

06;10

## Лазеры зеленого спектрального диапазона на основе CdSe/ZnSe наноструктур с накачкой электронным пучком с энергией менее 10 keV

© М.М. Зверев, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова,  
Д.В. Перегудов, В.Б. Студенов, С.В. Иванов,  
И.В. Седова, С.В. Сорокин, С.В. Гронин, П.С. Копьев

Московский государственный институт радиотехники,  
электроники и автоматики  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: mzverev@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 мая 2007 г.

Исследованы параметры излучения импульсных лазеров с электронно-лучевой накачкой на основе ZnSe-содержащих квантово-размерных структур с тонким (20 nm) внешним ограничивающим слоем ZnMgSSe. При комнатной температуре генерация наблюдалась при энергии электронного пучка свыше 3.7 keV. Минимальное значение пороговой плотности тока пучка, зарегистрированное при энергии пучка 8–9 keV, составило 0.4–0.5 A/cm<sup>2</sup>, а максимальная импульсная мощность — 2 W при энергии электронов ~ 5 keV.

PACS: 42.70.Hj, 81.07.Vc

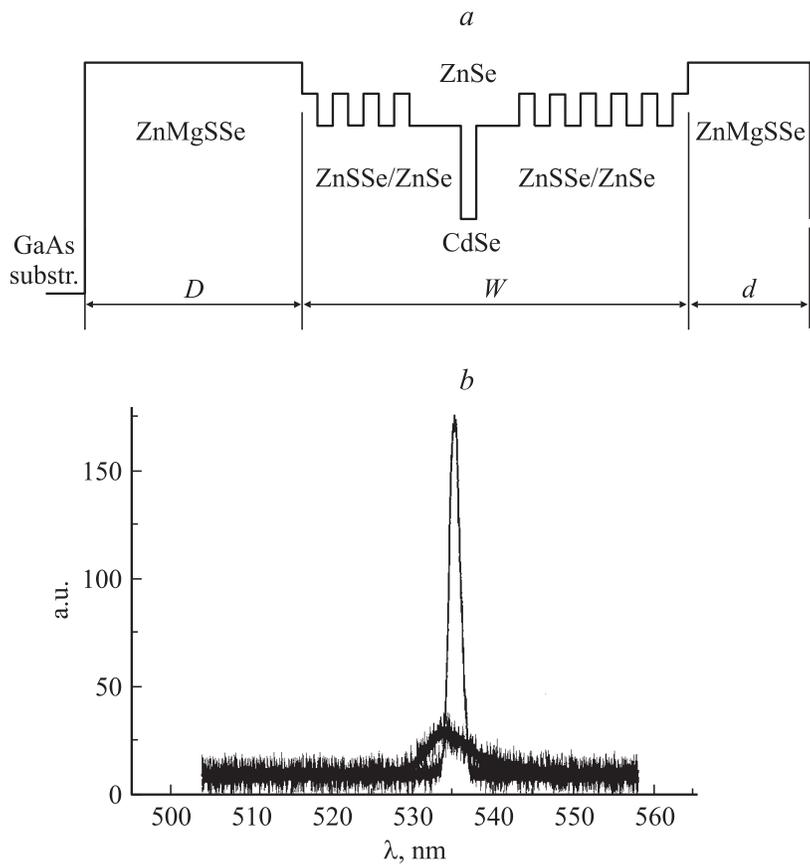
Лазеры с электронно-лучевой накачкой на основе полупроводниковых монокристаллов известны уже около четырех десятилетий [1]. Продемонстрированы возможности их применений для скоростной интерферометрии и фотографии, в системах посадки самолетов и проводки судов, для проекционного отображения информации с высоким

разрешением на большом экране, в медицине и т.д. [2]. Тем не менее системы с использованием полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком (ПЛЭН) широкого распространения не получили. Главными причинами этого являются высокие значения пороговой плотности тока электронного пучка и высокие напряжения (десятки и сотни киловольт), требуемые для работы приборов при комнатной температуре.

