

Отметим, во-первых, что возрастание  $K_r$  с ростом температуры на начальном участке характеристики  $K_r(T)$  связано с разрушением поверхностных окисных пленок во время нагревания [3] и, во-вторых, что различие в значениях  $T_{ом}$  для структур с ориентацией (100), представленных на рис. 2 и 1, связано с разной обработкой поверхности полупроводника.

5. В работе [1] мы предположили, что переход контакта полупроводник—жидкий металл от вентильного к омическому происходит в результате перестройки поверхностных состояний (максимум плотности состояний оказывается вблизи дна  $s$ -зоны), которая является следствием растворения приповерхностного слоя полупроводника.

Зависимость  $T_{ом}$  от ориентации поверхности полупроводника и способности грани кристалла к растворению и независимость  $T_{ом}$  от концентрации электронов подтверждают предположение, что переход контакта от вентильного к омическому связан прежде всего с растворением приповерхностного слоя полупроводника.

Толщина растворенного слоя GaAs в жидком Ga при температуре образования омического контакта была оценена следующим образом. Поскольку данных по растворимости As в Ga при температурах  $< 500^\circ\text{C}$  в известной нам литературе нет, мы воспользовались результатами [4], согласно которым атомная доля As, соответствующая насыщенному раствору-расплаву Ga—As,  $x_{As} = 4479 \exp[-13\,112/T(K)]$  в интервале температур  $580\div 670^\circ\text{C}$ , и экстраполировали эту зависимость до  $300^\circ\text{C}$ . Отсюда была вычислена толщина растворенного слоя GaAs, которая оказалась порядка  $10\text{ \AA}$ , т. е. порядка величины постоянной решетки GaAs.

6. Таким образом, установлено, что температура перехода контакта полупроводник—жидкий металл от вентильного к омическому:

— существенно зависит от кристаллографической ориентации поверхности полупроводника и тем ниже, чем выше способность грани кристалла к растворению в жидком металле;

— не зависит от концентрации электронов в полупроводнике ( $10^{15}\div 10^{18}\text{ см}^{-3}$ ).

Контакт становится омическим после растворения в жидком металле тонкого, близкого к монокристаллическому, приповерхностного слоя полупроводника.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Гольдберг Ю. А., Поссе Е. А., Царенков Б. В. Переход контакта полупроводник—жидкий металл от вентильного к омическому. — ФТП, 1986, т. 20, в. 8, с. 1510—1513.
- [2] Galos H. C., Lavine M. C. — J. Phys. Chem. Sol., 1960, v. 14, p. 169—174.
- [3] Гольдберг Ю. А., Лаперашвили Т. А., Наканидзе Г. А., Царенков Б. В. Влияние термообработки на характеристику прямой ток—напряжение Au— $n$ -GaP поверхностно-барьерных структур. — Письма ЖТФ, 1982, т. 8, в. 14, с. 866—869.
- [4] Perea E. H., Fonstad C. G. — J. Electrochem. Soc., 1980, v. 127, N 2, p. 313—315.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получено 15.09.1987  
Принято к печати 22.09.1987

ФТП, том 22, вып. 3, 1988

## ФОТОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ В $n$ -InSb В КВАНТОВОМ ПРЕДЕЛЕ

Кадушкин В. И., Денисов А. А.

Измерения нечетного фотомагнитного эффекта ФМЭ [ $1^{-3}$ ], выполненные на вырожденных образцах  $n$ - $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в квантовом пределе, обнаружили аномальную зависимость ЭДС ФМЭ от магнитного поля, а именно в области магнитных полей непосредственно за  $\theta^+$ -экстремумом осцилляций Шубникова—

де-Гааза ( $\hbar\omega > \xi$ ,  $\omega$  — циклотронная частота,  $\xi$  — уровень Ферми) ЭДС ФМЭ уменьшается с увеличением магнитного поля. Измерения ЭДС ФМЭ в квантовом пределе при вырождении электронов на  $n$ -InSb нам не известны (на «чистых образцах в квантовом пределе наблюдаются осцилляции Гуревича—Фирсова, а на существенно вырожденных образцах в достижимых магнитных полях квантовый предел не был реализован [4]).

Нами выполнены измерения ЭДС нечетного фотомагнитного эффекта  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{неч}}$  на образцах  $n$ -InSb с концентрацией электронов  $n = (1.7 \div 2.5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в диапазоне температур  $4.2 \div 20 \text{ К}$ , в магнитных полях  $B$  до 7 Т. ЭДС ФМЭ измерялась по обычной методике при постоянном и модулированном освещении с записью на двухкоординатном самописце ИЗО6 при низком уровне возбуждения.

