

Эффективный полупроводниковый лазер зеленого диапазона с электронно-лучевой накачкой на основе многослойных наноструктур $A^{II}B^{VI}$

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

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики,
119454 Москва, Россия

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

(Получена 20 мая 2008 г. Принята к печати 30 мая 2008 г.)

Исследованы параметры излучения полупроводникового $Cd(Zn)Se/ZnMgSSe$ -лазера с активной областью на основе 10 эквидистантно расположенных квантовых ям $ZnSe$ с дробно-монослойными вставками квантовых точек $CdSe$ и волноводом в виде короткопериодной сверхрешетки общей толщиной ~ 0.65 мкм при накачке электронным пучком. При комнатной температуре получены значения импульсной оптической мощности до 12 Вт с одного торца резонатора на длине волны 542 нм с рекордно высокой эффективностью $\sim 8.5\%$ при энергии пучка электронов 23 кэВ.

PACS: 42.55.Px, 68.65.Hb, 81.05.Dz, 81.15.Ni, 68.37.Hk, 85.35.Be

1. Введение

Полупроводниковые лазеры зеленого спектрального диапазона ($\lambda = 500\text{--}550$ нм) имеют много потенциальных применений. Это оптическая связь, локация, навигационные системы, накачка лазеров других типов и т.д. Импульсные полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком по своим энергетическим параметрам занимают промежуточное место между твердотельными и полупроводниковыми инжекционными лазерами.

В полупроводниковых лазерах с электронно-лучевой накачкой не требуется наличие p – n -перехода и контактов. Неравновесные носители возникают в относительно большом объеме материала, определяемом глубиной проникновения электронного пучка в кристалл и его поперечным сечением. В связи с этим отсутствует необходимость создания материала p -типа проводимости — критического элемента инжекционных приборов на основе широкозонных материалов, возникает возможность варьировать в широких пределах размер возбужденной области и предельную выходную мощность путем изменения энергии электронов накачки и тока в электронном пучке. В лазерах с электронно-лучевой накачкой существует возможность широкополосной модуляции выходной мощности излучения, электронного управления угловым положением диаграммы направленности, синхронизации импульса света с импульсом запуска с точностью до долей наносекунды. Применения лазеров данного типа на основе монокристаллов в значительной степени ограничены высоким уровнем пороговой плотности тока и высокими значениями рабочей энергии электронного пучка.

В последние годы продемонстрирована перспективность использования квантово-размерных гетероструктур

для лазеров с накачкой электронным пучком, в частности для лазеров зеленого диапазона — гетероструктур на основе $ZnSe$. Изготовлен миниатюрный прибор, в котором при рабочей энергии пучка $U = 10$ кэВ в импульсно-периодическом режиме достигнута средняя мощность 30 мВт при криогенном охлаждении структуры [1].

Применение многослойных квантово-размерных гетероструктур $ZnCdSe/ZnSe$ в лазерах с продольным возбуждением сканирующим электронным пучком позволило достичь средней мощности излучения в квазинепрерывном режиме в несколько ватт при комнатной температуре [2,3]. Структуры с волноводом на основе переменного-напряженной короткопериодной сверхрешетки (СР) $15 \text{ \AA}-ZnS_{0.14}Se_{0.86}/18 \text{ \AA}-ZnSe$ и одиночной плоскостью квантовых точек (КТ) $CdSe/ZnSe$ в активной области продемонстрировали генерацию (300 К) при энергии электронного пучка $U < 5$ кэВ, причем при $U \approx 8\text{--}10$ кэВ достигнута предельно низкая пороговая плотность тока пучка $0.4\text{--}0.5 \text{ A/cm}^2$ [4].

Для увеличения эффективности преобразования энергии электронного пучка в лазерное излучение необходимо согласовать значения рабочей энергии пучка с конструкцией полупроводниковой структуры. Для каждой энергии пучка существует оптимальный размер структуры, так как при малых значениях U часть энергии накачки тратится во внешнем слое структуры, а при больших U гетероструктура простреливается электронным пучком насквозь и значительная часть энергии накачки теряется в подложке. Эффективность излучения 1.6% с одной грани кристалла при энергии электронного пучка 17–21 кэВ была достигнута при 300 К при использовании гетероструктуры с одним слоем КТ $CdSe$, расположенных в центре 10 нм- $ZnSe$ квантовой ямы (КЯ). Общая толщина структуры составляла величину ~ 1.1 мкм

[¶] E-mail: irina@beam.ioffe.ru

при толщине волновода 0.2 мкм [5]. Увеличение толщины волновода до 0.4 мкм и использование структуры с тремя одинаковыми активными слоями КТ CdSe/ZnSe (общая толщина структуры 1.3 мкм) позволило получить генерацию с эффективностью с каждой грани $\sim 4\%$ при энергии пучка 20–22 кэВ [6].

