

【發明說明書】

【中文發明名稱】

利用結合電場之小型微波電漿施加器

【英文發明名稱】

COMPACT MICROWAVE PLASMA APPLICATOR UTILIZING
CONJOINING ELECTRIC FIELDS

【技術領域】

本發明係關於電漿施加器且特定言之，係關於一種利用結合電場之小型微波電漿施加器。

【先前技術】

在半導體處理中，通常在一處理腔室之上游採用電漿產生器。在電漿產生器中，能量通常耦合至流動通過定位於一微波腔中之一電漿放電管之一氣體，且電漿藉由微波能量在氣體中激發。電漿產物向下游流動通過電漿放電管至處理腔室中，且撞擊在諸如一半導體晶圓之一工件上。

在電漿產生系統中，能量效率及成本係重要考量。在習知高能量(例如，大於5 kW微波功率)電漿產生器中，電漿放電管可達到極高溫度。為了減少高溫之效應，通常採用冷卻系統。一般言之，使液體冷卻劑(例如，水)循環通過繞管之一銅繞組/線圈以移除過量熱。此等液體冷卻系統趨於非常昂貴，但由於高功率位準下之高溫而係不可避免的。由於空氣冷卻之減小之複雜性及成本，較佳在電漿產生器中使用空氣冷卻，但空氣冷卻通常僅可用於使用較低功率(例如，1 kW或更小微波功率)之系統中，此係因為空氣冷卻有效對抗在電漿放電管中產生之相對較低溫度。

又，由於用於激發氣體以在電漿放電管中產生電漿之非均勻激發能

量型樣(例如，電場)，可依一非均勻空間型樣產生電漿，從而導致管中之電漿能量(及因此溫度)在其處尤其高之「熱點」。此等「熱點」引發電漿產生製程中之低效率。又，無論使用空氣冷卻或水冷卻，其等對冷卻系統提出一非均勻溫度控制負擔。出於此及其他原因，可高度期望用於在電漿放電管中產生電漿之微波能量(及尤其電場)空間上均勻，使得所得電漿相對無熱點。

【發明內容】

根據一第一態樣，提供一種電漿施加器。該電漿施加器包含其中可產生電漿之一電漿放電管，該電漿放電管具有用於容許一電漿製程氣體進入該電漿放電管之一製程氣體入口，該電漿放電管具有一縱向軸線。一微波腔至少部分包圍該電漿放電管之一部分。該電漿施加器包含一耦合虹膜(iris)，在該耦合虹膜處微波能量可耦合至該微波腔，使得該微波能量可在該電漿放電管之該部分中產生一電漿。該微波腔具有三個正交尺寸，包含一長度、一寬度及一高度，該等正交尺寸之至少兩者經選擇使得該微波腔中之該微波能量在一橫向電(TE)模式中傳播。

在一些實施例中，自該微波能量產生之主電場與自該耦合虹膜產生之一消散電場組合，使得該微波腔中之一組合電場沿著該電漿放電管之該縱向軸線係實質上均勻的。

在一些實施例中，該微波能量具有約1 kW之一功率。

在一些實施例中，該電漿放電管之一長度係約11英吋。

在一些實施例中，該電漿放電管之一外徑係約1英吋。

在一些實施例中，該微波腔之一寬度係約3英吋。

在一些實施例中，該微波腔之一長度係約4.5英吋。

在一些實施例中，該微波能量之一源包括一固態產生器。

在一些實施例中，該微波能量之一源包括一磁控管。

在一些實施例中，該電漿放電管係由包含石英、藍寶石、陶瓷、氮化鋁及氮化硼之至少一者之一材料製成。

在一些實施例中，該製程氣體包括氧氣、氮氣、氫氣、氟化氣體、合成氣體、 NF_3 、 NH_3 、 C_2F_4 及 C_2F_6 之至少一者。

在一些實施例中，該電漿施加器進一步包括安置於該電漿放電管之一外部且安置於該微波腔之末端處用於實質上將該微波能量圍阻在該微波腔中之複數個徑向微波扼流圈，該等微波扼流圈之位置係使得在該TE模式及橫向電磁(TEM)模式中傳播之微波能量衰減。在一些實施例中，該複數個徑向微波扼流圈包括定位於該微波腔之一第一末端處之一第一內部扼流圈及一第一外部扼流圈及定位於該微波腔之一第二末端處之一第二內部扼流圈及一第二外部扼流圈，該第一內部扼流圈與該第一外部扼流圈之間之一第一空間及該第二內部扼流圈與該第二外部扼流圈之間之一第二空間經選擇以提供在該TE模式及該TEM模式中傳播之該微波能量之衰減。該第一空間及該第二空間可實質上相等，且在一特定例示性實施例中，該等空間之至少一者係約0.38英吋。

根據另一態樣，提供一種電漿施加器。該電漿施加器包含其中可產生電漿之一電漿放電管，該電漿放電管具有用於容許一電漿製程氣體進入該電漿放電管之一製程氣體入口，該電漿放電管具有一縱向軸線。一微波腔至少部分包圍該電漿放電管之一部分。該電漿施加器包含一耦合虹膜，在該耦合虹膜處微波能量可耦合至該微波腔，使得該微波能量可在該電漿放電管之該部分中產生一電漿。自該微波能量產生之主電場與自該耦合虹

膜產生之一消散電場組合，使得該微波腔中之一組合電場沿著該電漿放電管之該縱向軸線係實質上均勻的。

在一些實施例中，該微波腔具有三個正交尺寸，包含一長度、一寬度及一高度，該等正交尺寸之至少兩者經選擇使得該微波腔中之該微波能量在一橫向電(TE)模式中傳播。

在一些實施例中，該電漿施加器進一步包括安置於該電漿放電管之一外部且安置於該微波腔之末端處用於實質上將該微波能量圍阻在該微波腔中之複數個徑向微波扼流圈，該等微波扼流圈之位置係使得在該TE模式及橫向電磁(TEM)模式中傳播之微波能量衰減。在一些實施例中，該複數個徑向微波扼流圈包括定位於該微波腔之一第一末端處之一第一內部扼流圈及一第一外部扼流圈及定位於該微波腔之一第二末端處之一第二內部扼流圈及一第二外部扼流圈，該第一內部扼流圈與該第一外部扼流圈之間之一第一空間及該第二內部扼流圈與該第二外部扼流圈之間之一第二空間經選擇以提供在該TE模式及該TEM模式中傳播之該微波能量之衰減。該第一空間及該第二空間可實質上相等，且在一特定例示性實施例中，該等空間之至少一者係約0.38英吋。

在一些實施例中，該微波能量具有約1 kW之一功率。

在一些實施例中，該電漿放電管之一長度係約11英吋。

在一些實施例中，該電漿放電管之一外徑係約1英吋。

在一些實施例中，該微波腔之一寬度係約3英吋。

在一些實施例中，該微波腔之一長度係約4.5英吋。

在一些實施例中，該微波能量之一源包括一固態產生器。

在一些實施例中，該微波能量之一源包括一磁控管。

在一些實施例中，該電漿放電管係由包含石英、藍寶石、陶瓷、氮化鋁及氮化硼之至少一者之一材料製成。

在一些實施例中，該製程氣體包括氧氣、氮氣、氫氣、氟化氣體、合成氣體、 NF_3 、 NH_3 、 C_2F_4 及 C_2F_6 之至少一者。

根據另一態樣，提供一種電漿施加器。該電漿施加器包含其中可產生電漿之一電漿放電管，該電漿放電管具有用於容許一電漿製程氣體進入該電漿放電管之一製程氣體入口，該電漿放電管具有一縱向軸線。一微波腔至少部分包圍該電漿放電管之一部分。該電漿施加器包含一耦合虹膜，在該耦合虹膜處微波能量可耦合至該微波腔，使得該微波能量可在該電漿放電管之該部分中產生一電漿。複數個徑向微波扼流圈安置於該電漿放電管之一外部且安置於該微波腔之末端處用於實質上將該微波能量圍阻在該微波腔中，該等微波扼流圈之位置係使得在一橫向電(TE)模式及一橫向電磁(TEM)模式中傳播之微波能量衰減。

在一些實施例中，該複數個徑向微波扼流圈包括定位於該微波腔之一第一末端處之一第一內部扼流圈及一第一外部扼流圈及定位於該微波腔之一第二末端處之一第二內部扼流圈及一第二外部扼流圈，該第一內部扼流圈與該第一外部扼流圈之間之一第一空間及該第二內部扼流圈與該第二外部扼流圈之間之一第二空間經選擇以提供在該TE模式及該TEM模式中傳播之該微波能量之衰減。該第一空間及該第二空間可實質上相等，且在一特定例示性實施例中，該等空間之至少一者係約0.38英吋。

