

## Особенности формирования цвета изображения в проекционном микроскопе на основе лазера на парах меди с неустойчивым резонатором и призмой Глана

В.Т.Карпухин, И.И.Климовский, М.М.Маликов, В.Я.Менделеев, С.Н.Сковородько

*Исследовано влияние свойств металлических поверхностей на цвет их изображений, получаемых с помощью проекционного микроскопа с лазером на парах меди (длины волн генерации 510.6 и 578.2 нм). Наблюдаемая поверхность облучается лазерным излучением, на 99 % поляризованным в горизонтальной плоскости. Излучение, с помощью которого формируется изображение поверхности, преимущественно поляризовано в вертикальной плоскости и выводится из резонатора в направлении, перпендикулярном его оптической оси. Установлено, что определяющее цвет изображения отношение мощностей лазерного излучения, формирующего изображение, на длинах волн 510.6 и 578.2 нм зависит от коэффициентов полного отражения, кривизны и статистических характеристик шероховатости поверхностей.*

**Ключевые слова:** проекционный микроскоп, лазер на парах меди, неустойчивый резонатор, поляризатор, поверхность, коэффициент отражения, кривизна, шероховатость.

### 1. Введение

В [1, 2] проведены исследования лазерного проекционного микроскопа (ЛПМ) на основе лазера на парах меди, снабженного неустойчивым резонатором и призмой Глана, который генерирует излучение на зеленой ( $\lambda_g = 510.6$  нм) и желтой ( $\lambda_y = 578.2$  нм) длинах волн. Одна из особенностей ЛПМ заключалась в том, что наблюдаемый с его помощью объект облучался излучением, на 99 % поляризованным в горизонтальной плоскости, а изображение объекта формировалось с помощью излучения, преимущественно поляризованного в вертикальной плоскости. Это излучение выводилось из резонатора призмой Глана, которая в данном случае выполняла функции поляризационного разветвителя, в направлении, перпендикулярном оптической оси неустойчивого резонатора.

В экспериментах [1, 2], во-первых, установлено, что ЛПМ, как и обычный ПМ (см., напр., [3]), позволяет получать изображение микрообъектов (например, штрихов измерительной линейки, каверн на ее поверхности и т.п.). Во-вторых, обнаружено, что изображение поверхностей, диффузно рассеивающих свет (штрихов и каверн на поверхности линейки), имело зеленый цвет, а полированных металлических (зеркальных) и плоских диэлектрических поверхностей – желтый. Цвет изображения от кривизны металлических поверхностей не зависел. На рис.1 в качестве примера представлено полученное в

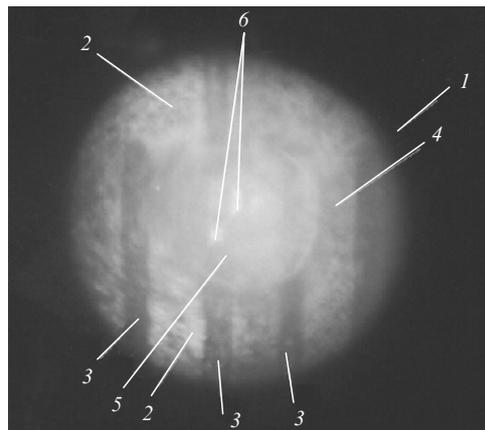


Рис.1. Изображение фрагмента металлической измерительной линейки, полученное в [1, 2] с помощью ЛПМ:

1 – граница изображения наблюдаемого объекта, формируемая ограничивающей размеры изображения диафрагмой; 2 – светлая область, обусловленная отражением лазерного излучения от полированной поверхности линейки; 3 – темные штрихи на линейке; 4 – светлый круг, лишенный сегмента в верхней его части (отсутствие сегмента обусловлено тем, что оправа призмы Глана перекрывает верхнюю часть лазерного пучка, распространяющегося между малым и большим зеркалами резонатора); 5 – слабо различимый светлый круг, расположенный внутри круга 4 и представляющий собой изображение выходного зеркала резонатора; 6 – яркие пятна (блики) внутри круга 5.

[1, 2] изображение фрагмента стальной измерительной линейки с полированной поверхностью, на котором выделяются воспринимаемые глазом характерные детали.

Учитывая, что средняя мощность генерации на зеленой линии больше мощности генерации на желтой линии, можно предположить, что при равных для обеих линий генерации условиях отражения излучения от поверхности линейки ее изображение, получаемое с помощью ЛПМ, должно быть преимущественно зеленым. Однако

В.Т.Карпухин, М.М. Маликов, В.Я.Менделеев, С.Н.Сковородько  
Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412  
Москва, ул. Ижорская, 13/19

И.И.Климовский Институт теплофизики экстремальных состояний  
Объединенного института высоких температур РАН, Россия, 127412  
Москва, ул. Ижорская, 13/19

Поступила в редакцию 28 мая 2003 г., после доработки – 3 февраля 2004 г.

