

基于Fabry-Peror腔共振的吸收增强型膜系设计

顾殿雨, 王玉良*, 郭云超

海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台

Email: *yarmiay@163.com

收稿日期: 2020年10月7日; 录用日期: 2020年10月22日; 发布日期: 2020年10月29日

摘要

利用特征矩阵方法, 研究基于Fabry-Peror腔共振原理设计膜系的吸收增强效应。研究发现这种结构可以实现特定波段激光的吸收增强, 通过调整膜系结构、吸收介质的位置等因素实现较宽光谱的高吸收率, 结果表明吸收介质对应波长的吸收率提高了一个数量级。

关键词

Fabry-Peror腔共振, 特征矩阵, 膜系设计, 吸收增强

Design of Enhanced Absorption Optics Multilayer Based on Fabry-Peror Cavity Resonance

Dianyu Gu, Yuliang Wang*, Yunchao Guo

School of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Yantai Shandong

Email: *yarmiay@163.com

Received: Oct. 7th, 2020; accepted: Oct. 22nd, 2020; published: Oct. 29th, 2020

Abstract

By using the characteristic matrix method, the enhanced absorption effects of optics multilayer, which was designed based on Fabry-Peror cavity resonance, were studied, and the investigation showed that this multilayer structure could realize the absorption enhancement in the particular band. Meanwhile, the absorption spectrum width could be broadened by modifying the film structure and the location of the absorbing medium. The results showed that the absorption rate

*通讯作者。

was raised an order of magnitude in the particular band.

Keywords

Fabry-Perot Cavity Resonance, Characteristic Matrix, Multilayer Design, Enhanced Absorption

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

吸收介质薄膜在太阳能电池[1] [2] [3] [4]、表面等离子体[5] [6]、非线性超快激光等领域具有十分重要的应用，由于吸收介质的总体厚度很薄，因此如何提高薄膜的吸收系数，增强光与薄膜介质的相互作用是研究重点之一。目前吸收薄膜的常用方案为刻蚀周期性微纳米结构[2]，利用金属纳米颗粒形成表面等离子体[7] [8] [9]，或者基于几何光学设计散射表面[10] [11]来增加光程。以上的解决方案中，几何光学的方法弊端在于很难应用于薄膜尺度，而纳米结构工艺目前来说加工精度及适用范围仍存在限制。

本文利用介质镀膜工艺，基于 Fabry-Perot 腔共振效应设计的特殊膜系使吸收介质在特定波段实现较高的吸收率，从而达到提高半导体激光器增益和效率的目的。分析了不同膜系结构中场强的分布特点与膜系整体吸收系数之间的关系，同时模拟设计了扩展吸收率的半高宽的初步方案，结果表明通过膜系的优化设计可以有效提高特定激光波段的吸收率。

2. 吸收介质高反膜系基本理论

薄膜光学的理论基础是经典电磁场理论，研究薄膜的光学性质，从本质上来说就是研究平面电磁波在多层介质中的传输过程。影响特定波长光束反射率的因素有介质厚度、介质折射率以及入射角等，所以最终方程的形式往往非常复杂，缺乏直观性和普适性。用特征矩阵方法解决多层介质薄膜问题方便简洁，利于仿真计算，因此本文的研究基于特征矩阵理论。理论推导如下，在图 1 中假设光波沿 z 轴传输，并且振幅与 x, y 轴无关。

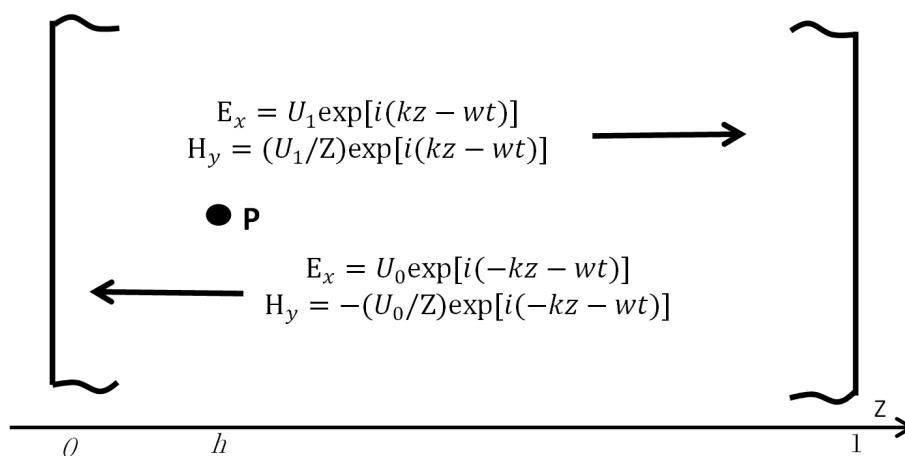


Figure 1. The vibration equations of two beams of light traveling in opposite directions

图 1. 传输方向相反的光的振动方程

介质中存在传输方向相反的光, U_0 、 U_1 是 $z = 0$ 的边界处不同传输方向的光束的电场强度, 所以介质边界处满足的方程为[12]:

$$E_x(l) = U_0 \exp(-ikl) + U_1 \exp(ikl) \quad (1)$$

$$E_x(0) = U_0 + U_1 \quad (2)$$

$$H_y(l) = (U_0/Z) \exp(-ikl) - (U_1/Z) \exp(ikl) \quad (3)$$

$$H_y(0) = \frac{U_0}{z} + \frac{U_1}{z} \quad (4)$$

Z 为介质阻抗, 且与折射率的关系为 $n = \frac{z_0}{z}$, 消去上式中的 U_0 、 U_1 得到两边界之间场强存在如下关系:

$$E_x(0) = \cos(kl)E_x(l) + (i/n)\sin(kl)Z_0H_y(l) \quad (5)$$

$$Z_0H_y(0) = (in)\sin(kl)E_x(l) + \cos(kl)Z_0H_y(l) \quad (6)$$

写成矩阵形式为[13]:

$$\begin{bmatrix} E_x(0) \\ Z_0H_y(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(l) \\ Z_0H_y(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kl) & (i/n)\sin(kl) \\ (in)\sin(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(l) \\ Z_0H_y(l) \end{bmatrix} \quad (7)$$

介质内部任意位置 p 点处的电场强度可以表示为:

$$E_p = E_{ik} \exp[ik(z-h)] + E_{rk} \exp[-ik(z-h)] \quad (8)$$

上式中的 E_{ik} 和 E_{rk} 是第 i 界面上的入射光和反射光, 可以用 E_x 表示, l 界面上的电场强度可写为:

$$E_x(l) = E_{il} + E_{rl} \quad (9)$$

$$E_p(z) = \frac{E(l)\exp(ikl) - E_0}{2i\sin(ikl)} \exp[ik(z-l)] - \frac{E(l)\exp(-ikl) - E_0}{2i\sin(ikl)} \exp[-ik(z-l)] \quad (10)$$

联立(7)~(10)式, 可以得到介质内任一位置处的电场 E_p 。一般特征矩阵方法折射率通常为实数, 在计算吸收介质时, 将折射率替换为复数即可, 虚部的值可以与吸收系数的关系可以通过以下的推导确定。

设 ν_1 为 $N \cos \theta$ 的虚部, 表征沿 z 轴方向光强的衰减, 因此在某一吸收介质中复振幅的变化可以表示为:

$$E_1 = E_0 \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi N}{\lambda} (x \sin \theta + z \cos \theta) \right] \right\} = E_0 \exp \left(\frac{2\pi}{\lambda} z \nu_1 \right) \exp \left\{ i \left[\omega t - \frac{2\pi N}{\lambda} (x \sin \theta + z u_1) \right] \right\} \quad (11)$$

其中 $N \cos \theta = u_1 + i\nu_1$, 光场单次通过吸收介质中的变化为:

$$a = \frac{E}{E_0} = \exp(-\alpha d) \exp(i\delta) \quad (12)$$

联立以上两式可得:

$$\nu_1 = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (13)$$

a 为光场以一定角度通过薄膜介质的吸收系数。由于复折射率 $N = n_1 - ik_1$, 结合式(11)~(13)可得虚部 k_1 与 ν_1 的关系为:

$$k_1^2 = \frac{n_1^2 + \nu_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0}{1 + n_1^2 / \nu_1^2} \quad (14)$$

通过以上推导,可以得出复折射率 N 的虚部 k_1 与介质的吸收系数 α 之间的关系,方便我们在已知吸收系数的情况下,利用特征矩阵方法进行膜系吸收率的计算。

3. 吸收介质高反膜系优化设计

3.1. 膜系设计基本思路

Matlab 是一种以矩阵运算为基础的交互式程序语言,广泛应用于数学运算、仿真建模和信号分析等领域。本文使用 Matlab 进行数值运算和结果分析,通过合理的膜系设计提高薄膜吸收率,最终达到增加吸收薄膜中场强以及光束的有效传输距离的目的。实践中,FP 腔是一种能够实现特定波段的光在腔内实现多次反射的特殊结构,由于腔共振效应,腔内有效传输距离增加,场强增强,如图 2 所示,若腔内存在吸收介质,那么此波段的吸收率会得到增强。

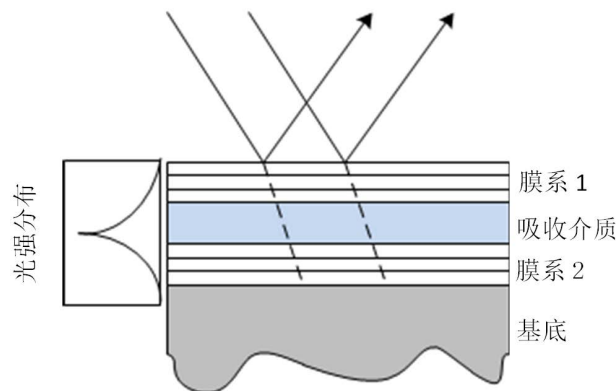


Figure 2. The schematic of FP cavity
图 2. FP 腔结构示意图

图 2 中,膜系 1 和膜系 2 的反射率分别为 R_1, R_2 , 透射率为 t_1, t_2 , α 为吸收介质本身性质决定的吸收系数, d 为吸收介质的总厚度。若采用 FP 腔结构,图中膜系 1 和膜系 2 为高反膜系,根据多光束干涉原理,最终透射率、反射率和吸收率为:

$$T = \frac{I_0 t_1 t_2 a}{1 - R_1 R_2 a^2 \exp(i\delta)} \quad (15)$$

$$R = I_0 R_1 + \frac{I_0 R_2 a^2 t_1^2 \exp(i\delta)}{1 - R_1 R_2 a^2 \exp(i\delta)} \quad (16)$$

$$A = 1 - T - R \quad (17)$$

$$\delta = 2kd \cos \theta \quad (18)$$

选取 Yb:YAG 薄膜作为吸收介质,厚度 $d = 20 \mu\text{m}$, 吸收系数为 20.79 (940 nm 15 at%), 薄膜的本征吸收约为 4.2×10^{-4} , 而采用 FP 膜系设计的结果如图 3 所示。

本模型中,膜系 1 和膜系 2 的反射率为 $R_1 = R_2 = 0.9$, 入射角 $\theta = 45^\circ$, 不考虑镀膜过程中产生的误差,入射光在 940 nm 附近的吸收率最大值为 7.8×10^{-3} , 比本征吸收提高了一个量级。然而这种情形下,吸收率半高宽仅为 2 nm 左右,当采用宽谱光源时,光谱利用率很低,因此需要进一步的优化设计,扩展膜系的吸收光谱范围。

根据多层介质膜理论,典型高反膜系的结构为 $A|(HL)^m H|G$, 此外还有 $A|L(HL)^m|G$ 、 $A|(LH)^m L|G$ 等,在 m 取值相同时,不同的膜系结构,反射率及膜系内部场强分布各不相同,因此选取合适的膜系将

有利于实现我们需要的膜内场强分布。

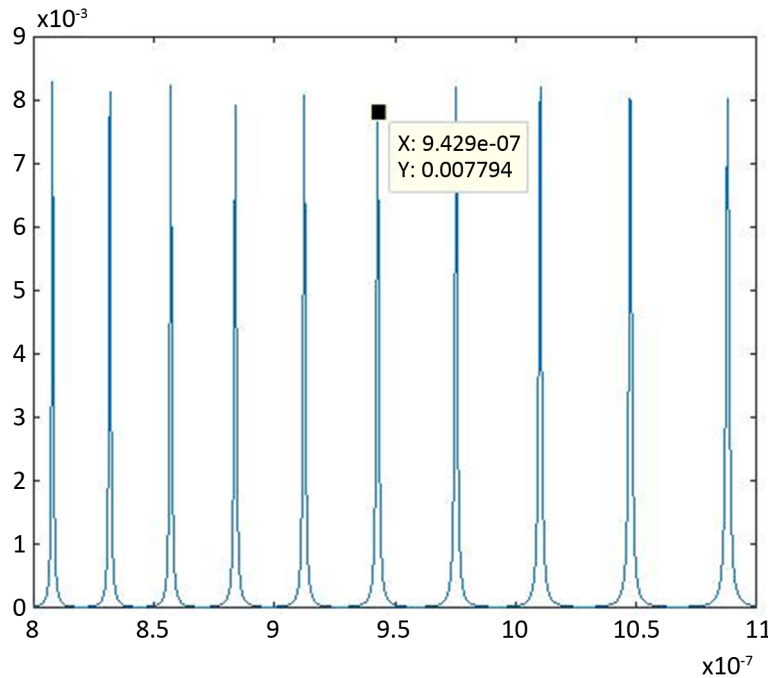


Figure 3. Absorption coefficient of PF multilayer design
图 3. FP 膜系设计的吸收系数

典型 $A|(HL)^m H|G$ 膜内场强分布如图 4 所示, $m = 2$, $n_H = 2.4$, $n_L = 1.45$, $n_g = 1.47$, A 代表空气层, 入射光波长 940 nm 附近。

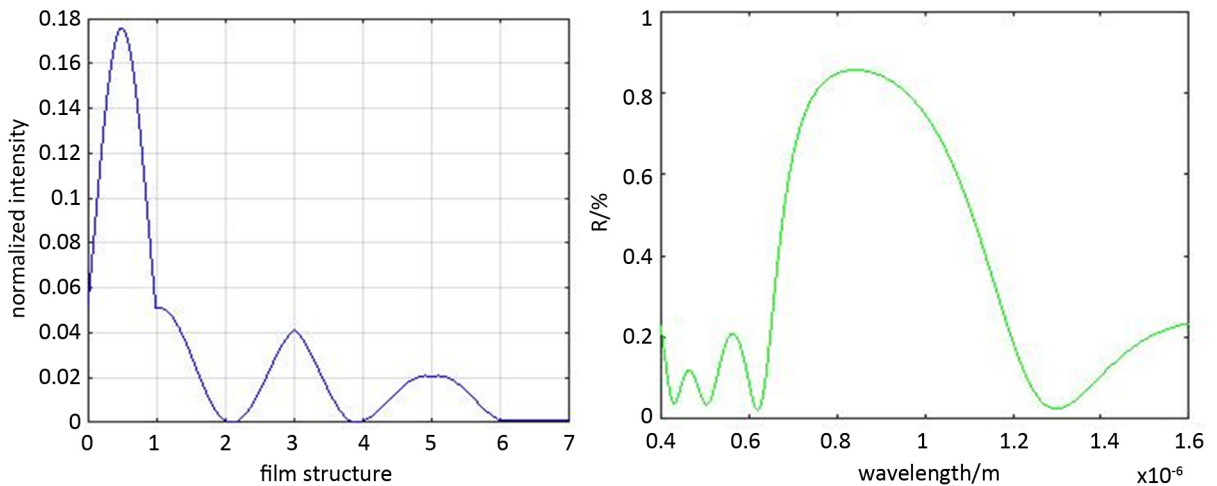


Figure 4. The field intensity of $A|(HL)^m H|G$ multilayer structures when $m = 2$ (left figure); Reflectivity distributions under different wavelengths when $m = 2$ (right figure)

图 4. $m = 2$ 时 $A|(HL)^m H|G$ 膜系结构的场强分布(左图); $m = 2$ 时不同波长时的反射率分布(右图)

图 4 中, 0-1 界面之间是空气层, 6-7 界面之间是基底, 在 $m = 2$ 时, 膜系反射率 $R > 80\%$ 。高反膜系中场强的分布特点是在每层介质的交界处场强出现极值, 并且越靠近基底, 场强越弱。

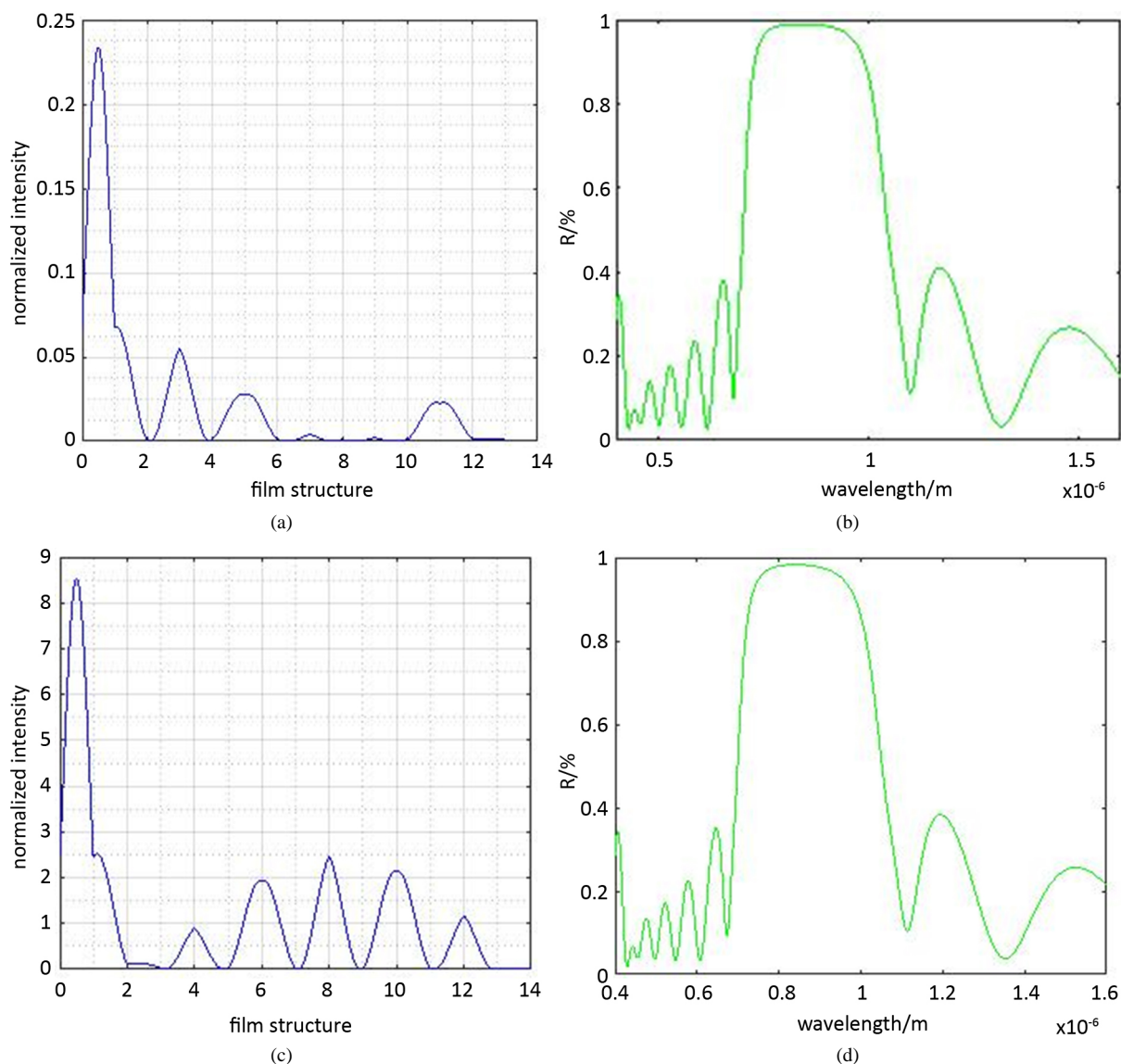


Figure 5. (a) The field intensity of $A|(HL)^m H|G$ multilayer structure (b) Reflectivity of $A|(HL)^m H|G$ multilayer structure (c) The field intensity of $A|L(HL)^m H|G$ multilayer structure (d) Reflectivity of $A|L(HL)^m H|G$ multilayer structure

图 5. (a) $A|(HL)^m H|G$ 结构场强分布 (b) $A|(HL)^m H|G$ 结构反射率 (c) $A|L(HL)^m H|G$ 结构场强分布 (d) $A|L(HL)^m H|G$ 结构反射率

图 5(a)、5(b) 是 $m = 5$ 时场强和反射率分布，随着膜层数的增加，高反射带宽进一步增大，这有利于吸收增强膜系的设计，但是膜层内部的场强分布并没有增强。图 5(c)、5(d) 是 $A|L(HL)^m H|G$ 结构的场强和反射率分布，这种结构的反射率虽然有所降低，但是膜系内部的场强得到了加强，因此在整个吸收增强膜系结构的设计中，膜系 1 的最外层应设计为低折射率介质层。

