

文章编号: 1001-3806(2015)05-0658-04

机械应力对石英滤波输出的影响

高 傲, 夏 刚, 孔 勇*, 刁 利, 王文龙, 韩 华

(上海工程技术大学 电子电气学院, 上海 201620)

摘要: 为了研究机械应力对石英滤波输出的影响, 基于石英晶体的弹光效应, 推导了石英晶体双折射率与不同方向机械应力之间的关系, 并进行了数值模拟。采用了 Ultra-6600 系列紫外-可见分光光度计搭建了实验系统, 得到了立奥型石英双折射滤光片的透射光谱图, 并对光谱图进行了研究与分析。结果表明, 在不同方向机械应力作用下, 立奥型石英双折射滤光片的中心波长发生漂移; 大小为 0.0025N/m^2 机械应力沿 Ox_1 轴、 Ox_2 轴、 Ox_3 轴方向作用, 石英滤波片中心波长向长波长方向的漂移量分别约为 0.4nm 、 0.6nm 、 1nm 。这一结果对石英双折射滤光片的封装制作、正确设计和使用是有帮助的。

关键词: 光学器件; 晶体光学; 机械应力; 弹光效应; 石英晶体双折射滤光片

中图分类号: O734 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.05.015

Influence of mechanical stress on quartz filter output

GAO Ao, XIA Gang, KONG Yong, DIAO Li, WANG Wenlong, HAN Hua

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study influence of mechanical-stress on quartz filter output, based on the elasto-optical effect of quartz crystal, the relationship between birefringence of quartz crystal and mechanical stress in different directions was analyzed. After numerical simulation, the experimental system was set up by using UV-visible spectrophotometer of Ultra-6600 series and the transmission spectrum of a Lyot quartz birefringence filter was studied and investigated. Theoretical simulation and experimental results show that central wavelength of the Lyot quartz crystal birefringence filter will drift under mechanical stress at different directions. The drifts of central wavelength of a Lyot quartz crystal birefringence filter are 0.4nm , 0.6nm and 1nm respectively when mechanical stress is 0.0025N/m^2 along the direction of Ox_1 axis, Ox_2 axis, Ox_3 axis. The research is helpful for manufacture, design and application of quartz birefringence filters.

Key words: optical devices; crystal optics; mechanical stress; elasto-optical effect; quartz crystal birefringent filter

引 言

光学滤光片是重要的无源器件之一, 能按照需要来改变入射光的光谱强度分布, 是在连续光谱中透过一定宽度的光谱带或在线状光谱中用来提取某些辐射的波长选择器件^[1]。光学滤光片早期用于天文观测, 随着激光技术的发展, 光学滤光片在激光滤波、光传感、光谱分析和光纤通信^[2-6]等领域起着重要作用。

光学滤光片种类很多, 根据不同原理可分为选择吸收滤波器、多光束干涉滤波器、色散滤波器、双折射滤波器^[7-8]等等。双折射滤光片具有结构简单、滤波频带宽、滤波波形可精确调节、可实现 0.1nm 级的滤波线宽等优点, 在太阳光谱研究、激光腔内波长选择器、

波分复用 (wavelength division multiplexing, WDM) 器件、光纤增益均衡器件等领域中有广泛的应用。石英晶体由于其二向色性小、使用波段宽 ($185\text{nm} \sim 3500\text{nm}$)、机械强度高、人工生长技术成熟、易于得到大块的光学级晶体等特点, 成为重要的双折射材料。石英晶体滤光片在组装和器件封装时易受机械振动的影响, 从而中心波长发生漂移, 影响其滤光效果, 因此, 研究机械应力对石英晶体滤光片的影响, 对正确设计及使用双折射滤光片具有重要意义。

机械应力对石英滤波输出的影响国内还鲜见报道, 作者主要研究机械应力对 Lyot 型石英滤光输出的影响, 基于石英晶体的弹光效应, 推导出了石英晶体双折射率与不同方向机械应力的关系, 进行了理论上的模拟。根据 Lyot 型滤光片原理, 利用 Ultra-6600 系列紫外-可见分光光度计设计实验进行验证。理论模拟和实验结果有很好的一致性, 机械应力作用下石英滤光片中心波长发生漂移。

作者简介: 高 傲 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为偏振光学和偏振器件。

* 通讯联系人。E-mail: kky7757@aliyun.com

收稿日期: 2014-08-26; 收到修改稿日期: 2015-01-11

1 基本原理

1.1 Lyot 型滤光片的原理

典型的 Lyot 型滤光片通常由几个双折射器件和数个偏振器件组成,单级 Lyot 型滤光片结构如图 1 所示^[7,9]。

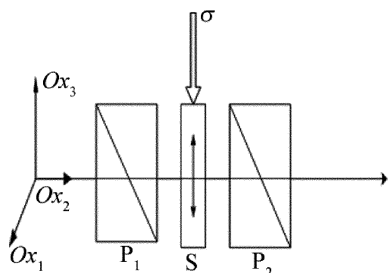


Fig. 1 Schematic diagram of a unipolar Lyot filter

图中, P₁ 和 P₂ 是偏振镜, S 是平行光轴平行于晶体表面的石英晶片, 两偏振镜 P₁ 和 P₂ 的偏振面相互平行, S 的光轴方向与两偏振镜 P₁ 和 P₂ 偏振面成 45°, o 光和 e 光的相位延迟量 δ 为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot d \quad (1)$$

式中, λ 为入射光波长, Δn 为折射率差, d 为石英晶片的厚度。

根据偏振干涉理论, 可得单级 Lyot 滤光片的透射率 T 是偏振双折射器件所产生相位延迟量 δ 的函数:

$$T = \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

1.2 石英晶体在机械应力作用下折射率差的变化

下面从理论方面讨论机械应力作用下石英晶体弹光效应引起的入射光折射率差的变化, 石英晶体属于三方晶系的晶类, 晶轴方向为 Ox₁, Ox₂, Ox₃, 3 个方向的应力分别为 σ₁, σ₂, σ₃。

(1) 假设有平行于光轴 Ox₃ 的单向正应力 σ 作用于石英晶体, 即 σ = σ₃, 而无其它应力分量。施加应力前, 光率体方程为一旋转椭球体, 其方程如下:

$$\beta_1^- x_1^2 + \beta_2^- x_2^2 + \beta_3^- x_3^2 = 1 \quad (3)$$

式中, β_j⁻ (j=1, 2, 3) 为逆介电张量。

在单向应力作用下, 光率体发生了变化, 新光率体方程为^[10-13]:

$$\left(\frac{1}{n_e^2} + \pi_{13}\sigma_3\right)(x_1^2 + x_2^2) + \left(\frac{1}{n_o^2} + \pi_{33}\sigma_3\right)x_3^2 = 1 \quad (4)$$

式中, n_e 为非常光折射率, n_o 为常光折射率, π_{ij} (i, j=1, 2, …, 6) 为石英晶体的弹光系数, 双折射率为:

$$\Delta n_3 = (n_e - n_o) - \frac{1}{2} \left(n_e^3 \pi_{13} - \frac{1}{2} n_o^3 \pi_{33} \right) \sigma_3 \quad (5)$$

即除了原来的双折射率之外, 附加了与应力 σ₃ 成正比的应力双折射。

(2) 施加平行于 Ox₁ 轴的单向正应力 σ = σ₁, 而无其它应力分量, 新光率体方程为:

$$\left(\frac{1}{n_e^2} + \pi_{11}\sigma_1\right)x_1^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \pi_{12}\sigma_1\right)x_2^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \pi_{31}\sigma_1\right)x_3^2 + 2\pi_{41}\sigma_1 x_2 x_3 = 1 \quad (6)$$

上式中出现了交叉项 x₂x₃, 表明新光率体的主轴已不是原来的 Ox₁, Ox₂, Ox₃ 轴了, 需寻求新主轴方向, 原有主轴 Ox₁ 未变, 另外两个主轴 Ox₂, Ox₃ 发生变化, 将原来的平面 Ox₂-Ox₃ 绕 Ox₁ 旋转 θ 角得到新坐标系, 坐标转换如图 2 所示。

