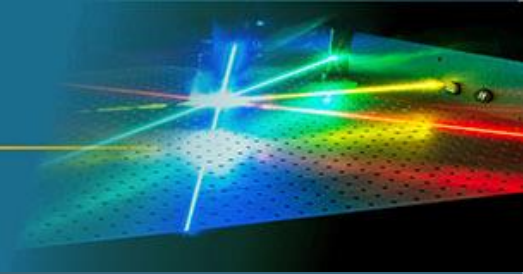




ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СО РАН

Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences



Конкурс молодых ученых – 2024 по присуждению премий имени выдающихся ученых СО РАН
Премия имени В.П. Чеботаева – за работы в области квантовой электроники и лазерной физики

Цикл научных работ: Исследование нелинейных кристаллов бариевых халькогенидов и создание на их основе перестраиваемых параметрических генераторов света среднего ИК диапазона для применений в газоанализе

Костюкова Надежда Юрьевна

к.ф.-м.н.,

Зав. лаборатории квантовых оптических технологий (ЛКОТ)

Институт лазерной физики СО РАН

Цикл научных работ

2022 – 2024 гг.

1. **Kostyukova N.**, Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. Barium Chalcogenide Crystals: A Review // Photonics. – 2024. – Vol. 11, Issue 3. – P.281. <https://doi.org/10.3390/photonics11030281>
2. Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. **and Kostyukova N.** Measurement of nonlinear refraction and absorption coefficient in BaGa₂GeSe₆ crystal // Optical Materials. – 2024. – Vol. 154. – P. 115745. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115745>
3. **Kostyukova N.**, Trunov V., Frolov S., Kolker D., Boyko A., Isaenko L. Cascade picosecond optical parametric amplification for generating radiation in the 2.1 μm // Infrared Physics & Technology. – 2024. – Vol. 136. – P. 105103. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.105103>
4. Bednyakova A., Erushin E., Miroshnichenko I., **Kostyukova N.**, Boyko A., Redyuk A. Enhancing long-term stability of photoacoustic gas sensor using an extremum-seeking control algorithm // Infrared Physics & Technology. – 2023. – Vol. 133. – P. 104821. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104821>
5. Erushin E., **Kostyukova N.**, Boyko A., Loginova A., Safaraliev G., Shevyrdyaeva G., Badikov D. Ba₂Ga₈GeS₁₆: New nonlinear optical crystals with high laser-induced damage threshold for parametric down-conversion in mid-IR // Appl. Phys. B. – 2024. – Vol. 130. – P. 10. <https://doi.org/10.1007/s00340-023-08152-2>.
6. Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. **and Kostyukova N.** Nonlinear absorption and refraction study of barium chalcogenide crystals // Optical Materials. (в печати)
7. Erushin E.Y., Badikov D.V., Kostyukov A.I., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Safaraliev G. **and Kostyukova N.** Laser-induced damage threshold of sulfur-containing crystals of barium chalcogenides // Appl. Phys. B. (в печати)
8. **Kostyukova N.**, Erushin E., Boyko A., Kostyukov A., Kiryakova A., Badikov D. Nonlinear absorption and refraction study of quaternary barium chalcogenide BaGa₂GeSe₆ crystal at 1053 nm in nanosecond regime // Сборник трудов конференции «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)». 2023. №23. p. 163.
9. **Kostyukova N.Yu.**, Trunov V.I., Kolker D.B., Erushin E.Yu., Kolker M.D., Boyko A.A., Isaenko, L.I. Cascaded OPG based on BaGa₄Se₇ to broadband continuum generation in mid-IR range. In 2022 International Conference Laser Optics, ICLO 2022 - Proceedings, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839775>
10. **Костюкова Н. Ю.**, Ерушин Е. Ю., Бойко А. А., Шевырдяева Г. С., Бадиков Д. В. Исследование оптических и нелинейно-оптических характеристик кристаллов бариевых халькогенидов для создания источников излучения среднего ИК диапазона // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции МТФ 2024 с международным участием «Материалы и технологии фотоники, электроники и нелинейной оптики». г. Томск, Россия, 2024.
11.

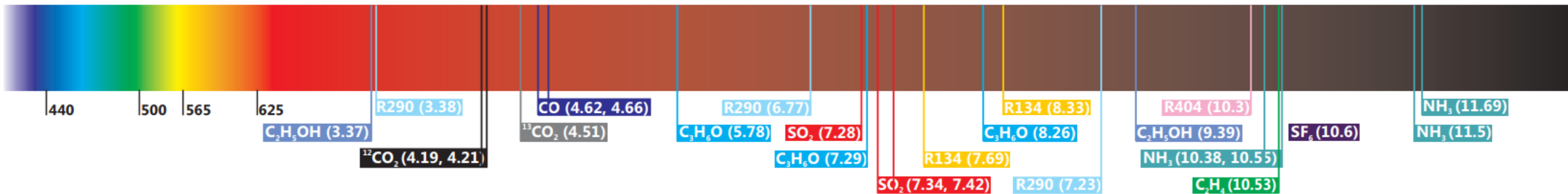
Всего по теме исследования в период 2022 – 2024 гг. - 14 публикаций

Всего по теме исследования в период 2015 – 2024 гг. - 35 публикаций, в том числе: 14 статей Q1 и Q2

и 21 тезисов из научных сборников конференций

Актуальность

Линии поглощения некоторых распространенных летучих соединений



На сегодняшний день задача разработки источников когерентного излучения, перестраиваемых в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, является актуальной.

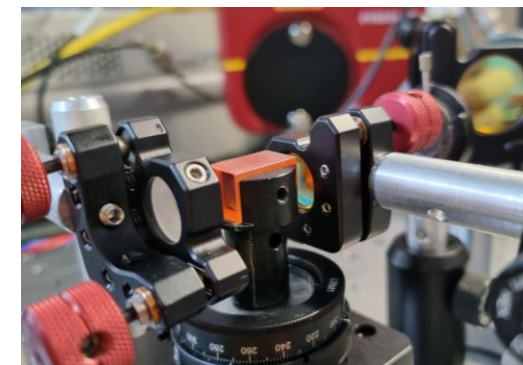
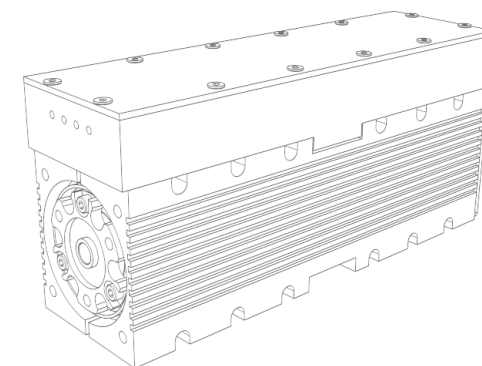
- ❖ в этой части спектра находятся основные окна прозрачности атмосферы;
- ❖ широко представлены характеристичные линии поглощения колебательно-вращательных переходов различных газов (H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 , CO , NO , N_2O и др.);
- ❖ области прозрачности многих биологических объектов и соединений биологического происхождения, оптических и полупроводниковых материалов.

Применение

- ❖ **Экология:** мониторинг атмосферы;
- ❖ **Промышленность:** геологоразведка, поиск утечек в котельных, на ТЭЦ и в автомобильной промышленности;
- ❖ **Медицина:** неинвазивная медицинская диагностика; лазерная хирургия;

Источники среднего ИК диапазона

❖ Газовые CO лазеры	4.9 – 7.5 мкм + первый обертон: 2.5 – 4.2 мкм
❖ Газовые CO ₂ лазеры	9.2 – 10.6 мкм + с использованием изотопов: 8.9 – 12.3 мкм
❖ Химические HF и DF лазеры	2.7 – 5 мкм
❖ твердотельные лазеры, использующие кристаллы, легированные ионами переходных и редкоземельных элементов	до 5 мкм
❖ Межзонные каскадные лазеры (ICLs)	до 5 мкм, генерация в более длинноволновой части спектра возможна только при криогенных температурах
❖ Квантово-каскадные лазеры (QCLs)	3.5 – 24 мкм
❖ Параметрические преобразователи частоты, такие как ПГС и ГРЧ	Определяется нелинейным кристаллом, лазером накачки и используемой оптикой

