



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1656373 B

(45) 授权公告日 2010.06.02

(21) 申请号 03812321.5

(22) 申请日 2003.05.29

(30) 优先权数据

10/157,089 2002.05.29 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2004.11.29

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2003/016913 2003.05.29

(87) PCT申请的公布数据

W02003/102564 EN 2003.12.11

(73) 专利权人 埃克斯射线有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 云文兵 肯尼斯·W·尼尔

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

公司 11227

代理人 王学强

(51) Int. Cl.

G01N 23/223 (2006.01)

G01N 23/225 (2006.01)

G21K 1/06 (2006.01)

审查员 曲新兴

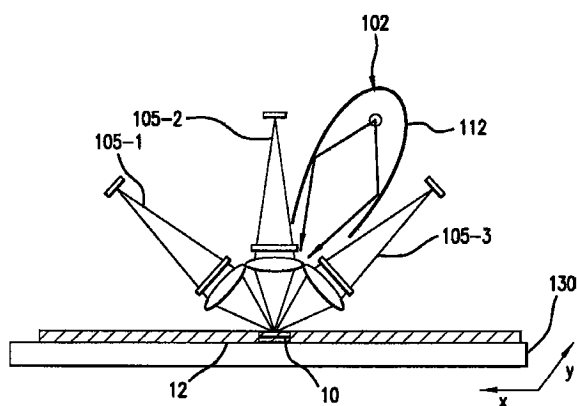
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 5 页

(54) 发明名称

元素特定的 X 射线荧光显微镜以及操作方法

(57) 摘要

一种利用由初级电离辐射所感应出的元素特定荧光 X 射线的元素特定成像技术。然后通过使用光学列,来自感兴趣元素的荧光 X 射线被优先地成像到检测器上。通过使用被适当配置的成像系统中的色透镜,获得光学列的优先成像。波带片是这种色透镜的实例;其焦距与 X 射线的波长成反比。如果波带片本身由包括基本上相同元素的化合物制成,则可以获得测试试样中给定元素的优先成像的增强。例如,当使用 Cu La 光谱线对铜成像时,铜波带片透镜被采用。



1. 一种用于检测测试物体 (10) 中所感兴趣元素的方法,所述过程包括:
使用聚光器 (114) 将来自源的初级电离辐射中继到测试物体;
照射所述测试物体 (10) 以从所感兴趣元素中感应出二级荧光 X 射线辐射 (116);以及
优先地将来自所感兴趣元素的二级荧光 X 射线辐射 (116) 成像到检测器 (122) 上。
2. 根据权利要求 1 所述的方法,还包括沿着光轴线扫描波带片,以优先地将来自所感兴趣元素的二级辐射成像到检测器上。
3. 根据权利要求 1 所述的方法,其中优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:利用色透镜将二级辐射成像到检测器阵列上。
4. 根据权利要求 1 所述的方法,其中优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:利用波带片将二级辐射成像到检测器阵列 (122) 上。
5. 根据权利要求 1 所述的方法,其中优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:对来自测试物体的辐射进行光谱滤波,以便于二级辐射到达检测器。
6. 根据权利要求 1 所述的方法,还包括通过孔径在检测器阵列处接收二级辐射。
7. 根据权利要求 1 所述的方法,其中优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:选择色透镜以便对于所感兴趣元素的荧光能量具有高的衍射效率。
8. 根据权利要求 1 所述的方法,其中照射测试物体的步骤包括:利用电子照射测试物体。
9. 根据前面任何一项权利要求所述的方法,其中优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:由包括所感兴趣元素的化合物形成色透镜。
10. 根据权利要求 1-8 中任何一项所述的方法,其中所感兴趣元素是铝并且优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:由铝或包括铝的化合物形成色透镜。
11. 根据权利要求 1-8 中任何一项所述的方法,其中所感兴趣元素是铜并且优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:由铜或包括铜的化合物形成色透镜。
12. 根据权利要求 1-8 中任何一项所述的方法,其中所感兴趣元素是钽并且优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:由钽或包括钽的化合物形成色透镜。
13. 根据权利要求 1-8 中任何一项所述的方法,其中所感兴趣元素是磷并且优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:由包括磷的化合物形成色透镜。
14. 根据权利要求 1-8 中任何一项所述的方法,其中所感兴趣元素是硼并且优先地对二级辐射进行成像的步骤包括:由包括硼的化合物形成色透镜。
15. 根据权利要求 1-8 中任何一项所述的方法,其中所述照射测试物体的步骤包括:在扫描电子显微镜的电子束下扫描测试物体。
16. 一种 X 射线荧光显微镜,包括:
用于照射测试物体 (10) 的源 (102),以由荧光从所感兴趣元素中感应出二级 X 射线辐射 (116);
用于检测来自所感兴趣元素的二级辐射的检测器 (122);以及
用于优先地将来自所感兴趣元素的二级辐射成像到检测器的光学列 (105);以及
聚光器 (114),其用于将来自源 (112) 的初级电离辐射中继到测试物体。
17. 根据权利要求 16 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光学列包括色透镜。
18. 根据权利要求 17 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光学列包括光谱滤波器

(124,150)。

19. 根据权利要求 18 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光谱滤波器是反射式多层光学装置 (150)。

20. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述检测器 (122) 是检测器阵列。

21. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,还包括光瞳孔径 (126),用于改善二级辐射的优先成像。

22. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,还包括毛细管光学装置聚光器,其用于将来自源 (112) 的初级电离辐射中继到测试物体。

23. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光学列包括对于所感兴趣元素的荧光线的能量具有高衍射效率的波带片透镜。

24. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述源产生电子以照射测试物体。

25. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述源是扫描电子显微镜的电子束。

26. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光学列包括由包括所感兴趣元素的化合物制成的透镜。

27. 根据权利要求 26 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所感兴趣元素是铝并且透镜包括铝。

28. 根据权利要求 26 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所感兴趣元素是铜并且透镜包括铜。

29. 根据权利要求 26 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所感兴趣元素是钽并且透镜包括钽。

30. 根据权利要求 26 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所感兴趣元素是磷并且透镜包括磷的化合物。

31. 根据权利要求 26 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所感兴趣元素是硼并且透镜包括硼的化合物。

32. 根据权利要求 16-19 中任何一项所述的 X 射线荧光显微镜,还包括位于检测器和所感兴趣元素之间的所感兴趣物体,其被参考二级辐射的吸收加以分析。

33. 一种操作在背光照明模式下的 X 射线荧光显微镜,包括:

用于照射已知结构 (12) 以由荧光从元素中感应出二级 X 射线辐射 (116) 的源 (102);
待检测的物体 (10),位于已知结构 (12) 之上;

用于检测来自元素的二级辐射的检测器 (122);

用于优先地将来自元素的二级辐射成像到检测器上的光学列 (105);以及
聚光器 (114),其用于将来自源的初级电离辐射中继到测试物体。

34. 根据权利要求 33 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光学列包括色透镜。

35. 根据权利要求 33 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光学列包括透镜 (118) 和光谱滤波器 (124)。

36. 根据权利要求 35 所述的 X 射线荧光显微镜,其中所述光谱滤波器是多层光学装置

(150)。

37. 根据权利要求 33 所述的 X 射线荧光显微镜,还包括用于改善优先成像的光瞳孔径 (126)。

38. 一种操作在光谱仪模式下的 X 射线荧光显微镜,包括:

用于照射物体 (10) 以由荧光从所感兴趣元素中感应出二级 X 射线辐射 (116) 的源 (102);

用于检测来自元素的二级辐射的检测器 (122);

用于优先地将来自元素的二级辐射成像到检测器 (122) 上的透镜 (118);

光瞳孔径 (126),当大面积的测试物体被初级电离辐射 (110) 照明时,其用于确保适当的优先成像;以及

用于将来自源的初级电离辐射中继到测试物体的聚光器 (114)。

39. 一种 X 射线荧光显微镜,包括

用于照射测试物体 (10) 的源 (102),其用于由荧光从一个或更多个所感兴趣元素中感应出二级 X 射线辐射,

两个或更多个成像系统 (105-1,105-2),每个成像系统包括:

