

УДК 535.345

## Оптические покрытия для современных тепловизионных систем

*И. С. Гайнутдинов, Р. С. Сабиров, В. А. Иванов, Е. А. Несмелов,  
Р. Д. Алиакберов, Р. Г. Сафин*

ФГУП «НПО "Государственный институт прикладной оптики"», г. Казань, Россия

***Представлены результаты разработки одно- и двухдиапазонных просветляющих покрытий, спектроделительных, дихроичных покрытий и высокоотражающих зеркал для тепловизионных приборов нового поколения.***

В последнее десятилетие наблюдается интенсивное развитие многоспектральных и многофункциональных оптоэлектронных систем. Естественным результатом этого являются увеличение числа оптических элементов в современных тепловизионных приборах и расширение спектральных диапазонов их применения. Увеличение числа оптических элементов в приборе вместе с расширением рабочего спектрального диапазона требует решения целого ряда новых задач по разработке интерференционных покрытий, обеспечивающих на достаточном уровне эффективность работы всей оптоэлектронной системы.

Объективы тепловизионных приборов формируются на основе полупроводниковых материалов с большими значениями показателей преломления. Это германий, кремний, сульфид и селенид цинка и некоторые другие материалы. Высокие показатели преломления приводят к большим потерям энергии на отражение. Оптическая система, состоящая из 4—5 элементов, что является обычным для современных высококачественных объективов, оказывается практически непрозрачной из-за значительных потерь излучения на отражение даже без учета

потерь на поглощение в материалах. Снижение потерь достигается нанесением на все оптические поверхности просветляющих покрытий, обеспечивающих резкое снижение величины отраженного сигнала. Однако интерференционные пленки из большинства материалов, используемых для изготовления покрытий, обладают заметным поглощением в рабочей спектральной области, что заметно усложняет решение задачи просветления. Кроме того, наложение требования высокой прозрачности в нескольких спектральных диапазонах еще более усложняет задачу эффективного просветления.

Разработка оптических покрытий для тепловизионных приборов нового поколения включает в себя синтез конструкции интерференционного покрытия с удовлетворением требования многоспектральности рабочего диапазона, выбор и исследование свойств материалов для реализации синтезированного покрытия и разработку технологии нанесения этого покрытия. Следует заметить, что свойства материала, полученного в виде

так как меняются техника и условия изготовления пленок. Дополнительную трудность в процессе разработки просветляющих покрытий создает отсутствие прозрачных в широком спектральном диапазоне материалов с низким показателем преломления, обладающих высокой механической прочностью и повышенными эксплуатационными характеристиками.

В настоящее время основные усилия сосредоточены на разработке следующих основных типов покрытий с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками:

просветляющие — для одного или нескольких спектральных диапазонов в ИК-области спектра;

просветляющие — для видимой области спектра;

спектроделительные — выполняющие функцию разделения световых потоков видимой и ИК-областей спектра;

дихроичные — разделяющие по разным спектральным каналам световые потоки видимой области спектра;

высокоотражающие зеркала, обеспечивающие максимально возможное отражение отдельных спектральных участков в видимой области спектра.

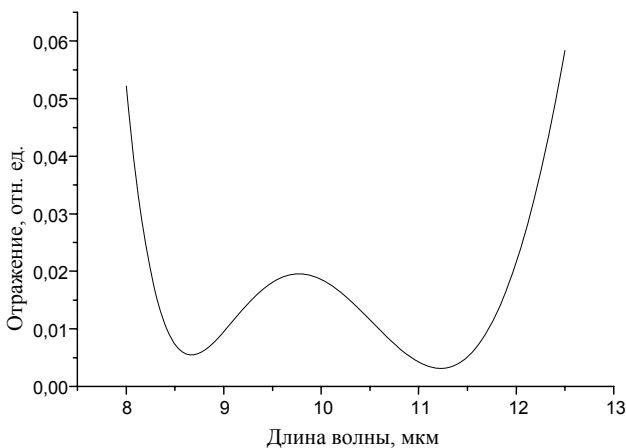
Для успешной работы любого тепловизионного прибора в ИК-области спектра нет необходимости разрабатывать просветляющие покрытия, обеспечивающие эффективное снижение коэффициента отражения во всей ИК-области спектра. Пропускание излучения атмосферой сосредоточено только в отдельных спектральных участках, показанных на рис. 1 [1]. Из рисунка видно, что снижение потерь на отражение необходимо только в определенных спектральных областях. За границами этих областей наличие потерь не имеет значения, так как нет и информативного излучения. Это обстоятельство несколько облегчает задачу просветления, так как оказывается возможным изготовление покрытий из сравнительно небольшого числа однородных слоев, технология нанесения которых относительно проста.



