

宽调谐固体激光器的BF设计

赵永华 刘玉璞 张影华

(中国科学院上海光机所激光技术实验室, 上海 201800)

提要 按照掺钛宝石激光器宽调谐的特性,提出了一种关于双折射滤光片的新设计方法,并得出了BF中光轴倾角的优化公式。据此设计的双折射滤光片已经用于实验,完全符合掺钛宝石激光器的调谐要求。

关键词 双折射滤光片(BF), 掺钛宝石激光器, 调谐

1 引言

调谐元件一直是可调谐激光器的重要部分。一般来说,由于棱镜和光栅的插入损耗较大,因而只适宜于增益较大的脉冲式可调谐激光器中。相反,双折射滤光片(Birefringent Filter,简称BF)由于其插入损耗小,调谐方便,在低增益的连续波可调谐染料激光器中得到了广泛的应用^[1]。关于BF的原理和设计,已有成熟的理论^[2]。但是近几年,可调谐固体激光器获得了很大的发展,特别是最近出现的掺钛宝石激光器^[3],其调谐范围可从650nm一直延伸到1150nm。相比之下,染料激光器的调谐范围仅为50nm左右,至多不超过100nm。因此,为了使BF能在如此宽的波长范围内平滑调整而不发生波长跳动,就得重新考虑BF的设计。

2 理论推导

双折射滤光片通常由石英晶体加工成平行平板,晶体的光轴与表面成一定的角度。在激光器光路中,BF以布儒斯特角放置。以其面法线为轴转动BF,便能实现对腔内振荡激光的调谐。其原理、制作及使用已臻成熟。下面仅对宽频调谐范围的情况进行讨论。

2.1 干涉级次 k 的确定

在图1中, o 光和 e 光在石英晶体内的位相延迟可表示为^[1]

$$\delta = \frac{2\pi d(n_o - n_e)\sin^2\gamma}{\lambda\sin\theta} \quad (1)$$

式中 n_o, n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率, d 为晶体厚度, γ 是晶体中折射光波矢量 k 与晶体光轴之间的夹角, λ 是入射光的波长, θ 是入射角,即布儒斯特角。显然,当 $\delta = 2k\pi$ 时,出射光依然为水平偏振光,就好象BF不存在似的,因而损耗极小。据此,只有以下波长才能无损耗地透过BF

$$\lambda_k = \frac{d(n_o - n_e)\sin^2\gamma}{k\sin\theta} \quad (2)$$

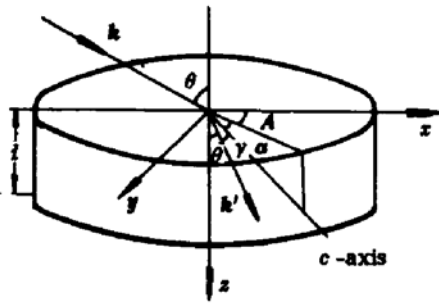


Fig. 1 Physical arrangement of the birefringent filter. The plane including x -axis and y -axis is the incident plane. k : incident ray and k' : refractive ray

此处 k 为干涉级次。BF 作为调谐元件时,总是选定某一级次的 λ_k 作为调谐波长,通过改变 γ (旋转 BF), λ_k 也随之改变,从而达到调谐的目的。 γ 与旋转角度 A 的关系可表示为

$$\cos\gamma = \cos\theta\cos\alpha\cos A + \sin\theta\sin\alpha \quad (3)$$

式中 α 是光轴与晶体表面的夹角。

在掺钛宝石激光器出现之前的染料激光器,由于调谐范围窄,所以无需考虑干涉级次与调谐范围的关系。但对于宽调谐固体激光器来说,为了使 BF 能在整个激光波段内连续平滑调谐而不跳级, k 必须满足

$$k < \lambda_{\min}/\Delta\lambda \quad (4)$$

式中 λ_{\min} 为激光器的最短波长, $\Delta\lambda$ 为激光器的调谐范围。 k 的确定是基于以下两方面的考虑

$$\text{当 } \lambda_k = \lambda_{\min} \text{ 时, } \lambda_{k-1} - \lambda_k > \Delta\lambda$$

$$\text{当 } \lambda_k = \lambda_{\max} \text{ 时, } \lambda_k - \lambda_{k+1} > \Delta\lambda$$

对于 $k = 1$ 这种特殊情况,则只需考虑后一个不等式。

2.2 透过率公式

水平偏振的激光束经过 BF 之后,由于 o 光与 e 光的干涉,出射光的水平偏振部分其光强与入射光强之比为^[4]

$$T = I/I_0 = 1 - \sin^2(2\varphi)\sin^2(\delta/2) \quad (5)$$

式中 φ 为水平偏振面(即入射面)与折射光 o 光的电位移矢量之间的夹角。至于出射光的垂直偏振部分,由于谐振腔存在多种以布氏角放置的光学介质,将因损耗较大而不产生激光振荡。关于 φ 的推导,文献[4]中曾有论述,但经过我们反复仔细的推导,发现文献[4]的表示有误。根据我们的计算, $\sin\varphi$ 应为

$$\sin\varphi = \text{ctg}\gamma \cdot \left(\text{tg}\theta - \frac{\sin\alpha}{\cos\theta\cos\gamma} \right) \quad (6)$$

