



XVII Международная конференция  
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»  
19–23 мая 2025 г. Снежинск, Россия

# Генерация импульсов терагерцевого излучения с высокой напряженностью электрического поля и их применение в исследованиях взаимодействия с различными материалами

О. В. Чефонов, А.В. Овчинников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук  
(ОИВТ РАН), г. Москва, Россия



# Терагерцевый спектральный диапазон излучения

Частота	Длина волны	Энергия	Волновое число
$10^{11} \div 10^{13}$ Гц	0.03 ÷ 3 мм	0.41 ÷ 41 мэВ	3.3 ÷ 333.3 см <sup>-1</sup>

$$1 \text{ ТГц} = 10^{12} \text{ Гц}$$

Частота	Длина волны	Энергия	Волновое число
1 ТГц	300 мкм	4.14 мэВ	33.3 см <sup>-1</sup>

# Основные методы генерации ТГц излучения с применением фемтосекундных лазерных импульсов

- 1. Фотопроводящая антенна.** Генерация ТГц импульсов осуществляется с помощью короткоживущих носителей заряда, индуцированных сверхкороткими лазерными импульсами. Позволяет получить широкополосную и узкополосную генерацию. Спектральный диапазон генерации находится в диапазоне 0.3 – 1.5 ТГц.
- 2. Лазерно-плазменные методы.** Генерация ТГц импульсов происходит в газе, жидкости или твердом теле при воздействии фемтосекундных импульсов с высокой интенсивностью ( $>10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>). Основным преимуществом данных методов является широкий спектральный диапазон генерации 0.3-30 ТГц и возможность получить ТГц импульсы с высокой напряженностью электрического поля.
- 3. Оптическое выпрямление.** Генерация ТГц импульсов происходит при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейной среде. Данный метод позволяет получить широкий спектр генерации 0.3-10 ТГц, высокую конверсионную эффективность и высокие значения напряженности электрического поля ТГц импульса. Преимуществом данного метода является простота реализации.

# Нелинейные кристаллы, используемые для генерации ТГц излучения методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов

## Неорганические кристаллы

**LiNbO<sub>3</sub>.** Накачка - излучение с длиной волны 800 нм. Спектральный диапазон генерации 0.3-1.5 ТГц. Конверсионная эффективность 3.7% при криогенном охлаждении кристалла.

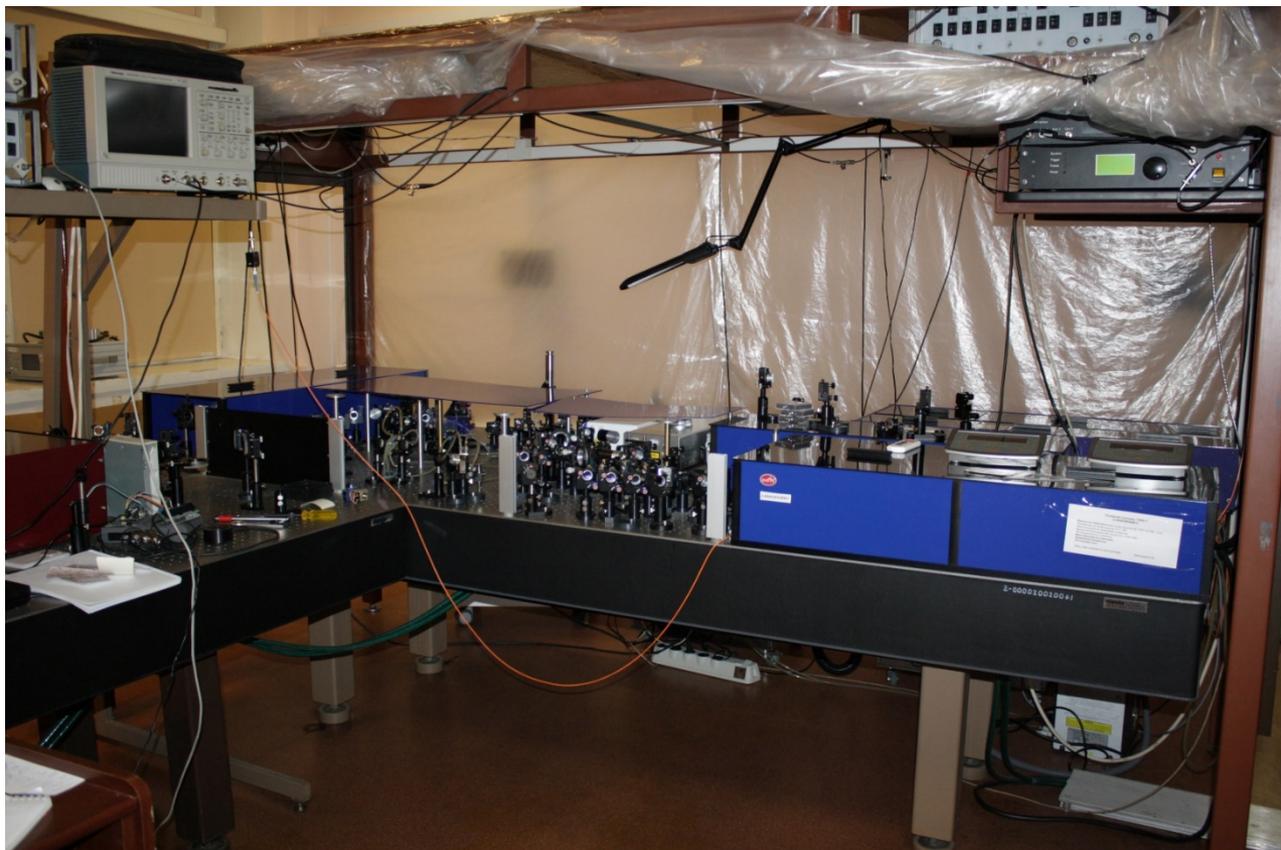
**ZnTe.** Накачка - излучение с длиной волны 800 нм. Спектральный диапазон генерации 0.3-2.5 ТГц. Конверсионная эффективность 0.01% при комнатной температуре.

## Органические кристаллы

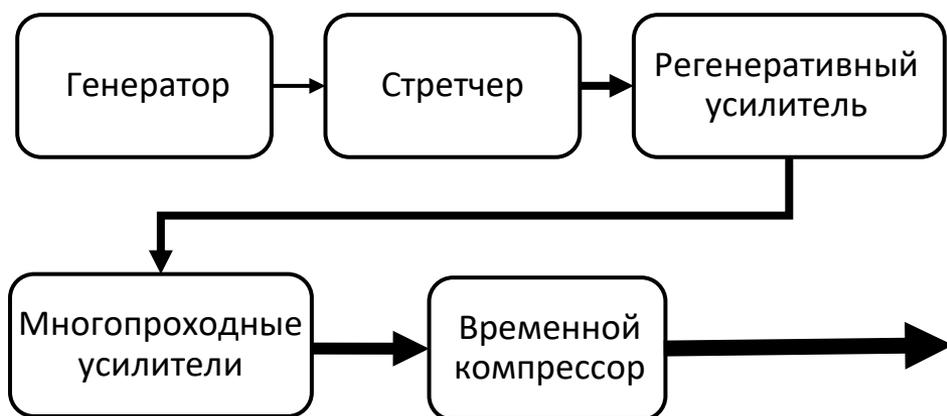
**DSTMS, DAST, OH1.** Накачка - излучение с длиной волны 1100-1600 нм. Спектральный диапазон генерации 0.3-10 ТГц. Конверсионная эффективность 3% при комнатной температуре.

**BNA.** Накачка - излучение с длиной волны 1030 нм. Спектральный диапазон генерации 0.3-2 ТГц. Конверсионная эффективность 0.1% при комнатной температуре.

