

05:09

Реакция системы дислокация–примесь на электромагнитное воздействие

© В.И. Алексеенко

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина
АН Украины, 340114 Донецк, Украина

(Поступило в Редакцию 23 марта 1999 г.)

В монокристалле антимонида индия экспериментально изучено динамическое поведение системы: винтовая дислокация-примесная атмосфера в результате электромагнитного воздействия на материал. Обнаружено локальное поглощение электромагнитной энергии в рассматриваемой системе, приводящее к развитию релаксационных процессов, в результате которых изменяется энергия системы и, как следствие, ее динамические свойства. Замечательным является то, что активность системы к электромагнитному воздействию обусловлена наличием примесных атмосфер на неактивных к взаимодействию винтовых дислокациях.

Введение

До недавнего времени низкоэнергетические электромагнитные (ЭМ) поля ($U \ll kT$, где U — энергия электрической либо магнитной составляющей поля, T — температура объекта исследования) являлись принципиальной основой научных методов изучения физических явлений в материалах и их свойств. Считалось, что такие воздействия не могут привести к каким-либо необратимым изменениям в структуре и свойствах конденсированных систем, поскольку они не влияют на динамически равновесную концентрацию дефектов. Однако применение слабых ЭМ полей к неравновесным конденсированным системам, как кристаллическим [1–4], так и аморфным [5], приводило к необратимым изменениям в их структуре и свойствах. В результате интенсивно стали развиваться лабораторные и промышленные методы ЭМ обработки материалов и изделий, призванные улучшить их физико-механические, электрофизические и эксплуатационные свойства [4,6]. Невзирая на прикладной характер таких исследований, была установлена непосредственная причина наблюдаемых структурных изменений — релаксационные процессы, зарождаемые в результате ЭМ воздействий на термодинамически неравновесные материалы. При всем при этом остается нерешенным вопрос, какие элементы структуры ответственны за поглощение ЭМ энергии и за релаксационные процессы, индуцированные ЭМ полем. От успешного решения этого вопроса зависит перспектива эффективного использования ЭМ полей в различных целях. Для решения такой задачи необходимо найти связь между макросвойствами материала и самим ЭМ воздействием на него. Такая связь позволила бы сформулировать научный подход в применении слабых ЭМ полей, благодаря которому можно качественно и количественно оценивать возможности их влияния на структуру и свойства материалов. Принципы такого подхода автором были сформулированы в работе [7]. В основе этих принципов лежат знания структурно-энергетических состояний материала, которые могут быть ответственны за релаксационные

процессы и за непосредственное поглощение ЭМ энергии. В общем случае природа структурно-энергетических состояний может быть различна: точечные дефекты, атомы примесей, линейные дефекты, комплексы, объемные дефекты. Так, в работе [1] показано, что релаксационный процесс обусловлен распадом примесных фаз CdCl_2 и PbCl_2 в магнитообработанных монокристаллах NaCl . В работе [2] релаксационный процесс, выражающийся в периодическом изменении внутреннего трения, связывается с распадом и формированием примесных атмосфер на дислокациях в результате магнитоимпульсного воздействия на поликристаллическую структуру. А вот релаксационный процесс, вызванный электромагнитным воздействием на неупорядоченные системы, авторы работы [5] связывают с последовательным разрушением и формированием кластерных структур. В приведенных выше работах, да и во многих других имеется серьезный недостаток. Он состоит в том, что в каждом конкретном случае нет однозначного определения природы дефектов, ответственных за поглощение ЭМ энергии и релаксационные процессы. В объектах исследования одновременно могут присутствовать различные типы дефектов, а задача их селектирования с точки зрения применения ЭМ воздействий не решается. Пожалуй, поэтому на сегодняшний день и нет единой модели релаксационных процессов, обусловленных ЭМ воздействием.

В настоящей работе предпринята серьезная попытка исправить общее положение дел в этом вопросе. Для того чтобы выяснить элементы структуры, поглощающие ЭМ энергию поля и возможные механизмы релаксационных процессов, индуцированных им, необходим корректный подход, а именно правильный выбор материала в качестве объекта исследования, формирование в нем определенной системы дефектов, которая и будет апробироваться на предмет возможности поглощения ЭМ поля и развития релаксационного процесса, и, наконец, выбор методик, позволяющих локально (*in situ*) контролировать поведение этой системы дефектов.

В работе в качестве системы дефектов выбраны составные дислокации со сформированной на них атмосфе-

рой примесных атомов. Понятно, что материал должен быть монокристаллическим с контролируемой плотностью дислокаций известного типа. Кроме того, плотность дислокаций требуется такова, чтобы максимально исключить взаимодействие между ними и не допустить тем самым неконтролируемую делокализацию в объеме интересующего нас процесса. Для исключения влияния объема на зарождение релаксационного процесса важно иметь диамагнитный кристалл, не чувствительный к внешнему полю.

Объект исследования и методики

На основании выше изложенного для исследований использовался изначально бездислокационный ($\rho < 10^2 \text{ см}^{-2}$) монокристаллический антимонид индия (InSb), легированный теллуридом до концентраций 10^{15} см^{-3} . Применялись образцы в форме прямоугольного параллелепипеда размером $2.5 \times 2.5 \times 15 \text{ мм}$, вырезанные вдоль кристаллографических направлений $[111]$, $[11\bar{2}]$ и $[110]$ соответственно. Исследования проводились на винтовых дислокациях, которые являются неактивными к ЭМ воздействию, что позволяет исключить влияние ЭМ поля на их подвижность. Вводились дислокации с помощью скрайбирования грани $(11\bar{2})$ и последующего четырехопорного изгиба образца относительно направления $[111]$. В результате такого способа нагружения образца в течение определенного времени в нем формируется ансамбль дислокаций, изображенный на микрофотографии поверхности кристалла (111) после его селективного химического травления (рис. 1, *a*). На рис. 1, *b* приведена рентгеновская топограмма дислокационного ансамбля, индуцированного приведенным выше способом. Топограммы снимались по методу аномального прохождения рентгеновских лучей. Для повышения разрешающей способности съемка топограмм проводи-

лась в однокристалльной геометрии с использованием $\text{Mo } K_{\alpha 1}$ излучения. Толщина образцов для топографических исследований составляла $\sim 250 \mu\text{м}$. Для рентгенографической расшифровки дислокационного ансамбля с целью выявления винтовых дислокаций использовалось условие "невидимости" дислокаций на топограмме

$$(\bar{g} \times \bar{b}) = 0, \quad [\bar{g} \times \bar{n}] = 0, \quad (1)$$

где \bar{g} — вектор дифракции отражающей плоскости, \bar{b} — вектор Бюргера дислокации, \bar{n} — вектор дислокационной линии [8].

Очевидно, что для винтовой дислокации имеется множество плоскостей, удовлетворяющих этому условию, а для краевой — лишь единственная отражающая плоскость. Приведенное правило и позволило определить тип введенных деформированием образца дислокаций. Были получены серии топограмм типа $\{220\}$, $\{224\}$ и $\{004\}$. Три таких топограммы приведены на рис. 1, *c–e*. На топограмме *c* видно, что большие сегменты направлены по двум кристаллографическим направлениям $[0\bar{1}1]$ и $[\bar{1}01]$. Дислокации с направлением $[0\bar{1}1]$ скользят в плоскости $(1\bar{1}1)$ и "гаснут" на топограмме 400 (рис. 1, *d*), что свидетельствует о их винтовой природе. Сегменты с направлением $[\bar{1}01]$ скользят в плоскости $(1\bar{1}1)$ и "гаснут" на топограмме 040 (рис. 1, *e*), а это также является свидетельством того, что и эти дислокации имеют винтовую природу. Важно, что именно они наблюдаются на поверхности (111) образца после его химического травления (рис. 1, *a*). В дальнейшем все исследования проводятся на этих дислокациях из-за удобства изучения их движения с помощью химического травления.

Примесная атмосфера на дислокациях создавалась в результате отжига образцов при температуре 300°C в течение 4ч . Для возбуждения ЭМ поля использовалась установка генерирования импульсов магнитного поля (ОИМП-101) с амплитудой 10^5 А/м и частотой следования 1Hz . ЭМ воздействие на образец с винтовыми дислокациями осуществлялось при комнатной температуре.

В качестве параметра исследования в работе используется среднее перемещение ансамбля дислокаций (l) в поле внешнего механического напряжения (σ), достаточно чувствительное к состоянию атмосферы на дислокациях. Значение l определялось путем усреднения перемещений каждой дислокации в исследуемом ансамбле. Изучались ансамбли из 40–50 дислокаций. Механическое напряжение в образце создавалось четырехточечным изгибом.

Измерение перемещений состаренных винтовых дислокаций проводилось с помощью оптического микроскопа с использованием метода повторного селективного травления образца по изменению положения ямок травления в результате их движения. Экспериментально снимались зависимости l от времени механического нагружения образца (t).

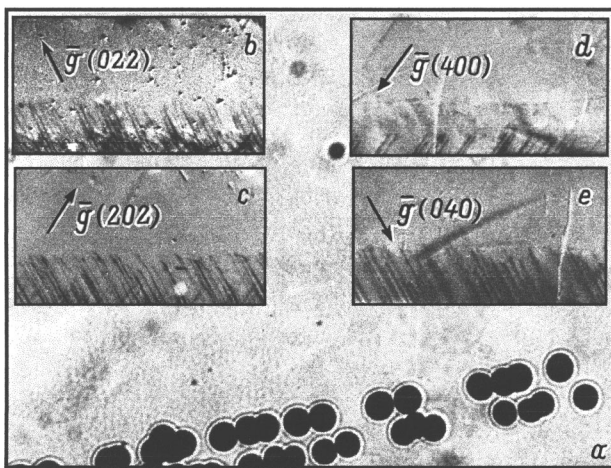


Рис. 1. Микрофотография поверхности (111) (*a*) и рентгеновские топограммы (*b–e*) с изображением винтовых дислокаций в монокристаллах деформированного антимонида индия. Увеличение для всех топограмм $\times 28.5$.

Результаты исследований

Приступая к изучению динамического поведения системы винтовая дислокация–примесь после ЭМ воздействия на образец, вначале рассмотрим динамику системы в отсутствие ЭМ воздействия. На рис. 2 приведены зависимости l от времени механического нагружения образца антимонида индия после отжига в указанном выше режиме. Зависимости получены при изгибном напряжении $\sigma = 10$ МПа и температурах $T_1 = 150^\circ\text{C}$ (кривая 1), $T_2 = 130^\circ\text{C}$ (кривая 2), $T_3 = 115^\circ\text{C}$ (кривая 3). На приведенных зависимостях можно выделить критические времена (t_{cr}) механического нагружения, ниже которых $l = 0$. Следует отметить, что при измерении зависимостей $l(t)$ после отжига образца учитывались нулевые перемещения винтовых дислокаций. Именно это обстоятельство позволило выявить t_{cr} , которое, как видно из рис. 2, зависит от температуры механического нагружения образца.

Используя выражение для зависимости t_{cr} от температуры механического нагружения образца [9]

$$t_{cr} = t_{cr}^0 \sigma^{-m} \exp(U_a/kT), \quad (2)$$

оценим энергию активации процесса отрыва примесной атмосферы от дислокаций в поле внешних напряжений. Ее значение составляет $U_a = 1.0 \pm 0.1$ eV. Учитывая, что зависимость $U_a(\sigma)$ может быть аппроксимирована линейной функцией [9]

$$U_a = U_0 - \gamma\sigma \quad (3)$$

(U_0 — энергия связи атмосферы с линией дислокации, $\gamma = b^2 L_c$ — активационный объем процесса отрыва дислокации от атмосферы, b — вектор Бюргерса,

