

## Краткие сообщения

05;06;07;12

## Аномальные характеристики лазеров с большим числом квантовых ям

© А.А. Бирюков,<sup>1</sup> С.М. Некоркин,<sup>1</sup> М.Н. Колесников,<sup>1</sup> Т.С. Бабушкина,<sup>1</sup> В.Я. Алешкин,<sup>2</sup> А.А. Дубинов<sup>2</sup><sup>1</sup> Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,

603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН,

603950 Нижний Новгород, Россия

e-mail: sanya@ipm.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 28 июля 2010 г.)

Проведено экспериментальное исследование полупроводниковых лазеров с активной областью, содержащих шесть квантовых ям. Исследованы температурные зависимости рабочих характеристик (плотности порогового тока, внешней дифференциальной квантовой эффективности, диаграммы направленности). Обнаружено аномальное поведение температурной зависимости порогового тока и внешней дифференциальной квантовой эффективности, связанное с наличием отрицательной характеристической температуры и падением квантовой эффективности излучения при понижении температуры. Выявлено обужение диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной  $p-n$ -переходу при увеличении температуры.

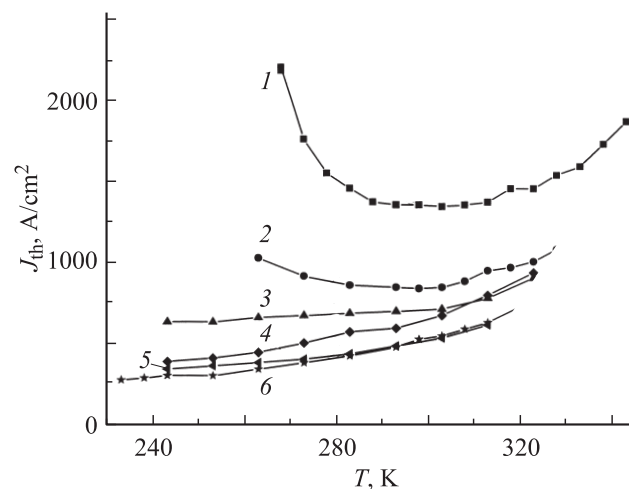
Для достижения высоких энергетических значений излучения лазерных диодов можно использовать несколько идентичных квантовых ям (КЯ) в активной области. Увеличенная активная область при этом позволит достичь большего значения оптического усиления при больших токах накачки. Однако концентрация носителей в КЯ может различаться, что приводит к неоднородности вклада в усиление лазерного диода. Неоднозначность влияния числа КЯ на пороговый ток, квантовую эффективность затормозила применение большого числа КЯ в активной области полупроводниковых лазерных диодах [1].

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования GaAs/AlGaAs/InGaAs гетеролазеров с шестью КЯ в сверхшироком волноводе. Параметры слоев исследуемой структуры приведены в таблице.

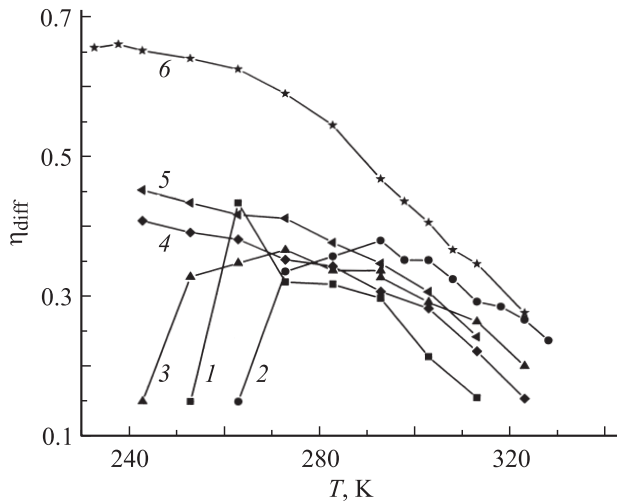
Гетероструктура GaAs/AlGaAs/InGaAs была выращена в НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского методом МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении на установке Aix200RF, а также изготовлены полупроводниковые лазерные чипы с шириной полосы активной области  $360 \mu\text{m}$  и длиной резонатора 0.5, 0.75, 1, 1.2 и 2 mm.

