

06

Инжекционные лазеры на квантовых точках с высоким оптическим усилением и длиной волны излучения более 1300 нм

© *И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, М.В. Максимов, А.Е. Жуков, Ю.М. Шерняков, В.М. Устинов, Н.В. Крыжановская, А.С. Паюсов, И.Л. Крестников, Д.А. Лифшиц, С.С. Михрин, А.Р. Ковш*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

Академический физико-технологический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

Innolume GmbH, Konrad-Adenauer-Allee 11, 44263, Dortmund, Germany

E-mail: novikov@switch.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2008 г.

Созданы и исследованы полупроводниковые лазеры на квантовых точках InAs/GaAs с максимальным коэффициентом модального усиления 46 cm^{-1} на длине волны 1325 нм за счет увеличения фактора оптического ограничения и оптимизации параметров роста. Модальное усиление превысило 20 cm^{-1} в диапазоне длин волн 1315–1345 нм при плотности тока 500 A/cm^2 .

PACS: 78.20.Bh, 85.60.-q, 85.60.Bt, 85.60.Jb, 42.70.Qs, 42.60.By

Применение самоорганизующихся квантовых точек (КТ) позволяет существенно снизить пороговую плотность тока инжекционных лазеров и расширить их спектральный диапазон. В частности, с помощью КТ InAs/InGaAs/GaAs может быть достигнута длина волны генерации около $1.3 \mu\text{m}$, что позволяет использовать хорошо отработанную технологию лазеров на подложках GaAs для создания приборов волоконно-оптической связи. Одной из важнейших характеристик полупроводникового лазера является величина максимального оптического усиления, которая во многом определяет динамические характеристики лазера, а также предельное значение дифференциальной эффективности лазерного диода и диапазон оптических потерь, в котором лазерная генерация происходит на длине волны основного оптического перехода активной

области. В лазере на основе КТ максимальное оптическое усиление определяется поверхностной плотностью массива самоорганизующихся КТ [1]. Максимальное усиление можно увеличить за счет использования большего числа слоев КТ. Однако дополнительные слои КТ повышают вероятность образования дислокаций и могут привести к увеличению пороговой плотности тока. Проблема достижения высокого модального усиления стоит особенно остро в длинноволновых лазерах на КТ ($\lambda > 1.3 \mu\text{m}$), поскольку значительное содержание индия в активной области таких лазеров накладывает ограничения на максимальное число рядов КТ.

В работе [2] сообщалось о достижении величины модального усиления на уровне 41 cm^{-1} для лазера на КТ с длиной волны генерации 1304 nm и пороговой плотностью тока 622 A/cm^2 . Однако в работе не сообщалось о возможности работы лазера при непрерывном режиме накачки, что существенно сужает возможные применения такого прибора. Недавно было продемонстрировано модальное усиление в лазерах на КТ диапазона $1.3 \mu\text{m}$ на уровне 54 cm^{-1} [3]. Однако пороговая плотность тока составила около 1300 A/cm^2 , тогда как максимальные потери на вывод излучения всего 16 cm^{-1} . Таким образом, значительная часть оптического усиления затрачивается на покрытие больших (около 38 cm^{-1}) внутренних потерь.

Целью данной работы являлись разработка и создание лазерных гетероструктур на квантовых точках, работающих в непрерывном режиме, сочетающих длину волны генерации свыше 1310 nm , высокое модальное усиление (более 40 cm^{-1}), низкие внутренние потери (менее 10 cm^{-1}) и низкую пороговую плотность тока (около 500 A/cm^2 в режиме максимального усиления).

Лазерные гетероструктуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках $n\text{-GaAs}$ (100). Для увеличения модового усиления была оптимизирована конструкция лазерной гетероструктуры путем увеличения мольной доли Al в эмиттерных слоях AlGaAs с 30 до 80%. Это привело к росту фактора оптического ограничения с 0.09 до 0.13. Десять слоев InAs КТ, сформированных по методу Странски–Крастанова, были помещены в центр волновода GaAs толщиной $0.44 \mu\text{m}$. Каждый слой КТ зарастивался тонким слоем $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y \sim 15\%$). Длина волны излучения выращенной гетероструктуры по данным фотолюминесцентных исследований составила 1312 nm .

