

单元超透镜模式分析及其亚波长成像特性研究

余慕欣^{1,2} 周文超¹ 吴一辉¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 提出了一种可工作于可见光波段的波长可调的超透镜。该超透镜由一层等离子体金属薄膜和两侧等厚介质薄膜的平面波导构成。通过分析介质薄膜对波导表面等离子体模式的调制作用, 给出了超透镜的成像规律。结果表明, 通过调节透镜介质薄膜的厚度可实现从 365~515 nm、分辨率为 $\lambda/6$ 、高能量透射率的亚波长成像。该三层膜超透镜结构简单, 可有效地减小制备误差及表面粗糙度对成像的不利影响, 降低了制造难度。此结构以其简单的结构、出色的成像性能在亚波长光刻、生物显微镜、高密度数据存储等方面具有潜在的应用价值。

关键词 图像处理; 超分辨; 薄膜; 表面等离子体; 金属光学

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1210001

Mode Analysis of Unit Cell Superlens and Study on Its Sub-Wavelength Imaging Performance

Yu Muxin^{1,2} Zhou Wenchao¹ Wu Yihui¹

(¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A superlens which can work at visible wavelength and whose work wavelength can be manipulated is proposed. It consists of a plasmonic metal film layer and two dielectric film layers. The relationship between the dielectric layer and the surface plasmon waveguide mode is analyzed, and its sub-wavelength imaging law is given. The results show that a sub-wavelength image with high transmittance and resolution of $\lambda/6$ can be obtained in the range of 365~515 nm. The fabrication tolerance and surface roughness can be greatly reduced, ascribed to its quite simple structure. Its simple structure and excellent sub-wavelength imaging capability opens a door for potential applications, such as sub-wavelength lithography, bio-microscopy and high intensity storage.

Key words image processing; superresolution; thin films; surface plasmons; metal optics

OCIS codes 100.6640; 240.0310; 240.6680; 260.3910

1 引言

折射率为-1的平板超材料能够实现对微小物体的完美成像^[1]。这种全新的理论一经提出很快引起广泛的关注。受限于材料和目前的工艺水平, 制

备出理想的超材料仍然面临挑战。事实上单层银膜同样能够实现亚波长成像, 并很快得到实验验证^[2-3], 但受表面等离子体共振波长的限制, 其工作波长为紫外波段。为了将亚波长成像技术的适用范

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-07-09

基金项目: 国家 863 计划(2012AA040503)、国家重点基金(11034007)、国家青年基金(61102023)、吉林省自然科学基金(20101502)

作者简介: 余慕欣(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事金属等离子体亚波长成像方面的研究。

E-mail: mxyuhit@hotmail.com

导师简介: 吴一辉(1965—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事微光机电系统、光学传感器、声波传感器等方面的研究。

E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

围拓展到可见光波段,相继提出了多膜超透镜^[4-8]、双曲透镜^[9-11]、平板光子晶体透镜^[12-14]以及金属-介质混合超透镜^[15]等新的亚波长成像方法,其中多膜超透镜和双曲透镜已经获得了实验证实。

多膜超透镜可调整金属-介质薄膜膜厚占空比选择透镜的工作波长,实现了可见光波段的亚波长成像^[6]。然而对于纳米结构来说,尺寸精度和表面粗糙度均对成像分辨率有很大影响^[16]。多膜超透镜与双曲透镜都是由十几到数十个薄膜堆栈而成,层厚的控制、各层均匀性以及表面粗糙度的控制会随着层数的增加变得更加困难和不确定^[17],因而不易保证系统的成像分辨率。以双曲透镜为例,它在365 nm 横磁波照明下分辨率理论上可达到 $\lambda/4.5$ ^[9],而实验结果仅为 $\lambda/3$ ^[10]。

本文提出了一种可代替多膜超透镜的亚波长成像透镜。它由介质/金属/介质三层结构组成。由于可以将其视为裁剪自多膜超透镜的一个单元,因此被称之为单元超透镜(UCSL)。相比于多膜超透镜,它在保证波长调制特性和分辨率的前提下,大大简化了结构,减小了制备误差及表面粗糙度的不确定性,降低了制造难度。并且由于该结构的等离子模式较少,其成像特性与模式之间的关系清晰,增加了设计的可预见性。本文将分析单元超透镜亚波长成像特性与其支持的等离子体模式之间的关系,给出亚波长成像规律及成像性能评估的方法。

2 单元超透镜的原理

单银膜超透镜(SLSL)可视为单元超透镜在介质薄膜厚度为零的情况下的一种特例,是一种介质-金属-介质(IMI)等离子体波导。关于这种波导的特性已有比较充分的研究^[18-19]。一方面结构支持的对称模式和反对称模式具有相同的共振波长;另一方面模式共振波长主要由材料决定而与结构无关。因此,单银膜超透镜的工作波长受材料限制,工作于特定的紫外波段。

单元超透镜的结构由图1所示,由等离子体金属薄膜 III(ϵ_m, d_m)和两层紧贴于金属层的介质薄膜 II(ϵ_2, d_2)构成。整个结构置于基底介质 I(ϵ_1)中。考虑到材料在可见光波段的损耗,选择银为等离子体金属,光学参数参照文献^[20],其厚度 d_m 为35 nm。介质薄膜的材料为二氧化钛(TiO_2),光学参数参照文献^[21]并采用均值($\epsilon_2 = 7.8$)做近似处理。基底介质为二氧化硅^[19],其介电常数为2.3。物平面和像平面到透镜表面的距离为常数15 nm。

单元超透镜由一系列光学薄膜材料堆栈而成;目前采用电子束蒸发法^[22]或者气相化学沉积法^[23]制备此薄膜材料的工艺已经相对成熟,对薄膜的厚度、表面形貌能够进行很好的控制。另外引入超薄锗(Ge)膜作为浸润层可明显改善单元超透镜表面粗糙度^[22]。

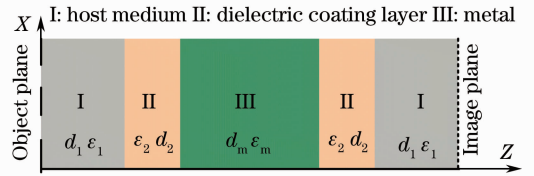


图1 单元超透镜结构示意图

Fig.1 Schematic geometry of the unit cell superlens

单元超透镜是一个三明治结构的平板波导,如图1所示。其支持的波导模式可表示为

$$H(z) = f(z)\exp[i(\beta z - \omega t)], \quad (1)$$

式中 $\beta = \beta_r + i\beta_i$ 为复波导传播常数,实部 β_r 和虚部 β_i 分别对应于表面等离子体波的波长和传播损耗; $f(z)$ 为表面等离子体波在纵向上的磁场分布。根据 $f(z)$ 的对称性,可将波导模式分为对称模式与反对称模式。利用麦克斯韦方程以及电磁场连续性边界条件可得到波导模式的色散方程,具体过程可参考文献^[18];利用Muller求根算法在复数域求解色散方程可得到波导模式的色散曲线。由于单元超透镜的成像能力主要受波导局域模式的影响,这里仅讨论其局域模式。图2给出了计算得到的波导模式色散曲线。根据介质薄膜的厚度(0, 5, 10, 15, 20, 25 nm),计算了6组数据。从图2中可以看出,随着介质薄膜的增加(Δd),波导模式的共振波长会发生相应的红移($\Delta\lambda$)。共振波长的移动范围由图中的可调谐区间标出。可调谐区间的上边界对应于介质薄膜厚度为零时的共振波长,即 $\text{SiO}_2/\text{Ag}/\text{SiO}_2$,其共振波长为365 nm;可调谐区间的下边界对应于介质薄膜厚度为无限大时的共振波长,即 $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$,其共振波长为520 nm。从图2中可以看出,共振波长的移动速率($\Delta\lambda/\Delta d$)经历了一个由快到慢的变化过程,当介质薄膜厚度超过25 nm后,共振波长的移动将变得不再明显。造成这一现象的原因在于介质薄膜中存在的电磁场是一个衰减场,会随着离开金属/介质界面而迅速衰减,如图2中插图所示,这样介质薄膜中的电磁场能量占模式总能量比重的变化率会随着介质薄膜厚度增加而逐渐减小,使得介质薄膜厚度变化对模式的影响逐渐降低。因此在单元超透镜结构设计上,介质薄膜膜厚的选

