

07

*Посвящается светлой памяти чл.-корр. РАН В.Г. Мокерова,
д.ф.-м.н., профессора, основателя и первого директора
Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН*

Генерация частотных гребенок терагерцевым квантово-каскадным лазером под воздействием СВЧ-модуляции напряжения питания

© С.С. Пушкарёв^{1,2}, Д.А. Белов^{2,3}, А.В. Иконников³, Д.Д. Дмитриев³, Ф.И. Зубов⁴, А.В. Зуев¹,
Д.Л. Гнатюк¹, А.Ю. Павлов¹, Д.С. Пономарёв^{1,2}, Р.А. Хабибуллин^{1,2}

¹ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Алферовский университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: s_s_e_r_p@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 1 июня 2026 г.

Принято к публикации 1 июня 2026 г.

Измерены спектры излучения терагерцевого (THz) квантово-каскадного лазера с резонатором Фабри–Перо длиной 1.78 mm, напряжение питания которого было промодулировано синусоидальным СВЧ-сигналом с частотой 19.0–23.3 GHz и мощностью от +10 до +19 dBm. Показано, что под действием СВЧ-модуляции вблизи частоты обхода световым импульсом резонатора квантово-каскадного лазера (20.6–20.8 GHz) происходит генерация частотных гребенок, что подтверждается значительным увеличением количества пиков на спектрах THz-эмиссии, повышением степени их эквидистантности и ростом суммарной интенсивности THz-излучения лазера по сравнению с аналогичными характеристиками для свободно излучающего лазера.

Ключевые слова: терагерцевый квантово-каскадный лазер, частотная гребенка, синхронизация мод, моды резонатора Фабри–Перо, СВЧ-модуляция.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.17.63480.20759

Частотные гребенки (frequency combs) — это лазерные спектры, состоящие из узких эквидистантных линий, соответствующих непрерывным монохроматическим колебаниям поля, фазово-синхронизованным между собой. Сами спектральные линии лежат в „оптической“ области (куда входят инфракрасный и терагерцевый диапазоны), в то время как величина интервала между соседними линиями на спектре относится к микроволновому (гигагерцевому) диапазону. Благодаря фазовой синхронизации мод частота межмодового интервала гораздо более стабилизирована, чем каждая отдельная оптическая линия [1]. Частоты в этом диапазоне могут быть измерены с существенно большей точностью, чем оптические частоты, поэтому частотные гребенки используются в качестве „линеек“ с эквидистантными делениями для измерений оптических спектров [1,2].

Одним из подходов к генерации частотных гребенок в терагерцевом (THz) диапазоне является использование квантово-каскадных лазеров (ККЛ). В настоящее время принято считать, что механизм генерации частотной гребенки свободно излучающим лазером следующий: вокруг первоначально зажегшихся продольных мод ре-

зонатора Фабри–Перо в результате четырехволнового смешения из-за нелинейности третьего порядка активной среды происходит образование боковых мод, отстоящих на величину разности между первоначальными модами; моды таким образом мультиплицируются и образуют частотную гребенку [1]. Исследование условий, при которых THz ККЛ генерирует частотную гребенку, выявило сложную картину: при постепенном увеличении тока инжекции наблюдаются многократные переходы лазера между различными режимами генерации (одномодовым режимом, режимами плотной и гармонической частотных гребенок, некогерентным многомодовым режимом) [3,4]. Плотная частотная гребенка состоит из идущих подряд друг за другом продольных мод резонатора Фабри–Перо, в то время как в гармонической частотной гребенке моды подавляются с некоторой периодичностью [5]. Часто гребенка распадается на несколько частей с одинаковым межмодовым интервалом, но с разными, не связанными между собой началами отсчета пиков; в целом пики такой гребенки расположены неэквидистантно. Для характеристики перечисленных выше режимов необходимо дополнитель-

ное измерение радиочастотных спектров ККЛ, на которых проявляются узкие линии, соответствующие стабилизированным межмодовым интервалам (по порядку величины около 10 GHz), либо широкие полосы в случае некогерентности множественных мод. Ширина линии на радиочастотном спектре, соответствующей биениям соседних синхронизированных мод, на много порядков меньше ширины линий на оптическом эмиссионном спектре [6].

