

УДК 621.315.5:621.383

PACS: 07.07 Df, 07.57.-c, 81.05.Ea

**Антиотражающие покрытия фотоприемников на основе антимонида индия**

*М. В. Седнев, А. Н. Гришина, К. О. Болтарь, Е. В. Пермикина,  
Э. А. Макарова, А. А. Пестова*

*В работе представлены результаты расчетного конструирования антиотражающих покрытий на поверхности антимонида индия и их практической реализации с использованием пленкообразующих материалов ZnS, YF<sub>3</sub>, Si и SiO<sub>2</sub>, осажденных методами магнетронного распыления, электронно-лучевого и резистивного испарения, определены показатели преломления используемых пленок. Измерены спектральные характеристики отражения полученных однослойных, двухслойных, трехслойных и более антиотражающих покрытий в средневолновом ИК-диапазоне. Проанализированы возможности минимизации отражения от поверхности антимонида индия в средневолновом ИК-диапазоне спектра.*

*Ключевые слова:* МФПУ, антимонид индия, антиотражающие покрытия, спектральные характеристики, свойства оптических материалов.

**Ссылка:** Седнев М. В., Гришина А. Н., Болтарь К. О., Пермикина Е. В., Макарова Э. А., Пестова А. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 1. С. 67.

**Reference:** M. V. Sednev, A. N. Grishina, K. O. Boltar, E. V. Permikina, E. A. Makarova, and A. A. Pestova, Usp. Prikl. Fiz. **8** (1), 67 (2020).

**Введение**

В конструкции фотоприемных устройств (ФПУ) на спектральный диапазон 3÷5 мкм широко используются фоточувствительные элементы (ФЧЭ) на основе фотодиодов из антимонида индия [1, 2]. ФЧЭ из антимонида

индия охлаждают до 77 К для получения высоких параметров фотоэлектрического преобразования светового потока.

Антимонид индия обладает высоким показателем преломления, равным 4, что приводит к потере 36 % полезного сигнала из-за отражения на границах сред с разным показателем преломления [3]. К тому же, даже незначительные потери потока принимаемого излучения, проходящего вдоль оптической оси конструкции ФПУ (входное окно, диафрагма, поверхность ФЧЭ), могут приводить к уменьшению контраста и четкости изображения из-за многократных отражений от поверхностей элементов оптической системы (так называемые «блики») [4].

Тема расчета антиотражающих покрытий многократно освещена в монографиях и многочисленных научных публикациях [5–14]. В то же время оптические свойства пленок в значительной степени зависят от способа напыления и от технологических режимов (температуры подложки, скорости осаждения, остаточного давления в вакуумной камере), используемых при их изготовлении, и отли-

Седнев Михаил Васильевич<sup>1</sup>, нач. участка, к.т.н.

Гришина Анна Николаевна<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

Болтарь Константин Олегович<sup>1,2</sup>, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

Пермикина Елена Вячеславовна<sup>1</sup>, вед. инженер.

Макарова Элина Алексеевна<sup>1</sup>, инженер 2 кат.

Пестова Анастасия Александровна<sup>1</sup>, инженер.

<sup>1</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел.: 8(499) 374-94-00, 374-94-01.

E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2019 г.

© Седнев М. В., Гришина А. Н., Болтарь К. О.,  
Пермикина Е. В., Макарова Э. А., Пестова А. А., 2020

чаются от оптических констант исходных веществ. Поэтому для успешного синтеза любого оптического покрытия должны быть с достаточной степенью определены оптические характеристики получаемых на практике тонких пленок [14], что позволит получать удовлетворительное соответствие результатов практической реализации расчетным отражениям.

Технологические параметры процессов напыления слоев должны обеспечивать сохранение фотоэлектрических параметров матрицы ФЧЭ. Температура процессов не должна превышать 80–100 °С для варианта изготовления фильтров непосредственно на фотоприемной матрице.

В данной работе представлены результаты расчетного конструирования антиотражающих покрытий на поверхности антимионида индия и их практической реализации с использованием пленкообразующих материалов ZnS, YF<sub>3</sub>, Si и SiO<sub>2</sub>, осажденных методами магнетронного распыления, электронно-лучевого и резистивного испарения, а также определены показатели преломления используемых пленок. Измерены спектральные характеристики отражения полученных однослойных, двухслойных, трехслойных и более антиотражающих покрытий в средневолновом ИК-диапазоне. Проанализированы возможности минимизации отражения от поверхности антимионида индия в средневолновом ИК-диапазоне спектра.

