

槽深线性渐变的表面等离子光栅光吸收器

梁磊霞, 薛文瑞, 杨荣草

山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006

摘要 设计了一种槽深呈线性渐变的表面等离子光栅光吸收器, 运用有限元算法分析了该吸收器的结构参数及光入射角度对其在可见光波段内的吸收性能的影响, 并与槽深呈对称分布的光吸收器进行了对比。结果表明, 增加空气凹槽的数目、宽度和深度以及减小相邻凹槽间距, 均可有效提高光吸收率。与槽深呈对称分布的光吸收器相比, 该吸收器的吸收性能更优越。

关键词 光学器件; 光吸收器; 表面等离子; 光栅

中图分类号 O431 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0123002

Optical Absorber from Surface Plasmonic Grating with Depth-Linear-Gradient Grooves

Liang Leixia, Xue Wenrui, Yang Rongcao

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

Abstract A new kind of optical absorber based on surface plasmonic gratings with depth-linear-gradient grooves is designed. The effects of structural parameters and the light incident angle on the absorption characteristics within the visible wavelength range are analyzed by the finite element method. The proposed optical absorber is also compared with other optical absorbers with symmetrical groove depths. Results indicate that, increasing the number of grooves, groove width, and groove depth of air grooves, as well as reducing the center distance of adjacent air grooves, all can effectively enhanced the light absorption efficiency. The absorption performance of optical absorber here is superior to that of other optical absorber with symmetrical groove depth.

Key words optical devices; optical absorber; surface plasmon; grating

OCIS codes 230.0230; 350.2450; 240.6680; 050.2770

1 引 言

光吸收器是一种能有效吸收光频电磁波的器件^[1], 它在太阳能^[2]、传感^[3]、滤波^[4]、成像^[5]、热辐射和热探测^[6]等方面具有广阔的应用前景。

表面等离子体激元(SPPs)是金属中的自由电子和光子在金属-电介质界面上发生集体振荡而产生的^[7-9]。当光照射到具有特定形貌的金属表面上时会激发 SPPs, SPPs 使得入射光场被束缚在金属-电介质界面附近, 金属表面光吸收率增大^[10]。利用 SPPs 的这一特性, 可以构造各种类型的表面等离子光吸收器^[11]。按照几何结构划分, 光吸收器可分为平板金属/电介质堆栈型^[12]、金属光栅型^[13-14]、孔阵列型^[15]、基于超材料的完美光吸收器型^[16]以及复合涂层型^[17]等。按照吸收带宽大小划分, 光吸收器可以分为窄带型^[18-19]和宽带型^[20-21]。

表面等离子光栅光吸收器是近年来研究的热点之一。Kravets 等^[22]理论模拟了一种金基质表面等离子光栅光吸收器, 可以有效吸收不同方向入射的平面电磁波。Bonod 等^[14]研究了基于裸金属金基质拉莫光栅

收稿日期: 2016-05-30; **收到修改稿日期:** 2016-08-26

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(J1103210)

作者简介: 梁磊霞(1994—), 女, 本科生, 主要从事表面等离子体光吸收器方面的研究。E-mail: 1360869985@qq.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: wxue@sxu.edu.cn(通信联系人)

对光的吸收特性,结果表明在一定的深度范围内,光栅沟槽的深度越大,吸收特性越好。Popov 等^[23]设计了一种三维的表面等离子光栅光吸收器,当平面波的入射方向与金属表面垂直时,金属表面对频率较高的可见光的吸收率显著提高。Meng 等^[24]理论模拟了一种在半个光栅周期上的沟槽深度呈线性渐变分布的宽带吸收器,在近红外波段得到了较理想的吸收特性。但在一定程度上,这些表面等离子光栅光吸收器均存在吸收不均匀及吸收效率较低等缺陷。

本文设计了一种槽深呈线性渐变分布的表面等离子光栅光吸收器,在波长为 400~800 nm、入射角度为 $0^\circ\sim 80^\circ$ 的范围内,该吸收器的平均吸收率达到 0.85 以上,吸收率标准差控制在 0.20 以内。介绍了结构模型和计算方法,详细讨论了该吸收器的几何结构参数及入射角度对其光吸收率的影响,并对比分析了其与槽深呈对称分布的光吸收器的吸收特性。

2 结构模型与计算方法

设计的槽深呈线性渐变的表面等离子光栅光吸收器是一种以周期长度为 p 、沿水平方向拓展的光栅,其单元结构模型如图 1 所示,其中 α 为入射角, H 为磁场强度, E 为电场强度, k 为波矢。每一单元包含若干个金属银板上的矩形空气凹槽。相邻凹槽的中心间距均为 a ,宽度均为 t 。它们的深度呈线性渐变分布,最小深度值为 h_{\min} ,最大深度值为 h_{\max} 。这种表面等离子光栅光吸收器可以采用 Polyakov 等^[25-26]提出的方法来制作。在计算中,假设金属银的相对介电常数满足 Drude 模型 $\epsilon_r = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}$ 。其中 ω_p 为等离子体振荡频率,大小为 1.4421×10^{16} rad/s; γ 为阻尼系数,大小为 1.4983×10^{14} rad/s; ϵ_∞ 为圆频率趋于无限大时的相对介电常数,大小为 5.0^[27]; ω 为圆频率。

采用有限元算法对吸收器的吸收特性展开研究。计算中,把单元的左右边界设置为周期性边界条件(PBC),顶端设置为入射端口和反射端口(Port 1),底端设置为透射端口(Port 2),并考虑 0 级和 ± 1 级衍射效应。假设波长为 λ_0 的横磁(TM)型平面电磁波以 α 角入射到光栅表面,受到光栅的作用,电磁波会发生反射和透射现象。设 S_{11} 为回波损耗,则反射率 $R = |S_{11}|^2$; 设 S_{21} 为插入损耗,则透射率 $T = |S_{21}|^2$ 。吸收率 $A = 1 - T - R$ 。为保证计算精度,加大了光栅所在区域的网格密度,最小网格尺寸达到了波长的 1/400。

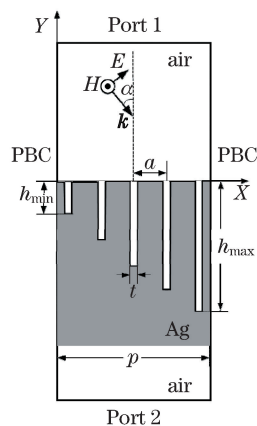


图 1 槽深呈线性渐变的表面等离子光栅光吸收器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of optical absorber based on surface plasmonic grating with depth-linear-gradient grooves

3 结果与讨论

3.1 凹槽结构参数对吸收特性的影响

3.1.1 单元内空气凹槽个数对吸收特性的影响

在凹槽宽度 $t = 80$ nm、深度最小值 $h_{\min} = 1200$ nm、深度最大值 $h_{\max} = 2400$ nm、中心间距 $a = 100$ nm 的情况下,分别设定空气凹槽的个数 $n = 11, 16, 21$,可见光波长范围内吸收器的吸收特性曲线如图 2 所示,其中 λ 为入射光波长。

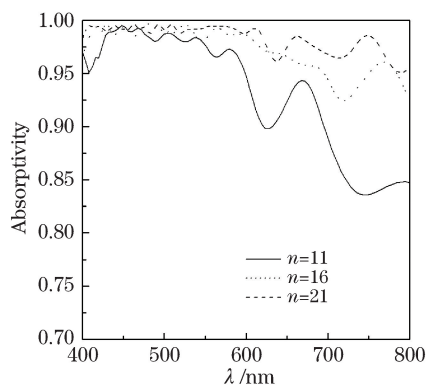


图 2 不同空气凹槽数目下,吸收率随波长的变化

Fig. 2 Variation of absorptivity with wavelength under different number of air grooves

从图 2 可以看出,吸收率随着单元内凹槽个数的增加而增大。当凹槽个数 $n=21$ 时,吸收率曲线的起伏较小,在可见光波长范围内,吸收率超过了 0.95。

3.1.2 相邻空气凹槽中心间距对吸收特性的影响

因为单元周期 p 等于相邻空气凹槽的中心间距 a 与凹槽数目 n 的乘积,即 $p=na$,所以讨论相邻空气凹槽的中心间距对吸收特性的影响实际上讨论的是单元周期对吸收特性的影响。在凹槽个数 $n=21$ 、宽度 $t=80$ nm、深度最小值 $h_{\min}=1200$ nm、深度最大值 $h_{\max}=2400$ nm 的情况下,分别设定相邻空气凹槽的中心间距 $a=100,130,160$ nm,可见光波长范围内吸收器的吸收特性曲线如图 3 所示。

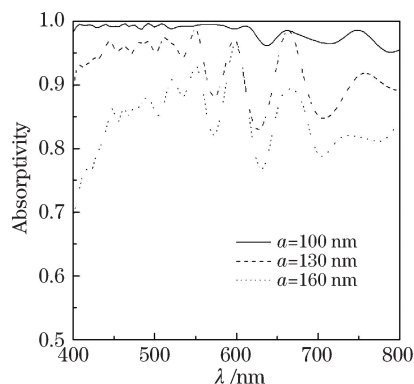


图 3 不同相邻空气凹槽中心间距下,吸收率随波长的变化

Fig. 3 Variation of absorptivity with wavelength under different center distances between adjacent air grooves

从图 3 可以看出,当相邻空气凹槽的中心间距 $a=160$ nm 时,吸收率曲线起伏较大,吸收率明显较低。当 $a=130$ nm 时,吸收率有所增大,但长波长范围内的吸收率不高。当 $a=100$ nm 时,吸收率曲线的起伏很小,在 400~800 nm 的波长范围内,吸收率均超过了 0.95。可见相邻空气凹槽的中心间距 a 越小,吸收率越高。

3.1.3 空气凹槽宽度对吸收特性的影响

在凹槽个数 $n=21$ 、深度最小值 $h_{\min}=1200$ nm、深度最大值 $h_{\max}=2400$ nm、中心间距 $a=100$ nm 的情况下,考虑到实验制作时两个相邻凹槽之间的金属壁能达到的最小宽度的限制,分别设定凹槽宽度 $t=50,60,80$ nm,可见光波长范围内吸收器的吸收特性曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出,在 400~800 nm 的波长范围内,随着凹槽宽度的增加,吸收器的吸收率增大。尤其当 $t=80$ nm 时,吸收率达到 0.97 以上。因为中心间距 $a=100$ nm 是固定的,所以凹槽宽度不能无限增大。当凹槽宽度 $t=80$ nm 时,吸收效果已经达到了设计目标。

3.1.4 空气凹槽深度对吸收特性的影响

在凹槽个数 $n=21$ 、宽度 $t=50$ nm、中心间距 $a=100$ nm 的情况下,改变凹槽深度值,分别设定凹槽深

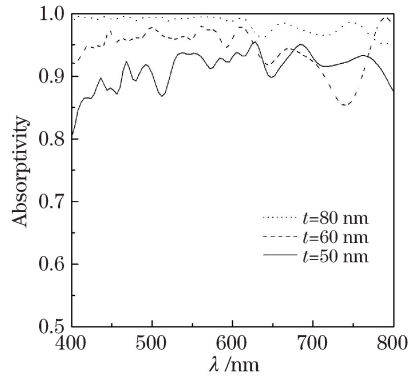


图 4 不同空气凹槽宽度下,吸收率随波长的变化

Fig. 4 Variation of absorptivity with wavelength under different air groove widths