Лазерные диоды изготавливались в полосковой геометрии с шириной полоска $W = 100 \mu\text{m}$. Возможными негативными последствиями увеличения мольной доли Al могли послужить повышенная шероховатость образующейся поверхности, приводящая к возрастанию внутренних потерь, а также низкая проводимость слоев с высоким содержанием Al, повышающая последовательное сопротивление лазерного диода. Нам удалось успешно решить проблему шероховатости за счет низкотемпературного осаждения ($\sim 560\text{--}570^\circ\text{C}$) эмиттерных слоев AlGaAs. Предварительно было проведено тщательное обезгаживание установки МПЭ для снижения внедрения нежелательных примесей, прежде всего кислорода, в слои с высоким содержанием алюминия. В результате последовательное сопротивление лазерной структуры не ухудшилось по сравнению с использованием эмиттеров $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и составило величину $2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

Лазерные характеристики исследовались при импульсной и непрерывной накачках. На рис. 1, *a* представлена зависимость пороговой плотности тока и длины волны лазерной генерации от длины лазерного резонатора. Наименьшая пороговая плотность тока составила около 150 A/cm^2 для лазера длиной 4 mm . Лазерная генерация через основное состояние КТ наблюдалась вплоть до длин резонатора порядка 300 микрон, что соответствует наибольшим потерям на вывод излучения 38 cm^{-1} . При этом пороговая плотность тока составила 520 A/cm^2 . Длина волны лазерной генерации лежала в диапазоне $1324\text{--}1331 \text{ nm}$. Зависимость обратной дифференциальной квантовой эффективности (рис. 1, *a*) позволила оценить внутренний квантовый выход стимулированного излучения на уровне 95% и внутренние оптические потери, которые составили 8 cm^{-1} . Наибольшее значение внешней дифференциальной эффективности 47% .

Используя хорошо известное выражение для модального усиления $G = \alpha_{out} + \alpha_{in}$, где G — модальное усиление, α_{out} — потери на выход излучения, α_{in} — внутренние оптические, можно рассчитать зависимость модального усиления от плотности тока (рис. 1, *b*). Модальное усиление растет с ростом плотности тока вплоть до $\sim 500 \text{ A/cm}^2$, при этом максимальное усиление составило 46 cm^{-1} . Плотность тока прозрачности, определяемая экстраполяцией зависимости $G(J)$ в нулевое усиление, приблизительно составляет 100 A/cm^2 , что соответствует накачке в 10 A/cm^2 на один ряд КТ.

Полученные значения модального усиления хорошо согласуются со значениями, полученными при помощи прямого измерения модального

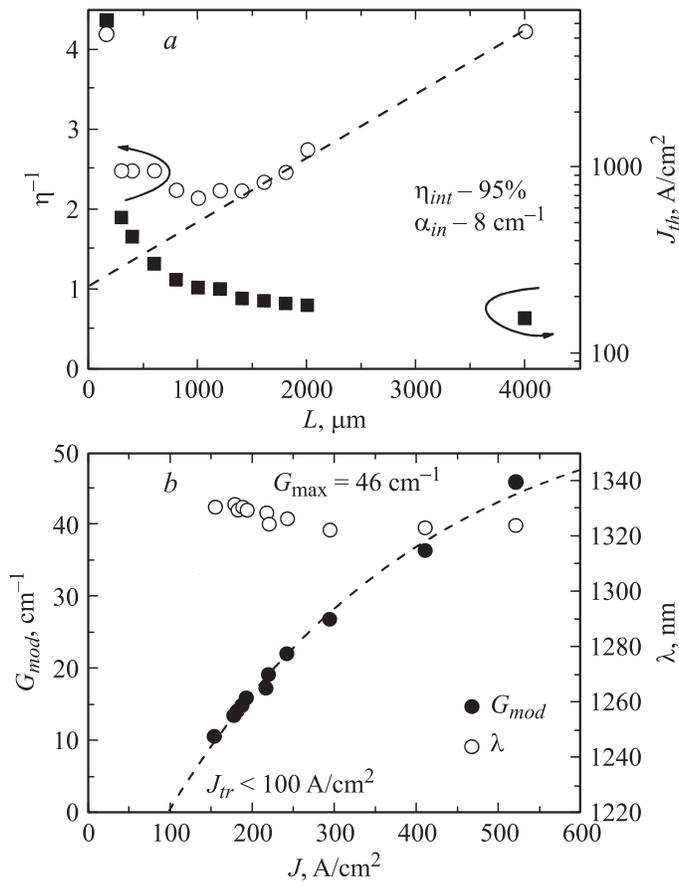


Рис. 1. Зависимость пороговой плотности тока (J_{th}) и обратной дифференциальной квантовой эффективности (η^{-1}) от длины резонатора (а). Зависимость модального усиления (G_{mod}) и длины волны лазерной генерации (λ) от плотности тока (б).

