

УДК 539.67 : 546.492

© 1992

ФОТОАКУСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КРИСТАЛЛЕ HgI_2 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АМПЛИТУДАХ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Б. К. Кардашев, С. Н. Голяндин, С. Б. Кустов, В. М. Залетин

Получены экспериментальные данные по внутреннему трению, упругим и фотоакустическим свойствам кристалла диодида ртути при амплитудах ультразвукового воздействия на образец от 10^{-7} до 10^{-5} . Обнаружен фотоакустический эффект, суть которого состоит в том, что под влиянием света (в ультрафиолетовой или видимой частях спектра) затухание ультразвука и действующий модуль упругости образцов меняются. Изучена спектральная характеристика эффекта в области амплитудно-независимого поглощения. Предполагается, что наблюдаемые явления связаны с образованием или исчезновением под действием света долгоживущих препятствий (центров) для колеблющихся под действием ультразвука дислокаций.

В настоящее время интерес к кристаллам HgI_2 связывается с возможностью создания на их основе детекторов ядерного излучения, способных работать при комнатной температуре. Для детекторов на широкозонных полупроводниках, в частности на HgI_2 , характерны деградационные эффекты, связанные с электрической поляризацией кристалла, возникающей в процессе эксплуатации; кроме того, для имеющихся в настоящее время монокристаллов диодида ртути характерны высокая неоднородность свойств по объему, наличие большого числа дефектов, что, несомненно, сказывается на качестве детекторов [1, 2].

Акустические методы широко используются для изучения дефектов кристаллической решетки, в том числе дислокаций, точечных дефектов, их взаимодействия друг с другом (см., например, [3]). Исследования кристаллов HgI_2 были начаты в настоящей работе по схеме, в которой предполагалось, как и на других кристаллах [3], провести изучение внутреннего трения и упругих характеристик диодида ртути при различных температурах в широком диапазоне амплитуд колебательной деформации, включая измерения не зависящего и зависящего от амплитуды поглощения ультразвуковых колебаний. В ходе выполнения исследований был обнаружен фотоакустический эффект: при включении и выключении света затухание и модуль упругости образцов HgI_2 менялись. В данной статье представлены первые результаты изучения фотоакустического эффекта, включая исследование его спектральных характеристик.

1. Методика и результаты исследований

Кристаллы HgI_2 выращивались из газовой фазы методом статической сублимации с пересыщением по иоду. Оптимизация режимов роста позволяла с помощью указанного метода получать кристаллы с объемом монокристаллических блоков до 1.0 см^3 . В качестве сырья использовался особо чистый порошок диодида ртути. Общее содержание примесей в исходном сырье, по данным химико-спектрального и масс-спектрометрического анализа, не превышало $10^{-3}\%$.

Образцы для ультразвуковых исследований имели форму пластинок размером около $9 \times 5 \times 0.5$ мм. Кристаллографическая плоскость широкой грани пластинки была (100). Два других направления были близки к направлениям типа [110].

Продольные колебания осуществлялись вдоль ребра пластинки, имевшего длину около 9 мм.

Работа была выполнена с использованием компьютеризированного комплекса аппаратуры, предназначенного для исследования акустических характеристик твердых тел на ультразвуковых частотах около 100 кГц резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора [4]. Установка с программным обеспечением позволила на кристаллах HgI_2 измерить в автоматическом режиме амплитудные зависимости (нелинейное поведение) модуля упругости и поглощения звука в диапазоне колебательных деформаций от 10^{-7} до $1.0 \cdot 10^{-5}$. В этой методике два кварцевых преобразователя и исследуемый образец составляют вибратор, в котором возбуждаются продольные стоячие волны. Частота собственных колебаний образца должна быть близкой к собственной частоте кварцевых резонаторов. Один из пьезокварцев служит для возбуждения, другой является приемником колебаний. В этом случае для определения логарифмического декремента колебаний трехкомпонентного составного вибратора δ_3 , модуля упругости E и амплитуды деформации ϵ_0 образца достаточно измерить на резонансе частоту колебаний f_3 и величины электрических напряжений на возбуждающем U_d и приемном U_r кварцах. Зная декремент δ_3 и резонансную частоту f_3 акустической системы, можно определить декремент δ_0 и действующий модуль упругости E образца по формулам, приведенным, например, в [3].

При постепенном увеличении напряжения U_d на возбуждающем кварце в целом ряде материалов (как правило, достаточно пластичных) можно выйти в ту область амплитуд, где материал образца ведет себя нелинейно. К таким кристаллам принадлежит и диодид ртути. Нелинейность проявляется в том, что на фоне амплитудно-независимых декремента δ_i и модуля упругости E_i , измеряемых при малых амплитудах, возникают амплитудно-зависимые декремент δ_h и дефект модуля упругости $(\Delta E/E)_h$

$$\delta_h(\epsilon_0) = \delta_0(\epsilon_0) - \delta_i, \quad (1)$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_h = \frac{E(\epsilon_0) - E_i}{E_i} = 2 \frac{m_3}{m_0} \frac{f_{3h}(\epsilon_0) - f_{3i}}{f_{3i}}. \quad (2)$$

Здесь f_{3i} и f_{3h} — резонансные частоты тройного вибратора соответственно в амплитудно-независимой и зависимой областях, m_3 и m_0 — массы тройного вибратора и образца.

Примером данных экспериментального исследования влияния амплитуды ультразвука на модуль Юнга и поглощение ультразвука образцов диодида ртути могут служить кривые, приведенные на рис. 1. Из этого рисунка видно, что при увеличении амплитуды поглощение ультразвука проходит через максимум. При этом резонансная частота вибратора (модуль Юнга исследуемого образца HgI_2) заметно возрастает. Уменьшение амплитуды также сопровождается пиком поглощения и соответствующим изменением модуля упругости. Кривые, снятые при увеличении и уменьшении амплитуды, не совпадают друг с другом. Кроме того, возбуждение в образце ультразвука с большой амплитудой в амплитудно-зависимой области вызывает появление временной зависимости поглощения и действующего модуля упругости. Таким образом, необходимо учитывать амплитудную предысторию образца при проведении акустических измерений.

Рис. 2 демонстрирует первые данные, полученные при обнаружении фотоакустического эффекта. Образец диодида ртути облучался белым светом ртутной лампы. Из рис. 2 видно, что освещение образца приводит к заметному умень-

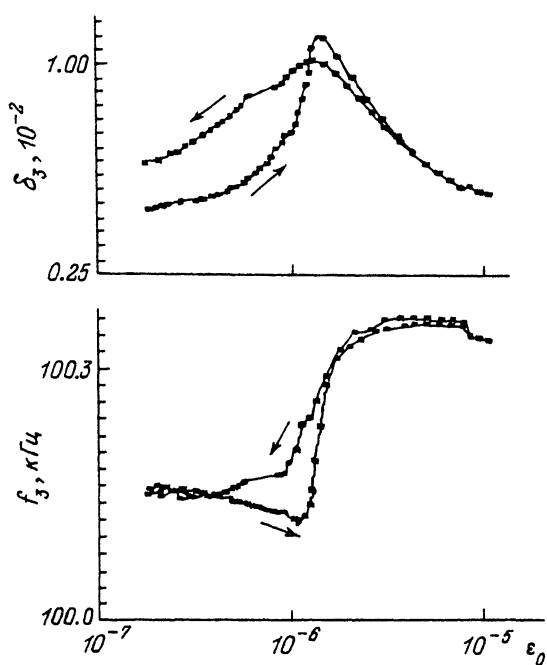


Рис. 1. Амплитудные зависимости декремента и резонансной частоты составного вибратора с образцом диодида ртути, снятые при последовательных увеличении и уменьшении амплитуды относительной колебательной деформации образца.

Температура комнатная. Стрелки указывают направление изменения амплитуды. Измерения выполнены в темноте.

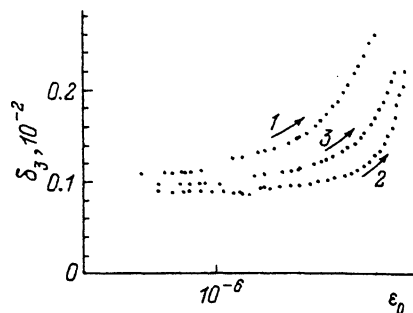


Рис. 2. Амплитудные зависимости декремента составного вибратора с образцом диодида ртути, измеренные последовательно в темноте (1), после облучения белым светом в течение 90 мин (2) и после выдержки в темноте в течение 17 ч (3).

Кривые получены при увеличении амплитуды.

шению затухания в акустической системе пьезокарц—образец HgI_2 . Выключение света вызывает медленный возврат затухания к исходному уровню.

В связи с обнаружением фотоакустического эффекта основное внимание в данной работе было уделено исследованию спектральных характеристик этого эффекта. Источником света служила ртутная лампа. Для получения света определенной длины волны использовались оптические фильтры. Изучение спектров проводилось примерно при одинаковых интенсивностях, таких, что уровень фотоакустического эффекта выходил на насыщение.

Необходимо отметить, что для диодида ртути можно было ожидать три различных вида спектральных характеристик фотоакустического эффекта: 1) в области амплитудно-независимого поглощения при малых амплитудах колебательной деформации порядка 10^{-7} , 2) при средних амплитудах в области амплитудно-зависимого поглощения до максимума, 3) при амплитудах выше максимума, когда затухание в образце уменьшается с ростом амплитуды (рис. 1). Кроме того, ожидалось влияние предыстории образца, как световой, так и амплитудной. Поэтому была разработана специальная программа экспериментов, которая позволяла бы выявить спектры, характерные для амплитудно-независимых декремента δ_i и резонансной частоты f_i и соответствующих амплитудно-зависимых параметров с наименьшим влиянием предыстории. Для этого перед каждым опытом по влиянию света той или иной длины волны образец в темноте подвергался воздействию ультразвука большой интенсивности с амплитудой деформации, равной 10^{-5} . Затем процедура измерений декремента и резонансной частоты выглядела так. Устанавливалась определенная амплитуда колебаний в области амплитудно-независимого поглощения, обычно $2.00 \cdot 10^{-7}$, затем изме-

рались декремент δ_{3j} и резонансная частота f_{3j} . Потом устанавливалась амплитуда $1.00 \cdot 10^{-6}$ уже в нелинейной области и также измерялись декремент δ_{3h} и частота f_{3h} составного вибратора. Погрешность установки амплитуд была менее 1%. Временной интервал между измерениями был равен 10 с. Общая продолжительность опыта обычно была равна 5000 с. В любой момент времени мог быть включен или выключен белый свет или свет с определенной длиной волны. Заканчивались все опыты облучением образца белым светом большой интенсивности и последующим затемнением. Следующий опыт со светом другой длины волны начинался через сутки.

Из полученных данных можно было оценить влияние света не только на непосредственно измеряемые δ_{3j} , f_{3j} , δ_{3h} и f_{3h} , но и на амплитудно-зависимые части декремента Δ_h и частоты F_h составного вибратора с образцом HgI_2

$$\Delta_h = \delta_{3h} - \delta_{3j},$$

$$F_h = f_{3f} - f_{3h}.$$

Параметр F_h непосредственно связан с дефектом модуля упругости исследуемого образца (см. формулу (2)).

Примеры временных диаграмм этих исследований приведены на рис. 3—5. Опыты выполнялись при комнатной температуре.

Полученные данные позволили построить спектральные характеристики фотоакустического эффекта в амплитудно-независимой области (рис. 6). Параметры фотоакустического эффекта определялись следующим образом:

$$\Delta\delta_i = \delta_{3j}(2000) - \delta_{3j}(900),$$

$$\Delta f_i = f_{3j}(2000) - f_{3j}(900).$$

Аргументы 900 и 2000 в этих выражениях обозначают моменты времени соответственно до включения света какой-либо длины волны и после того, как образец облучался этим светом в течение 1100 с.

Результаты, приведенные на рис. 3—5, в принципе позволяют оценить и спектры амплитудно-зависимых декремента и дефекта модуля Юнга. Однако здесь пока наблюдается большой разброс данных, связанный, по всей видимости, со значительным влиянием на эти параметры как оптической, так и амплитудной предыстории образца перед измерениями. Пока только ясно, что этот спектр должен значительно отличаться от спектров, снятых в амплитудно-независимой области. О подобном влиянии амплитуды на фотоакустический эффект в сульфиде кадмия упоминается в [5].

Рис. 7 дает представление о фоточувствительности акустических параметров (декремента и резонансной частоты) к свету с различной длиной волны при большой амплитуде — $1.00 \cdot 10^{-5}$. Здесь интересно отметить, что в этой области амплитуд воздействие оранжевого света (590 нм) прямо противоположно тому, что наблюдается при малых амплитудах порядка 10^{-7} : если при малых амплитудах он приводит к уменьшению затухания в образце (рис. 5, 6), то при больших — к увеличению. Ультрафиолетовое излучение вызывает гашение эффекта, вызванного оранжевым светом.

2. Обсуждение

Ультразвуковым исследованиям упругих свойств кристалла HgI_2 посвящен ряд работ [6, 7]. Однако затухание ультразвуковых волн в этом кристалле до

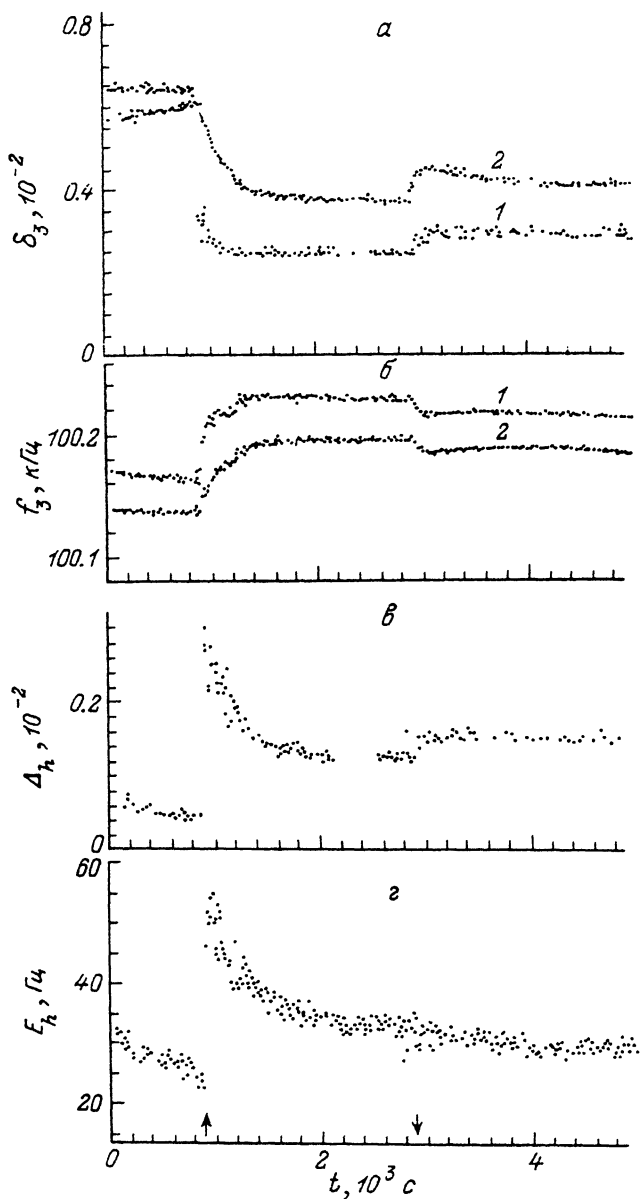


Рис. 3. Временная диаграмма опыта по изучению влияния белого света на декременты δ_{3j} при амплитуде $2.0 \cdot 10^{-7}$ (1) и δ_{3h} для амплитуды $1.0 \cdot 10^{-6}$ (2) (а), соответствующие частоты f_{3j} (1), f_{3h} (2) (б), а также на амплитудно-зависимые параметры Δ_h (в) и F_h (г).

Моменты включения света (900 с) и выключения (2900 с) обозначены стрелками.

сих пор не изучалось. Как следует из полученных нами данных, затухание ультразвука под действием света может меняться в два и более раз. Модуль упругости при максимальном эффекте изменяется всего лишь на 0.1%. Этим можно объяснить тот факт, что до настоящей работы фотоакустические эффекты на этом кристалле обнаружены не были.

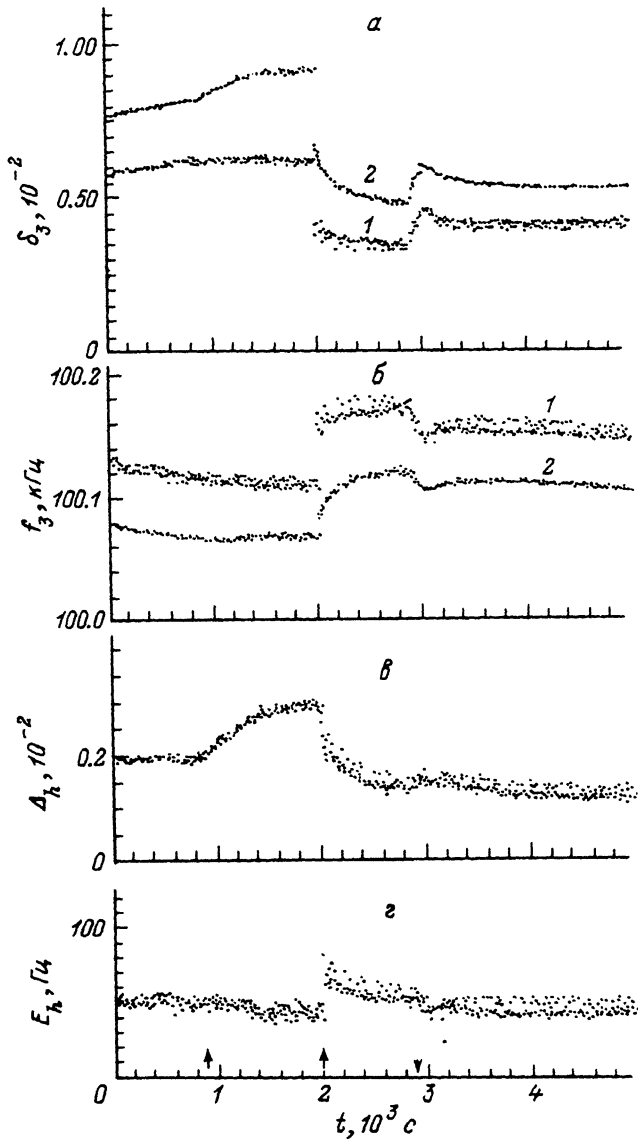


Рис. 4. Диаграмма опыта по изучению влияния ультрафиолетового облучения (длина волны 360 нм) на декременты δ_{3j} при амплитуде $2.0 \cdot 10^{-7}$ (1) и δ_{3h} для амплитуды $1.0 \cdot 10^{-6}$ (2) (а), соответствующие частоты f_{3j} (1), f_{3h} (2) (б), а также на амплитудно-зависимые параметры Δ_h (в) и F_h (г).

Моменты включения УФ излучения (900 с), белого света (2000 с) и выключения света (2900 с) обозначены стрелками. До момента 900 с образец находился в темноте в течение суток.

В результате проведенных исследований обнаружены три характерных области амплитуд, где фотоакустический эффект проявляет себя по-разному: 1) область амплитудно-независимого поглощения при малых амплитудах, 2) область средних амплитуд и 3) область больших амплитуд, где затухание ультразвука уменьшается с ростом амплитуды.

В настоящее время известны два типа фотоакустических эффектов. Один из них обнаруживается в пьезоэлектрических полупроводниках [5, 8-10]. Он связы-

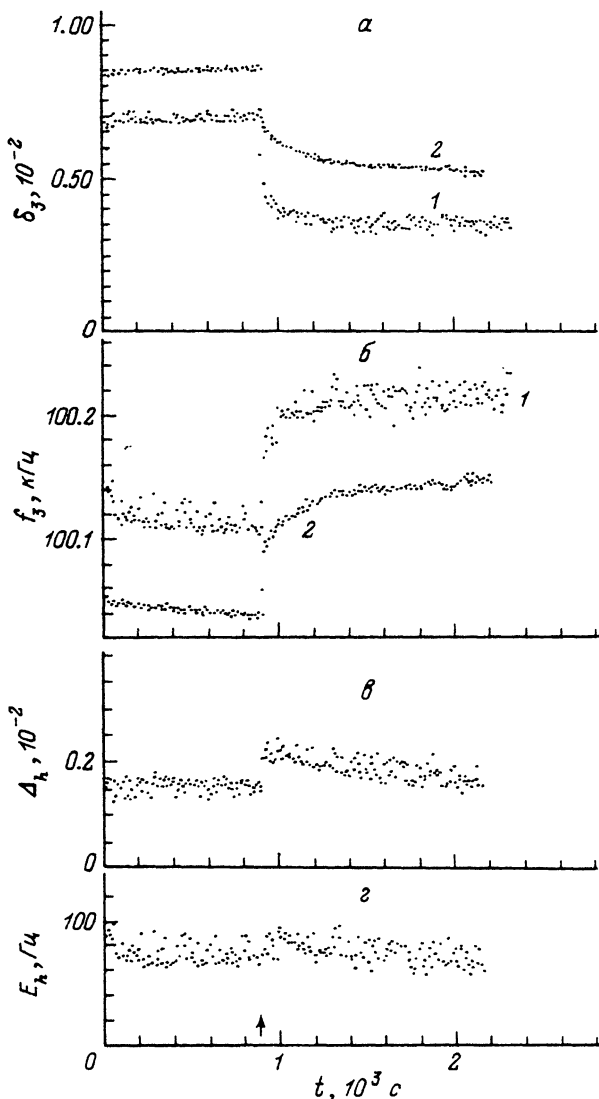


Рис. 5. Диаграмма опыта по изучению влияния оранжевого света (длина волны 590 нм) на декременты δ_{3j} при амплитуде $2.0 \cdot 10^{-7}$ (1) и δ_{3h} для амплитуды $1.0 \cdot 10^{-6}$ (2) (а), соответствующие частоты f_{3j} (1), f_{3h} (2) (б), а также на амплитудно-зависимые параметры Δ_h (в) и F_h (z).

Момент включения света 900 с обозначен стрелкой. В момент времени 2000 с интенсивность оранжевого излучения была увеличена в 2.3 раза.

важется с дрейфом носителей тока в электрическом поле, возникающем в образце под действием звуковых волн [10]. Второй тип ярче всего проявляется в пьезоэлектрических кристаллах, в частности в кристалле NaCl, содержащем дислокации и радиационные дефекты [11]. Для этого типа фотоакустических явлений характерны как мгновенные изменения затухания и действующего модуля упругости при включении—выключении света, так и последующие изменения этих параметров с характерными временами от минут до нескольких суток. Кристалл HgI_2 пьезоэлектрический. Его поведение в подобного рода экспериментах естественно отнести ко второму типу.

Рис. 6. Спектральные характеристики фотоакустического эффекта в амплитудно-независимой ($\Delta f_i, \Delta \delta_i, \varepsilon_0 = 2.0 \cdot 10^{-7}$) области амплитуд колебательной деформации ε_0 .

Наблюдаемые явления качественно можно объяснить возникновением (или исчезновением) под действием света той или иной длины волны долгоживущих стопоров (центров закрепления) для колеблющихся под действием ультразвука дислокаций. Возникновение дополнительных стопоров должно приводить к уменьшению затухания и увеличению действующего модуля упругости. Для диоксида ртути в области амплитудно-независимого поглощения наиболее эффективным является оранжевый свет с длиной волны 590 нм (рис. 6).

Интересно отметить, что спектральные характеристики фотоакустического эффекта для амплитудно-независимой области практически полностью соответствуют спектральной харак-

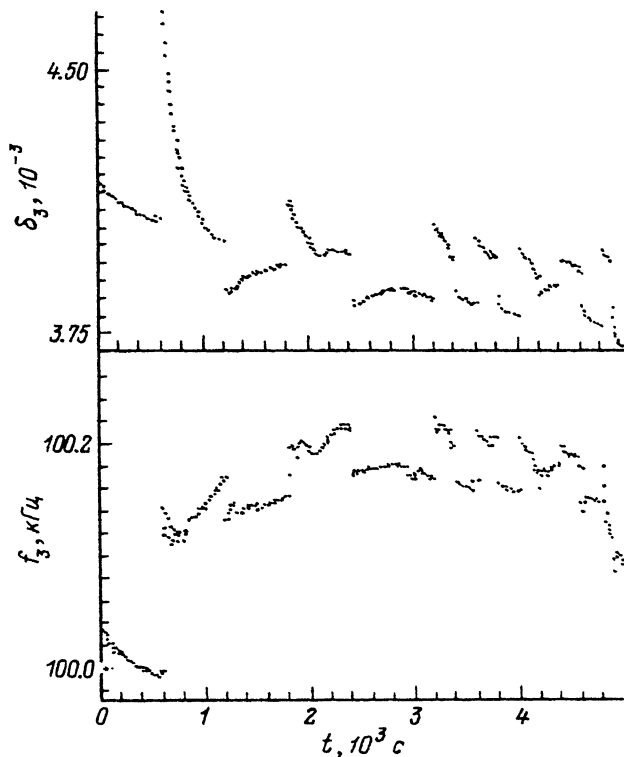
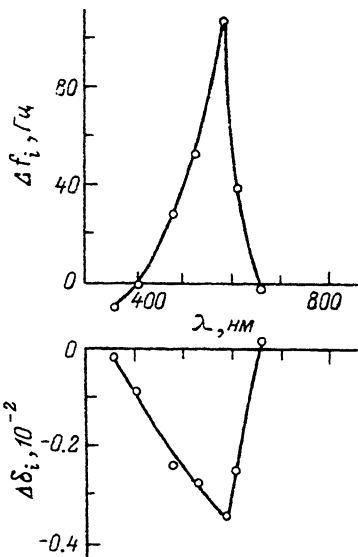


Рис. 7. Диаграмма опыта по изучению влияния света различной длины волны на акустические характеристики образца диоксида ртути при амплитуде $1.00 \cdot 10^{-3}$.

До момента времени 900 с образец находился в темноте в течение суток. Далее в промежутках времени 900—1200 с образец облучался светом с длиной волны 590 нм, 1200—1800 — 360 нм, 1800—2400 — 590 нм, 2400—3000 — 360 нм, 3000—3200 — 660 нм, 3200—3400 — 590 нм, 3400—3600 — 360 нм, 3600—3800 — 590 нм, 3800—4000 — 360 нм, 4000—4200 — 590 нм, 4200—4400 — 480 нм, 4400—4600 — 590 нм, 4600—4800 — 360 нм, 4800—4900 — белым светом. В момент 4900 с свет был выключен.

теристике фотопроводимости дионида ртути, приведенной в [1]. Это позволяет говорить о том, что центры закрепления дислокаций формируются при непосредственном участии фотоиндуцированных носителей тока.

Что касается трактовки фотоакустических эффектов в различных областях амплитудно-зависимого поглощения ультразвука, то здесь требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Авторы выражают искреннюю признательность С. П. Никанорову, Ю. А. Буренкову и А. Б. Лебедеву за поддержку и помощь при проведении исследований.

Список литературы

- [1] Suryanarayana P., Acharya H. N. // J. Electronic Mat. 1989. V. 18. N 4. P. 481—485.
- [2] Petroff P. M., Yu Peng Hu, Milstein F. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 6. P. 2525—2527.
- [3] Никаноров С. П., Кардашев Б. К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 254 с.
- [4] Кустов С. Б., Кардашев Б. К., Иванов В. И. и др. // Препринт ФЭИ-2141. Обнинск, 1990. 20 с.
- [5] Nine H. D., Truell R. // Phys. Rev. 1961. V. 123. N 3. P. 799—803.
- [6] Haussuhl S., Sholz H. // Kristall und Technik. 1975. V. 10. N 11. P. 1175—1179.
- [7] Thanh V., Ivanov D., Burov Yu., Gospodinov M. // Bulg. J. Phys. 1980. V. 7. N 6. P. 606—615.
- [8] Nine H. D. // Phys. Rev. Lett. 1960. V. 4. N 7. P. 359—361.
- [9] Царев О. К., Иванов В. И., Лебедев А. Б. // Тез. докл. IV Всес. совещ. «Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы». Кемерово, 1986. С. 85—86.
- [10] Гуревич В. Л. // ФТП. 1968. Т. 2. № 11. С. 1557—1592.
- [11] Голосовский М. А., Сойфер Я. М. // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. № 5. С. 2068—2077.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург
НПО «Композит»
Калининград
Московской обл.

Поступило в Редакцию
13 февраля 1992 г.