Для уменьшения рабочей энергии электронного пучка и пороговой плотности тока в ПЛЭН можно использовать в качестве активных элементов гетероструктуры, в которых используются эффекты электронного и оптического ограничения. Кроме того, при использовании для накачки электронного пучка не требуется наличие  $p-n$ -перехода и омических контактов. Тем самым значительно снижаются технологические трудности изготовления активных элементов, а также появляется возможность создания лазеров в тех спектральных областях, в которых получение материала  $p$ -типа проводимости затруднено. Применение квантово-размерных структур в сочетании с автоэмиссионными источниками электронов позволило создать ПЛЭН, работающие при энергии электронов  $\sim 10$  keV в ИК-диапазоне при комнатной температуре [3], и в сине-зеленом — при криогенном охлаждении образца [4]. Исследованные нами ранее в качестве активных элементов ПЛЭН ZnSe-содержащие гетероструктуры с волноводом на основе переменного напряженной сверхрешетки (СР) ZnSSe/ZnSe и квантовыми точками (КТ) CdSe/ZnSe в активной области продемонстрировали генерацию в сине-зеленом диапазоне при  $T = 300$  К и энергии электронного пучка в диапазоне 8–25 keV [5]. При этом пороговая плотность тока была снижена до уровня  $0.8$  A/cm<sup>2</sup> (при энергии электронов 16–18 keV).

В настоящей работе за счет оптимизации конструкции многослойной гетероструктуры на основе селенида цинка получена генерация при рекордно малых значениях рабочей энергии электронного пучка (менее 4 keV) при  $T = 300$  К и низких значениях пороговой плотности тока.

Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) псевдоморфно на подложках GaAs(001) при температуре 270–280°C. Структуры содержат нижний (толщиной  $D$ ) и верхний (толщиной  $d$ ) ограничивающие слои Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>S<sub>0.15</sub>Se<sub>0.85</sub>, волновод в виде сверхрешетки 15 Å-ZnS<sub>0.14</sub>Se<sub>0.86</sub>/18 Å-ZnSe толщиной 250–620 nm и активную область в виде ZnSe КЯ с плоскостью самоформирующихся



**Рис. 1.** *a* — схематическая зонная диаграмма исследуемых структур; *b* — спектр излучения лазера на основе структуры #4446.

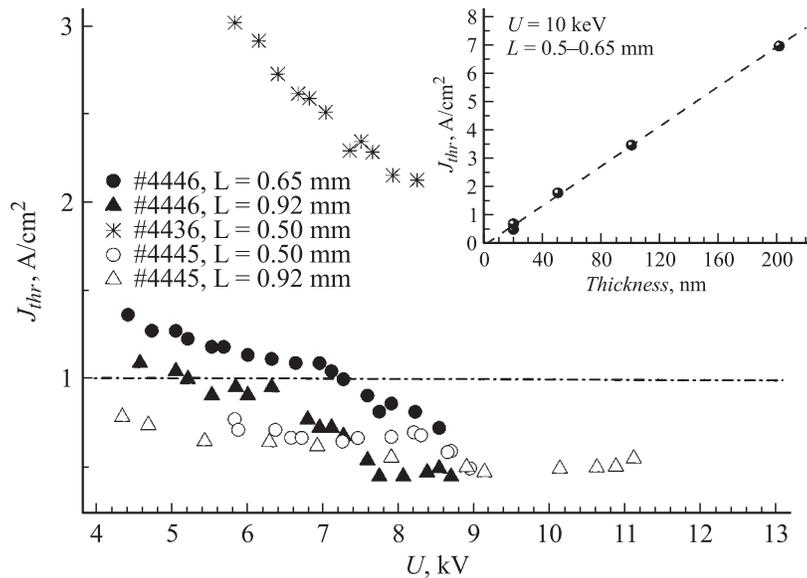
КТ CdSe в ее центре [5]. Схематическое изображение зависимости ширины запрещенной зоны от координаты для исследуемых структур представлено на рис. 1, *a*. Исследовались структуры как с симметричным, так и с асимметричным расположением активного слоя в волноводе *W*. Параметры использованных структур приведены в таб-

№ структуры	$d$ , nm	Толщина волновода $W$ , $\mu\text{m}$	Расположение активного слоя в волноводе	$D$ , $\mu\text{m}$
4445	20	0.62	Симметричное	1.2
4446	20	0.37	Асимметричное	1.15
4436	50	0.254	Асимметричное	1

лице. В отличие от структур, использованных ранее [5], в настоящей работе толщина  $d$  внешнего приповерхностного слоя была существенно уменьшена. Благодаря этому снижены потери энергии накачки во внешнем ограничивающем слое ZnMgSSe, особенно существенные при малых энергиях электронного пучка.