择区间为 0~25 nm。为了获得更大的波长调谐区间,可以考虑采用 Si、SiC 或者某些折射率更高的半

导体材料,使得可调谐区间下边界对应的共振波长红移。

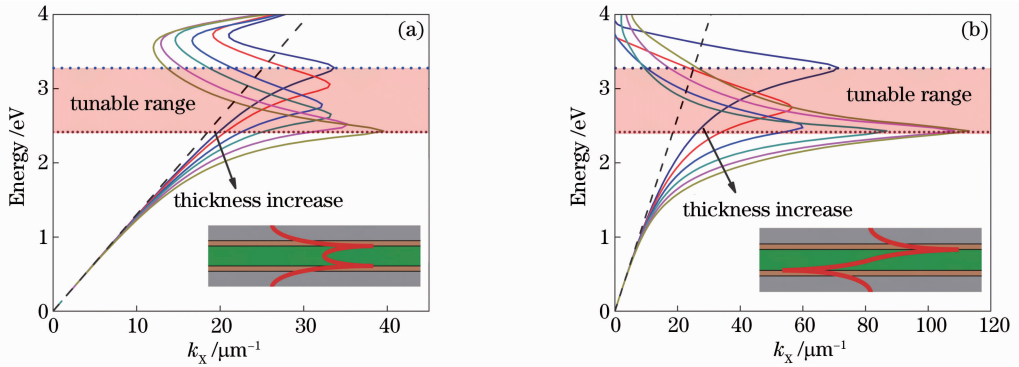


图 2 单元超透镜波导模式随介质层厚度(0,5,10,15,20,25 nm)变化示意图。(a)对称模式实部;(b)反对称模式实部。插图分别对应对称模式与反对称模式的磁场分布

Fig. 2 Dispersion relations of UCSL corresponding to the increase of dielectric layer thickness (0, 5, 10, 15, 20, 25 nm). (a) real parts of the dispersive curve for symmetric mode; (b) real parts of the dispersive curve for anti-symmetric mode. The inserted figures present the magnetic field distribution along Z-axis for symmetric mode and anti-symmetric mode respectively

介质薄膜会对等离子体波导模式尤其是模式共振波长产生影响,这种调制机制使得单元超透镜具备了在可选波长下实现亚波长成像的可能性,除此之外,也直接影响了透镜的成像性能。以介质薄膜厚度为 10 nm 的单元超透镜为例,结构支持的波导模式如图 3(a)和(b)所示。由于亚波长结构的散射场具有高空间频率带宽,能有效激励对称模式和反

对称模式,并使之作用于成像。系统的成像性能为两种模式共同作用的体现。从图 3(a)可以看出,与单层金属波导不同,三明治结构的对称模式与反对称模式的共振波长并不相同,导致在同一波长下两种模式对成像的贡献存在差异,在某些波长上两种模式的贡献甚至是相反的。

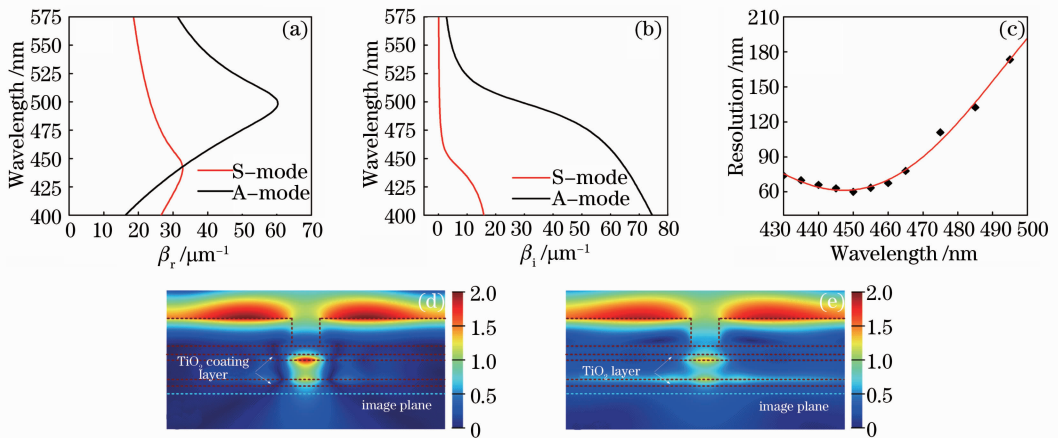


图 3 (a)和(b)分别为介质薄膜厚度为 10 nm 时单元超透镜波导模式实部和虚部的色散曲线,其中红线对应对称模式(S-mode),黑线对应反对称模式(A-mode);(c)单元超透镜在不同波长下的分辨率;(d)和(e)分别为单元超透镜在 450 nm 和 498 nm 波长下的电磁场分布

