(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 111048372 B
(45)授权公告日 2021.04.27

(21)申请号 201811190748.7

(22)申请日 2018.10.12

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111048372 A

(43)申请公布日 2020.04.21

(73)专利权人 中国电子科技集团公司第三十八研究所
地址 230088 安徽省合肥市高新区香樟大道199号

(72)发明人 刘华荣 靳学明 戚玉轩 王学慧 李艺晶 王俊听 郑春宁 钱庆 罗婷婷 董中林

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021
代理人 李春伟

(51)Int.Cl.
H01J 3/02(2006.01)
H01J 1/304(2006.01)

(56)对比文件
CN 102629538 A,2012.08.08
US 6573642 B1,2003.06.03
CN 105140091 A,2015.12.09
CN 104704601 A,2015.06.10
CN 102789947 A,2012.11.21
CN 104347335 A,2015.02.11
CN 102651295 A,2012.08.29

审查员 邓辉

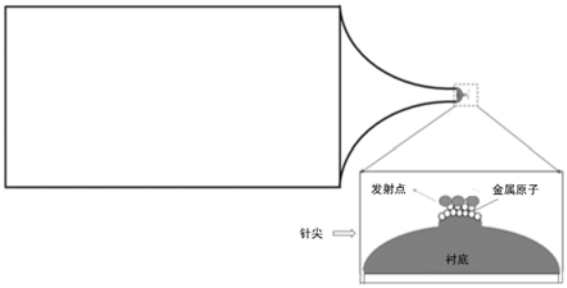
权利要求书3页 说明书14页 附图7页

(54)发明名称

一种电子源工作方法

(57)摘要

本公开提供了一种电子源工作方法,所述电子源包括至少一个固定在针尖上的发射点,所述发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物,所述工作方法包括通过控制所述电子源的工作参数发射电子。



CN 111048372 B

1.一种电子源工作方法,所述电子源包括至少一个固定根植在针尖上的发射点,该发射点是非游离的发射点,所述发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物,所述工作方法包括:

通过控制所述电子源的工作参数发射电子。

2.根据权利要求1所述的方法,其中,所述电子源的工作参数包括工作偏压以及以下任意一种或多种:工作温度或所述电子源所处环境的工作压强。

3.根据权利要求1所述的方法,还包括:

在所述电子源发射电子之前或者之后,对所述电子源进行热处理;和/或

在所述电子源发射电子时进行热处理。

4.根据权利要求2所述的方法,其中:

所述工作温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的最小值;或者

当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,所述工作温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的最小值。

5.根据权利要求2所述的方法,其中,

所述电子源发射电子时施加的工作偏压包括以下任意一种或多种:连续偏压或者脉冲偏压。

6.根据权利要求2所述的方法,其中:

所述工作温度≤1000K,所述工作压强≤10^{-3}Pa。

7.根据权利要求3所述的方法,其中,所述在所述电子源发射电子之前或者之后,对所述电子源进行热处理包括以下任意一种或多种:连续加热处理或者脉冲加热处理。

8.根据权利要求3中所述的方法,其中,所述在所述电子源发射电子时进行热处理包括以下任意一种或多种:连续加热处理或者脉冲加热处理。

9.根据权利要求7或8所述的方法,其中,所述连续加热处理包括:

对所述电子源持续进行加热,其中,

加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的最小值,或者

当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,加热的温度低于所述电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的最小值;以及

维持所述电子源的温度直至达到第一设定时长。

10.根据权利要求9所述的方法,其中,所述电子源的温度≤800K,所述第一设定时长≤20min。

11.根据权利要求7或8所述的方法,其中,所述脉冲加热处理包括:

以脉冲方式对所述电子源进行加热,其中,脉冲的周期≤脉冲周期阈值,脉冲周期之间的间隔时长≥间隔时长阈值,其中,

加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的最小值,或者

当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,加热的温度低于所述电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的最小值。

12.根据权利要求11所述的方法,其中:

500K≤所述电子源的温度≤1000K,所述脉冲周期阈值≤10s,所述间隔时长阈值≥3s。

13.根据权利要求7所述的方法,还包括:

在连续加热处理或者脉冲加热处理的过程中,对电子源辅以偏压。

14.根据权利要求13所述的方法,其中,所述对电子源辅以偏压包括以下任意一种或多种:辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合。

15.根据权利要求14所述的方法,其中:

当辅以正偏压时,所述正偏压的值小于所述发射点的场致蒸发对应的电压值;或者

当辅以负偏压时,所述负偏压的值小于所述电子源的第一发射电流阈值对应的电压值。

16.根据权利要求15所述的方法,其中:

0.5KV≤所述正偏压的值≤2KV,或者

-0.5KV≤所述负偏压的值≤-1KV。

17.根据权利要求7或8所述的方法,还包括:对所述电子源进行发射点修复;

所述对所述电子源进行发射点修复包括:

去除所述电子源针尖表面至少一个发射点;以及

在所述针尖表面上形成新的发射点,所述新的发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物。

18.根据权利要求17所述的方法,其中,所述去除所述电子源针尖表面至少一个发射点包括:

通过加热或者场致蒸发去除所述电子源表面至少一个发射点,其中,

通过加热去除所述电子源表面至少一个发射点时,

加热的温度低于电子源衬底和所述针尖表面的金属原子的消失温度的最小值,或者

当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,所述加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述高场强结构消失温度的最小值,

其中,在加热过程中,可对电子源辅以偏压,所述对电子源辅以偏压包括以下任意一种或多种:辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合;

通过场致蒸发去除所述电子源表面至少一个发射点时,

所述场致蒸发施加的正偏压的值低于电子源衬底和所述针尖表面的金属原子的消失对应的正偏压的最小值,或者

当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,所述场致蒸发施加的正偏压的值低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述高场强结构消失对应的正偏压的最小值。

19.根据权利要求1所述的方法,其中,所述发射点为氢钨化合物。

20.根据权利要求6所述的方法,其中:

所述工作温度≤150K,所述工作压强≤10^{-6}Pa;或者

500K≤所述工作温度≤800K,所述工作压强≤10^{-6}Pa。

21.根据权利要求12所述的方法,其中:

800K≤所述电子源的温度≤1000K,2s≤所述脉冲周期阈值≤3s,所述间隔时长阈值≥

3s。

一种电子源工作方法

技术领域

[0001] 本公开涉及电子源技术领域，更具体地，本公开涉及一种电子源工作方法。

背景技术

[0002] 金属中的自由电子在特定条件下可以发射出来，若用金属构成阴极并做成极细的针尖状，在真空中施以数千伏电压，金属中的电子即可从阴极冷金属中发射，这种发射电子的方法称为场发射，属于冷阴极发射。

[0003] 对于电子源而言，最重要的指标就是亮度，直接决定了其束流品质。在引出电压V0下，亮度可如公式(1)所示：

[0004] $$B=\frac{I}{S\times\Omega}\propto\frac{I}{d^2\times\alpha^2} \quad (1)$$

[0005] 其中，B为亮度，I为发射电流，S为等效发射面积，d为等效直径，Ω为空间发射角，α为发射半角。此外，亮度B正比于加速电压V_a，如公式(2)所示。

[0006] $$B\propto V_a \quad (2)$$

[0007] 由公式(1)可知，为得到高亮度，需要尽可能得提升I，以及减小α和d。此外，获得一定的发射电流所需要的引出电压V0越低越好，而这需要针尖的发射面具有较低的功函数以及较尖锐的头部结构。另外，电子源的另外一个关键指标就是单色性，可用能散δE表示。

[0008] 综合上述考虑，最理想的电子源就是冷场发射电子源(cold field emission electron sources，简称CFE)，CFE的亮度高过其它种类电子源约一个量级以上，且有很小的能散(～0.3eV)。此外，为了尽量追求极限直径，近年来具有低功函数的原子级电子源成为研究热点，即发射点仅有一个或者数个原子组成。

[0009] 在实现本公开构思的过程中，发明人发现现有技术中CFE至少存在如下问题：第一，CFE稳定性往往很差，需在极高真空下(10^{-9}～10^{-8}Pa)才能工作，这严重限制了其使用范围。而即使在该环境下，也需定期处理以获得较稳定的工作状态。第二，受离子轰击的影响，CFE较容易烧毁。第三，前述问题在较大发射电流下变得更为严重，现有的CFE一般可长时间稳定工作的总发射电流为～10微安，且利用率很低。鉴于前述弊端，在高亮度电子源领域占据主导地位的是肖特基式场发射电子源(Schottky thermal-field emission source)。

发明内容

[0010] 本公开的一个方面提供了一种能使得CFE可以稳定的工作在较低真空环境下、且具有较大的场发射电流的电子源工作方法，该工作方法适用于如下所述的电子源，所述电子源包括至少一个固定在针尖上的发射点，所述发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物，相应地，所述电子源工作方法包括：通过控制所述电子源的工作参数发射电子。由于该发射点是固定在针尖表面的金属原子与气体分子形成的反应产物，根植于针尖表面，而非游离在针尖表面的气体分子或者游离颗粒等，不会因游离状的物质聚集在一起形成新的发射点而导致过电流烧毁，有效提升了稳定性，此外，该发射点包括针

尖表面的金属原子与气体分子形成的反应产物，相对于金属原子或其它金属化合物(如金属硼化物等)而言，在工作环境中(存在气体分子)具有更好的稳定性，如更加不容易与工作环境中的例如氢气等发生作用或反应，进一步提升了电子源的稳定性。另外，本公开提供的电子源的发射点可以为一个或数个金属原子与气体分子形成的反应产物，即能形成具有低功函数的原子级电子源。此外，该反应产物使表面功函数显著降低，表面发射点尖锥的形成也使发射能力显著提高。另外可以通过增加发射点的数量来提升场发射电流的电流值。这样就可以通过控制上述电子源的工作参数实现CFE可以稳定的工作在较低真空环境下、且具有较大的场发射电流。

[0011] 可选地，所述电子源的工作参数包括工作偏压以及以下任意一种或多种：工作温度或所述电子源所处环境的工作压强。本公开的电子源在工作过程中对于不同的工作偏压、工作温度或环境的工作压强有不同的工作方式，可以通过控制工作偏压、工作温度或环境的工作压强实现用户的发射状态的需求。

