

# Лазер с внешним резонатором, работающий на длине волны 625 нм при оптической накачке наноструктуры InGaP/AlGaInP с брэгговским зеркалом\*

В.И.Козловский, Б.М.Лаврушин, Я.К.Скасырский, М.Д.Тибери

*Импульсный режим генерации в резонаторе с внешним зеркалом реализован при накачке многослойной квантоворазмерной структуры InGaP/AlGaInP с брэгговским зеркалом AlAs/AlGaAs второй гармоникой ( $\lambda = 532$  нм) Nd:YAG-лазера с диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора. Получена генерация основной поперечной моды ( $TEM_{00}$ ) резонатора на длине волны 625 нм. Импульсная мощность генерируемого пучка достигала 3.1 Вт, а расходимость – дифракционного предела 10–12 мрад при длительности импульса 5 нс и частоте повторения 6 кГц.*

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, внешний резонатор, GaInP/AlGaInP-наноструктура, оптическая накачка.

## 1. Введение

Объектом исследований, выполненных в данной работе, является лазер, который согласно принятой в настоящее время терминологии называется полупроводниковым лазером с внешним резонатором (VECSEL) или полупроводниковым дисковым лазером (extended cavity surface-emitting semiconductor laser). Оптический резонатор такого лазера (рис. 1) состоит из полупроводниковой многослойной квантоворазмерной структуры (МКС), которая обеспечивает оптическое усиление при оптической (или другой) накачке, и двух зеркал резонатора: плоского (31) и сферического (32). Такой лазер представляет интерес для многих практических применений [1, 2] благодаря возможности получения большой мощности излучения и высокой эффективности преобразования энергии накачки в свет, присущей полупроводниковым лазерам, в сочетании с высоким качеством генерируемого светового пучка, присущим лазерам с внешним резонатором. Последнее заключается в достижении дифракционного предела расходимости основной поперечной моды резонатора ( $TEM_{00}$ ), в которой сосредоточена практически вся мощность генерируемого пучка. Кроме того, протяжённый резонатор длиной 50–100 мм открывает возможность эффективного внутрирезонаторного преобразования генерируемого пучка во вторую гармонику.

Впервые потенциальные возможности VECSEL продемонстрировали авторы [3], получив мощность излучения 0.52 Вт в  $TEM_{00}$ -моду на  $\lambda = 1004$  нм в непрерывном режиме генерации. В качестве активной среды они использовали МКС InGaAs/AlGaAs с диодной накачкой

\*Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

**В.И.Козловский, Б.М.Лаврушин, Я.К.Скасырский.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: blavr@sci.lebedev.ru, yans@sci.lebedev.ru  
**М.Д.Тибери.** Principia Light Works Inc., 6455 Independence Ave., Woodland Hills, CA 91367, USA

Поступила в редакцию 28 января 2009 г., после доработки – 12 мая 2009 г.

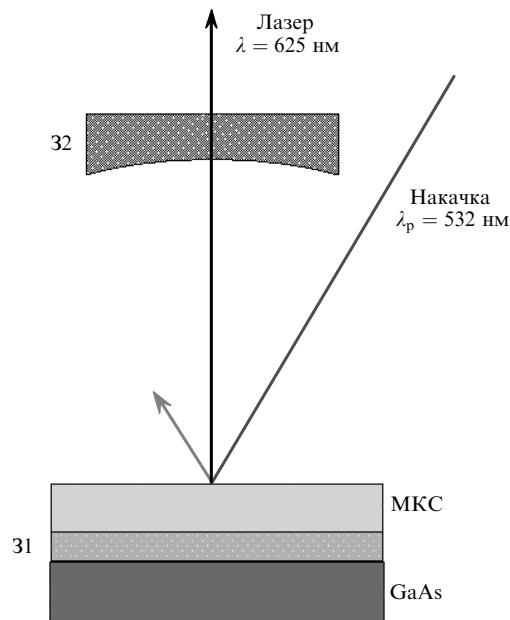


Рис. 1. Оптическая схема лазера с внешним резонатором.

