

一维金属-介质周期结构的自准直特性和亚波长成像^{*}

张锦龙[†] 刘旭 厉以宇 李明宇 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2006 年 12 月 9 日收到, 2007 年 2 月 25 日收到修改稿)

计算了一维金属-介质周期结构(1DMD)的色散曲线,利用传输矩阵法模拟了该结构对入射高斯光束的自准直作用,着重讨论了金属层吸收的影响,对该结构在半波长厚度时近场成像特性进行了分析,单光源的成像分辨率为 $\lambda/8$,达到亚波长分辨效果,分辨率随着光源逐渐远离近场范围而降低.双狭缝的成像模拟进一步验证了 1DMD 结构的近场亚波长成像能力,分辨率达到 $\lambda/3$.

关键词:光子晶体,自准直,亚波长成像,金属-介质层

PACC: 7820, 0340K

1. 引言

自准直效应是光子晶体中的一个特殊现象,假定一高斯光束入射到光子晶体,自准直效应使原先在空间发散的光束到了光子晶体内部成为平行光,抑制了光束发散角. Chigrin 等人^[1]和 Chen 等人^[2]首先对光子晶体的自准直效应进行了研究. Lin 等人^[3]和 Li 等人^[4,5]利用不同结构光子晶体的自准直特性和近场散射效应实现了亚波长的近场成像. Belov^[6]首先在实验上对其进行了探索,并在微波波段取得了进展.

本文研究了一维金属-介质周期结构(1DMD)的自准直效应,讨论了金属层吸收对自准直的影响,利用传输矩阵法(TMM)及时域有限差分方法(FDTD)模拟分析了该结构的亚波长成像特性,分析了不同光源距离情况下的成像分辨率.研究表明在近场条件下,亚波长成像的分辨率可到达 $\lambda/3$ 以上.

2. 1DMD 的色散曲线

图 1 表示 1DMD 结构,界面垂直于 z 轴.介质层和金属层厚度分别为 $d_1 = 10 \text{ nm}$ 和 $d_2 = 5 \text{ nm}$,即一个周期厚度为 15 nm ,介质层的介电常数 $\epsilon_1 = 2$,金属层介电常数 $\epsilon_2 = -1$,磁导率均为 1.

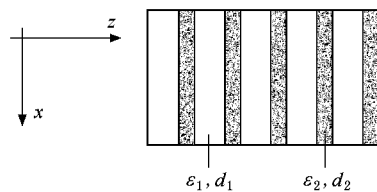


图 1 1DMD 结构

1DMD 结构的色散关系可表示为如下形式^[7]:

$$\begin{aligned} \cos(K_B d) &= \cosh(\alpha_1 d_1) \cos(\alpha_2 d_2) \\ &+ \frac{\alpha_1^2 \epsilon_2^2 + \alpha_2^2 \epsilon_1^2}{2\alpha_1 \alpha_2 \epsilon_1 \epsilon_2} \sinh(\alpha_1 d_1) \\ &\times \sinh(\alpha_2 d_2), \end{aligned} \quad (1)$$

其中, K_B 为 Bloch 波矢, $d = d_1 + d_2$, $\alpha_i = \sqrt{k_x^2 - k_0^2 \epsilon_i \mu_i}$, $k_0 = 2\pi/\lambda$, $\lambda = 600 \text{ nm}$, 根据(1)式计算得到色散曲线,如图 2 所示,图中虚线代表自由空间的等频线.可以看到此结构 $|k_x d/\pi| < 0.25$ 时,即对于 $|k_x| < 5k_0$ 范围内的频谱分量有较平滑的等频线,可以实现自准直效应.

3. 自准直现象模拟

利用 TMM 方法对 1DMD 结构的自准直现象进行了模拟.图 2 中色散曲线为无限周期 1DMD 结构的计算结果,计算时 1DMD 结构取 40 个周期,总厚

^{*} 国家重点基础研究发展规划(973)项目(批准号 2004CB19803)和国家自然科学基金(批准号 60608014)资助的课题.

