

УДК 621.373.826 : 681.7.064

Н. Д. Голдина

(Новосибирск)

**ПРОСВЕТЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ  
ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ГАРМОНИК ИЗЛУЧЕНИЯ  
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА**

С помощью метода эквивалентных слоев и численных оптимизационных методов найдены тонкопленочные структуры для просветления нелинейных кристаллов КТР и ЛБО в области генерации двух и трех гармоник твердотельного лазера. Экспериментально изготовлены просветляющие покрытия КТР для двух длин волн на основе диэлектрических материалов  $Y_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $SiO_2$  и просветляющие покрытия ЛБО для двух и трех длин волн на основе тонкопленочных пар  $HfO_2/SiO_2$  и  $ZrO_2/SiO_2$ .

1. Уменьшение коэффициента отражения нелинейных кристаллов до минимально возможной величины в определенных спектральных интервалах определяет успех внутрирезонаторного преобразования гармоник в твердотельных лазерах, особенно малогабаритных с лазерной диодной накачкой. Решение общих задач синтеза просветляющих покрытий рассматривалось в [1], однако для получения удовлетворительных экспериментальных результатов в каждой конкретной задаче приходится заново подбирать оптимальный вариант многослойной структуры. В данной работе рассматривается задача просветления нелинейных кристаллов КТР и ЛБО для двух и трех длин волн твердотельного лазера Nd : YAG.

При конструировании просветляющих покрытий для нелинейных кристаллов КТР и ЛБО были использованы диоксиды гафния, циркония и кремния, удовлетворяющие необходимым требованиям к оптическим потерям и лучевой прочности. Для поиска структуры покрытия применялись оптимизационные методы с последующей корректировкой нестабильности процесса нанесения слоев.

Один из вариантов получения просветляющего покрытия КТР для двух длин волн  $\lambda_1 = 1,06$  и  $\lambda_2 = 0,53$  мкм состоит в нанесении трехслойной комбинации слоев  $S/QQH/A$ , где  $Q$  – четвертьволновый слой;  $H$  – полуволновой слой для длины волны  $\lambda_k = 2\lambda_1\lambda_2/(\lambda_1 + \lambda_2)$ ;  $S$  – подложка;  $A$  – воздух. Структура  $QQH$  может обеспечить необходимое решение для заданного показателя преломления подложки при соответствующем выборе показателей преломления слоев. Так как эти расчетные значения трудно реализовать практически вследствие недостатка материалов, то с помощью метода эквивалентных слоев их можно свести к показателям преломления извест-

ных материалов. Здесь в качестве материала с низким показателем преломления  $n_l$  использовался  $\text{SiO}_2$ , а для среднего слоя с высоким показателем преломления  $n_H$  рассчитывался симметричный эквивалентный трехслойник  $\text{SiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$  по методу, предложенному в [2]. В результате получилась трехслойная структура с общей толщиной порядка длины волны для  $\lambda_k = 0,71$  мкм.

Еще один вариант просветляющего покрытия для  $\lambda_1 : \lambda_2 = 1 : 2$  может быть осуществлен на основе структуры из двух материалов, имеющих нужный показатель преломления, с толщинами, кратными четверти контрольной длины волны  $\lambda_k$ . Расчет дает близкие к нулю коэффициенты отражения от поверхности КТР для структуры  $S/QQQH/A$ , где первым слоем на подложке является слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а вторым –  $\text{SiO}_2$ . Однако при изготовлении покрытия возникают серьезные трудности, связанные с нестабильностью показателя преломления  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Большие возможности предоставляют тонкопленочные структуры с нечетвертьволновыми толщинами, где можно использовать любую пару материалов. Для поиска толщин необходимо применять численные оптимизационные методы. В данной работе такие задачи решались для двухволнового просветления  $\lambda_1 : \lambda_2 = 1 : 2$  кристаллов КТР и кристаллов ЛБО и трехволнового просветления кристаллов ЛБО с соотношением длин волн  $1 : 2 : 3$ . Был составлен алгоритм для минимизации соответствующей целевой функции для  $N$ -слойной системы из двух материалов с чередующимися  $n_H$  и  $n_l$ .

2. Покрытия наносились на поверхности кристаллов площадью  $3 \times 3$  мм и одновременно на «паразитки» (контрольные образцы)  $7 \times 7$  мм. Зависимость показателей преломления кристаллов от длины волны взята из справочных данных [3] в виде дисперсионных соотношений Зельмейера – Коши или в виде таблицы. Показатели преломления выбирались из табличных данных в соответствии с условиями фазового синхронизма для эффективного взаимодействия оптических гармоник в двусосных кристаллах.