( $\lambda_p = 808$  нм), а в качестве глухого зеркала – брэгговское зеркало AlAs/GaAs. В дальнейшем (см., напр., [4–6]) была продемонстрирована возможность значительного увеличения мощности лазера при сохранении высокого качества генерируемого светового пучка.

Преобразование генерируемого светового пучка во вторую гармонику реализовано во многих работах; было получено излучение в красной, зелёной, синей и УФ областях спектра [6–8]. Так, авторы работы [8] использовали МКС InGaP/InGaAlP с непрерывной накачкой второй гармоникой Nd-лазера ( $\lambda_p = 532$  нм) и брэгговское зеркало AlGaAs/GaAs и получили мощность 1.1 Вт на  $\lambda = 675$  нм. Внутрирезонаторное преобразование этого светового пучка во вторую гармонику позволило получить УФ излучение на длине волны 337 нм мощностью 120 мВт.

Математическая модель VECSEL предложена в работе [9], которая содержит также обзор основных резуль-

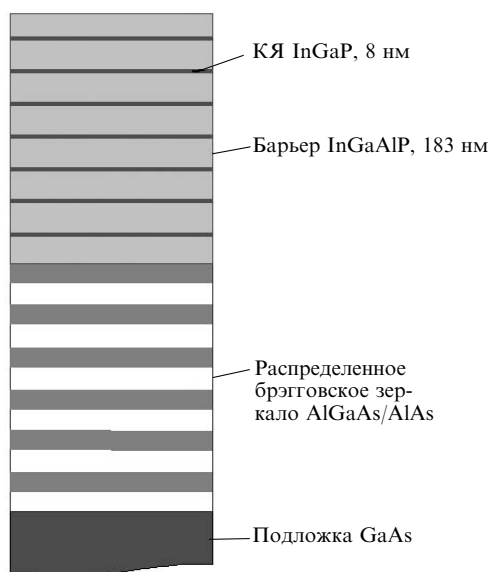


Рис.2. Схема наноструктуры.

татов экспериментальных исследований этого лазера, выполненных до 2006 г. Обзор дальнейших исследований можно найти в статье [6].

В настоящей работе представлены результаты исследования VECSEL, в котором так же, как и в лазере [8], активной средой является МКС InGaP/InGaAlP, а распределенным брэгговским зеркалом – многослойная структура AlGaAs/AlAs. В отличие от [8] мы использовали другой состав твердых растворов InGaP в квантовых ямах и InGaAlP в барьерах и получили генерацию на длине волны 625 нм, что является шагом вперед в решении задачи создания полупроводниковых дисковых лазеров в диапазоне длин волн короче 635 нм [6]. Кроме того, мы использовали импульсную накачку второй гармоники Nd-лазера ( $\lambda_p = 532$  нм). Импульсный режим работы представляет интерес по крайней мере на этапе изучения свойств лазера, т.к. позволяет избавиться от ограничений, обусловленных нагревом активной среды лазера, и открывает возможности увеличения мощности генерируемого лазерного пучка и эффективности его преобразования во вторую гармонику. Кроме того, он позволяет получить важную информацию о динамике переходного процесса нарастания поля в резонаторе, когда модовое усиление может быть значительно больше, чем в стационарном режиме генерации.

## 2. Эксперимент

Многослойное брэгговское зеркало AlGaAs/AlAs и квантоворазмерная структура InGaP/InGaAlP были выращены на подложке GaAs в едином технологическом процессе MOCVD. Расчётный коэффициент отражения на границе с InGaAlP составил не менее 99.8 % на  $\lambda = 625$  нм. МКС (рис.2) представляет собой периодическую последовательность квантовых ям (КЯ) InGaP толщиной 8 нм и широкозонных барьеров InGaAlP толщиной 183 нм. Период (191 нм) подобран так, чтобы он совпадал с длиной волны (в среде InGaAlP) генерации лазера и все КЯ могли располагаться вблизи пучностей стоячей волны резонатора. Общая толщина МКС – около 5 мкм (26 периодов по 191 нм).

