Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 8, с. 518 – 525 © 2026 г. 25 апреля

“Двухцветная” генерация разностной частоты по I- и II-типу фазового синхронизма в нелинейном кристалле $BaGa_2GeS_6$, накачиваемого фемтосекундными импульсами титан-сапфирового лазера

И. О. Киняевский[+], М. В. Ионин[+1)], А. В. Корибут[+], Я. В. Грудцын[+], Ю. М. Климачев[+], Д. В. Бадиков[*]

[+]*Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

[*]*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Кубанский государственный университет”, 350040 Краснодар, Россия*

Поступила в редакцию 18 декабря 2025 г.
После переработки 26 февраля 2026 г.
Принята к публикации 5 марта 2026 г.

Экспериментально исследована генерация разностной частоты фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в область длин волн 5–10 мкм в нелинейном кристалле $BaGa_2GeS_6$ длиной 2.46 мм. Энергия импульсов излучения разностной частоты достигала 23 мкДж. Обнаружено, что в $BaGa_2GeS_6$ происходит “двухцветная” генерация разностной частоты одновременно по I- и II-типу фазового синхронизма, приводящая к появлению в среднем инфракрасном диапазоне двух спектральных полос шириной ~ 0.5 мкм, отстроенных на 1.5–2 мкм. Продемонстрировано влияние полярного и азимутального углов $BaGa_2GeS_6$ на спектральные и энергетические характеристики “двухцветного” излучения. Полученное “двухцветное” излучение может быть использовано для дистанционного газового анализа методом дифференциального поглощения.

DOI: 10.7868/S3034576626040136

Введение. Для создания мощных лазерных источников ультракоротких импульсов среднего инфракрасного (ИК) диапазона активно исследуются различные методы и материалы для параметрического преобразования частоты [1–3]. В настоящее время особое внимание уделено серии перспективных нелинейных кристаллов – халькогенидов бария: $BaGa_4S_7$, $BaGa_4Se_7$, $BaGa_2GeS_6$, $BaGa_2GeSe_6$, $Ba_2Ga_8GeS_{16}$ [4, 5]. Среди данных кристаллов можно выделить $BaGa_2GeS_6$ (BGGS). Первые образцы кристалла размером в несколько кубических сантиметров с высоким оптическим качеством были синтезированы и выращены в Кубанском государственном университете в 2016 г. [6].

Особенностью кристалла BGGS является привлекательное сочетание ряда свойств. Во-первых, большая ширина запрещенной зоны (3.37 эВ [5]), которая исключает двухфотонное поглощение для лазерного излучения с длиной волны $\lambda > 0.8$ мкм, что важно для фемто-пикосекундных лазерных систем. Во-вторых, высокая прозрачность в длинноволновой области среднего ИК-диапазона, простирающаяся до длины волны $\lambda = 11.8$ мкм [6]. В-третьих, высокий порог оптического разрушения, который составляет ~ 7 Дж/см^2 для 5-нс импульсов с $\lambda = 1.06$ мкм, ~ 14 Дж/см^2 для 100-нс импульсов с $\lambda = 10.6$ мкм [5] и 0.6 Дж/см^2 для 0.3-пс импульсов с $\lambda = 1.03$ мкм [7]. В-четвертых, высокая нелинейность, составляющая 17 пм/В [8].

В 2024 году появились первые работы, демонстрирующие эффективное применение кристалла BGGS в различных параметрических преобразователях частоты излучения лазерных импульсов с длиной волны ~ 1 мкм в средний ИК-диапазон. В работе [9] продемонстрирована генерация сигнального импульса с энергией 340 мкДж (1.67 мкм) и импульса холостой волны с энергией 100 мкДж (4.65 мкм) (при длине волны накачки 1.24 мкм) с эффективностью преобразования 28 %. В работе [10] исследована генерация разностной частоты (РЧ) фемтосекундных импульсов с длиной волны 0.95 мкм в область длин волн 5–10 мкм с максимальной энергией импульса 14 мкДж. В работе [11] сообщается об оптической параметрической генерации в кристалле BGGS, накачиваемого наносекундными импульсами с длиной волны 1.064 мкм. В этой работе были получены импульсы с длиной волны, перестраиваемой от 3.4 мкм до 12.5 мкм, максимальная энергия

