

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЙ НА АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА В $p$ -InAs

Андерсен Г. Ю., Гусев О. К., Зайтов Ф. А.,  
Киреев В. П., Яржембицкий В. Б.

Исследована зависимость ЭДС Холла в кристаллах  $p$ -InAs ( $p_0 \sim 1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) с инверсионными каналами на поверхности от температуры, величины тока и расстояния между холловскими и токовыми контактами. Показано, что пропускание электрического тока через токовые контакты сопровождается электрическим пробоем перехода канал—объем кристалла и стабилизацией измеряемой «аномальной» ЭДС Холла в широком диапазоне токов. Показана возможность неразрушающего одновременного контроля параметров поверхностного канала и объема кристалла.

Известно [1], что идентификация параметров полупроводниковых материалов, характеризующихся отклонением температурной зависимости ЭДС Холла от классической, осложняется неоднозначностью интерпретации аномального эффекта Холла. Это связано с адекватностью проявления гальваномагнитных эффектов при смешанной проводимости и проводимости в слоистых структурах.

Применительно к аномальному эффекту Холла в  $p$ -InAs [2] ранее было показано, что аномалии, заключающиеся в двойной смене знака ЭДС Холла с температурой, вызваны наличием на гранях кристалла инверсионного канала  $n$ -типа проводимости [3]. Высокое сопротивление перехода инверсионный канал—объем кристалла приводит к преобладанию в измеряемой при низкой температуре ЭДС поверхностной компоненты отрицательного знака, а повышение температуры измерений вызывает перераспределение вкладов поверхности и объема с инверсией знака ЭДС Холла на классический положительный. Для количественной интерпретации холловских кривых в этом случае необходимо знание параметров одного из двух слоев — поверхностного или объемного. Это достигается путем удаления поверхностного слоя (например, травлением) либо путем использования для анализа низкотемпературной области, в которой ЭДС Холла, как считается [2], определяется поверхностным слоем.

Вместе с тем при анализе параметров  $p$ -InAs и барьерных структур на его основе при воздействии различных технологических и эксплуатационных факторов возникает вопрос одновременного неразрушающего контроля объемных и поверхностных параметров материала и кинетики их измерений в процессе внешних воздействий.

В этой работе приведены данные, позволяющие уточнить механизм формирования аномального эффекта Холла в  $p$ -InAs и конкретизировать режимы измерений, позволяющие решить поставленную задачу.

Исследовались кристаллы  $p$ -InAs ( $p_0 \sim 1.1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) в виде параллелепипедов с размерами  $1.2 \times 0.3 \times 0.05 \text{ см}$ , грани которых механически полировались алмазной пастой и кипятились в изопропиловом спирте. В качестве токовых контактов использовался индий, нанесенный низкотемпературной пайкой, а холловскими контактами служили прижимные бронзовые зонды. Контакты припаивались к торцевым граням кристалла, причем расстояние  $\Delta x$  между положительно смещенным токовым и холловскими контактами варьировалось в пределах длины кристалла.

На рис. 1 представлены температурные зависимости ЭДС Холла  $U_H$  при различных величинах тока через кристалл и  $\Delta x = 0.4$  см. Видно, что в зависимости от тока кривые  $U_H(T)$  для одного кристалла существенно различаются. При малых токах (до 3 мА) ЭДС Холла отрицательна во всем исследованном диапазоне температур (кривые 1—4). При значениях тока  $> 70$  мА ЭДС Холла положительна (кривые 8, 9), а в промежуточной области токов кривые  $U_H(T)$  характеризуются изменением знака ЭДС с отрицательного при низкой на положительный при более высокой температурах (кривые 5—7). Отметим, что аномальная низкотемпературная инверсия знака ЭДС Холла может происходить в широком интервале температур ( $77 \div 180$  К).

На рис. 2 приведена зависимость ЭДС Холла от величины тока  $I$  через образец при температуре 77 К и различных расстояниях  $\Delta x$  (кривые 1—7). Прямая

