DOI: 10.17117/na.2016.02.02.439

Поступила (Received): 24.02.2016

<http://ucom.ru/doc/na.2016.02.02.439.pdf>

Карежева М.А., Ортанов А.А.
Влияние кристаллической решётки на
спектры интенсивности излучения
электронов с энергиями свыше 100 ГэВ

Karezheva M.A., Ortanov A.A.
Influence of crystal lattice on radiation intensity
spectra of above 100 GeV Electrons

Методом численного моделирования проведен расчет спектров интенсивности излучения электронов с энергиями свыше 100 ГэВ в ориентированных кристаллах. Сечения излучения брались в приближении постоянного поля (ППП) с учётом квантовых эффектов. Учитывалось многократное рассеяние электронов на атомах кристалла. Результаты расчётов сравниваются с экспериментами в ЦЕРНе и показана адекватность PPP для расчётов спектров при указанных энергиях при почти параллельном движении электронов атомным цепочкам
Ключевые слова: ультрарелятивистский электрон, излучение, каналирование, ориентированный кристалл

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

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

Calculations of radiation intensity spectra has been done by means of computer simulation for electrons with above 100 GeV energies in oriented crystals. Constant field approximation (CFA) radiation cross sections has been used with account of quantum effects. Multiple scattering of electrons by crystal atoms has been taken into account. The results of calculations are compared with experiments in CERN. It has been demonstrated that CFA is an adequate approximation for almost parallel electron motion along the atomic axis

Key words: ultrarelativistic electron, radiation, channeling, oriented crystal

Karezheva Mariya Amirovna
Student
Kabardino-Balkarian state university named H.M. Berbekov
Nalchik, Chernyshevskogo st., 173

Ortanov Alan Albievich
Student
Kabardino-Balkarian state university named H.M. Berbekov
Nalchik, Chernyshevskogo st., 173

Как хорошо известно, ультрарелятивистские электроны теряют в веществе энергию на электромагнитное излучение в виде рентгеновских и гамма квантов (тормозное излучение – ТИ). Длина L , на которой на излучение теряется основная часть первоначальной энергии электрона, не зависит от их энергии и определяется выражением

$$1/L = 4\alpha Z^2 r_0^2 N \ln(183Z^{-1/3}), \quad (1)$$

где Z – атомный номер вещества мишени с плотностью атомов N , $\alpha = 1/137$ – постоянная тонкой структуры, $r_0 = e^2/mc^2$ – классический радиус электрона, e и m – его заряд и масса покоя, c – скорость света в вакууме. Величину L в (1) называют радиационной длиной.

При движении электрона в кристалле вдоль кристаллографических направлений ситуация коренным образом меняется (см., например, [1]). Движение электрона происходит в электростатическом потенциале атомной цепочки $U(r)$, который получается усреднением потенциала отдельного атома $V(R)$ вдоль направления атомной цепочки z :

$$U(r) = \int_{-\infty}^{\infty} V\left(R = \sqrt{z^2 + r^2}\right) \frac{dz}{d}, \quad (2)$$

здесь r – расстояние от электрона до атомной цепочки, d – расстояние между соседними атомами в атомной цепочке. В наших расчетах в качестве атомного потенциала $V(R)$ бралась аппроксимация Дойля-Тёрнера, как это делалось в [2]. Потенциал (2) называют непрерывным потенциалом Линдхарда (см. [1]), а движение быстрых заряженных частиц в таком потенциале называется каналированием. Эффект каналирования имеет место в том случае, если угол влёта в кристалл не сильно превышает критический угол Линдхарда

$$\theta_L = \left(\frac{4Ze^2}{dE} \right)^{1/2} \approx \left(\frac{2U_m}{E} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $E = \gamma mc^2$ – энергия электрона, $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ – Лоренц фактор электрона, v – его скорость, U_m – глубина потенциальной ямы. Эта величина имеет порядок $U_m \sim 10^2 - 10^3$ эВ.