1)e-mail: ioninmv@lebedev.ru

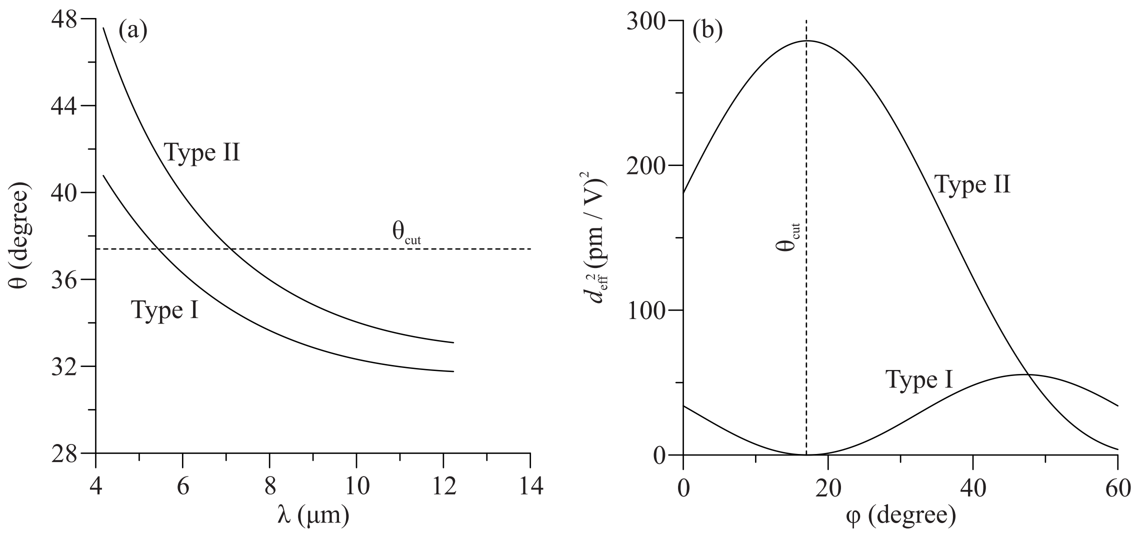

Рис. 1. Рассчитанные углы ФС (a) и рассчитанный квадрат эффективной нелинейности (b) для генерации РЧ по I- и II-типу ФС в кристалле BGGS, пунктирная линия соответствует углам среза экспериментального образца

импульсов достигала 0.73 мДж (на длине волны 6.5 мкм) при эффективности преобразования 4.7 % (квантовая эффективность 29 %).

В данной работе исследуется генерация РЧ в кристалле $BaGa_2GeS_6$ (BGGS) в той же оптической схеме, что в работе [10], но с образцом BGGS длиной 2.46 мм (в ~ 3.5 раза длиннее, чем в [10]). Целью работы изначально являлось определение возможности увеличения эффективности генерации РЧ за счет увеличения длины кристалла BGGS, однако при этом была обнаружена коллинеарная "двухцветная" генерация РЧ одновременно по I- и II-типу фазового синхронизма (ФС). Насколько нам известно, ранее коллинеарная "двухцветная" генерация РЧ одновременно по I- и II-типу ФС в нелинейных кристаллах не наблюдалась.

Свойства кристалла $\mathbf{BaGa_2GeS_6}$. В эксперименте использовали образец нелинейного кристалла BGGS размерами $10.2 \times 8.23 \times 2.46$ мм^3, высокого оптического качества, с углами среза: $\theta_{\text{cut}} = 37.4°$, $\theta_{\text{cut}} = 17°$.

На рисунке 1a представлены рассчитанные углы ФС в зависимости от длины волны РЧ для I- и II-типа ФС, где импульс накачки – импульс титан-сапфирового лазера ($\lambda = 0.95$ мкм), а сигнальный импульс – широкополосное излучение ближнего ИК-диапазона ($\lambda = 1.0$–1.2 мкм). Рисунок 1a показывает, что угол среза образца $\theta_{\text{cut}} = 37.4°$ соответствует длине волны РЧ $\lambda \sim 5.5$ мкм при I-типе ФС, а также соответствует длине волны РЧ ~ 7 мкм при II-типе ФС. Отметим, что дисперсионные уравнения для кристалла BGGS были взяты из [6]. На рисунке 1b представлены зависимости квадрата эффективной нелинейности для генерации РЧ по I- и II-типу ФС в зависимости от азимутального угла φ кристалла BGGS. Для расчета эффективной нелинейности BGGS были взяты значения коэффициентов тензора нелинейной восприимчивости d_{ij} из работы [8]. Из рисунка 1b видно, что угол среза образца $\varphi_{\text{cut}} = 17°$ соответствует максимуму значения квадрата эффективной нелинейности $\sim 285\,[\text{пм/В}]^2$ для II-типа ФС, при этом эффективная нелинейность для I-типа ФС равна нулю. Другими словами, при ориентации BGGS $\theta_{\text{cut}} = 37.4°$ $\varphi_{\text{cut}} = 17°$ в эксперименте должна наблюдаться только генерация РЧ с $\lambda \sim 7$ мкм (II-тип ФС).

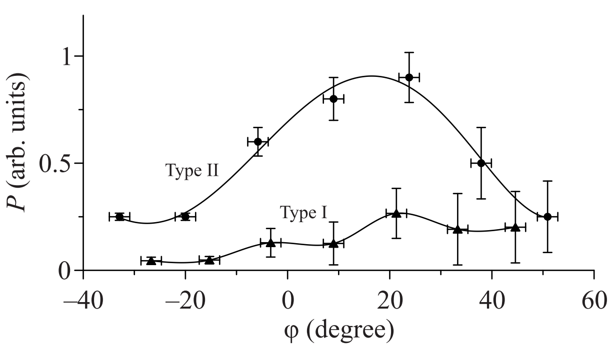

Рис. 2. Относительная мощность генерации суммарных частот излучения CO-лазера по I- и II-типу ФС в кристалле BGGS по данным работы [12]

В работе [12] исследовалась генерация суммарных частот CO-лазера по I- и II-типу ФС в BGGS и наблюдалась согласованность измеренной мощно-

