

Лазерная генерация на длине волны 1.5 мкм в структурах с квантовыми точками на подложках GaAs

© А.Е. Жуков[¶], А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, А.Ю. Егоров, В.А. Одноблюдов, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров

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

(Получена 2 июня 2003 г. Принята к печати 3 июня 2003 г.)

Сообщается о реализации лазерной генерации на длине волны 1488–1515 нм в диапазоне температур 20–83°С в структурах с активной областью на основе многослойных массивов самоорганизующихся квантовых точек, выращенных на подложках GaAs. В лазере с четырьмя сколотыми гранями пороговая плотность тока составила 800 А/см² при комнатной температуре. Метод увеличения длины волны основан на использовании метаморфного переходного слоя с содержанием индия около 20%, предназначенного для релаксации напряжения рассогласования.

1. Введение

Недавние успехи в создании инжекционных лазеров с активной областью на основе самоорганизующихся квантовых точек (КТ) на подложках GaAs, работающих на длине волны 1.3 мкм [1,2], мотивируют интерес к исследованиям с целью продвижения в область больших длин волн — вплоть до 1.55 мкм. Подобные структуры могут стать альтернативой традиционным лазерам этого спектрального диапазона на основе системы материалов InGaAsP/InP, а также перспективны для создания монолитных вертикально-излучающих лазеров.

Ранее нами было показано [3], что длина волны лазерной генерации в структурах на основе самоорганизующихся КТ InAs может быть управляемо увеличена с помощью уменьшения ширины запрещенной зоны матрицы, окружающей массив КТ. В частности, при осаждении на подложках InP использование матрицы In_{0.53}Ga_{0.47}As, согласованной по параметру решетки с подложкой, позволило нам достичь длины волны генерации 1.9 мкм [4]. Однако в случае применения подложек GaAs слои InGaAs являются несогласованными по параметру решетки. В рамках концепции псевдоморфного осаждения ширина запрещенной зоны матрицы InGaAs ограничена значениями около 1.25 эВ, что в свою очередь ограничивает длину волны генерации КТ лазера значениями 1.3–1.35 мкм. Достижение существенного уменьшения ширины запрещенной зоны матрицы InGaAs, окружающей массив КТ, позволяет применение метаморфных гетероструктур. Было продемонстрировано [5], что при использовании специальных режимов осаждения переходного буферного слоя InGaAs релаксация напряжения происходит преимущественно путем образования дислокаций несоответствия, локализованных в области интерфейса. Это позволяет затем выращивать свободные от дислокаций слои InGa(Al)As с содержанием индия около 20%, формирующие лазерную структуру. Используя указанный метод, в работе [5] была продемонстри-

рована генерация на длине волны 1.29 мкм в лазере на основе двух квантовых ям InGaAs с более высоким по отношению к окружающей матрице содержанием индия (около 40%).

В настоящей работе мы применяем концепцию метаморфного роста к лазерам с активной областью на основе самоорганизующихся квантовых точек. Длина волны генерации при комнатной температуре составила 1488 нм при пороговой плотности тока 800 А/см². Лазерная генерация наблюдалась вплоть до 83°С (1515 нм, 2.5 кА/см²).

2. Эксперимент

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32P с твердотельным источником As на подложках *n*⁺-GaAs(100). Зонная диаграмма базовой конструкции, далее обозначаемой MMQD1, схематически показана на рис. 1, а. Мольная доля индия во всех слоях лазерной структуры, за исключением активной области, составляла около 21%. Легированный кремнием переходный буферный слой InGaAs толщиной около 1.2 мкм осаждался непосредственно на поверхность GaAs. В качестве лазерного волновода использовался нелегированный слой InGaAs толщиной около 0.7 мкм, ограниченный эмиттерными слоями InAlGaAs толщиной 1.6 мкм *n*- и *p*-типа, легированными кремнием или бериллием соответственно, с концентрацией $(5-10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Соотношение мольных долей Al и Ga составляет примерно 3/5. В середину волноводного слоя помещены 10 рядов самоорганизующихся квантовых точек InAs. Каждый из рядов КТ получен осаждением InAs с эффективной толщиной 2.7 монослоя и покрыт квантовой ямой In_{0.4}Ga_{0.6}As толщиной 4 нм. Толщина спейсерных слоев InGaAs, разделяющих ряды КТ, составляет 45 нм. Структура завершается контактным слоем InGaAs толщиной около 0.4 мкм, легированным бериллием с концентрацией 10^{19} см^{-3} .

