

07

Влияние амплитудной модуляции светового потока на интерференцию электронов: эффект Ааронова–Бома

© А.Н. Агеев, С.Ю. Давыдов

Физико-технический институт им.А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 28 октября 1996 г.

В статье получены выражения для изменения ширины центрального пика в эффекте Ааронова–Бома.

С времени открытия эффекта Ааронова–Бома (ЭАБ) [1] основное внимание исследователей было сосредоточено на изучении фазовых характеристик электронных волн в постоянных во времени магнитных полях [2], тогда как влиянию переменного электромагнитного поля на ЭАБ посвящено лишь несколько публикаций [3–6]. В работе [4] было получено выражение, связывающее уширение центрального интерференционного максимума из-за влияния электромагнитного поля с частотой ω , амплитудой создаваемого им векторного потенциала A_0 и скоростью электронов v . Эти исследования были продолжены в [5–6]. В настоящей работе в рамках обсуждаемой в [4–6] модели рассмотрено влияние амплитудной модуляции (АМ) светового сигнала на интерференционную картину ЭАБ.

Представим векторный потенциал A в виде [7]:

$$A = A_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где $m = \Delta A/A_0$ — коэффициент модуляции, Ω — частота модулирующего сигнала. Как показано в [4], интерференция двух электронных пучков, дифрагировавших от двух щелей, отстоящих друг от друга на расстоянии d , определяется вероятностью P вида

$$P = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2ev}{\hbar} \int_0^t A dt + \frac{ev}{\hbar} \int_{-\tau}^0 A dt - \omega_e \tau \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь e — заряд электрона; \hbar — приведенная постоянная Планка; c — скорость света; τ — временной интервал попадания в одно и то же место экрана электронов, дифрагировавших от разных щелей; ω_e — угловая частота электронной волны. Подставляя (1) в (2), получим

$$P = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[R \cdot F(t) + \frac{1}{2} R \cdot F(\tau) - \omega_e \tau \right] \right\}, \quad (3)$$

где

$$R = \frac{2evA_0}{\hbar\omega}, \quad (4)$$

$$F(t) = \sin \omega t + m\omega \left[\frac{\sin(\omega - \Omega)t}{\omega - \Omega} + \frac{\sin(\omega + \Omega)t}{\omega + \Omega} \right]. \quad (5)$$

Разложим выражение (5) по параметру малости Ω/ω . Тогда получим

$$F(t) = \sin \omega t + 2m \left[\sin \Omega t \cdot \cos \omega t - \frac{\Omega}{\omega} \cos \Omega t \cdot \sin \omega t \right]. \quad (6)$$

Аналогичное выражение имеет место для $F(\tau)$. Если используется схема детектирования, при которой записывается накопление дифрагированных электронов в каждой точке экрана, то условие, отвечающее полувысоте центрального максимума, есть [4]

$$\omega_e \tau - \left[R \cdot F(t) + \frac{1}{2} R \cdot F(\tau) \right]_{\max} = \frac{\pi}{2}. \quad (7)$$

Можно показать, что главная поправка к функции $F(t)$, вызванная модуляцией, есть $(-2m\Omega/\omega)$ и, следовательно,

$$F_{\max}(t) \cong 1 - 2m \frac{\Omega}{\omega}. \quad (8)$$

Поправкой к функции $F(\tau)$ можно пренебречь, так как $\omega\tau$ является малой величиной. Тогда, повторяя все выкладки работы [5], получим относительную величину угла для центрального дифракционного пика

$$\frac{\theta - \theta_0}{\theta_0} = \frac{4}{\pi} \frac{evA_0}{\hbar\omega} \left(1 - 2m \frac{\Omega}{\omega} + \frac{\pi}{4} \frac{\omega}{\omega_e} \right). \quad (9)$$

Таким образом, АМ светового сигнала приводит к сужению центрального дифракционного пика.

Представляет интерес рассмотреть влияние АМ на контрастность дифракционной картины. Повторяя вычисления работы [6], можно показать, что постоянная (низкочастотная) составляющая вероятности дифракции $P_{d.c.}$ имеет вид

$$P_{d.c.} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos(\beta\omega_e\tau) J_0 \left[R \left(1 - 2m \frac{\Omega}{\omega} \right) \right] \right\}, \quad (10)$$

где $\beta = 1 - \omega R/2\omega_e$. Таким образом, контрастность интерференционной картины

$$K \equiv (P_{d.c. \max} - P_{d.c. \min}) / (P_{d.c. \max} + P_{d.c. \min})$$

есть

$$K = \left| J_0 \left[R \left(1 - 2m \frac{\Omega}{\omega} \right) \right] \right|. \quad (11)$$

Отсюда следует, что, когда значения параметра $R(1 - 2m\Omega/\omega) < 2.40$ (это первый нуль функции Бесселя J_0), увеличение $m\Omega/\omega$ приводит к увеличению контрастности интерференционной картины. В интервале

$$2.40 < R(1 - 2m\Omega/\omega) < 3.84,$$

т. е. на растущем участке функции $|J_0[R(1 - 2m\Omega/\omega)]|$, наоборот, рост $m\Omega/\omega$ приводит к уменьшению K и т. д. Это вытекает из осцилляционного характера функции Бесселя: на "падающих" участках $|J_0|$ увеличение $m\Omega/\omega$ вызывает рост контрастности, на участках роста $|J_0|$ — эффект обратный.

Таким образом, АМ вызывает сужение центрального интерференционного максимума и при малых значениях $R < 2.40$ — усиление контрастности дифракционной картины ЭАБ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 95-02-04064-а).

Список литературы

- [1] Aharonov Y., Bohm // Phys. Rev. 1959. 115. N 3. P. 485–491.
- [2] Peshin M., Tonomura A. // Lecture Notes in Physics. 1984. V. 340. P. 3–152.
- [3] Roy S.M., Singh V. // Nuovo Cimento. 1984. V. 79. N 4. P. 391–409.

- [4] *Lee B., Yin E., Gustafson T.K., Chiao R.* // Phys. Rev. A. 1992. V. 45. N 7. P. 4319–4325.
- [5] *Агеев А.Н., Давыдов С.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Р. 23. С. 71–73.
- [6] *Агеев А.Н., Давыдов С.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 4. С. 70–72.
- [7] *Потемкин В.В.* Радиофизика. М.: Изд-во МГУ, 1988. 260 с.