[0012] 可选地，所述方法还可以包括如下操作：在所述电子源发射电子之前或者之后，对所述电子源进行热处理，和/或，在所述电子源发射电子时进行热处理。通过热处理可以使得电子源表面保持清洁，提高发射效率。

[0013] 可选地，所述工作温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，所述工作温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的小值。这样可以有效保护发射点和/或发射点所在的金属原子层，避免工作温度过高导致电子源受损。

[0014] 可选地，所述电子源发射电子时施加的工作偏压包括以下任意一种或多种：连续偏压或者脉冲偏压。具体地，可以根据用户需求对电子源施加连续偏压或者脉冲偏压来满足用户的使用需求。

[0015] 可选地，所述工作温度≤1000K，所述工作压强≤10^{-3}Pa，或者，所述工作温度≤150K，所述工作压强≤$1E^{-6}$Pa，或者，500K≤所述工作温度≤800K，所述工作压强≤$1E^{-6}$Pa。其中，本公开提供的电子源可以实现在较低的真空度下工作较长时间，当电子源处于低温或处于较高的工作温度范围时，能有效延缓游离物(无论是离子轰击产生还是表面解离产生)向发射区域的移动，且针尖制冷有助于改善针尖附近局域真空度，这有助于延长使用寿命。而当电子源处于较高的工作温度范围时，可有效避免表面解离物的形成，且改善游离物聚集烧毁的情况，这有助于延长电子源的使用寿命。由于发射点形成和工作温度较低，在工作时电子源结构不改变，施加电压值不发生变化，电压值稳定使电子枪的设计更简单。

[0016] 可选地，所述在所述电子源发射电子之前或者之后，对所述电子源进行热处理包括以下任意一种或多种：连续加热处理或者脉冲加热处理。通过热处理来使得吸附在针尖表面的气体分子等脱离，有助于提升针尖表面清洁度，提升发射能力，且改善游离物容易聚集形成发射点甚至烧毁的情况，延长使用寿命。

[0017] 可选地，所述在所述电子源发射电子时进行热处理包括以下任意一种或多种：连续加热处理或者脉冲加热处理。

[0018] 可选地，所述连续加热处理可以包括如下操作：首先，对所述电子源持续进行加热，其中，加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度

的小值，或者当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，加热的温度低于所述电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的小值，然后，维持所述电子源的温度直至达到第一设定时长。这样可以有效保护发射点、发射点所在的金属原子层、高场强结构，避免工作温度过高导致电子源受损。

[0019] 可选地，在连续加热处理过程中，所述电子源的温度可以≤800K，所述第一设定时长可以≤20min。

[0020] 可选地，所述脉冲加热处理可以包括：以脉冲方式对所述电子源进行加热，其中，脉冲的周期≤脉冲周期阈值，脉冲周期之间的间隔时长≥间隔时长阈值，并且，加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，加热的温度低于所述电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的小值。这样可以有效保护发射点、发射点所在的金属原子层、高场强结构，避免工作温度过高导致电子源受损。

[0021] 可选地，500K≤所述电子源的温度≤1000K，所述脉冲周期阈值≤10s，所述间隔时长阈值≥3s，或者，800K≤所述电子源的温度≤1000K，2s≤所述脉冲周期阈值≤3s，所述间隔时长阈值≥3s。

[0022] 可选地，所述方法还可以包括：在连续加热处理或者脉冲加热处理的过程中，对电子源辅以偏压，以避免针尖，如高场强结构等发生形变。

[0023] 可选地，所述对电子源辅以偏压可以包括以下任意一种或多种：辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合。

[0024] 可选地，当辅以正偏压时，所述正偏压的值小于所述发射点的场致蒸发对应的电压值，或者，当辅以负偏压时，所述负偏压的值小于所述电子源的第一发射电流阈值对应的电压值，即避免针尖的显著场发射导致电子激励出气，进而至少部分避免离子化的气体的轰击。

[0025] 可选地，在一个实施例中，0.5KV≤所述正偏压的值≤2KV，或者，-0.5KV≤所述负偏压的值≤-1KV。

[0026] 可选地，所述方法还可以包括如下操作：对所述电子源进行发射点修复。其中，所述对所述电子源进行发射点修复可以包括如下操作：首先，去除所述电子源针尖表面至少一个发射点，然后，在所述针尖表面上形成新的发射点，所述新的发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物。

[0027] 可选地，所述去除所述电子源针尖表面至少一个发射点可以包括如下操作：首先，通过加热或者场致蒸发去除所述电子源表面至少一个发射点，其中，通过加热去除所述电子源表面至少一个发射点时，加热的温度低于电子源衬底和所述针尖表面的金属原子的消失温度的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，所述加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述高场强结构消失温度的小值。需要说明的是，在加热过程中，可对电子源辅以偏压，所述对电子源辅以偏压包括以下任意一种或多种：辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合。此外，通过场致蒸发去除所述电子源表面至少一个发射点时，所述场致蒸发施加的正偏压的值低于电子源衬底和所述针尖表面的金属原子的消失对应的正偏压的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，所述场致蒸发施加的正偏压的值低于电子源衬底、所述针尖表面

的金属原子和所述高场强结构消失对应的正偏压的小值。这样可以避免在去除发射点时对发射点之下的金属原子、高场强结构、针尖等造成损伤，当去除发射点之后，再使得针尖表面的金属原子和气体分子形成反应产物，作为发射点。

[0028] 可选地，所述发射点为氢钨化合物。

[0029] 可选地，所述衬底材料是导电材料，或者，所述高场强结构材料是导电材料，或者，所述衬底和/或高场强结构表面是金属原子，或者，所述高场强结构材料与衬底材料相同或者不同，或者，所述衬底和/或高场强结构表面的金属原子材料与高场强结构材料相同或者不同，当不同时，所述衬底和/或高场强结构表面的金属原子通过蒸镀或者电镀等方式形成，或者，所述衬底和/或高场强结构表面的金属原子材料与衬底材料相同或者不同，当不同时，所述衬底和/或高场强结构表面的金属原子通过蒸镀或者电镀等方式形成。

[0030] 可选地，所述衬底材料是导电材料并且熔点高于1000K，或者所述高场强结构材料是导电材料并且熔点高于1000K，或者所述衬底和/或高场强结构表面的金属原子的材料为熔点高于1000K的金属材料，以及所述金属原子与气体分子的反应产物包括在真空条件下熔点高于1000K的金属原子与气体分子的反应产物。

[0031] 本公开提供的电子源工作方法可以使得CFE稳定的工作在较低真空环境下、且具有较大的场发射电流，其中，该CFE可以包括至少一个固定在针尖上的发射点，所述发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物。

附图说明

[0032] 为了更完整地理解本公开及其优势，现在将参考结合附图的以下描述，其中：

[0033] 图1示意性示出了根据本公开实施例的电子源的结构示意图；

[0034] 图2示意性示出了根据本公开实施例的适用于电子源工作方法的设备的结构示意图；

[0035] 图3A示意性示出了根据本公开实施例的高真空度环境中在低温或室温下电子源的电流发射能力示意图；

[0036] 图3B示意性示出了根据本公开实施例的高真空度环境中在低温或室温下电子源烧毁过程的示意图；

[0037] 图3C示意性示出了根据本公开实施例的中真空度环境中在低温或室温下电子源的电流发射能力示意图；

[0038] 图3D示意性示出了根据本公开实施例的真空度环境中在高温下电子源的电流发射能力示意图；

[0039] 图3E示意性示出了根据本公开实施例的针尖表面吸附气体分子的示意图；

[0040] 图4A示意性示出了根据本公开实施例的中温连续加热处理模式的示意图；

[0041] 图4B示意性示出了根据本公开实施例的中温脉冲加热处理模式的示意图；

[0042] 图4C示意性示出了根据本公开实施例的对电子源进行热处理以恢复发射能力的示意图；

[0043] 图4D示意性示出了根据本公开实施例的针尖运行模式的流程图；

[0044] 图5示意性示出了根据本公开实施例的针尖在长期运行后发射能力出现老化的示意图。

具体实施方式

[0045] 以下，将参照附图来描述本公开的实施例。但是应该理解，这些描述只是示例性的，而并非要限制本公开的范围。在下面的详细描述中，为便于解释，阐述了许多具体的细节以提供对本公开实施例的全面理解。然而，明显地，一个或多个实施例在没有这些具体细节的情况下也可以被实施。此外，在以下说明中，省略了对公知结构和技术的描述，以避免不必要地混淆本公开的概念。

[0046] 在此使用的术语仅仅是为了描述具体实施例，而并非意在限制本公开。在此使用的术语“包括”、“包含”等表明了所述特征、步骤、操作和/或部件的存在，但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、步骤、操作或结构。

[0047] 在此使用的所有术语(包括技术和科学术语)具有本领域技术人员通常所理解的含义，除非另外定义。应注意，这里使用的术语应解释为具有与本说明书的上下文相一致的含义，而不应以理想化或过于刻板的方式来解释。

[0048] 在使用类似于“A、B和C等中至少一个”这样的表述的情况下，一般来说应该按照本领域技术人员通常理解该表述的含义来予以解释(例如，“具有A、B和C中至少一个的系统”应包括但不限于单独具有A、单独具有B、单独具有C、具有A和B、具有A和C、具有B和C、和/或具有A、B、C的系统等)。在使用类似于“A、B或C等中至少一个”这样的表述的情况下，一般来说应该按照本领域技术人员通常理解该表述的含义来予以解释(例如，“具有A、B或C中至少一个的系统”应包括但不限于单独具有A、单独具有B、单独具有C、具有A和B、具有A和C、具有B和C、和/或具有A、B、C的系统等)。

[0049] 附图中示出了一些方框图和/或流程图。应理解，方框图和/或流程图中的一些方框或其组合可以由计算机程序指令来实现。这些计算机程序指令可以提供给通用计算机、专用计算机或其他可编程数据处理装置的处理器，从而这些指令在由该处理器执行时可以创建用于实现这些方框图和/或流程图中所说明的功能/操作的装置。

[0050] 以下首先对现有技术中的场发射行为进行说明以便更好地理解本公开的技术方案。

[0051] 现有的电子源，如钨(310)单晶针尖的电子源在使用过程中会经历如下三个阶段，首先，是较清洁的电子源，随着气体的吸附，进入稳定期(Stability)，然而，随着气体的进一步吸附，电流噪声逐渐出现，进入不稳定期(Instability)，电子源稳定性变差，随着工作时长的增加，表面会逐渐出现污染物，发射电流开始剧烈波动，最终导致烧毁。

