

结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器

赵 阳 何建芳 杨荣草 薛文瑞

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

摘要 设计了一种结构渐变的表面等离子体光栅光吸收器,采用二维时域有限差分法(2D-FDTD)对其吸收特性进行了详细的分析。结果表明,通过调整槽深、槽宽和墙宽,可以有效地降低反射率,提高其对光的吸收能力。由中心向两边适当地使槽宽线性增加,同时使墙宽线性减小,可以达到较理想的吸收效果。对于不同空间半峰全宽的人射光,反射谱线的形状有所不同。当入射光的空间半峰全宽较窄时,该吸收器对短波长光的吸收能力更强。当入射光的空间半峰全宽较宽时,该吸收器对长波长光的吸收能力更强。这种光吸收器有望在全光芯片中得到应用。

关键词 光学器件;光吸收器;表面等离子体;微纳光子学

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0223005

Two-dimensional Surface Plasmonic Grating Optical Absorber with Gradually Varying Structure

Zhao Yang He Jianfang Yang Rongcao XueWenrui

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract A kind of surface plasmonic grating optical absorber with gradually varying geometrical parameters is designed, and its absorption characteristics are analyzed in detail by the two-dimensional finite-difference time-domain (2D-FDTD) method. Results show that the reflectivity can be effectively reduced and the absorption capacity can be enhanced by adjusting the depths of the grooves, the widths of the grooves and the thicknesses of the walls. By increasing the widths of the grooves linearly and reducing the thicknesses of the walls linearly from centre to the both sides at the same time, better absorption effect can be achieved. The shape of the reflection spectrum is different for different spatial full width at half-maximum of the incident light. When the full width at half-maximum is narrow, the absorption ability is stronger for shorter wavelength light. When the full width at half-maximum is wide, the absorption ability is stronger for longer wavelength light. This light absorber is expected to be applied in all-optical chips.

Key words optical devices; optical absorber; surface plasmonics; micro-nano photonics

OCIS codes 240.6680; 230.7370; 350.5500

1 引 言

微纳光子学元器件在光的产生、传输、调控、吸收和传感等方面越来越得到重视^[1-6]。表面等离子体学元器件是微纳光子学元器件的一个分支,这些器件有尺寸小、速度快和可以克服传统衍射极限等

特点,有望实现电子学和光子学在纳米尺度上的完美结合^[7-8]。其中,表面等离子体光吸收器已经成为了一个研究热点^[9-10]。由于这种光吸收器的表面具有纳米和微米量级的表面组合形貌,入射光可以在其表面形成表面等离子体,使得这种光吸收器

收稿日期: 2013-08-21; **收到修改稿日期**: 2013-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61178013)、国家基础科学人才培养基金(J0730317)、山西省自然科学基金(2010011003-1)、山西省回国留学人员科研资助项目(2011-002)、量子光学与光量子器件国家实验室开放课题(KF201006)

作者简介: 赵 阳(1987—),男,硕士研究生,主要从事表面等离子体光波导器件等方面的研究。

E-mail: zhaoyangsx@163.com

导师简介: 薛文瑞(1967—),男,博士,教授,主要从事导波光学、纳米光子学和表面等离子体学等方面的研究。

E-mail: wrxue@sxu.edu.cn(通信联系人)

能够强烈地抑制光的反射,从而可以实现对光的强烈吸收。

对于目前提出的多种表面等离子体光吸收器,按其表面组合形貌,可分为不规则型^[11-14]和规则型^[10,15-19]。不规则型光吸收器是在金属表面制作出不规则的纳米结构,当光照射在这些结构上时,可形成局域化的或非局域化的表面等离子体,从而可以构成光吸收器。这种吸收器的表面细节的表征和重现比较困难。对于规则型表面等离子体光吸收器,按其吸收机理,可分为非共振型^[9,20-21]和共振型^[10,15-19]光吸收器。非共振型光吸收器存在多种吸收机制,现在正处在发展阶段。共振型吸收器是在金属材料表面制作出规则的纳米光栅结构,当光照射在这些结构上时,可形成局域的或非局域的表面等离子体激元,从而对光进行强烈吸收。

对于金属纳米光栅光吸收器的研究可以追溯到1902年。当时,Wood等^[22]发现了拉莫光栅中反射光谱的异常,并断言,表面等离子体在这一现象中起到了重要的作用。1965年,Hessel等^[23]对该现象进行了进一步的理论分析。2008年,Perchec等^[24]解释了为什么带有纳米量级深度和宽度凹槽的金属能够对光吸收起到显著作用。同年,Bonod等^[19]研究了如何使用金属拉莫尔光栅进行全光吸收。2011年,Tittl等^[16]应用金属钯的表面凹槽光栅结构制作了氢传感器。上述金属纳米光栅光吸收器中存在的不足是吸收带宽较窄,吸收效率还有待于进一步提高。

为了克服这些缺点,本文设计了一种结构渐变的二维(2D)表面等离子体光栅光吸收器,拟采用二维时域有限差分法对其吸收特性进行研究,在可见光范围内,讨论几何结构参数对吸收特性的影响。为表面等离子体光栅光吸收器的设计、制作和应用提供理论参考。

