

УДК 539.234

## Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор)

А. Н. Тропин

*Представлен краткий обзор задач оптики тонких пленок в части пленкообразующих материалов, применяемых для проектирования и изготовления тонкослойных оптических покрытий для инфракрасной области спектра. Обсуждаются пути решения задач получения оптических пленок с набором требуемых показателей преломления. Приведены некоторые сведения о покрытиях на оптических элементах из халькогенидных стекол и новой технологии атомно-слоевого осаждения тонких пленок.*

PACS: 78.20.-e

*Ключевые слова:* пленкообразующие материалы, оптические покрытия, тонкие пленки, интерференционный фильтр.

### Введение

Достижения в современной оптике и оптоэлектронике диктуют новые требования к многослойным оптическим тонкопленочным покрытиям, формирующим фазовые и энергетические характеристики оптических элементов. В большей мере это относится к инфракрасной области спектра и связано с развитием тепловизионной техники и технологий, а также много- и гиперспектральных оптических систем различного назначения.

В оптике тонких пленок всегда уделялось особое внимание не только созданию и исследованию новых пленкообразующих материалов с набором требуемых значений показателей преломления [1—4], но и разработке технологий получения оптических покрытий на их основе. Вариация показателя преломления дает дополнительные возможности при проектировании оптических покрытий различного назначения. В связи с этим на первый план выходят задачи получения новых пленкообразующих материалов,

разработка и освоение технологий получения оптических пленок на основе этих материалов и исследование оптических свойств пленок, получаемых на практике.

В настоящей работе, имеющей обзорный характер, затронуты некоторые наиболее актуальные на сегодня задачи оптики инфракрасных тонкопленочных покрытий в части пленкообразующих материалов и кратко приводятся предполагаемые пути их решения.

### Пленки с низким показателем преломления

На сегодняшний день в области тонкопленочных покрытий для оптических применений наиболее остро стоит задача получения слоев на основе низкопреломляющих материалов, прозрачных в спектральном диапазоне с длинами волн более 10—12 мкм. В этой спектральной области слои тугоплавких окислов, традиционно используемых в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра, имеют большое поглощение и не могут быть использованы [5—7]. Необходимость получения оптических пленок с показателем преломления  $n \approx 1,4$ —1,5 и менее в первую очередь связана с реализацией высокоэффективных просветляющих покрытий [8].

В видимой и ближней ИК-областях спектра в качестве материала для слоев с низким показателем преломления в основном используется диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Однако применение пленок  $\text{SiO}_2$  для изготовления интерференционных покрытий, работающих в среднем ИК-диапазоне

Тропин Алексей Николаевич, начальник лаборатории<sup>1</sup>, доцент<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> АО «НИИ «Гириконд».

Россия, 194223, Санкт-Петербург, ул. Курчатова, 10. Тел. (812) 552-30-34. E-mail: 216@giricond.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП). Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67.

Статья поступила в редакцию 11 марта 2016 г.

© Тропин А. Н., 2016

спектра, невозможно из-за полосы поглощения в окрестности длины волны  $\lambda = 9$  мкм [9].

Пленкообразующими материалами для получения пленок с низким показателем преломления, альтернативными диоксиду кремния, могут быть некоторые фториды металлов: кальция ( $\text{CaF}_2$ ), бария ( $\text{BaF}_2$ ), свинца ( $\text{PbF}_2$ ), иттрия ( $\text{YF}_3$ ) и некоторых других [6, 7]. Однако сдерживающим фактором широкого использования пленок, например,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$  является их способность поглощать атмосферную влагу, вследствие чего в интервале длин волн 2,8—3,2 мкм и 6,0—7,4 мкм наблюдается существенное увеличение оптических потерь в покрытиях на основе пленок этих материалов.

Кроме этого, проблема усугубляется еще и тем обстоятельством, что для получения покрытий, работающих, например, в области спектра 8—12 мкм необходимы достаточно толстые слои, физическая (геометрическая) толщина которых достигает 1 мкм и более. Возникающие механические напряжения в таких слоях не позволяют использовать те материалы, которые традиционно и с успехом используются в видимой и ближней ИК-областях спектра в качестве низкопреломляющих.

Одним из таких материалов является фторид иттрия  $\text{YF}_3$ , пленки которого обладают низким показателем преломления ( $n_{10 \text{ мкм}} = 1,28\text{—}1,30$ ) и высокими эксплуатационными характеристиками [10, 11]. Однако покрытия, содержащие слои  $\text{YF}_3$  с суммарной толщиной несколько микрометров, крайне неустойчивы при изменении температуры и зачастую отслаиваются от поверхности оптической детали вследствие механических напряжений, возникающих в пленках  $\text{YF}_3$  [10].

В этом случае, возможно, перспективным может оказаться использование пленок легированных фторидов, смесей и твердых растворов бинарных фторидов металлов. В частности, свойства оптических пленок в системах  $\text{BaF}_2 - \text{YF}_3$  и  $\text{BaF}_2 - \text{MgF}_2$  исследовались в работах [12—14]. Возможны и другие варианты бинарных, а в отдельных случаях и тройных систем фторидов, для которых изучение свойств их тонких пленок представляет важное прикладное значение. Так, определенными перспективами практического применения в качестве пленкообразующих материалов обладают твердые растворы и смеси фторидов в системе  $\text{PbF}_2 - \text{YF}_3$  [15]. В настоящее время нами проводятся комплексные исследования пленок материалов различного состава в этой системе с привлечением методов инфракрасной Фурье-спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Кроме всего прочего, до конца не изучено влияние ионного ассистирования на свойства пленок фторидов металлов. И если в случае с туго-

плавкими окислами это влияние сложно недооценить, то при получении слоев фторидов металлов влияние ионного ассистирования не так однозначно и требует проведения дополнительных исследований.

### Пленки с высоким показателем преломления

Из используемых на практике пленкообразующих материалов теллурид свинца  $\text{PbTe}$  позволяет формировать оптические пленки с одним из самых высоких показателей преломления. При комнатной температуре показатель преломления пленок  $\text{PbTe}$ , по данным различных работ [16—21], составляет от 4,9 до 5,6 на длине волны  $\lambda = 8$  мкм. Анализ большинства имеющихся публикаций, затрагивающих задачи конструирования и изготовления интерференционных фильтров для спектрального диапазона 5—50 мкм, свидетельствует о том, что альтернативы высокопреломляющим пленкам  $\text{PbTe}$  практически не существует.

Многие одно- и многоэлементные инфракрасные приемники оптического излучения функционируют только при глубоком охлаждении. Отсюда в отдельную область задач можно выделить проектирование, изготовление и исследование охлаждаемых инфракрасных интерференционных фильтров. Такие фильтры, например, используются в приборах для дистанционного зондирования Земли [22—24], различных спектроанализаторах для проведения измерений как космосе, так и в атмосфере и на поверхности планет Солнечной системы [25, 26]. В некоторых публикациях по этой тематике приводятся результаты исследований температурных зависимостей спектральных характеристик отрезающих [27] и узкополосных [19, 28—30] интерференционных фильтров. При этом отмечается, что температурные характеристики фильтров, в основном, определяются свойствами пленок теллурида свинца, в первую очередь — температурной зависимостью показателя преломления [27, 28].

В ряде работ развит подход, позволяющий уменьшить влияние температуры на спектральные характеристики оптически покрытий на основе пленок теллурида свинца. Так, использование вместо высокопреломляющих слоев  $\text{PbTe}$  пленок твердых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Ge}_x\text{Te}$  ( $x = 0,21$ ) со слоями  $\text{ZnS}$  в структуре узкополосного интерференционного фильтра с  $\lambda_{\text{макс}} \approx 11$  мкм позволяет уменьшить диапазон изменения  $\lambda_{\text{макс}}$  со 100 нм до 30 нм в интервале температур от 70 до 300 К [28].

Известно множество способов получения пленок  $\text{PbTe}$ : термическое испарение [18, 19, 23], испарение лазерным лучом [31], взрывное испарение (*flash method*) [32], метод горячей стенки [33]. Такое разнообразие методов получения тонкоплен-

ночных структур свидетельствует о способности PbTe образовывать пленки с широким набором различных параметров и характеристик, зачастую труднопроизводимых. Это обстоятельство, в определенной мере, доставляет существенные трудности и неудобства при создании оптических покрытий на основе теллурида свинца.

Наш опыт показывает, что на практике не всегда удается получить воспроизводимые результаты с использованием пленок PbTe, что, по всей видимости, связано с их полупроводниковой природой. Возникновение существенных оптических потерь в пленках теллурида свинца в спектральной области с длинами волн более 8 мкм обусловлено поглощением излучения на свободных носителях [18, 34]. Поэтому исследование влияния как условий синтеза исходного материала, так и условий получения тонких пленок PbTe на их оптические свойства является важным этапом в разработке технологий многослойных прецизионных фильтрующих и многоспектральных покрытий для инфракрасного диапазона спектра. Кроме этого, в литературе отсутствуют сведения о влиянии ионного ассистирования на свойства получаемых пленок PbTe.

#### Набор пленок с промежуточными значениями показателей преломления

Для изготовления оптических покрытий, работающих в средней инфракрасной области спектра, на практике применяется ограниченное число пленкообразующих материалов. Задача получения пленок с набором значений показателей преломления, перекрывающих диапазон величин от 1,4 до 5,6, может быть решена, например, с учетом следующих соображений.

Во-первых, определенные перспективы прослеживаются при использовании пленок халькогенидных стекол в системе As-Ga-Ge-S-Se-Te. Так, результаты проведенных нами исследований свидетельствуют о том, что одним из наименьших показателей преломления в системе As-S обладают пленки AsS<sub>4</sub>, показатель преломления которых на длине волны 2 мкм составляет  $n_{2 \text{ мкм}} \approx 2,2$  [35]. В свою очередь, показатель преломления высокопреломляющих стекол Ge<sub>15</sub>Ga<sub>10</sub>Te<sub>75</sub> равен  $n = 3,42$  [36].

Во-вторых, интерес представляют пленки в системе PbTe-ZnTe. Для этой системы характерна фазовая диаграмма эвтектического типа, а смешимость в твердой фазе отсутствует [37, 38]. Величина показателя преломления ZnTe  $n_{5 \text{ мкм}} \approx 2,7$  [39] позволяет прогнозировать, что показатели преломления пленок смесей PbTe и ZnTe разного состава могут перекрыть диапазон от 2,7 до 5,6 с практически непрерывным рядом значений.

Интерес к смесовым пленкам — пленкам из механических смесей различных материалов — обусловлен не только возможностью получения слоев с различными требуемыми показателями преломления, но и с необходимостью снижения внутренних механических напряжений в пленках. Современный обзор свойств некоторых таких смесовых пленок для инфракрасной области спектра представлен в работе [4].

#### Оптика из халькогенидного стекла

В настоящее время особое внимание уделяется вопросам атермализации оптических систем для тепловизионной техники [40, 41]. Для пассивной атермализации объективов перспективным можно считать использование оптических компонентов из халькогенидных бескислородных стекол различного состава, показатели преломления которых мало зависят от температуры [42, 43]. На сегодняшний день наибольшее распространение получили стекла под торговыми марками AMTIR и GASIR [44].

Ряд зарубежных компаний продвигает на рынок оптические компоненты из халькогенидных стекол в системах As-Se-Ge и Sb-Se-Ga, изготавливаемые горячим прессованием [45—47]. Горячее прессование — моллирование — как способ формообразования оптических поверхностей, существенно дешевле механического полирования или алмазного микроточения [42—44, 48]. Моллированием могут быть изготовлены сферические, асферические и асферо-дифракционные (гибридные) линзы [49]. Немаловажным является и то обстоятельство, что стоимость бескислородных халькогенидных стекол меньше стоимости монокристаллического германия, традиционно применяемого для изготовления объективов для тепловизионных систем. Все это в совокупности делает применение бескислородного стекла экономически обоснованным при массовом производстве тепловизионных приборов, например, ИК-камер для автомобильной промышленности.

Из-за невысоких механических свойств халькогенидных стекол внешние поверхности оптических элементов, изготавливаемых из этих материалов, зачастую требуют защиты специальными упрочняющими покрытиями. Так, в работах [44, 48] имеются сведения о создании на линзах из бескислородных стекол такого рода покрытий, в том числе и алмазоподобных (*DLC — diamond like carbon*) покрытий.

Использование элементов из халькогенидных стекол различного состава со своими характерными оптическими, физико-химическими и механическими свойствами формирует задачи по созданию новых тонкопленочных оптических покрытий

[50, 51]. Для решения этих задач может оказаться перспективным использование оптических пленок халькогенидов мышьяка различного состава [31].

### Технология атомно-слоевого осаждения

В контексте рассматриваемых задач к наиболее употребительному методу получения пленок упомянутых в работе веществ, по всей видимости, следует отнести метод термического испарения (резистивного и электронно-лучевого) как наиболее универсальный при использовании различных пленкообразующих материалов, а также не требующий изготовления распыляемых мишеней.

Тем не менее, нельзя не отметить современные достижения в технологиях получения тонкопленочных покрытий, в том числе и оптических. Речь идет о технологии атомно-слоевого осаждения (АСО) или атомного наслаивания (*ALD* — *atomic layer deposition*) [52]. Исторически эта технология получила развитие, в большей мере, для решения задач, возникающих в кремниевой микроэлектронике. Однако в последнее время интерес к этому проявляют исследователи, специализирующиеся и в области тонкопленочных оптических покрытий. Как следует из уже достигнутых результатов, пленки, сформированные по технологии АСО, обладают улучшенными параметрами и характеристиками по сравнению с пленками, получаемыми другими способами. Так, например, полученные по этой технологии пленки SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм на длине волны 1064 нм обладают оптическими потерями порядка  $1,5 \cdot 10^{-6}$ , что существенно меньше по сравнению с аналогичным параметром в пленках SiO<sub>2</sub>, получаемым с применением альтернативных технологий [53].

Атомно-слоевое осаждение считается методом, который имеет наибольший потенциал для получения однородных пленок на подложках больших размеров с возможностью управления их толщиной и составом на атомарном уровне. Возможности технологии АСО в перспективе позволят реализовать оптические покрытия из тех материалов и комбинаций материалов, которые были малопригодны или невозможны с применением уже традиционных методов получения тонких пленок — термического испарения, магнетронного или ионно-лучевого распыления.

### Заключение

В данном обзоре отражены некоторые ключевые задачи в области пленкообразующих материалов, применяемых при создании инфракрасных тонкопленочных покрытий для современных приложений. Одновременно предложены возможные пути их решения.

С позиции накопления новых знаний и опыта, разработка новых пленкообразующих материалов, а также работы по совершенствованию технологии получения и исследованию тонких пленок и оптических покрытий на их основе являются актуальной и весьма перспективной областью исследований.

Кроме получения новых пленкообразующих материалов как таковых, в отдельную область задач можно выделить разработку физико-химических основ их создания. Проведение подобного рода исследований позволит в дальнейшем прогнозировать и создавать новые материалы для тонкопленочных оптических покрытий с заданными функциональными свойствами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко В. Ф. // Оптик. журн. 2006. Т. 73. № 12. С. 72.
2. Зинченко В. Ф., Ефреюшина Н. П., Кочерба Г. И., Галькевич Е. П., Соболев В. П., Горштейн Б. А. // Оптик. журн. 2006. Т. 73. № 12. С. 78.
3. Галькевич Е. П., Кочерба Г. И., Недоступ В. И., Раницев А. А. // Оптик. журн. 2006. Т. 73. № 12. С. 82.
4. Баранов А. Н., Муранова Г. А. // Оптик. журн. 2014. Т. 81. № 4. С. 77.
5. Pulker H. K. // Appl. Opt. 1979. Vol. 18. P. 1969.
6. Kruschwitz J. D. T., Pawlewicz W. T. // Appl. Opt. 1997. Vol. 36. No. 10. P. 2157.
7. Котликов Е. Н., Кузнецов Ю. А., Лавровская Н. П., Тропин А. Н. // Научн. приборостроение. 2008. Т. 18. Вып. 3. С. 32.
8. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Amotchkina T. V., Dobrowolski J. A. // Appl. Opt. 2008. Vol. 47. No. 13. P. C124.
9. Philipp H. R. // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. No. 2. P. 1053.
10. Pellicori S. F., Colton E. // Thin Solid Films. 1992. Vol. 209. P. 109.
11. Bezuidenhout D. F., Clarke K. D., Pretorius R. // Thin Solid Films. 1987. Vol. 155. P. 17.
12. Новикова Ю. А., Котликов Е. Н., Тропин А. Н. // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение. 2011. № 1. С. 117.
13. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А. // Опт. спектр. 2014. Т. 117. № 3. С. 48.
14. Новикова Ю. А. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — СПб: СПб ГУ. 2015
15. Reau J. M., Fedorov P. P., Rabardel L., Matar S. F., Hagemuller P. // Mat. Res. Bull. 1983. Vol. 18. P. 1235.
16. Zhang K. Q., Seeley J. S., Hunneman R., Hawkins G. J. // Proc. SPIE. 1989. Vol. 1112. P. 393.
17. Котликов Е. Н., Иванов В. А., Погарева В. Г., Хонина Е. В. // Опт. и спектр. 2000. Т. 88. № 5. С. 795.
18. Li B., Zhang S., Zhang F., Zeng L. // Appl. Phys. A. 2003. Vol. 76. P. 965.
19. Li B., Zhang S. Y., Jiang J. C., Fan B., Zhang F. S. // Optics Express. 2004. Vol. 12. No. 3. P. 401.
20. Wang J., Hu J., Sun X., Agarwal A. M., Kimerling L. C., Lim D. M., Synowicki R. A. // J. App. Physics. 2008. Vol. 104. P. 053707-1.
21. Kotlikov E. N., Ivanov V. A., Tropin A. N. / PIER Symposium Proceedings. 2010. P. 159.
22. Hawkins G., Sherwood R. // Appl. Opt. 2008. Vol. 47. No. 13. P. C25.
23. Hawkins G., Sherwood R., Djotni K. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 7101. P. 710114-1.

