

# 突破光学衍射极限, 发展纳米光学和光子学

干福熹<sup>1,2</sup> 王 阳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

**摘要** 信息技术已经进入纳米时代, 纳米光学和光子学正是为满足快速和高密度信息技术的需求而产生、发展的。先进的纳米光学和光子学器件应该是高速、高分辨率和高集成的, 形成各类光学和光子学芯片和盘片。由于器件最小特征尺寸和加工分辨率受限于光的衍射极限, 现有技术已接近实用化技术的理论极限并且成本很高, 只有突破光学衍射极限才能进一步发展纳米光学和光子学。在光的远场和近场应用超分辨率技术, 是当前重要的前沿课题, 它们的应用主要集中于信息技术领域, 具有代表性的是纳米信息存储和光刻中的光学超分辨率技术等。

**关键词** 纳米光学; 纳米光子学; 超分辨率; 光信息存储; 光刻

**中图分类号** TQ597.3; TN305.7 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0900104

## Breaking Through the Optical Diffraction Limits, Developing the Nano-Optics and Photonics

Gan Fuxi<sup>1,2</sup> Wang Yang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** Information technology has entered into the nanometer scale era. Nano-optics and photonics are generated and developed to meet the demands of fast and high density information technology. Advanced nano-optical and photonic devices should be of high speed, high resolution and high integration, forming various types of optical and photonic chips and disks. Because the minimum feature size and processing resolution of optical devices are limited by the diffraction limit, the existing technologies have been approaching to the theoretical limit and the cost is very high. Only breaking through the diffraction limit can further develop nano-optics and photonics. Achieving super-resolution in the far and near optical fields is one of the important academic topics, and its application is mainly focused on the optical super-resolution technologies for the nano information storage and lithography applications.

**Key words** nano-optics; nano-photonics; super-resolution; optical data storage; photolithography

**OCIS codes** 210.4810; 220.4241; 210.1635; 110.5220

## 1 引 言

21 世纪是多媒体信息时代, 大容量、高密度和快速是其显著特征。信息量已经以太位计(1 Tb =  $10^{12}$  bit), 信息数据密度和信息数据流速度分别达到 Tb/cm<sup>2</sup> 和 Tb/s 的量级。当前, 微电子学

(micro-electronics) 已突破 Moore 定律, 进入纳米电子学(nano-electronics)时代, 大规模集成电路的分辨率和制造工艺已精确到纳米尺度(90, 65, 45 和 32 nm)。光子的传播速度( $10^{12}$  cm/s)比电子传播速度( $10^9$  cm/s)快得多, 纳米光学和光子学的发展

**收稿日期:** 2011-07-21; **收到修改稿日期:** 2011-08-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(11054001)资助课题。

**作者简介:** 干福熹(1933—), 男, 光学和材料学家。1980 年当选为中国科学院院士(学部委员)。1993 年当选为第三世界科学院院士。1957 年建立了我国第一个光学玻璃试制基地; 建立了我国耐辐射光学玻璃系列。研制掺钕激光玻璃, 国内第一个获得激光输出并建立了激光钕玻璃系列。是我国光信息存储领域的开拓者。曾获国家自然科学基金三等奖、国家科学进步二等奖、中国科学院科技进步一等奖、国家优秀科技图书特等奖等。1997 年获何梁何利科学和技术进步奖。2001 年获国际玻璃界的终身成就奖国际玻璃协会主席奖。E-mail: fxgan@mail.shnc.ac.cn

可以满足这种快速和高密度信息技术的需求。先进的纳米光学和纳米光子学器件应该是快速、高分辨率和高集成的,形成包括生物芯片、通信芯片、传感芯片和存储芯片等在内的各类光学和光子学芯片和盘片。由于器件最小特征尺寸和加工分辨率受限于光的衍射极限,现有技术已接近实用化技术的理论极限并且成本过高,只有突破光学衍射极限才能进一步发展纳米光学和光子学。在光的远场和近场应用超分辨率技术,是当前重要的前沿课题,它们的应用主要集中于信息技术领域<sup>[1]</sup>。本文将介绍应用于纳米信息存储和光刻的光学超分辨技术。

## 2 光学衍射极限与突破衍射极限的途径

### 2.1 光学衍射极限

光学衍射极限是指一个理想光点经过光学系统成像,由于瑞利衍射的限制,不可能得到理想像点,而是一个夫琅禾费衍射点。这个衍射点的大小  $D$  与光波波长  $\lambda$  成正比、与所用物镜的数值孔径(NA)成反比。相应地,可以定义光学衍射造成的成像分辨率极限。尽管突破衍射极限和超分辨率的涵义并不完全等同,但常常把突破衍射极限的技术统称为超分辨技术。常规光学系统的衍射极限一般为  $\lambda/2$ ,为了缩小光点就需要使用更短的波长和采用更大的数值孔径。例如,分辨率为 100 nm 的光刻系统一般需要波长短于 200 nm 的光源,要达到 50 nm 的分辨率,不仅需要紫外光源,而且数值孔径要大于 1.5(如浸没式光刻技术)。短波长激光器和数值孔径透镜都已经接近目前技术所能达到的极限并且成本很高,例如,一台深紫外浸没式光刻机的价格达 0.2~0.3 亿美元,所以传统技术路线已经面临着巨大的挑战。

### 2.2 突破衍射极限的途径

获得小于衍射极限的有效光斑或刻录点都可以认为是突破了光学衍射极限,主要可以通过远场波前调制、近场聚焦和材料响应三个途径来实现。

远场波前调制,主要通过入射光束的相位、幅度、偏振和相干性等进行调制,获得小于衍射极限的聚焦光斑。光瞳滤波器是常用的远场超分辨元件,采用光瞳遮挡或相位调制技术使衍射光斑的能量分布改变,减小中心零级光斑的尺寸,从而达到提高系统分辨率的效果<sup>[2]</sup>。高数值孔径下由于去偏振效应,线偏振入射光经透镜聚焦后在焦点处还会出现另外两个方向的偏振分量,使得焦点在沿入射光偏振方向上形成拉伸的椭圆光斑,且更大的光斑压缩