检测器,用于检测来自所感兴趣元素之一的二级辐射,以及

光学列,用于优先地将来自所感兴趣元素之一的二级辐射成像到检测器上;以及

聚光器 (114),其用于将来自源的初级电离辐射中继到测试物体。

元素特定的 X 射线荧光显微镜以及操作方法

[0001] 相关申请

[0002] 这个申请提出对在 2002 年 5 月 29 日提交的美国申请序号 10/157,089 的优先权要求,所述申请在此全部被引入作为参考。

背景技术

[0003] 存在利用 X 射线进行物体元素分析的众多技术。这些技术中的一些依赖于元素的不同 X 射线衰减特征,而另一些则依赖于 X 射线荧光。

[0004] 基于衰减的分析技术的实例利用特征性的元素共振能量。当中央能量增加超过测试物体的组成元素的共振能量时,足够窄的光谱带宽的 X 射线束的衰减显著增加。利用这个特征的 X 射线显微镜已经被开发用于元素特定成像。显微镜典型地将源例如同步加速器,单色器,透镜例如波带片透镜 (zone plate lens),检测器阵列,以及可能的闪烁器进行组合以产生给定测试物体的图像。典型地,显微镜被用于透射。经常需要在低于和高于感兴趣元素共振能量的 X 射线能量处的两个图像,以获得测试物体的感兴趣元素和其它组成元素之间的必要对比度,以便于由此在测试物体内部产生元素分布的图像。

[0005] X 射线荧光分析或光谱测定法 (XRF) 是无损 (nondestructive) 分析技术,其使用初级辐射,如 X 射线或高能电子来从测试物体的原子中喷射内壳电子,从而在内壳层中产生电子空位。当原子中的外层电子填满空位时,利用等于内及外层电子状态之间能量差的能量发射二级辐射。荧光发射是不同元素的特征。因此,二级 X 射线光谱的测量产生对存在于测试试样中每个元素的相对丰度 (abundance) 的定量测量。

[0006] 借助对电离辐射,如经过所述测试物体的 X 射线或高能电子的小探头的光栅扫描,通过分析在每点上的 X 射线荧光光谱,则具有优于约 1 微米的空间分辨率的测试物体的元素特定成像被当前取得。通过使用高亮度同步加速器辐射源,具有空间分辨率接近 100 纳米 (nm) 的元素特定成像已经被展示出具有高的元素灵敏度,但是光栅扫描的系列性质 (serial nature) 显著地限制了生产量并且高的源亮度要求使它对于利用实验室 X 射线源来产生元素特定成像系统并不实际。

发明内容

[0007] 本发明针对 X 射线分析技术,其依赖从测试物体的二级辐射的产生。基于它们的元素成分或吸收,本发明使能测试物体内部结构的高分辨率、高对比度成像。它还使能测试物体的元素分析。

[0008] 更详细地,元素特定成像技术被公开,其利用通过初级电离辐射而感应的元素特定的荧光 X 射线。然后通过使用光学列,来自感兴趣元素的荧光 X 射线被优先地成像到检测器上。

[0009] 在一个实施例中,通过使用被适当配置的成像系统中的色透镜,则获得光学列 (optical train) 的优先 (preferential) 成像。波带片是这种色透镜的实例;它的焦距与 X 射线波长呈反比例。

[0010] 通过适当地配置成像系统以在检测器阵列上形成来自测试物体的特征性荧光 X 射线的图像,本发明的这个实施例取决于色透镜的成像和色特性来对测试物体中感兴趣的元素进行成像。利用其荧光 X 射线,测试试样中的给定元素可以被成像。如果波带片被用作色透镜,则若所述片本身由包括相同元素的化合物组成,那么元素的优先成像可以得到增强。例如,当使用 $\text{Cu L}\alpha$ 光谱线对铜成像时,则铜波带片透镜被采用。这增强了波带片透镜的优先成像,因为它的衍射效率(被衍射进入焦点的入射能量的百分率)在接近吸收线处快速地改变并且可以在其制造元素的 X 射线荧光处达到峰值。

[0011] 在另一实施例中,光谱滤波器,如薄膜过滤器或晶体被用在光学列中。

[0012] 波长色散元素可以被用在所感兴趣的物体和检测器之间的光学列中,以改善优先成像。

[0013] 根据本发明,由辐射源所发射的初级电离辐射照射到测试物体上并且激励测试物体内的元素以发射二级 X 射线荧光辐射。通过使用具有适当成像配置的透镜,由来自感兴趣的元素的测试物体发射的二级 X 射线荧光辐射随后被优先地成像在检测器系统上。在一些实例中,二级辐射的分布是所感兴趣的,而在其它实施中,二级辐射被用作背面光(backlighting)。

[0014] 在一个实施例中,通过使用波带片透镜而取得优先成像,其中所述波带片透镜仅将感兴趣元素的荧光周围的窄能量带聚焦到被适当配置的成像系统中的检测器系统。这个特性起因于波带片的焦距对辐射波长的依赖且因此仅一个波长满足给定显微镜配置的成像条件(物体到透镜以及透镜到检测器的距离)。

[0015] 已认识到使用波带片的高阶衍射,如第三阶(order)衍射的元素特定成像提供比使用初级第一阶衍射显著更佳的元素特异性。总体上,用于较高阶衍射的波带片的聚焦效率小于初级第一阶衍射的聚焦效率。

[0016] 波带片上的中央光阑可被要求或被需求,以通过降低或消除未被波带片所聚焦的 X 射线光子,在由所感兴趣的荧光 X 射线在检测器上所形成的图像中获得高的信噪比。

[0017] 根据另一实施例,借助于采用有色或无色成像光学装置(optic)例如波带片或者适当配置的镜子(例如,Wolter 光学装置)以及波长色散设备如被适当加以设计的多层光学装置的成像系统组合,也取得了优先成像。这个光学装置被配置成高效地反射来自感兴趣的元素的荧光 X 射线,而同时维持成像系统必要的成像特点。

[0018] 更具体地,X 射线荧光显微镜包括将初级电离辐射中继到测试物体的聚光器、用于操纵测试物体的机械段(mechanical stage)、波带片、波长色散光学装置如多层涂层或晶体、以及检测器如检测器阵列。

[0019] 作为选择地,X 射线荧光显微镜包括:用于将初级电离辐射中继到测试物体的聚光器、用于操纵测试物体的机械段、被适当配置的反射成像光学装置如 Wolter 光学装置、波长色散光学装置如多层过滤器、以及检测器如检测器阵列。已经认识到通过使用对所感兴趣的荧光 X 射线具有高透射但是对于一些基本上不同于荧光 X 射线的一些 X 射线能量具有低透射的过滤器,优先成像可以被进一步加以改善。

[0020] 在本发明的一个实施中,X 射线荧光显微镜包括初级电离辐射源、将初级电离辐射中继到测试物体的聚光器、用于操纵测试物体的机械段、波带片透镜、以及检测器如检测器阵列。

[0021] 在所优选的 X 射线荧光显微镜的実施中,通过使用由包括相同元素的化合物或基本上由相同元素组成的化合物所制成的波带片,给定的元素被成像。X 射线荧光显微镜的物体到透镜以及透镜到检测器的距离被典型地配置成对测试物体中元素的特征性 X 射线荧光光线成像,并且所记录的图像由此表示元素的分布。通过使用适合于它们相应的 X 射线荧光光线的配置,则取得物体中其它元素的图像。这个成像模式被称为 X 射线荧光成像模式。

[0022] 在另一实施例中, X 射线荧光显微镜被配置用于具有已知结构物体中的元素的特定特征性荧光 X 射线,以通过使用由来自元素的荧光所提供的照明,在由显微镜的视野和聚焦深度所定义的体积内对结构成像。这个成像模式被称为 X 射线荧光背光照明成像模式。

[0023] 在另一实施例中, X 射线荧光显微镜被配置用于元素的特定特征性荧光,但是所有的 X 射线荧光信号被集成以测量特定体积内的元素总量。通过使用适合于它们相应的 X 射线荧光光线的显微镜配置,其它元素的数量得到测量。这个 X 射线荧光显微镜模式被称为荧光光谱仪模式。

[0024] 已认识到测试物体可以利用具有用于增加二级 X 射线荧光产生速率的大立体角的照明束被照明。还认识到 X 射线荧光显微镜的生产量可以通过典型地包括源和聚光器的照明系统的最优化得到改善,以增加测试物体中所感兴趣体积内的二级荧光 X 射线的产生率。这种设计的一个实例包括被专门设计用于高亮度应用的精细焦点 X 射线源以及被专门设计用于以大立体角收集来自源的初级电离 X 射线并且将它们导引到测试物体上的 X 射线聚光器。

