

06.3

## Мощные пространственно-одномодовые лазеры диапазона $1.3\ \mu\text{m}$ на основе InAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур с квантовыми точками

© Д.А. Лившиц, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, Н.А. Малеев,  
С.С. Михрин, А.П. Васильев, Е.В. Никитина,  
В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, G. Lin, J. Chi

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
Industrial Technology Research Institute, Hsinchu, Taiwan R.O.C.  
E-mail: daniil.livshits@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 7 июля 2003 г.

Продемонстрированы пространственно-одномодовые лазеры диапазона длин волн  $1.3\ \mu\text{m}$  с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs. Минимальная пороговая плотность тока составила  $1.4\ \text{mA}$ , что является рекордным значением для лазерных диодов гребешковой конструкции. Максимальные значения эффективности и выходной мощности в непрерывном режиме генерации составили  $0.73\ \text{W/A}$  и  $120\ \text{mW}$  соответственно.

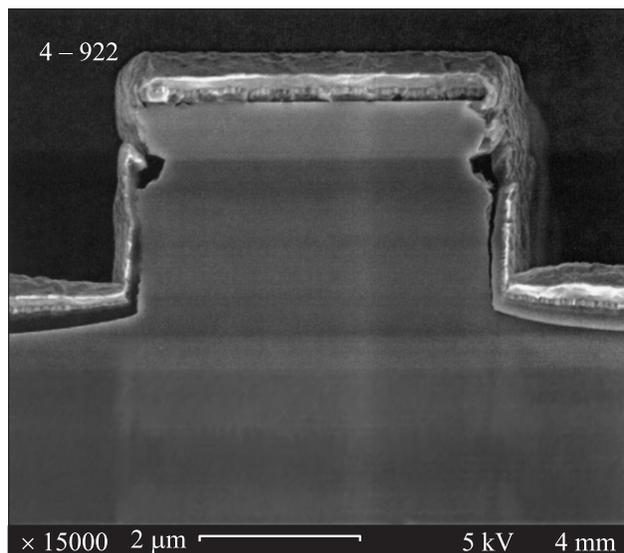
**Введение.** Лазерные диоды, излучающие на длине волны  $1.3\ \mu\text{m}$ , являются ключевым элементом высокоскоростных локальных волоконно-оптических линий связи (ЛВОЛС). Основными требованиями к подобным приборам являются низкая цена и высокая эффективность. Ожидается, что разрабатываемые в последние годы лазеры на основе GaAs могут в полной мере удовлетворить указанным требованиям в отличие от традиционно используемых лазерных диодов на основе InP. Существуют два основных подхода к получению длинноволновой генерации в структурах на подложках GaAs. Первый состоит в использовании квантовых ям InGaAsN с малым содержанием азота [1]. Необходимая длина волны  $\sim 1.3\ \mu\text{m}$  может быть также достигнута при использовании самоорганизующихся InAs квантовых точек (КТ) в качестве активной области лазерной структуры [2,3]. В случае использования InGaAsN квантовых ям до сих пор не решена проблема слишком высокой пороговой плотности тока [4]. В то же время для лазеров на

основе КТ серьезной проблемой является низкое дифференциальное усиление, которое требует большой длины резонатора для получения достаточной выходной мощности излучения на основном состоянии (ОС) массива КТ. В работе [5] нами было показано, что данная проблема может быть решена за счет использования в качестве активной области нескольких слоев КТ. В результате лазеры с многократно складированными массивами КТ (вплоть до 10) показали внешнюю дифференциальную эффективность выше 80% и выходную мощность свыше 5 W со 100  $\mu\text{m}$  апертуры.

В данной работе мы демонстрируем возможность получения мощных пространственно-одномодовых низкороговых лазеров, базирующихся на InAs/AlGaAs/GaAs структурах с КТ, излучающих в диапазоне длин волн 1.3  $\mu\text{m}$ .

