

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРОБОЙ ДОНОРНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИМЕСИ СУРЬМЫ В СПЛАВАХ $Ge_{1-x}Si_x$

© С.И. Шаховцова

Институт физики Национальной академии наук Украины,
252650 Киев, Украина
(Получена 11 января 1995 г. Принята к печати 15 мая 1995 г.)

Приводятся результаты исследования низкотемпературного примесного пробоя донорных состояний примеси сурьмы в монокристаллах полупроводниковых твердых растворов $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0.124$). На основании исследования эффекта Холла, проводимости и вольт-амперных характеристик в области примесного пробоя в условиях одноосной упругой деформации сжатия в направлении $\langle 100 \rangle$ показано, что с ростом содержания Si увеличивается энергия ионизации донорных состояний примеси Sb, а с ростом деформации уменьшается подвижность электронов. В условиях сложной структуры дна зоны проводимости вблизи инверсии зон типа $\langle 111 \rangle \rightarrow \langle 100 \rangle$ глубокие резонансные донорные состояния примеси Sb, расположенные обычно в разрешенной зоне, выходят в запрещенную зону. Однако с увеличением деформации поле пробоя возрастает только в сплавах в интервале составов, соответствующих $x < 0.08$, а для сплавов с $x > 0.08$ — уменьшается. Увеличение поля пробоя с ростом деформации коррелирует с наблюдаемым уменьшением подвижности и увеличением энергии ионизации доноров. Причина уменьшения поля пробоя с ростом деформации в настоящее время не ясна.

1. Введение

Основным следствием сплавления германия с кремнием является перестройка зонной структуры сплавов $Ge_{1-x}Si_x$ (x — мольная доля Si) в зависимости от содержания Si. При $x = 0.14$ минимумы зоны проводимости типа $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ расположены на одинаковом энергетическом уровне, а при $x > 0.14$ имеет место инверсия минимума проводимости типа $\langle 100 \rangle \rightarrow \langle 100 \rangle$. Другая возможность достижения состояния инверсии существует в условиях изотропной или одноосной, в направлении $\langle 100 \rangle$, упругой деформации сжатия. В сплавах с большим содержанием Si инверсия достигается при малых деформациях, например для сплавов с $x = 0.1$ при $P = 4$ тс/см². Для сравнения, в Ge инверсия наблюдается при всестороннем сжатии свыше 30 кбар [1] или одноосном сжатии более 24 тс/см², так что в фундаментальном аспекте сплавы $Ge_{1-x}Si_x$ являются удобным объектом для изучения особенностей переноса электронов в условиях двузонной проводимости.

Ударная ионизация мелких уровней в однородном полупроводнике осуществляется при низких температурах в однородном электрическом поле. Критерий примесного пробоя (ПП) для валентных полупроводников с простой структурой зоны проводимости имеет вид [3]

$$E_{br}\mu \simeq \varepsilon_i^a T^{-b}, \quad (1)$$

где E_{br} — поле пробоя, μ — подвижность электронов, ε_i — энергия ионизации доноров, a и b — численные коэффициенты, зависящие от механизма потерь энергии электронами ($a < 1$, $b < 1$). Факторами, определяющими величину поля пробоя в однородном образце при постоянной температуре, являются энергия ионизации донорного уровня ε_i и подвижность электронов μ .

Роль факторов, влияющих на примесный пробой в условиях перестройки зонной структуры, практически не изучена даже в однородных сплавах. В реальных образцах экспериментальные значения E_{br} в среднем на порядок ниже теоретических [4,5]. Последнее можно объяснить локальным развитием пробоя в местах неоднородностей сопротивления образцов, например на флуктуациях состава. Присутствие флуктуаций состава с геометрическими размерами в интервале $50 \div 700 \text{ \AA}$ заметно изменяет физические свойства сплавов. В процессах переноса проявляются особенности, связанные со статическим распределением компонентов сплава [6], а особенности механизма проводимости и механизма потерь энергии горячими носителями определяются соотношением между размерами неоднородностей и длиной свободного пробега носителей тока.