率会引起旁瓣升高与光能损失,这限制了其在光存储和光刻等领域的应用,需要使用电子学和光学滤波器匹配降低旁瓣噪声。在高数值孔径透镜聚焦下,径向偏振光可以聚焦到突破衍射极限的  $0.4\lambda$  尺寸,这比线偏振光和圆偏振光聚焦的最小尺寸要小,在光学加工和光存储等领域展现了广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。径向偏振光在介质中聚焦会导致纵向电场矢量强度的锐减和横向分量的大幅提高,在应用中需要对矢量光束和介质进行优化匹配。

光通过普通的光学系统无法聚焦到小于  $\lambda/2$  的一点,但可设法用一小孔来获得这样的光斑,只要这一小孔的孔径足够小。虽然光通过小孔会迅速衍射到各个方向,但在非常靠近小孔的近场区域,光束的束径将等于小孔的尺寸,而与波长无关。如果样品表面被置于这一近场区域内,并利用该近场光点对样品表面进行二维扫描,则可以实现超分辨刻录和读出<sup>[4]</sup>。基于该思路的传统近场超分辨途径包括近场扫描探针(NSOM)、固体浸没透镜(SIL)和微小孔径激光器(VSAL)等。近年来出现了基于人工超常介质和功能结构,如微结构的金属薄膜,产生表面等离子体与光束调制的近场聚焦方案,是亚波长光学的突破性进展<sup>[5]</sup>。

利用功能材料来实现超分辨率和利用特殊光学元件(功能结构)来缩小光斑、提高系统分辨率,最终的分辨能力是由功能材料本身的物理化学特性决定的,典型的例子包括基于材料非线性响应(如双光子吸收和饱和-反饱和吸收等)的超分辨率、基于阈值相变效应的超分辨率和基于表面等离子体效应的超分辨率等。近年来,超分辨功能材料和技术发展迅速,成为具有高实用性的、实现光学超分辨率的最重要的技术途径之一。事实上,利用材料特性来获得超分辨效果在信息存储领域已经获得了长期、广泛的关注,利用磁致超分辨效应的高密度磁光盘在多年前已获得实用。利用材料特性实现超分辨率光存储,最早可追溯到 1990 年 Bouwhuis 等<sup>[6]</sup>的理论工作。计算表明,聚焦激光通过非线性光学特性材料(掩模)后,在近场区域可得到更加锐利的光斑,可望将之应用于光盘超分辨读取。1992 年,SONY 公司利用相变材料在只读式光盘中成功实现了掩模超分辨率,线密度提高两倍以上<sup>[7]</sup>。此后,出现了基于多层薄膜结构的近场超分辨光存储方法<sup>[8]</sup>,在利用非线性掩模层减小有效光斑的同时,通过一层很薄的介质层(厚度小于  $\lambda/10$ )来控制近场,巧妙地解决了常规近场高速扫描中飞行高度的控制问题。基于超

分辨功能材料薄膜的超分辨率方案目前已经成为国际公认的最具实用性的下一代大容量光盘存储的重要技术方案之一，通过拓展可望在超分辨纳米光学制造、光学成像等领域中获得应用。

单一地从远场、近场或材料着手，大幅度提高分辨率是非常困难的，因此必须从一个全新的角度去看待这个问题。通过两种或以上超分辨技术的组合，在激光与材料相互作用中实现超分辨率是一个重要的突破途径。近年来在纳米光刻领域引起重点关注的双光束刻录技术<sup>[9~11]</sup>，与受激辐射损耗(STED)显微镜的原理相似<sup>[12]</sup>，是利用了刻录材料的饱和非线性以及远场相位的调制而实现，具有 $\lambda/20$ 线宽的光刻能力，但其大幅度提高刻录分辨率的代价是光能量损耗加大。在实际应用中，综合利用远场和近场超分辨技术，进一步融合材料的超分辨效应来大幅度提高光刻录或光存储的分辨率，有望在实现高于 50 nm 分辨率的同时保持较高的光能利用效率。

### 3 光学超分辨技术在纳米信息存储和光刻中的应用

当前，每年所产生的信息量以指数方式上升，其速度高于存储器件总容量的增长速度，如何存储越来越多的信息是一个重大课题。信息存储以其所使用的驱动能不同可分为光存储、磁存储和电存储三类，分别侧重于不同的应用领域。随着对存储密度和容量提升需求的日益迫切，三类存储器对光学超分辨技术都有不同程度的需求。

在磁存储技术中，由于超顺磁效应，难以获得纳米尺度的稳定磁畴。为了突破这一限制，近年来发展了垂直磁记录、激光辅助磁记录和图案化磁记录等技术。超高密度磁存储用的磁头和图案化存储介质对加工工艺提出了更高要求，达到纳米精度，需要采用超分辨率的光刻技术。激光辅助磁记录技术中缩小激光光斑的尺寸对获得更高存储密度和降低串扰起着重要作用，超分辨光学技术和磁头技术的集成，特别是在近场高速飞行的条件下，是实现光磁混合记录一个极具挑战性的课题。

电存储器件大多是基于 CMOS 半导体工艺而制成的，存储密度取决于最小记录单元的尺寸，光刻分辨率是主要限制因素，发展分辨率增强和光学超分辨技术显得至关重要。光盘是目前最主要的光存储器件。各种光盘的读写装置(驱动器)中，物镜和盘片之

