

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

УДК 535.36.01: 535.44

НАРУШЕНИЕ ИЗОТРОПНОСТИ ДИФFUЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ЕГО ДИФРАКЦИИ НА МНОГОМЕРНЫХ РЕГУЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ

© 2010 г. В. В. Савуков

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

E-mail: vladimir@savukov.ru

Статья посвящена результатам экспериментальной проверки теоретического предположения, согласно которому базовый аксиоматический постулат статистической физики о равновероятности пребывания замкнутой системы в любом из доступных ей микросостояний может быть несправедлив для неэргодических случаев. В ходе фотометрических экспериментов, призванных зафиксировать прогнозируемую потерю изотропности диффузным световым полем вследствие его контакта с двумерной дифракционной решеткой фазового типа, выявилось значимое отклонение от закона Ламберта при рассеянии диффузного фотонного газа поверхностью решетки. Это привело к появлению угловой анизотропии потоков излучения в изначально однородном световом поле. Полученные результаты дают основание для ревизии определения наиболее вероятного макросостояния замкнутой системы.

Ключевые слова: дифракция, индикатриса, рассеяние, диффузный.

Коды OCIS: 000.2658, 000.6590, 050.1940, 290.0290, 290.5820, 290.5825

Поступила в редакцию 04.09.2009

Введение

Еще в 1913 г. Геде [1], а затем и другими [2, 3] исследователями было строго доказано, что диффузный газ, в том числе и фотонный, может находиться в состоянии детального динамического равновесия с некоторой отражающей поверхностью, если только угловая характеристика плотности вероятности рассеяния, обобщенная для всех частиц этого газа, описывается косинусоидальным законом Ламберта¹ или Кнудсена² [4, 5].

Иначе говоря, для диффузного фотонного газа³ любого спектрального состава⁴ в ходе “упругого рассеяния” (без поглощения) его ча-

стиц на каком-либо объекте формально обязан выполняться закон Ламберта⁵. Это требование является частным следствием нулевого начала термодинамики.

Цель работы

Целью работы является прямая экспериментальная проверка ранее высказанного автором теоретического предположения [6], согласно которому закон Ламберта может нарушаться в некоторых случаях дифракционного рассеяния диффузного (изотропного) газа фотонов на поверхности особо организованного дифракционного оптического элемента (ДОЭ).

Методология проведения работы

Проверка предположения о возможности нарушения закона Ламберта выполнялась в ходе фотометрических экспериментов, призванных

⁵ На визуальном уровне это означает следующее: целиком отражающие свет объекты любой макроскопической формы с матовой, зеркальной или дифракционно рассеивающей поверхностью, помещенные в заполненный диффузным излучением замкнутый объем, не должны создавать в этом “приготовленном” изотропном световом поле какие-либо яркостные градиенты, которые могли бы быть зафиксированы внешним наблюдателем.

¹ Такое название используют в оптике, когда рассматривают взаимодействие с поверхностью потока фотонов электромагнитного излучения.

² Это название обычно применяют в молекулярной динамике или в иных случаях, когда частицы изучаемого газа имеют ненулевую массу покоя.

³ Под фотонным диффузным газом здесь понимается неполяризованное некогерентное электромагнитное излучение, для отдельных фотонов которого с равной вероятностью реализуется любая возможная угловая ориентация их волновых векторов в геометрическом пространстве.

⁴ Принцип детального равновесия предполагает сохранение свойства изотропности для каждой отдельной спектральной компоненты излучения.

зафиксировать возможную потерю изотропности диффузным световым полем, прогнозируемую как следствие его контакта с двумерной фазовой дифракционной решеткой синусоидального профиля.

Осуществление каждого из экспериментов выглядело так: дифракционный оптический элемент с цилиндрической формой поверхности помещался в центральную часть объема фотометрической камеры. Внутри этой камеры создавалось диффузное световое поле со спектральным составом видимого диапазона. Через малое отверстие в корпусе фотометрической камеры выполнялось фотографирование ДОО на фоне ее внутренней стенки. Зафиксированная картина предполагаемого искажения поверхностью ДОО изначально диффузного излучения обрабатывалась методами дисперсионного и регрессионного анализа, выявляющими наличие или отсутствие ожидаемых явлений анизотропии.

