

МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА СВЕТОВОЙ ВОЛНОЙ

П.Л.Рубин

При прохождении пучка электронов через световой пучок, интенсивность которого резко изменяется по сечению или круто спадает у края пучка, плотность электронного тока будет промодулирована с оптической частотой. При попадании на мишень такой поток может вызвать излучение на частоте световой волны и ее гармониках (ср. [1]).

Рассмотрим моноэнергетический узкий пучок электронов, движущийся со скоростью V вдоль оси OX (см. рис. 1). Пусть в точке O он пересекает узкий монохроматический линейно поляризованный пучок света частоты ω , электрический вектор которого направлен вдоль оси X и меняется по амплитуде от нуля в точке P до E в точке O (кривая на рисунке справа). Будем считать, что при переходе через O поперек пучка его интенсивность скачком обрывается. В точке $x = L$ поток электронов попадает на металлический экран, перпендикулярный оси X .

Если внутри пучка света его интенсивность медленно меняется в поперечном направлении, то скорость электронов, вылетающих из пучка в точке O в момент времени t может быть записана так (электроны считаем нерелятивистскими)

$$v(t) = V + \frac{eE}{m\omega} \sin \omega t, \quad (1)$$

где e и m — заряд и масса электрона. Причем для весьма умеренных энергий электронов и вплоть до очень сильных световых полей выполняется неравенство

$$eE/m\omega \ll V. \quad (2)$$

Концентрация же электронов в точке O практически остается неизменной и равной их концентрации в падающем пучке. Обозначим ее N .

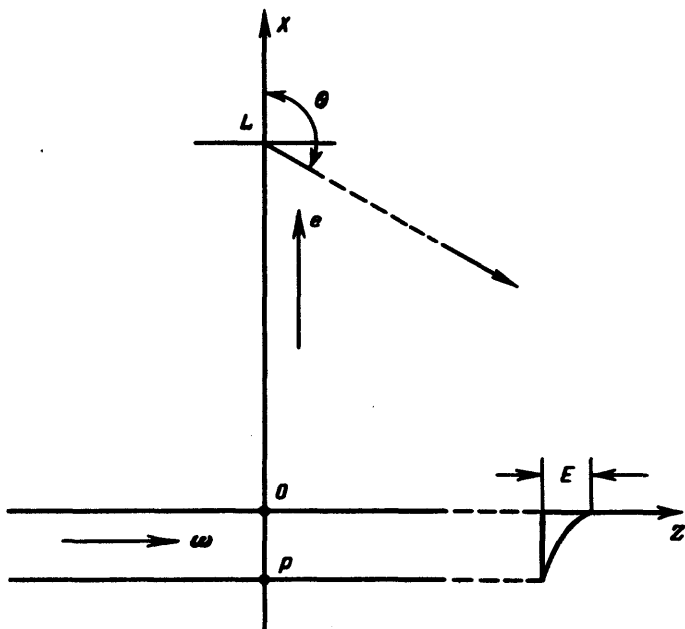


Рис.1

Таким образом, модуляция, которой подвергаются электроны в рассматриваемых условиях, вполне аналогична процессу, происходящему в клистроне [2]. Поэтому мы сразу приведем выражение для плотности тока (I_p — функции Бесселя)

$$j(x, t) = \text{Re} \left\{ eNV \left[1 + 2 \sum_{\rho=1}^{\infty} I_{\rho} \left(\rho \frac{x e E}{mV^2} \right) e^{i\rho\omega \left(t - \frac{x}{V} \right)} \right] \right\}. \quad (3)$$

Заметим, что при значениях параметра $x e E / mV^2$, близких по порядку величины к единице, амплитуды ряда гармонических составляющих плотности тока (в том числе и основной — на оптической частоте) будут сравнимы с постоянной составляющей eNV .

Падающий на экран поток электронов вызывает с его поверхности переходное излучение [4]. Будем ради простоты считать экран бесконечно проводящим¹⁾. Тогда излучение электрона, движущегося внутри экрана, полностью поглощается, и векторный потенциал создаваемого током поля излучения (точ-

¹⁾ Если материал экрана достаточно прозрачен, то помимо переходного необходимо учитывать также тормозное излучение.

