

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 621.384

Об ускорении и замедлении частиц сгустками неоднородного высокочастотного электромагнитного поля с нестационарной огибающей

В. В. Окороков

Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова", Москва, Россия

Т. К. Старожилова

Государственный университет — Московский физико-технический институт, Московская обл., Россия

Е. В. Майоров

Институт биохимической физики имени Н. М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

Рассмотрен дополнительный вклад в изменение движения заряженных частиц (любого знака!) при их взаимодействии со сгустками пространственно-неоднородных высокочастотных электромагнитных колебаний при условии изменения как геометрических размеров, так и масштаба огибающей амплитуд этих сгустков по сравнению с взаимодействием частиц со сгустками, у которых размеры и масштаб амплитуд остаются неизменными.

М. А. Миллер в 1958 г. показал [1], что пространственно-неоднородное высокочастотное электромагнитное (ВЧ ЭМ) поле формирует потенциальные барьеры, одинаково действующие на частицы обоих знаков. Это подчас трудновоспринимаемое свойство "сил Миллера", а именно независимость направления силы, действующей на частицу, от знака ее заряда, обуславливает многочисленные красивые и довольно неожиданные технические приложения.

В том же 1958 г. А. В. Гапонов и М. А. Миллер предложили использовать потенциальные ямы, образованные сгустками неоднородного ВЧ ЭМ поля для ускорения частиц [2]. Рис. 1 поясняет идею такого ускорения.

Сгусток ВЧ ЭМ-поля, огибающая которого сохраняет свою форму, двигаясь как целое вдоль оси X , толкает частицы обоих знаков и тем самым ускоряет их.

Г. А. Аскарьян предложил ускорять частицы движущимся фронтом лазерного импульса [3]. Он же предсказал красивейшее явление самофокусировки света при распространении в различных средах [4].

В основе этого явления также лежит расталкивающее действие фронта лазерного импульса на

электроны среды, обусловленное неоднородностью поля фронта этого импульса.

Физика явлений, описанных в работах [1—4], исчерпывающим образом иллюстрируется рис. 1. Во всех этих работах используется интегральное свойство пространственно-неоднородных ВЧ ЭМ-полей формировать потенциальные барьеры, управляющие движением заряженных частиц обоих знаков.

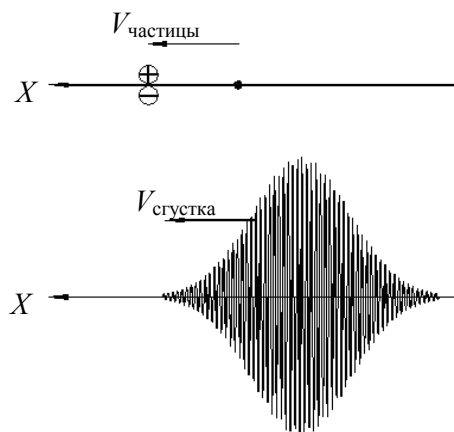


Рис. 1. Ускорение частиц движущимся синусоидальным ВЧ-сгустком электромагнитного поля с неизменной во времени огибающей амплитуд

В работе [5] исследован внутренний механизм изменения скорости частиц, находящихся внутри пространственно-неоднородного *неподвижного* ВЧ ЭМ-сгустка и взаимодействующих с ним. В этом случае мы имеем дополнительный механизм ускорения частиц, начавших свой путь внутри *неподвижного* ВЧ ЭМ-сгустка ограниченных размеров!

Таким образом, скорость движения частиц обоих знаков определяется суммой скоростей движения сгустка ВЧ ЭМ-поля как целого и скорости, набираемой за счет ускорительного механизма, существующего внутри ВЧ ЭМ-сгустка. Такой “внутренний” механизм ускорения показан на рис. 2, а. Важным выводом работы [5] является утверждение об ахроматичности внутреннего механизма ускорения частиц внутри неоднородного ВЧ ЭМ-поля, т. е. независимость от частоты неоднородного поля.