В данной работе представлены результаты исследований зеленого лазера с накачкой электронным пучком на основе гетероструктуры Cd(Zn)Se/ZnMgSSe с 10 активными слоями КТ CdSe/ZnSe, эквидистантно расположенными в волноводе на основе короткопериодной СР ZnSe/ZnSSe толщиной 0.65 мкм, в котором достигнута эффективность преобразования энергии электронного пучка в свет, равная 8.5% с одной грани лазерного кристалла.

2. Эксперимент

Гетероструктуры Cd(Zn)Se/ZnMgSSe для лазеров с электронной накачкой были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) псевдоморфно на подложках GaAs (001) при температуре роста 270–280°C [7,8]. Структуры содержат нижний ограничивающий слой *n*-типа $\text{Zn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{S}_{0.15}\text{Se}_{0.85}:\text{Cl}$ толщиной 1.6 мкм и верхний нелегированный ограничивающий слой того же состава толщиной 20 нм, волновод в виде короткопериодной СР 2.4 нм-ZnS_{0.14}Se_{0.86}/0.9 нм-ZnSe общей толщиной 0.65 мкм, в котором равномерно расположены 10 активных слоев, представляющих собой КЯ ZnSe шириной 4 нм с плоскостью КТ CdSe номинальной толщиной 2.5 монослоя (МС) в центре КЯ (рис. 1). Использование переменного-напряженной короткопериод-

ной СР позволяет повысить стойкость всей структуры к механическим напряжениям, а также защитить активную область от проникновения протяженных и точечных дефектов и их развития в процессе эксплуатации лазерной структуры [9].

Все измерения проводились при 300 К в поперечной геометрии возбуждения. Отражающие покрытия на грани кристалла не наносились. Для накачки использовался импульсный электронный пучок, длительность импульса накачки составляла 50 нс при частоте следования импульсов до 10 Гц. Размер электронного пучка в направлении, перпендикулярном оси лазерного резонатора, ограничивался диафрагмой размером 0.25 мм. Энергия электронов могла варьироваться от 10 до 30 кэВ. Спектры генерации регистрировались с помощью приемника на основе ПЗС-линейки, закрепленной на выходе монохроматора МДР-2. Для измерения формы светового импульса и мощности генерации использовался калиброванный коаксиальный фотоэлемент ФЭК-22.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 схематически изображена энергетическая диаграмма структуры, а также пространственное распределение потерь энергии электронов в ZnSe для пучков с энергией 7, 15, 24 и 30 кэВ [10]. Генерация наблюдалась на длине волны 542 нм при полуширине линии излучения 2–3 нм. Спектр излучения представлен на вставке к рис. 1, *b*.

На рис. 2 приведены зависимости импульсной мощности излучения с одного торца лазера от тока накачки, измеренные при различных значениях энергии электронного пучка. Длина резонатора $L = 0.46$ мм, поперечный размер лазера равен 0.25 мм. Максимальная мощность 12 Вт достигается при энергии электронного пучка 23 кэВ и токе 5.5 мА. Следует заметить, что полный ток электронной пушки в нашей экспериментальной установке уменьшается с уменьшением ускоряющего напряжения из-за влияния на него пространственного заряда пучка. В связи с этим при больших напряжениях есть возможность обеспечить большее превышение над порогом и соответственно увеличить мощность генерации. Однако это может привести также и к возрастанию потерь носителей в подложке. Оптимальным решением здесь является модернизация конструкции электронной пушки, позволяющей увеличивать плотность тока электронов в пучке при сохранении неизменным ускоряющего напряжения в пределах 20–30 кВ.

