

06

Получение квантовых каскадных лазеров с длиной волны излучения $5\ \mu\text{m}$ молекулярно-пучковой эпитаксией

© В.В. Мамутин, В.М. Устинов, J. Boettcher, H. Kuenzel

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
Fraunhofer Institut Nachrichtentechnik, Heinrich Hertz Institut,
Berlin, Einsteinufer 37, 10587 Germany
E-mail: mamutin@mail.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2009 г.

Сообщается о получении молекулярно-пучковой эпитаксией квантовых каскадных лазеров (ККЛ) с длиной волны излучения $\sim 5\ \mu\text{m}$, на основе четырехъямной активной области с вертикальными переходами и напряженно-компенсированной сверхрешеткой с высокой эффективностью инжекции и малым временем жизни основного состояния. Использование приспособленного для ККЛ процессирования позволяет воспроизводимо получать высококачественные лазеры.

Со времени предсказания [1] возможности использования туннелирования между связанными квантовыми ямами для создания лазеров с внутризонными переходами прошло более 20 лет до получения первого такого лазера [2], названного квантовым каскадным лазером (ККЛ). Необходимо было достичь понимания того, как влияет дизайн активной области лазера на лазерные характеристики, и разработать конструкцию со сверхрешеткой, дающую инверсную заселенность, уменьшающую потери и позволяющую, в принципе, достичь лазерной генерации [3]. После первых попыток была представлена так называемая „трехуровневая с вертикальными переходами“ схема активной области для диапазона длин волн $5\text{--}11\ \mu\text{m}$ и больше [4], а потом продемонстрированы и первые лазеры для гораздо больших длин волн (87 и $130\ \mu\text{m}$) [5]. Длина волны есть функция применения для различных каскадных лазеров, одно из которых — использование атмосферных

окон прозрачности 3–5 и 8–13 μm для высокоскоростных систем связи, в том числе и со спутниками, когда влияние поглощения и турбулентности атмосферы существенно уменьшено по сравнению с видимым и ближним инфракрасным диапазонами [3].

В данной работе сообщается о получении квантового каскадного лазера с длиной волны излучения $\sim 5 \mu\text{m}$ на основе AlInAs/GaInAs напряженно-компенсированных сверхрешеток с четырехъямной схемой активной области, выращенного молекулярно-пучковой эпитаксией (МПЭ) на подложках InP. Такой дизайн активной области позволяет достичь минимального времени жизни основного состояния, необходимого для достижения инверсной населенности ($\sim 0.4 \text{ ps}$ [6]), и высокой эффективности инжекции [7].

Лазерные гетероструктуры были выращены молекулярно-пучковой эпитаксией на установке RIBER-32. Ростовые температуры активных областей лазерных структур составляли 500°C , и при росте использовались слабо As-стабилизированные условия. Вся лазерная структура была разработана согласно [7] и наносилась на подложку $n\text{-InP:Sn}$, легированную до $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Активные области гетероструктур GaIn_xAs/AlIn_yAs выращивались в напряженно-компенсированном варианте для увеличения разрыва зон на гетерограницах, чтобы подавить потери свободных носителей в континуум. Напряженно-сжатые ямные области с содержанием индия $x = 0.6$ и напряженно-растянутые барьеры с содержанием индия $y = 0.44$ приводили к общему напряжению в структурах ниже 10^{-3} . Активная область ККЛ состояла из 25 периодов. Один период содержал следующую последовательность из 20 чередующихся слоев AlInAs/GaInAs в ростовом направлении (в nm): 2.4/3.9/1.5/4.4/1.4/5.0/1.4/1.3/4.2/2.1/3.0/2.1/**2.3**/**2.2**/**2.1**/**2.3**/2.0/2.6/1.9/2.9 с подчеркнутыми слоями GaInAs и выделенными (**bold**) легированными слоями. Они были легированы кремнием на уровне $4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Вся структура от подложки до верха (последовательность по направлению роста) состояла из следующих слоев: 30-nm градиентный слой ($2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 300-nm волноводный слой InGaAs ($1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 1130-nm (25 периодов) активная зона, 300-nm волноводный слой GaInAs ($1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 30-nm градиентный слой ($2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 2500-nm эмиттерный (покрывающий — cladding) слой AlInAs ($2 \cdot 10^{17}$, $3 \cdot 10^{17}$, $7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 30-nm градиентный слой ($7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), и верхний подконтактный 10-nm слой InGaAs ($1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Каждый период содержал собственно активную

