

дителя. Другие закономерности, в особенности неоднократно наблюдавшийся ступенчатый коллапс (рис. 3—5, кривые 2), требуют своего объяснения.

Автор благодарит Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку работы по проекту № 93—03—4187.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tanaka T.//Phys. Rev. Lett. 1978. 40, N 2. P. 820.
- [2] Tanaka T., Fillmore D. J., Sun S. T. et al.//Phys. Rev. Lett. 1980. 45, N 20. P. 1636.
- [3] Shibayama M., Tanaka T.//Advances in Polymer Sci. 1993. 109. Responsive Gels: Volume Transitions 1/Ed. K. Dusek. Springer-Verlag. P. 1.
- [4] Tanaka T., Fillmore D. J.//J. Chem. Phys. 1979. 70, N 3. P. 1214.
- [5] Tanaka T., Sato E., Hirokawa Y. et al.//Phys. Rev. Lett. 1985. 55, N 22. P. 2455.
- [6] Sato-Matsuo E., Tanaka T.//J. Chem. Phys. 1988. 89, N 3. P. 1695.
- [7] Li Y., Tanaka T.//J. Chem. Phys. 1982. 92, N 2. P. 1365.
- [8] Ilavsky M.//Macromolecules. 1982. 15, N 7. P. 782.
- [9] Глазман Ю. М., Фукс Г. И.//Успехи коллоидной химии/Под ред. П. А. Ребиндера, Г. И. Фукса. М., 1973. С. 140.

Поступила в редакцию  
05.04.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 1

УДК 548.4:538.951

#### ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСЛОКАЦИИ НА ДЕФЕКТ МОДУЛЯ ЮНГА

Г. М. Зиненкова, Д. Л. Леготин, Е. В. Пала, Н. А. Тяпунина  
(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

Исследовано влияние распределения дислокаций на дефект модуля Юнга кристаллов NaCl при знакопеременной нагрузке в килогерцевом диапазоне частот и амплитудах относительной деформации  $\varepsilon^0 \approx 4 \cdot 10^{-4}$ . Обнаружено, что дефект модуля Юнга зависит не только от плотности дислокаций, но и в значительной степени от их распределения по объему образца.

Известно, что упругие свойства реальных кристаллов существенным образом зависят от их дефектной структуры. Если к кристаллу с дислокациями приложить напряжение  $\sigma$ , то полная деформация будет складываться из собственно упругой деформации  $\varepsilon_e$  и деформации  $\varepsilon_d$ , обусловленной движением дислокаций. Закон Гука для одноосной деформации реального кристалла может быть представлен в виде

$$\sigma = E_{\text{eff}} (\varepsilon_e + \varepsilon_d), \quad (1)$$

где  $E_{\text{eff}}$  — эффективный модуль Юнга. Деформация  $\varepsilon_d$  зависит от плотности и подвижности дислокаций. Есть основания полагать, что и распределение дислокаций может оказывать влияние на  $\varepsilon_d$ , а следовательно, и на упругие свойства кристаллов.

Целью данной работы было исследовать влияние распределения дислокаций на дефект модуля Юнга  $\Delta E/E$  кристаллов, находящихся под действием знакопеременной нагрузки.

Дефект модуля Юнга и  $E_{\text{eff}}$  исследовались методом составного пьезокварцевого вибратора [1]. В этом методе первичными данными

для определения  $\Delta E/E$  служат результаты непосредственных измерений резонансной частоты системы (пьезокварцевый осциллятор + образец)  $f_r$ . Связь дефекта модуля Юнга и изменения резонансной частоты  $\Delta f_r$  образца имеет вид [1]

$$\Delta E/E = 2\Delta f/f. \quad (2)$$

Эксперимент проводился в следующем порядке: в диапазоне входных напряжений  $V_{\text{ent}} = 0-400$  В при каждом значении  $V_{\text{ent}}$  измерялись ток, протекающий через кварц,  $I = V_R/R$  и частота  $f_r$  в зависимости от времени. (Здесь  $V_R$  — напряжение, снимаемое с измерительного сопротивления  $R \approx 1$  Ом [1]) Резонансная частота пьезокварцевого осциллятора составляла 140 кГц. По этим данным находились мгновенные и установившиеся значения  $f_r$  как функции относительной деформации  $\epsilon^0$  и рассчитывался дефект модуля Юнга  $\Delta E(\epsilon^0)/E$ . За изменением состояния образца в процессе эксперимента следили по вольт-амперной характеристике (ВАХ) составного осциллятора:  $I(V_{\text{ent}})$  или  $V_R(V_{\text{ent}})$ .

