

## 扫描近场圆偏振光学显微镜

金涛, 谢孟宇, 冀胡东, 吴丹丹, 郑继红

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代化光学重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 提出一种利用镀有金属薄膜的 V 形无孔光学探针构建的扫描近场光学显微镜, 将圆偏振光注入镀有金属薄膜的 V 形槽内在针尖处形成近场照射光源, 并利用探针收集样品表面近场光信号。理论分析表明: 探针收集的近场和远场反射光之间存在一定的相位差, 该相位差与探针机械结构、探针与样品的距离有关, 可通过探针与样品之间的距离加以控制, 因此利用偏振性器件可有效抑制远场光强。实验中, 探针与样品之间的距离通过范德华力回馈控制, 探针操作在接触模式, 实验结果显示所测近场与远场光相位相差  $57^\circ$ , 近场光学图像横向分辨率优于 12 nm。

**关键词:** 近场光学; 无孔光学探针; 扫描近场圆偏振光学显微镜

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1103003

## Scanning near-field circular polarization optical microscope

Jin Tao, Xie Mengyu, Ji Hudong, Wu Dandan, Zheng Jihong

(Shanghai Key Lab of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering,  
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A scanning near-field optical microscope (SNOM) based on an apertureless optical probe was presented. The probe had a V shape hollow on its top and coated with metal film. Illumination near-field light (NFL) will emit from the apex of probe when far-field light (FFL) is focused on the hollow. There is a phase difference between collected NFL and FFL, which relates to the distance between probe and sample. The collected FFL can be eliminated using a Glan-Taylor analyzer according to the phase difference. The experimental results show the phase difference of this system is  $57^\circ$ . The spatial resolution of SNCOM is less than 12 nm.

**Key words:** near-field optics; apertureless optical probe;  
scanning near-field circular polarization optical microscope

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(51075280); 上海市自然科学基金(16ZR1423000); 国家基金委中德合作研究中心项目(GZ1287)

作者简介: 金涛(1985-), 男, 特聘副教授, 博士, 主要从事纳米光子学和精密干涉测量方面的研究。Email: jintao@usst.edu.cn

## 0 引言

信息领域的中心问题就是存储能力,为使存储容量增大,必须不断减小用于记录信息的信息位的尺寸。但当尺寸减小到一定程度时,磁存储和光存储技术分别面临“超顺磁效应”和“衍射极限”问题<sup>[1-3]</sup>。近场光学显微镜突破了衍射极限实现了约 45 Gbit/inch<sup>2</sup>(1 inch=2.54 cm)的超高记录密度<sup>[4]</sup>。目前探针型 SNOM 主要采用直径为纳米级的孔径探针尖端作记录头,Hosaka 等人利用半导体激光作为光源实现了 60 nm 的记录磁畴<sup>[5]</sup>,但是近场光收集能力受限于小孔孔径的限制,它的空间分辨率一般大于 50 nm。为克服探针孔径的束缚,研究人员研制了无孔探针型近场光学显微镜<sup>[5]</sup>,主要是干涉型微扰动型,近年文献表明该探测方式的近场光学显微镜已经实现了低于 10 nm 的空间分辨率。利用入射光的偏振性,无孔探针型 SNOM 已用来研究局域磁性薄膜磁畴、等离子共振等问题,但纵向近场磁光克尔效应研究尚不足,究其原因:(1) 散射光探测的背景信号(远场光)较大,而且远场光与磁场的相互作用也进入到探测系统中<sup>[5]</sup>;(2) 入射光偏振方向影响近场光学成像质量,而入射光的偏振方向是受外磁场影响而发生偏转使得入射光的偏振性不确定<sup>[6-7]</sup>。基于上述原因,探讨了一种新的近场光强探测系统。系统采用垂直入射聚集近场光收集方式获取近场光信号,设计在 V 型氮化硅原子力探针背后涂一层金属薄膜,用圆偏振光作为激励信号源,当圆偏振光聚焦到 V 型槽内时,金属表面等离子体沿探针方向在针尖处汇聚形成近场照射光源<sup>[5,8]</sup>,待测表面的近场光强通过探针传导至远场放置的探测系统中。该近场光产生和收集方式将探针的结构信息与远近反射光相位联系起来。通过合理设计探针结构以及控制探针与样品之间的距离,可以有效抑制远场光强提高近场光信号的信噪比。实验表明,所设计系统远场光强可被有效抑制,使近场光学图像横向分辨率优于 12 nm。

