

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРИМЕСНЫЙ ПРОБОЙ В СПЛАВАХ ГЕРМАНИЙ—КРЕМНИЙ

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

Исследуются вольтамперные характеристики твердых растворов Ge—Si *n*-типа проводимости, обогащенных кремнием, вдоль направлений [111] и [100] в области примесного пробоя. Установлена зависимость пробивного поля от состава сплава, температуры и направления электрического поля. Воздействие различных факторов на характеристики пробоя обсуждается в связи с особенностями механизмов рассеяния электронов в сплавах.

Примесный пробой (ПП) был впервые обнаружен экспериментально в германии, легированном элементами III, V группы, при температуре 4.2 К. Величина пробивного поля менялась в пределах 5—100 В/см в зависимости от степени легирования [1, 2]. ПП, протекающий обратимо, обусловлен лавинообразным размножением носителей тока в зоне проводимости, происходящим вследствие ударной ионизации нейтральных донорных уровней. В полной теории ПП [3] для валентных полупроводников, в которой предполагалось рассеяние носителей тока на фононах и примесях, получено хорошее количественное согласие с экспериментом для германия.

В сплавах Ge—Si по сравнению с чистым германием изменяется энергия ионизации мелкой донорной примеси и появляется дополнительное рассеяние на флуктуациях состава [4]. В связи с этим выводы [3] в применении к сплавам должны быть модифицированы. Целью настоящей работы является исследование влияния указанных факторов на примесный пробой в Ge—Si.

Исследованы образцы монокристаллических сплавов Ge—Si, легированные сурьмой в концентрации до  $1 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, концентрация кремния достигала 8.5 ат%. Образцы вырезались в форме параллелепипедов, ориентированных в направлениях [111] и [100], длиной 0.5—1 см, с поперечным сечением  $6 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>. Вольтамперные характеристики (ВАХ) измерялись в режиме заданного тока или напряжения по импульсной методике или на постоянном токе в интервале температур 4.2—50 К. Длительность импульсов напряжения не превышала 10 мкс, что позволило избежать джоулевого разогрева образцов. За  $E_{пр}$  мы принимали значение, соответствующее величине отсечки на оси абсцисс, касательной к участку резкого увеличения тока на ВАХ, как показано на рис. 1.

Семейство типичных для сплавов ВАХ, измеренных при разных температурах, приведено на рис. 1. С увеличением содержания кремния холловская подвижность уменьшается, а величина полей пробоя растет (данные приведены

Образец	Si, ат%	Ориентация	$E_{пр}$ , В/см (5 К)	$\sigma R_{\Sigma}$ , см <sup>2</sup> /В · с (5 К)	$N_{Sb}$ , см <sup>-3</sup>	Степень компенсации
Ge	0	111	4.2	$2.6 \cdot 10^5$	$2.7 \cdot 10^{14}$	0.26
C3	1.5	111	18	$2.2 \cdot 10^4$	$7.1 \cdot 10^{14}$	0.35
C27	1—1.5	111	18.33	$9 \cdot 10^3$	$8.2 \cdot 10^{15}$	0.21
C23	3—3.5	111	42	$5 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^{16}$	0.5
C25	8.2	111	52.5	$1 \cdot 10^3$	$8.7 \cdot 10^{15}$	0.9

в таблице). Таблица иллюстрирует также увеличение степени компенсации с ростом концентрации кремния вследствие самокомпенсации проводимости в процессе выращивания Ge—Si. В образцах с высокой концентрацией кремния наблюдалась анизотропия пробивного поля в направлениях [111] и [100]. Например, для Ge—Si с 8.5 ат% Si  $E_{пр}^{100} = 240$  В/см в 4 раза превышает  $E_{пр}^{111}$  при температуре 5 К. Экспериментальная температурная зависимость пробивного поля степенная:  $E_{пр} \sim T^{-\alpha}$ , показатель степени меняется в пределах  $0.6 \leq \alpha \leq 0.8$ .

