

Н. П. БЕЛОВ, В. Н. ГРИСИМОВ, А. С. ШЕРСТОБИТОВА, А. Д. ЯСЬКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ С ЭКРАНОМ

Представлены результаты численного моделирования интегрирующей сферы, имеющей экран для исключения попадания на исследуемый образец (диффузный отражатель) прямого освещения от излучателя, расположенного вблизи центра сферы. Приводятся результаты анализа распределения освещенности внутри сферы такой конфигурации.

Ключевые слова: интегрирующая сфера, освещенность, коэффициенты диффузного отражения, фотометрическая погрешность.

Интегрирующая сфера широко применяется для измерения коэффициента диффузного отражения различных объектов. Для сферы такой конфигурации, где освещение от излучателя падает на стенки сферы, а приемник регистрирует световой поток, отраженный от образца, требуется исключить прямое попадание излучения от источника на образец. Это может быть обеспечено экраном, устанавливаемым в полости сферы. Цель исследования, описываемого

в настоящей статье, состояла в численном анализе распределения освещенности и погрешностей измерения коэффициентов отражения для интегрирующей сферы, имеющей экран.

Конфигурация интегрирующей сферы с экраном изображена схематически на рис. 1, где 1 — сфера, 2 — экран, 3 — оптическое волокно, 4 — люк для установки образца.

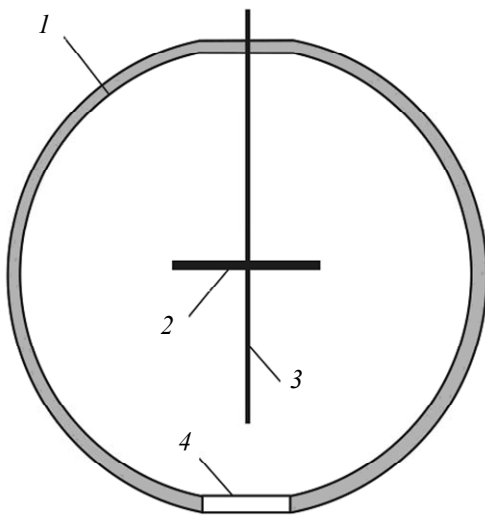


Рис. 1

В прикладном отношении такая геометрия интегрирующей сферы может представлять значительный интерес, поскольку, во-первых, благодаря осевой симметрии данной конструкции может быть обеспечено более равномерное распределение освещенности на внутренней поверхности сферы, а расположение излучателя в полости сферы повышает эффективность его светоодачи; во-вторых, здесь в качестве коллектора отраженного излучения целесообразно использовать оптоволокно, что позволяет упростить прием отраженного излучения и передачу его к фотоприемнику (в том числе, ввод излучения в монохроматор). Вместе с тем анализ интегрирующей сферы с внешним расположением осветителя и фотоприемника ранее производился (см., например, [1, 2]), тогда как для рассматриваемой сферы с экраном (в представленной на рис. 1 конфигу-

рации) такие данные в известной литературе отсутствуют.

Для определения функциональности конструкции необходимо знать распределение освещенности внутри сферы. Если принять, что излучение отражается по закону Ламберта, освещенность внутри сферы можно определить матричным методом [1, 3]. В соответствии с этим методом осуществляется разбиение поверхности внутри сферы на N кольцевых зон, имеющих одинаковые коэффициенты отражения и освещенности (рис. 2). Обмен излучением между элементами двух зон в точках с координатами Ω_i и Ω_j определяется конфигурационными факторами $G(\Omega_i, \Omega_j)$:

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \frac{(\chi \cdot \eta) \cdot (\chi \cdot \eta)}{\pi \chi_{ij}^4} = \frac{\cos \xi_i \cos \xi_j}{\pi \chi_{ij}^2},$$

где χ — вектор, направленный от точки Ω_j к точке Ω_i , η — нормальный единичный вектор; ξ_i — угол между вектором, направленным от точки Ω_j к точке Ω_i , и нормалью к поверхности в точке Ω_i ; ξ_j — угол между вектором, направленным от точки Ω_i к точке Ω_j , и нормалью к поверхности в точке Ω_j ; χ_{ij} — расстояние между точками Ω_i и Ω_j ; i и j — индексы зон: $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N$.

