

PACS: 72.20.-i

А.Ю. Моллаев, С.Ф. Габибов, Р.К. Арсланов

## ЭВОЛЮЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Институт физики Дагестанского научного центра РАН  
ул. М. Ярагского, 94, г. Махачкала, 367003, Россия  
E-mail: fvd@xtreem.ru

*При высоком гидростатическом давлении до 9 GPa по результатам измерения удельного электросопротивления  $\rho$  и коэффициента Холла  $R_H$  исследована эволюция энергетического спектра  $n$ - и  $p$ -GaAs в области междолинных переходов. Результаты интерпретированы на основе простой двухдолинной модели зоны проводимости.*

Арсенид галлия – один из интереснейших полупроводниковых материалов как с научной, так и с практической точек зрения. Вот уже много лет он интенсивно исследуется во многих ведущих лабораториях мира [1–3]. Однако  $n$ -GaAs изучен при давлениях лишь до 5 GPa [4], а данные по исследованию  $p$ -GaAs при гидростатическом давлении нам не известны. Исходя из вышеизложенного, мы считали целесообразным провести исследования арсенида галлия, легированного различными примесями, при гидростатических давлениях до 9 GPa.

Для генерирования давления применяли аппарат высокого давления типа «плоские наковальни с лункой и тороидальной поддержкой». Методика создания и измерения всестороннего давления описана в работах [5,6]. Тефлоновую ампулу с образцом, заполненную жидкостью, вставляли в отверстие катленитовой прокладки и сжимали двумя твердосплавными пуансонами. В качестве среды, передающей давление, использовали известную смесь 4:1 метанола и этанола [7] с удовлетворительной степенью гидростатичности до 10 GPa.

Для двух идентичных монокристаллических образцов  $n$ -Ge, расположенных в измерительной ячейке взаимно перпендикулярно, с  $\rho = 1.75 \Omega\cdot\text{cm}$  при 300 К проведены измерения  $\rho$  в зависимости от давления до 9 GPa. Совпадение измеренных значений удельного сопротивления при фиксированном давлении в обоих образцах при подъеме и спуске давления свидетельствует об отсутствии осевых напряжений, наблюдавшихся ранее в диапазоне 4–5 GPa

при использовании в качестве среды, передающей давление, *n*-пентан-изоамилового спирта [4]. Кроме того, полученные данные о зависимости  $R(P)$  в Ge(Au) с уровнем  $E_{\text{Au}}^{2-}$  подтверждают вывод об удовлетворительной степени гидростатичности давления.

При гидростатическом давлении до 9 GPa одновременно измерены удельное электросопротивление и коэффициент Холла на монокристаллических образцах арсенида галлия электронного и дырочного типов: *n*-GaAs(Te) (рис. 1,а) и *p*-GaAs(Zn) (рис. 1,б). Измерения проводили в аппаратах высокого давления типа «Тороид» в области комнатных температур и магнитных полях до  $H \leq 5$  кОе по методике, описанной в работе [6]. Образцы имели омические контакты, которые получали путем сплавления чистого индия высокочастотным нагревом в вакууме.

Удельное сопротивление в образце *n*-GaAs(Te) до давлений  $P \leq 2$  GPa растет слабо, при  $P > 2$  GPa резко возрастает и при  $P = 4$  GPa достигает максимума, увеличиваясь в 50 раз. Далее убывает и при  $P > 8$  GPa выходит на насыщение. Коэффициент Холла до давлений  $P \leq 2$  GPa также меняется слабо, далее резко возрастает, достигает максимума ( $R_{\text{H,max}}/R_{\text{H}_0} = 6$ ) при  $P = 2.2$  GPa, затем убывает и при  $P > 8$  GPa выходит на насыщение.

Известно, что с приложением давления меняется как форма, так и взаимное расположение энергетических зон. В арсениде галлия наибольшему смещению подвергается  $\Gamma$ -долина с коэффициентом давления  $\partial \varepsilon_{\Gamma} / \partial P = 126$  meV/GPa, *L*-долина движется с коэффициентом  $\partial \varepsilon_L / \partial P = 55$  meV/GPa, а *X*-долина смещается слабо в противоположном направлении с  $\partial \varepsilon_X / \partial P = -15$  meV/GPa (рис. 2). Вследствие изменения междолинного зазора  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{\Gamma} - \varepsilon_X$  от величины  $\Delta \varepsilon_0 = 0.36$  eV при атмосферном давлении происходит перераспределение носителей между центральной и боковой долинами. Суммарная концентрация электронов  $n = n_1 + n_2$ , а их отношение  $n_1/n_2 = (N_1/N_2)\exp(\Delta/k_B T)$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $N_1$  и  $N_2$  – эффективные плотности состояний *L*- и *X*-долин,  $n_1$  и  $n_2$  – концентрации легких и тяжелых электронов соответственно.