Fig. 3 (a) and (b) Present the real part and imaginary part of the supported waveguide mode for UCSL with 10 nm thick dielectric layers respectively, and the red line corresponds to the symmetric mode while the black line corresponds to the anti-symmetric mode; (c) resolution of UCSL at different wavelengths; (d) and (e) present the electromagnetic field distribution for UCSL at 450 nm and 498 nm, respectively

图 3(c)给出了透镜在 430~500 nm 上的绝对分辨率,绝对分辨率为像平面上归一化光强的半峰全宽

(FWHM)。用到的计算方法为有限元法(Comsol Multiphysics 3.5),为保证计算精度,在网格划分上最

大网格单元为 $\lambda/20$ 。将线宽为 50 nm 的线条刻于 50 nm 厚的铬^[20]金属薄板上作为物,铬板靠近透镜的表面即为成像系统的物平面。从图 3(c)中可以看出,当波长大于 450 nm 时,分辨率会随着波长的增加而变差。导致此现象的原因在于波导模式损耗,尤其是对称模式的的损耗,会随着波长的增加而迅速减小[图 3(b)],从而导致表面等离子体波传播距离增加,引起大量的旁瓣而降低系统分辨率。图 3(e)给出了透镜在波长为 498 nm 时的电磁场分布。从图中可以看出,大量的旁瓣淹没了亚波长信息,导致系统分辨率和信噪比很低,不适宜成像。当波长小于 450 nm 时,分辨率会随着波长的减小而变差。波导模式的传播常数会随着波长的减小而减小,如图 3(a)所示,导致表面等离子体波波长增加,系统的空间频率响应带宽变窄,分辨率降低。当波长为 450 nm 时,波导所支持的表面等离子体波的传播距离与波长取得了很好的平衡,获得分辨率最优值。此时透镜的电磁场分布如图 3(d)所示,系统

在保证分辨率的同时有效地抑制了旁瓣,物与像之间很好地满足一一对应关系,此时系统的绝对分辨率为 62 nm,相对分辨率为 $\lambda/6.5$ 。可以看出,对于该亚波长成像单元,高的分辨率需波导模式的实部足够大从而保证系统有足够的空间频率响应带宽;高的信噪比需要波导模式的损耗足够大来抑制表面波的传播距离,进而抑制旁瓣。这一条件在波长为 450 nm 时得到了很好的满足,此波长即为透镜在介质薄膜厚度为 10 nm 时的工作波长。

图 4 比较了单元超透镜与单银膜超透镜的成像性能。单元超透镜在由半峰全宽确定的绝对分辨率和能量透射率上具有明显的优势,其峰值光强约为单银膜超透镜的 1.5 倍。原因在于单元超透镜中引入的介质薄膜与金属薄膜形成了一个类 F-P 共振腔,能够明显地增强成像消逝场的强度与空间频率响应带宽,从而提高了透镜的分辨率和能量透射率,如图 4(b)所示。

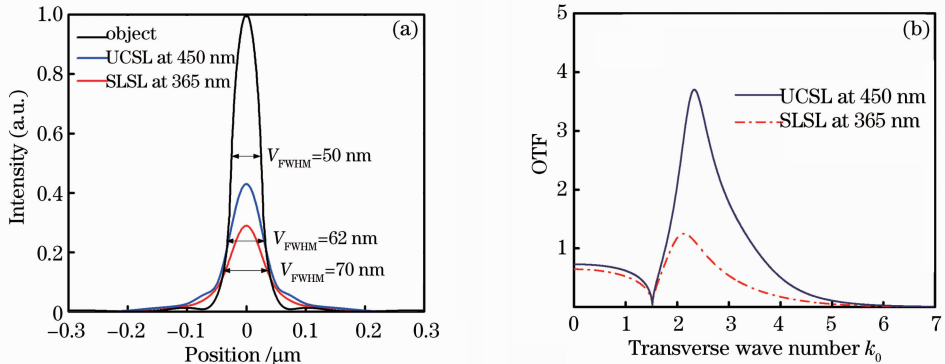


图 4 (a)单元超透镜和单银膜超透镜在各自工作波长下像平面的归一化光强分布;(b)单元超透镜和单银膜超透镜的光学传递函数(OTF)

