

Генерация многопериодных квантово-каскадных лазеров в спектральном диапазоне 5.6–5.8 мкм при токовой накачке

© А.Ю. Егоров^{†*}, А.В. Бабичев^{†*}, Л.Я. Карачинский^{†*}, И.И. Новиков^{†*}, Е.В. Никитина[#], М. Tchernycheva^{*}, А.Н. Софронов[°], Д.А. Фирсов[°], Л.Е. Воробьев[°], Н.А. Пихтин⁺, И.С. Тарасов⁺

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

^{*} Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101 Санкт-Петербург, Россия

[‡] ООО «Коннектор Оптикс», 194292 Санкт-Петербург, Россия

[#] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Institut d'Electronique Fondamentale, University Paris Sud XI, 91405 Orsay cedex, France

[°] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 29 апреля 2015 г. Принята к печати 6 мая 2015 г.)

Реализована генерация многопериодных квантово-каскадных лазеров, содержащих 60 каскадных периодов, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии в спектральном диапазоне 5.6–5.8 мкм при токовой накачке. Несмотря на относительно короткую длину резонатора и большие потери на вывод излучения, достигнута генерация в температурном диапазоне 80–220 К. Плотность тока на пороге генерации при температуре 220 К не превышает 4 кА/см² с характеристической температурой $T_0 = 123$ К.

1. Введение

С появлением концепции квантовой инженерии уровней в полупроводниковых гетероструктурах возникла возможность создавать лазеры на основе квантовых межподзонных переходов носителей заряда одного типа. Еще в 1971 г. Казаринов и Сурис теоретически предложили прототип квантово-каскадного лазера [1], но только в середине 90-х годов благодаря развитию молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ), квантово-каскадный лазер был впервые реализован экспериментально [2]. Основным преимуществом данного класса лазеров является возможность генерации в диапазоне длин волн от ближнего инфракрасного (ИК) вплоть до субмиллиметровой области спектра (с длинами волн ~ 100 мкм) на основе одного материала активной области [2]. Другим преимуществом ККЛ является малый температурный сдвиг длины волны излучения вследствие отсутствия необходимости применения узкозонных материалов для генерации излучения в ИК области спектра.

Хотя и предложены альтернативные подходы по созданию ККЛ на основе гетероструктур Si/Ge [3–5], основным направлением исследований в данной области являются ККЛ, базирующиеся на соединениях A^{III}B^V [2,6–10]. К настоящему моменту реализована работа в непрерывном режиме ККЛ на основе пары тройных твердых растворов InGaAs/InAlAs на подложке InP [6].

Несмотря на ряд достигнутых успехов в области создания ККЛ [7–9], исследования возможности повы-

шения коэффициента полезного действия (кпд) таких приборов, показывающего эффективность преобразования электрической мощности в оптическую, являются актуальной задачей [10]. Коэффициент полезного действия определяется такими факторами, как рабочая температура устройства, квантово-механическая структура энергетических уровней, параметры устройства (длина волновода, потери в нем) [10]. Полная эффективность состоит из оптической, токовой, внутренней и эффективности по напряжению. Оптическая эффективность определяется числом фотонов в резонаторе перед тем, как они поглотятся в волноводе; токовая эффективность описывается величиной плотности тока по отношению к пороговому значению; внутренняя эффективность определяется квантовыми параметрами структуры (скоростями излучательной и безызлучательной рекомбинации, термическим выбросом); эффективность по напряжению определяется как падение напряжения в структуре при генерации излучения.

Один из подходов по повышению эффективности работы ККЛ состоит в использовании геометрии многопериодных ККЛ [11,12]. С увеличением числа периодов пороговая мощность ККЛ слабо изменяется (пороговая плотность тока и напряжение многопериодных ККЛ обратно и прямо пропорциональны числу периодов N соответственно). В свою очередь применение многопериодных ККЛ приводит к уменьшению межподзонного поглощения света и разогрева структуры (вследствие падения плотности порогового тока), что положительно сказывается на рабочих характеристиках ККЛ.

