

Влияние легирования и предварительной обработки на магнитоимулированную подвижность дислокаций в монокристаллах InSb

© Е.А. Петржик, Е.В. Даринская, С.А. Ерофеева*, М.Р. Раухман**

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Российской академии наук,
117333 Москва, Россия

* Институт физики твердого тела Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

** Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

E-mail: petrzhik@ns.crys.ras.ru

(Поступила в Редакцию 27 февраля 2002 г.
В окончательной редакции 20 июня 2002 г.)

Обнаружено влияние типа проводимости и степени легирования монокристаллов InSb на подвижность быстрых 60° дислокаций в магнитном поле. Оказалось, что при легировании чистого кристалла InSb теллуром (*n*-тип) до 10^{18} cm^{-3} подвижность дислокаций падает до уровня фона. В то же время в кристаллах InSb *p*-типа, легированных Ge, при такой же концентрации носителей (10^{18} cm^{-3}) магнитоэластический эффект ярко выражен. Показано, что предварительное механическое нагружение, а следовательно, и внутренние напряжения кристалла влияют не только на среднюю величину пробегов дислокаций в магнитном поле, но и на величину порогового магнитного поля, ниже которого магнитоэластический эффект не наблюдается. Обсуждаются возможные причины этих явлений.

Работа частично финансировалась грандом Российской академии наук (Шестой конкурс научных проектов молодых ученых РАН).

Магнитоэластический эффект (МПЭ) как движение дислокаций в постоянном магнитном поле в отсутствие механической нагрузки впервые обнаружен на кристаллах NaCl [1]. Макроскопически МПЭ проявляется в понижении предела текучести немагнитных кристаллов в магнитном поле [2], в уменьшении их микротвердости [3], а также коэффициента упрочнения [4], в изменении параметров внутреннего трения [5,6]. МПЭ наблюдается в щелочно-галогенидных кристаллах [1–10], немагнитных металлах [11,12], полимерах [13,14], молекулярных кристаллах [15], а также в полупроводниках [16–19] и сегнетоэлектриках [20,21]. Изучение характера движения дислокаций в слабом магнитном поле ($\mu B \ll kT$, где μ — магнетон Бора, B — магнитная индукция, k — постоянная Больцмана, T — температура) в зависимости от различных физических параметров показало, что природа МПЭ связана с откреплением дислокаций от магниточувствительных стопоров в результате спин-зависимых электронных переходов, происходящих под действием внешнего магнитного поля в системе дислокация–парамагнитный центр [7–10]. Подобная концепция [22,23] лежит в основе интерпретации ряда различных явлений, связанных с влиянием слабых магнитных полей на физические и химические свойства немагнитных материалов.

Настоящая работа посвящена исследованию МПЭ в полупроводниковых кристаллах InSb с разными типами проводимости и степенью легирования, а также изучению влияния внутренних напряжений в кристалле на

подвижность быстрых 60° дислокаций в постоянном магнитном поле.

1. Методика эксперимента

Исследования проводились на монокристаллах InSb с различным типом проводимости и разной степенью легирования: *n*-тип ($1 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) и *p*-тип ($5 \cdot 10^{13}$, $1.6 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Образцы вырезались в виде четырехугольных брусков размером $3 \times 1.5 \times 40 \text{ mm}$ в направлениях [111], [112] и [110] соответственно. Дислокации вводились с помощью нанесения царапины корундовой иглой вдоль [110] на поверхность наблюдения (111) и разгонялись при последующей деформации четырехточечным изгибом при повышенных температурах (на расстояния 1000–2000 μm). Подробно методика приготовления образцов описана в [24,25].

Подготовленные образцы помещались в однородное постоянное поле электромагнита ($B = 0.2\text{--}0.9 \text{ T}$) на время t от нескольких секунд до 20 min. Эксперименты проводились при повышенной температуре ($T = 200^\circ\text{C}$) с предварительным медленным нагревом в течение 40–60 min и последующим аналогичным медленным охлаждением.

Начальные и конечные положения дислокаций (соответственно до и после „магнитной обработки“) выявлялись с помощью избирательного химического травления (травитель CP-4A) [16,25]. Измерялись пробеги быстрых 60° дислокаций.

