

УДК 535.24

© А. Ю. Иванов

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДИКАТРИС ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ РАССЕЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ОБЛУЧЕНИИ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Разработана методика измерения индикатрис элементов матрицы коэффициентов обратного рассеяния шероховатых поверхностей различных материалов при импульсном лазерном облучении. Описывается экспериментальная установка для проведения таких измерений, имеющая временное разрешение $\sim 10^{-9}$ с. Приводятся полученные экспериментальные результаты (индикатрисы элементов матрицы коэффициентов яркости) для ряда различных материалов, которые могут использоваться в справочных целях.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все более актуальной становится задача исследования процессов взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твердого тела. Определение свойств поверхности важно при проведении поляриметрических и эллипсометрических измерений, для контроля качества поверхности при обработке материалов, для контроля качества элементной базы лазерных технологий, кристаллических активных сред и пр., а также в нелинейной оптике.

Один из методов изучения свойств поверхности основан на измерении индикатрис элементов матрицы коэффициентов обратного рассеяния (отражения) шероховатых поверхностей различных материалов при импульсном лазерном облучении. Целью данной работы являлось разработка методики и создание экспериментальной установки для проведения подобных исследований, а также проведение конкретных измерений на ряде конкретных материалов.

1. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Отражательные характеристики тел наиболее полно описываются 16-элементной матрицей Мюллера M [1]. В случае, когда падающая волна линейно-поляризована, для описания процесса рассеяния излучения на исследуемом материале достаточно знать всего 4 ее элемента [2]:

$$M \equiv [E_{ij}] = \begin{pmatrix} E_S^S & E_P^S \\ E_S^P & E_P^P \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $i, j = 1, 2$; E — напряженность поля в падающей (отраженной) волне; индекс S указывает на ориентацию вектора \mathbf{E} , перпендикулярную плос-

кости падения; индекс P указывает на ориентацию вектора \mathbf{E} , параллельную плоскости падения; верхний индекс указывает состояние поляризации в падающей, а нижний индекс в отраженной волне.

Поскольку [3]

$$\beta \sim B \sim b_\lambda \sim \Phi, \quad (2)$$

где β , B и b_λ — соответственно коэффициент яркости, яркость и спектральная плотность яркости поверхности исследуемого материала в данном направлении, и поток излучения источника, отраженный от поверхности тела,

$$\Phi \sim E^2, \quad (3)$$

где E^2 — квадрат напряженности поля в отраженной волне, то

$$\beta \sim E^2. \quad (4)$$

Соответственно элементы матрицы рассеяния коэффициента яркости

$$[\beta_{ij}]_{i,j=1,2} = \begin{pmatrix} \beta_S^S & \beta_P^S \\ \beta_S^P & \beta_P^P \end{pmatrix} \quad (5)$$

однозначно связаны с элементами матрицы Мюллера (1) и достаточно полно описывают процесс рассеяния излучения на поверхности исследуемого материала.

Пусть на плоскую поверхность исследуемого образца падает линейно-поляризованное излучение. При рассеянии на поверхности возможны следующие варианты частичного изменения состояния поляризации: деполяризация и превращение линейной поляризации в эллиптическую. При этом плоскость и ориентация полуосей этого эллипса могут не совпадать с плоскостью и ориентацией вектора \mathbf{E} в падающей волне. Однако если исследуемый материал не является оптически ак-

тивным веществом, то в отраженной волне часть излучения деполаризуется, а оставшаяся часть остается линейно-поляризованной [4]. Откладывая по оси аппликат величину, пропорциональную интенсивности отраженного излучения (например коэффициент яркости, коэффициент отражения или удельную эффективную поверхность рассеяния (ЭПР)), а по осям абсцисс и ординат, расположенным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, углы рассеяния, получим некую поверхность рассеяния исследуемого материала — пространственное представление матрицы Мюллера. Выделяя определенное направление колебаний вектора \mathbf{E} в отраженной волне, будем получать соответствующие сечения этой поверхности рассеяния.

