



(21)申請案號：108136469

(22)申請日：中華民國 108 (2019) 年 10 月 08 日

(51)Int. Cl.：

H01J37/07 (2006.01)

H01J37/36 (2006.01)

(30)優先權：2018/10/12 中國大陸 201811190748.7

(71)申請人：中國電子科技集團公司第三十八研究所(中國大陸) (CN)
中國大陸

(72)發明人：劉華榮 (CN)；靳學明 (CN)；戚玉軒 (CN)；王學慧 (CN)；李藝晶 (CN)；王俊聽 (CN)；鄭春寧 (CN)；錢慶 (CN)

(74)代理人：劉箐茹

申請實體審查：有 申請專利範圍項數：19 項 圖式數：5 共 35 頁

(54)名稱
電子源工作方法

(57)摘要

本發明提供了一種電子源工作方法，該電子源工作方法適用於一種電子源，所述電子源包括至少一個固定在針尖上的發射點，所述發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物，所述電子源工作方法包括通過控制所述電子源的工作參數發射電子。

指定代表圖：

符號簡單說明：
(無)

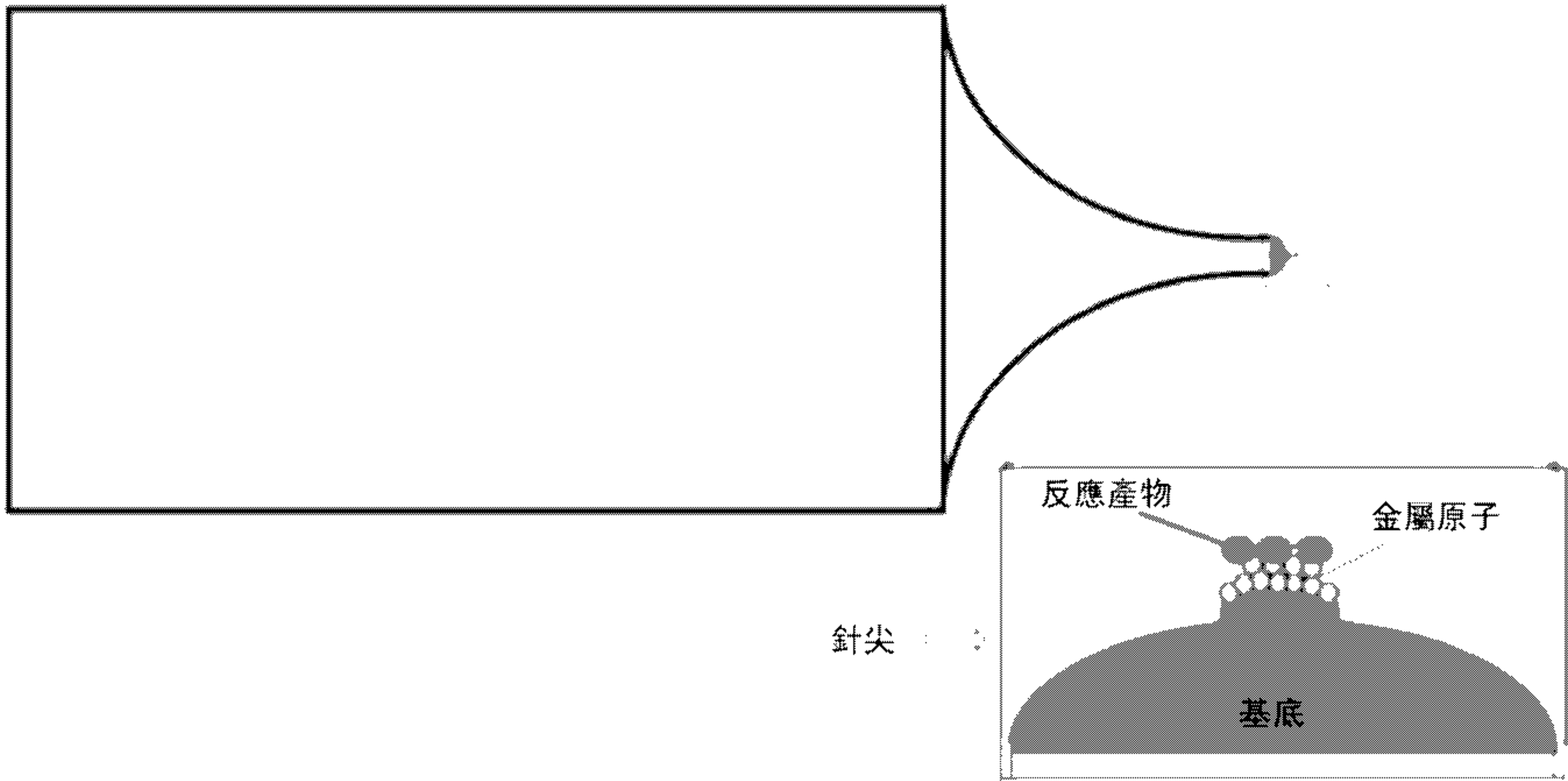


圖 1



202020919

申請日：
IPC 分類：

【發明摘要】

【中文發明名稱】 電子源工作方法

【中文】

本發明提供了一種電子源工作方法，該電子源工作方法適用於一種電子源，所述電子源包括至少一個固定在針尖上的發射點，所述發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物，所述電子源工作方法包括通過控制所述電子源的工作參數發射電子。

【指定代表圖】：第（ 1 ）圖。

【代表圖之符號簡單說明】

(無)

【發明說明書】

【中文發明名稱】 電子源工作方法

【技術領域】

【0001】 本發明涉及電子源技術領域，更具體地，本發明涉及一種電子源工作方法。

【先前技術】

【0002】 金屬中的自由電子在特定條件下可以發射出來，若用金屬構成陰極並做成極細的針尖狀，在真空中施以數千伏電壓，金屬中的電子即可從陰極冷金屬中發射，這種發射電子的方法稱為場發射，屬於冷陰極發射。

【0003】 對於電子源而言，最重要的指標就是亮度，直接決定了其束流品質。在引出電壓 V_0 下，亮度可如公式（1）所示：

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

【0004】 其中， B 為亮度， I 為發射電流， S 為等效發射面積， d 為等效直徑， Ω 為空間發射角， α 為發射半角。此外，亮度 B 正比於加速電壓 V_a ，如公式（2）所示。

$$B \propto V_a \quad (2)$$

【0005】 由公式（1）可知，為得到高亮度，需要盡可能得提升 I ，以及減小 α 和 d 。此外，獲得一定的發射電流所需要的引出電壓 V_0 越低越好，而這需要針尖的發射面具有較低的功函數以及較尖銳的頭部結構。另外，電子源的另外一個關鍵指標就是單色性，可用能散 δE 表示。

【0006】 綜合上述考慮，最理想的電子源就是冷場發射電子源（cold field emission electron sources，簡稱CFE），CFE的亮度高過其它種類電子源約一個量級以上，且有很小的能散（ $\sim 0.3\text{eV}$ ）。此外，為了儘量追求極限直徑，近年

來具有低功函數的原子級電子源成為研究熱點，即發射點僅有一個或者數個原子組成。

【0007】 在實現本發明構思的過程中，發明人發現現有技術中CFE至少存在如下問題：第一，CFE穩定性往往很差，需在極高真空下（ $10^{-9}\sim 10^{-8}$ Pa）才能工作，這嚴重限制了其使用範圍。而即使在該環境下，也需定期處理以獲得較穩定的工作狀態。第二，受離子轟擊的影響，CFE較容易燒毀。第三，前述問題在較大發射電流下變得更為嚴重，現有的CFE一般可長時間穩定工作的總發射電流為~10微安，且利用率很低。鑒於前述弊端，在高亮度電子源領域佔據主導地位的是肖特基式場發射電子源（Schottky thermal-field emission source）。

【發明內容】

【0008】 本發明的一個方面提供了一種能使得 CFE 可以穩定的工作在較低真空環境下（如 10^{-5} Pa）、且具有較大的場發射電流的電子源工作方法，該工作方法適用於如下所述的電子源，所述電子源包括至少一個固定在針尖上的發射點，所述發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物，相應地，所述電子源工作方法包括：通過控制所述電子源的工作參數發射電子。由於該發射點是固定在針尖表面的金屬原子與氣體分子形成的反應產物，根植於針尖表面，而非游離在針尖表面的氣體分子或者游離顆粒等，不會因游離狀的物質聚集在一起形成新的發射點而導致過電流燒毀，有效提升了穩定性，此外，該發射點包括針尖表面的金屬原子與氣體分子形成的反應產物，相對於金屬原子或其它金屬化合物（如金屬硼化物等）本身而言，在工作環境中（存在氣體分子）具有更好的穩定性，如因為該發射點已經是金屬原子與氣體分子反應形成的產物，更加不容易與工作環境中的例如氫氣等發生作用或反應，進一步提升了電子源的穩定性。另外，本發明提供的電子源的發射點可以為一個或數個金屬原子與氣體分子形成的反應產物，即能形成具有低功函數的原子級電子源。此外，該反應產物使表面功函數顯著降低，表面發射點尖錐（發射點尖錐使場強增強）的形成也使發射能力顯著提高。另外可以通過增加發射點的數

量來提升場發射電流的電流值。這樣就可以通過控制上述電子源的工作參數實現 CFE 可以穩定的工作在較低真空環境下、且具有較大的場發射電流。

【0009】 可選地，所述電子源的工作參數包括工作偏壓以及以下任意一種或多種：工作溫度或所述電子源所處環境的工作壓強。本發明的電子源在工作過程中對於不同的工作偏壓、工作溫度或環境的工作壓強有不同的工作方式，可以通過控制工作偏壓、工作溫度或環境的工作壓強滿足使用者對發射狀態的需求。

【0010】 可選地，所述電子源工作方法還可以包括如下操作：在所述電子源發射電子之前或者之後，對所述電子源進行熱處理，和/或，在所述電子源發射電子時進行熱處理。通過熱處理可以使得電子源表面保持清潔，恢復高發射能力。

【0011】 可選地，所述工作溫度低於電子源針尖結構受損溫度和所述發射點消失溫度的小值。由於所述發射點是由針尖表面的金屬原子與氣體分子形成的反應產物，在較高溫度工作或者熱處理時，會導致發射點的消失。由於發射點在一定溫度下會消失，針尖結構在較高溫度下會發生損壞變形，所以應選擇合適的工作溫度範圍，以保證發射點長期工作。例如對於針尖存在突起結構的情況，工作溫度過高會導致突起結構損壞、熔化。應該選擇合適的工作溫度，這樣可以有效保護發射點和/或針尖結構（例如針尖突起），避免工作溫度過高導致電子源受損。

【0012】 可選地，所述電子源發射電子時施加的工作偏壓包括以下任意一種或多種：連續偏壓或者脈衝偏壓。具體地，可以根據使用者需求對電子源施加連續偏壓或者脈衝偏壓來滿足用戶的使用需求。

【0013】 可選地，所述工作溫度 $\leq 1000\text{K}$ ，所述工作壓強 $\leq 10^{-3}\text{Pa}$ ，或者，所述工作溫度 $\leq 150\text{K}$ ，所述工作壓強 $\leq 10^{-6}\text{Pa}$ ，或者， $500\text{K} \leq \text{所述工作溫度} \leq 800\text{K}$ ，所述工作壓強 $\leq 10^{-6}\text{Pa}$ 。其中，本發明提供的電子源可以實現在較低的真空度下工作較長時間，當電子源處於低溫工作溫度範圍時，能有效延緩游離物（無論是離子轟擊產生還是表面解離產生）向發射區域的移動，可一定程度上改善游離物聚集燒毀的情況；且製冷有助於改善針尖附近局域真空度，這有助於延長使用壽命。而當電子源處於較高的工作溫度範圍時，可有效避免表面解離物的形成，改善游離物聚集燒毀的情況；且較高的工作溫度可減少針尖氣體吸附，這有助於延長電子源的使用壽命。

【0014】 可選地，所述在所述電子源發射電子之前或者之後，對所述電子源進行熱處理包括以下任意一種或多種：連續加熱處理或者脈衝加熱處理。通過熱處理來使得吸附在針尖表面的氣體分子等脫離，有助於提升針尖表面清潔度，保持高發射能力，且改善游離物容易聚集作為發射點發射電流甚至燒毀的情況，延長使用壽命。

【0015】 可選地，所述在所述電子源發射電子時進行熱處理包括以下任意一種或多種：連續加熱處理或者脈衝加熱處理。

【0016】 可選地，所述連續加熱處理可以包括如下操作：首先，對所述電子源持續進行加熱，其中，加熱的溫度低於電子源針尖結構受損溫度和所述發射點消失溫度的小值，然後，維持所述電子源的溫度直至達到連續加熱設定時長 t_c 。這樣可以有效保護發射點和針尖結構（例如突起結構），避免溫度過高導致電子源受損。

【0017】 可選地，在連續加熱處理過程中，所述電子源的溫度應該 $\leq 800K$ ，所述連續加熱設定時長 t_c 應該 $\leq 20min$ 。

【0018】 可選地，所述脈衝加熱處理可以包括：以脈衝方式對所述電子源進行加熱，其中，脈衝時長 $t_1 \leq$ 脈衝時長閾值，脈衝之間的間隔時長 $t_2 \geq$ 間隔時長閾值，並且，加熱的溫度低於電子源針尖結構受損溫度和所述發射點消失溫度的小值。這樣可以有效保護發射點和針尖結構，避免溫度過高導致電子源受損。

【0019】 可選地， $500K \leq$ 所述電子源的溫度 $\leq 1000K$ ，所述脈衝時長閾值 $\leq 10s$ ，所述間隔時長閾值 $\geq 3s$ ，或者， $800K \leq$ 所述電子源的溫度 $\leq 1000K$ ， $2s \leq$ 所述脈衝時長閾值 $\leq 3s$ ，所述間隔時長閾值 $\geq 3s$ 。

