

УДК 535.32: 621.38

Оптические покрытия с продольным градиентом показателя преломления и вакуумно-плазменные технологии их получения

О. Д. Вольпян

Рассмотрены основные виды оптических покрытий с градиентом показателя преломления вдоль направления распространения света, структуры градиентных покрытий и вакуумно-плазменные технологии их получения. Обсуждены преимущества метода импульсного реакционного магнетронного распыления и результаты его применения для нанесения субволнового покрытия с продольным наноградиентом показателя преломления.

PACS: 42.7.-a, 78.20.-e, 78.20.Ci

Ключевые слова: оптические покрытия, градиентный показатель преломления, продольный градиент, наноградиентное покрытие, магнетронное распыление.

Введение

Оптические покрытия являются важным элементом оптических и оптико-электронных приборов. Они применяются для согласования оптических сред и управления световым излучением путем изменения его направления распространения, спектра, амплитуды, фазы или поляризации. Оптические покрытия, как правило, представляют собой интерференционную систему, состоящую из множества тонких диэлектрических слоев с различными показателями преломления n_i ; в типичном случае имеем систему слоев со ступенчатым изменением показателя преломления при переходе от одного слоя к другому. Такая система слоев с чередующимися низким n_L и высоким n_H значениями показателя преломления используется, например, в качестве интерференционных фильтров, зеркал или просветляющих (антиотражающих) покрытий. При соответствующем выборе материалов и толщин отдельных слоев получают необходимые характеристики оптической системы, но в узких диапазонах длин волн и углов падения света, что ограничивает возможности применения ступенчатых покрытий. Известно также, что наличие большого количества границ между слоями из разных материалов приводит к возрастанию оптических потерь в покрытии (из-за рассеяния на шероховатостях границы слоя), неблагоприятно сказывается на его механической, термической и лазерной прочности [1].

На практике всегда имеется некоторая неоднородность распределения n в слоях из-за особенностей материала, несовершенства технологии или других причин, и такие покрытия называют неоднородными. Покрытия с преднамеренно созданной плавной неоднородностью n называют градиентными. Они характеризуются непрерывным изменением показателя преломления по радиусу $n(r)$ или по толщине $n(z)$ покрытия, а в общем случае — по всем пространственным координатам. Покрытия с радиальным изменением $n(r)$ создают линзовый эффект и находят применение в резонаторах лазеров, в приборах с "градиентной" оптикой (в англоязычной литературе ее именуют как GRIN optics) и в световодах [1]. Покрытия с изменением $n(z)$ по толщине вдоль направления распространения света называют покрытиями с продольным градиентом. Подробная классификация градиентных оптических покрытий представлена в [2, 3]. Покрытие с продольным изменением показателя преломления по толщине $n(z)$ предложено сокращенно называть градиентное $1D_z$ -покрытие. Если такое градиентное покрытие имеет на верхней границе покрытия значение $n(z_2)$, равное показателю преломления внешней среды, а $n(z_1)$ на нижней границе слоя равен показателю преломления подложки, то в результате можно получить безотражательное прохождение света через градиентное покрытие из внешней среды в подложку.

Покрытия с продольным (по толщине) градиентным профилем показателя преломления известны давно, еще с XIX века. Лорд Рэйли (J. S. Rayleigh), анализируя прохождение света через атмосферу, показал, что слои с градиентным n обладают антиотражающими свойствами в широкой полосе длин волн λ . Их изучал и Фраунгофер (J. Fraunhofer). Поэтому хотя в оптике преобладают однородные покрытия и большое внимание уделяется устранению их неоднородностей, градиентные покры-

Вольпян Олег Дмитриевич, начальник отдела, главный конструктор.

ФГУП «НИИ "Полус"» им. М. Ф. Стельмаха.

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, 3.

Тел. 8 (495) 720-54-64. E-mail: polus813isd@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 20 июня 2012 г.

© Вольпян О. Д., 2012

тия вызывают интерес из-за их потенциально более высоких характеристик. Сдерживающим фактором в их применении являются сложность технологии получения и повышенные затраты на производство. Тем не менее, эти проблемы успешно решаются. Примером тому являются успехи в получении механических, защитных и термобарьерных градиентных покрытий [4—6]. Реализованы электромагнитные градиентные покрытия из метаматериалов; в [7] рассмотрены некоторые из них. К сожалению, информация по оптическим покрытиям с продольным градиентом весьма разрознена, и она нуждается в систематизации. Цель данной работы — обсудить достижения в области технологии оптических покрытий с продольным градиентом n и направления ее развития, а также показать перспективность технологии на основе среднечастотного импульсного реакционного магнетронного распыления для получения покрытий с продольным градиентом n .

Профили продольного градиента показателя преломления

Возможны различные варианты продольных распределений $n(z)$ в градиентных покрытиях. Их можно разделить на монотонные профили изменения n , распределения со знакопеременным градиентом и гибридные. Выбор того или иного распределения $n(z)$ зависит от назначения покрытия, его толщины и, конечно, возможностей технологии. Для расчета градиентных покрытий с целью выбора $n(z)$ обычно используют ступенчатую аппроксимацию градиентного профиля $n(z)$ путем его разбиения на большое количество ($i \geq 60$) однородных тонких субслоев с n_i , равным среднему значению показателя преломления по толщине субслоя. Затем проводятся вычисления с использованием методик для многослойных интерференционных систем. Рассмотрим примеры распределений $n(z)$.

Монотонные распределения $n(z)$

Основная область применения покрытий с таким $n(z)$ — просветление, т. е. снижение отражения от границы двух сред до минимально возможного. Типичными распределениями $n(z)$, применяемыми в просветлении, являются линейная, кубическая и квинтичная (5-й степени) функции, а также часть синусоиды. Переход от функции 1-й степени к функции 3-й степени обеспечивает непрерывность не только $n(z)$, но и первой производной n , а в случае 5-й степени обеспечивается непрерывность и второй производной. В результате выбор $n(z)$ в виде полинома высокой степени приводит к снижению градиента на границах покрытия, улучше-

нию согласования сред и, соответственно, снижению отражения (рис. 1). При повышении степени полинома больше 5 градиент $n(z)$ в средней части покрытия возрастает настолько, что просветление перестает улучшаться [8]. Однако в [9] было показано, что наибольшего снижения отражения можно достичь именно при использовании $n(z)$ в виде полинома 9-й степени.

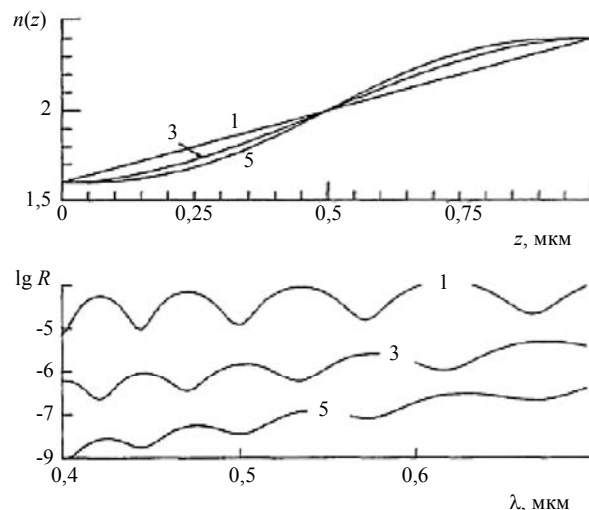


Рис. 1. Профили показателя преломления $n(z)$ в градиентном слое толщиной 1 мкм между двумя средами с $n = 1,6$ и $n = 2,4$ (верхний график) и соответствующие им спектры коэффициента отражения R (нижний график).

Без покрытия коэффициент отражения на границе сред $R = 4 \cdot 10^{-2}$. Цифры на поле указывают степень аппроксимирующего полинома. Адаптировано из [8]

Возможна оптимизация предварительно выбранного распределения для дальнейшего снижения отражения. Для этого градиентный слой разбивается на большое количество тонких однородных субслоев со ступенчатым изменением n_i между субслоями, так чтобы аппроксимация $n(z)$ казалась непрерывной. Вполне достаточно 15 субслоев на длине $\lambda/4$, где λ — длина волны излучения. Затем применяются известные методики оптимизации многослойных интерференционных систем для подгонки значений n_i для каждого субслоя. Например, оптимизация для 250 субслоев после 30 прогонок, начиная с квинтичного распределения, дает значительное снижение коэффициента отражения во всем диапазоне видимого света уже при небольших изменениях начального $n(z)$ и толщине покрытия 1 мкм [8]. В [9] было доказано, что использование для оптимизации $n(z)$ комбинации алгебраической и синусоидальных функций позволяет еще больше снизить коэффициент отражения видимого света после процедуры оптимизации даже при толщине покрытия 0,7 мкм.

Рассмотрим теоретические предпосылки расширения полосы просветления при переходе к

градиентному распределению $n(z)$ в случае высокопреломляющей подложки. Опять будем рассматривать эквивалент в виде многослойной системы. $\lambda_0/4$ -покрытие с соответствующим n дает удовлетворительный результат для одной длины волны λ_0 . По мере добавления слоев в такую систему полоса просветления расширяется, а коэффициент R в полосе снижается. В пределе будем иметь бесконечное количество слоев с бесконечно малой разницей между n_i для соседних слоев. Если же при добавлении слоев не изменять общую оптическую толщину многослойной системы, то толщина отдельных слоев будет стремиться к нулю, а вся система будет практически представлять собой монослой с той же оптической толщиной, но с плавным изменением n от подложки до внешней среды.

Пусть многослойная система содержит m слоев с общей оптической толщиной $\Omega = m\lambda_0/4$. Тогда имеем m спектральных точек с нулевым отражением в диапазоне от λ_1 до λ_2 :

$$\lambda_1 = [(m+1)/m] \times \lambda_0/2 = 2[(m+1)/m^2] \times \Omega,$$

$$\lambda_2 = (m+1) \times \lambda_0/2 = 2[(m+1)/m] \times \Omega,$$

а на длинах волн $\lambda \geq \lambda_2$ просветление ухудшается.

Если m увеличивать до бесконечности, но Ω сохранить, получаем один градиентный слой с $\lambda_1 \rightarrow 0$, а $\lambda_2 \rightarrow 2\Omega$. Все волны с длиной волны в этих пределах не будут отражаться. Таким образом, неоднородный слой с монотонно меняющимся показателем преломления будет отличным антиотражающим покрытием на волнах короче удвоенной оптической толщины. При большей величины λ сильно возрастает отражение, а при $\lambda > 4\Omega$ покрытие становится очень неэффективным [10].

Для просветляющих градиентных покрытий имеется проблема согласования с воздушной средой. Она вытекает из того, что отсутствуют твердые природные материалы с $n = 1$, из которых можно было бы изготовить начальную часть покрытия, контактирующую с воздухом. Но эта проблема решается при использовании пористых неорганических и полимерных материалов, которые рассмотрены в разделе 3.

Применение градиентных профилей с монотонным распределением $n(z)$ позволяет создать просветляющие покрытия, эффективно снижающие отражение в гипершироких областях длин волн. На рис. 2 приведен рассчитанный автором градиентный профиль показателя преломления $n(z)$ просветляющего покрытия и коэффициент его отражения в интервале длин волн 0,5—5 мкм [11]. Покрытие применяется для просветления поверхностей изделий из сапфира в гипершироком ин-

тервале длин волн от видимой области до средней инфракрасной.

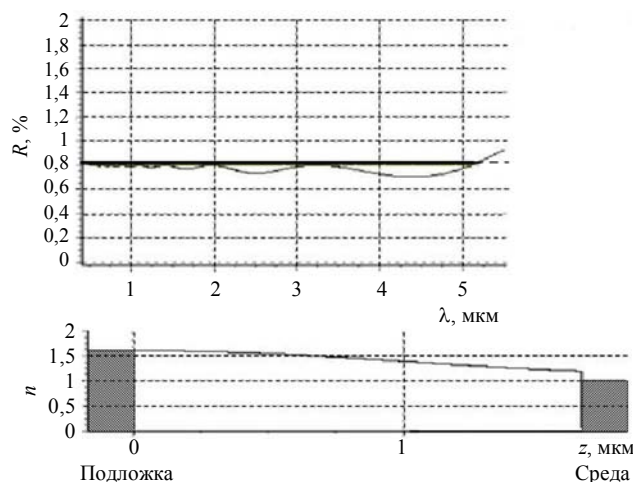


Рис. 2. Профиль показателя преломления $n(z)$ в градиентном слое толщиной 1,7 мкм (нижний график) и его коэффициент отражения в интервале длин волн 0,5—5 мкм (верхний график)

Распределения $n(z)$ со знакопеременным градиентом

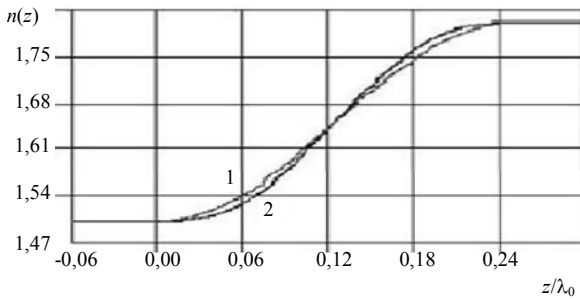
Покрытия с подобным распределением $n(z)$ обычно предназначены для выполнения функций узкополосных отражающих фильтров или, как их еще называют, нотч-(notch)-фильтров. В этих фильтрах распределение $n(z)$ имеет синусоидальный характер, поэтому в англоязычной литературе эти фильтры именуют термином "rugate" ("волнистые").

Для нотч-фильтров обычно применяют $\lambda_0/4$ -системы с однородными слоями, но эти системы, как известно, отражают на многих волнах кроме λ_0 , а именно, на $\lambda_0/3$, $\lambda_0/5$, $\lambda_0/7$ и т. д. Для устранения этих нерабочих отражений применяют специальные способы, в том числе комбинируя их с полосовыми фильтрами, например, из цветных стекол, что для ряда применений является нежелательным. Эту проблему можно решить при выполнении $\lambda_0/4$ -слоя градиентным, как это, например, показано на рис. 3, а [10]. И действительно, спектр на рис. 3, б демонстрирует отсутствие отражений помимо основной полосы.

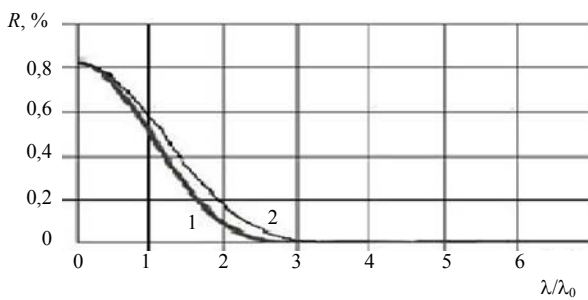
Увеличение количества $\lambda_0/4$ -слоев в обычном нотч-фильтре не сокращает количество полос отражения, а лишь сужает их. Поэтому для подавления полос высшего порядка необходимо каждый $\lambda_0/4$ -слой в фильтре сделать градиентным, причем как на фронте подъема n , так и на спаде, т. е. заменить ступенчатый прямоугольный профиль на синусоидальный, как это показано на рис. 4. В результате получаем одну узкую полосу сильного отражения для rugate-фильтра при $\lambda = \lambda_0$. При

этом в нижней части спектра может наблюдаться небольшой "шум", обусловленный ограниченным количеством слоев в покрытии (рис. 5, верхние рисунки). Очистить спектр отражения от боковых

"лепестков" и "шума" можно путем рассчитываемого изменения формы огибающей профиля показателя преломления rugate-фильтра, как показано на рис. 5 (нижние рисунки).



a



b

Рис. 3. Градиентный $\lambda_0/4$ -слой (а) и его спектр отражения (б) для синусоидального (1) и квантичного (2) распределений $n(z)$. Адаптировано из [10]

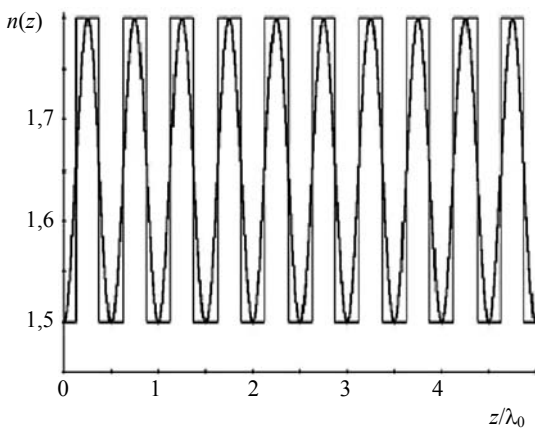


Рис. 4. Замена ступенчатого прямоугольного профиля показателя преломления нотч-фильтра на градиентный (синусоидальный) профиль

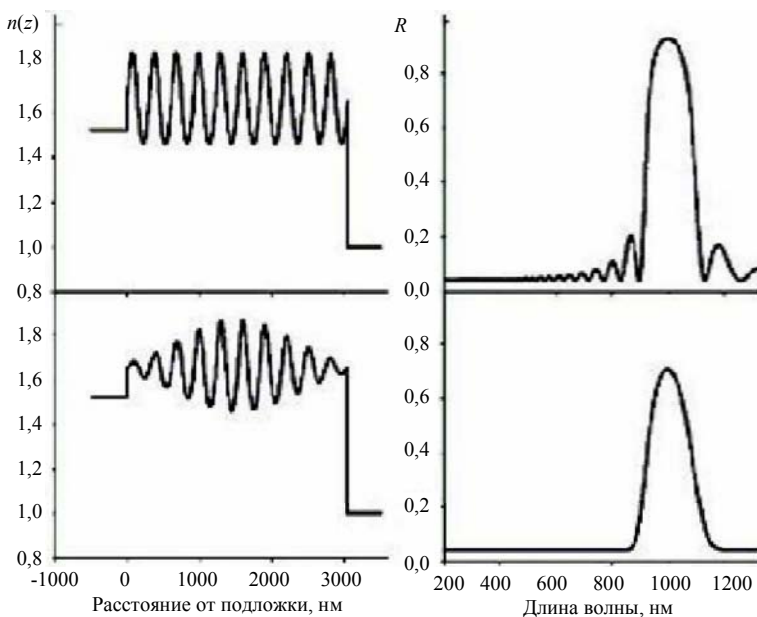


Рис. 5. Применение рассчитываемого изменения формы огибающей синусоидального профиля показателя преломления rugate-фильтра (нижние рисунки) для улучшения спектра отражения синусоидального фильтра (верхние рисунки)

Анализируя возможность изготовления rugate-фильтров со знакопеременным градиентом, приходим к выводу, что технология их производства намного сложнее и так в непростой технологии получения однослойных градиентных просветляющих покрытий, рассмотренных в предыдущем разделе. Можно применить для изготовления rugate-фильтров аппроксимацию в виде последовательности однородных слоев со ступенчатым изменением показателя преломления. По аналогии с тем, как в импульсной технике для преобразования постоянного напряжения в синусоидальное используют подходы на основе амплитудно-импульсной, широтно-импульсной и фазово(частотно)-импульсной модуляции, такие же подходы можно реализовать и в технологии градиентных покрытий.

При первом подходе надо заменить непрерывный профиль $n(z)$ последовательностью высоких и низких ступенек, как уже предлагалось в предыдущем разделе. Каждая ступенька будет представлять собой однородный субслой с n_i , равным полусумме показателей на его границах при непрерывном профиле. Толщина отдельных субслоев должна быть намного меньше $\lambda_0/4$. Если субслои будут толстыми (т. е. уменьшится их количество), в спектре отражения появятся полосы высшего порядка, и будет расширяться основная полоса отражения.

При втором подходе высота ступенек n_i постоянная, но меняется ширина субслоев, чтобы средняя величина $\langle n_i \rangle$ на интервалах "ступенька с высоким n_H — ступенька с низким n_L " изменялась как $n(z)$ в градиентном покрытии. При третьем подходе не меняются высота ступенек и ширина субслоев с высоким n_H , но меняется ширина субслоев (ступенек) с низким n_L . Последние два подхода выполнить проще, но в спектрах отражения появляются полосы высшего порядка. Для их подавления нужно значительно увеличивать количество субслоев, приходящихся на длину $\lambda_0/4$.

Рассмотренные аппроксимации полезны не только для технологии изготовления rugate-фильтров, но и при проектировании других многослойных интерференционных покрытий.

Гибридные распределения $n(z)$

Наряду с монотонными и знакопеременными градиентами $n(z)$ можно создать покрытия (например просветляющие), в которых сочетаются неоднородные и однородные слои [12, 13]. Технология их изготовления, как и моделирование, основывается на ступенчатой аппроксимации $n(z)$ с разбивкой градиентных частей покрытия на тонкие однородные субслои. Результаты подобных подходов к изготовлению (методами электронно-

лучевого испарения, магнетронного и ионно-лучевого распыления) и моделированию неплохо согласуются друг с другом [12, 13].

Микроструктуры градиентных покрытий

Продольный градиент показателя преломления создают непрерывным изменением химического состава вещества покрытия, и здесь возможны разные варианты такого изменения, приводящие к различным микроструктурам градиентного покрытия. Регулирование показателя преломления в таких покрытиях основано на теории эффективной среды, которая сводит материал сложного состава (композит) к однородному материалу со свойствами, представляющими, примерно, среднее от свойств компонентов композита. Изменение относительных концентраций компонентов с низким n_L и высоким n_H значениями показателя преломления приводит к изменению эффективного n . При этом размеры составляющих частей композита должны быть намного меньше рабочих длин волн. Это условие выполняется при смешивании компонентов на молекулярном уровне, например, в виде твердых растворов, или при выполнении компонентов в виде наноразмерных блоков (структурных нанозащитных элементов), например, в виде неплотно упакованных наностержней.

Чаще всего вариацию состава осуществляют в слоистых системах оксид→оксинитрид→нитрид Si и смесях переменного состава из оксидов Si и металлов. Также возможны и другие комбинации смесей (например, оксида Zr и фторида Mg [14]) или вариация бинарного соединения, если имеют место метастабильные нестехиометрические составы, отличающиеся показателем преломления (например, как в случае оксидов Mo [15]). Такие составы при соответствующей технологии осаждения со смешиванием на молекулярном уровне обеспечивают плотную малопористую микроструктуру градиентных покрытий. Плотная беспористая микроструктура покрытия обеспечивает стойкость к внешним факторам, в первую очередь, к влажности, химическим, механическим и термическим воздействиям, загрязнению, а также обеспечивает лазерную прочность. Поэтому покрытия с такой структурой особенно интересны для оптической и лазерной аппаратуры, используемой в экстремальных условиях.

В связи с тем, что в природе отсутствуют твердые вещества с $n \cong 1$, т. е. близким к показателю преломления воздуха, возникает проблема получения покрытия с плавным изменением $n(z)$ от 1 до значения, равного показателю преломления подложки. Решить эту проблему можно по аналогии с вышерассмотренным подходом, т. е. изготавливая смесь твердого преломляющего вещества

с воздухом, другими словами, применяя структуры с градиентной пористостью. Для этого на границе с воздушной средой создается максимальная пористость (до 85—95 %), а вблизи подложки пористость делается минимальной, чтобы покрытие и подложка имели близкие значения n . Чаще всего для этих покрытий применяют кремний и оксид кремния, но также используют оксиды индия—олово (ITO), GaP и полимеры.

Структуры с регулируемой пористостью обычно создают из стержневых наноэлементов, полученных при наклонном падении парового потока на подложки [16—20], но также изготавливают наноэлементы любой другой формы (конусной, пирамидальной, сферической) или в виде конусообразных отверстий в подложке. Изменение показателя преломления в таких структурах в пределах 1,08—2,6 [17, 19] осуществляется регулированием угла падения конденсирующихся частиц на подложку. Вследствие эффекта самозатенения при конденсации слоя и невысокой температуре подложки (т. е. при отсутствии поверхностной диффузии осажденных частиц) увеличение угла падения приводит к большему затенению поверхности подложки и увеличению пористости. Наименьшая пористость и наибольший показатель преломления будут в той части покрытия, которая осаждалась при нормальном падении. При вращении подложки можно получить вертикальные осесимметричные наностержни, у которых отсутствует двулучепреломление, присущее системам с наклонными наностержнями [20]. Подобная технология осаждения под косым (скользящим) углом получила название GLAD — Glancing Angle Deposition.

Для того чтобы градиентные покрытия с дискретной/пористой структурой функционировали с минимальным рассеиванием света в широком диапазоне длин волн, необходимо выполнять следующее условие: размеры неоднородностей в покрытии (наноэлементов и зазоров между ними или нанопор) должны быть значительно меньше рабочих длин волн, т. е. они должны быть нанометрового масштаба. Для расширения диапазона вариации показателя преломления в градиентных покрытиях комбинируют слои с плотной и пористой микроструктурами [18, 19].

Несмотря на то, что градиентные просветляющие покрытия из SiO₂-наностержней могут обеспечивать пропускание больше 99 % в видимой и ближней ИК-области спектра [20], их эксплуатационные характеристики нельзя считать удовлетворительными для приборных применений. Они имеют очевидный существенный недостаток, а именно, чувствительность к воздействиям внешней среды: влага или другие химические вещества, в том числе грязь, могут попадать в поры, механические воздействия могут вызвать разломы нано-

стержней на поверхности, возможно разрушение пористой структуры при сильном тепловом воздействии. Все это приводит к неконтролируемому изменению показателя преломления материала покрытия. Пористые структуры имеют пониженный порог повреждения при воздействии лазерным излучением или плазмой. В связи с этим были предложены различные подходы к минимизации этих недостатков. Основной из них заключается в закрытии пор на внешней поверхности покрытия. Вышеуказанные недостатки еще более очевидны для градиентных оптических покрытий из пористых полимеров [21].

Технологии изготовления градиентных покрытий с плотной микроструктурой

В данной статье будут рассмотрены технологии изготовления градиентных оптических покрытий с плотной микроструктурой, которые наиболее важны для приборных применений. К этой группе технологий относятся методы, уже хорошо зарекомендовавшие себя в микроэлектронике и при нанесении традиционных оптических покрытий, а именно, химическое осаждение из газа (CVD — Chemical Vapor Deposition) и физическое осаждение из пара или потока распыленного вещества (PVD — Physical Vapor Deposition). При этом применяются такие варианты указанных методов, которые обеспечивают получение переменного химического состава осаждаемых покрытий с плотной микроструктурой при относительно невысоких температурах подложек. В связи с последним обстоятельством вместо обычной высокотемпературной CVD-технологии применяют низкотемпературное CVD с плазменным стимулированием — PE CVD (Plasma-Enhanced CVD).

Применение PE CVD-технологий

Для создания плазмы применяют ВЧ-разряд в двухэлектродной (конденсаторной) системе на частоте 13,56 МГц или в двухчастотном режиме [22—24], а также СВЧ-разряд в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в безэлектродной системе на частоте 2,45 ГГц [25].

В ВЧ-системе получали градиентные покрытия из аморфного оксинитрида кремния (SiO_xN_y) и смеси SiO₂/TiO₂ [22—24]. Для получения SiO_xN_y использовались газы SiH₄, N₂O, NH₃ (общее давление — 80 мТорр, расход SiH₄ поддерживался постоянным, а потоки других регулировались с помощью компьютера). Для получения смеси SiO₂/TiO₂ использовались газы O₂ (при постоянном расходе), TiCl₄ и SiCl₄ (потоки последних регулировались); общее давление составляло 3,3—

6,6 Па; мощность разряда 100 Вт; отрицательное напряжение автосмещения на подложке около 400 В. На длине волны 550 нм диапазоны вариации n составляли 1,46—1,86 для SiO_xN_y и 1,46—2,35 для $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$. Скорость осаждения зависела от состава газовой среды и составляла около 0,7 нм/с для SiO_xN_y и около 1,3 нм/с для смеси оксидов. Система [22—24] была апробирована в процессах получения линейных градиентов, одно- и многополосных rugate-фильтров. Длительность осаждения фильтров при суммарной толщине в несколько микрометров составляла нескольких часов.

В СВЧ-ЭЦР-системе [25] получали градиентные покрытия из оксинитрида кремния (SiO_xN_y), используя газы SiH_4 , O_2 и N_2 . Расходы SiH_4 и N_2 поддерживались постоянными (соответственно, 4 и 20 стандартных см^3 в минуту, т. е. в единицах SCCM), а регулировали расход O_2 (как наиболее активного газа) в диапазоне 0,5—8 SCCM; общее давление составляло 0,2 Па; мощность разряда 220 Вт; температура подложки — 200 °С. В этих условиях объемная доля SiO_2 в покрытии составляла 46—96 %. В указанном диапазоне концентраций были получены линейный и параболический градиенты n в слоях толщиной 300 нм при продолжительности процесса осаждения около 1,5 ч.

Применение PVD-технологий

Для получения сложных оптических покрытий применение PE CVD-технологий ограничено из-за ряда трудностей, присущих им (невозможность получения тонких слоев с высокой точностью, неприменимость подложек, неустойчивых к высоким температурам и др.). С 60-х годов прошлого века для получения оптических покрытий начали эффективно применять разновидности PVD-технологий, а именно, ионно-плазменные технологии. Впервые в мире в ГОИ им. С. И. Вавилова была показана возможность использования реактивного катодного распыления для получения сверхпрочных оптических покрытий [26]. В развитие этих работ и в тесном сотрудничестве с ГОИ им. С. И. Вавилова отечественная фирма НПО "Орион" приступила к серийному выпуску оптических покрытий ионно-плазменным методом, создав полностью автоматизированные вакуумные установки, действующие на основе принципа пульсирующего разряда [27]. В настоящее время ионно-плазменный метод является ведущим для получения прецизионных оптических покрытий.

Для получения градиентных покрытий применяются разные методы физического осаждения (но поскольку в камере всегда напускается реак-

ционный газ, O_2 и/или N_2 , то эти методы включают и химические процессы):

- соиспарение двух материалов с низким n_L и высоким n_H значениями показателя преломления; для испарения обычно применяют электронный луч (метод EBE — Electron Beam Evaporation) [28]; в [29] этот метод применялся для получения двухполосных волнистых notch-фильтров (состав покрытия $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$; варьировалась скорость испарения TiO_2); в [14] этот метод применялся для получения просветляющего покрытия (состав покрытия $\text{ZrO}_2/\text{MgF}_2$; варьировались скорости испарения обоих материалов; скорость осаждения покрытия порядка 1 нм/с; температура подложки 80 °С);
- сораспыление ионными лучами (метод IBS — Ion Beam Sputtering) двух материалов с низким n_L и высоким n_H (возможно применение одного луча для распыления обоих материалов); в [14] этот метод применялся для получения волнистых notch-фильтров (состав покрытия $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$; варьировалась скорость распыления TiO_2 ; при толщине покрытия 30 мкм длительность осаждения составляла 104 ч);
- сораспыление двух материалов с низким n_L и высоким n_H с помощью двух магнетронных распылительных систем (MPC);
- распыление кремния в MPC с вариацией состава реакционной газовой смеси (O_2+N_2) для получения оксинитрида SiO_xN_y ;
- распыление молибдена в MPC в кислородной среде для получения различных метастабильных оксидов MoO_x с разным n_x путем изменения мощности магнетронного разряда [15].

