

Пространственно одномодовый лазер диапазона 1.25–1.28 мкм с квантовыми точками InAs на подложке GaAs

© С.С. Михрин, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.А. Малеев, В.М. Устинов, Ю.М. Шерняков, И.Н. Каяндер, Е.Ю. Кондратьева, Д.А. Лившиц, И.С. Тарасов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, П.С. Копьев, Д. Бимберг*, Ж.И. Алфёров

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

* Institut für Festkörperphysik Technische Universität Berlin, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 20 сентября 1999 г. Принята к печати 23 сентября 1999 г.)

Реализована пространственно одномодовая генерация в диапазоне длин волн 1.25–1.28 мкм в инжекционных лазерах на подложках GaAs. Максимальная выходная мощность при комнатной температуре составляет 110 мВт, дифференциальная эффективность 37%. Активная область лазера представляет собой массив самоорганизующихся квантовых точек InAs.

В настоящее время актуальной задачей является разработка дешевых лазеров диапазона 1.3 мкм на подложках GaAs, призванных заменить существующие InP-лазеры в системах волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Кроме того, ожидается, что более глубокая локализация носителей в активной области позволит существенно улучшить приборные характеристики [1]. Недавно было обнаружено, что рабочий диапазон GaAs-лазеров может быть расширен до длин волн 1.24–1.31 мкм при использовании в активной области массива самоорганизующихся квантовых точек (КТ) (In,Ga)As [2–5]. Были продемонстрированы рекордно низкая пороговая плотность тока (26 А/см²) [3], высокая температурная стабильность ($T_0 = 160$ К) [4], высокие дифференциальная эффективность (50%) и выходная мощность (2.7 Вт) [5]. Однако эти многообещающие характеристики были реализованы в многомодовых лазерах с широким (50–200 мкм) полоском, тогда как о создании пространственно одномодовых КТ лазеров диапазона 1.3 мкм, требуемых в ВОЛС, насколько нам известно, не сообщалось.

Для решения этой задачи требуется формирование узких полосковых структур (с шириной полоска $W < 10$ мкм). При этом внутренние потери увеличиваются из-за более сильного рассеяния световой волны на неоднородностях границ полоска. Увеличение дифференциальной эффективности при возросших внутренних потерях и достижение большого выхода лазерных диодов с эпитаксиальной пластины обуславливают необходимость уменьшения длины полоска. Соответствующее увеличение оптических потерь может сделать невозможным достижение длинноволновой генерации через основное состояние КТ вследствие недостаточного усиления.

В настоящей работе мы исследуем пространственно одномодовые КТ лазерные диоды на подложках GaAs, излучающие на длине волны 1.25 мкм. Эпитаксиальная структура была выращена в геометрии двойной гетероструктуры AlGaAs/GaAs с раздельным ограничением на подложке *n*-GaAs(100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке RIBER-32P. Активная область ла-

зерной структуры состояла из трех рядов квантовых точек InAs, зарощенных твердым раствором In_{0.13}Ga_{0.87}As толщиной 5.5 нм и разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 33 нм. Толщина волновода (в направлении роста) составляла 0.4 мкм. Подробности эпитаксиального роста описаны в [5]. Из эпитаксиальной структуры были изготовлены лазерные диоды в гребешковой геометрии с шириной полоска $W = 7$ мкм. Остаточная толщина верхнего эмиттера в протравленной области составила 0.6 мкм. В качестве изолятора, формирующего полосковый контакт, использовался слой SiO₂ толщиной 0.2 мкм, нанесенный магнетронным распылением кремния в атмосфере кислорода. Длина полоска L варьировалась в пределах 0.55–2.6 мм. Грани резонатора не защищались каким-либо покрытием. Диоды были питаемы *p*-контактом на медный теплоотвод. Все приборные характеристики исследовались при непрерывном возбуждении при 22°C, если не указана иная температура.