在一些實施例中，該微波腔具有三個正交尺寸，包含一長度、一寬度及一高度，該等正交尺寸之至少兩者經選擇使得該微波腔中之該微波能量在一橫向電(TE)模式中傳播。

在一些實施例中，自該微波能量產生之主電場與自該耦合虹膜產生之一消散電場組合，使得該微波腔中之一組合電場沿著該電漿放電管之該縱向軸線係實質上均勻的。

在一些實施例中，該微波能量具有約1 kW之一功率。

在一些實施例中，該電漿放電管之一長度係約11英吋。

在一些實施例中，該電漿放電管之一外徑係約1英吋。

在一些實施例中，該微波腔之一寬度係約3英吋。

在一些實施例中，該微波腔之一長度係約4.5英吋。

在一些實施例中，該微波能量之一源包括一固態產生器。

在一些實施例中，該微波能量之一源包括一磁控管。

在一些實施例中，該電漿放電管係由包含石英、藍寶石、陶瓷、氮化鋁及氮化硼之至少一者之一材料製成。

在一些實施例中，該製程氣體包括氧氣、氮氣、氫氣、氟化氣體、合成氣體、 NF_3 、 NH_3 、 C_2F_4 及 C_2F_6 之至少一者。

【圖式簡單說明】

參考所附複數個圖式藉由本發明之實施例之非限制性實例，在下文之詳細描述中進一步描述本發明，其中貫穿圖式之若干視圖之類似元件符號表示類似零件。

圖1包含根據例示性實施例之一小型低功率電漿施加器之一示意性橫截面圖。

圖2A及圖2B包含根據例示性實施例之包含圖1之電漿施加器之兩個電漿產生系統之示意性方塊圖。

圖3A及圖3B係繪示一矩形 TE_{10} 模式波導之傳播及場型樣之示意圖。

圖4A係其中扼流圈未相對於彼此最佳定位之一電漿施加器之一示意圖。

圖4B包含繪示起因於圖4A中繪示之扼流圈位置之針對多個電漿密度條件之一電漿施加器之一微波腔中之所得電場衰減之圖表。

圖5A係根據例示性實施例之其中扼流圈相對於彼此最佳定位之一電漿施加器之一示意圖。

圖5B包含繪示起因於圖5A中繪示之扼流圈位置之針對多個電漿密度條件之一電漿施加器之一微波腔中之所得電場衰減之圖表。

圖6A包含根據例示性實施例之冷卻套之一部分之一示意性透視圖，其繪示IR透明窗。

圖6B包含根據例示性實施例之圖6A中繪示之IR透明窗之一者之一示意性透視圖。

圖7係根據例示性實施例之用於一電漿產生系統之一冷卻系統之操作之一示意性功能圖。

圖8係根據例示性實施例之具有本文中描述之最佳化冷卻之一電漿施加器之一示意性橫截面圖。

圖9係繪示電漿放電管之壁厚度與溫度之間之關係之一示意圖。

圖10係根據例示性實施例之另一電漿施加器之一示意性橫截面圖，其繪示根據例示性實施例之用於最佳化電漿施加器200之冷卻之設計及測試參數。

圖11係根據例示性實施例之圖10中繪示之電漿施加器之一詳細示意性橫截面圖。

圖12包含根據例示性實施例之一實質上圓柱形電漿施加器之一示意

性圖示透視圖。

圖13包含根據例示性實施例之一實質上矩形電漿施加器之一示意性圖示透視圖。

【實施方式】

圖1包含根據例示性實施例之一小型低功率電漿施加器100之一示意性橫截面圖。參考圖1，電漿施加器100包含具有一縱向軸線136之一電漿放電管102，其中一或多個製程氣體藉由耦合至至少部分包圍電漿放電管102之一微波腔106中之微波能量激發。在一些例示性實施例中，製程氣體包括氧氣、氮氣、氫氣、氟化氣體、合成氣體、 NF_3 、 NH_3 、 C_2F_4 及 C_2F_6 或一或多個其他製程氣體之至少一者。經由一耦合虹膜124將微波能量自在耦合虹膜124處耦合至電漿施加器100之外殼122之一微波波導(未展示)引導至微波腔106中。在例示性實施例中，電漿施加器100包含充氣徑向波導扼流圈108、110、112、114，其等如展示般經定大小且成對定位於電漿放電管102之相對末端處且包圍電漿放電管102以提供微波能量在微波腔106內之圍阻。即，相對於微波腔106及彼此之大小及相對位置係使得實質上防止微波能量自微波腔106傳播出來。用於產生電漿之製程氣體在一製程氣體入口116處進入電漿放電管102。所得電漿產物透過一出口120離開電漿放電管102以用於所要應用處理中。

電漿施加器100亦包含至少部分包圍電漿放電管102之一冷卻套104。冷卻套104含有繞電漿放電管102之外部循環之一冷卻流體以控制電漿放電管102之溫度(即，提供電漿放電管102之冷卻)。根據例示性實施例，電漿施加器100以相對低功率(例如，約1 kW)操作，使得在冷卻套104中循環之冷卻流體可係一氣體，諸如空氣。即，在一些例示性實施例中，由於

電漿施加器100之低功率操作，不需要液體(即，水)冷卻。冷卻套104包含冷卻空氣透過其進入冷卻套104之一空氣冷卻入口118。空氣循環通過冷卻套104且在空氣冷卻出口130處離開冷卻套104。冷卻套104可藉由O型環密封件132密封至電漿放電管102之外部。

如上文提及，電漿施加器100係一小型低功率產生器，其具有一高度H及一寬度W。在一些例示性實施例中，高度H可係約11英吋，且寬度W可係約3.5英吋。如上文提及，電漿施加器100可以依相對低微波功率操作，該相對低微波功率在一些特定例示性實施例中係約1 kW，且可高達1.5 kW。

圖2A及圖2B包含根據例示性實施例之包含圖1之電漿施加器100之兩個電漿產生系統150A及150B之示意性方塊圖。圖2A繪示可用於經由一同軸電纜143整合一固態微波產生器141之兩個不同替代耦合結構。一個結構包含經由一同軸連接器(可在其處連接同軸電纜143)直接耦合至施加器100之一同軸饋伺142。另一結構包含用於經由耦合虹膜124將微波激發能量耦合至微波腔106之一波導饋伺138。一同軸至波導轉接140經由一同軸電纜143將來自固態微波產生器141之微波能量耦合至波導饋伺138。波導饋伺提供一固定調諧短柱142或二進制調諧之額外優點，該固定調諧短柱142或二進制調諧用於提供用於電漿點火之一個調諧位置及用於操作之一個固定位置。此結構藉由固態產生器141提供對自動頻率調諧之額外調諧增強。應注意，圖2A繪示經由同軸電纜143連接至同軸至波導轉接140之固態波導產生器141。在其中使用同軸饋伺142之情況中，同軸電纜143直接連接至一同軸連接器，在其上經由波導饋伺142上之一同軸連接器直接耦合至施加器100。

圖2B繪示使用一磁控管而非圖2A之固態產生器141之電漿產生系統150B。參考圖2B，一高壓DC電力供應器153經由高壓電纜155將電力施加至磁控管頭151。一隔離器149將磁控管頭151與施加器100隔離，使得自施加器100反射回的任何電力被阻擋以防止對磁控管頭151之損害。一雙向耦合器147量測且耦合磁控管頭151與施加器100之間之電力。耦合至施加器100之微波能量由一三短柱自動調諧器157調諧。

各種電漿施加器描述於美國專利第5961851號；第7183514號；第5498308號；第6263830號；第8048329號；第7562638號；第7554053號及第6439155號中。該等美國專利(其等全部指定在本申請案中指定之至少一個發明者)之全文以引用的方式併入本文中。在先前電漿施加器(例如，在美國專利第5,961,851號中描述之電漿施加器)中，多個微波腔在 TM_{mnp} (橫向磁)模式中操作以產生一長形激發場。微波腔內之電漿收縮依據製程氣體壓力而變化，且隨著壓力增大，電漿趨於集中在個別腔之各者之中心部分中。

此外，在先前已知技術中，如(例如)在美國專利第5,961,851號及第8,048,329號中描述，使用呈一單一或一雙重組態之微波扼流圈以減小TEM(橫向電磁)模式之電場強度。設計雙重組態使得扼流圈經組態成彼此鄰近以減小經過電漿放電管之微波穿透。主要基於四分之一波長設計之此等鄰近組態提供僅針對TEM模式組態有效之衰減。

相比之下，在例示性實施例之電漿施加器100中，在TE(橫向電)模式中在微波腔106中產生微波激發。例示性實施例之微波扼流圈108、110、112、114同時針對TE及TEM模式兩者衰減電場。如本文中詳細描述，扼流圈108、110、112、114相對於微波腔106及相對於彼此之位置經

選擇以達成用於TE及TEM模式兩者之衰減之扼流圈108、110、112、114之有效操作。

可期望微波腔中之電場係均勻的，使得所得電漿亦係均勻的。在先前電漿施加器中，在努力達成電場之均勻性時，多個腔被構造成彼此鄰近，其等可能係體積大且在長度上大的。在此等系統中，各個別施加器管內之電漿形成取決於壓力。隨著壓力增大，電漿趨於在管內收縮且塌縮或集中於電漿管之中心部分內。此係歸因於無充足電場可用於防止電漿收縮之事實。

又，在此等先前系統中，微波扼流圈被設計成彼此鄰近而無扼流圈之間之距離之任何最佳化來實現所要電場衰減。此等先前組態之效能係基於諧振或非諧振四分之一波長拓樸，且不如本實施例之拓樸有效。

根據圖1及圖2中繪示之例示性實施例，電漿施加器100為一 TE_{mnp} (橫向電)類型電場組態，其與在先前施加器及先前技術中使用之 TM_{mnp} (橫向磁)類型組態相反。根據例示性實施例，兩個結合電場基本上覆蓋電漿放電管102之整個長度。使用由耦合虹膜124產生之「近場」強度填充且完成橫向鄰近耦合虹膜124之其中僅存在一部份場之結合場之部分。因此，根據例示性實施例，經由主模式加上由耦合虹膜124產生之消散場之一組合達成電漿放電管102內之結合電場。

