

Лазерный источник сверхмощного переходного ТГц излучения

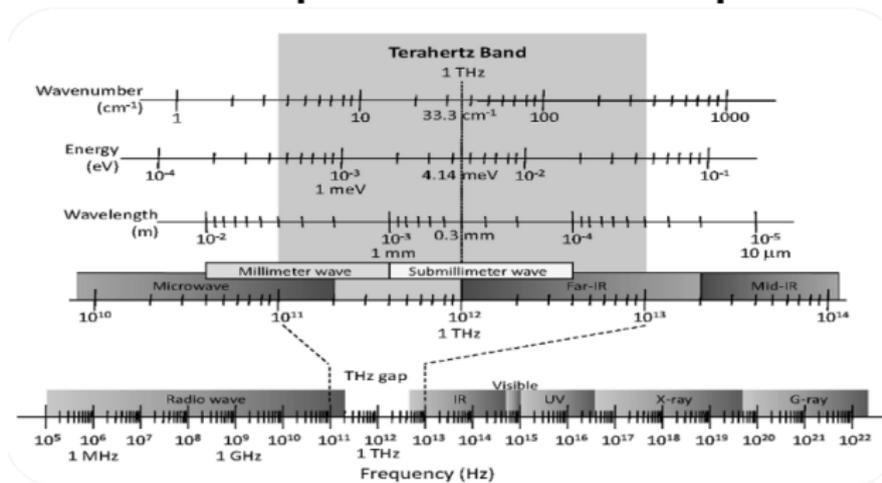
Куратов А.С., Брантов А.В., Ковалев В.Ф., Быченков В.Ю.

ВНИИА, ФИАН, ИПМ

2023

Терагерцовое (ТГц) излучение

Электромагнитный спектр



Характеристики ТГц излучения

- Frequency: $\nu = 1 \text{ THz} = 1000 \text{ GHz}$
- Angular frequency: $\omega = 2\pi\nu = 6.28 \text{ THz}$
- Period: $\tau = 1/\nu = 1 \text{ ps}$
- Wavelength: $\lambda = c/\nu = 0.3 \text{ mm} = 300 \mu\text{m}$
- Wavenumber: $\bar{k} = k/2\pi = 1/\lambda = 33.3 \text{ cm}^{-1}$
- Photon energy: $h\nu = \hbar\omega = 4.14 \text{ meV}$
- Temperature: $T = h\nu/k_B = 48 \text{ K}$

Применение ТГц излучения в медицине^{1,2}

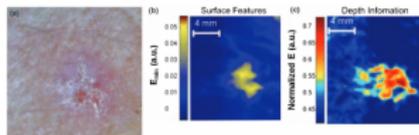


Table 2. THz Treatment Applications

Therapy Field	Treatment Method	Advantages
Decreasing tumor size	THz irradiation	<ul style="list-style-type: none"> It affects refractory tumors activity. It causes a significant reduction after 3 days of irradiation. While it acts almost as effectively as X-Ray, it destroys selectively.
Treating skin cancer	Intense THz pulse irradiation	<ul style="list-style-type: none"> It affects the number of EDC genes. It treats and controls non-melanoma cancer cells.
Healing burn injuries	Terahertz therapy endogenous and exogenous NO inhibition	<ul style="list-style-type: none"> NO excitation in THz frequency range Higher burn injury healing quality Exact healing of a wound Instant feasibility issues
Treating cardiovascular patients	NO-terahertz therapy	<ul style="list-style-type: none"> It eliminates negative reactions after drug therapy, for angina pectoris patients. It increases blood clotting activity. It improves the health condition of myocardial ischemia patients.
Improving Corneal epithelium of the eye	Terahertz imaging and spectroscopy	<ul style="list-style-type: none"> It improves corneal epithelialization. Tolerable. Non-invasive. Non-allogenic. Non-harmful.

