

Термоэдс полупроводникового $p-n$ -гетероперехода

© М.М. Гаджиалиев[¶], З.Ш. Пирмагомедов

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Россия

(Получена 20 февраля 2003 г. Принята к печати 4 марта 2003 г.)

Получены и исследованы „длинные“ $p-n$ -гетеропереходы Ge–GaAs. Измерена термоэдс гетероперехода в зависимости от разности температур на торцах от 10 до 180 К, при постоянной средней температуре, равной 300 К. Найдено, что при большом градиенте температуры эксперимент согласуется с теорией, учитывающей появление неосновных носителей за счет тепловой эмиссии.

В работах [1–6] представлены результаты исследования термоэлектрических свойств $p-n$ -переходов и гетеропереходов. Найдено, что термоэдс гетероструктур состоит из вкладов от объемных термоэдс и эдс Бенедикса p - и n -областей, а также барьерной термоэдс на самой гетерогранице α_b . Установлено, что при небольшой разности температур, при которой выполняется неравенство $E_g \Delta T \ll kT_0^2$ (где E_g — ширина запрещенной зоны узкозонного материала, ΔT — разность температур на торцах структуры, T_0 — температура гетероперехода, k — постоянная Больцмана), вычисленная величина эффективной термоэдс гетероперехода $\alpha_{\text{эф}}$ согласуется с измеренной величиной.

В настоящей работе исследована термоэдс гетероперехода в случае, когда выполняется неравенство $E_g \Delta T > kT_0^2$, т. е. при большом градиенте температуры.

Для проведения эксперимента были изготовлены „длинные“ $p-n$ -гетероструктуры Ge–GaAs. Под длинными мы подразумеваем гетероструктуры, в которых размеры базовых областей $(-A)(-d_1)$ и (d_2B) намного больше ширины областей объемных зарядов $(-d_10)$ и $(0d_2)$, т. е. $(-A)(-d_1) \gg (-d_10)$ и $(d_2B) \gg (0d_2)$ (рис. 1).

Гетеропереходы были получены по методике, предложенной в работе [7]. Из n -GaAs и p -Ge были изготовлены пластинки прямоугольной формы с одинаковыми размерами $0.1 \times 1 \times 3 \text{ мм}^3$. После шлифовки и травления пластинки электронного арсенида галлия и дырочного германия накладывались друг на друга таким образом, чтобы получалась общая длина 4 мм. Затем образцы помещались в вакуумную установку, и в атмосфере проточного гелия в области наложения пластинок друг на друга создавался большой градиент температуры, при котором материал с более высокой температурой плавления (арсенид галлия) оказывался со стороны высокой температуры. С ростом градиента температуры, когда плоскость германия, граничащая с арсенидом галлия, начинала расплавляться, сразу выключался нагрев; расплавленный слой снова кристаллизовался, и возникал гетеропереход. Рентгеноструктурный анализ показал, что перекристаллизованная пограничная область между германием и арсенидом галлия является монокристал-

лической и пограничные плоскости арсенида галлия и германия повернуты относительно друг друга не более чем на 3° .

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) полученных описанным способом гетеропереходов Ge–GaAs (рис. 2) аналогична ВАХ, полученной Андерсоном на гетеропереходе, созданном эпитаксией германия на поверхности арсенида галлия [7], что говорит о хорошем качестве гетеропереходов.

Изготовленные таким способом гетеропереходы помещались в установку для измерения термоэдс при большом градиенте температуры [8].

Была измерена зависимость термоэдс гетероперехода Ge–GaAs от величины градиента температуры при одной и той же средней температуре гетероперехода в двух случаях: 1) когда поток тепла направлен от германия к арсениду галлия; 2) когда поток тепла направлен от арсенида галлия к германию.