С целью контроля воспроизводимости получаемых результатов работы с каждым ДОО независимо проводились на трех разных экспериментальных установках, которые отличались конструкциями фотометрических камер, источниками первичного излучения и методами его стохастизации, а также параметрами регистрирующей фотоаппаратуры.

Описание экспериментальных установок и их элементов

Экспериментальная установка № 1 выполнена на основе цилиндрической фотометрической камеры и сменного внешнего локального источника первичного светового излучения, которое вводилось в камеру через массивный фильтр из молочных акриловых плит с матированной поверхностью, размещенный на ее открытом торце. Такая конструкция не накладывает ограничений на размер, тип и мощность источника излучения, что удобно при варьировании различных видов этих источников. В ходе экспериментов в качестве локального источника были использованы пять типов светильников светодиодного, люминесцентного и галогенного (накаливания) типа с разными характеристиками спектров излучения.

Форма камеры – цилиндрическая (положение оси симметрии – вертикальное).

Диаметр камеры (внутренний) – 260 мм.

Длина вдоль оси симметрии (внешняя) – 185 мм.

Диаметр отверстия для объектива фотоаппарата 5,0 мм ($\cong 0,00768\%$ площади всей вну-

тренней поверхности камеры), центр отверстия для объектива отстоит от нижней поверхности камеры на 85 мм.

Материал покрытия внутренней поверхности камеры – ярко-белая матовая краска на акриловой основе. Имеет усредненное для видимой области значение коэффициента спектрального отражения $\approx 0,97$, блеск по ISO 2813, 85° – не более 10%.

Экспериментальная установка № 2 выполнена на основе цилиндрической камеры и внутреннего источника стохастизированного светового излучения, равномерно распределенного по всей ее внутренней поверхности.

Форма – цилиндрическая (положение оси симметрии – вертикальное).

Диаметр камеры (внутренний) – 220 мм.

Длина вдоль оси симметрии (внешняя) – 155 мм.

Диаметр отверстия для объектива фотоаппарата – 6,5 мм ($\cong 0,01826\%$ площади всей внутренней поверхности камеры), центр отверстия для объектива отстоит от нижней поверхности камеры на 85 мм.

Покрытие внутренней поверхности камеры – светорассеивающая подложка из матовой ярко-белой краски с коэффициентом диффузного отражения для видимого спектра $\approx 0,97$, покрытая слоем твердого коллоидного 10%-раствора самосветящегося люминофора марки “Пента Л-1” в прозрачном матовом лаке.

Перед началом каждого эксперимента особое светоаккумулирующее покрытие боковых и торцевых стенок камеры (см. описание внутреннего покрытия) длительно облучалось люминесцентной лампой “накачки”, после чего внутренняя поверхность камеры приблизительно восемь часов испускала синий видимый свет с доминирующей длиной волны около $\lambda \approx 420$ нм. В течение первых 30 мин яркости этого света было достаточно для выполнения любых необходимых фотометрических работ.

Несмотря на громоздкий характер подготовки каждого эксперимента и фиксированный спектр получаемого света изотропность излучения, формируемого в камере № 2, была практически идеальной. Пылинки мелкодисперсного люминофора, внедренные в объем прозрачного матового лака, представляли собой огромное множество элементарных источников света, равномерно распределенных по всей внутренней поверхности камеры. А низкая концентрация частиц люминофора в составе коллоидной “взвеси” не мешала дополнительной стохастизации испускаемого

этими частицами излучения матово-белой подложкой описанного двуслойного покрытия.

Экспериментальная установка № 3 имеет сферическую камеру и внутренний источник. Это “классическая” по своей форме камера из числа тех, которые обычно и применяют для создания диффузных световых полей. В составе установки использовалась бесцокольная миниатюрная галогенная лампа накаливания КГМ-12В капсульного типа мощностью 40 Вт, с непрерывным (“планковским”) спектром излучения и цветовой температурой около $T \approx 2700$ К. Источник светового излучения расположен непосредственно в центре камеры так, чтобы образец ДОЭ “загораживал” этот источник от фотоаппарата.

Форма камеры – сферическая (рис. 1а).

Диаметр камеры (внутренний) – 400 мм.

Диаметры отверстий для объектива фотоаппарата – 32, 16 и 8 мм (соответственно 0,16%, 0,04% и 0,01% площади всей внутренней поверхности камеры).

Материал покрытия внутренней поверхности камеры – аналогичен внутреннему покрытию камеры в установке № 1.

Образцы дифракционных оптических элементов

Исследования проводились на шести образцах цилиндрической формы, рассеивающие поверхности которых представляли собой ДОЭ, изготовленные в виде гибких реплик дифракционной решетки (рис. 1б). Рабочая часть каждого ДОЭ имеет квадратную форму и состоит из равно-великих прямоугольных полос с отражающим покрытием из алюминия. На половине этих полос сформирован микрорельеф с заданными параметрами (дифракционные участки, представляющие собой фазовую решетку), а разделяющие их полосы обладают зеркально гладкой поверхностью.

Благодаря наличию в составе ДОЭ чередующихся (смежных) дифракционных и зеркальных участков появляется объективная возможность контроля однородности исходного светового поля. Действительно, такие смежные участки ДОЭ одновременно находятся в идентичных условиях освещения. Поэтому отсутствие изначальной изотропности светового поля стало бы очевидным по характеру его отражения от зеркальных участков.

Геометрия микрорельефа дифракционных участков ДОЭ имеет квазисинусоидальный

профиль, характеризуемый стандартными для синусоидальной функции пропорциями между шагом S_0 (периодом) и амплитудой вариации высоты A . Шаг решетки – $S_0 \approx 417, 833, 1667$ и $10\,000$ нм, размах амплитуды – $A = \pm S_0/2\pi$.

Размерность геометрии микрорельефа дифракционных участков отдельных ДОЭ была либо одномерной (линейной), либо двумерной (ортогональная перекрестная решетка с пересечением штрихов под углом 90°). По отношению к сторонам квадратной рабочей области ДОЭ линии штрихов разных дифракционных решеток были ориентированы (наклонены) либо под углом 45° , либо под углом 90° .

Каждый дифракционный оптический элемент закреплялся на массивном металлическом цилиндре с зеркальной боковой и матово-белой торцевой поверхностью (опорном цилиндре) таким образом, чтобы при вертикальном положении цилиндра дифракционные и зеркальные полосы ДОЭ были горизонтальны.

Регистрирующая аппаратура

В состав экспериментальных установок № 1 и № 2 (с цилиндрическими камерами) входил ультракомпактный цифровой фотоаппарат фирмы *Canon*TM “*Digital Ixus 90 IS*”, а в состав установки № 3 (со сферической камерой) входил компактный цифровой фотоаппарат *Canon*TM “*PowerShot S2 IS*”.

Результаты экспериментов

Проведенные эксперименты выявили значимое отклонение от закона Ламберта при дифракции диффузного фотонного газа на поверхности двумерной дифракционной решетки с квазисинусоидальным профилем микрорельефа. Данное отклонение, в свою очередь, вызывало угловую анизотропию потоков излучения в изначально однородном световом поле.

На рис. 2 приведены два фотоснимка, иллюстрирующие проявление эффекта анизотропного рассеяния. В обоих случаях рабочие поверхности ДОЭ представляют собой гибкие реплики, имеющие чередующиеся горизонтальные участки зеркального типа (на снимках они более светлые) и участки с двумерным квазисинусоидальным микрорельефом, направление штрихов которых составляет угол 45° с образующими опорных цилиндров. Оба образца последовательно помещались в фотометрическую камеру, заполняемую стохастизированным световым



Рис. 1. а – установка на основе фотометрической камеры № 3, б – внешний вид дифракционного оптического элемента.