Использовалась поперечная геометрия возбуждения. Лазерные резонаторы изготавливались путем скалывания, отражающие покрытия на поверхности не наносились. Все эксперименты проводились при комнатной температуре образцов. Для накачки использовался импульсный электронный пучок с энергией электронов до 12 keV и плотностью тока в плоскости образца до 3 A/cm<sup>2</sup>. Длительность импульсов составляла около 200 ps, частота следования — до 10 Hz.

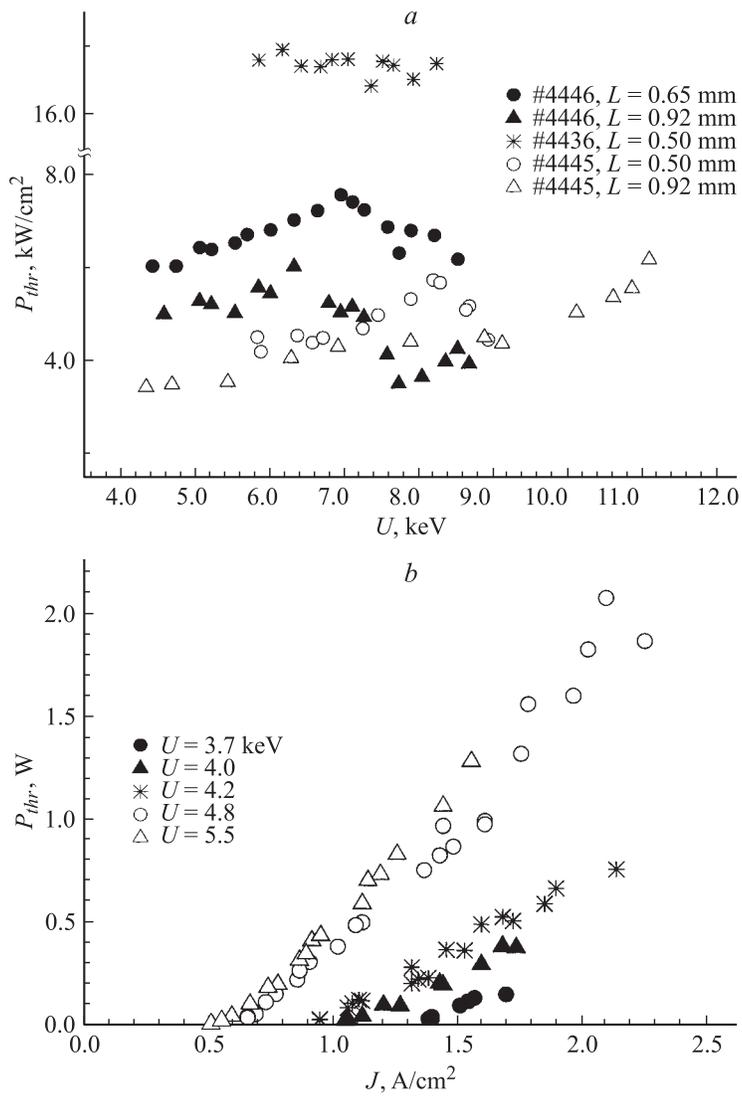
На рис. 2 представлена зависимость пороговой плотности тока  $J_{thr}$  от энергии электронов для лазеров на основе разных структур. Минимальное значение пороговой плотности тока 0.4–0.5 A/cm<sup>2</sup> наблюдалось при энергии пучка 8–9 keV для лазеров #4445 и #4446 (толщина внешнего слоя  $d = 20$  nm) с длиной резонатора  $L = 0.92$  mm.  $J_{thr}$  возрастает при уменьшении длины резонатора и существенно увеличивается с ростом толщины внешнего слоя  $d$  (структура #4436,  $d = 50$  nm). Глубина проникновения электронного пучка с энергией менее 10 keV в кристалл составляет доли микрона и уменьшается с понижением энергии. Поэтому с уменьшением толщины внешнего ограничивающего слоя ZnMgSSe, транспорт носителей в котором существенно уступает транспорту в ZnSSe/ZnSe CP [6], уменьшаются потери энергии накачки и соответственно пороговая плотность тока (см. зависимость на вставке к рис. 2). Минимальная энергия  $U$  электронного пучка, при которой удалось получить лазерную генерацию, составила 3.7 keV.