Выходное зеркало резонатора 32 – стеклянный диск с радиусом кривизны сферической поверхности 50 мм и с отражающим покрытием – имело на  $\lambda = 625$  нм коэффициент отражения 98.5 %. Длина резонатора  $L$  варьировалась в пределах  $\pm 10$  % вблизи 45 мм, при этом расчётное значение диаметра TEM<sub>00</sub>-моды резонатора (по уровню 1/e интенсивности поля на оси резонатора) на поверхности МКС составляла 75 мкм.

Для накачки МКС использовалась вторая гармоника Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазера с диодной накачкой и модуляцией добротности резонатора акустооптическим затвором [10]. На длине волны 532 нм длительность импульса излучения составляла 10–20 нс в зависимости от уровня накачки Nd-лазера, частота следования импульсов могла регулироваться от 2 до 20 кГц. Угол падения пучка накачки на поверхность МКС был около 30°, размер пятна – 75–100 мкм.

Для регистрации формы импульса, а также мощности накачки и генерируемого пучка использовались коаксиальные вакуумные фотоэлементы ФЭК 29, ФЭК 22 и цифровой осциллограф TDK 5054B, которые обеспечивали точность измерений не хуже 1 нс по времени и  $\pm 30$  % по абсолютной мощности.

Следует отметить, что время жизни фотона в резонаторе  $\tau_{ph}$ , обусловленное потерями на излучение, при указанных коэффициентах отражения зеркал составляет  $\sim 20$  нс. Следовательно, в рассматриваемом лазере заведомо не выполняются условия квазистационарного режима генерации. В этом случае усиление может значительно превышать потери резонатора, и а priori не ясно, какова будет динамика нарастания интенсивности поперечных мод резонатора и будет ли доминирующей TEM<sub>00</sub>-мода.

## 3. Результаты

Визуальные наблюдения засветки экрана в дальней зоне показывают, что красное излучение становится заметным при мощности накачки около 40 Вт. При увеличении мощности накачки вплоть до 500 Вт яркость излучения монотонно растёт, а форма его – круглое пятно, характерное для гауссова пучка с шириной угла диаграммы направленности 10–12 мрад, – остаётся неизменной. Последняя соответствует TEM<sub>00</sub>-моду резонатора с шириной диаграммы направленности 7.5 мрад (с учетом преломления в подложке выходного зеркала резонатора). Более сложная форма пятна засветки наблюдалась при недостаточно точной юстировке внешнего зеркала резонатора, значительной асимметрии или неоднородности пятна накачки, а также в случае какого-либо локального дефекта на поверхности МКС. Однако с помощью более точной юстировки оптических элементов лазера или параллельного сдвига МКС всегда можно было обеспечить генерацию на основной моде резонатора (рис.3).

Спектр генерируемого излучения состоит из одной линии на длине волны 625 нм шириной не более 0.5 нм. При аппаратном разрешении 0.5 нм по длине волны и 1/200 по относительной интенсивности никаких структурных особенностей спектра не обнаружено.

Динамика генерации иллюстрируется рис.4, на котором показаны осциллограммы импульсов накачки и генерируемого излучения при разных мощностях накачки. Погрешность синхронизации импульсов накачки и гене-



Рис.3. Фотография действующего макета лазера.

