

压电效应对 LiNbO₃ 集成光波导电场传感器 频率特性的影响

张家洪 陈福深 李万军

(电子科技大学通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘要 实验研究中发现 LiNbO₃ 集成光波导电场传感器的输出波形中叠加有频率在几百千赫兹左右的振荡信号, 导致传感器探测到的电场信号发生畸变。从 LiNbO₃ 衬底的压电效应出发对这一谐振现象进行了理论分析。比较谐振频率的理论计算值和实际测量值得知, LiNbO₃ 衬底的宽度是影响谐振的主要因素。针对一种用于雷电电磁脉冲测量的 LiNbO₃ 集成光波导电场传感器, 其设计衬底宽度为 3 mm, 再次实验发现振荡信号被抑制在 -30 dB 以下。

关键词 传感器; 铌酸锂; 集成光学; 电场传感器; 压电效应

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105006

Influence of Frequency Characteristics by Piezoelectric Effect on LiNbO₃ Integrated Optical Waveguide Electric Field Sensor

Zhang Jiahong Chen Fushen Li Wanjun

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science and
Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract In experiment it has been found that the output waveform of integrated optical waveguide electric field sensor is overlapped by interference signal with frequency of hundreds of kilohertz, which leads to a distortion of the detected electric field signal. The resonance phenomenon is analyzed theoretically based on the piezoelectric effect of LiNbO₃ crystal. By comparing the resonant frequency value of theoretical calculation with that of measurement, it shows that the resonance is mainly influenced by the width of LiNbO₃ substrate. For lightning impulse detecting, an integrated optical waveguide electric field sensor with 3 mm substrate width is designed and experimental results demonstrate that the resonance phenomenon has been obviously suppressed under -30 dB.

Key words sensors; lithium niobate; integrated optics; electric field sensor; piezoelectric effect

OCIS codes 130.6010; 130.3120; 230.4110; 160.3730

1 引 言

随着电子信息产业的不断进步, 周围的电磁环境变得越来越复杂, 人们不仅需要对微电子设备的电磁兼容(EMC)做出正确评价, 还须对核电磁脉冲(NEMP)、雷电电磁脉冲(LEMP)、高功率微波(HPM)、超宽带(UWB)、静电放电(ESD)等高功率

电磁脉冲做出正确评价, 以减少它们对电子设备的危害, 保证人们生活的正常进行^[1]。评估这些电磁脉冲最直接有效的办法就是对它们进行测量。因此, 在过去的几十年里电场传感器得到了极大的发展, 相继出现了以热电偶效应为基础的第一代电场传感器, 以激光二极管和偶极子天线为基础的第二

收稿日期: 2013-07-16; 收到修改稿日期: 2013-08-26

作者简介: 张家洪(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事集成光波导脉冲电场传感器方面的研究。

E-mail: zjh_mit@163.com

导师简介: 陈福深(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与集成光波导电磁场传感器方面的研究。

E-mail: fschen@uestc.edu.cn

代电场传感器,以及以晶体(如铌酸锂 LiNbO_3 , 钽酸锂 LiTaO_3 等)电光效应为基础的第三代电场传感器^[2-3]。相比较而言,以光学技术为基础的第三代电场传感器极大地减小了第一、第二代传感器中金属元件对被测电场的干扰,因而成为国内外研究的热点。20世纪80年代,研究人员主要研究基于泡克尔斯效应的电场传感器,但是这种电场测量系统需要多个分离的光学元件,因此限制了其实际应用。之后美国和英国的研究人员研究了将光波导、电极与天线有机集成在一起的基于泡克尔斯效应的集成光波导电场传感器。该传感器具有体积小、灵敏度高、带宽宽等优势,因而受到国内外研究人员的重视并被广泛应用于 EMC 以及瞬态强电磁脉冲的测量^[4-6]。但是,这种电场传感器常常在几百千赫兹甚至几兆赫兹处出现谐振现象,严重影响了测量的精确度^[7]。

