

Влияние *p*-легирования активной области на температурную стабильность характеристик лазеров на InAs/GaAs-квантовых точках

© И.И. Новиков[¶], Н.Ю. Гордеев, Л.Я. Карачинский, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, А.Р. Ковш*, И.Л. Крестников*, А.В. Кожухов*, С.С. Михрин*, Н.Н. Леденцов*

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

* NL Nanosemiconductor GmbH,
44227 Dortmund, Germany

(Получена 6 сентября 2004 г. Принята к печати 17 сентября 2004 г.)

Проведено детальное исследование влияния легирования активной области длинноволновых лазеров на InAs–GaAs-квантовых точках акцепторной примесью на их характеристики. Показано, что увеличение степени легирования приводит к росту характеристической температуры и увеличению диапазона температурной стабильности пороговой плотности тока. В лазере со степенью легирования порядка $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ акцепторов на одну плоскость квантовых точек продемонстрирована характеристическая температура 1200 К в диапазоне температур 15–75°C, а также постоянное значение дифференциальной квантовой эффективности в диапазоне температур 15–65°C. Для оптимизированной структуры максимальная достигнутая выходная мощность в непрерывном режиме составила 4.4 Вт.

1. Введение

Полупроводниковые лазеры на основе квантовых точек (КТ) являются объектом интенсивных исследований благодаря возможности достижения лазерами с КТ основных приборных характеристик (пороговая плотность тока, ее температурная стабильность, дифференциальная квантовая эффективность, фактор уширения линии и др.), значительно превосходящих аналогичные характеристики лазеров на квантовых ямах. Сверхвысокая температурная стабильность пороговой плотности тока была предсказана в одной из первых теоретических работ, посвященных лазерам на квантовых точках [1], и в значительной степени мотивировала интерес к их созданию и исследованию. В то же время более детальное рассмотрение показало, что полное отсутствие температурной зависимости пороговой плотности тока может быть реализовано только в идеальном случае, когда весь ток инжекции расходуется на излучательную рекомбинацию в КТ [2]. В реальных лазерах на квантовых точках имеется ряд факторов, обуславливающих температурную зависимость пороговой плотности тока:

— неизбежное существование температурно-зависимых компонент пороговой плотности тока, связанных с излучательной и безызлучательной рекомбинацией носителей в волноводе [2];

— температурно-зависимое заселение возбужденных электронных и дырочных состояний и рекомбинация через данные состояния;

— неоднородное уширение ансамбля квантовых точек. При высоких температурах носители, находящиеся в точках, не участвующих в лазерной генерации, находятся в квазиравновесии с точками, дающими вклад в лазерную генерацию. Компонента порогового тока, связанная с заселением точек, не участвующих в генерации, зависит от температуры [3];

— эффект нарушения зарядовой нейтральности приводит к температурной зависимости компоненты порогового тока, связанной с генерацией в квантовых точках [4];

— температурная зависимость поглощения на свободных носителях.

Вследствие данных эффектов температурная стабильность пороговой плотности тока зависит как от характеристик массива квантовых точек, так и других параметров лазерной структуры и может быть как высокой, так и низкой. Успехи в технологии выращивания КТ [5] позволили получить массивы квантовых точек, обладающих малым разбросом по размерам и высокой степенью локализации основного состояния электронов и дырок относительно возбужденных состояний и состояний широкозонной матрицы (материала волновода). Была достигнута характеристическая температура 170 К в диапазоне температур 10–65°C [6]. Для повышения температурной стабильности лазеров на КТ были предложены такие подходы как туннельная инжекция носителей в КТ [3], а также легирование активной области акцепторной примесью.