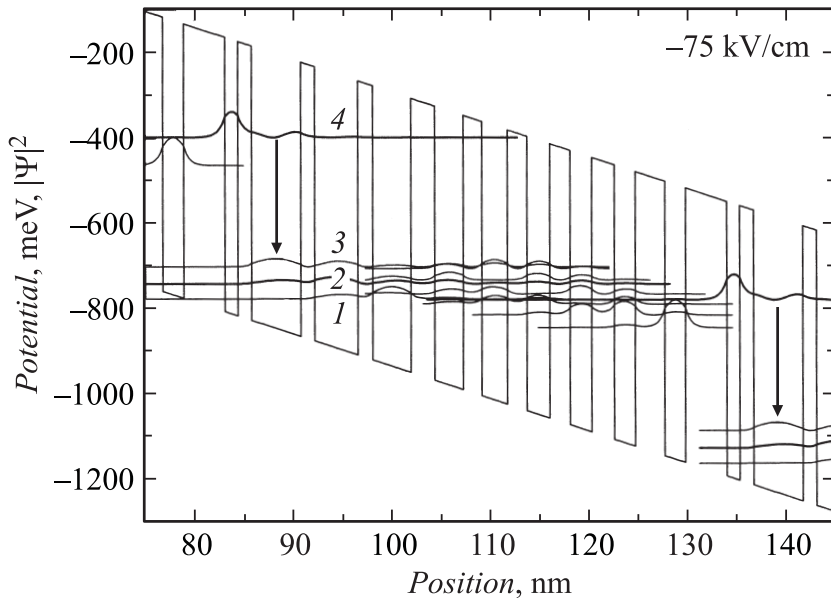


Рис. 1. Схематическая диаграмма зоны проводимости активной четырехъямной области лазерной структуры.

зону из четырех квантовых ям (КЯ) и градиентно-зонный инжектор из напряженно-компенсированной сверхрешетки (рис. 1). Активная зона из связанных КЯ выращивалась таким образом, чтобы при пороговом поле ($\sim 75 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$) основное состояние КЯ было в резонансе с минизоной, образуемой в инжекторной области. В свою очередь инжекторная сверхрешетка разрабатывалась так, чтобы подавлять выброс носителей с высоковозбужденного состояния ($n = 4$) в континуум, но позволяла освобождать низшее состояние лазерного перехода ($n = 3$) [7]. Разница энергии между квазиуровнем Ферми в инжекторе и низшим состоянием $n = 3$ лазерного перехода есть важный параметр, контролирующий поведение лазера, так как температурная заселенность состояния $n = 3$ может компенсироваться более высоким током инжекции для поддержания инверсной населенности на пороговом значении. Более высокая разница ведет к меньшим порогам при высоких температурах, уве-

