

07.2;07.3;09.1

Перестройка частоты излучения арочных квантово-каскадных лазеров среднего инфракрасного диапазона

© Д.И. Курицын¹, А.В. Антонов¹, С.В. Морозов¹, В.А. Анфертьев¹, М.Б. Черняева¹, В.Л. Вакс¹, В.В. Дюделев², Д.А. Михайлов², Д.В. Чистяков², Н.Г. Дерягин², С.О. Слипченко², А.В. Лютецкий², А.Г. Гладышев³, А.В. Бабичев⁴, Л.Я. Карачинский⁴, И.И. Новиков⁴, Н.А. Пихтин², А.Ю. Егоров⁵, Г.С. Соколовский², В.И. Гавриленко¹

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „Коннектор Оптик“, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gavr@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 26 ноября 2023 г.

Принято к публикации 28 ноября 2023 г.

Исследована перестройка частоты импульсного одночастотного квантово-каскадного лазера с арочной геометрией резонатора при изменении температуры от 300 до 10 К в интервале длин волн 7.7–7.5 μm , составившая около 35 cm^{-1} . Продемонстрирована перестройка частоты генерации $\Delta\nu \sim 1 \text{ cm}^{-1}$ за время около 50 ns в течение импульса питания лазера. При свипировании частоты излучения лазера в течение импульса при комнатной температуре наблюдалась линия поглощения паров воды в атмосфере на частоте 1296.7 cm^{-1} .

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, арочная геометрия резонатора, перестройка частоты, поглощение паров воды.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.05.57180.19746

Компактные полупроводниковые источники излучения среднего инфракрасного (ИК) диапазона востребованы для различных приложений в области медицины, охраны окружающей среды, систем безопасности. Квантово-каскадные лазеры (ККЛ), работающие на внутризонных переходах носителей заряда, продемонстрировали работоспособность при комнатной температуре в широком спектральном интервале, в том числе в окнах прозрачности воды 3–5 и 8–12 μm . Для различных спектроскопических приложений желательно иметь одночастотный и перестраиваемый источник излучения. В случае ККЛ среднего ИК-диапазона одночастотная генерация чаще всего достигается за счет спектрально-селективной обратной связи путем использования внешнего резонатора с дифракционной решеткой (см., например, [1]) либо путем нанесения дифракционной решетки на лазерный волновод (см., например, [2]). В первом случае конструкция прибора перестает быть компактной и, кроме того, требует точной механической юстировки оптической системы. Создание на поверхности волновода ККЛ дифракционной решетки с малым периодом приводит к необходимости использования значительно более сложных постростовых технологий.

В литературе описаны другие способы получения одночастотной генерации ККЛ. В работе [3] продемонстрирован ККЛ с коротким резонатором Фабри–Перо, в работе [4] — с двумя связанными резонаторами,

в работе [5] — с асимметричным интерферометром Маха–Цендера. В работах [6,7] предложены лазеры с резонатором арочной формы (hairpin или U-shaped в англоязычной литературе), состоящим из полукольцевого и двух линейных участков. Технология создания такого резонатора аналогична используемой для создания полостковых ККЛ и не требует проведения дополнительных операций. Несмотря на то что эти три секции арочного резонатора не разделены физическими границами, они могут рассматриваться как индивидуальные резонаторы и вместе формируют монолитный связанный резонатор. Радиус полукольцевого участка резонатора R выбирается много меньшим длины линейных участков L . Таким образом, расстояние между модами шепчущей галереи в полукольцевом участке волновода

$$\Delta k_{\text{WG}} \approx 1/(2\pi R n_{\text{eff}})$$

оказывается много большим расстояния между продольными модами резонаторов Фабри–Перо, образованных линейными участками волноводов,

$$\Delta k_{\text{FP}} \approx 1/(2L n_{\text{eff}}),$$

где n_{eff} — эффективная диэлектрическая проницаемость волновода. В результате вместо многочастотной генерации ККЛ с резонатором Фабри–Перо (см., например, [8]) в лазерах с арочными резонаторами в

ряде случаев удается реализовать одночастотный режим генерации на частоте одной из мод шепчущей галереи, совпадающей с частотой моды „резонатора Фабри–Перо“. При этом подавление боковых мод (отстоящих на Δk_{FP}) достигает 20–25 dB [6,7]. В работе [6], по-видимому, впервые сообщалось о реализации ККЛ с арочным резонатором, демонстрировавшим одночастотную генерацию в области длин волн $\sim 4.4 \mu\text{m}$ в большей части диапазона рабочих температур 80–240 К с перестройкой частоты генерации на 13 cm^{-1} . В [7] сообщалось о создании одночастотного арочного ККЛ, работающего уже при комнатной температуре на длине волны $7.7 \mu\text{m}$. Настоящая работа посвящена исследованию перестройки частоты излучения арочного ККЛ, изготовленного из той же гетероструктуры, что и в [7].

