

©1995 г.

МЕЖДОЛИННОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ МЕЛКИХ ДОНОРОВ В ОДНООСНО ДЕФОРМИРОВАННОМ Ge

А.Е.Горин, В.Н.Ермаков, В.В.Коломоец

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,
252650, Киев, Украина

(Получена 6 июня 1994 г. Принята к печати 21 сентября 1994 г.)

Исследована ударная ионизация нейтральных доноров Sb, P, As в одноосно деформированных кристаллах германия. Эксперименты проведены для двух принципиально различных случаев деформационной перестройки зонной структуры и соответственно проявления различных механизмов тензоэффектов. Теоретические расчеты зависимостей поля ударной ионизации (E_b) от одноосного давления X сопоставляются с экспериментальными данными для случая $X \parallel [111] \parallel E$. Определены доминирующие механизмы изменения полей ударной ионизации под влиянием одноосного давления. Установлено, что в случае $X \parallel [001] \parallel E$ максимумы на зависимостях $E_b = f(X)$, которые наблюдаются для примесей As и P, связаны с рассеянием электронов на оптических фононах. Обнаружено, что вследствие $L_1 - \Delta_1$ -инверсии типа абсолютного минимума зоны проводимости энергия ионизации фосфора в Ge изменяется от $\mathcal{E}_i^{L_1}(P) = 12$ мэВ до $\mathcal{E}_i^{\Delta}(P) = 41$ мэВ.

Введение

Цель настоящей работы — исследование механизмов междолинного перераспределения электронов в условиях ударной ионизации мелких примесей Sb, As, P в одноосно деформированных кристаллах германия. Экспериментально исследовались как вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов, так и зависимость поля ударной ионизации от давления. В связи с тем, что характер перестройки энергетического спектра под влиянием сильного давления существенно зависит от ориентации оси деформации относительно кристаллографических направлений, эффект междолинного перераспределения электронов может определяться как эквивалентными долинами зоны проводимости (долины L_1), так и неэквивалентными долинами (долины $L_1 - \Delta_1$). Поэтому в экспериментах было использовано два варианта продольных ориентаций одноосного давления X и электрического поля E относительно кристаллографических направлений — $X \parallel [111] \parallel E$ и $X \parallel [001] \parallel E$.

Образцы германия, на которых были выполнены измерения, имели концентрацию доноров $1.15 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для каждой из примесей: Sb, P, As. Измерения проводились при температуре жидкого гелия.

Смещение по шкале энергии L_1 - и Δ_1 -долин зоны проводимости для указанных ориентаций оси деформации показано на рис. 1.

Расчеты проведены на основе теории деформационного потенциала с использованием значений констант деформационного потенциала, полученных в работах [1,2].

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) для случая $X \parallel [111] \parallel E$. Такой вид ВАХ является типичным для обеих указанных ориентаций. С ростом давления ВАХ смещаются в область более высоких значений критических полей (E_b) примесного пробоя, сохраняя степенной характер зависимости.

Для регистрации зависимостей $E_b = f(X)$ была использована электронная схема, которая позволяла осуществлять их автоматическую запись при стабилизированном токе через образец. Ток мог устанавливаться на любом уровне в диапазоне от 0.5 мкА до 15 мА. Так, на-

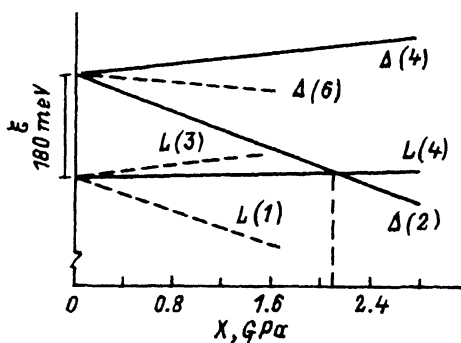


Рис. 1. Смещение по шкале энергии L_1 - и Δ_1 -долин зоны проводимости германия при $X \parallel [001]$ (сплошные линии) и при $X \parallel [111]$ (штриховые). Числа в скобках — количество соответствующих долин, смещающихся по энергии с одинаковой скоростью.

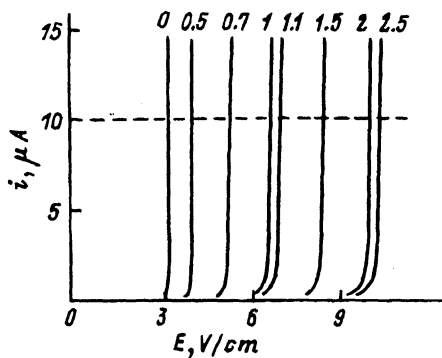


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики образцов $n\text{-Ge}(\text{Sb})$ при различных значениях одноосного давления X . Штриховая линия — значение стабилизированного тока, при котором снимались зависимости $E_b = f(X)$.

