

Мощные (более 1 Вт) квантовые каскадные лазеры для длинноволнового ИК диапазона при комнатной температуре

В.В.Дюделев, Д.А.Михайлов, А.В.Бабичев, А.Д.Андреев, С.Н.Лосев, Е.А.Когновицкая, Ю.К.Бобрецова, 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 и исследованы полосковые квантовые каскадные лазеры, генерирующие излучение с длиной волны вблизи 8 мкм. Продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре с максимальной выходной пиковой мощностью с одного зеркала свыше 1 Вт.

Ключевые слова: квантовый каскадный лазер, гетероструктура, высокая мощность.

1. Введение

Квантовые каскадные лазеры (ККЛ), концепция которых была предложена ещё в 70-х гг. прошлого века [1], в настоящее время являются наиболее компактными и эффективными источниками лазерного излучения в среднем и длинноволновом ИК диапазоне. В настоящее время они широко востребованы во многих областях науки и техники, особенно в газоанализе [2–4] и биомедицине [5]. Активный интерес к разработке ККЛ, генерирующих излучение в длинноволновом ИК диапазоне (длина волны излучения 8–14 мкм) [6–10], связан с тем, что в нём находятся интенсивные линии поглощения многих газов и органических веществ, в том числе взрывчатых [11].

2. Экспериментальные образцы

Эпитаксиальные гетероструктуры ККЛ изготовлены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках InP. Эпитаксиальный рост осуществлялся в компании ООО «Коннектор Оптикс» на промышленной ус-

тановке Ribet 49. Активная область ККЛ рассчитана для получения лазерной генерации с длиной волны вблизи 8 мкм и состоит из 50 идентичных квантовых каскадов, которые представляют собой чередование изопериодичных с подложкой InP гетеропар $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$. Подробное последнее описание гетероструктуры исследуемых ККЛ представлено в [12]. Инверсия населённости в каскаде обеспечивается двухфононным опустошением нижнего уровня лазерного перехода [13]. Следует отметить, что необходимая скорость опустошения нижнего уровня будет поддерживаться только при условии, что величина энергетического зазора между уровнями размерного квантования близлежащих квантовых ям близка к энергии LO-фонона, составляющей ~ 34 мэВ [14] для используемой структуры.

После выращивания гетероструктуры на ней методами постростовой обработки были изготовлены полоски, формирующие боковую стенку лазерного волновода и ограничивающие область протекания тока. Полоски создавались травлением неглубоких (до активной области) мезоканавок [15]. После формирования полосок, а также верхнего и нижнего контактов структура раскалывалась на отдельные чипы, которые затем спаивались на первичные теплоотводы. Полоски были двух типов – шириной 20 и 50 мкм. Длина исследуемых лазерных чипов составляла ~ 4.5 мм.

3. Эксперимент

Характеристики ККЛ исследовались при накачке импульсами тока длительностью ~ 75 нс с частотой следования 48 кГц. Температура теплоотвода была стабилизирована. Проведённые спектральные измерения показали наличие многомодовой генерации вблизи 8 мкм. Спектры измерялись при помощи монохроматора МДР-23 с фотоприёмником Vigo Systems PVI-4TE-10.6. Подробнее техника измерений описана в работе [16]. Типичный спектр генерации приведён на рис. 1, а.

Измерения ватт-амперных характеристик проводились при помощи калиброванного измерителя мощности Thorlabs PM100 с измерительной термоэлектрической головкой S401C. Все экспериментальные образцы демонстрировали лазерную генерацию при комнатной температуре. Пороговые плотности тока исследуемых ККЛ сос-

В.В.Дюделев, С.Н.Лосев, Ю.К.Бобрецова, С.О.Слипченко, Н.А.Пихтин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: v.dudelev@mail.ru; gs@mail.ioffe.ru
Д.А.Михайлов, Е.А.Когновицкая. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия, 197022 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5
А.В.Бабичев. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49; ООО «Коннектор Оптикс», Россия, 194292 С.-Петербург, ул. Домостроительная, 16
А.Д.Андреев, А.Ю.Егоров. Университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49
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 РАН, 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

Поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

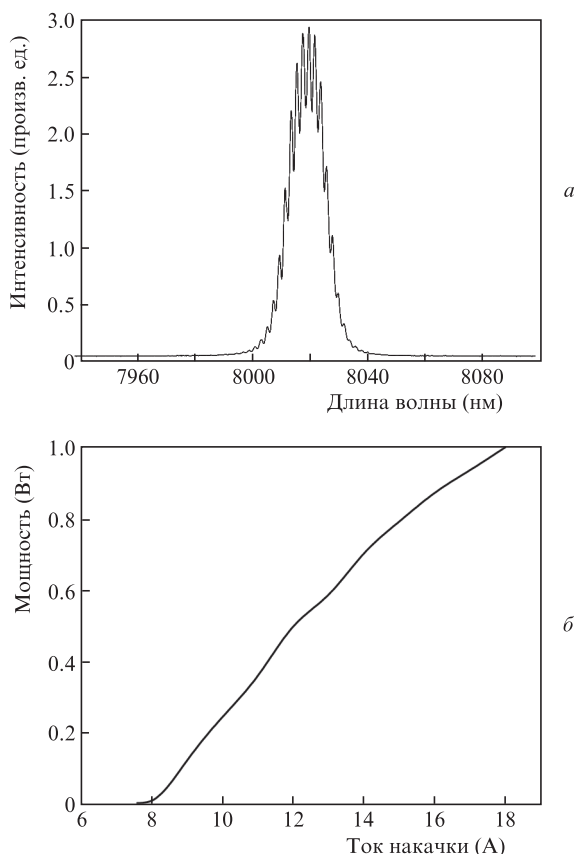


Рис.1. Типичные спектр излучения ККЛ (а) и ватт-амперная характеристика ККЛ с шириной полоски 50 мкм (б) при комнатной температуре.

