

压电超声换能器阻抗特性分析与匹配设计

王玉江², 王志斌^{1,2,3}, 宋雁鹏², 解琨阳², 赵同林²

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要:压电超声换能器在不同的工作频率下具有不同的输入阻抗, 当驱动信号源输出阻抗与换能器输入阻抗失配时会产生能量损耗, 导致无法满足换能器的功率要求, 从而使其光谱衍射效率降低, 影响光谱成像质量。为此对换能器阻抗频率特性的深入研究, 设计了一种新型宽带阻抗匹配网络。通过 ADS 仿真及匹配电路的测试, 最终在 115~180 MHz 超声波频率内可使换能器的光谱衍射效率最高达 70%。

关键词:压电超声换能器; 频率特性; 阻抗匹配; 衍射效率

中图分类号: TN384; TB552 **文献标识码:** A

Impedance Characteristic Analysis and Matching Design of Piezoelectric Ultrasonic Transducer

WANG Yujiang², WANG Zhibin^{1,2,3}, SONG Yanpeng², XIE Kunyang², ZHAO Tonglin²

(1. Electronics Laboratory Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Provincial Research Center for Opto-electronic Information and Instrument Engineering Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Key Lab. of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The piezoelectric ultrasonic transducer has different input impedances at different frequencies. The mismatch between the output impedance of the driving signal source and the input impedance of the transducer will result in energy losses and can't meet the power requirements of the transducer, thus the spectroscopy diffraction efficiency will be reduced and affect the spectral imaging quality. So to do this, the transducer impedance frequency characteristics has been studied deeply and a new broadband impedance matching network was designed. By ADS simulation and experimental testing of matching circuit, Finally, the spectral diffraction efficiency get up to 70% within the 115~180 MHz ultrasonic frequency.

Key words: ultrasonic transducer; frequency characteristic; impedance matching; diffraction efficiency

0 引言

声光可调滤波器(AOTF)作为一种新型分光系统,它具有体积小,入射角和通光孔径大,光谱扫描速度快,全固态无移动部件,调谐范围宽,分辨率高及衍射效率高等优点,广泛应用于机载或星载的成像光谱仪^[1-3]。压电超声换能器是 AOTF 最重要的部件,它是产生光谱衍射的超声振荡源,具有重要的作用。AOTF 中的驱动信号经过阻抗匹配网络加载在 AOTF 压电超声换能器上,在声光晶体中产生超声波,与准直入射到 AOTF 中的复色光发生相互

作用,实现光谱选择。由于压电超声换能器在不同频率下具有不同的输入阻抗,当驱动信号源输出阻抗与超声换能器输入阻抗失配时会产生能量损耗,导致换能器两端的电能无法最大限度的转变为对外做功的机械能,从而影响换能器的衍射效率,甚至无法发生衍射。当前大部分换能器的阻抗匹配方法都是采用电阻变压器的匹配方法,这种匹配方法由于变压器存在发热损耗,换能器长时间会使衍射效率降低。为此,本文采用电感-电容无耗元件设计了一种新型的阻抗匹配网络,该网络可以使信号源的输

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国际科技合作基金资助项目(2013DFR10150); 国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(61127015);

作者简介: 王玉江(1989-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事高频信号的获取与处理的研究。E-mail: 1522916824@qq.com。王志斌(1966-),男,山西长治人,教授,硕士,硕士生导师,主要从事测试计量技术及仪器、光电子技术与仪器、光学工程、光电信息工程的研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn。