Складываясь во временной области, синхронизированные по фазе моды образуют результирующее поле с огибающей в форме ряда ультракоротких импульсов, перемещающихся внутри лазерного резонатора. При отражении от выходного зеркала импульс частично проникает наружу, в результате чего лазер испускает ряд равноотстоящих ультракоротких „световых“ импульсов. Время, за которое импульс совершает полный обход резонатора ККЛ (round-trip time), соответствует частоте обхода резонатора f_{rt} , лежащей в гигагерцевом диапазоне и равной расстоянию между соседними линиями частотной гребенки [7].

На частотную гребенку можно воздействовать при помощи амплитудной модуляции тока инжекции ККЛ с частотой, близкой к частоте обхода резонатора f_{rt} (СВЧ-модуляция). Это достигается вводом в линию питания ККЛ радиочастотного сигнала (RF injection) [8]. СВЧ-модуляция позволяет синхронизовать по фазе моды в изначально некогерентном многомодовом режиме [4] или расширить полосу, занимаемую уже существующей частотной гребенкой. Например, сообщается о расширении гребенки от 600 до 700 GHz под воздействием СВЧ-сигнала мощностью +23 dBm [9] и расширении гребенки от 0.8 до 1.0 THz под воздействием СВЧ-сигнала +30 dBm [10].

Цель настоящей работы заключается в генерации частотных гребенок THz квантово-каскадным лазером под воздействием СВЧ-модуляции вблизи частоты обхода резонатора ККЛ. В качестве объекта исследования был выбран THz ККЛ # 822.C1.2LM с резонатором Фабри–Перо длиной 1.78 mm и шириной 30 μm . THz ККЛ был изготовлен с двойным металлическим волноводом, который по сути представляет собой микрополосковую линию с активной областью лазера вместо диэлектрической среды. Изготовление лазера детально описано в работе [11], оригинальный двухфотонный зонный дизайн лазера подробно описан в работе [12].

Спектры ККЛ измерялись при помощи вакуумированного фурье-спектрометра Bruker Vertex 70v с разрешением 0.2 cm^{-1} (6 GHz) и точностью определения частоты более 0.01 cm^{-1} (0.3 GHz). Питание ККЛ в непрерывном режиме обеспечивалось источником-измерителем Keithley 2400. Для реализации модуляции использовались СВЧ-генераторы Корунд М22А (ООО „РиПриз“) и E8257D (Agilent). Первый прибор отличается существенной компактностью и используется прежде всего для тестовых измерений и для измерений с небольшой

фиксированной мощностью при сканировании широкого диапазона частот (до +10 dBm); второй позволяет поддерживать большую фиксированную мощность при сканировании широкого диапазона частот (до +19 dBm), но обладает очень крупными габаритами. Постоянное напряжение питания, подаваемое на лазер, смешивалось с радиочастотным сигналом от СВЧ-генератора с помощью адаптера ввода питания (bias-tee). Диапазон рабочих частот адаптера ввода питания до 26.5 GHz. Промодулированное с заданной частотой напряжение питания подводилось к лазеру с помощью специально спроектированной печатной платы, согласующей импедансы 50 Ω СВЧ-порта и THz ККЛ (действительная часть импеданса ККЛ оценивалась как 7.5–9.0 Ω , мнимая — как +90 Ω [13]). Печатная плата, в общих чертах представляющая собой заземленный копланарный волновод (имеющий дополнительную металлизацию заземления с обратной стороны платы) с четвертьволновыми резонаторами, вставленными в определенные точки, была спроектирована так, чтобы обеспечить наилучшее прохождение СВЧ-сигнала в диапазоне 19–21 GHz. Измеренный на векторном анализаторе коэффициент отражения СВЧ-сигнала S_{11} от платы с лазером, смонтированным на ней, имеет минимум при 21.8 GHz и в области 20.9–22.8 GHz составляет менее -10 dB, что довольно неплохо совпадает с результатами моделирования, как видно из рис. 1. Можно предположить, что коэффициент пропускания S_{21} также согласуется с расчетным и имеет максимум в области 20.9–22.8 GHz. THz ККЛ был соединен с сигнальным полоском копланарного волновода платы посредством четырех золотых проволочек диаметром 18 μm и длиной около 1 mm каждая, приваренных к верхнему металлическому контакту лазерного полоска,