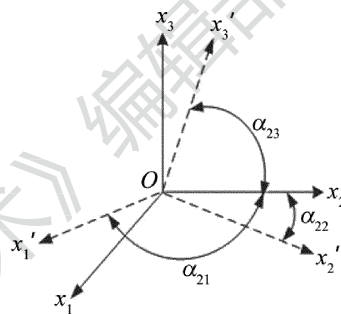


Fig. 2 Figure of coordinate system transformation

图中, α_{ij} 是新轴 i 与旧轴 j 基矢的方向余弦, θ 角应由下式决定给出^[10]:

$$\tan(2\theta) = \frac{2\pi_{41}\sigma_1}{\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}} \quad (7)$$

光率体方程为:

$$\left(\frac{1}{n_e^2} + \pi_{11}\sigma_1\right)x_1'^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \pi_{12}\sigma_1 + \pi_{41}\sigma_1 \tan\theta\right)x_2'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \pi_{31}\sigma_1 - \pi_{41}\sigma_1 \tan\theta\right)x_3'^2 + 2\pi_{41}\sigma_1 x_2' x_3' = 1 \quad (8)$$

沿 Ox₂ 轴方向的双折射率变为:

$$\Delta n_1 = n_1 - n_3 = (n_e - n_o) - \frac{1}{2} n_e^3 \sigma_1 (\pi_{11} - \pi_{13} + \pi_{41} \tan\theta) \quad (9)$$

(3) 同理, 通过主轴变换可以推出施加平行于 Ox₂ 轴的单向机械应力 σ = σ₂, 无其它应力分量, 沿 Ox₂ 轴方向的双折射率为:

$$\Delta n_2 = n_1 - n_3 = (n_e - n_o) - \frac{1}{2} n_e^3 \sigma_2 (\pi_{12} - \pi_{13} + \pi_{41} \tan\theta) \quad (10)$$

1.3 机械应力对石英滤波输出的影响

从 Lyot 型滤光片的基本原理出发, 研究机械应力作用下 Lyot 型石英滤光片滤波输出的变化。

(1) 施加在石英晶片的机械应力为平行于 Ox_1 轴的单向正应力 $\sigma = \sigma_1$, 由(2)式、(5)式得滤波片的透射比为:

$$T_1 = \cos^2 \frac{\delta}{2} = \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \left[(n_e - n_o) - \frac{n_e^3 \sigma_1}{2} (\pi_{11} - \pi_{13} + \pi_{41} \tan \theta) \right] \right\} \quad (11)$$

(2) 施加在石英晶片的机械应力为平行于 Ox_2 轴的单向正应力 $\sigma = \sigma_2$, 由(2)式、(9)式得滤波片的透射比为:

$$T_2 = \cos^2 \frac{\delta}{2} = \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \left[(n_e - n_o) - \frac{n_e^3 \sigma_2}{2} (\pi_{12} - \pi_{13} + \pi_{41} \tan \theta) \right] \right\} \quad (12)$$

(3) 施加在石英晶片的机械应力为平行于 Ox_3 轴的单向正应力 $\sigma = \sigma_3$, 由(2)式(10)式得滤波片的透射比为:

$$T_3 = \cos^2 \frac{\delta}{2} = \cos^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \left[(n_e - n_o) - \frac{1}{2} (n_e^3 \pi_{33} - n_o^3 \pi_{13}) \sigma_3 \right] \right\} \quad (13)$$

由(11)式、(12)式、(13)式可以看出, 对一定波长的入射光 λ , 对应一定的 δ 值, 若使 δ 取某一相应的值, T 便可取最大值; 对不同波长 λ 的入射光, 使其透射比 T 值最大, 机械应力 σ 改变, 石英滤光片的输出改变。

以厚度 $d = 7\text{mm}$ 的石英晶体为例, 图 3 是滤光片的理论透射曲线, 波长范围为 $580\text{nm} \sim 600\text{nm}$, 其中曲线 1 为无机械应力时滤光片的理论透射曲线; 曲线 2 为应力平行于 Ox_1 轴、大小为 $\sigma = 0.0025\text{N/m}^2$ 时滤光片的理论透射曲线; 曲线 3 为应力平行于 Ox_2 轴、大小为 $\sigma = 0.0025\text{N/m}^2$ 时滤光片的透射曲线; 曲线 4 为应力平行于 Ox_3 光轴、大小为 $\sigma = 0.0025\text{N/m}^2$ 时滤光片的透射曲线。