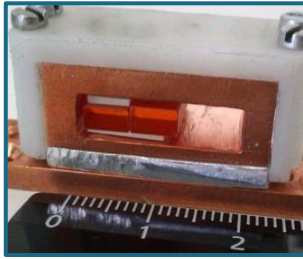


Нелинейные кристаллы среднего ИК диапазона

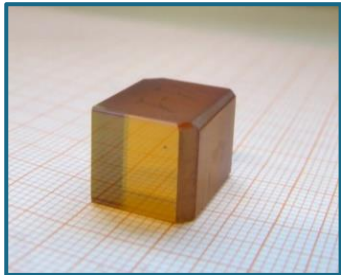
LiBC₂ кристаллы



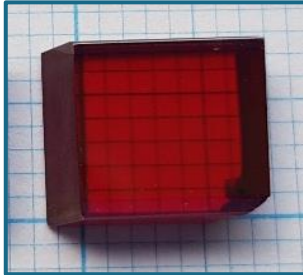
HgGa₂S₄



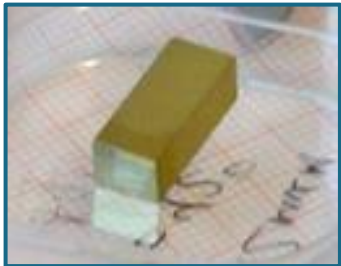
BaGa₄Se₇



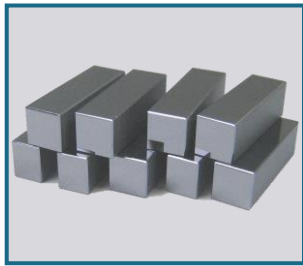
BaGa₂GeSe₆



AgGaS₂



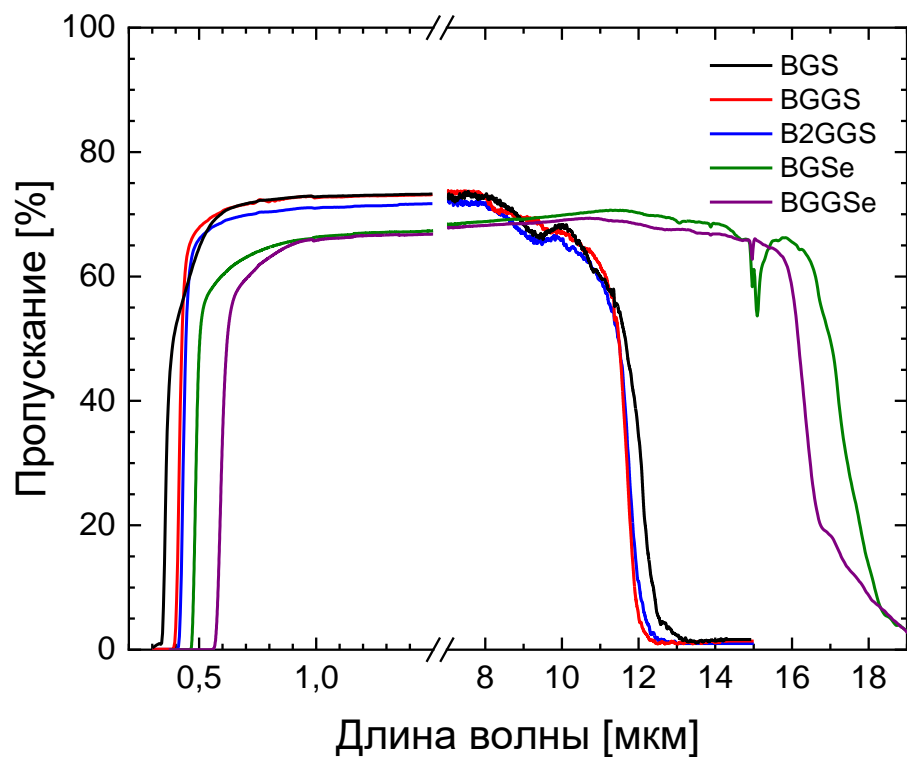
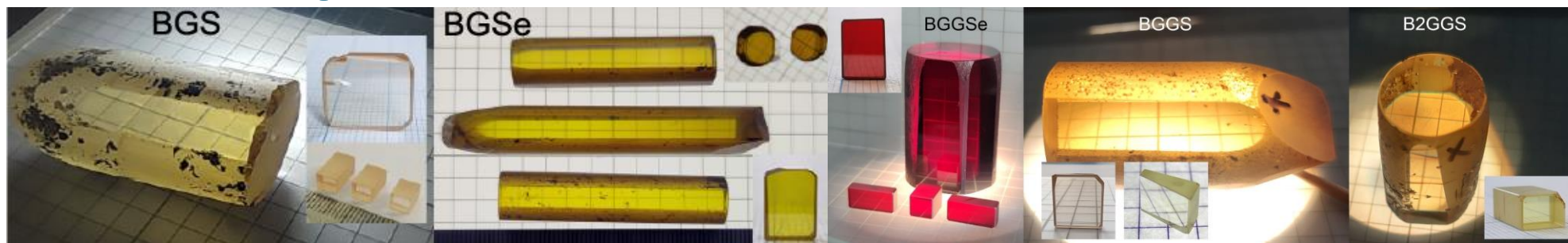
ZnGeP₂



Выбор подходящего нелинейного кристалла должен основываться на комплексной оценке всех его физических свойств, соответствующих конкретным требованиям данной задачи.

- ❖ В приложениях, связанных с генерацией излучения высокой средней мощности или непрерывного излучения, важнейшей характеристикой кристаллов является их высокая **теплопроводность**.
- ❖ Для приложений, требующих перестройки длины волны в широком спектральном диапазоне, решающее значение имеют такие параметры, как **диапазон прозрачности**, **коэффициент нелинейности** и выполнение **условий фазового синхронизма** в широком диапазоне.
- ❖ Для задач, требующих высокую энергию импульсов, например, в лазерной хирургии, крайне важно, чтобы нелинейный кристалл демонстрировал высокий **порог лучевой стойкости**.
- ❖ При разработке оптических систем с высокой пиковой интенсивностью также крайне важным становится учёт **нелинейного поглощения** и **нелинейного преломления** среды.

Кристаллы бариевые халькогениды



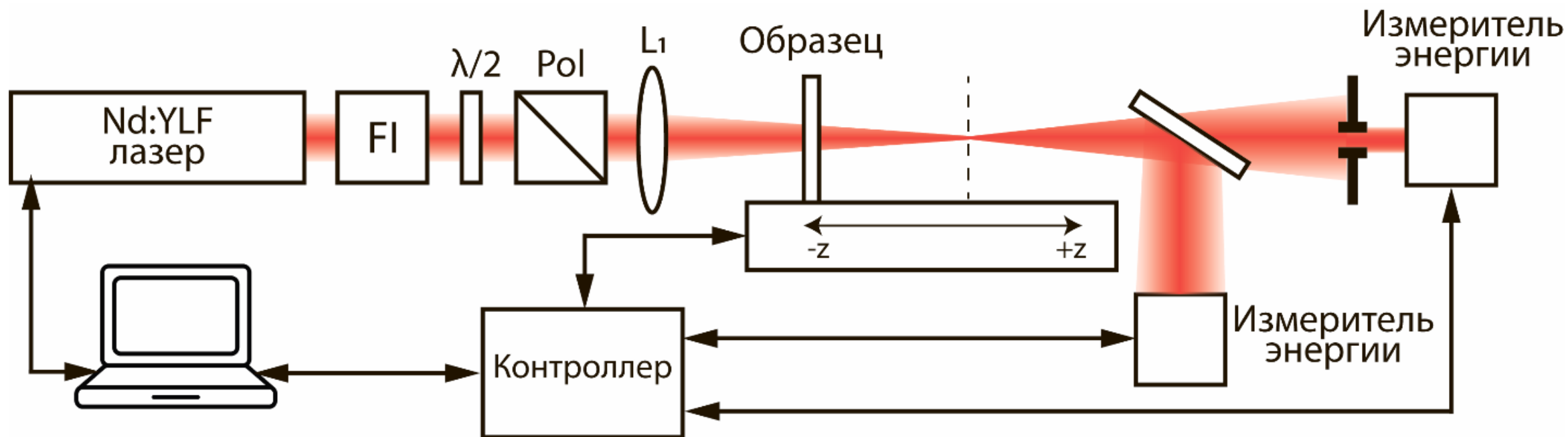
Кристалл	$d_{эфф}, \text{пм/В}$	$E_g, \text{эВ}$
BaGa_4S_7 (BGS)	5,3 (ee-o, xz)	3,59
BaGa_4Se_7 (BGSe)	14,2 (ee-o, xz)	2,73
$\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (BGGSe)	39,6 (oo-e)	2,31 2,38
$\text{BaGa}_2\text{GeS}_6$ (BGGs)	17,3 (oe-o)	3,37
$\text{Ba}_2\text{Ga}_8\text{GeS}_{16}$ (B2GGS)	11,3 (oo-e)	2,95

Нелинейное поглощение и преломление

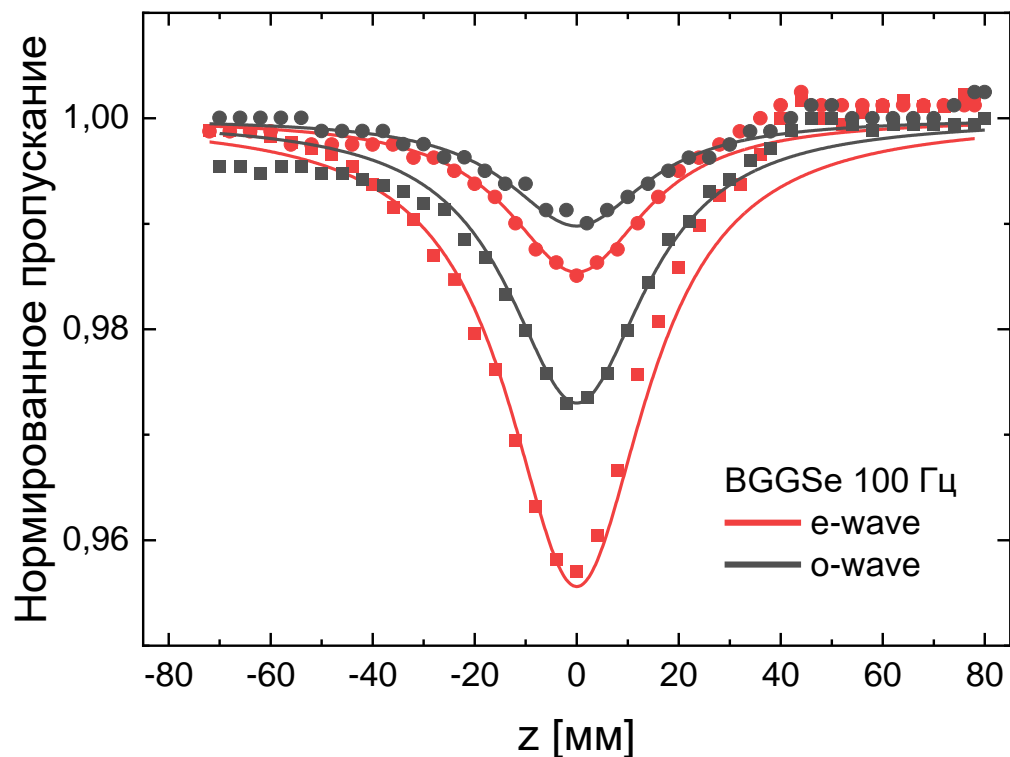
Нелинейное поглощение и **нелинейное преломление**, возникающие в кристаллах при взаимодействии с мощным лазерным излучением, могут приводить к искажению поперечного распределения интенсивности лазерного пучка в кристалле и проявлению эффектов самофокусировки и рассогласованию оптического резонатора, и тем самым уменьшать эффективность преобразования в ПГС. Поэтому их важно учитывать при проектировании оптических схем!

Кристалл	Условия измерения	$n_2 \cdot 10^{-14}, \text{ см}^2/\text{Вт}$	$\beta, \text{ см}/\text{ГВт}$
BGS	1028 нм, 180 фс, 100 Гц – 100кГц, 8 ГВт/см ² , о- и е-поляризация, 4,8 мм длина образца	0,72-0,83	Не наблюдалось
	1028 нм, 180 фс, 100 Гц – 100кГц, 2,3 ГВт/см ² , о- и е-поляриз., 8,3 мм длина образца	1,0	Не наблюдалось
BGSe	1064 нм, 30 пс, 10 Гц, 1,3 ГВт/см ² , 4 мм длина образца	Нет данных	Наблюдалось
BGGSe	1053 нм, 10 нс, 1 кГц, о-поляриз., 150 МВт/см ² , длина образца 2 мм	Нет данных	Наблюдалось

Нелинейное поглощение и преломление



Нелинейное поглощение



Нормированный коэффициент пропускания кристалла BGGSe для необыкновенных (красная кривая) и обыкновенных (черная кривая) волн при частоте повторения импульсов 100 Гц и пиковой интенсивности 122 МВт/см² (круги) и 265 МВт/см² (квадраты).

