

01;07;08;12

©1994 г.

ВОЗБУЖДЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Н.К.Жабитенко, В.А.Калитенко, И.Я.Кучеров, В.М.Перга

Введение

Фотоэлектрическим явлениям в твердых телах — возбуждению упругих волн световым излучением посвящено большое количество работ. Исследования ведутся по многим направлениям использования фотоакустического эффекта в микроскопии и спектроскопии вещества [1], бесконтактного возбуждения упругих волн в твердых телах [2–6]. Экспериментально и теоретически исследованы стадии преобразования энергии светового излучения в упругие смещения среды, причем основное внимание уделялось возбуждению упругих волн в полубезграничной среде. В последнее время ведутся исследования возбуждения упругих волн в неоднородных и ограниченных структурах [7–10]. К ним относятся ограниченные тела в виде дисков, пластин и т.п. Интерес к данным системам связан с их разнообразным применением. Однако, несмотря на значительное число публикаций по возбуждению упругих волн в неоднородных системах лазерным излучением, все они носят экспериментальный характер и не позволяют судить о стадиях преобразования светового импульса в упругий импульс смещений.

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследовано возбуждение осесимметричных радиальных колебаний короткими импульсами лазерного излучения в пьезоэлектрическом резонаторе.

Теория

Пьезорезонатор и схема его возбуждения показаны на рис. 1, где 1 — металлический слой толщиной h_0 служит в качестве мишени, облучаемой лазерным излучением, диаметр пучка которого $2a_0$; 2 — пьезоэлектрический диск радиусом R и толщиной h ; электрод 3 совместно с электродом 1 служит для регистрации электрического напряжения V , возникающего в пьезорезонаторе при облучении импульсным световым излучением.

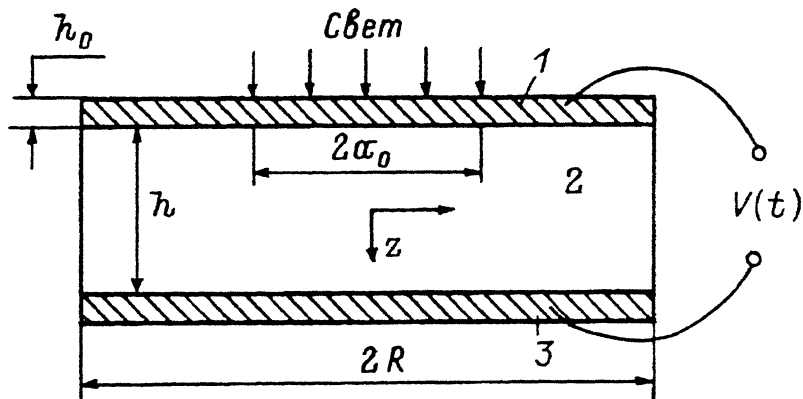


Рис. 1.

Механизм преобразования энергии импульсного лазерного излучения в электрическое напряжение состоит в следующем. Поглощение энергии светового излучения приводит к нагреванию металлического электрода 1. Вследствие процессов теплопроводности в пьезорезонаторе возникает нестационарное температурное поле, которое создает нестационарные температурные напряжения и упругие колебания в системе. Упругие деформации в пьезоэлектрике создают электрическое поле и напряжение на обкладках резонатора.

В общем случае произвольных h_0 , h , a_0 , R и произвольной временной зависимости мощности лазерного излучения аналитическое решение задачи довольно сложное. В работе эта задача решается при следующих условиях:

$$а) \quad h_0 \ll h, \quad a_0, R \gg h. \quad (1)$$

В этом случае задача сводится к возбуждению радиальных колебаний пьезорезонатора цилиндрическим тепловым источником радиуса a_0 . Металлический слой служит только как поглотитель энергии светового излучения и в качестве электрода пьезорезонатора.

б) Для заданной геометрии возбуждения пьезодиска в пункте а на практике наиболее часто выполняется соотношение

$$\tau_{и} \ll \tau_{упр} \ll \tau_{т}, \quad (2)$$

где $\tau_{и}$ — длительность импульса лазерного излучения; $\tau_{упр} = a_0/v$ — время релаксации упругих напряжений в области, поглотившей тепловую энергию; $\tau_{т} = a_0^2/4\chi$ — время тепловой релаксации в радиальном направлении, χ — коэффициент температуропроводности среды диска, v — скорость распространения упругих волн в радиальном направлении.

