

08; 09

ОСОБЕННОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ПЬЕЗОКОМПОНЕНТНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

В.А. И с у п о в

В работах [1-5] показано, что пьезокомпонентные схемы, т.е. схемы, построенные из компонентов, обладающих электромеханической активностью и тензочувствительностью и механически взаимодействующих между собой, имеют весьма своеобразное поведение и могут представлять интерес для радиофизики (а в будущем, возможно, и для радиотехники). Данная статья посвящена рассмотрению особенностей поведения последовательного пьезокомпонентного колебательного контура (ППКК) и имеет своей целью показать, что при его подключении к источнику постоянного напряжения в контуре возникают колебания и через него течет переменный ток.

Рассмотрим ППКК (рис. 1,а), состоящий из пьезоэлемента (ПЭ) с емкостью C и длиной l_C и индуктивного компонента L с пьезомагнитным сердечником (ПМС) с длиной l_L . ПЭ и ПМС склеены между собой и вклеены совместно в зазор абсолютно жесткого корпуса K , имеющий длину $l_C + l_L$. Предполагается, что L и C не меняются при деформациях ПЭ и ПМС. При малой величине деформаций применимость этого предположения не вызывает сомнения.

ПЭ может быть выполнен из любого пьезоэлектрического материала, в том числе из пьезокерамики с потоком остаточной поляризации Q_0 и пьезомодулем $d^{(e)}$, ПМС - из пьезомагнитного кристалла или из предварительно намагниченного ферромагнетика с остаточным магнитным потоком M_0 , который также будет обладать пьезомагнитными свойствами ($\Delta l_L = \alpha(M_0 + \Delta M)^2 - \alpha M_0^2 \approx 2\alpha M_0 \Delta M = d^{(m)} \Delta M$, где α - коэффициент магнитострикции). Сопротивление R включает в себя все виды активного сопротивления, присутствующие в контуре, и в том числе диэлектрические, магнитные и механические потери. Частота деформаций должна быть ниже резонансных частот механических колебаний системы и ее компонентов.

Если ПЭ и ПМС вынуты из зазора, то при включении постоянного напряжения U_0 через контур потечет ток зарядки конденсатора $I(t)$ и на ПЭ будет накапливаться заряд $Q(t)$. При этом ПЭ и ПМС будут свободно деформироваться, и ППКК будет вести себя как обычный контур с емкостью C и индуктивностью L . По иному поведут себя эти компоненты, если они вклеены в зазор. На рис. 2,а показано начальное состояние системы, где длина компонента представлена отрезком прямой, заключенным в круглые скобки. Рис. 2,б дает представление о состоянии системы при зарядке ПЭ при $d^{(e)} > 0$ и $d^{(m)} > 0$ и при положительных значениях всех других величин (как они показаны на рис. 1,а). При этом оба компонента,

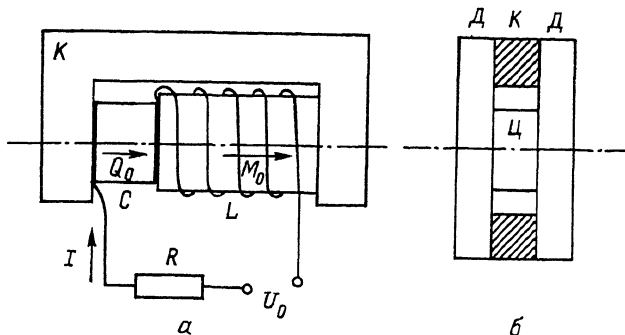


Рис. 1. Схемы ППКК. а) Механическая и электрическая системы ППКК, вклеенного в зазор корпуса К. б) Механическая система ППКК, вклеенного между двумя жесткими дисками Д.

будучи свободными, удлинились бы, как это показано на рис. 2, б, на Δl_c и Δl_L соответственно. Однако поскольку полная деформация ППКК равна нулю, произойдет перемещение границы между ПЭ и ПМС в положение, отмеченное вертикальным штрихом. (Естественно, что положение этой границы будет зависеть от модулей упругости (γ), длин (l) и поперечных сечений ПЭ и ПМС (S). Другими словами, если свободные ПЭ (из-за накопления заряда) и ПМС (из-за тока через катушку) расширяются, то для того, чтобы их поместить в зазор, нужно их поджать на Δl_e и Δl_m соответственно. Это поджатие вызывает на пьезоэлементе определенное добавочное напряжение $V_{A(e)}$, а в катушке — из-за изменения магнитного потока в сердечнике — добавочное напряжение $V_{A(m)}$.

Оценим Δl_e и Δl_m . Из равенства сил, действующих в ПЭ и ПМС, учитывая, что $\Delta l_e + \Delta l_m = \Delta l_c + \Delta l_L$ (см. рис. 2б), легко получить выражения:

$$\Delta l_e = \frac{\gamma_L S_L l_C (\Delta l_e + \Delta l_m)}{\gamma_L S_L l_C + \gamma_C S_C l_L} = A'_e (\Delta l_e + \Delta l_m) = A'_e (\Delta l_c + \Delta l_L),$$

$$\Delta l_m = \frac{\gamma_C S_C l_L (\Delta l_e + \Delta l_m)}{\gamma_L S_L l_C + \gamma_C S_C l_L} = A'_m (\Delta l_e + \Delta l_m) = A'_m (\Delta l_c + \Delta l_L).$$

Однако $\Delta l_c \sim V_c \sim \int Idt$, $\Delta l_L \sim \Delta M \sim I$, так что можно записать: $\Delta l_e \sim A_e \int Idt + B_e I$, а $\Delta l_m \sim A_m \int Idt + B_m I$. Добавочные напряжения: на ПЭ $V_{A(e)} \sim \Delta l_e$, на индуктивности $V_{A(m)} \sim -dM/dt \sim -dl_m/dt$, так что $V_{A(e)} = a_e \int Idt + b_e I$, $V_{A(m)} = a_m I + b_m (dI/dt)$. Отсюда полное добавочное напряжение:

$$V_A = V_{A(e)} + V_{A(m)} = a_e \int Idt + (b_e + a_m) I + b_m (dI/dt).$$

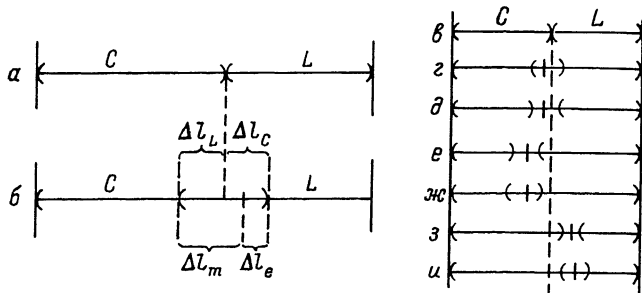


Рис. 2. Схемы, представляющие длины ПЭ и ПМС. Длины показаны отрезками, заключенными в круглые скобки. а - при $U_0 = 0$, б - при $U_0 \neq 0$. Показано, какими бы были длины при деформации в свободном состоянии. Показаны они и в зажатом состоянии, однако при этом граница между ПЭ и ПМС отмечена вертикальным штрихом. г-и - различные комбинации знаков Δl_e и Δl_m (в - длины при $U_0 = 0$).

Теперь, суммируя все напряжения на ППКК, можно записать уравнение:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C} \int Idt + a_e \left\{ Idt + (b_e + a_m)I + b_m \frac{dI}{dt} \right\} = U_0,$$

или, полагая $a_e = 1/\xi$, $b_e + a_m = \rho$, $b_m = \lambda$,

$$(L + \lambda) \frac{dI}{dt} + (R + \rho)I + \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{\xi} \right) \int Idt = U_0,$$

или же

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{R_{\text{эф}}}{L_{\text{эф}}} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{L_{\text{эф}} C_{\text{эф}}} Q = \frac{U_0}{L_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где

$$L_{\text{эф}} = L + \lambda, \quad R_{\text{эф}} = R + \rho, \quad C_{\text{эф}} = C \xi / (C + \xi). \quad (2)$$

Решение имеет вид $Q = A e^{\pm j \omega_d t} \cdot e^{-\alpha t} + C_{\text{эф}} U_0$, где j - мнимая единица,

$$\alpha = R_{\text{эф}} / (2L_{\text{эф}}), \quad \omega_d = \left\{ 1 / (L_{\text{эф}} C_{\text{эф}}) - [R_{\text{эф}} / (2L_{\text{эф}})]^2 \right\}^{1/2} = (\omega_1^2 - \alpha^2)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\omega_1 = 1 / (L_{\text{эф}} C_{\text{эф}})^{1/2}.$$

Из начальных условий ($Q = 0$ при $t = 0$) находим $A = -C_{эф} U_0$ и

$$Q = C_{эф} U_0 (1 - e^{\pm j\omega_d t} e^{-\alpha t}). \quad (4)$$

В результате мы получили такое же выражение для колебаний, как и для обычного последовательного контура, но с измененными значениями L , C и R . Однако в обычном контуре активное сопротивление всегда положительно, а здесь оно включает добавку ρ , которая может быть и положительной, и отрицательной. Если $\rho < 0$ и $|\rho| > R$, величина α в выражении (3) будет отрицательной. Из выражения (4) видно, что в этом случае амплитуда колебаний Q_0 , пропорциональная U_0 , возрастает со временем. Постоянной составляющей тока через контур при этом, конечно, нет. Для осуществления раскачки важно получить отрицательную величину ρ . При этом всегда можно сделать R ничтожно малым, тогда $R_{эф}$ будет отрицательным.