# Тераваттная хром-форстеритовая фемтосекундная лазерная система ОИВТ РАН



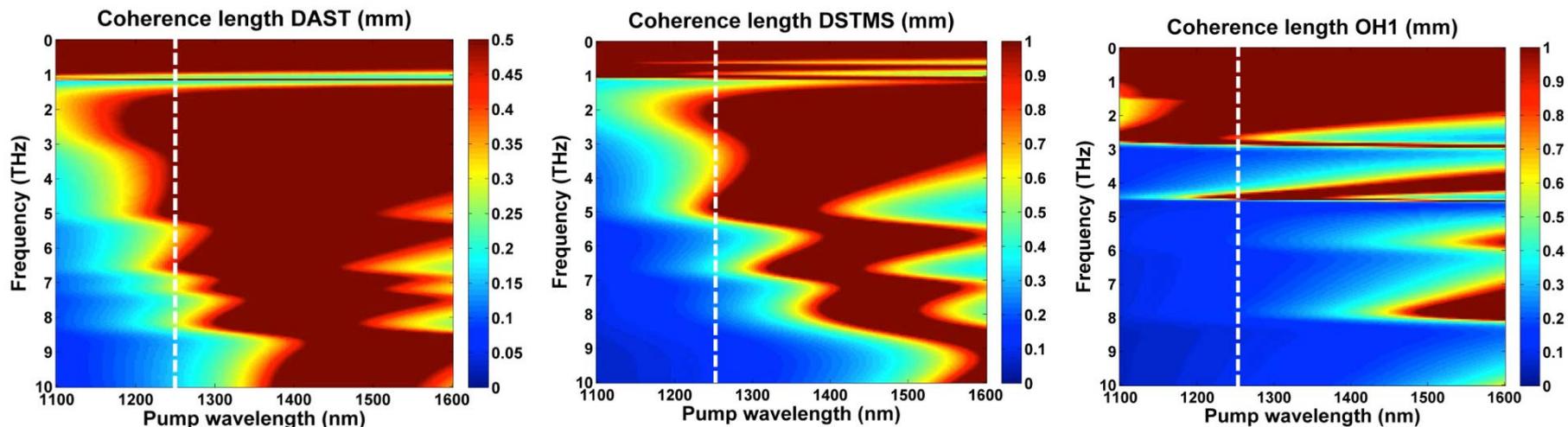
# Тераваттная хром-форстеритовая фемтосекундная лазерная система ОИВТ РАН



## Параметры лазерной системы

1. Длина волны **1240 нм**
2. Ширина спектра 25 нм
3. Энергия в импульсе до **80 мДж**
4. Длительность импульса 100 фс
5. Частота повторения 1 - 10 Гц

# Спектры генерации ТГц излучения в кристаллах DSTMS, DAST и OH1 при накачке лазером с длиной волны 1240 нм

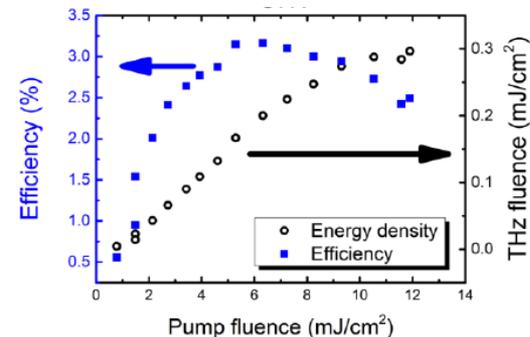
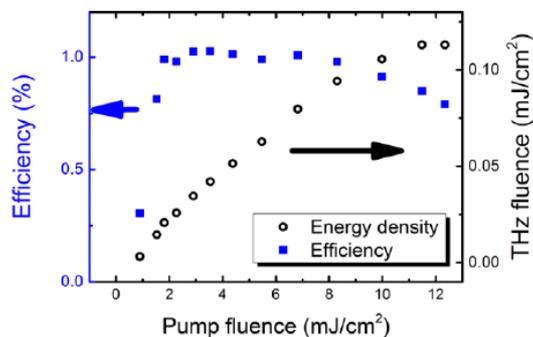
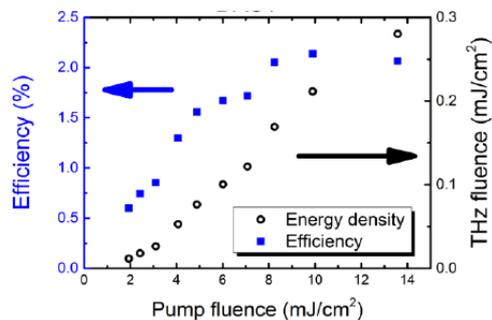
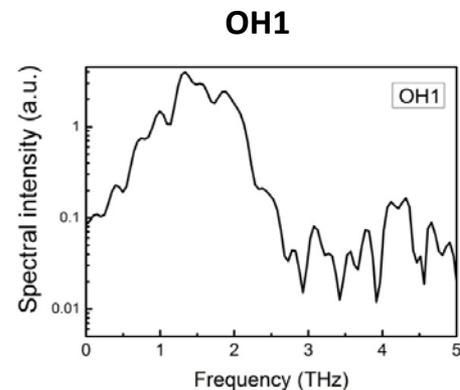
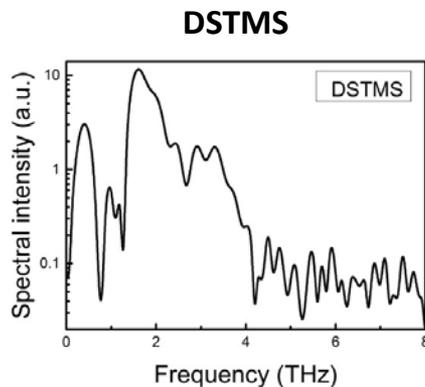
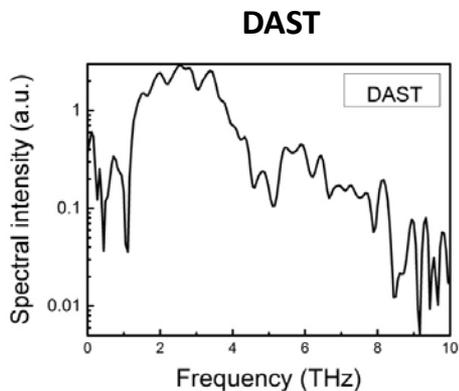


DSTMS - 4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium 2,4,6-trimethylbenzenesulfonate

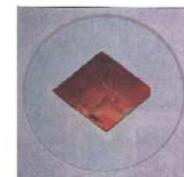
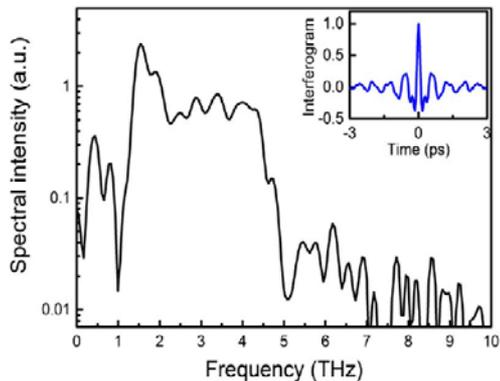
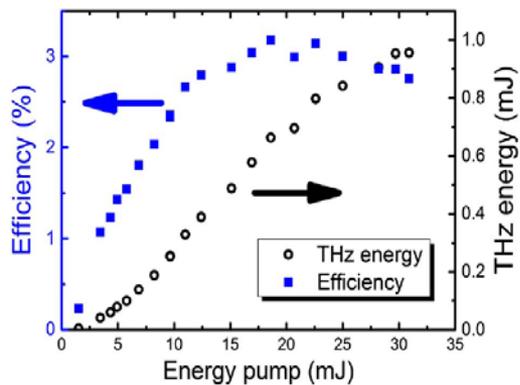
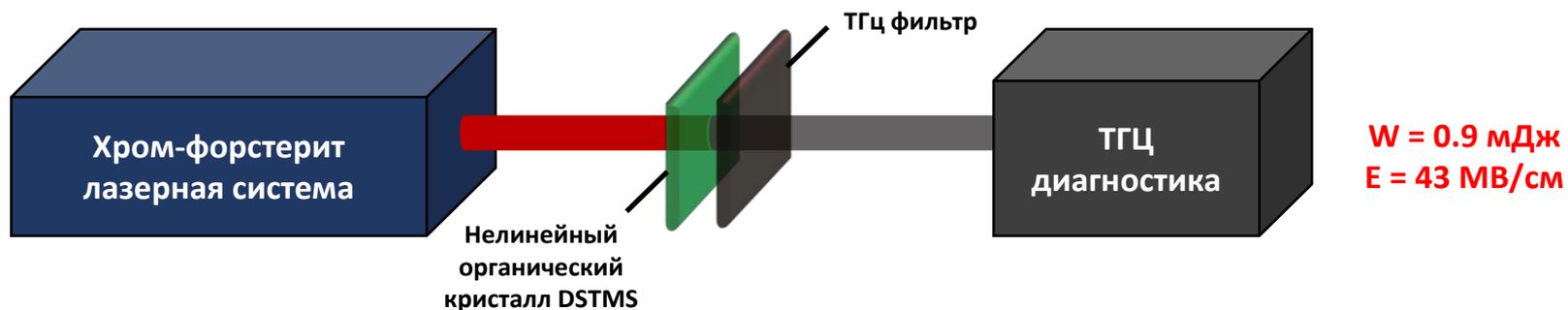
OH1 - (2-(3-(4-Hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclohex-2-enylidene)malononitrile)

