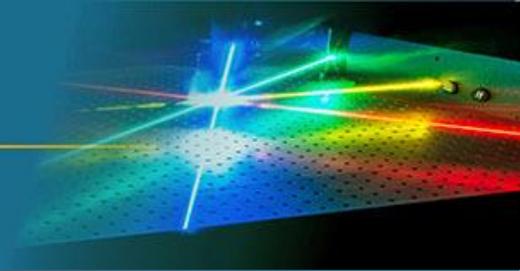




# ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СО РАН

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



Конкурс молодых ученых – 2025 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

**Костюкова Надежда Юрьевна**

к.ф.-м.н.,

Зав. лаборатории квантовых оптических технологий (ЛКОТ)

Институт лазерной физики СО РАН

# Цикл научных работ

2023 – 2025 гг.

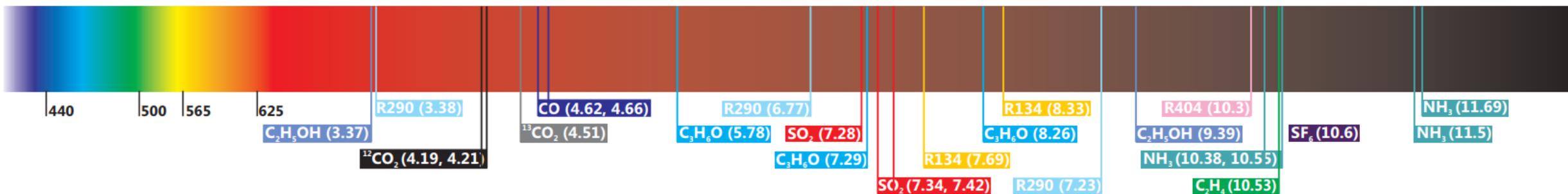
1. **Kostyukova N.**, Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. Barium Chalcogenide Crystals: A Review // Photonics. – 2024. – Vol. 11, Issue 3. – P.281. <https://doi.org/10.3390/photonics11030281>
2. Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. and **Kostyukova N.** Nonlinear absorption and refraction study of barium chalcogenide crystals // Optical Materials. – 2024. – Vol. 157, part 2. – P. 116275. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116275>
3. Erushin E., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Badikov D. and **Kostyukova N.** Measurement of nonlinear refraction and absorption coefficient in BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub> crystal // Optical Materials. – 2024. – Vol. 154. – P. 115745. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115745>
4. Erushin E., **Kostyukova N.**, Boyko A., Loginova A., Safaraliev G., Shevyrdyaeva G., Badikov D. Ba<sub>2</sub>Ga<sub>8</sub>GeS<sub>16</sub>: 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>.
5. Erushin E., Badikov D., Kostyukov A., Boyko A., Shevyrdyaeva G., Safaraliev G. and **Kostyukova N.** Laser-induced damage threshold of sulfur-containing crystals of barium chalcogenides // Appl. Phys. B. – 2025. – Vol. 131, Issue 1. – P. 11. <https://doi.org/10.1007/s00340-024-08374-y>
6. **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>
7. 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>
8. **Kostyukova N.**, Erushin E., Boyko A., Kostyukov A., Kiryakova A., Badikov D. Nonlinear absorption and refraction study of quaternary barium chalcogenide BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub> 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 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 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 2023 – 2025 гг. - 13 публикаций**

**Всего по теме исследования в период 2015 – 2025 гг. - 36 публикаций**

# Актуальность

## Линии поглощения некоторых распространенных летучих соединений



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

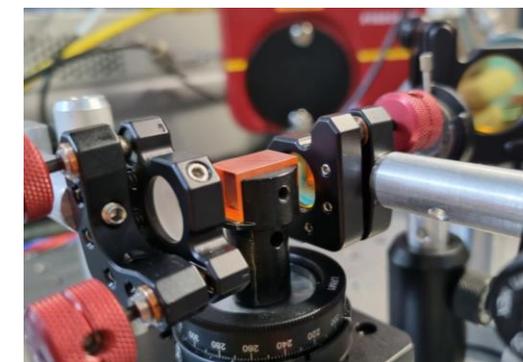
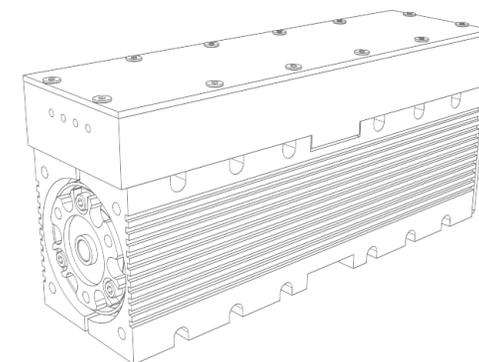
- ❖ в этой части спектра находятся основные окна прозрачности атмосферы;
- ❖ широко представлены характеристичные линии поглощения колебательно-вращательных переходов различных газов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.);
- ❖ области поглощения многих соединений биологического происхождения;
- ❖ области прозрачности оптических 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<br>+ первый обертоном: 2.5 – 4.2 мкм   |
| ❖ Газовые CO <sub>2</sub> лазеры  | 9.2 – 10.6 мкм<br>+ 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                           |

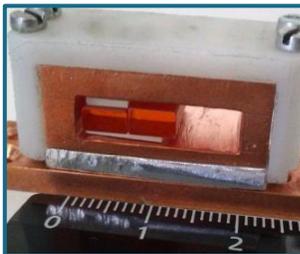


# Нелинейные кристаллы среднего ИК диапазона

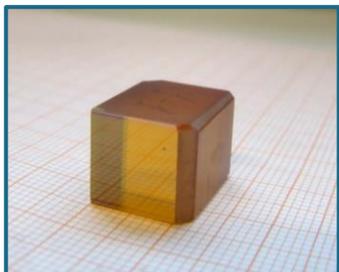
LiBC<sub>2</sub> кристаллы



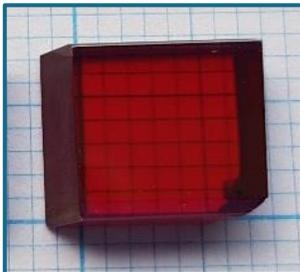
HgGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>



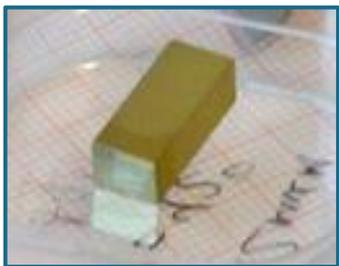
BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>