间的距离远大于激光波长，应视为远场存储，其信息点的大小与光波波长成正比、与所用物镜的数值孔径成反比。因此，要提高存储密度和存储容量，主要通过缩短激光波长和增大物镜的数值孔径来实现。从光存储技术的发展历程看，第一代 CD 系统(波长 780 nm, 数值孔径 0.45)、第二代 DVD 系统(波长 650 nm, 数值孔径 0.6)到最新的第三代 BD 系统(波长 405 nm, 数值孔径 0.85)，5 inch(1 inch=2.54 cm) 盘的单面存储容量从 CD 的 650 MB(最小记录点尺寸 830 nm, 存储密度约为 0.4 Gb/inch<sup>2</sup>)、DVD 的 4.7 GB(最小记录点尺寸 400 nm, 存储密度约为 2.5 Gb/inch<sup>2</sup>)，上升到 BD 的 25 GB(最小记录点尺寸 149 nm, 存储密度约为 14 Gb/inch<sup>2</sup>)。然而，由于光学衍射极限效应的制约，传统的光存储已接近其存储密度的极限。开发更短波长的半导体激光器和更大数值孔径的光学头物镜也会遇到很大的技术难题，同时也会给光盘盘基、存储材料和光学信号检测等带来诸多难以克服的问题。所以传统技术路线正面临着巨大的挑战。分辨率要达到纳米级别，需要探索突破光学衍射极限发展超分辨纳米光信息存储的新技术。

与光盘存储技术类似，光刻技术也主要以缩短激光波长和增大数值孔径为主要手段来实现高分辨率，目前主要采用紫外光源和浸没式物镜，下一步可能会采用极紫外甚至软 X 射线光源来实现 22 nm 节点以下的光刻。事实上，采用光学超分辨技术，即使采用可见光甚至红外波段的激光，采用非浸没式光学系统也可以实现纳米尺度的激光刻录。通过探索超分辨光学超精密加工新原理、新方法、新材料和新工艺，可望利用可见光光源(波长为 400~800 nm)和数值孔径 NA 小于 1 的半导体激光刻写装置，实现高速(米每秒级)、大面积(大于 $\phi 8$  inch)的纳米结构(最小特征尺寸为 30~50 nm)加工，为超高精度光学制造技术提供新的思路。

#### 3.1 超分辨相位板

Francia<sup>[13]</sup>首次提出了光瞳超分辨技术，建立了相关超分辨光瞳滤波器的理论基础。在光存储应用领域，Yamanaka 等<sup>[14]</sup>最早提出利用狭缝光阑压缩主斑，滤掉旁瓣而应用于光盘超分辨记录和读出。相位型超分辨光阑是在获得同样超分辨效果的情况下，能获得 Strehl 比(超分辨衍射斑中心峰值强度与未加超分辨光阑时中心峰值强度的比值)最高的一种技术，适于光存储应用。在高密度光存储系统中，为了提高存储密度，通常在高密度光存储系统中采用高数值孔径物镜和短波长的激光光源，这使焦深减小，增加了伺服系统的跟踪难度。Wang

等<sup>[15,16]</sup>采用光强均匀分布照明光源和基于近轴近似的标量衍射理论研究相位型超分辨光阑的焦深调节功能,指出三区域纯相位板法可以加大焦深。Gao 等<sup>[17,18]</sup>在此基础上利用矢量衍射理论系统研究了在高数值孔径情况下同轴分区相位板对光学焦点轴向光强分布的影响。选择适当的几何尺寸可以使焦深提高约 3 倍。在几何尺寸一定的情况下,通过控制高斯光束的束腰可以使焦深提高约 4 倍。

干福熹曾经在 2004 年于上海召开的国际音、视电子高层论坛和同年于武汉召开的国际光电子高层论坛上向工业界提出采用超分辨技术路线、开发我国自有知识产权的高清光存储技术(NVD)的建议,该系统可以利用成熟的红光系统达到蓝光光盘技术所实现的高清存储。要达到红光高清的目标,可以通过在光学头中加入超分辨光阑来实现。超分辨光阑易于大规模制造,成本低廉,且无需对原有光头系统做太多修改,是非常具有应用前景的技术途径之一。周常河等<sup>[19]</sup>针对该应用设计、制作了光盘读取头用超分辨相位板,艾里斑和超分辨衍射斑点的光强与半径的变化曲线如图 1 所示。该课题组在 NA 为 0.65 的超分辨光存储读取系统中对商用 DVD 光盘进行了动态读取测试,在光束与 DVD 光盘相对移动时,超分辨光斑仅有细微的变化,光盘凹坑边界对光斑主瓣的影响很小。

超分辨相位板还可以应用于轴对称偏振光(如径向偏振光)系统,通过对入射光瞳进行调制,进一步提高径向偏振光大数值孔径聚焦时的超分辨性能<sup>[20]</sup>。通过对光场的相位和偏振态的综合调制,可以对聚焦点进行三维调制,实现三维超分辨纳米光刻或光存储。

### 3.2 表面等离子体光刻和光存储

当改变金属表面的微观结构时,表面等离子体激元(SPP)的性质将产生重大的变化。通过调节和

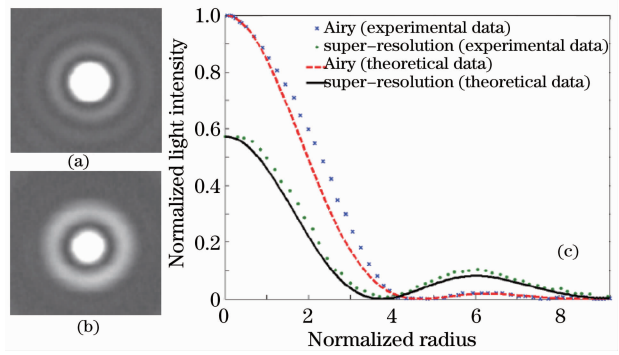


图 1 相位板超分辨。(a)艾里斑实验结果;(b)相位板超分辨光斑实验结果;(c)艾里斑和超分辨衍射模式下光强与半径的变化曲线  
Fig. 1 Super-resolution by phase plate. (a) Airy disk; (b) super-resolution light spot obtained by phase plate; (c) normalized intensity versus normalized radius for different light spots

改变微结构的材料或其结构特性,能够实现对光传播的操控。1998 年 Ebbesen 等<sup>[21]</sup>报道了光通过金属薄膜上单孔径或者大小为亚波长尺寸的洞阵列结构的金属板时的透射增强现象,认为是 SPP 的激发导致了增强的倏逝场。随后,表面等离子体光学功能结构开始在超分辨光刻、成像和存储等领域广受关注。Tominaga 等<sup>[22]</sup>发现,利用激光诱导分解产生的金属纳米颗粒的表面等离子体增强效应可以实现超分辨光存储中的信号增强。Luo 等<sup>[23]</sup>提出了表面等离子体共振干涉纳米光刻技术,该技术利用具有短波特性的 SPP 的干涉效应产生超精细光场进行超分辨光栅条纹刻写。Zhang 等<sup>[24]</sup>利用 Ag 薄膜制作了光学超透镜,可得到分辨率达到照明光波长 1/6 的清晰像,此后还发展了基于飞行扫描光学头的等离子体纳米光刻技术<sup>[25]</sup>。Wei 等<sup>[26]</sup>报道了基于 Ag 表面等离子体超透镜效应的只读式超分辨光盘技术,如图 2 所示。

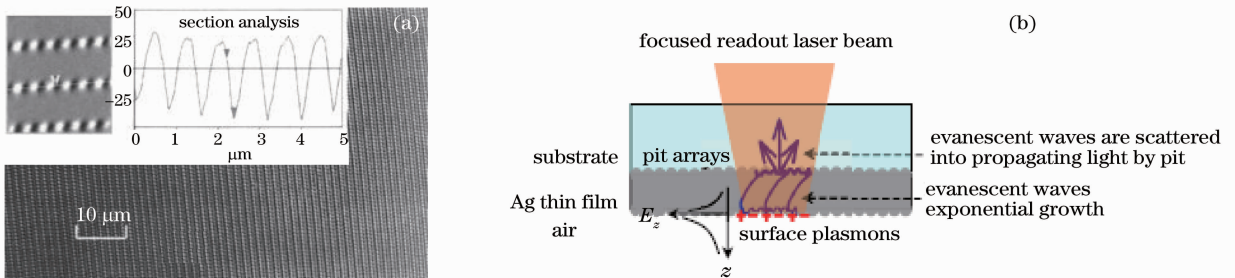


图 2 基于 Ag 表面等离子体超透镜效应的超分辨光存储。(a)Ag 超分辨只读式光盘,(b)超分辨读出原理示意图  
Fig. 2 Super-resolution optical disk based on a silver superlens. (a) Read-only memory optical disk with Ag layer; (b) schematic principle of dynamic readout of subdiffraction-limited pit arrays by surface plasmons

### 3.3 非线性超分辨光存储和光刻

基于光学非线性效应的超分辨材料如硫系玻璃薄膜主要利用非线性材料的非线性折射或吸收特性来减小聚焦光斑、实现亚衍射极限的分辨率。利用硫系玻璃薄膜的三阶非线性效应可以获得亚衍射极限的聚焦光斑。Song 等<sup>[27]</sup>利用近场扫描显微镜直接观测到了透过  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃(厚度  $1.7 \mu\text{m}$ )后光斑的压缩,实验光学系统的衍射极限半峰全宽(FWHM)为  $3.45 \mu\text{m}$ ,而获得的聚焦斑最小尺寸可达  $0.3 \mu\text{m}$ 。非线性效应形成的梯度折射率分布和自聚焦可能是其主要原因。利用硫系玻璃的非线性吸收特性也可以获得超分辨光斑。Nagase 等<sup>[28]</sup>发现利用 CdSSe 掺杂玻璃的饱和吸收特性,可以将透过光斑的 FWHM 压缩 25% 以上。通过材料优化(如超细纳米粒子工艺)可望进一步提高压缩效率。Wei 等<sup>[29]</sup>发现硫系相变材料 AgInSbTe 具有典型

的反饱和和吸收性质,载流子吸收导致等效多光子吸收可能是其非线性机制。利用近场光斑扫描观察到了透过 AgInSbTe 薄膜后近场光斑的限幅效应,且透过光斑的顶端被抑制和平滑,数值模拟证实这一过程是来源于 AgInSbTe 的反饱和吸收特性。利用 AgInSbTe 的非线性吸收特性和阈值相变特性,可以实现约  $\lambda/10$  分辨率的光刻<sup>[30]</sup>,图 3 为 AgInSbTe 薄膜上非线性能量吸收斑和原始光斑的对比(数值模拟),可以缩小到原来的 2/5。此外,由于硫系玻璃的光学非线性效应可以被超快激光脉冲诱导产生,所以响应时间只有几百飞秒<sup>[31]</sup>。除了硫系玻璃材料,利用多光子吸收和聚合材料也可实现非线性超分辨光刻,飞秒激光双光子聚合三维微细加工技术成为近期的研究热点之一<sup>[32]</sup>。基于光学非线性效应的超分辨材料在超快和超高密度光刻和光存储方面具有广阔的应用前景。

