

# Нелинейное усиление мощных электромагнитных импульсов электронными сгустками

А.В. Савилов, Ю.С. Опарина, Д.Д. Крыгина

Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** в данной работе описан усилитель, основанный на принципиально нелинейном эффекте отражения короткого фотоинжекторного электронного сгустка от мощного волнового импульса. Это эффективный механизм отбора энергии волной из частиц, когда параметры электронного сгустка (начальный энергетический разброс, длина сгустка и эмиттанс) не оказывают существенного влияния на эффективность электронно-волнового взаимодействия. Описаны две концепции этого процесса (нерезонансное и резонансное электронно-волновое взаимодействие).

**Ключевые слова:** мощные терагерцовые импульсы, мазер на свободных электронах

## 1. Введение

Эффект ускорения электронов в полях волновых импульсов хорошо изучен [1,2]. В данной работе мы рассматриваем возможность «обращения» этой проблемы и исследуем усиление короткого мощного волнового импульса терагерцового диапазона частот фотоинжекторным электронным сгустком за счет торможения (отражения) электронов. При этом начальные продольные скорости электронов превышают групповую скорость импульса. Естественно, этот процесс должен реализовываться в средах с «правильной» дисперсией, чтобы групповая скорость волнового импульса была достаточно малой. Электроны догоняют импульс, а он их отражает, так что их конечные скорости становятся меньше групповой скорости волнового пакета. В результате кинетическая энергия электрона передается волне.

Поскольку это принципиально нелинейный процесс, возможно усиление очень мощных волновых импульсов. Опишем две схемы реализации этого процесса. Первый – это усиление мощных импульсов за счет почти полного торможения в волноводе под действием нерезонансной пондеромоторной силы (рис. 1, а). Во-вторых, описано усиление слабых импульсов в волноводе, помещенном в периодическое ондуляторное магнитное поле (рис. 1 б); здесь ондуляторный резонанс обеспечивает эффективное электронно-волновое взаимодействие.

## 2. Нерезонансное отражение частиц от мощных волновых импульсов

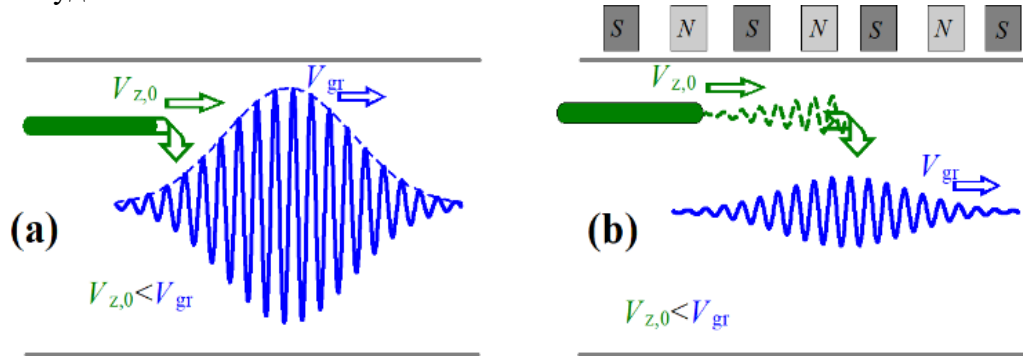
Рассмотрим волновой пакет в волноводе, распространяющийся с групповой скоростью  $V_{gr}$ . Сгусток догоняет волновой пакет и «отражается» волновым полем: скорости частиц уменьшаются до скоростей, меньших групповой скорости. Если скорости частиц различны, частицы тормозятся в разных точках. Очевидно, дальше распространяются частицы с максимальными энергиями. Эти частицы не должны распространяться за точку максимальной амплитуды импульса. При определенных условиях можно обеспечить отражение всех частиц. Из анализа уравнений, описывающих взаимодействие в такой системе, следует условие отражения всех частиц:

$$\gamma_0^2(\beta_{z,0} - \beta_{gr})^2 \leq (1 - \beta_{gr}^2)a_{max}^2. \quad (1)$$