[0025] 在另一实施例中,多成像系统被用来增加生产量和 / 或执行立体或断层 X 射线摄影的成像。

[0026] 现在参考所附的附图,包括各种新颖的结构细节和部件组合的本发明的上述及其它特点,以及其它优点将被更加特别地加以说明,并且在权利要求中被指出。将要理解为体现本发明的特殊方法和装置借助于示例被示出,且并不作为对本发明的限制。这个发明的原理和特点可被体现在各种和众多的实施例中,而不偏离本发明的范围。

附图说明

[0027] 在所附的附图中,参考字符指遍及不同视图的相同部件。所述附图并没有必要按照比例;相反重点被放在对本发明原理的示例上。在所述附图中:

[0028] 图 1 是根据本发明的 X 射线荧光显微镜的示意图;

[0029] 图 2 是示例感兴趣元素中辐射所感应的 X 射线荧光的示意图;

[0030] 图 3 示意性地示例使用 X 射线荧光成像模式在集成电路中包含特定元素的结构的光线成像;

[0031] 图 4 是作为光子能量(以电子伏特 eV)函数的 500 纳米铜波带片的效率曲线,示例出接近 Cu L α 辐射能量在 $\sim 930\text{eV}$ 处峰值衍射效率被获得;

[0032] 图 5 是对于铜作为光子能(以电子伏特)函数的衰减长度(以 mm)曲线,示例出 Cu L α 荧光 X 射线的高透射以及在 $\sim 930\text{eV}$ 对于能量大于 Cu L 吸收边缘的 X 射线的急剧的吸收增加;

[0033] 图 6 是作为光子能(以电子伏特 eV)函数的 500 纳米金波带片的效率曲线,示例

出在 800–1000eV 能量范围上衍射效率的缓慢变化；

[0034] 图 7 是根据另一实施例的 X 射线荧光显微镜的示意图，其中波长色散光学装置采用有色或无色透镜以获取元素特定成像；

[0035] 图 8 是包括被沉积在平基片上面的 80 层钨和碳的对的多层光学装置的 X 射线反射率曲线图，假设 1.81 度的掠射入射角以及 2.5nm 的多层周期；

[0036] 图 9 是根据另一实施例的 X 射线荧光显微镜的示意图，其中多个成像系统被并行使用以增加生产量，或执行立体和断层 X 射线摄影的三维成像，或同时对多个元素进行成像；以及

[0037] 图 10 是根据操作在背光照明模式下的另一实施例的 X 射线荧光显微镜的示意图。

具体实施方式

[0038] 图 1 示出 X 射线荧光显微镜 100，其根据本发明的原理已经被构建。

[0039] 具体地，测试物体，如半导体晶片 12 的集成电路 (IC) 10，被初级电离辐射 110 如来自辐射发生器 102 的 X 射线或电子照射。

[0040] 在所优选的实施例中，晶片 / 测试物体被把持在精确的 x-y 台 130 上以将测试试样定位在 X 射线荧光显微镜 100 上。

[0041] 在一个实例中，通过用高能电子轰击固体目标，或者通过将足够强度的激光束聚焦到固体或液体目标上，由源 112 产生初级 X 射线辐射 110。

[0042] 在所示例的实例中，聚光器 114，如具有或不具有多层涂层的被适当成型的毛细管，被用来将初级辐射 110 聚焦且中继到测试物体 10 的小面积上，所述测试物体通过控制把持测试物体 10 的 x-y 台 130 被正确地放置。其它类型的 X 射线聚光器，如聚乙烯毛细管及弯曲晶体，被用在可供选择的实施中。

[0043] 聚光器 114 增加了测试物体 10 处的通量密度并且因此使所感应的二级荧光 X 射线最大化。测试物体优选地利用具有大立体角的照明束被照明。这增加了二级 X 射线荧光产生的速率。这个特性对于有效利用实验室 X 射线源是重要的，因为它们典型地在大的立体角范围上发射 X 射线。

[0044] 原则上，可接受的立体角可以高达 2π 立体弧度。大约 1 立体弧度的较低立体角是理想的。

[0045] 初级辐射 110 的能量被加以选择，以为了在感兴趣的元素中感应出荧光。例如，当 X 射线作为初级辐射时，下述元素在或超出相应吸收边缘处展现出急剧增加的辐射吸收：氧在 543 电子伏特 (eV)；硅在 99.8 和 1839eV；铝在 1560eV；铜在 933 和 8979eV；钽在 2389eV；磷在 2145eV；以及硼在 188eV。

[0046] 在一些实施中当使用 X 射线作为初级辐射时，已认识到 X 射线能量的选择对于 X 射线荧光显微镜的性能是重要的。有时，选择用来降低或消除测试物体中某些其它元素的激发的初级 X 射线辐射能量可是有益的，以从而增加来自感兴趣元素的荧光 X 射线的信噪比。有时，选择足以高于感兴趣元素的吸收边缘的初级 X 射线辐射能量可是有益的。借助于初级 X 射线的弹性和康普顿 (Compton) 散射，这提供了二级荧光 X 射线和到达检测器的其它 X 射线之间大的能量分离。初级 X 射线辐射的能量还可被加以选择以取得所希望的探测深度，因为激发深度随着入射的 X 射线能量变化。

[0047] 在一些其它的实施中,初级辐射是被精细地加以聚焦的电子束,如来自扫描电子显微镜 (SEM) 或来自利用大于感兴趣元素吸收边缘能量的电子能量操作的电子枪。典型地,三至四倍于吸收边缘能量的电子能量被加以选择以获取 X 射线荧光信号与“轫致辐射 (bremsstrahlung)”连续体辐射背景的高比值。电子能量也被加以选择以获取理想的探测深度。有时,电子能量被选择成低于测试物体中一些元素的吸收边缘,以改善荧光 X 射线图像中的信噪比。

[0048] 如图 2 中所示例,初级辐射 110 致使感兴趣元素中的内壳电子 (1) 被喷射 (电离)。在内壳中由此产生的空位 (2) 被外部电子壳 (4) 中的电子 (3) 所填充。这个迁移产生不是对应能量的光子,就是俄歇电子 (Auger electron)。所发射的光子构成来自感兴趣元素,如形成晶片 12 的 IC10 中轨迹的铜,的二级或荧光辐射 116,如图 3 中示例。

[0049] 返回到图 1,其它辐射可来自测试物体 10,如来自其它元素的二级辐射,被反射或被散射的初级辐射,以及由初级辐射已经喷射出的光电子所产生的轫致辐射。

[0050] 成像系统 105 最低限度地包括透镜 118 和检测器系统 122。透镜 118 被用来产生从感兴趣的元素到检测器系统 122 上的二级辐射 116 的聚焦束 120。

[0051] 在一个实施中,检测器系统 122 是元素的二维阵列,如电荷耦合器件 (CCD) 检测器阵列。取决于所涉及的能量,还需要闪烁器以将 X 射线转化成光,然后所述光被具有适当成像光学装置的适合的检测器阵列成像。在另一实施中,检测器系统 122 是具有无空间分辨率的检测器,如单元素固态检测器。在一些实施中,检测器系统还具有能量分辨率。

[0052] 根据本发明的本实施例,透镜 118 被选择用来优先地将仅 (典型地) 来自感兴趣元素的二级 X 射线辐射 116 成像到检测器系统 122。具体地,透镜 118 是有效地仅将窄能量带,即在感兴趣元素的荧光周围能量,聚焦到探测器系统 122 上的色透镜。这是通过使用其中焦距取决于能量的透镜并且通过适宜地设置物体 10 与透镜 118 之间 (距离 L1) 以及透镜 118 与检测器系统 122 之间 (距离 L2) 的距离而实现,这样正常的成像条件仅对于那个窄能量带得到满足。

[0053] 在本实施中,透镜 118 是波带片透镜。总体上,波带片透镜的焦距线性地取决于能量。能量带宽 ($\Delta E/E$) 由等式 $\Delta E/E = 2V/D$ 大致给出,其中 D 是波带片透镜的直径,以及 V 是 X 射线荧光显微镜的有效视野。

[0054] 通过控制初级电离辐射的大小,或通过使用光学列中的光瞳孔径,例如图 1 中的孔径 126,有效视野可以被设计成理想值。波带片直径优选地被设计成对于给定视野取得所要求的能量分辨率。具有处在能量带宽外部的能量的辐射在检测器平面上将是焦点没有对准的。