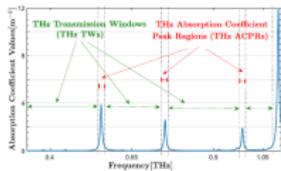
Table 1. THz Detection Methods, Advantages and Applications

Cancer Type	Method	Advantage	Application
Skin	In vivo THz imaging	Clear distribution	Cancer detection within organs Malignant tissue removal
	Ex vivo THz imaging		
Oral	Terahertz imaging (tissue freezing)	THz absorption effect is eliminated by freezing	Distinguishing malignant and healthy cellular structures
	Terahertz imaging (brain tumor modelling)	Accurate determination of tumor margin Clear determination of tumor area without the need for wet fluorescence High contrast image	Glioma tumor detection
Brain	In vivo THz Imaging	Definite tumor border detection	Diagnosis of brain fat deficiency
	Terahertz spectroscopy	Accurate diagnostic	
Lungs and Small Intestine	Terahertz Spectroscopy Imaging (reflective)	Clear difference in morphology, density, electrical properties Recognizable morphological details Agreement with histopathological results In situ detection	Diseased tissue detection (in situ or after removal)
Prostate	Terahertz time-dependent spectroscopy, imaging techniques, computer classification	The prominent color of the tumor makes it distinguishable with a prediction accuracy of 92.22%.	Classify and diagnose cancer specimens in paraffin
Colon	Terahertz imaging (by an endoscopic)	Convenient endoscopic system Computerized endoscopic system Does not require different operators Preparations can be done by an inexperienced person More economical	Imaging live cancer cells
Cervical	Terahertz single measurement	Absorption is proportional to density	Identifying live cervical cancer cells
Gastrointestinal	Terahertz time-domain spectroscopy	Tissue detection by absorption rate Refractive index and dielectric permittivity can help in diagnosis	Malignant tumor detection

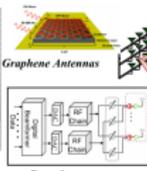
¹ J.Son et al., J. Appl. Phys. 125, 190901 (2019)

² T.Amini et al., J Lasers Med Sci 12:e92 (2021)

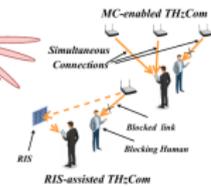
Применение ТГц излучения в системах безопасности^{1,2} и коммуникации³



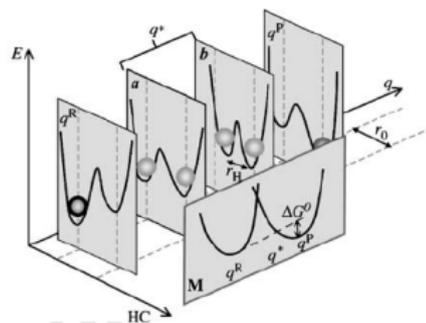
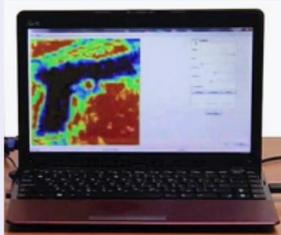
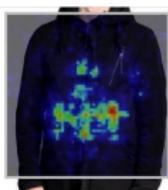
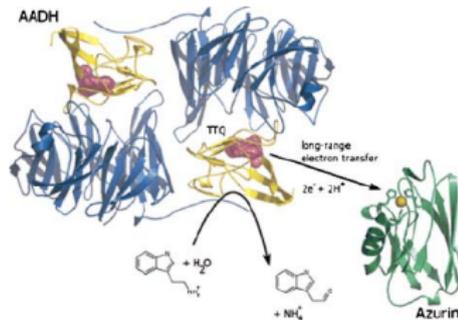
THz Spectrum Management



Beamformers
THz Antenna Arrays



6G-enabling technologies for THzCom



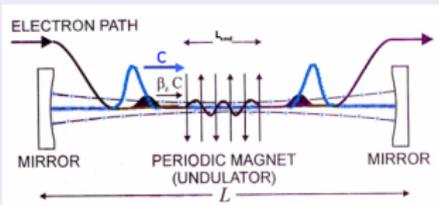
¹ R.Orlando et al., J Inf. Milli. Tera. Waves 30, 1308–1318 (2009)

