РАСЧЕТ КОНСТАНТ ПОТЕНЦИАЛА ДЕФОРМАЦИИ *b* И *d* В ДЫРОЧНОМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

И. Ф. СВИРИДОВ

Из анализа зависимости компонент тензора пьезорезистивного эффекта от температуры по направлениям <111>, <110> и <100> в монокристаллах арсенида галлия *p*-типа проводимости, легированных цинком, с концентрацией дырок $p = 10^{17} \div 10^{19}$ см⁻³ в интервале температур $80 \div 600$ К определены константы потенциала деформации *b* и *d*. Установлено, что константы потенциала деформации *b* и *d* слабо зависят от температуры, но чувствительны к степени легирования исходного материала. Полученные результаты подтверждают непараболичность валентной зоны арсенида галлия.

В настоящей работе обсуждаются экспериментальные результаты пьезорезистивного эффекта в образцах арсенида галлия *P*-типа проводимости, легированных цинком, в интервале температур 80÷600 К. Кристаллы *p-GaAs*, из которых вырезались образцы для измерений, были выращены методом Чохральского и ориентированы с помощью световых фигур. Конценграция носителей тока в образцах арсенида галлия *p*-типа проводимости, которая определялась из измерений эффекта Холла и электропроводности при комнатной температуре, изменялась от 4,6·10¹⁷ до 3,9·10¹⁹ см⁻³. Деформирующее усилие совпадало с направлением теплового потока. Величина нагрузки составляла 2·10⁹ дин/см³.

Схема установки и методика проведения эксперимента описаны в работе [1]. На рис. 1—3 приведены температурные зависимости компонент



Рис. 1. Зависимость константы пьезорезистивного эффекта Π_{11} для образцов p-GaAs от 1/T: $1e-p=4,6\cdot10^{17}$; $2e-p=6,7\cdot10^{18}$; $3_{\mathcal{A}}-p=1,2\cdot10^{19}$; $4c-p=3,9\cdot10^{19}$ см⁻³; пунктир — расчетные кривые.

тензора пьезорезистивного эффекта Π_{11} , Π_{12} и Π_{44} . Из рисунков зидно, что пьезорезистивный эффект в арсениде галлия *P*-типа проводимости анизотропен. Величина констант Π_{ij} зависит от температуры, концентрации примеси исходного материала и от степени вырождения дырочного газа. Образцы с концентрацией $p = 10^{19}$ см⁻³ были вырождены во всем температурном интервале. Образцы с концентрацией $p = 10^{17}$ см⁻³ обладали промежуточной степенью вырождения и константы Π_{ij} в этих кристаллах изменялись по закону T^{-1} во всем температурном интервале. Отклонение от закона T^{-1} наблюдалось лишь в области низких температур, причем температура начала нелинейности возрастала с увеличением числа свободных дырок.



Рис. 2. Зависимость константы пьезосопротивления Π_{12} для образцов *p-GaAs* от 1/*T*: кривым 1е, 2*s*, 3*д* и 4*c* соответствуют те же концентрации, что и на рис. 1.

Рис. 3. Зависимость константы пьезосопротивления Π_{44} для образцов ρ -GaAs от 1/T: кривым 1e, 2e, 3g и 4c соответствуют те же концентрации, что и на рис. 1; пунктир—расчетные кривые.

Для сильно легированных образцов *p*-GaAs с концентрацией $p = 10^{19}$ см⁻³ в области высоких температур изменение констант Π_{ij} также приближалось к закону T^{-1} . Однако с уменьшением температуры наблюдалось существенное ослабление линейной зависимости Π_{ij} от температуры, и эта зависимость в области низких температур практически отсутствовала.

Переход от констант битензора пьезосопротивления Π_{ij} к сдвиговым константам эластосопротивления m_{44} и 1/2 (m_{11} — m_{12}) осуществлялся на основе использования известных модулей упругости C_{ij} [2]. Приведенная на рис. 4 зависимость констант эластосопротивления во всем температурном интервале для всех образцов изменяется по закону, близкому к T^- Величина и характер температурного хода m_{44} и 1/2 (m_{11} — m_{12}) существенно зависят от уровня легирования исходного материала. При понижении температуры наблюдается отклонение от линейности, причем у более легированных образцов отклонение наступает раньше по шкале обратных температур.

