

# Полупроводниковый лазер с туннельным $p-n$ -переходом и выходом излучения через подложку

© Д.А. Колпаков\*<sup>¶</sup>, Б.Н. Звонков\*, С.М. Некоркин\*, Н.В. Дикарева\*, В.Я. Алешкин<sup>+</sup>, А.А. Дубинов<sup>+</sup>

\* Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>+</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, Россия

<sup>¶</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Впервые реализован многоямный межзонный каскадный лазер с туннельным переходом внутри единого волновода и выходом излучения через подложку. Показано, что в лазерной гетероструктуре такой конструкции происходит более эффективное заполнение квантовых ям по сравнению с традиционным многоямным лазером с выходом излучения через подложку, за счет чего достигается существенное снижение порога генерации.

## 1. Введение

Гетеролазеры с увеличенной активной областью и выходом излучения через подложку уже продемонстрировали высокие энергетические параметры и значительно улучшенные пространственные характеристики [1–3]. Однако в ходе исследования таких лазеров с большим количеством квантовых ям (КЯ), необходимых для эффективной генерации [4], была отмечена неоднородность заполнения носителями тока КЯ, и можно предположить, что при малых токах, когда наблюдается спонтанная люминесценция, в основном заполнены носителями тока крайние КЯ [5,6]. В результате лазерная генерация возникает при больших импульсных токах накачки, значения которых составляют 7 А и выше [5]. Кроме того, неоднородность возбуждения КЯ растет с увеличением тока инжекции и приводит к снижению мощности генерации по сравнению с однородным возбуждением [4].

В этом отношении весьма перспективной может стать конструкция гетеролазеров с туннельным переходом, разделяющим две активные области, расположенные в одном и том же волноводе. Такая конструкция может позволить добиться более равномерного заполнения КЯ (за счет снижения их числа вдвое в каждом каскаде) и, как следствие, соблюдения условий генерации при меньших токах накачки. Отметим, что ранее исследовались как межзонные двухкаскадные лазеры с отдельными оптическими резонаторами для каждого каскада [7,8], так и лазеры с выходом излучения через подложку [9], но предложенная нами конструкция гетеролазера реализована впервые. Исследуемые в данной работе образцы межзонных каскадных лазеров с туннельным  $p-n$ -переходом и выходом излучения через подложку показали значительно меньшие значения порогового тока по сравнению с многоямными гетеролазерами с выходом

излучения через подложку, не содержащими туннельный переход.

## 2. Конструкция структуры и работа в допороговом режиме

Конструктивные особенности межзонного каскадного лазера с туннельным переходом внутри единого волновода приводят к улучшению условий генерации. По сравнению с аналогичными лазерами с выходом через подложку, но не содержащими туннельный  $p-n$ -переход, локализация основной волноводной моды относительно КЯ в исследуемой структуре позволяет повысить значение фактора оптического ограничения за счет их более полного перекрытия. Параметры структуры подобраны таким образом, чтобы положение максимумов основной волноводной моды соответствовало положению КЯ, а в месте расположения сильно легированных слоев туннельного  $p-n$ -перехода плотность излучения была небольшой (см. рис. 1).

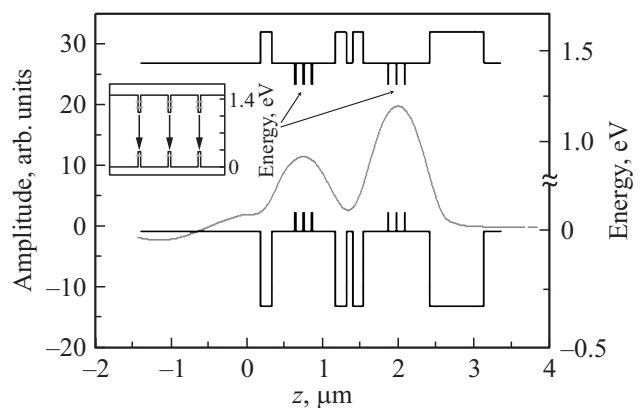


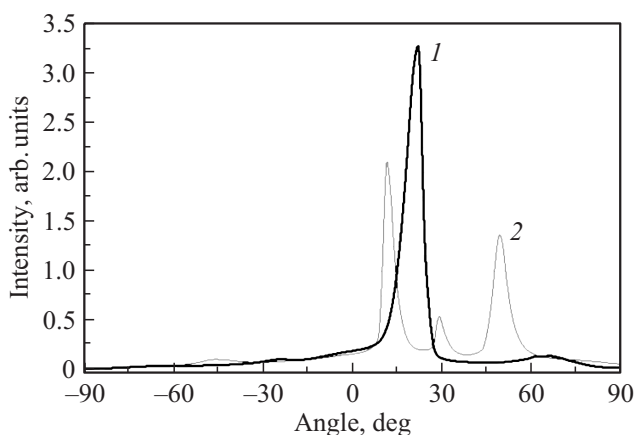
Рис. 1. Зонная диаграмма и рассчитанное продольное распределение электрического поля основной моды. На вставке — рабочие переходы в квантовых ямах InGaAs.

