

激光刻蚀实现介质谐振器参数微调的研究

陈 赐 海

(漳州师范学院 物理与电子信息工程系, 福建 漳州 363000)

摘 要:研究提出激光刻蚀加工技术的新方法,实现微波陶瓷介质谐振器的参数微调。首先运用电磁理论推导求解本征值问题的有限元法,利用该方法验证了机械调节谐振器参数存在的缺点,重点研究激光刻蚀微调操作中存在的几种影响因素,获得激光微调参数与谐振频率改变量的关系式。最后用自制相对频率误差小于0.2%的微波介质谐振器验证了激光刻蚀法微调的优势。

关键词:介质谐振器;有限元法;激光刻蚀;谐振频率;参数微调

中图分类号:TQ174

文献标识码:A

Research of the Small Adjusting Parameter for Dielectric Resonator with Laser Etching Technology

CHEN Cihai

(Dept. of Physics & Electronic Engineering, Zhangzhou Normal College, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: In this paper, a new method of the laser etching technology was proposed for the small adjusting parameter of the microwave dielectric ceramics resonator. The FEM for solving the eigenvalue problem was firstly deduced by electromagnetic theory, meanwhile, the shortcomings of the mechanical adjustment resonator parameter was verified with the FEM. Several factors affecting laser etching operation were mainly explored. The relationship between laser etching parameters and resonant frequency variation was obtained through experiments. Finally, the advantage of laser etching technology was verified with self-made dielectric resonator, which its relative frequency error was less than 0.2%.

Key words: dielectric resonator; finite element method; laser etching; resonance frequency; small adjusting parameter

0 引言

微波介质陶瓷是近几十年发展起来的一种新型功能陶瓷材料。具有介电常数高、介电损耗低、频率温度系数小等优良性能。用微波陶瓷设计合适的介质谐振器能满足微波电路小型化、集成化、高可靠性和低成本的要求^[1-2]。介质谐振器的谐振频率是微波电路的重要参数,由于材料配方误差、烧结条件微小差异等,都可能导致最终产品不符合应用要求。因此,介质谐振器的频率调节成为生产过程中一个重要环节。目前广泛应用的频率调节法是机械研磨法,通过表面研磨,减小介质谐振器高度,从而提高谐振器的谐振频率。机械加工方法存在不可避免的机械精度问题,往往研磨时间较长,效率较低^[3]。针对此问题,研究提出激光加工技术的新方法,实现对介质谐振器进行精细刻蚀调节,推导有限元法并从

理论上分析频率微调的可行性,通过实验研究微调刻蚀操作中存在的几种影响因素,获得激光微调参数与谐振频率改变量的关系式。最后用自制的微波介质谐振器验证了激光刻蚀微调法的优势。

1 理论分析

图1为MIC中介质基片上的介质谐振器系统。图中, ϵ_r 为介质基板相对介电常数, $D=2a$ 为样品直径, H 为高度, s 为介质基板厚度, g 为金属杆与介质谐振器间隙,介质谐振器上、下表面为平行金属板距离。根据Maxwell方程组,可得到电场 $\mathbf{E}$ 和磁场 $\mathbf{H}$ 矢量形式的Helmholtz方程:

$$\begin{cases} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E} / \mu_r) - k^2 \epsilon_r \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \times (\nabla \times \mathbf{H} / \epsilon_r) - k^2 \mu_r \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ_r, μ_r 分别为相对介电常数和相对磁导率; k 为自由空间波数,且 $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$,其中, ϵ_0, μ_0 分别为

收稿日期:2011-09-26

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2008J0036)

作者简介:陈赐海(1973-),男,福建漳州人,讲师,硕士,主要从事微波理论应用的研究。

真空中介电常数和磁导率。

对于理想的无耗边界条件,电场满足第一类和第二类边界条件:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{n} \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

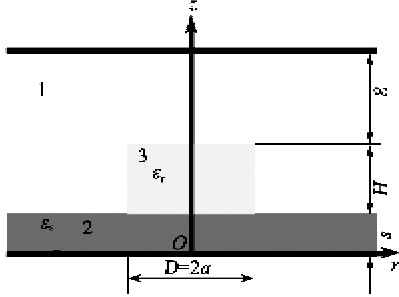


图1 MIC中介质基片上的介质谐振器

在两种介质(i, j)的交界面处,电场和磁场的切向分量连续。可得电场的第一、二类边界条件:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_i - \mathbf{E}_j) &= 0 \\ \mathbf{n} \times (\mu_{ri}^{-1} \nabla \times \mathbf{E}_i - \mu_{rj}^{-1} \nabla \times \mathbf{E}_j) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

导体表面存在的边界关系为

$$\mathbf{H} = \frac{1}{(1+j)\sqrt{\pi f \mu / \sigma}} \mathbf{n} \times \mathbf{E} \quad (4)$$

即

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \frac{1}{(1+j)R_s} \mathbf{n} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \quad (5)$$

式中: $R_s = \sqrt{\pi f \mu / \sigma}$ 称为导体表面电阻; f 为谐振频率。利用Maxwell方程可得到有耗导体的第三类边界条件:

$$\mathbf{n} \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - \eta (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \mathbf{n} = 0 \quad (6)$$

式中 $\eta = \frac{(1+j)\pi f \mu_0}{R_s}$ 。

可以证明^[4],对于图1所示的多种各向同性介质谐振系统,与电场Helmholtz方程及其边界条件等价的泛函为

$$J[\mathbf{E}] = \frac{1}{2} \left\{ \int_V [(\nabla \times \mathbf{E})^2 / \mu_r - \epsilon_r k^2 \mathbf{E}^2] dV + \int_S \eta (\mathbf{n} \times \mathbf{E})^2 dS \right\} \quad (7)$$

式中: V 为各分区; S 为电磁损耗边界。

通过求解波数 k^2 为本征值的方程,同时获得电场矢量本征分布函数,计算过程在Matlab的PDEtool下用有限元法实现。

$$\omega = \sqrt{k^2 / (\mu_0 \epsilon_0)} = \omega_0 \left(1 + \frac{j}{2Q} \right) \quad (8)$$

式中 Q 为介质谐振器的品质因数。根据式(8)可求得系统介质谐振器的 f 和 Q 。

以文献[5]提供的几种样品作为算例,得到与其

他方法比较的计算结果如表1、2所示。

表1 介质谐振器样品参数

ϵ_r	ϵ_s	D/mm	H/mm	S/mm	g/mm
34.19	9.6	14.98	7.48	0.7	0.720
34.21	9.6	13.99	6.95	0.7	1.250
34.02	9.6	11.99	5.98	0.7	2.215
36.13	9.6	6.03	4.21	0.7	10.100

表2 圆柱形介质谐振器 f_0 和 Q 求解比较

编号	参数	FEM 本文	FD-SIC [5]	EDC [6]	MM [7]
1	f_0/GHz	4.353	4.351	4.34	4.348
	Q	2464	2458	2473	2470
2	f_0/GHz	4.528	4.524	4.51	4.523
	Q	2446	2449	2457	2440
3	f_0/GHz	5.058	5.052	5.01	5.050
	Q	2413	2417	2423	2410
4	f_0/GHz	8.235	8.228	8.14	8.220
	Q	2242	2257	2181	1980

通过与文献结果(等效介电常数法、模匹配法及有限差分法)进行比较,表明该方法具有较高的求解精度。

2 验证分析

应用本文提出的FEM对文献[5]上的介质谐振器TE01 δ 模的金属机械调节进行分析。谐振器结构如图2(a)所示。 f 和金属传导损耗的品质因数 Q_c 随 g 的变化关系如图2所示,图中, $s=2\text{ mm}$, $H=4\text{ mm}$, $D=10\text{ mm}$, $g+h=8\text{ mm}$, $\epsilon_r=38$, $\epsilon_s=1$, $\sigma=5.336 \times 10^7\text{ S/m}$,计算结果与文献[5-7]一致。从而验证FEM方法的有效性。

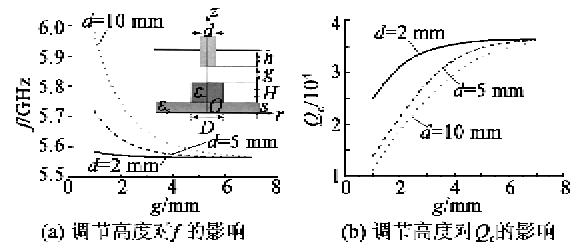


图2 调节高度对 f 和 Q_c 的影响

由图2(a)可看出,随着 g 的增大,其对谐振频率影响越来越小,频率的调节量也越小;当 $g < 4\text{ mm}$ 时,增大金属杆直径 d ,可增加谐振频率的调节量。因此,可增大 d 、减小 g 来获得较大的频率调节量。

由图2(b)可看出,随着 g 的增大, Q_c 也随着增大,金属损耗减小; d 越大, Q_c 越小。因此,可缩小

d 、增加 g 来减小导体损耗。

由以上的分析可得,谐振频率和品质因数的调节量存在矛盾。为减少损耗,希望微波电路获得较大的品质因数,此时谐振频率的调节量却明显减小。如果电路要求 $Q_0 > 25\ 000$,采用 $d = 2\text{ mm}$ 的金属杆,谐振频率的调节量接近于 0;采用 $d = 10\text{ mm}$ 的金属杆,必须要求 $g > 3\text{ mm}$,此时调节量仅约为 50 MHz。

总之,该机械调节法存在主要问题是谐振频率的改变量因金属导体损耗的影响而受限。

3 激光刻蚀法影响因素

3.1 谐振器结构

介质谐振器的 TE 模具有轴对称性,TE_{01δ} 模是主要工作模式,具有很多优点,在实际微波电路中可用微带线或探针等进行耦合,为保持介质谐振器的轴对称性,激光刻蚀时采用圆形或环形刻蚀,如图 3 所示。

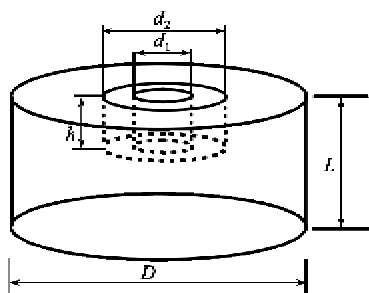


图3 介质谐振器激光刻蚀示意图

由矢量网络分析仪、激光打标机、计算机、平行板测试夹具及其单片机控制步进电机电路等硬件构成微调系统,测得的频率值与理论计算的一致,说明刻蚀微调的可行性。

3.2 影响因素

介质谐振器的调频是其制造工艺过程的最后重要环节。文献[8-9]提到几种不同的谐振频率的调节方法,而激光刻蚀法更具特色和优点,激光刻蚀对介质谐振器具有一定破坏性,主要体现在刻蚀之后的介质谐振器会产生轻微的不光滑表面,影响介质谐振器的性能。为了研究激光刻蚀对谐振器性能的影响程度,通过改变实验条件,从刻蚀尺寸,材料配方,刻蚀次数等角度进行分析。

3.2.1 刻蚀尺寸

以 BMZN 配方介质谐振器为例,表 3 为采用不同刻蚀尺寸得到谐振器参数变化情况(激光机刻蚀参数:速度 3 500 m/s,电流 5 A,频率 10 kHz,刻蚀

次数 $N = 200$),频率的微调量达到 0.02%。表中, d_1 和 d_2 分别为介质谐振器刻蚀环内径和外径, L 为高(深)度, f_0 为介质谐振器的谐振频率。对于同样的内外径刻蚀间距,随着内径 d_1 的增大,刻蚀后的介质谐振器的频率变化量也随着增加,而介质谐振器无载品质因数 Q_0 基本保持不变。如果为获得较大的调节量,可略偏离轴心刻蚀。

表3 不同刻蚀尺寸的谐振频率 f 和 Q_0 的变化

D mm	L mm	d_1 mm	d_2 mm	f_0 MHz	Δf MHz	Q_0	ΔQ_0
7.69	2.64	1	2	9 285	2	839	6
7.64	2.58	3	4	9 353	36	840	12
7.68	2.60	4	5	9 341	61	848	-60
7.66	2.55	5	6	9 441	91	826	-4

3.2.2 材料配方

采用不同的材料配方,实验结果如表 4 所示。激光机刻蚀参数:速度 3 500 m/s,电流 5 A,频率 10 kHz, $N = 100$ 。由表可看出,刻蚀后介质谐振器 Q_0 并不发生显著的变化,说明在一定调节量内刻蚀,介质谐振器的性能基本不变。

表4 不同材料配方的谐振频率 f 和 Q_0 变化

	D mm	L mm	d_1 mm	d_2 mm	f_0 MHz	Δf MHz	Q_0	ΔQ_0
CTLA 配方	7.64	2.56	2.0	4.0	9 383	38	735	-7
	7.62	2.54	3.0	5.0	9 334	67	845	-38
	7.65	2.50	4.0	6.0	9 392	87	813	-26
BMZN 配方	6.96	2.02	3.0	5.0	9 221	46	1 858	23
	6.96	2.00	4.0	6.0	9 238	62	1 901	15
	6.94	2.02	4.5	6.5	9 205	67	1 807	46

3.2.3 n 对频率改变量 Δf 的影响

以 CTLA 配方的介质谐振器为例,尺寸 $D = 6.2\text{ mm}$, $L = 1.9\text{ mm}$,激光机刻蚀参数:速度为 3 500 mm/s,电流为 5 A,频率为 10 kHz, $d_2 = 6\text{ mm}$, $d_1 = 5\text{ mm}$, Δf 与 N 的关系曲线如图 4 所示。

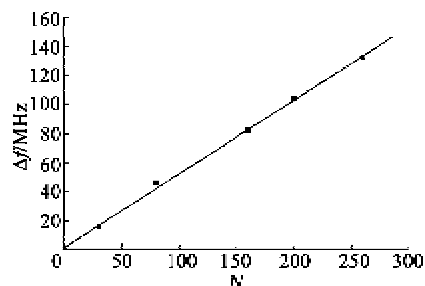


图4 Δf 与 N 的关系

Δf 与 N 近似为线性关系:

$$\Delta f = 1.735 + 0.506N \quad (9)$$

因此,通过设置合理的激光参数(速度、电流、频率等),并控制激光刻蚀次数 N ,就可精确控制 Δf ,实现频率微调。

3.3 设计介质谐振器

以商用标准样谐振频率的相对误差在 0.2% 内

为衡量标准,采用激光刻蚀法,选用 CTLA 配方,自制的微波陶瓷介质谐振器如表 5 所示(激光机刻蚀参数:速度 3 500 mm/s,电流 5 A,频率 10 kHz, $d_2 = 6$ mm, $d_1 = 5$ mm),谐振频率能达到标准样的要求。同时可看到,通过刻蚀,微波陶瓷介质谐振器 Q 得到一定的改善。

表 5 自制介质谐振器与商用标准样对比

编号	D/mm	L/mm	f/MHz	ϵ_r	$Q \times f/\text{GHz}$	备注
SZ0 #	5.50	2.01	9141	43.98	37 705	(商用)标准样
CTLA1	6.18	1.87	9108	41.77	28 887	(未刻蚀)不合格
CTLA2	6.12	1.85	9 091	41.60	24 829	(未刻蚀)不合格
CTLA3	6.17	1.90	9 070	41.69	27 265	(未刻蚀)不合格
CTLA1(30 次)	6.18	1.87	9 124	41.68	29 621	(刻蚀后)合格
CTLA2(80 次)	6.12	1.85	9137	41.49	25 354	(刻蚀后)合格
CTLA3(160 次)	6.17	1.90	9 152	41.51	28 588	(刻蚀后)合格

4 结束语

本文运用电磁理论推导求解本征值问题的有限元法,通过与其他计算方法的比较和机械调节问题的验证,阐明理论方法的正确性及机械调节法的缺点。提出激光加工技术的新方法,采用精细刻蚀微波陶瓷介质谐振器以实现参数调节。通过激光刻蚀实验,重点探讨激光微调刻蚀操作中存在的几种影响因素,获得激光微调参数与谐振频率改变量的关系。只要合理设置激光的微调参数(加工次数和尺寸等),就能将谐振频率调至要求的范围内。最后用自制的微波介质谐振器验证了激光刻蚀法微调的优势。

参考文献:

- [1] 王光辉,梁小平,史奕同,等.高介电常数微波介质陶瓷材料的研究现状[J].硅酸盐通报,2008,27(2):312-317.
WANG Guanghui, LIANG Xiaoping, SHI Yitong, et al. Research status of high dielectric constant microwave dielectric ceramics[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2008, 27(2): 312-317.
- [2] 周东祥,潘杰夫,龚树萍,等.一种微波介质谐振器复介电常数测试方法[J].压电与声光,2003,25(5):433-435.
ZHOU Dongxiang, PAN Jie fu, GONG Shu ping, et al. A testing method for complex dielectric constant of microwave dielectric resonator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2003, 25(5): 433-435.
- [3] 曹良足,陈刚,胡鸿豪.介电常数对介质谐振器调频工作效率的影响[J].电子元件与材料,2005,24(11):33-34.

CAO Liangzu, CHEN Gang, HU Honghao. Effects of dielectric constant on efficiency of adjusting frequency for dielectric resonators[J]. Electronic Components & Materials, 2005, 24(11): 33-34.

- [4] 肖芬,骆超艺,陈赐海.一种求解微波介质谐振器复介电常数的方法[J].固体电子学研究进展,2007,27(2):226-229.
XIAO Fen, LUO Chaoyi, CHEN Cihai. A method for solving the complex permittivity of the microwave dielectric resonator [J]. Research & Progress of SSE, 2007, 27(2): 226-229.
- [5] GUAN J M, SU C C. Precise computations of resonant frequencies and quality factors for dielectric resonators in MIC's with tuning elements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(3): 439-442.
- [6] MONGIA R K, BHARTIA P. Accurate conductor Q -factor of dielectric resonator placed in an MIC environment [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(3): 445-449.
- [7] MAJ S, MODELSKI J W. Application of a dielectric resonator on microstrip line for a measurement of complex permittivity[J]. IEEE MTT-S Digest, 1984, 23(6): 525-527.
- [8] WINTER D Y, MANSOUR R R. Tunable dielectric resonator bandpass filter with embedded MEMS tuning elements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(1): 154-160.
- [9] GREGORY I P, OTT R, KLEIN N. Dielectric resonator with discrete electromechanical frequency tuning[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(11): 3371-3377.