BaGa<sub>2</sub>GeSe<sub>6</sub>



AgGaS<sub>2</sub>



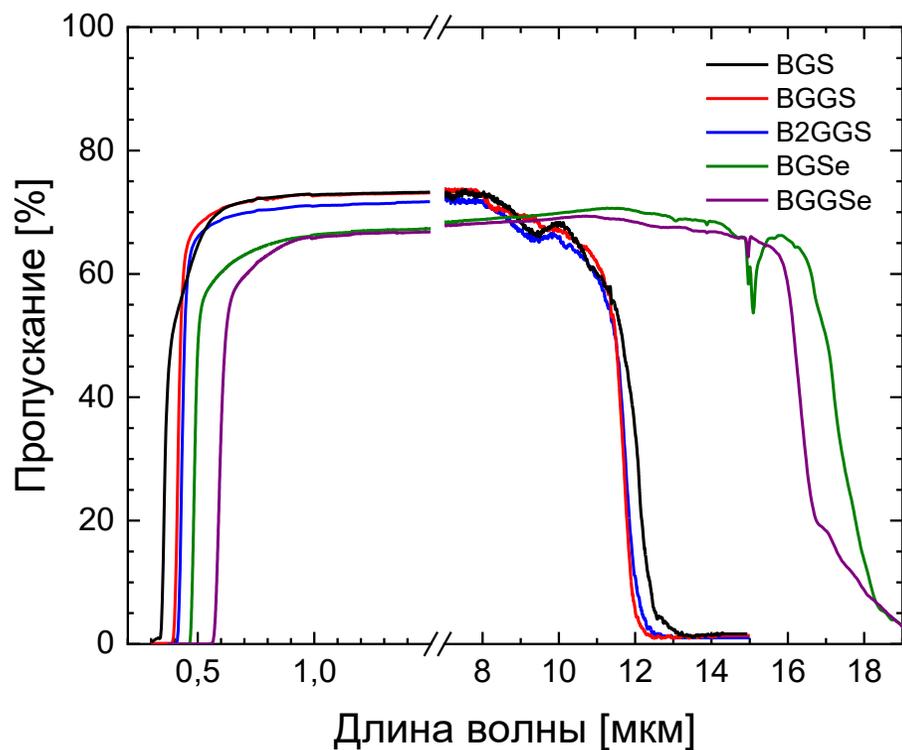
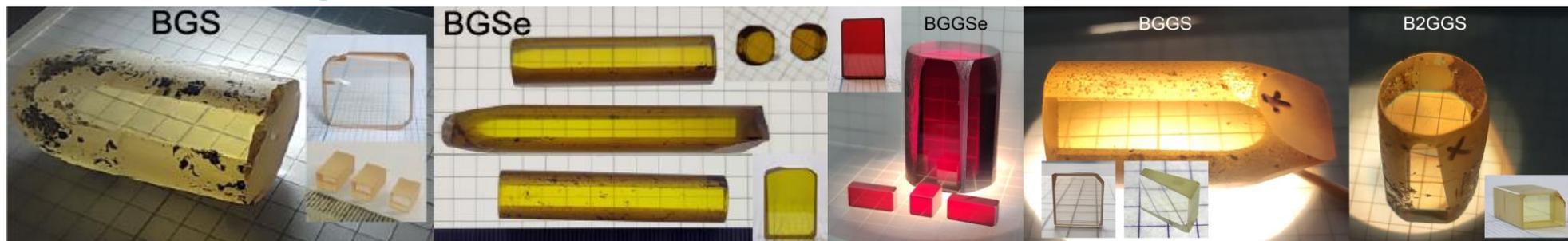
ZnGeP<sub>2</sub>



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.

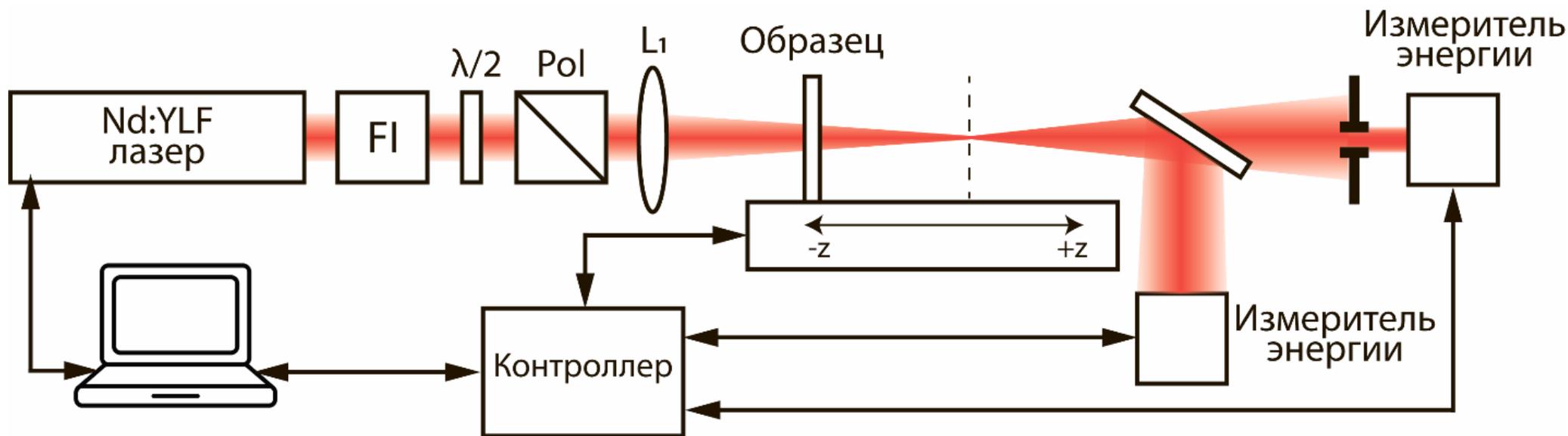
# Кристаллы бариевые халькогениды



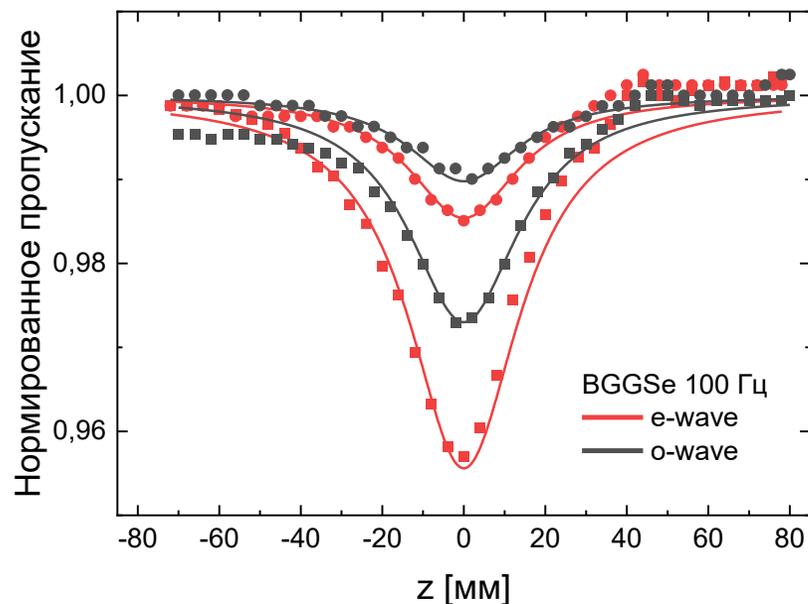
| Кристалл  | $d_{эфф}, \text{пм/В}$ | $E_g, \text{эВ}$ |
|---|------------------------|------------------|
| BaGa <sub>4</sub> S <sub>7</sub> (BGS)                    | 5,3 (ee-o, xz)         | 3,59             |
| BaGa <sub>4</sub> Se <sub>7</sub> (BGSe)                  | 14,2 (ee-o, xz)        | 2,73             |
| BaGa <sub>2</sub> GeSe <sub>6</sub> (BGGSe)               | 39,6 (oo-e)            | 2,31<br>2,38     |
| BaGa <sub>2</sub> GeS <sub>6</sub> (BGGs)                 | 17,3 (oe-o)            | 3,37             |
| Ba <sub>2</sub> Ga <sub>8</sub> GeS <sub>16</sub> (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!



