

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЯЗАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ С РАЗЛИЧНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

С. А. Провалов

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: yusidor@ire.kharkov.ua*

Приведены результаты экспериментального исследования дисперсионных характеристик связанных диэлектрических волноводов с различной высокой диэлектрической проницаемостью в миллиметровом диапазоне длин волн. Показано, что использование диэлектрических волноводов с различной крутизной дисперсионных зависимостей позволяет получить систему, у которой одно из разрешенных колебаний имеет малый градиент дисперсионной зависимости. Полученные результаты могут быть использованы при разработке функциональных элементов КВЧ-диапазона. Ил. 3. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: связанные диэлектрические волноводы, дисперсионная характеристика, период перекачки энергии, четные, нечетные колебания.

Теория и техника связанных линий передачи занимает важное место в изучении и разработке различных функциональных элементов КВЧ-диапазона и интегральной оптики. Использование в интегральной оптике открытых линий передачи – диэлектрических волноводов (ДВ) различного поперечного сечения и материалов с электрооптическими свойствами позволяет разрабатывать направленные ответвители, фильтры, модуляторы [1] и т. д., вплоть до логических элементов оптических ЭВМ и лазеров в планарном исполнении. Наряду с этим в последнее время интенсивно развивается такое направление КВЧ-диапазона, как техника объемных интегральных схем (ОИС) [2], где связанные линии передачи играют очень важную роль, а их свойства используются при разработке функциональных блоков. Техника исполнения ОИС отличается от технических решений в интегральной оптике, так как основным элементом ОИС являются различные модификации микрополосковых линий, а не диэлектрические волноводы. Однако при освоении все более коротковолновых участков КВЧ-диапазона требуются линии передачи, характеристики которых были бы адекватны диапазону. Одной из таких линий является ДВ [3–5].

Целью данной работы было экспериментальное исследование особенностей дисперсионных зависимостей связанных диэлектрических волноводов (Св. ДВ) в случае, когда волноводы изготовлены из материалов со значительной разницей диэлектрической проницаемости. Вначале кратко изложим основные свойства Св. ДВ, полученные многими авторами в процессе экспериментальных [6] и теоретических [7, 8] исследований.

1. Процессы в Св. ДВ и различных функциональных элементах на их основе характеризуются интерференцией двух собственных волн системы. Принято определять эти волны следующим образом: медленная или четная

волна и быстрая или нечетная волна. Рассмотрение Св. ДВ в рамках формализма теории связанных волн устанавливает, что если две линии идентичны, то постоянные распространения собственных волн системы отличаются от значения постоянной распространения одиночного невозмущенного ДВ γ_0 на величину коэффициента связи C , а вдоль продольной оси системы энергия периодически «перекачивается» из одной линии в другую. Если же линии не идентичны, то процесс «перекачки» энергии характеризуется не 100 % переходом из линии 1 в линию 2.

Вопросам исследования связанных не одинаковых линий передачи посвящено незначительное число работ, например [8, 9], в которых предлагаются схемы функциональных элементов, составленных из утопленных полосковых линий различного поперечного сечения. Дисперсионные зависимости этих линий согласованы таким образом, чтобы они пересекались на некоторой частоте f_0 . Утверждается, что только на этой частоте, благодаря равенству постоянных распространения волноводов в таком направленном ответвителе, передается вся мощность из одного волновода в другой. Частотная избирательность связи определяется разностью наклона дисперсионных кривых в точке их пересечения. Однако здесь не учитывается поведение дисперсионных зависимостей собственных волн системы.

В данном сообщении приведены результаты экспериментальных исследований по изучению дисперсионных зависимостей Св. ДВ ограниченного поперечного сечения из материалов со значительной разницей диэлектрической проницаемости. Один волновод представляет собой круглый стержень из кварца, второй волновод – прямоугольный стержень из лейкосапфира. Показано, как расщепляются дисперсионные зависимости одиночных линий передачи в случае, когда

система связанных линий передачи составлена из идентичных и не идентичных волноводов.

2. Результаты экспериментальных исследований. В данной работе объектом изучения были дисперсионные характеристики одиночных волноводов и системы Св. ДВ, составленной из тех же ДВ. Для получения экспериментальных данных использовались две методики. Зависимость величины коэффициента замедления $U = \lambda_0 / \lambda_g$ (λ_0 – длина волны в свободном пространстве, λ_g – длина волны в ДВ) от длины волны λ_0 для одиночного ДВ определялась по методу стоячих волн в линии [11]. Для определения аналогичных зависимостей Св. ДВ проводилась запись продольного распределения интенсивности поля в одном из связанных ДВ на участке области связи не менее удвоенной длины участка перекачки энергии ΔZ . Используя полученные значения замедления одиночных ДВ и измеряя длину участка перекачки энергии ΔZ вычислялись величины замедления быстрой и медленной волн. Методика получения дисперсионных зависимостей по биениям волн с учетом замедления одиночных ДВ была апробирована в случаях связи одинаковых волноводов. Кроме этого, значения замедления в отдельных точках дисперсионных кривых проверялись по направлению излучения волноводных волн из Св. ДВ с помощью дифракционной решетки [12].