以下方程式(1)根據例示性實施例在三維空間(x, y, z)中定義微波腔106內之磁場及電場強度。

$$\begin{aligned}
 H_y &= -\frac{C}{k_c^2} \left(\frac{p\pi}{d}\right) \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \cos \frac{p\pi z}{d} \\
 E_x &= \frac{j\omega\mu C}{k_c^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{d} \\
 E_y &= -\frac{j\omega\mu C}{k_c^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \sin \frac{p\pi z}{d} \\
 k_c^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \\
 \beta &= \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - k_c^2 \right]^{1/2} = \frac{p\pi}{d} \\
 k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2 \right]^{1/2}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

下文之方程式(2)定義一矩形TE₁₀模式波導之電場及磁場型樣。圖3A及圖3B係繪示矩形TE₁₀模式波導之傳播及場型樣之示意圖。

$$\begin{aligned}
 E_y &= E_0 \sin \frac{\pi x}{a} \\
 H_x &= -\left(\frac{E_0}{Z_{TE}}\right) \sin \left(\frac{\pi x}{a}\right) \\
 H_z &= \frac{jE_0}{\eta} \left(\frac{\lambda}{2a}\right) \cos \frac{\pi x}{a} \\
 H_y &= 0 = E_x \\
 Z_{TE} &= \frac{\eta}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \\
 v_p &= \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \\
 v_g &= \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \\
 \lambda_c &= 2a \\
 f_c &= \frac{1}{2a \sqrt{\mu\epsilon}}
 \end{aligned}$$

(2)

參考方程式(1)，針對此特定實施例，整數 p 被選擇為0 (零)，使得諧振獨立於微波腔106之高度，該高度係在縱向軸線136之方向上量測。藉由將高度調整為一足夠大的值，獲得例示性實施例之兩個結合電場。在一些特定例示性實施例中，微波腔106之約略寬度係3英吋，且約略高度係4.5英吋。使用此等腔尺寸，達成例示性實施例之兩個結合電場。

因此，根據例示性實施例，在單一微波腔106中產生結合電場以沿著電漿放電管102產生一長形場。結合場由自耦合虹膜124產生之「近場」消散輻射連接且完成為一均勻場。由兩個單一電場及消散輻射形成之此均勻長形場使電漿施加器100能夠在高達且高於10托之較高壓力下操作同時維持電漿形成及均勻性。均勻長形場亦提供沿著電漿放電管102之均勻電

漿形成及均勻溫度，從而實現通常被視為脆弱且在先前較惡劣電漿形成環境中經受損害之此等管材料之使用。舉例而言，根據例示性實施例，電漿放電管102可由諸如藍寶石、石英、陶瓷、氮化鋁、氮化硼及/或其他類似材料之一材料形成。

根據例示性實施例，電漿放電管102內之電漿形成獨立於壓力且隨著製程壓力增大而維持其形成。電漿將不塌縮且集中於電漿放電管102之中心部分內。均勻長形場防止電漿之集中且迫使電漿維持其在電漿放電管102內之形成。

根據例示性實施例，微波能量經由耦合虹膜124耦合至微波腔106中。應注意，在方程式(1)及(2)中，指數 x 、 y 、 z 分別表示微波腔(波導)之寬度、深度及高度(長度)。在一些例示性實施例中，如上文描述般根據方程式(1)及(2)選擇波導腔106之尺寸，其中方程式(1)計算且定義 TE_{mnp} 之微波腔106內之結合場形成，且方程式(2)計算且定義用於從微波電源(其如上文詳細描述，可係(例如)固態產生器141或磁控管151)傳遞能量之 TE_{10} 波導參數。

根據例示性實施例，在電漿放電管102中產生兩個結合電場。如上文描述，使用由耦合虹膜124產生之「近場」強度填充且完成與耦合虹膜124橫向相對定位之其中僅存在一部分場之結合場之部分。因此，如上文提及，經由主模式加上由耦合虹膜124產生之消散場之一組合達成結合電場，從而導致沿著電漿放電管102之縱向軸線延伸之一實質上均勻電場。

如上文詳細描述，例示性電漿施加器100在 TE_{mnp} 模式中操作。在一特定例示性實施例中，整數 m 、 n 及 p 分別為1、1及0。由於定義高度之整數 p 設定為零(0)，故微波腔106之高度獨立於模式。因此，藉由選擇 TE_{110}

高度之兩倍之一長度，可形成分離達一小距離之兩個獨立電場，其等在組合末端處由各電場之殘餘強度弱連接。經設計以將微波能量傳遞且耦合至電漿施加器100之耦合虹膜124具有一非常強的近場消散模式，其可延伸深入至電漿施加器100之內部部分中，兩個獨立電場在其中安置且經由TE₁₁₀模式之弱殘餘場弱連接。兩個獨立電場經由自耦合虹膜124發射之強得多的消散模式結合且組合，藉此沿著電漿放電管102之縱向軸線136產生一實質上均勻電場。

圖4A、圖4B、圖5A及圖5B繪示根據例示性實施例之微波扼流圈108、110、112、114之位置對微波腔106中之電場之衰減，及因此電場在微波腔106內之圍阻之效應。具體言之，圖4A係根據例示性實施例之其中扼流圈未相對於彼此最佳定位之電漿施加器100之一示意圖，且圖4B包含繪示針對多個電漿密度條件之微波腔106中之所得電場衰減之圖表。圖5A係根據例示性實施例之其中扼流圈相對於彼此最佳定位之電漿施加器100之一示意圖，且圖5B包含繪示針對多個電漿密度條件之微波腔106中之所得電場衰減之圖表。

參考圖4A、圖4B、圖5A及圖5B，將內部扼流圈110及112稱為「扼流圈1」，且將外部扼流圈108及114稱為「扼流圈2」。根據例示性實施例將第二扼流圈108及114分別相對於第一扼流圈110及112之相對距離視為增強組合結構之衰減效率。又，扼流圈中之場強度非常低，從而指示顯著衰減。如圖中繪示，在例示性實施例中，扼流圈108、110、112、114安置於微波腔106之兩個末端處。在一些實施例中，扼流圈108、110、112、114填充有一石英材料，使得可使徑向波導結構之直徑相對小以增強系統之小型化。可使用其他扼流圈填充材料，諸如(例如)陶瓷、藍寶石

及其他介電材料。又，舉例而言，在其他實施例中，扼流圈108、110、112、114填充有空氣。

參考圖4A及圖4B，組態不包含內部扼流圈110、112與各自外部扼流圈108、114之間之最佳化間隔。在圖4A之例示性圖解中，各自內部扼流圈與外部扼流圈之間之標稱空間係約0.08英吋。參考圖4B之對應強度曲線，在扼流圈(即，扼流圈1及扼流圈2)處之所繪示之所得衰減係可忽略的。即，在無扼流圈之最佳化定位(特定言之，扼流圈之間之間隔)之情況下，實現非常小或無電場衰減。

相比之下，參考圖5A及圖5B，組態包含內部扼流圈110、112與各自外部扼流圈108、114之間之最佳化間隔。在圖5A之例示性圖解中，各自內部扼流圈與外部扼流圈之間之標稱空間係約0.38英吋。參考圖5B之對應強度曲線，在扼流圈(即，扼流圈1及扼流圈2)處之所繪示之所得衰減遠比圖4A及圖4B之情況更顯著。即，在具有扼流圈之最佳化定位(特定言之，扼流圈之間之間隔)之情況下，實現電場衰減之一實質改良。

根據例示性實施例，導致影響兩個鄰近扼流圈之間之最佳衰減之效能之扼流圈之間之距離之特徵係 TE_{mnp} 模式之存在，其具有根據方程式(1)中之最後一行描述之一波長。

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d} \right)^2 \right]^{1/2}$$

在一特定例示性實施例中，針對 TE_{110} 之模式，波長可計算為4.243”，其中方程式(1)之整數 m 、 n 及 p 分別為1、1及0。在此例示性實施例中，尺寸 a 及 b 各係3.0英吋，且頻率 $f=2,450$ MHz。將 $m=1$ 、 $n=1$ 、 $p=0$ 、 $a=3.0$ 及 $b=3.0$ 代入上文針對 k 之方程式中，且求解 λ 得到 $\lambda=4.243$ 英吋。根據先前方法，波長如下計算： $\lambda=c/f$ ，其中 λ 係波長， c 係光之速度

且 f 係頻率。此計算適用於一TEM模式。相比之下，根據例示性實施例，針對2,450 MHz之設計頻率，例示性系統之波長係4.243英吋。根據例示性實施例，扼流圈分離距離依據波長(即，頻率)而變化。針對給定例示性實施例，依4.243英吋之一微波電漿激發波長及0.38英吋之扼流圈分離距離，獲得 $0.38/4.243=0.0896$ 之一線性倍率(即，斜率)。根據例示性實施例，發現0.38英吋之扼流圈分離距離提供最佳衰減。然而，亦已判定在0.125至0.625英吋之一範圍中之扼流圈分離距離提供可接受衰減。

因此，根據例示性實施例，與先前系統之TM模式相反，在TE模式中使用微波扼流圈組態以衰減在腔106中傳播之微波能量。扼流圈組態亦捕集或衰減在TEM模式中傳播之微波能量。

參考圖4A、圖4B、圖5A及圖5B，將衰減計算為在電漿放電管102之圓周內求平均值之扼流圈內部與扼流圈外部之電場之一比率。在10至100 S/m之一電漿導電性範圍內評估扼流圈效能以確保操作空間內之穩定效能。在特定例示性實施例中，如圖5B中展示，取決於電漿阻抗，電場衰減達50至71倍。由於功率根據電場強度之平方變動，故功率衰減約為2,500至5,000。

