

УДК 539.374 : 539.67

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ $A^{IV}V^VI$

В. А. Робман, М. Ш. Шихсаидов

Исследовано влияние импульсов ультразвуковых колебаний (УЗК) на пластические свойства кристаллов ZnS , $ZnSe$ и CdS . Показано, что ультразвуковое воздействие на стадии упругоэластической деформации приводит к понижению деформирующего напряжения — акустопластическому эффекту. Проведены исследования зависимости эффекта от частоты УЗК и степени деформации образца. В работе продемонстрирована возможность открепления дислокаций от возникающих под действием света локальных препятствий при воздействии УЗК.

Как известно, возбуждение электронной подсистемы полупроводниковых материалов, например, в результате освещения может приводить к изменению их пластических свойств [1]. Детальное изучение данного явления показало, что при освещении могут реализовываться как положительный (упрочняющий) фотопластический эффект (ФППЭ) [1], так и отрицательный (разупрочняющий) ОФПЭ [2]. В настоящее время известны и такие эффекты влияния внешних воздействий на пластические свойства полупроводников, как, например, приповерхностный изгиб зон [3], фотоинжекция электронов из металла [3], внешнее электрическое поле [3-5] и т. д. Наряду с перечисленными выше способами управления пластическими свойствами полупроводниковых материалов могут существовать и другие. Одним из таких свойств может быть изменение пластичности кристаллов при воздействии знакопеременных периодических напряжений. Это явление было детально исследовано при изучении пластических свойств металлов и получило название акустопластического эффекта (АПЭ) [6-9].

Пластическая деформация кристаллов сульфида и селенида цинка также приводит к возникновению дискретных импульсов акустической эмиссии (АЭ) [10]. Изучение спектральной плотности сигналов АЭ показало, что максимум спектра в основном расположен в диапазоне сотен килогерц. Увеличение степени и скорости деформации приводит к стабилизации флуктуаций максимума спектра. При этом происходит некоторое смещение максимума в более высокочастотную область.

Исходя из вышеизложенных экспериментальных фактов в настоящей работе была предпринята попытка обнаружения акустопластического эффекта при импульсном ультразвуковом воздействии в полупроводниковых соединениях $A^{IV}V^VI$. С этой целью были проведены исследования влияния ультразвука в диапазоне 25—100 кГц на процессы активного деформирования и ползучести кристаллов. В работе продемонстрирована возможность влияния акустической волны на открепление дислокаций от возникающих под действием света локальных препятствий.

1. Методика эксперимента

Возбуждение ультразвуковых колебаний в исследуемых образцах выполнялось с применением генератора импульсов, частота повторения

которых была 30 Гц, частота заполнения импульса 25, 60, 100 кГц, длительность на уровне 0.5 в пределах 5—10 мкс. Форма излучаемых ультразвуковых импульсов была в виде затухающих осцилляторов. Амплитуда электрических сигналов на входе в ультразвуковых колебаниях (УЗК) была порядка 300 В.

На рис. 1 показана схема ультразвукового воздействия на полупроводниковый кристалл в процессе его статической деформации. Кварцевая деформирующая «головка» вместе с образцом устанавливалась на излучатель, который для исключения влияния нагрузок размещался в полости специального защитного кварцевого стакана.

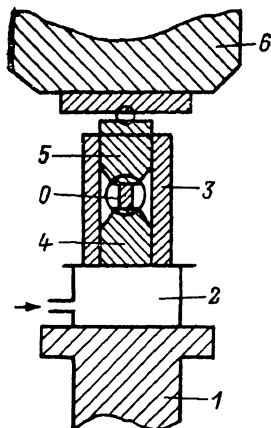


Рис. 1. Схема ультразвукового воздействия на полупроводниковый кристалл в процессе его статической деформации.

0 — образец; 1 — неподвижный столик; 2 — специальный защитный кварцевый стакан, в полости которого размещался УЗ излучатель; 3 — направляющий полый кварцевый цилиндр; 4, 5 — нижний и верхний деформирующие кварцевые головки; 6 — пуансон.