Исследуемый ККЛ был изготовлен из гетероструктуры, выращенной в компании „Коннектор Оптикс“ методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке InP (001), легированной серой до уровня $n = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [9]. Активная область прибора состояла из 50 каскадов с десятью квантовыми ямами $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с дизайном на основе двухфононного резонансного рассеяния носителей заряда [9,10]. Ширина лазерного полоска составляла $20 \mu\text{m}$, длина линейных участков лазерного резонатора 1 mm, радиус полукольцевого участка резонатора $37.5 \mu\text{m}$. Зеркала лазера формировались скалыванием торцов волновода. Далее прибор монтировался эпитаксиальной поверхностью вниз на медный теплоотвод с помощью индиевого припоя.

На рис. 1 представлена ватт-амперная характеристика ККЛ, измеренная в импульсном режиме (длительность импульсов 70 ns, частота повторения 48 kHz). Мощность излучения измерялась с помощью термоэлектрического преобразователя Thorlabs S401. Спектры излучения ККЛ измерялись с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80V в режиме пошагового сканирования. Образец размещался на холодном пальце оптического криостата замкнутого цикла с окном из селенида цинка. Измерения проводились со спектральным разрешением 0.2 cm^{-1} в интервале температур от 10 до 300 К. Питание ККЛ осуществлялось импульсами тока длительностью 100 ns с частотой повторения 1 kHz. Излучение ККЛ с помощью двух параболических зеркал фокусировалось на входную апертуру фурье-спектрометра и регистрировалось быстродействующим ($< 1 \text{ ns}$) фотоприемником Vigo PVI-4TE-10.6. Импульсный сигнал с выхода фотоприемника оцифровывался быстрым аналого-цифровым преобразователем с интервалом 2.5 ns, что позволяло после фурье-преобразования получить спектры излучения ККЛ с разверткой по времени.

На рис. 2 в виде 3D-графики представлена динамика спектров излучения ККЛ в течение времени импульса при различных температурах прибора. Как и в работе [6], понижение температуры приводит к увеличению частоты генерации ККЛ (на 35 cm^{-1} при изменении температуры от 300 до 10 К, рис. 3). Аналогичный эффект

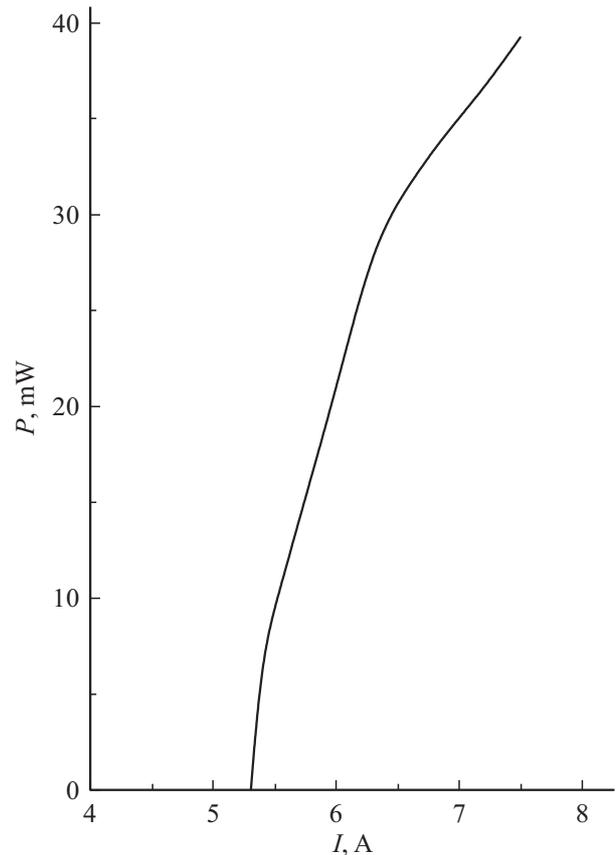


Рис. 1. Ватт-амперная характеристика исследуемого ККЛ при $T = 288 \text{ K}$.

