

УДК 621.372

К. т. н. Ю. В. ПРОКОПЕНКО

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: prok@phbme.kpi.ua

ПРЕДЕЛЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛОСКОСТЯМИ

Получены оценки управляемости характеристиками расположенной между металлическими плоскостями диэлектрической неоднородности как элемента микромеханически управляемых СВЧ-устройств. Показано, что при микроперемещениях металлической плоскости над диэлектриком эффективная диэлектрическая проницаемость неоднородности может изменяться от значения относительной проницаемости диэлектрика до единицы. Получены критерии необходимой малости толщины диэлектрика или частоты, при которых диэлектрический эффект не наблюдается. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электромеханически управляемых СВЧ-устройств с использованием пьезоэлектрических и электрострикционных актюаторов или микроэлектромеханических систем.

Ключевые слова: микромеханическое управление, эффективная диэлектрическая проницаемость, диэлектрическая неоднородность.

Основное достоинство перестраиваемых СВЧ-устройств с электромеханическим управлением состоит в низком уровне вносимых потерь и сохранении высокой добротности [1]. Вместе с тем такие устройства обладают высокой управляемостью. Так, резонансные частоты низшего типа колебаний диэлектрических резонаторов с поперечной неоднородностью перестраиваются на 25–30% [2]. Электромеханические фазовращатели на основе микрополосковой и копланарной линий передач обеспечивают изменение фазового сдвига на сотни градусов на отрезках, равных длине волны [3].

Электромеханически управляемые устройства, как правило, строятся на основе перемещения диэлектрических или металлических частей относительно диэлектрика. Проектирование таких устройств связано с оптимальным выбором материала и размеров диэлектриков с точки зрения обеспечения возможности требуемых перемещений и необходимых характеристик управления.

В данной работе исследуется простейший элемент управляемых устройств — одномерная диэлектрическая неоднородность, расположенная между идеальными металлическими плоскостями — с точки зрения повышения эффективности управления.

Дисперсионные характеристики диэлектрической неоднородности между металлическими плоскостями

Рассмотрим одномерную структуру, состоящую из диэлектрической неоднородности, расположенной между идеальными металлическими

плоскостями. Неоднородность состоит из двух диэлектриков со значениями относительной диэлектрической проницаемости ϵ_1 и ϵ_2 и толщиной h и d соответственно (рис. 1). В такой структуре диэлектрические свойства среды изменяются только в направлении Oy .

Электромагнитные колебания в рассматриваемой структуре раскладываются на колебания ЛМ- и ЛЕ-типов, являющиеся независимыми решениями уравнений Максвелла [4]. Поперечные волновые числа ЛМ-типов колебаний находят из условия непрерывности тангенциальных составляющих электромагнитного поля в плоскости $y=h$:

$$\frac{\beta_{y1}}{\epsilon_1} \operatorname{tg}(\beta_{y1}h) + \frac{\beta_{y2}}{\epsilon_2} \operatorname{tg}(\beta_{y2}d) = 0;$$

$$(\epsilon_1 - \epsilon_2)k^2 = \beta_{y1}^2 - \beta_{y2}^2, \quad (1)$$

где β_{y1}, β_{y2} — поперечные волновые числа в области 1 ($0 \leq y \leq h$) и в области 2 ($h \leq y \leq h+d$);

$k = \omega/c$ — постоянная распространения в свободном пространстве;

ω — круговая частота;

c — скорость света в вакууме.

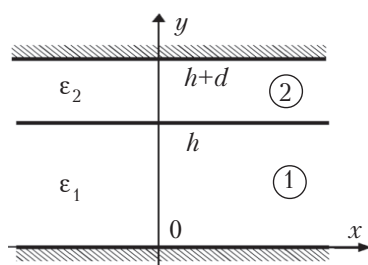


Рис. 1. Одномерная структура с диэлектрической неоднородностью

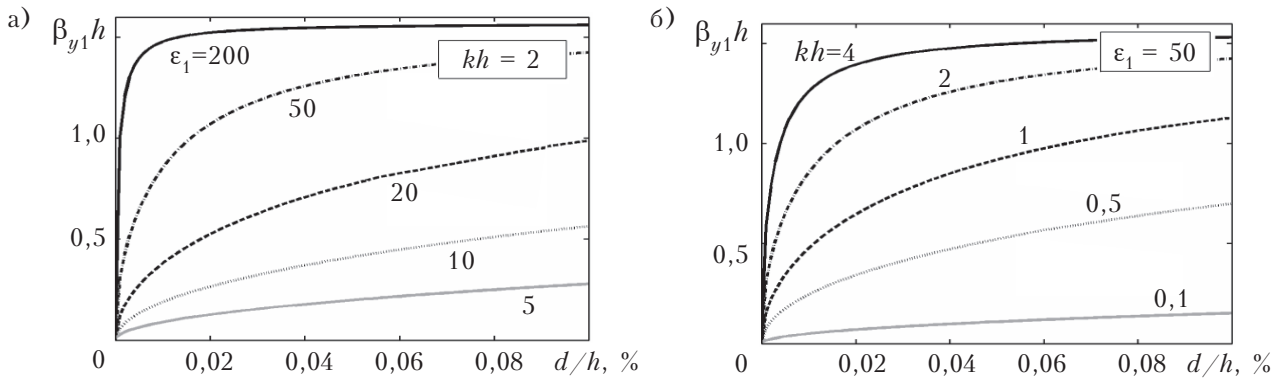


Рис. 2. Графики зависимости нормированного поперечного волнового числа в области 1 для низших ЛМ-колебаний от нормированной толщины воздушного зазора ($\epsilon_2=1$) при различных ϵ_1 (а) и kh (б)

Решения дисперсионных уравнений (1) зависят только от частоты, диэлектрической проницаемости и размеров областей 1 и 2 на рис. 1. Нормированные первые корни этих уравнений при различных значениях относительной диэлектрической проницаемости области 1 и различных нормированных постоянных распространения в свободном пространстве kh показаны на **рис. 2**.

Как видно из рис. 2, в случае когда область 2 является воздушной ($\epsilon_2=1$), на поперечное волновое число для ЛМ-колебаний сильно влияет расстояние d от диэлектрика с проницаемостью ϵ_1 до металлической плоскости. Изменение этого расстояния всего на несколько сотых долей процента от толщины диэлектрика h приводит к существенному изменению поперечного волнового числа. Количественно эти изменения увеличиваются с ростом диэлектрической проницаемости области 1 и частоты.

Как видно из **рис. 3**, колебания ЛЕ-типа свойственны значительно меньшие количественные изменения поперечного волнового числа, чем для ЛМ-типа, и требуемые изменения размеров области 2 для достижения этих изменений соиз-

меримы с размером диэлектрика в области 1. Следовательно, микромеханически перестраиваемые устройства не могут быть построены на основе ЛЕ-колебаний.

В отличие от ЛЕ-колебаний, в ЛМ-колебаниях имеется компонента E_y электрического поля, перпендикулярная плоскости диэлектрической неоднородности. Следовательно, для эффективной перестройки электродинамических свойств диэлектрических структур воздушная неоднородность должна быть расположена перпендикулярно электрическому полю. Аналогично можно показать, что для магнитных материалов эффективная перестройка возможна при наличии компоненты магнитного поля, перпендикулярной воздушной неоднородности.

Поскольку ЛЕ-типы колебаний обладают низкой управляемостью и не могут быть использованы для микромеханического управления, в дальнейшем будем рассматривать только низшие ЛМ-колебания, являющиеся основным типом колебаний и имеющие наиболее высокую чувствительность к изменению воздушного зазора между металлом и диэлектриком, а также наименьшую критическую частоту.

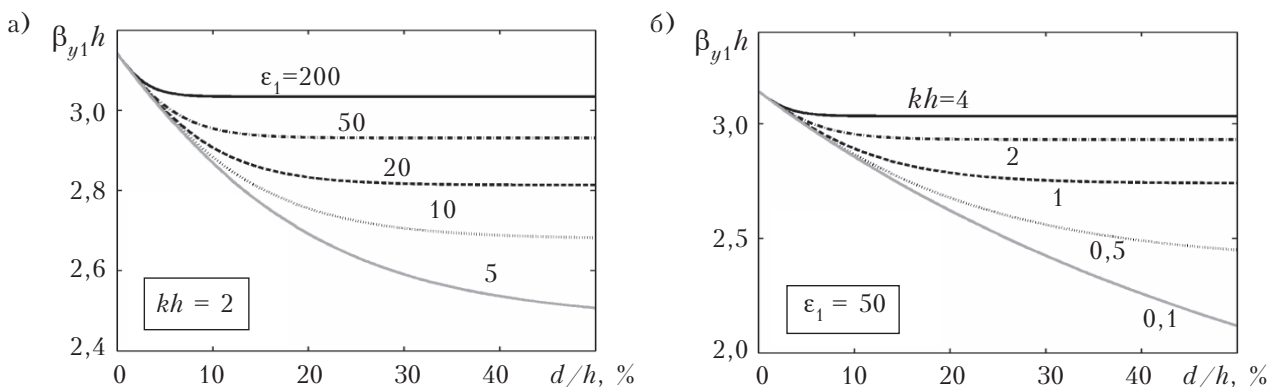


Рис. 3. Графики зависимости нормированного поперечного волнового числа в области 1 для низших ЛЕ-колебаний от нормированной толщины воздушного зазора ($\epsilon_2=1$) при различных ϵ_1 (а) и kh (б)

Эффективная диэлектрическая проницаемость

Основной управляемой характеристикой рассматриваемой одномерной диэлектрической неоднородности является длина волны. Для оценки количественного изменения длины волны удобно сравнивать ее изменение в рассматриваемой и в однородной структурах.

Под эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} рассматриваемой неоднородной структуры будем понимать такую диэлектрическую проницаемость однородного диэлектрика, расположенного между двумя параллельными металлическими плоскостями, находящимися на расстоянии $h+d$ друг от друга, при которой длина волны в однородной структуре будет равна длине волны в неоднородной структуре, приведенной на рис. 1. Эффективная диэлектрическая проницаемость зависит от типа колебаний.

Поскольку для ЛМ-колебаний в случае однородного диэлектрика поперечное волновое число равно нулю, то, в соответствии с введенным определением эффективной диэлектрической проницаемости, имеем

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_1 - \frac{\beta_{y1}^2}{k^2}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что характер зависимости эффективной диэлектрической проницаемости от величины воздушного зазора d определяется поведением функции $\beta_{y1}(d)$.

Рассмотрим предельный диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости. Из (2) следует, что относительное изменение эффективной диэлектрической проницаемости может быть выражено через отношение нормированных волновых чисел:

$$\delta\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{eff}}{\epsilon_1} = \frac{(\beta_{y1}h)^2}{\epsilon_1(kh)^2}. \quad (3)$$

Поскольку максимальное значение нормированного поперечного волнового числа $\beta_{y1}h$ равно $\pi/2$, при больших значениях kh максималь-

ное относительное изменение ϵ_{eff} может быть оценено как $\delta\epsilon_{eff\max} < \pi^2 / (4\epsilon_1(kh)^2)$. Мера больших и малых kh будет оценена ниже.

Из (3) следует, что относительное изменение эффективной диэлектрической проницаемости растет с уменьшением нормированной постоянной распространения в свободном пространстве. Максимальный диапазон изменения ϵ_{eff} достигается при $kh \rightarrow 0$. При этом условии, как видно из (1), $\beta_{y1}h$ также стремится к нулю. Это позволяет, используя эквивалентность бесконечно малых величин, решить уравнения аналитически. В итоге получим

$$\lim_{kh \rightarrow 0} (\beta_{y1}h) = \sqrt{\frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{d}{h}}{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + \frac{d}{h}}} \cdot kh. \quad (4)$$

Следовательно,

$$\lim_{kh \rightarrow 0} \delta\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 \frac{d}{d} + \epsilon_1}, \quad (5)$$

откуда видно, что при $kh \rightarrow 0$ эффективная диэлектрическая проницаемость с ростом d изменяется от ϵ_1 до ϵ_2 .

Графически зависимость (5) показана на рис. 4, а и демонстрирует максимально возможное относительное изменение ϵ_{eff} одномерной диэлектрической неоднородности при изменении воздушного зазора между диэлектриком и металлической плоскостью. Приведенные зависимости являются верхними асимптотами для других значений нормированной постоянной распространения kh , т. е. при $kh \neq 0$ аналогичные зависимости лежат ниже тех, которые здесь представлены. Как видно из рисунка, управление эффективной диэлектрической проницаемостью за счет изменения расстояния между металлической плоскостью и диэлектриком становится более эффективным с увеличением диэлектрической проницаемости области 1.

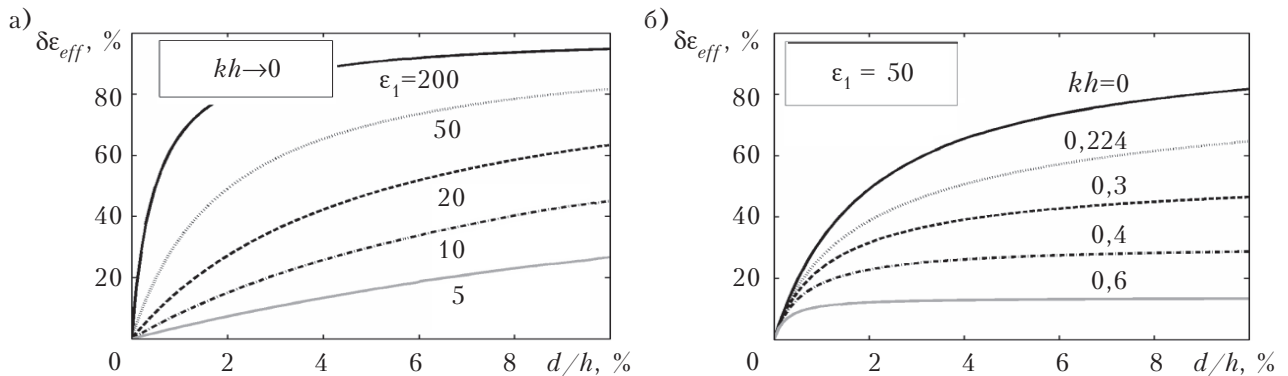


Рис. 4. Зависимость относительного изменения ϵ_{eff} от нормированной толщины воздушного зазора ($\epsilon_2 = 1$) для различных ϵ_1 (а) и различных kh (б)

Поскольку диапазон изменения ϵ_{eff} от ϵ_1 до ϵ_2 является предельным, а максимальное значение $\beta_{y1}h$ равно $\pi/2$, из (3) следует, что для достижения наилучшего управления эффективной диэлектрической проницаемостью должно выполняться условие

$$kh < \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}}. \quad (6)$$

Невыполнение этого условия приводит к тому, что значение ϵ_{eff} будет ограничено величиной $[\epsilon_1 - \pi^2/(4(kh)^2)] > \epsilon_2$. К такому же заключению можно прийти и из анализа формулы (4) при $d/h \rightarrow \infty$. Аналогичный вывод можно получить и из анализа решений уравнений (1) в более общих случаях.

Влияние нормированной постоянной распространения в свободном пространстве на предельный диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости проиллюстрировано на рис. 4, б.

Для $\epsilon_1 = 50$ условие (6) приводит к требованию $kh < \pi/14$, т. е. $kh < 0,224$. Как видно из рисунка, при невыполнении этого требования предельный диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости существенно уменьшается и уже при $kh = 0,6$ составляет только около 10%, причем при $d/h > 0,02$ ее значение практически не зависит от расстояния от диэлектрика до металлической плоскости. Аналогичный эффект в слоистых волноводах, где фазовая скорость волны слабо зависит от размера диэлектрического включения, назван диэлектрическим эффектом или эффектом диэлектрического волновода [4].

Как видно из рис. 4, б, тенденция изменения эффективной диэлектрической проницаемости в зависимости от нормированного волнового числа противоположна тенденции изменения поперечного волнового числа (рис. 2, б). Если скорость изменения последнего увеличивается с ростом нормированной постоянной распространения в свободном пространстве, то скорость изменения ϵ_{eff} (а именно этот параметр характеризует управляемость системы) при том же условии уменьшается. Это связано с тем, что изменение ϵ_{eff} определяется не столько самим нормированным поперечным волновым числом $\beta_{y1}h$, сколько его отношением к kh .

Условие (6) можно рассматривать как критерий малости нормированной постоянной распространения в свободном пространстве kh . Если это условие выполняется, то нормированное волновое число следует считать малым, в противном случае — большим.

Таким образом, для увеличения эффективности управления длиной волны низшего типа колебаний, распространяющейся в одномерной

диэлектрической неоднородности, должна быть обеспечена необходимая малость нормированной постоянной распространения в свободном пространстве. Поскольку обычно частота выбирается из условия отсечки и не может варьироваться в широких пределах, для обеспечения необходимой малости нормированного волнового числа $\beta_{y1}h$ необходимо уменьшать толщину диэлектрика. Из (6) следует, что толщину необходимо выбрать такой, чтобы она удовлетворяла условию

$$h < \frac{\pi}{2k\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}}. \quad (7)$$

При толщине диэлектрика, не удовлетворяющей условию (7), диапазон изменения эффективной диэлектрической проницаемости ограничивается величиной $(\pi/(2kh))^2$. Кроме того, требуемые для управления эффективной диэлектрической проницаемостью абсолютные перемещения металлической плоскости будут возрастать.

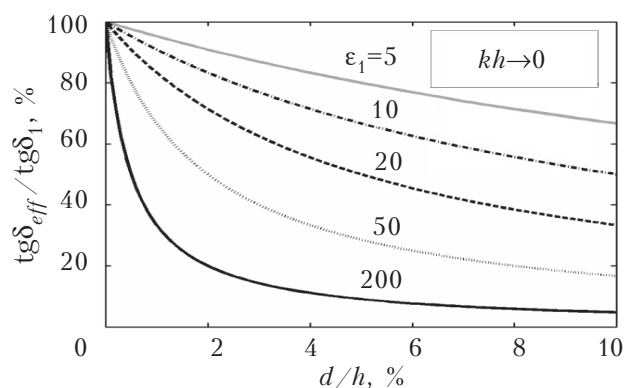


Рис. 5. Зависимость нормированного $\text{tg}\delta_{eff}$ одномерной диэлектрической неоднородности от нормированной толщины воздушного зазора ($\epsilon_2 = 1$)

Если диэлектрик в области 1 имеет потери, характеризуемые тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_1$, то эффективная диэлектрическая проницаемость будет комплексной величиной: $\epsilon_{eff} = \epsilon_{eff} (1 - j \text{tg}\delta_{eff})$, где $\text{tg}\delta_{eff}$ — эффективный тангенс угла диэлектрических потерь, характеризующий диссипативные потери системы. Величина $\text{tg}\delta_{eff}$ зависит от значений относительной диэлектрической проницаемости областей, соотношения их размеров и частоты.

На рис. 5 показаны зависимости нормированного тангенса угла диэлектрических потерь неоднородности «диэлектрик — воздух» от нормированной толщины воздушного зазора при $kh \rightarrow 0$. Эти зависимости являются нижними асимптотами аналогичных зависимостей при $kh \neq 0$. Как следует из рисунка, уменьшение толщины диэлектрика h не только повышает эффективность управления, но и приводит к уменьшению диэлектрических потерь.

Заключение

Таким образом, для эффективного управления характеристиками диэлектрической неоднородности за счет изменения расстояния от металлической плоскости до диэлектрика необходимо использовать ЛМ-колебания, особенностью которых является наличие составляющей электрического поля, перпендикулярной к границе раздела «диэлектрик — воздух». Изменение размеров воздушной неоднородности приводит к сильному возмущению электромагнитного поля и, в результате, к изменению дисперсионных характеристик. Требуемые перемещения для создания перестраиваемых устройств составляют единицы процентов от толщины диэлектрика и доступны для современных пьезоэлектрических, электрострикционных актюаторов, а также микроэлектромеханических систем.

Пределы изменения эффективной диэлектрической проницаемости растут с уменьшением произведения рабочей частоты на толщину диэлектрика. При малых значениях этого произведения эффективная диэлектрическая проницаемость может изменяться от относительной проницаемости материала диэлектрика до единицы за счет микроперемещений металлической плоскости над диэлектриком. Столь высокая управляемость не может быть достигнута другими способами, включая использование нелинейности сегнетоэлектриков.

Установленный критерий максимальной толщины диэлектрика, при котором наблюдается диэлектрический эффект, вместе с условиями согласования цепи за счет уменьшения характеристического сопротивления в структуре с тонкослойным диэлектриком позволяет найти компромисс между эффективностью управления и размерами устройств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Поплавко Ю. М., Молчанов В. И., Пашков В. М. и др. Перестраиваемые СВЧ-устройства с электромеханическим управлением // Техника и приборы СВЧ. — 2009. — Вып. 1. — С. 49—59. [Poplavko Yu. M., Molchanov V. I., Pashkov V. M. i dr. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. Iss. 1. P. 49]

2. Poplavko Yu. M., Prokopenko Yu. V., Molchanov V. I., Dogan A. Frequency-tunable microwave dielectric resonator // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — 2001. — Vol. 48, N 6. — P. 1020—1027.

3. Голубева И. П., Поплавко Ю. М., Прокопенко Ю. В. МЭМС-фазовращатели на микрополосковой и компланарной линии с пьезоуправлением // Электроника и связь. — 2006. — Ч. 2. — С. 17—20. [Golubeva I. P., Poplavko Yu. M., Prokopenko Yu. V. // Elektronika i svyaz'. 2006. Part 2. S. 17]

4. Егоров Ю. В. Частично заполненные прямоугольные волноводы. — Москва: Сов. радио, 1967. [Egorov Yu. V. Chastichno zapolnennye pryamougol'nye volnovody. Moskva: Sov. radio, 1967]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 28.02 2012 г.*

Prokopenko Yu. V. Controllability range of dielectric inhomogeneity located between the metal planes.

Keywords: micromechanical control, effective dielectric constant, dielectric inhomogeneity.

Controllability assessment of the characteristics of dielectric inhomogeneity, located between the metal planes, as part of micromechanically controlled microwave devices has been obtained. It is shown that with the micromovements of the metal plane over the dielectric, the effective dielectric constant of heterogeneity varies from the relative permeability value to one. The authors obtained smallness criteria of the thickness of dielectric or the frequency, at which the dielectric effect is not observed. The results can be used in design of electro-mechanically controlled microwave devices using piezoelectric and electrostrictive actuators and microelectromechanical system.

Ukraine, NTUU «Kyiv Polytechnic Institute».

Прокопенко Ю. В. Межі керованості діелектричної неоднорідності, розташованої між металевими площинами.

Ключові слова: мікромеханічне управління, ефективна діелектрична проникність, діелектрична неоднорідність.

Отримано оцінки керованості характеристиками розташованої між металевими площинами діелектричної неоднорідності як елемента мікромеханічних керованих НВЧ-пристроїв. Показано, що при мікропереміщеннях металевої площини над діелектриком ефективна діелектрична проникність неоднорідності може змінюватися від значення відносної проникності діелектрика до одиниці. Отримано критерії малості товщини діелектрика або частоти, при яких діелектричний ефект не спостерігається. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні електро-механічних керованих НВЧ-пристроїв з використанням п'єзоелектричних і електрострикційних актюаторів або мікроелектромеханічних систем.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».