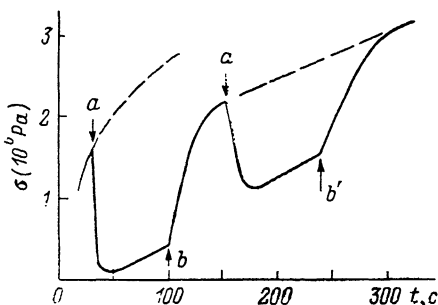


Рис. 2. Изменение деформирующего напряжения при акустическом эффекте в кристаллах селенида цинка (УЗК — 25 кГц). a, a' — начало УЗ воздействия; b, b' — конец.

Исследования проводились на монокристаллических образцах ZnS, ZnSe и CdS размерами $3 \times 3 \times 6$ и $2 \times 3 \times 4$ мм. Статическое деформирование проводилось на испытательной электрогидравлической машине в режиме активной деформации и ползучести.

В качестве источника монохроматического освещения использовалась ксеноновая лампа высокого давления ДКСШ-200, свет от которой проходил через монохроматор МДР-2 и фокусировался на образец с помощью линз.

2. Результаты эксперимента

Основной результат настоящей работы заключается в обнаружении АП эффекта в полупроводниковых соединениях $A^{IV}B^{VI}$ (ZnS, ZnSe, CdS) при периодическом воздействии ультразвуковыми упругими импульсами. На рис. 2 приведена часть диаграммы деформации кристаллов селенида цинка. На участке пластического течения в момент времени a и a' дополнительно к деформированию с постоянной скоростью нагружения образец подвергался воздействию ультразвука с частотой 25 кГц. Из этого рисунка видно, что действие вибраций носит обратимый характер: при прекращении ультразвукового воздействия (моменты времени b и b') наблюдается возвращение деформирующего напряжения к исходному значению. При этом если на стадии установившейся пластической деформации напряжение полностью возвращается к исходному значению (точка b'), то на начальной стадии пластического течения, как правило, дефор-

мирующее напряжение не достигает исходного значения (точка *b*); на этой стадии возможны случаи, когда пластическое течение после прекращения ультразвукового воздействия продолжается при напряжениях, меньших, чем напряжение, при котором производилось включение ультразвука. Максимальная величина АП эффекта составляла $\sim 7\%$ от значения предела текучести, т. е. $\Delta\sigma/\sigma \approx 7\%$.

Изучение АП эффекта от степени деформации продемонстрировало резкую зависимость величины эффекта $\Delta\sigma$ от степени деформации ϵ (рис. 3). Эффект наиболее отчетливо проявляется при выходе на стадию пластического течения кристалла. С увеличением степени деформации наблюдается уменьшение $\Delta\sigma$.

Исследования частотной зависимости показали, что максимальная величина АП эффекта наблюдается при частоте 25 кГц. Увеличение частоты ультразвука приводило к уменьшению величины эффекта. Аналогичные результаты были получены и на кристаллах сульфида цинка и кадмия.

Как известно, в кристаллах со структурой вюрцита плоскостями лег-

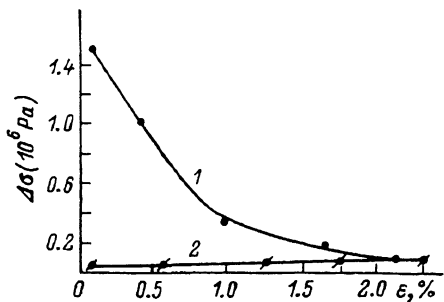


Рис. 3. Зависимость величины АПЭ от степени деформации в кристаллах селенида цинка. УЗК 25 (1) и 100 кГц (2).