усиления методом Хакки–Паоли [4]. В этом методе модальное усиление рассчитывается по измерению спектров модуляции мод Фабри–Перо лазера с коротким резонатором, работающего в режиме излучения усиленного спонтанного света (рис. 2, а). Измеренные спектры модаль-

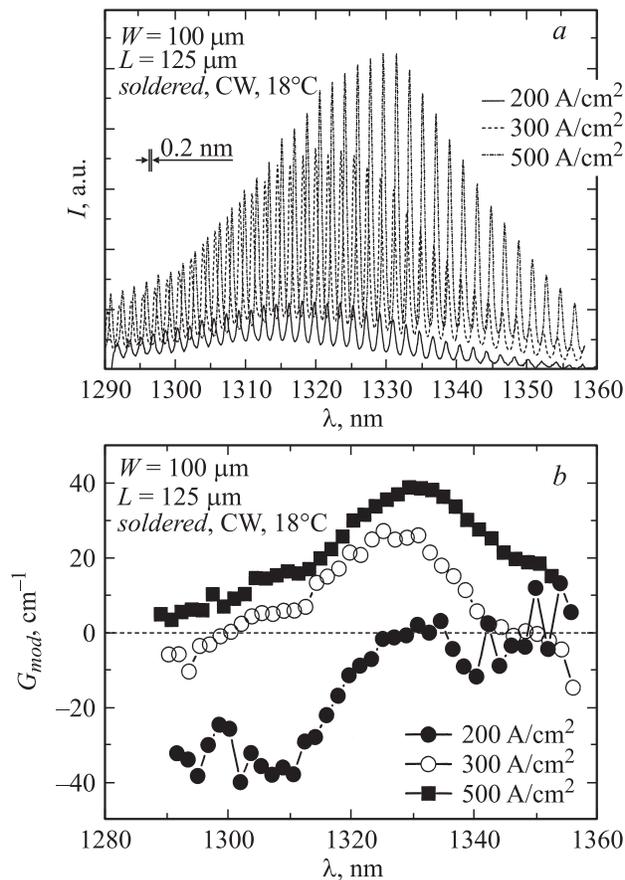


Рис. 2. Спектры спонтанного излучения, использованные для расчета модального усиления (*a*). Спектры модального усиления при различных уровнях накачки (*b*).

ного усиления в зависимости от тока накачки показаны на рис. 2, *b*. К значениям усиления прибавлено значение внутренних оптических потерь в лазерной структуре $\alpha_{in} = 8 \text{ cm}^{-1}$ (рис. 1, *a*). Хорошо видно, что модальное усиление составляет более 20 cm^{-1} в диапазоне длин волн 1315–1345 nm и плотности тока 500 A/cm^2 .

Для проведения исследования температурных зависимостей порогового тока и исследований характеристик в непрерывном режиме накачки лазерные диоды напаялись на медные теплоотводы p -слоями вниз при помощи индийевого припоя. Защитные покрытия на зеркала резонатора не наносились. Характеристическая температура (T_0), измеренная в импульсном режиме, составила 60 К. Максимальная выходная оптическая мощность излучения в непрерывном режиме составила более 2 Вт.

Таким образом, нами была отработана лабораторная технология получения лазерных гетероструктур с квантовыми точками на подложках GaAs с длиной волны излучения свыше $1.32\ \mu\text{m}$, способных работать в непрерывном режиме генерации. Оптимизация конструкции лазерного волновода позволила увеличить величину максимального модального усиления при сохранении малого сопротивления лазеров и высокой планарности интерфейсов. Максимальное усиление составило $46\ \text{cm}^{-1}$ на длине волны $1325\ \text{nm}$ при пороговой плотности тока $520\ \text{A/cm}^2$. Внутренние потери составили $8\ \text{cm}^{-1}$, а наибольшая внешняя дифференциальная эффективность 47%. Модальное усиление превышает $20\ \text{cm}^{-1}$ в диапазоне длин волн $1315\text{--}1345\ \text{nm}$ при плотности тока $500\ \text{A/cm}^2$.

Данная работа была поддержана в разных частях проектами Европейского Сообщества "SANDIE", (номер контракта NMP4-CT-2004-500101) и ZODIAC, грантом Н.П.2.1.1.2215 Министерства образования и науки РФ, программой фундаментальных исследований президиума РАН "Квантовые наноструктуры, Благодарность финансовой поддержке в рамках гранта президента Российской Федерации по поддержке молодых ученых выражают авторы: А.Е. Жуков (МД-3858.2007.2) и И.И. Новиков (МК-5162.2008.2).

Список литературы

- [1] Maximov M.V., Ledentsov N.N. // Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. New York: Taylor & Fransis Group, 2004.
- [2] Salhi A., Fortunato L., Martiradonna L., Cingolani R., De Vittorio M., Passaseo A. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 123111.
- [3] Amano T., Aoki S., Sugaya T., Komori K., Okada Y. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007. V. 13. P. 1273–1278.
- [4] Hakki B.W., Paoli T.L. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. P. 4113–4119.