

## ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ПЛЕЧО ИНТЕРФЕРОМЕТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК

В. Е. Буданов, Н. Н. Суслов, А. Л. Шубенко, В. Ю. Степанов\*

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины,  
2/10, ул. Дм. Пожарского, Харьков, 61046, Украина*

[E-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua](mailto:shuben@ipmach.kharkov.ua)

*\*Завод «Харпластмасс»,*

*4, ул. Залютинская, Харьков, 61177, Украина*

[E-mail: khazplast@kharkov.ukrtel.net](mailto:khazplast@kharkov.ukrtel.net)

Исследуется новый волноведущий тракт, состоящий из плоскопараллельного открытого волновода и двух секторных рупоров специальной геометрии, который при использовании его в составе измерительного плеча интерферометра 4-мм диапазона обеспечивает возможность субмикронной разрешающей способности при бесконтактном контроле толщины тонких диэлектрических пленок в процессе их производства. Ил. 6. Библиогр.: 4 назв.

**Ключевые слова:** интерферометр миллиметрового диапазона, волноведущий тракт.

В настоящее время производство диэлектрических пленок выросло до огромных масштабов, в первую очередь, по причине широчайшего использования пленки для упаковки различных товаров и изделий. Отклонение толщины пленки от номинального значения является дефектом, так как, либо делает упаковку недостаточно прочной, т. е. бракованной, либо вызывает неоправданное возрастание ее себестоимости, что выливается в значительные суммы, если учитывать современные объемы пленочного производства.

Применения диэлектрической пленки в технике миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов такие, как создание микроволновых волноводов, просветляющих покрытий, интерференционных фильтров, зеркал и т. п., хотя и не требуют таких объемов производства, как бытовые нужды, но при этом допустимые относительные отклонения толщины пленки от номинальной должны быть намного меньшими, чем для упаковочной пленки. Как очевидно, бездефектное производство возможно лишь при наличии в составе пленкопроизводящей машины прибора непрерывного контроля толщины пленки, который сигнализирует о всяком отклонении толщины от номинального значения и выработанный сигнал используется соответствующим блоком для осуществления автоматической коррекции толщины пленки.

Тем не менее приходится констатировать, что контроль толщины пленки в процессе ее производства все еще остается актуальной задачей, поскольку далеко не все известные методы толщинометрии реализуемы в производственных условиях, а реализованные - обладают требуемыми разрешающей способностью, динамическим диапазоном, точностью и безынерционностью, являясь при этом неразрушающими (иногда бесконтактными), простыми и надежными в экс-

плуатации при сравнительно низкой стоимости прибора.

В настоящей работе речь пойдет о разработке нового интерференционного датчика [1], использующего 4-мм диапазон электромагнитных волн, в значительной мере отвечающего перечисленным выше условиям, а по разрешающей способности более чем на порядок превосходящего существующие аналоги.

Уже несколько десятилетий микроволновая интерферометрия, как наиболее чувствительный инструмент, широко применяется в аппаратуре для неразрушающего контроля характеристик материалов, измерения смещений, скоростей (с использованием эффекта Доплера) и т. п. В работе [2] описан интерферометр миллиметрового диапазона, обеспечивающий пороговую чувствительность при определении фазового сдвига в измерительном канале менее  $1^\circ$ . Аналогичные результаты получены на интерферометре 8-мм диапазона, достигнута «беспрецедентная разрешающая способность», составляющая 10 мкм при определении смещения в режиме зондирования «на отражение» [3]. При использовании разработанного интерферометра для целей толщинометрии, например, полиэтиленовой пленки диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = 2,56$  разрешающая способность ухудшится в  $(\sqrt{\varepsilon} - 1)^{-1}$  раз, т. е. составит  $\sim 17$  мкм, чего явно недостаточно при контроле, например, 5-мкм пленки. Здесь нужны субмикронные разрешения.

