

05:06:08;12

Добротность пьезоэлектрических преобразователей из ниобата лития при высоких уровнях возбуждения

© И.В. Островский, А.Б. Надточий, О.А. Коротченков, М.В. Никандрова

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,
03127 Киев, Украина
e-mail: nadt@gala.net

(Поступило в Редакцию 15 июля 2002 г. В окончательной редакции 17 марта 2003 г.)

Экспериментально исследовалось изменение электроакустических параметров пьезоэлектрических преобразователей из ниобата лития (добротности, коэффициента электромеханической связи, емкости) с повышением амплитуды возбуждающего преобразователь высокочастотного электрического напряжения. Максимальное значение относительной акустической деформации достигало порядка 10^{-4} в области частот от 2 до 3 МГц. Обнаружено значительное увеличение добротности некоторых пьезопреобразователей, которое в исследуемом интервале акустических деформаций достигает 100%. Указанное увеличение сопровождается возникновением акустической эмиссии преобразователя. Установлена связь данного эффекта с наличием блочной структуры кристалла LiNbO_3 .

Введение

Пластины пьезоэлектрика ниобата лития широко используются в качестве источника ультразвуковых поверхностных и объемных волн, являясь одним из основных материалов современной акусто- и оптоэлектроники [1–3]. При этом часто возникают задачи их эксплуатации при достаточно высоком уровне возбуждающего ультразвук высокочастотного напряжения. Несмотря на это, вопросы возможного изменения параметров самих преобразователей, обусловленные их колебанием, изучены недостаточно. Учитывая обнаруженное ранее уменьшение добротности пьезокерамических преобразователей с ростом амплитуды их колебаний [4], вопрос исследования подобных эффектов в пластинах LiNbO_3 , несомненно, является актуальным. Исходя из вышесказанного, в настоящей работе ставилась задача экспериментального исследования изменения электроакустических параметров пьезоэлектрических преобразователей из ниобата лития (добротности, коэффициента электромеханической связи, емкости) с повышением амплитуды возбуждающего преобразователь высокочастотного электрического напряжения.

Методика измерений

Параметрами, определяющими работу пьезоэлектрического преобразователя, являются его емкость C , добротность Q и коэффициент электромеханической связи K . Традиционно данные параметры определяются [5]: 1) измерением емкости C на частоте, существенно меньшей резонансной частоты преобразователя; 2) вычислением добротности Q по ширине резонансного пика частотной зависимости полной проводимости на уровне 0.707; 3) вычислением квадрата коэффициента электромеханической связи K^2 при измерении частот резонанса f_r и антирезонанса f_a частотной зависимости

полной проводимости следующим образом:

$$K^2 = \frac{\pi f_r}{2f_a} \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi f_r}{2f_a} \right). \quad (1)$$

Следует отметить, что при достаточно высоких амплитудах колебаний параметры пьезоэлектрического преобразователя начинают зависеть от приложенного электрического напряжения. В этом случае точность измерения изучаемых параметров ограничена возможной неидентичностью режимов нагружения преобразователя при последовательных измерениях C , Q и K^2 . В данной работе нами была применена методика, позволяющая в одном цикле измерений одновременно получить значения параметров преобразователей при данной амплитуде возбуждающего электрического напряжения. Такой режим измерения параметров преобразователя достигался при использовании смешанного двухчастотного сигнала. При этом пьезопреобразователь возбуждался напряжением

$$U = U_r \sin(2\pi f_r t) + U_a \sin(2\pi f_a t + \Delta\varphi), \quad (2)$$

где U_r — амплитуда напряжения резонансной частоты f_r ; U_a — амплитуда напряжения антирезонансной частоты f_a ; $\Delta\varphi$ — некоторый постоянный сдвиг фаз, который для наших измерений существенного значения не имеет.

Использование такого сигнала дает возможность одновременного измерения сопротивления преобразователя на его резонансной и антирезонансной частоте.