Использование легирования активной области для улучшения характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых ямах исследовалось теоретически в работе [7]. Было показано, что *n*-легирование способствует уменьшению тока прозрачности [7], в то время как *p*-легирование увеличивает максимальное усиление. Высокая характеристическая температура ($T_0 = 230 \text{ К}$ в диапазоне температур от 0 до 80°C) была недавно продемонстрирована в лазерах на квантовых точках с *p*-легированной активной областью [8]. Однако легирование активной области привело к значительному падению дифференциальной квантовой эффективности, которая составила менее 20%.

Таким образом, для достижения высокой характеристической температуры при сохранении достаточно

[¶] E-mail: novikov@switch.ioffe.ru

большой дифференциальной квантовой эффективности необходима оптимизация степени легирования лазерной структуры.

В настоящей работе представлено детальное исследование влияния легирования активной области на пороговую плотность тока лазеров на КТ, ее температурную стабильность, дифференциальную квантовую эффективность и внутренние оптические потери.

2. Эксперимент

Исследуемые лазерные структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в геометрии раздельного ограничения носителей заряда и световой волны. Были выращены три структуры, одна с нелегированной активной областью („нелегированная“ структура) и две структуры с различной степенью легирования активной области („умеренно легированная“ и „сильно легированная“). Ширина волновода составляла 0.4 мкм. Эмиттерные слои AlGaAs толщиной 1.5 мкм с эффективным содержанием алюминия 35% легировались Si и С для достижения концентрации электронов и дырок на уровне 10^{18} см^{-3} . Активная область лазерных структур состояла из 10 рядов квантовых точек InAs, разделенных слоями GaAs толщиной 30 нм (в дальнейшем „спейсерные слои“). КТ были сформированы методом активированного распада раствора InGaAs [9]. Центральная часть каждого „спейсерного слоя“ толщиной 10 нм легировалась акцепторной примесью (углеродом), при этом уровень легирования составлял $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ акцепторов на одну плоскость КТ для умеренно легированной и $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для сильно легированной структур. Все три структуры излучали в диапазоне длин волн 1.28–1.285 мкм.

Из выращенных структур были изготовлены лазеры полосковой конструкции с шириной полоска 100 мкм в геометрии мелкой мезы с длиной резонатора в пределах 0.5–4 мм. На зеркала резонатора, полученные скалыванием, просветляющие и отражающие покрытия не наносились. Образцы напаивались на медный теплоотвод *p*-контактом вниз при помощи индиевого припоя. Приборные характеристики исследовались в температурном диапазоне 15–150°С при возбуждении импульсами тока (длительность 300 нс, частота 1 кГц).

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлена зависимость пороговой плотности тока от потерь на выход излучения. Нелегированная структура продемонстрировала самое низкое значение пороговой плотности тока 110 А/см^2 (лазер с длиной резонатора 2 мм), в то время как умеренно легированная и сильно легированная лазерные структуры показали значение пороговой плотности тока 233 и 380 А/см^2 соответственно для лазеров той же длины.

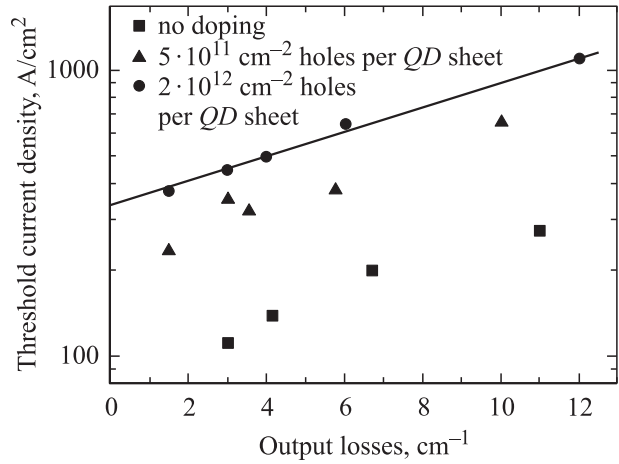


Рис. 1. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} от потерь на выход излучения для всех трех гетероструктур.