[0055] 光瞳孔径 126 典型地位于透镜 118 和检测器之间,并且优选地在接近检测器的附近。然而,在其它应用中,光瞳孔径位于透镜 118 和所感兴趣的物体 10 之间。

[0056] 通过使用具有衍射效率在 X 射线荧光能量的窄能量带中达到峰值的波带片,能量带宽 $\Delta E/E$ 可以得到改善。

[0057] 在本实施中,透镜 118 优选地是包括感兴趣元素的波带片透镜。优选地,波带片透镜由化合物,例如基本上由感兴趣元素组成的合金制成。在其它情况下,波带片透镜只由感兴趣的元素制成。在另外的情况下,波带片透镜由包括感兴趣元素的化合物制成。

[0058] 例如,如果感兴趣元素是铜,即操作者正在寻求对如图 3 中的 IC 的铜结构进行成

像,例如铜或含铜波带片透镜被使用。总体上,由元素对其自身的荧光 X 射线的吸收在接近荧光 X 射线能量的有限能量范围上接近局部极小,并且这个特性可以总体上被用于使用包括感兴趣元素的化合物构建波带片,以获取高衍射(聚焦)效率,。

[0059] 对于大量元素,如具有原子序数在 4-30 之间的元素,可以使得波带片透镜的衍射(聚焦)效率在制成波带片的元素的荧光 X 射线能量处达到峰值。上述通过利用元素的原子散射因子的实数部分中的变化,其在接近荧光 X 射线能量处其从正值减少到负值,在本实施中对于小于约 1keV 的荧光 X 射线能量得到实现。

[0060] 图 4 示出实例式实施,其中 Cu 波带片被设计成具有在 932eV 达到峰值的衍射效率,所述 932eV 大致是 CuL α 荧光线的能量。作为比较,金波带片在铜荧光线(930eV)将具有大约 10%的效率,并且从这个值开始从 850 到 1000eV 将变化极小(见图 6)。

[0061] 参考图 4 和 1,当使用由包括相同元素以及优选地包括基本上相同元素的化合物而生产波带片时,由于衍射效率损失以及远离所感兴趣的 X 射线荧光线的 X 射线能量焦点没有对准的组合效应,优先成像被增强。

[0062] 考虑一 500nm 厚的铜波带片,其针对具有焦距为 1cm 且最外波带宽度为 50nm 的 930eV 铜荧光线而设计。波长为大约 1.3nm。在 905eV,铜波带片透镜将具有 9.73mm 的焦距。聚焦深度为几微米,这样出现在 905eV 的荧光的图像平面基本上焦点没有对准且正好远离在 932eV 的图像。在 905eV 波带片的聚焦效率大约为在 930eV 所述值的一半,从而在由 930CuLa 荧光 X 射线所形成的图像上进一步降低了其对背景强度的贡献。

[0063] 总体上,基于波带片的 X 射线荧光成像显微镜的空间分辨率是 $k_1 \lambda / (NA)$; 聚焦深度 = $k_2 \lambda / (NA)^2$; $k_1 = k_2 = 1/2$, 对应于衍射限制成像的通常定义。

[0064] 为了从测试物体中进一步切断较高的能量辐射,在一些实施例中,包含适宜元素成分如针对小于 2keV 的 X 射线能量的感兴趣元素的板 124 被与波带片透镜串联而添加。荧光材料对于其自己的荧光能量是相对透明的,但是超过吸收边缘则吸收相当高(见图 5),从而导致低通(low-pass)透射特征,其降低了具有能量高于被透射到检测器 122 的 X 射线荧光能量的 X 射线的数量。当然,波带片透镜本身在超过吸收边缘变成吸收性,但是波带仅覆盖大约其面积的 50%。

[0065] 包括用于对这些元素成像的其它组成元素的波带片透镜是可能的。下面提出具有 1cm 焦距、50nm 最精细带的波带片的参数:

[0066]

元素	能量 (eV)	波长 (nm)	直径 (mm)	带数
B	183	6.78	1.36	6820
Cu	930	1.33	0.266	1330
As	1282 (1317)	0.967	0.193	967
Al	1486	0.833	0.166	833
Ta	1710	0.724	0.145	724
Si	1740	0.712	0.143	712
P	2013	0.615	0.123	615
Cu	8048	0.154	0.031	156

[0067] 已认识到将低衰减材料用于其上波带片被制作的薄膜是重要的,特别地对于低能量荧光成像应用,如硼。需要大的直径以补偿低的荧光率。因此波带片基片应该不是氮化硅,由于对于这样大的窗它将不得不是厚的,这将给它提供高度的吸收性。适合的基片将是

氮化硼,其是提供基本上比 B 更大衰减,即大于 90%、但是比氮化硅对辐射更敏感的材料。

[0068] 同样,有一种对激发辐射的能量选择成太接近于荧光能量的考虑,例如对 CuK 的具有 WL beta 的 As。在这种情况下,鉴别散射和康普顿辐射要比鉴别激发是否处于较高能量更为困难。当然,吸收剂有助于此,但是它还可以是荧光的二级源。

[0069] 最终,要注意到存在对用于阻挡零阶辐射的中央光阑的需求。

[0070] 图 7 示出根据本发明的 X 射线荧光显微镜 100 的另一实施例。在此,通过在成像系统 105 中插入适宜的光谱滤波器 150,获得优先成像。过滤器被选择成通过,即反射被集中于感兴趣元素的荧光线上的窄光谱带。在一个实施中,光谱滤波器 150 是多层光学装置或晶体。

[0071] 在这个实施例中,成像光学装置或者是色透镜,如波带片,或者是无色光学装置,如 Wolter 光学装置。光谱滤波器 150 被如此配置以便于物体 10、和透镜 118 以及检测器 122 之间的成像条件得到维持。

[0072] 总体上,色透镜和光谱滤波器 150 的组合导致有关 X 射线荧光显微镜优先成像特性的更佳性能。

[0073] 图 8 示出示范性多层过滤器或光学装置 150 的 X 射线反射率,所述过滤器或光学装置 150 被设计且设置成高效地反射接近 Cu Ka (8046eV) 荧光 X 射线的窄能量带。对于给定的多层或晶体,它仅在有限入射角之内(接受角)高效地反射所感兴趣的荧光 X 射线。为了避免因有限接受角导致降低生产量并且维持 X 射线荧光显微镜的分辨率,将多层光学装置或晶体远离透镜 118 并且接近检测器 122 放置是重要的,因为随着离透镜 118 的距离增加,成像形成荧光 X 射线束的角偏向减少,并且因此对于高生产量降低了多层或晶体光学装置所要求的接受角。

[0074] 即将被探测的物体的深度取决于初级和荧光辐射的能量,并且取决于几何形状。总体上,较低的能量辐射穿透性更小,并且导致较浅的物体体积。通过调节荧光相对于表面法线的收集角和入射角,被探测的深度是可调节的。

[0075] 初级电离辐射 110 的类型可基于具体应用被最优化。总体上, X 射线较电子提供显著较高的荧光 X 射线与背景信号的比率。X 射线还提供其它的优点,如对所有材料的适应性,因为没有充电效应并且它们在周围环境下可使用,即无真空要求。

[0076] 图 9 示出能够在同一时间对所感兴趣的多个元素进行成像的另一实施例。具体地,多个成像系统 105-1, 105-2, 105-3 被导向到测试物体 10 中大约相同或相同体积的图像。每个成像系统 105-1、105-2, 105-3 被配置成对不同元素的荧光 X 射线线进行成像。因此,在一个具体的实例中,每个成像系统 105-1、105-2、105-3 的波带片透镜包括不同的组成材料。

[0077] 根据另一实施例,图 9 的系统被配置用于增加的生产量。每个成像系统 105-1、105-2、105-3 被配置成对相同的荧光进行成像并且被瞄准到与测试物体的体积邻接或相邻的图像。

[0078] 根据另一实施例,在大范围角上一组元素特定的二维 (2D) 图像被收集并且通过使用断层 X 射线摄影再现被再现。这产生元素特定的三维 (3D) 图像。这个方法的简单实施收集到具有大约 10 度角分离的两个 2D 立体图像对,并且通过使用立体观看技术可以观看该物体的立体信息。通过使用在测试物体中进行大致相同体积的成像的几个相同成像系