[¶] E-mail: zhukov@beam.ioffe.ru

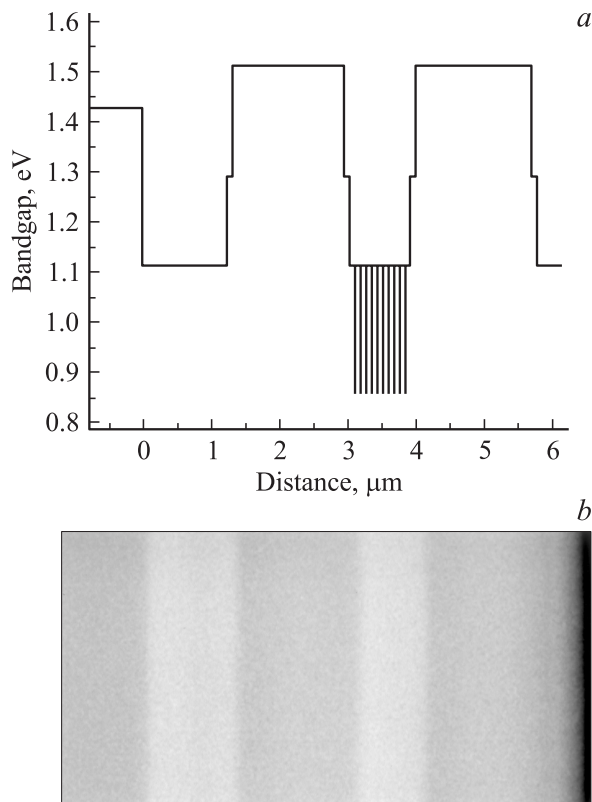


Рис. 1. Схематическое изображение зонной структуры исследованной лазерной структуры (а) и микрофотография скола лазерной структуры, полученная методом сканирующей электронной микроскопии (б).

Таким образом, конструкция метаморфной лазерной структуры MMQD1 близка к типичному дизайну, используемому в лазерах на основе КТ диапазона длин волн 1.3 мкм на подложках GaAs. Однако использование метаморфной гетероструктуры с содержанием индия около 21% позволяет уменьшить ширину запрещенной зоны матрицы до 1.12 эВ при комнатной температуре, в результате чего положение максимума фотолюминесценции массива КТ достигает 1.45 мкм. Предложенный метод является также альтернативой использованию подложек InGaAs (например, [6]), производство которых не получило к настоящему времени широкого распространения.

Как видно, в описанной структуре релаксация напряжения рассогласования происходит на буферном слое InGaAs, и активная область оказывается заметно удалена от подложки GaAs (в среднем примерно на 3 мкм). Это нежелательно с точки зрения применения концепции метаморфного роста для создания вертикально излучающих лазерных структур, так как полная толщина структуры ограничена величиной в несколько длин волн (типично не более 2 мкм). С целью проверки возможности уменьшения полной толщины метаморфной лазерной структуры была применена конструкция MMQD2. Ее основное отличие от базовой структуры MMQD1 за-

ключается в отсутствии InGaAs-буферного слоя. Релаксация напряжения происходит непосредственно в слое InGaAlAs:Si, который, таким образом, выполняет роль нижнего эмиттера и переходного буферного слоя. Это позволяет значительно приблизить активную область к интерфейсу GaAs-подложки.

Из выращенных структур были изготовлены лазеры с четырьмя сколотыми гранями. Контакты *n*- и *p*-типа формировались напылением и сплавлением (450°C) металлических слоев AuGe/Ni/Au и AuZn/Ni/Au соответственно. Характеристики лазеров исследовались в температурном диапазоне 20–85°C при возбуждении импульсами тока длительностью 0.2 мкс. Для регистрации сигнала использовался германиевый фотодиод.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1, б приведена фотография скола лазерной структуры MMQD1, полученная методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Следует отметить высокую планарность всех гетероинтерфейсов, а также отсутствие микротрещин, отслаивания и других дефектов скола. Последнее обстоятельство позволяет формировать зеркала лазерного резонатора скальванием граней, как и в случае неметаморфных лазеров на GaAs.

