

KUSCHNER T.L. CHUGUNOV S.V. Contributions of thermal expansion on the changes in temperature of the optical band gap in semiconductor CuGa<sub>5</sub>Se<sub>8</sub>

The temperature dependence of the optical band gap  $E_g$  in bulk crystals CuGa<sub>5</sub>Se<sub>8</sub> has been analyzed by separately considering the contributions due to electron-phonon interaction and thermal expansion. It is found that the variation of the optical band gap with temperature is mainly due to the contribution of optical phonons with a characteristic phonon energy of about 16 meV. The Debye temperature is defined by parameters  $\Theta$  obtained from the theoretical fit. The value is in good agreement with reported for the compound CuGa<sub>5</sub>Se<sub>8</sub> earlier and obtained from the x-ray powder diffraction measurements at various temperatures.

УДК 535:621.373.8

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

## ФАКТОР ОПТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР ZnMgCdSSe С ВАРИЗОННЫМ ВОЛНОВОДОМ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИ НАКАЧИВАЕМЫХ ЛАЗЕРОВ

**Введение.** Полупроводниковые лазеры, излучающие в зеленой области спектра, могут применяться в системах локальной оптической связи, лазерной локации и навигации, подводной связи, системах проекционного лазерного телевидения, лазерной печати, а также в других прикладных задачах.

Наиболее перспективными материалами для создания промышленных лазеров, излучающих в зеленой области спектра, являются гетероструктуры ZnMgCdSSe.

Для создания низкороговых лазеров с оптической накачкой необходима оптимизация дизайна лазерной гетероструктуры с активной областью из вставок квантовых точек (КТ) ZnCdSe (улучшение оптического и электронного ограничения, обеспечение эффективного транспорта носителей в активную область). Снижение порога генерации является весьма актуальной задачей, поскольку позволит кардинально снизить стоимость источников когерентного излучения в зеленой области спектра и приведет к созданию высокоэффективных лазеров.

В настоящей работе представлены результаты расчетов фактора оптического ограничения и внутренних оптических потерь, обусловленных поглощением в подложке, для кванторазмерных гетероструктур ZnMgCdSSe. Предложен дизайн гетероструктур с варизонным волноводом. Проведено сравнение фактора оптического ограничения, удельного фактора оптического ограничения для гетероструктур с варизонным волноводом, содержащих одну, две, три, пять, семь и девять вставок КТ ZnCdSe.

**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 вставок КТ ZnCdSe.

Внутренние потери, обусловленные поглощением в подложке, вычислялись с помощью выражения:

$$\alpha_{GaAs} = \alpha \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} E_y^2(x) dx} \quad (4)$$

**Результаты расчетов и их обсуждение.** Для расчетов были выбраны гетероструктуры с одной, двумя, тремя, пятью, семью и девятью вставками КТ ZnCdSe, толщиной 2 нм каждая. Структуры дизайнов А, В и С отличаются лишь конструкцией волноводной и активной области. Толщина ZnMgSSe возле подложки равна 1200 нм. В гетероструктурах, содержащих более одной вставки КТ ZnCdSe, они разделены узким слоем ZnSSe, толщиной 3 нм. Этот слой применяется для снятия механического напряжения, вызываемого вставками КТ ZnCdSe. Ширина запрещенной зоны четвертого соединения ZnMgSSe во всех исследуемых гетероструктурах была выбрана 2.96 эВ. Значения показателей преломления тройных и четверных соединений были взяты из работ [5, 6].

**Структуры дизайна А.** В гетероструктурах дизайна А волновод образован сверхрешетками (СР) ZnSSe/ZnSe для обеспечения эффективного транспорта неравновесных заряда в активную область. Схемы профилей показателя преломления гетероструктур представлены на рисунке 1.

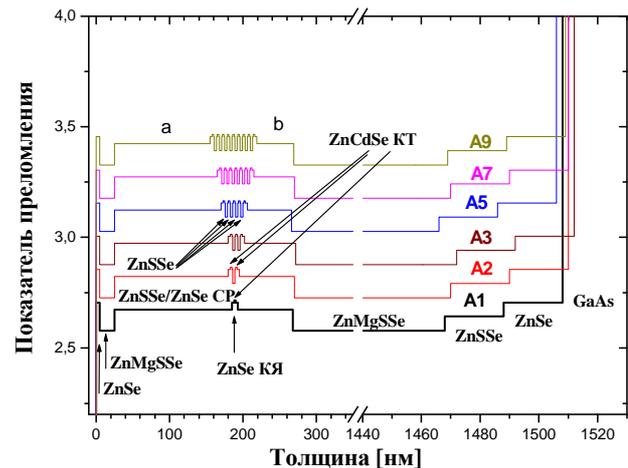


Рис. 1. Кванторазмерные гетероструктуры дизайна А, содержащие различное количество вставок КТ ZnCdSe.

