

## 基于半导体微环谐振器的光滤波器设计方法

张彬, 张淑梅

(中国科学院 长春光学精密仪器与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 提出了一种完整的基于微环谐振器的光学滤波器的系统设计方法。使用该方法可以从一定滤波特性参数出发, 计算得到每个环之间的耦合系数, 再根据耦合系数和器件尺寸的关系得到具体的器件尺寸, 从而实现光学滤波器从性能特性到器件尺寸设计的一整套完整的解决方案。并在此基础上利用感应耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀技术和聚酰亚胺介质平坦化工艺制作了双环光滤波器, 对该设计方法进行了初步的实验验证, 使用扫描电子显微镜和原子力显微镜等多种测试方法证实, 制作的光波导具有很好的性能, 测试了其梳状滤波特性。

**关键词:** 微环谐振器; 光滤波器; Spice 模型; 耦合系数; 感应离子刻蚀

**中图分类号:** TN252; TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-353X (2012) 01-0024-05

## Design Method of Optical Filter Based on Semiconductor Micro-Ring Resonator

Zhang Bin, Zhang Shumei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A system design method of optical filter based on micro-ring resonator was provided. Using this method, coupling parameter and passing parameter of series micro-ring resonator were calculated. The size of device was received according to the relationship between the coupling parameter and the size of devices. A full solution of optical filter design flow from filter characteristics to device geometry was provided. In order to verify the design strategy preliminarily, a double micro-ring optical filter was design and fabricated. The process is involved advanced inductive coupled plasma (ICP) etch technology and Polyimide smoothness technology. The measurement of electron microscope and atomic force microscope show that the light guide has good performances. And the comb filter characteristic was tested.

**Key words:** micro-ring resonator; optical filter ; Spice model; coupling parameter; inductively coupled plasma (ICP)

**EEACC:** 4130

## 0 引言

高密度平面光集成是光波导技术发展的重要方向之一。1969 年 Marcatili 提出了光学微环谐振器的概念和结构, 近年来由于半导体工艺技术的提高, 基于平面波导技术的光学微环谐振器逐渐受到人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。硅基微环谐振器可以构成半

导体激光器、光波导滤波器等多种集成光电子元件, 在无源半导体环形谐振腔的设计方面国内外众多学者进行了大量的实验研究, 实现了很好的光学滤波器功能, 积累了很多宝贵的经验, 为有源双稳态器件的发展打下基础。在双稳态光存储方面, 在理论和实验两方面都提出很多有意义的成果, 并研制成功环形光存储的基本单元, 打开了通向真正意义光存储、光子集成电路以及光子计算机的研究方向<sup>[3]</sup>。文献 [4] 提出了一种基于微环谐振器的波

分复用系统的结构,但是没有提出具体的设计方法。本文将文献[5]提出的基于反射腔滤波器的设计方法进行扩展,将其应用到半导体微环谐振器的场合。并使用基于时钟采样的 Spice 模型对设计结果进行了仿真验证,并进一步探讨了此光学谐振器组成波分复用系统的性能。

## 1 半导体环形光滤波器设计理论

### 1.1 光滤波器的系统设计

当环形滤波器的周长等于光波长的整数倍时发生谐振,自由光谱区(FSR)是指相邻两个谐振波长的差( $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ ),也可以用相邻两个谐振频率的差( $\Delta f_{\text{FSR}}$ )表示,它们之间的转换关系如式(1)和(2)所示

$$R = \frac{c}{n_g \Delta f_{\text{FSR}}} \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FSR}} = \lambda_c^2 \frac{\Delta f_{\text{FSR}}}{c} \quad (2)$$

式中: $c$ 为光速; $n_g$ 为材料的等效折射率; $\lambda_c$ 为光波波长。设计自由光谱区,可由式(1)计算得到环半径 $R$ 。

半导体环形谐振器等效于一个全极点的 IIR 数字滤波器,本文提出的设计方法是先使用经典滤波器的设计方法实现零极点的 IIR 数字滤波器,然后将零极点形式的 IIR 数字滤波器映射到全极点的 IIR 数字滤波器。使用 Matlab 的数字滤波器设计工具包可以在很大程度上简化设计的过程,考虑到多环串联光滤波器的损耗,环数目不宜过多,同时考虑到滤波器的频率选择特性,选择 2~4 环的结构。

采用经典巴特沃斯滤波器作为系统的原型,考虑到通带 3 dB 带宽、阻带和通带增益的要求,使用 Matlab 滤波器工具包设计得到的零极点 IIR 的传递函数为  $H(z)$ 。零极点形式和全极点形式的 IIR 滤波器的传递函数具有下面的关系,以满足两者幅频响应的一致性

$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\text{Num}(e^{j\omega})}{\text{Den}(e^{j\omega})} \right| = \left| \frac{1}{A(e^{j\omega})} \right| \quad (3)$$

式中: $\text{Num}(e^{j\omega})$ 表示零极点滤波器的分子; $\text{Den}(e^{j\omega})$ 为零极点滤波器的分母; $A(e^{j\omega})$ 为含有未知参数的全极点形式滤波器的分母。式(3)容易表示为等价的形式

$$|\text{Den}(e^{j\omega}) \cdot A(e^{j\omega})| = |\text{Num}(e^{j\omega})| \quad (4)$$

式中: $\omega$ 为归一化频率,其取值范围为 0~1。可以将这个范围分为若干相等的间隔。选择  $A(e^{j\omega})$  的不同系数,当式(5)中  $F$  取最小值时,可以得到最佳的全极点 IIR 滤波器,它的幅频曲线最大程度的逼近零极点型 IIR。使用这种方法把全极点 IIR 滤波器的设计问题转换为一个最优化的问题,选择合适的最优化方法可以得到全极点 IIR 滤波器的系数

$$F = \sum_{n=1}^N \left| \text{Den} \left[ \exp(j \frac{n}{N}) \right] A \left[ \exp(j \frac{n}{N}) \right] \right| - \left| \text{Num} \left[ \exp(j \frac{n}{N}) \right] \right| \quad (5)$$

### 1.2 环形微环光学滤波器穿通和耦合系数的求解

文献[4]提出了基于 Fabry-Perot 型反射镜谐振器的光学滤波器的设计方法,图1和图2比较了 Fabry-Perot 型反射镜谐振器和环形串联谐振网络的信号流图表示。其中  $\{T_0, T_1, \dots, T_n\}$  表示正向信号节点; $\{R_0, R_1, \dots, R_n\}$  表示反向信号节点。在图1中  $r_n$  和  $t_n$  是反射腔型滤波器的反射系数和穿通系数,它们满足  $r_n^2 + t_n^2 = 1$  的能量守恒关系式。在图2中  $c_n$  和  $t_n$  为微环滤波器的耦合系数和穿通系数,它们满足  $r_n^2 + c_n^2 = 1$  的能量守恒关系式。

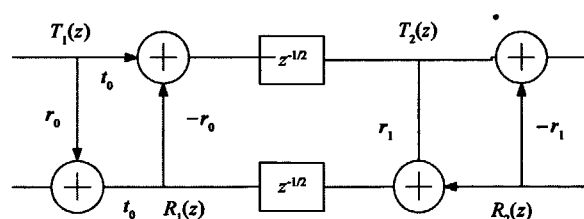


图1 反射腔型光滤波器的信号流图  
Fig. 1 Signal flow plot of reflect cavity filter

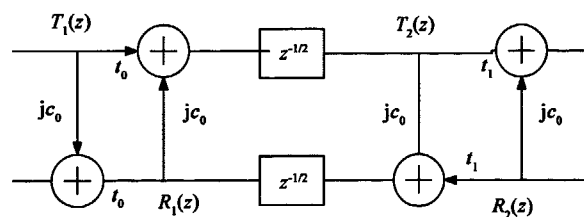


图2 半导体微环光滤波器的信号流图  
Fig. 2 Signal flow plot of semiconductor ring filter

从中可以看出两者的信号流图具有一定的相似性,因此可以将文献[4]提出的光滤波器的设计方法推广到基于微环光滤波器的情形。图2的环形滤波器结构可以用下面的传递矩阵表示

$$\begin{bmatrix} T_{n+1} \\ R_{n+1} \end{bmatrix} = \varphi_{1,0} \times \varphi_{2,1} \times \dots \times \varphi_{n+1,n} \begin{bmatrix} T_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\varphi_{1,0} = \frac{1}{t_0} \begin{bmatrix} 1 & -c_0 \\ c_0 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\varphi_{k+1,k} = \frac{1}{t_k} \begin{bmatrix} \gamma z^{-1} & -c_k \\ c_k \cdot \gamma z^{-1} & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$z^{-1} = \exp(-j\Omega T), T = n_s \frac{R}{c} = \frac{1}{\Delta f_{\text{FSR}}} \quad (9)$$

式中： $R$ 为环半径； $n_s$ 为等效折射率；半环形损耗用 $\gamma$ 表示； $\Delta f_{\text{FSR}}$ 是两临近谐振峰之间的频率差，称为有效自由光谱区<sup>[5]</sup>。