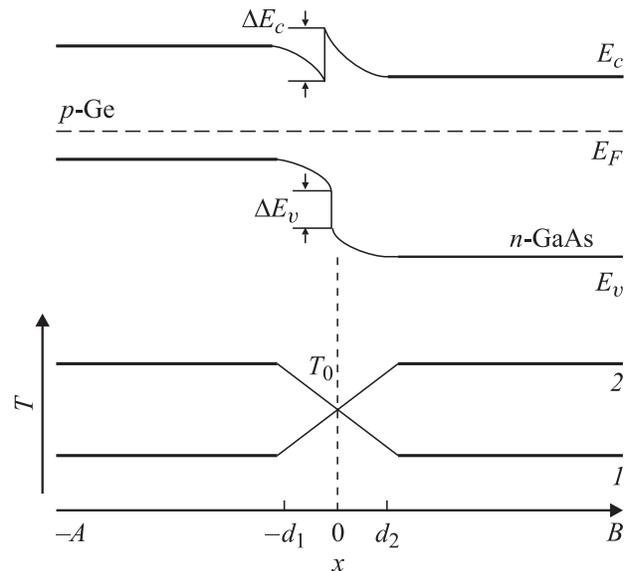


Рис. 1. Энергетическая диаграмма $p-n$ -гетероперехода Ge–GaAs в отсутствие градиента температуры и два варианта распределения температуры вдоль оси x : E_c , E_v — зона проводимости и валентная зона, ΔE_c , ΔE_v — соответствующие разрывы зон на гетерогранице, E_F — уровень Ферми. 1 — направление (+), 2 — направление (–).

[¶] E-mail: Kamilov@datacom.ru

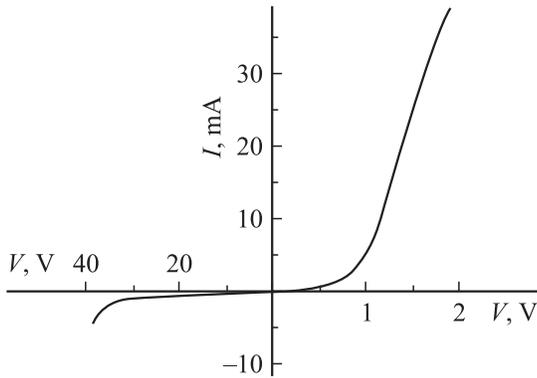


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика $I(V)$ $p-n$ -гетероструктуры Ge-GaAs при 300 К.

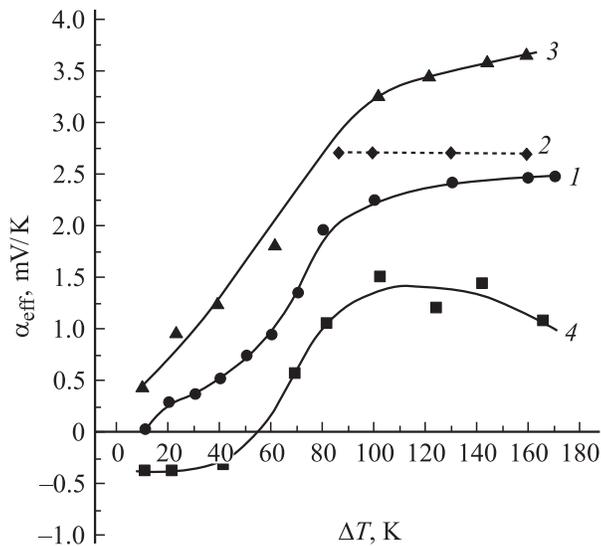


Рис. 3. Зависимости термоэдс $p-n$ -гетероперехода Ge-GaAs от разности температур ΔT на торцах при средней температуре 300 К: 1 — средние значения термоэдс $\alpha_{\text{eff}}^{\text{av}}$; 2 — расчет при большом градиенте температуры согласно (1); 3 — α_{eff} при тепловом потоке (+); 4 — α_{eff} при тепловом потоке (-).

В работе [4] показано, что, в отличие от вентильной фотоэдс, барьерная термоэдс α_b может иметь не только пропускное (прямое) направление (со знаком „+“ на p -области и знаком „-“ на n -области), но также запирающее (обратное) направление — в зависимости от расположения температурных градиентов и физических параметров $p-n$ -структуры. Далее первый случай, когда тепловой поток направлен от германия к арсениду галлия, отмечен знаком (+), а случай обратного направления теплового потока знаком (-).

На рис. 3 представлены зависимости термоэдс от величины разности температур между горячим и холодным торцами гетероперехода при одной и той же средней температуре, равной 300 К. Кривая 3 получена при тепловом потоке (+), а зависимость 4 — при тепловом потоке (-). Кривая 1 — зависимость средних для двух направлений потоков тепла значений термоэдс $\alpha_{\text{eff}}^{\text{av}}$.

