Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9 12 мая 1988 г.

ТОК ЧЕРЕЗ ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

В.А. Исупов

В работе [1] было высказано мнение, что при введении в радиосхему механического взаимодействия между ее компонентами эта радиосхема будет проявлять новые и интересные свойства. В качестве примера таких свойств приводится получение отрицательной или бесконечной эффективных емкостей. Естественно, что для введения в схему механического взаимодействия в нее должны быть включены, во-первых, деформирующие (Дщ) компоненты (например, конденсаторы-пьезоэлементы, (пьезоконденсаторы), магнитострикционные устройства) и деформируемые (Дм) компоненты, обладающие тензочувствительностью (например, пьезоконденсаторы или тензосопротивления). Данная работа посвящена рассмотрению свойств тензочувствительного Дм сопротивления при его деформации с помощью пьезоэлемента или электрострикторного элемента.

Следует отметить, что в этой работе выражение „деформируемое тензочувствительное сопротивление" используется в самом широком смысле слова. Это может быть и проволочный датчик, наклеенный на поверхность Дщ пьезоэлемента, и полупроводниковая пластинка, присоединенная тем или иным образом к пьезоэлементу или вклеенная между двумя (для симметрии) пьезоэлектрическими пластинками. Это может быть и пленка из вещества, находящегося при температуре фазового перехода „металл-полупроводник" или „полупроводник-сверхпроводник", нанесенная на поверхность пьезоэлемента. Это может быть также композит типа „металлический порошок-полимерная связка", соотношение фаз в котором соответствует порогу протекания. И наконец, это может быть какое-угодно устройство при условии, что оно обладает тензочувствительным омическим сопротивлением. В работе допускаются самые различные зависимости сопротивления от деформации, но рассматриваются только две: линейная и квадратичная.

Схема системы „Дщ конденсатор – Дм сопротивление" представлена на рисунке. Деформирующий конденсатор изображен как обычный конденсатор с добавлением исходящей из него стрелки, Дм сопротивление обозначено прямоугольником с упирающейся в его торец наклонной стрелкой, механическая связь отражена штриховой линией от стрелки до стрелки.

Рассмотрим случай, когда сопротивление Дм компонента линейно зависит от деформации, а Дщ конденсатор представляет собой пьезоэлемент. Тогда деформация Дм компонента (пропорциональная деформации Дщ компонента) будет пропорциональна напряжению на Дщ компоненте, т.е. $V_{Дщ}$. Напряжение на входе Дщ цепи ($V^0_{Дщ}$) или равно, или пропорционально напряжению питающей сети V, т.е. равно $k \cdot V$, где k – постоянный коэффициент. Удобнее в данном случае обсуждать не сопротивление Дм компонента,

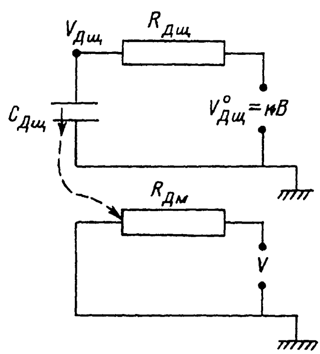

Схема системы „деформирующий конденсатор – деформируемое тензочувствительное сопротивление".

а его электропроводность:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + s \cdot V_{Дщ}\right), \tag{1}$$

где s – коэффициент пропорциональности.

Пусть $V = V_0 \cdot \cos\omega t$. Тогда напряжение на Дщ пьезоэлементе (установившаяся величина) будет:

$$V_{Дщ} = \frac{V_0 \cos\omega t}{1+\omega^2 \tau^2_{Дщ}} + \frac{\omega \tau_{Дщ} V_0 \sin\omega t}{1+\omega^2 \tau^2_{Дщ}}. \tag{2}$$

При этом ток через Дм сопротивление (установившийся ток) будет равен:

$$I = V\sigma = V_0 \sigma_0 \cos\omega t + s V_0^2 \sigma_0 \frac{\cos^2 \omega t}{1+\omega^2 \tau^2_{Дщ}} + \tag{3}$$

$$+ s V_0^2 \sigma_0 \, \omega \tau_{Дщ} \frac{\sin\omega t \cdot \cos\omega t}{1+\omega^2 \tau^2_{Дщ}}$$

или

$$I = V_0 \sigma_0 \cos\omega t + \frac{s V_0^2 \sigma_0}{2\left(1+\omega^2 \tau^2_{Дщ}\right)} + \frac{s V_0^2 \sigma_0}{2\left(1+\omega^2 \tau^2_{Дщ}\right)} \left(\cos 2\omega t + \omega \tau_{Дщ} \sin 2\omega t\right). \tag{4}$$

При $\tau_{Дщ} = 0$, т.е. при $R_{Дщ} = 0$:

$$I = V_0 \sigma_0 \cos\omega t + \frac{s V_0^2 \sigma_0}{2} + \frac{s V_0^2 \sigma_0}{2} \cos 2\omega t. \tag{5}$$

Из выражений (4) и (5) мы видим, что в токе имеются составляющие с частотой ω и 2ω, а также постоянная составляющая. Другими словами, Дм сопротивление, продолжая функционировать как омическое сопротивление, является еще и генератором постоянной составляющей и второй гармоники.

