

УДК 535.14;530.182

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КВАНТОВОЙ
МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

С. Г. ОГАНЕСЯН, Н. А. САРГСЯН

НИИ физики конденсированных сред ЕГУ

(Поступила в редакцию 30 сентября 1986 г.)

Получены выражения для плотности и тока поляризованного пучка электронов в случае, когда его модуляция основана на вынужденном черенковском эффекте.

Классическая модуляция плотности пучка электронов осуществляется в системах клистронного типа. Квантовый анализ этой задачи [1, 2] устанавливает связь эффекта модуляции с асимметричной частью отдачи, получаемой электроном при излучении или поглощении фотона, и определяет характерную длину L , разделяющую области квантовой и классической модуляции. В настоящей работе рассмотрен вклад спина электрона в этот эффект.

Пусть монохроматическая электромагнитная волна распространяется в диэлектрической среде с показателем преломления n :

$$A_{x,y}(r, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A_{x,y}(q) q_z \delta \left[\left(\frac{\omega}{c} n \right)^2 - q^2 \right] \exp(iqr - i\omega t) dq + \text{к.с.}, \quad (1)$$

$$A_{x,y}(q) = \sqrt{\pi} A_{1x,y} d \exp\left(-\frac{1}{4} q_x^2 d^2\right), \quad A_{1x} = -\frac{i}{2} A_{0x}, \quad A_{1y} = \frac{1}{2} A_{0y}.$$

Фурье-образ векторного потенциала выбран таким образом, чтобы в плоскости $z=0$ поле имело гауссову огибающую с шириной $2d$ вдоль оси x и было поляризовано по эллипсу (вдоль осей y и z поле не ограничено). Предполагается также, что ширина лазерного пучка велика ($\lambda/d \ll 1$) и проекцией поля на ось z можно пренебречь, $A_z \approx 0$.

Рассмотрим взаимодействие пучка электронов, движущихся под углом θ к оси z , с полем (1) (скорость частиц v лежит в плоскости xz). Решая уравнение Дирака в линейном по полю (1) приближении и полагая, что до взаимодействия поляризация электронного пучка определяется 4-вектором $a^\mu = (a_0, \mathbf{a})$ [3], находим, что в области $x \gg d$ 4-вектор тока $j^\mu = (erc, \mathbf{j})$ имеет вид

$$j^\mu = j_0^\mu + 2 j_0^\mu \frac{\Delta E}{h\omega} \xi_x \sin(\Delta qr) \sin\Phi +$$

$$\begin{aligned}
 & + e\rho_0 c \frac{\Delta E}{\varepsilon} \left(\frac{cq_1^u}{\omega} + \frac{cp^u}{\varepsilon} \frac{n^2 - 1}{V(n\beta)^2 - 1} \frac{d^2}{2} q_{1x} q_{1z} \right) \xi_x \cos(\Delta \mathbf{q} \mathbf{r}) \cos \Phi + \\
 & + e\rho_0 c \frac{\Delta E}{\varepsilon} \frac{mc}{p_x} \left(\frac{cq_{1z}}{\omega} \delta_{\mu 0} + \delta_{\mu 3} \right) \sin(\Delta \mathbf{q} \mathbf{r}) (a_x \xi_y \sin \Phi + a_y \xi_x \cos \Phi) + \\
 & + e\rho_0 c \frac{\Delta E}{\varepsilon} \frac{mc}{p_x} \left(\frac{cq_{1x}}{\omega} a_0 - a_z \right) \sin(\Delta \mathbf{q} \mathbf{r}) (\xi_y \sin \Phi \delta_{\mu 1} + \xi_x \cos \Phi \delta_{\mu 2}). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Здесь $j_0^\mu = (e\rho_0 c, e\rho_0 \mathbf{v})$ и $p^\mu = \left(\frac{\varepsilon}{c}, \mathbf{p} \right)$ — 4-векторы тока и импульса начальных электронов, $q_1^\mu = \left(\frac{\omega}{c}, \mathbf{q} \right)$ — волновой 4-вектор фотона, фаза $\Phi = \mathbf{q} \cdot \mathbf{r} - \omega t$,

$$\Delta E = 2\pi \sqrt{\pi} mc^2 \frac{d}{l} \exp\left(-\frac{1}{4} q_{1x}^2 d^2\right), \quad (3)$$

