

宽波段波状多层膜结构偏振分束器的设计与优化*

彭皓 沈伟东[†] 杨陈楹 章岳光 刘旭

(浙江大学光电信息工程学系, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2014年2月11日收到; 2014年3月17日收到修改稿)

本文基于二维光子晶体波状多层膜结构, 提出了叠加两种不同膜厚的周期膜堆来拓宽偏振分束器有效带宽的方法. 采用粒子群优化算法, 建立偏振分束特性的评价函数, 优化结构和薄膜厚度等参数, 获得了中心波长 565 nm, 带宽 220 nm, 平均消光比大于 30 dB 的宽波段偏振分束器. 采用时域有限差分方法分析了膜层顶角的角度敏感性和波状结构的电场分布. 结果表明, 两个周期膜堆组合的结构解决了禁带不连续的情况, 而粒子群优化算法的使用加快了结果收敛, 有效地扩展了偏振分束带宽.

关键词: 关键词偏振分束器, 光子晶体, 光学薄膜, 粒子群优化算法

PACS: 42.25.Bs, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.63.134212

1 引言

偏振分束器是将 TE 模式和 TM 模式的偏振光沿着不同传播方向分开的一种光学器件^[1], 它被广泛应用于液晶显示、光通信与光互连以及偏振成像等领域中. 传统的偏振分束器主要利用具有双折射效应的天然晶体^[2] 或者可在布儒斯特角附近分离偏振光束的多层介质薄膜^[3]. 它们或者体积大, 无法实现微型化、集成化, 或者由于工作波长范围较窄, 应用范围受限制. 为了缩小器件的尺寸, 越来越多的研究者将光子晶体用于偏振分束器的设计和制作中, 利用 TE 模和 TM 模在光子晶体中不同的传播特性实现偏振分束^[4-10]. Jong 等^[11] 在二维正方晶格多孔硅结构中嵌入光子晶体平板, 实现了高效率高消光比的偏振分束. Lu 等^[12] 利用光子晶体中 TE 和 TM 模式光波在多模干涉效应中耦合长度的不同来实现光束分离, 设计的介质棒状结构偏振分束器体积小, 但不具备较宽的工作波段. Chen 等^[13] 基于二维光子晶体波状结构设计了在可见和近红外双波段的偏振分束器, 但是其计算粗略, 禁带不连续导致获得的带宽有限.

日本 Photonic Lattice 公司设计的可见光偏振分束器^[14], 仅有 100 nm 带宽, 应用受到限制.

本文基于二维光子晶体波状多层膜结构, 提出了采用两种不同膜厚的周期膜堆叠加来增加偏振带宽的方法, 并应用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO), 通过建立合理的评价函数来优化结构参数和膜层厚度, 设计了中心波长 565 nm, 带宽 220 nm, 平均消光比大于 30 dB 的宽波段偏振分束器. 使用时域有限差分方法 (finite difference time domain, FDTD) 分析膜层顶角的角度敏感性, 并研究了波状结构的电场分布. 结果表明膜堆叠加的方式可以有效解决光子晶体禁带的不连续现象, 实现偏振分束波段的扩展, 而粒子群算法强大的全局搜索能力可以快速找到最佳的结构参数.

2 仿真模型和理论

波状多层膜结构是一种二维光子晶体, 它由折射率不同的两种介质材料按照一定的周期排在二维平面上, 而在第三个方向呈均匀分布, 如图 1(a) 所示.

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA040401)、国家自然科学基金 (批准号: 61275161)、中央高校基本科研业务专项资金 (批准号: 2014FZA5004) 和浙江省自然科学基金 (批准号: LY13F050001) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: adongszju@hotmail.com