## 1 基本原理

### 1.1 入射-收集型无孔光学探针

金属表面等离子体极化激元沿纳米线向其直径缩减方向传导时,导波波长减小使聚集明显,且在顶点

处有巨大的增强,而且小于衍射极限尺度的针尖可将隐失的非传输波转换为可传输波,从而使大体积的光电探测器可以在远场采集近场的空间为超衍射分辨尺度的隐失场信息,因此在扫描近场光学显微镜中,探针即可以作为纳米“点”光源,也可作为近场光收集器件。图 1 为所设计探针结构示意图和时域有限差分法(FDTD)的仿真结果,光学探针是在 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 制作的原子力显微镜探针的 V 型槽的背面镀一层金属薄膜,所对应的锥角为 2θ。当远场激励光被高倍物镜聚集到槽内时,大部分远场光在直径为半个波长处反射回物镜,金属层受激产生等离子激元并沿金属表面汇聚于探针顶端增强形成纳米光源,如图 1(b)所示。

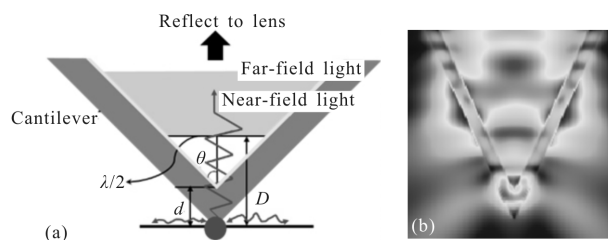


图 1 无孔型近场光学探针(a)和探针顶端增强效应 FDTD 仿真(b)  
Fig.1 Near-field optical apertureless probe (a) and top enhancement of probe by FDTD simulation (b)

以该光源照射样品时,探针在水平方向的扰动使得待测样品表面的近场光可以通过探针传导至物镜焦点并被远场系统探测<sup>[9-11]</sup>。探针收集的近场光和其本身反射的远场光沿入射光原路返回,但是反射的远场和收集的近场光存在光程差,以远场光反射位置(λ/2)为参考点,进入光电探测器的远场反射光与近场探测光之间的相位差 Δp 与探针的结构和针尖与样品的距离有关:

$$\Delta p = 2D/\lambda = \cos\theta/2 + 2d/\lambda \quad (1)$$

式中:λ 为波长;D 为远场光反射位置与样品的距离;θ 为 V 型槽的半锥角。

### 1.2 近场光强探测系统

光电探测器一般置于远场,所收集光信号中通常包含远场和近场信号,而远场光信号又远强于近场光强,因此如何提供近场光强信噪比是高质量和高分辨率近场光学图像的关键问题之一。公式(1)显示近场和远场光信号之间存在相位差,若以圆偏振光作为入射远场光,则相位差会导致所收集的近场

光和远场光偏振面不同,可在远场探测系统用使用偏振性器件对远场光进行抑制。

图 2(a)就是在该思路下设计的近场光强探测系统,线偏振光经过四分之一( $\lambda/4$ )波片和分光棱镜后被注入探针 V 型槽内,远场反射光和近场探测光经过分光棱镜、四分之一波片、空间滤波系统(由一对物镜和光阑构成)、格兰泰勒棱镜和物镜后被光电倍增管接收。利用远场反射光和近场探测光之间的相位差,旋转格兰泰勒棱镜可抑制远场光强,提高近场探测光的信噪比。图 2(b)为旋转格兰泰勒棱镜一周( $360^\circ$ )近场探测光和远场反射光的强度,图中纵坐标是归一化的结果。实验表明近场光与远场光的偏振方向相差  $57^\circ$ ,当旋转格兰泰勒棱镜至  $180^\circ$  时,近场光强与远场光强比超过 100 倍。在具体实际实验中,只需将探针和样品分开,旋转格兰泰勒棱镜使得远场光强输出最低即可。