Как очевидно, единственным путем радикального повышения разрешающей способности микроволнового интерферометра (если не уменьшать длину волны зондирующего электромагнитного поля) является создание условий для многократного (30 и более раз) зондирования того участка волноведущего тракта, где расположен

объект зондирования. При этом необходимо позаботиться о такой геометрии измерительного плеча интерферометра, при которой максимально просто и надежно реализовывалось бы многократное зондирование.

**1. Основная идея.** Зерно идеи при определении геометрии измерительного плеча мы позаимствовали из геометрии волноводного фазовращателя миллиметрового диапазона [4]. Этот фазовращатель состоит из отрезка прямоугольного волновода сечением  $0,45 \times 0,9 \lambda_n$ , где  $\lambda_n$  - длина волны в свободном пространстве, которая дает название диапазону длин волн, для которого предназначается этот волновод. Так, волновод сечением  $1,8 \times 3,6$  мм в основном служит для канализации электромагнитного излучения 4-мм диапазона волной типа  $H_{10}$  в одномодовом режиме. Через узкую ( $\sim 0,1 \lambda_n$ ) длинную ( $\sim 10 \lambda_n$ ) щель в середине широкой стенки имеет возможность вдвигаться тонкая длинная диэлектрическая пластинка, обеспечивающая изменение фазы волны  $H_{10}$  на выходе из фазовращателя до  $360^\circ$ . Такой значительный эффект объясняется тем, что бриллюэновские волноводные волны на длине пластинки в  $10 \lambda_n$  многократно проходят сквозь нее, с каждым прохождением накапливая небольшие фазовые сдвиги. Эквивалентная интерпретация: вдвигаемая диэлектрическая пластинка в месте своего расположения меняет фазовую скорость волны  $H_{10}$  тем в большей мере, чем более вдвинута она в волновод.

Таким образом, измерительное плечо интерферометра должно представлять собой модифицированный волноводный фазовращатель, в котором роль диэлектрической пластинки должна играть контролируемая диэлектрическая пленка. Модификации пришлось проводить по двум направлениям.

Во-первых, прямоугольный волновод был заменен открытым волноводом (ОВ), образованным двумя плоскими параллельными металлическими пластинами прямоугольной формы  $\sim 10 \lambda_n \times 40 \lambda_n$ , расстояние между которыми  $a \sim 0,9 \lambda_n$  (впрочем, в лабораторной установке имелся механизм для изменения  $a$ ). Так появилась возможность беспрепятственного движения контролируемой пленки между пластинами ОВ.

**2. Возбуждение ОВ.** Основной же задачей являлась необходимость волноводную волну типа  $H_{10}$ , идущую от генератора, с максимальной эффективностью превратить в волну типа квази  $H_{10}$  ОВ, после чего, сделав обратное превращение, направить ее к смесителю интерферометра и далее.

Закачку СВЧ мощности в ОВ и ее съем решено было осуществлять с помощью сектор-

ных рупоров (СР) в плоскости  $E$ , располагаемых перпендикулярно пластинам ОВ так, что плоскости раскрывов рупоров 1 и 2 совпадают с плоскостями пластин 3 и 4, на которых они раскреплены (рис. 1).

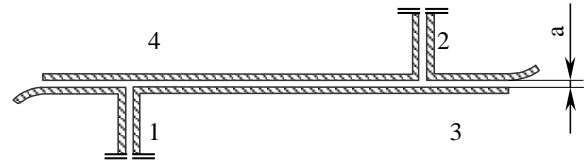


Рис. 1. Схема волноведущего тракта измерительного плеча интерферометра

Каждый СР состоял из двух одинаковых частей, эскиз одной из которых представлен на рис. 2. Угол раскрыва рупора -  $23^\circ$ , длина рупора - 80 мм. Диаграмма направленности излучения рупора в  $E$ -плоскости по уровню половинной мощности составляла  $\sim 17^\circ$ , в  $H$ -плоскости  $\sim 100^\circ$ . Последнее не играло никакой отрицательной роли, так как в  $H$ -плоскости волна ограничена пластинами ОВ. Качество изготовления рупоров проверялось по уровню мощности паразитной поляризации в излучаемой волне - этот уровень оказался не более 1-2%, что вполне удовлетворительно.