нее его X-компоненту) можно записать так [3]

$$A_X = \frac{S}{c R_0} \int_0^L i \left(x, t - \frac{R_0}{c} + \frac{x \cos \theta}{c} \right) dx . \quad (4)$$

Здесь R_0 — расстояние до точки наблюдения; θ — угол между осью X и направлением наблюдения; S — площадь сечения пучка электронов. При подстановке (3) в (4) множители, содержащие функции Бесселя, меняются с изменением x гораздо медленнее экспоненциального фактора. Поэтому (4) можно вычислить интегрированием по частям. При этом для p -й гармоники получится

$$A_X^{(p)} = \frac{2eNV^2S}{R_L} I_p \left(p \frac{LeE}{mV^2} \right) \frac{1}{ip \omega (V \cos \theta - c)} e^{ip \omega \left(t - \frac{R_L}{c} - \frac{L}{V} \right)} .$$

Здесь R_L — расстояние от L до точки наблюдения. На самом деле $A_X^{(p)}$ следует еще удвоить, чтобы учесть наведенные на поверхности экрана заряды ("электрическое изображение" тока, ср. [4]).

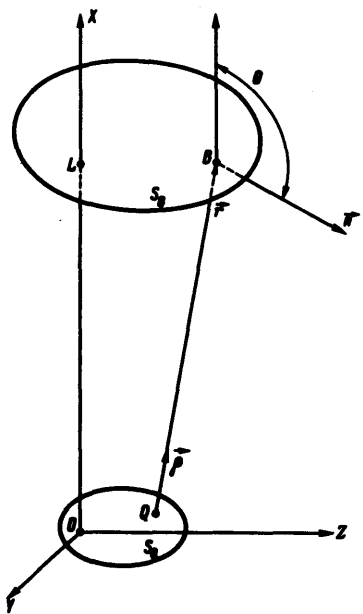


Рис. 2

Теперь рассмотрим пучок электронов, поперечные размеры которого больше длины волны света (см. рис. 2; S_Q и S_B — сечения электронного пучка соответственно при выходе из пучка света и на экране). Считая длину волны электронов h/mV много меньше световой, будем описывать их пучок с помощью геометрической оптики. Рассмотрим бесконечно узкий пучок электронов, проходящий через элементарную площадку dS_Q в плоскости S_Q в направлении QB . Введем аналогичный яркости коэффициент ν_{QB} , представляющий

собой отношение концентрации dN_B , которую создает этот пучок в точке B в отсутствие модуляции световой волной, к площади dS_Q :

$$dN_B = \nu_{QB} dS_Q.$$

Поле световой волны можно получить, суммируя поля от таких элементарных бесконечно узких пучков, один из которых был рассмотрен выше. Оказывается, что световое поле на больших расстояниях может быть описано с помощью интеграла типа Гюйгенса – Френеля [3], взятого по площади сечения электронного пучка на экране. При этом поле (для определенности магнитное) p -и гармоники на экране должно быть взято в виде

$$H_B = \frac{8\pi i}{p\omega} I_p \left(p \frac{LeE}{mV^2} \right) \int_{S_Q} \vec{\rho} \times \mathbf{n} \frac{e\nu_{QB} V^2}{(\vec{\rho}\mathbf{n})V - c} e^{ip\omega \left(t - \frac{r}{V} - \frac{z_Q}{c} \right)} dS_Q.$$

Здесь \mathbf{n} и $\vec{\rho}$ – единичные векторы в направлениях наблюдения и вектора \mathbf{r} соответственно. Остальные обозначения ясны из рис. 2.

Можно предположить, что описанный здесь процесс объясняет появление излучения на нелюминесцирующем экране под действием пучка электронов, которое наблюдали Шварц и Хора [1]. На границах помещенной ими в световой пучок тонкой кристаллической пластинки возникали скачки амплитуды нормальной составляющей электрического поля световой волны. Параметр LeE/mV^2 (см. выше) в условиях [1] мог как раз составлять величину порядка единицы (наличие двух скачков на двух гранях пластинки могло лишь изменить амплитуду модуляции скорости электронов, ср. [2]).

Без детального знания геометрии пучка электронов интенсивность света можно оценить лишь весьма приблизительно. При угловой расходимости пучка электронов 10^{-4} рад (ср. [5]) для визуальной яркости в условиях [1] в качестве такой оценки можно получить величину порядка 10^{-4} нит.

В заключение автор благодарит Г.А.Аскарьяна и И.В.Тютину за обсуждение работы.

Поступила в редакцию
27 февраля 1970 г.

Литература

- [1] H.Schwarz, H.Hora. Appl. Phys. Lett., 15, 349, 1969.
- [2] Б.И.Калинин, Г.М.Герштейн. Введение в радиофизику. М., ГИТТЛ, 1957.
- [3] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля. М., Физматгиз, 1960.
- [4] И.М.Франк. УФН, 87, 189, 1965.
- [5] П.Хирш, А.Хови, Р.Николсон, Д.Нэшли, М.Уэлан. Электронная микроскопия тонких кристаллов. М., Мир, 1968.