从(5)式可以看出, φ 对调谐性能有很大的影响。当 $\sin^2(2\varphi) = 0$ 时, $T = 1$ 。这就意味着对所有波长 BF 的透过率均为 1,此时 BF 就失去了调谐作用。因此,可以把 $\sin^2(2\varphi)$ 作为对比度来标志 BF 的调谐性能,设计得好的 BF 在整个波段内 $\sin^2(2\varphi)$ 的值均应接近于 1。

2.3 光轴倾角的优化

从(6)式可以看出, φ 与光轴倾角 α 有很大的关系。因此,适当地选取 α 角,就能使 BF 在整个波段内都有良好的调谐性能。倾角 α 的优化可通过下式来实现

$$\sin\alpha = \cos\theta \cdot \cos\gamma_0 \cdot \left(\text{tg}\theta - \text{tg}\gamma_0/\sqrt{2} \right) \quad (7)$$

式中 γ_0 为中心波长 $(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})/2$ 所对应的 γ 值,这可通过(2)式来确定。上式是个经验公式,实际设计时可根据需要进行适当调整。

3 设计实例和实验比较

根据上述理论,我们设计了一组双折射滤光片,用于本实验室自行研制的氩离子泵浦连续

掺钛宝石激光器^[5]。这组 BF 由三片石英晶体组成,光轴倾角为 27° ,基片厚度为 0.5 mm ,三片比例为 $1:3:10$,插入损耗为 5% 左右。图 2 是根据(5)式计算的透过率 T 随波长的关系曲线。从图中可以看出,不同的旋转角度分别对应着不同的透过率极大值,即调谐波长。并且,从 700 nm 调谐到 1000 nm ,只需旋转 20° 左右。如果增大厚度并相应增大倾角 α ,所需转动的角度会更小,这在某些应用场合将显得很方便。

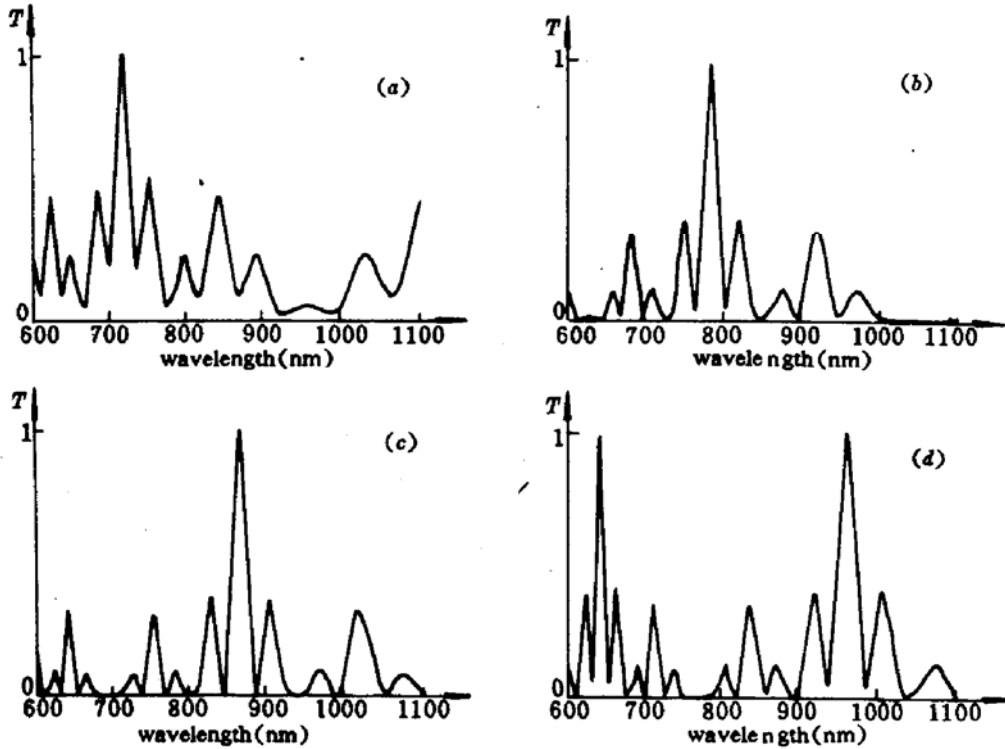


Fig. 2 Three-plate BF transmission curves for $d = 0.5\text{ mm}$, $\alpha = 27^\circ$ and $r = 1:3:10$, where r is the thickness ratio of the three plates that consist the BF and d , α and A below are referred to Fig. 1