Так, выделяя E_S^S -компоненту, получим сечение, лежащее в плоскости XZ ; а выделяя E_P^S -компоненту — сечение, лежащее в плоскости YZ . В случае идеального диффузного отражателя поверхность рассеяния вырождается в поверхность вращения, и для ее измерения достаточно будет измерить индикатрису $\beta(\varphi)$ при какой-нибудь одной ориентации вектора \mathbf{E} в отраженной волне

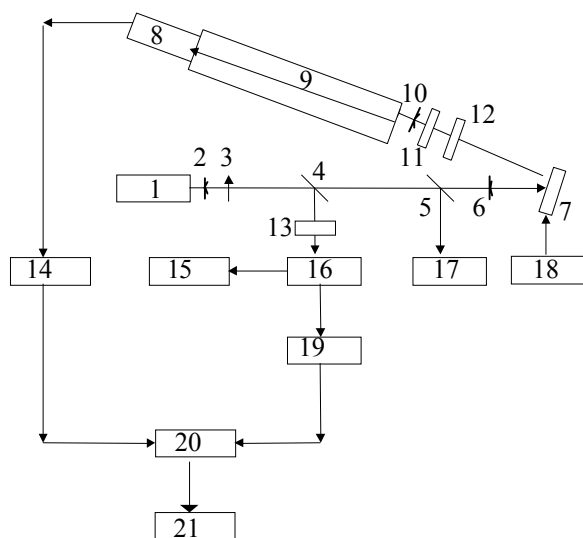


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, где 1 — импульсный лазер, 2, 6, 10 — ирисовые диафрагмы, 3 — механический затвор, 4, 5 — светоделительные пластины, 7 — исследуемый образец, 8 — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), 9 — светоизолятор, 12, 13 — нейтральные светофильтры, 11 — анализатор поляризации рассеянного излучения лазера, 14 — линия задержки, 15 — счетчик импульсов, 16 — фотодиод, 17 — измеритель энергии излучения лазера, 18 — устройство поворота образца, 19 — аттенуатор, 20 — стробоскопический осциллограф, 21 — ПЭВМ

[5, 6]. В случае идеального зеркального отражателя все рассеянное излучение останется линейно-поляризовано, и элементы β_P^S и β_S^P будут равны 0. В случаях зеркально-диффузного и световозвращающего отражателя реализуются промежуточные формы поверхности рассеяния. Тип рассеяния зависит от отношения среднеквадратичной шероховатости поверхности исследуемого материала R_z к длине волны падающего излучения λ . Так, при $R_z/\lambda \ll 1$ происходит зеркальное, при $R_z/\lambda \geq 1$ — диффузное, а при $R_z/\lambda \sim 1$ — зеркально-диффузное рассеяние. В общем случае при падении линейно-поляризованного излучения на плоскую поверхность исследуемого материала для расчета поверхности рассеяния достаточно измерить индикатрисы четырех элементов матрицы рассеяния $[\beta_{ij}]_{i,j=1,2}$.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В задачу настоящей работы входило экспериментальное исследование индикатрис элементов матрицы рассеяния коэффициента яркости шероховатых поверхностей в обратном направлении при их облучении импульсным лазерным излучением с длительностью импульса порядка 10 нс. Для решения этой задачи была создана экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

Данная установка была построена для реализации методики измерения индикатрис коэффициента яркости шероховатых поверхностей материалов в обратном направлении [3] и отличалась лишь введением в приемном плече установки 8–12 анализатора поляризации 11 излучения лазера, рассеянного исследуемой поверхностью в данном направлении.

Измерения индикатрис элементов матрицы коэффициента яркости β_P^S и β_S^S поверхностей проводились в плоскости падения. Для этого направление оси вращения образца выбиралось параллельным направлению колебаний вектора \mathbf{E} в падающей волне. Измерения индикатрис элементов матрицы рассеяния коэффициента яркости β_P^P и β_S^P проводились в плоскости, перпендикулярной плоскости падения излучения лазера на исследуемый образец. Для этого направление оси вращения образца выбиралось перпендикулярным направлению колебаний вектора \mathbf{E} в падающей волне. Выделение направления колебаний вектора \mathbf{E} в отраженной волне осуществлялось с помощью поляроида-анализатора 12.

Расстояние от образца до фотоприемника $L = 2.2$ м [3]. Площадь проекции облучаемого участка поверхности исследуемого образца на

плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения, $\Delta S = 1 \text{ см}^2$. Телесный угол $\Delta\Omega$, в котором принималось рассеянное излучение, составлял 8.8×10^{-5} стер. Угол между направлением наблюдения и направлением лазерного луча составлял $\delta \sim 2.5^\circ$. Специально проведенный теоретический анализ показал, что при такой большой базе измерений L с точностью до 0.5 % при данных условиях эксперимента можно считать $\delta \sim 0^\circ$ и рассматривать данную ситуацию как пример обратного рассеяния в схеме с совмещенными источником и приемником излучения, а угол рассеяния полагать равным углу падения и углу поворота образца в устройстве 7.

Измерения проводились на длине волны 0.532 мкм. В качестве источника излучения использовался импульсный твердотельный лазер на Nd^{3+} : YAG типа ЛТИПЧ-5 (мощность импульса $\sim 10^4$ Вт; длительность импульса ~ 10 нс; скважность — $2 \cdot 10^6$ в спектральном интервале $\Delta\lambda = 1$ нм). Приемниками излучения служили ФЭУ-84-6 и фотодиод ФДК-155. В качестве нейтральных ослабителей использовался стандартный набор оптического стекла НС [7]. В работе использовался строб-осциллограф С7-16 с чувствительностью 0.1 мВ и временным разрешением 0.1 нс. Погрешность измерений определялась в основном нестабильностью излучения лазера и не превышала 20 %.

Рабочее выражение для определения индикатрис элементов матрицы рассеяния коэффициента яркости шероховатых поверхностей в направлении назад получается аналогично выражению для определения самого коэффициента яркости поверхностей исследуемых материалов в обратном направлении [3]:

$$\beta \cos \varphi = \frac{U}{U_{ид}}, \quad (6)$$

где U и $U_{ид}$ — величины сигналов рассеяния на исследуемом и эталонном (идеальном) образцах.

Таким образом, измеряя зависимость амплитуды импульса на выходе системы регистрации от угла поворота образца φ , можно получить индикатрисы элементов матрицы рассеяния коэффициента яркости исследуемой поверхности при ее облучении импульсным лазерным излучением с длительностью импульса порядка 10^{-8} с в схеме с совмещенными источником и приемником излучения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе исследовались плоские поверхности ряда образцов различных материалов (стекло, металлические пленки, текстолит, резина, ткань, различные покрытия и пр.) со среднеквадратичным отклонением высоты профиля шероховатости исследуемой поверхности в диапазоне $R_z = 0,007\text{--}37$ мкм (табл. 1). В качестве образца сравне-

ния использовалась пластина из оптического стекла МС-20 с коэффициентом отражения на рабочей длине волны 0.90 [8]. Индикатриса коэффициента яркости МС-20 близка к индикатрисе коэффициента яркости идеального диффузного отражателя [9].

