



СТРУКТУРНО СЛОЖНАЯ ГРАНИЦА С ЗЕРКАЛЬНО-ДИФFUЗНОЙ ИНДИКАТРИСОЙ ОТРАЖЕНИЯ

Д. М. Наплеков¹, А. В. Тур², В. В. Яновский¹

¹Институт монокристаллов, Национальная Академия Наук Украины

² Université de Toulouse [UPS], CNRS, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

В работе предложен способ моделирования зеркально-диффузного характера отражения света от реальных поверхностей. Модель структурно сложной отражающей границы основана на открытых бильярдах. Индикатриса отражения от этой границы при всех углах падения состоит только из зеркального пика и диффузной компоненты. Зависимость доли зеркальной компоненты от угла падения может быть любой наперед заданной функцией, ее выбор будет определять также и вид диффузной компоненты. Показано, что генерируемая поверхностью индикатриса отличается от ламбертовой и хорошо совпадает с экспериментально наблюдаемыми индикатрисами отражения от реальных границ.

Ключевые слова: Диффузное отражение света, открытый бильярд.

Введение

Диффузный характер отражения света от различных поверхностей впервые рассматривался Иоганном Ламбертом, который в работе [1] предложил индикатрису диффузного отражения в виде $I(\varphi) = I_0 \cos \varphi$, где φ угол отражения. Эта индикатриса в целом адекватно описывает диффузное отражение от различных поверхностей и благодаря своей простоте широко используется как модельная индикатриса диффузного отражения. Однако точная индикатриса отражения от реальных физических объектов, как правило, существенно отличается от ламбертовой. Поэтому были предложены другие модели, приводящие к более близким к реальности индикатрисам отражения. К таким моделям относятся основанная на физической оптике модель Бэкмана–Спизичино [2], на геометрической оптике модель Торэнса–Спароу [3] и ряд других [4–6]. Во всех этих моделях как, правило, рассматривается один из компонентов индикатрисы отражения, например, лепесток зеркального отражения, и не учитывается взаимосвязь между зеркальной и диффузной компонентами. Эти модели используются, в частности, при автоматической обработке изображений, получении информации о форме и физических свойствах объектов, определении движения, нахождении одинаковых объектов на снимках с разными условиями освещения, например, на спутниковых фотографиях. Яркость объекта на изображении напрямую зависит от его индикатрисы отражения.

Разумеется, индикатриса отражения также важна для описания множества других физических явлений. Большое значение индикатриса отражения приобретает, в проблемах оптической биомедицинской диагностики, лазерной хирургии и деструкции биотканей, клеток и биомолекул, наконец, в лазерной микро- и макродиагностике [7, 8]. Она используется для описания не зеркального характера отражения от границ реальных тел, в том числе границы скинтилляционного кристалла [9]. При этом классическое описание распространения света в скинтилляционном кристалле с диффузно отражающей поверхностью приводит к интегральному уравнению светосбора с сингулярным ядром. Поиск и анализ его точных решений сталкивается с серьезными трудностями. Естественным выходом из такой ситуации является моделирование процессов распространения света в кристалле с помощью бильярда (см., например, [10]), повторяющего форму кристалла. Однако в обычном бильярде отражение от границы происходит по зеркальному закону, тогда как индикатриса отражения от границ кристалла часто имеет существенную диффузную компоненту. Чтобы преодолеть это противоречие, необходим простой способ моделирования отражения от границы с существенной диффузной компонентой.

Для этого рассмотрим открытый бильярд определенного типа, имеющий, как будет показано ниже, определенную зеркально-диффузную индикатрису отражения, подходящую для моделирования диффузно отражающей поверхности. Открытым называется бильярд, граница которого является незамкнутой и имеет участки, через которые лучи могут как попадать, так и покидать бильярд. Такие бильярды интенсивно изучаются в настоящее время (см., например, [11–13]). Основное внимание уделяется распределению времен нахождения внутри открытого бильярда, которое может иметь экспоненциальный или степенной закон спада. Нас однако будет интересовать индикатриса отражения, формирующаяся из параллельного пучка падающих на отверстие в границе бильярда лучей.