безразмерные параметры $\xi_x, y = z A_{0xy} / mc^2$, m — масса электрона. Векторы \mathbf{q}_1 и $\Delta \mathbf{q}$ имеют проекции

$$\begin{aligned}
 q_{1x} &= \frac{\omega}{v^2} [v_x - v_z \sqrt{(n\beta)^2 - 1}], \quad q_{1z} = \frac{\omega}{v^2} [v_z + v_x \sqrt{(n\beta)^2 - 1}], \\
 \Delta q_x &= \frac{\hbar \omega}{2\varepsilon} \frac{n^2 - 1}{V(n\beta)^2 - 1} q_{1z}, \quad \Delta q_z = -\frac{\hbar \omega}{2\varepsilon} \frac{n^2 - 1}{V(n\beta)^2 - 1} q_{1x}, \quad \beta = v/c. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Перейдем к анализу полученных формул. Вычисляя плотность пучка частиц с помощью уравнения Клейна—Гордона, можно убедиться, что временные компоненты ($\mu = 0$) второго и третьего слагаемых в (2) не связаны со спином электрона. Анализ фаз во втором слагаемом показывает, что длина L вдоль направления $\Delta \mathbf{q} / |\Delta \mathbf{q}|$, разделяющая области квантовой ($r \gtrsim L$) и классической ($r \ll L$) модуляции, определяется из условия $L |\Delta \mathbf{q}| = 2\pi$. Третье слагаемое связано с модуляцией плотности электронов в поле (1) и, наконец, четвертое слагаемое определяет вклад магнитного момента электрона в эффект модуляции плотности частиц.

Переходя в пространственных компонентах ($\mu = 1, 2, 3$) формулы (2) к нерелятивистскому пределу и учитывая определение нерелятивистского тока [3], получаем, что эффект модуляции тока обусловлен как модуляцией плотности пучка частиц, так и его намагниченностью. С первым эффектом связаны второе, третье и четвертое слагаемые в x - и z -проекциях тока ($\mu = 1, 3$). Модуляция плотности пучка приводит к модуляции его намагниченности. С этим чисто спиновым эффектом связано пятое слагаемое в формуле (2) и, в частности, возникновение y -проекции тока ($\mu = 2$).

Если лазерный пучок поляризован вдоль оси y , то модуляция пучка частиц обусловлена только спином электрона и достигает 10% при $\lambda = 1,06$ мкм, $d = 0,1$ см, $P = 7,71 \cdot 10^7$ Вт/см², $n = 1,021$, $\varepsilon = 2,5$ МэВ, $\theta = 2,77 \cdot 10^{-2}$ рад. В расчетах принималось, что пучок электронов полностью поляризован вдоль оси x , а z -проекция скорости частиц удовлетворяет условию $1 - n\beta_z = 0$.

Авторы выражают глубокую благодарность В. М. Арутюняну за обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варшалович Д. А., Дьяконов М. Н. ЖЭТФ, 60, 90 (1971).
2. Арутюнян В. М., Оганесян С. Г. ЖЭТФ, 72, 465 (1977).
3. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. Изд. Наука, М., 1980, с. 133, 150.

ԲԵՎԵՌԱՑՄԱՆ ԵՐԵՎՈՒՅՔՆԵՐԸ ԷԼԵԿՏՐՈՆԱՑԻՆ ՓՆՋԻ ՔՎԱՆՏԱՑԻՆ ՄՈՒՈՒՂՅԱՑԻԱՑԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Ս. Գ. ՀՈՎՀԱՆԵՍՅԱՆ, Ն. Հ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

Ստացված են բևեռացված էլեկտրոնային փնջի խտության և հոսանքի համար արտահայտություններ այն դեպքում, երբ նրա մոդուլացիան պայմանավորված է ստիպորական շերտակալի երևույթով:

POLARIZATION EFFECTS AT QUANTUM MODULATION OF ELECTRON BEAMS

S. G. OGANESYAN, N. H. SARGSYAN

Expressions for the density and current of polarized electron beams modulated by using stimulated Cherenkov effect are obtained.