

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПИИ ПОЛИМЕРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ИХ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ МАТРИЦ МЮЛЛЕРА

© 2004 г. А. А. Галкин*; В. И. Кравченко**, доктор физ.-мат. наук; С. Н. Савенков***, канд. физ.-мат. наук;
В. П. Вербицкий**; Е. А. Оберемок***

* ОАО "Укрпластик", Киев, Украина

** Институт прикладных проблем физики и биофизики НАН Украины, Киев, Украина

*** Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

E-mail: vilenkr@iptelecom.net.ua

С помощью метода Мюллера исследованы ориентационный порядок в многослойных полимерных пленках и шероховатость их поверхности. Пленки и их поверхность моделируются эквивалентной оптической системой, состоящей из последовательно расположенных элементов с линейной и круговой амплитудной и фазовой анизотропией. Обсуждается вопрос применимости матриц Мюллера-Джонса для нахождения параметров полимерных пленок в процессе их производства.

Коды OCIS: 120.6660, 230.4170.

Поступила в редакцию 22.10.2003.

Поляризационные методы широко используются для исследования пленок. Известно, что матрица Мюллера содержит все поляризационные характеристики объекта. Однако эта информация содержится в неявном виде. Если можно пренебречь влиянием деполяризации, то интерпретация полученных результатов значительно упрощается. В этом случае поляризационные свойства объекта могут быть представлены посредством детерминированной матрицы Мюллера, которая может быть задана в общем случае с помощью семи параметров [1]. Однако шероховатость поверхности полимерных пленок и неоднородность толщины слоев приводят к деполяризации излучения при взаимодействии с пленкой [2]. Деполяризующие свойства пленок можно оценить по величине энтропии матрицы когерентности, которая строится с помощью линейных преобразований матрицы Мюллера. Предполагается, что если энтропия матрицы когерентности не превосходит величины 0,5, то реальный объект можно адекватно описать с помощью детерминированной матрицы Мюллера [3].

В этом случае можно реальную матрицу Мюллера представить в виде произведения четырех базисных матриц, которые описывают линейную и круговую амплитудную, а также линейную и круговую фазовую анизотропию, а сам реальный объект — в виде четырех слоев с соответствующими анизотропными свойствами, расположенных один за другим [4].

В настоящей работе на примере полимерных двумерно растянутых многослойных пленок иллюстрируется применимость представления матрицы

Мюллера в базисе детерминированных матриц для исследования параметров анизотропии многослойных полимерных пленок и идентификация шероховатости их поверхности.

Параметры анизотропии полимерных пленок

Измерения проводились на поляриметре, собранном по схеме двух вращающихся фазовых пластинок. Ошибка измерения матрицы Мюллера составляла 2%.

В качестве тестового объекта, позволяющего судить о принципиальной применимости методики для определения ориентационного порядка, исследовались пленочные поляризатор и анализатор.

Результаты исследования параметров анизотропии пленочных поляризационных элементов представлены в табл. 1. Экспериментальные матрицы Мюллера и построенные соответствующие детерминированные матрицы M , приведены в приложении.

Известно, что пленочные поляризаторы изготавливаются из полимерных материалов с полностью ориентированными полимерными цепями, направленными перпендикулярно оси пропускания. Как видно из параметров анизотропии (табл. 1), ось поляризатора и ось линейной фазовой анизотропии ортогональны между собой [$(\theta - \alpha) = 0$ — для поляризатора и $(\theta - \alpha) = 90^\circ$ — для анализатора], а линейная фазовая анизотропия имеет значительную величину ($\delta = 90^\circ$). Ошибка измерения азимута ориентировки молекулярных цепей не превышает $0,2^\circ$. Полученные данные позволяют говорить о

принципиальной применимости методики для исследования ориентационного порядка пленочных полимерных материалов, результаты исследования которых представлены ниже.

В качестве образцов использовались пятислойные полимерные пленки толщиной 30 мкм. Исследовались два типа пленок – с матовой и зеркальной поверхностями. При этом образцы, обозначенные ниже № 1 и 2, были прозрачными, а на одну из сторон аналогичных пленок (образцы № 3 и 4) было нанесено алюминиевое покрытие.

При определении ориентационного порядка поверхность пленок устанавливалась перпендикулярно направлению зондирующего пучка. Исследовались поляризационные характеристики прошедшего сквозь образец излучения. Параметры анизотропии приведены в табл. 2, соответствующие матрицы в приложении.

Из полученных параметров анизотропии видно, что $P \approx 1$, $R \approx 0$, а значит, амплитудной циркулярной или линейной анизотропии образцы не проявляют. В то же время все образцы, за исключением образца № 1, имеют значительную линейную фазовую анизотропию (δ), что говорит о наличии в них ориентированных микрокристаллов. Образец № 1 имеет меньшую (δ , φ) фазовую анизотропию, и, видимо, в нем микрокристаллы дезориентированы в пространстве. Он обладает значительно меньшей прочностью.

При исследовании шероховатости поверхности полимерной пленки ставилась задача идентификации поверхностей равной шероховатости. Зондирующее излучение направлялось на исследуемую поверхность под углом 30° . Причем для пленок без напыления зондирующее излучение направлялось непосредственно на исследуемую поверхность, а поверхность пленок с покрытием исследовалась при прохождении излучения через образец с последующим отражением от покрытия. При анализе отраженного излучения выделялся фрагмент спекл-поля. Исследовались образцы пленок, обозначенных ранее под № 1–4.

Параметры анизотропии приведены в табл. 3, а матрицы в Приложении.

Видно, что величины фазовой линейной и циркулярной анизотропии попарно практически совпадают по модулю для образцов № 1, 3 и № 2, 4.

Так как поверхность образцов № 3 и 4 по условиям эксперимента развернута на 180° по отношению к соответствующей поверхности образцов № 1 и 2, то эквивалентная этим поверхностям оптическая система также должна быть развернута. Операция транспонирования, примененная к производству описывающих такую систему базовых матриц, приведет к изменению знака фазовой анизотропии.

Таблица 1. Параметры анизотропии пленочного поляризатора и анализатора

Параметр	Поляризатор	Анализатор
H	0,031	0,044
R	0,002	0
P	0	0
θ	$0,11^\circ$	$90,24^\circ$
δ	-90°	90°
α	$0,1^\circ$	$0,02^\circ$
φ	$0,13^\circ$	$0,06^\circ$

Примечание. H – энтропия матрицы когерентности; P , R , φ – линейная амплитудная анизотропия, круговая амплитудная анизотропия, круговая фазовая анизотропия; θ , δ , α – азимут ориентации линейной амплитудной анизотропии, линейная фазовая анизотропия, ориентация азимута линейной фазовой анизотропии.

Таблица 2. Параметры анизотропии пленок

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
H	0,041	0,026	0,034	0,026
R	$-7,5 \times 10^{-4}$	$-0,0035$	0,0035	$-3,96 \times 10^{-4}$
P	0,9894	0,9891	0,9580	0,9810
θ	$44,21^\circ$	$133,6^\circ$	$54,08^\circ$	$160,7^\circ$
δ	$3,5^\circ$	$31,09^\circ$	$8,4^\circ$	$8,9^\circ$
α	$175,2^\circ$	$90,1^\circ$	$49,44^\circ$	$179,6^\circ$
φ	$0,091^\circ$	$0,13^\circ$	$0,13^\circ$	$0,2^\circ$

Таблица 3. Параметры анизотропии поверхности пленок

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
H	0,17	0,18	0,13	0,13
R	0,0133	0,0113	$-0,0063$	$-0,0040$
P	0,7721	0,7962	0,9825	0,9415
θ	$178,6^\circ$	$2,6^\circ$	$144,1^\circ$	$141,6^\circ$
δ	$176,4^\circ$	160°	$-181,1^\circ$	$-193,4^\circ$
α	$96,1^\circ$	$177,4^\circ$	$82,1^\circ$	$0,98^\circ$
φ	$14,2^\circ$	$-2,8^\circ$	$-14,3^\circ$	$3,08^\circ$

Таким образом, оказывается, что эквивалентная фазовая анизотропия исследуемых поверхностей попарно совпадает по величине и знаку для образцов № 1, 3 и № 2, 4.

Выводы

Предложенная модель, представляющая объект как четырехслойную оптическую систему, состоящую из последовательно расположенных линейного и кругового поляризаторов, а также пластин с линейной и круговой фазовой анизотропией, оказывается достаточной для поляризационного контроля параметров многослойной полимерной пленки в процессе ее изготовления. С ее помощью удастся выделить участки с нарушенным ориентационным порядком, а также идентифицировать шероховатость поверхности пленки.

Наиболее примечательным является тот факт, что информации, полученной на основании такой модели, оказывается достаточно для определения пространственной ориентации пленки относительно зондирующего излучения. В этом отношении представление матрицы Мюллера в базисе четырех детерминированных матриц Мюллера является более информативным по сравнению с ее представлением одной матрицей Мюллера-Джонса.

Как показали измерения, энтропия матрицы когерентности не превышает значения 0,4 для эталонных металлических поверхностей 14-11-го классов чистоты, оптических линз и призм, а также большинства полимерных пленок, что позволяет при исследовании свойств этих объектов, включая шероховатость их поверхности, применять представление матрицы Мюллера посредством детерминированных матриц.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Матрица Мюллера пленочного поляризатора

$$\begin{vmatrix} 1 & 1,0086 & 0,0060 & 0,0039 \\ 0,9935 & 0,9999 & 0,0017 & 0,0040 \\ 0,0083 & 0,0083 & 0,0004 & -0,0001 \\ 0,0003 & 0,0003 & -0,0002 & -0,0001 \end{vmatrix}.$$

Построенная детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,9998 & 0,0038 & 0,0039 \\ 0,9999 & 0,9999 & 0,0038 & 0,0039 \\ 0,0082 & 0,0082 & 1,7403 \times 10^{-4} & 6,6365 \times 10^{-5} \\ 3,0035 \times 10^{-4} & 2,9992 \times 10^{-4} & -3,2861 \times 10^{-5} & 1,4367 \times 10^{-4} \end{vmatrix}.$$

Матрица Мюллера пленочного анализатора

$$\begin{vmatrix} 1 & -0,9959 & -0,0099 & 0,0002 \\ -0,9851 & 0,9904 & 0,0084 & -0,0002 \\ -0,0103 & 0,0122 & -0,0025 & 0,0003 \\ 0,0003 & -0,0006 & -0,0004 & 0 \end{vmatrix}.$$

Построенная детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,9999 & -0,0092 & 1,9989 \times 10^{-4} \\ -0,9999 & 0,9998 & 0,0092 & -2,0449 \times 10^{-4} \\ -0,0113 & 0,0113 & -0,0012 & 3,4964 \times 10^{-4} \\ 4,5752 \times 10^{-4} & -4,5453 \times 10^{-4} & -3,5614 \times 10^{-4} & -0,0013 \end{vmatrix}.$$

Матрица Мюллера пленки № 1

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,0038 & 0,0131 & -9,3783 \times 10^{-4} \\ -0,0035 & 0,9904 & -0,0066 & 0,0122 \\ -0,0027 & -0,0023 & 0,9958 & 0,0677 \\ -0,0019 & -0,0076 & -0,0545 & 0,9969 \end{vmatrix}.$$

Детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & 1,4466 \times 10^{-4} & 0,0053 & -0,0015 \\ 1,1661 \times 10^{-4} & 0,999 & -0,0024 & 0,0100 \\ 0,0052 & 0,0018 & 0,9981 & 0,0612 \\ -0,0018 & -0,0102 & -0,0612 & 0,9981 \end{vmatrix}.$$

Матрица Мюллера пленки № 2

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -0,0016 & -0,0024 \\ -5,6902 \times 10^{-4} & 0,9964 & 0,0059 & -0,0025 \\ -0,0059 & -0,0022 & 0,8546 & -0,5884 \\ -0,0081 & -0,0031 & 0,5106 & 0,8514 \end{vmatrix}$$

Детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & -2,6484 \times 10^{-4} & -0,0054 & -0,0031 \\ -2,8890 \times 10^{-4} & 1 & 0,0047 & -4,8191 \times 10^{-4} \\ -0,0030 & -0,0043 & 0,8563 & -0,5165 \\ -0,0055 & -0,0020 & 0,5165 & 0,8563 \end{vmatrix}$$

Матрица Мюллера пленки № 3

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,0247 & 0,0096 & -0,0015 \\ 0,0158 & 0,9889 & -0,0095 & 0,0096 \\ -8,4222 \times 10^{-4} & -0,0014 & 0,9914 & 0,1442 \\ -0,0015 & -0,0053 & -0,1375 & 0,9900 \end{vmatrix}$$

Детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & -0,0065 & 0,0200 & 0,0070 \\ -0,0074 & 0,9892 & 0,0030 & -0,1449 \\ 0,0199 & -0,0063 & 0,9997 & -0,0213 \\ 0,003 & 0,1448 & 0,0221 & 0,9890 \end{vmatrix}$$

Матрица Мюллера пленки № 4

$$\begin{vmatrix} 1 & -0,0073 & 0,0066 & 0,0020 \\ -0,0154 & 0,9863 & -0,0046 & 0,0093 \\ -0,0016 & -0,0027 & 0,9878 & -0,1490 \\ 1,2222 \times 10^{-4} & 0,0130 & 0,1506 & 0,9820 \end{vmatrix}$$

Детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,0073 & -0,0058 & -7,9228 \times 10^{-4} \\ 0,0073 & 0,9999 & 0,0081 & 0,0034 \\ -0,0059 & -0,0086 & 0,9878 & 0,1552 \\ 9,6052 \times 10^{-5} & -0,0021 & -0,1552 & 0,9878 \end{vmatrix}$$

Матрица Мюллера поверхности пленки № 1

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,1606 & -0,0168 & 0,0243 \\ 0,0849 & 0,9225 & -0,0559 & -0,0196 \\ -0,0116 & -0,0715 & -0,9184958 & -0,0529 \\ -0,0266 & -0,0046 & -0,0617 & -0,9766 \end{vmatrix}$$

Детерминированная матрица Мюллера

$$\begin{vmatrix} 1 & 0,1284 & -0,0062 & -0,0266 \\ 0,1281 & 0,9971 & -0,0692 & -0,0139 \\ -0,0044 & -0,0699 & -0,9871 & -0,0597 \\ -0,0284 & -0,0133 & 0,0607 & -0,9898 \end{vmatrix}$$

Матрица Мюллера поверхности пленки № 2

1	0,1057	-0,0184	0,0209
0,0906	0,9677	-0,0803	-0,0079
-0,0020	-0,0632	-0,8082	0,2758
-0,0235	-0,0184	-0,2867	-0,8232

Детерминированная матрица Мюллера

1	0,1129	0,0106	-0,0226
0,1117	0,9965	-0,0782	-0,0010
-0,0110	-0,0743	-0,9362	0,3236
-0,0280	-0,0294	-0,3227	-0,9394

Матрица Мюллера поверхности пленки № 3

1	-0,0091	-0,0431	-0,0137
0,0117	1,0122	-0,0117	0,0065
-0,0263	-0,0878	-0,9503	-0,0271
0,0119	0,0043	0,0128	-0,9891

Детерминированная матрица Мюллера

1	0,0019	-0,0086	-0,0128
0,0023	0,9986	-0,0508	0,0046
0,0087	-0,0506	-0,9984	-0,0204
0,0126	0,0056	0,0200	-0,9997

Матрица Мюллера поверхности пленки № 4

1	-0,0034	0,0644	-0,0015
0,0173	0,9957	0,0076	0,0093
-0,0076	-0,0813	-0,9001	0,2204
-0,0015	0,0051	-0,2141	-0,9219

Детерминированная матрица Мюллера

1	0,0069	-0,0293	$-8,0396 \times 10^{-4}$
0,0080	0,9988	-0,0369	0,0170
0,0280	-0,0397	-0,9719	0,2318
0,0076	0,0080	-0,2324	-0,9722

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jellison G.E.* Spectroscopic ellipsometry data analysis: measured versus calculated quantities // *Thin Solid Films*. 1998. V. 313–314. P. 33–39.
2. *Forcht K., Gombert A., Joerger R., Kohl M.* Ellipsometric investigation of thick polymer films // *Thin Solid Films*. 1998. V. 313–314. P. 808–813.

3. *Cloude C.R., Potter E.* Concept of polarization entropy in optical scattering // *Optical Engin.* 1995. V. 34. № 6. P. 1599–1610.
4. *Савенков С.М., Оберемок Э.А.* Роз'язок оберненої задачі поляриметрії для детермінованих об'єктів на основі неповних матриць Мюллера // *Укр. физ. журнал*. 2002. Т. 47. № 8. С. 803–807.