度最小值 $h_{\min} = 400, 800, 1200$ nm, 相应的最大值 h_{\max} 分别取 800, 1600, 2400 nm, 此时可见光波长范围内的吸收特性曲线如图 5 所示。

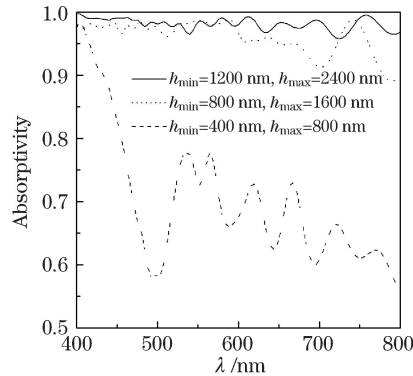


图 5 不同空气凹槽深度下,吸收率随波长的变化

Fig. 5 Variation of absorptivity with wavelength under different air groove depths

从图 5 可以看出,随着凹槽深度的增加,吸收率逐步增大,吸收曲线逐步趋于平缓。当凹槽深度 $h_{\min} = 1200$ nm、 $h_{\max} = 2400$ nm 时,吸收效果已经达到了设计目标。

对于图 2~5 所示的现象,可结合各自对应的磁场强度分布图来解释。为了表述简洁起见,这里仅以图 5 为例进行解释。当凹槽深度最小值 h_{\min} 分别取 400, 800, 1200 nm、相应的最大值 h_{\max} 分别取 800, 1600, 2400 nm、入射波波长取 600 nm 时,磁场的强度分布图如图 6 所示。图 6 中的磁场强度已按照相同的归一化条件进行了归一化处理。可以看出,当凹槽深度不断增加时,空气凹槽中形成的场的局域点数目不断增加,因此吸收器对光的吸收效果不断增强。反之,当凹槽深度不断减小时,吸收器对光的吸收效果不断减弱。

3.2 入射角度对吸收特性的影响

通过以上分析发现,当 TM 波以 $\alpha = 0^\circ$ 入射时,在凹槽个数 $n = 21$ 、宽度 $t = 80$ nm、深度最小值 $h_{\min} = 1200$ nm、深度最大值 $h_{\max} = 2400$ nm、中心间距 $a = 100$ nm 的条件下,吸收效果很好。当取上述结构参数时,在波长为 400~800 nm、入射角度为 $0^\circ \sim 80^\circ$ 的范围内,光吸收器吸收率的等高线图如图 7 所示。可以看出,在 $0^\circ < \alpha < 65^\circ$ 的范围内,吸收率随波长的波动较小,存在大面积的高吸收率区域。当 $\alpha > 65^\circ$ 时,吸收率开始逐步下降。当 α 接近 80° 时,在 400~800 nm 波长范围内,吸收率降低到了 0.5 左右。在图 7 所示的范围内,计算得到的平均吸收率为 0.86,吸收率的标准差为 0.19。

当凹槽个数 $n = 21$ 、宽度 $t = 80$ nm、深度最小值 $h_{\min} = 1200$ nm、深度最大值 $h_{\max} = 2400$ nm、中心间距 $a = 100$ nm、入射波长为 600 nm 时,不同入射角度的磁场强度分布图如图 8 所示。图 8 中的磁场强度已按照相同的归一化条件进行了归一化处理。每个空气凹槽类似于一个上端开口的法布里-珀罗谐振腔,如果凹槽深度与 SPPs 的波长匹配,就会形成驻波,图 8 中强弱的场分布分别对应波腹和波节^[11]。当入射角度不断增加时,空气凹槽中形成的 SPPs 的强度不断减小,对光的吸收效果就不断减弱。反之,当入射角度不断减