В методах соиспарения или сораспыления (№ 1—3) выбирается такое соотношение между скоростями осаждения компонентов покрытия, чтобы обеспечивалось получение заданного значения n . Необходимое соотношение скоростей осаждения компонентов с низким n_L (D_L) и высоким n_H (D_H) можно определить по формуле [29]:

$$D_L/D_H = (n_L^2 - n^2)/(n^2 - n_L^2).$$

К методам № 1—2 следует добавить методы осаждения с ионным ассистированием (методы IAD — Ion Assisted Deposition или IBAD — Ion Beam Assisted Deposition), которые включают в себя электронно-лучевое испарение или ионно-лучевое распыление с ионной бомбардировкой поверхности осаждаемого слоя. В методе IAD источником ионов служит плазма, генерируемая вблизи подложки, а в методе IBAD — специальный отдельный ионный источник (ионная пушка). Ионное ассистирование предназначено не только для ионной очистки поверхности конденсации пе-

ред осаждением покрытия, но и для воздействия на сам конденсат в целях повышения адгезии, уплотнения микроструктуры и стимулирования химического синтеза материала покрытия.

В [14] представлена реализация ионного ассистирования в IBAD IBS-процессе; для этого в ионно-лучевую установку введен ионный источник, направленный на подложку. В источник подавалась смесь $\text{Ag}+\text{O}_2$. Благодаря ионной бомбардировке и градиентному профилю изготавливаемого нотч-фильтра (состав покрытия — $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) его оптические и механические свойства, а также стойкость к воздействиям внешней среды выше, чем у обычных многослойных покрытий, или, по меньшей мере, они равны последним.

В [30] был реализован IBAD IBS-процесс применительно к получению аморфной оксинитридной пленки Si путем распыления мишени из Si_3N_4 с помощью ионов N_2^+ в среде O_2+N_2 при комнатной температуре. Соотношение Si_3N_4 и SiO_2 регулировалось изменением содержания кислорода в среде и интенсивностью бомбардировки подложки ионами N_2^+ с энергией 200 эВ (доля SiO_2 возрастала при увеличении отношения потоков ионов азота и атомов кремния на подложке).

Получение градиентного покрытия из оксинитрида Si на кремниевой подложке методом IBAD EBE в установке Balzers-760 исследовалось в работе [31]. Электронный луч испарял кремний в среде кислорода, а ионы азота из источника Кауфмана (ток 100 мА, энергия 500 эВ) направлялись на подложку при отношении потоков ионов азота и атомов кремния 1:1. Химический состав конденсата регулировался изменением скоростей подачи N_2 в ионный источник и O_2 прямо в камеру.

IAD EBE-процесс был реализован в установке Leybold Syrus-Pro для получения градиентных покрытий (волнистых нотч-фильтров) путем испарения Nb_2O_5 и SiO_2 двумя электронными пушками с ассистированием ионами из плазмы, генерируемой APS (Advanced Plasma Source) [32].

Затем этот метод получения различных градиентных профилей показателя преломления (регулировка состава — изменением скорости испарения компонент; скорость осаждения $\approx 1,4$ нм/с) сравнивался в работах [12, 13] с IBS-процессом (ионы Ar^+ распыляли мишени из Si и Ti в среде кислорода при давлении около 0,4 Па; регулировка состава — изменением положения мишеней относительно ионного луча, скорость осаждения градиентного покрытия $\text{SiO}_2+\text{TiO}_2$ составляла 0,02—0,06 нм/с) и распылением керамических мишеней (SiO_2 и Ta_2O_5) в ВЧ MPC (регулировка состава — изменением мощностей MPC, мощность MPC — до 800 Вт; расход Ar — 59 SCCM, O_2 — 4 SCCM; скорость осаждения $\approx 0,14$ нм/с).

Экспериментальное сравнение указанных методов показывает, что минимальные погрешности обеспечивают ионно-лучевое (IBS) и магнетронное распыление (ошибки в n составляют 0,2 и 0,25 %, соответственно, против 0,6 % для EBE), но соиспарение дает наибольшую скорость осаждения покрытия.

В [33] для получения пленок смешанного состава ($\text{SiO}_2+\text{TiO}_2$) применялось магнетронное ВЧ-распыление двух мишеней из Ti и SiO_2 . Здесь подложки размещались на барабанном подложкодержателе и поочередно проходили мимо обеих мишеней. Показатель преломления пленки регулировался путем изменения относительной мощности MPC (максимальная мощность магнетронов составляла 400 Вт; скорости осаждения чистых оксидов Ti и Si составляли $12,1 \cdot 10^{-2}$ и $18,6 \cdot 10^{-2}$ Å/(мин·Вт), соответственно, доля O_2 в смеси с Ar — 30 % при общем давлении около 4,66 Па; температура подложки — 85 °C). Микроструктура пленок была плотной и аморфной в широком диапазоне варьирования состава.

В аналогичной установке, но с подачей на мишени MPC постоянного напряжения и с использованием отдельного ВЧ-активатора кислорода для стимулирования окисления осажденных атомов наносилась смесь стехиометрических оксидов $\text{SiO}_2+\text{TiO}_2$ (или Nb_2O_5) [34].

В [35] для получения пленок с промежуточным значением n между значениями для оксидов Ta и Ti применялось магнетронное распыление отдельных мишеней из Ta и Ti на постоянном токе в среде $\text{Ar} + \text{O}_2$. Перемешивание осуществлялось благодаря поочередному обращению подложек к обоим мишеням, а состав регулировался изменением скоростей распыления мишеней. Покрытия наносились на колбы галогеновых ламп и могли работать при высокой температуре.

Данные, полученные при использовании магнетронного распыления, указывают на перспективность развития именно этой технологии, особенно, если перейти от ВЧ-распыления диэлектрических мишеней и распыления металлов на постоянном токе к распылению проводящих мишеней в среднечастотном (20—200 кГц) импульсном режиме. В работах [36, 37] подробно описаны методика и преимущества среднечастотного реакционного магнетронного распыления применительно к получению оптических покрытий. Основные достоинства этого метода заключаются в получении с высокой производительностью плотных, устойчивых к воздействиям внешних факторов и воспроизводимых по своим свойствам покрытий с отличной адгезией к подложке. Импульсный режим обеспечивает стабильность высокоскоростного процесса распыления металлических мишеней в

реакционной среде, эффективную активировку реакционных газов и ионно-плазменное стимулирование синтеза стабильных стехиометрических оксидных и нитридных соединений. Наиболее совершенный вариант импульсных MPC — дуальный, при котором в составе MPC используются две мишени, работающие поочередно как катод и анод. Этот вариант и получил в последнее время наибольшее развитие.