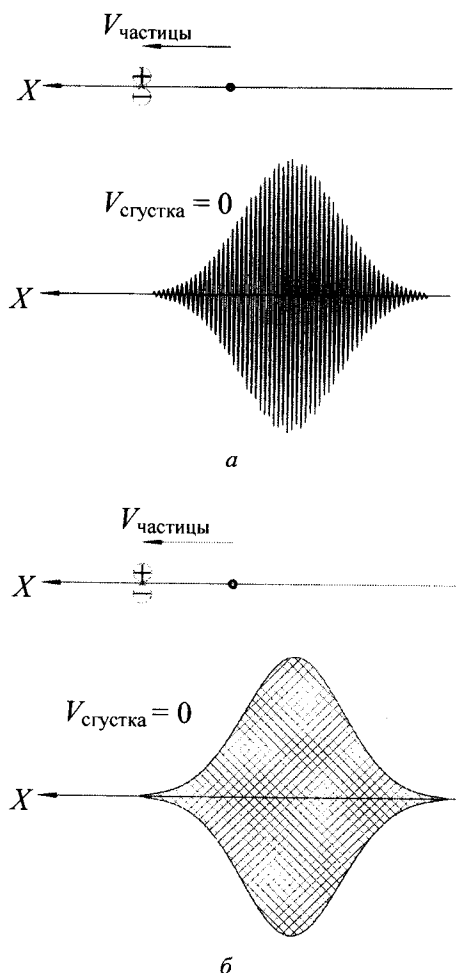


Рис. 2. Ускорение частиц внутри неподвижного сгустка: а — синусоидального ВЧ электромагнитного поля с неизменной во времени огибающей амплитуд; б — стохастических ВЧ-колебаний электромагнитного поля с неизменной огибающей амплитуд

Как следствие этого — сделан важный вывод о том, что аналогичным эффектом ускорения обла-

дает пространственно-неоднородное стохастическое ЭМ-поле *любого спектрального состава* (неподвижное в пространстве!) Ускорение внутри такого стохастического ЭМ-поля иллюстрируется рис. 2, б и практически не отличается от рис. 2, а.

Рассмотрим теперь взаимодействие частиц с нестационарным сгустком ВЧ ЭМ-поля, т. е. сгустком, огибающая амплитуд которого изменяется по величине.

В этом случае процесс взаимодействия приобретает новое качество: частицы могут либо получать дополнительное ускорение — при монотонном увеличении огибающей амплитуд сгустка, либо замедлять свою скорость (даже до нуля!) — при монотонном уменьшении амплитуд ЭМ-колебаний. Качественно картина взаимодействия частиц с нестационарным сгустком ЭМ-поля представлена на рис. 3. В данном случае огибающая амплитуд увеличивается без изменения длительности сгустка.

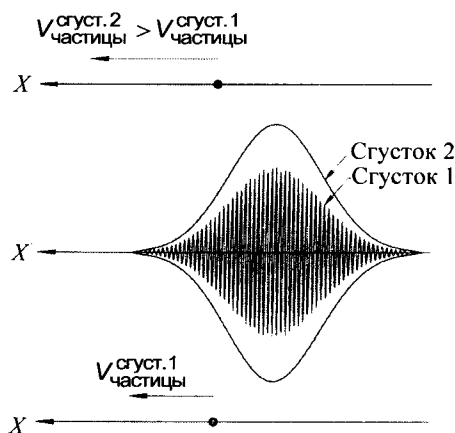


Рис. 3. Ускорение частиц внутри неподвижных сгустков синусоидального ВЧ электромагнитного поля с огибающей амплитуд разной величины

Ясно, что при увеличении длительности сгустка частицы, взаимодействующие с ним, получают еще одно дополнительное ускорение. Замедляющее действие монотонно убывающего ВЧ ЭМ-поля можно проиллюстрировать на простом и важном примере экспоненциально уменьшающегося во времени неоднородного ВЧ ЭМ-поля, амплитуда которого также экспоненциально изменяется в пространстве (вдоль оси X)

$$E = E_0 e^{-\left(\frac{x}{\alpha} + \beta t\right)} \sin \omega t. \quad (1)$$

Такой характер изменения проще всего реализовать на практике (рис. 4).

Для сравнения приведем сначала решение несколько более простой задачи взаимодействия

частицы (в данном случае электрона) с ВЧ ЭМ-по-лем, огибающая которого неизменна во времени (отсутствие множителя $e^{-\beta t}$ в (1)).

