

# Пробой мелких доноров в Si и Ge на диэлектрической стороне деформационно-индуцируемого перехода металл–диэлектрик

© С.И. Будзуляк<sup>¶</sup>, Е.Ф. Венгер, Ю.П. Доценко, В.Н. Ермаков, В.В. Коломоец,  
В.Ф. Мачулин, Л.И. Панасюк

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,  
252650 Киев, Украина

(Получена 16 августа 1999 г. Принята к печати 21 декабря 1999 г.)

Исследована ударная ионизация локализованных состояний электрона на диэлектрической стороне деформационно-индуцируемого перехода металл–диэлектрик в кристаллах Si(P) и Ge(Sb) при концентрациях доноров, значительно превышающих критическую концентрацию перехода, реализуемого за счет изменения концентрации примеси. Получены зависимости энергии активации и поля ударной ионизации от одноосного давления. Переход от металлической проводимости к  $\epsilon_2$ -проводимости в области больших одноосных давлений обсуждается на основе перестройки энергетического спектра зоны проводимости при определенных направлениях оси деформации в кристаллах кремния и германия.

## 1. Введение

Деформационно-индуцируемый переход от активационной проводимости к металлической реализован при произвольной ориентации оси деформации в слабо диэлектрических образцах  $n$ -Si(P) в области температур  $T = 3\text{--}35\text{ мК}$  и одноосных давлений до 0.8 ГПа [1]. Этот переход обусловлен главным образом механизмом изменения с деформацией долино-орбитального расщепления. Параметры зоны проводимости при этом не изменяются.

Переход металл–диэлектрик в вырожденных кристаллах  $n$ -Si и  $n$ -Ge [2] был получен за счет существенного изменения параметров зоны проводимости вследствие трансформации энергетического спектра при определенных ориентациях оси деформации (оси давления  $X$ ) [3].

Как в кремнии (при  $X \parallel [111]$ ), так и в германии (при  $X \parallel [001]$ ) деформационная перестройка энергетического спектра зоны проводимости приводит к существенному увеличению эффективной массы электронов, уменьшению боровского радиуса и локализации электрона на примесном атоме. В кремнии при  $X \parallel [111]$  вследствие деформационной непараболичности  $\Delta$ -долин [4] заметно увеличивается поперечная компонента эффективной массы электрона в области больших одноосных давлений. В германии при  $X \parallel [001]$  и величинах давления  $X > 2.1$  ГПа достигается инверсия типа абсолютного минимума ( $L$ – $\Delta$ -инверсия), вследствие чего увеличивается эффективная масса электронов, что приводит, в частности, примерно к четырехкратному увеличению энергии ионизации мелких примесей (Sb, P, As) [3] в чистых кристаллах, а в сильно легированных кристаллах — к существенному уменьшению боровского радиуса и локализации электрона на примесном центре.

Таким образом, несмотря на различную природу деформационно-индуцируемого перехода металл–диэлектрик (МД), определяемую принципиально различающим-

ся характером перестройки зонного спектра в  $n$ -Si и в  $n$ -Ge при указанных ориентациях оси деформации, в обоих случаях в области сильных одноосных давлений достигается переход от металлической проводимости к активационной. Очевидно, закономерности деформационно-индуцируемого перехода МД должны существенно различаться для двух монокристаллических сильно легированных полупроводников  $n$ -Si и  $n$ -Ge. С другой стороны, поскольку деформационно-индуцируемый переход МД связан в обоих случаях с увеличением эффективной массы электрона  $m_e^*$  и его локализацией на примесном центре, должны иметь место и общие характерные особенности перехода от металлической проводимости к активационной при возрастании одноосного давления  $X$ : появление и возрастание энергии активации  $\epsilon_a$ , которая для рассматриваемых условий идентифицируется с  $\epsilon_2$ -проводимостью [2], трансформация линейных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в  $S$ -образные, переход от слабой локализации электрона на примесном центре к его сильной локализации и другие.

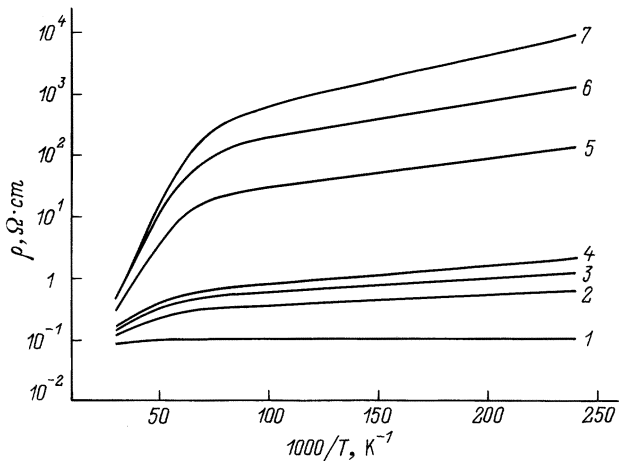
Рассмотрению указанных особенностей деформационно-индуцируемого перехода МД в сильно легированных кристаллах  $n$ -Si(P) и  $n$ -Ge(Sb), обусловленного перестройкой энергетического спектра зоны проводимости в области сильных одноосных давлений  $X$ , посвящена данная работа.

## 2. Эксперимент и обсуждение полученных результатов

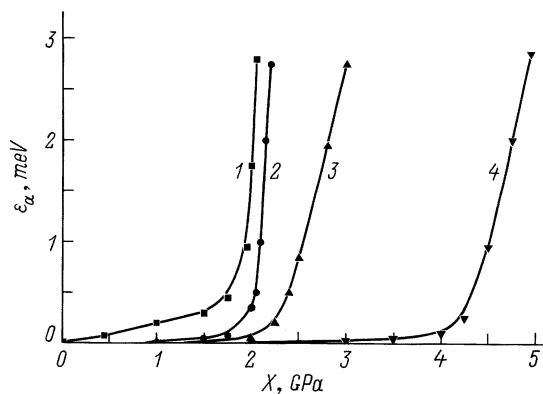
Исследование деформационно-индуцируемого перехода МД проводилось на образцах кремния, легированных фосфором в области концентрации  $N_P = (4.2\text{--}6.2) \times 10^{18}\text{ см}^{-3}$ , и двух кристаллах германия, легированных сурьмой в концентрации  $N_{Sb} = 1.8 \cdot 10^{17}$  и  $3.26 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ . Измерены зависимости удельного сопротивления кристаллов  $\rho(X)/\rho(0)$  от одноосного давления  $X$  при  $T = 4.2\text{ К}$ , вольт-амперные характери-

<sup>¶</sup> Fax: (044) 265–63–91

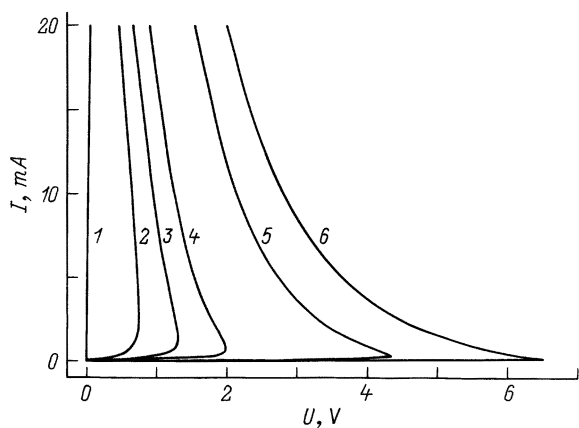
E-mail: korbutyak@div47.semicond.kiev.ua



**Рис. 1.** Удельное сопротивление кристаллов  $n\text{-Ge(Sb)}$  в зависимости от обратной температуры для разных значений одноосного давления  $X$ , ГПа: 1 — 0, 2 — 10, 3 — 17, 4 — 18, 5 — 19, 6 — 20, 7 — 21.  $N_{\text{Sb}} = 1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .



**Рис. 2.** Зависимость энергии активации от одноосного давления  $X$  для кристаллов  $n\text{-Ge}$  (1, 2) и  $n\text{-Si}$  (3, 4) в области деформационно-индуцированного перехода МД. Концентрации примеси в  $n\text{-Ge}$   $N_{\text{Sb}} = 1.8 \cdot 10^{17}$  (1) и  $3.26 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (2), в  $n\text{-Si}$   $N_{\text{P}} = 4.7 \cdot 10^{18}$  (3) и  $6.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (4).

