

К. т. н. Я. М. БОНДАРЧУК, Г. А. ПЕТРОВСКАЯ,
к. т. н. В. Я. ТАТАРИН

Украина, г. Львов, Научно-промышленная фирма «Протон»;
Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: bond@proton.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
17.02 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ПОЛИХРОМНЫХ ЛАЗЕРОВ

Рассматривается физическая модель резонаторных зеркал с графическим и математическим аппаратом обоснования процесса их проектирования с учетом поглощения в тонкопленочных покрытиях. Обеспечиваются оптимальные параметры зеркал для каждой длины волны генерации.

Развитие современных лазерных технологий, лазерной медицины, экологического мониторинга, систем навигации и т. п. связано с созданием мощных лазеров с широкими спектрами излучения. Газоразрядные лазеры с активными средами Ar^+ , Kr^+ , He-Ne^+ работают, преимущественно, в видимой и прилегающих к ней областях спектра. Значительный уровень мощности таких лазеров за счет полихромности удачно сочетается с присущей для газовых лазеров высокой пространственной однородностью выходного излучения. Многолинейный режим генерации достигается в случае применения широкополосных интерференционных зеркал с максимумом отражения на длине волны λ_0 , которая соответствует середине спектрального диапазона полихромного излучения. При проектировании резонаторных интерференционных зеркал преимущественно используют численные методы [1], в качестве контролируемых параметров синтезированных покрытий используют коэффициенты пропускания (или отражения) на длинах волны линий генерации. Получение максимальной интегральной мощности в таких лазерах возможно лишь при условии обеспечения оптимальных режимов генерации для каждого лазерного перехода. В то же время известно, что для каждой длины волны существует свой коэффициент оптимального пропускания выходного зеркала τ_r . Использование же широкополосных интерференционных зеркал с максимумом отражения в середине спектрального диапазона полихромного излучения не обеспечивает оптимального пропускания для всех длин волн. Кроме того, для многолинейных лазеров необходимо учитывать также диапазонные свойства интерференционных зеркал с точки зрения суммарного поглощения в структуре покрытия, которое имеет минимальное значение на резонансной длине волны λ_0 , а при отклонении от нее на 20–25% возрастает в десятки раз (рис. 1).

Игнорирование специфического характера спектральной зависимости коэффициента поглощения ре-

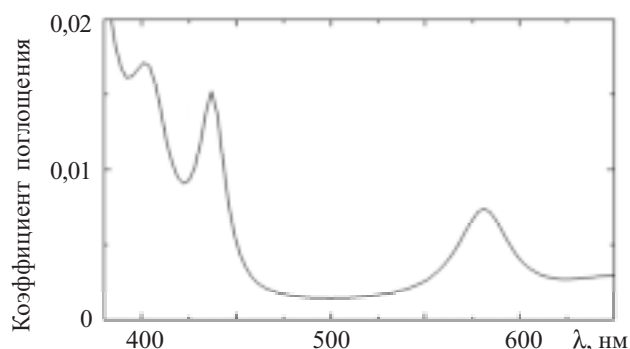


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения пятнадцатислойного интерференционного покрытия $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$ ($\lambda_0=500$ нм)

альных интерференционных зеркал в области высокого отражения приводит к существенному снижению интегральной мощности маломощных лазеров и возникновению внутриврезонаторных термических эффектов в мощных лазерах [2].

Таким образом, поиск новых подходов при проектировании резонаторных зеркал лазеров с широким спектром излучения с учетом диапазонных свойств интерференционных структур является весьма актуальным. Так как эффект поглощения в покрытиях зеркал по-разному влияет на характеристики выходного излучения в маломощных и мощных лазерах, то каждый из случаев рассмотрим отдельно.