统 105, 可以取得对 2D 图像的收集。

[0079] 实例

[0080] 利用处于大约 100 至 8000eV 范围的辐射能量, 来自 IC 重要材料的 X 射线荧光被感应。例如, 产生 X 射线荧光的材料是处在 930eV (La) 和 8046eV (Ka) 的铜、处在 99eV (La) 和 1740eV (Ka) 的硅、处在 1186eV (La) 的锗、处在 1710eV (Ma) 的钼、处在 452eV (La) 和 4510eV (Ka) 的钛、处在 776eV (La) 和 6929eV (Ka) 的钴、处在 2013eV (Ka) 的磷、处在 1282eV (La) 的砷、以及处于 1486eV (Ka) 的铝。处于 183eV (Ka) 的硼是另一可供选择。

[0081] 将铜作为一个实例考虑, 图 4 示出在 900 至 950eV 范围中 500 纳米 (nm) 铜波带片的效率, 其中铜具有荧光。注意到在 932eV 周围效率达到约 30% 的峰值, 其接近于处于 930eV 的 Cu La 荧光的能量。

[0082] 图 5 示出在这个 900 至 950eV 范围上铜的透射。例如 200nm 的铜在 933eV 以上具有仅 8% 的透射, 但是在光栅效率高时具有 75% 的透射。透射的急剧变化是因铜的吸收边缘所致并且荧光在略微低于这个边缘的能量处, 即在大约 930eV 被发射。

[0083] 结果是, 200 纳米 (nm) 厚的铜固体板 124 与 500nm 厚波带片透镜组合后, 将具有在 930eV 大约 20% 的聚焦效率以及在超出大约 933eV 小于 1% 的聚焦效率。在低于 930eV, 即在 925eV 时, 效率跌到小于 1%。在能量已经跌到约 905eV 之前它维持在 10% 以下。

[0084] 虽然在较低的能量时衍射效率恢复, 但是波带片的焦距正在显著地从处于荧光能量的那个焦距发生变化——任何辐射如处于这个能量的荧光辐射 (来自其它材料) 并不被成像在检测器阵列 122 上。应该注意到在 IC 制造中所使用的元素数量典型地被加以限制, 并且因此特征性荧光被大大地间隔开, 这样在大多数情形下, 由荧光材料所制成的波带片透镜的元素特定特性将不被危及。

[0085] 实例应用是对 IC 中的 Cu 结构, 如互联及通道以及与它们有关的缺陷进行成像。有益地是针对这个应用使用 Cu L α X 射线荧光。初级电离辐射或者是能量大于 1000eV 的电子束或是 X 射线束, 所述 X 射线束例如由产生能量大于 940eV 的 X 射线的对固体目标的电子轰炸所产生。具体应用包括 IC 部件的故障分析、IC 计量及在生产线上的检查。

[0086] 在不同的实例中, 处于 8046eV 的铜 K α 荧光被用来对 IC 封装中的铜互联线进行成像。初级辐射由能够产生所需初级辐射的固体阳极例如钨和金阳极的电子轰炸来提供。9670eV 左右的钨 L β 线对于感应铜中的荧光是高效的。这个较高的能量辐射可以被用来探测直至几百微米厚的封装。对于较高分辨率的应用, 由于受到限制的立体接受角, 采用平版印刷技术所制造的波带片在生产量上可能受到限制。

[0087] 然而, 通过下述设计可引导低的立体接受角。聚焦透镜由彼此以直角取向的两个线性波带片组成。通过在基片上对适当材料 (如 W 和 C) 的交替层进行溅射, 并且将这个多层结构切成给予最大效率的厚度, 则制造出这些线性波带片。这样, 小到 3 纳米的最精细带可以被制造, 并且同具有 50nm 最精细带的波带片相比较, 最后所得到的立体接受角被改善了 278 这样的倍数 (factor)。这些光学元件并不太可能获得 3nm 的分辨率, 但是在基本上大于 3nm 的分辨率时, 为了高生产量它们提供了显著较大的立体接受角。例如, 具有 3nm 最精细带宽的波带片的立体接受角比具有 30nm 最精细带宽的波带片的立体接受角的大 100 倍。并且将 30nm 分辨率 X 射线荧光成像的生产量提高了大约 100 倍。另一实例将涉及对埋入结构如涂层 (通过热喷涂或其它而被施加) 下面的钢和其它结构材料的研究。在这个

应用中铜或钨阳极将被用来产生初级辐射以在铁、镍、铬或钴中激发出荧光。同样地,作为研究例如微裂纹和腐蚀的透镜,交叉的线性波带片将是所优选的。

[0088] 另一应用是生物标本,如骨骼和单生物细胞的成像。利用本发明,元素如骨骼或细胞中钙和磷的空间分布可以以 2D 或 3D 来成像。已认识到这样的成像可被如此执行,而没有显著地影响正在调查之中的生物标本的生活,并且因此时间消逝成像可被取得以研究进化。

[0089] X 射线荧光背光照明成像模式

[0090] 图 10 示出根据本发明被配置在 X 射线荧光背光照明成像模式下的 X 射线荧光显微镜 100。具体地,被成像的荧光起始于已知结构 12(如基片,而不是起始于所感兴趣的物体 10)。所感兴趣的物体 10 被放置在已知结构 12 和透镜 118 之间。所感兴趣物体吸收或散射部分特征性 X 射线辐射,且因此在图像平面上投下阴影。

[0091] 在这个操作模式下,存在于物体中的元素并不直接被识别,但是如果它们的成分是已知的,则可根据包含背光照明衰减信息的图像对物体的几何形状,如厚度和形状加以确定。其它图像对比度增强方法,如 Schlieren 方法可以被采用以增加低吸收对比度材料的图像对比度。

[0092] 例如,硅 $L\alpha$ 或 $K\alpha$ 荧光 X 射线作为背光照明被用于一个应用中,以对硅基片上面的 IC 结构,如 Cu 互连线和通道、含 Ta 扩散势垒(barrier)、层间电介质以及多晶硅栅接触进行成像。已认识到硅是用于制作高聚焦效率波带片的优选材料。其它优选的材料包括用于 Si $L\alpha$ 线的钼和铈,以及用于 Si $K\alpha$ 线的 Au、W 和 Ta。

[0093] 作为另一实例,通过使用 X 射线荧光背光照明成像模式,在 IC 生产过程中所产生的蚀刻结构轮廓可以被加以研究。在晶片 12 中由 X 射线荧光所产生的背光照明在被包括蚀刻结构的测试物体 10 吸收或散射之后到达透镜 118。蚀刻结构 10 的几何形状,包括其轮廓,连同蚀刻结构的材料成分确定对背光照明荧光 X 射线的影响,并且导致 X 射线荧光图像中的可测量效应。已认识到对于不显著大于荧光 X 射线波长约 30 倍以及纵横比大于约 3 的线性尺寸蚀刻结构,由于散射效应使蚀刻结构的轮廓对背光照明荧光 X 射线的角分布产生显著的影响。这个影响随着蚀刻结构线性尺寸的减少以及纵横比的增加而增加。要进一步意识到当蚀刻结构被适当地设置如周期性结构时,蚀刻结构轮廓的影响可以得到增强。在一些实施中有益地是使用较长波长且来自被包含在主要 IC 制造材料中的元素,如硅、铜、氧、钼及碳的 X 射线荧光。

[0094] 对于另一实例,来自 Cu 互连线或通道的 Cu $L\alpha$ 荧光被用来检测 IC 生产过程中它们顶部上的残余物和颗粒且对其进行成像。在所优选的实施中,通过使用铜构建波带片。

[0095] 例如,通过对来自基片 12 的硅荧光进行成像,可以看到缺陷,如在 IC 制造中所用的掩模中的抗蚀剂残余物污染或其它污染,其可以是硅晶片材料或硅化合物,如玻璃、石英或氮化硅。缺陷将显现为与所要求的干净且完整掩模的图像有偏差。在这个成像模式中,掩模可被设计成被用在透射或反射中。

[0096] 通过使用具有 1cm 焦距的波带片,在具有 50nm 分辨率的一个曝光中,边长为 0.1mm 的面积可被成像到 CCD 检测器上。整个晶片将以分步重复操作被探测。通过比较数字图像与存储于控制计算机中的标准,缺陷识别将被自动执行。

[0097] 另一应用是检查涂层,如用于改善表面操作温度的热涂层、用于改善表面硬度的

硬度涂层、以及用于改善表面化学抗腐蚀性的涂漆。通过使用来自涂层下面的体材料 (bulk material) 的荧光辐射, 图像将清晰地显示出非均匀性、针孔、裂纹和其它缺陷。

[0098] 荧光光谱仪模式

[0099] 参考图 1, 在荧光光谱仪模式中, 物体与透镜的距离 $L1$ 和透镜与检测器的距离 $L2$ 被加以调节, 以便于给定元素的所有特征性荧光落在单元素检测器上或在二维成像检测器 122 中所有的象素上被集成。通过沿着连接物体 10 中心和检测器 122 中心或光瞳孔径 126 的轴线来扫描色透镜例如波带片, X 射线光谱可以被测量。几个这些光谱仪可以被配置以便于同时监视多个元素, 如有关图 9 中所说明。

[0100] 因为所使用透镜的数值孔径与能量成反比, 所以对于较低能量, 仪器的能量分辨率与立体接受角两者得到改善。这是优于能量分散 (energy dispersive) 和波长分散 (wavelength dispersive) 光谱仪的重要优点, 因为荧光的产率随着能量而下降, 并且典型固态能量分散检测器的能量分辨率对于低能量 X 射线分析应用而言经常被过于限制。

[0101] 这个设置适用于监视具有硼、磷和 / 或砷的半导体材料的浅掺杂 (dope) 的剂量。在这种情况下通常高的空间分辨率并不是所需要的, 这样波带片被用在产生方便的工作距离和生产量的几何形状中。通过使用单元素检测器前面的孔径, 可以限定即将被调查的面积。所观察的计数速率, 余矩阵 (after matrix) 和元素相关校准因子和背景校正将直接与探测体积内的掺杂剂量成比例。

[0102] 利用透镜成像特性用于厚度测量的另一实例是基于这样的认识, 即成像特性允许被探测面积和荧光收集的立体角两者被极好地加以限定, 因此允许对探测体积内的荧光原子数量的精确确定。如果被探测的体积是已知的均匀厚度 (膜), 则其膜厚度可以被确定。实例应用包括测量 IC 生产线中各种材料, 如 Cu、扩散势垒及层间电介质层的膜厚度。

[0103] 虽然这个发明已经参考其优选实施例被显示和说明, 但是本领域中的那些普通技术人员将要理解到: 可在不脱离由所附权利要求所包含的范围内对其进行各种形式和细节变化。例如, 典型的扫描电子显微镜 (SEM) 具有被用来识别被成像材料的 X 射线检测器 (EDAX)。在荧光光谱仪模式中, 本发明被用作 SEM 的元素特定成像的附加部分。