До сих пор количественное описание ПП в германии проводилось в предположении постоянства энергии ионизации примеси ε_i . В сплавах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ становится актуальным учет факторов, обусловленных не только трансформацией дна зоны проводимости, но и изменением энергии донорных состояний в запрещенной зоне [7]. Исходя из этого представляет интерес задача, заключающаяся в контролируемом изменении подвижности и энергетического положения примесных уровней с помощью внешних воздействий для выяснения их влияния на поле пробоя при условии сохранения неизменной неоднородности образцов. Это условие выполняется, например, в случае одноосной упругой деформации.

По сравнению с Ge в сплавах Ge-Si дополнительными видами рассеяния, ограничивающими подвижность электронов, являются «сплавное» и междолинное. Сплавное рассеяние, специфически присущее неупорядоченным системам, обусловлено рассеянием электронов в полях упругой деформации, возникающих из-за различия атомных объемов и атомных псевдопотенциалов компонентов сплава [8,9], роль его возрастает с ростом содержания Si. С уменьшением энергетической щели между неэквивалентными минимумами $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ возрастает междолинное рассеяние вида $\langle 111 \rangle \rightarrow \langle 100 \rangle$, вследствие чего уменьшается подвижность электронов в обоих типах минимумов.

Примесь замещения Sb создает в запрещенной зоне германия и кремния вблизи дна зоны проводимости систему локальных уровней донорного типа, энергетическое положение которых зависит от параметров и структуры зоны в точке соответствующего экстремума типа $\langle 111 \rangle$

или $\langle 100 \rangle$. Например, энергия основного состояния примеси Sb в германии вблизи дна зоны проводимости типа $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ равна соответственно $\varepsilon(L) = 9.6 \text{ мэВ}$, $\varepsilon(\Delta) = 36 \text{ мэВ}$ [10], а в кремнии — $\varepsilon(\Delta) = 39 \text{ мэВ}$. В простейшем случае невырожденной зоны уровни мелких доноров ε_i следуют за своими минимумами [11]. Известно также [12], что в германии любая примесь, обладающая валентностью, большей валентности тетраэдрической связи sp^3 , имеет энергетические состояния в разрешенной зоне, так называемые резонансные уровни.

Принципиальная возможность выхода резонансных состояний в запрещенную зону при изменении состава сплавов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ показана Ньюманом и Доу [7]. С примесью сурьмы в германии связаны глубокие резонансные уровни типа A_1 (синглет s -симметрии), T_2 (триплет p -симметрии) и большое число мелких уровней в зоне проводимости. Находясь в разрешенной зоне, уровни A_1 и T_2 не участвуют в явлениях переноса. Однако в условиях, при которых неэквивалентные по свойствам симметрии экстремумы почти вырождены по энергии, резонансные состояния A_1 и мелкие донорные состояния $\varepsilon(\Delta)$, связанные с минимумами $\langle 100 \rangle$, выходят в запрещенную зону. В этом случае уровень A_1 , в отличие от $\varepsilon(L)$ и $\varepsilon(\Delta)$ ведет себя как глубокий центр, а донорный уровень примеси определяется наиболее низким по энергии уровнем в запрещенной зоне.

Теоретическая зависимость энергетического положения донорных уровней Sb в сплавах от концентрации Si, рассчитанная с точностью $\pm 0.02 \text{ эВ}$, опубликована в работе [9] и схематически представлена на рис. 1. Видно, что с ростом содержания Si происходит эволюция донорного уровня Sb от «мелкого» $\varepsilon(L)$ к «глубокому» A_1 и снова к мелкому $\varepsilon(\Delta)$. При $x > 0.7$ уровень A_1 вновь становится резонансным, уходя в зону проводимости типа $\langle 100 \rangle$.

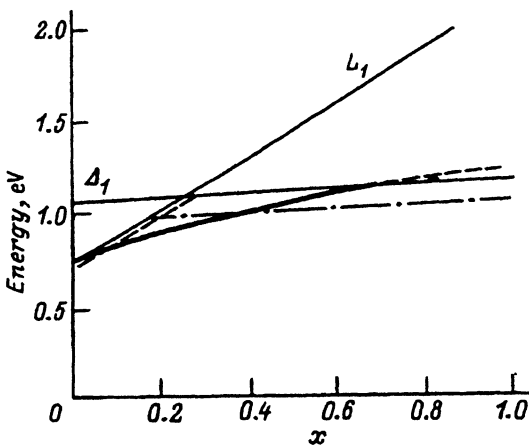


Рис. 1. Схематическая иллюстрация зависимости энергетического положения уровней $\varepsilon(L)$, $\varepsilon(\Delta)$ и A_1 от состава сплава $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. Положение минимумов $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ отмечено сплошными, а уровней ε_i — штриховой и штрихпунктирной прямыми линиями. Положение глубокого уровня A_1 показано жирной линией для составов $0 \leq x \leq 0.7$, а его резонансного состояния выше дна зоны проводимости — штриховой линией [9].