Зеркала маломощных лазеров

Известно, что максимальная мощность в полихромных лазерах, в которых усиление незначительно превышает внутриврезонаторные потери, достигается при строгом соблюдении максимального отражения от «глухого» и оптимального пропускания «выходного» зеркала для каждой длины волны интегральной генерации. Значение коэффициента оптимального пропускания выходного зеркала зависит не только от коэффициента усиления, но и от общих потерь в резонаторе для данной длины волны. Существенную часть этих потерь составляет поглощение в покрытиях зеркал, величина которого зависит от структуры покрытия и длины волны генерации. В связи с этим при проектировании интерференционных зеркал необходимо обеспечить оптимальное пропускание и минимальное поглощение для каждой длины волны. Исходя из этого, можно обеспечить получение мак-

симальной интегральной мощности маломощных лазеров, если конструктивные параметры зеркал будут соответствовать минимуму целевой функции следующего вида:

для выходного зеркала

$$M = \sum_{i=1}^N (\sqrt{2G_{0i}} - a_i - \tau_i - \sigma)^2, \quad (1)$$

для глухого зеркала

$$M = \sum_{i=1}^N (a_i + \sigma)^2, \quad (2)$$

где G_{0i} — ненасыщенный коэффициент усиления i -го лазерного перехода;

a_i и τ_i — соответственно коэффициенты поглощения и пропускания зеркала для i -го перехода;

σ — слабодисперсионная составляющая внутрирезонаторных потерь (рассеяние лазерного излучения);

N — количество лазерных переходов.

Характерными представителями маломощных полухромных лазеров являются малогабаритные Ag^+ -лазеры с воздушным охлаждением. Длина разрядного промежутка в них не превышает 150 мм (диаметр разрядного канала $d \leq 1$ мм), ток разряда — до 10 А. В моделях таких лазеров реализуются четыре линии генерации излучения видимого диапазона с длиной волны $\lambda_1=476,5$ нм; $\lambda_2=488$ нм; $\lambda_3=496,5$ нм; $\lambda_4=514,5$ нм. Константы, которые определяют величины G_{0i} для лазерных переходов ионизированного аргона, исследованы и определены с достаточной точностью [3]. Коэффициенты оптимального пропускания выходного зеркала для данных длин волн были определены экспериментально методом калиброванных потерь и соответствуют значениям $\tau_1=0,5-3\%$, $\tau_2=2-4\%$, $\tau_3=0,5-1,5\%$, $\tau_4=1-2\%$. При разработке алгоритма численного проектирования зеркал мы исходили из условий их технологичности, и поэтому в качестве проектных параметров были использованы оптические толщины слоев. Пленкообразующие материалы слоев при этом выбирались из перечня используемых в серийном производстве ZnS, MgF_2 , Na_3AlF_6 , ZrO_2 , HfO_2 , SiO_2 . Программа синтеза была реализована на базе программного продукта Visual Micro Films. Значение σ для данного диапазона излучения принималось равным 0,2%. Проектирование интерференционных покрытий проводилось путем подбора толщины каждого слоя покрытия, при этом учитывались дисперсии показателей преломления n и поглощения k тонкопленочных материалов [4]

$$n^2(\lambda) = a + k^2(\lambda) + \frac{b\lambda^2(\lambda^2 - c^2)}{(\lambda^2 - c^2) + d^2\lambda^2}, \quad (3)$$

$$k(\lambda) = \frac{1}{2n(\lambda)} \frac{bd\lambda^3}{(\lambda^2 - c^2) + d^2\lambda^2}, \quad (4)$$

где a , b , c и d — оптические константы, зависящие от структуры материала. Их значения для выбранных материалов определены экспериментально в [4].

На **рис. 2** представлены зависимости показателя преломления (1) и показателя поглощения (2) мате-

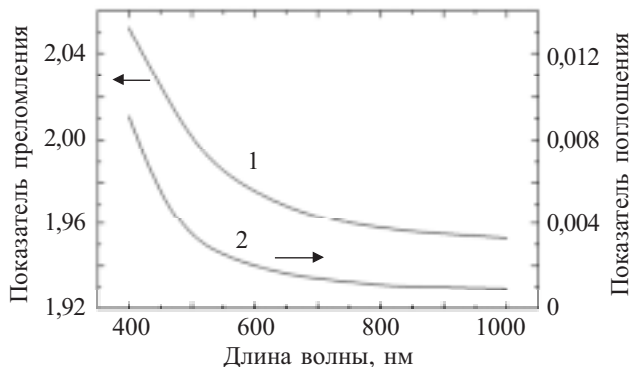


Рис. 2. Дисперсионные зависимости тонкопленочного материала ZrO_2

Таблица 1
Структуры синтезированных покрытий

| Тип зеркала | Тонкопленочная структура | Материал В | Материал Н |
|-------------|-----------------------------|------------|------------|
| Выходное | $S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$ | ZrO_2 | SiO_2 |
| Глухое | $S_0(0,7B; 1,3H)^{13} 0,7B$ | ZrO_2 | SiO_2 |
| Выходное | $S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$ | HfO_2 | SiO_2 |
| Глухое | $S_0(0,7B; 1,3H)^{13} 0,7B$ | HfO_2 | SiO_2 |

риала ZrO_2 . Результаты синтеза показали, что минимальных значений целевых функций (1) и (2) удастся достичь для пар материалов ZrO_2-SiO_2 и HfO_2-SiO_2 . В **табл. 1** приведены структуры оптимальных синтезированных покрытий «глухого» и «выходного» зеркала для резонансной длины волны $\lambda_0=510$ нм.

На **рис. 3** представлены спектральные характеристики пропускания и поглощения синтезированного выходного зеркала $S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$. Зеркала изготовлены по электронно-лучевой вакуумной технологии [5].

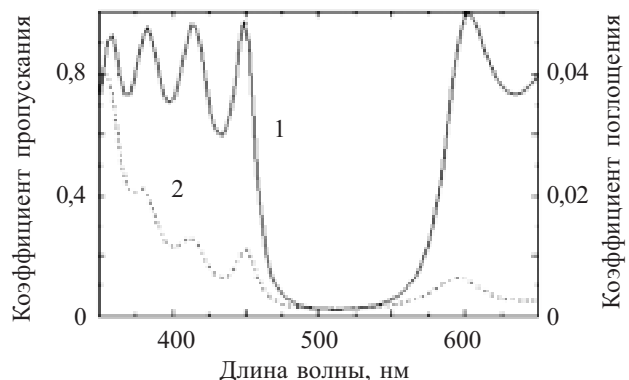


Рис. 3. Спектральные характеристики пропускания (1) и поглощения (2) синтезированного выходного зеркала $S_0(0,7B; 1,3H)^7 0,7B$

Результаты испытаний зеркал в открытых резонаторах были усреднены по трем парам каждого из типов зеркал не менее чем на трех активных элементах и приведены в **табл. 2**.

Результаты испытаний показали увеличение интегральной мощности излучения при использовании синтезированных зеркал в среднем на 50%, что свидетельствует о правильности и эффективности выбран-

Результаты испытаний синтезированных зеркал

| Тип активного элемента | Длина разрядного промежутка, мм | Диаметр разрядного канала, мм | Ток разряда, А | Паспортное значение интегральной мощности, мВт | Достигнутое значение интегральной мощности, мВт |
|------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------|--|---|
| Модель 001 («Мицелла») | 150±1 | 1 ^{-0,1} | 10 | 50 | 75 |
| Модель 002 («Магнум») | 100±1 | 1 ^{-0,1} | 8 | 25 | 38 |

ного пути улучшения основных характеристик выходного излучения маломощных полихромных аргонных лазеров.

Зеркала мощных лазеров

Если в маломощных полихромных лазерах поглощение в зеркалах является определяющим с точки зрения получения максимальной выходной мощности излучения, то в мощных лазерах, в которых усиление значительно превышает потери, поглощением в зеркалах определяются термооптические внутрирезонаторные процессы [2]. Единственным эффективным способом минимизации тепловых потерь до недавнего времени было использование в лазерном производстве в качестве материала подложек зеркал кварцевого оптического стекла. Низкое значение ТКЛР стекол марок КУ-1,2 и КВ обуславливает минимальные термодформации рабочих поверхностей зеркал. Однако создание термосогласованных долговечных вакуумноплотных узлов элементов конструкции мощных газовых лазеров на основе кварцевой оптики и сегодня остается достаточно сложным. Хорошим решением проблемы является использование подложек зеркал из оптического бесцветного стекла и минимизации при этом поглощенной мощности в зеркальных покрытиях. Исходя из этого, тонкопленочная структура, на наш взгляд, должна определяться минимумом оценочного функционала

$$M = \sum_{i=1}^N b_i \left(\frac{G_{0i}}{\tau_i + a_i} - 1 \right)^2 a_i, \quad (5)$$

где b_i — параметр насыщения для i -го лазерного перехода.

При минимальном значении функционала (5) обеспечивается минимальное термическое влияние внутрирезонаторного излучения на характеристики резонатора.

Исходя из констант, которые определяют особенности переходных процессов в моделях лазеров типа ЛГН-402, 404, 406, 502, были синтезированы интерференционные структуры резонаторных зеркал. При проектировании для основных лазерных переходов Ag^+ значения τ_i были определены экспериментально: для 476,5 нм — 2—6%, для 488,0 нм — 4—8%, для 496,5 нм — 2—4%, для 514,5 нм — 2—4%. В качестве проектных параметров в данном случае выбраны оптические толщины слоев интерференционных покрытий. Результаты синтеза для резонансной длины волны $\lambda_0=510$ нм приведены в табл. 3.

Зеркала с тонкопленочными структурами, приведенными в табл. 3, как и зеркала маломощных лазе-

Таблица 3

Сруктуры синтезированных покрытий

| Тип зеркала | Тонкопленочная структура | Материал В | Материал Н |
|-------------|----------------------------|------------------|------------------|
| Выходное | $S_0(0,7B; 1,3H)^{0,7B}$ | ZrO ₂ | SiO ₂ |
| Глухое | $S_0(0,7B; 1,3H)^{1,0,7B}$ | ZrO ₂ | SiO ₂ |
| Выходное | $S_0(0,8B; 1,2H)^{0,8B}$ | HfO ₂ | SiO ₂ |
| Глухое | $S_0(0,8B; 1,2H)^{1,0,8B}$ | HfO ₂ | SiO ₂ |

ров, изготавливались по вакуумной технологии электронно-лучевого осаждения тонких пленок. Распыление материалов ZrO₂, HfO₂, SiO₂ проводилось на установке ВУ-2М. Особенности технологические режимы осаждения и последующая обработка зеркал, отличные от типового технологического процесса, в данном случае не использовались. С полученными зеркалами оптических резонаторов были изготовлены активные элементы ионных лазеров типа ГЛ-303. Стендовые испытания лазеров с данными активными элементами показали полное соответствие пространственных и временных характеристик выходного излучения техническим условиям при увеличении выходной мощности излучения в среднем на 20%.

Таким образом, предложенный способ проектирования зеркал полихромных лазеров позволяет существенно увеличить интегральную мощность излучения, а также уменьшить тепловые потери в резонаторах мощных лазеров. Разработка таких зеркал положила начало серии работ по созданию активных элементов с бесклеевыми вакуумноплотными соединениями, что позволит проводить термодегазирование активных элементов на стадии вакуумирования, а это, в свою очередь, обеспечит достижение абсолютно других, более высоких параметров надежности полихромных газоразрядных лазеров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бондарчук Я. М., Довгий Я. О. Теоретичні й технологичні аспекти синтезу лазерних дзеркал// Фізика і хімія твердого тіла.— 2002.— Т. 3, № 2.— С. 199—214.
2. Бондарчук Я. М., Петровська Г. А. Проектування оптичних резонаторів потужних неперервних лазерів// Вісник НУ «Львівська політехніка», серія Електроніка.— 2002.— № 455.— С. 60—64.
3. Справочник по лазерам. Т. 1 / Под ред. А. М. Прохорова.— М.: Сов. радио, 1981.
4. Петровська Г. А., Редько Т. А. Метод оптимізації дисперсійних характеристик тонкоплівкових оптичних матеріалів// Вісник НУ «Львівська політехніка», серія Електроніка.— 2002.— № 455.— С. 39—44.
5. Бондарчук Я. М. Технологія і обробка оптичних матеріалів.— Львів: Ліга-Прес, 2001.