DOI: 10.17117/na.2016.02.02.425

<http://ucom.ru/doc/na.2016.02.02.425.pdf>

Поступила (Received): 14.02.2016

Батова А.Э., Кипшиева Э.А., Мамова А.З. Высшие гармоники в спектрах излучения электронов высоких энергий в поле мощных лазеров

Batova A.E., Kipshieva E.A., Mamova A.Z.
High harmonic generation in radiation spectra of
high energy electrons in intense laser field

Изучены особенности спектров излучения ультрарелятивистских электронов, движущихся навстречу лазерной волне тера и пета ваттной мощности. Рассмотрен наиболее сложный и интересный случай, когда соотношение между инвариантами, определяющими задачу таково, что спектр излучения 100 ГэВ-ных электронов в поле тераваттного лазера имеет сложную структуру с ярко выраженными максимумами
Ключевые слова: тера и пета ваттные лазеры, ультрарелятивистский электрон, спектр излучения

Peculiarities of radiation spectra of ultrarelativistic electrons moving head on the powerful tera and peta watt laser waves have been studied. The most interesting and complex case is considered when the relation between invariants defining the problem is such that the radiation spectrum of 100 GeV electron has a complicated structure with well defined maxima

Key words: tera and peta watt lasers, ultrarelativistic electron, radiation spectrum

Батова Альбина Эдуардовна
Студент

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Batova Albina Eduardovna
Student

Kabardino-Balkarian state university named H.M. Berbekov
Nalchik, Chernyshevskogo st., 173

Кипшиева Эльвира Арсеновна
Студент

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Kipshieva Elvira Arsenovna
Student

Kabardino-Balkarian state university named H.M. Berbekov
Nalchik, Chernyshevskogo st., 173

Мамова Аида Заурбековна
Студент

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова
г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Mamova Aida Zaurbekovna
Student

Kabardino-Balkarian state university named H.M. Berbekov
Nalchik, Chernyshevskogo st., 173

Появление тера и пета – ваттных лазеров привело к бурному развитию физики процессов в сильных внешних электромагнитных полях [1]. Как известно, процессы взаимодействия релятивистских электронов с интенсивной плоской волной можно охарактеризовать в терминах трёх инвариантов [2,3]:

$$\chi = \frac{e |F_{\mu\nu} p^\nu|}{m^3 c^4} = \frac{e E_0}{m^2 c^3} (1 + \beta) \gamma, \quad (1)$$

$$\nu_0^2 = \frac{e^2 E_0^2}{2 m^2 c^2 \omega_0^2} = \frac{e^2}{m^2 c^4} A^2, \quad (2)$$

$$a = \frac{2}{m^2 c^2} k p = \frac{2 \Omega_0 \gamma}{m c^2}, \quad (3)$$

где χ – параметр Швингера (при $\chi > 1$ внешние поля считаются сильными), $F_{\mu\nu}$ – тензор внешнего поля, A – его 4-потенциал, E_0 – амплитуда напряжённости электрического поля в плоской волне, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ – Лоренц фактор электрона, $\beta = v/c$, v – скорость электрона, e и m – его заряд и масса покоя, c – скорость света в вакууме, ω_0 – частота лазерной волны, Ω_0 – частота поперечных осцилляций электрона в поле плоской волны (для встречного взаимодействия $\Omega_0 = 2\omega_0$ [4]), k и p – 4-волновой вектор плоской волны и 4-импульс электрона. Инвариант ν_0 (2) имеет чисто классическое происхождение и характеризует интенсивность поля лазерной волны (интенсивными называют поля с $\nu_0 \geq 1$). В настоящее время достижимы лазерные поля с интенсивностью $W \approx 10^{22}$ Ватт/см² (для пета ваттных лазеров) [1]. В таких системах значения параметра лазерного поля могут достигать $\nu_0 \sim 10^2$, а значения параметра Швингера (1) становятся порядка единицы. При этом спектр излучения ультрарелятивистских электронов движущихся в таких полях описывается формулами для синхротронного излучения, то есть спектр имеет плавный вид без каких-либо выраженных максимумов [4,5]. Инвариант a (3) характеризует влияние квантовой отдачи фотона при излучении. Условие классичности задачи можно записать как $a \ll 1$.

Если $\nu_0 \ll 1$, то как в квантовом, так и в классическом случае спектр излучения состоит только из одной гармоник, отвечающей процессу поглощения движущимся электроном одного лазерного фотона и последующим излучением нового фотона с частотой, смещённой в жёсткую часть спектра за счёт эффекта Доплера [1]. В обратном предельном случае $\nu_0 \gg 1$, как было отмечено выше, спектр излучения также имеет простой вид, но уже синхротронного типа. Наиболее сложный вид спектр излучения имеет в промежуточной области, когда $\nu_0 \approx 1$ и $a \approx 1$. Это область, когда имеет место нелинейный процесс поглощения электроном нескольких фотонов с последующим излучением одного жёсткого фотона. В квантовом случае ($a \geq 1$) спектр излучения будет простирается до значений излучаемых частот $\omega \sim E$, где $E = \gamma m c^2$ – энергия электрона.