[0052] 关于上述烧毁，发明人进一步的研究，表明其与离子轰击密切相关。这是由于电子发射后会电离周围空间的气体分子，进而轰击到针尖。一个可能就是针尖表面被轰击形成多个突起，多个突起分别作为发射点，最后导致过多电流，造成烧毁。还有一种机制，就是吸附到针尖表面的气体分子或其和其它物质的结合物，在电场作用下不断移动，最终在一个表面的缺陷点(如由离子轰击产生)汇集成一个纳米级突起作为发射点，发射点的迅速长大导致了过流，最终导致了针尖的烧毁。

[0053] 进一步地，前述问题在较大发射电流下变得更为严重。一般可长时间稳定工作的总发射电流为～10微安，且利用率很低。鉴于前述弊端，在高亮度电子源领域占据主导地位的是肖特基式场发射电子源(Schottky thermal-field emission source)。

[0054] 本质上讲，对CFE而言，任何材料都不能避免气体吸附和离子轰击的影响。但是，如

工作在大电流下(>10微安),电子激励脱气(特别在电子轰击引出极),就会进一步劣化真空度,使得针尖发射稳定性很差,波动幅度极大,更加无法长期稳定工作。因而,如何提供出稳定的、较大的场发射电流,一直是冷场发射电子源发展历程中最主要的挑战。

[0055] 为了避免上述气体吸附和离子轰击的影响,当前场发射电子源(一般指金属针尖)仅能在超高真空中工作(<10^{-8}Pa),这严重制约了CFE的适用范围,发明人针对于此又进行了进一步深入研究,发现以下特点,真空中残留气体成分有H_2,CO,CO_2,而主要成分则是H_2。H_2的吸附会导致清洁表面的发射能力逐渐变差。可以说在该真空范围,H_2的影响从根本上决定了针尖的场发射性能。因此,如何应对H_2的影响成为实现高稳定度针尖的关键。现有技术中也存在一些技术方案可以缓解气体吸附的问题,例如,通过进一步提高腔体真空度至1×10^{-9}Pa量级。

[0056] 此外,还存在一些技术方案直接利用一些针尖表面游离颗粒物(atomic clusters)作为发射点,也是尝试的一种解决方式。这些游离颗粒物,可以是通过在较差真空度下长时间放置形成的污染物,电场作用使得这些游离颗粒物可以移动到针尖某处。这种发射点发射角很小(~5°),引出电压极低,亮度可以达到传统W(310)的10倍以上。尽管不能够形成较大的发射电流(一般可以稳定地给出~10nA),但是展现出了极好的稳定性(<1×10^{-7}Pa)。一个可能推论就是,极小的束流角和发射面积可以有效降低离子轰击的影响。然而,如前所述,这种游离颗粒物是不固定的,发明人发现,在电流较大时(>1uA),这种电子源容易烧毁,且在工作工程中,还会有这种物质不断出现,逐渐改变其发射状态,很难长时间维持。另外一个问题就是暴露大气时,由于这种物质的尺寸和气体分子可以比拟,极易受到气体的干扰。

[0057] 基于以上种种分析、推理及实验,发明人提供了本公开的电子源工作方法以实现电子源可长期稳定的工作,能提供较大的场发射电流,能在较差的真空环境下工作。

[0058] 本公开的实施例提供了一种电子源工作方法,可以应用于如下电子源,该电子源可以包括至少一个固定在针尖上的发射点,所述发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物,该方法包括通过控制所述电子源的工作参数发射电子。其中,该电子源具有如下优点:首先,发射点直接由气体分子和表面金属原子在强场下反应生成,根植于针尖表面,不在表面移动。其次,发射点本身具有很强的环境适应性,可以在较差的真空(<10^{-5}Pa)下工作。再次,具有典型的场发射行为,引出电压极低,与普通针尖相比引出电压降低约30%,最大发射电流可达10mA级别。但是,在使用该电子源的过程中还存在以下问题:容易受到气体吸附的影响,随着气体分子不断吸附在电子源表面,例如发射点可以被气体分子覆盖,导致其发射能力降低;另外,容易受到离子轰击因素的影响,如电子发射后会电离空间气体分子,电离产生的离子会轰击针尖表面,一种机制是这样可能到导致针尖表面被轰出突起(该突起会作为一个新的发射点发射电流),针尖表面被轰击形成多个突起,多个突起分别作为发射点,最后导致过多电流,从而烧毁电子源;还有一种机制,就是吸附到针尖表面的气体分子或其和其它物质的结合物,在电场作用下不断移动,最终在一个表面的缺陷点(如由离子轰击产生)汇集成一个纳米级突起作为发射点,纳米突起发射点的迅速长大导致了过流,最终导致了针尖的烧毁。此外,可能受到表面解离的影响,如当针尖长时间工作或者放置时,其表面会产生一些解离,即产生一些可移动的原子级颗粒物,这些物质可能在某些位置汇集,这些可移动的原子级颗粒物的亮度尽管很高,但却很难承受大的

发射电流(如1微安),极易导致针尖突然烧毁,其表现和离子轰击很相似。本公开提供的方法为能控制如上所述的电子源的工作,且进一步提供了一些技术方案来解决如上所述的问题。

[0059] 图1示意性示出了根据本公开实施例的电子源的结构示意图。

[0060] 如图1所示,针尖可以包括一个或多个固定在针尖表面的发射点,该发射点可以为位于针尖表面的金属原子与气体分子形成的反应产物。

[0061] 在一个实施例中,通过施加电场而使得针尖表面的金属原子与气体分子形成的反应产物,具体可以采用多种实现方式,例如,直接给针尖施加电压在针尖表面形成较高的场强以促使针尖表面的金属原子和周围的气体分子发生反应形成的反应产物;也可以是给针尖附近的场强产生结构(如电极等)施加电压形成电场,进而在针尖表面形成较高的场强以促使针尖表面的金属原子和周围的气体分子发生反应形成的反应产物。总之,在针尖表面形成的场,及该场的形成方式不做限定,只要能在针尖表面形成能促使针尖表面金属原子与周围气体分子反应形成反应产物的场(如电场)即可。

[0062] 在通过给针尖施加电压以形成场的实施例中,示意性的例子中,所述电场为通过给所述针尖施加正偏压、负偏压或者正偏压和负偏压的结合而产生的电场,其中,对于施加正偏压时,电场的场强包括1～50V/nm,对于施加负偏压时,电场的场强包括1～30V/nm。

[0063] 所述发射点可以形成在针尖的指定位置,例如,针轴线与针尖表面相交处的一定范围内,也可以是形成在特定的结构上,如突起等具有场强优势,以优先形成金属原子与气体分子的反应产物的结构,还可以是形成在特定的具有反应活性的区域,如具有更容易与气体分子发生反应的特定的金属原子区域,当然,也可以是上述两种情形的组合使用,在此不做限定。

[0064] 其中,所述金属原子可以是针尖本体表面的金属原子,即金属原子的种类和针尖本体的种类相同,还可以是通过蒸镀、电镀等方式在针尖表面形成的不同种类的金属原子。优选地,该金属原子熔点高于1000K,稳定性更好,且便于利用如上所述的热处理等技术以对针尖进行清洁。例如,该熔点高于1000K的金属材料可以包括以下任意一种或多种:钨、铱、钽、钼、铌、铪、铬、钒、锆、钛、铼、钯、铂、铑、锇、钌、金或者六硼化金属等,例如,其中某一种金属原子单独作为针尖表面的金属原子,或者其中几种金属原子形成的叠层,如钛层\铂层\钨层形成的叠层等,又或者其中几种金属原子混合形成的非单质的金属层,在此不做限定。

[0065] 所述气体分子可以是由气体引入装置引入,如通过气体流量阀等引入的特定的气体分子、从某些部件表面脱吸附产生的气体分子,也可以是在对腔室抽真空时残留的气体分子等,当然也可以是上述两种气体分子的组合,在此不做限定。其中,所述气体分子包括含氢元素气体分子,以及以下任意一种或多种气体分子:含氮元素气体分子、含碳元素气体分子或者含氧元素气体分子。上述气体分子可以是引入的气体分子,因此,气体引入量可以动态调整,一般在引入气体时,真空度＜10^{-4}Pa。当直接利用真空腔室中的残余气体时,真空腔室中主要残留气体为氢气。优选地,所述含氢元素气体分子包括氢气。

[0066] 需要说明的是,发射点消失的温度,如分解的温度可以低于针尖本体消失的温度以便去除发射点,发射点的消失温度可以高于工作温度和使得吸附的气体分子脱吸附的温度,这样便于通过简单的脱吸附处理(如热处理)使得电子源恢复稳定状态。

[0067] 所述电子源的工作方法包括:通过控制所述电子源的工作参数发射电子。例如,通过控制电子源的工作电压、施加电压的时长、加热电流、加热电流的时长、工作温度和环境真空度等来使得所述电子源以用户期望的模式工作,例如,发射电子工作模式(发射电流可控)、热处理模式和修复模式等,具体如下所述。通过所述电子源工作方法使得本公开提供的电子源可以稳定的工作在较低真空环境下、且具有较大的场发射电流,其中,该电子源包括至少一个固定在针尖上的发射点,所述发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物。

[0068] 具体地,所述工作温度应当低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的小值,或者,当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,所述工作温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的小值。

[0069] 所述电子源发射电子时施加的工作偏压包括以下任意一种或多种:连续偏压或者脉冲偏压。施加偏压方式不限定,这样可以满足用户对电子源的各种需求。

[0070] 图2示意性示出了根据本公开实施例的适用于电子源工作方法的设备的结构示意图。

[0071] 如图2所示,该设备可以包括高压电源V_{EX},直流电源V_{Heat},引出级、真空腔室、冷头、绝缘体、发叉、电子源、气体引入装置(未示出)和加热装置(未示出)。

[0072] 其中,电子源(如针尖表面有钨原子和氢分子的反应产物作为发射点)焊接在发叉上,并放置在真空腔室(Vacuum Chamber),本底真空优于10^{-3}Pa(优选优于10^{-6}Pa)。

[0073] 电子源外接一个直流电源(V_{Heat},～5A@5V)。因此,可以对针进行热处理。热处理包含连续加热模式,以及热脉加热冲模式等。通过上述加热方式,针尖最高温度可达3000度以上,即可调温度范围为室温至3000度。需要说明的是,给针加热的方式可以是通过热辐射等方式,加热方式在此不作限定。