Эксперименты проводили на кристаллах NaCl с исходной плотностью дислокаций  $\sim 10^4$  см<sup>-2</sup>. Образцы выкалывали по плоскостям спайности из промышленного монокристалла, выращенного методом Киропулоса; общее содержание примесей составляло  $\sim 10^{-2}$  вес. %. Примеси состояли в основном из ионов Sr<sup>2+</sup>. Катионы Zr, Ca, Mg, Al и Si составляли  $10^{-3}-10^{-4}$  вес. %, а содержание катионной примеси других элементов — меньше  $10^{-4}$  вес. %. Атомная концентрация двухвалентной катионной примеси Sr<sup>2+</sup> не превышала  $7 \cdot 10^{-5}$ .

Для получения образцов с различным распределением дислокаций использовались два метода деформирования: ультразвуком и статическим изгибом в изложнице.

Известно, что распределение дислокаций по длине образца, деформированного методом составного пьезоэлектрического осциллятора, коррелирует с распределением напряжений в стоячей ультразвуковой волне [2]. При возбуждении на основной частоте в центральной части образца, вблизи пучности напряжений, образуется область с высокой плотностью дислокаций. Предварительная деформация ультразвуком проводилась следующим

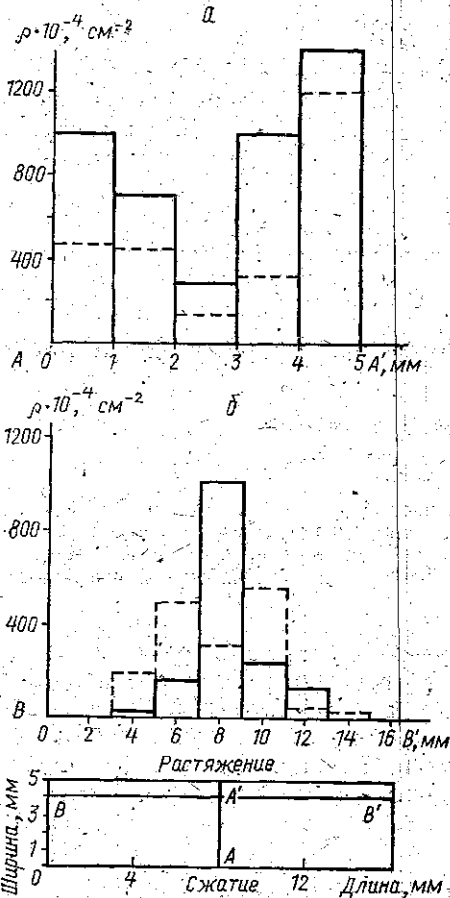


Рис. 1. Распределение дислокаций по ширине (а) и длине (б) образца, предварительно деформированного изгибом: до (штриховые линии) и после обработки ультразвуком (сплошные)

образом: в пьезокварцевом вибраторе с исходным образцом длиной  $\sim 70$  мм возбуждалась стоячая ультразвуковая волна на

основной частоте 37 кГц. Образец деформировался в течение 8—10 ч в режиме плавного увеличения амплитуды ультразвука. При этом в образце формируются три четко выраженные зоны, каждая из которых занимает  $\sim 1/3$  длины образца. В центральной зоне (зоне пластической деформации) плотность дислокаций составила  $\sim 10^7$  см $^{-2}$ . Здесь распределение дислокаций по сечению образца достаточно однородно; тензорная плотность дислокаций близка к нулю. За пределами этой области плотность дислокаций оставалась равной исходной и составляла  $\sim 10^4$  см $^{-2}$ . Затем продеформированный на частоте 37 кГц стержень раскалывали на три части одинаковой длины. Дальнейшие опыты с этими образцами проводились на резонансной частоте  $\sim 140$  кГц.