DAST - 4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate

# Сравнение генерации ТГц излучения в кристаллах DSTMS, DAST и OH1

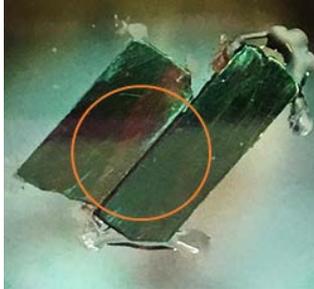


# Генерация ТГц излучения в кристалле DSTMS



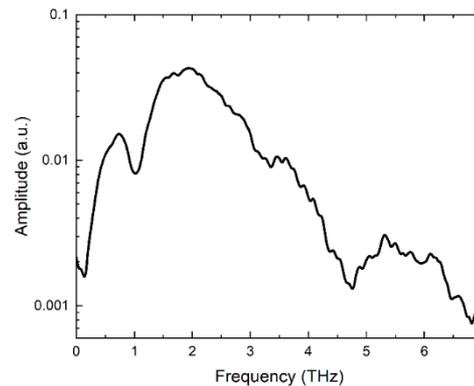
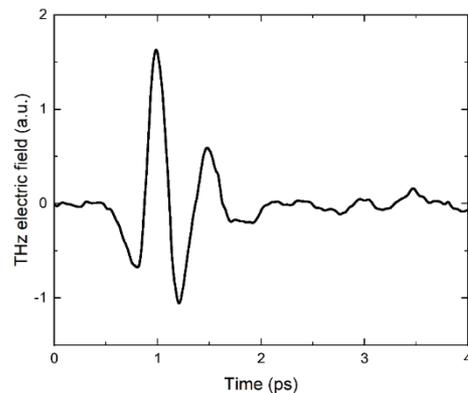
Размер кристалла 20x20 мм  
Энергия лазера накачки 30 мДж  
Диаметр пучка накачки 20 мм  
Диаметр ТГц пучка 260 мкм

# Генерация импульсов ТГц излучения в мозаичном кристалле DSTMS



Кристалл состоит из двух отдельных пластин толщиной 440 мкм и с линейными размерами 6 мм x 10 мм и 5 мм x 12 мм. Элементы неорганического кристалла закреплены на подложке из стекла толщиной 3 мм и просветляющим покрытием на длины волн в диапазоне 1100-1600 нм. Эффективный диаметр кристалла ~8 мм.

Временная форма ТГц импульса и его спектр



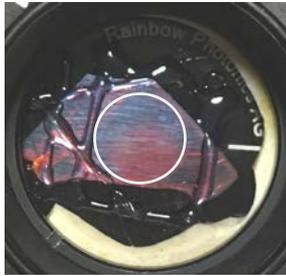
$$W_{\text{ТГц}} \sim 120 \text{ мкДж}$$

$$\tau_{\text{FWHM}} \sim 700 \text{ фс}$$

$$R_{1/e} \sim 95 \text{ мкм}$$

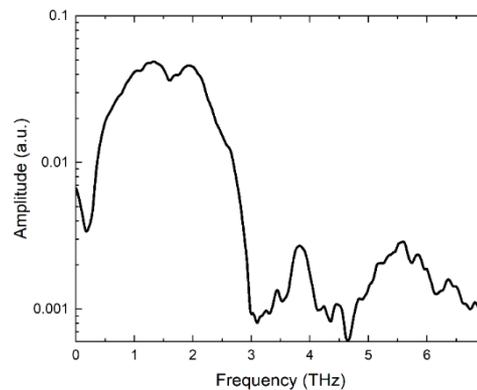
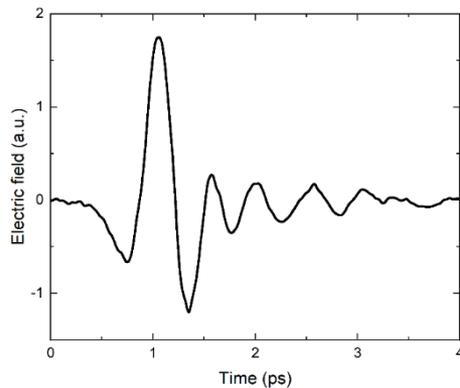
$$E_{\text{ТГц}} \sim 22 \text{ МВ/см}$$

# Генерация импульсов ТГц излучения в кристалле ОН1



Кристалл состоит из одной пластины толщиной 570 мкм, который закреплен на металлической пластине с отверстием 8 мм.

Временная форма ТГц импульса и его спектр



$$W_{\text{ТГц}} \sim 150 \text{ мкДж}$$

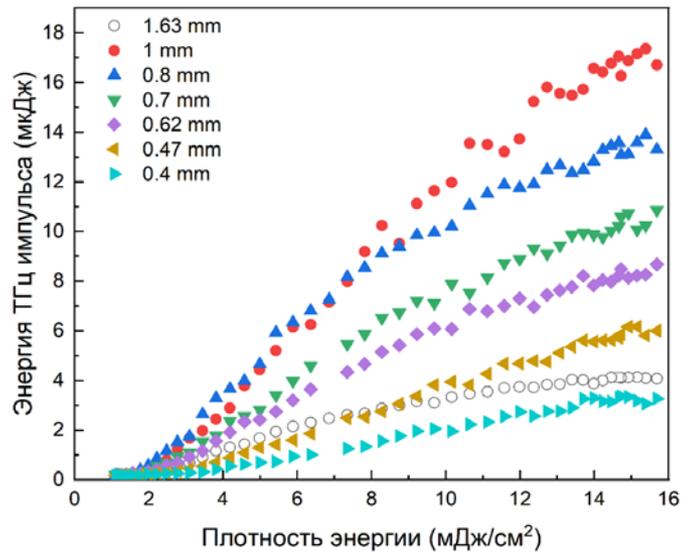
$$\tau_{\text{FWHM}} \sim 400 \text{ фс}$$

$$R_{1/e} \sim 120 \text{ мкм}$$

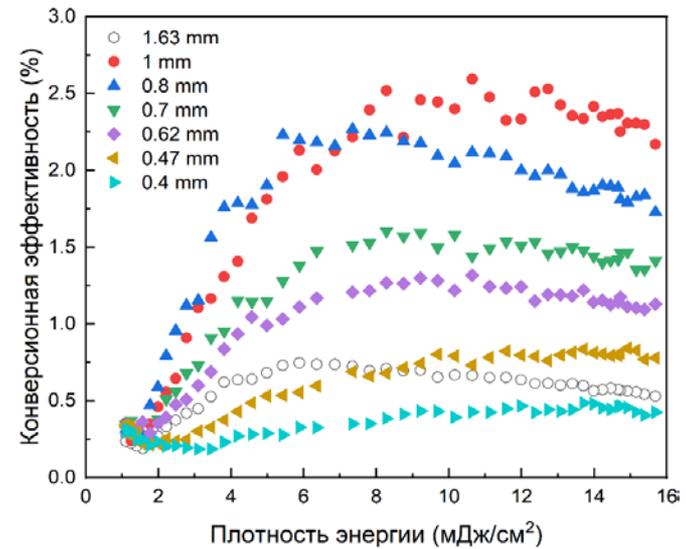
$$E_{\text{ТГц}} \sim 23 \text{ МВ/см}$$

# Оптимизация генерации ТГц излучения в кристалле ОН1

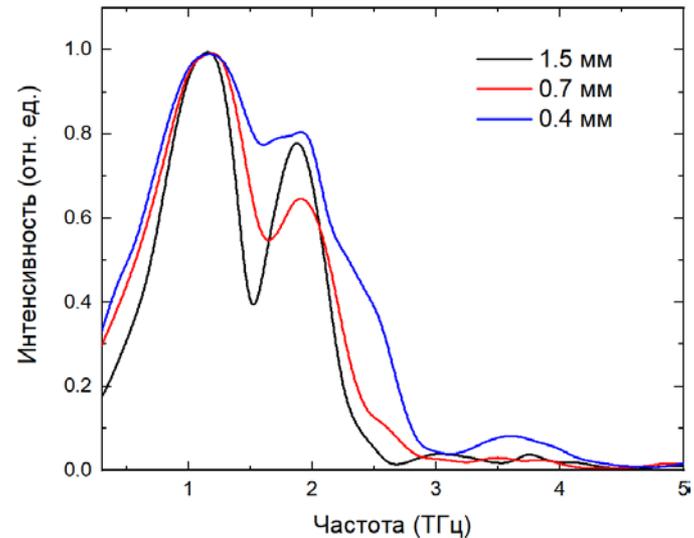
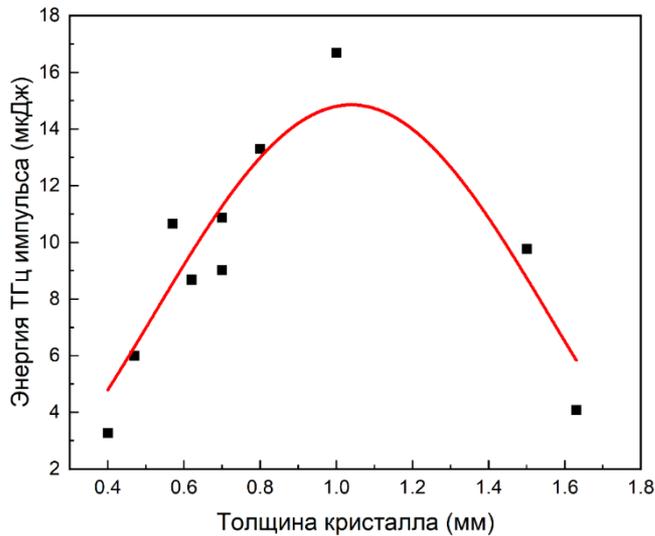
## Энергия ТГц импульса



