

УДК 621.378.331

**ИМПУЛЬСНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ЭЛЕКТРОННОЙ НАКАЧКОЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР****Зверев М.М.**, д.ф.м.н., профессор. E-mail: mzverev@mail.ru**Жданова Е.В.**, ст. преподаватель. E-mail: zhdanova@mirea.ru**Гамов Н.А.**, инженер. E-mail: nikich-gam@yandex.ru**Студенов В.Б.**, к.ф.м.н., доцент. E-mail: vbstudenov@yandex.ru

МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье приведен краткий обзор выполненных в МИРЭА работ по импульсным лазерам с накачкой электронным пучком на основе полупроводниковых квантоворазмерных структур.

**Ключевые слова:** лазер, квантоворазмерная структура, гетероструктура, электронный пучок.

**PULSED ELECTRON BEAM PUMPED LASERS BASED ON SEMICONDUCTOR QW – STRUCTURES****Zverev M. M.**, D.ofSci., prof., E-mail: mzverev@mail.ru**Zhdanova E.V.**, senior lecturer, E-mail: zhdanova@mirea.ru**Gamov N.A.** E-mail: nikich-gam@yandex.ru**Studionov V.B.**, PhD, assoc.prof., E-mail: vbstudenov@yandex.ru

MSTU MIREA, Moscow, Russia

**Abstract.** The article gives a brief overview of the work carried out in MIREA on pulsed electron beam pumped semiconductor lasers based on QW-structures

**Keywords:** electron beam pumped laser, quantum size structure, heterostructure, electron beam.

Использование электронного пучка для накачки полупроводниковых лазеров было предложено и реализовано в СССР в 60-х годах прошлого века [1]. При таком методе накачки для работы лазера не требуется наличие p-n перехода и контактов, что делает возможным использование в качестве активных элементов широкого круга полупроводниковых кристаллов, главное требование к которым – большая вероятность излучательной рекомбинации. Таких кристаллов достаточно много, и они позволяют получать лазерное излучение в широком диапазоне длин волн, лежащих в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Метод накачки электронным пучком позволяет реализовать специфические режимы работы устройств, присущие только этому типу лазеров. Так, существует возможность излучения световых импульсов одновременно либо последовательно во времени на различных длинах волн. Возможна синхронизация импульсов света с импульсом запуска с субнаносекундной точностью. Возможна модуляция параметров световых импульсов путем управления параметрами электронного луча – источника накачки. За счет

сканирования электронным пучком по поверхности активного элемента можно реализовать режим углового сканирования лазерным лучом, что было успешно использовано для систем отображения информации на большом экране (в том числе для проекционного телевидения), а также для реализации сканирующего лазерного микроскопа [1-5]. Диапазон мощностей световых импульсов для лазеров этого типа чрезвычайно широк – от единиц милливатт до десятков мегаватт (при использовании лазерных сборок, в которых большое количество – несколько тысяч - отдельных лазеров накачиваются электронным пучком большого сечения).

Разнообразие свойств и параметров излучения полупроводниковых лазеров на основе монокристаллов позволило продемонстрировать возможность их использования в разнообразных системах. Мощные импульсные лазеры наносекундной длительности (с использованием лазерныхборок) использовались для диагностики быстропротекающих процессов, для систем наблюдения в условиях плохой видимости, для систем посадки самолетов и проводки судов [4]. Были опробованы такие лазеры для медицинских применений [4]. Низкая пространственная когерентность излучения лазерныхборок позволяла получать высококачественные фото и интерференционные изображения объектов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями [4,5].

Промышленный выпуск сканирующих и импульсных полупроводниковых лазеров был налажен в НПО «Платан». Несмотря на то, что в ряде случаев использование полупроводниковых лазеров с электронной накачкой было весьма успешным, широкого применения такие лазеры не получили. В значительной степени это связано с высокой энергией электронов, используемых для накачки. Действительно, в мощных импульсных лазерах использовались электроны с энергией 200-300 кэВ, что требовало защиты как от высокого напряжения, так и от сопутствующего рентгеновского излучения. Существенного снижения рабочей энергии электронов накачки в лазерах данного типа удалось добиться за счет использования гетероструктур и, в частности, квантоворазмерных структур.

В 1993-95 годах был опубликован ряд работ, в которых сообщалось о создании миниатюрных маломощных источников света - лазеров ИК и видимого диапазона на основе квантоворазмерных структур с накачкой электронами с энергией 10 кэВ [6-8]. Источником электронов являлась миниатюрная электронная пушка с автоэмиссионным катодом. Для лазеров видимого диапазона в этих работах использовалось криогенное охлаждение.

