

01;09;10

Взаимодействие релятивистских заряженных частиц с сильным высокочастотным полем большой протяженности

© О.П. Коровин, Е.О. Попов, С.О. Попов, И.В. Розова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 16 октября 1997 г.

Исследуется процесс взаимодействия релятивистских заряженных частиц с электрическим СВЧ полем высокой напряженности при больших длинах взаимодействия. Магнитная составляющая СВЧ поля на всей длине взаимодействия отсутствует. Показано, что характер взаимодействия релятивистских частиц имеет ряд особенностей, зависящих от соотношения между энергией частицы на входе и напряженностью поля. В частности, возможно ускорение части мюноэнергетического пучка частиц за счет энергии самого пучка с одновременной передачей части энергии от пучка полю.

Введение

Развитие фундаментальных исследований в области физики высоких энергий требует повышения энергии импульсной и непрерывной мощности ускорителей заряженных частиц. Это в свою очередь требует повышения напряженности электромагнитных полей в ускоряющих структурах и передающих линиях. Решающими в этих условиях становятся факторы, определяющие поведение заряженных частиц в ускоряющих промежутках при высоких напряженностях поля. Повышение напряженности поля в системах с малыми пролетными промежутками ведет к увеличению вероятности возникновения электрического пробоя. Большой промежуток обладает более высокой электрической прочностью. Следовательно, в СВЧ приборах, увеличивая пролетный промежуток, можно увеличить выходную мощность прибора или энергию ускоренной частицы. Рассмотрению больших промежутков посвящено ограниченное число работ. Считается, что частицы в этом случае взаимодействуют с

полем неэффективно. В данной работе показано, что при определенных условиях в больших пролетных промежутках может осуществляться эффективное взаимодействие заряженной частицы с высокочастотным полем. В работе был исследован процесс поведения заряженных частиц в электромагнитном СВЧ поле большой протяженности в зависимости от энергии частицы при входе в пространство взаимодействия, входной фазы поля, частоты колебаний поля, длины пространства взаимодействия. Задача была рассмотрена в отсутствие магнитной составляющей СВЧ поля. Такой случай имеет место, в частности, при прохождении пучка частиц вдоль центральной оси цилиндрического резонатора, работающего на типе колебаний TM_{01N} .

Для расчета движения частицы любой массы и заряда использовалась математическая модель из работы [1].

Математическая модель

Уравнение движения частицы

$$\frac{dmv}{dt} = qE + q(v \times B), \quad (1)$$

где $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ — масса частицы; m_0 — масса покоя частицы; v — скорость частицы; c — скорость света; q — заряд частицы; B — магнитная индукция; E — напряженность электрического поля.

В отсутствие магнитного поля

$$\omega \frac{dmv}{d\vartheta} = qE_0 \sin \vartheta = \frac{qV_0}{h} \sin \vartheta, \quad (2)$$

где h — длина промежутка взаимодействия; V_0 — амплитуда напряжения; E_0 — амплитуда напряженности электрического поля.

После интегрирования выражения (2) вводим функцию $A(\vartheta)$:

$$\begin{aligned} A(\vartheta) &= \frac{\beta}{(1-\beta^2)^{1/2}} \\ &= \frac{\beta_e}{(1-\beta_e^2)^{1/2}} + \left(\frac{qV_0}{m_0c^2} \right) \left(\frac{\lambda}{2\pi h} \right) [\cos \vartheta_e - \cos \vartheta], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\beta = \frac{v}{c}$ — скорость электрона в единицах скорости света, λ — длина волны, β_e — скорость частицы и ϑ_e — фаза СВЧ поля в момент начала взаимодействия.

Уравнение (3) описывает движение частиц в переменном во времени электрическом поле. Путь, пройденный частицей в ускоряющем промежутке в зависимости от входной фазы СВЧ поля, рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{c}{\omega} \int_{\vartheta_e}^{\vartheta_n} \frac{A(\vartheta) d\vartheta}{[1 + A^2(\vartheta)]^{1/2}}. \quad (4)$$

Таким образом, интегрируя уравнения (4) с переменным верхним пределом ϑ_n , можно определить момент выхода частицы из пространства взаимодействия.

Кинетическая энергия W частицы на выходе из пространства взаимодействия определяется из известного соотношения:

$$W = m_0 c^2 [(1 - \beta^2)^{-1/2} - 1]. \quad (5)$$

На основе приведенной модели было разработано программное обеспечение для среды Windows 95/NT, которое позволяет полностью описать процесс взаимодействия. Оно может быть использовано для расчета взаимодействия частиц произвольной массы, заряда, энергии с СВЧ электрическим полем произвольной частоты и напряженности.

В ходе разработки приложения были созданы динамически подключаемые библиотеки и ActiveX математической модели [2]. При анализе результатов использовалась мультипликация.