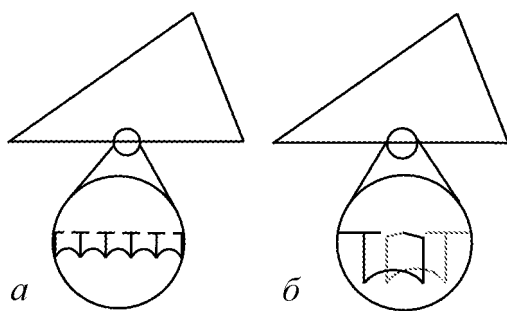


Рис. 1. Показаны два способа построения глобальной границы из микроскопических бильярдов. *а* – структурно сложная граница глобального бильярда, полученная состыковкой «микроскопических» открытых рассеивающих бильярдов. Периодическая верхняя плоская часть границы обеспечивает значительную зеркальную компоненту отражения. *б* – граница глобального бильярда, полученная наложением «микроскопических». В этом случае плоские участки границы отсутствуют и зеркальная компонента определяется только свойствами «микроскопических» бильярдов

Для моделирования диффузного отражения будем использовать границу, имеющую нетривиальную структуру. Такая макроскопически плоская граница состоит из «микроскопических» открытых бильярдов одного или нескольких разных видов. Возможные варианты устройства такой границы показаны на рис. 1. В первом варианте (рис. 1, *а*) отражение от границы в целом преимущественно идеально зеркальное с поправкой, обусловленной лучами, попавшими в микроскопический бильярд. Во втором варианте (рис. 1, *б*) формирования границы микроскопические бильярды наложены друг на друга таким образом, что граница макроскопического глобального бильярда целиком состоит из входов в микроскопические бильярды. В этом случае соотно-

шение между зеркальной и диффузной компонентами отражения от границы зависит только от индикатрис отражения микроскопических открытых бильярдов.

В целом, в основе такого моделирования лежит не попытка непосредственно проследить ход лучей при отражении от реальной поверхности, а стремление использовать общие свойства хаотических процессов. Так, например, в случае сильного хаоса независимо от конкретного физического процесса (излучение света с поверхности Солнца или вылет атомов из ячейки Кнудсена) распределение направлений вылета будет ламбертовым. Соответственно для построения модели идеально матовой поверхности в качестве микроскопического можно выбрать любой бильярд, закрытая форма которого обладает сильно хаотической динамикой. При достаточно маленькой величине входного окна индикатриса отражения, генерируемая таким бильярдом, будет полностью совпадать с модельной индикатрисой Ламберта [14]. В нашей работе предлагается метод построения специального открытого бильярда, который при всех углах падения будет давать кроме диффузной еще и зеркальную компоненту отражения. Причем зеркальная компонента отражения будет иметь любую исходно заданную зависимость от угла падения, в частности, и экспериментально наблюдаемую для определенных поверхностей [15].

Кроме характеристики отражения от сложно устроенной границы, индикатриса отражения открытого бильярда имеет отношение и к другим важным физическим явлениям. Так, например, современные методы литографии позволяют создание наноразмерных структур, транспортные свойства которых имеют множество интересных «аномалий». Находящиеся на уровне Ферми электроны в этих структурах существуют в баллистическом режиме и образуют двумерный электронный газ. Размеры системы много меньше длины свободного пробега электронов, поэтому ее сопротивление определяется не обычным диффузным рассеянием электронов, а (как минимум для коротких траекторий) отражением от границ структуры [16]. Наблюдаемые аномалии можно успешно объяснить в рамках модели классического движения частицы в открытом бильярде, где в роли границы бильярда выступает граница структуры, а в роли движущихся в бильярде частиц – непосредственно электроны. Сравнение классического и квантового подхода показывает [17], что классический подход находится в полном согласии с результатами квантового описания системы. Таким образом, изучение транспорта через открытые бильярды имеет также важное значение и для развития современной наноразмерной электроники.

1. Построение границы бильярда

Основная идея построения бильярда с индикатрисой отражения, содержащей зеркальную и диффузную компоненты, заключается в следующем. За основу построения берется бильярд с полностью регулярной динамикой, обладающий следующим свойством: при небольшом входном окне практически все лучи падающего пучка выходят после всего двух столкновений с границей практически в направлении зеркального отражения. Чем меньше размер входного окна, тем меньше будет отклонение от зеркального направления. Другими словами, такой бильярд имеет индикатрису отражения близкую к зеркальной. Далее его граница искажается определенным образом для появления диффузной компоненты. Способ искажения осно-

ван на изменении части поверхности бильярда, на которую падает пучок параллельных лучей, при выбранном угле падения на отверстие в границе такого бильярда. Ясно, что доля зеркальной компоненты будет определяться частью границы бильярда, не претерпевшей изменений, а доля диффузной – частью границы, подверженной специальным изменениям. Смысл деформации части границы заключается в стремлении обеспечить многократность столкновений луча с границей бильярда до его выхода из открытого бильярда. При этом такие лучи хаотизируются, теряют память об угле падения и, следовательно, будут давать вклад в диффузную компоненту.