Fig. 4 (a) Normalized optical intensity distribution for UCSL and SLSL at the imaging plane; (b) optical transfer function (OTF) for UCSL and SLSL

3 单元超透镜不同波长的成像特性

图 5(a)给出了单元超透镜在不同波长下亚波长成像性能。照明光为横磁波(TM 波),照明光的波长(365, 405, 442, 473, 495 和 515 nm)分别对应不同的介质层厚度(0, 5, 10, 15, 20 和 25 nm),物为一对亚波长平行线,线宽为 50 nm,线与线之间的距离为 120 nm。从图中可以看出,由于单元超透镜具有良好的绝对分辨率(小于 $\lambda/6$)以及对旁瓣的抑制,所成的像具有良好的对比度, $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$,其中 I_{\max} 与 I_{\min} 分别对应波峰与波谷的光强强度。另外,介质薄膜扮演了增透膜的

角色。对比于单银膜透镜[介质薄膜厚度为零,波长为 365 nm,如图 5(a)中暗红色曲线所示]的归一化峰值光强强度,可以发现,随着介质薄膜的引入,单元超透镜的能量透射率得到了明显的提升。在给定的 6 种情况下,当薄膜厚度为 20 nm,工作波长为 495 nm 时,能量透射率达到最高值。

从图 5(b)中可以看出,单元超透镜的工作波长与其对称模式的共振波长非常接近,两者之间的微小差异来源于铬膜的影响。因此,在单元超透镜的设计上,若不考虑掩膜的影响,则可利用对称模式的共振波长作为其工作波长。当然,图中仅仅给出了 6 种情况下单元超透镜的工作波长,但是可以通过

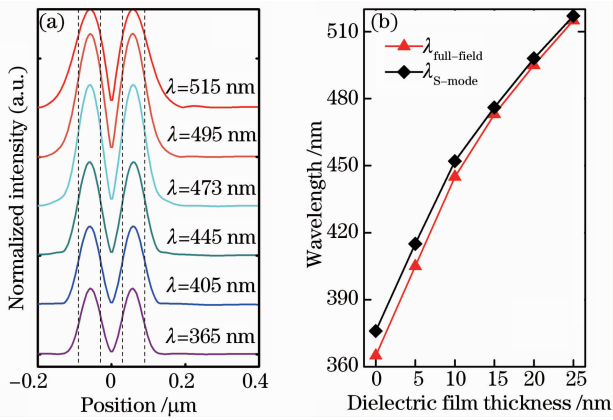


图 5 (a) 在不同波长下单元超透镜在像平面上的归一化光强分布, 照明光波长 (365, 405, 442, 473, 495, 515 nm) 分别对应于介质层厚度 (0, 5, 10, 15, 20, 25 nm); (b) 单元超透镜的工作波长和对称模式的共振波长对比

Fig. 5 (a) Lateral normalized field distribution of UCSL at the image plane. The illuminating wavelength (365, 405, 442, 473, 495, 515 nm) corresponds to the thickness of the dielectric layer (0, 5, 10, 15, 20, 25 nm); (b) comparison between the work wavelength and the resonant wavelength of symmetric mode for UCSL

调整介质薄膜厚度实现超透镜在 365~515 nm 上的可选波长亚波长成像。

4 结 论

研究了一种可工作于可见光波段工作波长可调谐的亚波长成像透镜。研究结果表明: 1) 介质薄膜对金属等离子体波导模式具有明显的调制作用, 随着介质薄膜的引入可实现单元透镜在可见光波段的可选波长亚波长成像; 2) 由于介质薄膜的引入形成的 F-P 共振腔能够明显地增强能量透射率和消逝场响应带宽, 提高了透镜的工作性能; 3) 单元超透镜的亚波长成像性能主要受对称模式的影响, 工作波长为对称模式的共振波长。单元超透镜以其简单而紧凑的结构、出色的亚波长成像性能在亚波长光刻、生物显微镜、高密度数据存储等方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 3966.
- 2 N Fang, H Lee, C Sun, *et al.*. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. Science, 2005, 308(5721): 534–537.
- 3 D Melville, R Blaikie. Super-resolution imaging through a planar silver layer [J]. Opt Express, 2005, 13(6): 2127–2134.