Цель настоящей работы — экспериментальное изучение вольт-амперных характеристик в области примесного пробоя в сплавах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ ($0 < x < 0.12$) в условиях трансформации дна зоны проводимости и сдвига донорных уровней в запрещенной зоне, а также оценка вклада этих процессов в изменение E_{br} .

2. Образцы и методика исследований

Монокристаллы сплавов $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ выращены вытягиванием из расплава по методу Чохральского. Сплавы легировались сурьмой в концентрации $4 \cdot 10^{14} \div 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, максимальное содержание кремния достигало величины $x = 0.124$. Состав сплава контролировался методами прецизионного взвешивания и рентгеноспектрального микроанализа на установке «Суперзонд-733». В сплавах состава $x \leq 0.04$ разброс концентрации Si по длине образца не превышал 0.1%, но при $x > 0.1$ отклонение от среднего уровня легирования германия кремнием на отдельных участках образца достигало 25%.

Исследовались эффект Холла, проводимость и вольт-амперные характеристики (ВАХ) в области примесного пробоя в условиях одноосного сжатия образцов. Давление P и электрическое поле E прикладывались вдоль длинной оси образца в направлении $P \parallel E \parallel (100)$, максимальное сжатие достигало 15 тс/см^2 . Исследования ПП проводились при температурах $5 \div 30 \text{ К}$, методика описана в работах [4,5]. Энергия ионизации донорных уровней рассчитывалась из температурной зависимости холловской концентрации электронов.

Отметим, что результаты проведенного нами исследования донорных уровней в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ методом инфракрасной спектроскопии оказались малоинформативными, подобно известным результатам [13] для кремниепободных сплавов. Из-за сильного уширения спектральных линий не удалось разрешить тонкую структуру спектров поглощения в области $60 \div 80 \text{ см}^{-1}$ при 4 К (поглощение атомами Sb) даже для сплавов с $x = 0.001$, а при $x \geq 0.01$ тонкая структура вообще исчезала.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

3.1. Концентрационная зависимость $\epsilon_i(x)$. За изменением энергетического спектра донорных уровней примеси Sb можно проследить, измеряя коэффициент Холла и проводимость в образцах с разным содержанием Si. Экспоненциальная зависимость коэффициента Холла и проводимости от температуры в области вымораживания электронов позволяет определить глубину залегания доноров. На рис. 2. приведены температурные зависимости холловской концентрации электронов для двух образцов сплавов с $x = 0.07$ и 0.124 при концентрации доноров $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Вычисленная величина ϵ_i (синглетного состояния донорного уровня Sb) равна соответственно 0.01 и 0.025 эВ. При расчете согласно известному соотношению $\epsilon_i(x) \sim 1/\kappa^2(x)$ учитывалась зависимость диэлектрической проницаемости $\kappa(x)$ от содержания Si, экспериментально установленная в работе [14].

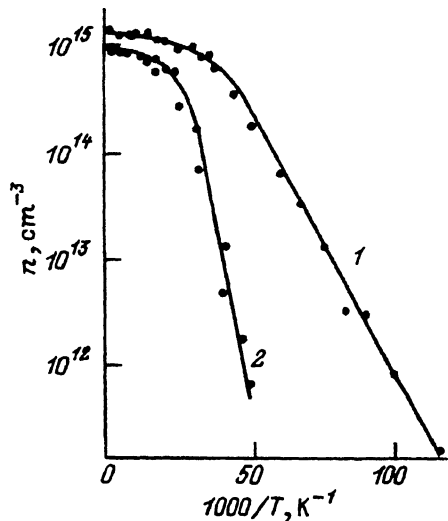


Рис. 2. Температурная зависимость холловской концентрации электронов n в сплавах с $x = 0.07$ (кривая 1) и $x = 0.124$ (кривая 2). $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

