

Квантовый каскадный лазер на основе гетеропары GaInAs/AlInAs с длиной волны излучения 5.6 мкм

И.И.Засавицкий, Н.Ю.Ковбаса, Н.А.Распопов, А.В.Лобинцов,
Ю.В.Курняк, П.В.Горлачук, А.Б.Крыса, Д.Г.Ревин

На основе напряженно-компенсированной гетеропары Ga_{0.4}In_{0.6}As/Al_{0.58}In_{0.42}As создан квантовый каскадный лазер, работающий в области длин волн 5.5–5.6 мкм в импульсном режиме при температурах, как минимум, до 350 К. Это стало возможным благодаря увеличению глубины квантовой ямы и использованию двухфононного механизма опустошения нижнего лазерного уровня. Рассчитанный вольтовый дефект составляет около 100 мэВ. Лазерная гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Характеризация структуры проведена методом рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения. Показано, что структура обладает высоким качеством, ширина основных спутных пиков равна 55 угл. с. Пороговая плотность тока составляет 1.6 кА/см² при 300 К. Характеристическая температура T₀ = 161 К для интервала температур 200–350 К. Максимальная импульсная мощность излучения лазера с размерами 20 мкм × 3 мм со сколотыми зеркалами составляет 1.1 Вт при 80 К и 130 мВт при 300 К.

Ключевые слова: квантовый каскадный лазер, гетеропара GaInAs/AlGaAs, МОС-гидридная эпитаксия, средняя ИК область спектра.

1. Введение

Квантовый каскадный лазер (ККЛ) является униполярным источником излучения, основанным на межподзонных переходах носителей заряда в полупроводниковой наногетероструктуре [1, 2]. Длина волны излучения ККЛ определяется как размерами квантовой ямы, так и используемой гетеропарой, определяющей разрыв в зонах, т. е. глубину квантовой ямы. Изменяя эти два параметра, а также состав материалов, в настоящее время удалось перекрыть широкую (3–250 мкм) ИК область спектра. Для работы в актуальной средней ИК области спектра 4–6 мкм используется напряженно-компенсированная гетеропара GaInAs/AlInAs, при этом выращивание многослойной наногетероструктуры проводится, как правило, методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Метод МОС-гидридной эпитаксии, предложенный в [3–5], обладает такими достоинствами, как высокая скорость роста и возможность выращивания фосфорсодержащих материалов. Однако для этого метода характерна проблема резкости интерфейса из-за более высоких температур роста.

В настоящей работе методом МОС-гидридной эпитаксии была выращена лазерная гетероструктура на основе напряженно-компенсированной гетеропары Ga_{0.4}In_{0.6}As/Al_{0.58}In_{0.42}As, высокое качество структуры следует из спектров рентгеновской дифракции. Дизайн

структуры соответствует длине волны излучения около 5.6 мкм и двухфононной схеме опустошения нижнего лазерного уровня. В импульсном режиме рабочая температура ККЛ достигала 350 К, мощность излучения составляла более 1.1 Вт при 80 К.

2. Конструкция и характеристика лазерной гетероструктуры

Известно, что при эпитаксиальном выращивании твердых растворов Ga_{1-x}In_xAs и Al_{1-y}In_yAs на подложке InP практически идеальное совпадение постоянных решеток достигается при $x = 0.53$ и $y = 0.52$. При этом для гетеропары Ga_{1-x}In_xAs/Al_{1-y}In_yAs разрыв зоны проводимости $\Delta E_c = 0.52$ эВ. Такой глубины квантовой ямы в рассматриваемой гетероструктуре недостаточно для получения эффективных лазеров с длиной волны излучения менее 6 мкм, тем более для ККЛ с двухфононным механизмом опустошения нижнего лазерного уровня. Поэтому для увеличения глубины квантовой ямы используется гетеропара, не согласованная по постоянной решетки с InP [6]. С этой целью содержание In в твердом растворе Ga_{1-x}In_xAs увеличивают, а в твердом растворе Al_{1-y}In_yAs уменьшают, в результате чего эпитаксиальные слои получают соответственно сжатые и растянутые относительно подложки InP. При таком изменении составов рассматриваемых твердых растворов разрыв зоны проводимости в гетеропереходе заметно увеличивается, хотя из-за знака возникающих механических напряжений он немного уменьшается. В конечном итоге разрыв зоны проводимости в такой напряженно-компенсированной гетеропаре возрастает, и для выбранных нами значений $x = 0.60$ и $y = 0.42$ получим значение около $\Delta E_c = 0.68$ эВ. Оценка величины разрыва зон основана на идее «электронного сродства» [7] для псевдоморфно выращенных твердых растворов с указанными составами на подложке InP. При оценке использовались зависимости от состава

И.И.Засавицкий, Н.Ю.Ковбаса, Н.А.Распопов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: zasavit@sci.lebedev.ru

А.В.Лобинцов, Ю.В.Курняк, П.В. Горлачук. АО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп.1

А.В.Крыса, Д.Г.Ревин. University of Sheffield, Sheffield, S1 3JD United Kingdom

Поступила в редакцию 9 декабря 2017 г., после доработки – 16 января 2018 г.