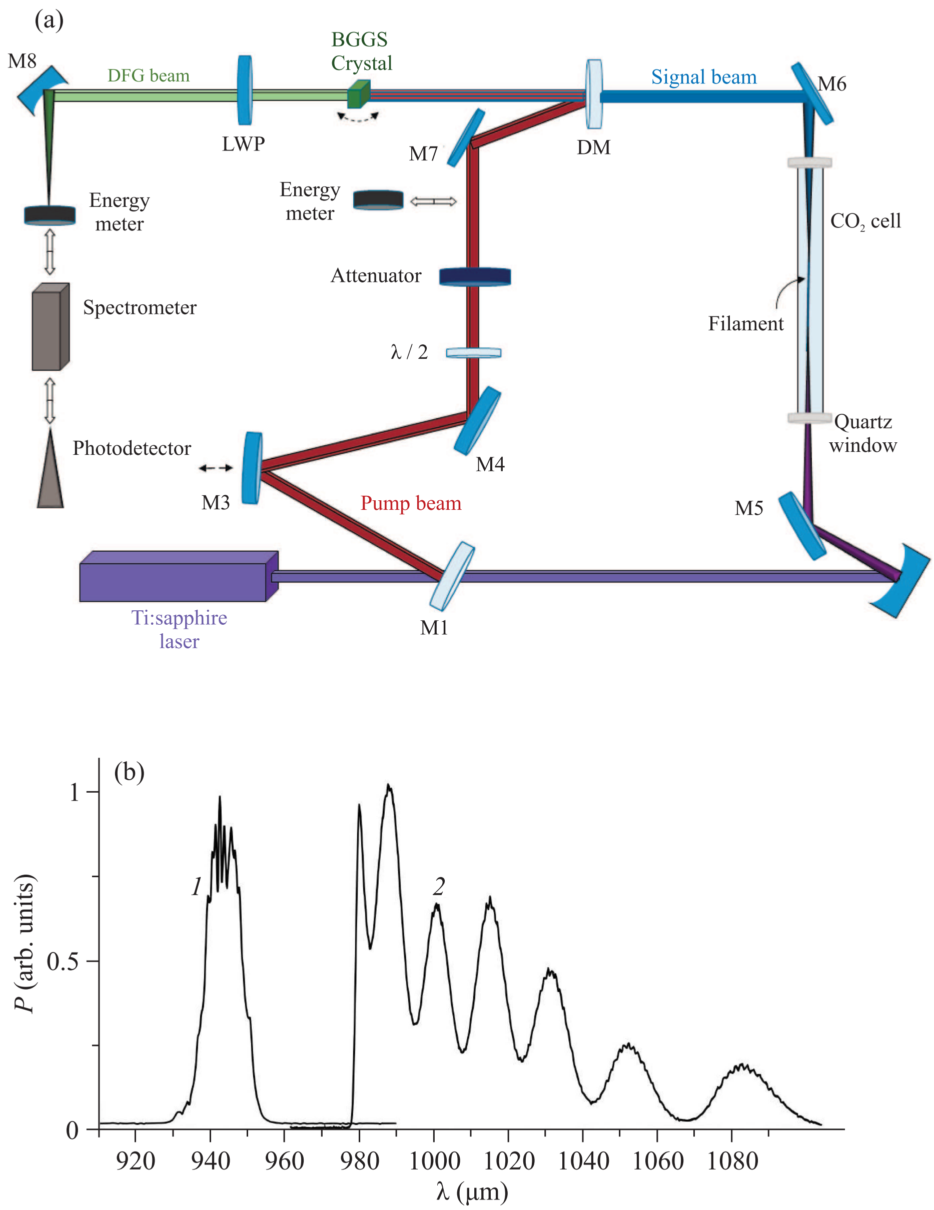

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Оптическая схема эксперимента по генерации РЧ; (b) – спектры импульсов накачки (*1*) и сигнальной волны (*2*)

сти излучения суммарных частот с рассчитанной зависимостью эффективной нелинейности для II-типа ФС при вариации угла φ [8]. Однако, для I-типа ФС наблюдалось существенное расхождение между экспериментом и расчетом. Из рисунка 2 видно, что при $\varphi \approx 20°$, генерация суммарных частот по I-типу ФС не пропадала, и даже была максимальной. Аналогичный эффект в кристалле BGGS, но для процесса генерации РЧ, мы наблюдали и в настоящей работе.

