

МЕЗОСКОПИЧЕСКИЙ ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ЭЛЕКТРОННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

А.А.Быков, З.Д.Квон, Л.В.Литвин, Ю.В.Настаушев, В.Г.Мансуров,
В.П.Мигаль, С.П.Мощенко

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН
630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 20 августа 1993 г.

В электронном интерферометре, изготовленном в форме кольца на гетеропереходе $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$, обнаружен фотогальванический эффект, возникающий при $T \leq 4,2\text{ К}$ под воздействием микроволнового излучения в виде осциллирующей с изменением магнитного поля ЭДС. Период осцилляций ЭДС равен периоду осцилляций сопротивления и соответствует изменению магнитного потока через площадь интерферометра на квант потока $\Phi_0 = h/e$. Показано, что обнаруженный эффект имеет мезоскопическую природу.

В работе [1] теоретически было показано, что в мезоскопических проводниках из-за отсутствия центра инверсии под действием микроволнового излучения должен возникать стационарный фототок – фотогальванический эффект. Позднее мезоскопический фотогальванический эффект был обнаружен экспериментально при облучении микроволновым полем микромостиков на основе δ -легированного GaAs [2]. Было установлено, что в отличие от универсальных флуктуаций проводимости, где мезоскопический вклад мал по сравнению с усредненной проводимостью, микроволновая ЭДС полностью определяется мезоскопикой и является эффективным инструментом исследования мезоскопических свойств проводников малых размеров [3,4].

В данной работе экспериментально обнаружен фотогальванический эффект, возникающий под действием микроволнового поля в электронном интерферометре кольцевой формы при $T \leq 4,2\text{ К}$ в диапазоне частот от 9 до 145 ГГц.

Экспериментальные образцы изготавливались с использованием техники электронной литографии и технологии реактивного ионного травления на основе $2D$ -электронного газа в гетеропереходе $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$. Параметры $2D$ -электронного газа при $T = 4,2\text{ К}$ были следующими: концентрация электронов $N_s = (7 - 9) \cdot 10^{11}\text{ см}^{-2}$, подвижность $\mu = 10^5\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, длина свободного пробега электронов $l = 1,5\text{ мкм}$. Геометрические размеры интерферометра представлены на рис.1. Более подробно технология изготовления и электрофизические свойства квазибаллистического электронного интерферометра описаны в работе [5].

Исследования проводились при температурах 1,6–4,2 К в магнитных полях до 7Т. Микроволновое излучение частотой 9–12 ГГц подавалось с помощью кабеля непосредственно на омические контакты интерферометра. Излучение частотой 37–145 ГГц подавалось на образец при помощи волновода. ЭДС измерялась с омических контактов интерферометра. Сопротивление интерферометров в нулевом магнитном поле (R_0) зависело от условий охлаждения и составляло при 4,2 К $4 \div 15\text{ кОм}$.

На рис.2 показаны зависимости ЭДС (V) и сопротивления (R) от магнитного поля для кольцевого интерферометра. Видны периодические по магнитному полю осцилляции как магнетосопротивления, так и ЭДС. Период осцилляций

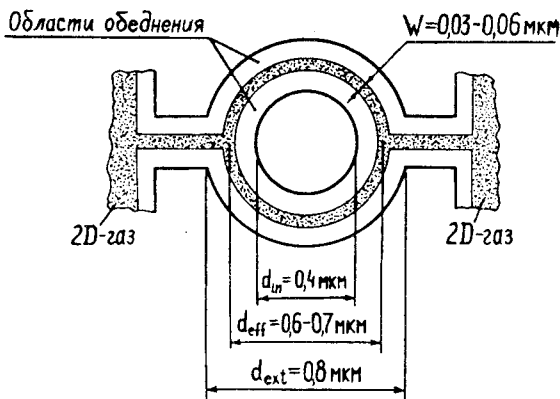


Рис.1. Схематическое изображение и геометрические размеры квазибаллистического электронного интерферометра

соответствует изменению магнитного потока через площадь интерферометра ($\pi d_{eff}^2/4$) на квант магнитного потока $\Phi_0 = h/e$. Амплитуда периодических осцилляций магнетосопротивления $\Delta R/R_0$ (R_0 – сопротивление в нулевом магнитном поле) при $T = 4,2$ К мала и равна около $5 \cdot 10^{-3}$. Амплитуда периодических осцилляций ЭДС сравнима с величиной полного сигнала. Кроме периодической составляющей как в ЭДС, так и в магнетосопротивлении наблюдается аperiodическая. Наиболее отчетливо эта составляющая проявляется в зависимости ЭДС от магнитного поля.

