

01;12

Моделирование характеристик многослойного планарного конденсатора

© О.Г. Вендик, М.А. Никольский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 27 апреля 2000 г.)

Приведено модельное описание сегнетоэлектрического планарного конденсатора, содержащего тонкий слой подэлектродного линейного диэлектрика. Показано, что такая структура позволяет снизить СВЧ потери в планарном конденсаторе без значительного уменьшения его управляемости. В рамках описанной модели произведена оценка размеров области растекания заряда на электродах планарного конденсатора.

Введение

В настоящее время возник большой интерес к сегнетоэлектрическим материалам, обусловленный возможностью создания управляемых СВЧ устройств [1–4]. Основной применения сегнетоэлектриков в технике СВЧ стала планарная технология, а основными конструктивными элементами оказались планарный конденсатор, копланарная или щелевая линии передачи [5]. Особый интерес представляет собой планарный конденсатор, емкость которого может изменяться под действием внешнего электрического поля. Для использования вышеназванных элементов в технике необходима разработка математических моделей элементов, которые могут быть положены в основу систем автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ устройств, использующих сегнетоэлектрические материалы.

Как правило, планарный конденсатор состоит из трех слоев: диэлектрическая подложка, сегнетоэлектрический слой и планарные электроды (металлические или сверхпроводниковые). Емкость такого стандартного планарного конденсатора может быть рассчитана на основе проверенных методов конформных отображений и частичных емкостей [6–11]. В данной работе был рассмотрен планарный конденсатор, содержащий в отличие от стандартной планарной структуры дополнительный подэлектродный слой диэлектрика.

Следует отметить ряд преимуществ планарной структуры, содержащей дополнительный подэлектродный слой.

1. Наличие дополнительного подэлектродного слоя обеспечивает дополнительную защиту сегнетоэлектрической пленки от электрического пробоя.

2. Дополнительный подэлектродный слой отделяет сегнетоэлектрическую пленку от проводящих электродов. Это исключает инжекцию носителей заряда из электродов в сегнетоэлектрик и обеспечивает более однородное распределение электрического поля в сегнетоэлектрической пленке. Однородность распределения поля необходима, чтобы подавить дополнительные СВЧ потери, обусловленные электрострикционным преобразованием

СВЧ поля в акустические колебания при наличии неоднородного статического, электрического поля [12,13].

3. Дополнительный подэлектродный слой позволяет исключить из технологического процесса создания планарного конденсатора нежелательные процессы напыления проводящих электродов и их последующее травление, необходимое для вскрытия зазора конденсатора, непосредственно на поверхности сегнетоэлектрической пленки.

4. Дополнительный подэлектродный слой позволяет снизить уровень механических напряжений в сегнетоэлектрической пленке посредством использования дополнительного подэлектродного слоя линейного диэлектрика, аналогичного материалу подложки, и, как следствие этого, снижения СВЧ потерь многослойного планарного конденсатора.

Однако введение дополнительного подэлектродного слоя усложняет расчет емкости такого планарного конденсатора. Возникает необходимость использования громоздких, численных методов расчета, не применимых для САПР. Целью данной работы является получение аналитического выражения для расчета емкости планарной структуры, содержащей слой подэлектродного диэлектрика. В результате расчета будет также показано, что присутствие дополнительного подэлектродного слоя с относительно небольшой диэлектрической проницаемостью не может существенно уменьшить емкость планарного конденсатора.

Метод конформных отображений применительно к стандартному планарному конденсатору

Распределение электрического поля в планарных конденсаторах неоднородно. Для расчета емкости планарного конденсатора принято использовать метод конформных отображений, который позволяет преобразовать поле в планарной структуре в поле обычного плоского конденсатора.

Рассмотрим планарный конденсатор, представленный на рис. 1. Пусть $h_d = 0$, т.е. подэлектродный слой ди-

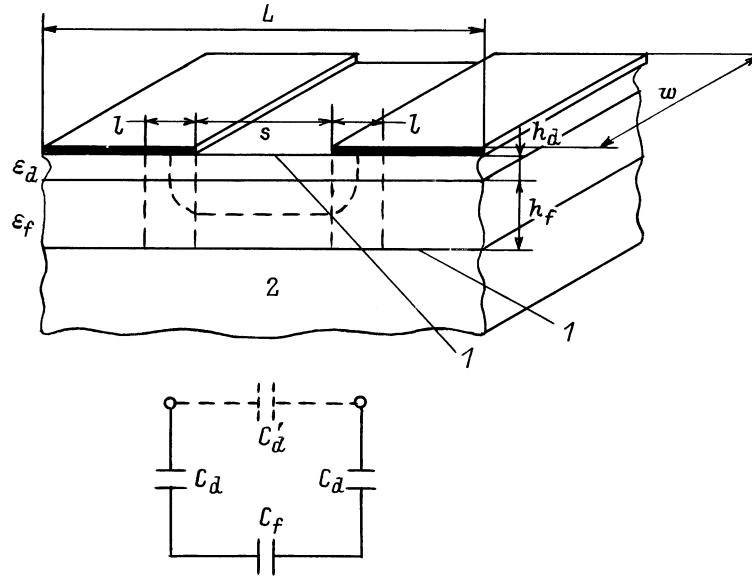


Рис. 1. Планарный конденсатор на основе сегнетоэлектрика, содержащий тонкий слой подэлектродного линейного диэлектрика, и его эквивалентная схема: 1 — магнитная стенка, 2 — подложка.

электрика отсутствует, а на границах сегнетоэлектрик–подложка и сегнетоэлектрик–воздух находятся ”магнитные стенки”. Емкость такого планарного конденсатора, состоящего только из сегнетоэлектрической пленки, на поверхности которой расположены электроды, может быть представлена следующим образом [8–11]:

$$C_f = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_f w}{s/h_f + (4/\pi) \ln 2}. \quad (1)$$

Модель с анизотропным диэлектрическим слоем

Вспользуемся формулой для емкости планарного конденсатора на анизотропном диэлектрическом слое [9,11]. Тогда с учетом вышепринятых обозначений получим

$$C_f = \varepsilon_0 \frac{w \varepsilon_s}{s/(h_f + h_d) + (4/\pi) \ln 2 \sqrt{\varepsilon_s/\varepsilon_h}}. \quad (2)$$

Рассмотрим рис. 1 (при $h_d = 0$). Обозначим эффективную диэлектрическую проницаемость пленки, образованной большим числом пар слоев h_d , ε_d , h_f , ε_f , по отношению к компонентам поля, параллельным границе раздела, через ε_s и через ε_h диэлектрическую проницаемость для компонент поля, направленных перпендикулярно границам раздела слоев. Причем

$$\varepsilon_d \ll \varepsilon_f, \quad h_d \ll h_f. \quad (3)$$

Тогда для поля вдоль пленки слои образуют параллельно соединенные конденсаторы

$$\begin{aligned} \varepsilon_s(h_d + h_f) &= \varepsilon_f h_f + \varepsilon_d h_d, \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_f \frac{h_f}{h_d + h_f} + \varepsilon_d \frac{h_d}{h_d + h_f}. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом неравенств (3) можем записать

$$\varepsilon_s = \varepsilon_f. \quad (5)$$

Для поля поперек пленки диэлектрические слои образуют последовательное соединение конденсаторов

$$\begin{aligned} \frac{h_f + h_d}{\varepsilon_h} &= \frac{h_d}{\varepsilon_d} + \frac{h_f}{\varepsilon_f}, \\ \frac{1}{\varepsilon_h} &= \frac{h_d}{h_d + h_f} \frac{1}{\varepsilon_d} + \frac{h_f}{h_d + h_f} \frac{1}{\varepsilon_f}. \end{aligned} \quad (6)$$

Из (4) и (5) получим

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_h} = 1 + \frac{h_f h_d}{(h_f + h_d)^2} \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_d} + \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_f} - 2 \right). \quad (7)$$

Используя неравенства (3), получим упрощенную формулу

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_h} = 1 + \frac{h_d \varepsilon_f}{h_f \varepsilon_d}. \quad (8)$$

Модельное описание многослойного планарного конденсатора

Обратимся снова к рис. 1. Будем считать, что на границах сегнетоэлектрик–подложка и воздух–диэлектрик находятся ”магнитные стенки”, т.е. нормальные компоненты электрического поля обращаются на этих границах в нуль. Таким образом, в дальнейшем будем рассматривать планарный конденсатор, образованный слоями подэлектродного диэлектрика и сегнетоэлектрика. Эквивалентная схема такого планарного конденсатора представляет собой последовательное соединение емкостей, определя-

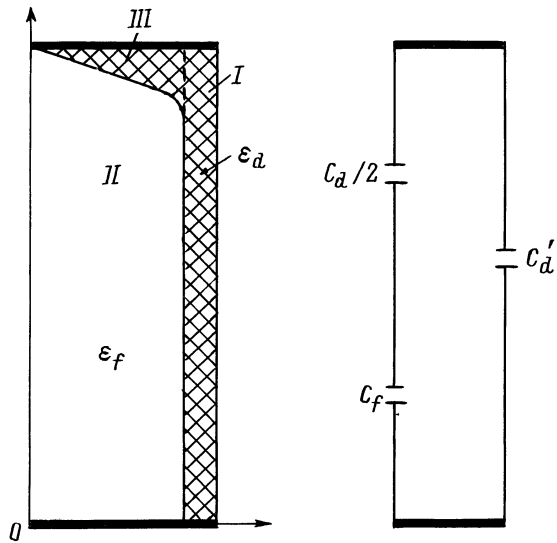


Рис. 2. Представление двухслойного планарного конденсатора в виде плоского конденсатора с использованием преобразования Кристоффеля–Шварца: область I образует емкость C'_d ; область II — C_f ; область III — $C_d/2$, которая на рис. 1 представлена как последовательное соединение емкостей C_d , расположенных между слоем сегнетоэлектрика и электродами.

емых присутствием слоя диэлектрика C_d (рис. 1), и емкости, определяемой присутствием слоя сегнетоэлектрика C_f (рис. 1). Вкладом емкости, образованной тонким диэлектрическим слоем между электродами

$$C_d \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_d w h_d}{s}$$

(рис. 1), можно пренебречь вследствие ее малого значения по сравнению с основной емкостью сегнетоэлектрического слоя (не более 2% от общей емкости конденсатора). Для иллюстрации соотношения между C_d , C_f , введенных на рис. 1, рассмотрим результат преобразования Кристоффеля–Шварца (рис. 2). Представленная на рис. 1 подложка — это всего лишь элемент конструкции.

Емкость двухслойного конденсатора при $\epsilon_d \ll \epsilon_f$ не может быть найдена с помощью метода частичных емкостей. Для определения его емкости можно использовать численный метод, развитый А. Деленевым [14]. Однако упомянутый расчет требует много машинного времени.

Используем полученные выше соотношения для вывода аппроксимационной функции для емкости двухслойного конденсатора. Подгоночный коэффициент в таком случае может быть найден путем сравнения с достоверным численным расчетом [14]. Подставляя (5) и (8) в (2), получим выражение для емкости ”сегнетоэлектрика-диэлектрика”

$$C_{fd} = \epsilon_0 \epsilon_f w \left(\frac{s}{h_f} + \frac{4}{\pi} \ln 2 \sqrt{1 + K \frac{\epsilon_f h_d}{\epsilon_d h_f}} \right)^{-1}, \quad (9)$$

где K — подгоночный коэффициент, учитывающий, что анизотропия пленки образована не большим числом пар слоев, а только одной парой.

Иначе говоря, поле заполняет не всю толщину слоя h_f , поэтому эффективная толщина слоя $h_{f\text{eff}} < h_f$ и коэффициент K должен быть в этом случае $K > 1$.

Определение подгоночного коэффициента K модели

Выразим из (9) коэффициент K

$$K(\epsilon_f, s, h_f, h_d) = \frac{h_f \epsilon_d}{h_d \epsilon_f} \times \left[\left(\frac{\epsilon_0 w \epsilon_f}{C(\epsilon_f)} - \frac{s}{h_f} \right)^2 \left(\frac{\pi}{4 \ln 2} \right)^2 - 1 \right]. \quad (10)$$