因此，具有一徑向波導拓樸之在微波腔106之相對末端處之兩個鄰近扼流圈彼此分離達一最佳距離以同時衰減TE模式及TEM模式兩者之一組合。此係獨有的，至少係因為同時針對TE模式及TEM模式兩者，在扼流圈處之微波表面電流接近零。在例示性實施例中，扼流圈具有匹配微波腔106之外部尺寸之一直徑且為了小型化而填充有一石英材料以進一步減小尺寸。例示性實施例之此微波扼流圈組態(即，分離達一預定距離之一徑向波導組態)針對TE模式及TEM模式兩者有效減小電場強度，如圖5B中展

示。相比之下，如圖4B中展示，在未針對TE模式及TEM模式兩者最佳化兩個扼流圈之分離之情況下，電場衰減較差且最小。此係因為，在無最佳化分離之情況下，在扼流圈處之TE模式之微波表面電流非零且因此，達成最小衰減。

如上文描述，電漿施加器100包含至少部分包圍電漿放電管102之冷卻套104。在一些實施例中，可期望透過某一形式之視線監測(諸如使用一或多個紅外線(IR)偵測器之溫度偵測)而監測電漿放電管102之溫度。為了促成此監測，電漿冷卻套104可視情況包含一或多個窗，該一或多個窗可對監測輻射(例如，IR輻射)透明。圖6A包含根據例示性實施例之冷卻套104之一部分之一示意性透視圖，其繪示IR透明窗103。圖6B包含根據例示性實施例之圖6A中繪示之IR透明窗103之一者之一示意性透視圖。參考圖1、圖6A及圖6B，電漿放電管102可視情況形成為具有多個開口，如展示。各自多個IR透明窗103可接合至冷卻套104之外表面，接合提供窗103與冷卻套104之間之一密封。窗103可與選用監測孔126對準，使得電漿放電管102之內部可(例如)藉由一或多個IR偵測器監測。窗103之材料可係一IR透明材料，諸如硒化鋅(ZnSe)、溴化鉀(KBr)或類似材料。

由於電漿施加器100在低氣壓下操作，故自電漿放電管102移除足夠熱可係具有挑戰的。根據例示性實施例，為了最佳熱移除效率而最佳化冷卻套104與電漿放電管102之間之間隙。特定言之，現將詳細描述用以提供電漿施加器100(特定言之，電漿放電管102)之冷卻之一方法。根據例示性實施例，在施加器之相對側處之兩個實質上對稱構造提供施加器之空氣冷卻及凸緣之水冷卻。

根據例示性實施例，電漿施加器100中之強制空氣冷卻系統在一壓縮

空氣系統之容量之一大範圍中獲得電漿放電管102處之最低溫度。圖7係根據例示性實施例之用於電漿產生系統150之冷卻系統之操作之一示意性功能圖。參考圖7，一處理氣體在一第一末端處進入電漿放電管102、與微波腔106中之微波能量耦合以產生電漿且在電漿放電管102之相對末端處離開。冷卻套104 (其係直徑大於電漿放電管102之另一管)與電漿放電管102同心耦合以至少部分包圍且圍封電漿放電管102。電漿放電管102與冷卻套104之間之間隙(g) 107提供供強制空氣冷卻電漿放電管102之一通道。

根據例示性實施例，電漿放電管102與冷卻套104之間之間隙g係經最佳化之一尺寸。針對一給定空氣系統，g判定熱傳遞係數(h)及空氣流速(f)。隨著g增大，f亦增大，但h減小。間隙g之大小經選擇以最佳化空氣流速及熱傳遞係數。在一些例示性實施例中，電漿放電管具有1.00英吋(25.4 mm)之一外徑(OD)。具有不同內徑(ID)(諸如26 mm、27 mm、28mm、29mm及30mm)之各種標準大小冷卻套104將搭配一1.00英吋OD電漿放電管102操作。在此等可能冷卻套104當中，已藉由模擬及經驗資料判定具有27 mm之一ID之冷卻套提供電漿放電管102處之最低溫度。此導致間隙g之大小係約0.8 mm。

圖8係根據例示性實施例之具有本文中描述之最佳化冷卻之電漿施加器100之一示意性橫截面圖。參考圖8，一旦判定g之值，便可藉由增大管冷卻區段C2外部之流導率而進一步增強冷卻。指示為C1、C2及C3之施加器100之三個不同區段之各者中之流導率大體係不同的。施加器100之總傳導率可書寫為

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} ; \quad (3)$$

其中C係總傳導率，C1係施加器100之上游區段之傳導率，C2係管冷卻區段之傳導率，且C3係施加器100之下游區段之傳導率。在例示性實施例中，將C1及C3進一步最大化以獲得最高總傳導率及流速，且因此最大化施加器100中之冷卻效能。此包含在可行時之最大數目個最大注入孔、最短冷卻空氣通道及最大橫截面積之使用。

相較於其他冷卻方法，例示性實施例之冷卻方法提供對電漿放電管102之低熱應力。由於所提供之經改良冷卻，電漿放電管102不必具有一高壁厚度以作為對抗來自由一不均勻冷卻表面引起之高熱應力之損害之一防護。根據例示性實施例，針對電漿放電管102之內表面上之一給定熱通量及一給定管材料，一較薄壁導致較低管溫度。此容許電漿放電管102具有一相對小的壁厚度，使得實現進一步溫度降低。

圖9係繪示電漿放電管102之壁厚度與溫度之間之關係之一示意圖。

參考圖9，

$$q = k \frac{T_i - T_o}{\Delta x}; \quad (4)$$

其中q係熱通量， T_i 係內部管溫度， T_o 係外部溫度，k係導熱率，且 Δx 係電漿放電管102之厚度。方程式(4)亦可書寫為

$$T_i = T_o + \frac{q\Delta x}{k}. \quad (5)$$

如由方程式(4)及(5)展示，一較小壁厚度導致較低內部管溫度。

圖10係根據例示性實施例之另一電漿施加器200之一示意性橫截面圖，其繪示根據例示性實施例之用於最佳化電漿施加器200之冷卻之設計及測試參數。參考圖10，判定在壓縮空氣系統之能力之一大範圍中之最佳冷卻效能。具體言之，使用如圖10中繪示之一設置來設計且測試電漿施加器100及200，其中P1係上游壓力，P2係下游壓力，C4係上游流導率，且

C5係歸因於連接之下游流導率。為了驗證此設計在流動設置不同的情況下係最佳的，則使用一理論設置來提供壓縮空氣系統之最高能力，即，設置C4=C5=0。接著計算流速，基於其模擬且發現當前設計之熱效能就電漿放電管102處之最低溫度而言係最佳的。

為了描述最佳化，自總熱方程式：

$$Q = C_p F (T_{out} - T_{in}); \quad (6)$$

其中Q係每秒藉由空氣移除之總熱，C_p係空氣之比熱(W/kg)，F係空氣流速，T_{out}係出口處之空氣之溫度，且T_{in}係入口處之空氣之溫度。Q隨著F之一增大而增大。F隨著氣壓之一增大而增大，且針對一恆定壓力，電漿管與套管之間之一大間隙導致一較高F。

自熱傳遞，

$$Q = hk(T_{wall} - T_{air}); \quad (7)$$

其中h係熱傳遞係數，k係空氣之導熱率，T_{wall}係電漿放電管102之溫度，且T_{air}係空氣之溫度。Q隨著h之一增大而增大。H亦隨著壓力之一增大而增大，且當壓力恆定時，電漿放電管102與冷卻套104之間之一較窄間隙將導致一較高h。然而，在一給定壓縮空氣系統中，最高壓力係恆定的。因此，根據例示性實施例，提供電漿管102與冷卻套104之間之一最佳化間隙。

開發兩個測試條件，自其等開發系統中之流導率之全部值。預測全部可能條件及設計中之空氣流動。基於適用於全部壓力範圍之一選定例示性商用壓縮空氣系統產生一最佳化管間隙g，以提供電漿放電管102之最佳冷卻結果。

圖11係根據例示性實施例之圖10中繪示之電漿施加器200之一示意性

橫截面圖。參考圖11，電漿施加器200類似於本文中描述之電漿施加器100，惟施加器200中之凸緣之水冷卻除外。使用相同元件符號識別電漿施加器100及200中之相同元件。

參考圖11，微波腔106包含繞電漿放電管102及冷卻套104之外部之徑向腔凸緣202A及202B。一徑向入口凸緣208A繞電漿放電管102及冷卻套104之外部安置於電漿施加器200之入口端處。一徑向出口凸緣208B繞電漿放電管102及冷卻套104之外部安置於電漿施加器200之出口端處。

除了經由冷卻套104提供之電漿施加器200之空氣冷卻之外，電漿施加器200亦提供藉由諸如一水之一液體對凸緣202A、202B、208A及208B之冷卻。為了此目的，電漿施加器200包含徑向水配件206A及206B，水可通過其等流入且流出循環水通道204A及204B。

圖12及圖13包含根據例示性實施例之電漿施加器之替代實施例之示意性圖示透視圖。具體言之，圖12包含根據例示性實施例之一實質上圓柱形電漿施加器300之一示意性圖示透視圖，且圖13包含根據例示性實施例之一實質上矩形電漿施加器400之一示意性圖示透視圖。本文中之整個詳細描述分別適用於圖12及圖13中之電漿施加器300及400之實施例，除非內容脈絡另外指示。