# Нелинейное поглощение

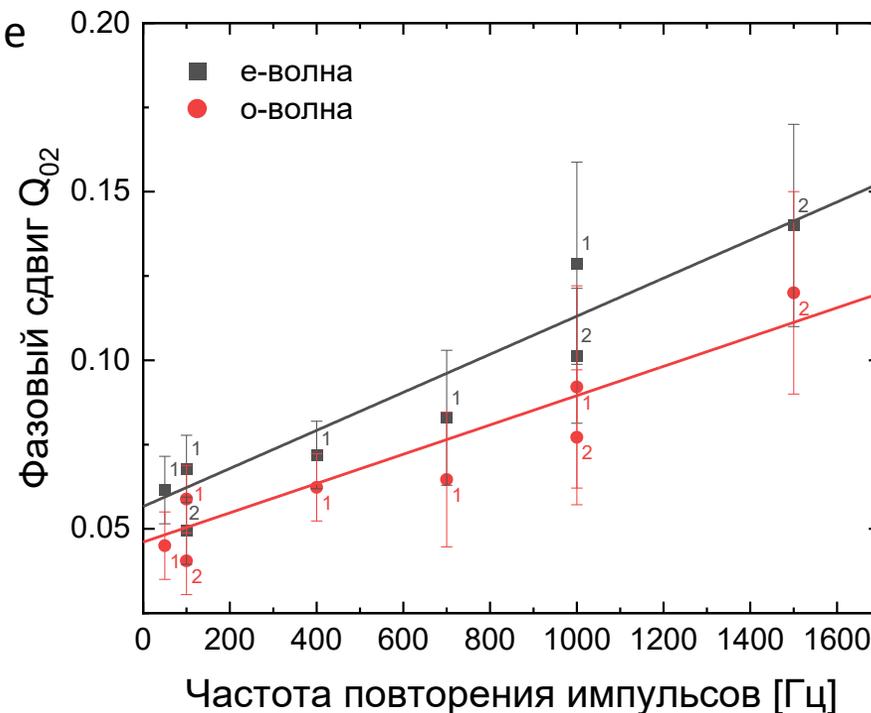


нормированное пропускание

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

фазовый сдвиг

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

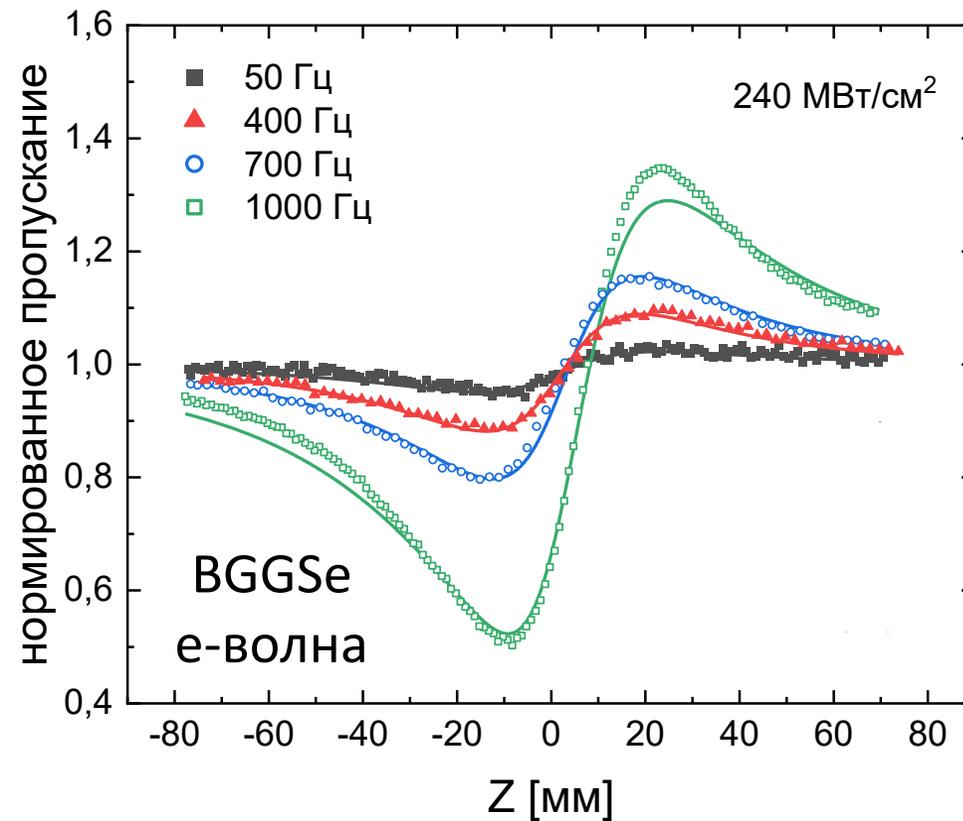
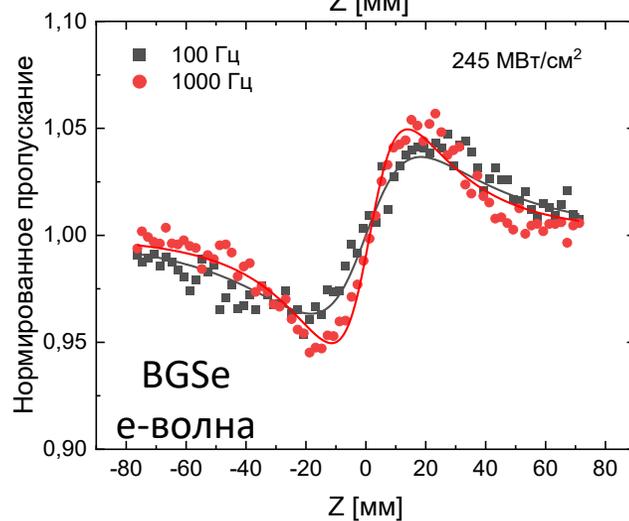
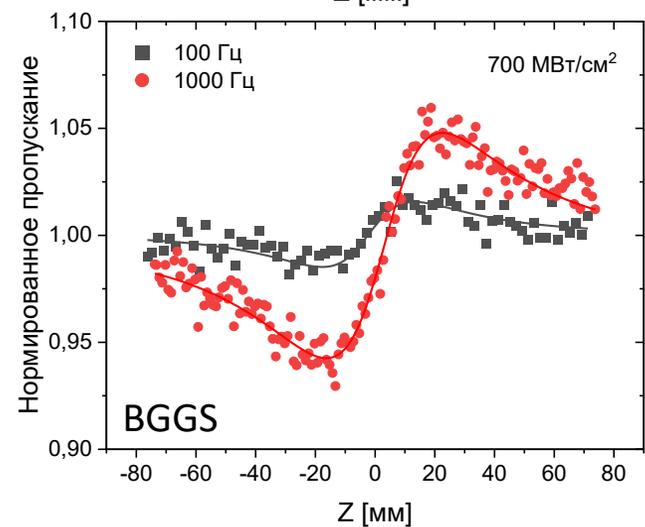
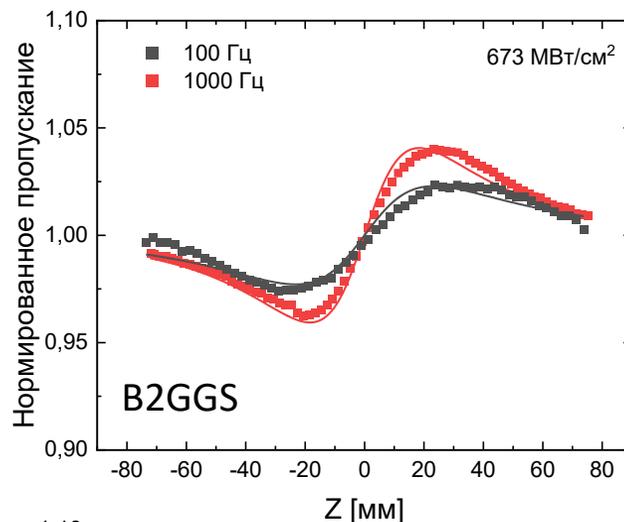
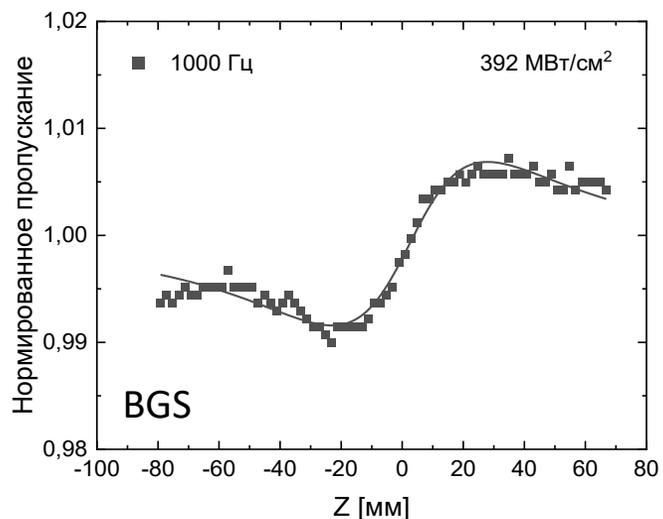


Нормированный коэффициент пропускания кристалла BGGSe для необыкновенных (красная кривая) и обыкновенных (черная кривая) волн при пиковой интенсивности 122 МВт/см<sup>2</sup> (круги) и 265 МВт/см<sup>2</sup> (квадраты) и частоте повторения импульсов 100 Гц.

