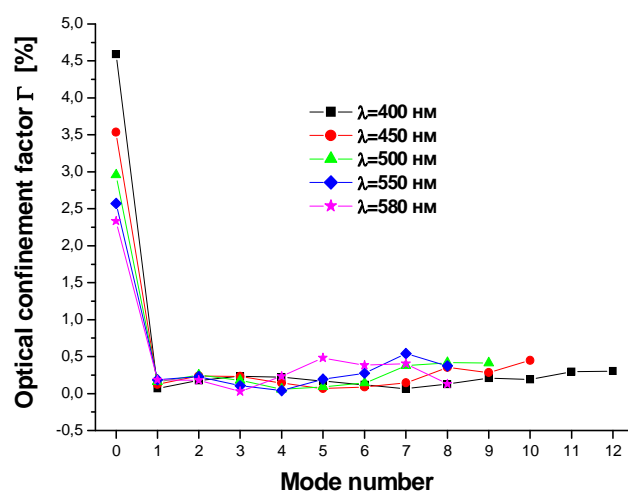
Далее рассчитаем фактор оптического ограничения для различных мод волновода.



**Рисунок 6** – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 5 квантовых ям дизайна 1



**Рисунок 7** – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 5 квантовых ям дизайна 2



**Рисунок 8** – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 5 квантовых ям дизайна 3

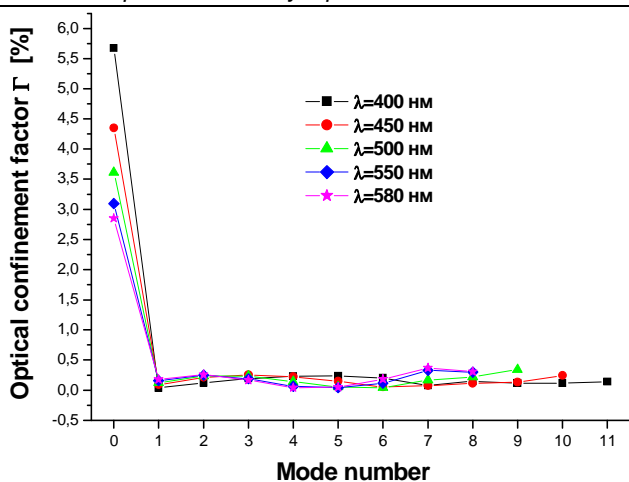


Рисунок 9 – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 5 квантовых ям дизайна 4

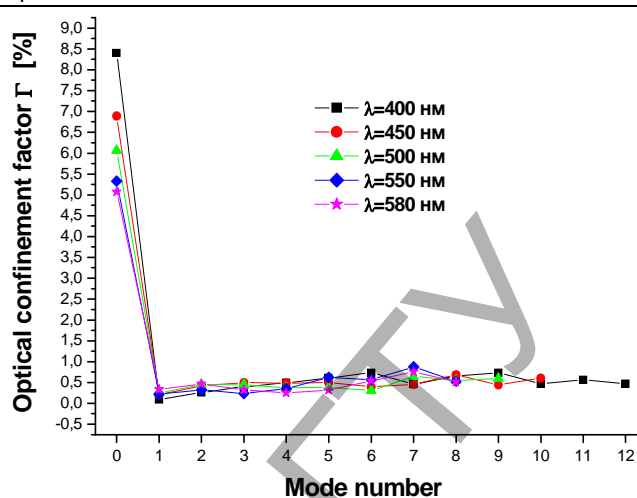


Рисунок 12 – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 10 квантовых ям дизайна 3

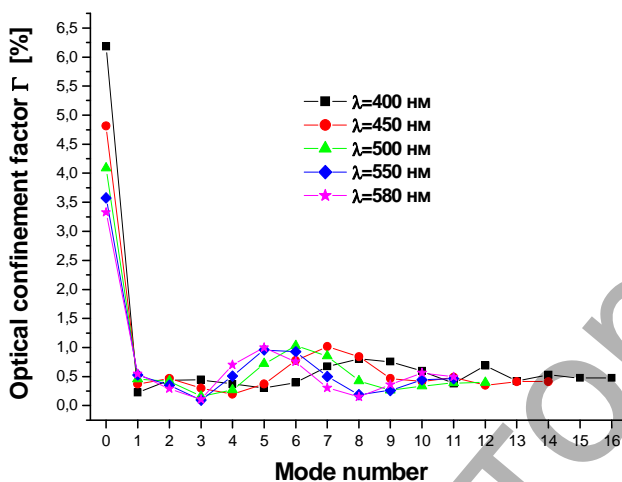


Рисунок 10 – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 10 квантовых ям дизайна 1