Такими образом граница этого бильярда разбивается на достаточно маленькие участки с расчетом, чтобы при любом угле падения пучка он не мог целиком попасть внутрь одного участка при первом отражении от границы. Далее у каждого участка берется его часть и заменяется на другую измененную форму. Тогда те лучи падающего пучка, что попали на неизмененную часть границы, по-прежнему выйдут за два столкновения, а попавшие на новую часть границы положат начало более длинным и сложным траекториям. Множество этих траекторий и сформирует диффузную часть отражения. Выбор частей исходной границы, которые будут заменены, диктуется требуемыми свойствами воспроизводимой индикатрисы. Например, если при некотором угле падения нам надо, чтобы зеркально отражалась половина лучей, можно половину соответствующего участка границы оставить, а половину заменить. Если при другом угле падения надо отражать зеркально 90% лучей, соответственно оставим 90% того участка, на который попадет пучок при этом угле падения, и т.д. Полученная в итоге зависимость доли зеркальной компоненты от угла падения не будет полностью совпадать с заложенной таким образом, но будет достаточно сильно с ней коррелировать, чтобы отличия было несложно скомпенсировать.

Таким образом, за основу построения возьмем бильярд в форме криволинейного треугольника (рис. 2), две стороны которого задаются уравнением

$$y = \pm \frac{x}{2a}(2a - x), \quad x \in [0, a]. \quad (1)$$

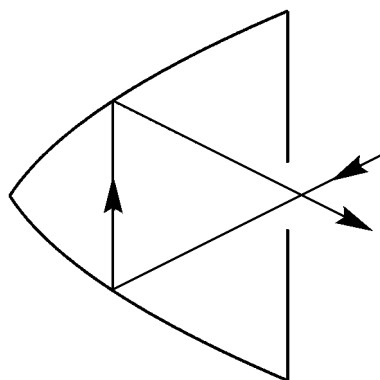


Рис. 2. Параболический открытый бильярд и падающая в него траектория. Любая траектория, попавшая в него, после двух столкновений покидает бильярд в направлении «зеркального» отражения

Третья сторона является плоской. Криволинейная часть границы обладает следующим свойством: все лучи, исходящие из точки $(a, 0)$, после двух отражений возвращаются в нее. Таким образом, расстояние a можно считать фокусным расстоянием этого бильярда.

Описание движения в бильярде можно проводить разными способами, в рассматриваемом случае удобно воспользоваться лагранжевым подходом к описанию бильярдов [18]. Основная причина этого связана с возможностью рассматривать и сравнивать фазовые пространства как исходных бильярдов, так и их объединений. Кроме того, в этом формализме исключитель-

но наглядно выглядит результат появления отверстия на границе бильярда, что удобно для качественных соображений о свойствах открытых бильярдных систем. Границу замкнутого бильярда в этом формализме удобно описывать параметром $s \in S^1$. Основным элементом, определяющим состояние бильiardной частицы, является отдельный прямолинейный сегмент траектории. Каждый такой сегмент однозначно определяется началом и концом прямолинейного отрезка, начинающегося и заканчивающегося на границе бильярда. В координатах натурального параметра его можно задать как (s_1, s_2) , где $s_1 \in S^1$ и $s_2 \in S^1$. Этот направленный отрезок однозначно определяет следующий сегмент бильiardной траектории (s_2, s_3) :

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} \xrightarrow{f} \begin{pmatrix} s_2 \\ s_3 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, фазовое пространство бильярда содержится в двумерном торе $T^2 = S^1 \times S^1$. Однако не каждый прямолинейный отрезок, начинающийся и заканчивающийся на границе бильярда, лежит внутри него и, следовательно, может быть сегментом бильiardной траектории. Поэтому фазовое пространство таких бильярдных систем – тор с дырками. Более подробно этот подход изложен в работе [18]. Также просто выглядит структура динамического уравнения, определяющего следующий сегмент (\bar{s}_1, \bar{s}_2) по предыдущему,

$$\begin{aligned} \bar{s}_1 &= s_2, \\ \bar{s}_2 &= f(s_1, s_2), \end{aligned}$$

где функция $f(s_1, s_2)$ определяется формой бильярда и обладает некоторыми общими и универсальными свойствами (см., например, [19]). В частности, она является инволюцией, поскольку для бильярдных систем всех форм удовлетворяет тождеству

$$f(f(s_1, s_2), s_2) = s_1.$$

При изучении и демонстрации фазового портрета удобно пользоваться разверткой тора в виде единичного квадрата. Тогда построенный в рамках описанного выше подхода фазовый портрет исходного параболического бильярда будет иметь вид, показанный на рис. 3. Видно, что движение лучей в таком бильярде является полностью регулярным, хаотическая компонента в фазовом пространстве отсутствует.

