

УДК 534.2–8

ФОТОАКУСТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ, СОДЕРЖАЩИХ ФОТОРЕФРАКТИВНЫЕ КРИСТАЛЛЫ, ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

© 1997 г. П. А. Пятаков, А. А. Чабан

Акустический институт им. Н.Н. Андреева
117036 Москва, ул. Шверника, 4

Поступила в редакцию 10.01.96 г.

Исследовано фотоакустическое взаимодействие в слоистых структурах типа фоторефрактивный кристалл–проводник, когда к ним приложено внешнее электрическое поле. Показано, каким образом известный эффект поля, вызывая перераспределение фотовозбужденных носителей в фоторефрактивном кристалле и образование долгоживущих внутренних электрических полей после захвата носителей на уровни рекомбинации, приводит к появлению целого ряда новых фотоакустических явлений с памятью.

Фоторефрактивные кристаллы [1, 2] в настоящее время считаются особо перспективными материалами. Их замечательные свойства связаны со способностью сохранять память о засветке в форме остаточного электрического поля, созданного объемным зарядом на связанных уровнях. Ниже будут рассмотрены фотоакустические взаимодействия в слоистых структурах фоторефрактивный кристалл–проводник, связанные с таким сохранением памяти о предшествующей засветке. Принципиальным обстоятельством является использование внешнего электрического поля, которое меняет концентрацию фотовозбужденных носителей у границы слоев (известный эффект поля [3]), что приводит к появлению дополнительных внутренних “замороженных” электрических полей, созданных зарядами на уровнях рекомбинации.

Исследование генерации лазерным импульсом поверхностной звуковой волны на границе металл–фоторефрактивный кристалл при действии внешнего поперечного поля уже проводилось в [4]. Экспериментально наблюдался звуковой сигнал после пространственно периодической засветки лазерным импульсом (условимся называть его мгновенным откликом), была понята причина его появления. Было обнаружено необъясненное явление фотоакустической памяти, которое заключается в том, что повторная засветка, но уже пространственно однородным импульсом, приводит к появлению дополнительного звукового сигнала той же частоты (фотоакустическая память). Кроме того, при повторной пространственно периодической засветке мгновенный отклик существенно усиливался. В данной работе мы расширим класс этих явлений с памятью и выясним их природу.

Для выяснения механизма фотоакустических явлений с памятью проведены экспериментальные исследования на установке (рис. 1), несколько модернизированной по сравнению с [4]. На пластину фоторефрактивного кристалла $Bi_{12}SiO_{20}$ (BSO) напылен электрод из алюминия. Во всех интересных случаях это отрицательный электрод. С другой стороны пластины через тонкий слой глицерина подсоединен второй, прозрачный электрод. Большая грань пластины BSO совпадает с кристаллографической плоскостью (001). На краю пластины нанесены встречно-штыревые преобразователи, которые могут принимать пьезоактивные поверхностные волны в кристаллографическом направлении [110] на частоте 20 МГц. Это соответствует длине поверхностной звуковой волны $\lambda = 8 \times 10^{-3}$ см. Толщина пластины составляет 2 мм. Освещение кристалла производится импульсами лазерного света с длиной волны 0.53