наблюдался в многомодовых ККЛ диапазона $8 \mu\text{m}$ на основе такой же материальной системы и связывался с изменением спектра усиления [11]. По-видимому, увеличение энергии перехода (что подтверждается измерениями спектров электролюминесценции, см. рис. 1, а в [12]) происходит вследствие роста высоты барьеров при понижении температуры. При всех температурах в начальный момент времени наблюдалась одномодовая генерация. Далее в течение 50–60 ns наблюдалась перестройка моды генерации в низкочастотную область до 1 cm^{-1} , после чего происходил перескок генерации на более высокочастотную моду, отстоящую примерно на 1.4 cm^{-1} . Эта величина очевидно соответствует расстоянию между модами резонатора Фабри–Перо, образованного прямолинейной частью волновода ККЛ длиной 1 mm (ср. с [8]). Низкочастотный сдвиг частоты моды в течение импульса наблюдался ранее в ККЛ с резонатором Фабри–Перо как среднего ИК-диапазона (см., например, [8]), так и терагерцового диапазона [13] и связан с изменением эффективной диэлектрической проницаемости лазерного волновода (и соответственно оптической длины резонатора Фабри–Перо) вследствие разогрева во время импульса (см., например, [14]). Несмотря на значительные различия теплоемкости и теплопроводности материалов ККЛ при комнатной и криогенной

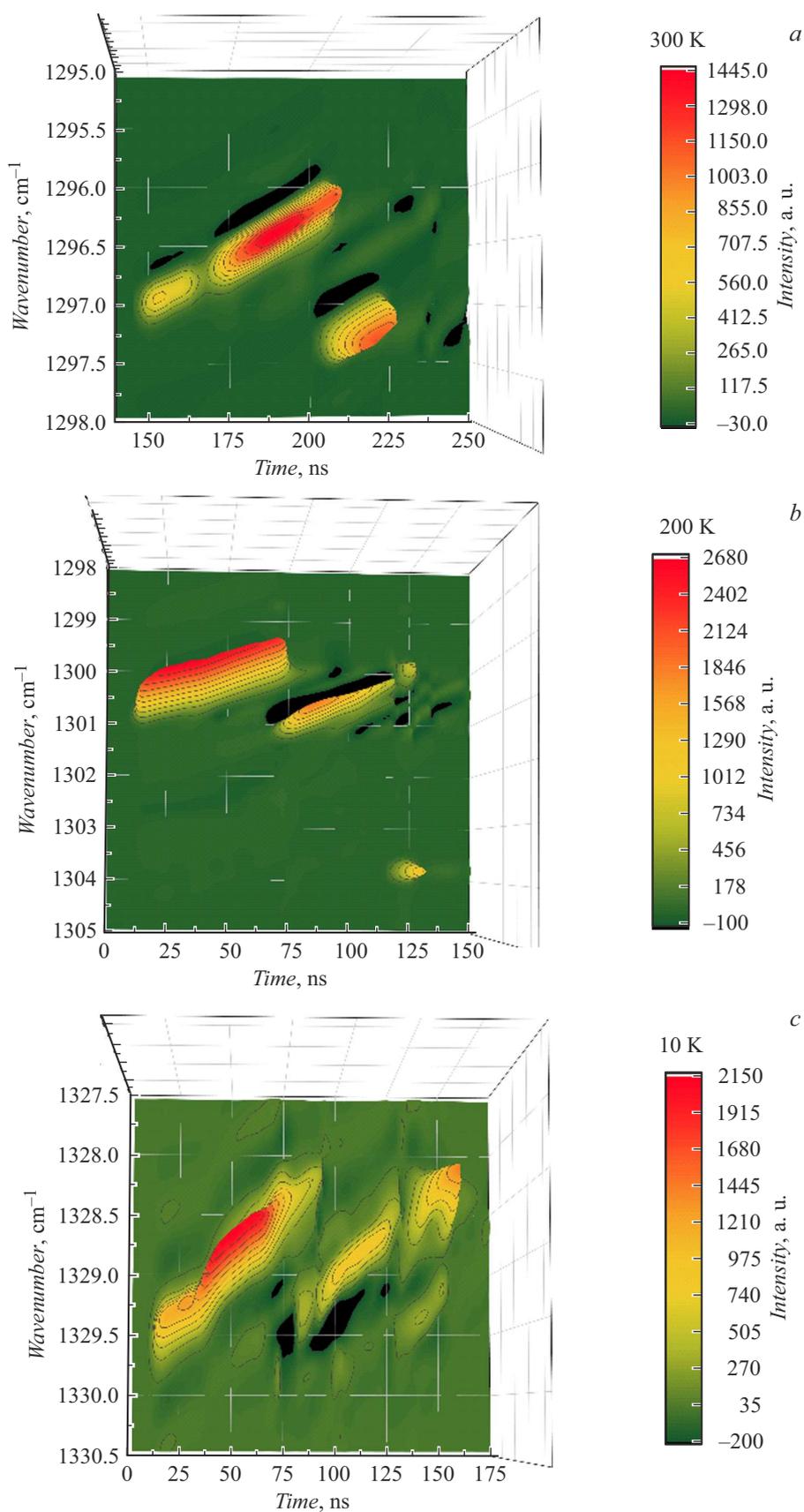


Рис. 2. Эволюция спектров излучения ККЛ в течение импульса при различных температурах (ток $I = 6$ А).