ширины запрещенной зоны, постоянной решетки, а также значения деформации, упругие константы и деформационные потенциалы [8–10].

В качестве рабочей схемы была выбрана активная область из четырех квантовых ям, в которой имеет место слабо диагональный оптический переход. Расчет проведен для следующей структуры активной области (для одного каскада): **4.0/1.3/1.3/5.1/1.3/4.5/1.4/4.0/2.3/3.1/1.8/2.8/1.9/2.5/2.0/2.4/2.2/2.3/2.8/2.2**, где толщины эпитаксиальных слоев, начиная с инжекционного барьера, даны в нанометрах. Здесь жирным шрифтом выделены толщина барьеров, обычным – ширина квантовых ям; толщины легированных слоев подчеркнуты. Конструкция гетероструктуры рассчитывалась для получения длины волны излучения в области спектра около 5.4 мкм.

Для нахождения уровней энергий и волновых функций электронов использовалось одномерное уравнение Шредингера. Поставленная задача решалась численным методом (метод конечных разностей). Поскольку данная гетероструктура нацелена на работу при комнатной температуре, то для расчета подбирались параметры, соответствующие $T = 300$ К [8, 9]: разрыв зоны проводимости $\Delta E_c = 0.68$ эВ, ширина запрещенной зоны барьера равна 1.75 эВ, квантовой ямы – 0.68 эВ; эффективная масса электрона в барьере – 0.11 m_0 , в яме – 0.05 m_0 (m_0 – масса свободного электрона). Учитывалась также непараболичность зоны проводимости.

На рис. 1 приведена рассчитанная энергетическая диаграмма для ККЛ на основе гетеропары $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.58}\text{In}_{0.42}\text{As}$. Видно, что основной переход с верхнего лазерного уровня 4 на нижний лазерный уровень 3 является слабодиагональным и разность энергий $E_{43} = 230$ мэВ, что примерно соответствует длине волны излучения 5.4 мкм. Разность энергий между нижним лазерным уровнем 3 и уровнем 2, а также между уровнями 2 и 1 примерно одинакова и составляет 43 мэВ. Поскольку основной уровень инжектора расположен ниже уровня 1, то получающийся вольтовый дефект превышает 100 мэВ. Уровень 5 является ближайшим к верхнему лазерному уровню 4, расстояние между ними равно 58 мэВ, что превышает тепловую энергию $2k_B T$ и позволяет надеяться на то, что рабочая температура будет около 300 К.

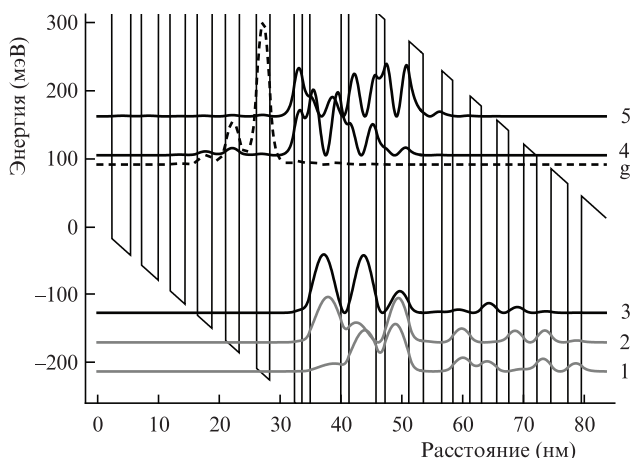


Рис. 1. Рассчитанная энергетическая диаграмма активной области ККЛ на основе гетеропары $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.58}\text{In}_{0.42}\text{As}$. Приложенное электрическое поле составляет 80 кВ/см. Показаны квадраты модулей волновых функций основных уровней.