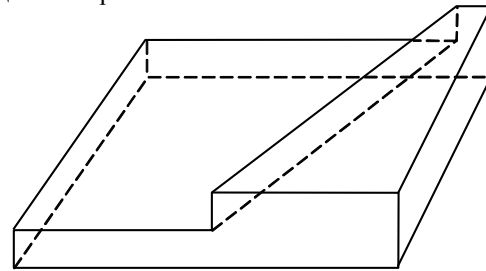


Рис. 2. Эскиз элемента СР

Степень пригодности изображенной на рис. 1 конструкции в качестве измерительного плеча интерферометра 4-мм диапазона исследовалась экспериментально - по характеру коэффициента передачи СВЧ мощности  $P$  через волноведущий тракт СР-ОВ-СР. На рис. 3 представлен типичный график зависимости нормированной по максимуму мощности  $P/P_{max}$ , передаваемой через волноведущий тракт СР-ОВ-СР при изменении длины ОВ  $L$ . Полученная зависимость свидетельствует о наличии стоячей волны в ОВ, которая может существовать только за счет переотражений между СР, поскольку концы пластин, образующих ОВ, плавно отогнуты во вне ОВ и отражений от них не происходит.

В принципиальном отношении построенный волноведущий тракт уже является интерферометром, в котором опорной волной можно считать сразу прошедшую через тракт волну, а зонди-

рующей - после двух последовательных отражений от приемного и передающего рупоров с коэффициентами отражения по мощности  $\sim 25\%$  (что следует из графика на рис. 3; вклады остальных последовательных отражений от ЦСР не учитывались). Но в практическом смысле использовать этот волноведущий тракт для контроля толщины пленки нецелесообразно по следующим двум причинам: непрогнозируемое и нерегулируемое соотношение мощностей и фаз опорной и зондирующей волн; слишком большое высвечивание СВЧ мощности через боковые раскрывы ОВ.

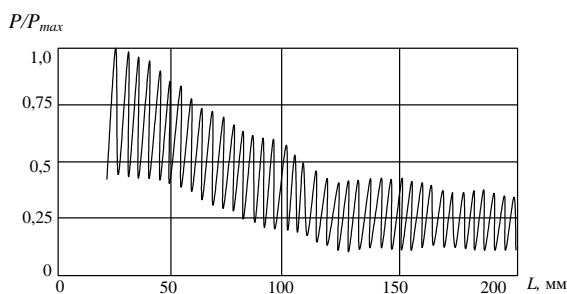


Рис. 3. Коэффициент передачи мощности через волноведущий тракт ЦСР-ОВ-ЦСР при изменении длины ЦСР:  $\lambda = 5$  мм;  $a = 3,8$  мм

Наиболее вероятной авторы считают следующую интерпретацию причин названных недостатков. В ЦСР при запитке его волной  $H_{10}$  прямоугольного волновода возбуждается расходящаяся квазицилиндрическая волна с фазовым центром в основании ЦСР. Как очевидно, ЦСР с эффективностью в 100%, без отражений, в режиме приема воспринял бы сходящуюся к его фазовому центру цилиндрическую волну. Но в построенном волноведущем тракте волна, приходящая по ОВ к одному рупору от другого, - расходящаяся, и отсюда сильное отражение от ЦСР и значительное высвечивание мощности через боковые раскрывы ОВ.

Предложенная интерпретация дает рецепт устранения обнаруженных недостатков - необходимо придать цилиндричность трапецевидным граням секторных рупоров (на рис. 4 изображен раскрыв цилиндрического ЦСР) на одной из пластин ОВ). Радиус кривизны взят равным длине ЦСР, поэтому распространяющаяся в рупоре квазицилиндрическая волна типа  $H_{10}$  после поворота на  $90^\circ$  превратится в квазиплоскую волну ОВ, распространяющуюся в направлении возрастающих значений  $x$ . В режиме приема процесс пойдет в обратном порядке: подошедшая к раскрыву ЦСР квазиплоская волна ОВ преобразуется в сходящуюся квазицилиндрическую волну ЦСР с минимальным отражением.