Тарасюк Николай Петрович, ст. преподаватель кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Гладыщук Анатолий Антонович, кандидат физико-математических наук, зав. кафедрой физики Брестского государственного технического университета.

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

Луценко Евгений Викторович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Физика, математика, информатика

Для данных структур была проведена оптимизация фактора оптического ограничения  $\Gamma$  в зависимости от толщины верхнего (a) и нижнего (b) волноводных слоев CP ZnSSe/ZnSe (рис. 2–7).

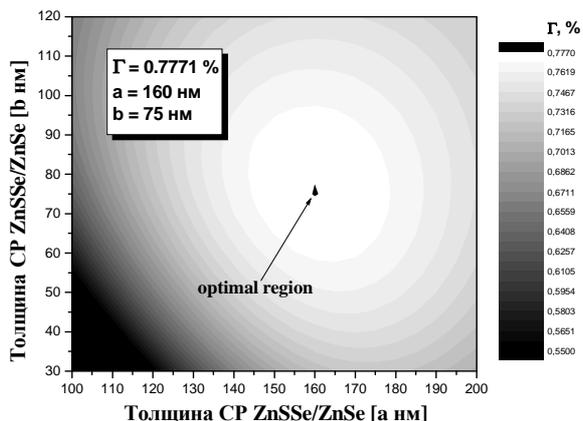


Рис. 2. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин CP ZnSSe/ZnSe гетероструктуры с одной вставкой KT ZnCdSe

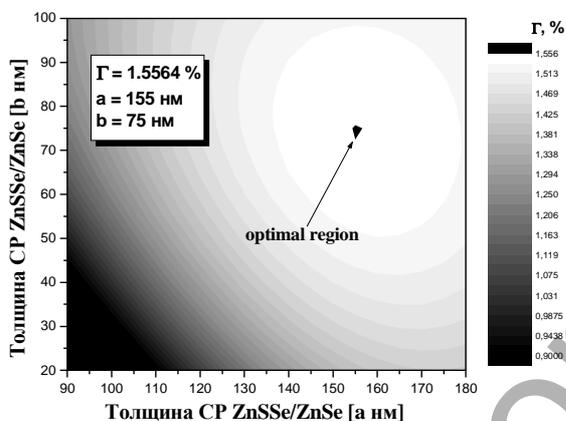


Рис. 3. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин CP ZnSSe/ZnSe гетероструктуры с двумя вставками KT ZnCdSe

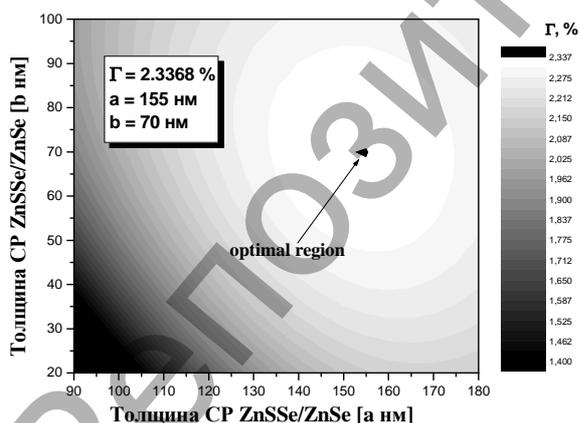


Рис. 4. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин CP ZnSSe/ZnSe гетероструктуры с тремя вставками KT ZnCdSe

Результаты расчетов значений максимального фактора оптического ограничения  $\Gamma$  в зависимости от количества вставок KT ZnCdSe при оптимальной толщине сверхрешеток ZnSSe/ZnSe для структур дизайна А представлены в таблице 1.