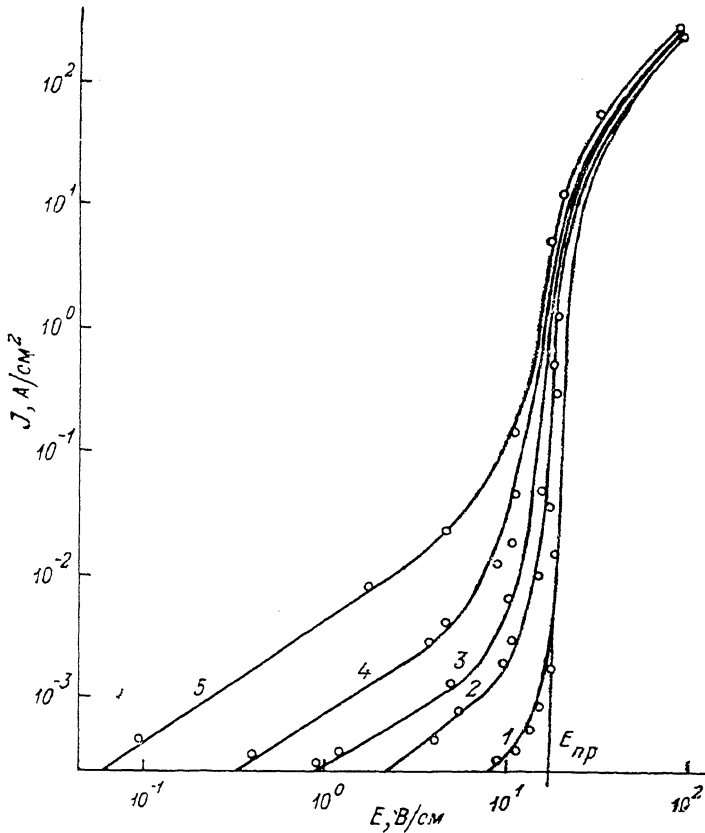


Рис. 1. ВАХ Ge—Si с 1.5 ат% Si при разных температурах.  
Т, К: 1 — 5, 2 — 6, 3 — 7, 4 — 8, 5 — 10. E || [111].

В качественной теории ПП [1] в предположении развития пробоя в условиях равенства скоростей накопления энергии и ее рассеяния электронами на тепловых колебаниях решетки  $E_{пр}$  описывается формулой

$$E_{пр} = \frac{2c}{\mu} \left[ \frac{\gamma \epsilon_i}{2kT} - 1 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость звука,  $\mu$  — подвижность носителей тока,  $\epsilon_i$  — энергия ионизации мелких доноров,  $\gamma = 0.2$  — корректировочный коэффициент для полупроводников  $n$ -типа проводимости. В полной теории ПП [3]  $E_{пр}$  определяется из соотношения

$$E_{пр} = E_0 \left\{ \ln \left[ \frac{2}{\pi^{1/2}} \left( \frac{\epsilon_i}{kT} \right)^{3/2} \tau \xi_0 \left( \frac{E_{пр}}{E_0^*} \right)^4 \right] \right\}^{-1/2}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — время жизни электронов, а  $\xi_0$ ,  $E_0$ ,  $E_0^*$  — сложные функции длины свободного пробега электронов, определяемой механизмами рассеяния. Для обеих теорий справедливо простое соотношение

$$E_{пр} \mu \approx \text{const} \approx e_0^2 T^{-b}, \quad (3)$$

где, согласно [1],  $a=b=0.5$ , или, согласно [3], при  $N_D - N_A < 10^{15} \text{ см}^{-3}$   $a=5/4$ ,  $b=3/2$ , а при  $N_D - N_A > 10^{15} \text{ см}^{-3}$   $a=b=3/4$ .

Проведенное в [5] рассмотрение кинетической модели пробоя в режиме фотозавозбуждения носителей заряда позволило уточнить критерий примесного пробоя. Учтена зависимость времени жизни электронов от степени компенсации, показано увеличение пробойного поля с ростом компенсации полупроводника.

На основании вышеизложенного проведен анализ соответствия теоретических и экспериментальных функциональных зависимостей  $E_{пр}$  в сплавах Ge—Si.

При заданной температуре величина  $E_{пр}$  определяется энергией ионизации мелких доноров, степенью компенсации и подвижностью носителей тока. Заниженное по сравнению с германием значение подвижности свидетельствует не только о существовании дополнительного рассеяния на флуктуациях состава,