Нашей задачей является исследование спектра излучения электронов, движущихся навстречу лазерному полю с $\nu_0 \approx 1$ и имеющих энергии для которых $a \approx 1$. Эти параметры соответствуют тера-ваттным лазерам и электронам с энергиями в сотни ГэВ. Так, для лазера с длиной волны 1 мкм значение $a = 1$ соответствует энергии электронов $E = 125$ ГэВ. Соответствующий расчёт приводится на рис. 1. Характер излучения электронов с такими энергиями в условиях,

когда $\chi \approx 1$, подробно изучался в ЦЕРНе для ориентированных кристаллов [6,7]. Преимуществом лазеров по сравнению с кристаллами является то, что в них отсутствует "хаотический" фон, связанный с многократным рассеянием электронов на атомах кристаллов [8,9].

В расчётах (см. рис.1) нами использовались квазиклассические формулы Байера – Каткова для спектра фотонов излучённых электроном, движущимся навстречу линейно поляризованной плоской волне [5]

$$N_0^{-1} \frac{d^3 N}{du dz d\varphi} = \frac{3}{\pi a} \sum_{k=1}^{\infty} \left[g_{class}^{(k)} + \frac{uu'}{2} \left(g_{class}^{(k)} + \frac{j_{zk}^2}{2\nu_0^2} \right) \right], \quad (4)$$

где "классический" вклад в излучение есть

$$g_{class}^{(k)} = j_{xk}^2 + \frac{\eta_k^2}{2\nu_0^2} j_{zk}^2 - \sqrt{2} \frac{\eta_k}{\nu_0} j_{xk} j_{zk} \cos \varphi, \quad (5)$$

здесь $u = \omega / E$, $u' = u / (1 - u)$, $\eta_k^2 = ak / u' - \nu_0^2 - 1$, $z = ct$. Для заданного номера гармоники k частота изменяется в пределах $0 < u' < ak / (1 + \nu_0^2)$, j_{xk} и j_{zk} определяются в [5].

Рис. 1. Спектр излучения электронов движущихся навстречу лазерной волне с длиной волны 1 мкм и параметрами $\nu_0 = 1$ и $a = 1$. Кривая 1 – точный расчёт, 2 – вклад спина электрона в спектр, 3 – расчёт в приближении постоянного поля

Величина N_0 в (4) имеет смысл числа фотонов излучаемых на единице длины пути z в приближении классической электродинамики: $N_0 \equiv (2/3c)\alpha\nu_0^2\Omega_0$, где $\alpha = 1/137$ [4,5]. Энергия фотонов на рисунке задана в единицах $u = \omega / E$, а интенсивность показана в единицах N_0 .

Как видно из рисунка, при высоких энергиях электронов, превышающих 100 ГэВ, отдельные гармоники в спектре излучения чётко различимы даже в сверх интенсивных лазерных полях тера-ваттной мощности. Такое положение вещей при таких энергиях невозможно в ориентированных кристаллах, где спектры излучения имеют плавный вид без характерных максимумов.

Список используемых источников:

1. Di Piazza A., Muller C., Hatsagortsyan K. Z. and Keitel C. H. // *Rev. Mod. Phys.* 2012. Vol. 84. P. 1177.
2. Хоконов А.Х., Хоконов М.Х. Письма в Журнал технической физики. 2005. Т.31. № 4. С. 44-48.
3. Хоконов А.Х., Хоконов М.Х., Кешев Р.М. Письма в Журнал технической физики. 1998. Т. 24. № 20. С. 20-27.
4. Khokonov A.Kh., Khokonov M.Kh., Keshev R.M. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1998. Vol. 145. No. 1-2. P. 54-59.
5. Хоконов А.Х., Хоконов М.Х., Киздермишов А.А. Журнал технической физики. 2002. Т. 72. № 11. С. 69-75.
6. Uggerhoj U. *Reviews of Modern Physics*. 2005. Vol. 77. P. 012703-1-11.
7. Хоконов М.Х. ЖЭТФ. 1993. Т.103. В.5. С. 1723-41.
8. Khokonov M.Kh. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1993. Vol. 74. P. 375-379.
9. Khokonov M.Kh., Tuguz F.K. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1993. Vol. 82. No.1. P. 46-51.

© 2016, Батова А.Э., Кипшиева Э.А., Мамова А.З.
Высшие гармоники в спектрах излучения
электронов высоких энергий в поле мощных
лазеров

© 2016, Batova A.E., Kipshieva E.A., Mamova A.Z.
*High harmonic generation in radiation spectra of
high energy electrons in intense laser field*