Из рис. 4 видно, что в арсениде галлия выполняется неравенство

$$m_{44} \gg \frac{1}{2} (m_{11} - m_{12}),$$

которое указывает на то, что горбы изоэнергетических «гофрированных» поверхностей зоны тяжелых дырок вытянуты в направлении <111>. При деформации вдоль этого направления конфигурация зоны меняется существенно, что приводит к большим эффектам, т. е. к значительной величине П₄₄ или m₄₄. Симметричное расположение горбов относительно оси <100> обуславливает незначительное изменение конфигурации изоэнергетических поверхностей, и величина константы пьезорезистивного эффекта Π_{11} в этом направлении минимальна. Однако теоретически полученное в работе [3] соотношение $m_{11} = -2 m_{12} \, для$ арсенида галлия не выполняется. По-видимому это можно объяснить непараболичностью валентной зоны и наличием гетерополярной составляющей связи атомов в арсениде галлия.



Рис. 4.

Рис. 5.

Рис. 4. Зависимость констант эластосопротивления m_{44} и $1/2 (m_{11} - m_{12})$ для образцов *p-GaAs* от 1/T: кривым 1е и 4с соответствуют те же концентрации, что и на рис. 1; пунктир—кривые, рассчитанные по формулам (3) и (4).



Как видно из полученных нами экспериментальных результатов, все величины Π_{ij} (T) и их любая линейная комбинация могут быть представлены в виде

$$\Pi_{ij}(T) = (\Pi_{ij})_0 + (\Pi_{ij})_i, \tag{1}$$

где константы $(\Pi_{ij})_0$ получаются линейно экстраполяцией соответствующих зависимостей Π_{ij} к значению 1/T = 0 и практически слабо зависят от уровня легирования исходного материала. Для всех исследованных образцов постоянная составляющая $(\Pi_{44})_0$ имела эначение $30\cdot10^{-12}$ см²/дин, а для $(\Pi_{11})_0 - 7\cdot10^{-12}$ см²/дин.

Наличие постоянных составляющих пьезорезистивного эффекта является дополнительным экспериментальным подтверждением непараболичности валентной зоны арсенида галлия и обусловлено изменением эффективных масс от деформации [4]. Температурный ход констант Π_{ij} для наших образцов во многом определяется степенью вырождения дырочного газа; так, увеличение степени вырождения с уменьшением температуры приводит к отклонению Π_{ij} (T) от линейной зависимости.

Для расчета констант потенциала деформации b и d в дырочном арсениде галлия использовался температурный ход сдвиговых констант эластосопротивления, который, согласно работе [4], можно записать

$$m_{li}(T) = (m_{li})_0 + (m_{li})_l, \tag{2}$$

где

$$(m_{44})_0 = \frac{Dd}{\overline{B}\Delta} \left[\Gamma_1 \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} + \Gamma_2 \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \right], \qquad (3)$$

$$\left(\frac{m_{11}-m_{12}}{2}\right)_0 = \frac{9}{4} \frac{Bb}{\overline{B}\Delta} \left[\lambda_1 \frac{\sigma_1}{\sigma_1+\sigma_2} + \lambda_2 \frac{\sigma_2}{\sigma_1+\sigma_2} \right], \tag{4}$$

$$\Gamma_{1,2} = \frac{3}{4} \frac{\overline{B}}{A \pm \overline{B}} \left(1 \pm \frac{\sqrt{3}D + 4B}{7\overline{B}} \right), \ \lambda_{1,2} = \frac{\overline{B}}{A \pm \overline{B}} \left(1 \pm \frac{D^2 + 4B^2}{7\overline{B}B} \right), \ (5)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{8 \prod_{l,l} e^2}{3 m_{1,2}^* \hbar^3} (2m_{1,2}^* k_0 T)^{s_{l_2}} \tau_0 \Phi_n (\mu_{P}^*, a), \qquad (6)$$
$$D = \sqrt{3} B, \ B/\overline{B} = -1.$$

Значения интегралов вида $\phi_n(\mu_F^*, a)$ приведены в работе [1].

Таким образом, величины констант потенциала деформации b и d могут быть оценены независимо как по абсолютным значениям $(m_{ij})_i$, так и по значениям $(m_{ij})_o$. Однако точная оценка констант потенциала деформации по экспериментальным данным эластосопротивления во многом затруднена необходимостью расчета времени релаксации легких и тяжелых дырок. Общая структура сдвиговых констант эластосопротивления $(m_{ij})_i$, дана в работе [4].

