

Генерация мощного терагерцового излучения с управляемыми параметрами при облучении искривленных проволочных мишеней ультракороткими релятивистскими лазерными импульсами

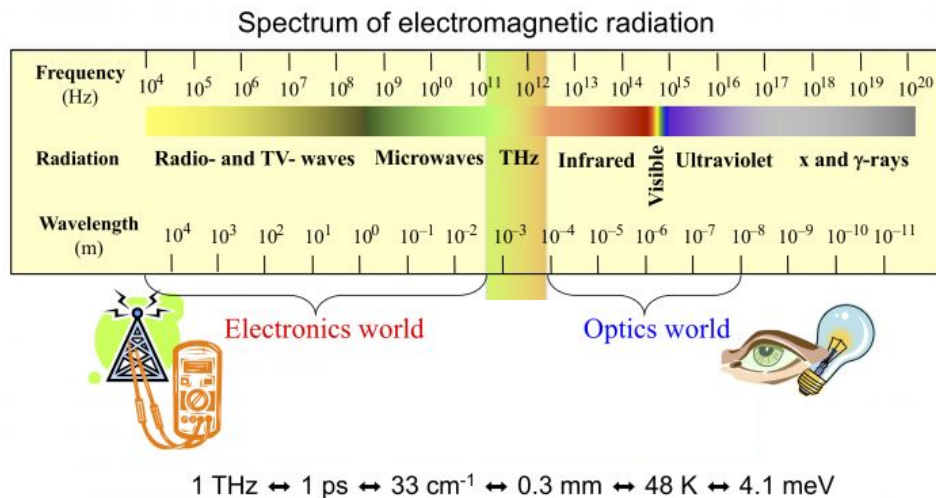
Бухарский Н.Д.^{1,2}, Корнеев Ф. А.^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

² Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва

e-mail: n.bukharskii@gmail.com, ph.korneev@gmail.com

Терагерцовое излучение



Источник: www.fzu.cz

Возможные приложения ТГц излучения:

- медицинская диагностика
- спектроскопия
- исследование свойств различных материалов и управление ими
- системы безопасности
- системы беспроводных коммуникаций с высокой пропускной способностью
- системы для поиска и обнаружения дефектов

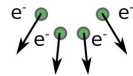
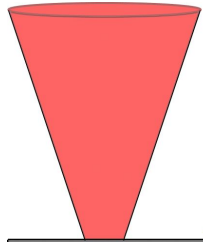
Методики получения мощных ТГц импульсов:

- широкоапертурные фотопроводящие антенны (англ. LAPCA - Large Aperture Photoconductive Antennas) - плотность мощности ограничена вследствие эффекта насыщения
- оптическое выпрямление в нелинейных кристаллах - плотность мощности ограничена порогом повреждения нелинейной среды
- **лазерно-плазменные методы** - ограничения отсутствуют, выходная мощность определяется параметрами лазерного драйвера

Генерация разрядных токов в протяженных мишенях

Для генерации электромагнитного излучения можно использовать разрядные токи, возбуждаемые в протяженных мишенях при помощи мощных лазерных импульсов

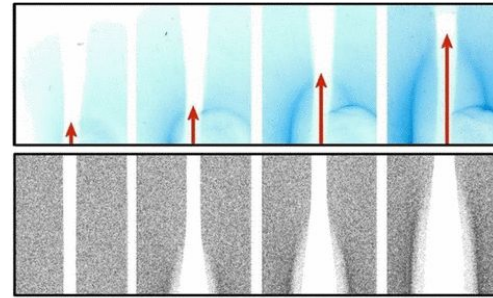
мощный лазерный импульс



горячие электроны

разрядный ток

Схема генерации разрядной волны в протяженной мишени



Распространение фронта разрядной волны: результаты эксперимента (верхний ряд) и численных симуляций (нижний ряд)

K. Quinn et al. Phys. Rev. Lett. **102**, 194801 (2009).

Измеренная экспериментально скорость распространения фронта разрядной волны - $(0.95 \pm 0.05)c$

Разрядные токи в катушечно-дисковых мишенях

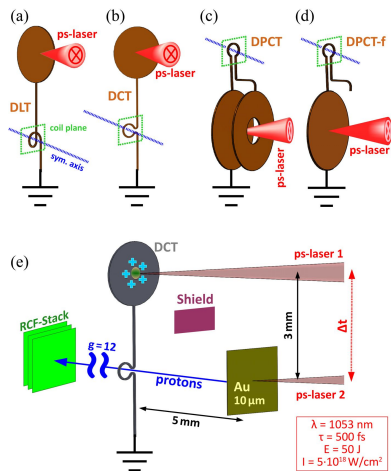
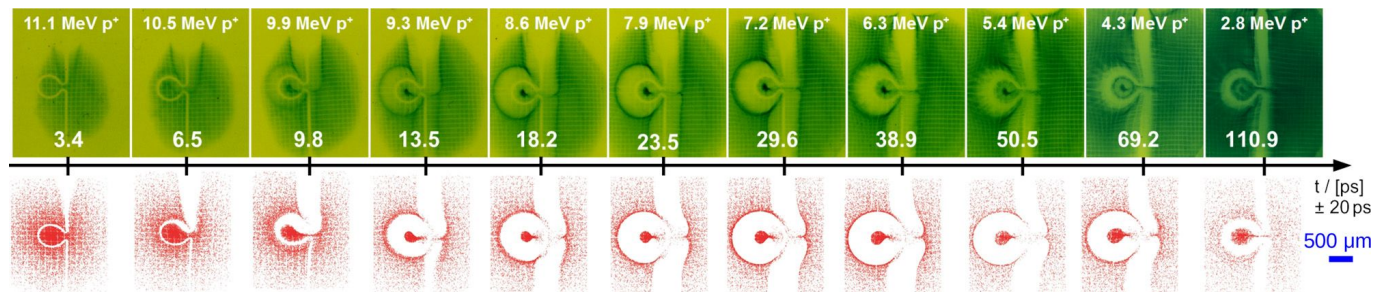
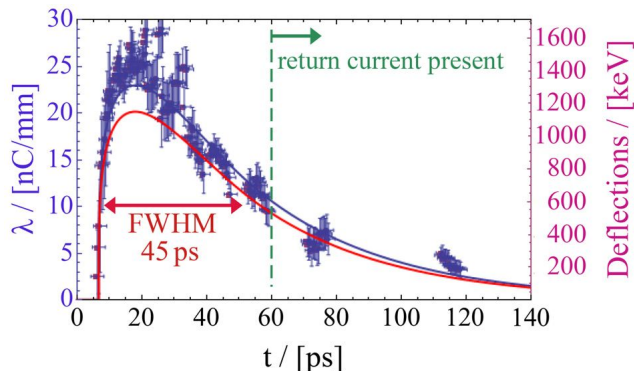


