

09

Квантовые каскадные лазеры с длиной волны излучения $4.8 \mu\text{m}$, работающие при комнатной температуре

© В.В. Мамутин¹, А.П. Васильев¹, А.В. Лютецкий¹,
Н.Д. Ильинская¹, А.А. Усикова¹, Ю.М. Задиранов¹,
Н.А. Малеев¹, А.Н. Софронов², Д.А. Фирсов²,
Л.Е. Воробьев², В.М. Устинов¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mamutin@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2018 г.

Описано получение генерации при комнатной температуре в изорешеточной структуре для квантового каскадного лазера на подложке фосфида индия. Гетероструктура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии, состояла из 30 каскадов и была рассчитана на длину волны вблизи $4.8 \mu\text{m}$, что соответствует одному из окон прозрачности атмосферы. Экспериментально получена лазерная генерация при температурах от 80 до 300 К на длине волны, совпадающей с расчетной, что подтверждает высокое качество интерфейсов и высокую точность исполнения толщин и легирования активной области.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46607.17383

Длина волны излучения в квантовых каскадных лазерах (ККЛ) может выбираться в широких пределах в зависимости от предполагаемого применения. Одно из них — использование атмосферных окон прозрачности среднего инфракрасного диапазона $3\text{--}5 \mu\text{m}$ для высокоскоростных систем связи, в том числе со спутниками, когда влияние поглощения и турбулентности атмосферы существенно уменьшено по сравнению с видимым и ближним инфракрасным диапазонами. В ККЛ для диапазона длин волн вблизи $5 \mu\text{m}$ со слоями GaInAs/AlInAs в основном из-за значений показателя преломления, технологичности и подходящего теплоотвода используются структуры, выращенные на

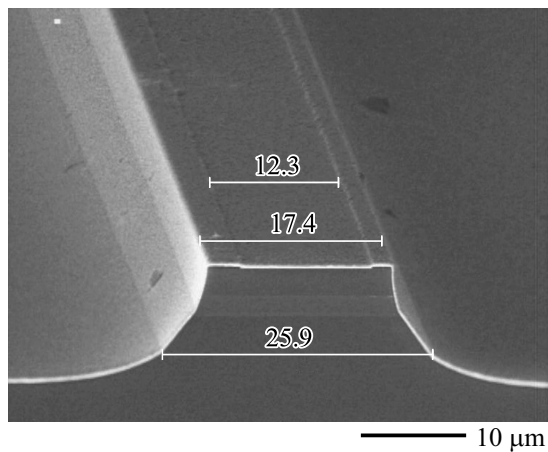


Рис. 1. Внешний вид лазерного полоска с диэлектриком и металлическим контактом в электронном микроскопе.

подложках InP [1–3]. Ранее для достижения генерации при комнатной температуре использовалось зарастивание полосковой структуры фосфидом индия [1]. И хотя была показана такая возможность [4–6], но в силу ее сложности и необходимости привлечения сторонних технологий [7,8] в настоящей работе мы исследовали возможность достижения лазерной генерации при 300 К более простыми методами: изготовление соответствующей полосковой структуры и различные методы ее напайки на теплоотвод.

В работе сообщается о достижении лазерной генерации вблизи $4.8\ \mu\text{m}$ на полосковой структуре при температурах от 80 до 300 К (по нашим данным — впервые в нашей стране на данной длине волны). Мы сконцентрировались на использовании решеточно-согласованных гетероструктур как наиболее точно контролируемых по составу с помощью рентгеновской дифракции и фотолюминесценции для попадания в нужную длину волны излучения.

Лазерные гетероструктуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке RIBER Compact-21 TM. Ростовые температуры активных областей лазерных структур составляли 500°C , при росте использовались слабо As-стабилизированные условия. Лазер-

ная структура была разработана с решеточно-согласованной активной областью и эмиттерами и наносилась на подложку n -InP(100):Sn, легированную до $2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Активная область квантового каскадного лазера состояла из 30 периодов. Один период содержал последовательность из 18 чередующихся слоев AlInAs/GaInAs (в nm):

$$3.0/4.0/2.2/4.7/1.5/0.9/5.0/1.9/2.8/1.9/2.3/$$

$$\underline{2.0/2.0/2.0/2.2/2.2/2.3/2.3},$$

подчеркнуты слои квантовых ям GaInAs, жирным шрифтом выделены слои, легированные кремнием на уровне $n = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Вся структура (указана последовательность от подложки по направлению роста, в скобках приводится уровень легирования) состояла из следующих слоев: 300 nm волноводный слой $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$); 1356 nm (30 периодов) активная зона; 200 nm волноводный слой $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$); толстый эмиттер: 600 nm $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 700 nm $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 1200 nm $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ ($7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); верхний „подконтактный“ сильно легированный 50 nm слой $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ ($2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) [9].