因此,分析产生谐振现象的原因,提出相应的解决办法对于设计更高指标的集成光波导电场传感器具有重要意义。本文对实验中观察到的共振现象进行了理论分析,并针对一种用于雷电电磁脉冲探测的集成光波导电场传感器提出了消除谐振的有效方法。

2 基本原理

2.1 集成光波导电场传感器

集成光波导电场传感器的基本结构如图1所示,其中光波导为马赫曾德尔干涉仪(MZI)结构。设计 MZI 为非对称结构以使波导中传播的两束光在未加电场时具有 $\pi/2$ 的相位差,从而使器件工作在近线性区^[6]。为实现强电场测量,在其中一支波导臂上制作屏蔽电极,当沿 z 轴方向施加外电场 E 时,由 LiNbO_3 晶体的电光效应使波导中的两束光增加一个与电场 E 相关的相位差,最后两束光经输出 Y 分支合成输出。输出表达式为^[8-10]

$$P_{\text{out}} = \alpha(P_{\text{in}}/2) [1 + \cos(\pi E_c/E_\pi + \Delta\varphi_0)], \quad (1)$$

式中 P_{in} 为输入光强度, E_π 为半波电场, E_c 为被测

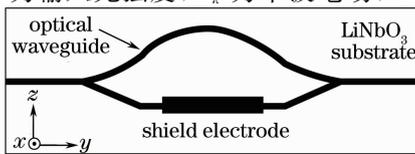


图1 集成光波导电场传感器原理图

Fig.1 Schematic diagram of integrated optical waveguide electric field sensor

电场, α 为传感器损耗因子, $\Delta\varphi_0$ 为器件的相位偏置。考虑 $\Delta\varphi_0 = \pi/2, \pi E_c/E_\pi \ll 1$, 光接收机的光电转换因子为 ρ , 则传感系统的输出电压为

$$V_{\text{out}} = \rho\alpha(P_{\text{in}}/2)[1 - \sin(\pi E_c/E_\pi)] \approx \rho\alpha(P_{\text{in}}/2)(1 - \pi E_c/E_\pi). \quad (2)$$

由(2)式可知传感系统的输出和被测电场呈线性关系,即通过传感系统的输出电压值便可得出被测电场的大小。

2.2 集成光波导电场传感器的时域响应

集成光波导电场传感器的时域校准装置如图2所示,高压脉冲发生器产生的标准雷电电磁脉冲(1.2/50) μs 由同轴电缆接到分压器进行分压,然后再由同轴线分别送到平行板电极和衰减器。加到平行板电极上的电压通过两极板转换为电场作为传感器的输入,经衰减器衰减后的信号则直接输入示波器作为参考信号。激光器输出功率稳定的线偏振光,经保偏光纤(PMF)耦合至电场传感器的输入端口,传感器输出的受电场调制的光信号由单模光纤(SMF)传送至光接收机完成光功率到电压的转换,最后输入示波器观察时域波形。

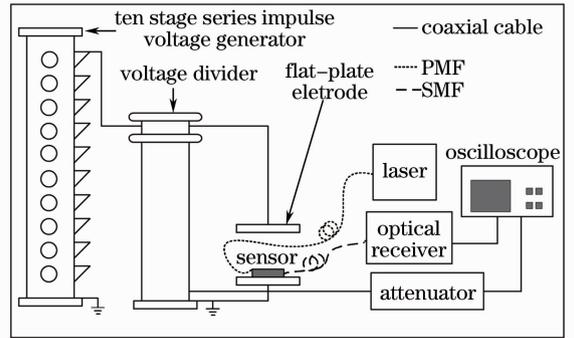


图2 集成光波导电场传感器时域校准装置

Fig.2 Time domain calibration setup for integrated optical waveguide electric field sensor

图3是电场传感系统的输入输出波形及其频谱,其中图3(a)是集成光波导电场传感系统的输入输出波形,图3(b)是探测到的电场信号的频谱,图3(c)是输入的标准雷电电磁脉冲的频谱。图中归一化幅度定义为: $20 \lg(V/V_{\text{max}})$, 单位为 dB, 其中 V 为信号幅值, V_{max} 为最大信号幅值。由图3(a)可知,探测到的电场信号和输入信号的时域波形基本重合,但是探测到的信号中明显叠加了一个干扰信号。由图3(c)可知,标准雷电电磁脉冲的频谱分量主要集中在 500 kHz 以内。由图3(b)可知探测到的信号中叠加的干扰信号主要分布在 300 kHz 附近,归一化幅度甚至大于 -20 dB。分析产生这种干扰信