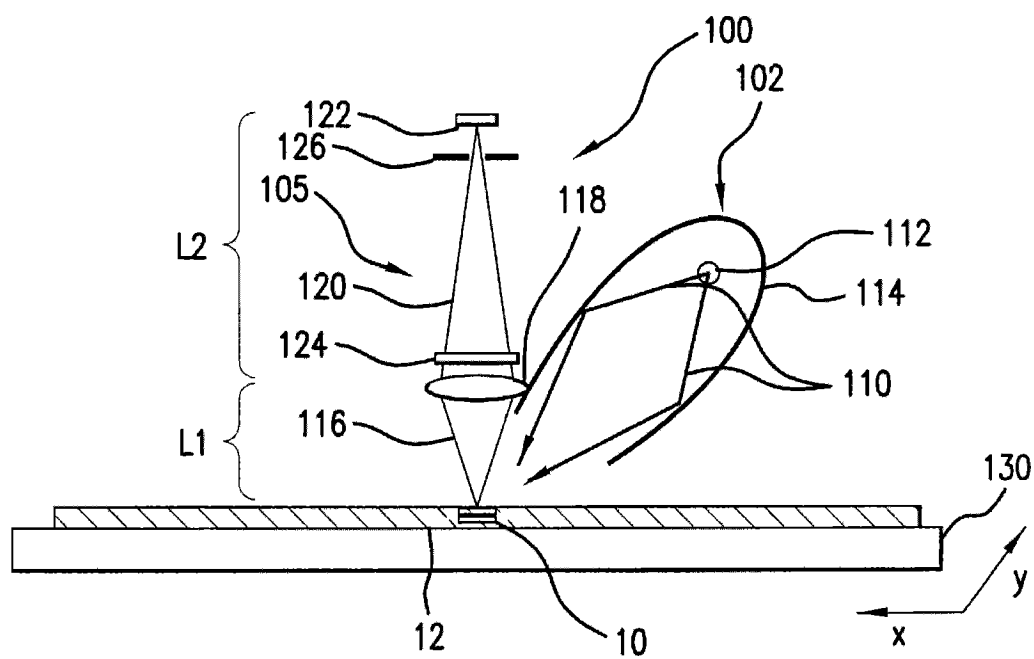


图 1

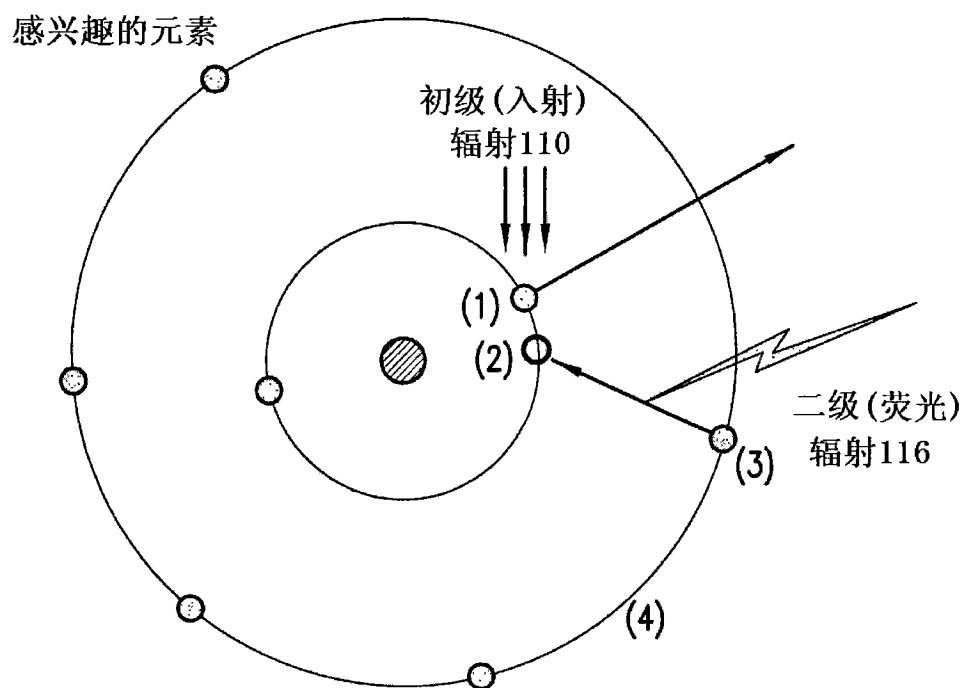


图 2

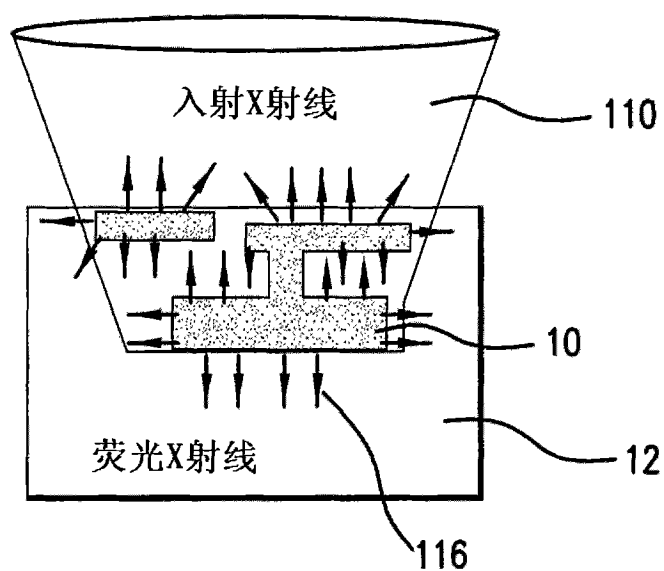


图 3

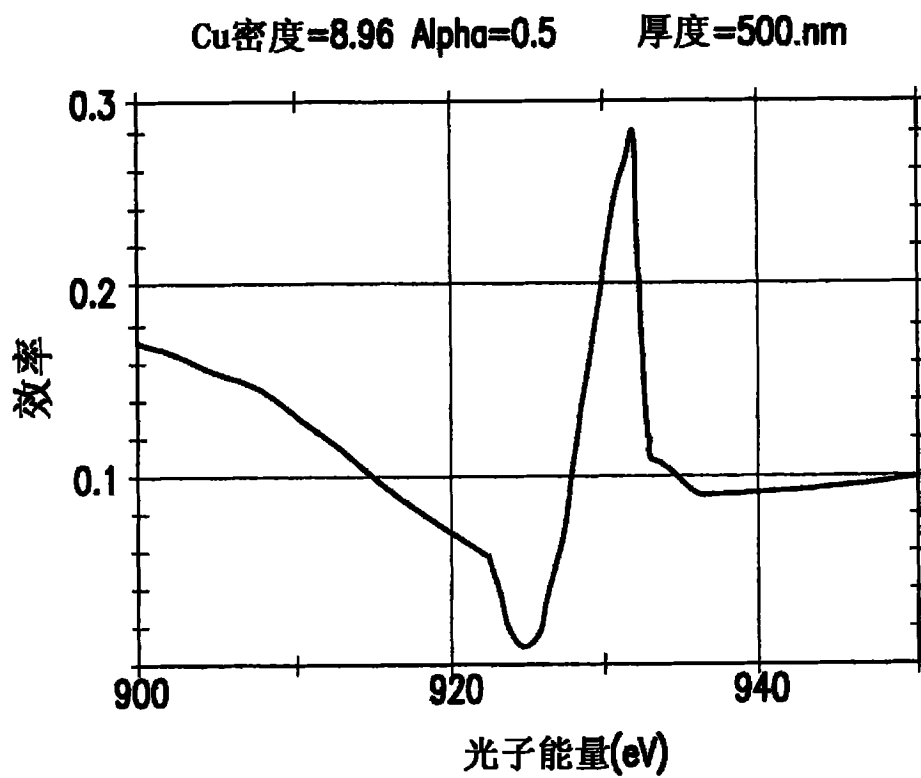


图 4

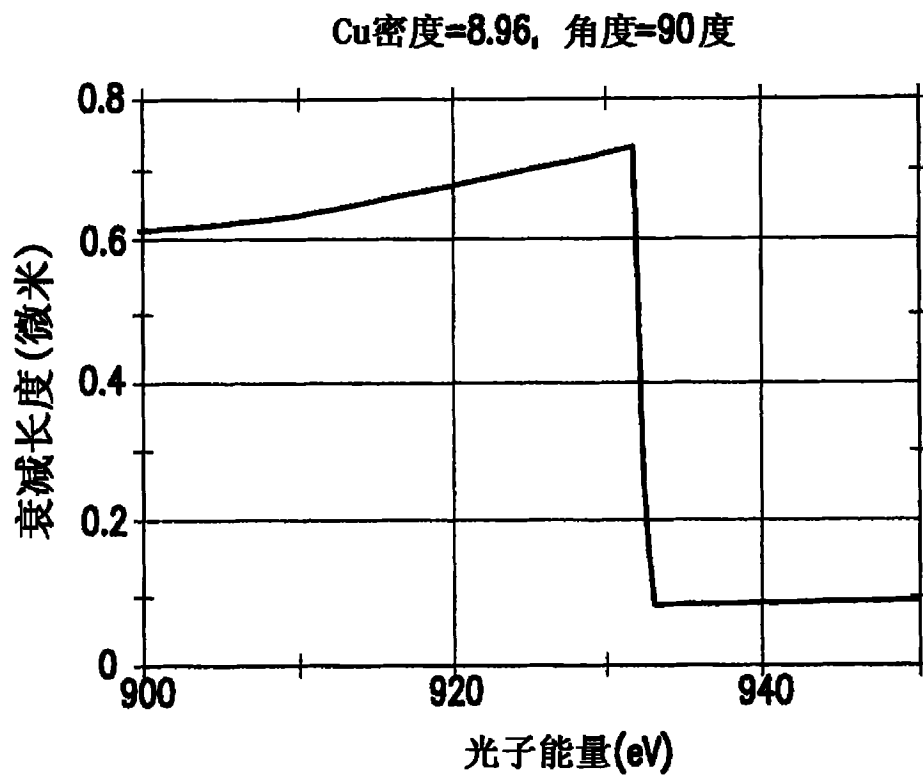


图 5

