

АНОМАЛЬНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ МОД В ОБЛАСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛАХ

В.С.Романов, Н.К.Соловаров¹⁾

Физико-технический институт им. Е.К.Завойского КНЦ РАН
420029 Казань, Россия

Поступила в редакцию 5 января 1995 г.

Обнаружена пороговая нелинейная генерация звука (на половинной и двойной частотах импульсного радиочастотного возбуждения) в монокристаллах R_s и KDP в окрестности сегнетоэлектрического фазового перехода. Продемонстрировано проявление такой аномальной генерации и преобразования звуковых мод в сигналах поляризационного эха.

Импульсное ультразвуковое зондирование конденсированных сред в области фазовых переходов (ФП) считалось ранее [1] невозможным из-за дисперсии и рассеяния звуковых волн на неоднородностях. Подобного рода исследования были реализованы [2,3] после обнаружения поляризационного эха (ПЭ) в области ФП сегнетоэлектрических монокристаллов R_s (сегнетова соль) и KDP (дигидрофосфат калия). Позднее [4] в более узких температурных диапазонах в окрестности тех же ФП наблюдались минимумы поглощения звука в исследованном диапазоне частот $2 \div 50$ МГц, глубина которых увеличивалась с ростом амплитуды звуковой волны. Оба явления интерпретировались [5,6] как проявление нелинейных электроупругих свойств монокристалла в области ФП.

В настоящей работе сообщается о наблюдении в области ФП генерации звука на частоте $\omega/2$ в два раза меньшей частоты возбуждения ω , проявляющей характерные свойства динамического поведения нелинейных систем [7,8]. Показано, что такая аномальная генерация и преобразование звуковых мод могут объяснить механизм формирования аномального сигнала ПЭ.

Методика экспериментов была аналогична использованной в [2-4, 9] для возбуждения сигналов ПЭ в монокристаллах сегнетоэлектриков. В отличие от представленных там результатов, в данной работе исследовались дополнительно сигналы индукции после каждого из последовательности возбуждающих радиочастотных (РЧ) импульсов. Причиной внимания к поведению индукции послужило необычное поведение "звона" после одного возбуждающего РЧ импульса. Кроме обычной индукции на частоте возбуждения ω наблюдались сигналы индукции на частотах 2ω (вторая гармоника) и $\omega/2$. Характерная осциллограмма сигнала индукции $I_{\omega/2}$ на половинной частоте $\omega/2$ после одного РЧ импульса с несущей частотой ω приведена на рис.1.

Отметим качественные особенности указанного сигнала

1) Генерация сигнала $I_{\omega/2}$ имеет пороговый характер по амплитуде возбуждающего РЧ импульса. При повышении мощности РЧ импульса выше пороговой амплитуда сигнала $I_{\omega/2}$ увеличивается нелинейно.

2) Сигнал $I_{\omega/2}$ генерируется в окрестности ФП в более узком диапазоне температур, чем диапазон ΔT_{PE} , в которых наблюдаются сигналы ПЭ [2,3]. Например, в монокристалле R_s $\Delta T_{PE} \rightarrow -28 - +32^\circ C$, а $\Delta T_{\omega/2} \rightarrow$ в верхней

¹⁾ E-mail: solovar@ksc.iasnet.com.

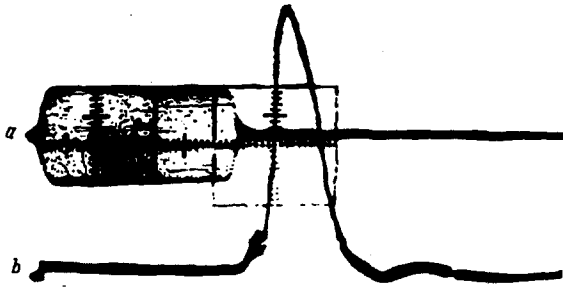


Рис.1. Осциллограмма генерации звука на половинной частоте возбуждающего РЧ импульса: *a* – РЧ импульс на частоте 24 МГц; *b* – сигнал на частоте 12 МГц, приемник открыт в момент окончания РЧ импульса. Монокристалл R_5 , развертка 2 мкс/см, $T = 23,7^\circ\text{C}$, $E_1 = 0,8$ и $E_0 = 0,6$ кВ/см

точке Кюри $+23,7 \div +24,3^\circ\text{C}$; в KDP $\Delta T_{\text{РЧ}} \rightarrow -160 \div -149^\circ\text{C}$, а $\Delta T_{\omega/2} \rightarrow -153,3 \div -152,9^\circ\text{C}$. Диапазоны $\Delta T_{\omega/2}$ увеличиваются с ростом амплитуды РЧ импульса. Выше указаны наблюдавшиеся максимальные диапазоны $\Delta T_{\omega/2}$.