На рис. 1 представлена зависимость пороговой плотности тока J_{th} и длины волны генерации λ от длины полоска L . Из рисунка видно, что в длинных диодах ($L \geq 2$ мм) реализуется генерация через основное состояние КТ ($\lambda = 1.253$ мкм). Наименьшее значение J_{th} составило 250 А/см² при $L = 2.55$ мм. При уменьшении длины полоска ($L \leq 1.25$ мм) наблюдается переход к генерации через первое возбужденное состояние КТ ($\lambda = 1.18$ мкм), сопровождающийся резким возрастанием J_{th} . Для достижения генерации через основное состояние КТ необходимо соблюдение условия

$$\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \leq g^{sat}, \quad (1)$$

где α_i — внутренние потери, $R_{1,2}$ — коэффициенты отражения граней резонатора (0.32 в данном случае), g^{sat} — насыщенное, т.е. максимально достижимое усиление. Внутренние потери в исследуемых узких полосках были определены из анализа зависимости внешней дифференциальной эффективности от длины полоска

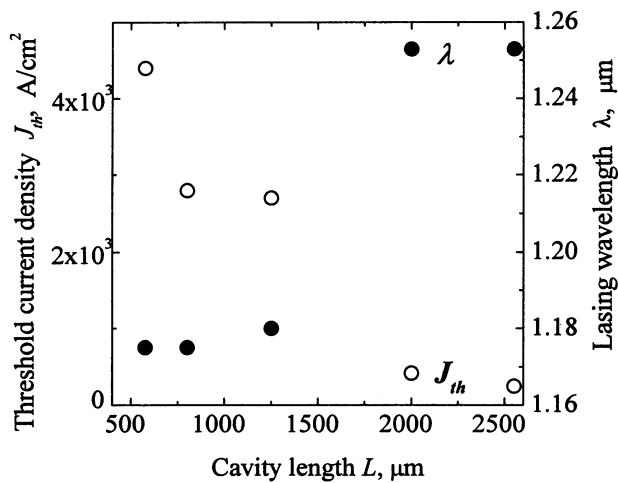


Рис. 1. Зависимость пороговой плотности тока (светлые кружки) и длины волны генерации (темные кружки) от длины полоска.

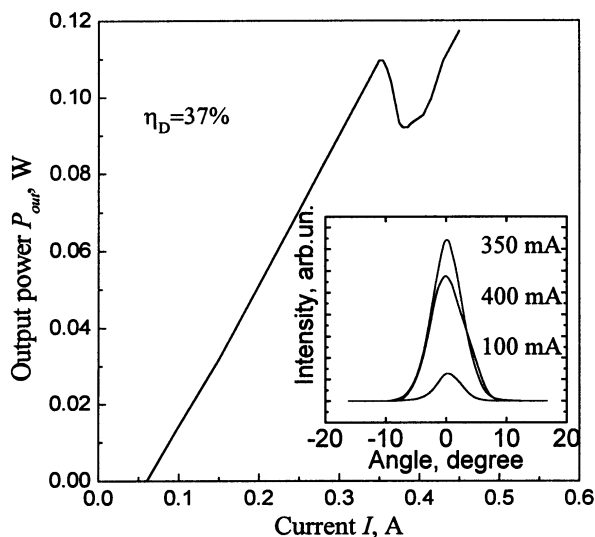


Рис. 2. Зависимость выходной оптической мощности от тока накачки. Величина внешней дифференциальной эффективности (η_D) составляет 37%. На вставке — зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения при различных токах накачки (100, 350, 400 мА).

равными 5.2 см^{-1} при внутренней квантовой эффективности $\eta_i = 70\%$. Это позволяет оценить насыщенное усиление для основного состояния КТ равным 10.9 см^{-1} . Это значение превосходно согласуется с величиной $g^{\text{sat}} = 11 \text{ см}^{-1}$, определенной из анализа характеристик широких диодов ($W = 200 \text{ мкм}$) [5]. Отметим, что в последнем случае переход к генерации через возбужденное состояние КТ наблюдался в более коротких диодах ($L \sim 1.2 \text{ мм}$) как следствие более низких внутренних потерь (1.5 см^{-1}). Таким образом, относительно невысокая величина насыщенного усиления, присущая данной активной области с тремя рядами

КТ, накладывает ограничение на минимальную длину полоска. Использование большего количества рядов КТ позволит достичь генерации через основное состояние в более коротких полосках и тем самым увеличить дифференциальную эффективность.

На рис. 2 приведена зависимость выходной мощности P_{out} (в непрерывном режиме) от тока накачки для лазера длиной 2 мм. Величина порогового тока I_{th} составляет 60 мА, дифференциальная квантовая эффективность $\eta_D = 37\%$. На вставке показана зависимость интенсивности излучения от угла наблюдения вдоль плоскости p - n -перехода при различных токах накачки. Форма картин дальнего поля для значений тока накачки, меньших 350 мА, близка к гауссовой, что указывает на пространство одномодовый характер излучения данного лазера. При значениях тока накачки выше 350 мА происходит образование гибридной моды, сопровождающееся уменьшением регистрируемой выходной мощности. Максимальная мощность, достигаемая на данной структуре в режиме одномодовой непрерывной генерации, составляет 110 мВт (рис. 2).

