

# 近场高密度光存储\*

鲁拥华<sup>1</sup> 明海<sup>1</sup> 蔡定平<sup>2</sup> 林威志<sup>2</sup>

(1 中国科学技术大学物理系 合肥 230026)

(2 台湾大学物理系)

**摘要** 文章综述了近场高密度光存储领域的研究进展情况,着重介绍了固体浸没透镜(solid immersion lens, SIL)存储方案和近场超分辨结构(super resolution near-field structure, SuperRENS)的原理、研究进展及问题。

**关键词** 近场,光存储,固体浸没透镜,近场超分辨结构

## NEAR-FIELD HIGH-DENSITY OPTICAL STORAGE

LU Yong-Hua<sup>1</sup> MING Hai<sup>1</sup> TSAI Ding-Ping<sup>2</sup> LIN Wei-Chi<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(2 Department of Physics, National Tai Wan University, China)

**Abstract** Recent progress in near-field high-density optical storage is reviewed. In particular, the principles, research and open questions concerning near-field storage using a solid immersion lens and the super resolution near-field structure are discussed.

**Key words** near-field, optical storage, solid immersion lens, super resolution near-field structure

### 1 概述

从1982年 Philips 和 Sony 公司推出第一张数字激光唱盘(CD-DA)开始,激光存储技术给信息技术领域带来了革命性的影响。激光存储产品历经了 CD-DA, CD-I, VCD, DVD 等,存储密度不断上升。现在,双面双层的 DVD 单盘存储容量已达到 17Gbits。美国 Trend Focus 公司的调查报告显示,存储密度的增长由 1990 年之前的每十年增长 10 倍的速度已变为目前的每十年增长 100 倍。到目前为止,光存储技术都可以统一称为远场存储技术,存储密度的提升最终将受到 Rayleigh 衍射分辨率极限( $0.61\lambda/N.A.$ )的限制。因此,为了满足不断增长的市场需求而寻求新的光存储原理和克服 Rayleigh 极限的限制变得尤为迫切。1992 年,IBM 的 E. Betzig 等用近场扫描显微镜(SNOM)在磁光介质(Co/Pt)上进行了近场的记录和读出实验,存储点的大小约为  $60\text{nm}$ <sup>[1]</sup>,估计的数据存储密度约为  $45\text{Gbits/in}^2$ 。从此,近场光存储技术成为光存储研究的一个重要发展方向,并在近几年内取得了一系列的进展<sup>[2-4,6]</sup>。

为实现近场记录和读取,存储系统必须满足以下两个条件:首先,要形成一个纳米级的透光小孔;

其次,要控制透光孔和记录介质之间的距离在  $\lambda/10$  左右。满足了上述的两个条件以后,存储点的大小只取决于透光孔的尺寸而不受 Rayleigh 极限的约束。这两点要求也正是近场光存储的关键与难点。在 E. Betzig 的工作中,他们运用 SNOM 来满足以上的两点要求。虽然明显地减小了存储点的大小,但该系统的缺点也同样是明显的:激光通过光纤探针的衰减极大(透过率只有约  $10^{-6}$ — $10^{-3}$ ),从而严重地限制了该系统的写入速度;复杂的近场间距控制系统也限制了 SNOM 存储的应用。

为使近场存储技术更加接近实用,研究者提出了一系列的方案以克服上述的限制,其中以固体浸没透镜存储和近场超分辨结构光盘技术最具前途,因而它们也倍受研究者的关注。

### 2 固体浸没透镜存储

固体浸没透镜(SIL)是一种齐明透镜(即没有像差的透镜),它通常有两种几何形状:半球形和超半球形(如图 1 所示)。从原理上,固体浸没透镜与油浸

\* 国家重大基础科研项目(批准号:G1999033002)