Схема эксперимента по
генерации разрядных
импульсов в катушечных
мишенях

Измеренная групповая
скорость распространения
фронта разрядной волны -
 $(0.82 \pm 0.06)c$



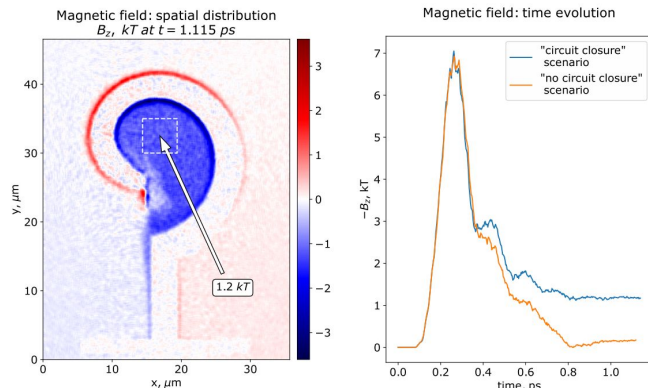
Протонные радиограммы, соответствующие различным моментам времени и характеризующие процесс распространения разрядной волны по DCT мишени. Верхний ряд - экспериментальные данные, нижний ряд - синтетические изображения, полученные при помощи метода пробных частиц



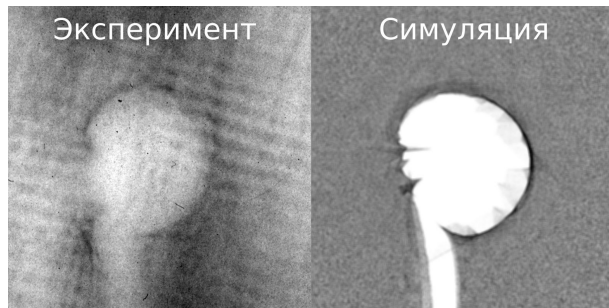
Временной профиль
разрядного импульса,
полученный на основе
анализа экспериментальных
данных

Разрядные токи в микро-катушечных мишенях

Фокусировка непосредственно на свободном конце незамкнутой катушки - отсутствует дисперсия, связанная с распространением разрядной волны по диску. Возможны различные режимы взаимодействия.



Результаты двумерного PIC моделирования в Smilei: пространственное распределение магнитного поля для сценария с замыканием электрического контура (слева) и эволюция средней величины магнитного поля в центре мишени для двух различных сценариев: (I) 'circuit closure' - в мишени остается постоянный ток, который замыкается через плазму в области взаимодействия; (II) 'no circuit closure' - ток не замыкается и уходит в землю по ножке мишени

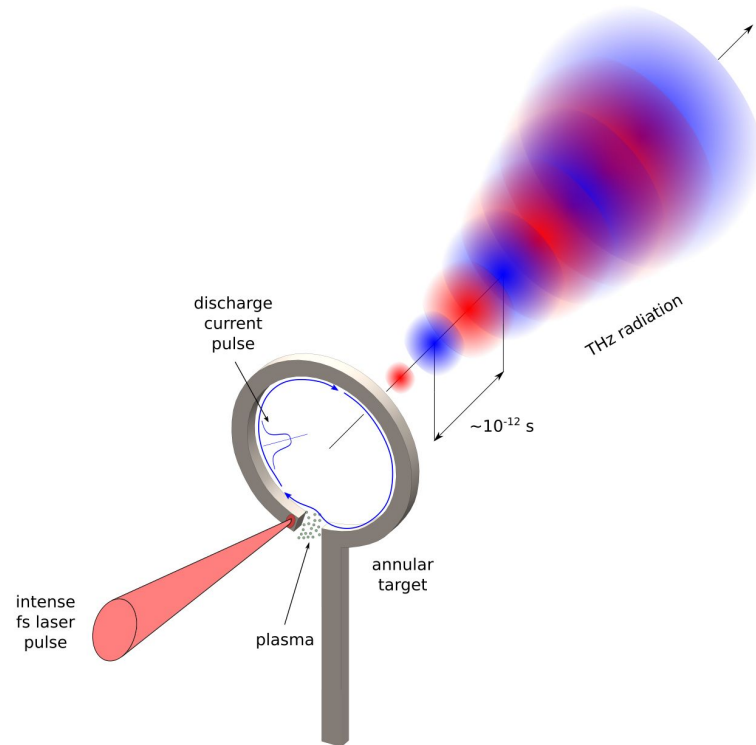


Сравнение экспериментальной радиограммы, соответствующей моменту времени 25 пс после окончания лазерного импульса, с синтетической. Результаты анализа свидетельствуют о поддержании в мишени величины тока, соответствующей значению магнитного поля (210 ± 50) Тл