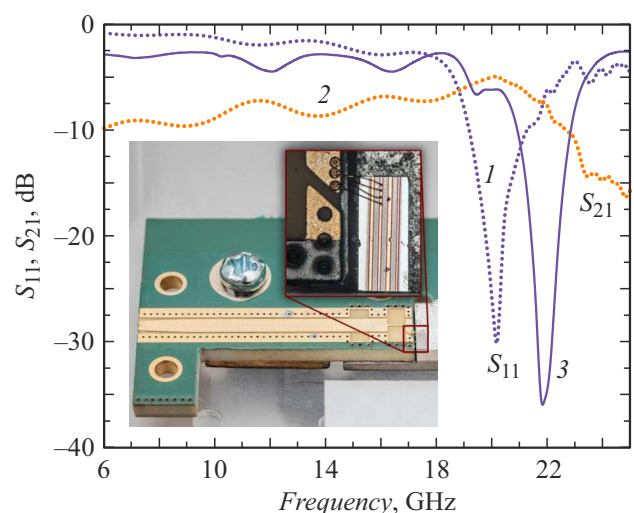


Рис. 1. Промоделированные коэффициенты отражения S_{11} (1) и пропускания S_{21} (2) согласующей платы с размещенным на ней ККЛ; измеренный параметр S_{11} (3). На вставке показана фотография платы со смонтированным лазером. Расчеты и измерения выполнены для „холодного“ резонатора ККЛ, без приложения питающего напряжения.

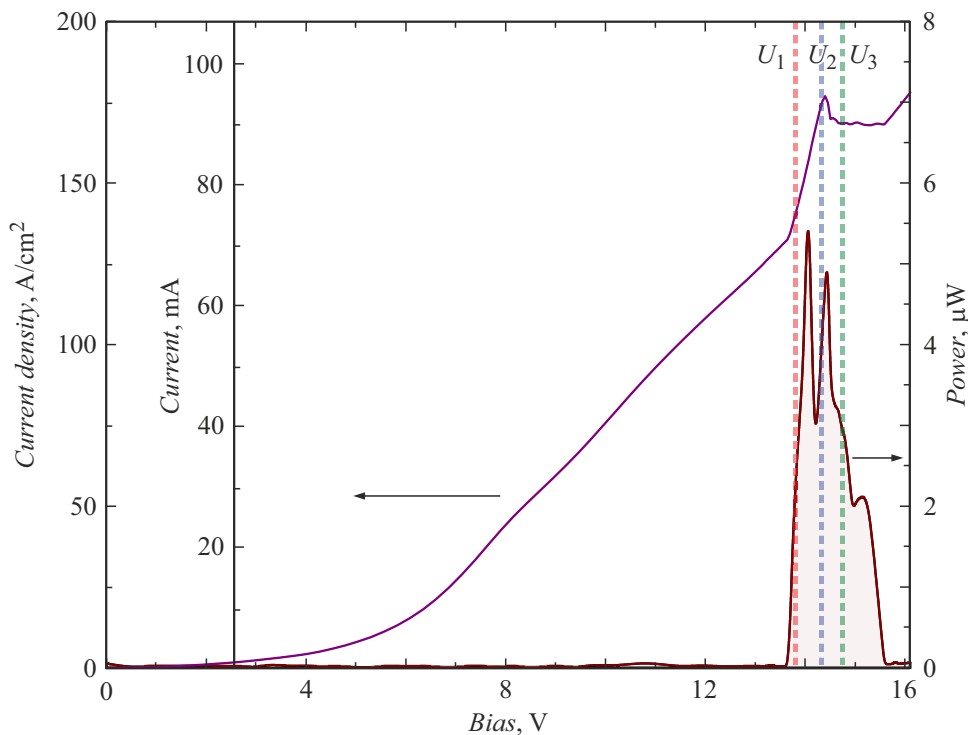


Рис. 2. Вольт-амперная и вольт-ваттная характеристики свободно излучающего ККЛ (вертикальными линиями указаны рабочие точки).

в то время как нижняя заземляющая плоскость платы была электрически связана с нижним металлическим контактом лазера через теплоотвод типа F-mount, на который индием был припаян лазер (см. вставку на рис. 1). Плата с лазером размещалась в вакуумном колпаке рефрижератора Стирлинга Lihan TC4189, температура теплоотвода лазера поддерживалась равной 50 К.