На рис. 3 представлена зависимость эффективности излучения с одного торца лазерного кристалла от тока электронного пучка при значениях энергии пучка 23 и 26 кэВ. Максимальное значение полученной эффективности ($\sim 8.5\%$) является рекордно большим для лазеров данного типа. Так как излучение выходит в две стороны, истинное значение эффективности вдвое больше, т.е. $\sim 17\%$. Зависимость максимального значения

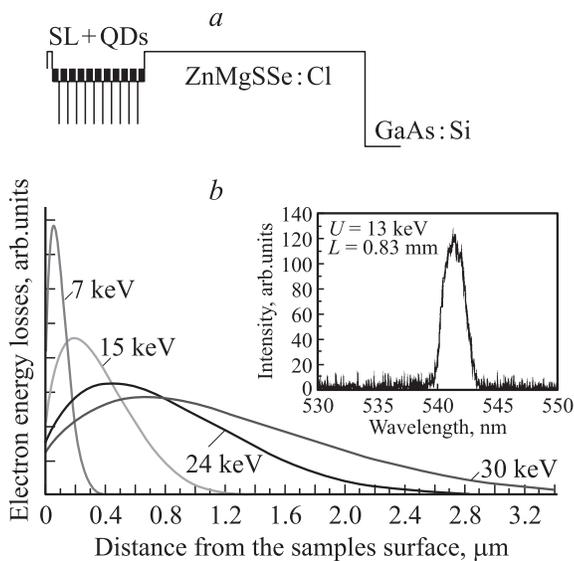


Рис. 1. Энергетическая диаграмма гетероструктуры (*a*), а также пространственное распределение потерь энергии электронов в ZnSe (*b*) для пучков с энергией 7, 15, 24 и 30 кэВ [10]. Вставка показывает спектр генерации при энергии электронного пучка 13 кэВ и длине резонатора 0.83 мм.

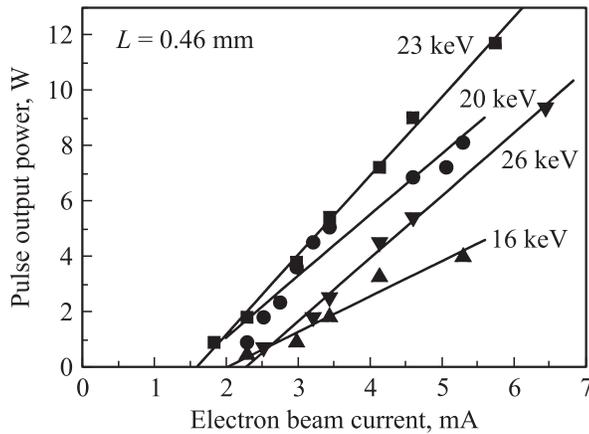


Рис. 2. Зависимости импульсной мощности от тока накачки, полученные при разных значениях энергии электронного пучка (указаны на рисунке). L — длина резонатора.

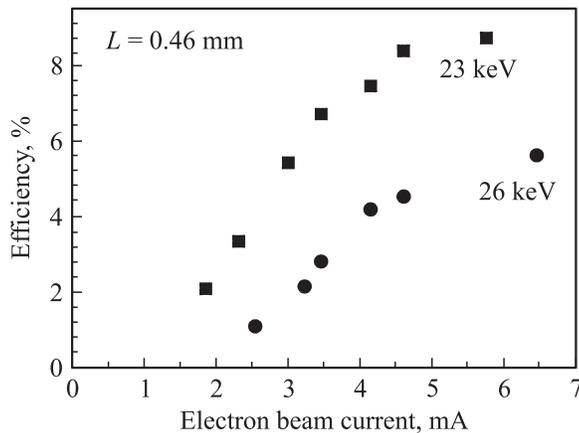


Рис. 3. Зависимости эффективности излучения с одного торца лазера от тока электронного пучка для значений энергии пучка 23 и 26 кэВ. Длина резонатора 0.46 мм.

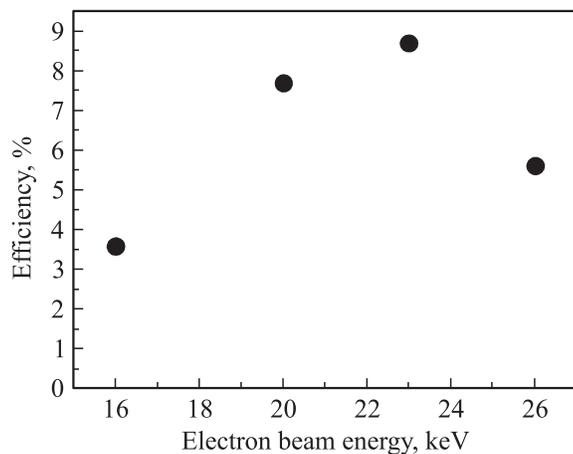


Рис. 4. Зависимость максимального значения полученной в экспериментах эффективности от энергии электронного пучка.