Для уменьшения пороговой плотности тока пучка электронов и их энергии используются структуры, в которой для ограничения светового поля выращивается

волновод, в котором размещается активная область - квантовая яма или слой квантовых точек. При накачке такой структуры электронным пучком неравновесные носители, возникающие во всем возбужденном объеме, за счет диффузии и дрейфа во внутренних электрических полях, концентрируются в активном слое. Наличие волновода приводит к локализации поля световой волны. С ростом накачки (плотности тока электронного пучка) при достижении пороговой концентрации неравновесных носителей происходит генерация лазерного излучения.

Длина волны излучения определяется выбором материала активного слоя, параметрами квантовой ямы, оптического резонатора, температурой образца. Для зеленого диапазона длин волн используются ZnSe-содержащие структуры, в которых активной областью является ZnSe – или ZnCdSe – квантовая яма или слой CdSe – квантовых точек, расположенных в центре ZnSe – квантовой ямы [8-10]. Для инфракрасного диапазона возможно использование, например, структур на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs, для синего – фиолетового и ультрафиолетового диапазонов – структур на основе нитридов индия, галлия и алюминия. Главной проблемой при выращивании таких структур является необходимость устранения безизлучательной рекомбинации, всегда сопровождающей дефекты структуры. В связи с этим для выращивания структур используются современные ростовые методы, позволяющие получать структуры с малой плотностью дефектов: метод молекулярно-пучковой эпитаксии и метод МОС – гидридной эпитаксии.

В нашей группе проводятся систематические исследования импульсных лазеров с электронной накачкой на основе квантоворазмерных полупроводниковых структур. Использование ZnSe-содержащих структур позволило получить генерацию при комнатной температуре в зеленом диапазоне спектра [8-12]. За счет оптимизации конструкции квантоворазмерных структур удалось добиться уменьшения рабочей энергии электронов накачки до 3.5 – 4 кэВ при комнатной температуре активных элементов для лазеров зеленого диапазона, достигнуты рекордно низкие значения пороговой плотности тока электронов накачки ( $\sim 0.4 - 0.5 \text{ А/см}^2$ ) [12]. Для лазеров инфракрасного диапазона на основе структуры AlGaAs/InGaAs/GaAs удалось уменьшить значения энергии электронов накачки до рекордно низких значений - 3.2-3.5 кэВ [13,14]. На рис. 1. представлена конструкция структуры, используемой в этих работах, наряду с распределением энергии накачки в образце при использовании электронов с разной энергией.

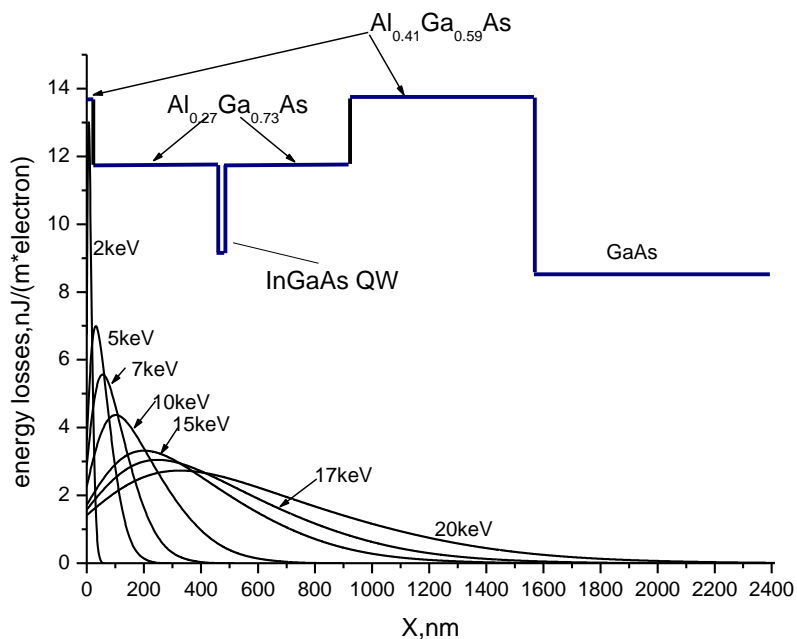


Рис. 1. Верхний рисунок – схема структуры: зависимость ширины запрещенной зоны слоев (в относительных единицах) от расстояния от поверхности структуры. Внизу - пространственное распределение в кристалле GaAs потерь энергии электронов накачки при разных значениях их энергии 2,5,7,10,15,17,20 кэВ. Координата  $x=0$  соответствует поверхности структуры.

