



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118845062 A

(43) 申请公布日 2024. 10. 29

(21) 申请号 202410870799.3

H01J 35/08 (2006.01)

(22) 申请日 2018.05.18

H01J 35/16 (2006.01)

(30) 优先权数据

A61N 5/10 (2006.01)

62/508,996 2017.05.19 US

A61B 6/42 (2024.01)

A61B 6/50 (2024.01)

(62) 分案原申请数据

A61B 6/02 (2006.01)

201880047531.2 2018.05.18

A61B 6/00 (2024.01)

A61B 6/58 (2024.01)

(71) 申请人 想像科学有限公司

地址 美国

(72) 发明人 埃里克·H·西尔弗

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司 11227

专利代理师 李彦丽

(51) Int. Cl.

A61B 6/40 (2024.01)

H05G 2/00 (2006.01)

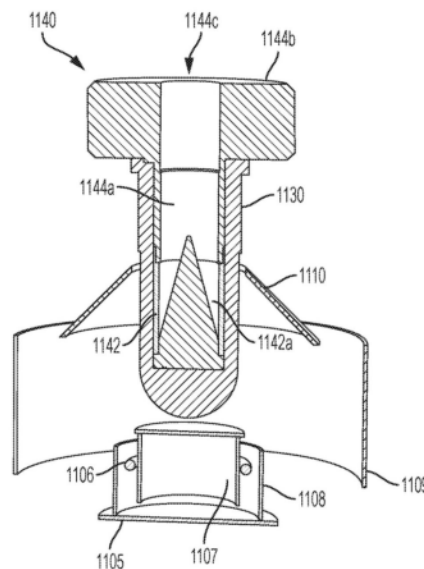
权利要求书4页 说明书29页 附图44页

(54) 发明名称

单色x射线装置

(57) 摘要

提供一种单色x射线装置,包括:电子源,其被配置成发射电子;初始靶,其被配置成响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射而经由荧光产生单色x射线辐射;以及用于所述次级靶的壳体,所述壳体包括孔,来自所述次级靶的单色x射线辐射通过所述孔被发射,所述壳体被配置成将所述次级靶定位成:使得由所述初始靶发射的宽带x射线辐射中的至少一些入射在所述次级靶上;使得当所述单色x射线装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.7的单色性的单色x射线辐射。



1. 一种单色x射线装置,包括:  
电子源,其被配置成发射电子;  
初始靶,其被配置成响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;  
次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射而经由荧光产生单色x射线辐射;以及  
用于所述次级靶的壳体,所述壳体包括孔,来自所述次级靶的单色x射线辐射通过所述孔被发射,所述壳体被配置成将所述次级靶定位成:使得由所述初始靶发射的宽带x射线辐射中的至少一些入射在所述次级靶上;使得当所述单色x射线装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.7的单色性的单色x射线辐射。

2. 根据权利要求1所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.8的单色性的单色x射线辐射。

3. 根据权利要求1所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.9的单色性的单色x射线辐射。

4. 根据权利要求1所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.95的单色性的单色x射线辐射。

5. 根据权利要求1所述的单色x射线装置,其中,所述电子源和所述初始靶布置在真空管中,所述真空管包括被配置成容纳所述壳体的容器,其中,所述壳体被配置成能够从所述容器移除,并且其中,可移除的所述壳体允许所述次级靶被移除并且用不同的次级靶替换。

6. 根据权利要求5所述的单色x射线装置,其中,可移除的所述壳体包括:  
透射部,其被配置成允许宽带x射线辐射在存在时被透射至所述次级靶;以及  
阻挡部,其被配置成吸收宽带x射线辐射。

7. 根据权利要求6所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括第一圆柱形部,所述第一圆柱形部被配置成容纳所述次级靶的至少一部分,并且其中,所述阻挡部包括:

具有第一直径的第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被定位成邻近所述第一圆柱形部;  
以及

环形部,其包括所述孔并且具有大于所述第一直径的第二直径,所述环形部被定位成邻近所述第二圆柱形部并且被配置成经由所述孔发射单色x射线辐射。

8. 根据权利要求6所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶的至少第一部分被定位在所述壳体的透射部内,并且所述次级靶的第二部分被定位在所述壳体的阻挡部内。

9. 根据权利要求8所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括被配置成容纳所述次级靶的第一圆柱形部,并且所述阻挡部包括第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶的第二部分交叠。

10. 根据权利要求9所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少1mm。

11. 根据权利要求9所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少2mm。

12. 根据权利要求9所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少3mm。

13. 根据权利要求6所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级

靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶被排他地定位在所述透射部内。

14. 根据权利要求5所述的单色x射线装置,其中,可移除的所述壳体在被定位在所述容器内时位于所述真空管的外部。

15. 根据权利要求14所述的单色x射线装置,其中,所述容器的至少一部分是可透射的,以使得当所述壳体被定位在所述容器内时来自所述初始靶的至少一些宽带x射线能够撞击所述次级靶。

16. 根据权利要求1所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的两倍。

17. 根据权利要求16所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的三倍。

18. 根据权利要求16所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的四倍。

19. 根据权利要求16所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的五倍。

20. 根据权利要求1所述的单色x射线装置,其中,所述电子源包括环形阴极,并且其中,所述单色x射线装置还包括:

至少一个第一内部引导件,其被同心地布置在所述环形阴极内以引导电子朝向所述初始靶;以及

至少一个第一外部引导件,其被同心地布置在所述环形阴极外部以引导电子朝向所述初始靶。

21. 一种单色x射线装置,包括:

电子源,其被配置成发射电子;

初始靶,其被配置成响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;

次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射而经由荧光产生单色x射线辐射;以及

电源,其被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的两倍。

22. 根据权利要求21所述的单色x射线装置,其中,所述电源被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的三倍。

23. 根据权利要求21所述的单色x射线装置,其中,所述电源被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的四倍。

24. 根据权利要求21所述的单色x射线装置,其中,所述电源被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的五倍。

25. 根据权利要求21所述的单色x射线装置,其中,所述电子源包括环形阴极,并且其中,所述单色x射线装置还包括:

至少一个第一内部引导件,其被同心地布置在所述环形阴极内以引导电子朝向所述初

始靶;以及

至少一个第一外部引导件,其被同心地布置在所述环形阴极外部以引导电子朝向所述初始靶。

26. 根据权利要求25所述的单色x射线装置,其中,所述电子源和所述初始靶布置在真空管中,所述真空管包括被配置成容纳所述壳体的容器,其中,所述壳体被配置成能够从所述容器移除,并且其中,可移除的所述壳体允许所述次级靶被移除并且用不同的次级靶替换。

27. 根据权利要求26所述的单色x射线装置,其中,可移除的所述壳体包括:

透射部,其被配置成允许宽带x射线辐射在存在时被透射至所述次级靶;以及

阻挡部,其被配置成吸收宽带x射线辐射。

28. 根据权利要求27所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括第一圆柱形部,所述第一圆柱形部被配置成容纳所述次级靶的至少一部分,并且其中,所述阻挡部包括:

具有第一直径的第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被定位成邻近所述第一圆柱形部;以及

具有大于所述第一直径的第二直径的环形部,所述环形部被定位成邻近所述第二圆柱形部并且被配置成经由孔发射单色x射线辐射,所述孔被设置成穿过所述环形部。

29. 根据权利要求28所述的单色x射线装置,其中,当所述单色x射线装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.7的单色性的单色x射线辐射。

30. 根据权利要求29所述的单色x射线装置,其中,当所述单色x射线装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.9的单色性的单色x射线辐射。

31. 一种单色x射线装置,包括:

包括环形阴极的电子源,所述电子源被配置成发射电子;

初始靶,其被配置成响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;

至少一个引导件,其与所述环形阴极同心地被布置以引导电子朝向所述初始靶;以及

次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射而经由荧光产生单色x射线辐射。

32. 根据权利要求31所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括被同心地布置在所述环形阴极内的至少一个第一内部引导件。

33. 根据权利要求32所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括被同心地布置在所述环形阴极外部的至少一个第一外部引导件。

34. 根据权利要求33所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括被同心地布置在所述环形阴极外部的多个外部引导件。

35. 根据权利要求31所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括铜、不锈钢和钛中的至少一种。

36. 根据权利要求31所述的单色x射线装置,还包括电源,其被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的两倍。

37. 根据权利要求36所述的单色x射线装置,其中,所述电源被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的三倍。

38. 根据权利要求36所述的单色x射线装置, 其中, 所述电源被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置, 所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的四倍。

39. 根据权利要求36所述的单色x射线装置, 其中, 所述电源被配置成使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述单色x射线装置, 所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的五倍。

40. 根据权利要求31所述的单色x射线装置, 还包括用于所述次级靶的壳体, 所述壳体包括孔, 来自所述次级靶的单色x射线辐射通过所述孔被发射, 所述壳体被配置成将所述次级靶定位成: 使得由所述初始靶发射的宽带x射线辐射中的至少一些入射在所述次级靶上; 使得当所述单色x射线装置被操作时, 在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.8的单色性的单色x射线辐射。

## 单色x射线装置

[0001] 申请是国家申请号为201880047531.2,国际申请日为2018年5月18日,进入国家日期为2020年1月16日,发明名称为“单色x射线成像系统及方法”的申请的分案申请。

[0002] 相关申请的交叉引用

[0003] 本申请根据35U.S.C.§119要求于2017年5月19日提交的名称为“MONOCHROMATIC X-RAY SYSTEMS AND APPARATUS”的美国临时申请序列第62/508996号的优先权,本申请通过引用以其全部内容并入本文中。

### 背景技术

[0004] 传统的诊断性射线照相术使用x射线发生器,该x射线发生器发射在宽能量带范围内的x射线。该带的大部分包含对医学成像没有用处的x射线,原因是这些x射线的能量要么太高而无法在被检查的组织中相互作用,要么能量太低而无法到达用于记录x射线的x射线探测器或胶片。能量太低而无法到达探测器的x射线尤其成问题,原因是这些x射线不必要地暴露正常组织并增加了患者接收的辐射剂量。早已经认识到,如果能够以适当的能量使用,则单色x射线的使用将在减少辐射剂量的同时提供最佳的诊断图像。迄今为止,还没有这样的可以用于常规临床诊断用途的单色x射线源。

[0005] 单色辐射已被用于特殊场合。然而,由于其阻止性的尺寸、成本和/或复杂性,用于产生单色辐射的常规系统已经不适用于临床或常规商业用途。例如,可以在同步加速器源中使用低效的布拉格(Bragg)晶体作为滤光器或使用固体的平坦靶x射线荧光剂来大量产生单色x射线,但是这些非常大并且不适用于医院和诊所的常规使用。

[0006] 可以通过以下操作来产生单色x射线:依次提供响应于入射电子束产生宽谱辐射的靶(也被称为阳极),然后提供响应于入射宽谱辐射产生单色x射线的荧光发射靶。本文使用术语“宽谱辐射”来描述具有或不具有阳极材料的特征发射线的韧致辐射(Bremsstrahlung radiation)。简而言之,经由x射线荧光产生单色x射线的原理如下。

[0007] 厚靶韧致辐射

[0008] 如图1中示意性地所示,在x射线管中,电子从被称为阴极的加热丝中释放出来,并且通过高电压(例如,约50kV)朝向被称为阳极的金属靶被加速。高能电子与阳极中的原子相互作用。通常,能量为 $E_1$ 的电子接近靶中的原子核,并且其轨迹因电磁相互作用而发生变化。在这种偏转过程中,电子朝向原子核减速。当电子减速至能量 $E_2$ 时,电子发射能量为 $E_2 - E_1$ 的x射线光子。该辐射被称为韧致辐射(制动辐射),并且运动学在图2中示出。

[0009] 发射的光子的能量可以采用任何值,该值可以高达入射电子的最大能量 $E_{\max}$ 。由于电子未被破坏,因此它会经历多种相互作用,直到它失去所有能量或与阳极中的原子结合为止。初始的相互作用根据实际角度和与原子核的接近度而变化——从较小的能量改变至较大的能量改变。因此,如图3所示,韧致辐射将具有通常连续的谱。韧致辐射产生的概率与 $Z^2$ 成比例,其中 $Z$ 是靶材料的原子序数,并且产生效率与 $Z$ 和x射线管电压成比例。注意,如下文进一步详细讨论的,低能量的韧致辐射x射线随着它们试图脱离内部深处而被厚靶阳极吸收,从而导致强度曲线在最低能量处弯曲。

### [0010] 特征线发射

[0011] 尽管大多数电子减速并改变其轨迹,但有些电子会与被能量 $BE$ 约束在它们各自的围绕靶原子中的核的轨道或壳层中的电子碰撞。如图4所示,这些壳层由K、L、M、N等表示。在入射电子与束缚电子之间的碰撞中,如果入射电子的能量大于沿轨道运行的电子的 $BE$ ,则束缚电子会从原子被射出。例如,图4中示出的具有能量 $E > BE_K$ 的碰撞电子会使K壳层电子射出,从而在K壳层中剩下空位。随着外层轨道中的电子填入空位,得到的激发且离子化的原子会去激发。在去激发期间,x射线被发射,其能量等于去激发所涉及的电子的最初能级与最终能级之间的差。由于轨道壳层的能级是周期表上的每种元素所独有的,因此x射线的能量可以识别元素。能量将是单能量的,并且谱呈现为单色的而不是宽的连续带。在此,单色是指发射线的能量宽度等于与所涉及的原子跃迁相关联的自然线宽度。对于铜 $K\alpha$ x射线,自然线宽度为约4eV。对于Zr  $K\alpha$ 、Mo  $K\alpha$ 和Pt  $K\alpha$ ,线宽度分别为约5.7eV、6.8eV和60eV。来自具有作为阳极的钨靶的x射线管的整个谱如图5所示。钨的原子能级独有的特征发射线交叠显示在厚靶韧致辐射上。

### [0012] x射线吸收和x射线荧光

[0013] 当来自任何类型的x射线源的x射线撞击样品时,x射线可以被原子吸收或通过材料被散射。如图6A所示,x射线通过将其所有能量转移至最里面的电子而被原子吸收的过程被称为光电效应。当入射x射线的能量大于其在碰撞中遇到的轨道电子的结合能时,就会出现这种情况。在相互作用中,光子不再存在,将其所有能量给予轨道电子。需要x射线能量中的大部分来克服轨道电子的结合能,其余x射线能量在电子射出并在壳中留下空位时被给予电子。射出的自由电子被称为光电子。当入射光子的能量超过但相对接近它撞击的电子的结合能时,最可能发生光电相互作用。

[0014] 作为示例,与入射光子为50keV相比,当入射光子为25keV时,结合能为23.2keV的K壳层电子更可能发生光电相互作用。这是因为光电效应与x射线能量的大约第三功率成反比。当x射线能量等于吸收体中电子壳层(K、L、M等)的结合能时,这种下降通过激增而被中断。在特定壳层中可以产生空位的最低能量被称为边缘。图7示出了锡(Sn)的吸收随x射线能量的变化。通过其质量衰减系数在纵轴上定义吸收。与L轨道和K轨道的结合能对应的吸收边缘分别由大约43.4keV和29keV处的不连续跃迁来表示。周期表中的每种元素都有相似的曲线,该曲线描述了其吸收随x射线能量的变化。

[0015] 原子的内壳层中的空位为原子提供了不稳定的条件。如上面在“特征线发射”章节中描述的,随着原子回到它的稳定条件,来自外壳层的电子被转移至内壳层,并在此过程中发射其能量为相应壳层的两种结合能之间的差的特征x射线。这种光子诱导的x射线发射过程被称为x射线荧光或XRF。图6B示意性地示出了来自K壳层的x射线荧光,并且图8中示出了来自铝样品的典型x射线荧光谱。使用其能量分辨率统治L-K跃迁的自然线宽度的固态光子计数探测器来测量谱。重要的是要注意,这些单能量发射线不位于宽带连续辐射的背景上;相反,谱是无韧致辐射的。

## 发明内容

[0016] 根据一些实施方式,提供了一种载体,所述载体被配置成与宽带x射线源一起使用,所述宽带x射线源包括:电子源;以及初始靶,其被布置成接收来自电子源的电子以响应

于撞击在初始靶上的电子而产生宽带x射线辐射。所述载体包括壳体,所述壳体被配置成可移除地耦接至宽带x射线源并且被配置成容纳次级靶,所述次级靶能够响应于入射宽带x射线辐射而产生单色x射线辐射;所述壳体包括:透射部,其被配置成允许宽带x射线辐射在存在时被透射至所述次级靶;以及阻挡部,其被配置成吸收宽带x射线辐射。

[0017] 一些实施方式包括被配置成与宽带x射线源一起使用的载体,所述宽带x射线源包括:电子源;以及初始靶,其被布置成接收来自电子源的电子以响应于撞击在初始靶上的电子而产生宽带x射线辐射,所述载体包括壳体,所述壳体被配置成容纳次级靶,所述次级靶响应于撞击宽带x射线辐射而产生单色x射线辐射,所述壳体还被配置成:可移除地耦接至宽带x射线源,使得当所述壳体被耦接至宽带x射线源并且容纳次级靶时,次级靶被定位成使得来自初始靶的至少一些宽带x射线辐射撞击在次级靶上以产生单色x射线辐射,所述壳体包括第一部分和第二部分,所述第一部分包括对宽带x射线辐射基本上透明的第一材料,所述第二部分包括对宽带x射线辐射基本上不透明的第二材料。

[0018] 一些实施方式包括单色x射线装置,所述单色x射线装置包括:电子源,其被配置成发射电子;初始靶,其被配置成响应于来自电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射经由荧光产生单色x射线辐射;以及用于次级靶的壳体,所述壳体包括孔,来自次级靶的单色x射线辐射通过所述孔被发射,所述壳体被配置成将次级靶定位成:使得由初始靶发射的宽带x射线辐射中的至少一些入射到次级靶上;使得当单色x射线装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.7的单色性的单色x射线辐射。根据一些实施方式,在至少约15度的视场上经由所述孔发射的单色x射线辐射具有大于或等于0.8的单色性。根据一些实施方式,在至少约15度的视场上经由所述孔发射的单色x射线辐射具有大于或等于0.9的单色性。根据一些实施方式,在至少约15度的视场上经由所述孔发射的单色x射线辐射具有大于或等于0.95的单色性。

[0019] 一些实施方式包括单色x射线装置,所述单色x射线装置包括:电子源,其被配置成发射电子;初始靶,其被配置成响应于来自电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;以及次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射经由荧光产生单色x射线辐射,其中,使用电子源与初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于次级靶的吸收边缘的能量的两倍。根据一些实施方式,使用电子源与初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于次级靶的吸收边缘的能量的三倍。根据一些实施方式,使用电子源与初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于次级靶的吸收边缘的能量的四倍。根据一些实施方式,使用电子源与初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于次级靶的吸收边缘的能量的五倍。

[0020] 一些实施方式包括单色x射线装置,所述单色x射线装置包括:包括环形阴极的电子源,所述电子源被配置成发射电子;初始靶,其被配置成响应于来自电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;至少一个引导件,其与环形阴极同心地被布置以引导电子朝向初始靶;以及次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射经由荧光产生单色x射线辐射。根据一些实施方式,所述至少一个引导件包括被同心地布置在环形阴极内的至少一个第一内部引导件。根据一些实施方式,所述至少一个引导件包括被同心地布置在环形阴极外部的至少一个第一外部引导件。

## 附图说明

[0021] 将参考以下附图来描述所公开的技术的各个方面和各种实施方式。应当理解,附图不一定按比例绘制。

[0022] 图1示出了宽带x射线源的示意图;

[0023] 图2示出了如下情况:电子(比原子核轻得多)非常靠近原子核,并且电磁相互作用导致轨迹的偏离,电子在所述轨迹处失去能量,而且x射线光子被发射,并且图2描述了最简单形式的轫致辐射;

[0024] 图3示出了由典型的x射线管产生的轫致辐射谱,其中试图逃离靶的较低能量的x射线被吸收,从而引起谱的在低能量处的特征翻转;

[0025] 图4示出了产生特征线发射的物理现象;

[0026] 图5示出了来自具有钨阳极的x射线管的组合谱,其示出了厚靶轫致辐射和特征钨线发射;

[0027] 图6A示出了光电效应;

[0028] 图6B示出了来自K壳层的x射线荧光的原理;

[0029] 图7示出了吸收系数随着关于锡的x射线能量的变化,其中不连续的跳跃或边缘示出了如何仅增强高于锡中的电子的结合能的吸收;

[0030] 图8示出了通过用由具有铜阳极的x射线管产生的铜x射线照射铝(Al)靶而得到的x射线荧光谱;

[0031] 图9示出了用于产生单色x射线的x射线设备;

[0032] 图10A和图10B示出了从常规单色x射线设备发射的x射线辐射的轴上x射线谱和离轴x射线谱;

[0033] 图11A示出了根据一些实施方式的单色x射线装置;

[0034] 图11B示出了图11A中所示的单色x射线装置的部件的放大视图;

[0035] 图11C示出了根据一些实施方式的使用混合材料接口部的图11A中所示的单色x射线装置的部件的放大视图;

[0036] 图12示出了被配置成被插入单色x射线装置的容器并且能够从单色x射线装置的容器移除的可移除载体;

[0037] 图13A、图13B和图13C示出了根据一些实施方式的次级靶载体的视图;

[0038] 图14A和图14B示出了使用图13A、图13B和图13C中所示的示例性载体从单色x射线设备发射的x射线辐射的轴上x射线谱和离轴x射线谱;

[0039] 图14C示出了图10A至图10B和图14A至图14B中所示的x射线谱的视场特性;

[0040] 图15示出了低能谱和高能谱中的集成功率比随着视角的变化;

[0041] 图16示出了单色性随着视角的变化;

[0042] 图17A、图17B和图17C示出了根据一些实施方式的次级靶载体的视图;

[0043] 图18A和图18B示出了使用图17A、图17B和图17C所示的示例性载体从单色x射线设备发射的x射线辐射的轴上x射线谱和离轴x射线谱;

[0044] 图19示出了四种示例性材料的次级靶的荧光x射线谱;

[0045] 图20示出了x射线强度随着关于用于两种不同几何形状的次级靶的多个初级电压的发射电流的变化;

- [0046] 图21示出了从金初始靶发射的x射线谱；
- [0047] 图22示出了轴上单色性和离轴单色性随着用于使用图17A、图17B和图17C中所示的载体的锡次级靶的初级电压的变化；
- [0048] 图23示出了轴上单色性和离轴单色性随着用于使用图17A、图17B和图17C中所示的载体的银次级靶的初级电压的变化；
- [0049] 图24A和图24B示出了根据一些实施方式的具有改进的电子光学器件的单色x射线源2400的截面；
- [0050] 图25示出了电子撞击图24A和图24B中所示的单色x射线源中的初始靶的点的轨迹；
- [0051] 图26示出了电子撞击图24A和图24B中所示的单色x射线源中的初始靶的点的轨迹；
- [0052] 图27示出了包括混合接口部件的单色x射线源；
- [0053] 图28示出了替代配置,在该替代配置中,阴极进一步远离初始靶而移动,从而导致发散的电子轨迹和降低的单色性；
- [0054] 图29示出了用于使用本文中描述的单色x射线源进行成像实验的乳腺X线照相术仿体；
- [0055] 图30示出了图29中所示的仿体的嵌入式线性块阵列的直方图；
- [0056] 图31示出了根据一些实施方式的使用商用宽带x射线系统和单色x射线系统的图29中的仿体的图像以及相应的直方图；
- [0057] 图32示出了对厚的乳腺组织进行建模的堆叠式乳腺X线照相术仿体；
- [0058] 图33示出了根据一些实施方式的使用商用宽带x射线系统和单色x射线系统的图32中的仿体的图像以及相应的直方图；
- [0059] 图34示出了根据一些实施方式的常规宽带乳腺X线照相术与单色乳腺X线照相术的对比；
- [0060] 图35示出了根据一些实施方式的使用商用宽带x射线系统和单色x射线系统的微钙化的图像以及相应的直方图；
- [0061] 图36示出了根据一些实施方式的使用商用宽带x射线系统和单色x射线系统的微钙化的图像以及相应的直方图；
- [0062] 图37示出了用于不同的次级靶和商用宽带x射线系统的线分辨率；
- [0063] 图38示出了用于单色仪器的调制传递函数(MTF)；
- [0064] 图39示出了对不同的曝光时间和锥形几何形状的期望信噪比所需的功率需求；
- [0065] 图40示出了不同的曝光时间和锥形几何形状以及关于商用机器的指示的期望信噪比所需的功率需求；
- [0066] 图41示出了关于碘的质量吸收系数曲线；
- [0067] 图42示出了使用22keV处的Ag K x射线和被称为Oxilan 350的碘造影剂进行对比增强成像的示例。

## 具体实施方式

- [0068] 如上所述,由于制造、操作和维护这样的系统的成本过高以及/或者由于对诊所和

医院用途而言系统占用空间过大,因此能够产生单色辐射以产生诊断图像的常规x射线系统通常不适合临床和/或商业用途。因此,关于这些系统的研究仅限于应用于如下相对较少的研究机构处的研究以及由这些研究机构进行的研究,所述研究机构投资了大型、复杂且昂贵的设备。

[0069] 数十年来,在临床环境中具有成本效益的单色x射线成像已经成为许多物理学家和医学专业人员的目标,但是对于可以在临床中被采用用于常规诊断用途的单色x射线设备,诸如医院和诊所的医疗机构仍然没有可行的选择。

[0070] 发明人已经开发了用于在相对较大的视场(FOV)上产生可选择的单色x射线的方法和设备。在医学和非医学领域中,许多应用都可以从这种单色x射线源中受益。医学应用包括但不限于乳腺组织、心脏、前列腺、甲状腺、肺、脑、躯干和四肢的成像。非医学领域包括但不限于经由x射线吸收、x射线衍射和x射线荧光进行的非破坏性材料分析。发明人已经认识到,用于常规乳腺癌筛查的2D和3D x射线乳腺X线照相术可以立即受益于这种单色源的存在。

[0071] 根据一些实施方式,提供可选择的能量(例如,高达100keV)以对不同的解剖特征进行最佳成像。一些实施方式有助于提供具有允许相对短的曝光时间的强度的单色x射线辐射,从而减少递送给正在经历成像的患者的辐射剂量。根据一些实施方式,可以使用从其发射单色x射线辐射的相对较小的紧凑区域来保持相对高水平的强度,从而有助于以适合于高品质成像(例如,乳腺成像)的空间分辨率进行x射线成像。从相对较小的紧凑区域产生相对较高强度的单色x射线辐射的能力有助于在相对较高的空间分辨率下进行短的低剂量成像,除其他益处外,这(例如,根据一些实施方式,通过克服以下困难:检测厚的乳腺组织中的癌性病变,同时仍将辐射剂量水平保持在监管机构设定的极限值以下)还解决了常规x射线成像系统的一个或更多个问题。

[0072] 使用常规的乳腺X线照相系统,即使不是不可能,也很难与较小的正常密度乳腺组织相同的置信水平来检查大(厚)且密实的乳腺。这严重限制了乳腺X线照相术对乳腺较大和/或密实的女性(占人口的30%至50%,该妇女群体的乳腺癌发病率高六倍)的价值。对于乳腺密实的女性,检测灵敏度从85%降至64%,对于乳腺非常密实的女性,则检测灵敏度降至45%。另外,使用常规的x射线成像系统(即,宽带x射线成像系统),假阳性和不必要的活检以不令人满意的水平发生。本文所述的技术有助于能够为具有大和/或密实的乳腺的女性——这些女性长期未被诊断、被过度筛查并且患乳腺癌的风险最高——提供更好的诊断解决方案的单色x射线成像。尽管与一些实施方式相关的益处对于厚和/或密实的乳腺具有特定优点,但是应当理解,本文提供的用于单色x射线成像的技术也为筛查任何尺寸和密度的乳腺提供了优点,并且为其他临床诊断应用提供了益处。例如,与当前在临床环境中部署的常规x射线成像系统相比,本文所述的技术有助于根据所有患者的组织密度将患者的辐射剂量减少6至26倍,从而允许进行年度检查和重复检查,同时显著减少患者的终身辐射暴露。另外,根据一些实施方式,在某些情况下,可以在不痛苦地压迫乳腺的情况下进行筛查。另外,本文描述的技术有助于相对低成本的单色x射线系统的制造,从而将其保持在目前用于临床乳腺X线照相术的宽带x射线系统的当前成本约束内。

[0073] 可以使用批准的造影剂进行单色x射线成像,以进一步增强以减少剂量对组织异常的检测。本文所述的技术可以以类似的低剂量与三维3D层析X射线照相组合

(tomosynthesis)一起使用。使用本文中描述的技术的单色辐射还可以被用于进行原位化学分析(例如,肿瘤的化学成分的原位分析),例如以改进于2017年11月28日提交的题为“Methods and Apparatus for Determining Information Regarding Chemical Composition Using X-ray Radiation”的美国专利申请第15/825787号中描述的化学分析技术,该申请以其全部内容并入本文中。

[0074] 常规的单色x射线源先前已经被开发用于除了医学成像以外的目的,因此,通常不适合用于临床目的。具体地,单色性、强度、空间分辨率和/或功率水平可能不足以用于医学成像目的。发明人已经开发了用于产生单色x射线辐射的技术,该技术适用于多种应用,包括用于诸如乳腺和其他组织成像的临床目的,在下面进一步详细描述其各方面。发明人认识到,除了发射的单色x射线辐射之外,常规的单色x射线源还发射大量的宽带x射线辐射。因此,从这样的单色x射线源发射的x射线辐射由于也从该源发射的大量宽带辐射而具有很差的单色性,从而污染了x射线谱。

[0075] 发明人已经开发了用于在相对较大的视场上沿轴上方向和离轴方向二者产生具有高的单色性程度的x射线辐射的技术(例如,如通过在下文中进一步详细讨论的单色x射线辐射与宽带辐射的比率所测量的)。本文描述的技术使得能够在不显著增加宽带x射线辐射污染的情况下(即,在基本上不降低单色性的情况下)增加宽带x射线源的功率。因此,可以使用增加的功率水平来产生更高强度的单色x射线辐射,同时保持高的单色性程度。

[0076] 根据一些实施方式,提供了一种单色x射线装置,该单色x射线装置能够产生如下单色x射线辐射,所述单色x射线辐射具有以下特性(例如,单色性、强度等):使得用于乳腺X线照相术的曝光时间少于20秒,并且根据一些实施方式,曝光时间少于10秒。

[0077] 根据一些实施方式,提供了一种单色x射线装置,该单色x射线装置在足以在单次曝光中对靶器官(例如,乳腺)成像的视场上发射具有高的单色性程度(例如,纯度为90%或更高)的单色x射线,以便以适合于诊断的空间分辨率(例如,100微米或更高的空间分辨率)产生图像。

[0078] 以下是与单色x射线系统和与其相关的技术的实施方式有关的各种概念的更详细描述。应当理解,本文描述的实施方式可以以多种方式中的任何方式被实现。下面仅出于说明性目的提供特定实现的示例。应当理解,可以将所提供的实施方式和特征/功能单独使用、一起使用或者以两个或更多个的任意组合使用,原因是本文描述的技术的各方面在此方面不受限制。

[0079] 图9示出了用于经由x射线荧光产生单色x射线的常规x射线设备的二维(2D)示意性剖视图。图9中所示的x射线设备的几何形状与题为“Radiation Source for Generating Essentially Monochromatic X-rays”的美国专利第4,903,287号中示出和描述的x射线设备的几何形状以及在以下文献中示出和描述的单色x射线源的几何形状相似:Marfeld等人,国际光学工程学会的会刊(Proc. SPIE),第4502卷,117页至125页,Advances in Laboratory-based X-ray Sources and Optics II,编者为Ali M.Khounsayr和Carolyn A.MacDonald。参照图9,x射线设备900包括真空管950,该真空管950包括:环形丝905,其操作作为阴极;以及初始靶910,其操作作为用于产生宽带x射线辐射的电路的阳极。真空管950包括通常由壳体955、前部965(例如,铜面板)和窗930(例如,铍窗)形成的真空密封罩。

[0080] 在操作中,由于由阴极和阳极之间的高电压偏置建立的电场,来自丝905(阴极)的

电子(例如,示例性电子907)朝向初始靶910(阳极)被加速。随着电子因初始靶910而减速,产生宽带x射线辐射915(即,如图3中所示的轫致辐射)。如果电压足够大以产生光电子,则也可以通过对阳极材料的电子轰击产生初始靶材料独有的特征发射线。因此,宽带x射线辐射(或可替代地,宽谱辐射)是指具有或不具有初始靶的特征发射线的轫致辐射。从初始靶910发射的宽带辐射915被透射通过真空罩的窗930以辐照次级靶920。窗930提供了真空罩的透射部,该透射部由如下材料(例如,铍)制成,该材料通常透射由初始靶910产生的宽带x射线辐射并阻止电子(例如,从初始靶散射的电子)撞击在次级靶920上以防止产生不想要的轫致辐射。窗930可以是杯状的,以将次级靶920容纳在真空罩的外部,从而使得能够在不破坏x射线管950的真空密封的情况下移除和更换次级靶。

[0081] 响应于来自初始靶910的入射宽带x射线辐射,次级靶920经由荧光产生次级靶中的(一种或多种)元素的单色x射线辐射925特征。如下面进一步详细讨论的,次级靶920为锥形形状并且由所选的材料制成,以在期望能量下产生荧光单色x射线辐射。在图9中示意性地示出了宽带x射线辐射915和单色x射线辐射925,以示出使用初始靶和次级靶经由荧光产生单色x射线辐射的一般原理。应当理解,初始靶和次级靶将分别在 $4\pi$ 方向上发射宽带x射线辐射和单色x射线辐射。因此,将从x射线管950以相对于与穿过x射线管950的孔的中心的纵轴对应的轴955的不同角度 $\theta$ 发射x射线辐射。

