

光子晶体隐身应用分析

刘必鏊, 时家明, 赵大鹏, 张 玮, 许 波

(电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘 要:激光隐身和红外隐身的兼容是现代战场的迫切需求,但是二者对材料的要求是相互制约的,利用掺杂光子晶体的缺陷能级形成的“光谱挖孔”结构可以很好地解决这一难题。利用薄膜光学理论中的特征矩阵法计算了设计的掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体薄膜的反射、透射和吸收光谱,计算结果表明掺杂光子晶体能够很好的满足热红外与 1.06 μm 或 10.6 μm 激光隐身兼容的要求。指出掺杂光子晶体的缺陷能级是由高透射引起的低反射,并不满足激光隐身的实际要求,解决方法是在光子晶体薄膜的基底中引入吸收材料,从而把缺陷能级透过的激光吸收掉。

关键词:激光隐身;隐身兼容;光子晶体;薄膜光学

中图分类号:TJ765.5 **文献标识码:**A

Analysis on the Camouflage Application of Photonic Crystals

LIU Bi-liu, SHI Jia-ming, ZHAO Da-peng, ZHANG Wei, XU Bo

(Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: Compound camouflage of laser and infrared is an urgent demand of modern battlefield, but the requirements of laser and infrared camouflage are contradictory. This problem could be solved by the defect level structure of doped photonic crystals. The reflectance spectrum, transmitted spectrum and absorption spectrum of CdSe/SiO₂ photonic crystals thin film doped with ZnSe were calculated by the characteristic matrix method of thin-film optical theory. The result shows that the doped photonic crystals could satisfy the demand of compound camouflage of thermal infrared and 1.06 μm or 10.6 μm laser. The low reflection of the defect level of doped photonic crystals is caused by the high transmission, which do not satisfy the practice demand of laser camouflage. If the photonic crystals thin film is added with a layer of absorbing substrate, the laser which passes through the defect level will be absorbed.

Key words: laser camouflage; compound camouflage; photonic crystals; thin film optics

1 引 言

光子晶体(photonic crystals, PC)的概念是贝尔通信研究所的 Eli Yablonovitch^[1]和普林斯顿大学的 Sajeew John^[2]在 1987 年分别独立提出的,它是指介电常数(或折射率)空间周期性分布而具有光子带隙的特殊材料。光子晶体最显著的特性是光子禁带的存在,频率处于禁带中的电磁波不能在光子晶体中传播,意味着处于禁带中的入射电磁波将被全反

射。如果在光子晶体中引入缺陷,光子禁带中将产生相应的缺陷能级,称为光子局域,相应频率的入射电磁波可以透过光子晶体。利用光子晶体的禁带和

基金项目:“新世纪优秀人才支持计划”资助;安徽省红外与低温等离子体重点实验室基金项目(No. 2007A005005E)资助。

作者简介:刘必鏊(1983 -),男,硕士,主要从事光子晶体的制备及应用的研究工作。Email:liubiliu@sohu.com

收稿日期:2008-07-20; **修订日期:**2008-08-18

局域特性,通过合理的设计,掺杂光子晶体可以实现“光谱挖孔”结构,在常见的激光波长(如 $10.6\mu\text{m}$)附近的窄波段内具有低反射率,而在红外的大部分波段(如 $8\sim 14\mu\text{m}$)具有高反射率(低发射率),从而实现红外与激光隐身的兼容。

2 激光隐身性能的评价及要求

激光隐身技术又称为激光低可探测技术,是通过降低武器装备的激光回波信号特征,使其难以被敌方激光探测和制导系统发现、识别、跟踪和攻击的技术。当前,激光隐身主要用于对抗激光测距仪、激光制导武器和激光雷达。

为了方便,通常用激光测距仪的主要性能参数——测准率和最大可探测距离来表征激光隐身的效果^[3]。测准率是指在距离一定的条件下利用激光测距仪准确测出激光隐身目标的次数与总测量次数之比。测准率越小,说明激光隐身效果越好。在测准率一定的条件下,激光测距仪对激光隐身目标的最大可探测距离可以称为隐身距离。目标在隐身距离之外就被认为对激光测距仪是隐身的。最大可探测距离越小说明激光隐身效果越好。

从激光测距方程来看,在测距仪的性能及大气传输条件确定以后,最大可探测距离主要与目标的反射率有关^[4]。降低反射率主要从两个方面考虑:一是从对激光具有强吸收的材料研究入手;二是研究涂层的表面形态,构造漫反射表面,使入射的激光能量散射到其他方向,同时进行多层结构设计,波长匹配层导入激光信号,吸收层耗散激光能量。