24. Hawkins G., Sherwood R., Djotni K., Coppo P., Höhnemann H., Belli F. // Appl. Opt. 2013. Vol. 52. No. 10. P. 2125.
25. McCleese D. J., Schofield J. T., Zurek R., Martonchik J. V., Haskins R. D., Paige D. A., West R. A., Diner D. J., Locke J. R. E., Chrisp M. P., Willis W., Taylor F. W. // Appl. Opt. 1986. Vol. 25. No. 23. P. 4232.
26. Chrisp M. P. // Proc. SPIE. 1987. Vol. 810. P. 44.
27. Feng W., Zhou P. // Infrared Phys. 1992. Vol. 33. No. 1. P. 1.
28. Li B., Zhang S. Y., Jiang J. C., Liu D. Q., Zhang F. S. // Optics Express. 2005. Vol. 13. No. 17. P. 6376.
29. Hawkins G., Hunneman R., Sherwood R., Barret B. M. // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4842-06. P. 43.
30. Hawkins G. J., Seeley J. S., Hunneman R. // Proc. of SPIE. 1988. Vol. 915. P. 71.
31. Baleva M., Surtchev M. // Vacuum. 2003. Vol. 69. P. 419.
32. Kungumadevi L., Sathyamoorthy R. // Adv. Cond. Matt. Phys. 2012. Vol. 2012. P. 763209-1.
33. Harbachova A. N., Malashkevich G. E., Freik D. M., Nykyruy R. I., Shevchenko G. P. // Chem. Met. Alloys. 2010. Vol. 3. P. 140.
34. Yen Y., Zhu L., Zhang W., Zhang F., Wang S. // Appl. Opt. 1984. Vol. 23. P. 3597.
35. Котликов Е. Н., Иванов В. А., Крупенников В. А., Таллерчик Б. А., Тропин А. Н. // Опт. и спектр. 2007. Т. 103. № 6. С. 981.
36. Adam J-L., Zhang X. Chalcogenide Glasses: Preparation, Properties and Applications — Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.
37. Мовсун-заде А. А., Аллазов М. Р., Сулейманова А. Ю., Сейдова Н. А. // Ж. неорг. хим. 1986. Т. 31. № 1. С. 198.
38. Грыцив В. И., Томашик В. Н., Олейник Г. С., Томашик З. Ф. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1980. Т. 16. № 3. С. 543.
39. Li H. H. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. Vol. 13. No. 1. P. 103.
40. Chen S., Fan Z., Chang H. // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7383. P. 73830D-1.
41. Тарасов В. В., Якушиенков Ю. Г. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 3 (85). С. 1.
42. Moreshead W. V., Novak J., Symmons A. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 8541. P. 854102-1.
43. Plesa C., Turcanu D., Todirica C., Nicola I. // Chalcogenide Letters. 2015. Vol. 12. No. 11. P. 633.
44. Cordier C., Lonnoy J. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5252. P. 92.
45. Novak J., Pini R., Moreshead W. V., Stover E., Symmons A. // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8896. P. 889602-1.
46. Gleason B., Wachtel P., Musgraves J. D., Qiao A., Anheier N., Richardson K. // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8884. P. 888417-1.
47. Huddleston J., Novak J., Moreshead W. V., Symmons A., Foote E. // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9451. P. 945110-1.
48. Zdravec D., Franks J. W., Rodgers K. A., Hendry A. F., Drach P. // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7298. P. 72982L-1.
49. Zhao J., DiFilippo V., Li M. // Proc. SPIE. 2009. Vol. 7298. P. 72983J-1.
50. Guimond Y., Bellec Y., Du Boulais Z.A. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5252. P. 103.
51. Rahmlow T. D., Lazo-Wasem J. E., Wilkinson S., Tinker F. // Proc. SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69400T-1.
52. George S. M. // Chem. Rev. 2010. Vol. 110. P. 111.
53. Pfeiffer K., Shestaeva S., Bingel A., Munzert P., Ghazaryan L., van Helvoirt C., Kessels W. M. M., Sanli U. T., Grevent C., Schutz G., Putkonen M., Buchanan I., Jensen L., Ristau D., Tunnermann A., Szeghalmi A. // Opt. Mat. Express. 2016. Vol. 6. No. 2. P. 660.

## Film's forming materials for optical coatings: new problems and perspectives (a review)

A. N. Tropin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> NII GIRICOND, JS Co.  
10 Kurchatova str., St. Petersburg, 194223, Russia  
E-mail: 216@giricond.ru

<sup>2</sup> Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI)  
67 Bolshaya Morskaya str., St. Petersburg, 190000, Russia

Received March 11, 2016

***In the view of film's forming materials for infrared optical coatings, a brief review of some questions in optics of thin films is presented. Possible ways of solving the problems of producing optical films with the set of required indices of refraction are discussed. Some aspects of the thin film coatings on chalcogenide glass optical elements and the new technology of atomic layer deposition of thin films are considered.***