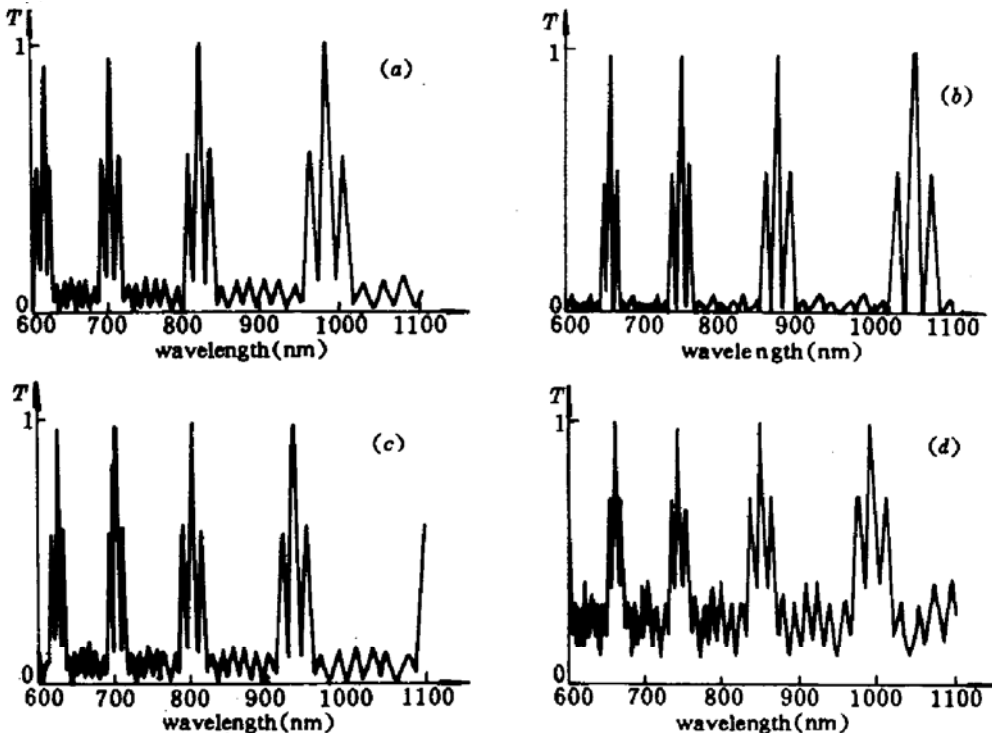


Fig. 3 Three-plate BF transmission curves for $d = 0.6\text{ mm}$, $\alpha = 0^\circ$ and $r = 1:2:9$
(a) $A = 30^\circ$; (b) $A = 40^\circ$; (c) $A = 50^\circ$; (d) $A = 60^\circ$

作为比较,我们也计算了基片厚度为 0.6 mm,倾角 $\alpha = 0^\circ$,三片比例为 1:2:9 的双折射滤光片的透过率曲线,如图 3 所示。显然,其调谐范围仅为 120 nm 左右,不足以满足掺钛宝石激光器调谐的需要。

4 结 论

对于宽带可调谐固体激光器,双折射滤光片的设计关键是确定光轴倾角 α 与基片厚度 d 。因基片厚度通常为 0.5 mm 或 0.6 mm,所以 α 的确定是至关重要的,这可通过以下步骤来实现。首先,根据所需的调谐范围,利用(4)式确定干涉级次 k 。然后,根据(2)式,确定中心波长所对应的 γ_0 。最后,利用(7)式,就能把最佳倾角 α 大致确定下来。上述结果不但可用于连续掺钛宝石激光器,也可用于别的宽带激光器。若用于脉冲激光器,则必须增加至四片石英晶体,以进一步抑制调谐曲线中的次峰。

参 考 文 献

- 1 G. Holton, O. Teschke. Design of a birefringent filter for high power dye lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, QE-10: 577~579
- 2 A. L. Bloom. Modes of a resonator containing tilted plates, *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, 64(4): 447~452
- 3 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti: Al₂O₃. *J. Opt. Soc. Am.*, 1986, B3(1): 125~133
- 4 X. Wang, J. Yao. Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters. *Appl. Opt.*, 1992, 31(22): 4505~4508
- 5 刘玉璞,张影华,陆培华. 连续可调谐钛宝石激光器的实验研究. *中国激光*, 1993, A20(2): 85~88

Design of BF for Tunable Broadband Solid-state Lasers

Zhao Yonghua Liu Yupu Zhang Yinghua

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract A new design for a birefringent filter is described, which is suitable for Ti: sapphire lasers and other tunable broadband solid-state lasers. The formulas to optimize the angle between the optic axis and the BF surface are given. A new BF designed according to this theory has been used in laboratory and its tuning characteristics are confirmed by the experimental measurement.

Key word birefringent filter (BF), Ti: sapphire lasers, tune