

УДК 620.179.15

Диэлектрический СВЧ-интерферометр Маха-Цандера как преобразователь перемещений

Dielectric microwave interferometer of the Mach-Zehnder as the transducer displacement

Борисов В.И., Афанасьев А.А.
Borisov V.I., Afanasiev A.A.

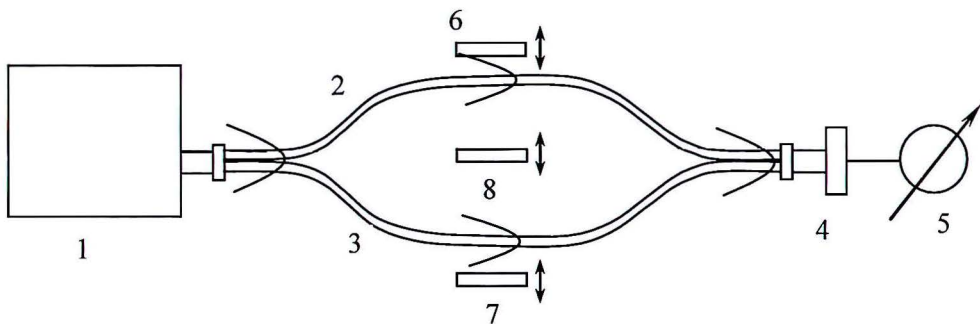
Исследованы возможности применения СВЧ-интерферометра Маха-Цандера на основе диэлектрических волноводов а качестве чувствительного элемента датчика перемещений. Показано, что сигнал на выходе интерферометра изменяется при изменении расстояния между волноводами интерферометра и контролируемым диэлектрическим или металлическим объектами.

Possibilities of application of the microwave Mach-Zehnder interferometer on the basis of dielectric waveguides as sensitive element of sensor of displacement have investigated. It is shown that a signal on the exit of interferometer changes with distance between the waveguides of interferometer and controlled dielectric or metallic objects.

Характерной особенностью диэлектрических волноводов является то, что излучение волноводных мод, распространяющихся вдоль волновода, проникает в граничную с волноводом среду на расстояние, сравнимое с длиной волны излучения. Такие волны представляют собой неоднородные волны с волновым вектором, направленным вдоль волновода, и затухают по экспоненте при удалении от поверхности волновода. В западной литературе их называют «эванесцентными волнами». Так как такие волны могут легко взаимодействовать с окружающей волновод средой, то диэлектрические волноводы можно применять в качестве датчиков, определяющих разные свойства граничной с волноводом среды. Так в работе [1] исследован датчик спектра поглощения метанола в инфракрасной области спектра с чувствительным элементом на основе отрезка волоконного световода из $\text{AgCl}_{0,6}\text{Br}_{0,4}$. В работе [2] эванесцентные волны стандартных волоконных световодов используются при изготовлении датчика показателя преломления жидкости, а в [3] аналогичная задача решается с применением микроструктурных волоконных световодов. В работах [2, 3] для увеличения глубины проникновения эванесцентной волны в граничную со световодом среду, чувствительный элемент датчика изготовлен в виде перетяжки, в месте которой наблюдается постепенное

уменьшение, а затем увеличение диаметра световода. Но эванесцентные волны волоконных световодов находят ограниченное применение, так как они распространяются в границах оболочки световода и проникают в граничную среду на расстояние порядка длины волны света, поэтому применение СВЧ-излучения, длина волны которого значительно превышает длину волны света, представляет большой практический интерес [4, 5].

В представленной работе приводятся данные о возможностях применения интерферометров Маха-Цандера на основе диэлектрических СВЧ-волноводов для построения фазовых датчиков, перемещений. Исследования проводились в СВЧ миллиметровом и сантиметровом диапазонах на длинах 7,5 мм и 30 мм соответственно. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.



1 – СВЧ-генератор; 2, 3 – СВЧ-волноводы, образующие интерферометр Маха-Цандера; 4 – детекторная секция; 5 – микроамперметр; 6, 7, 8 – перемещающиеся пластинки

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Преобразование фазовой модуляции в амплитудную осуществлялось с помощью СВЧ-интерферометра Маха-Цандера, который содержал два связанных диэлектрических СВЧ-волновода прямоугольного сечения из винипласта размерами 2×5,3 мм для СВЧ-излучения частотой 40 ГГц и из оргстекла с поперечными размерами 4×25 мм для излучения с частотой 10 ГГц. Для того, чтобы интерферометр работал на линейном участке градуировочной характеристики длина одного волновода была меньше на четверть длины волны используемого СВЧ-излучения. В качестве источника СВЧ-излучения использовался генератор Г4-142, работающий на частоте 40 ГГц, и генератор Г4-109, работающий на частоте 10 ГГц. Возбуждение волн в интерферометре осуществлялось путем размещения входного участка обоих волноводов интерферометра в выходном металлическом волноводе