кого скольжения являются базисная и призматическая. Освещение кристалла светом на стадии пластического течения кристалла может приводить к реализации положительного ФПЭ в случае деформации по базисной системе скольжения и к отрицательному эффекту по призматической [2, 11]. Как показали исследования ориентационной зависимости АПЭ на кристаллах сульфида кадмия, воздействие ультразвука приводит к разупрочнению в обоих ориентациях. Кроме изучения влияния ультразвука на пластические свойства, в темноте были проведены аналогичные исследования на образцах, подвергавшихся в процессе деформации освещению. Включение ультразвука по достижению «светового» уровня деформирующего напряжения также приводило к эффекту разупрочнения.

Ранее нами сообщалось о наблюдении эффектов последствия (ЭП) и фотопластической памяти (ЭФПП) в полупроводниковых соединениях $A^{IV}B^{VI}$ [12, 13]. В настоящей работе были проведены исследования влияния ультразвука на эти явления. В частности, если кристаллы на стадии пластического течения осветить импульсом света длительностью $t=1$ с, то деформирующее напряжение продолжает возрастать, после выключения света достигает некоторого максимального значения $\Delta\sigma_{max}$ и лишь после этого самопроизвольно уменьшается до первоначального уровня (рис. 4, 1). Уровень деформирующего напряжения в темноте принят за начало отсчета. Подробное изложение данного явления приведено в работе [12]. Если эксперимент воспроизвести повторно, но в момент времени \downarrow (рис. 4) воздействовать ультразвуком, то на кривой деформации практически мгновенно наблюдается излом, и соответственно величина ЭП в этом случае существенно меньше, чем в первом (рис. 4, 2). Для сравнения моменты начала освещения в первом и во втором случаях совмещены. В момент времени \uparrow (рис. 4) производилось прекращение воздействием ультразвука.

Аналогичные эксперименты были проведены и при изучении ЭФПП [10, 13]. В работе [10] было показано, что если в процессе упрочнения образца на свету произвести остановку деформирующей машины, а затем выключить свет, то напряжение деформации может стабильно сохранять фиксированное значение в течение $t_p=10$ мин. Если, однако, в момент времени $t < t_p$ воздействовать ультразвуком, то релаксация

деформирующего напряжения начнется существенно раньше (рис. 5). Как и на рис. 4, моменты освещения кристалла без воздействия ультразвука и с последующим его воздействием совмещены. Напряжение деформации образца в темноте принято за начало отсчета. Если же включение деформирующей машины осуществлять одновременно с выключением света, то в этом случае деформирующее напряжение не изменится по крайней мере в течение 2 ч после выключения света [10]. Воздействие же ультразвуком приводит практически к мгновенному началу релаксации напряжения.

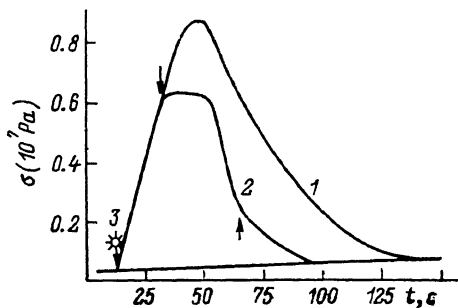


Рис. 4. Влияние УЗК на величину эффекта последействия (ЭП).

1 — ЭП без воздействия УЗК, 2 — ЭП при воздействии УЗК 25 кГц, 3 — момент импульсного освещения кристалла ($\tau=1$ с).

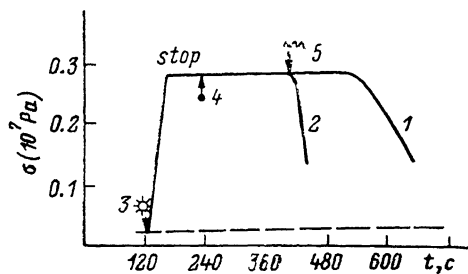


Рис. 5. Влияние УЗК на эффект фотопластической памяти (ФПП) в кристаллах сульфида цинка.

1 — ФПП без воздействия УЗК; 2 — ФПП при воздействии УЗК 25 кГц; 3, 4 — моменты включения и выключения света соответственно; 5 — момент воздействия УЗК; stop — остановка деформирующей машины.