2001-09-03 收到初稿 2001-12-04 修回

透镜并无太大的区别,都是通过提高物空间的材料折射率来增大透镜的数值孔径,但固体浸没透镜由于不和物体直接接触,可以和物体作相对扫描运动,因此更适用于光存储.固体浸没透镜的存储方式是将一个固体浸没透镜插入到光盘读写头的聚焦透镜的下方,并让激光正好会聚到 SIL 的平面上,这样可以提高光学头的有效数值孔径,减小光斑的尺寸.半球型 SIL 可以使光学头的数值孔径提高为 SIL 插入前的  $n_{\text{SIL}}$  倍 ( $n_{\text{SIL}}$  是 SIL 的折射率)<sup>[2]</sup>,而超半球型 SIL 则由于激光在 SIL 的球面上要发生折射而增大激光的会聚角  $\theta_{\text{max}}$ ,从而使光学头的数值孔径增大为 SIL 插入前的  $n_{\text{SIL}}^2$  倍<sup>[3]</sup>.包含 SIL 的光学头的数值孔径通常都要大于 1,这时,激光透过 SIL 的底面后将产生倏逝波.为使 SIL 有效地发挥作用,SIL 的底面与存储介质之间的间距要保持在近场距离之内,但近场小孔在这里并不存在,所以固体浸没透镜存储方式通常被认为是一种准近场方法.

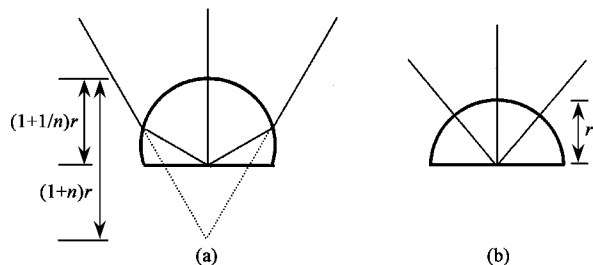


图 1 固体浸没透镜(SIL)结构示意图

(a)超半球形结构 (b)半球形结构  
( $r$  为球半径,  $n$  是 SIL 的材料折射率)

S. M. Mansfield 和 G. S. Kino 在 1990 年首先将半球型 SIL 应用于固体浸没显微镜(SIM)<sup>[4]</sup>,明显提高了成像的分辨率.随后在 1993 年用半球型 SIL 进行了近场存储实验<sup>[2]</sup>.1994 年,B. D. Terris 等将超半球型 SIL 应用于近场存储,用 780nm 光源记录并读出了 317nm 的存储点( $n_{\text{SIL}} = 1.83$ )<sup>[3]</sup>.而且,他们在 1996 年报道了超半球型 SIL 的动态存储实验结果<sup>[5]</sup>.在文献[5]中,他们首先给出了 SIL 飞行光学头设计.如今,气动悬浮飞行头设计已成为 SIL 近场存储中近场距离保持的主要手段.日本 Sony 公司的研究人员也报道了这种 SIL 悬浮飞行头的详细设计<sup>[7]</sup>.在理论分析和设计方面,由于 SIL 光学头的数值孔径很大,标量光学方法显得不够准确,矢量光学分析及直接的数值解法是比较合适的选择<sup>[8,9]</sup>.图 2 为用角谱方法计算的线偏振光透过 SIL 后的近场光场各分量的分布<sup>[9]</sup>,从此分布中可以看出 SIL 不但

可以在近场范围内有效地减小光斑的大小,而且还可以很好地保持入射激光的偏振方向.