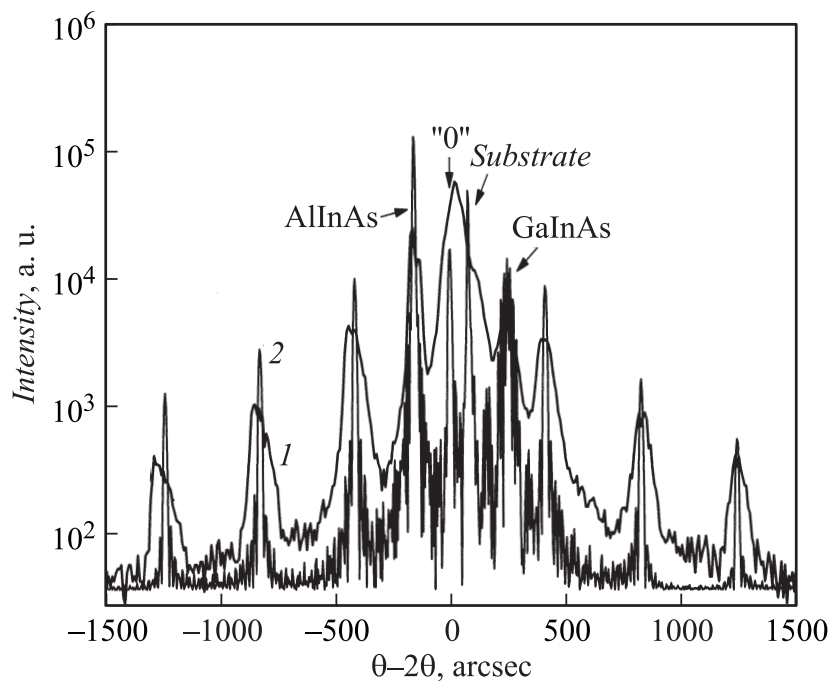


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная картина рентгеновской дифракции 25-периодной активной зоны.

личивая рабочую температуру. Для порогового электрического поля, фиксируемого выравниванием основного состояния инжектора с $n = 4$ состоянием активной области, эта разница пропорциональна длине инжектора.

На рис. 2 показан измеренный спектр рентгеновской дифракции для всего ККЛ (кривая 1). Индивидуальные пики отражения могут ясно коррелировать с различными слоями, как показано на рисунке. AlInAs и GaInAs слои, формируя внешнюю часть последовательности слоев, показывают удовлетворительно слабое решеточное рассогласование, соответствующее содержанию индия 0.538 и 0.524 соответственно. Из периодического поведения дополнительных особенностей отражения от 25-периодной активной области видно отличное согласие между

выращенными и предполагаемыми слоями. Из пика нулевого порядка, отмеченного как „0“, может быть вычислено общее напряжение 25-периодной активной области. Благодаря слабому отстоянию его от пика подложки, отражающему то, что средняя постоянная решетки почти согласована с подложкой InP, очевидна очень высокая степень компенсации напряжений. Кроме того, теоретическая подгонка спектра (кривая 2) позволяет выяснить выращенные составы тройных слоев, формирующих активную область. На основе этого динамического моделирования дифракции, которое представляет решение уравнений Такаги–Таупина, было получено содержание индия 0.605 и 0.440 для GaInAs и AlInAs соответственно.

Образцы были отпроцессированы в меза-травленные гребневые (ridge) волноводы. Вытравливались лазерные полоски номинальной ширины от 20 до 30 μm с разделением в 300 μm . Процессирование лазеров основывалось на стандартных селективном химическом травлении в $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ для вытравливания гребня, изоляции SiN_x и электронного распыления Ti/Pt/Au контактов металлизации. Чтобы подстроить стандартный процесс пост-ростовой обработки специально для ККЛ, было необходимо сделать некоторые модификации. Во-первых, процессы очистки и проявления полоска были найдены критическими, так как удаление сильно легированного 10-nm GaInAs контактного слоя должно быть минимальным. Таким образом, очистка на основе HF предваряла использование раствора H_2SO_4 , и контакт полоска выявлялся непосредственно, так как контакт с проявителем вызывал удаление материала. Во-вторых, мокрое химическое вытравливание полоска критично из-за заметных скоростей латерального (продольного) травления. Так, травление нескольких микрон вниз по направлению к подложке вызывало большой латеральный растрав, приводя к потере контроля над шириной полоска. Тщательной подборкой состава и снижением температуры травителя до 0°C продольная скорость травления была доведена до равной вертикальной. Используя смесь 1 : 4 : 100, можно было контролируемо уменьшать ширину полоска до 10 μm , когда вертикальный растрав достигал подложки. В-третьих, латеральная связь полоска с контактной площадкой через довольно крутой край мезы — очень критична, так как при работе ККЛ используются очень большие токи. В попытке увеличить толщину металла на боковых склонах мезы мы напыляли металлы под углом наклона в 45°. Так, по крайней мере на одном боку мезы, приемлемая толщина в 300 nm по сравнению с 500 nm

