

软 X 射线偏振光学元件*

王占山^{1 †} 崔明启² 付绍军³ 夏绍建⁴

(1 同济大学精密光学工程技术研究所 物理系 上海 200092)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100038)

(3 中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230038)

(4 中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 介绍了 50—2000eV 软 X 射线能区偏振光学元件的发展现状, 阐述和分析了几种偏振光学元件的性能, 并说明了这些偏振光学元件的应用.

关键词 软 X 射线, 多层膜, 磁性薄膜, 偏振元件, 磁圆二色

Polarizing optical elements for soft X-rays

WANG Zhan-Shan^{1 †} CUI Ming-Qi² FU Shao-Jun³ XIA Shao-Jian⁴

(1 Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100038, China)

(3 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230038, China)

(4 Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The status of polarizing optical elements for soft X-rays ranging from roughly 50 to 2000eV is reviewed. The performances of optics including linear polarizers, phase retarders based on multilayer interference structures, and circular polarizing filters based on magnetic circular dichroism are described. The applications of these polarizing optical elements are discussed.

Keywords soft X-ray, multilayer, magnetic film, polarization component, magnetic circular dichroism

1 引言

在 50—2000eV 的软 X 射线能区, 有磁性金属材料 Fe、Co 和 Ni 的 2p 吸收边、稀土元素 3d 吸收边以及磁性材料中含有的 B、C、O、N 的 1s 吸收边^[1,2]. 在软 X 射线能区进行偏振测量可以获得磁性材料的许多特性, 这对于研究超快、大容量磁光存储器件特别重要. 因此, 近年来, 测量不同材料(尤其是磁性和生命物质)对入射偏振软 X 射线强度和偏振状态的变化已成为越来越多的同步辐射中心研究的热点. 这一工作的深入和发展开创了一些新的实验方法, 如软 X 射线能区法拉第旋光效应、克尔效应和磁显微镜等^[3-5]. 要实现这些测量, 必需发展

软 X 射线能区的偏振光学元件.

在可见光和紫外光波段, 可用透明材料(如 MgF₂, LiF)的双折射特性制成起偏器、检偏器和相移片. 在 20—100eV 的真空紫外能区, 应用镜面全反射临界角附近的多次反射可制成偏振元件^[6,7]. 在硬 X 射线区(3keV 以上), 可用硅、金刚石和石墨单晶 45°附近的反射制成起偏器和检偏器, 同样条件下的透射也可以制成相移片^[8,9]. 在软 X 射线能区, 镜面全反射临界角变小, 偏振元件所需较大掠入射角处的反射率很低, 无法用多次反射方法制成偏振元件, 同时, 任何材料的吸收又限制制成类似于硬

* 国家自然科学基金(批准号: 10435050, 60378021)资助项目

2004-12-09 收到初稿, 2005-04-03 修回

† 通讯联系人. Email: wangzshie@online.sh.cn

X 射线的相移片。

软 X 射线多层膜是由两种材料组成的一维人造晶体结构,晶格常数在纳米量级,是天然晶体向低能端的延续,可有效地增加非掠入射条件下的反射率,是软 X 射线能区重要的光学元件。在约 45° 入射角时,它对 s 偏振光的反射率比 p 偏振的反射率高几个数量级,因此,可制成反射式多层膜起偏器和检偏器。透射式多层膜能在 s 偏振光和 p 偏振光间引入一定的相位差,从而构成相移片。利用磁性薄膜的磁二色性,可在确定的波长处,制成线偏振到圆偏振转化的四分之一相移片。

为了实现偏振测量,需用偏振元件构成偏振测量装置。要全面测量光源与材料的偏振特性,需要先用相移片将入射光引入一定的相移,再用检偏器检验光偏振状态的变化。相移功能只有透射式多层膜可实现,反射和透射多层膜都可以组成检偏器。软 X 射线偏振测量装置有两类,其一是相移片为透射式多层膜,检偏器为反射式多层膜^[10],其二是相移片和检偏器都为透射式多层膜^[11]。虽然透射元件具有不改变光路方向的优点,但其制作的困难和效率限制了它的广泛使用。目前,偏振测量主要是在同步辐射上完成的,同步辐射本身的偏振特性以及光学元件很少会将偏振光变成非偏振光,因此,在一些实验中,没有对入射光引入一定的相移,而是直接采用检偏器测量同步辐射光源的偏振特性^[12]和材料的偏振变化^[13]。