Предварительно были выполнены измерения вольт-амперных и вольт-ваттных характеристик свободно излучающего лазера (без СВЧ-модуляции) в непрерывном режиме с использованием калиброванного пироэлектрического приемника (рис. 2). Рабочий диапазон напряжений ККЛ, в котором наблюдалась лазерная генерация, составлял 13.7–15.1 В. Спектральные измерения свободно излучающего лазера были выполнены с небольшим шагом во всем этом диапазоне, после чего были выбраны три рабочие точки: $U_1 = 13.80$ В, $U_2 = 14.30$ В и $U_3 = 14.75$ В. Первая точка близка к порогу генерации, вторая практически соответствует максимальному току до начала области отрицательного дифференциального сопротивления, для третьей наблюдалась гребенка линий, позволяющая определить межмодовое расстояние для свободно излучающего лазера.

На спектрах излучения свободно излучающего лазера, приведенных на рис. 3, можно различить небольшое количество линий (одна для первой точки, две для второй, шесть для третьей), положения которых близки к частотам из набора продольных мод резонатора Фабри–Перо (заметим, что некоторые моды в наборе

могут быть подавлены). По интенсивности одна из линий является доминирующей, а прочие линии сильно уступают ей; в такой ситуации еще не приходится говорить о частотных гребенках. По спектру излучения лазера при напряжении $U_3 = 14.75$ В (рис. 3) можно определить собственный межмодовый интервал, который составляет $\Delta f = 20.37 \pm 0.13$ GHz. Это значение равно f_{rt} — частоте, с которой совершается полный обход THz-излучением резонатора лазера.

СВЧ-модуляция лазера в полосе пропускания согласующей печатной платы привела к значительному увеличению количества линий на спектрах, при этом новые линии расположены упорядоченно, с одинаковым интервалом (рис. 3). По сравнению со свободно излучающим лазером при СВЧ-модуляции в первой рабочей точке $U_1 = 13.80$ В вместо единственной линии возникло 8 линий; во второй рабочей точке $U_2 = 14.30$ В число линий возросло с 2 до 12; в третьей рабочей точке $U_3 = 14.75$ В — с 6 до 11 (см. таблицу). В результате произошло значительное расширение спектральной полосы генерации THz ККЛ — до 230 GHz. Такие спектры уже могут быть названы частотными гребенками. Очевидно, точный подсчет числа линий в гребенке ограничен главным образом чувствительностью и уровнем шумов измерительной системы. Вероятнее всего, увеличение соотношения сигнал/шум позволило бы обнаружить большее число линий. Тем не менее эти дополнительные слабые линии практически не окажут влияния на интегральную интенсивность, что позволяет оценить

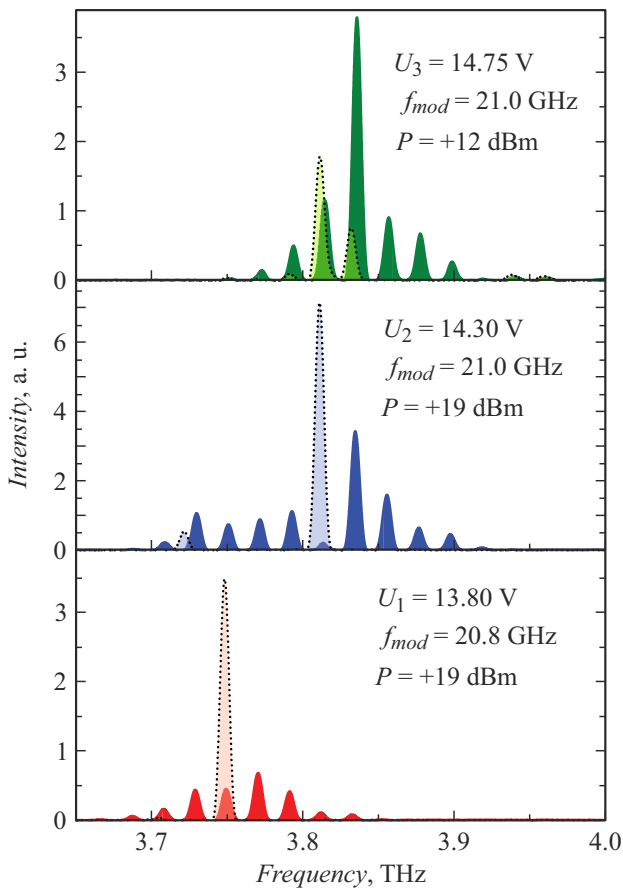


Рис. 3. Измеренные при температуре тепловода 50 К в разных рабочих точках по напряжению (13.80, 14.30 и 14.75 В) спектры излучения ТГц ККЛ без СВЧ-модуляции (пунктирные линии) и с СВЧ-модуляцией (сплошные линии).