В данной работе представлены результаты по изучению оптических свойств многопериодных квантово-

[†] E-mail: anton@beam.ioffe.ru

каскадных лазеров (содержащих 60 периодов) с длиной волны генерации вблизи 5.8 мкм, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

2. Эксперимент

Гетероструктуры были изготовлены методом МПЭ на установке RiberMBE49 на подложках InP (100) диаметром 2 дюйма. Технология и структура выращенной квантово-каскадной гетероструктуры подробно описаны в работе [13]. Перед формированием периодов ККЛ на подложке InP был выращен согласованный по параметру решетки слой InGaAs, легированный Si, толщиной 100 нм. Гетероструктура содержит 60 каскадных периодов, образованных гетеропарой $\text{In}_{0.32}\text{Al}_{0.68}\text{As}/\text{In}_{0.72}\text{Ga}_{0.28}\text{As}$. Покрывающий слой InAlAs и контактный слой InGaAs, легированные Si, имеют толщины 1500 и 50 нм соответственно.

Для исследования электролюминесцентных свойств созданной гетероструктуры экспериментальные образцы квантово-каскадных лазеров были изготовлены по следующей маршрутной схеме. Первый шаг состоял в формировании верхнего контактного слоя Ti/Au (с толщинами 30/300 нм соответственно) на поверхности гетероструктуры с помощью термического напыления в вакууме (давление в камере составляло $8 \cdot 10^{-6}$ мбар). Далее производилось утончение подложки InP за счет механической шлифовки и полировки до достижения толщины 120 мкм. Нижний контактный слой формировался на основе сплава Au–Ge (толщиной 300 нм) с помощью термического напыления в вакууме (давление в камере составляло $8 \cdot 10^{-6}$ мбар). После формирования нижнего контакта пластина была расколота на квадратные кристаллы, которые далее монтировались на теплоотвод. Сформированные 4-сколотые лазеры имели геометрические размеры $(508 \times 508) \pm 18$ мкм². Монтаж производился на посеребренный медный теплоотвод подложкой вверх. Смонтированные на теплоотвод экспериментальные образцы квантово-каскадных лазеров загружались в криостат с выходным окном, изготовленным из ZnSe, оснащенный системой контроля температуры в диапазоне 77–300 К, где и проводились исследования их электролюминесцентных свойств. Смещение на структуру подавалось через токоограничивающее сопротивление в виде импульсов напряжения длительностью 2–10 мкс с частотой 0.95–1 кГц и контролировалось с помощью цифрового осциллографа. Измерения спектров спонтанного и стимулированного излучения проводились с помощью фурье-спектрометра BrukerVertex 80v. Образцы в криостате размещались в фокусе входного порта фурье-спектрометра, излучение детектировалось с помощью фотоприемника на основе HgCdTe. Измерение спектров спонтанной электролюминесценции структуры проводилось в режиме пошагового сканирования. Сигнал с фотоприемника регистрировался в течение импульса импульсным синхронным детектором

SR250 с усреднением по 300 измерениям. Выходное напряжение синхронного детектора измерялось штатным аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) фурье-спектрометра. Спектры стимулированного излучения измерялись в режиме пошагового сканирования, причем величины сигнала с фотоприемника было достаточно для непосредственного измерения штатным АЦП фурье-спектрометра. Это позволило получить серию время-разрешенных спектров стимулированного излучения и исследовать временную эволюцию лазерной генерации во время действия импульса напряжения.

3. Результаты и их обсуждение

Спектры спонтанного излучения экспериментального образца квантово-каскадного лазера, измеренные при различных температурах T , приведены на рис. 1. Максимум интенсивности спектра излучения, измеренного при $T = 79$ К, соответствует длине волны излучения 5.68 мкм, типичная ширина спектра на полувысоте (FWHM) составляет 149 см^{-1} . С повышением температуры вплоть до 300 К (см. рис. 1) наблюдается уширение спектра излучения до 322 см^{-1} и сдвиг положения максимума спектра излучения в длинноволновую область спектра до 5.85 мкм. Стоит отметить, что существенного падения интенсивности излучения с ростом температуры не наблюдается.