нормированное пропускание

$$T_N(z) = 1 - \frac{Q_{02}}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2}\right)}$$

фазовый сдвиг

$$Q_{02} = \frac{\alpha_2 I_0 (1 - e^{-\alpha_0 L})}{\alpha_0}$$

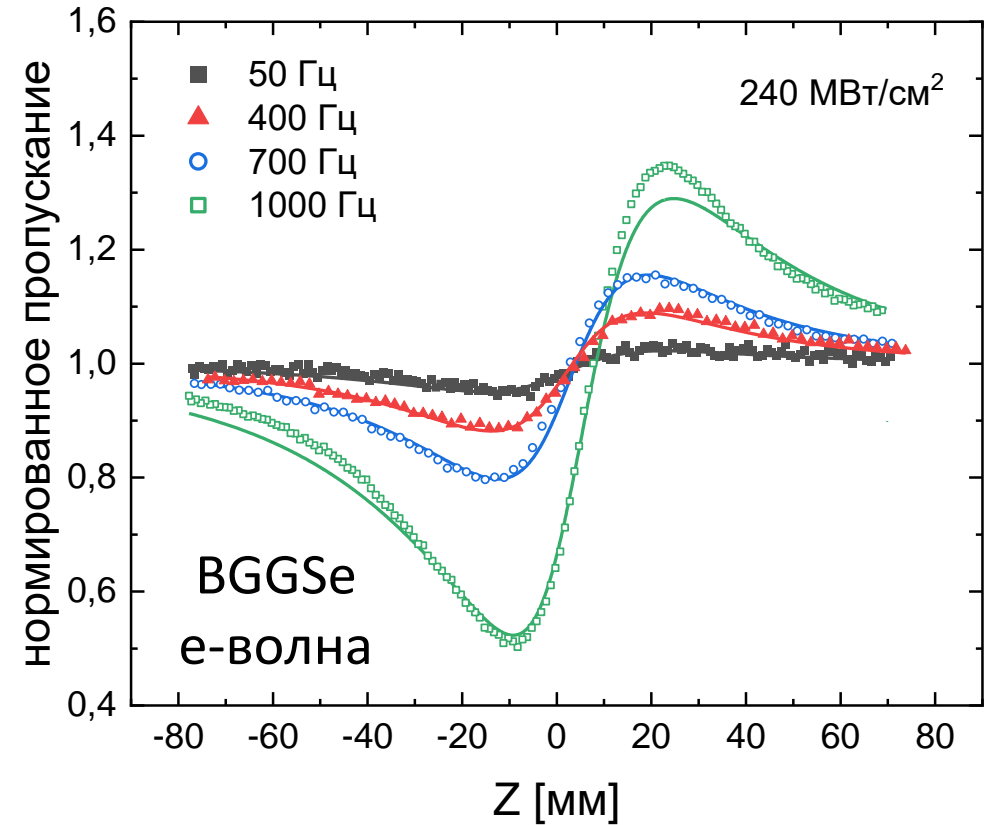
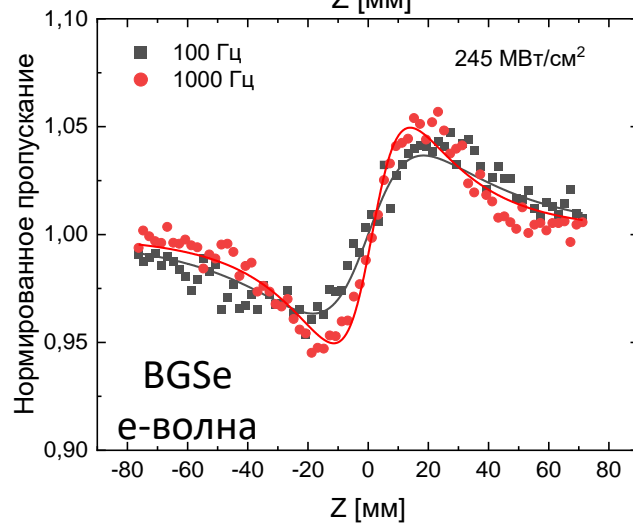
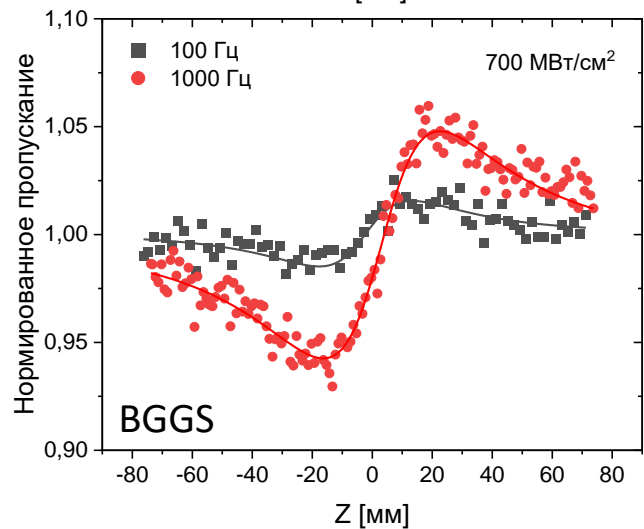
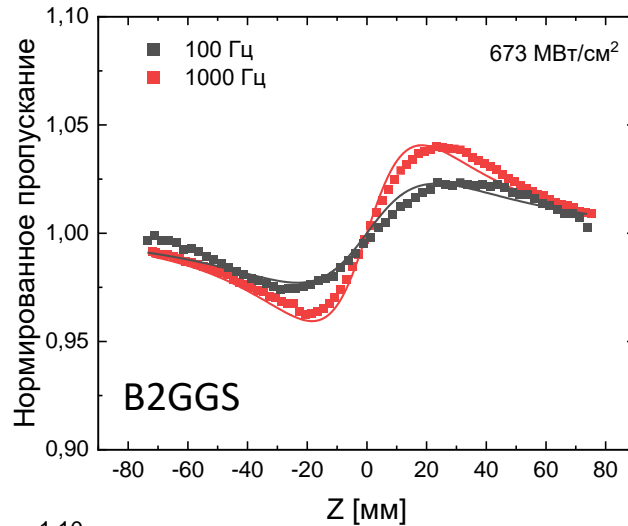
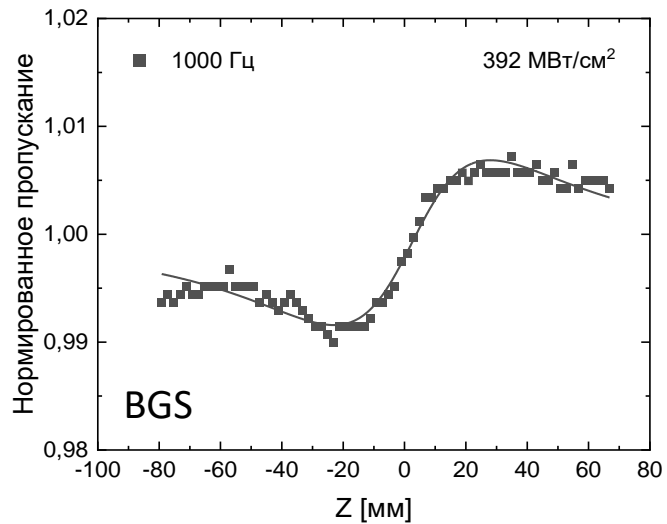
**о-волна,
см/ГВт**