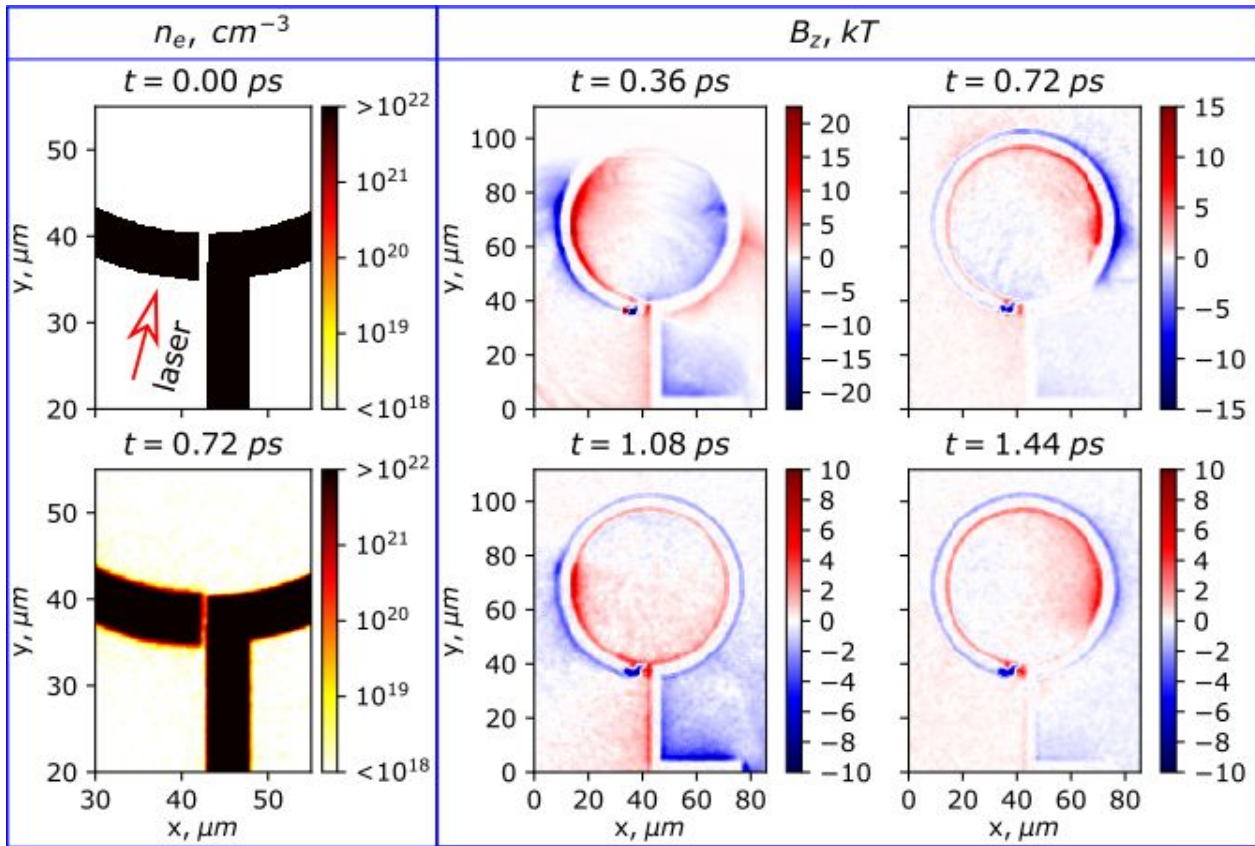
Генерация ТГц излучения в микро-катушечных мишенях

При выполнении условий на замыкание электрического контура и достаточно хорошей локализации разрядного импульса возможен третий сценарий взаимодействия - (III) в мишени формируется короткий осциллирующий разрядный импульс, который может генерировать электромагнитное излучение

- изначально кольцо не замкнуто, разрядный импульс распространяется по часовой стрелке
- за счет расширения плазмы вблизи свободного конца мишени происходит замыкания электрического контура с током
- генерация излучения происходит за счет периодических осцилляций разрядного импульса в замкнутом электрическом контуре
- период колебаний разрядного импульса в контуре определяет частоту создаваемого системой излучения
- ориентация мишени определяет направление создаваемого системой излучения



Численный расчет процесса формирования короткого разрядного импульса в микро-катушечной мишени