2 结构模型和计算方法

图1是设计的结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器的示意图。它是在金属银板上刻蚀出若干关于中心位置左右对称的深度为 d 的矩形沟槽而构成的。矩形沟槽从中心位置向左右两边延伸,每个沟槽的槽宽 a_i ($i = 0, 1, 2, \dots$)和相邻两沟槽间的墙宽 b_i ($i = 0, 1, 2, \dots$)是渐变的。这里之所以引入渐变结构,是因为当槽宽及墙宽固定不变时,吸收器只对某特定波长附近的光吸收比较强烈,不同的槽宽及墙宽值对应的特定波长有所不同。如果使槽宽及墙宽线性变化,则可以使吸收器对不同波长的吸收

更加均衡,就可以使吸收曲线更加平缓,从而达到更好的吸收效果。金属银的相对介电常数遵循修正的Drude模型, $\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega}$,其中 ω_p 为等离子体振荡频率,其倒数反映的是等离子体对扰动的响应时间, γ 为阻尼系数,其反映的是介质的阻尼特性。在400~800 nm波长范围内,通过拟合实验数据^[25],取 $\epsilon_\infty = 5.0$, $\omega_p = 1.4421 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma = -1.4983 \times 10^{14}$ rad/s。为简单起见,假设高斯型空间调制的TM脉冲波垂直于刻蚀了矩形沟槽的金属银板入射,光束的对称中心和光吸收器的对称中心完全一致,其空间半峰全宽为 W_0 ,脉冲时间半峰全宽取为1.68 fs,脉冲中心波长为600 nm。

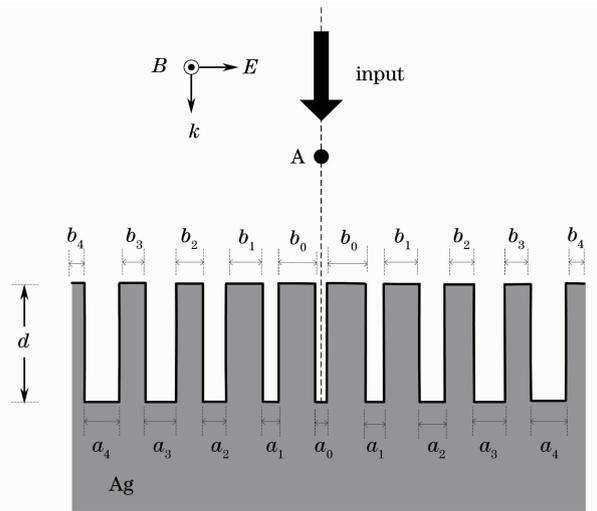


图1 结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the 2D surface plasmonic grating optical absorber with gradually varying structure

拟采用二维时域有限差分法^[26]来研究这种光吸收器的吸收特性与其几何结构参数之间的关系。计算中,把整个计算空间离散为 2000×800 的网格,采用了横向为100层,纵向为100层的各向异性良匹配层(APML)来截断网格,横向和纵向的空间离散步长均为5 nm。为了实现并行计算,把整个计算空间分成10个子计算区域,每个子计算区域为 200×800 的网格。采用了总场/散射场(TF/SF)技术。把图1所示的A设置为探测点,随着时间步的推进,通过记录A点电磁场的变化,可以得到A点处入射电磁场和反射电磁场随时间变化的信号,通过傅里叶变换,就可以得到入射电磁场和反射电磁场的频谱,再通过比较,就可以得到反射率 R 与波长 λ 的关系图。

3 结果与讨论

为了研究图 1 所示的光吸收器在可见光范围内的吸收特性,进行了大量计算。分别研究槽深、槽宽、墙宽和入射光的宽度对吸收特性的影响,然后以反射曲线尽可能降低且平缓为优化标准,给出优化结构参数下的吸收特性。

3.1 槽深对吸收特性的影响

图 2 给出了入射光的空间半峰全宽 W_0 取 500 nm,在 400~800 nm 波长范围内,槽宽不变($a_i = a_0, a_0 = 300 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$),且墙宽也不变($b_i = b_0, b_0 = 25 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$)时,槽深 d 分别取 600, 2000,

2500 nm[图 2(a)]及 2500, 2850, 2950 nm[图 2(b)]的条件下,槽深的变化对这种光吸收器的反射率 R 的影响。从图 2(a)可以看出,在 400~800 nm 波长范围内,当槽深取值为入射光波长量级(例如 600 nm)时,吸收曲线仅在特定波长处有较强吸收。当槽深逐渐增大时,吸收曲线逐渐从窄带吸收过渡到了宽带吸收。从图 2(b)可以看出,在 400~800 nm 波长范围内,当槽变深时,反射率总体上在逐渐降低。当槽深达到一定程度后,反射谱不再发生变化,即出现了饱和现象。这时吸收曲线较为平缓,且整体反射率基本维持在 3% 以内。这些现象可以结合图 3 来解释,图 3 给