Описание эксперимента. Оптическая схема эксперимента по генерации РЧ изображена на рис. 3a. В качестве источника излучения применялся титан-сапфировый лазер “СТАРТ-480М” (ООО “Авеста Проект”, Россия). Центральная длина волны лазера составляла ~ 0.95 мкм, ширина спектра на уровне половины максимума достигала ~ 12 нм, длительность импульсов равнялась 110 ± 10 фс, а частота их следования – 10 Гц. Полупрозрачное зеркало M1 делит исходный пучок титан-сапфирового лазера на два пучка. Первый используется как пучок накачки (показан красным цветом на рис. 3a), и его энергия может контролироваться ослабителем. Кроме этого, на пути пучка накачки стояла полуволновая пластинка для поворота поляризации волны накачки на 90°, чтобы обеспечить соответствие обыкновенной волне в кристалле BGGS. Второй пучок, проходящий сквозь зеркало M1, фокусируется сферическим зеркалом M2 ($F = 2$ м) в ячейку с CO_2 газом ($L = 1.46$ м, $P = 1$ атм.) с окнами из УФ-кварца и используется как сигнальная волна. В данной ячейке спектр излучения уширяется за счет эффекта фазовой самомодуляции при филаментации импульса. Стоксовая часть спектра уширенного излучения используется как сигнальная волна для генерации РЧ в нелинейном кристалле. Энергетические и спектральные характеристики излучения на выходе из ячейки с газом подробно изучены в работах [13] и [14]. После этого оба пучка сводятся на дихроичном зеркале (LP02-980RU-25, Semrock, США). Спектры импульсов накачки и сигнальной волны после дихроичного зеркала были такие же, как в работе [10] (рис. 3b). Синхронизация импульсов по времени внутри кристалла достигалась за счет перемещения зеркала M3, что приводило к изменению оптической длины для импульса накачки. Отметим, что расходимость пучков накачки и РЧ в этой оптической схеме исследовалась в работе [15]. Излучение РЧ после кристалла проходит через длинноволновый фильтр LWP (фильтр # 3 из набора фильтров ИК-спектрометра ИКС-31, ЛОМО, Россия), после чего зеркалом M8 фокусируется на измерительные приборы: самодельный спектрометр с разрешением $\lambda/\Delta\lambda \sim 1000$, построенный по схеме Черни–Тернера, оснащенный дифракционной решеткой (75 штрихов/мм) и фотоприемником PEM-L-3 (VIGO Systems, Польша), либо измеритель энергии Ophir-PE9.

Результаты эксперимента и анализ. На рисунке 4 представлена измеренная зависимость энергии импульса РЧ от угла падения (α) излучения накачки на кристалл BGGS при $E_{\text{pump}} = 1.43$ мДж. Угол α был пересчитан в угол между волновым вектором излучения накачки и оптической осью кристалла θ (угол ФС), верхняя ось X на рис. 4. Над данным рисунком указана ожидаемая длина волны излучения РЧ, определенная из расчетов условий ФС (см. рис. 1), сверху шкалы представлена длина волны для II-типа преобразования, а под шкалой – для I-типа. Стоит отметить, что зависимость на рис. 4 измерялась при азимутальном угле $\beta = 0°$ (угол вращения вокруг нормали поверхности кристалла, которым можно изменять ориентацию поляризации излучения по углу φ внутри кристалла).

Зависимость на рис. 4 имеет два ярко выраженных максимума. Реализованный диапазон перестройки угла падения α, согласно расчетам, соответствует диапазону перестройки длины волны излучения РЧ 5–12 мкм по II-типу преобразования и 4–8.2 мкм по I-типу преобразования. Наибольшая энергия импульсов РЧ ~ 23 мкДж получена при угле $\alpha \approx 1°$ ($\theta \approx 37.8°$), что соответствует длине волны РЧ ~ 6.9 мкм (II-тип) или ~ 5.2 мкм (I-тип). Второй максимум ~ 19 мкДж наблюдался при $\alpha \approx 11°$ ($\theta \approx 42.2°$), что соответствует длине волны РЧ ~ 5.3 мкм (II-тип) или ~ 3.8 мкм (I-тип). Однако излучение с длиной волны ~ 3.8 мкм не может быть зарегистрировано в нашем эксперименте, поскольку использованный ИК фильтр для РЧ отсекает излучение с $\lambda < 5$ мкм. Наличие двух максимумом на рис. 4 может быть связано с реализацией генерации РЧ по I- и II-типу ФС одновременно: первый максимум ($\alpha \approx 1°$) соответствует РЧ по I-типу ФС с $\lambda \sim 5.2$ мкм; второй максимум ($\alpha \approx 11°$) соответствует РЧ по II-типу ФС с $\lambda \sim 5.3$ мкм. Отметим, что I- и II-тип ФС в нашем случае имеют одинаковую поляризацию для волны накачки и сигнальной волны, и различаются только поляризацией волны РЧ.

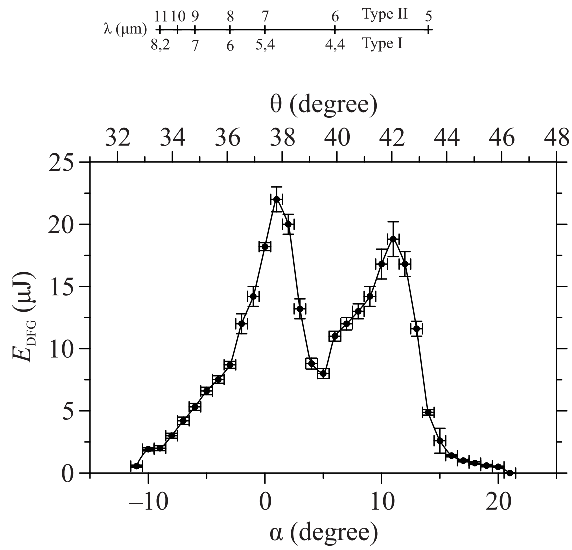

Рис. 4. Зависимость энергии импульса РЧ от угла падения излучения на кристалл (нижняя ось), а также угла ФС (средняя ось) который соответствует длине волны при двух типах синхронизма (верхняя ось)

После этого, при угле $\alpha \approx 1°$ ($\theta \approx 37.8°$) была измерена зависимость энергии импульса РЧ от энергии импульса накачки (рис. 5a) в диапазоне от ~ 0.2 до 1.6 мДж (~ 0.06–0.47 ТВт/см^2).

