

05

Особенности рассеяния дырок в электропластически деформированных кристаллах германия

© М.А. Алиев, Б.Г. Алиев, Ш.Р. Муталибов, В.В. Селезнев

Институт физики Дагестанского научного центра РАН, Махачкала
E-mail: kamilov@datacom.ru

В окончательной редакции 22 октября 2001 г.

Исследовано влияние специфики формирования центров рассеяния в структурах, полученных в процессе электропластической деформации монокристаллов германия на его электрические свойства. Обнаружено существенное различие эффектов рассеяния дырочных носителей заряда при сравнении с аналогичными эффектами в структурах кристаллов, сконструированных традиционными способами деформирования, в частности термопластическими. Предложены возможные механизмы объяснения наблюдаемых эффектов.

Исследования влияния характера дефектообразования и его структурирования в процессе электропластической деформации (ЭПД) кристаллов кремния на их электрические свойства выявили ряд особенностей в поведении холловской подвижности дырок [1]. Изучение влияния деформационных дефектов на подвижность носителей заряда [2–5] и сопоставление их с современными представлениями об эволюции дефектных структур [6,7] позволили сделать некоторые предположения о специфике механизмов рассеяния в дефектных кристаллах атомарных полупроводников.

Исследования проводились на пластически деформированных образцах, структурное формирование которых отличалось от традиционных по многим параметрам — по удельной плотности дефектов, примесному составу, характеру динамики дислокаций, относительной ориентации направлений электрического тока (I) и дислокационных плоскостей скольжения (D).

В данной работе приведены результаты исследований электрических свойств монокристаллических образцов германия, вырезанных из кристаллов, деформированных электропластическим (ЭПД) и термопласти-

ческим (ТПД) способами. Одновременно с деформацией реализовалась диффузия примесных атомов индия вдоль преимущественного выхода дислокаций.

Объектами исследований были монокристаллы *p*-германия с удельным сопротивлением $\rho = 45 \Omega \cdot \text{см}$, исходно легированные галлием до разностной концентрации акцепторов $N_A - N_D = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Кристаллы в виде призм размерами $12 \times 10 \times 5 \text{ мм}$, ребра которых совпадали с направлениями [110], [111], [112] соответственно, деформировались сжатием вдоль оси [110], в режиме стационарной ползучести при температуре $T = 700^\circ\text{C}$, в течение 30 min. Контрольные образцы проходили термоотжиг при температуре деформации. В остальном методика приготовления образцов для измерения совпадает с описанной в [1].

Нетрадиционный методико-технологический подход конструирования структур, примененный нами, обогащает физические свойства кристаллов и в то же время неизмеримо усложняет его экспериментальную реализацию и количественное описание. Это происходит оттого, что деформируемое твердое тело уподобляется открытой системе, находящейся вдали от термодинамического равновесия, где под воздействием сдвигового напряжения спонтанно изменяются его свойства. Переводя пластически деформируемый кристалл с помощью дополнительных внешних воздействий в термодинамически неравновесное состояние, можно в принципе управлять процессами, протекающими в них. В точках сдвиговой неустойчивости происходит самоорганизация дислокационных диссипативных структур [8]. Есть надежда, что с разработкой новых технологий с высокой эффективностью и малыми затратами энергии откроются возможности получения новых материалов с управляемыми свойствами [9].

На рис. 1, 2 в двойном логарифмическом масштабе приведены температурные зависимости холловской подвижности дырок исследованных образцов. Как видно из кривых, существенное отличие в характере рассеяния носителей в контрольном и термопластически деформированных образцах наблюдается при низких температурах (ниже 100 К), тогда как для электропластически деформированных образцов оно начинается при более низких температурах $T < 80 \text{ К}$.

Наиболее характерной и отличительной особенностью для образцов из ТПД-режима, как видно из кривых 5–7 (рис. 1), является наличие минимумов подвижности $\mu(T)$ в окрестности $T \approx 25 \text{ К}$, глубина которых

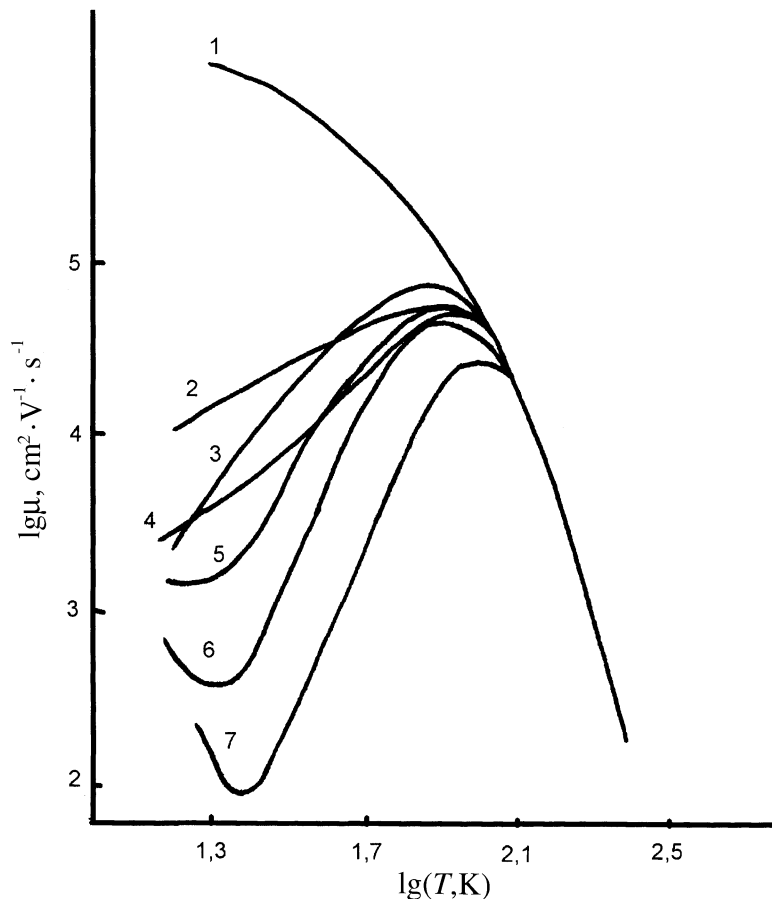


Рис. 1. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в образцах *p*-германия, деформированных термопластически при $T = 700^\circ\text{C}$ и величинах деформации ε : 1 — исходный образец; 2 — $\varepsilon = 1\%$ с диффузией индия; 3 — $\varepsilon = 1\%$, $I \parallel D$; 4 — $\varepsilon = 1.5\%$ с диффузией индия; 5 — $\varepsilon = 1.5\%$ $I \parallel D$; 6 — $\varepsilon = 1\%$, $I \perp D$; 7 — $\varepsilon = 1.5\%$ $I \perp D$.

увеличивается с ростом степени деформации ε . Расхождение по величине изменения подвижности для образцов из ТПД-режима составляет более четырех порядков, тогда как для образцов из ЭПД-режима —

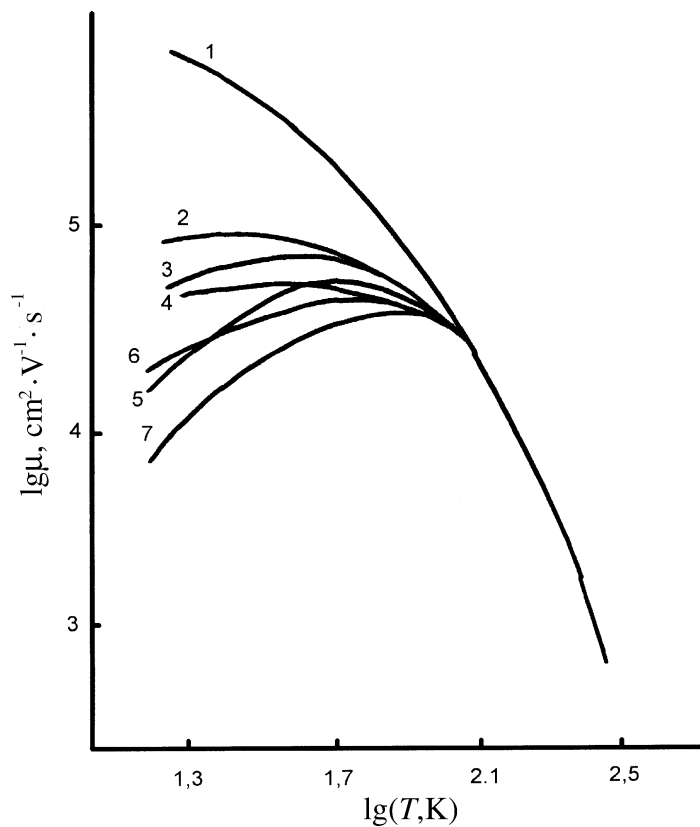


Рис. 2. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в образцах *p*-германия, деформированных электропластически при $T = 700^\circ\text{C}$ и величинах деформации ε : 1 — исходный образец, 2 — $\varepsilon = 1\%$ с диффузией индия; 3 — $\varepsilon = 1\%$, $I \parallel D$; 4 — $\varepsilon = 1.5\%$ с диффузией индия; 5 — $\varepsilon = 1.5\%$ $I \parallel D$; 6 — $\varepsilon = 1\%$, $I \perp D$; 7 — $\varepsilon = 1.5\%$ $I \perp D$.

не более двух. По данным электронно-микроскопических исследований, плотность дислокаций в образцах из ТПД-режима ($N = 10^9 \text{ cm}^{-2}$) на два порядка больше, чем в образцах из ЭПД-режима ($N = 10^7 \text{ cm}^{-2}$) при одинаковой величине деформации. Общим и характерным фактором для обоих режимов деформирования является: во-первых — наличие анизо-

тропии подвижности основных носителей заряда, правда, для образцов из ЭПД-режима она выражена намного слабее, во-вторых — одинаковое влияние примесных атомов индия, диффундирующих одновременно с генерацией дислокаций в глубь кристалла, на эффекты рассеяния. Так, примесь-дислокационное взаимодействие при малых степенях деформации приводит к заметному уменьшению рассеяния (кривые 2 и 4 рис. 1 и 2), а увеличение степени деформации приводит к значительному росту рассеяния носителей заряда (кривые 5, 7 рис. 1 и 2), обуславливающие аномально низкие значения подвижности, особенно для ТПД-режима.