Спектры стимулированного излучения, измеренные вблизи порога генерации при $T = 80$ К и зафиксированные в различные моменты времени относительно начала импульса накачки, представлены на рис. 2. В начальный момент времени наблюдается генерация на длине волны 5.58 мкм. Со временем возникают дополнительные продольные моды излучения и перераспределение интенсивностей между ними. Разогрев структуры также

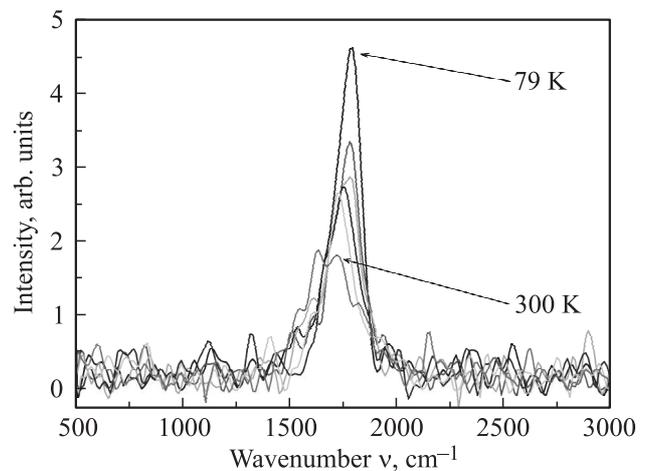


Рис. 1. Спектры спонтанного излучения ККЛ, измеренные при $T = 79, 100, 120, 140, 160, 300$ К. Пропускаемый ток 1.127 А, частота импульсов 0.95 кГц, длительность импульса 2.1 мкс, спектральное разрешение 32 см^{-1} .

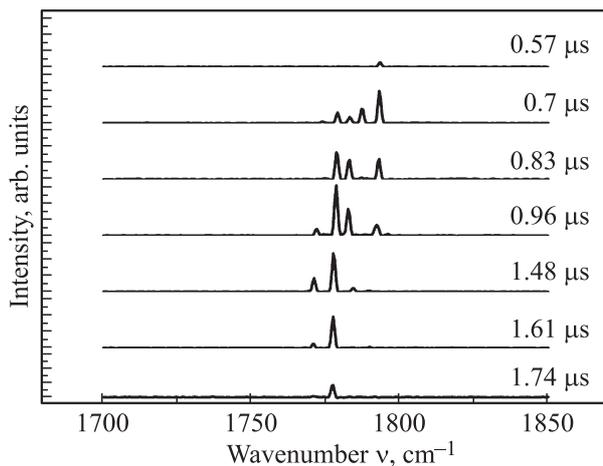


Рис. 2. Спектры стимулированного излучения, зафиксированные при температуре 80 К в различные моменты времени относительно начала импульса накачки. Напряжение смещения 34.7 В, пропускаемый ток 3.63 А, частота импульсов 1 кГц, длительность импульса 5 мкс, спектральное разрешение 1 см^{-1} .