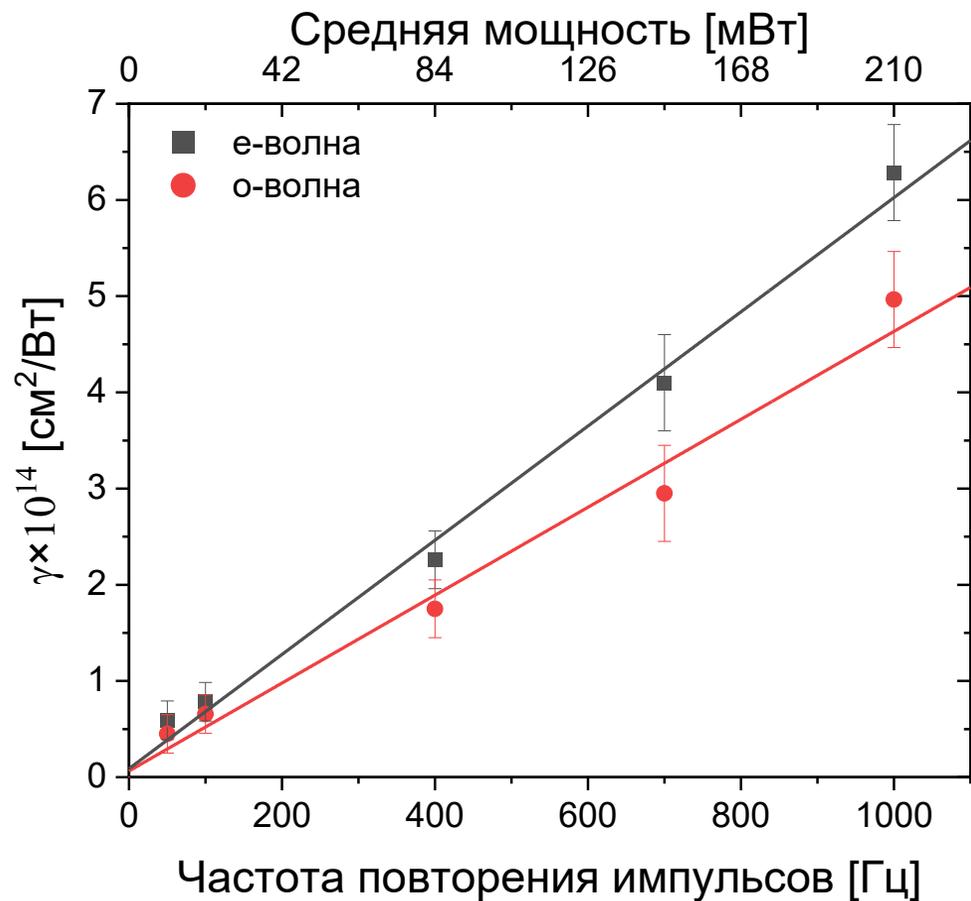
| о-волна, см/ГВт | е-волна, см/ГВт | @1053 нм, 50 МВт/см <sup>2</sup> ,<br>100 Гц, 5,1 нс |
|-----------------|-----------------|--|
| 0,03            | 0,85            |  |

\* $\beta = 0.25$  см/ГВт @950 нм, 0,33 ТВт /см<sup>2</sup>, 10 Гц, 100 фс

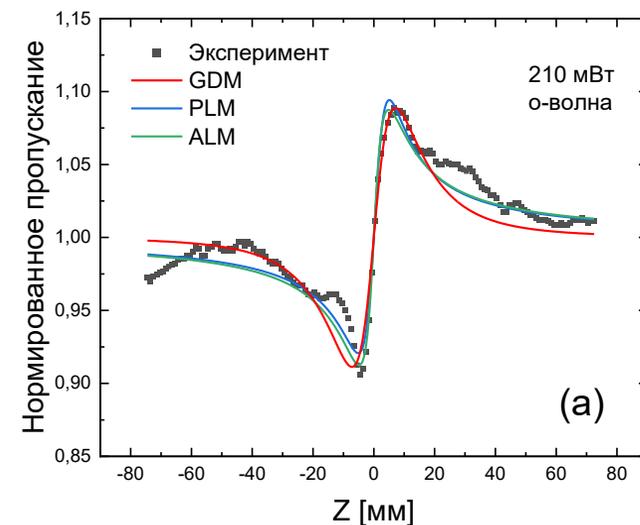
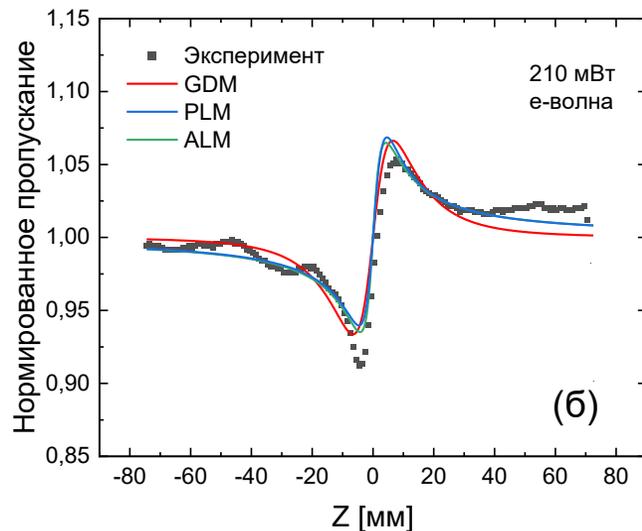
# Нелинейное преломление



# Нелинейное преломление



## Воздействие непрерывным излучением



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

| о-волна,<br>$\text{см}^2/\text{Вт} \times 10^{-9}$ | е-волна,<br>$\text{см}^2/\text{Вт} \times 10^{-9}$ |
|--|--|
| 2,8  | 2,1  |

экспериментальные

| о-волна,<br>$\text{см}^2/\text{Вт} \times 10^{-9}$ | е-волна,<br>$\text{см}^2/\text{Вт} \times 10^{-9}$ |
|--|--|
| 2,5  | 2,2  |

ожидаемые

# Нелинейное преломление

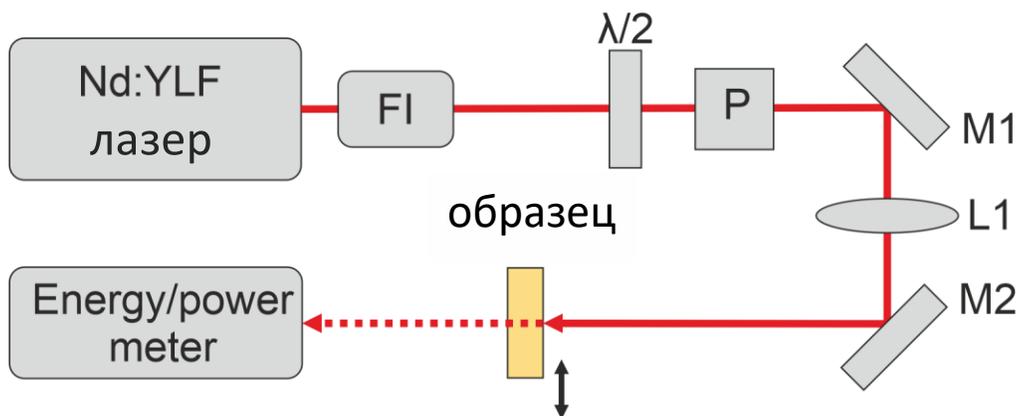
| Кристалл | Длина, мм | Волна | $\gamma \times 10^{-14}$<br>см <sup>2</sup> /Вт | $n_2$ (эксп.) $\times 10^{-11}$<br>(esu) | $n_2$ (теор.) $\times 10^{-11}$<br>(esu) | $\chi_R^{(3)} \times 10^{-12}$<br>(esu) | $P_{кр}$<br>кВт |
|----------|-----------|-------|---|--|--|---|-----------------|
| BGGSe    | 2.04      | O     | 5,5   | 3,4                                      | 2,9                                      | 9                                       | 11.6            |
|          |           | E     | 6,8   | 4,3                                      | 4,1                                      | 11.8                                    | 9.1             |
| BGSe     | 2.31      | O     | 1,6   | 0,96                                     | 1,1                                      | 2.5                                     | 40.7            |
|          |           | E     | 1,8   | 1,1                                      | 1,1                                      | 2.9                                     | 35.8            |
| B2GGS    | 2.6       | —     | 1,14  | 0,6                                      | 0,8                                      | 1.9                                     | 55.9            |
| BGGS     | 2.05      | —     | 0,78  | 0,43                                     | 0,4                                      | 1.1                                     | 89.7            |
| BGS      | 2.7       | —     | 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,  $n_2=0,58 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/Вт ( $0,32 \times 10^{-11}$  esu), что близко к теоретически предсказанному значению  $0,29 \times 10^{-11}$  esu.

