

Квантово-каскадные лазеры мощностью 10 Вт для спектральной области 4.6 мкм

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, А.В.Бабичев, С.Н.Лосев, Е.А.Когновицкая, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, А.Г.Гладышев, Д.В.Денисов, И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский, В.И.Кучинский, А.Ю.Егоров, Г.С.Соколовский

Изготовлены полосковые квантово-каскадные лазеры, излучающие вблизи 4.6 мкм, и исследованы их мощностные и спектральные характеристики. Продемонстрирована устойчивая лазерная генерация с выходной оптической мощностью более 10 Вт (свыше 5 Вт с одного зеркала) в импульсном режиме работы при комнатной температуре.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, гетероструктура, высокая мощность.

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) являются наиболее компактными и эффективными источниками излучения для среднего ИК диапазона 3–20 мкм [1–4]. Современные системы газоанализа, промышленного мониторинга и безопасности требуют создания источников излучения, длины волн которых соответствуют линиям поглощения различных веществ в среднем ИК диапазоне [5, 6]. В настоящее время ведутся активные исследования по созданию различных конструкций ККЛ для спектральной области 4.6 мкм [6–11], в которой, в частности, находятся интенсивные линии поглощения монооксида углерода и силана. Показана возможность получения высокой выходной оптической мощности как в геометрии с одним широким полосковым контактом [7], так и на основе массивов оптически связанных узкополосковых лазеров [8], в которых используются, в том числе, Y-соединители [9]. Исследуется также влияние температурных эффектов [10] и транспорта носителей заряда [11] на характеристики ККЛ.

Гетероструктуры ККЛ выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках InP

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, С.Н.Лосев, А.В.Лютецкий, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: gs@mail.ioffe.ru

А.В.Бабичев. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптикс», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Е.А.Когновицкая. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

А.Г.Гладышев. ООО «Коннектор Оптикс», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

Д.В.Денисов. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

И.И.Новиков, Л.Я.Карачинский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптикс», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16

А.Ю.Егоров. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49

Поступила в редакцию 23 марта 2020 г.

в ООО «Коннектор Оптикс» на промышленной установке Riber 49. Активная область ККЛ содержала 30 квантовых каскадов, состоящих из чередующихся напряжённых квантовых ям и барьеров $\text{In}_{0.669}\text{Ga}_{0.331}\text{As}/\text{In}_{0.362}\text{Al}_{0.638}\text{As}$. Подробное описание структуры представлено в работе [12].

В процессе постростовой обработки гетероструктуры ККЛ методами фотолитографии и химического травления были сформированы полоски шириной от 20 до 50 мкм, которые формировались травлением глубоких мезоканавок до нижней обкладки волновода. Следующим этапом было напыление диэлектрика и формирование нижнего и верхнего контактов путем металлизации. Длина исследованных ККЛ составляла 2–5 мм. Плоскопараллельные зеркала лазеров получались скалыванием – высокоотражающие и просветляющие покрытия на зеркала не наносились. Кристаллы ККЛ монтировались на медный теплоотвод эпитаксиальной поверхностью вниз.

Исследования ККЛ проводились в импульсном режиме. Длительность импульсов накачки составляла ~75 нс при скважности ~0.3%. На рис.1 приведена типичная ватт-амперная характеристика ККЛ при измерении мощности излучения с одного зеркала. Исследование мощностных характеристик проводилось калиброванным

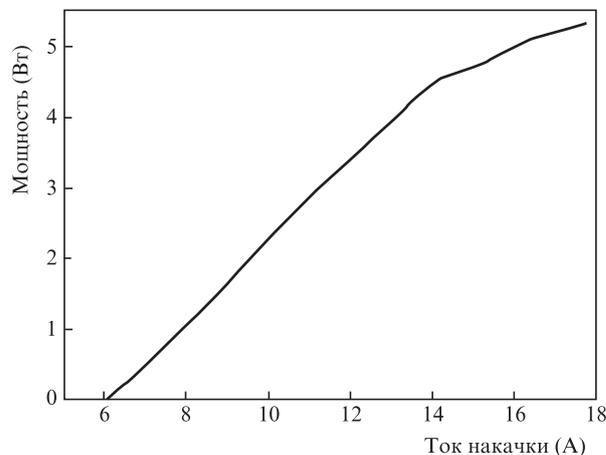


Рис.1. Типичная ватт-амперная характеристика ККЛ с шириной полоскового контакта 50 мкм и длиной резонатора 5 мм при комнатной температуре.

измерителем мощности Thorlabs PM100 с термоэлектрической головкой S401C. Пороговые плотности тока исследуемых ККЛ находились в диапазоне 1.5–2.5 кА/см². Максимальная пиковая мощность излучения при комнатной температуре превышала 10 Вт (более 5 Вт с одного зеркала). Полученные значения пороговых плотностей токов и максимальной выходной оптической мощности свидетельствуют о высоких усилительных характеристиках активной области и структурном совершенстве гетероструктуры ККЛ [12].

