

соотношения с аналогичными формулами для кремниевых структур [15, 16] следует, что при одинаковых  $j$  и  $W_n$  вклад ЭДР в ВАХ арсенид-галлиевых структур примерно в 40—50 раз меньше, чем в кремнии. Кроме того, толщина слабо легированного базового слоя у арсенид-галлиевых структур обычно не превышает 300 мкм. Это делает вклад ЭДР в ВАХ структур незначительным. Например, для  $p^+ - n - n^+$ -структур, рассмотренных в [8] и имеющих  $W_n = 170$  мкм, величина  $U_{теш}$  при  $j = 1000$  А/см<sup>2</sup> составляет всего 0.02 В. Сравнивая эту величину с экспериментальным значением прямого падения напряжения, составляющим, согласно [8], несколько вольт, легко видеть, что влияние ЭДР на ВАХ арсенид-галлиевых структур оказывается пренебрежимо малым.

Учитывая то, что при корректном учете ЭДР практически не оказывает влияния на динамические процессы в мощных кремниевых структурах [17], с учетом полученных оценок для  $\mu_{np}$  и  $\mu_{pn}$  можно утверждать, что и в GaAs ЭДР можно не учитывать при исследовании динамических свойств мощных структур.

Таким образом, влияние ЭДР на свойства многослойных арсенид-галлиевых структур оказывается гораздо слабее, чем в кремнии. Возможность наблюдать в GaAs эффект полного увлечения неосновных НЗ при низких температурах обусловлена спецификой квантовых ячеек, в которых удается исключить влияние рассеяния на заряженных примесях.

Авторы благодарны М. Е. Левиштейну за полезное обсуждение вопросов, затронутых в работе.]

#### Список литературы

- [1] Davies L. W. // Nature. 1962. V. 194. N 4830. P. 762—763.
- [2] Dannhäuser F. // Sol. St. Electron. 1972. V. 15. N 12. P. 1371—1375.
- [3] Kransse J. R. // Sol. St. Electron. 1972. V. 15. N 12. P. 1376—1381.
- [4] Grivitskas V., Willander M., Vaitkus J. // Sol. St. Electron. 1984. V. 27. N 6. P. 565—572.
- [5] Höpfel R. A., Shah J., Wolff P. A., Gossard A. C. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. N 25. P. 2736—2739.
- [6] Höpfel R. A., Shah J., Wolff P. A., Gossard A. C. // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 49. N 10. P. 572—574.
- [7] Юферев В. С. // Автореф. докт. дис. ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Л., 1984.
- [8] Delimova L. A., Zhilyaev Yu. V., Kachorovsky V. Yu., Levinstein M. E., Rossin V. V. // Sol. St. Electron. 1988. V. 31. N 6. P. 1101—1104.
- [9] Mnatsakanov T. T. // Phys. St. Sol. (b). 1987. V. 143. N 1. P. 225—234.
- [10] Грессеров Б. Н., Мнацаканов Т. Т. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 9. С. 1658—1663.
- [11] Хилсум К., Роуз-Инс А. Полупроводники типа А<sup>III</sup>В<sup>V</sup>. М., 1963. 323 с.
- [12] Mears A. L., Stradling R. A. // J. Phys. C. 1971. V. 4. N 1. P. L22—L24.
- [13] Störmer H. L., Gossard A. C., Wiegman W., Blondel R., Baldwin K. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44. N 1. P. 139—141.
- [14] Авакьянц Г. М., Лазарев Е. В. // Изв. АН АрмССР. Физика. 1969. Т. 4. В. 1. С. 83—89.
- [15] Грехов И. В., Отблеск А. Е. // Радиотехн. и электрон. 1974. Т. 19. В. 7. С. 1483—1489.
- [16] Кузьмин В. А., Мнацаканов Т. Т., Шуман В. Б. // Письма ЖТФ. 1980. Т. 6. В. 11. С. 689—693.
- [17] Мнацаканов Т. Т., Ростовцев И. Л., Филатов Н. И. // Изв. вузов СССР. Радиоэлектрон. 1987. Т. 30. В. 6. С. 30—36.

Всесоюзный электротехнический институт  
им. В. И. Ленина  
Москва

Получено 24.04.1990  
Принято к печати 25.04.1990

ФТП, том 24, вып. 9, 1990

### О КОЭФФИЦИЕНТЕ ТЕРМОЭДС В ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ GaP

Джамагидзе Ш. З., Лагвилава Т. А., Швангирадзе Р. Р.

