Лазерный источник мощного униполярного терагерцового излучения

Брантов А. Ковалев В. Куратов А. Быченков В.

ФИАН, ВНИИА, ИПМ

2021

Брантов А. Ковалев В. Куратов А. Бычен Лазерный источник мощного униполярного те

・ロト ・回ト ・ヨト ・ヨト

Особенности униполярных импульсов [Arkhipov 2020a]



Степень униполярности

$$\xi(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{\left|\int \mathsf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) \, dt\right|}{\int |\mathsf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t})| \, dt}$$

(A) (□) (A) (□) (A)

Существования униполярных импульсов [Arkhipov 2020a]



《曰》《聞》 《臣》 《臣》

Применение униполярных импульсов



- Ускорение частиц [Rosanov 2020,Xie 2007]
- Управление молекулами [Salen 2019]

Аттосекундные импульсы

 Изучение и управление квантовыми системами [Arkhipov 2020c, Pakhomov 2017, Ramasesha 2016, Hassan 2016, Arkhipov 2020d, Bastrakova 2020]

《口》 《問》 《臣》 《臣》



Численная модель



Характеристики моделирования:

- * Метод конечные разности во временной области
- * Размер области 700 imes 700 imes 700

* Проводник - Друде модель

$$\epsilon = 1 + 4\pi\sigma(\omega)/\omega$$

 $\sigma = \sigma_0/(1 - i\omega)/\nu)$, где
 $\sigma_0 = 10^{18} \text{ c}^{-1}$ and $\nu = 10^{13} \text{ c}^{-1}$

・ロト ・四ト ・ヨト ・ヨト

Короткий лазерный импульс



Параметры задачи:

 $r_{\perp} = r_z = 20$ мкм $Q \sim 20$ нКv/c = 0.95, 0.5

Поля:

$$\begin{split} E_{\textit{surf}} &\sim 10^7 ~\mathrm{B/m} \\ E_{em} &\sim 10^{10-11} ~\mathrm{B/m} \end{split}$$

<ロト < 回ト < 回ト < 回ト < 回ト</p>

Длинный лазерный импульс





・ロト ・四ト ・ヨト ・ヨト

э

Модель излучения ТГц униполярных импульсов



Ток горячих электронов:

$$\mathbf{j} = (0, 0, j_z)$$
$$j_z = Qvn_z(t, z)n_\perp(\rho)$$

Электромагнитные поля:

 $\mathbf{E} = (E_
ho, 0, E_z)$ $\mathbf{H} = (0, H_\phi, 0)$

Уравнение для векторного потенциала:

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

- T

→ Ξ →

Общий вид решения

Решение уравнения для векторного потенциала:

$$\begin{split} A_z &= \frac{Qv}{c} \iint\limits_{\sqrt{\rho'^2 + z'^2} < ct} \mathrm{d}z' \mathrm{d}\rho' \rho' N_{\perp}(\rho, \rho') \frac{n_z(t - \sqrt{\rho'^2 + z'^2}/c, z' + z)}{\sqrt{\rho'^2 + z'^2}} \\ N_{\perp}(\rho, \rho') &= \int\limits_{0}^{2\pi} \mathrm{d}\chi \, n_{\perp} \left(\sqrt{\rho^2 + \rho'^2 + 2\rho' \rho \cos \chi}\right) \\ E_{\rho} \mid_{z=0} &= 0 \end{split}$$

Граничные условия учитываются добавлением тока изображения j_z^- .

3

・ロト ・四ト ・ヨト ・ヨト

Решение для вылетающего заряда

Используются следующие плотности горячих электронов:

$$\begin{split} n_z &= \theta(z)(\theta(vt-z) - \theta(v\tau-z))/(vt_0) \ , \tau = t - t_0 \\ n_\perp &= \exp\left(-\rho^2/r_0^2\right)/(\pi r_0^2) \end{split}$$