При E_{pump} до ~ 1 мДж зависимость на рис. 5a близка к линейной, однако при $E_{\text{pump}} > 1$ мДж рост энергии импульса РЧ замедляется – наблюдается “насыщение” преобразования, как и в работе [10]. Наибольшая энергия импульса РЧ соста-

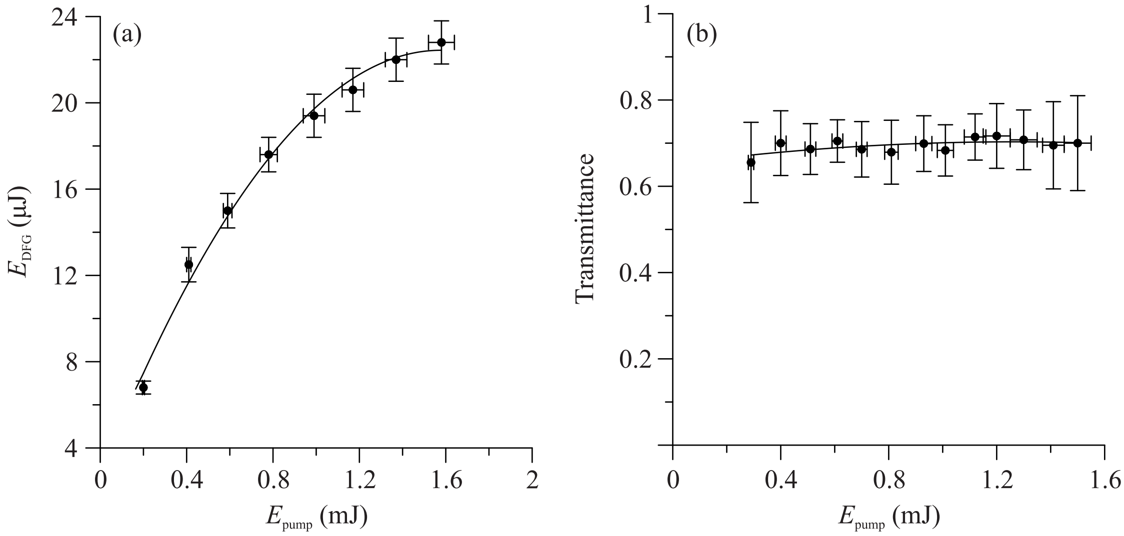

Рис. 5. (a) – Энергия импульса РЧ в зависимости от энергии импульса накачки при угле ФС 37.8°. (b) – Пропускание кристалла BGGS в зависимости от энергии импульса накачки

вила $\sim 23 \pm 1$ мкДж при энергии накачки 1.6 мДж, что соответствует внешней энергетической эффективности генерации РЧ (процентное отношение энергии импульса РЧ к энергии импульса накачки) – 1.4 %. Энергетическая эффективность генерации РЧ при $E_{\rm pump} = 0.8$ мДж (до "насыщения") составила 2.2 %. С учетом потерь на френелевское отражение от непросветленных граней кристалла и разницы в энергиях фотонов излучения РЧ и накачки, внутренняя квантовая эффективность преобразования фотонов с длиной волны 0.95 мкм в фотоны с длиной волны 5.2 мкм составила ~ 11 % при $E_{\rm pump} = 1.6$ мДж и ~ 17 % при $E_{\rm pump} = 0.8$ мДж. Энергия импульсов РЧ, полученная в "длинном" (2.46 мм) образце кристалла BGGS оказалась в 1.6 раз выше, чем в "тонком" (0.7 мм) образце, а эффект "насыщения" преобразования проявляется при одинаковой энергии накачки >1 мДж. Измеренная зависимость коэффициента пропускания BGGS от энергии импульса накачки, представленная на рис. 5b, показывает, что пропускание образца BGGS в диапазоне энергий от 0.2 до 1.5 мДж оставалось на уровне ~ 70 %, заметного нелинейного (трехфотонного) поглощения в BGGS не происходило. Кроме этого, не зарегистрировано видимого оптического повреждения образца кристалла при энергии накачки до 2 мДж (интенсивность ~ 0.6 ТВт/см^2).

На рисунке 6 показаны характерные спектры импульсов РЧ, измеренные при разных углах ФС: $\theta \sim 43°$ ($\alpha = 13°$), $\theta \sim 39.1°$ ($\alpha = 4°$), $\theta \sim 37.4°$ ($\alpha = 0°$) и $\theta \sim 36.5°$ ($\alpha = -2°$). Энергия накачки равнялась $E_{\rm pump} = 1.43$ мДж, угол $\beta = 0°$ ($\varphi_{\rm cut} = 17°$). При данных углах ФС центральная длина волны излучения РЧ перестраивалась от 5.2 до 8.5 мкм. В отличие от спектров, полученных в [10] с "тонким" BGGS, в данном случае можно увидеть, что при фиксированном угле ФС генерируются две отстроенные спектральные полосы одновременно. Ширина полос составляла ~ 0.5 мкм, расстояние 1.5–2 мкм. Сравнение центральных длин волн в полосах спектров с рассчитанными углами ФС для I- и II-типа преобразования (см. рис. 1a), подтверждает, что в наших условиях происходит генерация РЧ одновременно по I- и II-типу ФС. Проверка наблюдаемых спектров с помощью поляризаторов (ZnSe, степень поляризации 94–97 % для 2 мкм, >99 % для 10 мкм, ООО "Тидекс") подтвердила, что излучение в полосах имеет различную поляризацию. В работе [10] с "тонким" BGGS наблюдалась широкополосная генерация РЧ с шириной спектра ~ 3 мкм. Такая "широкополосная" генерация могла быть связана не только с большей спектральной шириной ФС для "тонкого" образца, но и с наложением спектров от двух типов ФС.