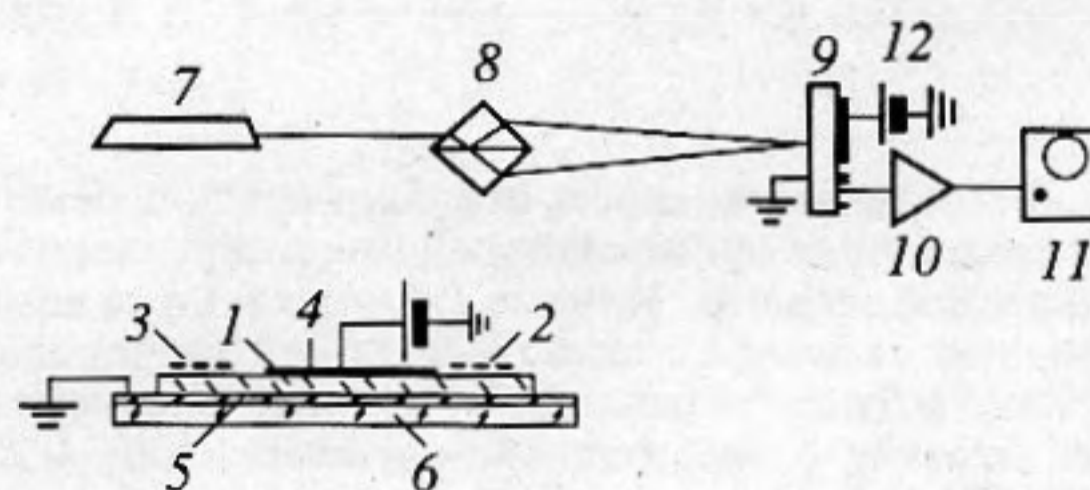


Рис. 1. Конструкция фотоакустической ячейки и схема эксперимента. 1 – кристалл BSO, 2, 3 – электродные встречно-штыревые преобразователи поверхностных акустических волн, 4 – алюминиевый электрод, 5 – прозрачный электрод (SnO_2), 6 – стеклянная подложка, 7 – импульсный лазер, 8 – делительная призма, 9 – фотоакустическая ячейка, 10 – усилитель, 11 – осциллограф, 12 – источник постоянного напряжения.