**Рис. 1. Прозрачность атмосферы.**

Стрелками указано положение линий сильного поглощения основными атмосферными составляющими

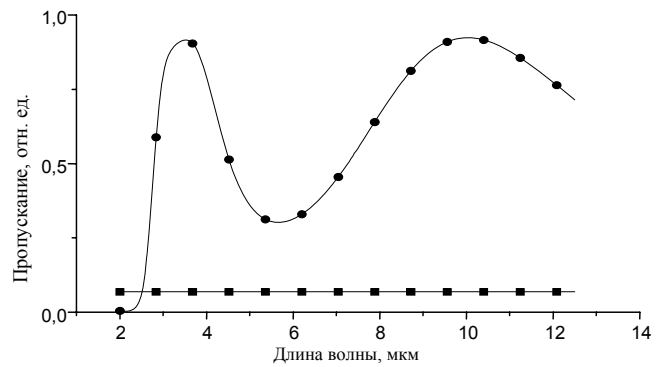
Нами разработаны достаточно эффективные интерференционные просветляющие покрытия, обеспечивающие пропускание более 96 % оптических элементов из германия в области спектра 9...—11,5 мкм (область максимальной чувствительности фотоприемников на основе КРТ). Спектральная характеристика отражения поверхности германия после нанесения покрытия показана на рис. 2.



**Рис. 2. Отражение от поверхности германия с просветляющим покрытием**

Аналогичные спектральные характеристики реализуются и для второго окна прозрачности атмосферы в области 3...—5 мкм. Следует отметить, что подобные характеристики получаются только в случае хорошо полированных поверхностей из германия. Наличие шероховатости на поверхностях приводит к повышению коэффициента отражения и снижению пропускания.

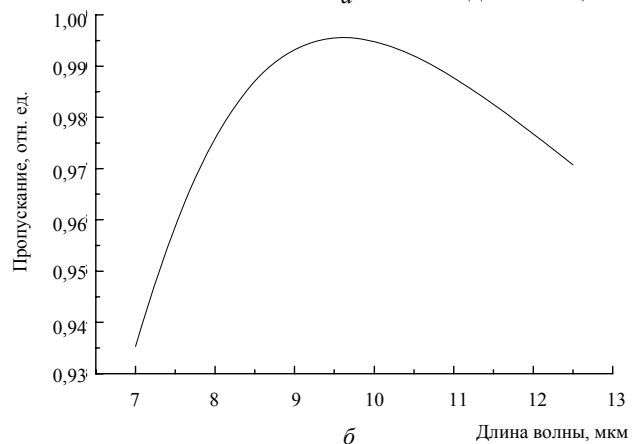
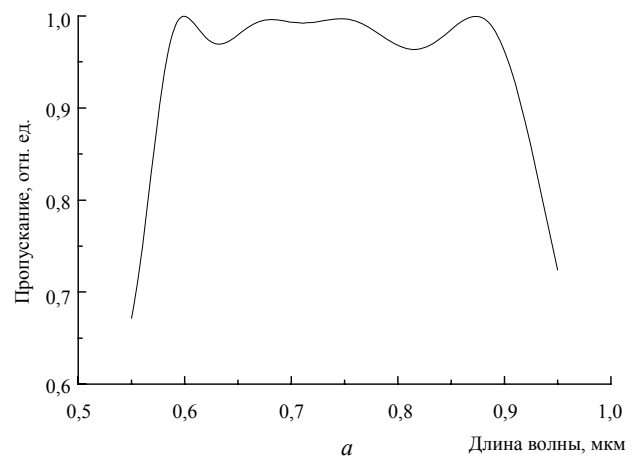
Разработаны также двухдиапазонные просветляющие покрытия на поверхностях из германия, обеспечивающие просветление в областях 3...—5 и 8...—12,5 мкм. Спектральная характеристика объектива, состоящего из 5 линз из германия с подобными покрытиями, показана на рис. 3. Наглядно видна эффективность просветления. Для элементов из германия, не имеющих прозрачности в видимой области спектра, этими покрытиями, видимо, можно ограничиться.



**Рис. 3. Пропускание объектива, состоящего из пяти просветленных линз из германия:**

■ — прозрачность объектива без просветления;  
● — прозрачность объектива с просветлением

На элементах из селенида цинка авторами разработаны просветляющие покрытия, обеспечивающие остаточное отражение не более 4 % в области спектра 0,6—0,9 и 8,0...—12 мкм. Без просветления потери такого элемента составляют 31 %, т. е. это покрытие является эффективным. Спектральные характеристики разработанного просветляющего покрытия представлены на рис. 4. В настоящее время проводится разработка покрытий, обеспечивающих меньшее остаточное отражение. Подобные покрытия необходимы в приборах, предусматривающих совмещение видимого и теплового изображений, что в ряде случаев оказывается очень желательным.