Температурные зависимости плотности порогового тока для лазерных диодов с различной длиной резонатора приведены на рис. 1. Для лазерных диодов с длиной резонаторов 0.5 и 0.75 mm обнаружены участки температур с отрицательными характеристическими температурами (плотность порогового тока увеличивается с уменьшением температуры). Температурные зависимости внешней дифференциальной квантовой эффективности для лазерных диодов с такими же значениями длины резонатора приведены на рис. 2. Необходимо отметить, что для резонатора длиной 0.5, 0.75 и 1 mm наблюдается участок резкого уменьшения внешней квантовой эффек-

тивности при понижении температуры. Кроме того, как видно из рис. 2, внешняя дифференциальная квантовая эффективность растет с длиной резонатора. Так как внешняя дифференциальная квантовая эффективность выражается следующим образом [2]:  $\eta_{\text{diff}} = \eta_{\text{m}} \frac{\alpha_{\text{m}}}{\alpha_{\text{m}} + \alpha_{\text{in}}}$  ( $\eta_{\text{m}}$  — внутренняя дифференциальная квантовая эффективность,  $\alpha_{\text{in}}$  и  $\alpha_{\text{m}}$  — коэффициенты внутренних потерь и потерь на выход излучения соответственно), а потери на выход излучения обратно пропорциональны длине резонатора  $L$  ( $\alpha_{\text{m}} = \frac{1}{2L} \ln(\frac{1}{R_1 R_2})$ , где  $R_1$  и  $R_2$  — коэффи-



**Рис. 1.** Температурные зависимости плотности порогового тока для лазерных диодов с длиной резонатора 0.5 (1), 0.75 (2), 1 (3), 1.2 (4), 2 mm (5) без нанесенных зеркал и для лазерного диода с нанесенными отражающим и просветляющим диэлектрическими зеркалами (6).



**Рис. 2.** Температурная зависимость внешней дифференциальной квантовой эффективности для лазерных диодов с длиной резонатора 0.5 (1), 0.75 (2), 1 (3), 1.2 (4), 2 mm (5) без нанесенных зеркал и для лазерного диода с нанесенными отражающим и просветляющим диэлектрическими зеркалами (6).

циенты отражения от граней резонатора), то объяснить наблюдаемое уменьшение внешней дифференциальной квантовой эффективности от уменьшения длины резонатора можно только уменьшением внутренней дифференциальной квантовой эффективности либо увеличением внутренних потерь. С уменьшением температуры этот эффект, как описывалось выше, только усиливается. Это явление можно объяснить присутствием в активной области шести КЯ, для которых возможно неравномерное распределение электронов и дырок по КЯ, что может приводить к отсутствию усиления и даже к поглощению излучения в некоторых КЯ, где концентрация носителей тока мала. С увеличением температуры распределение носителей тока между КЯ становится более равномерным, так как увеличивается обмен между КЯ. Тот же эффект дает уменьшение потерь на выход излучения (увеличение длины резонатора), так как это приводит к росту величины генерируемого электромагнитного поля в резонаторе, а значит, и к росту внутренней дифференциальной квантовой эффективности. Это означает, что в рассматриваемой лазерной структуре при низких температурах внутренняя дифференциальная квантовая эффективность мала.