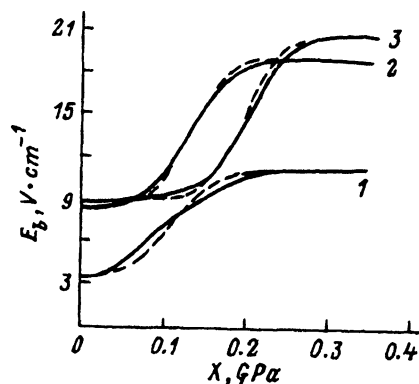


Рис. 3. Зависимости поля ударной ионизации от одноосного давления X для $n\text{-Ge}$, легированного примесями Sb (1), P (2) и As (3). Сплошные линии — эксперимент, штриховые — результаты расчетов для случая $X \parallel [111] \parallel E$.

пример, зависимости $E_b = f(X)$ (рис. 3) были записаны при неизменном стабилизированном токе $i = 10$ мкА (штриховая линия на рис. 2).

Необходимо отметить такие особенности зависимостей $E_b = f(X)$, полученных для случая $X \parallel [111] \parallel E$ (рис. 3).

Как для $X = 0$, так и в области давлений, где наблюдается выход на насыщение зависимостей $E_b = f(X)$ значение поля пробоя увеличивается с увеличением энергии ионизации мелкой примеси: $E_b(\text{As}) > E_b(\text{P}) > E_b(\text{Sb})$. Такое соотношение полей пробоя связано с тем, что для ударной ионизации примеси с большим значением энергии ионизации электрону необходимо набрать более высокую энергию.

Другой характерной особенностью зависимостей $E_b = f(X)$ является то, что увеличение поля ударной ионизации с ростом давления X начинается при более высоких значениях X для кристаллов с примесью, которая имеет более высокую энергию ионизации. Известно, что для ориентации $X \parallel [111] \parallel E$ одноосное сжатие приводит к переселению электронов из трех долин с малой эффективной массой в одну долину с большой массой [3]. Поэтому вторая особенность зависимостей (рис. 3) связана с перезаселением долин, которое осуществляется за счет различного разогрева электронов в электрических полях, приводящих к ударной ионизации нейтральных примесей. Очевидно, такой неэквивалентный разогрев приводит к переселению электронов также из долин с малой массой электронов («горячие» долины) в долину с большой массой («холодная» долина) [4]. Поэтому начало переселения электронов за счет одноосной деформации смещается в область более высоких давлений с увеличением энергии ионизации примеси (Sb, P, As).

Наличие переселения электронов за счет неэквивалентного разогрева объясняет и третью особенность зависимостей $E_b = f(X)$ — существенное уменьшение относительного изменения E_b^s/E_b^0 (E_b^0 , E_b^s — значения E_b при $X = 0$ и в насыщении соответственно) с увеличением энергии ионизации примеси (растет разогрев при $X = 0$ и, значит, полевое междолинное перезаселение электронов). Однако наиболее заметно это относительное изменение E_b^s/E_b^0 отличается от соответствующего изменения напряжения (или удельного сопротивления) от значения при $X = 0$ до насыщения, $U^s/U^0 \equiv \rho^s/\rho^0$, полученного для равновесных условий (полное отсутствие разогрева электронов). Так, при ударной ионизации примесных атомов Sb и Ge имеем $E_b^s/E_b^0 = 3.2$, а для кристалла $n\text{-Ge}(\text{Sb})$ с такой же концентрацией примеси на основе измерений пьезосопротивления было получено значение отношения $U^s/U^0 \simeq 8$.

Учитывая перезаселение электронов как за счет их неэквивалентного разогрева в горячих и холодной долинах, так и за счет направленной деформации, были проведены расчеты зависимостей $E_b = f(X)$, которые отвечали условию эксперимента $i = \text{const}$.

На основе теории ударной ионизации мелких примесей [5,6] была рассчитана общая концентрация электронов в зоне проводимости. Отношение концентрации электронов в долине, которая поднимается с давлением по шкале энергии (n_2), к концентрации электронов в доли-

не, которая опускается по энергии (n_1), определялось соотношением

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{4}{9}\Xi_u s_{44} X - \delta\mathcal{E}\right) (kT_e)^{-1}. \quad (1)$$

Здесь Ξ_u — константа деформационного потенциала, s_{44} — константа упругой податливости, X — давление, k — постоянная Больцмана, T_e — температура электронов в холодной долине, $\delta\mathcal{E}$ — подгоночный параметр, который связан с разницей энергий электронов в горячих и холодной долинах.