Теперь обсудим вопрос о знаках. Знаки ΔL_e и ΔL_m зависят от знаков $d^{(m)}$ (т.е. знака магнитострикции) и $d^{(e)}$, направления Q_0 и M_0 и соотношения величин $|\Delta L_C|$ и $|\Delta L_L|$. Все возможные комбинации знаков ΔL_e и ΔL_m , получающиеся в результате изменения упомянутых величин, представлены на рис. 2, в-и. При этом оказалось, что раскачка колебаний осуществляется полной суммой напряжений $V_A(e) > 0$ и $V_A(m) > 0$ только в случаях ж и з. Условия такой раскачки: $d^{(e)} d^{(m)} Q_0 M_0 < 0$, $|\Delta L_C| - |\Delta L_L| < 0$. Если эти условия не соблюдаются, раскачка осуществляется разностью $|V_A(e)| - |V_A(m)|$, которая в частном случае может быть равна нулю. Случай $V_A < 0$ соответствует увеличению положительного активного сопротивления.

Следует отметить, что возможны и другие способы осуществления механической связи между ПЭ и ПМС (рис. 1, б). Здесь один из компонентов имеет форму цилиндра (Ц), другой — форму кольца (К). Оба имеют одинаковую высоту и вклеены между жесткими дисками (Д). При этом увеличение высоты одного компонента будет вызывать не сжатие другого компонента (как в случае на рис. 1, а), а его удлинение. Для случая, представленного на рис. 1, б, оба добавочных напряжения ($V_A(e)$ и $V_A(m)$) больше нуля при $d^{(e)} d^{(m)} Q_0 M_0 > 0$, $|\Delta L_C| - |\Delta L_L| < 0$.

Подводя итоги, отметим: 1) в ППКК, подсоединенном к источнику постоянного напряжения, возникают электрические, магнитные и механические колебания, а в результате через него течет переменный ток; 2) величина тока через ППКК пропорциональна приложенному постоянному напряжению U_0 , а частота определяется в основном эффективными величинами емкости и индуктивности; 3) меняя знаки $d^{(e)}$, $d^{(m)}$, Q_0 , M_0 , а также соотношения $|\Delta L_C|$ и $|\Delta L_L|$, можно получать раскачивающее напряжение различной величины, причем вместо отрицательного активного сопротивления можно получать положительное.

- [1] И с у п о в В.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 8. С. 500-504.
- [2] И с у п о в В.А. // Тез. 3-й Всес. конф. „Актуальные проблемы получения и применения сегнетоэлектриков и пьезоэлектрических материалов. М. 1987. С. 180.
- [3] И с у п о в В.А. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 9. С. 795-799.
- [4] И с у п о в В.А. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 9. С. 799-803.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
30 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 23

12 декабря 1989 г.

07

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ
ПОСРЕДСТВОМ МНОГОКРАТНОГО САМОПОГЛОЩЕНИЯ
СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П.В. А д а м с о н

Полупроводниковым оптоэлектронным устройствам, работающим при комнатных температурах, характерны широкая спектральная полоса и высокая интегральная интенсивность спонтанного рекомбинационного излучения. Поэтому роль фотоактивного поглощения собственной люминесценции в этих приборах рассматривалась в литературе уже давно [1]. Но эффективное практическое применение самопоглощения стало возможным только с появлением совершенных гетероструктур и при достижении внутреннего квантового выхода люминесценции в них, близкого к 100 % [2]. Примечательным примером здесь является существенное повышение эффективности светодиодов [3].

Обсуждалось применение самопоглощения спонтанного излучения и для снижения порогового уровня накачки гетеролазеров [4-6]. На сегодняшний день самые низкие пороговые плотности тока достигнуты в лазерах со сверхтонкими активными слоями (структуры с отдельным ограничением [7, 8]). Расчет [9], однако, показывает, что в случае очень тонких активных слоев влияние многократного самопоглощения (переизлучения) на пороговую накачку незначительно. Следовательно, его использование для получения рекордно малых значений пороговых плотностей тока неэффективно. С другой стороны, эффект переизлучения все-таки весьма ощутим уже при толщинах активного слоя несколько десятых микрон. Поэтому пред-