Для экспериментальных исследований были изготовлены два ЦСР: длина и радиус кривизны цилиндров - по  $12\lambda_n$ ; раскрыв -

$0,9\lambda_n \times 8\lambda_n$ ; расстояние между раскрывами рупоров (длина ОВ) менялось от 0 до  $30\lambda_n$ ;  $\lambda_n = 4$  мм.

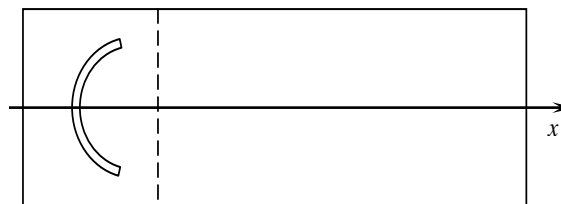


Рис. 4. Раскрыв модифицированного секторного рупора на одной из пластин открытого волновода

На рис. 5 приведен график зависимости нормированной по максимуму мощности, передаваемой через волноведущий тракт ЦСР-ОВ-ЦСР при изменении длины ОВ. Сразу обращает на себя внимание то обстоятельство, что усредненное значение  $P/P_{max}$  практически не изменяется на всем интервале изменения  $5\lambda < L < 30\lambda$ . Это свидетельствует в пользу того, что в ОВ удалось сформировать квазиплоский, почти не расходящийся волновой пучок - в этом отношении цель достигнута. Построенный волноведущий тракт пригоден в качестве измерительного плеча интерферометра.

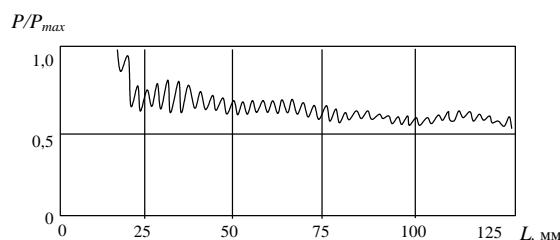


Рис. 5. Коэффициент передачи мощности через волноведущий тракт ЦСР-ОВ-ЦСР при изменении длины ОВ:  $\lambda = 5$  мм;  $a = 3,9$  мм

Немонотонность графика на рис. 5 говорит о том, что полностью устранить переотражения между ЦСР не удалось, но причину этого авторы видят в отсутствии надлежащего технологического оборудования при изготовлении ЦСР, т. е. отмеченный недостаток в принципе устраним. Необходимо отметить также, что приведенная благоприятная картина в ОВ наблюдается для сравнительно узкого диапазона расстояний между пластинами ОВ:  $0,8\lambda_n < a < 0,96\lambda_n$ ; как очевидно, при желании выйти на другой интервал  $a$  необходимо изменять радиус кривизны цилиндров ЦСР, либо расстояние между цилиндрическими секторами ЦСР.

**3. Оценка разрешающей способности.** О разрешающей способности интерферометра с новым измерительным плечом мы будем судить по величине того интервала изменения контролируе-

мого параметра, на котором фаза зондирующего сигнала получит дополнительную добавку в  $180^\circ$ .

Сравнение будем проводить с аналогичной величиной при контроле смещения интерферометром, описанном в работе [3]. Там зондирующий сигнал в свободном пространстве на трассе длиной  $L$ , которую он проходит дважды, получает изменение фазы  $2kl$  ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ). Смещение отражающего экрана на величину  $\Delta l$  вызывает дополнительное изменение фазы на  $2k\Delta l$ , и эта величина равна  $\pi$  тогда, когда  $\Delta l = \frac{\pi}{2k} = \frac{\lambda}{4}$ . В работе [3] рабочая длина волны  $\lambda = 8$  мм, т. е.  $\Delta l = 2$  мм.