**Рис. 4. Отражение от поверхности селенида цинка с двухдиапазонным просветляющим покрытием:**  
а — в видимой области спектра; б — в ИК-области спектра

Авторами разработано несколько типов просветляющих покрытий для видимой области спектра, не искажающих цветовые характеристики наблюдаемых объектов как в дневное, так и в сумеречное время. Это широкополосные ахроматические покрытия для биноклей.

Для лазерных длин волн на оптических деталях из стекла К-8 и кварца разработаны просветляющие покрытия с остаточным отражением менее 0,1 %. К сожалению, перенести эти результаты на объективы, работающие в видимой и ИК-областях спектра, пока не удалось.

Наиболее эффективное разделение падающего излучения на видимую и ИК-части (т. е. две широкие спектральные области) достигается при использовании однослойных электропроводящих покрытий на основе  $\text{In}_2\text{O}_3$  (90 %) —  $\text{SnO}_2$  (10 %). Обычными интерференционными системами слоев выполнить такую задачу практически невозможно. Уникальность данного класса полупроводников в том, что, во-первых, проводимость этих соединений только на один-два порядка меньше, чем у металлов. Во-вторых, наличие широкой запрещенной зоны ( $E_g > 3,7$  эВ) обеспечивает высокую прозрачность в видимой области спектра. В-третьих, сравнительно высокие подвижность и концентрация свободных носителей определяют большие значения коэффициента отражения в ИК-диапазоне спектра. Пластина с покрытием из токопроводящего слоя  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$  обеспечивает разделение поступающего сигнала на канал видимого диапазона и канал ИК-диапазона. В качестве критерия оптического качества спектроделителя в работе [2] было выбрано произведение интегрального коэффициента прозрачности в видимой области спектра на интегральный коэффициент отражения в ИК-области. Это позволяет определить оптимальную величину толщины пленки. Следует отметить, что величину прозрачности пленки в видимой области спектра можно увеличить за счет просветления. Просветление поверхности стекла с использованием слоев  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$  может быть реализовано многими способами. Требование сохранения высокого отражения в ИК-области спектра диктует условие того, что слой окиси индия должен быть либо последним, либо предпоследним в системе. Если этот слой будет последним, то отражение в ИК-области сохранится полностью, если же этот слой оказывается предпоследним, то последним должен быть слой с малой оптической толщиной и не имеющий поглощения в рабочей части ИК-области спектра.

Многочисленные работы по теории просветляющих покрытий показывают, что последний слой в интерференционной просветляющей системе должен иметь минимальный показатель преломления. Кроме того, эксплуатационные характеристики покрытия требуют максимально возможной прочности этого слоя и достаточной прочности всех остальных слоев покрытия. Очевидно, что для просветления в этом случае можно использовать слои окислов и фторида магния. Фторид магния полностью прозрачен в видимой области спектра, а в ИК-области (в тонких слоях) значительное по-

глощение для этого материала начинается после 14 мкм [3]. Кроме того, слои фторида магния обладают достаточной твердостью, что позволяет использовать их в качестве внешних слоев покрытия.

Найденное решение при дополнительном условии оптимальности толщины слоя  $\text{In}_2\text{O}_3(\text{Sn})$ , равной 280 нм, приводит к системе

$$D\ 4H\ 0,99L,$$

где  $H$  — четвертьволновый слой окиси индия для длины волны 0,56 мкм;

$L$  — четвертьволновый слой фторида магния.

Пропускание этой системы и чистой пленки окиси индия в видимой области спектра показано на рис. 5. Видно, что прозрачность системы не опускается ниже 0,9, т. е. спектроделитель оказывается достаточно эффективным.

В ИК-области спектра отражение от покрытой поверхности спектроделителя не изменяется, так как верхний слой фторида магния имеет малую толщину и малое поглощение в рабочей области спектра. Спектральное отражение этого покрытия показано на рис. 6 в сравнении с отражением от алюминиевого зеркала. Рисунок показывает большую эффективность спектроделительного покрытия на основе проводящих пленок окиси индия с оловом. Отличные оптические характеристики этого покрытия можно получить только в результате тщательно проработанной технологии.

