

УДК 548.4:534

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА И СВЕТА НА ДИССИПАТИВНЫЕ СВОЙСТВА CdS.

1. Низкоомные кристаллы

Г. В. Бушуева, Г. М. Зиненкова, И. Г. Полякова, Н. А. Тяпунина

(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния ультразвука на диссипативные свойства низкоомных кристаллов CdS. Показано, что основной вклад во внутреннее трение низкоомных образцов вносят дислокационные механизмы поглощения ультразвука. Анализируются изменения, происходящие в системе «дислокации — закрепляющие их центры» под действием ультразвука при различных амплитудах деформации.

Введение

Кристаллы CdS относятся к числу полупроводниковых соединений A^2B^6 . В них наблюдалось явление фотопроводимости и был обнаружен фотопластический эффект. Кристаллы CdS являются пьезоэлектриками и могут также служить квантовыми генераторами света с электронным возбуждением.

Изучению изменений свойств CdS под действием различных полей посвящено много работ (см., напр., [1–5]). Однако известные из литературы данные далеко не всегда согласуются друг с другом. Нет единой точки зрения и на природу наблюдаемых эффектов.

Цель настоящей работы состояла в изучении влияния ультразвука и света на диссипативные свойства CdS и оценке вкладов во внутреннее трение электронной и решеточной подсистем в условиях раздельного и совместного действия ультразвука и света.

По своим свойствам исследованные образцы CdS можно было разделить на два типа: низкоомные — с таким темновым удельным сопротивлением ρ_{dark} при котором частота релаксации проводимости ω_c больше частоты ультразвуковых испытаний ω ($\omega_c > \omega$); высокоомные — с таким ρ_{dark} , при котором $\omega_c < \omega$.

В данном сообщении детально рассмотрены результаты, относящиеся к низкоомным образцам. Их темновое удельное сопротивление ρ_{dark} лежало в интервале от 7 до 400 Ом·см. При освещении удельное сопротивление ρ_{light} таких образцов несколько уменьшалось и находилось в пределах от 7 до 300 Ом·см, соотношение же $\omega_c > \omega$ при этом сохранялось. Диссипативные свойства образцов данной серии не меняются при освещении.

1. Методика экспериментов

Для изучения диссипативных свойств кристаллов использовался метод составного пьезоэлектрического осциллятора [6]. В данном методе ультразвуковое (УЗ) поле в образцах создается пьезокварцевым стержнем (X -срез, ось стержня составляет угол 71° с оптической осью кварца [7]), а не возникает за счет

собственного пьезоэффекта CdS. Это позволило проводить эксперименты при условиях, когда пьезоэлектрические свойства CdS не проявляются. Метод составного пьезоэлектрического осциллятора позволяет измерять внутреннее трение и дефект модуля упругости, а также деформировать кристаллы с помощью УЗ [6, 8].

Исследования проводились на основной частоте составного осциллятора ~ 90 кГц в широком интервале амплитуд относительной деформации (от 10^{-5} до 10^{-3}) при комнатной температуре. В образцах CdS, представляющих собой стержни размерами $2 \times 2 \times 16$ мм, возбуждалась продольная стоячая волна

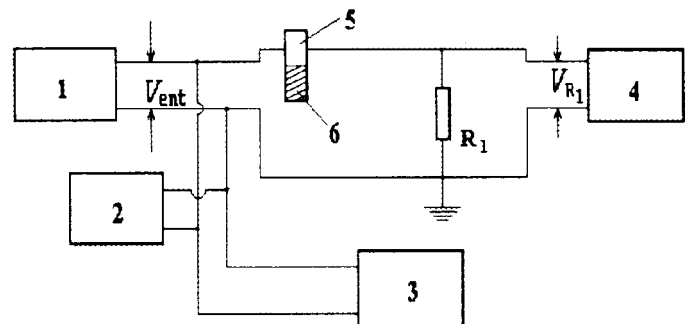


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 — звуковой генератор, 2 — частотомер, 3 — вольтметр, 4 — милливольтметр, 5 — пьезокварц, 6 — образец, R_1 — дополнительное сопротивление (1,2 кОм)

За изменением состояния образца CdS при УЗ-воздействии следили *in situ* по так называемым вольт-амперным характеристикам (ВАХ) составного осциллятора $V_{R1}(V_{\text{ent}})$, где $V_{R1} = IR_1$. Смысл R_1 , V_{R1} и V_{ent} ясен из рис. 1, где приведена схема установки. Значения V_{R1} пропорциональны силе тока смещения I в кварце и амплитуде относительной деформации ϵ^0 в пучности стоячей волны. Отношение V_{ent}/V_{R1} может служить мерой диссипируемой энергии [8].

Электрические свойства образцов CdS — их удельное сопротивление и емкость в темноте и на свету — измерялись стандартными приборами.

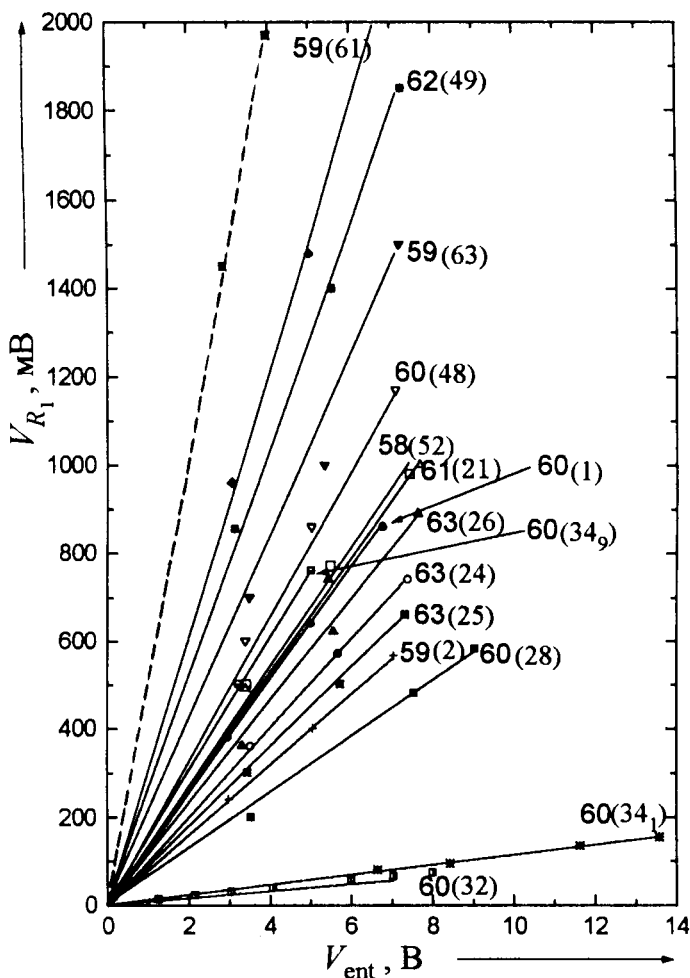


Рис. 2. Линейные участки ВАХ составного осциллятора с образцами близкой кристаллографической ориентации $58^\circ < \theta < 63^\circ$. Цифры без скобок соответствуют значениям угла θ . Цифры в скобках соответствуют номерам образцов, а их нижний индекс — номеру испытания. Пунктирная линия — ВАХ ненагруженного кварца

2. Результаты и их обсуждение

Начальные линейные участки ВАХ составного осциллятора с низкоомными образцами близкой кристаллографической ориентации приведены на рис. 2. Ориентацию образцов характеризовали углом θ между осью 6-го порядка и продольной осью образца, совпадающей с направлением распространения УЗ-волны. Подчеркнем, что значения V_{ent}/V_{R1} для осциллятора с низкоомными образцами, несмотря на близкую кристаллографическую ориентацию образцов ($58^\circ < \theta < 63^\circ$)*, оказались различны. Величины внутреннего трения Q^{-1} образцов этой группы могли значительно отличаться (даже в 30 раз), что свидетельствует о существенном различии исходных состояний образцов. Это обстоятельство затрудняет сравнение результатов, полученных на серии образцов. Поэтому предпочтительнее сравнивать резуль-

таты многократных УЗ-испытаний одного и того же образца.

