

Рассеяние ультракоротких электромагнитных импульсов на свободном электроном в нерелятивистском пределе

В.А. Астапенко, С.В. Сахно

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе рассматривается рассеяние ультракоротких электромагнитных импульсов (УКИ) различной формы на свободном электроном: получены аналитические выражения для вероятности рассеяния за все время действия импульса, построены соответствующие зависимости. Вычисления проводились для скорректированного гауссового импульса (СГИ), а также для синус- и косинус-вейвлетов без несущей частоты [1].

Выражение для полной вероятности рассеяния ультракороткого электромагнитного импульса за все время действия УКИ имеет следующее выражение [2]:

$$W_{sc} = \frac{c}{4\pi^2} \int_0^\infty \sigma_{sc}(\omega) \frac{|E_i(\omega)|^2}{\hbar\omega} d\omega \quad (1)$$

Заметим, что (1) применимо, если $W_{sc} \leq 1$, по смыслу вероятности процесса.

Рассмотрим процесс рассеяния излучения на свободном электроном в нерелятивистском пределе, т.е. когда энергия излучения много меньше энергии покоя электрона:

$$\hbar\omega \ll m_e c^2 \quad (2)$$

В этом случае можно воспользоваться следующим выражением для интегрального по углу томсоновским сечением рассеяния фотона на электроном [3]:

$$\sigma^{(th)} = \frac{8\pi r_e^2}{3} \quad (3)$$

где $r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$ - классический радиус электрона.

Таким образом, в рамках приближения (2) выражение для сечения рассеяния является константой и в атомной системе единиц, которой мы воспользуемся в дальнейших вычислениях, имеет следующий вид:

$$\sigma_{sc} = \frac{8\pi}{3 \cdot c^4} \quad (4)$$

где $c = 137$ – скорость света в атомной системе единиц.

Фурье-образы синус- и косинус-вейвлетов имеют следующие выражения соответственно:

$$E_s(\omega) = 2i^4 \sqrt{\pi} \omega \tau^2 E_0 \exp\left(\frac{-\omega^2 \tau^2}{2}\right) \quad (5)$$

$$E_c(\omega) = 2\sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt[4]{\pi}\omega^2\tau^3 E_0 \exp\left(\frac{-\omega^2\tau^2}{2}\right), \quad (6)$$

где ω – текущая частота, τ – длительность импульса, E_0 – амплитудное значение напряженности электрического поля.

Фурье-образ для СГИ имеет следующий вид:

$$E_{cor}(\omega', \omega, \tau, \varphi) = iE_0\tau\sqrt{\frac{\pi}{2}}\frac{\omega^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2}\left[\exp(-i\varphi - (\omega - \omega')^2\frac{\tau^2}{2}) - \exp(i\varphi - (\omega + \omega')^2\frac{\tau^2}{2})\right], \quad (7)$$

где ω' – текущая частота, а ω – несущая частота излучения, φ – начальная фаза.

Особенностью СГИ является отсутствие постоянной составляющей в его спектре, что отличает его от традиционного гауссового импульса [3]. Следует отметить, что наличие такой постоянной составляющей в спектре в пределе сверхкоротких длительностей импульсов приводит к нефизичности получаемых результатов. Действительно, заметим, что для данного выражения справедливо условие $E_{cor}(\omega'=0)=0$, что подтверждает отсутствие постоянной составляющей в спектре СГИ.

Подставляя выражения для фурье-образов импульсов (5), (6), (7) в выражение (1) получаем выражение для полной вероятности рассеяния для соответствующего типа импульса.

Результаты моделирования показали, что вероятности рассеяния за все время действия УКИ как функция длительности импульса в случае вейвлет-импульсов представляют собой монотонно возрастающие функции, причем график для косинус-вейвлета идет круче, чем подобная зависимость для синус-вейвлета.

В случае рассеяния СГИ было показано, что при достаточно больших длительностях импульса τ графики выходят на линейную зависимость, причем с уменьшением несущей частоты импульса увеличивается угол наклона прямой. Спектр рассеяния имеет характерный максимум, пик которого смещается в область более низких несущих частот ω при увеличении длительности импульса τ , причем значение вероятности рассеяния в пике при этом увеличивается.

Литература

- [1] Gets A.V. and Krainov V.P. Ionization of atoms by attosecond pulses // Contrib. Plasma Phys. – 2013. - 53, No. X, 1 – 8
- [2] Astapenko V.A. Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field // Physics Letters A. – 2010. – V. 374. P. 1585–1590.
- [3] Астапенко В.А. Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. – 496 с.