<sup>¶</sup> E-mail: kolpdm@gmail.com

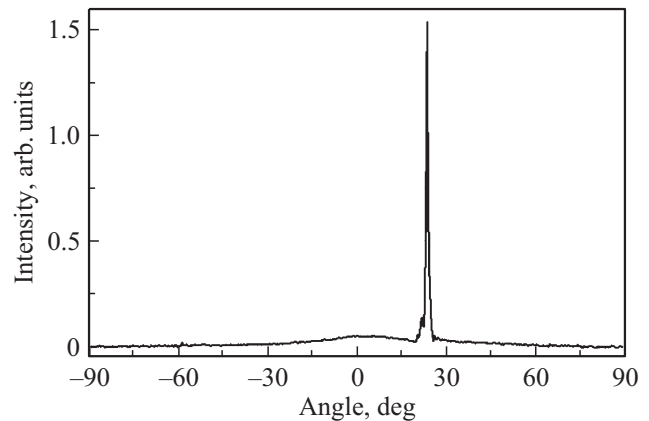
Исследуемые в данной работе полосковые лазеры были созданы на основе многоямной гетероструктуры, содержащей две активные области, разделенные  $p-n$ -переходом (см. рис. 1), которая была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Из выращенных лазерных гетероструктур были изготовлены лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм и длинами резонаторов 0.45, 0.7, 0.8 и 1 мм. На излучающие грани лазерных чипов с длинами резонаторов 0.45, 0.7 и 1 мм были напылены просветляющие и отражающие покрытия с коэффициентами отражения 5 и 95% соответственно.

Конструкция исследуемой гетероструктуры способствует модовой селекции в допороговом режиме работы за счет увеличения потерь на вытекание у возбужденных мод по сравнению с основной. На рис. 2 приведены типичные диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу в допороговом режиме при постоянной токовой накачке 200 мА. Диаграмма направленности излучения в допороговом режиме работы свидетельствует об отсутствии значительной модовой конкуренции, которая наблюдается у многоямных лазеров с вытеканием излучения через подложку [5]. Из рисунка видно, что по сравнению с такими лазерами, исследуемые образцы показывают ярко выраженное формирование лишь основной моды.

Кроме того, вывод излучения через подложку позволяет существенно сузить диаграмму направленности в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу. В лазерах без выхода излучения через подложку, но содержащих туннельный переход внутри единого волновода [10], такая особенность приводит к уширению диаграммы направленности: эффективная ширина волноводной моды 1-го порядка составляет около  $120^\circ$  [11]. Вывод излучения через подложку позволяет существенно оптимизировать данный параметр — излучение из активной



**Рис. 2.** Диаграмма направленности излучения в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу в допороговом режиме работы, для межзонного каскадного лазера с туннельным переходом и выходом излучения через подложку (1), и для аналогичного лазера с выходом излучения через подложку без туннельного перехода (2) при постоянной токовой накачке 200 мА.



**Рис. 3.** Диаграмма направленности излучения лазера в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу при импульсной накачке (ток 10 А,  $t = 180$  нс,  $f = 1.43$  кГц).

области туннелирует в подложку под одним углом, в результате чего достигается узконаправленность излучения в дальнем поле в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу.

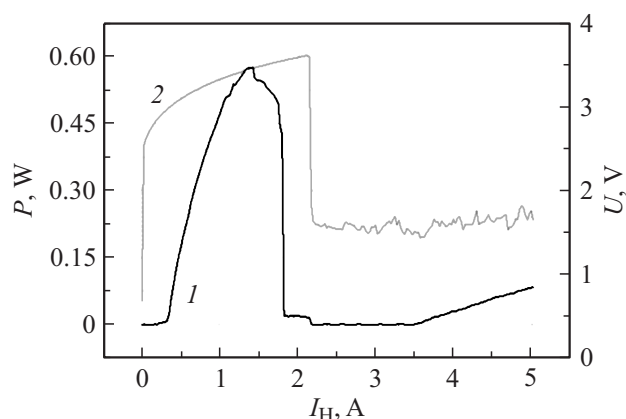
### 3. Генерация и диаграмма направленности

Вследствие более равномерного заполнения КЯ у межзонных каскадных лазеров исследуемой конструкции наблюдаются низкие значения порогового тока, а также происходит генерация в непрерывном режиме. В нашем случае пороговые токи генерации для образцов с длинами резонаторов 0.45 и 0.8 мм составили 350 и 700 мА соответственно. Наблюдается устойчивая лазерная генерация в импульсном режиме (длительность импульса  $t = 180$  нс, частота повторения  $f = 1.43$  кГц), максимальная зарегистрированная выходная оптическая мощность при этом составила 20 Вт. Квантовая эффективность образцов на основе исследуемой гетероструктуры возрастает с уменьшением длины резонатора: для образцов с длинами резонаторов 1 и 0.7 мм значения квантовой эффективности соответственно составили 25.6 и 44.5% при токе накачки 15 А.