3) Сигнал $I_{\omega/2}$ совпадает со временем $T_2^*(\omega/2)$, большим времени спада $T_2^*(\omega)$ сигнала I_ω на частоте возбуждения; что соответствует относительному сужению спектра возбуждаемого звукового сигнала. Это иллюстрируется более шумовым характером спада сигналов I_ω после РЧ импульсов на рис.2*a* по сравнению с $I_{\omega/2}$ на рис.1. Качественно такое поведение сигнала $I_{\omega/2}$ хорошо соответствует пороговому характеру его возбуждения.

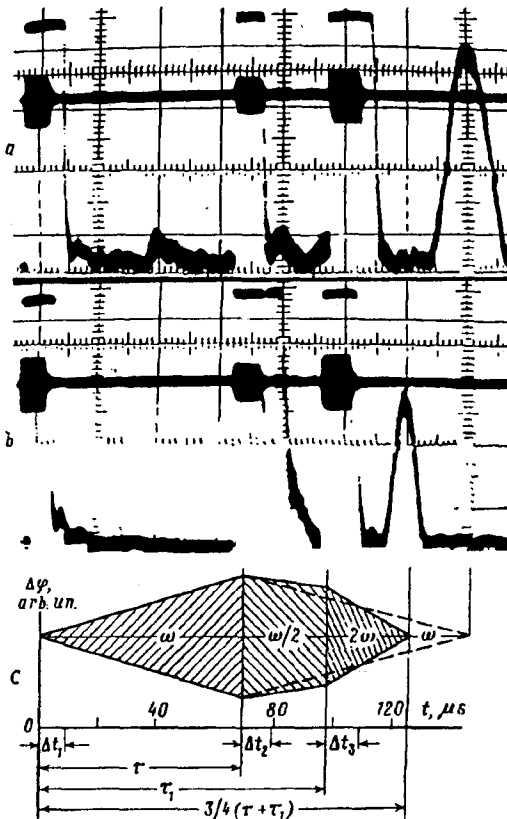


Рис.2. Осциллограмма временных последовательностей РЧ импульсов (ω , 2ω , ω), сигналов индукции, эха и диаграмма формирования аномального эха: *a* – приемник настроен на частоту ω ; *b* – приемник настроен на частоту 2ω ; монокристалл KDP, развертка 20 мкс/см, $E_{1,3} = 1,3$, $E_2 = 1,1$ и $E_0 = 3,0$ кВ/см, $T = 153,3^\circ\text{C}$; *c* – диаграмма преобразования звуковых мод при формировании аномального эха

Отметим, что генерация второй гармоники (2ω) на рис.2*b* также имеет пороговый характер по амплитуде возбуждающего РЧ импульса.

Перечисленные свойства аномальной генерации звука в окрестности ФП в сегнетоэлектриках проявляются и в сигнале ПЭ.

Рассмотрим проявление такой генерации на примере возбуждения аномального сигнала ПЭ на частоте 2ω последовательностью трех РЧ импульсов (рис.2б) с частотами ω , 2ω , ω , соответственно. Перечислим качественные особенности наблюдаемых при этом сигналов.

1) После каждого из РЧ импульсов имеется сигнал индукции $I_{2\omega}$.

2) Сигнал аномального эха на частоте 2ω наблюдается в момент времени $\tau_e = 3/4(\tau + \tau_1)$, где τ – время начала 2-го импульса, τ_1 – время начала 3-го импульса и отсчет времени ведется с начала 1-го импульса. Этот сигнал наблюдается в узком диапазоне температур в окрестности ФП, причем этот диапазон зависит от интенсивностей возбуждающих РЧ импульсов. Амплитуда эха нелинейно зависит от амплитуд возбуждающих импульсов. Сигнал отсутствует при выключении любого из трех импульсов.

Именно последнее обстоятельство позволяет назвать рассматриваемый сигнал эха аномальным. Действительно, ранее [9] сообщалось о возбуждении сигналов ПЭ в сегнетоэлектриках в области ФП на суммарной и разностной частотах возбуждающих импульсов ($\omega_1 \pm \omega_2 = \omega_e$). При этом каждый из сигналов ПЭ [2] представлял собой результат возбуждения двумя импульсами, в роли одного из которых мог выступать и один из сигналов ПЭ. Обсуждаемое же здесь эхо представляет собой результат совокупного действия всех трех РЧ импульсов.

При расчете времени формирования аномального эха использована следующая модель:

1) первый импульс может одновременно генерировать звуковые волны с частотами $\omega/2$, ω , 2ω ;

2) во время 2-го и 3-го импульсов может происходить преобразование волн и обращение фронтов с генерацией звуковых мод на всех возможных суммарных и разностных частотах, которые удобно записать в виде $m\omega/2$ (где $m = 1, 2, 3, \dots$);

3) преобразование и обращение [10] звуковых волн происходит с сохранением фазы каждой компоненты в спектре моды в момент преобразования (обращения).