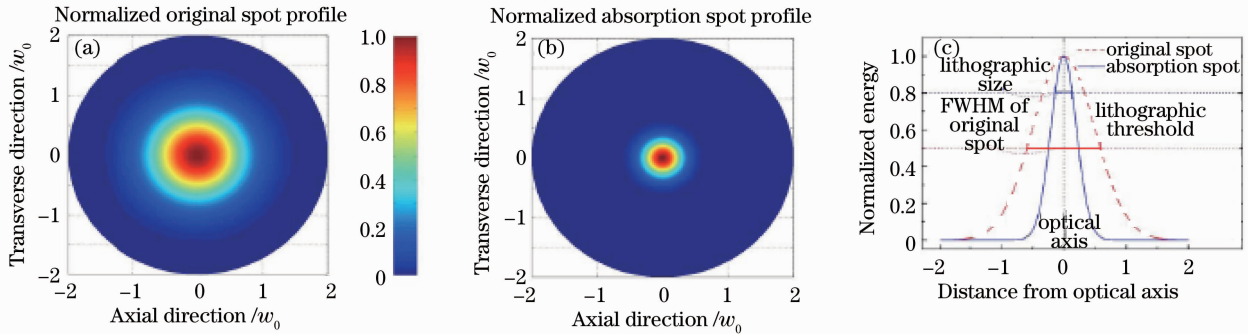


图 3 非线性吸收亚波长激光直写的计算结果。(a)原始光斑;(b)有效能量吸收斑;(c)有效能量吸收斑与原始光斑的对比  
Fig. 3 Calculated results of the nonlinear absorption sub-wavelength direct laser writing. (a) Original spot profile; (b) effective energy absorption spot profile; (c) comparison of effective energy absorption spot with original spot in cross-section profile

### 3.4 相变光刻

相变材料在聚焦激光作用下能发生快速结构转变,且结构变化的界面厚度能够控制在原子尺度。这也意味着相比传统的有机大分子光刻胶材料,在相变材料上进行纳米刻蚀所获得的结构速率更快、表面轮廓更加清晰,非常适合于超分辨纳米光记录(光刻)。相变除了指固、液、气三相之间的转变还包括不同晶相间的转变(如晶态-非晶态转变)。某些材料发生相变具有明显的阈值,通过控制诱导相变的临界条件可以实现阈值相变。利用阈值相变获得超分辨效果的典型例子是热虹蚀掩模效应<sup>[33]</sup>。在光盘动态读出过程中,由于作用时间更长,光斑后部的温度要高于光斑前部的温度,当光斑后部的温度达到掩模层的熔点时,处于光斑后部的掩模从固态变为液态,由于相变材料层的融化态(液态)反射率要远低于其晶态(固态)的反射率,因此从光斑后部

处反射回来的光的强度大大降低,相当于光斑后部被掩盖,从而减小了光斑的有效尺寸,可以读出更小的记录点。研究表明,这种“热虹蚀”相变可以由超快激光脉冲来诱导,且转变时间快(在纳秒量级)、具有较好的反复循环性<sup>[34]</sup>。除了固-液相转变,Tomimaga 等<sup>[35]</sup>提出了基于固态相变的超分辨机制,利用相变薄膜在第二转变(如 GeSbTe 从 NaCl 型面心立方转变为六方晶体结构)中的光学对比度差异可以实现固态“开孔”。除了激光直写(或曝光)获得超分辨效果,利用晶态和非晶态区域对某些腐蚀剂和刻蚀气体的化学响应,可以进一步缩小相变刻录点的尺寸。硫系介质作为光刻介质应用于微加工,最早在 1976 年由 Nagai 等<sup>[36]</sup>提出,目前已成为超高密度光盘刻录中的核心技术<sup>[37]</sup>。研究表明,通过控制相变条件(包括激光条件和后续腐蚀工艺等),可以获得比相变区域更小的凸起或凹坑型浮雕结构<sup>[38]</sup>,这是一

种优良的无机光刻材料。图 4 为通过刻蚀剂优化后在 GeSbTe 相变介质表面上获得的光栅结构,在该刻蚀剂中,10 min 后,晶态和非晶态刻蚀选择比可达 20 倍以上,刻蚀后表面粗糙度小于 2 nm<sup>[39]</sup>。

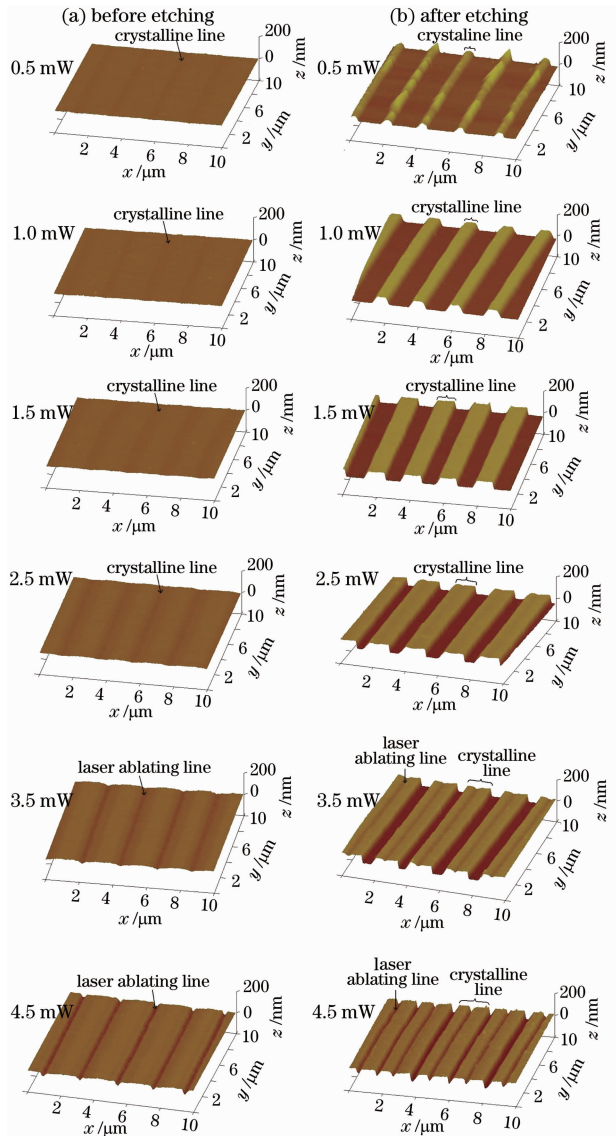


图 4 不同功率下 Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> 非晶态薄膜上激光晶化线的刻蚀结果