² <https://terasense.com>

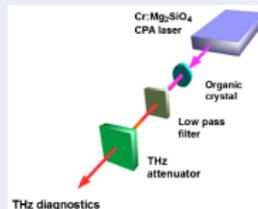
³ arXiv:2207.11021 (2022)

Источники Мощного ТГц излучения

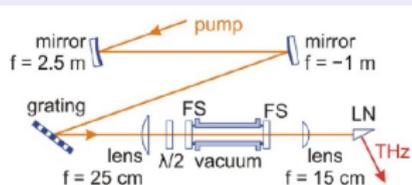
ЛСЭ^a



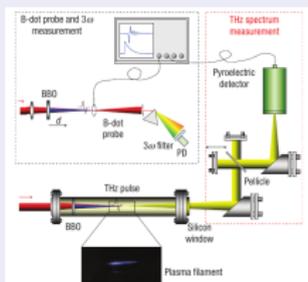
Органические кристаллы^c



Оптическое выпрямление^b



"Газовая" плазма^d



^aR.Kulipanov, et al., Ter. Sci. Tech. 1, 2 (2008)

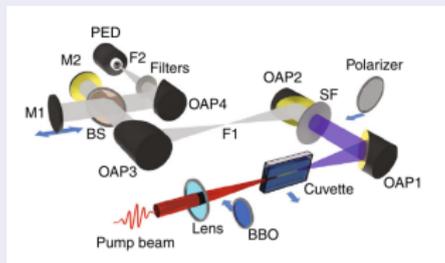
^bJ.Fülöp et al., Opt. Exp. 20155, (2014)

^cC.Vicario et al., Opt.Lett. 39, 23 (2014)

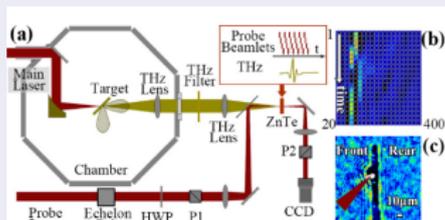
^dK.Kim et al., Nat.Phot. 2, 605 (2008)

Источники Мощного ТГц излучения

"Жидкостная" плазма^a



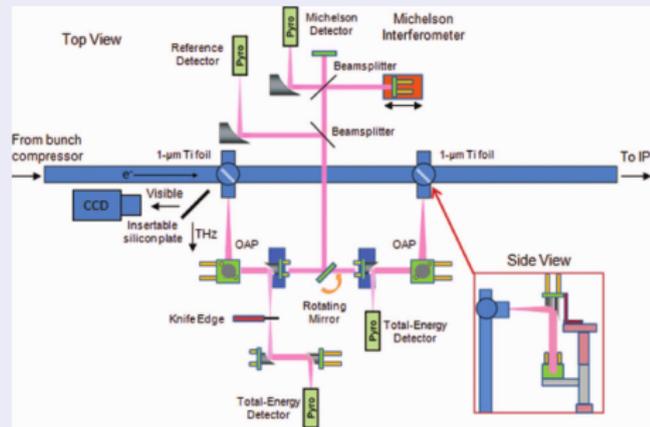
"Твердотельная" плазма^b



^a I. Dey, et al., Nat. Comm. 8:1184 (2017)

^b Z. Jin et al., PRE. 94, 033206 (2016)

Переходное излучение из ускорителей^c



^c Z. Wu et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 022701 (2013)