Структура выращена на подложке из арсенида галлия. Волновод структуры образован слоями  $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ , ограниченными с двух сторон слоями  $\text{Al}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ . Активная область – квантовая яма InGaAs. На рис. 2. показана зависимость пороговой плотности тока электронов накачки  $j$  от их энергии для лазера на основе этой структуры. Длина волны излучения составляла около 0.9 мкм.

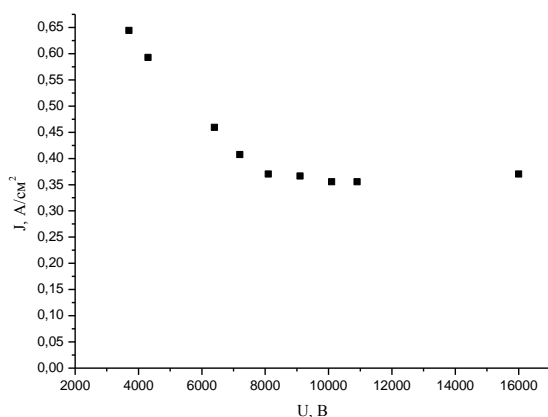


Рис.2. Зависимость пороговой плотности тока от ускоряющего напряжения для лазера ИК диапазона на основе структуры, представленной на рис.1.  $T=300\text{K}$ , длина резонатора  $L=0.95\text{ мм}$ .

Минимальное значение пороговой плотности тока при комнатной температуре активного элемента составило  $0.35 \text{ A/cm}^2$ , что является рекордно низким значением для лазеров данного типа.

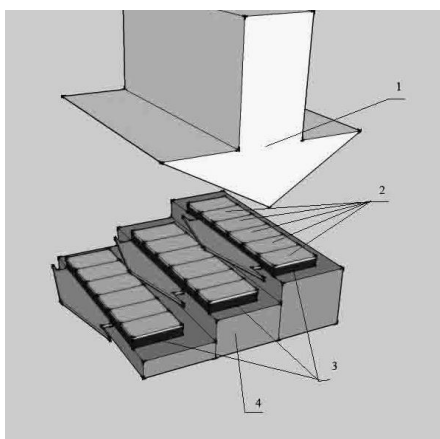
Пространственное распределение энергии накачки зависит от энергии используемых электронов (рис.1). Оптимальная с точки зрения минимизации пороговой плотности тока конструкция структуры (ширина волновода, расположение и количество активных слоев) определяются длиной волны излучения лазера. Поэтому существует оптимальная энергия электронов накачки, при которой пороговая плотность тока минимальна. Расчеты и эксперименты показывают, что для большинства используемых материалов эта энергия составляет около 10 кэВ. Для практического использования лазеров на основе полупроводниковых структур желательно стремиться к дальнейшему уменьшению рабочей энергии электронов накачки.

Из рис. 2 видно, что при уменьшении энергии электронов происходит практически линейное увеличение пороговой плотности тока. Из расчетов следует, что такая зависимость должна наблюдаться, если во всем диапазоне энергий нет влияния на концентрацию неравновесных носителей поверхностной безизлучательной рекомбинации, что свидетельствует о высоком совершенстве выращенных структур. Это позволяет надежно прогнозировать возможность дальнейшего снижения энергии электронов накачки до 1 – 2 кэВ. Практически такие же выводы были сделаны для лазеров зеленого диапазона на основе ZnSe-содержащих структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии [15].

Как показывают эксперименты, предельная мощность, которую можно получить с одиночного лазера при увеличении накачки, ограничена разрушением активного элемента собственным лазерным излучением [16,17]. Для увеличения выходной мощности необходимо либо тем или иным способом увеличивать площадь выходного зеркала лазера, либо – использовать лазерную сборку, состоящую из набора оптически изолированных лазеров, накачиваемых одновременно электронным пучком большого сечения. Эксперименты показывают, что для лазеров зеленого диапазона с одиночного лазера можно достичь без разрушения активного элемента значений импульсной мощности в 30 – 50 Вт (при длительности импульса около 0.3 мкс) [18,19], для лазеров ИК – диапазона – около 100 Вт [17]. Таким образом, для достижения импульсной мощности около 1 кВт необходима сборка из 10 – 20 лазерных элементов. Учитывая, что характерные размеры одиночного лазера составляют обычно около 0.4 – 1 мм (длина резонатора) и 0.2-0.5 мм (поперечный размер), длина линейного набора из 10

элементов будет около 5 мм. Таким образом, достижение выходной импульсной мощности более 1 кВт представляется вполне реальным.