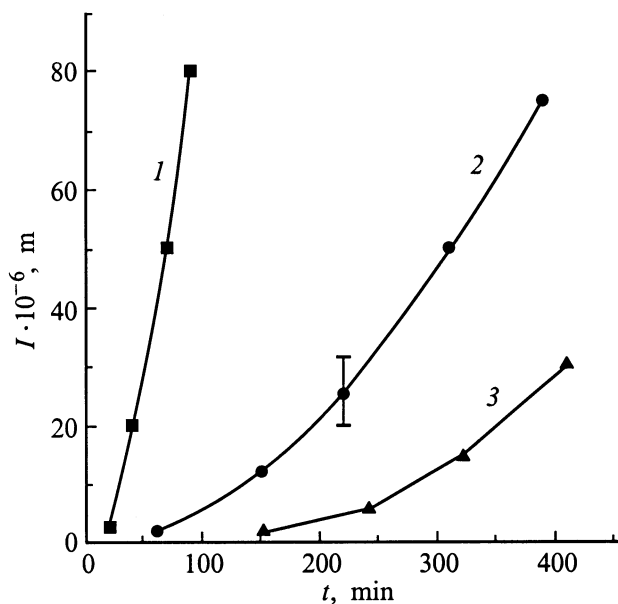


Рис. 2. Зависимость среднего пробега ансамбля винтовых дислокаций от времени механического нагружения монокристалла антимонида индия.

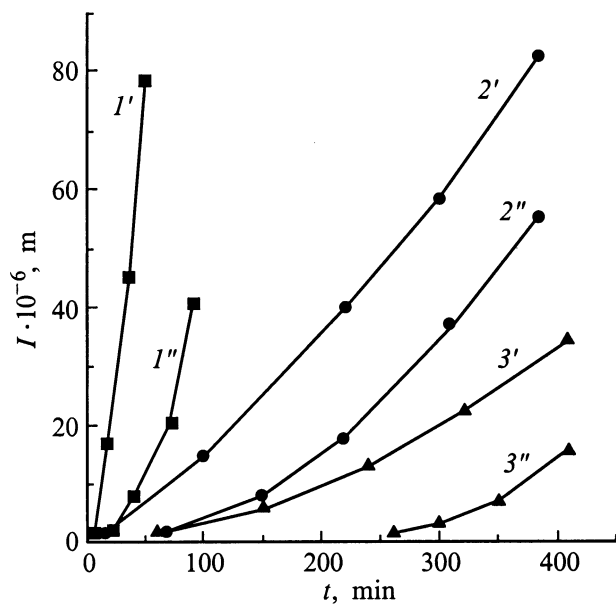


Рис. 3. То же, что на рис. 2, с ЭМ воздействием.

L_c — расстояние между точками закрепления дислокаций примесями), можно определить энергию взаимодействия дислокации с атмосферой U_0 . Для исследуемых в работе монокристаллов антимонида индия при $\sigma = 10$ МПа и $L_c = 1/n = 2 \cdot 10^{-6}$ см энергия $U_0 = 1.3 \pm 0.1$ eV. Линейная плотность примеси на линии дислокации (n) после отжига оценивалась из выражения Коттрелла–Билби [10]

$$n(t_T) = \alpha n_0 (ADt_T/kT_T), \quad (4)$$

где t_T и T_T — соответственно время и температура отжига образца с винтовыми дислокациями, $\alpha = 6$, $A = 10^{-7}$ eV·см, D — коэффициент диффузии примеси, n_0 — общее число атомов в единице объема раствора; коэффициент диффузии определялся экспериментально и составлял значение $D = 10^{-15}$ см²/с.

Поскольку вопрос состоит в выяснении возможности влияния ЭМ поля на динамические свойства винтовых дислокаций, то представляется корректным провести эти исследования с точки зрения влияния ЭМ поля на такие характеристики: t_{cr} , U_a , U_0 .

На рис. 3 приведены зависимости $l(t)$ при $\sigma = 10$ МПа и температурах 150, 130, 115°C сразу (кривые 1'–3') и через сутки (кривые 1''–3'') после ЭМ воздействия на отожженный антимонид индия с винтовыми дислокациями. Сразу после воздействия уменьшается количество винтовых дислокаций с нулевыми пробегами, что обуславливает снижение t_{cr} при всех используемых температурах нагружения. Кроме того, обсуждаемые зависимости спрямляются, поскольку их нелинейность обусловлена ростом со временем нагружения образца и числа сдвинувшихся дислокаций. Оценка энергии активации процесса отрыва дислокаций от примесных атмосфер показывает снижение ее значения до