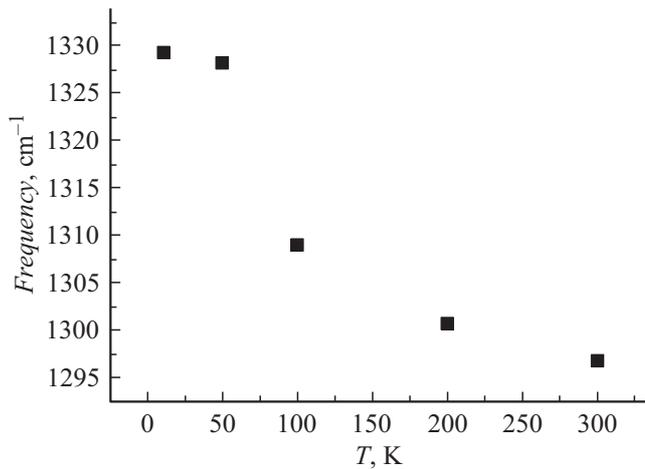


Рис. 3. Зависимость частоты излучения ККЛ в начальный момент импульса от температуры.

Измеренные [15] и рассчитанные [16] интенсивности линий поглощения паров воды в интервале частот между 1295 и 1298 cm^{-1} , нормированные на интенсивность линии с частотой 1296.709705 cm^{-1}

k, cm^{-1} [15]	I [15]	I [16]
1295.612131	0.160	—
1296.408780	0.233	—
1296.490427	0.899	0.631*
1296.709705	1	1
1296.777923	0.178	—
1297.183450	0.245	0.081**
1297.206022	0.222	—

* Суммарная интенсивность для линий с частотами 1296.49003 и 1296.49043 cm^{-1} .

** Суммарная интенсивность для линий с частотами 1297.18295 и 1297.18323 cm^{-1} .

температурах, величина перестройки частоты моды в режиме одночастотной генерации ($\sim 1 \text{ cm}^{-1}$) практически одинакова при всех температурах. По-видимому, во всех случаях устойчивость одночастотной генерации сохраняется лишь до тех пор, пока перестройка частоты моды в течение импульса не станет порядка межмодового расстояния прямолинейной части арочного резонатора. Отметим, что в работе [6], где исследования арочного ККЛ проводились в режиме питания короткими (15 ns) импульсами тока, при определенных условиях наблюдалась генерация на двух частотах, соответствующих соседним модам резонатора Фабри–Перо, образованного прямолинейной частью волновода.

Перестройка частоты одномодовой генерации арочного ККЛ в течение импульса открывает возможность использования таких приборов для экспресс-диагностики газовых смесей. Зная частоту какой-либо достаточно сильной линии поглощения газа, наличие или концентрацию которого необходимо контролировать, можно посредством изменения рабочей температуры выставить

частоту генерации ККЛ чуть выше частоты линии поглощения. Тогда свипирование частоты генерации лазера в течение импульса приведет к резонансному поглощению излучения в момент времени, когда частота генерации совпадет с частотой линии поглощения газа, что может быть зарегистрировано как падение сигнала излучения ККЛ, приходящего на фотоприемник. Пример такой регистрации линии поглощения можно видеть на рис. 2, а, где наблюдается резкое падение сигнала в момент времени, соответствующий 168 ns, когда частота генерации ККЛ проходит через сильную линию поглощения паров воды с частотой 1296.7 cm^{-1} [15,16]. В таблице приведены данные об измеренных [15] и рассчитанных с помощью информационно-вычислительной системы „Спектроскопия атмосферных газов“ [16] линиях поглощения паров воды в интервале частот между 1295 и 1298 cm^{-1} . Имеется заметное расхождение между приведенными в таблице расчетными и экспериментальными данными об относительных интенсивностях линий, однако в обоих случаях линия поглощения с частотой $\sim 1296.71 \text{ cm}^{-1}$ (выделена в таблице жирным шрифтом) является доминирующей; примыкающая к ней линия с частотой $\sim 1296.49 \text{ cm}^{-1}$ несколько меньшей интенсивности в наших измерениях не проявляется, вероятно из-за недостаточно высокого (0.2 cm^{-1}) спектрального разрешения.

