

# Генерация лазерных импульсов с резким передним фронтом при обратном рамановском рассеянии в плазме

А.А. Балакин, С.А. Скобелев, А.Г. Литвак

Институт прикладной физики РАН

Сессия по нелинейной динамике, 2022

## Рамановское усиление

Трехволновые уравнения, описывающие рамановское усиление

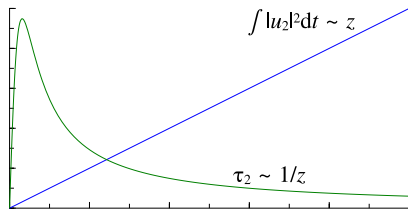
$$\frac{\partial a}{\partial t} + c \frac{\partial a}{\partial z} = -\Omega b f, \quad \frac{\partial b}{\partial t} - c \frac{\partial b}{\partial z} = \Omega a f^*, \quad \frac{\partial f}{\partial t} = \Omega a b^*.$$

при  $\omega_a \approx \omega_b \gg \omega_p = \sqrt{4\pi n_0 e^2 / m}$ ,  $\Omega = \sqrt{\omega_a \omega_p / 2}$ .

Обычно используется для рамановской компрессии, когда длина плазмы большая

$$L/c \approx \tau_a / 2 \gg \tau_b, \quad b_0 \leq a_0$$

и усиление на нелинейной стадии идет по степенному закону.

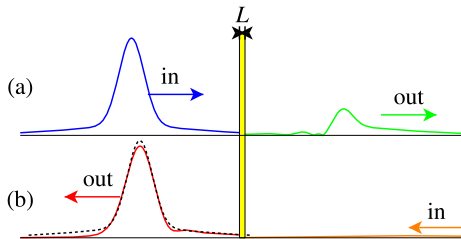


## Обрезание импульсов

Для обрезания импульсов нужен экспоненциальный рост амплитуды с квазилинейной стадии, когда

$$\tau_b \geq \tau_a \gg \gg L/c,$$

$$b_0 \ll \ll a_0.$$



Основная идея — использовать нелинейное зеркало, когда в импульсе накачке

$$a = a_0 \left[ e^{-\tau^2/\tau_a^2} + \delta_a / \cosh(\tau/\tau_p) \right]$$

предимпульс  $\delta_a$  не успевает усилиться, а основной импульс успевает.

Это дает оценку длины плазмы

$$\gamma \frac{L}{c} \lesssim \ln \left( \frac{a_0}{b_0} \right) \Leftrightarrow a_0 \lesssim a_{\text{th}} \equiv \frac{c}{L} \sqrt{\frac{2}{\omega_p \omega_a} \ln \left( \frac{a_0}{b_0} \right)}.$$

## Ограничения обрезания импульсов

На линейной стадии

$$b(\tau) \approx b_0 \exp \left( \int_{-\infty}^{\tau} |a(\tau')| \Omega d\tau' \right).$$

Предимпульс не успеет нарасти если

$$\delta_a \tau_p \ll (1/\gamma) \ln (a_0/b_0).$$

Появляется ограничение на минимальную длительность накачки

$$\tau_a > \tau_{th} = (2/\gamma) \ln (a_0/b_0) \gtrsim \pi/\omega_p.$$

Например, рамановское усиление эффективно при  $\tau_a \gtrsim \pi/\omega_p$ . Для плазмы  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  ( $\omega_a/\omega_p = 10$ ), интенсивности  $10^{16} \text{ W/cm}^2$  ( $a_0 = 0.1$ ) и контрасте  $a_0^2/b_0^2 = 10^5$  (т.е.  $b_0 = 0.0003$ ), пороговая длительность  $\omega_a \tau_{th} \approx 16\pi$  близка к предельной  $\pi\omega_a/\omega_p \approx 15\pi$ .

## Уравнения для численного моделирования

Поскольку длительности малы, а интенсивность близка к релятивистской, то необходимо использовать более общие уравнения для численной проверки эффекта обрезания импульсов:

$$\frac{\partial a}{\partial t} - \frac{\partial a}{\partial z} = \beta \hat{K}_a \left[ n_0(1 - \phi)a + bf - \frac{\Delta_{\perp} a}{\beta} \right],$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial b}{\partial z} = \beta \hat{K}_b \left[ n_0(1 - \phi)b + af^* - \frac{\Delta_{\perp} b}{\beta} \right],$$

