УДК 538.975: 621.382.13: 535

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2007 г. **А. В. Тихонравов**, доктор физ.-мат. наук; **М. К. Трубецков**, доктор физ.-мат. наук

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва

E-mail: tikh@srcc.msu.ru

В работе рассматриваются современные подходы к проектированию многослойных оптических покрытий, основанные на использовании различных модификаций метода игольчатого синтеза. Огромные возможности этого метода и мощности современных вычислительных средств позволяют получать практически реализуемые конструкции любых по сложности элементов многослойной оптики.

Коды OCIS: 310.1620, 240.0310.

*Поступила в редакцию 26.04.2007.*

## 1. Введение

Общая классификация подходов к проектированию многослойных оптических покрытий делит эти подходы на локальные и нелокальные [1, 2] в зависимости от того, какие математические методы используются для решения многопараметрических задач их оптимизации. В данной работе мы рассматриваем нелокальные подходы, основанные на методе игольчатого синтеза [3, 4]. Последний сам по себе является нелокальной оптимизационной процедурой. Основные идеи метода игольчатого синтеза и его общее описание можно найти в работах [4, 5]. Дальнейшие модификации этого метода описаны в работах [6, 7].

В 1986 году Добровольский писал [8], что для решения любой задачи синтеза многослойных оптических покрытий требуется обеспечить минимально необходимую оптическую толщину этого покрытия независимо от того, какой метод проектирования используется. Практическая значимость этого замечания была многократно продемонстрирована в работах, связанных с применением методов так называемого Фурье-синтеза [8–12]. Детальному теоретическому и практическому исследованию ключевой роли полной оптической толщины покрытия в решении задач проектирования посвящена работа [6]. В ней было предложено в качестве основных параметров проектирования наряду с общим числом слоев покрытия и значением оценочной функции, характеризующей точность аппроксимации требуемых спектральных свойств, рассматривать и его полную оптическую толщину.

В данной работе описывается современная реализация метода игольчатых вариаций. Мы также рассматриваем современные подходы к получению серии решений задачи проектирования с различными комбинациями основных параметров. Целью получения серии решений является расширение возможностей выбора наиболее подходящей для практической реализации конструкции покрытия. Рассматриваются подходы к получению множества решений с почти одинаковыми комбинациями основных параметров, что также направлено на поиск наилучшего, с практической точки зрения, покрытия. В заключительной части работы обсуждаются перспективы развития методов проектирования оптических покрытий на ближайшее будущее.

## 2. Современная реализация метода игольчатых вариаций и его модификации

Подробное описание основных идей метода игольчатых вариаций и ряда технических деталей его реализации можно найти в работах [4, 7, 13–17]. Развитие метода в последние годы коснулось в первую очередь расширения списка целевых характеристик покрытия, которые могут формулироваться в задании на синтез. Так, в связи с задачами оптики сверхкоротких лазерных импульсов и телекоммуникационными задачами в список целевых характеристик покрытия были добавлены все возможные типы групповых задержек и дисперсий групповых задержек. В связи со все возрастающими требованиями к цветовым характеристикам многослойных оптических покрытий стало возможным использовать в качестве целевых значений любые координаты во всех основных цветовых системах (Chromaticities, CIE YU’V’ 1976, CIE YUV 1960, Tristimulus, Hunter Lab, CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*u^*v^*$ и др.). Возможно также и использование любых комбинаций целевых характеристик покрытия.

Успех применения метода игольчатых вариаций определяется тем, насколько точные и быстрые алгоритмы используются в его программной реализации. С самого начала развития метода эти требова-

ния выполнялись за счет использования абсолютно точных аналитических формул для вычисления всех требуемых для работы метода функций и величин: производных спектральных характеристик покрытия по параметрам слоев, функции возмущений, предсказывающей место проведения игольчатых вариаций, и т. п. [4, 5, 14–17, 18]. Абсолютно точные рекуррентные формулы удалось вывести и для вычисления всех необходимых производных таких сложных характеристик, как групповые задержки и дисперсии групповых задержек. Это дало возможность успешно применить метод игольчатых вариаций для проектирования многослойной оптики, позволяющей получать сверхкороткие (до 2,5 фс) длительности лазерных импульсов [19].