Здесь  $\gamma_0$  – релятивистский Лоренц-фактор по максимальной энергии частиц,  $\beta_{z,0} = \frac{V_{z,0}}{c}$ ,  $\beta_{gr} = \frac{V_{gr}}{c}$  – нормированная продольная скорость электронов и групповая скорость волны.  $a_{max} = A/500[\text{KV}]$  – максимальная нормированная амплитуда векторного потенциала. Оценки изменения энергии электрона дают (в приближении постоянной амплитуды импульса):

$$\langle \Delta\gamma \rangle \approx -\frac{\beta_{gr}\gamma_0|\beta_{z,0} - \beta_{gr}|}{1 - \beta_{gr}^2} \propto -a_{max} \quad (2)$$

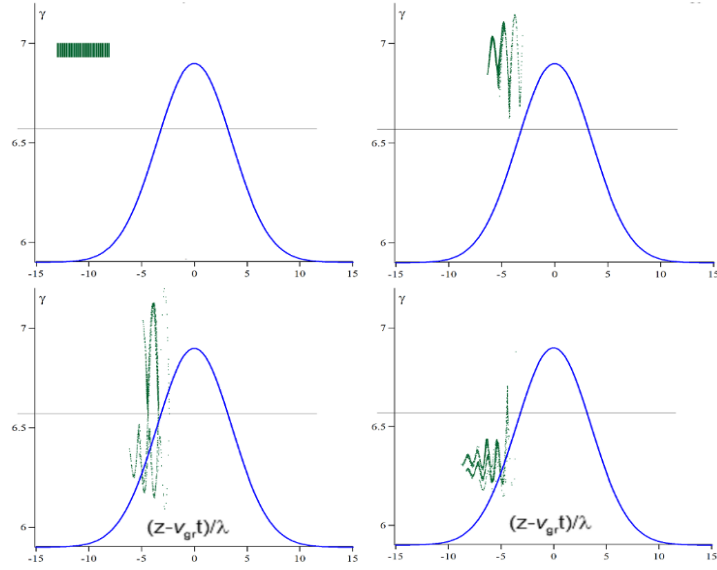
Поэтому существенное изменение энергии обеспечивается при достаточно больших амплитудах.



**Рисунок 1.** Нерезонансное (а) и резонансное (б) «отражение» электрона коротким мощным волновым импульсом.

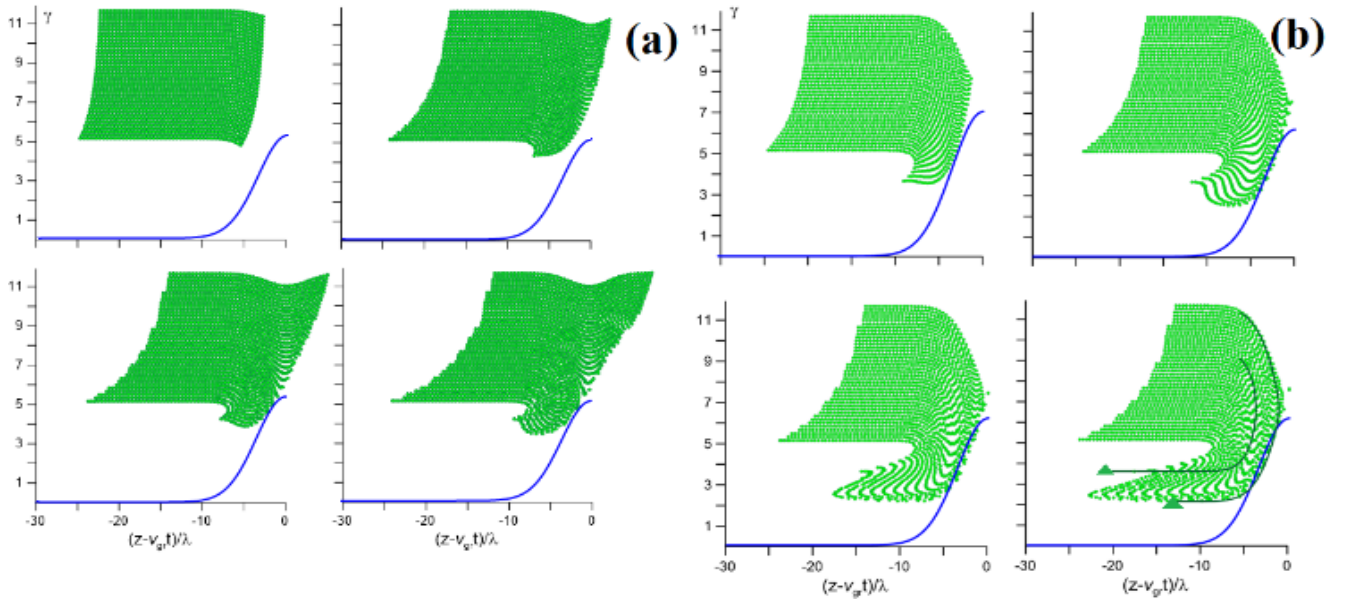
В качестве примера был рассмотрен гауссов волновой импульс. Длительность импульса соответствует десяти волновым циклам. Начальные энергии частиц распределены в пределах от  $\gamma_{min}=5$  до  $\gamma_{max}=12$ . Рассмотрим групповые скорости по наименьшей энергии (частицы из фракции с наименьшей энергией не догоняют импульс и не отдают энергию). В соответствии с (1) отражение частиц с максимальной энергией обеспечивается при  $a_{max} \approx 0.95$ .