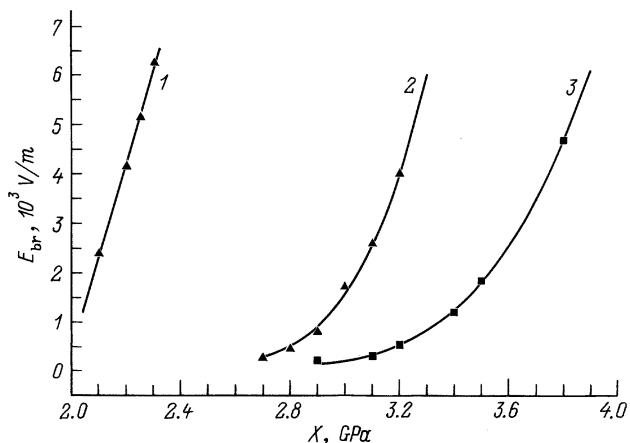


**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики  $I(U)$  кристаллов  $n\text{-Si(P)}$ , измеренные в импульсном режиме при  $T = 4.2 \text{ К}$  для различных значений одноосного давления  $X$ , ГПа: 1 — 0, 2 — 2.7, 3 — 2.8, 4 — 2.9, 5 — 3.0, 6 — 3.1.  $N_{\text{P}} = 4.7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

стики в области перехода МД в импульсном режиме, температурные зависимости удельного сопротивления кристаллов в диапазоне температур  $T = 4.2\text{--}50 \text{ К}$  при различных значениях одноосного давления  $X$ . Получены зависимости энергии активации  $\varepsilon_a$  от давления  $X$  и зависимости поля ударной ионизации от  $X$ .

Существенное увеличение удельного сопротивления кристаллов в  $n\text{-Ge(Sb)}$  при  $T = 4.2 \text{ К}$  и одноосных давлениях  $X$ , приводящее с ростом  $X$  к переходу МД, а также появление и увеличение наклона температурных зависимостей удельного сопротивления  $\rho$  (рис. 1) свидетельствует о появлении и увеличении энергии активации проводимости ( $\varepsilon_2$ -проводимость) вследствие инверсии типа абсолютного минимума зоны проводимости германия при  $X \parallel [001]$  ( $L\text{-}\Delta$ -инверсия), сопровождающейся значительным увеличением эффективной массы электронов [5]. При этом, в случае локализации электрона на водородоподобной примеси, будет существенно уменьшаться его боровский радиус ( $a_B = h^2\chi/m_e^*e^2$ ), что должно приводить при неизменном уровне легирования к переходу от металлического типа проводимости, характерного для вырожденных (при  $X = 0$ ) кристаллов, к активационной проводимости в области  $X > 2 \text{ ГПа}$ .

С локализацией электрона на диэлектрической стороне деформационно-индуцируемого перехода МД связано появление и увеличение энергии активации при возрастании одноосного давления  $X$  ( $X \parallel [111]$  в  $n\text{-Si}$  и  $X \parallel [001]$  в  $n\text{-Ge}$ ) (рис. 2). Видно, что характер приведенных зависимостей  $\varepsilon_a = f(X)$  существенно различается для  $n\text{-Si}$  и  $n\text{-Ge}$ , что связано с различными закономерностями перестройки зоны проводимости в кремнии (деформационно-индуцируемая непараболичность  $\Delta$ -долин) и в германии ( $L\text{-}\Delta$ -инверсия типа абсолютного минимума). Однако как в  $n\text{-Si}$ , так и в  $n\text{-Ge}$  с увеличением концентрации легирующей примеси область сильной локализации электрона смещается в область более высоких значений  $X$ .



**Рис. 4.** Зависимости поля ударной ионизации локализованных состояний мелких доноров  $E_{\text{br}}$  от одноосного давления  $X$  для  $\text{Ge(Sb)}$  с  $N_{\text{Sb}} = 1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (1) и  $\text{Si(P)}$  с  $N_{\text{P}} = 4.2 \cdot 10^{18}$  (2),  $6.2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (3).

Набор вольт-амперных характеристик при различных значениях  $X$ , характеризующий деформационно-индуцируемый переход МД, представлен на рис. 3 для кристаллов  $n$ -Si с концентрацией фосфора  $N_p = 4.7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Линейные ВАХ в области малых значений  $X$  трансформируются в нелинейные  $S$ -образные ВАХ в области больших одноосных давлений ( $X > 2.7 \text{ ГПа}$ ).