Одним из наиболее мощных подходов к проектированию оптических покрытий является использование модификации метода игольчатых вариаций, названной нами методом последовательной эволюции [6]. Эта модификация основана на осознании особой роли полной оптической толщины покрытия при решении задач проектирования. Ключевым моментом метода последовательной эволюции является принудительное увеличение полной оптической толщины покрытия в моменты, когда заканчивается оптимизация конструкции методом игольчатых вариаций. Детально эта процедура и другие особенности метода описаны в [6]. В принципе метод последовательной эволюции может строить бесконечную последовательность конструкций покрытия со все возрастающими оптическими толщинами $T$. При этом, как правило, возрастает и число слоев покрытия $N$, а оценочная функция $M$, характеризующая качество решения задачи синтеза, постоянно уменьшается. Для остановки метода могут использоваться различные критерии: достижение предельно допустимой полной оптической толщины покрытия, превышение заданной верхней границы для числа слоев покрытия, достижение требуемого уровня аппроксимации заданных спектральных свойств покрытия, которое фиксируется как уменьшение оценочной функции ниже требуемого уровня. Общая схема метода последовательной эволюции представлена на рис. 1.

Для начала работы метода последовательной эволюции совершенно необязательно задание какого-либо начального приближения для проектируемого покрытия. При его отсутствии проектирование начинается с однослойного покрытия нулевой толщины. В процессе работы метода получается серия конструкций покрытия с различными комбинациями основных параметров $T$, $N$, $M$. Современная программная реализация метода настолько эффективна, что серия решений с числом слоев до 50–60 по-

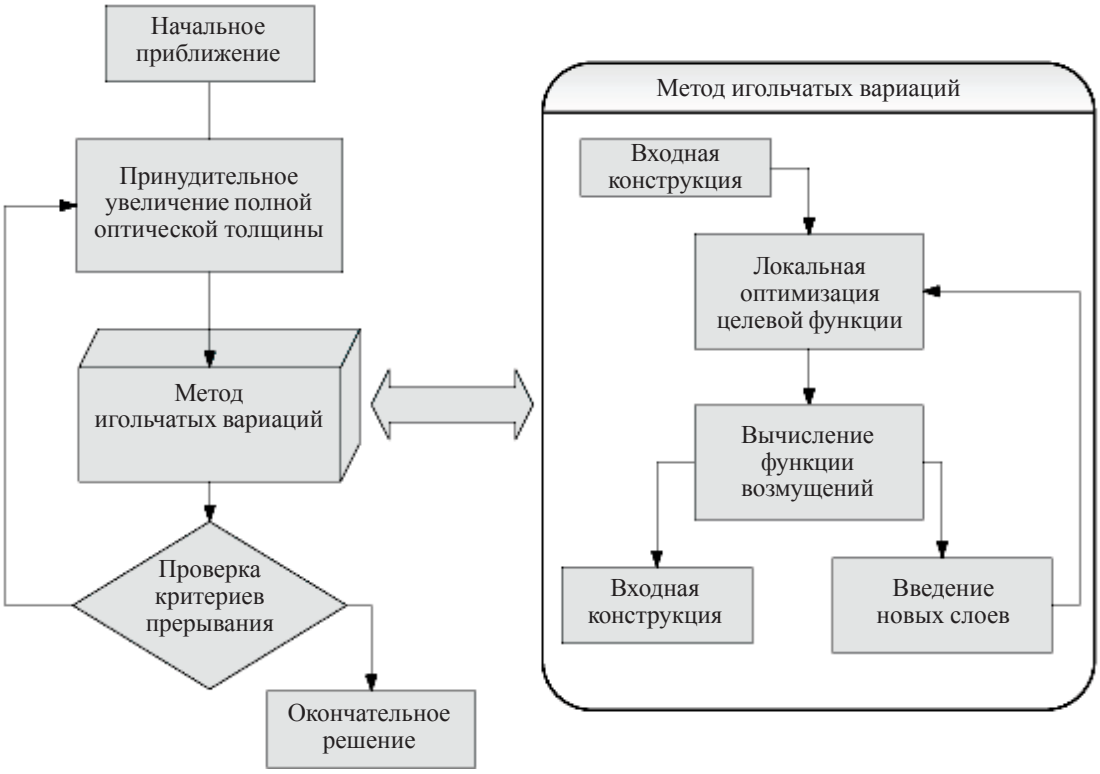



**Рис. 1.** Общая схема метода последовательной эволюции.

лучается за считанные минуты. Для ряда наиболее сложных современных задач проектирования оптических покрытий число необходимых слоев может быть порядка 100 и более. Но и для таких задач полный набор решений получается за вполне приемлемое время (как правило, не более нескольких часов вычислений на современном персональном компьютере). Программная реализация метода последовательной эволюции использует наиболее современные достижения вычислительной математики и программирования, в частности, она предусматривает возможность распараллеливания вычислений. Благодаря этому скорость вычислений заметно повышается при использовании персонального компьютера с несколькими двухъядерными или четырехъядерными процессорами.

Метод последовательной эволюции предоставляет оптику-оператору принципиально новые возможности для выбора наиболее подходящей, с практической точки зрения, конструкции покрытия. Имея в своем распоряжении серию конструкций с разными комбинациями основных параметров, он может выбрать ту из них, которая в наибольшей степени соответствует возможностям находящихся в его распоряжении напылительной и измерительной аппаратуры. Здесь следует отметить, что возможности современной напылительной аппаратуры позволяют получать покрытия с числом слоев до нескольких сотен.

## 3. Схема получения множественных решений задачи проектирования покрытий

Развитие основанных на методе игольчатых вариаций подходов к проектированию покрытий позволило переключить внимание исследователей с проблемы получения какого-либо покрытия, обладающего требуемыми спектральными свойствами, на проблему выбора из множества возможных решений задачи проектирования того решения, которое обладает наилучшими производственными свойствами (наиболее точно контролируется в процессе производства, дает максимальный процент выхода успешных изделий при массовом последовательном производстве и т. п.). Оказывается, что многие задачи проектирования оптических покрытий позволяют получить не одно, а несколько решений с почти одинаковыми наборами основных параметров $T$, $N$, $M$. Наличие множества таких решений расширяет возможности выбора покрытия с наилучшими производственными свойствами. Эффективным подходом к поиску данного множества решений является сочетание метода игольчатых вариаций с серией локальных оптимизаций со случайно заданными начальными приближениями.

Более детально обсуждаемый подход состоит в следующем. Допустим, что мы уже получили оценку для минимально необходимой полной оптической толщины покрытия, которая позволяет достичь требуемой точности аппроксимации заданных спектральных свойств покрытия (т. е. получить достаточно малое значение целевой функции). Такая оценка легко может быть получена с помощью рассмотренного выше метода последовательной эволюции. Обозначим эту оценку полной оптической толщины покрытия как $T_0$. Зададим некоторое число $N_0$, которое будет обозначать число слоев генерируемых случайным образом начальных приближений для проектируемого покрытия. Начальные приближения будем генерировать таким образом, чтобы математическое ожидание оптических толщин их слоев равнялось $T_0/N_0$. Понятно, что при этом математическое ожидание полных оптических толщин начальных приближений будет равно $T_0$.

Для каждого из генерируемых начальных приближений проводится оптимизация структуры покрытия с использованием одного из наиболее эффективных методов локальной оптимизации оптических покрытий [18]. Получаемые при этом конструкции покрытия упорядочиваются в соответствии с достигнутыми значениями целевой функции. Как правило, даже лучшие из результатов, полученных путем локальной оптимизации, могут быть улучшены и далее с помощью метода игольчатых вариаций. На этом пути получается серия решений задачи проектирования, полные оптические толщины которых близки к $T_0$. Данное свойство связано с тем, что полная оптическая толщина покрытия является весьма консервативным параметром, который изменяется незначительно как в ходе локальной оптимизации, так и при последующей оптимизации с использованием метода игольчатых вариаций.

Получаемые решения не всегда обладают хорошими конструктивными свойствами. Они, например, могут иметь ряд тонких слоев, толщины которых достаточно трудно контролировать в процессе производства с применением такого все еще широко используемого метода, как термическое распыление в вакууме. Тем самым по условиям практической реализуемости покрытия может быть необходимым исключение из его конструкции слишком тонких слоев. Для улучшения процесса производства может быть желательным и уменьшение общего числа слоев покрытия. Для решения соответствующих задач были разработаны процедуры, позволяющие исключать тонкие слои и уменьшать общее число слоев покрытия за счет некоторого, как пра-

вило, весьма незначительного увеличения значения оценочной функции $M$ [6]. Эти процедуры могут быть применены к серии решений, полученных после оптимизации методом игольчатых вариаций.

Для получения множественных решений задачи проектирования описываемый подход может быть расширен путем проведения не одной, а нескольких серий оптимизаций со случайно заданными начальными приближениями. При этом число слоев начальных приближений в этих сериях $N_j$ и математические ожидания толщин слоев $T_j$ выбираются так, чтобы выполнялось равенство $N_jT_j = T_0$. Описанная схема получения множественных решений приведена на рис. 2. После применения процедур улучшения конструктивных свойств решений в ней могут быть задействованы и дополнительные критерии отбора решений по ряду наиболее существенных параметров. Например, могут исключаться все решения с числом слоев, превосходящим заданное предельно допустимое значение.

Для целого ряда задач проектирования описанный подход позволяет получить серию решений с очень близкими комбинациями основных параметров, но структурно существенно различных. С практической точки зрения, это означает, что данные решения могут соответствовать совершенно разным по своим напылительным свойствам покрытиям. Какие-то из этих решений могут оказаться существенно более точно контролируемыми в процессе напыления с помощью используемого на данной установке метода контроля напыления.

Пример множественных решений задачи проектирования приведен на рис. 3, на котором представлены зависимости показателей преломления четырех многослойных покрытий (так называемых “горячих зеркал”) от оптической толщины покрытия. Первые три из этих покрытий имеют одинаковое число слоев $N = 42$ и очень близкие значения полной оптической толщины ($T = 7492$, 7491, 7817 нм для покрытий а, б, в соответственно). Спектральные характеристики покрытий в области от 400 до 1200 нм также очень близки и практически неразличимы на графиках. Поэтому на рис. 4 показан коэффициент пропускания только одного “горячего зеркала”, а именно, покрытия с профилем показателя преломления, соответствующим рис. 3а. Четвертое из горячих зеркал (см. профиль показателя преломления на рис. 3г) имеет 40 слоев. Оно приведено в качестве примера того, как за счет увеличения полной оптической толщины покрытия можно добиться выполнения дополнительных конструктивных требований к толщинам слоев покрытий. В отличие от трех предыдущих конструкций покрытие (г) имеет только толстые слои с оптическими толщинами, превосходящими 80 нм. Это

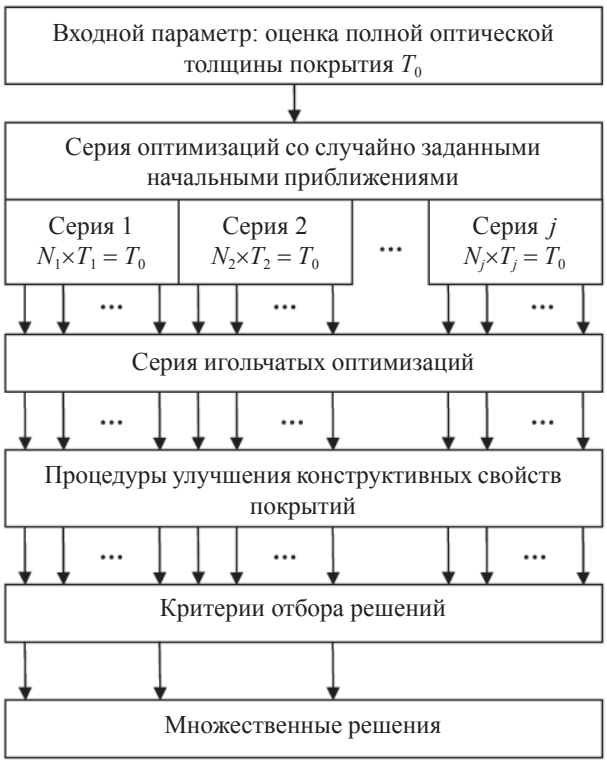



**Рис. 2.** Общая схема получения множественных решений задачи проектирования покрытий.

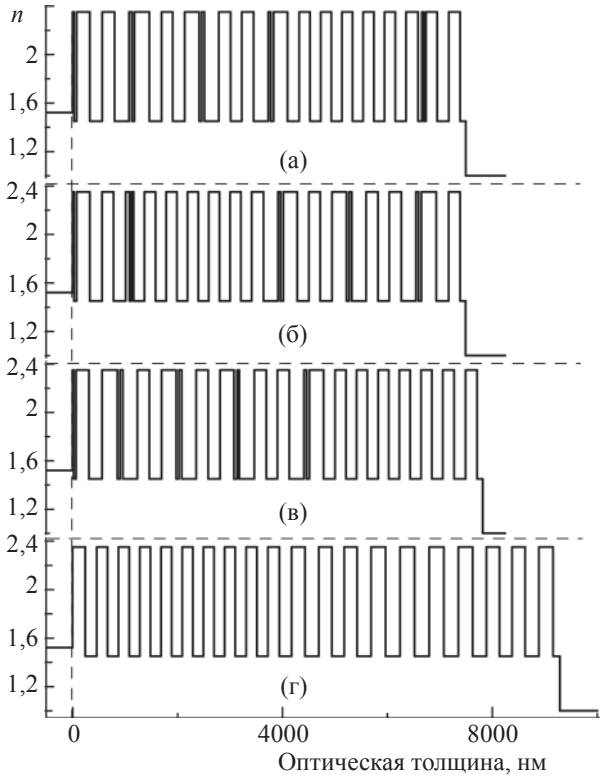



**Рис. 3.** Зависимости показателей преломления четырех многослойных покрытий (“горячих зеркал”) от их оптической толщины: покрытия имеют близкие спектральные характеристики в области от 400 до 1200 нм, коэффициент пропускания покрытия (а) приведен на рис. 4.

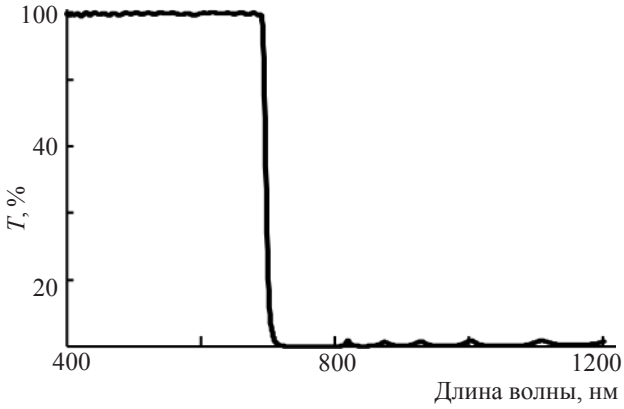



**Рис. 4.** Коэффициент пропускания одного из "горячих зеркал" – покрытия с профилем показателя преломления на рис. 3а.

позволяет применить при его напылении специальные методы, резко повышающие точность контроля (см. следующий раздел). Спектральные свойства покрытия (г) близки к свойствам, которые иллюстрирует рис. 4.

В заключение данного раздела следует указать, что не все задачи проектирования допускают множественные решения с близкими комбинациями основных параметров. К таковым, например, относятся задачи проектирования чирп-зеркал, применяемых при создании лазеров с фемтосекундными длительностями импульсов. В то же время множественные решения могут быть получены для многих важнейших классов задач проектирования многослойной оптики: различного рода фильтров и зеркал, WDM-фильтров для телекоммуникационных устройств и т. д.

## 4. Предпроизводственный анализ теоретических конструкций покрытий

Проблема поиска оптимального, с практической точки зрения, решения тесно связана с возможностями напылительной аппаратуры. Очень важную роль играет выбор стратегии контроля толщин слоев покрытия в процессе их напыления. Поиск оптимальной для практики конструкции покрытия сильно зависит от этой стратегии. Согласованное проектирование конструкции покрытия и стратегии его контроля в процессе напыления (например, последовательности длин волн для монохроматического оптического мониторинга толщин слоев) также является важной проблемой, в решении которой в последнее время были получены существенные результаты [21, 22].

В настоящее время проверка практической пригодности полученных теоретических конструкций покрытия проводится в основном путем серии пробных напылительных экспериментов. Каждый из таких экспериментов может требовать многих часов, а то и суток работы напылительной камеры и, кроме того, весьма дорог. Для проверки большого числа возможных теоретических конструкций покрытия требуются другие подходы. Мощными средствами предпроизводственного анализа конструкций и проверки их практической пригодности являются статистический анализ ожидаемых производственных погрешностей [20–22] и эксперименты по вычислительному производству оптических покрытий [23–25].

На рис. 5 показаны результаты предпроизводственного анализа ожидаемых погрешностей для двух конструкций горячего зеркала: покрытий (а) и (г) на рис. 3. При данном анализе предполагалось, что для контроля напыления используется новая стратегия монохроматического мониторинга, разработанная в [21] и позволяющая свести к минимуму эффект накопления ошибок в процессе производства покрытий с несколькими десятками слоев. Предполагалось также, что среднеквадратичная ошибка измеряемого коэффициента пропускания покрытия составляет 0,05%. Следует отметить, что данная точность измерений вполне доступна для современной аппаратуры контроля процесса напыления [26].

Сравнение приведенных на рис. 5 результатов показывает, что в случае покрытия с профилем показателя преломления (г) на рис. 3 ожидаемые погрешности заметно ниже, чем в случае 42-слойного покрытия с профилем показателя преломления (а). То же самое верно и в отношении двух других 42-слойных конструкций горячего зеркала, приведенных на рис. 3. Другие примеры предпроизвод-

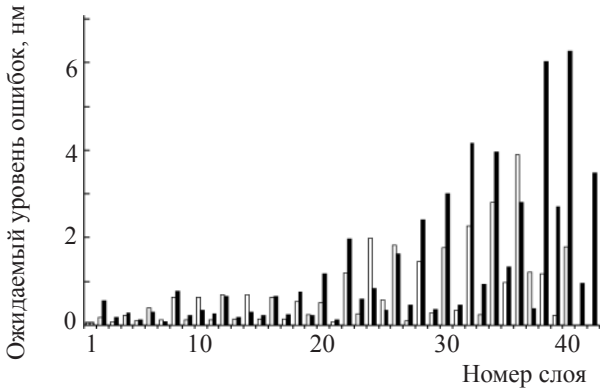



**Рис. 5.** Ожидаемый уровень ошибок в толщинах слоев для двух конструкций горячего зеркала при уровне ошибок измерений коэффициента пропускания 0,05%: светлые столбики – покрытие (г) на рис. 3, темные столбики – покрытие (а) на рис. 3.

ственного анализа ожидаемых погрешностей можно найти в работах [20, 21].

В заключение данного раздела приведем один пример экспериментов по вычислительному производству покрытий. При этом одновременно будет продемонстрирована и возможность резкого улучшения точности контроля напыления за счет только что предложенного принципиально нового метода монохроматического мониторинга толщин слоев покрытия [22].

Общая схема экспериментов по вычислительному производству описана в работах [23, 24]. В ходе этих экспериментов моделируются основные факторы, приводящие к ошибкам в толщинах слоев. Эти факторы могут относиться как к самому процессу напыления, так и к процессу контроля толщин слоев. К первым относятся флуктуации скорости осаждения тонкопленочных материалов, отличия показателей преломления слоев в напылительной камере от их теоретических значений, неточности во времени прерывания процесса напыления и т. п. В случае оптического контроля напыления ко второй группе относятся такие факторы, как случайные шумы при измерении коэффициента пропускания покрытия и изменение калибровки спектрофотометра во времени.

В ходе вычислительного эксперимента, результаты которого отражены на рис. 6 и 7, помимо шумов коэффициента пропускания того же уровня, что и ранее, моделировались также флуктуации скорости напыления обоих материалов с высоким и низким показателями преломления, флуктуации высокого показателя преломления внутри камеры и ошибки в моментах прерывания напыления слоев. Средние скорости напыления обоих материалов были взяты равными 0,4 нм/с, а их среднеквадратичные флуктуации – 0,1 нм/с. Среднеквадратичные флуктуации высокого показателя преломления были равны 0,02 (данное значение можно считать верхней оценкой возможного уровня этих флуктуаций). Среднеквадратичная ошибка в моментах прерывания напыления составила 0,5 с.

Как следует из рис. 6 и 7, несмотря на большое число дополнительных факторов, приводящих к ошибкам напыления, уровень ошибок в толщинах слоев таков (см. рис. 6), что он практически не ухудшает спектральных свойств зеркала (см. рис. 7). Отличие коэффициента пропускания от 100% в спектральной области 400–700 нм связано в основном с отражением от обратной стороны подложки.