### Оборудование и методика эксперимента

Для создания конструкций антиотражающих покрытий в работе были использованы пленки с высоким и низким показателями преломления: аморфный кремний 2,4÷3,4, сульфид цинка 2,2÷2,3, фторид иттрия 1,4÷1,5, двуокись кремния 1,46÷1,5. Данные пленки были сформированы вакуумными методами магнетронного распыления, резистивного и электронно-лучевого испарения на установках вакуумного напыления.

Скорость осаждения пленочного покрытия поддерживали постоянной, контролируя значения показаний соответствующего кварцевого датчика.

Оптические толщины слоев в процессе напыления контролировали фотометрическим

методом по оптическому каналу ( $\lambda = 1,0$  мкм) на свидетеле из лейкосапфира, и останавливали напыление при достижении соответствующего расчетному значению произведения показателя преломления на физическую толщину, деленные на  $\lambda/4$ . Физическую толщину напыленного слоя измеряли контактным профилометром на свидетелях по высоте ступеньки, образованной маскирующим покрытием элементом.

Измерение спектров отражения и пропускания выполняли на спектрофотометре в диапазоне длин волн 1,35÷25 мкм.

Для определения показателя преломления применяли спектрофотометрический метод [16–24], заключающийся в анализе спектров пропускания и отражения пленки на подложке с известными оптическими константами. Спектрофотометрические методы позволяют проводить исследования в широком спектральном диапазоне и не требуют создания оригинального измерительного оборудования.

Решение задачи проектирования просветляющего покрытия связано с расчетом спектральных характеристик. На сегодняшний день существует возможность осуществлять синтез покрытий в инженерной практике, минуя трудоемкие расчеты. Проектирование просветляющих покрытий в рамках настоящей работы осуществлялось с помощью САПР Optilayer.

### Результаты и обсуждение

Конструкция антиотражающего покрытия (количество и толщина слоев, составляющие покрытие материалы, способы их осаждения в вакууме) выбирается в зависимости от конструктивных и эксплуатационных условий работы изделия.

При выборе конструкции антиотражающего покрытия желательно обходиться минимальным количеством слоев [14].

Простейшим и наиболее распространенным способом уменьшения интенсивности отраженного от освещаемой поверхности излучения является создание прозрачной в требуемом диапазоне однослойной пленки с меньшим, чем у подложки, показателем преломления  $n_{\text{пл}} = \sqrt{n_{\text{подл}}}$  [4].

Анализ показателей преломления и коэффициентов поглощения известных пленкообразующих материалов показал, что для спектрального диапазона  $3\div 5$  мкм выбор этих покрытий крайне ограничен [5, 6, 10–15]. Из них известными и применяемыми являются ZnS ( $n = 2,2\div 2,3$ ) и SiO ( $n = 1,9\div 1,96$ ).

На рис. 1, а представлена спектральная характеристика отражения антиотражающего покрытия из сульфида цинка. Для антиминоида индия наименьшее отражение с пленкой сульфида цинка равно 1,38 % на длине волны 4,3 мкм. Однослойные покрытия удовлетворительны для ряда задач и просты в изготовлении, но обладают некоторыми серьезными ограничениями: наименьшее отражение можно получить лишь на определенной длине волны выбранного диапазона, и даже небольшие ошибки в толщине пленки могут снизить просветление на рабочей длине волны. Тем не менее, при поиске практических решений неоспоримым преимуществом однослойного антиотражающего покрытия является минимальная толщина. Толщины слоев антиотражающих покрытий, напыляемых на подложку антиминоида индия и использованных в этой

работе, приведены в табл. 1, из которой видно, что с увеличением количества слоев в конструкции антиотражающего покрытия, как правило, возрастает суммарная толщина. Исключением является двухслойное покрытие из фторида иттрия и кремния, для которого суммарная толщина составляет 0,37 мкм, что меньше, чем у однослойного из сульфида цинка.