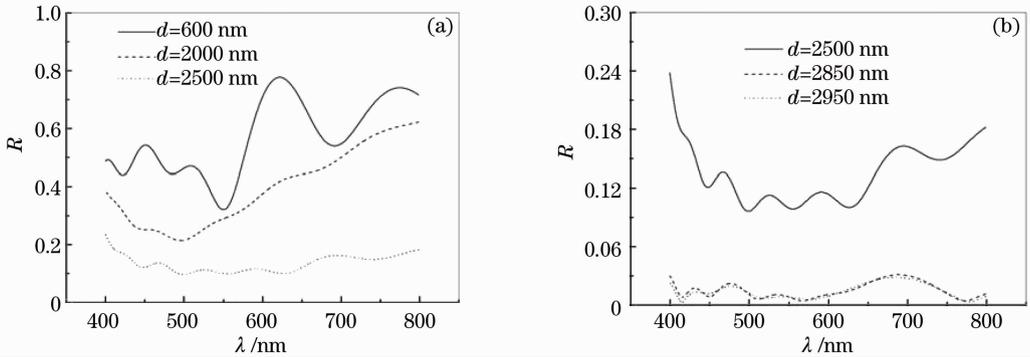


图 2 反射率 R 随波长 λ 的变化图。(a) $d = 600, 2000, 2500 \text{ nm}$; (b) $d = 2500, 2850, 2950 \text{ nm}$

Fig. 2 Variation of reflectance R with wavelength λ . (a) $d = 600, 2000, 2500 \text{ nm}$; (b) $d = 2500, 2850, 2950 \text{ nm}$

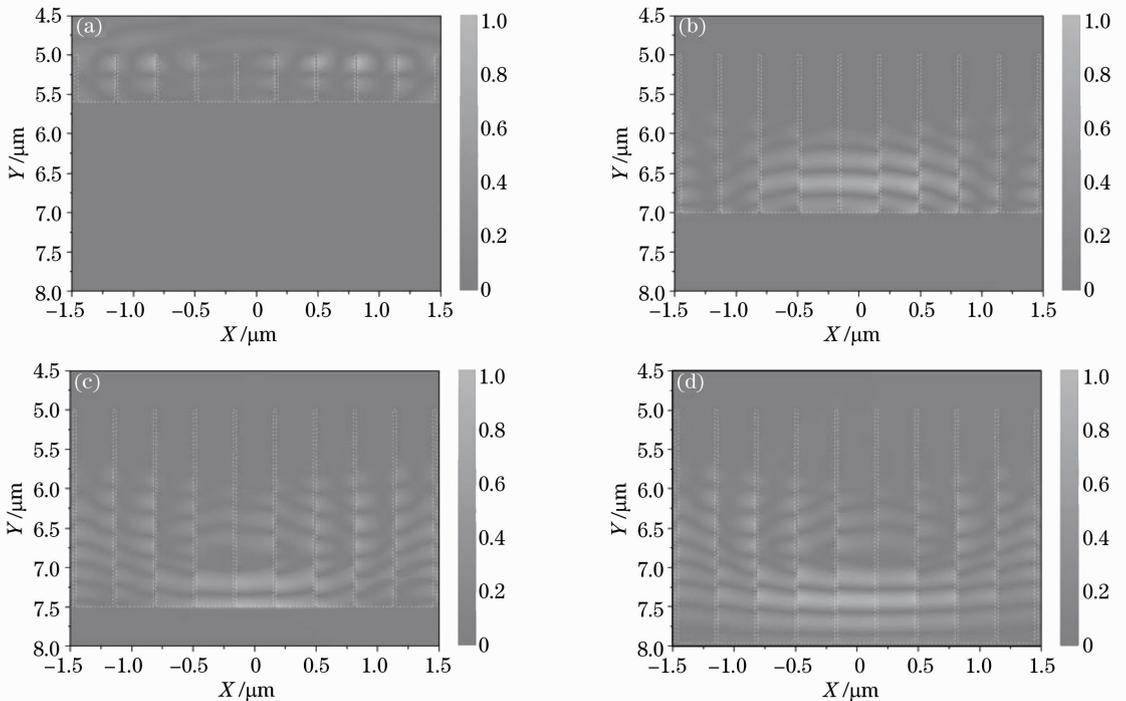


图 3 第 1800 时间步时的 H_z 场的强度分布图。(a) $d = 600 \text{ nm}$; (b) $d = 1200 \text{ nm}$; (c) $d = 2500 \text{ nm}$; (d) $d = 2950 \text{ nm}$

Fig. 3 Intensity distributions of the H_z field at 1800 time steps. (a) $d = 600 \text{ nm}$; (b) $d = 1200 \text{ nm}$; (c) $d = 2500 \text{ nm}$; (d) $d = 2950 \text{ nm}$

出了空间半峰全宽 W_0 。取 500 nm, 槽深 d 分别取 600, 2000, 2500, 2950 nm, 第 1800 时间步时的 Hz 场的强度分布图。从图 3 可以看出, 当槽深在波长量级时, 槽内形成的表面等离子体与槽壁的接触面积非常有限, 它们与金属槽壁的相互作用就较弱, 仅对波长在 550 nm 左右的光分量有较好吸收, 呈现出了窄带吸收的效果。当槽的深度逐渐加深后, 槽内形成的表面等离子体与槽壁的接触面积增大, 它们与金属槽壁的相互作用就变强, 对光的吸收作用就越强^[27]。由于损耗的存在, 表面等离子体进入槽内的深度有限, 所以当槽深到一定程度后, 对光的吸收作用就不再变化, 反射谱也就是不再变化。