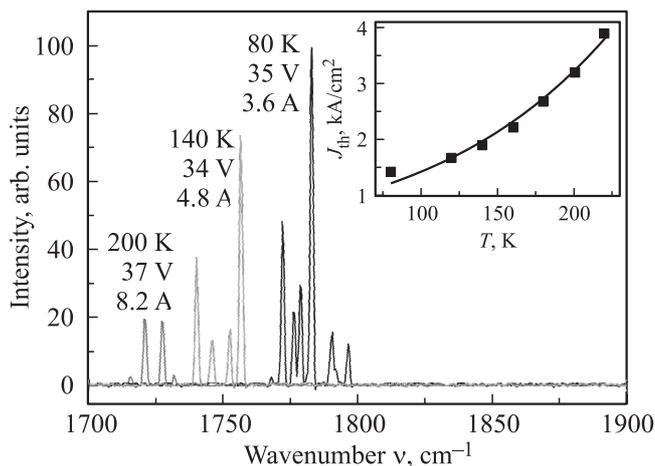


Рис. 3. Спектры стимулированного излучения, измеренные при температурах образца 80, 140 и 200 К. Частота импульсов 1 кГц, длительность импульса 5 мкс, спектральное разрешение 1 см^{-1} . На вставке — экспериментальная температурная зависимость пороговой плотности тока J_{th} квантово-каскадного лазера и аппроксимация экспериментальной зависимости выражением $J_{th}(T) = J_0 \exp(T/T_0)$ со значениями $T_0 = 123 \text{ К}$, $J_0 = 0.63 \text{ кА/см}^2$.

приводит к слабому сдвигу линий генерации в длинноволновую область на $\sim 2 \text{ см}^{-1}$, наблюдаемому экспериментально. Оценка изменения температуры образца для такого сдвига дает величину нагрева $\sim 6 \text{ К}$ за время действия импульса, при этом оценочный рост сопротивления структуры составляет 1.08 раза с момента начала импульса накачки. Абсолютная величина интенсивности стимулированного излучения (при 80 К) в 100 раз превышает интенсивность спонтанного излучения. Согласно [14, 15], генерация кольцевых замкнутых мод в

4-сколотом лазере не приводит к значительному росту интенсивности стимулированного излучения в сравнении со случаем спонтанного излучения по причине практически полного внутреннего отражения световой волны. В свою очередь, наблюдаемый нами в эксперименте рост интенсивности сигнала, в 100 раз и более, при переходе от спонтанного к стимулированному излучению свидетельствует об эффективном выводе излучения из кристалла, обусловленном работой лазера в режиме генерации продольных мод в резонаторе Фабри–Перо с относительно малой длиной, порядка $\sim 500 \text{ мкм}$, между двумя параллельными сколами кристалла. Кольцевые замкнутые моды также, возможно, присутствуют.

На рис. 3 представлены спектры стимулированного излучения квантово-каскадного лазера, измеренные при различных температурах теплоотвода. С ростом температуры теплоотвода наблюдается сдвиг длины волны генерации от 5.6 до 5.8 мкм и перераспределение интенсивности между различными продольными модами. Для исследованного квантово-каскадного лазера регистрируется генерация вплоть до температуры 220 К. Вставка к рис. 3 показывает экспериментальную температурную зависимость пороговой плотности тока в исследуемом образце. Максимальная пороговая плотность тока при температуре 220 К не превышает значение 4 кА/см^2 . Экспериментальная зависимость порогового тока хорошо описывается выражением $J_{th}(T) = J_0 \exp(T/T_0)$ [2], где J_{th} — плотность порогового тока, T — температура наблюдения, T_0 — характеристическая температура стабильности порогового тока, $T_0 = 123 \text{ К}$ для исследуемого образца, J_0 — плотность порогового тока при нулевой температуре, $J_0 = 0.63 \text{ кА/см}^2$.

4. Заключение

Реализована генерация многопериодных квантово-каскадных лазеров, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, содержащих 60 каскадных периодов, в спектральном диапазоне 5.6–5.8 мкм при токовой накачке. Несмотря на относительно короткую длину резонатора, 500 мкм, и большие потери на вывод излучения генерация наблюдается в температурном диапазоне 80–220 К. Плотность тока на пороге генерации при температуре 220 К не превышает 4 кА/см^2 с характеристической температурой $T_0 = 123 \text{ К}$. Такое поведение лазера с относительно коротким резонатором обусловлено большим числом каскадных периодов, 60, и вследствие этого большим усилением активной области лазера. С ростом температуры образца и времени с начала импульса накачки наблюдается перераспределение интенсивности излучения между продольными модами спектра генерации.

Работа выполнена при частичной поддержке Федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на

2014–2020 годы“, шифр 2015-14-582-0015, соглашение № 14.581.21.0100, уникальный идентификатор RFMEFI57814X0100, Министерства образования и науки России (государственное задание), а также FP7 EU „Funprob“.