Fig. 4 AFM images of crystalline lines that were crystallized with laser power of 0.5~4.5 mW in the amorphous Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> films before and after etching

### 3.5 双光束光刻

利用材料在两束不同激光诱导下的激发和抑制效应,可以实现超分辨刻录<sup>[9~11]</sup>。一束波长 800 nm 的飞秒激光用来诱导聚合物的交联反应,同时使用另一束同波长的连续光抑制这一反应过程,最终叠加的效果是形成一个远小于单光束焦斑的聚焦点,实现多光子吸收聚合刻录。其横向和纵向的分辨率

都十分理想,沿光轴方向的分辨率小于 40 nm,即达到  $\lambda/20$  纵向分辨率<sup>[9]</sup>。该研究中,激光束的整形(环形)采用简单的二元光学元件相位板实现,通过优化设计就可以在各个维度上实现超分辨率。通过材料改进,甚至可以使光刻分辨能力在各个维度上达到 10 nm 左右。

不利用多光子吸收效应也可以实现双光束超分辨激光直写。Scott 课题组<sup>[10]</sup>发展了基于光聚合物的单光子吸收增强-抑制双光束超分辨激光刻录技术,可获得横向 64 nm 的线宽。相对于双光子吸收光刻过程而言,单光子吸收效应曝光反应速度快,适合高速、大面积纳米器件的制作。

除了光聚合物,采用光致变色介质也可以实现双光束纳米光刻,这种材料具有两种同质异构的分子结构,在紫外和可见光的照射下能够进行相互的转换。可见光采用传统的高斯光束,而紫外光采用相位板进行光束整形形成环形光束,当两种波长的激光以干涉的方式照射在光致变色膜上,只在环形紫外光的内部节点位置形成一个透明窗口,可见光可以有效地通过这个窗口并对底层的光敏材料进行曝光。一般情况下,曝光窗口的尺寸与紫外光和可见光能量的比值成反比关系,在合适的光强比值下,可以实现接近  $\lambda/10$  的刻写能力,如图 5 所示<sup>[11]</sup>。

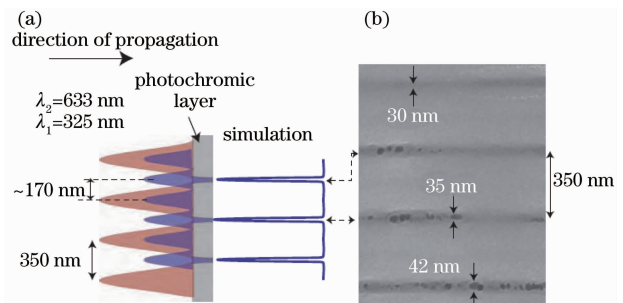


图 5 基于光致变色材料的双光束刻录。(a) 双光束叠加形成驻波;(b) 曝光线的扫描电镜图

Fig. 5 Two beams sub-wavelength patterning using photochromic materials. (a) Two overlapping standing waves on photochromic layer; (b) scanning electron micrograph of lines under-exposed in photoresist

### 3.6 近场-远场相结合的超分辨技术

利用材料这个媒介将远场光束调制技术和近场超分辨技术结合起来是一个新的超分辨概念<sup>[40]</sup>,不仅增加了一个自由度去控制超分辨聚焦光斑,而且建立了新的像差校正技术。通过远场自适应光学元件相位与偏振综合控制和近场表面等离子体效应的结合可以有效减小系统像差,尤其是非线性像差。

近场和远场相结合的超分辨方法主要从两个步骤控制聚焦光斑：1)在入射光束通过高数值孔径的镜头进入非线性介质进行刻写之前，采用自适应光学元件将入射的线性偏振光转换为径向偏振光，然后通过相位和振幅波带片对照明光束的偏振态和相位同时进行调制；2)在记录介质的表面镀制表面等离子体功能薄膜(如 Ag 膜)，调制照明光入射之后，就会激发表面等离子体波，从而在焦平面产生去偏振化的效应。如图 6(a)所示，焦平面位置附近入射光侧向分量的场分布存在很强的旁瓣，纵向偏振分量则

具有很强的中心斑，如图 6(b)所示。焦平面位置附近的 Ag 膜相当于一个表面等离子体滤波器，能够透射纵向偏振分量而反射绝大部分的侧向偏振分量，因此在通过滤波器之后，径向偏振光的侧向旁瓣得到了有效的抑制，从而得到一个超衍射极限的聚焦光斑，如图 6(c)所示。如果对远场技术的波带片和近场超分辨薄膜做进一步的优化，可以进一步地减小聚焦光斑。通过从远场和近场两方面去设计超分辨光学器件，可以达到最佳的效果。