Причина возникновения мезоскопической ЭДС, как показано в [1], заключается в том, что неравновесные носители в мезоскопических проводниках рассеиваются на случайном потенциале когерентно и поэтому потоки неравновесных электронов в правый и левый контакты микроструктуры не будут равны, то есть возникает результирующий стационарный фототок – фотогальванический эффект.

Степень асимметрии когерентного рассеяния неравновесных носителей заряда α относительно омических контактов в мезоскопических микромостиках является случайной функцией магнитного поля B и энергии возбуждения неравновесных электронов $\hbar\omega$ [1]. Случайная зависимость $\alpha(B)$ в квазибаллистическом интерферометре проявляется в виде аperiodической составляющей микроволновой ЭДС (рис.2а).

В кольцевом интерферометре аperiodическая составляющая ЭДС связана с асимметрией когерентного рассеяния неравновесных носителей относительно омических контактов в каждом из полуколец в отдельности, то есть совершенно аналогична исследованной ранее [3,4]. Корреляционное магнитное поле этой составляющей определяется площадью полукольца. Средний период осцилляций аperiodической составляющей по магнитному полю приблизительно в 10 раз больше периодической, что согласуется с отношением площадей круга с эффективным диаметром 0,6 – 0,7 мкм и полукольца шириной 0,04 мкм.

Наибольший интерес представляет собой периодическая составляющая ЭДС, ранее не наблюдавшаяся. Она обусловлена тем, что степень асимметрии α для кольцевого интерферометра должна содержать не только случайную зависимость от величины B , но и периодическую, то есть в этой составляющей проявляется прямая интерференция электронных волн, распространяющихся по различным полукольцам интерферометра. Асимметрия в этом случае возникает вследствие того, что электронные волноводы интерферометра не могут быть

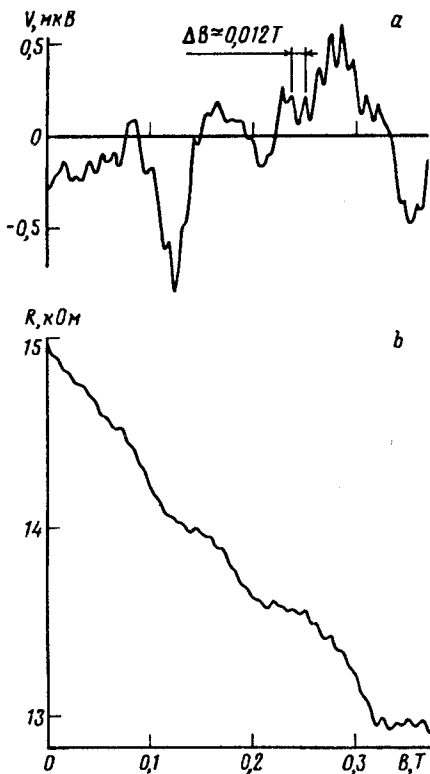


Рис.2. а - Зависимость микроволновой ЭДС от магнитного поля: $f = 9 \text{ ГГц}$, $T = 4,2 \text{ К}$, образец № 1, $R_0 = 15 \text{ кОм}$; б - зависимость сопротивления от магнитного поля: $T = 4,2 \text{ К}$, образец № 1, $R_0 = 15 \text{ кОм}$

идеально одинаковыми из-за случайно расположенных в них рассеивающих примесей. В результате возникает стационарный ток неравновесных носителей с периодом, соответствующим изменению потока магнитного поля на квант потока $\Phi_0 = h/e$.

