

# 消色差复合宽带太赫兹波片的优化设计

张鹏程<sup>1</sup> 任国斌<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中央民族大学理学院, 北京 100081

<sup>2</sup>北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

<sup>3</sup>北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

**摘要** 采用模拟退火算法设计了 0.2~2.0 THz 和 0.2~3.0 THz 两个波段下的消色差复合太赫兹  $\lambda/4$  波片, 在 0.2~2.0 THz 波段内实现了波片相位延迟偏差小于 2%, 在 0.2~3.0 THz 波段内波片相位延迟偏差小于 4%。系统分析了不同石英玻片个数对消色差复合太赫兹波片的消色差性能以及厚度和损耗等关键参量的影响。分析表明, 随着石英玻片个数的增加, 波片的消色差性能也会变好, 在相应太赫兹波段相位延迟失谐量也随之减小; 但同时, 波片的厚度也随之增加, 导致对太赫兹波的损耗增加。在 0.2~2.0 THz 和 0.2~3.0 THz 范围内, 太赫兹  $\lambda/4$  波片采用 5 个玻片为最佳, 此时可以获得较好的消色差性能, 同时波片的厚度和损耗也在可实际应用范围内。

**关键词** 光纤光学; 太赫兹技术; 模拟退火算法; 消色差波片

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.0111001

## Optimization and Design of Composite Terahertz Achromatic Wave Plate

Zhang Pengcheng<sup>1</sup> Ren Guobin<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

<sup>3</sup>Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** Based on simulated annealing algorithm, the terahertz composite achromatic quarter-wave plate is designed for two frequency bands, 0.2~2.0 THz and 0.2~3.0 THz bands. Remarkable design results (retardation deviation is 2% from 0.2 to 2.0 THz and retardation deviation is 4% from 0.2 to 3.0 THz) are got. The influence of different numbers of quartz plates on the key parameters of the quarter-wave plate, such as achromatic performance, thickness and loss is analyzed. It is shown that with the increase of the number of quartz plates, the achromatic performance of the quarter-wave plate will be improved and phase delay detuning will also be reduced; however, the thickness of the quarter-wave plate is increased, leading to the increase of the loss. It is also shown that the optimized quartz plate number is five, with which good achromatic performance can be got, and the thickness and the loss are also practical for THz application.

**Key words** fiber optics; terahertz technology; simulated annealing algorithm; achromatic wave plate

**OCIS codes** 040.2235; 150.1135; 120.4570

## 1 引言

太赫兹 (THz) 波段是指频率在 0.1~10.0 THz 范围的电磁波, 波长在 0.03~3.0 mm 范围, 介于微

波与红外之间。对太赫兹波技术的研究方法和手段大多借鉴光学或微波波段的研究思路<sup>[1]</sup>。目前太赫兹波在超快过程探测、材料表征、环境检测、物体成

收稿日期: 2011-08-19; 收到修改稿日期: 2011-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(61178008)和教育部科学技术研究重点项目(210267)、中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 张鹏程(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤光学方面的研究。E-mail: zpengcheng2006@126.com

导师简介: 任国斌(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤光学方面的研究。E-mail: gbre@bjtu.edu.cn

(通信联系人)

像、实时生物信息提取、宽带短距离移动通信等领域具有广阔的应用前景<sup>[2,3]</sup>,并按照摩尔定律的增长速度,在不久的将来,无线通信的载波就会进入太赫兹波谱范围<sup>[4]</sup>,因此对太赫兹波的研究越来越受到重视。而在这些应用中迫切需要一些太赫兹波段的偏光器件,如波片、偏振分光器和合成器等。

波片是太赫兹技术中极为重要的基本器件,也是最基本的相位调制器。它能使透过它的振动方向相互垂直的两束太赫兹波彼此之间产生一定的相位差,被广泛应用于光弹力学、现代光通信技术和光学精密测量等诸多领域<sup>[5]</sup>。常用的有 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片。常规的波片,其延迟量都是对某一波长而言的,当入射太赫兹波长改变时其延迟量也要发生相应的变化。波片同其他偏振器件相配合,可以实现太赫兹波的各种偏振态之间的相互转换、偏振面的旋转以及各类太赫兹波的调制。可以说几乎所有应用太赫兹技术的地方都离不开波片。例如,太阳磁场的测量实际上是通过偏振分析器实现对太阳光斯托克斯偏振分量的测量,进而得到太阳磁场与偏振态的关系,波片是偏振分析器的核心元件,它的精确性和稳定性将直接决定望远镜的偏振精确性和稳定性。因而研制在太赫兹波段下参数稳定可靠的高精度波片具有重要的应用价值<sup>[5~8]</sup>。

由于缺乏低损耗的双折射太赫兹材料,目前对低损耗太赫兹波片材料的研究及其应用正迅速成为热点。Weis等<sup>[9]</sup>研究了具有高双折射的cut-wire-pair metamaterials,这种材料对入射波的正交偏振分量能产生符号相反的折射率,可以用来制作高效的亚波长薄太赫兹波片。Scheller等<sup>[10]</sup>设计出了一种一维聚合物光子晶体材料,这种材料在太赫兹频率处具有显著的双折射效应,因此可以用来作为太赫兹波片材料和频率滤波原件等。Saha等<sup>[11]</sup>采用Imprint技术,在高密度聚乙烯上印入垂直的沟槽而获得了一种人工聚合物材料,这种材料具有低损耗特性,可以用于制作 $\lambda/4$ 太赫兹波片。对于波片在太赫兹时域光谱中的应用,目前太赫兹波片的带宽仍然太窄,因此对太赫兹波片设计也在向着宽带方向发展。Masson等<sup>[7]</sup>成功用6个玻片组合成复合波片,实现了太赫兹波段 $\lambda/4$ 的相位延迟,在0.2~1.6 THz波段内相位延迟偏差小于3%。

复合太赫兹波片的设计方法是源于Destriau等<sup>[12]</sup>的思想:将若干石英玻片叠合成复合波片,各石英玻片的光轴互成一定角度。用数值计算来优化

设计消色差复合波片是一个涉及到多个参数和多个约束条件的系统优化问题。模拟退火算法是解决多参数和多约束系统优化问题的有效方法,它将每个参数均视为变量,并设定每个变量的取值范围。模拟退火算法具有极强的搜索能力,不会陷入局部最优解,是解决多参数、多约束系统优化问题的常用方法。

本文采用模拟退火算法分别设计了0.2~2.0 THz和0.2~3.0 THz两个波段下的消色差复合太赫兹波片,每个波段分别设计了7组 $\lambda/4$ 太赫兹波片,每组波片由不同数量的石英玻片组成。并依据设计结果,系统分析了不同石英玻片个数对消色差复合太赫兹波片的消色差性能、厚度和损耗等关键参量的影响。

## 2 复合太赫兹波片的模拟退火算法

1982年Kirkpatrick等<sup>[13]</sup>将固体退火过程的思想引入到求解组合优化问题中,从而提出了模拟退火算法。模拟退火算法的核心思想与高温流体的冷却和退火方式颇为相似。高温下的流体如果慢慢冷却下来,流体中的大量原子往往会自行排列形成一个纯净的晶体。这一过程的本质在于缓缓的冷却,自然界本身的极小化算法就是基于这样的一种方式。利用这种思想,模拟退火算法具有很强的搜索能力,不会陷于局部极小值,容易得到全局最小值<sup>[14,15]</sup>。

与人造材料(比如metamaterials和某些聚合物光子晶体材料)<sup>[16,17]</sup>相比,天然的双折射材料(比如石英)在太赫兹频率处具有相对较低的吸收损耗,并且具有成熟的制造技术。选用石英作为太赫兹 $\lambda/4$ 波片的材料,这是由于石英是双折射材料,在太赫兹波段具有较高的双折射效应;此外,石英材料在太赫兹波段的传输损耗很小<sup>[18]</sup>,同时,为了减小石英材料表面的反射,可以在其表面镀增透膜<sup>[19]</sup>,增加对各个频率太赫兹波的透过,因此具有很高的实际应用价值。

复合波片是由若干石英玻片叠合而成的,各个石英玻片间紧密贴合在一起,同时各片的光轴互成一定角度。当把任意延迟量的波片叠合起来,让它们的光轴有一定的夹角,可以使整个器件的延迟量与波长无关,成为消色差波片。

由矩阵光学,玻片的琼斯矩阵可表示为

$$J_i(\delta_i, \theta_i) =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{\delta_i}{2} + j \sin \frac{\delta_i}{2} \cos 2\theta_i & j \sin \frac{\delta_i}{2} \sin 2\theta_i \\ j \sin \frac{\delta_i}{2} \sin 2\theta_i & \cos \frac{\delta_i}{2} - j \sin \frac{\delta_i}{2} \cos 2\theta_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\delta_i$  为出射的 e 光和 o 光的相位差, 即玻片的相位延迟,  $\delta_i = 2\pi d_i \nu (n_e - n_o) / c$ ,  $d$  为玻片厚度,  $\nu$  为入射太赫兹波的频率,  $n_e$  为石英材料 e 光的折射率,  $n_o$  为石英材料 o 光的折射率,  $c$  为光速;  $\theta$  表示玻片相对于光轴方向的角度。由于石英材料在太赫兹波段存在色散, 所以本文通过拟合得到石英材料在 0.2~3.0 THz 波段下的折射率<sup>[20]</sup>, 依据得到的折射率计算出不同太赫兹波频率下的  $\delta$  值。

每一个玻片用一个琼斯矩阵表示,  $n$  个玻片情况下, 其相位延迟效果为所有玻片的琼斯矩阵的乘积:

$$\mathbf{J} = \prod_{i=1}^n \mathbf{J}_i = \begin{pmatrix} A & B \\ -B^* & A^* \end{pmatrix}. \quad (2)$$

总相位延迟  $\delta$  可表示为

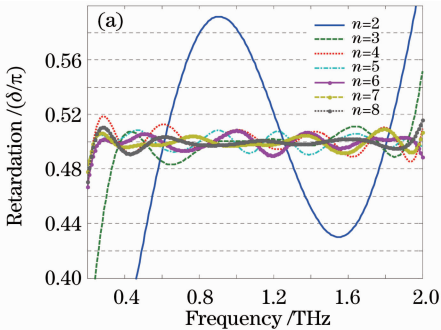
$$\tan^2 \frac{\delta}{2} = \frac{|\operatorname{Im} A|^2 + |\operatorname{Im} B|^2}{|\operatorname{Re} A|^2 + |\operatorname{Re} B|^2}, \quad (3)$$

式中  $\operatorname{Im} A$  为(2)式中  $A$  的虚部,  $\operatorname{Im} B$  为(2)式中  $B$  的虚部,  $\operatorname{Re} A$  为(2)式中  $A$  的实部,  $\operatorname{Re} B$  为(2)式中  $B$  的实部。

设计的目的是让波片的  $\delta$  在整个波段都稳定在  $\pi/2$  左右, 因此利用模拟退火算法来求得目标优化函数(误差函数)在 0.2~2.0 THz 和 0.2~3.0 THz 两个波段下的最小值, 目标优化函数定义为

$$\sum_{\nu} [\delta(\nu) - \pi/2]^2. \quad (4)$$

利用 C++ 语言, 编写了模拟退火程序<sup>[15]</sup>。由于目标优化函数中的变量为石英玻片厚度和石英玻片角度, 要求变量的取值都要在一定的实际考虑范