$U_a = 0.8 \pm 0.1$ eV. Аналогично снижается и энергия связи дислокаций с примесями до значений $U_0 = 1.1$ eV. Через сутки после ЭМ воздействия на образец и вылёживания его при комнатной температуре картина изменяется в обратную сторону: t_{cr} для всех температур увеличилось (рис. 3, кривые $I''-3''$) даже по сравнению с материалом, не подвергавшимся ЭМ воздействию (рис. 2). Замечательным является то, что за сутки при комнатной температуре в системе дислокация–примесь прошли изменения, повлекшие за собой увеличение энергий до значений $U_a = 1.1$ eV и $U_0 = 1.4$ eV. Следует напомнить, что в исходном образце примесная атмосфера (менее связанная) сформировалась при 300°C за 4 h. При значении энергии активации диффузии примеси теллура порядка 0.5 eV коэффициенты диффузии D_1 и D_2 для $T_1 = 20^\circ\text{C}$ и $T_2 = 300^\circ\text{C}$ отличаются примерно на четыре порядка. Учитывая временной закон диффузии $D_1 t_1 / D_2 t_2 = 1$, времена диффузии t_1 и t_2 также отличаются во столько же раз, однако в работе их соотношение менее одного порядка. Таким образом, понятно, что за сутки эксперимента атмосфера, да еще и более связанная с дислокацией, не сформируется за счет диффузии примеси из объема на дислокацию. Такой результат качественно можно представить в рамках концепции о диффузионной неустойчивости атомов примеси в результате ЭМ воздействия на материал [4]. Но тогда, согласно сказанному, в материале после ЭМ воздействия за сутки при комнатной температуре на свежевведенных винтовых дислокациях должна сформироваться примесная атмосфера. Однако дополнительно проведенный опыт о таком не свидетельствует: на винтовых дислокациях, индуцированных в образце после ЭМ воздействия, время задержки их движения экспериментально не обнаруживалось в течение нескольких суток после воздействия, т. е. $T_{cr} = 0$.

На основании проведенного анализа вытекают следующие важные выводы. В результате ЭМ воздействия на образцы антимониды индия с состаренными винтовыми дислокациями в системе дислокация–примесь индуцируется релаксационный процесс, в результате которого примесная атмосфера трансформируется в более связанное с дислокацией состояние. Это в свою очередь приводит в первые промежутки времени после ЭМ воздействия (по-видимому, при ее разрушении) к снижению (относительно исходного состояния) U_0 , U_a и t_{cr} , а затем к росту U_0 , U_a и t_{cr} ; локализация ЭМ энергии и релаксационного процесса происходит в системе дислокация–примесная атмосфера, поскольку в системе свободных от примесных атмосфер дислокаций релаксационные процессы не наблюдаются; переход системы дислокация–примесная атмосфера в результате ЭМ воздействия из одного состояния в другое свидетельствует о наличии в ней метастабильных состояний, которые и могут быть ответственны за поглощение ЭМ поля и за индуцированные им процессы.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве научной основы к созданию электромагнитных способов управления механическими свойствами материала.

Список литературы

- [1] Дистлер Г.И., Каневский В.М., Москвин В.В. и др. // ДАН СССР. 1983. Т. 268. № 3. С. 591–593.
- [2] Дацко О.И., Алексеевко В.И., Шахова А.Д. // ФТТ. 1996. Т. 38. Вып. 6. С. 1799–1804.
- [3] Дацко О.И., Алексеевко В.И. // ФТТ. 1997. Т. 39. Вып. 7. С. 1234–1236.
- [4] Обработка импульсным магнитным полем / Под ред. С.Н. Постникова. София; Горький, 1989. 133 с.
- [5] Алексеевко В.И., Волкова Г.К., Попова И.Б. и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 1. С. 49–58.
- [6] Постников С.Н., Сидоров В.П. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький, 1981. С. 150–154.
- [7] Алексеевко В.И. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 10. С. 50–54.
- [8] Дженкинсон А., Ленг А. Прямые методы исследования дефектов в кристаллах / Под ред. А.М. Елистратова. М.: Мир, 1965. 360 с.
- [9] Алексеевко В.И., Мостовой В.М. // Укр. физ. журн. 1992. Т. 37. № 3. С. 415–419.
- [10] Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургия, 1958. 267 с.