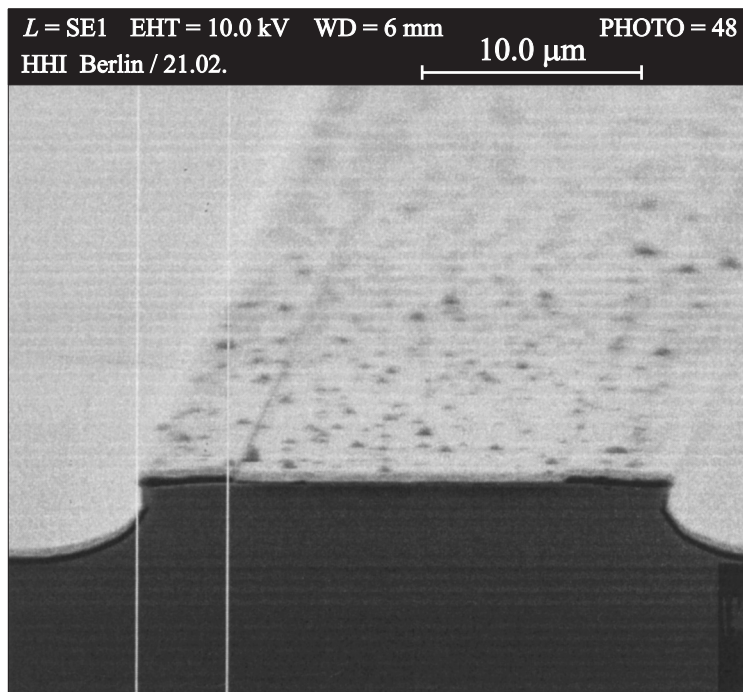


Рис. 3. Фотография мезаполоска лазерной структуры в сканирующем электронном микроскопе.

на поверхности была достигнута. Такое дополнительное нанесение металлов должно было обходиться без нежелательных последствий при работе.

На рис. 3 показана поверхность мезы с металлизацией на SiN_x около боковой поверхности и непокрытая поверхность полоска в середине. Были приготовлены лазерные полоски, и затем приборы длиной 0.5–3.0 mm были сколоты для оптической характеристики без дополнительного покрытия поверхности. Спектры излучения были сняты с использованием методов Фурье-преобразований в комбинации с MgHgTe (МНТ)-детектором в импульсном режиме с частотой 5 kHz, длиной импульса 100 ns при температурах между 77 и 300 K. Спектры

