

06.3;12

## Управление длиной волны лазерной генерации в диапазоне 1.3–0.85 $\mu\text{m}$ с помощью высокотемпературного отжига структур с квантовыми точками

© Е.В. Никитина, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова,  
А.Г. Гладышев, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов,  
Ю.М. Шерняков, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов

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

Поступило в Редакцию 15 марта 2004 г.

Исследовано влияние высокотемпературного отжига на свойства лазерной структуры с квантовыми точками InAs в сверхрешетке AlAs/GaAs. Показано, что при увеличении длительности отжига при 700°C длина волны генерации может плавно варьироваться от 1290 до 916 nm без изменения величины пороговой плотности тока (250 A/cm<sup>2</sup>, T<sub>0</sub> = 110 K). Применение отжига при 750°C позволяет получить лазерную генерацию на длине волны 845 nm.

**Введение.** Лазеры с квантовыми точками (КТ) в активной области демонстрируют рекордно низкие значения порогового тока, высокую дифференциальную эффективность и высокую температурную стабильность [1]. Однако длина волны квантовых точек в матрице GaAs ограничена диапазоном 1.0–1.2  $\mu\text{m}$ . К настоящему времени с помощью различных подходов продемонстрированы лазерные КТ структуры на подложках GaAs с длиной волны генерации 1.3  $\mu\text{m}$  [2], а также вблизи 1.5  $\mu\text{m}$  [3]. Однако для расширения потенциальных применений КТ лазеров большой интерес вызывает продление диапазона излучения КТ структур и в коротковолновую сторону.

Известно, что высокотемпературный отжиг КТ структуры (постростовой или в течение роста верхнего эмиттера) приводит к коротковолновому сдвигу линии излучения вследствие частичного перемешивания материала КТ и матрицы [4]. В частности, в работе [5] сообщалось о достижении длины волны генерации 950 nm при комнатной температуре в подвергнутом отжигу при 700°C лазере на основе КТ InGaAs в

матрице GaAs. Пороговая плотность тока составила около  $240 \text{ A/cm}^2$ . В то же время, насколько нам известно, не сообщалось о достижении длины волны  $\leq 900 \text{ nm}$ .

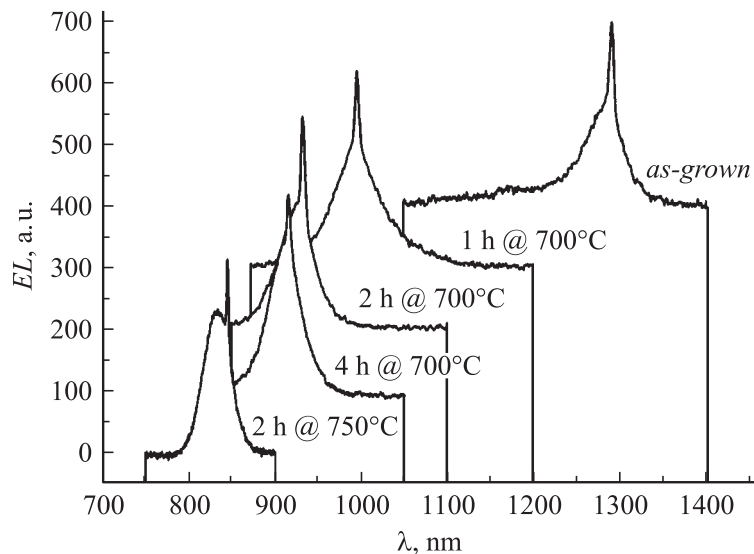
Очевидно, что длина волны излучения КТ структуры, подвергнутой отжигу, ограничена в коротковолновом пределе шириной запрещенной зоны материала матрицы. Поэтому более широкозонные материалы, такие как AlGaAs или Al(Ga)As/GaAs сверхрешетки более предпочтительны по сравнению с GaAs для использования в качестве матрицы для массива КТ. При этом было бы весьма желательно сохранить длинноволновую генерацию в исходной (не подвергнутой отжигу) структуре. Достижение широкого диапазона перестройки длины волны с помощью соответствующего выбора режима отжига открыло бы путь к созданию из одной эпитаксиальной пластины лазерных источников различных спектральных диапазонов. Определяющим является слабое изменение пороговых характеристик КТ лазера в процессе отжига.