## Конверсионная эффективность



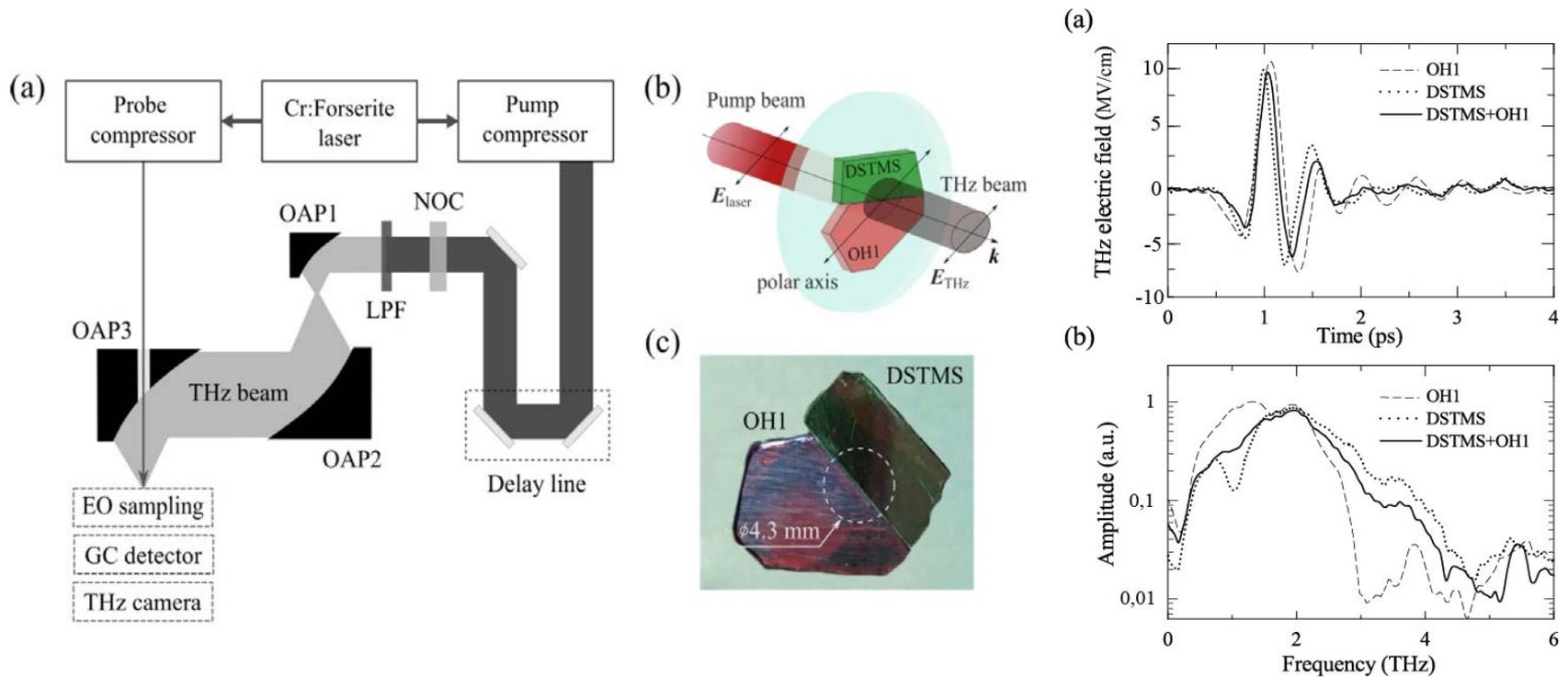
# Оптимизация генерации ТГц излучения в кристалле ОН1



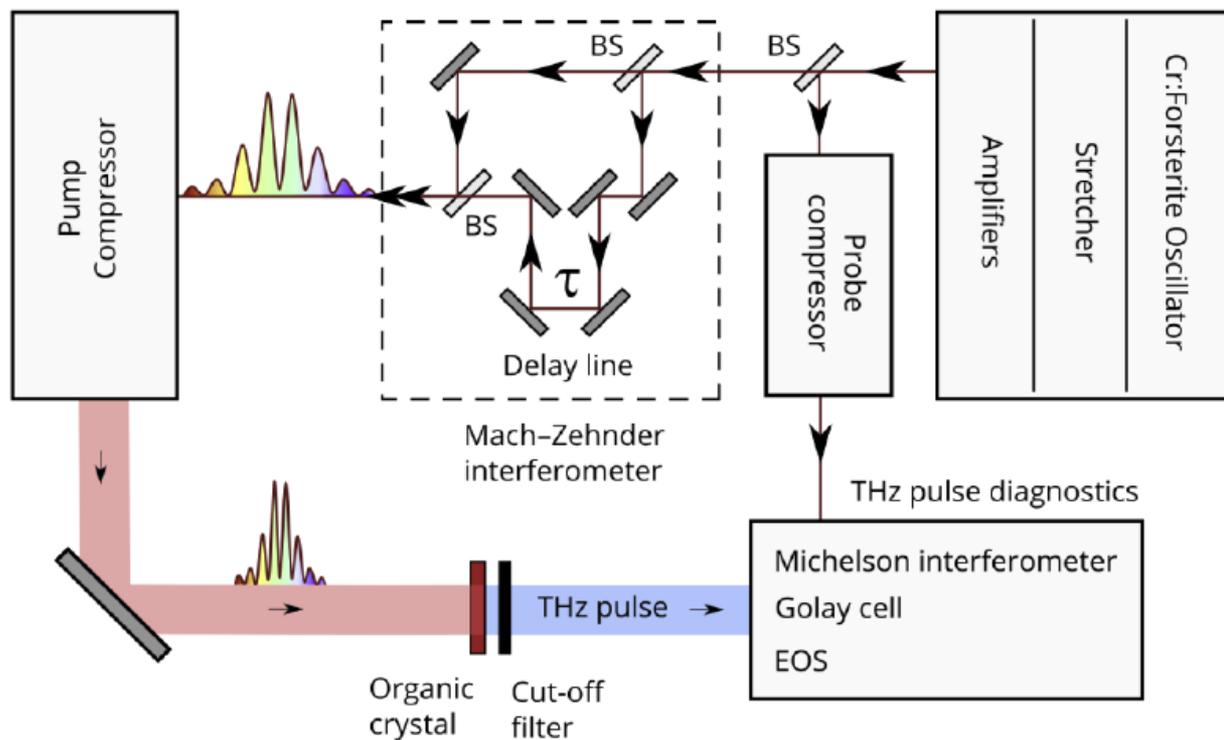
$$I(\omega, l) = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c n_{\text{THz}} |E_{\text{THz}}(\omega, l)|^2, \text{ где } E_{\text{THz}}(\omega, l) \propto \text{sinc}\left(\frac{\pi l}{2l_c(\omega, \lambda)}\right) l$$

$$I(\omega, l) \propto \text{sinc}^2\left(\frac{\pi l}{2l_c}\right) l^2 = \frac{4l_c^2}{\pi^2} \sin^2 \pi \left(\frac{\pi l}{2l_c}\right)$$

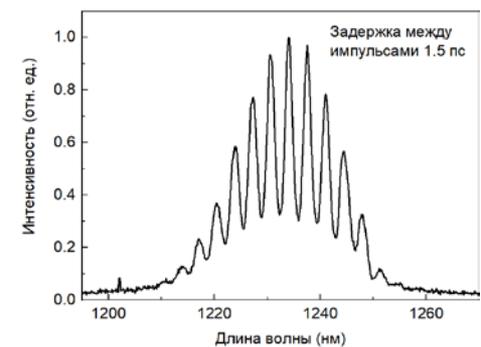
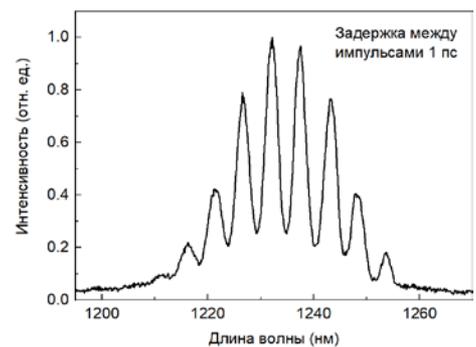
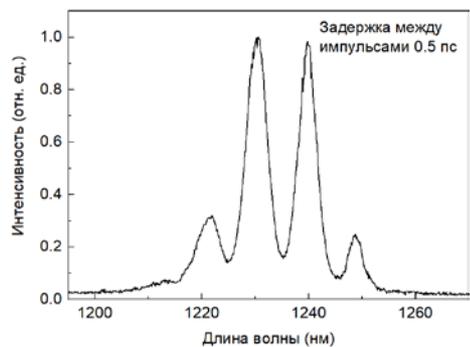
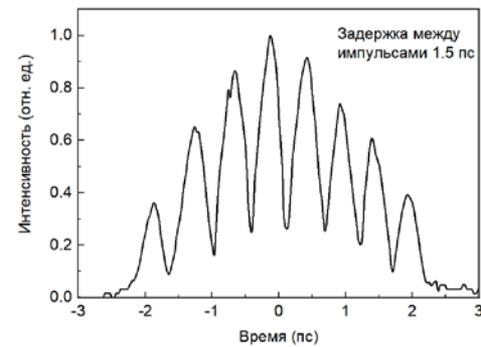
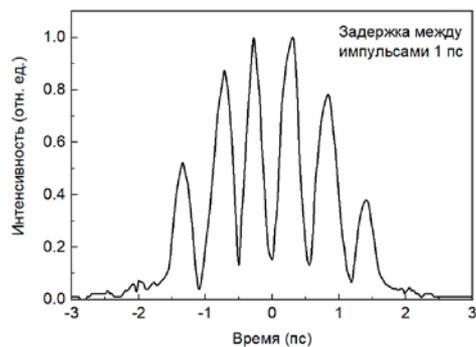
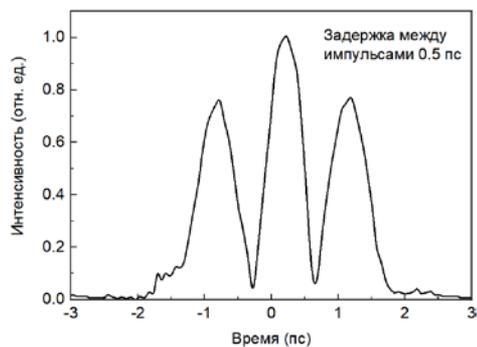
# Генерация ТГц излучения из мозаичного комбинированного кристалла



