

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОШИБОК НАПЫЛЕНИЯ СЛОЕВ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ МНОГОСЛОЙНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ФИЛЬТРА

© 2004 г. С. А. Фетисенков, К. Н. Кривецкий

ООО "Изовак", Минск, Белоруссия

E-mail: fetrl@yandex.ru

Выполнен расчет конструкции интерференционного фильтра для устройств разреженного мультиплексирования по длине волн на основе Nb_2O_5 и SiO_2 . Исследовано влияние ошибок напыления слоев на спектральную характеристику фильтра. Определены максимально чувствительные к ошибкам слои и допустимая погрешность напыления покрытия. Оценены возможности коррекции допущенных ошибок в процессе нанесения интерференционных слоев фильтра. Проведен анализ ошибок напыления полученного экспериментального образца фильтра.

Коды OCIS: 120.3180, 230.4170, 310.6860.

Поступила в редакцию 19.02.2004.

Введение

В области оптоволоконной связи весьма актуальным является вопрос повышения скорости и увеличения объема передачи цифровых данных. Эта задача успешно решается с помощью мультимедийного уплотнения оптических несущих (CWDM) [1–3]. Суть этого метода состоит в том, что m информационных цифровых потоков, переносимых каждый на своей оптической несущей на длине волны λ_m , с помощью специальных устройств оптических мультиплексоров объединяются в один оптический поток $\lambda_1, \dots, \lambda_m$. После чего он вводится в оптическое линейное волокно, входящее в состав оптического кабеля. На приемной стороне проводится обратная операция демультиплексирования.

Мультиплексирование и демультиплексирование спектральных компонентов отдельных сигналов в системах CWDM основано на использовании комбинированных или последовательно расположенных узкополосных фильтров. В частности, для фильтрации применяют тонкопленочные фильтры, волоконные или объемные брэгговские дифракционные решетки, сварные биконические волоконные разветвители, фильтры на основе жидких кристаллов, устройства интегральной оптики (матрицы фазовых волноводных дифракционных решеток или фазары). Данная работа посвящена непосредственно тонкопленочным интерференционным фильтрам для CWDM-устройств (далее CWDM-фильтр). Необходимо отметить, что к оптическим фильтрам такого типа предъявляются высокие требования. Должна обеспечиваться высокая стабильность оптических характеристик CWDM-фильтра в широком диапазоне климатических условий работы. Спектральная характеристика должна удовлетворять следующим требованиям:

центральная длина волны 1551 ± 1 нм (своя для каждого спектрального канала);

ширина полосы пропускания на уровне 0,9 должна составлять 11–13 нм;

волнистость вершины спектральной кривой пропускания не ниже уровня 0,89;

ширина полосы пропускания на уровне 0,003 не более 25 нм.

Теория тонкопленочных интерференционных покрытий подробно изложена в широком спектре литературных источников. Как следует из [4–7], элементарный интерференционный фильтр состоит из двух зеркал, между которыми находится разделительный слой. CWDM-фильтр имеет более сложную структуру, что обусловлено узкой П-образной кривой пропускания.

Материалы и конструкция фильтра

Для расчета и изготовления фильтра в качестве материала с высоким показателем преломления используется Nb_2O_5 ; с низким показателем преломления – SiO_2 . Такие материалы широко распространены в технологиях вакуумного нанесения покрытий и позволяют получать слои хорошего оптического качества, обеспечивающие требуемую адгезию пленки. Одним из наиболее важных качеств выбранных материалов в данном случае является их прозрачность в исследуемом спектральном диапазоне.

Показатели преломления окислов: 2,16 Nb_2O_5 и 1,46 SiO_2 .

Подложкой для разрабатываемого фильтра служит широко распространенное стекло К8 с показателем преломления 1,52.

Расчет и анализ интерференционного покрытия CWDM-фильтра произведен с помощью специализированной программы "Multi Layer" (ML). Данная

программа разработана Институтом оптико-электронных технологий (Санкт-Петербург) в 1992 г. Также расчет осуществлялся посредством программы "Opti Layer" [8, 9].

В результате поисков оптимального варианта конструкции фильтра при выполнении требований к его спектральной характеристике получена следующая последовательность из 82 слоев:

$$1,35L + 0,3H + H + L + H + L + H + L + 4H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + \\ + L + H + L + 2H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + 4H + \\ + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + 2H + L + H + L + H + \\ + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + 4H + L + H + L + H + L + H + G,$$

где L – слой из материала с низким показателем преломления с оптической толщиной, равной $\lambda/4$; H – слой из материала с высоким показателем преломления с такой же оптической толщиной; G – подложка.

Как видно из приведенной формулы, CWDM-фильтр состоит из 5 последовательно напыленных фильтров с разделительными слоями $4H$, $2H$, $4H$, $2H$, $4H$. Два последних слоя $1,35L + 0,3H$ выполняют роль просветления, с помощью которого окончательно формируется спектральная характеристика CWDM-фильтра.

Определение критических слоев и допустимой погрешности напыления фильтра

Критическими слоями считаются те слои покрытия, которые оказывают наиболее сильное влияние на форму спектральной характеристики. Другими словами, это наиболее чувствительные слои, в которых даже минимальная ошибка приводит к недопустимому искажению спектральной кривой.

Определение таких слоев проводится путем анализа значений производных dR/dh_i , характеризующих скорость изменения коэффициента отражения R покрытия в зависимости от изменения толщины i -го слоя h_i . Значения таких производных рассчитаны с помощью вышеупомянутой программы ML.

Очевидно, что наиболее чувствительным слоем будет тот слой, для которого показатель dR/dh_i окажется максимальным. Анализируя зависимость значений производных от номера слоя, несложно заметить тенденцию увеличения параметра dR/dh_i по мере приближения к разделительным слоям. Значит, можно сделать вывод о том, что ошибки в толщинах при напылении разделительных слоев будут оказывать максимальное влияние на спектральную

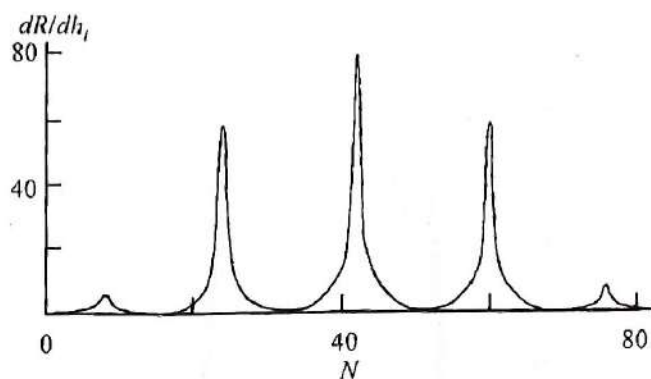


Рис. 1. Зависимость dR/dh_i от номера слоя CWDM-фильтра.

характеристику. Видно также и то, что прилегающие к разделительному слою имеют достаточно высокие значения производных. Это явление играет положительную роль в процессе напыления фильтра, если принять во внимание то, что ошибки, допущенные в разделительном слое, можно компенсировать, изменяя толщины последующих слоев.

Для исследуемого светофильтра критическим является 43-й разделительный слой ($dR/dh_i = 78,806$). Зависимость dR/dh_i от номера слоя N представлена на рис. 1.

Для определения допустимой погрешности необходимо выяснить величину ошибки в критических слоях, которая приведет к недопустимому искажению спектральной характеристики. Для этого нужно вносить некоторую погрешность в значение толщины определенного слоя и наблюдать за изменениями формы кривой пропускания. Такие исследования требуется проводить в отношении самого чувствительного слоя. Допустимая ошибка, определенная в этом случае, будет допустима и для любого другого слоя данной конструкции.

Предположим, что при напылении 43-го слоя возникла ошибка, которая составляет 0,01% от расчетной толщины (при этом погрешности предыдущих слоев не учитываются). Здесь имеется в виду оптическая толщина слоя. Из приведенной выше конструкции покрытия видно, что 0,01% от толщины исследуемого слоя ($4H$) будет составлять $0,0004H$. Допустим, процесс напыления был остановлен позже, чем нужно, т. е. рассмотрим случай слой + ошибка. Для моделирования такой ситуации в конструкцию фильтра внесем следующее изменение:

$$1,35L + 0,3H + H + L + H + L + H + L + 4H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + \\ + H + L + 2H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + 4,0004H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + H + L + 2H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + 4H + L + \\ + H + L + H + L + H + G.$$

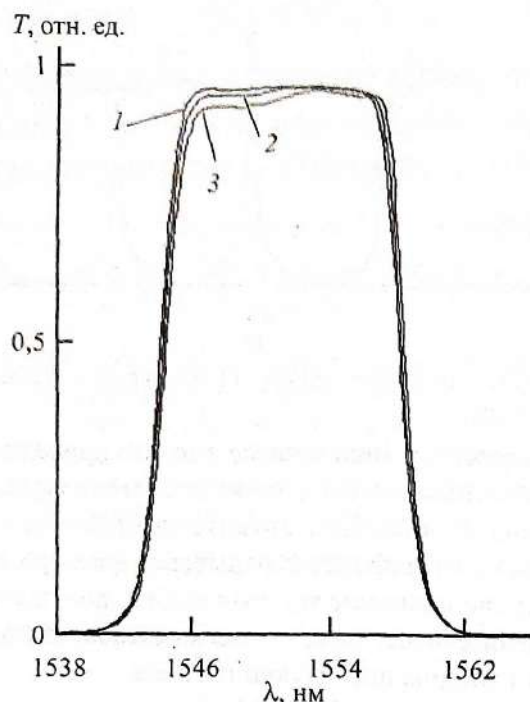


Рис. 2. Спектры пропускания CWDM-фильтра с учетом ошибок в критическом слое (примечания в тексте).

Рассматриваемой конструкции соответствует кривая 1 на рис. 2. Видно, что спектр пропускания 1 совсем незначительно отклонился от расчетной спектральной характеристики. Таким образом, можно сделать вывод о том, что даже для самого чувствительного слоя покрытия ошибка в 0,01% является несущественной и не выводит характеристики фильтра из поля допусков.

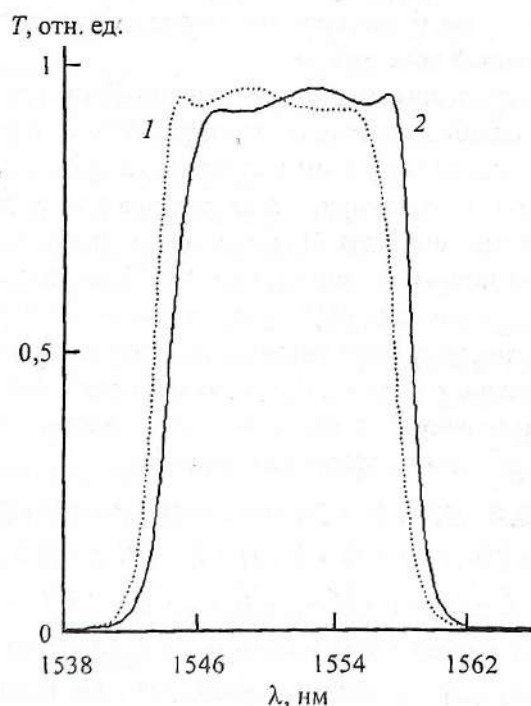


Рис. 3. Спектры пропускания CWDM-фильтра с учетом недопустимой погрешности в критическом слое. 1 – недонапыленный слой, 2 – перенапыленный слой.

Далее проводится аналогичная процедура, но с увеличением вносимых погрешностей. Ошибке, равной 0,05%, соответствует кривая 2 на рис. 2. Здесь ширина полосы пропускания на уровне 0,9 составляет 11,5 нм, что удовлетворяет заданным требованиям. Не возникло также и недопустимых провалов в верхней части кривой. Значит, погрешность в 0,05% допустима.

Кривая 3 на рис. 2 демонстрирует искажения, которые возникают при перенапылении слоя на 0,1%. Ширина полосы пропускания на уровне 0,9 составляет 11,2 нм. Провал спектральной характеристики не достигает предельного уровня, а нижняя часть кривой незначительно отличается от расчетной, как и в предыдущих экспериментах. Следовательно, рассматриваемую погрешность можно считать допустимой. Однако уже при возникновении ошибки, составляющей 0,15% от расчетной толщины, спектральная характеристика выходит за рамки требований. Конструкция покрытия в этом случае

$$1,35L + 0,3H + H + L + H + L + H + L + 4H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + 2H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + \\ + H + L + H + L + H + L + H + L + 4,006H + L + H + \\ + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + \\ + L + H + L + 2H + L + H + L + H + L + H + L + H + \\ + L + H + L + H + L + H + L + H + L + 4H + L + H + \\ + L + H + L + H + G.$$

Теперь ширина полосы пропускания на уровне 0,9 составляет 10,8 нм, что ниже допустимого значения. Несмотря на то что остальные параметры фильтра остаются в пределах допуска, погрешность, равная 0,15%, является недопустимой. На рис. 3 показаны кривые пропускания исследуемого фильтра, которые получены с учетом погрешности в 0,15%. Кривая 1 соответствует недонапыленному слою; кривая 2 – перенапыленному (ширина полосы пропускания на уровне 0,9 составляет 10,9 нм).

В результате проведенных исследований с достаточной степенью точности можно сделать вывод о том, что допустимая погрешность напыления слоев CWDM-фильтра составляет 0,1% от расчетной толщины напыляемого слоя.

Анализ ошибок напыления слоев CWDM-фильтра

Экспериментальный образец CWDM-фильтра был получен на установке IzoMod (разработка фирмы "Изовак"). Метод напыления – ионно-лучевое распыление материалов Si и Nb в смеси газов O_2 и Ar.

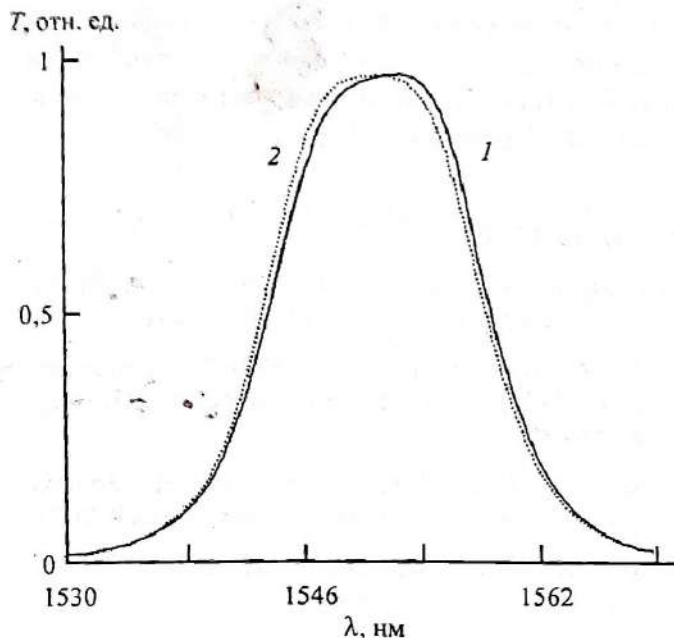


Рис. 4. Спектры пропускания CWDM-фильтра после нанесения 31-го слоя. 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Анализ ошибок напыления слоев исследуемого покрытия проводится по спектрам пропускания, которые зарегистрированы после нанесения каждого слоя с помощью спектроанализатора Advantest Q8384.

По ряду технических причин требуемую точность напыления разделительных слоев обеспечить не представляется возможным. В ходе эксперимента выявлена еще одна трудность достижения заданных параметров CWDM-фильтра. Она заключается в том, что ошибка, допущенная в разделительном слое, может быть выявлена только после напыления нескольких последующих слоев. Другими словами, несмотря на допущенную ошибку, кривая пропускания сохраняет свою симметричность относительно центральной длины волны в процессе нанесения нескольких последующих слоев.

Эксперимент показывает, что первый фильтр из 13 слоев напылен "идеально". Но это не означает отсутствия ошибки в 7-м – разделительном слое. Данное явление обусловлено тем, что погрешность напыления одиночного интерференционного фильтра может достигать 10%, и при этом спектральная характеристика сохраняет свою симметричность, но смещается центральная длина волны покрытия.

В ходе эксперимента первая ошибка выявляется лишь при формировании 31-го слоя. Будем считать, что данное искажение кривой – это результат погрешности напыления 23-го разделительного слоя. Вид спектра пропускания покрытия после нанесения 31-го слоя (рис. 4, кривая 1) значительно отличается от расчетной кривой 2. Путем моделирования искажения кривой на ЭВМ определено, что ошибка в 23-м слое составляет 0,1% от расчетной

толщины. Такая погрешность допустима при изготовлении CWDM-фильтра. Однако полное покрытие содержит 5 разделительных слоев, каждый из которых будет вносить свою ошибку. Накопленная ошибка неизбежно приведет к недопустимым искажениям спектральной характеристики. Поэтому необходимо рассматривать возможность исправления ошибок последующими слоями. При этом необходимо помнить о том, что слоями каждого следующего фильтра можно исправить лишь ошибку, допущенную в этом фильтре.

Теоретически ошибку 23-го слоя можно исправить, если 31-й слой напылить на 6% тоньше, чем он должен быть по расчету. Скорректированная спектральная кривая, соответствующая данному слою, полностью совпадает с идеальной, как показано на рис. 5. Конструкция покрытия в таком случае

$$0,94H + L + H + L + H + L + H + L + 2,002H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + H + L + 4H + L + H + L + H + L + H + G.$$

Однако, несмотря на теоретическую возможность корректировки, на практике не удалось добиться полного устранения рассматриваемой ошибки. Поэтому все регистрируемые далее спектральные характеристики не соответствуют расчетным.

При анализе экспериментально полученных спектров пропускания при напылении следующих слоев покрытия выявлено, что ошибка 41-го разделительного слоя проявляется лишь при напылении 49-го. Эту погрешность также можно скомпенсировать. Но вклад ошибки 23-го слоя остается, т. е. кривую пропускания уже невозможно привести к расчетному виду.

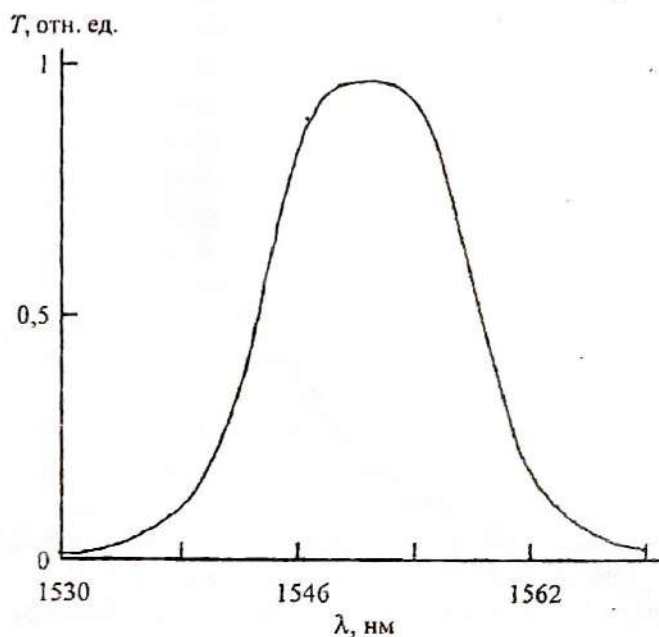


Рис. 5. Спектр пропускания CWDM-фильтра после нанесения 31-го слоя с учетом корректировки.

Дальнейшее исследование процесса напыления покрытия проводится по такой же схеме с учетом ошибок следующих критических слоев и накопленных ошибок.

Заключение

Из проведенного анализа видно, что погрешность нанесения разделительных слоев неизбежна. Но ошибки не являются критическими, если их рассматривать каждую в отдельности. К тому же существует возможность коррекции данных ошибок. Очевидно однако и то, что получить спектральную характеристику CWDM-фильтра идеальной формы невозможно, поскольку неисправленные ошибки накапливаются в процессе нанесения покрытия.

Эксперимент показал, что теоретические расчеты справедливы и одиночная ошибка в критических слоях, составляющая 0,1%, допустима. При этом следует отметить, что для того чтобы проконтролировать необходимую оптическую толщину слоя и вовремя остановить процесс напыления, точность оптического контроля должна соответствовать погрешности не больше 0,1%. При напылении разделительного слоя сигнал коэффициента пропускания покрытия имеет значение 5,5%, изменение сигнала пропускания – 18%. В нашем случае точность (отношение сигнал/шум) оптического контроля была недостаточна для определения момента окончания напыления разделительных слоев фильтра, поэто-

му напыление разделительных и ближайших к ним слоев проводилось с помощью кварцевого метода контроля (прибор кварцевого контроля толщины "Микрон-5", разработка фирмы "Изовак").

ЛИТЕРАТУРА

1. Складов О.К. Современные волоконно-оптические системы передачи. М.: СОЛОН-Р, 2001. 240 с.
2. Pan J.J., Zhou Feng Qing, Zhou Ming. Thin films improve DWDM devices // Laser Focus World. 2002. May. P. 111–113.
3. Sappey A., Huang P. An alternative DWDM technology emerges // Europhotonics. 2002. February/March. P. 29–31.
4. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.
5. Хасца Г. Физика тонких пленок. Т. 2 / Под ред. Хасца Г., Франкомба М. М.: Мир, 1967. 396 с.
6. Хасца Г. Физика тонких пленок. Т. 8 / Под ред. Хасца Г., Франкомба М. М.: Мир, 1967. 396 с.
7. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977. 264 с.
8. Thelen A., Tikhonravov A.V. et al. Results of Optical Interference Coatings 2001 Meeting Design Contest, in Optical Interference Coatings // JSA Technical Digest. Washington: OSA, 2001. P. TuC1-1–TuC1-3.
9. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. Automated design of WDM filters, in Optical Interference Coatings // JSA Technical Digest. Washington: OSA, 2001. P. WD3-1–WD3-3.