

УДК 534.2-8

ОПТИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПЛАСТИНЕ ФОТОРЕФРАКТИВНОГО КРИСТАЛЛА В ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

© 2000 г. П. А. Пятаков

Акустический институт им. Н.Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: slparuat@citylina.ru

Поступила в редакцию 09.12.98 г.

Экспериментально исследованы фотоакустические явления при импульсном оптическом возбуждении поперечных волн горизонтальной поляризации во внешнем поперечном электрическом поле в пластине фоторефрактивного кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

Фоторефрактивные кристаллы, к ним относятся многие фоточувствительные диэлектрики и высокоомные полупроводники, обладают набором оптических и электроакустических свойств, который обуславливает возможность наблюдения в них целого ряда оптико-акустических эффектов [1–5]. Один из них – фотоакустический эффект с памятью, впервые наблюдавшийся в работе [3]. К настоящему времени известно несколько разновидностей этого эффекта. Экспериментально наблюдалось возбуждение как поверхностной волны рэлеевского типа [3], так и чисто объемных поперечных волн [6].

В данной работе фотоакустический эффект с памятью исследуется в пластине фоторефрактивного кристалла силиката висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$), кристаллографическая ориентация и условия на границе которого допускают существование в нем чисто поперечной поверхностной волны Гуляева–Блюстейна. В условиях, когда поперечная поверхностная волна может вносить существенный вклад в поле излучения, фотоакустический эффект с памятью еще не наблюдался. Новой деталью эксперимента, по сравнению с работой [6], является ориентация внешнего электрического поля. Она поперечна по отношению к направлению распространения возбужденных поперечных волн. Как показано ниже, при такой геометрии акустический сигнал наблюдается при любой поляризации внешнего электрического поля. Интересно, что при переключении направления электрического поля область, из которой происходит генерации акустического сигнала, перемещается от одной поверхности пластины к другой.

Цель работы – дать описание экспериментальных наблюдений фотоакустического эффекта с памятью в пластине фоторефрактивного пьезоэлектрического кристалла во внешнем поперечном электрическом поле и обсудить особенности

оптического возбуждения и распространения поперечных приповерхностных волн.

Оптико-акустическая ячейка, на которой проводились эксперименты (рис. 1), была изготовлена из образца кристалла германата висмута ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$), вырезанного в виде пластины размерами $60 \times 20 \times 1.5 \text{ мм}^3$. Большая грань пластины параллельна кристаллографической плоскости (110), а длинное ребро совпадает с кристаллографической осью $[\bar{1}10]$. Вдоль этого направления в объеме кристалла германата висмута может распространяться чисто поперечная пьезоактивная объемная волна, вектор смещения которой параллелен плоскости (110). На одну из больших граней пластины нанесена пленка алюминия. Этот электрод заземляется. Другой электрод ячейки, на которой подавалось электрическое напряжение, выполнен в виде прозрачной проводящей пленки SnO_2 на стеклянной подложке. Стеклянная пластинка вместе с прозрачным электродом через слой жидкости (раствор глицерина в воде) поджимается к кристаллу. Толщина слоя жидкости $\sim 10 \text{ мкм}$. На торце пластины германата