В эксперименте использовались кварцевые ДВ круглого поперечного сечения диаметром 4,5 мм и волновод из лейкосапфира прямоугольного поперечного сечения 3,2×1,7 мм. Эти волноводы размещались на диэлектрических опорах так, чтобы была возможность измерять распределение внешнего поля вдоль продольной оси системы на длине не менее 250 мм и изменять величину зазора между волноводами от $b = 0,0$ мм до $b = 50$ мм. Кроме того, на экспериментальном стенде имеется платформа для размещения дифракционной решетки параллельно боковой поверхности ДВ и поворотная штанга с приемной рупорной антенной.

Как уже отмечалось, в качестве реперных зависимостей величины замедления U служат экспериментально полученные зависимости для одиночных волноводов. На рис. 1 сплошной линией представлена зависимость замедления U от длины волны для круглого кварцевого ДВ.

В рассматриваемом диапазоне длин волн замедление монотонно падает с увеличением длины волны. При переходе к системе, состоящей из двух одинаковых электродинамически связанных ДВ, дисперсионная зависимость расщепляется на две линии – для четной и нечетной волн. Для случая, когда в системе из двух параллельных ДВ энергия поступает в один волновод, про-

дольное распределение в линиях характеризуется биениями, у которых расстояние между минимумами $2\Delta Z$ зависит от длины волны λ_0 и величины связи C .

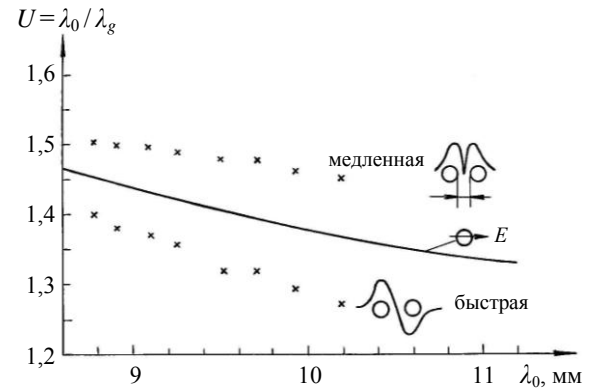


Рис. 1. Зависимость замедления кварцевого ДВ: сплошная линия – замедление для одиночного кварцевого волновода; крестиками – замедление для системы из двух кварцевых связанных ДВ при величине зазора $b = 0,5$ мм

Зависимость расстояния (далее – длина участка перекачки энергии) от длины волны для кварцевых Св. ДВ приведена на рис. 2, верхняя кривая. При фиксированном зазоре между волноводами ($b = 0,5$ мм) величина участка перекачки энергии монотонно уменьшается с увеличением длины волны λ_0 , что характеризует возрастание величины связи C . Здесь мы видим подтверждение того факта, что в ДВ при увеличении длины волны увеличивается доля электромагнитной энергии, которая распространяется в области пространства, прилегающей к поверхности ДВ. Соответствующие значения замедления быстрой и медленной волн представлены на рис. 1 (крестиком) с поясняющими обозначениями. Очевидно, что эти две зависимости не пересекаются. Даже если величина коэффициента связи уменьшится до сколь угодно малой величины, то в предельном случае кривые сольются в одну линию, тождественно совпадающую с зависимостью одиночной линии передачи.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда Св. ДВ не одинаковы (изготовлены из материалов с различной диэлектрической проницаемостью). Известно [8, 10], что такие ДВ имеют различную крутизну дисперсионных кривых. Исходя из этого выберем два ДВ, у которых величина замедления одинакова при некотором значении длины волны, а геометрические размеры удовлетворяют требованию одномодовости. Один из волноводов изготовлен из кварца ($\epsilon \approx 4,0$), другой – из лейкосапфира ($\epsilon \approx 9,6$). На рис. 3 сплошными линиями для этих волноводов представлены зависимости величины замедления U от длины волны, когда они расположены в свободном пространстве и не

связаны между собой (пояснения на рисунке). На длине волны $\lambda_0 = 9,8$ мм величина замедления волноводов практически совпадает ($U = 1,39$). На рис. 2 представлены зависимости длины участка перекачки энергии от длины волны для системы Св. ДВ из кварца и лейкосапфира при двух значениях зазора между ДВ. Отличие приведенных зависимостей для одинаковых и разных Св. ДВ заключается в том, что для одинаковых ДВ величина длины участка перекачки энергии при уменьшении длины волны монотонно растет, а для не одинаковых – монотонно растет до участка, в котором у невозмущенных волноводов постоянные распространения равны ($\lambda_0 \approx 9,8$ мм), после чего наблюдаем спад.