【0020】 可選地，所述方法還可以包括：在連續加熱處理或者脈衝加熱處理的過程中，對電子源輔以偏壓，可有效避免針尖，如高場強結構等發生形變。

【0021】 可選地，所述對電子源輔以偏壓可以包括以下任意一種或多種：輔以正偏壓、輔以負偏壓或者輔以正偏壓和負偏壓相結合。

【0022】 可選地，當輔以正偏壓時，所述正偏壓的值低於所述發射點的場致蒸發對應的電壓值，或者，當輔以負偏壓時，所述負偏壓的值為所述電子源不發射電子或發射小於預定閾值的電流對應的電壓值，即在該電壓下可以避免針尖的顯著場發射導致電子激勵出氣，進而有效避免離子化的氣體對針尖的轟擊。

【0023】 可選地，在一個實施例中， $0.5\text{KV} \leq \text{所述正偏壓的值} \leq 2\text{KV}$ ，或者， $-1\text{KV} \leq \text{所述負偏壓的值} \leq -0.5\text{KV}$ 。

【0024】 可選地，所述方法還可以包括如下操作：對所述電子源進行發射點修復。其中，所述對所述電子源進行發射點修復可以包括如下操作：首先，去除所述電子源針尖表面至少一個發射點，然後，在所述針尖表面上形成新的發射點，所述新的發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物。

【0025】 可選地，所述去除所述電子源針尖表面至少一個發射點可以包括如下操作：首先，通過加熱或者場致蒸發去除所述電子源表面至少一個發射點，其中，通過加熱去除所述電子源表面至少一個發射點時，加熱的溫度低於使電子源針尖結構受損的溫度。需要說明的是，在加熱過程中，可對電子源輔以偏壓，所述對電子源輔以偏壓包括以下任意一種或多種：輔以正偏壓、輔以負偏壓或者輔以正偏壓和負偏壓相結合。此外，通過場致蒸發去除所述電子源表面至少一個發射點時，所述場致蒸發施加的正偏壓的值低於電子源針尖結構受損對應的正偏壓值（例如針尖突起結構發生場致蒸發對應的正偏壓值）。這樣可以避免在去除發射點時對針尖結構例如突起等造成損傷，當去除發射點之後，再使得針尖表面的金屬原子和氣體分子形成反應產物，作為發射點。

【0026】 可選地，所述發射點為氫鎢化合物。

【0027】 可選地，針尖結構包括基底和所述基底上的一個或多個比所述基底其它部位的電場強度高的高場強結構，其中，至少一個所述高場強結構的外表面包括金屬原子，該高場強結構表面的金屬原子憑藉場強優勢在相同的環境中更容易與氣體分子形成反應產物，以優先在高場強結構生成發射點。在另一個具體實施例中，針尖包括基底和所述基底上的一個或多個比所述基底其他部位反應活性大的活性區域，其中，至少一個所述活性區域外表面包括金屬原子，該活性區域表面的金屬原子憑藉活性優勢在相同的環境中更容易與氣體分子形成反應產物，以優先在活性區域生成發射點。在另一個具體實施例中，針尖包括基底和所述基底上的一個或多個比所述基底其它部位的場強高的高場強結構，所述高場強結構的至少部分表面是反應活性大的活性區域，其中，所述活性區域外表面包括金屬原子，該活性區域表面的金屬原子憑藉場強優勢和活性優勢在相同的環境中更容易與氣體分子形成反應產物，以優先在活性區域生成發射點。

【0028】 可選地，所述高場強結構包括突起。

【0029】 可選地，所述基底材料是導電材料，並且/或者，所述高場強結構材料是導電材料，並且/或者，所述基底和/或高場強結構表面是金屬原子，並且/或者，所述高場強結構材料與基底材料相同或者不同，並且/或者，所述基底和/或高場強結構表面的金屬原子材料與高場強結構材料相同或者不同，當不同時，所述基底和/或高場強結構表面的金屬原子通過蒸鍍或者電鍍等方式形成，並且/或者，所述基底和/或高場強結構表面的金屬原子材料與基底材料相同或者不同，當不同時，所述基底和/或高場強結構表面的金屬原子通過蒸鍍或者電鍍等方式形成。

【0030】 可選地，所述基底和高場強結構的材料可以是金屬材料，也可以不是金屬材料，如導電材料即可。

【0031】 可選地，當高場強結構與基底是金屬材料時，表面金屬原子材料可以是與高場強結構和基底相同的金屬材料，也可以是通過蒸鍍或者電鍍等方式形成的不同的金屬材料。當高場強結構與基底不是金屬材料，如僅是導電材料時，表面金屬原子可以是通過蒸鍍或者電鍍等方式形成的。

【0032】 可選地，所述基底材料是導電材料並且熔點高於 1000K，並且/或者所述高場強結構材料是導電材料並且熔點高於 1000K，並且/或者所述基底和/或高場強結構表面的金屬原子的材料為熔點高於 1000K 的金屬材料。

【0033】 可選地，所述基底和高場強結構的材料是導電材料並且熔點高於 1000K。該導電材料可以是金屬材料，根據本發明的實施例，所述金屬材料包括以下任意一種或多種：鎢、鉍、鉭、鉬、鈮、鈦、鋁、鎂、鈣、鎳、鈷、鉀、鉑、銨、銻、鉛、金等熔點高於 1000K 的金屬材料（此時，針尖表面金屬原子的材料可以就是基底和高場強結構本身的材料）；該導電材料也可以是金屬硼化物，如六硼化鎢。此時，針尖穩定性更好，且便於利用熱處理等方法對針尖進行清潔而不損傷針尖結構。

【0034】 可選地，當針尖表面蒸鍍或電鍍有其它金屬原子時，該金屬原子的材料應為具有較高熔點（如高於 1000K）的金屬材料。其中，所述金屬材料包括以下任意一種或多種：鎢、鉭、鈮、鉬、銻、鈦、鉍、銨、銻、鉛、金、鎂、鈣、鎳、鈷、鉀、鉑、銨、銻、鉛、金、鎂、鈣、鎳、鈷、鉀。

【0035】 針尖優選地採用熔點高於 1000K 的金屬材料，例如鎢，穩定性更好，且便於利用熱處理等方法對針尖進行清潔而不損傷針尖結構。

【0036】 本發明的另一個方面提供了一種電子槍，包括如上所述的電子源，用於發射電子，以及冷卻裝置、加熱裝置和氣體引入裝置，其中，所述冷卻裝置用於給所述電子源冷卻，所述電子源通過電絕緣熱導體固定在所述冷卻裝置上；加熱裝置，用於給所述電子源調節溫度；所述氣體引入裝置，用於引入包含氫元素的氣體，以便在針尖形成發射點。

【0037】 本發明提供的電子源工作方法可以使得CFE穩定的工作在較低真空環境下、且具有較大的場發射電流，其中，該CFE可以包括至少一個固定在針尖上的發射點，所述發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物。

【圖式簡單說明】

【0038】

圖 1 示意性示出了根據本發明實施例的電子源的結構示意圖；

圖 2 示意性示出了根據本發明實施例的適用於電子源工作方法的設備的結構示意圖；

圖 3A 示意性示出了根據本發明實施例的高真空度環境中在低溫或室溫下電子源的電流發射能力示意圖；

圖 3B 示意性示出了根據本發明實施例的高真空度環境中在低溫或室溫下電子源燒毀過程的示意圖；

圖 3C 示意性示出了根據本發明實施例的中真空度環境中在低溫或室溫下電子源的電流發射能力示意圖；

圖 3D 示意性示出了根據本發明實施例的真空度環境中在高溫下電子源的電流發射能力示意圖；

圖 3E 示意性示出了根據本發明實施例的針尖表面吸附氣體分子的示意圖；

圖 4A 示意性示出了根據本發明實施例的連續加熱處理模式的示意圖；

圖 4B 示意性示出了根據本發明實施例的脈衝加熱處理模式的示意圖；

圖 4C 示意性示出了根據本發明實施例的對電子源進行熱處理以恢復發射能力的示意圖；

圖 4D 示意性示出了根據本發明實施例的針尖運行模式的流程圖；以及

圖 5 示意性示出了根據本發明實施例的針尖在長期運行後發射能力出現老

化的示意圖。

【實施方式】

【0039】 以下，將參照附圖來描述本發明的實施例。但是應該理解，這些描述只是示例性的，而並非要限制本發明的範圍。在下面的詳細描述中，為便於解釋，闡述了許多具體的細節以提供對本發明實施例的全面理解。然而，明顯地，一個或多個實施例在沒有這些具體細節的情況下也可以被實施。此外，在以下說明中，省略了對公知結構和技術的描述，以避免不必要地混淆本發明的概念。

【0040】 在此使用的術語僅僅是為了描述具體實施例，而並非意在限制本發明。在此使用的術語“包括”、“包含”等表明了所述特徵、步驟、操作和/或部件的存在，但是並不排除存在或添加一個或多個其他特徵、步驟、操作或結構。

【0041】 在此使用的所有術語（包括技術和科學術語）具有本領域技術人員通常所理解的含義，除非另外定義。應注意，這裡使用的術語應解釋為具有與本說明書的上下文相一致的含義，而不應以理想化或過於刻板的方式來解釋。

【0042】 在使用類似於“A、B和C等中至少一個”這樣的表述的情況下，一般來說應該按照本領域技術人員通常理解該表述的含義來予以解釋（例如，“具有A、B和C中至少一個的系統”應包括但不限於單獨具有A、單獨具有B、單獨具有C、具有A和B、具有A和C、具有B和C、和/或具有A、B、C的系統等）。在使用類似於“A、B或C等中至少一個”這樣的表述的情況下，一般來說應該按照本領域技術人員通常理解該表述的含義來予以解釋（例如，“具有A、B或C中至少一個的系統”應包括但不限於單獨具有A、單獨具有B、單獨具有C、具有A和B、具有A和C、具有B和C、和/或具有A、B、C的系統等）。

【0043】 附圖中示出了一些方框圖和/或流程圖。應理解，方框圖和/或流程圖中的一些方框或其組合可以由電腦程式指令來實現。這些電腦程式指令可以提供給通用電腦、專用電腦或其他可程式設計資料處理裝置的處理器，從而這些指令在由該處理器執行時可以創建用於實現這些方框圖和/或流程圖中所說

明的功能/操作的裝置。

【0044】 以下首先對現有技術中的場發射行為進行說明以便更好地理解本發明的技術方案。

【0045】 現有的電子源，如鎢（310）單晶針尖的電子源在使用過程中會經歷如下三個階段，首先，是較清潔的電子源，隨著氣體的吸附，進入穩定期（Stability），然而，隨著氣體的進一步吸附，電流雜訊逐漸出現，進入不穩定期（Instability），電子源穩定性變差，隨著工作時長的增加，表面會逐漸出現污染物，發射電流開始劇烈波動，最終導致燒毀。

【0046】 關於上述燒毀，發明人進一步的研究，表明其與離子轟擊密切相關。這是由於電子發射後會電離周圍空間的氣體分子，進而轟擊到針尖。一個可能就是針尖表面被轟擊形成多個突起，多個突起分別作為發射點，最後導致過多電流，造成燒毀。還有一種機制，就是吸附到針尖表面的氣體分子或其和其它物質的結合物，在電場作用下不斷移動，最終在一個表面的缺陷點（如由離子轟擊產生）彙集成一個奈米級突起作為發射點，發射點的迅速長大導致了過流，最終導致了針尖的燒毀。

【0047】 進一步地，前述問題在較大發射電流下變得更為嚴重。一般可長時間穩定工作的總發射電流為~10 微安，且利用率很低。鑒於前述弊端，在高亮度電子源領域佔據主導地位的是肖特基式場發射電子源（Schottky thermal-field emission source）。

【0048】 本質上講，對 CFE 而言，任何材料都不能避免氣體吸附和離子轟擊的影響。但是，如工作在大電流下（>10 微安），電子激勵脫氣（特別在電子轟擊引出極），就會進一步劣化真空度，使得針尖發射穩定性很差，波動幅度極大，更加無法長期穩定工作。因而，如何提供出穩定的、較大的場發射電流，一直是冷場發射電子源發展歷程中最主要的挑戰。

【0049】 為了避免上述氣體吸附和離子轟擊的影響，當前場發射電子源（一般指金屬針尖）僅能在超高真空中工作(<10⁻⁸ Pa)，這嚴重制約了 CFE 的適用範圍，發明人針對於此又進行了進一步深入研究，發現以下特點，真空中殘留氣體成分有 H₂、CO 和/或 CO₂ 等，而主要成分則是 H₂。H₂ 的吸附會導致清潔表面的發射能力逐漸變差。可以說在該真空範圍，H₂ 的影響從根本上決定了針尖的場發射性能。因此，如何應對 H₂ 的影響成為實現高穩定度針尖的關鍵。現有技術中也存在一些技術方案可以緩解氣體吸附的問題，例如，通過進一步提

高腔體真空度至 $1 \times 10^{-9} \text{Pa}$ 量級。

【0050】 此外，還存在一些技術方案直接利用一些針尖表面游離顆粒物（atomic clusters）作為發射點，也是嘗試的一種解決方式。這些游離顆粒物，可以是通過在較差真空度下長時間放置形成的污染物，電場作用使得這些游離顆粒物可以移動到針尖某處。這種發射點發射角很小（ $\sim 5^\circ$ ），引出電壓極低，亮度可以達到傳統鎢（310）的 10 倍以上。儘管不能夠形成較大的發射電流（一般可以穩定地給出 $\sim 10 \text{ nA}$ ），但是展現出了極好的穩定性（ $< 1 \times 10^{-7} \text{Pa}$ ）。一個可能推論就是，極小的束流角和發射面積可以有效降低離子轟擊的影響。然而，如前所述，這種游離顆粒物是不固定的，發明人發現，在電流較大時（ $> 1 \mu\text{A}$ ），這種電子源容易燒毀，且在工作過程中，還會有這種物質不斷出現，逐漸改變其發射狀態，很難長時間維持。另外一個問題就是暴露大氣時，由於這種物質的尺寸和氣體分子可以比擬，極易受到氣體的干擾。

