

Электрически управляемые компоненты на основе керамики BST—Mg для применения в ускорительной технике

© Е.А. Ненашева*, А.Д. Канарейкин, А.И. Дедык, Ю.В. Павлова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ),
Санкт-Петербург, Россия

* Научно-исследовательский институт „ГИРИКОНД“,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: dedyk_ai@mail.ru, Liza@ceramics.sp.ru

Приведены экспериментальные результаты исследования диэлектрических свойств новой композитной керамики BSM, управляемость которой возрастает с ростом концентрации комплексной магнийсодержащей добавки. Рассмотрены основные направления применения сегнетоэлектрической керамики в ускорительной технике.

PACS: 77.84.Lf, 77.84.Dy, 72.20.Ht

1. Введение

В последнее время разработан новый тип объемной керамики BST [1–2], нашедшей свое применение в частотных диапазонах 0.7–30.0 GHz для ускорительной техники [2–6]. Это прежде всего переключающие и управляющие СВЧ-элементы на основе сегнетоэлектриков: быстрые ключи и фазовращатели из высокочастотных сегнетокерамических элементов для компрессии мощных СВЧ-импульсов схем питания линейных ускорителей [2], а также управляемые ускорительные структуры для новых схем ускорения в системах с диэлектрическим заполнением [3,4].

Применение исследованной в настоящей работе сегнетоэлектрической керамики направлено на следующие разработки: 1) управляемая ускорительная структура с диэлектрическим заполнением (DLA); 2) фазовращатели и переключатели большой мощности на основе резонаторов с сегнетоэлектрическим заполнением.

Целью настоящей работы явилось исследование диэлектрических свойств нового композитного сегнетоэлектрика, удовлетворяющего требованиям ускорительной техники: диэлектрическая проницаемость $\epsilon \sim 500$, управляемость диэлектрической проницаемостью $K \sim 1.2$ ($\sim 20\%$ в поле напряженностью $E = 4–5 \text{ V}/\mu\text{m}$), низкие диэлектрические потери в микроволновом диапазоне ($\text{tg } \delta \leq 0.005$).

2. Технология получения керамики и методика измерений

Для создания такого материала была использована объемная сегнетоэлектрическая керамика BaTiO_3 (BTO)— SrTiO_3 (STO) с соотношением Ba и Sr 55/45 и с двумя добавками: 1) в виде окиси магния MgO, 2) в виде комплексной магнийсодержащей добавки (BSM). Состав и объемное содержание магнийсодержащих добавок выбирались таким образом, чтобы

обеспечить слабое взаимодействие компонент друг с другом при температуре спекания керамики.

Образцы необходимой формы и размеров изготавливались гидравлическим прессованием и спекались на воздухе при температуре 1350–1540°C в камерной электропечи до нулевого водопоглощения и пористости материала не более 5%. На полированные образцы в виде дисков диаметром 6–12 mm и толщиной 0.2–3 mm методом магнетронного распыления в атмосфере Ar наносились металлические электроды для измерения диэлектрических характеристик. Для измерений ВЧ-характеристик в качестве электродов использовались Cu и Au. Измерения вольт-фарадных характеристик и зависимостей $\text{tg } \delta$ от управляющего напряжения керамических образцов различного состава проводились на частоте 1 MHz в интервале напряжений $\pm 1000 \text{ V}$. Диэлектрическая проницаемость ϵ и добротность Q в диапазоне 3.5–10 GHz определялись на дисковых образцах в специальной измерительной ячейке, разработанной в соответствии с международным стандартом [7].

3. Результаты измерений

При использовании обеих магнийсодержащих добавок диэлектрическая проницаемость ϵ образцов уменьшается с ростом концентрации добавки (рис. 1, a). Однако коэффициент управляемости образцов с комплексной магнийсодержащей добавкой возрастает с ростом концентрации добавки в отличие от образцов с добавкой в виде MgO (рис. 1, b).