Измеренные значения немного ниже данных, представленных Mero и др. ( $0,72 - 1,0 \times 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/Вт.) Это расхождение может быть результатом значительных различий в длительности импульсов (5,1 нс против 180 фс) используемых лазеров, что приводит к перераспределению вкладов различных механизмов, влияющих на нелинейные оптические эффекты.

# Исследование лучевой стойкости

Методика R-on-1



**Параметры излучения:**

$\lambda = 1053 \text{ нм};$

$\tau = 5-10 \text{ нс};$

$2w = 180 \text{ мкм};$

$f = 0,1 - 2 \text{ кГц};$

$M^2 \sim 1,2;$

О-поляризация

**Параметры излучения:**

$\lambda = 2091 \text{ нм};$

$\tau = 13 - 17 \text{ нс};$

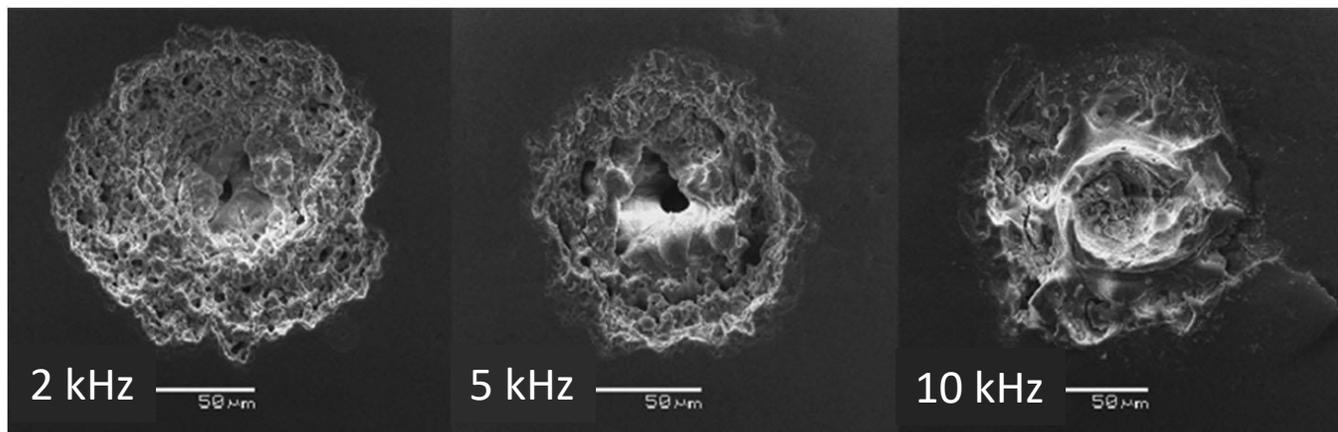
$2w = 200 - 360 \text{ мкм};$

$f = 2 - 10 \text{ кГц};$

$M^2 \sim 1,2;$

О-поляризация

FI – оптический изолятор, P – поляризатор,  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка,  $L_1$  – фокусирующая линза, нелинейный кристалл.

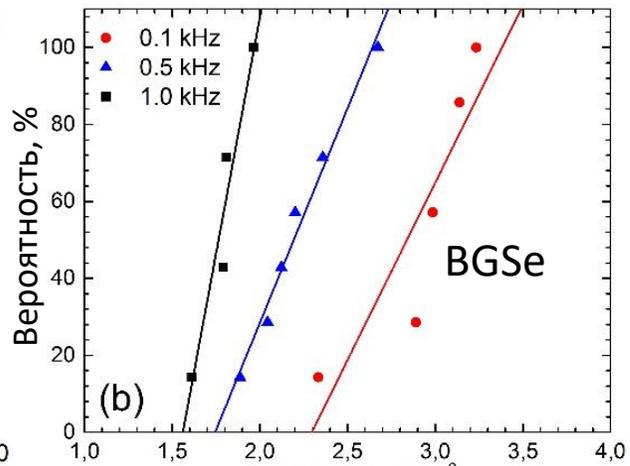
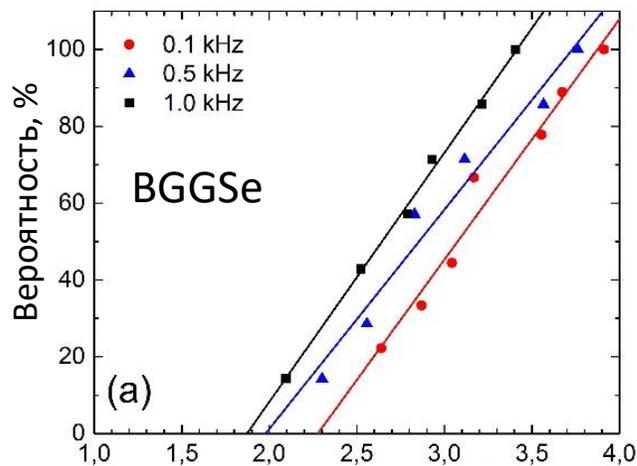


\*ISO 21254-1-4:2011: Lasers and laser-related equipment - Test methods for laser-induced damage threshold - Part 1-4

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

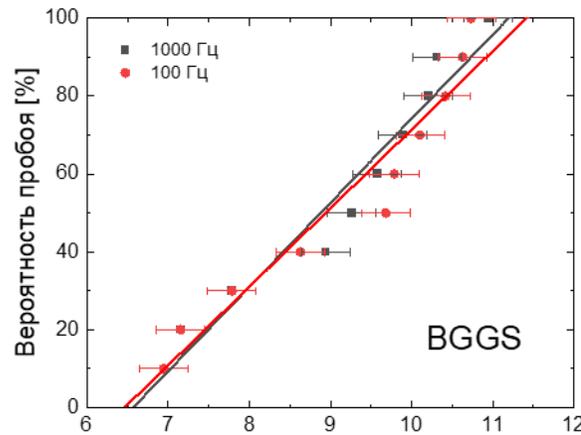
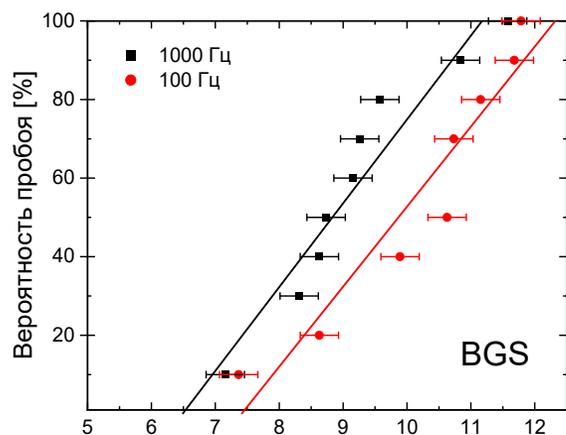
\*<https://lidaris.com/laser-damage-testing>

# Исследование лучевой стойкости @1,053 мкм



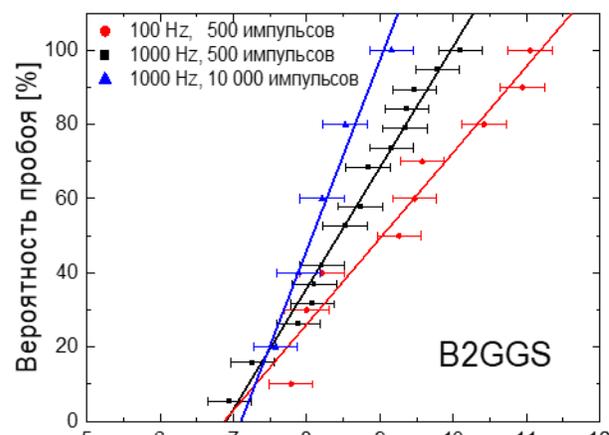
Пиковая пл-ть энергии, Дж/см<sup>2</sup>