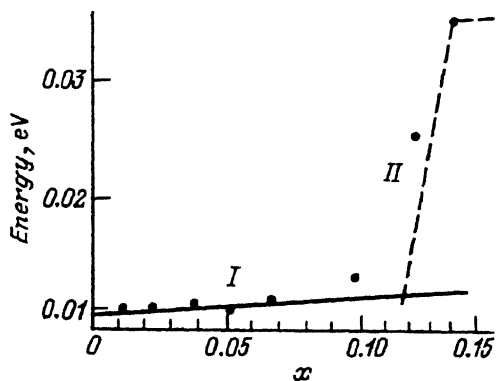


Рис. 3. Зависимость энергии ионизации основного состояния донорного уровня Sb от содержания Si в сплавах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. Точки — эксперимент, линии — расчет, $\epsilon(L)$ — сплошная линия, $\epsilon(\Delta)$ — штриховая.

На концентрационной зависимости $\epsilon_i(x)$ (рис. 3) можно выделить два участка. На участке I в интервале составов $0 < x < 0.11$ увеличение ϵ_i на 15% коррелирует с уменьшением диэлектрической проницаемости $\kappa(x)$ от 15.8 до 14.7, а положение уровня ϵ_i соответствует энергии основного состояния донорного уровня Sb $\epsilon_i(L)$ (сплошная линия), что согласуется также с результатами, опубликованными в работе [15]. Согласно расчету, проведенному с учетом смещения минимумов $\langle 100 \rangle$ при изменении состава сплава, уровень $\epsilon(\Delta)$ (значения $\epsilon(\Delta)$ показаны штриховой линией) выходит в запрещенную зону при $x > 0.11$, а при $x = 0.12$ уровни $\epsilon(L)$ и $\epsilon(\Delta)$ расположены на одинаковом расстоянии от дна минимума $\langle 111 \rangle$. На участке II для составов с $0.11 < x < 0.14$ экспериментальные значения ϵ_i превышают значения $\epsilon(L)$, полученные с учетом зависимости $\kappa(x)$. В линейном по x приближении скорость изменения экспериментальных значений ϵ_i равна 0.43 эВ на мольную долю Si, что меньше скорости «выдвижения» уровня $\epsilon(\Delta)$ в запрещенную зону, равной 1.29 эВ на мольную долю Si.

Расхождение примерно в 3 раза расчетной и экспериментальной скоростей изменения положения ϵ_i на участке II может быть объяснено фактом появления в запрещенной зоне резонансных состояний типа A_1 , однако количественные оценки их энергетического положения в настоящее время провести невозможно. Точность определения теоретического значения энергии ионизации уровней резонансных состояний составляет ± 0.2 эВ [7], поэтому пока единственно достоверным способом определения ϵ_i является эксперимент.

3.2. Расщепление основного состояния примеси Sb при деформации $\mathbf{P} \parallel \langle 100 \rangle$. При деформации в направлении $\mathbf{P} \parallel \langle 100 \rangle$ можно выделить три группы долин: самая низкая по энергии группа из четы-

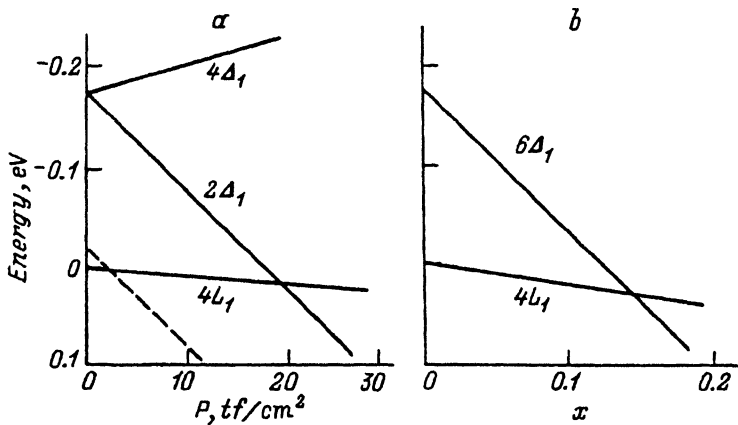


Рис. 4. Зависимость энергетического положения минимумов зоны проводимости Ge от величины давления $P \parallel \langle 100 \rangle$ (а) и от содержания Si (б). Штриховой линией отмечено положение двух самых низких минимумов типа $\langle 100 \rangle$ в сплаве с $x = 0.1$.

