

$$V_0^2 \gg \frac{E_z V \varphi L}{c d},$$

(3)

которое зависит от величины СВЧ-полей и геометрии системы.

Рассмотренный механизм радиального дрейфа не может непосредственно влиять на транспортировку пучка после окончания импульса СВЧ излучения. Однако он может давать начальное возмущение параметров РЭП, которое приводит к развитию других самоподдерживающихся механизмов, необратимо изменяющих структуру пучка.

Л и т е р а т у р а

- [1] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Михеев В.В., Плетюшкин В.А., Суходольский В.Н. - ЖТФ, 1982, т. 52, в. 1, с. 110-111.
- [2] Александров А.Ф., Воронков С.Н., Галузо С.Ю., Михеев В.В., Стрелков П.С., Шкварунец А.Г. В кн.: У Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике. Тезисы докладов. Новосибирск, 1984. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1984, ч. 2, с. 22-24.
- [3] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А., Слепков А.И. - ЖТФ, 1980, т. 50, в. 11, с. 2381-2389.
- [4] Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И., Плетюшкин В.А. - ЖТФ, 1981, т. 51, в. 8, с. 1727-1730.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
10 июля 1987 г.

В окончательной редакции
5 января 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

О НОВОМ ТИПЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ

Б.В. Х о л о м а й

В работе дается теоретическое обоснование нового типа излучения, обнаруженного экспериментально в ЦЕРН [1] при каналировании в кристалле германия пучков электронов с энергией $E = 150$ ГэВ.

Новый тип излучения [1] характеризуется высоким энергетическим пиком в спектре излучения, приходящимся на излучаемые фотоны с энергией $0.85 E$. Авторы работы [1] предполагают, что

это излучение связано с электронами (в отличие от позитронов), которые втягиваются в области, близкие к атомам оси кристалла в режиме аксиального каналирования [2]. Однако существующие теории, в частности теория синхротронно-подобного излучения [3], не могут объяснить высокоэнергетического пика в спектре излучения.

На наш взгляд, „механизм“ возникновения нового типа излучения можно объяснить следующим образом: в режиме аксиального каналирования электроны двигаются по эллиптическим орбитам [4], периодически приближаясь к атомам оси кристалла на близкие расстояния. Это приводит к периодическому взаимодействию электронов с отдельными атомами оси в продольном направлении движения, т.е. электроны двигаются в некотором эффективном периодическом электрическом поле, которое изменяется с периодом, соответствующим частоте обращения электронов по эллиптической орбите, см. [5]. Период a_1 для электронов, влетающих под углами к оси кристалла порядка критических углов каналирования ($\psi \sim \psi_K$, $\beta_3 = \beta_0 \cos \psi_K$) с энергией $E = 150$ ГэВ, имеет следующий порядок величины:

$$a_1 \sim 10^{-5} \text{ см.} \quad (1)$$

Анализ излучения релятивистских электронов, движущихся в продольном периодическом электрическом поле

$$\vec{E} = \{0, 0, -\varphi'(z)\}, \quad \varphi(z+a) = \varphi(z), \quad (2)$$

методами квантовой механики можно произвести на основе волновых функций уравнения Клейна-Гордона, найденных в приближении $\left| \frac{e\varphi(z)}{E} \right| \ll 1$. Эти функции здесь не приводятся. Заметим, что метод нахождения волновых функций и расчета излучения аналогичен расчету в периодическом магнитном поле [6].

