

О.Л.РЕЗИНКИН, канд.техн.наук, докторант НТУ «ХПИ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ

Сформульовані вимоги до конструкції та технології виготовлення розподіленої високовольтної формуючої лінії з нелінійним діелектриком. Наведені результати розробки формувача ударних електромагнітних хвиль з активним діелектриком виготовленим за технологією мікродугового покриття.

Engineering and technological requirements for distributed high voltage forming line with nonlinear dielectric have been formulated. Results of design of pulsed electromagnetic shock waves generator with active dielectric produced by spark sintering technology have been described.

Применение формирующих линий, заполненных активным нелинейным диэлектриком, является одним из перспективных путей получения мощных импульсов быстро нарастающего электромагнитного поля [1]. Известно два различных механизма обострения фронта электромагнитного импульса, распространяющегося по электродам формирующей линии с распределенными параметрами, межэлектродное пространство которой заполнено нелинейным диэлектриком. В том случае, когда нарастание напряженности электрического поля на фронте волны приводит к изменению диэлектрической проницаемости нелинейного диэлектрика, скорости распространения различных участков профиля волны могут не совпадать. Если увеличение напряженности электрического поля приводит к падению диэлектрической проницаемости, то скорость вершины импульса оказывается выше, чем его начала. Это приводит к «набеганию» вершины на фронт и, как следствие, к сокращению его длительности. Другой механизм обострения фронта электромагнитного импульса основан на нелинейности диссипации (рассеяния) энергии волны, возникающей из-за релаксационных потерь, возникающих при поляризации активного диэлектрика. При достаточно большой амплитуде волны поляризация диэлектрика происходит лишь на части ее фронта, на вершине диэлектрик оказывается уже поляризованным, и диссипации энергии нет. Диссипация энергии приводит к «выеданию» начальной части фронта волны и к сокращению его длительности. Оба описанных механизма приводят в пределе к образованию так называемых ударных электромагнитных волн, которым соответствует разрыв в решении нелинейных телеграфных уравнений, описывающих переходные процессы в формирующей линии с активным диэлектриком. Длительность фронта волны, реально достижимая в линии, определяется релаксационными характеристиками использованного активного диэлектрика. В качестве нелинейной среды, способной выступить в роли ак-

тивного диэлектрика распределенной формирующей линии, могут быть использованы сегнетокерамики на основе твердого раствора титанатов бария и стронция [2]. Для получения требуемой величины температуры Кюри $T_K = 40 \div 50$ °С был выбран состав сегнетокерамики, соответствующий формуле $Ba_{0.75}Sr_{0.25}Ti_{0.95}Zr_{0.05}O_3$.

При разработке конструкции нелинейной формирующей линии возникает ряд трудностей, связанных с выбором приемлемой геометрической формы электродов и активного диэлектрика, а также технологии их изготовления. Во-первых, между поверхностями электродов и активного диэлектрика недопустимы даже микронные зазоры. Это связано с тем, что относительная диэлектрическая проницаемость $Ba_{0.75}Sr_{0.25}Ti_{0.95}Zr_{0.05}O_3$ в полях $E = 10^3 \div 5 \cdot 10^3$ В/м при температурах близких к T_K составляет $\epsilon_r = 4 \cdot 10^3 \div 1,2 \cdot 10^4$, в то время, как для изоляционных жидкостей, применяемых в высоковольтной технике, ϵ_r не превышает нескольких единиц. По этой причине импульсы напряжения, распространяющиеся в формирующей линии, содержащей дополнительные изоляционные зазоры, оказались бы приложенными не к активному диэлектрику, а к этим зазорам. Во-вторых, резкий скачок диэлектрической проницаемости в приэлектродной области, вызванный вышеупомянутыми различиями в проницаемостях активного диэлектрика и высоковольтной изоляции, приводит к сильному электрическому коронированию электродов и, как следствие, к электрическому пробую формирующей линии. Таким образом, геометрическая форма границ раздела диэлектрических и проводящих сред в формирующей линии должна обеспечивать плотное прилегание активного диэлектрика к поверхностям электродов и исключать наличие тройных точек раздела: активный диэлектрик – металл – изоляция. Описанные ограничения, касающиеся формы полеобразующих элементов, в совокупности с жесткими требованиями к электрофизическим характеристикам активного диэлектрика приводят к существенным ограничениям в выборе возможной технологии синтеза сегнетокерамических элементов формирующей линии.

Одним из основных структурных параметров сегнетокерамики, влияющих на скорость ее поляризации под действием внешнего электрического поля, является размер доменов, в пределах которых диэлектрик спонтанно поляризован. Крупные домены не способны к быстрому повороту вектора поляризации из-за пьезо- и пирозлектрических эффектов, приводящих к деформации и вязкому трению на их границах. Классическая технология синтеза керамики включает этап обжига изделия, сформованного тем или иным способом (сухое либо мокрое прессование, шликерное литье) из измельченного сырья при температуре свыше 1000 °С. На этом этапе происходит рост размеров доменов, сопровождающий объединение зерен исходного сырья и высокотемпературный синтез твердых растворов.

Конструкция высоковольтной формирующей линии с нелинейным диэлектриком, выполненная классическим методом высокотемпературного син-

теза сегнетокерамического активного элемента и последующего нанесения на его поверхность металлических электродов, схематически изображена на рис. 1, а.