Как будет показано в настоящей работе, отжиг при  $700^\circ\text{C}$  слабо влияет на величину пороговой плотности тока и характеристическую температуру при использовании многослойных массивов КТ, помещенных в сверхрешетку AlAs/GaAs. При длине волны генерации в исходной структуре вблизи  $1.3 \mu\text{m}$ , диапазон управляемого изменения длины волны превышает  $400 \text{ nm}$ . Наименьшая длина волны генерации составила  $845 \text{ nm}$ .

**Эксперимент.** Лазерная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber-32P на подложке  $n^+$ -GaAs(100). Особенности формирования КТ InAs описаны в работе [6]. Длина волны фотолюминесценции таким КТ при комнатной температуре составляет около  $1.28 \mu\text{m}$ . Активная область содержала 5 рядов КТ. В качестве матрицы использовалась короткопериодная сверхрешетка AlAs/GaAs. Эмиттерами  $n$ - и  $p$ -типа служили слои  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  толщиной  $1.3 \mu\text{m}$ , легированные Si и Be соответственно. Температура осаждения лазерной структуры не превышала  $600^\circ\text{C}$ .

После выращивания эпитаксиальная пластина была разделена на несколько частей. Некоторые из них были затем подвергнуты высокотемпературному отжигу в ростовой камере установки молекулярно-пучковой эпитаксии в потоке мышьяка при температуре  $700^\circ\text{C}$  длительностью 1–4 h или при  $750^\circ\text{C}$  в течение 2 h.

Из всех участков лазерной структуры затем были сформированы диоды в геометрии с четырьмя сколотыми гранями. Лазерные харак-

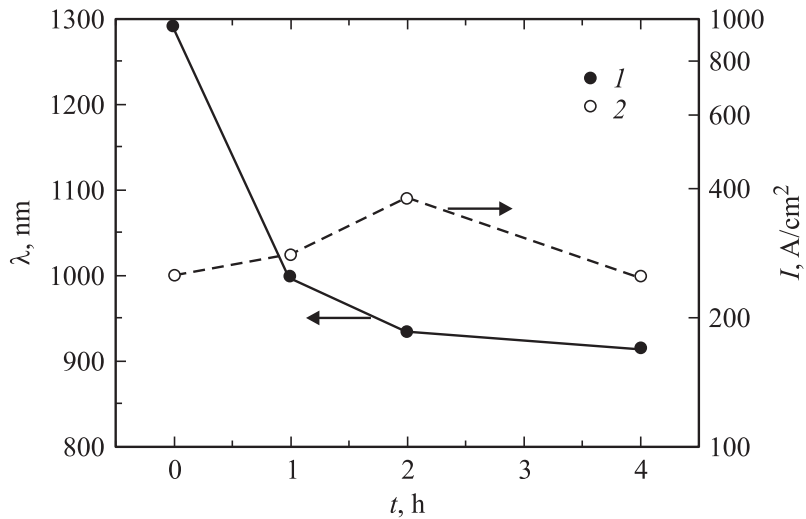


**Рис. 1.** Спектры лазерной генерации при комнатной температуре, записанные вблизи порога генерации, для четырехсколотых лазеров, изготовленных из пластин с разными режимами отжига.

теристики исследовались при комнатной температуре в импульсном режиме накачки при частоте тока 5 kHz и длительностью 0.2 μs. Для регистрации сигнала использовался германиевый фотодиод.

**Результаты и обсуждения.** На рис. 1 приведены спектры лазерной генерации при комнатной температуре, записанные при 5%-ном превышении порога генерации, для четырехсколотых лазеров, изготовленных из пластин с разными режимами отжига. Рис. 2 обобщает зависимость длины волны генерации от длительности отжига при 700°C, а также показывает изменение пороговой плотности тока.