Рассчитаем электрический ток через пьезорезонатор из пьезокерамики, поляризованной по толщине (ось z). Он может быть найден как

$$I = \int D_z dS. \quad (3)$$

Для случая осесимметричных упругих радиальных колебаний в цилиндрической системе координат D_z определяется из следующего уравнения пьезоэффекта:

$$D_z = \varepsilon_{33}^R E_3 + \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)}(S_r + S_\varphi), \quad (4)$$

где E_3 — напряженность электрического поля вдоль оси z ; $S_r = \partial U/\partial r$, $S_\varphi = U/r$ — радиальная и угловая деформации; U — упругие смещения; $\varepsilon_{33}^R = \varepsilon_{33}^T(1 - K_p^2)$ — диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика при заторможенной боковой поверхности диска; d_{31} — пьезоэлектрический модуль; $K_p^2 = 2d_{31}^2/\varepsilon_{33}^s s_{11}^E$ — коэффициент электромеханической связи; s_{11}^E — упругая податливость; σ — коэффициент Пуассона материала пьезоэлектрика.

В выражении (4) второй член есть индукция в веществе, связанная с его пьезоэлектрической деформацией, которая в свою очередь обусловлена изменением температуры среды при ее облучении светом. Поэтому второй член в (4) можно трактовать как пьезоэлектрический вклад в пироэлектрический эффект в пьезокерамике, или “ложный пироэлектрический эффект”. Наряду с ложным пироэлектрическим эффектом вклад в индукцию должен давать и “истинный” пироэлектрический эффект, однако при импульсном тепловом возбуждении истинный пироэлектрический отклик носит аperiодический характер и его можно не учитывать при рассмотрении колебаний пьезорезонатора.

Так как основания диска, на которые нанесены электроды, являются эквипотенциальными, то вследствие $R \gg h$ можно приближенно считать, что

$$\frac{\partial E_3}{\partial r} = 0. \quad (5)$$

Интегрируя (3), с учетом (4) и (5) получаем

$$I(t) = -C_0^R \frac{dV}{dt} + \frac{d_{31}}{1-\sigma} \frac{1}{s_{11}^E} \frac{d}{dt} \int (S_r + S_\varphi) dS, \quad (6)$$

где $V = -E_3 h$; $C_0^R = \varepsilon_{33}^R/\pi R^2 h$ — емкость пьезорезонатора.

Можно показать, что в случае радиальных колебаний

$$\int (S_r + S_\varphi) dS = 2\pi \int_0^R \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right) r dr = 2\pi R U(R, t), \quad (7)$$

где $U(R, t)$ — смещение края электрода.

Тогда

$$I(t) = -C_0^R \frac{dV}{dt} + \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)} 2\pi R \frac{d}{dt} [U(R, t)]. \quad (8)$$

Проанализируем частные случаи.

1) Электроды закорочены (режим короткого замыкания). В этом случае электрическое напряжение равно нулю, а ток короткого замыкания равен

$$I_{к.з} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)} 2\pi R \cdot v(R, t), \quad (9)$$

где $v(R, t)$ — скорость смещений боковой поверхности диска.

2) Электроды разомкнуты (режим холостого хода). $I(t) = 0$, тогда из (8) при начальных условиях $V(0) = 0$ и $U(R, 0) = 0$ следует

$$V(t) = \frac{1}{C_0^R} \frac{d_{31}}{s_{11}^E(1-\sigma)} 2\pi R U(R, t). \quad (10)$$

Из (9), (10) видно, что в режиме холостого хода электрическое напряжение между электродами пьезорезонатора определяется радиальным смещением его боковой поверхности, а ток короткого замыкания — скоростью смещения.

Рассчитаем упругие смещения в диске при его облучении светом.

Уравнения движения и термоупругости для диска имеют вид [11]

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial T_r}{\partial r} + \frac{T_r - T_\varphi}{r},$$

$$T_r = \frac{1}{(1-\sigma^2)} \frac{1}{s_{11}^E} \left[\frac{\partial U}{\partial r} + \sigma \frac{U}{r} \right] - \alpha_T \frac{1}{(1-\sigma)s_{11}^E} \theta, \quad (11)$$

$$T_\varphi = \frac{1}{(1-\sigma^2)} \frac{1}{s_{11}^E} \left[\sigma \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} \right] - \alpha_T \frac{1}{(1-\sigma)s_{11}^E} \theta, \quad (12)$$

где T_r, T_φ — радиальные и азимутальные компоненты упругих напряжений, ρ — плотность среды, α_T — коэффициент линейного расширения, θ — температура среды.