Следует обратить внимание на то, что характер погрешностей в толщинах слоев на рис. 6 и 5 принципиально различен. Это связано не только с тем, что на рис. 6 представлены ошибки одного конкретного вычислительного эксперимента, а на рис. 5 –

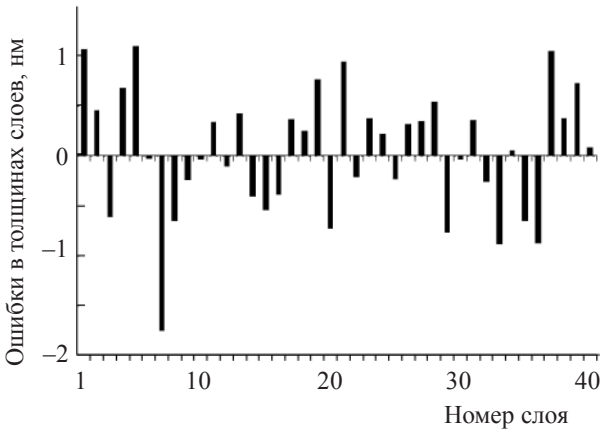



**Рис. 6.** Ошибки в толщинах слоев 40-слойного горячего зеркала (профиль показателя преломления (г) на рис. 3), полученного в ходе вычислительного эксперимента по напылению.

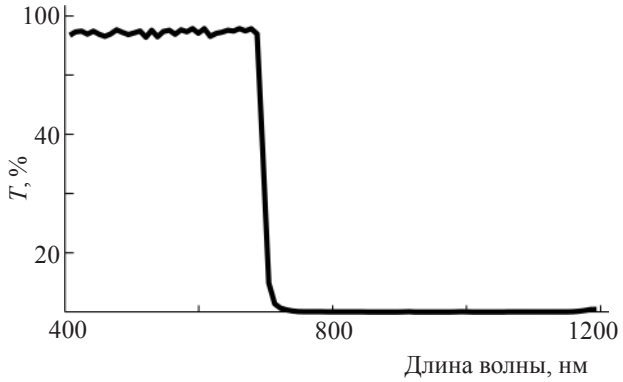



**Рис. 7.** Коэффициент пропускания 40-слойного горячего зеркала, полученного в ходе вычислительного эксперимента по напылению (снижение коэффициента пропускания в области 400–700 нм по сравнению с рис. 4 связано в основном с отражением от обратной стороны подложки).

среднеквадратичные погрешности, оцениваемые статистически. Самое главное то, что на рис. 5 наблюдается резкий рост уровня погрешностей с увеличением номера напыляемого слоя, а на рис. 6 этот эффект полностью отсутствует. Последнее связано с тем, что в ходе обсуждаемого вычислительного эксперимента была применена принципиально новая стратегия монохроматического мониторинга [22], позволяющая полностью исключить эффект накопления ошибок с ростом числа напыленных слоев.

## 5. Заключение

Открытие метода игольчатых вариаций и его дальнейшее развитие привели к перевороту в проектировании многослойных оптических покрытий.

В настоящее время основная проблема состоит не в получении какой-либо теоретической конструкции покрытия с требуемыми спектральными свойствами, а в надежной практической реализации этой конструкции, при которой принципиально не ухудшаются теоретические спектральные свойства. В связи с этим огромное значение приобретает выбор наиболее перспективной в практическом плане конструкции из большого числа возможных решений задачи проектирования. Несомненно, что дальнейшее развитие методов проектирования покрытий пойдет по пути автоматизации той схемы получения множественных решений и отбора наиболее перспективных из них, которая была изложена в разделе 3 данной работы.

Предпроизводственный анализ конструкций покрытий также будет играть все бóльшую роль. Вычислительные напылительные эксперименты неизмеримо дешевле, чем реальные напылительные эксперименты. Кроме того, они могут быть проведены в десятки и сотни раз быстрее, чем эксперименты в реальной напылительной камере. Автоматизация вычислительных экспериментов, позволяющая статистически оценивать результаты большого числа экспериментов и сравнивать различные конструкции, также сулит большие перспективы.

