

ОПТИЧЕСКИ НАКАЧИВАЕМЫЕ НИЗКОПОРОГОВЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРЫ С АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ ИЗ CDSE КВАНТОВЫХ ТОЧЕК

Е. В. Луценко¹⁾, А. Г. Войнилович¹⁾, Н. П. Тарасюк, В. Н. Павловский¹⁾,
Г. П. Яблонский¹⁾, И. В. Седова²⁾, С. В. Сорокин²⁾, А. А. Торопов²⁾,
С. В. Иванов²⁾, П. С. Копьев²⁾

¹⁾Институт физики им. Б. И. Степанова Национальной академии наук
Беларуси, 220072 Минск, Беларусь

²⁾Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021
Санкт-Петербург, Россия

Компактные полупроводниковые лазеры, излучающие в зеленой области спектра, могут найти применение в системах проекционного лазерного телевидения, лазерной печати, системах локальной оптической связи, использующих пластиковые световоды, лазерной локации и навигации, подводной связи. Одними из наиболее вероятных кандидатов для создания промышленных лазеров зеленого свечения являются лазерные гетероструктуры на основе ZnSe. Однако инжекционные лазеры на основе ZnSe подвержены процессам медленной деградации, связанной с легированием структуры, что резко ограничивает время жизни прибора. В то же время оптически накачиваемые лазеры, не требующие создания р-п перехода и омических контактов, показывают значительно большую стабильность.

Нами впервые было продемонстрировано лазерное излучение в зеленой области спектра в ZnMgSSe гетероструктуре с активной областью в виде квантовых точек CdSe/ZnSe при ее накачке излучением InGaN/GaN лазера, излучающего на длине волны 450 нм [1]. Это свидетельствует о перспективности создания лазерного конвертера, включающего “зеленый” лазер на основе ZnSe, накачиваемый излучением “фиолетового” инжекционного лазера на основе GaN. В настоящей работе представлены результаты исследования люминесцентных и лазерных свойств гетероструктур Cd(Zn)Se/ZnMgSSe с одним и двумя слоями КТ CdSe в качестве активной области. Обе структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs (001). Схематически дизайн исследуемых структур представлен на рис. 1.

Активная область структуры А представляет собой один слой КТ CdSe, расположенный внутри квантовой ямы ZnSe 5 нм. Активная область структуры В – два слоя КТ CdSe, разделенные слоем ZnSe 5 нм. В остальном дизайны сравниваемых лазерных структур отличаются незначительно. Волноводная область образована двумя участками короткопериодной попеременно-напряженной сверхрешетки ZnSSe/ZnSe. Обкладками волновода служат толстый (~1 мкм) слой ZnMgSSe со стороны подложки и воздушный слой у поверхности гетероструктуры. У структуры А слой ZnMgSSe разделен напряженной широкозонной сверхре-

шеткой MgSe/MgS, призванной препятствовать утечке неравновесных носителей заряда в подложку.

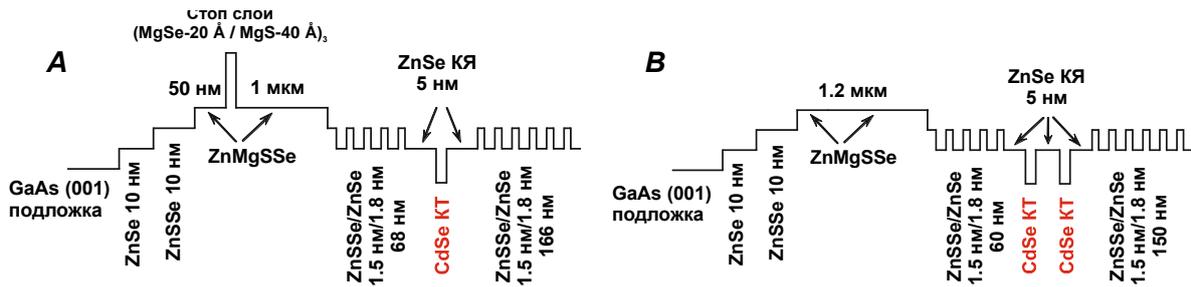


Рис. 1. Схематический дизайн исследуемых структур

Квантовые точки образовались вследствие упругой релаксации напряжений несоответствия параметров решетки CdSe и ZnSe ($\Delta a/a \approx 7\%$) в процессе роста, который проводился по методу эпитаксии с повышенной миграцией атомов [2].