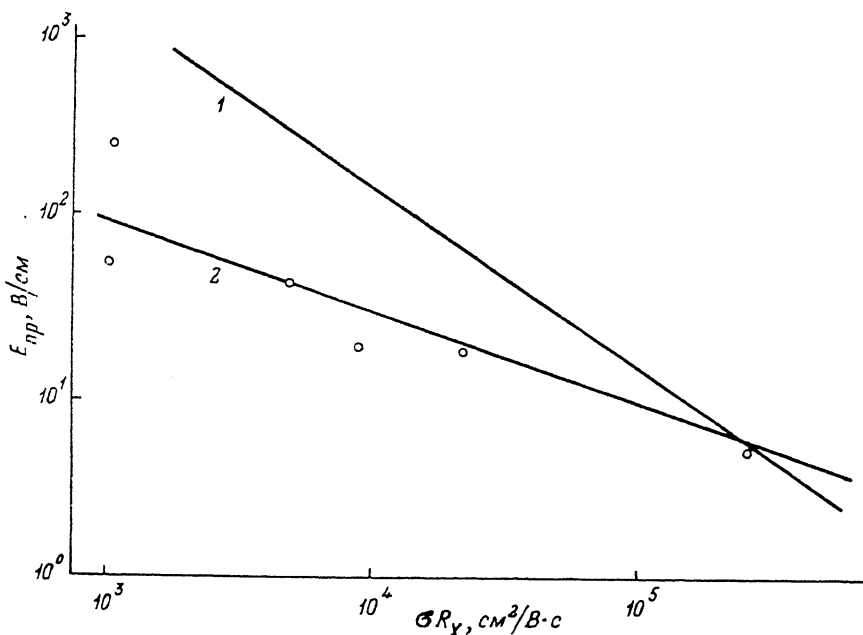


Рис. 2. Зависимость  $E_{пр}$  от подвижности.

1 — теоретическая прямая для n-Ge из работы [1]; 2 — точки для сплавов Ge—Si (см. таблицу).

но и об увеличении доли примесного рассеяния. Полученная экспериментально связь  $E_{пр}$  и холловской подвижности для сплавов не противоречит формуле (3) и выводам работы [5]. Как видно из рис. 2, точки ложатся на одну прямую. Однако значения  $E_{пр}$  для сплавов (рис. 2, прямая 2) в среднем на порядок ниже величины  $E_{пр}$ , предсказанной теорией [1, 3] (рис. 2, прямая 1), в то время как при существенном уменьшении подвижности в сплавах следовало ожидать увеличения  $E_{пр}$ . Разброс точек на прямой 2 может быть связан с изменением в сплавах энергии ионизации примеси. Известно [6], что энергия ионизации уровня сурьмы в Ge—Si возрастает с увеличением содержания кремния. В качестве примера укажем на то, что при изменении концентрации кремния от 0.1 до 8.2 ат% Si  $\epsilon_i$  изменяется соответственно от 0.0097 до 0.0108 эВ. Таким образом, учет изменения  $\epsilon_i$  соответствует изменению  $E_{пр}$  в пределах 5—12 %.

Одной из причин уменьшения по сравнению с теоретическими значений  $E_{пр}$  могут быть неоднородности, степень которых возрастает, как известно [4, 7], с увеличением содержания кремния. Однако экспериментальные данные плохо согласуются с этим предположением. В этом случае следовало бы ожидать большого разброса значений  $E_{пр}$  от образца к образцу, чего нет в эксперименте. Кроме того, измерения  $E_{пр}$  по общему приложенному к образцу напряжению и между потенциальными зондами дают практически одинаковые результаты.

Еще одна возможная причина, приводящая к уменьшению  $E_{пр}$  в сплавах, состоит в уменьшении энергетических потерь электронов на акустических колебаниях решетки либо в уменьшении потерь энергии, связанном с изменением механизма токопереноса в сплавах при низких температурах (диффузионного движения в полях неоднородностей [7]).

Отсутствие количественной теории рассеяния горячих носителей тока в неоднородных полупроводниках делает детальный анализ примесного пробоя в сплавах затруднительным. Например, эффект анизотропии пробоя в рамках существующих моделей объяснить нельзя.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность О. Г. Сарбею и В. А. Чуенкову за интерес к работе и ценную дискуссию.

#### Список литературы

- [1] Sclar N., Burstein E. // J. Phys. Chem. Sol. 1957. V. 2. N 1. P. 1—23.
- [2] Абаулина-Заварицкая 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] Shahovtsova S. I., Shahovtsov V. I., Belokurova I. N. // Sol. St. Commun. 1982. V. 41. N 1. P. 269—272.
- [5] Пеня Н. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 3. С. 466—470.
- [6] Белокурова И. Н., Дегтярев В. Ф., Земсков В. С., Скуднова Е. В. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1978. Т. 14. В. 11. С. 2119—2121.
- [7] Шаховцов В. И., Шаховцова С. И., Шварц М. М., Шпинар Л. И., Ясковец И. П. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 1. С. 48—51.

Институт физики АН УССР  
Киев

Получена 9.11.1989  
Принята к печати 19.03.1990