Результаты и обсуждение

В расчетах задавались частота и амплитуда напряженности электрического СВЧ поля, энергия электрона на входе в пространство взаимодействия, фаза поля в момент начала взаимодействия. Изменяя начальную фазу поля от 0 до 360 grad с интервалом 1–3 grad, можно выяснить характер взаимодействия поля с непрерывным пучком электронов. С целью проверки верности расчетов была решена задача взаимодействия заряженной частицы с трехмерным полем стоячей волны в прямоугольном волноводе, в которой рассматриваемая задача представляет собой частный случай. Несмотря на то что программы разрабатывались для разных случаев и решение задач осуществлялось различными методами, результаты расчетов совпадают во всех случаях с точностью лучше 0.1%. Это позволяет сделать заключение об их достоверности.

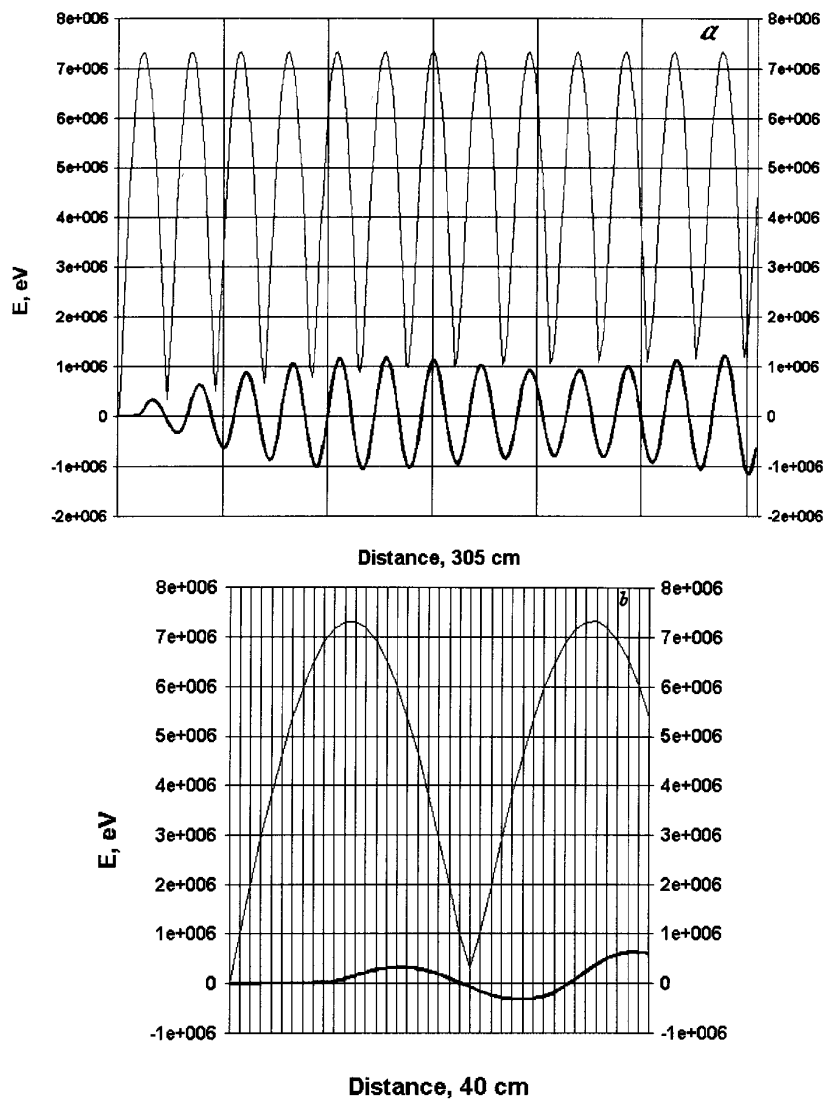


Рис. 1. Зависимость от длины пролетного промежутка максимальной энергии (верхняя кривая) и средней энергии (нижняя кривая), приобретаемой электроном.

Расчеты проводились для частот от 0.8 до 3 GHz в диапазоне напряженностей СВЧ поля от 100 kV/m до 100 MV/m и входной энергии электронов от 7 keV до 700 MeV. На рис. 1, *a, b* представлены зависимости от длины пространства взаимодействия максимальной энергии, приобретаемой электронами, и средней энергии, полученной или отданной электронами, стартовавшими в интервале входных фаз от 0 до 2π . Напряженность электрического поля 100 MV/m, частота 1.3 GHz. Входная энергия электронов 7 MeV.

Из анализа кривых следует:

1. В сравнительно протяженном промежутке 8 см (рис. 1, *b*) электроны получают прирост энергии 6.45 MeV или $\sim 80\%$ от максимально возможного значения, которое они получили бы в постоянном поле с напряженностью 100 MV/m. При этом суммарная энергия, переданная от поля электронами, близка к нулю, т.е. ускорение происходит за счет энергии других электронов пучка. Это обстоятельство может представить интерес для сверхпроводящих резонаторов.