Из (11) с учетом (12) находим

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \alpha_T (1-\sigma) \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad (13)$$

где $v = [\rho s_{11}^E (1-\sigma^2)]^{-1/2}$.

Для представленной на рис. 1 схемы с учетом условий (1) и (2) теплопроводностью пьезокерамики в радиальном направлении можно пренебречь. Тогда распределение температуры в диске имеет вид

$$\theta = \frac{E_0 \gamma}{C_p \rho h \pi a_0^2} H_t(a_0 - r) H_t(t), \quad (14)$$

где E_0 — полная энергия импульса лазерного излучения, $\gamma = (1-p)$ (p — коэффициент отражения света электродом) характеризует долю энергии, поглощенной металлическим электродом, C_p — удельная теплоемкость пьезокерамики,

$$H_t(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}$$

— функция Хевисайда.

Решая уравнение (13) с учетом (14) при нулевых начальных и граничных условиях

$$U(r, 0) = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial t}(r, 0) = 0; \quad T_r \Big|_{r=R} = 0,$$

получаем выражение для упругих смещений $U(R; t)$ диска

$$U(R, t) = 2\alpha_T(1 + \sigma) \frac{E_0 \cdot \gamma}{\pi h C_p \rho} \sum_{h=1}^{\infty} \frac{J_1(\beta_n \frac{a_0}{R}) (1 - \cos \frac{\beta_n}{R} vt)}{a_0 J_1(\beta_n) (1 - \sigma^2 - \beta_n^2)} H_t(t), \quad (15)$$

где β_n — корни уравнения $\beta J_0(\beta) - (1 - \sigma) J_1(\beta) = 0$; J_1, J_0 — функции Бесселя первого рода первого и нулевого порядков.

Известно, что собственные частоты радиальных колебаний равны $\omega_n = \beta_n(v/R)$, поэтому упругие смещения (15) представлены в виде суммы радиальных гармоник диска.

Окончательно с учетом (10) для электрического напряжения на пьезорезонаторе при возбуждении его коротким импульсом лазерного излучения получаем

$$V(t) = \frac{1 + \sigma}{1 - \sigma} \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \frac{4\alpha_T E_0 \gamma}{\epsilon_{33}^R \pi C_p \rho} \frac{1}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\beta_n \frac{a_0}{R}) [1 - \cos \beta_n \frac{v}{R} t]}{a_0 J_1(\beta_n) (1 - \sigma^2 - \beta_n^2)} H_t(t). \quad (16)$$

Эксперимент

Экспериментальные исследования возбуждения электрических колебаний импульсным лазерным излучением проведены в пьезокерамических резонаторах на основе керамик ПТС-19 и ТБК-3. Основные параметры резонаторов приведены в таблице. Блок-схема установки для данных исследований показана на рис. 2. Возбуждение пьезорезонатора осуществлялось либо одиночным импульсом, либо импульсами с частотой следования ≤ 50 Гц, при которой не происходило перекрытия откликов от различных импульсов. Экспериментальные условия выбирались такими же, как и в расчетной модели.

Электрический отклик пьезорезонатора имеет довольно сложную форму, зависящую от соотношения радиуса светового пятна и радиуса

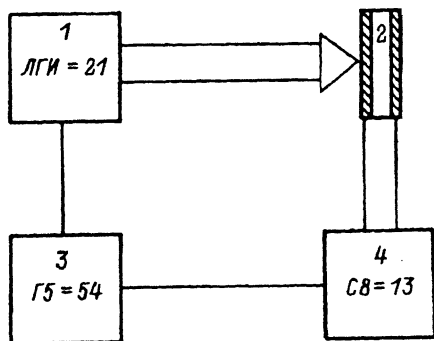


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования откликов пьезорезонаторов под действием лазерного излучения.

