УДК 621.315.592

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-2-51-56

Р.К. Арсланов, М.И. Даунов, У.З. Залибеков

Примесный энергетический спектр в разбавленном магнитном полупроводнике $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ при всестороннем давлении

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра РАН; Россия, 367003, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94; arslnovr@gmail.com

По данным о барических зависимостях удельного электросопротивления и коэффициента Холла в диапазоне всесторонних давлений до 9 ГПа и 300 К в разбавленном магнитном полупроводнике $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ рассчитаны характеристические параметры носителей заряда. Определены энергетические промежутки между уровнями энергии мелких, глубоких и глубоких резонансных примесных уровней и краями собственных зон и их коэффициенты давления, коэффициент давления статической диэлектрической проницаемости. При давлениях от атмосферного до 3 ГПа наблюдается смешанная проводимость: знак R_H с ростом давления инвертирует от «–» к «+». При давлениях выше 3 ГПа до давления начала полиморфного превращения наблюдается примесная проводимость с близкой к экспоненциальной зависимостью коэффициента Холла. По данным о барической зависимости коэффициента Холла в диапазоне давлений 4–6 ГПа определен коэффициент давления энергии связи акцепторного центра 38.8 мэВ/ГПа. По полученным значениям коэффициента давления определена величина диэлектрической проницаемости ≈ -0.09 , что согласуется с коэффициентами давления диэлектрической проницаемости в прямозонных полупроводниках. Обобщены полученные результаты о собственном и примесном энергетическом спектре $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$.

Ключевые слова: *давление, температура, коэффициент Холла, удельное электросопротивление, энергетический спектр, коэффициент давления.*

Введение

Актуальной для физики полупроводников является задача исследования примесного электронного спектра. Согласно общепринятому мнению [1], мелкой донорной (акцепторной) примесью считается примесь, уровень энергии которой находится в запрещенной зоне полупроводника и близок к дну зоны проводимости (потолку валентной зоны), т. е. энергия связи электрона (дырки) мала по сравнению с шириной запрещенной зоны. Однако это положение является необходимым, но недостаточным признаком для идентификации уровня дефекта как водородоподобного, так как и глубокий примесный центр при определенных условиях может также находиться вблизи края собственной зоны. Таким образом, только лишь по данным феноменологического описания примесного центра с помощью энергии ионизации, сечения захвата и т. п. при атмосферном давлении идентифицировать примесный центр затруднительно. Ситуация усложняется, когда уровень энергии глубокого центра располагается на зонном континууме, т. е. является резонансным. В [2] по результатам экспериментальных данных о кинетических свойствах полупроводников при всестороннем давлении показано, что при изотропном сжатии кристаллической решетки, если энергия ионизации мелкого примесного центра практически остается постоянной (с поправкой на барическую зависимость эффективной массы носителей зарядов и статической диэлектрической прони-

цаемости), то коэффициент давления энергетического промежутка между зоной проводимости и уровнем энергии глубокого центра равен барическому коэффициенту ширины запрещенной зоны (с поправкой на энергетическую зависимость энергии потолка валентной зоны [3]). Пренебрежимо малая, на уровне погрешности эксперимента, зависимость энергии глубоких примесных центров относительно вакуума от всестороннего давления обусловлена тем, что их волновые функции следует строить по всей зоне Бриллюэна и характер воздействия давления на их энергию определяется эволюцией всей структуры энергетического спектра, а не только ближайшими одной или двумя зонами [3].

В связи с вышесказанным на наш взгляд, целесообразно исследование электронного спектра реальных полупроводников, подвергнутых воздействию всестороннего давления.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные о барических зависимостях коэффициента Холла и электропроводности в разбавленном магнитном полупроводнике $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$, проведен количественный анализ и обобщены данные об эволюции собственного и примесного энергетического спектра $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ под воздействием изотропного сжатия кристаллической решетки.

Методика измерений. Образцы

Гидростатическое давление до $P = 9$ ГПа создавалось в аппарате высокого давления типа «тороид». Тefлоновая ампула с образцом, заполненная жидкостью, вставлялась в отверстие катленитовой прокладки и сжималась двумя твердосплавными пуансонами. В качестве среды, передающей давление, использовалась известная смесь 4:1 метанола и этанола с удовлетворительной степенью гидростатичности до 10 ГПа. Давление в камерах измерялось с помощью предварительно отградуированного манганинового манометра. Методика создания и измерения всестороннего давления в использованных аппаратах высокого давления описана в работе [4].