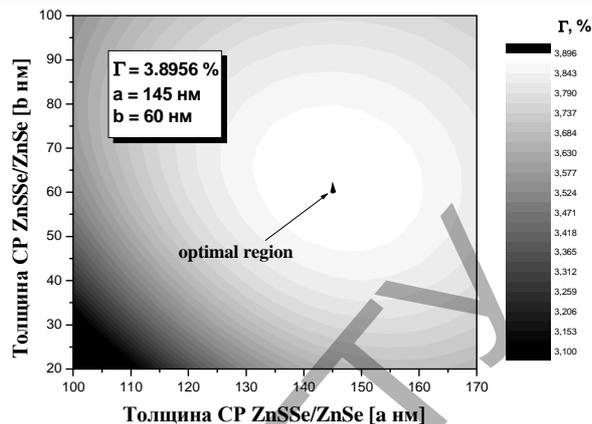


Рис. 5. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин CP ZnSSe/ZnSe гетероструктуры с пятью вставками KT ZnCdSe

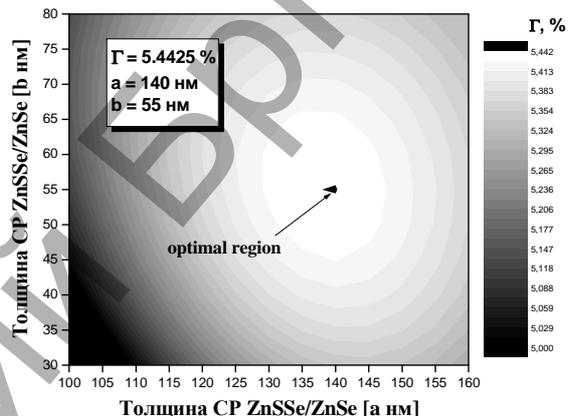


Рис. 6. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин CP ZnSSe/ZnSe гетероструктуры с семью вставками KT ZnCdSe

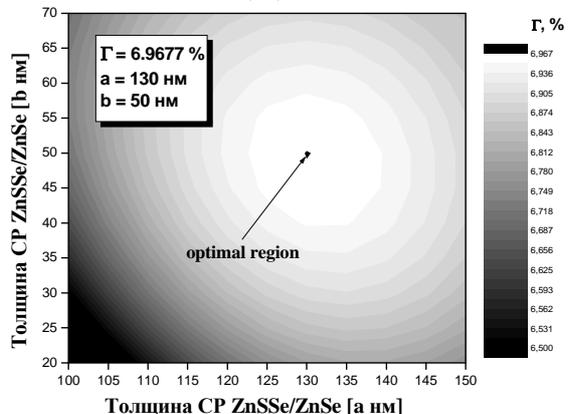


Рис. 7. Зависимость фактора оптического ограничения от толщин CP ZnSSe/ZnSe гетероструктуры с девятью вставками KT ZnCdSe

Таблица 1. Значения максимального фактора оптического ограничения  $\Gamma$  в зависимости от количества вставок KT ZnCdSe при оптимальной толщине CP ZnSSe/ZnSe и внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке, для структур дизайна А

Кол-во вставок KT	Дизайн А			
	a, нм	b, нм	$\Gamma$ , %	$\alpha_{GaAs}$ , см <sup>-1</sup>
1	160	75	0.7771	0.01572
2	155	75	1.5564	0.01382
3	155	70	2.3368	0.01219
5	145	60	3.8956	0.01510
7	140	55	5.4425	0.01173
9	130	50	6.9677	0.01154

Как видно из таблицы 1, толщина верхней CP ZnSSe/ZnSe а для максимального фактора оптического ограничения варьируется от 160 нм (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 130 нм (для 9 вставок КТ ZnCdSe), при этом толщина нижней изменяется от 75 до 50 нм, соответственно. Необходимо отметить, что общая толщина волновода почти не изменяется с увеличением количества вставок. Фактор оптического ограничения растет почти линейно с увеличением количества вставок от 0.7771 % (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 6.9677 % (для 9 вставок КТ ZnCdSe). При этом, удельный фактор оптического ограничения максимален для гетероструктуры с 4-5 вставками КТ ZnCdSe, что хорошо видно на рисунке 8. Внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке, малы и в расчетах могут не учитываться.