0,03

**е-волна,
см/ГВт**

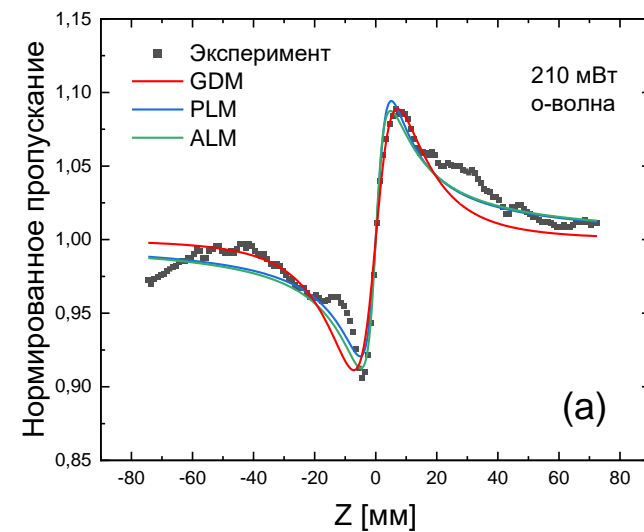
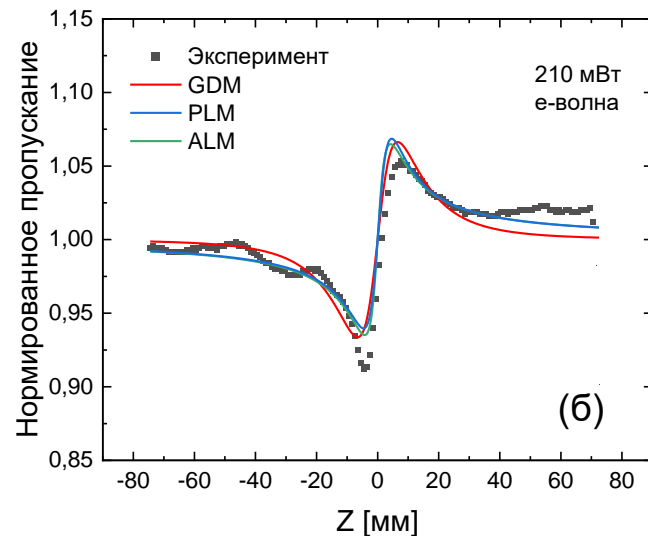
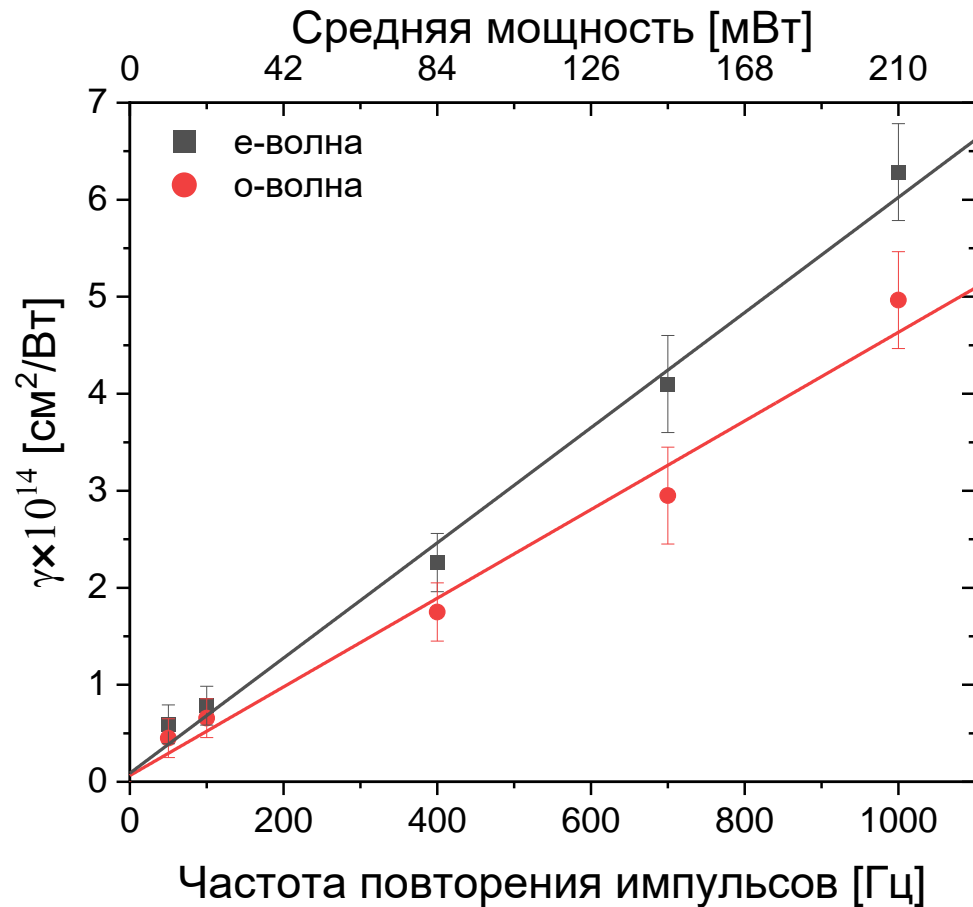
0,85

Нелинейное преломление



Нелинейное преломление

Воздействие непрерывным излучением



GDM – метод разложения по Гауссу (Gaussian Decomposition Method)
 PLM – модель параболической линзы (parabolic lens model)
 ALM – модель аберационной линзы (aberration lens model)

о-волна, см ² /Вт×10 ⁻⁹	е-волна, см ² /Вт×10 ⁻⁹
2,8	2,1

экспериментальные

о-волна, см ² /Вт×10 ⁻⁹	е-волна, см ² /Вт×10 ⁻⁹
2,5	2,2

ожидаемые

Нелинейное преломление

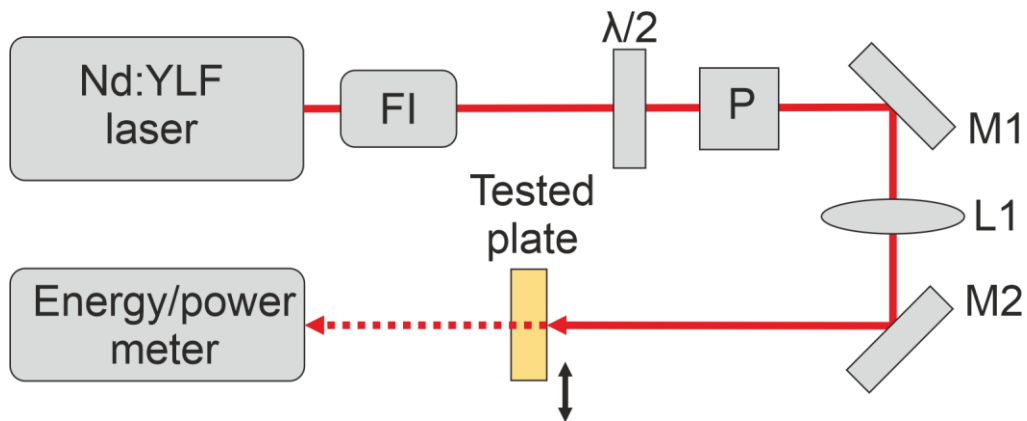
Кристалл	Длина, мм	Волна	α_0 , см ⁻¹	$\gamma \times 10^{-14}$ см ² /Вт	n_2 (эксп.) $\times 10^{-11}$ (esu)	n_2 (теор.) $\times 10^{-11}$ (esu)	$\chi_R^{(3)} \times 10^{-12}$ (esu)	$P_{кр}$ кВт
BGGSe ($\theta = 30^\circ$, $\varphi = 30^\circ$)	2.04	O	0.026	5,5	3,4	2,9	9	11.6
		E		6,8	4,3	4,1	11.8	9.1
BGSe ($\theta = 46.46^\circ$, $\varphi = 0^\circ$)	2.31	O	0.182	1,6	0,96	1,1	2.5	40.7
		E		1,8	1,1	1,1	2.9	35.8
B2GGS	2.6	—	0.062	1,14	0,6	0,8	1.9	55.9
BGGS	2.05	—	0.013	0,78	0,43	0,4	1.1	89.7
BGS	2.7	—	0.01	0,58	0,32	0,29	0.8	122

Кристалл BGGSe демонстрирует самый высокий нелинейный показатель преломления среди проанализированных образцов, а кристалл BGS демонстрирует самый низкий нелинейный показатель преломления, $n_2 = 0,58 \times 10^{-14}$ см²/Вт ($0,32 \times 10^{-11}$ esu), что близко к теоретически предсказанному значению $0,29 \times 10^{-11}$ esu.

Однако эти измеренные значения немного ниже данных, представленных Mero и др., которые находятся в диапазоне от $0,72$ до $1,0 \times 10^{-14}$ см²/Вт.

Исследование лучевой стойкости

Методика R-on-1



FI – оптический изолятор, P – поляризатор,

$\lambda/2$ – полуволновая пластинка, L_1 – фокусирующая линза, нелинейный кристалл.

Параметры излучения:

$\lambda = 1053$ нм; $M^2 \sim 1,2$;
 $f = 0,1 - 2$ кГц; $2w = 180$ мкм;
 $\tau = 5-10$ нс; О-поляризация

500
импульсов

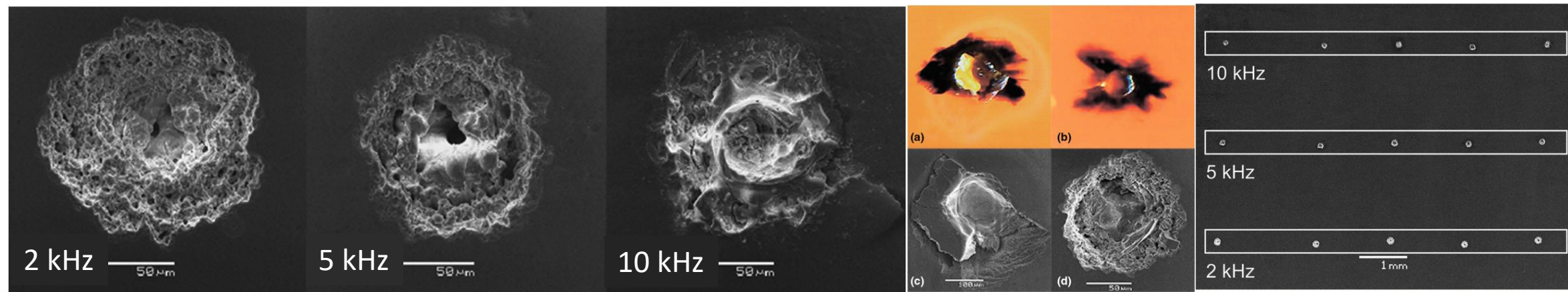
Параметры излучения:

$\lambda = 2091$ нм; $M^2 \sim 1,2$;
 $f = 2 - 10$ кГц; $2w = 200 - 360$ мкм;
 $\tau = 13 - 17$ нс; О-поляризация

500
импульсов

Параметры тестовых пластинок:

Толщина ~ 2 мм;
 Клин $\sim 30''$
 Просветляющее покрытие Al_2O_3
 на заднюю сторону @1 мкм

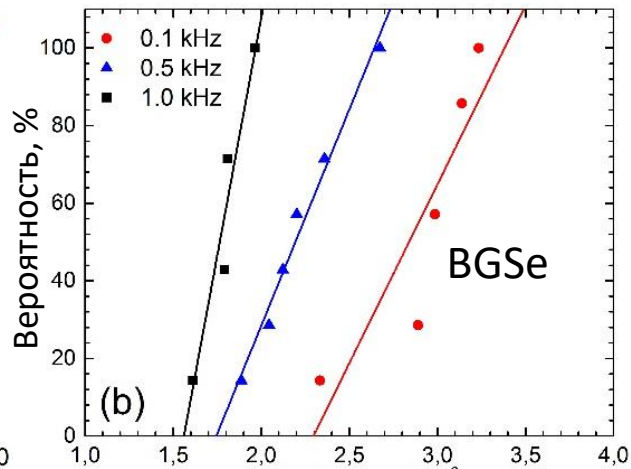
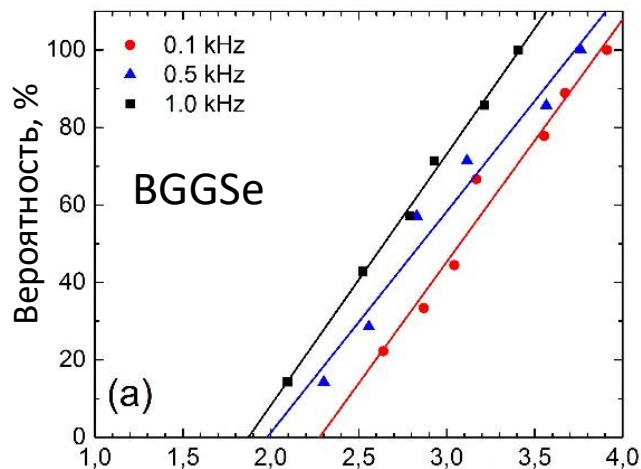


