

發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※ 申請案號：97103568

※ 申請日期：2008 年 1 月 30 日

※IPC 分類：
H01J 37/32(2006.01)

一、發明名稱：(中文/英文)

利用調整數個 VHF 功率源的功率比率來改善工件上的電漿處理均勻性
IMPROVING PLASMA PROCESS UNIFORMITY ACROSS A WAFER
BY APPORTIONING POWER AMONG PLURAL VHF SOURCES

二、申請人：(共 1 人)

姓名或名稱：(中文/英文)

美商·應用材料股份有限公司

APPLIED MATERIALS, INC.

代表人：(中文/英文)

鄭錦安

KWONG, RAYMOND K.

住居所或營業所地址：(中文/英文)

美國加州聖大克勞拉市波爾斯大道 3050 號

3050 Bowers Avenue, Santa Clara, CA 95054, U.S.A.

國 籍：(中文/英文)

美國/USA

三、發明人：(共 16 人)

姓 名：(中文/英文)

1. 柯林肯尼 S/COLLINS, KENNETH S.

2. 塙廣二/HANAWA, HIROJI

3. 拉馬斯瓦米卡提克/RAMASWAMY, KARTIK

4. 布克柏格二世道格拉斯 A./BUCHBERGER JR., DOUGLAS A.

5. 羅夫沙西德/RAUF, SHAHID
6. 貝拉卡羅/BERA, KALLOL
7. 王羅倫斯/WONG, LAWRENCE
8. 莫利華特 R./MERRY, WALTER R.
9. 米勒馬修 L./MILLER, MATTHEW L.
10. 薛儂史蒂芬 C/SHANNON, STEVEN C.
11. 蓋葉安德魯恩/NGUYEN, ANDREW
12. 克魯斯詹姆士 P/CRUSE, JAMES P.
13. 卡度希詹姆士/CARDUCCI, JAMES
14. 迪崔克特洛依 S./DETRICK, TROY S.
15. 戴希繆克沙哈西/DESHMUKH, SUBHASH
16. 孫珍妮佛 Y./SUN, JENNIFER Y.

國 籍：(中文/英文)

1. 美國/USA
2. 日本/JAPAN
3. 美國/USA
4. 美國/USA
5. 美國/USA
6. 印度/INDIA
7. 美國/USA
8. 美國/USA
9. 美國/USA
10. 美國/USA
11. 美國/USA
12. 美國/USA
13. 美國/USA
14. 美國/USA
15. 美國/USA

16. 美國/USA

四、聲明事項：

☐ 主張專利法第二十二條第二項 ☐ 第一款或 ☐ 第二款規定之事實，其事實發生日期為： 年 月 日。

☒ 申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號 順序註記】

☒ 有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1. 美國；2007 年 1 月 30 日；60/898,632
2. 美國；2007 年 4 月 11 日；11/733,764

☐ 無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

☐ 主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號 順序註記】

☐ 主張專利法第三十條生物材料：

☐ 須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼 順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼 順序註記】

☐ 不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

16. 美國/USA

四、聲明事項：

☐ 主張專利法第二十二條第二項 ☐ 第一款或 ☐ 第二款規定之事實，其事實發生日期為： 年 月 日。

☒ 申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號 順序註記】

☒ 有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1. 美國；2007 年 1 月 30 日；60/898,632
2. 美國；2007 年 4 月 11 日；11/733,764

☐ 無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

☐ 主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號 順序註記】

☐ 主張專利法第三十條生物材料：

☐ 須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼 順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼 順序註記】

☐ 不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

九、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明的實施例係關於用於處理例如半導體晶圓之工件的電容耦合電漿源。

【先前技術】

電容耦合電漿源包含頂電極，其在高於 110 MHz 的特高頻 (very high frequency, VHF) 頻率下驅動，能在相對低的電壓下產生高密度電漿。電容耦合電漿源可進一步產生用於低電極侵蝕的低電極電位，並且視需要，允許將在晶圓表面的離子能量限制於低級別，同時在寬範圍的電漿密度 (特低到特高電漿離子密度) 下進行操作。在該電漿源中的一個固有問題為：由於電漿的有效介電常數，頂電極展現出徑向傳輸線效應和負載。例如，在 150MHz，真空(freespace)四分之一波長大約為 20 英寸，其與頂電極直徑 (約 15 英寸) 類似。因此，射頻 (RF) 場在整個頂電極表面上顯著變化，引起晶圓表面的處理不均勻性。對有效介電常數大於 1 的電漿而言，有效波長被降低到小於頂電極直徑，加劇了 RF 場的不均勻性，使在整個晶圓表面上的處理不均勻性嚴重。對於蝕刻處理而言，這將在整個晶圓表面上產生不均勻的邊緣低蝕刻速度分佈。

採用各種方法以降低該不欲之效應。在一個方法中，採用磁導向以改變電漿離子分佈，例如，降低其中心高的不均勻性，從而產生一定程度上的平坦分佈。該方法的一個問題在於來源之中心高的不均勻性可能超過磁導向的校正能力。該方法的另一問題為：如果磁通量密度過高，則將對工件產生充電式破壞。在另一方法中，通過將更高的

電漿 RF 偏置功率施加到晶圓而增加電漿鞘（或偏置）電壓。這具有增加電漿鞘厚度的效應，其接著通常會降低整個頂-電漿鞘上的電容以及降低整個晶圓-電漿鞘上的電容，從而形成串聯的三個電容器，包括頂鞘電容、電漿電容和晶圓鞘電容。最終效應為降低電漿介電常數的效應，從而降低 RF 場的不均勻性。在一些氧化蝕刻電漿處理方式中，需要的高偏置電壓與後面的方法相容。然而，高電漿偏置電壓在某些其他類型的電漿處理中是不樂見的。最差的不均勻性出現在採用最低電漿偏置電壓的處理中。

在處理方法規定的其他處理條件具有與磁導向或者偏置（鞘）電壓任一者對電漿分佈一樣大的效應，這使得方法複雜化。例如，增加腔室壓力產生較少的中心高之電漿離子分佈以及較多的中心低之電漿離子分佈，而降低腔室壓力產生較多的中心高之分佈。電漿分佈的其他變化由源功率（電漿密度）、氣體化學組成、氣體混合物的電負性、抽吸速度、氣流速度和處理方法規定的其他參數所導致。

【發明內容】

本發明提供一種用於在具有至少包含頂電極和工件支撐電極之電極的電漿反應器中處理工件的方法。該方法包括將各個 VHF 頻率 f_1 和 f_2 的各自 RF 功率源耦接到以下其中之一：(a) 各自的電極或 (b) 所述電極的公共電極，其中 f_1 高到足以產生中心高的非均勻電漿離子分佈，而 f_2 低到足以產生中心低的非均勻電漿離子分佈。該方法進一步包括調整在 f_1 頻率下的 RF 參數與在 f_2 頻率下的 RF 參數之間的比率，從而控制電漿離子密度分佈，所述 RF

參數可以是以下其中之一：RF 功率、RF 電壓或 RF 電流。

在一個實施方式中， f_1 高於大約 110MHz 而 f_2 小於大約 90MHz。在相關實施方式中，所述調整步驟包括通過降低在 f_1 頻率下的 RF 參數相對於在 f_2 頻率下的 RF 參數之比率而減小中心高的電漿離子密度分佈。在另一相關實施方式中，所述調整步驟包含通過降低在 f_2 頻率下的 RF 參數相對於在 f_1 頻率下的 RF 參數之比率而減小邊緣高的電漿離子密度分佈。

在一個實施方式中，該方法進一步包括對於頻率 f_1 和 f_2 部分，提供直接經過所述頂電極和所述工件支撐電極之間的 RF 電流的各自中心接地回路；以及對於每個頻率 f_1 和 f_2 ，提供邊緣接地回路。在另一實施方式中，該方法進一步包括調整對應於頻率 f_1 之所述中心接地回路的阻抗，從而增加或降低在 f_1 頻率下 RF 功率產生電漿離子密度分佈之中心高的非均勻性趨勢。

在進一步實施方式中，該方法包括調整對應於頻率 f_2 之所述中心接地回路的阻抗，從而增加或降低在 f_2 頻率下 RF 功率產生電漿離子密度分佈之中心低或邊緣高的非均勻性的趨勢。

【實施方式】

第 1A 圖是通過在不同頻率的源功率中分配電容耦合電漿源功率而能控制電漿離子密度的徑向分佈之電漿反應器的簡化示意圖。反應器具有由柱狀側壁 202 和圓盤狀頂部 204 圍繞的真空腔室 200。頂部 204 既為導電頂電極又為氣體分佈噴頭或板，並且在此將稱為頂電極 204。頂電極可選擇性地由導電、半導體或絕緣材料所覆蓋。頂電極

204 包括在其底表面 204c 上之氣體注射孔的內部和外部區域 206、208，係耦接到各個內部和外部氣體歧管 210、212。內部和外部區域處理氣體供應器 214、216 將處理氣體配送到內部和外部歧管 210、212。晶圓支撐底座 218 可支撐例如半導體晶圓 220 的工件。底座 218 可具有靜電夾盤的特徵，包括導電底層 222 和圍繞內部電極 226 的絕緣頂層 224。通過腔室 200 的底部 (floor) 230 而耦接真空泵 228。底座 218 被支撐在支柱 232 上，該支柱 232 係耦接到可提升或降低底座 218 高度的升降機構。在一個實施例中，升降機構 234 提供約 0.3 英寸到約 6 英寸範圍內的晶圓-到-頂部間隙。通過自直流供應器 236 施加直流鉗制電壓到電極 226 而將晶圓夾持於底座上。直流供應器 236 典型地包括低通濾波器 (low-pass filter)，以將直流供應器與存在於電極 226 上的 RF 電壓絕緣。RF 偏置功率可直接耦接到內部電極 226，或者可通過導電底層 222 而間接耦接。底座 218 典型地包括導電接地外殼 217，其通常利用絕緣材料 (諸如，石英、陶瓷或塑膠) 而與導電底層 222 和內部電極 226 絕緣。或者，導電底層 218 可接地。

在整個腔室 200 上的電漿離子徑向分佈均勻性係通過提供一對 VHF 電漿源功率產生器 240、242 來控制。在一個態樣中，RF 產生器 240 具有在 VHF 範圍的較上部分中的頻率，在 110 和 250MHz 之間的大小，且名義上約為 162MHz，而其他 RF 產生器具有在 VHF 範圍較低部分中的頻率，約 40-90MHz 的大小，且名義上約為 60MHz。我們已經發現來自產生器 240 (如果僅應用該產生器) 的較高 VHF 頻率傾向於產生中心高且邊緣低的電漿離子密度徑向分佈，而來自產生器 242 (如果僅應該該產生器) 的較低

VHF 頻率傾向於產生中心低且邊緣高的電漿離子密度徑向分佈。在該態樣中，當同時使用時，這兩個產生器彼此互補。在一個實施例中，產生器 240、242 其中之一的輸出功率彼此相應地調整，以在中心低圖案和中心高圖案之間改變電漿離子密度的徑向分佈。選擇兩個產生器 240、242 的 RF 功率（或電壓或電流）級別的比率，以最小化中心高和中心低的非均勻性並建立幾乎沒有這兩種非均勻性且更加接近均勻的電漿離子分佈，並因此接近或基本上均勻。該均勻性可通過測量整個晶圓或工件上的蝕刻速度的徑向分佈而確定。該分佈的變化隨著均勻性增加而降低。舉例而言，對於蝕刻速度的更均勻徑向分佈的變化可以低至 4% 或更低。

在一個實施例中，較高 VHF 頻率產生器 240 通過阻抗匹配網路 244 耦接到頂電極 204，該阻抗匹配網路 244 可以為任一固定的或者為動態的並且可以由集總元件或者分散元件形成。較低的 VHF 頻率產生器 242 通過阻抗匹配網路 246 耦接到頂電極 204，該阻抗匹配網路 246 由集總元件或者分散的元件形成並且可以為固定的或者動態的。高 VHF 匹配 244 的輸出通過陷波濾波器 248 與低 VHF 產生器 242 的輸出隔離，對該陷波濾波器 248 調諧以阻擋圍繞低 VHF 產生器 242 的頻率 f_2 呈中心的窄帶，或者可選地通過高通濾波器調諧以阻擋低 VHF 產生器 242 的頻率 f_2 。低 VHF 匹配 246 的輸出通過陷波濾波器 250 與高 VHF 產生器 240 的輸出隔離，對該陷波濾波器 250 調諧以阻擋圍繞高 VHF 產生器 240 的頻率 f_1 呈中心的窄帶，或者可選地通過低通濾波器調諧以阻擋高 VHF 產生器 240 的頻率 f_1 。根據傳統的實施並結合匹配網路而設計濾波器電路，從而實現

具有所需頻率隔離的期望匹配範圍。

對於每個 VHF 頻率 f_1 、 f_2 ，提供兩個 RF 接地回路。通過將側壁 202 接地，提供沿著腔室 200 側部的路徑，如在附圖中所示。沿著該路徑的 VHF 電流相對於通過腔室中心的 RF 接地回路，可促進邊緣高中心低的電漿離子徑向分佈，或者至少促進較少之中心高的電漿離子徑向分佈。通過將底座電極 226（或底層 222）經過各個調諧（可變）帶通濾波器 252、254 耦接到地面而可選性地提供經過腔室 200 中心的路徑，其中帶通濾波器 252、254 彼此獨立受控。可變帶通濾波器 252 具有窄通帶，其包括（或集中至少大約在）較高 VHF 產生器 240 的頻率 f_1 。可變帶通濾波器 254 具有窄通帶，其包括（或其中至少大約在）較低 VHF 產生器 242 的頻率 f_2 。帶通濾波器 252、254 兩者都在各自的帶通頻率 f_1 、 f_2 下提供各自的接地阻抗。通過控制器 270 改變這些阻抗，以確定來自底座電極 226 和側壁 202 之間的每個產生器 240、242 的 RF 電流的分配。該電流的分配通過改變每個帶通濾波器 252、254 的電抗而控制。可採用電容和電感元件的傳統 RF 濾波器電路，以實施可變的帶通濾波器 252、254。根據傳統的實施，這些濾波器可實施為電容和電感元件的集總元件或實施為分散的元件，諸如同軸的調諧元件或線腳（stub）。例如，第 1B 圖為可在第 1A 圖的反應器中採用的可變帶通濾波器類型的簡化示意圖。第 1B 圖的可變帶通濾波器可包括並聯電容器 256、感應器 258 和負載電容器 260、電容器 256、260 的任一個或兩者都可變化。根據一個態樣，濾波器 252、254 不必為帶通濾波器或具有帶通濾波器的頻率回應。例如，濾波器 252、254 的其中之一或兩者可以為高通濾波器或低