Установим зависимости, связывающие сопротивление преобразователя на его резонансной и антирезонансной частотах с параметрами пьезоэлектрического преобразователя. Коэффициент распространения волны γ опреде-

ляется соотношением

$$\gamma = \alpha + j \frac{\omega}{v}, \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; v — скорость звука; j — мнимая единица; α — коэффициент затухания ультразвука, связанный с добротностью Q пьезопреобразователя

$$Q = \frac{\pi}{\alpha\lambda}, \quad (4)$$

где λ — длина звуковой волны, которую в данном случае можно выбрать равной удвоенной толщине преобразователя.

Полная проводимость пьезоэлектрического преобразователя представима в следующем виде [6]:

$$Y = \frac{j\omega C}{1 - \frac{K^2 \text{th}(\gamma d)}{\gamma d}}, \quad (5)$$

где C — емкость преобразователя, d — его полутолщина.

Раскладывая проводимость Y из (5) в ряд по $1/Q$ вблизи частоты антирезонанса и учитывая лишь линейный член разложения, получим выражение, связывающее сопротивление преобразователя R_a на его антирезонансной частоте f_a с добротностью Q , в виде

$$R_a = \frac{1}{2\pi f_a C} \frac{8}{\pi^2} K^2 Q. \quad (6)$$

Видно, что сопротивление преобразователя на антирезонансной частоте прямо пропорционально его добротности. Раскладывая далее $1/Y$ из (5) в ряд по $1/Q$ вблизи частоты резонанса, оставляя линейный член разложения и учитывая малость величины K^2 , получим выражение, связывающее сопротивление преобразователя R_r на его резонансной частоте f_r с добротностью Q , в виде

$$R_r = \frac{1}{2\pi f_a C K^2 Q} \frac{\pi^2}{8}. \quad (7)$$

Используя формулы (6) и (7), получим выражение для емкости преобразователя C

$$C = \frac{1}{2\pi f_a \sqrt{R_r R_a}} \quad (8)$$

и его добротности Q

$$Q = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{1}{2K^2} \sqrt{\frac{R_a}{R_r}}. \quad (9)$$

Деформация ε , возникающая в металлизированном пьезорезонаторе при приложении к нему высокочастотного напряжения U , может быть рассчитана в рамках стандартной одномерной задачи [7] в случае, когда линейные размеры преобразователя значительно меньше его толщины. Расчет дает [6]

$$\varepsilon = U \sqrt{\frac{K^2 C}{m v^2}} \frac{\text{ch}(\gamma z) / \text{ch}(\gamma d)}{1 - \frac{K^2 \text{th}(\gamma d)}{\gamma d}}, \quad (10)$$

где m — масса преобразователя, z — координаты вдоль его толщины.

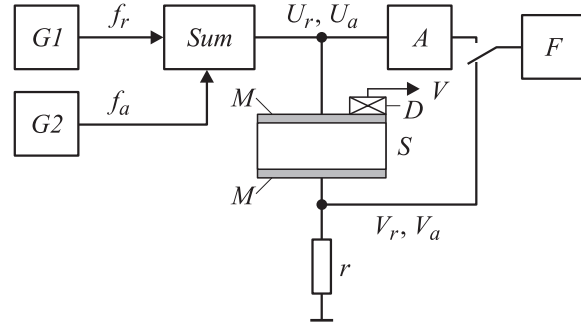


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения параметров пьезопреобразователей. G_1, G_2 — генераторы, Sum — сумматор мощностей, A — аттенюатор, S — образец (пластина LiNbO_3), M — металлический слой, D — датчик сигналов акустической эмиссии, r — сопротивление 1–10 Ω , F — анализатор спектра.

Видно, что деформация ε максимальна в центре преобразователя ($z = 0$) на частоте его резонанса. Из (10), учитывая (3) и (4), используя процедуру разложения в ряд по $1/Q$ и оставляя линейный член разложения, получим выражение для деформации в резонаторе

$$\varepsilon \approx U \sqrt{\frac{K^2 C}{m v^2}} \frac{4}{\pi} Q. \quad (11)$$

Используемая схема измерения параметров резонаторов при возбуждении амплитудно-модулированным сигналом приведена на рис. 1. Обозначим через V_r и V_a напряжения резонансной f_r и антирезонансной f_a частот на сопротивлении r . Тогда

$$R_r = \left(\frac{V_r}{U_r} - 1\right) r, \quad R_a = \left(\frac{V_a}{U_a} - 1\right) r. \quad (12)$$

Напряжение U_r, U_a, V_r, V_a и частоты f_r и f_a непосредственно измерялись анализатором спектра F , параметры резонаторов вычислялись по формулам (1), (8) и (9), а деформация оценивалась с использованием выражения (11).

