

06;07;12

Высокая деградиционная стабильность длинноволновых ($> 1.25 \mu\text{m}$) лазеров на квантовых точках, выращенных на подложках GaAs

© Е.Ю. Лундина,¹ Ю.М. Шерняков,¹ М.В. Максимов,¹ И.Н. Каяндер,¹ А.Ф. Цацульников,¹ Н.Н. Леденцов,¹ А.Е. Жуков,¹ Н.А. Малеев,¹ С.С. Михрин,¹ В.М. Устинов,¹ Ж.И. Алферов,¹ D. Vimbeg²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin,
D-10623 Berlin, Germany
e-mail: maximov@beam.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 24 июня 2002 г.)

Проведены ускоренные деградиционные исследования длинноволновых ($> 1.25 \mu\text{m}$) лазеров на квантовых точках, выращенных на подложках GaAs, при фиксированном токе 1.7 А, начальной выходной оптической мощности около 0.3 W и температуре теплоотвода 60°C. За время испытаний в течение 450 h лазеры не обнаружили признаков деградации, при этом деградиционный стенд не был герметически закрыт, продувка инертным газом не производилась и грани лазера не были пассивированы.

С момента первой демонстрации лазерной генерации через основное состояние квантовых точек, полученных методом самоорганизации [1], лазеры на квантовых точках привлекают огромное внимание во всем мире [2,3]. Одно из преимуществ лазеров на квантовых точках связано с тем, что вследствие сильной локализации электронов и дырок в точках транспорт носителей в латеральном направлении к дефектам, дислокациям и граням лазера значительно подавлен. Это может приводить к улучшенным деградиционным свойствам лазеров на квантовых точках по сравнению с лазерами на квантовых ямах, а также повышенной стабильности по отношению к радиации. Так, недавно было показано, что чувствительность лазеров на квантовых точках к облучению пучком протонов значительно ниже, чем лазеров на квантовых ямах [4]. Важно подчеркнуть, что использование квантовых точек позволяет реализовать лазерную генерацию на длине волны 1.3 μm для структур, выращенных на подложке GaAs [2,3,5,6]. Максимальная выходная мощность таких лазеров в режиме непрерывной генерации составила 2.7 W [7,8]. Поверхностно излучающие лазеры на основе вертикального микрорезонатора с InAs–GaAs квантовыми точками, выращенные на подложке GaAs, продемонстрировали лазерную генерацию в диапазоне длин волн 1.295–1.305 μm , внутреннюю дифференциальную эффективность 64% и внешнюю эффективность 20% [6].

В данной работе мы исследуем деградиционные свойства длинноволнового лазера на квантовых точках и показываем, что стабильность такого лазера выше, чем лазера на квантовой яме, выращенного на той же установке молекулярно-пучковой эпитаксии и протестированного в тех же условиях.

Исследованная лазерная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в геометрии двойной гетероструктуры с отдельным ограничением электронов и световой волны. Активная область поме-

щалась между двумя эмиттерными слоями $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ толщиной 1.5 μm с эффективным содержанием алюминия 75%, легированных Si и Be для достижения концентрации соответственно электронов и дырок на уровне $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$.

Активная область лазера представляла собой три слоя квантовых точек, разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 33 nm. Квантовые точки в активной области лазера выращивались методом активированного распада твердого раствора: сначала путем осаждения 2.7 монослоев InAs формировались начальные островки, которые затем зарастивались слоем $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ средней толщиной 5 nm. В процессе зарастивания атомы In диффундируют по направлению к островкам, параметр решетки которых ближе к параметру решетки объемного InAs, в то время как атомы Ga диффундируют к областям между островками, где параметр решетки ближе к параметру решетки объемного GaAs. Этот процесс приводит к активированному распаду InGaAs, увеличению эффективного объема островков и соответственно длинноволновому сдвигу линии фотолуминесценции. После зарастивания квантовые точки оказываются внедренными в InGaAs квантовую яму, что также дает вклад в длинноволновый сдвиг линии фотолуминесценции за счет перераспределения полей напряжений в точках и сужения ширины запрещенной зоны матрицы. Плотность точек, измеренная методом трансмиссионной электронной микроскопии, составляла $4 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2}$.