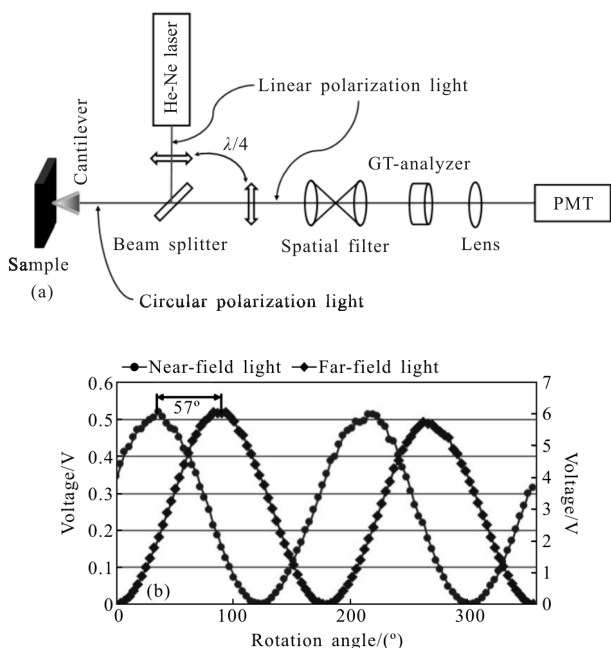


图 2 近场光强探测系统(a)和远场光与近场光相位差(b)

Fig.2 Near-field optical detection system (a) and phase difference between near-field light and far-field light (b)

### 1.3 扫描近场圆偏振光显微镜

为实现对纳米结构进行成像,图 3 为文中所设计扫描近场圆偏振光显微镜示意图,该系统包含光学显微镜、原子力显微镜和近场光学显微等三个子系统。公式(1)和图 2 的结果表明在探针结构一定的情况下,远场反射光和近场收集光的相位差主要受

控于探针与样品之间的距离,为实现探针与样品之间的距离控制,引入原子力显微镜控制系统,通过 PID 伺服控制系统实现探针-样品之间距离的控制。当扫描样品时,文中所设计显微镜可同时显示样品形貌图和近场光学图像。由于探针 V 形槽开口不大(大约  $4\ \mu\text{m}$ ,如 OLYMPUS 公司的 TR400PSA 系列探针),为了使近场光源激励注入槽内,远场激励信号通过光学显微镜聚焦到槽内,物镜的数值孔径尽可能大以便得到更小的光斑。同时,样品和光学探针之间的距离通过检测探针的弯曲实现,与普通商用原子力显微镜光杠杆探测的光路略有不同,文中的原子力探测光也通过物镜聚集到探针上,如图 3 所示。采用这种方式的主要原因是便于将两束不同的光信号聚焦在探针合理的位置,光杠杆的放大倍数  $M$  可通过下式计算:

$$M=2f/L \quad (2)$$

式中: $f$ 为物镜的工作距离; $L$ 为探针的长度。公式(2)显示有长工作距离的物镜和短的探针可以有效提高光杠杆的放大倍数,考虑到物镜同时希望较大的数值孔径以便将远场激励信号注入 V 形槽内,文中选用 NIKON 公司超远工作距离(SLWD)系列物镜。

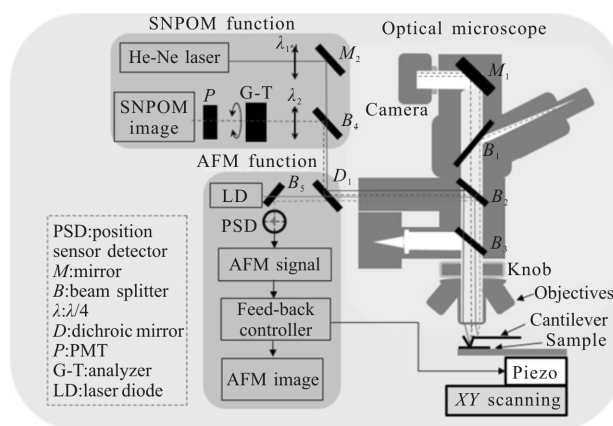


图 3 扫描近场圆偏振光显微镜

Fig.3 Scanning near-field circular polarization optical microscope

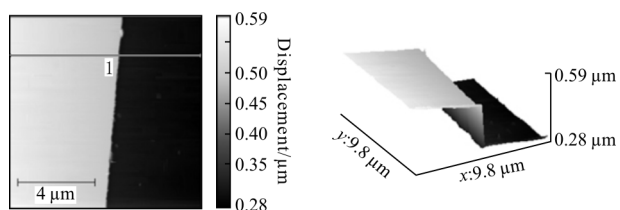
光学显微镜系统的作用就是将探测探针弯曲的绿光( $532\ \text{nm}$ )和远场激励的红光( $633\ \text{nm}$ )聚集在光学探针上。氦氖激光器(He-Ne)发出线偏振光进过四分之一波片( $\lambda_1$ )变为圆偏振光,再通过平面反光镜( $M_2$ )、分光棱镜( $B_4$ )、二向分光棱镜( $D_1$ )、分光镜( $B_1, B_2$ )后被物镜聚焦在探针的 V 型槽内。近场光通过探针收集后沿远场光路原路返回至  $B_4$  处被分一部分光通