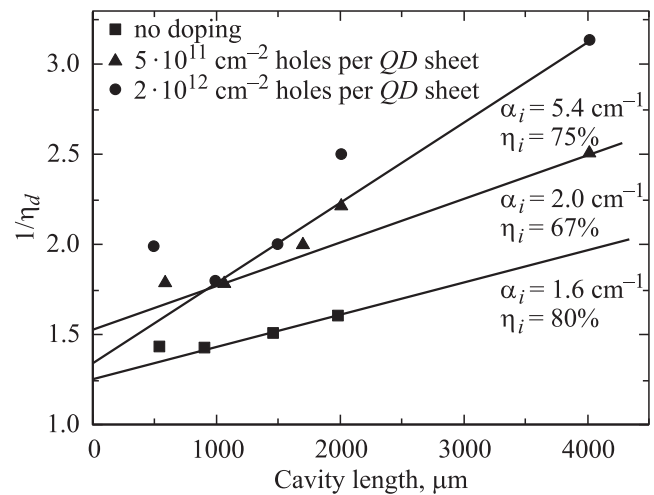


Рис. 2. Зависимость обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора для всех трех гетероструктур.

На рис. 2 представлена зависимость обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора для всех трех структур. Данная зависимость позволила оценить внутренние оптические потери и внутреннюю эффективность стимулированного излучения. Видно, что нелегированная структура имеет самые низкие внутренние потери 1.6 см^{-1} и высокую внутреннюю квантовую эффективность около 80%, в то же время потери в легированных структурах растут с ростом степени легирования и составляют 2 и 5.4 см^{-1} для умеренно легированной и сильно легированной структур соответственно. На рис. 3 представлены зависимости пороговой плотности тока от температуры в полулогарифмическом масштабе. На вставке приведены зависимости длины волны генерации от температуры для всех трех структур. Характеристическая температура пороговой плотности тока составила 70 К для нелегированной и 1200 К для сильно легированной структур

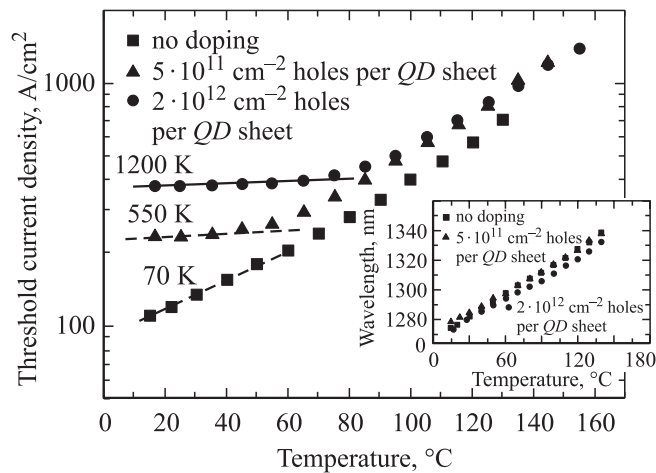


Рис. 3. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} от температуры для всех трех гетероструктур. На вставке — зависимости длины волны лазерной генерации от температуры для всех трех гетероструктур. Длина образцов составляла 2 мм для нелегированной структуры и 4 мм для легированных структур.

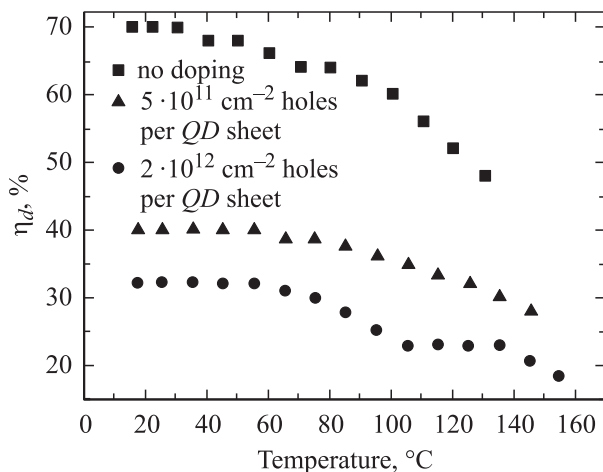


Рис. 4. Зависимости дифференциальной квантовой эффективности от температуры для всех трех гетероструктур. Длина образцов составляла 2 мм для нелегированной структуры и 4 мм для легированных структур.

