

文章编号: 0253-2239(2010)05-1459-05

基于纳米光学天线的扫描近场光学探针研究

石建平¹ 董可秀¹ 黄 圆¹ 陈旭南²

(¹安徽师范大学物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000
²中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 提出了一种基于纳米光学天线的新型扫描近场光学探针,基本结构是在传统光学探针的下端面集成金属偶极纳米光学天线,当入射光照射金属纳米偶极天线时激发金属表面等离子元共振,在天线间隙处产生了巨大的局域场增强,既提高耦合进入探针的光信号强度,又提高信噪比,实现高分辨率。利用时域有限差分(FDTD)法研究了不同孔径(50,100,130,150,170和200 nm)的新型探针针对同一样品的探测结果。照明光源为830 nm平面波,TE极化,扫描高度10 nm。研究结果表明新型探针分辨率随孔径增大时变化规律是先增加后减小,在孔径150 nm时分辨率最高,达45 nm,比同样孔径传统探针分辨率提高近4倍。对比分析了当探针位于样品中心时不同孔径探针端面光场分布图,认为新型探针分辨率变化规律是纳米天线在探针上的有效长度不同所致。对其灵敏度和对比度也进行了初步分析。

关键词 光学器件; 纳米光学天线; 扫描近场光学探针; 表面等离子元共振

中图分类号 0436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1459

Scanning Near-Field Optical Probe Based Nano-Antennas

Shi Jianping¹ Dong Kexiu¹ Huang Yuang¹ Chen Xunan²

¹Department of Physics & Electronic Technology, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China
²State Key Laboratory of Optical Technology on Microfabrication, Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract A novel probe is put forward based on the nano optical antenna which is added by a metallic dipole nano-antenna onto the tip of the ordinary probe. When the sample light arrives at the nano-antenna, the huge field enhancement will be obtained at the antenna feedback for the surface plasmon resonances produced on the surface of the metal. The light coupled into the probe and the signal-to-noise ratio is increased, and then the higher resolution is realized. Based on the FDTD algorithm the measure results are investigated numerically by different aperture probes for the same sample with the incident wavelength of 830 nm and the scan height of 10 nm. The results show that the the new probe resolution with aperture increass first and then decreases with the change of the aperture diameter and reaches the highest of 45 nm at 150 nm which is four times of the ordinary probe resolution. The optical fields on the probe with different diameter are analyzed. The results show that the change law of the new probe resolution is caused by the different efficient length of nano-antenna on the probe. The results also show that the new probe has higher sensitivity and contrast ratio.

Key words optical devices; nano optical antenna; scanning near-field optical probe; surface plasmon resonance

1 引 言

扫描近场光学显微镜(SNOM)被誉为“光学听诊器”,由于其极大地突破了传统光学显微镜的分辨率极限,在物理、化学和生物等技术领域获得了广泛应用^[1]。它的基本原理是采用直径远小于波长的光

纤探针在距离样品表面只有几个纳米的近场区扫描^[2],探测样品表面的倏逝场。由于距离样品表面很近,该距离内光束的发散很小,探针所收集的光学信息是与之对应的样品表面微区内的光学信息,其分辨能力一般可近似认为等于探针孔径。目前探

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(10805001)和安徽省教育厅自然科学基金项目(2006kj262B)资助课题。

作者简介: 石建平(1976—),男,博士,教授,主要从事光子晶体与微纳光电子技术方面的研究。

E-mail: shi_jian_ping@hotmail.com

针孔径多在 50~100 nm 之间,可以实现超越衍射极限的纳米分辨成像。然而,要想进一步通过减小探针孔径来实现更高分辨率将面临巨大挑战。因为孔径太小,截止频率将很高,极大地限制进入探针的样品光强度,导致信噪比减小,灵敏度降低,分辨率反而下降。另外,探针太细也将增加工艺难度。因此理想探针应该“又粗又亮”,即要在大孔径条件下既保证高分辨率又保证灵敏度。

近年来,有关金属表面等离子激元(SPP)共振增强效应的报道很多^[3~5],主要讨论金属纳米缝或者金属纳米孔对局域场的增强效应。如果将这种结构引入到 SNOM 的光纤探针上,即可利用这种局域场增强效应来增强耦合进入探针的样品表面光强度,从而提高分辨率。例如,2005 年简国树等^[6]在光子扫描隧道显微镜探针针尖处加一金属纳米单粒子结构,利用这种光纤探针扫描小样品,分辨力可达到 10 nm;2006 年 Hecht 等^[7]又研究了在原子力显微镜的探针顶部表面制作一个蝴蝶结形纳米金属薄膜结构,研究表明分辨率和灵敏度均有很大提高。2007 年 Taminiou^[8]在 SNOM 针尖上制备了纳米条(nano-strip)用来探测单分子荧光,得到大约 25 nm 的分辨率。本文研究一种基于 SPP 的新型近场扫描光学探针,在传统探针顶部集成纳米光学天线,可以实现“又粗又亮”,称之为纳米天线探针。所谓纳米光学天线是指利用 SPP 共振效应将光频电磁波高效耦合到亚波长尺度的纳米光子器件,最早由斯坦福大学的 Crozier^[9]小组提出,2003 年该小组用电子束光刻技术制作了微米尺度的金属薄膜条阵列并研究其光学性质,发现该结构对红外波段 10.6 μm 的激光有很强的聚束和增强效应,非常类似于微波天线的性质故将其命名为光学天线。2005 年 Muehlschlegel 等^[10]报道了一种结构更小的金偶极光学天线,共振波长位于可见光波段,用长波长光实现了纳米量级的聚焦,极大的超越了衍射极限。因此,在 SNOM 探针顶端集成纳米光学天线,有望实现灵敏度和分辨率的同步提高。

2 基本结构和原理

提出的纳米天线探针结构如图 1 所示,上部为传统探针,由普通裸光纤拉制而成,探针锥角 22.5°,纤心材料 SiO₂,表面镀金膜 80 nm;探针顶端集成有纳米光学天线,为对称偶极共振结构,两共振臂间隔 10 nm 以纤心为中心对称放置,均为长方体结构,单臂尺寸为 40 nm×90 nm×5 nm,材料为金

Au。共振臂尺寸选择与照明波长有关,需反复计算优化才能得到,采用的是 830 nm 光源,图 2 是其结构示意图和共振谱。

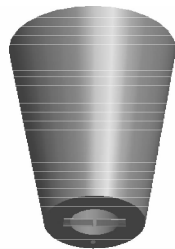


图 1 纳米天线探针结构示意图

Fig. 1 Nano-antenna probe structure

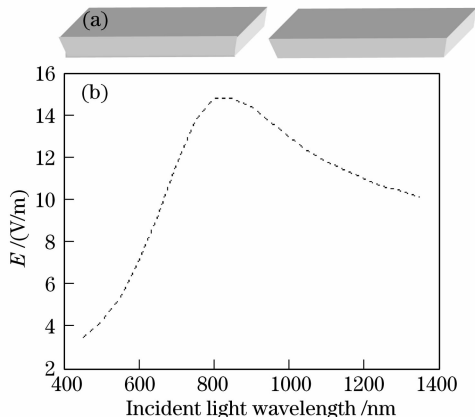


图 2 纳米天线结构示意图(a)和共振谱(b)

Fig. 2 Structure diagram (a) and resonant spectrum (b) of nano-antennas

当使用该探针探测样品表面波时,入射波将在纳米光学天线的共振臂上产生 SPPs,这些 SPPs 波长较小,由于隧道效应一部分 SPPs 将沿偶极臂间的 10 nm 狭缝穿透到小孔的另一面,由于共振臂仅有 5 nm 厚,其上下表面的 SPPs 将会发生重叠,当入射波矢与天线 SPPs 波矢匹配时将发生表面等离子激元共振(SPR)。共振效应产生强的自由电子集体振荡在共振臂两端出现时变异种电荷,形成反馈间隙。由于反馈间隙很小静电耦合很强,从而获得巨大的场增强,耦合进入光纤探针的能量也随之增加,探针的分辨率和灵敏度得以提高。关于纳米光学天线的增强效应,Boyd 等^[11]从天线结构出发给出了天线增强因子,认为增强因子 L 满足下式

$$L = L_{LR}L_{QS}L_{SPR}, \quad (1)$$

式中 L_{LR} 描述尖端效应; L_{QS} 描述准静态因素(Quasi-static Factor),与天线结构相关; L_{SPR} 描述表面等离子共振因素。需要说明的是,虽然实验上已经多次证明 SPR 现象的存在,但物理机制还没有完全搞清楚,尚存在相互矛盾的争议,因此关于纳米光学天线

的聚焦和增强机制也还不是十分清楚。图 3 给出的是用 830 nm 激光照明图 2 所示纳米光学天线时的光场分布,入射光电场强度 E_0 为 1 V/m,共振时天线反馈间隙中心处电场强度 E 为 15 V/m,光场强度 I 增强了 225 倍($I=E^2$)。图 3 给出的是 150 nm 孔径传统探针和纳米天线探针端面的光场分布图,照明条件同图 4,传统探针和纳米天线探针端面中心场强分别为 0.12,9.37 V/m,可见集成了纳米光学天线的探针的确可以实现极大场增强。

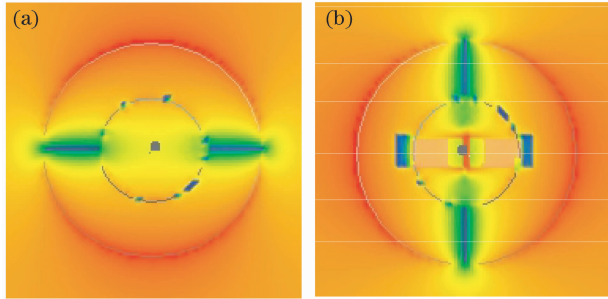


图 3 传统探针(a)和纳米天线探针(b)端面的光场分布图

Fig. 3 Distribution of optical field on tip top face for tradition probe (a) and nano-antennas probe (b)

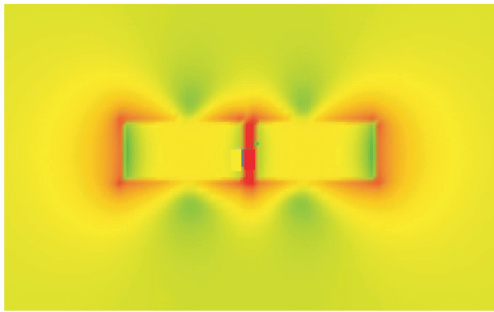


图 4 830 nm 照明时纳米天线光场分布

Fig. 4 Nano-antennas optical field distribution with incident light of the wavelength of 830 nm

3 数值计算及结果分析

为验证该探针的探测效果,将图 2 所示的纳米光学天线集成到不同孔径普通光纤探针顶端,然后分别对同一样品进行探测,对比分析不同情形下的探测结果。样品选择无限大金属薄膜上的 100 nm×100 nm 方孔,膜厚 100 nm。图 5 为探测位置示意图,坐标中心选在方孔中心。探针在样品表面以步长 5 nm 进行逐点等高扫描,扫描高度 10 nm,由于作二维扫描计算耗时很多,仅沿 y 方向扫描一条曲线。扫描时,天线轴线与 y 轴重合。样品照明方式为透射式,即光源从样品下方沿 z 方向入射,探针在样品上

方探测。照明光源为 830 nm 平面波,TE 极化,即 $E_y=1$ V/m, $E_x=E_z=0$ 。理论和实验研究已经表明,纳米光学天线的场增强效应与入射光的极化方向密切相关^[12],二者相差可达两个数量级,此处需选择 TE 极化。采用有限时域差分法^[13,14]逐一计算不同位置时进入探针的光场强度,得到样品表面的形貌。FDTD 计算的差分网格大小 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=5$ nm,吸收边界条件选择完全匹配层(PML)。模拟时探针长度取 300 nm,金的介电常数采用修改的德拜材料模型^[15]

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau} + \frac{\sigma}{i\omega\epsilon_0}, \quad (2)$$

式中静态介电常数 $\epsilon_s = -15063.5$,正离子背景介电常数 $\epsilon_{\infty} = 8.01677$,电导率 $\sigma = 1.48 \times 10^7$,弛豫时间 $\tau = 912 \times 10^{-15}$ 。模拟计算均在 Recom 公司的 xFDTD 平台上完成。

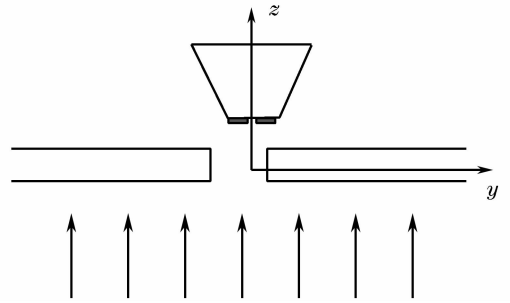


图 5 探测位置示意图

Fig. 5 Schematic for the probe to detect the sample

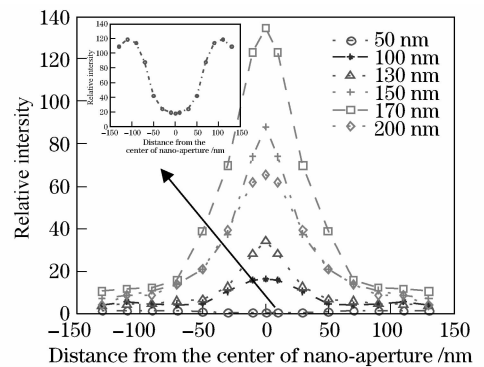


图 6 不同孔径纳米天线探针扫描样品表面光强分布

Fig. 6 Optical field distribution on sample face with different antenna probe

当探针孔径分别为 50, 100, 130, 150, 170 和 200 nm 时,纳米天线探针扫描获得的样品表面光强分布如图 6 所示,扫描范围以方孔中心为原点,沿 y 方向左右延伸 150 nm。当孔径为 50 nm 时光场增强相对较弱,为清楚观察分辨率将扫描曲线重绘于图 6 的插图中。对于孔径 50 nm 的探针,出现了

比度反常成像现象,这可能由于其共振波长小于入射光波长所致。从图 6 可以看出,对应 50, 100, 130, 150, 170 和 200 nm 孔径的分辨率分别为 100, 75, 50, 45, 50 和 70 nm。当孔径小于 150 nm 时,分辨率随孔径增大而逐渐提高,当孔径超过 150 nm 继续增大时,分辨率又逐渐下降。这与传统探针分辨率变化规律很不相同。传统探针的分辨能力一般近似认为等于探针孔径,孔径越小分辨率越高,大孔径探针无法实现高分辨率,而纳米天线探针可以在孔径 150 nm 时实现 45 nm 的分辨率,与同样孔径的传统探针相比分辨率提高近 4 倍。

纳米天线探针的分辨率变化规律可以从图 7 中得到解释。图 7 是当探针位于样品中心时,不同孔径探针端面光场分布图。从图中可以看到,虽然纳米天线均为同一结构,但由于孔径不同,纳米天线在探针上的有效长度也不一样。有效长度指纳米天线结构与探针孔径端面接触的长度。对应 50, 100, 130, 150, 170 和 200 nm 孔径的有效长度分别为

50, 100, 130, 150, 170 和 190 nm。有效长度是影响场增强效应和分辨率的主要因素。当孔径为 50 nm 时,孔径小而天线大(宽 40 nm, 长 90 nm),孔径几乎被完全遮住,光场只能从 5 nm 的缝耦合进入探针,虽然由于纳米天线的聚束效应场有一定增强(3 倍左右),但能够耦合进入探针的能量太小,因此分辨率较低。随着孔径的逐步增大,纳米天线的有效长度逐渐增加,天线聚束作用逐渐增强,峰值强度增强倍数依次为 18(100 nm), 38(130 nm), 85(150 nm), 140(170 nm), 分辨率随之逐渐提高。但当孔径超过 170 nm 继续增大到 200 nm 时,由于孔径大小已经超过纳米天线长度(190 nm),孔径边缘部分区域不能被纳米光学天线覆盖,纳米天线的增强效应迅速减弱,增强倍数不足 170 nm 孔径时的一半,仅为 65,导致分辨率降低。由此可见,设计高分辨率纳米天线探针时,既要保证纳米光学天线的共振波长与入射波长一致以获得较高的增强因子,同时也要兼顾孔径与纳米天线的相对大小和位置。