3.2 槽宽对吸收特性的影响

图 4 给出了入射光的空间半峰全宽 W_0 。取 500 nm, 墙宽不变($b_i = b_0, b_0 = 25 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$), 且槽深也不变($d = 2950 \text{ nm}$)时, 在 400~800 nm 波长范围内, 槽宽对反射率 R 的影响。其中, 图 4(a) 是槽宽不变($a_i = a_0$, 其中 $a_0 = 250, 300, 400 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$) 的三

种情形, 图 4(b) 是槽宽按线性规律变化($a_i = a_0 + i\Delta a$, 其中 $a_0 = 300 \text{ nm}, \Delta a = 0, 5, 10 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$) 的三种情形。计算发现, 槽宽按照线性规律递减变化时, 优化效果不理想。从图 4(a) 可以发现, 当槽宽 $a_i = a_0 = 300 \text{ nm}$ 时, 在所计算的波长范围内, 反射率曲线较好一些。从图 4(b) 可以看出, 对槽宽 a_i 进行线性调整, 可以对反射曲线进行微调, 使其在所计算的波长范围内趋于平缓。这种现象可以结合图 5 来解释, 图 5 给出了槽宽取 400 nm 和 300 nm 时, 第 1800 时间步时的 Hz 场的强度分布图。从图 5 可以看出, 槽越窄, 槽内两个槽壁上形成的表面等离子体之间的耦合作用越大, 它们与金属槽壁的相互作用就变弱, 损耗变小, 对光的吸收作用也变小。反之, 槽越宽, 槽内两个槽壁上形成的表面等离子体之间的耦合作用越小, 它们与金属槽壁的相互作用就变强, 损耗变大, 对光的吸收作用也变大^[27]。由于槽宽是按照线性规律递增的, 所以可以利用这种效应对反射曲线进行微调。

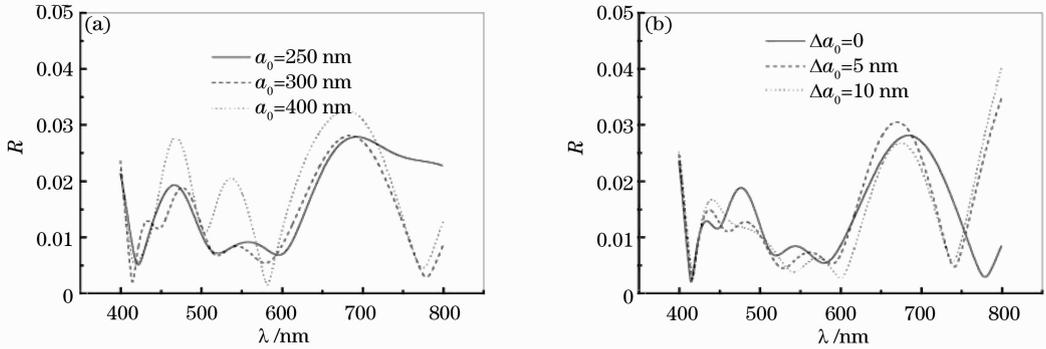


图 4 槽宽对吸收特性的影响。(a) 槽宽不变; (b) 槽宽按照线性规律递增

Fig. 4 Influence of widths of the grooves on absorption characteristics. (a) Widths of the grooves are invariant; (b) widths of the grooves are increased linearly

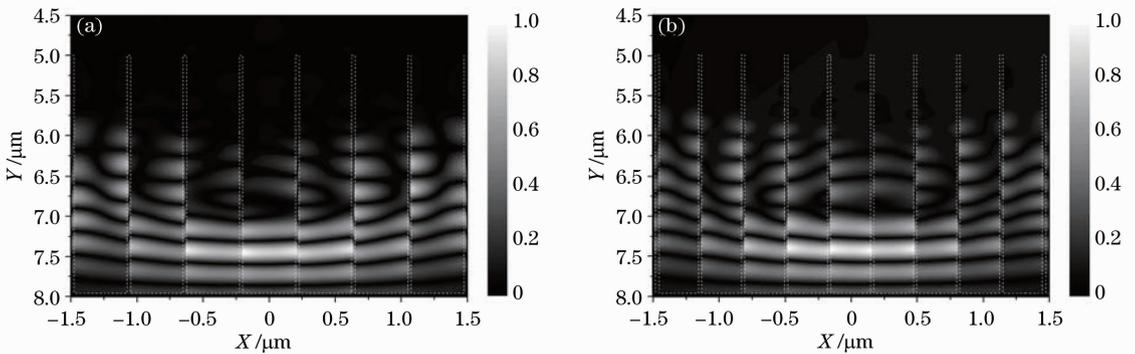


图 5 第 1800 时间步时的 Hz 场的强度分布图。(a) $a_i = a_0 = 400 \text{ nm}$; (b) $a_i = a_0 = 300 \text{ nm}$