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены спектры ФЛ исследуемых структур при возбуждении излучением HeCd-лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 325 \text{ нм}$), измеренные в одинаковых условиях при $I_{\text{возб}} = 0,64 \text{ Вт/см}^2$ – (а) и $I_{\text{возб}} = 3,2 \text{ Вт/см}^2$ – (б).

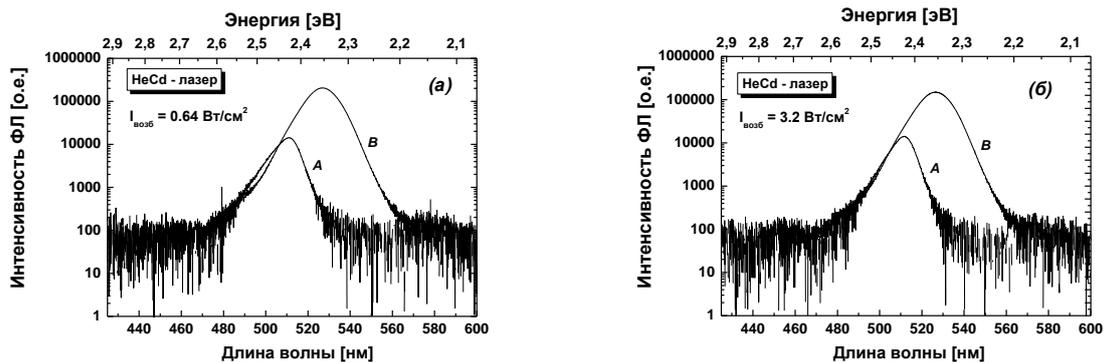


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции структур А и В при возбуждении излучением HeCd-лазера с интенсивностью $0,64 \text{ Вт/см}^2$ – (а) и $3,2 \text{ Вт/см}^2$ – (б), измеренные в одинаковых условиях

В спектрах ФЛ доминируют полосы с максимумами на длинах волн 511 нм (структура А) и 527 нм (структура В), соответствующие рекомбинации электронно-дырочных пар через локализованные состояния в КТ CdSe. Интенсивность этих полос на несколько порядков превышает интенсивность излучения из других слоев гетероструктур. Как видно из рисунка, при низком уровне возбуждения интегральная интенсивность ФЛ из активного слоя структуры В более чем на порядок выше, чем у структуры А. При этом полуширина спектра ФЛ структуры с двумя слоями КТ составляет 15,8 нм при $I_{\text{возб}} = 0,64 \text{ Вт/см}^2$ и 16,2 нм при $I_{\text{возб}} = 3,2 \text{ Вт/см}^2$, что соответственно, в 1,34 и 1,51 раза больше, чем у структуры с одним слоем КТ.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ исследуемых структур при возбуждении излучением импульсного азотного лазера ($\lambda_{\text{возб}} = 337.1 \text{ нм}$, $\tau_{\text{и}} = 8 \text{ нс}$, $\nu = 400 \text{ Гц}$), измеренные в одинаковых условиях при $I_{\text{возб}} = 1,5 \text{ кВт/см}^2$ – (а) и 65 кВт/см^2 – (б).