围内, 程序中对各变量的取值范围做了界定。经过多次实验, 发现在计算目标优化函数值时, 起主导作用的退火参数是退火步长, 其次是每次退火所执行的运算次数。不同的石英玻片个数下, 得到最优值时的退火步长都不同, 其规律为, 石英玻片个数越多, 则退火步长设定的越小。另一个起重要作用的参数是每次退火所执行的运算次数, 实验发现每次退火所执行的运算次数与石英玻片的个数和得到的目标优化函数值都有密切关系。

### 3 优化结果及分析

分别对每组波片的目标优化函数用模拟退火算法进行了优化, 得到了相位延迟偏差较小的优化结果, 并且讨论了不同的石英玻片个数对目标优化函数的影响, 系统分析了不同石英玻片个数下消色差复合太赫兹波片的性能, 主要包括: 相位延迟偏差、相位延迟失谐量、厚度和损耗等。

图 1 为 0.2~2.0 THz 和 0.2~3.0 THz 两个波段下 7 组  $\lambda/4$  波片的相位延迟曲线。每组波片分别由 2~8 个石英玻片叠合而成。从两图中可以直观看出, 随着石英玻片个数的增加, 曲线的波动范围变小, 曲线上各点的值更接近于 0.5。用相位延迟偏差  $\Delta$  来定量表示波片延迟量曲线在太赫兹波段的波动情况, 定义为

$$\Delta = \frac{|\delta_{\max}/\pi - 0.5|}{0.5} \times 100\%, \quad (5)$$

式中  $\delta_{\max}$  为某波段下波片最大的相位延迟量。相位延迟偏差反映的是波片的延迟量曲线在某个波段上最大的上下波动范围, 波动范围越小, 说明复合波片在此波段的消色差性能越好。从两图中可以整体看出, 波片的相位延迟偏差主要分布在太赫兹波的低频和低频附近, 在中间波段的相位延迟偏差较小, 这

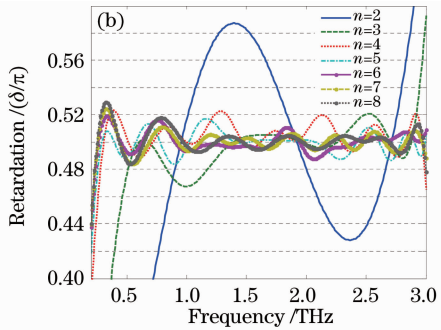


图 1 7 组  $\lambda/4$  波片的相位延迟。(a) 0.2~2.0 THz 波段; (b) 0.2~3.0 THz 波段

Fig. 1 Frequency dependence retardation of THz achromatic quartz quarter wave plate.

(a) 0.2~2.0 THz; (b) 0.2~3.0 THz

说明在高频和低频部分波片的消色差性能较差,在中间波段波片的消色差性能较优。当  $n=2$  时,两图中波片的相位延迟偏差在整个波段上都很大,此组波片的消色差性能较差。当  $n=3$  时,两图中波片的相位延迟偏差在低频部分仍然很大,此组波片在低频部分消色差性能较差。但当石英玻片个数增加到  $n \geq 5$  时,两图中波片的相位延迟偏差在整个波段上均较小,这表明波片的消色差性能在石英玻片个数  $n$  增加到 5 以上时得到了极大的提高。

在图 2 中给出了图 1(a), (b) 中的两个典型的设计结果,分别是 0.2~2.0 THz 波段下由 7 个石英玻片组成的  $\lambda/4$  波片和 0.2~3.0 THz 波段下由 5 个石英玻片组成的  $\lambda/4$  波片。各个石英玻片的厚度以及与光轴形成的角度数据分别由表 1 和表 2 给出。从图 2 中可以看出,在 0.2~2.0 THz 波段下,由 7 个石英玻片组成的复合波片的  $\Delta$  在整个波段

表 1 0.2~2.0 THz 波段  $n=7$  时各玻片厚度和光轴形成的角度

Table 1 Calculated thicknesses and orientations for the seven quartz plates over 0.2~2.0 THz

	1	2	3	4	5	6	7
Thickness /mm	3.76	6.17	3.37	4.35	4.05	6.43	3.43
Orientation /( $^\circ$ )	103.1	51.6	114.6	57.3	68.8	143.2	126.0

表 2 0.2~3.0 THz 波段  $n=5$  时各玻片厚度和光轴形成的角度

Table 2 Calculated thicknesses and orientations for the five quartz plates over 0.2~3.0 THz

	1	2	3	4	5
Thickness /mm	3.13	2.03	8.26	2.05	4.13
Orientation /( $^\circ$ )	31.6	47.0	149.0	14.1	131.8

为了更清楚地描述模拟退火算法的优化结果,在图 3 中给出了目标优化函数值与复合波片中石英玻片个数的关系。目标优化函数值是用模拟退火算法得到的目标优化函数的优化值,优化值的大小同样反映了波片的消色差性能的好坏,结合图 1(a), (b), 可以直观地看出因为优化值的不同而导致的消色差性能的差别。例如图 1(a) 中,  $n=2$  时的优化值为 18.24,  $n=7$  时优化值为  $3.6 \times 10^{-2}$ , 可以看出,  $n=7$  时波片的消色差性能要远远优于  $n=2$  时波片的消色差性能。从图 3 可以看出优化值整体上随着石英玻片个数的增加而减小,但是这两条曲线并不是呈严格单调下降的趋势,存在几个特殊点,在 0.2~2.0 THz 曲线上,  $n=6$  时的优化值 ( $5.6 \times 10^{-2}$ ) 大于  $n=5$  时的优化值 ( $5.2 \times 10^{-2}$ ); 在 0.2~3.0 THz 曲线上,  $n=7$  和  $n=8$  时的优化值也大于  $n=6$  时的优化值。这是因为采用模拟退火算法得

上小于 2%; 在 0.2~3.0 THz 波段下, 由 5 个石英玻片组成的复合波片在整个波段上的  $\Delta$  小于 4%, 并且具有很大的带宽 ( $\nu_{\max}/\nu_{\min}=15$ )。

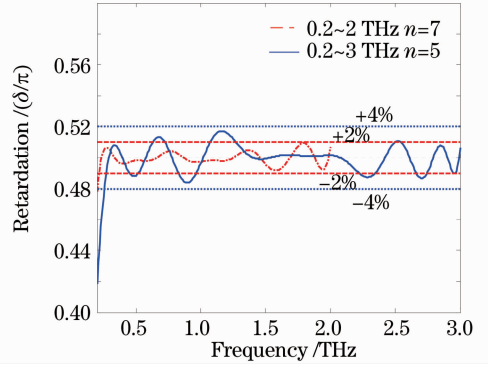


图 2 两组典型波片的相位延迟

Fig. 2 Frequency dependence retardation of two groups THz achromatic quartz quarter wave plate

到的这几个点的优化值并不是全局最小值,而是近似值。要得到收敛的全局最小值需要较大的计算量和较长的计算时间,例如,玻片个数为 8 时,模拟退火程序中的变量为 16 个。搜索 16 个变量的空间来求得收敛的全局最小值需要巨大的计算量和较长的计算时间,目前还不具备这样的计算条件,因此曲线中的目标优化函数值只是多次计算得到的最优极小值。但是从得到的数据来看,随着石英玻片个数的增加优化值曲线的整体趋势是下降的,说明波片的消色差性能随着玻片个数的增加在提高。