СВЧ-генератора. Регистрация сигнала на выходе интерферометра проводилась с помощью детекторной секции, в металлический волновод которой были вставлены выходные концы обоих диэлектрических волноводов интерферометра. На рисунке 1 схематически показано поперечное распределение интенсивности поля волноводной моды диэлектрического волновода, из которого видно, что часть энергии, переносимой волноводной модой, распространяется по граничной с волноводом среде.

Принцип работы преобразователя заключается в том, что при приближении к одному из диэлектрических волноводов контролируемого объекта в волноводе происходит фазовый сдвиг СВЧ-волны, что приводит к расстройке интерферометра. В экспериментах перестройка фазы неоднородной волны осуществлялась при помощи диэлектрических и металлических пластинок разной ширины.

К примеру, на рисунке 2 приведены зависимости изменения сигнала на выходе СВЧ-интерферометра, возбуждаемого СВЧ-излучением с длиной волны 7,5 мм при приближении к волноводам интерферометра винипластовых пластинок.

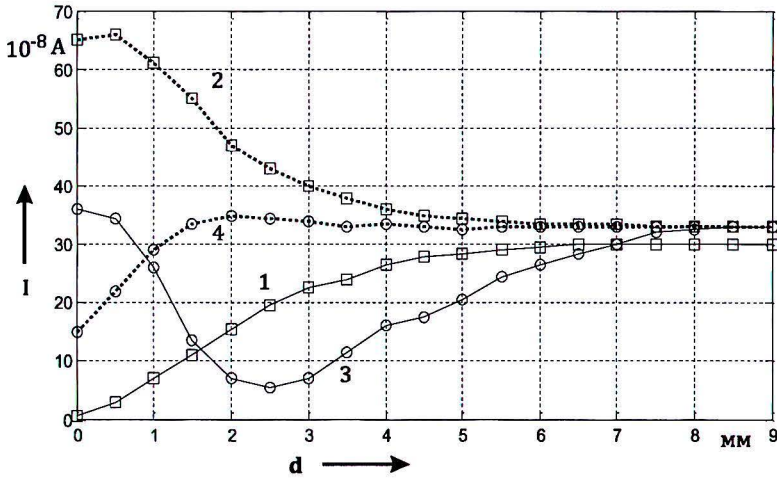


Рисунок 2. Зависимость изменения сигнала на выходе интерферометра от расстояния между диэлектрической пластинкой и СВЧ-волноводами

Кривая 1 соответствует приближению пластинки толщиной 2 мм и шириной 10 мм к верхнему волноводу интерферометра в центральной области изгиба обоих волноводов, а кривая 2 – приближению этой же пластинки к нижнему волноводу интерферометра.

Кривая 3 соответствует приближению пластинки толщиной 2 мм и шириной 30 мм к верхнему волноводу интерферометра, а кривая 4 –

приближению этой же пластинки к нижнему волноводу интерферометра.

При отсутствии приближаемых пластинок сигнал на выходе интерферометра был равен $3,2 \cdot 10^{-7}$ А.

Из рисунка 2 видно, что сдвиг фаз в плечах интерферометра увеличивается с увеличением ширины пластинки. Также видно, что при приближении пластинок к разным волноводам интерферометра, наблюдается работа интерферометра в противофазе, т.е. при одной и той же величине зазора между пластинкой и верхним волноводом сигнал на выходе интерферометра меньше величины сигнала без пластинок, а при таком же зазоре между пластинкой и нижним волноводом – больше.

На рисунке 3 приведены зависимости изменения сигнала на выходе СВЧ-интерферометра, возбуждаемого излучением с длиной волны 7,5 мм, от расстояния до волновода для двух металлических пластинок толщиной 0,5 мм и шириной 10 и 30 мм соответственно.