3. Обсуждение результатов

Несмотря на то что к настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал как по динамической ползучести, так и по снижению усилия при активном нагружении ШГК и металлов (см., например, [6-9]), вопрос о природе эффекта акустического разупрочнения остается дискуссионным. Обсуждаемые в литературе механизмы эффекта акустического разупрочнения в металлах могут быть условно разделены на три группы: 1) суперпозиция статических и знакопеременных периодических напряжений [6, 8, 14]; 2) возрастание вероятности активированного преодоления дислокациями барьеров, препятствующих их движению [15-17]. Очевидно, сюда же можно отнести и влияние ультразвука на движение дислокационных перегибов [18]; 3) увеличение плотности подвижных дислокаций при воздействии ультразвуком, например, при зарождении от источника Франка—Рида [19]. В нашем случае имеет смысл исключить из рассмотрения эффект акустического разупрочнения, связанный с влиянием колебаний на структурные изменения, так как вклад этих процессов существен при значительно более высоких амплитудах вибраций.

Согласно гипотезе, суперпозиции статических и динамических напряжений, на которой базируются различные теоретические расчеты, наиболее часто встречающиеся при обсуждении механизма АПЭ, вытекающие из них выводы могут быть сформулированы следующим образом [6, 8, 14].

Во-первых, акустическое разупрочнение будет проявляться всегда, если скорость пластической деформации нелинейно зависит от напряжения деформации. Во-вторых, величина эффекта не должна зависеть от частоты колебаний и от величины предшествующей пластической деформации (зависимость от степени деформации проявляется лишь в силу зависимости активационного объема).

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты находятся в противоречии с перечисленными выше выводами. В частности, было установлено, что величина акустического разупрочнения претерпевает существенные изменения в зависимости от степени деформации и частоты ультразвука. Следовательно, можно предположить, что наблюдаемый на полупроводниковых материалах АПЭ не связан с суперпозицией статических и знакопеременных периодических напряжений. Возможно, вклад этого механизма незначителен и проявляется в разупрочнении образца при частотах колебаний ≈ 100 кГц и более высоких степенях деформации (рис. 3). Величина эффекта деформирующего напряжения в этом случае составляет $\Delta \sigma$ (100 кГц) $\leq 5\%$ $\Delta \sigma$ (25 кГц).

Исследование температурной зависимости внутреннего трения (ВТ) на полупроводниковых кристаллах CdS [20] и ZnS [21] свидетельствует, что пик ВТ для частот ≈ 100 кГц приходится на температурную область 350–400 К. С уменьшением частоты наблюдается смещение пика ВТ к частотам порядка 25 кГц; это позволяет предположить, что максимум ВТ будет соответствовать температурной области 300 К. Просматривается тенденция к коррелированному поведению пика ВТ и максимума АПЭ. Таким образом, полученные в настоящей работе экспериментальные результаты могут быть непротиворечиво объяснены в рамках модели Келлера—Гранато—Люкке (КГЛ) [15, 16]. В частности, можно предположить, что в рамках дислокационного ВТ акустическое разупрочнение может быть обусловлено облегчением термофлуктуационного открепления дислокации от препятствий под действием ультразвука. Необходимо также учитывать возможности повышения подвижности дислокаций от препятствий, совершающих независимое от дислокации колебательное движение при воздействии на них ультразвука [17].

В рамках модели КГЛ зависимость величины акустического разупрочнения от предшествующей деформации можно объяснить возникновением «сильных» препятствий, например дислокационных пересечений с увеличением степени деформации, и поэтому влияние ультразвука данной амплитуды на преодоление таких стопоров становится значительным. Можно также предположить и смещение пика ВТ с увеличением степени деформации, которая соответственно будет приводить к смещению частоты максимума АПЭ, например, в результате изменения среднего расстояния между препятствиями, т. е. средней длины сегмента дислокации.