Спектральные измерения лазеров проводились с использованием монохроматора МДР-23 с дифракционной решёткой 150 мм⁻¹. Регистрация спектров осуществлялась фотоприёмником PVI-4TE-10.6 (Vigo Systems). Подробнее методика измерений описана в работах [13, 14]. Типичный спектр генерации ККЛ с длиной резонатора 3 мм и шириной полоскового контакта 50 мкм, измеренный при комнатной температуре, приведён на рис.2. Длина волны лазерной генерации находится вблизи расчётного максимума [12], ширина спектра превышает 100 нм. Измеренное межмодовое расстояние ККЛ с длиной резонатора 3 мм составило 1.04 нм, из чего следует, что эффективный показатель преломления лазерного волновода ККЛ равен 3.28.

Итак, представлены исследования характеристик ККЛ, излучающих в спектральной области 4.6 мкм. Полученная

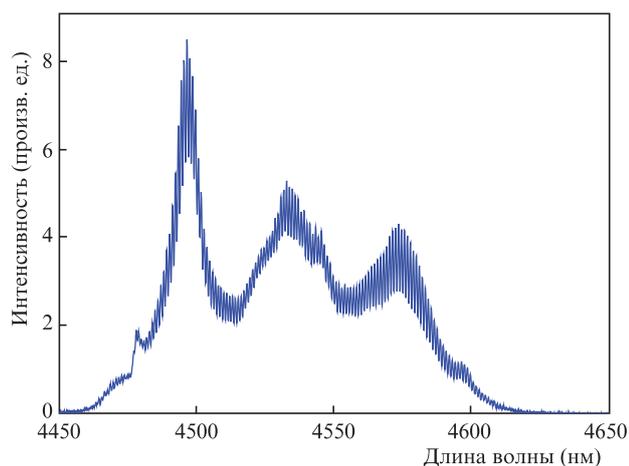


Рис.2. Типичный спектр генерации ККЛ с шириной полоскового контакта 50 мкм и длиной резонатора 3 мм при комнатной температуре.

при комнатной температуре максимальная выходная пиковая мощность лазера превысила 10 Вт (более 5 Вт с одного зеркала).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0318).

1. Capasso F., Gmachl C., Paiella R., Tredicucci A., Hutchinson A.L., Sivco D.L., Baillargeon J.N., Cho A.Y., Liu H.C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **5**, 31 (2000).
2. Botez D., Chang C.-C., Mawst I.J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **49**, 043001 (2016).
3. Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В., Андреев А.Д., Лосев С.Н., Когновицкая Е.А., Бобрецова Ю.К., Слипенченко С.О., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Денисов Д.В., Новиков И.И., Карачинский Л.Я., Кучинский В.И., Егоров А.Ю., Соколовский Г.С. *Квантовая электроника*, **50** (2), 141 (2020) [*Quantum Electron.*, **50** (2), 141 (2020)].
4. Babichev A.V., Dudelev V.V., Gladyshev A.G., Mikhailov D.A., Kurochkin A.S., Kolodeznyi E.S., Bougrov V.E., Nevedomskiy V.N., Karachinsky L.Y., Novikov I.I., Denisov D.V., Ionov A.S., Slipchenko S.O., Lutetskiy A.V., Pikhin N.A., Sokolovskii G.S., Egorov A.Y. *Techn. Phys. Lett.*, **45**, 735 (2019).
5. Curl R.F., Capasso F., Gmachl C., Kosterev A.A., McManus B., Lewicki R., Pusharsky H., Wysocki G., Tittel F. *Chem. Phys. Lett.*, **487**, 1 (2010).
6. Van Helden J.H., Lopatik D., Nave A., Lang N., Davies P.B., Röpcke J. *J. Quantitat. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **151**, 287 (2015).
7. Liu P.Q., Hoffman A.J., Escarra M.D., Franz K.J., Khurgin J.B., Dikmelik Y., Wang X., Fan J.-Y., Gmachl C.F. *Nature Photon.*, **4**, 95 (2010).
8. Yan F.-L., Zhang J.-C., Jia Z.-W., Zhuo N., Zhai S.-Q., Liu S.-M., Liu F.-Q., Wang Z.-G. *AIP Advances*, **6**, 035022 (2016).
9. Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A., Go P., Kumar C., Patel N. *Opt. Express*, **22**, 1203 (2014).
10. Lee H.K., Yu J.S. *Appl. Phys. B*, **106**, 619 (2012).
11. Jonasson O., Mei S., Karimi F., Kirch J., Botez D., Mawst L., Knezevic I. *Photonics*, **3**, 38 (2016).
12. Babichev A.V., Gladyshev A.G., Dudelev V.V., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Denisov D.V., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhin N.A., Sokolovskii G.S., Egorov A.Yu. *Techn. Phys. Lett.*, **46**, 444 (2020).
13. Dudelev V.V., Losev S.N., Myl'nikov V.Yu., Babichev A.V., Kognovitskaya E.A., Slipchenko S.O., Lyutetskii A.V., Pikhin N.A., Gladyshev A.G., Karachinsky L.Ya., Novikov I.I., Egorov A.Yu., Kuchinskii V.I., Sokolovskii G.S. *Techn. Phys.*, **63**, 1656 (2018).
14. Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мильников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипенченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю., Кучинский В.И., Соколовский Г.С. *Оптика и спектроскопия*, **125** (3), 387 (2018) [*Optics and Spectroscopy*, **125** (3), 402 (2018)].