2. Результаты исследований и их обсуждение

МПЭ в полупроводниковых кристаллах InSb проявляется как преимущественное движение дислокаций от царапины („расходящиеся“ полупетли) под действием постоянного магнитного поля при повышенных температурах в отсутствие механической нагрузки [16]. При этом также наблюдается смещение дислокаций к царапине („стягивающиеся“ полупетли). Однако, как показано в работе [16], при магнитных полях $B = 0.7\text{--}0.9\text{ Т}$ относительное число „стягивающихся“ дислокаций составляет всего $\sim 10\%$ от общего числа сдвинувшихся дислокаций, в то время как при контрольном отжиге без магнитного воздействия таких дислокаций порядка 90%. Величины средних пробегов „расходящихся“ дислокаций в магнитном поле существенно больше, чем при $B = 0$.

В настоящей работе обнаружено влияние типа проводимости и степени легирования монокристаллов InSb на МПЭ. Оказалось, что легирование чистого (с концентрацией $C = 1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$) кристалла n -InSb (точки 1 на рис. 1) теллуром до концентрации $C = 1 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$ (точки 5 на рис. 1) приводит к исчезновению МПЭ, т.е. пробеги „расходящихся“ от царапины дислокаций уменьшаются до уровня фона, а относительное число „стягивающихся“ к царапине дислокаций увеличивается до 80–90%, что характерно для отжига. Однако в кристаллах InSb p -типа, легированных Ge, даже при той же концентрации примеси Ge ($C = 1 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$, точки 3 на рис. 1), что и Te в n -InSb, МПЭ ярко выражен: пробеги „расходящихся“ дислокаций в пределах ошибки эксперимента ($\sim 15\%$) совпадают с пробегами в нелегированном кристалле (рис. 1). При уменьшении концентрации легирующей примеси Ge ($C = 1 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$) пробег „расходящихся“ дислокаций в магнитном поле уменьшается (рис. 1, точка 4, полученная по измерению пяти образцов). При дальнейшем уменьшении концентрации Ge до $1.6 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$ МПЭ исчезает. Следует отметить, что при механических испытаниях тех же кристаллов [24] в отсутствие магнитного поля при росте концентрации Te пробеги незначительно увеличивались, а при росте концентрации Ge — существенно уменьшались. Таким образом, при „магнитной обработке“ в отсутствие механической нагрузки наблюдается обратное явление: при легировании теллуром пробеги уменьшаются до уровня фона, а при легировании германием той же концентрации остаются практически такими же, как в чистых образцах. Видимо, для подвижности дислокаций в магнитном поле в полупроводниковых кристаллах важен не только тип проводимости, но и магнитное состояние легирующей проводимости. Возможно, что легирование InSb теллуром приводит к упрочнению кристалла в магнитном поле, как наблюдалось в работе [9] на кристаллах NaCl(Pb).

Проводился сравнительный анализ трех кристаллов InSb n -типа с одинаковой концентрацией носителей ($C = 1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$), взятых из разных буль. Специаль-

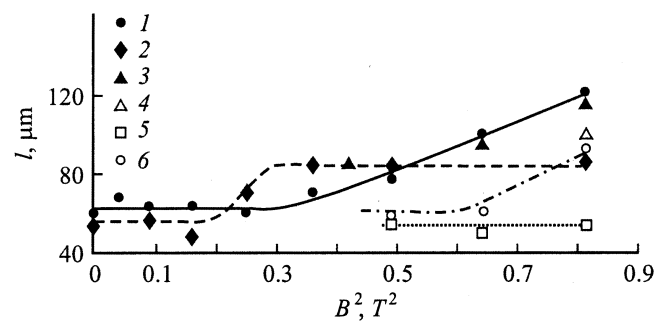


Рис. 1. Зависимость среднего пробега l „расходящихся“ быстрых 60° дислокаций от величины магнитной индукции B для монокристаллов InSb в случае предварительного механического нагружения 15 ($1\text{--}5$) и 10 МПа (6). $T = 200^\circ\text{C}$; $t = 10\text{ мин}$. n -тип: 1, 6 — InSb-I ($1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$), 2 — InSb-II ($1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$), 5 — InSb(Te) ($1 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$); p -тип: 3 — InSb(Ge) ($1 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-3}$), 4 — InSb(Ge) ($1 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$).

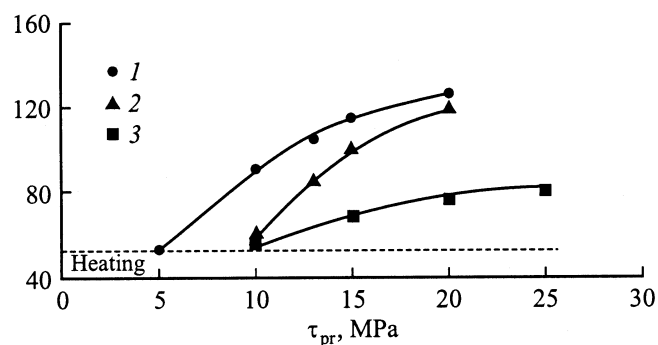


Рис. 2. Зависимость среднего пробега l „расходящихся“ быстрых 60° дислокаций в кристалле InSb-I (n -тип с концентрацией $1 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$) от величины предварительного механического нагружения $\tau_{\text{пр}}$ для различных значений магнитной индукции. B, T : 1 — 0.9, 2 — 0.8, 3 — 0.7. $T = 200^\circ\text{C}$; $t = 10\text{ мин}$.

но проведенные анализы температурной зависимости электропроводности и химический анализ не выявили разницы между образцами из трех буль. Однако подвижность в магнитном поле в этих, казалось бы одинаковых, кристаллах существенно отличается.

Зависимости среднего пробега „расходящихся“ дислокаций для кристаллов InSb-I [16] (точки 1) и InSb-II (точки 2) представлены на рис. 1. Наблюдаемый уровень насыщения по пробегам для InSb-II не зависит ни от времени „магнитной обработки“, ни от величины предварительного механического нагружения. По-видимому, уровень насыщения определяется наличием каких-то немагниточувствительных стопоров, преодолеть которые с помощью магнитного поля дислокация не может. При исследовании всей зоны пропускания и отдельно края зоны поглощения были обнаружены небольшие изменения в структуре оптического спектра и небольшой сдвиг края зоны поглощения в InSb-II по сравнению с InSb-I. Причина этих изменений пока неясна. Хотя кристалл InSb-III при механических испытаниях

вел себя аналогично InSb-I, на котором МПЭ проявляется ярче всего (при одинаковых условиях энергия активации кристаллов InSb-I $U_{\text{InSb-I}} = 0.8 \text{ eV}$, а энергия активации InSb-III $U_{\text{InSb-III}} = 0.88 \text{ eV}$), под воздействием постоянного магнитного поля без механического нагружения быстрые 60° дислокации „стягиваются“, а „расходящиеся“ дислокации не наблюдаются. На основании изучения подвижности дислокаций в магнитном поле в трех типах кристаллов InSb с одинаковой концентрацией носителей можно предположить, что на величину МПЭ влияет либо небольшое количество магниточувствительной примеси, наличие которой не сказывается ни на проводимости, ни при механических испытаниях, либо разное магнитное состояние, в котором находится одна и та же примесь в разных кристаллах и которое может способствовать упрочнению кристалла аналогично [9].

На образцах InSb-I (n -тип, $C = 1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) изучалось влияние предварительного механического нагружения при „отгоне“ дислокаций от царапины с помощью метода четырехточечного изгиба на подвижность дислокаций в магнитном поле. Предварительное механическое нагружение задает плотность дислокаций в луче, идущем от царапины, а следовательно, и уровень внутренних напряжений. На рис. 2 показаны зависимости среднего пробега l дислокаций от величины предварительного механического нагружения τ_{pr} для различных магнитных полей. Откладывались пробеги только „расходящихся“ дислокаций. Из рис. 1, 2 видно, что уровень внутренних напряжений определяет не только величину дислокационных пробегов в магнитном поле, но и величину порогового магнитного поля, начиная с которого наблюдаются преимущественно „расходящиеся“ дислокации. Так, для $\tau_{\text{pr}} = 15 \text{ МПа}$ (точки 1 на рис. 1) $B_{\text{thr}} \approx 0.6 \text{ Т}$, а для $\tau_{\text{pr}} = 10 \text{ МПа}$ (точки 6 на рис. 1) $B_{\text{thr}} \approx 0.8 \text{ Т}$.