2 多层膜反射式偏振元件

软 X 射线多层膜能实现非掠入射反射率的极大提高,通过设计和制作,可以保证多层膜在不同入射角度下得到高反射率。在约 45° 准布儒斯特角处, s 偏振光的反射率 R_s 比 p 偏振光的反射率 R_p 大几个量级。当光以准布儒斯特角入射时, s 偏振光会反射,而 p 偏振光几乎不反射,这一功能与可见光中透射检偏器的功能一致,只是在软 X 射线能区是反射。设计多层膜起偏器和检偏器时,主要是要多层膜工作在准布儒斯特角位置。衡量多层膜起偏器和检偏器性能的指标有表示光通过率的 s 偏振光的反射率 R_s 和表示偏振效果的偏振度 R_s/R_p 。

软 X 射线反射式起偏器和检偏器是由起反射作用的散射层材料和起支撑作用的间隔层材料堆叠起来的纳米多层膜。随着能量的增加,多层膜内每层膜的厚度逐渐减小,最薄接近 1nm,因此,在选择组成多层膜材料时,除了吸收尽可能小,折射率差尽可

能大的光学标准外,还要求两种材料易于形成光滑稳定的界面,不发生相互反应和扩散。经过上述考虑后,可在软 X 射线能区找到满足性能要求的多层膜材料组合。

图 1 是计算得到的软 X 射线能区检偏器的偏振特性^[10],不同能区有不同的材料组合,在间隔层材料的吸收边处, s 偏振光的反射率达到最大,如在 12.4nm Si 的吸收边处, Mo/Si 多层膜的反射率最大,在 4.4nm C 的吸收边处, Fe/C 多层膜反射率最大。随着软 X 射线能量的增加,多层膜偏振度逐渐增大。在图 1 中,没有考虑到 W/B₄C 的组合, W/B₄C 可形成非常光滑的界面,即使在不成连续膜的情况下,也可有较好的反射,因此是较高能量软 X 射线波段不可缺少的偏振元件^[14,15]。在能量低于 B 的吸收边时, La/B₄C 是非常好的材料组合,可得到 R_s 和 R_s/R_p 都高的偏振元件^[16]。

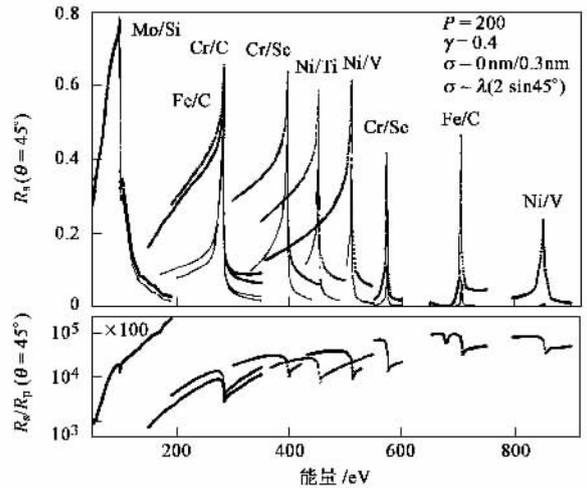


图 1 上图是在入射角 45° 时,不同材料组合的理想界面(表面粗糙度均方根值 $\sigma=0\text{nm}$)和非理想界面(表面粗糙度均方根值 $\sigma=0.3\text{nm}$)多层膜在周期为 200、散射层材料厚度与周期比是 0.4 时, s 偏振光的反射率随能量的变化;下图是在相同条件下, s 偏振光的反射率与 p 偏振光的反射率之比随能量的变化

在固定能点使用多层膜起偏器和检偏器时,入射角与准布儒斯特角匹配能给出最佳的性能。当入射角与准布儒斯特角不匹配时,偏振元件的性能将会降低。为了避免这个缺点,可用两块多层膜^[17]或在同一块基板上不同位置镀制不同周期的多层膜^[18],实现在较宽能区内的偏振元件。

在制作过程中,有许多误差会影响多层膜起偏器和检偏器的性能,这些误差主要为每层膜的厚度误差,不同工艺制备的薄膜光学常数差别,杂质对膜层尤其是低折射率膜层光学常数的影响,薄膜内界

面的粗糙度造成的散射损失,两种材料间的混合和扩散产生的界面处光学常数的连续变化等.要制作高质量的多层膜偏振元件,需在镀膜过程中控制工艺条件,使得每层膜的厚度尽可能与理论值相一致,同时保证膜层内含有较少的杂质,且膜层界面光滑,相互扩散小.现在采用的多层膜制作方法有热蒸发和溅射法.图2是到目前为止,已经制成的不同能量下不同材料的多层膜的反射率值^[10].图中的每一点代表不同能量下的一种 d 值的多层膜,图中还画出了不同元素的吸收边,在每一种材料的吸收边处都得到了最高的反射率值.例如:在 90eV 的 Si 吸收边处,可达到 70% 的反射率,在 C 的吸收边处,可得到大于 20% 的反射率,在更高的能量区域, $d = 1.2\text{nm}$ 的 W/B₄C 有 1.6% 的反射率.

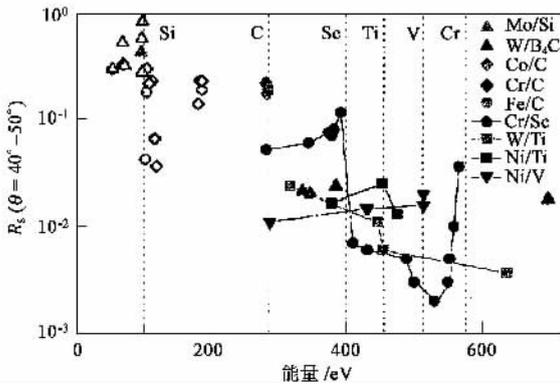


图2 到目前为止,实际制作的不同能量处的多层膜偏振元件 R_s 反射率

3 多层膜透射式偏振光学元件

当多层膜的布拉格反射角与准布儒斯特角重合时,多层膜对入射 s 偏振光有极强的反射,而对 p 偏振的光几乎没有反射.若多层膜镀在半透明衬底上,透射的软 X 射线主要是 p 偏振光,这表明在透射方式运用时,多层膜也是一种起偏器或检偏器.但其性能不如反射式起偏器.上面关于反射式偏振多层膜的讨论都可以用到透射偏振元件上,只是在制作过程中多了一个制作衬底或自支撑多层膜的过程.

除了可作起偏器和检偏器外,透射式多层膜更重要的应用是作相移片.在布拉格反射角附近,透射式多层膜可在 s 偏振和 p 偏振透射光之间引入一个相位差 Δ .当 $\Delta = 90^\circ$ 时,就是可见光范围内四分之一波片的含义,可将线偏振光完全转变为圆偏振光,或者将圆偏振光转变为线偏振光.这种效应与单轴晶体的双折射效应非常相似.当一束线偏振光入射

到透射式多层膜上时,在接近干涉峰值最大的布拉格角度时, s 偏振的光在多层膜结构内表现出很大的驻波调制,从而产生强的反射,而 p 偏振则几乎没有这种驻波调制,因此反射率很低.不同的驻波将使物质内电子加速到不同的振幅,产生不同的传播速度,最终导致 s 偏振和 p 偏振光之间存在一定的相位差^[19].在入射角大于布拉格角时,驻波场的波幅位于多层膜的间隔层材料中,当入射角小于布拉格角时,驻波场的波幅位于多层膜的吸收层材料中.这样,在入射角大于布拉格角时, s 偏振的光落后于 p 偏振光,在入射角小于布拉格角时, s 偏振的光超前于 p 偏振光.图3给出了在 95eV 时周期为 8.74nm、周期数为 30、表面粗糙度为 0.6nm 的自支撑 Mo/Si 多层膜 s 偏振与 p 偏振光之间的相位差随入射角的变化.增加多层膜的周期数,可以增加相位差,但同时会减小透射率.随着能量的增加,透射多层膜 s 偏振和 p 偏振光的相位差急剧地减小,这主要是由于多层膜膜层的不完整性减少了散射作用,部分是由于随着波长的减少不同材料间光学常数差别减小.四分之一波片和二分之一波片的功能只在 50—100eV 波段有报道^[20],但这时的透射率只有 1% 左右,在其他波段还没有.但作为偏振测量,只有几度的相移也是可以的.调节入射角可以实现不同能量下的相移,但可调节范围很小^[21].