Отмечено сужение диаграммы направленности в импульсном режиме работы лазера вплоть до значения ширины пика на полувысоте  $2.5^\circ$  при токе накачки 10 А. Диаграмма направленности в импульсном режиме работы для исследуемых лазеров представлена на рис. 3, и положение основного пика хорошо совпадает с положением основного пика, вычисленного в приближении [12] для основной моды (рис. 1).

### 4. Деградация в непрерывном режиме

При исследовании образцов на основе этой структуры было обнаружено, что образцы с длинами резонатора 0.45 и 0.7 мм демонстрируют лазерную генерацию и



**Рис. 4.** Ватт-амперная (1) и вольт-амперная (2) характеристики исследуемой структуры при непрерывном режиме накачки.

в непрерывном режиме. Максимальная зарегистрированная выходная оптическая мощность составила 0.6 Вт при постоянной накачке 1.2 А (рис. 4)

Отмечено, что в постоянном режиме работы при достижении током накачки значения 2.1 А происходит токовая деградация: шунтируется один из каскадов лазера, что подтверждается соответствующим изменением вольт-амперной характеристики (напряжение отсечки падает вдвое), а также падением выходной оптической мощности (рис. 4). После деградации, при достижении током накачки значения в 3.5 А наблюдается генерация в оставшемся каскаде, но мощность излучения в этом случае уже на порядок ниже. Этот факт свидетельствует о разрушении туннельного  $p-n$ -перехода в результате перегрева активной области при постоянной токовой накачке.

## 5. Заключение

Впервые реализован многоямный межзонный каскадный лазер с туннельным переходом внутри единого волновода и выходом излучения через подложку. Данные гетеролазеры демонстрируют генерацию как в импульсном режиме (20 Вт), так и в непрерывном (0.6 Вт) режиме накачки. Достигнуто сужение диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу ( $2.5^\circ$ ), а также существенно снижен пороговый ток (350 мА при длине резонатора 0.45 мм).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-02-97062р\_поволжье\_а, 14-02-31287мол\_а) и Минобрнауки России (государственное задание 3.285.2014/К).

## Список литературы

[1] С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Д.А. Винокуров, А.Д. Бондарев, В.А. Капитонов, Н.А. Пихтин, П.С. Копьев, И.С. Тарасов. ФТП, **47** (8), 1082 (2013).

[2] В.Я. Алешкин, Т.С. Бабушкина, А.А. Бирюков, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, С.М. Некоркин. Квант. электрон., **40** (10), 855 (2010).  
 [3] С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, Н.В. Дикарева, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов. Вестн. ННГУ, **1** (1), 30 (2012).  
 [4] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, В.Я. Алешкин. Квант. электрон., **43** (11), 999 (2013).  
 [5] С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, Н.В. Дикарева, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов. Квант. электрон., **42** (10), 931 (2012).  
 [6] А.А. Бирюков, С.М. Некоркин, М.Н. Колесников, Т.С. Бабушкина, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов. ЖТФ, **81** (7) 149 (2011).  
 [7] J.P. van der Ziel, W.T. Tsang. Appl. Phys. Lett., **41**, 499 (1982).  
 [8] J.K. Kim, E. Hall, O. Sjolung, L.A. Coldren. Appl. Phys. Lett., **74**, 3251 (1999).  
 [9] D.C. Scifres, W. Streifer, R.D. Burnham. Appl. Phys. Lett., **29**, 23 (1977).  
 [10] А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, П.Б. Демина, Н.Н. Семенов, В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, А.А. Дубинов, К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, А.А. Белянин, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский. ФТП, **41** (10), 1226 (2007).  
 [11] В.Я. Алешкин, Т.С. Бабушкина, А.А. Бирюков, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, С.М. Некоркин. ФТП, **45** (5), 652 (2011).  
 [12] Х. Кейси, М. Паниш. Лазеры на гетероструктурах (М., Мир, 1981).

Редактор А.Н. Смирнов

## Semiconductor laser with a tunnel $p-n$ -junction with radiation coupling out through the substrate

D.A. Kolpakov\*, B.N. Zvonkov\*, S.M. Nekorkin\*, N.V. Dikareva\*, V.Y. Aleshkin<sup>+•</sup>, A.A. Dubinov<sup>+•</sup>

\* Physicotechnical Research Institute, Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

+ Institute for Physics of Microstructures Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

• Nizhny Novgorod State University, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The multi quantum well interband two-cascade laser with a tunnel  $p-n$ -junction within a single waveguide and the output radiation through the substrate is developed. In the paper it is shown, that such a construction of a laser heterostructure provides more efficient fulfilling of the quantum wells compared with conventional multi quantum well laser with output radiation through the substrate, which helps to lower the generation threshold.