*ISO 21254-1-4:2011: Lasers and laser-related equipment - Test methods for laser-induced damage threshold - Part 1-4

*ISO 11146-1/2 BSI Standards Publication Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser-induced damage threshold Part 1-2

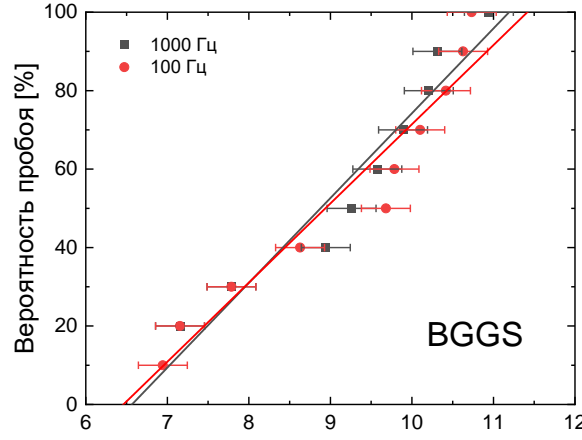
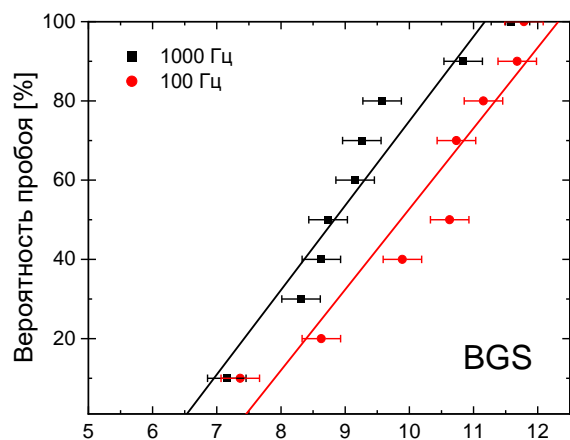
*<https://lidaris.com/laser-damage-testing>

Исследование лучевой стойкости @1,053 мкм



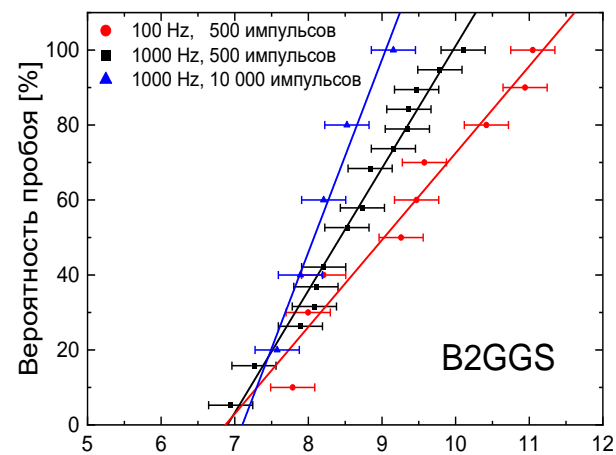
Вероятность, %
BGGSe
(a)
Пиковая пл-ть энергии, Дж/см²

Вероятность, %
BGSe
(b)
Пиковая пл-ть энергии, Дж/см²



Вероятность пробоя [%]
BGS
Пиковая плотность энергии [Дж/см²]

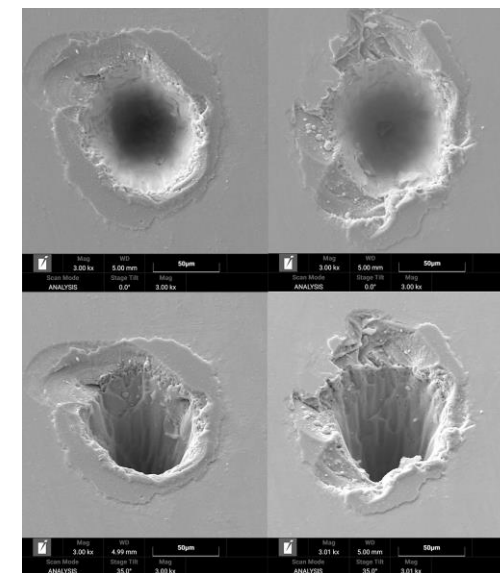
Вероятность пробоя [%]
BGGs
Пиковая плотность энергии [Дж/см²]



Вероятность пробоя [%]
B2GGS
Пиковая плотность энергии [Дж/см²]

$I_{0\%}$, Дж/см²

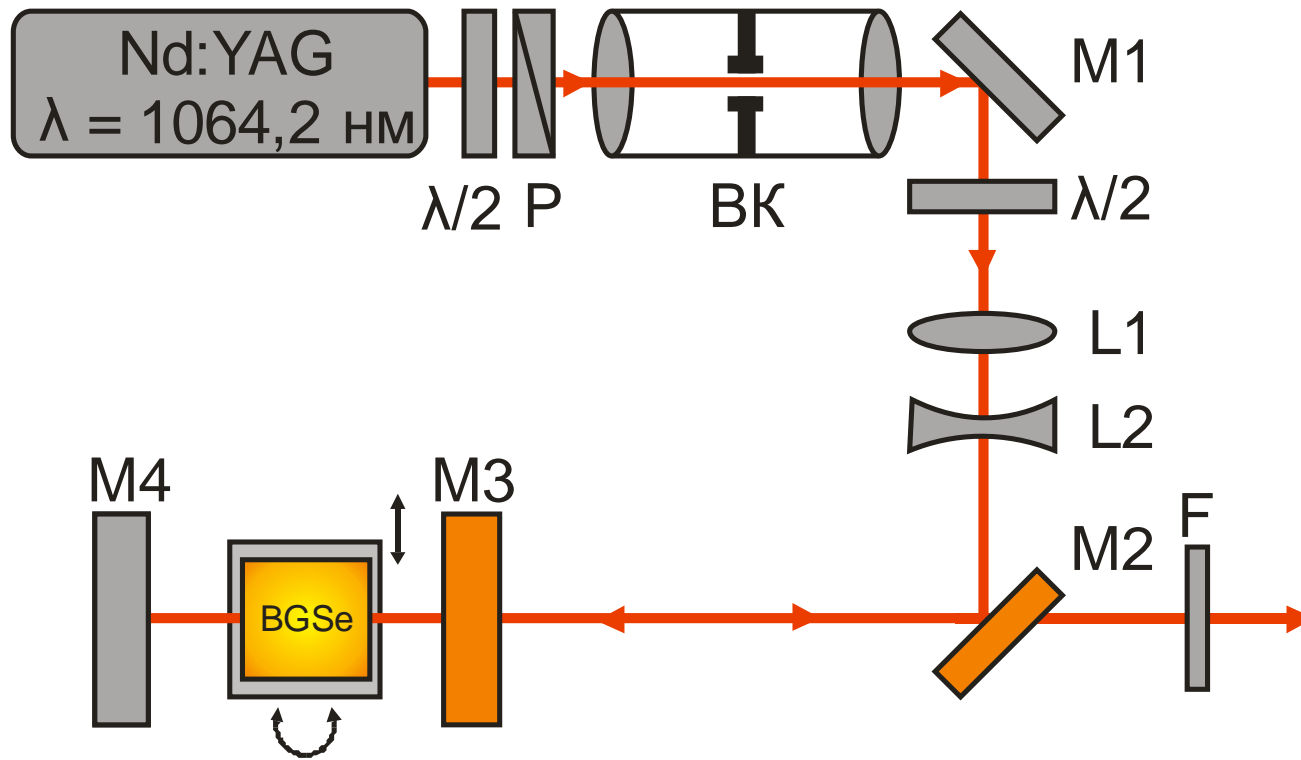
BGS	6,4-7,4
BGSe	1,5-2,3
BGGSe	1,9-2,3
BGGs	6,8-7
B2GGS	6,9-7



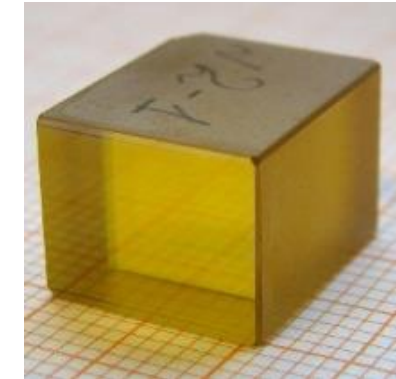
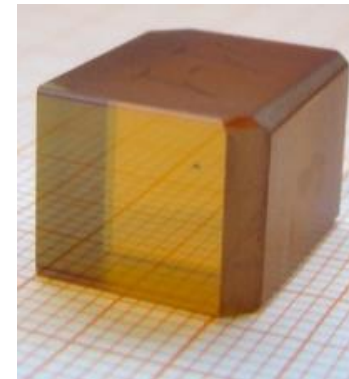
Исследование лучевой стойкости

λ		2 мкм	1 мкм
Нелинейные кристаллы	BGS	14,2 Дж/см ² (2,1 мкм, 30 нс, 1 Гц) [1]	2,4 Дж/см ² (1,064 мкм, 15 нс, 1 Гц) [4] 3,7/2,9 Дж/см ² (1,064 мкм, 14/1 нс, 0,1/0,5 кГц) [5] 7,4/6,4 Дж/см² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
	BGSe	4,8/3,3/2,1 Дж/см² (2,091 мкм, 15 нс, 2/5/10 кГц) 3,3 Дж/см ² (2,091 мкм, 27 нс, 0,5 кГц) [2] 2,1 Дж/см ² (2,091 мкм, 35 нс, 1 кГц) [3]	2,5/2,3 Дж/см² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц) 4,1/4/3,6 Дж/см ² (1,064 мкм, 16 нс, 0,1/0,15/0,2 кГц) [6] 1,4/1 Дж/см ² (1,064 мкм, 14/1 нс, 0,1/0,5 кГц) [7] 5,6 Дж/см ² (1,064 мкм, 5 нс, 1 Гц) [8]
	BGGSe	6,5/4,3/2,7 Дж/см² (2,091 мкм, 15 нс, 2/5/10 кГц)	3,7/2,7 Дж/см² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
	BGGS	нет данных	6,8/7 Дж/см² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)
	B2GGS	нет данных	6,9/7 Дж/см² (1,053 мкм, 5,1 нс, 0,1/1 кГц)