На рис. 3 показаны спектры генерации, записанные при различных значениях выходной оптической мощности. Каждый спектр представляет собой совокупность множества продольных мод, т.е. исследуемые лазеры не являются одночастотными. Положение максимума сдвигается в область больших длин волн при увеличении тока накачки вследствие разогрева активной области в непрерывном режиме генерации. Спектральная ширина линии излучения δ растет с током, достигая 8 нм при 330 мА (100 мВт).

Учитывая поверхностную плотность КТ ($N_{\text{QD}} = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в каждом слое) и геометрические размеры резонатора ($7 \text{ мкм} \times 2 \text{ мм}$), мы можем оценить

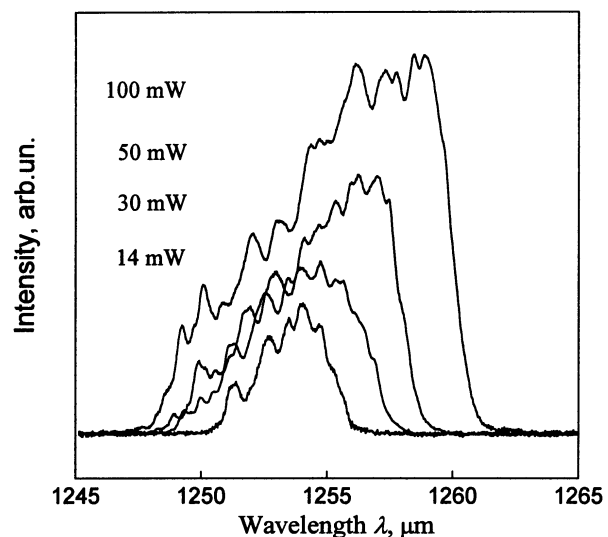


Рис. 3. Спектры лазерной генерации, записанные при различной выходной оптической мощности (14–100 мВт).

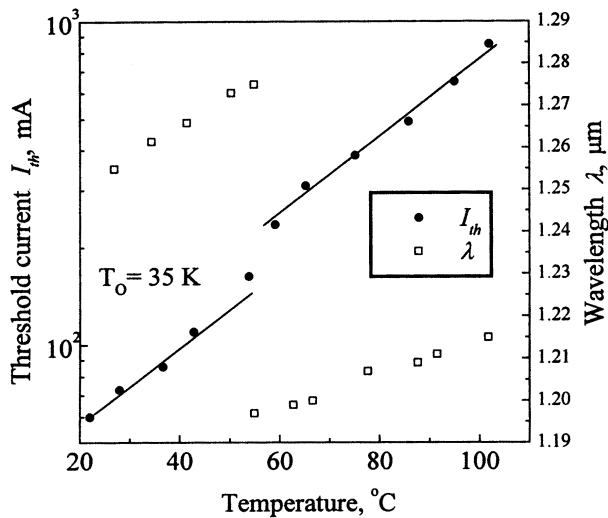


Рис. 4. Температурные зависимости порогового тока и длины волны генерации. Характеристическая температура (T_0) составляет 35 К.

полное количество КТ, участвующих в генерации,

$$n_{\text{las}} = \frac{\delta}{\Delta} W L N N_{QD}, \quad (2)$$

равным приблизительно $3.4 \cdot 10^6$. В выражении (2): N — количество рядов КТ, Δ — величина неоднородного уширения, определенная из спектра фотолюминесценции равной 42 мэВ (50 нм). Следовательно, каждая КТ излучает приблизительно $p_{QD} = 30$ нВт выходной оптической мощности, что соответствует 56 нВт полной излучаемой мощности ($\eta_i/\eta_D p_{QD}$). Это заметно превышает соответствующую величину ($p_{QD} = 12.5$ нВт), вычисленную для лазера диапазона 1.1 мкм с активной областью на основе самоорганизующихся КТ InGaAs в матрице GaAs [6].

Мы полагаем, что это обусловлено более быстрым захватом носителей в основное состояние КТ, помещенных во внешнюю квантовую яму [3]. Мощность, излучаемая одной КТ, равна энергии излучаемого фотона (приблизительно 1 эВ в исследуемом случае), приведенной к времени стимулированной рекомбинации τ . Таким образом, при выходной оптической мощности 100 мВт величина τ составляет приблизительно 2.5 пс. В режиме лазерной генерации возрастание оптической мощности с током обусловлено соответствующим уменьшением величины τ . Однако, когда τ становится сравнимым с временем заполнения состояния, участвующего в генерации, мощность, излучаемая в данную спектральную моду, насыщается. Такими образом, время заполнения основного состояния исследуемого массива КТ, оцененное как нижний предел τ , равно 2.5 пс.