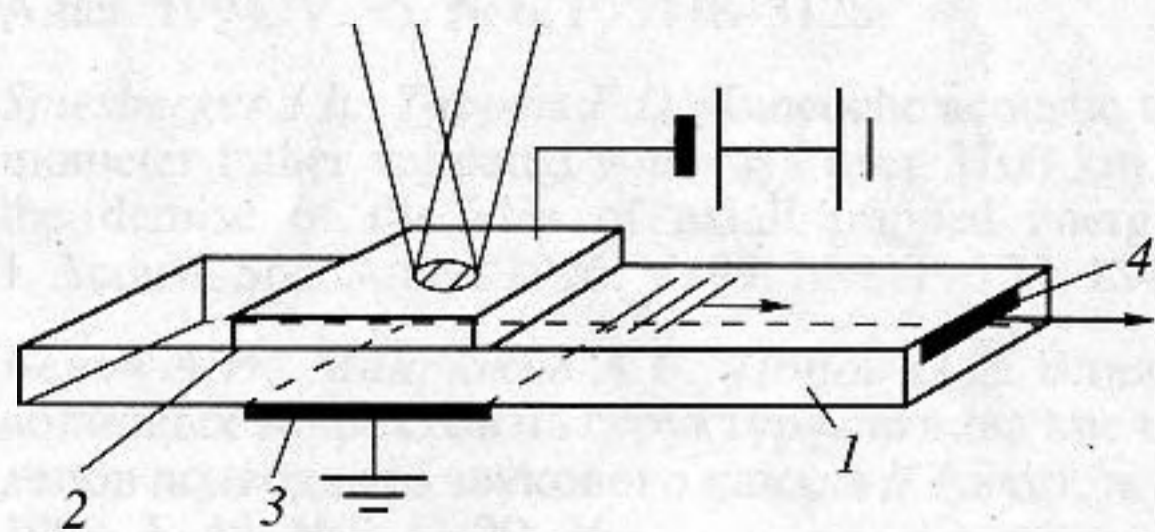


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – образец кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, 2 – прозрачные электрод SnO_2 на стеклянной подложке, 3 – пленка Al, 4 – торцевой преобразователь.

висмута (см. рис. 1), у верхней ее грани, расположен пластинчатый преобразователь поперечных волн из LiNbO_3 . Резонансная частота преобразователя ~ 90 МГц, диапазон чувствительности от 20 до 160 МГц. Размеры преобразователя: по глубине – 0.5 мм, по ширине – 8 мм,

Кристалл германата висмута освещался через прозрачный электрод лазерными импульсами длительностью 20 нс и длиной волны несущей $\lambda = 0.53$ мкм. Распределение интенсивности засветки представляло собой либо интерференционную картину с периодом, равным длине акустической волны (в этом случае картина формировалась при интерференции двух световых лучей одинаковой амплитуды), либо однородное по пространству пятно. В последнем случае один из интерферирующих лучей перекрывался затвором.

Наблюдались фотоакустические эффекты двух типов: мгновенный фотоакустический отклик и фотоакустический отклик с памятью. Несущая частота акустических импульсов $f \approx 30$ МГц. При мгновенном отклике акустический сигнал возбуждался периодически неоднородной засветкой. При фотоакустическом эффекте с памятью – акустический сигнал являлся откликом на однородную засветку при условии предварительно произведенной записи, т.е. предварительной экспозиции неоднородной засветкой. Результаты экспериментов представлены в виде графиков на рис. 2–4. Отметим наиболее характерные свойства наблюдавшихся эффектов.

Как можно видеть из рис. 2, первый мгновенный отклик при всех экспозициях засветки относительно мал. Последующие сигналы заметно превосходят первый и достигают максимального значения, когда суммарная экспозиция от первой засветки до экспозиции, соответствующей максимальному акустическому сигналу, составляет величину $\sum (W_i) \sim 0.1$ мДж/см².

Далее отметим, что акустический сигнал наблюдается и при мгновенном отклике, и при фотоакустическом отклике с памятью (рис. 3), как при отрицательной полярности внешнего электрического поля, так и при положительной. Причем амплитуда акустического сигнала при отрицательной полярности внешнего поля существенно больше, чем при положительной.

Зависимость от экспозиции засветки (рис. 4) при разных полярностях внешнего электрического поля проявляет одинаковую закономерность: сначала идет рост по закону $\sim W^{0.5}$, затем – насыщение и спад.

Отметим, что при поперечном электрическом поле время памяти оказывается существенно большим, чем при продольном: $\tau_{\perp} = 10^3$ – 10^4 с и $\tau_{\parallel} = 10$ – 10^2 с соответственно.

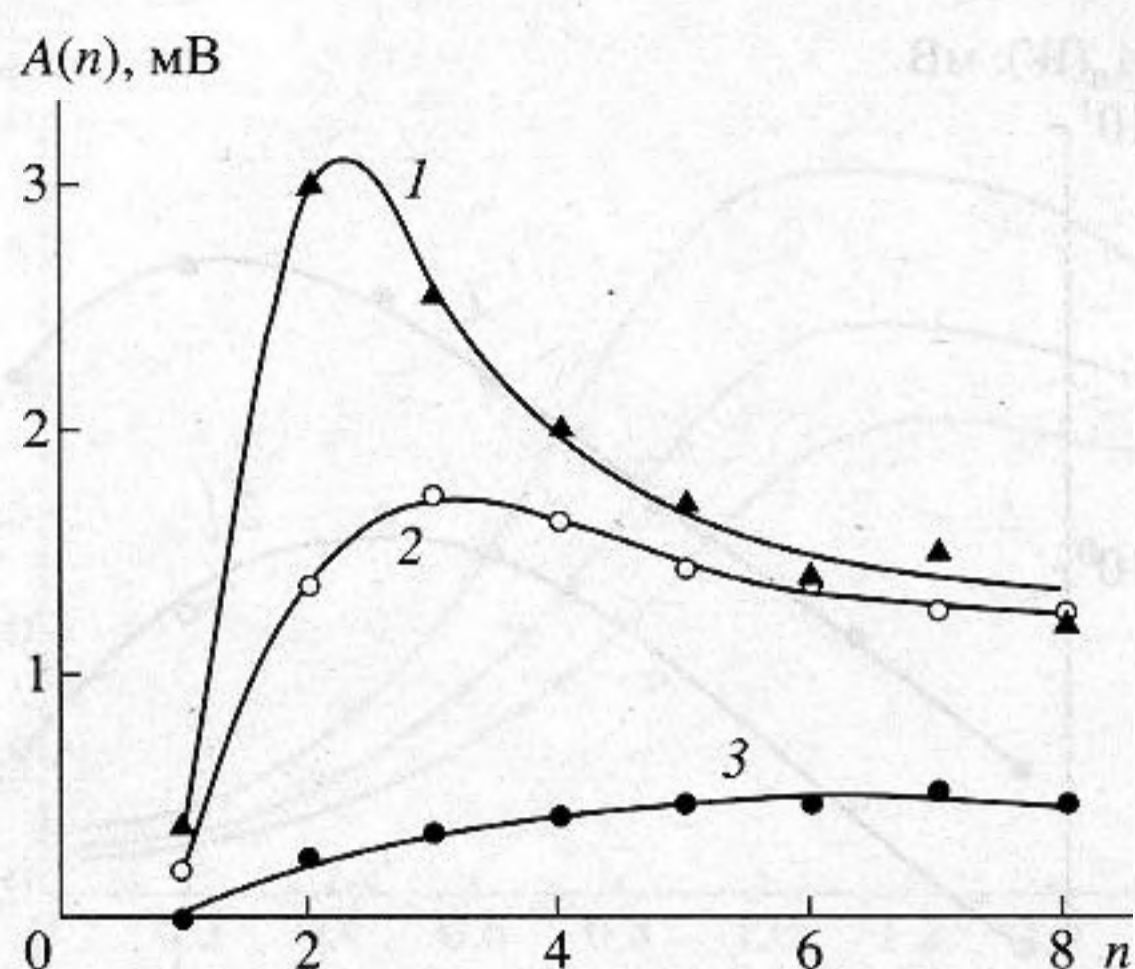


Рис. 2. Мгновенный фотоакустический отклик в зависимости от порядкового номера лазерного импульса. Напряжение $U = -600$ В. Экспозиция в импульсе: кривая 1 – 70 мкДж/см², кривая 2 – 20 мкДж/см², кривая 3 – 10 мкДж/см².