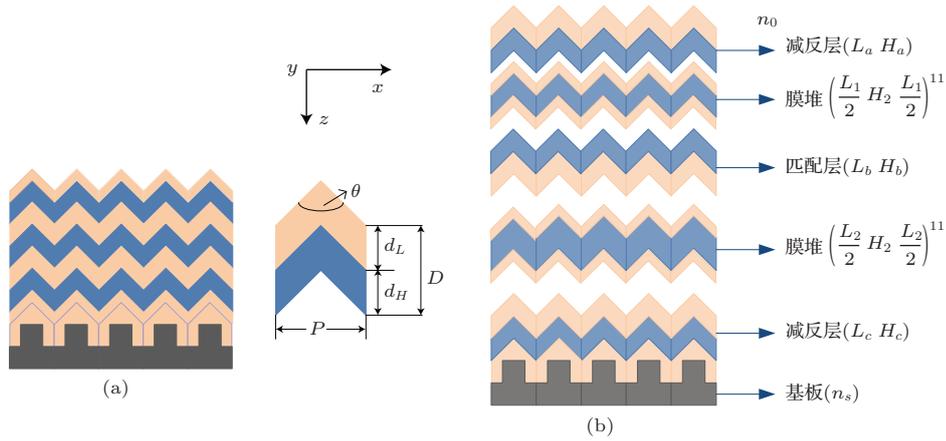


图1 (网刊彩色) 波状多层膜结构示意图 (a) 单周期膜堆结构; (b) 两个不同膜厚周期膜堆组合结构

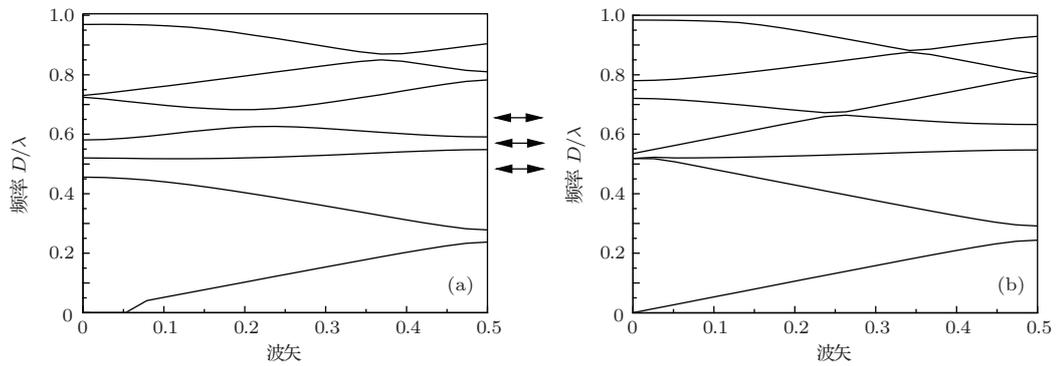


图2 计算的波状多层膜能带图 (a) TE 模能带; (b) TM 模能带, 其中波矢以 $2\pi/P$ 为单位

分别选用 TiO_2 ($n_H = 2.3$) 和 SiO_2 ($n_L = 1.47$) 作为高低折射率的两种介质材料. 其中 P 为矩形基板周期, D 为膜层周期, θ 为膜层顶角, d_H 和 d_L 分别表示 TiO_2 和 SiO_2 的膜层厚度. 入射介质和基板分别为空气 ($n_0 = 1$) 和熔融石英 ($n_S = 1.47$). 上述 n_H, n_L, n_0 和 n_S 分别为相应折射率. 初始结构参数设定为 $P = 300 \text{ nm}$, $d_H = d_L = 150 \text{ nm}$, $\theta = 90^\circ$, 共 11 对高低折射率膜层. 由于电磁波在光子晶体中传播时, 受到布拉格散射的调制, 其能量形成能带结构. 不同偏振态下光子晶体能带结构的差异是偏振分束的实现原理, 多层膜的能带结构如图 2 所示, TE 模的能带结构中出现三条不连续的禁带(箭头所指区域), 而相应频率的 TM 模则是通带. 因此 TM 模沿 z 方向透过, 而 TE 模则被反射, 形成偏振分束.

采用 FDTD^[15] 计算波状多层膜结构的透射光谱, 如图 3 所示, 可以看到 TE 模有三个分离的截止区, 分别在 460 nm, 530 nm 和 620 nm 处, 这与能带结构图一致. 而 TM 在整个波段都具有较高的透过率, 但透射曲线振荡剧烈, 特别在 430 nm, 500 nm 和 570 nm 处, 这是因为光在周期结构中传播会

经历多重散射, 散射与未散射的光波叠加形成驻波场, 这些布洛赫波矢叠加后会在空间形成建设性或者破坏性干涉, 导致了透射光谱曲线的振荡^[16].

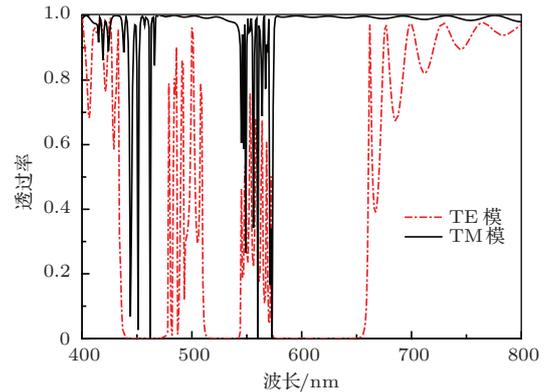


图3 单个周期膜堆结构的透射光谱

扩展偏振分束带宽的关键在于调整能带结构, 将不连续的禁带合并起来. 参考光学薄膜扩展反射区的方法, 采用 $\left(\frac{L_1}{2} H_1 \frac{L_1}{2}\right)^{11}$ 和 $\left(\frac{L_2}{2} H_2 \frac{L_2}{2}\right)^{11}$ 两种不同膜厚的周期膜堆叠加结构来增大带宽, 如

图 1 (b), L 代表 SiO_2 , H 代表 TiO_2 . 为了提高 TM 模透过率, 消除透射光谱中出现的尖峰以及减小波动, 使曲线趋于平稳, 在两个膜堆之间加入中心匹配层 ($L_b H_b$), 在膜堆与空气之间和膜堆与基板之间分别加入减反层 ($L_a H_a$) 和 ($L_c H_c$). 由于结构参数较多, 使用 PSO 优化算法对各个参数进行寻优来提高偏振器的光学特性. PSO 算法是由 Eberhart 和 Kennedy^[17] 提出的, 源于模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法, 它具有收敛速度快、对初始参数依赖低等优点, 因而在复杂光学薄膜滤光片的设计中得到应用^[18].

在优化过程中需要同时考察 TE 模和 TM 模的透射率曲线, 因此建立的评价函数 Merit 如下:

$$\text{Merit} = \sum_{\lambda=440}^{\lambda=660} (W_1(T_{\text{TE}}(\lambda) - 0))^2 + \sum_{\lambda=440}^{\lambda=660} (W_2(T_{\text{TM}}(\lambda) - 1))^2, \quad (1)$$

式中优化范围为 440 至 660 nm 的可见光波段, $T_{\text{TE}}(\lambda)$ 和 $T_{\text{TM}}(\lambda)$ 为 TE 模和 TM 模入射下的透射率, 目标值分别为 0 和 1. W_1 和 W_2 为两种偏振态的权重值, 设定权重值时, 要考虑两个方面的因素: TE 偏振的截止效果对偏振分束器的消光比十分重要; 同时兼顾 TM 偏振可能存在的透射率反常现象, 若 TE 模的权重设置过高会导致优化过程中 TM 模透射率值无法起到杠杆作用, 特性曲线较差. 综合考虑, 设定 $W_1 = 10$, $W_2 = 1$.

3 结果与分析

3.1 设计结构的模拟结果

叠加两种不同膜厚的周期膜堆 $\left(\frac{L_1}{2} H_1 \frac{L_1}{2}\right)^{11}$ 和 $\left(\frac{L_2}{2} H_2 \frac{L_2}{2}\right)^{11}$ 两种作为初始结构进行优化设计, 根据不同的中心波长, 设定初始结构 L_1/H_1 , L_2/H_2 分别为 200 nm/100 nm, 150 nm/150 nm, 膜层顶角固定为 90° . 设计的偏振分束器在可见光波段, 由于基板周期约为中心波长的一半^[19], 因此将基板周期固定在 300 nm. 优化前初始结构的透射光谱如图 4 所示, 可以看出 TE 模有两个分离的截止带, 而 TM 模的透过率有较大的振荡.

