

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРИМЕСНЫЙ ПРОБОЙ В ОДНОСНО ДЕФОРМИРОВАННЫХ СПЛАВАХ ГЕРМАНИЙ—КРЕМНИЙ

Семенюк Ю. А., Шаховцова С. И., Белокурова И. Н.

Проведен анализ экспериментальных исследований примесного пробоя в односно деформированных сплавах Ge—Si, легированных сурьмой и содержащих до 10 ат% Si. Определена зависимость поля пробоя от содержания кремния, а также величины и направления одноосного сжатия для случаев $P \parallel [111]$, $P \parallel [100]$. Воздействие различных факторов на пробой обсуждается в связи с изменением механизмов рассеяния при изменении зонной структуры сплавов. Особенности примесного пробоя, как например отсутствие корреляции в изменении поля пробоя и подвижности носителей тока, качественно объясняются в рамках модели развития пробоя в неоднородных полупроводниках.

Введение. Примесный пробой (ПП) в полупроводниках *n*-типа проводимости обусловлен лавинообразным размножением электронов в зоне проводимости, происходящем вследствие ударной ионизации нейтральных доноров. ПП протекает обратимо. Впервые ПП был обнаружен в германии при 4.2 К в полях порядка нескольких вольт на сантиметр [1, 2]. В теории ПП для валентных полупроводников, в которой учитывалось рассеяние носителей тока на фононах и примесях, получено количественное согласие с экспериментом для германия [3]. Произведение пробивного поля на подвижность $\mu E_{пр} \approx \text{const}$ и есть функция ϵ_i/kT , где ϵ_i — энергия ионизации уровня мелких доноров.

ПП в сплавах германий—кремний изучен в [4]. В сплавах изменяется величина ϵ_i , а в дополнение к традиционному механизму рассеяния носителей тока оказывается значительным вклад рассеяния на флуктуациях состава. Влияние на величину пробивного поля состава сплава, температуры и кристаллографической ориентации обсуждалось в рамках особенностей механизмов рассеяния в сплавах. Обращает на себя внимание экспериментальный факт существенно заниженной (в среднем на порядок) величины $E_{пр}$ в сплавах по сравнению с теоретической, несмотря на то, что подвижность по сравнению с германием значительно уменьшена.

В сплавах, как и в германии, ширина запрещенной зоны определяется положением четырех минимумов L_1 в точке [111] зоны Бриллюэна, в которых в условиях теплового равновесия находится большинство электронов проводимости. Минимум Γ_2' в точке [000] лежит выше минимумов L_1 и Δ_6 ($\Gamma_2' - L_1$) = 0.14 эВ. Его влияние на кинетические явления мало из-за малости эффективной массы и плотности состояний. Шесть эквивалентных минимумов Δ_1 в точке [100] отделяют от L_1 щель, равная при 4.2 К Δ_6 ($\Delta_1 - L_1$) = 0.18 эВ в чистом германии и уменьшающаяся до нуля при повышении концентрации кремния до ~14 ат%. В предположении линейного закона изменения щели составляет 0.013 эВ на 1 ат% Si. В сплавах не обнаружено изменения в зависимости от состава эффективных масс, соответствующих L_1 - и Δ_1 -минимумам, поэтому при оценках используются значения параметров зоны проводимости германия.

Наиболее чувствительными к деталям зонной структуры являются гальваномагнитные явления. Целью настоящей работы было изучение ВАХ в области ПП в сплавах, подвергнутых одноосному сжатию. Выбранные направления деформации $P \parallel [111]$, $P \parallel [100]$ являются полярными с точки зрения неэкви-

валентности расположения L_1 - и Δ_1 -долин относительно этих направлений. Одноосная упругая деформация германия и сплавов вызывает изменение их энергетической структуры и, следовательно, междолинного рассеяния [5, 6].