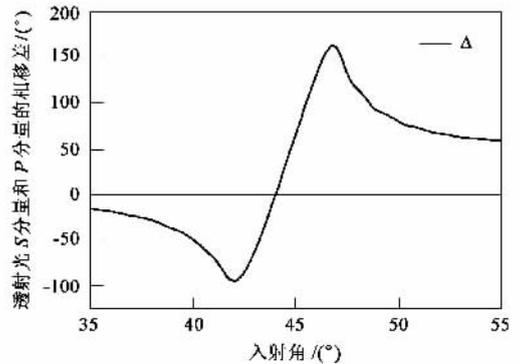


图3 自支撑 Mo/Si 多层膜在 95eV 时, s 偏振与 p 偏振光之间的相位差随入射角的变化

在设计相移片的过程中,文献^[21]给出的评价函数是透射率的平方根与相移正弦的乘积.这种评价函数给出的结果表明,相移片最佳入射角与软 X 射线能量和材料无关,基本上都在 30° 附近.文献^[22]给出另外一种确定透射多层膜相移最大选材的评价方法,这种方法得到的最佳材料组合与人们经常采用的材料组合有一定差别,例如在 95eV 处,

采用 Rh/Si 和 Ru/Si 组合都比 Mo/Si 组合好. 目前人们已经制作完成的透射多层膜相移片主要有 Mo/Si, Cr/C、Cr/Sc、Ni/Ti 等, 其中 Cr/Sc 多层膜既可用在 Sc 的吸收边, 又可用在 Cr 的吸收边.

4 磁光效应圆偏振片^[23]

磁光效应圆偏振片是利用磁性材料和稀土金属 3d 跃迁表现出来的强烈磁圆二色性的原理制成的. 当一束线偏振光入射到一个饱和磁化的薄膜上时, 它可以分解为一个左旋圆偏振光和一个右旋圆偏振光. 由于磁性薄膜的磁圆二色性, 左旋圆偏振光比右旋圆偏振光有更多的吸收, 或右旋圆偏振光比左旋圆偏振光有更多的吸收, 因此, 在从薄膜出射的光中就剩下没有被吸收的那种圆偏振光了. 对于 3d 跃迁的铁磁性材料, 这种圆偏振片在磁圆二色最强的 L_3 吸收边附近最有效. 用这样的圆偏振片就可以将线偏振光转换成圆偏振光. 若将两块这样的圆偏振片共同使用, 可以实现圆偏振光的输出或截止, 这一效应在许多方面有应用.

5 偏振光学元件应用

5.1 软 X 射线波段法拉第旋转角度测量^[3]

用同步辐射线偏振光可以检测经磁性样品后入射光偏振面的旋转, 美国波克利国家实验室首先完成了软 X 射线区法拉第旋转的实验. 入射光为同步辐射发出的线偏振光, 磁性材料是周期数为 40 的 Fe/Cr 多层膜, 其中 Fe 膜厚 2.0nm, Cr 膜厚 1.9nm, 样品制备在 100nm 厚的氮化硅薄膜上. Fe/Cr 多层膜是用 $3 \times 10^3 \text{ Oe}$ ($10e = 79.6 \text{ A/m}$) 的轴向静磁场磁化的. 入射光经过样品后, 由 W/B₄C 多层膜检偏器反射软 X 射线到探测器上. 通过检测信号可以判断入射光偏振面的变化. 为了测量软 X 射线经过磁性多层膜后光振动面转过的角度, 多层膜需要沿着静磁场方向(也就是光传播方向)旋转. 若没有样品在时, 转动多层膜可以得到正弦的反射率曲线, 其最大值和最小值分别出现在线偏振光的偏振方向是多层膜的 s 偏振和 p 偏振光入射的方向. 当样品插到光路中时, 由于法拉第效应, 线偏振光的偏振面会转一个角度, 这使得测量得到的正弦曲线有一个相移. 如果磁场方向相反, 法拉第旋转的变化也会相反. 测试表明, 总厚度为 80nm 的 Fe 最大旋转角是 4.8° , 相当于法拉第旋转常数是 $6.0 \times 10^4 \text{ deg/mm}$, 是可见光波段的 2 倍, 是 7.1keV X 射线的 1000 倍, 旋转角可确定材料的磁学特性.