Для регистрации внутренних механических процессов (например, движения дислокаций, границ зерен кристалла), сопровождающих колебания пьезорезонатора достаточной амплитуды, в данной работе использовался метод акустической эмиссии. Регистрация акустического шума, сопровождающего указанные выше процессы, осуществлялась с использованием фильтров, препятствующих прохождению паразитного сигнала на возбуждающей частоте, и прибора АФ-15. Использовались также стандартные датчики акустической эмиссии от прибора АФ-15. В случаях, когда размеры образца были значительно меньше размеров датчика, применялись обычные промышленные пьезоэлектрические преобразователи из пьезокерамики типа ЦТС (D на рис. 1). Чувствительность датчика акустической эмиссии максимальна на частоте, близкой к частоте антирезонанса датчика. Амплитуду импульсов акустической эмиссии в предположении, что сигналами акустической эмиссии

являются продольные акустические волны, можно оценить, используя выражение [6]

$$A = \frac{V}{4h_{33}}, \quad (13)$$

где V — напряжение, возникающее при падении на датчик акустической волны с амплитудой A ; h_{33} — пьезоэлектрический коэффициент датчика.

Коэффициент h_{33} связан с другими параметрами датчика следующим образом:

$$h_{33} = \sqrt{\frac{K_d^2 4m_d f_a^2}{C_d}}, \quad (14)$$

где m_d — масса датчика, K_d — коэффициент электромеханической связи, C_d — емкость, f_a — частота антирезонанса датчика.

В работе исследовались 8 пластин LiNbO_3 X- и Y-срезов. Ниже приведены данные для трех образцов Y-среза, обозначенных LNY1, LNY2, LNY4. Линейные размеры образцов заключались в пределах от 6 до 11 мм, их толщина составляла 1 мм. Для выявления дислокационной структуры исследованных кристаллов LiNbO_3 проводилось их избирательное травление. С этой целью использовался травитель, состоящий из смеси азотной (2 объемных части) и плавиковой (1 объемная часть) кислот. Время травления составляло несколько десятков минут при температуре кипения смеси около 110°C . Протравленная поверхность пластины исследовалась и фотографировалась с помощью металлографического микроскопа МИМ.

Результаты и их обсуждение

В некоторых исследованных образцах как X-, так и Y-срезов обнаружен эффект существенного увеличения добротности Q с повышением амплитуды акустической

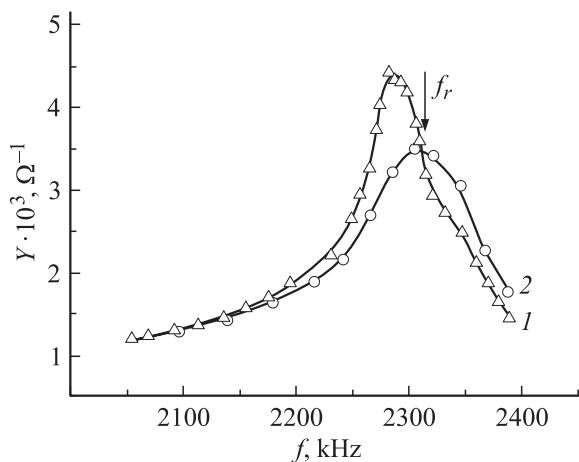


Рис. 2. Частотная зависимость проводимости $Y(f)$ образца LNY2 при $U = 1$ (1) и 30 V (2). Стрелка f_r соответствует резонансной частоте колебаний для кривой 1.