相位延迟偏差只反映了波片延迟量曲线的波动

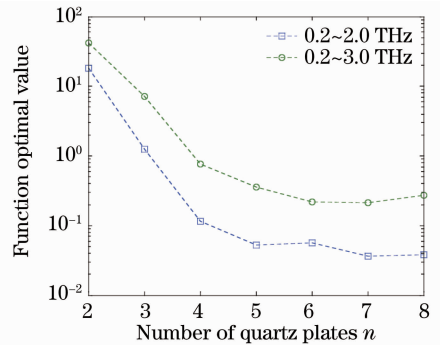
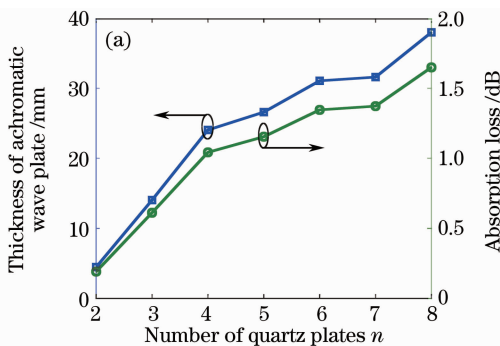


图 3 两个太赫兹波段内 7 组波片的目标优化函数值  
Fig. 3 Function optimal value of THz achromatic wave plate versus number of quartz plates

范围,由于会受到曲线中极大极小值点的影响,相位延迟偏差不能精确、定量地反映出波片消色差性能。目标优化函数值能定量地反映出波片消色差性能,但是由于受波段范围大小的影响,目标优化函数值只能反映同一波段下的波片消色差性能。而波片延迟量的均方差反映了整个波段上波片延迟量的平均波动情况,不会受曲线上个别极大极小值点的影响,并且均方差可以用来比较不同波段下波片的消色差性能,因此用波片延迟量的均方差来定量给出波片的消色差性能。定义波片延迟量的均方差为相位延迟失谐量  $\alpha$ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\delta_i / \pi - 0.5)^2}{N}}, \quad (6)$$

式中  $N$  为所取的频率离散值的个数。 $\alpha$  定量反映了波片的消色差性能, $\alpha$  越小标志着波片的消色差性能越好。图 4 给出了两个频率段下 7 组波片的  $\alpha$  值,可以看出,随着石英玻片个数的增加, $\alpha$  呈下降的趋势。从图 4 可看出,当  $n \geq 5$  时,两个波段下的  $\alpha$  都趋于稳定。当石英玻片个数分别为 5~8 时,在 0.2~2.0 THz 波段所对应的  $\alpha$  分别为: 0.0054, 0.0056, 0.0045, 0.0046; 在 0.2~3.0 THz 波段所对应的  $\alpha$  分别为: 0.0114, 0.0089, 0.0088, 0.0090。这说明石英玻片个数增加到 5 个及以上的时候,波片在整个频率范围内相位延迟失谐量趋于稳定,即波片的消色差性能趋于稳定,不会随着石英玻片个数的增加而有大的提高。与 0.2~2.0 THz 波段相比,



0.2~3.0 THz 波段内整个波段的  $\alpha$  值整体上要大于 0.2~2.0 THz 波段的  $\alpha$  值,例如,0.2~3.0 THz 波段  $n=7$  时  $\alpha=8.8 \times 10^{-3}$ ,而 0.2~2.0 THz 波段  $n=7$  时  $\alpha=4.5 \times 10^{-3}$ ,从图 1(a)和(b)的对比上能直观地看出,0.2~3.0 THz 波段的波片消色差性能整体上比 0.2~2.0 THz 波段要差,这说明,随着波段带宽的增加,波片的消色差性能相对有所下降。

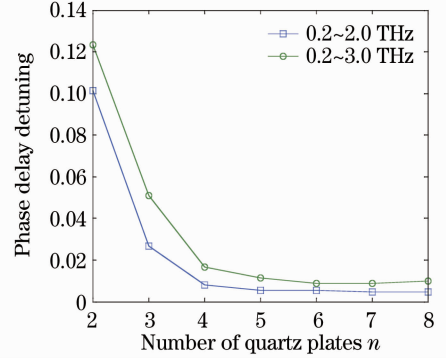


图 4 两个太赫兹波段内 7 组波片的相位延迟失谐量  
Fig. 4 Phase delay detuning of THz achromatic wave plate versus number of quartz plates

图 5 给出了波片厚度和损耗的关系,这里的损耗为波片对入射太赫兹波的功率吸收损耗。忽略石英材料对不同频率下太赫兹波的吸收系数会有所不同这个问题,近似认为石英材料在这两个波段下对太赫兹波的吸收系数恒定,为  $0.05 \text{ cm}^{-1}$ [7]。从图 5(a),(b)中可以看出,随石英玻片个数的增加,波片的厚度在增加,损耗也随之增加。

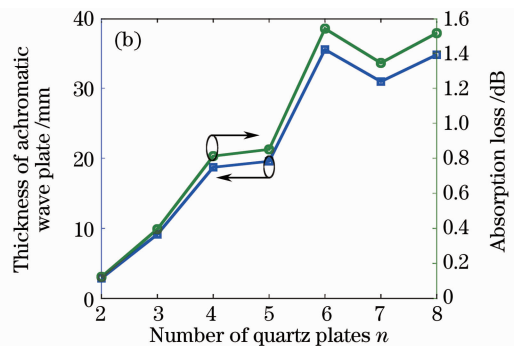


图 5 7 组  $\lambda/4$  波片的厚度和损耗。(a) 0.2~2.0 THz 波段;(b) 0.2~3.0 THz 波段

Fig. 5 Thickness and absorption loss of THz achromatic wave plate versus number of quartz plates.

(a) 0.2~2.0 THz; (b) 0.2~3.0 THz

综合分析这几个图发现,随着玻片个数的增加,波片的消色差性能在提高,当石英玻片个数在 5 个及以上时,波片的相位延迟失谐量趋于稳定,即消色差性能趋于稳定,不会随着玻片个数的增加而有显著提高,但是波片的厚度和损耗却随着玻片个数的

增加而有明显的上升。例如,图 5(a)中,玻片个数为 5 时,波片厚度为 26.6 mm,损耗为 1.2 dB,而玻片个数为 8 时,厚度为 38.0 mm,损耗达到 1.6 dB,损耗增加了 33%,图 5(b)中。玻片个数为 5 时,波片厚度为 19.6 mm,损耗为 0.9 dB,而玻片个数为 8

时,厚度为 34.9 mm,损耗达到 1.5 dB,损耗增加了 67%。在实际应用中,波片应该在提高性能的同时保持低的损耗;同时应考虑石英玻片的工艺和材料成本。因此,太赫兹  $\lambda/4$  波片采用 5 个玻片为最佳,此时相位延迟失谐量相对较小,波片的消色差性能较好,并且波片的损耗和厚度也较小。

综合以上分析,可以得出结论:1)随着石英玻片个数的增加,在相应太赫兹波段波片的相位延迟偏差、优化值和相位延迟失谐量都会越来越小,即消色差性能越来越好。2)石英玻片个数增加到 5 个以上时,波片的消色差性能趋于稳定,不会随着石英玻片个数的增加而有较大的提高。3)随着石英玻片个数的增加,波片的厚度也在不断增加,导致对太赫兹波的损耗增加。4)从实际应用的角度考虑,太赫兹  $\lambda/4$  波片采用 5 个玻片为最佳。