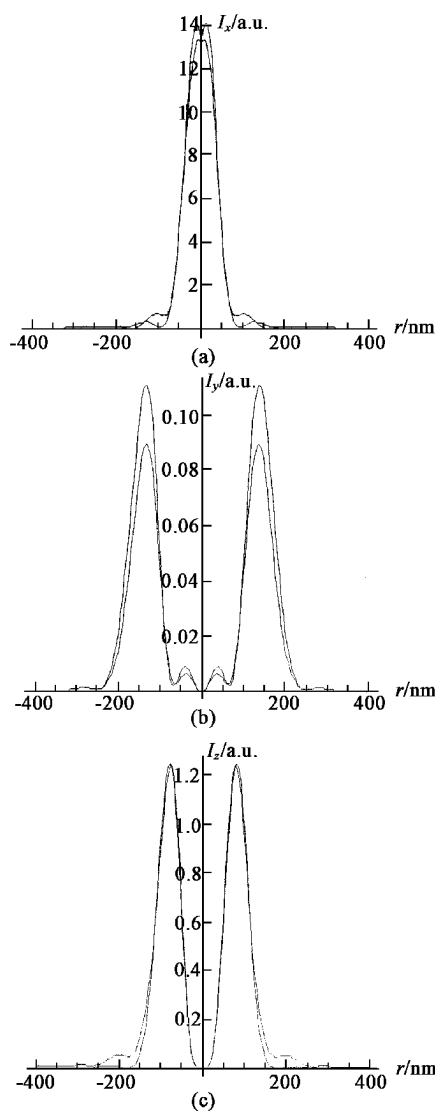


图 2 角谱方法计算的 SIL 的近场矢量光场的各偏振分量的强度分布

(a)出射光沿  $x$  方向的偏振分量强度 ( $I_x$ ) 分布;  
(b)出射光沿  $y$  方向的偏振分量强度 ( $I_y$ ) 分布;  
(c)出射光沿  $z$  方向的偏振分量强度 ( $I_z$ ) 分布  
( $\lambda$  射光的偏振矢量沿  $x$  方向)

从目前的研究状况来看,光学飞行头设计的 SIL 近场存储方案在原理上已无重大困难.虽然它可能无法达到 SNOM 探针那样高的存储密度,但它克服了 SONM 探针透光率低、读写缓慢的缺点,而且它与现存的光盘机的兼容性要优于 SNOM 系统.如何设计稳定可靠的 SIL 飞行光学读写头可能是现在 SIL 存储研究的一个重点,有待于研究者的进一步努力.

### 3 近场超分辨结构(SuperRENS)光盘

#### 3.1 近场超分辨结构光盘原理

近场超分辨结构光盘是由日本的 J. Tominaga 于 1998 年首次提出的<sup>[6]</sup>。通过在常规相变光盘的相变记录层上加入三明治式的非线性层(如 SiN/Sb/SiN),可以方便地实现近场光存储。近场超分辨结构光盘的原理可以类比于光纤探针的近场存储结构来理解(如图 3)。探针式近场存储是通过利用一根周围镀有金属反射膜(通常为 Al 膜)尖端留有 20nm—100nm 的小孔的光纤探针在光盘上进行信息的读写,当探针和光盘的距离满足近距离要求(通常要小于 100nm)时,记录位的大小近似为针尖小孔的大小。该方案中的关键在于制造纳米级的通光小孔和控制该孔与记录介质之间的距离在近场距离之内。当我们把光纤探针和光盘看作一个整体时,如果利用镀膜技术把探针的小孔做在光盘上(也即近场超分辨结构的方式),同样也可以实现近场光学存储,只不过这时候的通光小孔要能够动态地产生和消失(近场超分辨结构就是利用 SiN/Sb/SiN 来实现的)。近场超分辨结构的优点是显然的(1)通过调整介质膜的厚度可以很方便地改变通光孔与记录介质的距离,克服了常规近场存储时近场间距控制困难;(2)由于整个近场结构都做在光盘片上,所以可以很

的结果。

#### 3.2 近场超分辨结构光盘研究进展

从 1998 年至今,日本的 J. Tominaga 小组先后提出了两种结构的超分辨结构光盘体系(1)透过式:SiN/Sb/SiN/GeSbTe/SiN<sup>[6]</sup>;(2)散射式:SiO<sub>2</sub>-ZnS/AgO<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>-ZnS/GeSbTe/SiO<sub>2</sub>-Zn<sup>[10]</sup>,并且都获得了很好的存储效果。图 4 显示了透过式近场超分辨结构的超衍射分辨极限的存储特性<sup>[11]</sup>。它可以分辨出 90nm 的记录点,载噪比约为 10dB。但是由图 4(b)可以看出,读出激光的功率必须要高于某一阈值才能