通濾波器，或者其回應可改變以作為任何類型的濾波器的反應性元件。或者，通過將底座電極 226 接地，可提供經過腔室 200 中心的 RF 接地回路。這可經過高通濾波器以允許 RF 偏置的有效絕緣。

將 RF 偏置功率施加到 ESC (靜電夾盤) 電極 226，包括來自低頻 RF 功率產生器 262 通過 LF (低頻) 阻抗匹配 264 的 LF 功率 (例如，大約 2MHz)，和來自高頻 RF 功率產生器 266 通過 HF (高頻) 阻抗匹配 268 的 HF 功率 (例如，大約 13.56MHz)。典型地，選擇 RF 偏置頻率，使得 LF 功率級別控制峰值離子能量，同時 HF 功率級別控制離子能量分佈的中心寬度。對於施加於 ESC 電極 226 的每個 RF 偏置源，提供 RF 電流接地路徑。可選擇地通過將頂部經過帶通或低通濾波器將頂部耦接到地面，而提供通過頂部 204 的路徑。另外，可變的電抗可插入路徑中，以允許相對於到其他表面的偏置返回電流 (即，到壁 202 和環 219 的電流)，來控制到頂部的偏置返回電流。可增加插入電抗或阻抗，以迫使更大的偏置返回電流到邊緣 (環 219 或壁 202)，其趨於促成邊緣高電漿離子密度均勻性條件。或者，可降低插入電抗或阻抗，以使較少的偏置返回電流到邊緣 (環 219 或壁 202)，其趨於促成中心高電漿離子密度均勻性條件。

兩個 VHF 源功率產生器 240、242 可以連續波 (CW) 模式中操作或它們可相對於彼此而同步或不同步地脈衝。再者，偏置功率產生器 262、266 的任一個或兩者可以 CW 模式操作或以脈衝模式操作。在脈衝模式中，可控制它們的工作周期，以控制晶圓表面的時間平均 RF 偏置功率或電壓 (並因此控制離子能量)。偏壓產生器 262、266 的脈

衝可以相對於彼此和/或相對於源功率產生器 240、242 而為同步的或不同步的。在脈衝模式中，相對於彼此同步脈衝的任何成對前述產生器的 RF 包絡 (envelope) 可與時間一致或者隨時間偏移以及可重疊或不重疊。

通過在底座 218 的晶圓支撐表面下方處提供從底座 218 側部徑向向外延伸的晶圓下方的接地回路 219，在整個晶圓 220 的表面的氣流均勻性和晶圓邊緣附近的 RF 場的均勻性可得到改善。晶圓下方的接地回路 219 通常成形為柱狀或朝向側壁 202 延伸的平面孔環，以形成間隙 203，其部分限制來自晶圓上方的處理區域的氣流進入到由真空泵 228 抽空之晶圓下方的抽吸環面中。晶圓下方的接地回路的高度位於諸如晶圓狹口閥 229 或抽吸口的部件上方，由於氣流圖案或靜電或電磁場中的不對稱而在電漿分佈中產生不期望的不對稱。在側壁和晶圓下方的接地回路 219 的外邊緣之間的窄間隙部分地限制氣流，使得晶圓 220 上方的區域相對地免受該不對稱性影響，從而改善處理均勻性。在一個實施方式中，晶圓下方的接地面 219 由導電材料形成並接地。這因此提供晶圓邊緣處更加均勻的接地參考，其使得磁場在那裏更加均勻並且更不易受到腔室內部中導電表面分佈中不對稱性影響。環 219 還可用作電漿邊界，以有助於將電漿空間限制到環 219 上方的腔室區域。在替代的實施方式中，環 219 不作為接地面，並且其替代地由不導電材料所形成。在另一替代的實施方式中，接地返回環（或圓柱體）219 位於工件處或晶圓高度處或工件高度上方。其可以位於或接近頂部高度並同心式圍繞頂電極 204。在另一實施例中，可利用升降機構，相對於工件高度來選擇性地調整接地返回環 219 的高度。例如，通過

將環 219 附著於底座 218 的外側，可藉由底座升降機構而將環 219 升起並降低。接地返回環 219 可與腔室中的其他接地表面（例如，ESC 底層 224）絕緣，從而不直接耦接到地面，並且替代地通過可變的反應性元件（例如，可變的濾波器 252）而耦接到地面。在該情形下，對於 VHF 頻率 f_2 ，接地返回環 219 作為邊緣接地回路。因此，該邊緣接地回路的高度是可變的，並作為反應器的可調參數的其中一個。

均勻性控制器 270 控制兩個 VHF 產生器 240、242 的相對功率輸出級別並且可選擇性地控制可變的帶通濾波器 252、254 的阻抗。控制器 270 可設置高 VHF 頻率（ f_1 ）帶通濾波器的阻抗，以提供通過晶圓 220 的較低阻抗接地回路，其比在較高 VHF 頻率 f_1 下通過側壁 202 接地回路的阻抗低，使得來自 f_1 產生器 240 的功率產生更加顯著的中心高徑向分佈。另外，控制器 270 可設定低 VHF 頻率（ f_2 ）帶通濾波器的阻抗，以提供通過晶圓 220 接地回路較高的阻抗，其比在較低 VHF 頻率 f_2 下通過側壁 202 接地回路的阻抗高，使得來自 f_2 產生器 242 的功率產生更加顯著的中心低和邊緣高徑向分佈。控制器 270 分配高和低 VHF 頻率產生器 240、242 的相對功率輸出級別，以抑制蝕刻速度分佈的中心高不均勻性（通過增加較低 VHF 頻率產生器 242 的功率輸出）或者抑制蝕刻速度分佈的邊緣高非均勻性（通過增加較高 VHF 頻率產生器 240 的功率輸出）。控制器 270 可回應通過下游或在線(in-line)測量儀器 272 在前述處理的晶圓上所測量的不均勻圖案而進行這些調整。在連續的晶圓處理中，可採用標準的反饋控制校正技術，實施為控制器 270 中的程式化演算法，以通過均勻性控制

器 270 進行連續的校正，從而最小化測量儀器 272 所感應的蝕刻速度分佈中的不均勻性。測量儀器 272 可程式化，以通知控制器 270 電漿離子密度分佈是否具有顯著地中心高非均勻性或顯著地邊緣高非均勻性。或者，測量儀器 272 可包含原位感測器，以提供控制器 270 即時信號。OES（發光光譜儀）感測器可放置在頂部 204 上不同半徑處，提供徑向電漿激發的物質密度的指示。電漿自身可用作光源，或可使用外部光源。或者，干涉測量感測器可放置在頂部 204 上不同半徑處，提供工件薄膜厚度變化速度隨半徑的函數的指示。或者，離子通量感測器可放置在頂部 204 不同半徑處，提供徑向電漿離子密度的指示。或者，電壓感測器可放置在頂部 204 不同半徑處，提供徑向電極電壓的指示。或者，絕緣的電壓感測器可放置在頂部 204 不同半徑處，提供徑向電漿浮動電位的指示。可通過控制器 270 利用感測器輸入和傳統的技術來執行電漿均勻性的即時控制。

均勻性控制器還可控制升降機構 234，以提供改善電漿離子分佈均勻性（或蝕刻速度分佈均勻性）的另一控制因素。通過將底座 218 朝向頂電極 204 提升，減小晶圓-到-頂部間隙，其抑制晶圓中心附近的電漿離子密度並促進晶圓邊緣附近的電漿離子密度。相反地，通過降低底座 218 離開頂電極 204，增加晶圓-到-頂部間隙，其提高晶圓中心上方的電漿離子密度，同時晶圓邊緣的電漿離子密度降低。因而，電漿分佈將通過分別提升或降低底座 218 而表現出更加中心高或更加中心低的情形。如上所述，電漿分佈可通過分別增加或降低較高 VHF 頻率功率相對於較低 VHF 頻率功率的比率而表現出更加中心高或更加中心低的

情形。因而，底座高度和 VHF 功率比率是影響電漿離子分佈的兩個不同控制條件。均勻性控制器 270 可同時採用這兩個控制條件以優化電漿離子分佈均勻性。例如，可通過增加較高 VHF 頻率產生器 240 的輸出功率而降低邊緣高電漿的非均勻性，其將趨於增加電漿離子分佈的中心高峰值。通過提升底座 218 以降低晶圓-頂部間隙直到實現優化的電漿分佈，可抑制中心高峰值的所述增加，而不需要進一步改變 VHF 功率分配。這對於要求低 RF 偏置和低腔室壓力的處理方法是有用的，其中在該情形下電漿離子分佈的中心高峰值是尤其顯著的。VHF 頻率分配的控制與晶圓-頂部間隙的控制一起延伸控制器 270 能抵消的非均勻性範圍。對於嚴重的中心高非均勻性，例如，控制器 270 可要求增加較高與較低 VHF 頻率功率分配比率且要求較窄的晶圓-頂部間隙。

可變的晶圓-到-頂部間隙影響特定 VHF 頻率（例如 f_1 或 f_2 ）具有非均勻電漿離子密度分佈的峰的位置。因此，控制器 270 可設定該間隙以優化 f_1 的選擇，從而產生顯著之中心高的非均勻性電漿離子密度分佈，以及優化 f_2 的選擇，從而產生顯著之邊緣高的非均勻性電漿離子密度分佈。例如，控制器 270 設定晶圓-頂部間隙以優化 f_1 和 f_2 的選擇，從而產生不同的非均勻性圖案，並且控制器 270 改變在不同的頻率 f_1 、 f_2 下 RF 功率（或電流或電壓）的比率以控制電漿離子分佈並降低其非均勻性。

控制器 270 可回應來自測量儀器 272 的電漿離子密度分佈中顯著之中心高或邊緣高的非均勻性指示，通過測量和控制（改變）以下任一因素以趨於降低該非均勻性：(a) 在頻率 f_1 、 f_2 下的 RF 電壓比率；(b) 在頻率 f_1 、 f_2 下的

RF 電流比率；或 (c) 在頻率 f_1 、 f_2 下的 RF 功率比率。可以在例如各個電極處或者另一適當的位置處進行該測量。

在一個替代模式中，控制器 270 改變電漿離子密度分佈而不需要改變較高 (f_1) 和較低 (f_2) VHF 產生器 240、242 中的功率分配。替代地，電漿離子密度分佈由控制器 270 通過改變由 f_1 和 f_2 可變帶通濾波器 252、254 所表示的到中心接地回路的阻抗而變化。例如，較高頻率 (f_1) VHF 功率在電漿密度分佈產生中心峰或抑制邊緣峰的趨勢可通過改變由可變帶通濾波器 252 對 f_1 功率提供的阻抗而增加或降低。類似地，較低頻率 (f_2) VHF 功率在電漿離子密度分佈中產生邊緣峰或抑制中心峰的趨勢可通過改變由可變帶通濾波器 254 對 f_2 功率提供的阻抗而增加或降低。該變化影響在每個頻率 f_1 、 f_2 下在中心接地回路（頂部-到-晶圓）和側部接地回路（通過側壁 202）之間的 VHF 電流的分配。通過將更多的 f_1 功率導引到中心接地回路，增加較高 VHF 頻率 (f_1) 功率產生中心高分佈的趨勢。通過將更多的 f_2 功率導引到側壁接地回路，增加較低 VHF 功率 (f_2) 功率產生邊緣高分佈的趨勢。在一些情形下，控制器可改變兩個頻率 f_1 、 f_2 的僅其中之一的接地回路分配。

在第 1A 圖的反應器的另一替代模式中，僅其中一個 VHF 產生器（例如，僅產生器 240）提供 RF 功率，其他產生器（例如，產生器 242）並不使用或者被除去。均勻性控制器 270 通過改變 f_1 帶通濾波器 252 而改變電漿離子徑向分佈，從而控制通過 ESC 電極 226 的接地回路的阻抗。這分配通過 ESC 電極 226 的中心路徑與通過側壁 202

的側部路徑之間的接地返回電流。因此，控制器 270 的該特徵改變電漿離子分佈（或等效地在蝕刻速度分佈中）的中心高和中心低的非均勻性，以優化均勻性。

雖然在第 1A 圖中僅示出兩個 VHF 產生器 240、242，但是可採用具有不同頻率的更多 VHF 產生器。例如，可採用具有高於兩個 VHF 產生器 240、242 任一個之頻率的第三 VHF 產生器。如上所述，高 VHF 頻率產生器（例如，162MHz）產生電漿離子分佈中的中心峰，同時低頻率產生器 242（60MHz）產生邊緣峰。可通過引入具有更高頻率的第三 VHF 產生器而改善均勻性，其中第三 VHF 產生器在中心和邊緣之間產生峰，該峰填充電漿離子密度徑向分佈中的最小值。