Поместим входное отверстие бильярда величины Δ в центре его плоской стороны. Через это входное окно лучи могут попадать и покидать бильiard, что делает его открытым. Разобьем теперь криволинейные границы исходного бильярда на участки таким образом,

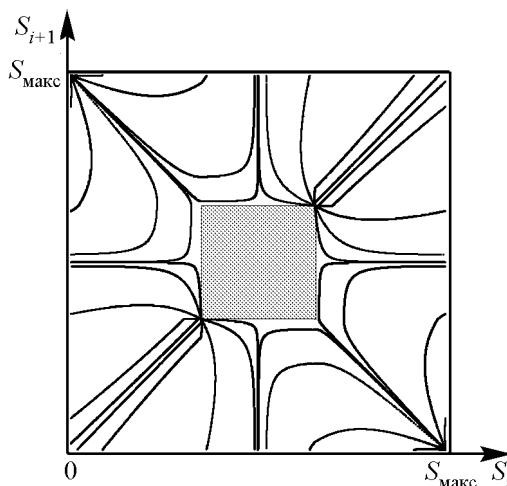


Рис. 3. Фазовый портрет траекторий криволинейного треугольного бильярда: регулярная динамика, хаотическая компонента в фазовом пространстве отсутствует

чтобы каждый участок соответствовал проекции входного отверстия на соответствующую сторону (рис. 4). Координаты граничных точек этих участков задаются отображением

$$\begin{cases} x_{n+1} = a \left(1 + \frac{2y_n + \Delta}{2(a - x_n)} - \sqrt{\left(1 + \frac{2y_n + \Delta}{2(a - x_n)} \right)^2 - \frac{2y_n + \Delta}{a - x_n} - \frac{\Delta}{a}} \right), \\ y_{n+1} = \pm \frac{x_{n+1}(2a - x_{n+1})}{2a} \end{cases}$$

с начальным условием $x_0 = y_0 = 0$. По мере приближения к плоской стороне границы размер этих участков границы уменьшается до нулевого, поэтому при приближении к плоской стороне на некоторое заданное расстояние процедура разбиения границы на участки прекращается. Это расстояние может быть выбрано сколь угодно маленьким.

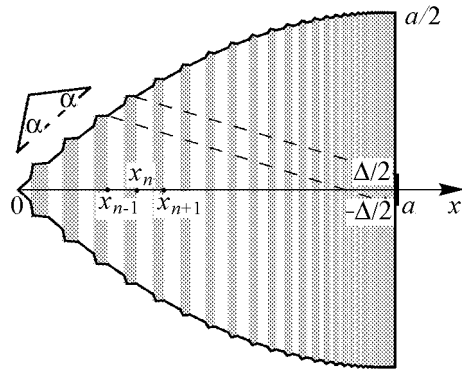


Рис. 4. Вид границы рассматриваемого бильярда. Граница разбита на участки, соответствующие проекции входного окна. У каждого участка часть изначально гладкой границы заменена на две стороны равностороннего треугольника с углом α

Разобьем теперь каждый из полученных участков границы на две части в соответствии с некоторой произвольно выбираемой функцией угла падения $0 < f(\varphi) < 1$, так что координаты разделяющей точки будут иметь вид

$$\begin{cases} x'_n = x_n + f(\varphi_n)(x_{n+1} - x_n), \\ y'_n = \pm \frac{x'_n(2a - x'_n)}{2a}, \\ \tan \varphi_n = \frac{a - x_n}{y_n + \Delta/2}. \end{cases}$$

Первую часть каждого из участков оставим нетронутой, эти части границы будут генерировать зеркальную часть индикатрисы бильярда. Вторую часть каждого участка заменим на выпуклую кривую любого другого вида. В качестве наиболее простой замены были взяты две стороны равностороннего треугольника с углом α при них. Так что в итоге граница бильярда приобретает вид, показанный на рис. 4.

Типичный фазовый портрет бильярда такого вида показан на рис. 5. Видно, что на фазовом портрете сохраняются некоторые следы регулярной динамики. Чем больше общая доля зеркальной компоненты, тем более явно они выражены. Серия занятых траекторией областей вдоль диагонали $y = x$

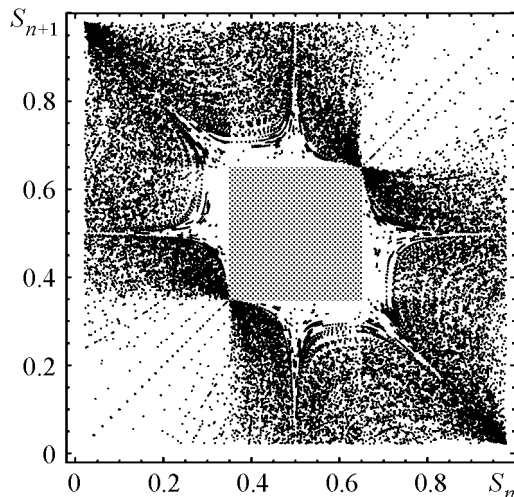


Рис. 5. Фазовый портрет бильярда с параметрами $a = 100$, $\Delta = 5$, $\alpha = 0.6$, $f(\varphi) = 0.92$, $N = 20000$

соответствует двум последовательным столкновениям со сторонами равностороннего треугольника. Каждая из этих областей соответствует своему треугольнику на границе бильярда. В окрестности этих областей находится запрещенная зона сложной формы, внутрь которой траектория не может заходить. Ее появление связано с тем, что рассматриваемый бильярд не является строго выпуклым.

