

УДК 539.23

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-10-70-73

Гибридные светоделительные покрытия с алмазоподобным слоем на селениде цинка

© 2018 г. **А. Н. Баранов***, аспирант; **А. В. Михайлов****, канд. техн. наук

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**АО "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

E-mail: a.n.baranov@hotmail.com

Поступила в редакцию 26.06.2018

Представлен метод синтеза светоделительных покрытий с различной шириной рабочего спектрального диапазона и разным соотношением коэффициентов пропускания T и отражения R . Продемонстрирован пример расчёта светоделителя с отношением $T:R = 60:40\%$ для оптических элементов из селенида цинка для спектрального диапазона 2–10 мкм. Показано, что внедрение алмазоподобного углеродного слоя толщиной не менее 100 нм на границе раздела с воздухом позволяет получать стабильные светоделительные покрытия с высокой механической прочностью и влагостойкостью. Среднее значение коэффициента пропускания у изготовленных образцов в диапазоне 2–10 мкм составляет 60,5%, коэффициента отражения — 39,2%, максимальное отклонение — 3,8%.

Ключевые слова: оптические покрытия, светоделительные покрытия, эксплуатационные характеристики, алмазоподобные плёнки.

Коды OCIS: 310.1620, 310.1860, 310.4165.

ВВЕДЕНИЕ

Современная технология оптических покрытий позволяет создавать светоделители с различными спектральными характеристиками (соотношение коэффициента пропускания к отражению, ширина рабочего спектрального диапазона варьируются в широком диапазоне) и эксплуатационными свойствами. Структура покрытий может состоять из одного слоя металла, слоя металла и диэлектрика или интерференционной многослойной системы, сформированной из диэлектрических материалов.

Используя тонкие слои диэлектриков, можно создать светоделители, работающие в широком спектральном диапазоне с чрезвычайно малым поглощением. Такие светоделители характеризуются высокой термической и химической стойкостью. Особенностью диэлектрических покрытий является существенная зависимость их спектральных характеристик от угла падения излучения и рассогласование спектральных характеристик для s и p компонент. Для данного вида покрытий это рассогласование желательно свести к минимуму.

Светоделители на основе металлов обычно содержат в составе слой металла и тонкий защитный

слой диэлектрика. Спектральные свойства таких покрытий определяются металлом, входящим в его состав, — ахроматизация у хрома, например, выше, чем у серебра, но поглощение света больше. Зависимость спектральной характеристики коэффициента пропускания (отражения) от угла падения света у данных покрытий существенно меньше, чем у диэлектрических. Главными недостатками металлических светоделителей являются высокое поглощение света, низкая термическая и химическая стойкость. Некоторого улучшения свойств можно добиться при специальном подборе материала и толщины для диэлектрического слоя [1].

Успехи в разработке гибридных просветляющих покрытий с алмазоподобным слоем в последнее время [2–4] позволяют предположить, что возможен синтез гибридных светоделительных покрытий на основе диэлектриков с алмазоподобным слоем на границе с внешней средой. Аморфные гидрогенизированные углеродные плёнки ($-C:H$), прозрачные в инфракрасной области спектра, характеризуются высокой механической прочностью и химической инертностью, что является основой для их выбора в качестве защитных слоёв в многослойных интерференционных покрытиях.

ТЕОРИЯ

В качестве начальной конструкции светоделительного покрытия выберем конструкцию, состоящую из диэлектрических материалов, значения показателей преломления которых плавно изменяются от значений показателей преломления оптического элемента к значениям показателей преломления внешней среды. Шалленберг в работе [5] предложил рекуррентные формулы для расчёта значений показателей преломления слоёв в таких системах. Им рассматривался случай просветления и соответственно уменьшения значений показателя преломления оптического элемента по отношению к показателю преломления внешней среды (воздуха). Несложно показать, что если увеличивать показатель преломления внешней среды, то будет увеличиваться и коэффициент отражения от многослойной системы. Необходимое значение показателя преломления внешней среды для получения заданного соотношения между коэффициентами пропускания и отражения можно рассчитать по формуле

$$n_{BS} = n_0 \left(\frac{1 + \sqrt{R_{BS}}}{1 - \sqrt{R_{BS}}} \right), \quad (1)$$

где R_{BS} — требуемый энергетический коэффициент отражения светоделителя, n_0 — показатель преломления внешней среды (реальный).

Примеры расчёта этого значения представлены в табл. 1.