На рис. 6 представлена схема установки с двумя дуальными MPC [38]. Каждая MPC (1) содержала по 2 мишени либо из Ta, либо из Si, подключенные к среднечастотному импульсному источнику биполярного питания. Знакопеременное питание предотвращало образование электрических дуговых разрядов на мишенях при работе в реакционной газовой среде. Подложкодержатель (2) вращался со скоростью около 100 об/мин и перемещал подложки от одной MPC к другой, а затем к ВЧ-активатору кислорода (3), где ранее осажденный материал эффективно окислялся с образованием стехиометрических оксидов. В активаторе поддерживался безэлектродный плазменный ВЧ-разряд мощностью 2 кВт, в котором молекулярный кислород возбуждался, ионизовался и распадался на атомарный с образованием новых кислородных частиц с повышенной химической активностью, что и требуется для быстрого окисления металлического конденсата на подложках. Барабанная форма подложкодержателя и экраны (4) устраняют перекрестное запыление мишеней MPC. Регулирование показателя преломления покрытия осуществлялось изменением мощности питания MPC. Максимальная мощность MPC для Ta — 1,5 кВт; для Si — 2,8 кВт. Поскольку изменение мощности может быть плавным, то плавным может быть и изменение n (получается истинное градиентное покрытие). В данной установке распыление мишеней происходит в чисто металлической фазе. Это устраняет гистерезисные явления на мишенях, обеспечивает воспроизводимость скорости распыления при изменении мощности и высокую скорость осаждения покрытия (до 40 нм/мин). Расходы газов O_2 — 60 SCCM, Ar — 300 SCCM для Ta и 200 SCCM для Si. Общее давление 0,5 Па. Подогрев подложки не применялся. Диапазон регулирования n : 1,463—2,182 на длине волны 550 нм. Коэффициент экстинкции на этой волне меньше $5 \cdot 10^{-4}$ при $n < 2,0$ и меньше $1 \cdot 10^{-3}$ при $n > 2,0$. Средняя и среднеквадратичная шероховатость поверхности составляла около 0,84 и 1,06 нм. Электронная микроскопия поперечного сечения просветляющего покрытия с градиентным слоем $SiO_2 + Ta_2O_5$ указывает на плотную беспористую аморфную микроструктуру покрытия.

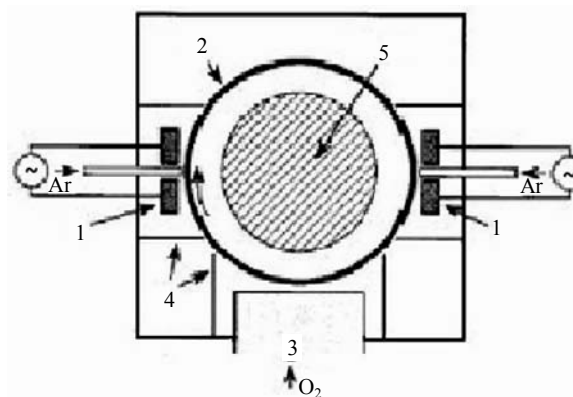


Рис. 6. Схема установки магнетронного распыления с активатором кислорода [35]:

- 1 — дуальные MPC; 2 — барабанный подложкодержатель;
- 3 — ВЧ-активатор кислорода; 4 — экраны; 5 — откачка

Метод магнетронного распыления (№ 4) для получения градиентных слоев оксинитрида SiO_xN_y был реализован путем распыления кремния с помощью одной дуальной MPC, при этом регулирование состава и показателя преломления оксинитрида кремния осуществлялось вариацией реакционной газовой смеси ($O_2 + N_2$), напускаемой в систему [39—42]. Данная MPC представляет собой двойной кольцевой магнетрон (DRM — Double Ring Magnetron) с внешней плоской кольцевой мишенью вокруг дисковой мишени (обе мишени из Si). На мишени подается среднечастотное знакопеременное напряжение (десятки—сотни килогерц), так что мишени по очереди работают как катод и анод. Этим предотвращается образование дуговых разрядов на мишенях и устраняется эффект "исчезновения анода". Оба указанные вредные эффекты могут вызываться образованием на мишенях диэлектрической оксинитридной пленки. Частая переполюсовка мишеней нейтрализует заряд на пленке и приводит к ее распылению в период работы мишеней как катод. Таким образом, в дуальной MPC поочередно возникают кольцевые магнетронные разряды над каждой из мишеней. Компьютер управляет мощностью питания MPC (скоростью распыления мишеней), положением магнитов (для управления характеристиками магнетронных разрядов) и подачей газов. Аргон используется для распыления кремния, кислород и азот — для синтеза на поверхности подложки оксинитрида. Регулировка состава SiO_xN_y осуществляется изменением соотношения расходов O_2 и N_2 .

Показатель преломления n оксинитрида кремния, осаждаемого на подложку, зависит от содержания кислорода в газовой смеси и может регулироваться в пределах от 1,46 до 1,99. Скорость осаждения SiO_xN_y зависит от содержания кислорода в газовой смеси. Переход от чистого оксида к

чистому нитриду Si может осуществляться за 3 с в слое толщиной около 3 нм. Типичные параметры режима: мощность разряда — 2,5 кВт, расход аргона — 40 SCCM, общее давление — 0,75 Па. Рассмотренная дуальная МРС диаметром 400 мм позволяет наносить покрытия на неподвижные подложки 200 мм с неоднородностью до $\pm 1\%$. Она успешно применялась для нанесения слоев с линейным и синусоидальным продольным градиентом профиля показателя преломления для просветляющих покрытий и notch-фильтров [39—42]. Длительность процесса осаждения просветляющего покрытия составляла порядка 5 мин, а rugate-фильтра из нескольких десятков периодов — несколько часов.

Наногradientные оптические покрытия

В последнее время внимание исследователей привлекают покрытия с оптическими параметрами, непрерывно распределенными в нанометровом масштабе. Эти объекты можно именовать наногradientными покрытиями (и даже пленочными метаматериалами [7]). На их основе предполагается создание новых оптических устройств, в частности, субангстремных фильтров, высококонтрастных широкозонных поляризаторов и т. п. Теоретической основой функционирования этих устройств служат результаты работ, выполненных А. Б. Шварцбургом с сотрудниками [43]. Ими рассчитан продольный профиль показателя преломления предложенной авторами новой gradientной наноструктуры — субволнового фотонного барьера. Предполагается, что эти наноструктуры станут основой перспективных приборов, использующих эффект резонансного туннелирования света через фотонный барьер [43].

Проблема состоит в разработке технологии получения таких покрытий, которая должна обеспечить прецизионный процесс роста малодефектной пленки заданного состава в нанометровом интервале толщин. Анализ различных способов получения наногradientных профилей указывает на то, что наиболее подходящим методом является технология среднечастотного импульсного магнетронного распыления нескольких металлов (или субстехиометрических окислов) в реакционной газовой среде постоянного состава при постоянной мощности МРС [2, 11, 44]. Последние особенности метода отличают его от вышерассмотренных магнетронных технологий.

Для реализации такого подхода автором с сотрудниками была создана автоматизированная установка с компьютерным управлением, обеспечивающая режим среднечастотного (22 кГц) импульсного распыления [2]. Схема установки показана на рис. 7.

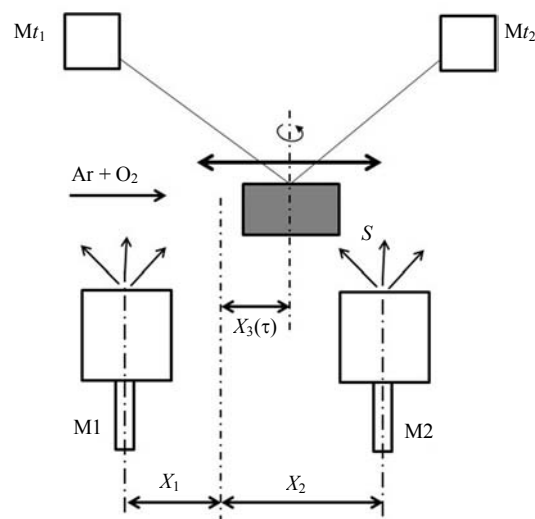


Рис. 7. Установка для осаждения наногradientного покрытия из смеси окислов двух материалов.