ПГС на основе кристалла BGSe



Элементы BGSe:
A $\theta = 46^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ - x - z
B $\theta = 33,5^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ - y - z



Nd:YAG лазер (Innolas):

$E_{\max} = 250$ мДж;

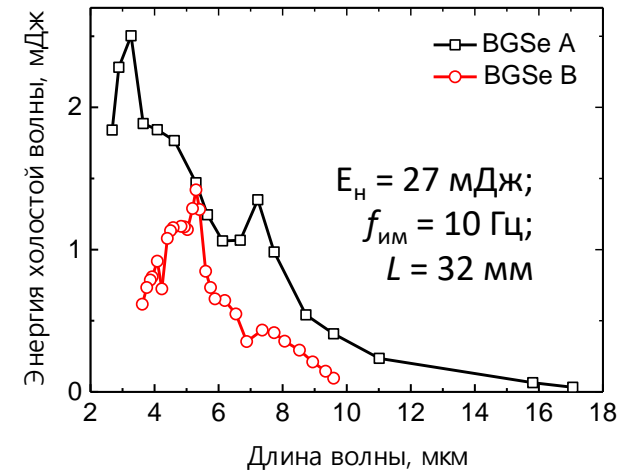
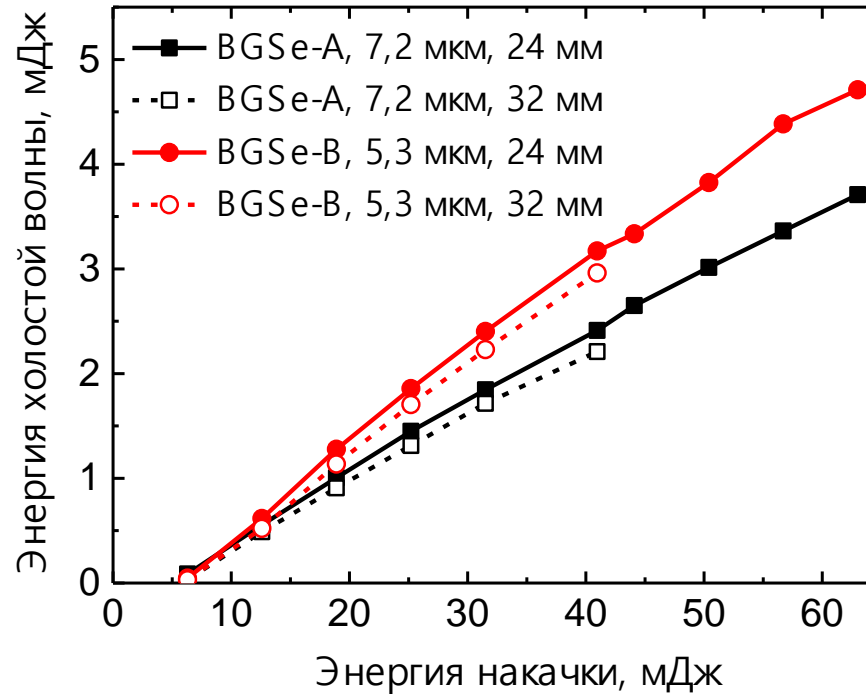
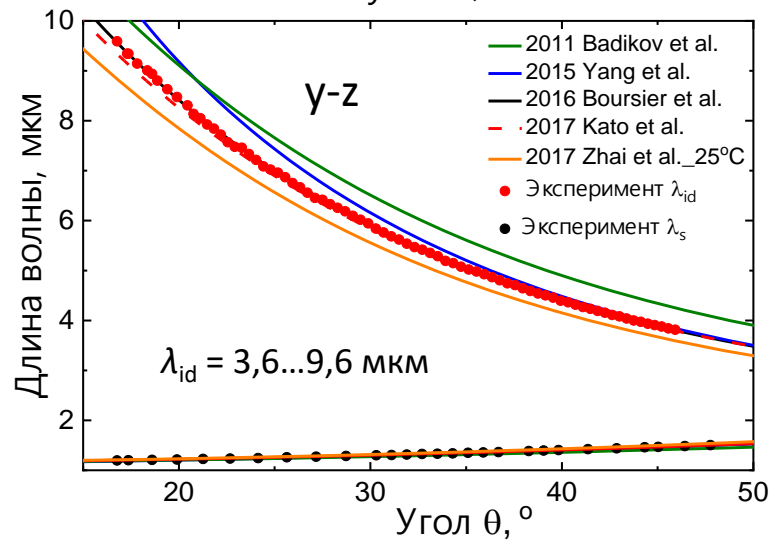
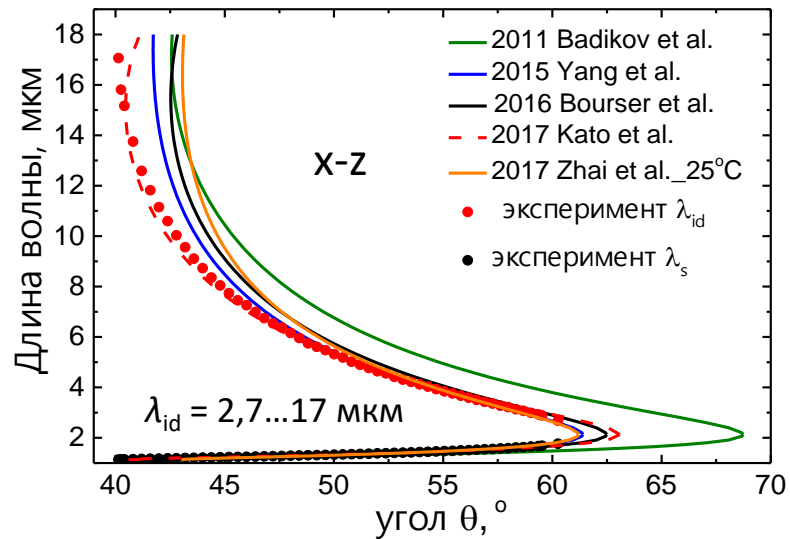
$f_p = 10 - 100$ Гц;

$\Delta\nu = 30$ ГГц (1 см^{-1});

$\tau_p = 8$ нс;

$M^2 < 2$

ПГС на основе кристалла BGSe



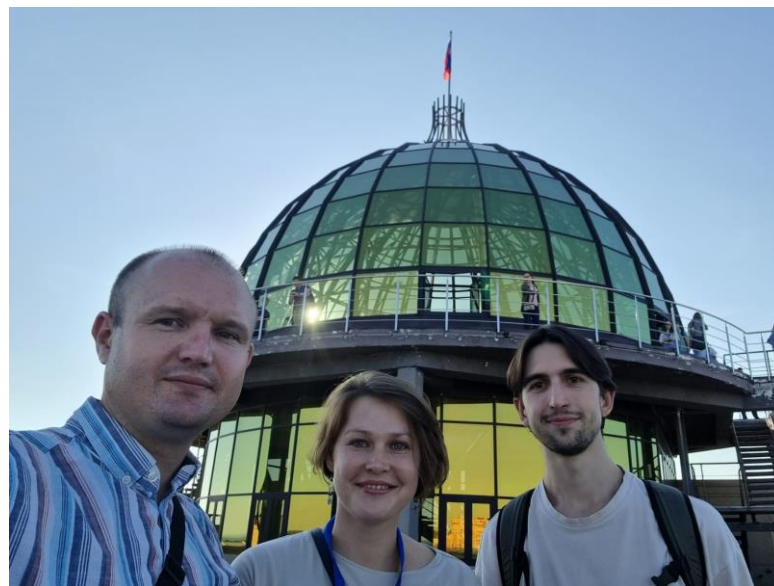
Эффективность преобразования:
5,9% (BGSe A) и 7,5% (BGSe B)

Квантовая эффективность преобразования:
40% (BGSe A) и 37% (BGSe B)

Заключение

- ❖ Экспериментально измерены коэффициенты **нелинейного преломления** кристаллов бариевых халькогенидов на длине волны 1,053 мкм и рассчитана критическая пиковая мощность и нелинейная восприимчивость 3-го порядка. Измеренные значения нелинейного поглощения и нелинейного преломления сравнивались с теоретическими значениями, полученными из двухпараболической зонной модели, основанной на соотношении Крамера-Кронинга. Полученные значения показали в среднем не более ~20% отклонения от теоретических.
- ❖ С помощью непрерывного Nd:YAG лазера было проведено измерение **теплового нелинейного показателя преломления BGGSe** кристалла. Полученные значения n_{2T} показали в среднем ~10% отклонения от расчетных, что указывает на достоверность таких оценок.
- ❖ **Нелинейное поглощение** наблюдалось только в кристалле **BGGSe**. Показано, что коэффициент двухфотонного поглощения для кристалла BGGSe линейно увеличивается с увеличением пиковой интенсивности. Используя линейную аппроксимацию, были определены коэффициенты двухфотонного поглощения для о-волны и е-волны при частоте повторения импульсов 0,1 кГц и пиковой интенсивности 50 МВт/см², они составили **0,03 см/ГВт** и **0,85 см/ГВт**, соответственно.
- ❖ Порог пробоя нелинейных кристаллов **сульфидов бария (6,5–7,5 Дж/см²)** превышает порог пробоя их **селеносодержащих** аналогов (**2,4–3,5 Дж/см²**) более чем в 3 раза при схожих параметрах излучения. Данные кристаллы имеют большой потенциал для приложений, требующих высокой энергии в импульсах. Селеносодержащие кристаллы демонстрируют большую нелинейность и более широкий диапазон прозрачности, что делает их привлекательными для применений в спектроскопических задачах.

Результаты использования кристаллов в параметрических преобразователей частоты свидетельствуют о том, что кристаллы халькогенида бария могут стать перспективными нелинейными кристаллами для генерации среднего ИК-диапазона с исключительно широким спектральным диапазоном перестройки.