从图 3 中可以看出, 当分别施加 0.0025N/m^2 、平行于 Ox_1, Ox_2, Ox_3 轴的机械应力在石英晶片上时, 滤

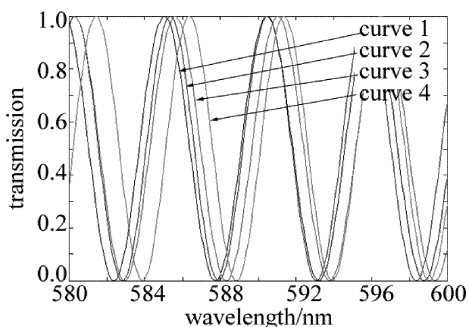


Fig. 3 Transmittance curves without mechanical stress and with mechanical stress of 0.0025N/m^2 along the directions of Ox_1, Ox_2, Ox_3 axis

光片中心波长向长波长方向发生了漂移, 漂移量分别为 $0.3\text{nm}, 0.6\text{nm}, 1.2\text{nm}$ 。进一步通过数值模拟表明, 当机械应力增大至 0.005N/m^2 时, 滤光片的中心波长向短波长方向漂移, 说明机械应力大小不同, 石英滤光片中心波长漂移方向不同。本文中重点研究不同方向机械应力对石英滤光片滤光输出的影响, 实验和理论模拟机械应力大小均为 0.0025N/m^2 , 其它方向相同、大小不同的机械应力对石英滤光片滤光输出影响有待进一步研究和讨论。

2 实验设计与结果分析

为了检验以上理论的正确性, 利用 Ultra-6600 系列紫外-可见分光光度计搭建了实验系统, 对 Lyot 石英双折射滤光片的透射光谱进行研究与分析。透射光谱测量系统框架如图 4 所示, 测试系统由以下几个部分组成: 光学系统、电源、数据采集与放大系统、主控板。光学系统主要由光源室、滤光片组、单色器、分光室和接收室组成。Ultra-6600 系列提供 5 个滤光片, 光谱范围为 $190\text{nm} \sim 900\text{nm}$ 。

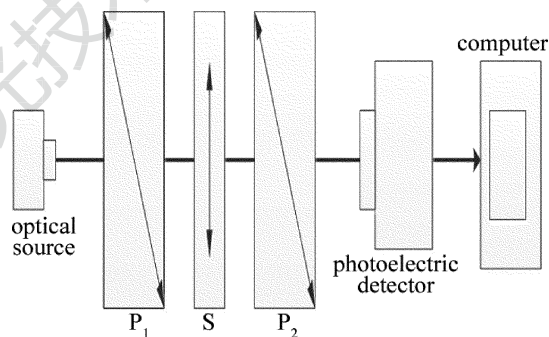


Fig. 4 System frame

测试中使用的石英晶片厚度为 7mm , 实验中利用砣码和应力测试仪给石英晶片施加指定轴向的机械应力。测试得到的 Lyot 型石英双折射滤光片的透射曲线如图 5 所示。图 5 中光谱测量范围为 $580\text{nm} \sim 600\text{nm}$, 光谱分辨率为 0.1nm 。其中曲线 1 为不施加机械应力时滤光片的透射曲线; 曲线 2 为施加平行于轴 Ox_1 、大小为 $\sigma_1 = 0.0025\text{N/m}^2$ 的机械应力时滤光片的透射曲线; 曲线 3 为施加平行于 Ox_2 轴、大小为 $\sigma_2 = 0.0025\text{N/m}^2$ 的机械应力时滤光片的透射曲线; 曲线 4 为施加平行于光轴 Ox_3 、大小为 $\sigma_3 = 0.0025\text{N/m}^2$ 的机械应力时滤光片的透射曲线。