Таким образом, подгоночный коэффициент K модели — некоторая функция размеров планарного конденсатора и проницаемостей сегнетоэлектрического и подэлектродного диэлектрического слоев. В выражении (10) $C(\epsilon_f)$ — емкость слоев сегнетоэлектрика и подэлектродного диэлектрика планарного конденсатора, рассчитанная численным методом [14], как функция диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Примем обозначения

$$S = \frac{s}{h_f}, \quad H = \frac{h_d}{h_f}. \quad (11)$$

Аналитическое выражение, описывающее зависимость подгоночного коэффициента K как функции размеров планарного конденсатора и проницаемостей сегнетоэлектрического и подэлектродного диэлектрического слоев, может быть записано следующим образом:

$$K(S, H, \epsilon_f) = A(\epsilon_f) + B(\epsilon_f)S + C(\epsilon_f)H + D(\epsilon_f)SH. \quad (12)$$

Введем следующую форму записи для коэффициентов в (12):

$$A(\epsilon_f) = A_1 \frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} + A_2 + A_3 \frac{\epsilon_f}{\epsilon_d}. \quad (13)$$

Аналогично для $B(\epsilon_f)$, $C(\epsilon_f)$ и $D(\epsilon_f)$. Тогда

$$K(S, H, \epsilon_f) = (A_1 + B_1 S + C_1 H + D_1 SH) \frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} + A_2 + B_2 S + C_2 H + D_2 SH + (A_3 + B_3 S + C_3 H + D_3 SH) \frac{\epsilon_f}{\epsilon_d}. \quad (14)$$

Коэффициенты A_i , B_i , C_i , D_i (табл. 1) в выражении (14) были найдены путем обеспечения минимального

Таблица 1. Значения коэффициентов аналитического выражения (14)

i	A_i	B_i	C_i	D_i
1	-6.679	-2.193	0.024	0.143
2	6.64	2.216	-0.02	-0.144
3	0.039	-0.023	$-3.645 \cdot 10^{-3}$	$1.548 \cdot 10^{-3}$

отклонения значений подгоночного коэффициента K , полученных из выражения (10), от значений, даваемых выражением (14) для разных геометрий планарного конденсатора, а также разных значений диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. На рис. 3 представлены зависимости значений подгоночного коэффициента K , рассчитанных по формулам (10) и (14) для произвольной геометрии конденсатора. Полученное совпадение численных и аналитических значений коэффициента K является приемлемым. Более подробное исследование показывает, что переход от численного метода расче-

Таблица 2.

№ кривой на рис. 4	ϵ_d	$s, \mu\text{m}$	$h_d, \mu\text{m}$	$h_f, \mu\text{m}$
1	10	2	0.02	1.1
2	10	11	0.11	1.1
3	10	2	0.02	0.5
4	10	5	0.05	0.5
5	10	4	0.06	0.9
6	10	6	0.04	0.7

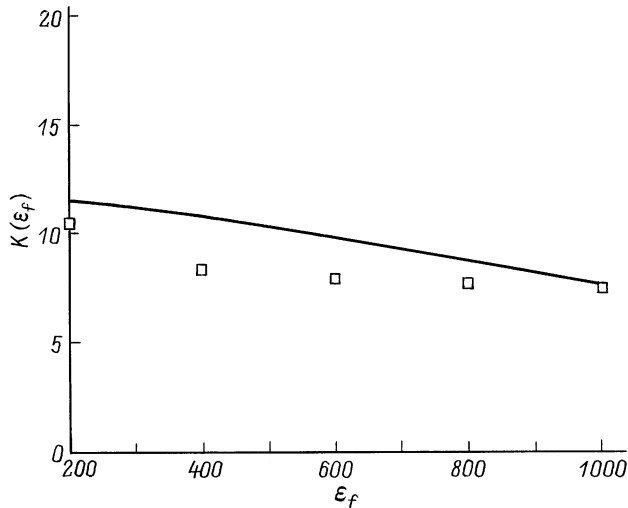


Рис. 3. Зависимости значений подгоночного коэффициента K от диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика, рассчитанные по формулам (10) (значки) и (14) (сплошная линия) для геометрии конденсатора: $s = 4 \mu\text{m}$, $h_d = 0.05 \mu\text{m}$, $h_f = 0.7 \mu\text{m}$, $w = 0.29 \text{mm}$, $L = 1150 \mu\text{m}$, $H_s = 500 \mu\text{m}$.