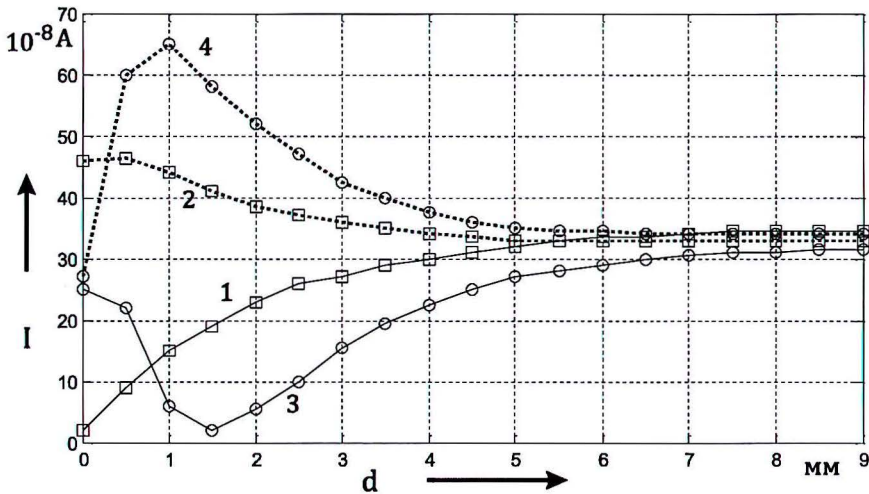


Рисунок 3. Зависимость изменения сигнала на выходе интерферометра от расстояния между металлической пластинкой и СВЧ-волноводами

Кривая 1 соответствует приближению пластинки 10 мм к верхнему волноводу интерферометра в центральной области изгиба обоих волноводов, а кривая 2 – приближению этой же пластинки к нижнему волноводу интерферометра.

Кривая 3 соответствует приближению пластинки шириной 30 мм к верхнему волноводу интерферометра, а кривая 4 – приближению этой же пластинки к нижнему волноводу интерферометра.

Из этого рисунка видно, что характер изменения сигнала для металлических пластинок носит аналогичный характер, как и для диэлектрических с той лишь разницей, что изменение фазы в случае металлической пластинки в 3 раза больше для пластинки шириной 10 мм и в 1,7–2 раза больше для пластинки шириной 30 мм, чем для соответствующих пластмассовых пластинок. Характерной особенностью изменения сигнала для обоих типов пластинок является наличие квазилинейных участков на приведенных зависимостях, которые можно использовать в качестве градуировочных характеристик при построении датчика перемещений.

Несколько иной характер зависимости сигнала от зазора между пластинкой и волноводами наблюдается при расположении пластинки между двумя волноводами (рисунок 4).

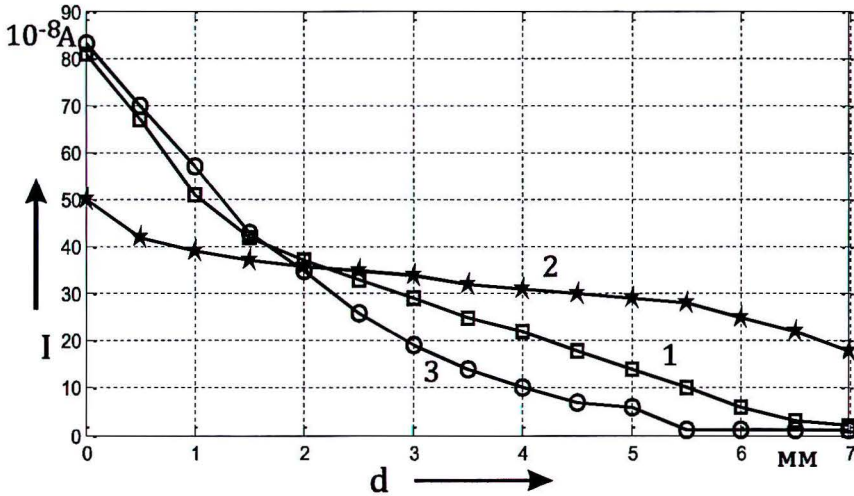


Рисунок 4. Зависимость изменения сигнала на выходе интерферометра при перемещении пластинки между волноводами интерферометра Маха-Цандера

Кривая 1 соответствует случаю перемещения винипластовой пластинки шириной 10 мм в месте, где наблюдается максимальный зазор между волноводами интерферометра, равный 9 мм, а кривая 2 соответствует перемещению в той же области металлической пластинки шириной 10 мм.

При расположении пластинки между двумя волноводами, когда происходит одновременная модуляция неоднородных волн обоих волноводов, наблюдается монотонное изменение сигнала на выходе интерферометра, что также можно использовать для построения датчика перемещений. В случае перемещения пластинок между волново-

дами интерферометра можно изменять крутизну зависимости сигнала на выходе интерферометра, если перемещать пластинку не в области максимального зазора между волноводами. Это иллюстрируется зависимостью, приведенной на кривой 3 рисунка 4, которая соответствует перемещению винипластовой пластинки в месте, где величина зазора между волноводами интерферометра составляет 7 мм. При этом зависимость сигнала от величины перемещения носит более монотонный характер, чем при перемещении пластинки в области максимального зазора (кривая 1).