в диапазоне температур 17–75°C. Для умеренно легированной структуры она составила 550 К в диапазоне температур 17–55°C. Монотонный, близкий к линейному, ход зависимости длины волны лазерной генерации, представленный на вставке рис. 3, позволяет утверждать, что во всем исследуемом температурном диапазоне генерация происходит через основное состояние КТ. Обращает на себя внимание тот факт, что если в случае нелегированной структуры температурная зависимость пороговой плотности тока носит практически линейный характер, то подобная зависимость для легированных структур содержит два линейных участка (см. рис. 3). При температуре выше 75°C температурная стабильность легированных структур ухудшается, что сопрово-

ждается уменьшением характеристической температуры до 57 и 59 К для умеренно легированной и сильно легированной структур соответственно. Для нелегированной структуры диапазон выше 75°C описывается характеристической температурой 56 К.

Подобное поведение находит свое отражение и в зависимости дифференциальной квантовой эффективности от температуры, представленной на рис. 4. Видно, что в диапазоне температур 17–55°C дифференциальная квантовая эффективность легированных структур практически постоянна, а при дальнейшем повышении температуры начинает резко падать, тогда как в нелегированной структуре падение начинается гораздо раньше.

4. Обсуждение

Легирование „спейсерных“ областей позволило достичь характеристической температуры 550 К для умеренно легированной и 1200 К для сильно легированной структуры. Данные значения являются существенным улучшением параметров, полученных в работе [8], где также использовалась концепция легирования активной области лазеров на КТ. В работе [10] указывалось, что при комнатной температуре при энергии перехода 0.958 эВ расстояние между основным и возбужденным состоянием КТ составляет порядка 88 мэВ, при этом 75–80 мэВ приходится на разницу энергий уровней размерного квантования электрона, в то время как разнице энергий уровней размерного квантования дырок составляет всего лишь 8–13 мэВ. Ввиду малого энергетического зазора между основным и возбужденным дырочным состояниями инжектированные дырки заселяют несколько уровней размерного квантования уже при комнатной температуре, что приводит к уменьшению их концентрации на основном состоянии. Таким образом, для достижения порогового усиления требуется дополнительная инжекция электронно-дырочных пар, что и обуславливает увеличение порога лазерной генерации с ростом температуры. Как было показано в работе [11], увеличение энергетического зазора между основным и возбужденными состояниями в КТ позволяет увеличить температурную стабильность пороговой плотности тока вследствие уменьшения заселенности возбужденных дырочных состояний.

Увеличение степени заселенности дырками основного состояния КТ может быть достигнуто при помощи легирования спейсерных областей GaAs вблизи КТ акцепторной примесью. Дырки из легированных областей захватываются в КТ, и тем самым компенсируется эффект термического выброса дырок с основного состояния КТ. Действительно, температурная стабильность пороговой плотности тока легированных структур существенно выше, чем нелегированной структуры в диапазоне температур 17–75°C, при этом, чем выше уровень легирования, тем выше температурная стабильность. Как видно из рис. 4, *p*-легирование позволяет также увеличить и