[†] E-mail: williomcheung@yahoo.com.cn

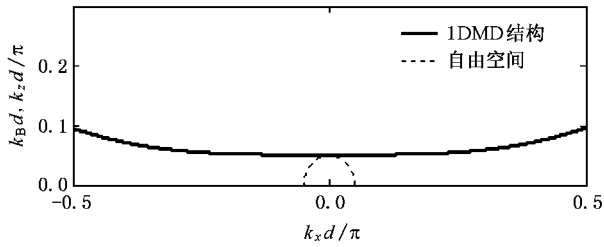


图2 1DMD结构和自由空间的色散曲线

度 $D = 600 \text{ nm}$, 入射和出射区域均为自由空间. 采用高斯光束入射, 高斯光束可表示为^[8,9]

$$E_{iy} = \int_{-\infty}^{\infty} dk_x \exp[i(k_x x + k_{iz} Z)] \phi(k_x), \quad (2)$$

其中

$$\phi(k_x) = \frac{g}{2\sqrt{\pi}} \exp[-g^2(k_x - k_{ix})^2/4]. \quad (3)$$

入射光以 $k_i = \hat{x}k_{ix} + \hat{z}k_{iz}$ 为中心, 高斯光束腰 $g = 0.6\lambda$.

图3是用TMM方法模拟的光强分布图. 其中图3(a)为高斯光在自由空间中传播的情况, 可以看到高斯光束发散严重. 图3(b)给出了高斯光束垂直入射到1DMD结构中的光强分布情况, 光强由时间平均能流密度表示, 强度与灰度值一一对应, 高斯光束束腰位于 $x = z = 0$ 处. 模拟结果显示, 对于40个周期, 1DMD结构也有明显的自准直效应. 图3(c)和(d)分别表示高斯光束 30° 和 60° 角倾斜入射情况下的自准直效果, 出射光束的方向与入射光束保持平行, 入射面与出射面的强度基本相同, 相比于文献[4]的情况, 反射光强很小.

前面考虑的是金属层没有吸收的理想情况, 在现实中, 各种各样的金属都存在一定的吸收, 因此有必要研究金属的吸收对1DMD结构自准直效应的影响.