【0051】 基於以上種種分析、推理及實驗，發明人提供了本發明的電子源工作方法以實現電子源可長期穩定的工作，能提供較大的場發射電流，能在較差的真空環境下工作。

【0052】 本發明的實施例提供了一種電子源工作方法，可以應用於如下電子源，該電子源包括至少一個固定在針尖上的發射點，所述發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物，該方法包括通過控制所述電子源的工作參數發射電子。其中，該電子源具有如下優點：首先，發射點直接由氣體分子和表面金屬原子在電場下反應生成，根植於針尖表面，不在表面移動。其次，發射點本身具有很強的環境適應性，可以在較差的真空（ $< 10^{-5} \text{Pa}$ ）下工作。再次，具有典型的場發射行為，引出電壓極低，與普通針尖相比引出電壓降低約 30%，最大發射電流可達 10mA 級別。但是，在使用該電子源的過程中還存在以下問題：容易受到氣體吸附的影響，隨著氣體分子不斷吸附在電子源表面，例如發射點可以被氣體分子覆蓋，導致其發射能力降低；另外，容易受到離子轟擊因素的影響，如電子發射後會電離空間氣體分子，電離產生的離子會轟擊針尖表面，一種機制是這樣可能導致針尖表面被轟出突起（該突起會作為一個新的發射點發射電流），針尖表面被轟擊形成多個突起，多個突起分別作為發射點，最後導致過多電流，從而燒毀電子源；還有一種機制，就是吸附到針尖表面的氣體分子或其和其它物質的結合物，在電場作用下不斷移動，最終在一個表面的缺陷點（如由離子轟擊產生）彙集成一個奈米級突起作為發

射點，奈米突起發射點的迅速長大導致了過流，最終導致了針尖的燒毀。此外，可能受到表面解離的影響，如當針尖長時間工作或者放置時，其表面會產生一些解離，即產生一些可移動的原子級顆粒物，這些物質可能在某些位置彙集，這些可移動的原子級顆粒物的亮度儘管很高，但卻很難承受大的發射電流（如 1 微安），極易導致針尖突然燒毀，其表現和離子轟擊很相似。本發明提供的方法為能控制如上所述的電子源的工作，且進一步提供了一些技術方案來解決如上所述的問題。圖 1 示意性示出了根據本發明實施例的電子源的結構示意圖。

【0053】 如圖 1 所示，針尖包括一個或多個固定在針尖表面的發射點，該發射點為位於針尖表面的金屬原子與氣體分子形成的反應產物。

【0054】 在一個實施例中，通過施加電場而使得針尖表面的金屬原子與氣體分子形成反應產物，即發射點；施加電場具體可以採用多種實現方式，例如，直接給針尖施加電壓在針尖表面形成較高的場強以促使針尖表面的金屬原子和氣體分子發生反應形成反應產物；也可以是給針尖附近的場強產生結構（如電極等）施加電壓形成電場，進而在針尖表面形成較高的場強以促使針尖表面的金屬原子和氣體分子發生反應形成反應產物。總之，在針尖表面形成電場的方式不做限定，只要能在針尖表面形成電場從而能促使針尖表面金屬原子與氣體分子反應形成反應產物即可。

【0055】 在通過給針尖施加電壓以形成電場的實施例中，示意性的例子中，所述電場為通過給所述針尖施加正偏壓、負偏壓或者正偏壓和負偏壓的結合而產生的電場，其中，對於施加正偏壓時，電場強度包括 1~50V/nm，對於施加負偏壓時，電場強度包括 1~30V/nm。

【0056】 所述發射點可以形成在針尖的指定位置，例如，可以是形成在特定的結構上，如突起等具有場強優勢，以優先形成金屬原子與氣體分子的反應產物的高場強結構，該結構可以位於針軸線與針尖表面相交處的一定範圍內；還可以是形成在特定的具有反應活性的區域，如具有更容易與氣體分子發生反應的特定的金屬原子區域，當然，也可以是上述兩種情形的組合使用，在此不做限定。

【0057】 根據本發明的實施例，所述基底和高場強結構的材料是導電材料並且熔點高於 1000K。該導電材料可以是金屬材料，根據本發明的實施例，所述金屬材料包括以下任意一種或多種：鎢、鉍、鉭、鉬、鈮、鈦、鎳、鈷、鋁、鈹、鈳、鈹、鈾、鈿、金等熔點高於 1000K 的金屬材料；該

導電材料也可以是金屬硼化物，如六硼化鐳。此時，針尖穩定性更好，且便於利用熱處理等方法對針尖進行清潔而不損傷針尖結構。

【0058】 其中，所述金屬原子可以是針尖本體表面的金屬原子，即金屬原子的種類和針尖本體的種類相同（例如高場強結構和基底的材料是金屬鎢，針尖表面的金屬原子是鎢原子），還可以是通過蒸鍍、電鍍等方式在針尖表面形成的不同種類金屬原子。優選地，該金屬原子的材料為熔點高於 1000K 的金屬材料，穩定性更好，且便於利用如上所述的熱處理等技術以對針尖進行清潔而不損壞針尖結構。例如，該熔點高於 1000K 的金屬材料可以包括以下任意一種或多種：鎢、鉍、鉭、鉬、鈮、鈦、鉛、鎢、釩、鈷、鈦、鎳、鈳、鈹、鉑、銻、鐵、鈟、金等，例如，其中某一種金屬原子單獨作為針尖表面的金屬原子，或者其中幾種金屬原子形成的疊層，如鉑層\鎢層形成的疊層等，又或者其中幾種金屬原子混合形成的非單質的金屬層，在此不做限定。在一個可選的實施例中，針尖本體材料為鎢，針尖表面金屬原子為鎢原子。

【0059】 所述氣體分子可以是由氣體引入裝置引入，如通過氣體流量閥等引入的特定的氣體分子、從某些部件表面脫吸附產生的氣體分子，也可以是在對腔室抽真空時殘留的氣體分子等，當然也可以是上述多種方式的組合，氣體引入方式在此不做限定。其中，所述氣體分子包括含氫元素氣體分子、含氮元素氣體分子、含碳元素氣體分子或者含氧元素氣體分子中的一種或多種。例如，所述氣體分子包括含氫元素氣體分子，或者含氫元素氣體分子以及以下至少一種：含氮元素氣體分子、含碳元素氣體分子或者含氧元素氣體分子。上述氣體分子可以是引入的氣體分子，因此，氣體引入量可以動態調整，一般在引入氣體時，真空度 $<10^{-4}\text{Pa}$ 。當直接利用真空腔室中的殘餘氣體時，真空腔室中主要殘留氣體為氮氣。優選地，所述含氮元素氣體分子包括氮氣分子。

【0060】 需要說明的是，在一定溫度下，發射點會消失，由於發射點在一定溫度下會消失，應選擇合適的工作溫度範圍、合適的材料，以保證發射點長期工作。並選擇一定的脫附溫度保證去氣，且不至損壞發射點。發射點消失的溫度，應低於針尖結構受損（例如針尖結構變形、熔化、突起或針尖表面金屬熔化等）的溫度以便去除例如發射能力老化的發射點，且不損壞針尖結構。發射點的工作溫度應低於發射點的消失溫度，發射點的消失溫度應該高於使得吸附的氣體分子脫吸附的溫度，這樣可以保證發射點長期工作，且便於通過簡單的熱處理進行脫吸附（如通過 Flash 等熱處理使氫氣脫吸附）使得電子源恢復

發射能力，且不損壞發射點。所述電子源的工作方法包括：通過控制所述電子源的工作參數發射電子。例如，通過控制電子源的工作電壓、施加電壓的時長、工作溫度和環境真空度、加熱溫度、加熱時長等來使得所述電子源以使用者期望的模式工作，例如，發射電子週期（發射電流可控）-恢復處理週期-發射電子週期-恢復處理週期-.....修復週期-發射電子週期.....的迴圈模式等，具體將如下所述。通過所述電子源工作方法使得本發明提供的電子源可以穩定的工作在較低真空環境下、且具有較大的場發射電流，其中，該電子源包括至少一個固定在針尖上的發射點，所述發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物。

【0061】 具體地，所述工作溫度應當低於電子源針尖結構受損溫度和所述發射點消失溫度的小值。由於發射點在一定的溫度下會消失，而對於針尖包括突起結構的電子源，突起結構在高溫下會被損壞，因此電子源的工作溫度應該保證發射點不會消失，而且針尖結構不發生改變。

【0062】 所述電子源發射電子時施加的工作偏壓包括以下任意一種或多種：連續偏壓或者脈衝偏壓。施加偏壓方式不限定，這樣可以滿足使用者對電子源的各種使用需求。

【0063】 圖 2 示意性示出了根據本發明實施例的適用於電子源工作方法的設備的結構示意圖。

【0064】 如圖 2 所示，該設備可以包括高壓電源 V_{EX} ，直流電源 V_{Heat} ，引出級、真空腔室、冷頭、絕緣體、髮叉、電子源、氣體引入裝置（未示出）和加熱裝置（未示出）。

【0065】 其中，電子源（如針尖表面有鎢原子和氫分子的反應產物作為發射點）焊接在髮叉上，並放置在真空腔室（Vacuum Chamber），本底真空優於 10^{-3}Pa （優選優於 10^{-6}Pa ）。

【0066】 電子源外接一個直流電源（ V_{Heat} ）。因此，可以對電子源進行熱處理。熱處理包含連續加熱模式，以及脈衝加熱模式等。通過上述加熱方式，針尖最高溫度可達 3000°C 以上，即可調溫度範圍為室溫至 3000°C 。需要說明的是，給針加熱的方式也可以是通過熱輻射等方式，加熱方式在此不作限定。

【0067】 在電子源的前部有一個引出極，該引出極接地，引出級本身可以是一個導電螢光屏（可用於觀察圖案），也可以是全金屬結構。電子源接高壓電源 V_{EX} （ $\pm 30\text{kV}$ ），可對電子源施加電場。當 V_{EX} 為負時，可以用做場發射；

當 V_{EX} 為正時，可以用於場致蒸發等表面處理。需要說明的是，給針施加電場的方式也可以是電子源接地，引出級接高壓電源，施加電場方式在此不做限定。

【0068】 熱處理時可以外加電場，熱處理與電場可以同步施加，也可不同步施加。

【0069】 電子源放在一個絕緣體樣品台（Insulator）上，再與冷頭（Cold head）相連。絕緣體（電絕緣熱導體）樣品臺上還有加熱裝置，該加熱裝置與冷頭結合可調溫度範圍為 10~500K。

【0070】 以下結合圖 3A 至圖 3E 來說明在給電子源施加工作電壓後，電子源的工作狀態和工作參數之間的關係。其中，所述電子源的工作參數包括工作偏壓、工作溫度或所述電子源所處環境的工作壓強中的一種或多種。例如，所述電子源的工作參數包括工作偏壓以及以下任意一種或多種：工作溫度或所述電子源所處環境的工作壓強。

【0071】 圖 3A 示意性示出了根據本發明實施例的高真空度環境中在低溫或室溫下電子源的電流發射能力示意圖。

【0072】 如圖 3A 所示，電子源穩定工作一定時長後被燒毀。其中，低溫或室溫可以為 20~500K，高真空可以為約 10^{-8} Pa。本發明提供的電子源展現了典型的場發射行為，即其發射電流隨著引出電壓的提升而顯著增大。圖 3A 給出了真空度在 10^{-8} Pa 量級下的典型測試結果，施加電壓仍為恒定負高壓（~-2 kV）。起始階段發射電流較穩定，一段時間之後，發射電流出現一些不穩定，再過一段時間會出現圖案突變或者燒毀。這種行為在溫度為 20~500K 時都可以觀察到，不同的是，低溫下（<150K）該過程發生的時間顯著增長。

【0073】 圖 3B 示意性示出了根據本發明實施例的高真空度環境中在低溫或室溫下電子源燒毀過程的示意圖。

【0074】 上述燒毀可能歸因於針尖表面出現了表面游離物，圖 3B 給出了相應的示意圖。該表面游離物可能由以下兩種機理產生：一種是基於表面解離，一種是基於場發射過程中的離子轟擊。如圖 3B 所示，這種游離物質是不固定的，在外界電場的作用下，會向高場強處移動，最後堆積到某些區域。堆積後的形成物，即使在很低的引出電壓下就可發射電子。根據大量實驗發現，在穩定發射時，這種堆積物僅能給出很小的發射電流；當發射電流較大時（如 $>1\mu\text{A}$ ），波動較大，容易導致電子源燒毀。

【0075】 圖 3C 示意性示出了根據本發明實施例的中真空度環境中在低溫或室溫下電子源的電流發射能力示意圖。

【0076】 如圖 3C 所示，電子源的發射電流隨著工作時間的增長而出現明顯下降，一段時間之後，發射電流變得不穩定，再過一段時間後會出現燒毀現象。其中，低溫或室溫可以為 20~500K，中真空可以為約 10^{-7} - 10^{-5} Pa。圖 3C 給出了針尖在中真空下（ 10^{-7} - 10^{-5} Pa）的典型測試結果，施加電壓仍為恒定負高壓（~-2 kV）。電流隨著時間出現較明顯的下降，一段時間之後，發射電流出現一些不穩定，再過一段時間會出現燒毀。這種行為在室溫以及低溫下都可以觀察到。不同的是，低溫下（<150K）該過程發生的時間顯著增長。同時，低溫下，電流下降斜率（the slope of degradation，簡稱 SL）顯著減緩，趨向水準。燒毀歸因於離子轟擊以及表面解離物的影響。而電流下降基本可以歸因於氣體吸附的作用。

【0077】 圖 3D 示意性示出了根據本發明實施例的真空度環境中在高溫下電子源的電流發射能力示意圖。

【0078】 如圖 3D 所示，電子源在較高工作溫度時（如 500~800 K）表現出截然不同的場發射行為。具體地，電子源的發射電流隨著工作時間的增長而出現明顯下降，但是沒有出現燒毀現象。其中，高溫可以為 500~800K，真空可以為優於 10^{-5} Pa。圖 3D 給出了在一定真空範圍內（< 10^{-5} Pa）高溫下的典型測試結果，施加電壓仍為恒定負高壓（~-2kV）。電流隨著時間出現一定的下降，但是相對於室溫（~300K）測試的針，其下降斜率簡稱 SL 顯著減緩。斜率和真空度密切相關，因而電流下降可歸因於氣體吸附的作用。有趣的是，不再出現燒毀行為。但當真空度進一步下降，即使在高溫下，針尖仍然會出現燒毀行為，其結果很類似於圖 3A 和圖 3C。燒毀仍可歸因於離子轟擊以及表面解離物的影響。