Покрытия изготавливались на установке ВУ-2М (Беларусь) электронно-лучевым испарением диоксидов гафния, циркония и кремния. Экспериментальные условия поддерживались на одном уровне так, чтобы технологические параметры (температура нагрева подложек, остаточное давление в

КТР			
$\lambda$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
1,064	1,7377	1,7453	1,8297
0,532	1,7780	1,7886	1,8887
ЛБО			
$\lambda$	$n_x$	$n_y$	$n_z$
1,064	1,5656	1,5905	1,6055
0,532	1,5785	1,6065	1,6212
0,355	1,5973	1,6286	1,6444

камере, скорость конденсации) оставались постоянными. Толщина слоев контролировалась фотометрически одновременно для двух длин волн путем измерения коэффициента отражения  $R$  на одной длине волны и коэффициента пропускания  $T$  – на другой. Количество слоев составляло 3–5, толщины слоев были разными. Заранее рассчитывались зависимости  $R$  и  $T$  тонких пленок от толщины для выбранных длин волн с возможными отклонениями показателей преломления от расчетных. Предпринимались попытки учета изменений оптических толщин слоев при извлечении образцов из вакуумной камеры на воздух. Так как на окончательный результат может заметно влиять изменение дисперсии  $n$  и неоднородности показателей преломления по толщине слоя  $\Delta n$ , то заранее напылялись слои различных материалов с разными толщинами с целью определения  $n$  и  $\Delta n$ . Анализ проводился спектрофотометрическим методом [4], а затем полученные данные учитывались в расчетах с целью дополнительной оптимизации характеристик.

Коэффициенты отражения и пропускания готовых покрытий измерялись на спектрофотометре "Shimadzu UV-3101PC". Отражение измерялось с помощью специальной приставки вблизи нормали относительно референтной поверхности кварца. В полученные данные для  $R$  затем вводилась поправка на дисперсию кварца по формулам Зельмейера – Коши [5].

На рис. 1–6 приведено несколько вариантов просветления нелинейных кристаллов. Получено качественное совпадение расчетных и экспериментальных кривых. Наибольшие расхождения с расчетом наблюдаются в точках минимумов. Окончательно малые коэффициенты отражения покрытий поверхностей кристаллов измерялись на лазерном стенде для длин волн генерирующих гармоник. Следует заметить, что на лазерном стенде для  $\lambda = 1,06$  мкм коэффициенты отражения кристаллов были ниже, чем на спектрофотометре. Для лучших образцов получены значения  $R < 0,1\%$ . Расхождение можно объяснить систематическими ошибками при измерениях на спектрофотометре из-за наклона световых пучков при установках эталона и образца, влиянием обратной стороны подложки и рассеянием на поверхности «паразиток» и приборных диафрагмах. При измерениях малых значений  $R$  была проведена калибровка фотодиода путем измерения квадрата величины коэффициента отражения  $R^2 = (0,035)^2 = 0,0012 = 0,12\%$  от чистой поверхности кварца и приняты меры для предотвращения засветки фотодиода от рассеяния на окружающих деталях.

3. Просветление для одной длины волны не представляет сложной проблемы, и экспериментально можно получить значения для коэффициентов отражения  $R < 0,1\%$  для любой подложки. Для двух длин волн даже при отличном расчетном варианте, дающем нулевые значения с точностью до сотых долей процента, в процессе экспериментального изготовления небольшие отклонения в показателях преломления и толщинах слоев дают некомпенсируемое возрастание  $R$ . Поэтому необходимы точный контроль толщины и воспроизводимость значений  $n$  при напылении каждого отдельного слоя.

Нами опробовано много вариантов просветляющих покрытий для двух длин волн 1,06 и 0,53 мкм на кристаллах КТР. На рис. 1 приведены расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости коэффициента отражения «паразиток» КТР для варианта  $S/QQH/A$  ( $\lambda_k = 707$  нм,  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ ), где средний слой с  $n_H = 1,68$  заменен трехслойником LHL с толщинами 0,305/0,388/0,305. Вертикальными линиями отмечены значения длин волн, для которых

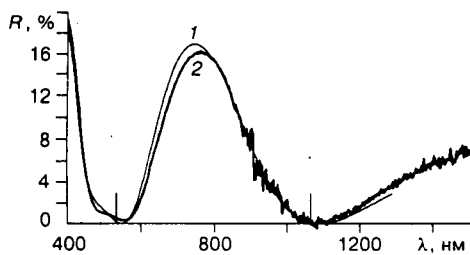


Рис. 1

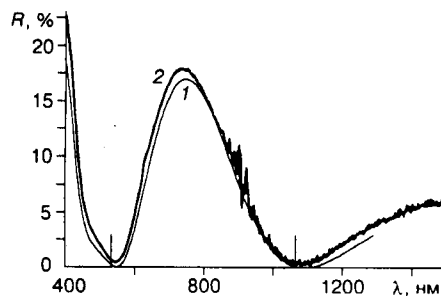


Рис. 2

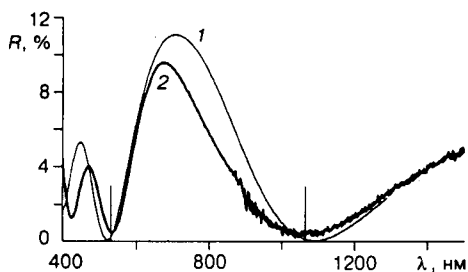


Рис. 3

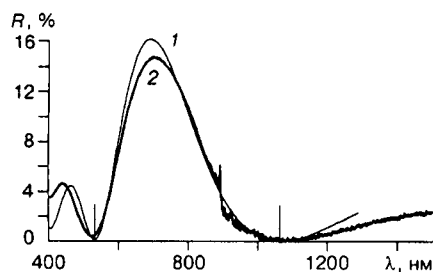


Рис. 4

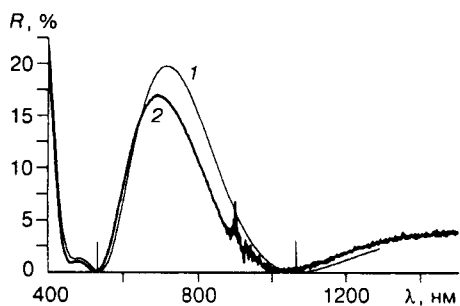


Рис. 5

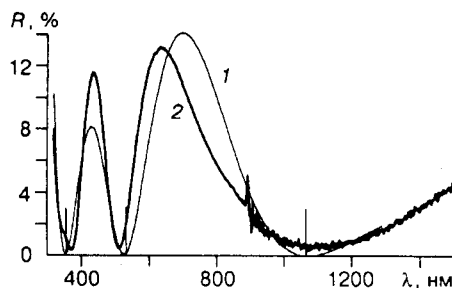


Рис. 6

рассчитывается просветление. На рис. 2 показан тот же вариант для другого высокопреломляющего материала –  $ZrO_2$ . На рис. 3 экспериментальные значения минимумов  $R$  сильно отклоняются от расчетного варианта  $SIQQHIA(\lambda_k = 707 \text{ нм})$  для  $Al_2O_3/SiO_2$  из-за нестабильности слоев  $Al_2O_3$ . Очень хорошие результаты были получены для четырехслойного покрытия  $Y_2O_3/SiO_2$  (см. рис. 4). Толщины слоев находились численным методом. Здесь при измерении на лазерном стенде лучшие образцы имели  $R < 0,1 \%$  для  $1,064 \text{ мкм}$  и  $R < 0,2 \%$  для  $0,532 \text{ мкм}$ .

На рис. 5 показана спектральная зависимость коэффициента отражения кристалла ЛБО для двух длин волн, четырехслойный вариант ( $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ ) просветления найден численным оптимизационным методом. Полная оптическая толщина многослойника равна 0,75 мкм. Экспериментальная зависимость хорошо совпадает с расчетом. На рис. 6 приведены расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости пятислойного просветляющего покрытия ( $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ ) для трех  $\lambda$  (1,064, 0,532 и 0,355 мкм) для кристалла ЛБО. Общая оптическая толщина пятислойника равна 0,65 мкм. Как видно из рисунка, для всех трех длин волн наблюдаются отклонения от расчетных значений в минимумах  $R \sim 0,5\%$ , хотя измерения на лазерном стенде образцов лазерных кристаллов ЛБО дали  $R \sim 0,25\%$  для 1,064 мкм.

4. С помощью метода эквивалентных слоев и численных оптимизационных методов найдены тонкопленочные структуры для просветления нелинейных кристаллов КТР и ЛБО в области генерации двух и трех гармоник твердотельного лазера. Экспериментально изготовлены просветляющие покрытия КТР для двух  $\lambda$  на основе двух диэлектрических материалов ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$  в качестве материала с  $n_H$  и  $\text{SiO}_2$  в качестве материала с  $n_L$ ) и просветляющие покрытия кристаллов ЛБО для двух и трех  $\lambda$  на основе тонкопленочных пар  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$ . Получено качественное согласие с расчетными кривыми, хотя в точках минимумов требуется дальнейшая работа по выяснению причин отклонений от расчетных значений  $R$  просветляющих покрытий с очень малым остаточным коэффициентом отражения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев П. П., Мешков Б. Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение. 1987.
2. Ohmer M. Design of three-layer equivalent films // JOSA. 1978. 68. N 1. P. 137.
3. Crystal Guide. China: CASIX Inc., 1996. P. 18.
4. Borgogno J. P., Lazarides B., Pelletier E. Automatic determination of the optical constants of inhomogeneous thin films // Appl. Opt. 1982. 21. N 22. P. 4020.
5. American Institute of Physics Handbook. N. Y., 1972. P. 6.

Поступила в редакцию 30 января 1998 г.