

МАГНИТОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В InSb**Е.В.Даринская, Е.А.Петржик, С.А.Ерофеева*, В.П.Кисель****Институт кристаллографии¹⁾ РАН, 117333 Москва, Россия***Институт физики твердого тела РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия*

Поступила в редакцию 9 июля 1999 г.

Обнаружено движение дислокаций в полупроводниковых кристаллах InSb под действием постоянного магнитного поля в отсутствие механической нагрузки. Получены зависимости среднего пробега дислокаций и относительного числа расходящихся и сходящихся полупетель от величины магнитной индукции и времени "магнитной обработки". Оценена энергия активации движения расходящихся дислокаций под действием магнитного поля в интервале температур $120 \div 250$ °С. Обсуждаются возможные причины наблюдаемого явления.

PACS: 61.72.-y, 75.90.+w

В настоящее время существование магнитоэластического эффекта – движения дислокаций в постоянном магнитном поле при отсутствии механического нагружения – надежно установлено в немагнитных щелочно-галогидных и металлических кристаллах (NaCl, CsI, LiF, Zn и Al). Изучению этого явления посвящен ряд экспериментальных и теоретических работ, выполненных в независимых группах [1–5].

Проведенные систематические исследования [6–8] дают основание полагать, что движение дислокаций происходит в полях внутренних напряжений кристалла, а роль магнитного поля сводится к откреплению дислокаций от парамагнитных центров. Это открепление можно объяснить в рамках концепции спин-зависимых электронных переходов во внешнем магнитном поле. Магнитное поле вызывает эволюцию спинов в системе дислокация + парамагнитный центр, завершающуюся снятием спинового запрета на определенный электронный переход, который радикально меняет конфигурацию системы, например, уменьшает высоту барьера для движения дислокаций. При этом полная энергия в системе практически не меняется. Подобная идеология лежит в основе физической интерпретации [9] влияния магнитного поля на целый ряд процессов, включая скорость протекания химических реакций [10] и фототок в полупроводниках [11].

В настоящей работе обнаружен магнитоэластический эффект в полупроводниковых кристаллах, приводятся результаты исследования движения 60-градусных дислокаций в кристаллах InSb под действием постоянного магнитного поля в отсутствие механического нагружения.

Эксперименты проводились на чистых монокристаллах InSb *n*-типа с концентрацией носителей 1×10^{14} см⁻³. Образцы вырезались в виде четырехугольных брусков размером $3 \times 1.5 \times 40$ мм в направлениях [111], [112] и [110], соответственно. Для введения "свежих" дислокаций корундовой иглой на поверхность наблюдения (111) наносилась слабая царапина вдоль направления [110]. При последующей деформации четырехточечным изгибом при температуре 200 °С и нагрузке $\tau = 15$ МПа в течение

¹⁾ e-mail: public@mechan.incr.msk.su

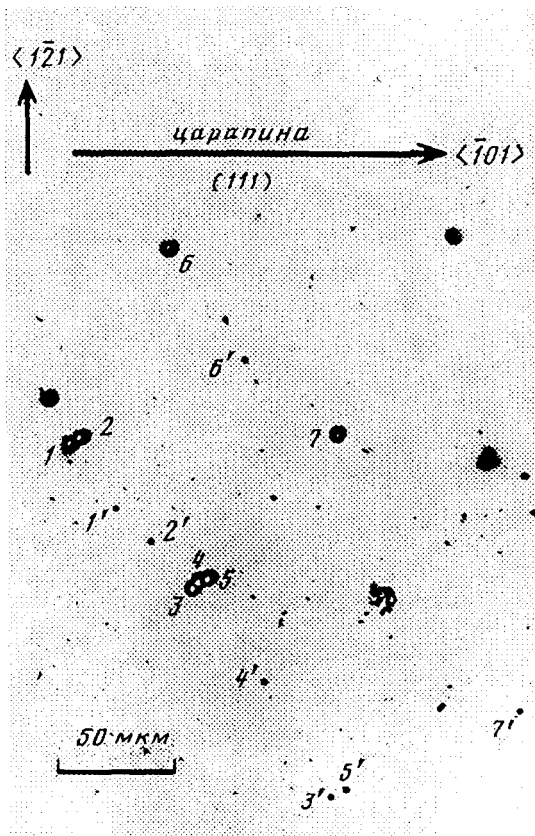


Рис.1. Смещения дислокаций в кристаллах InSb под действием постоянного магнитного поля 0.7 Тл при температуре 200 °С, $t = 10$ мин: 1, 2, ... - начальные положения дислокаций, 1', 2', ... - конечные положения дислокаций

5 мин дислокации разгонялись от царапины на расстояния 1000 ÷ 2000 мкм. Подробно методика приготовления образцов описана в [12, 13].

Подготовленные образцы помещались в однородное постоянное поле электромагнита ($B = 0.2 \div 0.9$ Тл) на время t от нескольких секунд до 50 мин. Эксперименты проводились при температурах $T = 120, 150, 200, 250$ °С с предварительным медленным нагревом в течение 50 мин и последующим аналогичным медленным охлаждением. Никакой внешней механической нагрузки во время "магнитной обработки" не прилагалось.