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{\alpha}} \sin \omega t. \quad (2)$$

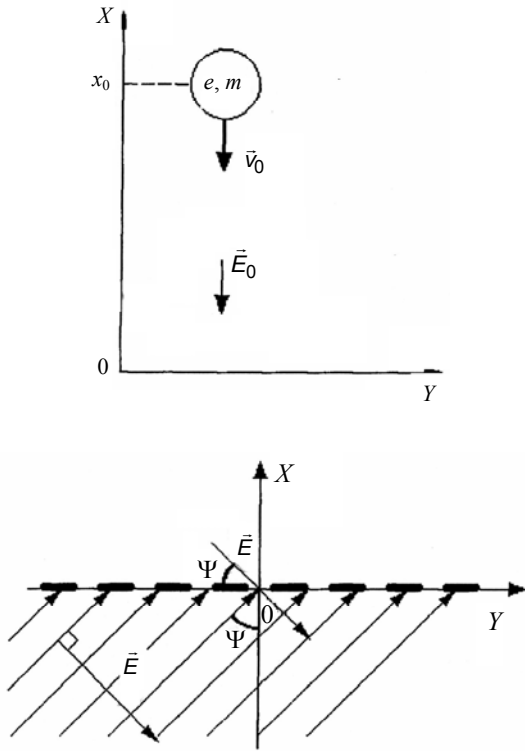


Рис. 4. Один из способов формирования синусоидальных электромагнитных колебаний с экспоненциальным изменением амплитуды вдоль оси X — при отражении электромагнитной волны от проводящей решетки (при условии $d < \lambda$, где d — шаг решетки, λ — длина электромагнитной волны)

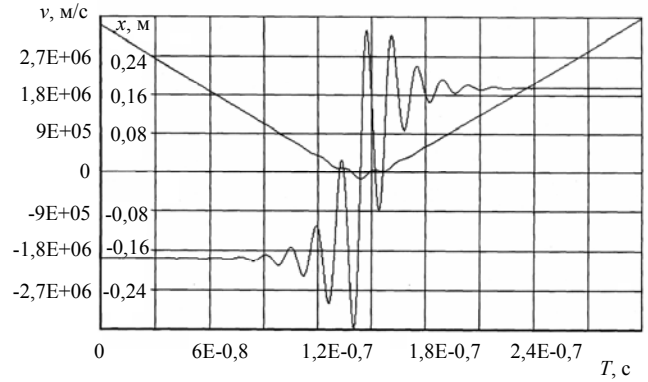
Движение частицы в таком электрическом поле (2) описывается уравнением

$$\ddot{x} = \frac{e}{m} E_0 e^{-\frac{x}{\alpha}} \sin \omega t. \quad (3)$$

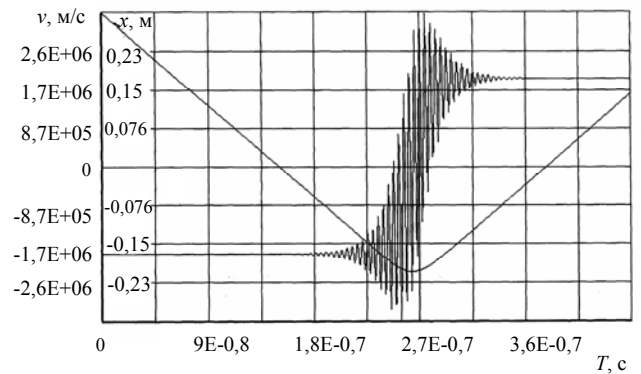
Для электрона, влетающего с начальной скоростью $v_0 = \dot{x} = 2 \cdot 10^6$ м/с (энергия 11,4 эВ) на расстоянии $x_0 = 10 \cdot \alpha$ в неоднородное ВЧ-поле ($\omega = 10^7 - 10^{11}$ рад/с), начальные условия таковы:

$$x|_{t=0} = x_0; \quad \dot{x}|_{t=0} = -v_0.$$

Из рис. 5, а, б, отличающихся друг от друга частотой ω , видно, что частица (электрон) отражается неоднородным ВЧ-полем, причем в процессе отражения скорость частицы испытывает колебания с частотой порядка частоты поля.