Коэффициент термоэдс является чувствительным к механизмам рассеяния носителей заряда в полупроводниках [1]. Поэтому, изучая его температурную зависимость, можно судить о процессах рассеяния.

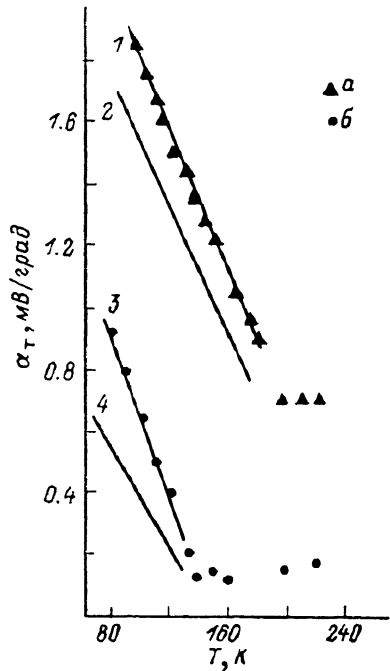
Попытка объяснить расхождения между экспериментальной и теоретической зависимостями подвижности носителей заряда от температуры в [2] привело авторов к заключению о пространственной корреляции в распределении доноров и акцепторов в фосфиде галлия, что должно было выражаться в существовании заряженных донорно-акцепторных пар (ДАП) с плечом диполя  $l_{\text{дип}} \ll \ll \bar{R}$  ( $\bar{R}$  — среднее межпримесное расстояние при хаотическом распределении доноров и акцепторов). Анализируя экспериментальные результаты, авторы [2] пришли к заключению, что все акцепторы в GaP электронной проводимости находятся в ДАП. Изучение поведения коэффициента термоэдс дало бы возможность проверить предположение о существовании корреляции в пространственном распределении доноров и акцепторов в GaP, так как ДАП должны привести к появлению соответствующей составляющей в дрейфовой подвижности свободных носителей заряда. Это должно отражаться на температурной зависимости коэффициента термоэдс. На эпитаксиальных слоях (ЭС) фосфида галлия измерения коэффициента термоэдс, насколько нам известно из литературы, не проводились. Поэтому эти исследования целесообразны еще и с этой точки зрения.

Изучались нелегированный и легированный редкоземельным элементом (РЗЭ) Yb ЭС GaP, электрические и оптические характеристики которых исследовались в [3].

Параметры ЭС  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $A$ ,  $l_{\text{дип}}$  — концентрации двух одновременно существующих донорных центров, проявляющихся на холловских измерениях, концентрация акцепторов и длина плеча заряженного диполя соответственно, определенные в [3] и используемые в расчетах данной работы, представлены в таблице.

Зависимость коэффициента термоэдс от температуры.

Образцы: а — 260, б — 194. Точки — эксперимент, сплошные линии — теория с учетом (1, 3) и без учета (2, 4) дипольного рассеяния.



Измерения температурной зависимости коэффициента термоэдс  $\alpha_T$  проводились по методике, описанной в [4], в интервале температур 80—200 К. Задаваемая разность температур была равна 5—7 °С и измерялась двумя медь-константановыми термопарами в точках, между которыми измерялась термоэдс. Точность измерений коэффициента термоэдс достигала 5 %.

На рисунке представлена экспериментальная зависимость коэффициента термоэдс от температуры для двух образцов. Видно, что с понижением температуры происходит увеличение  $\alpha_T$ , что связано с вымораживанием носителей заряда. Обработка результатов измерения происходила при помощи формулы [5]

$$\alpha_T = \frac{1}{eT} \left( \frac{\langle \varepsilon \tau \rangle}{\langle \tau \rangle} - \xi \right). \quad (1)$$

Здесь  $e$  — элементарный заряд,  $T$  — температура,  $\varepsilon$  — энергия,  $\xi$  — уровень Ферми,  $\tau$  — время релаксации. Время релаксации электронов записывали для двух случаев:

$$\begin{aligned} 1. \quad \tau_1^{-1} &= \tau_T^{-1} + \tau_N^{-1} + \tau_L^{-1}, \\ 2. \quad \tau_2^{-1} &= \tau_{\text{дип}}^{-1} + \tau_N^{-1} + \tau_L^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\tau_T$ ,  $\tau_N$ ,  $\tau_L$  и  $\tau_{\text{дип}}$  — времена релаксации в GaP, когда имеется рассеяние на кулоновских [6] и нейтральных [7] центрах, фононах решетки [8] и диполях [9] соответственно;  $\tau_T$ ,  $\tau_N$  и  $\tau_{\text{дип}}$  рассчитывались при помощи данных таблицы,  $\tau_1$  —