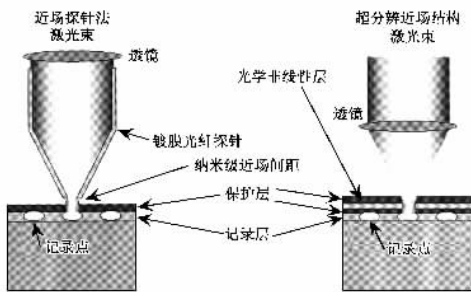


图 3 近场超分辨结构和近场探针存储方式的类比(左边是近场探针存储的模型,右边是近场超分辨结构的模型,两者的功能结构极其相似)

好地与现在的光盘存储器保持兼容(3)由于通光小孔是由动态夹层的非线性光学响应动态产生的,因此可以通过改变入射激光的功率来方便地改变通光孔的大小,从而改变记录位的大小。从近场超分辨结构的原理可以看出,非线性夹层的特性在其中起着至关重要的作用,所以,近几年来,针对近场超分辨结构的非线性夹层中的物理过程进行研究,已成为近场超分辨结构研究的重点,并获得了一些有意义

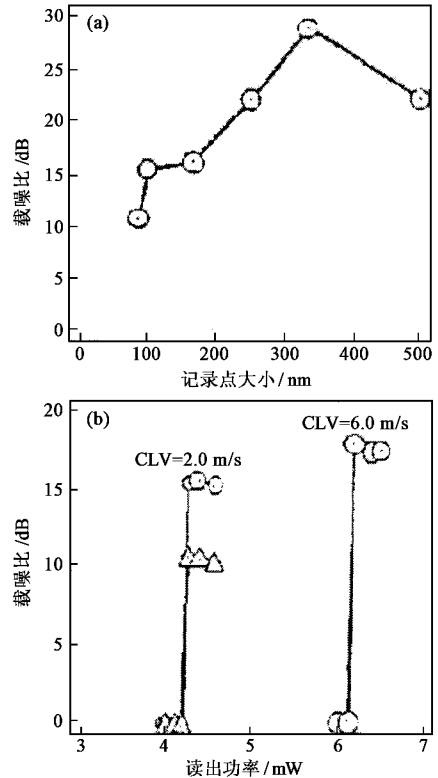


图 4

(a) 读出信号的载噪比随记录点大小变化的关系,读出时的恒线速度(constant linear velocity)CLV=2.0m/s;  
(b) 读出信号的载噪比随读出功率的变化  
(图中符号○对应于 100nm 的记录点,符号△对应于 90nm 的记录点)

读出超衍射分辨率的信号。从目前的研究结果来看,这两种结构的非线性层具有不一样的物理机制。透过式近场超分辨结构的非线性介质层 Sb 膜在激光的作用下会发生从晶态到无定形态的转变,相应地,薄膜的介电系数、透光率也发生变化,从而在 Sb 膜上等效应地打开了一个超衍射极限的“透光孔”,并且上述过程会在激光撤离之后可逆地进行。散射型的近场超分辨结构的近场小孔的形成则有完全不同的机制,AgO<sub>x</sub> 薄膜在激光的照射加热下会发生分解反