полученной в экспериментах эффективности от энергии электронного пучка представлена на рис. 4. Заметим, что приведенные на рис. 4 значения эффективности при малых значениях энергии электронного пучка ограничены возможностями экспериментальной установки, а именно жесткой взаимосвязью ускоряющего напряжения и тока в электронном пучке.

На рис. 5 представлены результаты расчета распределения концентрации носителей заряда в структуре при различных значениях энергии электронного пучка. При расчетах учитывалась диффузия носителей, а также их пространственное перераспределение, связанное с различным значением ширины запрещенной зоны в разных слоях структуры. Значение диффузионной длины принято равным 0.5 мкм [11], время жизни носителей в широкозонных слоях ZnMgSSe — 0.04 нс [12], а в остальных слоях — 0.4 нс. При таких значениях времен жизни нам удалось ранее достичь лучшего согласия расчетных и экспериментальных зависимостей интенсивности катодolumинесценции структуры от энергии электронного пучка [12]. Пространственное распределение потерь энергии электронного пучка в селениде цинка взято из работы [10].

Из результатов расчета (рис. 5) можно проследить, как изменяется заселенность различных слоев структуры при изменении энергии электронов накачки. С увеличением энергии электронного пучка возрастает количество слоев, заполненных носителями. При энергии, превышающей 15 кэВ, заполнены, хотя и в разной степени, все слои КТ CdSe. С дальнейшим увеличением энергии пучка структура простреливается насквозь, заметная часть энергии выделяется во внутреннем широкозонном слое ZnMgSSe, и за счет диффузии носителей из этого слоя идет эффективное заполнение носителями последнего, 10-го слоя, концентрация в котором значительно возрастает. Одновременно с заполнением активных слоев КТ CdSe/ZnSe часть носителей остается в СР, однако при приведенных выше параметрах структуры концентрация носителей в КТ CdSe/ZnSe на 2–3 порядка превышает суммарную концентрацию носителей в СР, что говорит о высокой эффективности сбора носителей в активных слоях структуры. На рис. 5, h показано распределение носителей по структуре при энергии электронов 15 кэВ, при этом масштаб по оси ординат уменьшен на 3 порядка по сравнению с остальными рисунками, а масштаб по оси абсцисс увеличен вдвое. Отчетливо видно, что часть носителей сосредоточена в слоях СР, а некоторая часть — в нижнем четвертом широкозонном слое. С увеличением энергии пучка доля энергии, выделяющейся в нижнем широкозонном слое, и соответственно концентрация носителей в этом слое увеличиваются, активная область простреливается насквозь и эффективность генерации падает. Конечно, точное значение концентрации в каждом слое будет определяться конкретными значениями времени жизни, диффузионной длины в каждом слое и коэффициентами безызлучательной рекомбинации на каждой

