

07

Генерация терагерцового излучения в многослойных квантово-каскадных гетероструктурах

© А.В. Иконников^{1,2}, К.В. Маремьянин^{1,2}, С.В. Морозов^{1,2},
В.И. Гавриленко^{1,2}, А.Ю. Павлов³, Н.В. Щаврук³,
Р.А. Хабибуллин³, Р.Р. Резник^{4,5,6}, Г.Э. Цырлин^{4,5,6,7},
Ф.И. Зубов⁴, А.Е. Жуков^{4,7}, Ж.И. Алфёров^{4,7}

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород

³ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН,
Москва

⁴ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический
университет РАН

⁵ Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

⁶ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

⁷ Санкт-Петербургский научный центр РАН

E-mail: antikon@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2017 г.

Исследованы вольт-амперные и излучательные характеристики многослойных квантово-каскадных гетероструктур GaAs/AlGaAs с двойным металлическим волноводом. Продемонстрированы ВАХ, типичные для квантовых каскадных лазеров. Наблюдался пороговый рост интенсивности и узкий спектр излучения, что характерно для лазерной генерации. Измеренная частота излучения составила около 3 THz, что совпадает с расчетным значением. Таким образом, впервые продемонстрированы полностью отечественные квантово-каскадные лазеры THz-диапазона.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.07.44473.16602

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) — малогабаритные высокоэффективные полупроводниковые источники излучения, реализованные как в среднем инфракрасном (ИК, 2–24 μm), так и в терагерцовом (THz, 60–300 μm) диапазонах. Идея ККЛ была впервые предложена

Р.Ф. Казариновым и Р.А. Сурисом в 1971 году [1]. ККЛ представляет собой полупроводниковую гетеросистему с большим (до нескольких сотен) числом туннельно-связанных квантовых ям (КЯ); генерация осуществляется за счет вынужденных переходов электронов между уровнями размерного квантования КЯ [1,2], образующих при приложении внешнего электрического поля усилительный каскад. К настоящему времени реализованы ККЛ, работающие в среднем ИК-диапазоне при комнатной температуре в непрерывном режиме [3] с мощностями, достигающими единиц ватт [4].

Подходы, отработанные при создании ККЛ среднего ИК-диапазона, позволили создать приборы ТНz-диапазона [5]. Электромагнитные волны этого диапазона отражаются металлами, но проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину и любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния. В ТНz-диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод ДНК и белков, а также фоновые резонансы кристаллических решеток, что позволяет развить новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых структур. Поскольку энергии фотонов ТНz-излучения малы, оно не производит ионизации среды и повреждения биомолекул, в отличие, например, от рентгеновского излучения. Это позволяет использовать ТНz-излучение для медицинской диагностики, в современных системах безопасности, экологического мониторинга, высокоскоростной связи, для контроля качества медикаментов и продуктов питания [6,7]. Все это делает задачу создания компактных, эффективных и дешевых источников излучения ТНz-диапазона стратегически важной. В то же время в России на данный момент имеются единичные сообщения лишь о создании ККЛ среднего ИК-диапазона ($5-8\ \mu\text{m}$) [8-10]. Поэтому как создание ТГц ККЛ, так и их всестороннее исследование являются актуальной задачей.

В настоящей работе нами представлены результаты исследований вольт-амперных и спектральных характеристик первых структур ККЛ, полностью изготовленных в России.

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 21. За основу была взята конструкция многопериодной гетероструктуры AlGaAs/GaAs с тремя КЯ в периоде, описанная в [11] и позволившая получить лазерную генерацию вплоть до 200 К на частоте 3 ТНz. Рост осуществлялся на

полуизолирующих подложках GaAs (100). На буферном слое GaAs осаждался стоп-слой $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ толщиной 200 nm, который в дальнейшем использовался при создании лазерного полоска, а затем выращивалась активная область, состоявшая из 228 периодов, каждый из которых содержит три КЯ GaAs толщиной 8.9, 81.5 и 16 nm, разделенных барьерами $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$. Самая широкая КЯ служит экстрактором/инжектором электронов за счет резонансного испускания оптического фотона; она легировалась донорной примесью (Si) с концентрацией $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Снизу и сверху активная область была ограничена контактными слоями GaAs:Si ($5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 75 и 50 nm соответственно. Более подробно процесс роста структур описан в [12].