PACS: 78.20.-e

**Keywords:** film's forming materials, optical coatings, thin films, interferential filter.

## REFERENCES

1. V. F. Zinchenko, *J. Opt. Tech.* **73** (12), 887 (2006).
2. V. F. Zinchenko, N. P. Efyushina, G. I. Kocherba, E. P., Gal'kevich, V. P., Sobol', and B. A. Gorshtein, *J. Opt. Tech.* **73** (12), 892 (2006).
3. Gal'kevich, V. P., G. I. Kocherba, V. I. Nedostup, and A. A. Rantsev, *J. Opt. Tech.* **73** (12), 896 (2006).
4. A. N. Baranov and G. A. Muranova, *J. Opt. Tech.* **81** (4), 227 (2014).
5. H. K. Pulker, *Appl. Opt.* **18**, 1969 (1979).
6. J. D. T. Kruschwitz and W. T. Pawlewicz, *Appl. Opt.* **36** (10), 2157 (1997).
7. E. N. Kotlikov, Yu. A. Kuznetsov, N. P. Lavrovskaya, and A. N. Tropin, *Nauchnoe Priborostroenie*, **18** (3), 32 (2008).
8. A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, T. V. Amotchkina, and J. A. Dobrowolski, *Appl. Opt.*, **47** (13), C124 (2008).
9. H. R. Philipp, *J. Appl. Phys.* **50** (2), 1053 (1979).
10. S. F. Pellicori, E. Colton, *Thin Solid Films*, **209**, 109 (1992).
11. D. F. Bezuidenhout, K. D. Clarke, and R. Pretorius, *Thin Solid Films* **155**, 17 (1987).
12. Yu. A. Novikova, E. N. Kotlikov, and A. N. Tropin, *Izv. GUAP. Aerospace Instrumentation* **1**, 117 (2011).
13. E. N. Kotlikov and Yu. A. Novikova, *Opt. Spectr.* **117** (3), 381 (2014).
14. Yu. A. Novikova, PhD Thesis (St. Petersburg State University, 2015).
15. J. M. Reau, P. P. Fedorov, L. Rabardel, S. F. Matar, and P. Hagenmuller *Mat. Res. Bull.*, **18**, 1235 (1983).
16. K. Q. Zhang, J. S. Seeley, R. Hunneman, and G. J. Hawkins, *Proc. SPIE* **1112**, 393 (1989).
17. E. N. Kotlikov, V. A. Ivanov, V. G. Pogareva, and E. V. Khonineva, *Opt. Spectr.* **85** (5), 795 (2000).
18. B. Li, S. Zhang, F. Zhang, and L. Zeng, *Appl. Phys. A*, **76**, 965 (2003).
19. B. Li, S. Y. Zhang, J. C. Jiang, B. Fan, and F. S. Zhang, *Optics Express* **12** (3), 401 (2004).
20. J. Wang, J. Hu, X. Sun, A. M. Agarwal, L. C. Kimerling, D. M. Lim, and R. A. Synowicki, *J. App. Physics* **104**, 053707-1 (2008).
21. E. N. Kotlikov, V. A. Ivanov, and A. N. Tropin, *PIER Symposium Proceedings*, 159, (2010).
22. G. Hawkins and R. Sherwood, *Appl. Opt.* **47** (13), C25 (2008).
23. G. Hawkins, R. Sherwood, and K. Djotni, *Proc. SPIE* **7101**, 710114-1 (2008).
24. G. Hawkins, R. Sherwood, K. Djotni, P. Coppo, H. Höhnemann, and F. Belli, *Appl. Opt.* **52** (10), 2125 (2013).
25. D. J. McCleese, J. T. Schofield, R. Zurek, J. V. Martonchik, R. D. Haskins, D. A. Paige, R. A. West, D. J. Diner, J. R. E. Locke, M. P. Chrisp, W. Willis, and F.W. Taylor, *Appl. Opt.* **25** (23), 4232 (1986).
26. M. P. Chrisp, *Proc. SPIE* **810**, 44 (1987).
27. W. Feng and P. Zhou, *Infrared Phys* **33** (1), 1 (1992).