第 1A 圖的反應器可用於再生電漿處理條件屬性，其具有由單一 HF（高頻）（13.56MHz）頻率源常規產生的僅甚低密度偏置的電漿，以產生電漿離子並控制晶圓上的偏置電壓。該類比可通過僅施加來自產生器 264 的 LF（例如，2MHz）偏置功率而實現，並將兩個 VHF 產生器 240、242 的每一個輸出功率設定到甚低級別（例如，10 瓦特），以建立所需的低電漿離子密度。其優點在於可以輸出功率的極細微變化來調整兩個產生器 240、242，以在比由單一 HF（13.56MHz）頻率源實現的更寬的變化處理條件範圍下保持電漿均勻性。

第 2 圖描述了第 1A 圖的反應器的變型，其中較低 VHF 頻率（ f_2 ）產生器 242 及其匹配 246 和陷波濾波器 250 耦接到 ESC 電極 226，而不是頂電極 204。在該情形下， f_2 接地回路通過頂電極 204。因此， f_2 可變帶通濾波器 254 耦接到頂電極 204，而不是 ESC 電極 226。陷波濾波器 255，

其調諧以阻擋來自更高 VHF 頻率 (f_1) 產生器 240 的 RF 電流，可連接到 f_2 帶通濾波器 254。類似地，陷波濾波器 253，其調諧以阻擋來自較低 VHF 頻率 (f_2) 產生器 242 的 RF 電流，可連接到 f_1 帶通濾波器 252。

在第 2 圖的反應器的一個替代模式中，分別應用到頂 (頂電極 204) 和底部 (ESC 電極 226) 的 VHF 頻率 f_1 和 f_2 為相同的頻率 ($f_1=f_2$)。在該情形下，控制器 270 通過改變頂電極 204 的電壓 (或電流) 和 ESC 電極 226 的電壓 (或電流) 之間的相位而改變離子密度 (或蝕刻速度) 的徑向分佈。例如，通過改變帶通濾波器 252、254 的電抗而控制在頂電極 204 的電流和 ESC 電極 226 的電流之間的相位。例如，如果帶通濾波器 252、254 的電抗相同 (並且如果沒有其他差異)，則頂電極 204 的 RF 電流和 ESC 電極 226 的 RF 電流之間的相位角是零。在 180 度相位處，本質上頂電極 204 和 ESC 電極 226 之間的所有電流，產生中心高分佈的電漿離子密度或蝕刻速度。在零度相位，本質上從頂電極 204 或 ESC 電極 226 任一到側壁 202 的所有電流，產生中心低邊緣高分佈。因此，控制器 270 可改變 0 和 180 度之間的相位角度，以獲得寬範圍的結果。

在第 2 圖的反應器的另一替代模式中，只有其中一個 VHF 產生器 (即，僅 f_2 產生器 242) 提供 RF 功率，其他產生器 240 不使用或者被去除。均勻性控制器 270 通過改變 f_2 帶通濾波器 254 而改變電漿離子徑向分佈，從而控制通過頂電極 204 的接地回路的阻抗，使得其相對於通過側壁 202 的接地回路的 (固定) 阻抗而增加或降低。這分配通過頂電極 204 的中心路徑與通過側壁 202 的側部路徑之間的接地返回電流。因此，控制器 270 的這個特徵改變電

漿離子分佈（或等效地蝕刻速度分佈）中的中心高和中心低的非均勻性，以優化均勻性。

在第 2 圖的反應器的又一替代模式中，僅有其中一個 VHF 產生器（即，僅 f_1 產生器 240）提供 RF 功率，其他產生器 242 不使用或者被去除。均勻性控制器 270 通過改變 f_2 帶通濾波器 252 而改變電漿離子徑向分佈，從而控制通過 ESC 電極 226 的接地回路的阻抗，使得其相對於通過側壁 202 的接地回路的（固定）阻抗而增加或降低。這分配通過 ESC 電極 226 的中心路徑與通過側壁 202 的側部路徑之間的接地返回電流。因此，控制器 270 的這個特徵改變電漿離子分佈（或等效地蝕刻速度分佈）中的中心高和中心低的非均勻性，以優化均勻性。

第 3A 圖和第 3B 圖描述了第 1A 圖的反應器的變型，其中頂電極 204 被分成彼此電絕緣的徑向內部和外部區段 204a、204b，並且通過各自的產生器 240、242 單獨地驅動。雖然可選擇任一產生器以驅動內部電極 204a，留下其他產生器以驅動外部電極 204b，但是較佳為較高 VHF 頻率產生器 240 耦接到內部電極 204a 而較低 VHF 頻率產生器 242 耦接到外部電極 204b，以增強較高頻率形成中心高離子分佈的趨勢，並增強較低頻率形成中心低離子分佈的趨勢。

第 4 圖描述了第 1A 圖的反應器的變型，其中 VHF 產生器 240、242 驅動 ESC 電極 226，同時接地返回帶通濾波器 252、254 耦接到頂電極 204。

第 5 圖描述了第 2 圖的反應器的變型，其中兩個頻率 f_1 和 f_2 都在 VHF 帶較低部分中。例如， f_1 和 f_2 分別為 54MHz 和 60MHz。這表示通過消除對具有接近 200MHz 或大於 150MHz 的輸出頻率的高 VHF 頻率產生器的需要，節

約了大量成本。在第 5 圖的反應器中，缺失的高 VHF 頻率（例如，162MHz），其提供中心高回應，是由耦接到頂電極 204（或可選地耦接到 f1 產生器 240 的輸出端）的高 VHF 頻率（例如，162MHz）諧振器 274 所產生。較佳地，諧振器 274 經調諧，以在 f1 的奇數諧波下共振，諸如第三諧波。例如，如果 $f_1 = 54\text{MHz}$ ，則在諧振器 274 中所產生的第三諧波將為 162MHz。通過反應器腔室中電漿的非線性回應而便於較高諧波的產生，其中該反應器腔室與諧振器 272 協作充當為頻率倍增器。可變帶通濾波器 252 經調諧至 f1 的第三諧波，使得來自產生器 240 的在 f1 下的部分 RF 功率被轉換為 f1 的第三諧波。

在第 5 圖的反應器的另一替代模式中，僅有其中一個 VHF 產生器（即，僅有產生器 240）提供 RF 功率，其他產生器 242 並不使用或被去除。均勻性控制器 270 通過改變 f1 帶通濾波器 252 而變化電漿離子徑向分佈，從而控制通過頂電極 204 的接地回路的阻抗，使得其相對於通過側壁 202 的接地回路的（固定）阻抗而增加或降低。這分配通過頂電極 204 的中心路徑與通過側壁 202 的側部路徑之間的接地返回電流。因此，控制器 270 的這個特徵改變電漿離子分佈（或等效地蝕刻速度分佈）中的中心高和中心低的非均勻性，以優化均勻性。

第 6 圖描述了反應器的變型，該反應器同時採用高和低 VHF 頻率但是僅採用單一低 VHF 頻率產生器以實現較大的成本節約。低 VHF 產生器 240 為可變頻率振盪器（VFO），其頻率通過控制器 270 而在基本頻率 f 和 $f \pm \Delta f$ 之間變化，其中 Δf 為 f 的小偏差。諧振器 274 經調諧到基本頻率 f 的第三諧波， $F = 3 \cdot f$ 。通過變化產生器 240 的頻

率，與產生器輸出頻率 $f \pm \Delta f$ 和第三諧波為諧振器 274 的共振頻率的基本頻率 f 之間的差成反比，來增加或降低轉化為第三諧波 F 的產生器的輸出功率的比例。結果為兩個頻率，即產生器輸出頻率 $f \pm \Delta f$ 和共振頻率 F ，耦接到電漿，並且通過改變產生器 240 的輸出頻率而控制它們的相對功率級別。通過減小產生器輸出頻率和基本頻率 f 之間的差，在第三諧波下耦接到電漿的功率增加而在基本頻率 f 下的功率降低，從而增加中心高非均勻性或降低邊緣高非均勻性。相反，通過增加產生器輸出頻率與基本頻率 f 之間的差，在第三諧波下耦接到電漿的功率降低，而在基本頻率 f 下的功率增加，從而增加邊緣高的非均勻性或降低中心高的非均勻性。因此，由控制器 270 通過變化 VFO 或產生器 240 的頻率而調節電漿均勻性。兩個可變帶通濾波器 252、254 具有分別在基本頻率 f 和第三諧波 F 下呈中心的帶通。

在一個態樣中，內部腔室元件係由金屬(例如，鋁)所形成。為了防止或最小化電漿處理期間的金屬污染，暴露於電漿的金屬腔室元件表面，諸如側壁 202 的內部表面和底座 218 的暴露表面，可由處理相容材料(例如，氧化鈮)的薄膜所塗敷。該薄膜可以為電漿噴塗氧化鈮。或者，可將塊狀陶瓷材料(例如，氧化鈮)附著於下面的金屬內部腔室元件。例如，頂部 204 可在暴露於電漿的側壁上具有附著的陶瓷板。側壁 202 可在暴露於電漿的側壁上包括附著的陶瓷柱體，或者環 219 可在暴露於電漿的側部上包括附著的陶瓷環。陶瓷材料可經摻雜或者以其他方式製造，使得它們的電阻率落在半導體的範圍內(例如，在 10^8 到 10^{12} 歐姆 * cm 之範圍中的電阻率)，以對施加於 ESC 電極 226

之 ESC 鉗制電壓提供直流電流回路。這些腔室表面可加熱，以最小化例如聚合物之材料的不欲之沉積或聚集，或者冷卻以最小化或消除蝕刻，或採用加熱和冷卻的受控溫度。通過採用適當的化學物質，可在電漿蝕刻處理中清洗腔室的內部表面。例如，在幹式清洗步驟中，可將氧氣或含氧，或者氮氣或含氮氣體引入腔室中，並且可使用 VHF 源功率產生器 240、242 和 / 或偏置功率產生器 262、266 來產生電漿。

第 7 圖示出了可使用第 1A 圖之反應器實施的處理。在第 7 圖的文字塊 300 中，同時通過在兩個不同 VHF 頻率 f_1 和 f_2 下之電極（頂部或晶圓）而電容性耦接 RF 電漿源功率，其中 f_1 在 VHF 帶的較高範圍（例如，162MHz）中而 f_2 在 VHF 帶的較低區域（例如，50-60MHz）中。在文字塊 302 中，通過提供帶通濾波器 252、254 到地面，可對每個頻率 f_1 和 f_2 提供經過相反電極（晶圓或頂部）之各個中心接地回路，如第 1A 圖所示。在第 7 圖的文字塊 304 中，通過將側壁 202 接地，對每個頻率 f_1 和 f_2 提供經由側壁的邊緣回路，如第 1A 圖所示。在文字塊 306 中，通過調節帶通濾波器 252，以相對於 f_1 邊緣回路的阻抗來調節 f_1 中心回路的阻抗，好促進在 f_1 頻率下到中心回路的電流。在文字塊 308 中，通過調節帶通濾波器 254，以相對於 f_2 中心回路的阻抗來調節 f_2 邊緣回路的阻抗，以促進在 f_2 頻率下到側壁的電流。在文字塊 310 中，通過選擇在 f_1 頻率下的 VHF 功率與在 f_2 頻率下的 VHF 功率之間的比率，均勻性控制器 270 可改善徑向電漿離子密度分佈的均勻性。通過降低在 f_1 頻率下的 VHF 功率相對於在 f_2 頻率下的 VHF 功率之比率，可實施文字塊 310 的步驟，來降

低中心高電漿離子密度分佈（文字塊 312）。或者，可通過降低在 f_2 頻率下的 VHF 功率相對於在 f_1 頻率下的 VHF 功率之比率，可實施文字塊 310 的步驟，以降低邊緣高的電漿離子密度分佈不均勻性（文字塊 314）。作為影響或改善離子密度分佈的另一方式，控制器 270 可調整 f_1 和 f_2 任一或兩者的中心和邊緣回路的阻抗（通過調整各自的帶通濾波器 252、254），以達到以下任一：（a）朝向邊緣引導更多的電流，以抑制中心高的非均勻性或（b）朝向中心引導更多的電流以抑制邊緣高的非均勻性（文字塊 316）。

在本說明書中，均勻性係指關於徑向電漿離子密度分佈。應該理解，該分佈是從蝕刻速度徑向分佈推斷或等同於蝕刻速度徑向分佈，其中蝕刻速度徑向分佈可以在反應器中通過電漿蝕刻處理處理的整個晶圓表面上進行測量。

第 8 圖示出了可使用第 2 圖的反應器實施的處理。在第 8 圖的文字塊 318 的步驟中，RF 電漿源功率通過一個電極（頂部或晶圓）在較高 VHF 頻率 f_1 （例如，大約 162MHz）下電容性耦接，同時 RF 電漿源功率通過相反的電極（晶圓或頂部）在較低 VHF 頻率 f_2 （例如，大約 50-60MHz）下電容性耦接。在文字塊 320 中，對於頻率 f_1 ，提供經過相反電極的中心回路。在文字塊 322 中，對於頻率 f_2 ，提供經過電極的中心回路。在文字塊 324 的步驟中，對於每個頻率 f_1 和 f_2 ，提供經過側壁的邊緣回路。在文字塊 326 的步驟中，通過調節可變帶通濾波器 252，以相對於 f_1 邊緣回路的阻抗來調節 f_1 中心回路的阻抗，好促進在 f_1 頻率下流到中心回路的電流。在文字塊 328 的步驟中，通過調節可變帶通濾波器 254，以相對於 f_2 中心回路的阻抗來調節 f_2 邊緣回路的阻抗，好促進在 f_2 頻率下流到側壁的

