

06;09;12

Влияние мощности СВЧ сигнала на управляемость сегнетоэлектрического фазовращателя

© А.Н. Васильев,¹ О.Г. Вендик,¹ И.В. Якушин²¹ Санкт-Петербургский электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия² ЗАО „Светлана-Электронприбор“,
194156 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: OGVendik@mail.eltech.ru

(Поступило в Редакцию 26 февраля 2011 г.)

Рассмотрен СВЧ фазовращатель на основе тонкопленочных сегнетоэлектрических планарных конденсаторов для работы в составе фазированной антенной решетки на повышенном уровне СВЧ мощности и при ограниченной мощности в цепях управления. Для устранения модуляции емкости планарных конденсаторов переменным полем предложено разделить влияние постоянного управляющего напряжения и переменного напряжения, что осуществляется на основе использования симметрии вольт-фарадной характеристики элемента, в котором соединены два конденсатора параллельно по переменному напряжению (U_{ac}) и последовательно по постоянному напряжению (U_{dc}). Эксперимент показал, что при $U_{dc} > U_{ac}$ фаза волны, прошедшей через фазовращатель, слабо зависит от мощности СВЧ сигнала. Отражательный фазовращатель испытан при импульсной мощности СВЧ сигнала до 6 W и при мощности в цепи управления порядка 10 μ W.

С развитием физики сегнетоэлектричества появляются новые требования к реализации сверхвысокочастотных (СВЧ) фазовращателей, служащих основой фазированных антенных решеток (ФАР), которые наряду с традиционным применением в радиолокации широко используются в различных телекоммуникационных системах.

В настоящее время не существует никакого другого способа реализации СВЧ фазовращателей, предназначенных для работы на повышенном уровне СВЧ мощности при существенном ограничении мощности в цепях управления, кроме реализации фазовращателей на основе тонкопленочных сегнетоэлектрических СВЧ интегральных схем.

Исследование возможности применения сегнетоэлектрических материалов в технике сверхвысоких частот началось в середине 60-х годов XX века. Первой работой в этом плане была диссертация К. Бете, защищенная в университете г. Аахен в 1970 г. и опубликованная в Докладах фирмы Филипс [1]. Следующим содержательным изданием (1979 г.) была работа [2], подготовленная группой авторов из Ленинграда и Москвы. Интерес к проблеме не затухает в течение многих десятилетий. В 2003 г. появился большой обзор А.К. Таганцева с соавторами [3].

Основой разработки фазовращателей служат корректные модели диэлектрического отклика сегнетоэлектрика на воздействие постоянного и высокочастотного электрических полей [4–9]. В расчете и проектировании управляющих СВЧ устройств решающую роль играет зависимость диэлектрической проницаемости материала или емкости конденсатора на его основе от приложенного напряжения. Часто используется следующая модель зависимости емкости конденсатора от управляющего

напряжения:

$$C(U) = \frac{C_0}{1 + (n-1)\left(\frac{U}{U_0}\right)^\gamma}, \quad (1)$$

где

$$U = U_{dc} + U_{ac} \cos \omega t, \quad (2)$$

U_{dc} , U_{ac} , ω — постоянное напряжение и амплитуда переменного СВЧ напряжения, имеющего частоту ω ; U_0 — параметр, задающий меру управляющего напряжения, γ — подгоночный параметр, обычно этот параметр лежит в пределах $\gamma = 1.2-2.0$ и определяет меру кривизны зависимости $C(U)$. Используем следующее обозначение:

$$n = \frac{C(0)}{C(U_{max})}. \quad (3)$$

Введенное обозначение носит название управляемости сегнетоэлектрического материала. В рассматриваемом случае примем следующие величины: $U_0 = 200$ V, $n = 2$, $\gamma \approx 1.5$.

Положим, что управляемый конденсатор, находящийся в составе отражательного фазовращателя, служит нагрузкой передающей линии при параллельном соединении конденсатора и индуктивного элемента цепи [10]. Амплитуда переменного СВЧ напряжения на конденсаторе определяется следующей формулой:

$$U_{ac} = \sqrt{2Z_0 P_{inc}} |1 + \Gamma|, \quad (4)$$

где Γ — коэффициент отражения, Z_0 — волновое сопротивление линии передачи, P_{inc} — мощность падающей волны. Максимальное напряжение на конденсаторе соответствует $\Gamma = 1$.