Fig. 5 Intensity distributions of the Hz field at 1800 time steps. (a) $a_i = a_0 = 400 \text{ nm}$; (b) $a_i = a_0 = 300 \text{ nm}$

3.3 墙宽对吸收特性的影响

图 6 给出了入射光的空间半峰全宽为 $W_0 = 500 \text{ nm}$, 槽宽不变($a_i = a_0, a_0 = 300 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$),

且槽深也不变($d = 2950 \text{ nm}$)时, 在 400~800 nm 波长范围内, 墙宽对反射率 R 的影响。其中, 图 6(a) 是墙宽不变($b_i = b_0$, 其中 $b_0 = 75, 10, 5 \text{ nm}, i = 1, 2, 3, \dots$) 的三种

情况。图 6(b)是墙宽按照线性规律递减变化($b_i = b_0 - i\Delta b$, 其中 $b_0 = 75 \text{ nm}$, $\Delta b = 0, 5, 10 \text{ nm}$, $i = 1, 2, 3, \dots$)的三种情形。计算发现, 墙宽按照线性规律递增变化时, 优化效果不理想。从图 6(a)可以看出, 随着墙宽 b_0 的减小, 反射率曲线会越来越低并趋于平滑。从图 6(b)可以看出, 随着线性递减量 Δb 的增加, 反射率曲线会越来越低并趋于平滑。这种现象可以结合图 7 来解释, 图 7 给出了墙宽 b 分别取 10 nm 和 75 nm 时, 第 1800 时间步时的 Hz 场的强度分布

图。从图 7 可以看出, 墙越窄, 墙壁两侧上形成的表面等离子体之间的耦合作用越大, 它们与金属槽壁的相互作用就变强, 损耗变大, 对光的吸收作用也变大。反之, 墙越宽, 墙壁两侧上形成的表面等离子体之间的耦合作用越小, 它们与金属槽壁的相互作用就变弱, 损耗变小, 对光的吸收作用也变小^[27]。由于墙宽是按照线性规律递减的, 所以可以利用这种效应对反射曲线进行微调。

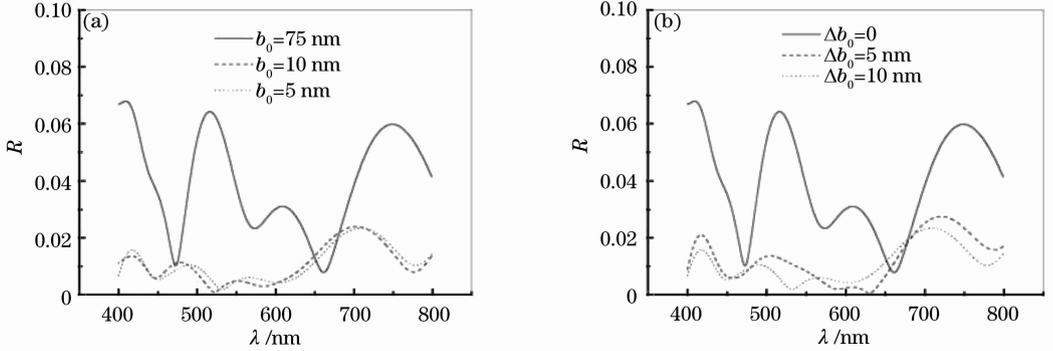


图 6 墙宽对反射率 R 的影响。(a) 墙宽不变; (b) 墙宽按照线性规律递减

Fig. 6 Influence of thicknesses of the walls on absorption characteristics. (a) Thicknesses of the walls are invariant; (b) thicknesses of the walls are increased linearly

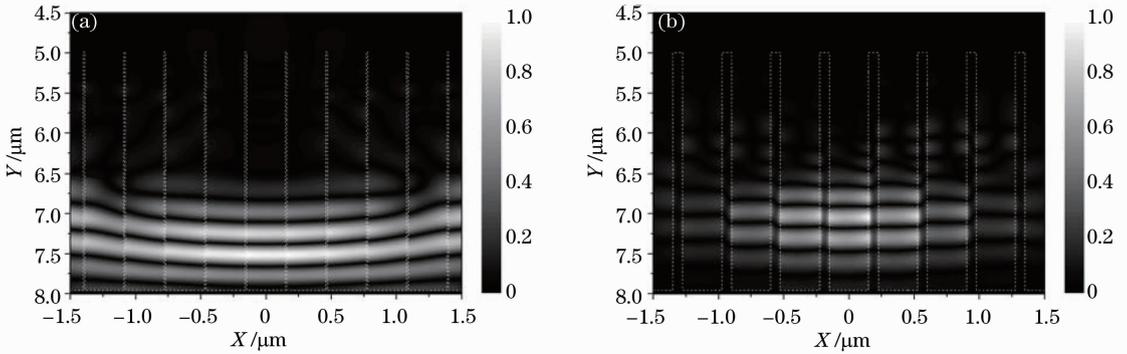


图 7 在第 1800 时间步时的 Hz 场的强度分布图。(a) $b_i = b_0 = 10 \text{ nm}$; (b) $b_i = b_0 = 75 \text{ nm}$