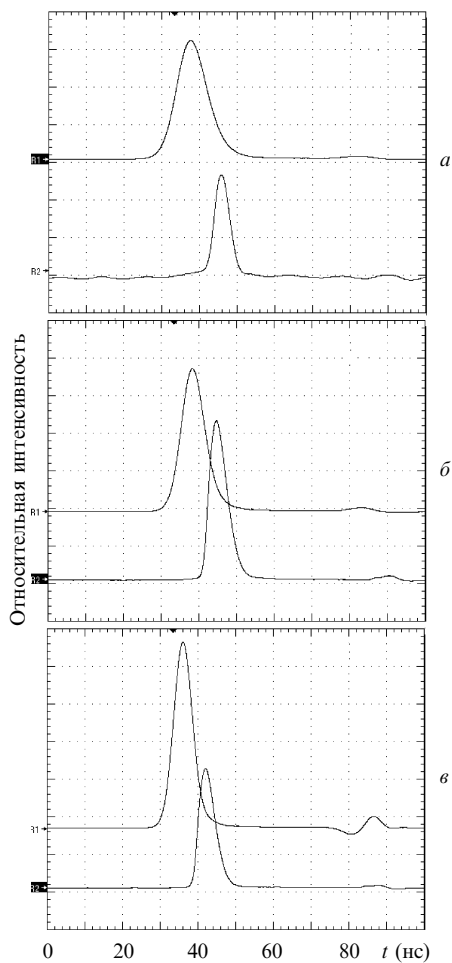


Рис.4. Осциллограммы импульсов мощности накачки (верхняя линия) и генерируемого пучка (нижняя линия) при амплитуде импульса накачки 70 (*a*), 200 (*б*) и 440 Вт (*в*).

рируемого пучка не превышает 1 нс. Красное излучение возникает на заднем фронте импульса накачки. При увеличении мощности накачки от 70 до 440 Вт задержка импульса генерации относительно импульса накачки уменьшается от 8 до 6 нс, а его длительность практически не изменяется и составляет  $\sim 5$  нс, что существенно меньше времени жизни фотона в резонаторе (20 нс).

На рис.5 показана зависимость мощности генерируемого пучка от мощности накачки при частоте следования импульсов 6 кГц. Экспериментальные точки – это результат автоматического усреднения амплитуды импульсов за время около 0.1 с (примерно 500 импульсов), а указанные погрешности по вертикали дают среднеквадратичное отклонение амплитуды импульса генерации от среднего значения. Проведенная кривая – субъективная аппроксимация этих точек. Разброс экспериментальных точек относительно кривой является следствием долго-

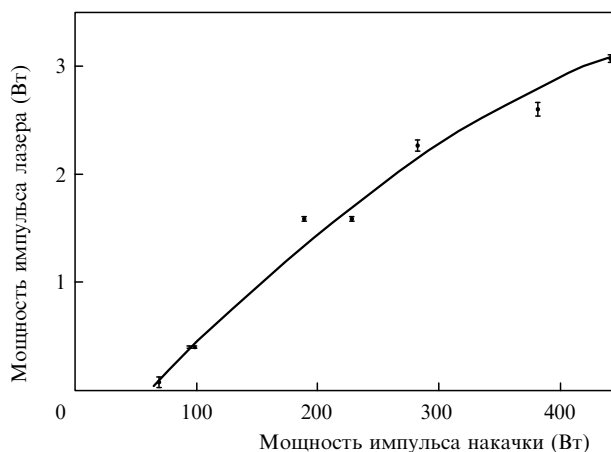


Рис.5. Зависимость мощности генерируемого пучка от мощности накачки при частоте следования импульсов 6 кГц.

временной (за несколько минут) нестабильности амплитуды импульсов накачки.

Импульсная мощность генерируемого пучка при накачке 440 Вт достигает 3.1 Вт, а дифференциальная эффективность монотонно уменьшается от 1.2 % на начальном участке характеристики до 0.5 % при максимальной накачке.

#### 4. Обсуждение результатов

Отличительной особенностью полупроводникового лазера с внешним резонатором по сравнению с другими твердотельными лазерами является малое время жизни возбуждённого состояния. Типичное значение времени жизни электронно-дырочной пары в полупроводниках (1 нс) значительно меньше  $\tau_{ph}$  в рассматриваемом резонаторе (20 нс). Расчёт показывает, что максимальное усиление за один проход резонатора  $G \approx 0.25$ . При изотропном спонтанном излучении МКС только  $10^{-6}$  часть излучаемых фотонов попадает в ТЕМ<sub>00</sub>-моду. Кроме того,  $\sim 10^{-2}$  часть фотонов исходного спонтанного спектра приходится на ширину линии генерации. При квазистационарной генерации доля фотонов, излучаемых в узкую спектральную линию ТЕМ<sub>00</sub>-моды, достигнет единицы за  $N$  проходов резонатора, где  $N$  определяется выражением  $\exp(GN) = 10^8$ . Следовательно, время  $t_1$  установления генерации должно быть равным  $2LN/c$ , т. е.  $t_1 \approx 20$  нс при  $L = 4.5$  см. Реальное значение  $t_1$  может оказаться ещё большим, т. к. усиление  $G$  может быть меньше 0.25.