28. B. Li, S. Y. Zhang, J. C. Jiang, D. Q. Liu, and F. S. Zhang, *Optics Express* **13** (17), 6376 (2005).
29. G. Hawkins, R. Hunneman, R. Sherwood, and B. M. Barret, *Proc. SPIE* **4842-06**, 43 (2002).
30. G. J. Hawkins, J. S. Seeley, and R. Hunneman, *Proc. SPIE* **915**, 71 (1988).
31. M. Baleva and M. Surtchev, *Vacuum* **69**, 419, (2003).
32. L. Kungumadevi and R. Sathyamoorthy, *Adv. Cond. Matt. Phys.* **2012**, 763209-1 (2012).
33. A. N. Harbachova, G. E. Malashkevich, D. M. Freik, R. I. Nykruy, and G. P. Shevchenko, *Chem. Met. Alloys*, **3**, 140 (2010).
34. Y. Yen, L. Zhu, W. Zhang, F. Zhang, and S. Wang, *Appl. Opt.* **23**, 3597 (1984).
35. E. N. Kotlikov, V. A. Ivanov, V. A. Krupennikov, B. A. Talchik, and A. N. Tropin, *Opt. Spectr.* **103** (6), 934 (2007).
36. J-L. Adam and X Zhang, *Chalcogenide Glasses: Preparation, Properties and Applications* (Cambridge: Woodhead Publishing, 2014).
37. A. A. Movsum-zade, M. R. Allazov, A. U. Sulejmanova, and N. A. Seidova, *Zhurnal Neorganicheskoy Khimii* **31** (1), 198 (1986).
38. V. I. Grytsiv, V. N. Tomashik, G. S. Olejnik, and Z. F. Tomashik, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater.* **16** (3), 543 (1980).
39. H. H. Li, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **13** (1), 103 (1984).
40. S. Chen, Z. Fan, and H. Chang, *Proc. SPIE* **7383**, 73830D-1 (2009).
41. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, *Scientific and Techn. J. of Information Techn., Mechanics and Optics* **3** (85), 1 (2013).
42. W. V. Moreshead, J. Novak, and A. Symmons, *Proc. SPIE* **8541**, 854102-1 (2015).
43. C. Plesa, D. Turcanu, C. Todiric, and I. Nicola, *Chalcogenide Letters* **12** (11), 633 (2015).
44. C. Cordier and J. Lonnoy, *Proc. SPIE* **5252**, 92 (2004).
45. J. Novak, R. Pini, W. V. Moreshead, E. Stover, and A. Symmons, *Proc. SPIE* **8896**, 889602-1 (2013).
46. B. Gleason, P. Wachtel, J. D. Musgraves, A. Qiao, N. Anheier, and K. Richardson, *Proc. SPIE* **8884**, 888417- 1 (2013).
47. J. Huddleston, J. Novak, W. V. Moreshead, A. Symmons, and E. Foote, *Proc. SPIE* **9451**, 945110-1 (2015).
48. D. Zdravec, J. W. Franks, K. A. Rodgers, A. F. Hendry, and P. Drach, *Proc. SPIE* **7298**, 72982L-1 (2009).
49. J. Zhao, V. DiFilippo, and M. Li, *Proc. SPIE* **7298**, 72983J-1 (2009).
50. Y. Guimond, Y. Bellec, and Z. A. Du Boulais, *Proc. SPIE* **5252**, 103 (2004).
51. T. D. Rahmlow, J. E. Lazo-Wasem, S. Wilkinson, and F. Tinker, *Proc. SPIE* **6940**, 69400T-1 (2008).
52. S. M. George, *Chem. Rev.* **110**, 111 (2010).
53. K. Pfeiffer, S. Shestaeva, A. Bingel, P. Munzert, L. Ghazaryan, C. van Helvoirt, W. M. M. Kessels, U. T. Sanli, C. Grevent, G. Schutz, M. Putkonen, I. Buchanan, L. Jensen, D. Ristau, A. Tunnermann, and A. Szeghalmi, *Opt. Mat. Express* **6** (2), 660 (2016).