Рассмотрим теперь случай, когда электропроводность Дм компонента зависит от деформации линейно, а в качестве Дщ компонента выступает электрострикторный элемент. Деформация последнего пропорциональна квадрату напряжения, что позволяет записать:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + c V^2_{Дщ}\right), \tag{6}$$

где c – некий постоянный коэффициент. Тогда установившийся ток будет описываться выражением:

$$I = V\sigma = V_0\sigma_0\cos\omega t\left[1 - \frac{cV_0^2(\cos\omega t + \omega\tau_{Дщ}\sin\omega t)^2}{(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2}\right]$$

или

$$I = \left[V_0\sigma_0 + \frac{3cV_0^3\sigma_0}{4(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2} + \frac{\omega^2\tau_{Дщ}^2 cV_0^3\sigma_0}{4(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2}\right]\cos\omega t + \frac{\omega\tau_{Дщ} cV_0^3\sigma_0}{2(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2}\sin\omega t +$$

$$+\left[\frac{cV_0^3\sigma_0}{4(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2} - \frac{\omega^2\tau_{Дщ}^2 cV_0^3\sigma_0}{4(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2}\right]\cos 3\omega t + \frac{\omega\tau_{Дщ} cV_0^3\sigma_0}{2(1+\omega^2\tau_{Дщ}^2)^2}\sin 3\omega t. \quad (7)$$

При $\tau_{Дщ} = 0$

$$I = V_0\sigma_0\left(1 + \frac{3cV_0^2}{4}\right)\cos\omega t + \frac{cV_0^3\sigma_0}{4}\cos 3\omega t. \quad (8)$$

Из (7) и (8) мы видим, что на Дм сопротивлении генерируется третья гармоника. При $c > 0$ ток с частотой ω через деформируемое сопротивление выше, чем тот, который шел бы через обычное сопротивление.

Очевидно, что если бы в качестве Дщ компонента мы взяли бы пьезоэлемент, а зависимость σ от деформации была квадратичной, то мы пришли бы к тем же формулам, что и (6)–(8).

Ясно, что при квадратичной зависимости σ от деформации (выражение (6)) и при использовании в качестве Дщ компонента электрострикторного элемента в токе через Дм сопротивление появится также пятая гармоника $(I_5 \sim \cos^5\omega t = \cos 5\omega t + \ldots)$.

Строго говоря, электрострикционная деформация используемых практически электрострикторных материалов (сегнетоэлектриков с размытым фазовым переходом) пропорциональна квадрату электрического поля только при не очень сильных полях, а в более сильном поле она приближенно описывается [2] как

$$S = ME^2 + M_1E^4 + M_2E^6 + \ldots$$

Это не означает, конечно, что нельзя получить достаточно большой абсолютной электрострикционной деформации (которая создала бы в Дм компоненте большую относительную деформацию) при квадратичной ее зависимости. Используя, например, склейку тонких электрострикторных дисков, можно при относительно невысоких управляющих напряжениях (и при относительно невысоких напряженностях поля) получить и высокую абсолютную деформацию Дщ компонента, и большую относительную деформацию Дм компонента.

Что же касается использования более высоких полей, то наличие высоких степеней поля в выражении для деформации приведет к значительному числу гармоник в токе через деформируемое сопротивление. Амплитуды этих гармоник будут зависеть от соотношения между величинами M_i, которое может быть различным у разных материалов.

Рассмотрим еще отношения составляющих тока различных частот в разобранных случаях. Из (5) и (8) следует, что

$I_{(\omega=0)}/I_{(\omega)}=I_{(2\omega)}/I_{(\omega)}=sV_0/2$, а $I_{(3\omega)}/I_{(\omega)}=cV_0^2/(4+3cV_0^2)$.

Ясно, что sV_0 в (1) и cV_0^2 в (6) при отрицательных s и c не могут быть более 100%, а это значит, что $I_{(2\omega)}/I_{(\omega)}$ не может быть более 1/2, а $I_{(3\omega)}/I_{(\omega)}$ более 1/7. Однако при положительных s и c электропроводность при одном знаке деформации в принципе может на несколько порядков превышать электропроводность при другом знаке деформации (например, в случае вещества с фазовым переходом „полупроводник - сверхпроводник", температура которого зависит от деформации). Тогда $I_{(2\omega)}/I_{(\omega)}$ может достигать очень больших значений, но $I_{(3\omega)}/I_{(\omega)}$ и в этом случае не будет превышать 1/3.

Литература

[1] Исупов В.А. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 8, с. 500-504.

[2] Смоленский Г.А., Исупов В.А., Смирнова Е.П., Юшин Н.К. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, в. 1, с. 44-49.

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

Поступило в Редакцию 26 декабря 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 9 12 мая 1988 г.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ Н-ГЕКСАНА

В.П. Бородин, В.Ф. Климкин

Внешнее давление является одним из факторов, повышающих электрическую прочность жидких диэлектриков. Степень влияния давления зависит от длительности воздействия напряжения [1, 2]. В работе [3] установлены интересные особенности электрического разряда в Н-гексане в квазиоднородном электрическом поле. Оказалось, что в зависимости от длительности воздействия напряжения пробой развивается либо с катода, либо с анода, или с обоих электродов одновременно. Развитие этих исследований представляет теоретический и практический интерес.

Целью настоящей работы является выяснение влияния давления на различные механизмы электрического разряда в Н-гексане в микронаносекундном диапазоне.