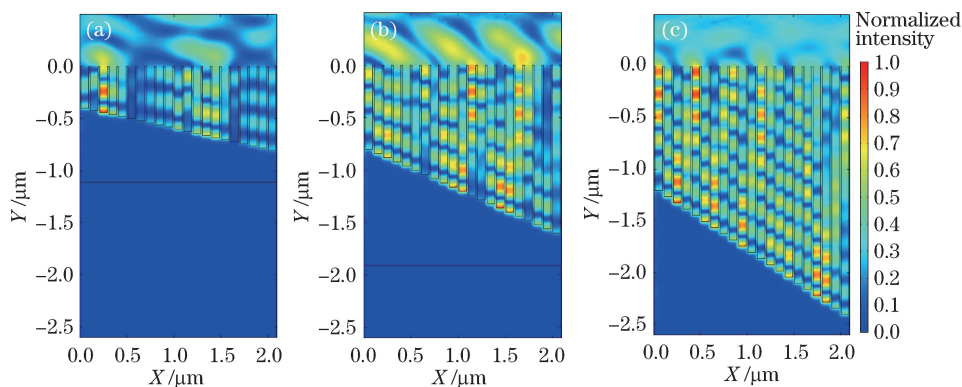


图 6 磁场的强度分布图。(a) $h_{\min}=400\text{ nm}$, $h_{\max}=800\text{ nm}$; (b) $h_{\min}=800\text{ nm}$, $h_{\max}=1600\text{ nm}$;
(c) $h_{\min}=1200\text{ nm}$, $h_{\max}=2400\text{ nm}$

Fig. 6 Intensity distribution of magnetic field. (a) $h_{\min}=400\text{ nm}$, $h_{\max}=800\text{ nm}$; (b) $h_{\min}=800\text{ nm}$, $h_{\max}=1600\text{ nm}$;
(c) $h_{\min}=1200\text{ nm}$, $h_{\max}=2400\text{ nm}$

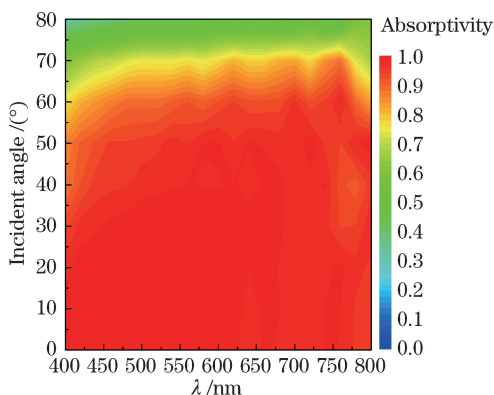


图 7 吸收率随入射角度和入射波长变化的等高线图

Fig. 7 Contour map of absorptivity versus incident angle and wavelength

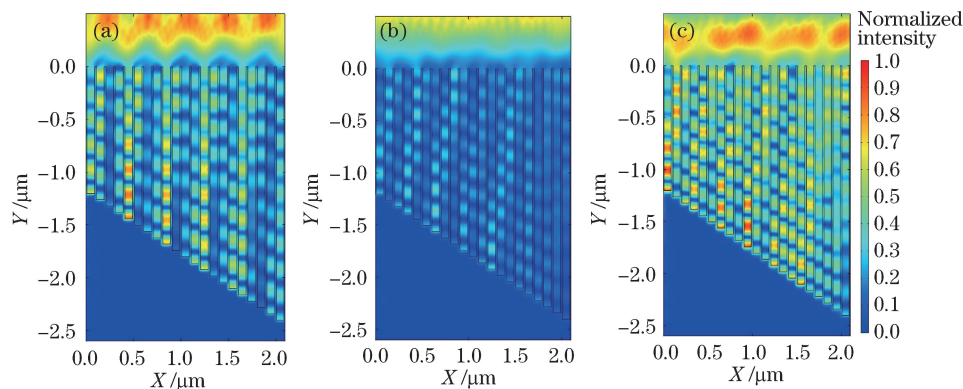


图 8 磁场的强度分布图。(a) $\alpha=80^\circ$; (b) $\alpha=70^\circ$; (c) $\alpha=60^\circ$

Fig. 8 Intensity distribution of magnetic field. (a) $\alpha=80^\circ$; (b) $\alpha=70^\circ$; (c) $\alpha=60^\circ$