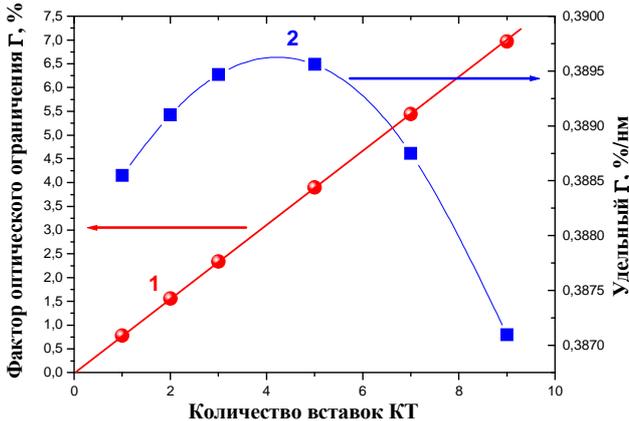


Рис. 8. Фактор оптического ограничения (1) и удельный фактор оптического ограничения (2) для гетероструктуры дизайна А

**Структуры дизайнов В.** Для увеличения эффективности транспорта носителей заряда в активную область было предложено использовать варизонный волновод. Для расчетов фактора оптического ограничения использовались структуры с четырьмя волноводными слоями CP1a-CP2a-CP3a-CPa выше активной области и четырьмя волноводными слоями CPb-CP3b-CP2b-CPb ниже активной области. В качестве волноводных слоев использовались сверхрешетки:

- CPa и CPb - ZnSSe/ZnSe(18нм/18нм),
- CP1a и CP1b - ZnMgSSe/ZnSe(18нм/6нм)
- CP2a и CP2b - ZnMgSSe/ZnSe(15нм/9нм)
- CP3a и CP3b - ZnMgSSe/ZnSe(12нм/12нм).

Количество периодов CP NCP1a, NCP2a, NCP3a и NCP1b, NCP2b, NCP3b выбиралось одинаковым. Количество периодов NCPa равно 25 и NCPb равно 10 и выбрано, исходя из расчетов гетероструктур дизайнов А. Оптимизация дизайна гетероструктур проводилась по максимизации фактора оптического ограничения при вариации количества вставок в CP ZnSSe/ZnSe обкладочных слоев CPa, CPb. Схемы гетероструктур с оптимальным дизайном В представлены на рис. 9.

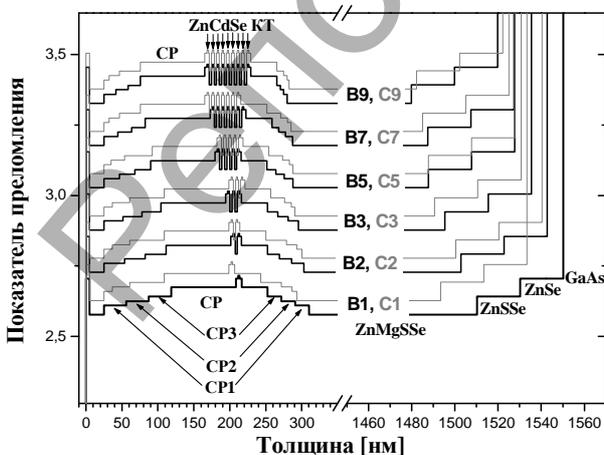


Рис. 9. Квантоворазмерные гетероструктуры дизайнов В и С с варизонным волноводом, содержащие различное количество вставок КТ ZnCdSe

Результаты расчетов зависимости значений максимального фактора оптического ограничения Г от количества вставок КТ ZnCdSe при оптимальном количестве периодов сверхрешеток CPa и CPb приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения максимального фактора оптического ограничения Г в зависимости от количества вставок КТ ZnCdSe при оптимальном количестве периодов сверхрешеток CPa и CPb и внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке для структур дизайнов В с варизонным волноводом

Кол-во вставок КТ	Дизайн В			
	NCP1a	NCP1b	Г, %	$\alpha_{GaAs}, cm^{-1}$
1	13	8	0.7528	0.02202
2	12	7	1.5163	0.02265
3	11	6	2.2874	0.02354
5	9	5	3.8415	0.02154
7	8	4	5.3973	0.01567
9	7	2	6.9349	0.01420

Из таблицы 2 видно, что количество периодов верхних CP ZnSSe/ZnSe а для максимального фактора оптического ограничения варьируется от 13 (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 7 нм (для 9 вставок КТ ZnCdSe), при этом количество периодов нижних CP b изменяется от 8 до 2 нм, соответственно. Фактор оптического ограничения растет почти линейно (рис. 10) с увеличением количества вставок от 0.7528 % (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 6.9349 % (для 9 вставок КТ ZnCdSe).