$\varphi_{k,k+1}$ 为第 $k$ 级到第 $k+1$ 级的转移矩阵，令 $G = \varphi_{1,0} \times \varphi_{2,1} \times \cdots \times \varphi_{n+1,n}$ 表示第 $n$ 级到输入端的转移矩阵。式(9)可以简要的表示为

$$\begin{bmatrix} T_{k+1} \\ R_{k+1} \end{bmatrix} = \tau_{k+1,0} G \begin{bmatrix} T_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $\tau_{k+1,0} = \frac{z^{-\frac{k}{2}}}{t_k \cdots t_0}$ 。可以证明 $\varphi_{1,n}$ 符合下面的递推关系式

$$G = \begin{bmatrix} -A_R & -B_R \\ B & A \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： $A$ 和 $B$ 表示关于 $z$ 的多项式，它们的第 $k$ 级系数分别用 $a_k$ 和 $b_k$ 来表示； $R$ 表示下面变换算符

$$A_k^R = z^{-k} A_k(z^{-1}) \quad (12)$$

对于 $n+1$ 级的光滤波网络，由于 $R_{n+1}$ 端没有光输入，因此满足下面的关系

$$\begin{bmatrix} T_{k+1} \\ 0 \end{bmatrix} = \tau_{k+1,0} \begin{bmatrix} -A_k^R & -B_k^R \\ B_k & A_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0 \\ R_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

求解式(12)的矩阵方程，可得

$$T_{k+1} = \tau_{k+1,0} \frac{-A_k A_k^R + B_k B_k^R}{A_k} T_0 \quad (14)$$

对式(14)可以进一步化简

$$\begin{aligned} -A_k A_k^R + B_k B_k^R &= \det(\varphi_{k+1,k}) \cdots \det(\varphi_{1,0}) = \\ &= (-\gamma z^{-1} + \gamma c_k^2 z^{-1}) \times \cdots \times (-1 + c_0^2) = (-1)^{k+1} z^{-k} \gamma^k \\ &\quad (t_0 t_1 \cdots t_k)^2 \end{aligned} \quad (15)$$

综合式(14)和(15)得到

$$T_{k+1} = \tau_{k+1,0} (-1)^{k+1} z^{-k} \gamma^k \frac{(t_0 t_1 \cdots t_k)^2}{A_k} T_0 \quad (16)$$

由于 $\varphi_{k+1,0} = \varphi_{k+1,k} \varphi_{k,0}$ 可以得到下面的递推公式

$$\begin{bmatrix} -A_k^R & -B_k^R \\ B_k & A_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma z^{-1} & -c_k \\ c_k \cdot \gamma z^{-1} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -A_{k-1}^R & -B_{k-1}^R \\ B_{k-1} & A_{k-1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

展开式(17)的矩阵方程，求解其中的 $A_{k-1}$ 和 $B_{k-1}$

$$A_{k-1} = \frac{1}{1-c_k^2} A_k + \frac{c_k}{1-c_k^2} B_k^R \quad (18)$$

$$B_{k-1} = -\frac{c_k}{1-c_k^2} A_k^R - \frac{1}{1-c_k^2} B_k \quad (19)$$

设 $A_k = \sum_{i=0}^k a_i(k) z^{-i}$ ，由于 $A_{k-1}$ 的第 $k$ 项为零

$$c_k = -\frac{a_k(k)}{b_0(k)} \quad (20)$$

$$a_0(k) a_k(k) = b_0(k) b_k(k) \quad (21)$$

综上所述求解穿通和耦合系数基本步骤如下：

①使用式(15)求出 $B_k B_k^R$ ，由于算符 $R$ 的性质， $B_k$ 和 $B_k^R$ 的根关于单位圆对称，将 $B_k B_k^R$ 的所有根中单位圆内部的根乘积组成 $\bar{B}_k$ 。 $\bar{B}_k$ 和 $B_k$ 只差一个常数项

$$B_k = \alpha \quad (22)$$

使用式(21)的关系得到

$$\alpha = \sqrt{\left| \frac{a_k(k)}{b_k(k)} \right|} \quad (23)$$

从而计算出响应的 $B_k$ 。

②应用式(18)和(19)得到所有的 $A$ 和 $B$ 的表达式，并使用式(17)得到所有的穿通系数 $c_n$ ，由式 $c_n^2 + k_n^2 = 1$ ，可以得到所有的耦合系数 $k_n$ 。

## 2 环形微环光学滤波器的实验验证

应用本文所论述的方法，设计了如图3所示的双环半导体微环光滤波器件。考虑到工艺的精度要求，其环形波导和直线波导之间的耦合间距为 $1 \mu\text{m}$ ，圆环半径为 $670 \mu\text{m}$ ，耦合系数约为 $1 \times 10^{-3}$ ， $\Delta \lambda_{\text{FSR}}$ 约为 $600 \text{ nm}$ ，FWHM约为 $200 \text{ nm}$ 。考虑到工艺可实现性，设计了宽波导和窄波导的两种几何结构，波导宽度分别为 $1 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 。考虑到光波导的单模条件，选择刻蚀深度为 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 的深刻蚀，以达到较好的滤波特性。对波导截面形态的观测，使用扫描电子显微镜测试得到如图4所示脊宽分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 的两种波导A和B的横截面，宽脊器件宽度大于设计数值 $2 \mu\text{m}$ ，图4(a)和(b)的刻蚀深度分别为 $5.82$ 和 $4.67 \mu\text{m}$ ，接近设计刻蚀深度 $5 \mu\text{m}$ 。从刻蚀效果上看，宽脊宽的波导的陡直度比窄脊宽的刻蚀效果要好，同时具有更好的侧面光滑度，从而降低而环内的光损

耗。但窄脊宽波导 B 更容易形成单模传输，而宽脊宽则为多模传输模式，部分能量耦合到无法在单模光纤中传输的高阶模式中，从而导致输出光功率的降低。

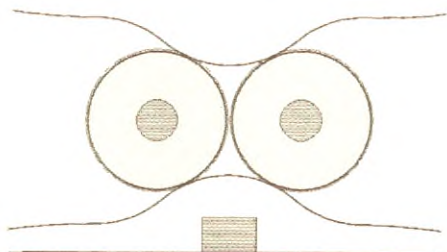
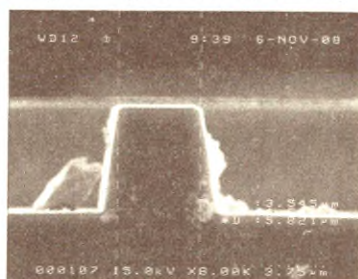
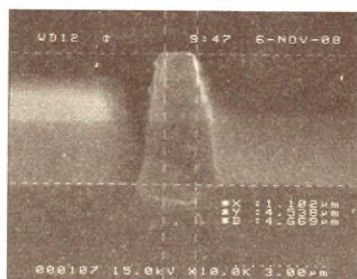


图3 设计双环光滤波器版图  
Fig.3 Layout of the double ring



(a) 5.82  $\mu\text{m}$

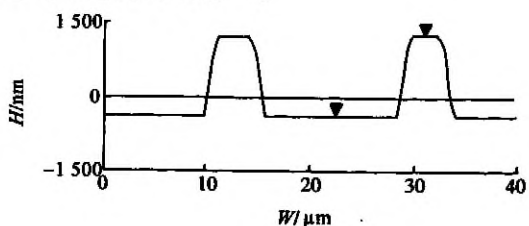


(b) 4.67  $\mu\text{m}$

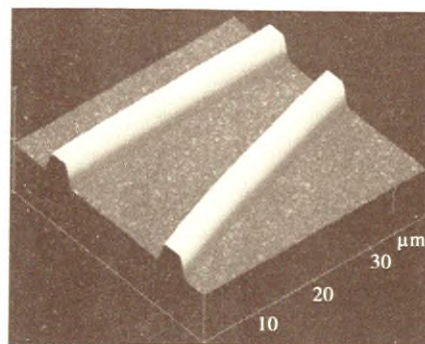
图4 波导截面形态

Fig.4 Waveguide shape of the cross section

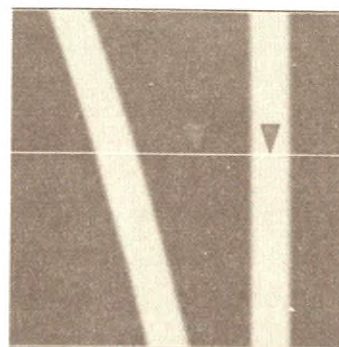
直波导和环形波导之间的耦合部分的刻蚀是器件制作的关键，图5表示器件耦合部分的原子力显微镜照片，图5(c)中箭头间距表示实际刻蚀间距为  $1.42 \mu\text{m}$ ，略大于设计的数值，但由于耦合部分由金属覆盖，耦合部分的光增益的作用可以弥补耦合间距过宽的缺陷<sup>[6]</sup>。



(a) 截面图



(b) 三维视图



(c) 俯视图

图5 直波导和环波导耦合部分的原子力显微镜照片  
Fig.5 AFM picture of the coupled section

使用 Agilent86142B 光谱分析仪测试了环形滤波器的光谱特性，如图6所示，可以看到它呈现明显的梳状滤波特性对实验测试的光谱特性，其中曲

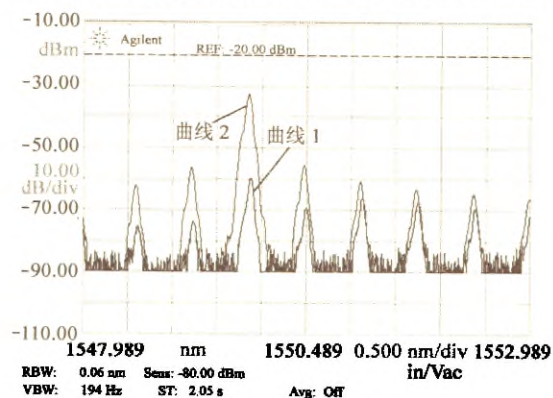


图6 双环谐振器光谱

Fig.6 Optical spectrum of the double ring

线1为实际测量曲线，曲线2为拟合曲线。进一步可以使用 Matlab 自动提取相关参数。谐振频率参数可以通过寻找局部的大于一定阈值的最大值，定义一定阈值的目的是避免局部造成的局部最大值的影响。找到局部最大值和之间的间隔可以计算  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  的数值。寻找某个最大值处附近光功率降低到最大数值的一半处的两个点之间的波长差，得到



$\Delta\lambda$ , 利用  $Q = \lambda/\Delta\lambda$  和  $\text{FINESSE} = \Delta\lambda_{\text{FSR}}/\Delta\lambda$  可以计算  $Q$  值和  $\text{FINESSE}$  这两个重要的性能参数与设计相一致。表 1 总结了制作的环形滤波器的性能参数。

表 1 制作环形谐振器性能总结  
Tab. 1 Characteristic table of fabricated ring resonator

参数	数值
$f_0$ (中心频率) / nm	1554.8
$\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ / nm	625
FWHM / nm	240
$Q$	135.83
FINESSE	2.6

### 3 结论

本文在文献 [5] 的基础上, 将其针对反射型光学滤波器的设计方法应用到环形光学滤波器中, 提出从系统设计到器件实现的一整套具体的解决方案。并使用仿真和实验的方法对多环光滤波器的设计方法进行了验证, 对微环光滤波器系统的设计和制作具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] CARUSO L, MONTROSSET I. Analysis of a racetrack micro ring resonator with MMI coupler [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21 (1): 206 - 207.
- [2] YANG J Y, ZHOU Q J, ZHAO F. Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonator [J]. Opt Commun, 2003, 228 (1/2/3): 91 - 98.
- [3] JOHN H, ROHIT G. Optical microresonators theory, fabrication and applications [M]. New York: Springer, 2003.
- [4] PAYAM R, CHENG Z, LARRY R D. Polymer micro-ring filters and modulators [J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20 (11): 150 - 152.
- [5] ERIC M D, DUNCAN L M. Light wave lattice filters for optically multiplexed communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12 (3): 21 - 23.
- [6] CHOI S J, DJORDJEV K, CHOI S J, et al. Micro ring resonators vertically coupled to buried heterostructure bus waveguides [J]. IEEE Photon Techno Lett, 2004, 16, 828 - 830.
- [7] JEON J, KIM J, KWON Y. Temperature compensating bias circuit for GaAs HBT RF power amplifiers with stage bypass architecture [J]. Electronics Letters, 2008, 44 (19): 1141 - 1142.
- [8] ZHU Y, TWYNAM J K, YAGURA M. Self-heating effect compensation in HBTs and its analysis and simulation [J]. IEEE Electron Devices, 2001, 48 (11): 2640 - 2646.
- [9] CHEN Y H, SHEN H J, WANG X T, et al. GaAs HBT microwave power transistor with on-chip stabilization network [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27 (12), 2075 - 2079.

(收稿日期: 2011-07-24)

#### 作者简介:

张彬 (1982—), 男, 天津人, 博士, 主要研究方向为 MEMS 设计与制作技术。



#### Biographies:

Zhang Ren (1987—), male, was born in Huaipei, Anhui province. He is now a graduate student, his research concerns RF power amplifiers;



Bao Jingfu (1964—), male, was born in Yiwu, Zhejiang province. He is now a Ph.D supervisor, his research concerns RF circuit and system, RF MEMS;

Yan Yuepeng (1963—), male, was born in Xi'an, Shanxi province. He is now a Ph.D supervisor, his research concerns communication and navigation system, RF and analog IC.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、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/>