Двухслойным антиотражающим покрытием можно уменьшить отражение света от поверхности прозрачного вещества независимо от показателя преломления его подложки [5]. На рис. 1, б и рис. 1, в представлены спектральные характеристики отражения антиотражающих 2-слойных покрытий на антиминоиде индия из материалов  $YF_3-Si$  и  $ZnS-YF_3$ . Применение пары фторид иттрия–кремний позволило уменьшить отражение до нуля в области максимальной чувствительности, однако отражение возрастает на краях выбранного диапазона по сравнению с однослойным покрытием из ZnS. На длине волны 3,5 и 5,0 мкм отражение составляет менее 10 и 3,5 % соответственно. Двухслойное покрытие  $ZnS-YF_3$  позволяет значительно уменьшить отражение в ближнем ИК-диапазоне.

Таблица 1

**Толщины слоев, напыленных на подложку антиминоида индия антиотражающих покрытий**

Покрытие	Количество слоев	Материал покрытия	Расчетная физическая толщина слоя, мкм	Расчетный показатель преломления (на длине волны 4,3 мкм)	Расчетная оптическая толщина слоя, мкм	Расчетная физическая толщина покрытия, мкм
ZnS	1	Сульфид цинка	0,488	2,2	1,075	0,488
$YF_3-Si$	2	Фторид иттрия	0,2832	1,36	0,3866	0,373
		Кремний	0,0900	3,43	0,3087	
$ZnS-YF_3$	2	Сульфид цинка	0,3325	2,26	0,7521	0,739
		Фторид иттрия	0,4072	1,49	0,6066	
$Si-ZnS-YF_3$	3	Кремний	0,1894	3,43	0,6491	0,976
		Сульфид цинка	0,3049	2,26	0,6898	
		Фторид иттрия	0,4814	1,46	0,7028	
$Si-SiO_2$	5	Кремний	0,0316	3,43	0,1085	0,878
		Двуокись кремния	0,0842	1,38	0,1159	
		Кремний	0,1829	3,43	0,6270	
		Двуокись кремния	0,5479	1,38	0,7543	
		Кремний	0,0315	3,43	0,1080	

Из рис. 1, в видно хорошее совпадение расчетов и экспериментальных результатов. Отражение стремится к нулю в области максимальной чувствительности фотодиодов и не превышает 10 % в диапазоне длин волн 1,7–6,0 мкм, а в диапазоне 3,5–5,0 мкм составляет менее 3,4 %.

Эффективным способом получения широкополосных просветляющих покрытий может быть использование неоднородных пленок, у которых показатель преломления постепенно изменяется от значения, равного показателю преломления подложки, до значения, характеризующего окружающую среду, например, воздух ( $n = 1$ ) [5]. Такие покрытия очень чувствительны к точности нанесения слоев, поэтому при их реализации предъявляются высокие требования к методу контроля их толщин и воспроизводимости получения оптических свойств формируемых слоев [5]. На рис. 1, г представлены расчетные и экспериментальные спектральные характеристики

отражения просветляющего 3-слойного покрытия, сконструированного на основе слоев кремния, сульфида цинка и фторида иттрия на подложке антимолибдита индия с убывающими расчетными значениями показателей преломления: 3,43, 2,26 и 1,46 соответственно. Расчеты показывают, что для этого решения отражение составляет менее 1,4 % в достаточно широком диапазоне длин волн от 1,9 до 5,3 мкм. В то же время спектр отражения экспериментально полученного трехслойного покрытия, оставаясь широкополосным, значительно отличается от расчетного.

Подобный результат был получен при конструировании 5-слойного покрытия, расчетный и экспериментальный спектры отражения которого представлены на рис. 1, д. Расчетное отражение 5-слойного покрытия составляет менее 0,85 % в диапазоне длин волн от 3,5 до 5,0 мкм. Спектральная характеристика отражения полученного 5-слойного покрытия также значительно отличается от расчетного.

