

## О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЭНЕРГИИ, ИЗЛУЧАЕМОЙ ЧАСТИЦАМИ В ЛАЗЕРЕ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ, ПО ПОПЕРЕЧНОМУ СЕЧЕНИЮ ПУЧКА

А.В. Серов

УДК 621. 378

*Исследовано влияние напряженности поля неоднородной электромагнитной волны на распределение по поперечному сечению пучка энергии, теряемой электронами на излучение.*

Как известно [1], в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) энергия, теряемая электроном на излучение  $\Delta\epsilon$ , зависит от напряженности поля электромагнитной волны  $E_B$ , в которой движется электрон. Поскольку в ЛСЭ электромагнитный луч имеет малые поперечные размеры, сравнимые с поперечными размерами электронного пучка, вклад в излучаемую энергию электронов, движущихся с большими и малыми амплитудами поперечных колебаний, будет различен. Это вызвано тем, что электроны с большими амплитудами колебаний взаимодействуют в среднем с более слабыми полями волны, чем электроны, движущиеся вблизи оси ондулятора.

В настоящей работе рассмотрено влияние напряженности поля волны на распределение потерь энергии электронов на излучение по поперечному сечению пучка.

Потери энергии пучка на излучение находились путем численного решения уравнений движения электронов в полях ЛСЭ. Рассматривалась динамика частиц в спиральном ондуляторе в поле циркулярно поляризованной электромагнитной волны. Предполагалось, что распределение напряженности поля волны по поперечному сечению электромагнитного луча описывается гауссовским законом  $E_B = E_0 \exp(-r^2/w^2)$ , где  $E_0$  — напряженность поля волны на оси луча;  $w$  — ширина луча;  $r$  — поперечная координата. В этом случае уравнения движения электронов имеют вид [2]:

$$\ddot{x} + \Omega_{\perp}^2 x [1 + C((\lambda_0/\pi w)^2 - 1) \cos\varphi - 8C^2(\lambda_0/\pi w)^2] = 0,$$

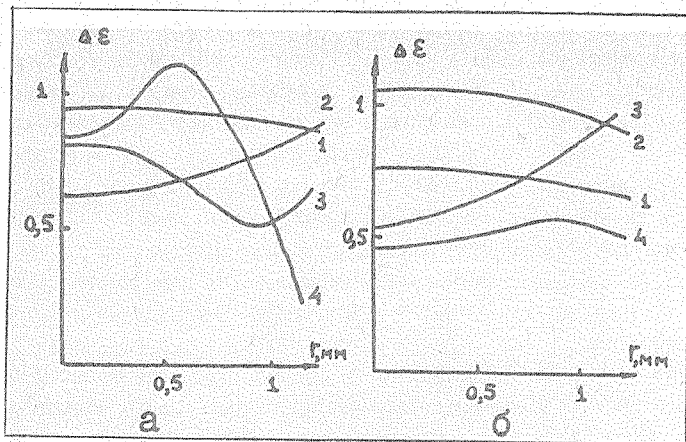
$$\ddot{y} + \Omega_{\perp}^2 y [1 + C((\lambda_0/\pi w)^2 - 1) \cos\varphi - 8C^2(\lambda_0/\pi w)^2] = 0,$$

$$\ddot{\varphi} + \Omega_{\Phi}^2 I_0 (\text{кг}) \exp(-r^2/w^2) \sin\varphi = 0,$$

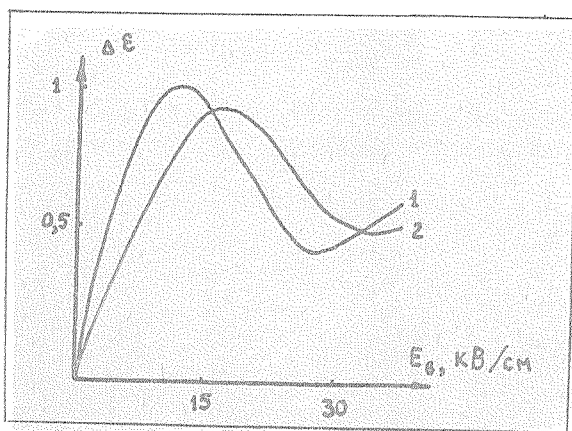
где  $C = E_B/H_0\beta(1 + \beta)\gamma^2$ ;  $\Omega_1 = eH_0/\sqrt{2}mc\gamma$ ;  $\Omega_{\Phi} = e\sqrt{2E_B H_0}/mc\gamma$  — частоты малых поперечных и фазовых колебаний;  $\beta = v/c$ ;  $v$  — скорость частицы;  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  — релятивистский фактор;  $\varphi$  — фаза. В уравнениях присутствуют члены, зависящие от ширины электромагнитного луча  $w$ . При увеличении  $w$  эти члены уменьшаются и в предельном случае плоской волны, когда  $w = \infty$ , они равны нулю.

