

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ БОЛЬШОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$

П. П. ВИЛЬМС, А. В. НОМОКОНОВ

Новосибирский электротехнический институт

(Поступила в редакцию 20 мая 1982 г.)

Получены и на ЭВМ рассчитаны выражения для относительного изменения удельных сопротивлений твердых растворов $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ под действием анизотропного нагружения. Зона проводимости принята в виде Γ - и X -минимумов с невырожденным электронным газом в условиях полной ионизации примесей. Показано, что анизотропно деформированный кристалл может обладать гораздо большей чувствительностью к давлению по сравнению со случаем изотропной деформации. Предложено использовать анизотропное нагружение твердых растворов в датчиках давления с целью увеличения их чувствительности и расширения диапазона измеряемых давлений.

Повышенный интерес к твердым растворам обусловлен возможностью в широких пределах изменять электрические параметры материала путем изменения его состава. Это свойство открывает широкие возможности их практического применения, в частности, для измерения давления. Чувствительность к давлению и диапазон измеряемых давлений с помощью датчиков на основе, например, электронного $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ существенно зависят от концентрации x фосфора. Например, при $x=0$ этот диапазон составляет $(200 \div 60000)$ бар [1], а при $x=0,4$ — $(10 \div 3500)$ бар [2]. Значение параметра x определяет энергетический зазор $\Delta E_{\Gamma, X}$ между Γ - и X -минимумами, от которого, в свою очередь, зависит чувствительность к давлению и диапазон измеряемых давлений.

Известно, что величина $\Delta E_{\Gamma, X}$ может быть изменена в довольно широких пределах также с помощью одноосной деформации. Поэтому представляет интерес исследовать электропроводность твердых растворов под действием одноосной деформации и гидростатического сжатия. В таких условиях предварительная одноосная деформация будет выполнять ту же роль, что и соотношения компонент твердого раствора, и, кроме того, будет приводить к снятию вырождения X -долин [3].

Рассмотрим кристалл $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ в условиях, когда примеси полностью ионизированы, электронный газ не вырожден и предварительное одноосное нагружение T_z приложено вдоль кристаллографического направления $\langle 100 \rangle$. В рамках двухзонной Γ — X -модели легко получить следующие выражения для относительного изменения удельных сопротивлений ρ_l/ρ_0 и ρ_t/ρ_0 , соответствующих случаям, когда ток течет вдоль оси деформации и перпендикулярно оси:

$$\frac{\rho_l}{\rho_0} =$$

$$= \frac{2+4 \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z + \frac{(a_X+a_\Gamma)}{kT} P \right]}{2+4 \frac{\mu_l}{\mu_t} \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \frac{\mu_\Gamma}{\mu_t} \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z + \frac{(a_X+a_\Gamma)}{kT} P \right]} \times$$

$$\times \frac{2+4 \frac{\mu_l}{\mu_t} \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \frac{\mu_\Gamma}{\mu_t} \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z \right]}{2+4 \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z \right]},$$

$$\frac{\rho_l}{\rho_0} =$$

$$= \frac{2+4 \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z + \frac{(a_X+a_\Gamma)}{kT} P \right]}{2+2 \left(\frac{\mu_l}{\mu_t} + 1 \right) \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \frac{\mu_\Gamma}{\mu_t} \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z + \frac{(a_X+a_\Gamma)}{kT} P \right]}$$

$$\cdot \frac{2+2 \left(\frac{\mu_l}{\mu_t} + 1 \right) \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \frac{\mu_\Gamma}{\mu_t} \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z \right]}{2+4 \exp \left[\frac{(a_{1X}+a_{2X})}{kT} T_z \right] + b \exp \left[\delta + \frac{(a_{1X}+a_{1\Gamma})}{kT} T_z \right]},$$

где μ_Γ — подвижность электронов в Γ -минимуме, μ_t , μ_l — продольная и поперечная компоненты тензора подвижности эллипсоидов в X -минимуме, $b = \left(\frac{m_{d\Gamma}}{m_{dX}} \right)^{3/2}$ — отношение эффективных масс плотности состоя-