【0079】 圖 3E 示意性示出了根據本發明實施例的針尖表面吸附氣體分子的示意圖。

【0080】 如圖 3E 所示，在左圖中，發射點表面是清潔表面，在工作過程中，如右圖所示，氣體分子會在電場作用下逐漸向發射點位置移動（對於發射點形成在高場強結構表面的情形，發射點處的場強最高），發射點上氣體分子的吸附導致電子源發射能力下降。但通過一定熱處理可以對氣體進行脫附，以恢復其發射能力。

【0081】 也就是說，發射能力下降和針尖燒毀制約著如上所述的電子源的使用。

【0082】 為了使得上述電子源可以在真空度較低的環境中（ 10^{-5}Pa ）實現穩定的工作以使得電子源便於推廣應用，對上述實驗結果進行了分析。

【0083】 經分析，在一定的工作電壓下，電子源的工作狀態主要與真空度和工作溫度相關。

【0084】 其中，關於真空度的影響如下所示：真空度是直接與電子源的發射能力密切相關。真空度越好，其穩定性越好，而且持續工作時間越長，且發射能力不容易下降或者老化（degrade）。

【0085】 關於工作溫度的影響如下所示：在適當的工作溫度，發射電流下降斜率 SL 顯著減小，即連續工作的時間可以延長，體現在兩個方面。第一個方面，在低溫工作（如 $<150\text{ K}$ ，相對室溫約 300 K ）時，工作時間可大為延長。第二個方面，在較高溫度工作（ $>500\text{ K}$ ，相對室溫約 300 K ）時，工作時間可大為延長。

【0086】 綜上，在一個實施例中，所述電子源可以工作在如下環境中：所述工作溫度 $\leq 1000\text{ K}$ ，所述工作壓強 $\leq 10^{-3}\text{ Pa}$ 。

【0087】 為了進一步延長所述電子源的使用壽命，優選地，所述電子源可以工作在如下環境中：所述工作溫度 $\leq 150\text{ K}$ ，所述工作壓強 $\leq 10^{-6}\text{ Pa}$ ，或者， $500\text{ K} \leq$ 所述工作溫度 $\leq 800\text{ K}$ ，所述工作壓強 $\leq 10^{-6}\text{ Pa}$ 。

【0088】 此外，通過上述分析可知，氣體吸附雖然不是致命的，但在發射過程中是普遍存在的，會導致發射能力下降。為了改善上述氣體吸附問題，經過分析，可以通過使得吸附的氣體分子從電子源表面分離，來恢復電子源的發射能力，具體地，可以在工作一段時間以後（如 $0.1\sim 10$ 小時），進行加熱脫吸附處理。其中，溫度越高，處理的越充分。然而，由於本發明提供的發射點是由針尖表面的金屬原子與氣體分子的反應產物，當長時間高溫處理時，會導致發射點的消失，如該反應產物可能會分解。此外，當發射點在奈米或亞奈米級的突起上形成，這些突起在高溫下也會逐步變形，導致發射能力下降，即需要更高的工作電壓。因此，本發明提供了適於上述電子源的熱處理相關方法。

【0089】 在一個實施例中，所述方法還可以包括如下操作。首先，在所述電子源發射電子之前或者之後，對所述電子源進行熱處理，並且/或者，在所述電子源發射電子時進行熱處理。

【0090】 其中，所述在所述電子源發射電子之前或者之後，對所述電子源進行熱處理可以包括以下任意一種或多種方式：連續加熱處理或者脈衝加熱處理。也就是說，在電子源不發射電子的狀態下，可以對其進行連續加熱處理或者脈衝加熱處理。

【0091】 所述在所述電子源發射電子時進行熱處理可以包括以下任意一種或多種方式：連續加熱處理或者脈衝加熱處理。也就是說，在電子源發射電子的狀態下，也同樣可以對其進行連續加熱處理或者脈衝加熱處理。

【0092】 在一個具體實施例中，所述連續加熱處理可以包括如下操作：首先，對所述電子源持續進行加熱（如給電子源通電進行加熱，也可以採用例如熱輻射等方式加熱，加熱方式在此不做限定），其中，加熱的溫度低於電子源針尖結構受損溫度和所述發射點消失溫度的小值，然後，維持所述電子源的溫度直至達到連續加熱設定時長 t_c 。可選地，對於採用鎢原子與氫氣分子的反應產物作為發射點的情形下，所述電子源的加熱溫度應該 $\leq 800K$ ，所述連續加熱設定時長 t_c 應該 $\leq 20min$ 。

【0093】 其中，對加熱溫度的限定可以有效避免發射點、針尖結構例如高場強結構受損。所述連續加熱設定時長 t_c 可以根據實際使用效果而定，此外，該加熱溫度與連續加熱設定時長 t_c 也與針尖表面的金屬原子的材料種類、高場強結構的材料種類等相關，例如，當針尖表面的金屬原子的材料、高場強結構的材料等的熔點越高，相應地，針尖結構越不容易受到熱處理的影響，只要熱處理時不會導致發射點消失即可。

【0094】 需要說明的是，在進行熱處理的過程中，如在進行連續加熱熱處理過程中，還可以對針尖輔以偏壓，可以有效避免針尖結構（如高場強結構）發生形變導致發射能力改變。

【0095】 其中，所述對電子源輔以偏壓包括以下任意一種或多種：輔以正偏壓、輔以負偏壓或者輔以正偏壓和負偏壓相結合。

【0096】 具體地，當輔以正偏壓時，所述正偏壓的值低於所述發射點的場致蒸發對應的電壓值，或者，當輔以負偏壓時，所述負偏壓的值為所述電子源不發射電子或發射小於預定閾值的電流對應的電壓值（如在該電壓下，電子源不產生發射電流或者不要產生過大發射電流，以避免針尖的顯著場發射導致電子激勵出氣）。

【0097】 圖 4A 示意性示出了根據本發明實施例的連續加熱處理模式的示意圖。

【0098】 如圖 4A 所示，在連續加熱處理模式中，若發射點為鎢原子與氫氣分子形成的反應產物，加熱溫度應該 $\leq 800\text{K}$ 。加熱方式可以是如對髮叉（hairpin）通電流（其電流值可以為約數安培），以此在 $\leq 800\text{K}$ 的溫度區間對針進行加熱。該設備可以參考圖 2 所示的設備。該處理過程一般持續數分鐘（如 0.1~20min），也可針對針尖具體情況加以延長。

【0099】 在上述連續加熱操作中，有可能對針尖突起帶來損傷。特別是，長時間處理的累積效果，最終會導致針尖突起變形，造成發射能力顯著下降。在實驗過程中，通過比對實驗結果發現在熱處理時對針尖加一定程度的偏壓（電壓）可以有效避免針尖變形。此時有兩種模式：第一種為施加正偏壓模式（例如，其典型值可以為 0.5~2kV），由於沒有場發射電流，因而可以避免因電子激勵的脫附氣體而導致針尖的繼續吸附，但是施加正偏壓時的最大電壓值應低於針尖表面發射點的場致蒸發電壓；第二種為施加負偏壓，應控制電壓範圍，以使得針尖的場發射不顯著，否則，發射出的電子會激勵出氣，進而導致針尖繼續吸附氣體以及產生離子轟擊，具體地，施加負偏壓的一般典型值可以為 -0.5~-1kV。

【0100】 在另一個具體實施例中，所述脈衝加熱處理可以包括如下操作：首先，以脈衝方式對所述電子源進行加熱，其中，脈衝時長 $t_1 \leq$ 脈衝時長閾值，脈衝之間的間隔時長 $t_2 \geq$ 間隔時長閾值，具體地，加熱的溫度低於電子源針尖結構受損溫度和所述發射點消失溫度的小值。

【0101】 例如， $500\text{K} \leq$ 所述電子源的溫度 $\leq 1000\text{K}$ ，所述脈衝時長閾值 $\leq 10\text{s}$ ，所述間隔時長閾值 $\geq 3\text{s}$ ，或者， $800\text{K} \leq$ 所述電子源的溫度 $\leq 1000\text{K}$ ， $2\text{s} \leq$ 所述脈衝時長閾值 $\leq 3\text{s}$ ，所述間隔時長閾值 $\geq 3\text{s}$ 。

【0102】 此外，如同在連續加熱模式中可以对電子源輔以偏壓，在脈衝加熱處理中同樣可以对電子源輔以偏壓。

【0103】 具體地，所述對電子源輔以偏壓包括以下任意一種或多種：輔以正偏壓、輔以負偏壓或者輔以正偏壓和負偏壓相結合。當輔以正偏壓時，所述正偏壓的值低於所述發射點的場致蒸發對應的電壓值，或者，當輔以負偏壓時，所述負偏壓的值為所述電子源不發射電子或發射小於預定閾值的電流對應的電

壓值。例如， $0.5\text{KV} \leq$ 所述正偏壓的值 $\leq 2\text{KV}$ ，或者， $-1\text{KV} \leq$ 所述負偏壓的值 $\leq -0.5\text{KV}$ 。

【0104】 圖 4B 示意性示出了根據本發明實施例的脈衝加熱處理模式的示意圖。

【0105】 如圖 4B 所示，在脈衝加熱處理模式中，可加偏壓也可不加。其中，脈衝加熱溫度可以在 $500 \sim 1000\text{K}$ （該加熱溫度可以和連續加熱溫度有所不同，脈衝模式可以提供略高於連續加熱的溫度，因此可以更有效地去除離子轟擊或者表面解離導致的表面游離物質，延長電子源壽命）。

【0106】 圖 4B 中每個脈衝之間為短暫停止加熱時間。例如，可以通過對髮叉（hairpin）通電流，實現對電子源進行加熱，設備參考圖 2 所示。優選地，脈衝加熱溫度在 $800 \sim 1000\text{K}$ 溫度區間，每個加熱脈衝時長 t_1 可以持續 $< 10\text{s}$ ，例如， $2 \sim 3$ 秒，可用多個脈衝進行處理。為避免前後脈衝間的相互干擾，可以增加相鄰脈衝間的時間，脈衝之間的時間時長 t_2 一般大於 3 秒。脈衝熱處理期間可以輔以偏壓（偏壓可正可負）。此外，偏壓的施加週期可以與脈衝加熱處理的脈衝週期相同，也可以在部分或整個脈衝處理期間都施加偏壓，在此不做限定。

【0107】 在上述脈衝加熱處理操作中，可能對針尖突起帶來損傷。特別是，長時間處理的累積效果，最終會導致針尖突起變形，造成發射能力顯著下降。通過在熱處理時對針尖加一定程度的偏壓（電壓）可以有效避免針尖變形。具體地，可以採用如下兩種模式：第一種，可以施加正偏壓（典型值 $0.5 \sim 2\text{kV}$ ），此時最大電壓值應小於針尖表面發射點（如 H-W 反應產物）的場致蒸發電壓；第二種，可以施加負偏壓，同樣需要控制電壓範圍，以使得針尖的場發射不顯著，否則，發射出的電子會激勵出氣，進而導致針尖繼續吸附氣體以及產生離子轟擊，施加負偏壓時，一般典型值可以為 $-0.5\text{ kV} \sim -1\text{kV}$ 。

【0108】 由於熱處理過程主要為氣體分子的脫吸附過程，同時也可以去除離子轟擊或解離的游離顆粒，不會損傷電子源基底、高場強結構、活性區域、表面的金屬原子或發射點中的一種或多種，因此，該熱處理過程對電子源的損傷較小或無損傷，當電子源發射能力下降時，可以優先嘗試使用熱處理的方式使得電子源恢復發射能力。

【0109】 一般而言，離子轟擊是一個較為嚴重的問題，在發射過程中是普遍存在的。這個問題即使在很小的發射電流以及好的真空狀態下也存在，只是

受到的影響變輕微而已，不可能從根本上避免。如不及時處理，壽命很難超過 24 小時。通過實驗發現，在此種游離物質產生初期，可以通過較高溫度處理(例如 $>700\text{ K}$)來使得該游離物從針尖表面脫離，其中，溫度越高，處理的越充分。然而，長時間高溫處理，會導致發射點的消失。此外，如果發射點在奈米級的突起上形成，這些突起在高溫下也會逐步變形，導致發射能力下降，即需要更高的工作電壓。然而，通過如上所述的熱處理方法可以有效去除吸附在針尖表面的氣體分子和上述離子轟擊以及表面解離形成的游離物質，改善了電子源的發射能力隨著使用時間的增長而下降的情況。圖 4C 示意性示出了根據本發明實施例的對電子源進行熱處理以恢復發射能力的示意圖。如圖 4C 所示，在電子源發射週期，如果電子源的發射能力下降，通過上述熱處理（對應恢復處理週期）可以有效恢復電子源的發射能力。

【0110】 也可在電子源發射電子的狀態下（如圖 4C 中的發射週期）對電子源進行連續加熱處理和/或脈衝加熱處理，以恢復電子源的發射能力。

【0111】 需要說明的是，在連續熱處理和/或脈衝熱處理模式中（可加偏壓，也可不加偏壓），有時會處理掉部分發射點。此時，可以在去除掉發射點的區域再次形成發射點，以恢復初始發射狀態。

【0112】 例如，形成發射點的方法包括通過給電子源施加正偏壓或負偏壓，在針尖表面形成電場，以使在被處理掉的發射點位置的金屬原子與氣體分子形成反應產物，作為新的發射點。具體地，當施加負偏壓形成發射點時，首先，給所述針尖施加負偏壓，產生電流值為微安量級的發射電流，維持預設時長或調節所述負偏壓直至產生預定值的發射電流，然後，調節負偏壓使得所述電子源的發射電流小於毫安培量級，避免針尖形貌改變或燒毀。當施加正偏壓形成發射點時，給所述針尖施加正偏壓並維持預設時長，所述正偏壓的值小於使針尖形成突起的場致蒸發的偏壓的值。

【0113】 對於施加正偏壓，形成的場強的範圍包括 $1\sim 50\text{ V/nm}$ ，對於施加負偏壓，形成的場強的範圍包括 $1\sim 30\text{ V/nm}$ 。