Лазерная гетероструктура выращивалась методом МОС-гидридной эпитаксии на подложке (001) InP с концентрацией электронов 2×10^{18} см^{-3} . Концентрация легированных слоев в инжекторе активной области была 1×10^{17} см^{-3} . Число каскадов равно 35. Толщина волноводных слоев n-InP составляла 2.5 мкм, концентрация электронов в них – 5×10^{16} см^{-3} .

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре ДРОН-8. Дифракционный скан $\Omega-2\theta$ исследуемой гетероструктуры имеет ряд хорошо разрешаемых сателлитов по обе стороны от пика подложки (рис. 2). Сателлит нулевого порядка находится практически в согласованном положении с подложкой. Период интерференции соответствует толщине каскада 50.5 нм, что близко к технологическому значению 51.2 нм. Сателлит нулевого порядка практически совпадает с пиком подложки. Необходимо отметить различие в интенсивностях сателлитных пиков с левой и правой стороны от нулевого порядка. Модельный расчет показывает, что такое соотношение интенсивностей соответствует содержанию индия $x = 61.2\%$ в твердом растворе $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ и $y = 41.9\%$ в $\text{Al}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$, что довольно близко к технологически заданным значениям. Интенсивность сателлитов, удаленных от нулевого порядка, сравнительно низкая и отличается от расчетной. Это свидетельствует о некотором размывании эпитаксиальных слоев (около 0.3–0.7 нм) на каждом интерфейсе, что находится в согласии с данными работ, где применялись другие экспериментальные методы исследования шероховатости интерфейсов в ККЛ, выращенных МОС-гидридной эпитаксией [11, 12].

На выращенной гетероструктуре с использованием метода фотолитографии формировались полосы (гребни) шириной 20 мкм, после чего пластина со стороны эпитаксиальных слоев полностью закрывалась слоем диэлектрика Si_3N_4 . Далее путем фотолитографии диэлектрик «вскрывался» в местах расположения полосок для дальнейшего формирования омических контактов. С этой целью на гетероструктуру после химического травления (чистки поверхности) напылялись контакты Ti (50 нм)/Au (250 нм) с последующим гальваническим осаждением слоя Au толщиной 2–3 мкм. Структура со стороны подложки методом химико-механической полировки сошлифовывалась до толщины около 0.15 мм, и на подложку напылялись контакты Ti/Au. Лазерные кристалли-

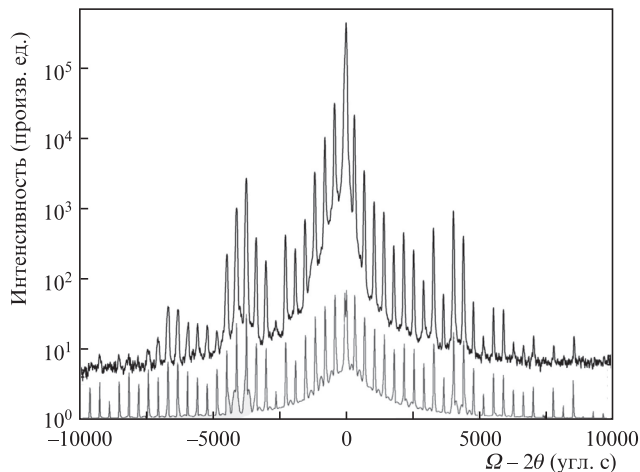


Рис. 2. Дифракционный $\Theta-2\theta$ -скан выращенной гетероструктуры (верхняя кривая) и ее расчетный вид (нижняя кривая).

ки с длиной резонатора 3 мм получались скалыванием и припаивались к медному держателю через тонкую прокладку из медно-вольфрамового сплава для улучшения согласования по коэффициенту термического расширения. Золотые токопроводящие контакты к кристаллику приваривались термокомпрессионной сваркой. Изготовленный таким образом активный лазерный элемент монтировался в специальном корпусе и устанавливался в металлический оптический криостат с ИК окнами из KBr или BaF₂ для работы в широком диапазоне температур (7–350 К) или в компактный оптический блок, содержащий термохолодильник Пельтье для работы при температуре до –20°С.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Измерения температурной зависимости плотности порогового тока проводились в импульсном режиме ($\tau = 1$ мкс, $f = 170$ Гц). В качестве приемника интегрального излучения использовались фотосопротивление на основе германия, легированного золотом. Полученная зависимость показана на рис.3. Достигнутая рабочая температура 350 К ограничена возможностями экспериментальной установки. Пороговая плотность тока при этом составляла не более 1.8 кА/см². При 300 К пороговая плотность была 1.6 кА/см². Таким образом, двухфотонный механизм опущения нижнего лазерного уровня работает эффективно, а квантовая яма является достаточно глубокой, чтобы снизить выброс электронов с верхнего лазерного уровня в континуум.