цвет изображения фрагмента линейки (рис.1) различен в разных его частях. Между границей 1 и светлой областью 2 в изображении преобладает зеленый цвет. Светлая область 2 окрашена в желтый цвет. Небольшие темные включения, наблюдаемые в области 2 и представляющие собой изображения каверн, имеют зеленый цвет. В области 2 отчетливо видны штрихи, причем их цвет также зеленый. Внутри круга 4, окрашенного в желтый цвет, зеленые штрихи на линейке просматриваются, хотя и менее отчетливо. Внутри круга 5, также окрашенного в желтый цвет, зеленые штрихи на линейке видны слабо. Яркие блики 6 имеют желтый цвет.

Поскольку в изображении зеркальных поверхностей (полированная поверхность линейки, поверхность выходного зеркала резонатора) преобладал желтый цвет, а в изображении шероховатых поверхностей (штрихи, цифры и каверны на поверхности линейки) – зеленый, в работе [1] был высказано предположение о том, что шероховатая поверхность деполяризует излучение и обнаруженная в данной работе зависимость цвета изображения от шероховатости поверхности связана с различными деполяризующими свойствами отдельных участков измерительной линейки для желтого и зеленого излучений. В работах [1, 2] предложено использовать ЛПМ для контроля шероховатости поверхностей различных материалов по цвету их изображения или, иными словами, по соотношению в каждом изображении интенсивностей желтого и зеленого цветов. Каких-либо специальных исследований свойств поверхности, определяющих цвет ее изображения, в [1, 2] не проводилось.

Цель настоящей работы заключалась в проверке самого факта существования зависимости цвета изображения поверхности, наблюдаемой с помощью ЛПМ, от величины ее шероховатости, а также в поиске других свойств (характеристик) поверхностей, оказывающих влияние на цвет их изображения.

## 2. Экспериментальная установка и методика эксперимента

Эксперимент, проведенный в данной работе, имел два существенных отличия от эксперимента в [1, 2]. Во-первых, в настоящем эксперименте использовались образцы шероховатых поверхностей с известной статистикой. Во-вторых, изображение наблюдаемой поверхности в данной работе не строилось.

В качестве исследуемых образцов использовались 4 стальных шероховатых образца (1–4), имеющих плоскую базовую поверхность прямоугольной формы размером  $20 \times 30$  мм, а также плоское и выпуклое сферическое (радиус кривизны  $R_{\text{крив}} \approx 3$  см) алюминиевые зеркала.

Поверхности стальных образцов 1 и 3 имели приблизительно одномерное, а образцов 2 и 4 – изотропное распределение микронеровностей. Поверхность образца 1 была получена путем доводки, а образцов 2 и 3 – шлифованием. Доводка и шлифование образцов 1 и 3 осуществлялись вдоль большей стороны. Пескоструйная обработка применялась для получения шероховатой поверхности образца 4. Среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  профиля шероховатой поверхности от средней линии и автокорреляционные функции  $B(\tau)$  поверхностей стальных образцов измерялись с помощью профилометра From Talysurf с иглой, радиус наконечника которой был

равен 2 мкм. Среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  составляло 0.009 мкм (образец 1), 0.06 мкм (2), 1.84 мкм (3) и 2.3 мкм (4). Форма автокорреляционных функций для всех образцов была близка к экспоненциальной. Длина корреляции  $\rho$  микронеровностей для образцов 1–4 была соответственно равна 1.0, 1.6, 26 и 20 мкм.

Следствием ручной обработки поверхности образца 1 являлась регистрируемая визуально крупномасштабная неровность его поверхности. Эта неровность приводила к образованию светового ореола, расположенного вокруг центральной части полоски света, возникающей при отражении лазерного пучка вследствие однонаправленного распределения микронеровностей на поверхности образца 1.

Контроль цвета излучения, выводимого из резонатора призмой Глана (поперечные размеры  $25 \times 25$  мм), осуществлялся путем измерения относительных интенсивностей излучения на желтой и зеленой линиях. Схема эксперимента представлена на рис.2. Как и в работах [1, 2], в настоящей работе использовался промышленный лазер на парах меди (ИЛГ-201) 1 с активным элементом длиной 800 мм и диаметром 20 мм, неустойчивым резонатором (зеркала 2, 3) с расстоянием между зеркалами 1500 мм и коэффициентом увеличения 200, а также призмой Глана 4. Мощность лазера составляла 12 Вт, частота следования импульсов – 8 кГц, длительность импульсов генерации – 25 нс.

Возбуждение активной среды осуществлялось с помощью схемы с емкостным удвоением напряжения и магнитным звеном сжатия [4]. Емкость каждого из двух накопительных конденсаторов была равна 1000 пФ. Мощность, потребляемая от выпрямителя, составляла 3.3 кВт.

Для контроля относительных интенсивностей излучения, генерируемого на зеленой и желтой линиях, небольшая часть этого излучения на выходе лазера (в точке А на рис.2) ответвлялась плоской стеклянной пластинкой 5 на соответствующую систему измерения, включающую в себя измеритель мощности 6 калориметрического типа и светофильтры 7, обеспечивающие выделение излучения на одной из линий генерации. Анализ поляризационных свойств излучения проводился с помощью поляроида 8.

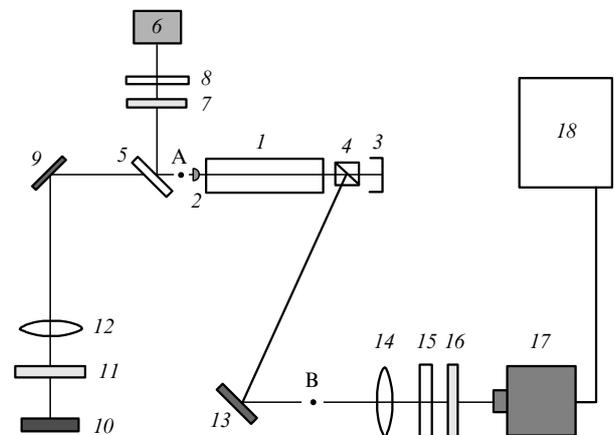


Рис.2. Схема экспериментальной установки:

1 – активный элемент лазера на парах меди; 2, 3, 9, 13 – зеркала; 4 – призма Глана; 5 – плоская стеклянная пластинка; 6 – измеритель мощности калориметрического типа; 7 – светофильтры; 8, 16 – поляризаторы; 10 – исследуемый образец; 11, 15 – нейтральные ослабители; 12, 14 – линзы; 17 – спектрофотометр; А – точка ответвления излучения; В – точка пересчета мощностей.

Табл. 1. Результаты измерений по схеме рис.2 мощностей излучения, выводимого из резонатора призмой Глана на зеленой и желтой линиях, и их отношений.

| Номер эксперимента | Образец и направление штрихов          | Компонента $E_y$       |                         |                      |                     |                      |              | Компонента $E_x$             |                                |                       |              | $P'_{A1}/P''_{A1}$ | $P'_{A2}/P''_{A2}$ | $\delta$ |
|--------------------|--|------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------|----------|
|                    |  | $P'_{sp}$<br>(отн.ед.) | $P''_{sp}$<br>(отн.ед.) | $K_{tr}$             | $P'_B$<br>(отн.ед.) | $P''_B$<br>(отн.ед.) | $P''_B/P'_B$ | $P'_{sp}(P'_B)$<br>(отн.ед.) | $P''_{sp}(P''_B)$<br>(отн.ед.) | $K_{tr}$              | $P''_B/P'_B$ |                    |                    |          |
| 1                  | Отсутствует                            | 0.68                   | 0.117                   | $1.5 \times 10^{-3}$ | 453                 | 78                   | 0.172        |                              |                                |                       |              | 2.4                |                    | 0        |
| 2                  | 4 (использован поляриод)               | 0.399                  | 0.182                   | $1.2 \times 10^{-3}$ | 332.5               | 151.7                | 0.456        | 0.343<br>(13.72)             | 0.196<br>(7.84)                | 0.025                 | 0.571        | 2.4                | 2.28               | 0.05     |
| 3                  | 4                                      | 0.618                  | 0.211                   | $1 \times 10^{-3}$   | 618                 | 211                  | 0.341        |                              |                                |                       |              | 2.44               | 2.33               | 0.045    |
| 4                  | 3, вертикальное                        | 0.36                   | 0.36                    | $2.1 \times 10^{-4}$ | 1714.3              | 1714.3               | 1.0          |                              |                                |                       |              | 2.41               | 2.28               | 0.054    |
| 5                  | 3, горизонтальное                      | 0.52                   | 0.555                   | $2 \times 10^{-4}$   | 2600                | 2775                 | 1.07         |                              |                                |                       |              | 2.4                | 2.28               | 0.05     |
| 6                  | 2                                      | 0.743                  | 0.529                   | $4 \times 10^{-4}$   | 1857.5              | 1322.5               | 0.712        |                              |                                |                       |              | 2.33               | 2.15               | 0.077    |
| 7                  | 1, вертикальное                        | 0.526                  | 0.868                   | $2.2 \times 10^{-4}$ | 2390.9              | 3945.5               | 1.65         |                              |                                |                       |              | 2.35               | 2.1                | 0.106    |
| 8                  | Плоское зеркало                        | 0.368                  | 0.524                   | $1.4 \times 10^{-4}$ | 2628.6              | 3742.9               | 1.42         |                              |                                |                       |              | 2.36               | 2.0                | 0.153    |
| 9                  | Плоское зеркало (использован поляриод) | 0.391                  | 0.461                   | $4 \times 10^{-4}$   | 977.5               | 1152.5               | 1.18         | 0.332<br>(37.94)             | 0.239<br>(27.31)               | $8.75 \times 10^{-3}$ | 0.72         | 2.36               | 2.0                | 0.153    |
| 10                 | 1*, вертикальное                       | 0.401                  | 0.391                   | $1.4 \times 10^{-4}$ | 2864.3              | 2792.9               | 0.975        |                              |                                |                       |              | 2.32               | 2.21               | 0.047    |
| 11                 | Выпуклое зеркало                       | 0.25                   | 0.618                   | $7.2 \times 10^{-5}$ | 3472.2              | 8583.3               | 2.47         |                              |                                |                       |              | 2.4                | 1.96               | 0.18     |

\*Использовался нейтральный ослабитель 11 (НС6,  $K_{tr} = 0.65$ ).

Излучение лазера с помощью зеркала 9 направлялось через линзу 12 с фокусным расстоянием 150 мм на исследуемый образец 10 с различной шероховатостью отражающей поверхности. Поверхность исследуемого образца располагалась на расстоянии около 130 мм от линзы, диаметр сфокусированного линзой лазерного излучения составлял около 3 мм. Линза 12 собирала часть отраженного образцом излучения и направляла его обратно в активную среду лазера. Для ослабления падающего на образец потока излучения использовались нейтральные ослабители (стекла НС) 11. Лазерное излучение с вертикальной поляризацией, отраженное от исследуемого образца и усиленное в активной среде лазера, выводилось призмой Глана 4 из резонатора. Это излучение с помощью зеркала 13 и линзы 14 направлялось через нейтральные ослабители 15 (стекла НС) в спектрофотометр 17 типа Spectrometer 4855 фирмы Hohner Corporation, регистрирующий относительные усредненные по времени мощности излучений на зеленой ( $P'_{sp}$ ) и желтой ( $P''_{sp}$ ) линиях. Выходной сигнал со спектрометра обрабатывался с помощью компьютера 18. Пересчет мощностей  $P'_{sp}$ ,  $P''_{sp}$  в мощности  $P'_B$ ,  $P''_B$  производился в точке В (рис.2) по известным коэффициентам пропускания  $K_{tr}$  ослабителей 15. В ряде случаев для анализа поляризационных свойств излучения использовался поляриод 16.

Для некоторых образцов проведены измерения отношения интенсивностей отраженного ими лазерного излучения на желтой и зеленой линиях генерации. В этих измерениях отраженный луч направлялся непосредственно в сторону спектрофотометра 17, минуя активную среду лазера.

Расстояния между основными элементами экспериментальной установки были следующими: между исследуемым образцом 10 и ближним к нему торцом активной среды излучателя 1 – 3400 мм, между призмой Глана 4 и ближним к ней торцом активной среды излучателя – 250 мм, между призмой Глана и спектрофотометром 17 – около 6000 мм. Все оптические элементы, используемые для транспортировки излучения (линзы и зеркала) и его ослабления (светофильтры), устанавливались таким образом, чтобы излучение, отраженное от этих элементов, не попадало в активную среду лазера.

В отсутствие исследуемых образцов 10 излучение на

выходе генератора в точке А практически полностью поляризовано в горизонтальной плоскости (вектор электрического поля  $E_x$ ). На горизонтально поляризованную компоненту излучения на обеих линиях генерации приходится 99 % мощности генерации, на вертикально поляризованную (вектор электрического поля  $E_y$ ) – около 1%. При этом отношение средней мощности генерации на зеленой линии к средней мощности генерации на желтой линии  $R_1 = P'_{A1}/P''_{A1}$  в точке А (рис.2) для горизонтально поляризованной компоненты  $R_{1x}$  составляло 2.27–2.44, для вертикально поляризованной компоненты  $R_{1y}$  – 1.6. Вариации значения  $R_{1x}$  обусловлены долговременной нестабильностью параметров выходного лазерного излучения. В отсутствие исследуемых образцов 10 в точке В наблюдалось фоновое излучение, преимущественно (около 90 %) поляризованное в вертикальной плоскости. При их наличии мощность излучения в точке В резко возрастала.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты измерений относительных мощностей излучения в точке В ( $P'_B$ ,  $P''_B$ ) и в точке А ( $P'_{A2}$ ,  $P''_{A2}$ ), проводившихся для стальных образцов и алюминиевых зеркал, сведены в табл.1\*. В эксперименте № 1 исследуемый образец отсутствовал, так что приведенные в табл.1 значения  $P'_B$ ,  $P''_B$  характеризуют мощность фонового из-

\*Необходимо отметить, что при выборе отношений  $P'_A/P''_A$  и  $P''_B/P'_B$  представленных в табл.1, авторы руководствовались следующими соображениями. Поскольку для лазеров на парах меди в качестве одной из характеристик выходного излучения традиционно используется отношение  $P'_A/P''_A$ , по величине которого можно судить о недогреве, перегреве или нормальном нагреве активной среды, именно это отношение и применялось в данной работе в качестве характеристики выходного излучения лазера. Использование обратного отношения для излучения, выводимого из резонатора призмой Глана, обусловлено тем, что при визуальном контроле цвета этого излучения зеленый цвет выступал в качестве «реперного» цвета, относительно которого изменялась яркость желтого цвета. Поэтому в качестве характеристики излучения, выводимого из резонатора призмой Глана, авторы сочли целесообразным использовать отношение  $P''_B/P'_B$ , более наглядно, на их взгляд, отображающее динамику изменения цвета данного излучения.

лучения с вертикальной поляризацией в точке В (см. рис.2). В экспериментах № 4, 7, 10, штрихи на поверхности стальных образцов располагались вертикально, в эксперименте № 5 – горизонтально. В экспериментах № 8, 9 использовалось плоское алюминиевое зеркало, в экспериментах № 2 и 9 – поляроид 16, а в эксперименте № 10 – нейтральный ослабитель 11 (см. табл.1). В эксперименте № 11 использовалось выпуклое алюминиевое зеркало.

Случайная погрешность относительных измерений  $P'_B$  и  $P''_B$  не превышала 10 %, а величин  $P'_{A1}$ ,  $P''_{A1}$  и  $P'_{A2}$ ,  $P''_{A2}$  – нескольких процентов. Изменения отношения  $P'_{A1}/P''_{A1}$ , обусловленные долговременной нестабильностью мощности выходного лазерного излучения, не влияли на точность измерений перечисленных параметров.

Прежде чем перейти к анализу экспериментальных результатов, уточним терминологию, использующуюся в данной статье при описании отражательных свойств поверхностей. Коэффициент полного отражения  $k_f$  равен коэффициенту отражения в телесный угол  $2\pi$  ср. Диаграмма отражения излучения характеризует распределение интенсивности отраженного излучения в данном телесном угле. Для плоской рассеивающей поверхности диаграмма отражения совпадает с диаграммой рассеяния света микронеровностями поверхности, для кривой зеркальной поверхности – с диаграммой зеркального отражения излучения, определяемой кривизной поверхности. В случае кривой рассеивающей поверхности диаграмма отражения определяется совокупностью диаграмм рассеяния и зеркального отражения излучения. Коэффициент зеркального отражения  $k_m$  характеризует долю излучения, отраженного от поверхности в направлении, совпадающем с направлением зеркального отражения падающего на поверхность излучения. Этот коэффициент зависит как от величины полного коэффициента отражения, так и от формы диаграммы отражения излучения. В эксперименте, проведенном в данной работе, реализуется случай, когда углы падения излучения на поверхность исследуемых образцов и отражения от нее близки к нулю.

Анализ факторов, влияющих на отношение  $P''_B/P'_B$  (на цвет изображения поверхности), целесообразно начать с анализа зависимости коэффициентов полного отражения  $k_f$  исследуемых образцов от длины волны. Учитывая, что  $k_f$  практически совпадают с  $k_m$  зеркальных поверхностей, воспользуемся для оценки значений  $k_f$  алюминиевых зеркал и стальных образцов данными по коэффициентам зеркального отражения зеркальных алюминиевых и стальных поверхностей. Согласно данным [5], для алюминия значения  $k_m$  на длинах волн 510.5 и 578.2 нм составляют соответственно 0.9174 и 0.9127, т. е. при переходе от первой из указанных длин волн ко второй коэффициент  $k_f$  уменьшается на 0.5 %. Это гораздо меньше погрешности измерения отношений  $P''_B/P'_B$ ,  $P''_{A2}/P'_{A2}$  и, по-видимому, не может оказать сколько-нибудь заметного влияния на результаты измерений.

Для стальных образцов коэффициенты  $k_m$ , измеренные с помощью спектрофотометра Shimadzu, составляли 0.474 для  $\lambda_g$  и 0.492 для  $\lambda_y$ . Таким образом, при переходе от  $\lambda_g$  к  $\lambda_y$  изменение  $k_f$  стальных образцов противоположно по знаку изменению  $k_f$  для алюминия и, составляя 3.8 %, почти в 8 раз больше по величине. Поэтому, в принципе, можно ожидать, что для стальных образцов различие значений  $k_f$  для зеленой и желтой линий генера-

ции окажет определенное влияние на отношение  $P''_B/P'_B$ .

Поскольку излучение, формирующее изображение наблюдаемой с помощью ПМ поверхности, инициируется той частью отраженного от этой поверхности излучения, которая возвращается обратно в активную среду лазера, на отношение  $P''_B/P'_B$  может также повлиять зависимость  $k_m$  от длины волны.

Специальные исследования отражательных характеристик стальных образцов и анализ результатов этих измерений с учетом данных [5–7] показали, что из многочисленных параметров, характеризующих микронеровности поверхности, параметрами, способным оказать существенное влияние на отношение  $P''_B/P'_B$ , являются статистические характеристики микронеровностей поверхностей данных образцов. В соответствии со специально проведенными расчетами установлено, что наиболее сильно это влияние должно проявляться для образцов 1 и 2.

Деполаризующие свойства шероховатых поверхностей проверялись на образцах 1 и 3. Для этого измерялись отношения мощностей вертикально и горизонтально поляризованных компонентов лазерного излучения, падающего на данные образцы и отраженного от них. Измеренные отношения практически не отличались друг от друга. Следовательно, использованные в настоящей работе шероховатые поверхности, так же как и в [8, 9], не деполаризовали лазерное излучение, а значит, деполаризация излучения отсутствовала и, таким образом, не могла влиять на величину  $P''_B/P'_B$  (цвет изображения).

При анализе данных, представленных в табл.1, обращает на себя внимание то, что наличие исследуемого образца влияет на отношение мощностей излучения, поляризованного в горизонтальной плоскости, на желтой и зеленой линиях генерации в точке А (см. рис.2). При этом, как и для излучения в точке В, увеличивается доля излучения на желтой линии. На основании сказанного можно предположить, что еще один фактор, определяющий цвет изображения поверхности, наблюдаемой с помощью ЛПМ, заключается в том, что эта поверхность не только отражает падающее на нее лазерное излучение, но и является третьим зеркалом (элементом) неустойчивого резонатора. Корректность сделанного предположения подтверждается результатами работ [10–13]. В первой из этих работ в экспериментах с  $\text{CO}_2$ -лазером показано, что попадание в резонатор лазерного излучения, отраженного от облучаемой мишени, может существенно влиять на расходимость излучения, приводя к нарушению регулярности распределения в плоскости фокусировки. В работе [11] теоретически показано влияние отражения излучения лазера с неустойчивым резонатором от мишени на ширину углового распределения этого излучения.

В [12, 13] при изучении процесса обработки графитового образца с помощью системы генератор – усилитель на парах меди установлено, что поверхность графитового образца оказывает существенное влияние на работу генератора и всей системы в целом. В [13] обнаружено существование над поверхностью графита относительно стабильных, отражающих лазерное излучение областей плазмы, отождествленных в этой работе с областями плазмы, концентрация электронов в которых достигает  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Однако, учитывая, что время релаксации таких концентраций заряженных частиц, определяемое скоростью тройной рекомбинации, несоизмеримо мало по

сравнению с временным интервалом между импульсами генерации (125 мкс), приходится предположить, что стабильное воспроизводство на одном и том же месте поверхности образца областей, сильно отражающих лазерное излучение, обусловлено различием отражательных свойств разных микрообластей поверхности графита. Или, другими словами, образование областей с повышенной концентрацией электронов происходит над теми микрообластями мишени, которые имеют относительно большой коэффициент  $k_m$ .

Итак, учитывая влияние исследуемых образцов на величину отношения  $P'_{A2}/P''_{A2}$  (см. табл.1) и результаты [10–13], можно сделать вывод, что в экспериментах, проведенных в настоящей работе с ЛПМ, поверхность исследуемого образца служит третьим зеркалом (элементом) резонатора. Наличие такого элемента, характеризующегося, например, неоднородным распределением по его поверхности полного коэффициента отражения, должно приводить к пространственному перераспределению лазерного излучения как на поверхности самого элемента (исследуемого объекта), так и внутри резонатора. Сделанный вывод позволяет объяснить образование в работах [1, 2] ярких бликов *b* на поверхности выходного зеркала 2 (см. рис.1) неоднородностью отражательных свойств поверхности линейки, являющейся третьим элементом резонатора.

Поиск факторов, влияющих на величину отношения  $P''_B/P'_B$  (на цветность изображения поверхности), начнем с сопоставления результатов экспериментов № 7 и № 10. Поскольку наличие нейтрального ослабителя эквивалентно уменьшению  $k_m$  поверхности исследуемого образца, результаты этих экспериментов свидетельствуют о том, что одним из факторов, влияющих на величину отношения  $P''_B/P'_B$ , является данный коэффициент. Увеличение  $k_m$  ведет к увеличению отношения  $P''_B/P'_B$ , или к увеличению интенсивности желтого цвета в изображении наблюдаемой поверхности.

Еще одним фактором, влияющим на отношение  $P''_B/P'_B$ , является кривизна поверхности (диаграмма зеркального отражения). Об этом свидетельствует сопоставление результатов экспериментов № 8, 9 и № 11. Как показывает такое сопоставление, для выпуклого алюминиевого зеркала (эксперимент № 11) отношение  $P''_B/P'_B$  гораздо больше, чем для плоского (эксперименты № 8, 9). Учитывая установленную выше зависимость отношения  $P''_B/P'_B$  от  $k_m$ , т.е. от количества лазерного излучения, возвращаемого в активную среду, можно сделать вывод о том, что выпуклое алюминиевое зеркало обеспечивает поступление в активную среду больше отраженного излучения, чем плоское зеркало. Таким образом, кривизна поверхности исследуемого объекта, формирующая диаграмму рассеяния отраженного света, также является фактором, влияющим на отношение  $P''_B/P'_B$ .

К сожалению, прямым сопоставлением результатов экспериментов № 7 и № 10 и № 8, 9 и № 11, исчерпывается возможность прямого сопоставления (сравнения) результатов различных экспериментов с целью выявления факторов, определяющих отношение  $P''_B/P'_B$ . Например, сопоставление результатов экспериментов с алюминиевыми зеркалами и стальными образцами с целью выявления влияния шероховатости на отношение  $P''_B/P'_B$  некорректно по той причине, что данная величина зависит от коэффициента зеркального отражения, определяемого не только формой диаграммы отражения, но и ко-

эффициентами полного отражения, различными для алюминиевых зеркал и стальных образцов. Сопоставление результатов экспериментов как с образцами 1 и 3, так и с образцами 2 и 4 также некорректно. Эта некорректность обусловлена тем, что при переходе от образца 1 к 3 и от образца 2 к 4 не только увеличивается среднее квадратичное отклонение  $\sigma$ , но и существенно изменяется соотношение между коэффициентами зеркального отражения на желтой и зеленой линиях генерации. Кроме того, при оценке влияния шероховатости поверхности образца 1 на отношение  $P''_B/P'_B$  необходимо учесть, что на это отношение влияет также крупномасштабная неоднородность поверхности образца, в результате чего, как отмечалось ранее, образуется световой ореол.

При поиске способов систематизации данных табл.1 была предпринята попытка проанализировать характер взаимосвязи между обсуждаемыми параметрами. На рис.3 представлены зависимости отношения  $P''_B/P'_B$  от параметра  $\delta = [1 - (P'_{A2}/P''_{A2}) / (P'_{A1}/P''_{A1})]$ . Параметр  $\delta$  представляется более предпочтительным, чем параметр  $P'_{A2}/P''_{A2}$ , поскольку в нем учтены изменения отношения как  $P'_{A2}/P''_{A2}$ , так и  $P'_{A1}/P''_{A1}$ , имеющие место при переходе от одного эксперимента к другому (см. табл.1). Необходимо отметить, что результаты двойных экспериментов (например, 2, 3) представлены на рис.3 в виде средних значений  $P''_B/P'_B$  и  $\delta$ .

Из рис.3 видно, что результаты измерений разбиваются на три группы, включающие в себя соответственно результаты экспериментов №1, 2, 3, 6, 8, 9 (зависимость 1), № 1, 11 (зависимость 2) и № 1, 10, 4, 5, 7 (зависимость 3). Обращает на себя внимание то, что в первую группу вошли результаты экспериментов, проведенных с образцами 2 и 4 и плоским алюминиевым зеркалом с изотропным распределением микронеровностей. Очевидно, что уменьшение модуля коэффициента Френеля зеркальной поверхности и увеличение изотропного рассеяния для рассеивающей поверхности приводят к снижению коэффициента зеркального отражения. Зависимость 1 свидетельствует о том, что при изотропном распределении микронеровностей поверхности основным параметром, определяющим взаимосвязь параметров  $P''_B/P'_B$  и  $\delta$ , является коэффициент зеркального отражения.

Зависимость 2, проходящая через две точки, отражает

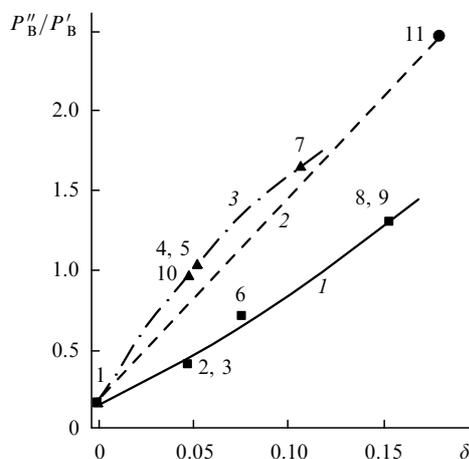


Рис.3. Зависимости отношения  $P''_B/P'_B$  для излучения с вертикальной поляризацией от параметра  $\delta$ . Цифры у точек соответствуют номерам экспериментов в табл.1; три группы экспериментов обозначены кривыми 1–3.

ранее установленный факт влияния кривизны поверхности исследуемого объекта на отношение  $P''_B/P'_B$ .

Результаты измерений  $\delta$  и  $P''_B/P'_B$  для образцов с приблизительно одномерной шероховатостью образуют самостоятельную зависимость 3, что лишним раз свидетельствует о сильном влиянии диаграммы рассеяния отраженного лазерного излучения на отношение  $P''_B/P'_B$  и параметр  $\delta$ . Из сопоставления зависимостей 1 и 3 видно, что для плоского алюминиевого зеркала отношение  $P''_B/P'_B$  меньше, чем для образца 1, у которого коэффициент полного отражения, а следовательно, и коэффициент зеркального отражения почти в два раза меньше, чем у алюминиевого зеркала. Отмеченный факт, скорее всего, является результатом неровности поверхности образца 1, вследствие чего образуется ореол, свидетельствующий о том, что крупномасштабная неоднородность в какой-то мере эквивалентна кривизне выпуклого алюминиевого зеркала.

При анализе зависимостей 1 и 3 обращает на себя внимание отсутствие проявлений существенного различия между коэффициентами зеркального отражения на желтой и зеленой линиях генерации как для образца 2 (зависимость 1, эксперимент № 6), так и для образца 1 (зависимость 2, эксперименты № 7 и 10). Можно предположить, что этот эффект связан с насыщением активной среды лазерным излучением, в результате чего относительные различия между интенсивностями излучения на желтой и зеленой линиях, возвращаемого исследуемым образцом в активную среду лазера, нивелируются. Это означает, что отношения  $P''_B/P'_B$  и, скорее всего,  $P''_{A2}/P'_{A2}$  определяются прежде всего как интенсивностью излучения на входе в активную среду, так и ее распределением по сечению активной среды.

Таким образом, переход к координатам  $\delta$  и  $P''_B/P'_B$  позволил систематизировать часть экспериментальных данных и выделить факторы, влияющие на отношение  $P''_B/P'_B$  (цвет изображения). Однако механизм этого влияния остается неясным. Более того, заканчивая анализ экспериментальных данных табл.1, необходимо отметить наличие еще по меньшей мере нескольких трудно объяснимых результатов. Например, при переходе от образца 4 (эксперимент № 2) к алюминиевому зеркалу (эксперимент № 9) мощность излучения в точке В с вертикальной поляризацией на желтой линии возрастает в 7.6 раза, а на зеленой – в 2.9 раза. В то же время мощность излучения в этой точке с горизонтальной поляризацией на желтой линии возрастает в 3.5 раза, а на зеленой – в 2.8 раза, т. е. с учетом погрешности измерений во столько же раз, во сколько возрастает излучение на зеленой линии с вертикальной поляризацией. При этом величина  $P''_B/P'_B$  для излучения с вертикальной поляризацией возрастает в

2.6 раза, а для излучения с горизонтальной поляризацией – всего в 1.26 раза.

#### 4. Заключение

Итак, результаты проведенных в данной работе исследований ЛПМ позволяют вполне определенно перечислить свойства (характеристики) поверхности, определяющие цвет ее изображения, формируемого с помощью данного микроскопа. К таким характеристикам относятся коэффициент полного отражения, диаграмма отражения излучения, определяемая, во-первых, статистическими характеристиками шероховатости поверхности и, во-вторых, кривизной этой поверхности. К сожалению, экспериментальные результаты, полученные в настоящей работе, не позволяют объяснить механизм влияния отражательных свойств поверхности на отношения  $P''_B/P'_B$  и  $P''_{A2}/P'_{A2}$ . По-видимому, также не поддается объяснению отмеченное ранее различие во влиянии отражательных свойств поверхности на отношение  $P''_B/P'_B$  для излучений с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Это свидетельствует о том, что для полного понимания работы ЛПМ необходимы дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

Такие исследования тем более оправданны, поскольку могут привести к созданию прибора, позволяющего одновременно контролировать большее или меньшее количество параметров, определяющих отражательные характеристики поверхностей различных материалов

1. Карпухин В.Т., Климовский И.И., Маликов М.М., Марковец В.В. *Оптика атмосферы и океана*, **12**, 1064 (1999).
2. Климовский И.И., Маликов М.М., Марковец В.В. *Тезисы III Междунар. конф. «Физика и промышленность 2001»* (Голицино, Моск. обл., 2001, с.53).
3. Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г. *Труды ФИАН*, **212**, 168 (1991).
4. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Угольников С.А., Королева М.Е., Казарян М.А. *Квантовая электроника*, **31**, 191 (2001).
5. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. *Оптические постоянные природных и технических сред* (Л.: Химия, 1984).
6. Beckmann P., Spizzichino A. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* (London: Pergamon Press, 1963).
7. ГОСТ 9378-75. *Образцы сравнения шероховатости поверхности*.
8. Менделеев В.Я. *Опт. ж.*, № 2, 22 (1995).
9. Mendeleev V. Ya., Skovorod'ko S. N. *Proc. SPIE Int. Opt. Soc. Ing.*, **4680**, 99 (2001).
10. Данышиков Е.В., Дымшаков В.А., Лебедев Ф.В., Рязанов А.В. *Квантовая электроника*, **9**, 1581 (1982).
11. Любимов В.В. *Квантовая электроника*, **11**, 851 (1984).
12. Опачко И.И., Шевера В.С. В сб.: *Процессы элементарных взаимодействий в атомах* (Ужгород: изд-е Ужгородского гос. ун-та, 1985, с.189).
13. Опачко И.И. *ТВТ*, **27**, 1020 (1989).