## 4 结 论

波片作为太赫兹技术中极为重要的相位调制器,可实现太赫兹波各种偏振态之间的相互转换、偏振面的旋转以及各类太赫兹波的调制,具有重要的应用价值。本文依据复合波片理论,编写了模拟退火算法,设计出了 0.2~2.0 THz 和 0.2~3.0 THz 两个波段下的消色差复合太赫兹  $\lambda/4$  波片,在 0.2~2.0 THz 波段范围内波片相位延迟偏差小于 2%,在 0.2~3.0 THz 波段内波片相位延迟偏差小于 4%。同时分析了两个波段下波片的消色差性能以及厚度和损耗等关键参量,并且对这两个波段下的波片消色差性能进行了对比。分析表明,在 0.2~2.0 THz 和 0.2~3.0 THz 两个波段下,太赫兹  $\lambda/4$  波片采用 5 个玻片为最佳,这时波片的消色差性能较好,同时波片的厚度和损耗也在合适范围内。结论对于消色差复合太赫兹  $\lambda/4$  波片的研制具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- G. Gallot, S. P. Jamison, R. W. McGowan *et al.*. Terahertz waveguides[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 851~863
- D. T. Petkie, C. Casto, F. C. De Lucia *et al.*. Active and passive imaging in the THz spectral region: phenomenology, dynamic range, modes and illumination[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(9): 1523~1531
- R. Piesiewicz, M. Jacob, M. Koch *et al.*. Performance analysis of future multi-gigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor

- environments[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(2): 421~430
- Yao Jianquan, Chi Nan, Yang Pengfei *et al.*. Study and outlook of terahertz communication technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2213~2233
- 姚建铨, 迟楠, 杨鹏飞等. 太赫兹通信技术的研究与展望[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2213~2233
- Hou Junfeng, Wang Dongguang, Deng Yuanyong *et al.*. Phase retardation measurement with least square fitting method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812001
- 侯俊峰, 王东光, 邓元勇等. 基于最小二乘拟合的波片相位延迟测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812001
- Wang Dongguang, Deng Yuanyong, Zhang Zhiyong *et al.*. Development of achromatic waveplate with large aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 979~986
- 王东光, 邓元勇, 张志勇等. 大口径消色差波片的研制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 979~986
- J.-B. Masson, G. Gallot. Terahertz achromatic quarter-wave plate[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 265~267
- Kong Chao. The Design and Analyze of Flat-Plate Birefringent Achromatic Wave Plate[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2007. 1~3
- 孔超. 片状复合式相位延迟器的设计及性能分析[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2007. 1~3
- P. Weis, O. Paul, C. Imhof *et al.*. Strongly birefringent metamaterials as negative index terahertz wave plates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(17): 171104
- M. Scheller, C. Jördens, M. Koch. Terahertz form birefringence[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(10): 10137~10142
- S. C. Saha, Y. Ma, J. P. Grant *et al.*. Imprinted quarter wave plate at terahertz frequency[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2010, **28**(6): 83~88
- G. Destriau, J. Prouteau. Realisation d'un quart d'onde quasi acromatique par juxtaposition de deux lames cristallines de meme nature[J]. *Phys. Radium*, 1949, **10**(2): 53~55
- S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220**(4598): 671~680
- Guo Lijiao, Wu Fuquan, Song Lianke *et al.*. Design of mica achromatic half wave plate with simulated annealing algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1574~1578
- 郭丽娇, 吴福全, 宋连科等. 用模拟退火算法设计的云母  $\lambda/2$  消色差复合波片[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1574~1578
- W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling *et al.*. Numerical Recipes in C[M]. Great Britain: Cambridge U. Press, 1992. 444~455
- X. G. Peralta, E. I. Smirnova, A. K. Azad *et al.*. Metamaterials for THz polarimetric devices[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 773~783
- S. C. Saha, Y. Ma, J. P. Grant *et al.*. Imprinted terahertz artificial dielectric quarter wave plates[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(12): 12168~12175
- D. Grischkowsky, S. R. Keiding, M. van Exter *et al.*. Far-infrared time domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1990, **7**(10): 2006~2015
- THz materials[OL]. [2011. 11. 25]. [http://www.tydex.ru/en/products/thz\\_optics/thz\\_coatings](http://www.tydex.ru/en/products/thz_optics/thz_coatings)
- THz AR coating[OL]. [2011. 11. 25]. [http://www.tydex.ru/en/products/thz\\_optics/thz\\_materials](http://www.tydex.ru/en/products/thz_optics/thz_materials)