Как отмечалось выше, степень асимметрии когерентного рассеяния неравновесных носителей заряда в мезоскопических проводниках прямоугольной формы является случайной функцией энергии возбуждения электронов $\hbar\omega$ ($\omega = 2\pi f$, f - частота микроволнового излучения) [1], что приводит к частотной зависимости фотогальванического эффекта и позволяет определить экспериментально важную характеристику мезоскопической системы - корреляционную энергию, E_c [3,4]. В кольцевом интерферометре α должна иметь не только случайную зависимость от частоты, но и периодическую, которую будет давать прямая интерференция электронных волн, распространяющихся по различным полукольцам интерферометра.

Экспериментальные зависимости ЭДС от магнитного поля для различных частот микроволнового поля представлены на рис.3. Видно, что изменение частоты приводит к сдвигу по фазе периодических осцилляций ЭДС и к видоизменению аперриодической составляющей. Наличие в степени асимметрии двух составляющих, периодической и случайной, приводит к тому, что в зависимости ЭДС от магнитного поля наблюдаются точки сбоя фазы периодических осцилляций (указаны на рис.3 пунктирными стрелками). В этих местах фаза осцилляций изменяется на π . При изменении частоты положение точек сбоя фазы в магнитном поле изменяется. Сдвиг по фазе периодических

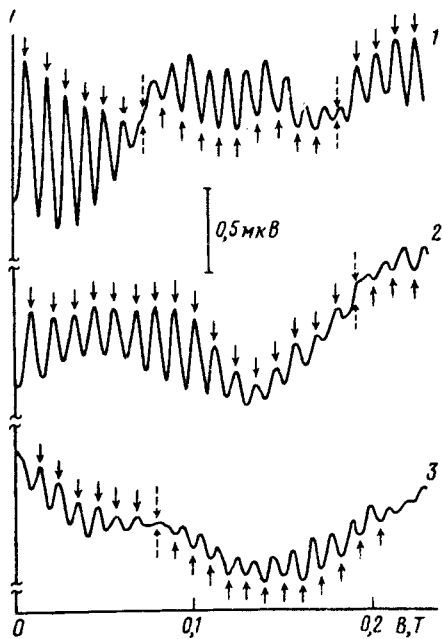


Рис.3. Зависимость микроволновой ЭДС от магнитного поля для различных частот: 1 - $f = 9$ ГГц, 2 - $f = 38$ ГГц, 3 - $f = 78$ ГГц; $T = 4,2$ К, образец № 2, $R_0 = 10$ кОм

осцилляций ЭДС при изменении частоты, из-за наличия точек сбоя по фазе, на различных участках магнитного поля может отличаться на π . Отметим также изменение с частотой амплитуды осцилляций ЭДС.

Таким образом, экспериментально обнаружен мезоскопический фотогальванический эффект в электронном интерферометре, обусловленный периодической составляющей в степени асимметрии когерентного рассеяния неравновесных носителей заряда относительно омических контактов. Фотогальванический эффект возникает под действием микроволнового поля в диапазоне от 9 до 145 ГГц и позволяет оценить качество интерферометра при $T = 4,2$ К когда осцилляции Ааронова-Бома в проводимости малы. Детальный анализ полученных экспериментальных данных требует построения теории фотогальванического эффекта в электронном интерферометре.

В заключение авторы благодарят М.В.Энтина, Э.М.Баскина и Ю.Лянда-Геллера за обсуждение результатов работы, В.Плюхина за проведение реактивного ионного травления. А.А.Быков и З.Д.Квон благодарят фонд Сороса за экономическую поддержку.

1. В.И.Фалько, Д.Е.Хмельницкий, ЖЭТФ **95**, 328 (1989).
2. А.А.Быков, Г.М.Гусев, З.Д.Квон и др., Письма в ЖЭТФ **49**, 13 (1989).
3. А.А.Быков, Г.М.Гусев, З.Д.Квон и др., ЖЭТФ **97**, 251 (1990).
4. А.А.Быков, G.M.Gusev, Z.D.Kvon et al., Superlattices and Microstructures **10**, 287 (1991).
5. А.А.Быков, З.Д.Квон, Е.Б.Ольшанецкий и др., Письма в ЖЭТФ **57**, 596 (1993).