Направления излучения на каждую из кольцевых зон на внутренней поверхности сферы задаются соответствующими углами в пределах $-90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$. Начало координат находится в центре сферы.

Для дальнейшего анализа целесообразно выделить области, участвующие в обмене излучением: поверхность образца, поверхности верхней и нижней полусферы и поверхность экрана. При этом конфигурационные факторы $G(\Omega_i, \Omega_j)$ определяются исходя из геометрии взаимодействующих областей: верхняя полусфера — верхняя полусфера; нижняя полусфера — нижняя полусфера; верхняя полусфера — нижняя полусфера; нижняя полусфера — верхняя полусфера; верхняя полусфера — верхняя поверхность экрана; нижняя полусфера —

нижняя поверхность экрана; верхняя полусфера — поверхность образца; нижняя полусфера — поверхность образца; нижняя поверхность экрана — поверхность образца.

Конфигурационные факторы $G(\Omega_i, \Omega_j)$ при обмене излучением в полости сферы, а также между поверхностью сферы и образцом для рассматриваемой сферы же, что и для сферы без экрана; их явный вид приведен в работе [1].

В исследуемой конфигурации сферы с экраном (см. рис. 1) требуется учитывать также взаимодействие между полостью сферы и экраном и между образцом и нижней поверхностью экрана. Геометрические соотношения, необходимые для вычисления факторов $G(\Omega_i, \Omega_j)$ при расположении экрана в центре сферы, иллюстрируются схемой, приведенной на рис. 2.

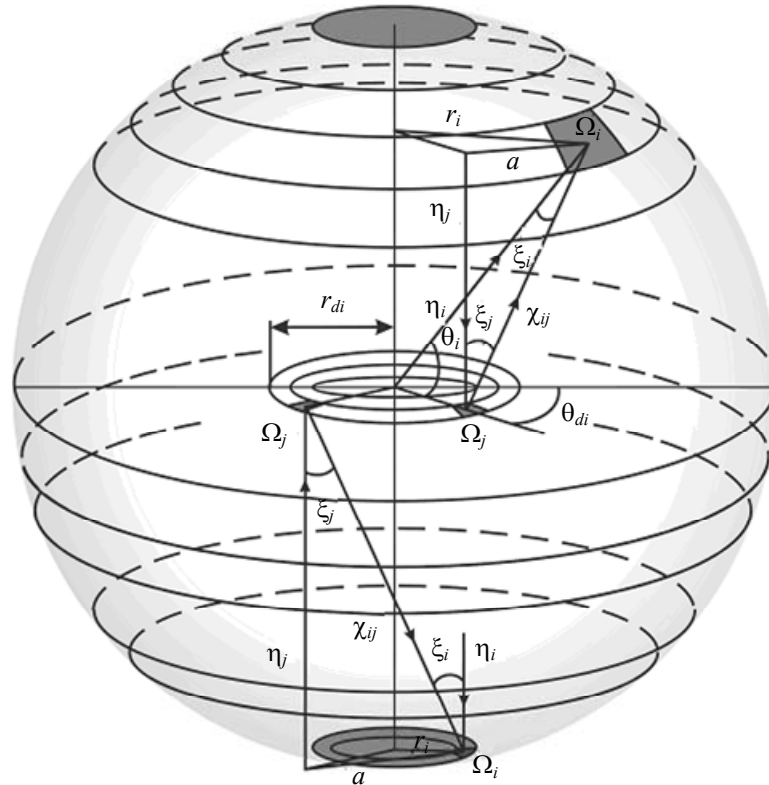


Рис. 2

Конфигурационные факторы, определяющие обмен излучением между верхней полусферой и верхней поверхностью экрана, нижней полусферой и нижней поверхностью экрана, совпадают и определяются как

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \left(\frac{a^2 - \chi_{ij}^2 - \eta_i^2}{-2\chi_{ij}\eta_i} \right) \cdot \left(\frac{r_{di}^2 - \chi_{ij}^2 - R^2}{-2\chi_{ij}R} \right) / \pi\chi_{ij}^2;$$

конфигурационный фактор для взаимодействующих нижней поверхности экрана и поверхности образца определяется выражением

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \left(\frac{a^2 - \chi_{ij}^2 - \eta_i^2}{-2\chi_{ij}\eta_i} \right)^2 / \pi\chi_{ij}^2,$$

здесь $a^2 = r_i^2 + r_{di}^2 - 2r_i r_{di} \cos \theta_{di}$, r_i — радиус зоны, R — радиус сферы, r_{di} — радиус экрана, θ_{di} — азимутальный угол в плоскости экрана, изменяющийся в пределах $0 \leq \theta_{di} \leq 360^\circ$.

Освещенность i -й зоны можно представить в виде уравнения [1]

$$H(\Omega_i) = H_0(\Omega_i) + \sum_j H(\Omega_j) \rho(\Omega_j) G(\Omega_i, \Omega_j) \lambda_j,$$

где H_0 — начальная освещенность; $H(\Omega_j)$ — освещенность j -й зоны, $\rho(\Omega_j)$ — ее коэффициент отражения; λ_j — весовые множители, определяемые методом интегрирования по поверхности зоны и представляющие собой площади элементарных участков кольцевых зон.

Начальная освещенность H_0 задается в виде равномерного распределения в пределах круга на верхней поверхности экрана. Диаметр этого круга такой же, как и у входного люка. Предполагается, что оптоволоконный коллектор не влияет на распределение излучения внутри сферы.

Задача расчета освещенности представляется в виде матричного уравнения:

$$H = (I - M)^{-1} H_0,$$

где I — единичная матрица, M — переходная матрица (матрица передаточных коэффициентов): $M = \rho G \lambda$.

В приводимых ниже расчетах число зон составляло $N = 334$; дальнейшее их увеличение практически не влияло на расчетные данные.

Для учета перекрытия экраном отдельных зон при взаимодействии верхней и нижней полусфер, а также верхней полусферы и образца выполнялось разделение кольцевых зон на экране на угловые секторы (соответствующий угол составлял 2°) и интегрирование освещенности по каждому из секторов, в которых перекрытие потока излучения экраном отсутствовало.

Представленные результаты расчетов относятся к интегрирующей сфере с экраном, которая использовалась в составе спектральных приборов, аналогичных лабораторному спектрометру, рассмотренному в работе [4]. Оптогеометрические характеристики сферы следующие: диаметр полости сферы 70 мм; диаметр люка 15 мм; диаметр экрана 23 мм; диаметр волоконно-оптического коллектора 1 мм; коэффициенты отражения поверхности сферы и экрана 0,96.

Результаты расчетов приведены в виде графика на рис. 3. Здесь показано распределение освещенности ($\Delta H = H - H_0$) внутри сферы, вычисленное для пяти образцов с различными коэффициентами диффузного отражения ρ . По оси абсцисс приведена нумерация кольцевых зон (i).