Проведенные эксперименты показывают, что в полупроводниковых кристаллах, так же как в щелочно-галогидных кристаллах и металлах, движущей силой для дислокаций в МПЭ являются поля внутренних напряжений кристалла. Роль магнитного поля заключается в создании условий открепления дислокаций от стопоров.

Авторы выражают признательность В.И. Альшицу за полезные обсуждения, В.К. Карандашеву, С.А. Шевченко, Э.А. Шейману и А.Ф. Баженову за помощь в работе.

Список литературы

- [1] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Т.М. Перекалина, А.А. Урусовская. ФТТ **29**, 2, 467 (1987).
- [2] В.И. Альшиц, А.А. Урусовская, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккаер. ФТТ **42**, 2, 270 (2000).
- [3] Yu.I. Golovin, R.B. Morgunov, D.V. Lopatin, A.A. Baskakov. Phys. Stat. Sol. (a) **160**, R3 (1997).
- [4] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов. Письма в ЖЭТФ **61**, 7, 583 (1995).
- [5] Н.А. Тяпунина, В.Л. Красников, Э.П. Белозерова. Изв. РАН. Сер. физ. **64**, 9, 1776 (2000).
- [6] О.И. Дацко. ФТТ **44**, 2, 289 (2002).
- [7] V.I. Alshits, E.V. Darinskaya, O.L. Kazakova, E.Yu. Mikhina, E.A. Petrzhik. Mater. Sci. Eng. A **234–236**, 617 (1997).
- [8] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская. Письма в ЖЭТФ **70**, 11, 749 (1999).
- [9] Е.В. Даринская, М.В. Колдаева. Письма в ЖЭТФ **70**, 3, 226 (1999).
- [10] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, В.Е. Иванов, А.А. Дмитриевский. ЖЭТФ **116**, 6, 123 (2000).
- [11] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, И.В. Гектина, Ф.Ф. Лаврентьев. Кристаллография **35**, 4, 1014 (1990).
- [12] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, Е.А. Петржик. ФТТ **34**, 1, 155 (1992).
- [13] Н.Н. Песчанская, П.Н. Якушев. ФТТ **39**, 9, 1690 (1997).
- [14] Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, С.Ю. Ликсутин. Высокомолекуляр. соединения Б **40**, 373 (1999).
- [15] Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, И.А. Пушкин, С.З. Шмурак. ФТТ **43**, 7, 1333 (2001).
- [16] Е.В. Даринская, Е.А. Петржик, С.А. Ерофеева, В.П. Кисель. Письма в ЖЭТФ **70**, 4, 298 (1999).
- [17] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, В.А. Фролов, Л.И. Гончар, О.В. Литвиненко. ФТТ **42**, 10, 1814 (2000).
- [18] А.А. Скворцов, А.М. Орлов, Л.И. Гончар. ЖЭТФ **120**, 1, 134 (2001).
- [19] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.М. Кравченко, А.Н. Коломиец. ФТТ **43**, 3, 462 (2001).
- [20] Б.И. Смирнов, Н.Н. Песчанская, В.И. Николаев. ФТТ **43**, 12, 31 (2001).
- [21] С.А. Гриднев, К.С. Дрождин, В.В. Шмыков. ФТТ **42**, 2, 318 (2000).
- [22] Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.Л. Франкевич. УФН **155**, 1, 3 (1988).
- [23] А.Л. Бучаченко, Р.З. Сагдеев, К.М. Салихов. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. Наука, Новосибирск (1978). 296 с.
- [24] S.A. Erofeeva. Phil. Mag. A **70**, 943 (1994).
- [25] V.P. Kisel, S.A. Erofeeva, M.Sh. Shikhsaidov. Phil. Mag. A **67**, 343 (1992).