последнюю исходя из спектральных измерений. Оценка показывает, что интегральная мощность ТГц-эмиссии в рабочих точках U_2 и U_3 увеличилась на 32 и 186 % соответственно, хотя в рабочей точке U_1 она уменьшилась на 30 % (см. таблицу). Последнее, скорее всего, связано с близостью этой рабочей точки к порогу генерации. Как видно из таблицы, СВЧ-модуляция во всех

случаях приводит к уменьшению тока, протекающего через лазер, что свидетельствует о внесении в активную среду лазера дополнительных нерезонансных потерь (например, за счет разогрева СВЧ-излучением). Однако в рабочей точке U_1 , близкой к порогу генерации, такое ухудшение оказывается драматическим, даже несмотря на „резонансное“ усиление за счет СВЧ-модуляции.

При сканировании частоты модуляции в окрестности полосы пропускания согласующей платы было обнаружено, что в некотором диапазоне частот вблизи f_{rt} межмодовый интервал частотных гребенок совпадает в пределах погрешности с частотой СВЧ-генератора либо приближается к ней. На левом крае упомянутого диапазона (который мы назовем „диапазоном захвата“) ситуация меняется: межмодовый интервал перестает следовать за частотой модуляции и держится около значения, характерного для свободно излучающего лазера (рис. 4). Данное наблюдение справедливо для рабочих точек U_1 и U_3 , но не для точки U_2 . По-видимому, это связано с тем, что точка U_2 находится на вольт-амперной характеристике далеко от краев диапазона генерации, поэтому внесение дополнительных нерезонансных потерь за счет инжекции СВЧ-сигнала оказывает меньшее влияние. Когда частота генератора превышает верхнюю границу диапазона захвата, лазерная генерация резко прекращается, при этом слева от низкочастотной границы диапазона захвата лазер продолжает излучать, хотя и более слабо.

Таким образом, было показано, что СВЧ-модуляция постоянного напряжения, подаваемого на ТГц ККЛ, с частотой, близкой к значению частоты полного обхода резонатора f_{rt} , позволяет существенно модифицировать спектральный состав излучения лазера. Спектр излучения ККЛ в результате СВЧ-модуляции приобретает форму частотной гребенки — совокупности эквидистантных, сравнимых по мощности спектральных линий. Межмодовый интервал частотной гребенки, который без внешней СВЧ-модуляции совпадал бы со значением f_{rt} , следует за частотой внешнего генератора, причем степень „близости“ повышается вместе с мощностью СВЧ-сигнала.

Условия получения частотных гребенок при СВЧ-модуляции напряжения питания ККЛ

Напряжение питания ККЛ, В	Частота генератора, GHz	Мощность генератора, dBm	Количество линий	Межмодовый интервал, GHz	Ток через лазер, mA	Интегральная интенсивность ТГц-эмиссии, a.u.
13.80	Без модуляции	+19	1	—	74.8	36.5
	20.8		8	20.800 ± 0.009	—	25.6
14.30	Без модуляции	+19	2	—	92.8	81.4
	21.0		12	20.999 ± 0.008	85.0	110.6
14.75	Без модуляции	+12	6	20.37 ± 0.13	92.4	28.3
	21.0		11	20.994 ± 0.013	92.0	81.0

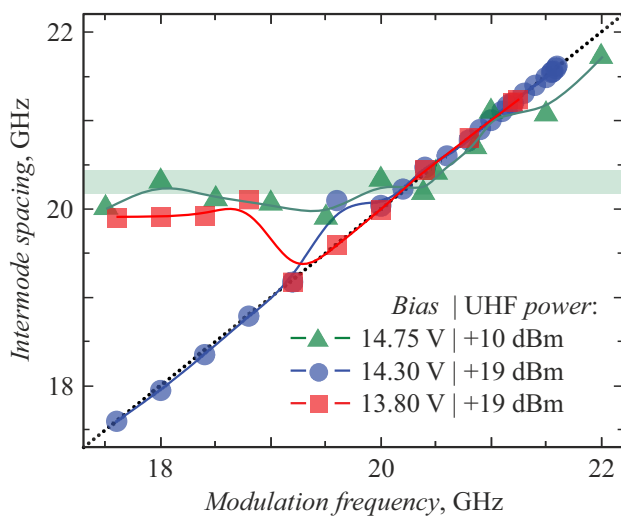


Рис. 4. Зависимости межмодового интервала от частоты модуляции при различных значениях напряжения питания лазера и мощности СВЧ-сигнала. Пунктирная линия показывает равенство межмодового интервала и частоты модуляции. Горизонтальная полоса — межмодовый интервал (с учетом неопределенности) для свободно излучающего ККЛ в рабочей точке $U_3 = 14.75$ V.