Рекуррентные формулы для расчёта показателей преломления слоёв ступенчатого светоделительного покрытия отсюда

$$\begin{aligned} n_{i(j=1)} &= \sqrt{n_{BS} n_{(i-1)(j=1)}}, \\ n_{ij} &= \sqrt{n_{(i-1)(j-1)} n_{(i-1)j}}, \\ n_{i(j=i)} &= \sqrt{n_{(i-1)(j=i-1)} n_s}, \end{aligned} \quad (2)$$

где j — индекс цикла, изменяющийся от единицы до количества слоёв в покрытии, i — порядковый номер слоя, n_s — показатель преломления оптического элемента, n_0 — показатель преломления внешней среды и здесь равен n_{BS} .

В табл. 2 представлены результаты расчёта конструкции многослойных светоделительных покрытий для оптических элементов, изготовленных из селенида цинка, а на рис. 1 — соответству-

Таблица 1. Значение показателя преломления внешней среды в зависимости от требуемого коэффициента отражения светоделителя

| $R, \%$ | 30 | 40 | 50 | 60 |
|----------|------|------|------|------|
| n_{BS} | 3,42 | 4,44 | 5,82 | 7,87 |

Таблица 2. Конструкции светоделительных покрытий $T:R = 60:40\%$ на селениде цинка

| Количество слоёв | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|------|------|------|------|
| n_1 | 3,23 | 3,79 | 4,1 | 4,27 |
| n_2 | | 2,76 | 3,23 | 3,64 |
| n_3 | | | 2,55 | 2,87 |
| n_4 | | | | 2,45 |

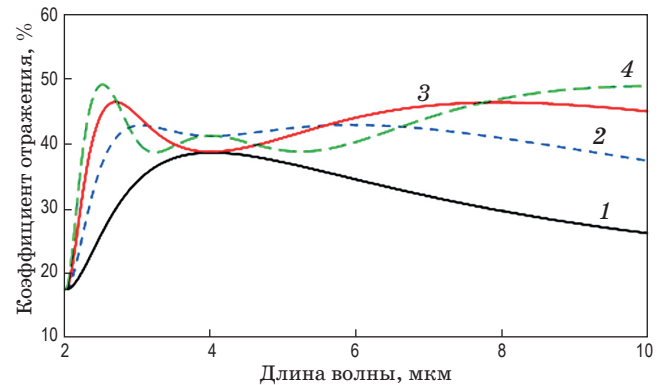


Рис. 1. Спектральные характеристики коэффициента отражения светоделительных покрытий, структуры которых представлены в табл. 2. Кривые 1–4 соответствуют структурам 1–4.

ющие полученным конструкциям спектральные характеристики отражения. Данный рисунок наглядно иллюстрирует, что рабочая спектральная область увеличивается при увеличении количества слоёв.

Расчитанные значения показателей преломления слоёв не соответствуют реальным плёнкообразующим материалам. Поэтому, после выбора конструкции светоделителя целесообразно произвести замену каждого нереализуемого слоя на трёхслойную симметричную систему согласно формулам, представленным в работе [6]. Эта система будет сформирована из двух плёнкообразующих материалов так, что показатель преломления исходного заменяемого слоя будет больше показателя преломления одного материала и меньше другого. А значит для каждого слоя с нереализуемым показателем преломления должен быть найден плёнкообразующий материал с ещё большим значением показателя преломления, что не всегда выполнимо на практике.

В качестве наружного защитного слоя в конструкцию внедряется тонкий алмазоподобный углеродный слой. Пример рассчитанной конструкции светоделителя $T:R = 60:40\%$ с эквивалентными слоями представлен на рис. 2, спектральные характеристики коэффициентов пропускания и отражения данного покрытия — на рис. 3. Последующая оптимизация алгоритмом «имита-

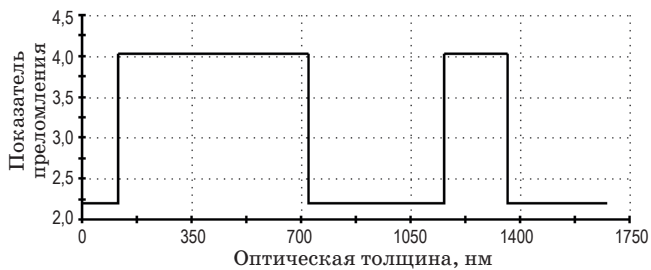


Рис. 2. Конструкция светоделительного покрытия $T:R = 60:40\%$ на селениде цинка. Отсчёт толщины от среды падения света.