Частотная зависимость ϵ и добротности Qf в диапазоне $f = 3–10 \text{ GHz}$ показаны на рис. 2, a, b. В пределах погрешности измерений диэлектрическая проницаемость не зависит от частоты, а добротность уменьшается с ростом частоты, что соответствует возрастанию тангенса угла диэлектрических потерь от $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-3}$ до $\sim 10^{-2}$. Оценка потерь в металлических электродах за счет увеличения толщины скин-слоя с ростом частоты дает значение $\text{tg } \delta \sim (2–1.8) \cdot 10^{-3}$, что соответствует

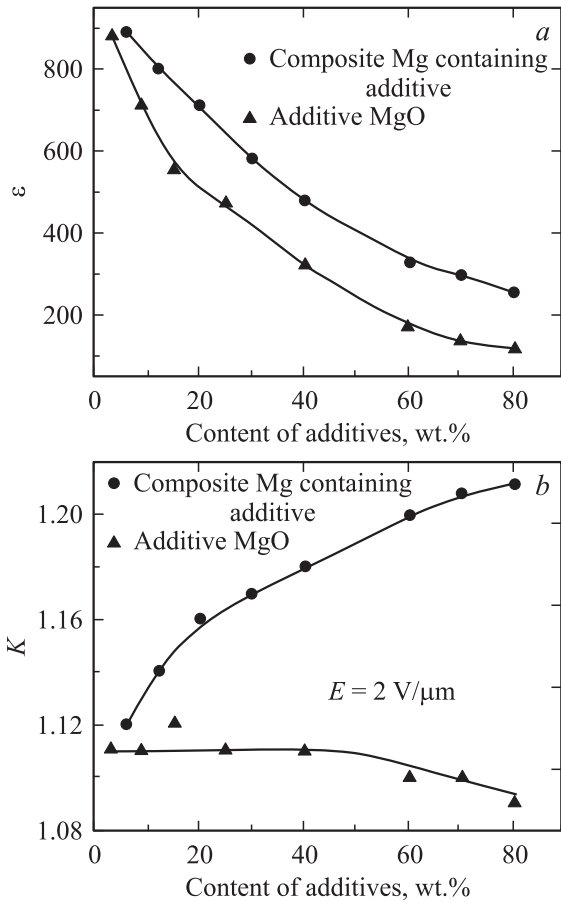


Рис. 1. Зависимости диэлектрической проницаемости (а) и коэффициента управляемости (b) от содержания добавки MgO и комплексной магниесодержащей добавки.

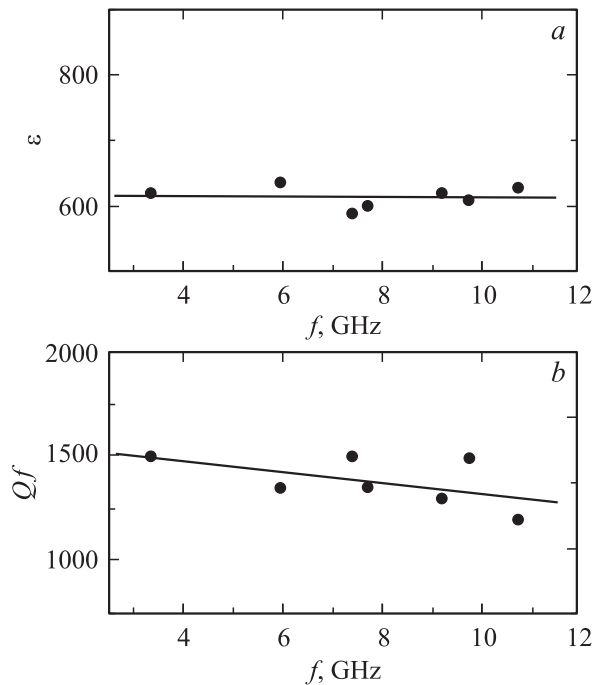


Рис. 2. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости (а) и добротности (b).