В ОВ предлагаемого здесь измерительного плеча интерферометра распространяется волна типа  $H_{10}$

$$E_z = e^{i\sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} x} \sin \frac{\pi}{a}(y - a).$$

Фаза волны на выходе ОВ отличается от

фазы на входе на величину  $\sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} L$ .

Смещение одной из пластин ОВ на величину  $\Delta a$  сделает это отличие равным

$$\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{(a + \Delta a)^2}} L,$$

т. е. фаза сигнала на выходе измерительного канала изменится на  $180^\circ$  тогда, когда

$$\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{(a + \Delta a)^2}} L = \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}} L + \pi. \quad (1)$$

Нас интересует случай очень высокой разрешающей способности, т. е.  $\Delta \ll 1$ , поэтому

$$\begin{aligned} & \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{(a + \Delta a)^2}} = \\ & = \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2(1 + \Delta)^2}} \cong \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}}(1 - 2\Delta) = \\ & = \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}} \sqrt{1 + \frac{2\pi^2\Delta}{a^2(k^2 - \frac{\pi^2}{a^2})}} \cong \\ & \cong \sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}} + \frac{\Delta\pi^2}{a^2\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}}}. \end{aligned}$$

Тогда (1) превращается в

$$\frac{\Delta\pi^2 L}{a^2\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}}} = \pi,$$

откуда

$$\Delta a = \frac{a^2\sqrt{k^2 - \frac{\pi^2}{a^2}}}{\pi L} = \frac{a\sqrt{4a^2 - \lambda^2}}{\lambda L}. \quad (2)$$

Для примера: при  $\lambda = 4$  мм,  $a = 3,6$  мм и  $L = 100$  мм  $\Delta a = 0,2$  мм, что уже позволяет на порядок превзойти разрешающую способность интерферометра при измерении смещения, достигнутую в работе [3].

Выражение (2) описывает очевидные способы увеличения кратности зондирования пространства между пластинами ОВ. Этого можно достичь, увеличивая длину  $L$ , либо увеличивая угол  $\varphi$  между пластиной ОВ и волновым вектором бриллюэновских волн, который, как известно, связан соотношением

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{2a}.$$

**Выводы.** На рис. 6 приведены примеры экспериментально снятых интерферограмм при контроле смещения одной из пластин ОВ при  $\lambda = 5$  мм и двух значениях длины ОВ. Отметим хорошее соответствие экспериментальных результатов теоретическим: из (2) следует, что в этих случаях для  $a = 3,67$  мм и  $L = 100$  мм  $\Delta a = 0,14$  мм, а для  $a = 3,72$  мм и  $L = 60$  мм  $\Delta a = 0,25$  мм.

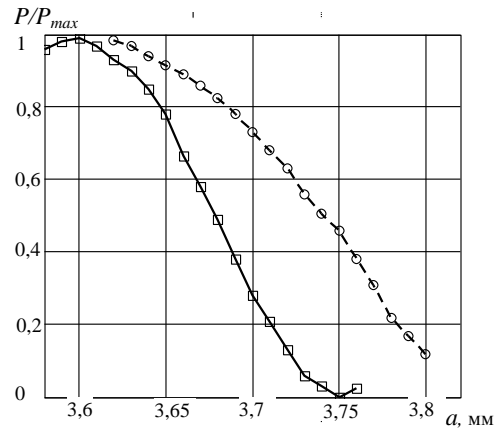


Рис. 6. Интерферограммы при смещениях одной из пластин ОВ:  $\lambda = 5$  мм;  $\square$  -  $L = 100$  мм;  $\circ$  -  $L = 60$  мм

Если ограничиться первым приближением, то, как известно, помещение тонкой пленки толщиной  $d$  и диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  эквивалентно увеличению длины трассы на величину  $(\sqrt{\varepsilon} - 1)d$ , поэтому при измерении  $d$  раз-