仍然取上述结构, 金属层介电常数 $\epsilon_2 = -1 + i\epsilon''$, 考虑垂直入射情况下, 分别对不同吸收 ϵ'' 值的

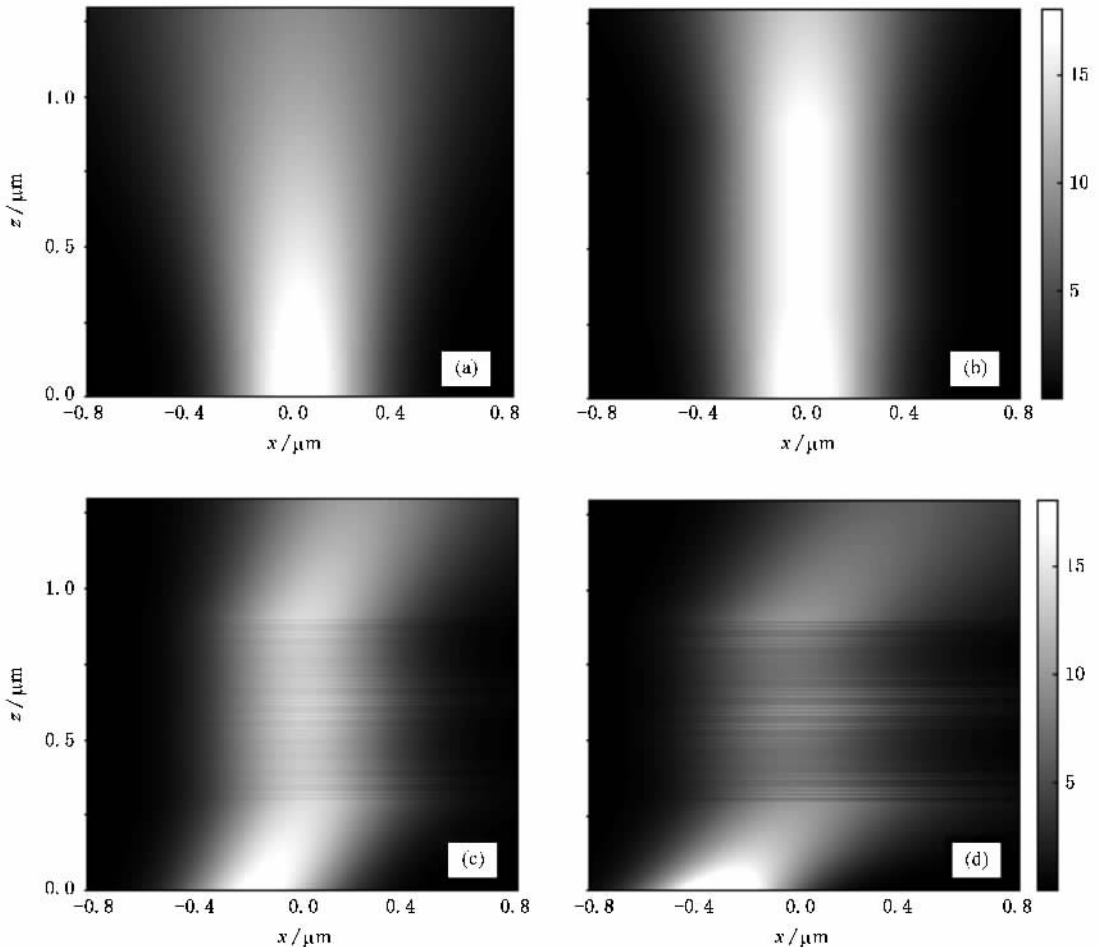


图3 TMM方法模拟的光强分布情况 (a)空气中发散的高斯光束 (b)高斯光束垂直入射1DMD结构的情况 (c)高斯光束 30° 角入射 (d)高斯光束 60° 角入射

情况进行了模拟. 图 4(a)给出了 ϵ'' 为 0.01, 0.05 和 0.1 时出射截面的光强 $|\bar{S}|$ 分布; 作为对比, 图 4(b) 给出了无吸收情况下和在自由空间传播时出射

截面的光强分布. 可以看到当 ϵ'' 达到 0.1 时出射面光强还能达到理想情况下的 75%, 并且保持了相似的高斯光角谱分布.

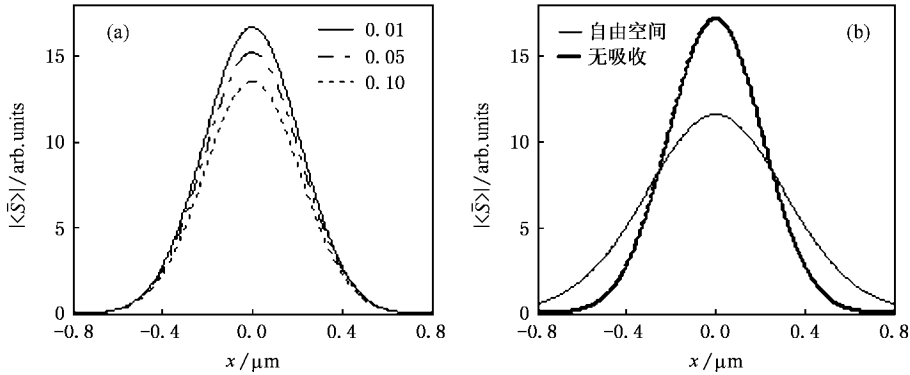


图 4 (a)不同吸收情况下出射面的光强分布;(b)自由空间和无吸收时相同出射截面光强分布

4. 近场亚波长成像

Belov^[10]首先提出利用 1DMD 结构实现亚波长成像, 认为 1DMD 结构的自准直效应, 能将入射光中所有的传播模和部分倏逝模分量转变为结构内部

准直的传播模, 因而能在近场实现亚波长成像.

1DMD 结构为半波长整数倍, 即满足 Fabry-Perot 条件时, 可以减少反射^[10], 提高成像质量. 取结构厚度为 20 个周期(半波长), 模拟不同光源距离情况下该结构的近场成像特性. 如图 5 所示.