# Генерация узкополосных ТГц импульсов с перестраиваемой центральной частотой

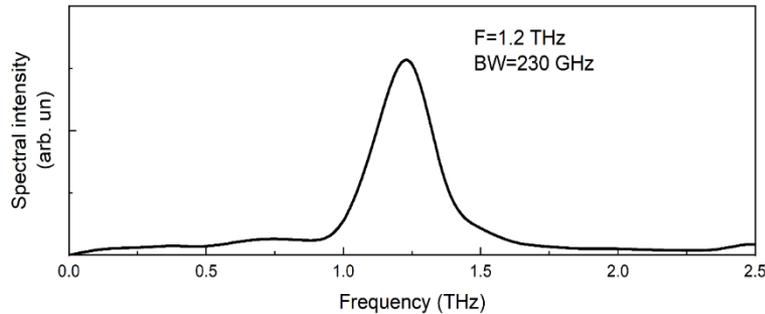
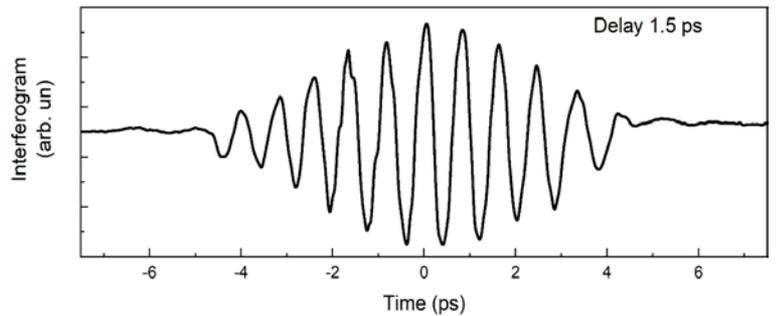


# Примеры временных профилей и спектров лазерного импульса накачки

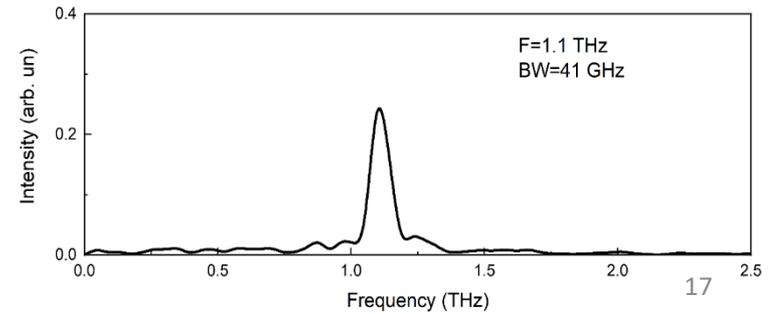
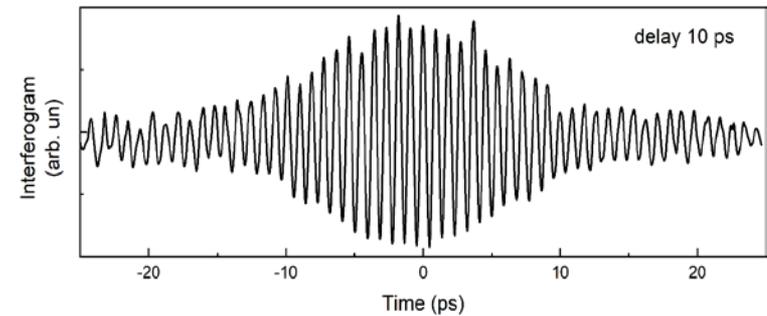


# Управление шириной спектра ТГц импульса с перестраиваемой центральной частотой

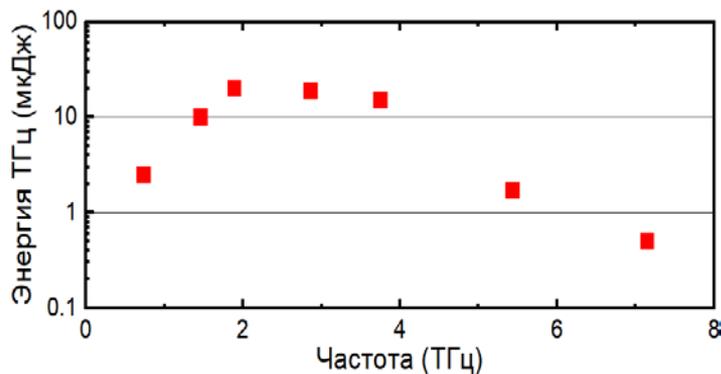
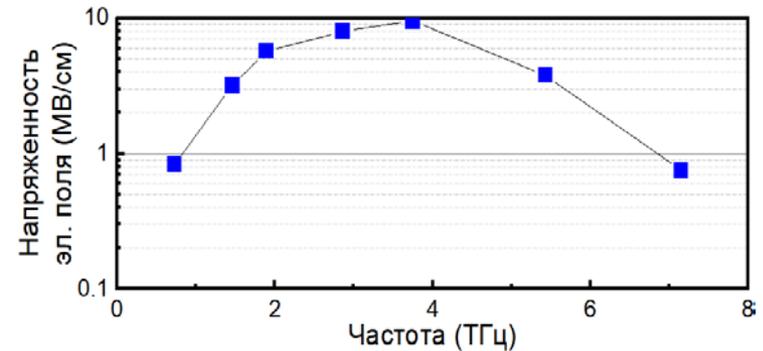
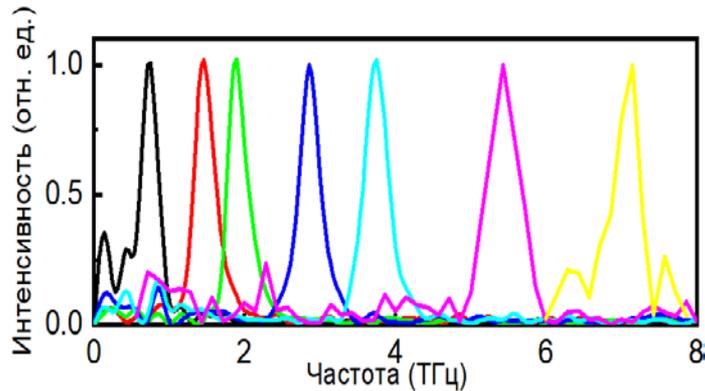
Длительность импульса 4 ps



Длительность импульса 30 ps



# Генерация узкополосного терагерцового излучения с различной центральной частотой в кристалле DSTMS



## Основные результаты:

1. Перестройка в диапазоне от 0.5 ТГц до 7 ТГц
2. Конверсионная эффективность от 0.02% до 2.8%

# Основные параметры источника ТГц излучения

## Режим широкополосной генерации ТГц излучения

1. Энергия в импульсе 100-150 мкДж
2. Ширина спектра излучения 0.3-7 ТГц (основная энергия до 3 ТГц)
3. Максимальная напряженность электрического поля до 20-25 МВ/см
4. Длительность импульса 0.4-0.7 пс
5. Конверсионная эффективность до 3%
6. Частота повторения импульсов до 10 Гц