Сравнение источников

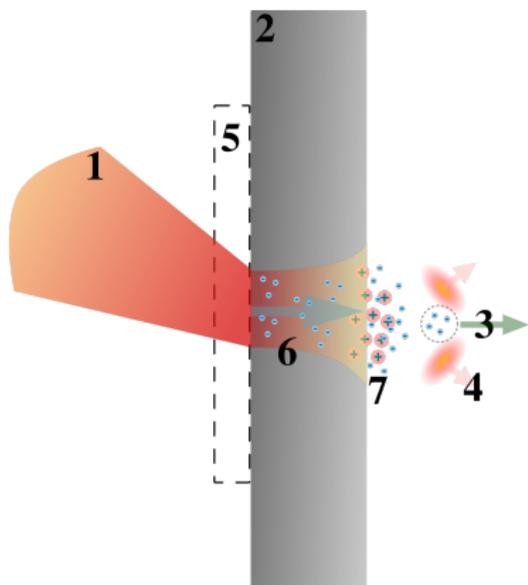
TABLE I. Comparison with state-of-the-art high-power THz sources, including a THz free-electron laser (FEL), TR in a linear accelerator (LINAC), optical rectification (OR) in organic crystals and lithium niobate (LiNbO₃), and laser-induced plasmas in air, liquids, and solids. All sources are broadband except the FEL. The data for existing sources are referenced from the previously reported experimental records.

	Peak power (GW)	20-dB bandwidth (THz)	Brightness temperature (10 ¹⁹ K)	Laser-THz conversion efficiency
FEL [15]	0.001	0.007	1	...
LINAC (TR) [16]	2–4	3–10	1–6	...
Organic crystal (OR) [18,19]	4	3	10	3%
LiNbO ₃ (OR) [20]	0.2	0.4	2	0.77% (3.8%[21])
Air plasma [25,26]	0.1	10	0.02	0.01% (0.1% [27])
Liquid plasma [28]	0.04	15	0.005	0.1%
Solid plasma	JETI [33]	1.5	0.4	0.08%
	This work	(0.08–1.2) × 10 ³	(0.5–5)	(0.16–0.29)%

Сравнение источников мощного ТГц излучения. Лазеры на свободных электронах, Линейные ускорители, Оптическое выпрямление (органические кристаллы, наклонный волновой фронт, "газовая" "жидкостная" и "твердотельная" плазма. Таблица взята из работы¹)

¹G.Liao et al., PRX. 10, 031062 (2020)

Дополнительные условия



- Тугоплавкая, хорошо проводящая мишень
- Основное излучение под направлениям близкими к нормали
- Сбор и фокусировка излучения
- Измерение на значительных расстояниях. Измеряемый спектр 0.5-2 ТГц
- Метод пробных частиц для измерения полей

Аналитический расчет

Электромагнитные поля:

$$\mathbf{E} = (E_\rho, 0, E_z)$$

$$\mathbf{H} = (0, H_\phi, 0)$$

Ток горячих электронов:

$$j_z = Qv\delta(z - vt)\theta(z) \frac{\exp(-\frac{\rho^2}{r_0^2})}{\pi r_0^2}$$

Уравнение для векторного потенциала:

$$\partial_{tt} A_z = c^2 \Delta A_z + 4\pi c j_z$$

Электрические и магнитные поля:

$$E_z = -(1/c) \partial_t (A_z^+ + A_z^-) - (c/v) \partial_z (A_z^+ - A_z^-)$$

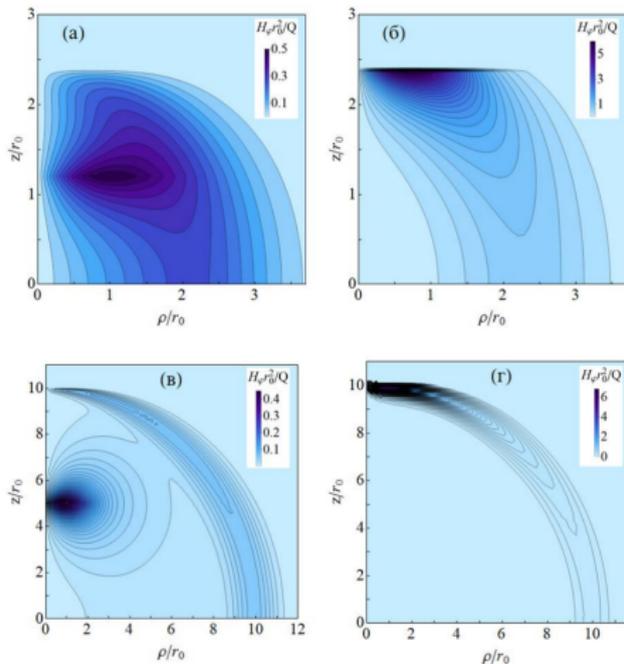
$$E_\rho = -(c/v) \partial_\rho (A_z^+ - A_z^-), \quad H_\phi = -\partial_\rho (A_z^+ + A_z^-)$$