Спасибо за внимание

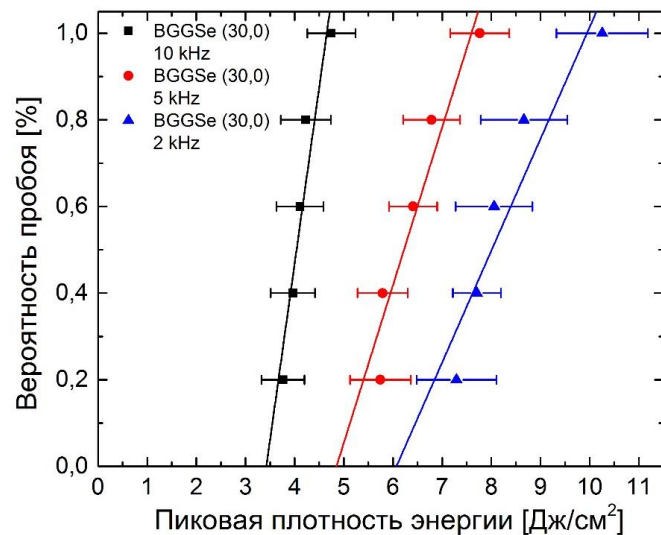
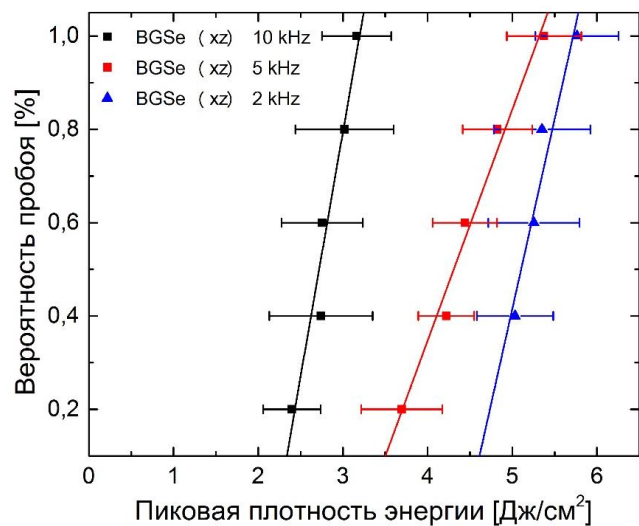
к.ф.-м.н. Надежда Костюкова
Заведующая лаб. квантовых
оптических технологий ИЛФ СО РАН,
с.н.с. ЛКОТ НГУ
n.duhovnikova@gmail.com

Выражаю глубокую благодарность всем
соавторам представленных работ,
в особенности Е.Ю. Ерушину, Д.В. Бадикову

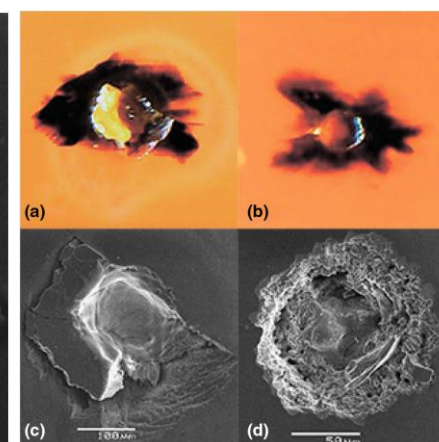
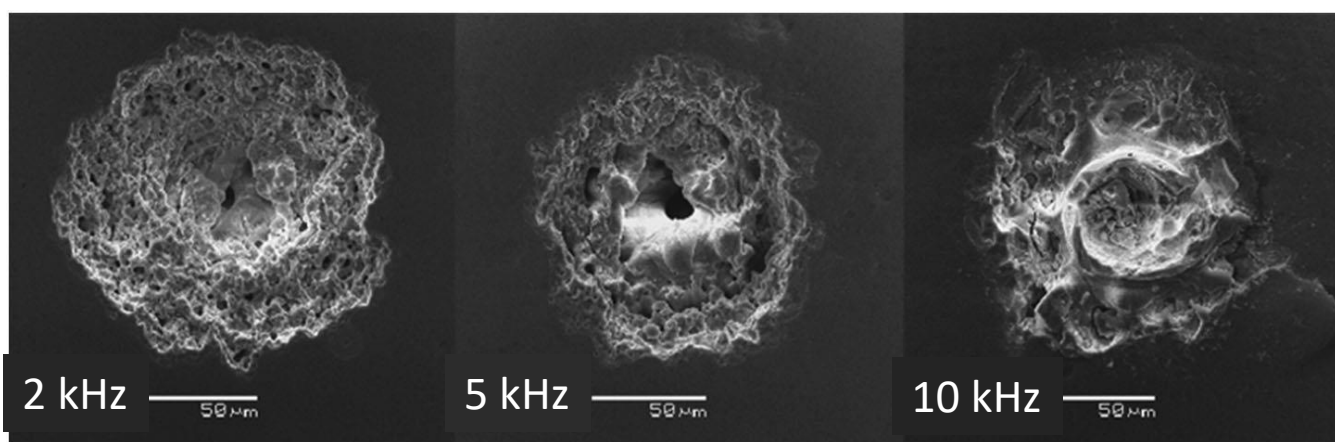
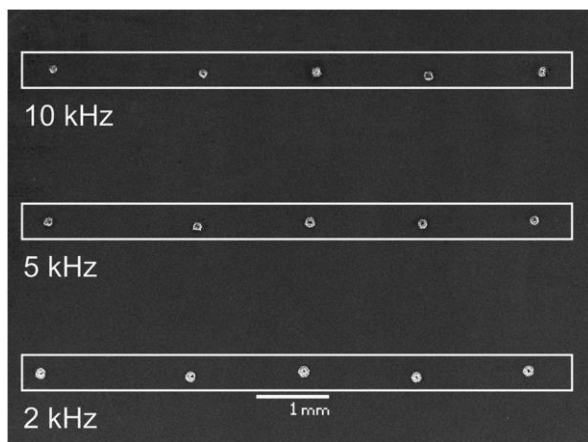
Данные об авторе работы

Фамилия Имя Отчество	Костюкова Надежда Юрьевна
Ученая степень	к.ф.-м.н.
Год присуждения ученой степени	2018
Полное название организации – основного места работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Должность по основному месту работы	Заведующая Лаборатории квантовых оптических технологий (Лаб. 2.4)
Scopus ID	56681970000
Кол-во публикаций (Scopus)	74
h-индекс	13
Награды	<ul style="list-style-type: none">• 2019 г. - медаль молодым ученым имени проф. В.С. Летохова за новаторские работы по лазерной физике, спектроскопии и их приложениям.• 2022 г. - премия мэрии города Новосибирска в сфере науки и инноваций в номинации "– «Лучший молодой исследователь в организациях науки».• 2023 г. - именная премия Правительства Новосибирской области за выдающиеся научные достижения в номинации – «Лучший молодой исследователь».• 2023 г. - почетная грамота президиума СО РАН за цикл работ, представленных на премию имени В.П. Чеботаева – за работы в области квантовой электроники и лазерной физики.

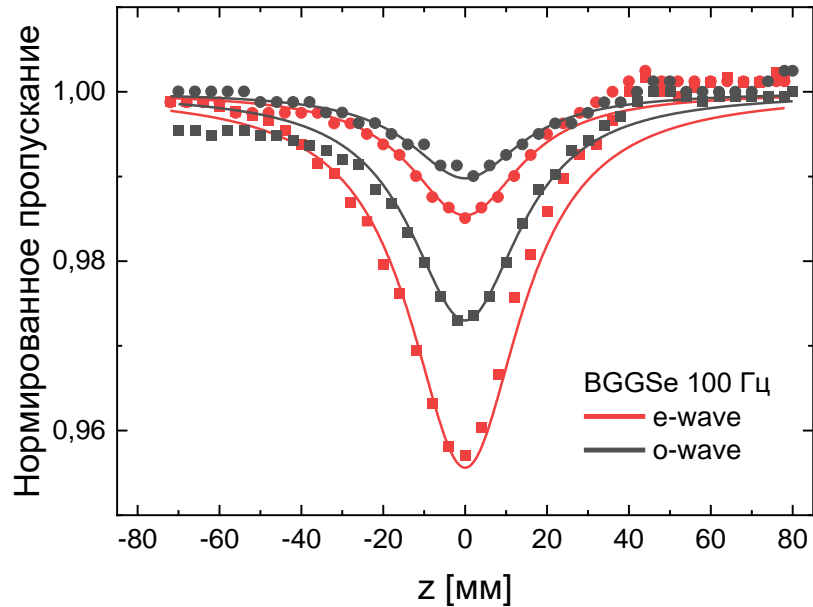
Исследование лучевой стойкости @2,09 мкм



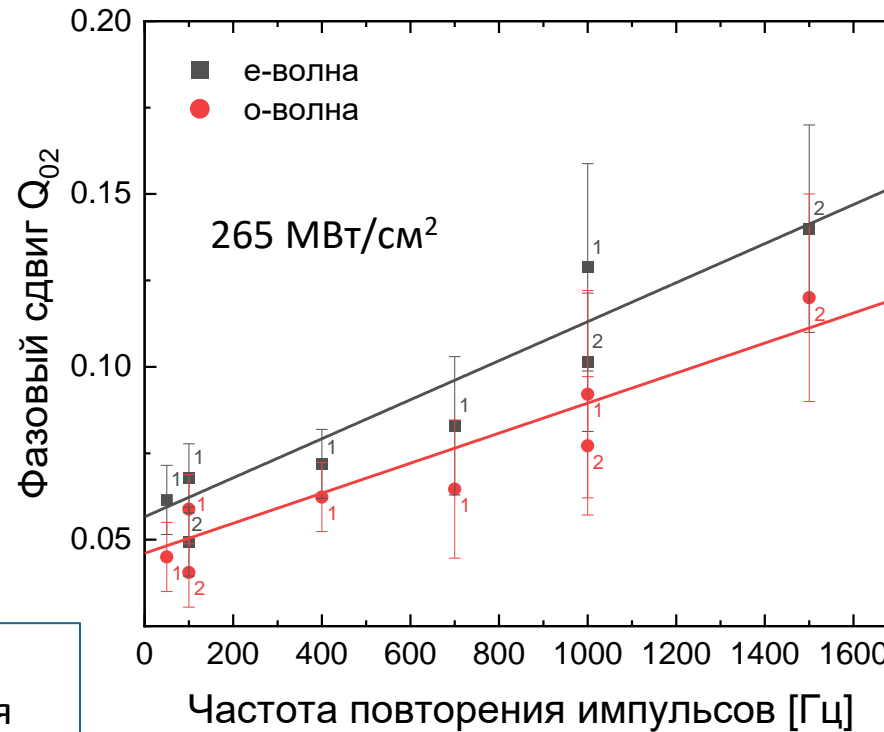
При увеличении частоты до 10 кГц порог пробоя уменьшался почти в 2 раза



Нелинейное поглощение



Нормированный коэффициент пропускания кристалла BGGSe для необыкновенных (красная кривая) и обыкновенных (черная кривая) волн при частоте повторения импульсов 100 Гц и пиковой интенсивности 122 МВт/см² (круги) и 265 МВт/см² (квадраты).