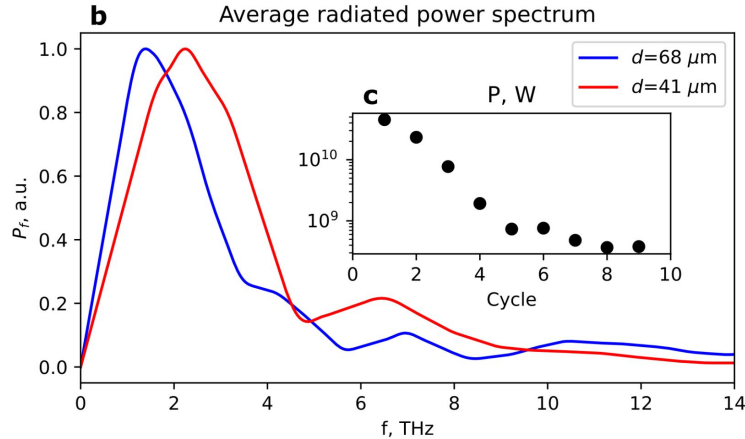
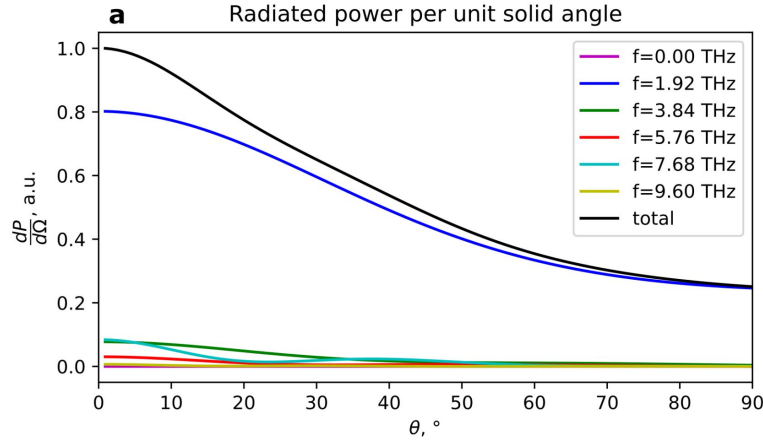
Результаты двумерного PIC моделирования в коде Smilei: пространственное распределение электронной плотности (слева) и компоненты B_z магнитного поля (справа) в различные моменты времени

Параметры лазерного драйвера, использованные в расчете:

$$\lambda = 800 \text{ нм}; \tau_{FWHM} = 24 \text{ фс}; \\ r_{foc.} = 4 \text{ мкм}; I_0 = 10^{21} \text{ Вт/см}^2$$

Bukharskii N. et al. Appl. Phys. Lett. **120**, 014102 (2022).

Свойства ТГц излучения, создаваемого катушечной мишенью



Векторный потенциал, создаваемый током $\mathbf{I}$, текущем в кольце радиуса R

$$\mathbf{A}_\omega = \frac{e^{ikR}}{cR} \int \mathbf{I}_\omega(\mathbf{r}) e^{-ik\mathbf{r}} d^3r$$

Угловое распределение плотности мощности излучения

$$\frac{dP_\omega(\Omega)}{d\Omega d\omega} = \frac{cR^2}{4\pi^2} |[k, A_\omega]|^2$$

Амплитуда электрического поля на расстоянии R

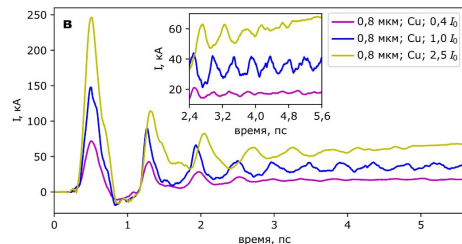
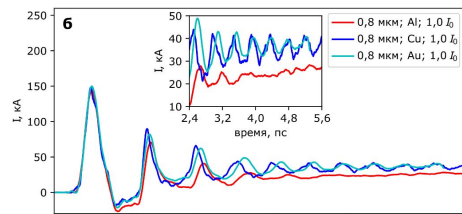
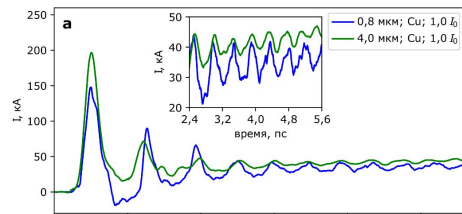
$$E_\omega = \sqrt{\frac{4\pi}{cR^2} \frac{dP_\omega}{d\Omega d\omega}}$$

Аналитические оценки свойств создаваемого мишенью ТГц излучения:

- (a) угловое распределение плотности мощности излучения для различных частотных компонент;
- (b) усредненный спектр излучения для двух мишеней с различным диаметром;
- (c) полная мощность, излучаемая в полупространство на каждом обороте вдоль периметра катушки

Эффективность преобразования лазерной энергии в энергию ТГц излучения $\sim 2\%$

Влияние параметров мишени и лазерного драйвера на время существования сильного разрядного импульса в замкнутом контуре

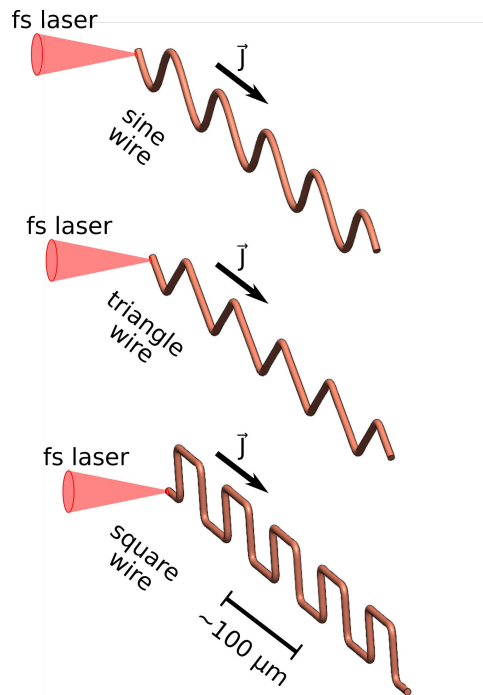


Результаты параметрического исследования зависимости временного профиля тока в фиксированном сечении проволоки от параметров мишени и лазерного драйвера:

- (а) профили тока для различных размеров зазора между свободным и противоположным концами катушки;
- (б) профили тока для различных вариантов материала мишени (различной массы ионов плазмы);
- (в) профили тока для различной пиковой интенсивности лазерного драйвера

Вывод: создание необходимых условий для замыкания электрического контура требует аккуратной оптимизации параметров мишени и лазерного драйвера

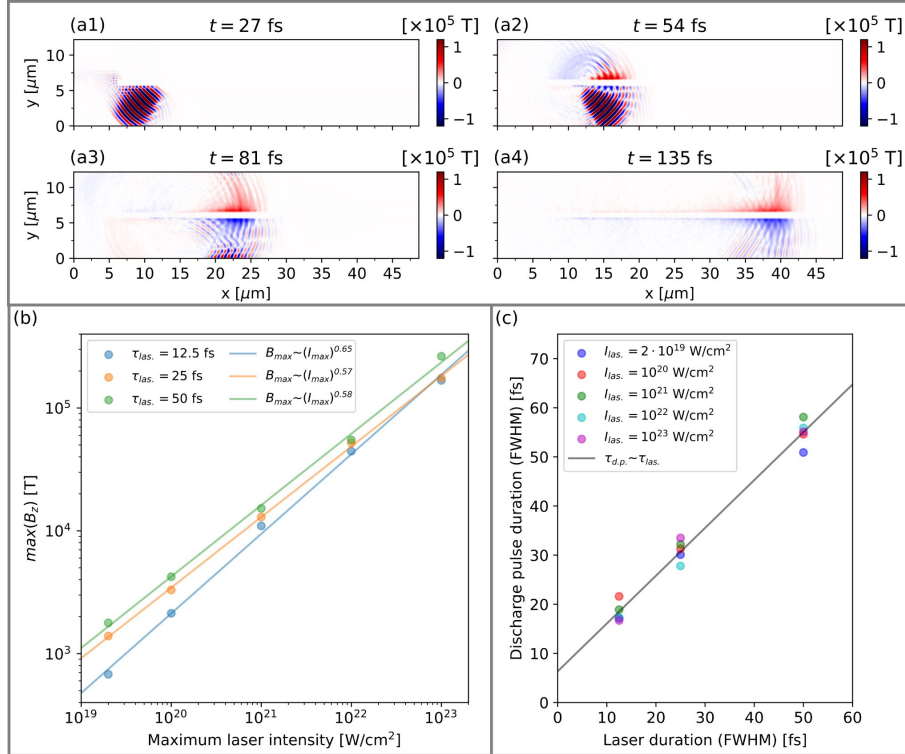
Генерация ТГц излучения в протяженных искривленных микро-проволочных мишенях



Возможные варианты геометрий микро-проволочных мишеней для генерации ТГц излучения

- фемтосекундный лазерный импульс релятивистской интенсивности облучает свободный конец проволоки, создавая сильный разрядный импульс, распространяющийся вдоль поверхности мишени
- в результате осцилляций разрядного импульса по искривленной поверхности мишени, имеющей периодическую структуру, создается электромагнитное излучение, попадающее в ТГц диапазон для размеров мишени $\sim 100 \text{ мкм}$
- генерация ТГц происходит непрерывно на протяжении всего процесса распространения разрядного импульса вдоль мишени
- для генерации ТГц излучения с длительностью выше одного периода колебаний не требуется соблюдения особых условий для замыкания тока

Исследование процесса формирования короткого разрядного в протяженной мишени



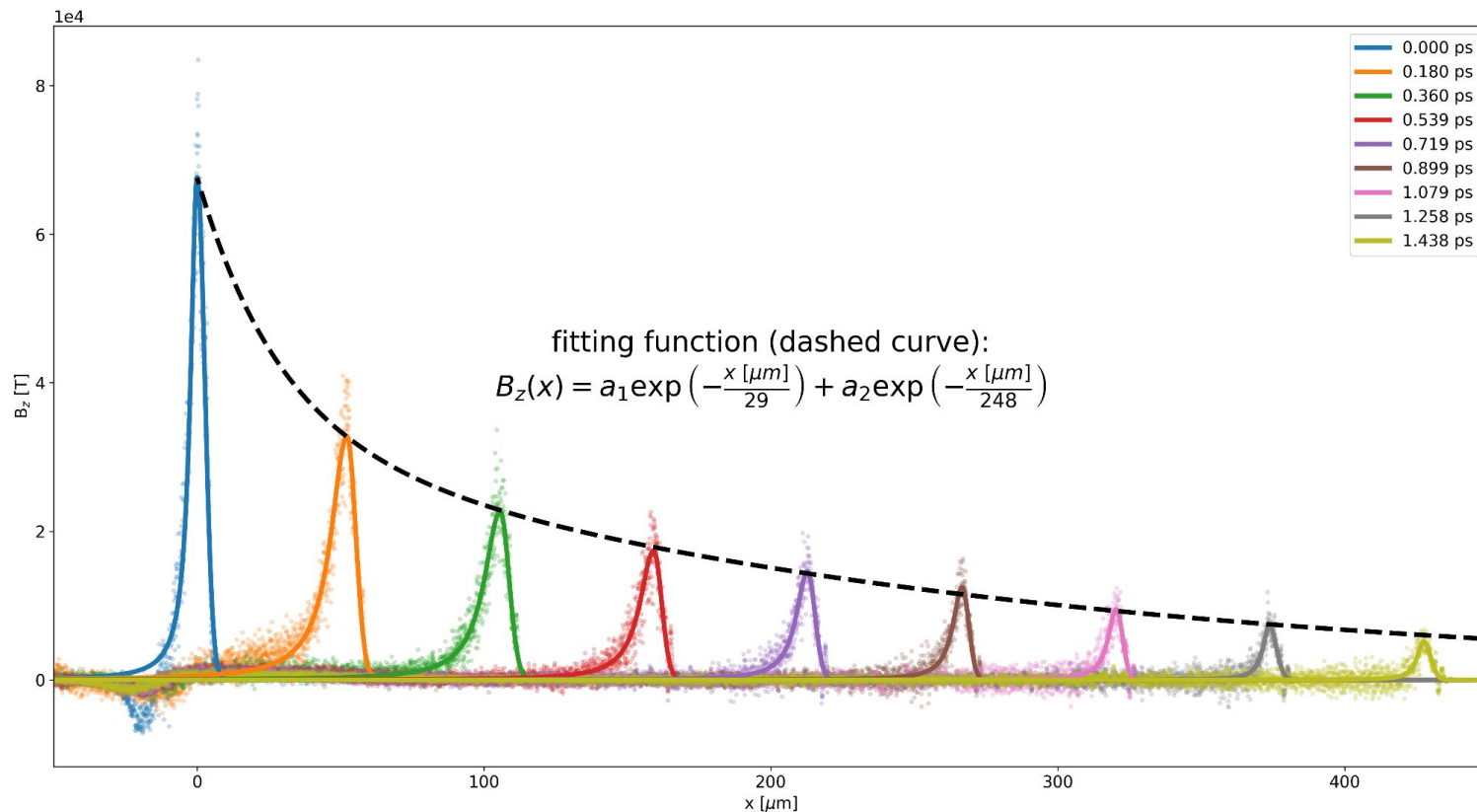
Результаты двумерного PIC моделирования в коде Smilei с учетом полевой ионизации для мишени с твердотельной плотностью:

(a1-a4) пространственное распределение компоненты B_z разрядной волны в различные моменты времени;

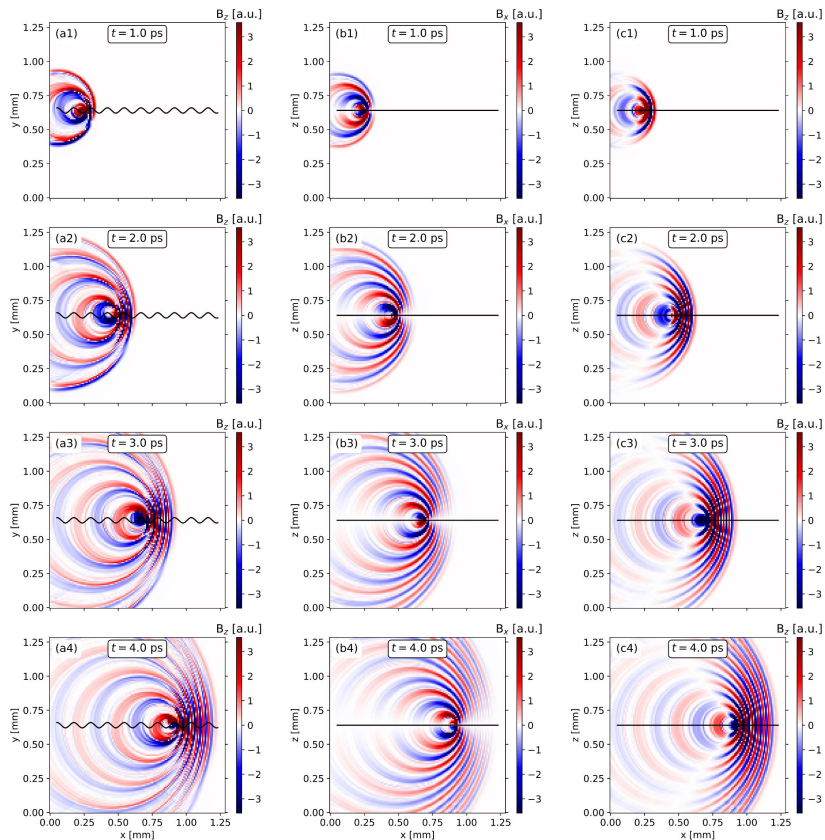
(b) зависимость амплитуды разрядной волны от пиковой интенсивности лазерного драйвера;

(c) зависимость длительности разрядного импульса от длительности импульса лазерного драйвера

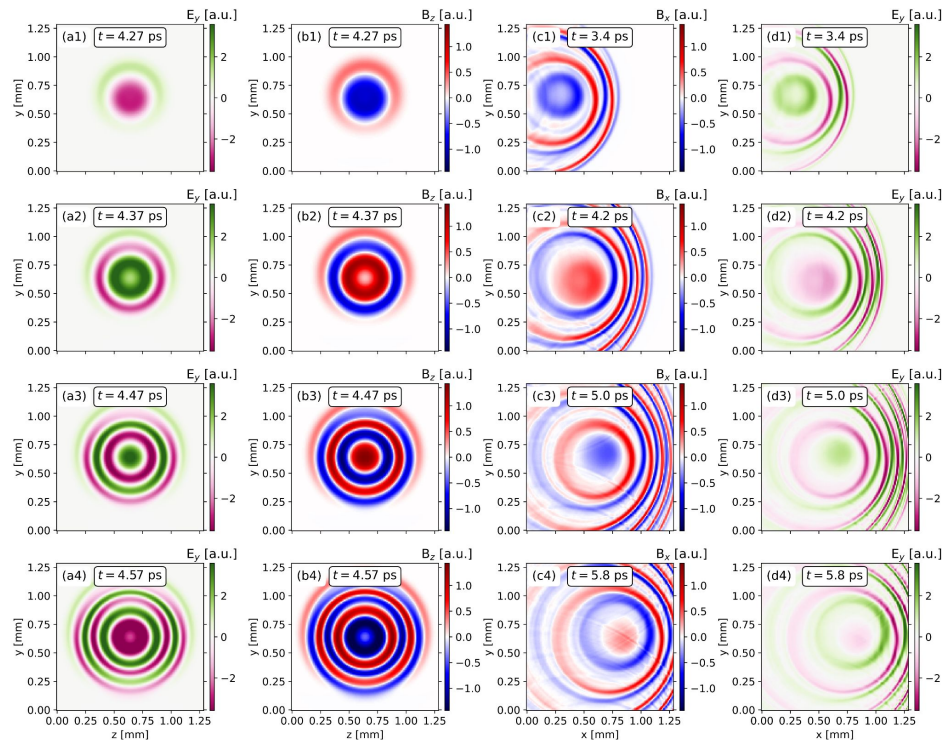
Затухание разрядного импульса при распространении по длинной проволоке