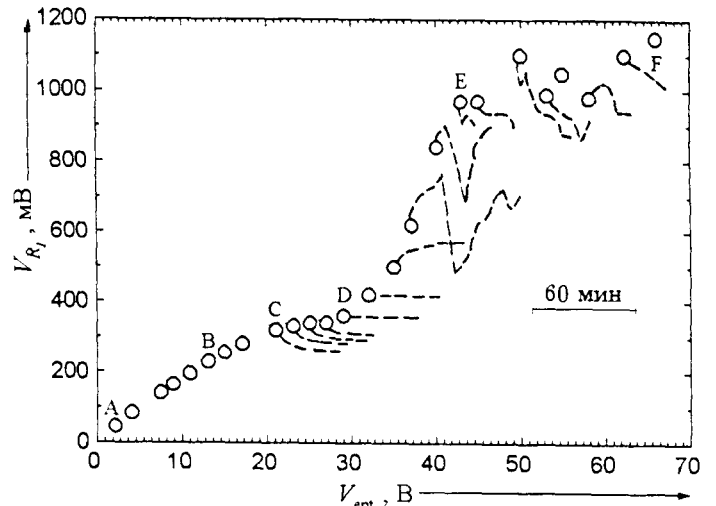


Рис. 3. Характерный вид ВАХ составного осциллятора с образцом ориентации $\theta = 60^\circ$ (№ 34, 3-е испытание). Штриховыми линиями изображены зависимости V_{R1} от времени, масштаб времени показан отрезком справа

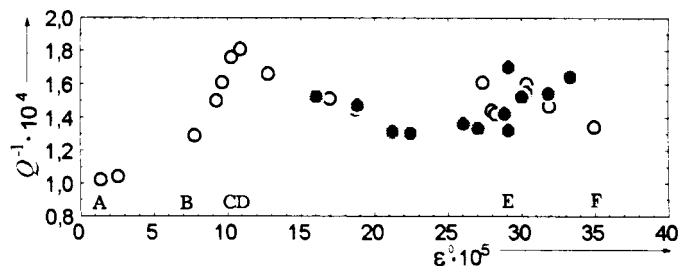


Рис. 4. Зависимость внутреннего трения Q^{-1} от амплитуды деформации ϵ^0 , соответствующая ВАХ, приведенной на рис. 3. Светлые кружки отвечают начальным значениям Q^{-1} , измеренным при очередном повышении V_{ent} , темные — после выдержки во времени

Рассмотрим влияние УЗ на свойства низкоомных образцов на примере образца № 34 ($\theta = 60^\circ$). Данный образец подвергался УЗ-воздействию 9 раз. ВАХ в испытаниях со 2-го по 5-е и соответствующие им зависимости $Q^{-1}(\epsilon^0)$ имеют вид, подобный представленным на рис. 3 и 4. На рис. 3 штриховыми кривыми показано и изменение V_{R1} во времени при $V_{ent} = const$.

Вид ВАХ составного осциллятора (рис. 3) позволяет условно выделить несколько стадий (отмечены буквами) УЗ-воздействия на образец: AB , BC , CD , DE , EF . Интервалы амплитуд относительной деформации, соответствующие выделенным стадиям, отмечены на зависимости $Q^{-1}(\epsilon^0)$ рис. 4 теми же буквами, что и на рис. 3. В качестве критериев для разбиения на стадии были взяты характер зависимости V_{R1} от времени t и наклон прямолинейных участков ВАХ. Изменение каждого из этих факторов в ходе испытания наводит на мысль о том, что при раз-

*) Такая ориентация образца была благоприятна для легкого скольжения базисных дислокаций.

личных амплитудах УЗ в образце протекают разные процессы.

Обращает на себя внимание тот факт, что характер зависимостей $V_{R1}(t)$ (штриховые кривые на рис. 3) меняется по мере увеличения V_{ent} . В интервале $V_{ent}^A - V_{ent}^B$ изменений V_{R1} со временем не наблюдается. Связь между V_{ent} и V_{R1} линейна и однозначна. На участке CD при каждом постоянном V_{ent} величина V_{R1} несколько уменьшается, достигая стационарного значения в течение ~ 10 мин. В интервале $V_{ent}^D - V_{ent}^E$ с течением времени $V_{R1}(t)$ сначала возрастает, а затем скачками изменяется. При $V_{ent} > V_{ent}^E$ также наблюдаются скачки на графиках зависимости $V_{R1}(t)$, но имеет место тенденция к уменьшению V_{R1} с течением времени, которая от опыта к опыту прослеживается более четко.

