

УДК 621.315.592; 535.33

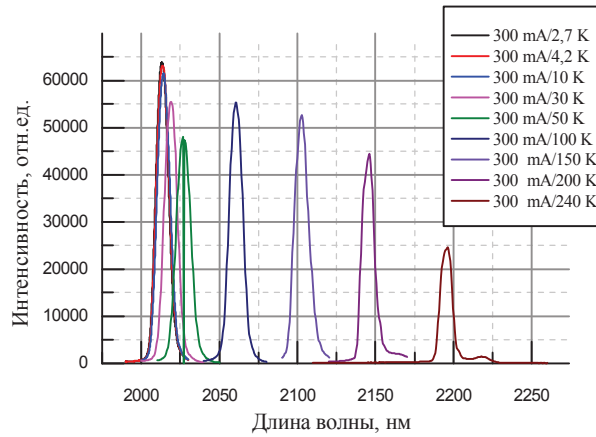
Е. В. Лебедок, канд. физ-мат. наук;  
Д. М. Кабанов, канд. физ-мат. наук; Р. Ю. Микулич, асп.  
(ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск);  
Ю. П. Яковлев, д-р физ-мат. наук; Е. В. Куницына, канд. физ-мат. наук  
(ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Россия, г. Санкт-Петербург)

## **ИЗЛУЧЕНИЯ ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ GAINASSB/ALGAASSB ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 2,7–300 К**

Создание спектральных приборов для медицины, экологии, промышленного мониторинга, изучения загрязнения окружающей среды на сегодняшний день является одним из важных направлений. Появление и разработка детекторов и анализаторов требует развитие полупроводниковых источников среднего ИК диапазона, работающих в широком интервале температур.

Исследуемые образцы представляет собой полупроводниковые лазерные диоды с дисковыми резонаторами. Гетероструктура лазеров выращена методом молекулярно - пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact 21E на подложке n - GaSb (100) в организации соисполнителе проекта с российской стороны (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). Активная область общей толщиной 750 нм состояла из двух напряженных квантовых ям состава  $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.11}\text{Sb}_{0.89}$ , каждая толщиной 10 нм, разьединённых слоем  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$  толщиной 30 нм. Волноводные слои, изготовленные из  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$ , имели толщину по 350 нм. Активная область преднамеренно не легировалась. Волновод был ограничен широкозонными слоями p (Be) - и n (Te) -  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$  толщинами по 1,5 мкм. Для улучшения инжекции носителей заряда в активную область с внешней стороны широкозонных слоев были выращены два тонких, по 100 нм, варизонных слоя AlGaAsSb. Верхний контактный слой GaSb p-типа имел толщину 300 нм и был легирован до концентрации дырок  $p = 5 \cdot 10_{18} \text{ см}^{-3}$ .

Для исследования температурных характеристик образцы были помещены охлаждаемый вакуумный криостат с возможностью установки температуры от 2,7 до 300 К. Регистрация излучения лазерных диодов осуществлялась с помощью монохроматора-спектрографа SOL Instruments MS3504i. Для детектирования излучения образцов применялся охлаждаемый PbSe фотоприемник. Измеренные спектры электролюминесценции образца №606 с диаметром резонатора 100 мкм представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 - Зависимость спектра электролюминесценции образца номер 606 от температуры, при квазинепрерывном режиме накачки, амплитуда 300 мА, частота следования импульса 16 кГц**

Не линейная зависимость интенсивности излучения исследуемого образца от температуры может быть объяснена сложной структурой излучаемой структуры. Более детальное моделирование процессов электролюминесценции и исследование образцов может проводиться с помощью дополнительного моделирования, при этом наличие в полупроводнике примесей и дефектов, характеризующихся мелкими энергетическими уровнями в запрещенной зоне, обуславливает разрешение оптических межзонных переходов без выполнения правил отбора по волновому вектору электрона [1]. Для такого случая спектральная мощность спонтанного излучения в объемных кристаллах описывается соотношением [2]:

$$W_{\text{сп}}(E) = \frac{2e^2 n_0 |\mathbf{M}|^2}{\pi^5 \epsilon_0 \hbar^8 c^3} m_c^{3/2} (m_{hh} + m_{lh})^{3/2} E^2 \times \int_{E_g}^E \sqrt{(E_c - E_g)(E - E_c)} f_e(E_c) f_h(E_c - E) dE_c,$$

где  $E$  – энергия фотона;  $m_c$  – эффективная масса электрона;  $m_{hh}$  – эффективная масса тяжелой дырки;  $m_{lh}$  – эффективная масса легкой дырки;  $n_0$  – показатель преломления активного слоя;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\hbar$  – редуцированная постоянная Планка;  $|\mathbf{M}|^2$  – квадрат матричного элемента межзонных оптических переходов в модели без выполнения правил отбора по волновому вектору, усредненный по поляризациям и направлениям распространения излучения;  $f_e(E)$  – функция Ферми–Дирака для электронов;  $f_h(E)$  – функция Ферми–Дирака для дырок;  $F_e$  и  $F_h$  – положения квазиуровней Ферми в зоне проводимости и валентной зоне соответственно;  $E_c$  – энергия состояния в зоне

проводимости.

Оценка зависимости ширины запрещенной зоны от температуры исследуемых структур по измеренным спектрам излучения проводилась следующим способом: построением зависимости положения максимума спектра излучения от температуры с поправкой (в длинноволновую область) на  $kT/2$  [3], где  $k$  – постоянная Больцмана. Для установления зависимости ширины запрещенной зоны исследуемых образцов от температуры необходимо экспериментально определить положение максимумов спектров электролюминесценции образцов при различных температурах. После чего зависимость положения максимумов спектров электролюминесценции в эВ, с поправкой на  $kT/2$ , аппроксимируется формулой Варшни [4]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T}$$

где  $E_g(0)$  – ширина запрещенной зоны при температуре  $T = 0$  К,  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры Варшни. Оцененные параметры Варшни для исследуемого образца 606:  $E_g(0) = 0,616$  эВ,  $\alpha = 3,44 \cdot 10^{-4}$  эВ/К,  $\beta = 245,87$  К.

Работа частично поддержана грантом БРФФИ № Ф18Р-121 и грантом РФФИ № 18-52-00027.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Температурная зависимость внутренних параметров дисковых лазерных диодов InAs/InAsSbP / В. В. Кабанов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 4. – С. 522–526.
- 2 Suhara, T. Semiconductor laser fundamentals / T. Suhara. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. – 306 p.
- 3 Электролюминесцентные характеристики светодиодов среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур InGaAsSb/GaAlAsSb при высоких рабочих температурах / А. А. Петухов [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 4. – С. 91–96.
- 4 Temperature dependence of the energy and broadening parameter of the fundamental band gap of GaSb and Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As<sub>y</sub>Sb<sub>1-y</sub>/GaSb (0.07 ≤ x ≤ 0.22, 0.05 ≤ y ≤ 0.19) quaternary alloys using infrared photoreflectance / M. Munoz [et al.] // Physical review B. – 2000. – Vol. 62, № 24. – P. 600–604.