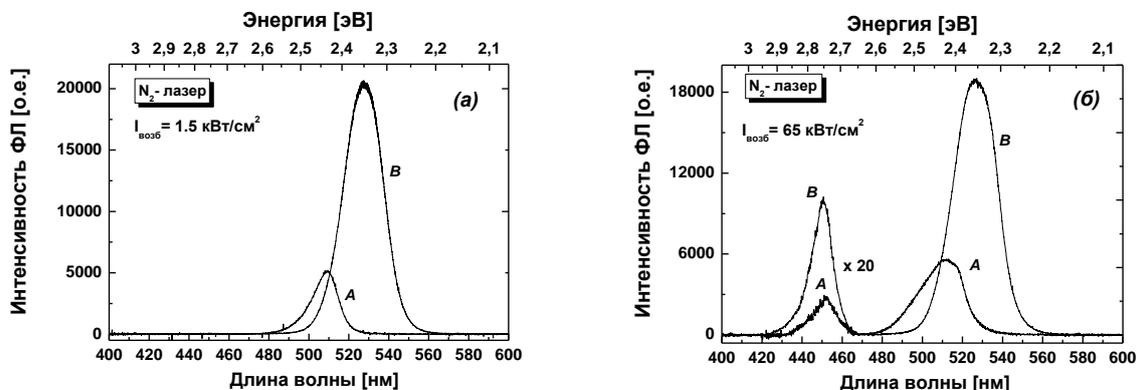


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции структур А и В при возбуждении излучением N_2 -лазера с интенсивностью $1,5 \text{ кВт/см}^2$ – (а) и 65 кВт/см^2 – (б), измеренные в одинаковых условиях

Как видно из рисунка при высоком уровне возбуждения интегральная интенсивность ФЛ из активного слоя структуры В выше, чем у структуры А в 6 и 3,3 раза при $I_{\text{возб}} = 1,5$ и 65 кВт/см^2 , соответственно. При $I_{\text{возб}} = 1,5 \text{ кВт/см}^2$ полуширина спектра ФЛ структуры В составляет 23 нм, что в 1,54 раза больше, чем у структуры А, а при $I_{\text{возб}} = 65 \text{ кВт/см}^2$ полуширины спектров ФЛ обеих структур оказываются равными (25 нм).

Для сравнения волноводных параметров рассматриваемых структур были проведены расчеты поперечного распределения электромагнитного поля фундаментальной моды волновода (рис. 4 (а), (б)). Для структуры с одним слоем КТ фактор оптического ограничения составляет $\Gamma_{\text{А}} = 0.0222$, а с двумя – $\Gamma_{\text{В}} = 0.0432$. Оптическое поглощение, связанное с проникновением электромагнитного поля в подложку, пренебрежимо мало ($< 0.05 \text{ см}^{-1}$).

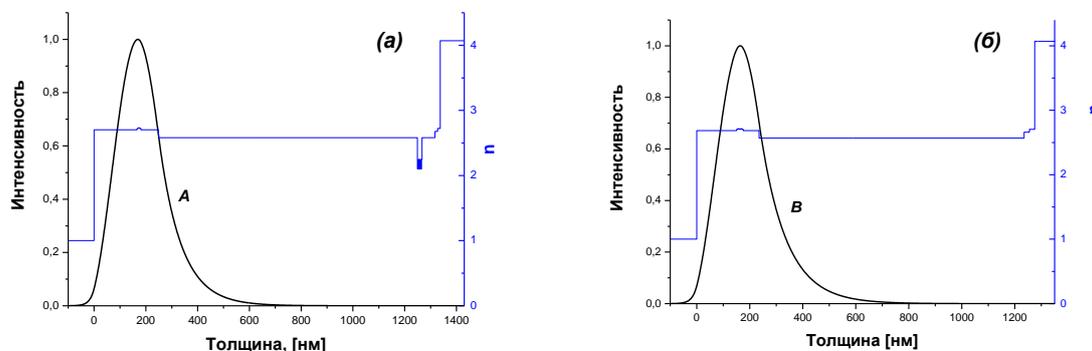


Рис. 4. Поперечное распределение электромагнитного поля фундаментальной моды

оптического волновода и профиля показателя преломления в структурах А и В

На рассматриваемых структурах была получена лазерная генерация при накачке излучением азотного лазера, сфокусированного в узкую полосу. Развитие генерации при увеличении мощности накачки представлено на рис. 5 (а), (б). Величина минимального порога для структуры А составила 5 кВт/см^2 , а для структуры В – $2,5 \text{ кВт/см}^2$.