采用 PSO 优化算法进行优化, 图 5 为评价函数在优化过程中的变化. 可以看到 Merit 值曲线在前

10 代左右已经有较大的下降幅度, 50 代之后趋于平稳, 这证明了 PSO 算法具有较强的搜索能力和较快的收敛效果. 图 6 为优化后的透射光谱和消光比曲线, 表 1 为优化后的膜堆参数. 与单个周期膜堆结构的结果对比, 采用两个不同膜厚的周期膜堆组合叠加的方法优化得到偏振分束器带宽有了明显的提升, TE 模禁带连续, 范围从 440 nm 到 675 nm, 共有 235 nm, 整个禁带截止深, 透过率低于 0.1%, 没有明显的起伏. 观察 TM 模, 大部分情况下透过率超过 85%, 而 455 nm 以及 558 nm 处有透射率较低的尖锐波谷. 这种尖锐波谷是由于当入射光波长约为基板周期的一倍到两倍之间, 处于共振区而发生类似瑞利伍德反常现象^[20, 21], 造成在特定波长附近的透射率异常. 综合 TE 和 TM 模的透射曲线, 优化后的偏振分束器在中心波长 565 nm 处获得了 220 nm 的工作带宽, 平均消光比超过 30 dB, 相比较以往设计的可见光处波状结构偏振分束器, 带宽有了很大提升. 同时整个偏振分束器厚度为 8 μm , 实现了微型偏振分束器的设计要求.

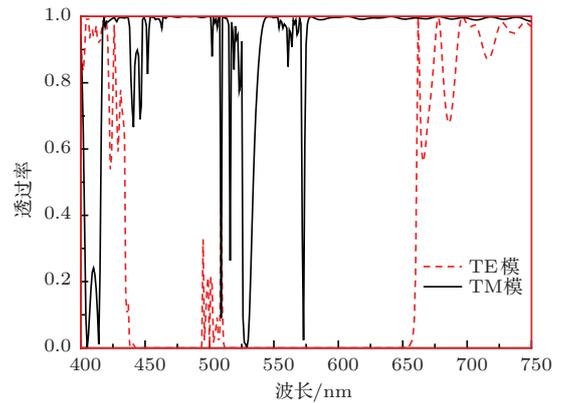


图 4 优化前初始结构的透射光谱

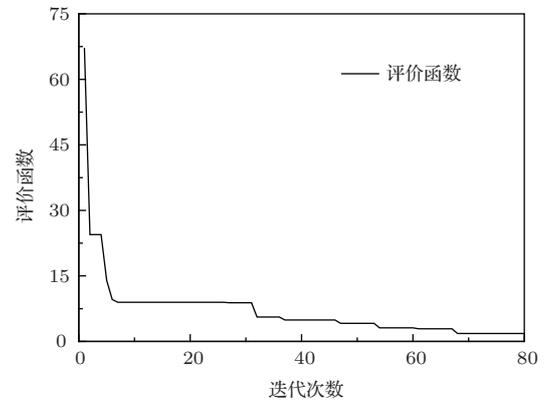


图 5 PSO 优化算法中评价函数的变化趋势

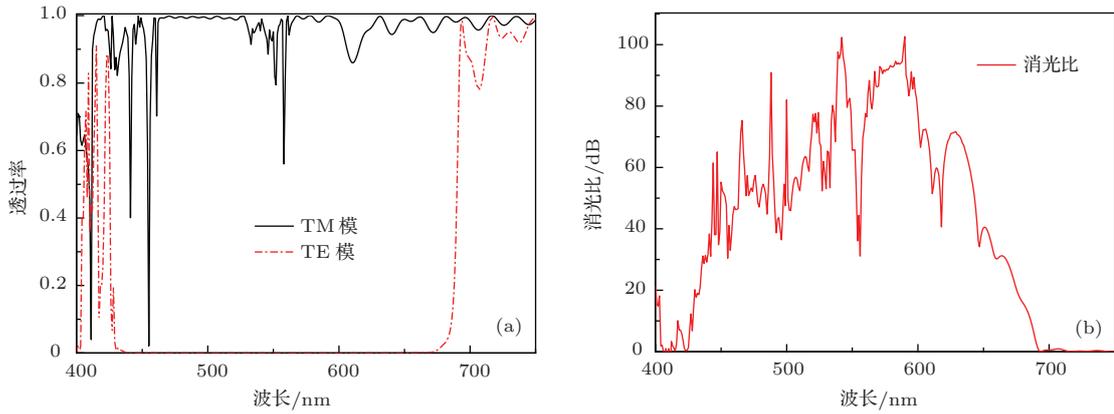


图6 两个不同膜厚对称周期膜堆组合结构 (a) 优化后的透射光谱; (b) 消光比

表1 优化后的膜堆参数

	SiO ₂ /nm	TiO ₂ /nm
减反层(上)	300	0
减反层(下)	0	0
匹配层(中)	268.66	0
膜系1(L ₁ /H ₁)	193.68	144.65
膜系2(L ₂ /H ₂)	176.95	125.96