нижней границе $\text{tg } \delta$ всей структуры при $f = 3 \text{ GHz}$. Таким образом, наблюдаемое возрастание $\text{tg } \delta$ структуры связано с потерями в самой керамике BSM, что согласуется с расчетом функциональной зависимости $\text{tg } \delta$ в сегнетоэлектриках типа перовскита [8].

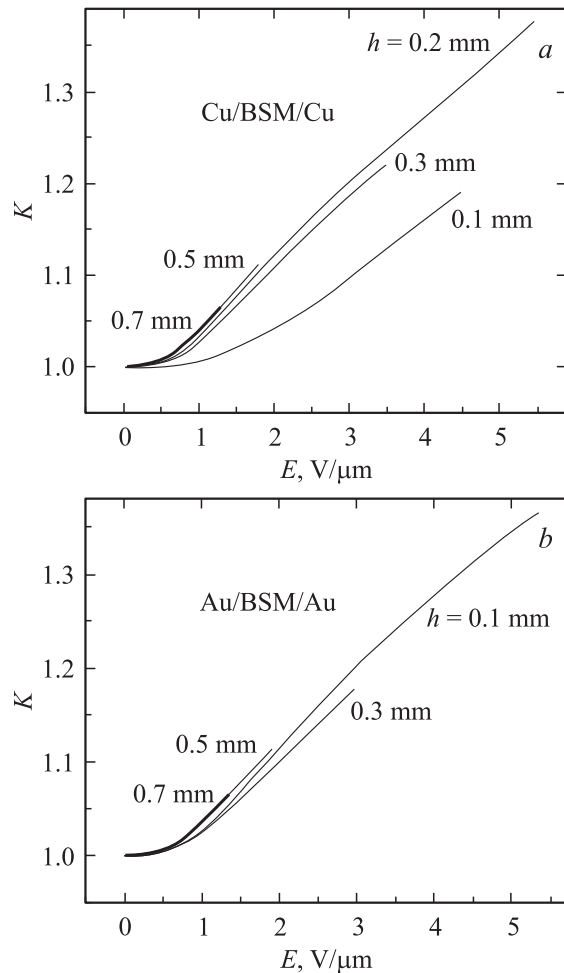


Рис. 3. Зависимости коэффициентов управляемости K от напряженности электрического поля для структур Cu/BSM/Cu (а) и Au/BSM/Au (b) с различной толщиной h керамики BSM.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов управляемости K от напряженности электрического поля для структур Cu/BSM/Cu и Au/BSM/Au с различной толщиной h керамики BSM. Коэффициент управляемости — отношение начальной емкости структуры к значению емкости при максимальном напряжении смещения — имеет линейную зависимость от напряженности поля при $E > 2 \text{ V}/\mu\text{m}$. Видно, что для образцов толщиной 0.1 mm с медными электродами управляемость существенно меньше вследствие влияния приэлектродных слоев. Как было показано ранее [9], при уменьшении толщины структуры падение напряжения на контактных областях становилось примерно равным падению напряжения на объеме керамики BSM, и при $h \leq 0.3 \text{ mm}$ проводимость структуры в основном опре-

делялась контактными областями. Для образцов с электродами из Au перераспределение напряжения между контактными областями и объемом не существенно. Использование золотых электродов позволяет получить величину $\text{tg } \delta \approx 0.002$ всей структуры на порядок ниже, чем для структур с медными электродами.

Разработка и исследования свойств нового керамического материала BSM позволили изготовить диэлектрическую ускоряющую структуру с сегнетоэлектрическим слоем [5] (рис. 4, *a, b*). Это один из новых методов кильватерного ускорения, который предполагает систему передачи энергии от сильноточного электронного густка к густку высоких энергий, но малого заряда [4,5]. Сильноточные электронные густки генерируют в ускорительной структуре электромагнитные поля с амплитудой продольной компоненты электрического поля до 100 MV/m, которая используется для ускорения последующего слаботочного густка. Необходимость держать слаботочный густок в ускоряющей фазе волны требует соблюдения жестких допусков как на параметры волноведущей структуры, так и на позиционирование густков. Возникает проблема компенсации частотных сдвигов, вызванных отклонением реальных параметров структуры от расчетных, а также межсекционным согласованием волноводов ускорителя. Изменение диэлектрической проницаемости волноведущей системы с помощью слоя сегнетоэлектрика позволяет оперативно