Таким образом, в работе продемонстрирована перестройка частоты ККЛ с арочной геометрией резонатора от 1296 до 1330 cm^{-1} при изменении температуры от 300 до 10 К. Одночастотный режим генерации сохраняется в течение первых 50 ns импульса питания лазера, частота генерации при этом смещается на $\sim 1 \text{ cm}^{-1}$ в низкочастотную область, что, в частности, позволило наблюдать линию поглощения паров воды в атмосфере на частоте 1296.7 cm^{-1} при комнатной температуре.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект „Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023–2025“). Создание и исследование характеристик ККЛ в ФТИ им. А.Ф. Иоффе выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-72-30020).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Kruczek, K.A. Fedorova, G.S. Sokolovskii, R. Teissier, A.N. Baranov, E.U. Rafailov, Appl. Phys. Lett., **102**, 011124 (2013). DOI: 10.1063/1.4774088
- [2] D.H. Wu, M. Razeghi, APL Mater., **5**, 035505 (2017). DOI: 10.1063/1.4978810

- [3] J. Semmel, L. Nähle, S. Höfling, A. Forchel, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 071104 (2007). DOI: 10.1063/1.2771054
- [4] Y. Wakayama, S. Iwamoto, Y. Arakawa, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 171104 (2010). DOI: 10.1063/1.3413949
- [5] P.Q. Liu, X. Wang, C.F. Gmachl, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 161115 (2012). DOI: 10.1063/1.4761247
- [6] P.Q. Liu, X. Wang, J.-Y. Fan, C.F. Gmachl, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 061110 (2011). DOI: 10.1063/1.3554757
- [7] А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, А.С. Курочкин, В.В. Дюделев, Е.С. Колодезний, Г.С. Соколовский, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, А.С. Ионов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров, *Письма в ЖТФ*, **45** (8), 31 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.08.47618.17716 [A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, V.V. Dudelev, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bugrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, A.S. Ionov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov, *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 398 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019040205].
- [8] 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, *ЖТФ*, **90** (8), 1333 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49544.78-20 [V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, A.V. Lyutetskii, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii, *Tech. Phys.*, **65**, 1281 (2020). DOI: 10.1134/S106378422008006X].
- [9] А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, А.В. Филимонов, В.Н. Неведомский, А.С. Курочкин, Е.С. Колодезний, Г.С. Соколовский, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А. Bousseksou, А.Ю. Егоров, *Письма в ЖТФ*, **43** (14), 64 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.14.44833.16776 [A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.V. Filimonov, V.N. Nevedomskii, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bugrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A. Bousseksou, A.Yu. Egorov, *Tech. Phys. Lett.*, **43**, 666 (2017). DOI: 10.1134/S1063785017070173].
- [10] А.В. Бабичев, А.Г. Гладышев, А.С. Курочкин, Е.С. Колодезний, Г.С. Соколовский, В.Е. Бугров, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, А. Bousseksou, А.Ю. Егоров, *ФТП*, **52** (8), 954 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.08.46226.8834 [A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bougrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.G. Bousseksou, A.Yu. Egorov, *Semiconductors*, **52**, 1082 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618080031].
- [11] C. Gmachl, A. Tredicucci, F. Capasso, A.L. Hutchinson, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.Y. Cho, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3130 (1998). DOI: 10.1063/1.121569
- [12] C. Sirtori, J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, A.L. Hutchinson, A.L. Cho, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 3242 (1995). DOI: 10.1063/1.113391
- [13] А.А. Ластовкин, А.В. Иконников, В.И. Гавриленко, А.В. Антонов, Ю.Г. Садофьев, *Изв. вузов. Радиофизика*, **54** (8-9), 676 (2011). [A.A. Lastovkin, A.V. Ikonnikov, V.I. Gavrilenko, A.V. Antonov, Yu.G. Sadof'ev, *Radiophys. Quantum. Electron.*, **54**, 609 (2012). DOI: 10.1007/s11141-012-9320-1].
- [14] А.Н. Пихтин, А.Д. Яськов, *ФТП*, **22** (6), 969 (1988).
- [15] G. Guelachvili, *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 137 (1983). DOI: 10.1364/JOSA.73.000137
- [16] С.Н. Михайленко, Ю.Л. Бабиков, В.Ф. Головкин, *Оптика атмосферы и океана*, **18** (09), 765 (2005). [S.N. Mikhailenko, Yu.L. Babikov, V.F. Golovko, *Atmos. Oceanic Opt.*, **18** (09), 685 (2005)].