Температурная зависимость порогового тока J_{th} не аппроксимируется одной экспонентой во всем изученном интервале температур 7–350 К. Для области температур 200–350 К ее можно представить в виде функции $J_{th} = 0.2 \times \exp(T/161)$, которая в полулогарифмическом масштабе показана на вставке рис.3; так, характеристическая температура в этом интервале $T_0 = (161 \pm 3)$ К.

При измерении ватт-амперной характеристики лазер также работал в импульсном режиме ($\tau = 50$ нс), но с частотой следования импульсов 10 кГц. Средняя мощность излучения измерялась калориметром OPHIR (с головкой 3 А) при температурах 80, 200 и 300 К. Результаты измерений представлены на рис.4. Видно, что для лазера с размерами 20 мкм × 3 мм и сколотыми зеркалами максимальная мощность излучения составляет 1.1 Вт при 80 К и более 130 мВт при 300 К. Это еще одно свидетельство высокого качества активной области ККЛ на основе напряженно-компенсированной гетеропары Ga_{0.4}In_{0.6}As/Al_{0.58}In_{0.42}As.

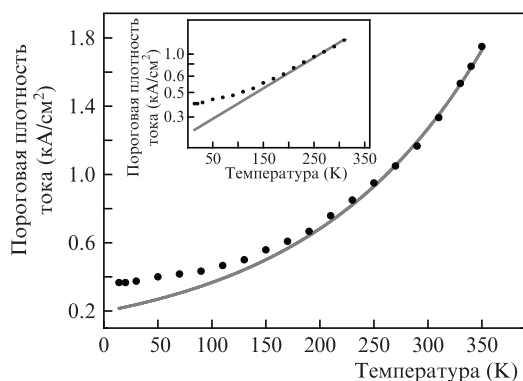


Рис.3. Зависимость плотности порогового тока от температуры (на вставке – зависимость $J_{th}(T)$ в полулогарифмическом масштабе).

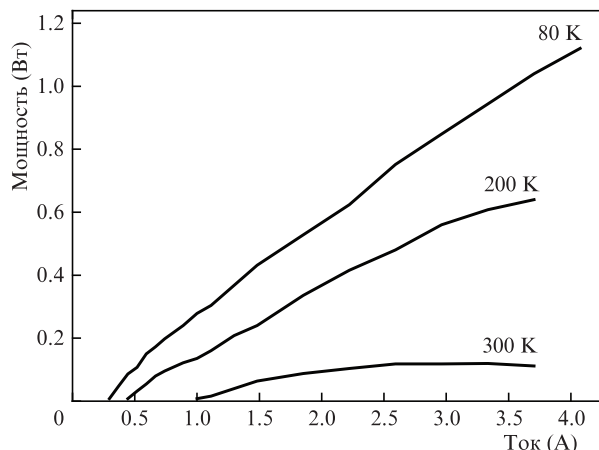


Рис.4. Ватт-амперные характеристики ККЛ при различных температурах.

Спектры излучения ККЛ при различных температурах измерялись с помощью фурье-спектрометра Vertex-70, работающего в режиме пошагового сканирования с разрешением 0.2 см⁻¹. Это позволило достичь хорошего разрешения модовой структуры спектров излучения. Результаты измерений при двух температурах представлены на рис.5. В спектре излучения при $T = 80$ К и уровне инжекции, составляющем несколько J_{th} , присутствует около 100 продольных мод, которые лежат в диапазоне 1810–1860 см⁻¹. Межмодовое расстояние составляет 0.505 см⁻¹. Отсюда следует, что эффективный показатель преломления активной области $n^* = (2\Delta kL)^{-1} = 3.30$, где Δk – межмодовое расстояние, $L = 3$ мм – длина резонатора.

Вид огибающей спектра излучения обусловлен активным поглощением излучения водяным паром, поскольку оптический путь регистрируемого излучения составляет около 2 м. Сопоставляя измеренный спектр ККЛ с известным спектром поглощения паров воды, можно выделить на огибающей лазерного спектра несколько полос разной интенсивности, обусловленных поглощением парами воды: 1818, 1825, 1830, 1836 и 1844 см⁻¹. При увеличении температуры спектр излучения ККЛ сдвигается в длинноволновую сторону, середина спектра излучения смещается с 1835 см⁻¹ при 80 К до 1780 см⁻¹ при 300 К, т.е. с 5.45 до 5.62 мкм. Спектр $T = 300$ К также искажен из-за поглощения парами воды в атмосфере. Обращает на себя вни-