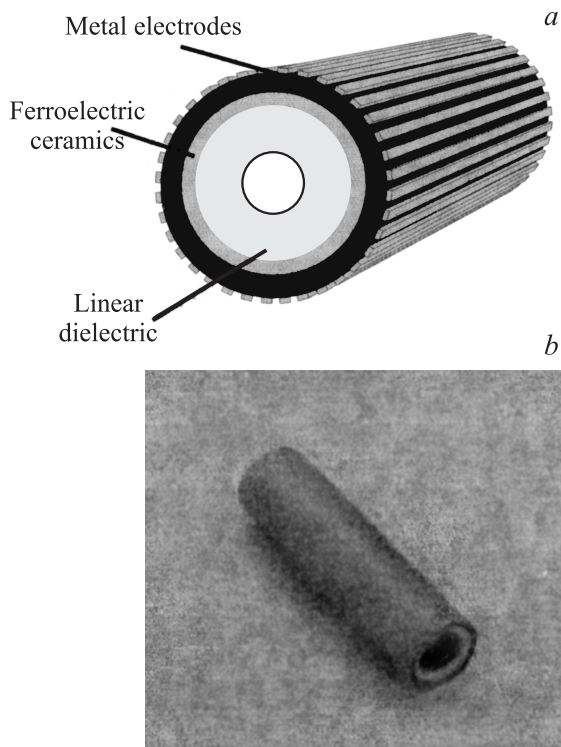


Рис. 4. *a)* Управляемый ускоритель с диэлектрическим заполнением. *b)* Двухслойный диэлектрический волновод с сегнетоэлектрическим слоем (размеры сегнетоэлектрической трубки: диаметр 9 mm, толщина 0.8 mm, длина 30 mm).

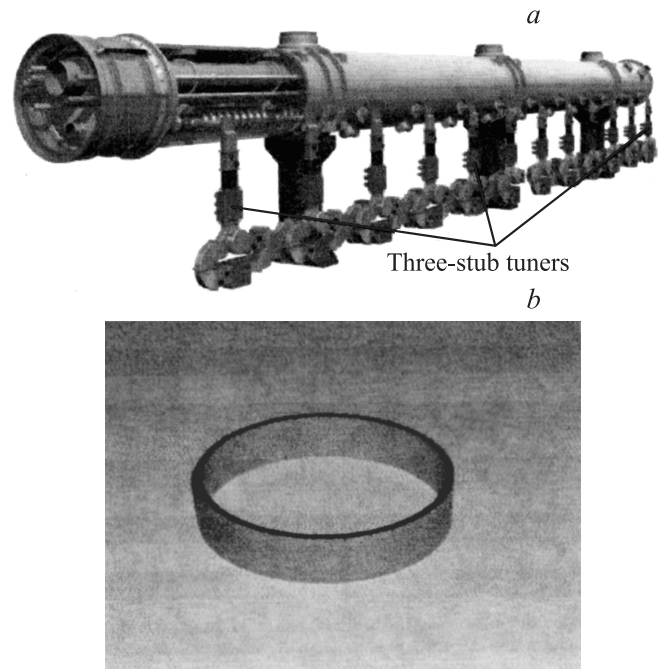


Рис. 5. *a)* Линейный ускоритель с элементами согласования между отдельными ускорительными структурами. *b)* Сегнетоэлектрическое кольцо (диаметр 106 mm, толщина 2.8 mm, высота 22 mm).

регулировать фазовые соотношения волна–густок и обеспечить наиболее выгодные энергетические условия для процесса ускорения [4,5].