Пороговые и спектральные характеристики лазеров, выращенных с использованием двух описанных выше различных дизайнов (MMQD1 и MMQD2), оказались весьма близки. Поэтому в дальнейшем отличия между ними обсуждаться не будут.

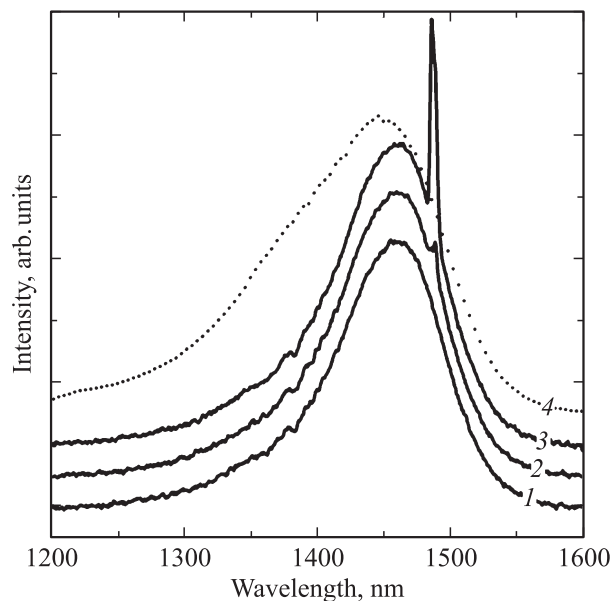


Рис. 2. Сплошные линии: спектры электролюминесценции при различных плотностях тока накачки (линия 1 соответствует 770 А/см², 2 — 800 А/см², 3 — 830 А/см²). Штриховая линия 4 — спектр фотолюминесценции от лазерной структуры, подвергнутой травлению в растворе H₂SO₄:H₂O₂:H₂O.

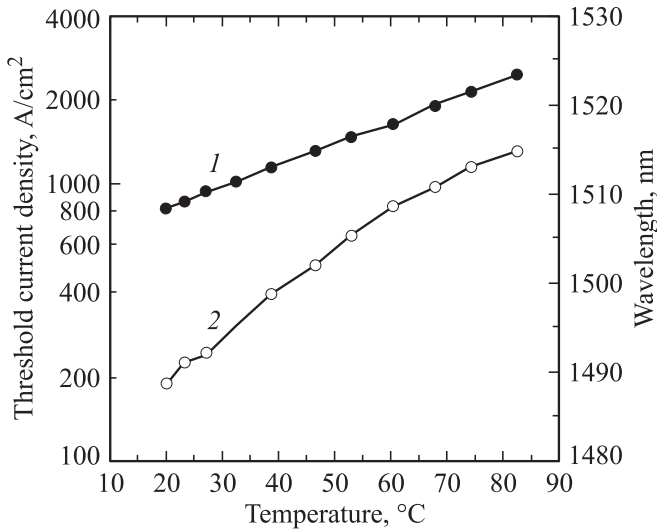


Рис. 3. Зависимость пороговой плотности тока (1) и длины волны лазерной генерации (2) от температуры.

На рис. 2 приведен записанный с поверхности спектр фотолюминесценции (ФЛ) при комнатной температуре от части лазерной структуры с удаленными контактными слоями и частью верхнего эмиттера. Максимум линии ФЛ от активной области лазера расположен на длине волны 1.45 мкм, что соответствует пику люминесценции от массива КТ, измеренному в тестовых структурах. Таким образом, отсутствует коротковолновый сдвиг линии люминесценции в лазерной структуре по отношению к тестам, часто наблюдаемый в КТ-лазерах диапазона длин волн 1.3 мкм.

На рис. 2 также показаны спектры электролюминесценции лазерной структуры, записанные с торца при различных плотностях тока накачки. Линия лазерной генерации возникает на длине волны 1488 нм при пороговой плотности тока 800 A/cm^2 . Линия генерации заметно сдвинута в длинноволновую сторону по отношению к максимуму ФЛ, что свидетельствует о достаточном запасе оптического усиления (насыщенное усиление заметно превышает внутренние потери). Достигнутые значения пороговой плотности тока следует сравнить с лучшими результатами, полученными в лазерах на основе азотсодержащих псевдоморфных квантовых ям. В работах [7,8] сообщалось о достижении лазерной генерации в структурах с квантовыми ямами InGaAsN и InGaAsNSb на длинах волн 1.52 и 1.50 мкм соответственно при пороговой плотности тока 7 и 3.5 kA/cm^2 .