Стоит отметить, что при угле $\beta = 0°$ ($\varphi_{\rm cut} = 17°$) согласно расчетам (рис. 1b) генерация РЧ по I-типу ФС не должна происходить, поскольку эффективная нелинейность для такого процесса должна быть равна нулю. Проведен эксперимент на поиск условий и возможности подавления РЧ по I-типу ФС путем вариации угла $\beta(\varphi)$. На рисунке 7 представлены спектры РЧ, измеренные при $\theta_{\rm cut} \sim 37.4°$ и различных углах β. Рисунке 7a соответствует случаю, когда амплитуда РЧ по I-типу ФС была минимальна ($\beta = 19°$), а рис. 7b соответствует случаю, ко-

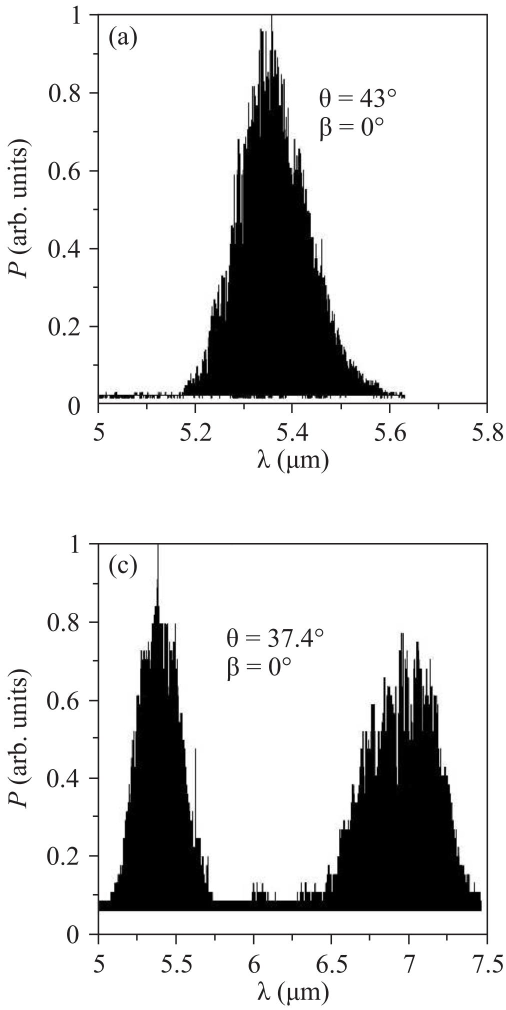

Рис. 6. Спектры излучения РЧ, полученные в кристалле BGGS при различных углах ФС: 43° (a); $\theta \sim 39.1°$ (b); $\theta \sim 37.4°$ (c); $\theta \sim 36.5°$ (d)

гда амплитуда РЧ по I-типу ФС была максимальная ($\beta = -16°$). Таким образом, полного подавления РЧ по I-типу ФС путем вариации азимутального угла $\beta(\varphi)$ достичь не удалось, что согласуется с результатами работы [12] (см. рис. 2). Однако, с помощью варьирования углов β можно изменять соотношение амплитуд первого и второго типа ФС в результирующую выходную энергию излучения РЧ от примерного соотношения 1:1 до 1:4.

Для ряда применений, где требуется селективное одночастотное ИК-излучение, наблюдаемый эффект “двухцветной” генерации РЧ является негативным. Однако для задач, где важна высокая энергия излучения в широком диапазоне длин волн, работа кристалла сразу на двух типах ФС увеличивает интегральную нелинейность кристалла и эффективность преобразования. Также подобная “двухцветная” генерация может найти свое применение в дистанционном газовом анализе по методу дифференциального поглощения [16] или последующего преобразования излучения за счет генерации РЧ в дальний ИК-диапазон с длиной волны $\lambda \sim 30$ мкм в таком нелинейном кристалле, как $PbIn_6Te_{10}$ [17].

Заключение. Исследована генерация разностной частоты фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в длинноволновую область среднего ИК диапазона ($\lambda = 5-10$ мкм) в “длинном” (2.46 мм) нелинейном кристалле $BaGa_2GeS_6$. Максимальная энергия импульсов РЧ была 23 мкДж, что в 1.6 раза больше, чем с “коротким” (0.7 мм) образцом $BaGa_2GeS_6$ [10]. Исследование спектральных характеристик излучения РЧ показало, что в $BaGa_2GeS_6$ происходит генерация РЧ одновременно по I- и II-типу ФС с отстроенными на 1.5–2 мкм центральными длинами волн. Вариация азимутального угла кристалла в диапазоне $\pm 20°$ не позволила