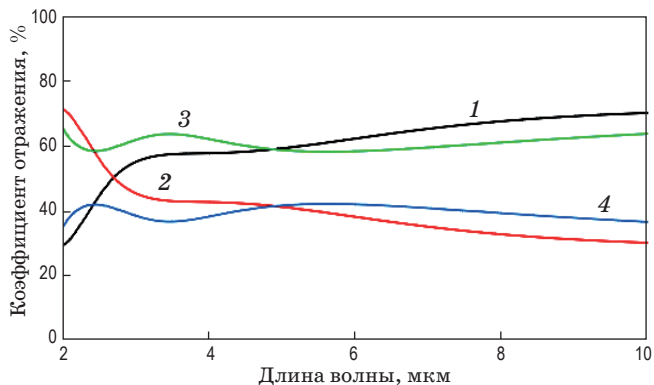


Рис. 3. Теоретическая спектральная характеристика коэффициентов пропускания (1, 3) и отражения (2, 4) светоделительного покрытия $T:R = 60:40\%$ до (1, 2) и после оптимизации (3, 4).

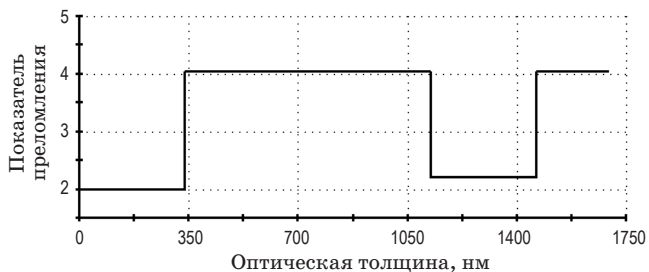


Рис. 4. Конструкция гибридного $T:R = 60:40\%$ светоделительного покрытия с алмазоподобным слоем на селениде цинка после оптимизации. Отсчёт толщины от среды падения света.

ции отжига» за счёт вариации толщин слоёв даёт возможность упростить конструкцию и снизить отклонение от требуемого коэффициента пропускания (отражения) (рис. 3 и 4).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Покрытие, структура которого представлена на рис. 4 формировалось в серийных вакуумных камерах типа Ортус-700 (ООО «Изовак», Беларусь) при давлении не выше 8×10^{-4} Па.

В качестве материала с высоким показателем преломления был выбран германий, как материал

с наибольшим показателем преломления и широкой областью прозрачности в инфракрасной области спектра. Теллурид свинца обладает большим показателем преломления, но его граница поглощения располагается в более дальней области спектра, чем у германия [7]. Кроме того, свинец является токсичным веществом, что также ограничивает его применение в технологии. В качестве материала с низким показателем преломления был выбран сульфид цинка. Оба плёнкообразующих материала осадились методом электронно-лучевого испарения.

Для осаждения аморфных гидрогенизированных углеродных плёнок использовался ионный источник с эффектом Холла [8–10]. В качестве реактивного газа был выбран метан с чистотой 99,99%.

На противоположной стороне каждого элемента, изготовленного из селенида цинка, предварительно было сформировано традиционное широкополосное просветляющее покрытие [11], характеризующееся средним значением остаточного энергетического коэффициента отражения 2% в диапазоне 2–10 мкм.

Спектральные коэффициенты пропускания и отражения образцов были получены при помощи инфракрасного Фурье-спектрометра Vertex 80 (Bruker Corporation, США). Адгезия покрытий оценивалась скотч-тестом, механическая прочность — по их стойкости к истиранию обёрнутым батистовой тканью резиновым наконечником на приборе СМ-55 согласно ОСТ 3-1901-95. Влагостойкость образцов оценивалась в климатической камере МТН-4100PR (Sanyo, Япония) с последующим визуальным осмотром образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По сравнению с предыдущими результатами по изготовлению просветляющих покрытий [4] адгезия алмазоподобного углеродного слоя к много-

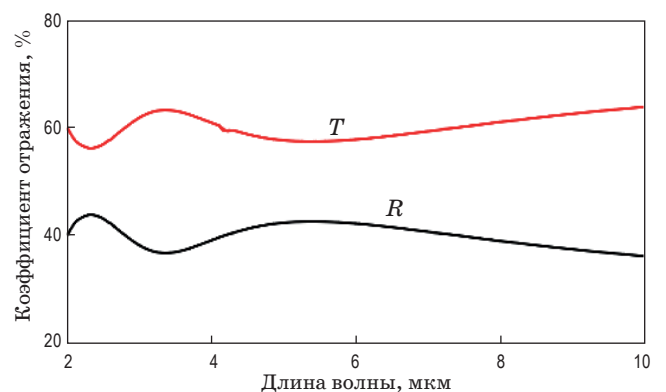


Рис. 5. Измеренная спектральная характеристика коэффициентов пропускания T и отражения R изготовленного светоделительного покрытия $T:R = 60:40\%$ с алмазоподобным слоем на селениде цинка.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на эксплуатационные свойства