Fig. 7 Intensity distributions of the Hz field at 1800 time steps. (a) $b_i = b_0 = 10 \text{ nm}$; (b) $b_i = b_0 = 75 \text{ nm}$

3.4 入射光的宽度对吸收特性的影响

计算中发现, 在槽深、槽宽和墙宽三个参量中有两个不变而另一个变化时, 入射光的半峰全宽对吸收特性的影响是类似的。下面以槽宽和墙宽不变而槽深变化时的情况为例来说明入射光的宽度对吸收特性的影响。图 8 给出了槽宽不变($a_i = a_0 = 300 \text{ nm}$), 墙宽不变($b_i = b_0 = 25 \text{ nm}$), 槽深 d 取 2850, 2900, 2950 nm, 且入射光的半峰全宽 $W_0 = 1000 \text{ nm}$ 时的反射率 R 随波长 λ 的变化图。与图 2 对比, 可以发现: 对于空间半峰全宽较窄的高斯型入射光束来说, 波长较短的光波对应的反射率较低, 波长较长的光波对应的反射率较高; 而对于空间半峰全宽较宽的

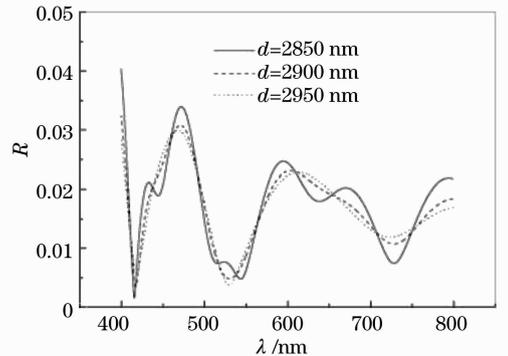


图 8 反射率 R 随波长 λ 的变化图

Fig. 8 Variation of reflectance R with wavelength λ

高斯型入射光束来说,波长较长的光波对应的反射率较低,波长较短的光波对应的反射率较高。

上述现象可以结合图 9 来解释。图 9 给出了在槽深 $d = 2950 \text{ nm}$, 槽宽不变 ($a_i = a_0 = 300 \text{ nm}$), 墙宽不变 ($b_i = b_0 = 25 \text{ nm}$), 单频入射光波长为 $\lambda = 450 \text{ nm}$, 空间半峰全宽为 $W_0 = 500 \text{ nm}$ [图 9(a)], $\lambda = 450 \text{ nm}$, $W_0 = 1000 \text{ nm}$ [图 9(b)], $\lambda = 700 \text{ nm}$, $W_0 = 500 \text{ nm}$ [图 9(c)], $\lambda = 700 \text{ nm}$, $W_0 = 1000 \text{ nm}$ [图 9(d)], 在第 1800 步时的 Hz 场的强度分布图。可以发现:对于确定波长的入射光,空间半峰全宽不

同,照射到这种吸收器上的光强的分布就不同,在各个槽中激发出来的表面等离子体激元的强度也不同,它们与金属槽壁的相互作用就不同^[27]。当入射光的空间半峰全宽较窄时[见图 9(a)和图 9(c)],会加强对短波长光的吸收。当入射光的宽度较宽时[见图 9(b)和(d)],会加强对长波长光的吸收。