[0074] 在电子源的前部有一个引出极,该引出极接地,引出级本身可以是一个导电荧光屏,也可以是全金属结构。电子源接高压电源V_{EX}(±30kV),可对电子源施加电场。当V_{EX}为负时,可以用做场发射;当V_{EX}为正时,可以用于场致蒸发等表面处理。需要说明的是,给针施加电场的方式也可以是电子源接地,引出级接高压电源,施加电场方式在此不做限定。

[0075] 热处理时可以外加电场,热处理与电场可以同步施加,也可不同步施加。

[0076] 电子源放在一个绝缘体样品台(Insulator)上,再与冷头(Cold head)相连。绝缘体样品台上还有加热装置,可调温度范围为10～500K。

[0077] 以下结合图3A至图3E来说明在给电子源施加工作电压后,电子源的工作状态和工作参数之间的关系。其中,所述电子源的工作参数包括工作偏压以及以下任意一种或多种:工作温度或所述电子源所处环境的工作压强。

[0078] 图3A示意性示出了根据本公开实施例的高真空度环境中在低温或室温下电子源的电流发射能力示意图。

[0079] 如图3A所示,电子源稳定工作一定时长后被烧毁。其中,低温或室温可以为20～500K,高真空可以为约10^{-8}Pa。本公开提供的电子源展现了典型的场发射行为,即其发射电流随着引出电压的提升而显著增大。图3A给出了真空度在10^{-8}Pa量级下的典型测试结果,施加电压仍为恒定负高压(～-2kV)。起始阶段发射电流较稳定,一段时间之后,发射电流出现

一些不稳定，再过一段时间会出现图案突变或者烧毁。这种行为在温度为20～500K时都可以观察到，不同的是，低温下(<150K)该过程发生的时间显著增长。

[0080] 图3B示意性示出了根据本公开实施例的高真空度环境中在低温或室温下电子源烧毁过程的示意图。

[0081] 上述烧毁可能归因于针尖表面出现了游离的污染物，图3B给出了相应的示意图。该游离的污染物可能由以下两种机理产生：一种是基于表面解离，一种是基于场发射过程中的离子轰击。如图3B所示，这种游离物质是不固定的，在外界电场的作用下，会向高场强处移动，最后堆积到某些区域。堆积后的形成物，即使在很低的引出电压下就可发射电子。根据大量实验发现，在稳定发射时，这种堆积物仅能给出很小的发射电流；当发射电流较大时(如>1uA)，波动较大，容易导致电子源烧毁。

[0082] 图3C示意性示出了根据本公开实施例的中真空度环境中在低温或室温下电子源的电流发射能力示意图。

[0083] 如图3C所示，电子源的发射电流随着工作时间的增长而出现明显下降，一段时间之后，发射电流变得不稳定，再过一段时间后会出现烧毁现象。其中，低温或室温可以为20～500K，中真空可以为约10^{-7}-10^{-5}Pa。图3C给出了针尖在中真空下(10^{-7}-10^{-5}Pa)的典型测试结果，施加电压仍为恒定负高压(～-2kV)。电流随着时间出现较明显的下降，一段时间之后，发射电流出现一些不稳定，再过一段时间会出现烧毁。这种行为在室温以及低温下都可以观察到。不同的是，低温下(<150K)该过程发生的时间显著增长。同时，低温下，电流下降的斜率SL显著减缓，趋向水平。烧毁归因于离子轰击以及表面解离物的影响。而电流下降基本可以归因于气体吸附的作用。

[0084] 图3D示意性示出了根据本公开实施例的真空度环境中在高温下电子源的电流发射能力示意图。

[0085] 如图3D所示，电子源在较高工作温度时(如500～800K)表现出截然不同的场发射行为。具体地，电子源的发射电流随着工作时间的增长而出现明显下降，但是没有出现烧毁现象。其中，高温可以为500～800K，中真空可以为约10^{-5}Pa。图3D给出了在一定真空范围内(<10^{-5}Pa)高温下的典型测试结果，施加电压仍为恒定负高压(～-2kV)。电流随着时间出现一定的下降，但是相对于室温(～300K)测试的针，其下降斜率(SL，the slope of degradation)显著减缓。斜率和真空度密切相关，因而电流下降可归因于气体吸附的作用。有趣的是，不再出现烧毁行为。但当真空度进一步下降，即使在高温下，针尖仍然会出现烧毁行为，其结果很类似于图3A和图3C。烧毁仍可归因于离子轰击以及表面解离物的影响。

[0086] 也就是说，发射能力下降和针尖烧毁制约着如上所述的电子源的使用方法。

[0087] 为了使得上述电子源可以在真空度更低的环境中实现稳定的工作状态以使得电子源便于推广应用，对上述实验结果进行了分析。

[0088] 图3E示意性示出了根据本公开实施例的针尖表面吸附气体分子的示意图。

[0089] 如图3E所示，在左图中为发射点表面是清洁表面，在工作过程中，吸附在针尖表面的气体分子会在电场作用下逐渐向发射点移动(对于发射点形成在高场强结构表面的情形，发射点处的场强最高)。经分析，在一定的工作电压下，电子源的工作状态主要与真空度和工作温度相关。

[0090] 其中，关于真空度的影响如下所示：真空度是直接与电子源的发射能力密切相关。

真空度越好，其稳定性越好，而且持续工作时间越长，且发射能力不容易下降或者老化(degrade)。

[0091] 关于工作温度的影响如下所示：在适当的工作温度，发射电流下降的斜率SL显著减小，即连续工作的时间可以延长，体现在两个方面。第一个方面，在低温工作(如<150K，相对室温约300K)时，工作时间可大为延长。第二个方面，在较高温度工作(>500K，相对室温约300K)时，工作时间可大为延长。

[0092] 综上，在一个实施例中，所述电子源可以工作在如下环境中：所述工作温度≤1000K，所述工作压强≤10^{-3}Pa。

[0093] 为了进一步延长所述电子源的使用寿命，优选地，所述电子源可以工作在如下环境中：所述工作温度≤150K，所述工作压强≤$1E^{-6}$Pa，或者，500K≤所述工作温度≤800K，所述工作压强≤$1E^{-6}$Pa。

[0094] 此外，通过上述分析可知，气体吸附虽然不是致命的，但在发射过程中是普遍存在的，会导致发射能力下降。为了改善上述气体吸附问题，经过分析，可以通过使得吸附的气体分子从电子源表面分离，来恢复电子源的发射能力，具体地，可以在工作一段时间以后(如0.1～10小时)，进行加热脱吸附处理。其中，温度越高，处理的越充分。然而，由于本公开提供的发射点是由针尖表面的金属原子与气体分子的反应产物，当长时间高温处理时，会导致发射点的消失，如该反应产物可能会分解。此外，由于发射点在纳米或亚纳米级的突起上形成，这些突起在高温下也会逐步变形，导致发射能力下降，即需要更高的工作电压。因此，本公开提供了适于上述电子源的热处理相关方法。

[0095] 在一个实施例中，所述方法还可以包括如下操作。首先，在所述电子源发射电子之前或者之后，对所述电子源进行热处理，并且/或者，在所述电子源发射电子时进行热处理。

[0096] 其中，所述在所述电子源发射电子之前或者之后，对所述电子源进行热处理可以包括以下任意一种或多种方式：连续加热处理或者脉冲加热处理。也就是说，在电子源不发射的状态下，可以对其进行连续加热处理或者脉冲加热处理。

[0097] 所述在所述电子源发射电子时进行热处理可以包括以下任意一种或多种方式：连续加热处理或者脉冲加热处理。也就是说，在电子源发射的状态下，也同样可以对其进行连续加热处理或者脉冲加热处理。

[0098] 在一个具体实施例中，所述连续加热处理可以包括如下操作：首先，对所述电子源持续进行加热(如给电子源通电进行加热，也可以采用例如热辐射等方式加热，加热方式在此不做限定)，其中，加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，加热的温度低于所述电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的小值，然后，维持所述电子源的温度直至达到第一设定时长。优选地，对于采用钨原子与气体分子的反应产物作为发射点的情形下，所述电子源的加热温度可以≤800K，所述第一设定时长可以≤20min。

[0099] 其中，对加热温度的限定可以有效避免发射点、针尖表面的金属原子、高场强结构或针尖本体受损。所述第一设定时长可以根据实际使用效果而定，此外，该第一设定时长也与针尖表面的金属原子的材料种类、高场强结构的材料种类等相关，例如，当针尖表面的金属原子的材料种类、高场强结构的材料种类等的熔点越高，相应地，针尖表面的金属原子和

高场强结构越不容易受到热处理的影响，只要热处理时不会导致发射点消失即可。

[0100] 需要说明的是，在进行热处理的过程中，如在进行连续加热热处理过程中，还可以对针尖辅以偏压，可以避免针尖结构(如高场强结构)发生形变导致发射能力改变。

[0101] 其中，所述对电子源辅以偏压包括以下任意一种或多种：辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合。

[0102] 具体地，当辅以正偏压时，所述正偏压的值小于所述发射点的场致蒸发对应的电压值，或者，当辅以负偏压时，所述负偏压的值小于所述电子源的第一发射电流阈值对应的电压值(如不产生发射电流或者不要产生过大发射电流)。

[0103] 图4A示意性示出了根据本公开实施例的中连续加热处理模式的示意图。

[0104] 如图4A所示，在连续加热处理模式中，加热温度可以<～800K。在<～800K的温度区间，如对发叉(hairpin)通电流(其电流值可以为约数安培A)，以此对针进行加热。该设备可以参考图2所示的设备。该处理过程一般持续数分钟(如0.1～20min)，也可针对针尖具体情况加以延长。

[0105] 此外，在上述中温连续加热操作中，仍有可能对针尖突起带来损伤。特别是，长时间处理的累积效果，最终会导致针尖突起变形，造成发射能力显著下降。在偶然的实验过程中，通过比对实验结果发现在热处理时对针尖加一定程度的偏压(电压)可以有效避免针尖变形。此时有两种模式：第一种为施加正偏压模式(例如，其典型值可以为0.5～2kV)，由于没有场发射电流，因而可以避免因电子激励的脱附气体而导致针尖的继续吸附，但是施加正偏压时的最大电压绝对值应小于针尖表面发射点的场致蒸发电压；第二种为施加负偏压，应控制电压范围，以使得针尖的场发射不显著，否则，发射出的电子会激励出气，进而导致吸附继续，具体地，施加负偏压的一般典型值可以为-0.5～-1kV。