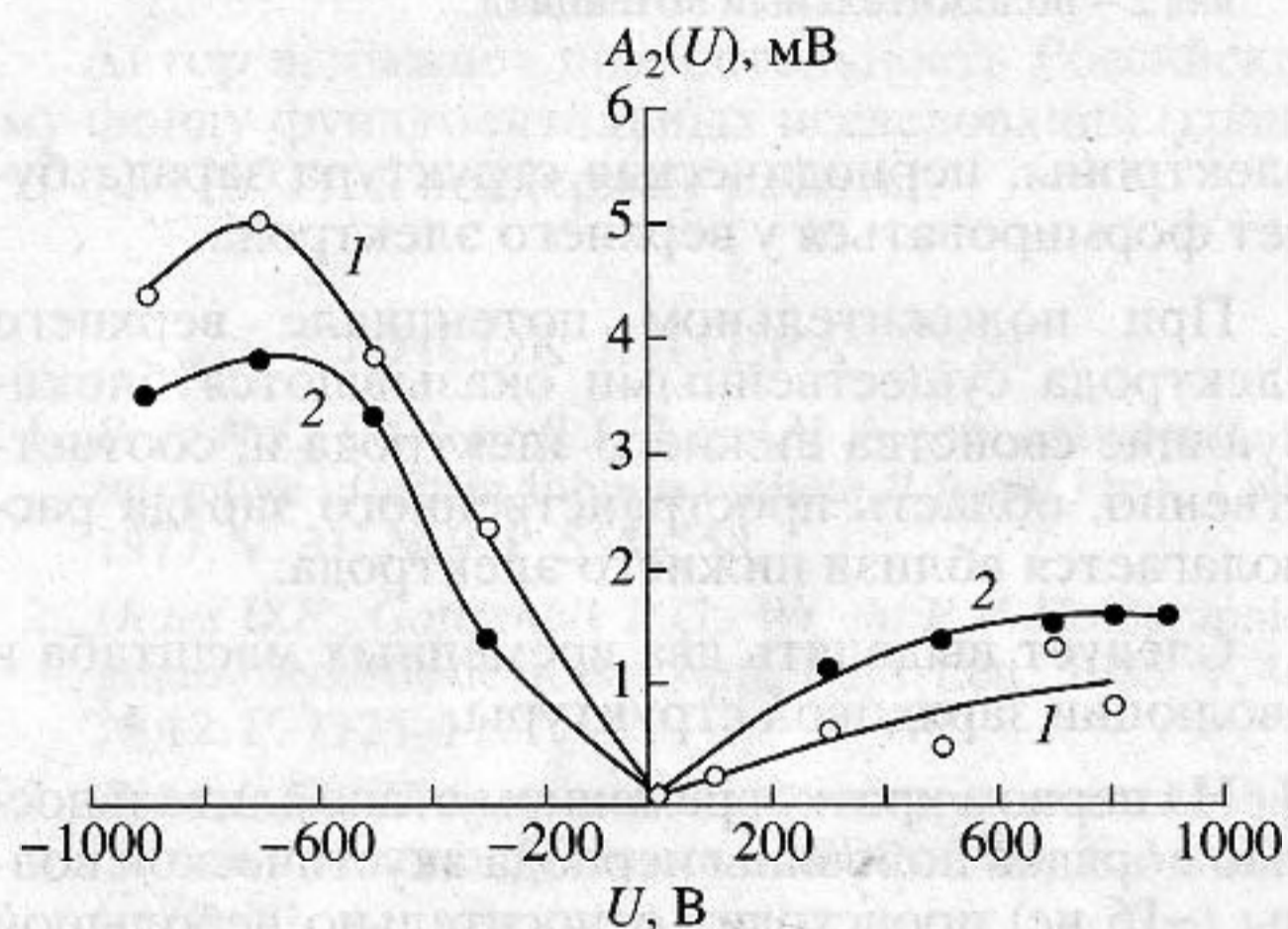


Рис. 3. Фотоакустический отклик с памятью (кривая 1) и второй по порядку мгновенный фотоакустический отклик (кривая 2) в зависимости от внешнего электрического поля. Экспозиция записи $W_{\text{п}} = 70$ мкДж/см². Экспозиция считывания $W_{\text{с}} = 200$ мкДж/см². Экспозиция при втором мгновенном отклике $W = 70$ мкДж/см².

Объяснение на качественном уровне отмеченным особенностям эффектов можно дать на основе следующей физической модели. Будем предполагать, что электроды на верхней и нижней гранях фоторефрактивного кристалла создают блокирующие контакты, то есть хотя бы в одном направлении не пропускают электрический ток. Пусть на верхнюю грань пластины подан отрицательный потенциал электрического поля. Тогда при периодически неоднородной засветке кристалла вследствие того, что фотоиндуцированными носителями в германате висмута являются

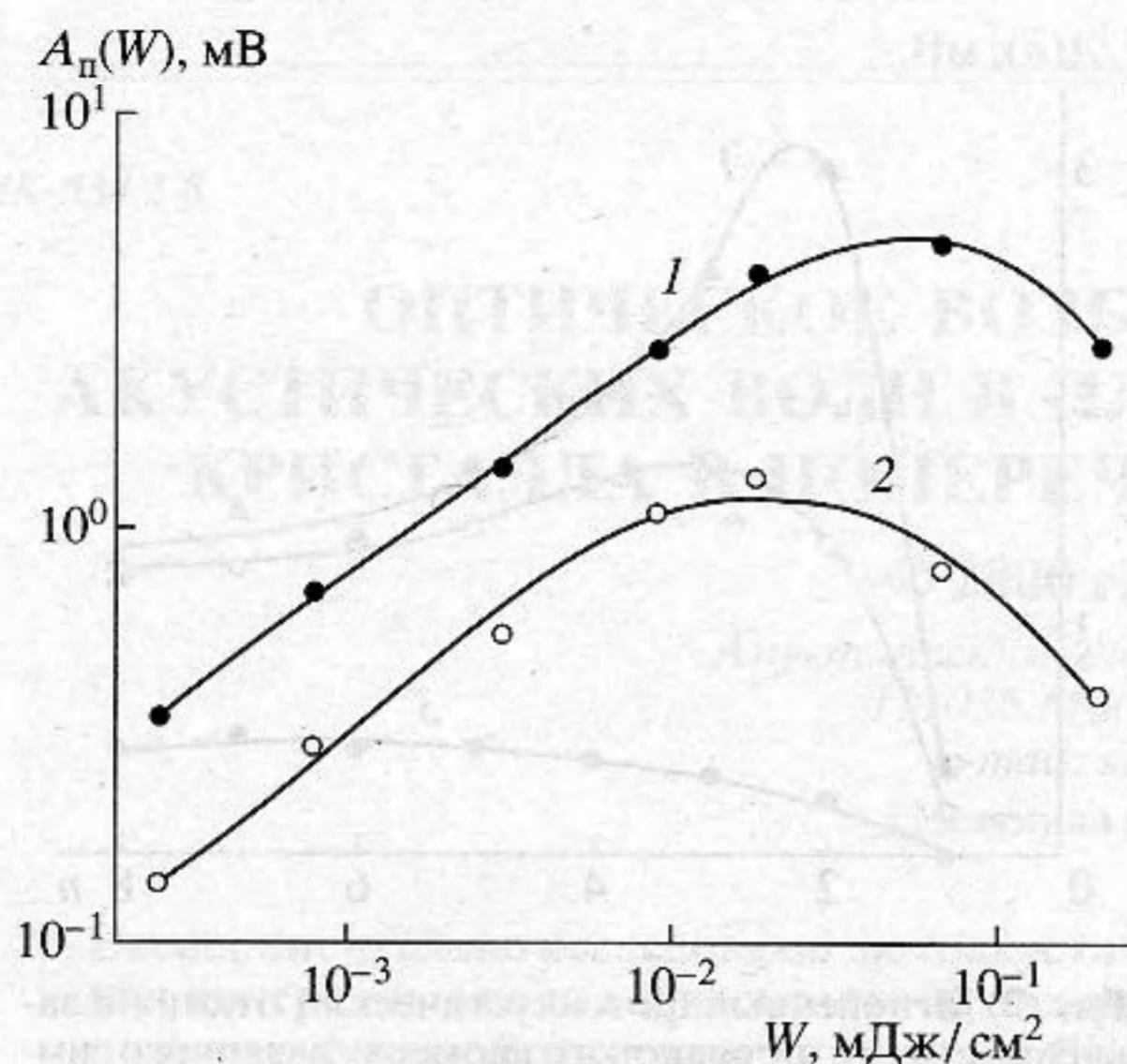


Рис. 4. Фотоакустический отклик с памятью в зависимости от экспозиции записи. $U = -800$ В. Кривая 1 – отрицательный потенциал верхнего электрода, кривая 2 – положительный потенциал.