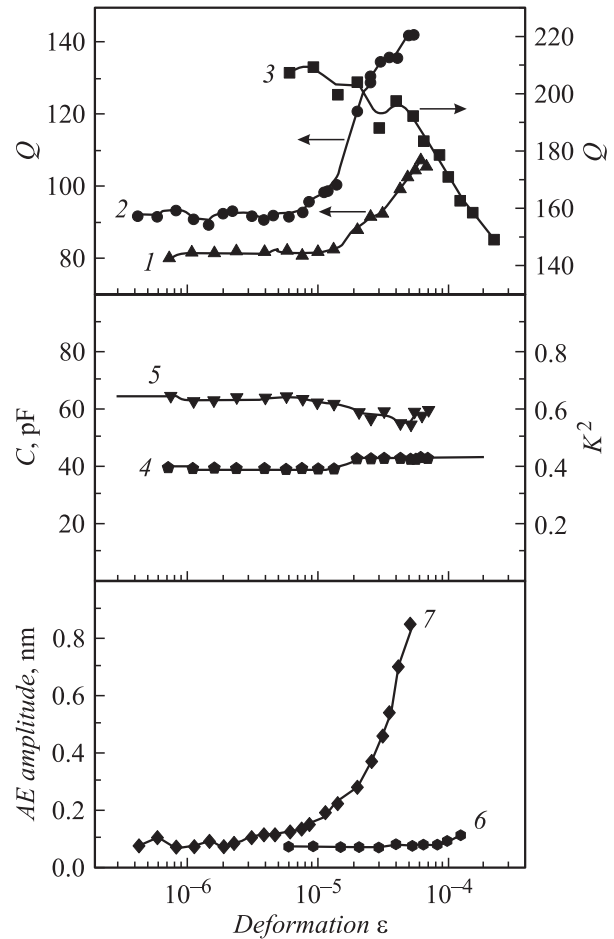


Рис. 3. Зависимость добротности Q (1), квадрата коэффициента электромеханической связи K^2 (4), емкости C (5) от деформации ϵ для образца LNY2 в сравнении с соответствующими зависимостями Q для образцов LNY4 (2) и LNY1 (3). Кривая 1 сдвинута на 50 единиц вверх. 6 и 7 — амплитуда акустической эмиссии как функция деформации для образцов LNY1 и LNY4 соответственно.

деформации. Данный эффект иллюстрируется на рис. 2 эволюцией частотной зависимости проводимости $Y(f)$ с повышением амплитуды возбуждающего пьезопреобразователя электрического напряжения U . Отметим некоторое уменьшение резонансной f_r (и антирезонансной f_a , не показанной на рисунке) частот, которое соответствует увеличению линейных размеров образца при его разогреве ультразвуком. Вместе с тем наблюдается заметное сужение резонансной кривой, свидетельствующее об увеличении добротности резонатора. Существенно подчеркнуть, что наблюдаемый эффект не воспроизводится простым нагревом образца при снятии кривой 1 на рис. 2 в режиме низкого уровня возбуждения преобразователя. Следовательно, зарегистрированное увеличение добротности (кривая 2 на рис. 2) не является чисто тепловым эффектом. Этот вывод подтверждается также отсутствием значительного роста Q в кристаллах LiNbO_3 другой группы, о чем будет сказано ниже.

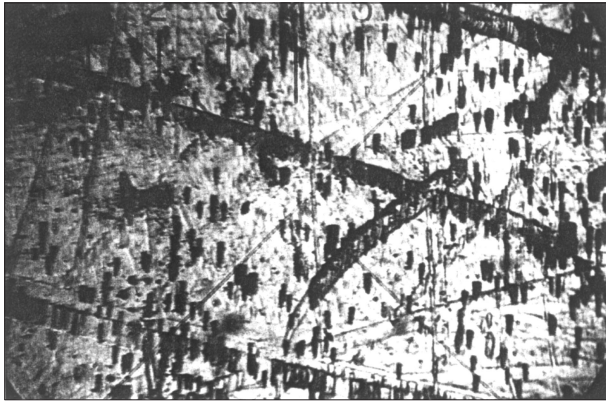


Рис. 4. Микрофотография травления поверхности образца LNY4. Размер наблюдаемой области $480 \times 320 \mu\text{m}$.