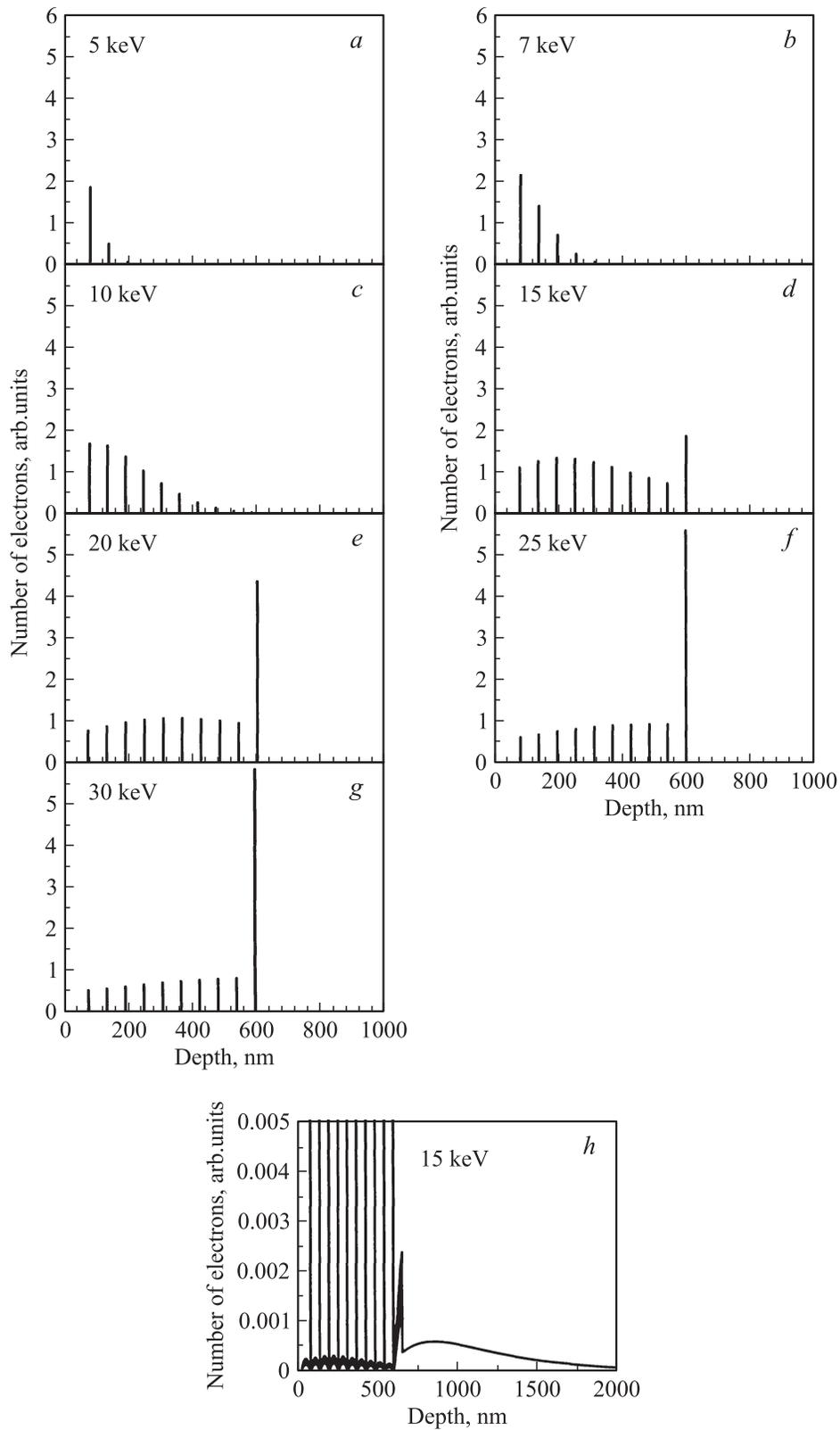


Рис. 5. Результаты расчета пространственного распределения носителей в структуре с 10 активными слоями квантовых точек CdSe/ZnSe при накачке электронным пучком с энергией, кэВ: *a* — 5, *b* — 7, *c* — 10, *d* — 15, *e* — 20, *f* — 25, *g* — 30. Поверхность структуры — слева на рисунках. Внутренняя поверхность волновода лежит на глубине ~ 0.65 мкм. На рис. *h* данные относятся к энергии пучка 15 кэВ, масштаб по оси ординат уменьшен на 3 порядка.

границе между слоями, значения которых известны лишь приблизительно. Поэтому результаты расчетов позволяют лишь качественно рассмотреть процессы, происходящие в многослойной структуре с электронной накачкой.

4. Заключение

Таким образом, исследованы параметры излучения полупроводникового лазера с электронно-лучевой накачкой на основе гетероструктуры Cd(Zn)Se/ZnMgSSe с волноводом в виде СР толщиной ~ 0.65 мкм с 10 активными слоями КТ CdSe/ZnSe. При комнатной температуре на длине волны 542 нм получены значения импульсной мощности до 12 Вт с одного торца лазера при рекордно высокой эффективности $\sim 8.5\%$ при энергии пучка электронов 23 кэВ. Основная причина увеличения эффективности — более полное использование энергии накачки за счет согласования геометрических размеров структуры и глубины проникновения электронного пучка в образец, а также высокий внутренний квантовый выход наноструктур с КТ. Высокая эффективность сбора носителей заряда в активной области может быть обеспечена и при меньших значениях энергии электронного пучка, однако в этом случае характеристики лазера ограничены возможностями экспериментальной установки. Как видно из рис. 2, выходная мощность излучения не испытывает насыщения при увеличении тока в пучке до максимальных значений при данной энергии. Это говорит о возможности дальнейшего увеличения оптической мощности лазера при модернизации конструкции электронной пушки. Предельное значение эффективности лазеров с накачкой электронным пучком составляет около 30% [13]. Достигнутое нами значение эффективности лазера $\sim 17\%$ (при учете выхода излучения с двух торцов лазера) — несколько ниже предельного. Для достижения максимальных значений мощности и эффективности излучения подобных лазеров необходима не только оптимизация параметров накачки, но и числа активных слоев. Оптимальное количество слоев будет зависеть от толщины волновода, согласованной с рабочей энергией пучка, а также от диффузионной длины носителей, так как она должна превышать расстояние между соседними слоями активной области структуры для обеспечения высокой эффективности сбора носителей. Некоторого увеличения эффективности можно достичь также за счет оптимизации параметров резонатора. Так как максимально достижимое значение выходной мощности ограничено разрушением зеркал активного элемента, для получения больших уровней мощности желательно увеличивать поперечное сечение выходного торца лазера за счет, например, дальнейшего увеличения толщины СР волновода.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта № 02.523.12.3013 от 19.09.2007, шифр „2007-3-2.3-07-11-002“ и проекта МНТЦ № 3754.