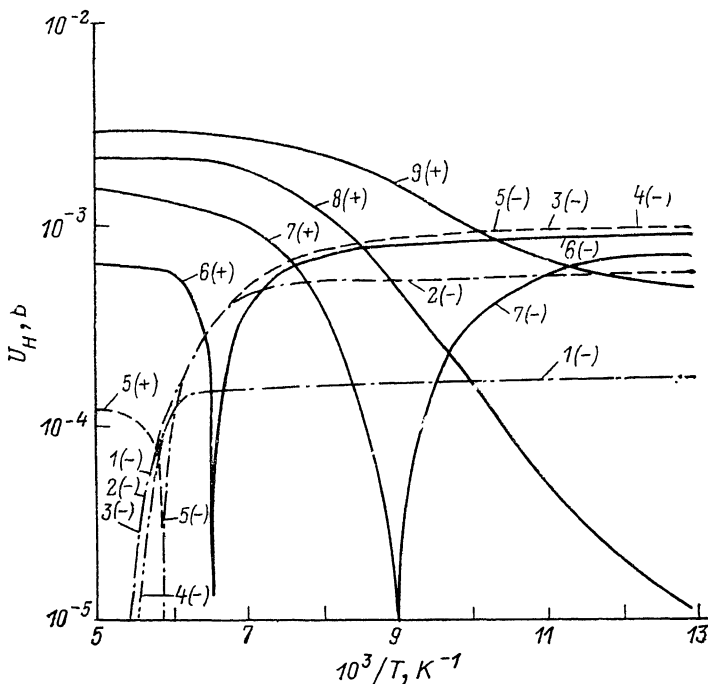


Рис. 1. Температурная зависимость ЭДС Холла при различных значениях тока  $I$  через образец.

$I$ , мкА: 1 — 14, 2 — 50, 3 — 150;  $I$ , мА: 4 — 1.2, 5 — 3, 6 — 20, 7 — 50, 8 — 70, 9 — 100.

8 характеризует зависимость  $U_H(I)$  при комнатной температуре. Для упрощения анализа за счет исключения влияния шунтирования токовыми контактами, уменьшающего величину ЭДС Холла, данные на рис. 2 получены путем умножения экспериментально измеренных величин ЭДС Холла на поправочные множители [1], приводящие результаты измерений к случаю «длинного» образца.

Из рис. 2 видно, что в области малых значений пропускаемого через образец электрического тока наблюдается линейная связь между измеряемой аномальной (имеющей отрицательный знак) ЭДС Холла и величиной тока. При достижении током  $\sim 100$  мкА (обозначим его  $I_0$ ) происходит стабилизация величины  $U_H$ , которая практически не меняется при варьировании электрического тока на 1—3 порядка. Дальнейшее увеличение тока приводит к спаду ЭДС Холла, а при токе, который обозначим  $I_0$ , наблюдается изменение знака с отрицательного на положительный. В дальнейшем происходит асимптотическое приближение кривой  $U_H(I)$ , соответствующей низкотемпературным измерениям, к прямой линии, соответствующей данным, полученным при комнатной температуре.

Изменение  $\Delta x$ , как следует из рис. 2, не влияет на значение  $U_H$  на линейном участке при токе  $I < I_0$  и в области стабилизации. Вместе с тем увеличение  $\Delta x$

приводит к возрастанию тока  $I_0$ , которое можно аппроксимировать эмпирической зависимостью

$$I_0 = 1.36 \cdot 10^{-1} \frac{\Delta x}{1.2 - \Delta x}. \quad (1)$$

Таким образом, кроме отмечавшейся в литературе аномальной температурной инверсии знака  $U_H$  [1, 2], наблюдаются токовая инверсия знака при низкой температуре, а также протяженная область значений тока со стабилизированной ЭДС Холла. Принимая во внимание связь аномального эффекта Холла с инверсионным каналом на поверхности  $p$ -InAs, сделаем заключение, что при величинах тока  $I > I_c$  происходит стабилизация компоненты тока, протекающего через канал, за счет электрического пробоя перехода канал—объем  $p$ -InAs в области положительно смещенного токового контакта.

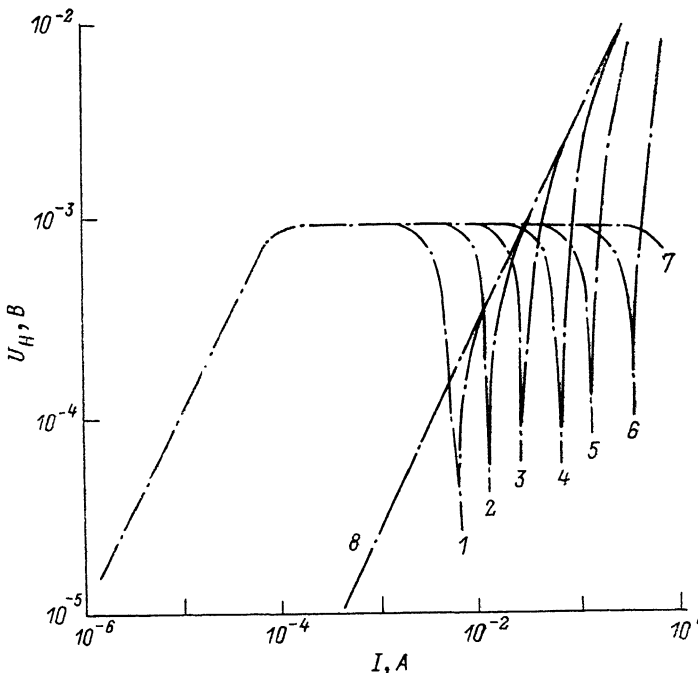


Рис. 2. Зависимость ЭДС Холла от величины электрического тока через образец.

