

УДК 534.214

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ, ОТРАЖАЕМЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЛУЧОМ

А. В. Серов

Численными методами исследовано изменение во времени пространственного распределения частиц, падающих на неоднородную электромагнитную волну. Показано, что в однородном при инжекции потоке, перед точкой отражения, происходит группировка частиц. При отражении волной ленточного пучка в нем образуется цуг возмущений плотности, перемещающийся со скоростью волны по направлению ее распространения.

При описании динамики частиц во внешнем электромагнитном поле, переменном во времени и неоднородном в пространстве, используют метод усреднения по времени уравнений движения частиц в быстроосциллирующем поле [1, 2]. Благодаря этому методу удается снизить порядок уравнений и получить приближенное решение ряда задач [3, 4]. Несмотря на вихревой характер мгновенных сил, действующих на частицу в электромагнитном поле, усредненные силы во многих случаях оказываются потенциальными. Роль потенциальной энергии играет кинетическая энергия быстроосциллирующего движения. Характер усредненного движения частицы определяется пространственным распределением интенсивности электромагнитного поля.

Уравнение для усредненного плавного движения отдельной заряженной частицы $r_0(t)$, падающей со скоростью v_0 на монотонно возрастающий от нуля потенциальный барьер,

$$\ddot{r}_0 = -\nabla\Phi, \quad (1)$$

где $\Phi = (e/2m\omega)^2 E^2$ – потенциал; e, m – заряд и масса частицы; ω, E – частота и напряженность внешнего электромагнитного поля, имеет интеграл

$$(\dot{r}_0)^2/2 + \Phi(r_0) = (\dot{r}_0)^2/2 + (\dot{r}_1)^2/2 = \text{const}, \quad (2)$$

где r_1 – быстрое осцилляторное движение с частотой поля ω . Из (2) следует, что при падении на потенциальный барьер частица может продвинуться в неоднородной электромагнитной волне только до точки отражения, положение которой определяется пространственным распределением поля и начальной скоростью частицы. В точке отражения потенциал барьера удовлетворяет условию $\Phi = v_0^2/2$.

Однако метод усреднения не позволяет рассчитать некоторые характеристики системы зарядов, движущихся в электромагнитном луче, в частности, изменение во времени пространственного распределения частиц. В самом деле, в условии отражения от барьера не входит фаза поля в момент инжекции частицы в электромагнитный луч. Поэтому в расчетах отсутствуют данные о траектории отдельных частиц и, следовательно, об их относительном перемещении.

В настоящей работе рассматривается изменение пространственного распределения частиц в пучке, падающем на неоднородную поляризованную электромагнитную волну перпендикулярно направлению ее распространения.

Для описания эволюции пространственного распределения сгустка численно решались уравнения движения большого числа частиц, инжектированных в волну через равные промежутки времени. По результатам расчета строились распределения частиц в различные моменты времени.

Геометрия рассматриваемой в работе задачи приведена на рис. 1. По круглому волноводу радиусом $R = 10$ мм распространяется H_{11} -волна с максимальной напряженностью поля на оси волновода $E = 3 \cdot 10^5$ В/см и длиной волны $\lambda = 1$ мм. Распределение электрического поля волны показано на рисунке. Вектор напряженности электрического поля волны на оси x имеет только E_y -составляющую. Электроны инжектируются в волновод в точке $(R, 0, 0)$ вдоль оси x со скоростью $v_{x0} = -3 \cdot 10^9$ см/с. Из симметрии пространственного распределения поля волны следует, что на частицы действует усредненная градиентная сила, направленная в сторону, противоположную скорости инжекции. При этом движение частиц при падении на волну и при отражении от волны происходит в плоскости hoz . Расчеты показывают, что поперечные по отношению к этой плоскости перемещения имеют пренебрежимо малую величину по сравнению с характерными размерами системы.

На рис. 2 приведены траектории частиц при отражении. Частицы инжектировались друг за другом через одинаковый интервал времени $\Delta t = 0,1T$, где $T = \lambda/c$ – период

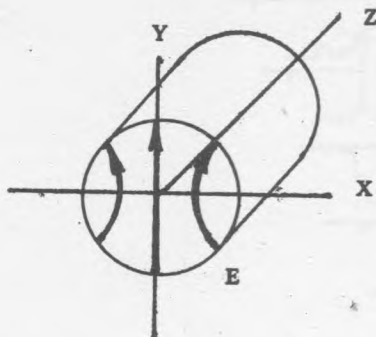


Рис. 1. Геометрия задачи.