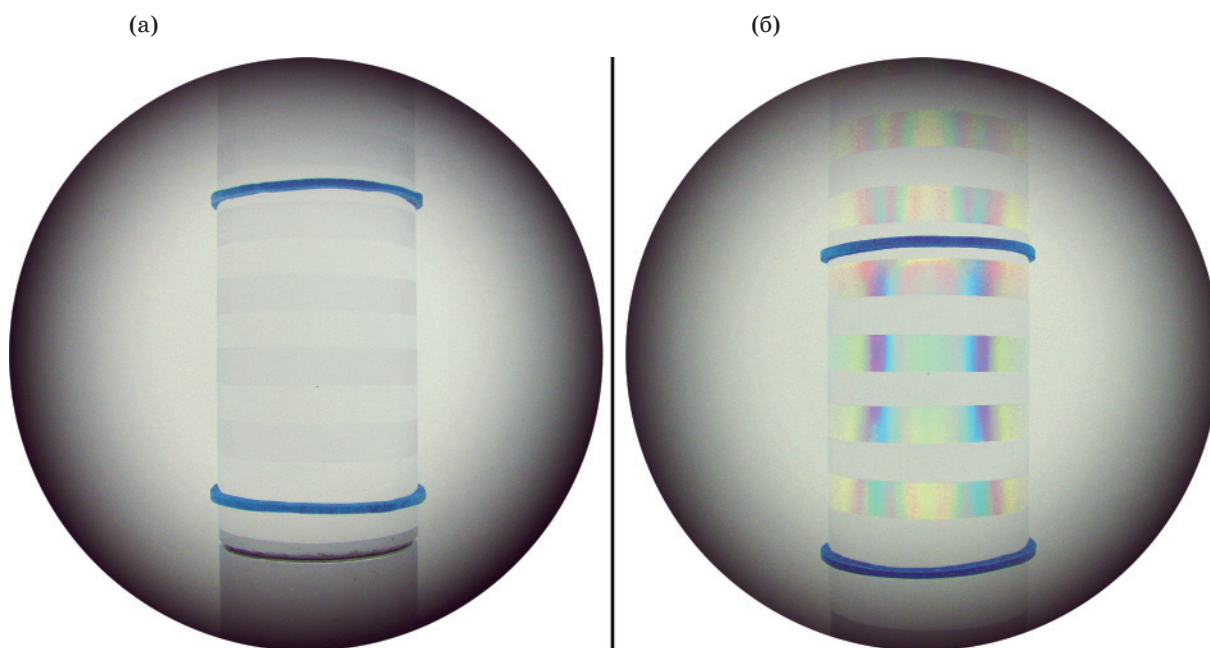


Рис. 2. Фотографии ДОЭ с двумерным квазисинусоидальным профилем микрорельефа. а – с шагом решетки 10 мкм, б – с шагом 833 нм.

излучением. В качестве первичного источника излучения использовалась люминесцентная лампа с трехполосным спектром, рабочие длины волн которого были 435 ± 10 нм, 545 ± 10 нм и 610 ± 10 нм. Цветовая температура источника составляла $T \approx 4200$ К, а коэффициент цветопередачи – $Ra \approx 80$.

На фотографии (рис. 2а) изображение ДОЭ, шаг решетки которого слишком велик (10 мкм) для того, чтобы прогнозируемые эффекты анизотропии проявили себя в видимой области спектра. На рис. 2б представлен снимок ДОЭ с шагом решетки 833 нм. Локальное уменьшение спектральной яркости, отчетливо наблюдаемое на дифракционных участках его боковой поверхности, составляет в данном случае около 30% от среднеинтегрального уровня. При этом угловая анизотропия яркости исходного диффузного светового поля не превышает 2%.

Апробация воспроизводимости выявленного эффекта была реализована для большого числа конструктивно выполнимых сочетаний дифракционных оптических элементов (6 вариантов), фотометрических камер (3 варианта) и источников излучения (8 вариантов). Полученные результаты позволяют сделать вывод об объективном характере наблюдаемой потери изотропности изначально однородным диффузным излучением [7].