Полную мощность излучения электрона в поле (2), найденную по волновым функциям уравнения Клейна-Гордона, в пределе $\beta_3 \rightarrow 1$ можно представить в виде:

$$W = \frac{ce^4}{E^2(1-\beta_3^2)} \sum_{n=1}^{\infty} |\mathcal{E}(n)|^2 F$$

$$F = \frac{(2+\mathcal{E})^2}{4\mathcal{E}^4} \left\{ (3+2\mathcal{E}) \ln(1+2\mathcal{E}) + \frac{2\mathcal{E}^2}{(1+2\mathcal{E})} - 6\mathcal{E} \right\} \quad (3)$$

$$\mathcal{E}(n) = \frac{a}{2} \int_0^a \mathcal{E}(z) \overline{I} \frac{i2\pi n z}{a} dz, \quad \mathcal{E} = \frac{2\pi n}{amc} \frac{\hbar}{\sqrt{1-\beta_3^2}}$$

Максимальная частота излучения в поле (2) при $\beta_3 \rightarrow 1$ равна:

$$\omega = \frac{E}{\hbar} \frac{2\mathcal{E}\beta_3^2}{1+2\mathcal{E}}, \quad (4)$$

где $\beta_3 = \frac{c\rho_3}{E}$, ρ_3 - квазимпульс электрона.

Классическое и квазиквантовое приближения характеризуются величиной $\mathcal{E} \ll 1$. В ультраквантовом случае $\mathcal{E} \gg 1$.

Исходя из результатов эксперимента [1], для \mathcal{E} получаем следующее значение:

$$\hbar\omega = 0,85E, \quad \mathcal{E} \approx 2,8. \quad (5)$$

Из (4) и (5) получаем, что период изменения поля (2) равен (при $n = 1$):

$$a \sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ см.} \quad (6)$$

Совпадение теоретической оценки для периода (1) с экспериментальной (6) свидетельствует о правильности предложенного нами „механизма“ возникновения нового типа излучения.

Из (3) и (5) получим следующее значение мощности излучения, соответствующее экспериментальному значению \mathcal{E} :

$$W \approx 0,1 W_{\text{кл}}, \quad (7)$$

где классическая мощность излучения равна (см. [7]):

$$W_{\text{кл}} = \frac{2e^4}{3m^2 c^3} \langle \mathcal{E}^2(z) \rangle; \quad \langle \mathcal{E}^2(z) \rangle = \frac{1}{a} \int_0^a \mathcal{E}^2(z) dz.$$

Полагая для оценок, что взаимодействие электрона с отдельными атомами оси на близких расстояниях определяется кулоновским полем:

$$\langle \mathcal{E}^2(z) \rangle \sim \frac{(ze)^2}{R^4}$$

получим, что мощность излучения $W \sim 10^{22} \frac{\text{эВ}}{c}$, соответствующая экспериментальному значению [1], получается, если электроны сближаются с отдельными атомами оси на расстоянии порядка $R \sim 0,3 \cdot 10^{-10} \text{ см.}$

Полную мощность излучения, определяемую поперечной составляющей поля оси кристалла, можно оценить, исходя из модели релятивистского осциллятора [8], колеблющегося с частотой ω_0 :

$$W_{\perp} = \frac{e^2 \omega_0^2 \beta_0^2}{12 c (1 - \beta_0^2)} \frac{(4 - 3\beta_0^2)}{(1 - \beta_0^2)^{3/2}}; \quad \beta_0 = \frac{\beta_{\perp}}{\sqrt{1 - \beta_3^2}}. \quad (8)$$

Полагая $\beta_3 = \beta \cos \varphi_k$, получим из (8), что $W_{\perp} \sim 10^{23} \frac{\text{эВ}}{c}$.

Из приведенных оценок следует, что мощность излучения, связанная с продольным полем оси, может быть вполне сравнима с полной мощностью излучения, связанной с поперечным полем. Нужно отметить, что мощность излучения, характеризуемая продольными колебаниями электронов, имеет острый максимум, приходящийся на первую гармонику излучения, в то время как излучение, определяемое поперечным полем оси, имеет синхротронно-подобный спектр излучения.

Существенным является вопрос, почему новый тип излучения не проявлялся ранее. Это объясняется, во-первых, тем, что электроны должны взаимодействовать с отдельными атомами оси на малых расстояниях, во-вторых, в классическом и квазиквантовом приближениях ($\mathcal{E} \ll 1$) частоты излучения в продольном и поперечном полях в нашей модели совпадают. В этом приближении ($\mathcal{E} \ll 1$) разница в излучении определяется поляризационными свойствами. Излучение в поле (2) полностью линейно поляризовано.