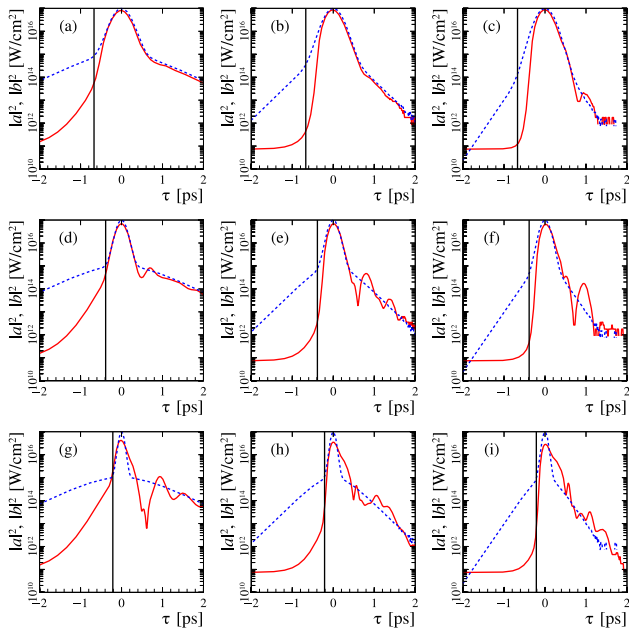
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \hat{k}_p [n_0(1 - \phi)q + vf] = 0,$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \beta \hat{k}_p^{-1} [f] - \hat{k}_p [vq + \frac{1}{2}ab^*],$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \beta n_0 \phi = \beta n_0 \frac{|a|^2 + |b|^2 + |q|^2}{2}, \quad v = \frac{|a|^2 + |b|^2 + |q|^2}{2} - \phi.$$

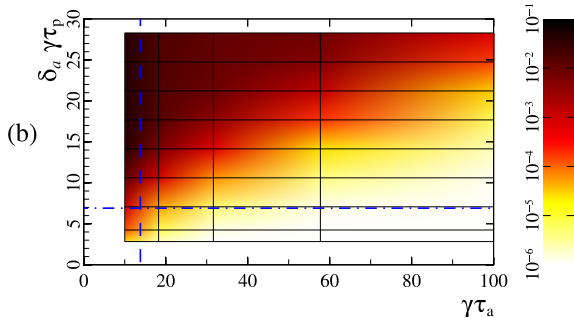
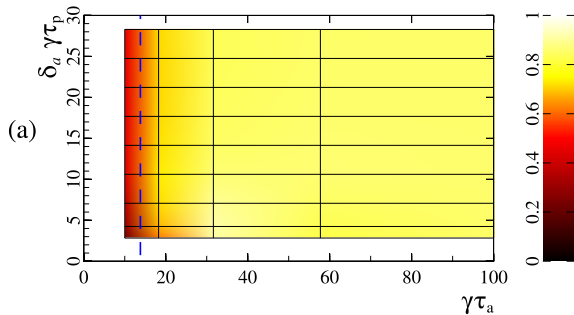
Здесь  $\hat{K}_{a,b} = \frac{-i}{\sqrt{\beta + \hat{k}^2 \pm \hat{k}}} \approx \pm \frac{1}{2} \int dz, \quad \hat{k} = i\hat{k}_p = \frac{1}{i} \frac{\partial}{\partial z}, \quad \beta = \frac{\omega_p^2}{\omega_a^2}.$

## Пример обрезания импульсов



Профили накачки и  
выходного сигнала при  
различных длительностях  
накачки  $\tau_a = 210$  фс,  
 $\tau_a = 140$  фс,  $\tau_a = 70$  фс и  
предимпульса  $\tau_p = 1000$  фс,  
 $\tau_p = 500$  фс,  $\tau_p = 330$  фс.

## Эффективность обрезания импульсов



(a) Эффективность отражения  $b_{\max}^2/a_0^2$  и (b) контраст на переднем фронте  $|b(-3\tau_a)|^2/b_{\max}^2$  в зависимости от длительности накачки  $\tau_a$  и предимпульса  $\tau_p$  при  $\delta_a = 0.1$ .

## Выводы

Предложен метод генерации субрелятивистских лазерных импульсов с резким передним фронтом, который основан на обратном рамановском рассеянии интенсивного короткого импульса накачки на встречном длинном низкочастотном импульсе, распространяющемся в тонком слое плазмы. Тонкий слой плазмы служит как для ослабления паразитных эффектов, так и для эффективного нелинейного отражения центральной части импульса накачки при превышении амплитудой поля порогового значения. Предимпульс с более низкой амплитудой поля проходит сквозь плазму почти без рассеяния. Данный метод работает для субрелятивистских лазерных импульсов с длительностью вплоть до 100 фс. Контраст переднего фронта лазерного импульса определяется амплитудой затравочного импульса.

Публикации:

1. A.A. Balakin, S.A. Skobelev, A.G. Litvak, *Laser pulse cutoff at nonlinear reflection due to Raman backscattering in plasma*. Optics Letters, vol. **47**, P. 6261-6264 (2022).