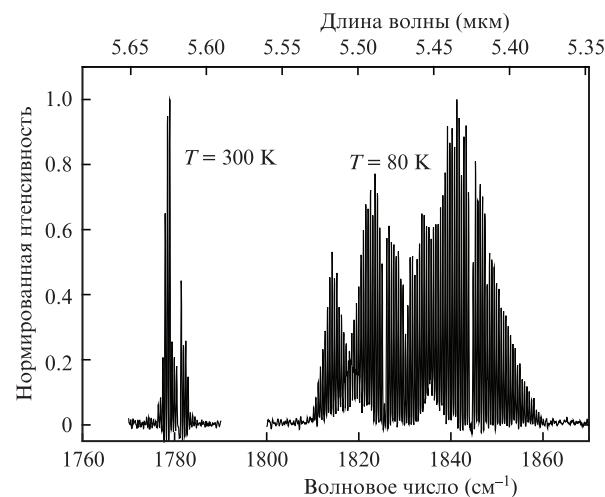


Рис.5. Спектр излучения ККЛ при 80 и 300 К.

мание тот факт, что длина волны излучения 5.62 мкм при комнатной температуре на 0.2 мкм больше расчетной длины волны (5.4 мкм). Это объясняется небольшим размытием интерфейсов в наногетероструктуре, что находится в согласии с данными работы [11, 12], где методом просвечивающей электронной микроскопии изучалась шероховатость интерфейсов в ККЛ, выращенных МОС-гидридной эпитаксией. Такое длинноволновое смещение наблюдалось также в работе [13], где ККЛ также создавались методом МОС-гидридной эпитаксии, при этом аналогичный длинноволновый сдвиг достигал даже 0.5–1 мкм.

Таким образом, на основе напряженно-компенсированной гетеропары Ga_{0.4}In_{0.6}As/Al_{0.58}In_{0.42}As создан квантовый каскадный лазер, работающий в области длин волн 5.5–5.6 мкм в импульсном режиме при температуре, как минимум, 350 К. Это стало возможным благодаря увеличению глубины квантовой ямы и использованию двухфононного механизма «опустошения» нижнего лазерного уровня. Лазерная гетероструктура высокого качества была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии. Пороговая плотность тока составляет 1.6 кА/см² при 300 К. Максимальная мощность излучения лазера с размерами 20 мкм×3 мм со сколотыми зеркалами составляет 1.1 Вт при 80 К и 130 мВт при 300 К.

Работа И.И.Засавицкого, Н.Ю.Ковбасы и Н.А.Распопова выполнена при поддержке Программы Пре-

зидиума РАН I.25П «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов».

1. Faist J., Capasso F., Sirtori C., Sivco D.L., Cho A.Y. *Semiconductors and Semimetals*, **66**, 183 (1999).
2. Faist J. *Quantum Cascade Lasers* (Oxford: University press, 2013).
3. Roberts J.S., Green R.P., Wilson L.R., Zibik E.A., Revin D.G., Cockburn J.W., Airey R.J. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4221 (2003).
4. Green R.P., Krysa A.B., Roberts J.S., Revin D.G., Wilson L.R., Zibik E.A., Ng N.H., Cockburn J.W. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 1921 (2003).
5. Krysa A.B., Revin D.G., Commin J.P., Atkins C.N., Kennedy K., Qiu Y., Walther T., Cockburn J.W. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23**, 774 (2011).
6. Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Hutchison A.L., Chu S.-N. G., Cho A.Y. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 680 (1998).
7. Van de Walle C.G. *Phys. Rev. B*, **39**, 1871 (1989).
8. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
9. Li E. H. *Physica E*, **5**, 2157 (2000).
10. Kim J., Fischetti M.V. *J. Appl. Phys.*, **108**, 013710 (2010).
11. Rajeev A., Chen Weixin, Kirch J.D., Luke J. Mawst L.J., Kuech T.F., Earles T. *Abstracts 21st Am. Conf. on Crystal Growth and Epitaxy/18th US Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy* (Santa Fe, NM, USA, p.275, 2017).
12. Walther T., Krysa A.B. *J. Microscopy*, **268**, 298 (2017).
13. Wang C.A., Schwarz B., Siriani D.F., Connors M.K., Missaggia L.J., Calawa D.R., McNulty D., Akey A., Zheng M.C., Donnelly J.P., Mansuripur T.S., Capasso F. *J. Crystal Growth*, **464**, 215 (2017).