

#### 4. Conclusion

Angular and spectral distribution of the optically pumped laser radiation from the InGaN/GaN multiple quantum wells and single heterostructures were investigated at room temperature. Calculations of the optical confinement factor and the electromagnetic field distribution inside and outside the heterostructures which were performed in the approach of the four-layer isotropic waveguide model showed that the MQW lasers operate in the high order (5-6) transverse mode regime. The spectral-angular distribution of the SH laser emission is mainly due to the leaky mode formation with the mode order number of 14–15.

This work was done in the frame of the ISTC project B-176.

1. Scifres D. R., Streifer W., Burnham R. D. // Appl. Phys. Lett. – 1976. – Vol. 29. – P. 23.
2. Bogatov A. P., Drakin A. E., Shveikin V. I. // Quantum Electronics. – 1999. – Vol. 29. – P. 28.
3. Marko I. P., Lutsenko E. V., Pavlovskii V. N. et al. // Phys. Stat.Sol. – 1999. – Vol. 216(b). – P. 491.
4. Yablonskii G. P., Lutsenko E. V., Marko I. P., et al. // Proc. Sec. Intern. Symp. on Blue Laser and Light Emitting Diodes. 1998. – Chiba, Japan. – P. 389.
5. Sun M. J., Muller M. W. // Appl. Optics. – 1997. – Vol. 16. – P. 815.
6. Linke R. A., Thio T., Chadi J. D., Devlin G. E. // Appl. Phys. Lett. – 1994. Vol. 65. – P. 16.

### МОДОВАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ С ПОПЕРЕЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ ZnMgSSe/ZnSe

Е. В. Луценко<sup>1</sup>, В. Н. Павловский<sup>1</sup>, В. З. Зубелевич<sup>1</sup>, А. Л. Гурский<sup>1</sup>,  
И. П. Марко<sup>1</sup>, Г. П. Яблонский<sup>1</sup>, Н. Kalisch<sup>2</sup>, М. Heuken<sup>2,3</sup>, К. Heime<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск

<sup>2</sup> Institut für Halbleitertechnik I, RWTH, Aachen, Germany

<sup>3</sup> AIXTRON AG, Aachen, Germany

Изучено спектральное и пространственное распределение мод излучения в лазерах с поперечной оптической накачкой на гетероструктурах ZnMgSSe/ZnSe с раздельным оптическим и электронным ограничением. Дальнее поле излучения структурировано и имеет расходимость на полувысоте порядка  $25^\circ$  в плоскости, перпендикулярной гетероструктуре. Определены значения группового показателя преломления лазерного волновода  $n_g$  и его дисперсии, изучено влияние длины резонатора и уровня накачки на эти параметры.

## 1. Введение

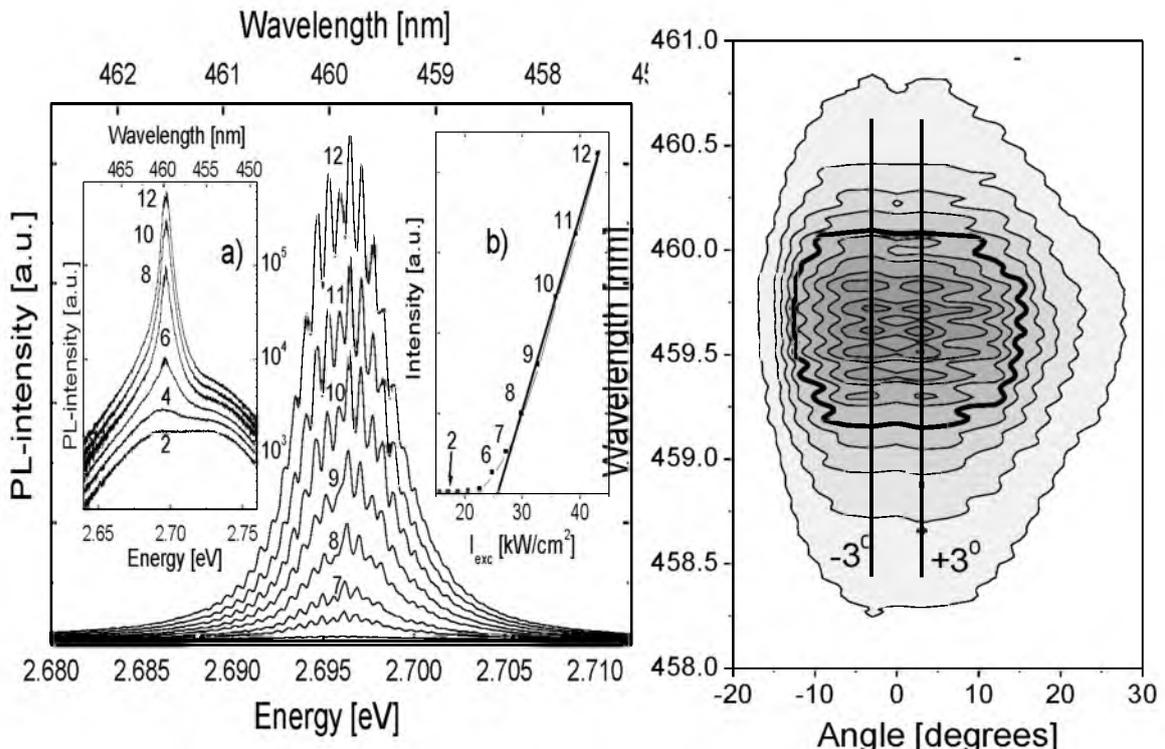
Структуры на основе ZnSe перспективны для создания светоизлучающих приборов сине-зеленой области спектра. В предыдущих работах изучались генерационные и люминесцентные свойства гетероструктур ZnMgSSe/ZnSe [1, 2]. Основной целью данной работы является изучение спектрально-углового распределения излучения квантоворазмерных ZnMgSSe/ZnSe лазеров с отдельным ограничением, а также исследование влияния уровня возбуждения и длины резонатора на модовый состав генерации.

