

УДК 535.417

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТОЛЩИНЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ ПЛЕНОК ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ МОД С РАЗНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

А. Ю. Агапов, Л. Н. Дерюгин, С. В. Зайцев и А. В. Чекан

Рассматриваются возможности определения изменений по толщине тонкопленочных оптических волноводов на основе измерения ширины полос интерференции полей рассеяния двух волноводных мод с разной поляризацией — ТЕ и ТМ. Рассчитана погрешность метода для волноводов с различными показателями преломления волноводных слоев. Приводятся результаты экспериментальных исследований изменений толщины волноводных пленок полистирола на стекле.

Введение

Отклонение параметров волноводных пленок от номинальных значений приводит к изменениям фазовой скорости волноводных волн, что может существенно изменить характеристики тонкопленочных оптических устройств [1-3]. Поэтому обеспечение достаточной однородности оптических волноводных пленок является необходимым условием создания эффективно работающих устройств. При этом допустимая относительная неоднородность пленок по фазовой скорости распространяющихся в них волноводных волн в ряде случаев имеет порядок $0.1 \div 0.01\%$, что соответствует изменениям по толщине пленки на десятки и даже единицы ангстрем. Известные интерференционные методы измерения параметров тонких диэлектрических пленок позволяют получить требуемую точность только при значительном усложнении техники измерений. В связи со сказанным возникает необходимость изыскания новых путей контроля изменений по толщине тонких оптических волноводных пленок, отвечающих особенностям и задачам волноводной оптики.

Использование волноводных свойств тонких пленок в сочетании с интерферометрическими методами позволяет измерить изменение толщины пленок вдоль направления распространения волноводной волны с более высокой точностью, чем при обычной интерферометрии, что представлено в нашей работе [4], где рассматривается возможность измерения неоднородности по толщине тонкопленочного волновода с излучающей дифракционной решеткой. Однако необходимость дифракционного вывода излучения по всей длине волновода ограничивает применение такого метода. Ниже рассматривается возможный метод измерения изменений по толщине волновода, не требующий вывода излучения и основанный на описанном в [5] явлении интерференции полей рассеяния двух волноводных мод, имеющих различную ТЕ и ТМ поляризацию.

Сущность метода измерений

Рассмотрим трехслойный диэлектрический волновод, образованный средами с показателями преломления: верхней — n_1 , несущего слоя для ТЕ мод — n_2 , несущего слоя для ТМ мод — n_2^* , подложки — n_3 , при толщине волноводной пленки — h . Коэффициенты замедления фазовой скорости волноводных мод с индексом m для ТЕ мод — γ_m и для ТМ мод — γ_m^* связаны с параметрами волновода известными дисперсионными уравнениями

$$K_0 h \sqrt{n_2^2 - \gamma_m^2} = \arctg \frac{\sqrt{\gamma_m^2 - n_1^2}}{\sqrt{n_2^2 - \gamma_m^2}} + \arctg \frac{\sqrt{\gamma_m^2 - n_3^2}}{\sqrt{n_2^2 - \gamma_m^2}} + m\pi, \quad (1)$$

$$K_0 h \sqrt{n_2^{*2} - \gamma_m^{*2}} = \arctg \frac{n_2^{*2} \sqrt{\gamma_m^{*2} - n_1^2}}{n_1^2 \sqrt{n_2^{*2} - \gamma_m^{*2}}} + \arctg \frac{n_2^{*2} \sqrt{\gamma_m^{*2} - n_3^2}}{n_3^2 \sqrt{n_2^{*2} - \gamma_m^{*2}}} + m\pi, \quad (2)$$