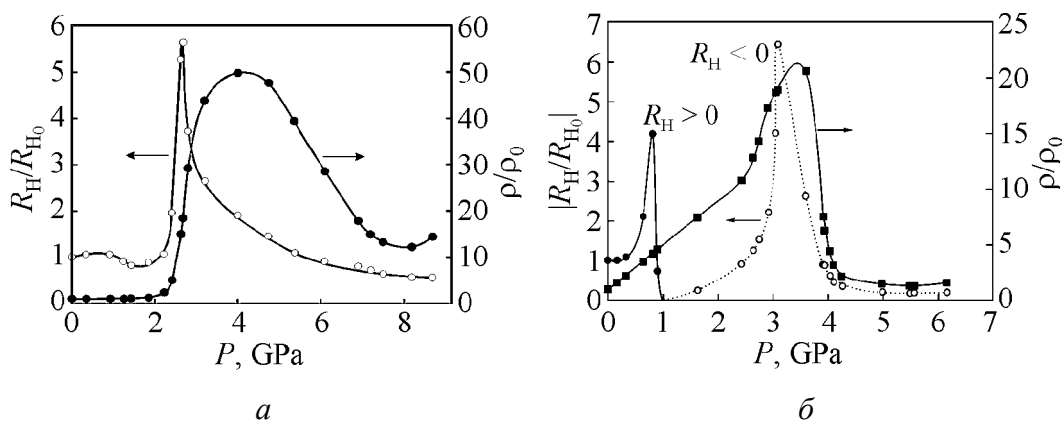
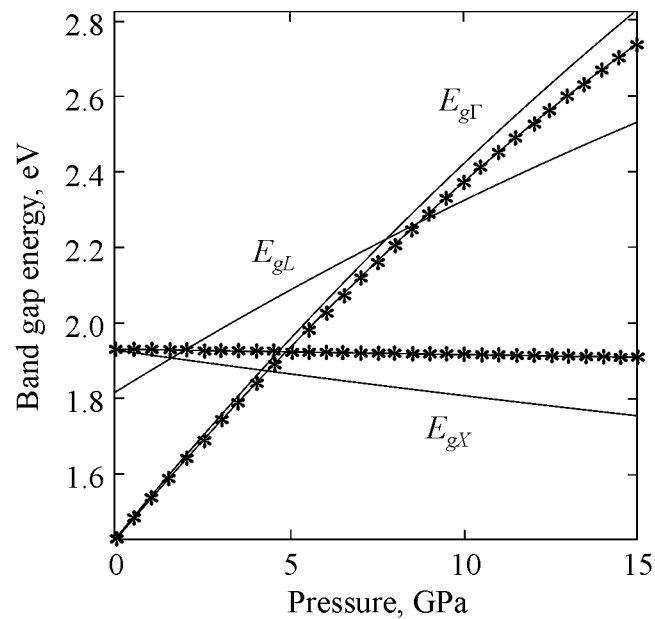


Рис. 1. Зависимость от давления приведенного к атмосферному давлению коэффициента Холла и удельного электросопротивления для *n*-GaAs(Te) (а) и *p*-GaAs(Zn) (б)



**Рис. 2.** Прогнозируемый эффект влияния давления на прямую и непрямую ширину запрещенной зоны в GaAs при 300 К в сравнении с экспериментом [1] при 300 К: — теория, —\*— эксперимент

Вероятно, слабое возрастание удельного сопротивления до  $P \leq 2$  GPa обусловлено уменьшением подвижности легких электронов в  $\Gamma$ -зоне. Максимум изменения удельного сопротивления происходит в области  $\Delta\varepsilon \approx k_B T$ . Дальнейшее изменение измеренных кинетических коэффициентов обусловлено перетеканием электронов из  $\Gamma$ -долины в боковую долину.

В  $p$ -GaAs(Zn) удельное сопротивление до  $P \approx 3.6$  GPa возрастает с двумя разными наклонами, достигает максимума при  $P \approx 3.6$  GPa, затем резко падает и при  $P \geq 4$  GPa выходит на насыщение. Знак коэффициента Холла при  $P \approx 1$  GPa инвертирует. При  $P \approx 3.1$  GPa он достигает максимума и выходит на насыщение при  $P > 4$  GPa. Из-за отсутствия сведений о примесном энергетическом спектре электронов  $p$ -GaAs(Zn) при атмосферном давлении проведен лишь качественный анализ экспериментальных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 02–02–17888).

1. H. Unlu, Phys. Status Solidi **B223**, 195 (2000).
2. E.E. Haller, L. Hsu, J.A Wolk, Phys. Status Solidi **B198**, 153 (1996).
3. J.Z. Jiang, J. Staun Olsen, L. Gerward, S. Steenstrup, High Pressure Research **22**, 395 (2002).
4. А. Джайяраман, Б. Косицкий, Тр. IX Межд. конф. полупр., Москва, **1**, 51 (1968).
5. L.G. Khvostantsev, V.A. Sidorov, Phys. Status Solidi **A64**, 379 (1981).

6. А.Ю. Моллаев, Л.А. Сайпулаева, Р.К. Арсланов, С.Ф. Маренкин, Неорганические материалы **37**, 405 (2001).
7. G.J. Piermarini, S. Block, J.D. Barnett, J. Appl. Phys. **44**, 5377 (1973).

*A.Yu. Mollayev, S.F. Gabibov, R.K. Arslanov*

## AN EVOLUTION OF THE ENERGY SPECTRUM OF GaAs UNDER PRESSURE

According to measurements of the specific resistance  $\rho$  and Hall coefficient  $R_H$  there has been studied an evolution of the energy spectrum of  $n$ - and  $p$ -GaAs in a region of inter-valley transitions at high hydrostatic pressure up to 9 GPa. The results have been interpreted on the basis of a simple two-valley model of the conduction band.

**Fig. 1.** Pressure dependence of Hall coefficient and specific resistance normalized to atmospheric pressure for  $n$ -GaAs<Te> (a) and  $p$ -GaAs<Zn> (б)

**Fig. 2.** Predicted pressure effects on the direct and indirect band gaps of GaAs at 300 K, compared with experiment [1] at 300 K: — — theory, -\*— — experiment