Зависимость параметров Q , C и K^2 преобразователя от амплитуды акустической деформации, рассчитанных из серии данных, аналогичных представленным на рис. 2, приведены на рис. 3 (кривые 1, 2, 4 и 5). Видно, что емкость C и квадрат коэффициента электромеханической связи K^2 остаются практически неизменными (кривые 4 и 5). При этом добротность Q начинает возрастать, начиная с деформаций порядка 10^{-5} , и обнаруживает практически 100%-ное увеличение при $\varepsilon \approx 10^{-4}$ (кривые 1 и 2). Дальнейшее повышение уровня возбуждения преобразователя приводило к падению Q (не показано на кривых 1 и 2).

Отметим, что проявление обнаруженного эффекта зависело от группы кристаллов LiNbO_3 , используемых в качестве резонатора. В ряде случаев увеличение добротности не наблюдалось (кривая 3 на рис. 3). Исследование фигур избирательного травления поверхности пластин позволило выявить общие закономерности проявления эффекта роста Q . Травление одного из кристаллов, обнаруживающих указанное увеличение Q , приведено на рис. 4. Он иллюстрирует наличие отдельных ямок травления (темные точки, вытянутые в вертикальном направлении), соответствующих пересечениям индивидуальных дислокаций с исследуемой поверхностью. Подобные ямки травления разной плотности наблюдались во всех исследованных кристаллах независимо от характера поведения Q . Напротив, все образцы, характеризующиеся рассматриваемым эффектом роста Q , обнаруживали на травленной поверхности характерные линии ямок травления типа границ зерен (три наклонные линии ямок травления на рис. 4). Дополнительно проведенные рентгеновские исследования показали наличие субблочной структуры в кристаллах LiNbO_3 такого типа.

Приведенные результаты позволяют предположить дислокационную природу падения добротности с ростом уровня возбуждения пьезопреобразователей (кривая 3 на рис. 3), аналогичную ранее описанной [4]. Наблюдаемый в настоящей работе эффект роста Q можно связать с наличием в кристаллах LiNbO_3 границ зерен.

Подтверждением данного вывода служит и зависимость амплитуды акустической эмиссии от уровня деформации (кривые 6 и 7 на рис. 3). В образце с отдельными дислокациями эмиссия очень слабая и появляется лишь при $\varepsilon \geq 10^{-4}$ (кривая 6). Можно предположить ее дислокационную природу [8]. В образцах другого типа, напротив, характер поведения амплитуды акустической эмиссии с ростом уровня возбуждения преобразователя соответствует характеру роста добротности. Так, возрастание амплитуды эмиссии на кривой 7 (рис. 3) коррелирует с возрастанием Q на кривой 2 для одного и того же образца. Это позволяет предположить, что в данном случае сигнал акустической эмиссии формируется движением границ зерен кристалла, а увеличение добротности соответствует дополнительной ориентации субблоков кристалла в акустическом поле. Последнее приводит к уменьшению акустических потерь (коэффициент α в формуле (4)) и, следовательно, к увеличению Q .

Выводы

Таким образом, в работе зарегистрирован эффект значительного увеличения добротности пьезопреобразователей из LiNbO_3 с повышением уровня их возбуждения, достигающее 100%-ной величины. Другие параметры преобразователей — коэффициент электромеханической связи и емкость изменяются при этом незначительно. Установлена связь данного эффекта с наличием блочной структуры кристалла LiNbO_3 . Увеличение добротности следует учитывать при расчете и изготовлении источников ультразвука высокой мощности на кристаллах ниобата лития.

Список литературы

- [1] Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. М.: Наука, 1987. 263 с.
- [2] Campbell C. // Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications. Boston: Academic, 1989. 475 p.
- [3] Campbell C. Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications. Boston: Academic, 1998. 633 p.
- [4] Коротченков О.А., Марченко А.Т., Островский И.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 8. С. 187–191.
- [5] Зеленка И. Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах: Материалы, технология, конструкция, применение. М.: Мир, 1990. 584 с.
- [6] Надточий А.Б. Канд. дис. Киев, 2000. 139 с.
- [7] Коцаренко И.Я., Кошечкина С.В., Островский И.В. // РиЭ. 1973. Т. 18. № 6. С. 1208–1214.
- [8] Калитенко В.А., Коротченков О.А., Кучеров И.Я. и др. // Укр. физ. журн. 1985. Т. 30. № 9. С. 1358–1359.