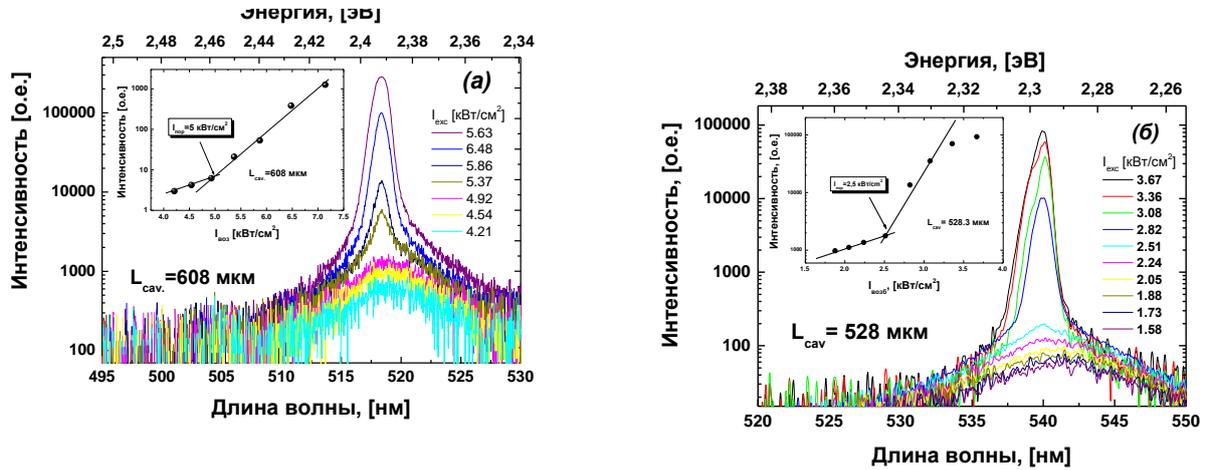


Рис. 5. Развитие генерации в структурах А (а) и В (б) при увеличении мощности накачки. На вставках показана зависимость интегральной интенсивности излучения лазера от плотности мощности возбуждения

Исследование лазерных свойств проводилось в широком интервале интенсивностей возбуждения. Измерение выходной мощности в абсолютных единицах позволило определить величину внешней квантовой эффективности (рис. 6). Для структуры А величина внешней квантовой эффективности достигала величины 32%, а для структуры В – более 41%.

Таким образом, увеличение числа слоев КТ CdSe позволило вдвое снизить порог лазерной генерации и получить внешнюю квантовую эффективность более 41%.

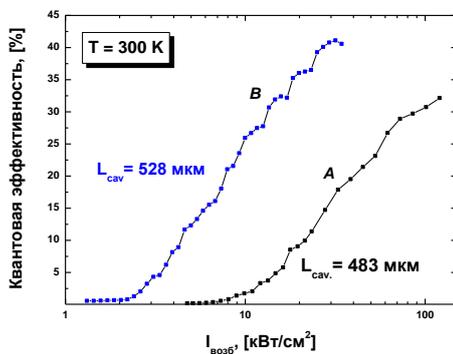


Рис. 6. Зависимость внешней квантовой эффективности от плотности мощности накачки в структурах А и В

1. Седова И. В., Сорокин С. В., Торопов А. А. и др. // ФТП. 2004. Т. 38. С. 1135.
1. Sedova I. V., Sorokin S. V., Sitnikova A. A. et al. // Proc. 29th Int. Symp. on Compound Semiconductors. – Lausanne, 2002. P. 71.