Использование сегнетоэлектрической керамики BSM в качестве фазовращателей и переключателей высокой мощности проиллюстрировано на примере линейного ускорителя с элементами согласования, которые изменяют связь и фазу отдельных ускорительных структур. Линейный ускоритель будет состоять из тысяч ускорительных структур (рис. 5, *a*) [3–5], для каждой из которых необходимо независимое согласование с СВЧ-источником. В настоящее время используются механические элементы согласования (рис. 5, *a*). Разработанная керамика позволит создать электрически управляемые тюнеры с существенно меньшими потерями и с временами переключения от единиц микросекунд до единиц миллисекунд, что превышает предъявляемые требования.

Разработка и исследования свойств нового керамического материала BSM позволили изготовить электрически управляемые компоненты в виде трубок (рис. 4, *b*) и контрольно-ускорительных колец на частоте 11.424 GHz (рис. 5, *b*).

4. Заключение

Для создания сегнетоэлектрических материалов с заданной диэлектрической проницаемостью при сохранении высокой управляемости и низких диэлектрических

потерь в микрополновом диапазоне возможно использовать композиты BST–Mg. Увеличение концентрации комплексной магнийсодержащей добавки не приводит к снижению коэффициента управляемости структуры. С ростом частоты параметр Qf незначительно уменьшается при сохранении управляемости структур на основе керамики BSM.

При $E > 2 \text{ V}/\mu\text{m}$ коэффициент управляемости имеет линейную зависимость от напряженности поля. В полях $E = 4\text{--}5 \text{ V}/\mu\text{m}$ коэффициент управляемости структур Au/BSM/Au составляет $K = 1.4\text{--}1.5$, что полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ускорительной техникой к сегнетоэлектрической керамике.

Разработана технология изготовления контрольно-ускорительных элементов для подстройки фазы излучения путем изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика.

Работа по применению сегнетоэлектрической керамики в ускорительных системах проводилась в сотрудничестве с компанией „Euclid Techlabs LLC“ (США), Университетом г. Йель (США) и Аргоннской национальной лабораторией (США).

Список литературы

- [1] E.A. Nenasheva, A.D. Kanareykin, N.F. Kartenko, S.F. Karmanenko. *J. Electroceram.* **13**, 235 (2004).
- [2] S.F. Karmanenko, A.D. Kanareykin, E.A. Nenasheva, A.I. Dedyk, A.A. Semenov. *Integrated Ferroelectrics* **61**, 177 (2004).
- [3] S. Kazakov, V. Yakovlev, J. Hirshfield, A. Kanareykin, E. Nenasheva. 12th Adv. Accelerator Concepts Workshop (AAC2006). Grand Geneva (2006). P. 331.
- [4] A.D. Kanareykin, W. Gai, J.G. Power, E. Sheinman, A. Altmark. *AIP Conf. Proc.* **647**, 565 (2002).
- [5] А.М. Альтмарк, А.Д. Канарейкин, И.Л. Шейнман. *ЖТФ* **75**, 89 (2005).
- [6] А.И. Дедык, А.Д. Канарейкин, Е.А. Ненашева, Ю.В. Павлова, С.Ф. Карманенко. *ЖТФ* **76**, 59 (2006).
- [7] С.Н. Сибирцев, В.Ф. Матвейчук, Е.А. Ненашева, О.Н. Трубицина, Н.М. Кирх, А.В. Серов, В.А. Ямтанов. *Материалы VIII Междунар. конф. „Актуальные проблемы электронного приборостроения“*. Сб. тр. Новосибир. гос. техн. ун-та, Новосибирск (2006). Т. 3. С. 101.
- [8] О.Г. Вендик, М.А. Никольский, М.С. Гашинова. *Письма в ЖТФ* **29**, 5 (2003).
- [9] Ю.В. Павлова, Е.А. Ненашева, С.Ф. Карманенко, А.И. Дедык. *Материалы IV Междунар. НТК. МИРЭА, М.* (2006). P. 132.