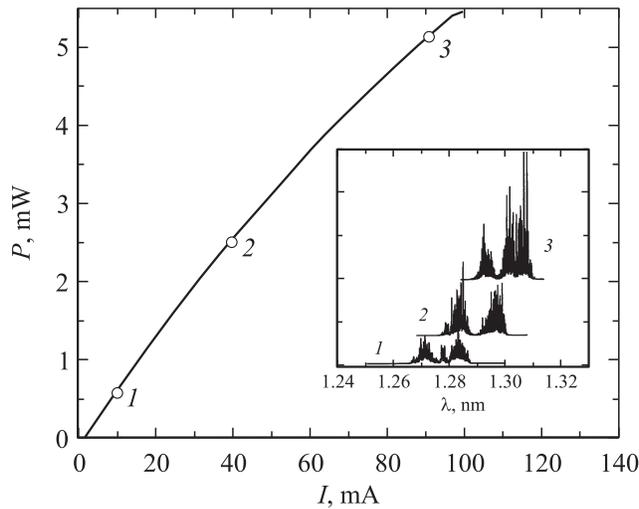
**Эксперимент.** Исследуемые лазерные структуры были выращены на установке Riber-32P методом молекулярно-пучковой эпитаксии в геометрии раздельного ограничения носителей заряда и световой волны. Активная область лазерных структур включала 2, 5 или 10 рядов квантовых точек InAs во внешней квантовой яме InGaAs, разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 33 nm. Подробное описание конструкции структур и особенностей эпитаксиального роста приведены в работе [5].

Из структур изготавливались лазеры гребешковой (Ridge waveguide) конструкции с шириной 2.7 или 4.5  $\mu\text{m}$ . На рис. 1 представлено изображение скола структуры поперек полоска, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. Гребешковый профиль формировался методом плазмохимического травления в системе газов  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  в режиме высокой плотности плазмы с контролем глубины травления лазерным интерферометром. Процесс травления останавливался на границе между верхним эмиттерным и волноводным слоем. Изолирующий диэлектрик  $\text{SiN}_x$  наносился методом активированного плазмой осаждения из газовой фазы. Окно в диэлектрике под нанесение Ti/Pt/Au *p*-контакта вскрывалось методом самосовмещающейся маски. Для надежного электрического контакта на *p*-сторону структуры гальваническим методом наносился слой золота толщиной 0.5  $\mu\text{m}$ . Лазеры паивались *p*-стороной вверх на металлизированные носители из AlN-керамики с коэффициентом теплопроводности  $1.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , затем носители монтировались в стандартный корпус TO46.



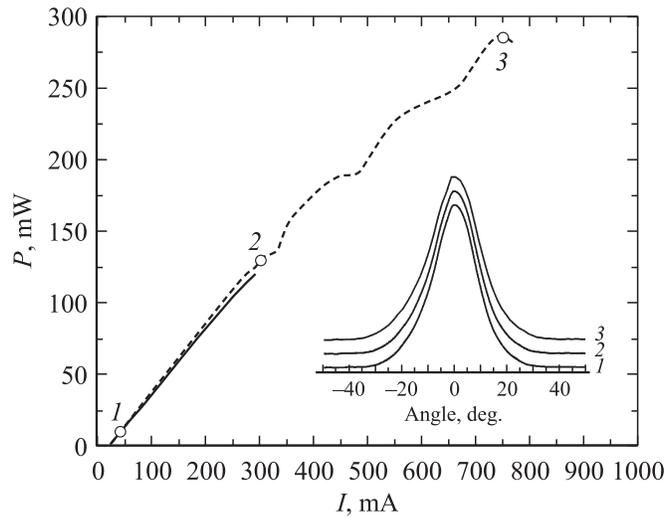
**Рис. 1.** Изображение поперечного скола лазера, полученное с помощью электронного сканирующего микроскопа.