小时,对光的吸收效果不断增强。

3.3 与空气凹槽深度呈对称分布的光栅光吸收器的对比

为了说明设计的光栅光吸收器的优越性,把图 1 所示的光栅光吸收器与空气凹槽深度呈对称分布的光栅光吸收器^[24]进行对比。固定参数:空气凹槽的个数 $n=21$,宽度 $t=80\text{ nm}$,凹槽深度最小值 $h_{\min}=1200\text{ nm}$,凹槽深度最大值 $h_{\max}=2400\text{ nm}$,中心间距 $a=100\text{ nm}$ 。在 $400\sim 800\text{ nm}$ 波长范围和 $0^\circ\sim 80^\circ$ 的入射角度范围内,计算空气凹槽深度呈对称分布时的吸收特性,得到图 9 所示的吸收率等高线图。

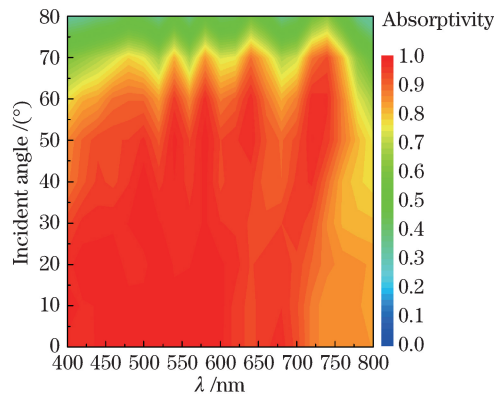


图 9 空气凹槽深度呈对称分布的光栅光吸收器的吸收率随入射角度和入射波长变化的等高线图

Fig. 9 Contour map of absorptivity versus incident angle and wavelength for grating optical absorber with symmetrical air groove depth

由图 9 可以明显看到,当空气凹槽深度呈对称分布时,在 400~700 nm 波长范围和 $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ 的入射角度范围内,吸收率较高,且波动较小。当 $\alpha > 45^\circ$ 时,吸收率开始逐步下降,且吸收率波动较大。当 $\lambda > 700$ nm 时,吸收率开始逐步下降。计算得到图 9 所示范围内的平均吸收率为 0.82,吸收率的标准差为 0.21。凹槽深度呈线性渐变分布的吸收器显然比凹槽深度呈对称分布的吸收器的吸收效果好。

4 结 论

对槽深呈线性渐变的表面等离子光栅光吸收器的吸收率进行了研究,发现在可见光波长范围内,光吸收器结构参数及入射角度对其吸收性能有较大影响。空气凹槽的数目、宽度和深度的增加以及相邻空气凹槽中心间距的减小均可以有效提高光吸收器的吸收率。在空气凹槽的个数为 21、宽度为 80 nm、深度最小值为 1200 nm、深度最大值为 2400 nm、相邻空气凹槽中心间距为 100 nm 的条件下,在 400~800 nm 波长范围和 $0^\circ \sim 65^\circ$ 的入射角度范围内,光吸收器具有优良的吸收效果。槽深呈线性渐变的表面等离子光栅光吸收器的吸收性能优于槽深呈对称分布的光栅光吸收器,这为光栅光吸收器的结构设计及实际应用提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Hutley M C, Maystre D. The total absorption of light by a diffraction grating[J]. Opt Commun, 1976, 19(3): 431-436.
- [2] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. Nat Materials, 2010, 9(3): 205-213.
- [3] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. Nano Lett, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [4] Li X, Yang L, Hu C, *et al.* Tunable bandwidth of band-stop filter by metamaterial cell coupling in optical frequency [J]. Opt Express, 2011, 19(6): 5283-5289.
- [5] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, *et al.* Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging[J]. Phys Rev B, 2009, 79(12): 125104.
- [6] Liu X, Tyler T, Starr T, *et al.* Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters[J]. Phys Rev Lett, 2011, 107(4): 045901.
- [7] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [8] Yao Bo, Liu Ye, Long Hu, *et al.* Spontaneous emission properties of emitters in dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0824001.
姚波, 刘焯, 龙虎, 等. 介质加载型表面等离子体波导中发光粒子的自发辐射特性[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0824001.
- [9] Zhang Xu, Wu Yu, Tong Xuan, *et al.* Study of surface plasmon polaritons waveguide of silver nanowire[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0124001.
张旭, 吴禹, 仝旋, 等. 银纳米线表面等离子体激元导光的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0124001.