5.2 同步辐射光源偏振特性测量^[24]

1998 年后, 为了适应日益增长的可调谐线、圆偏振光测量的需要, 德国在 BESSY - II 同步辐射上建立了三条用于偏振测量的光束线, 同时建立了偏振测量的实验装置. 先由透射式多层膜相移片对入射光引入一个相移, 然后用多层膜检偏器实现偏振状态的检测. 通过调节透射式多层膜相移片和反射多层膜检偏器的工作角度, 可以完全确定出同步辐射光的偏振状态. 通过采用不同工作能点的多层膜, 可以得到不同能点的光源偏振特性. 图 4 是用 Mo/Si 多层膜测得的波荡器发出的 98eV 的软 X 射线的偏振状态. S_1 代表线偏振度, S_3 代表圆偏振度. 由图可知, 随着测量点与轨道平面的偏离, 同步辐射光的线偏振度 S_1 逐渐减小, 而圆偏振度 S_3 逐步增加, 因此, 在使用同步辐射尤其是应用偏振特性时, 最好能够测量同步辐射输出的偏振特性, 否则将会给测量带来误差.

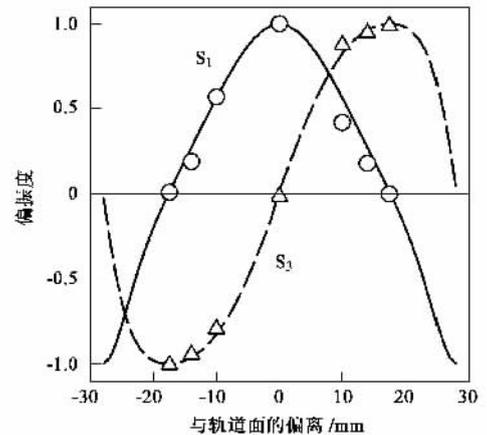


图 4 用 Mo/Si 多层膜测得的同步辐射偏振特性

5.3 磁畴显微镜^[25]

用磁圆二色效应构成的圆偏振片和高分辨率软 X 射线扫描显微镜组成成像系统, 可以实现薄样品的磁畴成像. 其成像过程为: 由单色仪输出的线偏振光首先经过磁圆二色材料组成的圆偏振片, 通过调节入射光方向与偏振片内磁化强度的方向, 可以得到最大的圆偏振光. 用软 X 射线能区的聚焦元件——波带片将偏振光会聚到磁性薄膜样品上, 再用探测器接收从样品出射的软 X 射线. 样品内不同磁畴对圆偏振光的吸收不同, 因此就构成了磁特性的衬度. 改变圆偏振片的磁化强度方向, 可使样品的衬度发生反转. 改变样品的倾角, 可以细致地观测样品的磁畴特性. 这种成像方法可实现几十纳米空间分

分辨率的磁畴研究,是一种新的研究磁性薄膜材料的方法。

6 结论

反射式起偏器与检偏器,透射多层膜偏振元件以及基于磁圆二色原理制成的圆偏振片,将各种磁光学测量扩展到 50—2000eV 软 X 射线能区。由于吸收和多层膜结构本身的限制,这一能区的偏振光学元件不可避免会带来光强度的损失,因此只有在高强度的同步辐射光束线上才能进行这样的测量。软 X 射线能区法拉第效应和克尔效应(需线偏振光)的直接测量是磁圆二色测量(需圆偏振光)的重要补充。相移片和圆偏振片可实现线偏振光到圆偏振光的转换以及左旋与右旋圆偏振光的转换,这扩大了线偏振同步辐射的应用范围。软 X 射线能区具有内壳层共振磁光光谱分析元素分辨的特点,并且可以得到比其他能区大的磁性材料特性信号。软 X 射线的穿透本领和纳米量级的波长提供了获得纳米级分辨率的可能性。这是其他波段偏振测量无法比拟的。软 X 射线偏振测量必将对复杂磁性材料的完整认识提供一种强有力的实验方法。

参 考 文 献

- [1] Henke B L, Gullikson E M, Davis J C. *At. Data Nucl. Data Tables*, 1993, 54 :181
- [2] Groot M F. *J. Electr. Spectrosc. Rel. Phenom.*, 1994, 67 : 529
- [3] Kortright J B, Rice M. *Phys. Rev. B*, 1995, 10240
- [4] Hecker M, Mertins H C, Abramsohn D *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2003, 93 :6516