**Результаты измерений и их обсуждение.** Для достижения минимальной величины порогового тока из структуры с 2 слоями КТ были изготовлены лазеры с длиной резонатора  $600\mu\text{m}$ . На переднюю и заднюю сколотые грани лазеров методом электронно-лучевого распыления были нанесены интерференционные высокоотражающие покрытия 3 и 4 пар слоев  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$  соответственно. Типичная ватт-амперная характеристика таких лазеров, измеренная в непрерывном режиме, приведена на рис. 2. При температуре  $25^\circ\text{C}$  на лазерном диоде с длиной резонатора  $0.6\text{mm}$  был получен пороговый ток  $1.4\text{mA}$ , что является рекордным результатом для лазеров гребешковой конструкции. Более низкие пороги, сообщенные в литературе, были получены только на лазерах с конструкциями, обеспечивающими локализацию носителей заряда в области мезы: в лазерах на квантовых ямах с конструкцией „зарощенная меза“ [6] и в лазерах на КТ с „оксидированной апертурой“ [7]. Несмотря на высокоотражающее покрытие



**Рис. 2.** Записанная в непрерывном режиме ватт-амперная характеристика лазерного диода на базе структуры с 2 слоями КТ. На вставке — спектры при токах 10, 40 и 90 мА.

передней выводной грани, прибор имеет эффективность  $0.07 \text{ W/A}$  и выходную мощность  $5.5 \text{ mW}$  при токе накачки  $100 \text{ mA}$ . Столь малый порог мы объясняем низкими внутренними оптическими потерями в структуре (менее  $1.5 \text{ cm}^{-1}$ ), которые были определены из зависимости дифференциальной эффективности от длины резонатора, а также малым числом состояний носителей в активной области лазера, состоящей из 2 слоев КТ, что определяет низкий ток прозрачности. На вставке рис. 2 приведены спектры генерации при токах накачки 10, 40 и 90 мА. Во всем диапазоне токов накачки генерация происходит только через ОС массива КТ. Однако в лазерах без высокоотражающих покрытий на основе структуры с 2 слоями КТ уже при незначительном превышении порогового тока наблюдалось возникновение генерации через первое возбужденное состояние (ВС) ( $\lambda = 1.21 \mu\text{m}$ ) одновременно с генерацией на ОС ( $\lambda = 1.28 \mu\text{m}$ ). Данный эффект мы связываем с накоплением носителей на возбужденных состояниях при увеличении тока накачки в связи с конечным временем перехода носителей заряда с ВС на ОС [8].



**Рис. 3.** Ватт-амперные характеристики лазерного диода на базе структуры с 10 слоями КТ, записанные в непрерывном (сплошная линия) и в импульсном режиме (пунктирная линия). На вставке — картины дальнего поля при токах 40, 300 и 750 мА.

Ток, и соответственно выходная мощность, при которых начинается генерация на ВС, напрямую зависят от количества рядов КТ [5]. Например, на структурах с 5 и 10 слоями КТ режим генерации на ОС был значительно расширен в область больших мощностей. На основе структуры с 5 слоями КТ в лазере с шириной гребешка  $2.7 \mu\text{m}$ , длиной резонатора 1 мм и просветляющим и высокоотражающим покрытиями на передней и задней гранях соответственно была получена внешняя квантовая эффективность 75%. Данное значение является рекордным для одномодовых лазеров на КТ данного спектрального диапазона. На рис. 3 приведена типичная ватт-амперная характеристика лазера на основе структуры с 10 слоями КТ, измеренная в непрерывном режиме — сплошная линия, и в импульсном режиме (длительность импульса  $2 \mu\text{s}$ ) — пунктирная линия. Лазер с длиной резонатора 2 мм имеет просветляющее и высокоотражающее покрытие на передней и задней гранях соответственно. Ширина гребешкового волновода