решающая способность всякого интерферометра будет в  $(\sqrt{\varepsilon} - 1)^{-1}$  раз хуже, чем при измерении смещения. Так, полиэтиленовая пленка с  $\varepsilon = 2,56$ , помещенная между пластинами ОБ разрабатываемого здесь измерительного плеча интерферометра вызовет изменение фазы в  $180^\circ$  на выходе

ОБ при  $d'' = 1,67 \frac{a^2 \sqrt{\frac{4a^2}{\lambda^2} - 1}}{L}$ , т. е. при  $\lambda = 5$  мм,

$a = 3,67$  мм и  $L = 100$  мм  $d'' = 0,22$  мм.

Эти выводы вполне подтверждаются экспериментально. Так, если при максимальном уровне сигнала на интерферограмме при отсутствии пленки в ОБ стрелка вольтметра отклонялась на 100 делений, а затем с помощью фазовращателя опорного канала снизить уровень сигнала до 50, т. е. остановиться на самом крутом участке интерферограммы, то помещение между пластинами ОБ даже самой тонкой из имеющейся в наличии полиэтиленовой пленки толщиной 0,005 мм вызвало изменение сигнала на три-четыре деления, которые манипулированием балансом и коэффициентом усиления выходного усилителя интерферометра нетрудно превратить в 20 или более делений. Таким образом, здесь можно говорить о субмикронной разрешающей способности интерферометра при контроле толщины тонких диэлектрических пленок. Результаты, полученные при работе с лабораторным макетом, служат основанием для разработки промышленного прибора измерения толщины пленки с субмикронной точностью с целью включения этого прибора в технологическую цепочку при производстве пленки.

1. Пат. 77780 Україна, МКВ7 G01N 22/00 H01Q13/00 Пристрій для неруйнівного контролю товщини тонких діелектричних плівок / В. Є. Буданова, М. М. Сусллова, О. Л. Шубенко. Бюл. 2007 №1 - 4 с.
2. Потапов А. И., Игнатов В. М., Александров Ю. Б. и др. Технологический неразрушающий контроль пластмасс. - Л.: Химия, 1979. - 288 с.

3. Seoktae Kim, Cam Nguyen. On the Development of a Multi-function Millimeter-Wave Sensor for Displacement Sensing and Low-Velocity Measurement // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. - 2004. - 52, №11. - P.17.
4. Харвей А. Ф. Техника СВЧ / Пер. с англ. под ред. В. И. Сушкевича. - М.: Сов. радио, 1965. - 178 с.

#### MEASURING SHOULDER OF MILLIMETER-WAVEBAND INTERFEROMETER FOR THICKNESS CONTROL OF THE THIN DIELECTRIC FILMS

V. E. Budanov, N. N. Suslov, A. L. Shubenko, V. Yu. Stepanov

The new wave guiding tract which is consist of the parallel plates of open waveguide and two sector horns of special geometry, which ones are provide in the measuring interferometer's shoulder of an submillimeter resolving capacity in the 4-mm waveband at the contact less thickness dielectric films control during their production is under consideration.

**Key words:** millimeter-waveband interferometer, wave guiding tract.

#### ВИМІРЮВАЛЬНЕ ПЛЕЧО ІНТЕРФЕРОМЕТРУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ СТРУНКІХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛІВОК

В. Е. Буданов, Н. Н. Суслов, А. Л. Шубенко, В. Ю. Степанов

Досліджується запропонований новий хвильоведучий тракт, що складається із плоскопаралельного відкритого хвильоводу і двох секторних рупорів спеціальної геометрії, який при використанні його у складі вимірювального плеча інтерферометра 4-мм діапазону забезпечує можливість субмікронної розрізняльної здатності при безконтактному контролі товщини тонких діелектричних плівок у процесі їх виробництва.

**Ключові слова:** інтерферометр міліметрового діапазону, хвильоведучий тракт.

Рукопись поступила 30 мая 2007 г.