[0082] 如上所述,发明人已经认识到,用于产生单色x射线辐射的常规x射线设备(在本文中也称为单色x射线源)发射大量的宽带x射线辐射。也就是说,尽管常规的单色源报告了产生单色x射线辐射的能力,但实际上,这些常规设备发射的x射线辐射的单色性很差(即,常规的单色源呈现出低的单色性程度)。例如,在Marfeld中描述的使用在165kV下工作并且具有钨(W)次级靶的源的常规单色源发射纯度为约50%(即,x射线发射是宽带x射线辐射的约50%)的单色x射线辐射。作为另一示例,具有图9所示的一般几何形状的常规单色x射线源发射图10A(轴上)和图10B(离轴)中所示的x射线谱,该单色x射线源在以下情况下工作:阴极处的负电压为-50kV,由金(Au;  $Z=79$ )制成的初始靶处于地电势,并且具有由锡(Sn;  $Z=50$ )制成的次级靶。如上所述,将从x射线管以相对于该x射线管的纵轴(图9中所示的轴955)不同的角度 $\theta$ 发射x射线辐射。

[0083] 由于轴上谱和离轴谱在单色源的功效中起作用,因此示出了轴上x射线谱和离轴x射线谱二者。具体地,x射线辐射的单色性随着视角 $\theta$ 的变化导致所得到的图像的不均匀性。另外,对于医学成像应用,x射线谱的在离轴角度下的单色性降低(即,宽带x射线辐射的相对量增加)增加递送给患者的剂量。因此,轴上谱和离轴谱二者的单色性程度可能是x射线设备的x射线发射的重要特性。在图10A中,轴上是指围绕x射线管的轴线的窄角度范围(小于约0.5度),而离轴是指偏离x射线管的轴线约5度。如图10A和图10B中所示,从常规单色x射线源发射的x射线谱实际上不是单色的,而是被大量的宽带x射线辐射污染。

[0084] 具体地,除了次级靶的特征发射线(即,由于在图10A和图10B中分别被标记为Sn  $K_{\alpha}$ 和Sn  $K_{\beta}$ 的L壳层和M壳层跃迁而产生的经由来自锡(Sn)次级靶的K壳层荧光而发射的单色x射线)之外,图10A和图10B中所示的x射线谱1000a和1000b还包括大量的宽带x射线辐射。具体地,x射线谱1000a和1000b包括在初始靶的特征发射线处的明显的峰值(即,与在图10A和图10B中被标记为Au  $K_{\alpha}$ 和Au  $K_{\beta}$ 的金初始靶的K壳层发射对应的能量处的x射线辐射)以及大量的轫致辐射背景。如图10A和图10B中的箭头1003所示,Sn  $K_{\alpha}$ 峰值在轴上方向上比轫

致辐射背景大仅(约)8.7倍,而在离轴方向上比致辐射背景大了约7倍。因此,仅从检查就可以清楚地看出,这种常规的单色x射线源在轴上方向和离轴方向二者上发射呈现出非常差的单色性的x射线辐射,如下面所量化的。

[0085] 可以基于次级靶的特征荧光发射线中的集成能量与宽带x射线辐射的总集成能量的比率来计算单色性。例如,可以计算在本文中被称为 $P_{low}$ 的低能宽带x射线辐射的集成能量(例如,由图10A和图10B中的箭头1001大体上指示的低于 $Sn K_{\alpha}$ 峰值的x射线谱的集成能量)和在本文中被称为 $P_{high}$ 的高能宽带x射线辐射的集成能量(例如,由图10A和图10B中的箭头1002大体上指示的高于 $Sn K_{\beta}$ 峰值的x射线谱的集成能量)。特征K壳层发射线的集成能量(在本文中被称为 $P_k$ ,其对应于图10A和图10B中 $Sn K_{\alpha}$ 和 $Sn K_{\beta}$ 发射中的集成能量)与 $P_{low}$ 和 $P_{high}$ 的比率提供了x射线源发射的宽带x射线辐射量相对于单色x射线辐射量的测量。在图10A的示例中,比率 $P_k/P_{low}$ 为0.69,比率 $P_k/P_{high}$ 为1.7。在图10B的示例中,比率 $P_k/P_{low}$ 为0.9,比率 $P_k/P_{high}$ 为2.4。增加比率 $P_{low}$ 和 $P_{high}$ 会增加源的谱输出为单色的程度。如本文中使用的,x射线谱的单色性 $M$ 被计算为 $M=1/(1+1/a+1/b)$ ,其中 $a=P_k/P_{low}$ , $b=P_k/P_{high}$ 。对于由常规x射线设备产生的图10A中的轴上x射线谱, $M=0.33$ ,并且对于由常规x射线设备产生的图10B中的离轴x射线谱, $M=0.4$ 。因此,x射线谱的大部分能量是宽带x射线辐射而不是单色x射线辐射。

[0086] 发明人已经开发出以下技术,所述技术有助于产生具有明显更高的单色性的x射线辐射,从而改进来自x射线装置的x射线发射的特征并有助于改进的x射线成像。图11A示出了与发明人开发的改进从装置发射的x射线辐射的特性的技术结合的x射线装置1100,图11B示出了根据一些实施方式的x射线装置1100的部件的放大视图。x射线装置1100包括真空管1150,真空管1150为x射线装置的电子光学器件1105和初始靶1110提供真空密封罩。真空密封罩基本上由壳体1160(其包括前部1165)和接口或窗部1130形成。面板1175可以被设置成形成前部1165的外表面。面板1175可以由通常对宽带x射线辐射不透明的材料——例如,防止从x射线装置1100发射至少一些宽带x射线辐射的高Z材料,例如铅、钨、厚不锈钢、钽、铌等——构成。

[0087] 接口部1130可以由通常x射线透射材料(例如,铍)组成,以使得来自初始靶1110的宽带x射线辐射能够穿过真空罩外部以辐照次级靶1120。以这种方式,接口部1130提供了真空罩的内部与外部之间的、宽带x射线辐射可以通过其透射的“窗”,因此,在本文中接口部1130也被称为窗或窗部1130。窗部1130可以包括面向真空管1150的真空罩的内部的内表面和面向真空管1150的真空罩的外部的的外表面(例如,图12中所示的内表面1232和外表面1234)。窗部1130可以被成形为形成容器(参见图12中标记的容器1235),该容器被配置成保持次级靶载体1140,使得次级靶(例如,次级靶1120)被定位在真空罩外部的至少从初始靶1110发射的一些宽带x射线辐射将撞击在次级靶上的位置。根据一些实施方式,载体1140是可移除的。如下面进一步详细讨论的,通过利用可移除载体1140,不同的次级靶可以与x射线系统1100一起使用而无需破坏真空密封。然而,根据一些实施方式,载体1140是不可移除的。

[0088] 发明人认识到,设置包括透射部和阻挡部的混合接口部有助于进一步减少从x射线装置发射的宽带x射线辐射的量。例如,根据一些实施方式,图11C示出了包括透射部1130a(例如,铍部分)和阻挡部1130b(例如,钨部分)的接口部1130'。因此,根据一些实施方

式,接口部1130'可以包括图11C中的虚线下方的第一材料,并且包括虚线上方的与第一材料不同的第二材料。透射部1130a和阻挡部1130b可以包括适合于充分地执行预期的透射和吸收功能的任何相应的材料,原因是该方面不限于与任何特定材料一起使用。

[0089] 根据一些实施方式,透射部与阻挡部之间的接口的位置(例如,图11C中的虚线的位置)近似地对应于当载体被插入由接口部形成的容器中时载体的透射部与阻挡部之间的接口的位置。根据一些实施方式,透射部与阻挡部之间的接口的位置(例如,图11C中的虚线的位置)与载体被插入由接口部形成的容器中时载体的透射部与阻挡部之间的接口的位置不对应。在图28中还示出了混合接口部件,下面将进一步详细讨论。

[0090] 在图11A和图11B所示的实施方式中,次级靶1120具有锥形几何形状,并且由响应于入射宽带x射线辐射以期望的能量荧光发射x射线的材料制成。次级靶可以由任何合适的材料制成,材料的示例包括但不限于锡(Sn)、银(Ag)、钼(Mo)、钯(Pd)或任何其他合适的材料或材料的组合。图19示出了由辐照以上列出的四种示例性材料的次级靶锥产生的x射线谱。如下面进一步详细讨论的,次级靶1120提供小的紧凑区域,可以经由荧光从所述紧凑区域发射单色x射线辐射以提供良好的空间分辨率。

[0091] 发明人已经理解,可移除载体1140可以被设计成改进从真空管1150发射的x射线辐射的特征(例如,改进x射线辐射发射的单色性)。如下面进一步详细讨论的,改进单色性的技术还有助于产生更高强度的单色x射线辐射的能力。在图11A和图11B所示的实施方式中,可移除载体1140包括透射部1142,该透射部1142包括通常对x射线辐射进行透射的材料,使得由初始靶1110发射的穿过窗部1130的至少一些宽带x射线辐射也穿过透射部1142以辐照次级靶1120。透射部1142可以包括圆柱形部1142a,该圆柱形部1142a被配置成容纳次级靶1120并且可以被配置成使得次级靶能够被移除和替换,从而使得可以使用不同材料的次级靶来以相应材料的不同特征能量产生单色x射线,不过这些方面不限于与使得次级靶能够替换(即,移除和代替)的载体一起使用。适用于透射部1142的示例性材料包括但不限于铝、碳、碳纤维、硼、硼氮化物、铍氧化物、硅、硅氮化物等。

[0092] 载体1140还包括阻挡部1144,该阻挡部1144包括对于x射线辐射通常是不透明的材料(即,基本上吸收入射的x射线辐射的材料)。阻挡部1144被配置成吸收宽带x射线辐射的穿过窗1130的、未被次级靶转换以及/或者未入射到次级靶上的至少一些,以及/或者阻挡部1144被配置成吸收宽带x射线辐射的否则可能会逃逸出真空罩的至少一些。在常规x射线源(例如,图9中所示的常规x射线设备900)中,使得能够从该设备发射大量的宽带x射线辐射,从而破坏了次级靶所发射的荧光x射线辐射并且显著降低了所发射的x射线辐射的单色性。在图11A、图11B、图12、图13A至图13C以及图17A至图17C所示的实施方式中,透射部和阻挡部形成被配置成容纳次级靶的壳体。

[0093] 根据一些实施方式,阻挡部1144包括圆柱形部1144a和环形部1144b。圆柱形部1144a使得由次级靶1120响应于来自初始靶1110的入射宽带x射线辐射而荧光发射的x射线辐射能够被透射,同时吸收如上所述的至少一些宽带x射线辐射。环形部1144b提供了如下部,所述部提供增加的表面积以吸收否则将由x射线装置1100发射的额外的宽带x射线辐射。在图11A和图11B所示的实施方式中,环形部1144b被配置成紧密地安装在x射线管的前部的凹处,以通常在可能的范围内使被吸收的宽带x射线辐射量最大化。也如在下面讨论的图13B和图17B中所示的,环形部1144b包括与穿过圆柱形部1144a和1142a的孔相对应的孔

部1144c,以使得从次级靶1120荧光发射的单色x射线辐射能够从x射线装置1100被发射。适用于阻挡部1144的示例性材料包括但不限于铅、钨、钽、铌、铂、金等。

[0094] 在图11A和图11B所示的实施方式中,载体1140被配置成使得次级靶的一部分被包含在阻挡部1144内。具体地,如图11A和图11B中所示的实施方式中示出的,当次级靶被插入载体1140的透射部1142中时,锥形次级靶1120的尖端延伸至圆柱形部1144a中。如下面进一步讨论的,发明人已经理解,将次级靶的一部分包含在阻挡部1144中可以改进从x射线装置发射的单色x射线辐射的特征。然而,根据一些实施方式,次级靶载体可以被配置成使得次级靶的任何部分都不包含在载体的阻挡部中,其示例在下面进一步详细讨论的图13A至图13C中被示出。如下面进一步详细讨论的,载体1140的两种配置(例如,具有和不具有次级靶载体的阻挡交叠)提供了对所发射的x射线辐射的特征的显著改进(例如,改进的单色性)。

[0095] 如图12中所示,载体1240(其可以与图11A和图11B中所示的载体1140相似或相同)被配置成是可移除的。例如通过分别沿通常由箭头1205指示的方向插入和移除载体,例如载体1240可以可移除地被插入由接口部件1230(例如,包括透射窗的接口)形成的容器1235中。也就是说,根据一些实施方式,载体1240被配置为可以被插入x射线装置中以及从x射线装置被移除(例如,通过将可移除载体1240插入容器1235中以及/或者从容器1235中移除载体1240)的单独部件。

[0096] 如图12中所示,载体1240具有:远端1245,其被配置成被插入x射线装置中;以及近端1247,单色x射线辐射经由孔1244d通过载体1240的中心从近端1247被发射。在图12所示的实施方式中,圆柱形阻挡部1244a被定位成邻近圆柱形透射部1242a并且位于圆柱形透射部1242a的远侧。环形阻挡部1244b被定位成邻近阻挡部1244a并且位于阻挡部1244a的远侧。如所示的,环形阻挡部1244b的直径D大于圆柱形阻挡部1244a(对于两个圆柱形部的直径大致相同的实施方式,为圆柱形透射部1242a)的直径d。在图12中,从近端的末端至远端的末端的距离被标记为高度H。载体1240的尺寸可以取决于载体被配置成容纳的次级靶的尺寸。例如,对于被配置成容纳具有4mm基部的次级靶的示例性载体1240,直径d可以为约4mm至5mm,直径D可以为约13mm至16mm,并且高度H可以为约18mm至22mm。作为另一示例,对于被配置成容纳具有8mm基部的次级靶的示例性载体1240,直径d可以为约8mm至9mm,直径D可以为约18mm至22mm,高度H可以为约28mm至32mm。应当理解,所设置的载体和次级靶的尺寸仅是示例性的并且可以是任何合适的值,原因是该方面不限于与任何特定尺寸或尺寸集一起使用。

[0097] 根据一些实施方式,载体1240可以被配置成:例如通过在载体1240上设置能够用手拧入容器1235内的协作螺纹中的螺纹而旋入容器1235中。可替代地,可以设置可释放的机械锁扣,以使得载体1240能够被保持在适当的位置并且使得能够通过从容器向外施加力来移除载体1240。作为另一替代,载体1240和容器1235的配合的紧密度足以在操作期间将载体保持在适当的位置。例如,载体1240的侧面与容器1235的壁之间的摩擦可能足以将载体1240保持在适当的位置,从而使得不需要额外的紧固机构。应当理解的是,可以使用当载体1240被插入容器中时足以将载体1240保持在适当位置的任何装置,原因是这些方面在这方面不受限制。

[0098] 如上所述,发明人已经开发了许多有助于改进的单色x射线辐射发射的载体配置。图13A和图13B示出了根据一些实施方式的载体1340的三维视图和二维视图。图13A中的三

维视图示出了被分成示例性组成部分的载体1340。具体地,图13A示出了与阻挡部1344分开的透射部1342。如上所述,透射部1342可以包括通常至少在关注的相关能量下透射宽带x射线辐射的材料(即,使得宽带x射线辐射能够至少在关注的相关能量下穿过该材料而基本上不吸收宽带x射线辐射的材料,例如铝、碳、碳纤维、硼、硼氮化物、铍氧化物、硅、硅氮化物等)。另一方面,阻挡部1344可以包括至少在关注的相关能量下通常对宽带x射线辐射不透明的材料(例如,至少在关注的相关能量下基本上吸收宽带x射线辐射的材料,例如铅、钨、钽、铌、铂、金等)。

[0099] 以这种方式,使得由初始靶发射的至少一些宽带x射线辐射能够穿过透射部1342以辐照次级靶,而从初始靶发射(以及/或者从x射线管的其他表面发射或由x射线管的其他表面散射)的至少一些宽带x射线辐射被阻挡部1344吸收以防止从x射线装置发射不想要的宽带x射线辐射。因此,载体1340有助于提供具有减少的由宽带x射线辐射引起的污染的单色x射线辐射,从而显著改进了x射线装置的x射线发射的单色性。在图13A至图13C所示的实施方式中,阻挡部1344包括圆柱形部1344a和环形部1344b——环形部1344b的直径大于圆柱形部1344a的直径——以吸收在更宽的角度范围和/或源自于更宽的位置范围内发射的宽带x射线辐射,以改进x射线装置的x射线辐射发射的单色性。

[0100] 根据一些实施方式,透射部1342和阻挡部1344可以被配置成使用多种技术中的任何技术耦接在一起或配合。例如,在图13A的实施方式中被示出为圆柱形区段的透射部1342可以包括在圆柱形区段的一端处的配合部1343a,该配合部1343a被配置成与在阻挡部1344的圆柱形部1344a的相应端处的配合部1343b配合。配合部1343a和1343b可以适当地被确定尺寸并且例如设置有螺纹,以使得能够通过将两个部分拧在一起而使透射部1342和阻挡部1344配合。可替代地,配合部1343a和1343b可以被确定尺寸为使得配合部1343a在配合部1343b上滑动或者配合部1343b在配合部1343a上滑动,以将两个部分耦接在一起。应当理解,可以使用任何机构来使得透射部1342和阻挡部1344能够被分开以及被耦接在一起。根据一些实施方式,透射部1342和阻挡部1344是不可分开的。例如,根据一些实施方式,载体1340可以被制造为如下单个部件,所述单个部件使透射部1342固定地耦接至阻挡部1344,从而使得这些部通常理所当然不会彼此分开。

[0101] 透射部1342还可以包括部1325,部1325被配置成容纳次级靶1320。例如,透射部1342的一端可以被开放并被适当地确定尺寸,使得次级靶1320可以被定位在透射部1342内,从而使得当载体1340被耦接至x射线装置时(例如,被插入由真空管的接口部形成的容器例如透射窗等中),次级靶1320被定位成使得从初始靶发射的至少一些宽带x射线辐射辐照次级靶1320,以使次级靶以所选材料的特征能量荧光发射单色x射线。以这种方式,不同的次级靶1320可以被定位在载体1340内和/或由载体1340保持,从而使得单色x射线辐射的能量是可选择。根据一些实施方式,次级靶1320可以包括部1322,部1322有助于使次级靶1320配合或以其他方式耦接至载体1340。例如,部1322和部1325可以设置有协作螺纹,所述协作螺纹使得次级靶能够被拧入载体1340的透射部1342内的适当位置处。可替代地,部1322和部1325可以被确定尺寸为使得次级靶紧密地安装在透射部内并且通过安装的紧密性(例如,通过两个部件之间的摩擦)被保持,以及/或者部1322和/或部1325可以包括使得次级靶能够被保持在适当位置的机械特征。根据一些实施方式,在次级靶已经被插入载体中之后,可以包括单独的覆盖零件以安装在透射部1342上方以及/或者可以使用任何其他

合适的技术以使得次级靶1320能够被插入载体1340内并且由载体1340充分地保持,原因是各方面在这方面不受限制。

[0102] 在图13B所示的实施方式中,次级靶1320被包含在透射部1342内,与阻挡部1344不交叠。也就是说,次级靶1320的最远范围(例如,图13B所示的实施方式中的锥形靶的尖端)未延伸到阻挡部的圆柱形部1344a(或阻挡部的任何其他部件)中。通过将次级靶1320排他地包含在载体的透射部内,通常可以使暴露于宽带x射线辐射并因此能够荧光发射单色x射线辐射的次级靶1320的体积最大化,从而提供通常针对x射线装置的给定次级靶和给定操作参数集(例如,x射线管的功率水平等)产生的单色x射线辐射的强度进行优化的机会。也就是说,通过增加次级靶的曝光量,可以实现增加的单色x射线强度。

[0103] 图13B中所示的阻挡部1334的环形部1344b的正视图示出了:环形部1344b包括与圆柱形部1344a(和圆柱形部1342)的孔对应的孔1344c,该孔1344c使得从次级靶1320荧光发射的单色x射线能够从x射线装置被发射。因为阻挡部1344由大体上不透明的材料制成,所以阻挡部1344还将吸收以大于某个阈值角度的离轴角度发射的、从次级靶荧光发射的一些单色x射线,该阈值角度取决于单色x射线源自的次级靶的体积中的位置。因此,阻挡部1344还操作为准直仪以将发射的单色x射线限制在相对于x射线管的轴线的角度范围内,在图13A至图13C的实施方式中,该轴线对应于穿过载体1340的中心的纵轴。

[0104] 图13C示出了被定位在x射线装置内(例如,被插入由真空管的接口部(例如,图11A、图11B和图12所示的示例性窗部1130和1230)形成的容器中)的载体1340的示意图。部1365对应于通常由诸如铜的材料构造的真空管的前部。另外,设置了由通常不透明的材料(例如,铅、钨、钽、铌、铂、金等)制成的具有与载体1340的孔对应的孔的盖或面板1375。可以可选地包括面板1375,以提供对宽带x射线的进一步吸收以防止杂散宽带x射线辐射污染从x射线装置发射的x射线辐射。

[0105] 根据一些实施方式,示例性载体1340可以用于改进单色x射线发射特征。例如,图14A和图14B示出了由于使用了图13A、图13B和/或图13C中所示的载体1340而得到的轴上x射线谱1400a和离轴x射线谱1400b。如所示的,相对于由被配置成产生单色x射线辐射的常规x射线设备(例如,图9所示的常规x射线设备900)产生的图10A和图10B中所示的轴上x射线谱和离轴x射线谱,所得到的x射线谱显著地被改进。如图14A中的箭头1403所示,轴上的Sn  $K_{\alpha}$ 峰值比韧致辐射背景大了约145倍;在图10A所示的轴上谱中,轴上的Sn  $K_{\alpha}$ 峰值比韧致辐射背景大了约8.7倍。如图14B中的箭头1403所示,离轴的Sn  $K_{\alpha}$ 峰值比韧致辐射背景大了约36倍;在图10B所示的离轴谱中,离轴的Sn  $K_{\alpha}$ 峰值比韧致辐射背景大了约7.0倍。另外,对于图14A所示的轴上谱, $P_k$ (在图14A和图14B中标记为Sn  $K_{\alpha}$ 和Sn  $K_{\beta}$ 的特征K壳层发射线的集成能量)与 $P_{low}$ (通常由图14A和图14B中的箭头1401指示的低于Sn  $K_{\alpha}$ 峰值的低能x射线谱的集成能量)和 $P_{high}$ (通常由箭头1402指示的高于Sn  $K_{\beta}$ 峰值的高能谱的集成能量)的比率分别为21和62;对于图10A的轴上谱, $P_k$ 与 $P_{low}$ 和 $P_{high}$ 的比率分别为0.69和1.7。对于图14B所示的离轴谱,比率 $P_k/P_{low}$ 和比率 $P_k/P_{high}$ 分别为12.9和22;对于图10B的离轴谱,比率 $P_k/P_{low}$ 和比率 $P_k/P_{high}$ 分别为0.9和2.4。这些增加的比率转化为.94( $M=.94$ )的轴上单色性和.89( $M=.89$ )的离轴单色性;对于图10A和图10B的x射线谱,这些增加的比率分别转化为.33的轴上单色性和0.4的离轴单色性。

[0106] 单色性的这一显著改进有助于获取如下x射线图像,所述x射线图像更均匀,具有

更好的空间分辨率,并且在医学成像应用中向患者递送明显更少的x射线辐射剂量。例如,在乳腺X线照相术的情况下,与图14A和图14B中所示的由x射线辐射谱递送的剂量相比,图10A和图10B中所示的x射线辐射谱将向正常厚度和密度的乳腺组织递送平均腺体剂量四倍的剂量。图14C示出了用于产生图10A和图10B所示的x射线谱的常规x射线源的视场以及用于产生图14A和图14B所示的x射线谱的x射线装置的视场。常规的x射线设备的半极大处全宽度(FWHM)约为30度,而改进的x射线装置的FWHM约为15度。因此,尽管经由示例性载体1340减小了视场,但是所得到的视场更加足以以紧凑的源探测器距离(例如,约760mm)在单次曝光中对诸如乳腺的器官进行成像,但是具有增加的均匀性和空间分辨率以及降低的辐射剂量,使得能够获得显著改进和更安全的x射线成像。图15示出了关于低能x射线辐射和高能x射线辐射的集成功率比( $P_k/P_{low}$ 和 $P_k/P_{high}$ )随着视角 $\theta$ 的变化;图16示出了常规x射线设备(1560a、1560b和1660)的x射线辐射的单色性以及使用示例性载体1340的改进的x射线设备(1570a、1570b和1670)的x射线辐射的单色性。如曲线1570a、1570b和1670所示,单色性随着视角而减小。使用载体1340,发射如下单色x射线辐射,所述单色x射线辐射关于纵轴在15度视场上具有至少为.7的单色性,并且所述单色x射线辐射关于纵轴在10度视场上具有至少为.8的单色性。如曲线1560a、1560b和1660所示,常规x射线设备的单色性在所有视角上都非常差(即,在整个视场上小于.4)。

[0107] 发明人已经认识到,可以通过修改次级靶载体的几何形状来改进对从x射线管发射的x射线辐射的单色性的各方面的进一步提高。根据一些实施方式,特别是对于离轴x射线辐射,可以显著地改进单色性。例如,发明人认识到,特别是相对于离轴x射线辐射,通过修改载体以使得次级靶的一部分在载体的阻挡部内,可以改进由x射线装置发射的x射线辐射的单色性。图17A和图17B示出了根据一些实施方式的载体1740的三维视图和二维视图。如图17A所示,示例性载体1740可以包括与载体1340类似的部件,示例性载体1740可以包括容纳次级靶1720的透射部1742和阻挡部1744(其可以包括圆柱形部1744a和环形部1744b,孔1744c穿过中心)。

[0108] 然而,在图17A至图17C所示的实施方式中,载体1740被配置成:使得当次级靶1720被定位在透射部1742内时,次级靶1720的一部分延伸到阻挡部1744中。具体地,阻挡部包括交叠部1744d,交叠部1744d与次级靶1720的一部分交叠,以使得次级靶的至少一些被包含在阻挡部1744内。根据一些实施方式,交叠部1744d在次级靶的约.5mm与5mm之间延伸。根据一些实施方式,交叠部1744d在次级靶的约1mm与3mm之间延伸。根据一些实施方式,交叠部1744d在次级靶的约2mm上延伸。根据一些实施方式,交叠部1744d延伸小于.5mm,而在一些实施方式中,交叠部1744d延伸大于5mm。交叠的量将部分地取决于次级靶、载体和x射线装置的尺寸和几何形状。图17C示出了被定位在x射线装置内(例如,被插入在真空管的接口处形成的容器中)的载体1740,其中面板1775被设置在真空管(例如,图11A中所示的真空管1150)的前部1765上方。

[0109] 根据一些实施方式,示例性载体1740可以用于进一步改进单色x射线发射特征。例如,图18A和图18B示出了由于使用了图17A至图17C中所示的载体1740而产生的轴上x射线谱1800a和离轴x射线谱1800b。如所示的,相对于图10A和图10B中所示的常规x射线设备产生的轴上x射线谱和离轴x射线谱,所得到的x射线谱得到了显著改进,并且相对于使用图13A至图13C所示的示例性载体1340产生的x射线谱,所得到的x射线谱呈现出改进的特征。

如图18A中的箭头1803所示,与关于图14A中的轴上谱的145和关于图10A中所示的轴上谱的8.7相比,轴上的 $\text{Sn K}_\alpha$ 峰值比韧致辐射背景大160倍。如图18B中的箭头1803所示,与关于图14B中的离轴谱的36和关于图10B中所示的离轴谱的7.0相比,离轴的 $\text{Sn K}_\alpha$ 峰值比韧致辐射背景大84倍。

[0110] 与关于图14A的轴上谱的21和62以及关于图10A的轴上谱的0.69和1.7相比,对于图18A中示出的轴上谱, $P_k$  (在图18A和图18B中被标记为 $\text{Sn K}_\alpha$ 和 $\text{Sn K}_\beta$ 的特征K壳层发射线的集成能量)与 $P_{\text{low}}$  (在图18A和图18B中通常由箭头1801指示的低于 $\text{Sn K}_\alpha$ 峰值的低能x射线谱的集成能量)和 $P_{\text{high}}$  (通常由箭头1802指示的高于 $\text{Sn K}_\beta$ 峰值的高能谱的集成能量)的比率分别为31和68。分别与关于图14B所示的离轴谱的12.9和22以及关于图10B的离轴谱的0.9和2.4相比,对于图18B的离轴谱,比率 $P_k/P_{\text{low}}$ 和比率 $P_k/P_{\text{high}}$ 分别为29和68。分别与关于图14A的x射线谱的.94 ( $M=.94$ )的轴上单色性和关于图14B的x射线谱的.89 ( $M=.89$ )的离轴单色性以及关于图10A和图10B的x射线谱的.33的轴上单色性和0.4的离轴单色性相比,这些增加的比率转换为.96 ( $M=.96$ )的轴上单色性和.95 ( $M=.95$ )的离轴单色性。

[0111] 再次参照图15和图16,星分别指示使用示例性载体1640发射的x射线辐射的轴上和离轴低能比 (1580a) 和高能比 (1580b) 以及轴上和离轴单色性 (1680)。如所示的,x射线辐射在轴上和5度离轴处呈现出基本上相同的特征。因此,如下面进一步详细讨论的,尽管示例性载体1740改进了轴上单色性和离轴单色性二者,但是图17A至图17C中所示的示例性载体的使用呈现出离轴单色性的显著增加,从而例如通过以下操作来为使用单色x射线的x射线成像提供实质性益处:改进均匀性,减少剂量,并且使得能够使用更高的x射线管电压来增加单色强度以提高空间分辨率以及区分微小的密度变化 (例如,小的组织异常,例如乳腺肉体的微钙化) 的能力。使用载体1740发射如下单色x射线辐射,所述单色x射线辐射关于纵轴在15度视场上具有至少.9的单色性,并且所述单色x射线辐射关于纵轴在10度视场上具有至少.95的单色性。

[0112] 应当理解,本文描述的示例性载体可以被配置成是可移除的壳体或者可以被集成到x射线装置中。例如,本文中描述的示例性载体的一个或更多个方面可以例如作为固定部件被集成、内置或以其他方式形成x射线装置的一部分,原因是这些方面在这方面不受限制。

[0113] 众所周知,可以通过以下操作来增加单色x射线发射的强度:增加阴极-阳极电压 (例如,图11A和图11B所示的丝1106与初始靶1100之间的电压电势) 以及/或者增加丝电流,这进而又增加了由丝发射的电子的发射电流,后一种增加丝电流的技术提供了有限的控制,原因是它高度依赖于阴极的特性。图20示出了x射线辐射强度、阴极-阳极电压与发射电流之间的关系,该图绘制了使用银 (Ag) 次级靶和750mm的源-探测器距离产生的x射线强度与使用两个不同的次级靶几何形状 (即,具有4mm直径的基部的Ag锥和具有8mm直径的基部的Ag锥) 在许多不同的阴极-阳极电压下的发射电流之间的关系。

[0114] 通常,作为产生高于吸收边缘的能够在次级靶中诱导x射线荧光以产生足够的单色x射线强度的足够的高能量宽带x射线辐射与产生污染所需的单色x射线辐射的过多高能宽带x射线辐射之间的平衡,阴极-阳极电压被选择成要由次级靶荧光发射的期望的单色x射线辐射的特征发射线的能量的约两倍。例如,对于Ag次级靶,通常选择45kV的阴极-阳极电势 (例如,电子光学器件将被设置在-45kV处),以确保产生高于如图21中所示的银的K边

缘 (25keV) 的足够的高能宽带x射线,以产生如图19(左下)中所示的22keV Ag K单色x射线辐射。类似地,对于Sn次级靶,通常将选择50kV的阴极-阳极电势,以确保产生高于如图21中所示的锡的K边缘 (29keV) 的足够的高能宽带x射线,以产生图19(右下)中所示的25keV Sn K单色x射线辐射。通常遵循对阴极-阳极电压的两个极限值的该因数,以限制从x射线设备发射的单色x射线的高能量污染。

[0115] 发明人已经认识到,本文中描述的技术允许消除两个极限值的因数,从而使得能够使用高的阴极-阳极电压来增加单色x射线强度,而不会显著增加宽带x射线辐射污染(即,单色性不显著降低)。具体地,可以使用用于阻挡宽带x射线辐射的技术——包括由发明人开发的示例性次级靶载体——来产生高强度的单色辐射,同时保持出色的单色性。例如,图22示出了在使用由发明人开发的示例性载体1740、利用Sn次级靶的情况下关于多个阴极-阳极电压(初级电压)的轴上单色性2200a和离轴单色性2200b。类似地,图23示出了在使用由发明人开发的示例性载体1740、利用Ag次级靶的情况下关于多个阴极-阳极电压(初级电压)的轴上单色性2300a和离轴单色性2300b。如所示的,在示出的高电压范围内保持高的单色性程度,在示出的范围内仅变化1.5%。因此,可以使用较高的电压来增加单色x射线强度(例如,沿着图20中所示的线),但基本上不影响单色性。例如,可以使用高达并超过100KeV的初级电压来生成纯度超过90% ( $M>0.9$ ) 的单色x射线辐射,从而显著增加单色x射线强度。

