

用 FDTD 和传输线法设计光滤波器

李正斌 冯恩信 傅君眉

西安交通大学电信学院微波与光通信研究所

邮编 710049

摘要：

本文用 FDTD 方法和传输线方法分析了多层光学薄膜的滤波特征，给出了无耗情况下薄膜参数满足的条件。为用于光的交叉连接利于集成，利用光波导的等效参数等效均匀层的参数，从而得到一种新的滤波器结构。

一、引言

随着通信用户的增加和业务种类的扩大，基于光纤媒质的通信技术向波分复用和密集波分复用的方向发展。目前国外已有通信容量大于 100G 的波分复用试验平台出现，最终目标是实现可交换的全光网络。随着阵列波导光栅 (Arrayed Waveguide Grating—AWG) 的出现，波分复用网络中可实现光在波长级的交换，即在主干网、交换网及接入网中引入光的波长级交叉连接。但在该连接过程中，由于工艺等原因，同时引入了串扰。该串扰分带内串扰和带间串扰，其中带内串扰是由带间串扰在光网络中传输时经一复杂过程产生的，它具有干涉和累加效应。若不对其控制，即使在误码率为 10^{-9} bits 时，经过一段时间后（一年）整个光通信系统将趋于瘫痪。在光接入网中，采用波分复用方式连接时，也要考虑相邻波长信道之间在分用后的串扰，尤其是采用密集波分复用给许多用户提供业务时，波长信道之间的串扰是人们关心的主要参数之一。国内外的学者根据串扰产生与传输特性，采用通过抑制每一级光交叉连接产生的带间串扰来间接抑制带内串扰。基于此，目前采用的光学多层薄膜是实现窄带滤波压制串扰较理想的器件之一。另一方面，最新文献表明在大容量波分复用光通信系统中，将系统的各种组件如阵列光源、复用/解复用器、检测器等集成在一起是使整个系统性能稳定的主要措施。因此，大容量波分复用系统的每一级光的交叉连接器（如 AWG）的滤波器也须利于集成。在本文中，我们用时域有限差分 (Finite Difference in Time Domain—FDTD) 和传输线法分析多层光学薄膜的滤波原理，推出利于集成的光波导滤波器的原理和结构。

二、基本原理

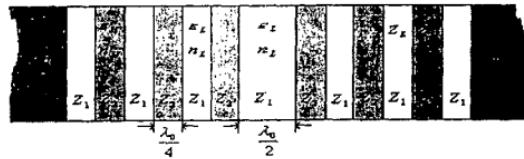


图 1 干涉滤波结构

光通信中采用波分复用方式时，在信号下光路节点以及进行波长级的交叉连接的节点上需要对信号进行滤波对串扰进行压制。通常采用的滤波方法之一是用如上图 (1) 所示的干涉滤波片。其结构组成是：由波阻抗为 Z_{C_1} 和 Z_{C_2} 的透明介质组成滤波器的输入端和输出端，中间是一组由波阻抗、介电常数或折射率为 Z_1, ϵ_L, n_L 和 Z_2, ϵ_H, n_H (综合层) 交替

并在左边相反排列组成的多层高反射膜。其中间层的厚度为中心频率光的半波长，其余层均为四分之一波长。从光学的角度来看，当复色光自左向右通过上述结构时，由于干涉作用，不同波长的光有的通过干涉而加强，而有的波长的光因干涉而相消，所以多色光线通过干涉后就只有特定波长的光了，从而起到滤波的作用。即当单层薄膜的光学厚度为某一特定波长的一半时，不管膜层的折射率如何，该波长的光都能完全通过（反射率为 $R = 0$ ），就象这个膜层不存在一样，但对其他波长的光却没有这个结论。实际上可以把它看成是一法布里-珀罗干涉仪。下面我们用 FDTD 时域有限差分法（FDTD）和传输线法分析光波在上述结构中的传输过程及达到高透射率所要满足的条件。

2.1 用 FDTD 方法模拟波的传播

FDTD 方法是基于麦克斯韦方程的数值模拟方法。我们用有差别的网格剖分分别对中心波长载波信道及相邻载波信道模拟波在上述结构的传播，证实波的干涉特性。有差别的网格剖分的原则是：由于在光波分复用中，一般采用 1310 和 1550 纳米窗口，其在折射率大于 1 的媒质中的四分之一波长非常小，用通常 FDTD 模拟要求每波长内 20 个剖分点在该结构中是得不到需要结果的，网格剖分必须满足在四分之一波长范围内稍大于能区分中心光和相邻光的采样率。以下是中心载波光(1560nm) 和相邻载波光(1550/1570nm) 在上述结构某些点上的幅度时间关系。

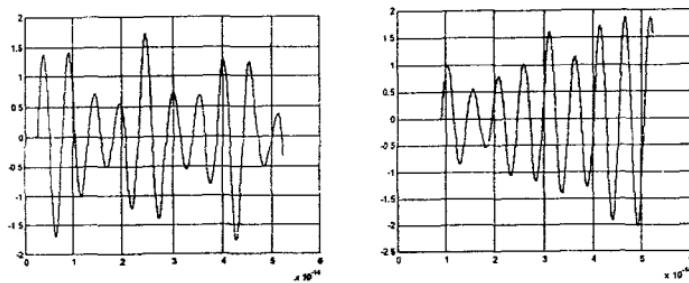


图 2.1 中心载波光的波在传播时的反相或同相叠加

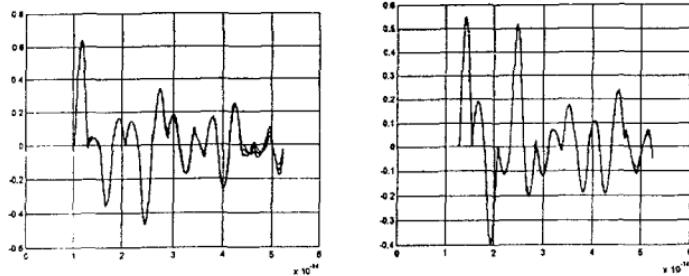


图 2.2 与中心光相邻的光载波的波传播的无序叠加

从上图可看出上述结构确实具有滤波特性。

2.2 传输线描述

根据上述结构各层的特性阻抗及四分之一电长度(即光学厚度)在不考虑损耗的情况下

可以推得结构满足匹配的条件为: $Z_1 = \sqrt{Z_{C1}Z_{C2}}$ 与一般无耗传输线所满足的条件一样, 而与高折射率层的特性阻抗无关, 即相当于透明的。

如下图为改变综合层的数目及综合层内两层之间折射率的比值得到的一组曲线。

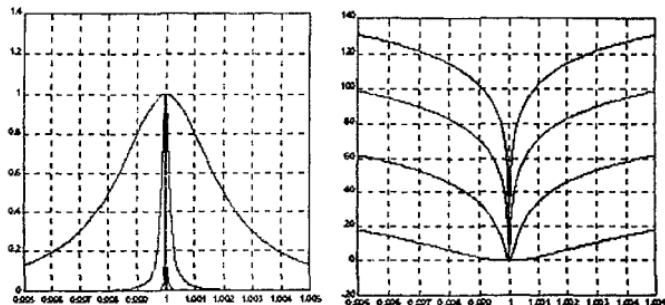


图 2.3 三层时透射系数 S_{21} 及插入衰减与波长比值之间的关系, $t = 2 \sim 4$

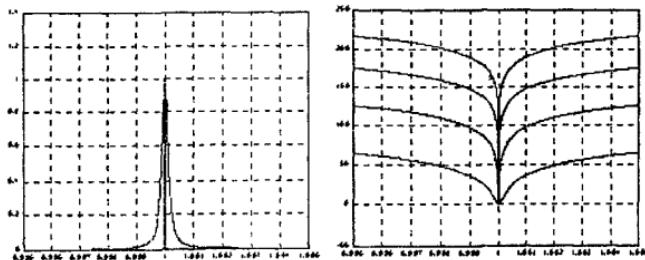


图 2.4 四层时透射系数 $S21$ 及插入衰减与波长比值之间的关系。 $t = 2 \sim 4$

从上面的曲线可看出该滤波器的通带较窄，并随层数的增加及综合层的高折射率与低折射率的比值 t 增大通带愈来愈窄，故通过调整 t 及层数可以达到用于波分复用实际所需的带宽。有耗时的带宽与损耗参数有关，这部分工作正在进行。

三、 波导实现

我们知道光能透过的介质不多，在设计时能精确选择到的用于1310/1550nm波长窗口的介质是有限的，为此我们提出用如下图所示波导结构实现图1所示的无限大均匀层叠加以利于集成，另一方面可精确定位 t 。



图 3.1 用对称光波导代替图 1 的结构

对于 TM_{10} 模，根据色散方程[2]有效介电常数(或有效折射率)与波导厚度满足的关系如

下图所示。图中上面的曲线是基底折射率为 1.45 波导折射率为 3.34 的有效介电常数与波导厚度的关系；下面的曲线的基底为 1.45 波导为 1.55。根据此关系可选择适当的波导厚度以满足精确的折射率比值。

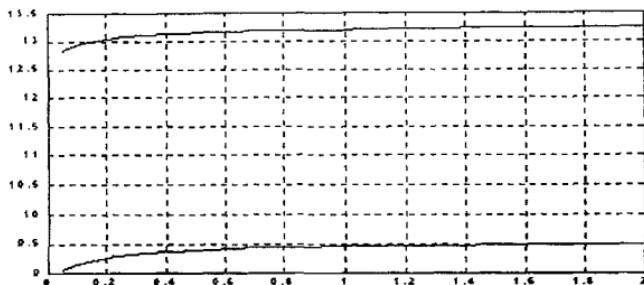


图 3.2 波导有效折射率与波导厚度的关系

根据上述参数设计确定的光波导传输中心频率为 1560nm 时在输出端获得的幅度随时间变化的曲线如下图所示。

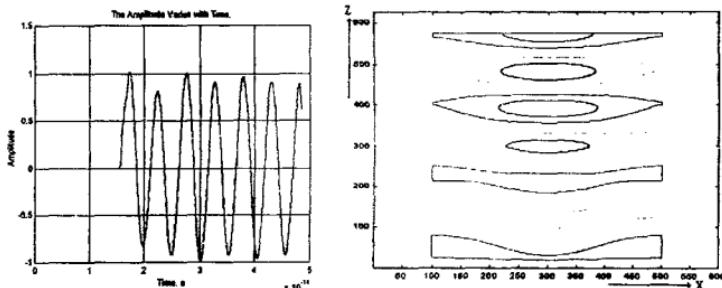


图 3.3 波导滤波器中心频率光传输 E_z 分量时间幅度关系及其在某时刻在波导中的场强分布

四、结论

本文利用 FDTD 模拟技术证实了多层薄膜结构的滤波效应，并用传输线法分析了结构匹配的条件。通过改变薄膜的层数和薄膜综合层折射率的比值可以改变滤波器的带宽。利用波导的有效介电常数来代替均匀媒质层得到基于波导的滤波器以利于集成。FDTD 模拟结果显示此方法是可行的。

参考文献

1. 傅君眉 编著 微波有源无源电路 西安交通大学出版社 1989 年
2. 吴万春 编著 微波毫米波与光集成电路的理论基础 西北电讯工程学院出版社 1985 年
3. 吴承治 徐敏毅 编著 光接入网工程 通信工程丛书 人民邮电出版社 1998 年
4. 毛幼菊 党明瑞 编著 光波分复用技术 电信高技术丛书 人民邮电出版社 1996 年

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>