Предварительная деформация образцов статическим изгибом проводилась в следующем порядке. Исходный образец в виде стержня размерами 16×5×5 мм зажимали в изложнице с радиусом изгиба 0,25 м. Изложницу с образцом помещали в муфельную печь и в течение 2 ч нагревали до 160 °С, затем образец остывал вместе с печью в течение 8 ч. В результате такой обработки распределение дислокаций по сечению и длине образца становится существенно неоднородным. В растянутой и сжатой областях образца (рис. 1, а, штриховые линии) плотность дислокаций ( $\rho$ ) составляет соответственно  $1 \cdot 10^7$  и  $5 \cdot 10^6$  см $^{-2}$ ; средняя по образцу плотность дислокаций  $\sim 10^6$  см $^{-2}$ . Распределение дислокаций по длине образцов зависит от формы изложницы и начального расположения источников дислокаций. Пример гистограммы распределения дислокаций по длине изогнутого образца приведен на рис. 1, б штриховой линией. Подчеркнем, что в результате изгиба в каждой из областей образца — растянутой или сжатой — возникает избыточная плотность дислокаций только одного знака. Тензорная плотность дислокаций в этом случае не равна нулю, о чем свидетельствуют мощные остаточные поля напряжений. Последние визуализировались с помощью поляризационно-оптического микроскопа. Данные химического избирательного травления показали, что распределение напряжений коррелирует с распределением полос скольжения и плотности дислокаций в образцах.

Рассмотрим результаты измерений  $f_r$  и ВАХ, полученные на образцах, предварительно продеформированных указанными выше способами. Характерные примеры ВАХ и зависимостей  $\Delta f_r(\epsilon^0)$ , полученные в процессе ультразвукового воздействия, представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Зависимости (1) и (2) рис. 2 и 3 получены для образцов без предварительной деформации. Видно, что под действием ультразвука образцы ведут себя сходным образом; количественные различия обусловлены тем, что частоты испытаний отличались более чем в 3 раза (37 и 143 кГц). Изменение хода кривой  $\Delta f_r(\epsilon^0)$  (указано стрелкой на кривой 1, рис. 3) соответствует началу процесса размножения дислокаций, о чем свидетельствует также и изменение наклона ВАХ (указано стрелкой на кривой 1, рис. 2). Согласно [3, 4], плавное изменение  $f_r(\epsilon^0)$  до этой точки обусловлено в основном нагревом образца за счет диссипации механической энергии колеблющимися дислокациями. Резкое падение резонансной частоты связано с началом «закритических»\*) колебаний и размножением дислокаций, приводящими к значительному росту дислокационной деформации  $\epsilon_d$ .

\*) К «закритическим» отнесем колебания, при которых дислокационный сегмент превышает критические размеры и форму [2, 5].

Образец с дислокациями, предварительно введенными ультразвуком, ведет себя по-другому, что видно из сравнения кривых 3 и 2 на рис. 2 и 3. Образец 2 является зеркальным сколом по отношению к

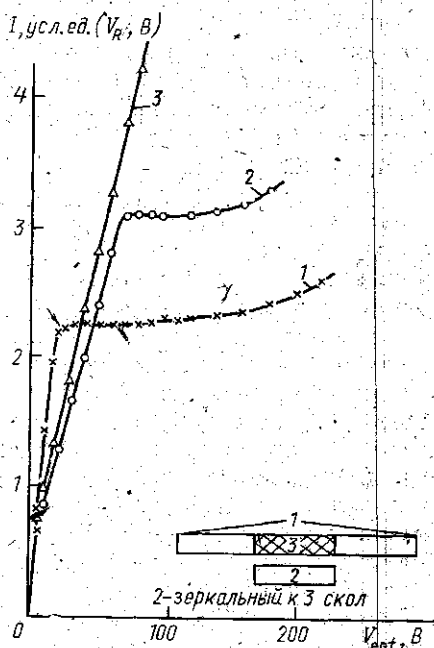


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики осцилляторов: 1 — при  $f_r = 37$  кГц (для целого стержня); 2 и 3 — при  $f_r = 143$  кГц соответственно для контрольного и предварительно деформированного ультразвуком образцов (см. схему)

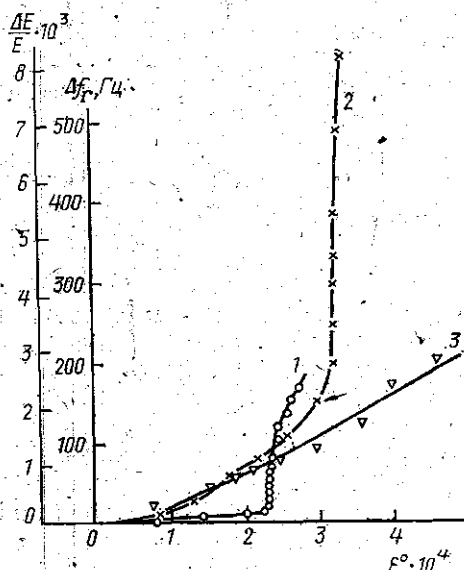


Рис. 3. Зависимости изменения резонансной частоты осцилляторов  $\Delta f_r$  и дефекта модуля Юнга  $\Delta E/E$  от амплитуды относительной деформации (обозначения кривых — как на рис. 2)