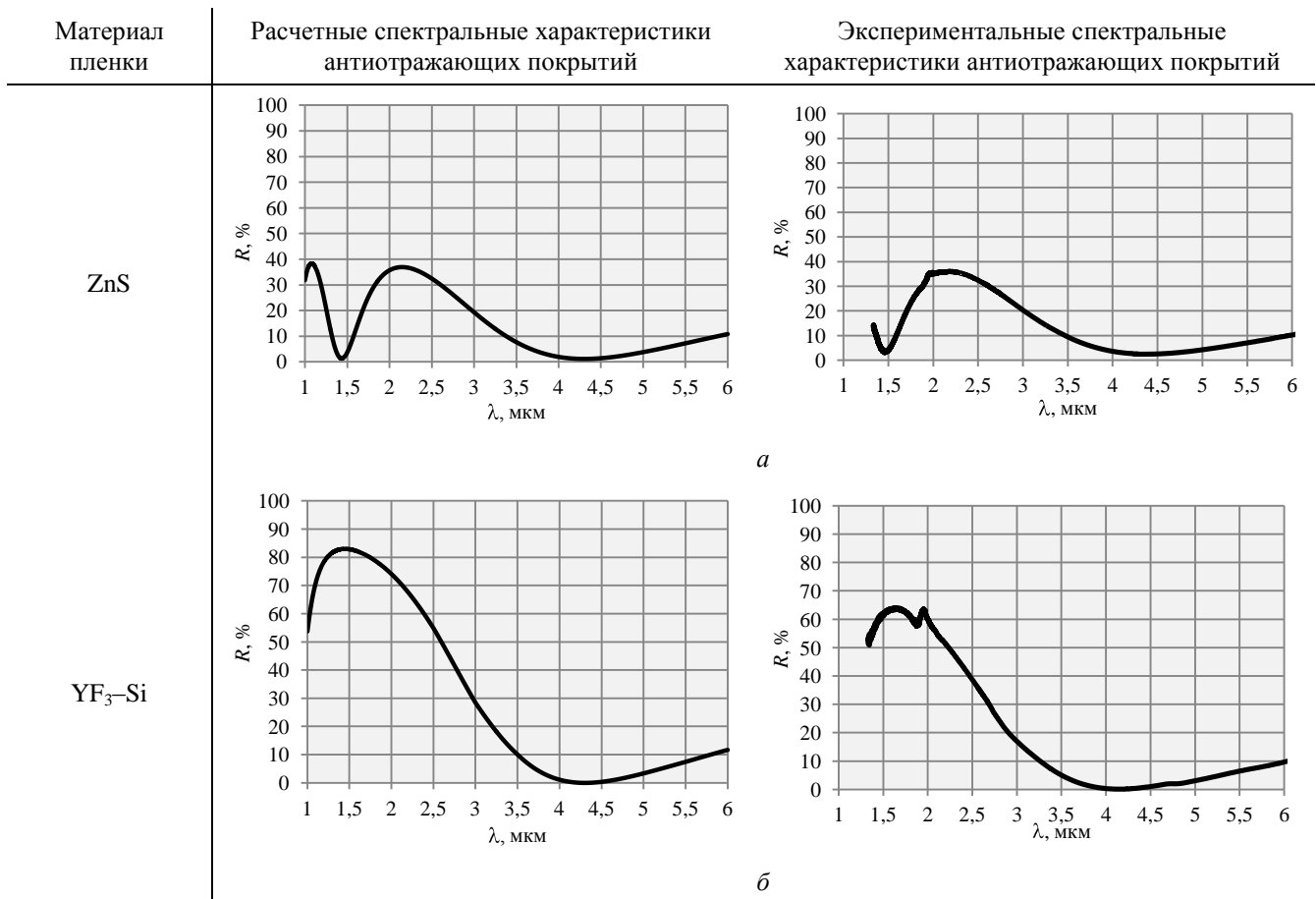


Рис. 1. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) спектральные характеристики отражения антиотражающих покрытий.