На рисунке 5 приведены зависимости изменения сигнала интерферометра, работающего на длине волны 3 см.

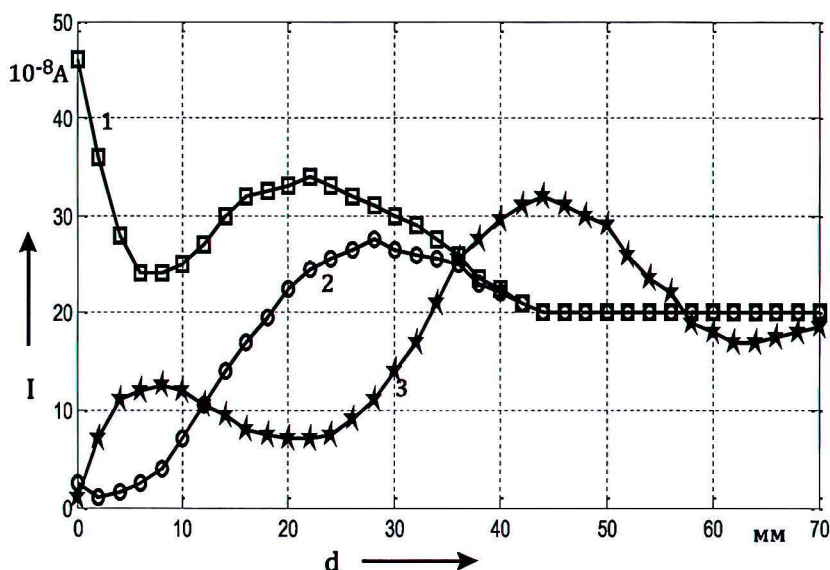


Рисунок 5. Зависимость изменения сигнала на выходе СВЧ-интерферометра Маха-Цандера от расстояния между пластиной шириной 21 см и СВЧ-волноводом интерферометра

В экспериментах применялись разнородные пластинки шириной 21 мм: стеклянная пластинка толщиной 3 мм (кривая 1 рисунка 5); винипластовая пластинка толщиной 3 мм (кривая 2) и металлическая пластинка толщиной 0,3 мм (кривая 3). Из кривых 1 и 2 на рисунке 5 видно, что характер изменения фазы неоднородной волны зависит также от диэлектрической проницаемости материала пластинки, что можно использовать для контроля диэлектрических свойств материалов. Видно также, что характер изменения фазы для металлической пластинки совершенно другой, чем для диэлектрических.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что применение СВЧ-интерферометра Маха-Цандера на основе диэлектриче-

ских волноводов можно использовать в качестве чувствительного элемента датчиков перемещений и положений диэлектрических и металлических объектов.

Литература

1. Raichlin, Y. Evanescent-wave infrared spectroscopy with flattened fibers as sensing element / Y. Raichlin, L. Fel, F. Katzir // Opt. Lett. – 2003. – V. 28, №22. – P. 2297–2299.
2. Polynkin, P. Evanescent field-based optical fiber sensing device for measurement the refractive index of liquids in microfluidic channels / P. Polynkin, A. Polynkin, N. Peyghambaria, M. Mansuripun // Opt. Lett. –2005. –V. 30, № 11. – P. 1273–1275.
3. Minkovich, V.P. Holey fiber tapered with resonance transmission for high-resolution refractive index sensing / V.P. Minkovich, J. Villatoro, D. Morson-Hernandes, S. Calisto, A.B. Sotsky, L.I. Sotskaya // Opt. Express. –2005. – V. 13. –P. 7609–7614.
4. Михнев, В.А., Любецкий Н.В. Поляризационный метод контроля толщины диэлектрических покрытий металлов с использованием диэлектрического волноводного датчика / В.А. Михнев, Н.В. Любецкий // Дефектоскопия, 1996. – №7. – С. 91–97.
5. Борисов, В.И. Применение диэлектрических СВЧ-волноводов для решения задач дефектоскопии и размерного радиоволнового неразрушающего контроля / В.И. Борисов, А.В. Карпенко // Перспективные технологии, материалы и системы: Сб. научн. тр. – Могилев: П27. – 2001. – С. 75–79.

Статья поступила в редакцию 02.04.18