**Структуры дизайна С.** Для дальнейшего повышения эффективности транспорта носителей заряда в активную область был сформирован варизонный волновод с нелинейным профилем показателя преломления. Геометрия гетероструктур дизайна С подобна дизайну В. Различие было в том, что количество периодов сверхрешеток NCP1a, NCP2a, NCP3a и NCP1b, NCP2b, NCP3b уменьшается в 2 раза при удалении от активной области (переходный дизайн от варизонного к прямоугольному волноводу). Количество периодов NCPa равно 25 и NCPb равно 10. Схемы гетероструктур дизайнов С представлены на рисунке 9.

Результаты расчетов зависимости значений максимального фактора оптического ограничения Г от количества вставок КТ при оптимальном количестве периодов сверхрешеток CP1a, CP2a, CP3a, CP1b, CP2b и CP3b для гетероструктур дизайнов С с варизонным волноводом приведены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что количество периодов верхних CP а для максимального фактора оптического ограничения варьируется от 5-10-20 (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 3-6-12 (для 9 вставок КТ ZnCdSe), при этом количество периодов нижних CP ZnSSe/ZnSe b изменяется от 3-6-12 до 1-2-4, соответственно. Фактор оптического ограничения растет почти линейно (рис. 10) с увеличением количества вставок от 0.7559 % (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 6.9381 % (для 9 вставок КТ ZnCdSe), что несколько больше, чем для гетероструктур дизайном В, однако меньше, чем для прямоугольного волновода А. Как видно из рисунка 10, применение варизонного волновода смещает максимум удельного фактора оптического ограничения с 3-4 вставок КТ в район 7 вставок КТ ZnCdSe.

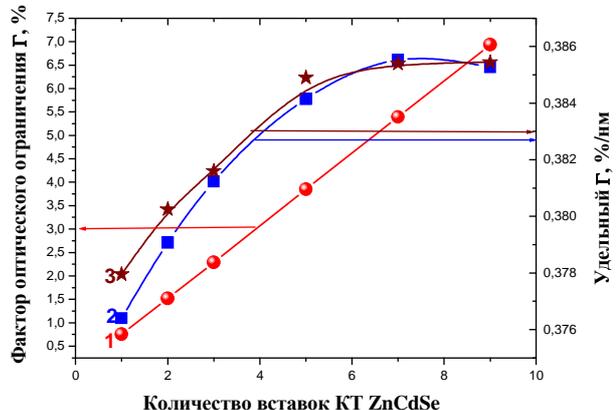


Рис. 10. Фактор оптического ограничения (1) и удельный фактор оптического ограничения для гетероструктуры дизайна В (2) и С (3)

**Таблица 3.** Значения максимального фактора оптического ограничения  $\Gamma$  в зависимости от количества вставок КТ ZnCdSe при оптимальном количестве периодов сверхрешеток CP1a, CP2a, CP3a, CP1b, CP2b и CP3b и внутренние оптические потери, обусловленные поглощением в подложке для гетероструктур дизайна С с варизонным волноводом

Кол-во вставок КТ	Дизайн С						$\Gamma, \%$	$\alpha_{GaAs}, \text{см}^{-1}$
	NCP1a	NCP2a	NCP3a	NCP1b	NCP2b	NCP3b		
1	5	10	20	3	6	12	0.7559	0.02799
2	5	10	20	3	6	12	1.5210	0.01892
3	5	10	20	2	4	8	2.2896	0.02096
5	4	8	16	2	4	8	3.8490	0.01763
7	3	6	12	2	4	8	5.3955	0.01540
9	3	6	12	1	2	4	6.9381	0.01204

**Заключение.** Оптимизированы по фактору оптического ограничения толщины волноводных слоев гетероструктур трех дизайнов с одной, двумя, тремя, пятью, семью и девятью вставками КТ ZnCdSe. У гетероструктур дизайна А максимальный фактор оптического ограничения растет почти линейно с увеличением количества вставок от 0.7771 % (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 6.9677 % (для 9 вставок КТ ZnCdSe). Удельный фактор оптического ограничения максимален для гетероструктуры с 4-5 вставками КТ ZnCdSe.