## Режим узкополосной генерации ТГц излучения

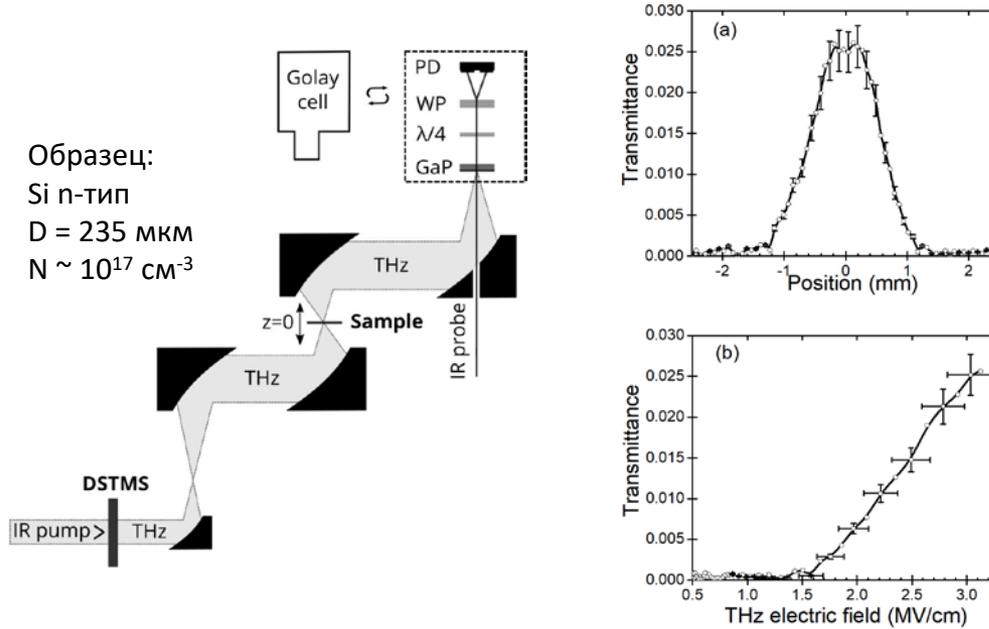
1. Энергия в импульсе в зависимости от выбранной частоты излучения до 20 мкДж
2. Минимальная ширина спектра излучения ~30 ГГц
3. Перестройка центральной частоты в диапазоне широкополосной генерации
4. Максимальная напряженность электрического поля до 10 МВ/см
5. Максимальная длительность импульса 30 пс
6. Конверсионная эффективность 0.02% до 2.8%
7. Частота повторения импульсов до 10 Гц

# Параметры ТГц источников, созданных в за рубежом

1. Энергия ТГц импульса **1.4 мДж** была получена в кристалле LiNbO<sub>3</sub>, а максимальная напряженность достигала **6.3 МВ/см**, накачка 800 нм 214 мДж, конверсионная эффективность **0.7%**, основной спектральный диапазон генерации от **0.1 до 1 ТГц** с максимумом в области **0.5 ТГц**. Laser Photonics Rev. 15, 2000295 (2021).
2. Из плазмы был получен импульс ТГц излучения с энергией **185 мкДж**. В качестве накачки использовалось лазерное излучение с длиной волны 3.9 мкм и энергией в импульсе 8.12 мДж, конверсионная эффективность **2.36%**, спектр излучения в диапазоне от **0.1 до 20 ТГц** с максимумом в области **8 ТГц**. Максимальная напряженность поля **~100 МВ/см**. Nature communications (2020) 11:292
3. Генерация узкополосного ТГц импульса была получена в кристалле LiNbO<sub>3</sub> на частоте **0.361 ТГц** (ширина полосы **~3 ГГц**) с энергией в импульсе **0.6 мДж**, для накачки использовалось лазерное излучение с длиной волны 800 нм, длительностью 260 пс и энергией 1.2 Дж. Напряженность электрического поля **18 МВ/см**. Nature communications (2019) 10:2591
4. Генерация ТГц излучения была получена в кристалле DSTMS. При накачке оптическим параметрическим усилителем чирпированных импульсов генерируемая энергия ТГц импульса достигала **175 мкДж**, а электрическое поле в фокусе составляло около **17 МВ/см**. Конверсионная эффективность **1.7%**. Optics Express (2023) Vol. 31, No. 15 23923

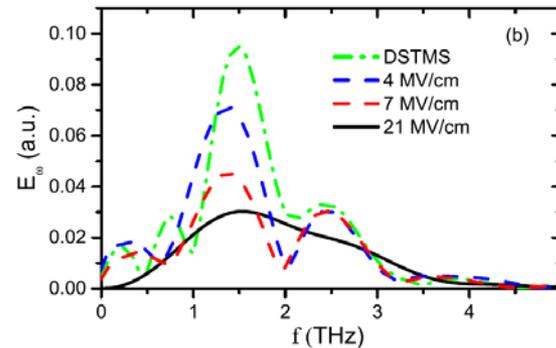
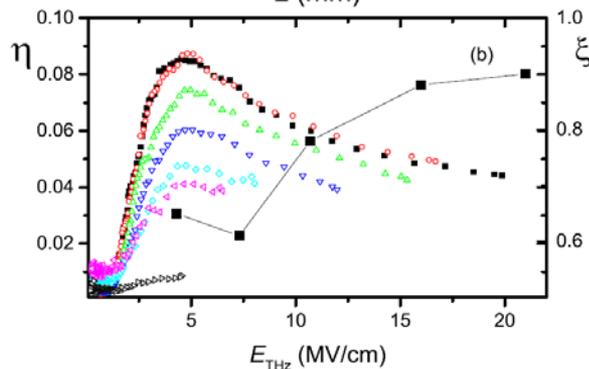
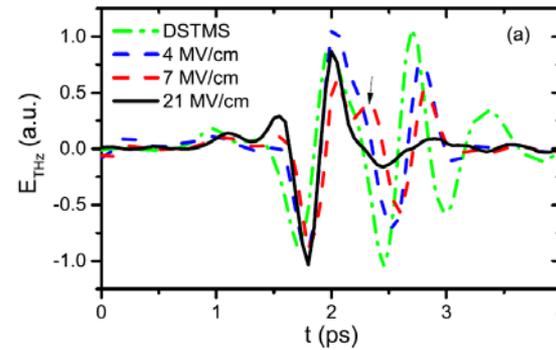
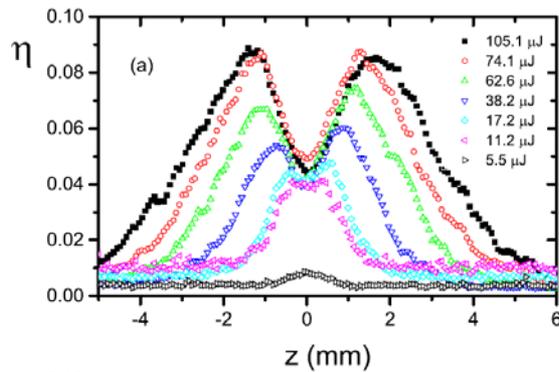
# Нелинейное пропускание кремния n-типа под действием ТГц импульсов с высокой интенсивностью

## Экспериментальная схема



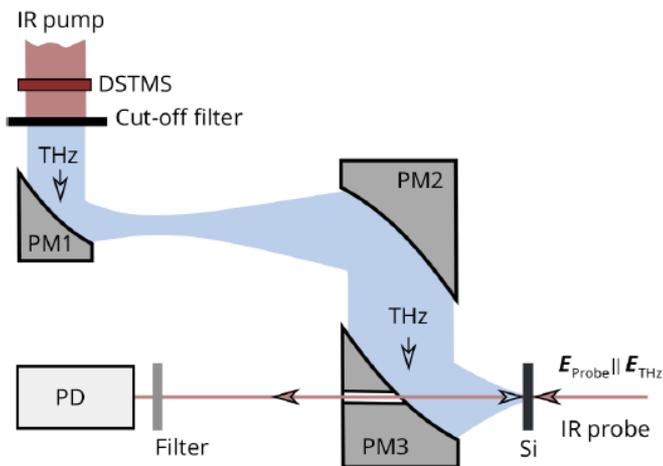
Увеличение пропускания составило **90** раз. Показано, что ТГц импульсы с высокой интенсивностью приводят к уменьшению времени междолинного рассеяния электронов и уменьшению коэффициента поглощения.