При большой мощности СВЧ сигнала возникает модуляция емкости конденсатора, вызванная СВЧ электрическим полем. Чтобы устранить модуляцию емкости

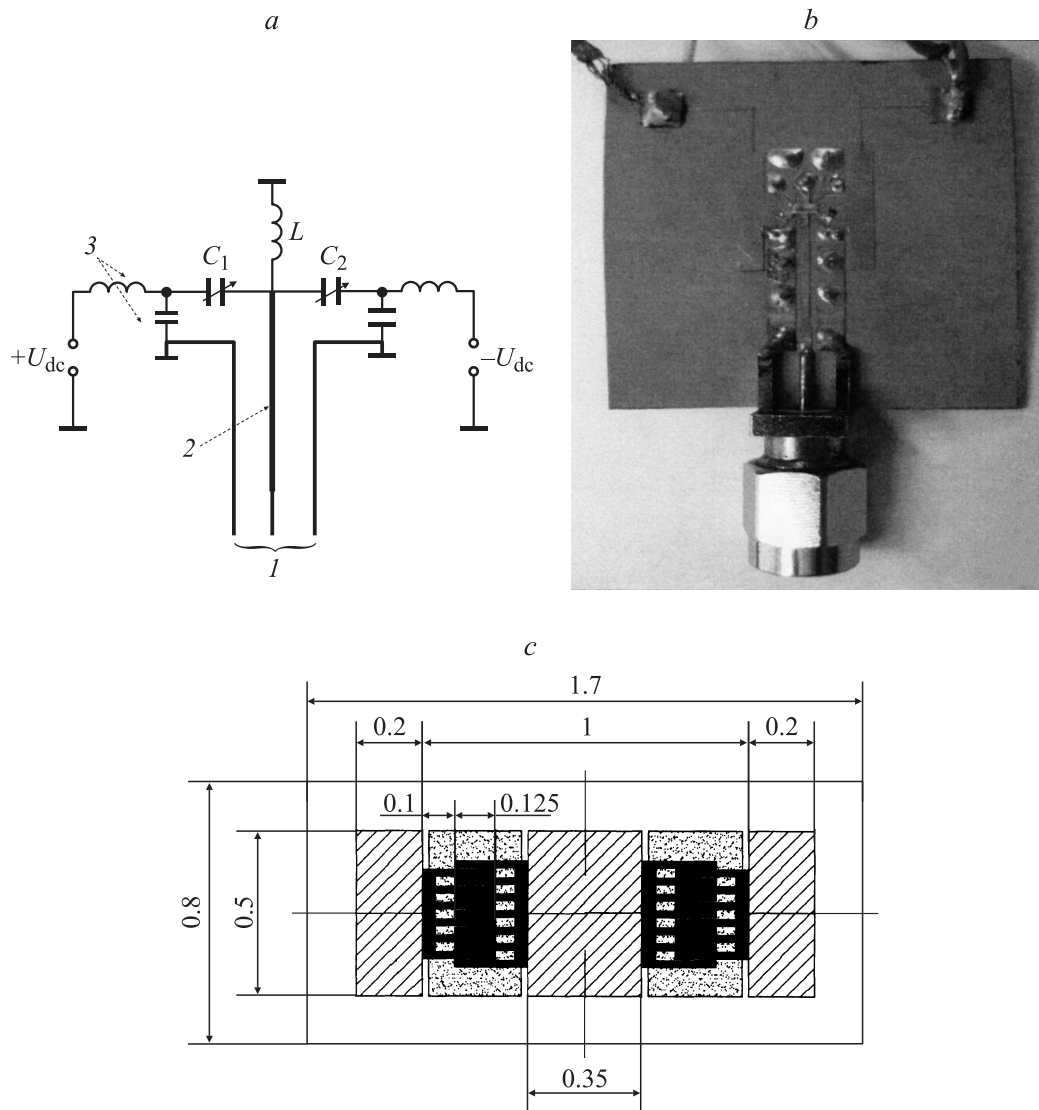


Рис. 1. Схема соединения двух конденсаторов параллельно переменному напряжению и последовательно управляющему LC -фильтрами (*a*), *b* — фотография отражательного фазовращателя, соответствующего схеме рис. 1, *a*, *c* — конструкция двух встречно-штыревых планарных конденсаторов: 1 — коаксиальный вход, 2 — $\lambda/4$ -трансформатор, 3 — изоляция цепей постоянного тока.

переменным полем, можно использовать симметрию вольт-фарадной характеристики (ВФХ) элемента [11]. На рис. 1, *a* показано соединение двух конденсаторов, при котором по переменному напряжению они включены параллельно, а по постоянному напряжению — последовательно. В схему включены LC -фильтры, разделяющие постоянное напряжение и напряжение СВЧ сигнала. В силу симметрии ВФХ постоянное напряжение независимо от знака одинаково изменяет емкость обоих конденсаторов. Переменное напряжение синфазно приложено к обоим конденсаторам. При $|U_{dc}| > U_{ac}$ в случае $U_{dc} > 0$ при положительной полуволне переменного напряжения его рост уменьшает емкость правого конденсатора, а в случае $U_{dc} < 0$ рост переменного напряжения увеличивает емкость левого конденсатора. В результате суммарная емкость двух параллельно со-

единенных конденсаторов мало зависит от амплитуды переменного напряжения. На рис. 1, *b* показана фотография отражательного фазовращателя, соответствующего схеме рис. 1, *a*.

Заметим, что при $U_{dc} = 0$ емкость сегнетоэлектрического (СЭ) конденсатора зависит от амплитуды СВЧ напряжения. Эта зависимость резко падает, когда $|U_{dc}| > U_{ac}$. Эта особенность работы двух СЭ конденсаторов, включенных по схеме рис. 1, *a*, сильно зависит от величины параметра γ , входящего в формулу (1). Заметим, что формула (1) пригодна только для аппроксимации полученных зависимостей $C(U)$. Обычно аппроксимация проводится в пределах изменения емкости от максимального до половинного значения, т. е. при $n = 2$. ВФХ объемного керамического материала (ВК-7) [12] при толщине образца 0.5 мм соотношением (1) хоро-

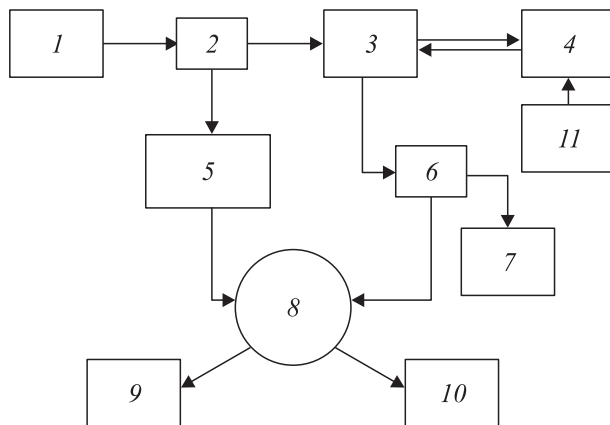


Рис. 2. Блок-схема измерительного стенда на ВУМ.

шо аппроксимируются при $\gamma = 2$. Феноменологическая теория, построенная на основе обработки уравнения Гинзбурга–Девоншира [4–6], дает ВФХ, которые хорошо аппроксимируются при $\gamma = 1.5$. Исследование тонкопленочных планарных конденсаторов на основе твердого раствора $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ при $x = 0.25-0.75$ дает ВФХ, которые хорошо аппроксимируются при $\gamma = 1.2-1.5$. Подробное исследование нелинейных характеристик сегнетоэлектрических конденсаторов при различных значениях параметра γ будет дано позже. В настоящей работе остановимся на воздействии мощности СВЧ сигнала на свойства управляемого конденсатора, находящегося в составе отражательного фазовращателя [10].

Для экспериментального исследования работы СЭ конденсатора при относительно большой СВЧ мощности был разработан и изготовлен отражательный фазовращатель. На рис. 1, *b* приведена фотография отражательного фазовращателя, включенного в копланарную линию передачи. Основой фазовращателя служили два встречно-штыревых планарных конденсатора, которые показаны на рис. 1, *c*. Планарный конденсатор получен на основе пленки $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ толщиной $d = 0.6 \mu\text{m}$, выращенной на подложке из поликора. Зазор между электродами планарного конденсатора $s = 5 \mu\text{m}$.

Для измерения фазы и затухания отраженной волны в зависимости от управляющего напряжения при различной мощности СВЧ сигнала был разработан стенд, схема которого показана на рис. 2: 1 — генератор и усилитель мощности СВЧ сигнала; 2 и 6 — разветвители мощности, обеспечивающие отвлечение 1–2% мощности из основного канала в измерительную цепь; 3 — циркулятор, обеспечивающий разделение падающей и отраженной мощностей; 4 — исследуемый отражательный фазовращатель; 5 — опорный фазовращатель (тромбон) с механическим управлением; 7 — измеритель мощности; 8 — гибридное кольцо; 9 — индикатор (измеритель малой мощности); 10 — согласованная нагрузка; 11 — блок, формирующий управляющие напряжения (U_{dc} и $-U_{\text{dc}}$) на фазовращателе.