參考圖12及圖13，電漿施加器300及400包含用於起始電漿之點火之點火燈總成311、411。電漿施加器300、400包含製程氣體入口316、416，以及用於根據上文詳細描述之例示性實施例提供空氣冷卻之空氣冷卻入口318、418及空氣冷卻出口330、430。電漿施加器300、400亦包含用於根據上文詳細描述之例示性實施例提供凸緣之水冷卻之水冷卻通口306、406。電漿施加器300、400亦包含耦合虹膜324、424，可在該等耦

合虹膜324、424處安裝一波導來將波導能量耦合至微波腔306、406中以產生電漿。電漿施加器300、400亦包含根據例示性實施例之微波扼流圈或捕集器308、310、312、314及408、410、412、414，如上文詳細描述。

雖然已參考本發明概念之例示性實施例具體展示且描述本發明概念，但一般技術者應理解，可在其中做出形式及細節之各種改變而不脫離如由以下發明申請專利範圍定義之本發明概念之精神及範疇。

【符號說明】

100	小型低功率電漿施加器
102	電漿放電管
103	IR透明窗
104	冷卻套
106	微波腔
107	間隙
108	充氣徑向波導扼流圈
110	充氣徑向波導扼流圈
112	充氣徑向波導扼流圈
114	充氣徑向波導扼流圈
116	製程氣體入口
118	空氣冷卻入口
120	出口
122	外殼
124	耦合虹膜
126	選用監測孔

130	空氣冷卻出口
132	O型環密封件
136	縱向軸線
138	波導饋伺
140	同軸至波導轉接
141	固態微波產生器
142	同軸饋伺/固定調諧短柱
143	同軸電纜
147	雙向耦合器
149	隔離器
150A	電漿產生系統
150B	電漿產生系統
151	磁控管頭
153	高壓DC電力供應器
155	高壓電纜
157	三短柱自動調諧器
200	電漿施加器
202A	徑向腔凸緣
202B	徑向腔凸緣
204A	循環水通道
204B	循環水通道
206A	徑向水配件
206B	徑向水配件

208A	徑向入口凸緣
208B	徑向出口凸緣
300	實質上圓柱形電漿施加器
306	水冷卻通口
308	微波扼流圈/捕集器
310	微波扼流圈/捕集器
311	點火燈總成
312	微波扼流圈/捕集器
314	微波扼流圈/捕集器
316	製程氣體入口
318	空氣冷卻入口
324	耦合虹膜
330	空氣冷卻出口
400	實質上矩形電漿施加器
406	水冷卻通口
408	微波扼流圈/捕集器
410	微波扼流圈/捕集器
411	點火燈總成
412	微波扼流圈/捕集器
414	微波扼流圈/捕集器
416	製程氣體入口
418	空氣冷卻入口
424	耦合虹膜

430	空氣冷卻出口
g	間隙
H	電漿施加器之高度
W	電漿施加器之寬度



公告本

申請日:

IPC分類:

I643530

【發明摘要】

【中文發明名稱】

利用結合電場之小型微波電漿施加器

【英文發明名稱】

COMPACT MICROWAVE PLASMA APPLICATOR UTILIZING
CONJOINING ELECTRIC FIELDS

【中文】

一種電漿施加器，其包含一電漿放電管及至少部分包圍該電漿放電管之一部分之一微波腔。微波能量經由一耦合虹膜(iris)耦合至該微波腔。該微波腔之至少兩個正交尺寸經選擇使得該微波腔中之該微波能量在一橫向電(TE)模式中傳播。自該微波能量產生之主電場與自該耦合虹膜產生之一消散電場組合，使得該微波腔中之一組合電場沿著該電漿放電管之該縱向軸線係實質上均勻的。複數個徑向微波扼流圈安置於該電漿放電管之一外部。該等微波扼流圈之位置係使得在該TE模式及一橫向電磁(TEM)模式中傳播之微波能量衰減。

【英文】

A plasma applicator includes a plasma discharge tube and a microwave cavity at least partially surrounding a portion of the plasma discharge tube. Microwave energy is coupled to the microwave cavity via a coupling iris. At least two orthogonal dimensions of the microwave cavity are selected such that the microwave energy in the microwave cavity propagates in a transverse electric (TE) mode. Primary electric fields generated from the microwave energy combine

with an evanescent electric field generated from the coupling iris, such that a combined electric field in the microwave cavity is substantially uniform along the longitudinal axis of the plasma discharge tube. A plurality of radial microwave chokes is disposed over an exterior of the plasma discharge tube. Positions of the microwave chokes are such that microwave energy propagating in the TE mode and a transverse electric magnetic (TEM) mode is attenuated.