На основании этой модели можно записать обычное в теориях эха условие сфазированности спектральных компонент в виде

$$m_1\tau'_1 \pm m_2\tau'_2 = 4\tau'_e, \quad (1)$$

где τ'_1 – время расфазирования между 1-м и 2-м импульсами; τ'_2 – время расфазирования (сфазирования) между 2-м и 3-м импульсами; числа m_1 , m_2 определяют частоты мод, участвующих в формировании эха; знак перед m_2 указывает на то, продолжает ли преобразованная 2-м импульсом мода расфазирование (+) или происходит обращение волнового фронта (-) и, соответственно, сфазирование. Само определение времен τ'_1 , τ'_e требует дополнительного обоснования. В существующих теоретических описаниях ПЭ в монокристаллах общепринято приближение относительно коротких импульсов возбуждения, и в расчетах времени формирования сигналов эха пренебрегается расфазированием во время действия импульсов. В описываемых экспериментах длительности импульсов сравнимы с интервалами между ними, поэтому необходимо из экспериментальных данных по времени формирования эха делать вывод не только о характере частотных преобразований и обращений звуковых волн, но также

и о характере расфазирования волн во время действия импульсов. То есть брать ли в качестве τ'_1 , τ'_2 , τ'_e в (1) только промежутки между импульсами или включать, и в каком порядке, длительности импульсов Δt_i ?

По результатам семи серий экспериментов с варьированием Δt_i , τ , τ_1 было получено, что указанное выше время формирования аномального эха $\tau_e = 3/4(\tau + \tau_1)$ соответствует экспериментальным данным с точностью $\pm 2,3$ мкс, если в (1) $m_1 = 2$, $m_2 = -1$ и длительности РЧ импульсов включены во времени расфазирования (сфазирования) τ'_i .

Для наглядного представления процессов преобразования звуковых волн и обращения волновых фронтов в процессе формирования эха удобно использовать диаграмму, аналогичную предложенной ранее В.И.Башковым [11]. Такая диаграмма формирования обсуждаемого здесь аномального эха приведена на рис.2с. По оси ординат отложено отклонение фазы $\Delta\varphi$ спектральной компоненты рассматриваемой звуковой моды от среднестатистического значения фазы моды в зависимости от времени. Двумя расходящимися (сходящимися) лучами представлен процесс расфазирования (сфазирования) двух спектральных компонент с симметричным отклонением частот ($\pm\Delta\omega$) от среднего значения частоты. Изображенный процесс заключается в: 1) генерации 1-м РЧ импульсом звуковой волны на частоте возбуждения ω ($m_1 = 2$), 2) расфазировании этой волны на интервале $0 \rightarrow \tau$, 3) преобразовании 2-м РЧ импульсом этой волны в обращенную на частоте $\omega/2$ ($m_2 = -1$), 4) сфазирование обращенной волны на интервале $\tau \rightarrow \tau_1$ со скоростью, в два раза меньшей скорости расфазирования на интервале $0 \rightarrow \tau$ в связи с уменьшением частоты в 2 раза, 5) преобразование волны 3-м РЧ импульсом в волну с частотой 2ω без обращения, 6) сфазировании этой волны на интервале $\tau_1 \rightarrow 3/4(\tau + \tau_1)$ со скоростью, в два раза большей скорости расфазирования на интервале $0 \rightarrow \tau$ (4 в правой части выражения (1)).

Полученный результат демонстрирует, что вблизи сегнетоэлектрического ФП в процессах генерации и преобразования звуковых мод существенными становятся нелинейности более высоких порядков, чем обычно рассматриваемые в сегнетофазе.

Работа частично выполнена при поддержке Международного научного фонда (проект RKA000).

1. К.Гарланд, Физическая акустика **7**, 61 (1974).
2. В.С.Романов, В.И.Башков, В.М.Березов, В.Д.Корепанов, ФТТ **20**, 466 (1978).
3. V.M.Berezov, V.I.Bashkov, V.D.Koropanov, and V.S.Romanov, Ferroelectrics **22**, 755 (1978).
4. В.М.Березов, В.С.Романов, А.Б.Балакин, УФЖ **29**, 1589 (1984).
5. Л.А.Шувалов, А.А.Уруссовская, И.С.Желудев и др., Современная кристаллография, т.4. М.: Наука.
6. В.М.Березов, В.С.Романов, ЖЭТФ **81**, 2111 (1981).
7. С.Н.Дрождин, Л.Н.Камышева, ФТТ **134**, 2797 (1992).
8. Мун Ф, Хаотические колебания. М.: Мир, 1990.
9. В.М.Березов, В.С.Романов, Поляризационное эхо и его применение. Сб. н.тр. М.: Наука, 1992, с.6.
10. А.А.Чабан, Письма в ЖЭТФ **6**, 967 (1967).
11. В.М.Березов, В.С.Романов, Изв. АН СССР **50**, 1537 (1986).