[0116] 根据一些实施方式,使用比从给定靶荧光发射的所需单色x射线辐射的能量大两倍的初级电压(例如,阴极-阳极电压电势,例如图11A和图11B中所示的x射线管1150的丝1106与初始靶1110之间的电压电势)来生成单色x射线辐射。根据一些实施方式,使用大于或等于从给定靶荧光发射的期望的单色x射线辐射的能量的约两倍且小于或等于约三倍的初级电压来生成单色x射线辐射。根据一些实施方式,使用大于或等于从给定靶荧光发射的期望的单色x射线辐射的能量的约三倍且小于或等于约四倍的初级电压来生成单色x射线辐射。根据一些实施方式,使用大于或等于从给定靶荧光发射的期望的单色x射线辐射的能量的约四倍且小于或等于约五倍的初级电压来生成单色x射线辐射。根据一些实施方式,使用大于或等于从给定靶荧光发射的期望的单色x射线辐射的能量的五倍的初级电压来生成单色x射线辐射。在每种情况下,可以实现跨越视场的轴上和离轴的具有大于或等于.9的单色性的x射线辐射,不过应该理解,达到这样的单色性水平不是必需的。

[0117] 发明人已经认识到,x射线管的几何形状可能导致宽带x射线辐射污染。发明人已经意识到,可以改进x射线管的电子光学器件,以进一步减少所产生的可能会污染从x射线装置发射的单色x射线的宽带x射线辐射的量。再次参照图11A和图11B,x射线装置1100包括电子光学器件1105,该电子光学器件1105被配置成产生撞击在初始靶1110上以产生宽带x射线辐射的电子。发明人已经开发出电子光学器件几何形状,其被配置成减少和/或消除对真空罩内除初始靶之外的表面的轰击。这种几何形状还减少和/或消除其他表面的要经由常规系统中的附加冷却来除去的寄生加热。

[0118] 作为示例,电子光学器件1105的几何形状被配置成减少和/或消除对真空管1150内的窗部1130和/或其他表面的轰击,以防止:从x射线管产生和可能从x射线管发射不想要的宽带x射线辐射,从而降低发射的x射线辐射谱的单色性。在图11A和图11B所示的实施方式中,电子光学器件1105包括形状通常可以为环形的丝1106以及位于环形丝1106的内侧和

外侧的引导件1107、1108和/或1109。例如,如下面进一步详细讨论的,引导件1107、1108、1109可以与环形丝1106同心地被定位(例如,内部引导件1107被定位在丝环内,并且外部引导件1108和1109被定位成围绕丝环),以在丝1106的任一侧上设置壁,以防止至少一些电子撞击在除初始靶1110之外的表面上。

[0119] 根据一些实施方式,电子光学器件105被配置成在高负电压(例如,40kV、50kV、60kV、70kV、80kV、90kV或更高)下工作。也就是说,丝1106、内部引导件1107和外部引导件1108、1109可以在装置的操作期间全部被设置在高负电势下。这样,在这些实施方式中,初始靶1110可以被设置在地电势下,使得从丝1106发射的电子朝向初始靶1110被加速。然而,真空罩内的x射线管的其他部件和表面通常也在地电势下。因此,电子也将朝向x射线管1150的其他表面——例如,真空罩的内部与外部之间的透射接口(例如,图11A和图11B中的窗1130)——加速并撞击x射线管1150的其他表面。使用常规的电子光学器件,这种非预期的表面的轰击产生宽带x射线辐射,该宽带x射线辐射导致从x射线装置发射的不想要的宽带谱并引起不期望的x射线管的加热。发明人意识到,使用为由丝1106发射的电子提供更受限的路径的内部引导件1107和外部引导件1108和/或1109可以减少和/或消除对除初始靶1110以外的表面的这种不期望的轰击。

[0120] 根据一些实施方式,引导件1107至1109是圆柱形形状,并且同心地被布置来为丝1106发射的电子提供受限的路径,该路径引导电子朝向初始靶1110,以防止对真空罩内的其他表面进行至少一些不想要的轰击(例如,减少和/或消除窗部1130的电子轰击)。然而,应当理解,在任何给定的实施方式中使用的引导件可以具有任何合适的形状,原因是各方面在这方面不受限制。根据一些实施方式,引导件1107、1108和/或1109包括铜,然而,可以使用任何合适的导电的(并且优选地是非磁性的)材料,例如不锈钢、钛等。应当理解,可以使用任意数量的引导件。例如,内部引导件可以与单个外部引导件(例如,引导件1108或1109)结合使用以提供一对引导件,一个引导件在阴极的内侧上,一个引导件在阴极的外侧上。作为另一示例,可以设置单个内部引导件以防止至少一些不想要的电子轰击真空管的内部与外部之间的接口(例如,图11A和图11B中的窗部1130),或者可以设置单个外部引导件以防止至少一些不想要的电子轰击真空管提供的其他内表面。另外,可以使用多于三个的引导件来限制电子到达初始靶的路径,以减少和/或消除对真空罩内的表面的不想要的轰击,原因是这些方面在这方面不受限制。

[0121] 图24A和图24B示出了根据一些实施方式的具有改进的电子光学器件的单色x射线源2400的截面。在示出的实施方式中,阴极与阳极之间的电势为80kV。具体地,钨环形阴极2406的偏压为-80kV,并且镀金的钨初始靶2410处于地电势。铜内部引导件2407以及铜外部引导件2408和2409也被设置在-80kV处以引导从阴极发射的电子,以防止至少一些电子撞击除初始靶2410以外的表面,以减少杂散宽带x射线辐射的量。单色x射线源2400使用银次级靶2420和铍接口部件2430。图24B示出了当单色x射线源2400被操作时在环形阴极与初始靶之间的电子轨迹。图25和图26示出了电子撞击初始靶2410的点的轨迹,表明在该配置中引导件防止电子撞击接口部件2430。图27示出了包括混合接口部件的单色x射线源,该单色x射线源具有铍的透射部和钨的阻挡部,当与本文中描述的其他技术结合(例如,使用本文中描述的示例性载体)时,该单色x射线源产生纯度为97% ( $M=0.97$ ) 的单色x射线辐射。图28示出了备选配置,在该备选配置中,阴极被移动而进一步远离初始靶,从而导致发散的电

子轨迹和降低的单色性。

[0122] 本文中描述的单色x射线源能够提供具有高单色性程度的相对高强度的单色x射线辐射,从而使得能够在获得具有高信噪比的图像的同时具有相对短的曝光时间,相对短的曝光时间减少向正经历成像的患者递送的辐射剂量。下面提供的是在乳腺X线照相术的背景下使用本文中描述的技术获得的结果。提供这些结果以示出使用本文中描述的一种或更多种技术可获得的显著改进,然而,由于这些方面不限于用于乳腺X线照相术,因此结果仅作为示例被提供,所获得的结果也不是本文中描述的任何实施方式所要求的。

[0123] 图29示出了乳腺X线照相术仿体(CIRS模型011a)2900,该乳腺X线照相术仿体(phantom)用于测试发明人开发的结合了本文描述的技术的单色x射线装置的性能的各个方面。如图29所示的仿体2900的内部视图所示,仿体2900包括许多尺寸不同且具有不同吸收特性的单个特征。图30突出显示了仿体2900的嵌入式特征中的一些特征,包括5个块的线性阵列,每个块1厘米厚,每个块具有模拟不同密度的乳腺组织的成分。最左侧的块模拟100%的腺体乳腺组织,最右侧的块模拟100%的脂肪(油脂)组织,而其他三个块是腺体和脂肪的混合,混合的比例的范围从70:30(腺体:脂肪)到50:50到30:70。所有5个块均被嵌入在由50:50的腺体与脂肪混合物制成的仿体中。仿体的总厚度为4.5cm。

[0124] 图30还示出了当x射线束进入仿体一路穿过块和仿体到达成像探测器中的一维成像过程的示意性描述,其中透射的x射线强度被转换成灰度计数的积分值(在这种情况下,强度是到达每个探测器像素的x射线能量的总和)。每个像素中的电子器件将这个能量总和转换为0到7000之间的数,其中7000表示电子器件饱和之前允许的最大能量总和。该数字转换产生的数被称为灰度计数)。

[0125] 图30的a)中的红色水平线所示的数据是通过基底50:50的腺体-脂肪混合物测得的x射线强度B。由黑色曲线所示的数据是通过50:50混合物和1cm块透射的x射线强度W。由于它们的成分不同,变化的步长表示块中x射线吸收的量不同。图30中的曲线b)将信号S定义为W-B,图30的曲线c)将对比度定义为S/B。最佳地用于确定成像系统的可检测性的品质因数是信噪比SNR。对于此处的讨论,SNR被定义为S/噪声,其中噪声是图30的曲线a)中示出的背景强度波动的标准偏差。使用本文描述的技术产生的图像可以利用22keV的x射线和25keV的x射线并在本文中被呈现,并且使用本文描述的技术产生的图像的SNR值和商用宽带x射线乳腺X线照相术机器产生的图像的SNR值被比较。

[0126] 乳腺X线照相术检查中的辐射暴露受到美国国会于1994年制定的《乳腺X线照相术质量标准法案》(MQSA)的严格监管。MQSA在乳腺X线照相术筛查中将平均腺体剂量(mgd)的极限值设置为3毫戈瑞(mGy);Gray是焦耳/千克。如下文进一步详细讨论的,这个3mGy的极限值对商用乳腺X线照相术机器的操作有重要影响。乳腺组织由腺体和脂肪(油脂)组织构成。腺体组织的密度( $\rho=1.03\text{gm}/\text{cm}^3$ )与脂肪组织的密度( $\rho=0.93\text{gm}/\text{cm}^3$ )差别不大,这意味着选择最佳的单色x射线能量来优化SNR并不明显取决于乳腺组织的类型。相反,用于最佳成像的单色能量的选择主要取决于乳腺厚度。与较厚的乳腺相比,较薄的乳腺会使更少的x射线衰减,从而使得x射线的更重要的部分能够到达探测器。这导致更高质量的图像和更高的SNR值。这些考虑提供了在使用常规的商用乳腺X线照相术机器进行乳腺X线照相术检查期间要求乳腺受压的主要原理。

[0127] 对图29所示的工业标准仿体进行了成像实验,该仿体的厚度为4.5cm并且代表典

型的受压乳腺。仿体2900具有50:50的腺体-脂肪组织混合物均匀分布。对于使用22keV和25keV的单色能量获得的CIRS仿体图像,下面将详细讨论SNR和平均腺体剂量。如图32所示,还使用双仿体进行了实验以模拟厚度为9cm的受压的厚实乳腺。双仿体也具有50:50的腺体-脂肪组织混合物均匀分布。对于使用25keV的单色能量的双仿体,呈现SNR和平均腺体剂量。如下文进一步详细讨论的,在这种厚实乳腺模型上获得的高SNR表明单色x射线可以用于检查受压减少或根本没有受压的女性,原因是通常情况下4.5cm厚的受压乳腺相当于8cm至9cm厚的未受压乳腺。

[0128] 实验表明,对于相同的SNR,单色测量的平均腺体剂量始终低于商用机器的平均腺体剂量。换句话说,对于相同的平均腺体剂量,单色测量的SNR明显高于商用机器的SNR。因此,单色X射线乳腺X线照相术比常规宽带x射线乳腺X线照相术方法具有重大进步,并且对诊断所有女性尤其是乳腺组织厚或密实的女性的乳腺病变具有重要意义。密实的乳腺的特征是腺体组织分布不均匀;这种不均匀性或可变性会在图像中引入伪像,使辨别病变更加困难。如下文进一步详细讨论的,单色成像所提供的提高的SNR使在密实乳腺中存在固有组织变化的情况下更容易看到病变。

[0129] 图31示出了使用单色Ag K (22keV) 和Sn K (25keV) x射线从本文描述的单色x射线源获得的仿体2900的图像和来自使用宽带发射的常规商用乳腺X线照相术机器的图像以及通过软组织块的相应直方图。来自商用机器的图像如图31的(a)所示。100%腺体块的SNR为8.4,平均腺体剂量(mgd)为1.25mGy (1Gy=1焦耳/千克)。图31中的图像(b)示出了使用22keV的x射线的单色图像,而图31中的图像(c)是使用25keV的x射线获得的。用22keV测量的100%腺体块的平均腺体剂量为0.2mGy,用25keV测量的平均腺体剂量为0.08mGy,两种能量的SNR值为8.7。为了获得与商用机器相同的SNR,使用22keV的单色系统递送降低了6.7倍的剂量,使用25keV的单色系统递送降低了15倍的剂量。

[0130] 与常规宽带系统相比,单色x射线技术提供的剂量减少具有明显更好的诊断可检测性,原因是SNR可以被提高3倍到6倍的因数,但仍然远低于用于筛查的3mGy的规定剂量限制。例如,在商用机器递送的相同剂量(1.25mGy)下,22keV图像的SNR值将为21.8,而在2.75mGy剂量下,22keV图像的SNR值为32。类似地,使用25keV能量,对于1.25mGy和2.75mGy的平均腺体剂量,SNR值分别为34和51。SNR的这一显著提高的范围对于诊断乳腺组织密实的女性具有巨大优势。如前所述,这种组织非常不均匀,并且与仿体的均匀特性和具有正常密度组织的女性的均匀特性不同,密实乳腺中腺体分布的变化会引入伪影和图像噪声,从而使辨别病变变得更加困难。本文描述的技术提供的更高的SNR可以克服这些问题。

[0131] 与本文描述的用于产生此处显示的图像的技术结合的单色x射线装置在尺寸和占用空间上均与商用宽带x射线乳腺X线照相术系统相当,首次使用单色性程度为95%的单色x射线产生乳腺X线照相术仿体的低剂量、高SNR的均匀图像。实际上,常规的单色x射线设备甚至不能达到这些单色性程度。

[0132] 如图32所示,为了模拟厚乳腺的乳腺X线照相术,通过将两个仿体彼此叠放(总厚度9.0cm)来创建厚实乳腺组织的模型,将18-220ACR乳腺X线照相术认证仿体(3200)放置在CIRS模型011A仿体(2900)的顶部上。对于这一系列实验,选择25keV的x射线以优化透射率,同时在由嵌入在CIRS仿体上的1cm块阵列表示的软组织中保持良好的对比度。将25keV的单色x射线的图像与从先前实验中使用的相同的商用宽带乳腺X线照相术机器获得的图像进

行比较。所得到的图像以及通过软组织块的对比度的直方图被显示在图33中。

[0133] 厚实乳腺组织的图像质量优于当前商用宽带系统可获得的任何图像的质量。商用机器递送的剂量为2.75mGy,在100%腺体块中仅达到3.8的SNR。对于0.43mGy的剂量,图33中的单色图像具有 $SNR=7.5$ 。商用宽带x射线系统要达到8.5的SNR所需的剂量——放射学家对于在4.5cm厚的较薄组织中成功检测的接受值——将为14mGy,这比用于对正常密度乳腺组织进行成像的商用剂量(1.25mGy)高11倍。这对于筛查来说是非常高且不安全的,并且比规定的MQSA筛查极限值高4.7倍。另一方面,单色系统达到 $SNR=8.5$ 所需的剂量仅为0.54mGy,比商用机器所需的剂量低26倍。使用单色x射线所需的剂量是安全的,比规定极限值低5倍多,并且仍然比用于使用商用宽带x射线乳腺X线照相术机器对4.5cm正常厚度的乳腺的剂量低2.5倍。在接近最大允许暴露(2.75mGy)的情况下,将单色x射线机器与商用宽带x射线机器进行比较,单色技术提供5倍高的SNR。在图34中示意性地总结了以上讨论。

[0134] 在9cm厚的乳腺仿体上进行的测量表明,本文描述的单色技术有助于在乳腺X线照相术筛查期间消除乳腺受压。4.5cm的受压乳腺在未受压时可以厚至9cm。然而商用机器由于乳腺厚度增加而失去了灵敏度,原因是商用机器无法将剂量增加到足够高以维持SNR并仍然保持低于规定的剂量极限值,而单色x射线系统却非常容易提供必要的SNR。作为示例,在单色乳腺X线照相术过程中,女性可能趋向于躺在诊疗台上,该诊疗台被设计成使得她的乳腺能够延伸通过台中的切口。单色x射线系统可以被设计成指引x射线平行于台的底侧。台还通过在台的水平表面的下侧上结合一层铅来有助于为患者提供改进的辐射屏蔽。

[0135] 发明人已经认识到,本文描述的单色x射线装置的几何形状的空间分辨率对于乳腺X线照相术应用而言是极好的。根据一些实施方式,单色x射线系统具有:760mm的源-探测器距离、具有4mm基部直径和8mm高度的次级靶锥以及像素尺寸为85微米的非晶硅成像探测器。使用本文描述的技术的该示例性单色x射线装置可以容易地解决在CIRS仿体和ACR仿体中直径为100微米至200微米的微钙化。图35和图36示出了相比于使用相同的商用装置获得的图像、使用该示例性单色x射线辐射装置获得的图像和相关联的直方图。对于这些图像,在较早前描述的使用单色25keV的x射线线的双ACR-CIRS仿体(堆叠的2900和3200仿体)实验中测得的微钙化的SNR比商用机器的SNR高50%并且其平均腺体剂量(mgd)比商用机器的平均腺体剂量低6倍。如果要使单色SNR与商用机器中测得的SNR相同,则单色平均腺体剂量(mgd)将是在总共低11倍的基础上另外再小2倍的因数。

[0136] 简单的几何形状考虑表明,次级锥的有效投影斑点尺寸为1mm至2mm。图37示出了通过被嵌入在CIRS仿体中的线对靶测得的强度扫描的直方图。线对靶的间距范围从每毫米5条线到高达每毫米20条线。最上面的四个直方图显示:使用上面简要描述的4mm次级锥对18keV、21keV、22keV和25keV的能量进行扫描,可以辨别出高达每毫米9条线的交替强度结构,这与110微米的空间分辨率FWHM一致。18keV能量仍然可以以每毫米10条线来辨别结构。图37中的底部直方图是使用常用的商用宽带乳腺X线照相术系统通过同一线对集合体的强度扫描。商用系统辨别结构的能力无法超过每毫米8条线。这种性能与系统的调制递送函数(MTF)一致,该调制递送函数通常被用来描述成像系统或部件的空间频率响应的特性。如图38所示,它被定义为在给定空间频率下相对于低频的对比度。在9条线/mm处的值0.25与具有直接探测器系统的其他系统相当,并且优于扁平面板探测器。

[0137] 根据一些实施方式,本文描述的示例性单色系统在连续模式下以高达2000瓦的功

率运行,即,主阳极被水冷却,高压和丝电流连续开启,并且使用计时器控制的机械快门获得图像。图20中的x射线通量数据以及图31和图33中所示的仿体图像为在不同压缩厚度的乳腺组织中在特定曝光时间内获得期望的信噪比所需的功率提供了缩放准则。在图39中,针对压缩厚度为4.5cm (50:50腺体-脂肪混合物),对使用Ag的次级材料的4mm锥组件和8mm锥组件进行了比较。对于由Sn制成的4mm锥、8mm锥,在图40中对如通过上述实验定义的压缩厚度为9cm (50:50腺体-脂肪混合物)的功率需求进行了比较。

[0138] 结果表明:在5秒钟的曝光中使用4mm锥在初级中消耗9.5kW的功率可以实现在对嵌入在正常乳腺密度被压缩至4.5cm的CIRS仿体中的100%腺体块的测量中获得的8.5的SNR (图39顶部);如果使用8mm锥,则需要3.7kW (图39底部)。在这两种情况下,源到探测器(S-D)距离为760mm。如果需要2秒钟,则如果使用8mm锥或者可以以471mm而不是760mm的源到探测器(S-D)距离使用4mm锥,那么需要9.2kW。由于空间分辨率依赖性与S-D呈线性关系,因此使4mm锥移动到更靠近样品的位置只会使空间分辨率降低1.6倍,但仍然比以760mm的源到探测器(S-D)距离使用8mm锥更好。通常,在空间分辨率和曝光时间之间需要做出权衡,这将决定以两个源到探测器距离使用4mm锥或8mm锥的实施方式是否最适合应用。此数据用作设计单色x射线源的指导,并且不排除其他各种靶尺寸和源到探测器距离的可能性。

[0139] 对于被压缩到9cm的厚实乳腺组织,SNR对功率的依赖性如图40所示。使用源到探测器距离为471mm的4mm Sn锥或源到探测器距离为760mm的8mm锥的情况下,在11kW下曝光7秒可以产生8.5的SNR。在对被压缩至4.5cm的正常密度乳腺组织的女性进行筛查时,常规的宽带商用乳腺X线照相术系统必须递送14mGy的剂量以达到这个相同的SNR,而单色系统在25keV时只能递送0.54mGy——低26倍的因数——但仍然比由商用机器递送的1.25mGy的常规剂量低2.3倍。

[0140] 发明人已经认识到,在紧凑型x射线发生器中最大化单色x射线强度对于医学成像中的应用可能是重要的。增加的强度允许更短的曝光,这减少运动伪影并提高患者舒适度。可替代地,可以使用增加的强度来提供增加的SNR,以实现不太明显的特征的检测。存在三种增加单色通量的基本方法:1)通过靶的几何形状使荧光效率最大化,2)在稳态模式下提高初级上的总功率输入,以及3)在脉冲模式下增加初级上的总功率输入。

[0141] 为了增加功率并且进一步减少曝光时间,可以使用10kW至50kW的功率水平。例如,大功率商用医用x射线管(即,宽带x射线管)中的电子束在撞击以10,000rpm旋转的阳极时具有约1×7mm的扇形形状。由于阳极与电子束成陡峭的角度,因此如观察者看到的,在长方向上投影的斑点尺寸减小到约1mm。对于1秒钟的曝光,可以将扇形束扫描出的整个环面视为电子轰击的入射面。对于直径70mm的阳极,该轨道长度为210mm,因此总入射的阳极表面积约为1400mm<sup>2</sup>。对于使用直径为36mm、截断高度为6mm的锥形阳极的单色系统,电子的总入射面积为1000mm<sup>2</sup>。因此,在不损坏阳极材料的情况下,以强医疗源的功率的70%的功率水平进行1秒钟的曝光应该是很容易的;100kW是最高功率医疗源的典型功率。假设非常保守的值是最高功率的50%,则对于短时间曝光,应该可以实现由以50kW操作的复合材料制成的阳极。这比进行厚实和/或密实的乳腺诊断所需要的功率更大,但是如果减小次级锥的有效尺寸成为当务之急,则可以提供显著的灵活性。

[0142] 在50kW下曝光一秒钟会在阳极上产生50kJ的热量。如果阳极是钨,则比热为0.134J/g/K。为了使温度保持在1000℃以下以免使阳极变形或熔融,阳极质量必须至少为

370gm。涂有厚金层的铜的阳极仅必须为130gm。这些参数可以被增加至少2倍到3倍,而不会严重改变源的尺寸或占用空间。对于重复曝光或较长时间曝光,可以主动冷却该系统中的阳极,而旋转阳极系统必须依赖于阳极质量来进行热储集以及通过滑环和缓慢的从真空容器中辐射转移出热量来低效地冷却。可以用水主动冷却上述单色x射线系统。

[0143] 根据一些实施方式,可以选择初级阳极材料以使来自次级的荧光强度最大化。在迄今为止的测试中,初级的材料是钨(W)或金(Au)。它们分别以59keV和68keV发射特征K发射线。与银的吸收边缘(Ag; 25.6keV)或锡的吸收边缘(Sn; 29keV)相比,这些能量相对较高,因此使它们在Ag或Sn次级靶中诱导x射线荧光时效率稍差。如果初级电压低于59keV,则这些线甚至可能不会被激励。在这种情况下,仅韧致辐射诱导荧光。可以利用其能量更接近次级的吸收边缘的特征线来选择初级材料,从而增加了x射线荧光的概率。例如,可以使用钼、镧、铈、钐的元素或包含这些元素的化合物,只要它们可以被形成适当的形状即可。所有的熔点都高于1000°C。如果希望以最有效的方式提高超过50keV的单色线的产生,则需要更高的Z元素。例如,可以使用贫铀(K线=98keV)来有效地诱导Au(吸收边缘=80.7keV)中的x射线荧光。在以160kV操作初级的情况下,韧致辐射加上特征铀K线可以产生单色Au线,用于胸/胸部成像、颅骨成像或无损工业材料分析。

[0144] 对于包括乳腺X线照相术的许多x射线成像应用,x射线探测器是集成了吸收的光子的能量的成像阵列。所有光谱信息都会丢失。如果光谱成像仪可用于特定情况,则次级靶可以是多种材料的合成。可以在最少两种能量下执行同时光谱成像,以确定样品的材料特性。即使具有谱功能的成像探测器可用于常规x射线乳腺X线照相术系统中使用的宽带源以用于确定可疑病变的化学成分的目的,使用光谱成像仪也不会减少至组织(或通常样品)的剂量,原因在于:与单色谱相比,宽带源向样品递送更高的剂量。

[0145] 使用单色x射线辐射的对比增强型乳腺X线照相术优于使用宽带x射线发射。通过以较低剂量选择性地吸收单色x射线,可以显著提高图像细节。靶向造影剂的选择性x射线吸收也将有助于乳腺肿瘤的高度靶向治疗性x射线治疗。迄今为止,在利用来自常规x射线管的宽带x射线发射进行的对比增强型数字乳腺X线照相术成像中,用户试图通过调整滤波并增加电子加速电压来利用诸如碘的试剂中增加的吸收,以产生高于碘的33keV的K吸收边缘的足够的x射线注量。图41示出了碘的质量吸收随着x射线能量变化的曲线。不连续的跳跃是L吸收边缘和K吸收边缘。如果来自常规源的宽带谱跨越包含这些边缘的能量范围,则造影剂将提供更大的吸收性能。因此,可检测性将提高。

[0146] 此处讨论的乳腺X线照相术系统中使用的单色辐射为对比度增强成像提供了更多选择。通常,人们可以选择荧光靶来产生仅超过碘吸收边缘的单色能量。从这个意义上说,来自管的单色x射线发射被调整到造影剂的吸收特性。为了进一步改进灵敏度,可以选择两个单独的荧光次级靶,它们将发射能量低于和高于造影剂的吸收边缘的单色x射线。通过有效地消除造影剂未积聚的邻近组织的影响,高于和低于边缘获得的吸收的差异可以进一步改进图像对比度。注意,如果它们同时辐照探测器,则当前在乳腺X线照相术中使用的x射线成像探测器中的大多数没有区分这两种能量的能量分辨率;必须分别连续使用两种不同的荧光靶来进行这两种测量。这肯定是可能的,并已并入我们的系统中。

[0147] 由于造影剂增强了相对于周围组织的x射线吸收,因此不必选择高于K边缘的单色能量以使吸收最大化。例如,图41示出低于K边缘的Pd  $K\alpha$  21.175keV能量的吸收系数与高于

K边缘的Nd K $\alpha$ 37.36keV能量的吸收系数相当。只要造影剂的原子相比于周围组织(C、O、N、P、S;Z<10和痕量的Fe、Ni、Zn等,Z<30)足够重(原子序数,Z>45),则在将来单色x射线技术增加对造影剂的可能选择。Pd、Ag和Sn的次级靶是该应用的最佳选择。例如,使用低于碘的吸收边缘的单色能量可以更好地利用典型乳腺X线照相术成像探测器的量子吸收效率。37keV(高于碘边缘)处的吸收比22keV(低于边缘)处的吸收低约2倍。较低的能量还可能同时证明在周围组织中具有更好的可检测性。图42示出了3滴Oxilan 350的线性组,Oxilan 350是通过Guerbet叠加在ACR仿体上制造的认可的碘造影剂。每滴中的碘的量约为1mg碘。

[0148] 例如,本公开还可以包括以下方案:

[0149] 方案1.一种被配置成与宽带x射线源一起使用的载体,所述宽带x射线源包括电子源和初始靶,所述初始靶被布置成接收来自所述电子源的电子以响应于撞击在所述初始靶上的电子而产生宽带x射线辐射,所述载体包括:

[0150] 壳体,其被配置成可移除地耦接至所述宽带x射线源并且被配置成容纳次级靶,所述次级靶能够响应于入射宽带x射线辐射而产生单色x射线辐射,所述壳体包括:

[0151] 透射部,其被配置成允许宽带x射线辐射在存在时被透射至

[0152] 所述次级靶;以及

[0153] 阻挡部,其被配置成吸收宽带x射线辐射。

[0154] 方案2.根据方案1所述的载体,其中,所述透射部至少包括第一透射材料,所述第一透射材料对于由所述宽带x射线源发射的宽带x射线辐射基本上是不透明的。

[0155] 方案3.根据方案2所述的载体,其中,所述透射部包括铝、碳、碳纤维、硼、硼氮化物、铍氧化物、硅和硅氮化物中的至少一种。

[0156] 方案4.根据方案1所述的载体,其中,所述阻挡部至少包括第一阻挡材料,所述第一阻挡材料对于由所述宽带x射线源发射的宽带x射线辐射基本上是不透明的。

[0157] 方案5.根据方案4所述的载体,其中,所述阻挡部包括铅、钨、钽、铪、铂和金中的至少一种。

[0158] 方案6.根据方案1所述的载体,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶的至少第一部分被定位在所述壳体的透射部内并且所述次级靶的第二部分被定位在所述壳体的阻挡部内。

[0159] 方案7.根据方案6所述的载体,其中,所述透射部包括被配置成容纳所述次级靶的第一圆柱形部,并且所述阻挡部包括第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶的第二部分交叠。

[0160] 方案8.根据方案7所述的载体,其中,所述次级靶是锥形的,其中,所述第一圆柱形部被配置成容纳锥形次级靶的基部的至少一部分,并且其中,所述第二圆柱形部被配置成与所述锥形次级靶的尖端的至少一部分交叠。

[0161] 方案9.根据方案7所述的载体,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少1mm。

[0162] 方案10.根据方案7所述的载体,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少2mm。

[0163] 方案11.根据方案7所述的载体,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少3mm。

[0164] 方案12.根据方案1所述的载体,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶被排他地定位在所述透射部内。

[0165] 方案13.根据方案1所述的载体,其中,所述透射部包括第一圆柱形部,所述第一圆柱形部被配置成容纳所述次级靶的至少一部分,并且所述阻挡部包括:

[0166] 具有第一直径的第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被定位成邻近所述第一圆柱形部;以及

[0167] 具有大于所述第一直径的第二直径的环形部,所述环形部被定位成邻近所述第二圆柱形部并且被配置成经由孔发射单色x射线辐射,所述孔被设置成穿过所述环形部。

[0168] 方案14.根据方案13所述的载体,其中,所述第一圆柱形部被定位在所述壳体的被配置成被插入所述宽带x射线源的容器的近端上,并且所述环形部被定位在所述载体的从其发射单色x射线辐射的远端上。

[0169] 方案15.根据方案1所述的载体,其中,所述壳体被配置成:当所述壳体被耦接至所述宽带x射线源并且容纳所述次级靶时,将所述次级靶定位成使得来自所述初始靶的至少一些宽带x射线辐射经由所述壳体的透射部撞击在所述次级靶上。

[0170] 方案16.根据方案15所述的载体,其中,所述宽带x射线源包括容纳所述电子源和所述初始靶的真空管,所述真空管包括具有透射窗的接口部件,所述透射窗允许由所述初始靶发射的宽带x射线辐射中的至少一些被透射至所述真空管的外部,并且其中,所述壳体被配置成可移除地被插入至少部分地由所述接口部件形成的容器中,使得当所述壳体被插入所述容器中并且容纳所述次级靶时,所述次级靶被定位成:接收来自所述初始靶的被透射通过所述接口部件的透射窗和所述壳体的透射部的至少一些宽带x射线辐射。

[0171] 方案17.根据方案16所述的载体,其中,当所述宽带x射线源被操作成产生宽带x射线辐射并且所述壳体被插入所述容器中并容纳所述次级靶时,所述载体被配置成:在至少约15度的视场上发射具有大于0.7的单色性的单色x射线辐射。

[0172] 方案18.根据方案16所述的载体,其中,当所述宽带x射线源被操作成产生宽带x射线辐射并且所述壳体被插入所述容器中并容纳所述次级靶时,所述载体被配置成:在至少约15度的视场上发射具有大于0.8的单色性的单色x射线辐射。

[0173] 方案19.根据方案17所述的载体,其中,当所述宽带x射线源被操作成产生宽带x射线辐射并且所述壳体被插入所述容器中并容纳所述次级靶时,所述载体被配置成:在至少约15度的视场上发射具有大于或等于0.9的单色性的单色x射线辐射。

[0174] 方案20.根据方案17所述的载体,其中,当所述宽带x射线源被操作成产生宽带x射线辐射并且所述壳体被插入所述容器中并容纳所述次级靶时,所述载体被配置成:在至少约15度的视场上发射具有大于或等于0.95的单色性的单色x射线辐射。

[0175] 方案21.一种单色x射线装置,包括:

[0176] 电子源,其被配置成发射电子;

[0177] 初始靶,其被配置成响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;

[0178] 次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射而经由荧光产生单色x射线辐射;以及

[0179] 用于所述次级靶的壳体,所述壳体包括孔,来自所述次级靶的单色x射线辐射通过所述孔被发射,所述壳体被配置成将所述次级靶定位成:使得由所述初始靶发射的宽带x射

线辐射中的至少一些入射在所述次级靶上;使得当所述单色x射线装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.7的单色性的单色x射线辐射。

[0180] 方案22.根据方案21所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.8的单色性的单色x射线辐射。

[0181] 方案23.根据方案21所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.9的单色性的单色x射线辐射。

[0182] 方案24.根据方案21所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.95的单色性的单色x射线辐射。

[0183] 方案25.根据方案21所述的单色x射线装置,其中,所述壳体包括:

[0184] 透射部,其被配置成允许宽带x射线辐射在存在时被透射至所述次级靶;以及

[0185] 阻挡部,其被配置成吸收宽带x射线辐射。

[0186] 方案26.根据方案25所述的单色x射线装置,其中,所述透射部至少包括第一透射材料,所述第一透射材料对于由所述宽带x射线源发射的宽带x射线辐射基本上是透明的。