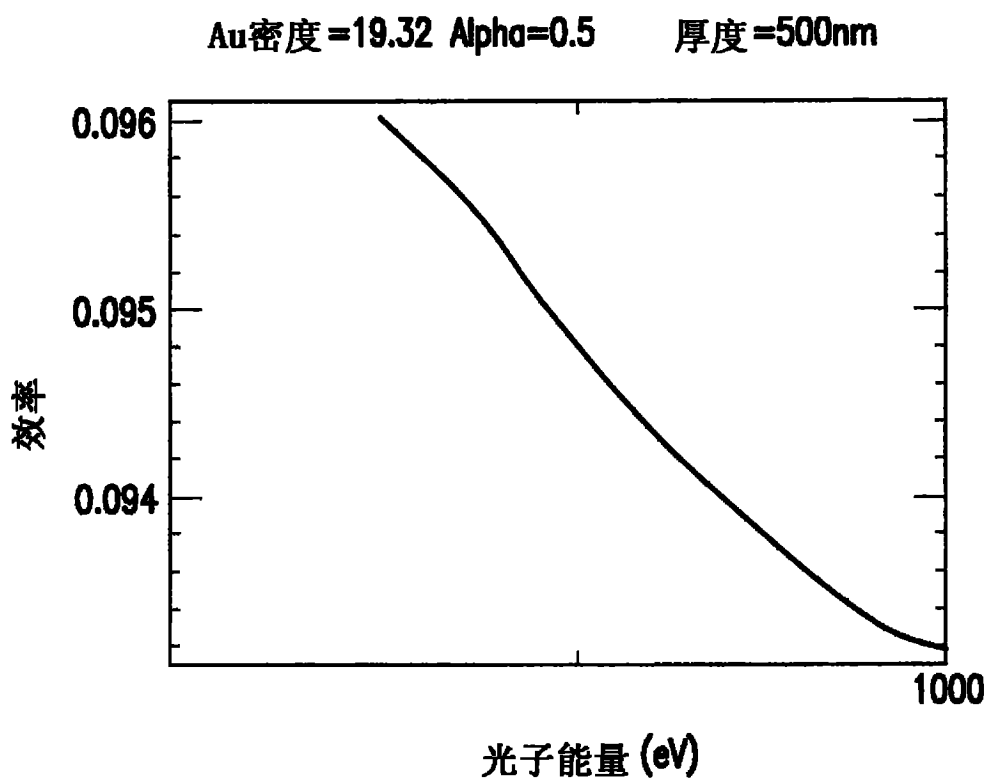


图 6

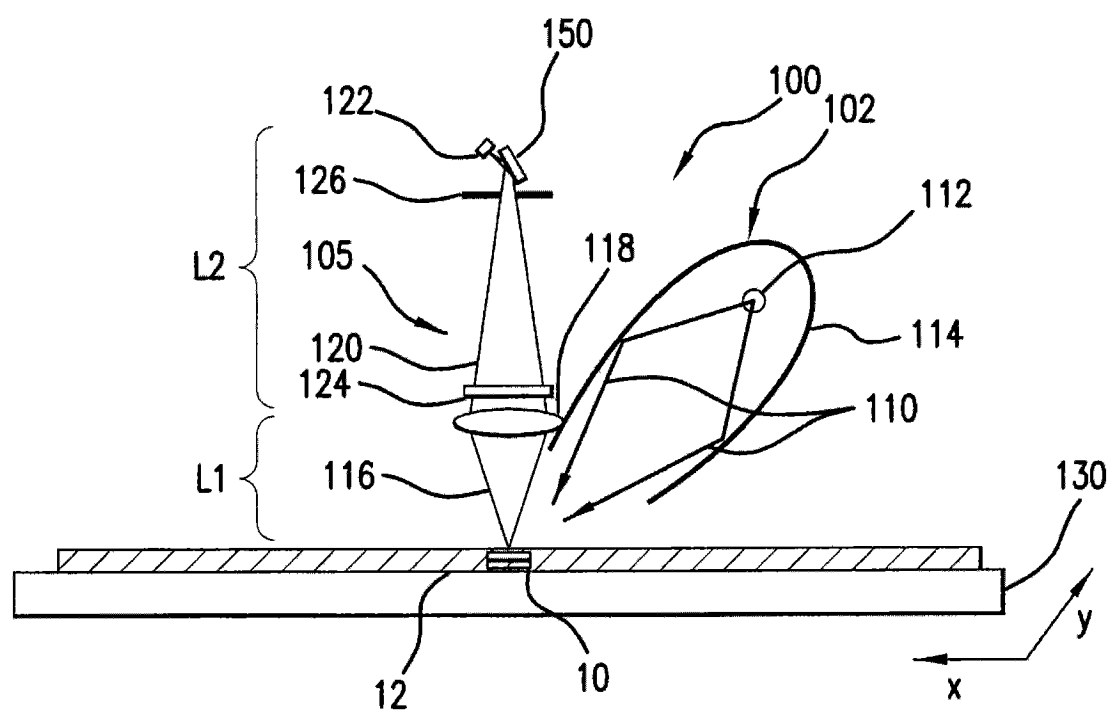


图 7

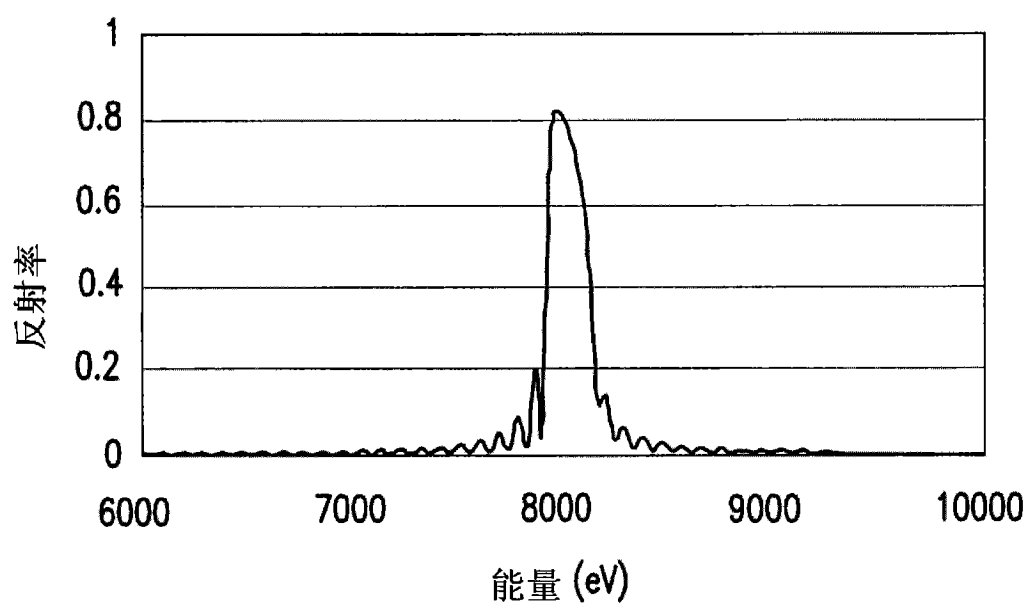


图 8

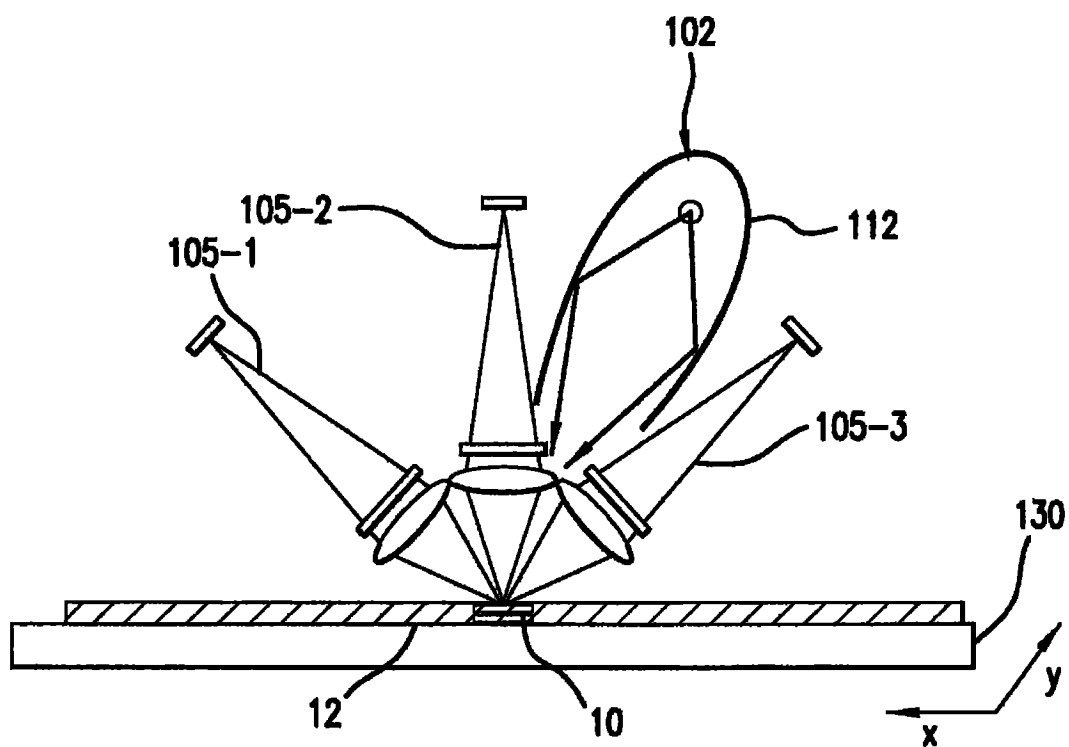


图 9

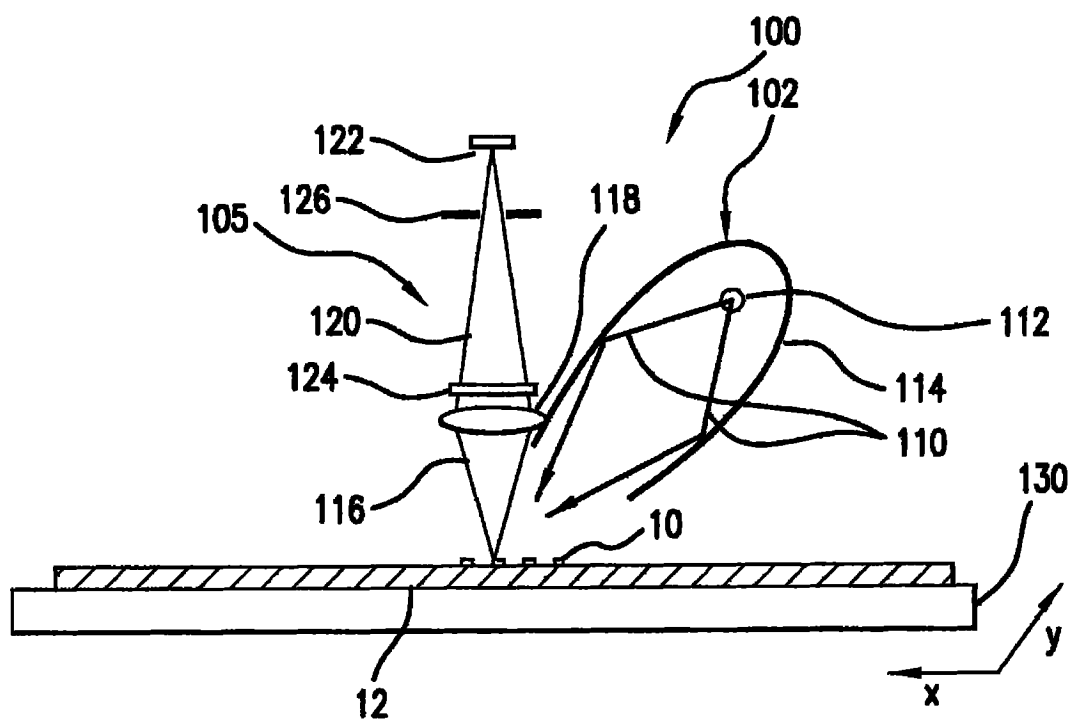


图 10