а



б

Рис. 5. Отражение электрона от пространственно-неоднородного ВЧ электромагнитного поля частоты $\omega = 10^7$ рад/с (а), $\omega = 10^{11}$ рад/с (б) и неизменяющейся во времени огибающей амплитуд

Для поля, экспоненциально изменяющегося во времени (1), вместо уравнения (3) получим

$$\ddot{x} = \frac{e}{m} E_0 e^{-\left(\frac{x}{\alpha} + \beta t\right)} \sin \omega t \quad (4)$$

с начальными условиями

$$x|_{t=0} = x_0; \quad \dot{x}|_{t=0} = -v_0. \quad (5)$$

Сделаем замену переменных $y = x + \alpha \beta t$. Тогда вместо (4)—(5) будем иметь уравнение

$$\ddot{y} = -\frac{e}{m} E_0 e^{-\frac{y}{\alpha}} \sin \omega t, \quad (6)$$

аналогичное (3) с начальными условиями

$$y|_{t=0} = 0; \quad \dot{y}|_{t=0} = U_0 = -v_0 + \alpha \beta,$$

решение которого известно (см. рис. 5).

Подобрав $\beta = \frac{U_{fin}}{\alpha}$, получим

$$V_{fin} = U_{fin} - \alpha \beta = 0,$$

т. е. частица будет замедляться до нулевой скорости. Это предположение подтверждено расчетом (рис. 6).

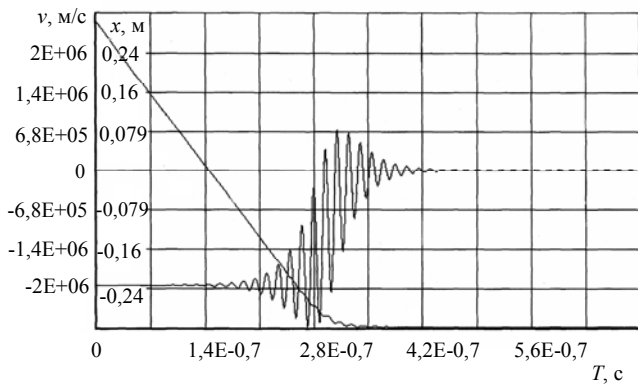


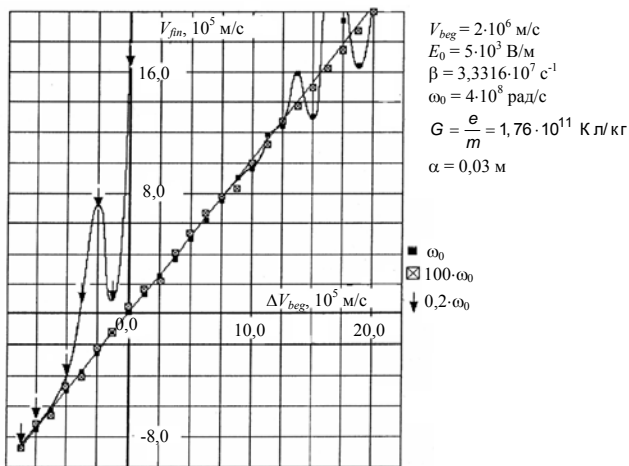
Рис. 6. Замедление электрона при взаимодействии с пространственно-неоднородным сгустком ВЧ электромагнитного поля, огибающая амплитуд которого экспоненциально уменьшается во времени. Конечная скорость равна нулю

В пучке частиц существует разброс скоростей, поэтому важно исследовать зависимость между конечной и начальной скоростями частиц при различных параметрах поля (рис. 7).

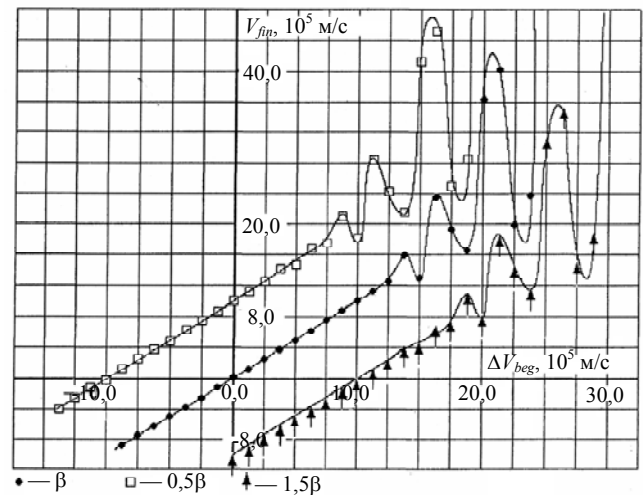
На рис. 7, а представлен график исследуемой зависимости при различных частотах поля, из которого видно, что существует участок линейной зависимости конечной скорости частицы от ее начальной скорости, причем с увеличением частоты поля длина линейного участка увеличивается.

