

变形矩形和 V 形微屏蔽线传输特性的 矢量有限元计算

孙海

(乐山师范学院数理学院, 四川 乐山 614000)

摘要:微屏蔽线在使用过程中难免会产生变形。本文利用矢量有限元法讨论了矩形微屏蔽线和 V 形微屏蔽线的变形对其传输特性的影响,其中传输特性包括主模截止波长、单模带宽和主模电场结构。计算结果显示,两种微屏蔽线的变形对三种传输特性均有较大影响,这些数值计算结果对两种微屏蔽线在使用过程中出现变形时对整个器件的影响有较强的指导意义。

关键词:变形矩形微屏蔽线;变形 V 形微屏蔽线;主模截止波长;单模带宽;主模场结构

中图分类号:TN81 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.014

Calculation of the transmission characteristics in deformed rectangular-shaped and V-shaped microshield lines by edge-based FEM

SUN Hai

(College of Mathematics and Physics, Leshan Normal University, Leshan 614000, China)

Abstract: Deformation of microshield lines is unavoidable during use. In this paper, the transmission characteristics in deformed rectangular-shaped and V-shaped microshield lines by edge-based finite element methods discussed. The transmission characteristics include the cutoff wavelength of dominant mode, single-mode bandwidth and the field patterns of dominant mode. The calculation results show that the deformation of the two kinds of microshield lines has a great influence on three transmission characteristics. These numerical results have strong guiding significance for the influence of deformation of the two kinds of microshielded lines on the overall device.

Keywords: deformed rectangular-shaped microshield lines; deformed V-shaped microshield lines; the cutoff wavelength of dominant mode; single-mode bandwidth; the field patterns of dominant mode

1 引言

微屏蔽线在微波和单片微波集成电路的设计和使用过程中,具有特性阻抗宽,辐射损耗和电磁耦合低等特点^[1],所以近年来很多研究者对各种类型的微屏蔽线进行了大量的讨论。如:1994年林为干院士等人对 V 形、圆形和椭圆形微屏蔽线的特性阻抗进行了研究^[2];1995年和2001年 Cheng 和 Praman-

ick 对不对称的 V 形和 W 形微屏蔽线的特性阻抗进行了计算^[3-4];孙海等人于2011年、2012年、2014年分别对椭圆形、梯形、矩形微屏蔽线的部分传输特性进行了计算和讨论^[5-7]。

前面的研究都基于微屏蔽线在使用过程中一直处于稳定的几何结构,但实际使用过程中,微屏蔽线的几何结构难免会出现变形,几何结构的变形必将

基金项目:乐山师范学院校级重点项目(No. LZD017);乐山市科技计划项目(No. 20GZD022)资助。

作者简介:孙海(1981-),男,理学博士,副教授,主要从事计算电磁学方面的研究。E-mail:sunhai0804@126.com

收稿日期:2021-09-22

引起屏蔽线传输特性的影响。对变形传输线的研究主要开始于 2008 年,相关文献主要来源于国内兰州交通大学逯迈教授和陈小强教授团队,从 2008 年到 2015 年,他们集中研究了变形矩形脊波导、变形圆脊矩形波导、变形双脊波导、变形梯形脊波导、变形三角形脊波导以及多种组合形变的脊波导传输特性的变化^[8-15],而这些研究都集中在均匀波导变形对传输特性的影响,对非均匀变形传输线的研究尚无涉猎。故本文主要对非均匀传输线中的变形矩形微屏蔽线和变形 V 形微屏蔽线主模截止波长、单模带宽和主模电场结构进行讨论。

2 原理

图 1 为矩形微屏蔽线和 V 形微屏蔽线变形前和变形后的横截面示意图,网状部分和白色部分分别代表加载区域和真空区域,其介电常数分别为 ϵ_r 和 ϵ_0 ,信号线用黑色表示,模型边界和信号线位置大小由符号用 $a, h_1, h_2, c, c_1, c_2, b, t$ 来表示, σ_1 至 σ_8 表示几何边界变形的幅度。在计算过程中假设 $\epsilon_r = 2.55, h_1/a = 0.3, h_2/a = 0.2$ 。对矩形微屏蔽线,假设 $c/a = 0.4$,而对 V 形微屏蔽线假设 $c/a = 0.5$ 。

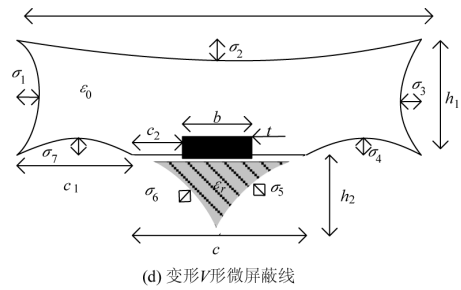
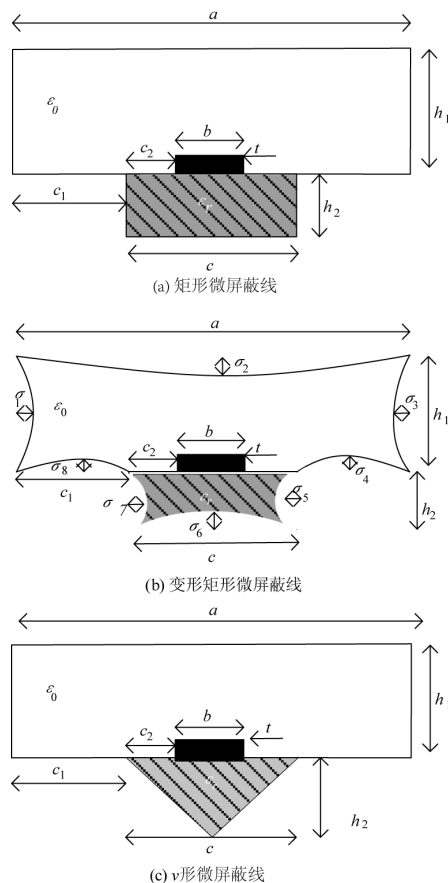


图 1 未变形和变形矩形、V 形微屏蔽线的横截面示意图
Fig. 1 Cross sections of undeformed and deformed rectangular-shaped and V-shaped microshield line

微屏蔽线中磁场 \vec{H} 的矢量 Helmholtz 方程和边界条件:

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon_r} \nabla \times \vec{H} \right) - K_0^2 \mu_r \vec{H} = 0 \\ \hat{n} \times (\nabla \times \vec{H}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中的 k_0 表示真空中的波数,其中 \hat{n} 表示外法线方向,与上式等效的变分问题为:

$$\delta F(\vec{H}) = 0 \quad (2)$$

其中:

$$F(\vec{H}) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left(\frac{1}{\epsilon_r} (\nabla_t \times \vec{H}_t) \cdot (\nabla_t \times \vec{H}_t)^* + \frac{1}{\epsilon_r} (\nabla_t H_z + jk_z \vec{H}_t) \cdot (\nabla_t H_z + jk_z \vec{H}_t)^* - \mu_r k_0^2 \vec{H} \cdot \vec{H}^* \right) d\Omega \quad (3)$$

式中, Ω, k_z 和 ∇ 分别表示积分区域,传播常数和矢量微分算符, H_t 表示横向磁场, H_z 表示 z 方向的磁场,运用矢量有限元方法进行离散,可得到如下方程:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^M \left(\begin{bmatrix} h_t^e \\ h_z^e \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} S^e(tt) & S^e(tz) \\ S^e(zt) & S^e(zz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_t^e \\ h_z^e \end{bmatrix}^* - k_0^2 \begin{bmatrix} h_t^e \\ h_z^e \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} T^e(tt) & 0 \\ 0 & T^e(zz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_t^e \\ h_z^e \end{bmatrix}^* \right) \quad (4)$$