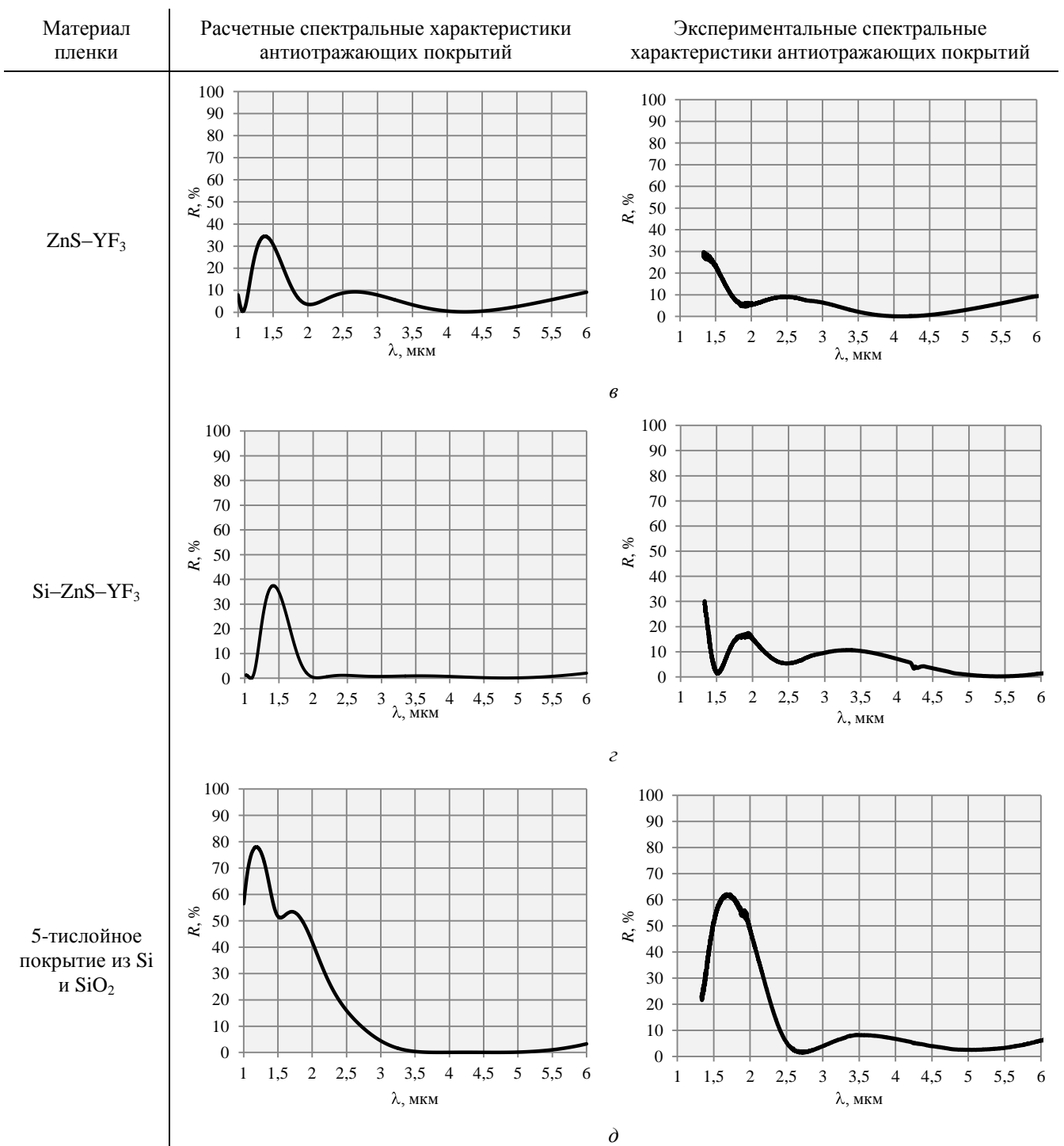


Рис. 1. Окончание.

Рассмотрим причины отклонения спектров экспериментальных многослойных покрытий от расчетных.

Оптические свойства пленок и величина показателя преломления напыляемого материала зависят от способа получения, от технологических режимов – величины остаточного давления в вакуумной камере, состава остаточных газов, изменения стехиометрического состава вещества во время осаждения слоя,

скорости испарения, температуры подложки, и отличается от констант исходных веществ. Отклонения в величинах показателей преломления и оптических толщинах слоев вызывает в экспериментальной спектральной кривой отличия от теоретической (расчетной) [14, 15].

Пленки кремния, использованные при конструировании экспериментальных антиотражающих покрытий, получали методом электронно-лучевого испарения напылением на

различных установках с различными технологическими режимами. Как показали проведенные исследования, напыленные в разных технологических условиях слои имели разные показатели преломления. Измеренные показатели преломления слоев кремния представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, важным параметром является скорость осаждения пленочного покрытия. С ростом скорости

осаждения увеличивается показатель преломления кремния (см. рис. 2). Причем динамика изменения показателя преломления с ростом скорости осаждения существенно зависит от выбора материала тигля. Наибольшие значения показателя преломления пленок кремния 3,28, близкие к значениям объемного 3,4, были получены при испарении кремния из графитового тигля со скоростью осаждения 2,1 Å/с.