图 5 中给出了点光源分别距离结构前表面 30, 60, 90 nm,

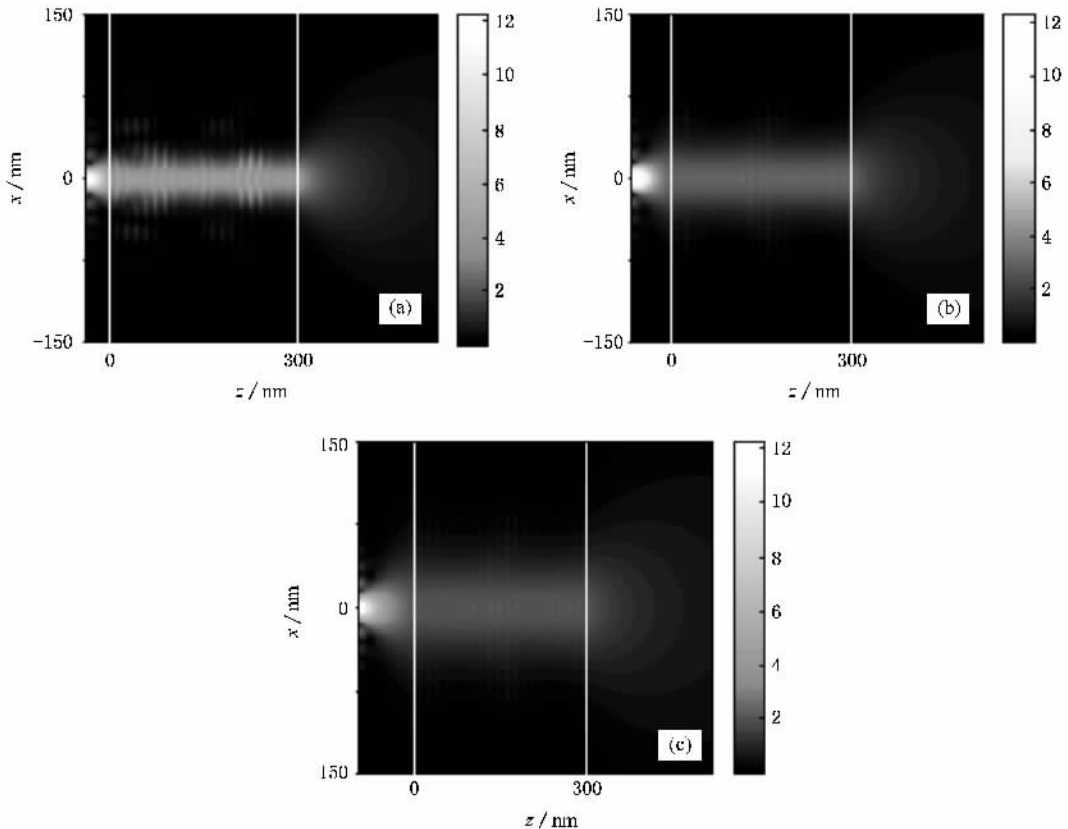


图 5 不同光源距离下的 1DMD 结构的点光源近场成像能量分布 (a)光源距离为 30 nm;(b)光源距离为 60 nm;(c)光源距离为 90 nm



60 和 90 nm 的近场成像情况,点源均位于最左边,白线代表结构的前后表面,结构前表面位于 $x = 0$ 处. 图 5 中展示的是时间平均能流密度的值,发散的高斯光入射到 1DMD 结构后,发生了准直效应,以一个规则的矩形穿过结构. 在出射面,光按照原来的情况发散,继续传播. 当光源距离表面较近时,出射面的光可以认为形成了一个点像;而随着光源距离变远,在出射面形成一个线状的源. 图 6 为不同光源距离下距离出射面后 20 nm 处截面的高斯光光强分布,不同光源距离下半峰全宽 (FWHM) 分别为 75 nm ($1/8\lambda$), 120 nm (0.2λ), 160 nm (0.27λ), 达到亚波长成像分辨率.

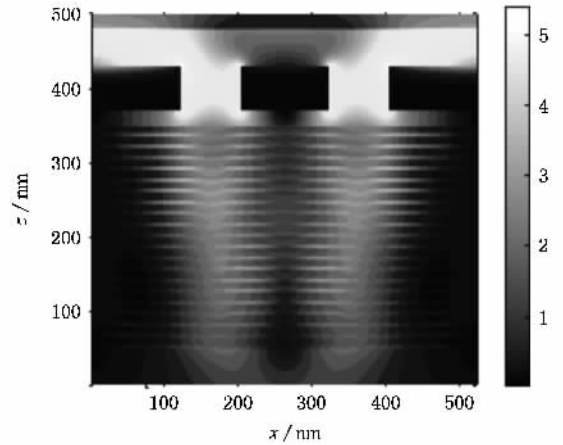


图 7 双狭缝结构的自准直成像

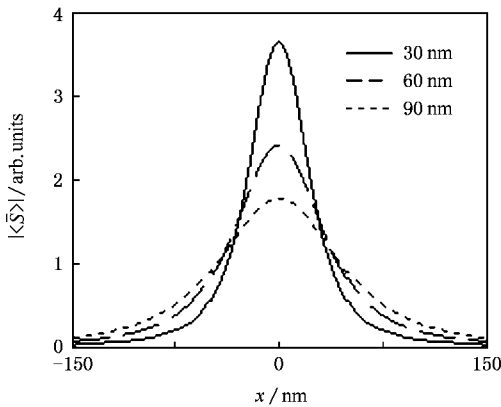


图 6 不同光源距离下距离出射面 20 nm 处光强分布

为了进一步分析 1DMD 结构的近场成像能力,用 FDTD 方法模拟了利用该结构实现双狭缝成像的情况. 金属层采用 Drude 模型 $\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)}$, $\omega_p = 4.4398 \text{ fs}^{-1}$, Γ 为 α (考虑无吸收的情况), $\omega = 2\pi c/\lambda$, $\lambda = 600 \text{ nm}$. 所选物体为两个相距 120 nm 的狭缝,狭缝宽度均为 80 nm,为亚波长结构,物面距离 1DMD 结构前表面 20 nm. 图 7 为 20 周期 1DMD 结构的成像模拟结果,在出射面后保持了与物相似的形状,可以实现亚波长成像,并且达到了 $\lambda/3$ 的分辨率. 图 8 给出距离出射面 10 nm 处的光强分布图.