Результаты и обсуждение

Количественный анализ экспериментальных результатов проведен при комнатной температуре по следующим причинам. Уширением глубоких уровней при комнатной температуре можно пренебречь. Кроме того, при понижении температуры и убывании концентрации свободных носителей заряда влияние хаотического потенциала усиливается, что может привести к ошибкам при вычислении величин коэффициентов давления. При расчетах использованы известные сведения о законе дисперсии, величинах эффективной массы электронов на дне зоны проводимости m_c/m_0 , ширины запрещенной зоны E_g и спин-орбитального расщепления валентных зон Δ_s . Считалось, что величина Δ_s и эффективная масса дырок плотности состояний не зависят от давления. Эффективная масса электронов на дне зоны проводимости равна [5]:

$$m_c/m_0 = 0.022 + 4.34 \cdot 10^{-3} \cdot P \quad (1)$$

(давление P в единицах ГПа).

Ранее в кристаллах $p\text{-InAs}$, легированных Zn, Сг и Mn, по результатам исследования электронного транспорта при гидростатическом давлении до $P = 9$ ГПа и $T = 300$ К были проанализированы особенности полиморфного превращения при компрессии и декомпрессии давления. Выяснено, что характер превращения и положение характеристических точек на шкале давления не зависит от легирующей примеси и ее концентрации.

В настоящей работе исследован собственный и примесный энергетический спектр электронов в кристаллах $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ по данным об электронном транспорте при атмосферном и всестороннем давлениях и $T = 300$ К. Монокристаллы $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ были по-

лучены в Институте тонкой химической технологии РАН выращиванием из расплава по методу Чохральского.

Типичные зависимости коэффициента Холла $R_H(P)$ и удельного сопротивления $\rho(P)$ от гидростатического давления приведены на рис. 1. При давлениях от атмосферного до 3 ГПа наблюдается смешанная проводимость: знак R_H с ростом давления инвертирует от «-» к «+». При давлениях выше 3 ГПа до давления начала полиморфного превращения наблюдается примесная проводимость с близкой к экспоненциальной зависимостью коэффициента Холла. По данным о барической зависимости $p_V = R_H e^{-1}$ в диапазоне давлений 4÷6 ГПа определены коэффициент давления энергии связи акцепторного центра $d\varepsilon_{a2}/dP = 38.8$ мэВ/ГПа, согласно соотношениям

$$n_{a2} = N_{a2} \cdot [1 + \beta \cdot \exp(\varepsilon_{a2}^* + \eta_P)]^{-1}, \quad (2)$$

$$\lg n_{a2} = \lg K - [(d\varepsilon_{a2}^*/dP) \cdot P + \eta_P] \cdot \lg e,$$

а также величины n_{a2} (рис. 2) и K :

$$K = \frac{N_{a2}}{\beta \cdot \exp(\varepsilon_{a20}^*)} = 3.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}. \quad (3)$$

Рис. 1. Зависимость удельного электросопротивления ρ и коэффициента Холла R_H при $T = 300$ К от гидростатического давления в образце $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ с $R_H = -32.7 \text{ см}^3/\text{Кл}$, $\rho = 0.17 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при атмосферном давлении и с концентрацией дырок валентной зоны $p_V = (R_H \cdot e)^{-1} = 7.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $P = 4$ ГПа

Рис. 2. Зависимости концентрации электронов n_{a2} на акцепторном уровне ε_{a2} (1) и дырок валентной зоны p_v (2) от $[(d\varepsilon_{a2}^*/dP)P + \eta_F] \lg e$ ($d\varepsilon_{a2}^*/dP$ и η_F – приведенные энергии ионизации акцепторного уровня и уровня Ферми относительно потолка валентной зоны) при $T = 300$ К в образце $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$

Как видно из рис. 2, зависимость n_{a2} от $[(d\varepsilon_{a2}^*/dP)P + \eta_F]$ линейная, что свидетельствует о корректности определения коэффициента давления $d\varepsilon_{a2}^*/dP$. Поскольку рассчитанное значение $n_{a2} < p_v$ (рис. 2), кроме уровня энергии ε_{a2} имеется глубокий резонансный акцепторный центр ε_{a3r} . Разность $N_{a3r}^- - N_d^+ = 1.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (N_d^+ и N_{a3r}^- – концентрации ионизированных донорных и акцепторных центров, расположенных соответственно выше и ниже уровня Ферми).

Отметим, что, так как коэффициент давления $d\varepsilon_{a2}/dP = 38.8 \text{ мЭВ/ГПа}$ больше коэффициента давления энергии потолка валентной зоны относительно абсолютного вакуума $|d\varepsilon_v/dP| \approx 8 \text{ мЭВ/ГПа}$ [2] и меньше $d\varepsilon_g/dP = (100 \pm 10) \text{ мЭВ/ГПа}$ [5], то, очевидно, акцепторный центр ε_{a2} является мелким акцептором. Отсюда, согласно известному выражению для эффективной боровской энергии, имеем:

$$\frac{(d\varepsilon_{a2}/dP)}{\varepsilon_{a2}} = -2 \frac{(d\chi/dP)}{\chi} + \frac{(dm_p/dP)}{m_p}. \quad (4)$$

Воспользовавшись полученным значением коэффициента давления $d\varepsilon_{a2}/dP$ определим величину $(d\chi/dP)/\chi \approx -0.09$, что согласуется с коэффициентами давления диэлектрической проницаемости χ в прямозонных полупроводниках [6], а также с концентрацией мелких акцепторов $N_{a3} = 2.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Использовано $\beta = 4$, так как основное состояние дырки на мелком акцепторе в InAs четырехкратно вырождено (валентная зона симметрии Γ_8).