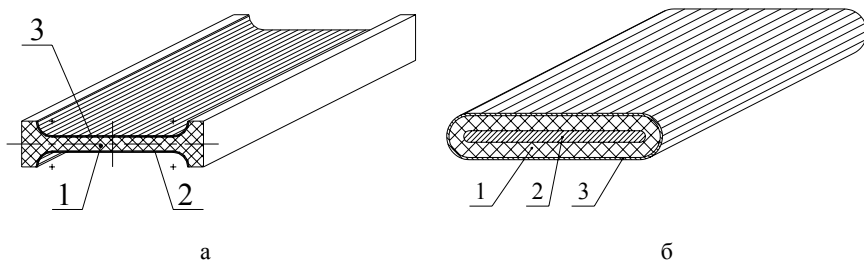


Рисунок 1 – Конструкции высоковольтных формирующих линий, полученные методом высокотемпературного синтеза сегнетокерамики (а) и методом микроплазменного оксидирования (б) 1 – активный диэлектрик; 2, 3 – высоковольтный и заземленный электроды.

Современные технологические методы позволяют синтезировать слои керамик из мелкодисперсного исходного сырья минуя этап обжига. К таким передовым методам относится, например, метод вакуумного аэрозольного напыления при комнатной температуре [3]. Данный метод позволяет получать на поверхности металлических электродов сегнетокерамические покрытия с высокой степенью адгезии и с плотностью, приближающейся к керамике, синтезированной по классической высокотемпературной технологии. Однако этот метод также не лишен недостатков, к которым относятся трудности с получением однородных лишенных локальных дефектов слоев керамики на искривленных поверхностях, а также наличие механических напряжений в толще синтезированной керамики. Перечисленных недостатков не имеет появившийся в недавние годы метод микродугового оксидирования (другие названия: микроплазменное, анодно-искровое, плазменно-электролитическое оксидирование) [4,5]. Данный метод состоит в электрофоретическом осаждении частиц керамики на поверхности металлического электрода из их взвеси в электролите. При пропускании тока большой плотности через границу раздела металл-электролит на поверхности электрода возникают микроплазменные разряды. Высокие температуры и давления, возникающие при электрических разрядах, приводят к формированию на поверхности электрода слоя диэлектрического покрытия, состоящего из оксидов элементов, входящих в состав металла подложки и электролита. При этом в состав покрытия включаются частицы диспергированного до основной фракции 50 нм $\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_3$, находящегося в электролите в виде взвеси. Поддержание мелкодисперсного порошка сегнетоэлектрика во взвешенном состоянии производится путем непрерывного вращения активатора в электролитиче-

ской ванне. При использовании плазменно-электролитического осаждения активного диэлектрика использование приведенной выше конструкции формирующей линии (рис. 1, а) оказывается нецелесообразным. При микроплазменном оксидировании сегнетокерамика, осаждаемая из взвеси в электролите, образует вокруг электрода замкнутую диэлектрическую оболочку, что позволяет реализовать конструкцию высоковольтной формирующей линии, схематически изображенную на рис 1, б. Геометрическая форма элементов конструкции такова, что устройство может рассматриваться и как симметричная полосковая линия, и как коаксиальная линия с распределенными параметрами. Распределение напряженности поля в плоской части системы является однородным. Нелинейный характер диэлектрической проницаемости $\text{Ba}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Ti}_{0.95}\text{Zr}_{0.05}\text{O}_3$ приводит к значительному усилению степени неоднородности распределения напряженности электрического поля в закругленных частях линии. Так например, при отношении радиуса закругления боковой поверхности внутреннего электрода к толщине слоя активного диэлектрика $r_{\text{in}}/d = 0,5$ величины напряженности электрического поля на поверхностях внутреннего и внешнего электродов могут отличаться более, чем в пять раз. Этот эффект отрицательно сказывается как на максимально допустимом уровне напряжения на электродах, так и на эффективности обострения фронта электромагнитных волн формирующей линией. По этой причине радиус закругления боковой поверхности внутреннего электрода следует выбирать не меньшим, чем толщина слоя нанесенного активного диэлектрика, а ширина плоской части линии должна более чем на порядок превышать ширину закругленных частей.

Локальная кратковременная электрическая прочность синтезированного покрытия, измеренная в системе шар – плоскость составила $2,2 \cdot 10^{11}$ В/м, что свидетельствует о перспективности применения данной технологии в высоковольтной технике.

Выводы. Использование технологии микроплазменного оксидирования позволяет формировать на поверхности электродов нелинейной формирующей линии мелкодисперсные и электрически прочные слои активного диэлектрика. Геометрические параметры полученных электродов, покрытых слоем активного диэлектрика, позволяют применять их при создании высоковольтных импульсных линий, формирующих ударные электромагнитные волны.

Список литературы: 1. *И.Г. Катаев* Ударные электромагнитные волны. – М.: Советское радио, 1963. – 148 с. 2. *О.Л. Резинкин, Г.В. Лисачук, В.В. Вытришко* Использование нелинейности электрофизических свойств сегнетокерамики для генерирования мощных ударных электромагнитных волн // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2005. – Ч. 4. – С. 100-103. 3. *О.Л. Резинкин* Получение толстых слоев сегнетокерамики методом вакуумного аэрозольного напыления при комнатной температуре // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 39. – С. 140-145. 4. *А.И. Мамаев* Сильноточковые процессы в растворах электролитов. – Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2005. 5. *C.-T. Wu, F.-H. Lu* Synthesis of Barium Titanate

Films by Plasma Electrolytic Oxidation at Room Electrolyte Temperature // Surf. and Coat. Technol. – 2005. – V. 199 (2-3). – P. 225-230.

Надійшла до редколегії 26.03.2010.