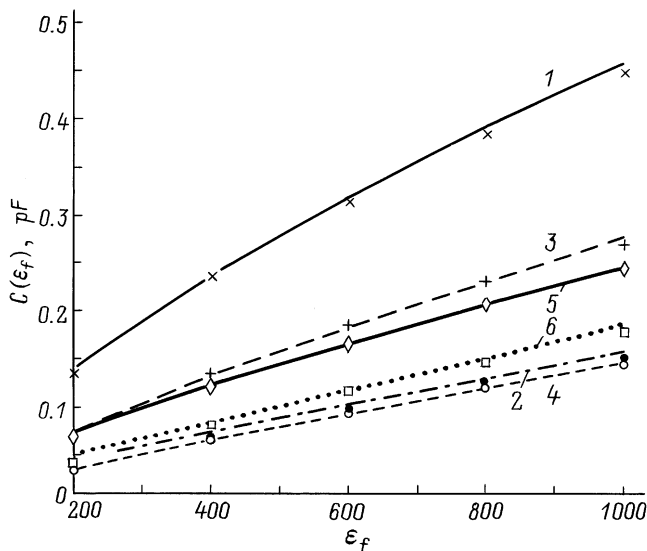


Рис. 4. Иллюстрация совпадения результатов моделирования по численному расчету (10) и по приведенной аналитической зависимости (14) от диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика для геометрий планарных конденсаторов, приведенных в табл. 2.

та к аналитическому выражению накладывает следующие ограничения на применение расчетных формул: $0 < H < 0.1$, $1 < S < 10$, $\epsilon_f/\epsilon_d < 100$.

На рис. 4 представлены зависимости емкости рассматриваемого двухслойного конденсатора от диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика для численного (значки) и аналитического (кривые) расчетов. Среднее квадратичное отклонение аналитического расчета от численного составило 2–4.5% для разных геометрий планарного конденсатора (табл. 2).

Эффективная емкость, образованная подэлектродным слоем диэлектрика. Определение размера области растекания заряда

Произведем некоторые оценки, которые могут быть полезны для интуитивного осмысления вклада различных компонентов рассматриваемого двухслойного планарного конденсатора в его емкость и управляемость. Положим, что C_f (рис. 1, эквивалентная схема) определяется формулой (1). Тогда из (9) можно получить отдельное выражение для емкости C_d (рис. 1, эквивалентная схема). Из геометрии (рис. 1) видно, что

$$C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d w l}{h_d}, \quad (15)$$

где l — размер области растекания заряда.

Исходя из эквивалентной схемы, представленной на рис. 1, получим

$$\frac{1}{C_{fd}} = \frac{1}{C_f} + \frac{2}{C_d}, \quad (16)$$

где C_{fd} определяется выражением (9), C_f — выражением (1).

Тогда C_d может быть найдено по формуле

$$C_d = \frac{\pi}{2 \ln 2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_f w}{\sqrt{1 + K(S, H, \epsilon_f) \frac{h_d \epsilon_d L}{h_f \epsilon_d} - 1}}. \quad (17)$$

Как видно из рис. 5, $C_d > C_f$ и растет с ростом диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика. Следовательно, присутствие дополнительного подэлектродного слоя линейного диэлектрика не может существенно уменьшить управляемость планарного конденса-

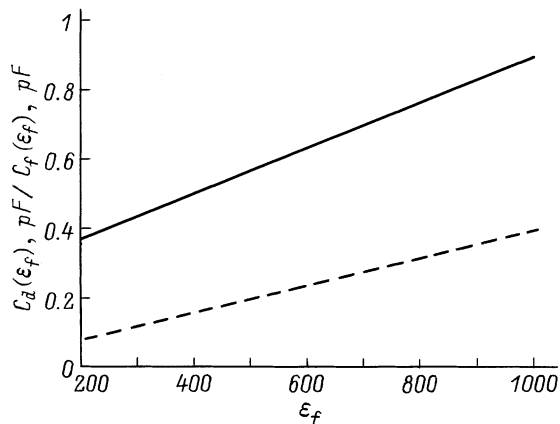


Рис. 5. Зависимости емкости подэлектродного диэлектрика C_d (17) и емкости сегнетоэлектрика C_f (1) от диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика для геометрии конденсатора: $s = 4 \mu\text{m}$, $h_d = 0.05 \mu\text{m}$, $h_f = 0.7 \mu\text{m}$, $w = 0.29 \text{mm}$, $L = 1150 \mu\text{m}$, $H_s = 500 \mu\text{m}$.