2. На длине пролетного промежутка, равной половине длины волны, происходит сортировка электронов на быстрые и медленные в зависимости от входной фазы. Выделившиеся в группу электроны, стартовавшие вблизи нулевой входной фазы, в дальнейшем сохраняют характер своего движения как наиболее энергичные.

3. Максимальная энергия, приобретенная электронами на отрезке, равном половине длины волны, составляет для релятивистских электронов 63.4% от приращения энергии, которое электроны получили бы на данном отрезке в постоянном поле с напряженностью, равной амплитуде переменного поля.

4. По мере движения в поле через каждый отрезок пути, равный длине волны, электроны набирают максимальную энергию ~ 7.3 MeV с большой точностью, равную значению в 1-м максимуме (рис. 1, *a*).

5. Особый интерес представляет ускоряющий промежуток с длиной, равной $\sim 5/4$ длины волны или 28 см (рис. 1, *b*). В этом промежутке максимально ускоренные электроны приобретают дополнительную энергию ~ 4.6 MeV. При этом электроны, стартовавшие в одном периоде в среднем за период, отдают полю энергию ≥ 200 keV. Энергетическое распределение электронов на выходе промежутка длиной 28 см в зависимости от входной фазы представлено на рис. 2. Это означает, что имеет место передача энергии от электронов полю с одновременным ускорением части электронов, т.е. ускорение электронов идет за счет

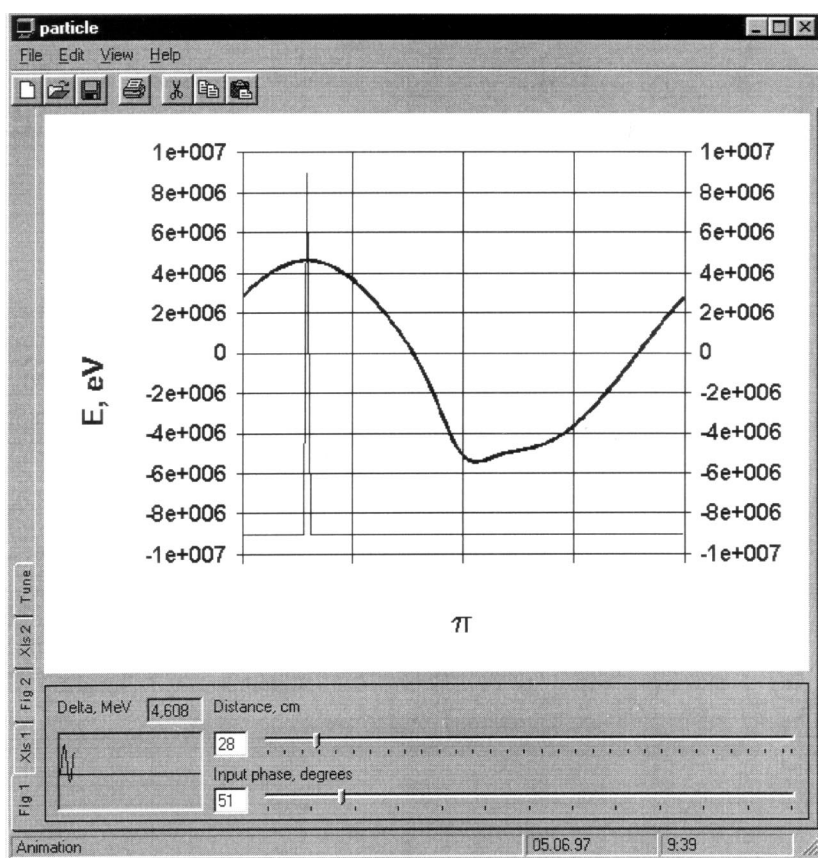


Рис. 2. Распределение частиц по энергиям в зависимости от входной фазы поля фаз в диапазоне от 0 до 2π на длине 28 см.

энергии самого пучка электронов. Подобный эффект может наблюдаться только в больших пролетных промежутках для релятивистских электронов. Так, например, при длине пролетного промежутка 32.4 см электроны приобретают энергию 7.1 meV только за счет энергии других электронов, не отбирая энергию от поля.

На основании проведенных расчетов было показано, что в больших пролетных промежутках при определенных условиях может эффективно осуществляться взаимодействие электронов с СВЧ полем и ускорение электронов за счет энергии самого пучка электронов. Отмеченные особенности характерны только для релятивистских электронов.

Авторы считают своим долгом выразить признательность В.О. Найденову за полезные обсуждения и внимание к работе и К.В. Верещагину за содействие в отладке программы.

Список литературы

- [1] *Coleman P.D.* // N.Y.: Journal of Applied Physics, 1957. V. 28. N 9. P. 927–936.
- [2] *Попов Е.О., Попов С.О.* // ПЖТФ. 1997. Т. 23. № 17. С. 48–56.