Рис.2 а иллюстрирует динамику энергетического распределения частиц для неоптимальной амплитуды импульса 0,5, в этом случае есть летящие и отраженные частицы. Увеличивая амплитуду импульса до  $a_{max}=1$ , можно добиться отражения всех частиц (динамика показана на рис.2 б). Доля частиц с наибольшей начальной энергией замедляется до  $\gamma=2$ . Частицы с меньшими энергиями, соответственно, тормозятся менее эффективно (например, при  $\gamma_0=9$  конечное значение энергии равно 3,5), что согласуется с оценкой (2).



**Рисунок 2.** Динамика распределения энергий частиц в процессе их отражения от волнового импульса с начальной амплитудой  $a_{\max}=0.5$  и  $a_{\max}=1$  (b).

### 3. Отражение частиц при резонансном электронно-волновом взаимодействии.



**Рисунок 3.** Динамика распределения энергий частиц в процессе их резонансного отражения от импульса с начальной амплитудой в случаях  $a_{\max}=0.05$  в ондуляторной системе (изображен резонансный уровень энергии  $\gamma_{\text{res}}=6.65$ ).

Включим в систему ондулятор (см. рис. 2 б). В этом случае изменение энергий электронов оценивается следующим соотношением:

$$\langle \Delta\gamma \rangle \propto -\sqrt{a_{\max}}, \quad (3)$$

Таким образом, можно обеспечить эффективное усиление в случае относительно малых амплитуд волн. В системе существует резонансный энергетический уровень, соответствующий резонансу электронов с усиливаемой волной. Оптимальное положение энергетического уровня соответствует  $\gamma_{\text{res}} = \gamma_0 - \sqrt{a_{\max}}/2$ , а групповая скорость волнового пакета соответствует энергии резонанса  $\beta_{gr} = \sqrt{1 - \gamma_{\text{res}}^{-2}}$ . При

этом почти часть электронов тормозится до скоростей, не превышающих групповую скорость.

Результаты численного моделирования на основе подхода, описанного в [3,4], подтверждают это утверждение (рис. 3). Наблюдается динамика энергий частиц в зависимости от их положения относительно центра импульса. Частицы, колеблющиеся в комбинированных волновом поле и поле ондулятора, распространяются в области максимума поля, где тормозятся до достаточно малых скоростей – «разворачиваются» относительно импульса, теряя примерно 10 % энергии.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (грант № 21-72-30027)**.

#### Список литературы

1. Nanni E.A. et al. “Terahertz-driven linear electron acceleration”, Nature Communications. vol. 6, p. 8486, 2015.
2. T. Tajima and J.M. Dawson “Laser electron accelerator,” Phys. Rev. Lett., vol. 43, pp. 267-270, 1979.
3. I.V. Bandurkin, Y.S. Oparina, A.V.Savilov, “Super-radiative self-compression of photo-injector electron bunches,” Appl. Phys. Letters, vol. 110, no. 26, p. 263508, 2017.
4. Y.S. Oparina, A.V. Savilov, “Coherent super-radiative undulator emission of ultra-short THz wave pulses,” Physics of Plasmas, vol. 28, no. 9, p. 093302, 2021.