2. Полученные результаты. Сравнение с экспериментальными

Точный вид границы бильярда и, соответственно, генерируемая им индикатриса зависят от достаточно большого числа параметров – размера входного окна Δ , угла равносторонних треугольников α и функции $f(\varphi)$. Размер входного окна является одним из основных параметров. Для того, чтобы индикатриса имела зеркально-диффузный характер, он должен быть выбран достаточно маленьким – много меньше параметра криволинейного бильярда a . В противном случае появится направленное отражение не только в зеркальном, но и в других направлениях. Кроме того, для некоторых бильярдов при расчете разбиения границы размер входного окна Δ_{br} брался меньше реального Δ . Это приводило к более мелкому разбиению границы, что делало зависимость доли зеркальной компоненты от угла падения более гладкой. Таким образом, с входным окном фактически связано два параметра. При построении границы бильярда бралось значение Δ_{br} . При построении индикатрисы, которую этот бильярд генерирует, для расчета попадания и выхода лучей бралось $\Delta > \Delta_{br}$.

Угол α может выбираться достаточно произвольно. В принципе, его можно выбирать не одинаковым для всех треугольников границы, а как некоторую функцию угла падения $\alpha(\varphi)$. Как оказалось, выбор этой функции незначительно влияет на индикатрису бильярда и не может качественно изменить ее вид. Исключением является только такой подбор углов α , когда попадающие в бильярд лучи выходят из бильярда после одного столкновения со стороной равностороннего треугольника. Например, $\alpha = \pi/4$ для первого участка границы. При таком выборе появится сильное обратное отражение лучей, а в диффузной части индикатрисы в соответствующем направлении появится провал.

Выбор вида функции $f(\varphi)$ в значительной степени определяет долю зеркально отраженных лучей для угла падения φ . Генерируемая бильярдом зависимость не полностью совпадает с $f(\varphi)$, однако сильно коррелирует с ней, так что выбором вида $f(\varphi)$ можно подобрать форму границы бильярда практически для любой желательной зависимости зеркальности от угла падения. Вид диффузной части индикатрисы, так же существенно зависит от выбора $f(\varphi)$. Можно было бы ожидать, что независимо от этого выбора будет формироваться диффузная компонента такого же вида, как у всех бильярдов с сильно развитым хаосом. Однако это оказалось не так, выбор зависимости зеркальности от угла падения определяет и вид диффузной части индикатрисы.

Выбором функции $f(\varphi)$ можно, например, добиться того, чтобы построенный бильярд давал такую же зависимость средней зеркальности от угла падения, как и наблюдаемая экспериментально. Были построены бильярды с зависимостями, совпадающими с экспериментально полученными данными из работ [20]. На рис. 6, а, г показаны зависимости доли зеркально отраженных лучей от угла падения у этих бильярдов, усредненные по небольшому диапазону углов падения, плавные кривые – эксперимент. Точные зависимости осциллируют с высокой частотой и некоторой ам-

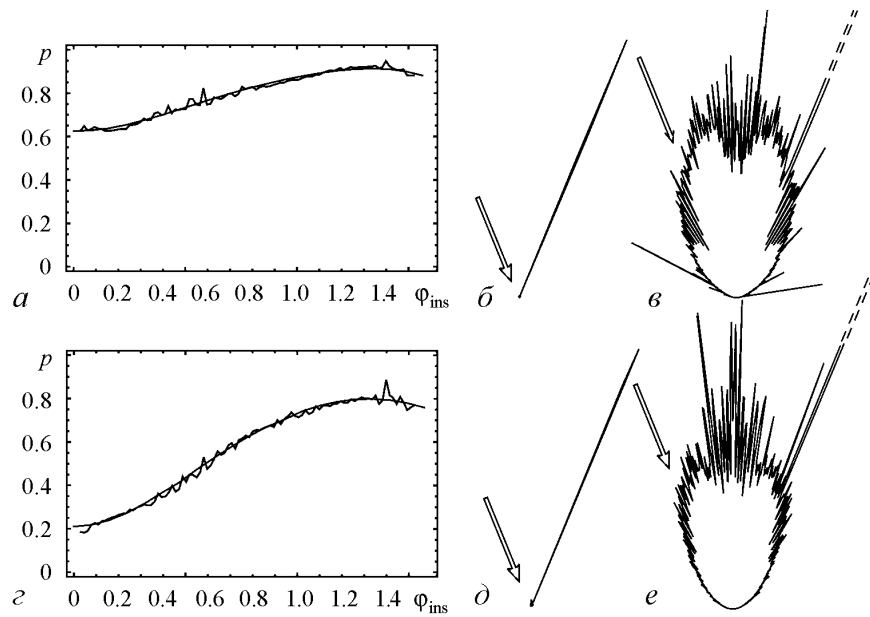


Рис. 6. *a, z* – зависимость доли зеркальной компоненты от угла падения, генерируемая билиардом. Плавная кривая – экспериментально наблюдаемая зависимость. *б, д* – общий вид индикатрисы отражения, генерируемой билиардом для показанного стрелкой угла падения $\varphi = 0.393$. *в, е* – вид диффузной части индикатрисы. *a, б, в* – для билиарда с параметрами $a = 100$, $\alpha = 0.05$, $\Delta_{br} = 0.45$, $\Delta = 0.7$, $f(\varphi) = 0.622 + 1.07\varphi - 1.765\varphi^2 + 1.42\varphi^3 - 0.41653\varphi^4$. *z, д, е* – билиард с параметрами $a = 100$, $\alpha = 0.05$, $\Delta_{br} = 0.45$, $\Delta = 0.7$, $f(\varphi) = -0.03e^{-60*(\varphi-0.18)^2} + 0.158 + 1.8563\varphi - 2.292\varphi^2 + 1.5647\varphi^3 - 0.4446\varphi^4 + 0.008055\varphi^5$, $N = 10^7$ траекторий

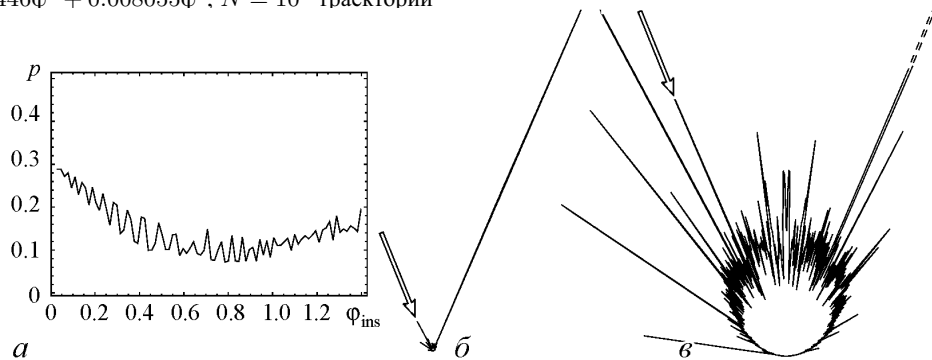


Рис. 7. *a* – зависимость доли зеркальной компоненты от угла падения, генерируемая билиардом с индикатрисой, близкой к ламбертовой. Параметры билиарда $a = 100$, $\alpha = 0.05$, $\Delta = 1$, $f(\varphi) = 0.3 + 0.075\varphi$, $N = 10^7$ траекторий. *б, в* – индикатриса этого билиарда, угол падения $\varphi = 0.41$

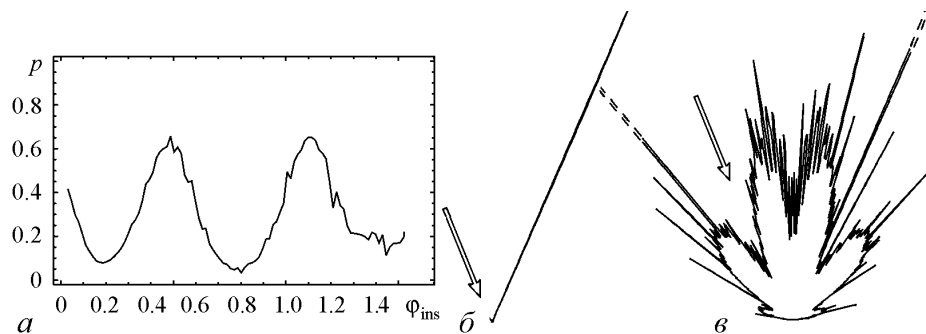


Рис. 8. *a* – зависимость доли зеркальной компоненты от угла падения, генерируемая билиардом с параметрами $a = 100$, $\alpha = 0.05$, $\Delta_{br} = 0.45$, $\Delta = 0.7$, $f(\varphi) = 0.5 - 0.3 \sin 10\varphi$, $N = 10^7$ траекторий. *б, в* – индикатриса этого билиарда, угол падения $\varphi = 0.41$

плитудой, зависящими от шага разбиения границы. На рис. 6, б, д показан общий вид индикатрис отражения этих бильярдов. На рис. 6, в, е показан вид диффузной части этих индикатрис.

Видно, что полученные индикатрисы, имеющие реально наблюдаемые зависимости зеркальности от угла падения, существенно отличаются от модельной индикатрисы Ламберта. Однако и реально наблюдаемые индикатрисы так же сильно отличаются от модельной, это отклонение описывается β фактором индикатрисы. Сравнение зависимости β фактора от угла падения для полученных индикатрис с экспериментальными данными из работы [15] показывает, что генерируемые соответствующими бильярдами индикатрисы качественно отличаются от модельной индикатрисы в ту же сторону, что и реально наблюдаемые. Другими словами, реальные индикатрисы диффузного отражения, как правило, более острые, чем индикатриса Ламберта и для близких к нормальному углов падения выглядят примерно, как показанные на рис. 6.

Для другого выбора зависимости зеркальности от угла падения (рис. 7, а) диффузная часть может иметь вид, хорошо совпадающий с модельной индикатрисой Ламберта (рис. 7, б, в), а также и сильно отличающийся как от нее, так и от приведенных выше индикатрис (рис. 8). Таким образом, для экспериментально наблюдаемых зависимостей зеркальности от угла падения форма диффузной части индикатрисы так же совпадает с экспериментально наблюдаемой. Для других зависимостей зеркальности диффузная часть индикатрисы также другая.

Выводы

В работе предложен способ нахождения формы границы открытого бильярда, генерирующего зеркально-диффузную индикатрису отражения с исходно заданной зависимостью доли зеркальной компоненты от угла падения лучей на входное окно бильярда. Были построены бильярды, у которых эта зависимость совпадает с экспериментально наблюдаемой. Бильярды с такой индикатрисой можно использовать в качестве микроскопических при построении модели диффузно отражающей границы.

Вид диффузной части индикатрисы отражения бильярдов рассматриваемого типа оказался зависящим от выбора вида зависимости доли зеркальной компоненты от угла падения и в общем случае не совпадающим с модельной индикатрисой Ламберта. Для бильярдов с экспериментально наблюдаемой зависимостью зеркальности от угла падения вид диффузной части индикатрисы отличается от модельной и качественно совпадает с экспериментально наблюдаемыми индикатрисами.

Библиографический список

1. *Lambert J.H.* Photometria sive de mensura et gradibus luminus, colorum et umbrae. Augsburg: Eberhard Klett, 1760.
2. *Beckmann P., Spizzichino A.* The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. NY:Pergamon, 1963.
3. *Torrance K., Sparrow E.* Theory for off-specular reflection from roughened surfaces // J. Opt. Soc. Am. 1967. Vol. 57, № 9. P. 1105.
4. *Oren M., Nayar S.K.* Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision // Int. J. Comput. Vision. 1995. Vol. 14. P. 227.
5. *Ginneken B., Stavridi M., Koenderink J.J.* Diffuse and specular reflectance from rough surfaces // Applied Optics. 1998. Vol. 37. P. 130.

6. *Wolff L.B.* Diffuse-reflectance model for smooth dielectric surfaces // *J. Opt. Soc. Am. A.* 1994. Vol. 11, № 11. P. 2956.
7. Оптическая биомедицинская диагностика: Т. 1, 2 / Пер. с англ. Под ред. В.В. Тучина. М.: Физматлит, 2007.
8. *Oliveira L., Carvalho M.I., Nogueira E., and Tuchin V.V.* The characteristic time of glucose diffusion measured for muscle tissue at optical clearing // *Laser Phys.* 2013. Vol. 23. P. 075606-1-7.
9. *Глобус М.Е., Гринёв Б.В.* Неорганические сцинтилляторы. Харьков: Акта, 2000.
10. *Гринев Б.В., Найденов С.В., Яновский В.В.* О спектрометрических закономерностях светособирания в сцинтилляционных детекторах // *ДАН Украины.* 2003. № 4. С. 88.
11. *Altmann E.G., Portela J.S.E., Tel T.* Leaking chaotic systems // *Rev. Mod. Phys.* 2013. Vol. 85. P. 869.
12. *Nagler J., Krieger M., Linke M., Schonke J., Wiersig J.* Leaking billiards // *Phys. Rev. E.* 2007. Vol. 75. P. 046204.
13. *Bauerand W., Bertsch G.F.* Decay of ordered and chaotic systems // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 65, № 18. P. 2213.
14. *Naplekov D.M., Tur A.V., Yanovsky V.V.* Scattering by a boundary with complex structure // *Phys. Rev. E.* 2013. Vol. 87. P. 042901.
15. *Hope A., Hauer K.-O.* Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials // *Metrologia.* 2010. Vol. 47. P. 295.
16. *Micolich A.P., See A.M., Scannell B.C., Marlow C.A., Martin T.P., Pilgrim I., Hamilton A.R., Linke H., Taylor R.P.* Is it the boundaries or disorder that dominates electron transport in semiconductor «billiards»? // *Fortschr. Phys.* 2013. Vol. 61, № 2–3. P. 332.
17. *Brunner R., Meisels R., Kuchar F., Akis R., Ferry D.K., Bird J.P.* Classical and quantum dynamics in an array of electron billiards // *Physica E.* 2008. Vol. 40. P. 1315.
18. *Naidenov S.V., Yanovsky V.V.* Geometric-dynamic approach to billiard systems: I. Projective involution of a billiard, direct and inverse problems // *Theor. Math. Physics.* 2001. Vol. 127, № 1. P. 500.
19. *Naidenov S.V., Yanovsky V.V.* Geometric-dynamic approach to billiard systems: II. Geometric features of involutions // *Theor. Math. Physics.* 2001. Vol. 129, № 1. P. 1408.
20. *Toporets A.S., Mazurenko M.M.* Diffusion reflection by a rough surface // *Zh. Prikl. Spekr.* 1969. Vol. 10, № 3. P. 486.