электроны, периодическая структура заряда будет формироваться у верхнего электрода.

При положительном потенциале верхнего электрода существенными оказываются блокирующие свойства нижнего электрода и, соответственно, область пространственного заряда располагается вблизи нижнего электрода.

Следует выделять два временных масштаба в эволюции зарядовой структуры.

На первом кратковременном этапе длительностью порядка половины периода акустической волны (~ 16 нс) происходит относительно небольшой рост амплитуды периодической структуры заряда. Но именно этот рост заряда ответствен за возбуждение акустической волны, источником которой являются механические напряжения, появляющиеся вследствие действия пьезоэффекта. Полное формирование зарядовой структуры, индуцированное одним лазерным импульсом, происходит за время порядка времени жизни электронов проводимости (для германата висмута $\tau = 10^{-4} - 10^{-6}$ с). К моменту действия второго лазерного импульса у поверхности блокирующего электрода уже сформирована область положительного заряда. Эффективная толщина слоя образца, на котором падает внешнее напряжение, уменьшается до толщины слоя заряда и, как следствие, в области пространственного заряда увеличивается напряженность электрического поля. Генерация второго, как и последующих импульсов, происходит при более высоких напряженностях электрического поля, чем генерация первого, поэтому их амплитуды выше. Увеличение суммарной экспозиции выше некоторой оптимальной величины

уже не увеличивает амплитуду фотоакустического отклика, так как приводит к стягиванию пространственного заряда до толщины, меньшей соответствующего размера приемного преобразователя.

Фотоакустический сигнал с памятью – это реакция записанной зарядовой структуры на однородную стирающую засветку. Изменение внутреннего электрического поля при стирании вызывает импульс акустической волны. Акустический сигнал памяти, также как и мгновенный отклик, излучается либо из верхней приповерхностной области кристалла, при отрицательной полярности внешнего поля, либо из нижней – при положительной полярности.

Легко понять различие в амплитудах сигналов при разных полярностях внешнего электрического поля, если заметить, что приемный преобразователь располагается несимметрично относительно верхней и нижней граней пластины, он смещен к верхней грани. Полезно получить численную оценку отношения амплитуд двух сигналов. Прежде всего, отметим, что фотоакустические сигналы – это короткие импульсы поперечных волн, возбуждаемые вдоль границ. Их длительность $\Delta t = d/v_t \approx 1$ мкс, где $d \approx 2$ мм – длина засвечиваемой области, $v_t \approx 1.7$ мм/мкс – скорость акустических волн. Длительность импульса настолько мала, что при рассмотрении дифракционного поля можно не учитывать вторую границу раздела, рассматривая поле в полупространстве, т.е. прямой прошедший и отраженный от границы сигналы во времени разделяются.

Условия на границах, закорачивание электрических полей электродами, приводит к возникновению в пространственном спектре поля излучения поверхностных волн, проникающих на глубину $10-20\lambda$, где λ – длина волны. Поверхностные волны локализуют энергию у поверхности и, как следствие, дифракционное расплывание энергии в сторону от границы уменьшается. После выхода волн из-под электродов восстанавливается спектр свободного полупространства и полное поле дифрагирует стандартным образом. Поэтому для оценки отношения амплитуд сигналов будем считать поле таким как оно было бы в случае чисто поперечных волн под свободной границей, а влияние поверхностных волн под электродами учтем, вводя эффективную длину пробега $l < l_0$, l_0 – истинное расстояние от приемника до места генерации. Численный расчет дифракционного интеграла проведен в приближении заданных силовых источников, функция распределения которых с глубиной имеет вид:

$$F(y) = F_0(1 - |y_1|/h), \text{ если } -h \leq y_1 \leq h,$$

$$\text{и } F(y_1) = 0, \text{ если } -h \geq y_1 \geq h,$$

т.е. действительные источники заданы в слое $0 \leq y_1 \leq h$, тогда как мнимые – в слое $-h \leq y_1 \leq 0$. Отношение амплитуд сигналов m , вычисляется как отношение двух интегралов I_1/I_2 , где

$$I_{1,2} = \int_{b_{1,2}}^H dy_2 \int_{-a}^a dx_1 \int_{-h}^h F(y_1) e^{ikr} / r dy_1,$$

$r = \sqrt{l^2 + (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, x_1, y_1 – координаты в плоскости источников, y_2 – координата в плоскости приемника, $H = 0.5$ мм – размер приемника по глубине, $a = 1$ мм – полуширина области засветки, l – расстояние от источников до приемника, $b_1 = 0, b_2 = 1$ мм, k – волновое число акустической волны.

Отношение m как функция толщины слоя источников h представлена на рис. 5 для трех значений l . Сравнение графиков с экспериментальными значениями ($m \approx 1.5-2.5$ на рис. 3) дает оценку толщины слоя $h \approx 0.6$ мм. Оцененная величина h представляется естественной. Она близка размеру преобразователя по глубине, что соответствует условию наблюдения максимального фотоакустического отклика.

Заметим, что при меньшем размере приемника по глубине следует ожидать и меньшей толщины слоя фотоакустических источников, соответствующей наилучшим условиям возбуждения. Но при этом увеличится и необходимая величина предварительной экспозиции, выводящая ячейку в оптимальный режим.

Таким образом, проведено экспериментальное исследование импульсной оптической генерации поперечных волн горизонтальной поляризации в фоторефрактивном пьезоэлектрике в поперечном электрическом поле. Наблюдались сигналы фотоакустических откликов при обеих полярностях внешнего электрического поля. Особенности эффектов объяснены с помощью предположений о блокирующих свойствах электрических контактов и наличия эффекта перемещения области расположения фотоакустических источников при изменении полярности внешнего поля. Оценена глубина локализации пространственного заряда, при которой наблюдается максимальный фотоакустический отклик.