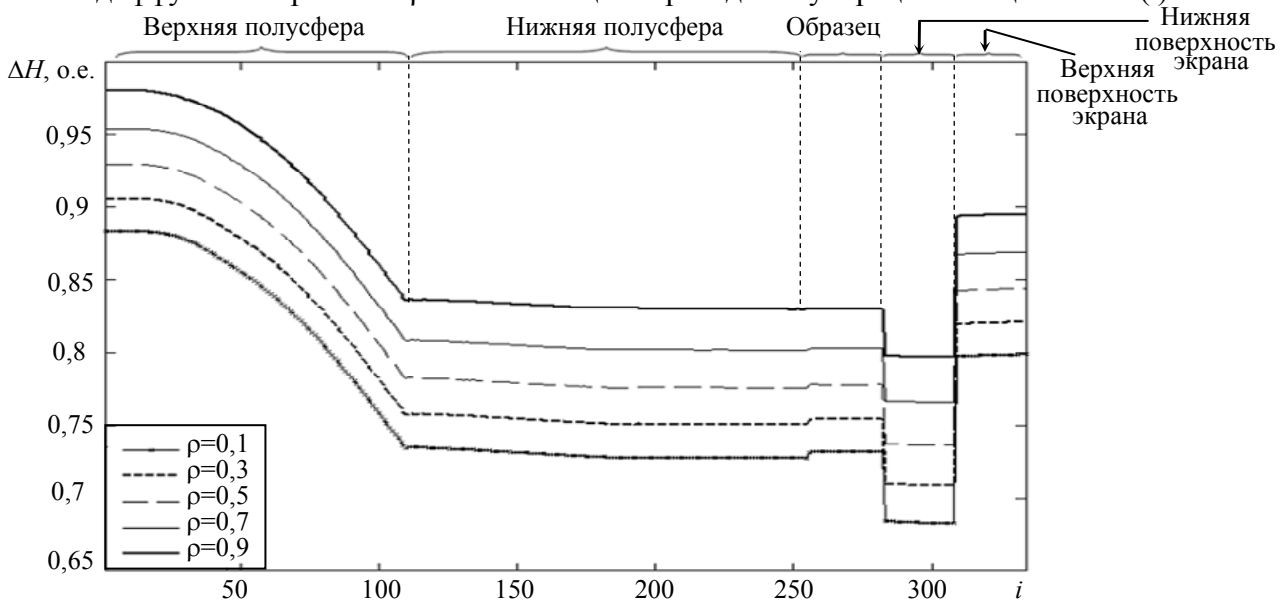


Рис. 3

Анализ графиков показал, что наибольшую неравномерность освещенности имеет верхняя полусфера, на которую попадает поток излучения, отраженный от верхней поверхности

экрана; общая освещенность снижается с уменьшением коэффициента отражения образца. Согласно сопоставительному анализу расчетных данных для рассматриваемой конфигурации интегрирующей сферы и для сферы без экрана (где первоначальное излучение падает на образец при постоянстве остальных оптогеометрических параметров) распределение освещенности на поверхности образца остается равномерным в пределах $\pm 0,01$. Это подтверждается данными табл. 1, где приведены значения освещенности ΔH для образцов с коэффициентами отражения 0,1 и 0,9, рассчитанные для сферы с экраном и без него.

Таблица 1

<i>i</i>	ΔH (сфера с экраном), при		ΔH (сфера без экрана), при	
	$\rho=0,1$	$\rho=0,9$	$\rho=0,1$	$\rho=0,9$
259	0,7319	0,8300	0,7275	0,8259
261	0,7318	0,8299	0,7274	0,8258
263	0,7318	0,8299	0,7273	0,8257
265	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
267	0,7317	0,8298	0,7272	0,8255
269	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
271	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
273	0,7318	0,8299	0,7272	0,8255
275	0,7319	0,8301	0,7272	0,8255
277	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
279	0,7318	0,8302	0,7272	0,8255
281	0,7320	0,8302	0,7272	0,8255

Значения относительной погрешности измерений распределения освещенности δH для пяти образцов (диффузных отражателей) с различными коэффициентами отражения приведены в табл. 2. Для сравнения в этой же таблице показаны результаты расчетов относительной фотометрической погрешности $\delta H'$, выполненных по формуле А6 из работы [1], для сферы без экрана.