Решение принимает вид:

$$\begin{split} A_{z}^{\pm} &= \frac{Q}{ct_{0}} \int_{0}^{\infty} \rho' \mathrm{d}\rho' N_{\perp}^{gs}(\rho,\rho') [F^{\pm}(t) - F^{\pm}(\tau)] \\ F^{\pm}(t) &= \theta \left(c^{2}t^{2} - z^{2} - \rho'^{2} \right) \times \\ &\times \ln \left(\frac{vt \mp z + \sqrt{(vt \mp z)^{2} + (1 - \beta^{2})\rho'^{2}}}{(1 + \beta)(\sqrt{z^{2} + \rho'^{2}} \mp z)} \right) \\ N_{\perp}^{gs}(\rho,\rho') &= \frac{2}{r_{0}^{2}} l_{0} \left(\frac{2\rho'\rho}{r_{0}^{2}} \right) \exp \left(-\frac{\rho^{2} + \rho'^{2}}{r_{0}^{2}} \right) \end{split}$$

э

イロン イロン イヨン イヨン

Поле вылетающего заряда

Электрические и магнитные поля:

$$\begin{split} E_{z} &= -(1/c) \,\partial_{t} (A_{z}^{+} + A_{z}^{-}) - (c/\nu) \partial_{z} (A_{z}^{+} - A_{z}^{-}) \\ E_{\rho} &= -(c/\nu) \partial_{\rho} (A_{z}^{+} - A_{z}^{-}) \\ H_{\varphi} &= -\partial_{\rho} (A_{z}^{+} + A_{z}^{-}) \end{split}$$

Собственные поля заряда и излучения:



2

Угловое распределение магнитного поля и спектрально энергетические характеристики



Оценка ширины спектра излучения:

$$\Delta\omega\simeq t_0^{-1}+c/r_0$$

Оценка полной энергии излучения:

$$\mathcal{E}_{R} = \frac{Q^{2}}{\pi c t_{0}} (3 \ln(\frac{\mathcal{E}}{e t_{0}}(mcr_{0})) - 1)$$

12/18

Сравнение численного моделирования с теоретическим решением



Брантов А. Ковалев В. Куратов А. БычениЛазерный источник мощного униполярного те

2

Сравнение численного моделирования с теоретическим решением

v/c = 0.95



2

・ロト ・四ト ・ヨト ・ヨト

2021

14/18

Оценка эффективности излучения

Потенциальный барьер:

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

Вырывающиеся электроны:

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

Заряд электронов:

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

Температура горячих электронов

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

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

Заряд электронов зависит от амплитуды и длительности:

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

- 4 回 ト - 4 三 ト - 4 三 ト

Оценка эффективности излучения

Энергия ТГц излучения:

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

Энергия лазера:

$$\mathcal{E}_L = mc^2 a_0^2 c t_0 R_0^2 \pi / (2\lambda^2 r_e)$$

Эффективность лазера:

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

 $\eta \sim 2\%$

э

16/18

<ロト < 回ト < 回ト < 回ト < 回ト</p>

Заключение

- Показана генерация униполярных импульсов переходныхм излучением горячих электронов, получены выражения для электромагнитных полей, оценен спектр и энергия излучения
- Представлено сравнение теоретических результатов с численным экспериментом, которое показывает их совпадение
- Представлены оценки эффективности генерации униполярного излучения, которое может достигать может достигать 2%

2021

・ロン ・回と ・ヨン

Литература

- 1 [Arkhipov 2020a] R M Arkhipov et al Quantum Electron. 50, 801 (2020)
- 2 [Arkhipov 2020b] R. M. Arkhipov et al JETP. Lett. 111, 484 (2020)
- 3 [Rosanov 2020] N. N. Rosanov et al JETP 130, 52 (2020)
- 4 [Xie 2007] Xie B-S et al Appl. Phys. Lett. 91, 011118 (2007)
- 5 [Salen 2019] P. Salen et al Physics Reports 836-837, 1-74 (2019)
- 6 [Arkhipov 2020c] Arkhipov R, et al Opt. Express 28, 17020 (2020)
- 7 [Pakhomov 2017] Pakhomov A, et al Phys. Rev. A95, 013804 (2017)
- 8 [Ramasesha 2016] K. Ramasesha, et al Ann. Rev. Phys. Chem. 67, 41 (2016)
- 9 [Hassan 2016] M. T. Hassan, et al Nature 530, 66 (2016)
- 10 [Arkhipov 2020d] R. M. Arkhipov, et al Opt. Spectrosc. 128, 102 (2020)
- 11 [Bastrakova 2020] Bastrakova et al Exp. Theor. Phys. 13, 1507 (2020)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >