

用于补偿增益窄化效应的 Rugate 滤波器设计^{*}

赵 磊^{1,2)†} 隋 展¹⁾ 朱启华¹⁾ 张 颖¹⁾ 左言磊¹⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 中国工程物理研究院研究生部, 绵阳 621900)

(2008 年 7 月 9 日收到, 2008 年 9 月 2 日收到修改稿)

采用 Rugate 膜系理论, 分别根据钛宝石和钽玻璃介质增益窄化的特点, 合理选择补偿增益窄化的调制函数, 优化设计出了分别用于补偿钛宝石系统和钽玻璃系统增益窄化效应的 Rugate 滤波器. 由普通均匀多层膜的特征矩阵方法近似分析了设计出的 Rugate 滤波器的光谱响应. 数值模拟了 Rugate 滤波器的光谱补偿效果. 结果显示, 能比较好的符合光谱补偿的要求, 可以用作补偿增益窄化效应的光谱调制滤波器.

关键词: 超短脉冲, 增益窄化, 光谱补偿, Rugate 滤波器

PACC: 4280W, 4280C

1. 引言

自从啁啾脉冲放大的概念提出以来^[1], 超短超强脉冲技术有了长足的进展, 实验可获得的超短脉冲功率密度已达到 10^{20} — 10^{22} W/cm², 从而为惯性约束聚变、强场物理等领域提供了一种强有力的实验手段^[2]. 但是许多因素限制了固体激光器功率的进一步提高, 其中增益窄化效应是一个较为棘手的问题^[3]. 近年来, 种子脉冲光谱整形已经成为克服增益窄化效应的一种有效技术手段. 通常在再生放大腔中加入可调谐空气隙标准具^[4]、薄膜标准具^[5]以及双折射滤光片^[6]等元件来补偿增益窄化效应, 或通过蓝移种子脉冲使红端得到较多放大^[7]而补偿增益窄化. 但是, 这些方法都具有局限性, 前者不仅增加了再生放大腔内的损耗, 而且调节复杂, 不能用于多通放大, 后者除了补偿有限外, 蓝移也降低了种子脉冲的平均功率. 而且由于钽玻璃介质的增益谱较窄, 目前还没有合适的光谱补偿手段. 因此需要探索其他更为有效的光谱整形技术.

Rugate 滤波器是渐变折射率薄膜的一种, 其折射率沿薄膜界面的法向方向呈周期性正弦或余弦变化^[8], 它能够反射一个较窄的带宽并对其余的带宽高透, 且没有高级次反射带. 因为其折射率呈现渐

变, 克服了传统的多层膜层间界面的跃变, 增加了薄膜的设计自由度, 可以实现传统分层介质膜无法实现的性能, 如获得较好的附着力, 较小的应力, 较理想的光学特性和提高薄膜的抗激光损伤阈值. Rugate 滤光片代表了一种革新的膜系设计观念, 自 20 世纪 80 年代问世以来, 薄膜学者从电磁场理论出发, 利用傅里叶变换, 设计出了不同类型的 Rugate 滤光片. 本文即首次采用 Rugate 膜系理论, 基于光谱调制函数, 设计了用于补偿高功率脉冲放大器增益窄化效应的 Rugate 滤波器, 并采用添加折射率匹配层的方法进行优化. 利用传统多层膜的特征矩阵方法分析了设计出的 Rugate 滤波器的光谱响应, 并验证了用于光谱补偿的效果.

2. 补偿增益窄化的滤波器光谱响应特性

光谱整形减弱或消除放大过程中增益窄化效应的原理即在放大过程中引入一个依赖频率的调制损耗, 使得脉冲在介质增益包络峰值处获得比在两翼处更大的损耗. 目前已有很多光谱整形的调制函数出现^[9, 10], 为简单起见, 选用文献 [9] 给出的高斯型调制函数作为滤波器的光谱响应

$$T(\omega) = 1 - A \exp[-(\omega - \omega_0)^2 / B^2]. \quad (1)$$

只要滤波器的透射谱宽度大于种子脉冲的宽度, 而

^{*} 中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2008A0401017)和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室基金(批准号: 9140C6803010701)资助的课题.

[†] E-mail: leizhao@nudt.edu.cn; leizhao@mail.ustc.edu.cn

且有合适的调制深度,就能满足补偿增益窄化的要求.根据这一补偿增益窄化的光谱调制需求,对钛宝石增益介质,选择 $A = 0.7, B = 2.945 \times 10^{13}$;对钕玻璃增益介质,选择 $A = 0.9, B = 5.1 \times 10^{12}$,对应的调制函数曲线即滤波器透射谱如图 1 所示.

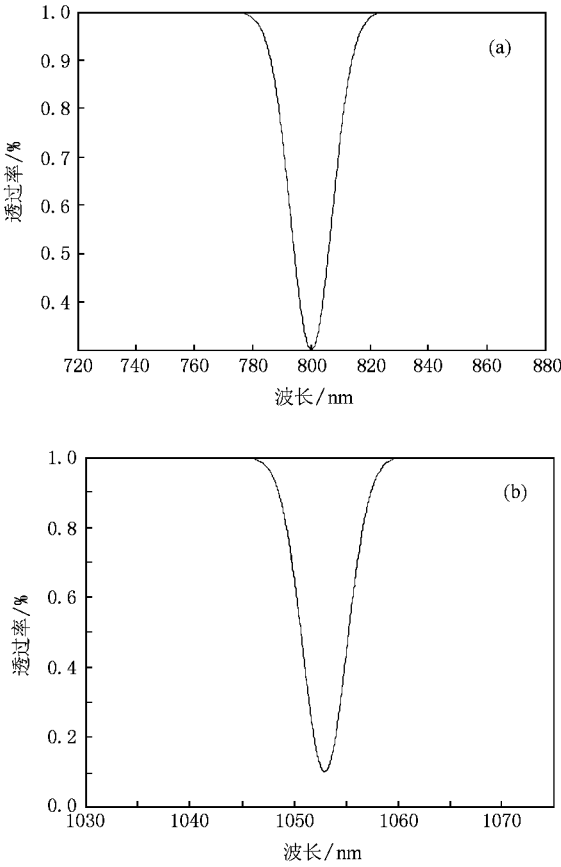


图 1 用于钛宝石的高斯型光谱整形调制函数曲线图(a)和用于钕玻璃的高斯型光谱整形调制函数曲线图(b)

3. Rugate 滤波器设计

Rugate 滤波器是一种周期性的渐变折射率薄膜,最简单的情形就是折射率随薄膜厚度成正弦形式变化,

$$n(x) = n_a + \frac{1}{2} n_p \sin\left(\frac{2\pi x}{p}\right), \quad (2)$$

其中, x 为垂直于基底方向的薄膜厚度, n_a 为平均折射率, n_p 为折射率调制深度, p 为折射率渐变周期长度, n_s 和 n_i 分别为基底和环境介质(一般为空气)的折射率.其折射率特性如图 2 所示.

这种周期性的薄膜能够产生一个很强的反射带,其中心波长由折射率变化周期 p 和平均折射率决定, $\lambda = 2 n_a p$. Southwell^[11]采用耦合波理论详细分

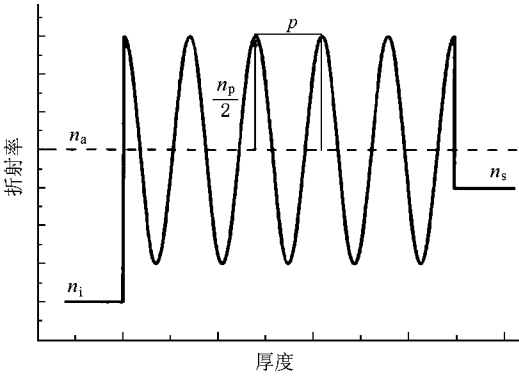


图 2 正弦渐变折射率 Rugate 滤波器的折射率特性

析了 Rugate 滤波器的光谱特性,得到两个重要的谱特性参数,反射带宽 d_{BW} 和透射光强 I_{OD} ,

$$d_{BW} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{n_p}{2n_a}, \quad (3)$$

$$I_{OD} = \lg\left(\frac{1}{1-R}\right) = (1.36 \times d_{BW} \times N) - \lg(4/n_s). \quad (4)$$

文献 [12] 中给出了 Rugate 滤波器光谱响应和折射率特性之间的近似关系

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dn}{dx} \frac{1}{2n} \exp(ikx) dx = Q(k) \exp[i\Phi(k)] \quad (5)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数; $x = 2 \int_0^z n(u) du$ 为两倍的光学厚度; z 为法向坐标; $Q(k)$ 是和光谱透射率 $T(k)$ 相联系的偶函数,有多种近似形式,这里采用 Rugate 膜系设计较常用的形式^[8]

$$Q(k) = \{[1 - T(k) - T(k)]\}^{1/2}, \quad (6)$$

这里 $\Phi(k)$ 为相位因子,一般可取为 0.

对(5)式实施傅里叶变换,并对 x 进行积分,即可得到折射率分布

$$n(x) = \exp\left\{\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(k)}{k} \sin[\Phi(k) - kx] dk\right\}. \quad (7)$$

这样,就可以从任意给定的光谱响应得到相应的膜系折射率变化曲线,这是 Rugate 膜系设计理论的基础.利用(1)式设计的光谱调制函数,由(7)式即可得到相应光谱响应的 Rugate 滤波器折射率分布.图 3 即给出了图 1 中两个光谱调制函数分别对应的 Rugate 滤波器的折射率分布,其中平均折射率均取为 $n_a = 1.8$.

可以采用分层介质理论来近似分析 Rugate 薄膜的光学性质^[8],即用足够多的均匀膜层来代替

Rugate 膜层 这些均匀膜层的折射率分布勾画出了 Rugate 薄膜的分布函数轮廓,这样就可以利用多层膜的特征矩阵方法^[13]对 Rugate 膜的光谱响应特性进行近似分析,图 4 就是利用特征矩阵方法对上面得到的 Rugate 滤波器的光谱响应进行的分析.结果表明,Rugate 滤波器确实可以实现较理想的光谱响

应特性,具有合适的调制深度和宽度(钛宝石系统对应的 Rugate 滤波器调制光谱宽度为 30 nm 左右,铍玻璃系统对应的 Rugate 滤波器调制光谱宽度为 15 nm 左右),满足补偿高功率脉冲放大器增益窄化效应的光谱调制需求.

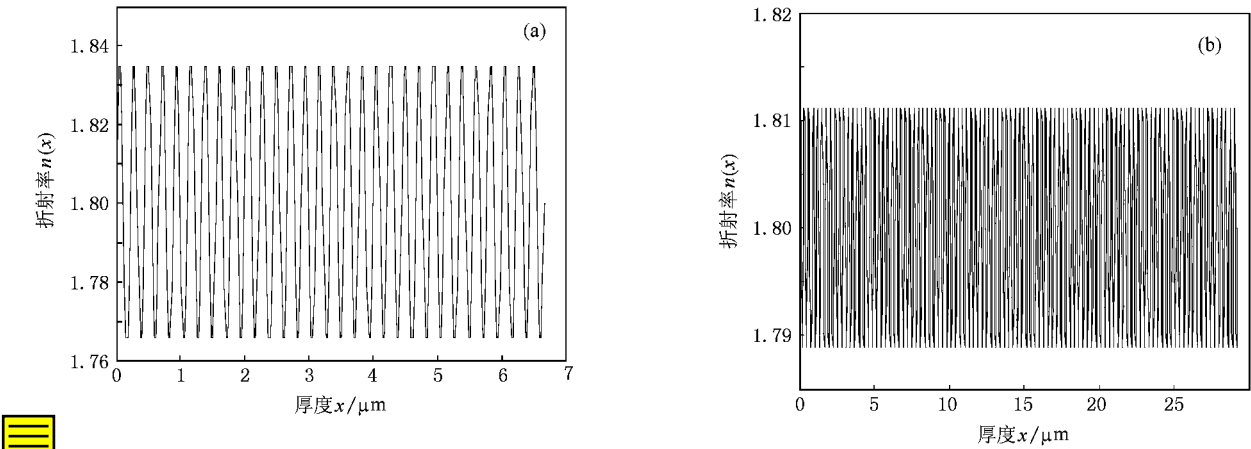


图 3 高斯型调制函数对应的 Rugate 滤波器折射率特性 (a) 钛宝石 (b) 铍玻璃

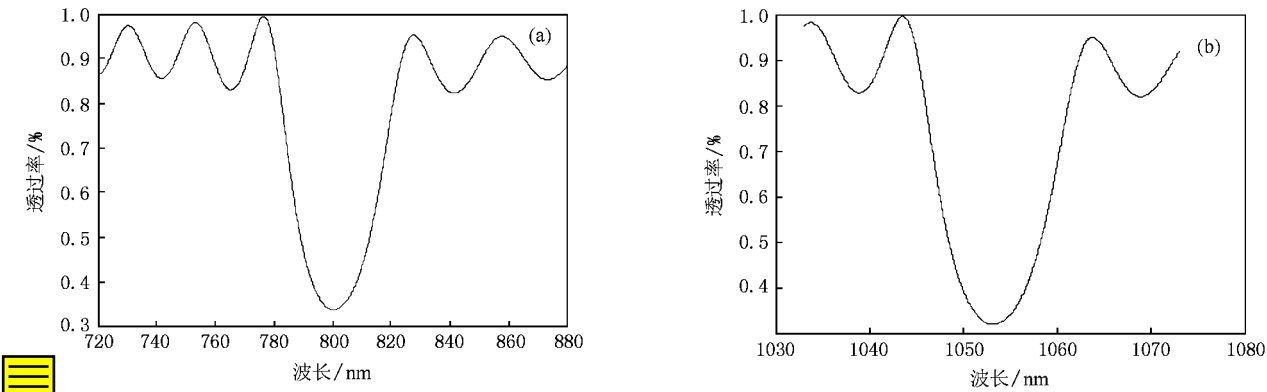


图 4 Rugate 滤波器的光谱响应 (a) 钛宝石 (b) 铍玻璃

4. Rugate 滤波器边频的抑制

由于折射率多周期结构,Rugate 膜系与基底或入射介质的折射率不匹配,以及薄膜制作过程中的误差等原因,Rugate 滤波器的光谱响应会存在边频振荡调制,从上面设计出的 Rugate 滤波器的光谱响应即可以看出明显的边频调制结构,这种边频调制可以通过添加折射率匹配层(matching layers)^[14]和切趾(apodization)^[15]的方法减弱或消除.下面即采用添加折射率匹配层的方法抑制这种边频调制.

一般来说,边频调制是 Rugate 薄膜结构的等效折射率与相邻介质(即基底和空气等)折射率失配的结果,所以可以通过添加折射率匹配层的办法抑制边频产生.Southwell 和 Hall^[14]分析指出匹配层满足如下五次多项式时可以达到最佳的折射率匹配效果:

$$n = n_L + (n_H - n_L)(10t^3 - 15t^4 + 6t^5), \quad (8)$$

其中, $t = d/T$ 为归一化的膜层厚度, d 为匹配层厚度变量, T 为匹配层总厚度, n_L 和 n_H 分别为待匹配的介质折射率.对上面设计出的 Rugate 滤波器分别添加了两个半周期和六个半周期的折射率匹配层,

得到它们的折射率分布如图 5 所示. 考虑到制作过程中的材料实际, 匹配的最低折射率设为 1.52.

进行上述折射率匹配后 Rugate 滤波器对应的光谱响应如图 6 所示. 与匹配前的光谱响应相比, 光谱边频调制明显得到了抑制. 但设计出的 Rugate 滤波器的光谱响应仍与理想情况有出入(透射谷的半宽度太宽、透射率偏高), 主要是因为采用的折射率周期数较少(特别是对用于钛宝石系统的 Rugate 滤

波器), 这里主要考虑的是在满足要求的基础上尽量降低制作难度. 当然吉布斯震荡和 Q 函数的近似选取也是引入误差的原因, 在要求精度较高的场合可以用迭代优化的方法选取更好的 Q 函数^[16,17], 但实际上没有必要. 这里可以通过调整选择调制函数的调制度(参数 A)和调制宽度(参数 B)来满足补偿高功率激光放大器系统增益窄化用 Rugate 滤波器的光谱调制需求.

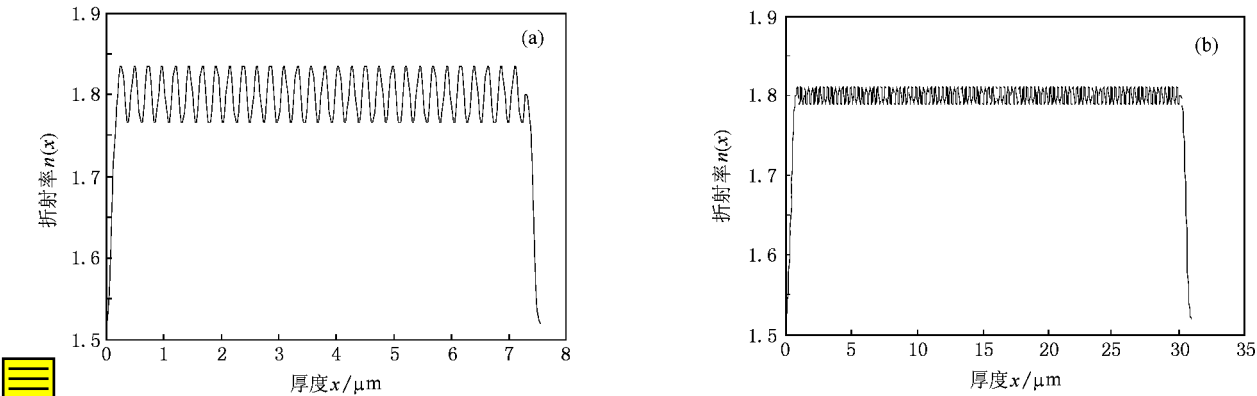


图 5 折射率匹配后 Rugate 滤波器折射率特性 (a) 钛宝石 (b) 钽玻璃

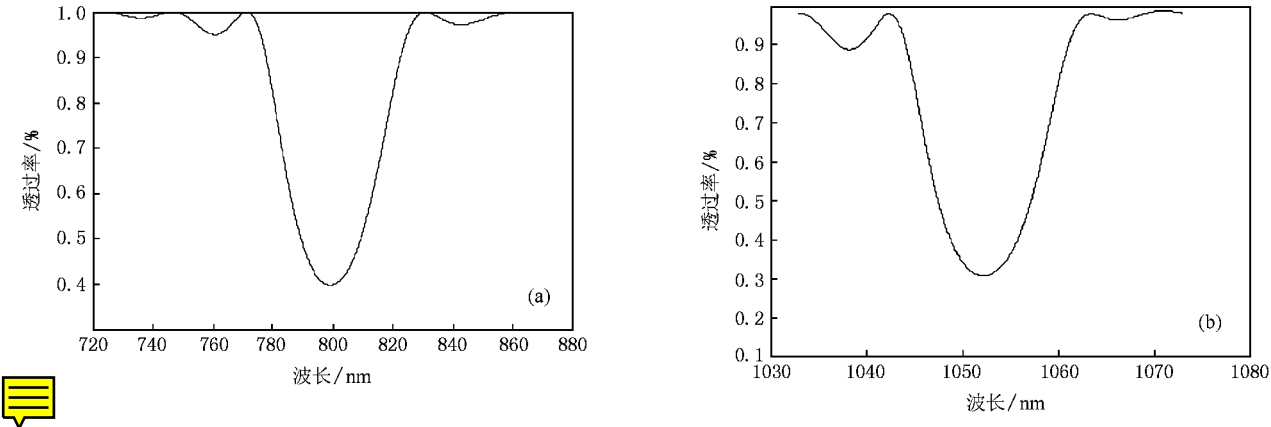


图 6 折射率匹配后 Rugate 滤波器的光谱响应 (a) 钛宝石 (b) 钽玻璃

5. Rugate 滤波器的光谱补偿效果

将以上设计的 Rugate 滤波器分别应用到钛宝石和钽玻璃的放大器中进行光谱增益窄化补偿, 补偿后的效果如图 7、图 8 所示. 数值模拟过程中, 根据中国工程物理研究院激光聚变研究中心 SILEX 装置、星光高能 PW 装置的实际情况, 对钛宝石系统, 采用谱宽 54 nm 的种子脉冲(点线), 如果不使用

Rugate 滤波器, 八通放大后脉冲谱宽为 38 nm(虚线) 采用 Rugate 滤波器进行光谱补偿, 不考虑增益饱和和等效效应, 放大后脉冲谱宽为 50 nm(实线); 对钽玻璃系统, 采用光谱宽度为 15 nm 的种子脉冲, 如果不使用 Rugate 滤波器, 双通放大后脉冲谱宽为 8 nm(虚线), 采用 Rugate 滤波器进行光谱补偿, 不考虑增益饱和和等效效应放大后脉冲谱宽为 13 nm(实线). 可见, Rugate 滤波器可以很好地补偿增益窄化效应. 应用未采用折射率匹配层的 Rugate 滤波器进行光

谱补偿时,对钛宝石系统,由于输入的种子脉冲较宽而对应的 Rugate 滤波器存在边频调制,结果放大后的光谱也出现了调制结构;对钕玻璃系统,虽然对应的 Rugate 滤波器也存在边频调制,但由于种子脉冲光谱较窄,补偿后尚未出现光谱调制结构.采用折射率匹配层的 Rugate 滤波器进行光谱补偿时,对钛宝石系统,由于 Rugate 滤波器的边频调制得到了很好

抑制,结果放大后的光谱没有出现调制结构,并且补偿的增益窄化的效果更好;对钕玻璃系统,由于种子脉冲本身的光谱宽度较窄,补偿后仍未出现光谱调制.实际上,对于应用于补偿增益窄化的 Rugate 滤波器而言,只要其光谱响应宽于待补偿的种子脉冲的光谱并且有合适的调制深度,即可以起到很好的光谱补偿效果.此时,边频调制的存在几乎不会影响

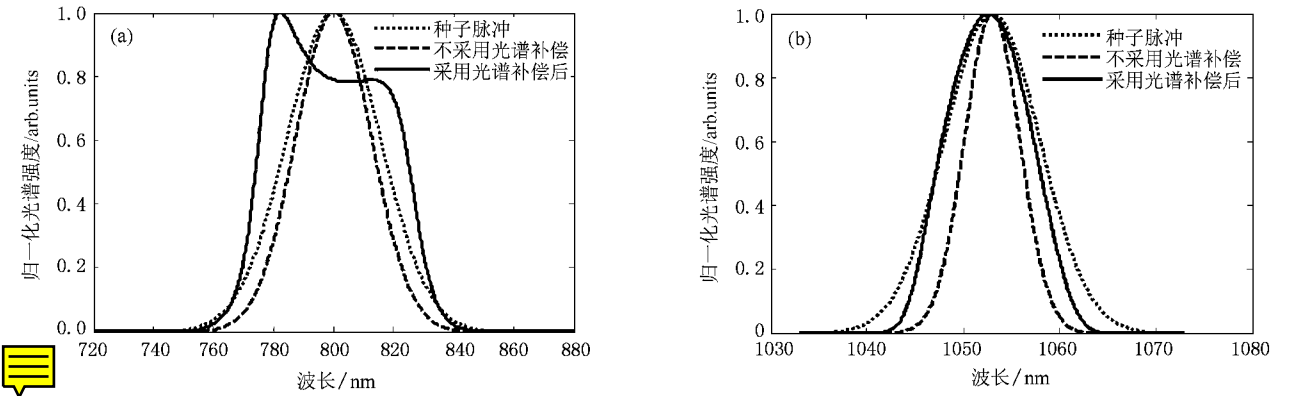


图 7 未添加折射率匹配层的 Rugate 滤波器的光谱补偿效果 (a) 钛宝石 (b) 钕玻璃

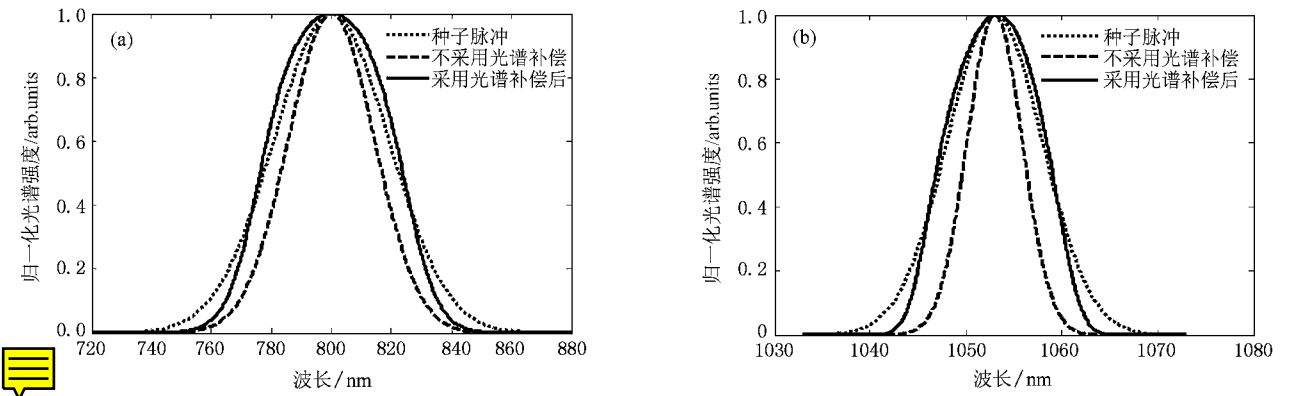


图 8 添加折射率匹配层后 Rugate 滤波器的光谱补偿效果 (a) 钛宝石 (b) 钕玻璃

补偿效果,即不需要添加折射率匹配层.

6. 结 论

本文首次由 Rugate 膜系设计理论出发,分别根据钛宝石和钕玻璃介质增益窄化的特点,合理选择补偿增益窄化的调制函数,设计出了用于补偿钛宝石系统和钕玻璃系统增益窄化效应的 Rugate 滤波器,并用普通均匀多层膜的特征矩阵方法近似分析了设计出的 Rugate 滤波器的光谱响应.针对 Rugate

滤波器的边频调制和对光谱补偿带来的影响,采用添加折射率匹配层的方法对 Rugate 滤波器的边频调制进行抑制.将设计出的 Rugate 滤波器分别应用到钛宝石和钕玻璃的放大器中进行光谱补偿,数值模拟显示,能比较好地补偿增益窄化效应.这种滤波器用于补偿高功率脉冲放大器增益介质的增益窄化效应,可以克服目前没有适合钕玻璃系统的光谱补偿手段,而且具有优于其他光谱补偿技术的优点,比如,可以忽略补偿引入的色散等额外因素,插入损耗较小等.

- [1] Strickland D , Mourou G 1985 *Opt. Comm.* **56** 219
- [2] Peng H S 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 721 (in Chinese)[彭翰生 2006 中国激光 **33** 721]
- [3] Stuart B C , Herman S , Perry M D 1995 *IEEE J. Quantum Electron* **31** 528
- [4] Barty C P J , Guo T , Blanc C L , Raksi F , Rose-Petruck C , Squier J , Wilson K R , Yakovlev V V , Yamakawa K 1996 *Opt. Lett.* **21** 668
- [5] Barty C P J , Korn G , Raksi F , Rose-Petruck C , Squier J , Tien A C , Wilson K R , Yakovlev V V , Yamakawa K 1996 *Opt. Lett.* **21** 219
- [6] Ribeyre X , Videau L , Migus A , Mercier R , Mullot M 1996 *Opt. Lett.* **21** 1374
- [7] Chambaret J P , Blance C L , Chériaux G , Curley P , Darpigny G , Rousseau P , Hamoniaux G , Antonetti A , Salin F 1996 *Opt. Lett.* **21** 1921
- [8] Bovard B G 1993 *Appl. Opt.* **32** 5427
- [9] He X X , Bai J T , Hou X 2003 *Acta Photonica Sinica* **30** 958 (in Chinese)[贺晓旭、白晋涛、侯 洵 2003 光子学报 **30** 958]
- [10] Liu L Q , Peng H S , Wei X F , Zeng X M , Peng Z T , Huang X J , Wang X D , Zhou K N , Wang X , Zhu Q H , Chu X L , Guo Y 2005 *High Power Laser and Particle Beam* **17** 856 (in Chinese)[刘兰琴、彭翰生、魏晓峰、曾小明、彭志涛、黄小军、王晓东、周凯南、王 道、朱启华、楚晓亮、郭 仪 2005 强激光与粒子束 **17** 856]
- [11] Southwell W H 1988 *J. Opt. Soc. Am. A* **5** 1558
- [12] Dobrowolski J A , Lowe D 1978 *Appl. Opt.* **17** 3039
- [13] Born M , Wolf E (Trans. by Yang X S) 2006 *Principles of Optics* (Beijing : Publishing House of Electronic Industry) p45 (in Chinese)[波 恩、沃耳夫著,杨葭荪译 2006 光学原理(北京:电子工业出版社)第45页]
- [14] Southwell W H , Hall R 1989 *Appl. Opt.* **28** 2949
- [15] Southwell W H 1989 *Appl. Opt.* **28** 5091
- [16] Verly P G , Dobrowolski J A 1990 *Appl. Opt.* **29** 3672
- [17] Tikhonravov A V , Trubetskov M K , Amotchkina T V , Kokarev M A , Kaiser N , Stenzel O , Wilbrandt S , Gäbler D 2006 *Appl. Opt.* **45** 1515

Design of Rugate filter for gain narrowing compensation *

Zhao Lei^{1,†} Sui Zhan¹⁾ Zhu Qi-Hua¹⁾ Zhang Ying¹⁾ Zuo Yan-Lei¹⁾

1) (Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

2) (Graduate School of China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 9 July 2008 ; revised manuscript received 2 September 2008)

Abstract

Two Rugate filters for compensating gain narrowing are designed separately based on the gain characteristics of Ti : sapphire amplifier and Nd : glass amplifier. The Gauss spectral shaping function is selected as the compensation modulation function. Characteristic matrix method is used to analyse the spectral response of the Rugate filter approximately. Amplification using Rugate filter spectral compensation is analysed numerically. Results show that they satisfy the compensation requirements well and can be used as the spectral compensation filters.

Keywords : ultra-short pulse laser , gain narrowing , spectral compensation , Rugate filter

PACC : 4280W , 4280C

* Project supported by the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2008A0401017) and the Science and Technology Foundation of State Key Laboratory of High Temperature and Density Plasma Physics (Grant No. 9140C6803010701).

† E-mail : leizhao@nudt.edu.cn ; leizhaoc@mail.ustc.edu.cn