3.2 膜层顶角的敏感性与膜间电场分布

在波状多层膜制备中, 波状结构容易产生平坦化的趋势, 因此研究膜层顶角的敏感性具有重要意义. 图7考察膜层顶角在小范围变化时对于透射光谱的影响, 初始结构设定膜层厚度与基板周期保持不变, 膜层顶角 θ 的变化范围从85°到95°, 间隔为2°, 并加入90°时的透射曲线进行比较. 从结果中可以看到, TE模整体保持很低的透过率, 当角度为85°和95°时, 透射曲线产生个别较小的凸起, 这说明当角度小于85°或者大于95°时, 原本连续的禁带开始变化, 而观察TM模, 除了异常透射位置透过率发生变化以及产生有很小的偏移, 大部分波长点透过率都基本保持不变. 因此在85°到95°的范围内, 无论TE模还是TM模的透射曲线均变化不大, 这说明膜层顶角小角度的变化可以维持较好的偏振分束效果.

进一步研究光与波状结构之间的相互作用. 当单色光垂直入射时, 选取一部分单元结构进行仿真. 图8(a), (b)表示600 nm处TE, TM条件下的膜间电场分布, (c), (d)表示800 nm处TE, TM条件下的膜间电场分布, 图中场强大小均作归一化处理. (a)与(b)的比较, (a)中场强沿着波的前进方向

迅速的衰减, 大部分区域场强很低, 而(b)中场强在传播方向上几乎没有衰减, 并且能够清晰地看到波状结构的轮廓, 因此600 nm处TE模截止, TM模通过, 有明显的偏振分束效果; 而对比(c)和(d), 可以看出在800 nm处, TE模和TM模的能量沿波矢方向都没有衰减, 因此没出现偏振分束效果. 同时将(a), (c)与(b), (d)相比较可以看到, 在TE模式下, 能量主要集中在高折射率区域($n_H = 2.3$), 其中顶角处的场强最大并以其为中心向四周发散;

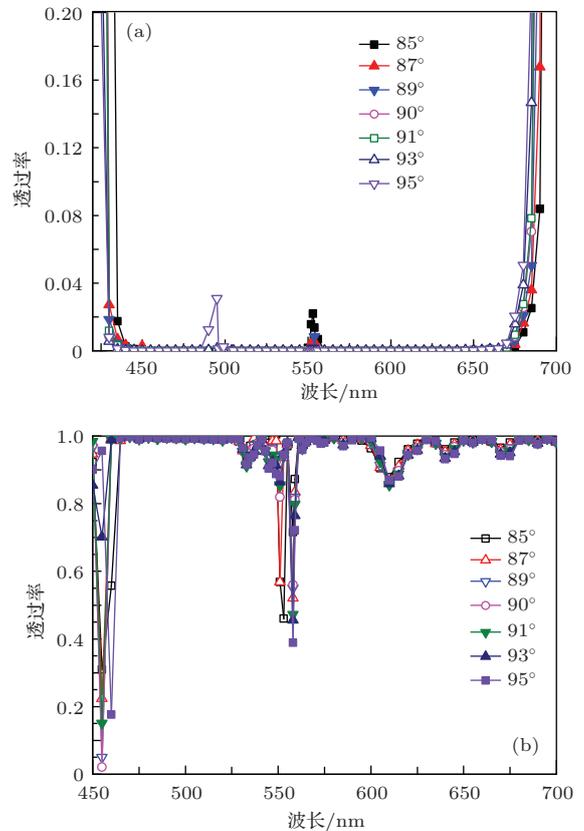


图7 (网刊彩色) 膜层顶角在85°到95°之间透射光谱的变化情况 (a) TE模; (b) TM模

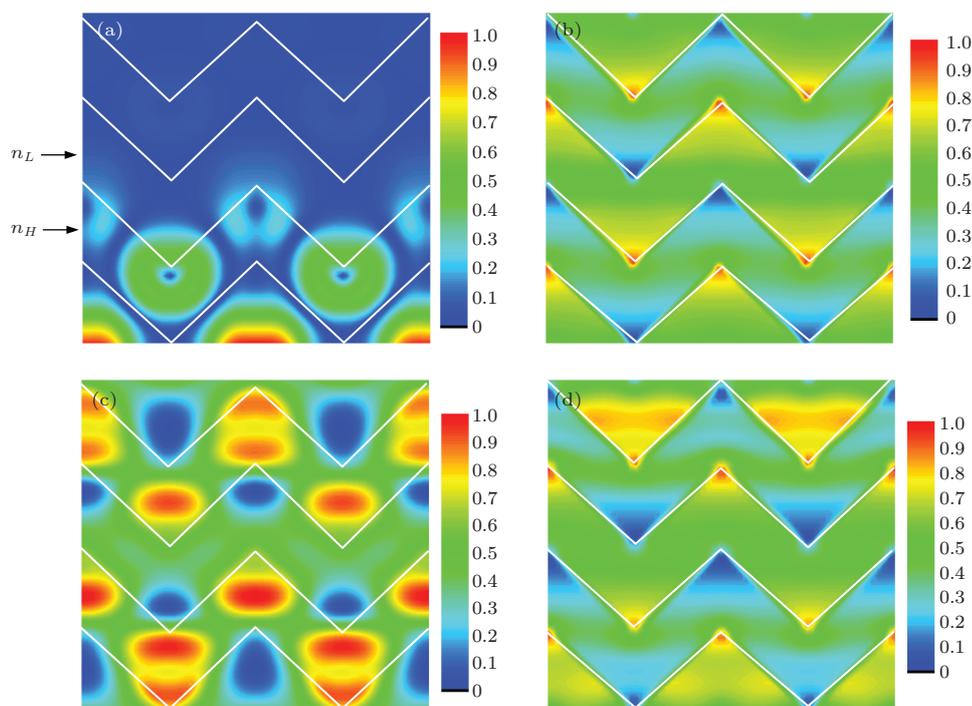


图8 (网刊彩色) 波状结构中的电场分布 (a) $\lambda = 600$ nm 时 TE 模的电场分布; (b) $\lambda = 600$ nm 时 TM 模的电场分布; (c) $\lambda = 800$ nm 时 TE 模的电场分布; (d) $\lambda = 800$ nm 时 TM 模的电场分布

而 TM 模式下刚好相反, 在低折射率区域 ($n_L = 1.47$) 的电场强度要高于高折射率区域. 虽然分布较 TE 模式更加均匀, 但是仍然可以看到光与波状结构在顶角处的相互作用最为明显.

4 结 论

本文基于二维光子晶体波状多层膜结构, 提出用 $\left(\frac{L_1}{2}H_1\frac{L_1}{2}\right)^{11}$ 和 $\left(\frac{L_2}{2}H_2\frac{L_2}{2}\right)^{11}$ 两种不同膜厚的周期膜堆叠加的结构扩展高反射区, 采用 PSO 优化算法, 结合偏振分束特性的评价函数, 优化设计得到了中心波长 565 nm, 工作带宽 220 nm, 平均消光比大于 30 dB 的宽波段偏振分束器. 仿真结果表明, 所设计的结构避免了禁带不连续的情况, 有效的拓宽了偏振分束器的带宽. 文章最后还分析研究了膜层顶角的角度敏感性, 表明膜层顶角小角度的变化可以维持较好的偏振分束效果.

参考文献

- [1] Shen X P, Han K, Li H P, Shen Y F, Wang Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1737 (in Chinese)[沈晓鹏, 韩奎, 李海鹏, 沈义峰, 王子煜 2008 物理学报 **57** 1737]
- [2] Gerald W, Roger P, Andrew R H 2011 *Opt. Lett.* **36** 1332