在满足激光隐身的同时,实现红外与激光隐身的兼容,是现代战场对隐身材料的又一要求^[5-6]。但是,红外隐身和激光隐身对材料的要求是相互制约的。红外探测是一种被动探测,主要利用目标自身的红外辐射来发现和识别目标,大多数军事目标都有热源,其温度通常高于背景温度,这就要求隐身材料具有低发射率。激光探测是一种主动探测,通过探测己方激光器发射的激光的回波来发现和识别目标,这就要求隐身材料具有低反射率。目前,常见的军用激光器有 $\text{Nd}^{+3}:\text{YAG}$ 激光器和 CO_2 激光器,工作波长分别为 $1.06\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$,分别对应着近

红外波段和远红外波段。如果要实现红外和激光隐身的兼容,就要求隐身材料在近红外和远红外波段同时具有低的发射率和反射率,这构成了一对矛盾。目前通常采取两种补救措施^[7]:一是“适度隐身”,即两方面都降低部分性能以达到复合隐身的效果,在具体实施时,以激光隐身材料研究为主,红外隐身侧重于热变形与热迷彩等融合技术的应用;二是在红外隐身材料的基础上通过发射烟幕等措施减弱激光的回波。但这些补救措施存在一定的局限性,在隐身效果上也有待改进。

3 设计实例及分析

光子晶体的带隙与晶格结构、晶格尺寸、填充率和组成材料的折射率比等因素有关。对于一维光子晶体,其光子带隙可以利用薄膜光学理论的特征矩阵法进行计算。选用常见的薄膜材料 CdSe (折射率:3.5($1\mu\text{m}$),透明区: $0.97\mu\text{m}\sim$)和 SiO_2 (折射率:1.45(0.55),透明区: $0.2\sim 9\mu\text{m}$)^[8],设计了 CdSe/SiO_2 光子晶体薄膜,并利用特征矩阵法计算了光子晶体的反射光谱。通过数值计算发现,当光子晶体的周期数达到3时,出现明显的高反射带隙特征;周期数达到5时,带隙特征基本趋于稳定,再增加周期数对带隙的宽度、反射率值增加不大。综合考虑光子晶体的带隙特征和实际制备的复杂程度,选择 CdSe/SiO_2 的周期数为5。

目前用于激光测距和激光雷达的军用激光器多为 $1.06\mu\text{m}$ 近红外的掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}:\text{YAG}$)激光器,而 $10.6\mu\text{m}$ 长波红外的 CO_2 激光器在未来军用激光器中的应用将越来越广泛。设计的5周期 CdSe/SiO_2 光子晶体薄膜,其单层 CdSe 和 SiO_2 厚度分别为 $0.7571\mu\text{m}$, $1.8276\mu\text{m}$,二者的光学厚度都等于 $10.6\mu\text{m}$ 的四分之一,在第二、第三周期之间掺杂一层 ZnSe (折射率:2.42($10.6\mu\text{m}$),透明区: $0.55\sim 15\mu\text{m}$)^[8],厚度为 $1.0950\mu\text{m}$,使其光学厚度也是 $10.6\mu\text{m}$ 的四分之一。该掺杂光子晶体在 $10.6\mu\text{m}$ 处具有“光谱挖孔”结构如图1所示,在 $8\sim 15\mu\text{m}$ 的高反射禁带(光谱反射率大于95%)中 $10.6\mu\text{m}$ 处出现了缺陷能级,通过局部放大可知该波长光谱反射率接近于0。

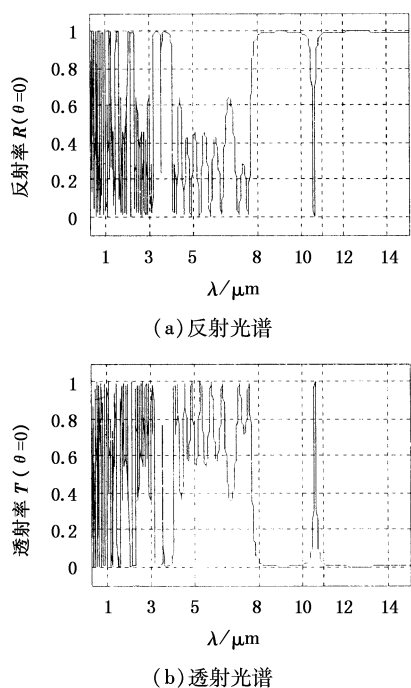


图1 掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体薄膜的反射光谱和透射光谱

激光隐身的实际要求是高吸收导致的低反射,对于像 CdSe, SiO₂ 和 ZnSe 这样由红外透明材料组成的掺杂光子晶体,其缺陷能级的低反射是由于高透射引起的,而高透射并不意味着高吸收。如果光子晶体下面的基底是高反射的,则光波将被反射回去,这将导致最终材料的高反射,不符合激光隐身的要求。通过研究发现,可以在光子晶体的基底中引入吸收材料,把缺陷能级透过光子晶体的激光吸收掉。在掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体下面加入一层厚度为 50 μm 的基底(数值计算发现,基底厚度再增加的话,对光子晶体的带隙影响不大),为简便起见,先假设基底没有吸收,折射率为 1.59,此时基底的加入对掺杂光子晶体的带隙基本没有影响,如图 2 所示。

假设基底为吸收材料,复折射率为 $1.59 - 0.1i$,如图 3 所示,掺杂光子晶体在带隙内的反射光谱基本不变,在 $7.96 \sim 15 \mu\text{m}$ (除去 $10.6 \mu\text{m}$ 附近的极窄波段)的光谱反射率大于 95%,但是在带隙外(包括缺陷能级)吸收变得很强,在 $10.6 \mu\text{m}$ 处出现了缺陷能级,通过局部放大可知该波长光谱反射率为 0.052,光谱吸收率为 0.946。这就很好地解决了上述问题,该材料能够很好地满足热红外与 $10.6 \mu\text{m}$ 激光隐身兼容的要求。

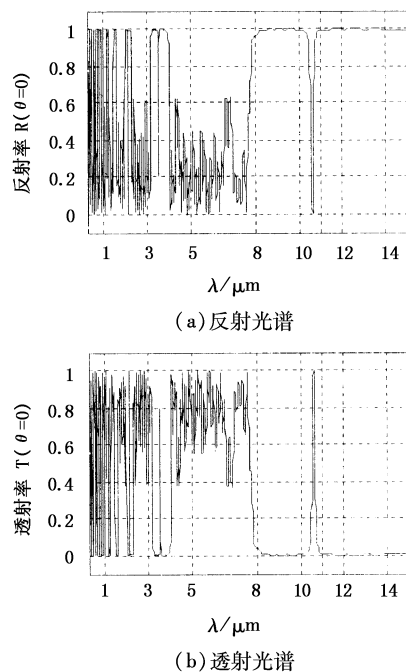


图2 加无吸收基底后掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体薄膜的反射光谱和透射光谱

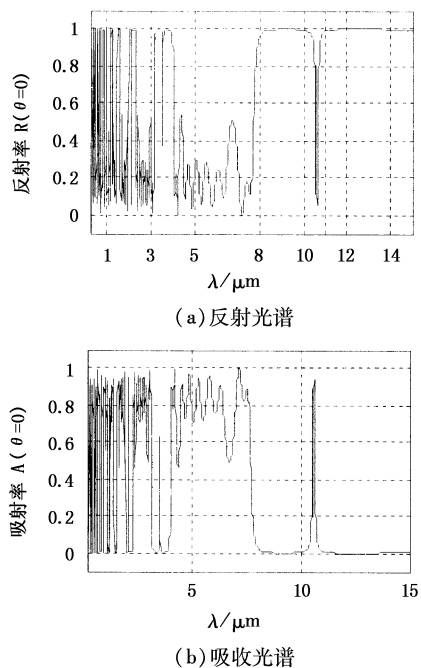


图3 加吸收基底后掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体薄膜的反射光谱和吸收光谱

设计的掺杂 ZnSe 的复合 CdSe/SiO₂ 光子晶体薄膜,由两种不同周期尺寸的 CdSe/SiO₂ 叠加而成,从上到下依次为:第一,掺杂 ZnSe 的 CdSe/SiO₂ 光子晶体薄膜,其单层 CdSe 和 SiO₂ 厚度分别为 $0.07571 \mu\text{m}$ 和 $0.18276 \mu\text{m}$,二者的光学厚度都等于 $1.06 \mu\text{m}$ 的 $1/4$,在第二、第三周期之间掺杂一层 ZnSe,厚度为 $0.1095 \mu\text{m}$,使其光学厚度也是 $1.06 \mu\text{m}$ 的 $1/4$,该掺杂光子晶体在 $1.06 \mu\text{m}$ 处具有“光谱挖