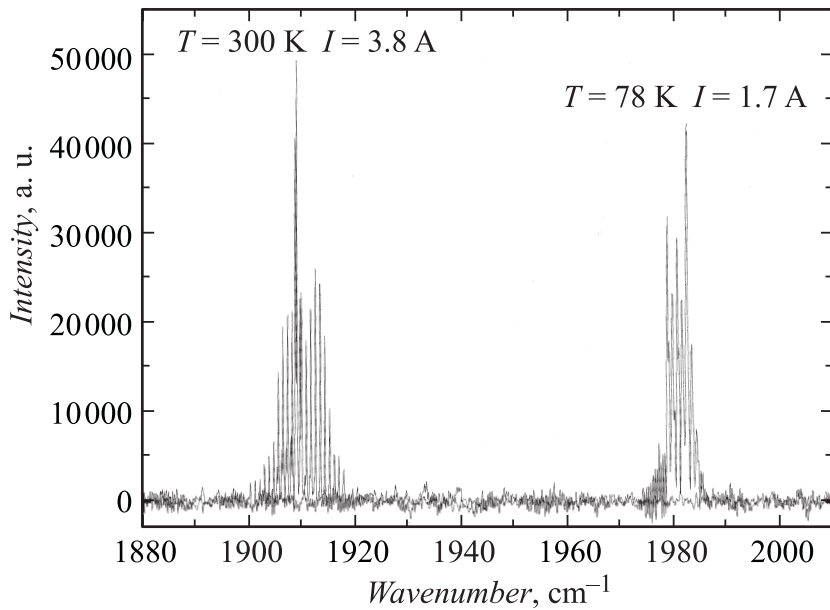


Рис. 4. Типичные спектры лазерной генерации при азотной и комнатной температурах.

электролюминесценции ниже порога демонстрировали при комнатной температуре (не приведены) узкий пик с полушириной на полувысоте порядка 20 meV, подтверждая очень высокое качество кристалла и интерфейсов, а также низкий уровень фоновых примесей [8]. Выше порога соответствующие многомодовые спектры генерации показаны на рис. 4 при 77 и 300 К. Красный сдвиг спектра с повышением температуры — индикатор вертикальных пространственно одноямыных лазерных переходов (а не диагональных между двумя разными ямами) [6]. Относительно длины резонатора 1.67 mm наблюдалась многомодовая генерация с разделением мод в 0.87 cm^{-1} и центром на 5.05 и $5.24 \mu\text{m}$ при 77 и 300 К соответственно. Плотность пороговых токов, определенная из характеристик „свет–ток“ (L/I), составляла $2.8 \text{ kA} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 100 К, увеличиваясь до $8.7 \text{ kA} \cdot \text{cm}^{-2}$ при 300 К. Типичные пороги генерации

Температура, К	Пороговый ток, А	Пороговое напряжение, V
100	1.40	9.0
150	1.70	8.5
200	2.21	8.2
250	3.00	8.2
300	4.30	8.7

при 300 К были в пределах 4–10 кА/см². Более детально пороговые токи от температуры иллюстрирует таблица.

Таким образом, были продемонстрированы квантовые каскадные лазеры, излучающие на длине волны 5.0 μm при 77 К и 5.2 μm при 300 К, основанные на четырехъямной схеме активной области с вертикальными переходами и с напряженно-компенсированными сверхрешетками с высокой эффективностью инжекции и коротким временем жизни основного состояния. Использование модифицированного для ККЛ процесса постростовой обработки позволяет воспроизводимо получать высококачественные приборы.

Авторы благодарны за содействие в изготовлении приборов S. Dressler (Humboldt University Berlin) и S. Anders (Technical University Vienna) — в измерениях методами Фурье-преобразований.

Список литературы

- [1] Kazarinov R.F., Suris R.A. // Sov. Phys. Semiconductors. 1971. V. 5. P. 707.
- [2] Faist J., Capasso F., Sivco D.L., Sirtori C., Hutchinson A.L., Cho A.Y. // Science. 1994. V. 264. P. 553.
- [3] Gmachl C., Capasso D., Sivco D.L., Cho A.Y. // Rep. Prog. Phys. 2001. V. 64. P. 1533.
- [4] Tahraoui A., Matlis A., Slivken S., Diaz J., Razeghi M. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. P. 416.
- [5] Ajili L., Scalari G., Faist J., Beer H., Linfield E., Ritchie D., Davies G. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 3986.

- [6] *Faist J., Capasso F., Sirtotri C., Sivco D.L., Baillargeon J.N., Hutchinson A.L., Chu S.-N.G., Cho A.Y.* // *Appl. Phys. Lett.* 1996. V. 68. P. 3680.
- [7] *Hofstetter D., Beck M., Aellen T., Faist J.* // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P. 396.
- [8] *Wang X.J., Fan J.Y., Tanbun-Ek T., Choa F.S.* // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 211103.