рех долин $\langle 111 \rangle$, следующая — из двух долин $\langle 100 \rangle$ и затем группа из четырех долин $\langle 100 \rangle$. Смещение минимумов в Ge в зависимости от содержания Si и величины деформации, рассчитанное в соответствии с теорией деформационного потенциала [16], показано на рис. 4 (отсчет энергии производится от минимума $\langle 111 \rangle$ зоны проводимости). Дополнительного расщепления состояний $\epsilon(L)$ при деформации $P \parallel \langle 100 \rangle$ не происходит, так как деформация симметрична по отношению к долинам $\langle 111 \rangle$.

Основное состояние примеси Sb в Ge, принадлежащее $\langle 100 \rangle$ минимумам, шестикратно вырождено и при учете поправок на многоэллипсоидную зону проводимости расщеплено на три состояния. Самое низкое состояние — синглет $I_1 = 36$ мэВ, от него на величину химического сдвига $\Delta = I_1 - I_2 = 9.84$ мэВ расположен дублет I_2 и практически на том же уровне — триплет [11]. В деформированном кристалле край зоны $\langle 100 \rangle$, а вместе с ним и донорные состояния $\epsilon(\Delta)$ смещаются на одинаковую величину и, кроме того, происходит расщепление вырожденных состояний. Для сдвига примесных уровней от их общего сдвига в деформированном кристалле справедливы выражения: для синглета —

$$\Delta E_1^{im} = \frac{\Xi_u^{100} \epsilon'_{zz}}{6} + \frac{\Delta}{2} - \frac{1}{2} (\Xi_u^{100} \epsilon'_{zz})^2 + \Delta^2 + \frac{2}{3} \Delta \Xi_u^{100} \epsilon'_{zz}, \quad (2)$$

для дублета —

$$\Delta E_2^{im} = \frac{\Xi_u^{100} \epsilon'_{zz}}{6} + \frac{\Delta}{2} + \frac{1}{2} (\Xi_u^{100} \epsilon'_{zz})^2 + \Delta^2 + \frac{2}{3} \Delta \Xi_u^{100} \epsilon'_{zz}, \quad (3)$$

для триплета —

$$\Delta E_2^{im} = \Delta - \frac{1}{3} \Xi_u^{100} \epsilon'_{zz}, \quad (4)$$

где тензор деформации

$$\varepsilon'_{zz} = -P \frac{2C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})},$$

P — давление, константа деформационного потенциала $\Xi_u^{100} = 10.4 \text{ эВ}$, а упругие константы для сплавов брались равными германиевым [17].

Энергетическое положение самого низкого синглетного состояния уровня сурьмы в сплавах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с давлением определяется формулой

$$\varepsilon(\Delta) = \Delta E^{(2)} - \Delta E_1^{im}, \quad (5)$$

где $\Delta E^{(2)}$ — изменение энергетического положения двух минимумов типа $\langle 100 \rangle$ относительно минимумов типа $\langle 111 \rangle$:

$$\begin{aligned} \Delta E^{(2)} = & -0.18 + 1.29x - P \frac{\Xi_d^{111} + \frac{1}{3}\Xi_u^{111}}{C_{11} + 2C_{12}} + P \frac{\Xi_d^{100}}{C_{11} + 2C_{12}} + \\ & + P \frac{\Xi_d^{100}(C_{11} + C_{12})}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}, \end{aligned} \quad (6)$$

здесь $\Xi_d^{111} = -7.65 \text{ эВ}$, $\Xi_u^{111} = 17 \text{ эВ}$ и $\Xi_d^{100} = 0.53 \text{ эВ}$.