Решение:

$$A_z^\pm = -\frac{Q\gamma v}{c} \int_0^\infty \rho' d\rho' \frac{N(\rho, \rho' \theta(\sqrt{c^2 t^2 - z^2} - \rho'))}{\sqrt{\gamma^2 (vt \mp z)^2 + \rho'^2}},$$

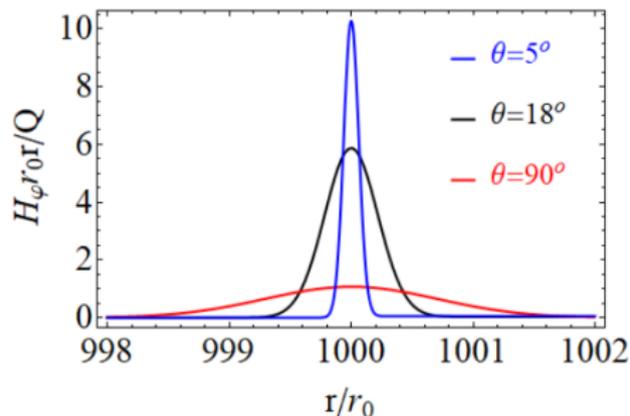
$$N(\rho, \rho') = \frac{2}{r_0^2} I_0\left(\frac{2\rho'\rho}{r_0^2}\right) \exp\left(-\frac{\rho'^2 + \rho^2}{r_0^2}\right)$$

Результат вычислений



Распределение магнитного поля при вылете из идеального проводника пучка электронов со скоростью $0.5c$ (а, в) и $0.99c$ (б, г) в момент времени $t = 2.4r_0/c$ (а, б) и $t = 10r_0/c$ (в, г).

Результат вычислений



Импульс магнитного поля излучения на расстоянии $r = 10^3 r_0$ при вылете из идеального проводника пучка электронов со скоростью $0.95c$ для трех углов наблюдения, отвечающих направлению вдоль мишени (90°), направлению наибольшей энергии излучения $\sim \gamma$ (18°) и направлению вблизи прямой вылета электронов (5°).

Эффективность генерации

Потенциальный барьер:

$$e\Phi_m = -2T_h \ln[r_0/(\lambda_{De}\sqrt{2})]$$

«Убегающие» электроны:

$$n_f \simeq n_h \exp(e\Phi_m/T_h)$$

$$Q = en_f ct_0 \pi r_0^2 = T_h ct_0 / (2e)$$

Температура горячих электронов

$$T_h \simeq mc^2(\sqrt{1 + a_0^2/2} - 1) \approx 0.7 \times mc^2 a_0$$

$$a_0 = 0.85 \sqrt{I[10^{18} \text{W/cm}^2]/\lambda[\mu\text{m}]}$$

Заряд электронов:

$$Q = 0.35 \times ea_0 ct_0 / r_e$$

Энергия ТГц излучения и энергия лазерного импульса:

$$\mathcal{E}_R \sim Q^2 / ct_0 \sim 0.1 \times mc^2 a_0^2 ct_0 / r_e$$

$$\mathcal{E}_L = mc^2 a_0^2 ct_0 R_0^2 \pi / (2\lambda^2 r_e)$$

Эффективность лазера:

$$\eta = \mathcal{E}_R / \mathcal{E}_L \sim 0.08 \lambda^2 / R_0^2 \sim 1.5\%$$

Параметры ТГц импульса

Лазерный импульс:

- 300 Дж
- 100 мкм
- $\sim 10^{19} \text{Вт/см}^2$

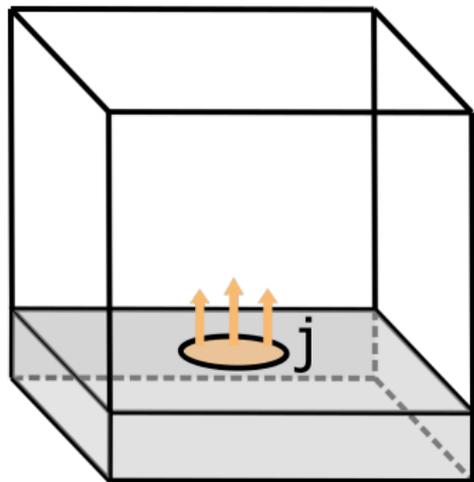
Горячие электроны:

- 0.1 мКл

ТГц импульс:

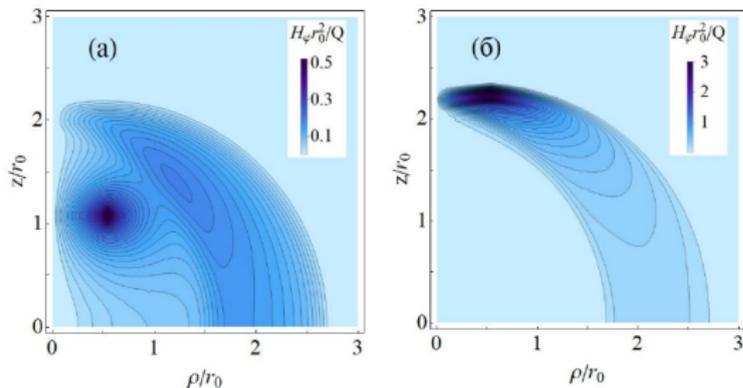
- 1 – 5 Дж
- 1.5%
- 10 – 50 ТВт
- $E_{\text{THz}} \sim \text{ГВ/м}$ при
 $l \sim 10 \text{ см}$

Численное моделирование соответствующее эксперименту

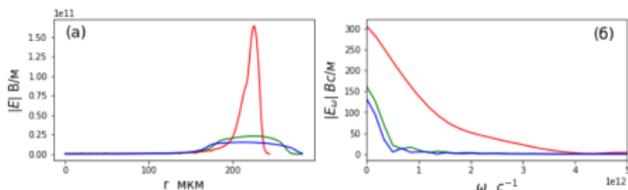


- * FDTD, модель Друде
- * $600 \times 600 \times 300$ мкм³
- * $\Delta t = 1$ фс, $\Delta r = 1$ мкм
- * $\sigma_0 = 10^{18} \text{ c}^{-1}$, $\nu = 10^{13} \text{ c}^{-1}$
- * $D_z = ct_0 = 8$ мкм, $D_r = 2r_0 = 200$ мкм
- * $v = 0.5c, 0.99c$

Результаты численного моделирования



Распределения магнитного поля из численного моделирования при вылете из металла пучка электронов со скоростями 0.5с (а) и 0.99с (б) в момент времени 800 фс ($2.4r_0/c$)



Профиль импульса электрического поля (а) и соответствующий спектр излучения (б), генерируемые при вылете из мишени пучка электронов со скоростью 0.99с, построенные для трех углов наблюдения: 10° (красный), 50° (зеленый) и 80° (синий) в момент времени 800 фс.

Вывод

- Продемонстрирована возможность использования коротких мощных лазерных импульсов, воздействующих на металлические мишени, для генерации низкочастотных ТГц импульсов
- Представлено точное аналитическое решение задачи для уравнений Максвелла описывает возникающие при мгновенном вылете из идеального проводника гауссова пучка релятивистских электронов
- Приведены оценки, которые позволяют предсказать высокий коэффициент конверсии энергии лазерного излучения в энергию ТГц импульса, имеющего рекордные величины электрического и магнитного полей
- Предложен эксперимент для мощной установки, оценены параметры результирующих ТГц импульсов