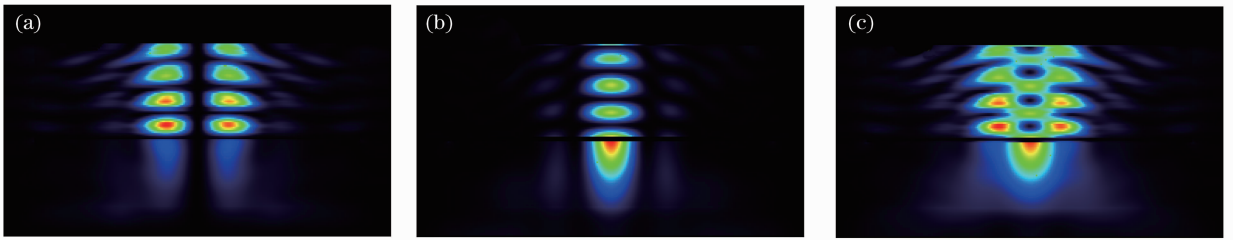


图 6 近场-远场相结合的超分辨图。(a)光场侧向分量；(b)光场纵向分量；(c)表面等离子体薄膜的滤波效应

Fig.6 Combination of the far-field beam modulation techniques and near-field super-resolution, (a) Lateral polarized component of focused spot; (b) longitudinal polarized component of focused spot; (c) super-resolution focused spot through a surface plasmon thin film filter

#### 4 结论和展望

光子学器件与光学器件的主要区别在于：光学器件主要工作于弱电磁场，利用其线性的、自发的和非相干辐射特性；而光子学器件主要工作于强电磁场，利用其非线性、受激的和相干辐射特性。随着器件特征尺度减小，其光子学特征将更加明显。

只有突破光学衍射极限才能进一步发展纳米光学和光子学。在光的远场和近场应用超分辨率技术，是当前重要的光学前沿课题，但它们的应用主要集中在信息技术领域，如应用于纳米信息存储和光刻的光学超分辨技术等。超分辨技术在光学和光子学器件中的应用可以提高其集成度和速度。

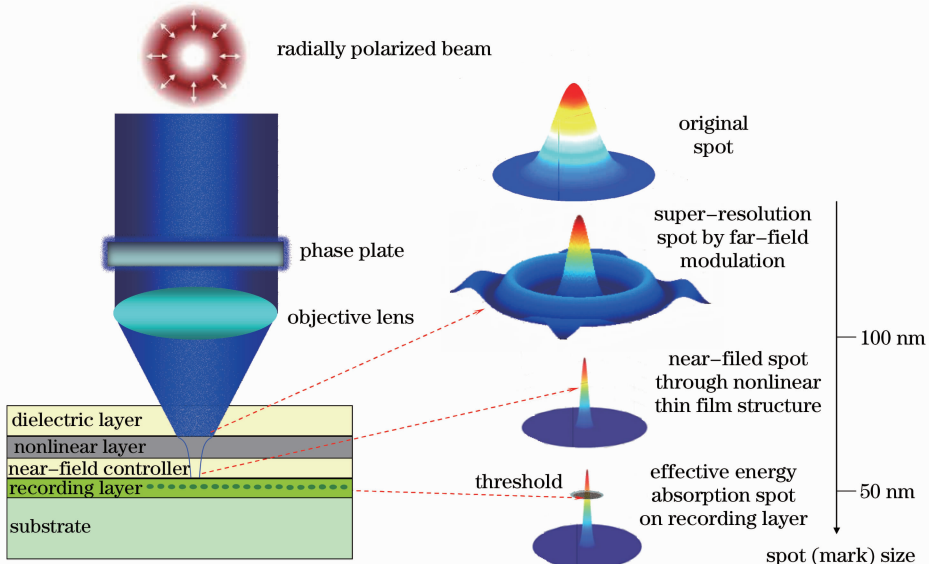


图 7 一种近场-远场相结合实现超分辨纳米光存储的技术方案示意图

Fig.7 Schematic approach to achieve nano optical data storage by combining near-field and far-field super-resolution technologies

在信息技术领域中应用的超分辨技术应该具有较强的实用性,利用简单的系统和工艺来实现高分辨率和高效率是极具挑战性的。单一地从远场、近场或材料着手是非常困难的,通过各种超分辨技术的有机结合,在激光与材料相互作用中实现超分辨率是一个重要的突破途径。图7为一种近场-远场相结合实现超分辨纳米光存储的技术方案示意图。

相关科研人员应从突破衍射极限的光学行为和机制入手,解决超分辨物理、材料及其器件中的基本科学问题,并在此基础上探索超分辨集成关键技术应用,为我国的纳米光学和光子学材料及器件技术的发展做出前瞻性、基础性的贡献。