Этим можно объяснить наличие участков с отрицательными характеристическими температурами лазеров. Для объяснения и описания наблюдаемых эффектов используем общепринятые формулы (см., например, [2]) для пороговой плотности тока  $J_{th}$  и характеристической температуры  $T_0$  полупроводникового лазера соответственно:

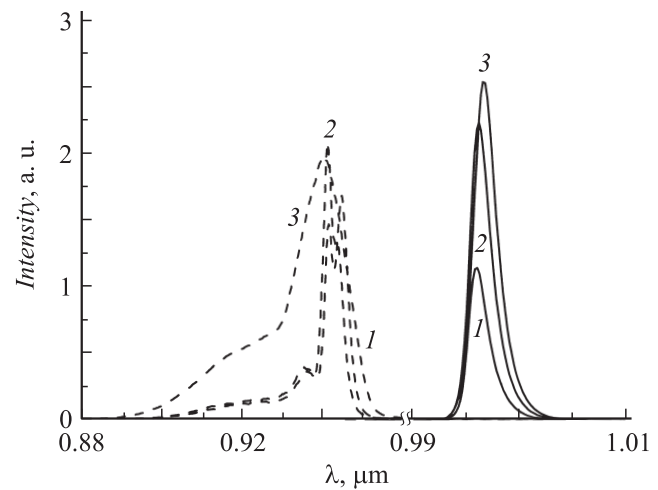
$$J_{th} = J_{tr} \exp\left(\frac{\alpha_m + \alpha_m}{g_0 \Gamma}\right), \quad T_0 = \left(\frac{d \ln J_{th}}{dT}\right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $J_{tr}$  — пороговая плотность тока прозрачности,  $g_0$  — параметр материального усиления,  $\Gamma$  — фактор оптического ограничения,  $T$  — температура. Используя

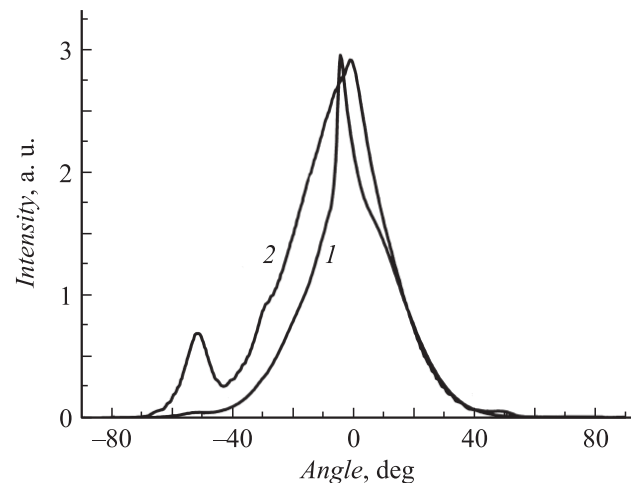
выражения (1), можно записать характеристическую температуру в следующем виде [2]:

$$\frac{1}{T_0} \approx \frac{d \ln J_{tr}}{dT} + \frac{1}{g_0 \Gamma} \frac{d \alpha_m}{dT} + \frac{\alpha_{in} + \alpha_m}{g_0 \Gamma^2} \frac{d \Gamma}{dT}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что при некоторых температурах уменьшение внутренних потерь с увеличением температуры может приводить к увеличению характеристической температуры вплоть до бесконечности и даже к отрицательным значениям характеристической температуры. По-видимому, это и наблюдалось в нашем эксперименте (рис. 1). Из сравнительного анализа спектральных зависимостей излучения, снятых при комнатной температуре и температуре жидкого азота при одинаковых токах накачки, можно сделать вывод об увеличении пороговой плотности тока генерации при понижении температуры до 77 К по сравнению с



**Рис. 3.** Спектральные зависимости излучения лазерного диода с длиной резонатора 1 mm, снятые при разных токах накачки (1 — ток 2.3 А, 2 — 3, 3 — 4). Сплошная кривая — температура тепловода 300, штриховая — 77 К.



**Рис. 4.** Диаграммы направленности излучения лазерного диода с длиной резонатора 0.5, снятые при температуре 40 (1) и 10°C (2). Ток накачки — 3.5 А.