На рис. 3 приведена фотография измерительного стенда. Генератор и усилитель мощности обеспечивают подачу на исследуемый фазовращатель импульсного сигнала на частоте $f_0 = 4.2 \text{ GHz}$ при длительности импульса $\tau = 10 \mu\text{s}$ и скважности $Q = 100$. Мощность на выходе усилителя регулируется в пределах от 0.1 до 10 W. Основной поток мощности проходит по следующим элементам измерительного стенда: 1–2–3–4–5–6–7. Измеритель мощности 7 определяет импульсную мощность, при которой происходит испытание фазовращателя. Измерительная цепь 2–5–6–8–9 позволяет измерить фазу отраженной от фазовращателя волны при фиксированной фазе падающей волны.

На рис. 4 показана зависимость фазы отраженной волны от управляющего напряжения U_{dc} при различных значениях фиксированной мощности СВЧ сигнала. Максимальная мощность волны, падающей на отражательный фазовращатель, равна 6.2 W. В соответствии с формулой (4) при $Z_0 = 50 \Omega$ и $|\Gamma| \approx 1$ этой падающей мощности отвечает амплитуда СВЧ сигнала $U_{\text{ac}} \approx 50 \text{ V}$. Из приведенных кривых видно, что при $U_{\text{dc}} > U_{\text{ac}}$ фаза отраженной волны слабо зависит от мощности СВЧ сигнала. На рис. 5 приведен результат расчета зави-

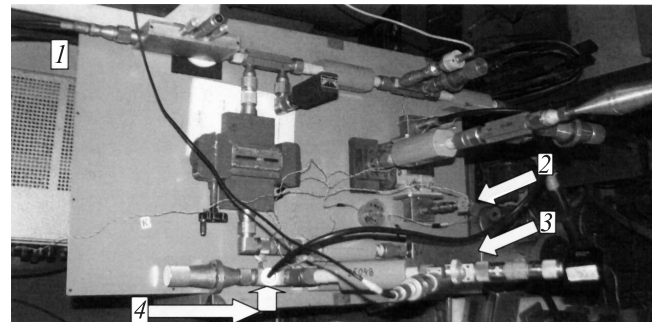


Рис. 3. Фотография измерительного стенда на ВУМ. 1 — вход, 2 — исследуемый фазовращатель, 3 — тромбонный фазовращатель, 4 — гибридное кольцо.

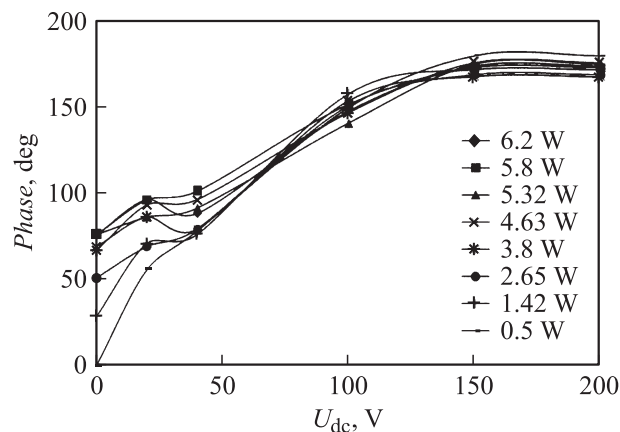


Рис. 4. Зависимости фазы отраженной волны от управляющего напряжения при различных значениях мощности СВЧ сигнала.

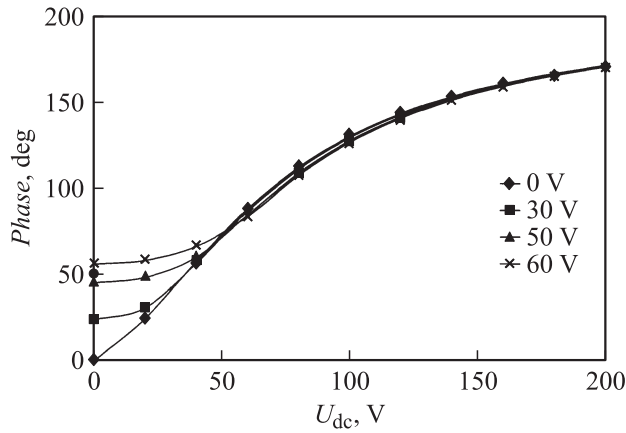


Рис. 5. Расчетные зависимости фазы отраженной волны от управляющего напряжения при различных значениях амплитуды СВЧ сигнала.