分析实验结果可知: (1) 当石英晶片上分别施加平行于轴 Ox_1, Ox_2, Ox_3 、大小均为 0.0025N/m^2 的机械应力时, 滤波片中心波长向长波长方向漂移, 漂移量分别约为 $0.4\text{nm}, 0.6\text{nm}, 1.0\text{nm}$ (理论值为 $0.3\text{nm}, 0.6\text{nm}, 1.2\text{nm}$), 实验结果与理论模拟得到的结果是相当接近

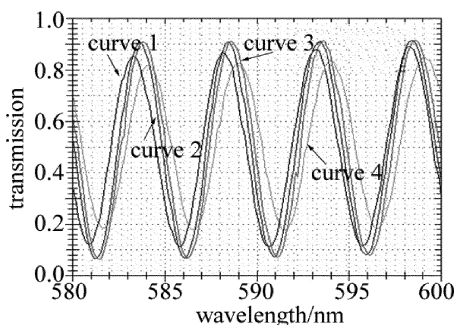


Fig. 5 Transmittance curves of quartz filter without mechanical stress and with mechanical stress of 0.0025N/m^2 along the direction of Ox_1 , Ox_2 , Ox_3 axis

的, 作者认为, 存在的微小差别是由于石英晶片的厚度误差及机械应力测量误差所引起的, 表明不同方向的机械应力对石英滤波输出的影响不同, 且沿光轴 Ox_3 方向的机械应力对石英滤波输出影响最大; (2) Lyot 型滤光片透射率最高在 92% 左右, 可认为是由于石英晶片的散射及偏振片吸收等原因导致的; (3) Lyot 型滤光片透射率最低在 6% 左右, 可认为是由于实验中所用偏振片的消光比不高及偏振片与石英晶体夹角不是严格 45° 等原因导致的。

3 结 论

作者基于石英晶体的弹光效应, 推导出不同方向机械应力作用下石英滤波输出与机械应力之间的关系, 并进行数值模拟, 且在 $580\text{nm} \sim 600\text{nm}$ 波段范围内进行了透射光谱测量。实验结果验证了上述理论的正确性, 且表明在外加机械应力作用下, 石英双折射滤光片中心波长发生偏移, 中心波长漂移的方向与外加机械应力的大小有关, 中心波长的漂移量与外加机械应

力的方向有关, 且沿光轴方向的机械应力对石英滤波输出影响最大。实验结果对制作封装、正确设计和使用时石英双折射滤光片具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] FRANCON M. Optical filter for radiations separation[M]. Beijing: Science Press, 1984: 37-42 (in Chinese).
- [2] WANG X, YAO J. Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters[J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4505-4508.
- [3] HARRIS S E, AMMANN E O, CHANY I C. Optical network synthesis using birefringent crystals[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(10): 1267-1279.
- [4] KONG Y, WANG Y M, ZHANG L P, et al. A quartz birefringent filter insensitive to incident angle [J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(5): 1497-1500.
- [5] KONG Y, YANG G W, HUANG X J. Multiple-stage liquid crystal tuned filter[J]. Optik, 2011, 122(19): 1723-1729.
- [6] OWENS J C. Optical refractive index of air dependence on pressure [J]. Temperature and Composition, 1967, 6(1): 51-58.
- [7] ZHANG J, LI G H. The theory of correcting the deviation of retardation wave-plate[J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 639-640 (in Chinese).
- [8] ZHANG Sh, WU F Q, WU W D. Characteristics of multistage quartz optical filter based on the optical rotatory dispersion effect[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5020-5026.
- [9] PENG D Y, SONG L K, LI K T, et al. Measurement of birefringence of liquid crystal with polarized light interference method[J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 422-424 (in Chinese).
- [10] CHEN G, LIAO L J, HAO W. Crystal physics basis[M]. Beijing: Science Press, 2007: 332-337 (in Chinese).
- [11] LIAO Y B. Polarized optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 133-135 (in Chinese).
- [12] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 1986: 6-70 (in Chinese).
- [13] ZHANG W Q. Optimized parameters of birefringent filter[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(10): 1420-1424 (in Chinese).