ний в Γ - и X -минимумах, $\delta = \frac{0,36 - 0,8x + 6 \cdot 10^{-5} (T - 300)}{kT}$ — приведенный энергетический зазор между Γ - и X -минимумами,

$$a_{1X} = \frac{56,9 + 21,9x + 2,1x^2}{32,61 + 22,1x + 4,86x^2 + 0,35x^3} \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{КГ}},$$

$$a_{2X} = \frac{27,37 + 10,44x + x^2}{32,61 + 22,1x + 4,86x^2 + 0,35x^3} \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{КГ}}$$

$$a_{1\Gamma} = \frac{26,7}{2,24 + 0,43x} \cdot 10^{-6} \frac{\text{эВ} \cdot \text{см}^2}{\text{КГ}}$$

— соответственно скорости движения двух $\langle 100 \rangle$ эллипсоидов, четырех $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$ эллипсоидов X -минимума и Γ -минимума при одноосной деформации в направлении $\langle 100 \rangle$,

$$a_X = \frac{1,5}{2,24 + 0,43x} \cdot 10^{-6} \frac{\text{эВ}}{\text{бар}}$$

$$a_\Gamma = \frac{26,7}{2,24 + 0,43x} \cdot 10^{-6} \frac{\text{эВ}}{\text{бар}}$$

— скорости движения X- и Г-минимумов при гидростатическом сжатии. Энергетический зазор δ принимался таким же, как в работе [4]. Упругие постоянные брались из [5] в линейном приближении при изменении концентрации фосфора. При $T_z = 0$ видно, что $\rho_1/\rho_0 = \rho_i/\rho_0$ и соответствует частному случаю — изменению удельного сопротивления от гидростатического давления.

На рис. 1—4 приведены рассчитанные на ЭВМ зависимости относительного изменения удельных сопротивлений одноосно деформированных и недеформированных кристаллов от давления для двух разных температур: 78 и 300 К.

Видно, что одноосно деформированный кристалл обладает большей чувствительностью к давлению, причем при сжатии порог чувстви-

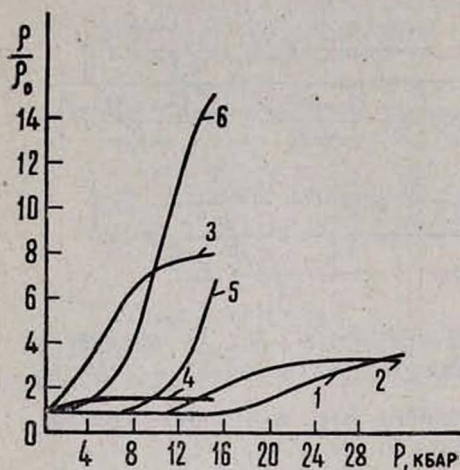


Рис. 1. Зависимость относительных изменений удельных сопротивлений $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ от давления при температуре $T = 300\text{ K}$ для различных значений концентрации x фосфора и одноосных напряжений сжатия $T_z < 0$: 1 — $x = 0$, $T_z = 0$; 2 — $x = 0,1$, $T_z = 0$; 3 — $x = 0$, $T_z = -10^4 \text{ кг/см}^2$; 4 — $x = 0,1$, $T_z = -10^4 \text{ кг/см}^2$; 5 — $x = 0$, $T_z = -5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 6 — $x = 0,1$, $T_z = -5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