3.2. 吸收增强型膜系结构

通过以上的分析，我们将膜系初始结构设为 $A|L(HL)^m HN(HL)^m H|G$ ， N 代表吸收介质层， $m = 5$ ，

参考波长设为 900 nm，整个膜系的吸收率曲线如图 6 所示。

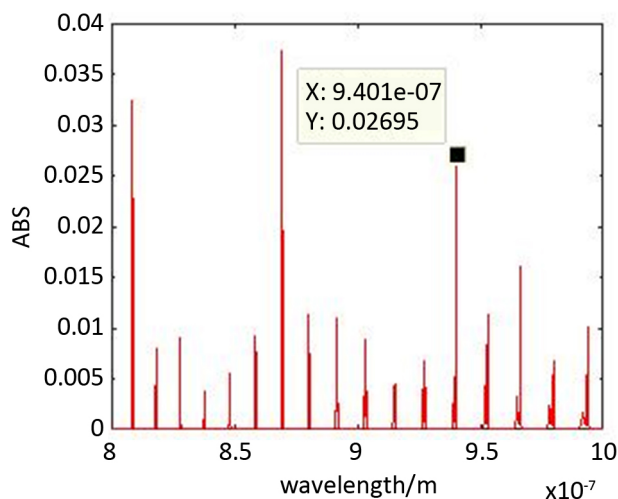


Figure 6. The absorption curve of $A|L(HL)^m HNL(HL)^m H|G$ multilayer

图 6. $A|L(HL)^m HNL(HL)^m H|G$ 膜系吸收率曲线

如图 6 所示，在我们感兴趣的波段 940 nm 附近，整个膜系的吸收率约为 0.03，优化效果更好。整个膜系的场强分布如图 7 所示。

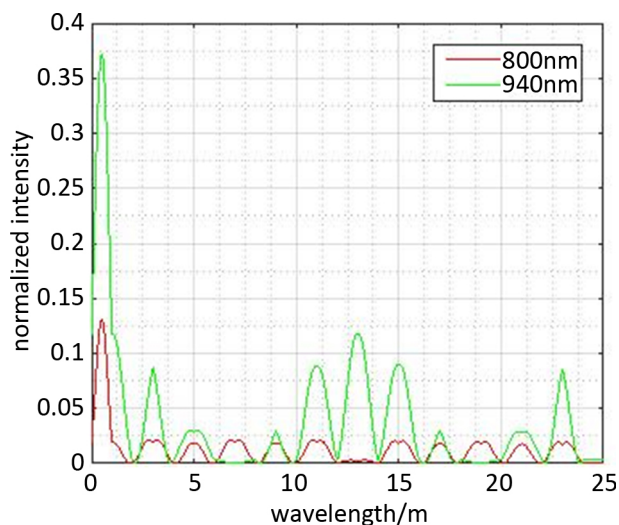


Figure 7. The field intensity of $A|L(HL)^m HNL(HL)^m H|G$ multilayer

图 7. $A|L(HL)^m HNL(HL)^m H|G$ 膜系场强分布

在吸收介质中，光场的强度由干涉作用和介质本身的吸收共同决定，相比于一般方法，通过分析图 7 来判断光场在吸收介质中的吸收率大小要简单的多：在吸收介质处，如果场强增强，那么吸收介质的吸收得到了增强，反之光场在吸收介质中受到的吸收较弱。图 7 中 800 nm 的光场在吸收介质处的场强很弱，而 940 nm 的光场在吸收介质处的光场得到了增强，由此我们可以判断，此膜系在 940 nm 处的吸收

率大于 800 nm 处的吸收率，以上分析在图 6 中可以得到验证。

图 6 中 940 nm 的吸收带宽仅在 1 nm 左右，参考窄带滤光片的相关理论，膜系 1 和膜系 2 的反射率 R 越大，吸收半宽度越小，因此适当减小 m 值可以减小反射率，从而增大吸收带宽，但 m 值减小同时会导致吸收增强的效果减弱。采取多个吸收介质层的结构，每个介质层两侧分布有较小 m 值的膜系，如图 8 所示，可以在增强吸收率的情况下扩大吸收带宽。