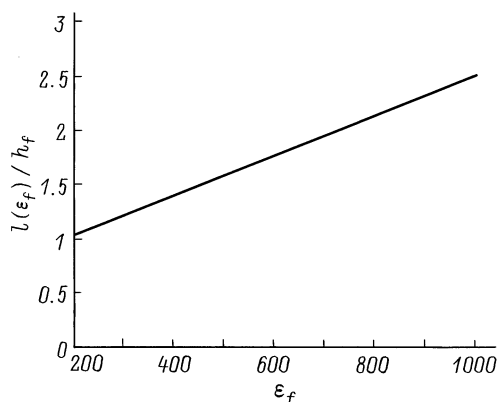


Рис. 6. Зависимость относительного увеличения размеров области растекания заряда l (рис. 1) на электродах конденсатора (18) от диэлектрической проницаемости слоя сегнетоэлектрика для геометрии конденсатора: $s = 4 \mu\text{m}$, $h_d = 0.05 \mu\text{m}$, $h_f = 0.7 \mu\text{m}$, $w = 0.29 \text{mm}$, $L = 1150 \mu\text{m}$, $H_s = 500 \mu\text{m}$.

тора. Отсюда размер области растекания заряда l может быть найден с учетом (15) и (17)

$$l(S, H, \epsilon_f) = h_f \frac{\frac{\pi}{2 \ln 2}}{\frac{\epsilon_d h_f}{\epsilon_f h_d} \left[\sqrt{1 + K(S, H, \epsilon_f) \frac{h_d \epsilon_f}{h_f \epsilon_d}} - 1 \right]}. \quad (18)$$

Из рис. 6 следует, что размер области растекания заряда l рассматриваемого двухслойного планарного конденсатора (рис. 1) может не только превышать величину толщины слоя сегнетоэлектрика, но также при некоторых условиях может быть сравним с зазором планарного конденсатора. Это накладывает определенные ограничения на длину конденсатора $L > s + 2l$.

Заключение

В результате данной работы были получены аналитические выражения для расчета емкости планарной структуры, содержащей слой подэлектродного диэлектрика, что может быть использовано для САПР двухслойного планарного конденсатора. Приведенный метод расчета позволяет не только оценить вклад емкости, образованной присутствием дополнительного подэлектродного слоя диэлектрика в составе планарного конденсатора, но также численно определить размеры области растекания заряда на электродах планарного конденсатора.

Список литературы

- [1] Vendik O.G., Ter-Martirosyan L.T., Dedyk A.I. et al. // Ferroelectrics. 1993. Vol. 144. N 1–4. P. 33–43.
- [2] Vendik O.G., Mironenko I.G., Ter-Martirosyan L.T. // Microwave & RF. 1994. Vol. 33. N 7. P. 67–70.
- [3] Gevorgian S.S., Kaparkov D.I., Vendik O.G. // Proc. IEE (London). 1994. Vol. 30. N 15. P. 1236–1237.
- [4] Findikoglu A.T., Jia Q.X., Campbell I.H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66. N 26. P. 3674–3677.
- [5] Сегнетоэлектрики в технике СВЧ / Под ред. О.Г. Вендика. М.: Сов. радио, 1979. 269 с.
- [6] Кочанов Э.С. // Радиотехника. 1967. Т. 22. № 7. С. 82–85.
- [7] Кочанов Э.С. // Радиотехника. 1975. Т. 30. № 1. С. 92–94.
- [8] Гунта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ устройств. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.
- [9] Лаврик В.И., Савельев В.Н. Справочник по конформным отображениям. Киев: Наукова думка, 1970. 252 с.
- [10] Hoffman K.R. // Handbook of Microwave Integrated Circuits. Artech House, 1987.
- [11] Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 1–7.
- [12] Вендик О.Г., Тер-Мартirosян Л.Т. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 8. С. 93–99.
- [13] Вендик О.Г., Рогачев А.Н. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 17. С. 62–68.
- [14] Деленив А.Н. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 8–14.