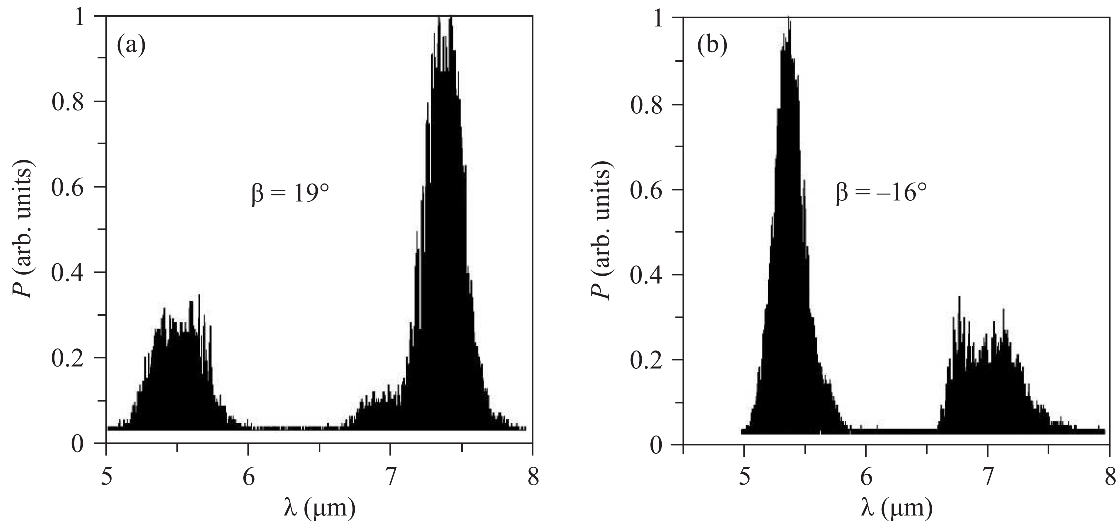

Рис. 7. Спектры излучения РЧ, полученные в кристалле BGGS при углах $\beta = 19^\circ$ (a) и $\beta = -16^\circ$ (b) при $\theta_{\mathrm{cut}} = 37.4^\circ$

полностью подавить генерацию РЧ по одному из типов ФС. Полученные результаты не описываются коэффициентами тензора нелинейной восприимчивости из [8], но согласуются с результатами работы [12]. Поэтому коэффициенты тензора нелинейной восприимчивости кристалла $BaGa_2GeS_6$ требуют уточнения. Также природа "насыщения" эффективности преобразования в $BaGa_2GeS_6$ остается не ясной.

Полученная двухцветная генерация РЧ в области длин волн 5–10 мкм может быть использована для дистанционного газового анализа по методу дифференциального поглощения или последующего преобразования излучения в дальний ИК-диапазон ($\lambda \sim 30$ мкм) методом генерации РЧ в кристалле $PbIn_6Te_{10}$.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда # 22-79-10068-П, https://rscf.ru/project/22-79-10068/-П.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. X. Gu, Y. Ding, Z. Hu, P. Yuan, D. Zhang, J. Wang, G. Xie, J. Ma, and L. Qian, "Difference-frequency generation of 0.2-mJ 3-cycle 9-чm pulses from two 1-kHz multicycle OPCPAs", Laser Photonics Rev. **19**, 2400507 (2024).
2. C. Guan, X. Han, K. Wang, Y. Wan, L. Zhang, J. Yang, S. Chen, Z. Huang, H. Long, and P. Lu, "Difference frequency generation from AA-Stacked WS2 coupled with dual-resonant Au nanocavity", Laser Photonics Rev. **19**, 2401895 (2025).
3. M. Jelinek, M. Frank, V. Kubecek, O. Novak, J. Huynh, and M. Cimrman, "70 MW-level picosecond mid-infrared radiation generation by difference frequency generation in $AgGaS_2$, $BaGa_4Se_7$, $LiGaSe_2$, and $LiGaS_2$", IEEE Photonics J. **17**(2), 1 (2025).
4. V. Petrov, V. Badikov, D. Badikov, K. Kato, G. Shevyrdyaeva, K. Miyata, M. Mero, L. Wang, Z. Heiner, and V. Panyutin, "Barium nonlinear optical crystals for the mid-IR: characterization and some applications", J. Opt. Soc. Am. B **38**, B46 (2021).
5. N. Kostyukova, E. Erushin, A. Boyko, G. Shevyrdyaeva, and D. Badikov, "Barium Chalcogenide Crystals: A Review", Photonics **11**, 281 (2024).
6. V. V. Badikov, D. V. Badikov, V. B. Laptev, K. V. Mitin, G. S. Shevyrdyaeva, N. I. Shchebetova, and V. Petrov, "Crystal growth and characterization of new quaternary chalcogenide nonlinear crystals for the mid-IR: $BaGa_2GeS_6$ and $BaGa_2GeSe_6$", Opt. Mater. Express **6**, 2933 (2016).
7. Д. В. Бадиков, М. В. Ионин, И. О. Киняевский, П. П. Пахольчук, Ф. С. Смык, "Порог оптического повреждения кристалла $BaGa_2GeS_6$ фемто- и пикосекундными лазерными импульсами с длиной волны 1.03 мкм", Квантовая электроника **56**(2), (2026) (принято в печать) [D. V. Badikov, M. V. Ionin, I. O. Kinyaevskiy, P. P. Pakholchuk, and F. S. Smik, "Porog opticheskogo povrezhdeniya kristalla $BaGa_2GeS_6$ femto- i pikosekundnimi lazernimi impulsami s dlinoi volni 1.03 mkm", Kvantovaya elektronika **56**(2), (2026)] (to be published).
8. V. Petrov, K. Kato, and K. Miyata, "Barium chalcogenides for nonlinear optics in the mid-IR: Properties and applications", Optical Materials: X **22**, 100319 (2024).
9. E. A. Migal, D. Z. Suleimanova, D. V. Badikov, and F. V. Potemkin, "Unlocking superior performance