Таблица 2

ρ	δH (сфера с экраном)	δH (сфера без экрана)	$\delta H'$ (формула А6, [1])
0,1	0,0467	0,0458	0,0485
0,3	0,0453	0,0444	0,0470
0,5	0,0439	0,0430	0,0454
0,7	0,0425	0,0416	0,0439
0,9	0,0411	0,0402	0,0423

Как видно, погрешность измерения остается практически без изменений для обеих геометрий сферы.

Таким образом, использование экрана в полости интегрирующей сферы не вносит дополнительной погрешности в данные измерений. В целом это подтверждает известное положение о том, что главным фактором, определяющим основную фотометрическую погрешность методов измерения коэффициента диффузного отражения, в которых используется интегрирующая сфера, является соотношение площадей поверхностей полости сферы и люка для установки образца [5].

Представляет интерес также анализ влияния размеров экрана и оптоволоконного коллектора на распределение освещенности сферы исследуемой конфигурации (см. рис. 1). Дополнительные расчеты показали, что варьирование диаметра экрана в пределах 10,45—23,00 мм практически не влияет на уровень и распределение освещенности как на внутренней поверхности сферы, так и образца. В расчетах, моделирующих влияние оптоволоконного коллектора на распределение освещенности, коэффициент отражения центральной области экрана, радиус которой составлял 1,35 мм, предполагался равным нулю. Результаты этих расчетов показали, что изменение освещенности составляет менее 1 %.

Для экспериментальной проверки результатов расчетов был проведен сравнительный анализ спектров отражения стандартных диффузных отражателей (эталонов „серого“), измеренных независимо на двух спектрометрах с различными геометриями интегрирующих сфер. Сопоставлялись экспериментальные данные для сферы без экрана (с диаметром полости 180 мм) с внешним излучателем и фотодетектором, а также для рассматриваемой сферы с экраном (с внутренним диаметром 70 мм). Обе сферы характеризуются близкими величинами отношений площади интегрирующей полости к площади выходного люка: соответственно 20,3 и 21,8. Измерения проводились в видимом диапазоне длин волн 380—760 нм. Коэффициент отражения образцов находился в пределах 0,5—0,85 при $\lambda=457$ нм. Сходимость результатов измерений коэффициента ρ для обеих конфигураций сферы не хуже 0,01 для всех исследованных образцов в пределах указанной области спектра. Таким образом, представленные экспериментальные данные в целом подтверждают результаты расчетов.

На основании приведенных расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод, что использование экрана в интегрирующей сфере не вносит неравномерности в распределение освещенности образца, т.е. не вносит дополнительной фотометрической погрешности. Излучатель может быть помещен над экраном внутри сферы, поскольку, как следует из результатов расчетов (см. рис. 3), неравномерность освещенности верхней полусферы не влияет на погрешность измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tardy H. L. Matrix method for integrating-sphere calculations // J. of Optical Society of America. 1991. Vol. 8, N 9. P. 1411—1418.
2. Clare J. F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // J. of Optical Society of America. 1998. Vol. 15, N 12. P. 3086—3096.
3. Альтиулер Е. В., Путилин Э. С. Математическая и программная обработка данных спектрофотометрических измерений // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. № 58. С. 11—16.
4. Белов Н. П., Грисимов В. Н., Яськов А. Д. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 74—78.
5. Prah S. A. Inverse adding-doubling for optical property measurements / Oregon Medical Laser Center [Электронный ресурс]: <<http://www.omlc.ogi.edu/software/iad/>. 2007>.

Сведения об авторах

- Николай Павлович Белов** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; ст. науч. сотрудник
- Владимир Николаевич Грисимов** — д-р мед. наук; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, лаборатория оптических технологий НПЦ стоматологии; E-mail: vngrsimov@gmail.com
- Александра Сергеевна Шерстобитова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: ashev87@mail.ru
- Андрей Дмитриевич Яськов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
17.10.12 г.