Анализ литературных данных [5, 6] и экспериментально установленных нами зависимостей U(T) и $\rho(T)$ дает основание считать, что в образцах с $p = 10^{19}$ см⁻³ доминирует рассеяние легких и тяжелых дырок на ионах примеси. Для наших образцов оценка констант b и d была произведена в предположении, что имеет место лишь внутризонное рассеяние носителей заряда со временем релаксации

$$z_{1,2} = (\bar{z}_0)_{1,2} E^{3/2}. \tag{7}$$

Величина (τ_0)_{1,2} рассчитывалась на основе результатов работы [7], а значения m_1^* и m_2^* равны соответственно 0,12 m_0 и 0,68 m_0 [8, 9]. Числовые значения величин A, B, D и \overline{B} были выбраны на основе теоретических результатов работы [10], учитывающей непараболичность валентной зоны арсенида галлия по Кейну. Уровень Ферми определялся из выражения для концентрации дырок с $m_p^* = 0,7 m_0$.

На рис. 5 изображены константы потенциала деформации b и d, найденные из выражений (3) и (4). На основе найденных констант потенциала деформации для образцов с $p = 4,6 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $p = 3,9 \cdot 10^{19}$ см⁻³ был выполнен расчет температурного хода констант эластосопротивления $m_{44}(T)$ и 1/2 (m_{11} — m_{12}), а также для констант пьезосопротивления Π_{11} и Π_{44} .

Расчетные кривые на рис. 1, 3 и 4 показаны пунктиром. Расчет был выполнен на ЭВМ М220-М с точностью до 10^{-7} . Совпадение расчетных и экспериментальных кривых можно считать удовлетворительным. Рассчитанные нами величины b и d во всех случаях несколько меньше, чем результаты других экспериментальных работ [11—13].

Одесский электротехнический институт связи им. А. С. Попова

Поступила 25.ХІ. 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Ф. Свирилов, В. А. Преснов. Изв. ВУЗ, сер. Физика, 2, 105 (1975).

- 2. T. B. Bateman, H. J. McSki. J. Appl. Phys., 30, 544 (1959).
- 3. Г. Е. Пикус, Г. Л. Бир. ФТТ, 1, 1828 (1959).
- 4. G. L. Bir, A. J. Bloom, U. V. Ilisavsky. Proc. Int. Conf. Phys's Somicond., Paris, 1964, p. 529.
- 5. D. N. Nasledov. J. Appl. Phys., 32, 2140 (1961).
- 6. Э. Э. Клотыныш, Д. Н. Наследов. Сб. Физические свойства полупроводников А^{III} В^V и А^{II} В^{VI}, Баку, 1967.
- 7. H. Brooka. Phys. Rev., 83a, 879 (1951).
- 8. H. Ehrenreich. Phys. Rev., 120, 1951 (1960).
- 9. H. Ehrenreich. Appl. Phys., 32, 2155 (1961).
- 10. А. Г. Закиров, К. Л. Штильман. Сб. Физические свойства полупроводников А^{III} В^V и А^{II} В^{VI}, Баку, 1967.
- I. F. Sviridov, V. A. Presnov, K. Sonnenburg. Phys. Stat. Sol. (b), 68, K 111 (1975).
- 12. G. Dresselhaus, A. F. Kip. Phys. Rev., 98, 368 (1955).
- 13. I. Balslev. Sol. St. Commun., 5, No 4 (1967).

ትቴ\$በቦሆԱ8ኮԱ3ኮ ባበՏԵՆ8ኮԱԼኮ *b* ԵՎ *d* ՀԱՍՏԱՏՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՇՎՈՒՄԸ ԱՆ8ՔԱՅԻՆ ՀԱԼԻՈՒՄԻ ԱՐՍԵՆԻԳՈՒՄ

Ի. Տ. ՍՎԻՐԻԴՈՎ

Աշխատանջում ըննարկվում են հաղորդականության p-տիպի հալիումի արսենիդում պլեգոռեդիստիվ էֆեկտի փորձարարական ուսումնատիրման արդյունըները 80 ÷ 600 K շերուսստիճանային տիրույթում։

CALCULATION OF *b* AND *d* CONSTANTS OF THE DEFORMATION POTENTIAL IN HOLE GALLIUM ARSENIDE

I. F. SVIRIDOV

Based on the theory of deformation potential, the b and d constants of the deformation potential were determined from experimental data on the piezoresistive effect in p-type gallium arsenide in the (80÷600) K temperature range. Both the theory and the experiment show, that in p-type gallium arsenide the constants b and d are weakly temperature dependent, but are rather sensitive to the degree of semiconductor doping.

315