Таблица 2

Измеренные показатели преломления в слоях кремния, полученных электронно-лучевым испарением

Материал тигля	Остаточное давление в камере, Торр	Скорость вращения подложкодержателя, об/мин	Скорость осаждения, Å/с	Толщина слоя $d$ , мкм	$\lambda_{\text{max}}$ из спектральных характеристик, мкм	Показатель преломления
графит	$6 \times 10^{-6}$	20	0,76	0,12	1,45	3,02
графит	$6 \times 10^{-6}$	20	2,05	0,271	3,47	3,2
графит	$6 \times 10^{-6}$	20	2,1	0,252	3,31	3,28
медь	$(3 \div 6) \times 10^{-6}$	3	8,3	0,29	3,39	2,92
медь	$(3 \div 6) \times 10^{-6}$	3	4,3	0,22	2,46	2,79
медь	$(3 \div 6) \times 10^{-6}$	3	5,0	0,24	2,54	2,56
медь	$(3 \div 6) \times 10^{-6}$	3	0,82	0,14	1,47	2,60
медь	$(3 \div 6) \times 10^{-6}$	3	0,96	0,75	6,99	2,33
медь	$(4,5 \div 6) \times 10^{-6}$	2,5	0,5	0,22	2,08	2,36
медь	$(4,5 \div 6) \times 10^{-6}$	2,5	0,46	0,20	1,92	2,40
медь	$(4,5 \div 6) \times 10^{-6}$	5	0,47	0,21	1,96	2,33
медь	$(4,5 \div 6) \times 10^{-6}$	5	0,57	0,19	1,74	2,29
медь	$(2,2 \div 4,5) \times 10^{-6}$	5	0,6	0,22	2,19	2,49

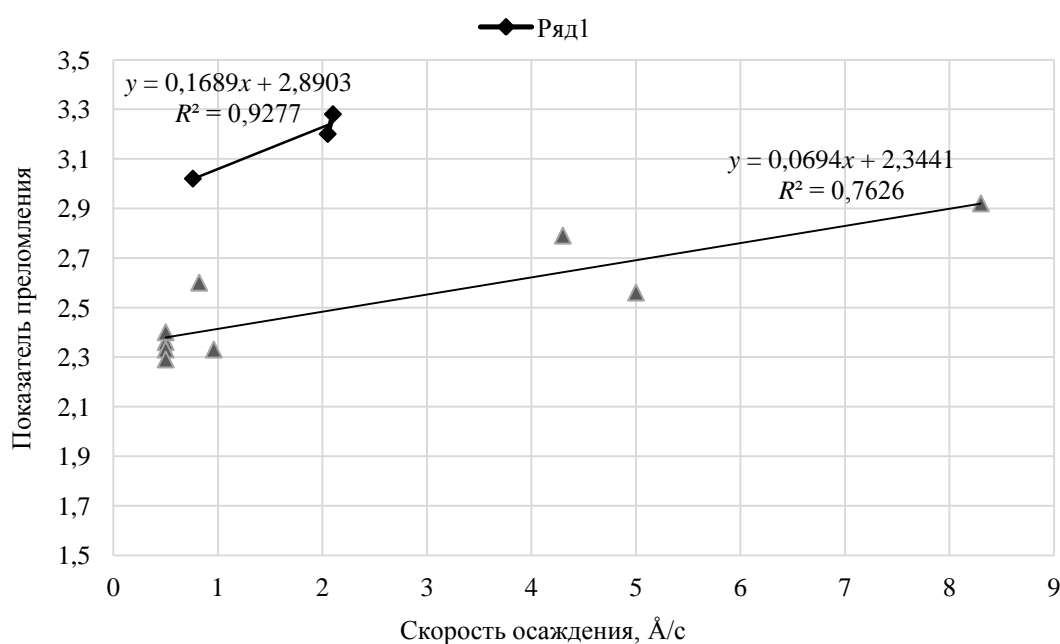


Рис. 2. Экспериментальная зависимость изменения показателя преломления кремния от скорости осаждения: ряд 1 – тигель из графита; ряд 2 – тигель из меди.

## Заключение

Однослойные покрытия удовлетворительны для ряда задач и просты в изготовлении, но обладают некоторыми серьезными ограничениями: наименьшее отражение можно получить лишь на определенной длине волны выбранного диапазона и даже небольшие ошибки в толщине пленки могут снизить просветление на рабочей длине волны.

