

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 535.428::536.756

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ НЕГЭНТРОПИЙНОГО ХАРАКТЕРА ДИФРАКЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИФFUЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ<sup>1</sup>

© 2016 г. В. В. Савуков\*

\*Балтийский государственный технический университет “Военмех” им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург

E-mail: vladimir@savukov.ru

В ходе анализа аксиоматических принципов, лежащих в основе статистической физики, проверялось предположение об ограниченной корректности постулата равновероятности всех доступных микросостояний замкнутой системы. В этой статье сообщается о результатах исследования квазиравновесной системы, внутри которой изотропное излучение взаимодействует с фазовой дифракционной решёткой. Имитационная компьютерная модель такого взаимодействия показала, что у дифрагированного излучения должна возникать анизотропная поляризация, которая уменьшает больцмановскую энтропию всей системы и позволяет внешнему наблюдателю получать информацию о топологии поверхности решётки. Данный прогноз был подтверждён в ходе его прямой экспериментальной проверки на реальной установке.

*Ключевые слова:* дифракция, поляризация, аксиоматика, энтропия.

Коды OCIS: 000.6590, 050.1940, 260.5430.

*Поступила в редакцию 24.05.2016.*

### Введение

Дифракционный механизм рассеяния газа квантовых частиц делает теоретически допустимым существование неэргодических систем, поведение которых лежит вне “зоны ответственности” статистической физики. Есть основания предполагать, что, например, диффузный монокромный фотонный газ, испытывающий рассеяние на идеально проводящей отражающей фазовой дифракционной решётке, может менять своё исходное изотропное макросостояние на анизотропное. Если фотонный газ и дифракционная решётка являются составными частями замкнутой физической системы, то больцмановская энтропия данной системы в ходе такого процесса должна самопроизвольно уменьшаться [1].

В настоящей статье представлены результаты прямой экспериментальной проверки вышеизложенного теоретического прогноза, осуществлённой на реальной физической установке.

### Постановка задачи

Пусть имеется замкнутая система в виде полости с малым отверстием, заполненная диффузным излучением. В полость также помещена дифракционная решётка, взаимодействующая с данным излучением. Результатом планируемого эксперимента является теоретически прогнозируемая возможность обнаружить в составе рассеиваемого решёткой излучения  $S$ -поляризационные компоненты с яркостными характеристиками, превышающими уровень яркости данных компонент у исходного диффузного излучения [1]. При этом индикатриса рассеяния одновременно должна содержать аналогично расположенные (в том же диапазоне углов отражения)  $P$ -поляризационные компоненты, имеющие существенно меньшую энергетическую яркость.

Главной сложностью вышеуказанной экспериментальной проверки является необходимость различения эффектов, обусловленных одновременным проявлением резонансных и пороговых аномалий Рэлея–Вуда.

<sup>1</sup> Статья публикуется по решению редакционной коллегии в порядке дискуссии.

Резонансные аномалии Рэля–Вуда характеризуют зоны поглощения излучения, падающего на решётку. Пороговые аномалии соответствуют областям перераспределения эффективности тех или иных компонент излучения (например, поляризационных) между различными дифракционными порядками рассеяния единичных фотонов. Если масштаб резонансных аномалий существенно доминирует над пороговыми, то проявление искомого эффекта нельзя будет надёжно идентифицировать [2].

В области видимого излучения обнаружено пока единственное “окно возможностей”, когда прогнозируемый эффект должен проявляться достаточно интенсивно. Это вариант взаимодействия диффузного монохромного излучения (длина волны не менее 700 нм) с золотой дифракционной решёткой, имеющей следующие параметры синусоидального профиля:

- отношение шага решётки к длине волны излучения  $d/\lambda = 0,82$ ;

- отношение полной глубины рельефа решётки к её шагу  $h/d = 0,38$ ;

Коэффициент поглощения поверхностью такой решётки диффузного излучения с длиной волны  $\lambda = 700$  нм не превышает величины 0,069. Это является приемлемым с точки зрения выполнимости поставленной задачи, так как при таком коэффициенте проявление резонансных аномалий Рэля–Вуда носит достаточно умеренный характер.

### Описание экспериментальной установки

На рис. 1 приведена схема установки. В ней применён принцип получения трёхмерного изображения, известный как “эффект рыбьего глаза”, когда фиксируются визуальные параметры объекта сразу для всех возможных сочетаний углов наблюдения. Данный принцип основан на фотографировании отражения поверхности дифракционной решётки в зеркальном шаре, расположенном на малом расстоянии от этой решётки. Съёмка выполняется через небольшое сквозное отверстие в теле самой решётки. В центре, справа и слева на кадрах фотоснимков могут наблюдаться помехи в виде трёх вторичных отражений зеркального шара: центрального, образуемого нулевым порядком дифракционного рассеяния, и двух боковых, формируемых  $\pm 1$  порядками [3].

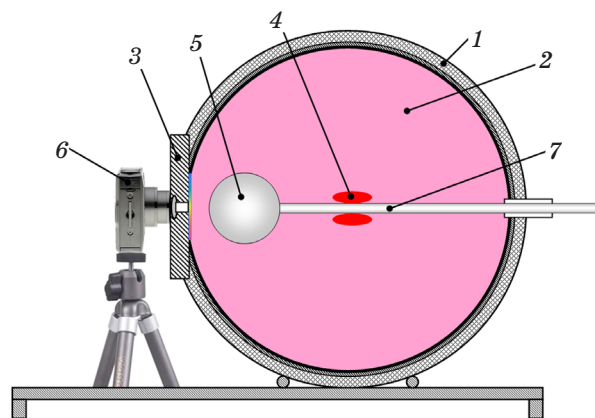


Рис. 1. Схема установки для исследования рассеяния диффузного светового поля поверхностью дифракционной решётки.

Установка (рис. 1) включает в себя следующие элементы:

1 – фотометрический полый шар, моделирующий квазизамкнутую систему;

2 – внутренняя поверхность шара 1, покрытая белой матовой краской с коэффициентом спектрального отражения приблизительно 0,97;

3 – плоская опорная шайба, на внутренней (обращённой в полость шара 1) поверхности которой закреплена дискообразная гибкая реплика дифракционной решётки с золотым покрытием. Шайба 3 и реплика решётки имеют круглое сквозное отверстие перед объективом фотоаппарата 6;

4 – светодиоды квазимонохромного ( $\lambda \approx 700 \pm 50$  нм) излучения;

5 – сферическое зеркало (“зеркальный шар”), служащее для трёхмерного обзора дифракционной решётки, закреплённой на опорной шайбе 3;

6 – фотографическая камера. Предназначена для получения трёхмерных снимков поверхности решётки. При регистрации поляризационных компонент перед объективом фотокамеры устанавливается анализатор;

7 – штук, служащий для фиксации светодиодов 4 и сферического зеркала 5.

### Организация эксперимента и его результаты

Перед осуществлением собственно физического эксперимента было выполнено прогнозирование ожидаемого эффекта методами имитационного моделирования. Рассматривалась изолированная оптическая система, содержащая

монокромный ( $\lambda \approx 700$  нм) стохастизированный диффузный фотонный газ, взаимодействующий либо с идеально проводящей, либо с золотой отражательной дифракционной решёткой фазового типа, имеющей одномерный (линейный) синусоидальный микрорельеф поверхности (число фотонов в статистическом испытании  $2^{20} - 1 = 1048575$ ).

Макроскопические параметры итогового светового поля, формируемые в результате данного взаимодействия, вычислялись на основе соответствующей теоретической модели. Ранее были специально созданы и верифицированы программные средства для имитационного моделирования процессов рассеяния диффузного фотонного газа на различных видах отражательных оптических элементов (подробно см. [3–5]).

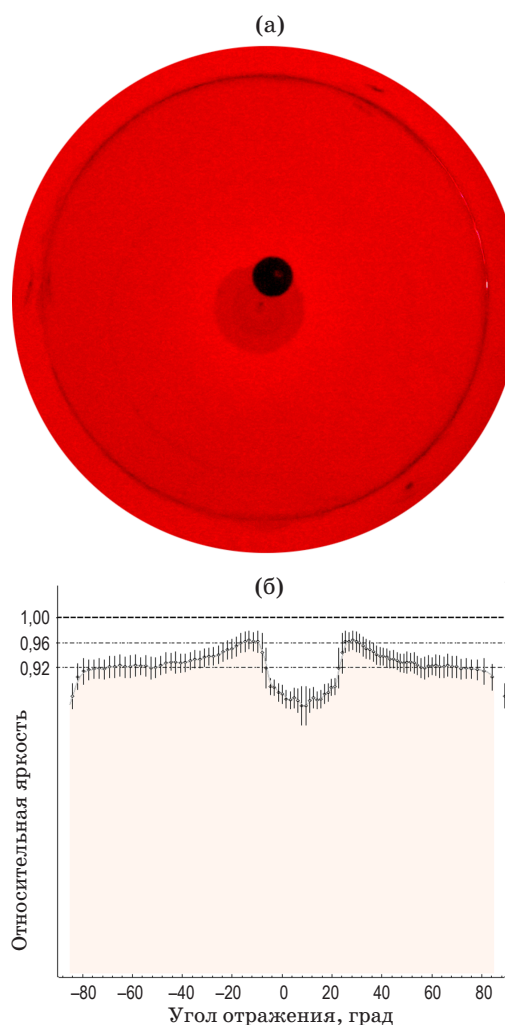
Прогнозируемый характер рассеяния различных компонент диффузного светового поля на золотой дифракционной решётке должен быть затем сопоставлен с соответствующими результатами, фиксируемыми на физической установке. Однако простое визуальное сравнение графических изображений индикатрис, полученных в ходе имитационного и реального экспериментов, не может дать однозначный ответ о наличии или отсутствии искомого эффекта. Чтобы исключить вероятность субъективной интерпретации получаемых данных необходимо использовать какой-либо количественный критерий, позволяющий оценить достоверность результатов эксперимента.

В качестве указанного критерия был выбран количественный контроль за уровнем энергетической яркости поляризационной  $S$ -компоненты рассеиваемого излучения. Прогнозом предполагается, что даже для реальной золотой решётки с конечной проводимостью указанный уровень яркости для отдельных телесных углов должен превысить половину идеального (без потерь на поглощение) ламбертовского уровня. Поскольку в произвольно выделенном потоке стохастизированного диффузного фотонного газа на каждую из  $S$ - и  $P$ -компонент приходится  $1/2$  часть, то превышение этого “половинного” уровня у любой из поляризационных компонент уже никак не сможет быть компенсировано оставшейся компонентой. Следовательно, итоговый поток дифрагированного излучения неизбежно приобретёт анизотропную поляризационную структуру. Данный вывод остаётся также справедливым и при включении в состав радиационного потока, покида-

ющего решётку, её собственного теплового излучения, определяемого законом Кирхгофа из условия термодинамического равновесия [1].

На рис. 2 проиллюстрирована методология определения численного критерия, соответствующего относительной энергетической яркости отражения диффузного светового поля от идеально проводящего зеркала (т.е. без потерь на поглощение). Причём калибровка выполняется на реальном золотом зеркале для излучения с  $\lambda \approx 700$  нм.

На рис. 2а приведена фотография трёхмерной индикатрисы отражения монокромного диффузного светового поля от золотого зеркала. Индикатриса построена в полярной системе координат таким образом, что её центр соответствует нулевому значению угла отражения



**Рис. 2.** К расчёту максимально возможного (при идеальном ламбертовском отражении) уровня яркости какой-либо компоненты рассеиваемого излучения на примере золотого зеркала.

при внешнем обзоре поверхности. Угол отражения пропорционален полярному радиусу, и на периферии круговой диаграммы значение этого угла приближается к  $90^\circ$ . На снимке это место видно как кольцевое сопряжение зеркала с внутренней поверхностью фотометрического шара (см. схему установки на рис. 1). Азимутальный угол наблюдения поверхности решётки определяется полярным углом диаграммы. В центральной части снимка видно вторичное отражение зеркального шара (см. рис. 1, позиция 5), образуемое нулевым порядком рассеяния, единственным в данном случае. Хорошо также видно контрастное отражение тёмного круглого отверстия в опорной шайбе (см. рис. 1, позиция 3), через которое производится фото-съемка.

Под снимком индикатрисы (рис. 2а) дан график (рис. 2б), показывающий зависимость относительной яркости излучения (ось ординат) от угла отражения, варьируемого от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  в плоскости горизонтального сечения индикатрисы рассеяния (ось абсцисс). Тонкими пунктирными линиями на графике установлены реперные уровни яркости, соответствующие расчётным значениям коэффициентов отражения: 0,96 – для случая нормального угла отражения ( $\theta \approx 0^\circ$ ) и 0,92 – для скользящего угла ( $\theta \rightarrow \pm 90^\circ$ ). Более жирным пунктиром отмечен единичный уровень относительной яркости, соответствующий идеальному ламбертовскому отражению без потерь на поглощение. Уровень для этого идеального случая вычислен путём линейной экстраполяции данных по уже установленным реперным уровням. Следует заметить, что такое приближение даёт хорошие результаты лишь в ближайших окрестностях существующих реперных точек. Подобное ограничение делает бессмысленной попытку полной оцифровки всей оси ординат (относительная яркость), тем более, что в этом нет реальной необходимости.

Аналогичным образом вычисляются уровни относительной яркости на графиках горизонтальных сечений индикатрис рассеяния поляризованных  $S$ - и  $P$ -компонент. В этом случае уровень, соответствующий идеальному ламбертовскому отражению без потерь на поглощение, равен  $1/2$  для каждой компоненты. Для дифракционных решёток следует особое внимание уделить выбору реперных зон на индикатрисах рассеяния. Эти зоны назначались на диагональных участках диаграмм, где в минимальной

степени проявлялись резонансные аномалии Рэлея–Вуда и помехи в виде вторичных отражений.

На рис. 3 представлены изображения индикатрис полной энергетической яркости (рис. 3а) и поляризационных компонент рассеянного светового поля ( $S$ -компонента на рис. 3б и  $P$ -компонента на рис. 3в), полученных для идеально проводящей фазовой линейной решётки (шаг  $d = 588$  нм, полная глубина синусоидального профиля микрорельефа  $h = 223$  нм). На диаграммах видны программно выделенные макроскопические градиенты яркости поляризованных  $S$ - и  $P$ -компонент рассеянного излучения (рис. 3б и 3в). Ожидаемая разнояркость реального физического светового поля прогнозируется в данном случае на уровне около 5–6% от величины, соответствующей ламбертовскому отражению. Столь сильно выраженный эффект обусловлен наличием пороговых аномалий Рэлея–Вуда при полном отсутствии резонансных аномалий (идеально проводящая решётка). Яркости  $S$ - и  $P$ -компонент так дополняют друг друга, что их сумма представляет собой обычное неполяризованное диффузное излучение (см. рис. 3а).

В следующем ряду рис. 3 приведены индикатрисы полной энергетической яркости (рис. 3г) и поляризационных компонент ( $S$ -компонента на рис. 3д и  $P$ -компонента на рис. 3е), полученных при моделировании рассеяния диффузного излучения на золотой решётке с такими же параметрами микрорельефа, что и для ранее описанного случая идеальной проводимости. Здесь прогнозируемый эффект проявляется в виде горизонтальной светлой полосы, проходящей через центральную часть диаграммы  $S$ -компоненты, и соответствующей ей тёмной полосы на диаграмме  $P$ -компоненты.

На рис. 3ж, 3з и 3и даны снимки диаграмм рассеяния (выполнена их гамма-коррекция), полученные в физическом эксперименте на золотой дифракционной решётке с теми же параметрами микрорельефа, что и у решёток, ранее использованных в компьютерных моделях. Под каждой диаграммой этого ряда приведён график, показывающий зависимость относительной яркости наблюдаемой компоненты излучения (ось ординат) от угла отражения, варьируемого от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  в плоскости горизонтального сечения индикатрисы рассеяния (ось абсцисс). Пунктирными линиями на графиках выделены уровни яркости различных компо-

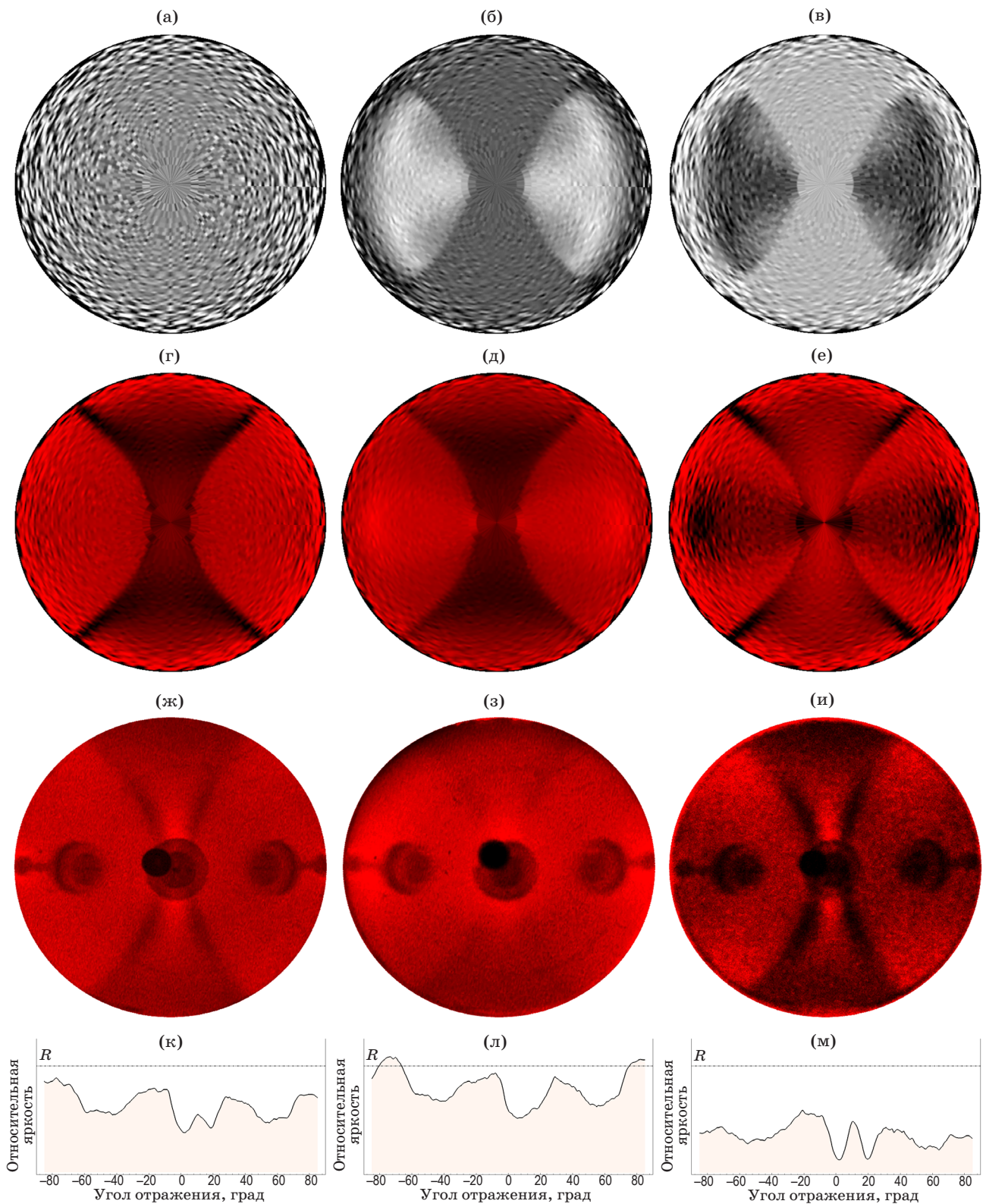


Рис. 3. Угловые диаграммы полной энергетической яркости и поляризационных компонент диффузного светового поля, рассеиваемого поверхностями следующих дифракционных решёток:

- 1) с идеальной проводимостью (компьютерная модель, максимальное отклонение  $S$ - и  $P$ -компонент от идеального ламбертовского уровня на 5–6%);
- 2) с золотым покрытием (компьютерная модель, превышение идеального ламбертовского уровня  $S$ -компоненты до 1,5–2%);
- 3) с золотым покрытием (реальный эксперимент, превышение идеального ламбертовского уровня  $S$ -компоненты на 1–1,5% в угловых направлениях, соответствующих расчётным максимумам у компьютерной модели).

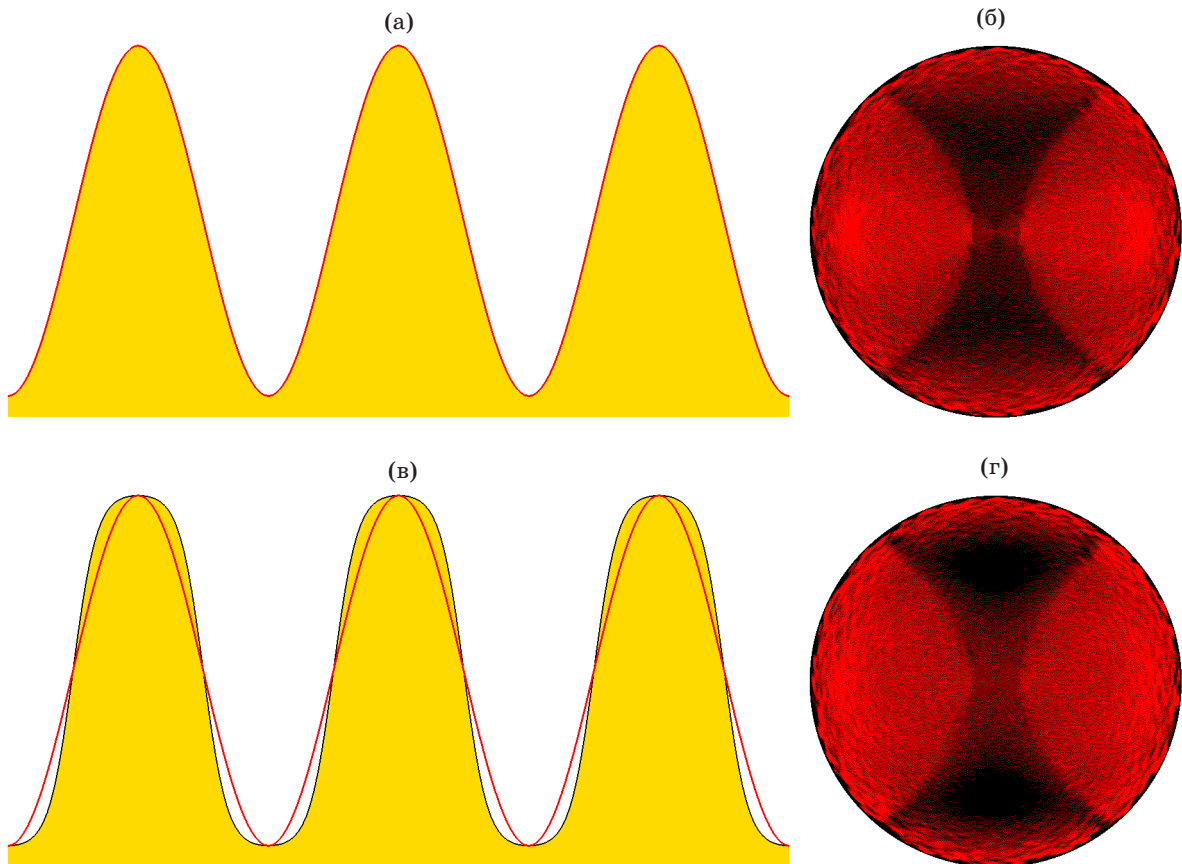


Рис. 4. Зависимость проявления прогнозируемого эффекта от точности микрорельефа решётки.

нент, соответствующих идеальному ламбертовскому рассеянию без потерь на поглощение:  $R = 1$  (рис. 3к) и  $R = 1/2$  (рис. 3л, 3м).

Превышение данного идеального уровня яркости у экспериментально зафиксированной  $S$ -компоненты (см. рис. 3з и 3л), причём именно в области тех углов, где ожидалось наиболее интенсивное проявление прогнозируемого эффекта (см. рис. 3б и 3д), позволяет говорить о достаточно выраженном соответствии реальности и прогноза.

Полезно обратить внимание на требования к точности соблюдения технических условий для успешного выполнения описанного эксперимента. Наряду с размером шага дифракционной решётки важно выдержать требуемую глубину, а также синусоидальный профиль её микрорельефа. Пример: на рис. 4а изображена синусоидальная решётка с необходимым шагом и глубиной. Диаграмма для  $S$ -компоненты рассеяния на рис. 4б говорит о присутствии ожидаемого эффекта. Отклонение от синусоидального профиля на рис. 4в (с теми же шагом и глубиной) приводит к исчезновению эффекта (рис. 4г).

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Получено экспериментальное подтверждение того, что монохромные компоненты диффузного фотонного газа могут приобретать анизотропную поляризацию в процессе дифракционного рассеяния, реализуемого в замкнутой физической системе.

Таким образом, например, излучение чёрного тела способно обрести неоднородную поляризационную структуру в процессе взаимодействия с дифракционной решёткой, с которой это излучение первоначально находилось в состоянии термодинамического равновесия. Сказанное даёт основание для ревизии того понятия о наиболее вероятном макроскопическом состоянии замкнутой системы, которое основано на постулате о равновероятности её микросостояний. В частности, реальное макросостояние может быть адекватно описано с применением энтропии, определяемой через формулу Шеннона [6]. Это позволяет формулировать понятие энтропии, как меры вероятности того или иного макросостояния замкнутой системы,

не прибегая к вышеупомянутому базовому постулату статистической физики, используемому при дефиниции энтропии Больцмана.

Полученные результаты, безусловно, нуждаются в тщательной проверке. В случае подтверждения их достоверности они приобретут практическую значимость. Очевидны технические решения, например, связанные с задачей пассивной локализации “маркированного” дифракционной решёткой объекта, находящегося

\* \* \* \* \*

в термодинамическом равновесии с окружающей средой (для скрытых систем безопасности и т. п.).

Автор выражает глубокую благодарность Игорю Голубенко, принимающему активное участие в создании программных средств, используемых в настоящем проекте.

Данная работа выполняется при поддержке Министерства образования и науки РФ (грант № 9.1354.2014/К).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савуков В.В. Анизотропная поляризация, прогнозируемая как результат дифракции излучения чёрного тела на отражающей фазовой решётке с идеальной проводимостью // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 10. С. 7–15.
2. Савуков В.В. Нарушение изотропности диффузного излучения вследствие его дифракции на многомерных регулярных структурах // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 1. С. 95–100.
3. Савуков В.В., Голубенко И.В. Моделирование взаимодействия произвольного светового поля с дифракционной решёткой методом Монте-Карло // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 7. С. 10–17.
4. Granet G. Diffraction par des surfaces biperiodiques: resolution en coordonnees non orthogonales // Pure Appl. Opt. 1995. V. 4. P. 777–793.
5. Granet G. Analysis of diffraction by surface-relief crossed gratings with use of the Chandezon method: application to multilayer crossed gratings // J. Opt. Soc. Am. 1998. V. 15. № 5. P. 1121–1131.
6. Савуков В.В. Уточнение аксиоматических принципов статистической физики // Деп. ВИНТИ. № 1249-B2004 от 16.07.2004.  
URL: [http://www.savukov.ru/viniti\\_1249\\_b2004\\_full\\_rus.pdf](http://www.savukov.ru/viniti_1249_b2004_full_rus.pdf)