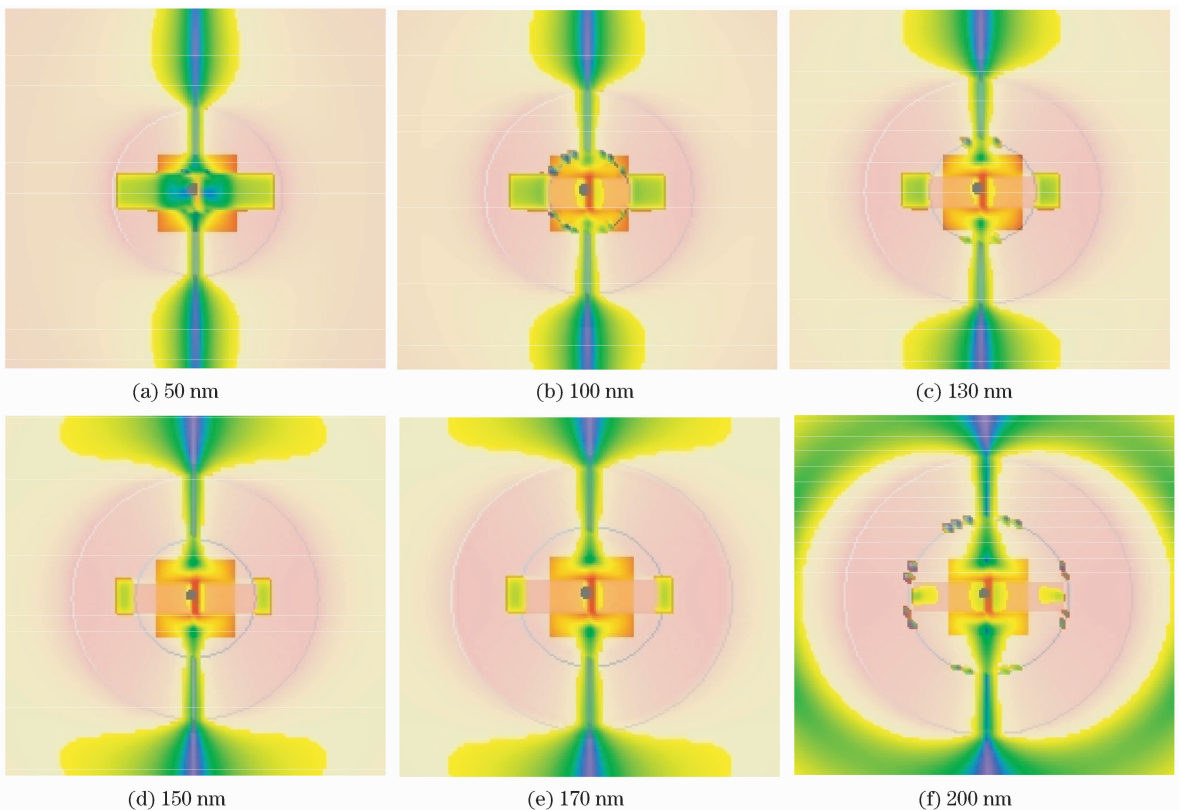


图 7 不同孔径探针端面光场分布图

Fig. 7 Optical field distribution of antennas probe with different aperture on tip top face

为分析信号光强度增加对分辨率的影响,在图 8 中给出了不同孔径探针探测结果的对比度。对比度计算公式为

$$f_{\text{CON}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (3)$$

式中 I_{max} 和 I_{min} 分别为曲线上相对强度最大值和最小值。从图中可以看出,对比度变化趋势与信号光

强度以及分辨率变化基本一致,都是随孔径先增加而后减小,说明信号光强度增加后,并没有引起背景光场的增加,光场能量仍然局域在天线反馈中心附近,这也是纳米光学天线聚束作用的体现。

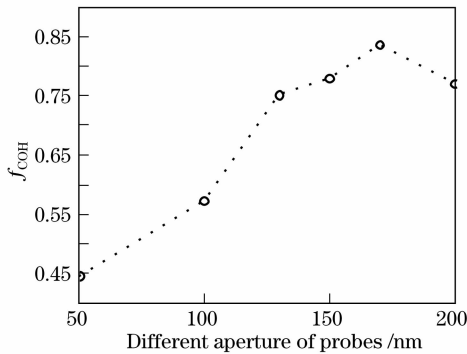


图 8 不同孔径纳米天线探针的对比度

Fig. 8 Contrast of different nano-antennaprobe

从上述分析还可以看到,纳米天线探针对提高 SNOM 检测微弱信号的灵敏度极为有利,因为集成纳米光学天线后,探针端面光场强度均有不同程度增强,经过适当设计的纳米天线能使大孔径探针信号光强度增加两个数量级,对比度没有降低,分辨率保持在 50 nm 左右,使探针能够“又粗又亮”,缓解了传统探针的分辨率和灵敏度矛盾,同时对降低探针制作难度也有一定帮助。

4 结 论

研究了一种新型探针的性能,该探针是在普通光纤探针的顶端集成偶极纳米光学天线,在孔径 150 nm 时获得了 45 nm 分辨率。与传统探针相比,该探针在大孔径时具有明显的分辨率优势,同时灵敏度和对比度也有较大提高,能够实现“又粗又亮”,可为进一步提高 SNOM 分辨率提供新的技术途径。

参 考 文 献

- Ge Huayong. Scanning near-field optical microscopy and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(6): 8~12
葛华勇. 近场光学显微镜及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, **39**(6): 8~12
- Zhang Shulin. Scanning Near-field Optical Microscopy and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2000
张树霖. 近场光学显微镜及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- Kaiqun Lin, Yonghua Lu, Zhaofeng Luo *et al.*. Numerical and experimental investigation of temperature effects on the surface plasmon resonance sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 428~431
- Li Ying, Zhong Jingang, Zhang Yonglin *et al.*. Construction basis of biotic gene chip checking system with surface plasmon resonance imaging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2290~2293
李莹, 钟金钢, 张永林等. 表面等离子体共振成像生物芯片检测系统[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2290~2293
- I. Romero, J. Aizpurua, G. W. Bryant *et al.*. Plasmons in nearly touching metallic nanoparticles: singular response in the limit of touching dimmers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9988~9999
- Jian Guoshu, Bo Fei, Pan Shi *et al.*. The numerical simulation of photon scanning tunnel microscope's image with metallic particle probe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 470~474
简国树, 柏菲, 潘石等. 探针尖带金属微粒的光子扫描隧道显微镜成像数值模拟[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 470~474
- B. Hecht, P. Mühlischlegel, J. N. Farahani *et al.*. Prospects of resonant optical antennas for nano-analysis[J]. *Chimia*, 2006, **60**(11): 765~769
- T. H. Taminiou, R. J. Moerland, F. B. Segerink *et al.*. $\lambda/4$ resonance of an optical monopole antenna probed by single molecule fluorescence[J]. *Nano Lett.*, 2007, **7**(1): 28~33
- K. B. Crozier, A. Sundaramurthy, G. S. Kino *et al.*. Field enhancement and resonance in optical antennas [J]. *IEEE Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2003, **89**: 1~2
- P. Muehlschlegel, H. J. Eisler, O. J. F. Martin *et al.*. Resonant optical antennas[J]. *Science*, 2005, **308**(5728): 1607~1609
- G. T. Boyd, T. Rasing, J. R. R. Leite *et al.*. Local-field enhancement on rough surfaces of metals, semimetals, and semiconductors with the use of optical 2nd-harmonic generation [J]. *Physical Review B*, 1984, **30**(2): 519~526
- G. D. Boreman C. Fumeaux, W. Herrmann *et al.*. Tunable polarization response of a planar asymmetric-spiral infrared antenna[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(24): 1912~1914
- Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time-Domain Electromagnetic Method[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005
- Allen Taflove, Susan Hagness. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method[M]. Boston: Artech House, 2000
- Yan Haifeng, Yang Jing, WU Xiaofei *et al.*. Analysis of field enhancement of resonant optical antennas[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, **43**(5): 639~642
颜海峰, 杨景, 吴晓飞等. 共振光学天线场增强特性研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007, **43**(5): 639~642