Благодарности

Д.А. Белов благодарит Фонд развития теоретической физики и математики „Базис“ за стипендиальную поддержку. Авторы благодарят группу компаний „Диполь“ за предоставленный генератор Корунд М22А.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10004 (<https://rscf.ru/project/24-49-10004/>). СВЧ-измерения частично выполнены в рамках государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Faist, G. Villares, G. Scalari, M. Rösch, C. Bonzon, A. Hugi, M. Beck, *Nanophotonics*, **5** (2), 272 (2016). DOI: 10.1515/nanoph-2016-0015
- [2] N. Picqué, T.W. Hänsch, *Nat. Photon.*, **13**, 146 (2019). DOI: 10.1038/s41566-018-0347-5
- [3] H. Li, P. Laffaille, D. Gacemi, M. Apfel, C. Sirtori, J. Leonardon, G. Santarelli, M. Rösch, G. Scalari, M. Beck, J. Faist, W. Hänse, R. Holzwarth, S. Barbieri, *Opt. Express*, **23** (26), 33270 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.033270
- [4] A. Forrer, M. Franckić, D. Stark, T. Olariu, M. Beck, J. Faist, G. Scalari, *ACS Photon.*, **7**, 784 (2020). DOI: 10.1021/acsp Photonics.9b01629
- [5] A. Forrer, Y. Wang, M. Beck, A. Belyanin, J. Faist, G. Scalari, *Appl. Phys. Lett.*, **118**, 131112 (2021). DOI: 10.1063/5.0041339
- [6] G. Torrioli, A. Forrer, F. Chiarello, J. Faist, M. Beck, P. Carelli, A. Gaggero, F. Martini, U. Senica, E. Giovine, R. Leoni, G. Scalari, S. Cibella, *Opt. Express*, **31** (10), 15942 (2023). DOI: 10.1364/OE.481081
- [7] Th. Udem, F. Riehle, *Riv. Nuovo Cim.*, **30** (12), 563 (2007). DOI: 10.1393/ncr/i2007-10027-5
- [8] U. Senica, M.A. Schreiber, M. Raffa, P. Micheletti, M. Beck, C. Jirauschek, J. Faist, G. Scalari, *Nature*, **652**, 892 (2026). DOI: 10.1038/s41586-026-10387-w
- [9] A. Forrer, L. Bosco, M. Beck, J. Faist, G. Scalari, *Photonics*, **7**, 9 (2020). DOI: 10.3390/photonics7010009
- [10] U. Senica, S. Gloor, P. Micheletti, D. Stark, M. Beck, J. Faist, G. Scalari, *APL Photon.*, **8**, 096101 (2023). DOI: 10.1063/5.0163337
- [11] O.Y. Volkov, I.N. Duzhikov, R.A. Khabibullin, A.N. Baranov, Y.Y. Divin, *Appl. Phys. Lett.*, **121** (26), 263504 (2022). DOI: 10.1063/5.0135562
- [12] R.A. Khabibullin, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, A.Yu. Pavlov, R.R. Galiev, D.S. Ponomarev, A.P. Vasilyev, A.G. Kuzmenkov, N.A. Maleev, F.I. Zubov, M.V. Maksimov, D.A. Belov, A.V. Ikonnikov, D.I. Kuritsyn, R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.A. Anfertev, V.L. Vaks, A.V. Antonov, A.A. Dubinov, S.V. Morozov, V.I. Gavrilenko, *J. Appl. Phys.*, **136** (19), 194504 (2024). DOI: 10.1063/5.0230491
- [13] С.С. Пушкарёв, Б.А. Жмудь, М.В. Майтама, А.С. Соболев, А.В. Зуев, Д.Л. Гнатюк, О.С. Матвеев, Р.А. Хабибуллин, *Изв. вузов. Радиофизика*, **69** (1-2), 14 (2026). DOI: 10.52452/00213462_2026_69_01_14