На рис. 3 штриховыми линиями показаны результаты соответствующих расчетов. Видно, что теоретические зависимости неплохо описывают экспериментальные кривые, за исключением наличия на экспериментальной зависимости $E_b = f(X)$ для n -Ge(Sb). Мы считаем, что такое несоответствие теоретической и экспериментальной кривых связано с тем, что в расчетах не учтен переход от увеличения полевого перераспределения электронов к его уменьшению [4] при увеличении поля ударной ионизации (и соответственно при увеличении разогрева электронов).

В связи с тем что для мелких доноров в Ge химический сдвиг мал [7], уменьшение энергии ионизации с давлением не дает заметного вклада в зависимости $E_b = f(X)$, что подтверждают экспериментальные данные (рис. 3) для всех примесей.

Принимая во внимание смещение долин в случае $X \parallel [111]$ (рис. 1), можно констатировать, что вклад Δ_1 -долин в явления переноса в условиях разогрева при увеличении одноосного давления X может только уменьшаться.

Другие механизмы изменения полей ударной ионизации с давлением имеют место в случае $X \parallel [001] \parallel E$, что связано с более радикальной перестройкой энергетического зонного спектра по сравнению со случаем $X \parallel [111] \parallel E$. Так, из рис. 1 видно, что для ориентации одноосного давления $X \parallel [001]$ в Ge при давлении $X > 2.1$ ГПа осуществляется инверсия типа абсолютного минимума: L_1 - Δ_1 -инверсия [8]. Перестройка зонного спектра приводит к тому, что изменение полей ударной ионизации мелких примесей Sb, P, As начинает происходить только в области давлений $X > 1.6$ ГПа (рис. 4). Такое увеличение E_b связано с существенным ростом энергии ионизации мелких примесей. Это возрастание энергии ионизации происходит за счет увеличения вклада блоховских функций Δ_1 -минимумов в волновую функцию примесных состояний при сближении L_1 - и Δ_1 -минимумов (рис. 1).

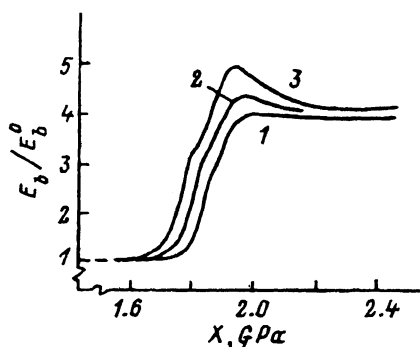


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $E_b/E_b^0 = f(X)$ для n -Ge, легированного Sb (1), P (2) и As (3), в случае $X \parallel [001] \parallel E$.

Как известно [9], волновая функция электрона, связанного с мелким примесным центром, будет определяться вкладом блоховских функций как L_1 -, так и Δ_1 -минимумов:

$$\psi = \sum_k (C_{Lk} \Psi_{Lk} + C_{\Delta k} \Psi_{\Delta k}). \quad (2)$$

Поэтому, изменяя одноосное давление $X \parallel [001]$ в широком диапазоне, мы имеем возможность изменять относительный вклад в волновую функцию (2) блоховских функций L_1 - и Δ_1 -минимумов. Так, для $0 < X < 1.6$ ГПа ψ определяется вкладом блоховских функций только L_1 -долин, а для $X > 2.2$ ГПа соответствующий вклад будут давать только Δ_1 -долины зоны проводимости.

Таким образом, значительное изменение $E_b = f(X)$, которое наблюдается в области давлений $1.6 < X < 2.2$ ГПа, связано с ростом вклада Δ_1 -долин зоны проводимости в формирование новых примесных состояний мелких доноров, которое происходит в процессе L_1 - Δ_1 -инверсии типа абсолютного минимума зоны проводимости германия.

На основе метода, использованного в работе [10], была определена энергия ионизации основного состояния примесного уровня атомов Р в Ge, связанного с Δ_1 -долинами: $\mathcal{E}_i^\Delta(\text{P}) = (41 \pm 2)$ мэВ.

Наиболее характерной особенностью зависимостей $E_b/E_b^0 = f(X)$ для случая $X \parallel [001] \parallel E$ является наличие максимума при давлении $X \simeq 2.0$ ГПа, который наблюдается для примесей As и Р и практически отсутствует для примеси Sb.

