

УДК 535.345.67

Л.А. Губанова, Д.Н. Перевозкин
**МЕТОД РАСЧЁТА КОНСТРУКЦИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПЛАСТИН-
ПОЛЯРИЗАТОРОВ**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Интерференционные пластины-поляризаторы получили широкое распространение в оптическом приборостроении, в частности, они используются в электрооптических затворах импульсных твердотельных лазеров. Стандартная равнотолщинная конструкция интерференционных слоёв пластин-поляризаторов характеризуется узкой полосой рабочего спектрального диапазона, что не вполне соответствует современным требованиям. Предложен метод расчёта технологичных конструкций широкополосных интерференционных пластин-поляризаторов, основанный на выравнивании толщин слоёв, входящих в неравнотолщинные конструкции, синтезированные с использованием широко распространённого компьютерного программного обеспечения для расчёта интерференционных оптических покрытий.

Ключевые слова: оптический интерференционный поляризатор, поляризационный контраст, пористое многослойное интерференционное покрытие, OptiLayer, оптимизация.

Введение

К настоящему времени пластины-поляризаторы получили широкое распространение в оптическом приборостроении, особенно в лазерной технике, и изучению их уделено достаточно много внимания. Принцип действия многослойных интерференционных пластин-поляризаторов основан на различии в ширине спектральной области высокого отражения, которое характерно для различных компонент поляризации при наклонном падении излучения на четвертьволновое интерференционное зеркало [1]. ОСТ 3-1901-95 для области применения «Поляризаторы пластинчатого типа, устанавливаемые в оптических системах под углом $(57\pm 4)^\circ$ к падающему излучению, предназначенные для поляризации лазерного излучения для длины волны 1060 нм» рекомендует конструкцию с условным обозначением $\text{P} \text{---} \text{V.006}$:

$$\text{P}-(\text{HВ})^n\text{H}-\text{ОС}, n = 9 \text{ и } 11,$$

где П – подложка,

Н – четвертьволновый слой, изготовленный из диоксида кремния SiO_2 ,

В - четвертьволновый слой, изготовленный из оксида циркония ZrO_2 ,

ОС – окружающая среда (воздух).

Оптическая толщина рассматриваемых слоёв определяется как $nd = 0.25 \lambda_0$, где λ_0 - референтная длина волны.

Для уменьшения пропускания s-компоненты оптическую толщину последнего слоя диоксида кремния следует выбрать равной $\lambda_0/8$.

Эта конструкция проста и удобна в практической реализации. Размещение слоёв, сформированных из диоксида кремния на подложке и на границе с окружающей средой, позволяет повысить лазерную прочность покрытия [2]. Расчётные спектральные характеристики такого стандартного 23-слойного покрытия показаны на Рисунке 1 (T_p – пропускание p- компоненты поляризации, T_s – пропускание s- компоненты поляризации). При расчёте использовались следующие значения показателей преломления:

- 1,507 (подложка, изготовлена из оптического стекла марки К108Л, длина волны 1064 нм);
- 1,950 (плёнообразующий материал оксид циркония);
- 1,450 (плёнообразующий материал диоксид кремния).

Расчётное распределение p- компоненты электромагнитного поля в слоях – плавное, спадающее к подложке и к внешней части покрытия, без резких пиков в отдельных слоях (Рисунок 2). $|E|^2$ – квадрат напряжённости электромагнитного поля лазерного излучения. Расчёт выполнен встроенными средствами программы OptiLayer (меню Analysis, команда Field).

Основной недостаток данной конструкции – малая ширина спектральной области, в которой T_p имеет значения более 98%. Для широко распространённой длины волны лазерного излучения 1064 нм эта ширина составляет менее 10 нм. Сужение рабочего диапазона наблюдается, когда количество слоёв в составе покрытия увеличивается, что необходимо для получения контраста поляризатора (то есть отношения T_p/T_s) более 200:1.

Замена оксида циркония на плёнообразующий материал с более высоким показателем преломления (например, оксид титана или оксид тантала) может обеспечить контрастность поляризатора до 500:1 без увеличения количества слоёв. Однако это может привести к снижению лазерной прочности покрытия, так как оксид циркония обладает наиболее высокой лучевой прочностью среди материалов, входящих в перечень плёнообразующих материалов, имеющих высокий коэффициент преломления и используемых для изготовления многослойных интерференционных оптических покрытий [3].