3.5 优化结构参数下的吸收特性

根据上面的研究结果,在入射光的空间半峰全宽为 $W_0 = 500 \text{ nm}$ 和 1000 nm 的情况下,假设槽宽和

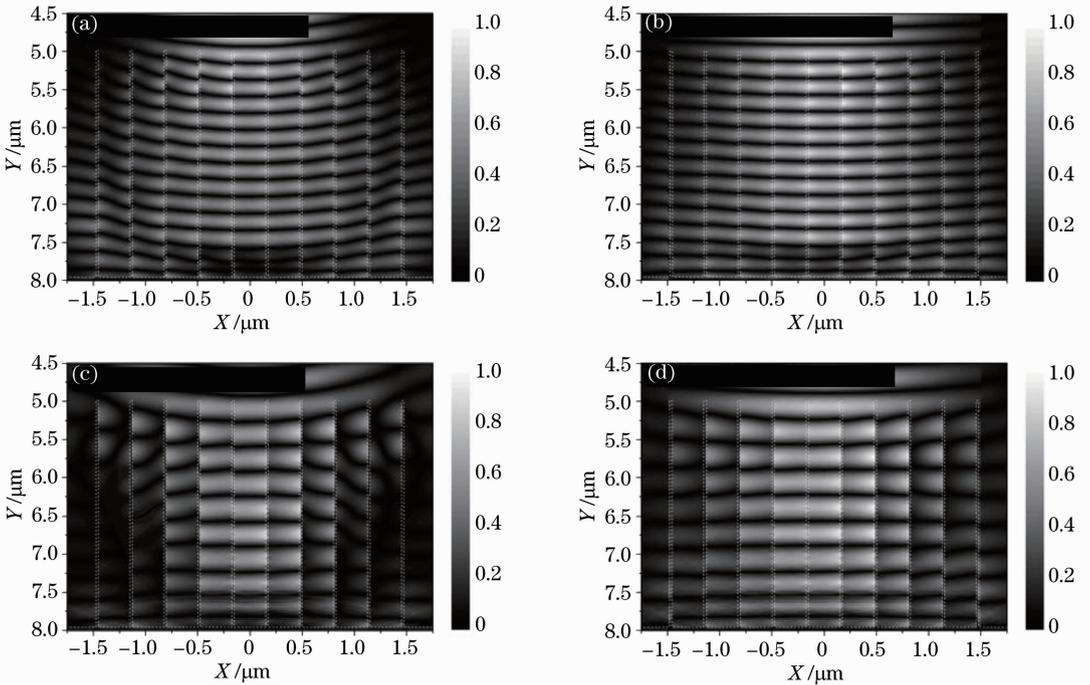


图 9 在第 1800 时间步时的 Hz 场的强度分布图。(a) $\lambda = 450 \text{ nm}$, $W_0 = 500 \text{ nm}$;

(b) $\lambda = 450 \text{ nm}$, $W_0 = 1000 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 700 \text{ nm}$, $W_0 = 500 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 700 \text{ nm}$, $W_0 = 1000 \text{ nm}$

Fig. 9 Intensity distributions of the Hz field at 1800 time steps. (a) $\lambda = 450 \text{ nm}$, $W_0 = 500 \text{ nm}$; (b) $\lambda = 450 \text{ nm}$, $W_0 = 1000 \text{ nm}$; (c) $\lambda = 700 \text{ nm}$, $W_0 = 500 \text{ nm}$; (d) $\lambda = 700 \text{ nm}$, $W_0 = 1000 \text{ nm}$

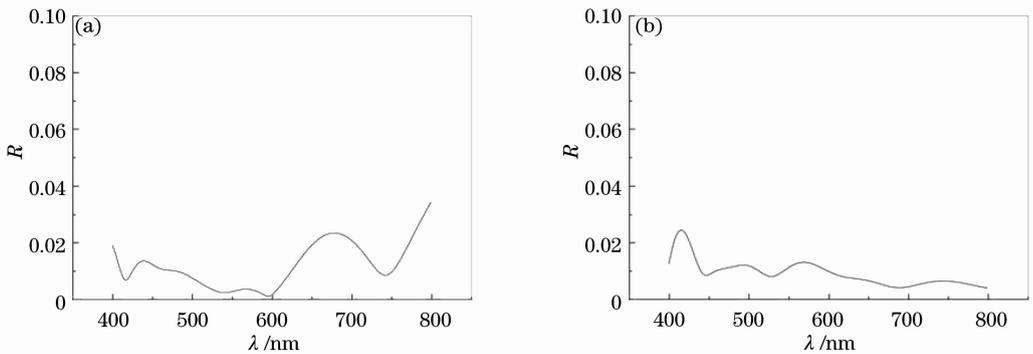


图 10 在较优结构参数下,光吸收器的反射率 R 与波长 λ 的关系图。(a) $W_0 = 500 \text{ nm}$, $a_0 = 300 \text{ nm}$;

(b) $W_0 = 1500 \text{ nm}$, $a_0 = 350 \text{ nm}$

Fig. 10 Relationship graphs of reflectance R and wavelength λ with better structural parameters. (a) $W_0 = 500 \text{ nm}$, $a_0 = 300 \text{ nm}$; (b) $W_0 = 1500 \text{ nm}$, $a_0 = 350 \text{ nm}$

墙宽线性变化,经过大量计算,分别得到了一组较优参数,对应的吸收特性如图 10 所示。在图 10(a)中,槽宽 $a_i = a_0 + i\Delta a$,其中 $a_0 = 300 \text{ nm}$, $\Delta a = 10 \text{ nm}$, $i = 1, 2, 3, \dots$; 墙宽 $b_i = b_0 - i\Delta b$,其中 $b_0 = 75 \text{ nm}$, $\Delta b = 5 \text{ nm}$, $i = 1, 2, 3, \dots$; 槽深 $d = 2950 \text{ nm}$ 。在图 10(b)中,槽宽 $a_i = a_0 + i\Delta a$,其中 $a_0 = 350 \text{ nm}$, $\Delta a = 10 \text{ nm}$, $i = 1, 2, 3, \dots$; 墙宽 $b_i = b_0 - i\Delta b$,其中 $b_0 = 75 \text{ nm}$, $\Delta b = 5 \text{ nm}$, $i = 1, 2, 3, \dots$; 槽深 $d = 2950 \text{ nm}$ 。从这两张图可以看出,吸收曲线较为平缓,且整体反射率基本维持在 3% 以内。