1 — лазер с длительностью импульса 10^{-8} с и энергией $E_0 = 3.0 \cdot 10^{-5}$ Дж, 2 — пьезорезонатор, 3 — генератор синхронизирующих импульсов, 4 — запоминающий осциллограф.

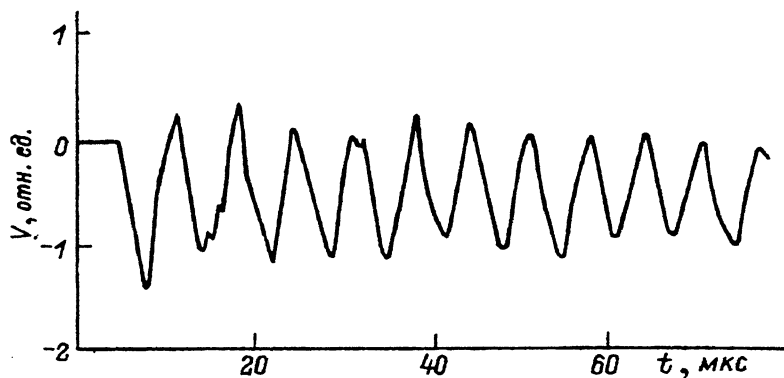


Рис. 3.

пьезодиска. Однако при сравнительно больших временах наблюдения переменный отклик описывается выражением типа

$$V = V_0^1 e^{-\alpha_1 t} \cos \omega_1 t, \quad (17)$$

где ω_1 — частота первой радиальной гармоники диска.

Другие радиальные гармоники практически отсутствуют. Это связано с тем, что более высокочастотные гармоники в пьезокерамике при больших t затухают сильнее, чем первая гармоника. В качестве примера на рис. 3 приведена типичная осциллограмма электрического отклика образца 2. Как видно из рис. 3, экстраполяция зависимости $V(t)$, заданной выражением (17) к моменту $t = 0$, позволяет определить амплитуду электрического напряжения $V_{0\text{эксп}}^1$, соответствующего первой гармонике.

Экспериментальные значения $V_{0\text{эксп}}^1$ приведены в таблице.

Материал	Номер образца	$2R$, мм	h , мм	C_0^R , пФ	f_1 , кГц	$V_{0\text{эксп}}^1$, мВ	$V_{0\text{теор}}^1$, мВ
ПТС-19	1	10	1.9	1540	111.6	1.7	1.1
ПТС-19	2	15	0.65	3860	149.3	2.1	1.6
ПТС-19	3	12	0.9	—	172.9	3.0	2.5
ПТС-19	4	10	1.0	890	209.6	4.0	3.7
ПТС-19	5	5	1.0	236	408.7	13.0	14.0
ТВК-3	6	22	2.9	1152	147.2	0.35	0.37
ТВК-3	7	40	1.45	7770	80.6	0.17	0.12

Для сопоставления экспериментальных и теоретических результатов амплитуда электрического напряжения первой гармоники $V_{0\text{теор}}^1$ была рассчитана по формуле (16) для условий, соответствующих эксперименту (см. таблицу). При расчетах использованы табличные значения параметров пьезокерамики [12,13]. Пьезоэлектрические, упругие и диэлектрические постоянные, коэффициент γ определялись также и экспериментально. Они в пределах точности эксперимента (10%) совпали со справочными данными.

Численные значения параметров равны для ПТС-19 $\alpha_T = 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $C_p = 4 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\rho = 7.5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0.42$, $d_{31} = 120 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$, $s_{11}^E = 14 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0 = 1.7 \cdot 10^3$, $K_p = 0.47$; для ТБК-3 $\alpha_T = 7.5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $C_p = 5 \cdot 10^2 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $\rho = 5.7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0.3$, $d_{31} = 49 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/Н}$, $s_{11}^E = 8.3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$, $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0 = 1.1 \cdot 10^3$, $K_p = 0.17$, $\gamma = 0.8$.