образцу 3 (см. схему рис. 2). В результате предварительной ультразвуковой деформации образец «упрочнился»: его ВАХ оставалась прямолинейной вплоть до разрушения образца. Зависимость  $\Delta f_r(\epsilon^0)$  для предварительно деформированного ультразвуком образца (кривая 3, рис. 3) с достаточной степенью точности может быть аппроксимирована параболой, что согласуется с результатами [4]. Это говорит о том, что при предварительной ультразвуковой деформации в образце было достигнуто предельное состояние системы «дислокации — точечные дефекты» [2].

Поведение образцов с дислокациями, предварительно введенными изгибом, отличается от поведения и предварительно деформированных ультразвуком, и контрольных недеформированных образцов. На рис. 4 и 5 приведены примеры ВАХ и зависимостей  $\Delta f_r(\epsilon^0)$  для образцов: предварительно деформированного изгибом (4), контрольного недеформированного (2') и предварительно деформированного ультразвуком (3). Средняя плотность дислокаций в образцах 3 и 4 одинакова, а распределение дислокаций различно.

Уже по ВАХ (рис. 4) видно, что зависимости  $V_R(V_{ent})$  для предварительно деформированных ультразвуком (кривая 3) и изгибом (кривая 4) образцов располагаются по разные стороны от ВАХ конт-

рольного недеформированного образца (кривая 2'). Кривая 4 ниже, а кривая 3 выше, чем кривая 2', во всем исследованном интервале амплитуд. Такое расположение ВАХ свидетельствует о том, что дис-

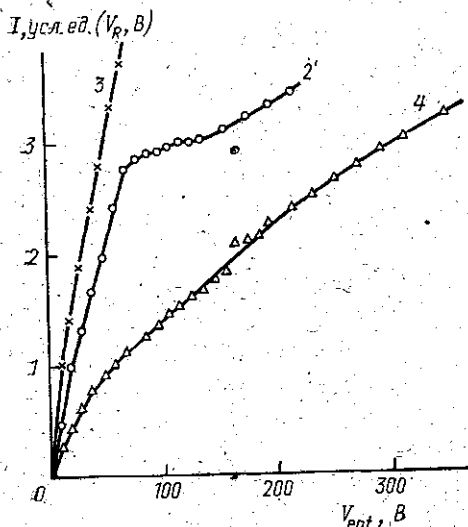


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики осцилляторов, нагруженных образцами: контрольным (2') и предварительно деформированным ультразвуком (3) и изгибом (4);  $f_r = 143$  кГц

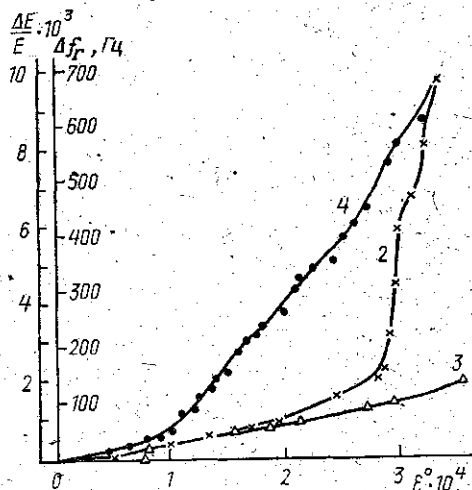


Рис. 5. Зависимости изменения резонансной частоты осцилляторов  $\Delta f_r$  и дефекта модуля Юнга  $\Delta E/E$  от амплитуды относительной деформации: контрольный образец (2') и предварительно деформированный ультразвуком (3) и изгибом (4);  $f_r = 143$  кГц

сипация механической энергии в изогнутом образце больше, тогда как в упорядоченном ультразвуком меньше, чем в контрольном.