На рис. 4 показана температурная зависимость порогового тока и длины волны излучения для диода длиной 2 мм. Генерация через основное состояния наблюдается

вплоть до 54°C. Длина волны достигает при этой температуре значения 1.28 мкм, пороговый ток составляет 163 мА. Характеристическая температура T_0 оценена в этом диапазоне равной 35 К. Отметим, что, как было нами обнаружено при исследовании широких лазерных диодов, изготовленных из этой же эпитаксиальной пластины, температурная зависимость порогового тока существенно зависит от соотношения между пороговым усилением лазера и насыщенным усилением активной среды, $g^{\text{th}}/g^{\text{sat}}$ [7]. Чем меньше отношение $g^{\text{th}}/g^{\text{sat}}$, тем выше величина T_0 при комнатной температуре. Так, в лазере с четырьмя сколотыми гранями было получено $T_0 = 160$ К [4]. Взаимосвязь порогового усиления и температурных характеристик обсуждалась также в [8,9]. Таким образом, использование большего числа рядов КТ в активной области лазера, вероятно, позволит увеличить значение T_0 .

Таким образом, в настоящей работе исследованы инжекционные лазеры с активной областью на основе трех рядов самоорганизующихся КТ InAs, помещенных во внешнюю квантовую яму InGaAs. Впервые реализована пространственно одномодовая генерация на длине волны 1.25–1.28 мкм в лазерах на подложках GaAs. Максимальная выходная мощность составляет 110 мВт при внешней дифференциальной эффективности 37%. Время заполнения основного состояния КТ оценено как 2.5 пс. Использование большего числа рядов КТ позволит уменьшить спектральную ширину линии генерации, достичь более высокой дифференциальной эффективности, а также повысить температурную стабильность порогового тока.

Список литературы

- [1] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani, M.C. Larson, K. Uomi. IEEE Photon. Tech. Lett., **10**, 487 (1998).
- [2] G. Park, D.L. Huffaker, Z. Zou, D.G. Deppe. IEEE Photon. Tech. Lett., **11**, 301 (1999).
- [3] L.F. Lester, A. Stinz, H. Li, T.C. Newell, E.A. Pease, B.A. Fuchs, K.L. Malloy. IEEE Photon. Tech. Lett., **11**, 931 (1999).
- [4] Yu.M. Shernyakov, D.A. Bedarev, E.Yu. Kondrat'eva, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, M.V. Maximov, S.S. Mikhrin, A.F. Tsatsul'nikov, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Electron. Lett., **35**, 898 (1999).
- [5] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, Yu.M. Shernyakov, S.S. Mikhrin, N.A. Maleev, E.Yu. Kondrat'eva, D.A. Livshits, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. IEEE Photon. Technol. Lett., (1999), in print.
- [6] M. Grundmann, F. Heinrichsdorf, N.N. Ledentsov, C. Ribbat, D. Bimberg, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov. Jpn. J. Appl. Phys., (1999), in print.
- [7] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.M. Shernyakov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **75**(13), (1999), in print.

- [8] H. Temkin, D. Coblenz, R.A. Logan, J.P. van der Ziel, T. Tanbun-Ek, R.D. Yadvish, A.M. Sergent. Appl. Phys. Lett., **62**(19), 2402 (1993).
- [9] S. Seki, H. Oohasi, H. Sugiura, T. Hirono, K. Yokoyama. J. Appl. Phys., **79**(5), 2192 (1996).

Редактор В.В. Чалдышев

Single-mode 1.25–1.28 μm laser with InAs quantum dots on GaAs substrate

S.S. Mikhurin, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kayander, E.Yu. Kondrat'eva, D.A. Livshits, I.S. Tarasov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg*, Zh.I. Alferov

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

* Institut für Festkörperphysik,
Technische Universität Berlin,
D-10623 Berlin, Germany

Abstract We report on the realization of the single-mode lasing at 1.25–1.28 μm in injection lasers on GaAs substrates. Maximum output power of 110 mW and differential efficiency of 37% at room temperature were measured. The active region of the laser structure consists of the array of self-organized InAs quantum dots.