電流。在文字塊 330 的步驟中，通過選擇在 $f1$ 頻率下的 VHF 功率與在 $f2$ 頻率下的 VHF 功率之間的比率，控制器 270 可改善徑向電漿離子密度分佈的均勻性。可通過降低在 $f1$ 頻率下的 VHF 功率相對於在 $f2$ 頻率下的 VHF 功率的比率，而實施該步驟，從而降低中心高的電漿離子密度分佈（文字塊 332）。可通過降低在 $f2$ 頻率下的 VHF 功率相對於在 $f1$ 頻率下的 VHF 功率的比率，實施該步驟，從而降低邊緣高的電漿離子密度分佈的非均勻性（文字塊 334）。可選地或除了文字塊 330 的步驟之外，通過調節 $f1$ 和 $f2$ 任一或兩者的中心和邊緣回路的阻抗（通過調節各個帶通濾波器 252、254），控制器 270 可改善均勻性，以實現以下任一個：（a）朝向邊緣引導更多的電流，以抑制中心高的非均勻性或（b）朝向中心引導更多的電流以抑制邊緣高的非均勻性（第 8 圖的文字塊 336）。

第 9 圖示出了可使用第 3A 圖的反應器實施的處理。在第 9 圖的處理中，在較高 VHF 頻率 $f1$ 下經過內部頂電極，在較低 VHF 頻率 $f2$ 下經過外部頂電極而電容性耦接 RF 電漿源功率（第 9 圖的文字塊 338）。在文字塊 340，通過提供耦接到地面的帶通濾波器 252，對頻率 $f1$ 提供經過晶圓的中心回路。在文字塊 342，通過提供耦接到地面的帶通濾波器 254，對頻率 $f2$ 提供經過晶圓的中心回路。在第 9 圖的文字塊 344 中，通過將側壁 202 接地，對每個頻率 $f1$ 和 $f2$ 提供經過側壁 202 的邊緣回路，如第 3A 圖中所示。在文字塊 346 的步驟中，通過調節帶通濾波器 252 的電抗，以相對於 $f1$ 邊緣回路的阻抗來調節 $f1$ 中心回路的阻抗，以促進在 $f1$ 頻率下流到中心回路的電流。在文字塊 348 的步驟中，通過調節帶通濾波器 254 的電抗，以相對

於 f_2 中心回路的阻抗來調節 f_2 邊緣回路的阻抗，以促進在 f_2 頻率下較大的電流流到側壁。在文字塊 350 中，通過選擇在 f_1 頻率下的 VHF 功率與在 f_2 頻率下的 VHF 功率之間的比率，控制器 270 可改善徑向電漿離子密度分佈（或晶圓上的蝕刻速度分佈）的均勻性。通過降低在 f_1 頻率下的 VHF 功率相對於在 f_2 頻率下 VHF 功率之間的比率，可實施該步驟，以降低中心高電漿離子密度分佈（文字塊 352）。或者，通過降低在 f_2 頻率下的 VHF 功率相對於在 f_1 頻率下 VHF 功率之間的比率，可實施該步驟，以降低邊緣高電漿離子密度分佈非均勻性（文字塊 354）。可選地，或者除了文字塊 350 的步驟之外，通過調節 f_1 和 f_2 任一或兩者的中心和邊緣回路的阻抗，控制器 270 可改善電漿離子密度分佈的均勻性（或者晶圓上的蝕刻速度分佈）以實現以下任一：(a) 朝向邊緣引導更多的電流，以抑制中心高的非均勻性或 (b) 朝向中心引導更多的電流以抑制邊緣高的非均勻性（第 9 圖的文字塊 356）。

第 10 圖示出了可在第 2 圖的反應器中通過將兩個 VHF 頻率 f_1 和 f_2 設定成彼此相等（或者至少幾乎彼此相等）而實施的處理。帶通濾波器 252、254 在該情形下用作可變電抗，其可控制或改變在頂部和晶圓處 VHF 電壓（或電流）之間的相位。在第 10 圖的文字塊 358 的步驟中，RF 電漿源功率經過一個電極（頂部或晶圓）在 VHF 頻率下電容性耦接，同時經過相反的電極（晶圓或頂部）在相同的 VHF 頻率下而電容性耦接 RF 電漿源功率。在文字塊 360 中，在第 2 圖的相反電極 226 處提供控制元件諸如可變電抗（例如，可變帶通濾波器 252），以用於控制相位。在文字塊 362 中，在電極 204 處提供控制元件諸如可變阻抗（例如，可

變帶通濾波器 254)，以用於控制相位。在文字塊 364 的步驟中，通過將側壁 202 接地而提供邊緣回路。在文字塊 366 的步驟中，通過控制在電極和相反電極處的 VHF 電流之間的相位差，控制器 270 可改善徑向電漿離子密度分佈的均勻性。通過將相位差朝向 180 度移動，可實施該步驟，以降低中心高電漿離子密度分佈（第 10 圖的文字塊 367）。或者，通過將相位差朝向 0 度移動，可實施文字塊 368 的步驟，以降低邊緣高電漿離子密度分佈非均勻性。

第 11 圖示出了可使用第 5 圖的反應器實施的處理。在第 11 圖的文字塊 370 中，RF 電漿源功率在兩個類似的 VHF 頻率 f_1 和 f_2 下（兩者都在 VHF 帶的較低區域中），分別電容性耦接至電極（第 5 圖的 204）以及相反的電極（第 5 圖的 226）。這表示通過去除高 VHF 頻率（例如，160-200MHz）產生器的成本而節約了重大成本。在第 11 圖的文字塊 372 中，電極 204 耦接到具有 f_1 的奇數（例如，第三）諧波並且位於 VHF 帶的較高區域中的共振頻率的諧振器（第 5 圖的 274），從而產生在奇數（例如，第三）諧波（例如，163MHz）下的 VHF 功率。在文字塊 374，對於 f_1 的第三諧波，提供經過相反電極（第 5 圖的 266）的獨立中心回路，例如通過提供帶通濾波器 252。在文字塊 376，對於 VHF 頻率 f_2 ，例如通過提供帶通濾波器 254，而提供經過電極 204 的獨立中心回路。在文字塊 378，通過將側壁（第 5 圖的 202）接地，對於 f_2 和對於 f_1 的奇數諧波，提供經過側壁的邊緣回路。在文字塊 380 的步驟中，控制器 270 通過調節帶通濾波器 252 的電抗，以相對於 f_1 諧波邊緣回路的阻抗來調節 f_1 諧波中心回路的阻抗，從而促進在 f_1 諧波下流到中心回路的電流。在文字塊

382 的步驟中，控制器 270 通過調節帶通濾波器 254 的電抗，以相對於 $f2$ 中心回路的阻抗而調節 $f2$ 邊緣回路的阻抗，以促進在 $f2$ 頻率下流到側壁的電流。控制器 270 通過選擇 $f1$ 和 $f2$ 產生器之間的 VHF 功率比率，以控制耦接到電漿的 $f1$ 諧波功率與 $f2$ 功率之間的比率，好改善徑向電漿離子密度分佈的均勻性（文字塊 384）。通過降低在 $f1$ 頻率下所產生的 VHF 功率相對於在 $f2$ 頻率下的 VHF 功率之間的比率，可實施該步驟，以減小中心高電漿離子密度分佈（文字塊 386）。或者，通過降低在 $f2$ 頻率下的 VHF 功率相對於在 $f1$ 頻率下所產生的 VHF 功率之間的比率，可實施該步驟，以減小邊緣高電漿離子密度分佈的非均勻性（第 11 圖的文字塊 388）。可選地或除了文字塊 384 的步驟之外，控制器 270 通過調節 $f2$ 和 $f1$ 的諧波的任一個或兩者的中心和邊緣回路的阻抗，可改善電漿離子密度分佈均勻性，以實現以下任一：(a) 朝向邊緣引導更多的電流，以抑制中心高的非均勻性或 (b) 朝向中心引導更多的電流以抑制邊緣高的非均勻性（文字塊 390）。

第 12 圖示出了可在第 5 圖的變型反應器中實施的處理，其中 $f2$ 帶通濾波器 254 和 $f2$ 產生器的位置與匹配 242、246 的位置互換，使得兩個頻率 $f1$ 、 $f2$ 驅動頂電極 204。在文字塊 392，RF 電漿源功率在兩個類似的較低 VHF 頻率 $f1$ 和 $f2$ 下同時提供給電極（例如，第 5 圖的頂電極 204）。在文字塊 394，諧振器（第 5 圖的 274）耦接電極 204，諧振器具有 $f1$ 的奇數諧波的共振頻率，以在奇數諧波下產生 VHF 功率。通過提供倍頻效應的電漿的非線性回應有助於該頻率增頻變頻。在第 12 圖的文字塊 396 中，通過提供耦接到地面的帶通濾波器 252，對 $f1$ 的諧波

提供經過相反電極（第 5 圖的 226）的單獨中心回路。在第 12 圖的文字塊 398 中，通過提供耦接到地面之第 5 圖的帶通濾波器 254，對 VHF 頻率 f_2 提供經過相反電極的單獨中心接地回路。在文字塊 400 中，通過將第 5 圖的側壁 202 接地，對 f_1 的諧波和 f_2 提供經過側壁的邊緣回路。在文字塊 402 中，控制器 270 通過調節第 5 圖的帶通濾波器 252，以相對於 f_1 諧波邊緣回路的阻抗來調節 f_1 諧波中心回路的阻抗，以促進在 f_1 諧波下經過中心回路的電流。在第 12 圖的文字塊 404 中，控制器 270 通過調節第 5 圖的帶通濾波器 254 的電抗，以相對於 f_2 中心回路的阻抗來調節 f_2 邊緣回路的阻抗，以促進在 f_2 頻率下流到側壁的電流。在文字塊 406，控制器 270 通過選擇在 f_1 和 f_2 產生器之間的 VHF 功率比率，以控制耦接到電漿的 f_1 諧波功率和 f_2 功率之間的比率，好改善徑向電漿離子密度分佈的均勻性。通過降低在 f_1 諧波下的 VHF 功率相對於在 f_2 功率下的 VHF 功率的比率，可實施該步驟，以降低中心高電漿離子密度分佈（文字塊 408）。或者，通過降低在 f_2 頻率下的 VHF 功率相對於在 f_1 諧波下的 VHF 功率的比率，可實施該步驟，以降低邊緣高電漿離子密度分佈非均勻性（文字塊 410）。可選地或除了在文字塊 408 的處理之外，通過調節 f_1 諧波和 f_2 的任一個或兩者的中心和邊緣回路的阻抗，控制器 270 可改善均勻性，以實現以下任一：(a) 朝向邊緣引導更多的電流，以抑制中心高的非均勻性或 (b) 朝向中心引導更多的電流以抑制邊緣高的非均勻性（第 12 圖的文字塊 412）。

第 13 圖示出了可在第 6 圖的反應器中實施的處理，其僅使用單一的較低 VHF 頻率產生器（在大約 50-60MHz 之

間)，實現在以上所述的反應器中需要兩個產生器的功能性。在第 13 圖的文字塊 414 中，從具有包括基本較低 VHF 頻率 f 之頻率範圍的可變頻率 VHF 產生器 240 而將 RF 電漿源功率電容性耦接經過電極（例如，第 6 圖的頂電極 204）。在文字塊 416 中，諧振器 274 耦接到電極 204，該諧振器具有共振頻率 F ，其為基本頻率 F 的奇數諧波，從而使用在腔室中的電漿作為非線性混合元素產生在奇數諧波下的 VHF 功率。在文字塊 418 中，通過提供耦接到地面的帶通濾波器 252，對諧波頻率 F 提供經過相反電極（例如，第 6 圖的 ESC 電極 226）的單獨中心回路。在文字塊 420 中，通過提供耦接到地面的帶通濾波器 254，對基本 VHF 頻率 F 提供經過相反電極（第 6 圖的 226）的單獨中心回路。在第 12 圖的文字塊 422 中，通過將第 6 圖的側壁 202 接地，對兩個頻率 f 和 F 提供經過側壁的邊緣回路。在第 12 圖的文字塊 424 中，控制器 270 通過調整可變帶通濾波器 252，以相對於 F 邊緣回路的阻抗來調整 F 中心回路的阻抗，好促進在 F 下流到中心回路的電流。在文字塊 426 中，控制器 270 通過調整可變帶通濾波器 254，以相對於 f 中心回路的阻抗來調整 f 邊緣回路的阻抗，好促進在 f 下流到側壁的電流。在文字塊 428 中，控制器 270 通過控制在（或臨近）基本頻率 f 下的 VHF 功率與在諧波 F 下 VHF 功率之間的比率，以改善電漿離子密度分佈均勻性。這係通過控制從 f 到 F 功率向上轉換的比例而完成。該比例係通過控制 VHF 產生器的可變輸出頻率與基本頻率 f 之間的差異而受到控制。舉例而言，隨著產生器輸出頻率接近基本頻率，由可變頻率產生器 240 所產生的 VHF 功率轉換為（第三）諧波 F 的比例增加。當產生器頻率等於基本

頻率 f 時，可獲得在 F 下的 VHF 功率與在 f 下的 VHF 功率之間的最大比率。通過降低在 F 下的 VHF 功率相對於在 f 下的 VHF 功率的比率，可實施文字塊 428 的步驟，以減小中心高的電漿離子密度分佈（第 13 圖的文字塊 430）。或者，通過降低在 f 下的 VHF 功率相對於在 F 下的 VHF 功率的比率，可實施文字塊 428 的步驟，以減小邊緣高的電漿離子密度分佈不均勻性（第 13 圖的文字塊 432）。可選地或者除了文字塊 428 的步驟之外，控制器 270 可通過調節各個帶通濾波器 252、254，來調整 F 和 f 任一或者兩者的中心和邊緣回路的阻抗好改善均勻性，以實現以下任一：(a) 朝向邊緣引導更多的電流，以抑制中心高的非均勻性或 (b) 朝向中心引導更多的電流以抑制邊緣高的非均勻性。