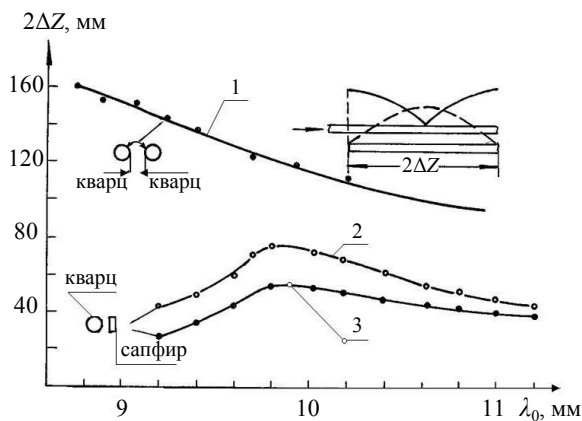


Рис. 2. Зависимость длины участка перекачки энергии $2\Delta Z$ от длины волны λ_0 : 1 – для связанных ДВ из кварца, $b=0,5$ мм; 2 – для связанных ДВ из кварца и лейкосапфира, $b=1,0$ мм; 3 – для связанных ДВ из кварца и лейкосапфира, $b=0,5$ мм

По величине длины области перекачки энергии $2\Delta Z$ вычислены значения замедления быстрой и медленной волн. На рис. 3 представлены соответствующие зависимости для двух значений зазора b .

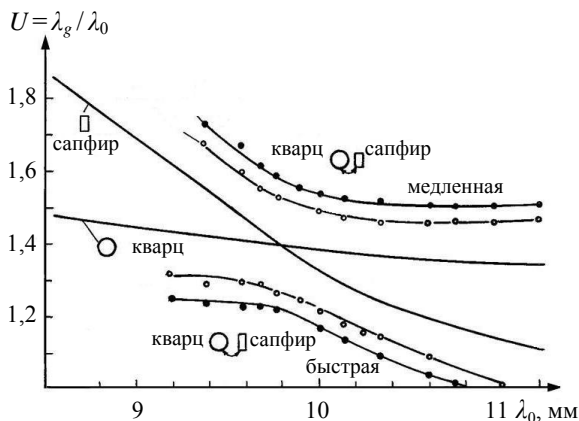


Рис. 3. Зависимость замедления U от длины волны λ_0 для одиночных волноводов из кварца и лейкосапфира – сплошные линии; четного и нечетного колебания системы связанных волноводов из кварца и лейкосапфира – линии с черными кружками

Рассмотрим зависимости в области длин волн, прилегающей к точке равенства замедления стержней. По аналогии с системой из одинаковых ДВ можно предположить, что собственные волны в связанных ДВ по сравнению с одиночными должны иметь фазовые скорости быстрее быстрой и медленнее медленной. Это предположение полностью подтверждается полученными результатами. Использование в системе волноводов, у которых градиент дисперсионных зависимостей разный, приводит к тому, что в дисперсионных зависимостях на разных участках относительно особой точки подчеркиваются свойства одной либо другой линии передачи. В области малых значений длин волн ($\lambda_0 < 9,8$ мм) медленная (четная) волна ведет себя аналогично собственной волне сапфирового стержня, а быстрая – аналогично собственной волне кварцевого стержня. Увеличение длины волны приводит к изменению характера поведения зависимостей. Кривая, соответствующая медленной волне, повторяет ход зависимости для кварцевого стержня, а замедление быстрой волны резко стремится к величине замедления $U = 1$. Уменьшение величины связи за счет расстояния b приводит к тому, что кривые приближаются к зависимостям одиночных линий, но не пересекают их. По аналогии с системой связанных одинаковых ДВ можно сделать вывод, что дисперсионные зависимости собственных волн связанных волноводов могут приближаться как угодно близко к зависимостям одиночных линий, но до тех пор, пока в системе будет существовать связь между ДВ, зависимости для быстрых и медленных волн не совпадут с зависимостями одиночных линий. Можно предположить и обратное, если дисперсионная зависимость линии передачи, которая представляет сложную конструкцию и включает в себя фрагменты элементарных линий передачи, имеют сложный вид и лежат выше или ниже асимптотических значений этих элементарных линий, то в такой системе существуют по крайней мере две собственные волны, которые создают картину продольного распределения поля в системе.