1. Методика эксперимента

Измерения пьезосопротивления, пьезохоллэффента и ВАХ в области пробы в условиях одноосного сжатия проведены на образцах сплавов Ge—Si n -типа проводимости, легированных сурьмой в концентрации $4 \cdot 10^{14}$ — $8 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. Максимальное содержание кремния составляло 10.5 ат%. Кристаллы выращены методом Чохральского. Образцы изготавливались в форме параллелепипедов размерами $1 \times 1 \times (8-10)$ мм вдоль осей [111] и [100]. Давление при-

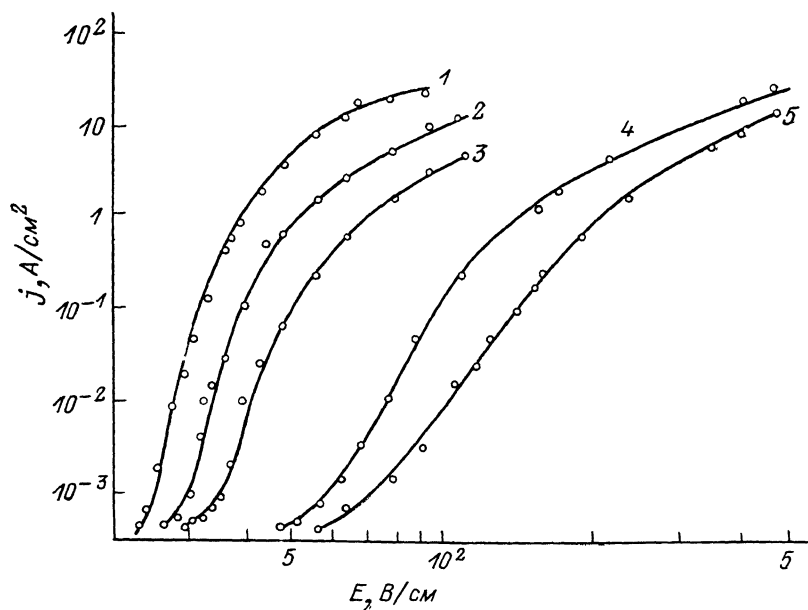


Рис. 1. ВАХ Ge—Si с 4 ат% Si (с 49, № 1) при следующих давлениях. Давление, т/см 2 : 1 — 0, 2 — 11, 3 — 12, 4 — 13 и 5 — 15; $E \parallel P \parallel [100]$, $T=5$ К.

кладывалось вдоль длинной оси образца, величина его достигала 15 т/см 2 . Исследования проводились в интервале температур 5—300 К. ВАХ измерялись в режиме постоянного тока или напряжения по импульсной методике или на постоянном токе в зависимости от величины сопротивления образца, аналогично описанному в [4]. Основные характеристики образцов приведены в таблице.

Образец	Si, ат%	Ориентация	$N_D - N_A$, см $^{-3}$	N_A , см $^{-3}$	μ_{300K} см 2 /В · с	μ_{77K} см 2 /В · с	$E_{пр}$, В/см 5К, $P=0$
47; № 1	0	111	$2 \cdot 10^{14}$	$6.9 \cdot 10^{13}$	$3.3 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^4$	4.2
с 3; № 17	1.5	111	$7 \cdot 10^{14}$	$2.2 \cdot 10^{14}$	$2.85 \cdot 10^3$	$1.35 \cdot 10^4$	18
с 25; № 9	8.5	111	$8.7 \cdot 10^{14}$	$7.7 \cdot 10^{15}$	460	750	39.5
с 49; № 1	4	100	$4.3 \cdot 10^{14}$	$1.9 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	38
с 57; № 1-ю	8.5	100	$1.5 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	240
с 57; № 6	10.4	100	$8.2 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	470	950	440

2. Результаты эксперимента

В экспериментальных исследованиях примесного пробы в условиях одноосного сжатия в направлениях [111] и [100] установлено, что в сплавах характер зависимости $E_{пр}(P)$ и вид ВАХ существенно зависят от содержания крем-