Пиковая пл-ть энергии, Дж/см<sup>2</sup>



Пиковая плотность энергии [Дж/см<sup>2</sup>]

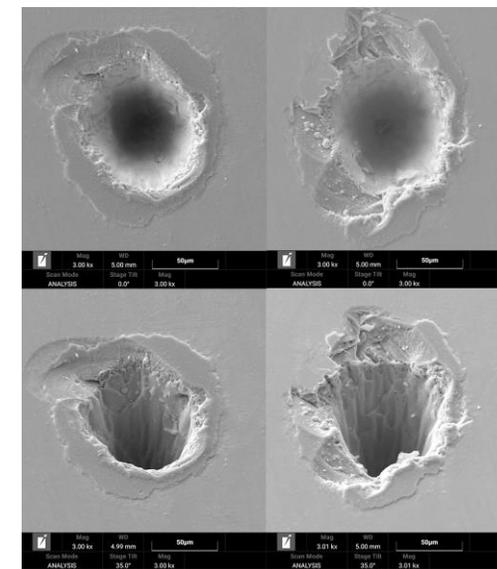
Пиковая плотность энергии [Дж/см<sup>2</sup>]



Пиковая плотность энергии [Дж/см<sup>2</sup>]

$I_{0\%}$ , Дж/см<sup>2</sup>

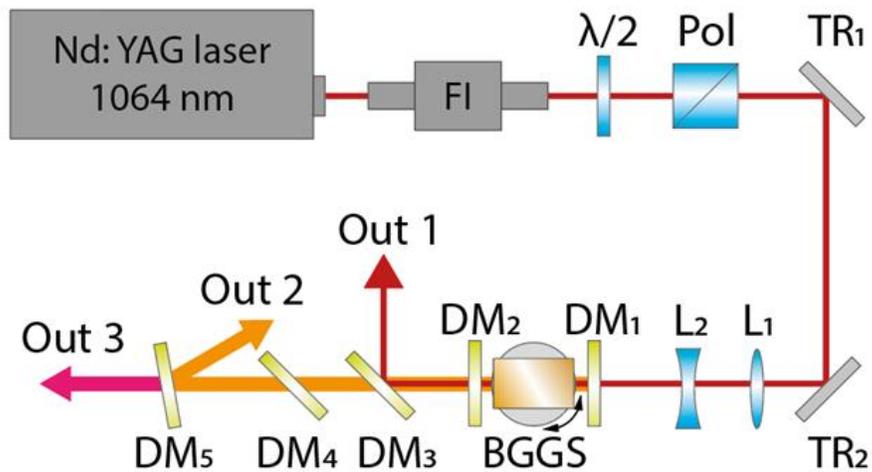
|       |         |
|-------|---------|
| BGS   | 6,5-7,4 |
| BGSe  | 1,5-2,3 |
| BGGSe | 1,9-2,3 |
| BGGs  | 6,6-6,5 |
| B2GGS | 6,8-7,0 |