Параметры слоев лазера с квантовыми ямами в волноводе

Номер слоя	Название слоя	Легирование и состав слоя	Толщина слоя, nm
1	Подложка	$n$ -GaAs	—
2	Буферный	$n$ -GaAs	550
3	Переходный	$n$ -GaAs- $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$	200
4	Ограничительный	$n$ - $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$	140
5	Волноводный	$i$ -GaAs	900
6	КЯ № 1	InGaAs	8
7	Волноводный	$i$ -GaAs	60
8	КЯ № 2	InGaAs	8
9	Волноводный	$i$ -GaAs	60
10	КЯ № 3	InGaAs	8
11	Волноводный	$i$ -GaAs	60
12	КЯ № 4	InGaAs	8
13	Волноводный	$i$ -GaAs	60
14	КЯ № 5	InGaAs	8
15	Волноводный	$i$ -GaAs	60
16	КЯ № 6	InGaAs	8
17	Волноводный	$i$ -GaAs	900
18	Ограничительный	$p$ - $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$	550
19	Переходный	$p$ - $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ -GaAs	200
20	Контактный	$p^+$ -GaAs	250

плотностью порогового тока, наблюдаемой при комнатной температуре, что связано с большими внутренними потерями.

Спектральные зависимости излучения лазерного диода с длиной резонатора 1 mm, снятые при комнатной температуре и температуре жидкого азота, приведены на рис. 3. Кроме того, тот же эффект будет возникать из-за третьего слагаемого в (2) при увеличении с температурой фактора оптического ограничения, тем более что этот член обратно пропорционален длине резонатора. Фактор оптического ограничения может измениться из-за изменения поперечного модового состава в лазерном резонаторе. Изменения поперечного модового состава сказываются в изменении диаграмм направленности, в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу. Для исследуемых лазеров были проведены измерения диаграмм направленности в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу, при различных температурах. На рис. 4 приведены такие диаграммы, измеренные при температурах 10 и 40°C для лазерного диода с длиной резонатора 0.5 mm. Выявлено обужение диаграммы направленности в плоскости, перпендикулярной  $p$ - $n$ -переходу при увеличении температуры. Подобная картина наблюдалась для всех длин резонаторов этой лазерной структуры. Наличие нескольких пиков на диаграмме направленности на рис. 4 для меньшей температуры в дополнение к центральному (около 0°) пику соответствует многомодовой генерации. Пик при угле  $-50^\circ$  соответствует моде с вытеканием в подложку, а следовательно, моде с большими внутренними потерями. Наличие подобного яркого пика в диаграмме направленности указывает на достаточно большую долю энергии в этой вытекающей в подложку моде, сопоставимую с долей энергии в основной моде. Это указывает на то, что пороговые токи для обеих мод достаточно большие.

При нанесении на торцы лазерных диодов с длиной резонатора 1 mm отражающих и просветляющих покрытий картина температурных зависимостей плотности порогового тока и внешней дифференциальной эффективности изменяется. Увеличивается температурная чувствительность плотности порогового тока и исчезает ярковыраженный участок уменьшения внешней квантовой эффективности при понижении температуры (рис. 2 и 3), что объясняется уменьшением потерь на выход излучения.

Таким образом, были созданы и исследованы полупроводниковые лазеры с шестью КЯ, в которых наблюдалось аномальное поведение температурной зависимости порогового тока и внешней дифференциальной квантовой эффективности, связанное с наличием отрицательной характеристической температуры и падением квантовой эффективности излучения при понижении температуры, обусловленным увеличением внутренних потерь.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-02-00371, 09-02-97025  $p$ -поволжье\_a, 09-02-90479-Укр\_ф\_a, 10-02-005501), программ РАН „Современные проблемы радиофизики“ и „Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров“, а также федеральной программы „Кадрь“.

## Список литературы

- [1] Snowton P.M., Lewis G.M., Sobiesierki A., Blood P., Lutti J., Osbourne S. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. P. 419.
- [2] Жуков А.Е. Лазеры на основе полупроводниковых наноструктур. СПб.: Элмор, 2007. 304 с.