Лазеры были выполнены в полосковой геометрии с шириной полоска 100 μm (структура типа „мелкая меза“). Длина полоска составляла 2000 μm , сколотые грани не были пассивированы и диэлектрические покрытия на них не наносились. Лазеры напаявались на медные теплоотводы при помощи индийского припоя. Продувка стенда инертным газом не проводилась, т.е. деградиционные характеристики исследовались в условиях

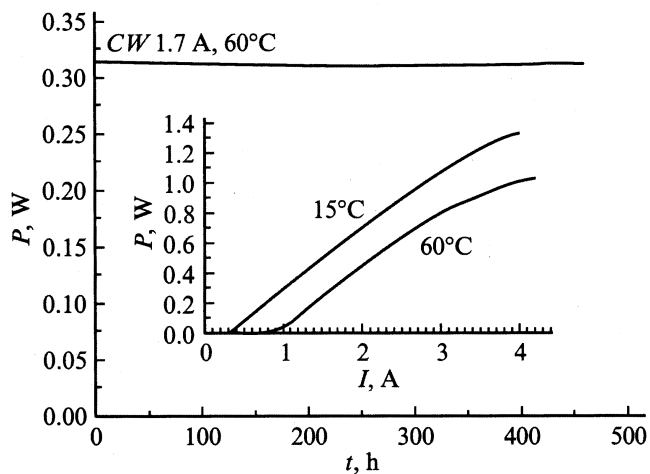


Рис. 1. Зависимость выходной мощности лазера на квантовых точках в режиме непрерывной генерации от времени при температуре 60°C . Деградиционный тест проводился в режиме стабилизации тока лазера. На вставке — ватт-амперные характеристики при температурах теплоотвода 15 и 60°C . Длина полоска $2000 \mu\text{m}$, ширина — $100 \mu\text{m}$.

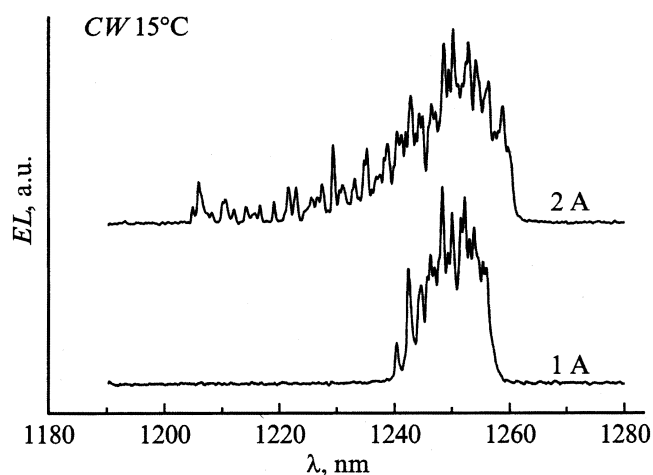


Рис. 2. Спектры генерации лазера на квантовых точках при двух различных токах. Температура теплоотвода 15°C .

комнатной атмосферы. Деградиционный тест проводился при стабилизации тока лазеров в непрерывном режиме.

Типичное значение дифференциальной эффективности лазеров на квантовых точках в диапазоне температур $15\text{--}60^\circ\text{C}$ составляло около 42% вблизи порога генерации. Квантовая эффективность и внутренние потери, определенные из зависимости обратной дифференциальной эффективности от длины полоска, составили соответственно $95 \pm 5\%$ и 7 cm^{-1} . Пороговая плотность тока равнялась $150 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при температуре теплоотвода 15°C и $340 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 60°C . Ускоренный деградиционный тест проводился при температуре 60°C и фиксированном токе 1.7 A , что соответствовало полной выходной мощности около 0.28 W на момент на-

чала деградиционных испытаний. Типичная зависимость выходной мощности лазера на квантовых точках от времени при токе 1.7 A приведена на рис. 1. После тестирования в течение 450 h лазеры были сняты со стенда для исследования спектральных характеристик. Спектры электролюминесценции в режиме непрерывной генерации при температуре 15°C и двух различных токах показаны на рис. 2. Изменения длины волны лазерной генерации после деградиционных исследований нами обнаружено не было.