Для создания ККЛ в данной работе, как и в [11], была использована схема волновода типа металл–металл, в которой активная область заключается между двумя металлическими слоями. Такой волновод обеспечивает более сильную локализацию поля и меньшие потери по сравнению с плазмонным волноводом [13], хотя такой подход значительно усложняет постростовую обработку структур. Для создания как волноводного ограничения, так и омических контактов была использована металлизация Ti/Au (10/500 nm). Выращенную структуру помещали на проводящую подложку-носитель n^+ -GaAs, на поверхность которой были нанесены такие же металлические слои, и сращивали методом термокомпрессионного соединения. Далее производилось последовательное травление исходной подложки до стоп-слоя, а затем и самого стоп-слоя, после чего сверху наносилась аналогичная последовательность металлических слоев Ti/Au. В результате структура толщиной около 10 μm оказывалась ограниченной двумя металлическими слоями. Далее с использованием электронно-лучевой литографии и сухого травления формировались полоски шириной 100 μm . Подробное описание процессов формирования волновода дано в [14]. После утонения подложки-носителя до толщины около 100 μm выкальвались лазерные чипы длиной около 1.5 mm (рис. 1, *a*). Какие-либо покрытия или линзы на сколотые грани не наносились. Чипы монтировались на медный теплопровод, являющийся нижним контактом к структуре. К верхнему контакту напаивалась золотая проволока (рис. 1, *b*).

Исследования вольт-амперных (ВАХ) и излучательных характеристик полученных структур ККЛ проводились при $T = 4.2 \text{ K}$ в импульсном режиме. Структура размещалась во вставке в транспортный гелиевый сосуд Дьюара СТГ-40. Для питания структур использовался

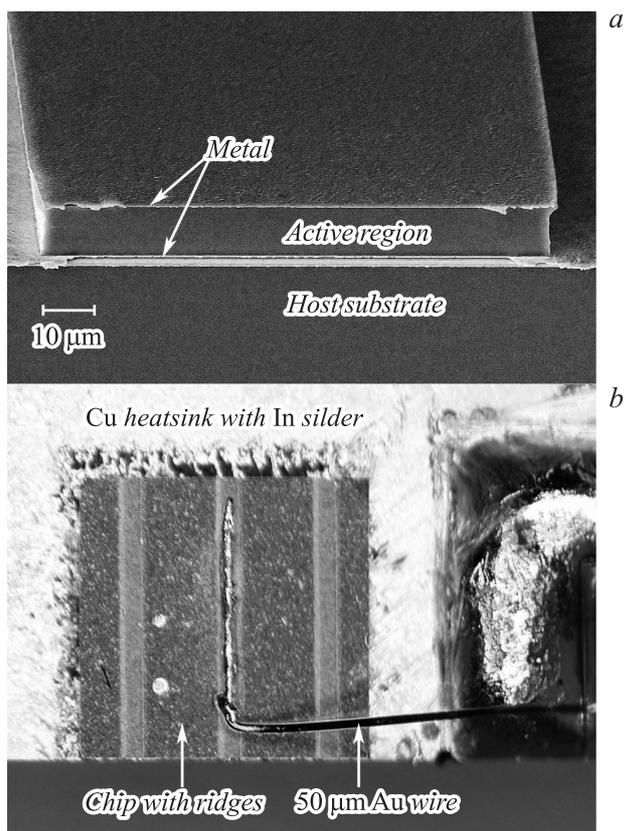


Рис. 1. Микрофотография сколотого торца излучателя (a) и фотография прибора, смонтированного на медном теплоотводе (b).

специально изготовленный электронный ключ на основе полевого транзистора IRF 9510. Задающие прямоугольные импульсы длительностью $10\text{--}20\ \mu\text{s}$ и частотой повторения $100\text{--}1000\ \text{Hz}$ формировались генератором Г5-56. Питание ключа осуществлялось от прибора Keithley 2400 Source Meter, который позволял осуществлять пошаговую развертку выходного напряжения. С выхода ключа импульсы напряжения до $16\ \text{V}$ подавались на исследуемую структуру. При измерении

ях ВАХ сигналы, пропорциональные амплитуде импульсов напряжения и тока, подавались на двухканальный строб-интегратор (boxcar) Stanford Research Systems SR250. Постоянное напряжение с выхода каждого из каналов строб-интегратора оцифровывалось с помощью аналого-цифрового преобразователя и записывалось в память ЭВМ.

При измерениях интегральной интенсивности излучения ККЛ в зависимости от тока терагерцовое излучение детектировалось примесным фотоприемником Ge:Ga, который также располагался во вставке в СТГ-40 непосредственно рядом с исследуемым образцом. Смещение на приемник подавалось с предусилителя прибора UNIPAN-232B, использовавшегося в данном эксперименте в качестве широкополосного усилителя с полосой 150 kHz. Усиленный сигнал с приемника вместе с импульсом, пропорциональным току через лазер, подавались на два канала строб-интегратора. Сигналы с выхода строб-интегратора оцифровывались и записывались в ЭВМ.