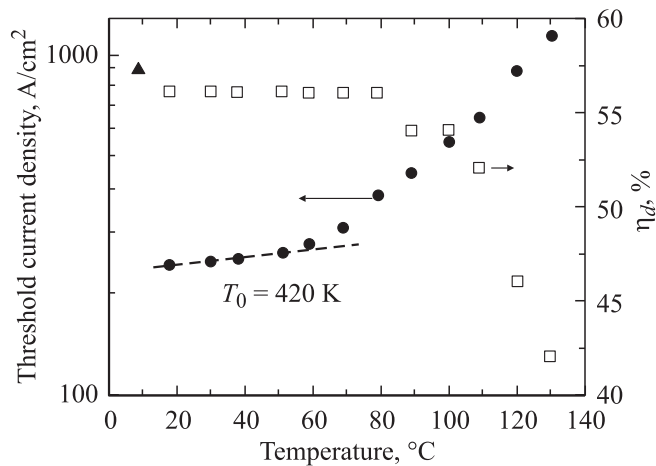


Рис. 5. Зависимости пороговой плотности тока J_{th} и дифференциальной квантовой эффективности η_d от температуры для оптимизированной структуры.

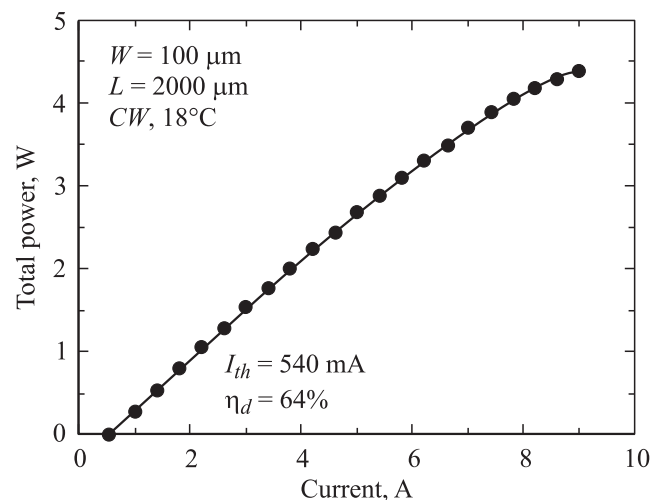


Рис. 6. Зависимость выходной мощности от тока накачки в непрерывном режиме для оптимизированной структуры. Длина образца составляла 2 мм.

температурную стабильность дифференциальной квантовой эффективности, которая в случае легированных структур остается практически постоянной в диапазоне температур 17–55°C. Необходимо отметить, что при обсуждении влияния *p*-легирования мы пренебрегли нарушением зарядовой нейтральности в КТ [4], степень которой зависит от параметров конкретной лазерной структуры.

Начиная с температур 55–75°C (рис. 3) в исследованных легированных структурах наблюдается существенное увеличение пороговой плотности тока, а также уменьшение внешней дифференциальной квантовой эффективности (рис. 4). Обращает на себя внимание и тот факт, что характеристические температуры легированных и нелегированной структур в диапазоне температур выше 75°C практически равны (рис. 3). Действительно,

при высоких температурах выброс дырок с основного состояния КТ становится настолько сильным, что положительный эффект *p*-легирования на температурную стабильность нивелируется и требуется дополнительная инжекция электронно-дырочных пар для компенсации выброса и достижения порогового усиления.

Негативными эффектами, возникающими при легировании структур, являются увеличение пороговой плотности тока и уменьшение дифференциальной квантовой эффективности. Эти эффекты связаны с большими потерями на свободных носителях в легированных структурах по сравнению с нелегированными. Таким образом, необходим компромисс между стремлением к увеличению характеристической температуры и приемлемым уменьшением дифференциальной квантовой эффективности и ростом пороговой плотности тока. Для оптимизации характеристик лазера требуются детальное моделирование с учетом параметров массивов КТ (плотность, количество слоев), энергетического спектра КТ, толщины волновода, толщин и уровня легирования „спейсеров“ GaAs, а также состава и степени легирования эмиттеров. Нами была выращена структура с оптимизированной толщиной волновода, состава и степени легирования эмиттеров и спейсерных областей. В спейсерных областях легировались два слоя GaAs толщиной по 5 нм, между которыми находился слой GaAs толщиной 13 нм (общая толщина „спейсера“ составляла 33 нм). Структура продемонстрировала высокую дифференциальную квантовую эффективность 56%, значение которой оставалось постоянным в диапазоне температур 15–80°C (рис. 5), а также достаточно большую характеристическую температуру 420 К в диапазоне температур 15–60° (рис. 5). Максимальная оптическая мощность излучения данной структуры в непрерывном режиме составила 4.4 Вт (рис. 6), что, насколько нам известно, является наилучшим значением для длинноволновых лазеров на КТ.