[0187] 方案27.根据方案26所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括铝、碳、碳纤维、硼、硼氮化物、铍氧化物、硅和硅氮化物中的至少一种。

[0188] 方案28.根据方案25所述的单色x射线装置,其中,所述阻挡部至少包括第一阻挡材料,所述第一阻挡材料对于由所述宽带x射线源发射的宽带x射线辐射基本上是不透明的。

[0189] 方案29.根据方案28所述的单色x射线装置,其中,所述阻挡部包括铅、钨、钽、铌、铯、铂和金中的至少一种。

[0190] 方案30.根据方案25所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶的至少第一部分被定位在所述壳体的透射部内,并且所述次级靶的第二部分被定位在所述壳体的阻挡部内。

[0191] 方案31.根据方案30所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括被配置成容纳所述次级靶的第一圆柱形部,并且所述阻挡部包括第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶的第二部分交叠。

[0192] 方案32.根据方案31所述的单色x射线装置,其中,所述次级靶是锥形的,其中,所述第一圆柱形部被配置成容纳锥形次级靶的基部的至少一部分,并且其中,所述第二圆柱形部被配置成与所述锥形次级靶的尖端的至少一部分交叠。

[0193] 方案33.根据方案31所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少1mm。

[0194] 方案34.根据方案31所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少2mm。

[0195] 方案35.根据方案31所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少3mm。

[0196] 方案36.根据方案24所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶被排他地定位在所述透射部内。

[0197] 方案37.根据方案24所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括第一圆柱形部,

所述第一圆柱形部被配置成容纳所述次级靶的至少一部分,并且所述阻挡部包括:

[0198] 具有第一直径的第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被定位成邻近所述第一圆柱形部;以及

[0199] 具有大于所述第一直径的第二直径的环形部,所述环形部被定位成邻近所述第二圆柱形部并且被配置成经由所述孔发射单色x射线辐射,所述孔被设置成穿过所述环形部。

[0200] 方案38.根据方案37所述的单色x射线装置,其中,所述第一圆柱形部被定位在所述壳体的被配置成被插入所述宽带x射线源的容器中的近端上,并且所述环形部被定位在所述载体的从其发射单色x射线辐射的远端上。

[0201] 方案39.根据方案21所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成是可移除的。

[0202] 方案40.一种单色x射线装置,包括:

[0203] 电子源,其被配置成发射电子;

[0204] 初始靶,其被配置成:响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;以及

[0205] 次级靶,其被配置成:响应于入射宽带x射线辐射经由荧光产生单色x射线辐射,

[0206] 其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的两倍。

[0207] 方案41.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的三倍。

[0208] 方案42.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的四倍。

[0209] 方案43.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,使用所述电子源与所述初始靶之间的电压电势操作所述装置,所述电压电势大于所述次级靶的吸收边缘的能量的五倍。

[0210] 方案44.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.7的单色性的单色x射线辐射。

[0211] 方案45.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.8的单色性的单色x射线辐射。

[0212] 方案46.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.9的单色性的单色x射线辐射。

[0213] 方案47.根据方案40所述的单色x射线装置,其中,当所述装置被操作时,在至少约15度的视场上经由所述孔发射具有大于或等于0.95的单色性的单色x射线辐射。

[0214] 方案48.根据方案40所述的单色x射线装置,还包括用于所述次级靶的壳体,所述壳体包括孔,来自所述次级靶的单色x射线辐射通过所述孔被发射,所述壳体被配置成将所述次级靶定位成:使得由所述初始靶发射的宽带x射线辐射中的至少一些入射在所述次级靶上。

[0215] 方案49.根据方案48所述的单色x射线装置,其中,所述壳体包括:

[0216] 透射部,其被配置成允许宽带x射线辐射在存在时被透射至所述次级靶;以及

[0217] 阻挡部,其被配置成吸收宽带x射线辐射。

[0218] 方案50.根据方案49所述的单色x射线装置,其中,所述透射部至少包括第一透射材料,所述第一透射材料对于由所述宽带x射线源发射的宽带x射线辐射基本上是透明的。

[0219] 方案51.根据方案50所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括铝、碳、碳纤维、硼、硼氮化物、铍氧化物、硅和硅氮化物中的至少一种。

[0220] 方案52.根据方案49所述的单色x射线装置,其中,所述阻挡部至少包括第一阻挡材料,所述第一阻挡材料对于由所述宽带x射线源发射的宽带x射线辐射基本上是不透明的。

[0221] 方案53.根据方案52所述的单色x射线装置,其中,所述阻挡部包括铅、钨、钽、铌、铯、铂和金中的至少一种。

[0222] 方案54.根据方案49所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶的至少第一部分被定位在所述壳体的透射部内,并且所述次级靶的第二部分被定位在所述壳体的阻挡部内。

[0223] 方案55.根据方案54所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括被配置成容纳所述次级靶的第一圆柱形部,并且所述阻挡部包括第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶的第二部分交叠。

[0224] 方案56.根据方案55所述的单色x射线装置,其中,所述次级靶是锥形的,其中,所述第一圆柱形部被配置成容纳所述锥形次级靶的基部的至少一部分,并且其中,所述第二圆柱形部被配置成与所述锥形次级靶的尖端的至少一部分交叠。

[0225] 方案57.根据方案55所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少1mm。

[0226] 方案58.根据方案55所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少2mm。

[0227] 方案59.根据方案55所述的单色x射线装置,其中,所述第二圆柱形部被配置成:当所述第一圆柱形部容纳所述次级靶时,所述第二圆柱形部与所述次级靶交叠至少3mm。

[0228] 方案60.根据方案49所述的单色x射线装置,其中,所述壳体被配置成使得:当所述次级靶被容纳在所述壳体内时,所述次级靶被排他地定位在所述透射部内。

[0229] 方案61.根据方案49所述的单色x射线装置,其中,所述透射部包括第一圆柱形部,所述第一圆柱形部被配置成容纳所述次级靶的至少一部分,并且所述阻挡部包括:

[0230] 具有第一直径的第二圆柱形部,所述第二圆柱形部被定位成邻近所述第一圆柱形部;以及

[0231] 具有大于所述第一直径的第二直径的环形部,所述环形部被定位成邻近所述第二圆柱形部并且被配置成经由所述孔发射单色x射线辐射,所述孔被设置成穿过所述环形部。

[0232] 方案62.根据方案61所述的单色x射线装置,其中,所述第一圆柱形部被定位在所述壳体的被配置成被插入所述宽带x射线源的容器中的近端上,并且所述环形部被定位在所述载体的从其发射单色x射线辐射的远端上。

[0233] 方案63.一种单色x射线装置,包括:

[0234] 包括环形阴极的电子源,所述电子源被配置成发射电子;

[0235] 初始靶,其被配置成响应于来自所述电子源的入射电子而产生宽带x射线辐射;

[0236] 至少一个引导件,其与所述环形阴极同心地被布置以引导电子朝向所述初始靶;以及

[0237] 次级靶,其被配置成响应于入射宽带x射线辐射经由荧光产生单色x射线辐射。

[0238] 方案64.根据方案63所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括被同心地布置在所述环形阴极内的至少一个第一内部引导件。

[0239] 方案65.根据方案64所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括被同心地布置在所述环形阴极外部的至少一个第一外部引导件。

[0240] 方案66.根据方案65所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括被同心地布置在所述环形阴极外部的多个外部引导件。

[0241] 方案67.根据方案63所述的单色x射线装置,其中,所述至少一个引导件包括铜、不锈钢和钛中的至少一种。

[0242] 因此,已经描述了本公开内容中阐述的技术的几个方面和实施方式,应当理解,本领域技术人员将容易想到各种改变、修改和改进。这样的改变、修改和改进意图在本文描述的技术的精神和范围内。例如,本领域普通技术人员将容易想到用于执行功能以及/或者获得本文描述的结果和/或一个或多个优点的各种其他手段和/或结构,并且这样的变体和/或修改中的每一个被认为在本文描述的実施方式的范围内。仅通过常规实验,本领域技术人员将认识到或能够确定本文描述的特定實施方式的许多等同方案。因此,应当理解,前述实施方式仅以示例的方式被呈现,并且在所附权利要求及其等同物的范围内,可以以与具体描述的方式不同的方式来实践本发明的实施方式。另外,如果这样的特征、系统、物品、材料、套件和/或方法不相互矛盾,则本文描述的两个或多个特征、系统、物品、材料、套件和/或方法的任意组合被包括在本公开内容的范围内。

[0243] 如本文所定义和所使用的所有定义应该被理解为涵盖字典定义、通过引用并入的文献中的定义和/或所定义的术语的普通含义。

[0244] 除非明确相反地指出,否则本文在说明书和权利要求书中使用的不定冠词“一个(a)”和“一个(an)”应该被理解为表示“至少一个”。

[0245] 如本文在说明书和权利要求书中所使用的,短语“和/或”应该被理解为是指这样结合的元素中的“一者或两者”,即,在某些情况下结合地存在而在其他情况下分离地存在的元素。用“和/或”列出的多个元素应该以相同的方式被解释,即,如此结合的元素中的“一个或多个”。除了由“和/或”子句明确标识的元素之外,还可以可选地存在其他元素,无论与那些具体标识的元素相关还是无关。因此,作为非限制性示例,在一个实施方式中,当与诸如“包括”的开放式语言结合使用时,对“A和/或B”的引用可以仅指A(可选地包括除B以外的元素);在另一实施方式中,仅指B(可选地包括除A以外的元素);在又一实施方式中,指A和B二者(可选地包括其他元素);等。

[0246] 如本文在说明书和权利要求书中所使用的,在提及一个或多个元素的列表时,短语“至少一个”应该被理解为是指从该元素列表中的任何一个或多个元素中选择的至少一个元素,但不一定包括元素列表中具体列出的每个元素和每一个元素中的至少一个,并且不排除元素列表中的元素的任何组合。该定义还允许可以可选地存在除了短语“至少一个”所指代的元素列表中具体标识的元素之外的元素,无论与那些具体标识的元素有关还是无关。因此,作为非限制性示例,“A和B中的至少一个”(或等效地,“A或B中的至少一个”,或等效地“A和/或B中的至少一个”)在一个实施方式中可以指代至少一个(可选地包括多于一个)A且不存在B(并且可选地包括除B以外的元素);在另一实施方式中可以指代至少

一个(可选地包括多于一个)B且不存在A(并且可选地包括除A以外的元素);在又一实施方式中,可以指代至少一个(可选地包括多于一个)A以及至少一个(可选地包括多于一个)B(并且可选地包括其他元素);等。

[0247] 另外,本文所使用的措词和术语是出于描述的目的并且不应被视为限制。在本文中“包括(including)”、“包括(comprising)”或“具有”、“包含(containing)”、“涉及”及其变型的使用意在涵盖其后列出的项及其等同物以及其他项。

[0248] 在权利要求书以及以上说明书中,所有过渡短语例如“包括(comprising)”、“包括(including)”、“搭载”、“具有”、“包含(containing)”、“涉及”、“持有”、“由……构成”等应该被理解为是开放式的,即,意指包括但不限于。仅过渡短语“由……组成”和“基本上由……组成”应该分别是封闭的或半封闭的过渡短语。