靜電夾盤 218 的使用有利於高的熱傳遞速率進出晶圓 220，甚至在甚低（mT）腔室壓力下，在該壓力下熱傳遞在沒有靜電夾盤下比較差。此特徵使真空泵 228 成為高強渦輪分子泵，以運行需要極低腔室壓力的腔室方法。這些特徵，搭配可以產生超低到超高電漿離子密度（例如， 10^9 到 10^{11} 離子/立方釐米）的 VHF 功率源 240、242，可提供低腔室壓力（在 mT 範圍內）、在高偏壓或者高熱負載下的高電漿離子密度（在 10^{10} 到 10^{11} 離子/立方釐米範圍內）的新能力，同時保持對晶圓溫度和電漿離子密度分佈均勻性的完全控制。這些特徵，包含於第 1A-6 圖的反應器中，滿足了特定處理諸如介電蝕刻電漿處理和電漿浸沒離子注入處理之特定處理的需求，其施加高熱負載同時需要低腔室壓力和高電漿離子密度。然而，這些反應器能在寬範圍的腔室壓力（mT 到 Torr）、寬範圍的晶圓熱負載和寬範圍

的電漿離子密度（例如， 10^9 到 10^{11} 離子/立方釐米）下執行。因此，第 1-6 圖的反應器還可應用於在高或低腔室壓力以及高或低電漿離子密度下實施之其他處理，諸如電漿增強化學氣相沉積（PECVD）、電漿增強物理氣相沉積（PEPVD）、電漿摻雜和電漿增強材料改性。

雖然前述係關於本發明的實施方式，但是在不脫離本發明的基本範圍下，本發明還承認本發明的其他和進一步的實施方式，且本發明的範圍係由以下的申請專利範圍所確定。

【圖式簡單說明】

爲了能獲得並能詳細理解本發明的以上所述實施方式，將參照在附圖中示出的實施方式對以上的概述進行更加詳細的描述。然而，應該注意到，附圖僅示出了本發明的典型實施方式，並因此其不能被理解爲是對本發明範圍的限制，因爲本發明可承認其他等效的實施方式。

第 1A 圖示出了具有施加到頂電極的多 VHF 源功率頻率的電漿反應器；

第 1B 圖描述了在第 1A 圖的反應器中控制 RF 接地回路的阻抗的可變電抗或帶通濾波器的元件；

第 2 圖示出了具有施加到相對電極的不同 VHF 頻率的電漿反應器；

第 3A 圖和第 3B 圖示出了具有施加到各個同心電極的不同 VHF 頻率的電漿反應器；

第 4 圖示出了具有施加到陰極電極的不同 VHF 頻率的電漿反應器；

第 5 圖示出了具有兩個 VHF 源功率頻率的電漿反應

器，其中高 VHF 源功率頻率為利用低 VHF 頻率產生器和第三諧波諧振器而產生；

第 6 圖示出了電漿反應器，其在具有第三諧波諧振器的 VHF 頻段的低部分（例如，50-60MHz）中具有單一 VHF 可變頻率產生器，從而在通過改變產生器輸出頻率而確定的功率級別下而產生在 VHF 帶的高部分（例如，大於 100MHz）中產生 VHF 頻率組分；

第 7 圖示出了可利用第 1A 圖的反應器實施的處理；

第 8 圖示出了可利用第 2 圖的反應器實施的處理；

第 9 圖示出了可利用第 3A 圖的反應器實施的處理；

第 10 圖示出了可通過將兩個 VHF 頻率 f_1 和 f_2 設置成彼此相等而可以在第 2 圖的反應器中實施的處理；

第 11 圖示出了可利用第 5 圖的反應器實施的處理；

第 12 圖示出了第 5 圖的反應器的變型中可實施的處理，其中 f_2 帶通濾波器 254 和 f_2 產生器以及匹配 242、246 的位置互換；

第 13 圖示出了僅使用單一低 VHF 頻率產生器可在第 6 圖的反應器中實施的處理。

爲了有助於理解，盡可能使用相似的元件符號表示附圖中共有的相似元件。在圖裏面的附圖僅是示意性的並且沒有按比例繪製。

【主要元件符號說明】

200 腔室	202 側壁
203 間隙	204 頂部
204a 頂部內部區段	204b 頂部外部區段

204c	頂部底表面	206	內頂部區域
208	外頂部區域	210	內部氣體歧管
212	外部氣體歧管	214	內部氣體供應器
216	外部氣體供應器	217	接地外殼
218	底座	219	環
220	晶圓/工件	222	導電底層
224	絕緣頂層	226	電極
228	真空泵	229	狹口閥
230	腔室底部	232	底座支柱
234	升降機構	236	直流供應器
240、242、262、266	功率產生器		
244、246	匹配網路		
248、250、253、255	陷波濾波器		
252、254	帶通濾波器	256、260	電容器
258	感應器	264、268	阻抗匹配
270	控制器	272	測量儀器
274	諧振器		
302、304、306、308、310、312、314、316、318、320、			
322、324、326、328、330、332、334、336、338、340、			
342、344、346、348、350、352、354、356、358、360、			
362、364、366、368、370、372、374、376、378、380、			
382、384、386、388、390、392、394、396、398、400、			
402、404、406、408、410、412、414、416、418、420、			
422、424、426、428、430、432、434	步驟		

200845090

五、中文發明摘要：

本發明提供一種用於在具有數個電極的電漿反應室中處理工件的方法，其中該些電極至少包含頂電極和工件支撐電極。該方法包括將各個 VHF 頻率 f_1 和 f_2 的各自 RF 功率源耦接到以下其中之一：(a) 各自的電極或 (b) 該些電極的公共電極，其中 f_1 高到足以產生中心高的非均勻電漿離子分佈，而 f_2 低到足以產生中心低的非均勻電漿離子分佈。該方法進一步包括調整在 f_1 頻率下的 RF 參數與在 f_2 頻率下的 RF 參數之間的比率，從而控制電漿離子密度分佈，RF 參數可以是以下其中之一：RF 功率、RF 電壓或 RF 電流。

六、英文發明摘要：

A method is provided for processing a workpiece in a plasma reactor chamber having electrodes including at least a ceiling electrode and a workpiece support electrode. The method includes coupling respective RF power sources of respective VHF frequencies f_1 and f_2 to either (a) respective ones of the electrodes or (b) a common one of the electrodes, where f_1 is sufficiently high to produce a center-high non-uniform plasma ion distribution and f_2 is sufficiently low to produce a center-low non-uniform plasma ion distribution. The method further includes adjusting a ratio of an RF parameter at the f_1 frequency to the RF parameter at the f_2 frequency so as to control plasma ion density distribution, the RF parameter being any one of RF power, RF voltage or RF current.

十、申請專利範圍：

1. 一種在具有數個電極的一電漿反應室中處理一工件的方法，其中該些電極至少包括一頂電極和一工件支撐電極，該方法包含：

將各個 VHF 頻率 f_1 和 f_2 的各自 RF 功率源耦接到以下其中之一：(a) 各自的電極，以及 (b) 該些電極的一公共電極，其中 f_1 高到足以產生一中心高的非均勻電漿離子分佈，而 f_2 低到足以產生一中心低的非均勻電漿離子分佈；

調整在該 f_1 頻率下的一 RF 參數與在該 f_2 頻率下的一 RF 參數之間的一比率，從而控制電漿離子密度分佈，該 RF 參數可以為以下其中之一：(a) RF 功率、(b) RF 電壓以及 (c) RF 電流。

2、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中 f_1 係大於約 110 MHz 而 f_2 係小於約 90 MHz。

3、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中該調整步驟包含：

通過降低在該 f_1 頻率下的 RF 參數相對於在該 f_2 頻率下的 RF 參數之比率而減小一中心高的電漿離子密度分佈。

4、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中該調整步驟包含：

通過降低在該 f_2 頻率下的 RF 參數相對於在該 f_1 頻率下的 RF 參數的比率而減小一邊緣高的電漿離子密度分佈不均勻性。

5、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，進一步包含：

對該些頻率 f_1 和 f_2 元件提供直接經過該頂電極與該工件支撐電極之間的 RF 電流之各自的中心接地回路；

對各個該些頻率 f_1 和 f_2 提供一邊緣接地回路。

6、如申請專利範圍第 5 項所述之方法，進一步包含：

調整對應於該頻率 f_1 之該中心接地回路的阻抗，從而增加或降低該 RF 功率在 f_1 頻率下產生電漿離子密度分佈中之中心高的非均勻性之趨勢。

7、如申請專利範圍第 5 項所述之方法，進一步包含：

調整對應於該頻率 f_2 之該中心接地回路的阻抗，從而增加或降低該 RF 功率在 f_2 頻率下產生電漿離子密度分佈中之中心低或邊緣高的非均勻性之趨勢。

8、如申請專利範圍第 5 項所述之方法，進一步包含：

調整至少一個中心接地回路的阻抗，以控制電漿離子密度分佈。

9、如申請專利範圍第 8 項所述之方法，其中執行該調

整阻抗的步驟，以增加該邊緣接地回路中的電流，從而抑制一中心高的非均勻性。

10、如申請專利範圍第 8 項所述之方法，其中執行該調整阻抗的步驟，以增加該中心接地回路中的電流，從而抑制一邊緣高的非均勻性。

11、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中：

該耦接步驟包含將該頻率 f_1 的 RF 功率源耦接到該室的頂電極，同時將該頻率 f_2 的 RF 功率源耦接到該工件支撐電極。

12、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中：

該耦接步驟包含將該頻率 f_1 的 RF 功率源和該頻率 f_2 的 RF 功率源耦接到該頂電極。

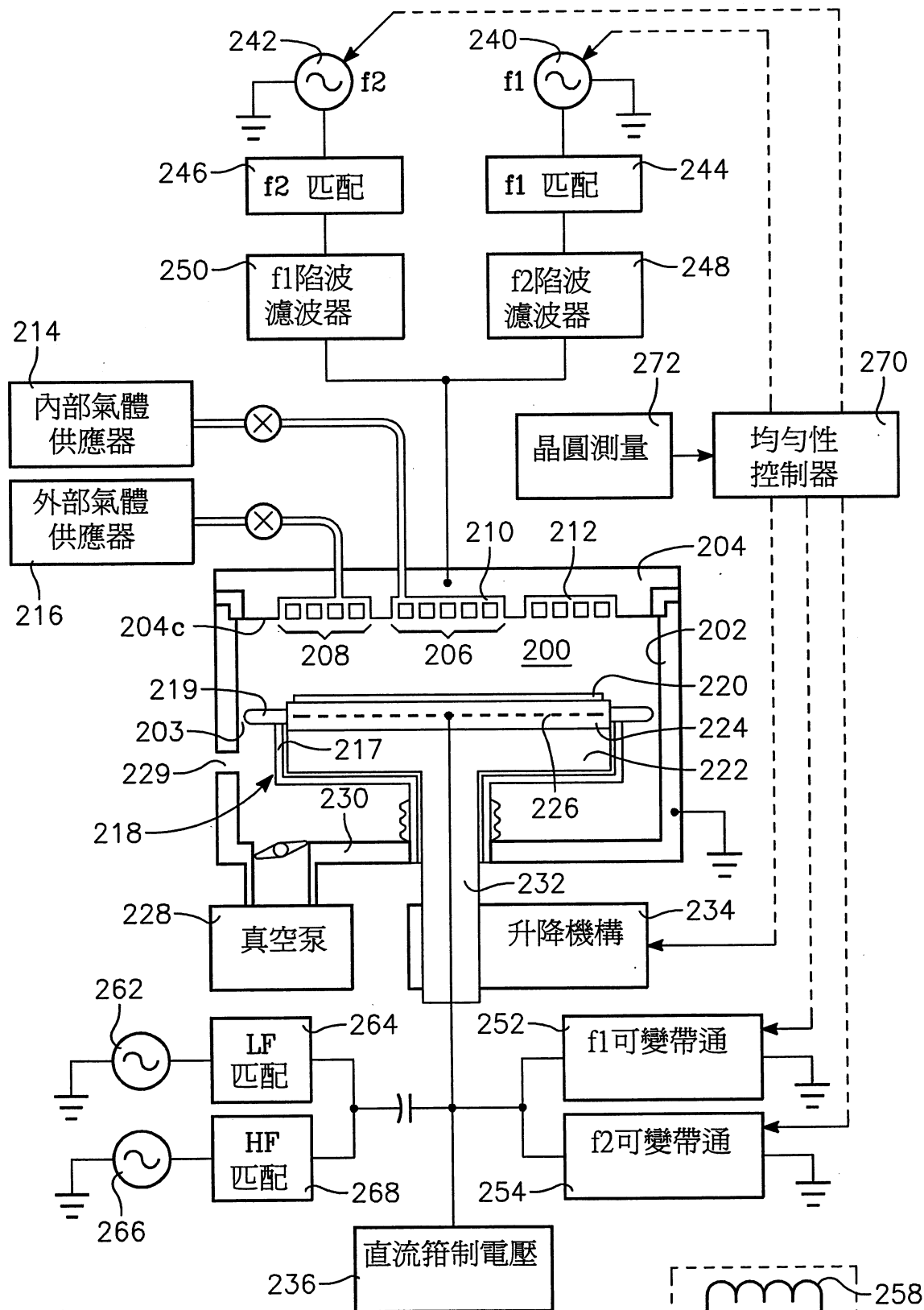
13、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中該耦接步驟包含：