of broadband powerful mid-IR optical parametric amplifiers with a $BaGa_2GeS_6$ crystal pumped at 1.24 μm”, Opt. Lett. **49**, 4537 (2024).

10. И. О. Киняевский, М. В. Ионин, А. В. Корибут, Я. В. Грудцын, Ю. М. Климачев, Д. В. Бадиков, “Генерация широкополосных фемтосекундных импульсов среднего инфракрасного диапазона путем генерации разностной частоты импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле $BaGa_2GeS_6$”, Письма в ЖЭТФ **122**(10), 644 (2025) [I. O. Kinyaevskiy, M. V. Ionin, A. V. Koribut, Ya. V. Grudtsyn, Yu. M. Klimachev, and D. V. Badikov, “Generation of broadband femtosecond pulses in the Mid-Infrared range by difference-frequency generation of Ti:Sapphire laser pulses in a $BaGa_2GeS_6$ crystal”, JETP Lett. **122**(10), 659 (2025)].
11. E. Yu. Erushin, S. E. Sere, M. V. Vostrikova, A. A. Boyko, G. S. Shevyrdyaeva, D. V. Badikov, and N. Yu. Kostyukova, “Widely tunable mid-infrared $BaGa_2GeS_6$ optical parametric oscillator pumped at 1064 nm by Nd:YAG laser”, Opt. Mater. **169**, 117610 (2026).
12. М. В. Ионин, А. А. Ионин, И. О. Киняевский, Ю. М. Климачев, А. В. Корибут, А. М. Сагитова, Е. П. Федорова, Д. В. Бадиков, Г. К. Сафаралиев, “Исследование эффективной нелинейности кристалла $BaGa_2GeS_6$ по генерации суммарных частот CO-лазера I и II типа фазового синхронизма”, Квантовая электроника **54**, 461 (2024) [M. V. Ionin, A. A. Ionin, I. O. Kinyaevsky, Yu. M. Klimachev, A. V. Koribut, A. M. Sagitova, E. P. Fedorova, D. V. Badikov, and G. K. Safaraliev, “A study of effective nonlinearity of $BaGa_2GeS_6$ crystal by CO laser sum-frequency generation with type-I and type-II phase matching”, Bull. Lebedev Phys. Inst. **51**, S862 (2024)].
13. И. О. Киняевский, Я. В. Грудцын, А. В. Корибут, М. В. Ионин, “Филаментация 100-фемтосекундных импульсов титан-сапфирового лазера в газах для формирования сигнальной волны генератора разностной частоты”, Квантовая электроника **54**, 231 (2024) [I. O. Kinyaevskiia, Ya. V. Grudtsyna, A. V. Koributa, and M. V. Ionin, “Filamentation of 100-fs Pulses from a Ti:Sapphire Laser in Gases to Generate a Signal Wave of a Difference Frequency Generator”, Bull. Lebedev Phys. Inst. **51**, S557 (2024)].
14. I. O. Kinyaevskiy, A. V. Koribut, Ya. V. Grudtsyn, M. V. Ionin, Yu. M. Klimachev, N. N. Yudin, and A. A. Ionin, “Frequency conversion of femtosecond Ti:Sapphire laser pulse into 5–11 μm wavelength range with $ZnGeP_2$, $AgGaS_2$ and $LiGaS_2$ crystals”, Opt. Laser Technol. **183**, 112270 (2025).
15. И. О. Киняевский, М. В. Ионин, А. В. Корибут, Ю. М. Андреев, “Угловое распределение интенсивности фемтосекундного источника излучения среднего ИК-диапазона, генерируемого в нелинейном кристалле с сигнальной волной, формируемой в филаменте в газе”, Письма в ЖЭТФ **121**(10), 817 (2025) [I. O. Kinyaevskiy, M. V. Ionin, A. V. Koribut, and Yu. M. Andreev, “Angular distribution of the intensity of a Mid-Infrared femtosecond radiation source in a nonlinear crystal with a signal wave formed in a filament in a gas”, JETP Lett. **121**, 778 (2025)].
16. O. A. Romanovskii, Y. V. Kistenev, S. V. Yakovlev, A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov, S. A. Sadovnikov, and O. V. Kharchenko, “Mobile ground-based differential absorption lidar systems for atmospheric greenhouse gas sensing: a review”, Appl. Spectrosc. Rev. **61**(2), 165 (2026).
17. Y. Andreev, V. Badikov, A. Ionin, I. Kinyaevskiy, Y. Klimachev, A. Kotkov, G. Lanskii, and V. Svetlichnyi, “Optical properties of $PbIn_6Te_{10}$ in the long-wave IR”, Laser Phys. Lett. **13**, 125405 (2016).