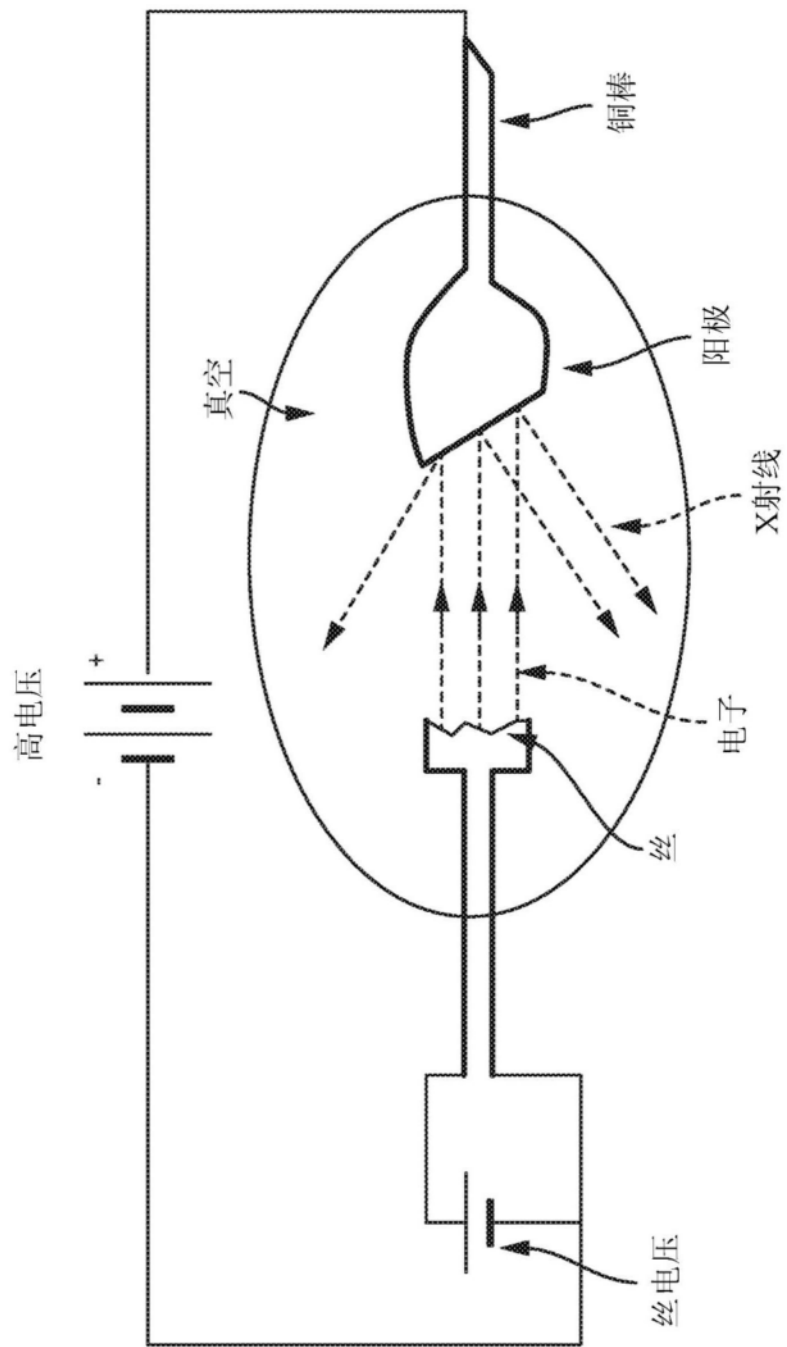


图1

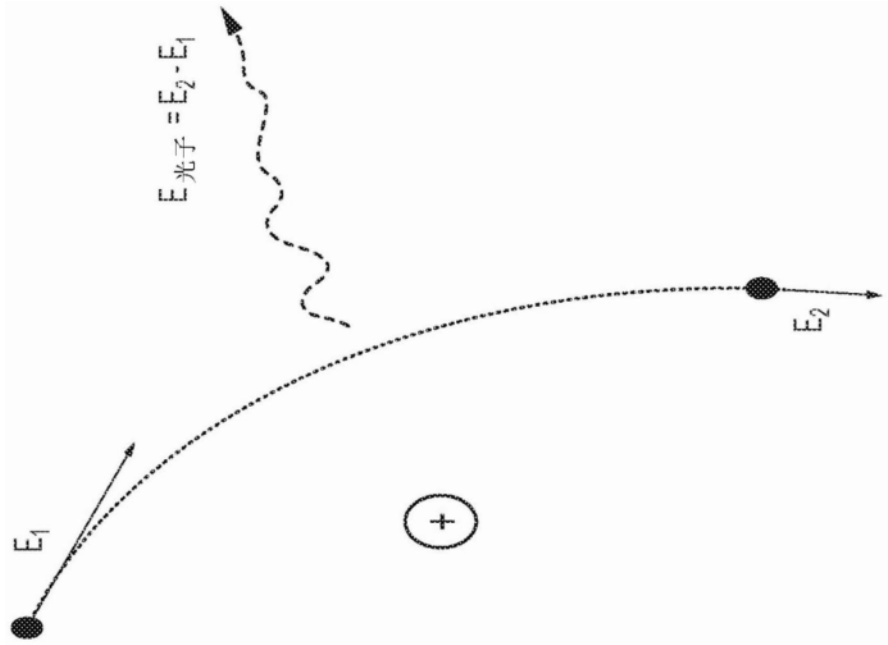


图2

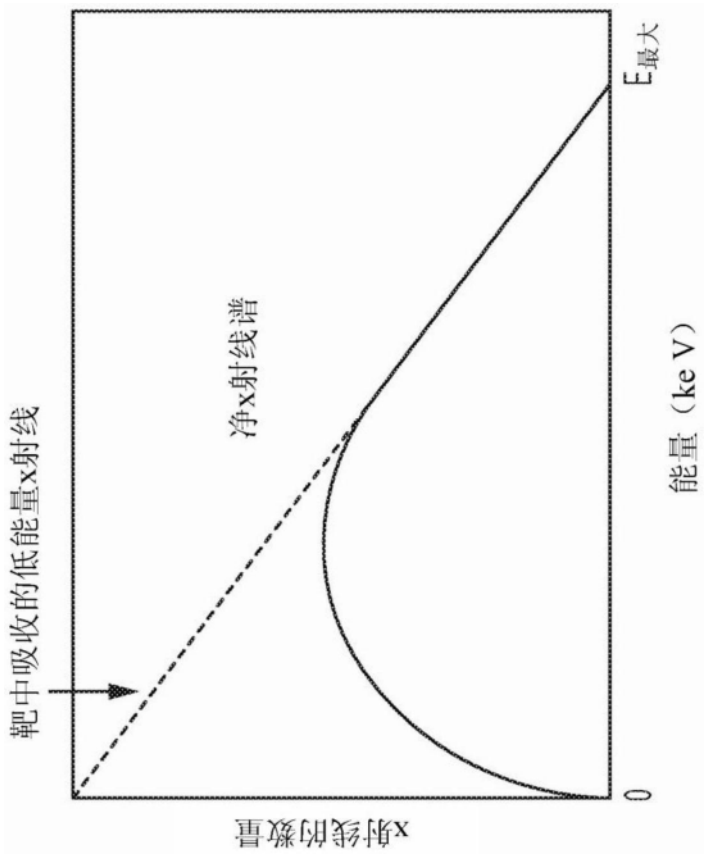


图3

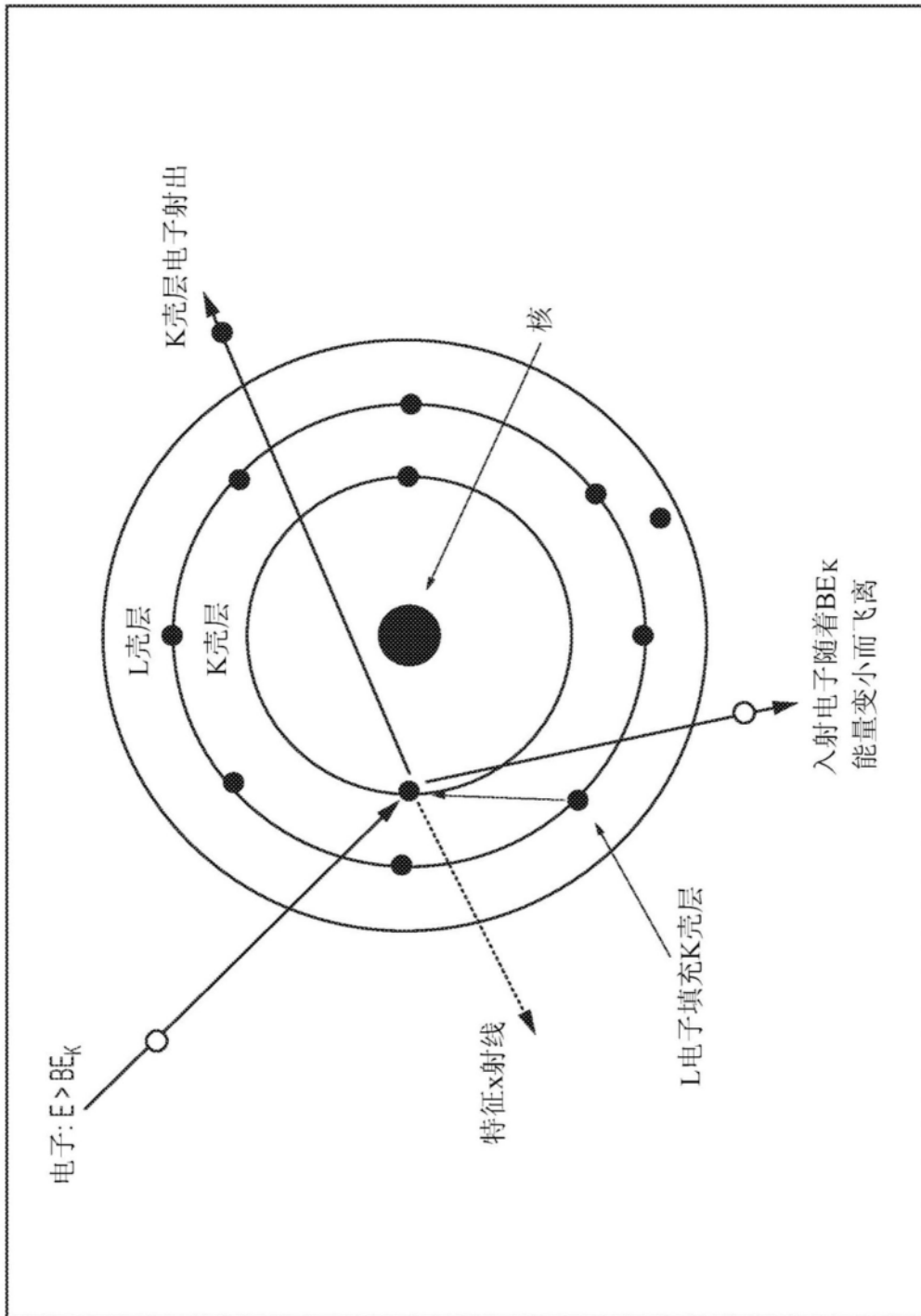


图4

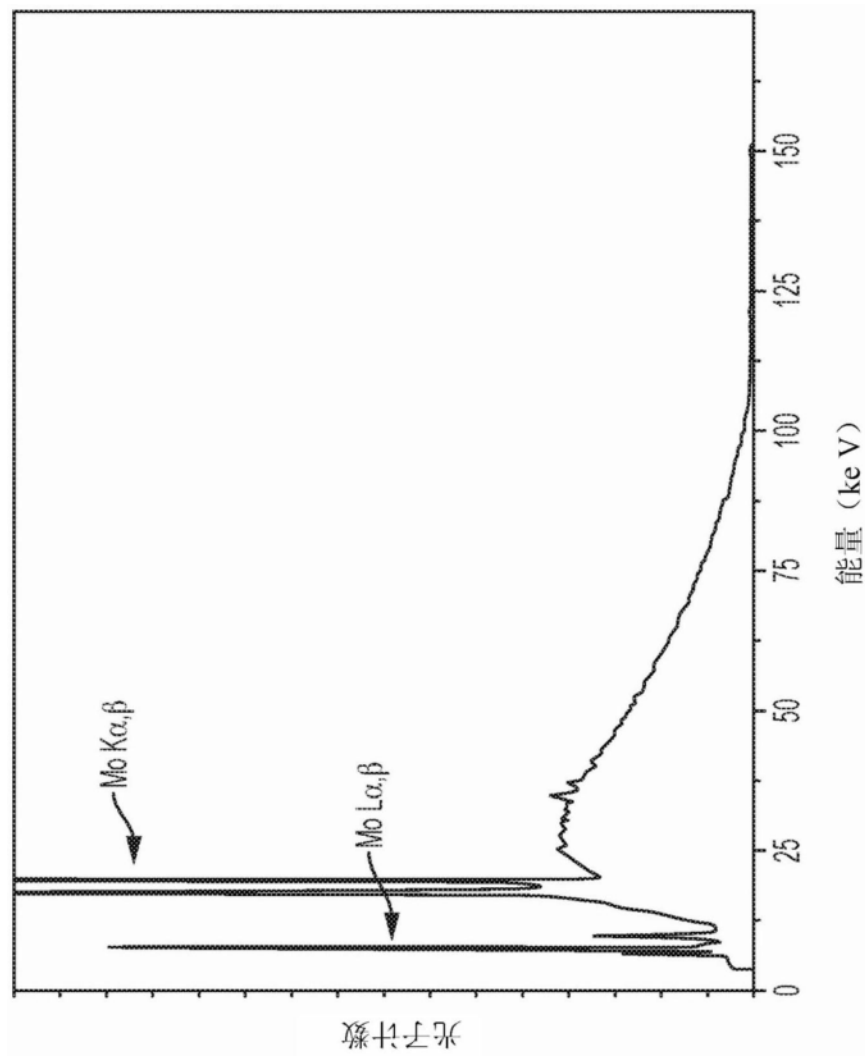


图5

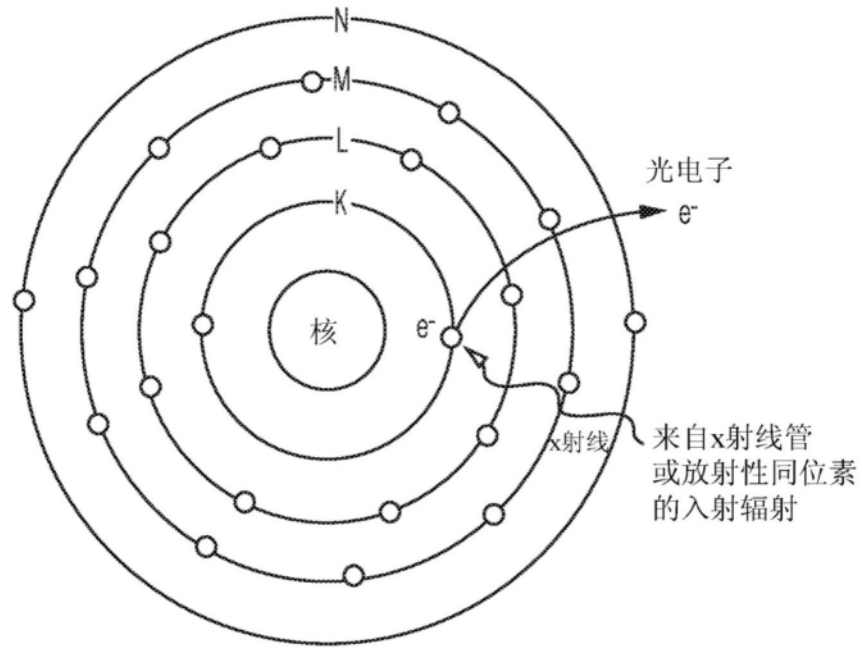


图6A

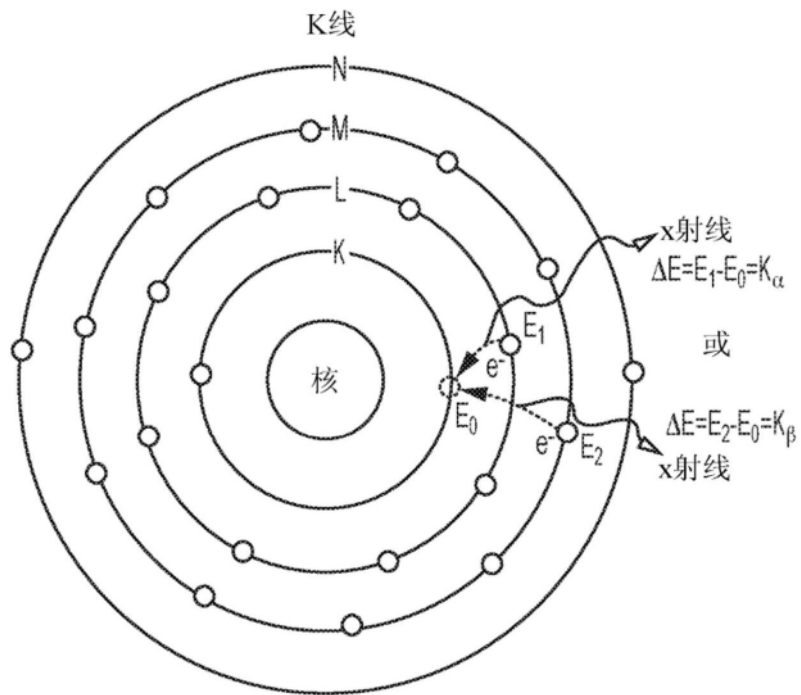


图6B

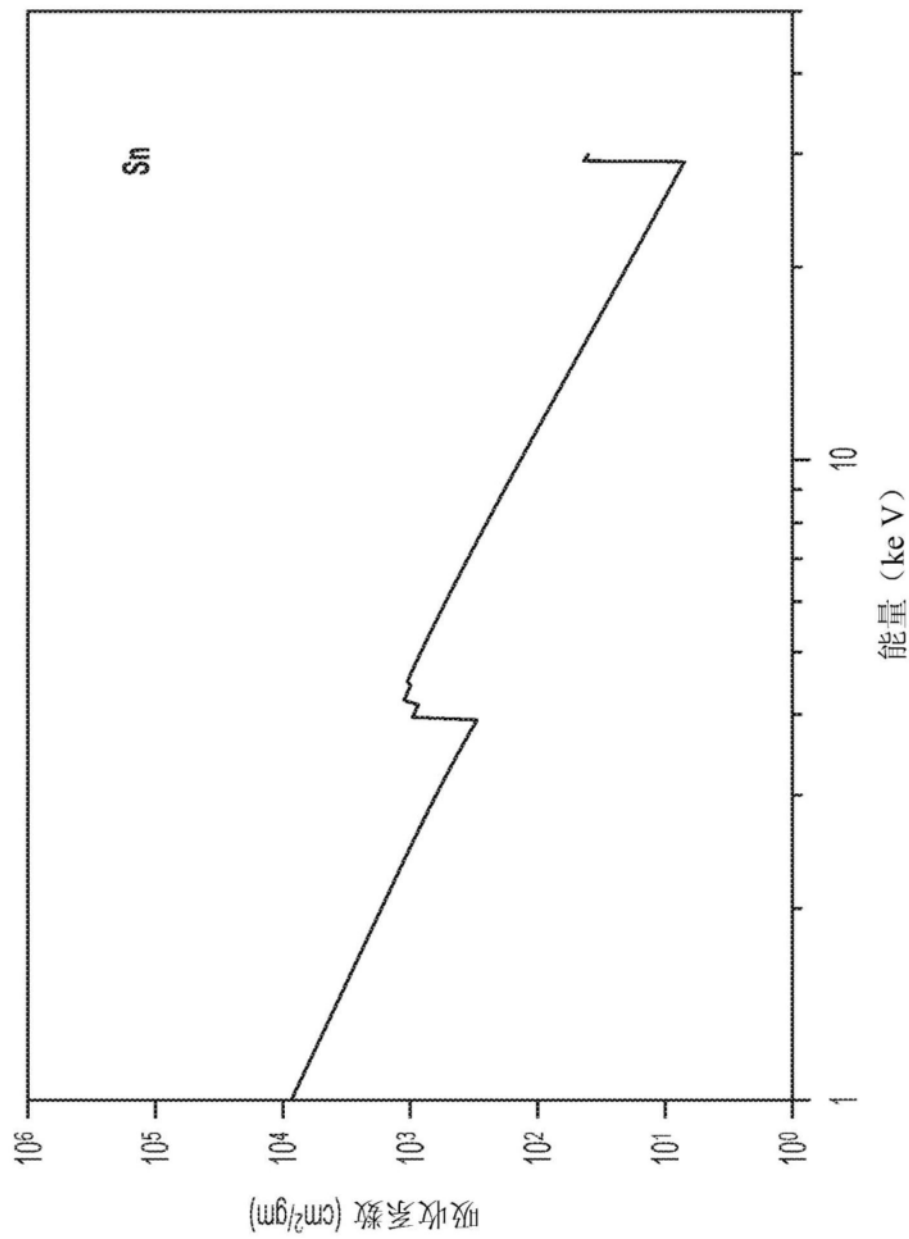


图7

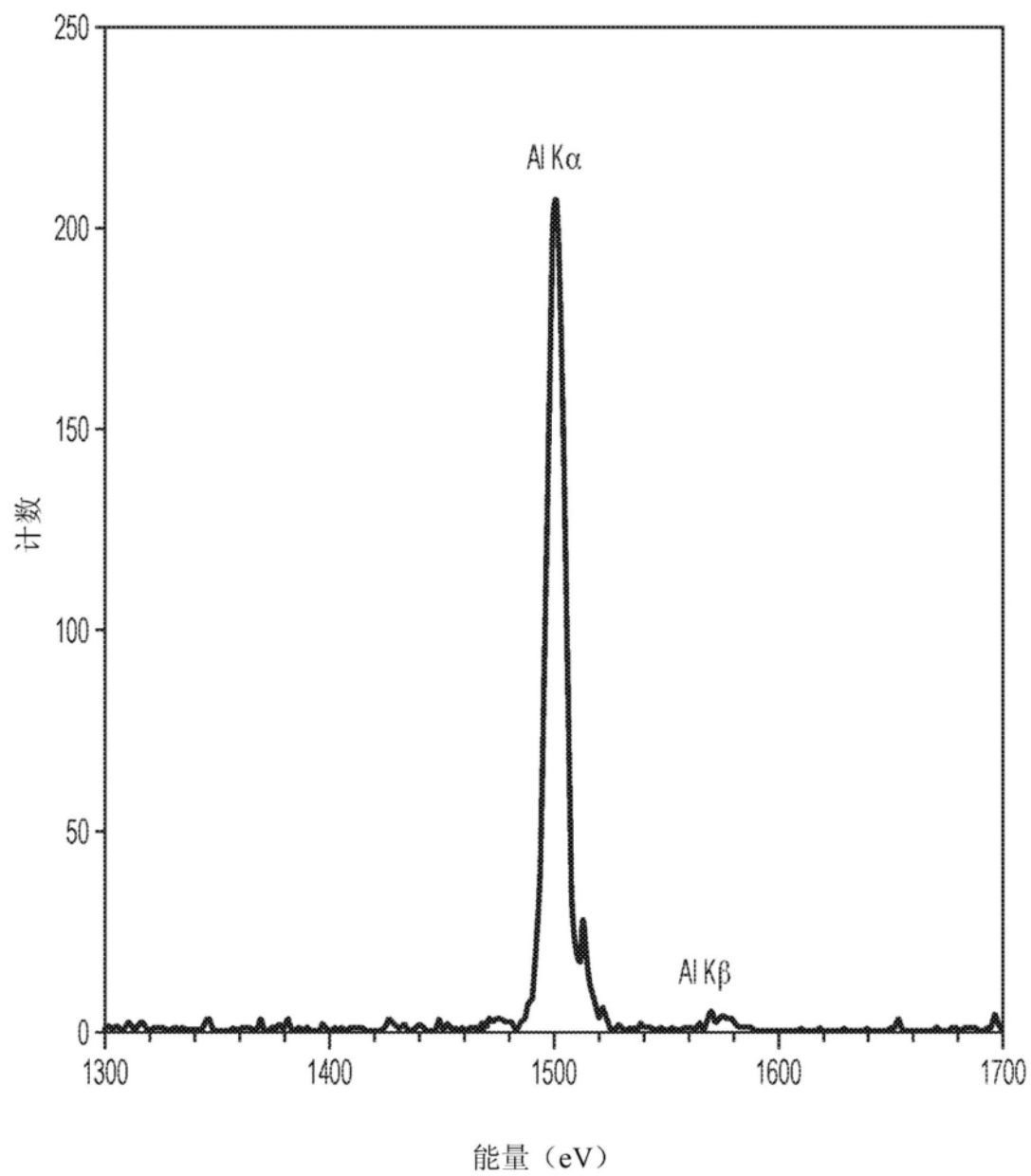


图8

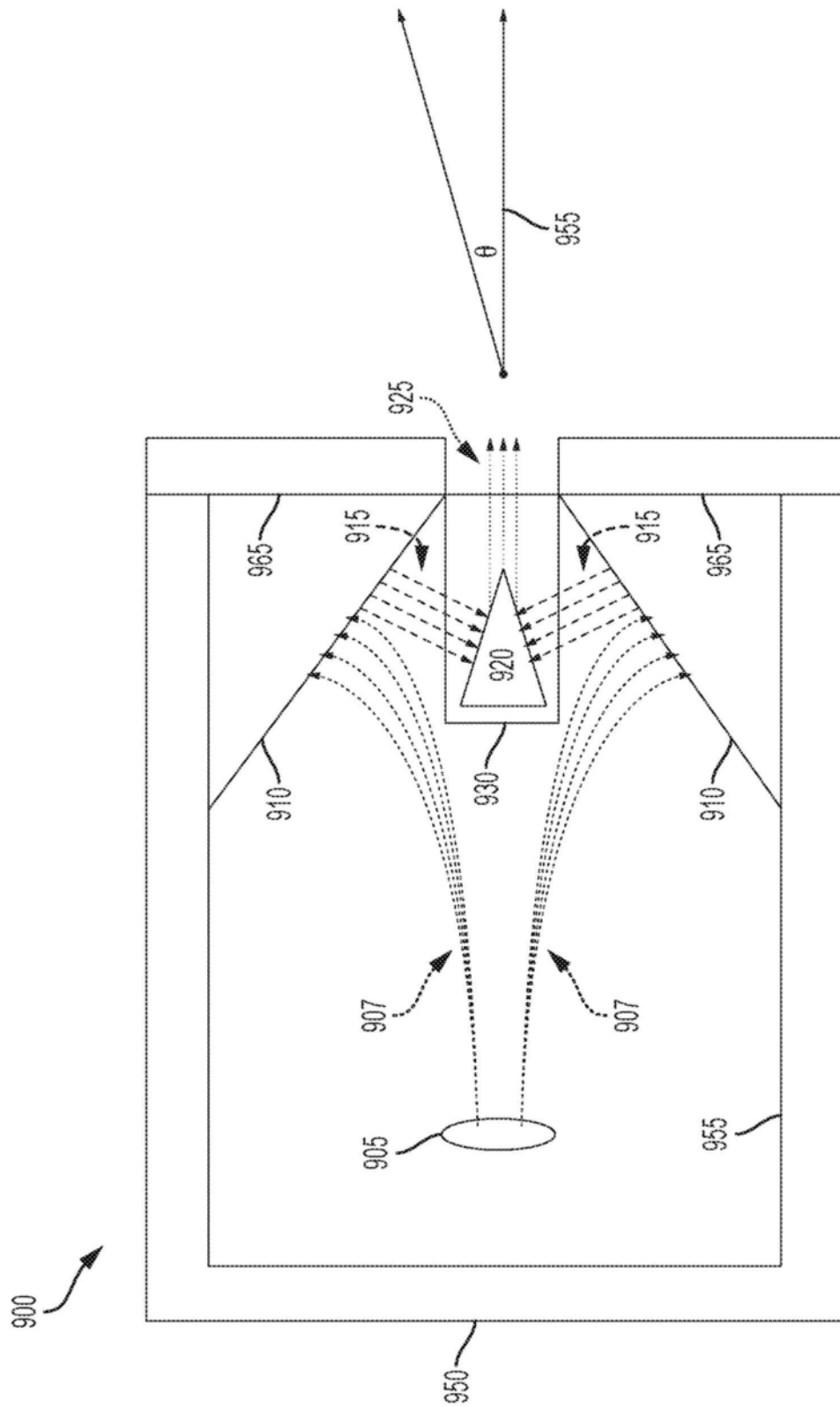


图9

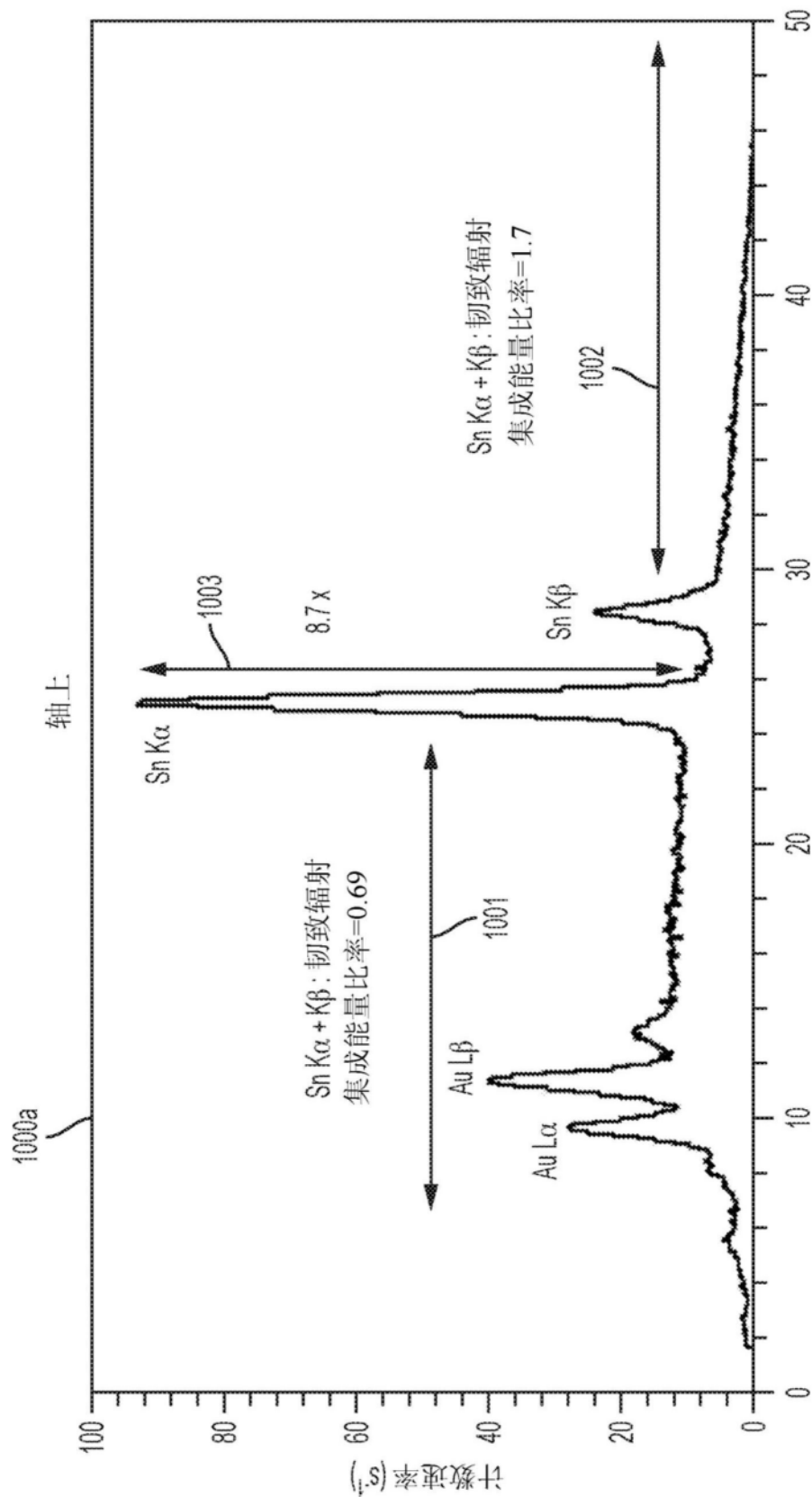


图10A

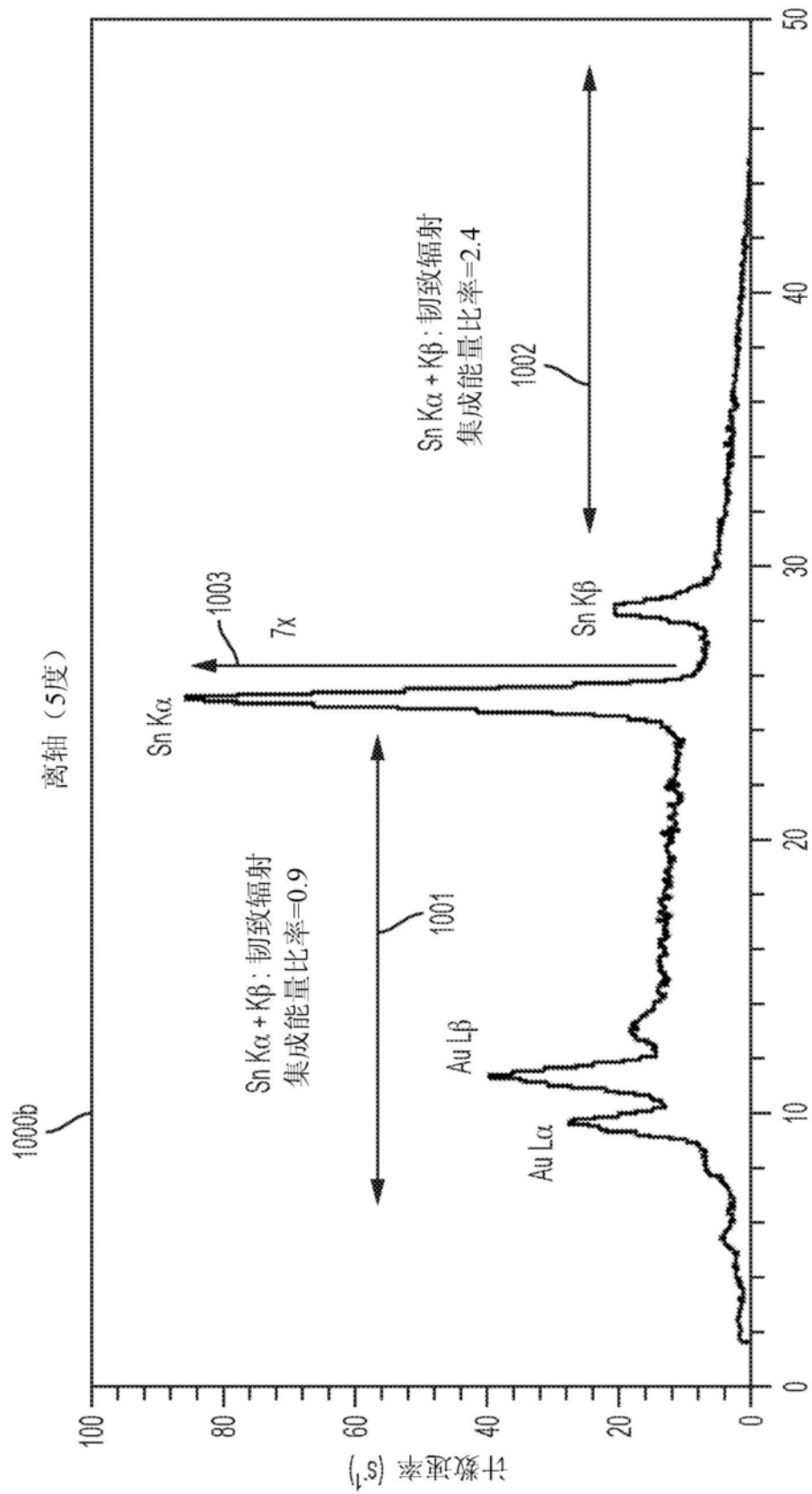


图10B

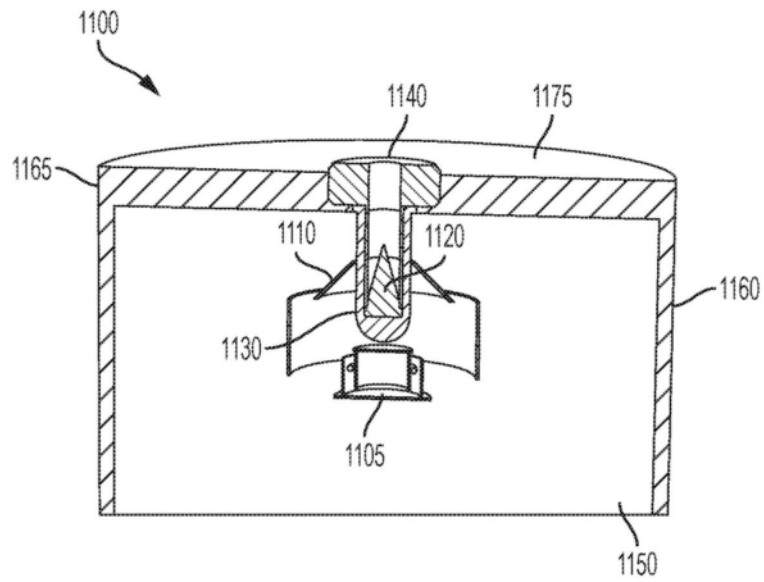


图11A

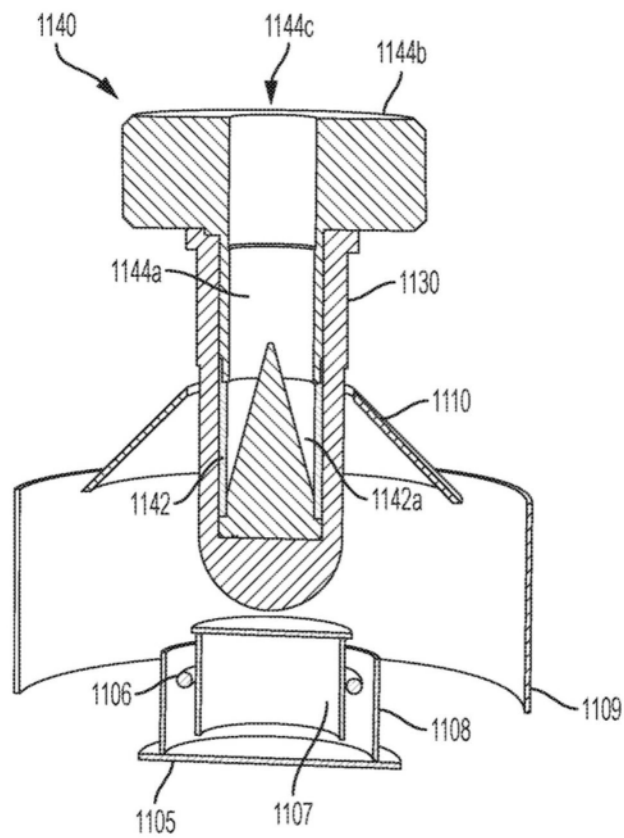