- 4 B Wood, J B Pendry, D P Tsai. Directed subwavelength imaging using a layered metal-dielectric system [J]. Phys Rev B, 2006, 74(11): 115116.
- 5 M Bloemer, G D' Aguanno, N Mattiucci, *et al.*. Broadband super-resolving lens with high transparency in the visible range [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(17): 174113.
- 6 A Pastuszczak, R Kotyński. Optimized low-loss multilayers for imaging with sub-wavelength resolution in the visible wavelength range [J]. J Appl Phys, 2011, 109(8): 084302.
- 7 M J Bloemer, G D' Aguanno, M Scalora, *et al.*. Energy considerations for a superlens based on metal/dielectric multilayers [J]. Opt Express, 2008, 16(23): 19342–19353.
- 8 W Yan, N A Mortensen, M Wubs. Hyperbolic metamaterial lens with hydrodynamic nonlocal response [J]. Opt Express, 2013, 21(12): 15026–15036.
- 9 Z Jacob, L V Alekseyev, E Narimanov. Optical hyperlens: far-field imaging beyond the diffraction limit [J]. Opt Express, 2006, 14(18): 8247–8256.
- 10 Z Liu, H Lee, Y Xiong, *et al.*. Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects [J]. Science, 2007, 315(5819): 1686–1686.
- 11 Jun Cui, Guoxing Zheng, Pingan He, *et al.*. A planar hyperlens-based device for super-resolution magnification imaging in a far field [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(s1): s11601.
- 12 S R Dastjerdi, M Ghanaatshoar, T Hattori. Design and analysis of superlens based on complex two-dimensional square lattice photonic crystal [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(10): 102303.
- 13 Chen Xuchong, Feng Shuai, Zhang Beibei, *et al.*. Subwavelength imaging characteristics of the near-infrared silicon-based metallic photonic crystal slabs [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123003.
- 陈霄冲, 冯 帅, 张贝贝, 等. 近红外波段硅基金属光子晶体平板的亚波长成像特性 [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123003.
- 14 Yu Miao, Gao Jinsong, Xu Nianxi. Diffractive characteristics of optically transparent frequency selective surface [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0831001.
- 于 淼, 高劲松, 徐念喜. 光学透明频率选择表面的衍射特性 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0831001.
- 15 W Cai, D A Genov, V M Shalaev. Superlens based on metal-dielectric composites [J]. Phys Rev B, 2005, 72(19): 193101.
- 16 Z Guo, Q Huang, C Wang, *et al.*. Negative and positive impact of roughness and loss on subwavelength imaging for superlens structures [J]. Plasmonics, 2014, 9(1): 103–110.
- 17 R B Nielsen, M D Thoreson, W Chen, *et al.*. Toward superlensing with metal-dielectric composites and multilayers [J]. Appl Phys B, 2010, 100(1): 93–100.
- 18 J J Burke, G I Stegeman, T Tamir. Surface-polariton-like waves guided by thin, lossy metal films [J]. Phys Rev B, 1986, 33(8): 5186.
- 19 W J Lee, J E Kim, H Y Park, *et al.*. Silver superlens using antisymmetric surface plasmon modes [J]. Opt Express, 2010, 18(6): 5459–5465.
- 20 A D Rakic, A B Djurišić, J M Elazar, *et al.*. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices [J]. Appl Opt, 1998, 37(22): 5271–5283.
- 21 T L Chen, Y Furubayashi, Y Hirose, *et al.*. Anatase phase stability and doping concentration dependent refractivity in codoped transparent conducting TiO₂ films [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(19): 5961.
- 22 W Chen, M D Thoreson, S Ishii, *et al.*. Ultra-thin ultra-smooth and low-loss silver films on a germanium wetting layer [J]. Opt Express, 2010, 18(5): 5124–5134.
- 23 J A Adamik, K S Collins, K S Law, *et al.*. Thermal CVD/PECVD Reactor and Use for Thermal Chemical Vapor Deposition of Silicon Dioxide and *In-Situ* Multi-Step Planarized Process; US, 5000113 [P]. 1991-03-13.