输出功率几乎完全转化为换能器的机械功率,提高了能量的利用率,从而提高光谱衍射强度及效率。

1 压电超声换能器工作原理

压电换能器设计中,布喇格(Bragg)带宽和Bragg衍射是最重要的考虑因素。非线性反常Bragg衍射的AOTF具有相对Bragg带宽大等优点^[4]。本AOTF系统基于反常Bragg衍射的声-光相互作用的原理,当一束准直复色光以某一特定的入射角进入声光晶体中,由射频驱动源产生的高频信号加载在压电换能器上时,压电换能器把电振荡转换成超声振荡,并通过换能器与声光介质间的金属镀层传递到声光介质中形成超声波,在声光介质中通过声光相互作用,超声波将引起入射光的Bragg衍射,产生衍射光,从而起到滤光器的作用,其衍射光的波长与超声波的频率有着对应的关系,只要改变驱动信号的频率,即可改变衍射光的波长。换能器长度(L)越小,换能器的带宽就越大,衍射光谱范围就越宽,光谱衍射效率却越小;L越大,则光谱衍射效率越小。因而Bragg带宽和衍射效率平衡显得尤为重要,为了获得满意的换能器带宽和衍射效率就必须确定换能器的长度和厚度及各镀层的结构、材料、厚度等。通过选取合适的换能器宽度(H)便于阻抗匹配。AOTF压电超声换能器工作原理如图1、2所示。压电超声换能晶片(LiNbO₃)与声光晶体(TeO₂)

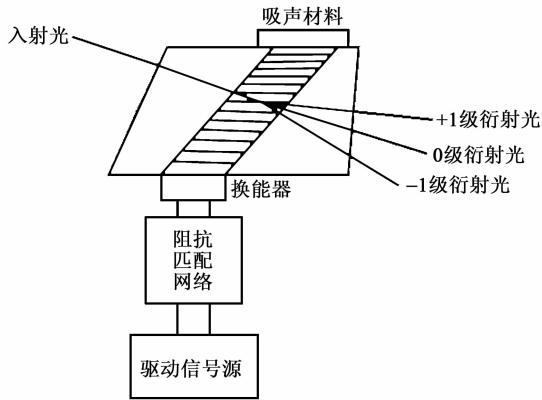


图1 AOTF结构示意图

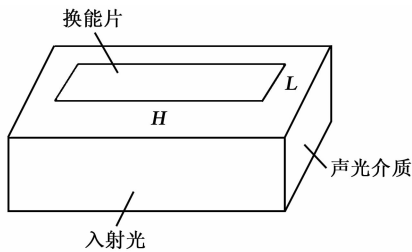


图2 超声换能器结构示意图

之间是利用键合工艺压在一起的,两晶体间需镀若干金属膜,整个声光器件的镀膜结构和各部分的特征量,如图3所示。图中, ρ_n 为密度; V_n 为声速; d_n 为厚度; k 为压电层机电耦合系数; C_0 为静态电容。

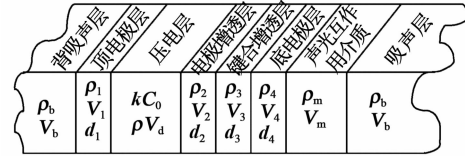


图3 声光器件的镀膜结构

在压电层与声光作用介质之间的3层金属膜分别是2个电极层和1个键合层,电极层用于焊接引线,一般采用银或金。键合层是将两晶体压合在一起,它的作用一是声学增透,二是把压电层的机械振动耦合到声光作用介质中去形成超声波,一般采用钢或锡等较软的金属。对于压电层,还需加上 k 和换能器薄片的 C_0 两个特征量。声光器件总可以用参数串来表示,即 $(z_1, t_1) - P(k) - (z_2, t_2) - (z_3, t_3) - (z_4, t_4) - z_m$,其中参数串包括各镀层相对声阻抗 z_n 、相对厚度 t_n 、机电耦合系数为 k 的压电晶片 $P(k)$ 和声光介质相对声阻抗 z_m 。

2 压电超声换能器阻抗特性分析

AOTF系统中采用厚度驱动模式的薄片换能器,其各镀层的厚度对换能器的工作特性具有重要的影响,特别是其阻抗特性与带宽特性。玛森(Mason)等效电路是计算换能器相关性能参数的基础^[5],通过Mason等效电路可获得换能器损耗、换能器3dB带宽、输入电阻、输入电抗等的频率特性,从而得到换能器3dB带宽条件下的理论换能器输入阻抗匹配阻值。

2.1 压电超声换能器等效电路

在超声换能器进行阻抗分析时,我们只需知道换能器的外部参量之间的关系,因此,可以把换能器视作一个矩阵网络,用等效电路来研究其频率特性,如换能器的损耗、输入阻抗等。常用的换能器的外部参量有电端的电压 U 与电流 I 、声端的作用力 F 与质点的振动速度 V 。而 F 与 V 之间遵循类似欧姆定律($U=RI$)的关系 $F=ZV$,其中, Z 为声阻抗。鉴于体波声光器件总是采用厚度驱动模式的薄片换能器,其Mason等效电路是换能器损耗、换能器3dB带宽、输入电阻、输入电抗等频率特性的重要依据。压电晶体层Mason等效电路如图4所示。图中, Z_0 为压电层绝对声阻抗, Z_1 为顶电极层绝对

声阻抗, γ 为压电层的相移, γ_1 为顶电极层的相移, ϕ 为变压比参数, Mason 等效电路右边部分参数为 T 形网络阻抗参数值。

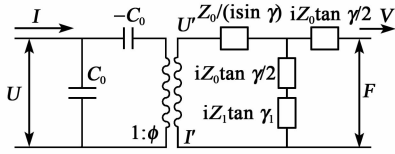


图4 Mason 等效电路图

由图4可将压电层的左部传递矩阵 A'_0 表示为

$$\begin{pmatrix} U \\ I \end{pmatrix} = A'_0 \begin{pmatrix} U' \\ I' \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$A'_0 = \begin{pmatrix} A'_0 & B'_0 \\ C'_0 & D'_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

假设 A'_0, B'_0, C'_0, D'_0 是 A'_0 传递矩阵的元素, 则由式(1)、(2)可得 $U = A'_0 U' + B'_0 I'$, $I = C'_0 U' + D'_0 I'$, 故令 $I' = 0$, 变压器次级线圈开路, 次级与初级线圈都无电流, 不产生电压降, 次级两端线圈电压 U' (等于初级两端线圈电压 U 的 ϕ 倍, U 与 U' 之间的关系可求出传递矩阵的元素 $A'_0 = 1/\phi$, I 与 U, U' 与 U' 之间的关系可求出传递矩阵的元素 $C'_0 = i\Omega C_0/\phi$; 再令 $U' = 0$, 变压器次级线圈短路, 初级线圈也相当于短路, 两线圈都无电压降。由于两个电容大小相等符号相反, 在电压一定时, 产生的电流大小相等、方向相反, 故左端口的输入电流 $I = 0$, 即 $D'_0 = -I/I' = 0$; 次级线圈中的电流 I' 等于初级电流的 $1/\phi$ 倍, 因此由 U, I' 与初级电流间的关系可求出传递矩阵元素 $B'_0 = i\phi/\Omega C_0$ 。故 Mason 等效电路左部的传递矩阵为

$$A'_0 = \frac{1}{\phi} \begin{pmatrix} 1 & i\phi^2/\Omega C_0 \\ i\Omega C_0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Mason 等效电路右部的网络传递矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} & \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3}{Z_2} \\ \frac{1}{Z_2} & \frac{Z_2 + Z_3}{Z_2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中

$$Z_1 = \frac{Z_0}{i \sin \gamma} \quad (5)$$

$$Z_2 = iZ_0 \tan \frac{\gamma}{2} + iZ_1 \tan \gamma_1 \quad (6)$$

$$Z_3 = iZ_0 \tan \frac{\gamma}{2} \quad (7)$$

将式(5)~(7)代入式(4)得到 Mason 等效电路

右部的矩阵 A , 式(3)、(4)矩阵相乘得到整个压电层的传递矩阵 A_0 为

$$A_0 = A'_0 \times A = \frac{1}{s\phi} \begin{pmatrix} 1 & i\phi^2/\Omega C_0 \\ i\Omega C_0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} (\cos \gamma - z_1 \tan \gamma_1 \sin \gamma) & iZ_0 (\sin \gamma + z_1 \tan \gamma_1 \cos \gamma) \\ i \sin \gamma / Z_0 & 2(\cos \gamma - 1) - z_1 \tan \gamma_1 \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: $s = \cos \gamma - 1 - z_1 \tan \gamma_1 \sin \gamma$; ϕ 为纯 X 切变波铌酸锂模式的变压比。换能器压电层的特性由 Mason 等效电路确定, 但各个镀层的特性采用传输线的网络传递矩阵更方便, 每个镀层可看做一个两端网络, 各镀层的传递矩阵为

$$A_n = \begin{pmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_n & iZ_n \sin \gamma_n \\ i \sin \gamma_n / Z_n & \cos \gamma_n \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中: γ_n 为各个镀层的相移; Z_n 为各个镀层的绝对声阻抗。

整个超声换能器总网络结构如图5所示。

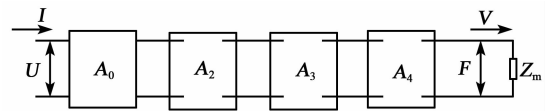


图5 超声换能器总网络结构图

由式(8)、(9)得到总传递矩阵 $A = A_0 \times A_2 \times A_3 \times A_4$, 输出端负载为声光相互作用介质的 Z_m 。对网络矩阵分析, 可以通过 MATLAB 计算压电换能器的各项阻抗特性。

2.2 压电超声换能器的阻抗特性

由图5可得超声换能器总传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} U \\ I \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} F \\ V \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$A = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中 $F = Z_m V$ 。计算换能器损耗(TL)为

$$TL = -10 \lg \left(\frac{4R_s Z_m}{|a + R_s b|^2} \right) \quad (12)$$

式中: $a = AZ_m + B$; $b = CZ_m + D$; R_s 为驱动电源的内阻。在 $TL-F$ 曲线中, $TL < 3$ dB 时对应的频率范围作为 3 dB 布喇格带宽, 这是很重要的设计指标。

压电换能器系统采用双增透、X 切声光器件镀膜结构, 取频率比 $\alpha = f_0/f_c = 1.2$ (f_0 为半波长频率, f_c 为中心频率)。声光器件参数串 $(z_1, t_1) - P(k) - (z_2, t_2) - (z_3, t_3) - (z_4, t_4) - z_m$ 为 $(0.78, 0.08) - P(0.69) - (0.78, 0.6) - (0.287, 0.7) - (0.78, 0.03) - 0.166$ 。用钢和金层作双增透, 各镀

层中, t_2 为金增透膜相对厚度, t_3 为铜增透膜相对厚度, t_4 为金底电极相对厚度, t_1 为金顶电极。通过不断地修改各镀层的厚度, 最终确定该参数串选下的 3 dB 带宽最佳, 各镀层的厚度: $l_1 = \frac{v_1/2}{f_0} t_1 = \frac{930/2}{150} \times 0.08 = 0.248 (\mu\text{m})$, $l_2 = \frac{930/2}{150} \times 0.6 = 1.86 (\mu\text{m})$, $l_3 = \frac{910/2}{150} \times 0.7 = 2.123 (\mu\text{m})$, $l_4 = \frac{930/2}{150} \times 0.03 = 0.093 (\mu\text{m})$, 单位换能片各镀层的厚度对输入阻抗影响很大, 镀层不仅具有增透作用, 还具有减小阻抗变化率的作用。TeO₂ 作为声光介质, 其 S[110] 方向的声速 $V = 616 \text{ m/s}$, 采用入射波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 激光, 使用 o 光模式, 其入射光折射率 $n_0 = 2.26$, 取 He-Ne 激光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $f_c = f_0/1.2 = 125 (\text{MHz})$, 则中心频率处的特征长度 $L_0^C = \frac{n_0 \Delta^2}{\lambda} = 0.087 (\text{mm})$ (其中上角 C 为中心频率, Δ 为声波长), 故 $L = 3.68 L_0^C = 0.32 (\text{mm})$, 此单片 L 达到最佳衍射条件。采用铌酸锂晶体厚度 l 为 $16 \mu\text{m}$, 由 $f_0 = v/2l = 150 (\text{MHz})$, 驱动信号源的 $R_s = 50 \Omega$ 。要想对换能器进行阻抗匹配, 就必须知道换能器的 3 dB 布喇格带宽及阻抗特性, 在 3 dB 带宽内通过阻抗频率变化曲线, 确定阻抗匹配理论值。通过 MATLAB 编程, 换能器损耗图如图 6 所示, 3 dB 带宽为 71~183 MHz, 换能器归一化输入阻抗模 $|z_i|$ 、归一化输入电阻、归一化输入电抗^[6-7] 如图 7~9 所示, 图中 f/f_0 为相对频率。

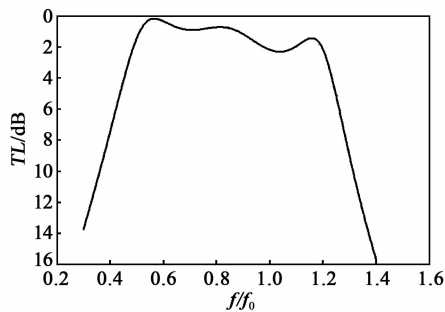


图 6 换能器损耗图

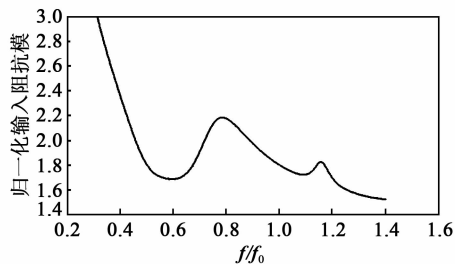
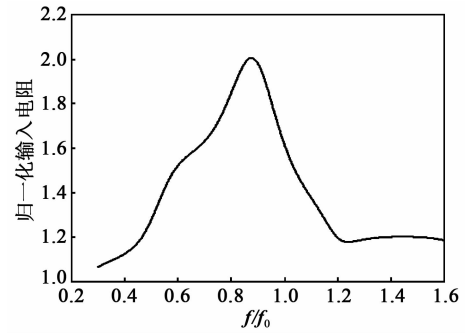
图 7 归一化输入阻抗模 $|z_i|$ 

图 8 归一化输入电阻

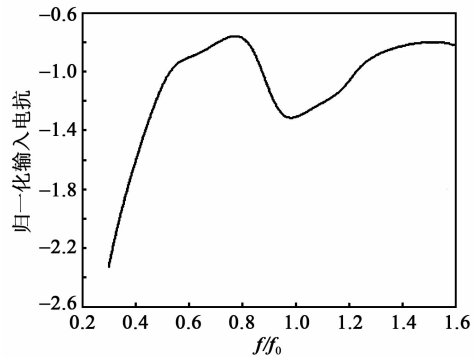


图 9 归一化输入电抗

在实际试验测试中发现, 由于换能片顶电极的长度太小, 制作工艺上较难; 单片结构的超声能量分布在相当大的角度范围内, 而每个频率只利用了某一个方向上的声能量, 使超声能量较低, 会影响衍射效率。为了解决以上问题, 我们采用换能器多片结构, 多片结构是可以使超声能量主方向由各个换能片所激发超声波相干叠加的结果。为了对所有频率实现完全跟踪, 各换能片必须用独立的电源供电驱动, 相邻两换能器片间的相位差必须随频率而变化, 故完全跟踪的驱动电源将很复杂, 无法达到实用要求, 所以用一个驱动电源, 通过不同的连接方式可以实现相邻两换能片间不同的相位差, 各换能片间并联时, 相邻换能片上所加电场方向相同, 相位差为 0, 同相位不随频率而变化; 串联时, 相邻换能片上所加电场方向相反, 铌酸锂极化方向相反, 相位差为 π 。所以采用平面多片串联结构换能器比单片超声利用率、衍射效率更高。平面多片串联结构换能器如图 10 所示。平面多片串联结构换能器, 在结构上是串联的, 但在同一个驱动电源情况下, 各铌酸锂分片的正负电极都各自连接在换能器匹配电路的正负极, 这样就可等效看作是各铌酸锂分片是并联的^[8]。相同的铌酸锂片并联, 由于相同电阻和电容各自并

联时,输入阻抗的实部电阻值减小,电阻值 $R_i = R'_i/N$;输入阻抗的虚部电抗值也减小,即 $X_i = X'_i/N$,所以 $Z_i = Z'_i/N$ 。在 $f/f_0 = 0.8 \sim 1.0$ 时,求得平均输入阻抗值 Z'_i ,即每片换能器的输入阻抗 $Z'_i = 96 - j \times 44$,选 $N = 8$ 片并联,则 $Z_i = Z'_i/N = 12 - j \times 5.5$ 。

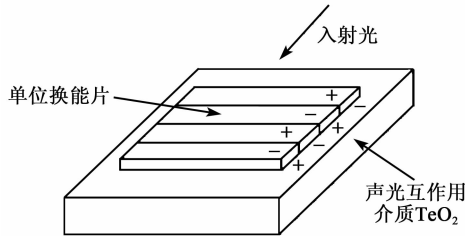


图 10 平面多片串联结构换能器

3 阻抗匹配设计

由图 9 可知,超声换能器是一种非线性容性负载,其工作频率上输出电压和电流存在一定的相位差,这种相位差使输出功率达不到期望的最大值。目前大部分换能器匹配方法有

1) 在换能器两端并联或串联一个反向电抗,使换能器变为一个纯电阻。

2) 在驱动信号源和换能器之间加入变压器,将换能器的纯电阻值变换成与驱动信号源内阻相等,当驱动信号源内阻和负载相等时,负载能得到额定功率^[9-10]。但在这种匹配方法中,存在变阻变压器发热损耗,会吸收很大的功率,作为只需 3~4 W 换能器驱动功率,这种损耗是很大的。而采用储能 LC 元件匹配网络几乎无损耗。通过使用射频电路设计软件 ADS 仿真,将驱动信号源内阻 50 Ω 直接通过 LC 匹配网络匹配到理论值 $12 - j \times 5.5$ ^[11-13],通过实验测试,衍射效率并不高。经过不断地改变阻抗及 LC 参数值,当换能器的输入阻抗在 $10 - j \times 5$ 时,衍射效率最高。匹配电路如图 11 所示。

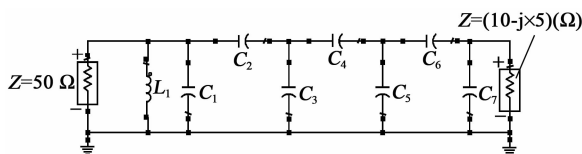


图 11 匹配电路图

通过 ADS 仿真,在 100~200 MHz 范围内, $S_{21} > -0.15$ dB,回波损耗 $S_{11} < -15$ dB。匹配网络电路较好地达到了匹配要求。 S_{21} 、 S_{11} 频率特性如图 12 所示。

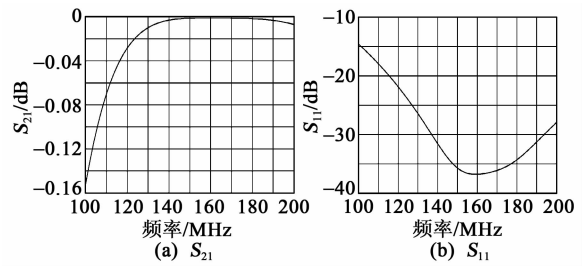


图 12 S_{21} 、 S_{11} 频率特性图

4 实验测试

利用 HR4000 光谱仪,在实验系统平台上进行实验测试,将可见光透过超声换能器,使 0 级光对准 HR4000 光谱仪探针,在光谱仪 SpectraSuite 软件中,实时观察在 115~180 MHz 频率范围内发生衍射及衍射强度的情况,通过不断地改变超声换能器阻抗及 LC 值,最终由实验可得当换能器阻抗在 $10 - j \times 5$ 时,衍射强度波坑下降最大,衍射效率最高。为了便于理论阻抗值与最佳阻抗值的衍射强度的比较,在 115~180 MHz 衍射范围内抽取若干点进行数据采集并对衍射图拟合,如图 13、14 所示,图中的纵坐标是用采集到的光子数来表示的,其单位是计数值。利用 MATLAB 对光谱仪采集的数据进行处理,得到理论和最佳阻抗的衍射效率^[14],如表 1 所示。

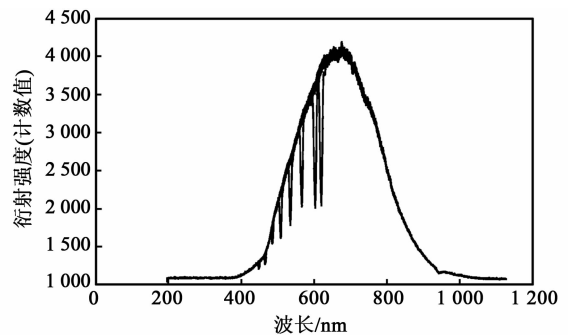


图 13 理论阻抗衍射强度图

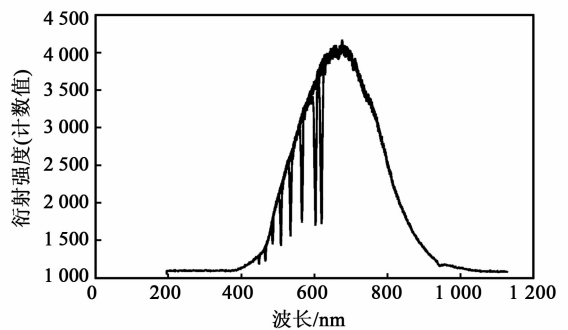


图 14 最佳阻抗衍射强度图

表1 不同频率衍射效率

驱动信号频率/MHz	115	120	130	140	150	160	170	180
实测波长/nm	620.0	602.6	565.6	534.6	508.3	484.8	465	448.5
理论阻抗衍射效率 (12-j×5.5)/%	64.84	62.58	54.17	53.69	51.50	31.86	37.24	33.96
最佳阻抗衍射效率 (10-j×5)/%	76.12	74.79	65.51	67.86	67.09	45.13	51.83	40.55

5 结束语

系统 AOTF 超声换能器采用平面多片串联结构,相邻单位换能片所激发的超声波相干叠加,使超声能量比单片时增大,光谱衍射效率变大。匹配电路采用储能 LC 元件匹配网络技术,与传统带有电阻变压器匹配技术相比具有以下几点:

1) 不发热,几乎无损耗,衍射效率更高。

2) 长时间使用,稳定性更好。

3) 匹配电路中只有电感和电容且电感数目远少于电容,更经济。该 AOTF 系统的换能器多片结构和 LC 匹配网络电路可以使 AOTF 系统获得较好的分光效果,衍射效率最高达 70% 以上,对当前基于 AOTF 的光谱仪成像技术应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 宋雁鹏,李晓,王志斌. 声光可调谐滤波器驱动系统设计[J]. 压电与声光,2015,37(4):721-725.
SONG Yanpeng, LI Xiao, WANG Zhibin. Design of acousto-optic tunable filter driving system[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2015,37(4):721-725.
- [2] WANG Jianyu, HE Zhiping, SHU Rong. Design and applications of space-borne imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter(AOTF)[C]//Incheon, Korea;Proceedings of SPIE,2010.
- [3] GUPTA N, VOLOSHINOV V B. Development and characterization of two-transducer imaging acousto-optic tunable filters with extended tuning range[J]. Applied Optics,2007,46(7):1081-1088.
- [4] 俞宽新,丁晓红,庞兆光. 声光原理与声光器件[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [5] 张春光. 基于超光谱成像系统的声光可调滤波技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [6] 苏金明,王永利. MATLAB7.0 实用指南[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [7] 杨丹,赵海滨,龙哲. MATLAB 图像处理实例详解[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [8] 曾洪. 声阻抗匹配层 OPCM 超声换能器的优化设计和实验研究[D]. 镇江:江苏大学,2011.
- [9] 李存波,谢本亮. TeO₂ 压电换能器的外部匹配网络设计[J]. 压电与声光,2011,35(5):768-770.
LI Cunbo, XIE Benliang. Design of the external matching network of TeO₂ piezoelectric transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2011,35(5):768-770.
- [10] 徐晓伟. 压电超声换能器的阻抗匹配分析[J]. 压电与声光,2014,36(5):745-747.
XU Xiaowei. Analysis on the matching impedance of piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2014,36(5):745-747.
- [11] LUDWING R, BOGDANOV G. 射频电路设计-理论与应用[M]. 王子宇,王心悦,译,北京:电子工业出版社,2013.
- [12] LI R C H. 射频电路工程设计[M]. 鲍景福,唐宗熙,张彪,译. 北京:电子工业出版社,2011.
- [13] 徐兴福. ADS2011 射频电路设计与仿真实例[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [14] 张泽红,赵治国,雷波,等. 宽光谱声光可调滤波器[J]. 压电与声光,2013,35(1):19-23.
ZHANG Zehong, ZHAO Zhiguo, LEI Bo, et al. Acousto-optic tunable filter with wide spectral range[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics,2013,35(1):19-23.