Наблюдения велись за быстрыми 60-градусными дислокациями. Начальные и конечные положения дислокаций соответственно до и после выдержки в магнитном поле фиксировались с помощью избирательного химического травления (травитель СР-4А: 5 частей HNO_3 + 3 части HF + 3 части CH_3COOH).

Обнаружено движение 60-градусных быстрых дислокаций в кристаллах InSb в постоянном магнитном поле в интервале температур $T = 120 \div 250$ °С без какой-либо механической нагрузки. Существенно, что смещение дислокаций наблюдается как к царапине (стягивающиеся полупетли), так и от царапины (расходящиеся полупетли). Контрольный отжиг образцов в отсутствие магнитного поля приводит в основном к стягиванию полупетель ($\approx 90\%$ от общего числа сдвинувшихся дислокаций). Типичная картина травления грани (111) образца InSb после выдержки в магнитном поле $B = 0.7$ Тл при температуре 200 °С в течение 10 мин представлена на рис.1. Видно, что дислокации двигаются преимущественно от царапины. По картинам травления

определялись средние пробеги l дислокаций при различных условиях эксперимента (точность измерения составляла $\approx 15\%$). На рис.2а показана зависимость среднего пробега расходящихся дислокаций от величины внешнего магнитного поля B . Существенно, что, начиная с некоторого магнитного поля, средний пробег оказывается пропорционален квадрату магнитной индукции. Для сходящихся дислокаций не обнаружено зависимости пробега, от величины магнитной индукции.

Наряду с измерением среднего пробега определялось и относительное число (n/N , где N – общее число сдвинувшихся дислокаций) расходящихся (точки 1 на рис.2б) и сходящихся (точки 2 на рис.2б) дислокаций. Оказалось, что с возрастанием величины магнитной индукции уменьшается относительное число стягивающихся полупетель и, соответственно, увеличивается относительное число расходящихся. После некоторого "поля инверсии" эти зависимости выходят на насыщение. Точки 3,4 на рис.2 относятся к контрольным экспериментам по нагреву образцов без приложения магнитного поля. Аналогичные данные (точки 5,6 на рис.2) получены для быстрого (в течение $\approx 2 \div 3$ с) включения и выключения электромагнита без дальнейшей магнитной обработки.

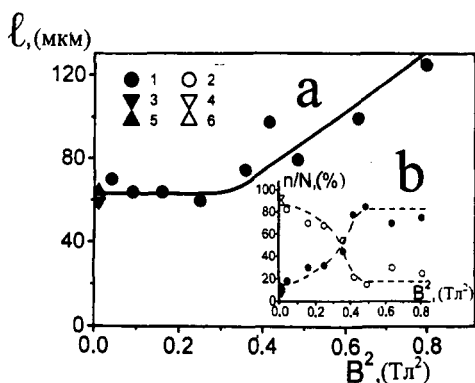


Рис.2. Зависимость: а – среднего пробега l расходящихся дислокаций и б – относительного числа n/N расходящихся (1, 3, 5) и стягивающихся (2, 4, 6) дислокаций от величины магнитной индукции B ; $t = 10$ мин, $T = 473$ К; 3, 4 – только отжиг, 5, 6 – включение и выключение электромагнита

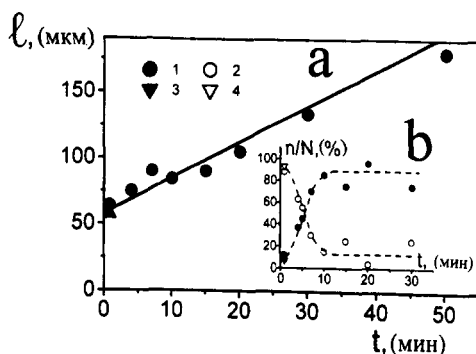


Рис.3. Зависимость: а – среднего пробега l расходящихся дислокаций и б – относительного числа n/N расходящихся (1, 3) и стягивающихся (2, 4) дислокаций от времени t выдержки образцов в магнитном поле $B = 0.7$ Тл; $T = 473$ К; 3, 4 – только отжиг

На рис.3 представлены зависимости пробега и относительного числа подвижных дислокаций от времени t выдержки образцов в магнитном поле. Наблюдается линейная зависимость среднего пробега расходящихся дислокаций от времени. Относительные числа расходящихся и стягивающихся полупетель соответственно увеличиваются и уменьшаются с возрастанием t и после некоторого "времени инверсии" выходят на насыщение. При выдержке в магнитном поле $B = 0.7$ Тл (и одновременно при $T = 200$ °С) в течение 50 мин наблюдается резкое уменьшение относительного числа расходящихся полупетель ($\approx 20\%$ вместо ожидаемых 80%), хотя их средний пробег продолжает расти и хорошо укладывается на линейную зависимость $l(t)$.