## 2. Эксперимент

Гетероструктуры с отдельным электронным и оптическим ограничением были выращены на подложках GaAs в MOVPE реакторе низкого давления при температуре роста 330°C. Они представляли собой восемь квантоворазмерных ям ZnSe (5 нм) с барьерами  $Zn_{0.83}Mg_{0.17}S_{0.18}Se_{0.82}$  (10 нм), расположенными между двумя волноводными слоями  $Zn_{0.83}Mg_{0.17}S_{0.23}Se_{0.77}$  (75 нм), которые, в свою очередь, окружены более широкозонными эмиттерами  $Zn_{0.56}Mg_{0.44}S_{0.34}Se_{0.66}$ . Возбуждение генерации лазеров с длиной резонатора 100–400 мкм осуществлялось полоской излучения импульсного азотного лазера ( $\lambda=337.1$  нм,  $\tau_{и}=10$  нс,  $\nu=1000$  Гц), сфокусированного цилиндрической линзой в интервале плотностей мощности 5–500 кВт/см<sup>2</sup>. Спектрально-угловое распределение излучения исследовалось с помощью волоконно-оптической системы. Отрицательные углы соответствовали направлению в сторону подложки.

## 3. Основные результаты и выводы

Генерация в лазерах на основе высококачественных квантоворазмерных гетероструктур ZnMgSSe/ZnSe с отдельным электронным и оптическим ограничением наблюдалась вплоть до 612 К, что выше температуры роста данных гетероструктур. При комнатной температуре для длин резонаторов 300 мкм и менее возникла четкая модовая структура генерации (рис. 1), которая развивалась на фоне люминесценции, что легко видеть в логарифмическом масштабе (рис. 1, вставка *a*). Для всех длин резонаторов наблюдалась явная пороговая зависимость интенсивности излучения из торца лазера от уровня накачки (рис. 1, вставка *b*). Величина порога генерации при комнатной температуре понижалась от 30 кВт/см<sup>2</sup> до 10 кВт/см<sup>2</sup> при увеличении длины резонатора от 100 до 400 мкм. Полуширина от-



Р и с. 1. Спектры и интенсивность излучения лазера в зависимости от уровня возбуждения в интервале  $I_{\text{в}} = 14 - 45 \text{ кВт/см}^2$  для резонатора с  $L = 247 \text{ мкм}$

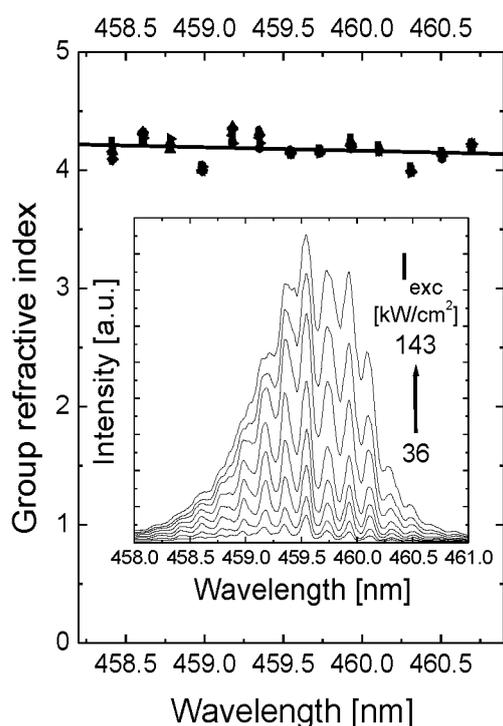
Р и с. 2. Спектрально-угловое распределение излучения лазера ( $L = 228 \text{ мкм}$ ,  $I_{\text{в}} = 70 \text{ кВт/см}^2$ )

дельных спектральных мод лазерного излучения находилась в пределах  $0.12 - 0.08 \text{ нм}$ .