**Рис. 2.** Зависимость пороговой плотности тока от энергии электронного пучка для лазеров на основе различных структур. На вставке приведена зависимость пороговой плотности тока от толщины внешнего ограничивающего слоя ZnMgSSe.

На рис. 3, *a* представлена зависимость пороговой плотности мощности накачки  $P$  от энергии электронного пучка для различных структур. Пороговая интенсивность накачки  $P$  слабо зависит от энергии пучка во всем исследованном диапазоне. Минимальное значение пороговой интенсивности (около  $3.5$   $kW/cm^2$ ) наблюдалось для лазеров на основе структур #4445 и #4446 с длиной резонатора  $L = 0.92$  mm.

На рис. 3, *b* представлены зависимости выходной импульсной мощности, излучаемой с одного торца лазера, от плотности тока накачки для разных значений энергии  $U$  электронного пучка для лазера с  $L = 0.92$  mm. При энергии пучка около  $5$  keV максимальная импульсная мощность составила  $\sim 2$  W. Спектр излучения лазера на основе структуры #4446 до и после порога генерации представлен на вставке



**Рис. 3.** *a* — зависимость пороговой плотности мощности накачки от энергии электронного пучка для различных структур; *b* — зависимости выходной мощности, излучаемой с одного торца лазера, от плотности тока накачки для разных значений энергии электронного пучка для лазера с  $L = 0.92$  mm.

к рис. 1, *b*. Длина волны в максимуме составила 535 nm при ширине линии около 2–3 nm.

Таким образом, использование ZnSe-содержащих гетероструктур с волноводом в виде переменного-напряженной СР с тонким (20 nm) внешним ограничивающим слоем ZnMgSSe в качестве активного элемента лазеров зеленого спектрального диапазона с электронно-лучевой накачкой позволило существенно уменьшить рабочую энергию электронного пучка. При комнатной температуре генерация получена при значениях энергии пучка свыше 3.7 keV. Минимальное значение пороговой плотности тока составило 0.4–0.5 A/cm<sup>2</sup>, а максимальная импульсная мощность — 2 W при энергии электронов ~ 5 kW.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, проект РНП 2.1.2.1087, гранта ИНТАС #03-51-5019, а также проекта РФФИ 05-02-08091-офи\_а.

## Список литературы

- [1] Богданкевич О.В. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. В. 12. С. 1113.
- [2] Богданкевич О.В., Меерович Г.А., Олихов И.М., Садчихин А.В. // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. В. 8. С. 901–919.
- [3] Molva E., Accomo R., Labrunie G., Cibert J., Bodin C., Dang L.S., Feuillet G. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 796.
- [4] Herve D., Accomo R., Molva E., Vanzetti L., Paggel J.J., Sorba L., Francioci A. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 2144.
- [5] Зверев М.М., Иванов С.В., Перегудов Д.В., Седова И.В., Сорокин С.В., Копьев П.С. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. В. 10. С. 909.
- [6] Lebedev A., Sorokin S., Toropov A., Shubina T., Il'inskaya N., Nekrutkina O., Ivanov S., Pozina G., Bergman J.P., Monemar B. // Acta Physica Polonica A. 1998. V. 94. P. 421.