【0114】 圖 4D 示意性示出了根據本發明實施例的針尖運行模式的流程圖。

【0115】 如圖 4D 所示，可以採用如圖 4C 中的工作模式。電子源在一定電壓下工作，經過一段發射週期（emission period）S201，發射能力發生下降（即相同電壓下場發射電流減小），即可對電子源的針尖進行恢復性處理（Recovering

treatment) (對應恢復處理週期 S202)，可以具有消除氣體吸附和離子轟擊的效果。上述恢復性處理可包含前述的連續加熱處理模式(可加偏壓也可不加)和/或脈衝熱處理模式中(可加偏壓也可不加)，處理之後，發射能力得到恢復，可以繼續工作。也就是說，不斷重複上述發射週期和恢復處理週期，這樣就可以使得電子源長期穩定工作。

【0116】 在電子源的發射過程(如步驟 S201)中，為了進一步提升發射的穩定性以及延長工作時間，可以使得電子源處於如下溫度段中工作。第一種，低溫工作(如 $<150\text{ K}$)，第二種，較高溫度工作(如 $>500\text{ K}$)。此外，也可在發射週期(Emission period) S201 中，進行連續加熱模式和/或脈衝熱處理模式，以同步消除氣體吸附和離子轟擊。

【0117】 在恢復性處理 Recovering treatment (如步驟 S202)中，可包含如下處理方法：第一種，連續加熱處理模式：溫度 $<\sim 800\text{ K}$ ；第二種，脈衝熱處理模式(pulse mode)： $500\sim 1000\text{ K}$ ；此外，在進行熱處理時，可同步對針施加偏壓，以防止針尖發生形變。

【0118】 通過如圖 4D 所示的針尖運行模式，可以對一根如上所述的電子源連續運行超過 1000 小時以上，極大的提升了電子源的使用壽命，並且，仍然保持良好的發射狀態，例如，引出電壓僅僅比開始提升了不到 200 伏特。

【0119】 圖 5 示意性示出了根據本發明實施例的針尖在長期運行後發射能力出現老化示意圖。

【0120】 在本實施例中，如圖 5 所示，當電子源經過較長時間運行(如第 1000 個使用週期，約 1000 小時)，電子源的發射能力出現了部分老化，即一定引出電壓下，電子源最大發射能力相較於第一個週期的發射能力下降且無法通過上述連續和/或脈衝熱處理方法恢復發射能力。但是，電子源仍可很大程度上通過熱處理進行修復，具體地，修復時可以採用在電子源工作間隔進行連續加熱和/或脈衝加熱時提高溫度(可加偏壓也可不加)，或者在電子源工作時連續加熱和/或脈衝加熱時提高溫度，此外也可以是在工作過程中提升工作溫度，以去除針尖表面至少一個發射能力老化的發射點，然後再在針尖表面形成新的發射點。需要強調的是，電子源進行修復的條件不限制，可以用戶自訂，比如發射電流下降至一定電流閾值或電子源工作一定時間閾值後進行修復。

【0121】 具體地，所述方法還可以包括如下操作：對所述電子源進行發射點修復。

【0122】 其中，所述對所述電子源進行發射點修復可以包括如下操作：首先，去除所述電子源針尖表面至少一個發射點，然後，在所述針尖表面上形成新的發射點，所述新的發射點是針尖表面的金屬原子與氣體分子在電場下形成的反應產物。新的發射點的形成方法可以參考如上實施例中形成新的發射點的方法，在此不再贅述。發射點形成的環境可以與工作環境相同。修復時可以採用在工作間隔加熱時提高溫度，和/或者在工作時加熱時提高溫度，此外也可以是在工作過程中提升工作溫度，以去除針尖表面至少一個發射能力老化的發射點，然後再在針尖表面形成新的發射點。

【0123】 在一個具體實施例中，所述去除所述電子源針尖表面至少一個發射點可以包括如下操作，例如，通過加熱或者場致蒸發去除所述電子源表面至少一個發射點，其中，通過加熱去除所述電子源表面至少一個發射點時，加熱的溫度低於電子源針尖結構受損的溫度值。

【0124】 需要說明的是，在加熱過程中，可對電子源輔以偏壓，所述對電子源輔以偏壓包括以下任意一種或多種：輔以正偏壓、輔以負偏壓或者輔以正偏壓和負偏壓相結合。

【0125】 通過場致蒸發去除所述電子源表面至少一個發射點時，所述場致蒸發施加的正偏壓的值低於電子源針尖結構受損所對應的正偏壓值。

【0126】 例如，首先，應該通過提高每次熱處理脈衝的溫度和/或次數（如數百次）去除表面上發射能力老化的發射點，也可以通過施加正偏壓去除掉表面發射能力老化的發射點（正偏壓值不應將針尖結構（例如突起）完全蒸發掉）；之後可以利用再次生長的方式，在針尖表面再次形成發射點。但應注意，加熱的溫度不宜過高，否則容易導致針尖表面突起的破壞，而這就需要採用一根新的電子源了。應注意，為延長使用時間，最可靠的方法就是在高真空（ $<10^{-7}\text{Pa}$ ）下運行。如果在更差的真空度下，必須減小工作電流，以保證執行時間。

【0127】 關於針尖燒毀的解決方案如下所述。

【0128】 根據對上述電子源的大量的測試實驗（如前所述），離子轟擊和表面解離都會導致針尖的燒毀。這往往是致命性的。具體提供如下方案避免燒毀。

【0129】 首先，提供較高真空度。在較高真空下（ $P < 10^{-6}\text{Pa}$ ）：特別需要保持針尖附近的真空度（Local pressure）小於這個量級。此時，離子轟擊的效應不

顯著。但仍需控制發射電流 I_E 。離子轟擊在針尖表面造成的游離物產額，近似與 $I \times P$ 成正比。

【0130】 其次，提供較高的工作溫度，例如，工作溫度為 500 K ~800K，這樣可有效避免燒毀。該溫度區間可避免表面解離物的形成。但在更高溫度下，例如>1000K，長時間會導致上述電子源的發射點消失，如會造成鎢原子和氣體分子的反應產物分解。

【0131】 或者，提供較低的工作溫度，例如，工作溫度為<150 K，此時，降低溫度可以有效延緩游離物（無論是離子轟擊產生還是表面解離產生）向發射區域的移動，同時，製冷還可以改善針尖局域的真空度，延長工作壽命，同樣有助於延緩燒毀。

【0132】 或者，上述為改善氣體吸附問題所做的熱處理（包括連續加熱處理或者脈衝加熱處理等）等方法在改善氣體吸附問題的同時，可以有效改善離子轟擊、表面解離導致的燒毀問題。

【0133】 同時，提供較高真空度也可以大大減少氣體吸附概率從而改善氣體吸附問題；提供較高的工作溫度或較低工作溫度也可以改善氣體吸附問題。

【0134】 另外，優選地，所述發射點為氫鎢化合物。由於該發射點的引出電壓較低，使離子轟擊出游離物的產率低，能量低，向發射區的移動速度慢，也可以延緩燒毀。

【0135】 本領域技術人員可以理解，本發明的各個實施例和/或權利要求中記載的特徵可以進行多種組合和/或結合，即使這樣的組合或結合沒有明確記載於本發明中。特別地，在不脫離本發明精神和教導的情況下，本發明的各個實施例和/或權利要求中記載的特徵可以進行多種組合和/或結合。所有這些組合和/或結合均落入本發明的範圍。

【0136】 儘管已經參照本發明的特定示例性實施例示出並描述了本發明，但是本領域技術人員應該理解，在不背離所附權利要求及其等同物限定的本發明的精神和範圍的情況下，可以對本發明進行形式和細節上的多種改變。因此，本發明的範圍不應該限於上述實施例，而是應該不僅由所附權利要求來進行確定，還由所附權利要求的等同物來進行限定。

【符號說明】

S201	發射週期
S202	恢復處理週期
t_c	連續加熱設定時長
t_1	脈衝時長
t_2	脈衝之間的間隔時長
V_{EX}	高壓電源
V_{Heat}	直流電源

【發明申請專利範圍】

【第1項】 一種電子源工作方法，該電子源工作方法適用於一種電子源，該電子源包括至少一個固定在針尖上的發射點，該發射點包括一針尖表面的一金屬原子與一氣體分子在電場下形成的反應產物，該電子源工作方法包括：

通過控制該電子源的工作參數發射電子。

【第2項】 如請求項 1 所述的電子源工作方法，其中，該電子源的工作參數包括工作偏壓以及以下任意一種或多種：一工作溫度或該電子源所處環境的一工作壓強。

【第3項】 如請求項 1 所述的電子源工作方法，其中，該電子源工作方法還包括：

在該電子源發射電子之前或者之後，對該電子源進行熱處理；和/或，
在該電子源發射電子時進行熱處理。

【第4項】 如請求項 2 所述的電子源工作方法，其中：該工作溫度低於該電子源的一針尖結構受損溫度和該發射點消失溫度的小值。

【第5項】 如請求項 2 所述的電子源工作方法，其中，該電子源發射電子時施加的工作偏壓包括以下任意一種或多種：連續偏壓或者脈衝偏壓。

【第6項】 如請求項 2 所述的電子源工作方法，其中：該工作溫度 $\leq 1000\text{K}$ ，該工作壓強 $\leq 10^{-3}\text{Pa}$ ；或者，該工作溫度 $\leq 150\text{K}$ ，該工作壓強 $\leq 1\text{E}^{-6}\text{Pa}$ ；或者， $500\text{K} \leq$ 該工作溫度 $\leq 800\text{K}$ ，該工作壓強 $\leq 1\text{E}^{-6}\text{Pa}$ 。

【第7項】 如請求項 3 所述的電子源工作方法，其中，所述在該電子源發射電子之前或者之後，對該電子源進行熱處理包括以下任意一種或多種：連續加熱處理或者脈衝加熱處理。

【第8項】 如請求項 3 中所述的電子源工作方法，其中，所述在該電子源發射電子時進行熱處理包括以下任意一種或多種：連續加熱處理或者脈衝加熱處理。

【第9項】 如請求項 7 或 8 所述的電子源工作方法，其中，該連續加熱處理包括：

對該電子源持續進行加熱，其中，

加熱的溫度低於該電子源的一針尖結構受損溫度和該發射點消失的溫度的小值；以及

維持該電子源的溫度直至達到一連續加熱設定時長 t_c 。

【第10項】如請求項 9 所述的電子源工作方法，其中，該電子源的溫度 $\leq 800\text{K}$ ，該連續加熱設定時長 $t_c \leq 20\text{min}$ 。

【第11項】如請求項 7 或 8 所述的電子源工作方法，其中，該脈衝加熱處理包括：

以脈衝方式對該電子源進行加熱，其中，脈衝時長 $t_1 \leq$ 一脈衝時長閾值，脈衝之間的時間隔時長 $t_2 \geq$ 一時間隔時長閾值，其中，

加熱的溫度低於該電子源的一針尖結構受損溫度和該發射點消失溫度的小值。

【第12項】如請求項 11 所述的電子源工作方法，其中：

$500\text{K} \leq$ 該電子源的溫度 $\leq 1000\text{K}$ ，該脈衝時長閾值 $\leq 10\text{s}$ ，該時間隔時長閾值 $\geq 3\text{s}$ ；或者

$800\text{K} \leq$ 該電子源的溫度 $\leq 1000\text{K}$ ， $2\text{s} \leq$ 該脈衝時長閾值 $\leq 3\text{s}$ ，該時間隔時長閾值 $\geq 3\text{s}$ 。

【第13項】如請求項 7 所述的電子源工作方法，其中，該電子源工作方法還包括：

在該連續加熱處理或者該脈衝加熱處理的過程中，對該電子源輔以偏壓。

【第14項】如請求項 13 所述的電子源工作方法，其中，所述對該電子源輔以偏壓包括以下任意一種或多種：輔以一正偏壓、輔以一負偏壓或者輔以該正偏壓和該負偏壓相結合。