у основания мезы составляет  $4.5 \mu\text{m}$ , что обеспечивает устойчивую генерацию в одномодовом режиме. На вставке на рис. 3 представлены картины дальнего поля в плоскости  $p$ - $n$ -перехода, измеренные при токах накачки 40, 300 и 750 мА. Распределение интенсивности излучения имеет вид функции Гаусса, а его ширина на полувысоте лишь незначительно меняется с  $16.1^\circ$  на пороге генерации до  $17.5^\circ$  при выходной мощности 280 мВт. Пороговый ток лазера при температуре измерения  $25^\circ\text{C}$  составляет 19 мА, внешняя квантовая эффективность на начальном участке характеристики достигает 50%. В непрерывном режиме на токе 300 мА достигается мощность одномодового излучения 120 мВт, что является рекордной величиной для длинноволновых лазеров на базе структур с КТ [9]. При дальнейшем увеличении тока накачки в непрерывном режиме наблюдаются насыщение выходной мощности на ОС и возникновение генерации на ВС. Отметим, что импульсная ватт-амперная характеристика, представленная на рис. 3 на токах выше 300 мА, имеет многочисленные воспроизводимые изломы. Данное явление нельзя объяснить конкуренцией пространственных мод или „перескоком“ генерации на ВС, так как во всем диапазоне токов лазер остается одномодовым, а генерация на ВС возникает только при токах более 750 мА. Такое поведение характерно для всех лазеров на базе структур с 5 и 10 слоями КТ при плотности тока накачки более  $3 \text{ kA/cm}^2$  и требует проведения дальнейших исследований.

Так как в большинстве ЛВОЛС в качестве передающего элемента используются лазеры с оптической мощностью порядка 10 мВт, то при использовании структур с КТ рабочий ток может быть в пределах 30–50 мА, т. е. заведомо находится в области стабильной ватт-амперной характеристики. При таких рабочих токах выделение тепловой мощности лазера не превышает величины 50–70 мВт, и она может быть рассеяна на корпусе модуля без принудительного охлаждения. Таким образом, лазеры на КТ могут использоваться без термоэлектрического холодильника, что позволяет существенно снизить цену передающего модуля.

**Заключение.** В работе получены и исследованы длинноволновые пространственно-одномодовые лазеры на базе InAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур с различным числом слоев КТ. Лазер на основе структуры с двумя слоями КТ демонстрирует рекордно низкий пороговый ток для лазеров гребешковой конструкции. Достигнуты рекордные значения выходной мощности в непрерывном (120 мВт) и импульсном (280 мВт)

режимах, а также дифференциальной квантовой эффективности (75%) для пространственно-одномодовых лазеров диапазона  $1.3\ \mu\text{m}$  на основе КТ.

## Список литературы

- [1] *Borchert B., Egorov A.Y., Illek S.* et al. / IEEE Phot. Technol. Lett. 2000. V. 12. P. 597–601.
- [2] *Schekin O.B., Park G., Huffaker D.L.* et al. // IEEE J. Quantum Electron. 2000. V. 36. P. 472–477.
- [3] *Ustinov V.M., Zhukov A.E., Maleev N.A.* et al. // J. Cryst. Growth. 2001. V. 227–228. P. 1155–1161.
- [4] *Livshits D.A., Egorov A.Yu., Riechert H.* // Electron. Lett. 2000. V. 36 (16). P. 1643–1644.
- [5] *Kovsh A.R., Maleev N.A., Zhukov A.E.* et al. // Electron. Lett. 2002. V. 38 (19). P. 1104–1106.
- [6] *Chen T.F.L., Zhao B., Zhuang Y.H.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60 (15). P. 1782–1784.
- [7] *Huffaker D.L., Park G., Zou Z.* et al. // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2000. V. 6 (3). P. 452–461.
- [8] *Zhukov A.E., Kovsh A.R., Livshits D.A.* et al. // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18 (in print).
- [9] *Михрин С.С., Жуков А.Е., Ковш А.Р.* и др. // ФТП. 2000. Т. 34 (1). С. 117–120.