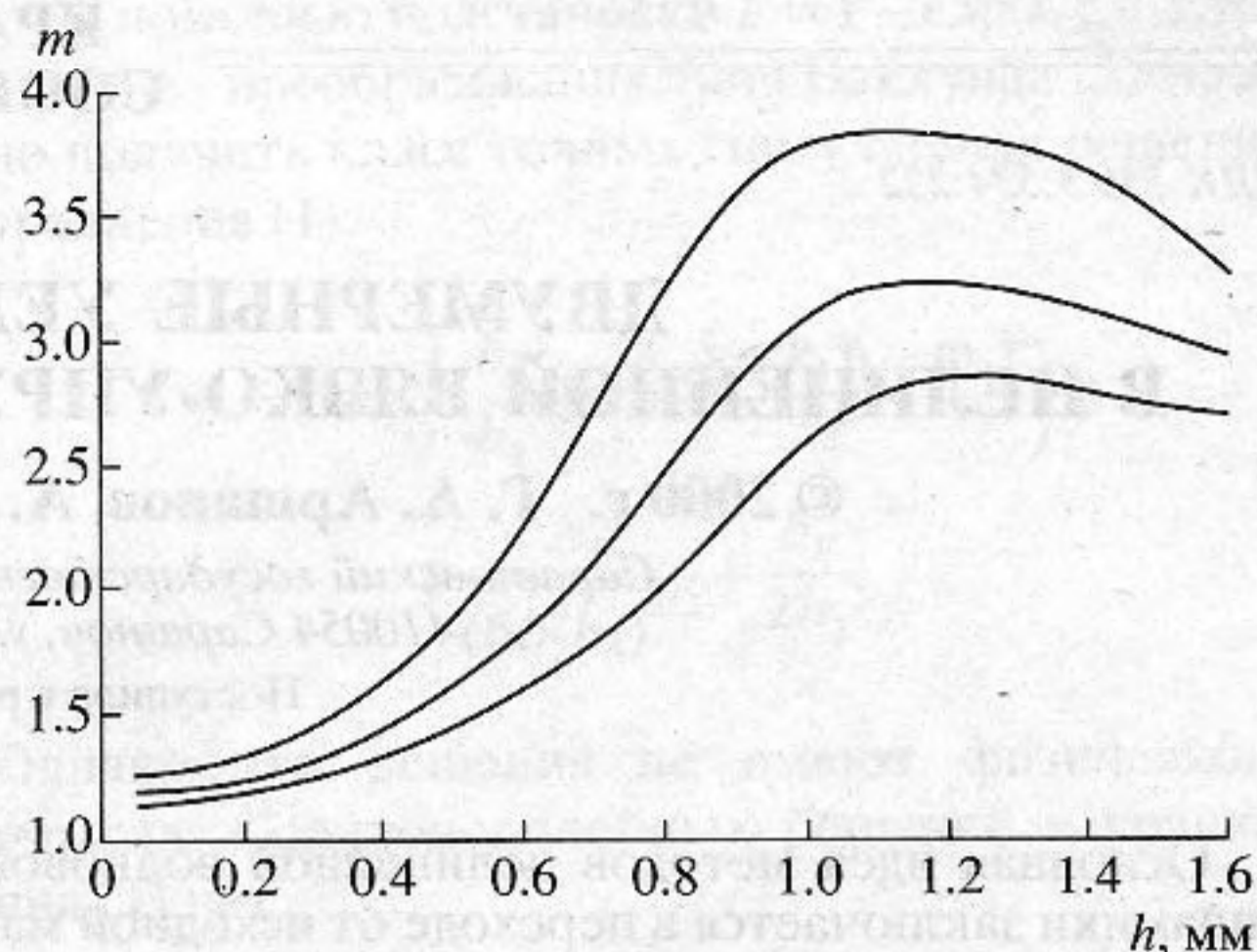


Рис. 5. Зависимость отношения m от толщины слоя пространственного заряда h : кривая 1 – для расстояния $l = l_0 = 40$ мм, кривая 2 – для $l = 30$ мм, равному расстоянию от приемника до электрода, кривая 3 – $l = 35$ мм.

Автор выражает признательность Российскому фонду фундаментальных исследований (грант 97-02-17671) за поддержку работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berg N.J., Udelson B.J., Lee J.N. A new acoustophotorefractive effect in lithium niobate // *Appl. Phys. Lett.*, 1977. V. 31. № 9. P. 555–558.
2. Oates D.E., Gottschalk P.G., Wright P.V. Holographic-grating acoustic devices // *Appl. Phys. Lett.*, 1985. V. 46. № 12. P. 1125–1127.
3. Деев В.Н., Пятаков П.А. Фотоакустический эффект с памятью // *Письма в ЖТФ*. 1985. Т. 11. В. 2. С. 76–80.
4. Быстров О.В., Голеннищев-Кутузов А.В. Акустически индуцированная доменная структура в ниобате лития // *Письма в ЖЭТФ*. 1995. Т. 61. В. 2. С. 128–130.
5. Montimorillon L.-A., de Delage P., Lannay J.-C., Roosen G. Novel theoretical aspects on photorefractive ultrasonic detection and implementation of a sensor with an optimum sensitivity // *J. Appl. Phys.*, 1997. V. 82. № 12. P. 5913–5922.
6. Деев В.Н., Пятаков П.А. Оптическая генерация акустических волн на фоторефрактивной решетке // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. В. 4. С. 621–627.

Optical Excitation of Transverse Acoustic Waves in a Photorefractive Crystal Plate under a Transverse Electric Field

P. A. Pyatakov

Photoacoustic phenomena arising in the case of a pulsed optical excitation of transverse waves of horizontal polarization in a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ photorefractive crystal plate under an external transverse electric field are studied.