Ранее нами были детально исследованы спектры спонтанной люминесценции и получена лазерная генерация при относительно низких температурах в четырех тестовых сколотых образцах из этой структуры [10]. В настоящей работе из выращенной структуры изготавливались меза-полоски шириной 15–18 μm (рис. 1) с глубиной травления до подложки (подробности изготовления будут изложены в отдельной публикации). Полоски раскалывались на лазерные чипы длиной 2–4 mm и монтировались на теплоотвод. Были исследованы две серии образцов лазерных чипов, смонтированных на теплоотвод как со стороны подложки, так и со стороны полосковой структуры. Измерения спектров излучения проводились на установке на базе фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v. Образцы монтировались в азотный криостат с выходным оптическим окном из ZnSe и устанавливались в фокусе параболического зеркала входного порта спектрометра. Излучение, проходя через интерферометр спектрометра, в котором использовался светоделитель из KBr, собиралось на входном окне охлаждаемого жидким азотом фотоприемника на основе твердого раствора кадмий–ртуть–теллур. Питание лазерных чипов осуществлялось в импульсном режиме с

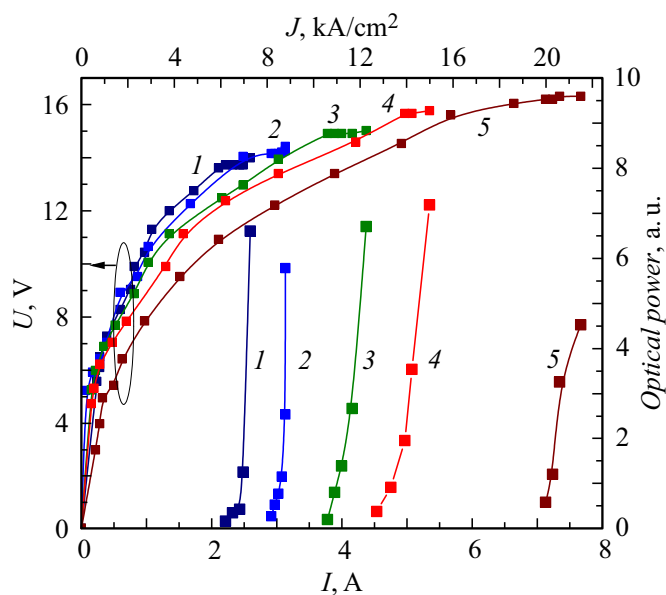


Рис. 2. Типичные вольт-амперные характеристики и зависимости интегральной интенсивности излучения от тока, измеренные при постепенном нагреве лазерного чипа с длиной резонатора 2.9 mm от температуры жидкого азота до комнатной температуры. T , К: 1 — 80, 2 — 156, 3 — 215, 4 — 260, 5 — 300.

помощью генератора тока на основе мощного полевого транзистора с длительностью импульса тока 60 ns на частотах 1–5 kHz, лазерный чип в криостате подключался к генератору тока с помощью микрополосковой линии с низким импедансом. Измерения напряжения, тока и сигнала фотосоответа осуществлялись с помощью цифрового осциллографа.

На рис. 2 показаны типичные вольт-амперные характеристики изготовленных лазерных чипов и зависимости интенсивности лазерного излучения от тока, измеренные в температурном диапазоне от 80 до 300 К. Лазерная генерация была экспериментально зафиксирована вплоть до 300 К. Пороговый ток с типичным значением при температуре жидкого азота около 5 kA/cm² с ростом температуры показывает