Отклонение хода ВАХ изогнутых образцов от линейной зависимости начинается при амплитудах меньших, чем отклонение ВАХ контрольных. Для образца 4 на рис. 4  $\epsilon^0 = 0,8 \cdot 10^{-4}$ , а для образца 2'  $\epsilon^0 = 2,8 \cdot 10^{-4}$ .

Вид ВАХ контрольного (2') и изогнутого (4) образцов позволяет заключить, что отклонение ВАХ образца (2') от прямой обусловлено в основном размножением дислокаций, тогда как для образца 4 это можно связать с перераспределением дислокаций, введенных изгибом. Последнее заключение подтверждается сравнением гистограмм распределения плотности дислокаций в изогнутом образце до и после ультразвукового воздействия. Вернемся к рис. 1, где представлены примеры гистограмм распределения дислокаций по ширине и по длине образца, предварительно деформированного изгибом, до и после воздействия ультразвука. Из рис. 1, б видно, что в результате действия ультразвука появляется характерное для ультразвуковой деформации распределение дислокаций по длине образца: плотность дислокаций существенно возрастает вблизи пучности напряжений и уменьшается к узлам. Неоднородное распределение по ширине образца (см. рис. 1, а) при этом сохраняется; средняя по образцу плотность дислокаций остается постоянной. В результате такого перераспределения дислокаций в изогнутых образцах происходит релаксация напряжений, что видно

при сравнении поляризационно-оптических микрофотографий до и после ультразвукового воздействия.

Различие в дислокационной структуре этих образцов отражаются на графиках  $\Delta f(\epsilon^0)$  следующим образом. Отклонение от параболической зависимости кривой  $\Delta f(\epsilon^0)$  предварительно изогнутого образца, в отличие от контрольного (2') и упрочненного ультразвуком (3), начинается практически сразу после приложения нагрузки. То есть на изменение частоты существенно влияет не только наличие «свежих» дислокаций, но и их распределение. По мере того как распределение дефектов в изогнутом образце приближается к виду, характерному для ультразвукового воздействия, и внутренние напряжения релаксируют, графики  $\Delta f(\epsilon^0)$  для образцов 2' и 4 сближаются. Подчеркнем, что в том же интервале амплитуд график  $\Delta f(\epsilon^0)$  предварительно упрочненного ультразвуком образца соответствует температурному ходу  $\Delta f(T)$  [4].

Поскольку  $\Delta f$ , и  $\Delta E/E$  связаны соотношением (2), то все сказанное выше о влиянии структурных дефектов на изменение частоты в равной мере относится и к дефекту модуля Юнга. Поэтому зависимости  $\Delta f$ , и  $\Delta E/E$  от  $\epsilon$  приведены на одних и тех же рисунках (рис. 3 и 5).

Таким образом, проведенные эксперименты и их анализ позволяют заключить, что дефект модуля Юнга образца, находящегося в поле знакопеременной нагрузки, в значительной степени определяется особенностями дислокационной структуры: распределением дислокаций по длине и сечению образца.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Швидковский Е. Г., Дугарян А. А. // Научн. докл. высшей школы — Физ.-мат. науки. 1958. 1, № 5. С. 211.
- [2] Тяпунина Н. А., Благовещенский В. В., Зиненкова Г. М., Ивашкин Ю. А. // Изв. вузов, Физика. 1982. № 6. С. 118.
- [3] Зиненкова Г. М., Пала Е. В. Деп. ВИНТИ № 541-В89Деп. М., 1989.
- [4] Пала Е. В. Особенности пластического деформирования ультразвуком щелочногалогенных кристаллов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1992.
- [5] Леготин Д. Л. Влияние дислокационной структуры на дефект модуля Юнга щелочногалогенных кристаллов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1993.

Поступила в редакцию  
14.04.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 1

УДК 621.315.592

#### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ПРОВОДИМОСТЬ, ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ КОМПЕНСИРОВАННОГО a-Si:H

А. Г. Казанский, А. В. Мельников, Д. Г. Яркин

(кафедра физики полупроводников)

Исследовано влияние уровня легирования и степени компенсации на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства компенсированного гидрированного аморфного кремния (a-Si:H). Полученные результаты объясняются влиянием положения уровня Ферми и вызванных введением примесей крупномасштабных флуктуаций потенциала на величину коэффициента поглощения ( $\alpha$ ) и фотопроводимости ( $\sigma_{ph}$ ) и форму зависимостей  $\alpha(h\nu)$  и  $\sigma_{ph}(T)$ .