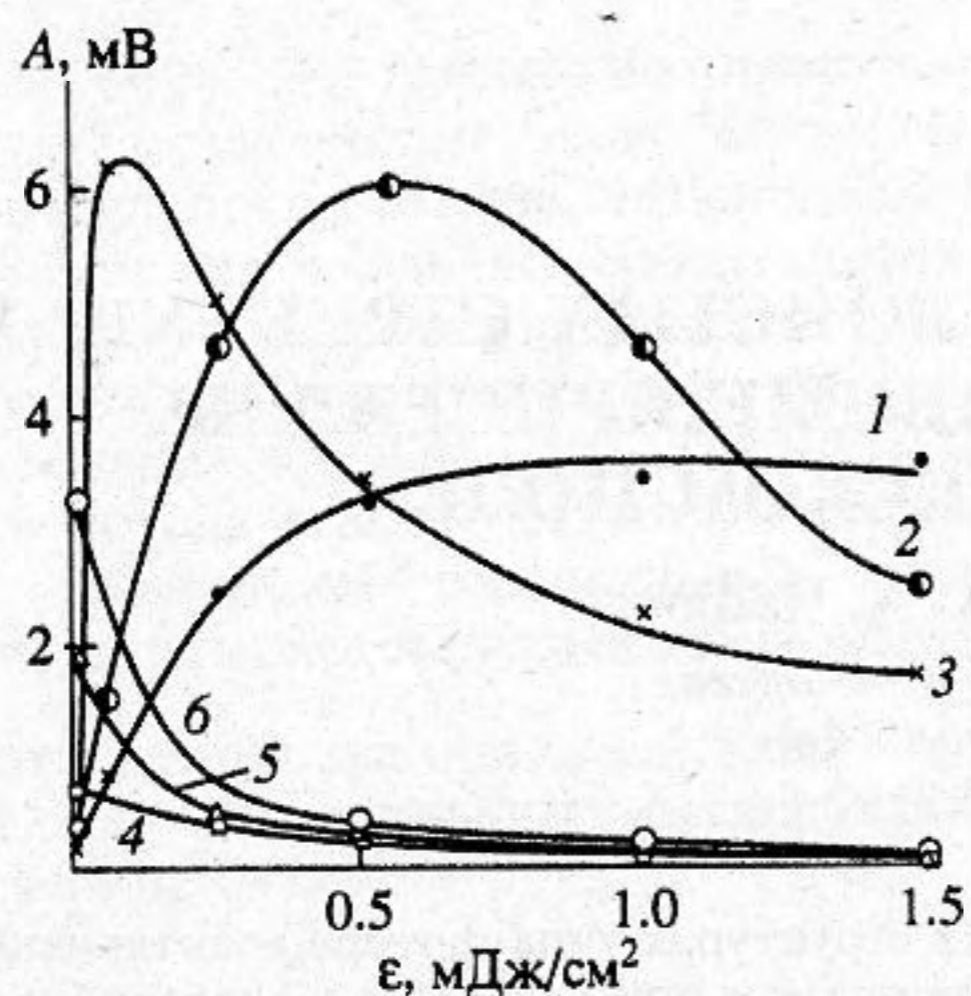


Рис. 2. Зависимости амплитуд мгновенного отклика (кривые 1, 2, 3) и сигнала памяти (кривые 4, 5, 6) от экспозиции предварительной засветки. Кривые 1, 4 соответствуют напряжению внешнего электрического поля $U = 200$ В; кривые 2, 5 — $U = 400$ В; кривые 3, 6 — $U = 600$ В.

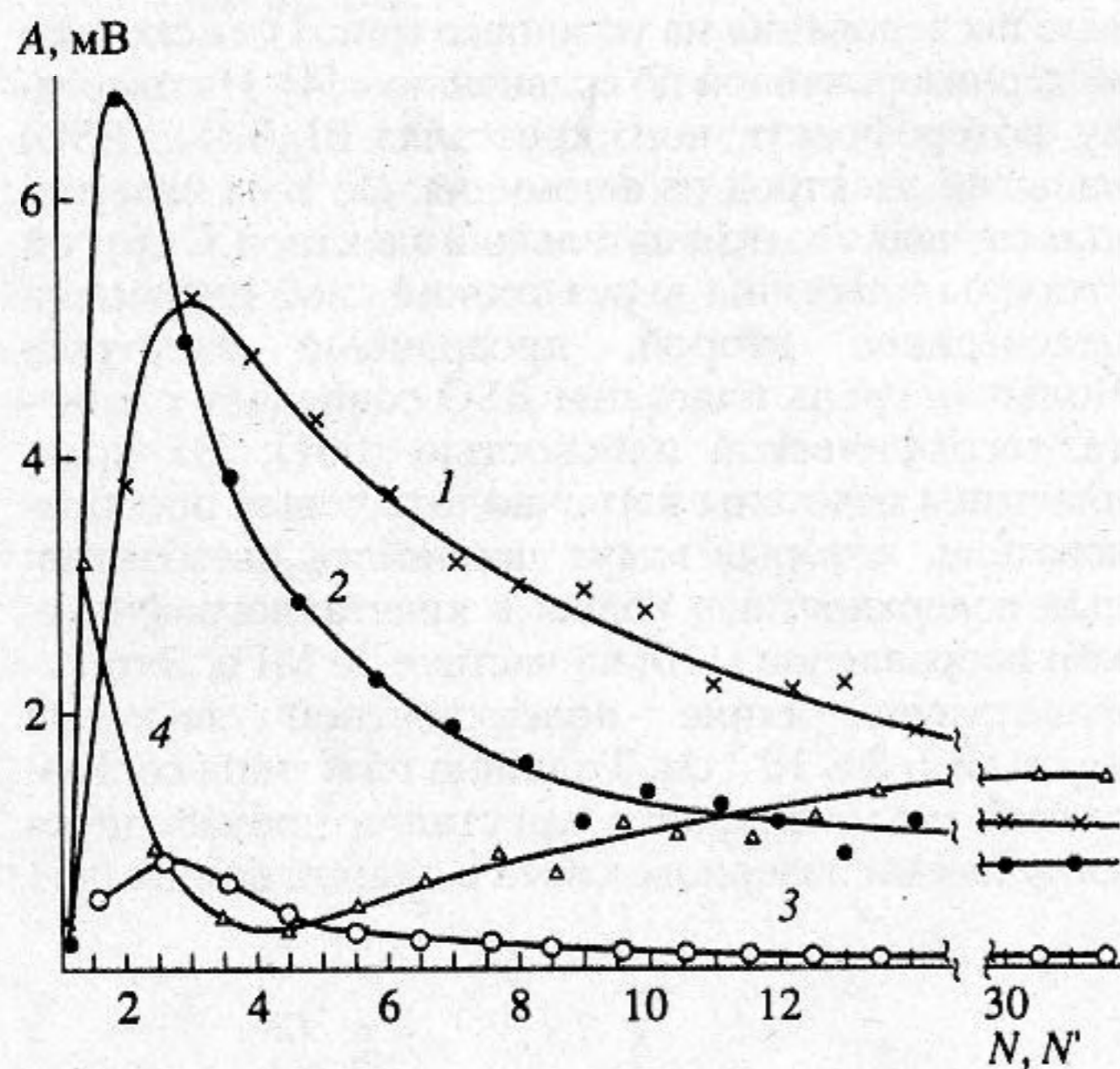


Рис. 3. Последовательность откликов при попеременном воздействии пространственно модулированной и однородной засветки. Кривые 1, 2 — отклики на неоднородную засветку с экспозицией, соответственно, 0.5, 0.045 мДж/см²; кривые 3, 4 — отклики на однородную засветку с экспозицией, соответственно, 0.25, 0.022 мДж/см².

мкм и длительностью $\tau_i = 20$ нс. Делительной призмой (рис. 1) свет разделяется на два пучка равной интенсивности, которые пересекаются под некоторым специально выбранным углом так, что интерференционная структура имеет период принимаемой поверхностной звуковой

волны. При этом освещение может производиться как сразу обоими пучками (пространственно периодическое освещение), так и одним пучком (пространственно однородное освещение).

В первой серии экспериментов BSO подвергается предварительному воздействию лазерного импульса с пространственно однородным распределением интенсивности один или несколько раз. После этого подается лазерный импульс с пространственно периодическим освещением. Время между импульсами составляет величину порядка секунды, что существенно меньше времени фоторефрактивной памяти в BSO. Появлялся мгновенный акустический отклик. Затем через несколько секунд подавался вновь импульс, но уже с однородной засветкой. Наблюдался сигнал фотоакустической памяти. Результаты соответствующих измерений приведены на рис. 2. Здесь представлены амплитуды мгновенного отклика (кривые 1, 2, 3) и сигнала фотоакустической памяти (кривые 4, 5, 6) в зависимости от полной экспозиции ϵ предварительной засветки. Однородную засветку с экспозицией $\epsilon \leq \epsilon_0 = 0.5$ мДж/см² мы могли обеспечить одним лазерным импульсом. Экспозиции большей величины создавались повторной засветкой. Мгновенный импульс всегда генерировался неоднородной засветкой с экспозицией $2\epsilon_0$; отклик фотоакустической памяти возникал при воздействии на записанную структуру импульса однородной засветки с экспозицией ϵ_0 .

Кривые, соответствующие мгновенному отклику и сигналу фотоакустической памяти, демонстрируют существенно различное поведение. Без предварительной засветки мгновенный отклик относительно мал, причем тем меньше, чем больше потенциал внешнего электрического поля U . Предварительная засветка приводит к существенной активации мгновенного отклика. Кривые 1, 2, 3 (рис. 2) показывают, что амплитуды мгновенного отклика, рассматриваемые как функции U , ведут себя по-разному при различных экспозициях предварительной засветки. При малых экспозициях это монотонно возрастающие функции, затем наблюдаются насыщение и спад. Результаты эксперимента указывают на наличие оптимальных экспозиции и электрического поля, наилучшим образом подготавливающих структуру к мгновенному отклику. В противоположность этому сигнал фотоакустической памяти без предварительной засветки максимален и увеличивается с увеличением U . Предварительная засветка приводит к подавлению сигнала памяти.

Была проведена также серия экспериментов, в которых осуществлялась многократная попеременная экспозиция кристалла BSO пространственно периодическими и пространственно однородными световыми импульсами. При этом

внешнее напряжение отрицательной полярности на алюминиевом электроде сохранялось постоянным. На рис.3 продемонстрирован характер изменения мгновенного отклика на периодическую засветку и отклика памяти на однородную засветку от порядковых номеров N пространственно неоднородных и N' – пространственно однородных лазерных импульсов. Поведение мгновенных откликов и сигналов памяти сильно различается.

Сигналы мгновенного отклика с ростом N , по крайней мере на начальном этапе, увеличиваются. Первый отклик памяти максимален, но заметно меньше второго мгновенного. По мере увеличения номера идет быстрое уменьшение амплитуды сигнала памяти и только при больших номерах ($N' > 10$) и интенсивностях наблюдается некоторый рост и стабилизация амплитуды на уровне, превышающем амплитуды мгновенного отклика тех же номеров.

Обсудим природу рассматриваемых эффектов. Она связана с захватом носителей (в нашем случае электронов) на уровне рекомбинации. Рассмотрим вначале действие предварительной засветки. Пусть пространственно однородный лазерный импульс освещает кристалл BSO. Поскольку в нашем случае время жизни носителей тока $\tau \approx 10^{-4} - 10^{-6}$ с много больше длительности светового импульса τ_i , т.е. смещение носителей за время засветки пренебрежимо мало по сравнению с полным смещением за время жизни, то можно считать, что после засветки возникает однородная концентрация фотовозбужденных носителей

$$n = \frac{\alpha\beta I\tau_i}{\hbar\omega}, \quad (1)$$

где I – интенсивность однородного светового потока, β – квантовая эффективность фотовозбуждения, α – коэффициент поглощения света, $\hbar\omega$ – энергия кванта света. В наших экспериментах характерная величина для n составляла около 10^{14} см⁻³. Хорошо известно, что в полупроводниках с электронной проводимостью во внешнем электрическом поле при отрицательном напряжении на границе с непроводящим слоем (предположительно окисный слой алюминия на границе с BSO) образуется слой объемного заряда, содержащий ионизованные примеси и очень малое число свободных носителей [3]. Если за время жизни носителей такое распределение успеет установиться, то после захвата носителей на уровне рекомбинации около контакта образуется слой ионизованных доноров с концентрацией n толщиной

$$h = \left(\frac{2\varepsilon U}{nq} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где q – абсолютная величина заряда электрона, ε – диэлектрическая проницаемость. Электрическое поле сосредоточено внутри этого слоя и равно

$$E(x) = -\frac{qn}{\varepsilon}(h-x). \quad (3)$$

Предположено, что $x = 0$ соответствует границе BSO с алюминием (BSO располагается в области $x \geq 0$). Отметим, что координатные оси у нас не являются кристаллографическими.

Обязательным условием для образования такого слоя является

$$l = \mu \frac{U}{L} \tau \gg h. \quad (4)$$

Здесь l – дрейфовая длина электрона за время жизни, μ – подвижность носителей, L – толщина образца, т.е. необходимы высокое $\mu\tau$, большое U или большое n . К сожалению, для имеющихся у нас источников света величина n оказывается слишком малой при всех реальных $\mu\tau$. Но в принципе это условие не только достижимо, но может соответствовать эффективному режиму взаимодействия. Существенно, что трактовку для этого случая можно провести достаточно строго.

Подадим на структуру импульс неоднородного освещения с интенсивностью $I = I_0(1 + m \cos(kz))$ в интервале времени $0 \leq t \leq \tau_i$. Здесь $k = 2\pi/\lambda$, λ – период акустического преобразователя. Малости параметра m мы не предполагаем. Для более эффективного возбуждения звука длительность импульса примем равной половине периода поверхностной звуковой волны. Подчеркнем, что примерно такое соотношение имело место во всех наших экспериментах. Смещение фотовозбужденных носителей в поле (3) во время засветки и во времена после нее, сравнимые с периодом звуковой волны, приведет к появлению нормального к границе раздела дополнительного электрического поля

$$\begin{cases} \Delta E(x, z, t) = \frac{q\mu_0 E(x)n_0}{\varepsilon}(1 + m \cos(kz))f(t), \\ n_0 = \frac{\alpha\beta I_0\tau_i}{\hbar\omega}, \\ f(t) = \begin{cases} t^2/2\tau_i & \text{при } t < \tau_i \\ t - \tau_i/2 & \text{при } t > \tau_i. \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $E(x)$ определяется формулой (3), μ_0 – подвижность носителей за время порядка звукового периода после фотовозбуждения. Подчеркнем, что по крайней мере на более высоких частотах эта величина может существенно превышать подвижность за достаточно длительный интервал времени, поскольку для BSO характерен захват на ловушечные уровни прилипания (см., напри-

мер, [5]). При выбранном нами срезе BSO нормальное к границе раздела электрическое поле $\Delta E(x, z, t)$ может генерировать поверхностную звуковую волну. Амплитуду смещения в этой волне легко оценить в наиболее интересном случае, когда $h < \lambda/2$

$$u = 0.1 \frac{d_{14} q \mu_0 n_0 m U}{\epsilon \Omega} \quad (6)$$

Здесь d_{14} – пьезоконстанта, Ω – круговая частота звука. Генерация мгновенного отклика без предварительной засветки должна быть примерно в L/h раз менее эффективна. Однако надо отметить, что в эксперименте в этом случае четко наблюдается вклад стандартного теплового механизма, который сложным образом накладывается на рассмотренный выше механизм.

Теперь перейдем к достаточно сложному случаю, когда длина дрейфа носителей за время жизни мала ($l \ll h$). При таком условии поле (3) не успеет образоваться. В этом случае можно ограничиться следующим простым приближением. Для оценки примем, что после однородной засветки электроны покидают слой BSO толщиной не h , а l , образуя аналогичный (2), (3) слой пространственного заряда. Тогда весь расчет, в основном, повторяет предыдущий. Легко получить выражение для амплитуды смещения в звуковой волне после последующей неоднородной засветки:

$$u = 0.1 \frac{d_{14} q^2 \mu^2 \mu_0 n n_0 m \tau^2 U^2}{\epsilon^2 \Omega L^2} \quad (7)$$

Здесь мы приняли, что $l \ll \lambda/2$. Простые оценки показывают, что при наших условиях эксперимента можно ожидать относительных деформаций в поверхностной звуковой волне порядка 10^{-7} и более, что качественно согласуется с результатами измерений.

Теперь мы можем объяснить и эффект фотоакустической памяти, наблюдавшийся в [4]. В этом случае вначале производится переменное в пространстве освещение образца. После него образуется слой ионизованных примесей. Предположим, что этот слой тонкий, т.е. его толщина много меньше, чем $\lambda/2$ и $h(z)$, где величина $h(z)$ определяется формулой (2) для каждой координаты на поверхности. Тогда слой приближенно можно описывать как имеющий толщину l , но разную плотность ионизованных примесей в зависимости от освещения участка. Повторное, но уже однородное освещение приведет к неоднородному вдоль поверхности сдвигу фотовозбужденных электронов под действием созданного ранее электрического поля и к генерации звука. Легко проследить, что для генерации звука при этом полностью сохраняет свою силу формула (7).

В данной работе и работе [4] наблюдалось усиление звуковых сигналов при различных типах многократной засветки. Засветка приводит к усилению поля в слое пространственного заряда и, следовательно, к росту мгновенного отклика. Сложнее дело с сигналом фотоакустической памяти. Для него важна лишь периодическая вдоль поверхности компонента электрического поля. Поэтому действие предварительной однородной засветки неоднозначно. Модуляция объемного заряда вдоль поверхности будет неизбежно ослабляться последующим световым импульсом, так как возникнут и токи, параллельные поверхности.