[0106] 在另一个具体实施例中，所述脉冲加热处理可以包括如下操作：首先，以脉冲方式对所述电子源进行加热，其中，脉冲的周期≤脉冲周期阈值，脉冲周期之间的间隔时长≥间隔时长阈值，具体地，加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述发射点的消失温度的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，加热的温度低于所述电子源衬底、所述针尖表面的金属原子、所述发射点和所述高场强结构消失温度的小值。

[0107] 例如，500K≤所述电子源的温度≤1000K，所述脉冲周期阈值≤10s，所述间隔时长阈值≥3s，或者，800K≤所述电子源的温度≤1000K，2s≤所述脉冲周期阈值≤3s，所述间隔时长阈值≥3s。

[0108] 此外，如同在连续加热模式中可以对电子源辅以偏压，在脉冲加热处理中同样可以对电子源辅以偏压。

[0109] 具体地，所述对电子源辅以偏压包括以下任意一种或多种：辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合。当辅以正偏压时，所述正偏压的值小于所述发射点的场致蒸发对应的电压值，或者，当辅以负偏压时，所述负偏压的值小于所述电子源的第一发射电流阈值对应的电压值。例如，0.5KV≤所述正偏压的值≤2KV，或者，-0.5KV≤所述负偏压的值≤-1KV。

[0110] 图4B示意性示出了根据本公开实施例的中脉冲加热处理模式的示意图。

[0111] 如图4B所示，在脉冲加热处理模式中，可加偏压也可不加。其中，可以采用中温热

脉冲处理模式，如500～1000K(该加热温度可以和连续加热温度有所不同，脉冲模式可以提供略高于连续加热的温度)。

[0112] 图4B中每个脉冲之间为短暂停止加热时间。例如，可以通过对发叉(hairpin)通电流，实现对电子源进行加热，设备参考图2所示。在该温度区间，每个加热脉冲可以持续<10s，例如，2～3秒，可用多个脉冲进行处理。为避免前后脉冲间的相互干扰，可以增加相邻脉冲间的间隔时间，一般大于3秒。中温热脉冲处理期间可以辅以偏压(偏压可正可负)。此外，偏压的施加周期可以与脉冲加热处理的脉冲周期相同，也可以在部分或整个脉冲处理期间都施加偏压，在此不做限定。

[0113] 在上述中温热脉冲处理操作中，可能对针尖突起带来损伤。特别是，长时间处理的累积效果，最终会导致针尖突起变形，造成发射能力显著下降。通过在热处理时对针尖加一定程度的偏压(电压)可以有效避免针尖变形。具体地，可以采用如下两种模式：第一种，可以施加正偏压(典型值0.5～2kV)，此时最大电压绝对值应小于针尖表面发射点(如H-W反应产物)的场致蒸发电压；第二种，可以施加负偏压，同样需要控制电压范围，以使得针尖的场发射不显著，否则，发射出的电子会激励出气，进而继续导致离子轰击，施加负偏压时，一般典型值可以为-0.5kV～-1kV。

[0114] 一般而言，离子轰击是一个较为严重的问题，在发射过程中是普遍存在的。这个问题即使在很小的发射电流以及好的真空状态下也存在，只是受到的影响变轻微而已，不可能从根本上避免。如不及时处理，寿命很难超过24小时。通过实验发现，在此种游离物质产生初期，可以通过较高温度处理(例如>～700K)来使得该游离物从针尖表面脱离，其中，温度越高，处理的越充分。然而，长时间高温处理，会导致发射点的消失。此外，由于发射点在纳米级的突起上形成，这些突起在高温下也会逐步变形，导致发射能力下降，即需要更高的工作电压。然而，通过如上所述的热处理方法可以有效去除吸附在针尖表面的气体分子和上述游离物质，改善了电子源的发射能力随着使用时间的增长而下降的情况。

[0115] 图4C示意性示出了根据本公开实施例的对电子源进行热处理以恢复发射能力的示意图。如图4C所示，通过上述热处理可以有效恢复电子源的发射能力。需要说明的是，在连续热处理和/或中温热脉冲处理模式中(可加偏压也可不加)，有时会处理掉部分发射点。此时，可以在去除掉发射点的区域再次形成发射点，以恢复初始发射状态。

[0116] 例如，通过给电子源施加正偏压或负偏压，在针尖表面形成电场，以使在被处理掉的发射点位置的金属原子与气体分子形成反应产物，作为新的发射点。具体地，当施加负偏压形成发射点时，首先，给所述针尖施加负偏压，产生电流值为微安量级的发射电流，维持预设时长或调节所述负偏压直至产生预定值的发射电流，然后，调节负偏压使得所述电子源的发射电流小于毫安量级，避免针尖形貌改变或烧毁。当施加正偏压形成发射点时，给所述针尖施加正偏压并维持预设时长，所述正偏压的值小于形成所述突起的场致蒸发偏压的值。

[0117] 对于施加正偏压，形成的场强的范围包括1～50V/nm，对于施加负偏压，形成的场强的范围包括1～30V/nm。

[0118] 图4D示意性示出了根据本公开实施例的针尖运行模式的流程图。

[0119] 如图4D所示，可以采用如图4C中的工作模式。电子源在一定电压下工作，经过一段发射周期(emission period)，发射能力发生下降(即相同电压下场发射电流减小)，即可对

电子源的针尖进行恢复性处理(Recovering treatment)可以具有消除气体吸附和离子轰击的效果。上述恢复性处理可包含前述的中温连续加热处理模式(可加偏压也可不加)和/或中温热脉冲处理模式中(可加偏压也可不加),处理之后,发射能力得到恢复,可以继续工作。也就是说,不断重复上述发射周期和恢复处理周期,这样就可以使得电子源长期稳定工作。

[0120] 在电子源的发射过程中,为了进一步提升发射的稳定性以及延长工作时间,可以使得电子源处于如下温度段中工作。第一种,低温工作(如<150K),第二种,较高温度工作(如>500K)。此外,也可在发射周期(Emission period)中,进行中温连续加热模式和/或中温热脉冲处理模式,以同步消除气体吸附和离子轰击。

[0121] 在恢复性处理Recovering treatment中,可包含如下处理方法:第一种,中温连续加热处理模式:温度<～800K;第二种,中温热脉冲处理模式:500～1000K(pulse mode);此外,在进行热处理时,可同步对针施加偏压,以防止形变。

[0122] 通过如图4D所示的针尖运行模式,可以对一根如上所述的电子源连续运行超过1000小时以上,极大的提升了电子源的使用寿命,并且,仍然保持良好的发射状态,例如,引出电压仅仅比开始提升了不到200伏特。

[0123] 图5示意性示出了根据本公开实施例的针尖在长期运行后发射能力出现老化示意图。

[0124] 在本实施例中,如图5所示,当电子源经过较长时间运行(如第1000个使用周期,约1000小时),电子源的发射能力出现了部分老化,即一定引出电压下,电子源最大发射能力相较于第一个周期的发射能力下降且无法恢复。但是,电子源仍可很大程度上通过热处理进行修复,具体地,采用中温连续加热处理模式(可加偏压也可不加)、中温热脉冲处理模式中(可加偏压也可不加)进行修复。具体地,修复时可以采用间隔连续加热或脉冲加热提高温度,或者工作时连续加热或脉冲加热提高温度,此外也可以是在工作过程中提升工作温度。需要强调的是,电子源进行修复的条件不限制,可以用户自定义。

[0125] 具体地,所述方法还可以包括如下操作:对所述电子源进行发射点修复。

[0126] 其中,所述对所述电子源进行发射点修复可以包括如下操作:首先,去除所述电子源针尖表面至少一个发射点,然后,在所述针尖表面上形成新的发射点,所述新的发射点是针尖表面的金属原子与气体分子在电场下形成的反应产物。新的发射点的形成方法可以参考如上实施例中形成新的发射点的方法,在此不再赘述。修复时可以采用间隔加热提高温度,或者工作时加热提高温度,此外也可以是在工作过程中提升工作温度。

[0127] 在一个具体实施例中,所述去除所述电子源针尖表面至少一个发射点可以包括如下操作,例如,通过加热或者场致蒸发去除所述电子源表面至少一个发射点,其中,通过加热去除所述电子源表面至少一个发射点时,加热的温度低于电子源衬底和所述针尖表面的金属原子的消失温度的小值,或者,当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时,所述加热的温度低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述高场强结构消失温度的小值。

[0128] 需要说明的是,在加热过程中,可对电子源辅以偏压,所述对电子源辅以偏压包括以下任意一种或多种:辅以正偏压、辅以负偏压或者辅以正偏压和负偏压相结合。

[0129] 通过场致蒸发去除所述电子源表面至少一个发射点时,所述场致蒸发施加的正偏

压的值低于电子源衬底和所述针尖表面的金属原子的消失对应的正偏压的小值，或者，当所述发射点位于所述电子源衬底的高场强结构上时，所述场致蒸发施加的正偏压的值低于电子源衬底、所述针尖表面的金属原子和所述高场强结构消失对应的正偏压的小值。

[0130] 例如，首先，应该通过提高每次热处理脉冲的温度和次数(如数百次)去除表面上发射能力老化的发射点，也可以通过施加正偏压去除掉表面发射能力老化的发射点(正偏压值不应将突起完全蒸发掉)；之后可以利用再次生长的方式，在针尖表面再次形成发射点。但应注意，热脉冲的温度不宜超过1000K，否则容易导致针尖表面突起的破坏，而这就需要采用一根新的电子源了。应注意，为延长使用时间，最可靠的方法就是在高真空($<10^{-7}$Pa)下运行。如果在更差的真空度下，必须减小工作电流，以保证运行时间。

[0131] 关于针尖烧毁的解决方案如下所述。

[0132] 根据对上述电子源的大量的测试实验(如前所述)，离子轰击和表面解离都会导致针尖的烧毁。这往往是致命性的。具体提供如下方案避免烧毁。

[0133] 首先，提供较高真空度。在较高真空下($P<10^{-6}$Pa)：特别需要保持针尖附近(Local pressure)的真空度小于这个量级。此时，离子轰击的效应不显著。但仍需控制发射电流IE。离子轰击在针尖表面造成的游离物产额，近似与I×P成正比。