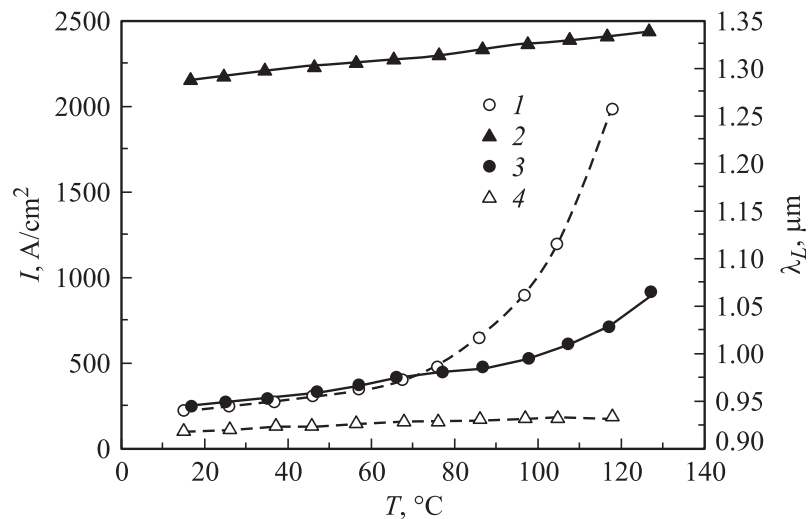
В исходной структуре длина волны генерации составляет 1290 nm при пороговой плотности тока 250 A/cm<sup>2</sup>. Как видно, увеличение длительности отжига при 700°C приводит к закономерному коротковолновому сдвигу. Этот сдвиг наиболее значителен после первого часа отжига, когда длина волны достигает значения 998 nm. В дальнейшем наблюдается насыщение зависимости длины волны от времени отжига.



**Рис. 2.** Зависимость длины волны генерации (1) и пороговой плотности тока (2) от длительности отжига при 700°C.

Наименьшая длина волны составила 916 nm. Пороговая плотность тока демонстрирует слабое возрастание при первоначальном отжиге. Однако в дальнейшем пороговая плотность тока вновь достигает значения 250 A/cm<sup>2</sup>. Отметим также, что и электрические свойства диода, такие как напряжение открывания и последовательное сопротивление, при отжиге остаются неизменными в пределах погрешности измерений.

На рис. 3 представлены температурные зависимости пороговой плотности тока (круги) и длины волны генерации (треугольники) для лазеров, изготовленных из исходной пластины (закрашенные символы) и подвергнутых отжигу при 700°C в течение 4 h (открытые символы). В обоих случаях наблюдается линейный сдвиг длины волны генерации с ростом температуры, а температурная зависимость пороговой плотности тока вблизи комнатной температуры описывается характеристической температурой  $T_0 = 110$  K. Это высокое значение  $T_0$  сохраняется вплоть до 100°C в исходном образце и до 70°C в образце, подвергнутом отжигу. В дальнейшем наблюдается снижение характеристической температуры до 60 и 30 K соответственно.



**Рис. 3.** Температурная зависимость пороговой плотности тока (круги) и длины волны излучения (треугольники) неотожженного образца (2, 3) и образца после четырехчасового отжига при 700 °C (1, 4).

Уменьшение длины волны генерации в результате отжига означает, что энергетическое разделение между электронными состояниями квантовых точек и матрицы снижается. Мы оцениваем эффективную ширину запрещенной зоны использованной сверхрешетки приблизительно 1.57 eV. Таким образом, энергетическое разделение снижается с 0.6 eV в исходной структуре до 0.2 eV в структуре, подвергнутой отжигу в течение 4 h. Для подобных массивов слаболокализованных КТ обычно наблюдаются высокие значения пороговой плотности тока и сильная температурная чувствительность характеристик, что обусловлено тепловым выбросом носителей в матрицу [7].