Расчет электромагнитных полей для микро-проволочной мишени в форме синусоиды



Электромагнитные поля в плоскости $z = z_{max}/2$ (колонка 1)
и в плоскости $y = y_{max}/2$ (колонки 2, 3)



Электромагнитные поля на стенках расчетной области:
в плоскости $x = x_{max}$ (колонки 1, 2) и в плоскости $z = z_{max}$ (колонки 3, 4)

Аналитическое рассмотрение процесса генерации электромагнитного излучения

Рассмотрим δ -функциональный ток:

$$J \sim J_0 \delta(l - v_0 t)$$

амплитуда
положение
разрядного
импульса на
поверхности
мишени
скорость
распространения
разрядного
импульса ($\approx c$)

Геометрия проволоки:

$$y = a \sin(\kappa x)$$

Тогда ток:

$$\vec{J} = J_0 \delta(l - v_0 t) \left(\frac{dx}{dl} \vec{e}_x + \frac{dy}{dl} \vec{e}_y \right)$$

Векторный потенциал:

$$\vec{A}(t) = \frac{J_0}{c} \int dl \frac{\delta(l - v_0 t')}{|\vec{R} - \vec{r}|} \left(\frac{dx}{dl} \vec{e}_x + \frac{dy}{dl} \vec{e}_y \right) \quad \text{где} \quad t' = t - \frac{|\vec{R} - \vec{r}|}{c}$$

Электрическое поле:

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{R} \parallel \vec{e}_x : E_x, E_z = 0; E_y \neq 0$$

волна поляризована вдоль y

$$\vec{R} \parallel \vec{e}_y : E_y, E_z = 0; E_x \neq 0$$

волна поляризована вдоль x

$$\vec{R} \parallel \vec{e}_z : E_z = 0; E_x, E_y \neq 0$$

поляризация имеет сложный вид

Аналитическое рассмотрение (продолжение)

Для проволоки в форме синусоиды:

$$\vec{A}(t) = \frac{J_0}{c} \int dx \frac{\delta(l(x) - v_0 t')}{|\vec{R} - \vec{r}(x)|} (\vec{e}_x + \kappa a \cos \kappa x \cdot \vec{e}_y)$$

где $l(x) = \frac{\sqrt{1 + a^2 \kappa^2}}{\kappa} E \left(\kappa x, \frac{a^2 \kappa^2}{1 + a^2 \kappa^2} \right)$ $t' = t - \frac{|\vec{R} - \vec{r}(x)|}{c}$

эллиптический интеграл второго рода

В волновой зоне знаменатель: $|\vec{R} - \vec{r}(x)| \approx R$

тогда
$$\vec{A}(\omega) = \frac{J_0}{c R v_0} \int dx \exp \left[i \frac{\omega l(x)}{v_0} - i \frac{\omega \vec{R} \vec{r}}{c R} + i \frac{\omega R}{c} \right] (\vec{e}_x + \kappa a \cos \kappa x \cdot \vec{e}_y)$$

Используя полученное выражение и метод перевала, можно получить выражение для характерной частоты, которая будет создаваться током J :

$$\omega \approx \frac{\kappa x_0}{\frac{l(x_0)}{v_0} - \frac{\vec{R} \vec{r}}{c R}}$$

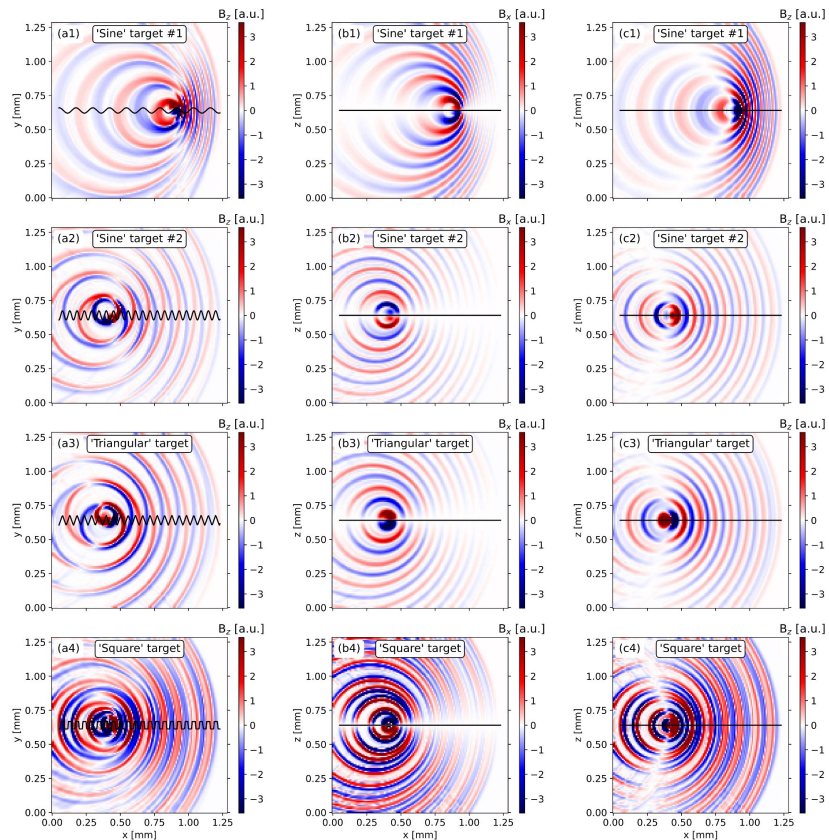
$$\begin{aligned} \kappa \uparrow &\Rightarrow \omega \uparrow \\ \vec{R} \uparrow \uparrow \vec{r} &\Rightarrow \omega = \omega_{\max} \\ \vec{R} \uparrow \downarrow \vec{r} &\Rightarrow \omega = \omega_{\min} \end{aligned}$$