На этом же рисунке (кривая 2) представлены значения термоэдс, вычисленные по формуле, выведенной в работе [3] для эффективной термоэдс гетероперехода:

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{K}{e} \frac{T_0}{\Delta T} \ln \left\{ 1 + \left(1 + \frac{d_1}{L_n} \right) \times \left[\left(1 + \frac{3\Delta T}{T_0} \right) e^{E_g \Delta T / kT_0^2} - 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где T_0 — средняя температура гетероперехода, ΔT — разность температур между горячим и холодным торцами гетероперехода, E_g — ширина запрещенной зоны узкозонного материала гетеропары, для германия равная 0.74 эВ; d_1 — ширина области объемного заряда в узкозонном материале, L_n — диффузионная длина неосновных носителей тока.

Формула (1) верна в случае больших ΔT , при которых, благодаря термической эмиссии в объеме гетеропереходов, возникают неосновные носители тока. Как было отмечено выше, большими считаются разности температур, для которых выполняется неравенство $E_g \Delta T > kT_0^2$. В нашем случае последнее неравенство выполняется при $\Delta T > 80$ К. Поэтому на рис. 3 приведены значения α_{eff} , вычисленные по формуле (1) для $\Delta T \geq 80$ К. Как видно из рисунка, в области $\Delta T > 80$ К экспериментальные величины близки к вычисленным значениям α_{eff} . Последнее указывает на то, что только при большом градиенте температуры реализуется случай, когда определяющую роль в термоэдс гетероперехода играет термоэдс неосновных носителей тока, создаваемых градиентом.

При описанной выше процедуре обработки экспериментальных результатов $\alpha_{\text{eff}}^{\text{av}}$ состоит в основном только из барьерной термоэдс α_b , поскольку все остальные составляющие (объемные термоэдс „базовых“ областей, термоэдс Бенедикса p - и n -областей) сокращаются при усреднении вследствие изменения их знака при смене направления теплового потока. Меняется знак и барьерной термоэдс, но, поскольку величины α_b при тепловых потоках (+) и (-) разные вследствие того, что при разных направлениях потоков тепла различаются концентрации неосновных носителей, поступающих из областей p -Ge в область n -GaAs и наоборот, возникают в обоих случаях разные по величине и противоположные по знаку барьерные термоэдс α_g ; в результате получаем средние значения $\alpha_{\text{eff}}^{\text{av}}$, отличные от нуля.

Исходя из изложенного можно утверждать, что при больших ΔT вычисленная по формуле (1) α_{eff} согласуется с экспериментальными значениями $\alpha_{\text{eff}}^{\text{av}}$.

Список литературы

- [1] Б.Л. Шарма, Р.К. Пурохит. *Полупроводниковые гетеропереходы* (М., Сов. радио, 1979).
- [2] Я. Тауц. *Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках* (М., ИЛ, 1962).
- [3] Н.С. Лидоренко, И.И. Балмуш, З.М. Дашевский, А.И. Касиан, Н.В. Коломоец. Докл. АН СССР, **272**, 855 (1983).

- [4] И.И. Балмуш, З.М. Дашевский, А.И. Касян. ФТП, **29**, 1796 (1995).
- [5] И.И. Балмуш, З.М. Дашевский, А.И. Касян. *Термоэлектрические эффекты в многослойных полупроводниковых структурах* (Кишинев, Штиинца, 1992).
- [6] R.H. Rediker, S. Stopek, J.H.R. Ward. Sol. St. Electron., **7**, 621 (1964).
- [7] R.L. Anderson. Sol. St. Electron., **5**, 341 (1962).
- [8] М.М. Гаджиалиев, В.А. Елизаров. ФТП, **32**, 1313 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

The thermopower of semiconductor $p-n$ heterojunction

М.М. Gadjaliev, Z.Sh. Pirmagomedov

Institute of Physics,
Dagestan Scientific Center
of Russian Academy of Sciences,
367003 Makhachkala, Russia

Abstract The „long“ $p-n$ GaAs-Ge heterojunctions have been fabricated and investigated. The thermopower of the heterojunction have been measured as a function of the temperature difference of the heterojunction from 10 to 180 K at a middle constant temperature of 300 K.

It has been found that the experiment agrees with theory, which is taking into account the occurrence of extrinsic carriers because of thermal radiation, at high gradient temperatures.