Малая интенсивность излучения исследуемых каскадных структур не позволила использовать для изучения его спектральных характеристик фурье-спектрометр (ср. с [15]), поэтому спектральные исследования проводились с использованием перестраиваемого магнитным полем режекторного фильтра на циклотронном резонансе (ЦР). Использовалась криомагнитная вставка в СТГ-40, в которой между ККЛ и приемником располагался сверхпроводящий соленоид, в центре которого (в разрезе световодной трубки из нержавеющей стали диаметром 4 mm, по которой излучение от ККЛ подводилось к фотоприемнику) помещалась гетероструктура с КЯ HgTe/Cd_{0,7}Hg_{0,3}Te шириной 8 nm с двумерным электронным газом. Записывалась зависимость сигнала а фотоприемнике (спектр ЦР в геометрии Фарадея) от магнитного поля. В качестве референсного источника излучения использовался квантово-каскадный лазер, изготовленный фирмой Trion Technology, работающий на частоте 2.99 THz [15]. Вследствие сильной непараболичности зоны проводимости циклотронная масса электронов в КЯ HgTe/CdHgTe сильно зависит от концентрации [16], поэтому последняя специально контролировалась с помощью измерений магнитосопротивления гетероструктуры по двухконтактной схеме.

На рис. 2 представлены ВАХ и зависимости интенсивности интегрального излучения от тока для исследуемой каскадной структуры. Такие зависимости вполне типичны для схем ККЛ с резонансным испусканием оптического фотона [17–19]. Наличие платообразных

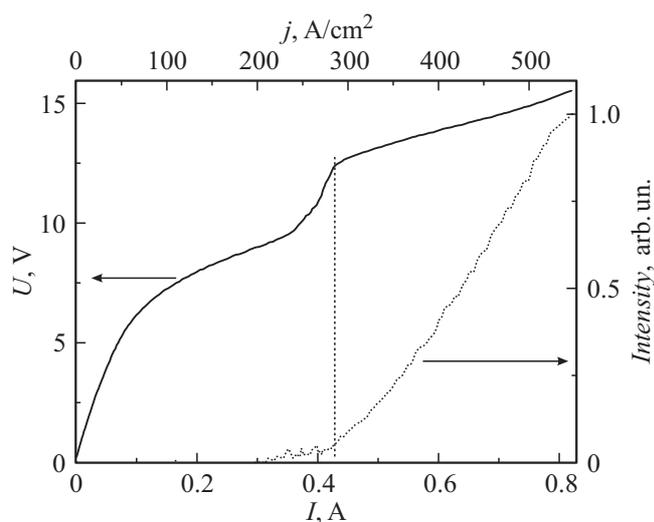


Рис. 2. ВАХ (сплошная линия) и зависимости интенсивности излучения от тока (точечная линия) исследуемой каскадной структуры.

участков на ВАХ (0.32–0.42 А), скорее всего, связано с образованием доменов электрического поля внутри лазерной структуры. Это подтверждается наличием высокочастотных осцилляций на осциллограммах напряжения и „скачков“ ВАХ в области плато. Подобные домены были подробно исследованы для ККЛ среднего ИК-диапазона [20]. Далее ВАХ претерпевает резкий излом, свидетельствующий о приближении уровня инжектора к верхнему рабочему лазерному уровню, что способствует эффективному туннелированию электронов и быстрому росту тока через структуру. Именно на этом участке в структурах с подобными ВАХ наблюдается возникновение лазерного излучения [17–19]. На зависимости интегральной интенсивности от тока видно (рис. 2), что излом на ВАХ при токе 0.42 А (280 A/cm^2) соответствует началу резкого роста интенсивности излучения, что является признаком возникновения в структуре стимулированного излучения. Кроме того, расчеты, выполненные в работе [21], показывают, что напряжение, соответствующее порогу генерации для данной структуры, составляет около 12.4 В, что совпадает с изломом ВАХ.

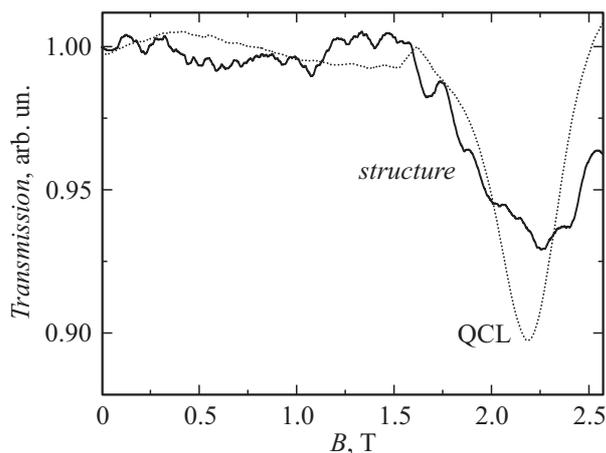


Рис. 3. Спектры циклотронного резонанса в гетероструктуре $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ (концентрация электронов $3.7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), полученные с помощью референсного ККЛ от Trion Technology (точечная линия) и исследуемой каскадной структуры (сплошная линия).