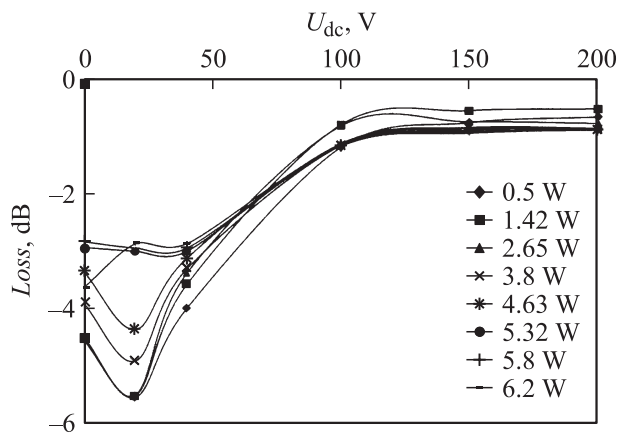


Рис. 6. Зависимости потерь отраженной волны от управляющего напряжения при различных значениях мощности СВЧ сигнала.

симости от управляющего напряжения фазы волны, прошедшей через отражательный фазовращатель, при фиксированной мощности СВЧ сигнала. Расчет выполнен для отражательного фазовращателя [10] при учете модели, описывающей зависимость емкости СЭ конденсатора от одновременно приложенного постоянного и переменного напряжений [11]. При расчете использована формула (1) при $\gamma = 1.2$.

Из приведенных кривых видно, что экспериментальные и расчетные данные достаточно хорошо совпадают. Заметим, что при $U_{dc} > U_{ac}$ потери в отражательном фазовращателе слабо зависят от мощности СВЧ сигнала.

На рис. 6 показана зависимость потерь волны, прошедшей через отражательный фазовращатель в функции от управляющего напряжения U_{dc} и мощности подающей СВЧ волны.

Упомянутая выше феноменологическая модель отклика СЭ элемента позволяет рассчитать фактор потерь ($\text{tg} \delta$) на заданной частоте СВЧ волны в зависимости от амплитуды СВЧ поля [9,13]. На рис. 7 сплош-

ные кривые показывают результат расчета для планарного конденсатора на основе пленки $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ при двух значениях коэффициента ξ_S , характеризующего усредненную напряженность встроенного электрического поля, созданного заряженными дефектами. Затем был произведен расчет фактора потерь, полученного в эксперименте. Для этого, используя графики рис. 6, были определены потери в dB в зависимости от мощности СВЧ сигнала при фиксированном значении управляющего напряжения $U_{dc} = 40 \text{ V}$. Знание величин потерь позволяет рассчитать величину $\text{tg} \delta$ управляемого конденсатора [10]. Величина мощности падающей волны соответствует СВЧ напряжению на управляемом конденсаторе (4). Полученные значения $\text{tg} \delta$ в зависимости от амплитуды СВЧ напряжения на конденсаторе приведены в виде точек на рис. 7, условно соединенных непрерывной линией. Полученный результат показывает удовлетворительное совпадение расчета [13] и эксперимента и позволяет определить значение коэффициента ξ_S . Можно дать оценку значениям этого параметра: $1.0 \leq \xi_S \leq 1.5$. Такая оценка совпадает с оценками значений параметра ξ_S , полученных на основе анализа зависимости диэлектрической проницаемости полученных пленок от температуры и напряженности постоянного смещающего поля [4–6].

Заметим, что убывание $\text{tg} \delta$ с ростом амплитуды СВЧ напряжения, полученное теоретически и подтвержденное настоящим экспериментом, справедливо только для достаточно тонких пленок. Л.Т. Тер-Мартirosяном было показано, что если толщина пленки превосходит половину длины акустической волны в материале пленки при рабочей частоте СВЧ волны, то в пленке возможно возбуждение акустических колебаний за счет наведенного пьезоэффекта [14] или за счет параметрического возбуждения акустических колебаний [2]. Скорость звука в $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ и аналогичных материалах пример-