Таким образом, с увеличением деформации энергия синглетного состояния возрастает и $\varepsilon(\Delta)$ приближается ко дну $\langle 111 \rangle$ зоны проводимости, а дублет и триплет удаляются от нее. Средняя скорость изменения энергии синглетного состояния составляет 0.014 эВ на 1 тс/см^2 . На рис. 5 показаны расчетные зависимости энергетического положения синглетного состояния $\varepsilon(\Delta)$ в сплавах, содержащих кремний в количестве $x = 0.015, 0.04, 0.085$ и 0.12 . Видно, что для сплавов с $x = 0.015$ инверсия наступает при 12 тс/см^2 , а уровень $\varepsilon(\Delta)$ выходит в запрещенную зону еще раньше. Условия выхода резонансных состояний $\varepsilon(\Delta)$ в запрещенную зону облегчаются при уменьшении энергетической щели между минимумами $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$.

Благодаря сильному изменению положения уровня $\varepsilon(\Delta)$ с давлением в сплавах так же, как в деформированном кремнии [18], становится значительным изменение концентрации носителей тока при низких температурах в области инверсии.

3.3. Примесный пробой в сплавах. В соответствии с теорией [3] в однородных образцах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ увеличение поля пробоя E_{br} может происходить за счет увеличения энергии ионизации донорных уровней или уменьшения подвижности электронов. Влияние указанных факторов удастся разделить в эксперименте.

В сплавах с высоким содержанием Si ($x > 0.08$) из-за доминирующего влияния сплавного рассеяния при низких температурах подвижность электронов мала и практически не зависит от x . Можно видеть, что в этой ситуации зависимость $E_{br}(x)$ отражает изменение $\varepsilon_i(x)$. Например, измеренные в образцах с $x = 0.07$ и 0.124 значения E_{br} равны соответственно 240 и 440 В/см , а энергия ионизации доноров — 0.01 и 0.025 эВ (холловская подвижность при 12 К равна соответственно 1000 и $800 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$), что качественно соответствует зависимости (1).

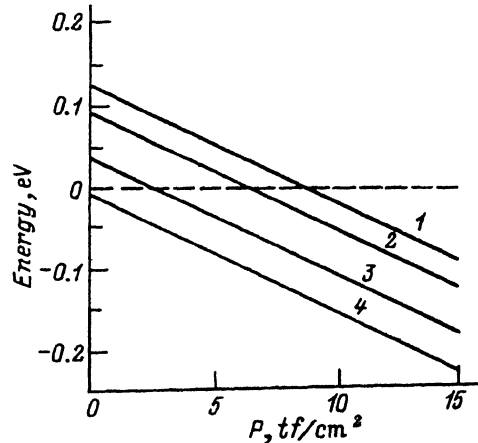


Рис. 5. Энергетическое положение синглетного состояния примеси Sb $\epsilon(\Delta)$ относительно дна зоны проводимости типа I_{1C} при деформации $P \parallel \langle 100 \rangle$ в сплавах с $x = 0.015, 0.04, 0.085$ и 0.12 (кривые 1-4 соответственно). За нуль энергии принято положение дна минимумов типа $\langle 111 \rangle$. $N_D = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

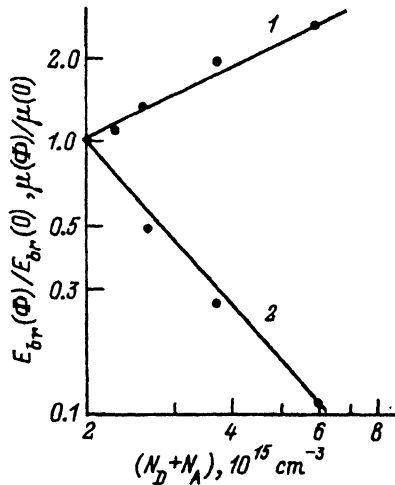


Рис. 6. Зависимость поля пробоя $E_{br}(\Phi)/E_{br}(0)$ при 5 K (кривая 1) и холловской подвижности $\mu(\Phi)/\mu(0)$ при 12 K (кривая 2) от концентрации заряженных дефектов $N_D + N_A$ в сплаве с $x = 0.026$, облученном γ -квантами. Максимальная доза $\Phi = 1.2 \cdot 10^9 \text{ Р}$, $\mu(0) = 1.7 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $E_{br}(0) = 21 \text{ В/см}$.