应  $\text{AgO}_x \leftrightarrow \text{Ag} + \text{O}$ , 分解成的  $\text{Ag}$  颗粒或其团簇作为散射中心, 从而完成近场的光学记录或读出. 由于  $\text{AgO}_x$  薄膜被夹在两层电介质薄膜之间的封闭空间内, 上述的分解反应在激光撤离之后可以逆向进行. 但是由于  $\text{AgO}_x$  的分解温度为  $160\text{--}200^\circ\text{C}$ , 这正好是记录介质  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  的相变温度, 从而记录点的稳定性大大降低. 所幸通过向  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  膜中少量掺杂氧(O)可以提高  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  膜的相变温度, 并因此可以提高散射型近场超分辨结构的稳定性<sup>[12]</sup>. 从近场超分辨结构的原理可以看出, 其关键在于要制作一层在激光作用下光学性质会发生可逆变化的薄膜. 目前试图用有机染料制作近场超分辨结构的实验也有报道<sup>[13]</sup>, 而且这种超分辨技术在磁光记录中也被证明是有效的<sup>[14]</sup>.

### 3.3 近场超分辨结构的机理研究

近场超分辨结构的机制是目前近场超分辨结构研究的一个重点. 这一方面台湾大学的蔡定平研究小组和日本的 Tominaga 小组已发表了一些研究结果, 初步判定近场超分辨结构光盘的性能与非线性夹层的非线性光学行为( nonlinear optical behavior )有关, 而且表面等离子体增强效应( surface plasmon enhancement )在其中有重要的影响<sup>[15-17]</sup>. 蔡定平小组用 tapping 模式的扫描近场光学显微镜( SNOM )测量了激光透过近场超分辨结构的非线性夹层后的光强和光强梯度的分布<sup>[18]</sup>( 光强梯度与倏逝光场相关 ), 随着入射激光强度的增加倏逝光场也明显增强( 见图 5 ). 另外, 他们还观察到明显的光场增强现象如图 6 所示, 图中透过  $\text{SiO}_2 - \text{ZnS}/\text{AgO}_x/\text{SiO}_2 - \text{ZnS}$  的近场光强是透过玻璃的 2.5 倍, 这些现象可能是表面等离子体增强的结果. 关于近场超分辨结构的非线性光学响应, Tominaga 小组于 1999 年运用共焦 Z 扫描的方法首先对 Sb 膜的非线性光学响应作了初步的研究<sup>[19]</sup>. 2001 年台湾大学蔡定平小组给出了  $\text{AgO}_x$  薄膜的共焦 Z 扫描研究的结果<sup>[16]</sup>, 并且进一步地研究了近场超分辨结构样品的动态非线性光学响应过程. 这些研究结果都显示了近场超分辨结构的非线性层在激光的作用下, 其透光性变化具有明显的非线性特性. 另外, 熊曹水等利用 X 射线衍射方法研究了  $\text{AgO}_x$  薄膜在加热下的分解过程, 给出了该薄膜的 X 射线衍射谱随温度变化的移动结果<sup>[20]</sup>. Tominaga 小组最近的研究还表明, 非线性层两侧的电介质层性质对近场超分辨结构的性能也有重大影响<sup>[21-22]</sup>, 比如对透射型的近场超分辨结构, 压力

型的  $\text{SiN}$  膜比张力型的  $\text{ZnS} - \text{SiO}_2$  膜会得到更好的超衍射分辨率读出信号. 为了清楚地理解近场超分辨结构中的详细物理过程, 必须要做更进一步的观察和测量, 相信这些实验结果不仅对光存储研究而且对集成光学的研究也是非常有益的.

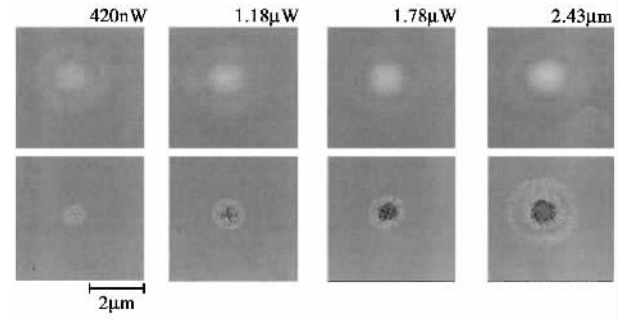


图 5  
上行是近场超分辨结构 [玻璃/ $\text{SiN}$  (170nm)/ $\text{SiN}$  (15nm)/ $\text{SiN}$  (20nm)] 透过光强的近场图像;  
下行是该近场超分辨结构的近场光强梯度图像  
(上行和下行对应的激光功率从左往右依次增强)