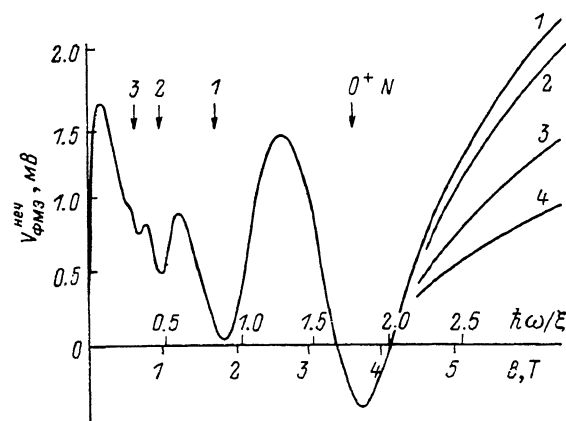


Рис. 1. Зависимость ЭДС нечетного фотомагнитного эффекта от магнитного поля.

$T, \text{ К}: 1 - 4.2, 2 - 7, 3 - 12, 4 - 16.$

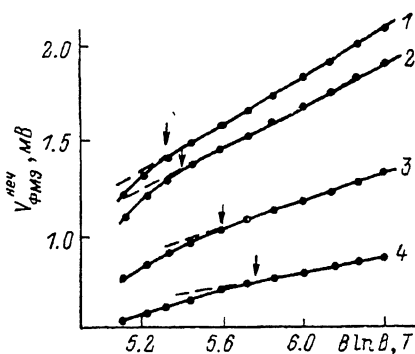


Рис. 2. Зависимость ЭДС нечетного фотомагнитного эффекта от магнитного поля в квантовом пределе по данным рис. 1, перестроенная в масштаб  $B \ln B$ .

Штриховые линии — продолжения линейных участков.

Источниками света служили миниатюрная лампочка накаливания и светодиод, располагавшиеся в непосредственной близости от образца.

На рис. 1 приведены кривая осцилляций ЭДС ФМЭ (1) при  $T = 4.2 \text{ К}$  и фрагменты кривых осцилляций (2, 3 и 4) в квантовом пределе при  $T = 7, 12$  и  $16 \text{ К}$  соответственно. Стрелками указаны положения экстремумов осцилляций, вычисленные согласно [4]. Для данного образца были вычислены по периоду осцилляций концентрация электронов и энергия Ферми ( $n = 1.9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и  $\xi = 16 \text{ мэВ}$ ), так что в магнитном поле  $B > 4 T \hbar\omega/\xi > 2$  и реализуются условия квантового предела. В этой области магнитных полей поперечное и продольное магнитосопротивление зависит от магнитного поля по закону  $\sim B^3$ , а  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{неч}} \sim \sim B^\alpha$  с  $\alpha < 1$  во всем исследованном интервале температур.

Известно [5–8], что в квантовых магнитных полях в фотоэлектрических эффектах определяющим является эффект Нернста (поперечный термомагнитный эффект на градиенте электронной температуры). Именно этим обстоятельством обусловлена, в частности, смена знака  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{неч}}$  в области осцилляций ШГ. Теоретические исследования фотоэлектрических эффектов вырожденного полупроводника в квантовом пределе с учетом конкуренций разогретого  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{неч}}$  и диффузионного  $V_{\text{ФМЭ}}'$  компонентов нам не известны.

При сравнительных измерениях различных кинетических коэффициентов, выполненных на одном образце, обнаружено, что в квантовом пределе эффект Нернста меняет знак и становится положительным [7]. С другой стороны, в квантовом пределе магнитное поле подавляет электрон-электронное взаимодействие и оно не вносит вклада в релаксацию энергии [9]. Более того, отношение разогретого и диффузионного слагаемых ФМЭ [8] содержит время релаксации электронов по энергии, а этот параметр существенно зависит от магнитного поля. В экспериментах [10, 11] наблюдалось уменьшение времени

релаксации более чем на порядок. Это позволяет говорить о существенном уменьшении роли разогретого ФМЭ в квантовом пределе [1].