Для фотоакустической памяти имеет смысл отметить две особенности. Во-первых, если слой пространственного заряда создан неоднородной засветкой, то возбуждение звука последующей неоднородной засветкой приведет к генерации звука и на удвоенной частоте. Этот сигнал может быть весьма эффективен. Вторая особенность заключается в следующем. При повторной засветке часть носителей появляется в области сильного внутреннего поля. Они сносятся полем гораздо быстрее, чем остальные носители, и на краю области начинают накапливаться избыточные электроны. После некоторого числа засветок возникнет область слабого поля внутри кристалла, которая предельно осложнит динамику процесса. В более простом случае постоянной во времени и пространстве засветки эти сложные проблемы уже обсуждались детально в ряде работ (см. обзор в [1]). Таким образом, многократное повторение предварительных засветок может привести к сложному нелинейному процессу, крайней чувствительности акустического сигнала к начальным условиям и плохой повторяемости результатов. Все это мы наблюдали экспериментально.

Мы исследовали эффекты фотоакустической памяти и в ряде других материалов. Была изучена структура $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ -алюминий. Результаты очень близки к приведенным здесь, и обсуждать их мы не будем. Интереснее исследования многократной засветки в слоистой структуре полупроводник (кремний)-BSO. Засветка в этом случае производилась только пространственно неоднородными импульсами света. Сигнал мгновенного отклика вполне аналогичен рассмотренному ранее, а основные закономерности процесса соответствуют обсужденному механизму. Первый мгновенный отклик был на уровне, близком к шумовому ($A_1 = 0.1$ мВ). Зависимости второго A_2 и третьего A_3 откликов (при повторении импульсов засветки) на пространственно модулированную импульсную засветку от напряжения внешнего электрического поля и экспозиции лазерного импульса представлены на рис. 4. Амплитуда второго мгновенного отклика A_2 зависела от вре-