Обсуждение результатов и выводы

Анализ таблицы показывает, что для одних образцов расчетные и экспериментальные результаты согласуются хорошо (образцы 3-6), а для некоторых (образцы 1, 7) расхождение между $V_{0 \text{ эксп}}^1$ и $V_{0 \text{ теор}}^1$ достигает 30-35%. Учитывая возможный разброс параметров пьезокерамики различных образцов и погрешности измерений, согласие экспериментальных и теоретических результатов можно считать удовлетворительным. Это подтверждает правильность выбранных механизмов преобразования энергии коротких импульсов лазерного излучения в пьезорезонаторе и обоснованность предложенных приближений, т.е. в случае $a_0 \gg h$ и $R \gg h$ в диске возникают радиальные колебания, а температуру диска можно представить в виде соотношения (14), согласно которому полная энергия импульса идет на нагрев области керамики диаметром равным диаметру светового пятна, причем теплопроводностью в радиальном направлении при выполнении условий (2) можно пренебречь.

Как следует из формулы (16), по амплитуде электрических колебаний можно определить энергию импульсов лазерного излучения E_0 , другими словами, пьезорезонатор может служить измерительным приемником лазерного излучения. Чувствительность такого приемника для случая $a_0 \ll R$ можно представить в виде

$$S = \frac{V}{E_0} = \frac{1 + \sigma d_{31}}{1 - \sigma s_{11}^E} \frac{4\alpha_T \gamma}{\varepsilon_{33}^R \pi C_p \rho} \frac{1}{2} \beta_1 \frac{1}{R^2} \frac{1}{J_1(\beta_1)(1 - \sigma^2 - \beta_1^2)}. \quad (18)$$

Согласно (18), чувствительность приемника светового излучения определяется тепловыми, пьезоэлектрическими и упругими постоянными пьезокерамики, а также изменяется обратно пропорционально квадрату радиуса диска. Поэтому для создания приемника света с высокой чувствительностью необходимо уменьшить радиус диска. При этом следует иметь в виду, что формула (16) справедлива только при выполнении условия $R \gg h$ и с уменьшением радиуса диска надо уменьшать и его толщину. Например, чувствительность пьезорезонатора диаметром 5 мм (образец 5 в таблице) составляет $5 \cdot 10^2 \text{ В/Дж}$. Такой же чувствительностью обладают пироэлектрические приемники импульсного излучения, основанные на регистрации постоянной составляющей напряжения, однако при регистрации постоянной составляющей необходимо принимать специальные меры для устранения различного рода помех медленно изменяющихся различного рода помех [14]. Этого недостатка лишен предложенный приемник лазерного излучения.

Список литературы

- [1] *Жаров В.П., Летохов В.С.* Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. 320 с.
- [2] *Буденков Г.А.* // Дефектоскопия. 1979. Вып. 2. С. 75-81.
- [3] *Буденков Г.А., Бойко М.С.* // Дефектоскопия. 1984. Вып. 3. С. 16-24.
- [4] *Буденков Г.А.* // Дефектоскопия. 1979. Вып. 3. С. 75-81.
- [5] *Кржижановский Р.Е., Ронжин О.Ф., Филиппов Н.М., Шермак В.Е.* // Дефектоскопия. 1980. Вып. 6. С. 45-51.
- [6] *Голенищев-Кутузов А.В., Мигачев С.А., Яфаев Н.Р.* // Акуст. журн. 1985. Т. 31. Вып. 5. С. 671-672.
- [7] *Jachson W., Amer M.* // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51 (6). P. 3343-3353.
- [8] *Kowai M., Morimoto J., Voshiona T., Miyakwa T.* // Jap. J. Appl. Phys. 1982. Vol. 21. Suppl. 21-3. P. 104-106.
- [9] *Кржижановский Р.Е., Ронжин С.Ф., Румянцев А.Д., Филиппов Н.М.* // Дефектоскопия. 1980. Вып. 2. С. 108-111.
- [10] *Лукошлявичус А., Сладки П., Кубечек В.* // Науч. тр. вузов Лит.ССР. Ультразвук. 1984. Вып. 16. С. 37-45.
- [11] *Коваленко А.Д.* Термоупругость. Киев: Вища школа, 1975. 216 с.
- [12] Физическая акустика / Под ред. У.Мезона. Т. 1. Ч. А. М.: Мир, 1966. 592 с.
- [13] Пьезокерамические преобразователи. Справочник / Под ред. С.И.Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
- [14] Справочник по приемникам оптического излучения / Под ред. Л.З.Криксынова, Л.С.Кременчугского. Киев: Техника, 1985. 216 с.

Киевский университет им. Т.Г.Шевченко

Поступило в Редакцию
30 декабря 1992 г.
В окончательной редакции
13 мая 1993 г.