где x_0 - решение уравнения:

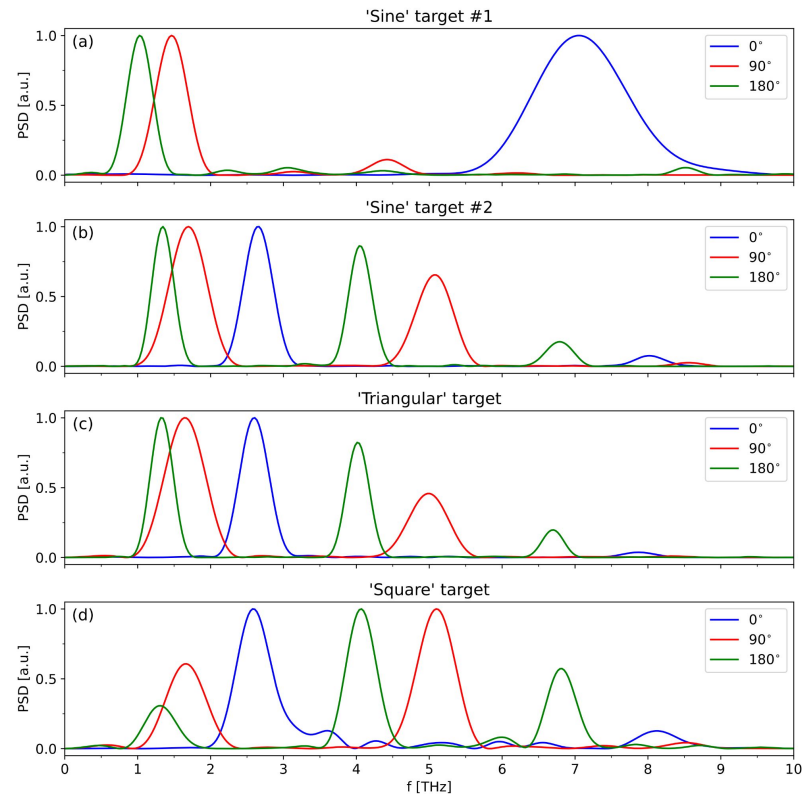
$$\frac{\omega}{v_0} \sqrt{1 + a^2 \kappa^2 \cos^2 \kappa x} - \frac{\omega R_x}{c R} \pm \kappa = 0$$

↑
эффект Доплера

Расчет электромагнитных полей для микро-проволочных мишеней различной формы



Электромагнитные поля в плоскости $z = z_{max}/2$ (колонка 1) и в плоскости $y = y_{max}/2$ (колонки 2, 3) для мишеней различной формы



Спектр излучения в различных направлениях для мишеней различной формы

Оценка мощности ТГц излучения

$$|\vec{E}| \sim \frac{J_0}{R} \quad \frac{dP}{d\Omega} = \frac{cR^2}{8\pi} |\vec{E}|^2 \quad P \approx \Delta\Omega \cdot \frac{dP}{d\Omega}$$

$$\tau_{las.} = 25 \text{ fs}; \quad R = 1 \text{ cm}; \quad \Delta\Omega_{eff.} = 1 \text{ sr}$$

$I_{las.} [\text{W/cm}^2]$	$E_{THz} [\text{V/m}]$	$P_{THz} [\text{W}]$	$U_{THz}/cycle [\text{J}]$
$2 \cdot 10^{19}$	10^8	$1,3 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^{-4}$
10^{20}	$3 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{10}$	0,006
10^{21}	$1,0 \cdot 10^9$	$1,3 \cdot 10^{11}$	0,07
10^{22}	$4 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{12}$	1,1
10^{23}	$1,4 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{13}$	13

Заключение

- рассмотрены процессы формирования коротких разрядных импульсов в протяженных мишенях различной формы
- исследован режим формирования короткого разрядного импульса при воздействии на мишень лазерного импульса сверхмалой длительности и показана возможность генерации ТГц излучения в этом режиме
- продемонстрирована возможность управления параметрами ТГц излучения - его спектром и пространственно-временным профилем - за счет геометрии мишени
- выполнены оценки амплитудно-энергетических характеристик ТГц излучения для различных параметров лазерного драйвера, показана возможность генерации ТГц импульсов ТВт уровня мощности при использовании современных петаваттных лазерных комплексов