Анализ ВАХ составного осциллятора по методике Наими [9] позволил оценить значения стартовых напряжений σ , необходимых для начала процессов, последовательно инициируемых УЗ-воздействием (по терминологии [9] — обобщенные барьеры Пайерлса–Набарро). Приведенное напряжение $\tau = m\sigma$ является количественной мерой обобщенных сил Пайерлса–Набарро, действующих в определенной системе скольжения (m — фактор Шмида). Результаты такой обработки показали, что соответствующее участку CD на ВАХ значение τ в самой нагруженной системе базисного скольжения возрастало от $\tau_{CD} \cong 0,9$ МПа ($\sigma_{CD} \cong 2$ МПа) во втором опыте до $\tau_{CD} \cong 1,7$ МПа ($\sigma_{CD} \cong 4$ МПа) в последующих. Значение τ_{EF} , соответствующее участку EF на ВАХ, составляло $\tau_{EF} \cong 5,5$ МПа ($\sigma_{EF} \cong 12,6$ МПа).

Внутреннее трение Q^{-1} в зависимости от амплитуды деформации ε^0 изменяется немонотонно (рис. 4). В интервале амплитуд ε^0 , соответствующих участку AB , внутреннее трение можно считать амплитудно-независимым; при дальнейшем повышении амплитуды деформации на зависимости $Q^{-1}(\varepsilon^0)$ обнаруживаются два максимума.

Анализ зависимости $Q^{-1}(\varepsilon^0)$ в интервале амплитуд первого, наиболее ярко выраженного максимума был проведен в рамках теории Гранато–Люкке [10]. Следуя [10], восходящую ветвь первого пика $Q^{-1}(\varepsilon^0)$ можно аппроксимировать выражением

$$Q^{-1}(\varepsilon^0) = Q_0^{-1} + \frac{a_1}{\varepsilon^0} \exp \left\{ -\frac{a_2}{\varepsilon^0} \right\}$$

или

$$\ln [(Q^{-1}(\varepsilon^0) - Q_0^{-1}) \varepsilon^0] = \ln a_1 - \frac{a_2}{\varepsilon^0},$$

где Q_0^{-1} — внутреннее трение при $\varepsilon^0 \rightarrow 0$, a_1 , a_2 — параметры аппроксимации.

Результаты обработки экспериментальных данных в опытах 2–5 приведены на рис. 5. Видно, что экспериментальные результаты, представленные

в координатах Гранато–Люкке, могут быть с достаточной степенью точности аппроксимированы прямыми. Видно также, что наклон аппроксимирующих прямых от опыта к опыту увеличивается.

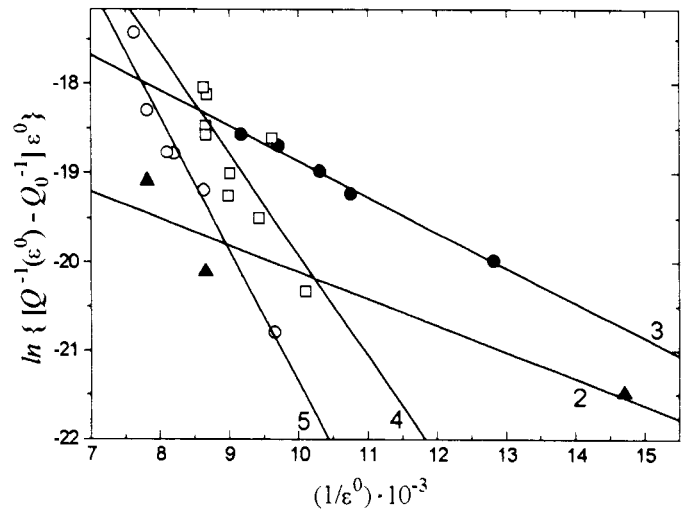


Рис. 5. Восходящая ветвь 1-го пика зависимости $Q^{-1}(\varepsilon^0)$, приведенной на рис. 4, представленная в спрямляющих координатах Гранато–Люкке. Цифры при кривых соответствуют номерам испытаний образца № 34