Двухслойное покрытие  $ZnS-YF_3$  позволяет значительно уменьшить отражение в ближнем ИК-диапазоне спектра.

Расчеты показывают, что трехслойное покрытие, сконструированное на основе слоев кремния, сульфида цинка и фторида иттрия на подложке антимонида индия, уменьшает отражение до 1,4 % в достаточно широком диапазоне длин волн от 1,9 до 5,3 мкм. А пятислойное покрытие, сконструированное на основе слоев кремния и двуокиси кремния на подложке антимонида индия, уменьшает отражение до 0,85 % в диапазоне длин волн от 3,5 до 5,0 мкм. В то же время спектры отражения экспериментально полученных покрытий, оставаясь широкополосными, значительно отличаются от расчетных.

Отклонения экспериментальных спектральных характеристик отражения от теоретических значений для многослойных покрытий обусловлены отличием показателей преломления слоев от расчетных, так как в расчете не была учтена зависимость коэффициента преломления осаждаемых пленок от метода и скорости напыления, а также материала тигля для электронно-лучевого распыления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. // Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36. P. 342.
2. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Полунеев В. В., Рябова А. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733.
3. Уиллардсон Р., Бир А. Оптические свойства полупроводников (пп соединения типа  $A_3B_5$ ). 1970.
4. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989.

5. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973.
6. Воронкова Е. М. Оптические материалы для инфракрасной техники. – М.: Наука, 1965.
7. Седнев М. В., Атрашков А. С. // Прикладная физика. 2017. № 4. С. 78.
8. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Стафеев В. И., Седнев М. В., Яковлева Н. И., Пермикина Е. В., Моисеев А. Н., Котков А. П., Гришнова Н. Д. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 57.
9. Boltar K. O., Burlakov I. D., Stafeev V. I., Sednev M. V., Iakovleva N. I., Permikina E. V., Moiseev A. N., Kotkov A. P., Grishnova N. D. // Proceedings of SPIE. 2006. Vol. 5834. No. 62. P. 367.
10. Кокс Дж. Т., Хасс Г. Просветляющие покрытия для видимой и инфракрасной областей спектра / В кн.: Физика тонких пленок / Под ред. Г. Хасса, М. Франкомбра, Р. Гофмана. – М.: Мир, 1978. Т. 2. С. 396.
11. Пугилин Э. С. Оптические покрытия: учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2010.
12. Яковлев П. П., Меишов Б. Б. Проектирование интерференционных покрытий. – М.: Машиностроение, 1987.
13. Ершов А. В., Машин А. И. Многослойные оптические покрытия. Проектирование, материалы, особенности технологии получения методом электронно-лучевого испарения: учебное пособие. – Нижний Новгород, 2006.
14. Котликов Е. Н., Кузнецов Ю. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н. // Научное приборостроение. 2008. Т. 18. № 3. С. 32.
15. Котликов Е. Н., Варфоломеев Г. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий: учебное пособие. – СПб.: ГУАП. 2010.
16. Lehmann W., Heerdegen W., Schirmer G., Mutschke H., Richter W., Hacker E., Dohle R. // Phys. stat. sol. 1990. Vol. 119. P. 683.
17. Хевенс О. С. Измерение оптических констант тонких пленок. В сб. «Физика тонких пленок» Т. 2. – М.: Мир, 1967. С. 136–185.
18. Валяев А. С. // Оптика и спектроскопия. 1963. Т. 15. Вып. 4. С. 500.
19. Раков А. В. Спектрофотометрия тонкопленочных полупроводниковых структур. – М.: Сов. радио, 1975.
20. Swanepoel R. // J. Phys. E.: Sci. Instrum. 1983. Vol. 16. P. 1114.
21. Минков И. М., Ветлицкая Е. Л., Золотарев В. М., Капитонова Л. Н. // Оптика и спектроскопия. 1985. Т. 58. № 3. С. 689.
22. Житарюк В. Г., Гуминецкий С. Г. // Оптика и спектроскопия. 1982. Т. 52. № 1. С. 126.
23. Андриевский Б. В., Вахулович В. Ф., Курляк В. Ю., Романюк Н. А. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 65. № 1. С. 136.
24. Филиппов В. В. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. № 5. С. 798.