о-волна,
см/ГВт

0,03

е-волна,
см/ГВт

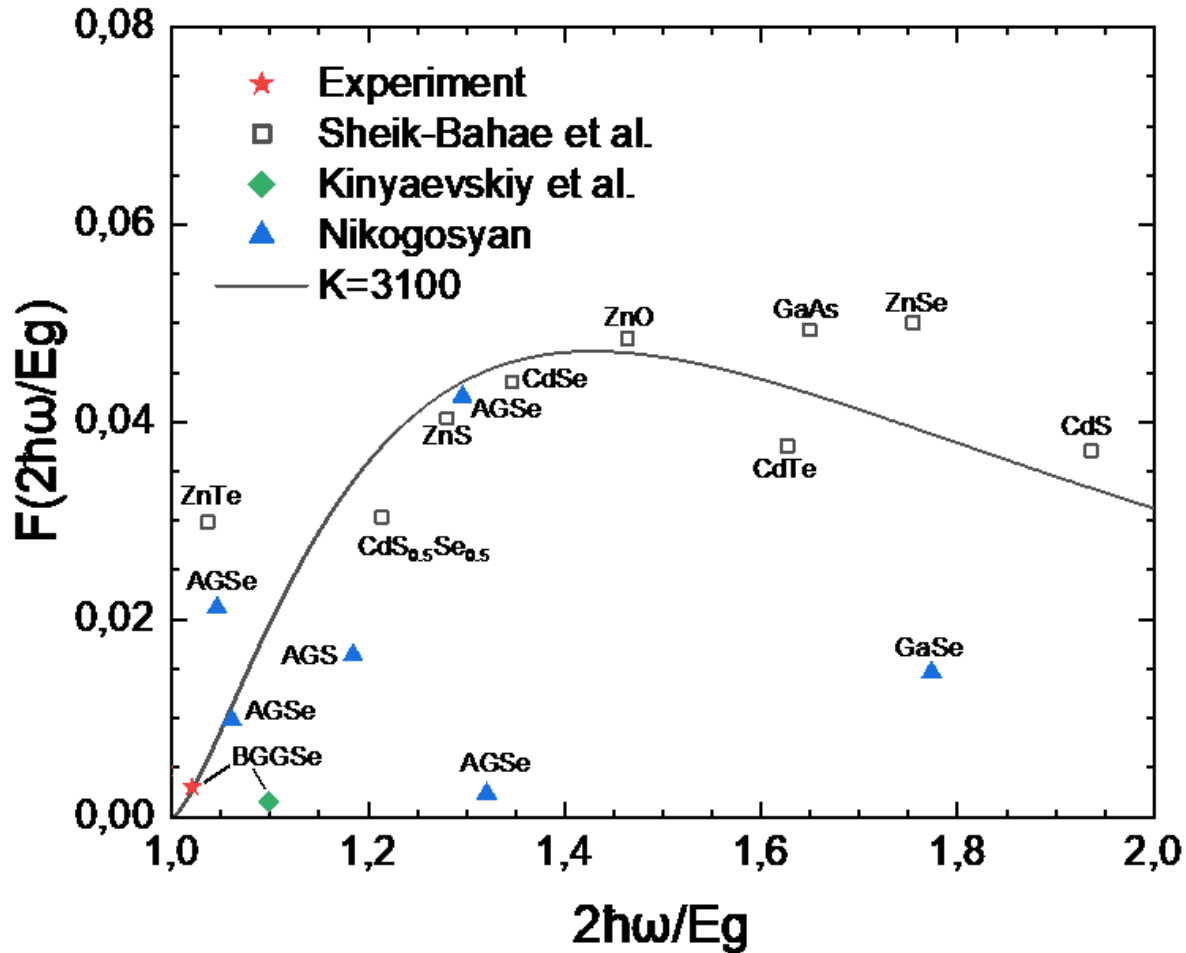
0,85

нормированное пропускание

$$T_N(z) = 1 - \frac{Q_{02}}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2} \right)}$$

фазовый сдвиг

$$Q_{02} = \frac{\alpha_2 I_0 (1 - e^{-\alpha_0 L})}{\alpha_0}$$



В 1984 Веррет обобщил на N-фотонное поглощение теорию правил масштабирования многофотонного межзонного поглощения, предполагающая изотропную эффективную массу и только две параболические зоны.

$$\alpha_N = \left(\frac{e^2}{\hbar c} \right)^N \hbar^{N-1} \frac{P^{2N-3}}{n^N E_g^{4N-5}} F_N \left(\frac{N\hbar\omega}{E_g} \right)$$

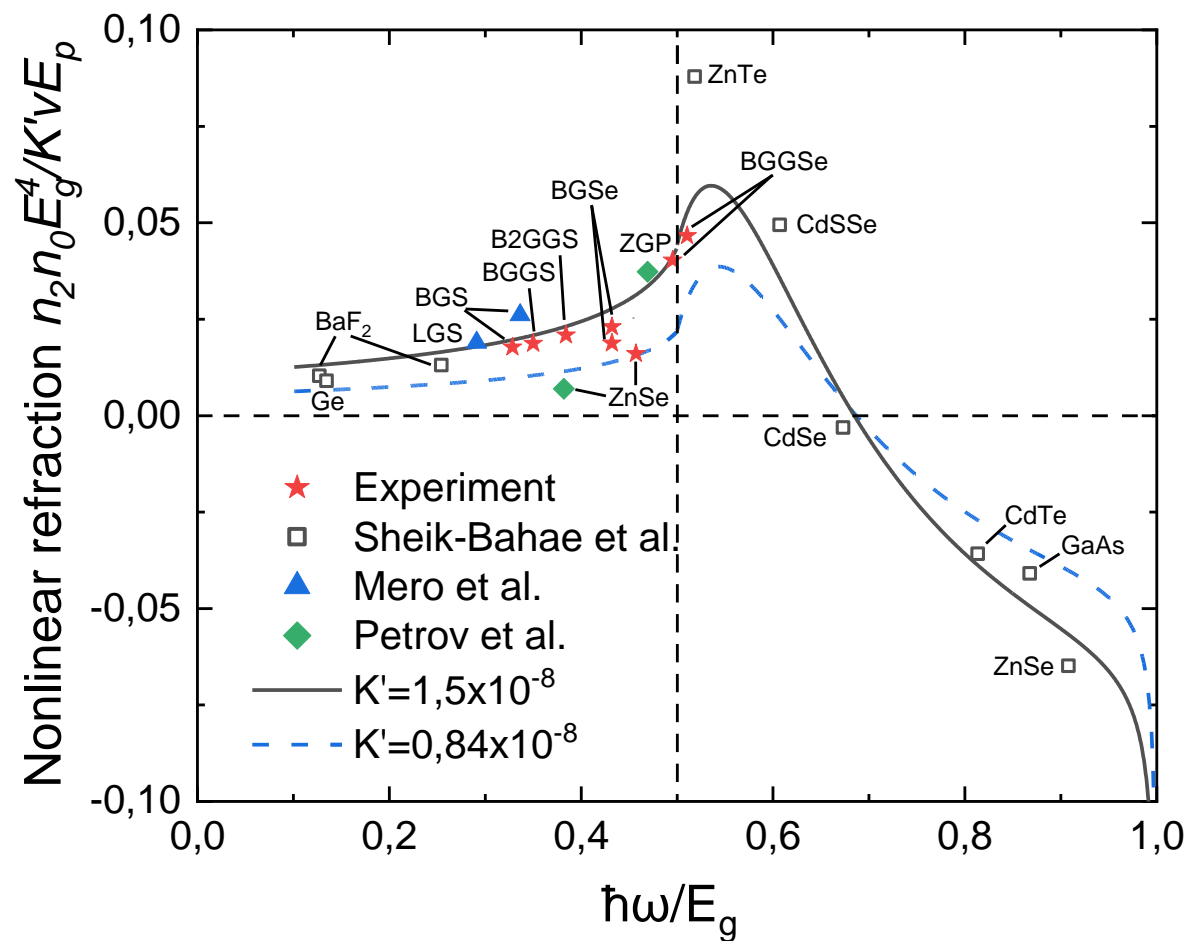
Согласно данной теории для поглощения N-фотонов коэффициент α_N определяется таким образом, что для интенсивности излучения I скорость поглощения энергии единицей объема материала равна $\alpha_N I^N$. В терминах скорости межзонного перехода в единице объема, связанной с одновременным поглощением N фотонов частоты ω коэффициент поглощения, выражается равенством:

$$\alpha_N = W_N N \hbar \omega I^{-N}$$

где W_N – скорость переходов фотонов из зоны проводимости в валентную зону 2ФП новых материалов можно предсказать по формуле:

$$\alpha_2 = K_2 \frac{\sqrt{E_p}}{n_0^2 E_g^3} \left[\frac{((2\hbar\omega/E_g) - 1)^{3/2}}{(2\hbar\omega/E_g)^5} \right] \quad K_2 = \frac{2^9 \pi}{5} \frac{e^4}{\sqrt{m_0 c^2}}$$

где E_p – энергия Кейна является мерой силы связи между валентной зоной и зоной проводимости и для многих полупроводников составляет около 21 эВ, а K_2 представляет собой константу, не зависящую от материала.



Дисперсия нелинейного показателя преломления n_2 .
 Данные для n_2 масштабируются как $n_2 n_0 E_g^4 / K' \sqrt{E_p}$.

Сплошная линия — функция $G(h\nu/E_g)$ двухзонной модели полупроводника.

- ★ Красными кружками на графике показаны коэффициенты нелинейного показателя преломления, полученные в данной работе.
- ▲ Mero, M.; et al. Progress in ultrafast, mid-infrared optical parametric chirped pulse amplifiers pumped at 1 μm . In Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XIX;—SPIE: Cergy-Pontoise, France, 2020; Volume 11264, p. 112640F. <https://doi.org/10.1117/12.2545961>
- Sheik-Bahae M. et al. Dispersion of bound electron nonlinear refraction in solids // IEEE J. Quantum. Electron. 1991. Vol. 27, № 6. P. 1296–1309
- ◆ F. Rotermund V.P.F.N. Characterization of ZnGeP2 for Parametric Generation with Near-Infrared Femtosecond Pumping // Fiber and Integrated Optics. 2001. Vol. 20, № 2. P. 139–150.