5. Заключение

Проведено исследование полупроводниковых лазерных гетероструктур с *p*-легированной активной областью. Показано, что при степени легирования порядка $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ акцепторов на одну плоскость квантовых точек удастся достичь значения характеристической температуры 1200 К в диапазоне температур 15–75°C. Ожидается, что дальнейшая оптимизация структуры позволит еще более существенно увеличить характеристическую температуру и расширить диапазон высокой температурной стабильности работы лазера при сохранении высокой дифференциальной квантовой эффективности и низкой пороговой плотности тока.

Работа была выполнена при поддержке совместного проекта ФТИ им. А.Ф. Иоффе и NL Nanosemiconductor-GmbH (Германия), а также фондов SANDiE и INTAS. Авторы И.И. Новиков и Л.Я. Карачинский благодарят за финансовую поддержку фонд „Династия“ и МЦФФМ.

Список литературы

- [1] Y. Arakawa, H. Sakaki. Appl. Phys. Lett., **40**, 939 (1982).
- [2] L.V. Asryan, R.A. Suris. Semicond. Sci. Technol., **11**, 554 (1996).
- [3] L.V. Asryan, L. Luryi. IEEE J. Quant. Electron., **37**, 905 (2001).
- [4] L.V. Asryan, R.A. Suris. IEEE J. Select. Top. Quant. Electron., **3**, 148 (1997).
- [5] V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Epitaxy of Nanostructures*, ISBN 3.540-67817-4, *Springer Series on Nanoscience and Technology* (Springer, Berlin, 2003).
- [6] A.R. Kovsh, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhrin, A.R. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Electron. Lett., **38**, 1104 (2002).
- [7] K.J. Vahala, C.E. Zah. Appl. Phys. Lett., **52**, 1945 (1988).
- [8] O.B. Shchekin, J. Ahn, D.G. Deppe. Electron. Lett., **38**, 712 (2002).
- [9] M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, D.S. Sizov, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, R. Heitz, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Yu.G. Musikhin, W. Neumann. Phys. Rev. B, **62**, 16 671 (2000).
- [10] O.B. Shchekin, D.G. Deppe. Appl. Phys. Lett., **80**, 3277 (2002).
- [11] O.B. Shchekin, G. Park, D.L. Huffaker, D.G. Deppe. Appl. Phys. Lett., **77**, 466 (2000).

Редактор Л.В. Беляков

Impact of *p*-type doping of the active region on temperature stability of the characteristics of InAs/GaAs quantum dot lasers

I.I. Novikov, N.Yu. Gordeev, L.Ya. Karachinsky, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, A.R. Kovsh, A.V. Kozhukhov*, I.L. Krestnikov*, S.S. Mikhrin*, N.N. Ledentsov**

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
* NL Nanosemiconductor GmbH,
44227 Dortmund, Germany

Abstract A detailed study of the active region *p*-type doping impact on characteristics of InAs/GaAs long-wavelength quantum dot lasers has been done. It is shown, that the rise of the *p*-doping level leads to increasing the temperature stability of the threshold current density. The characteristic temperature as high as 1200 K within the temperature range of 15–75°C was obtained for the structure with the *p*-doping level of about $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ per one sheet of quantum dots. A constant value of the differential quantum efficiency within the temperature range of 15–65°C was demonstrated. A maximal CW output power was 4.4 W for an optimized structure.