При расчетах пучок электронов на входе в ондулятор считался моноэнергетическим, не имеющим углового разброса, движущимся параллельно оси ондулятора и равномерно распределенным по начальным фазам инжекции  $\varphi_0$ . Для нахождения энергии, излучаемой всеми частицами пучка, инжектированными в точке с данной поперечной координатой  $r$ , проводилось усреднение изменения энергии по значениям начальных фаз  $\varphi_0$  от 0 до  $2\pi$ . Рассматривалось движение электронов с энергией  $\gamma = 10$  в спиральном ондуляторе длиной  $L = 3$  м с шагом  $\lambda_0 = 5$  см, величиной магнитного поля  $H_0 = 1$  и 2 кГс. Электроны взаимодействовали с электромагнитным лучом шириной  $w \approx 3$  мм и длиной волны  $\lambda_B = 250$  мкм. Поле луча при расчетах изменялось и достигало такой величины, при которой частицы совершали 1,5 — 2 фазовых колебания за время движения в ондуляторе.

На рис. 1 показаны полученные в результате численных расчетов зависимости излучаемой энергии от поперечной координаты частицы при инжекции. По мере увеличения поля волны меняется характер этих зависимостей. Такое изменение наблюдается только в том случае, когда поле волны неоднородно в поперечном направлении. Эту особенность преобразования энергии электронного пучка в излучение ЛСЭ в поле неоднородной волны можно понять, если учесть зависимость излучаемой энергии от поля волны. Как известно [1], в поле плоской волны в некоторых диапазонах изменения  $E_B$  энергия, излучаемая частицей, с увеличением напряженности поля волны уменьшается. При таких полях в неоднородной волне при росте  $E_B$  факторы, вызывающие уменьшение излучаемой энергии, прежде всего будут влиять на излучение тех частиц, которые движутся в областях с максимальной напряженностью поля, т. е. вблизи оси ондулятора. Поэтому вклад в излучение частиц, движущихся с большими амплитудами поперечных колебаний и взаимодействующих в среднем с более слабым полем волны, будет увеличиваться и может превышать вклад частиц, движущихся с малыми амплитудами колебаний. В этих диапазонах изменения  $E_B$  излучаемая энергия увеличивается с ростом  $r$ .



Р и с. 1. Зависимость излучаемой энергии от поперечной координаты инжекции частицы при  $H_0 = 2$  кГс (а) и 1 кГс (б);  $E_{\perp} = 5$  кВ/см (1), 10 кВ/см (2), 22 кВ/см (3), 28 кВ/см (4).



Р и с. 2. Зависимость излучаемой энергии от ширины пучка при  $H_0 = 1$  кГс;  $d = 0,1$  мм. (1),  $d = 2$  мм (2).

Из рис. 1 следует, что энергия, излучаемая всеми частицами пучка, зависит от его ширины. Для нахождения излучаемой пучком энергии, необходимо произвести свертку функции, представленной на рис. 1, и функции, описывающей распределение электронов по поперечному сечению пучка. На рис. 2 показаны зависимости излучаемой энергии от напряженности поля волны, рассчитанные для электронных пучков шириной  $d = 0,1$  мм и  $d = 2$  мм. При расчетах распределение частиц по поперечному сечению пучка предполагалось равномерным, а полный ток считался не зависящим от ширины пучка. Видно, что при широком пучке увеличение излучаемой энергии происходит медленнее, но насыщение наступает при большем (в рассмотренном случае в 1,5 раза) поле волны.

Таким образом, учет неоднородности поля волны и конечности размеров электронного пучка в поперечном направлении приводит к изменению зависимости энергии, теряемой пучком на излучение, от напряженности поля волны. В том случае, когда пучок имеет поперечные размеры много меньше поперечных размеров электромагнитного луча, целесообразен такой режим работы ЛСЭ, при котором по мере роста напряженности поля волны изменяется поперечная координата пучка при инжекции. Координату нужно менять таким образом, чтобы при данной напряженности поля волны энергия, излучаемая пучком, была максимальной.

Поступила в редакцию 8 августа 1984 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров М. В., УФН, 135, 2 (1981).
2. Серов А. В., Препринт ФИАН № 62, М., 1982; ЖТФ, 52, вып. 4, 813 (1982).