Разница в частотах излучения проявляется в случае, когда существенную роль начинают играть квантовые эффекты, поскольку квантовое выражение для частоты (3) существенно отличается от частоты, например, синхротронно-подобного излучения [3].

Предполагая, что электроны влетают под углом $\psi \sim \psi_K$ к оси кристалла германия, получим следующие оценки величины \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} \approx 0,1 \text{ при } E = 30 \text{ ГэВ; } \mathcal{E} \approx 1 \text{ при } E = 100 \text{ ГэВ.}$$

Предложенная нами теоретическая модель „механизма“ возникновения нового типа излучения может проявиться и для других типов движения: при плоскостном каналировании, при квазиканалировании, если реализуются условия периодического взаимодействия электронов или позитронов с отдельными атомами кристалла.

В заключение автор считает своим приятным долгом поблагодарить за помощь в работе В.Г. Багрова и И.М. Тернова.

Л и т е р а т у р а

- [1] В е л к а с е м А., В о л о г н а Г. — Phys. Lett., 1986, v. 177B, N 2, p. 211–217.
- [2] К у м а х о в М.А. — Phys. Lett., 1976, v. 57A, p.17–18.
- [3] С о к о л о в А.А., Т е р н о в И.М. Релятивистский электрон, М.: Наука, 1974. 392 с.
- [4] B e l l F., K r e i n e r H.J., S i r m a n n R Phys. Lett., 1972, v.38A, N 3, p. 373–374.
- [5] К у м а х о в М.А. Излучение каналированных частиц в кристаллах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 161 с.
- [6] Х о л о м а й Б.В. — ТМФ, 1982, т. 51, № 2, с. 211–217.
- [7] Б а г р о в В.Г., С и р о т а Н.Н., Т е р н о в И.М., Х о л о м а й Б.В. — Изв. вузов, Физика, 1982, № 10, с. 70–75.

Московский энергетический институт

Поступило в Редакцию
12 сентября 1987 г.
В окончательной редакции
16 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9

12 мая 1988 г.

КОРОТКОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОШНОГО ИОННОГО ПУЧКА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНЬЮ

А.Н. Д и д е н к о, В.С. П а к,
Г.Е. Р е м н е в, С.С. С у л а к ш и н,
С.А. Ч и с т я к о в

Как известно из экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с различными мишенями, образующаяся на поверхности плазма является источником интенсивного ультрафиолетового, вакуумно-ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений [1-3]. Спектральная плотность излучения в этом случае на несколько порядков выше, чем, например, при синхротронном излучении, что делает такие источники весьма перспективными для различных применений (литографирование, рентгеноскопия и др.).

Однако лазер не является единственным источником, позволяющим создавать плотную неравновесную плазму на поверхности мишени. Успехи в развитии физики и техники мощных электронных и ионных пучков [4] позволяют в настоящее время получать пучки с плотностью мощности 10^7-10^{14} Вт/см². По-видимому, наиболее перспективными являются мощные ионные пучки, поскольку малые пробеги ионов в веществе делают возможным даже при сравнительно небольших значениях плотности мощности (10^7-10^8 Вт/см²) создание значительных концентраций энергии (10^4-10^5 Дж/г), заведомо превышающих необходимые для создания плазмы. Имеющиеся теоретические оценки [5, 6] позволяют предположить высокий КПД преобразования энергии МИП в энергию коротковолнового излучения.

В настоящей работе приводятся первые результаты экспериментов по созданию плазмы на поверхности металлической мишени под действием МИП с плотностью мощности $\sim 10^8$ Вт/см² и измерений интегральных характеристик ее излучения в коротковолновой части спектра.

Эксперименты проводились на ускорителе „Тонус”, работавшем в двухимпульсном режиме [7]. Источником ионов служил магнитоизолированный диод с баллистической фокусировкой (схема эксперимен-