图11B

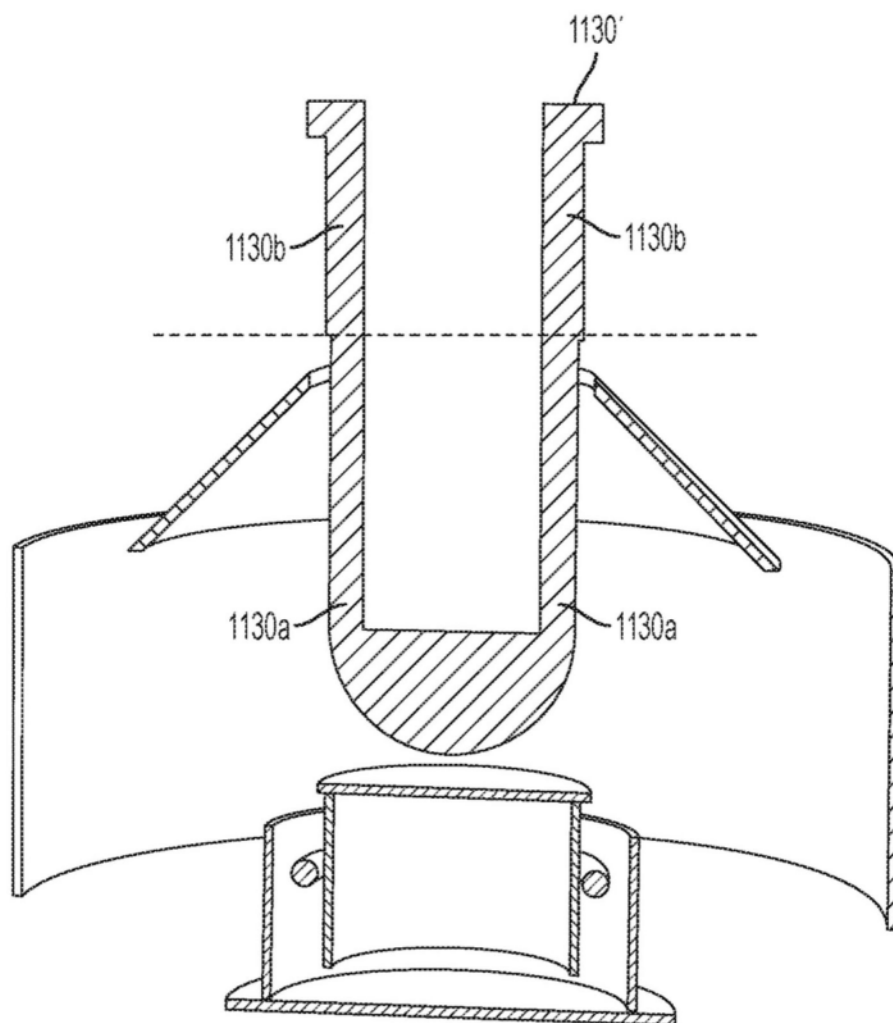


图11C

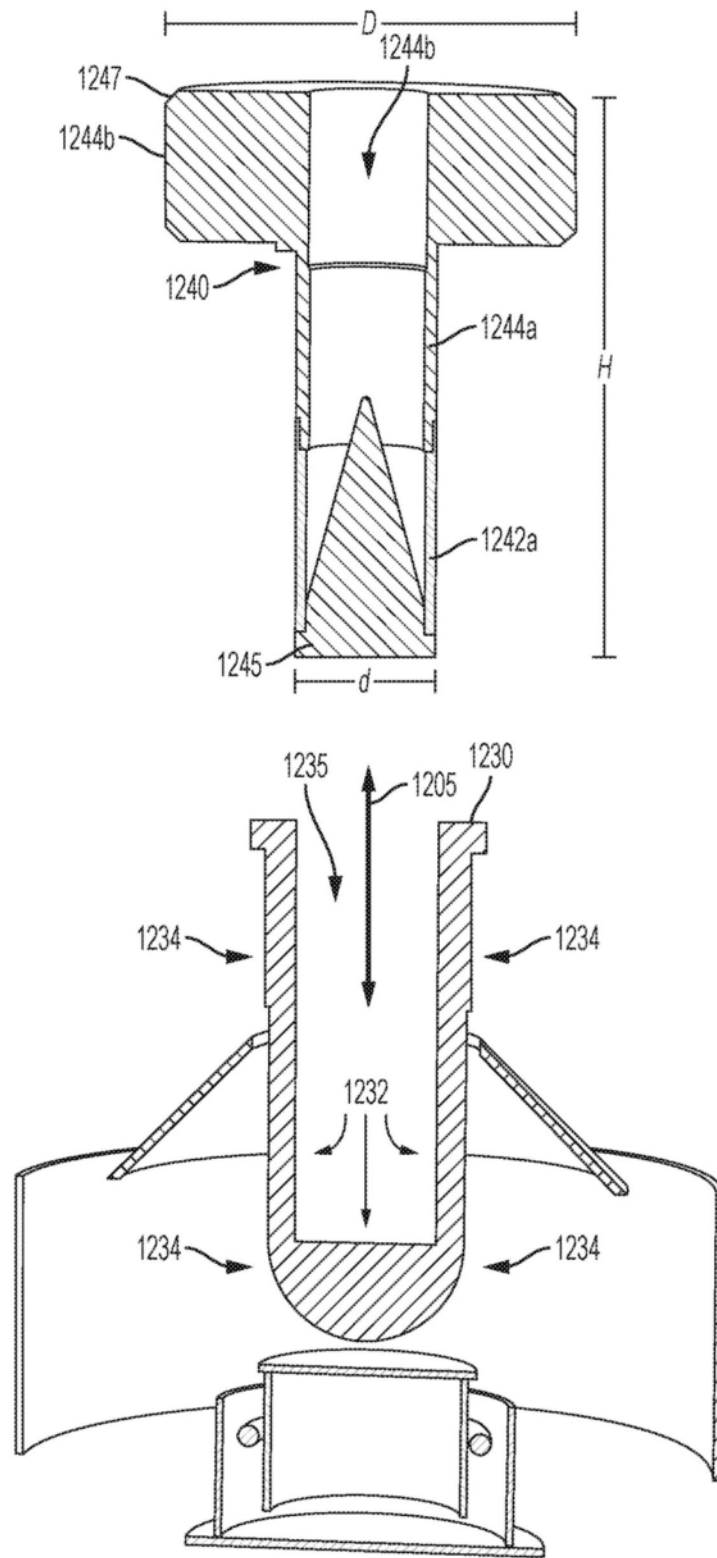


图12

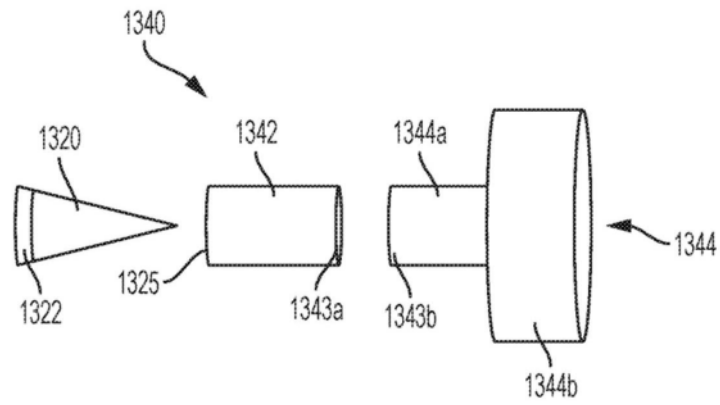


图13A

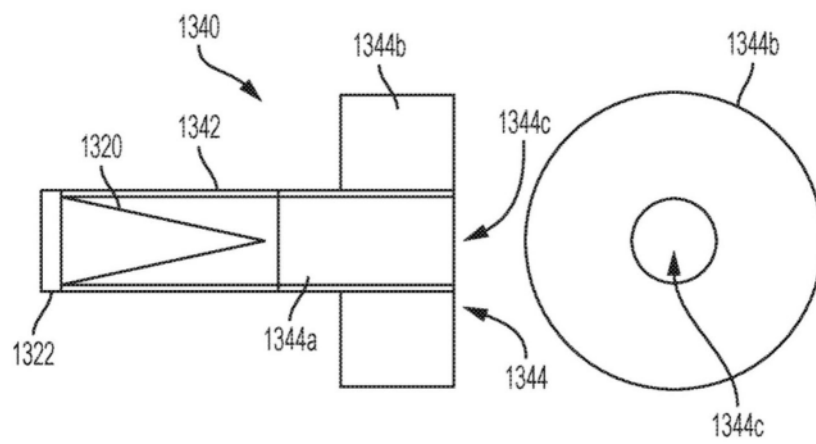


图13B

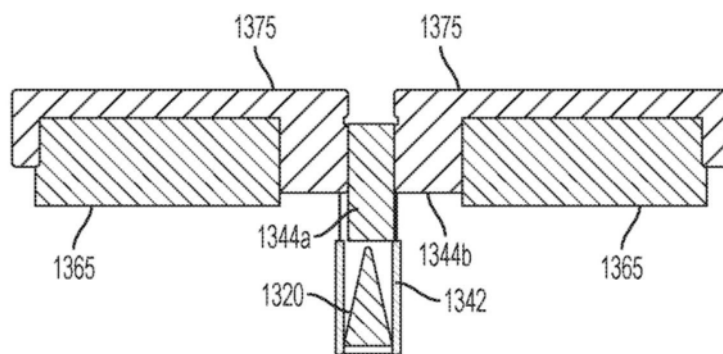


图13C

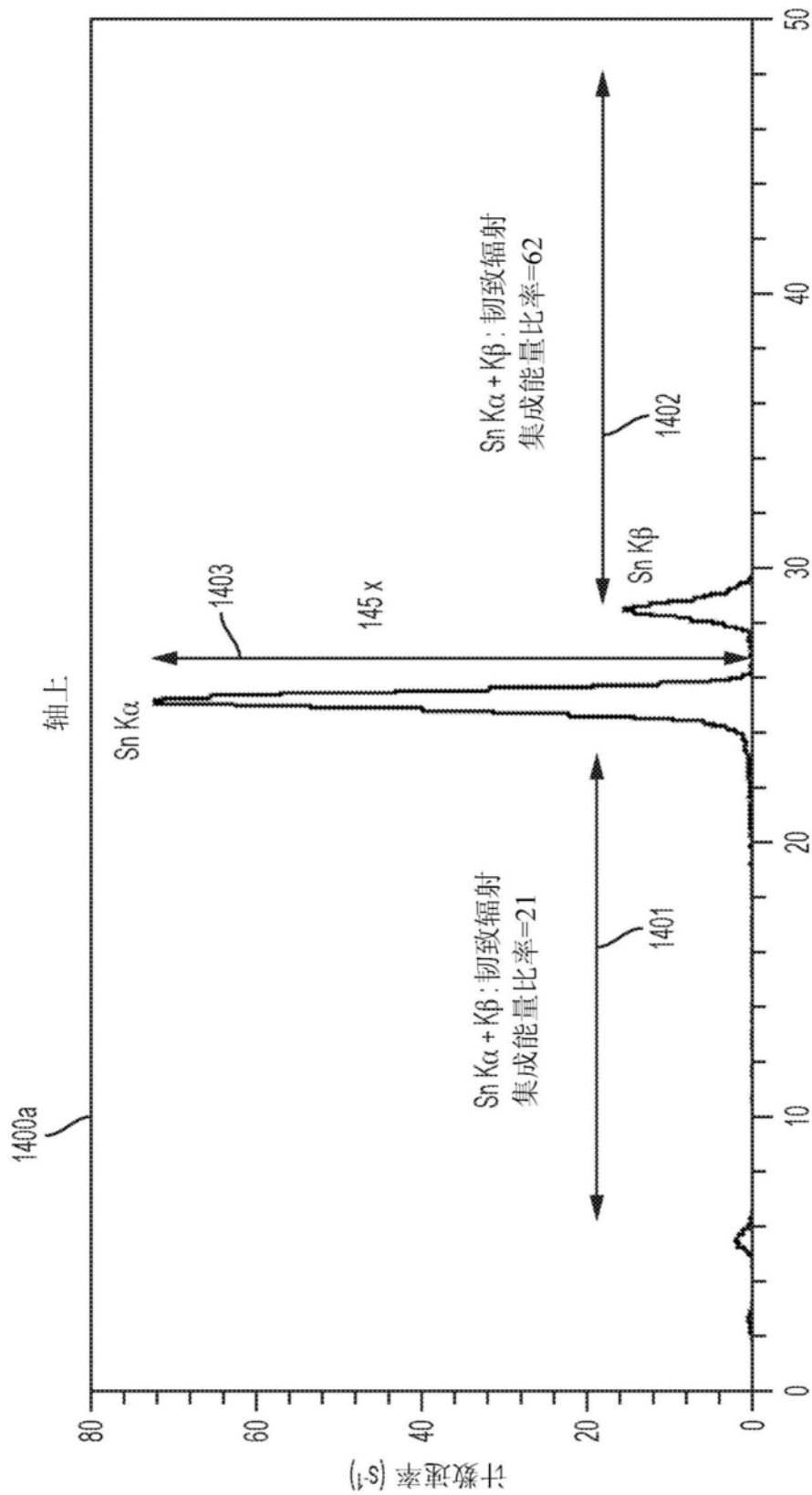


图14A

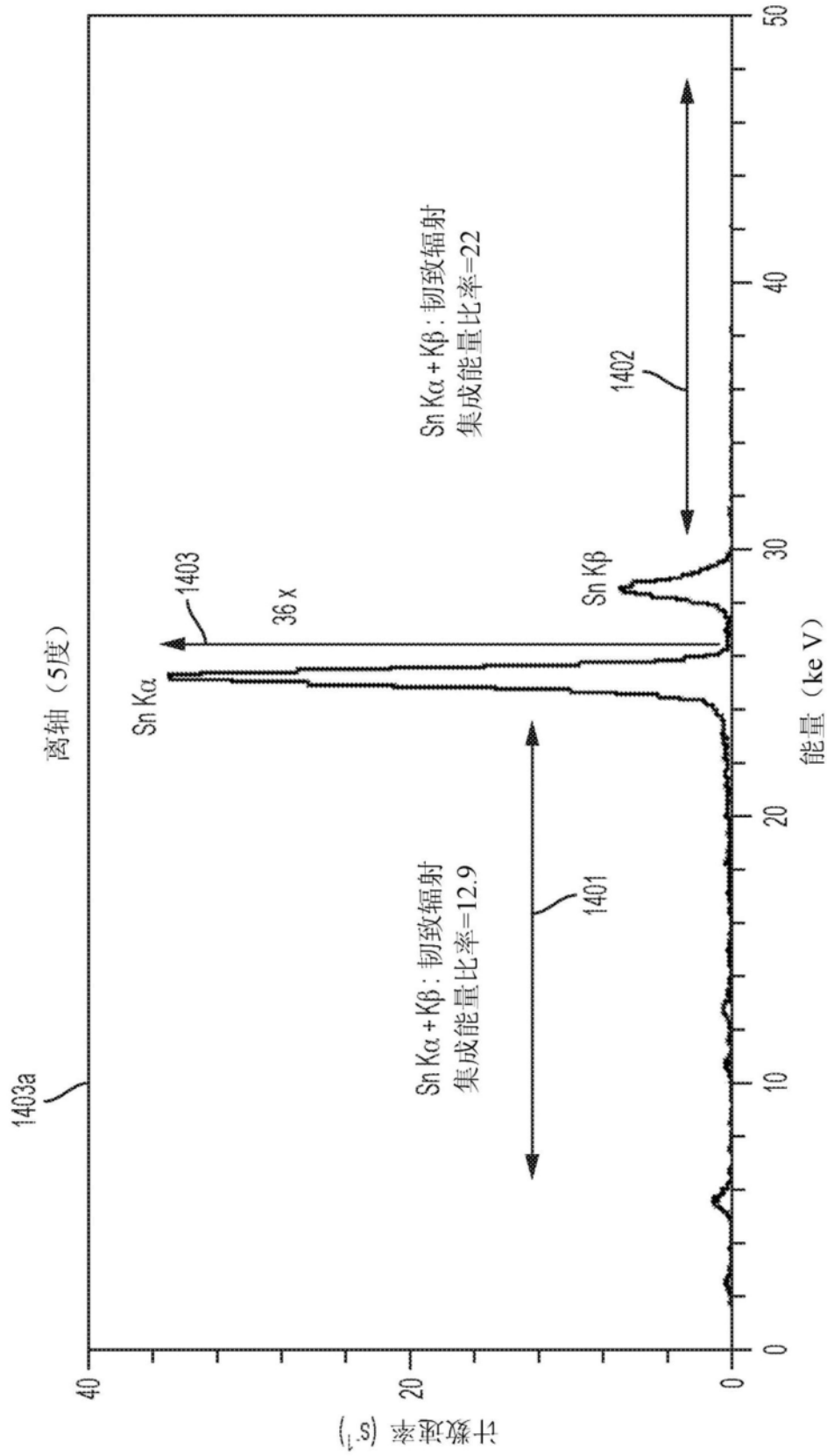


图14B

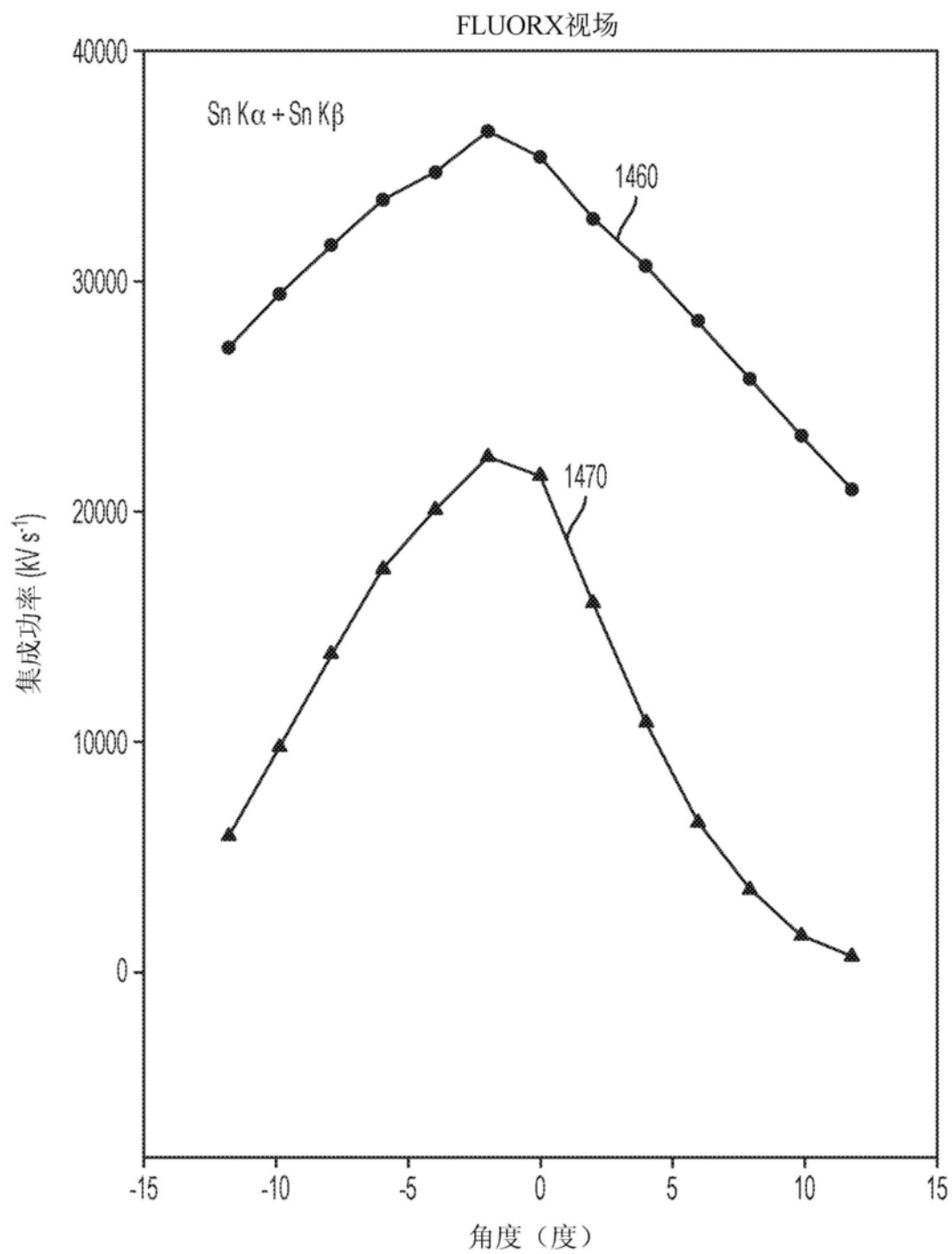


图14C

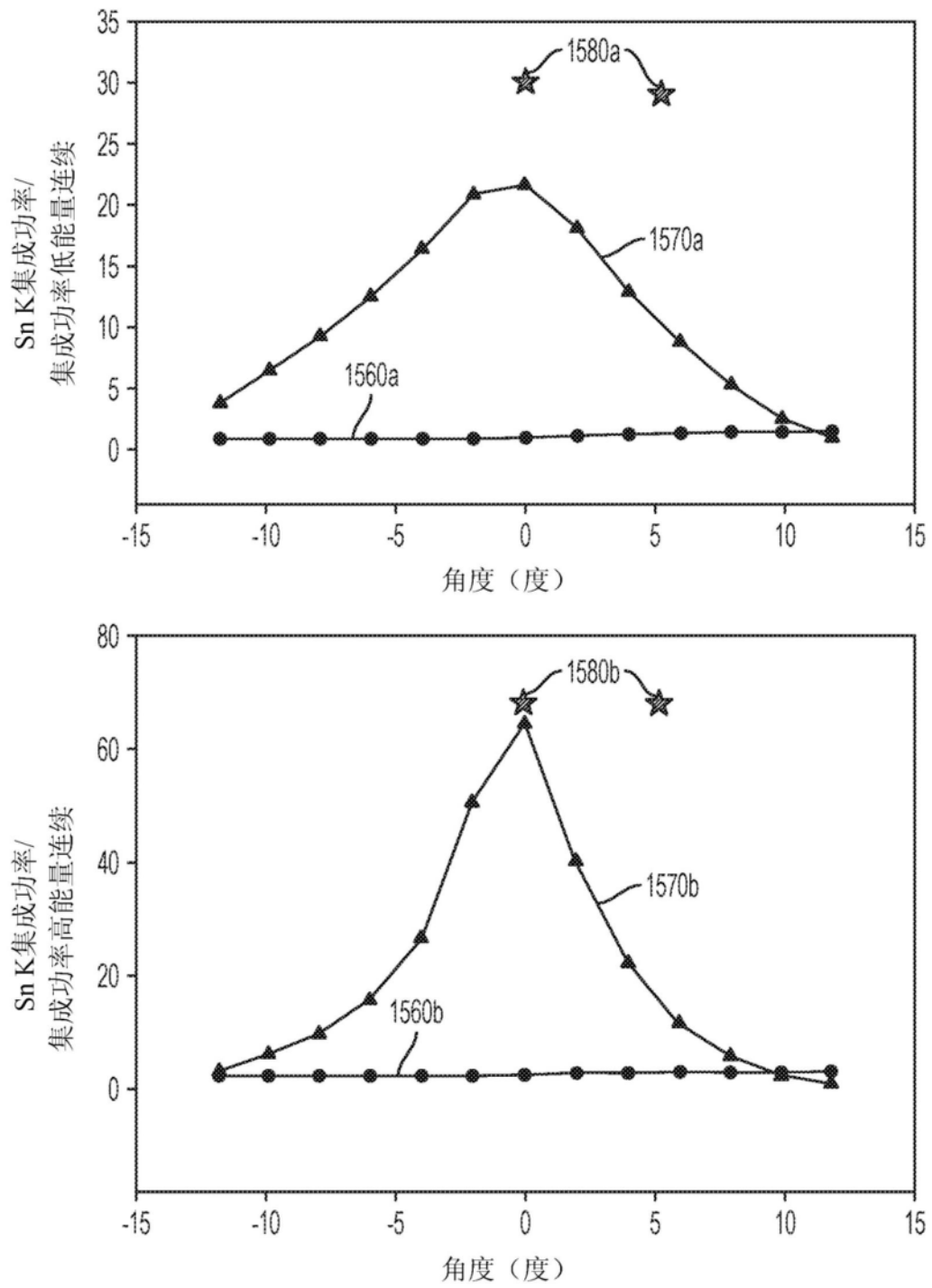


图15

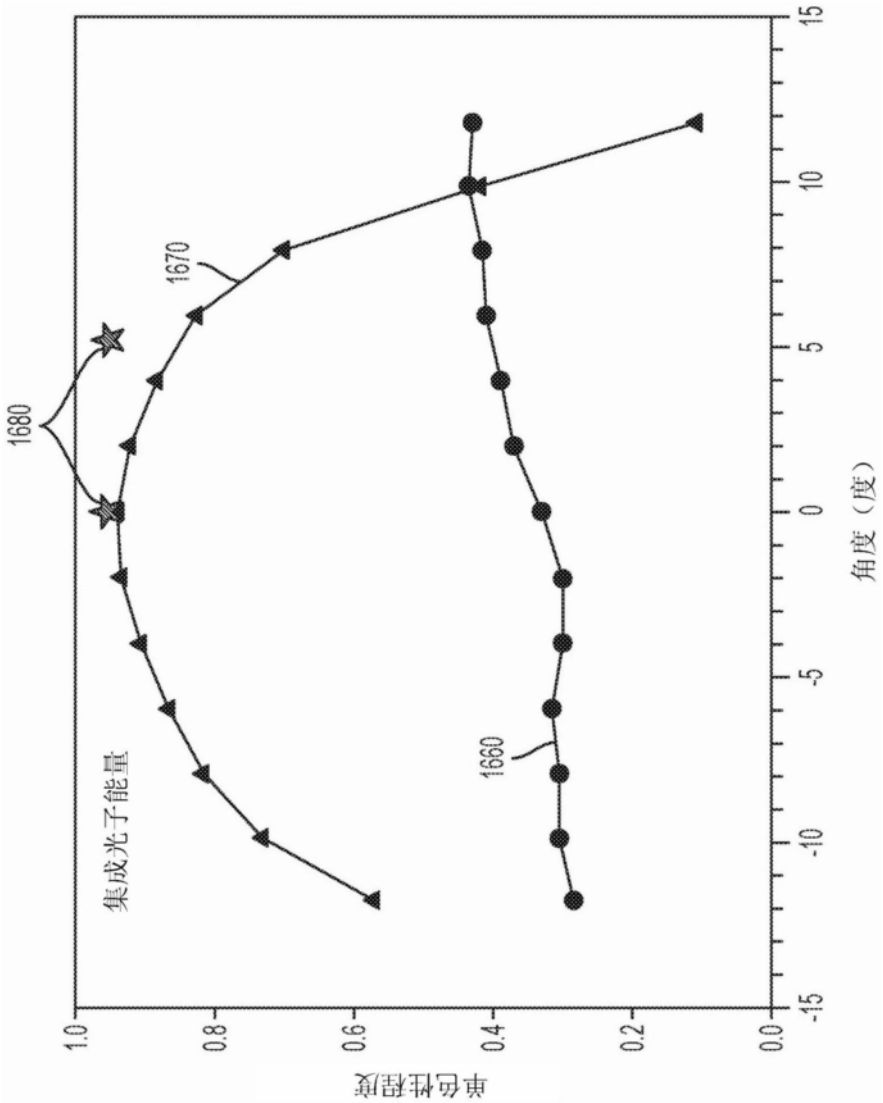


图16

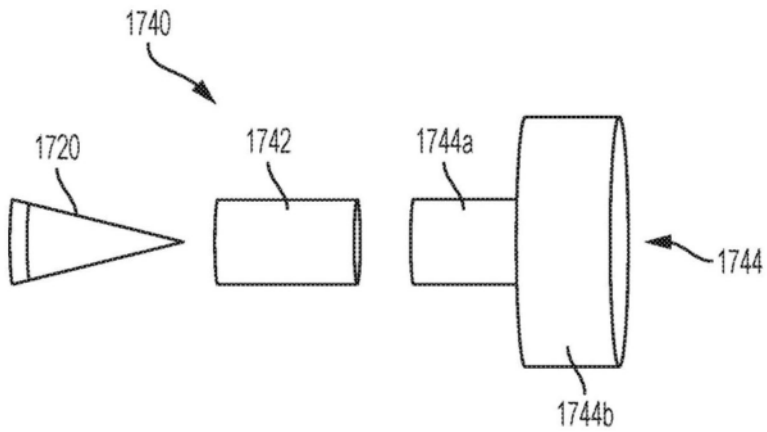


图17A

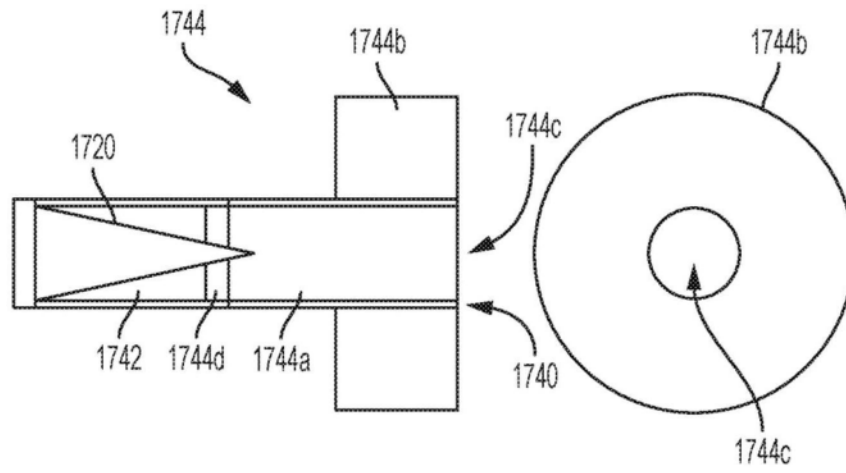


图17B

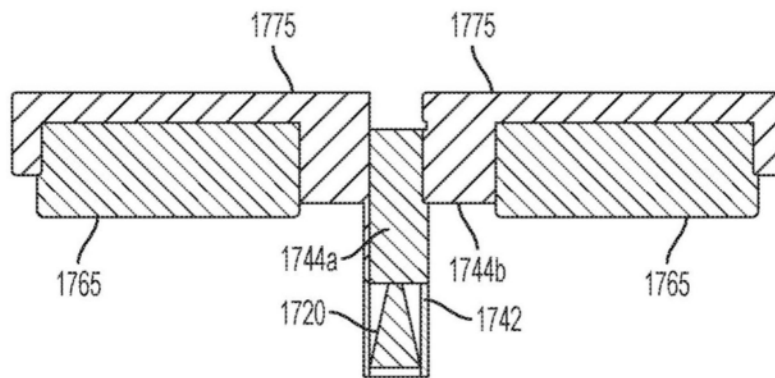


图17C