На рис. 3 представлена схема эксперимента, а на рис.4 - фотография ближней зоны излучения сборки лазеров на основе ZnSe- содержащей структуры с активной областью, содержащих 10 квантовых ям, размещенных в волноводе шириной 2 мкм [18]. Сборка из 26 лазеров состояла из 3-х линейных наборов, расположенных в виде лестницы. Длина резонатора лазеров составляла 0.4 мм. Для накачки использовался пучок электронов с энергией до 24 кэВ. На рис.5 представлена зависимость пикового значения выходной импульсной мощности от тока электронов накачки. Максимальное значение импульсной мощности составило 630 Вт при энергии электронов 24 кэВ [18]. Длина волны излучения равнялась 535 нм.



**Рис.3. Схема эксперимента. 1 – электронный пучок, 2 – лазерные элементы, 3 – одномерные наборы, 4 – ступенчатый хладопровод.**



**Рис.4. Ближняя зона излучения сборки, представленной на рис.3. Неоднородность свечения связана с пространственной неоднородностью распределения электронов накачки и разбросом параметров отдельных лазерных элементов.**

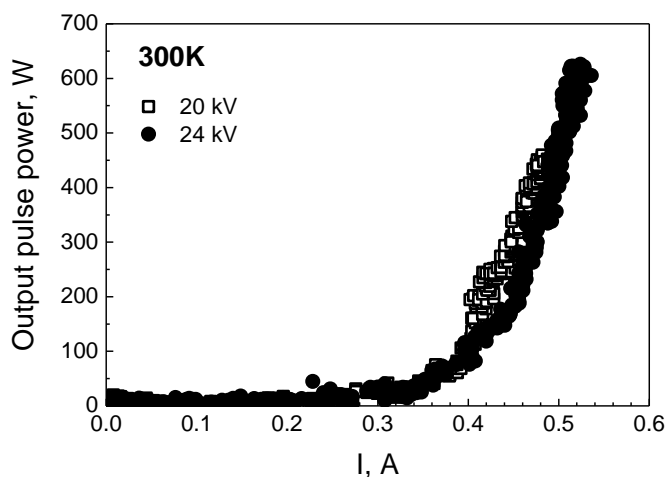


Рис.5. Зависимость выходной импульсной мощности излучения лазерной сборки от тока электронного пучка для энергии электронов накачки 20 кэВ (полые квадраты) и 24 кэВ (черные ромбы).

Таким образом, показана возможность создания импульсных источников света на основе полупроводниковых квантоворазмерных структур с накачкой низкоэнергетичными электронными пучками, работающих в инфракрасной и зеленой спектральных областях. Показана возможность получения излучения в зеленой области спектра с импульсной мощностью более 600 Вт. Результаты работы говорят о возможности разработки малогабаритных лазеров с накачкой электронным пучком с импульсной мощностью более 1 кВт.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 13-02-00604, а также Задания Минобрнауки № 3.611.2014/К.

#### Список литературы.

1. О.В. Богданкевич, С.А. Дарзбек, П.Г.Елисеев. Полупроводниковые лазеры. Москва, Наука, 1976.
2. О.В.Богданкевич. Полупроводниковые лазеры с накачкой электронным пучком // Квантовая электроника. – 1994. - 21 (12). - с.1113-1136.
3. В.Н.Уласюк. Квантоскопы. М., Радио и связь, 1988.
4. О.В.Богданкевич, Г.А.Меерович, И.М.Олихов, А.В.Садчихин. Устройства на основе полупроводниковых лазеров с накачкой электронным пучком // Радиотехника и электроника. – 1999. – 44 (8). С. 901 - 919.
5. М. М. Зверев, С. Иванов, И. Олихов. Полупроводниковые лазеры с электронно-лучевой накачкой // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2006. -(70). - С. 66 -69.