Наконец, рассмотрим механизм увеличения плотности подвижных дислокаций при воздействии ультразвука. Здесь, как правило, обсуждаются два механизма появления подвижных дислокаций при приложении знакопеременного напряжения: а) разблокировка состаренных дислокаций от примесных атмосфер [22], б) процесс размножения дислокаций [19, 23]. Согласно ранее выработанным представлениям [10, 13], экспериментальные результаты, полученные при изучении влияния ультразвука на эффекты последствия (рис. 4) и фотопластической памяти (рис. 5), свидетельствуют в пользу разблокировки дислокаций от препятствий, закрепленных под действием света.

Авторы выражают благодарность В. Я. Кравченко и Я. М. Сойферу за интерес к работе и полезные дискуссии.

Л и т е р а т у р а

- [1] Осипьян Ю. А., Савченко И. Б. Письма ЖЭТФ, 1968, т. 7, № 4, с. 130—133.
- [2] Осипьян Ю. А., Шихсаидов М. Ш. ФТТ, 1973, т. 15, № 12, с. 3711—3712.
- [3] Мдиваниян Б. Э., Шихсаидов М. Ш. ФТТ, 1987, т. 29, № 8, с. 2405—2411.
- [4] Бредихин С. П., Шмурак С. З. Письма ЖЭТФ, 1975, т. 21, № 6, с. 342—345.
- [5] Осипьян Ю. А., Петренко В. Ф. ЖЭТФ, 1975, т. 69, № 4, с. 1362—1371.
- [6] Manjoine M. J. Proc. Amer. Soc. Test. Mater., 1949, vol. 49, p. 788—798.
- [7] Blacha F., Langenecker B. Naturwissenschaften, 1955, Bd 42, H. 20, S. 556—558.
- [8] Fridrich R., Kaiser G., Pechold W. Z. Metallkunde, 1969, Bd 60, H. 5, S. 390—398.
- [9] Лебедев А. Б., Кустов С. Б., Кардашев Б. К. ФТТ, 1987, т. 29, № 12, с. 3563—3569.

- [10] Робсан В. А., Шихсаидов М. Ш. ФТТ, 1988, т. 30, № 8, с. 2437—2444.
[11] Шихсаидов М. Ш. ФТТ, 1981, т. 23, № 6, с. 1662—1667.
[12] Ермаков Г. А., Коровкин Е. В., Осипьян Ю. А., Шихсаидов М. Ш. ФТТ, 1975, т. 17, № 8, с. 2365—2367.
[13] Коровкин Е. В., Шихсаидов М. Ш. ФТТ, 1981, т. 23, № 6, с. 1618—1622.
[14] Козлов А. В., Мордюк И. С., Селицгер С. И. ФТТ, 1986, т. 28, № 6, с. 1818—1823.
[15] Köhler J. S. In: Imperfection in nearly perfect crystals. W. Shocley, 1952, N 4, p. 197—212.
[16] Гранато А., Люкке К. В кн.: Ультразвуковые методы исследования дислокаций. М.: ИЛ, 1963, с. 27—57.
[17] Варданян Р. А., Кравченко В. Я. ДАН СССР, 1982, т. 266, № 1, с. 82—85.
[18] Зегер А., Шиллер П. В кн.: Физическая акустика / Под редакцией У. Мэзона. М.: Мир, 1969, т. 3, ч. А, с. 578.
[19] Благовещенский В. В., Тяпунина Н. А. ДАН СССР, 1980, т. 254, № 4, с. 869—872.
[20] Блистанов А. А., Гераськин В. В., Соболева Е. С. В кн.: Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах. М.: Наука, 1972, с. 31—33.
[21] Александров Л. Н., Зотов М. И. ФТТ, т. 10, № 6, с. 2795—2797.
[22] Челноков В. А., Степанов В. А., Кузьмин Н. Л. ФТТ, 1970, т. 12, № 3, с. 841—847.
[23] Смирнов Б. И., Челноков В. А., Кузьмин Н. Л. ФТТ, 1983, т. 25, № 2, с. 519—524.

Институт физики
твёрдого тела АН СССР
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
3 июня 1988 г.