[0134] 其次，提供较高的工作温度，例如，工作温度为500K～800K，这样可有效避免烧毁。该温度区间可避免表面解离物的形成。但在更高温度下，例如>1000K，长时间会导致上述电子源的发射点消失，如会造成钨原子和气体分子的反应产物分解。

[0135] 或者，提供较低的工作温度，例如，工作温度为<150K，此时，有效降低温度可以延缓游离物(无论是离子轰击产生还是表面解离产生)向发射区域的移动，同时，针尖制冷还可以改善针尖局域的真空度，同样有助于延缓烧毁。

[0136] 或者，上述为改善气体吸附问题所做的热处理(包括连续加热处理或者脉冲加热处理等)等方法在改善气体吸附问题的同时，可以有效改善离子轰击、表面解离导致的烧毁问题；同时，提供较高真空度也可以大大减少气体吸附概率从而改善气体吸附问题；提供较高的工作温度或较低工作温度也可以改善气体吸附问题。

[0137] 另外，优选地，所述发射点为氢钨化合物。氢钨化合物作为发射点的引出电压低，使离子轰击出游离物的产率低，能量低，向发射区的移动速度慢，也可以延缓烧毁。

[0138] 本领域技术人员可以理解，本公开的各个实施例和/或权利要求中记载的特征可以进行多种组合和/或结合，即使这样的组合或结合没有明确记载于本公开中。特别地，在不脱离本公开精神和教导的情况下，本公开的各个实施例和/或权利要求中记载的特征可以进行多种组合和/或结合。所有这些组合和/或结合均落入本公开的范围。

[0139] 尽管已经参照本公开的特定示例性实施例示出并描述了本公开，但是本领域技术人员应该理解，在不背离所附权利要求及其等同物限定的本公开的精神和范围的情况下，可以对本公开进行形式和细节上的多种改变。因此，本公开的范围不应该限于上述实施例，而是应该不仅由所附权利要求来进行确定，还由所附权利要求的等同物来进行限定。