Измерения R_z проводились на профилографе (модель 283), микроинтерферометре МИН-4 и микроскопе УИМ-1. Результаты измерений $[\beta_{ij}(\varphi)]$ сведены в табл. 2. На рис. 2–4 графически приведены результаты измерений $[\beta_{ij}(\varphi)]$ для типичных диффузного, зеркально-диффузного и зеркального отражателей. Шероховатость поверхности образцов составляла соответственно 0.88, 0.7 и 0.007 мкм. Шестиконечными звездочками показаны результаты наших измерений элементов β_S^S матрицы рассеяния исследуемых образцов; стрелками — результаты измерений элементов β_P^S матрицы рассеяния; треугольниками — результаты измерений элементов β_S^P , а результаты измерений элементов β_P^P матрицы рассеяния обозначены пятиконечной звездочкой. Аппроксимация полученных результатов проводилась по методу наименьших квадратов полиномами n -степени (где $n = 6$ и 3 для зеркально-диффузных и световозвращающих образцов, $n = 2$ — для диффузных образцов и $n = 8$ — для зеркальных образцов). Коэффициенты аппроксимации были индивидуальны для каждого образца и подбирались эмпирически с помощью компьютерной программы GRAPHOR ORIGIN'88 1.76.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработана методика и создана экспериментальная установка для исследования индикатрис элементов матрицы коэффициентов обратного рассеяния шероховатых поверхностей различных материалов при их импульсном лазерном облучении с длительностью импульса порядка 10^{-8} с. Были проведены измерения индикатрис элементов матрицы рассеяния коэффициента яркости ряда материалов в диапазоне $R_z = 0,007\text{--}37$ мкм (табл. 1). Как и следовало ожидать, полуширина полученных индикатрис элементов матрицы рассеяния коэффициента яркости исследуемых поверхностей материалов прямо пропорциональна, а степень деполяризации обратно пропорциональна отношению R_z/λ , где λ — длина волны излучения лазера. Полученные результаты приведены в табл. 2 и на рис. 2–4. Они могут быть полезны при проведении поляриметрических и эллипсометрических измерений, для контроля качества поверхности при обработке материалов, для контроля качества элементной базы лазерных технологий, кристаллических активных сред и пр., а также в нелинейной оптике.

Табл. 1. Характеристики исследуемых образцов

№ образца	Наименование образца	R _z , мкм	Примечание
0	Молочное стекло МС-20	0.88	Молочное стекло
1	Покрытие «ОКСИ»	1.5	Покр. серого цвета на метал. основе
2	Лак АК-113+ 2 % ПАП-2 (1 сл.)+ гр. ВЛ-02 (2 сл.)	0.7 + 2.3	Покр. серебрист. цвета на метал. основе
3	Эмаль ЭП-140 (2 сл.)+ гр. АК-070 (1 сл.)	0.9	Покр. белого цвета на тверд. основе
4	ПЭТФ-АД	0.07	Метал. фольга
5	Световозвращающая пленка (Голландия)	0.1 + 1.0+ 24	Световозвр. пленка
6	Световозвращающая пленка (СССР)	0.3 + 1.6+ 26	Световозвр. пленка
7	Эмаль ЭП-140 (1 сл.)+ гр. АК-070 (2 сл.)	0.8	Покр. белого цвета на тканевой основе
8	Черная стеклоткань	0.4 + 2.0	Черная стеклоткань
9	«MYLAR» (Япония)	0.007	Метал. фольга
10	ПСТ-ОФ-Д	2.8	Текстолит
11	Резина ВЖФ-50	3.4	Резина
12	Эмаль ЭП-547	0.58	Покр. зеленого цвета
13	МКТ-8	3.2	Покр. серебрист. цвета на тканевой основе
14	Белая стеклоткань	0.75	Белая стеклоткань
15	Эмаль ЭП-567 + шпатл. ЭП-0020 + ПСТ-ОФ-Д	0.61	Покр. серого цвета
16	МКТ-8	0.68	Текстолит
17	Резина ВТЭ	0.39	Резина
18	Эмаль ЭП-147 (2 сл.) «Болото»	2.4	Покр. зеленого цвета на тверд. основе
19	Эмаль ФП-566	0.45	Покр. серого цвета
20	Эмаль ЭП-525	1.2	Покр. темное
21	Пенопласт ПУ-101	37	Пенопласт
22	ПСТ-ОФ-Д+ лак АК-113	0.7	Текстолит с лак. покр.

Табл. 2. Индикатрисы матрицы рассеяния образцов

№ образца	φ											
	0°	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	$\beta_S^S = 1.00$	0.99	0.95	0.89	0.84	0.74	0.63	0.51	0.39	0.25	0.11	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.99	0.97	0.95	0.92	0.83	0.72	0.58	0.43	0.29	0.09	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.99	0.95	0.87	0.80	0.78	0.70	0.56	0.43	0.29	0.10	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.99	0.96	0.93	0.90	0.80	0.68	0.54	0.40	0.27	0.13	0

Табл. 2 (продолжение)

1	$\beta_S^S = 1.00$	0.70	0.47	0.26	0.22	0.17	0.13	0.11	0.09	0.06	0.03	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.99	0.97	0.94	0.90	0.77	0.62	0.49	0.37	0.24	0.09	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.94	0.82	0.69	0.60	0.41	0.30	0.13	0.03	0.01	0.01	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.46	0.32	0.25	0.21	0.16	0.12	0.08	0.05	0.03	0.01	0
2	$\beta_S^S = 1.00$	0.98	0.84	0.62	0.44	0.22	0.11	0.06	0.06	0.02	0	0
	$\beta_P^S = 1.00$	1.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0	0	0	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.88	0.80	0.75	0.53	0.50	0.43	0.30	0.25	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.89	56	0.40	0.25	0.19	0.12	0.08	0.05	0.04	0.01	0
3	$\beta_S^S = 1.00$	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	$\beta_S^S = 1.00$	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	$\beta_S^S = 1.00$	0.83	0.68	0.60	0.56	0.48	0.44	0.36	0.28	0.22	0.12	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.85	0.79	0.73	0.68	0.56	0.45	0.34	0.23	0.11	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.98	0.90	0.85	0.77	0.64	0.52	0.39	0.39	0.26	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.84	0.73	0.60	0.49	0.27	0.12	0.02	0	0	0	0
6	$\beta_S^S = 1.00$	0.74	0.58	0.48	42	0.37	0.28	0.21	0.13	0.06	0.02	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.90	0.84	0.74	0.67	0.50	0.34	0.17	0.04	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.93	0.90	0.89	0.81	0.74	0.65	0.56	0.39	0.22	0.12	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.72	0.64	0.58	0.54	0.48	0.47	0.46	0.44	0.42	0.39	0
7	$\beta_S^S = 1.00$	0.94	0.88	0.73	0.60	0.55	0.55	0.55	0.55	0.41	0.24	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	1.00	1.00	1.00	0.67	0.33	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.31	0.18	0.15	0.13	0.08	0.07	0.06	0	0	0	0
8	$\beta_S^S = 1.00$	0.91	0.82	0.73	0.63	0.57	0.54	0.50	0.33	0	0	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.93	0.85	0.77	0.70	0.62	0.54	0.51	0.46	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.13	0.13	0.09	0.04	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.42	0.20	0.16	0.13	0.09	0.06	0.04	0	0	0	0
10	$\beta_S^S = 1.00$	0.72	0.46	0.31	0.27	0.19	0.14	0.08	0.03	0.01	0	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.86	0.80	0.72	0.72	0.43	0.29	0.2	0.07	0.01	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.50	0.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.30	0.06	0.06	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0

Табл. 2 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	$\beta_S^S = 1.00$	0.99	0.95	0.88	0.82	0.72	0.62	0.51	0.41	0.28	0.16	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.98	0.95	0.92	0.87	0.76	0.62	0.52	0.38	0.19	0.09	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.80	0.75	0.63	0.58	0.50	0.35	0.18	0.08	0.03	0.01	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.97	0.93	0.90	0.86	0.75	0.65	0.54	0.40	0.29	0.22	0
12	$\beta_S^S = 1.00$	0.95	0.74	0.64	0.55	0.42	0.33	0.245	0.13	0.05	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.98	0.91	0.83	0.77	0.68	0.58	0.48	0.37	0.23	0.02	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.96	0.92	0.92	0.88	0.71	0.54	0.38	0.21	0.09	0.05	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.97	0.88	0.78	0.69	0.53	0.43	0.36	0.27	0.18	0.03	0
13	$\beta_S^S = 1.00$	0.95	0.90	0.82	0.74	0.59	0.42	0.27	0.12	0.04	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	1.00	0.94	0.88	0.75	0.57	0.398	0.19	0.07	0.01	0.01	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.86	0.79	0.68	0.57	0.40	0.29	0.22	0.15	0.07	0.01	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.98	0.97	0.93	0.88	0.74	0.58	0.37	0.20	0.07	0.01	0
14	$\beta_S^S = 1.00$	0.97	0.90	0.78	0.67	0.42	0.25	0.10	0.02	0.01	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.96	0.88	0.79	0.75	0.54	0.38	0.25	0.13	0.04	0.01	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.89	0.67	0.61	0.56	0.39	0.22	0.17	0.06	0.03	0.01	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.88	0.60	0.42	0.29	0.19	0.18	0.17	0.16	0.08	0.01	0
15	$\beta_S^S = 1.00$	0.73	0.55	0.45	0.38	0.21	0.14	0.07	0.07	0.07	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.99	0.80	0.80	0.60	0.60	0.40	0.40	0.40	0.20	0.01	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.09	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.22	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
16	$\beta_S^S = 1.00$	0.79	0.59	0.45	0.35	0.48	0.22	0.13	0.04	0.01	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.92	0.87	0.79	0.70	0.56	0.52	0.35	0.25	0.11	0.05	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.99	0.98	0.98	0.0.67	0.64	0.39	0.33	0.23	0.08	0.02	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.53	0.28	0.19	0.49	0.13	0.07	0.07	0.04	0.01	0.01	0
17	$\beta_S^S = 1.00$	0.71	0.53	0.44	0.38	0.26	0.17	0.10	0.05	0.02	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.84	0.72	0.67	0.61	0.50	0.34	0.22	0.06	0.01	0.01	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.96	0.91	0.86	0.81	0.67	0.53	0.38	0.19	0.05	0.01	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.65	0.49	0.44	0.39	0.34	0.31	0.27	0.22	0.17	0.01	0
18	$\beta_S^S = 1.00$	0.82	0.71	0.58	0.49	0.34	0.23	0.17	0.11	0.05	0.03	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.94	0.91	0.82	0.73	0.55	0.46	0.28	0.09	0.01	0.01	0
	$\beta_S^P = 1.00$	1.82	0.78	0.68	0.59	0.50	0.41	0.32	0.28	0.18	0.02	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.35	0.15	0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0

Табл. 2. (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
19	$\beta_S^S = 1.00$	0.88	0.78	0.71	0.61	0.44	0.39	0.20	0.12	0.04	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.96	0.92	0.88	0.88	0.84	0.80	0.56	0.40	0.20	0.03	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.91	0.91	0.88	0.86	0.73	0.55	0.37	0.18	0.07	0.02	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.49	0.29	0.18	0.14	0.10	0.08	0.06	0.05	0.02	0.01	0
20	$\beta_S^S = 1.00$	0.95	0.88	0.83	0.76	0.61	0.49	0.37	0.25	0.10	0.03	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.90	0.90	0.88	0.88	0.83	0.68	0.66	0.58	0.41	0.10	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.99	0.99	0.98	0.97	0.90	0.75	0.70	0.60	0.43	0.09	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.96	0.86	0.761	0.66	0.62	0.57	0.57	0.55	0.52	0.12	0
21	$\beta_S^S = 1.00$	0.99	0.98	0.97	0.95	0.90	0.85	0.75	0.66	0.53	0.35	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.96	0.92	0.88	0.83	0.74	0.63	0.52	0.42	0.28	0.14	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.989	0.96	0.92	0.90	0.82	0.72	0.62	0.53	0.42	0.34	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.98	0.95	0.91	0.85	0.75	0.66	0.54	0.43	0.27	0.16	0
22	$\beta_S^S = 1.00$	0.57	0.39	0.23	0.20	0.11	0.06	0.04	0.03	0.01	0.01	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.80	0.80	0.60	0.60	0.40	0.40	0.20	0.20	0.01	0.01	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.70	0.50	0.35	0.27	0.16	0.08	0.01	0.01	0.01	0.01	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.47	0.27	0.14	0.10	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0
	φ											
	0°	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
9	$\beta_S^S = 1.00$	0.13	0.07	0.04	0.02	0.01	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^S = 1.00$	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_S^P = 1.00$	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\beta_P^P = 1.00$	0.09	0.05	0.03	0.01	0	0	0	0	0	0	0

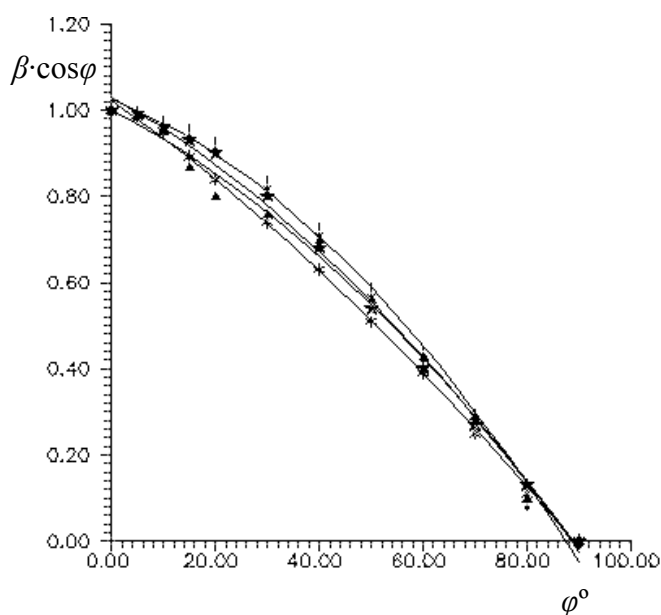


Рис. 2. Индикатрисы произведения $\beta(\varphi) \times \cos(\varphi)$ для элементов матрицы $[\beta_{ij}]_{i,j=1,2}$ коэффициента яркости образца № 0. Пояснения в тексте

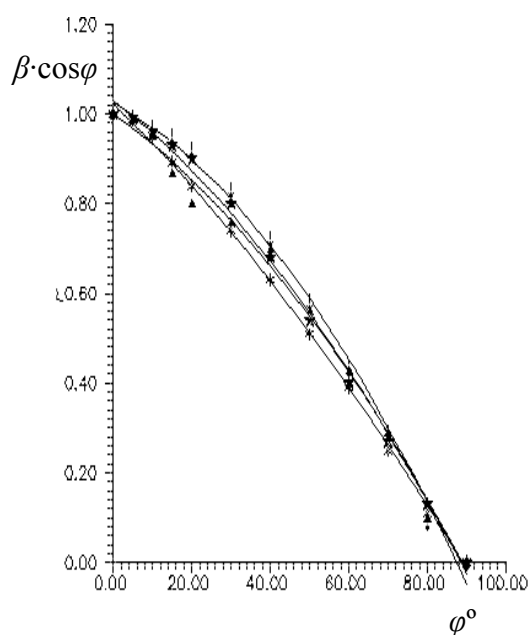


Рис. 3. Индикатрисы произведения $\beta(\varphi) \times \cos(\varphi)$ для элементов матрицы $[\beta_{ij}]_{i,j=1,2}$ коэффициента яркости образца № 22. Пояснения в тексте

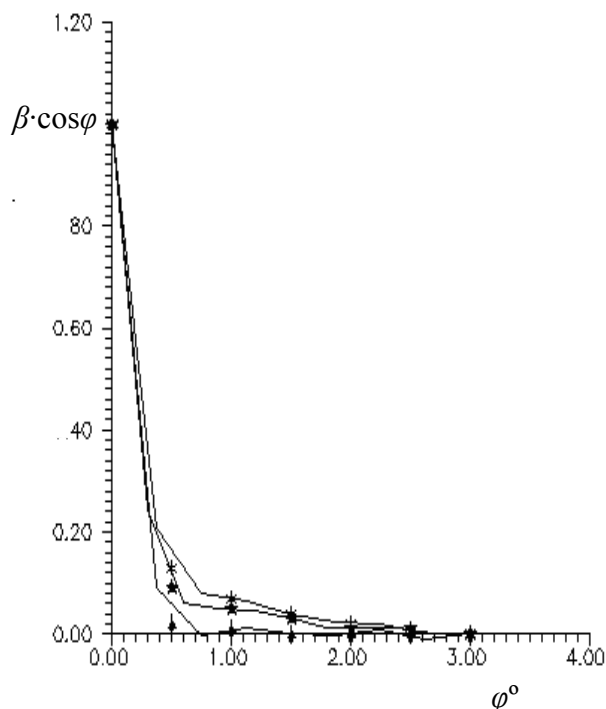


Рис. 4. Индикатрисы произведения $\beta(\varphi) \times \cos(\varphi)$ для элементов матрицы $[\beta_{ij}]_{i,j=1,2}$ коэффициента яркости образца № 9. Пояснения в тексте

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кизель В.А. Отражение света. М.:Наука, 1973. 352 с.
2. Сигналы и помехи в лазерной локации / Под ред. Зуева В.Е. М.: Радио и связь, 1985. 407 с.
3. Иванов А.Ю., Весничева Г.А. Исследование характеристик обратного рассеяния шероховатых поверхностей при их облучении импульсным лазерным излучением // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 2. С. 46–53.
4. Основные виды отражательных характеристик тел в направлении приема и методы их измерений в оптике / И.А. Непогодин // Импульсная фотометрия. Вып. 7. Л.: Машиностр., 1981. С. 124–131.
5. Wilgelmi G.J., Rouse J.W., Blanchard A.J. Depolarization of light back scattered from rough dielectrics // JOSA (A). 1975. V. 65, N 9. P. 1036–1042.
6. Egan W.G., Grusauskas J., Hallock H.B. Optical depolarization properties of surfaces illuminated by coherent light // Applied Optics. 1968. V. 7, N 8. P. 1529–1534.
7. Вейнберг Т.И. Каталог светорассеивающих стекол. М.: Машиностроение, 1967. 64 с.
8. Войшвилло Н.А. Каталог светорассеивающих стекол. Л.: Изд. ГОИ, 1975. 57 с.

9. *Войшвилло Н.А.* Индикатрисы рассеяния отражающих стекол // ОМП. 1985. № 7. С. 24–31. *Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 07.04.2000.

**MEASUREMENT OF INDICATRICES OF THE ELEMENTS
OF SCATTERING MATRICES OF BRIGHTNESS COEFFICIENTS
FOR ROUGH SURFACES OF DIFFERENT MATERIALS EXPOSED
TO PULSED LASER RADIATION**

A. Yu. Ivanov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

In this work we developed the methods of measurement of the scattering matrices elements of brightness coefficients for rough surfaces exposed to powerful pulsed laser radiation. An experimental setup to measure these characteristics with the time resolution $\sim 10^{-9}$ s is discussed. Experimental results (the indicatrices of the scattering matrix elements of brightness coefficients) for a number of different materials are given.