На рис. 2 представлено спектрально-угловое распределение излучения лазера в дальнем поле для длины резонатора  $L = 228 \text{ мкм}$  и интенсивности возбуждения  $I_{\text{в}} = 70 \text{ кВт/см}^2$ . Как видно из рисунка, расходимость излучения на полувысоте составляет величину  $27^\circ$ . Спектрально-угловое распределение показывает явную модовую структуру излучения лазера, причем положение спектральных мод не зависит от угла регистрации излучения. Наблюдается незначительное угловое структурирование излучения в картине дальнего поля - два максимума при углах  $\pm 3^\circ$ . Причем относительные интенсивности максимумов зависят от интенсивности возбуждения. При повышении интенсивности максимум, соответствующий отрицательным углам, становится доминирующим. Небольшая асимметрия дальнего поля

излучения обусловлена вкладом в генерацию люминесценции с поверхности гетероструктуры.

Анализ модовой структуры генерации лазера, имеющего резонатор 133 мкм (рис. 3, вставка) с использованием выражения для мод резонатора Фабри-Перо:  $\Delta\lambda = \lambda^2 / (2Ln_g)$ , где  $n_g$  - групповой показатель преломления,  $n_g = \bar{n} - \lambda(d\bar{n}/d\lambda)$ ,  $L$  - длина резонатора,  $\bar{n}$  - эффективный показатель преломления волновода; позволил определить значение и дисперсию группового показателя преломления.



Р и с. 3. Спектральная зависимость группового показателя преломления и спектры генерации при различных  $I_{\text{в}}$

заряда обусловлено действием нескольких причин: заполнением зон, изменением  $E_g$  из-за многочастичных взаимодействий и увеличением частоты плазменных колебаний.

Таким образом, спектрально-угловое распределение мод излучения лазеров на гетероструктурах ZnMgSSe/ZnSe с отдельным ограничением показало наличие двух слабовыраженных максимумов при углах  $\pm 3^\circ$  в дальнем поле генерации при общей расходимости  $25^\circ$  и независимость спектрального положения мод от угла регистрации. Показано, что значение группового показателя преломления лазерно-

Как видно из рис. 3, групповой показатель преломления лазерного волновода зависит от длины волны и принимает значения на границах спектрального диапазона генерации 4.213 при  $\lambda = 458.42$  нм и 4.143 при  $\lambda = 460.70$  нм. Его значение на длине волны 459.25 нм имеет величину порядка 4.186 и слабо зависит от уровня накачки. Дисперсия  $n_g$  при малых уровнях возбуждения имеет величину порядка  $-0.03 \text{ нм}^{-1}$  и уменьшается с увеличением уровня накачки. Длина резонатора слабо влияет на величину  $n_g$ .

Такое поведение группового показателя преломления и его дисперсии с повышением концентрации неравновесных носителей

го волновода составляет величину порядка 4.186 на длине волны 459.25 нм с дисперсией порядка  $-0.03 \text{ нм}^{-1}$ , уменьшающейся с увеличением уровня возбуждения.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ В-176.

1. Yablonskii G. P., Marko I. P., Lutsenko E. V. et al. // Proc. 2<sup>nd</sup> ISBLLED Ed. K. Onabe, Tokyo, Ohmsha LTD. - Chiba, 1998. - P. 532.
2. Gurskii A. L., Lutsenko E. V., Yablonskii G. P. et al. // Material Science and Engineering B: Solid State Materials for Advanced Technology. - 1998. Vol. B51. - P. 22.

## **INFLUENCE OF CARRIER DIFFUSION ON COMPETITIVE MODE DYNAMICS IN VCSEL UNDER PSEUDORANDOM PULSED MODULATION**

**Yu. Morozov<sup>1</sup>, I. Nefedov<sup>1</sup>, V. Gusyatinikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Radio Engineering and Electronics Russian Academy of Sciences, Saratov

<sup>2</sup> Saratov State University, Saratov

### **1. Introduction**

Vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers (VCSELs) are presently the subject of intense research due to their potential use as a compact, efficient laser sources for the fiber communication systems as well as for the optical signal processing. Despite a remarkable progress both in numerical simulations and in experimental investigations of VCSEL's dynamics [1-3], there are many subjects of great importance which have not been studied till now. For example, it has been shown that VCSELs emit few transverse modes simultaneously for high level of pumping current [1, 2]. However, in available papers the competition dynamics of these modes has not been adequately explored, in particular, for current modulated by a pseudorandom sequence of pulses at high frequencies.

### **2. Model and equations**

We used for calculation the model of index-guided VCSEL's structure with a cylindrical geometry. It was also assumed in our model that a ring contact supplies current to an active region whose radius corresponds to the radius of index-guided region for laser.