№ образца	Лигатура	$D_1, \text{см}^{-3}$	$D_2, \text{см}^{-3}$	$A, \text{см}^{-3}$	$l_{\text{дип}}^1, \text{Å}$
194	—	$6.9 \cdot 10^{17}$	$5.8 \cdot 10^{16}$	$6.7 \cdot 10^{17}$	22
260	Yb	$4.9 \cdot 10^{17}$	$4.0 \cdot 10^{16}$	$4.1 \cdot 10^{17}$	20

время релаксации при хаотическом распределении доноров и акцепторов, когда один из механизмов рассеяния должен быть кулоновским на заряженных донорах и акцепторах;  $\tau_2$  — время релаксации при коррелированном распределении доноров и акцепторов, когда один из механизмов рассеяния должен быть дипольным, так как считалось, что все акцепторы и доноры в количестве  $kD_1$  ( $k=A/D_1$ ) находятся в диполях [2, 3].

Подставляя  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в формулу (1), можно рассчитать теоретическую зависимость коэффициента термоэдс  $\alpha_T$  от температуры в случаях 1 и 2. Соответствующие кривые даны на рисунке. Подгоночным параметром в случае определения времени релаксации способом 2 служила длина плеча диполя  $l_{\text{дип}}^2$ , найденная в данной работе. Как видно из рисунка, в случае определения времени релаксации по способу 1 совпадение теоретической и экспериментальной кривых неудовлетворительно. При этом их расхождение примерно на порядок превосходит погрешность самой теоретической кривой, которая может складываться из погрешностей экспериментального определения констант, входящих в формулы (1) и (2) (константы деформационного потенциала для акустических и междолинных фононов, скорости звука в GaP, плотности вещества и т. д.). В случае же способа 2 совпадение хорошее, когда  $l_{\text{дип}}^2 \approx l_{\text{дип}}^1$ . При подгонке теории к эксперименту длины плеч диполей получаются 28 и 16 Å для образцов 194 и 260 соответственно. Это может служить подтверждением сделанных в [2, 3] выводов о том, что в ЭС GaP в интервале температур 77—150 К имеет место дипольное рассеяние как для нелегированных, так и для легированных PЗЭ образцов.

Резкое изменение температурной зависимости коэффициента термоэдс  $\alpha_T$  в области 120—160 и 150—200 К, по-видимому, связано с началом тепловой ионизации второго уровня  $D_2$ , которая при низких температурах должна быть в нейтральном состоянии, так как ее глубина залегания  $E_2 > E_1$  ( $E_2 = 0.104$  эВ; см. [8]). Этот процесс должен отразиться на уровне Ферми, который мог привести к изменению температурного хода  $\alpha_T$  (см. рисунок.)

#### Список литературы

- [1] Аскеров Б. М. Электронные явления переноса в полупроводниках. М., 1985. 317 с.
- [2] Дмитриева Л. А., Лагвилава Т. А., Твилова Э. А., Рытова Н. С., Соловьева Е. В. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 11. С. 2061—2065.
- [3] Бирюлин Ю. Ф., Лагвилава Т. А., Мильвидский М. Г., Писаревская В. А., Соловьева Е. В., Чалдышев В. В., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 6. С. 1070—1075.
- [4] Боровикова Р. П., Охотин А. С., Пушкарский А. С., Симонов В. А. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей. М., 1974. 167 с.
- [5] Грязнов О. С. Вычисление кинетических коэффициентов для полупроводников. Л., 1977. 169 с.
- [6] Stringfellow G. B., Hall H. et al. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 7. P. 3006—3014.
- [7] Erginsoy C. // Phys. Rev. 1950. V. 79. N 4. P. 1013—1018.
- [8] Rode D. L. // Phys. St. Sol. (b). 1972. V. 53. N 1. P. 245—253.
- [9] Stratton R. // J. Phys. Chem. Sol. 1962. V. 23. N 7. P. 1011—1017.

Сухумский физико-технический институт  
им. И. Н. Веква

Получено 9.04.1990  
Принято к печати 27.04.1990