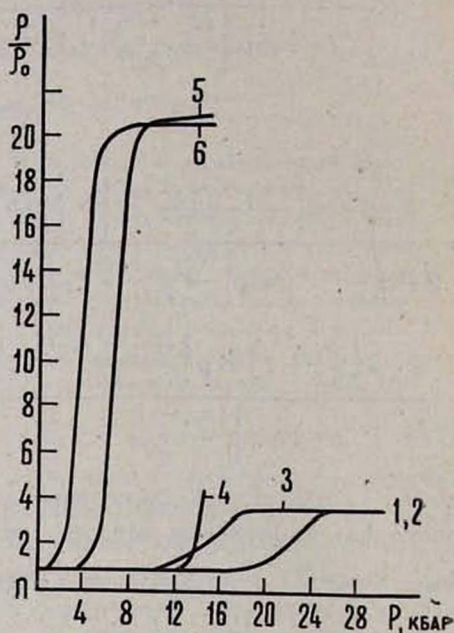


Рис. 2. Зависимость относительных изменений удельных сопротивлений $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ от давления при температуре $T = 78 \text{ K}$ для различных значений концентрации x фосфора и одноосных напряжений сжатия $T_z < 0$: 1 — $x = 0$, $T_z = 0$; 2 — $x = 0,1$, $T_z = 0$; 3 — $x = 0,2$, $T_z = 0$; 4 — $x = 0$, $T_z = -5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 5 — $x = 0,1$, $T_z = -5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 6 — $x = 0,2$, $T_z = -5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

тельности смещается в сторону меньших давлений, а при растяжении — в сторону больших давлений. Покажем это.

При одноосном сжатии полупроводника в направлении $\langle 100 \rangle$ две X-долины, длинная ось которых направлена вдоль оси деформации, опускаются по энергии, а четыре другие и основной Г-минимум поднимаются. Если деформации таковы, что Г-минимум при отсутствии гидростатического сжатия занимает наинизшее положение из всех долин, то все электроны будут находиться в этом минимуме, обладая подвижностью $\mu_\Gamma = e\tau/m_\Gamma$,

где m_{Γ} — эффективная масса электронов в рассматриваемом минимуме. Гидростатическое сжатие полупроводника, погруженного в рабочую среду, приводит к дальнейшему подъему Γ -минимума и опусканию X -долин. Если верхние четыре долины располагаются достаточно высоко, то элек-

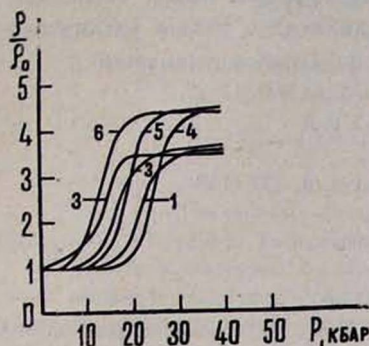


Рис. 3. Зависимость относительных изменений удельных сопротивлений $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ при температуре $T = 300\text{ K}$ для различных значений концентрации x фосфора и одноосных напряжений растяжения $T_z > 0$: 1 — $x = 0$, $T_z = 0$; 2 — $x = 0,1$, $T_z = 0$; 3 — $x = 0,2$, $T_z = 0$; 4 — $x = 0$, $T_z = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 5 — $x = 0,1$, $T_z = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 6 — $x = 0,2$, $T_z = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

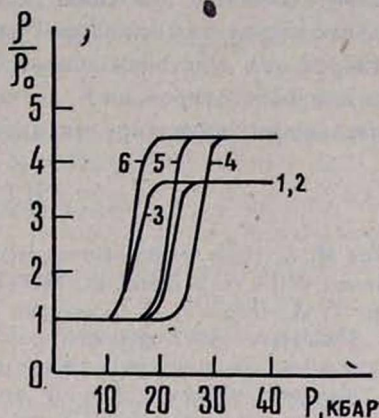


Рис. 4. Зависимость относительных изменений удельных сопротивлений $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ при температуре $T = 78\text{ K}$ для различных значений концентрации x фосфора и одноосных напряжений растяжения $T_z > 0$: 1 — $x = 0$, $T_z = 0$; 2 — $x = 0,1$, $T_z = 0$; 3 — $x = 0,2$, $T_z = 0$; 4 — $x = 0$, $T_z = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 5 — $x = 0,1$, $T_z = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$; 6 — $x = 0,2$, $T_z = 5 \cdot 10^3 \text{ кг/см}^2$.