Очевидно, такой максимум определяется неупругим рассеянием электронов на оптических фононах. Рассеяние на оптических фононах дает заметный вклад в том случае, когда с увеличением энергии ионизации примеси энергия ионизирующего электрона приближается к энергии оптического фонона \mathcal{E}_{ph} .

При значениях энергий $\mathcal{E}_i^\Delta(\text{Sb}) = 36$ мэВ [11], $\mathcal{E}_i^\Delta(\text{P}) = 41$ мэВ (данная работа), $\mathcal{E}_i^\Delta(\text{As}) = 45$ мэВ [10], $\mathcal{E}_{ph} = 37$ мэВ имеем $\mathcal{E}_i^\Delta(\text{As}) > \mathcal{E}_i^\Delta(\text{P}) > \mathcal{E}_{ph} > \mathcal{E}_i^\Delta(\text{Sb})$. Приведенное соотношение подтверждает наше предположение о природе максимума на зависимостях $E_b = f(X)$, который наблюдается для примесей As и Р в Ge.

Таким образом, с учетом характерных особенностей перестройки зонной структуры под действием сильных одноосных деформаций проведен детальный анализ экспериментальных данных по ударной ионизации мелких доноров в Ge для случаев $X \parallel [111] \parallel E$ и $X \parallel [001] \parallel E$. Результаты анализа позволили установить природу полученных закономерностей и найти энергию ионизации примеси фосфора в Ge, которая определяется параметрами Δ_1 -долин зоны проводимости. Приблизительно четырехкратное увеличение энергии ионизации мелких доноров в Ge в результате L_1 - Δ_1 -инверсии позволило показать вклад неупругого рассеяния ионизирующих электронов на оптических фононах. Этот механизм объясняет появление максимума на зависимостях $E_b = f(X)$ для примесей As и Р в Ge. Наличие максимума характеризует рост неупругого рассеяния, когда энергия ионизирующего электрона приближается к энергии оптического фонона.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда Сороса Американского физического общества.

Список литературы

- [1] P.I. Baranskii, V.V. Kolomoets. Phys. St. Sol. (b), **45**, K55 (1971).
- [2] V.N. Ermakov, V.V. Kolomoets, V.S. Timoshuk. Phys. St. Sol. (b), **116**, K77 (1983).
- [3] C. Herring, E. Vogt. Phys. Rev. **101**, 944 (1956).
- [4] C. Jacoboni, F. Nava, C. Canali, G. Ottaviani. Phys. Rev. B, **24**, 1014 (1981).
- [5] P. Wolff. Phys. Rev., **95**, 1413 (1954).
- [6] Л.В. Келдыш. ЖЭТФ, **37**, 713 (1959).
- [7] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (М., 1972).
- [8] П.И. Баранский, В.В. Коломоец, Б.А. Сусь, В.П. Шаповалов. ФТП, **13**, 602 (1979).
- [9] А.Я. Шик. ФТП, **7**, 193 (1973).
- [10] V.V. Baidakov, V.N. Ermakov, N.N. Crigorev, V.V. Kolomoets, T.A. Kudykina. Phys. St. Sol. (b), **122**, K163 (1984).
- [11] В.В. Байдаков, Н.Н. Григорьев, В.Н. Ермаков, В.В. Коломоец, Т.А. Кудыкина. ФТП, **17**, 370 (1983).

Редактор Л.В. Шаронова

Intervalley redistribution of electrons under impact ionization of neutral donors in uniaxially strained germanium crystals

A.E. Gorin, V.N. Yermakov, V.V. Kolomoets

Institute of Physics of Semiconductors, Ukrainian Academy of Sciences, 252028 Kiev, the Ukraine

Impact ionization of neutral donors (Sb,P,As) has been investigated in uniaxially strained germanium crystals. Experiments were carried out for two principally different cases of the energy band structure transformation and, consequently, for different tenseffect mechanisms. A comparison was made between theoretical calculations and experimentally obtained $E_b = f(X)$ dependencies for the case $X \parallel [111] \parallel E$ (X being the uniaxial pressure and E the electric field). Dominant mechanisms of the electric field breakdown as a function of the uniaxial pressure X were found. The maxima peculiar to $E_b = f(X)$ dependence for As and P impurities in the case of $X \parallel [001] \parallel E$ were explained in terms of the elastic interaction of free electrons with optical phonons. The ionization energy of phosphorus determined by the Δ_1 -minima features was obtained in the form: $\mathcal{E}_i^\Delta = (41 \pm 2) \text{ meV}$.