# Нелинейное пропускание кремния n-типа под действием ТГц импульсов с высокой интенсивностью



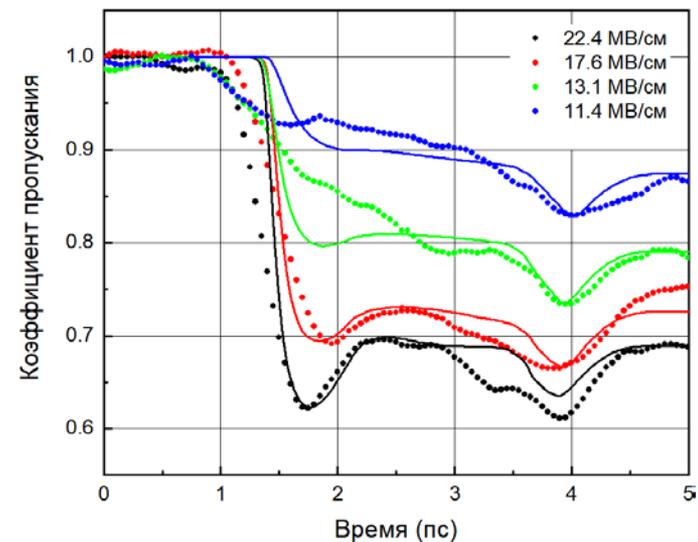
# Динамика генерации свободных носителей заряда, индуцированная ТГц импульсами в кремнии р-типа

## Экспериментальная схема



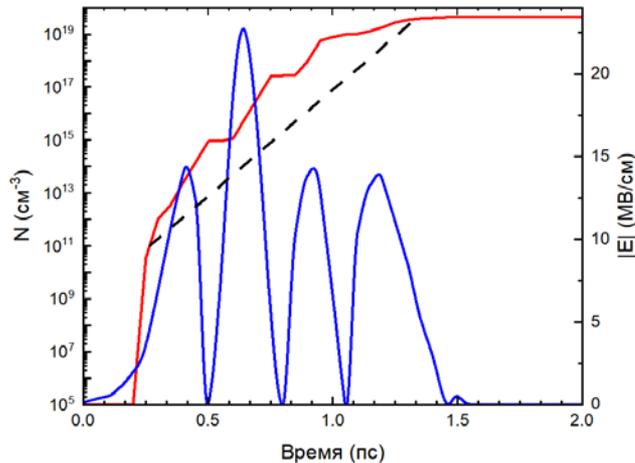
**Экспериментальный образец:** пластина кремния р-типа толщиной 235 мкм, концентрация легирующей примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$

Зависимость коэффициента пропускания Si на длине волны зондирующего импульса 1240 нм в зависимости от времени задержки между ТГц и зондирующим импульсами



# Динамика генерации свободных носителей заряда, индуцированная терагерцевыми импульсами в кремнии р-типа

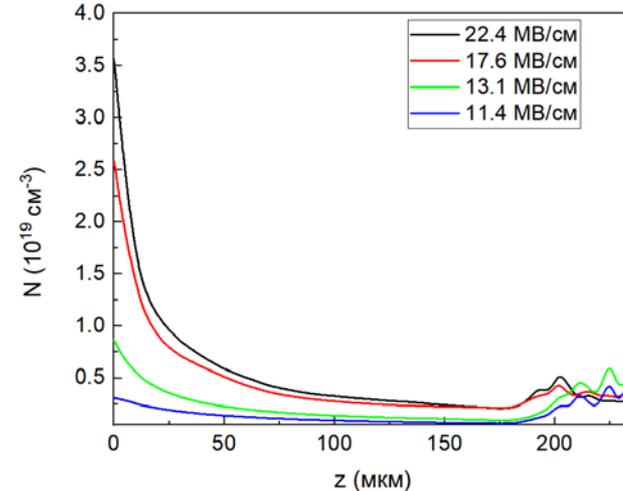
Динамика увеличения концентрации свободных носителей в поверхностном слое



**Синяя линия** – модуль напряженности электрического поля ТГц импульса.

**Красная линия** – концентрация свободных носителей.

Распределение концентрации свободных носителей по глубине образца

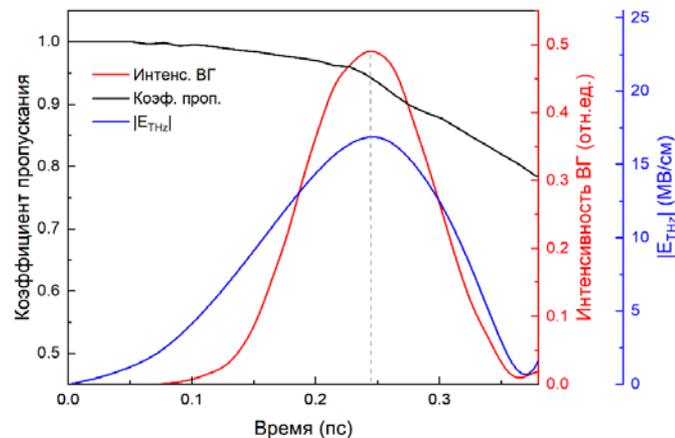
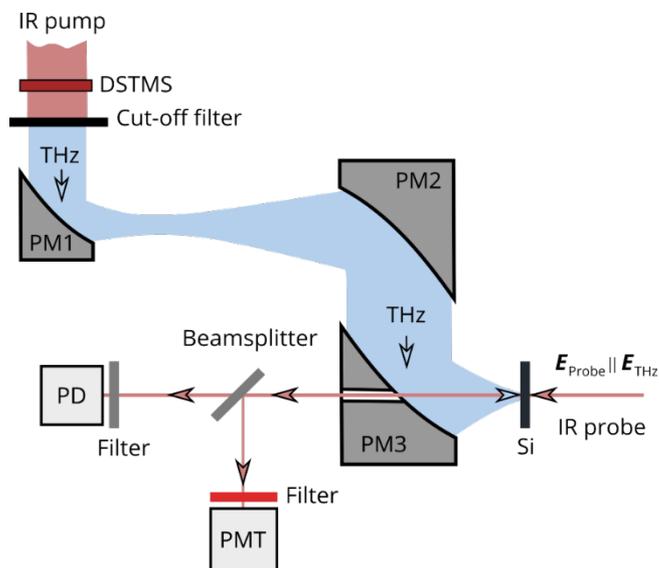


Образец: Si p-тип

$N \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$

# Синхронизация временной формы ТГц импульса с измерениями коэффициента пропускания пробного излучения

Экспериментальная схема



Красная линия – интенсивность сигнала второй гармоники  
 Синяя линия – временная форма ТГц импульса  
 Черная линия – коэффициент пропускания Si на длине волны излучения 1240 нм

## Оценка средней скорости ионизации за время 250 фс:

Коэффициент пропускания по эксп. кривой 0.94

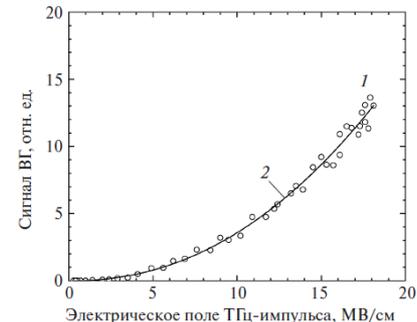
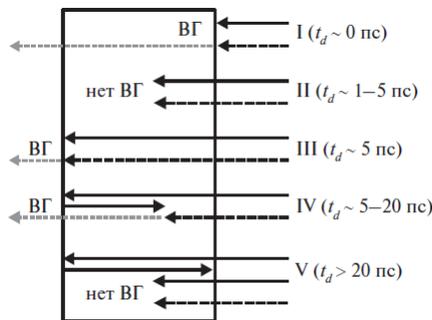
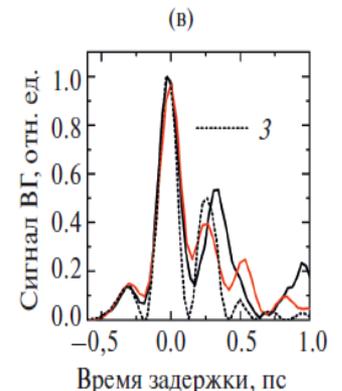
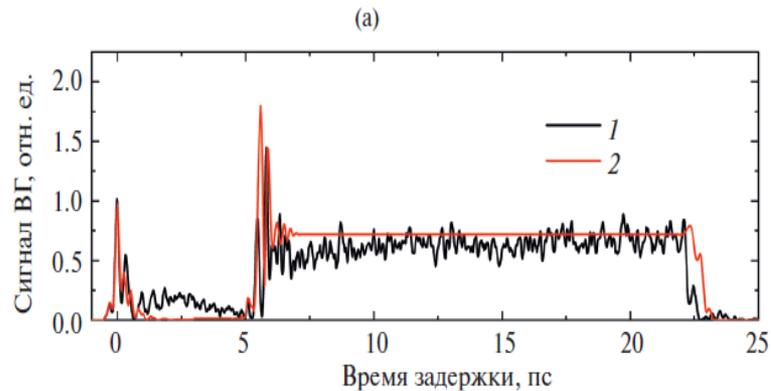
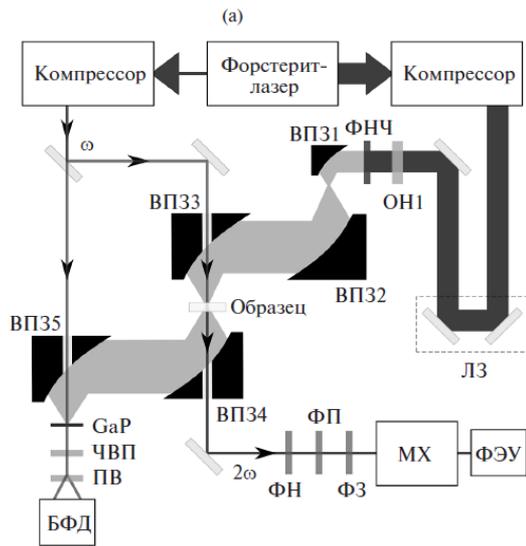
Показатель поглощения проба  $\sim 62 \text{ см}^{-1}$

Концентрация свободных носителей по Друде  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$