M1 и M2 — магнетроны для распыления 1-го и 2-го материалов; S — подложка; Mt₁ и Mt₂ — узлы спектровизора для мониторинга покрытия in situ

Она содержит две МРС (M1, M2) для распыления двух материалов (Si, Ti), между которыми постепенно движется вращающаяся вокруг собственной оси подложка S. Для получения заданного профиля изменения показателя преломления покрытия по его толщине изменяют в текущем режиме состав покрытия (соотношение концентраций распыляемых материалов мишеней обеих МРС, т. е., например, Si и Ti). В свою очередь, соотношение концентраций распыляемых материалов регулируется законом движения подложки между мишенями МРС, который обеспечивается прецизионным приводом, управляемым компьютером. Поверхность подложки с растущим покрытием постоянно обдувается потоком активированного кислорода (или другого газа при необходимости) для образования стехиометрического состава покрытия. Предусмотрена лазерная стимуляция процесса формирования покрытия. Расстояния X₁—X₃ подобраны для получения максимальной однородности распределения толщины покрытия по радиусу вращающейся подложки при минимальном перекрестном запылении мишеней МРС. Контроль процесса основан на оптическом мониторинге характеристик покрытия in situ с помощью спектровизора Mt₁—Mt₂ (измеряется толщина и показатель преломления растущего слоя, текущие спектральные характеристики покрытия). Установка обеспечивает высокую стабильность и воспроизводимость технологического процесса осаждения смесей окислов (при необходимости и фторидов) в реакционной газовой среде, эффективную энергетическую активацию синтеза материала покрытия без дополнительного нагрева подложек, высокую плотность и мини-

мальную шероховатость покрытий с минимальными оптическими потерями. Высокая стабильность и воспроизводимость процесса осаждения покрытия обусловлены, в частности, тем, что в процессе не изменяются электрические и газовые режимы работы МРС, т. е. требуемый профиль показателя преломления получается только за счет осуществления рассчитанного закона поступательного движения подложки. В результате были получены воспроизводимые наноградиентные оптические структуры с различным профилем и модуляцией показателя преломления.

Для характеристики разработанной установки рассмотрим, как пример, получение наноградиентного многоволнового просветляющего $1D_z$ -покрытия для применения в элементах преобразования частоты лазерного излучения (средний ток магнетронных разрядов составлял 0,5 А, напряжение — 0,5—0,7 кВ, суммарное давление газа в камере ~ 0,1 Па). На рис. 8, б представлен синтезированный продольный профиль показателя преломления

нением величины показателя преломления. При этом градиент изменения показателя преломления довольно значительный.

Преимущества разработанной структуры градиентного $1D_z$ -покрытия вытекают из того, что его физическая толщина получилась намного меньше толщины $\lambda/4$ ступенчатого интерференционного покрытия с аналогичной спектральной характеристикой, а также отсутствием недостатков, вызванных внутренними межслойными границами (см. выше). Это обеспечивает значительное снижение потерь в покрытии и повышение его устойчивости к внешним воздействиям.

На рис. 9 показан экспериментальный спектр отражения изготовленного наноградиентного $1D_z$ -покрытия. Можно видеть, что он хорошо согласуется с расчетом. Испытания наноградиентных покрытий, изготовленных в ФГУП «НИИ "Полус"» им. М. Ф. Стельмаха на радиационные, климатические и механические воздействия, показали, что параметры покрытий соответствуют установлен-

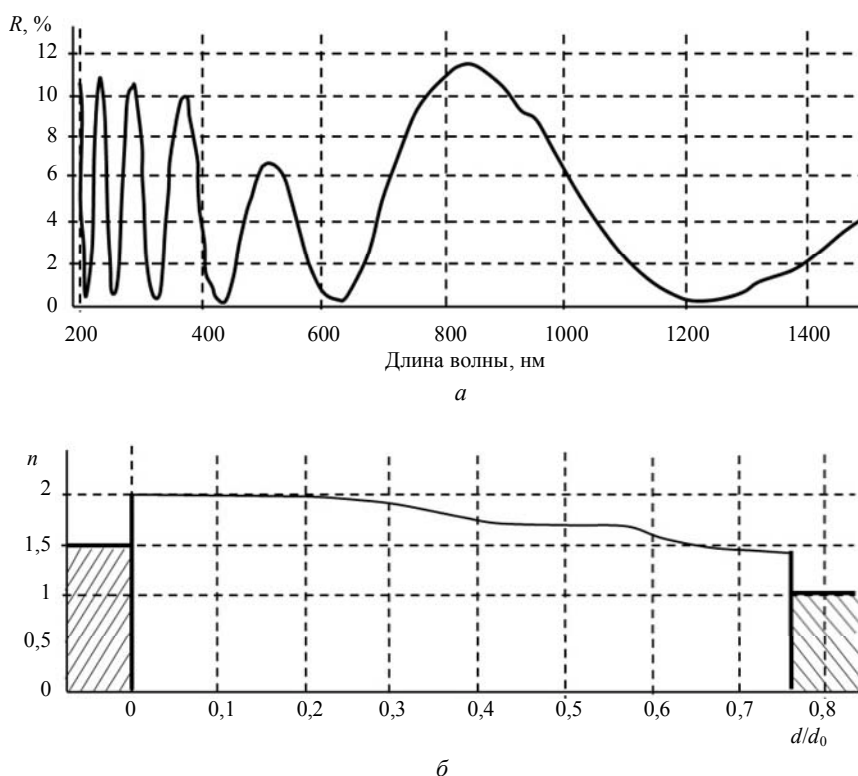


Рис. 8. Спектр отражения (а) и структура (б) просветляющего $1D_z$ -покрытия с продольным наноградиентом показателя преломления.
Нижняя шкала — относительная толщина покрытия

этого покрытия, на рис. 8, а показан рассчитанный по профилю спектр отражения покрытия. Оно состоит из однородного слоя с высоким показателем преломления, расположенного у подложки (слева), однородного слоя с низким показателем преломления, граничащего с воздухом (справа), и среднего наноградиентного слоя с линейным изме-

ненным требованиям к элементам бортовых оптических и лазерных приборов [11].

Приведенный пример показывает, что среднечастотное импульсное реакционное магнетронное распыление является удобным и эффективным методом изготовления оптических наноградиентных покрытий.

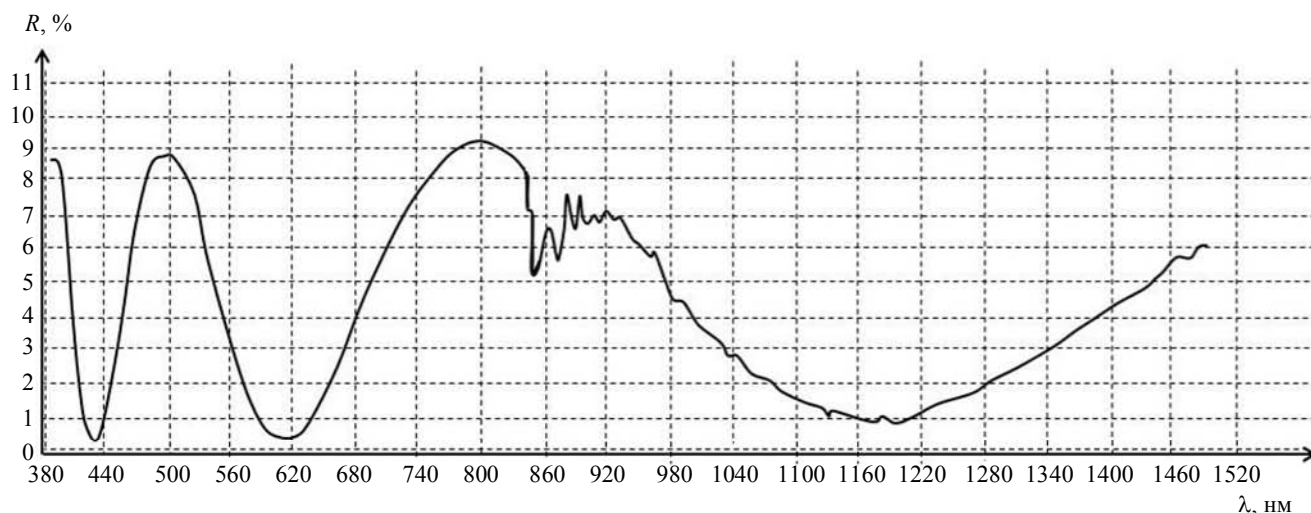


Рис. 9. Спектр отражения изготовленного наноградиентного ID_z -покрытия, структура которого показана на рис. 8, б. Горизонтальная ось — длина волны излучения

Заключение

Оптические покрытия с продольным градиентом показателя преломления работают в широких диапазонах длин волн и углов падения света и на- сущно необходимы для оптики различного назна- чения, оптоэлектронных и лазерных устройств, а также солнечных элементов с высокой эффек- тивностью преобразования солнечной энергии в элек- тричество. По сравнению с покрытиями со ступ- енчатым $\lambda/4$ -профилем показателя преломления, градиентные покрытия имеют меньшие толщины и оптические потери, а также повышенную стой- кость к действию внешних факторов и лазерного излучения.