- [10] Le Perche J, Quemerais P, Barbara A, *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.
- [11] Cui Y, He Y, Jin Y, *et al.* Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers[J]. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8(4): 495-520.
- [12] Kats M A, Blanchard R, Genevet P, *et al.* Nanometre optical coatings based on strong interference effects in highly absorbing media[J]. *Nat Materials*, 2013, 12(1): 20-24.
- [13] Zhao Yang, He Jianfang, Yang Rongcao, *et al.* Two-dimensional surface plasmonic grating optical absorber with gradually varying structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223005.
赵 阳, 何建芳, 杨荣草, 等. 结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器[J] *光学学报*, 2014, 34(2): 0223005.
- [14] Bonod N, Tayeb G, Maystre D, *et al.* Total absorption of light by lamellar metallic gratings[J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15431-15438.
- [15] Teperik T V, Gagcia De Abajo F J, Borisov A G, *et al.* Omnidirectional absorption in nanostructured metal surfaces [J]. *Nat Photonics*, 2008, 2(5): 299-301.
- [16] Hao J, Wang J, Liu X, *et al.* High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(25): 251104.
- [17] Hedayati M K, Javaherirahim M, Mozooni B, *et al.* Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials[J]. *Adv Materials*, 2011, 23(45): 5410-5414.
- [18] Chern R L, Hong W T. Nearly perfect absorption in intrinsically low-loss grating structures[J]. *Opt Express*, 2011, 19(9): 8962-8972.
- [19] Wu C, Neuner III B, Shvets G. Large-area wide-angle spectrally selective plasmonic absorber[J]. *Phys Rev B*, 2011, 84(7): 075102.
- [20] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, *et al.* Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers[J]. *Nat Commun*, 2011(2): 517.
- [21] Wang W, Cui Y, He Y, *et al.* Efficient multiband absorber based on one-dimensional periodic metal-dielectric photonic crystal with a reflective substrate[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(2): 331-334.
- [22] Kravets V G, Schedin F, Grigorenko A N. Plasmonic blackbody: Almost complete absorption of light in nanostructured metallic coatings[J]. *Phys Rev B*, 2008, 78(20): 205405.
- [23] Popov E, Enoch S, Bonod N. Absorption of light by extremely shallow metallic gratings: Metamaterial behavior[J]. *Opt Express*, 2009, 17(8): 6770-6781.
- [24] Meng L, Zhao D, Li Q, *et al.* Polarization-sensitive perfect absorbers at near-infrared wavelengths[J]. *Opt Express*, 2013, 21(101): A111-A122.
- [25] Polyakov A, Padmore H A, Liang X, *et al.* Light trapping in plasmonic nanocavities on metal surfaces[J]. *J Vac Sci Technol B*, 2011, 29(6): 06FF01.
- [26] Polyakov A, Thompson K F, Dhuey S D, *et al.* Plasmon resonance tuning in metallic nanocavities[J]. *Sci Rep*, 2012, 93(2): 1-4.
- [27] Weber M J. Handbook of optical material[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.