Заключение

На рис. 3 обобщены полученные результаты о собственном и примесном энергетическом спектре $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$. Количественный анализ энергетического спектра был проведен при комнатной температуре из-за негативного влияния флуктуирующего потенциала при низких температурах [7]. Именно этим обстоятельством объясняются приводимые в статьях и справочниках заниженные значения коэффициента давления ширины запрещенной зоны InAs (см., например, [9, 5]).

Рис. 3. Собственный и примесный энергетический спектр электронов $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ при изотропном сжатии кристаллической решетки и $T = 300$ К. Энергии: ε_c – дно зоны проводимости, ε_v – потолок валентной зоны, ε_{dr} – глубокий резонансный донорный уровень, ε_{a1} – глубокий акцепторный уровень, ε_{a2} – мелкий акцепторный уровень, ε_{a3r} – глубокий резонансный акцепторный уровень

Литература

1. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. – М.: Наука, 1979. – С. 416.
2. Даунов М.И., Камилов И.К., Габитов С.Ф. Применение всестороннего давления для оценки степени влияния флуктуационного потенциала на энергетический спектр носителей заряда в кристаллических полупроводниках // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 419, № 1. – С. 35.
3. Sarma S. Das, Madhukar A. Cation and anion ideal vacancy induced gap levels in some III–V compound semiconductors // Sol. St. Commun. – 1981. – V. 38, № 3. – P. 183.
4. Khvostantsev L.G., Slesarev V.N., Brazhkin V.V. Toroid type high-pressure device: history and prospects // High Pressure Research. – 2004. – V. 24, № 3. – P. 371.
5. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. – М.: Физматлит, 2009. – С. 336.
6. Downes J.R., N.W.A. van Uden S.H.B. Bosher, Frogley M.D., Dunstan D.J. Theory of the Anomalous Low Band-Gap Pressure Coefficients of Semiconductor Strained Layers // Phys. Stat. Sol. B. – 2001. – V. 223, № 1. – P. 205.
7. Sivakami A., Mahendran M. Hydrostatic pressure and conduction band non-parabolicity effects on the impurity binding energy in a spherical quantum dot // Physica B: Condensed Matter. – 2010. – V. 405, № 5. – P. 1403.
8. Камилов И.К., Даунов М.И., Моллаев А.Ю., Арсланов Р.К. Уровень энергии марганца в $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ под давлением // Известия РАН. Сер. физическая. – 2010. – Т. 74, № 8. – С. 1202.

9. Камилов И.К., Габиев С.Ф., Даунов М.И., Моллаев А.Ю. Влияние давления на электронный спектр арсенида индия // ФТП. – 2011. – Т. 45, № 12. – С. 1604.

Поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

UDC 621.315.592

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-2-51-56

Impurity energy spectrum in undoped dilute magnetic $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ semiconductors at hydrostatic pressures

R.K. Arslanov, M.I. Daunov, U.Z. Zalibekov

Amirkhanov Institute of Physics, Dagestan Scientific Center of RAS, Russia, 367003, Makhachkala, Yaragski st., 94; arslanovr@gmail.com

According to the data on the pressure dependences of the resistivity and the Hall coefficient, the characteristic parameters of the charge carriers are calculated in the range of hydrostatic pressures up to 9 GPa and 300 K in the dilute magnetic semiconductor $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$. Energy intervals between energy levels of shallow, deep and deep resonant impurity levels and edges of intrinsic zones and their pressure coefficients, pressure coefficient of static dielectric permittivity are determined. At pressures from atmospheric to 3 GPa, mixed conductivity is observed: the sign of R_H inverts from "–" to "+" with increasing pressure. At pressures above 3 GPa to the pressure of the onset of the polymorphic transformation, impurity conductivity is observed with a Hall coefficient close to the exponential dependence. The pressure dependence of the binding energy of the acceptor center 38.8 мэВ/GPa is determined from the data on the pressure dependence in the pressure 4–6 GPa range. From the obtained values of the pressure coefficient, the value dielectric permittivity ≈ -0.09 is determined, which is in agreement with the dielectric permittivity in the direct-gap semiconductors. The obtained results on the intrinsic and impurity energy spectrum of $p\text{-InAs}<\text{Mn}>$ are generalized.

Keywords: *pressure, temperature, Hall coefficient, resistivity, energy spectrum, pressure coefficient.*

Received 15 February, 2018