Тот факт, что в исследованной лазерной структуре значительный коротковолновый сдвиг линии генерации в результате отжига не сопровождается ухудшением пороговых характеристик вблизи комнатной температуры, может быть связан с использованием в активной области нескольких рядов КТ. Многослойные массивы КТ позволяют снизить относительный вклад теплового заселения матрицы вследствие

большого оптического усиления. Также следует отметить высокую стабильность массивов КТ по отношению к образованию структурных дефектов в результате длительного высокотемпературного отжига. В то же время уменьшение энергии локализации КТ по отношению к матрице в результате отжига проявляется в отмеченном уменьшении диапазона высокой температурной стабильности, а также в снижении характеристической температуры в области более высоких температур.

Очевидно, что сдвиг длины волны определяется не только длительностью отжига, но и его температурой. Менее очевидным является тот факт, что эффект этих параметров неравносителен. Насыщение зависимости длины волны излучения от времени отжига устанавливает коротковолновый предел, который не может быть преодолен для данной температуры отжига, сколь бы продолжительным он ни был. Мы можем констатировать, что для данного типа КТ структуры наиболее короткая длина волны, достижимая в результате достаточно длительного (бесконечного) отжига, определяется только температурой отжига.

В частности, отжиг при температуре  $600^{\circ}\text{C}$  и ниже не вызывает какого-либо заметного изменения длины волны излучения массива КТ. Для исследуемой структуры наименьшая длина волны для отжига при  $700^{\circ}\text{C}$  составляет приблизительно  $0,9\ \mu\text{m}$ . В то же время отжиг при  $750^{\circ}\text{C}$  позволяет продвинуться в более коротковолновый диапазон. После 2 h отжига длина волны генерации достигает  $845\ \text{nm}$ . Пороговый ток при этом увеличивается до  $750\ \text{A}/\text{cm}^2$ , что, вероятно, обусловлено сильным уменьшением энергии локализации КТ по отношению к матрице.

**Заключение.** Таким образом, продемонстрирована перспективность применения массивов квантовых точек InAs, помещенных в сверхрешетку AlAs/GaAs, для создания лазерных источников с управлением длиной волны посредством высокотемпературного отжига. Показано, что изменением режимов отжига может быть достигнута длина волны генерации от  $1290$  до  $845\ \text{nm}$ . Отжиг при  $700^{\circ}\text{C}$  не приводит к ухудшению характеристик лазерных диодов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, совместного проекта ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и NSC–Nanosemiconductor–GmbH, Германия и гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых № МД–4277.2004.2.

## Список литературы

- [1] *Ustinov V.M., Zhukov A.E., Egorov A.Yu., Maleev N.A.* // Quantum dot lasers. Oxford University Press, 2003. Oxford Science Publications, Series on semiconductor science and technology. V. 11.
- [2] *Мухрин С.С., Жуков А.Е., Ковш А.Р.* и др. // ФТП. 2002. Т. 36 (11). С. 1400–1407.
- [3] *Жуков А.Е., Васильев А.П., Ковш А.Р.* и др. // ФТП. 2003. Т. 37 (12). С. 1461–1464.
- [4] *Kosogov A.O., Werner P., Gosele U.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69 (20). P. 3072–3074.
- [5] *Жуков А.Е., Егоров А.Ю., Ковш А.Р.* и др. // ФТП. 1997. Т. 31 (1). С. 105–109.
- [6] *Maximov M.V., Tsatsul'nikov A.F., Volovik B.V.* et al. // Phys. Review B. 2000. V. 62 (24). P. 16 671–16 680.
- [7] *Zhukov A.E., Ustinov V.M., Alferov Zh.I.* Device characteristics of low-threshold quantum-dot lasers, Selected Topics in Electronics and Systems. V. 16. Advances in semiconductor lasers and applications to optoelectronics (Eds M. Dutta and M.A. Stroschio. World Scientific, Singapore, 2000). P. 263–292.