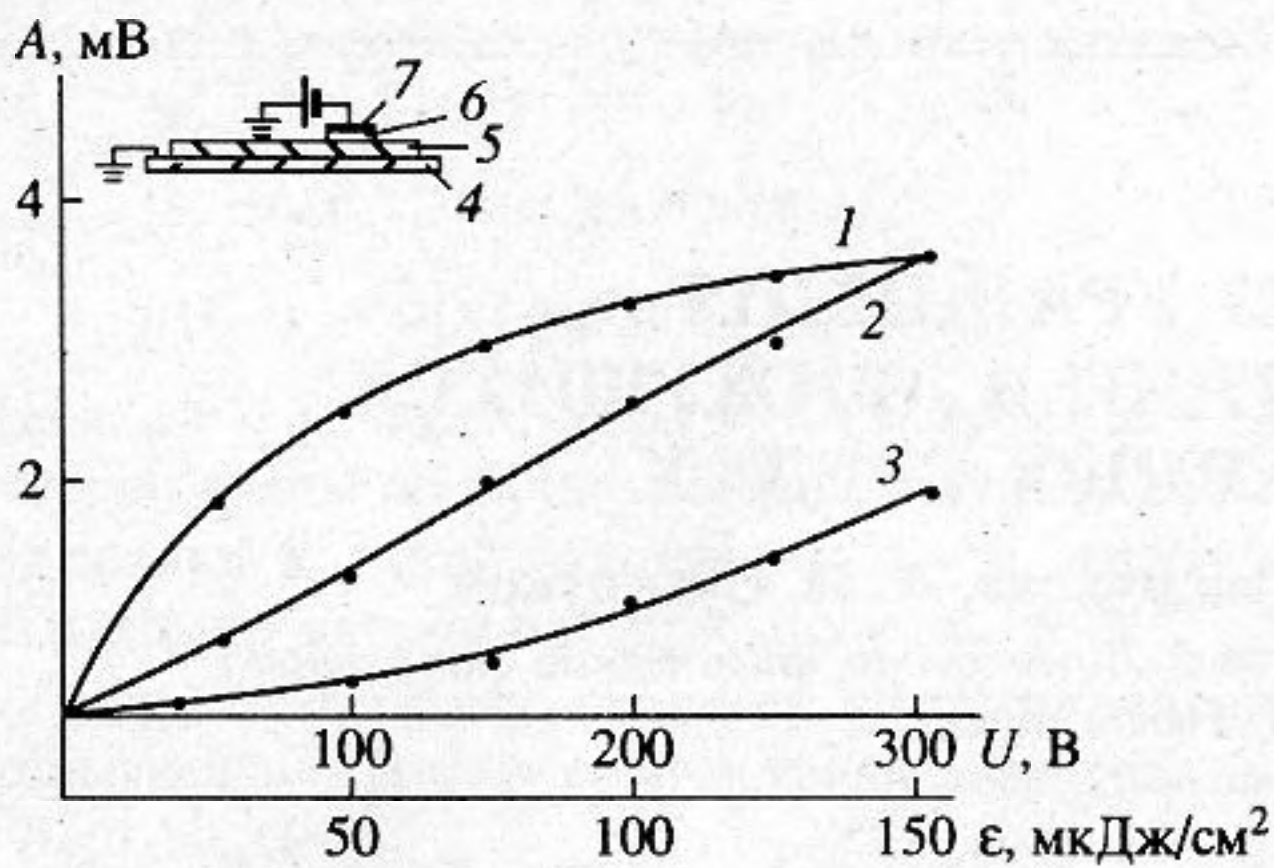


Рис. 4. Зависимость второго мгновенного отклика от экспозиции и напряжения внешнего электрического поля U (кривые 1, 2, соответственно), кривая 3 – амплитуда третьего мгновенного отклика от U . На схеме: 4 – стеклянная подложка с прозрачным электродом, 5 – BSO, 6 – Si, 7 – электрод.

менного интервала Δt между первым и вторым импульсом и при $\Delta t = 0.08$ с A_2 было примерно в 3 раза больше, чем при $\Delta t = 1$ с, при котором снимались данные, представленные на рис. 4.

Время жизни объемных фоторефрактивных решеток в BSO тщательно изучено и обычно не превышает 10^3 с. Наличие границы с металлом может существенно изменить ситуацию. Хорошо известно, что на границе металл–полупроводник

чрезвычайно важную роль могут играть поверхностные свойства. Мы провели исследование для выяснения их возможной роли. В итоге нам удалось наблюдать необычное для объемных решеток BSO сохранение фотоакустической памяти на временных интервалах порядка 10^4 – 10^5 с. При этом спад сигнала во времени не был экспоненциальным. Смывание алюминия с заменой контакта на прижимной алюминиевый или полупроводниковый полностью устраняло долговременную память.

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку работы грантом 95-02-06147.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. С.-Пб.: Наука, 1992. 320 с.
2. Стурман Б.И., Фридкин В.М. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления. М.: Наука, 1992. 208 с.
3. Гусева М.Б., Дубинина Е.М. Физические основы твердотельной электроники. М.: Изд. МГУ, 1986. 312 с.
4. Деев В.Н., Пятаков П.А. Фотоакустический эффект с памятью. Письма в ЖТФ. 1985. Т.11. В. 2. С. 76–80.
5. Sochava S.L., Buse K., Kratzig E. Photoinduced Hall-current measurements in photorefractive sillenites. Phys. Rev., B. 1995. V. 51. № 7. P. 4684–4686.

Photoacoustic Phenomena in Layered Structures with Photorefractive Crystals in an External Electric Field

P. A. Pyatakov and A. A. Chaban

Photoacoustic interaction in layered photorefractive crystal-conductor structures placed in an external electric field is studied. The known field effect creates a redistribution of the photoinduced carriers in the photorefractive crystal and forms long-living internal electric fields after capturing carriers at the recombination levels. The mechanism of the associated memory phenomena is discussed.