【第15項】如請求項 14 所述的電子源工作方法，其中：

當輔以該正偏壓時，該正偏壓的值低於該發射點的一場致蒸發對應的電壓值；或者

當輔以該負偏壓時，該負偏壓的值為該電子源不發射電子或發射小於預定閾值的電流對應的電壓值。

【第16項】如請求項 15 所述的電子源工作方法，其中：

$0.5\text{KV} \leq$ 該正偏壓的值 $\leq 2\text{KV}$ ，或者

$-1\text{KV} \leq$ 該負偏壓的值 $\leq -0.5\text{KV}$ 。

【第17項】如請求項 1 所述的電子源工作方法，其中，該電子源工作方法還包括：對該電子源進行該發射點修復；

所述對該電子源進行該發射點修復包括：

去除該電子源的該針尖表面至少一個該發射點；以及

在該針尖表面上形成新的該發射點，所述新的該發射點是該針尖表面的該金屬原子與該氣體分子在電場下形成的反應產物。

【第18項】如請求項 17 所述的電子源工作方法，其中，所述去除該電子源的該針尖表面至少一個該發射點包括：

通過加熱或者一場致蒸發去除該電子源的表面至少一個該發射點，其中，通過加熱去除該電子源的表面至少一個該發射點時，

加熱的溫度低於使該電子源的一針尖結構受損的溫度，

其中，在加熱過程中，可對該電子源輔以偏壓，所述對該電子源輔以偏壓包括以下任意一種或多種：輔以一正偏壓、輔以一負偏壓或者輔以該正偏壓和該負偏壓相結合；

通過該場致蒸發去除該電子源的表面至少一個該發射點時，

該場致蒸發施加的該正偏壓的值低於使該電子源的該針尖結構受損所對應的正偏壓值。

【第19項】如請求項1所述的電子源工作方法，其中，該發射點為氫鎢化合物。

【發明圖式】

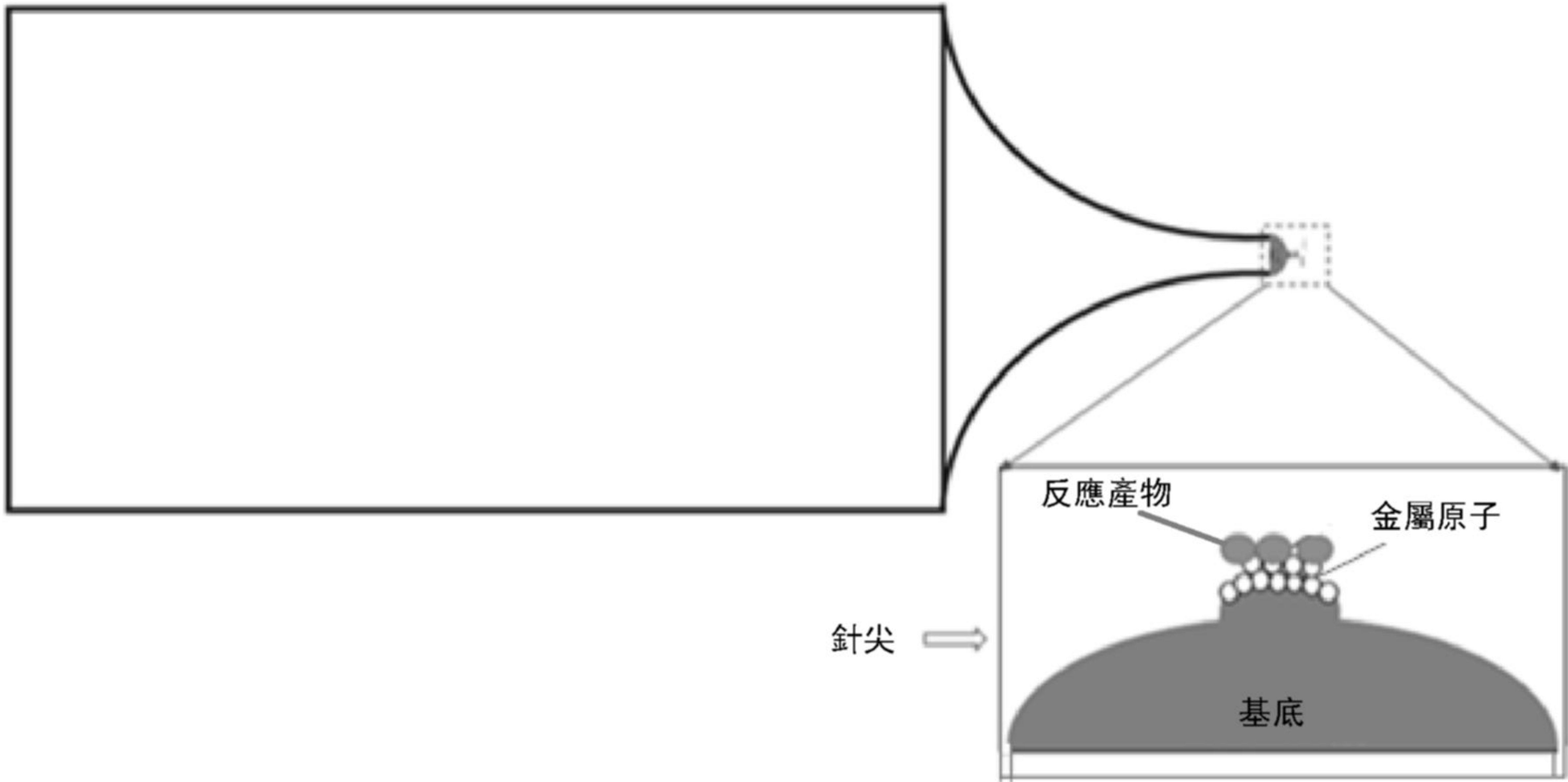


圖 1

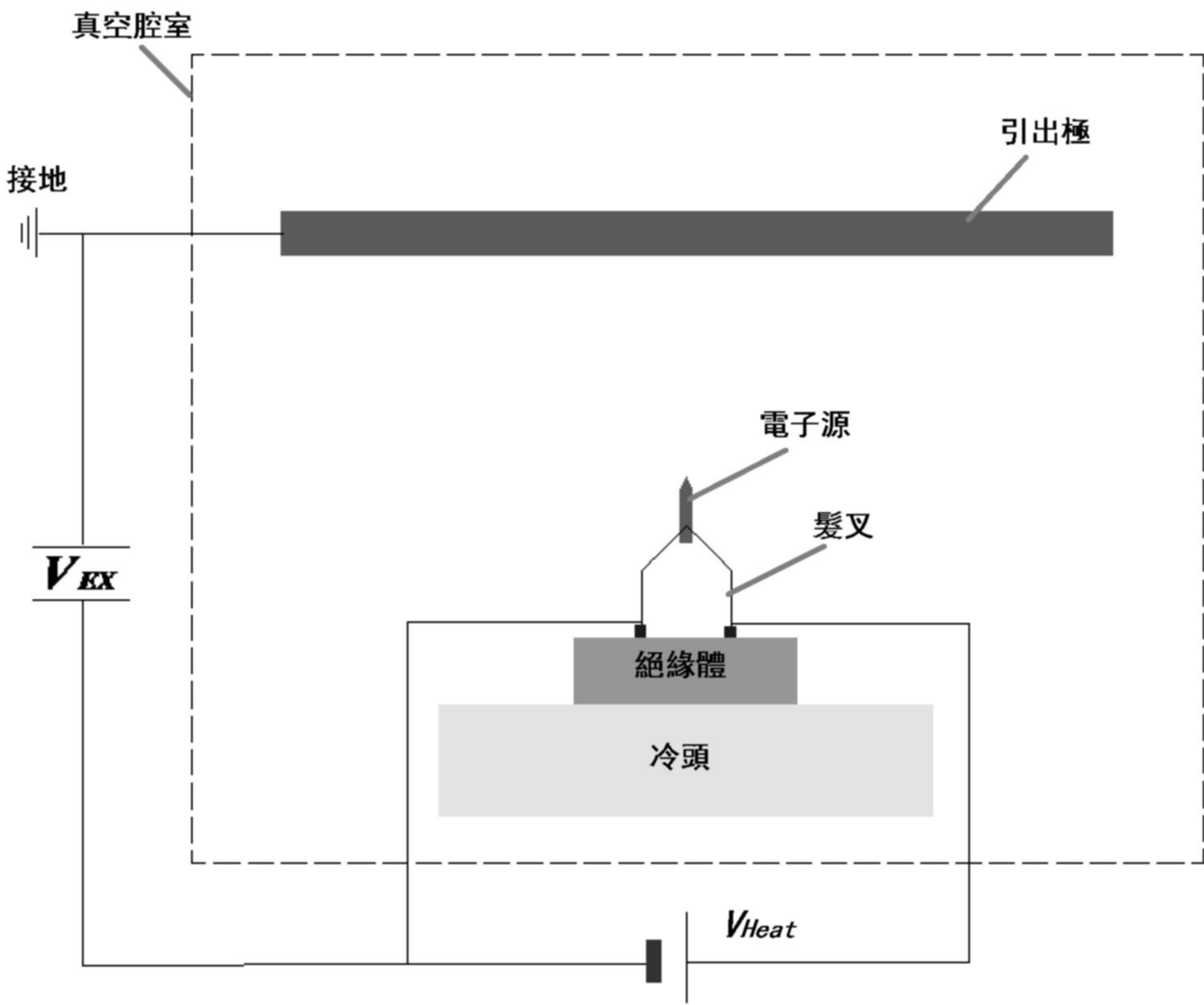


圖 2

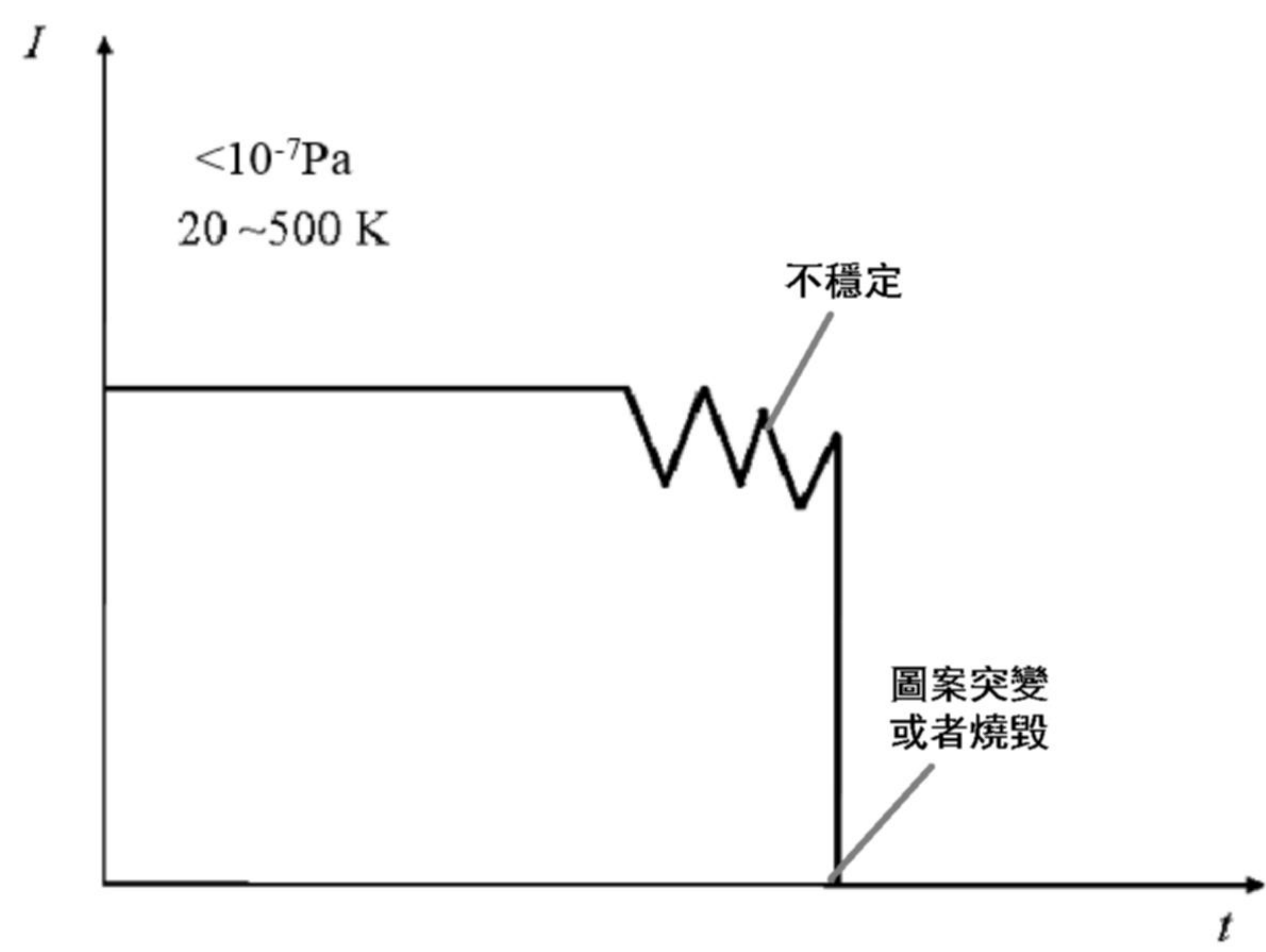


圖 3A