В сплавах одинакового состава, но содержащих разное количество заряженных дефектов, увеличение E_{br} может происходить за счет уменьшения подвижности электронов с возрастанием роли примесного рассеяния. На рис. 6 приведены типичные зависимости относительных значений холловской подвижности μ и поля пробоя E_{br} от концентрации заряженных дефектов $N_D + N_A$ для сплава с $x = 0.026$. Дефекты акцепторного типа создавались облучением образцов γ -квантами ^{60}Co , здесь $N_{D,A}$ — концентрация доноров или акцепторов, $\mu(0, \Phi)$ и $E_{br}(0, \Phi)$ — холловская подвижность и поле пробоя в исходных или облученных дозой Φ образцах. Разная величина эффектов $\mu(\Phi)/\mu(0)$ и $E_{br}(\Phi)/E_{br}(0)$ отражает особенности пробоя, связанные с его локальным развитием в реальных неоднородных образцах.

На рис. 7 приведены типичные экспериментальные зависимости поля пробоя и подвижности электронов от давления для деформированных в направлении $\langle 100 \rangle$ образцов с $x = 0.04$ и 0.085 . Здесь $\mu(0, P)$ и $E_{br}(0, P)$ — холловская подвижность и поле пробоя в исходных и деформированных образцах. Видно, что с ростом деформации подвижность электронов μ уменьшается в сплавах во всем интервале составов (кривые 1' и 2'). В области давлений, соответствующих инверсии, наблюдается особенность на зависимости $E_{br}(P)$ в сплавах с $x < 0.08$ (кривая 2). В сплавах с $x > 0.08$ поле пробоя с ростом деформации монотонно уменьшается (кривая 1). В сплавах с большим содержанием Si наблюдалось и более сложное, немонотонное изменение поля пробоя с деформацией [5].

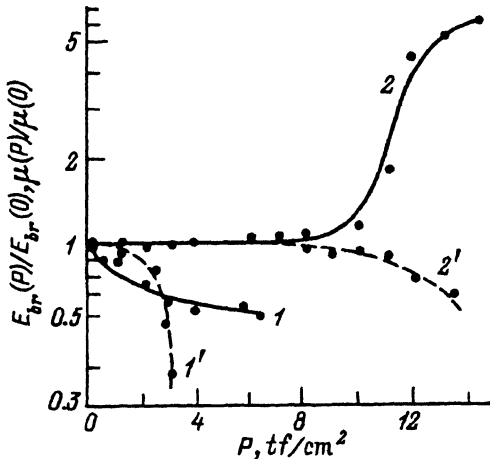


Рис. 7. Изменение поля пробоя $E_{br}(P)/E_{br}(0)$ при 5 К (кривые 1, 2) и подвижности электронов $\mu(P)/\mu(0)$ при 20 К (кривые 1', 2') с увеличением давления P . Для сплавов с $x = 0.085$ (кривые 1, 1') $E_{br}(0) = 210$ В/см, $\mu(0) = 850$ см²/В · с; для сплавов с $x = 0.04$ (кривые 2, 2') $E_{br}(0) = 38$ В/см, $\mu(0) = 4200$ см²/В · с; $P \parallel \langle 100 \rangle$.

Нам не известны работы, в которых развита теория резонансных состояний примеси в деформированных сплавах $Ge_{1-x}Si_x$, связанных с перестройкой зонной структуры сплавов. Можно лишь предположить, что в отличие от водородоподобных состояний донорных примесей $\epsilon(L)$ и $\epsilon(\Delta)$ глубокие резонансные состояния типа A_1 имеют большие барические коэффициенты.

Трансформация с давлением зоны проводимости приводит к переселению электронов в минимумы типа $\langle 100 \rangle$, поэтому величина средней подвижности вблизи области инверсии зависит от степени заселенности минимумов и механизмов рассеяния [19]. Изменение с деформацией физических параметров долин, таких как эффективные массы, константы деформационного потенциала, упругие константы, диэлектрическая постоянная, вносит малый вклад в подвижность [20]. Расчет подвижности в сплавах, проведенный нами в приближении времени релаксации (неопубликованные результаты), показал, что в условиях, близких к инверсии, возрастает рассеяние между неэквивалентными минимумами $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, так что междолинное рассеяние наряду со сплавным основную роль в ограничении подвижности электронов. При низких температурах необходимо учитывать также рассеяние заряженными примесями.