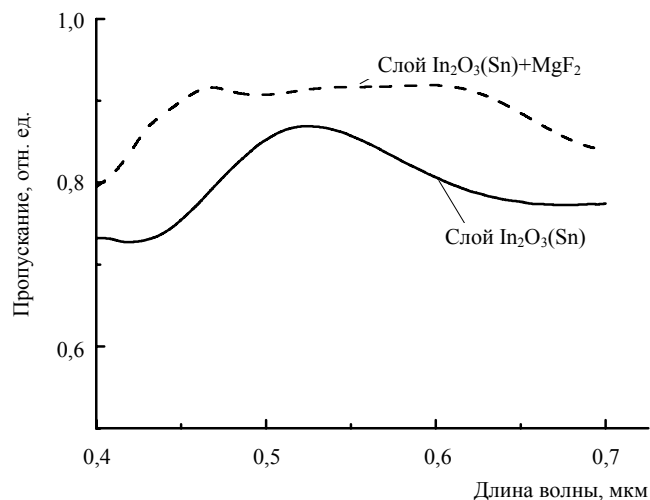


Рис. 5. Спектры пропускания слоя оксида индия, легированного оловом

Во многих случаях в тепловизионных приборах необходимы высокоотражающие зеркала для видимого диапазона, работающие в узких спектральных полосах. Наиболее эффективно использовать диэлектрические зеркальные покрытия, так как тогда реально получить отражения более 98 % невозможно, используя металлические зеркала.

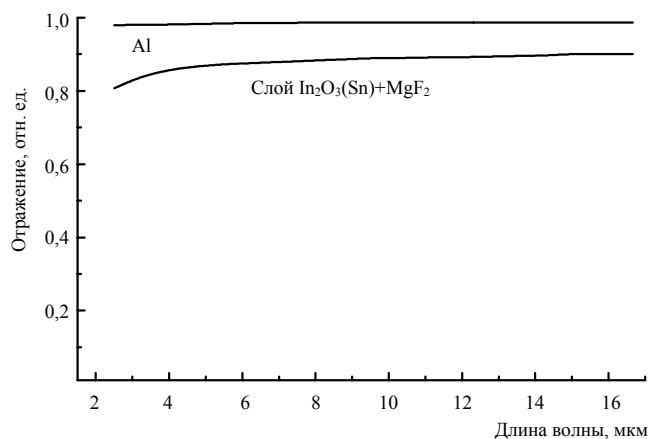


Рис. 6. Отражение от спектроразделительного покрытия в ИК-области спектра.

Для сравнения показано отражение от зеркала из алюминия

Авторами разработаны подобные зеркала, обеспечивающие получение отражения более 98 % при углах

падения излучения до 60°. Сложность достижения таких высоких коэффициентов отражения обусловлена поляризационными эффектами, возникающими при больших углах падения.

Поисковые работы во всех этих направлениях продолжаются.

**Л и т е р а т у р а**

1. Энперс В. Пропускание атмосферы в оптических диапазонах: Справочник по лазерам/Под редакцией А. М. Прохорова. — М.: Советское радио. 1978. Т. 1. С. 380—465.
2. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А., Алиакберов Р. Д. Критерий качества для определения оптимальных параметров широкополосных спектроразделителей//Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 5. С. 83—86.
3. Воронкова Е. М., Гречушиников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2004 г.

**Optical coatings for modern thermal imaging systems**

*I. S. Gainutdinov, R. S. Sabirov, V. A. Ivanov, E. A. Nesmelov,  
R. D. Aliakberov, R. G. Safin*  
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

*Design results of one-and two-range AR coatings, spectrodichroic coatings and high-reflection mirrors for the thermal imaging devices of the new generation are presented in this report.*

УДК 621.384.3

**Алгоритм приведения результатов испытаний тепловизионного прибора к нормированным значениям параметров и условий визирования объекта наблюдения**

*М. М. Трестман, Н. И. Харьковская,*  
ФГУП «Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики"»,  
г. Казань, Россия

*По результатам испытаний тепловизионного прибора реструктурируют инфракрасную (ИК) сигнатуру объекта наблюдения на фрагменты, формирующие его видеобраз. Дальность распознавания для нормированных условий вычисляют как дальность обнаружения фрагментов видеобраза, замещаая их эквивалентными мирами.*

Приведение (пересчет) результатов испытаний тепловизионного прибора (ТВП) по определению дальности действия к нормированным условиям визирования типового объекта наблюдения (ТОН) основано на использовании уравнения для вычисления дальности действия (D) ТВП. Характеризуя

влия обнаружение (распознавание) ТОН с разрешением мира, эквивалентной ИК-сигнатуре ТОН [1—3].

Так, используя экспоненциальную аппроксимацию зависимости МРРТ от частоты мира, частоту разрешаемой эквивалентной мира ( $\omega_m$ ) и соответствующее ей значение D вычисляют как [2, 4]

© Трестман М. М., Харьковская Н. И., 2007

мира-фон ( $MFD$ ), значение D вычисляют, отождеств-