Сопоставим результаты эксперимента (рис. 1) со следствиями диффузионной теории [12]. Для вырожденных электронов в квантовом пределе из [12] следует  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{нег}} \sim B \ln B$  (такая же зависимость имеет место и для невырожденных электронов). Следует отметить, что для исследованного образца с указанной концентрацией в квантовом пределе вырождение частично снято магнитным полем. Условие частичного вырождения имеет вид [13]

$$\xi^* < \hbar\omega/kT < \xi^{*3/2}, \quad (1)$$

где  $\xi^* = \xi/kT$ .

Для  $\hbar\omega/\xi = 2$  имеем  $\xi^* = 44$ ,  $\hbar\omega/kT = 89$ ,  $\xi^{*3/2} = 290$ , так что условие (1) выполняется.

На рис. 2 представлены кривые  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{нег}}(B)$ , перестроенные в масштабе  $B \ln B$ . Видно, что зависимость  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{нег}}$  от  $B \ln B$  линейная и область линейности смещается на большие магнитные поля с увеличением температуры опыта (на рисунке это отмечено вертикальными стрелками).

Явный вид зависимости  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{нег}}$  от температуры в [12] не приведен, но следует ожидать убывания  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{нег}}$  от температуры по крайней мере  $\sim T^{-1}$ . Из эксперимента следует, что в области  $T = 12 \div 24$  К  $V_{\text{ФМЭ}}^{\text{нег}} \sim T^{-1.5}$  с тенденцией к насыщению в области  $T < 10$  К.

Ввиду отсутствия теории фотоэлектрических явлений в квантовом пределе в вырожденных полупроводниках количественная интерпретация выполненных экспериментов затруднительна.

Авторы благодарят А. Г. Денисова за стимулирующее внимание к работе.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Гасан-заде С. Г., Сальков Е. А., Шепельский Г. А. Фотомагнитный эффект в квантовом пределе при разогреве электронов. — ФТП, 1978, т. 12, в. 10, с. 2045—2049.
- [2] Гаврилюк Ю. Н., Гасан-заде С. Г., Сальков Е. А., Шепельский Г. А. Фотомагнитные и гальваномагнитные эффекты в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в квантуемом магнитном поле. — ФТП, 1979, т. 13, в. 1, с. 112—119.
- [3] Кичигин Д. А., Раренко И. М., Тальянский Э. Б., Халамейда Д. Д. Фототермомагнитный эффект в  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. — ФТП, 1981, т. 15, в. 2, с. 375—378.
- [4] Парфеньев Р. В., Фарбштейн Н. П., Шалыт С. С. Квантовые осцилляции фотоэлектрических коэффициентов в  $n\text{-InSb}$  в сильном магнитном поле. — ЖЭТФ, 1967, т. 53, в. 11, с. 1571—1581.
- [5] Кикоин И. К., Лазарев С. Д. Фотоэлектромагнитный эффект. — УФН, 1978, т. 124, в. 4, с. 597—617.
- [6] Лягущенко Р. И., Ясевич И. Н. Фотомагнитный эффект в квантуемом магнитном поле при разогреве электронов светом. — ЖЭТФ, 1969, т. 56, в. 4, с. 1432—1440.
- [7] Лягущенко Р. И., Парфеньев И. И., Шалыт С. С., Ясевич И. Н. Фотомагнитный эффект в квантуемых магнитных полях при разогреве электронов светом. — ФТП, 1968, т. 10, в. 7, с. 2241—2243.
- [8] Yassievich I. N., Schleifstein M. — Phys. St. Sol., 1970, v. 42, p. 415—427.
- [9] Злобин А. М., Зырянов П. С. Влияние квантуемого магнитного поля на межэлектронные столкновения в полупроводниках и нелинейные гальваномагнитные явления. — ЖЭТФ, 1970, т. 58, в. 3, с. 952—961.
- [10] Кадушкин В. И. Релаксация энергии и импульса в  $n\text{-InSb}$  в квантовом пределе. — ФТП, 1975, т. 9, в. 9, с. 1706—1709.
- [11] Аронзон Б. А., Ефремова Г. Д., Лазарев С. Д. Релаксация нестационарной фотопроводимости в  $\text{InSb}$  в квантуемом магнитном поле. — ФТП, 1980, т. 14, в. 10, с. 1879—1886.
- [12] Собакин В. Н. К квантовой теории фотомагнитного эффекта в полупроводниках. — ДАН СССР, 1966, т. 167, в. 2, с. 318—321.
- [13] Образцов Ю. И. Квантовые осцилляции термоэда в полупроводниках в поперечном магнитном поле. — ФТП, 1966, т. 8, в. 6, с. 1772—1775.

Получено 1.12.1986

Принято к печати 9.10.1987