На рис. 3 приведены зависимости пороговой плотности тока и длины волны генерации от температуры. Лазерная генерация наблюдается вплоть до максимальной температуры измерения 83°C . Длина волны при этом составила 1515 нм, а пороговая плотность тока 2.5 kA/cm^2 . Температурная зависимость длины волны генерации описывается коэффициентом 0.5 nm/K , а пороговой плотности тока — характеристической температурой 60 K .

В заключение отметим хорошие электрические характеристики обеих лазерных структур. Напряжение отсечки вольт-амперной характеристики лазерных диодов составило 0.8 V , что хорошо согласуется с ожидаемой энергией оптического перехода основного состояния. Это свидетельствует об отсутствии дополнительных барьеров для инжекции носителей заряда внутри метаморфной структуры, например на гетерограницах буфер-нижний эмиттер или верхний эмиттер-контактный слой. Удельное последовательное сопротивление оценено равным $2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

4. Заключение

Продемонстрировано, что использование концепции метаморфного роста позволяет в структурах на подложках GaAs с активной областью на основе самоорганизующихся квантовых точек реализовать лазерную генерацию в спектральном диапазоне 1.5 мкм. Предложенный подход потенциально применим для создания вертикально излучающих лазерных структур, а также для продвижения в большие длины волн.

Авторы благодарны В.М. Бусову за исследования структурных свойств методом сканирующей электронной микроскопии, Ю.Г. Мусихину за исследования методом просвечивающей электронной микроскопии и М.В. Байдаковой за рентгено-дифракционные исследования.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и NSC-Nanosemiconductor-GmbH, Германия. А.Е. Жуков и В.М. Устинов выражают благодарность „Фонду содействия отечественной науке“.

Список литературы

- [1] A.R. Kovsh, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **38**, 1104 (2002).
- [2] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, M.M. Kulagina, E.V. Nikitina, I.P. Soshnikov, Yu.M. Shernyakov, D.A. Livshits, N.V. Kryzhanovskaya, D.S. Sizov, M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Zh.I. Alferov. *Physica E*, **17**, 589 (2003).
- [3] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov. *Semicond. Sci. Technol.*, **15**, R41 (2000).
- [4] V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, V.I. Kopchatov, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, S.S. Ruvimov, Z. Liliental-Weber, D. Bimberg. *Electron. Lett.*, **34**, 670 (1998).
- [5] А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, Е.В. Никитина, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.М. Шерняков, Ю.Г. Мусихин, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов В.М. Устинов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **9**, 1143 (2003).

- [6] K. Otsubo, Y. Nishijima, H. Ishikawa. *FUJITSU Sci. Technol. J.*, **34**, 212 (1998).
- [7] M. Fischer, D. Gollub, S. Moses, M. Muller, M. Kamp, A. Forchel. *Abstract Book Int. Workshop on GaAs Based Lasers for 1.3–1.5 μm Wavelength Range*, April 24–26, 2003 (Wroclaw, Poland) p. 48.
- [8] L.H. Li, V. Sallet, G. Patriarche, L. Largeau, S. Bouchoule, K. Merghem, L. Travers, J.C. Harmand. *Abstract Book Int. Workshop on GaAs Based Lasers for 1.3–1.5 μm Wavelength Range*, April 24–26, 2003 (Wroclaw, Poland) p. 49.

Редактор Л.В. Беляков

Lasing at 1.5- μm wavelength in quantum dot structures on GaAs substrates

A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin,
E.S. Semenova, A.Yu. Egorov, V.A. Odnobljudov,
N.A. Maleev, E.V. Nikitina, N.V. Kryjanovskaya,
A.G. Gladyshev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov,
N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov

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

Abstract We report on realization of lasing in the 1488–1515 nm wavelength range in the 20–83°C temperature interval from laser structures based on multiply stacked arrays of self-organized quantum dots deposited on GaAs substrates. Threshold current density of four-facet laser is 800 A/cm² at room temperature. The method of wavelength extension is based on use of metamorphic buffer layer with indium mole fraction of about 20% intended for relaxation of lattice mismatch strain.