где $K_0 = 2\pi/\lambda_0$ — постоянная распространения в свободном пространстве. Пусть в волноводе вдоль некоторого направления распространяются две волноводные моды ТЕ и ТМ с постоянными распространения $K = K_0 \gamma_m$ и $K = K_0 \gamma_m^*$, которые рассеиваются на поверхностных и объемных центрах. Тогда вследствие деполаризации полей рассеяния возникает интерференционная картина с периодом в соответствии с [5]

$$\Lambda = \lambda_0 |\gamma_m - \gamma_m^*|^{-1}. \quad (3)$$

Предположим, что вдоль направления распространения изменяется толщина волноводной пленки h при постоянных остальных параметрах волновода — n_1 , n_2 , n_2^* , n_3 . В этом случае изменяются и коэффициенты замедления фазовой скорости мод, и интерференционная картина становится неперiodичной. В предположении, что на ширине интерференционной полосы толщина меняется мало, в соответствии с (3), можно вычислить $\Delta\gamma = \gamma_m - \gamma_m^*$ на полосе и далее с помощью дисперсионных уравнений (1), (2), рассчитать толщину волновода h . Записать аналитический вид функции $h(\Lambda)$ при решении системы уравнений (1), (2) и (3) не удастся, однако использование современных вычислительных методов на ЭВМ позволяет решить эту задачу.

Возможности метода и точность измерений толщины пленок

1. Трехслойный волновод с изотропным несущим слоем. Для анализа возможностей метода были рассчитаны таблицы зависимости периода интерференционной картины Λ от толщины волноводной пленки h при различных показателях преломления n_1 , $n_2 = n_2^*$, n_3 сред, составляющих волновод. Результаты расчета для трех разных пленок на стеклянной подложке на длине волны $\lambda_0 = 0.6328$ мкм приведены на рис. 1. Погрешность измерения толщины пленки рассчитывалась по формуле

$$\Delta h = \left| \frac{\partial h}{\partial \Lambda} \right| \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} \Lambda, \quad (4)$$

где производная $\partial h / \partial \Lambda$ рассчитывалась при фиксированных параметрах волновода. На рис. 2 представлены графики зависимости Δh от толщины волноводных пленок при погрешности в определении ширины интерференционных полос $\Delta \Lambda / \Lambda = 0.1$ для волноводов с теми же параметрами, что и на рис. 1. Расчеты проводились для ТЕ₀ и ТМ₀ мод.

По результатам расчетов можно сделать выводы, что для изотропных волноводных пленок с небольшой разностью показателей преломления $n_2 - n_3 < 0.1$ ширина интерференционных полос $\Lambda > 0.05$ мм, что удобно для обработки, и метод может быть применен практически для пленок любой толщины; для пленок с большей разностью показателей преломления $n_2 - n_3 > 0.2$ ширина полос может быть менее 0.01 мм, что необходимо учесть при экспериментальных измерениях, в этом случае метод более удобен для пленок с большей толщиной — $h > 0.5$ мкм.

2. Трехслойный волновод с двойным лучепреломлением. Практически во всех тонкопленочных оптических волноводах, которые исследовались на наличие двойного лучепреломления, было обнаружено это свойство [6-8]. Разность показателей преломления пленки для волноводных волн разных поляризаций $\Delta = n_2^* - n_2$ существенно зависит от технологии ее изготовления и обычно составляет от 0.002 до 0.02. В этих пределах, как и для волновода с изотропным несущим слоем, были рассчитаны зависимости $\Lambda(h)$ и $\Delta h(h)$ при $\lambda_0 = 0.6328$ мкм и погрешности в определении ширины интерференционных полос $\Delta \Lambda / \Lambda = 0.1$. Для одного значения $\Delta = 0.005$ на рис. 3 представ-

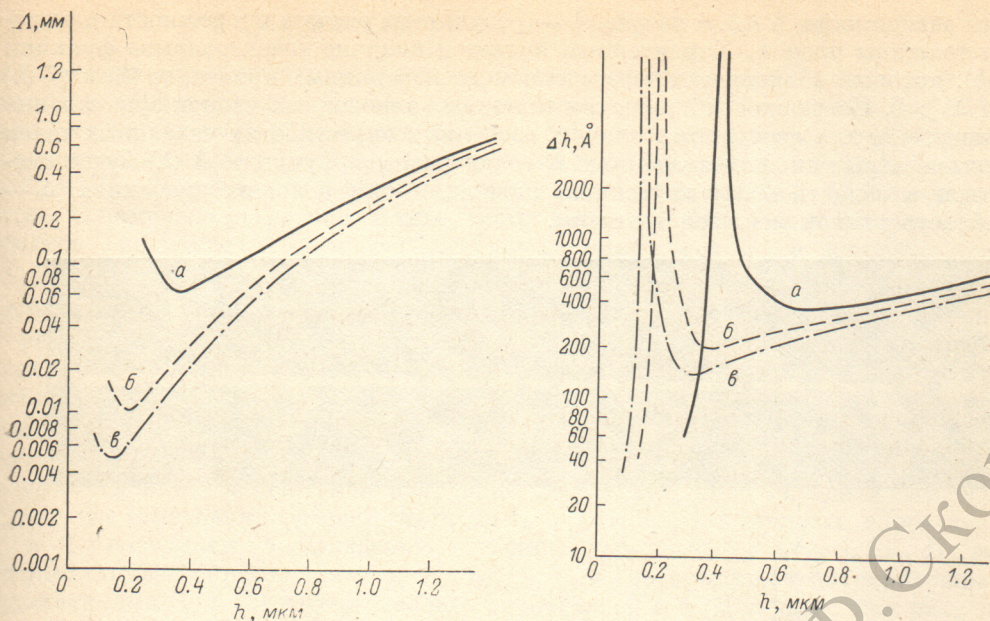


Рис. 1. Зависимость периода интерференционной картины полей рассеяния TE_0 , TM_0 волн от толщины изотропной волноводной пленки при $n_1=1.0$, $n_3=1.513$.

$a - n_2=1.6$, $b - n_2=1.8$, $c - n_2=2.0$.

Рис. 2. Погрешность измерения толщины изотропной волноводной пленки при $n_1=1.0$, $n_3=1.513$.

$a - n_2=1.6$, $b - n_2=1.8$, $c - n_2=2.0$.

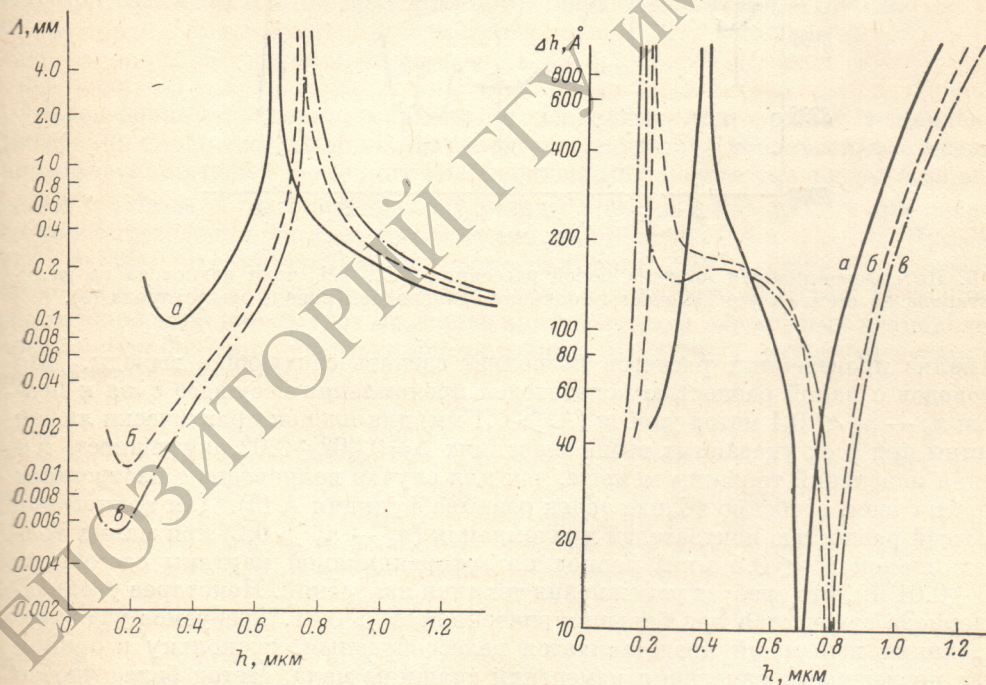


Рис. 3. Зависимость периода интерференционной картины полей рассеяния TE_0 , TM_0 волн от толщины волновода с двойным лучепреломлением при $n_1=1.0$, $n_3=1.513$.

$a - n_2=1.6$, $b - n_2=1.8$, $c - n_2=2.0$; $\Delta=0.005$.

Рис. 4. Погрешность измерения толщины волновода с двойным лучепреломлением при $n_1=1.0$, $n_3=1.513$.

$a - n_2=1.6$, $b - n_2=1.8$, $c - n_2=2.0$; $\Delta=0.005$.

лены зависимости $\Delta(h)$, а на рис. 4 — результаты расчета погрешности измерения толщины пленок. Характерным является наличие точек разрыва функции $\Delta(h)$, который объясняется пересечением дисперсионных кривых $\gamma_0(h)$ и $\gamma_0^*(h)$ при $\Delta > 0$. Погрешности измерения толщины волноводных пленок существенно меньше, чем для изотропных пленок, особенно в окрестностях указанных точек разрыва. При меньших значениях Δ точка разрыва функции $\Delta(h)$ будет смещаться в область больших толщин пленок, а при больших значениях Δ — в область пленок меньшей толщины.

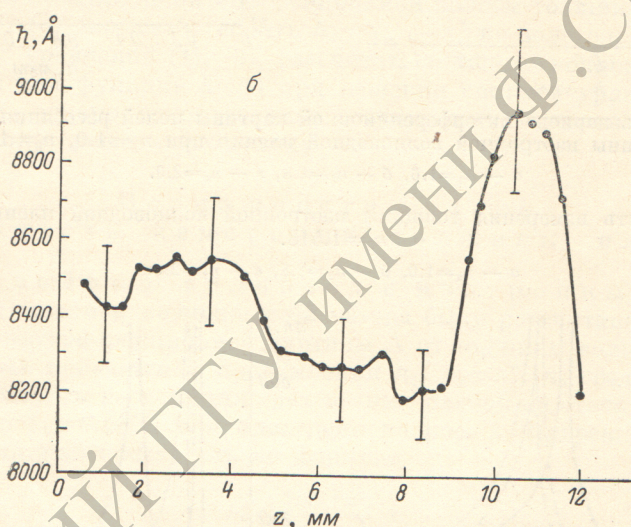
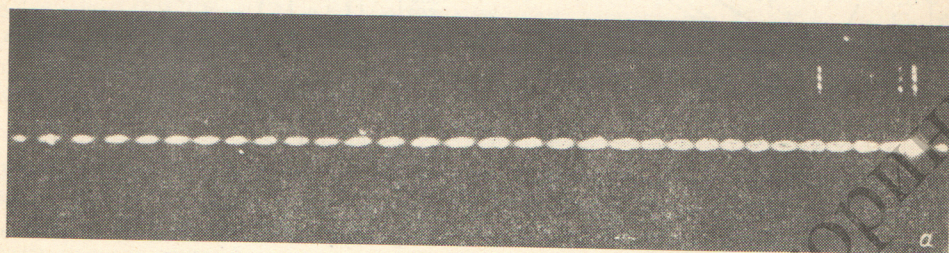


Рис. 5. Интерференционная картина полей рассеяния TE_0 , TM_0 волн волновода из полистирола на стекле (а) и изменения толщины волноводной пленки полистирола (б).

Анализ проведенных расчетов позволяет сделать следующие выводы. Для волноводов с малой разностью показателей преломления несущего слоя и подложки $n_2 - n_3 < 0.1$ метод удобен ($\Delta > 0.1$ мм) для пленок практически любой толщины при всех указанных выше значениях $\Delta = 0.002 \div 0.02$, погрешность измерения изменений толщины меньше, чем для случая волноводов с изотропным несущим слоем, особенно вблизи точек разрыва функции $\Delta(h)$. Для волноводов с большей разностью показателей преломления ($n_2 - n_3 > 0.2$) при малых толщинах пленок ($h < 0.5$ мкм) период интерференционной картины составляет $0.005 \div 0.01$ мм, что требует усложнения техники измерений. Некоторое увеличение периода отмечается при больших значениях $\Delta > 0.01$. Требуемое усложнение техники измерений представляется целесообразным, поскольку в данном случае погрешность измерения изменений толщины мала. Метод более удобен ($\Delta > 0.1$ мм) для пленок толщиной $h = 0.5 \div 1.5$ мкм, при этом погрешность также меньше, чем для волноводов с изотропным несущим слоем.

Следует отметить, что как для волноводов с изотропным несущим слоем, так и волноводов с двойным лучепреломлением функции $\Delta(h)$ имеют точки, где $\partial\Delta/\partial h = 0$, вблизи которых погрешность измерения изменений толщины пленок велика, что несколько ограничивает применение рассматриваемого метода в области малых толщин волноводных пленок.

Экспериментальные измерения изменений толщины проводились для волноводов, образованных пленками полистирола ($n_2=1.5852$) на стекле ($n_3=1.513$), полученных из раствора без специальной стабилизации скорости вытягивания. В волноводах вдоль некоторого направления z одновременно возбуждались моды TE_0 и TM_0 . Картина интерференции полей рассеяния этих мод фотографировалась. С помощью регистрирующего микрофотометра МФ-4 по негативу определялись координаты интерференционных минимумов z_j и ширина полос $\Lambda_j = z_{j+1} - z_j$. Показатели преломления сред, образующих волноводы, были измерены ранее по коэффициентам замедления фазовой скорости волн волноводов с разным числом мод. Показатель преломления для TM мод n_2^* отличался даже для серии волноводов, изготовленных из одного раствора, величина $\Delta = n_2^* - n_2$ составляла от 0.0042 до 0.0050. Для каждого образца значение Δ определялось следующим образом. В области, где ранее была измерена ширина интерференционной полосы Λ_i , устанавливалась призма для вывода излучения. По направлениям главных максимумов излучения TE_0 и TM_0 мод определялись коэффициенты замедления фазовой скорости γ_0 и γ_0^* . Контроль точности определения γ_0 и γ_0^* проводился по совпадению величины $\Delta\gamma = \gamma_0 - \gamma_0^*$ с $\Delta\gamma_i = \lambda_0/\Lambda_i$. По экспериментально определенным $n_1, n_2, n_3, \gamma_0, \gamma_0^*$ в соответствии с дисперсионными уравнениями (1) и (2) рассчитывалась величина n_2^* и Δ . Для известных параметров n_1, n_2, n_2^*, n_3 были рассчитаны подробные таблицы зависимости периода интерференционной картины от толщины волноводных пленок. По таблицам определялась толщина волноводной пленки h_j на ширине экспериментально измеренной полосы Λ_j . На рис. 5 приведены фотография интерференционной картины и результаты определения изменений толщины для одного из образцов волноводной пленки полистирола на стекле. Погрешность Δh рассчитывалась, как и ранее, при $\Delta\Lambda/\Lambda=0.1$. Величина Δ для этого образца составляла 0.0049.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность измерения изменений толщины волноводных пленок при использовании явления интерференции полей рассеяния волноводных мод. Точность определения изменений толщины по рассматриваемому методу составила $100-500 \text{ \AA}$ при погрешности в определении ширины интерференционной полосы $\Delta\Lambda/\Lambda=0.1$. Применение специальных методов интерферометрии позволяет значительно повысить точность и проводить измерения с точностью до десятков ангстрем. Метод измерения изменений параметров на основе интерференции рассеянных волноводных полей может быть применен для многослойных, диффузных, полосковых и других волноводных систем.

Литература

- [1] D. C. Flanders, H. Kogelnik, R. V. Schmidt, C. V. Shank. Appl. Phys. Lett., 24, 194, 1974.
- [2] А. С. Кузали, А. В. Чекан. Опт. и спектр., 44, 148, 1978.
- [3] О. В. Константинов, М. Э. Райх. ЖТФ, 49, 703, 1979.
- [4] Л. Н. Дерюгин, С. В. Зайцев, А. В. Чекан. Опт. и спектр., 47, 380, 1979.
- [5] А. Ю. Агапов, С. В. Зайцев. Опт. и спектр., 51, 722, 1981.
- [6] J. P. Sosnowski, H. P. Weber. App. Phys. Lett., 21, 310, 1972.
- [7] J. Wei, S. J. Ingre, W. D. Westwood, S. Kos. Appl. Phys. Lett., 28, 317, 1976.
- [8] А. М. Гончаренко, В. К. Киселев, В. П. Редько, О. Д. Шляхтичев. Квант. электр., 5, 434, 1978.

Поступило в Редакцию 26 марта 1981 г