Результаты исследований влияния температуры на подвижность дислокаций в магнитном поле представлены на рис.4. Оценка энергии активации по наклону зависимости $\ln(l/t) \div (1/T)$ дает величину ≈ 0.3 эВ. Полученное значение энергии ак-

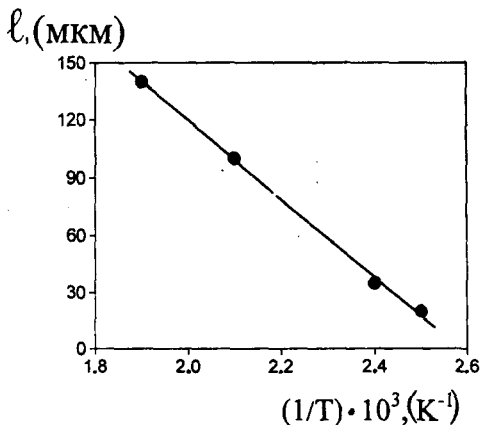


Рис.4. Зависимость среднего пробега l расходящихся дислокаций от температуры T ; $B = 0.8 \text{ Тл}$, $t = 10 \text{ мин}$

тивации движения дислокаций в магнитном поле при нагреве в 2.5 раза меньше энергии активации движения 60-градусных дислокаций в тех же кристаллах InSb под действием механической нагрузки при таком же нагреве в отсутствие магнитного поля [12–14]. Такое понижение энергии активации движения дислокаций в магнитном поле, по-видимому, связано с отрывом дислокаций от парамагнитных стопоров вследствие спин-зависимых электронных переходов в системе дислокация + парамагнитный центр. Таким образом, магнитное поле "убирает" часть стопоров и существенно облегчает термоактивационный процесс релаксации дислокационной структуры.

Изучалось влияние последовательности приложения магнитного поля на движение дислокаций при отжиге. В первом случае после отжига при 200°C в течение 50 мин сразу же прикладывалось магнитное поле $B = 0.8 \text{ Тл}$ на время $t = 10 \text{ мин}$ при той же температуре. Во втором случае сначала проводилась магнитная обработка ($B = 0.8 \text{ Тл}$; $t = 10 \text{ мин}$; $T = 200^\circ\text{C}$), а затем отжиг ($T = 200^\circ\text{C}$; $t = 50 \text{ мин}$). Средний пробег и относительное число расходящихся дислокаций оказались больше в первом случае (134 мкм и 70% вместо 114 мкм и 40%). При обычном отжиге ($T = 200^\circ\text{C}$; $t = 50 \text{ мин}$) расходится менее 20% дислокаций. Таким образом, проведенные предварительные эксперименты показывают, что магнитное поле не только облегчает обычную релаксацию дислокационной структуры при отжиге, но и приводит к изменению направления движения: преимущественное стягивание полупетельменяется на расхождение.

Для выяснения природы наблюдаемого явления требуются дальнейшие исследования. Авторы выражают признательность В.И.Альшицу и Б.В.Петухову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант #97-02-16327).

1. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, Т.М.Перекалина, А.А.Урусовская, ФТТ **29**, 467 (1987).
2. Ю.И.Головин, Р.Б.Моргунов, В.Е.Иванов, и др., Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
3. Э.П.Белозерова, А.А.Светашов, В.Л.Красников, Известия РАН, сер. физ. **61**, 291 (1997).
4. В.И.Альшиц, Н.Н.Беккауэр, А.Е.Смирнов, А.А.Урусовская, ЖЭТФ **115**, 951 (1999).
5. M.I.Molotskii and V.Fleurov, Phys. Rev. Lett. **78**, 2779 (1997).

6. V.I.Alshits, E.V.Darinskaya, O.L.Kazakova et al., *J. Alloys & Comp.* **211/212**, 548 (1994).
7. V.I.Alshits, E.V.Darinskaya, O.L.Kazakova, et. al., *Mat. Sci. Eng.* **A234-236**, 617 (1997).
8. V.I.Alshits, E.V.Darinskaya, O.L.Kazakova et al., *Proc. Intern. Symp. on Trends in Continuum Physics*, World Scient., Singapur, 1999.
9. Я.В.Зельдович, А.Л.Бучаченко, Е.Л.Франкевич, *УФН* **155**, 3 (1988).
10. А.Л.Бучаченко, Р.З.Сагдеев, К.М.Салихов, *Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях*, Новосибирск: Наука, 1978.
11. В.В.Кведер, Ю.А.Осипьян, А.И.Шалынин, *ЖЭТФ* **83**, 699 (1982).
12. S.A.Erofeeva, *Phil. Mag.* **70**, 943 (1994).
13. V.P.Kisel, S.A.Erofeeva, and M.Sh.Shikhsaidov, *Phil. Mag.* **A67**, 343 (1993).
14. С.А.Ерофеева, Ю.А.Осипьян, *Динамика дислокаций*, Киев: Наук. Думка, 1975, стр.26.