过  $\lambda_2$  变为线偏振光,该线偏振光包含了远场反射光和近场收集光,通过格兰泰勒棱镜(G-T)后远场光被尽量抑制,近场线偏振光被光电倍增管收集后通过近场光学成像系统成像。探针控制光从激光二极管发出,通过分光棱镜( $B_5$ )、 $D_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  和物镜聚焦在探针背面。反射光通过原路返回至  $B_5$  处后被位置传感器(PSD)接收转换为原子力信号用于回馈控制和绘制形貌图。实验中样品置于纳米位移扫描台上(PI-P753),实现光栅扫描,探针操作在接触模式,因此公式(1)中的  $d=h\sin\theta$ ,并通过设定 PID 伺服控制器的参考点(Setpoint)实现恒高(恒力)扫描,在探针与样品接触之前旋转格兰特勒棱镜(G-T analyzer)使光电倍增管(PMT)输出至最小即可将抑制远场信息的影响抑制至最低。

## 2 实验结果与分析

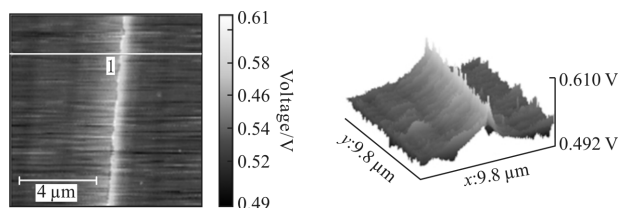
根据公式(1)可知近场光波与远场光波的相位差受探针和样品之间距离的控制。实验使探针工作在接触模式并通过原子力显微镜 PID 伺服系统进行控制,以保持在扫描过程中有恒定的相位差。实验样品制备了台阶和周期两种结构。

图 4(a)和(b)是台阶结构样品在同一时刻和位置通过原子显微镜和扫描近场圆偏振光显微镜所获得的形貌图和近场光学图像。为避免金属材料制备的



(a) 原子力显微镜

(a) Atomic force microscope



(b) 扫描近场圆偏振光学显微镜

(b) Scanning near-field circular polarization optical microscope

图 4 台阶样品的二维和三维形貌与近场光学图像

Fig.4 2D and 3D topography and near-field optical images of a step sample

样品产生附加等离子极化激元,图 4 所测样品为日立公司提供的 Si 校准样品,样品台阶高度为 200 nm,形貌图和近场光学图像的扫描范围均为 10  $\mu\text{m}$ 。对比图 3(a)和(b)可见,在台阶处,近场光强有迅速增强。图 5 为图 4 中形貌图和近场光学图像中标记为“1”处的轮廓,从图中可见,所测台阶高度差为 184 nm,与校准样品相差 16 nm。笔者实验室所用 V 型探针(OMCL-TR400PSA, Olympus)开口宽度为 4  $\mu\text{m}$ ,针尖高度为 2.9  $\mu\text{m}$ ,假设远场光在槽内半波长处返回,则公式 1 中的  $D$  为 435 nm。那么探针-样品之间的控制误差引起的相位误差大约为 0.036 rad ( $\sin(16/435)=0.036$ ),此误差引起近场光强的变化可忽略不计。

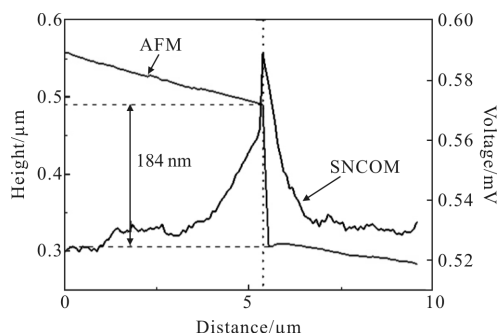


图 5 形貌图与近场光学图像轮廓曲线对比(在图 4 中标记为“1”处)

Fig.5 Line profile of topographic image and near-field optical image of mark line "1" in Fig.4