- [5] Denbeaux G, Fischer P, Kusinski G *et al.* *IEEE Transactions on Magnetics*, 2001, 37 :2764
- [6] Koide T, Shidara T, Yuri M *et al.* *Nucl. Instrum. Meth.*, 1991, A308 :635
- [7] Gaupp A, Peatman W. *Proc SPIE*, 1987, 733 :272
- [8] Golovchenko J A, Kincaid B M, Levesque R A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57 :202
- [9] Lang J C, Srajer G. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66 :1540
- [10] Schafers F, Mertins H C, Gaupp A *et al.* *Appl. Opt.*, 1999, 38(19) :#074
- [11] Haga T, Utsumi Y, Itabashi S. *Proc SPIE*, 1998, 3443 :117
- [12] Di Fonzo S, Jark W, Schafers F *et al.* *Appl. Opt.*, 1994, 33 : 2624
- [13] Yamamoto M, Goto Y, Yanagihara M *et al.* *J. Electr. Spectrosc. Rel. Phenom.*, 1996, 80 :#65
- [14] Seely J F, Gutman G, Wood J *et al.* *Appl. Opt.*, 1993, 32 : 3541
- [15] Walton C C, Thomas G, Kortright J B. *Acta Mater.*, 1998, 46 :3767
- [16] Michaelsen C, Wiesmann J, Bormann R *et al.* *Opt. Lett.*, 2001, 26 :792
- [17] Yanagihara M, Maehara T, Nomura H *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, 63 :1516
- [18] Kortright J B, Rice M, Franck K D. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, 66 :1567
- [19] Kortright J B, Underwood J H. *Nucl. Instrum. Meth.*, 1990, A291 :272
- [20] Yamamoto M, Nomura H, Yanagihara M *et al.* *J. Electr. Spectrosc. Rel. Phenom.*, 1999, 101 - 103 :869
- [21] Kortright J B. *Proc. SPIE*, 1993, 2010 :160
- [22] Kim D E, Lee S M, Jeon I. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1999, A17 :398
- [23] Kortright J B, Kim S K, Warwick T *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71 :1446
- [24] Weiss M R, Follath R, Sawhney K J S *et al.* *Nucl. Instrum. Meth.*, 2001, A467 - 468 :#49
- [25] Kortright J B, Kim S K, Ohldag H *et al.* *X - Ray Microscopy*, Proceedings of the sixth international conference. Eds Meyer - lise W, Warwick T, Attwood D. 45

· 物理新闻和动态 ·

超灵敏爆炸物探测器

一种比经过训练的狗更灵敏的能够探测隐藏的爆炸物和地雷的装置已研制成功。研究人员认为,这种新的探测装置可以在离开爆炸物一定距离处使用,对于识别自杀性爆破手和藏有爆炸物的物件具有潜在的应用前景。美国 MIT 的研究小组使用激光来增强现有的爆炸物探测方法的灵敏度。这种方法是基于荧光半导体有机聚合物,这种聚合物当接触到爆炸物质发出的分子时荧光会减弱。用简单的光子探测器就可以观察到这种减弱。MIT 的小组发现,用足够强的激光照射荧光聚合物,能使灵敏度提高 30 倍。这就能够探测 1×10^{-15} g 的爆炸物蒸汽。适当的蓝发光二极管激光器能够很容易地组装到一台袖珍探测器中。MIT 的研究员 Aimee Rose 说,她认为这项技术可用于探测特别难发现的爆炸物(如旋风炸药)或增加可探测的距离。

激光的作用通过在荧光聚合物中产生高密度的激发电子来提高灵敏度。而由于爆炸物蒸汽分子将电子带走,使聚合物荧光降低。即使不用激光,基于聚合物制成的传感器也能从地面上探测埋在地面的地雷,但是,新的探测装置可能从几十米以外探测炸弹。Rose 说,可能达到的灵敏范围将依赖于具体要探测的物质的性质。令人惊奇的是,新的探测器会比训练过的狗更灵敏,而狗的嗅觉系统是当前探测野地里的地雷和炸弹的最灵敏的手段。Rose 说:“使用电子探测器的好处在于你可以根据你的目的来设定灵敏阈值。所以开发一种电子狗是非常诱人的。”美国 Oklahoma 的 Nomadics 公司正在研制将激光器和聚合物传感器结合起来的商用探测器。该公司自 1996 年以来已从美国政府得到 4 000 万美元的贷款。有关论文见 *Nature* 2005, 434 :876

(树华 编译自 NewScientist.com news service 13 april 2005)