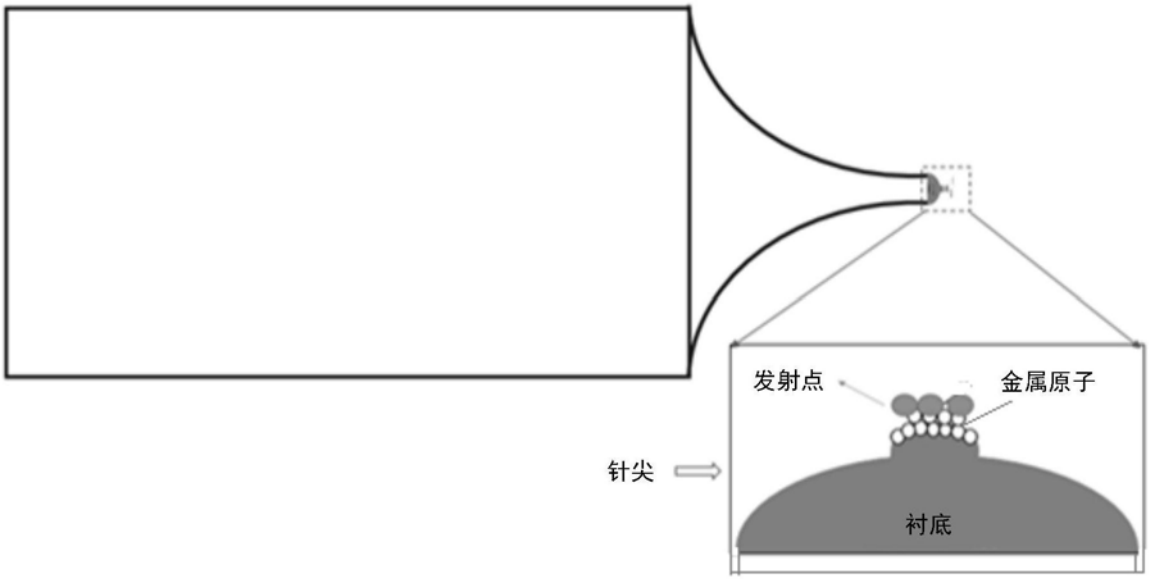


图1

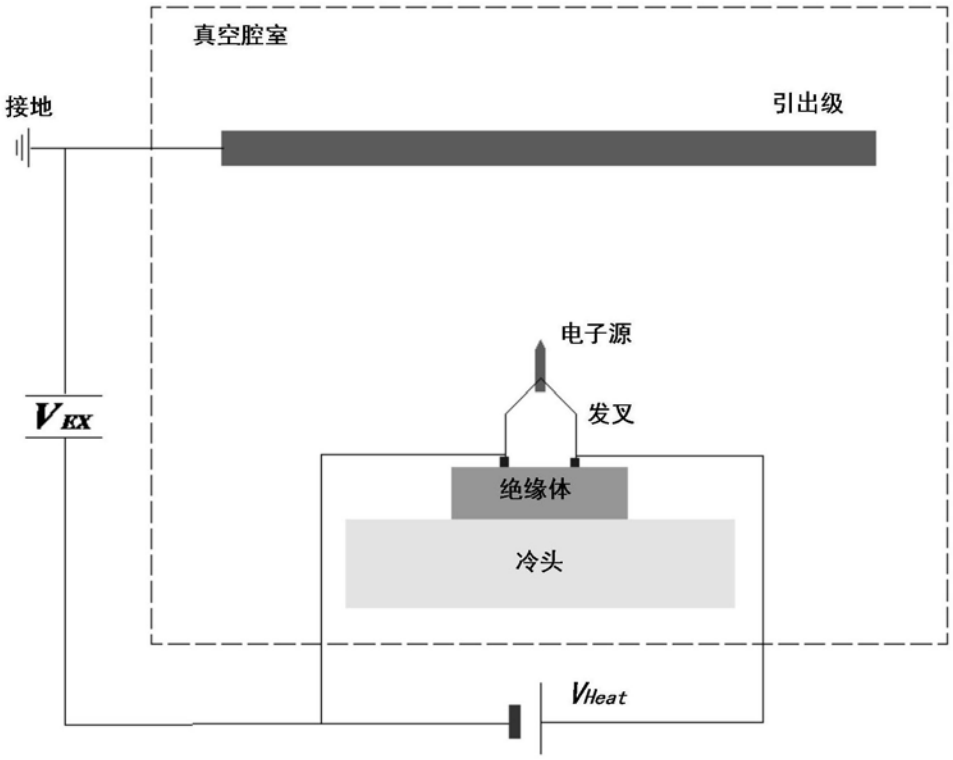


图2

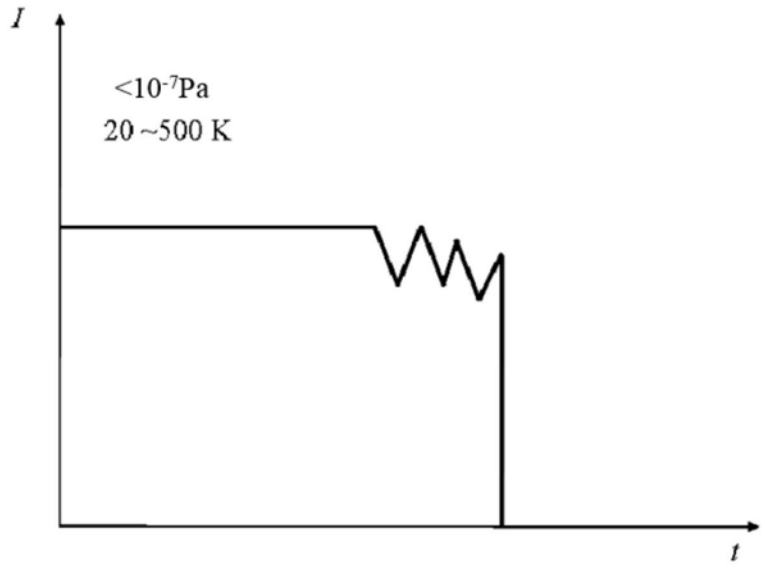


图3A

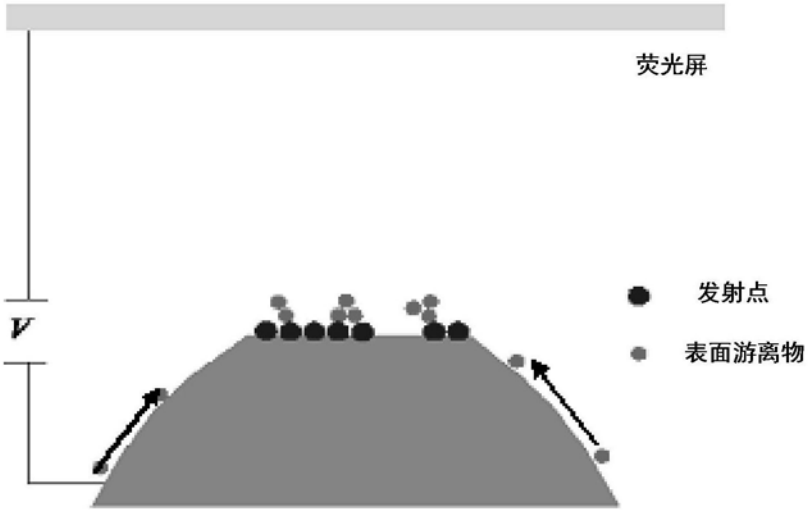


图3B

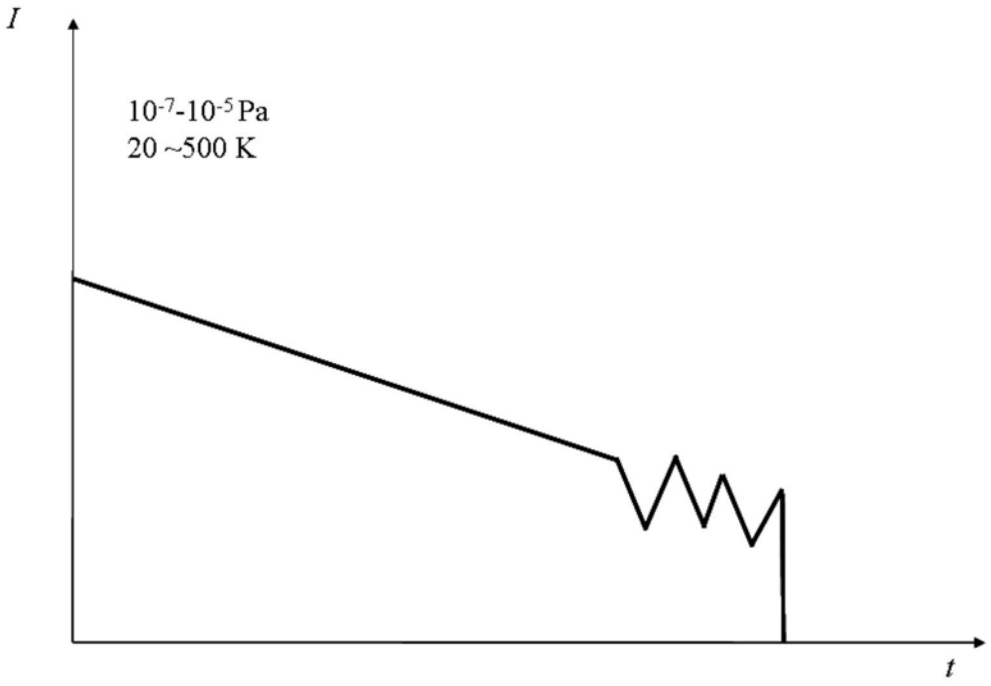


图3C

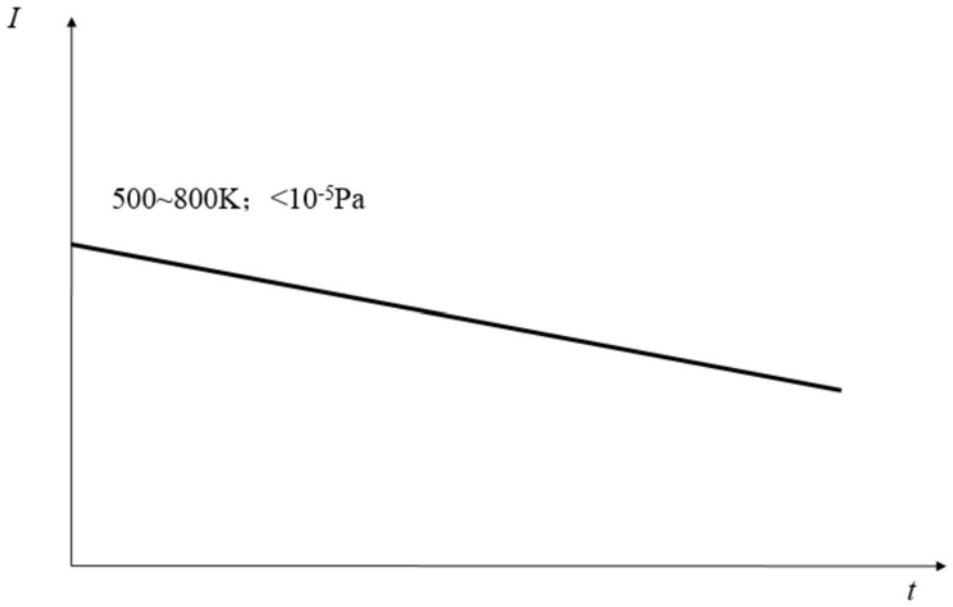


图3D

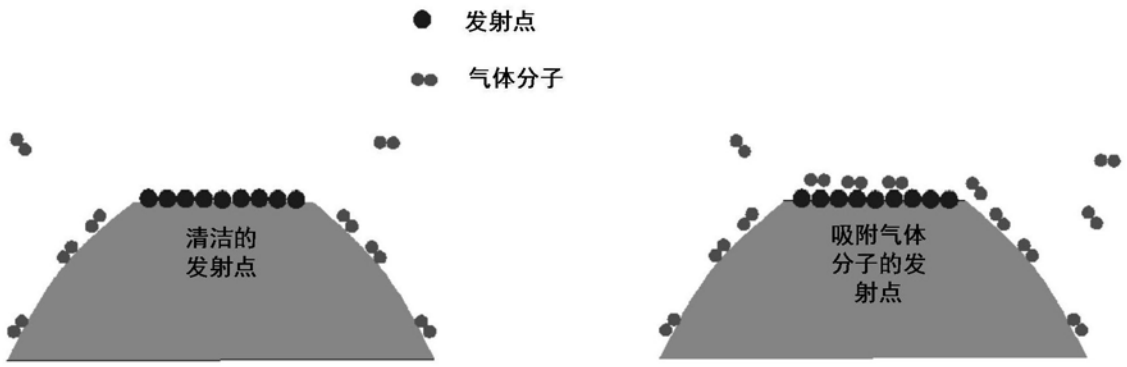

发射点
气体分子
清洁的
发射点
吸附气体
分子的发
射点