$\Delta x$ , см: 1 —  $5 \cdot 10^{-2}$ , 2 —  $10^{-1}$ , 3 —  $2 \cdot 10^{-1}$ , 4 —  $4 \cdot 10^{-1}$ , 5 —  $6 \cdot 10^{-1}$ , 6 —  $8 \cdot 10^{-1}$ , 7 — 1.0.

Легко показать, что при  $I > I_c$  зависимость падения напряжения между инверсионным каналом и объемом  $p$ -InAs от расстояния до положительно смещенного токового контакта  $x$  имеет вид

$$U(x) = (IR_g - I_c R_g + U_{\text{пор}})(1 - x/l), \quad (2)$$

где  $U_{\text{пор}}$  — пороговое напряжение пробоя перехода,  $R_d$  — динамическое сопротивление перехода в области пробоя,  $l$  — расстояние между токовыми контактами. Отсюда условие электрического пробоя перехода имеет вид

$$x = (I - I_c) \frac{R_g l}{U_{\text{пор}} + IR_g}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что фронт области электрического пробоя с увеличением тока движется вдоль кристалла в направлении к отрицательно смещенному токовому контакту.

При достижении фронтом пробоя холловских контактов сопротивление перехода канал—объем  $p$ -InAs резко падает и основной вклад в экспериментально измеряемую ЭДС Холла дает область с меньшим сопротивлением, т. е. объем

кристалла. В результате ЭДС Холла меняет знак на положительный,  $U_H$  асимптотически приближается к объемному значению.

Учитывая то, что при токовой инверсии знака ЭДС Холла  $I \gg I_c$ , получим из (3)

$$I_0 = \frac{U_{пр}}{R_g} \frac{\Delta x}{l - \Delta x}. \quad (4)$$

Это согласуется с эмпирическим выражением (1) и подтверждает заключение об электрическом пробое поверхностного перехода.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что характер температурной зависимости  $U_H(T)$  в отличие от приведенной в [1, 2] не определяется однозначно соотношением объемных и поверхностных параметров кристалла. Отсутствие температурной инверсии знака  $U_H$  на кривых  $U_H(T)$  при больших токах (рис. 1, кривые 8, 9) обусловлено тем, что сопротивление поверхностного перехода вблизи холловских зондов мало при всех температурах из-за их попадания в область пробоя и знак ЭДС Холла определяется объемной составляющей. Отсутствие температурной инверсии знака ЭДС при малых токах (рис. 1, кривые 1, 4) связано с тем, что объемная компонента ЭДС Холла мала и не регистрируется экспериментально (см. аппроксимацию прямой 8 на рис. 2 в область малых токов). Вид зависимости ЭДС Холла на кривых 5—7 определяется температурной зависимостью не столько параметров поверхности и объема, сколько характеристик пробоя поверхностного перехода канал—объем  $p$ -InAs, что делает зависимость  $U_H(T)$  чрезвычайно сложной для анализа.

В результате можно сделать следующие выводы.

1. Зависимость аномальной ЭДС Холла от величины тока и положения холловских зондов может служить критерием поверхностной природы аномалий.

2. Зондовые измерения аномального эффекта Холла в  $p$ -InAs сопровождаются электрическим пробоем перехода инверсионный канал—объем  $p$ -InAs, приводящим к стабилизации аномальной ЭДС Холла.

3. Неразрушающий контроль концентрации и подвижности носителей заряда в объеме и на поверхности  $p$ -InAs возможен с использованием линейных участков положительного и отрицательного знаков соответственно на токовой зависимости ЭДС Холла при низких температурах.

#### Список литературы

- [1] Кучис Е. В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М., 1990. 264 с.
- [2] Воронков В. В., Соловьев Е. В., Иглицын М. И., Пивоваров М. Н. // ФТП. 1968. Т. 2. В. 7. С. 1800—1808.
- [3] Гусев О. К., Киреев В. П., Ломтев А. А., Яржембицкий В. Б. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 6. С. 1153—1155.

Научно-техническое объединение  
«Политехник»  
Минск

Получена 11.02.1991  
Принята к печати 28.06.1991