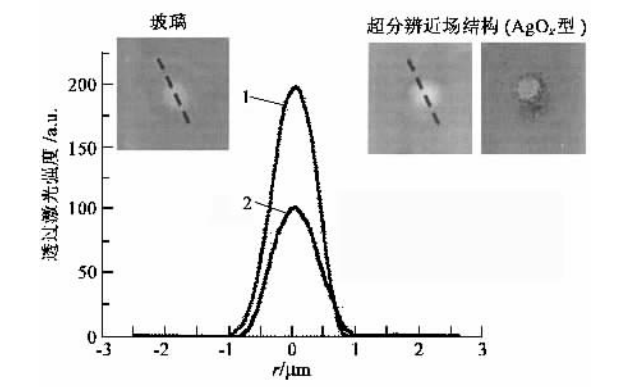


图 6 激光透过玻璃/ $\text{SiO}_2 - \text{ZnS}/\text{AgO}_x/\text{SiO}_2 - \text{ZnS}$  后在近场区域发生明显的增强现象  
(图中曲线 1 对应于激光透过玻璃/ $\text{SiO}_2 - \text{ZnS}/\text{AgO}_x/\text{SiO}_2 - \text{ZnS}$  后的近场光强; 曲线 2 对应于激光透过盖玻片后的近场光强)

近场光存储技术中除了上面总结的 SIL 存储和 SuperRENS 以外, 最近发展的 VSAL( very small aperture laser )<sup>[23]</sup> 也是一项值得关注的近场技术, 它利用聚焦离子束在半导体激光器的前端面( 一般为金属膜 )上刻出亚波长的小孔作为近场光源. 由于 VSAL 中没有光纤探针中的锥尖损耗, 且 VSAL 中的小孔和谐振腔相连, 从而可以提高光子的利用率, 因此 VSAL 出射的激光功率可比相同小孔的光纤探针高 3—4 个数量级( 250nm 宽的 VSAL 出射激光功率可达  $1\text{mW}$ <sup>[23]</sup> ). 由于 VSAL 的端面是平面, 如果要将它应用到近场光存储中去, 在近场间距控制等方面它

和 SIL 方案面临着相似的技术问题. 综合比较起来, 近场超分辨结构无疑是目前最有效、前景最光明的近场存储技术. 不过近场超分辨结构所涉及的许多物理过程还有待于进一步研究, 以期获得更小的存储点和更高的读出载噪比. 近场光学技术应用于光存储领域将有可能实现人们的太比特 ( $T_{bit}$ ,  $1 T_{bit} = 10^{12} \text{bit}$ ) 存储密度的梦想. 近场光存储的研究还可能为光刻技术提供新思路.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1992, 61 ( 2 ):142  
 [ 2 ] Mansfield S M, Stuenkel W R *et al.* Opt. Lett. ,1993, 18( 4 ): 305  
 [ 3 ] Terris B D, Mamin H J, Rugar D *et al.* Appl. Phys. Lett. 1994, 65 ( 4 ):388  
 [ 4 ] Mansfield S M, Kino G S. Appl. Phys. Lett. 1990, 57( 24 ):2165  
 [ 5 ] Terris B D, Mamin H J, Rugar D. Appl. Phys. Lett. ,1996, 68( 2 ): 141  
 [ 6 ] Tominaga J, Nakano T, Atoda N. Appl. Phys. Lett. ,1998, 73( 15 ): 2078  
 [ 7 ] Kojima N, Mizuno T, Hitosugi T *et al.* Optical Data Storage Topical Meeting 2001, Santa Fe, New Mexico, April 2001, 271  
 [ 8 ] 谢建平, 鲁拥华, 王沛等. 光学学报( 待发表 ) [ Xie J P, Lu Y H, Wang P *et al.* Acta Optica Sinica( to be published ) in Chinese ]]