| Образец | | № 1 | № 2 | № 3 |
|------------------------------|---|-----------|----------|----------|
| Толщина углеродного слоя, нм | | 50 | 100 | 150 |
| Адгезия | 1 отрыв липкой ленты | Провалено | Пройдено | Пройдено |
| Влажность | 24 часа; влажность $96 \pm 1\%$; температура $40 \pm 2^\circ\text{C}$ | Провалено | Пройдено | Пройдено |
| Механическая прочность | 3000 оборотов на СМ-55 | Провалено | Пройдено | Пройдено |

слоистой конструкции у изготовленных светодиодов улучшилась, что объясняется наличием слоя германия под ним.

На рис. 5 представлена спектральная характеристика коэффициентов пропускания и отражения образца. Среднее значение коэффициента пропускания в диапазоне 2–10 мкм составляет 60,5%, отражения — 39,2%, максимальное отклонение — 3,8%.

Результаты испытаний эксплуатационных характеристик представлены в табл. 3. По аналогии с работой по синтезу гибридных просветляющих покрытий [4] было проведено сравнение этих показателей при различных толщинах наружного алмазоподобного углеродного слоя. Наблюдается высокое согласие результатов — покрытие выдерживает все испытания при толщине защитного верхнего слоя не менее 100 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schürmann M., Stöckl W., Kaiser N. Metal layer beamsplitters with one dielectric achromatisation layer // Тез. докл. междуна конф. «Advances in Optical Thin Films III». Glasgow, 2008. С. 71011J-1–71011J-5.
2. Degel M., Gittler E. Multispectral optical coatings are tough, versatile for IR applications // Photonics Spectra. 2013. V. 47. № 3. P. 56.
3. Гайнутдинов И.С., Азаматов М.Х., Михайлов А.В., Галиев А.Н., Нуруллин И.З., Шушарин С.Н. Гибридное просветляющее покрытие с алмазоподобным слоем // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 1. С. 70–73.
4. Baranov A.N., Gubanova L.A. Design and fabrication of broadband infrared durable antireflection coatings on Ge // Тез. докл. междуна конф. «Advances in Optical Thin Films VI». Frankfurt, 2018. С. 106911Q-1–106911Q-5.
5. Schallenberg U. Design principles for broadband AR coatings // Тез. докл. междуна конф. «Advances in Optical Thin Films III». Glasgow, 2008. С. 710103-1–710103-8.
6. Epstein L.I. The design of optical filters // Journal of the Optical Society of America. 1952. V. 42. № 11. P. 806.
7. Kotlikov E.N., Ivanov V.A., Pogareva V.G., Khonineva E.V. Study of optical constants of PbTe and GeTe films // Optics and Spectroscopy. 2000. V. 88. № 5. P. 718–720.
8. Pan Y.Q., Yin Y. Diamond-like carbon films with End-Hall ion source enhanced chemical vapour deposition // Diamond and Related Materials. 2007. V. 16. № 2. P. 220–224.
9. Tang Y., Li Y.S., Yang Q., Hirose A. Characterization of hydrogenated amorphous carbon thin films by End-Hall ion beam deposition // Applied Surface Science. 2011. V. 257. P. 4699–4705.
10. Baranov A.N., Mikhailov A.V. Optical and operational characteristics of diamond-like films deposited using a Hall ion beam source // Journal of Optical Technology. 2018. V. 85. № 3. P. 179–181.
11. Соколова П.С., Пашкова Н.А. Многоспектральные просветляющие покрытия для ИК области // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 2. С. 25–27.

ВЫВОДЫ

При помощи разработанного метода синтеза светодиодных покрытий была рассчитана многослойная интерференционная система, разделяющая световой поток в заданных пропорциях. Максимальный коэффициент отражения светодиода при таком подходе ограничивается доступным максимальным значением показателя преломления плёнообразующего материала.

Аналогично случаю просветления внедрение алмазоподобного углеродного слоя на границе с воздухом для светодиодов позволяет получить их стабильно высокие эксплуатационные характеристики. Применение германия в качестве одного из плёнообразующих материалов для эквивалентных слоёв по Эпштейну позволяет избежать необходимости использования дополнительного адгезионного слоя между алмазоподобной углеродной плёнкой и многослойной системой.