*ЛИТЕРАТУРА*


1. *Dobrowolski J.A.* Numerical methods for optical thin films // Optics and Photonics News. 1997. № 6. P. 25–33.
2. *Tikhonravov A.V.* Design of Optical Coatings // Optical Interference Coatings / Ed. N. Kaiser and H.K. Pulker. Springer-Verlag, 2003. P. 81–104.
3. *Тихонравов А.В.* О методе синтеза оптических покрытий, использующем необходимые условия оптимальности // Вестник МГУ, сер. Физика, астрономия. 1982. Т. 23. С. 91–93.
4. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., DeBell G.* Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings // Appl. Opt. 1996. V. 35. P. 5493–5508.
5. *Furman S., Tikhonravov A.V.* Basics of Optics of Multilayer Systems // Edition Frontieres, Gif-sur-Yvette, 1992. 242 c.
6. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V., Kokarev M.A.* Key role of the coating total optical thickness in solving design problems // Proc. SPIE. 2004. V. 5250. P. 312–321.
7. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., DeBell G.* Optical coating design approaches based on the needle optimization technique // Appl. Opt. 2007. V. 46. P. 704–710.
8. *Dobrowolski J.A.* Comprison of the Fourier transform and flip-flop thin-film synthesis methods // Appl. Opt. 1986. V. 33. P. 1966–1972.
9. *Dobrowolski J.A., Lowe D.* Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms // Appl. Opt. 1978. V. 17. P. 3039–3050.
10. *Verly P.G., Dobrowolski J.A., Wild W., Burton R.* Synthesis of highrejection filters with the Fourier transform method // Appl. Opt. 1989. V. 28. P. 2864–2875.
11. *Verly P.G., Dobrowolski J.A.* Iterative correction process for optical thin film synthesis with the Fourier transform method // Appl. Opt. 1990. V. 29. P. 3672–3684.
12. *Tikhonravov A.V., Sullivan B.T., Borisova M.V.* Discrete Fourier-transform approach to inhomogeneous layer synthesis // Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 5142–5150.
13. *Tikhonravov A.V.* Some theoretical aspects of thin film optics and their applications // Appl. Opt. 1993. V. 32. P. 5417–5426.
14. *Свешников А.Г., Тихонравов А.В., Трубецков М.К.* Нелокальный метод оптимизации многослойных оптических систем // Математическое моделирование. 1995. Т. 7. № 8. С. 105–127.
15. *Sveshnikov A.G., Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* Modern methods for synthesizing multilayer optical coating // J. of Communications Technology and Electronics. 2000. V. 45. Suppl. 2. P. 151–159.
16. *Тихонравов А.В., Трубецков М.К.* К вопросу о разработке и изготовлении узкополосных телекоммуникационных фильтров // Изв. Академии наук. Серия физическая. 2001. Т. 65. № 12. С. 1712–1717.
17. *Тихонравов А.В., Трубецков М.К.* Новые задачи многослойной оптики // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. № 2. С. 1–8.
18. *Тихонов А.Н., Тихонравов А.В., Трубецков М.К.* Методы оптимизации второго порядка в задачах синтеза многослойных покрытий // Ж. выч. мат. и мат. физ. 1993. Т. 33. С. 1339–1352.
19. *Pervak V., Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Naumov S., Krausz F., Apolonski A.* 1.5-octave chirped mirror for pulse compression down to sub-3 fs // Appl. Phys. B. 2007. V. 87. P. 5–12.
20. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V.* Investigation of the effect of accumulation of thickness errors in optical coating production using broadband optical monitoring // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 7026–7034.
21. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K., Amotchkina T.V.* Statistical approach to choosing a strategy of monochromatic monitoring of optical coating production // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 7863–7870.
22. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* Elimination of cumulative effect of thickness errors in monochromatic monitoring of optical coating production: theory // Appl. Opt. 2007. V. 46. P. 2084–2090.
23. *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* Computational manufacturing as a bridge between design and production // Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 6877–6884.
24. *Tikhonravov A.V.* Virtual deposition plant // Proc. SPIE. 2005. V. 5870. P. 108–120.

25. *Тихонравов А.В., Трубецков М.К.* Стабилизация вычислительных алгоритмов определения свойств тонкопленочных оптических покрытий // Вычислительные методы и программирование. 2005. Т. 6. Р. 109–117.

26. *Zoeller A., Boos M., Goetzelmann R., Hagedorn H., Klug W.* Substantial progress in optical monitoring by intermittent measurement technique // Proc. SPIE. 2005. V. 5963. P. 105–113.