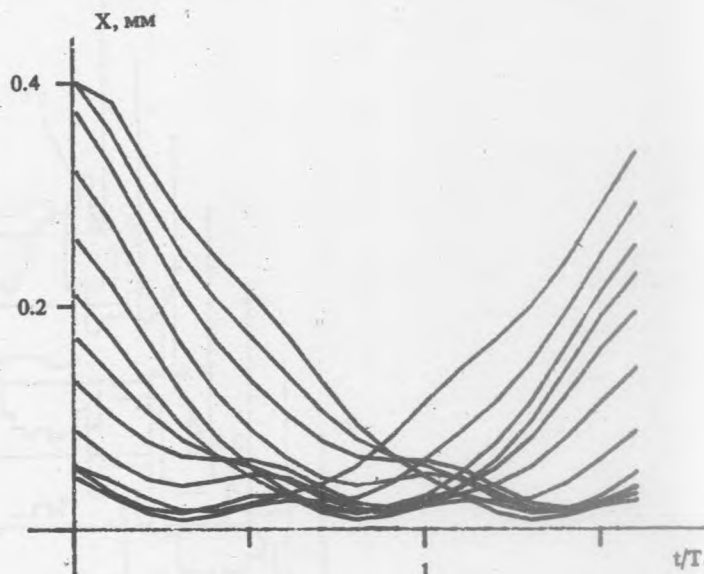


Рис. 2. Траектории частиц.

волны. Видно, что однородный при инжекции поток перед точкой отражения разбивается на группы частиц, одновременно меняющих направление своего движения на противоположное. В каждую группу попадают частицы, инжектированные в интервале фаз $\Delta\varphi = \pi$. Положение точки отражения каждой частицы зависит не только от начальной скорости, но и от фазы волны при инжекции частицы. Из расчетов следует, что моменты времени, при которых происходит остановка и отражение частиц, следуют с периодом, равным половине периода волны.

При движении в волне частицы тормозятся, поэтому плотность пучка вдоль траектории возрастает. Расчеты показали, что вблизи отражения плотность в сотни раз выше, чем при инжекции. Кроме того, на траектории движения в некоторые моменты времени происходит группировка частиц и плотность частиц резко возрастает. Заметим, что плотность максимальна не в точке отражения, где скорость частиц равна нулю, а на некотором расстоянии от нее.

Эволюцию пространственного распределения частиц иллюстрирует рис. 3, на котором показаны распределения вдоль направления инжекции для различных моментов времени. Распределения построены по результатам численного расчета динамики двухсот частиц, инжектированных с интервалом $\Delta t = 0,01T$. Видно, что расстояние от оси электромагнитного луча до ближайших частиц пучка изменяется с частотой, равной удвоенной частоте волны. В потоке частиц, падающих на волну, образуется возмуще-

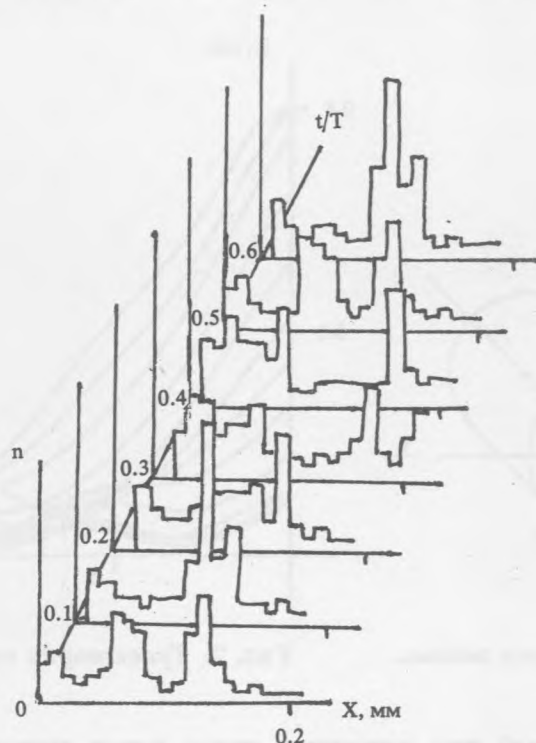


Рис. 3. Распределения плотности частиц вдоль направления инжекции для различных моментов времени.

ние плотности, которое перемещается вместе с потоком. В той точке траектории, где пересекаются возмущения плотности падающих и отраженных частиц, плотность максимальна. На рис. 3 этому соответствуют моменты времени $t = 0,1T$ и $t = 0,6T$. После отражения возмущение плотности при движении частиц из волны разрушается, и на выходе из неоднородной электромагнитной волны пучок практически однороден, так же как и при инжекции.

Все предыдущие распределения построены для частиц, испущенных в точке $(R, 0, 0)$ точечным источником. Пусть на электромагнитную волну падает ленточный электронный поток, размер которого вдоль оси z много больше длины волны. В этом непрерывном электронном потоке вблизи от линии отражения образуется пучок возмущений плотности, который будет перемещаться по направлению z . Скорость перемещения будет равна скорости волны, а период следования этих возмущений будет равен половине периода волны.

Автор благодарен Б. М. Болотовскому за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гапонов А. В., Миллер М. А. ЖЭТФ, 34, N 2, 242 (1958).
- [2] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. М., Наука, 1988.
- [3] Геккер И. Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой. М., Атомиздат, 1978.
- [4] Федоров М. В. Электрон в сильном световом поле. М., Наука, 1991.

Поступила в редакцию 12 января 1994 г.