ния. Увеличение $E_{np}(P)$ типично для сплавов с содержанием кремния меньше 8 ат%, а уменьшение E_{np} с давлением — для сплавов с большим (8 ат%) содержанием кремния. Эта граница в некоторой степени условна и зависит от

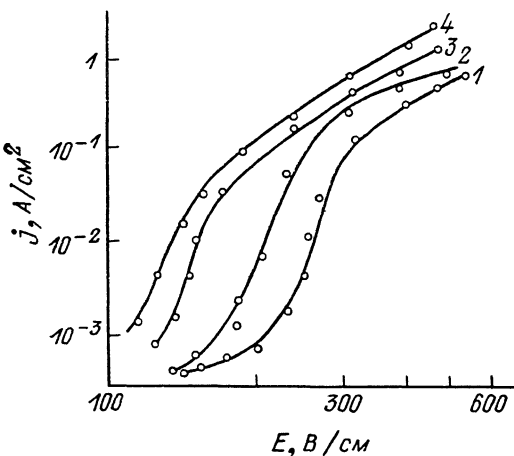


Рис. 2. ВАХ Ge—Si с 8.5 ат% Si (с 57, № 1-ю) при следующих давлениях.

Давление, $\tau/\text{см}^2$: 1 — 0, 2 — $\frac{1}{2}$, 3 — 2 и 4 — 5; $E \parallel P \parallel [100]$, $T=5$ К.

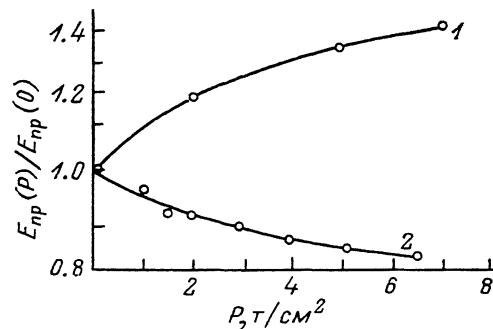


Рис. 3. Зависимость относительной величины поля пробоя от давления при $E \parallel P \parallel [111]$, $T=5$ К в Ge—Si с 1.5 ат% Si (с 3, № 17) — 1 и Ge—Si с 8.5 ат% Si (с 25, № 9) — 2.

температуры и направления деформации. Специфической особенностью ВАХ сплавов с малым содержанием кремния является наличие резко выраженного участка возрастания тока в области пробоя. С увеличением содержания крем-