# Исследование лучевой стойкости

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

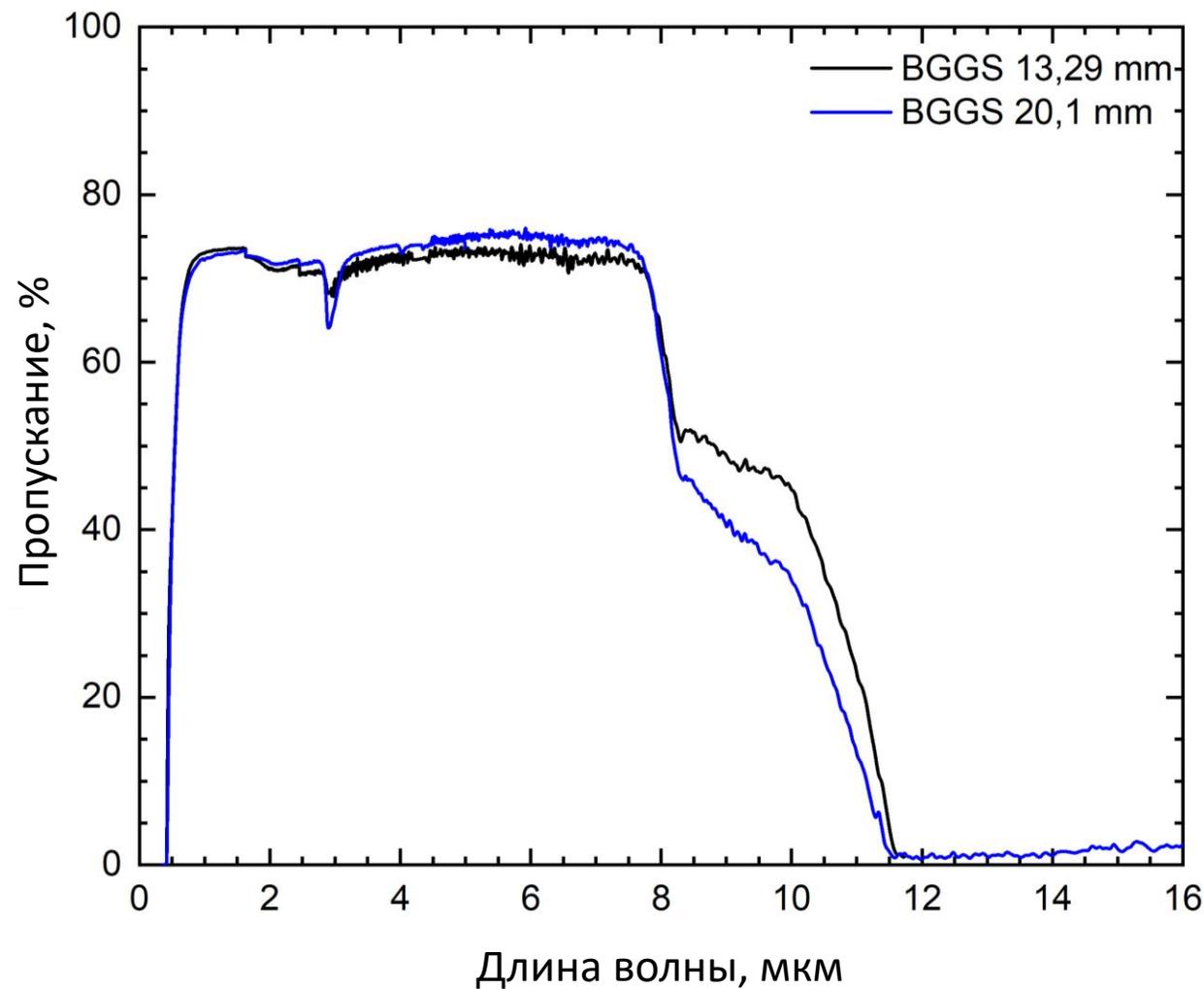
# ПГС на основе кристалла BGGs



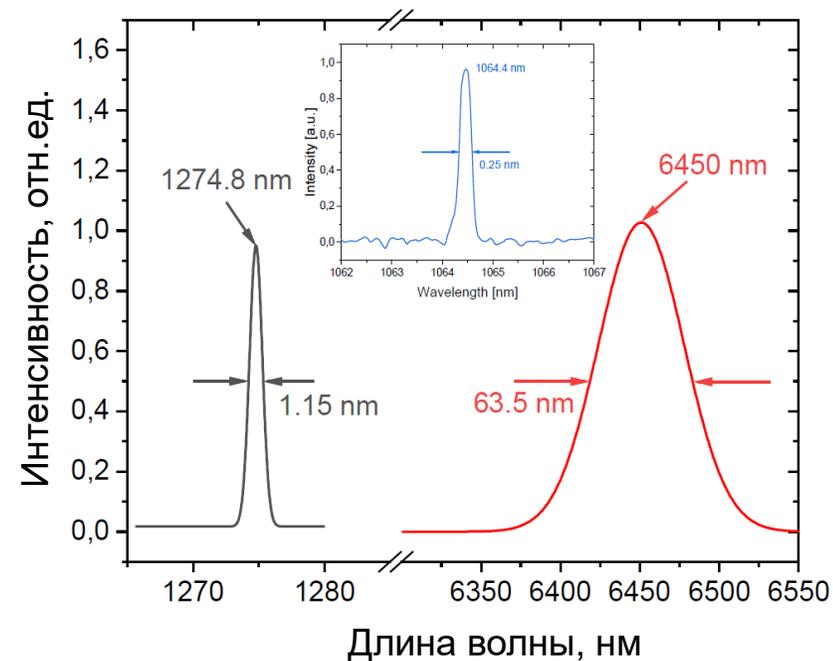
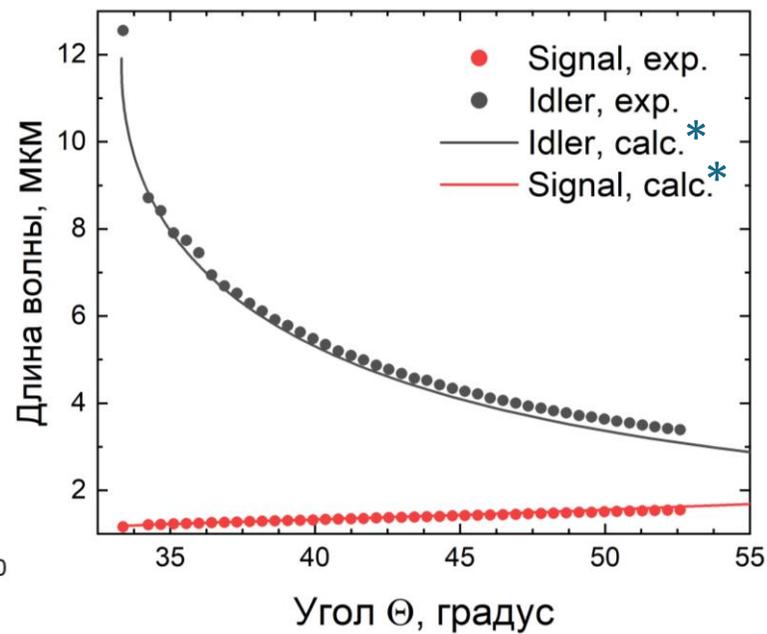
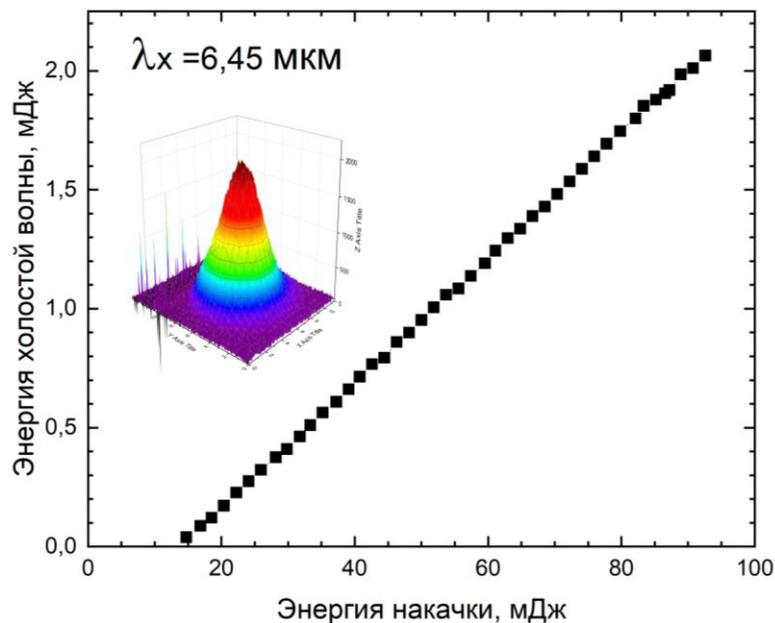
Элементы BGGs:

A  $\theta = 33,9^\circ$ ,  $\varphi = 17,3^\circ$ , 9.9 мм x 9.7 мм x 13.3 мм

B  $\theta = 37,4^\circ$ ,  $\varphi = 17^\circ$ , 10.3 мм x 9.0 мм x 20.15 мм



# ПГС на основе кристалла BGGs



Максимально достигнутое значение энергии:

- холостой волны ( $\lambda_x = 6,45 \text{ мкм}$ ) составляет **2,064 мДж**;
- сигнальной волны ( $\lambda_c = 1,27 \text{ мкм}$ ) – **12,87 мДж**.

Квантовая эффективность преобразования 13,7%.

Достигнута перестройка длины волны:

- **холостой волны** в диапазоне **3,39 – 12,55 мкм**;
- **сигнальной волны** в диапазоне **1,162 – 1,550 мкм**.

# 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 двух-параболической зонной модели, основанной на соотношении Крамерса — Кронига. Полученные значения показали в среднем ~20% отклонения от теоретических.
  - ❖ **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/см<sup>2</sup>, они составили 0,03 см/ГВт и 0,85 см/ГВт, соответственно.
  - ❖ С помощью непрерывного Nd: YAG лазера было проведено измерение **теплового нелинейного показателя преломления BGGSe** кристалла. Полученные значения  $n_{2T}$  показали в среднем ~5% отклонения от расчетных, что указывает на достоверность таких оценок.
  - ❖ Порог пробоя нелинейных кристаллов **сульфидов бария** превышает порог пробоя их **селеносодержащих** аналогов более чем в 3 раза при схожих параметрах излучения.
- S-содержащие кристаллы имеют большой потенциал для приложений, требующих высокой энергии в импульсах.**
- Se-содержащие кристаллы демонстрируют большую нелинейность** и более **широкий диапазон прозрачности**, что делает их привлекательными для применений в спектроскопических задачах.

# Заключение

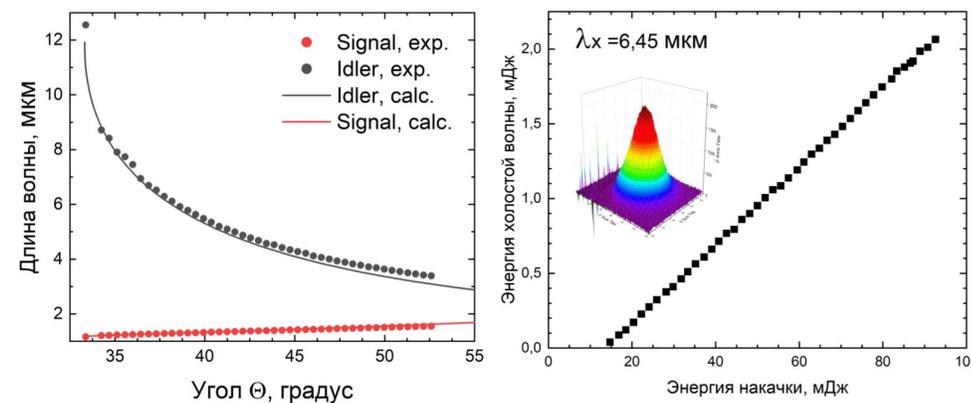
## ❖ Впервые реализован наносекундный ПГС на основе кристалла BGGs:

Максимально достигнутое значение энергии:

- холостой волны ( $\lambda_x = 6,45$  мкм) составляет **2,064 мДж**;
- сигнальной волны ( $\lambda_c = 1,27$  мкм) – **12,87 мДж**.

Достигнута перестройка длины волны:

- **холостой волны** в диапазоне **3,39 – 12,55 мкм**;
- **сигнальной волны** в диапазоне **1,162 – 1,550 мкм**.



Результаты использования кристаллов в параметрических преобразователях частоты свидетельствуют о том, что кристаллы бариевые халькогениды могут стать перспективными нелинейными кристаллами для генерации среднего ИК-диапазона в фемтосекундном, пикосекундном и наносекундном режимах с исключительно широким спектральным диапазоном перестройки.