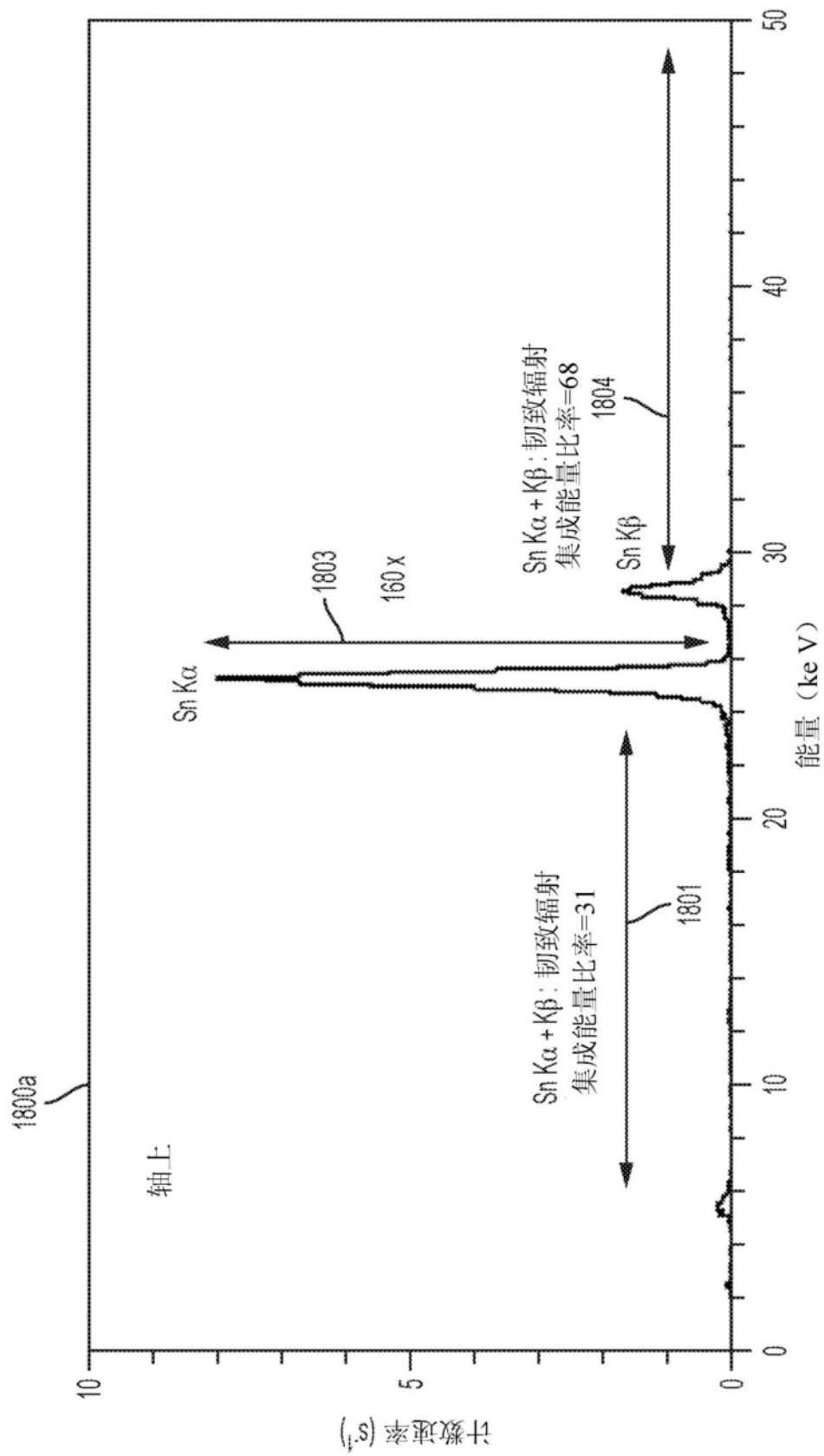


图18A

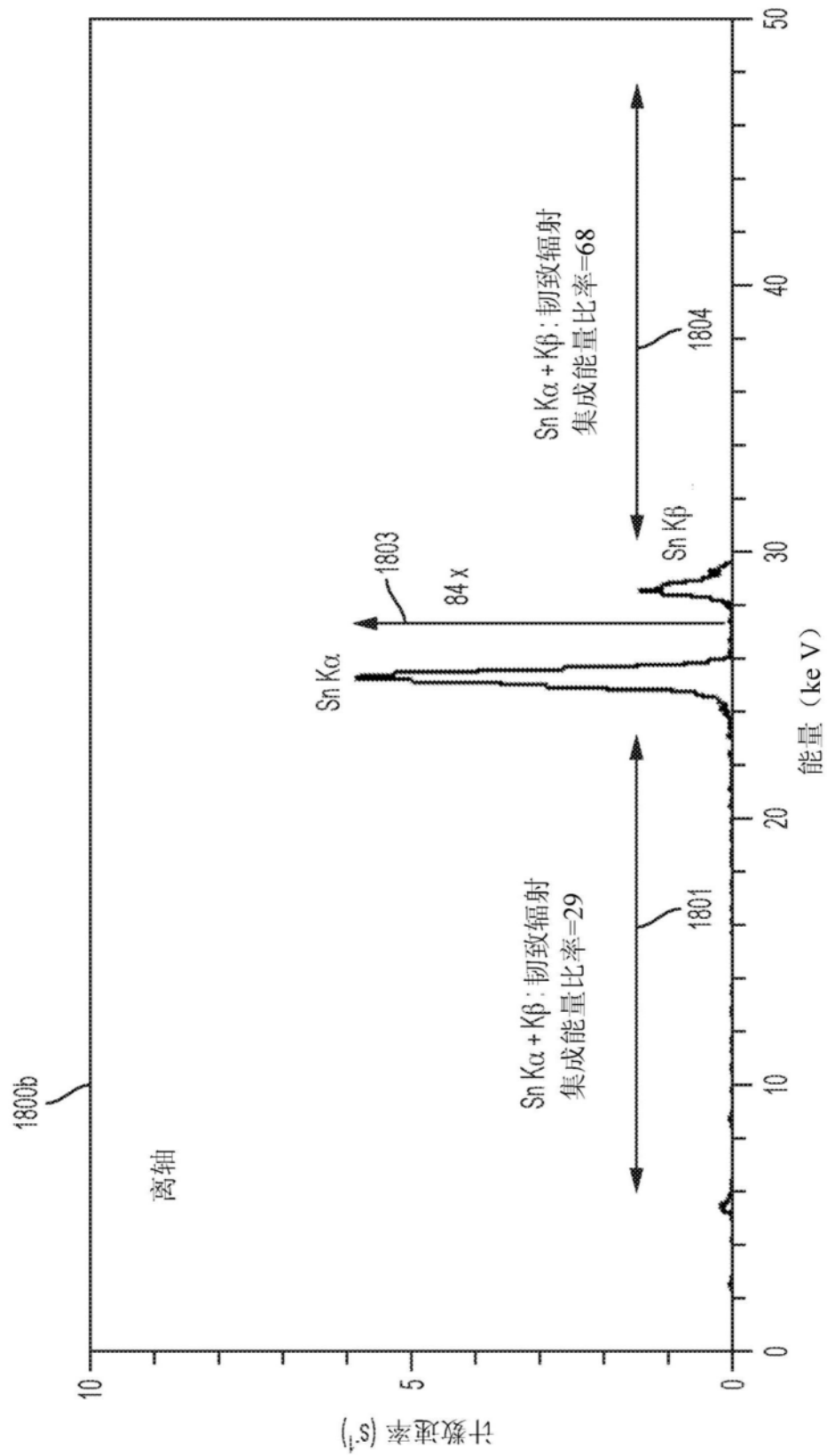


图18B

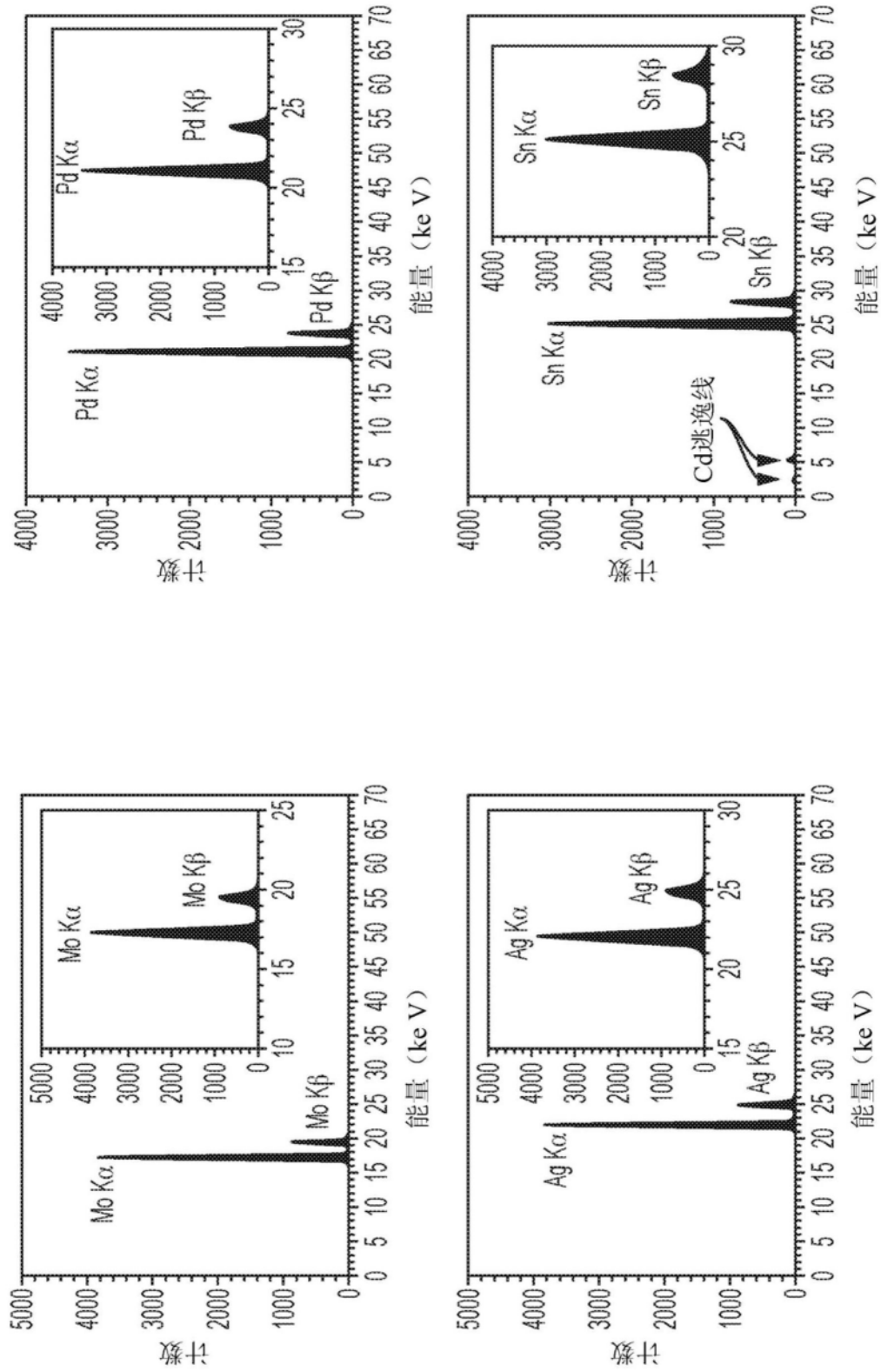


图19

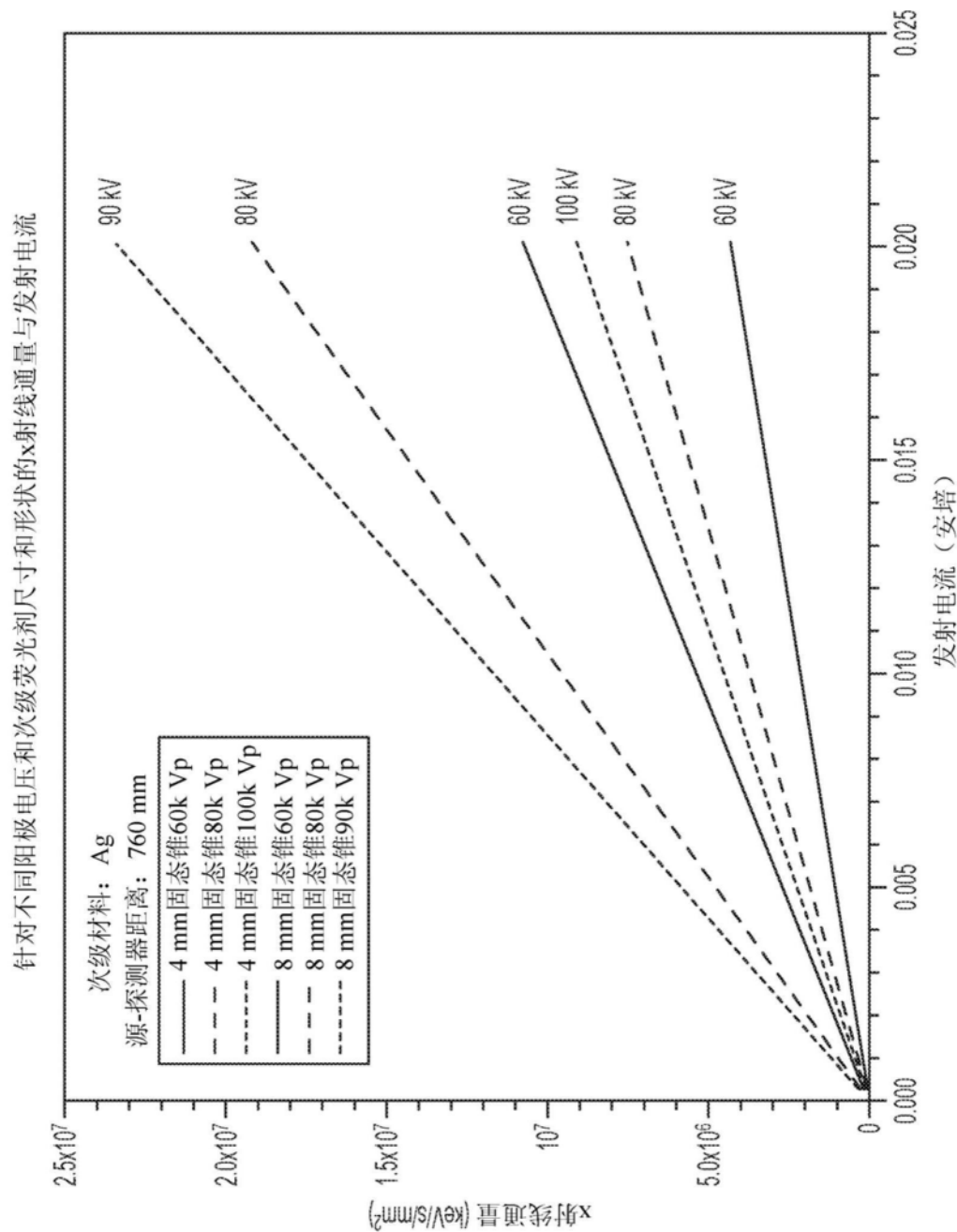


图20

由初级阳极发射的金谱

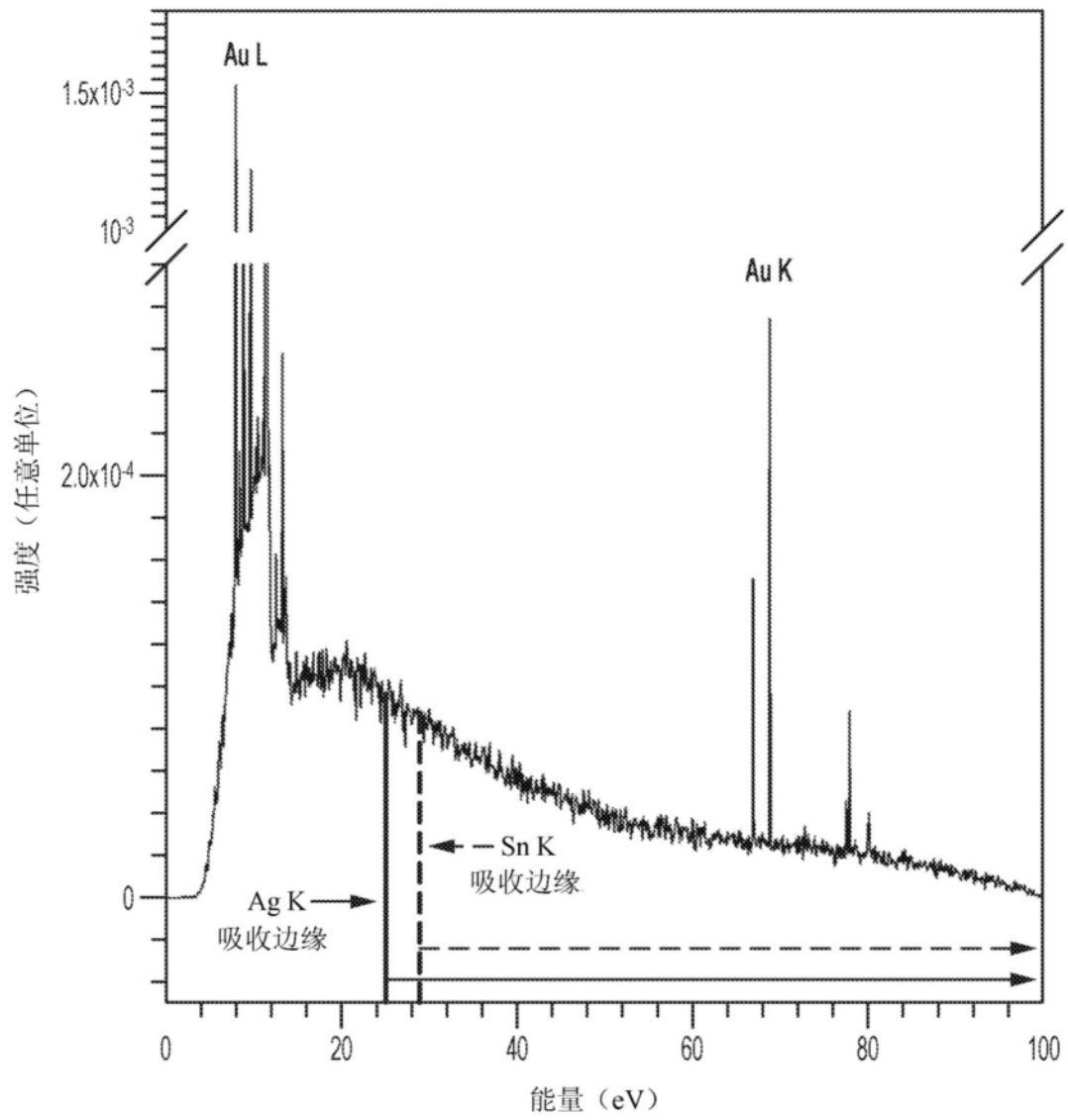


图21

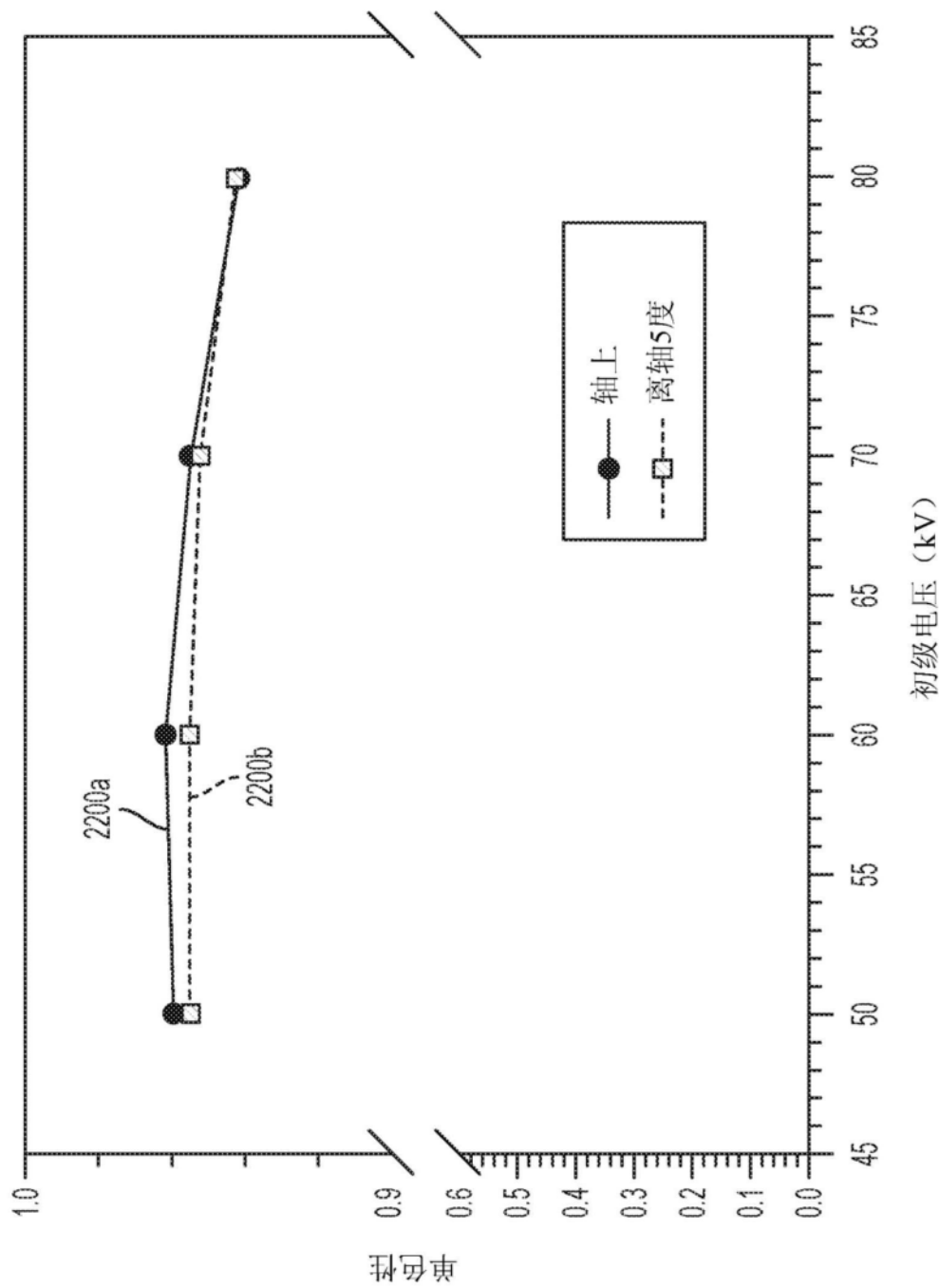


图22

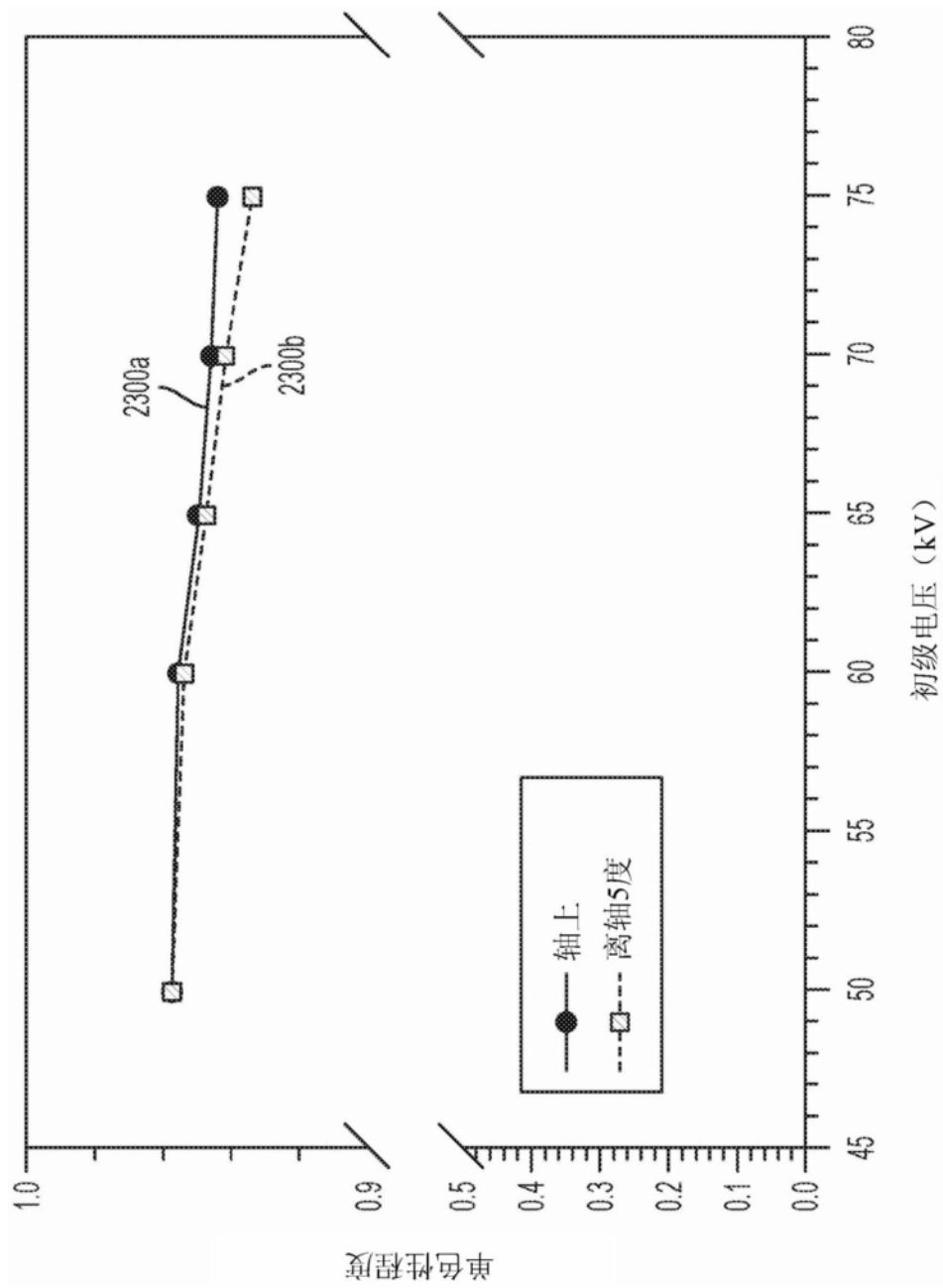


图23

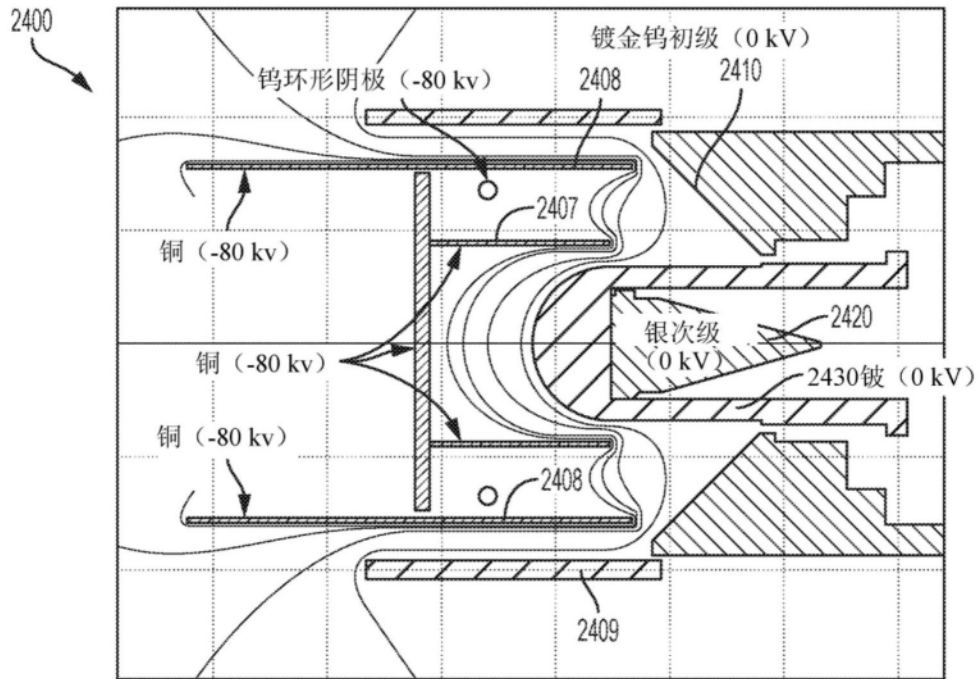


图24A

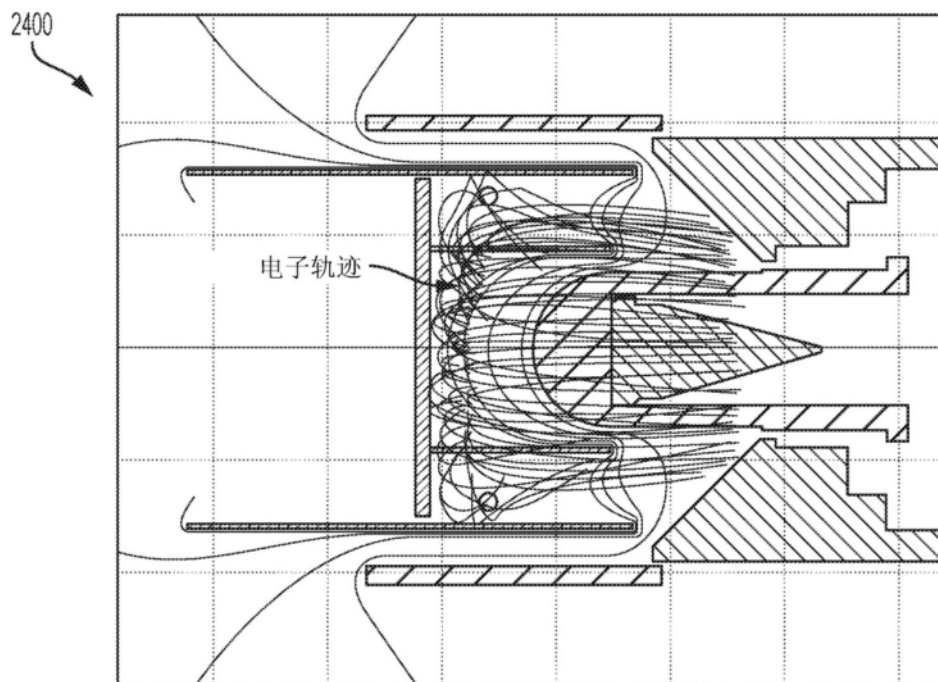


图24B

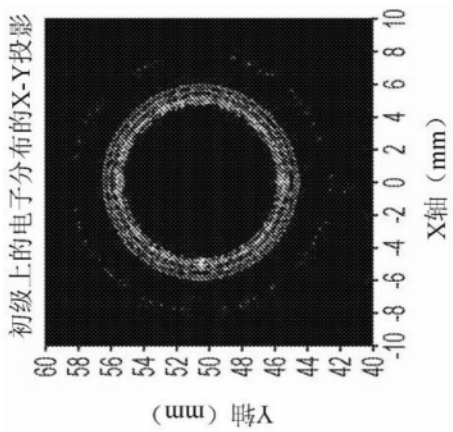


图25

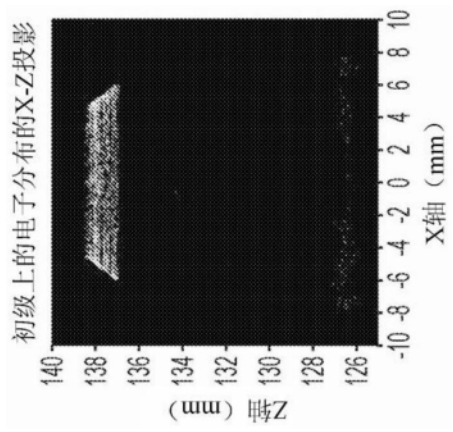


图26

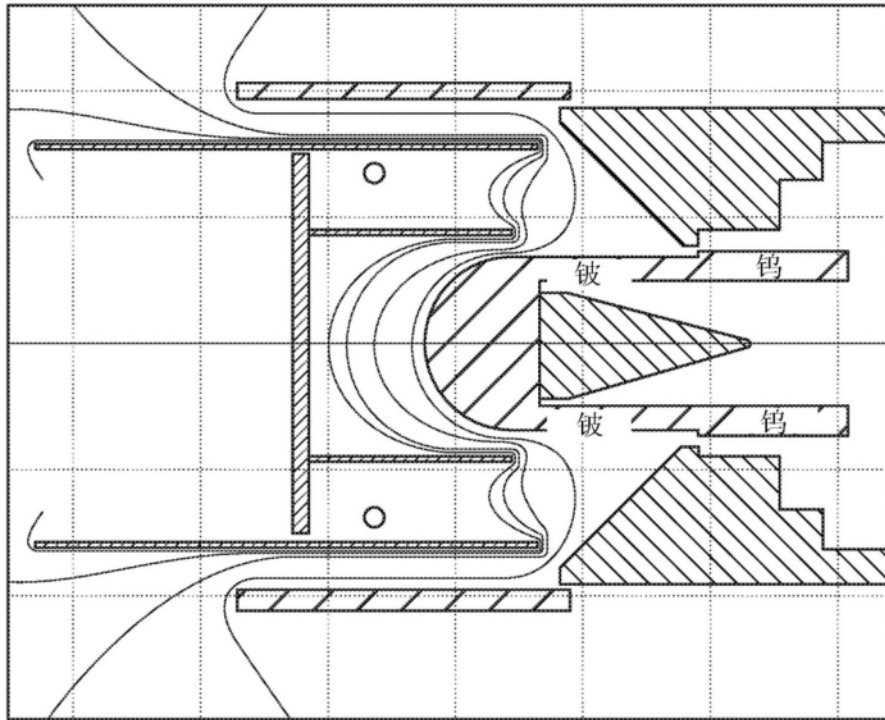


图27

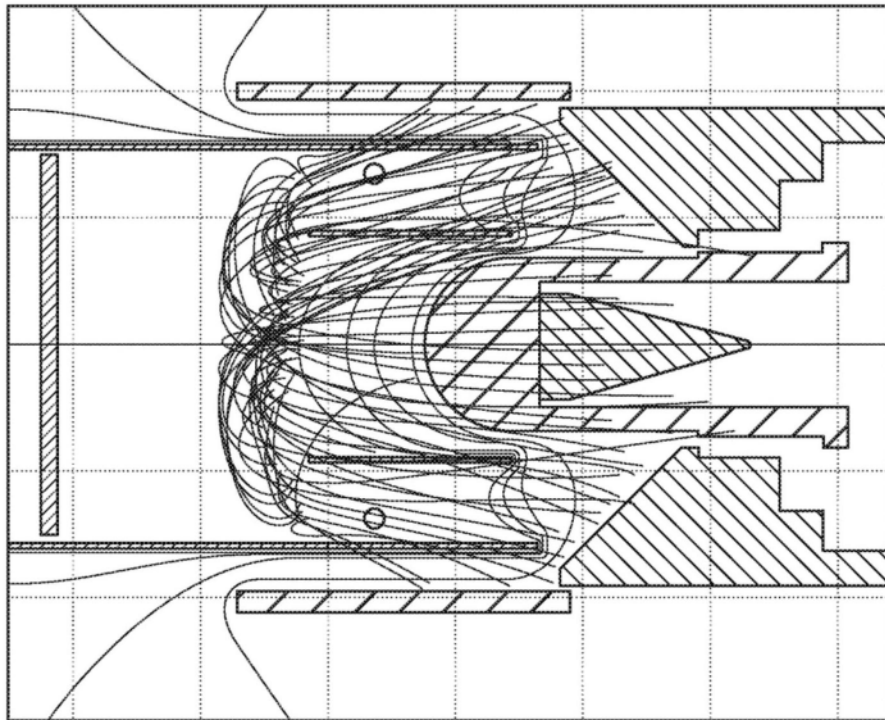


图28

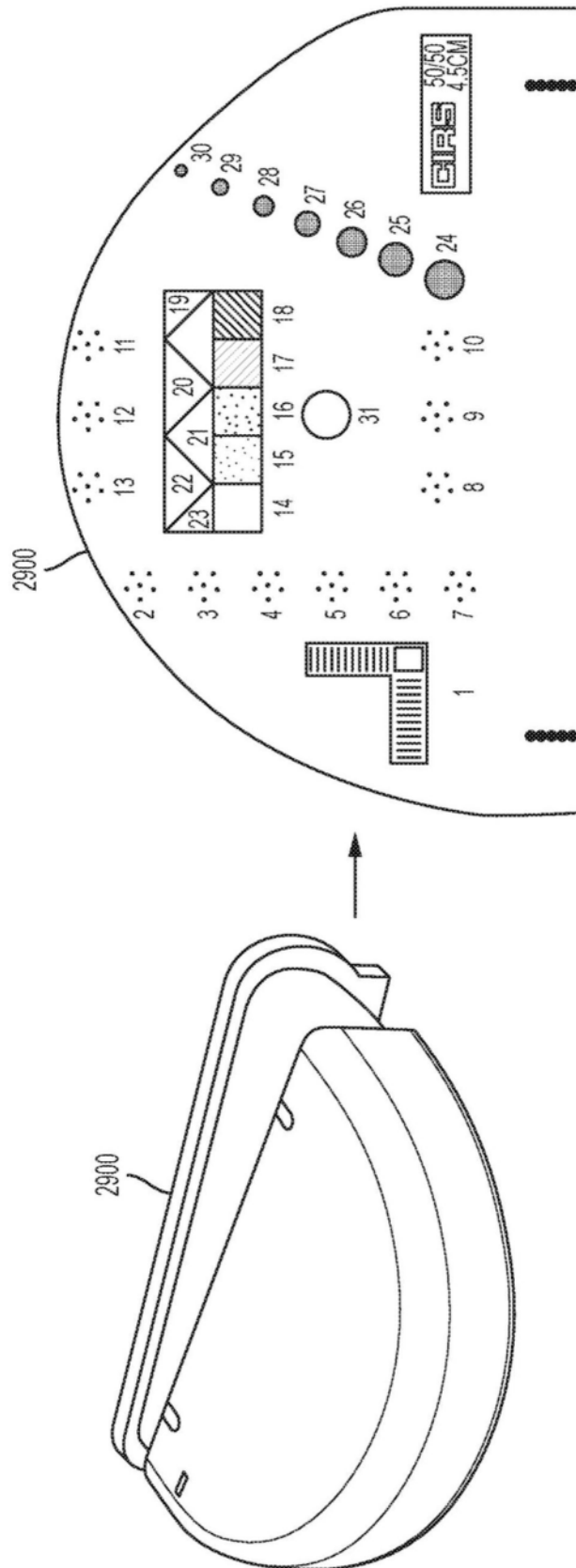


图29

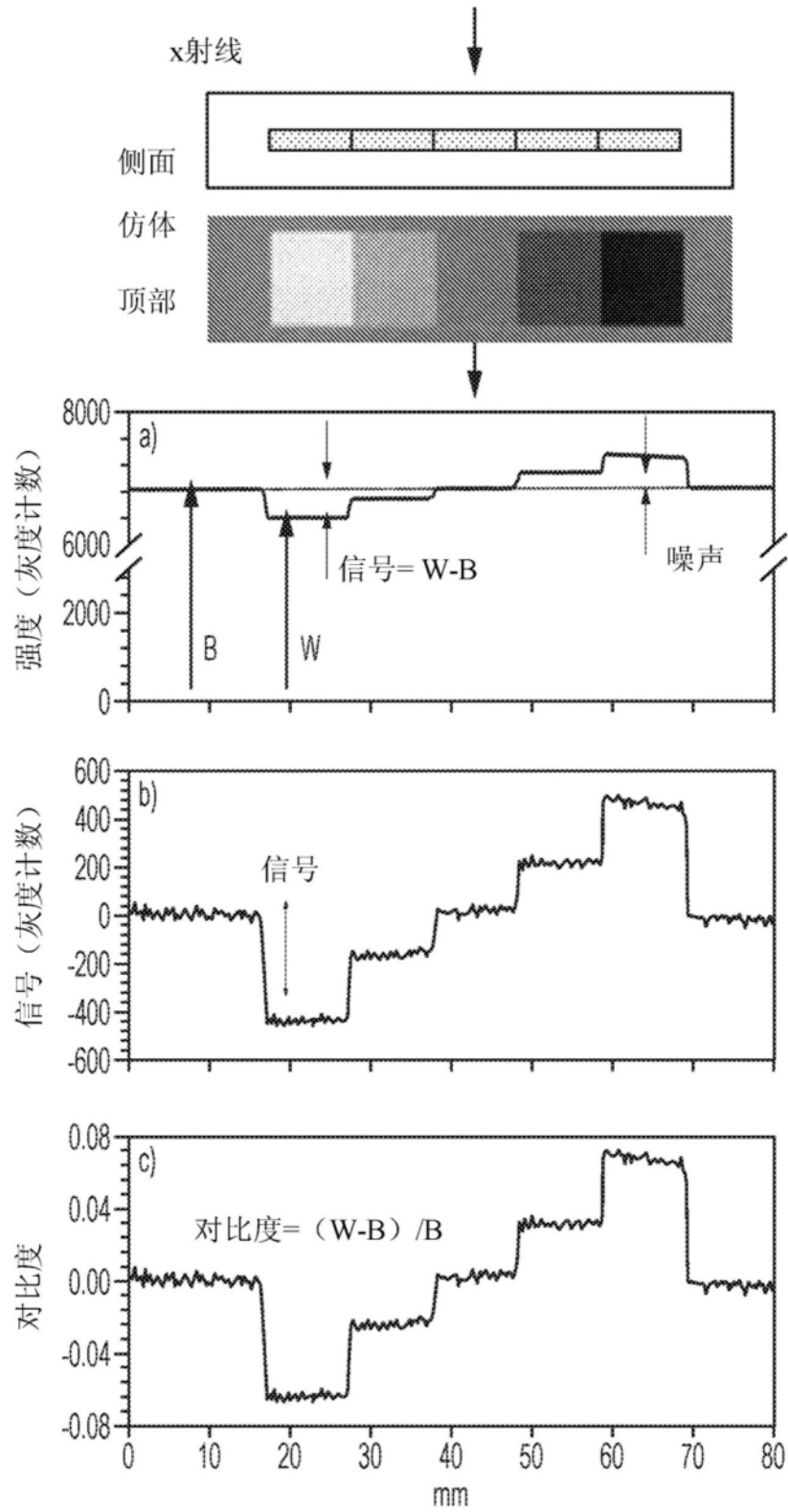


图30

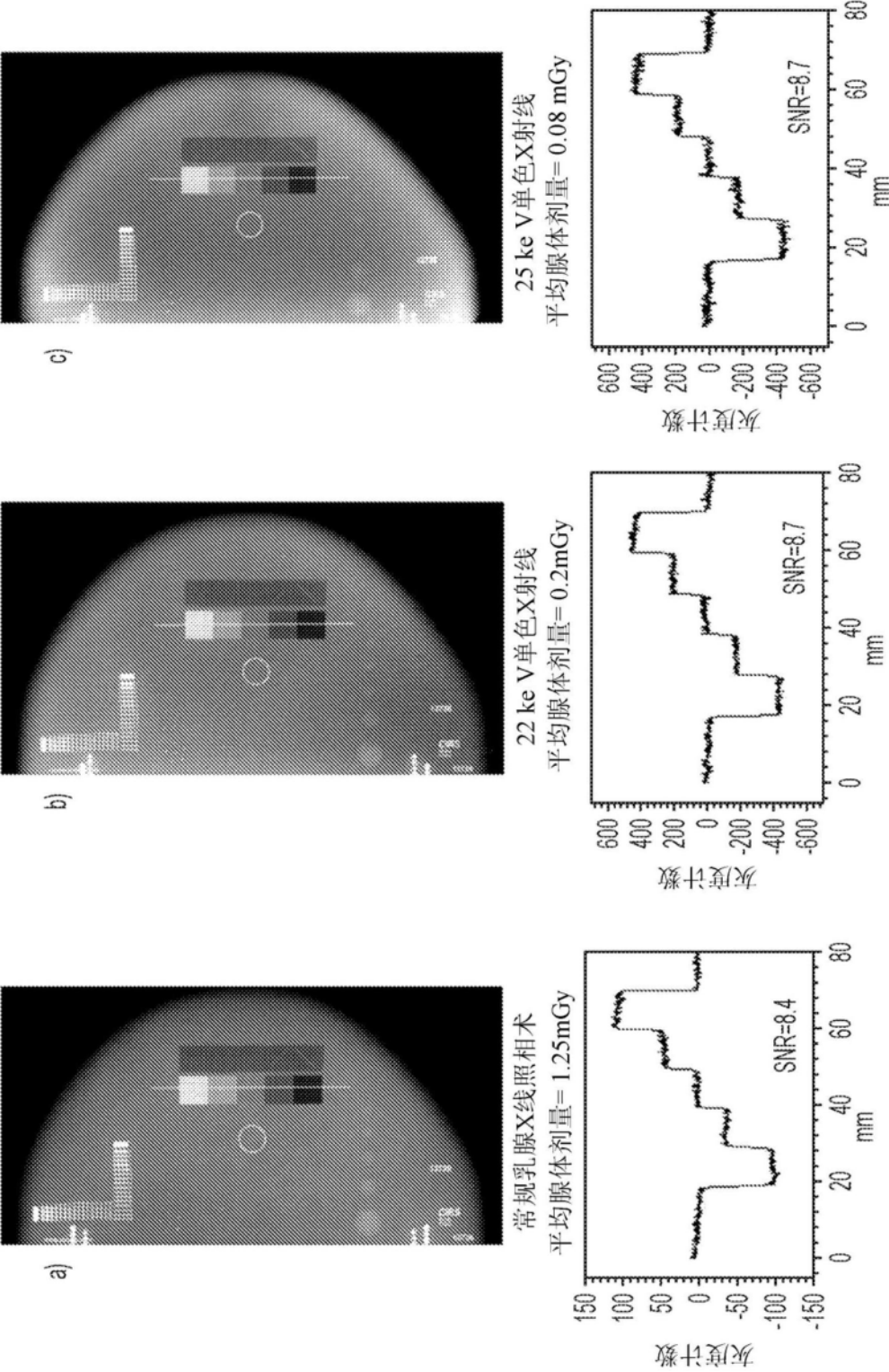


图31

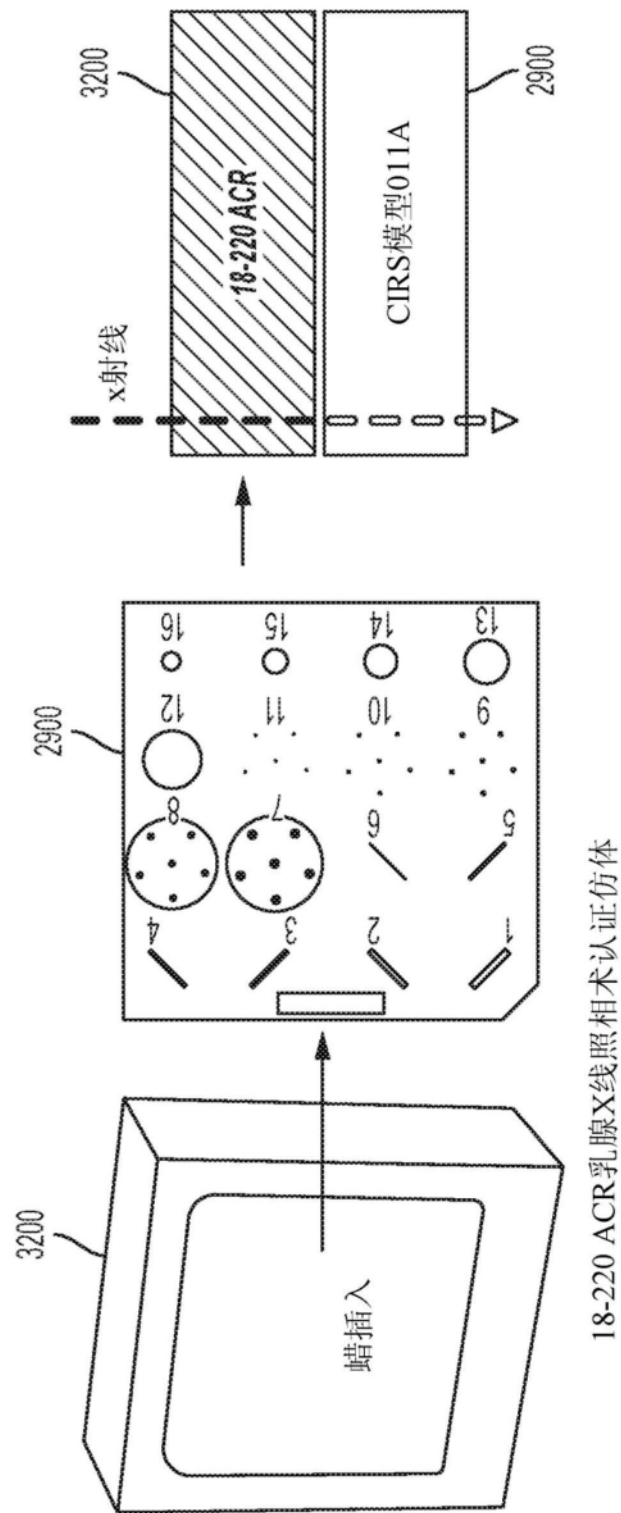


图32

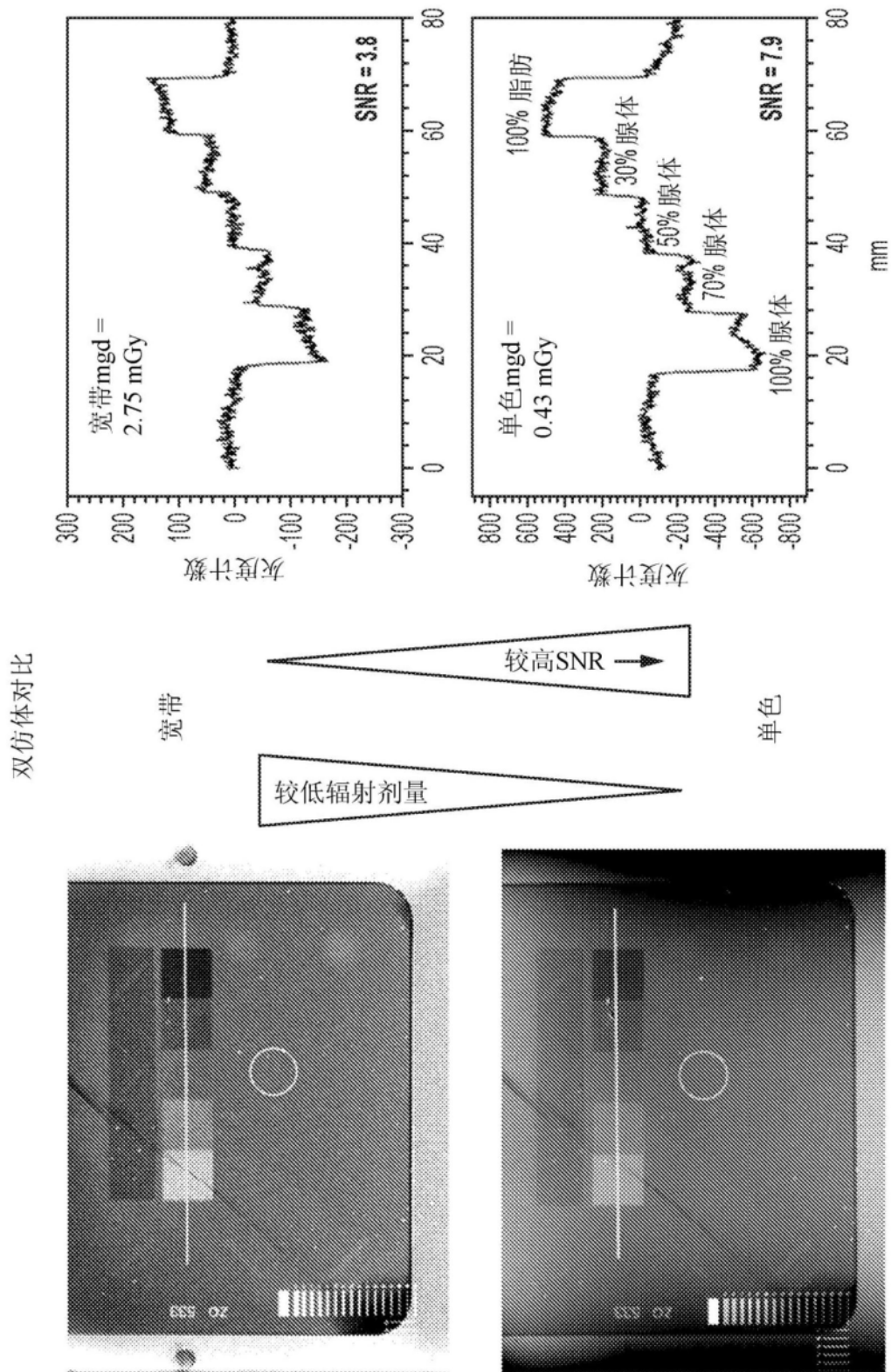


图33

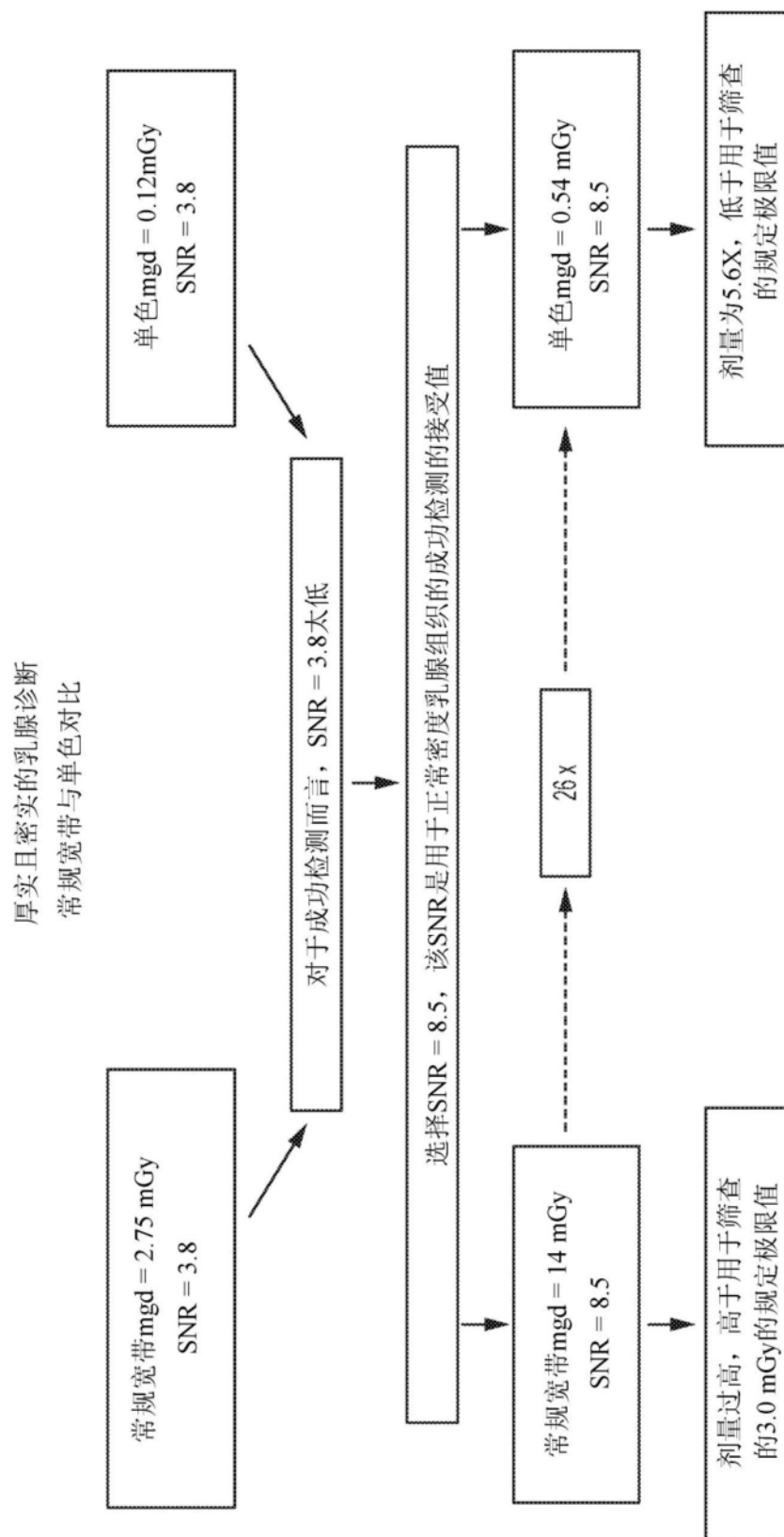


图34

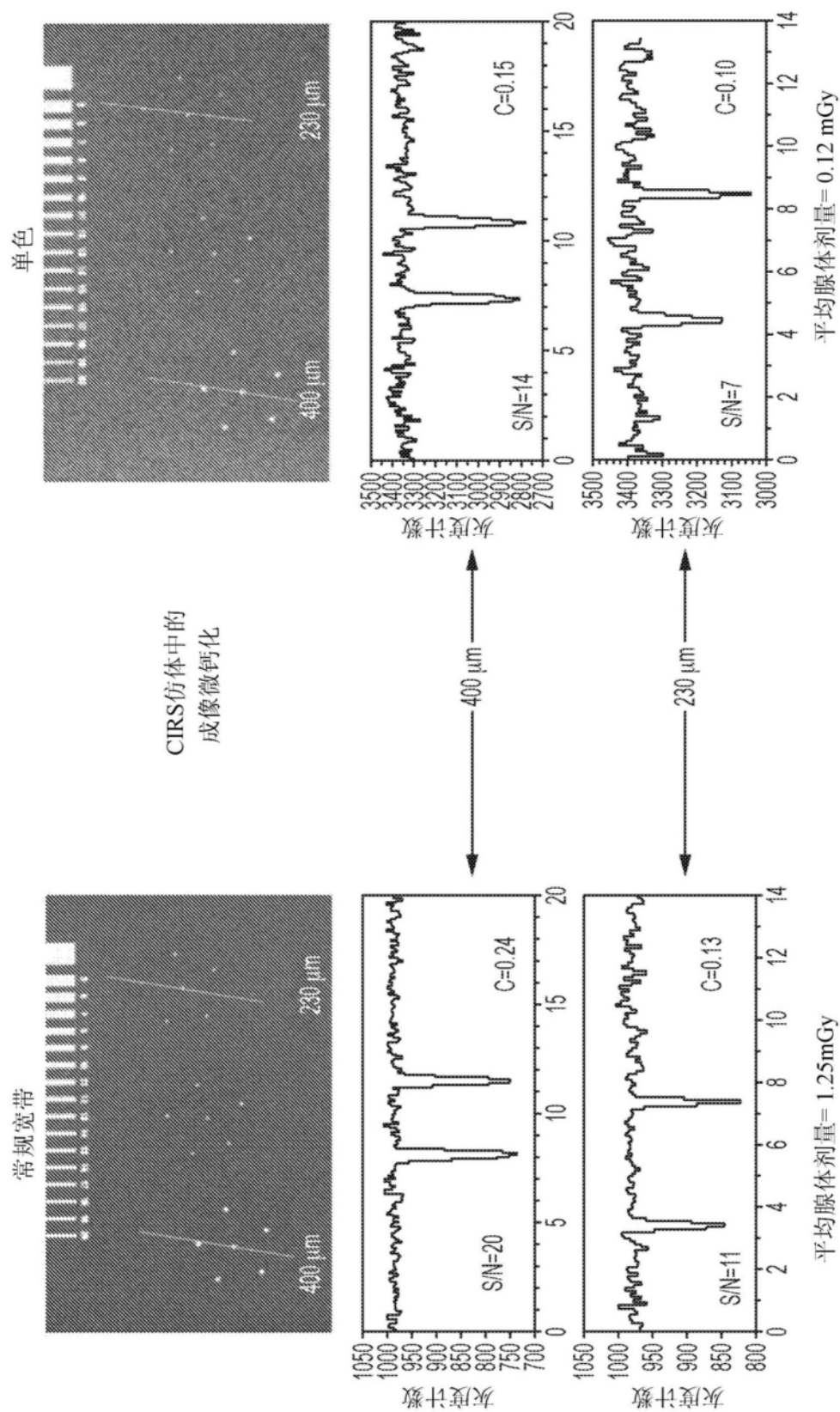


图35

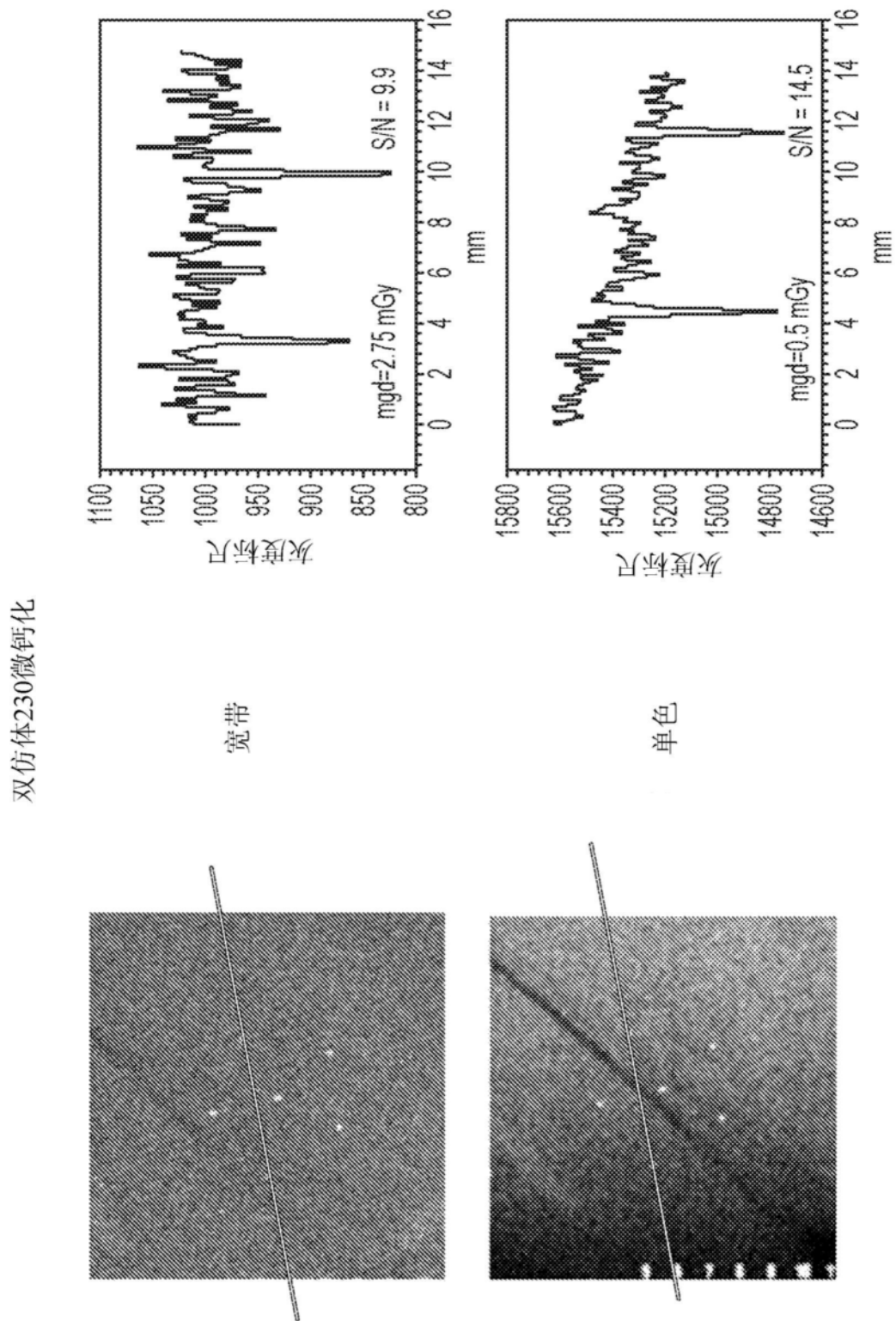


图36

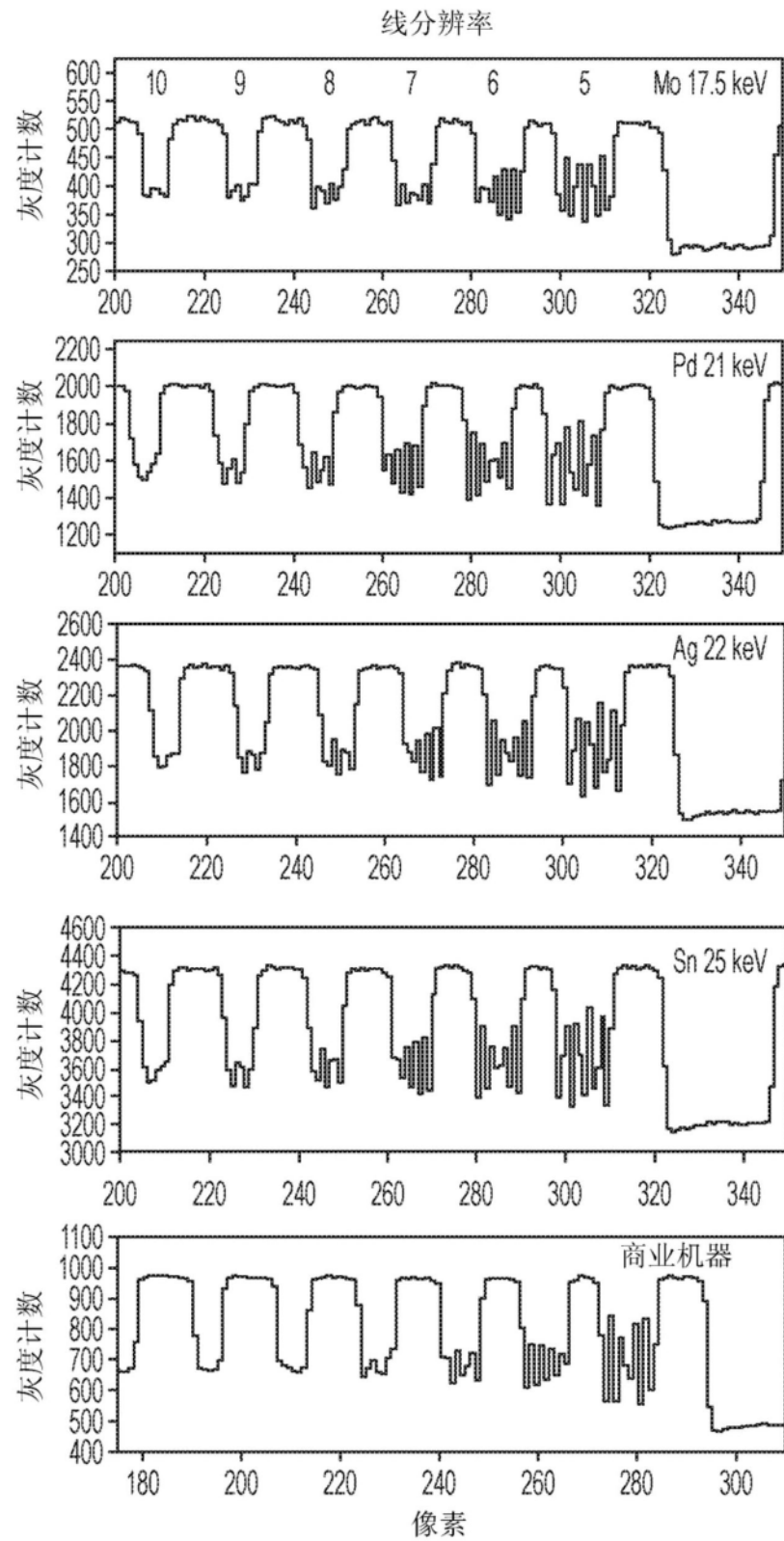


图37

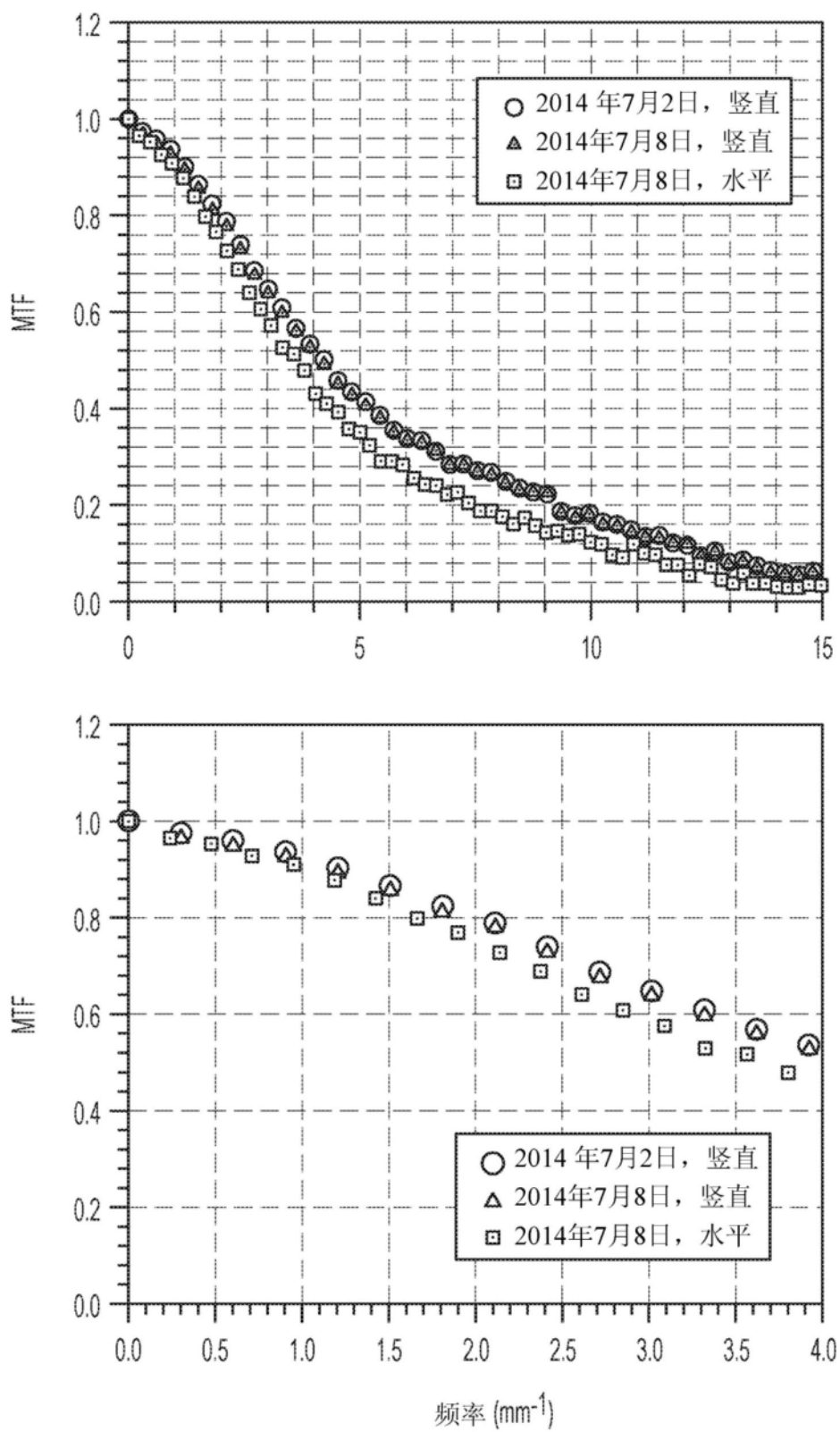


图38

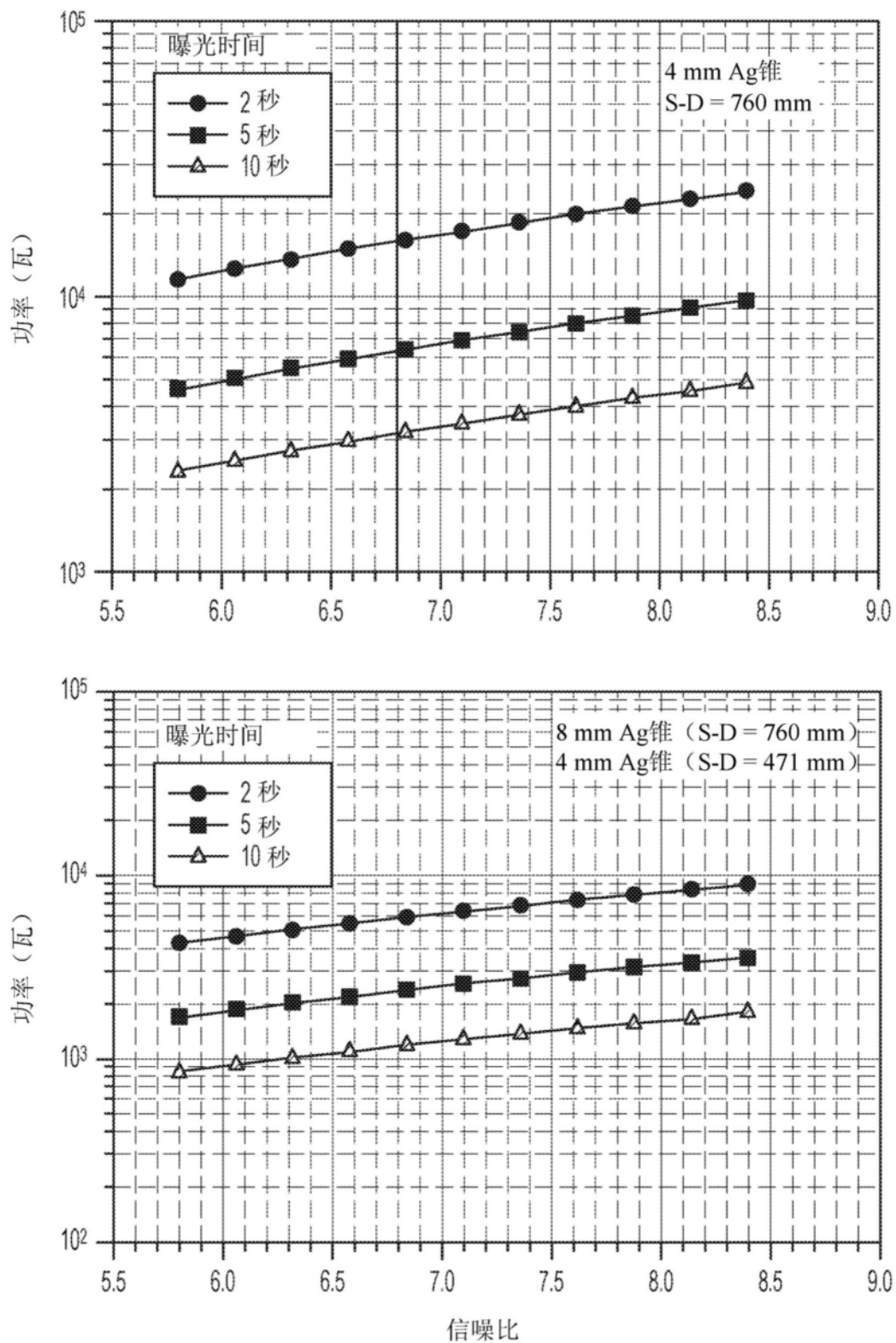


图39

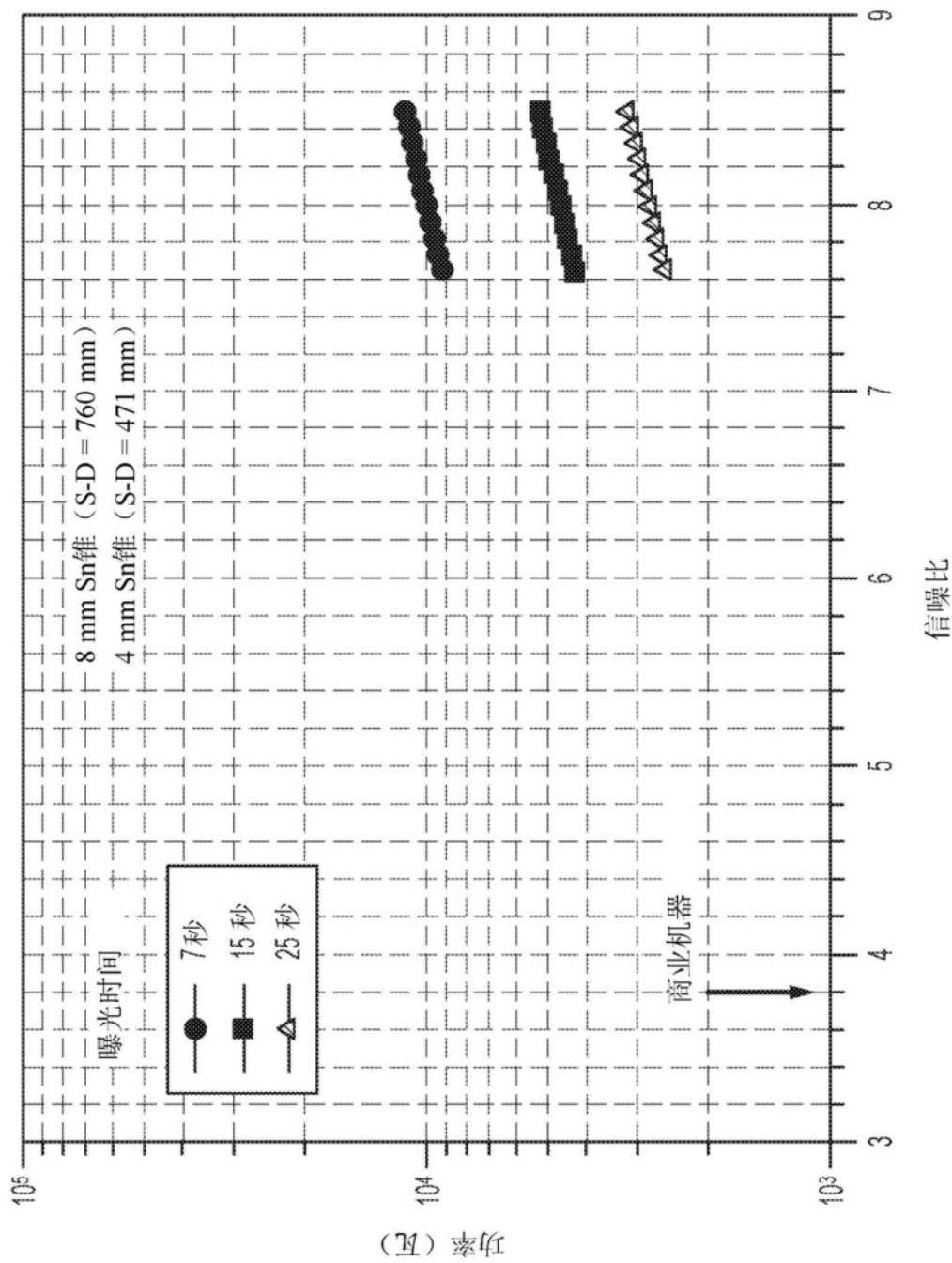


图40

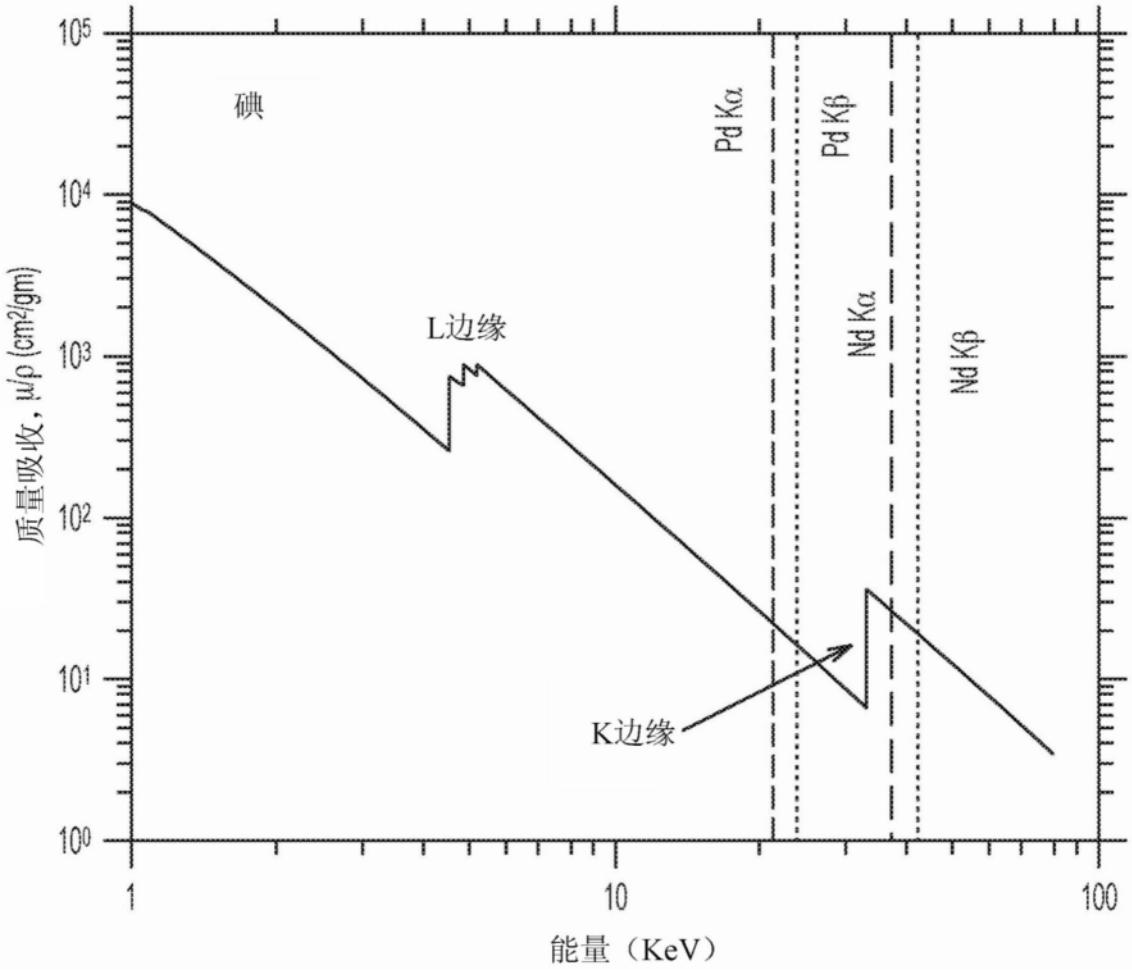


图41

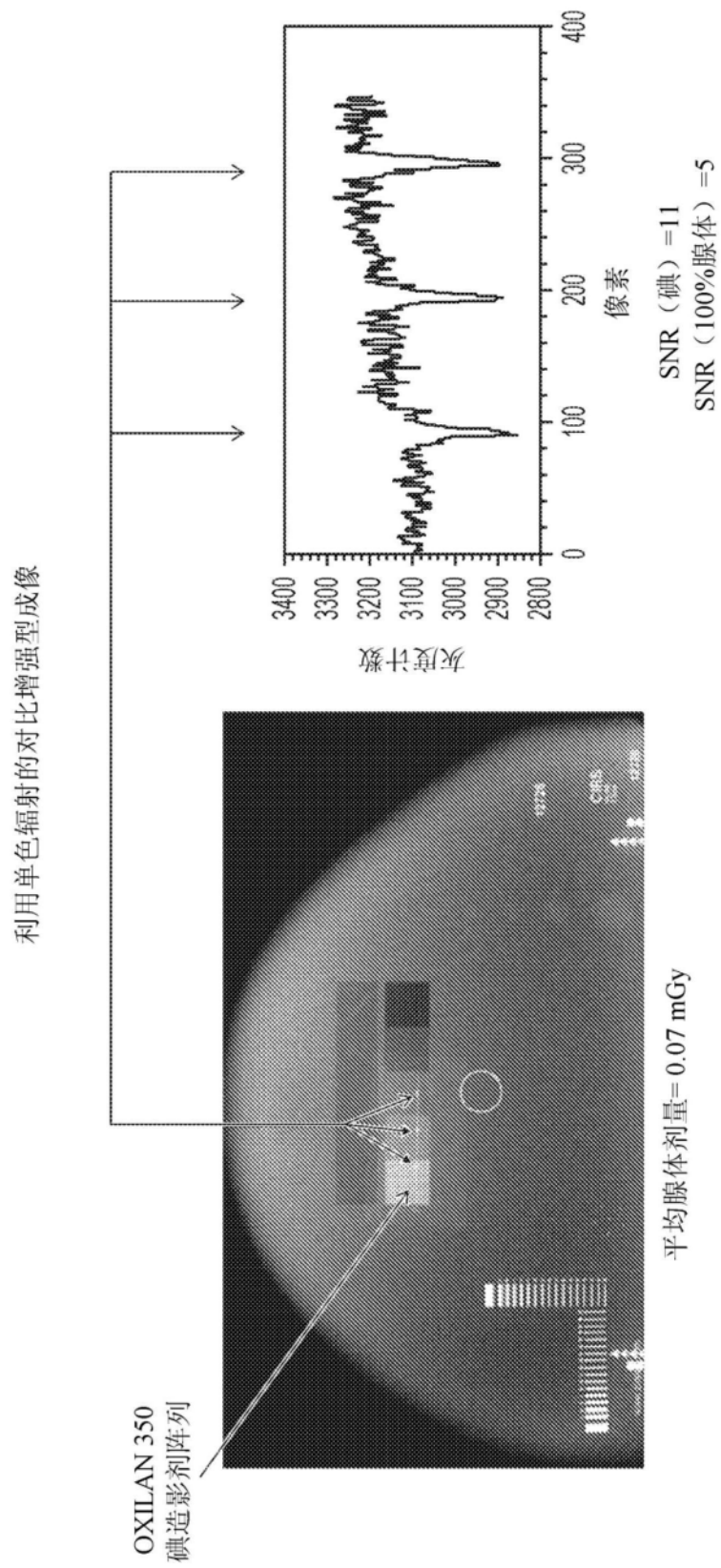


图42