图 6 为周期结构样品的扫描电子显微镜,原子力显微镜和扫描近场圆偏振光显微镜成像。所用样品是在 Si 基板上沉积一层光刻胶,并用扫描电子显微镜在其上描画出周期性点阵。图 6(a)为扫描电子显微镜成像并作为参考,图(c)和(d)能看出点阵之间的凹处近场光强强于点阵顶部,与图 5 实验结果吻合;且实验系统的形貌图和近场光学图像的空间分辨率优于 12 nm,表明扫描近场偏振光显微镜具有很高的空间分辨率。

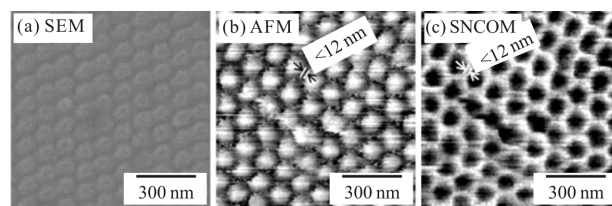


图 6 周期结构样品显微镜成像

Fig.6 Images of microscopes of periodic structure sample

### 3 结 论

文中用圆偏振远场光作为激励信号并采用反射-收集型近场光强探测方式能实现高分辨率近场光学图像。理论分析和模拟表明远场光照射在涂有金属层的 V 型原子力显微镜上会在探针针尖处产生近场光源, 以该光源照射样品并收集的其表面近场光与探针反射的远场光的相位不同, 该相位差由探针结构和探针-样品之间的距离决定, 因此利用偏振性器件可有效抑制远场光强, 得到高信噪比的近场光强信号, 有效提高近场信号的探测效率, 文中实验中是将探针操作在恒高(或恒力)情况下能得到 57° 恒定的相位差。实验还表明结构越复杂, 近场光强信号越明显, 且所设计系统近场光学图像空间分辨率超过 12 nm。但是目前实验结果未能提出探针引起的假象, 成像机理还不十分清楚, 对金属测试样品尚须深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Shiroishi Y, Fukuda K, Tagawa I, et al. Future options for HDD storage[J]. *Magnetics IEEE Transactions on*, 2009, 45(10): 3816-3822.
- [2] Hong Tao, Wang Jia, Li Dacheng. The application of near-field optics in high density data storage [J]. *Optical Technique*, 2011, 27(3): 255-259. (in Chinese)  
洪涛, 王佳, 李达程. 近场光学在高密度存储中的应用[J]. *光学技术*, 2011, 27(3): 255-259.
- [3] Hosaka S, Aramomi Y, Sone H, et al. Nanometer resolution stress measurement of the Si gate using illumination-collection-type scanning near-field Raman spectroscopy with a completely metal-inside-coated pyramidal probe [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(2): 025206.
- [4] Challener W A, Peng C, Itagi A V, et al. Heat-assisted magnetic recording by a near-field transducer with efficient optical energy transfer [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 190-191.
- [5] Takayuki Umakoshi, Yuika Saito, Prabhat Verma. Highly efficient plasmonic tip design for plasmon nanofocusing in near-field optical microscopy [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(10): 5634-5640.
- [6] Wu Xiaoyu, Sun Lin, Tan Qiaofeng, et al. A novel phase-sensitive scanning near-field optical microscope [J]. *Chin Phys B*, 2015, 24(5): 054204.
- [7] Tomas Neuman, Pablo Alonso-Gonzalez, Aitzol Garcia-Etxarri, et al. Mapping the near fields of plasmonic nanoantennas by scattering-type scanning near-field optical microscopy[J]. *Laser & Photonics Rev*, 2015, 9(6): 1-13.
- [8] Johnson T W, Lapin Z J, Beams R, et al. Highly reproducible near-field optical imaging with sub-20-nm resolution based on template-stripped gold pyramids [J]. *Acs Nano*, 2012, 6(10): 9168-9174.
- [9] Aplan Bek. Apertureless SNOM: A new tool for nano-optics [D]. Bilkent: Bilkent University, 2004.
- [10] Dereux A, Devaux E, Weeber J C, et al. Direct interpretation of near-field optical images [J]. *Journal of Microscopy*, 2011, 202(2): 320-331.
- [11] Wu Qinghua, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Influence of polarization of the incident light on imaging of the RSNOM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 513-516. (in Chinese)  
武清华, 王桂英, 徐至展. 入射光的偏振特性对反射式近场光学显微镜成像结果的影响[J]. *光学学报*, 2003, 23(5): 513-516.