В работе [7] теоретически показано, что провал в уровне яркости поверхности ДОЭ должен наблюдаться преимущественно в плоскостях, ориентированных под тангенциальным углом 45° к линиям штрихов фазовой двумерной дифракционной решетки, а на одномерных решетках эффект должен отсутствовать. При этом оптимальное значение угла отражения β , отсчитываемое от нормали к макроповерхности решетки, составит

$$\beta \approx \arcsin \left[1 - \lambda / (\sqrt{2} S_0) \right], \quad (1)$$

где β – угол оптимального наблюдения поверхности, S_0 – шаг решетки в направлении, ортогональном штрихам, λ – доминирующая длина волны рассеиваемого излучения, причем $\lambda \leq \sqrt{2} S_0$.

Справедливость данных прогнозов была с высокой точностью подтверждена во всех проведенных экспериментах. Зависимость угловой локализации эффекта от длины волны излучения видна на рис. 2б, где наблюдаются те спектральные компоненты исходного метамерного белого света, которые являются дополнительными (парными) по отношению к “подавляемым”.

Наибольшую интенсивность эффект приобретает в том случае, если доминирующая длина волны излучения становится равной $\lambda \approx \sqrt{2} S_0$.

Важно заметить, что рассмотренный в работе [7] механизм дифракционного рассеяния отчасти аналогичен тому, который реализуется при формировании аномалий Рэлея–Вуда [8, 9], и это нашло отражение в зависимости (1).

Выводы

Статистическая физика равновесных систем базируется на постулате о равновероятности всех микросостояний, доступных замкнутой системе. Данный постулат имеет характер априорно декларируемой гипотезы, принятие которой позволяет утверждать, что равновесное макросостояние у исследуемой системы может быть только одно, причем жестко регламентируются и параметры этого единственного состояния. В термодинамике функциональным аналогом данного постулата служит “Нулевое начало”.

Выявленный механизм рассеяния светового поля на поверхности ДОЭ создает в доступном физической системе фазовом пространстве локальные области с ненулевой дивергенцией потока фазовых траекторий фотонов (“источники” и “стоки”). Это делает такую систему неэргодичной⁶, а значит и не сообразной с аксиоматикой статистической физики.

Возникающий в результате эффект дает объективное основание для ревизии существующего понятия о наиболее вероятном макроскопическом состоянии замкнутой системы, поскольку очевидно, что такое состояние может не соответствовать определению термодинамического равновесия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gaede W. The external friction of gases // *Annalen der Physik*. 1913. В. 41. S. 289–336.
2. Epstein P.S. On the Resistance Experienced by Spheres in their Motion through Gases // *Physical Review*. 1924. V. 23. P. 710–733.
3. Clausius P. Cosine law of reflection as a result of the second main theorem of thermodynamics // *Annalen der Physik*. 1930. В. 4. S. 533–566.
4. Goodman F.O., Wachman H.Y. *Dynamics of Gas-Surface Scattering*. Academic Press, 1976. 423 p.

⁶ Свойство эргодичности предполагает достоверность микроканонической гипотезы статистической физики о тождественности результатов усреднения по времени и фазового усреднения при вычислении значений макроскопических параметров системы.

Перевод: Гудман Ф., Вахман Г. Динамика рассеяния газа поверхностью. М.: Мир, 1980. 423 с.

5. *Ramsey N.F.* Molecular Beams. Oxford: Clarendon Press, 1956. 466 p. Перевод: Рамзей Н. Молекулярные пучки. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. 411 с.

6. *Савуков В.В.* Уточнение аксиоматических принципов статистической физики // Деп. в ВИНТИ. № 1249-B2004. 177 с. URL: http://www.savukov.ru/viniti_1249_b2004_full_rus.pdf.

7. *Савуков В.В.* Нарушение закона Ламберта при дифракции диффузного фотонного газа на многомерных регулярных структурах. // Деп. в ВИНТИ. № 507-B2009. 49 с. URL: http://www.savukov.ru/viniti_0507_b2009_full_rus.pdf.

8. *Wood R.W.* On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum // Philosophical Magazine. 1902. V. 4. P. 396–402.

9. *Lord Rayleigh.* On the Dynamical Theory of Gratings // Proc. of the Royal Society of London. 1907. S. A 79. P. 399–416.