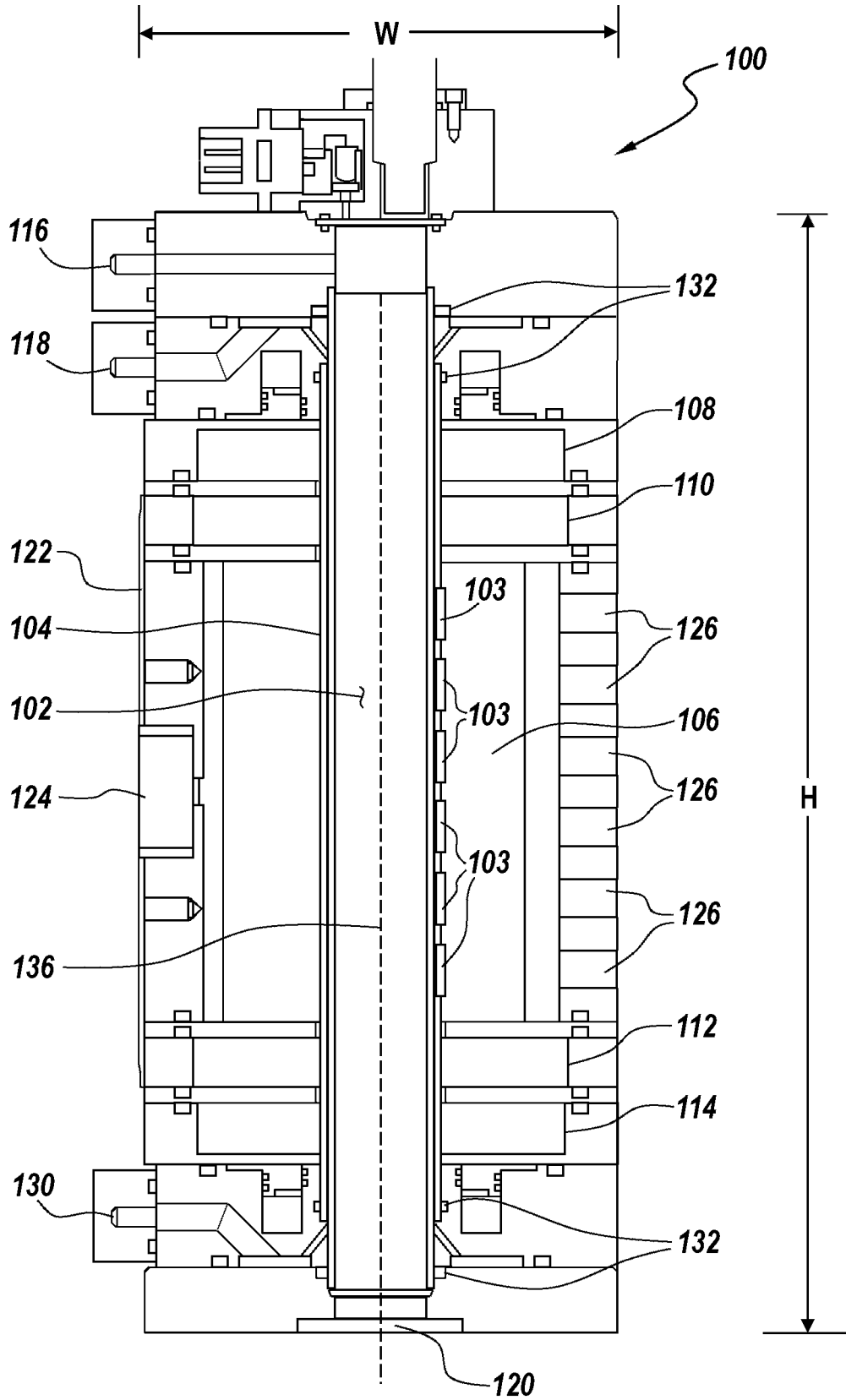
【指定代表圖】

圖1

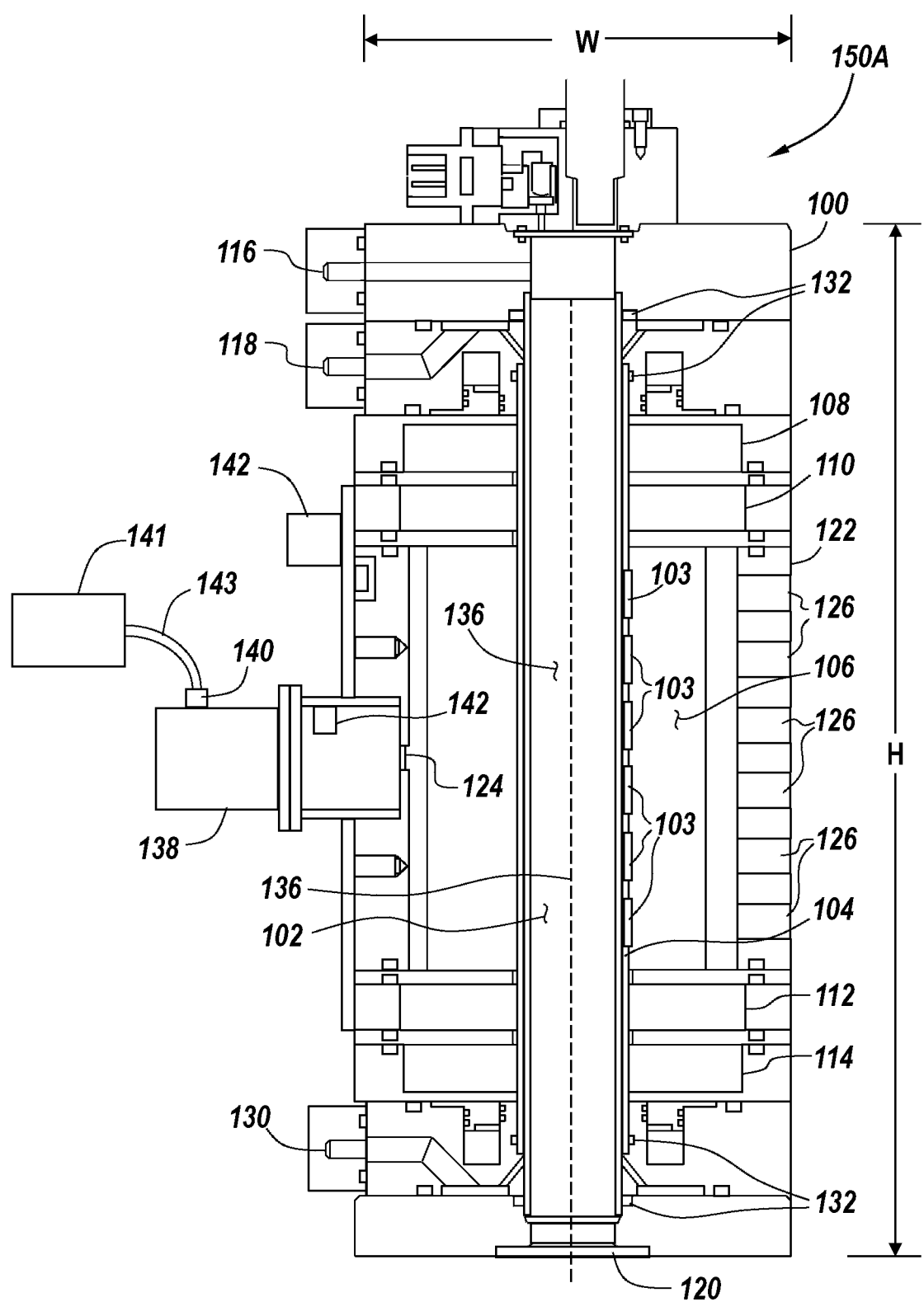
【代表圖之符號簡單說明】

- 100 小型低功率電漿施加器
- 102 電漿放電管
- 103 IR透明窗
- 104 冷卻套
- 106 微波腔
- 108 充氣徑向波導扼流圈
- 110 充氣徑向波導扼流圈
- 112 充氣徑向波導扼流圈
- 114 充氣徑向波導扼流圈
- 116 製程氣體入口
- 118 空氣冷却入口
- 120 出口
- 122 外殼