В градиентных покрытиях используются раз- личные варианты распределения $n(z)$ в зависи- мости от назначения: монотонные, знакопеременные и гибридные. По своей микроструктуре покрытия разделяются на пористые, состоящие из наноэле- ментов, и плотные. Первые обеспечивают получе- ние n , близкого к единице, но характеризуются пониженной эксплуатационной надежностью. Вторые обладают высокой стойкостью к меха- ническим, тепловым и химическим воздействиям, а также к действию лазерного излучения.

Перспективным методом изготовления гради- ентных покрытий является среднечастотное им- пульсное реакционное магнетронное распыление при его управлении от компьютера с использо- ванием спектрофотометрического мониторинга из- делия *in situ*. Но этот метод нуждается в дальней- шем совершенствовании как в аппаратурном отношении, так и применительно к осаждению более широкого круга материалов.

Работа частично финансировалась Министерством образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.527.12.0022).

Литература

1. Gomez-Reino C., Perez M. V., Bao C. Gradient-index optics. Fundamentals and applications. — Berlin: Springer-Verlag, 2002.
2. Вольпян О. Д., Кузьмичев А. И., Обод Ю. А., Яковлев П. П. / Мат. 15-й научн.-техн. конф. "Высокие технологии в про- мышленности России (Материалы и устройства функцио- нальной электроники и микрофотоники)". — М., 2009. С. 447.
3. Вольпян О. Д., Кузьмичев А. И. // Электроника и связь. 2010. № 2(55). С. 28.
4. Movchan B. A., Yakovchuk K. Yu. // Surf. Coat. Technol. 2004. V. 188, 189. P. 85.
5. PLATIT. Gradient Coating. Nanogradients. — <http://www.platit.com>
6. ВНИИИнструмент. Наноградиентные покрытия из се- паративной плазмы дугового разряда. — <http://www.vniinstrument.ru/production>
7. Вольпян О. Д., Кузьмичев А. И. Отрицательное прелом- ление волн. Введение в физику и технологию электромагнит- ных метаматериалов. — Киев: Аверс, 2012.
8. Southwell W. H. // Opt. Lett. 1983. V. 8. P. 584.
9. Kim J. H., Lee Y. J. // J. Opt. Soc. Korea. 2000. V. 4. P. 86.
10. Macleod H. A. Thin-film optical filters. — CRC Press, 2010.
11. Вольпян О. Д., Обод Ю. А., Шкатула С. В. Наногради- ентные интерференционные покрытия для инфракрасной оптики / VII Международный Форум "Оптические приборы и технологии" — OPTICS-EXPO 2011, 25—28 октября 2011, Москва.
12. Janicki V., Gäbler D., Wilbrandt S. et al. // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 7851.
13. Janicki V., Sancho-Parramon J., Stenzel O. et al. // Ibid. 2007. V. 46. P. 6084.
14. Ouellette M. F., Lang R. V., Yan K. L. et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. V. 9. P. 1188.

15. Jankowski A. F., Schrawyer L. R., Perry P. L. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1991. V. 9. P. 1184.
16. Qiu W., Kang Y. Mo, Goddard L. L. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 141116.
17. Xi J.-Q., Kim J. K., Schubert E. F. et al. // Opt. Lett. 2006. V. 31. P. 601.
18. Poxson D. J., Schubert M. F., Mont F. W. et al. // Ibid. 2009. V. 34. P. 728.
19. Kuo M.-L., Poxson D. J., Kim Y. S. et al. // Ibid. 2008. V. 33. P. 2527.
20. Kennedy S. R., Brett M. J. // Appl. Opt. 2003. V. 42. P. 4573.
21. Li B. X., Gao J., Xue L., Han Y. // Adv. Funct. Mater. 2010. V. 20. P. 259.
22. Martinu L., Poitras D. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2000. V. 18. P. 2619.
23. Poitras D., Stephane S., Martinu L. // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 5249.
24. Stephane S., Szymanowski H., Klemberg-Sapieha J. E. et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2004. V. 22. P. 1200.
25. Callard S., Gagnaire A., Joseph J. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. V. 15. P. 2088.
26. Мотовилов О. А., Рождественский В. Н. // Опτικο-механическая промышленность. 1958. № 2. С. 42.
27. Глебов Ю. А. // Там же. 1970. № 2. С. 46.
28. Якобсон Р. В кн. Физика тонких пленок. — М.: Мир, 1978. С. 61.
29. Gunning W. J., Hall R. L., Woodberry F. J. et al. // Appl. Opt. 1989. V. 28. P. 2945.
30. Lambrinos M. F., Valizadeh R., Colligon J. S. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1997. V. 127, 128. P. 369.
31. Snyder P. G., Xiong Yi.-M., Woollam J. A. et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1992. V. 10. No. 4. P. 1462.
32. Leitel R., Stenzel O., Wilbrandt S. et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 497. P. 135.
33. Chao S., Chang C.-K., Chen J.-S. // Appl. Opt. 1991. V. 30. P. 3233.
34. Song Y., Sakurai T., Maruta K. et al. // Vacuum. 2000. V. 59. P. 755.
35. Ritz A. // Surf. Coat. Technol. 2003. V. 174, 175. P. 651.
36. Вольпян О. Д., Кузьмичёв А. И. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 34.
37. Кузьмичёв А. И. Магнетронные распылительные системы. — Киев: Аверс, 2008.
38. Tang Q., Ogura S., Yamasaki M., Kikuchi K. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1997. V. 15. P. 2670.
39. Bartzsch H., Frach P., Goedicke K., Gottfried Chr. // Surf. Coat. Technol. 1999. V. 120, 121. P. 723.
40. Bartzsch H., Lange S., Frach P., Goedicke K. // Surf. Coat. Technol. 2004. V. 180, 181. P. 616.
41. Lange S., Bartzsch H., Frach P., Goedicke K. // Thin Solid Films. 2006. V. 502. P. 29.
42. Weber J., Bartzsch H., Frach P. // Appl. Opt. 2008. V. 47. P. 288.
43. Шварцбург А. Б., Агранат М. Б., Чефонов О. И. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. С. 948.
44. Kuzmichev A. I., Shvartsburg A. B., Volpian O. D., Obod Yu. A., Yakovlev P. P. Polarized light in nanogradient metamaterials / Optical Complex Systems: OCS11, 5—8 September 2011, Marseille, France.

Optical coatings with longitudinal gradient of refraction index and vacuum-plasma technology of their obtaining

O. D. Volpian

Polus Research Institute

3 Vvedensky str., Moscow, 117342, Russia

E-mail: polus813isd@rambler.ru

Basic optical coatings with refraction index gradient along light propagation, structures of gradient coatings and vacuum-plasma technology of their manufacturing are considered. Advantages of pulse reactive magnetron sputtering method and results of its applying to deposition of subwavelength coating with longitudinal gradient are discussed.

PACS: 42.7.-a, 78.20.-e, 78.20.ci

Keywords: optical coatings, graded index of refraction, longitudinal gradient index, nanogradient coatings, magnetron sputtering.

Bibliography — 44 references.

Received June 20, 2012

* * *