Поступила в редакцию 12.08.2014

STRUCTURALLY COMPLEX BOUNDARY WITH SPECULAR-DIFFUSE REFLECTION INDICATRIX

D. M. Naplekov¹, A. V. Tur², V. V. Yanovsky¹

¹Institute for Single Crystals, NAS Ukraine

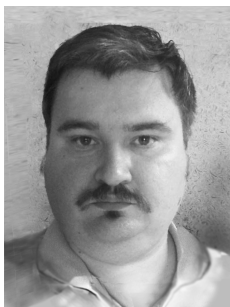
²Université de Toulouse [UPS], CNRS, Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

The way of modeling of specular-diffuse character of light reflection from real surfaces is proposed in the paper. Model of structurally complex reflecting boundary bases

*Д.М. Наплеков, А.В. Тур, В.В. Яновский
Изв. вузов «ПНД», т. 22, № 4, 2014*

on the open billiards. Indicatrix of reflection from this surface for all angles of incidence consists only of specular pike and diffuse component. Dependence of the share of specular component on an angle of incidence may be any predefined function, its choice also defines the shape of diffuse component. It is shown, that generated by the surface indicatrix differs from the Lambert one and well coincides with experimentally observed indicatrices of real surfaces.

Keywords: Diffuse light reflection, open billiard.



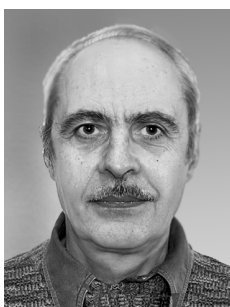
Наплеков Дмитрий Михайлович – родился в Харькове (1980), окончил Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина (2002). После окончания ХНУ работает в Институте монокристаллов НАН Украины младшим научным сотрудником. Область научных интересов – теоретическая физика. Автор 10 научных публикаций.

61001 Харьков, пр. Ленина, 60
Институт монокристаллов НАН Украины
E-mail: nmi@datasvit.net



Тур Анатолий Валентинович – родился в Петропавловске (1949), окончил Харьковский государственный университет (1972). После окончания ХГУ работал в Харьковском физико-техническом институте, а затем в Киевском институте космических исследований. В настоящее время работает в Национальном центре научных исследований Франции (CNRS), Университет Пауля Сабатини, Институт астрофизики и планетологии Тулузы. Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (1978, Киевский институт космических исследований) и доктора физико-математических наук (1988) в области теоретической физики. Область научных интересов – нелинейная динамика, теория турбулентности, физика плазмы, хаос и нелинейная физика. Автор более 150 научных публикаций и монографии «Конструктивный хаос» (в соавторстве с Ю.Л. Болотиным и В.В. Яновским).

9 avenue du Colonel Roche, BP 44346, 31028 Toulouse Cedex 4, France
Universite de Toulouse [UPS], CNRS, Institut de Recherche en Astrophysique et Planetologie,
E-mail: Anatoly.Tour@irap.omp.eu



Яновский Владимир Владимирович – родился в Полтаве (1950) окончил Харьковский государственный университет (1973). После окончания ХГУ работал в Харьковском физико-техническом институте. В настоящее время работает в Институте монокристаллов НАН Украины (ИМ НАНУ) заведующим теоретическим отделом и преподает на кафедре искусственного интеллекта Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в (1983, Киевский институт космических исследований) и доктора физико-математических наук (1996, ИМ НАНУ) в области теоретической физики. Область научных интересов – теоретическая физика, хаос и теория турбулентности, нелинейная физика. Автор более 250 научных публикаций.

61001 Харьков, пр. Ленина, 60
Институт монокристаллов НАН Украины
E-mail: yanovsky@isc.kharkov.ua