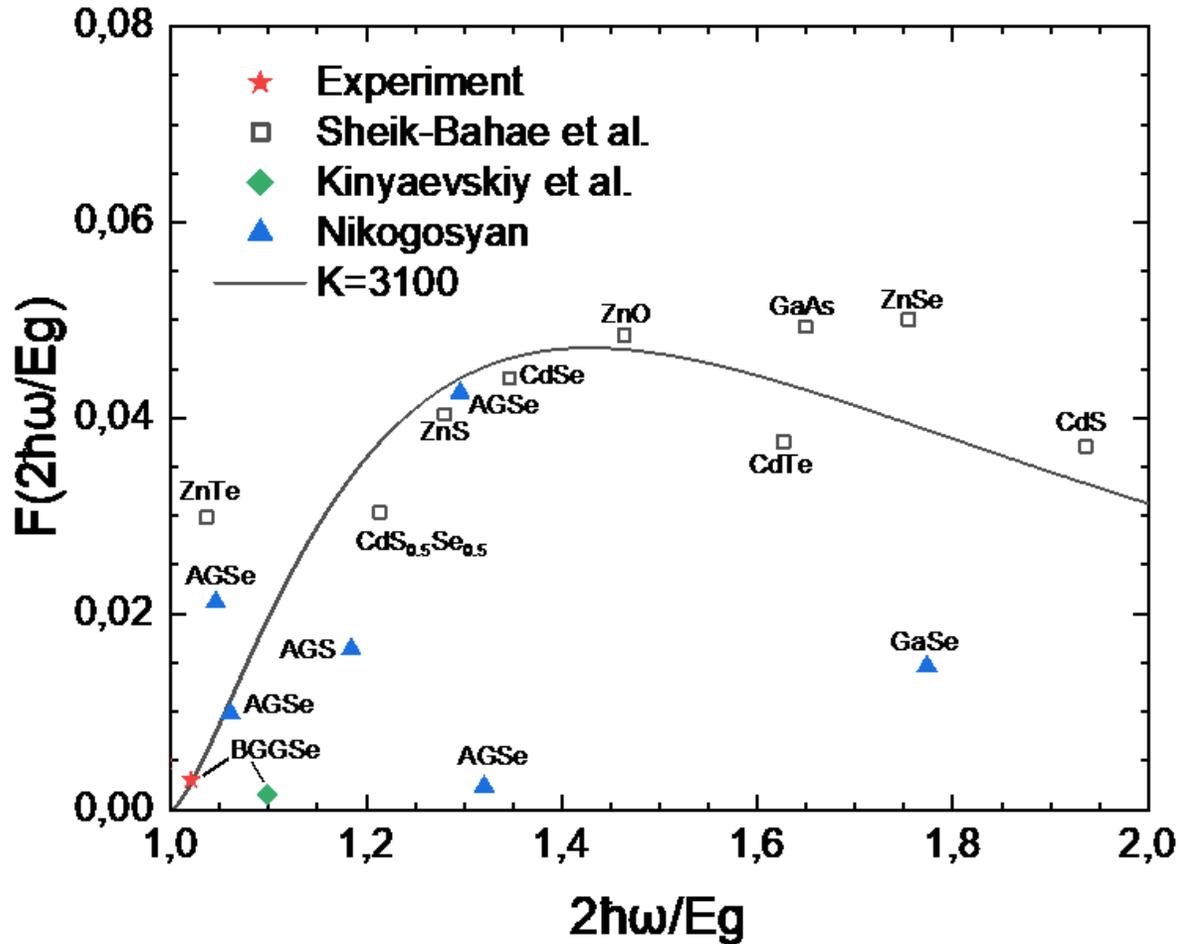
# Спасибо за внимание

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

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

# Данные об авторе работы

|  | 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<br>Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук  |
| Должность по основному месту работы                  | Заведующая Лаборатории квантовых оптических технологий<br>(Лаб. 2.4)  |
| Scopus ID  | 56681970000   |
| Кол-во публикаций (Scopus)                           | 79  |
| h-индекс   | 15  |
| Награды  | <ul style="list-style-type: none"><li>• 2019 г. - медаль молодым ученым имени проф. В.С. Летохова за новаторские работы по лазерной физике, спектроскопии и их приложениям.</li><li>• 2022 г. - премия мэрии города Новосибирска в сфере науки и инноваций в номинации – «Лучший молодой исследователь в организациях науки».</li><li>• 2023 г. - именная премия Правительства Новосибирской области за выдающиеся научные достижения в номинации – «Лучший молодой исследователь».</li><li>• 2023 и 2024 г. - почетная грамота президиума СО РАН за цикл работ, представленных на премию им. В.П. Чеботаева.</li></ul> |



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

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

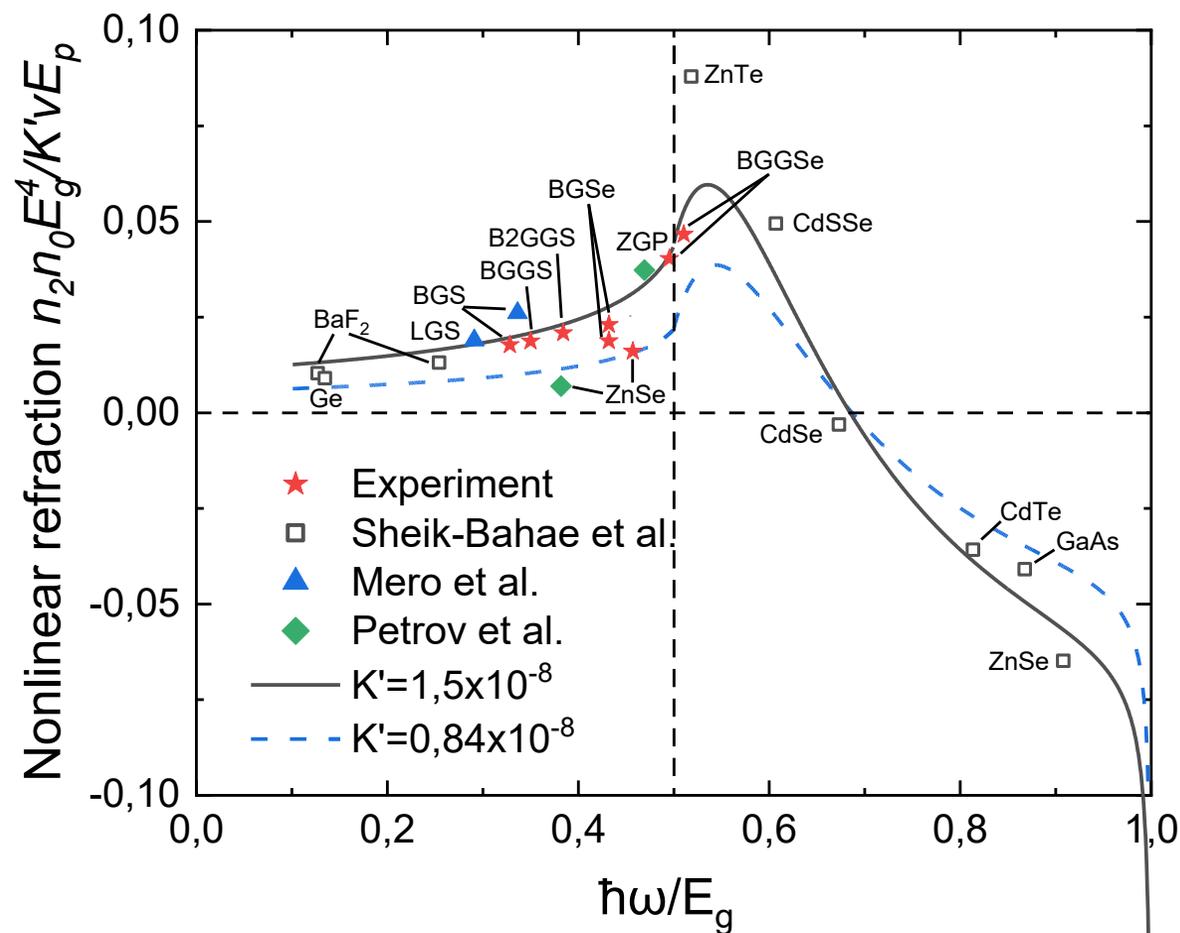
Согласно данной теории для поглощения N-фотонов коэффициент  $\alpha_N$  определяется таким образом, что для интенсивности излучения I скорость поглощения энергии единицей объема материала равна  $\alpha_N I^N$ . В терминах скорости межзонного перехода в единице объема, связанной с одновременным поглощением N фотонов частоты  $\omega$ , 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 символами 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  $\mu\text{m}$ . 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.