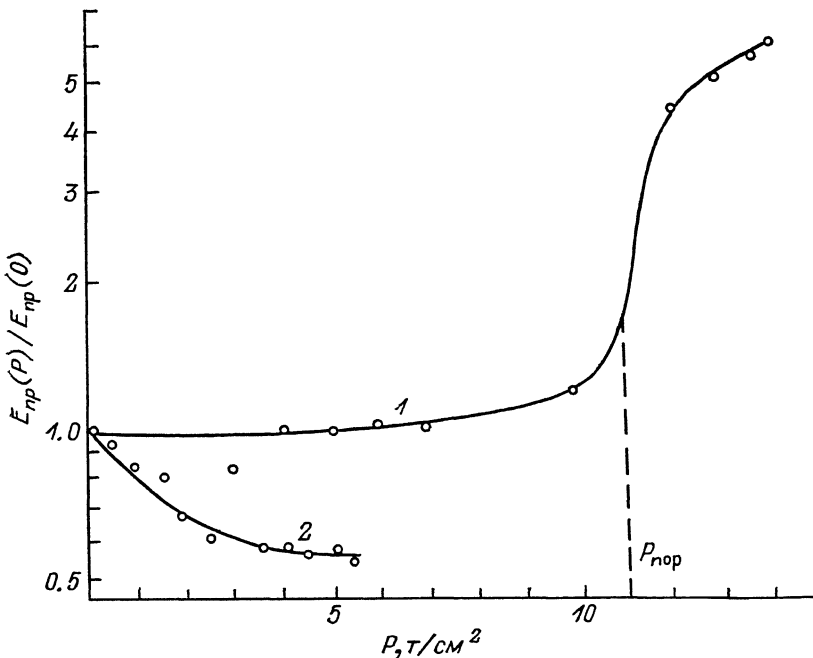


Рис. 4. Зависимость относительной величины поля пробоя от давления при $E \parallel P \parallel [100]$, $T=5$ К в Ge—Si с 4 ат% Si (с 49, № 1) — 1 и Ge—Si с 8.5 ат% Si (с 57, № 1-ю) — 2.

ния ВАХ в области пробоя становятся плавными и это качество усиливается при повышении температуры и давления. Типичные для сплавов ВАХ, измеренные при температуре 5 К в направлении $E \parallel P \parallel [100]$, приведены на рис. 1 и 2. В Ge—Si с 4 ат% Si величина E_{np} возрастает с увеличением давления

(рис. 1), а в Ge—Si с 8.5 ат% Si E_{np} уменьшается (рис. 2). На обоих рисунках показано выполаживание ВАХ в области пробоя при увеличении концентрации кремния или давления. Аналогичные зависимости получены для направления деформации $E \parallel P \parallel [111]$.

Типичные зависимости относительного поля пробоя $E_{np}(P)/E_{np}(0)$ от величины деформации приведены на рис. 3 и 4 соответственно в направлении $P \parallel [111]$ для Ge—Si с 1.5 и 8.5 ат% Si, при $P \parallel [100]$ для Ge—Si с 4 и 8.5 ат% Si. В случае $E \parallel P \parallel [111]$ для сплавов с малой концентрацией кремния зависимость $E_{np}(P)$ имеет вид монотонно возрастающей кривой без особенностей (рис. 3, кривая 1). Для сплавов с большой концентрацией кремния E_{np} уменьшается с давлением (рис. 3, кривая 2). Для ориентации $P \parallel [100]$ на зависимости $E_{np}(P)$ сплавов с малой концентрацией кремния можно выделить три характерных участка (рис. 4, кривая 1). На первом участке E_{np} от давления не зависит. По достижении значения, обозначенного на рисунке $P_{пор}$ (поро-

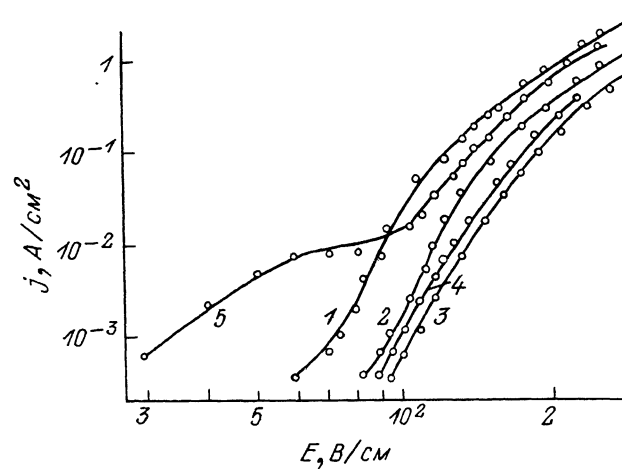


Рис. 5. ВАХ Ge—Si с 10.4 ат% Si (с 57, № 6) при следующих давлениях. Давление, т/см²: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 4, 4 — 5 и 5 — 6; $E \parallel P \parallel [100]$, $T = 5$ К.

говое), наблюдается резкое увеличение E_{np} . На третьем участке зависимость $E_{np}(P)$ имеет тенденцию к насыщению. Величина $P_{пор}$ уменьшается в сплавах с увеличением концентрации кремния: в германии она равна 21 т/см², а в Ge—Si с 4 ат% Si — 15 т/см². Для сплавов с содержанием более 8 ат% Si зависимость $E_{np}(P)$ монотонно уменьшается с давлением (рис. 4, кривая 2), как и в случае $P \parallel [111]$.

ВАХ сплавов с высоким содержанием кремния при $P \parallel [100]$ часто имеют немонотонную зависимость $E_{np}(P)$, как показано на рис. 5 для Ge—Si с 10 ат% Si. С увеличением давления E_{np} вначале возрастает (кривые 1—3), затем уменьшается (кривая 4), а ВАХ в области пробоя трансформируется (кривая 5).

3. Обсуждение результатов

Изменение степени заселенности долин и их вклад в явления переноса являются определяющими при анализе ВАХ. Перечислим основные эффекты в изменении зонной структуры сплавов, к которым приводит одноосная деформация.

1. $P \parallel E \parallel [111]$. Изменение концентрации равновесных электронов в нижней L_1 -долине вследствие изменения энергетического положения синглетного состояния примесного центра мелкого донора (сурьмы).

2. $P \parallel E \parallel [111]$. Расщепление при одноосном сжатии четырех L_1 -долин и связанное с этим переселение электронов в одну нижайшую L_1 -долину с меньшей подвижностью.

3. $\mathbf{P} \parallel \mathbf{E} \parallel [100]$. Встречные смещения по энергии четырех L_1 -долин и двух Δ_1 -долин, переселение электронов в две нижайшие долины с меньшей подвижностью.

4. $\mathbf{P} \parallel \mathbf{E} \parallel [100]$. Трансформирование зоны проводимости и выход в запрещенную зону состояний мелкого донора (сурьмы), связанных с Δ_1 -минимумами.

Рассмотрим влияние каждого из этих факторов на ВАХ сплавов в области пробоя.

1. Проведенные нами расчеты показали, что эффект изменения концентрации равновесных электронов в германии, легированном сурьмой, вследствие изменения энергетического положения синглетного состояния донорного уровня при $\mathbf{P} \parallel [111]$ [7] в условиях нашего эксперимента пренебрежимо мал в отличие от большого эффекта в кремнии [8].

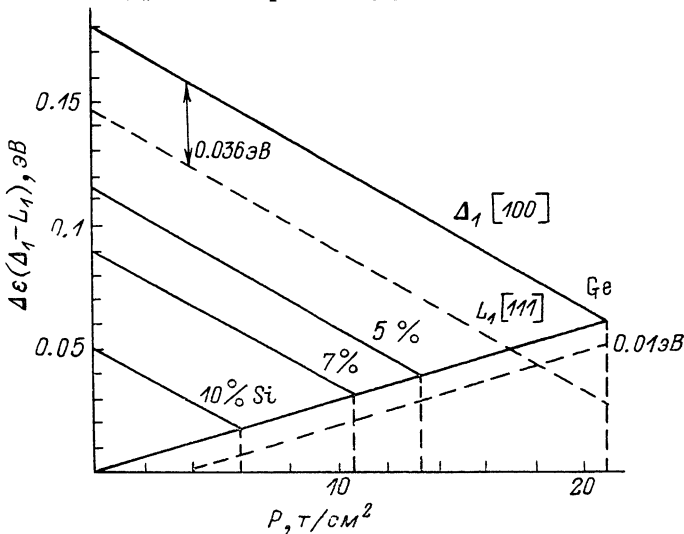


Рис. 6. Зависимость величины энергетической щели $\Delta \epsilon (\Delta_1 - L_1)$ от величины одноосного сжатия в направлении [100] в германии и сплавах Ge—Si с 5,7 и 10 ат% Si.

Штриховой линией показано положение донорного уровня сурьмы в L_1 - и Δ_1 -зонах германия. Встречные сдвиги L_1 - и Δ_1 -долин рассчитаны согласно [8].

2. Переход электронов в нижайшую L_1 -долину с меньшей подвижностью в случае $\mathbf{P} \parallel \mathbf{E} \parallel [111]$ соответствует области насыщения пьезосопротивления и в германии и сплавах наступает при давлении ~ 4 т/см² [5, 6]. Экспериментально в сплавах с содержанием менее 8 ат% Si в указанном интервале давлений действительно наблюдалось увеличение E_{np} , связанное с уменьшением подвижности электронов. На рис. 3 (кривая 1) показана тенденция зависимости $E_{np}(P)/E_{np}(0)$ к насыщению при увеличении давления.

3. Известно [7, 9], что влияние изотропного и одноосного сжатия на зонную структуру германия и сплавов аналогично эффекту сплавления. Вклад Δ_1 -долин в процессы переноса в сплавах тем больше, чем меньше щель между L_1 - и Δ_1 -долинами. На рис. 6 представлена номограмма, показывающая изменение величины щели $\Delta \epsilon (\Delta_1 - L_1)$ в германии и сплавах в зависимости от содержания кремния и величины деформации в направлении $\mathbf{P} \parallel [100]$. Номограмма построена с использованием результатов наших исследований пьезосопротивления Ge—Si [6].

Экспериментально вклад Δ_1 -долин в разогрев электронов в германии при 4,2 К наблюдается уже при $P \sim 3$ т/см² и $E \sim 3 \cdot 10^3$ В/см [10]. Для реализации условия полного переселения электронов в Δ_1 -долины в германии требуются огромные давления: всестороннее сжатие до 35 т/см² или одноосное сжатие вдоль направления [100] до 21 т/см² [5, 9]. В сплавах участие Δ_1 -долин в проводимости возрастает с увеличением деформации и содержания кремния. Этот факт показывает зависимость $E_{np}(P)$ для сплавов с содержанием кремния < 8 ат%, которая, как видно из рис. 4 (кривая 1), для сплавов и для герма-

ния [5] носит пороговый характер. Подобный ход зависимостей $E_{np}(P)$ для случая $P \parallel [111]$ не наблюдался. Увеличение E_{np} в наших экспериментах во много раз превышает эффект увеличения E_{np} вследствие изменения энергетического положения донорного уровня сурьмы при изменении состава сплава [6] и обусловлено в значительной степени уменьшением подвижности электронов в Δ_1 -долинах.

4. В большинстве экспериментов проявляются только примесные состояния, связанные с абсолютными экстремумами зоны проводимости. В Ge—Si формирование зоны проводимости [11], когда энергетические зазоры между абсолютными и дополнительными экстремумами стремятся к нулю, может быть осуществлено изменением состава или применением всестороннего или одноосного в направлении [100] сжатия. Разница состоит в количестве абсолютных экстремумов зоны проводимости: эффект сплавления и гидростатическое сжатие реализуют зону с 10 долинами, одноосное сжатие — с 8 долинами. Из рис. 6 видно, что в сплавах с высокой концентрацией кремния такая зона реализуется при очень малой деформации. Уменьшение щели $\Delta\epsilon$ (Δ_1-L_1) приводит не только к перераспределению электронов между неэквивалентными L_1 - и Δ_1 -долинами, но и к выходу состояний донорной примеси сурьмы, относящихся к Δ_1 -экстремумам, в запрещенную зону. Состояния сурьмы, связанные с Δ_1 -экстремумами, энергетически более глубокие. Так, в германии при одноосном сжатии $P \parallel [100]$ до 21 т/см^2 происходит увеличение энергии ионизации уровня сурьмы от 0.0096 до 0.036 эВ, что приводит к увеличению $E_{np} \sim \sim$ в 4 раза [5]. В Ge—Si с содержанием кремния 7 ат% также наблюдалось увеличение энергии ионизации донорной примеси [12]. Согласно нашим данным, в Ge—Si с 7 и 10 ат% Si величина ϵ_i , рассчитанная из холловских измерений, равна соответственно 0.011 и 0.025 эВ.