На рис. 7, б, в представлены аналогичные графики для различных значений коэффициента β и при различных значениях амплитуд E_0 , соответственно.

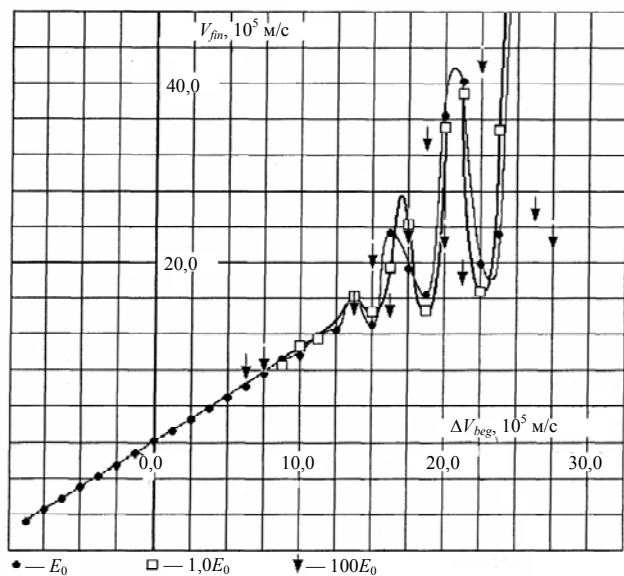
При увеличении β график смещается по оси начальной скорости вправо, при уменьшении β — влево, вид кривой существенно не меняется.



а



б



в

Рис. 7. Зависимость конечной скорости электрона от начальной скорости при его отражении от пространственно-неоднородного поля, изменяющегося во времени и пространстве по закону

$$E = E_0 e^{\left(\frac{x}{a} + \beta t\right)} \sin(\omega t) :$$

а — при различных частотах поля; б — при различных коэффициентах β -затухания во времени; в — при различных значениях амплитуды E_0 ВЧ электромагнитного поля

Исследование зависимости конечной и начальной скоростей при различных значениях амплитуд поля E_0 показало, что в широком диапазоне значений E_0 характер зависимости меняется несущественно.

Выводы

Эффект ускорения частиц “стационарными” пространственно-неоднородными сгустками ВЧ ЭМ-колебаний любого спектрального состава, исследованный в работе [5], вносит дополнительный вклад в движение частиц внутри *нестационарных* (т. е. увеличивающих свои размеры) ЭМ-сгустков. Этот дополнительный вклад обусловлен перемещением градиента огибающей ВЧ ЭМ поля, который ускоряет частицы при увеличении размеров сгустка, что эквивалентно перемещению всего сгустка (без изменения размера!).

Рассмотрено замедление заряженных частиц нестационарными ВЧ-полями, уменьшающими свои

размеры. Это может быть связано с проблемой удержания разреженной плазмы или отдельных частиц в СВЧ-ловушках.

Просматривается возможность получения ультрахолодных нейтронов нестационарными пространственно-неоднородными переменными магнитными полями и накопление холодных нейтронов в нейтронных ловушках с такими же магнитными полями.

Литература

1. Миллер М. А. // Известия вузов. Сер. радиофизика. 1958. Т. 1. № 3.
2. Гапонов А. В., Миллер М. А. // ЖЭТФ 1958. Т. 34. С. 751.
3. Аскарьян Г. А., Манукян С. Д. // Там же. 1972. Т. 62. С. 2156.
4. Аскарьян Г. А. // Там же. 1962. Т. 42. С. 1567.
5. Майоров Е. В., Окороков В. В., Свешиникова Н. В. // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 35—39.

Статья поступила в редакцию 27 марта 2007 г.

On the acceleration and deceleration of particles with clots of a non-homogeneous high frequency electromagnetic field with a non-stationary envelope

V. V. Okorokov

Alikhanov Institute for Theoretical and Experimental Physics, Russian Federation State Scientific Center, Moscow, Russia

T. K. Starojilova

Moscow Institute of Physics and Technology State University, Moscow Region, Russia

E. V. Mayorov

Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences
Moscow, Russia

The paper deals with the interaction of charged particles of any sign with clots of spatially non homogeneous high frequency electromagnetic oscillation as an additional contribution to a change in the particles momentum on condition of alteration of the geometry and envelope of these clots as compared with the interaction of particles with clots of constant geometry and envelope.

* * *