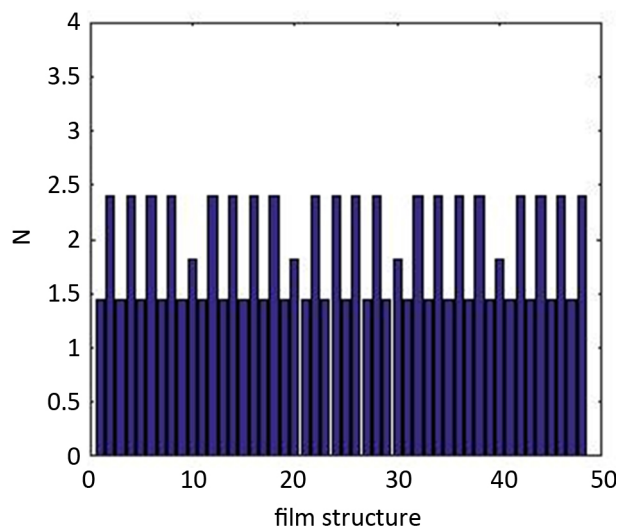


Figure 8. Multilayer absorptive film system
图 8. 多层吸收介质膜系

图 8 中，吸收介质折射率实部 $n_1 = 1.81$ ，每层厚度 $5 \mu\text{m}$ ，总厚度有 $5 \times 4 = 20 \mu\text{m}$ ，入射角 $\theta = \pi/5$ ，每个吸收膜层两侧有 $m = 3 \times 4$ 的规整膜系，整个膜系的吸收率和膜系内场强分布如图 9 所示。

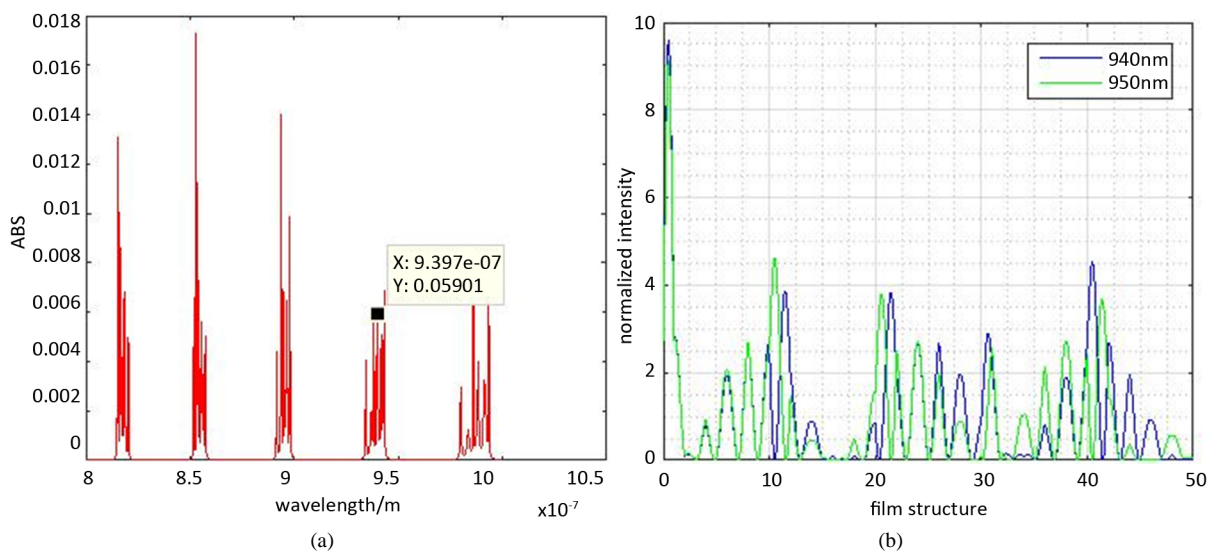


Figure 9. (a) The absorption rate of multilayer absorbing medium (b) The field intensity distribution of multilayer absorbing medium

图 9. (a) 多层吸收介质吸收率 (b) 多层吸收介质场强分布

图 9(a) 中 940 nm 附近的吸收率半高宽 $\Delta\lambda \approx 10 \text{ nm}$ ，较图 6 有了很大提高，但是吸收率比图 6 中相应