Экспериментально измеренная задержка импульса генерации относительно импульса накачки (6–8 нс) меньше  $t_1$ , таким образом, мы имеем дело с неустановившимся режимом генерации. В течение времени от начала импульса накачки до  $t_1$  значительная часть мощности накачки расходуется на спонтанное излучение, что является одной из причин низкой эффективности лазера. Другой причиной, вероятно, являются большие внутренние потери резонатора. Действительно, время затухания лазерного импульса (4 нс) существенно меньше  $\tau_{ph} = 20$  нс. Поглощение внутри резонатора может быть обусловлено неоднородной накачкой КЯ из-за неоптимального поглощения накачки в барьерных слоях.

Одна из причин нелинейности выходной характеристики лазера (рис.5) – сокращение длительности импульса накачки при увеличении его амплитуды. Сокращение импульса накачки при неизменном времени задержки лазерного импульса приводит к сдвигу лазерного импульса в область спада мощности накачки и, следовательно, к дополнительному уменьшению эффективности лазера.

Достаточно хорошая селекция поперечных мод резонатора была достигнута благодаря тщательному согласованию размера пятна накачки с диаметром ТЕМ<sub>00</sub>-моды.

Представленная здесь качественная интерпретация экспериментальных данных подтверждается численными расчётами в рамках математической модели [9].

#### 5. Заключение

При импульсной накачке МКС InGaP/AlGaInP получена генерация на длине волны 625 нм мощностью 3 Вт. Показано, что реализуется генерация основной поперечной моды резонатора при дифракционном пределе расходимости. Полученные результаты открывают благоприятные возможности увеличения мощности лазера при оптимизации добротности резонатора и генерации УФ излучения ( $\sim 312.5$  нм) путём внутрирезонаторного преобразования основной моды во вторую гармонику\*.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 07-02-01139, 08-02-00796), гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (грант № НШ-3168.2008.02), Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур» и компании Principia LightWorks Inc. (США).

1. Shchegrov A.V., Watson J.P., Lee D., Umbrasas A., Hallstein S., Carey G.P., Hitchens W.R., Scholz K., Cantos B.D., Niven G., Jansen M., Pelaprat J.-M., Mooradian A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5737**, 113 (2005).
2. Watson J.P., Shchegrov A.V., Umbrasas A., Lee D., Amsden C.A., Ha W., Garey G.P., Doan V.V., Lewis A., Mooradian A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5364**, 116 (2003).
3. Kuznetsov M., Hakimi F., Sprague R., Mooradian A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 1063 (1997).
4. Harkonen A., Suomalainen S., Saarinen E., Orsila L., Koskinen R., Okhotnikov O., Calves S., Dawson M. *Electron. Lett.*, **42**, 693 (2006).
5. Chilla J., Butterworth S., Zeitchel A., Charles J., Caprara A., Reed M., Spinelli L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5332**, 143 (2004).
6. Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **38** (12), 1083 (2008).
7. Lutgen S., Kühnelt M., Steegmüller U., Brick P., Albrecht T., Reill W., Luft J., Späth W., Kunert B., Reinhard S., Volz K., Stolz W., in *Advanced Solid-State Photonics, Techn. Dig.* (OSA, 2005, paper MB23).
8. Hastie J.E., Morton L.G., Kemp A.J., Dawson M.D., Krysa A.B., Roberts J.S. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 061114 (2006).
9. Tropper A.C., Hoogland S. *Progress Quantum Electron.*, **30**, 1 (2006).
10. Безотосный В.В., Глущенко Н.Ф., Залевский И.Д., Попов Ю.М., Семенов В.П., Чешев Е.А. *Квантовая электроника*, **35**, 507 (2005).

\*Новые результаты, полученные до мая 2009 г., и в частности внутрирезонаторное преобразование поля основной поперечной моды на длине волны 625 нм во вторую гармонику (312.5 нм), представлены на 7-м Белорусско-Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», 1–5 июня 2009 г., Минск, Белоруссия. (Добавление авторов при корректуре.)