图3E

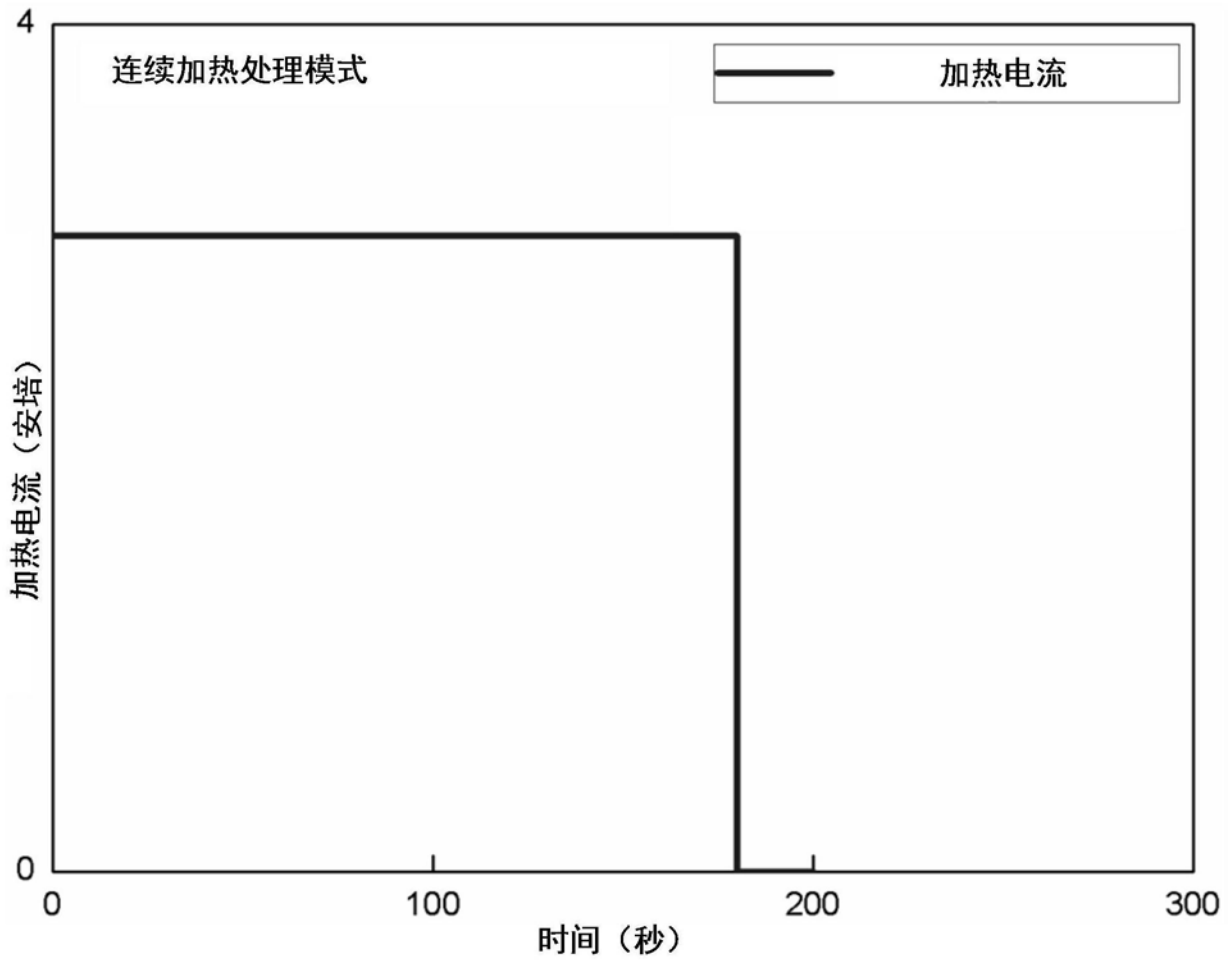

连续加热处理模式
加热电流
加热电流（安培）
4
0
0
100
200
300
时间（秒）

图4A

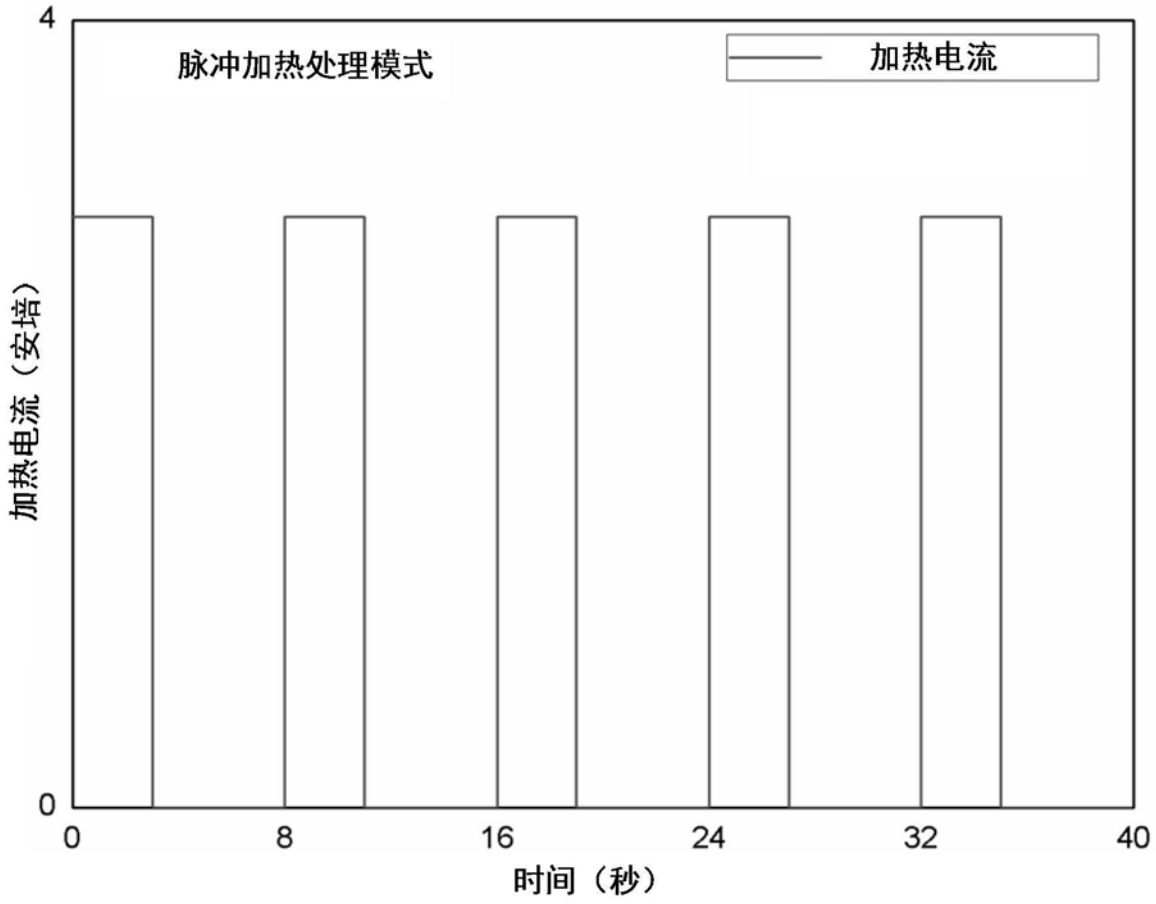


图4B

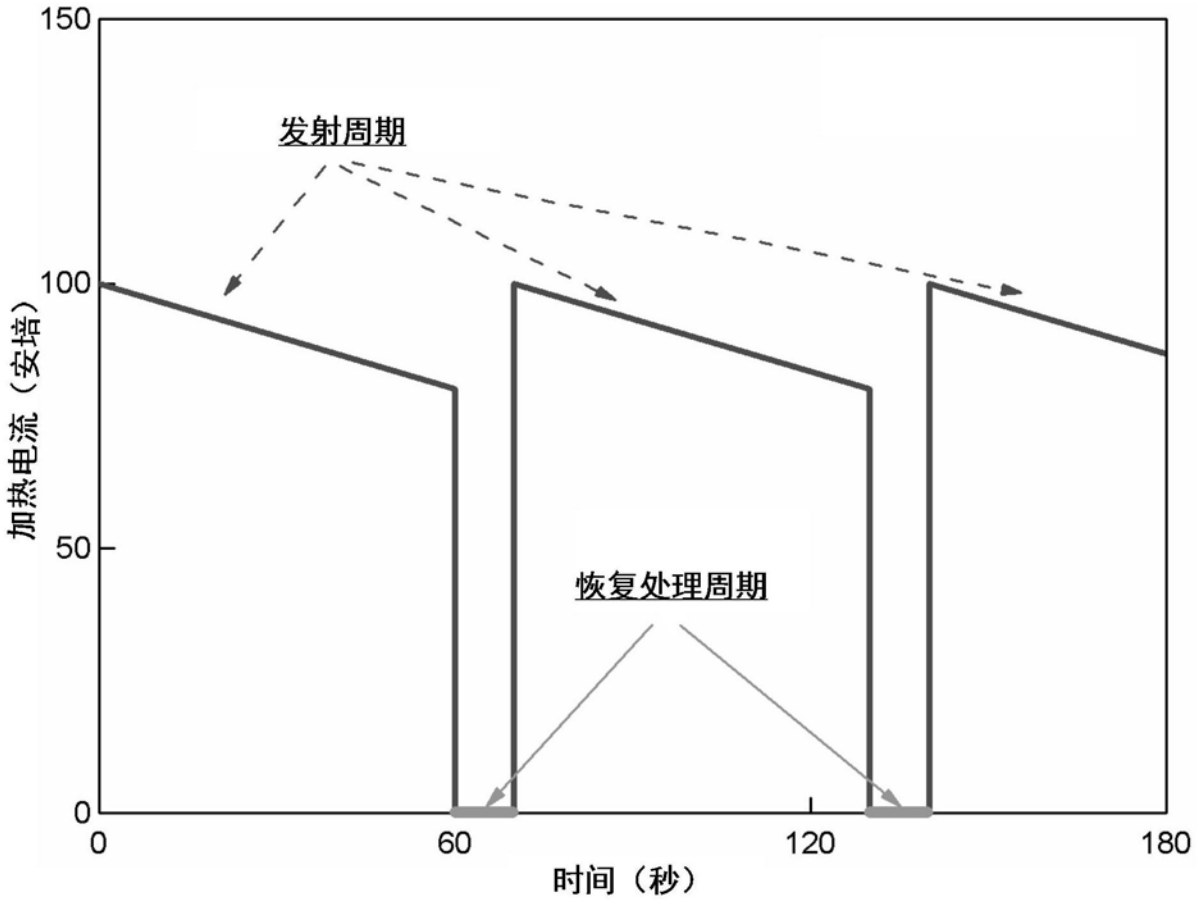

150
100
50
0
加热电流（安培）
发射周期
恢复处理周期
0
60
120
180
时间（秒）

图4C

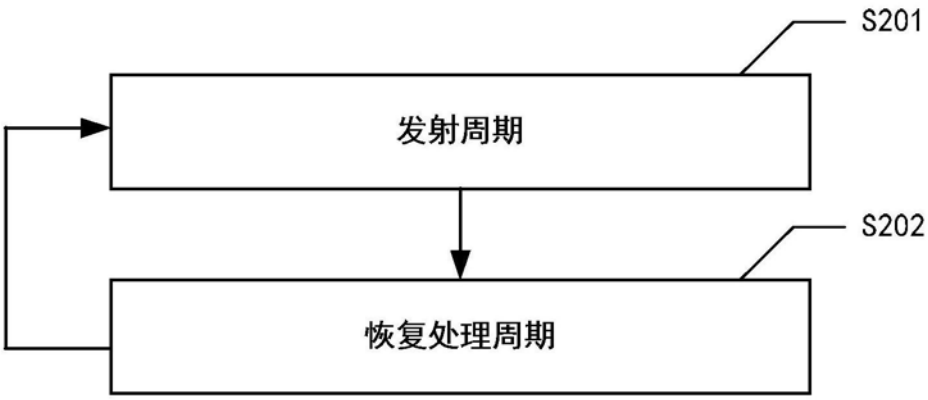

S201
发射周期
S202
恢复处理周期

图4D

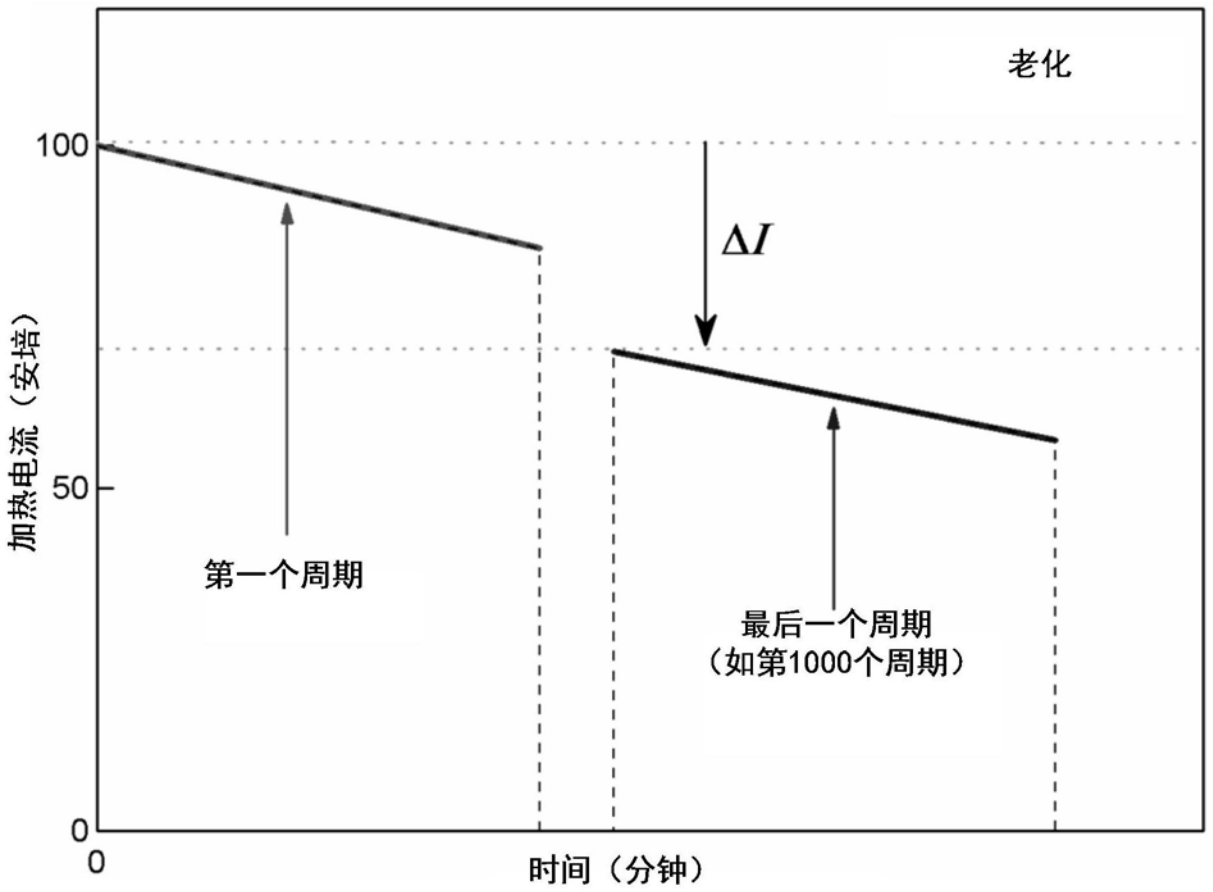


图5