В сплавах с большим (~ 10 ат%) содержанием кремния, согласно рис. 6, донорный уровень Δ_1 -зоны может оказаться изначально наименьшим по энергии. В этом случае увеличение ϵ_i под давлением со скоростью, равной скорости движения Δ_1 -долин, может быть причиной увеличения E_{np} в области малых давлений, а затем насыщения зависимости $E_{np}(P)$. Подобный экспериментальный факт действительно наблюдался в Ge—Si с 10.4 ат% Si, как показано на рис. 5 (кривые 1—3). Однако при дальнейшем увеличении давления E_{np} уменьшается (рис. 5, кривые 4, 5).

Уменьшение E_{np} с давлением оказывается типичным для Ge—Si с высокой концентрацией кремния как для деформации в направлении [100], так и [111] (рис. 3 и 4, кривые 2). Сопоставляя эти результаты с фактом заниженного на порядок значения E_{np} в сплавах, мы пришли к выводу, что указанные особенности могут быть обусловлены влиянием неоднородностей на развитие пробоя. Известно [13], что роль флуктуаций состава в Ge—Si в кинетических явлениях возрастает с увеличением концентрации кремния. Этот факт, а также эффекты, приводящие к уменьшению подвижности электронов при одноосной деформации, вызывают усиление неоднородности распределения электрического поля в сплавах. Усиление электрического поля в местах неоднородностей облегчает локальный разогрев электронов и развитие лавины. Поскольку в развитии пробоя указанный механизм конкурирует с эффектом уменьшения подвижности, понятно отсутствие количественного соответствия изменения E_{np} с изменением ϵ_i и подвижности, проявляющееся особенно сильно в сплавах с большой концентрацией кремния (рис. 3, 4, кривые 2 и рис. 5, кривые 4, 5). Ввиду сложности учета всех процессов большинству обнаруженных особенностей удалось дать лишь качественное объяснение.

В заключение авторы благодарят О. Г. Сарбея и А. Н. Чумака за полезное обсуждение работы и замечания.

Список литературы

- [1] Sclar N., Burstein E. // Phys. Chem. Sol. 1957. V. 3. N 1. P. 1—23.
- [2] Абаулина-Заваряцкая Э. И. // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. В. 5. С. 1342—1350.
- [3] Чуенков В. А. // ФТТ. 1960. Т. 2. В. 5. С. 799—809.

- [4] Семенюк Ю. А., Шаховцова С. И., Белокурова И. Н. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1272—1275.
- [5] Баранский П. И. и др. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 3. С. 602—604.
- [6] Шаховцова С. И., Семенюк Ю. А., Белокурова И. Н. // УФЖ. 1987. Т. 32. В. 1. С. 93—95.
- [7] Бир Г. Л., Пикус Г. Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М., 1972. 584 с.
- [8] Asche M., Russu E. // Phys. St. Sol. (b). 1974. V. 66. N 2. P. 499—506.
- [9] Bassani F., Brust D. // Phys. Rev. 1963. V. 131. N 4. P. 1524—1529.
- [10] Ермаков В. Н., Коломоец В. В., Тимощук В. С. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 9. С. 1677—1678.
- [11] Бир Г. Л. // ФТТ. 1971. Т. 13. В. 2. С. 460—470.
- [12] Байдакова А. П., Белокурова И. Н., Дегтярев В. Ф., Земсков В. С., Скуднова Е. В. Известия АН СССР. Неорг. матер. 1981. Т. 17. В. 11. С. 1951—1953.
- [13] Шаховцов В. И., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Шпинар Л. И., Ясковец П. И. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 1. С. 48—51.

Институт физики АН УССР
Киев

Получена 19.02.1991
Принята к печати 23.04.1991