波长的吸收率小, 主要原因是整体来看, 总的 m 值较大, 造成系统的整体反射率较高, 通过膜系的能量也相应减少, 从而使膜系吸收率降低。图 9(b)中, 在第 10、20、30、40 层吸收介质处 940 nm 和 950 nm 光强较其他位置均有所增强, 由此也可以验证图 9(a)中吸收率带宽的扩展。

4. 结论

利用特征矩阵方法, 模拟了基于 FP 腔共振原理的吸收增强膜系的光吸收增强效果。研究了光场强度在各个膜层中的分布规律及其与膜系吸收率之间的关系, 发现吸收介质层相对于其它膜层的光场有所增强时, 吸收增强效果更好。相较于其他方案, 通过膜系结构优化设计, 实现了波长在 940 nm 附近的激光的吸收, 峰值吸收率相比优化之前提升了一个量级, 半高宽提高到 10 nm 左右, 这对于稀土掺杂介质薄膜的研究十分有利。然而吸收波形并不十分规整, 仍需要进一步的优化设计。

参考文献

- [1] Sheng, P., Bloch, A.N. and Stepleman, R.S. (1983) Wavelength-Selective Absorption Enhancement in Thin-Film Solar Cells. *Applied Physics Letters*, **43**, 579-581. <https://doi.org/10.1063/1.94432>
- [2] Shi, Y., Wang, X. and Liu, W. (2015) Light-Absorption Enhancement in Thin-Film Silicon Solar Cells with Front Grating and Rear-Located Nanoparticle Grating. *Physica Status Solidi*, **212**, 312-316. <https://doi.org/10.1002/pssa.201431421>
- [3] Han, S.E. and Chen, G. (2010) Optical Absorption Enhancement in Silicon Nanohole Arrays for Solar Photovoltaics. *Nano Letters*, **10**, 1012-1015. <https://doi.org/10.1021/nl904187m>
- [4] Jain, S., Depauw, V. and Miljkovic, V.D. (2015) Broadband Absorption Enhancement in Ultra-Thin Crystalline Si Solar Cells by Incorporating Metallic and Dielectric Nanostructures in the Back Reflector. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **23**, 1144-1156. <https://doi.org/10.1002/pip.2533>
- [5] Atalla, M.R.M. (2014) Plasmonic Absorption Enhancement in a Dye-Sensitized Solar Cell Using a Fourier Harmonics Grating. *Plasmonics*, **10**, 151-156. <https://doi.org/10.1007/s11468-014-9789-x>
- [6] Tian, J.L., Zhang, W. and Fang, X.T. (2015) Coupling of Plasmon and 3D Antireflection Quasi-Photonic Crystal Structure for Enhancement Infrared Absorption. *Journal of Materials Chemistry C*, **3**, 1672-1679. <https://doi.org/10.1039/C4TC02519A>
- [7] Ko, Y.H. and Yu, J.S. (2012) Silver Nanoparticle Decorated ZnO Nanorod Arrays on AZO Films for Light Absorption Enhancement. *Physica Status Solidi*, **209**, 297-301. <https://doi.org/10.1002/pssa.201127480>
- [8] Park, J.B., Bae, T.S., Sohn, J.I., et al. (2015) Fabrication of Ag Nanorods-Embedded P3HT/PCBM Films for the Enhancement of Light Absorption. *ECS Solid State Letters*, **4**, Q5-Q9. <https://doi.org/10.1149/2.0021504ssl>
- [9] Wrobel, P., Antosiewicz, T.J., Stefaniuk, T., et al. (2015) Enhancement of Light Absorption in Polyazomethines due to Plasmon Excitation on Randomly Distributed Metal Nanoparticles. *Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 9502. <https://doi.org/10.1117/12.2180252>
- [10] Kim, K., Jung, B., Eom, Y., et al. (2015) Enhancement of Light Absorption by Using Light Scattering and Emitting Dyes in Organic Photovoltaics. *Physica Status Solidi*, **212**, 2326-2331. <https://doi.org/10.1002/pssa.201532173>
- [11] Wang, W. and Freundlich, A. (2015) Design and Development of Back Reflectors for Improved Light Coupling and Absorption Enhancement in Thin MQW Solar Cells. *Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, **9502**, 95020C. <https://doi.org/10.1117/12.2078669>
- [12] Brooker, G. (2003) *Modern Classical Optics*. Oxford University, Oxford.
- [13] 曹建章, 徐平, 李景春. 薄膜光学与薄膜技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 45-55.