Выводы. Таким образом, выбранные методики экспериментального исследования дисперсионных свойств волноводящей системы из двух диэлектрических волноводов позволили определить ее частотные свойства при различной степени связи волноводов. Полученные результаты хорошо согласуются с общефизическими представлениями теории связанных мод и указывают на различие в поведении дисперсионных зависимостей связанных одинаковых и не одинаковых волноводов. При целенаправленном возбуждении в системе из не одинаковых волноводов четного или нечетного колебания получаем дисперсионные зависимости с большим различием

ем градиента изменения замедления. Это свойство может быть использовано для уменьшения углочастотной чувствительности в антеннах дифракционного излучения [12]. Полученные результаты описывают свойства диэлектрических волноводов, выполненных из материалов с высоким показателем диэлектрической проницаемости и, соответственно, с другими техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с чаще всего используемыми высокомолекулярными диэлектриками, что является важным при решении специфических задач исследовательского и прикладного направлений. Представленные материалы могут быть полезны при разработке различных функциональных элементов КВЧ-диапазона.

Автор выражает глубокую признательность С. А. Масалову за внимание к работе, полезные замечания и дискуссии.

1. Хансперджер Р. Интегральная оптика / Пер. с англ. под ред. В. А. Сычугова. – М.: Мир, 1985. – 376 с.
2. Гвоздев В. И., Нефедов Е. И. Объемные интегральные схемы СВЧ. – М.: Наука, 1987. – 110 с.
3. Взятых В. Ф. Диэлектрические волноводы. – М.: Сов. радио, 1970. – 213 с.
4. Мериакри В. В. Состояние и перспективы развития линий передачи субмиллиметрового диапазона волн и устройства на их основе // Заруб. радиоэлектрон. – 2002. – № 12. – С. 3–7.
5. Маркузе Д. Оптические волноводы / Пер. с англ. под ред. В. В. Шевченко. – М.: Мир, 1974. – 576 с.
6. Меркурьев А. Н., Калинин В. И., Кошунов С. Ю. Характеристики распределенной связи интегральных диэлектрических волноводов // Тр. МЭИ. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры. – 1978. – Вып. 360. – С. 48–50.
7. Taylor H. F. Frequency selective coupling in parallel dielectric waveguides // Opt. Commun. – 1973. – 8, No. 4. – P. 421–425.
8. Банков С. А. Волноводы с нелокальными границами // Журн. радиоэлектрон. – 2008. – № 6. – С. 71–75.
9. Меркурьев А. Н. О методе связанных волн в применении к параллельным неодинаковым диэлектрическим волноводам // Тр. МЭИ. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры. – 1978. – Вып. 360. – С. 51–52.
10. Галдецкий А. В., Климов А. В., Манченко О. П., Пашков О. И. Системы связанных линий на керамике с высокой ди-

электрической проницаемостью и моделировании согласующих цепей мощных полевых транзисторов // Радио-техника. – 2007. – № 5. – С. 82–87.

11. Стариков В. Д. Методы измерения на СВЧ с применением измерительных линий. – М.: Сов. радио, 1972. – 144 с.
12. Андренко С. Д., Девятков Н. Д., Шестопалов В. П. Антенные решетки миллиметрового диапазона // Докл. АН СССР. – 1978. – 240, № 6. – С. 1340–1343.

ISTICS OF BOUND DIELECTRIC DISPERSION CHARACTER WAVEGUIDES WITH DIFFERENT DIELECTRIC CONDUCTIVITY

S. A. Provalov

The results of experimental research on the dispersion characteristics of bound dielectric waveguides with different dielectric conductivity in millimeter waveband are given. It is shown that the use of dielectric waveguides with different steepness of dispersion dependencies allows to obtain a system in which one of the allowable oscillations has a small gradient of dispersion dependence. The obtained results can be used for development of EHF functional elements.

Key words: bound dielectric waveguides, dispersion characteristic, energy transfer period, even and odd oscillations.

ДИСПЕРСІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВ'ЯЗАНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХВИЛЕВОДІВ З РІЗНОЮ ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ

С. А. Провалов

Приведено результати експериментального дослідження дисперсних характеристик зв'язаних діелектричних хвильоводів з різною висотою діелектричної проникності в міліметровому діапазоні довжини хвиль. Показано, що використання діелектричних хвильоводів з різною крутизою дисперсійних залежностей дозволяє одержати систему, у якій одне з дозволених коливань має невеликий градієнт дисперсійної залежності. Одержані результати можуть використовуватися при розробці функціональних елементів КВЧ-діапазону.

Ключові слова: зв'язані діелектричні хвильоводи, дисперсійна характеристика, період перекачування енергії, парні, непарні коливання.

Рукопись поступила 12 августа 2009 г.