Список литературы

- [1] D. Herve, R. Accomo, E. Molva, L. Vanzetti, J.J. Paggel, L. Sorba, A. Francioci. *Appl. Phys. Lett.*, **67** (15), 2144 (1995).
- [2] N.G. Basov, E.M. Dianov, V.I. Kozlovsky, A.B. Krysa, A.S. Nasibov, Yu.M. Popov, A.M. Prokhorov, P.A. Trubenko, E.A. Shcherbakov. *Laser Physics*, **6** (3), 608 (1996).
- [3] Н.Г. Басов, Е.М. Дианов, В.И. Козловский, А.Б. Крыса, А.С. Насибов, Ю.М. Попов, А.М. Прохоров, П.А. Трубенко, Е.А. Щербаков. *Квант. электрон.*, **22** (8), 756 (1995).
- [4] 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. *Письма ЖТФ*, **33** (24), 1 (2007).
- [5] М.М. Зверев, С.В. Иванов, Д.В. Перегудов, И.В. Седова, С.В. Сорокин, П.С. Копьев. *Квант. электрон.*, **34** (10), 909 (2004).
- [6] M.M. Zverev, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, D.V. Peregoudov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev. *Phys. Status Solidi C*, **2** (2), 923 (2005).
- [7] S.V. Ivanov, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, A.V. Lebedev, I.V. Sedova, A.A. Sitnikova, R.V. Zolotareva, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. *J. Cryst. Growth*, **201–202**, 942 (1999).
- [8] S.V. Ivanov, A.A. Toropov, S.V. Sorokin, T.V. Shubina, I.V. Sedova, A.A. Sitnikova, P.S. Kop'ev, Z.I. Alferov, A. Waag, H.-J. Lugauer, G. Reuscher, M. Keim, G. Landwehr. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 498 (1999).
- [9] С.В. Иванов, П.С. Копьев, А.А. Торопов. *УФН*, **169**, 468 (1999).
- [10] Е.Н. Донской, Е.В. Жданова, А.Н. Залялов и др. *Квант. электрон.* (в печати).
- [11] V.I. Kozlovsky, Yu.G. Sadofyev. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18** (3), 1538 (2000).
- [12] М.М. Зверев, Д.В. Перегудов, Е.В. Зданова, Н.А. Гамов, В.Б. Студенов, С.В. Иванов, С.В. Сорокин, И.В. Седова, П.С. Коп'ев, Le Si Dang. *Proc. 14 Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, Russia, June 26–30, 2006) p. 27.
- [13] О.В. Богданкевич, С.А. Дарзбек, П.Г. Елисеев. *Полупроводниковые лазеры* (М., Наука, 1976).

Редактор Т.А. Полянская

High efficiency green electron-beam pumped lasers based on multilayer semiconductor nanostructures

*M.M. Zverev, N.A. Gamov, D.V. Peregoudov,
V.B. Studionov, E.V. Zdanova, I.V. Sedova*,
S.V. Gronin*, S.V. Sorokin*, S.V. Ivanov*, P.S. Kop'ev**

Moscow State Institute of Radio Engineering,
Electronics and Automatic,
119454 Moscow, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Science,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We report on laser characteristics of electron beam pumped semiconductor lasers based on Cd(Zn)Se/ZnMgSSe heterostructures with a 0.6 μm -thick superlattice waveguide involving 10 equidistantly placed active layers CdSe/ZnSe quantum dot sheets. The maximum values of output pulse power of 12 W and efficiency of 8.5% per one facet at a wavelength of 542 nm have been obtained at room temperature, using the electron-beam energy and current 23 keV and 5.5 mA, respectively.