号的原因主要是 LiNbO₃ 晶体的压电效应逆压电效应致使晶体发生应力应变,并由弹光效应改变晶体的折射率^[11],进而改变波导中光信号的相位,最终

改变输出光强度,导致探测到的电场信号发生畸变,下面对这一过程做详细分析。

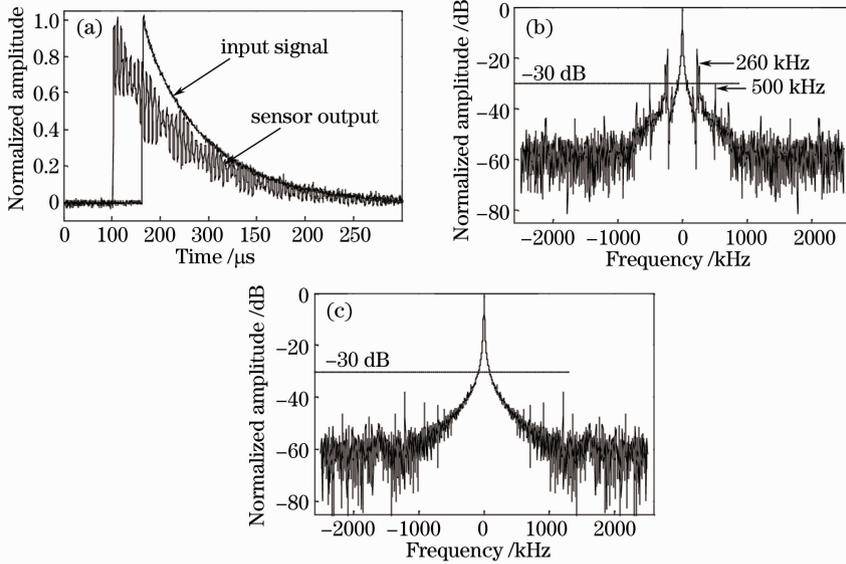


图3 集成光波导电场传感系统输入输出波形及其频谱。(a) 时域波形;(b) 探测到的电场信号的频谱;(c) 输入信号的频谱
Fig.3 Input/output waveforms and its frequency spectra of the integrated optical waveguide electric field sensing system.

(a) Time domain waveforms; (b) frequency spectrum of the detected electric field signal; (c) frequency spectrum of the input signal

3 集成光波导电场传感器谐振频率分析

3.1 LiNbO₃ 晶体中电磁场和声场的耦合

LiNbO₃ 晶体具有弹性性能、介电性能、压电性能。当有外电场作用时由于压电效应逆压电效应,晶体将产生极化、应力应变,从而在晶体中形成弹性波并和其中的电磁波相互耦合。为便于分析选取直角坐标系的三个坐标轴 x_1, x_2, x_3 分别与如图 1 中 LiNbO₃ 晶体的三个晶轴 x, y, z 相对应,可得 LiNbO₃ 晶体中电磁场和声场的耦合波方程为^[12-13]

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \boldsymbol{\varepsilon}_x \frac{\partial \mathbf{E}^2}{\partial t^2} - \mu_0 \mathbf{e} \nabla_x \frac{\partial \mathbf{u}^2}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \mathbf{c}_E \nabla_x \mathbf{u} - \nabla (\mathbf{e}^T \mathbf{E}) = \rho \frac{\partial \mathbf{u}^2}{\partial t^2}, \quad (4)$$

式中 \mathbf{E} 为电场矢量, \mathbf{u} 为质点的位移矢量, ρ 为晶体体密度, $\boldsymbol{\varepsilon}_x$ 为恒应变条件下的介电张量, μ_0 为真空中的磁导率, \mathbf{e} 为压电应力系数矩阵, \mathbf{c}_E 为电场恒定时的弹性刚度矩阵, \mathbf{e}^T 为 \mathbf{e} 的转置矩阵。从(3)式和(4)式中可以看出,(3)式在原有电磁场方程的基础上多了压电效应使晶体极化的部分,(4)式在原有声场方程的基础上多了逆压电效应使晶体发生应变的部分。考虑到其中的电磁场为准静态场(雷电波

长远大于器件的几何尺寸),电位移矢量 \mathbf{D} 的散度为零(介质中不存在自由电荷)。假定晶体中传播有振幅 A_l , 频率 ω , 波矢量方向余弦为 (l_1, l_2, l_3) 的声平面波,则由耦合波方程可得 LiNbO₃ 晶体中声平面波的 Christoffel 方程为^[12]

$$[\Gamma_{il} - \rho v^2 \delta_{il}] A_l = 0, \quad (5)$$

式中 $\Gamma_{il} = \left(c_{ijkl}^E + \frac{e_{kij} e_{klj}}{\varepsilon_{jk}^x} \right) l_j l_k$ ($i, j, k, l = 1, 2, 3$),且当 $i = l$ 时 $\delta_{il} = 1, i \neq l$ 时 $\delta_{il} = 0$ 。将 LiNbO₃ 晶体的介电张量 $\boldsymbol{\varepsilon}$, 压电应力系数矩阵 \mathbf{e} , 弹性刚度矩阵 \mathbf{c} , 以及体密度 ρ 代入(5)式便可求出晶体中沿各个方向传播的弹性波的相速。晶体中沿 x_i 方向传播的弹性波的频率 f_{ri} 为

$$f_{ri} = n v_i / (2S), \quad (6)$$

式中 v_i 为沿 x_i 方向传播的弹性波速度, n 为谐振次数, S 为波传播的距离。

3.2 LiNbO₃ 晶体中的谐振频率

仅考虑沿晶体 x, y, z 轴传播且谐振一次的弹性波,即 $i = 1, 2, 3, n = 1$,后面会看到这种考虑是合理的。由(6)、(7)式可得沿 x_1 方向传播分别在 x_1, x_2, x_3 三个方向振动的弹性波的谐振频率为

$$\begin{cases} f_1 |_{x_1} = \sqrt{c_{11}/\rho}/(2d) \\ f_2 |_{x_1} = \sqrt{(a_1 + b_1 + \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + 4c_1^2})/(2\rho)}/(2d), \\ f_3 |_{x_1} = \sqrt{(a_1 + b_1 - \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + 4c_1^2})/(2\rho)}/(2d) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $a_1 = c_{66} + (e_{22})^2/\epsilon_{11}$, $b_1 = c_{44} + (e_{15})^2/\epsilon_{11}$, $c_1 = c_{14} - e_{15}e_{22}/\epsilon_{11}$ 。同理, 设 $a_2 = c_{11} + (e_{22})^2/\epsilon_{11}$, $b_2 = c_{44} + (e_{15})^2/\epsilon_{11}$, $c_2 = e_{15}e_{22}/\epsilon_{11} - c_{14}$, 可得沿 x_2, x_3 方向传播的弹性波的谐振频率为

$$\begin{cases} f_1 |_{x_2} = \sqrt{c_{66}/\rho}/(2L) \\ f_2 |_{x_2} = \sqrt{(a_2 + b_2 + \sqrt{(a_2 - b_2)^2 + 4c_2^2})/(2\rho)}/(2L), \\ f_3 |_{x_2} = \sqrt{(a_2 + b_2 - \sqrt{(a_2 - b_2)^2 + 4c_2^2})/(2\rho)}/(2L) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_1 = f_2 |_{x_3} = \sqrt{c_{44}/\rho}/(2w) \\ f_3 |_{x_3} = \sqrt{(c_{33} + e_{33}^2/\epsilon_{33})/\rho}/(2w) \end{cases} \quad (9)$$

(7)~(9)式中 d, L, w 分别为 LiNbO₃ 的厚度、长度和宽度。将表 1 中的 LiNbO₃ 性能参数代入(7)~(9)式计算得到谐振频率如表 2 所示。

表 1 LiNbO₃ 晶体的性能参数

Table 1 Performance parameters of LiNbO₃ crystal

Parameter	Value	Unit
c_{11}	2.0×10^{11}	N/m ²
c_{14}	9.0×10^9	N/m ²
c_{33}	4.0×10^{10}	N/m ²
c_{44}	6.0×10^{10}	N/m ²
c_{66}	7.5×10^{10}	N/m ²
e_{15}	3.5	C/m ²
e_{22}	2.2	C/m ²
e_{33}	1.3	C/m ²
ϵ_{11}	43 ϵ_0	
ϵ_{33}	27 ϵ_0	
ρ	4.6×10^3	kg/m ³
d	0.5	mm
L	48	mm
w	6.9	mm

表 2 LiNbO₃ 衬底中的谐振频率

Table 2 Resonant frequencies of the LiNbO₃ substrate

Frequency	Direction of propagation	Direction of vibration	Value	Unit
f_1	x_1	x_1	6.5	MHz
f_2	x_1	x_2	4.1	MHz
f_3	x_1	x_3	4.8	MHz
f_1	x_2	x_1	42.1	kHz
f_2	x_2	x_2	71.5	kHz
f_3	x_2	x_3	46.3	kHz
f_1	x_3	x_1	261.7	kHz
f_2	x_3	x_2	261.7	kHz
f_3	x_3	x_3	213.6	kHz

由表 2 可知, 沿 x_1, x_2 方向的谐振频率和观察

到的干扰信号频率相差很大, 而沿 x_3 方向(宽度方向)的谐振频率为 261.7 kHz 和 213.6 kHz, 和图 3(b)中的实验结果几乎重合。分析原因主要是沿传感器厚度以及长度方向的弹性波在 MZI 两波导臂上会产生相同的作用, 而这种作用在输出 Y 分支处被相互抵消, 因此不会对已调光信号造成影响。

图 4 给出了沿 x_3 方向传播分别在 x_1, x_2, x_3 三个方向随衬底宽度变化的振动弹性波的谐振频率。由图可知, 同一宽度尺寸下沿不同方向振动的弹性波频率几乎相同, 说明谐振频率的大小主要取决于器件的宽度尺寸而与其振动方向无直接关系。当宽度为 3 mm 时, 谐振频率大于 500 kHz; 并且随宽度的进一步减小, 谐振频率迅速增大。由此可以认为压电效应对 LiNbO₃ 集成光波导电场传感器的谐振干扰主要由衬底宽度决定。据此重新设计的集成光波导电场传感器的衬底宽度为 3 mm, 实验结果如图 5 所示。

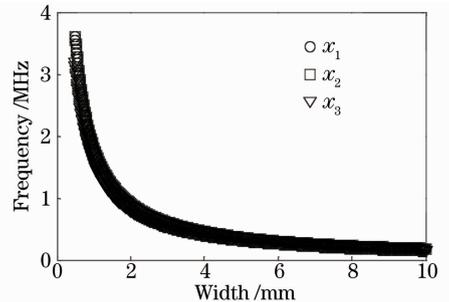


图 4 不同衬底宽度下的谐振频率

Fig. 4 Resonant frequency with different widths of substrate

比较图 5 和图 3 的结果可知, 从时域看改进后的传感系统输入输出波形重合得很好, 且原来叠加在输出波形中的振荡信号明显消失, 从频域上可以看出小于 500 kHz 的振荡信号被抑制在 -30 dB 以下。

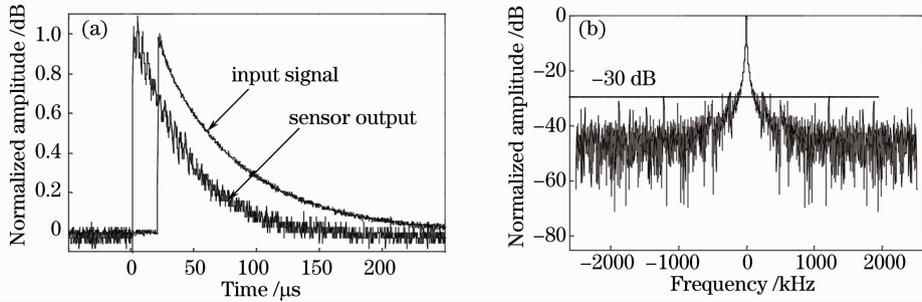


图 5 改进后的传感系统输入/输出波形及其频谱。(a) 时域波形；(b) 探测到的电场信号的频谱

Fig. 5 Input/output waveforms and frequency spectra of the improved sensing system. (a) Time domain waveforms; (b) frequency spectra of the detected electric field signal

4 结 论

从自行设计制作的用于雷电磁脉冲测量的集成光波导电场传感器在实验中出现的谐振现象出发,基于晶体中声场和电磁场的耦合波方程,分析了产生这种现象的原因,得知衬底的宽度是导致 LiNbO₃ 集成光波导电场传感器产生谐振的主要因素。据此,重新设计了一种衬底宽度为 3 mm 的用于雷电磁脉冲测量的集成光波导电场传感器,测试发现此前出现的振荡信号被抑制在 -30 dB 以下。然而文章仅限于对沿三个晶轴方向传播的弹性波进行分析,对沿任意方向传播的情况还有待进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 K Chen, B Sun, F Chen, *et al.*. Lithium niobate photonic sensor for measurement of pulsed electric field with nanosecond rise time [J]. *Microw Opt Technol Lett*, 2012, 54(2): 421–423.
- 2 M Kanda. Standard probes for electromagnetic field measurement [J]. *IEEE Trans Antennas Propagation*, 1993, AP-41(10): 1349–1364.
- 3 J C Santos, M C Taplamacioglu, K Hidaka. Optical high voltage measurement using Pockels microsingle crystal [J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, 70(8): 3271–3276.
- 4 K Feser, W Pfaff. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric field [J]. *IEEE Trans Power Apparatus and Systems*, 1984, PAS-103(10): 2904–2911.
- 5 N Kuwabara, K Tajima, R Kobayash. Development and analysis of electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator [J]. *IEEE Trans Electromagne Compat*, 1992, 34(4): 391–396.
- 6 C H Bulmer, W K Burns, R P Moeller. Linear interferometric

- waveguide modulator for electromagnetic-field detection [J]. *Opt Lett*, 1980, 5(5): 176–178.
- 7 P Bienkowski, H Trzaska. Frequency limitation in photonic EMF probes [C]. 12th Int Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, 1997, 114Q4: 603–606.
- 8 R Zeng, B Wang, Q Yu, *et al.*. Design and application of an integrated electro-optic sensor for intensive electric field measurement [J]. *IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(1): 312–319.
- 9 Yuan Yan, Qin Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(10): 1005004.
袁 燕, 秦 毅. 基于串联双电极马赫-曾德尔调制器的六倍频技术 [J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1005004.
- 10 Chen Fang, Liu Ruipeng, Qi Zhimei. Design, fabrication and characterization of LiNbO₃-based integrated optical waveguide Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0513001.
陈 方, 刘瑞鹏, 祁志美. 铌酸锂基集成光波导马赫-曾德尔干涉仪的设计、制备及其特性的初步测试 [J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0513001.
- 11 Chen Youhua, Zhang Jilong, Wang Yanchao, *et al.*. Single crystal photo-elastic modulator based on lithium niobate piezoelectric and photo-elastic effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1116002.
陈友华, 张记龙, 王艳超, 等. 基于铌酸锂压电弹光双效应的单晶体弹光调制器 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1116002.
- 12 Chen Gang, Lao Iiji, Hao Wei. *Crystal Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2007. 153–187.
陈 纲, 廖理儿, 郝 伟. *晶体物理学基础* [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 153–187.
- 13 Sun Kang, Zhang Fuxue. *Piezoelectrics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984. 83–302.
孙 慷, 张福学. *压电学(上)* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. 83–302.

栏目编辑: 韩 峰