В соответствии с теорией [7] в сплавах с $x \leq 0.08$ уровень A_1 еще не становится связанным уровнем, поэтому увеличение E_{br} с ростом деформации связано только с уменьшением подвижности. Уменьшение E_{br} с давлением в сплавах с $x \geq 0.08$ заставляет предположить, что в узкой области давлений, близкой к инверсии, примесный пробой определяется не только поведением подвижности, но и динамикой донорных состояний $\epsilon(L)$ и резонансных состояний A_1 и $\epsilon(\Delta)$.

В заключение отметим, что представленные результаты являются доказательством определяющего влияния динамики примесных донорных состояний на явления переноса вблизи области инверсии экстремумов в зоне проводимости в сплавах $Ge_{1-x}Si_x$.

Автор выражает глубокую признательность О.Г. Сарбею за внимание к работе и обсуждение результатов.

Список литературы

- [1] F. Bassani, D. Brust. Phys. Rev., **131**, 1524 (1963).
- [2] П.И. Баранский, В.В. Колomoец, Б.А. Сусь, В.В. Шаповалов. ФТП, **13**, 602 (1979).
- [3] В.А. Чуенков. ФТТ, **2**, (1960).
- [4] Ю.А. Семенюк, С.И. Шаховцова, И.Н. Белокурова. ФТП, **24**, 1272 (1990).
- [5] Ю.А. Семенюк, С.И. Шаховцова, И.Н. Белокурова. ФТП, **25**, 1553 (1991).
- [6] В.И. Шаховцов, С.И. Шаховцова, Л.И. Шпинар, И.И. Ясковец. ФТП, **23**, 48 (1989).
- [7] K.E. Newman, J.D. Dow. Phys. Rev. B, **30**, 1929 (1984).
- [8] M. Glicksman. Phys. Rev., **111**, 125 (1958).
- [9] В.Д. Искра. Изв. вузов. Физика, № 5, 47 (1987).
- [10] P.I. Baranskii, V.V. Baidakov, V.N. Ermakov, N.N. Grigorev, V.V. Kolomoets, T.A. Kudykuna. Phys. St. Sol. (b), **114**, k101 (1982).
- [11] Г.Л. Вир, Г.Е. Пикус. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [12] H.P. Hjalmarson, P. Vogl, D.J. Wolford, J.D. Dow. Phys. Rev. Lett., **44**, 810 (1980).
- [13] R. Krussmann, H. Vollmer, R. Labusch. Phys. St. Sol. (b), **118**, 275 (1983).
- [14] E. Schmidt. Phys. St. Sol., **27**, 57 (1968).
- [15] И.Н. Белокурова, В.Ф. Дегтярев, В.С. Земсков, Е.В. Скуднова. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **14**, 2119 (1978).
- [16] К. Херринг, Е. Фогт. В кн.: *Проблемы физики полупроводников* (М., Физматгиз, 1957).
- [17] М. Аше, З.С. Грибников, В.В. Митин, О.Г. Сарбей. *Горячие электроны в многослойных полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1957).
- [18] M. Asche, E. Russu. Phys. St. Sol. (b), **66**, 499 (1974).
- [19] K. Fletsher, G.D. Pitt. J. Phys. C, **4**, 1822 (1971).
- [20] C.N. Ahmad, A.R. Adams. Phys. Rev. B, **34**, 2319 (1986).

Редактор Т.А. Полянская

Low temperature impact ionization of donor states of Sb in $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ alloys

S.I. Shahovtsova

Institute of Physics, National Academy of Science of Ukraine, 252650 Kiev, the Ukraine

Investigations of impact ionization of Sb donor states in semiconductor $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ alloys ($0 \leq x \leq 0.124$) at low temperatures and uniaxial stress are reported. Current-voltage characteristics in the region of impurity breakdown, Hall-effect and resistivity measurements have been made on samples at uniaxial stress applied along (100) direction. It is shown that the breakdown field in alloys increases with stress at $0 < x < 0.08$, but decreases at $x > 0.08$. The increase of breakdown field with stress correlates with electron mobility decrease.