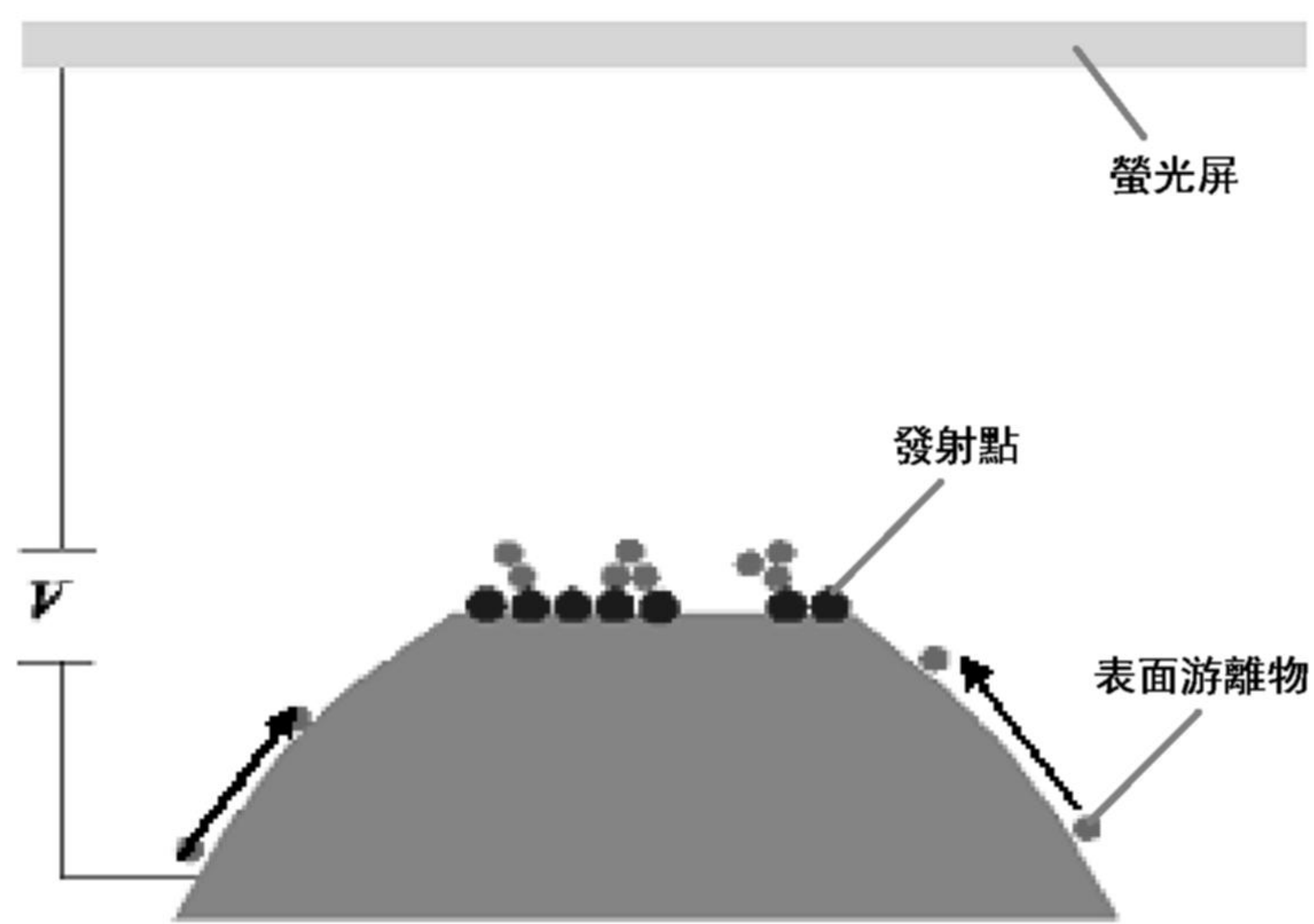


圖 3B

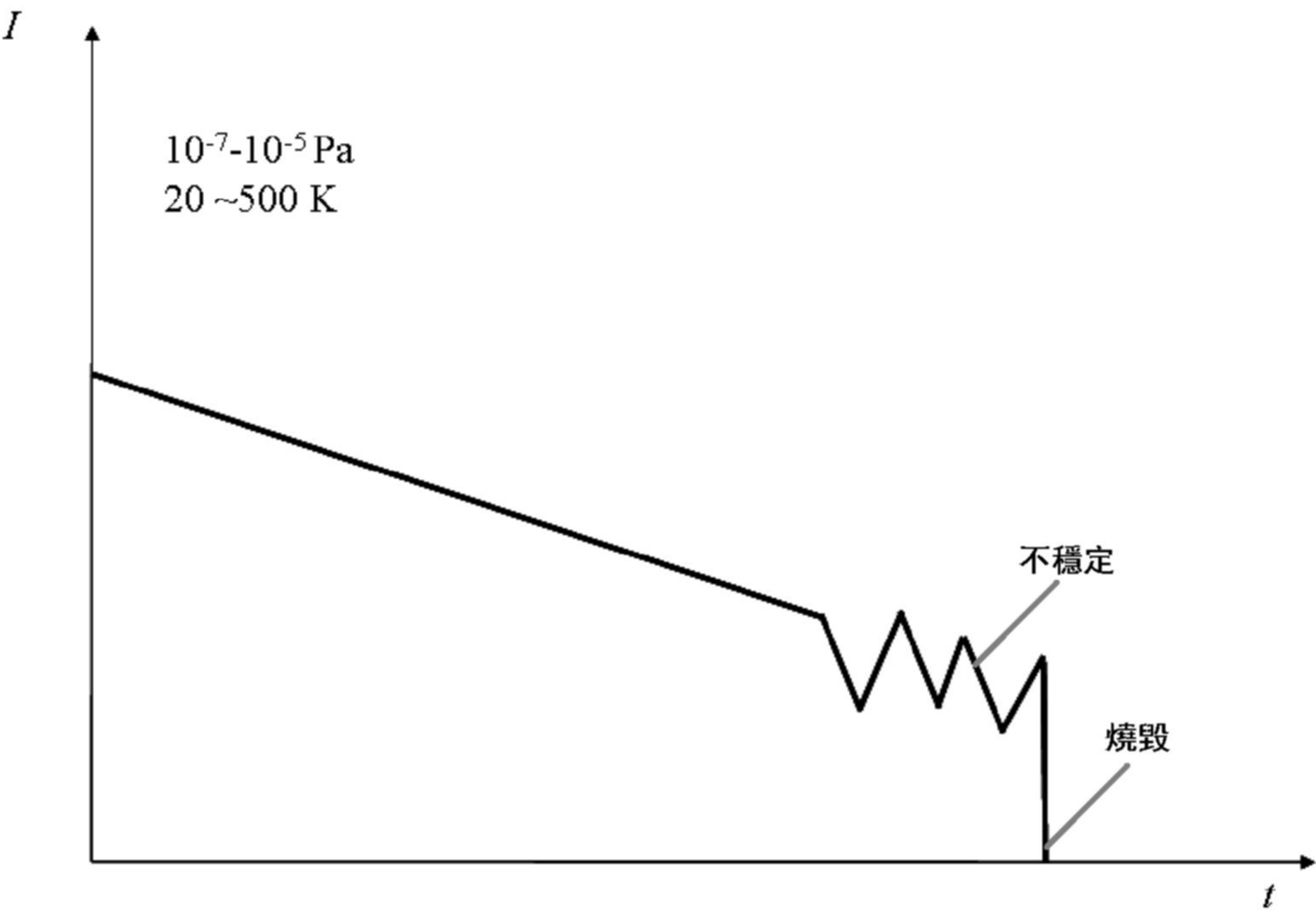


圖 3C

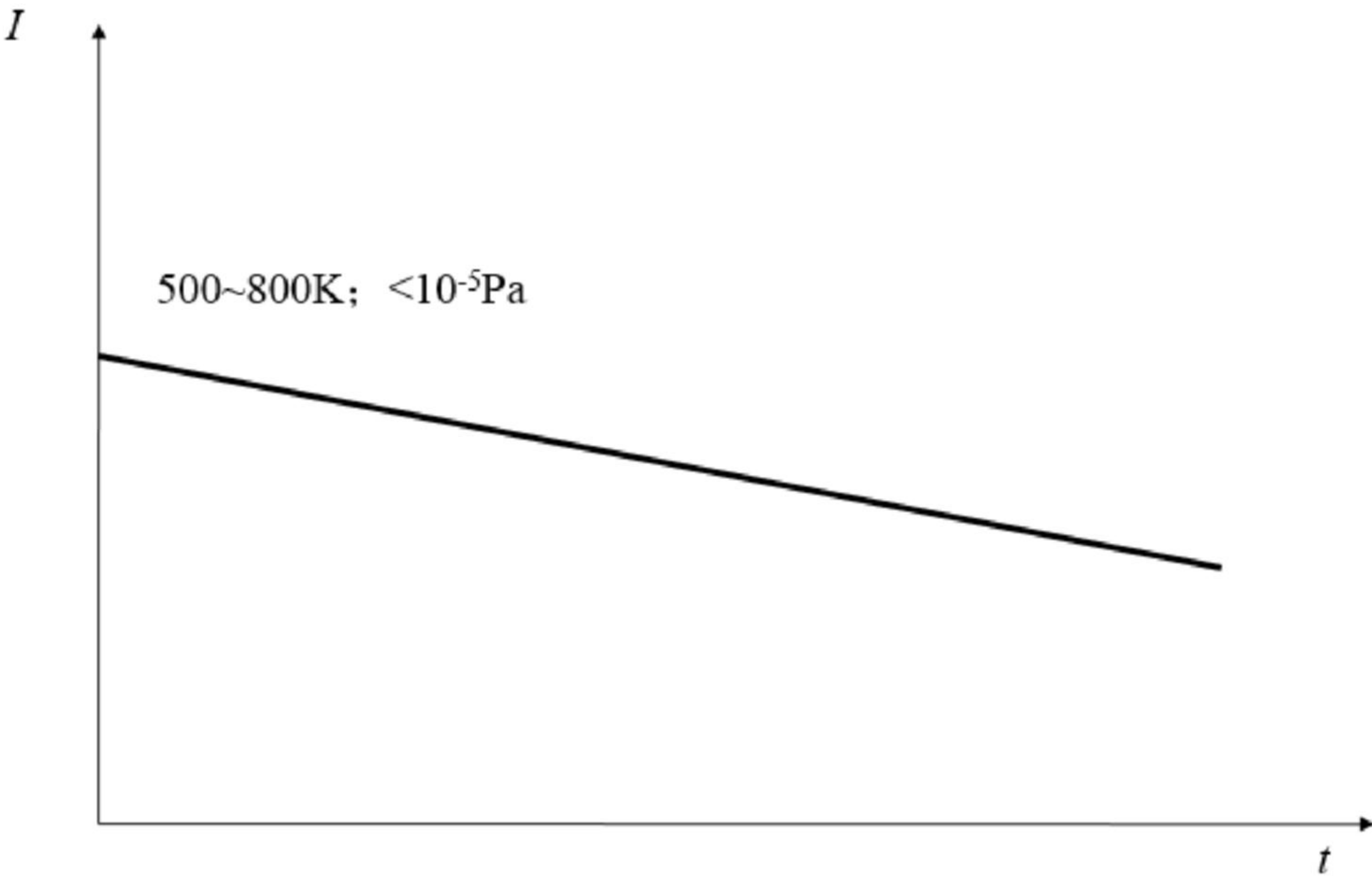


圖 3D

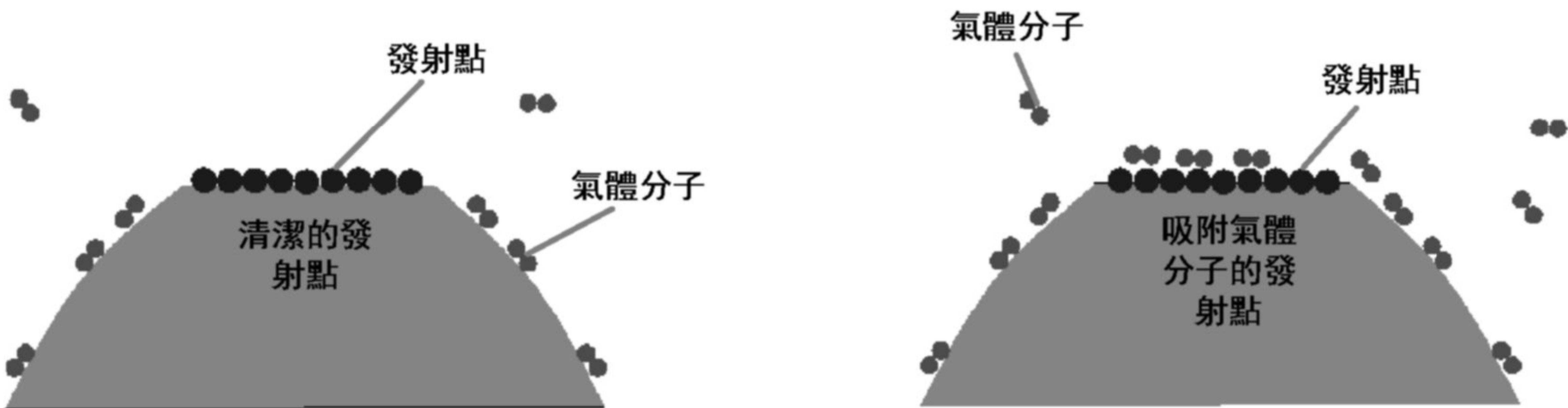


圖 3E

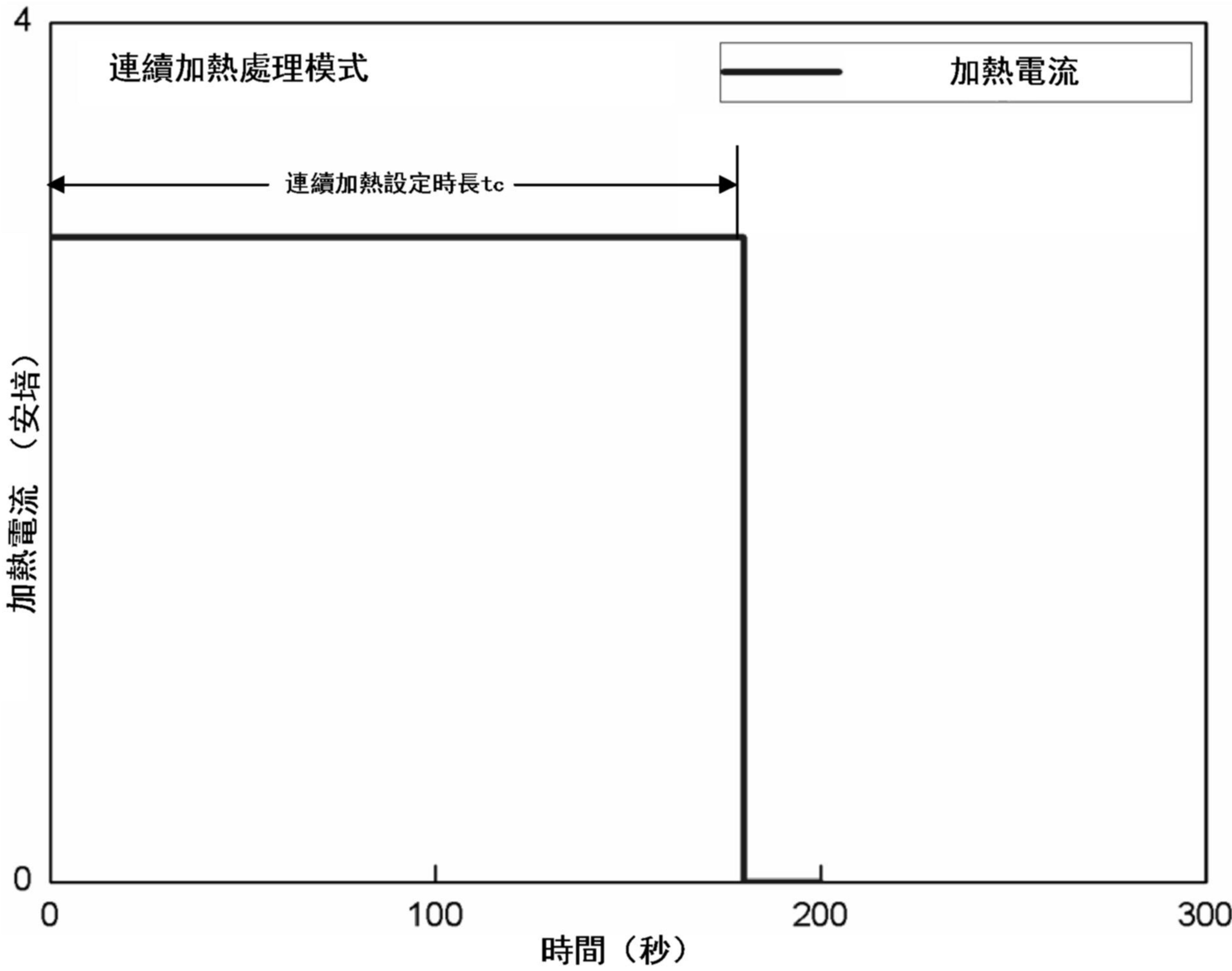


圖 4A

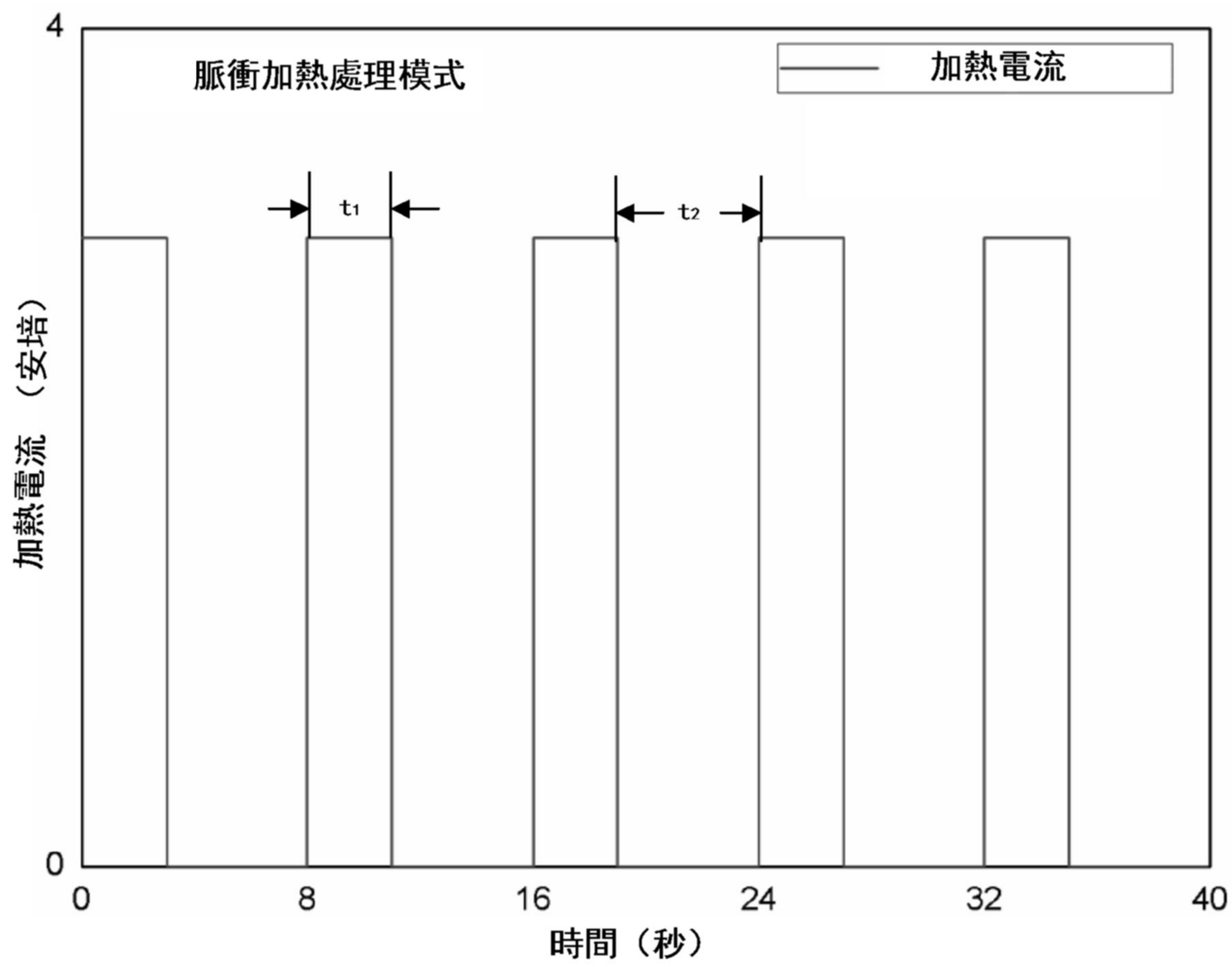


圖 4B

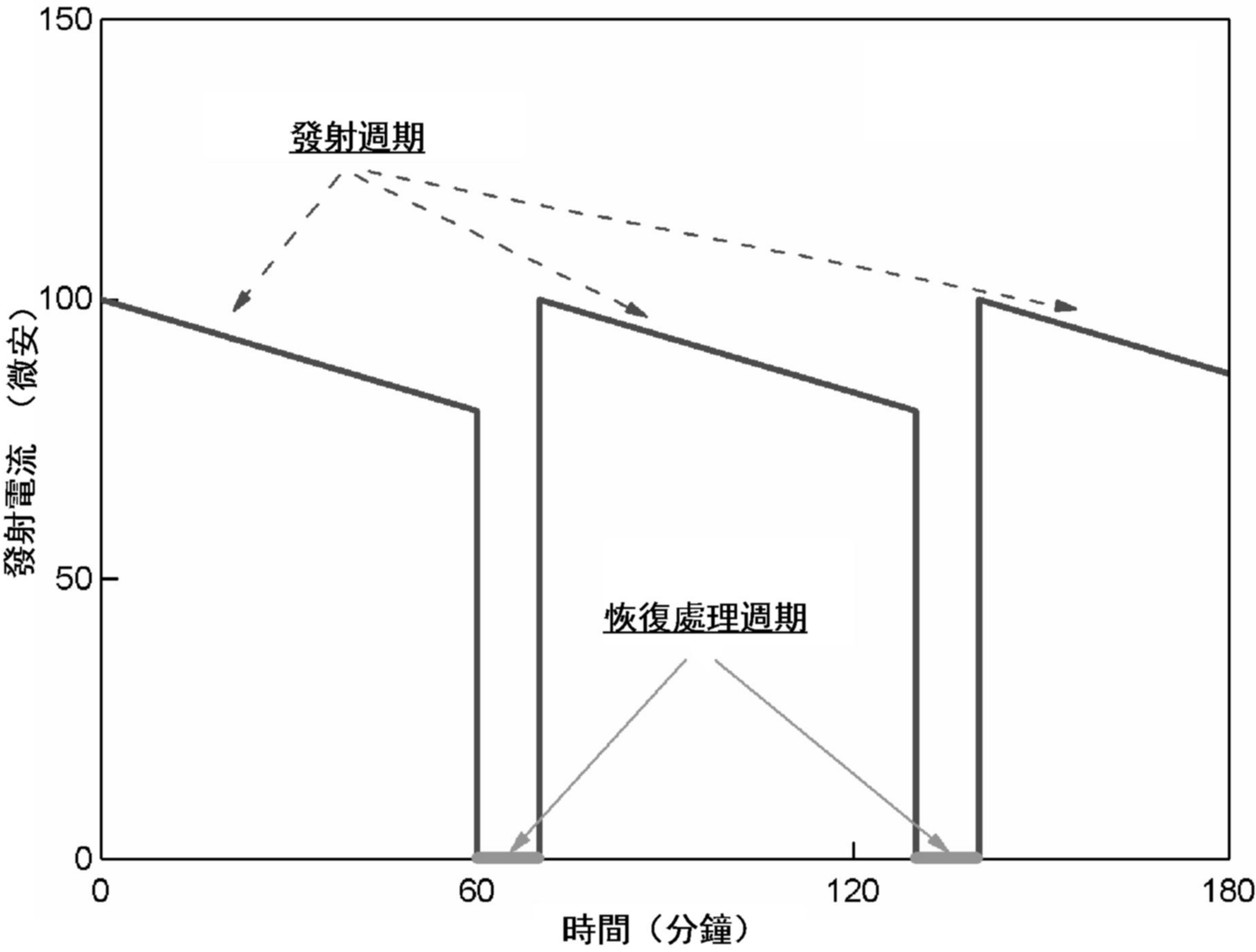


圖 4C

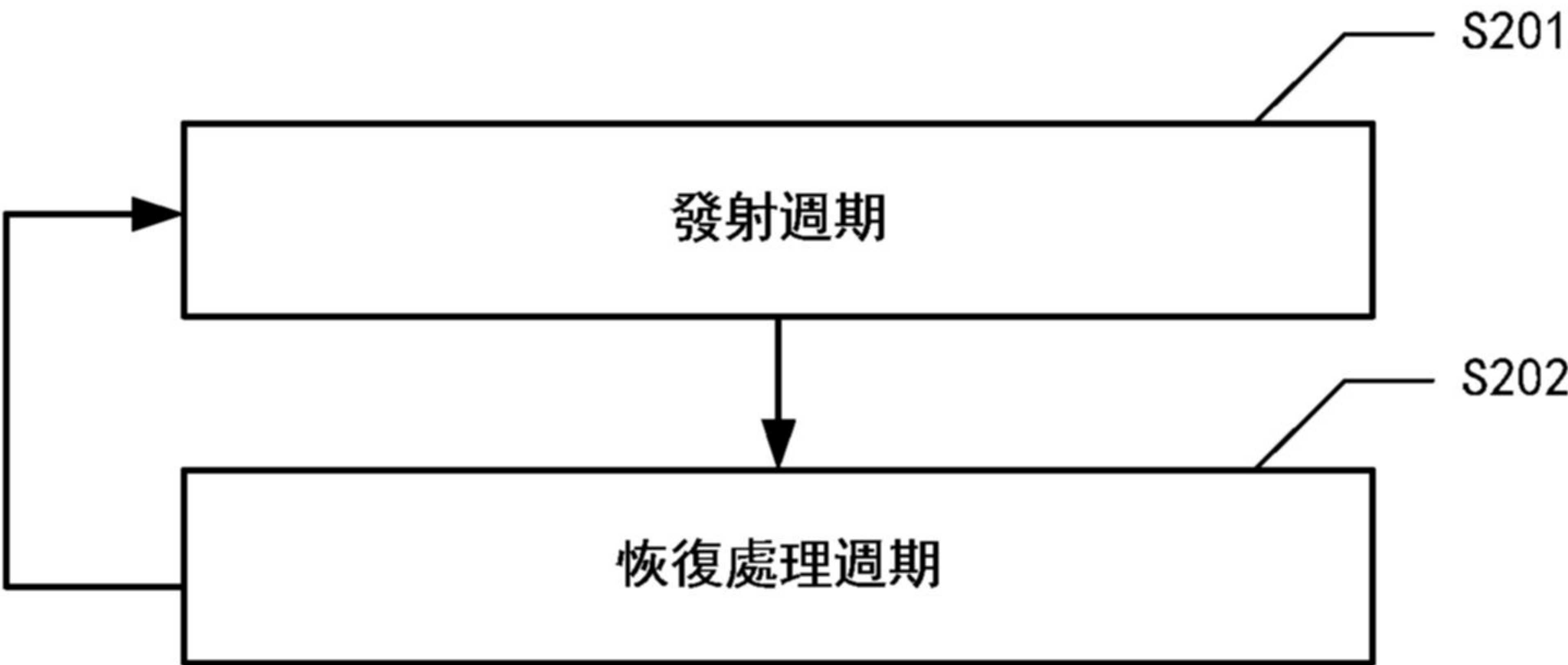


圖 4D

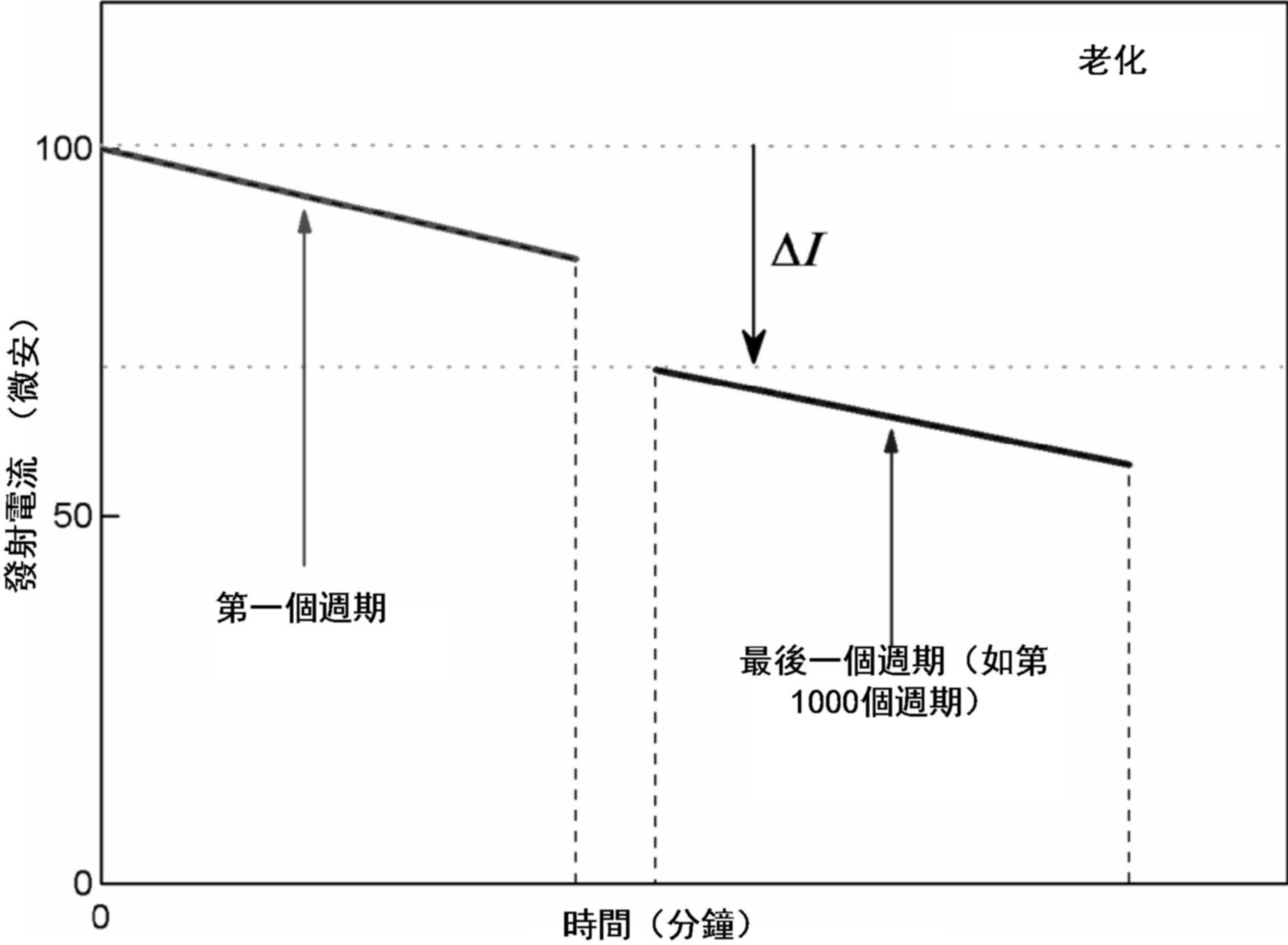


圖 5