Для увеличения эффективности транспорта носителей заряда в активную область предложен дизайн гетероструктур с варизонным волноводом. Для структур с варизонным волноводом дизайнов В и С максимальный фактор оптического ограничения растет почти линейно с увеличением количества вставок от соответственно 0.7528 % и 0.7559 % (для одной вставки КТ ZnCdSe) до 6.9349 % и 6.9381 % (для 9 вставок КТ ZnCdSe). Применение варизонного волновода смещает максимум удельного фактора оптического ограничения в район 7 вставок КТ ZnCdSe. У гетероструктур с варизонным волноводом дизайна В и С максимальный фактор оптического ограничения уменьшается незначительно по сравнению с структурами дизайна А. Однако у структур с варизонным волноводом более эффективно осуществляется транспорт неравновесных носителей заряда в активную область, что позволяет надеяться на существенное снижение порога генерации и увеличение эффективности лазеров, изготовленных на основе этих гетероструктур.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bergmann, M.J. Optical-field calculations for lossy multiple-layer  $Al_xGa_{1-x}N/In_xGa_{1-x}N$  laser diodes / M.J. Bergmann, H.C. Casey, Jr. // J. Appl. Phys. – 1998. – Vol. 84, Iss. 3. – P. 1196–1203.
2. Chen, Ch. Efficient and accurate numerical analysis of multilayer planar optical waveguides in lossy anisotropic media / Ch. Chen, P. Berini, D. Feng, S. Tanev and V.P. Tzolov // Optics Express. – 2000. – Vol. 7, Iss. 8. – P. 260–272.
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. Гладыщук, Е.В. Луценко // Вестник БГТУ. Физика, математика, химия. – 2002. – № 5. – С. 8–13.
4. Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов / М. Адамс. – Москва: Мир, 1984. – 512 с.
5. Lunz, U. Optical properties of  $Zn_{1-x}Mg_xS_ySe_{1-y}$  epitaxial layers for blue-green laser applications / U. Lunz, B. Jobst, S. Einfeldt, C.R. Becker, D. Hommel, G. Landwehr // J. Appl. Phys. – 1995. – Vol. 77, Iss. 10. – P. 5377–5380.
6. Li, H.H. Refractive index of ZnS, ZnSe, and ZnTe and its Wavelength and Temperature Derivatives / H.H. Li // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1984. – Vol. 13, Iss. 1. – P. 103–150.

Материал поступил в редакцию 23.10.12

#### TARASUK N.P., LUTSENKO E.V., GLADYSHCHUK A.A. Optical confinement factor of heterostructures ZnMgCdSSe with graded index a waveguide for optical pumped up lasers

The results of calculations of the optical confinement factor for heterostructures ZnMgCdSSe are presented. For increase in efficiency of transport of nonequilibrium charge carriers in active region the design of heterostructures with graded index a waveguide is offered. Comparison of the optical confinement factor, the specific optical confinement factor for heterostructures with graded index a waveguide, containing one, two, three, five, seven and nine ZnCdSe quantum dots has been carried out.

УДК 538. 91, 548.73,378.147:53

Чопчиц Н.И., Гладыщук А.А., Янусик И.С.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСТОЯННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СИЛ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Хорошо известно, что если в процессе колебаний на гармонический осциллятор действует постоянная диссипативная обобщенная сила, противоположная обобщенной скорости, то условный период колебаний, понимаемый как промежуток времени между двумя последовательными максимальными отклонениями одного знака, тот же, что и в отсутствие затухания. Поэтому определение характеристик диссипативной силы обычно основывается в этом случае исключительно на координатных измерениях, т.е. на изучении зависимости амплитудных отклонений от номера колебания или времени. Относительная погрешность измерения обобщенных координат в лабораторном физпрактикуме на два порядка больше относительной погрешности измерения времени, поэтому в данной работе предложена процедура определения характеристик постоянных диссипативных сил на

основе измерения времени. В качестве примера рассмотрим установку [1], схема которой изображена на рисунке 1.

Установка состоит из трёх сплошных цилиндров (заштрихованный цилиндр – съёмный) и двух некоаксиальных цилиндров,  $\ell$  – расстояние между центрами масс большого (точка  $C_1$ ) и малого (точка  $C_2$ ) цилиндра. Пусть  $\rho$  – плотность материала цилиндров,  $M_0$  – масса системы, состоящая из массы цилиндра радиусом  $R$  и толщиной  $h$  и суммы масс выступающих цилиндров радиусом  $r$  и толщиной  $h_1$ . Тогда массы цилиндров и масса системы равны

$$M = \rho\pi R^2 h, \quad m = \rho\pi r^2 h_1, \quad M_0 = \rho\pi(R^2 h + 2r^2 h_1) \quad (1)$$

Чопчиц Н.И., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

Янусик И.С., доцент кафедры физики Брестского государственного технического университета.

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