4 结 论

设计了一种结构渐变的表面等离子体光栅光吸收器,并通过数值方法研究了其吸收特性与其几何结构参数之间的关系。计算结果表明:槽深对这种吸收器的吸收特性有较大的影响。但当槽的深度超过 2950 nm 后,反射谱出现了饱和现象。由中心向两边适当地使槽宽线性增长,同时使墙宽线性减小,可以对反射曲线进行微调,使其在所计算的波长范围内趋于平缓。对于不同空间半峰全宽的入射光,反射谱线的形状有所不同。当入射光的宽度较窄时,会加强对短波长光的吸收。当入射光的宽度较宽时,会加强长波长光的吸收。这种光吸收器在全光芯片中具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 N C Lindquist, P Nagpal, K M McPeak, *et al.*. Engineering metallic nanostructures for plasmonics and nanophotonics [J]. *Rep Prog Phys*, 2012, 75(3): 6501–6563.
- 2 S Lal, S Link, N J Halas. Nano-optics from sensing to waveguiding [J]. *Nat Photonics*, 2007, 1(11): 641–648.
- 3 M Ohtsu, K Kobayashi, T Kawazoe, *et al.*. Nanophotonics: design, fabrication, and operation of nanometric devices using optical near fields [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2002, 8(4): 839–862.
- 4 Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0124002.
李娟,王冰艳,薛文瑞.基于MIM型表面等离子体光波导的Y形分束器的传输特性研究[J].*光学学报*, 2012, 32(1): 0124002.
- 5 Li Zhiqian, Gao Xiaoguang, Niu Liyong, *et al.*. Propagation properties of a surface plasmon polariton directional coupler [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1010001.
李志全,高晓光,牛力勇,等.一种表面等离子体激元定向耦合器的传输特性[J].*中国激光*, 2012, 39(10): 1010001.
- 6 Zhang Bingxin, Chen Shufen, Fu Lei, *et al.*. A temperature-controlled tunable plasmonic dual-band absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0723005.
张兵心,陈淑芬,付雷,等.一种温控的可调表面等离子体光学器件[J].*光学学报*, 2012, 32(7): 0723005.
- 7 D K Gramotnev, S I Bozhevolnyi. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. *Nat Photon*, 2010, 4(2): 83–91.

- 8 S I Bozhevolnyi, V S Volkov, E Devaux, *et al.*. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 508–511.
- 9 T Sondergaard, S M Novikov, T Holmgaard, *et al.*. Plasmonic black gold by adiabatic nanofocusing and absorption of light in ultra-sharp convex grooves [J]. *Nat Commun*, 2012, 3(7): 969–974.
- 10 T V Teperik, F J Garcia De Abajo, A G Borisov, *et al.*. Omnidirectional absorption in nanostructured metal surfaces [J]. *Nat Photon*, 2008, 2(5): 299–301.
- 11 M K Hedayati, M Javaherirahim, B Mozooni, *et al.*. Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials [J]. *Adv Mater*, 2011, 23(45): 5410–5414.
- 12 V G Kravets, S Neubeck, A N Grigorenko. Plasmonic blackbody: strong absorption of light by metal nanoparticles embedded in a dielectric matrix [J]. *Phys Rev B*, 2010, 81(16): 165401.
- 13 A Y Vorobyev, C L Guoa. Femtosecond laser blackening of platinum [J]. *J Appl Phys*, 2008, 104(5): 053516.
- 14 A Y Vorobyev, C L Guo. Enhanced absorbance of gold following multipulse femtosecond laser ablation [J]. *Phys Rev B*, 2005, 72(19): 195422.
- 15 K Aydin, V E Ferry, R M Briggs, *et al.*. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers [J]. *Nat Commun*, 2011, 2(10): 517–523.
- 16 A Tittel, P Mai, R Taubert, *et al.*. Palladium-based plasmonic perfect absorber in the visible wavelength range and its application to hydrogen sensing [J]. *Nano Lett*, 2011, 11(10): 4366–4369.
- 17 J Hao, J Wang, X Liu, *et al.*. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(25): 251104.
- 18 V G Kravets, F Schedin, A N Grigorenko. Plasmonic blackbody: almost complete absorption of light in nanostructured metallic coatings [J]. *Phys Rev B*, 2008, 78(20): 205405.
- 19 N Bonod, G Tayeb, D Maystre, *et al.*. Total absorption of light by lamellar metallic gratings [J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15431–15438.
- 20 K V Nerkararyan, S K Nerkararyan, S I Bozhevolnyi. Plasmonic black-hole: broadband omnidirectional absorber of gap surface plasmons [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(22): 4311–4313.
- 21 A I Fernandez-Dominguez, S A Maier, J B Pendry. Collection and concentration of light by touching spheres: a transformation optics approach [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105(26): 266807.
- 22 R W Wood. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum [J]. *Philos Mag*, 1902, 4(21): 396–402.
- 23 A Hessel, A A Oliner. A new theory of Wood's anomalies on optical gratings [J]. *Appl Opt*, 1965, 4(10): 1275–1297.
- 24 J Le Perchec, P Quemerais, A Barbara, *et al.*. Why metallic surfaces with grooves a few nanometers deep and wide may strongly absorb visible light [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(6): 066408.
- 25 M J Weber. *Handbook of Optical Materials* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- 26 A Taflove, S C Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method (2nd ed)* [M]. Boston: Artech House, 2000.
- 27 W R Xue, Y N Guo, W M Zhang. Propagation properties of a modified surface plasmonic waveguide with an arc slot [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(6): 2529–2534.