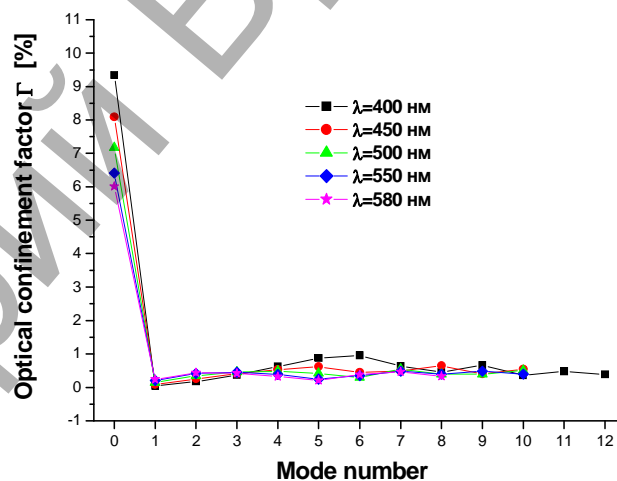


Рисунок 13 – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 10 квантовых ям дизайна 4

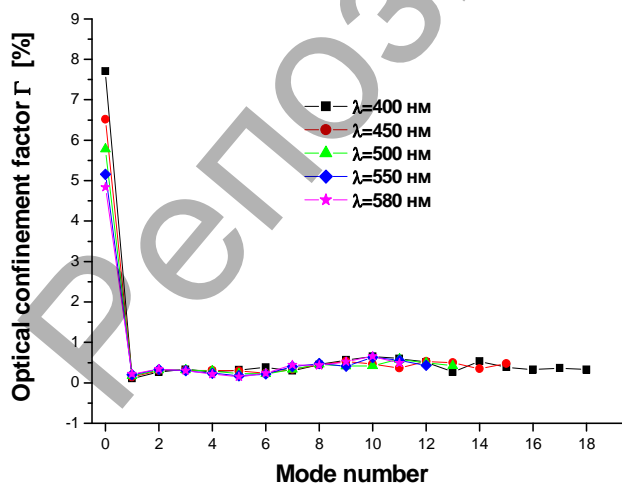


Рисунок 11 – Зависимость фактора оптического ограничения от номера моды для гетероструктуры с активной областью из 10 квантовых ям дизайна 2

Как видно из рисунков 6–13, максимальное значение фактора оптического ограничения соответствует моде нулевого порядка и в десятки раз больше, чем для других мод. Увеличение фактора оптического ограничения позволяет понизить порог генерации оптически накачиваемых лазеров.

**Заключение.** Проведена оптимизация по фактору оптического ограничения дизайна гетероструктур с активной областью из 5 и 10 квантовых ям InGaN. Максимальное значение фактора оптического ограничения соответствует гетероструктуре дизайна 4 и в 1.9–2.3 раз больше в случае 5 квантовых ям и в 1.5–1.8 раз больше в случае 10 квантовых ям, чем минимальное – у гетероструктуры дизайна 1. Максимальное значение фактора оптического ограничения при изменении длины волны от 400 нм до 580 нм для случаев пяти и десяти квантовых ям соответственно изменяется от 5.673 % до 2.852 % и от 9.344 % до 6.014 %. При этом толщина верхнего волноводного слоя для пяти и десяти квантовых ям соответственно изменяются от 20 нм до 135 нм и от 5 нм до 80 нм, а нижнего – от 5 нм до 45 нм и от 5 нм до 5 нм. Длина диффузии неравновесных носителей заряда в слоях на основе AlGaIn примерно равна 100 нм, что позволяет использовать данные гетероструктуры для лазеров с оптической накачкой.

Максимальное значение фактора оптического ограничения соответствует моде нулевого порядка и в десятки раз больше, чем для других мод. Увеличение фактора оптического ограничения позволяет понизить порог генерации оптически накачиваемых лазеров.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bergmann, M.J. Optical-field calculations for lossy multiple-layer Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N laser diodes / M.J. Bergmann, H.C. Casey, Jr. // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84, Iss. 3. – P. 1196–1203.
2. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – Москва: Наука, 1978. – 512 с.
3. Тарасюк, Н.П. Фактор оптического ограничения и пороговые условия генерации оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров на квантоворазмерных структурах InGaN/GaN, выращенных на кремниевых подложках / Н.П. Тарасюк, А.А. Глады-

щук, Е.В. Луценко // Вестник БГТУ. – 2002. – № 5: Физика, математика, химия – С. 8–13.

4. Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов / М. Адамс. – Москва: Мир, 1984. – 512 с.
5. Brunner, D. Optical constants of epitaxial AlGaIn films and their temperature dependence / D. Brunner, H. Angerer, E. Bustarret, F. Freudenberg, R. Höppler, R. Dimitrov, O. Ambacher, M. Stutzmann // J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 82, № 10. – P. 5090–5096.
6. Weber, M.J. Handbook of Optical Materials. / M.J. Weber. Boca Raton, Flo.: CRC Press – 2003. – P. 499.
7. Gonzalez, J.C. Minority-carrier diffusion length in a GaN-based light-emitting diode. / J.C. Gonzalez, K.L. Bunker, P.E. Russell // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 79, № 10. – P. 1567–1569.

Материал поступил в редакцию 10.01.2017

#### TARASYUK N.P., LUTSENKO E.V., GLADYSHCHUK A.A. Influence on the factor of optical restriction of wavelength of radiation, number of the mode and design for heterostructures of InGaN/GaN optimized under the fundamental mode

Heterostructures of InGaN/GaN are perspective for creation of the laser devices working in ultra-violet – dark cyan area of a range. Thanks to shorter wavelength blue lasers provide more high density of data record. One of possible laser applications in green area of ranges – information lines of short expansion on plastic light waveguides.

In this operation optimization on a factor of optical restriction of different designs of heterostructures with the active area containing five and ten quantum holes of InGaN is performed.

УДК 075.8;004.42;004.45

Бегель А.Н., Гладковский В.И., Пинчук А.И.

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМОДЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА

**Введение.** В качестве исходной математической модели необходимо записать систему дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, состоящую из уравнений пограничного слоя и уравнения теплоотдачи в условиях двухмерного стационарного потока при отсутствии внутренних тепловыделений и диссипации энергии, а также при постоянстве всех физических свойств жидкости (воздуха). Для нахождения точных решений дифференциальных уравнений математической физики в частных производных разработан ряд методов, основанных на переходе к новым переменным в результате масштабирования. При этом стремятся уменьшить число новых переменных по сравнению с числом исходных, например, за счет использования особенностей симметрии задачи. В некоторых случаях целесообразно выделять так называемые регулярные тепловые режимы – нестационарные процессы теплопроводности такие, что поле безразмерной температуры остается подобным самому себе с течением времени. В этом случае будем считать тепловое явление автомодельным, то есть распределение его характеристик в разные моменты времени могут быть получены одно из другого с помощью соответствующего преобразования подобия. Такое преобразование чаще всего ищут с помощью анализа размерности физических величин, входящих в уравнение, и соответствующего масштабирования [1].

Для горизонтально расположенного цилиндра в случае естественной конвекции после применения методов теории подобия получается следующий результат [2]:

$$Nu_{\infty} = 0.5(Ra)_{\infty}^{0.25} \left( \frac{Pr_{\infty}}{Pr_0} \right)^{0.25} \quad (1)$$

Конвективный теплообмен для вертикально расположенного цилиндра определяется уравнением

$$Nu_{\infty} = 0.75(Ra)_{\infty}^{0.25} \left( \frac{Pr_{\infty}}{Pr_0} \right)^{0.25} \quad (2)$$

В этих формулах в качестве определяющего размера используется диаметр цилиндра. За определяющую температуру принимается температура окружающей среды (жидкости)  $t_m = t_{\infty}$ .

**1. Методика расчета тепловых потерь при сложном теплообмене.** Плотность потока теплоты при сложном теплообмене можно рассчитать следующим образом [2]:

$$q = \alpha_{эфф} (T_{ж1} - T_{ж2}) \quad (3)$$

В формуле (3)  $\alpha_{эфф}$  – эффективное значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{эфф} = \alpha_k + \alpha_l \quad (4)$$

где  $\alpha_k$  и  $\alpha_l$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и тепловым излучением соответственно.

Для аналитического нахождения  $\alpha_k$  и тепловых потерь за счет конвекции,  $Q_k$ , выполняются следующие действия:

- находим характерную температуру  $t_m = 0.5(t + t_{\infty})$ , где  $t$  – температура стенки,  $t_{\infty}$  – температура жидкости (окружающей среды);
- по характерной температуре находим теплофизические характеристики жидкости (из таблиц): коэффициент кинематической вязкости,  $\nu$ , коэффициент теплопроводности,  $\lambda$ , а также число Прандтля,  $Pr$ ,

Бегель А.Н., студент группы АС-43 И факультета электронных и информационных систем Брестского государственного технического университета.

Гладковский В.И., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Пинчук А.И., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика