

УДК 537.87

**СУММАТОР СВЧ ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПЛОСКО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ
АНИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ****К.А. Вытовтов¹, О.А. Сидоренко²***Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара,**Кафедра электронных средств телекоммуникаций**Пр. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49000, Украина**e-mail: ¹vytovtov_konstan@mail.ru, ²sidol@i.ua*

Поступила в редакцию 8 ноября 2010 г.

Рассмотрена задача применения однослойной плоскопараллельной анизотропной структуры с произвольным направлением оси анизотропии для сумматоров сигналов СВЧ диапазона. Рассматривается тангенциальное падение плоской волны. Получена зависимость коэффициента отражения от угла наклона оси анизотропии и угла между плоскостью падения волны и плоскостью, включающей ось анизотропии. Невзаимные свойства структуры основаны не на эффекте Фарадея, а на зависимости коэффициента отражения от направления распространения волны.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анизотропная структура, сумматор сигналов, эффект втягивания, коэффициент отражения.

Розглянута задача використання одношарової плоскопаралельної анізотропної структури з довільним напрямом осі анізотропії в суматорі сигналів. Розглядається тангенціальне падіння плоскої хвилі. Отримана залежність коефіцієнта відбиття від кута нахилу осі анізотропії та кута між площиною падіння хвилі та площиною, яка включає вісь анізотропії. Невзаємні властивості структури ґрунтуються не на ефекті Фарадея, а на залежності коефіцієнта відбиття від напряму поширення хвилі.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анізотропна структура, суматор сигналів, ефект втягування, коефіцієнт відбиття.

The problem of possibility of using a homogeneous plan-parallel anisotropic slab with an arbitrary orientation of anisotropic axis in the coupler of signals is considered. The tangential incidence of plane wave is studied. The dependence of reflection coefficient on an inclination angle and an angle between incidence plane and a plane containing the anisotropy axis is obtained. The nonreciprocal properties of a structure are based on the dependence of the reflection coefficient on a direction.

KEY WORDS: anisotropic structure, coupler of signals, penetration effect, reflection coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Различные анизотропные структуры являются важной частью как современной техники СВЧ, так и оптоэлектроники [1-5]. В настоящее время они широко исследуются как с теоретической, так и практической точки зрения.

Большое внимание в литературе уделяется изучению задачи отражения и прохождения волны (например [6]) и, в частности, явления полного отражения от анизотропной среды при любых углах падения волны. Так называемый эффект втягивания, при котором волна, распространяющаяся в диэлектрике параллельно границе с плоскопараллельной анизотропной средой, возбуждает в ней объемную волну, описан в работах [7,8]. Это явление означает, что коэффициент прохождения волны через пластину в рассматриваемом случае не равен нулю.

В данной статье рассматривается однородная плоскопараллельная анизотропная пластина с произвольным направлением оси анизотропии при тангенциальном распространении волны над ее поверхностью. Проведено исследование зависимости коэффициента отражения от угла наклона оси анизотропии и угла между плоскостью падения волны и плоскостью, включающей ось анизотропии. На основе результатов теоретического исследования рассмотрена возможность практического применения изучаемых эффектов. В частности, предложена модель сумматора сигналов на основе изученных структур.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принцип работы предлагаемого устройства основан на эффекте втягивания, подробно описанном в [7]. Этот эффект означает неравенство коэффициента отражения единице при тангенциальном распространении волны ($\alpha_{\text{пад}} = 90^\circ$) над структурой [7]. Кроме того, предлагаемое устройство является невзаимным. При этом важно, что его невзаимные свойства основаны не на эффекте Фарадея, а на зависимости коэффициентов прохождения и отражения от угла между осью анизотропии и направлением распространения волны (Рис.1). Зависимость коэффициента отражения от направления определяется

зависимостью волновых чисел и компонент полей от угла между волновым вектором и осью анизотропии [5]. Более того для выполнения граничных условий для тангенциальных компонент полей важно, чтобы электромагнитное поле падающей волны имело как нормальные, так и тангенциальные составляющие поля. Другими словами в данном случае волна не должна быть ни ТЕ- ни ТМ-типа [8].

Представляемый сумматор включает в себя две анизотропные однородные пластины с произвольным направлением оси анизотропии (рис. 2). Магнитная проницаемость материала пластин описывается тензором в гиротропной форме

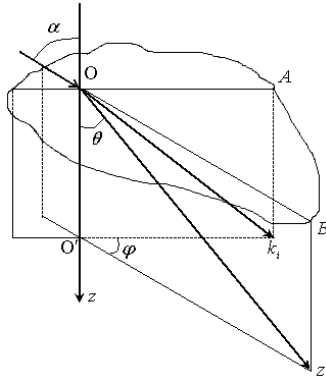


Рис. 1. Геометрия задачи

$$\underline{\underline{\mu}} = \begin{vmatrix} \mu_{xx} & j\mu_{xy} & 0 \\ -j\mu_{xy} & \mu_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

а диэлектрическая проницаемость является скалярной величиной. Геометрия задачи представлена на Рис.1: AOB – граница раздела, z' – ось анизотропии, z – нормаль к границе раздела, AOO' – плоскость падения, угол θ – угол между нормалью и осью анизотропии, угол φ – угол между плоскостью падения волны и плоскостью, которая включает ось анизотропии. Тензор (1) записан в системе координат, связанной с осью анизотропии z' . В результате его преобразования в систему координат, связанную с нормалью и границей раздела сред, получим

$$\underline{\underline{\mu}} = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu_{xx} & j\mu_{xy} \cos\theta & -j\mu_{xy} \sin\theta \\ -j\mu_{xy} \cos\theta & \mu_{zz} \sin^2\theta + \mu_{xx} \cos^2\theta & (\mu_{zz} - \mu_{xx}) \cos\theta \sin\theta \\ j\mu_{xy} \sin\theta & (\mu_{zz} - \mu_{xx}) \cos\theta \sin\theta & \mu_{xx} \sin^2\theta + \mu_{zz} \cos^2\theta \end{vmatrix} \quad (2)$$

Таким образом, нами рассматривается среда со всеми девятью ненулевыми элементами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе рассматривается сумматор (рис.2) на основе анизотропного материала с параметрами $\mu_{xx} = 2$, $\mu_{xy} = 1,7$, $\mu_{zz} = 0,99$, $\varepsilon = 5$. Волны из сред 1 и 3 проходят через эти пластины и суммируются в среде 2 в положительном направлении оси y .

Прежде всего, рассмотрим четыре, важных с точки зрения практического применения, направления распространения волны (рис.3). Полезный сигнал распространяется тангенциально вдоль структуры и благодаря эффекту втягивания [7] проходит из среды 1 в среду 2 (направление 1, рис.3). Отраженные волны с направлений 2 и 4 искажают полезный сигнал, поэтому для этих направлений коэффициенты отражения должны быть равными единице. Для направления 3 коэффициент отражения должен быть минимальным для исключения попадания отраженной в среде 1 волны обратно в источник излучения.

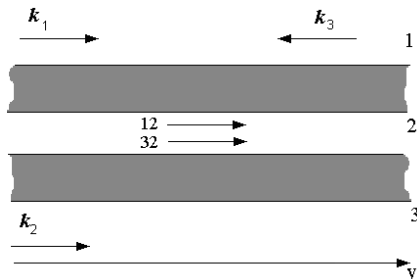


Рис. 2. Распространение волны вдоль структуры

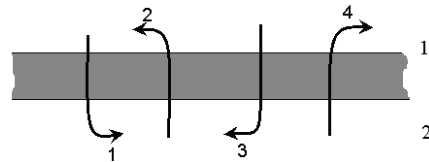


Рис. 3. Направления прохождения волн через структуру

Очевидно, что различные коэффициенты отражения для разных направлений существенным образом определяются свойствами волновых чисел. В рассматриваемом случае их нормальные компоненты в однородном анизотропном слое при тангенциальном падении волны не равны нулю, а являются решением дисперсионного уравнения [7]

$$c_4 k_z^4 + c_3 k_z^3 + c_2 k_z^2 + c_1 k_z + c_0 = 0 \quad (1)$$

Коэффициенты этого уравнения – функции частоты, материальных параметров среды, а также углов θ и φ (рис.1). При этом k_z могут быть как действительными, так и комплексными. Если k_z действительные, то волна является незатухающей в анизотропной среде и распространяется под углом к нормали. Если они комплексные, то волна является затухающей в направлении оси z , а значит прохождение возможно только при малых толщинах слоев и с учетом явления многократного отражения. При комплексных k_z и достаточно больших толщинах слоев наблюдается эффект полного внутреннего отражения при любых углах падения [9].

Важным является выбор таких параметров структуры, при которых искажение полезного сигнала в заданной полосе частот было бы минимальным. Рассмотрим зависимость коэффициента отражения от углов θ и φ (рис.4). Результаты расчетов показывают, что минимумы коэффициента отражения наблюдаются при различных комбинациях данных углов, а зависимость коэффициента отражения от угла падения может быть практически любой [7,8].

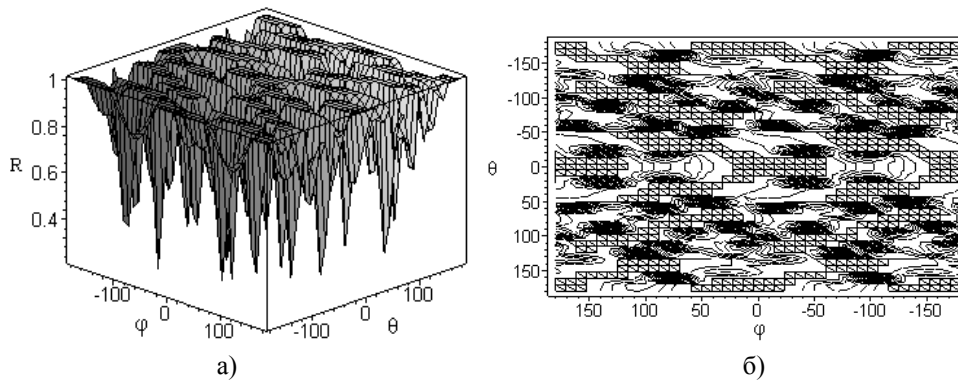


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от углов θ и φ

Кроме того, очевидно, что структура обладает невзаимными свойствами. Нагляднее этот результат представлен на рис.5. Здесь видно, что значения коэффициента отражения для всех четырех направлений (рис.3) различны.

Важным является и подтверждение того факта, что эффект втягивания обусловлен не явлением многократного отражения в слоистых структурах [7,8], а свойствами волновых чисел.

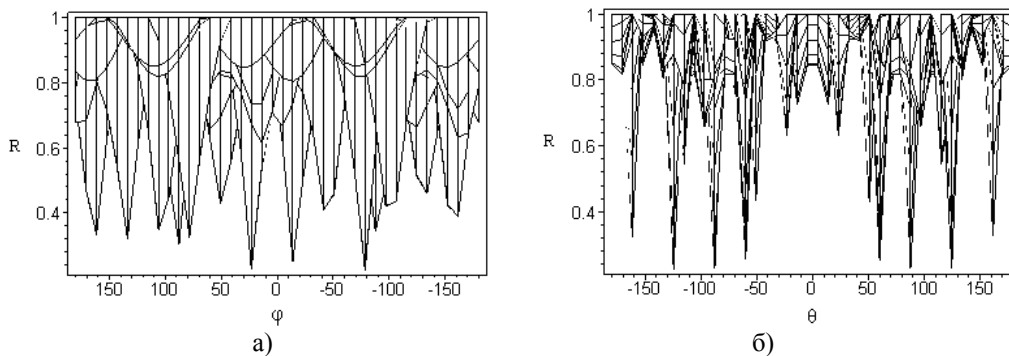


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от углов θ и φ

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента отражения от частоты в диапазоне 4 – 8 ГГц. Как видно, на частоте 5,55 ГГц (рис. 6) коэффициент отражения является минимальным и равен 0.35, полоса пропускания по уровню 0.6 равна 0.98 ГГц, а по уровню половинной мощности 1.7 ГГц. Отметим, что в остальных направлениях (рис. 3) коэффициент отражения равен единице.

Введение даже незначительных потерь ($\mu_{xx} = 2+j0.15$, $\mu_{xy} = 1.7+j0.1$, $\varepsilon = 5+j0.2$) приводит к усилению зависимости коэффициента отражения от углов, то есть к усилению избирательных свойств по углам. Однако при этом уменьшаются минимумы коэффициентов отражения. На рис. 7 приведена зависимость коэффициента отражения от частоты для среды с потерями при $\varphi=-80$, $\theta=88$, $d=20$ мкм. Из рисунка видно, что частота 5,56 ГГц является резонансной, полоса пропускания по уровню 0.6 составляет ≈ 0.97 ГГц. Также видно, что коэффициенты отражения для волн в направлениях 2 и 4 равны единице, то есть отраженная волна из среды 2 не попадает в передающий тракт и не создается паразитная модуляция за счет переотражения волн из среды 1 в 2 и обратно.

Модель сумматора сигналов на основе приведенных выше расчетов в простейшем виде представлена на рис. 8. Входные сигналы, тангенциально распространяясь вдоль анизотропных плоскопараллельных пластин, проходят в выходной тракт. При этом отраженный сигнал с выхода не может попасть снова в передающий тракт, поскольку коэффициент отражения для направления 2 равен единице. Недостатком структуры является полное отражение волны в направлении 3, т.е. в этом направлении отраженная волна попадет обратно в передающий тракт. Для устранения этого недостатка на выходе передающего тракта необходимо устанавливать согласованную нагрузку (рис. 9).

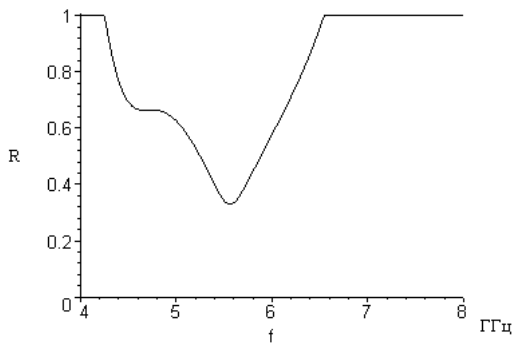


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты

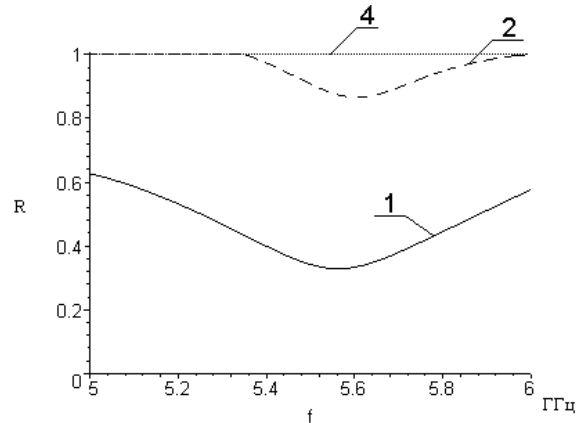


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты для всех направлений прохождения волн

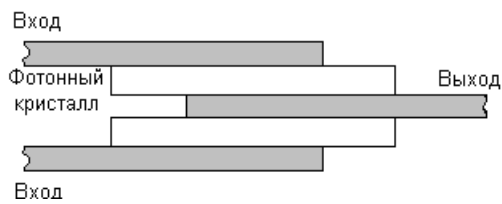


Рис. 8. Упрощенная структура сумматора

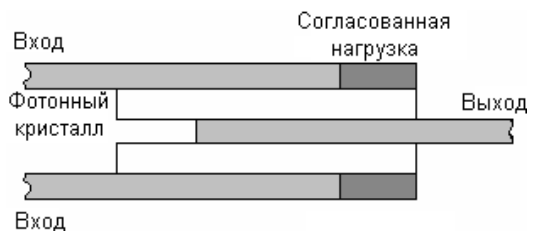


Рис. 9. Модель сумматора сигналов

ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрено тангенциальное распространение плоской волны над однослойной плоскопараллельной структурой с произвольным направлением оси анизотропии. Исследована зависимость коэффициента отражения от угла наклона оси анизотропии и угла между плоскостью падения волны и плоскостью, включающей ось анизотропии. На основе полученных результатов теоретического исследования предложена модель сумматора сигналов на основе анизотропной структуры. Распространение падающей волны вдоль структуры, очевидно, позволит уменьшить габаритные размеры устройства в сравнении с уже существующими [4,5], где рассматривалось излучение либо перпендикулярно, либо под произвольным углом к пластинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гауэр Д. Оптические системы связи.– М.: Радио и связь, 1988.– 502с.
2. Hunsperger R.G. Integrated Optics. Theory and Technology. University of Delaware 140 Evans Hall Newark, DE 19716–3130, USA (2009).
3. Clifford R.Pollock. Fundamentals of optoelectronics (R.R.Donnelley&Sons Company) 1995.
4. Lax, В.; Button, K.J. Microwave Ferrites and Ferrimagnetics, McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, (1962).
5. Микаэлян А. Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах.–М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 664с.
6. John Lekner Reflection at oblique incidence and the existence of a Brewster angle // JOSA A/ –1985/– Vol. 2, No 2. – P. 186-188.
7. К.А.Вытовтов, А.А.Архипов Свойства анизотропной слоистой структуры при распространении волны параллельно границе раздела // Ж. нано- і электрон. фіз. 2009.– Т.1, №4. – С. 31-41.
8. Vyotovtov K.A., Volkova S.A., Tarasenko Yu.S. Investigation of tangential wave propagation under a stratified anisotropic structure // Int. Conf. MMET-2010. Kiev.
9. Вольф М., Борн Э. Основы оптики.– М.: Наука, 1973.– 719с.