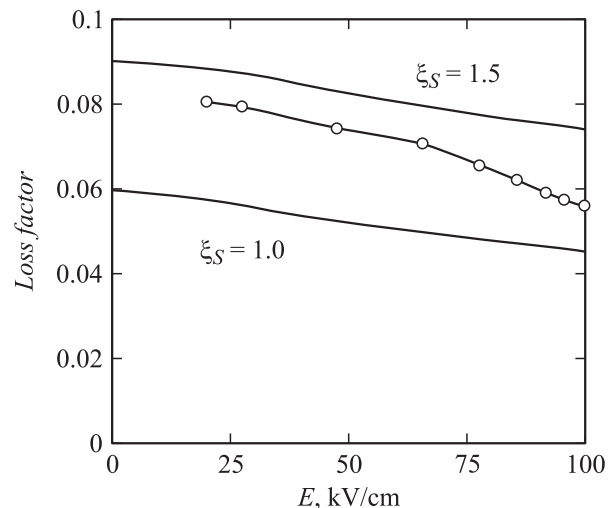


Рис. 7. Сопоставление экспериментальной и расчетной зависимостей тангенса диэлектрических потерь от напряженности СВЧ поля.

но 7500 м/с [14]. Длина волны звука на частоте 4 GHz составляет примерно 1.8 μm . Используемая в нашем эксперименте СЭ пленка имела толщину $d = 0.6 \mu\text{m}$, т.е. существенно меньше половины длины волны звука. Таким образом, в расчетах и экспериментальном исследовании исключены дополнительные потери СВЧ энергии за счет возбуждения акустических колебаний.

В настоящей работе приведен теоретический анализ отклика СЭ управляемого конденсатора в составе отражательного фазовращателя на управляющее напряжение при наличии падающей волны СВЧ сигнала достаточно большой мощности. Результаты анализа подтверждены экспериментом. Показано, что в случае использования симметрии ВФХ управляемого конденсатора [11] влияние достаточно интенсивного СВЧ сигнала на управляемый фазовый сдвиг отраженной волны подавляется при выполнении условия $U_{\text{dc}} \geq U_{\text{ac}}$, где U_{dc} — управляющее напряжение, U_{ac} — амплитуда СВЧ напряжения на конденсаторе. Так, при мощности СВЧ сигнала 6 W U_{ac} не превосходит 50 V. При изменении управляющего сигнала от 50 до 200 V разность фаз отраженной волны изменяется в пределах от 0° до $90^\circ \pm 15^\circ$ при условии, что мощность СВЧ сигнала изменяется в пределах от 0 до 6 W.

В [11] было показано, что мощность в цепях управления при 10^3 переключений в секунду составляет примерно 10^{-5} W. Эта мощность на несколько порядков меньше мощности в цепях управления ферритовых фазовращателей или фазовращателей на основе $p-i-n$ -диодов при сопоставимой мощности СВЧ сигнала. В этом заключается существенное преимущество СЭ фазовращателя в цепях ФАР.

Авторы благодарят П.В. Логачева за поддержку настоящей работы.

Список литературы

- [1] *Bethe K.* // Philips Res. Rep. Suppl. 1970. Vol. 2. N 1.
- [2] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Сов. Радио, 1979. 272 с.
- [3] *Tagantsev A.K., Sherman V.O., Astafiev K.F., Setter N.* // J. Electroceram. 2003. Vol. 11. P. 5.
- [4] *Vendik O.G., Zubko S.P.* // J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. P. 4475.
- [5] *Vendik O.G., Ter-Martirosyan L.T., Zubko S.P.* // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. P. 993.
- [6] *Vendik O.G., Zubko S.P.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 5343.
- [7] *Tagantsev A.K.* // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 1182.
- [8] *Vendik O.G., Ter-Martirosyan L.T.* // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87. P. 1435.
- [9] *Vendik O.G., Zubko S.P., Nikol'ski M.A.* // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. P. 7448.
- [10] *Вендик И.Б., Вендик О.Г., Парнес М.Д., Шифман Р.Г.* // Электромагнит. волны и электрон. системы. 2006. Т. 11. Вып. 12. С. 63.
- [11] *Вендик О.Г.* // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 7. С. 1441–1445.
- [12] *Антонова Л.М., Вендик О.Г., Дахнович А.А., Мироненко И.Г., Тер-Мартirosян Л.Т.* в кн. „Титанат бария“ / Под ред. Н.В. Белова. М.: Наука, 1973. 263 с.
- [13] *Зубко С.П., Васильев А.Н.* // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 8. С. 1457–1459.
- [14] *Вендик О.Г., Тер-Мартirosян Л.Т.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 93.