При электропластическом способе деформирования кристалла, в отличие от ТПД-режима, все участвующие в процессе структурные частицы (примесные и собственные атомы, заряженные носители подсистемы — дырки и одновременно генерируемые дислокации) кооперативно взаимодействуют между собой в динамическом потоке и в определенном направлении движения. Таким образом, при ЭПД-режиме условия деформации кристалла облегчены присутствием дополнительных факторов возмущения дислокационной системы в виде направленных потоков импульса тока и примесных ионов [10,11]. Поэтому при ЭПД-режиме формируется более упорядоченная структура деформационных дефектов. Известно, что дислокации могут приводить к заметной анизотропии рассеяния, если имеется их неравномерное распределение по ориентациям [12].

Обсудим физическую картину проявления рассеивающих свойств дефектов при одновременном введении в пластически деформируемый кристалл примесных атомов. Для слабых деформаций, когда без диффузии примесей существовала весьма большая анизотропия подвижности, при одновременной диффузии акцепторных примесей индия произошло не только значительное сглаживание эффекта анизотропии, но и общее увеличение μ . Этот факт может быть интерпретирован следующим образом. Легирование индием заметно повышает концентрацию ионизированных примесей. Так как в результате, вместо понижения, произошло увеличение подвижности, то причиной этому может быть взаимное подавление двух механизмов рассеяния — дислокационного и примесного. Такое может осуществиться, если в дислокационном рассеянии было важно их электрическое взаимодействие с носителями, обусловленное заряденностью дислокационных линий.

Внедренные акцепторные атомы индия, заряженные отрицательно, должны в заметном количестве собраться на дислокационных линиях.

При этом возможна существенная компенсация совместного — дислокационного и примесного электростатического взаимодействия с носителями. Только в таком случае можно ожидать общего увеличения подвижности μ в кристаллах. Таким образом, мы предполагаем, что ионы индия как сами в значительной степени исключаются из числа эффективных рассеивателей, так и заметно ослабляют рассеивающие свойства дислокаций.

Значительно меньшая анизотропия подвижности для образцов из ЭПД-режима с \parallel и \perp ориентациями линий тока и дислокационных плоскостей скольжения (D), возможно, связана с вовлечением большого числа плоскостей скольжения уже на ранних стадиях деформации ввиду предполагаемой в [13] локализации теплового действия электрического тока. Это предположение коррелирует с известным фактом отсутствия анизотропии подвижности в образцах, деформированных термопластически при высоких температурах [4].

Что касается минимума температурной подвижности, наблюдаемого при ТПД-способе, то бесспорно его дислокационное происхождение и он может быть связан с проявлением резонансного рассеяния на мелком дислокационном уровне. Предполагаемая картина поведения подвижности μ в образцах, деформированных различными способами на малые величины деформации ε без легирования и с дополнительным легированием, может быть распространена и на другие объекты, структурированные при тех или иных дополнительных параметрах воздействия на кристалл.

Список литературы

- [1] Алиев М.А., Алиева Х.О., Селезнев В.В. // ФТТ. 1998. Т. 40. В. 10. С. 1816.
- [2] Еременко В.Г., Никитенко В.И., Якимов Е.Б. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 26. В. 2. С. 7275.
- [3] Осипьян Ю.А., Шевченко С.А. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. В. 4. С. 256.
- [4] Кляцина И.В., Кожух М.А., Рывкин С.М., Трунов В.А., Шлимак И.С. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 6. С. 1089.
- [5] Кляцина И.В., Кожух М.А., Рывкин С.М., Трунов В.А., Шлимак И.С. // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29. В. 5. С. 289.
- [6] Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1998. Т. 41. В. 1. С. 7.
- [7] Судзуки Т., Есинага Х., Таксеути С. Динамика дислокаций и пластичности. М.: Мир, 1989. 296 с.

- [8] *Пригожин И.* От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985. 327 с.
- [9] *Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А.* Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
- [10] *Алиев М.А., Алиева Х.О., Селезнев В.В.* // ФТТ. 1995. Т. 37. В. 12. С. 3732.
- [11] *Конторова Т.А.* // ФТТ. 1967. Т. 9. В. 46. С. 1235.
- [12] *Конончук О.В., Орлов В.И., Феклисова О.В., Якимов Е.Б., Ярыкин Н.А.* // ФТП. 1996. Т. 30. В. 2. С. 256 .
- [13] *Алиев М.А., Алиева Х.О., Селезнев В.В.* // ФТТ. 1996. Т. 38. В. 11. С. 3372.
- [14] *Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б.* Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. М.: Наука, 1984. 267 с.