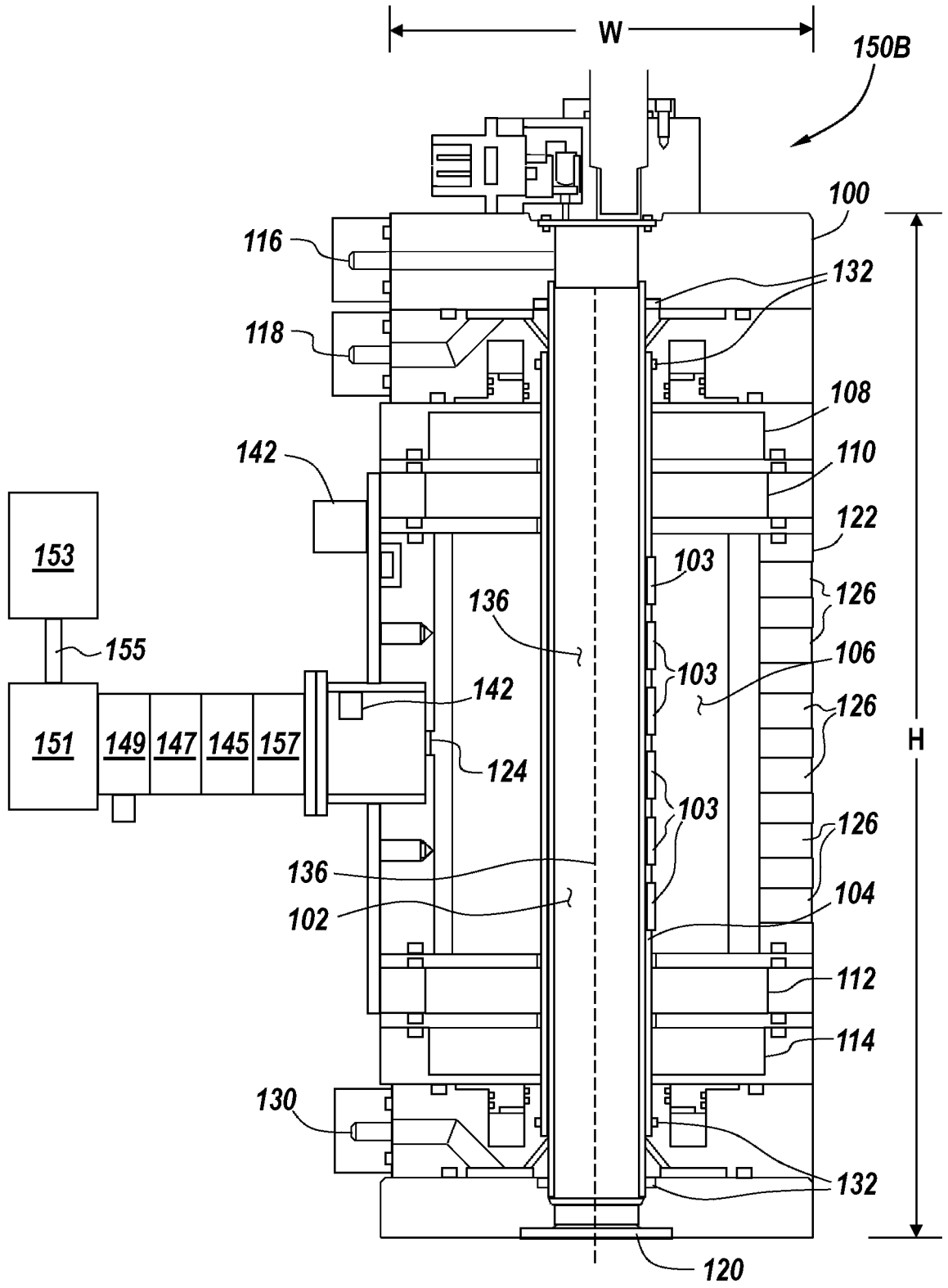
【發明圖式】



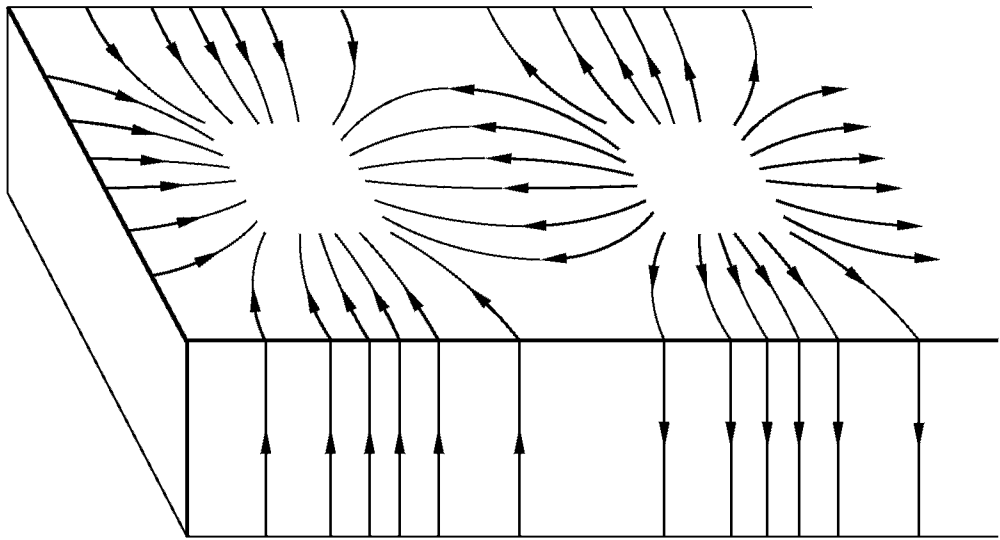
【圖1】



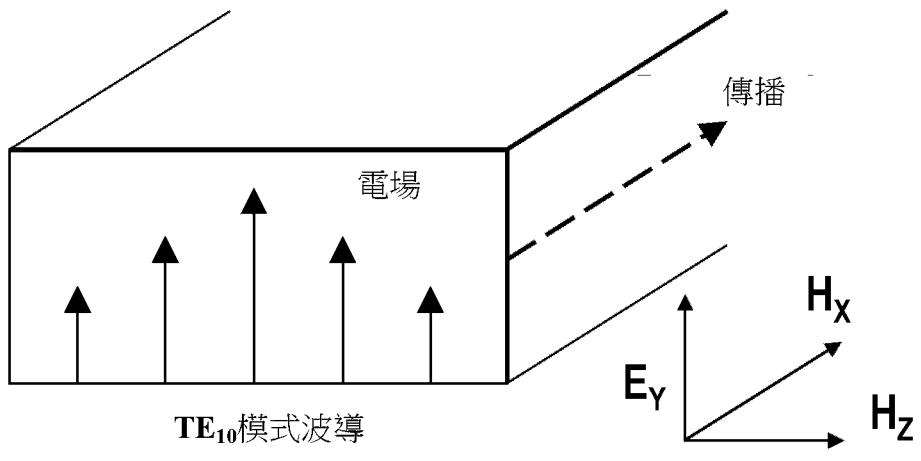
【圖2A】



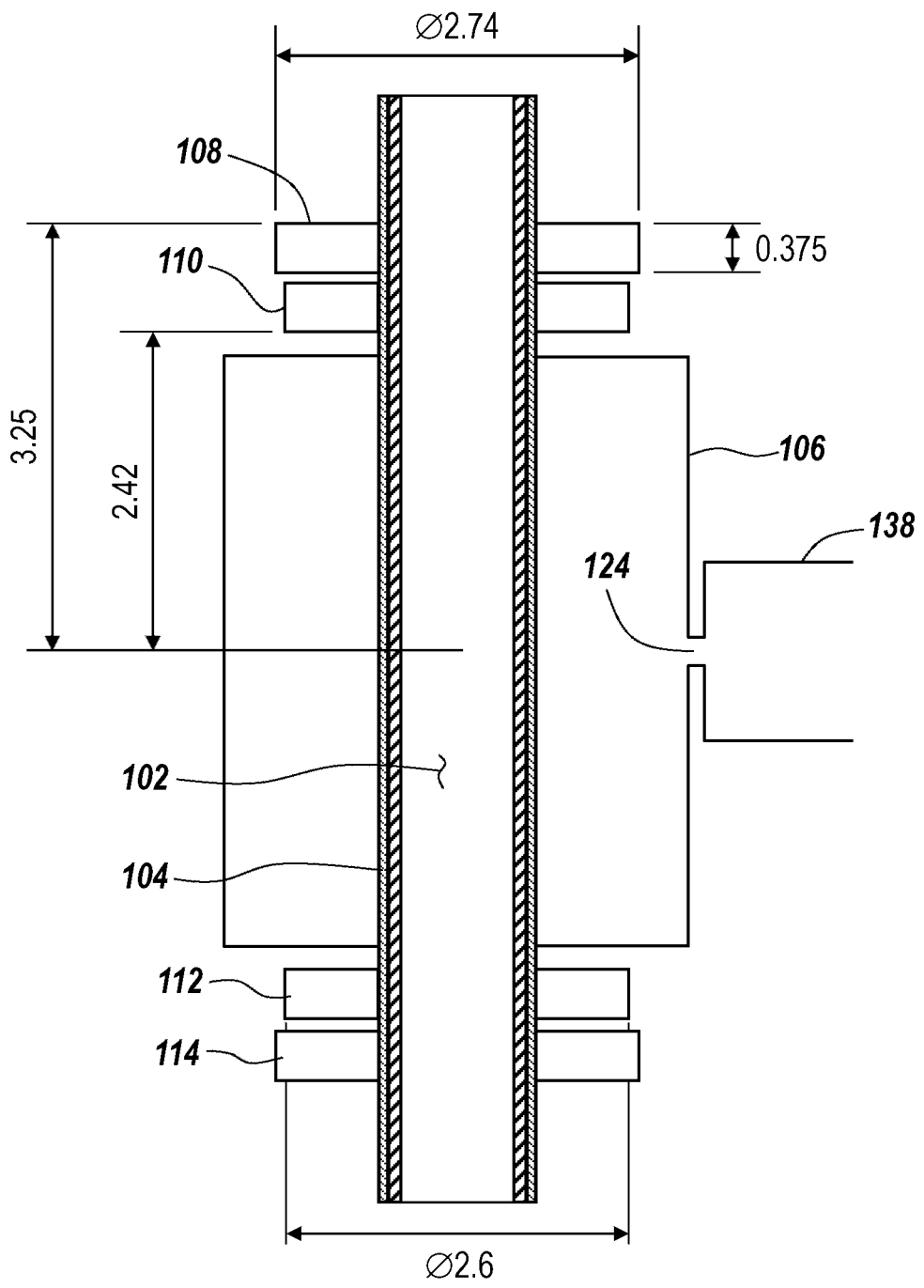
【圖2B】



