

Эффект Холла на инерционных электронах в полупроводниках

© В.И. Кадушкин

Научно-исследовательский технологический институт,
390011 Рязань, Россия

(Получена 28 марта 1995 г. Принята к печати 6 марта 1996 г.)

Предсказан новый физический эффект, обусловленный действием силы Лоренца на электроны полупроводника, движущегося ускоренно. Получено выражение для поля Холла и выполнены оценки холловского напряжения для реальной двумерной гетероструктуры. Выполнен анализ возможной схемы усиления холловского поля на примере двух холловских элементов, один из которых — генератор напряжения, а второй — нагрузка.

Известен опыт Толмена и Стюарта, в котором наблюдался импульс тока j , связанный с инерцией свободных электронов. При инерционном разделении зарядов в проводнике возникает электрическое поле напряженностью E . Если такой проводник поместить в магнитное поле B , то следует ожидать появления эдс, аналогичной эффекту Холла, обусловленной действием силы Лоренца на инерционные электроны.

В проводнике, движущемся с ускорением dv_x/dt , возникает ток j_x и поле E_x [1]

$$j_x = \sigma \frac{m}{e} \frac{dv_x}{dt}, \quad (1)$$

$$E_x = \frac{m}{e} \frac{dv_x}{dt}, \quad (2)$$

где $\sigma = en\mu$ — проводимость, μ — подвижность. В магнитном поле $B(0, 0, B_z)$ возбуждается поле $E_y = (1/ne)j_x B_z$ или

$$E_y = \frac{m}{e} \mu B_z \frac{dv_x}{dt}. \quad (3)$$

Последнее выражение эквивалентно $E_y = E_x \mu B_z$.

Наиболее подходящий объект для экспериментального наблюдения эффекта — двумерные электроны в гетеросистеме $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. В единичном образце ($1 \times 1 \text{ см}^2$) в поле 1 Тл и $\mu \cong 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для $dv_x/dt \cong 10 \text{ м/с}^2$ следует ожидать сигнал $V_y \cong 6 \cdot 10^{-11} \text{ В}$, что вполне доступно для современной техники измерений.

Рассмотрим одну из возможностей усиления эффекта на примере двух холловских элементов, один из которых (I) является генератором поля Холла, а второй (II) — нагрузкой. Схема соединений холловских элементов I и II показана на рисунке.

Итак, в магнитном поле B_z (направление которого на рисунке обозначено знаком \oplus) в первом холловском элементе (I) возбуждается ток $j_x^{(1)}$, поле $E_x^{(1)}$ и холловское поле $E_y^{(1)}$, даваемые выражениями (1)–(3). Замкнув потенциальные (холловские) контакты X_1 – X_1 на токовые контакты T_2 – T_2 холловского элемента II, в последнем дополнительно к первичному полю $E_x^{(2)} = E_x^{(1)}$, определяемому выражением (2), имеем и поле $E_y^{(1)}$. Так что результирующее поле имеет два компонента —

$E_x^{(2)} = E_x^{(1)} + E_y^{(1)}$. Это возможно, если холловский элемент I рассматривать как генератор напряжения, нагруженный на холловский элемент II. В этом случае должен выполняться режим "холостого хода", для чего необходимо выполнить условие $R(X_1-X_1) \ll R(T_2-T_2)$, где R — сопротивление между соответствующими контактами. В таком случае в холловском элементе II возбуждается поле

$$E_y^{(2)} = (E_y^{(1)} + E_x^{(1)}) \mu B_z. \quad (4)$$

Учитывая соотношение $E_y^{(1)} = E_x^{(1)} \mu B_z$, получаем

$$E_y^{(2)} = (1 + \mu B_z) \mu B_z E_x^{(1)}. \quad (5)$$

Непосредственное наблюдение эффекта, видимо, затруднено. Более реально осуществить опыты с вибрацией образца в магнитном поле. Полезный сигнал \mathcal{E}_y при этом может быть отделен от наводки \mathcal{E}_y^* по квадратичной зависимости от частоты колебаний ω (наводка пропорциональна 1-й степени частоты колебаний).

В самом деле, для данной геометрии опыта (см. рисунок) в магнитном поле $B(0, 0, B_z)$ при изменении координаты x со временем по закону $x = x_0 \cos \omega t$, где ω — частота задающего генератора, нагруженного на

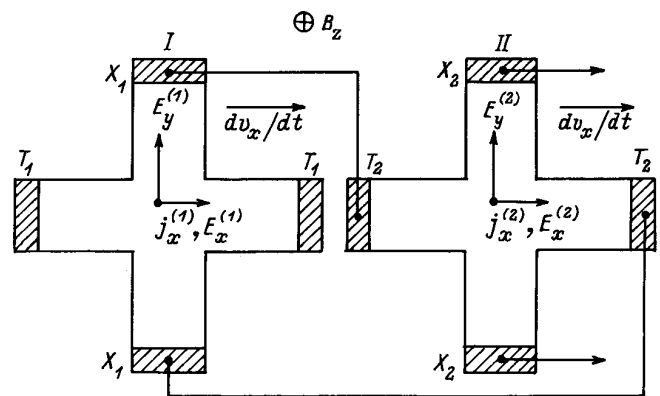


Схема усиления холловского поля из двух элементов I и II. Указаны направления: знаком \oplus — магнитного поля B_z ; стрелками — ускорения dv_x/dt ; полей Холла $E_y^{(1)}$, $E_y^{(2)}$; плотностей тока $j_x^{(1)}$, $j_x^{(2)}$.

пьезоэлемент, и x_0 — амплитуда колебаний последнего, имеем из соотношения (3)

$$\mathcal{E}_y = \frac{m}{e} \mu B_z l_y \omega^2 x_0 \cos \omega t, \quad (6)$$

где l_y — расстояние между холловскими контактами образца ($X_1 - X_1$), т. е. $\mathcal{E}_y = E_y l_y$. Паразитная наводка \mathcal{E}_y^* , возникающая в соединительных проводах в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея, определяется выражением

$$\mathcal{E}_y^* = -B_z l_y^* \omega x_0 \sin \omega t, \quad (7)$$

где l_y^* — эффективная длина соединительных проводников, включающих образец в схему измерений. Таким образом, полезный сигнал \mathcal{E}_y имеет отличительные особенности по отношению к наводке \mathcal{E}_y^* . Первая особенность это пропорциональность величине ω^2 , тогда как $\mathcal{E}_y^* \sim \omega$. Одновременно \mathcal{E}_y во времени изменяется синфазно, а \mathcal{E}_y^* — противофазно напряжению задающего генератора. Существенно отметить, что масса, входящая в выражения (1)-(3), это масса свободного электрона (см. [2]); величина же подвижности μ определяется эффективной массой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Министерства науки и техники Российской Федерации "Физика твердотельных наноструктур", проект 2-016/2.

Список литературы

- [1] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика*, т. VIII. *Электродинамика сплошных сред* (М., Наука, 1982) с. 309.
- [2] И.М. Цидильковский УФН, **115**, 321 (1975).

Редактор Т.А. Полянская

Hall effect on inertial electrons in semiconductors

V.I. Kadushkin

Scientific Research and Technology Institute,
390011 Ryazan, Russia

Abstract The new physical effect determined by Lorentz force effect on electrons being in accelerated motion was predicted in the work. The expression for Hall field was obtained and the Hall voltage was evaluated in the real two-dimensional structure. The analysis of the possible Hall field amplification circuit was fulfilled on example of two Hall elements; one of them is the voltage generator and the other is the load.