### 参 考 文 献

- 1 R. Menon. Towards diffraction-unlimited optical nanopatterning [J]. *Optics and Photonics News*, 2009, **20**(12): 17~18
- 2 H. F. Wang, F. X. Gan. New approach to superresolution[J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(5): 851~855
- 3 H. F. Wang, L. P. Shi, B. Lukyanchuk *et al.*. Creation of a needle of longitudinally polarized light in vacuum using binary optics[J]. *Nature Photon.*, 2008, **2**(8): 501~505
- 4 E. Betzig, J. Trautman, R. Wolfe *et al.*. Near-field magneto-optics and high density data storage[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(2): 142~144
- 5 W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824~830
- 6 G. Bouwhuis, J. H. M. Spruit. Optical storage read-out of nonlinear disks[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(26): 3766~3768
- 7 K. Yasuda, M. Ono, K. Aratani *et al.*. Premastered optical disk by superresolution[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1993, **32**(11B): 5210~5213
- 8 J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato *et al.*. The near-field super-resolution properties of an antimony thin film[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2*, 1998, **37**(11A): L1323~L1325
- 9 J. T. Fourkas, L. J. Li, R. R. Gattass *et al.*. Achieving  $\lambda/20$  resolution by one-color initiation and deactivation of polymerization[J]. *Science*, 2009, **324**(5929): 910~913
- 10 R. R. McLeod, T. F. Scott, B. A. Kowalski *et al.*. Two-color single-photon photoinitiation and photoinhibition for subdiffraction photolithography[J]. *Science*, 2009, **324**(5929): 913~917
- 11 R. Menon, T. L. Andrew, H. Y. Tsai. Confining light to deep subwavelength dimensions to enable optical nanopatterning[J]. *Science*, 2009, **324**(5929): 917~921
- 12 S. W. Hell, J. Wichmann. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(11): 780~782
- 13 G. T. Di Francia. Super-gain antennas and optical resolving power[J]. *Il Nuovo Cimento* (1943-1954), 1952, **9**(3): 426~438
- 14 Y. Yamanaka, Y. Hirose, H. Fujii *et al.*. High-density recording by superresolution in an optical disk memory system [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20): 3046~3051
- 15 H. F. Wang, F. X. Gan. High focal depth with a pure-phase apodizer[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31): 5658~5662
- 16 H. F. Wang, F. X. Gan. Phase-shifting apodizers for increasing focal depth[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(25): 5263~5266
- 17 X. M. Gao, Z. Fei, W. D. Xu *et al.*. Focus splitting induced by a pure phase-shifting apodizer[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **239**(1-3): 55~59
- 18 X. M. Gao, Z. Fei, F. Zhang *et al.*. Tunable focal depth of an apodized focusing optical system[J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(6): 063001
- 19 Zhou Changhe, Cao Youyou, Di Caihui. Optical disk pickup head with superresolution phase plate [P]. China Patent, CN201035986, 2008. 3. 12  
周常河, 曹由由, 底彩慧. 采用超分辨位相板的光盘读取头[P]. 中国专利, CN201035986, 2008. 3. 12
- 20 Cheng Kan, Tan Qiaofeng, Zhou Zhehai *et al.*. Design of three-dimensional superresolution diffractive optical elements for radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3295~3299  
程 侃, 谭峭峰, 周哲海 等. 径向偏振光三维超分辨衍射光学元件设计 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3295~3299
- 21 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667~669
- 22 J. Tominaga, D. Buechel, T. Nakano *et al.*. Readout characteristics and mechanism of light-scattering-mode super-RENS disks[C]. *SPIE*, 2000, **4081**: 86~94
- 23 X. G. Luo, T. Ishihara. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(23): 4780~4782
- 24 X. Zhang, N. Fang, H. Lee *et al.*. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, **308**(5721): 534~537
- 25 W. Sritravanich, L. Pan, Y. Wang *et al.*. Flying plasmonic lens in the near field for high-speed nanolithography[J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, **3**(12): 733~737
- 26 J. S. Wei, F. X. Gan. Dynamic readout of subdiffraction-limited pit arrays with a silver superlens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(21): 211101
- 27 K. B. Song, J. Lee, J. H. Kim *et al.*. Direct observation of self-focusing with subdiffraction limited resolution using near-field scanning optical microscope [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3842~3845
- 28 T. Nagase, S. Ashida, K. Ichihara. Super-resolution effect of semiconductor-doped glass [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 1999, **38**(3B): 1665~1668
- 29 J. S. Wei, J. Liu. Optical nonlinear absorption characteristics of AgInSbTe phase change thin films[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(8): 083112
- 30 J. S. Wei, J. Liu, X. B. Jiao. Subwavelength direct laser writing by strong optical nonlinear absorption and melt-ablation threshold characteristics[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(24): 241105
- 31 M. Frumar, T. Wagner. Proceedings of the 13th International Symposium on Non-Oxide Glasses and New Optical Glasses: preface[J]. *J. Non-Cryst. Solids.*, 2003, **326-327**: vii~viii
- 32 Dong Xianzi, Chen Weiqiang, Zhao Zhensheng *et al.*. Femtosecond laser two-photon micro/nano-fabrication and its applications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(1): 2~13  
董贤子, 陈卫强, 赵震声 等. 飞秒脉冲激光双光子微纳加工技术及其应用 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(1): 2~13
- 33 S. Kawata, H. B. Sun, T. Tanaka *et al.*. Finer features for functional microdevices-micromachines can be created with higher resolution using two-photon absorption [J]. *Nature*, 2001, **412**(6848): 697~698
- 34 F. X. Zhai, F. Y. Zuo, H. Huang *et al.*. Optical switch formation in antimony super-resolution mask layers induced by picosecond laser pulses[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(1):



014209

- 35 J. Tominaga, T. Shima, M. Kuwahara *et al.*. Ferroelectric catastrophe: beyond nanometre-scale optical resolution [J]. *Nanotechnology*, 2004, **15**(5): 411~415
- 36 H. Nagai, A. Yoshikawa, Y. Toyoshima *et al.*. New application of Se-Ge glasses to silicon microfabrication technology [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**(3): 145~147
- 37 A. Kouchiyama, K. Aratani, Y. Takemotoi *et al.*. High-resolution blue-laser mastering using an inorganic photoresist[J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 2003, **42**(2B): 769~771
- 38 J. S. Wei, A. H. Dun, F. X. Gan. Pattern structures fabricated on ZnS-SiO<sub>2</sub>/AgO<sub>x</sub>/ZnS-SiO<sub>2</sub> thin film structure by laser direct writing technology [J]. *Appl. Phys. A-Mater.*, 2010, **100**(2): 401~407
- 39 C. Deng, Y. Geng, Y. Wu. Selective wet etching of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> phase-change thin films in thermal lithography with tetramethylammonium[J]. *Appl. Phys. A*, 2011, DOI 10.1007/s00339-011-6377-1
- 40 X. Y. Gao, X. S. Gan. Modulation of evanescent focus by localized surface plasmons waveguide[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 22726~22734