троны при гидростатическом сжатии перетекают в нижележащие две анизотропные X -долины, характеризующиеся продольной ($\mu_l = e\tau_l/m_l$) и поперечной ($\mu_t = e\tau_t/m_t$) подвижностями и изменяют свою подвижность в μ_t/μ_l раз, если ток направлен вдоль оси деформации, и в μ_l/μ_t раз, если ток направлен перпендикулярно оси. Если же гидростатически сжимать одноосно недеформированный полупроводник, то подвижность будет изменяться в μ_t/μ_x раз, где μ_x — усредненная по шести долинам подвижность электронов в X -минимуме. Таким образом, одноосно сжатый в направлении $\langle 100 \rangle$ кристалл $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ будет обладать в $\frac{\mu_x}{\mu_l} =$

$$= \frac{1}{3} \left(1 + 2 \frac{\mu_t}{\mu_l} \right)$$
 раз большей по сравнению с недеформированным кристаллом чувствительностью. Соответственно порог чувствительности сместится в сторону меньших давлений. Принимая коэффициент анизотропии X -минимума равным $\mu_l/\mu_t = 5$, получим $\mu_x/\mu_l = 3,5$. При одноосном растяжении полупроводника в направлении $\langle 100 \rangle$ две X -долины, ориентированные вдоль оси деформации, поднимаются по энергии вверх, а Γ -минимум и четыре другие X -долины опускаются вниз. При этом вследствие большей скорости движения Γ -минимума по сравнению с X -долина-

ми энергетический зазор между Γ -минимумом и четырьмя X -долинами возрастает, и в результате одноосно растянутый кристалл $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ будет чувствителен к большим давлениям, чем недеформированный. Если при этом ток течет в направлении, перпендикулярном оси деформации, то чувствительность к давлению также, как и при сжатии, будет больше, чем в случае отсутствия одноосной деформации. Описанное поведение твердых растворов под действием анизотропной деформации может быть использовано при конструировании датчиков давления с целью увеличения чувствительности и расширения диапазона измеряемых давлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vas M. K. High temperatures—High pressures, 6, 237 (1974).
2. Патент США № 3270562, кл. 73-398, 1966.
3. Бир Г. А., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Изд. Наука, 1972, стр. 484.
4. Craford M. G. et al. Phys. Rev., 168, 867 (1968).
5. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника. Изд. Наукова думка, Киев, 1975, стр. 433.

ՈՒԺԵՂ ԱՆԻՋՈՏՐՈՊ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՊԻՆԴ ԼՈՒԾՈՒՅԹՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀԱՏՎՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

Պ. Պ. ՎԻԼՄՍ, Ա. Վ. ՆՈՄՈԿՈՆՈՎ

ԷՆՄ-ի վրա հաշվված են $n\text{-GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ կարծր լուծույթների տեսակարար դիմադրությանների հարաբերական փոփոխությունները անիզոտրոպ ճնշման ազդեցության տակ: Ցույց է տրված, որ անիզոտրոպ կերպով դեֆորմացված բյուրեղը շատ ավելի զգայուն է ճնշման ազդեցությանը, քան իզոտրոպ դեֆորմացիայի դեպքում: Առաջարկվում է այդ հատկությունը օգտագործել կարծր լուծույթների անիզոտրոպ ճնշումը չափող սարքերում նրանց զգայունությունը և չափվող ճնշումների անիզոտրոպ ընդլայնելու նպատակով:

THE EFFECT OF GREAT UNIAXIAL STRESS ON ELECTRICAL PROPERTIES OF n -TYPE $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ALLOYS

P. P. VIL'MS, A. V. NOMOKONOV

A phenomenological theory of n -type $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ under the uniaxial stress has been developed in the framework of two-valley $\Gamma-X$ -model on the assumption of undegenerate electron gas and the complete ionization of impurities. It was shown that under the uniaxial stress the crystal displayed greater stress sensitivity in comparison with the case of isotropic stress. This property may be of practical importance in the development of pressure transmitters.