- [3] Zhang Y G, Sheng Y J, Ai M N, Zhang M J, Gu P F, Tang J F 2001 *Optical Instruments* **23** 198 (in Chinese)[章岳光, 盛永江, 艾曼灵, 张梅骄, 顾培夫, 唐晋发 2001 光学仪器 **23** 198]
- [4] Schonbrun E, Wu Q, Park W 2006 *Opt. Lett.* **31** 3104
- [5] Morita Y, Tsuji Y, Hirayama K 2008 *IEEE Photonic Technology Letters* **20** 93
- [6] Liu T, Zakharian A R, Fallahi M 2005 *IEEE Photonic Technology Letters* **17** 1435
- [7] Zheng W H, Xing M X, Ren G, Johnson S G, Zhou W J, Chen W, Chen L H 2009 *Opt. Express* **17** 8657
- [8] Han K, Wang Z Y, Shen X P, Wu Q H, Tong X, Tang G, Wu Y X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044212 (in Chinese)[韩奎, 王子煜, 沈晓鹏, 吴琼华, 童星, 唐刚, 吴玉喜 2011 物理学报 **60** 044212]
- [9] Zhang X, Liao Q H, Chen S W, Hu P, Yu T B, Liu N H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104215 (in Chinese)[张旋, 廖清华, 陈淑文, 胡萍, 于天宝, 刘念华 2011 物理学报 **60** 104215]
- [10] Han B L, Lou S Q, Tang W L, Su W, Zou H, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 244202
- [11] Jong M P, Sun G L, Hae R P, Myung H L 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2247
- [12] Lu M F, Shan M L, Yang T H 2010 *Applied Optics* **49** 724
- [13] Chen S H, Wang C H, Ye Y W, Lee C C, Liang K S, Huang C C 2011 *Applied Optics* **50** 368
- [14] Polarization imaging device utilizing photonic crystal polarizer, Shojiro Kawakami, Takayuki Kawashima http://www.photonic-lattice.com/site/assets/files/1071/pi100_paper.pdf [2007-1-3]

- [15] Raymond L, Forrest P H, Karl S.K, Ronald B S, Michael S 1990 *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility* **32** 222
- [16] Sentenac A, Greffet J J, Pincemin F 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 339
- [17] Liu J H 2009 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: Central South University) (in Chinese) [刘建华 2009 博士学位论文 (长沙: 中南大学)]
- [18] Luo Z, Shen W D, Liu X, Gu P F, Xia C 2010 *Chinese Optics Letters* **8** 342
- [19] Yasuo Ohtera, Teppei Onuki, Yoshihiko Inoue, Shojiro Kawakami 2007 *Journal of Lightwave Technology* **25** 499
- [20] Zhao H J, Yang S L, Zhang D, Liang K Y, Cheng Z F, Shi D P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6236 (in Chinese) [赵华君, 杨守良, 张东, 梁康有, 程正富, 石东平 2009 物理学报 **58** 6236]
- [21] Hong L, Yang C Y, Shen W D, Ye H, Zhang Y G, Liu X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064204 (in Chinese) [洪亮, 杨陈楹, 沈伟东, 叶辉, 章岳光, 刘旭 2013 物理学报 **62** 064204]

Design and optimization of broadband polarization beam splitter made from a wave-structured multilayer film*

Peng Hao Shen Wei-Dong[†] Yang Chen-Ying Zhang Yue-Guang Liu Xu

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Hangzhou 310027, China)

(Received 11 February 2014; revised manuscript received 17 March 2014)

Abstract

Based on the 2D-PC wave multilayer film structure, a method to broaden the bandwidth of polarization beam splitter is proposed, which is composed of two different thickness periodic film stacks. Combined with the evaluation function of polarization splitting characteristic, the particle swarm optimization method is employed to design the optimal structural parameters. A broadband and compact polarization beam splitter is acquired, in which the center wavelength is 565 nm and its working range has achieved 220 nm with the average extinction ratio over 30 dB. In addition, by using the finite difference time domain method, the band structure and transmission spectrum of the wave-structure multilayer film are calculated, the angle sensitivity of the structure is investigated in detail. And we also study the electromagnetic field in the wavy-structure. Simulation results prove that the structure composed of the two different thickness periodic film stacks can avoid the discontinuity of bandgap, and PSO method can accelerate the convergence of the optimization algorithm and extend the bandwidth effectively.

Keywords: polarization beam splitter, photonic crystal, optical film, particle swarm optimization

PACS: 42.25.Bs, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.63.134212

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2012AA040401), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275161), the Fundamental Research Funds for the Central University of Ministry of Education of China (Grant No. 2014FZA5004), and the National Science Foundation of Zhejiang province, China (Grant No. LY13F050001).

[†] Corresponding author. E-mail: adongszju@hotmail.com