將該頻率 f_1 的 RF 功率源耦接到一第一頂電極，並且將該頻率 f_2 的 RF 功率源耦接到一第二頂電極，其中該第二頂電極與該第一頂電極同心。

14、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中該耦接步驟包含：

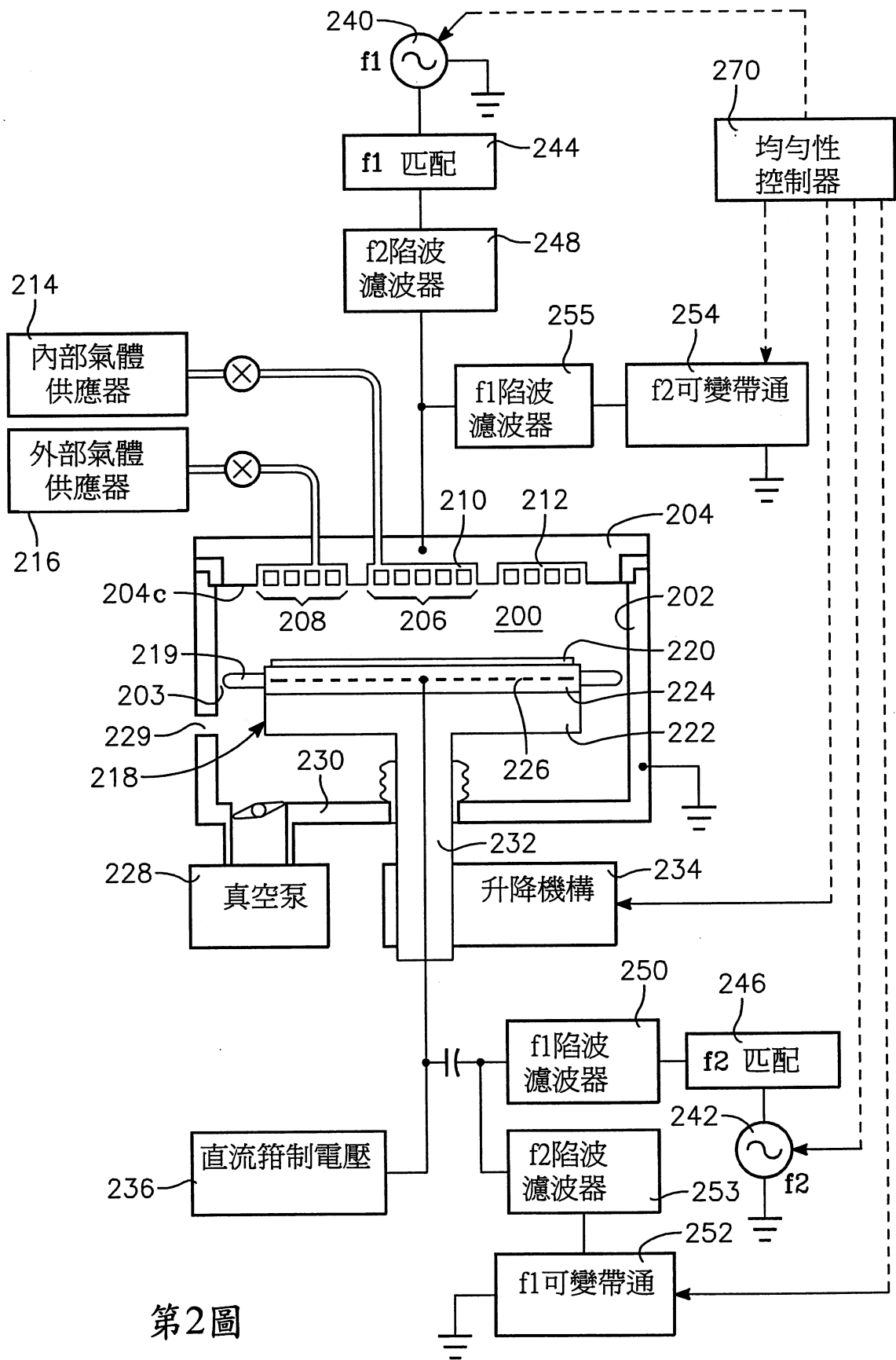
自一基本頻率 f_0 產生該頻率 f_1 的 RF 功率， f_1 為 f_0 的諧波，係利用一諧振器調諧到 f_1 並且使用該室中的電漿作為一非線性混合器。

15、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，進一步包含：
通過調整該工件與該頂電極之間的一間隙，而調整該電漿離子密度分佈。