孔”结构;第二,CdSe/SiO₂光子晶体薄膜,其单层CdSe和SiO₂厚度分别为0.7571 μm ,1.8276 μm ,二者的光学厚度都等于10.6 μm 的四分之一,该光子晶体的高反射禁带覆盖8~14 μm 波段;最后,加一层厚度为50 μm 的吸收基底,复折射率为1.59-0.1i。该掺杂ZnSe的复合CdSe/SiO₂光子晶体薄膜通过光子带隙的叠加,实现了1.06 μm 激光和8~14 μm 热红外隐身的兼容,如图4所示,在1.06 μm 的光谱吸收率为0.9477,在8.234~14.7 μm 波段的光谱反射率超过95%。

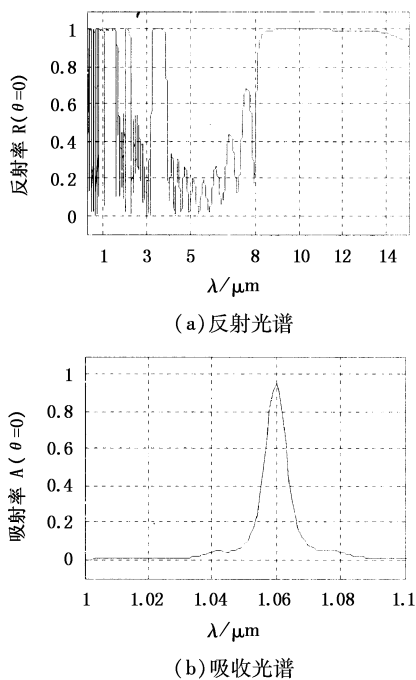


图4 加吸收基底后掺杂ZnSe的CdSe/SiO₂复合光子晶体薄膜的反射光谱和吸收光谱

4 总结

激光隐身和红外隐身的兼容是现代战场的迫切需求,但是二者对材料的要求是相互制约的,利用掺杂光子晶体形成的“光谱挖孔”结构可以很好地解决这一难题,克服现有隐身材料的不足。利用薄膜光学理论中的特征矩阵法计算了设计的几种掺杂光子晶体的反射、透射和吸收光谱,计算结果表明掺杂光子晶体在激光和红外隐身兼容上的可行性、有效性。具体结论如下:

(1)利用掺杂光子晶体形成的“光谱挖孔”结构可以很好地满足热红外与1.06 μm 或10.6 μm 激光隐身兼容的要求,克服了现有隐身材料的不足。

(2)红外透明材料组成的掺杂光子晶体所形成的“光谱挖孔”结构,其缺陷能级的低反射是由于高

透射引起的,而高透射并不意味着高吸收,不符合激光隐身的实际要求。通过研究发现,可以在光子晶体基底中引入吸收材料,把缺陷能级内透过光子晶体的激光吸收掉,从而真正满足激光隐身的实际要求。同时,吸收基底的引入并不影响光子晶体带隙内的反射光谱。

(3)设计的5周期CdSe/SiO₂光子晶体薄膜,其单层CdSe和SiO₂厚度分别为0.7571 μm ,1.8276 μm ,在第二、第三周期之间掺杂一层ZnSe,厚度为1.095 μm ,最后加一层厚度为50 μm 的吸收基底(复折射率为1.59-0.1i),该材料能够很好地满足热红外与10.6 μm 激光隐身兼容的要求,在7.96~15 μm (除去10.6 μm 附近的极窄波段)的光谱反射率大于95%,在10.6 μm 光谱吸收率为0.946。

(4)设计的掺杂ZnSe的复合周期CdSe/SiO₂光子晶体薄膜,通过光子带隙的叠加,实现了1.06 μm 激光和8~14 μm 热红外隐身的兼容,该材料在1.06 μm 的光谱吸收率为0.9477,在8.234~14.7 μm 波段的光谱反射率超过95%。

参考文献:

- [1] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58:2059-2062.
- [2] S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58: 2486-2489.
- [3] Wang Zi-rong, Sun Xiao-quan. Summary on property characterizations of electro-optic camouflage[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(1): 11-14. (in Chinese)
- [4] 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京:科学出版社, 2003:287-288.
- [5] Wang Zi-rong, Yu Da-bin, Sun Xiao-quan, et al. Compound camouflage paints of laser and infrared[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(5): 301-303. (in Chinese)
- [6] 童志鹏. 电子战和信息战技术与装备[M]. 北京:原子能出版社, 2003:114-147.
- [7] Wu Lingzhi, Xie Guohua, Wu Rui bin, et al. Prospect analysis for compatible stealth coatings in laser and infrared [J]. Astronavigation Materials Technology, 2001, 2: 1-3, 9. (in Chinese)
- [8] 卢进军, 刘卫国. 光学薄膜技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005:187-193.