Список литературы

- [1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис. ФТП, **5**, 797 (1971). [Sov. Phys. Semicond., **5**, 707 (1971)].
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho. Science, **264** (5158), 553 (1994).
- [3] L. Diehl, S. Mentese, E. Muller, D. Grutzmacher, H. Sigg, U. Gennser, I. Sagnes, Y. Campidelli, O. Kermarrec, D. Bensahel, J. Faist. Appl. Phys. Lett., **81** (25), 4700 (2002).
- [4] G. Dehlinger, L. Diehl, U. Gennser, H. Sigg, J. Faist, K. Ensslin, D. Grutzmacher, E. Müller. Science, **290** (5500), 2277 (2000).
- [5] S. Tsujino, H. Sigg, M. Scheinert, D. Grutzmacher, J. Faist. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **12** (6), 1642 (2006).
- [6] M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen, J. Faist, U. Oesterle, M. Plegems, E. Gini, H. Melchior. Science, **295** (5553), 301 (2002).
- [7] A. Tredicucci, C. Gmachl, F. Capasso, D.L. Sivco, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. Nature, **396** (6709), 350 (1998).
- [8] N. Owschimikow, C. Gmachl, A. Belyanin, V. Kocharovskiy, D.L. Sivco, R. Colombelli, F. Capasso, A.Y. Cho. Phys. Rev. Lett., **90** (4), 043902 (2003).
- [9] C. Gmachl, D.L. Sivco, R. Colombelli, F. Capasso, A.Y. Cho. Nature, **415** (6874), 883 (2002).
- [10] Y. Yao, A.J. Hoffman, C.F. Gmachl. Nature Photon., **6** (7), 432 (2012).
- [11] M. Razeghi, S. Slivken. Opto-Electronics Rev., **11** (2), 85 (2003).
- [12] A. Lyakh, C. Pflügl, L. Diehl, Q.J. Wang, F. Capasso, X.J. Wang, J.Y. Fan, T. Tanbun-Ek, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, C.K.N. Patel. Appl. Phys. Lett., **92** (11), 111110 (2008).
- [13] А.Ю. Егоров, П.Н. Брунков, Е.В. Никитина, Е.В. Пирогов, М.С. Соболев, А.А. Лазаренко, М.Б. Байдакова, Д.А. Кириленко, С.Г. Конников. ФТП, **48** (12), 1640 (2014).
- [14] N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Böhrer, O. Schmidt, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, Zh.I. Alferov, A.I. Borovkov, A.O. Kosogov, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gösele, J. Heydenreich. Phys. Rev. B, **54** (12), 8743 (1996).
- [15] D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov. *Quantum dot heterostructures* (John Wiley & Sons, Chichester, England, 1999) p. 285.

Редактор Л.В. Шаронова

Lasing of multiperiod quantum-cascade lasers in the spectral range of 5.6–5.8 μm under current pumping

A.Yu. Egorov^{+*‡}, A.V. Babichev^{+*‡},
L.Ya. Karachinsky^{+*‡}, I.I. Novikov^{+*‡}, E.V. Nikitina[#],
M. Tchernycheva[•], A.N. Sofronov[°], D.A. Firsov[°],
L.E. Vorobjev[°], N.A. Pihlin⁺, I.S. Tarasov⁺

⁺ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

^{*} ITMO University,

197101 St. Petersburg, Russia

[‡] Connector Optics LLC,

194292 St. Petersburg, Russia

[#] Saint Petersburg National Research Academic University,

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

[•] Institut d'Electronique Fondamentale,

University Paris Sud XI,

91405 Orsay cedex, France

[°] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

195251 St. Petersburg, Russia

Abstract The lasing of multiperiod quantum-cascade lasers in the spectral range of 5.6–5.8 μm under current pumping is demonstrated. The quantum-cascade laser heterostructure was grown by molecular-beam epitaxy technique. Despite the relatively short laser cavity length and high level of external loss the laser shows the generation in the temperature range of 80–220 K. The threshold current density below 4 kA/cm² at 220 K is demonstrated with the characteristic temperature $T_0 = 123$ K.