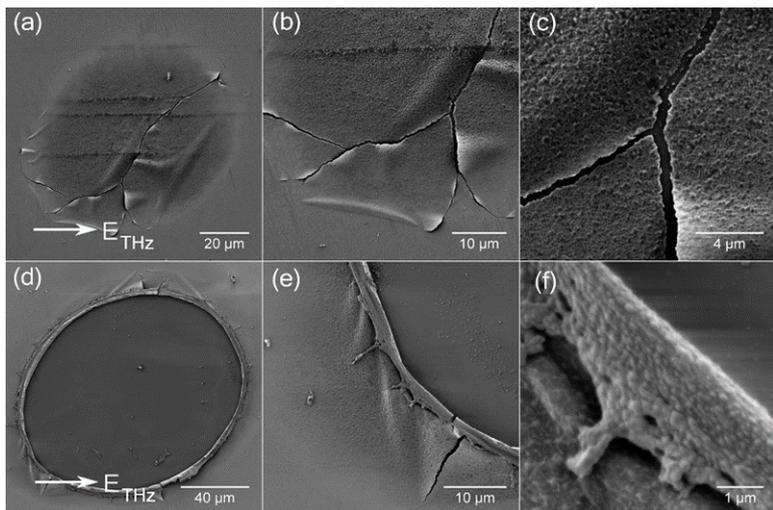
Средняя скорость генерации носителей  $\sim 10^{14} \text{ с}^{-1}$

# Генерация второй оптической гармоники при взаимодействии фемтосекундного лазерного и пикосекундного терагерцевого импульсов в сапфире

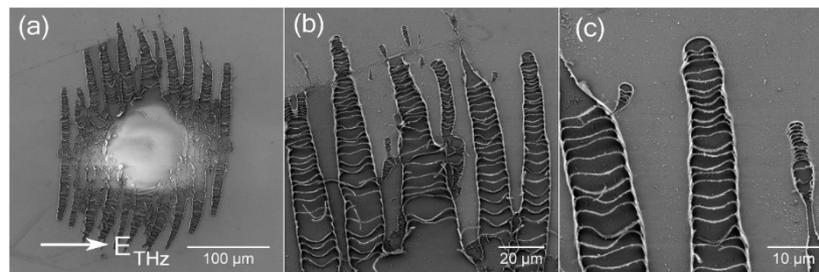
## Экспериментальная схема



# Взаимодействие ТГц импульсов с металлическими пленками (Алюминий)

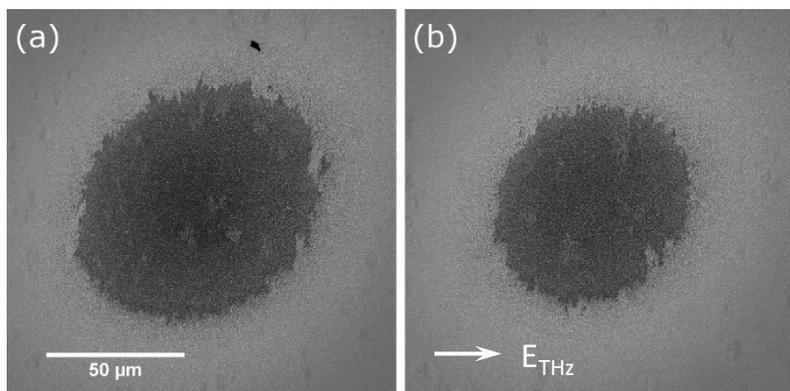


Изображения с электронного микроскопа Al пленки после воздействия 60 импульсов ТГц излучения с плотностью энергии  $F=0.24$  Дж/см<sup>2</sup>

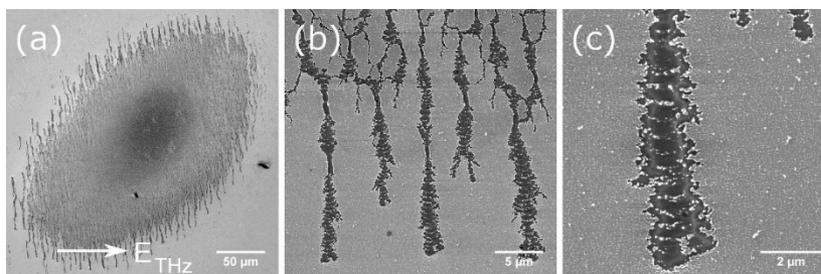


Изображения с электронного микроскопа Al пленки толщиной 25 нм после однократного воздействия ТГц импульса с плотностью энергии (a-c)  $F=0.14$  Дж/см<sup>2</sup>, (d-f)  $F=0.3$  Дж/см<sup>2</sup>. Порог разрушения  $F=0.15$  Дж/см<sup>2</sup>

# Взаимодействие ТГц импульсов с металлическими пленками (Никель)



Изображения с электронного микроскопа Ni пленки толщиной 25 нм после однократного воздействия ТГц импульса с плотностью энергии (a)  $F=0.43 \text{ Дж/см}^2$ , (b)  $F=0.39 \text{ Дж/см}^2$ .



Изображения с электронного микроскопа Ni пленки после воздействия 40 импульсов ТГц излучения с плотностью энергии  $F=0.43 \text{ Дж/см}^2$

# Список публикаций

1. Agranat, M.B. , Ovchinnikov, A.V., Chefonov, O.V. Ionization of a Silicon Surface Layer Induced by a High-Intensity Subpicosecond Electric Field. *Journal Of Infrared Millimeter And Terahertz Waves* 45, 383–391 (2024).
2. О. В. Чефонов, А. В. Овчинников, М. Б. Агранат, С. Б. Бодров, М. А. Киселев, А. Н. Степанов, Генерация второй оптической гармоники при взаимодействии фемтосекундного лазерного и пикосекундного терагерцевого импульсов в сапфире, *TBT*, 2024, том 62, выпуск 5, 739–749
3. Brekhov, K.; Bilyk, V.; Ovchinnikov, A.; Chefonov, O.; Mukhortov, V.; Mishina, E. Resonant Excitation of the Ferroelectric Soft Mode by a Narrow-Band THz Pulse. *Nanomaterials* 2023, 13, 1961
4. A. V. Ovchinnikov, O. V. Chefonov, M. B. Agranat, M. Shalaby, D.S. Sitnikov. Terahertz generation optimization in a OH1 nonlinear organic crystal pumped by a Cr:forsterite laser. *Optics letters*, 47(21),pp. 5505-5508 (2022).
5. A. V. Ovchinnikov, O. V. Chefonov, M. B. Agranat, A.V., Kudryavtsev, E. D. Mishina and A. A. Yurkevich Free-carrier generation dynamics induced by ultrashort intense terahertz pulses in silicon. *Optics Express*, 29(16) pp. 26093-26102 (2021).
6. Ovchinnikov A. V., Chefonov O. V., Agranat M.B., Fortov V.E., M. Jazbinsek, Hauri C.P., Generation of strong-field spectrally tunable terahertz pulses. *Optics Express*, 28(23), pp. 33921-33936 (2020).
7. Ovchinnikov, A.V., Chefonov, O.V., Mishina, E.D., Agranat, M.B. "Second harmonic generation in the bulk of silicon induced by an electric field of a high power terahertz pulse" *Scientific Reports*, 9 (1), статья № 9753 (2019)
8. Chefonov, O.V., Ovchinnikov, A.V., Hauri, C.P. and Agranat, M.B.,. Broadband and narrowband laser-based terahertz source and its application for resonant and non-resonant excitation of antiferromagnetic modes in NiO. *Optics Express*, 27(19), pp. 27273-27281 (2019)
9. Agranat M.B., Chefonov O.V., Ovchinnikov A.V., Ashitkov S.I., Fortov V.E., Kondratenko P.S. "Damage in a Thin Metal Film by High-Power Terahertz Radiation", *Phys Rev Lett*, V.120, 8, 085704, (2018)
10. Chefonov, O., V; Ovchinnikov, A., V; Evlashin, S. A.; Agranat, M. B. Damage Threshold of Ni Thin Film by Terahertz Pulses. *Journal Of Infrared Millimeter And Terahertz Waves*, 39(11) pp. 1047-1054 (2018).
11. Chefonov, O.V., Ovchinnikov, A.V., Agranat, M.B., Fortov, V.E., Efimenko, E.S., Stepanov, A.N. and Savel'ev, A.B., 2018. Nonlinear transfer of an intense few-cycle terahertz pulse through opaque n -doped Si. *Physical Review B*, 94(16).
12. Vicario, C., Jazbinsek, M., Ovchinnikov, A.V., Chefonov, O.V., Ashitkov, S.I., Agranat, M.B. and Hauri, C.P., High efficiency THz generation in DSTMS, DAST and OH1 pumped by Cr:forsterite laser. *Optics Express*, 23(4), pp. 4573-4580 (2015).
13. C. Vicario, A. V. Ovchinnikov, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat, V. E. Fortov, and C. P. Hauri «Generation of 0.9-mJ THz pulses in DSTMS pumped by a Cr:Mg2SiO4 laser», *Optics letters*, Vol. 39, No. 23, pp.6632-6635 (2014)