По своему характеру движение и излучение при каналировании аналогично движению и излучению в поле лазерной волны [3]. Эта аналогия наиболее точна для случая каналирования позитронов в поле атомных плоскостей. Тогда их движение хорошо аппроксимируется гармоническим поперечным движением, что в точности соответствует случаю движения электрона в поле плоско поляризованной лазерной волны. Периодический характер поперечного движения в обоих случаях приведёт к интерференции излучения от различных периодов и появлению в спектрах излучения характерных максимумов. С ростом энергии каналированных электронов период их поперечного движения растёт пропорционально $\sim \gamma^{1/2}$. При энергиях свыше 100 ГэВ длина волны поперечного движения становится много больше длины, на которой формируется излучение [4,5]. Это означает, что можно приближённо считать, что сила, действующая на электрон со стороны непрерывного потенциала (2) почти не меняется в процессе излучения фотона (приближение постоянного поля – ППП [1]). Сечение излучения фотона в ППП будет определяться сравнительно простыми известными выражениями для синхротронного излучения с учётом квантовых эффектов.

Измерения спектров интенсивности были проделаны в ЦЕРНе более 25 лет назад [6], однако невероятно высокая точность этих измерений, когда отслеживались траектории отдельных электронов, до сих пор делают эти результаты актуальными и позволяют проверять точность различных теоретических моделей. В наших расчётах методом численного моделирования мы исходили из кодов программ, изложенных в [7]. При этом нами учитывалось многократное рассеяние электронов на атомах кристалла [8], а также радиационное уменьшение поперечной энергии электронов вследствие излучения [9].

Рис. 1. Спектр интенсивности излучения электронов с энергией 150 ГэВ в кристалле кремния <110> толщиной 600 мкм. Круглые красные символы – эксперимент [6], квадратные голубые символы, соединённые сплошной линией – результаты нашего численного моделирования

Результаты наших расчётов для электронов с энергией 150 ГэВ попадающих в кристалл кремния с толщиной 600 мкм представлены на рисунке 1. Углы влёта в кристалл относительно выбранного направления составляли от 0 до 7 микро-радиан. По оси абсцисс отложена энергия фотонов в единицах первоначальной энергии электронов, а интенсивность излучения показана на оси ординат в единицах соответствующей величины для аморфной мишени. В качестве последней бралась величина $1/L$, где L задано в (1). Таким образом, в области максимума интенсивность излучения в кристалле примерно в 110 раз превышает аналогичную величину в аморфной мишени. Следует иметь в виду, что по оси абсцисс откладывается суммарная энергия всех фотонов, излучённых одним электроном. Именно эта величина измеряется в экспериментах [10]. Как следует из рисунка, наша модель, основанная на использовании ППП, с хорошей

степенью точности описывает результаты эксперимента, если углы влёта в кристалл не превышают критический угол Линдхарда.

Список используемых источников:

1. Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. Новосибирск. Наука. 1989.
2. Khokonov M.Kh., Efendiev K.V. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2006. Vol. 252. No.1. P. 36-43.
3. Khokonov M.Kh., Carrigan Jr. R.A. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1998. Vol. 145. No. 1-2. P. 133-141.
4. Хоконов М.Х., Бекулова И.З. Журнал технической физики. 2010. Т. 80. №5. С. 136-139.
5. Andersen K., Andersen S.L., Esberg J., et.al. *Physical Review Letters*. 2012. Vol. 108. P. 071802.
6. Medenwalt R.R., et al. *Phys.Lett. B*. 1990. Vol.242. P.517.
7. Хоконов М.Х., Тлячев В.Б. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015661450 от 28.10.2015.
8. 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.
9. Хоконов М.Х. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1992. Т. 56. С. 349-351.
10. Khokonov M.Kh. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. Vol. 344. P. 1-4.

© 2016, Карежева М.А., Ортанов А.А.

Влияние кристаллической решётки на спектры
интенсивности излучения электронов с энергиями
свыше 100 ГэВ

© 2016, Karezheva M.A., Ortanov A.A.

Influence of crystal lattice on radiation intensity
spectra of above 100 GeV Electrons