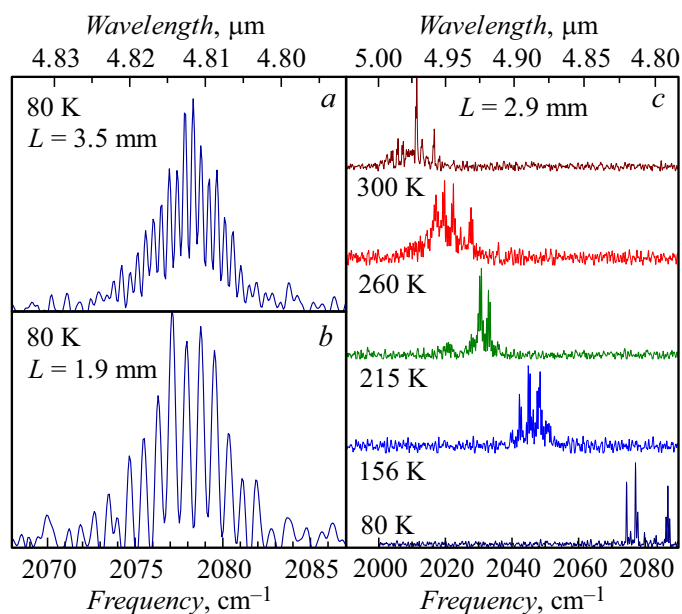


Рис. 3. Спектры генерации лазерных чипов с различной длиной резонатора при температуре жидкого азота (*a, b*) и при нагреве от температуры жидкого азота до комнатной (*c*). *a* — 3.5 mm (монтаж полосковой структурой на теплоотвод), *b* — 1.9 mm (монтаж подложкой на теплоотвод), *c* — 2.9 mm (монтаж полоском на теплоотвод).

близкий к экспоненциальному рост и при комнатной температуре составляет около 20 kA/cm^2 для всех исследованных образцов лазерных чипов.

Спектры излучения измерялись в режиме пошагового сканирования с внешней синхронизацией шага зеркала по импульсу напряжения со спектральным разрешением 0.2 cm^{-1} . На рис. 3, *a* и *b* показаны типичные спектры генерации при температуре жидкого азота для двух лазерных чипов с длинами резонаторов 3.5 и 1.9 mm, на которых хорошо разрешены моды резонатора Фабри–Перо с межмодовым расстоянием, равным соответственно 0.81 и 0.44 cm^{-1} , что отвечает эффективному показателю преломления активной области 3.25. Рис. 3, *c* отражает

температурную эволюцию спектра лазерной генерации с нагревом лазерного чипа от 80 до 300 К.

Сравнение времяразрешенных спектров генерации образцов лазерных чипов, смонтированных на теплоотвод со стороны подложки и со стороны полосковой структуры, показало, что в первом случае при питании лазерных чипов импульсами увеличенной длительности при рабочих токах происходит плавное смещение всего спектра излучения примерно на 1 cm^{-1} за $0.5 \mu\text{s}$ в длинноволновую область, что свидетельствует о динамическом нагреве активной области и недостаточном теплоотводе в такой конфигурации.

Таким образом, в работе исследованы лазерные характеристики выращенной с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках фосфида индия изорешеточной структуры AlInAs/GaInAs для квантового каскадного лазера, рассчитанного на длину волны вблизи $4.8 \mu\text{m}$, соответствующую окну прозрачности атмосферы. В эксперименте получена лазерная генерация при температурах вплоть до 300 К на длине волны, совпадающей с расчетной, что подтверждает высокое качество интерфейсов и прецизионную точность толщин и легирования активной области ККЛ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 3.933.2017/4.6).

Список литературы

- [1] *Razeghi M., Slivken S., Bai Y., Gokden D., Darvish S.R.* // New J. Phys. 2009. V. 11. P. 125017.
- [2] *Мамутин В.В., Устинов В.М., Boettcher J., Kuenzel H.* // ФТП. 2010. Т. 44. В. 7. С. 995–1001.
- [3] *Yao Y., Hoffman A.J., Gmachl C.F.* // Nature Photon. 2012. V. 6. P. 432–439.
- [4] *Мамутин В.В., Ильинская Н.Д., Пушный Б.В., Левин Р.Н., Шерняков Ю.М.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 18. С. 32–37.
- [5] *Evans A., Darvish S.R., Slivken S., Razeghi M.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 071101.
- [6] *Chashnikova M., Monastyrskiy G., Aleksandrova A., Klinkmuller M., Semtsiv M.P., Masselink W.T.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 213504.
- [7] *Tsekoun A., Go R., Pushkarsky R., Razeghi M., Kumar C., Patel N.* // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2006. V. 103. P. 4831–4835.

- [8] *Briggs R.M., Frez C., Borgentum C.F., Forouhar S.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 141117.
- [9] *Мамутин В.В., Малеев Н.А., Васильев А.П., Ильинская Н.Д., Задиранов Ю.М., Усикова А.А., Яговкина М.А., Шерняков Ю.М., Устинов В.М.* // ФТП. 2018. Т. 52. В. 1. С. 133–137.
- [10] *Мамутин В.В., Васильев А.П., Лютецкий А.В., Ильинская Н.Д., Задиранов Ю.М., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Малеев Н.А., Устинов В.М.* // ФТП. 2018. Т. 52. В. 7. С. 812–815.