[ 9 ] Yeh W H, Mansuripur M. Appl. Opt. 2000, 29( 2 ):302  
 [ 10 ] Fujii H, Tominaga J, Nakano T *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. ,2000, 39 ( part 1 ) 980  
 [ 11 ] Tominaga J, Nakano T, Atoda N. SPIE, 1998, 3467 282  
 [ 12 ] Men L, Tominaga J, Fujii H. Jpn. J. Appl. Phys. , 2000, 39 2639  
 [ 13 ] Hatakeyama M, Ando T, Tsujita K *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. 2000, 39 :752  
 [ 14 ] Kim J H, Buechel D, Nakano T *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2000, 77 ( 12 ):1774  
 [ 15 ] Liu W C, Wen C Y, Chen K H *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2001, 78 : 685  
 [ 16 ] Ho F H, Lin W Y, Chang H H *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. , 2001, 40 ( 6A ):134  
 [ 17 ] Fukaya T, Buchel D, Shinbori S *et al.* J. Appl. Phys. ,2001, 89 : 6139  
 [ 18 ] Tsai D P, Lin W C. Appl. Phys. Lett. 2000, 77 :1413  
 [ 19 ] Fukaya T, Tominaga J, Nakano T *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999, 75 3114  
 [ 20 ] 熊曹水, 熊永红, 赵天鹏等. 中国激光( 待发表 ) [ Xiong C S, Xiong Y H, Zhao T P *et al.* Chinese Journal of Lasers( to be published ) in Chinese ]]  
 [ 21 ] Tominaga J, Fujii H, Sato A *et al.* Jpn. J. Appl. Phys. ,2000, 39 : 957  
 [ 22 ] Tominaga J, Fujii H, Sato A. Jpn. J. Appl. Phys. ,1999, 38 :4089  
 [ 23 ] Partovi A, Peale D *et al.* Appl. Phys. Lett. ,1999, 75 :1515

· 物理新闻 ·

## 对胸部肿瘤的计算机辅助诊断法 ( Computer-Aided Diagnosis of Breast Cancer )

超声波扫描是诊断胸部肿瘤的初始阶段, 对于恶性肿瘤来说, 必须作活组织检验或其他直接侵入人体的检测才能作出最后的结论. 近来美国芝加哥大学以 K. Horsch 和 M. Giger 为首的科学家们利用超声波数据在计算机上作进一步的研究, 他们利用计算机自动对肿瘤的状况进行诊断分类, 这种方法称为计算机辅助诊断法( computer-aided diagnosis, CAD ).

肿瘤的形状、组织结构、清晰度以及其边缘处的光滑程度等都会对超声波信号作出不同的响应, 这就是自动诊断分类的科学根据. 当然, 不论是医学专家还是计算机仅仅依靠这些特征对肿瘤的性质作诊断是不够的, 一般来说还要考虑许多其他的因素. 为了考证 CAD 方法的可靠性, 科学家们分析了 400 个胸部肿瘤的病例, 每一个病例提供了 1—6 个超声波扫描图像. 结果表明, CAD 方法对恶性肿瘤诊断的正确率达到 95%, 对良性肿瘤诊断的正确率为 60%. 同时他们还将此方法与早期用于诊断恶性肿瘤的 X 射线辐射法作了比较, CAD 方法也要比它好. 因此专家们认为把这两种方法结合起来就能对恶性肿瘤作出较好的诊断, 并可减少既昂贵又伤身体的活组织检查法.

( 云中客摘自 Medical Physics 4 February 2002 )