Нами также были проведены деградиционные исследования обычных лазеров на GaAs-AlGaAs квантовых ямах, выращенных в той же установке молекулярно-пучковой эпитаксии. В этом случае после 100 h деградиционных исследований нами наблюдалось уменьшение выходной мощности более чем на 10% . Падение мощности могло быть вызвано деградиацией качества сколотых граней лазерных диодов, которые, как уже упоминалось выше, не были защищены. Более высокая деградиционная стабильность лазеров на квантовых точках объясняется слабой диффузией носителей к сколотым граням. Действительно, в квантовых точках электроны и дырки сильно локализованы во всех трех измерениях и тем самым их латеральная диффузия сильно подавлена. Это резко уменьшает перегрев лазерных граней, а также химические реакции на их поверхности, стимулированные рекомбинацией свободных носителей.

В настоящее время нами планируются деградиционные исследования лазеров на квантовых точках с нанесенными на грани зеркалами при продувке стенда нейтральным газом. В то же время уже первые результаты ускоренных деградиционных исследований, представленные в данной работе, доказывают повышенную деградиацию стабильность лазеров на квантовых точках.

Заключение

В работе показана высокая деградиционная стабильность длинноволновых ($> 1.25 \mu\text{m}$) лазеров на квантовых точках, полученных методом активированного распада твердого раствора. Результаты данного исследования согласуются с повышенной стабильностью лазеров на квантовых точках к облучению протонами высоких энергий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, программы „Физика твердотельных наноструктур“, программы INTAS и NanOp.

М.В. Максимов благодарит Alexander von Humboldt-Stiftung за стипендию, А.Е. Жуков и В.М. Устинов выражают благодарность Фонду содействия отечественной науке.

Список литературы

- [1] *Ledentsov N.N., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Maximov M.V., Tabatadze I.G., Kop'ev P.S.* / Semiconductors. 1994. Vol. 28 (8) P. 832–834.
- [2] *Huffaker D.L., Park G., Zou Z., Shchekin O.B., Deppe D.G.* // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. Vol. 6(3). P. 452–461.
- [3] *Stintz A., Lui G.T., Li H., Lester L.F., Malloy K.J.* // IEEE Photonics Technology Lett. 2000. Vol. 12(6). P. 591–593.
- [4] *Ribbat C., Sellin R., Grundmann M., Bimberg M., Sobolev N.A., Carmo M.C.* // Electron. Lett. 2001. Vol. 37(3). P. 174–175.
- [5] *Ledentsov N.N., Grundmann M., Heinrichsdorff F., Bimberg D., Ustinov V.M., Zhukov A.E., Maximov M.V., Alferov Zh.I.* // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. Vol. 6(3). P. 439–451.
- [6] *Ledentsov N.N., Bimberg D., Ustinov V.M., Alferov Zh.I., Lott J.A.* // Proc. Intern. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials. Nara (Japan), 2001. P. 5–8.
- [7] *Ledentsov N.N.* // Springer Tracts in Modern Physics. N 156. Berlin: Springer, 1999. 81 p.
- [8] *Shernyakov Yu.M., Bedarev D.A., Kondrat'eva E.Yu., Kop'ev P.S., Kovsh A.R., Maleev N.A., Maximov M.V., Ustinov V.M., Volovik B.V., Zhukov A.E., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D.* // Electronics Lett. 1999. Vol. 35(11). P. 898–899.