## Antireflection coatings for photodetectors based on InSb

M. V. Sednev<sup>1</sup>, A. N. Grishina<sup>1</sup>, K. O. Boltar<sup>1,2</sup>, E. V. Permikina<sup>1</sup>,  
E. A. Makarova<sup>1</sup>, and A. A. Pestova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received December 18, 2019

*The paper presents the results of the design of antireflection coatings on the surface of indium antimonides and their practical implementation using film-forming materials ZnS, YF<sub>3</sub>, Si and SiO<sub>2</sub> deposited by magnetron sputtering, electron beam and resistive evaporation. Refractive indices of the films used are determined. The spectral reflection characteristics of the obtained single-layer, two-layer, three-layer and more antireflection coatings in the mid-wave IR range were measured. The possibilities of minimizing the reflection from the surface of indium antimonides in the mid-wave IR spectrum are analyzed.*

**Keywords:** FPA, indium antimonide, antireflection coatings, spectral characteristics.

### REFERENCES

1. A. Rogalski, *Progress in Quantum Electronics* **36**, 342 (2012).
2. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, V. V. Poluneev, A. A. Ryabova, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (6), 733 (2013).
3. R. Willardson and A. Beer, *Optical Features of Semiconductors* (1970).
4. Yu. R. Nosov, *Optoelectronics* (Radio Svyaz', Moscow, 1989) [in Russian].
5. T. N. Krylova, *Interference Layers* (Leningrad, Mashinost., 1973) [in Russian].
6. E. M. Voronkova, *Optical Materials for IR Systems* (Nauka, Moscow, 1965) [in Russian].
7. M. V. Sednev and A. S. Atrashkov, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 78 (2017).
8. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. I. Stafeev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 2, 57 (2006).
9. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. I. Stafeev, M. V. Sednev, N. I. Iakovleva, E. V. Permikina, A. N. Moiseev, A. P. Kotkov, and N. D. Grishnova, *Proceedings of SPIE* **5834** (62), 367 (2006).
10. J. T. Koks and G. Hass, *Antireflection Layers for Vision and IR Irradiations*. In Book: *Physics of Thin Coating. Vol. 2.* (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
11. E. S. Putilin, *Optical Layers* (S-Pb, 2010) [in Russian].
12. P. P. Yakovlev and B. B. Meshkov, *Development of Interference Layers* (Mashinost., Moscow, 1987) [in Russian].
13. A. V. Ershov and A. I. Mashin, *Multilayer Optical Coatings*. (Nizhn. Novgorod, 2006) [in Russian].
14. E. N. Kotlikov, Yu. A. Kuznetsov, N. P. Lavrovskaya, and A. N. Tropin, *Nauchn. Priborostr.* **18** (3), 32 (2008).
15. E. N. Kotlikov, G. A. Varfolomeev, N. P. Lavrovskaya, and A. N. Tropin. *Development of Interference Layers* (SPb, GUAP, 2010) [in Russian].
16. W. Lehmann, W. Heerdegen, G. Schirmer, H. Mutschke, W. Richter, E. Hacker, and R. Dohle, *Phys. Stat. Sol.* **119**, 683 (1990).
17. O. S. Hevens, *Measuring of Optical Constants*. In Book: *Physics of Thin Coating. Vol. 2.* (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
18. A. S. Valyaev, *Optics and Spectroscopy* **15** (4), 500 (1963).
19. A. V. Rakov, *Spectrophotometry of Thin Semiconductor Structures* (Sov. Radio, Moscow, 1975) [in Russian].
20. R. Swanepoel, *J. Phys. E.: Sci. Instrum.* **16**, 1114 (1983).
21. I. M. Minkov, E. L. Vetlitskaya, V. M. Zolotarev, and L. N. Kapitonova, *Optics and Spectroscopy* **58** (3), 689 (1985).
22. V. G. Zhitaryuk and S. G. Guminetskii, *Optics and Spectroscopy* **52** (1), 126 (1982).
23. B. V. Andrievskii, V. F. Vakhulovich, V. Yu. Kurlyak, and N. A. Romanyuk, *Optics and Spectroscopy* **65** (1), 136 (1988).
24. V. V. Filippov, *Optics and Spectroscopy* **78** (5), 798 (1995).