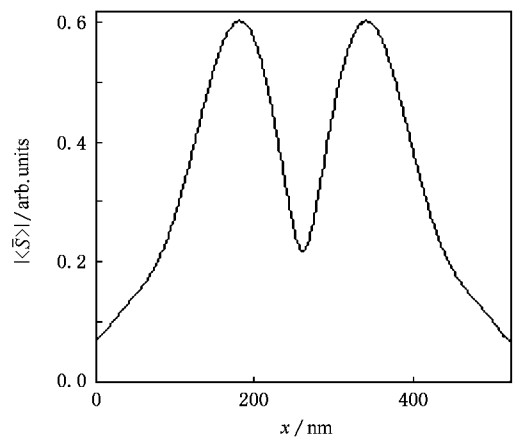


图 8 距离出射面 10 nm 处光强分布

5. 结 论

本文研究了一维金属-介质的周期结构的自准直现象,模拟了采用有限周期的 1DMD 结构,可以取得较为理想的效果;分析了金属层吸收对自准直特性的影响,证实了在一定的制备条件下可以实现有较好自准直效应的 1DMD 结构;利用传输矩阵法和 FDTD 法对 1DMD 结构的亚波长成像特性进行了研究,模拟了单光源和双狭缝的成像效果,显示该结构可以达到 $\lambda/3$ 的分辨率. 近场成像中不同结构厚度及金属层吸收的影响在这里没有涉及,是以后要研究的问题.

- [1] Chigrin D N , Enoch S , Tayeb G 2003 *Opt. Express* **11** 1203
- [2] Chen C H , Sharkawy A , Pustai D M 2003 *Opt. Express* **11** 3153
- [3] Li Z Y , Lin L L 2003 *Phys. Rev. B* **68** 245110
- [4] Li Y Y , Gu P F , Li M Y , Zhang J L , Liu X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2596 (in Chinese) [厉以宇、顾培夫、李明宇、张锦龙、刘旭 2006 物理学报 **55** 2596]
- [5] Li Y Y , Gu P F , Zhang J L , Li M Y , Liu X 2006 *Appl. Phys. Lett.* **68** 151911
- [6] Belov P A , Simovski C R , Ikonen P 2005 *Phys. Rev. B* **71** 193105
- [7] Feng S , Elson L M , Overfelt P L 2005 *Opt. Express* **13** 4113
- [8] Kong J A , Wu B L , Zhang Y 2002 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **33** 136
- [9] Chen L , He S L , Shen L F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2386 (in Chinese) [陈 龙、何赛灵、沈林放 2003 物理学报 **52** 2386]
- [10] Belov P A , Hao Yang 2006 *Phys. Rev. B* **73** 113110

Analysis of self-collimation and subwavelength imaging in one-dimensional metal-dielectric structure^{*}

Zhang Jin-Long[†] Liu Xu Li Yi-Yu Li Ming-Yu Gu Pei-Fu

(State Key Laboratory for Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China)

(Received 9 December 2006 ; revised manuscript received 25 February 2007)

Abstract

The dispersion curve of one-dimensional metal-dielectric structure is calculated , and the finite-difference time-domain (FDTD) method is used to simulate the self-collimation in one-dimensional metal-dielectric structure , to which a Gaussian beam is incident at different angles . The influence of the dissipation of the metal layer on self-collimation is discussed . Subwavelength imaging with the one-dimensional metal-dielectric structure is also analyzed . The resolution of $\lambda/8$ is achieved for single point source when the thickness of 1DMD is equal to $\lambda/2$. The resolution will gradually degrade as the source moves beyond the near-field domain . Imaging with double slits source is also demonstrated , and a resolution of $\lambda/3$ is achieved .

Keywords : photonic crystal , self-collimation , subwavelength imaging , metal-dielectric

PACC : 7820 , 0340K

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB19803) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60608014) .

[†] E-mail : williomcheung@yahoo.com.cn