Исследования спектральных характеристик излучения подтверждают предположение о стимулированном характере излучения. На рис. 3 представлены спектры ЦР в гетероструктуре $\text{HgTe}/\text{Cd}_{0.7}\text{Hg}_{0.3}\text{Te}$ (концентрация электронов $3.7 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), полученные как с помощью референсного ККЛ, так и с помощью исследуемой каскадной структуры. При использовании референсного лазера ширина линии ЦР определяется эффективной шириной уровней Ландау в КЯ $\text{HgTe}/\text{CdHgTe}$, а величина поглощения — концентрацией электронов, поскольку лазер можно считать монохроматическим источником излучения. В спектре ЦР, полученного с помощью исследуемой каскадной структуры, линия поглощения чуть смещена в большие магнитные поля по сравнению с линией ЦР, полученной с помощью референсного ККЛ, ее положение соответствует частоте 3.1 THz. При этом амплитуда линии поглощения для исследуемой структуры почти такая же, как для референсного ККЛ. Последнее указывает на узкополосность спектра излучения, что является дополнительным свидетельством его стимулированного характера.

Таким образом, впервые продемонстрированы полностью изготовленные в России квантово-каскадные лазеры THz-диапазона. Реализован импульсный режим работы ККЛ при температуре жидкого гелия с пороговой плотностью тока около 300 A/cm^2 при напряжении около 13 В. Измеренная частота излучения составляет около 3.1 THz, что находится в хорошем согласии с ожидаемым значением 3 THz.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН „Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий“, и гранта Президента РФ № 14.W01.16.6081-МК.

Авторы признательны М. Белкину за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Казаринов Р.Ф., Сурис Р.А. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 4. С. 797–800.
- [2] Faist J., Capasso F., Sivco D.L. et al. // Science. 1994. V. 264. P. 553–556.
- [3] Beck M., Hofstetter D., Aellen T. et al. // Science. 2002. V. 295. P. 301–305.
- [4] Bai Y., Darvish S.R., Slivken S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 101105.
- [5] Köhler R., Tredicucci A., Beltram F. et al. // Nature. 2002. V. 417. P. 156–159.
- [6] Siegel P.H. // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2002. V. 50. N 3. P. 910–928.
- [7] Chan W.L., Deibel J., Mittleman D.M. // Rep. Prog. Phys. 2007. V. 70. N 8. P. 1325–1379.
- [8] Мамутин В.В., Устинов В.М., Boethcher J., Kuenzel H. // ФТП. 2010. Т. 44. В. 7. С. 995–1001.
- [9] Засавицкий И.И., Зубов А.Н., Андреев А.Ю. и др. // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 447–450.
- [10] Бабичев А.В., Bousseksou A., Пухтин Н.А. и др. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1320.
- [11] Fatholouloumi S., Dupont E., Chan C.W.I. et al. // Opt. Express. 2012. V. 20. Iss. 4. P. 3866.
- [12] Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Резник Р.Р. и др. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 5. С. 674–678.
- [13] Williams B.S. // Nat. Photon. 2007. V. 1. P. 517–525.
- [14] Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Павлов А.Ю. и др. // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1395–1400.
- [15] Антонов А.В., Гавриленко В.И., Иконников А.В. и др. // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. LII. № 7. P. 550–556.

- [16] *Ikonnikov A.V., Zholudev M.S., Spirin K.E. et al. // Semicond. Sci. Technol.* 2011. V. 26. N 12. P. 125011.
- [17] *Kumar S., Hu Q., Reno J.L. // Appl. Phys. Lett.* 2009. V. 94. P. 131105.
- [18] *Hu Q., Williams B.S., Kumar S. et al. // Semicond. Sci. Technol.* 2005. V. 20. P. S228–S236.
- [19] *Иконников А.В., Антонов А.В., Ластовкин А.А. и др. // ФТП.* 2010. Т. 44. В. 11. С. 1514–1518.
- [20] *Lu S.L., Schrottke L., Teitsworth S.W. // Phys. Rev. B.* 2006. V. 73. P. 033311.
- [21] *Хабидуллин Р.А., Щаврук Н.В., Клочков А.Н. и др. // ФТП.* 2017. Т. 51. В. 4. С. 540.