Согласно [10], тангенс угла наклона этих прямых пропорционален отношению F_m/L_c , где F_m — максимальное значение силы взаимодействия дислокации с закрепляющим ее центром, а L_c — длина колеблющегося сегмента. Увеличение σ_{CD} и F_m/L_c от опыта к опыту указывает на то, что в результате УЗ-воздействия происходят изменения в системе «дислокации — закрепляющие их центры», приводящие к дополнительному закреплению дислокаций по сравнению с исходным состоянием.

Участок EF (см. рис. 3) соответствует протеканию другого процесса. Ему отвечает второй пик (область EF) на зависимости $Q^{-1}(\varepsilon^0)$ (см. рис. 4). Для начала этого процесса необходимо напряжение $\sigma_{EF} \cong 12,6$ МПа. Причинами появления второго пика на зависимости $Q^{-1}(\varepsilon^0)$ могут быть: отрыв дислокаций от закрепляющих центров в следующей по степени нагруженности системе скольжения; перераспределение дислокаций [11]; появление облака так называемых виртуальных дислокационных петель, которые генерируются источниками и аннигилируют за время, сравнимое с периодом УЗ-колебаний [12]; увеличение плотности дислокаций в результате их размножения [13]. Однако на основании имеющихся данных нельзя однозначно сказать, какой именно процесс имеет место.

После первых пяти испытаний образец выдерживался при комнатной температуре. Последующие с 6-го по 8-е испытания проводились спустя 2 года, а 9-е — по прошествии еще 1 года. В результате процесса старения произошло дополнительное закреплени-

ние дислокаций. ВАХ осциллятора, соответствующая 9-му испытанию этого образца, приблизилась к ВАХ ненагруженного кварца; отношение V_{ent}/V_{R1} для этого образца уменьшилось от ~ 80 в 1-м опыте до ~ 6 в 9-м (ср. графики 60(34₁) и 60(34₉) на рис. 2).

Таким образом, анализ данных, полученных при многократных УЗ-испытаниях низкоомных кристаллов CdS, показал, что под действием ультразвука происходят изменения в системе «дислокации — закрепляющие их центры», приводящие к изменениям диссипативных свойств кристаллов, и что основной вклад во внутреннее трение низкоомных образцов вносят дислокационные механизмы.

Литература

1. Осипьян Ю.А., Петренко В.Ф. // Физика соединений $A^{II}B^{VI}$. М., 1986. С. 35.
2. Мак-Фи Дж. // Физическая акустика. М., 1969. Т. 4, ч. А. С. 13.
3. Здебский А.П., Шейкман М.К. // ФТТ. 1987. 29, № 4. С. 1135.
4. Островский И.В., Лысенко В.Н. // ФТТ. 1982. 26, № 2. С. 531.
5. Варданетьян Р.П., Мелконян А.С. // ФТТ. 1991. 33, № 2. С. 466.
6. Швидковский Е.Г., Дургарян А.А. // Научн. докл. высш. школы — Физ.-мат. науки. 1958. Т. 1, № 5. С. 211.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., 1957.
8. Тяпунина Н.А. // Физика деформационного упрочнения монокристаллов. Киев, 1972. С. 228.
9. Naimi E.K. // Phys. Stat. Sol. (a). 1982. 72. P. 825.
10. Гранато А., Люкке К. // Ультразвуковые методы исследования дислокаций. М., 1963. С. 27.
11. Бушуева Г.В., Зиненкова Г.М., Решетов В.И., Хромов А.А. // ФТТ. 1994. 36, № 3. С. 712.
12. Благовещенский В.В., Леготин Д.Л., Тяпунина Н.А. // ФММ. 1993. 75, № 5. С. 154.
13. Тяпунина Н.А., Благовещенский В.В., Зиненкова Г.М., Ивашкин Ю.А. // Изв. вузов, Физика. 1982. № 6. С. 118.

Поступила в редакцию
22.09.97