6. E.Molva, R.Accomo, G.Labrunie, J.Cibert, C.Bodin, L.S.Dang, G.Fenillet. Microgun-pumped semiconductor laser // *Appl. Phys.Letters.* – 1993. – 62. P. 796.
7. D.Herve, E.Molva, L.Vanzetti, L.Sorba, A.Francioci. Microgun pumped blue and blue - green lasers // *Electronics Letters.* – 1995. – 31 (6). – p. 459-461.
8. D.Herve, R.Accomo, E.Molva, L.Vanzetti, J.J.Paggel, L.Sorba, A.Francioci. Microgun-pumped blue lasers // *Appl. Phys.Letters.* – 1995. - 67 (15). - 9. - P. 2144-2146.
9. М.М. Зверев, С.В. Иванов, Д.В. Перегудов, И.В. Седова, С.В. Сорокин, П.С. Копьев. Низкопороговые полупроводниковые лазеры зеленого диапазона с накачкой электронным пучком на основе квантоворазмерных гетероструктур. *Квантовая электроника*, т. 34, № 10, 2004, 909-911.
10. M.M. Zverev, S.V. Sorokin, I.V. Sedova, D.V. Peregoudov, S.V. Ivanov, and P.S. Kop'ev, High-efficiency Electron-Beam Pumped Green Semiconductor Lasers Based on Multiple Quantum Disk Sheets // *Phys. stat. sol. (c).* - 2005. - 2 (2). –p. 923.
11. М.М.Зверев, С.В.Иванов, Д.В.Перегудов, С.В.Сорокин, И.В.Седова, П.С.Копьев. Неохлаждаемый полупроводниковый лазер на основе ZnSe-содержащих квантоворазмерных структур с накачкой электронным пучком // *Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* – 2002.- №9. –с. 22-25.
12. М.М. Зверев, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, Д.В. Перегудов, В.Б. Студенов, С.В. Иванов, С.И. Гронин, И.В. Седова, С.В. Сорокин, П.С. Копьев. Лазер зеленого диапазона на основе ZnSe-содержащих структур с накачкой электронным пучком с энергией менее 10 кэВ // *Письма в ЖТФ.* – 2007. – 33 (24). – с. 1-7.
13. М.М. Зверев, Н.А. Гамов, Е.В. Жданова, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Д.В. Перегудов, В.Б. Студенов. Импульсный полупроводниковый лазер ИК диапазона с накачкой электронным пучком на основе квантоворазмерной структуры InGaAs/AlGaAs // *Оптика и спектроскопия.* – 2011. – 111 (2). - с. 212–213.
14. M.M. Zverev, N.A. Gamov, E.V. Zhdanova, D.V. Peregoudov, V.B. Studionov, A.A. Marmalyuk, M.A. Ladugin. InGaAs/AlGaAs-nanostructure based pulse laser pumped by electron beam of 3.5 – 15 keV energy // *Proceedings of 18th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”*, Ekaterinburg, Russia, pp.31-32. June 20–25, 2011, pp.35-36.
15. M.M. Zverev, N.A. Gamov, E.V. Zdanova, V.B. Studionov, D.V. Peregoudov, S.V. Ivanov, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Gronin, P.S. Kop'ev. On a possibility to reduce the electron beam energy used for pumping of ZnSe-based green laser heterostructures // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM'2010)*, pp.19-22, Sevastopol, Crimea, Ukraine, September 12-14, 2010.



16. М.М. Зверев, В.О. Вальднер, Н.А. Гамов, Р.В. Есин, С.И. Гронин, Е.В. Жданова, С.В. Иванов, П.С. Копьев, Д.В. Перегудов, И.В. Седова, С.В. Сорокин, В.Б. Студенов. Влияние нелинейных эффектов на процессы разрушения активных элементов лазеров с электронно-лучевой накачкой на основе ZnSe – содержащих квантоворазмерных структур // Оптика и спектроскопия. – 2011. - 111 (2). - с.208–211.

17. Зверев М.М., Вальднер В.О., Жданова Е.В., Гамов Н.А., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Перегудов Д.В., Студенов В.Б. Катастрофическая деградация импульсных лазеров на основе гетероструктур AlGaAs/ InGaAs/GaAs с электронно-лучевой накачкой // Оптика и спектроскопия. – 2013. – 114 (6). - с. 923–925.

18. M. M. Zverev, S. V. Ivanov, N. A. Gamov, E. V. Zdanova, V. B. Studionov, D. V. Peregoudov, I. V. Sedova, S. V. Gronin, S. V. Sorokin, P. S. Kop'ev, I. M. Olikhov. Green electron-beam pumped laser arrays based on II–VI nanostructures // Phys. Status Solidi B. – 2010. - 247, No. 6. –p. 1561–1563.

19. M.M. Zverev, N.A. Gamov, E.V. Zhdanova, D.V. Peregoudov, V.B. Studionov, S.V. Gronin, I.V. Sedova, S.V. Sorokin, S.V. Ivanov. Pulsed electron beam pumped laser based on ZnCdSe MQW structure with high threshold of catastrophic degradation // Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference Laser Optics, LO 2014, 30 June-4 July 2014, St-Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/LO.2014.6886304.