Узкий рабочий спектральный диапазон рассматриваемых покрытий приводит к необходимости обеспечивать отклонение спектральной характеристики реально изготовленного покрытия от расчётной спектральной характеристики в пределах 0,5%, а также к необходимости точно выставлять пластину-поляризатор по углу в лазерном устройстве. Ещё более серьёзной проблемой, связанной с узостью рабочего спектрального диапазона, может стать дрейф (нестабильность во времени) спектральных характеристик покрытия: для пористых многослойных покрытий они «плавают» в пределах около 1% от первоначального положения в зависимости от

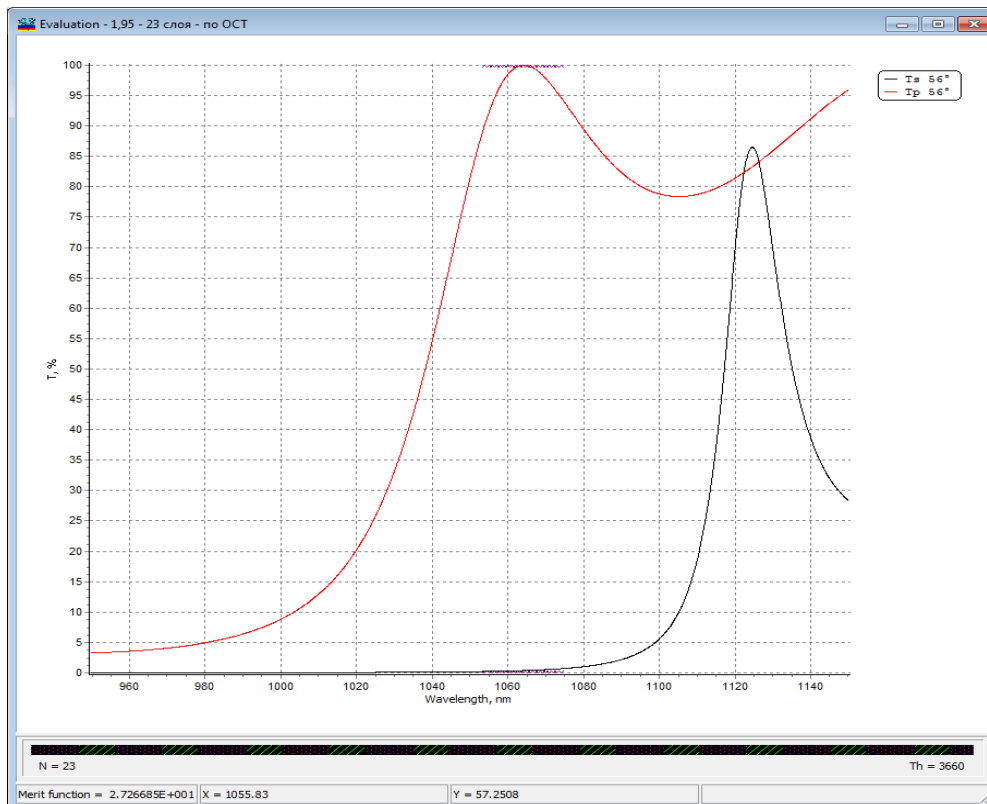


Рисунок 1 - Спектральные характеристики стандартного 23-слойного поляризационного покрытия.

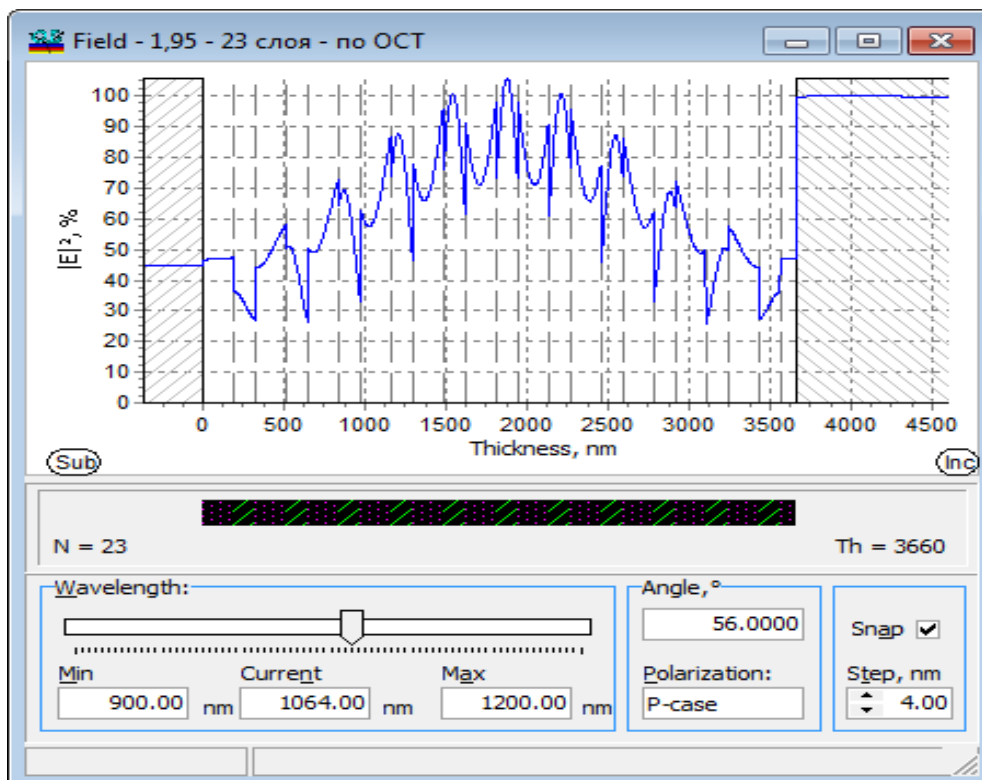


Рисунок 2 - Распределение электромагнитного поля в слоях стандартного 23-слойного поляризационного покрытия.

влажности окружающей среды. То есть если пластину-поляризатор, имеющую максимальную контрастность на длине волны 1064 нм, поместить во внутренний осушенный и герметизированный объём лазерного излучателя, с течением времени пористое покрытие «отдаст» влагу и её спектральные характеристики T_p и T_s сместятся в коротковолновую область приблизительно на 10 нм. Это приведёт (см. Рисунок 1) к падению пропускания р- компоненты поляризации со 100% до 95% и уменьшению контраста с 200:1 до 100:1.

Проблема дрейфа спектральных характеристик пластин-поляризаторов может быть решена путём получения плотных (не пористых) плёнок методами распыления плёнкообразующих веществ в вакууме: ионного, магнетронного или термического с ионным ассистированием [4]. Коэффициенты преломления плотных плёнок близки к коэффициентам преломления монокристаллических веществ и не зависят от параметров окружающей среды, в частности, от влажности. Скорость осаждения плотных плёнок, однако, невелика (порядка 0,1 нм/с), и время нанесения многослойного поляризационного покрытия может составить более одного рабочего дня, что практически неприемлемо.

Поскольку стандартная конструкция поляризационного покрытия, как показано выше, не полностью отвечает требованиям высокопроизводительного изготовления пластин-поляризаторов с $T_p > 98\%$ и контрастом 200:1 и более, различные исследователи и производители высококачественных поляризаторов использовали другие конструкции, позволяющие расширить рабочий спектральный диапазон поляризующего покрытия. В том числе - равнотолщинные с несколькими сглаживающими слоями [5]; состоящих из нескольких равнотолщинных [6] или неравнотолщинных [7] блоков (стеков). Оптимальный выбор системы слоёв для широкополосной интерференционной пластины-поляризатора зависит от конкретных технических требований к покрытию, технических характеристик вакуумного оборудования и комплекса технико-экономических условий [8].

Метод расчёта конструкции широкополосных поляризационных покрытий

Учитывая многообразие предлагаемых конструкций широкополосных поляризационных покрытий и отсутствие чётких критериев, позволяющих уверенно выбирать ту или конструкцию в каждом конкретном случае, задачу поиска метода синтеза условно оптимальной конструкции поляризатора, имеющей относительно широкий рабочий спектральный диапазон (20 нм и более), в котором обеспечиваются значения T_p более 98% и контраста более 200:1, можно считать актуальной. Метод должен учитывать требования к покрытиям по лазерной прочности: резкие пики интенсивности электромагнитного поля в слоях на рабочей длине волны (длине волны

лазерного излучения) должны отсутствовать. Синтезированные с помощью искомого метода конструкции должны быть максимально технологичными: устойчивыми к отклонениям в оптических слоях изготовленных систем от расчётных, иметь небольшое число сглаживающих слоёв (слоёв, чья оптическая толщина отличается от одной четверти референтной длины волны).

Целью исследования, представленного в настоящей статье, является поиск оптимального метода расчёта конструкций на основе анализа результатов компьютерного синтеза (ПО OptiLayer) различных поляризационных покрытий.

Обычным инструментом для синтеза многослойных интерференционных покрытий, в том числе поляризационных, в настоящее время является специальное программное обеспечение. При проведении данной работы использовался получивший широкое распространение пакет программ OptiLayer (разработчики - российские специалисты). С математической точки зрения задача синтеза интерференционных покрытий относится к классу обратных задач, характеризующихся тем, что они могут иметь (и, как правило, имеют) множественные решения. Это проявляется в том, что конструкции покрытий, полученные в результате компьютерного расчёта, определяются не только алгоритмом и параметрами синтеза, но и начальным приближением, с которого начинаются вычисления. В качестве начального приближения целесообразно выбирать хорошо известные стандартные конструкции, про которые заранее известно, что они близки к оптимальным, и затем варьировать толщины лишь небольшого количества слоёв для получения нужного результата. Для получения нужных спектральных характеристик различных блокирующих фильтров, а также пластин-поляризаторов, можно взять в качестве начального приближения многослойную четвертьволновую (равнотолщинную) систему слоёв, а затем варьировать толщины нескольких слоёв (так называемых сглаживающих), ближайших к подложке и ближайших к окружающей среде [5]. Другой подход – проводить синтез покрытия «с нуля» (использовать в качестве начального приближения, например, одиночный слой), то есть вообще не опираться на известные решения. Затем, исходя из конкретной задачи, выбирать наиболее подходящий результат из нескольких вариантов, синтезированных программой [7]. В результате такого синтеза, как правило, получаются полностью неравнотолщинные покрытия (покрытия, в которых все слои имеют различные оптические толщины). Современное вакуумное оборудование может обеспечивать контроль толщин слоёв в процессе напыления многослойных неравнотолщинных покрытий, поэтому такой подход к решению расчётной задачи вполне возможен.

В ходе поиска метода синтеза конструкций широкополосных поляризаторов был использован третий подход. С помощью стандартных проце-

дур программного обеспечения OptiLayer «с нуля» проводился синтез поляризующих покрытий с различными коэффициентами преломления материалов, из которых изготавливаются слои, и количеством слоёв. Во всех случаях угол падения излучения на покрытие (α) был выбран равным 56^0 , показатель преломления материала, из которого изготовлена подложка (n_s) был выбран равным 1,507, показатель преломления материала, из которого изготовлены слои с низким показателем преломления (n_L) был выбран равным 1,450. В качестве целевой функции была выбрана сумма интегрального отклонения T_p от 100% и интегрального отклонения T_s от 0% в рабочем спектральном диапазоне.

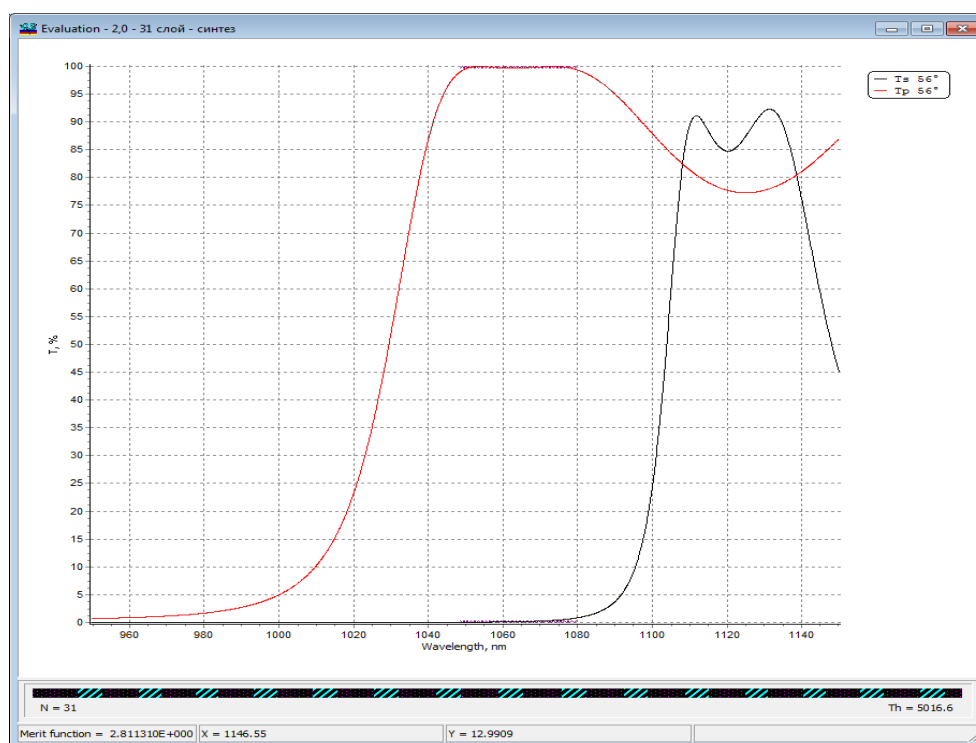


Рисунок 3- Спектральные характеристики синтезированной 31-слоистой конструкции при угле падения излучения 56^0 .

Ширина рабочего спектрального диапазона (или, иными словами, ширина целевой функции) варьировалась в диапазоне (5...40) нм, показатель преломления слоёв с высоким показателем преломления (n_H) - в диапазоне значений (1,8...2,4), количество слоёв – в диапазоне от 17 до 41. Ближайшими к подложке и окружающей среде выбирались слои, изготовленные из материала с низким показателем преломления. Всего было синтезировано около 100 конструкций покрытий.

Типичной для множества полученных решений стала конструкция, синтезированная при $n_H = 2,0$, количестве слоёв равном 31 и ширине целевой функции 30 нм. В спектральном диапазоне (1049...1068) нм $T_p > 99\%$, $T_s < 0,2\%$ (рис.3). Конструкция симметричная, оптические толщины слоёв

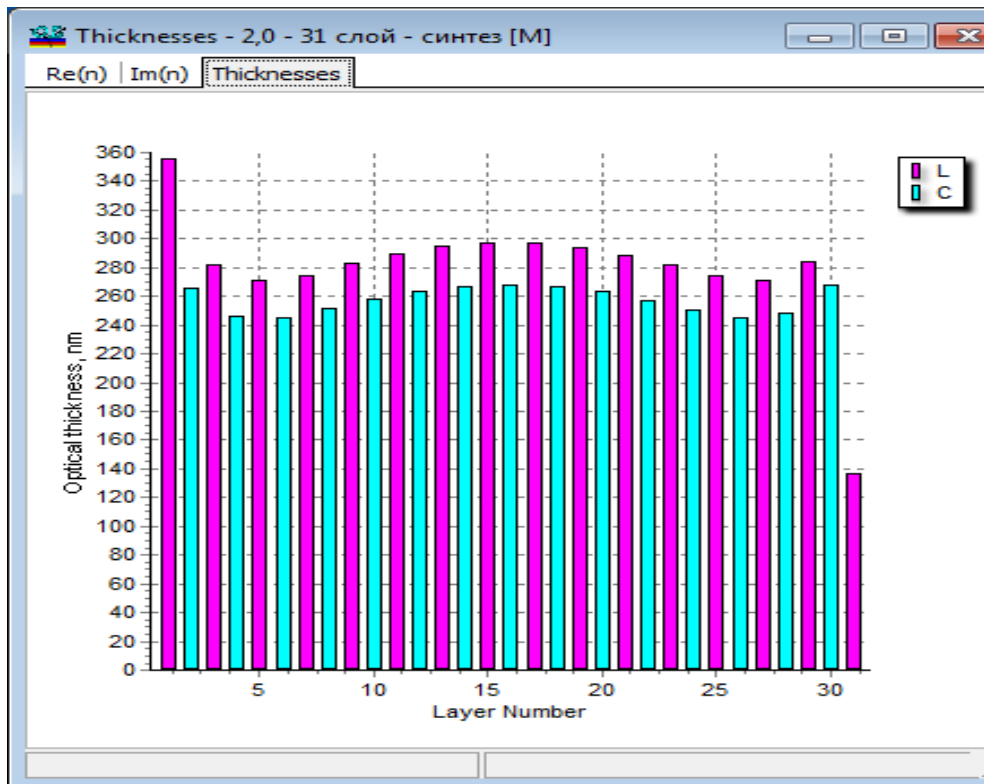


Рисунок 4 - Оптические толщины синтезированного 31-слойного поляризаторного покрытия.

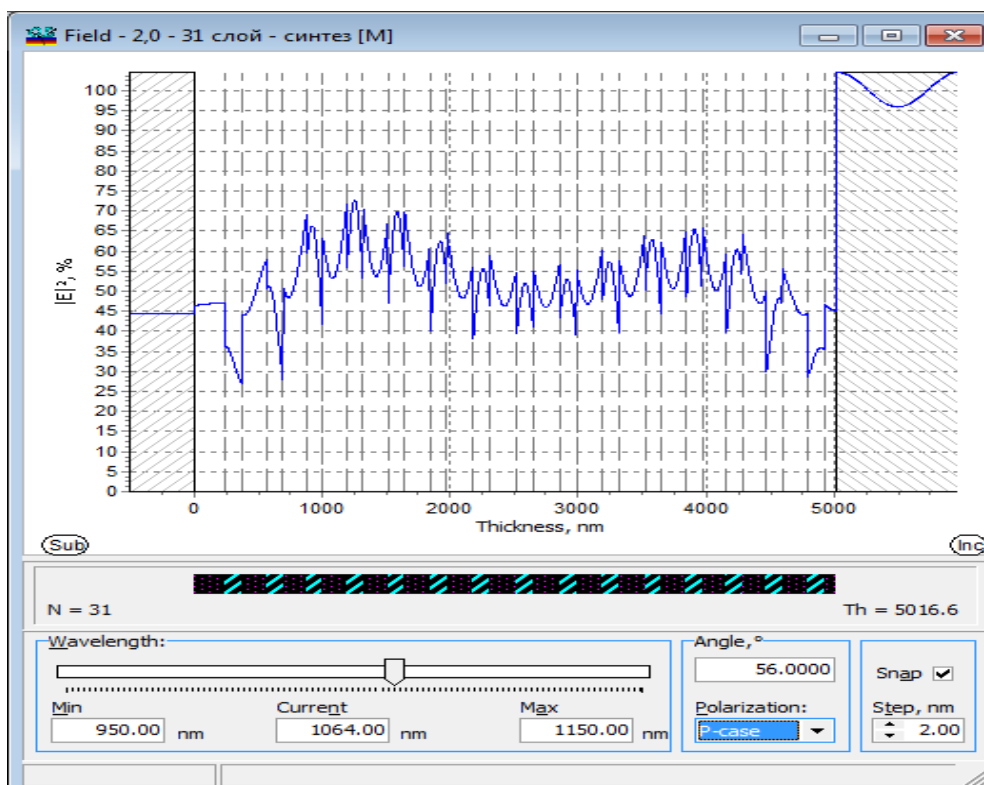


Рисунок 5 - Распределение электромагнитного поля в слоях синтезированного 31-слойного поляризаторного покрытия.

меняются плавно, волнообразно, в начальных и конечных слоях покрытия имеются минимумы оптической толщины слоёв (рис. 4). Распределение электромагнитного поля в слоях плавное, без резких пиков (рис. 5).

Поскольку эта конструкция включает в себя слои, толщины которых не равны и не кратны четверти рабочей длины волны, она не вполне удобна для практической реализации. Поэтому, с учётом того, что оптические толщины слоёв изменяются в незначительных пределах (около 20% для каждого слоя из одного плёнообразующего материала), была предпринята попытка «вручную» подобрать новую конструкцию. Эта новая конструкция должна быть близкой к программно синтезированной, но в ней большинство слоёв должны иметь одинаковую оптическую толщину; при этом спектральные характеристики не должны существенно ухудшиться.

В результате было установлено, что если перейти к равнотолщинной конструкции, имеющей всего лишь два одинаковых сглаживающих слоя уменьшенной оптической толщины (близких к $2/3$ от оптической толщины остальных слоёв), расположенных в тех местах, где у синтезированной конструкции находятся слои с минимальной оптической толщиной (рис. 7), то спектральные характеристики покрытия (рис. 6) изменятся незначительно: спектральный диапазон, в котором $T_P > 99\%$, $T_S < 0,2\%$, сузится с (1049...1068) нм до (1049...1064) нм. Распределение электромагнитного поля в слоях для такой оптимизированной конструкции даже несколько лучше (более равномерное по слоям), чем для исходной синтезированной системы слоёв (рис. 8).

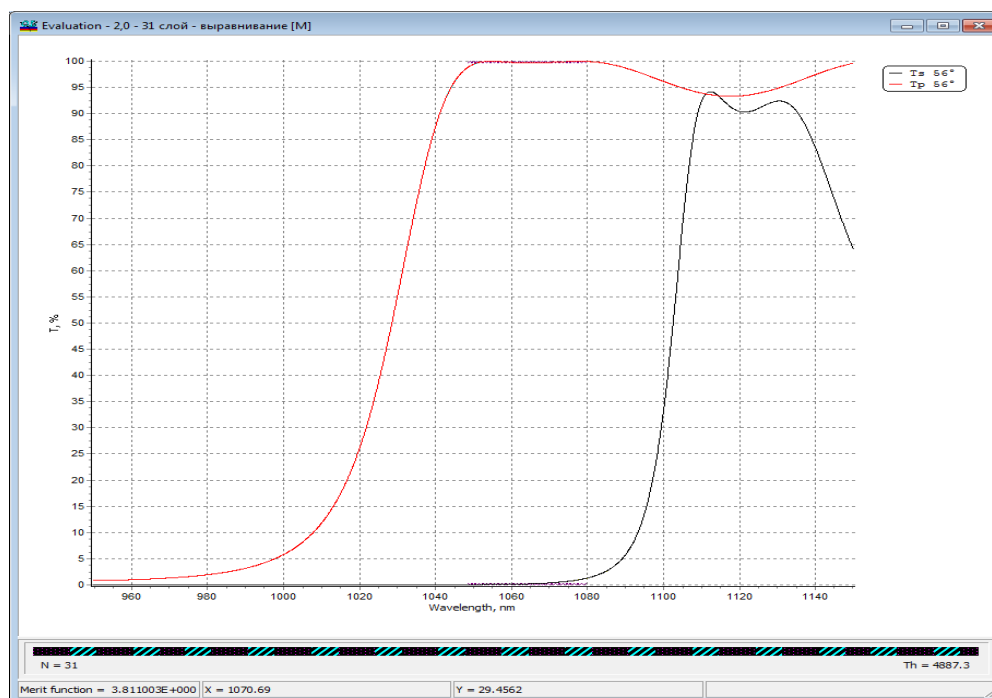


Рисунок 6 - Спектральные характеристики оптимизированной 31-слойной конструкции при угле падения излучения 56° .

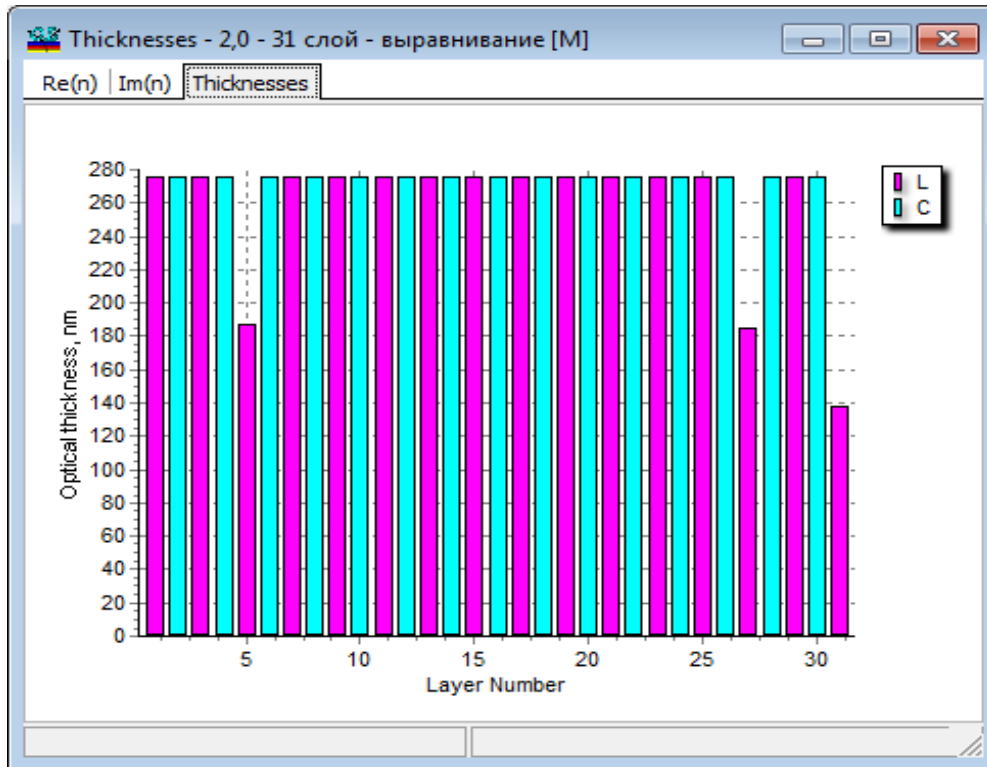


Рисунок 7 - Оптические толщины оптимизированного 31-слойного поляризационного покрытия.

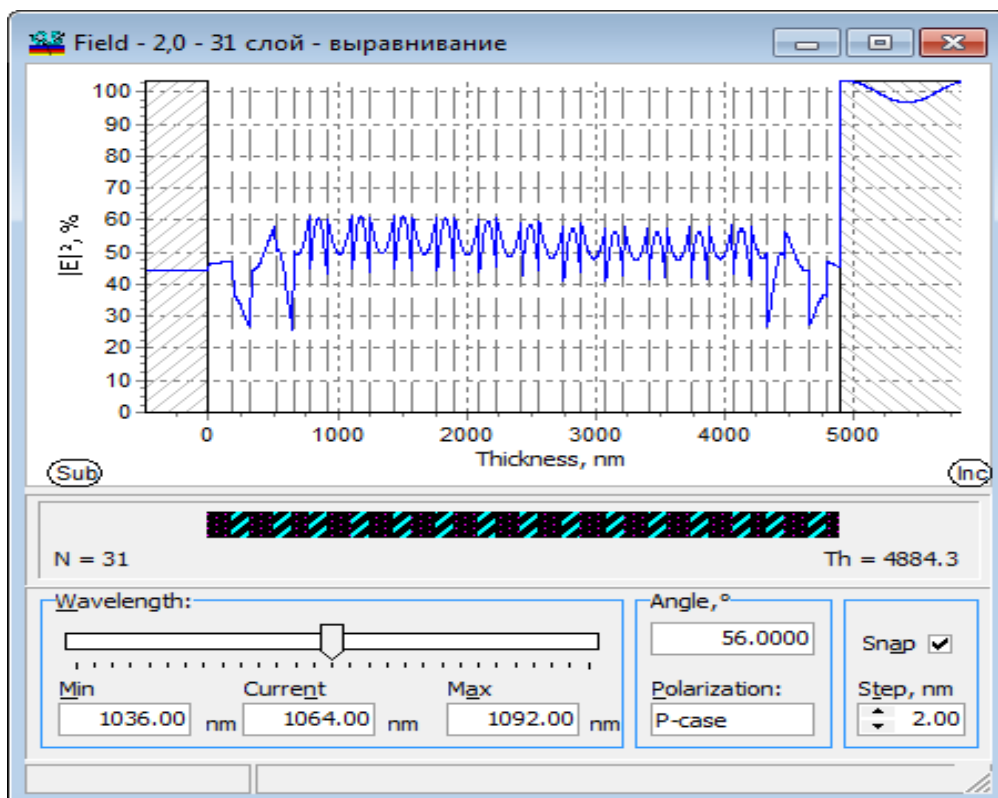


Рисунок 8 - Распределение электромагнитного поля в слоях оптимизированного 31-слойного поляризационного покрытия.

Предварительный анализ устойчивости спектральных характеристик оптимизированного покрытия показал, что ошибка напыления отдельного слоя (равнотолщинного или сглаживающего) до 5% от расчётного значения толщины слоя практически не влияет на спектральные характеристики покрытия. При этом, как и для полностью равнотолщинных покрытий, ошибку в толщине какого-либо слоя можно компенсировать корректировкой толщины следующих слоёв (одного или нескольких): важно, чтобы сумма оптических толщин этих слоёв мало отличалась от расчётной. В этом случае ошибка толщины отдельного слоя может достигать 10%. Суммарная же оптическая толщина всех слоёв покрытия прямо пропорциональна значению рабочей длины волны (т.е. среднему значению длины волны рабочего спектральном диапазоне) и должна отличаться от расчётной не более чем на 0,5%.

Результат исследования

Эффективность описанного выше способа выравнивания системы слоёв поляризационного покрытия была апробирована на нескольких синтезированных ПО OptiLayer конструкциях, существенно отличающихся между собой по количеству слоёв и по показателю преломления материалов, из которых изготавливаются слои, но имеющих визуально похожее на представленное на рис. 4 распределение оптических толщин слоёв. Результаты оказались удовлетворительными: в каждом случае имело место незначительное (не более 25%) сужение спектрального диапазона, где наблюдались высокие значения T_p и поляризационного контраста T_p/T_s .

Таким образом, основываясь на проведённые аналитические исследования, можно рекомендовать следующую методику расчёта конструкции многослойных интерференционных лазерных пластин-поляризаторов:

- 1) Выбрать материал, из которого изготовлена подложка; выбрать плёнообразующие материалы (выбор следует осуществлять с учётом требований по лазерной прочности поляризационного покрытия).
- 2) Определить целевую функцию (в OptiLayer называется Target). Спектральная ширина целевой функции должна быть приблизительно в 2 раза больше, чем рабочий спектральный диапазон.
- 3) Реализовать компьютерный синтез конструкции поляризующего покрытия. Убедиться в том, что характер распределения оптических толщин слоёв синтезированного покрытия близок к представленному на Рисунке 4.
- 4) Определить в синтезированной системе положение двух слоёв с минимальной оптической толщиной, симметрично расположенных относительно середины покрытия.

- 5) В равнотолщинном покрытии с такой же общей оптической толщиной и таким же количеством слоёв, как и в синтезированном покрытии, умножить на $2/3$ оптическую толщину двух слоёв, соответствующих слоям с минимальной оптической толщиной в синтезированном покрытии.
- 6) Провести окончательную коррекцию толщин основных и двух сглаживающих слоёв.

Заключение

Основанный на сочетании компьютерного синтеза и качественного анализа полученных результатов метод расчёта системы интерференционных слоёв пластин-поляризаторов, использующий широко распространённое программное обеспечение для синтеза интерференционных оптических покрытий, даёт удовлетворительные результаты. Применения данного метода исследования может найти своё применение при расчёте различных (не только поляризационных) интерференционных многослойных покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект 16.1651.2017/4.6)

ЛИТЕРАТУРА

1. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия: Учебник Лань. – СПб, 2016. – 268 с.
2. Гаврилов Н.И., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Прилюк О.М., Сергеев С.Н., Серов Р.В., Фурман Ш.А., Яновский В.П., Введенский В.Д. Прочные тонкопленочные интерференционные поляризаторы для мощных лазеров // Квантовая электроника – 1983. – Т.10. – №9. – С. 1914-1916.
3. Браунс Б. и др. Оптические покрытия для мощных неодимовых лазеров // Квантовая электроника. – 1988. - №10 – с. 2051-2058.
4. Граф И., Шахт М. Оптика мощных лазеров: улучшение свойств диэлектрических покрытий // Фотоника. – 2010. – №4. – С. 14-17.
5. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Сабиров Р.С., Михайлов А.В. Интерференционные поляризующие покрытия // Оптический журнал. – 2002. – Т.69. – №8. – С. 28-35.
6. Monga J.C., Gupta P.D., Bhawalkar D.D. Design of multiwavelength thin-film polarizers for high-power laser systems // Applied optics. – 1984. – Vol. 23. – №20. – P. 3538-3540.
7. Zhang J. et al. Broadband thin-film polarizers for high-power laser systems // Applied optics. – 2013. – Vol. 52. – №7. – P. 1512-1516.
8. Zhu M. et al. Theoretical and experimental research on spectral performance and laser induced damage of Brewster's thin film polarizers // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – №15. – P. 6884-6888.

L.A. Gubanova, D.N. Perevozkin
**THE DESIGN CALCULATION METHOD OF WIDEBAND
INTERFERENCE LASER PLATES POLARIZERS**
ITMO University, St. Petersburg

The interference plates-polarizers are widely used in optical devices, in particular, they are used in electrooptical Q-switches of pulsed solid-state lasers. The standard all-quarter-wave construction of the interference layers of the polarizer plates is characterized by a narrow band of the working spectral range, which does not fully correspond to modern requirements. A method is proposed for calculating the practically feasible designs of broadband interference polarizer plates, based on the alignment of the thicknesses of the layers included in the non-quarter-wave structures, synthesized using widespread computer software for the calculation of interference optical coatings.

Keywords: optical interference polarizer, polarization contrast, porous multilayer interference coating, OptiLayer, optimization.

REFERENCES

1. Putilin E.S., Gubanova L.A. Opticheskie pokrytiya: Uchebnik Lan'. – SPb, 2016. – p. 268 .
2. Gavrilov N.I., Pashinin P.P., Prokhorov A.M., Prilyuk O.M., Sergeev S.N., Serov R.V., Furman Sh.A., Yanovskiy V.P., Vvedenskiy V.D. Prochnye tonkoplenochnye interferentsionnye polyarizatory dlya moshchnykh lazerov // Kvantovaya elektronika – 1983. – Vol.10. – No.9. – pp. 1914-1916.
3. Brauns B. i dr. Opticheskie pokrytiya dlya moshchnykh neodimovykh lazerov // Kvantovaya elektronika. – 1988. - No.10 – pp. 2051-2058.
4. Graf I., Shakht M. Optika moshchnykh lazerov: uluchshenie svoystv dielektricheskikh pokrytiy // Fotonika. – 2010. – No.4. – pp. 14-17.
5. Gaynutdinov I.S., Nesselov E.A., Sabirov R.S., Mikhaylov A.V. Interferentsionnye polyarizuyushchie pokrytiya // Opticheskiy zhurnal. – 2002. – Vol.69. – №8. – pp. 28-35.
6. Monga J.C., Gupta P.D., Bhawalkar D.D. Design of multiwavelength thin-film polarizers for high-power laser systems // Applied optics. – 1984. – Vol. 23. – No.20. – pp. 3538-3540.
7. Zhang J. et al. Broadband thin-film polarizers for high-power laser systems // Applied optics. – 2013. – Vol. 52. – No.7. – pp. 1512-1516.
8. Zhu M. et al. Theoretical and experimental research on spectral performance and laser induced damage of Brewster's thin film polarizers // Applied Surface Science. – 2011. – Vol. 257. – No.15. – pp. 6884-6888.