其中:

$$S^e(tt) = \frac{1}{\epsilon_r^e} \iint_{\Omega^e} (\nabla_t \times \vec{N}^e) \cdot (\nabla_t \times \vec{N}^e)^T d\Omega + \frac{\beta^2}{\epsilon_r^e} \iint_{\Omega^e} (\vec{N}^e) \cdot (\vec{N}^e)^T d\Omega \quad (5)$$

$$S^e(tz) = \frac{\beta^2}{\epsilon_r^e} \iint_{\Omega^e} (\vec{N}^e) \cdot (\nabla_t L^e)^T d\Omega \quad (6)$$

$$S^e(zt) = \frac{\beta^2}{\epsilon_r^e} \iint_{\Omega^e} (\nabla_t L^e) \cdot (\vec{N}^e)^T d\Omega \quad (7)$$

$$S^e(zz) = \frac{\beta^2}{\epsilon_r^e} \iint_{\Omega^e} (\nabla_t L^e) \cdot (\nabla_t L^e)^T d\Omega \quad (8)$$

$$T^e(tt) = \mu_r^e \iint_{\Omega^e} (\vec{N}^e) \cdot (\vec{N}^e)^T d\Omega \quad (9)$$

$$T^e(zz) = \beta^2 \mu_r^e \iint_{\Omega^e} (L^e) \cdot (L^e)^T d\Omega \quad (10)$$

代入可以得到:

$$\begin{bmatrix} S^e(tt) & S^e(tz) \\ S^e(zt) & S^e(zz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_i^e \\ h_z^e \end{bmatrix} = k_0^2 \begin{bmatrix} T^e(tt) & 0 \\ 0 & T^e(zz) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_i^e \\ h_z^e \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中的上标 e 和 M 分别表示三角形剖分单元和三角形单元的总数; h_i^e 表示单元 e 上的横向磁场; 而 h_z^e 表示 z 方向的磁场; T 和 β 分别表示转置和传播常数; N 和 L 分别表示由面积构成的矢量基函数和单元面积的坐标。为了叙述方便, 令:

$$\begin{bmatrix} S \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(tt) & S(tz) \\ S(zt) & S(zz) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} T \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(tt) & 0 \\ 0 & T(zz) \end{bmatrix}$$

$$[\phi] = \begin{bmatrix} h_i \\ h_z \end{bmatrix}$$

经过合成, 总矩阵方程为:

$$[S][\phi] = k_0^2 [T][\phi] \quad (12)$$

可通过求解式(12)得到主模的截止波长, 单模带宽和场结构等传输特性, 其中 k_0^2 表示待求的特征值。

3 结果和分析

3.1 方法验证

为了验证本文所采用方法的正确性和可靠性, 我们首先使用上述推导结果计算了介质加载双脊波导的截止波长, 结果呈现在表1中, 与相关文献比较, 计算结果的相对误差均小于3%, 可说明本文所讨论的计算方法是可行的。接下来, 将利用本文的理论推导对变形矩形微屏蔽线和V形微屏蔽线的主模截止波长、单模带宽以及场结构进行计算。

表1 加载介质双脊波导模型的计算结果对照表 ($\epsilon_r = 1.5\epsilon_0, a = 12.7, b = 10.16, s = 2.54, d = 2.79$)

Tab. 1 Comparison table of the cutoff wavelength in the dielectric-loaded double-ridged waveguide

TE 模	截止波长	文献[16]	相对误差/%	文献[17]	相对误差/%
	本文				
主模	0.1311	0.1307	0.31	0.1291	1.55
第一高次模	0.3163	0.3153	0.32	0.3137	0.829
第二高次模	0.5205	0.5196	0.17	0.5080	2.46
第三高次模	0.6247	0.6238	0.14	0.6190	0.934
第四高次模	0.6573	0.6518	0.84	0.6550	0.351
第五高次模	0.7052	0.7059	0.099	0.6931	1.746

3.2 变形矩形和V形微屏蔽线主模截止波长的计算

表2~3分别表示矩形微屏蔽线和V形微屏蔽线主模截止波长随 $\sigma_1/a, \sigma_2/a, \sigma_3/a, \sigma_4/a, \sigma_5/a, \sigma_6/a, \sigma_7/a, \sigma_8/a$ 从0.01变化到0.05的过程中的变化情况, 每次只改变其中某一个 σ_i/a 。在计算的时候,

由于模型结构的对称性, 对变形矩形微屏蔽线, σ_1/a 和 $\sigma_3/a, \sigma_4/a$ 和 $\sigma_8/a, \sigma_5/a$ 和 σ_7/a 的变化结果是一样的; 而对V形微屏蔽线, σ_1/a 和 $\sigma_3/a, \sigma_4/a$ 和 $\sigma_7/a, \sigma_5/a$ 和 σ_6/a 的变化结果是一样的, 故没有进行重复计算。

表2 变形矩形微屏蔽线主模截止波长 λ_c/a 的变化情况

Tab. 2 The changes of normalized cutoff wavelength (λ_c/a) of dominant mode in deformed rectangular-shaped microshield line

σ_i/a	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
σ_1/a 或 σ_3/a	1.9969	1.9842	1.9725	1.9612	1.9494	1.9377
σ_2/a	1.9969	2.0096	2.0237	2.0360	2.0556	2.0725
σ_4/a 或 σ_8/a	1.9969	1.9932	1.9860	1.9807	1.9771	1.9686
σ_5/a 或 σ_7/a	1.9969	1.9982	1.9989	1.9986	2.0013	2.0041
σ_6/a	1.9969	2.0002	2.0022	2.0048	2.0064	2.0093

表 3 变形 V 形微屏蔽线主模截止波长 λ_c/a 的变化情况Tab. 3 The changes of normalized cutoff wavelength(λ_c/a) of dominant mode in deformed V-shaped microshield line

σ_i/a	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
σ_1/a 或 σ_3/a	2.0053	1.9923	1.9809	1.9686	1.9559	1.9444
σ_2/a	2.0053	2.0195	2.0341	2.0498	2.0662	2.0835
σ_4/a 或 σ_7/a	2.0053	1.9999	1.9934	1.9864	1.9798	1.9749
σ_5/a 或 σ_6/a	2.0053	2.0103	2.0134	2.0181	2.0230	2.0362

3.3 变形矩形和 V 形微屏蔽线单模带宽的计算

表 4, 表 5 分别表示矩形微屏蔽线和 V 形微屏蔽线的单模带宽随 $\sigma_1/a, \sigma_2/a, \sigma_3/a, \sigma_4/a, \sigma_5/a, \sigma_6/a, \sigma_7/a, \sigma_8/a$ 从 0.01 变化到 0.05 的过程中的变化情况, 每次只改变其中某一个 σ_i/a 。

3.4 变形矩形和 V 形微屏蔽线电场结构的计算

图 2、图 3 分别表示给出了当 $\sigma/a = 0.05$ ($i = 1, 2, \dots, 8$) 时, 矩形微屏蔽线和 V 形微屏蔽线主模电场结构的变化情况。

3.5 变形对两种微屏蔽线传输特性影响的变化规律小结

(1) 从表 2 和表 4 可以得出, 对变形矩形微屏蔽线, 当 σ_1/a 或 σ_3/a 和 σ_4/a 或 σ_8/a 从 0.01 增加到 0.05 的过程中, 主模截止波长和单模带宽均呈下降趋势; 而当 σ_2/a 和 σ_6/a 从 0.01 增加到 0.05 的过程中, 主模截止波长和单模带宽均呈增加趋势;

(2) 从表 2 和表 4 可以得出, 对变形矩形微屏蔽线, 当 σ_1/a 或 σ_3/a 和 σ_4/a 或 σ_7/a 从 0.01 增加

到 0.05 的过程中, 主模截止波长呈增加趋势, 单模带宽呈减小趋势, 该特点较为特殊;

(3) 从表 3 和表 5 可以得出, 对变形 V 形微屏蔽线, 当 σ_1/a 或 σ_3/a 和 σ_4/a 或 σ_7/a 从 0.01 增加到 0.05 的过程中, 主模截止波长和单模带宽均呈下降趋势; 而当 $\sigma_2/a, \sigma_5/a$ 或 σ_6/a 从 0.01 增加到 0.05 的过程中, 主模截止波长和单模带宽均呈增加趋势;

(4) 从表 2 ~ 表 5 可以得出, 从模型结构总体上来看, 变形矩形微屏蔽线和变形 V 形微屏蔽线的在 σ_i/a 的变化过程中, 主模截止波长和单模带宽呈现相似的变化趋势。

(5) 从图 2 和图 3 可以得出变形对主模场结构影响主要包括: 主模电场分布随模型几何结构变形而变形, 表现为电场结构的不对称性, 变形部分场线较为集中, 说明在变形周围有能量集聚, 其他未变形部分场线分布和未变形微屏蔽线相似, 说明主模场结构分布的改变主要体现在变形处。

表 4 变形矩形微屏蔽线单模带宽 $\lambda_{c1}/\lambda_{c2}$ 的变化情况Tab. 4 The changes of single-mode bandwidth ($\lambda_{c1}/\lambda_{c2}$) in deformed rectangular-shaped microshield line

σ_i/a	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
σ_1/a 或 σ_3/a	1.1901	1.1857	1.1807	1.1752	1.1706	1.1672
σ_2/a	1.1901	1.1988	1.2105	1.2235	1.2363	1.2489
σ_4/a 或 σ_8/a	1.1901	1.1865	1.1826	1.1720	1.1647	1.1638
σ_5/a 或 σ_7/a	1.1901	1.1877	1.1852	1.1843	1.1747	1.1703
σ_6/a	1.1901	1.2121	1.2376	1.2630	1.2943	1.3247

表 5 变形 V 形微屏蔽线单模带宽 $\lambda_{c1}/\lambda_{c2}$ 的变化情况Tab. 5 The changes of single-mode bandwidth ($\lambda_{c1}/\lambda_{c2}$) in deformed V-shaped microshield line

σ_i/a	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
σ_1/a 或 σ_3/a	1.4362	1.4293	1.4228	1.4166	1.4102	1.4040
σ_2/a	1.4362	1.4480	1.4602	1.4731	1.4856	1.4981
σ_4/a 或 σ_7/a	1.4362	1.4195	1.4171	1.4049	1.4004	1.3969
σ_5/a 或 σ_6/a	1.4362	1.4234	1.4293	1.4369	1.4423	1.4272

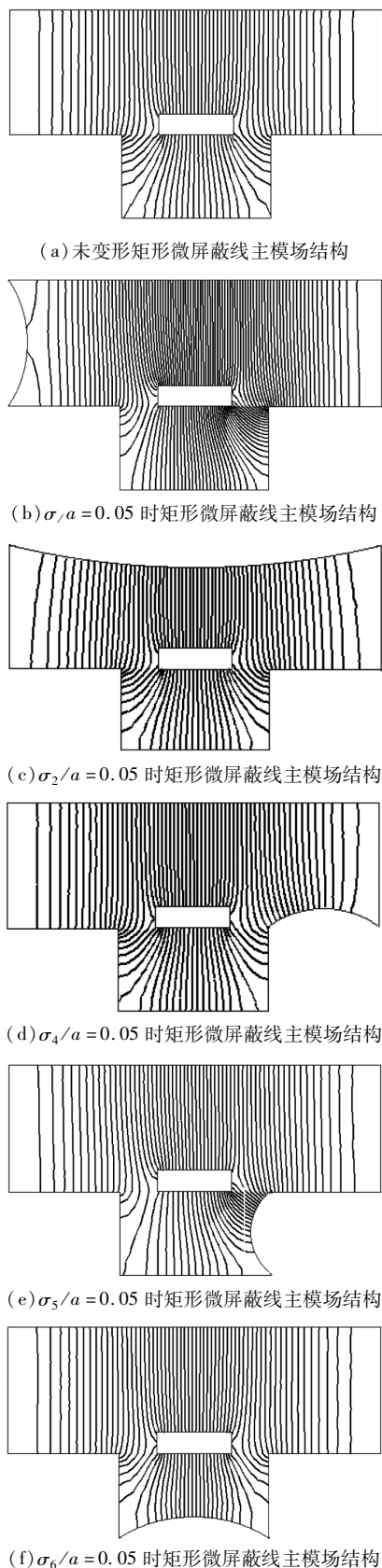


图2 矩形微屏蔽线主模场结构图随某一个 σ_i/a 变化而引起的变化情况

Fig.2 The changes of field patterns of the dominant mode in rectangular-shaped microshield lines versus σ_i/a

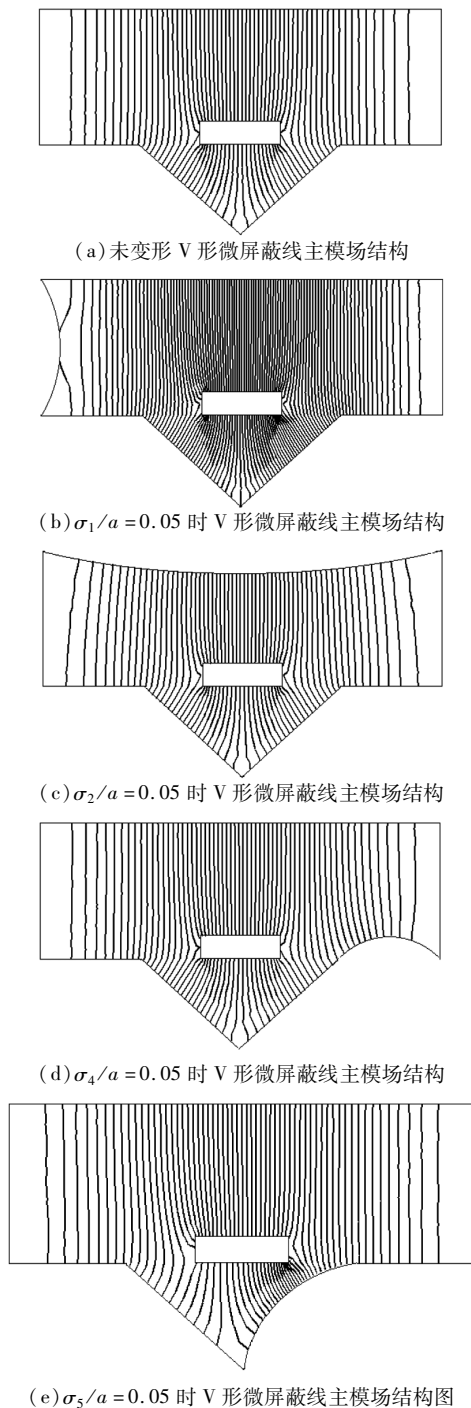


图3 V形微屏蔽线主模场结构图随某一个 σ_i/a 变化而引起的变化情况

Fig.3 The changes of field patterns of the dominant mode in V-shaped microshield lines versus σ_i/a

4 结论

本文利用矢量有限元方法对变形矩形和V形微屏蔽线的传输特性进行了计算,主要讨论了两种变形微屏蔽线的主模截止波长,单模带宽和主模场结构特性,通过计算分析,两种微屏蔽线在使用过程中的变形,会对上述三种传输特性均引起相应的改

变,这些计算结果必将丰富两类微屏蔽线在新型微波和毫米波器件中的设计和应用。

参考文献:

- [1] N I Dib, W P Harokopus Jr, P B Katehi, et al. Study of a novel planar transmission line [C]//IEEE MTT-S Dig, Boston, MA, 1991: 623 - 626.
- [2] N C Yuan, C L Ruan, W G Lin. Analytical analysis of V, elliptical, and circular-shaped microshield transmission lines[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech MTT-42, 1994: 855 - 859.
- [3] K K M Cheng, I D Robertson. Simple and explicit formulas for the design and analysis of asymmetrical V-shaped microshield line[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech MTT-43, 1995: 2501 - 2504.
- [4] Y, Yan, P. Praamanick, Finite-element analysis of generalized V-and W-shaped edge and broadside-edge-coupled shield microstrip lines on anisotropic medium[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2001, MTT - 49: 1649 - 1657.
- [5] Hai Sun, Yu-jiang Wu and Zhou-sheng Ruan, A study of transmission characteristics in elliptic-shaped microshield lines[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25(17): 2353 - 2364.
- [6] Hai Sun, Yujiang Wu. Research on cutoff wavelength of dominant mode and field patterns in trapezoidal-shaped microshield lines[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2012, 20(4): 463 - 447.
- [7] Hai Sun. A Comparative study on dispersions of rectangle-shaped microshield lines loaded with right-handed materials and left-handed materials[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2014, 31(5): 593 - 601. (in Chinese)
孙海. 填充右左手材料的矩形微屏蔽线的色散特性的比较研究[J]. 计算物理, 2014, 31(5): 593 - 601.
- [8] Zhao Xia, Chen Xiao-qiang, Lu Mai, et al. Study of transmission characteristic of trapezoidal-ridge waveguide in different distortions [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(6): 590 - 592. (in Chinese)
赵霞, 陈小强, 逯迈, 等. 不同变形下梯形脊波导传输特性研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 590 - 592.
- [9] Zhang Li-ming, Lu Mai, Chen Xiao-qiang, et al. Study of transmission characteristics of two kinds of deformed dual-ridge waveguide [J]. Laser Technology, 2009, (6): 333 - 336. (in Chinese)
张黎明, 逯迈, 陈小强, 等. 两种变形双脊波导传输特性的分析研究[J]. 激光技术, 2009, (6): 333 - 336.
- [10] Chen Xiao-qiang, Zhao Xia, Lu Mai, et al. Study on transmission characteristic of circular-ridge waveguide in different distortions [J]. Modern Electronics Technique, 2010, (2): 134 - 136. (in Chinese)
陈小强, 赵霞, 逯迈, 等. 变形圆脊矩形波导传输特性的研究[J]. 现代电子技术, 2010, (2): 134 - 136.
- [11] Zhao Xia, Chen Xiao-qiang. Influence of characteristic of triangle-ridge waveguide in deformation [J]. Automation & Instrumentation, 2010, (6): 126 - 127, 130. (in Chinese)
赵霞, 陈小强. 变形对三角形脊波导特性的影响[J], 自动化与仪器仪表, 2010, (6): 126 - 127, 130.
- [12] Zhao Xia, Chen Xiao-qiang. Analysis on transmission characteristics of rectangular-ridge waveguide in deformation [J]. Radio Engineering, 2011, (1): 35 - 37 (in Chinese)
赵霞, 陈小强. 变形矩形脊波导传输特性分析[J]. 无线电工程, 2011, (1): 35 - 37.
- [13] Zhao Xia, Chen Xiao-qiang. Eigenvalue analysis of triangle-ridge waveguide in deformation on finite element method [J]. Laser Journal, 2012, (6): 9 - 10. (in Chinese)
赵霞, 陈小强. 三角形变形脊波导特征值的有限元分析[J]. 激光杂志, 2012, (6): 9 - 10.
- [14] Chen Xiao-qiang, Yang Li-kun. Transmission characteristics of triangle ridge waveguide in combined deformations [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6): 1244 - 1248. (in Chinese)
陈小强, 杨立坤. 组合形变对三角形脊波导传输特性的影响[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 1244 - 1248.
- [15] Yang Li-kun, Chen Xiao-qiang. Impacts of deformations on triangular ridge waveguide transmission characteristics [J]. Study on Optical Communications, 2015, (5): 44 - 46, 50. (in Chinese)
杨立坤, 陈小强. 形变对三角形脊波导特性的影响[J]. 光通信研究, 2015, (5): 44 - 46, 50.
- [16] Mai Lu, Paul J. Leonard, Edge-based finite element analysis of the field patterns in V-shaped microshield line [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2004, 41(1): 43 - 47.
- [17] S F Shu, P M Goggans, A A Kishk. Computation of cutoff-wave numbers for partially filled waveguides of arbitrary cross section using surface-integral formulations and the method of moments [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1993; MTT-41: 1111 - 1118.