тавляли 3.5 и 4.5 кА/см² при ширине полоски 50 и 20 мкм соответственно. Более высокие пороговые плотности тока для образцов с меньшей шириной полоски объясняются, по-видимому, относительно большими потерями на боковых краях полоски. Типичная ватт-амперная характеристика для образцов ККЛ с шириной полоски 50 мкм показана на рис.1,б. Максимальная выходная пиковая оптическая мощность с одного зеркала составляла более 1 Вт без учёта потерь на фокусирующей оптике, коэффициент пропускания которой составлял не более 0.85. Полученное значение максимальной выходной пиковой мощности (~1.2 Вт) сопоставимо с результатами, опубликованными в литературе (максимальная выходная пиковая оптическая мощность ККЛ спектрального диапазона 8 мкм, соответствующая механически ненапряженной гетеропаре, составила 0.75 Вт [17], а у напряженной гетеропары – 1.5 Вт [6]).

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследования ККЛ длинноволнового ИК диапазона. Продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре с максимальной выходной пиковой мощностью с одного зеркала свыше 1 Вт.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI61619X0111).

1. Казаринов Р.Ф., Сулис Р.А. *ФТП*, **5**, 797 (1971) [*Sov. Phys. Semicond.*, **5**, 707 (1971)].
2. 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).
3. Kosterev A., Wysocki G., Bakhirkin Y., So S., Lewicki R., Fraser M., Tittel F., Curl R.F. *Appl. Phys. B*, **90**, 165 (2000).
4. Troccoli M., Diehl L., Bour D.P., Corzine S.W., Yu N., Wang C.Y., Belkin M.A., Hofler G., Lewicki R., Wysocki G., Titell F.K., Capasso F. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 3534 (2008).
5. Schwaighofer A., Brandstetter M., Lendl B. *Chem. Soc. Rev.*, **46**, 5903 (2017).
6. Botez D., Kirch J.D., Boyle C., Oresick K.M., Sigler C., Kim H., Knipfer B.B., Ryu J.H., Lindberg D., Earles T., Mawst L.J., Flores Y.V. *Opt. Mater. Express*, **8**, 1378 (2018).
7. Kirch J.D., Chang C.-C., Boyle C., Mawst L.J., Lindberg D., Earles T., Botez D. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 151106 (2015).
8. Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мыльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко 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. *ЖТФ*, **88**, 1708 (2018) [*Tech. Phys.*, **63**, 1656 (2018)].
9. Бабичев А.В., Гусев Г.А., Софронов А.Н., Фирсов Д.А., Воробьев Л.Е., Усикова А.А., Задиранов Ю.М., Ильинская Н.Д., Неведомский В.Н., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Гладышев А.Г., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Егоров А.Ю. *ЖТФ*, **88**, 1559 (2018) [*Tech. Phys.*, **63**, 1511 (2018)].
10. Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Курочкин А.С., Дюделев В.В., Колодезный Е.С., Соколовский Г.С., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Ионов А.С., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **45** (8), 31 (2019) [*Tech. Phys. Lett.*, **45**, 398 (2019)].
11. 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).
12. Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Филимонов А.В., Неведомский В.Н., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Соколовский Г.С., Бугров В.Е., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Bousseksou A., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **43** (14), 64 (2017) [*Tech. Phys. Lett.*, **43**, 666 (2017)].
13. Xu G., Moreau V., Chassagneux Y., Bousseksou A., Colombelli R., Patriarche G., Beaudoin G., Sagnes I. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 221101 (2009).
14. Fujita K., Hitaka M., Ito A., Edamura T., Yamanishi M., Jung S., Belkin M.A. *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 251104 (2015).
15. Бабичев А.В., Дюделев В.В., Гладышев А.Г., Михайлов Д.А., Курочкин А.С., Колодезный Е.С., Бугров В.Е., Неведомский В.Н., Карачинский Л.Я., Новиков И.И., Денисов Д.В., Ионов А.С., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Пихтин Н.А., Соколовский Г.С., Егоров А.Ю. *Письма в ЖТФ*, **45** (14), 48 (2019) [*Tech. Phys. Lett.*, **45**, 735 (2019)].
16. Дюделев В.В., Лосев С.Н., Мыльников В.Ю., Бабичев А.В., Когновицкая Е.А., Слипченко 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** (9), 387 (2018) [*Opt. Spectrosc.*, **125** (3), 402 (2018)].
17. Schwarz B., Wang C.A., Missaggia L., Mansuripur T.S., Chevalier P., Connors M.K., McNulty D., Cederberg J., Strasser G., Capasso F. *ACS Photonics*, **4**, 1225 (2017).