Ударная ионизация локализованных состояний электрона на примесном атоме характеризуется (как следует из ВАХ) как линейной (рис. 4, кривая 1), так и нелинейной (рис. 4, кривые 2, 3) зависимостью поля ударной ионизации  $E_{br}$  от одноосного давления  $X$ .

Полученные данные об энергии активации  $\varepsilon_a$ , которая возрастает с увеличением  $X$  до значений  $\varepsilon_a \geq 3 \text{ мэВ}$  (рис. 2),  $S$ -образный характер ВАХ в области больших одноосных давлений  $X$  (рис. 3), вид температурных зависимостей удельного сопротивления при разных значениях  $X$  (рис. 1) свидетельствуют о деформационно-индуцируемом переходе от металлической проводимости к  $\varepsilon_2$ -проводимости в кристаллах с концентрациями мелких примесей, существенно превышающих критическую, при которой осуществляется переход МД, связанный с изменением концентрации [6,7–9].

### 3. Заключение

В области концентраций мелких доноров, существенно превышающих критические концентрации перехода МД в кристаллах  $n$ -Si(P) и  $n$ -Ge(Sb), изучены закономерности деформационно-индуцируемого перехода от металлической проводимости к активационной проводимости. Совокупность экспериментальных данных — зависимость удельного сопротивления от одноосного давления  $X$ ,  $S$ -образный вид вольт-амперных характеристик, температурные зависимости удельного сопротивления при разных значениях  $X$ , зависимости энергии активации от  $X$ , зависимости поля ударной ионизации от  $X$  — свидетельствуют о реализации в вырожденных кристаллах  $n$ -Si(P) и  $n$ -Ge(Sb) перехода в области высоких одноосных давлений  $X$  к  $\varepsilon_2$ -проводимости.

### Список литературы

- [1] M.A. Paalanen, T.F. Rosenbaum, G.A. Thomas, R.N. Bhatt. Phys. Rev. Lett., **48**, 1284 (1982).
- [2] V.V. Baidakov, V.N. Ermakov, A.E. Gorin, V.V. Kolomoets, N.V. Stuchinska, V.A. Shenderovskii, D.P. Tunstall. Phys. St. Sol. (b), **198**, 149 (1996).
- [3] V.N. Ermakov, V.V. Kolomoets, L.T. Panasjuk, V.E. Rodionov. Proc. 20th Int. Conf. Phys. Semicond. (Thessaloniki, 1990) v. 3, p. 1803.
- [4] P.I. Baranskii, V.V. Kolomoets, S.S. Korolyuk. Phys. St. Sol. (b), **116**, K109 (1983).
- [5] В.В. Байдаков, Н.Н. Григорьев, В.Н. Ермаков, В.В. Коломоец, Т.А. Кудыкина. ФТП, **17**, 370 (1983).
- [6] T.F. Rosenbaum, K. Andres, G.A. Thomas, R.N. Bhatt. Phys. Rev. Lett., **45**, 1723 (1980).

- [7] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках (М., 1972).
- [8] C. Yamanouchi, K. Mizuguchi, W. Sasaki. J. Phys. Soc. Japan, **22**, 859 (1967).
- [9] P. Dai, Y. Zhang, M.P. Sarachik. Phys. Rev. B, **45**, 3984 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

### Breakdown of shallow donors in Si and Ge on the insulating side of strain-induced metal–insulator transition

S.I. Budzulyak, J.P. Dotsenko, V.N. Ermakov, V.V. Kolomoets, V.F. Machulin, L.I. Panasyuk, E.F. Venger

Institute of Semiconductor Physics,  
National Academy of Sciences of Ukraine,  
252650 Kiev, Ukraine

**Abstract** Impact ionization of electron localized states on the insulating side of strain-induced metal–insulator transition in Si(P) and Ge(Sb) crystals has been investigated for donor concentration essentially exceeding the critical transition concentration in unstrained crystals. Dependences of the activation energies and the impact ionization fields on the uniaxial pressure are obtained. Transition from the metallic type conductivity to  $\varepsilon_2$ -conductivity in the high uniaxial pressure region was analyzed on the basis of the transformation conduction band structure under a certain direction of the deformation axis in silicon and germanium crystals.