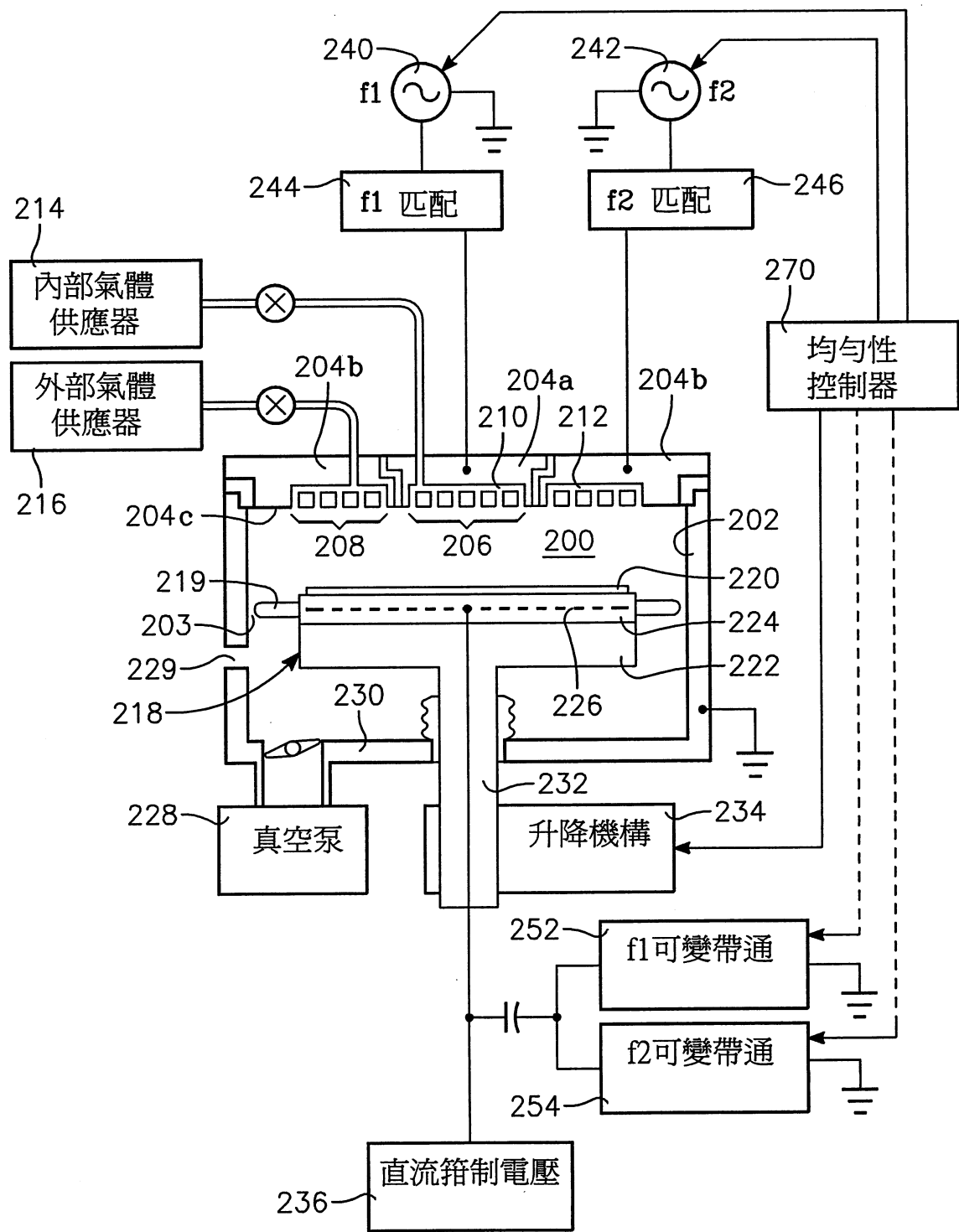


第1A圖

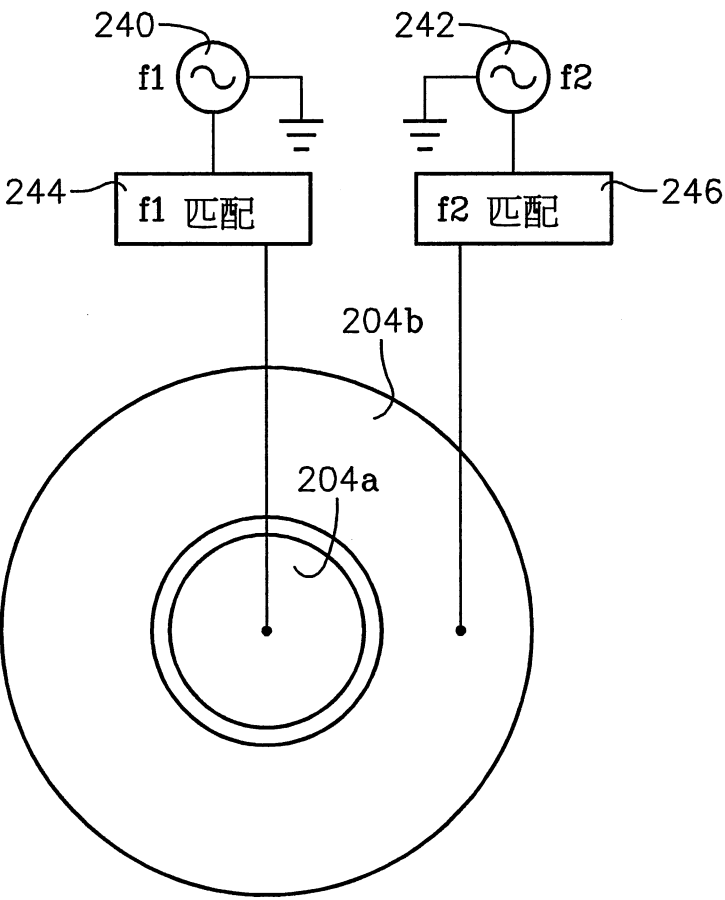
第1B圖



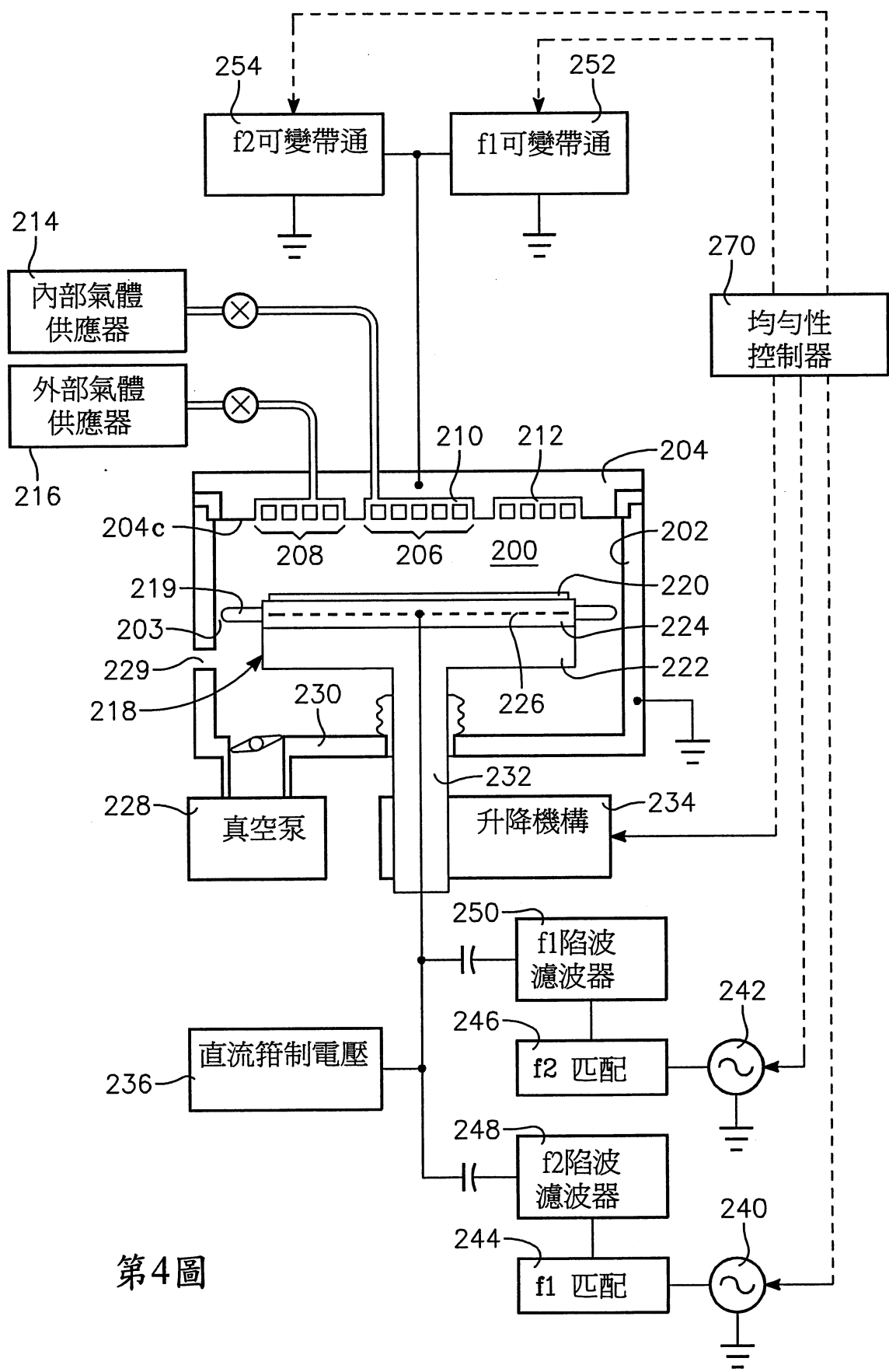
第2圖



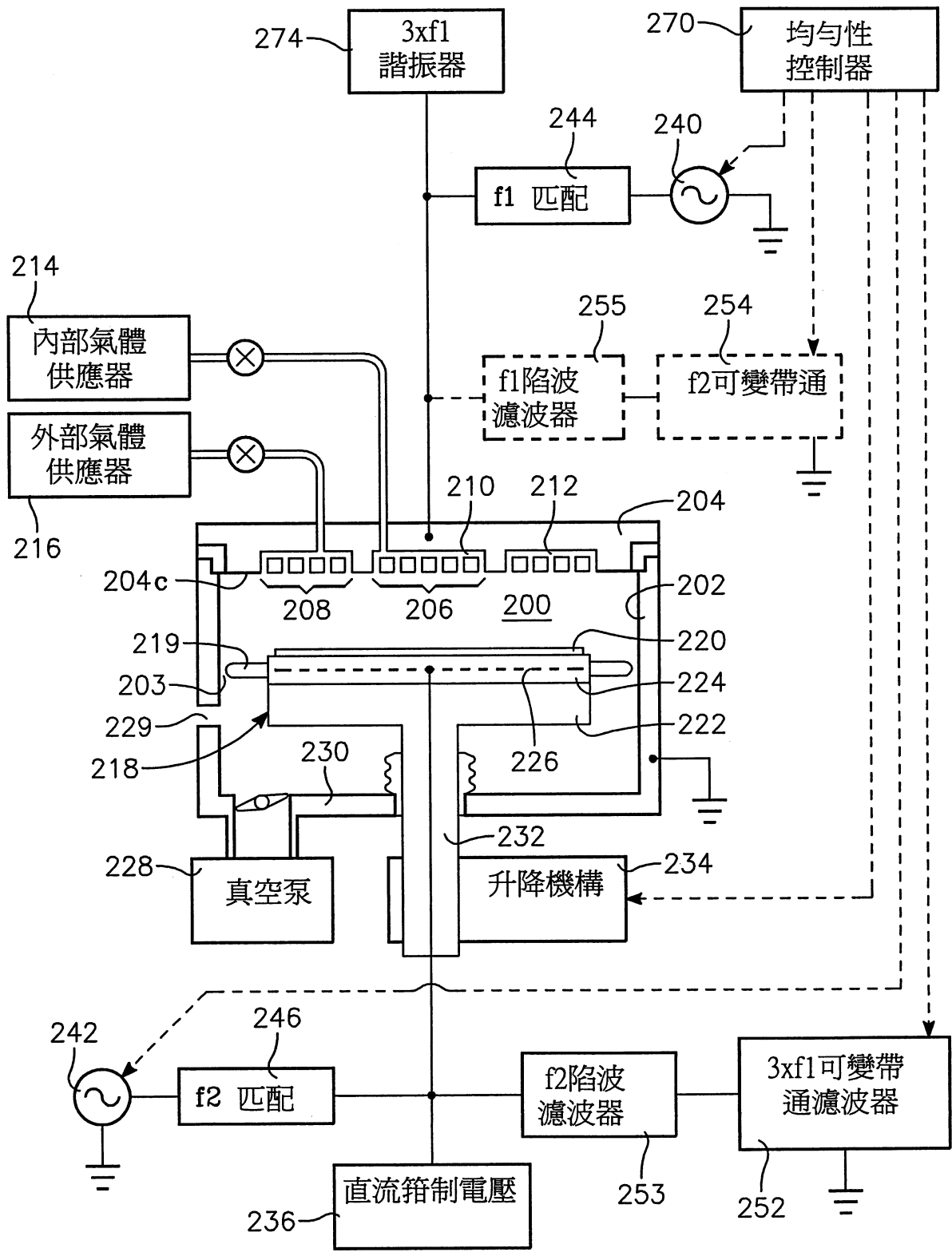
第3A圖



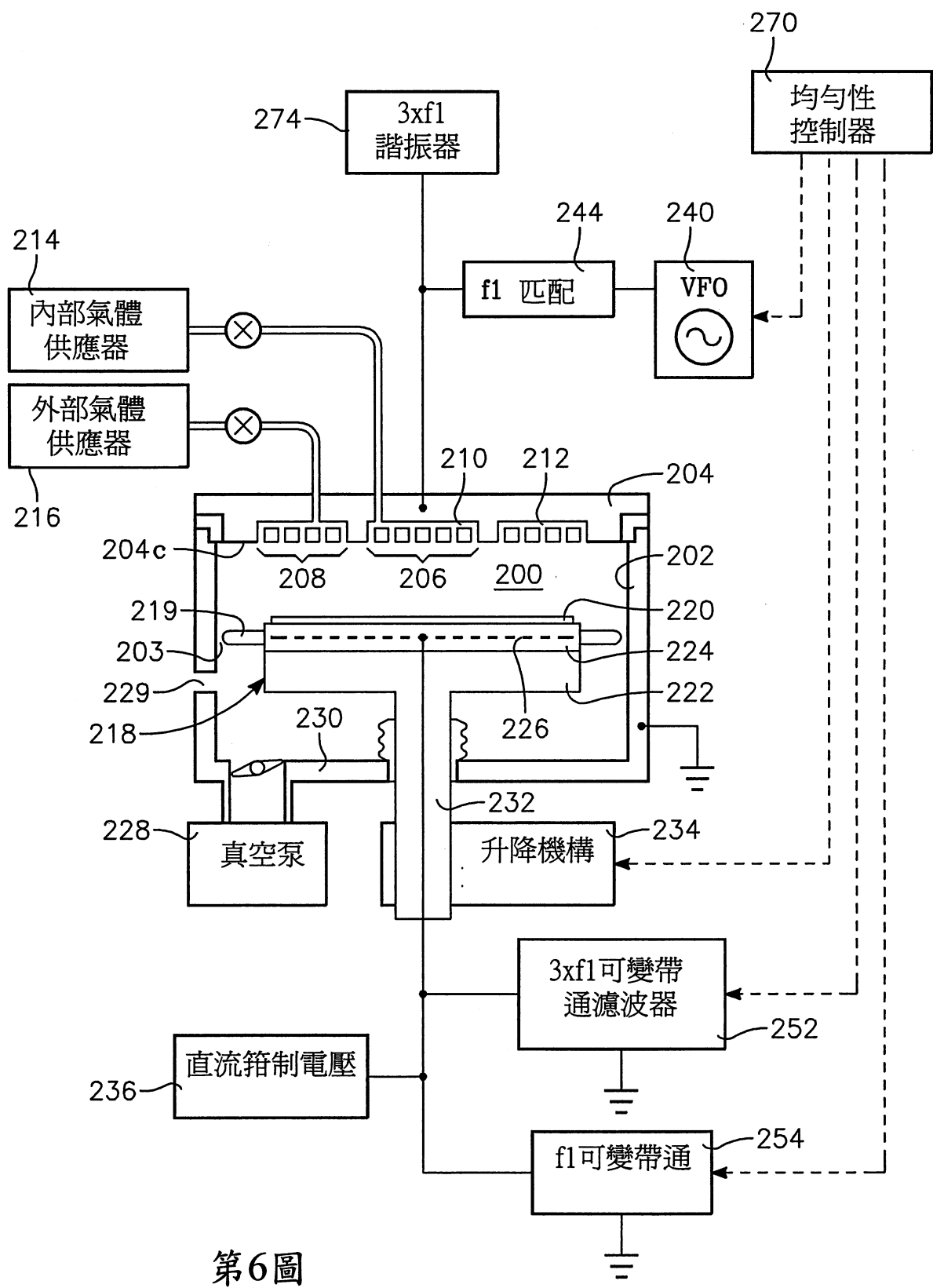
第3B圖



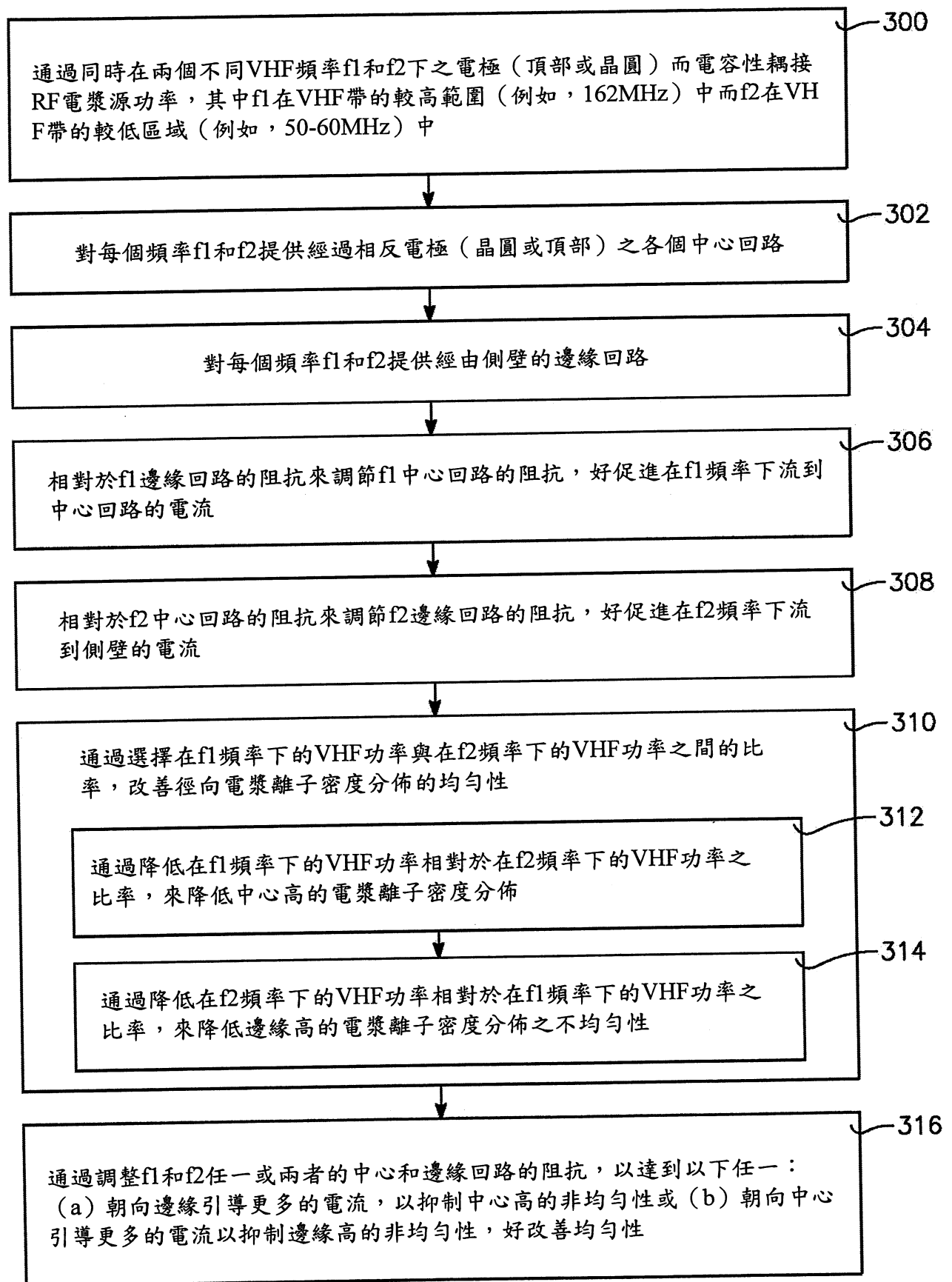
第4圖



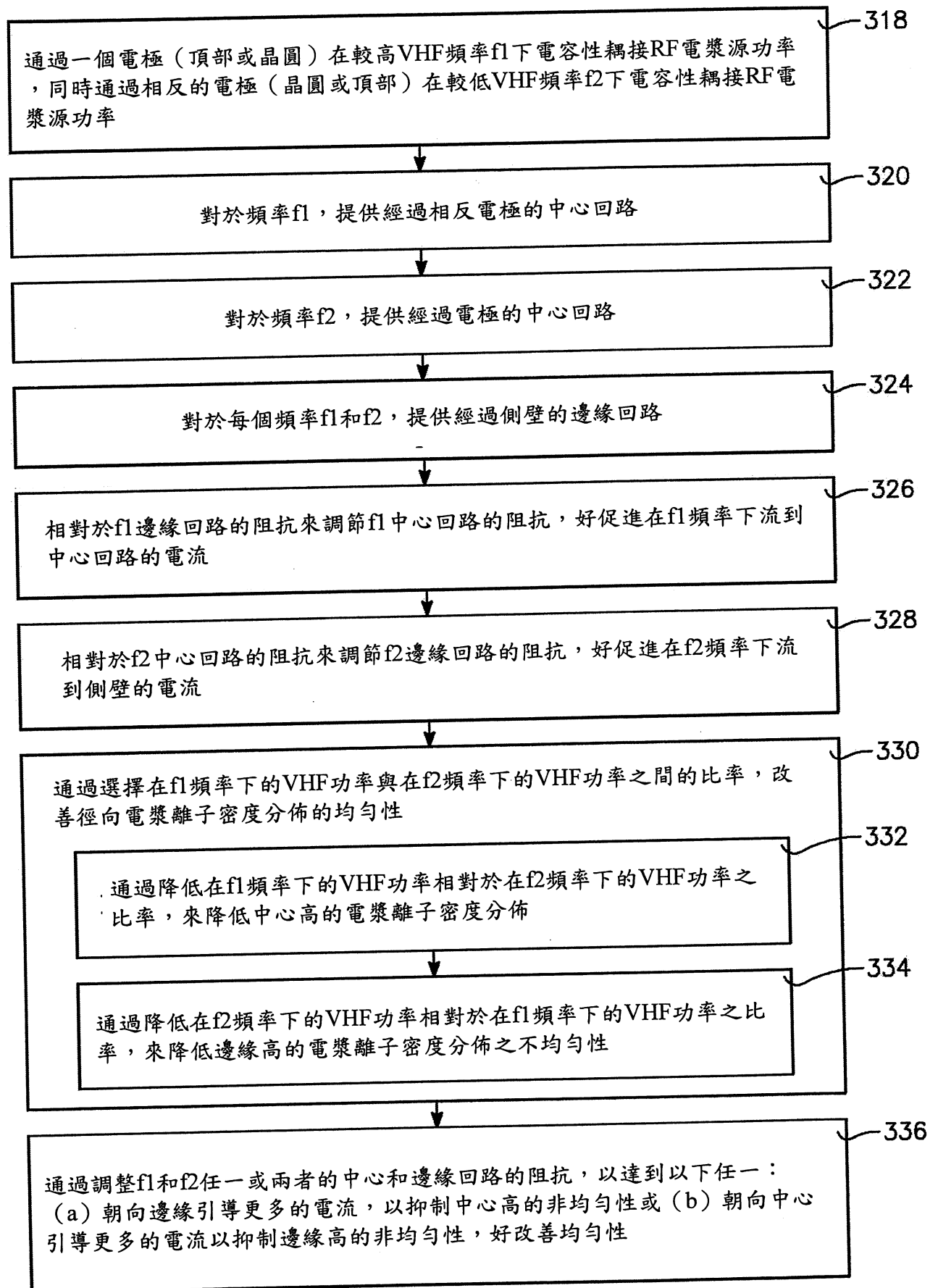
第5圖



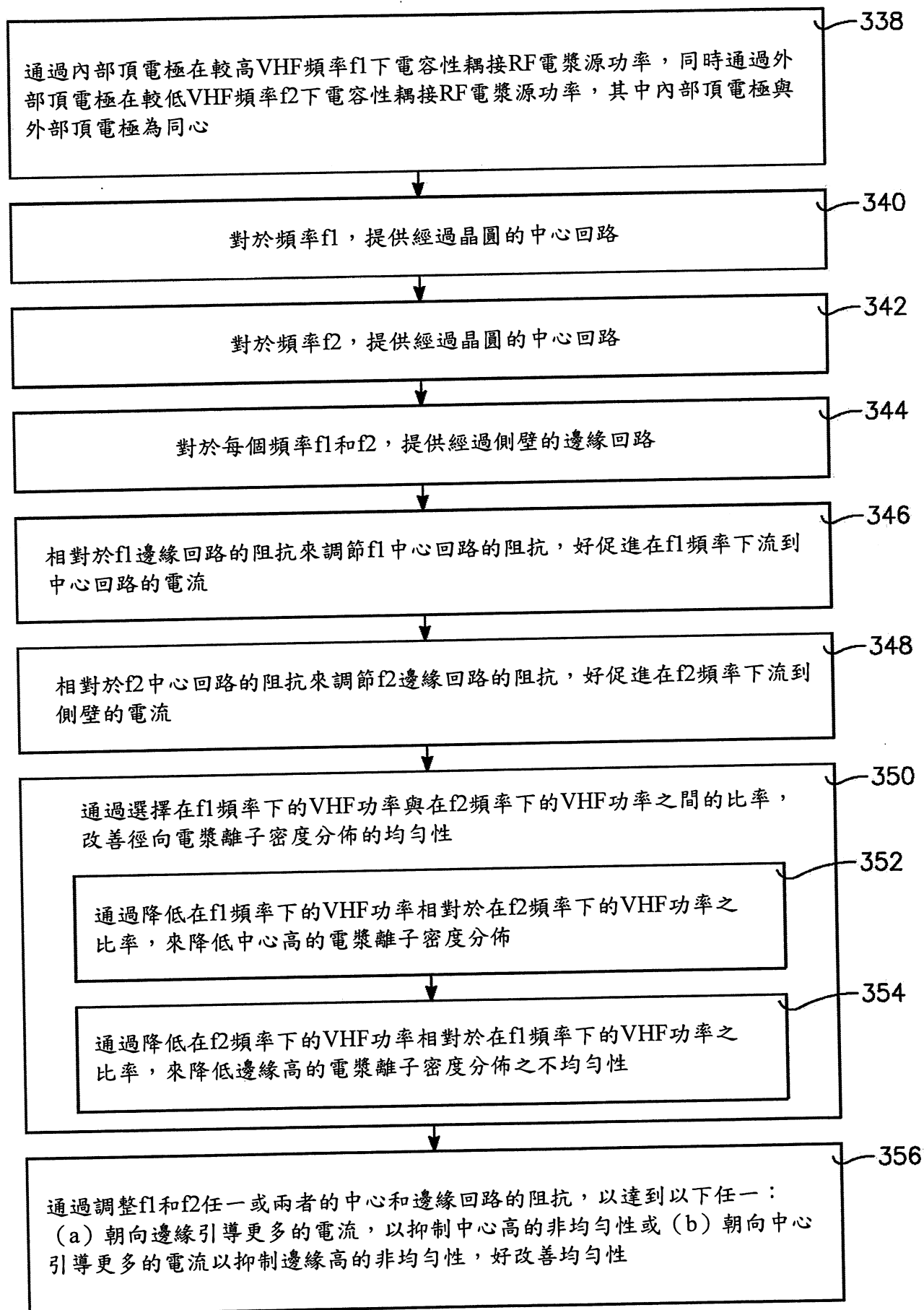
第6圖



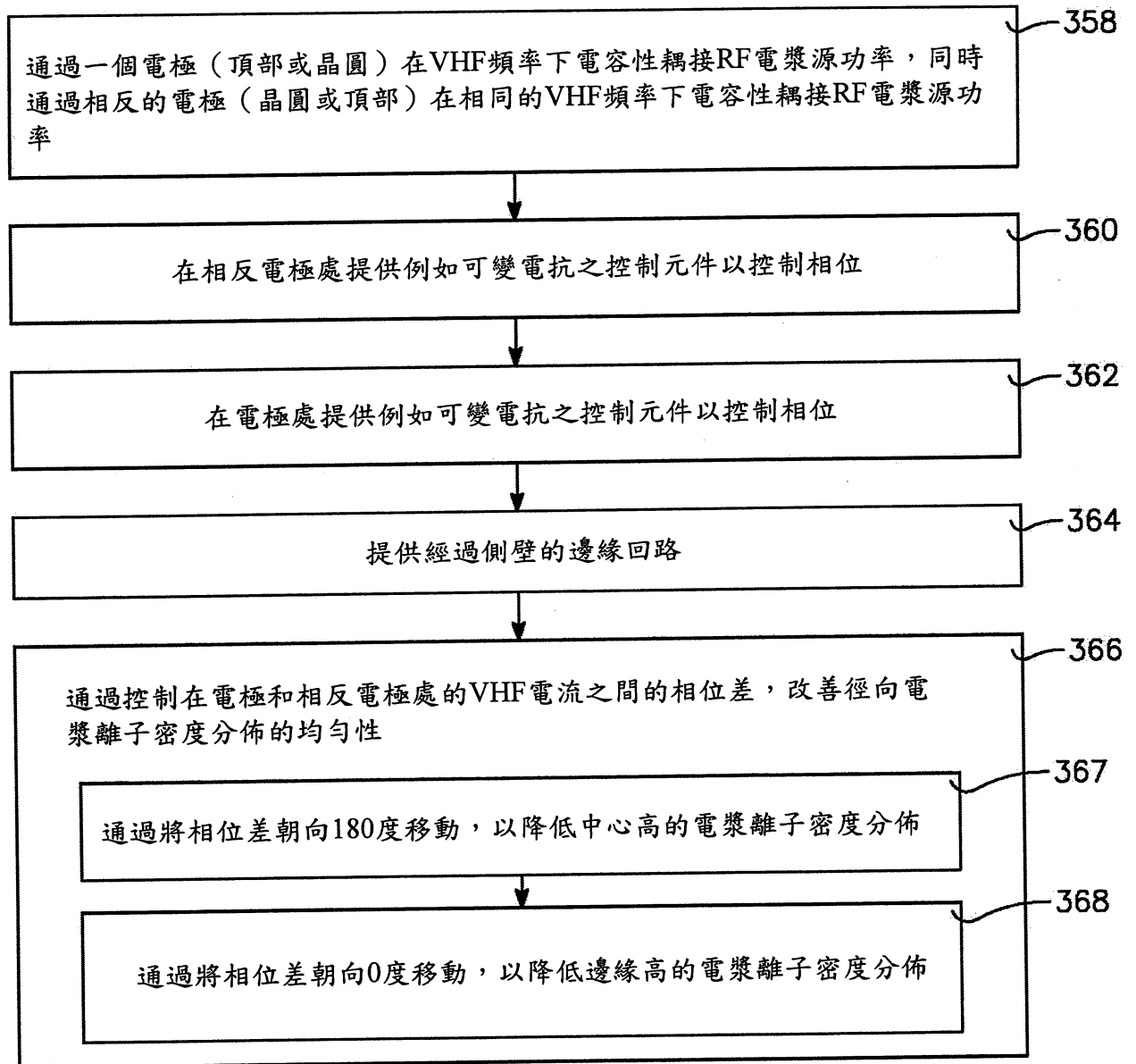
第 7 圖



第 8 圖



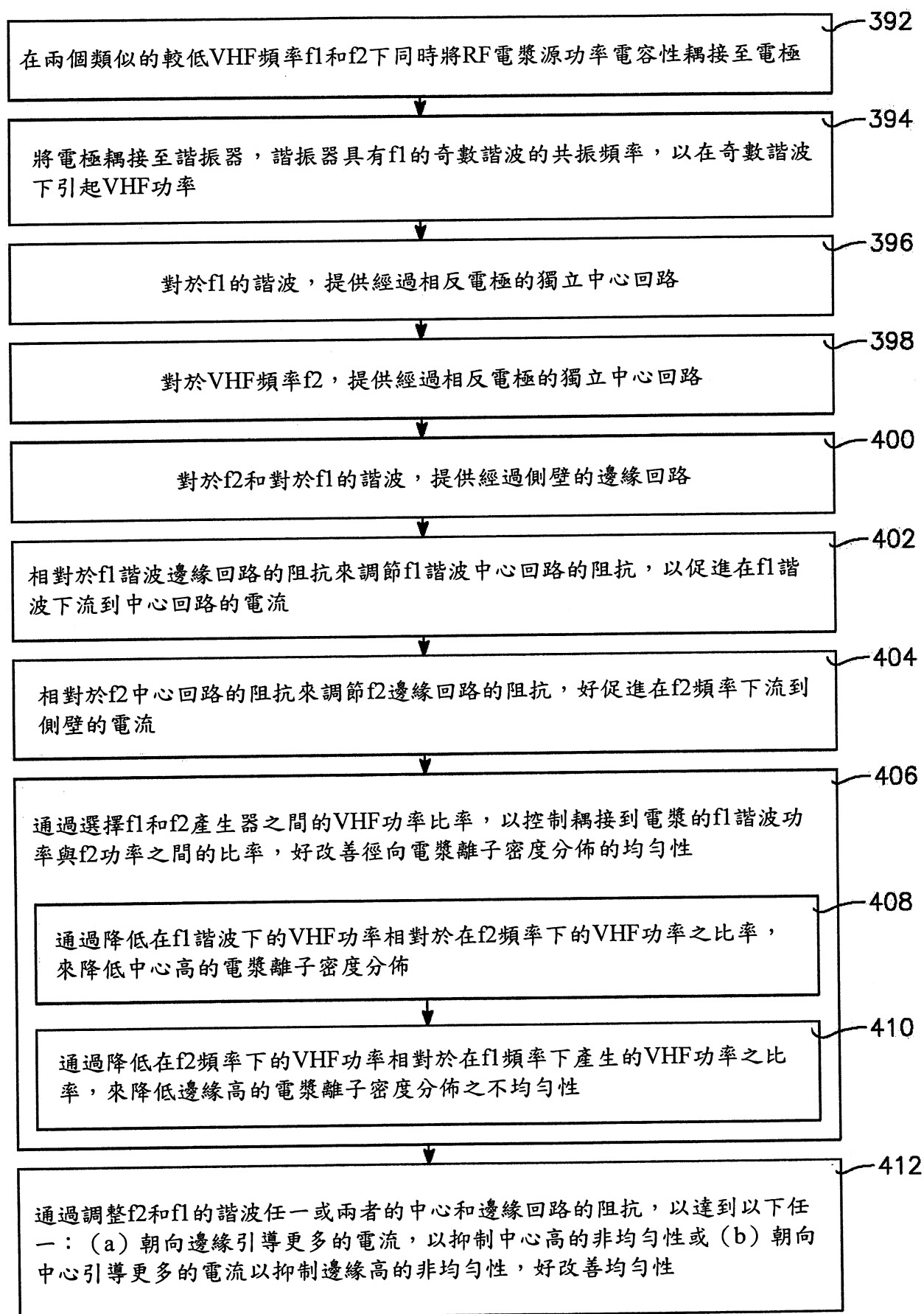
第 9 圖



第 10 圖



第 11 圖



第 12 圖



第 13 圖

七、指定代表圖：

(一)、本案指定代表圖為：第 1A 圖。

(二)、本代表圖之元件代表符號簡單說明：

200	腔室	202	側壁
203	間隙	204	頂部
204c	頂部底表面	206	內頂部區域
208	外頂部區域	210	內部氣體歧管
212	外部氣體歧管	214	內部氣體供應器
216	外部氣體供應器	217	接地外殼
218	底座	219	環
220	晶圓/工件	222	導電底層
224	絕緣頂層	226	電極
228	真空泵	229	狹口閥
230	腔室底部	232	底座支柱
234	升降機構	236	直流供應器
240、242、262、266 功率產生器			
244、246 匹配網路			
248、250	陷波濾波器	252、254	帶通濾波器
264、268	阻抗匹配	270	控制器
272	測量儀器		

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

無