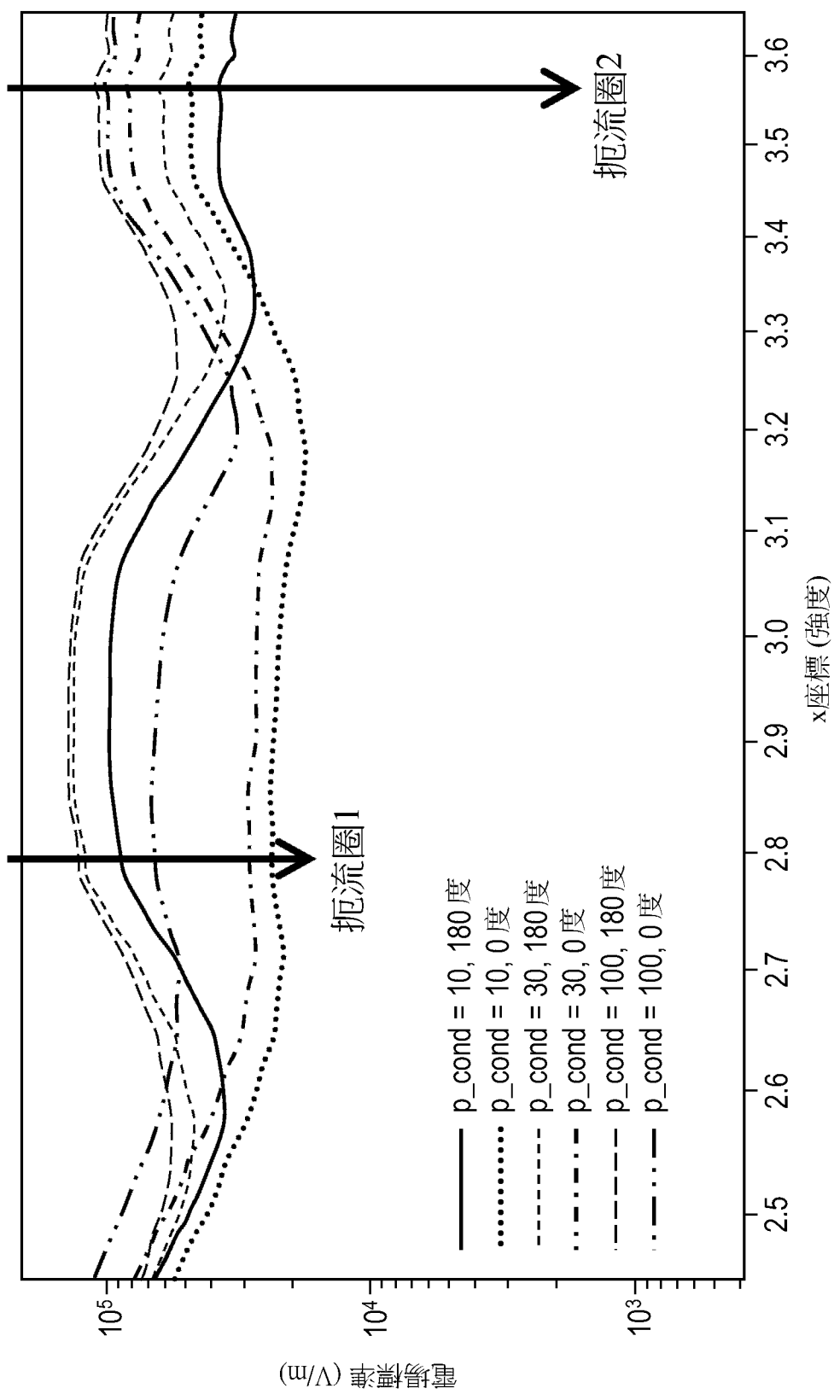
【圖3A】



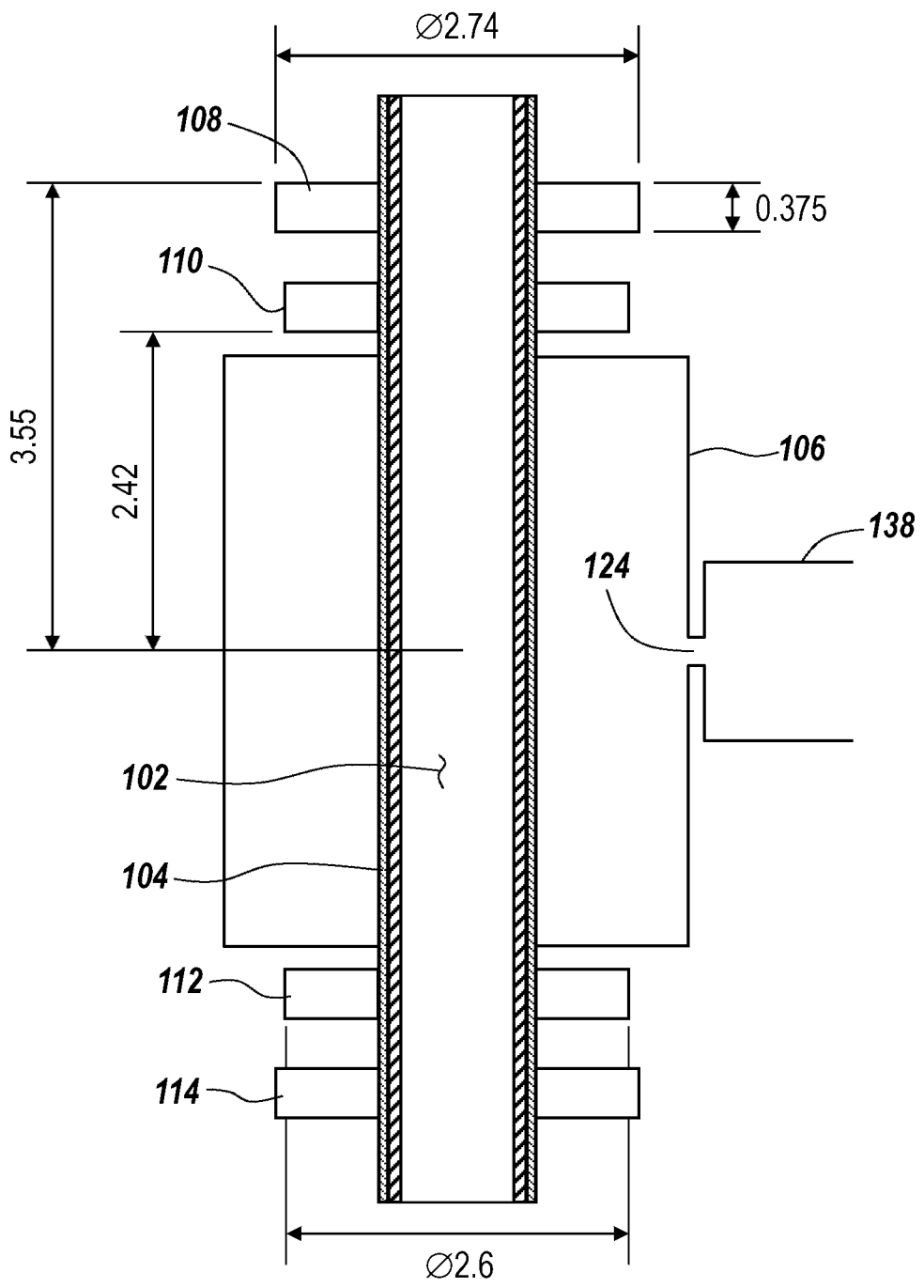
【圖3B】



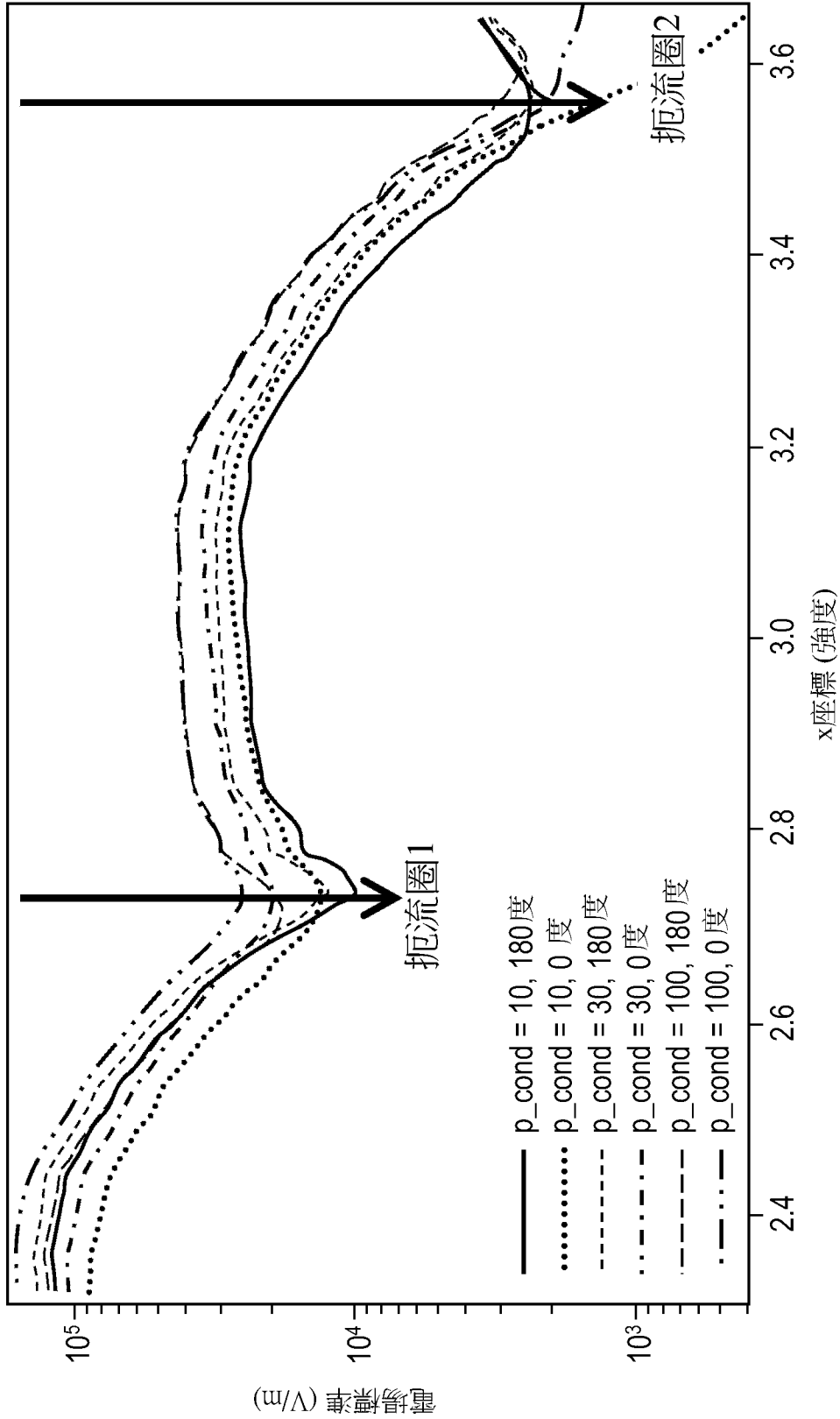
【圖4A】



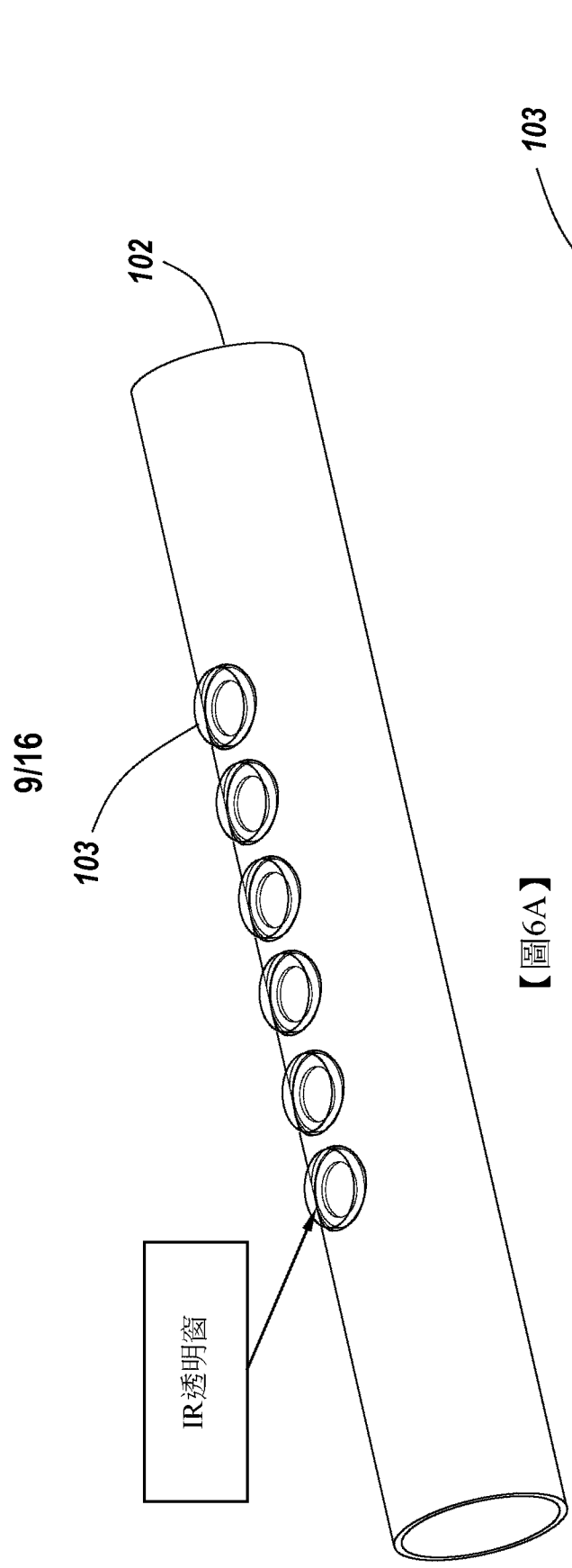
【圖4B】



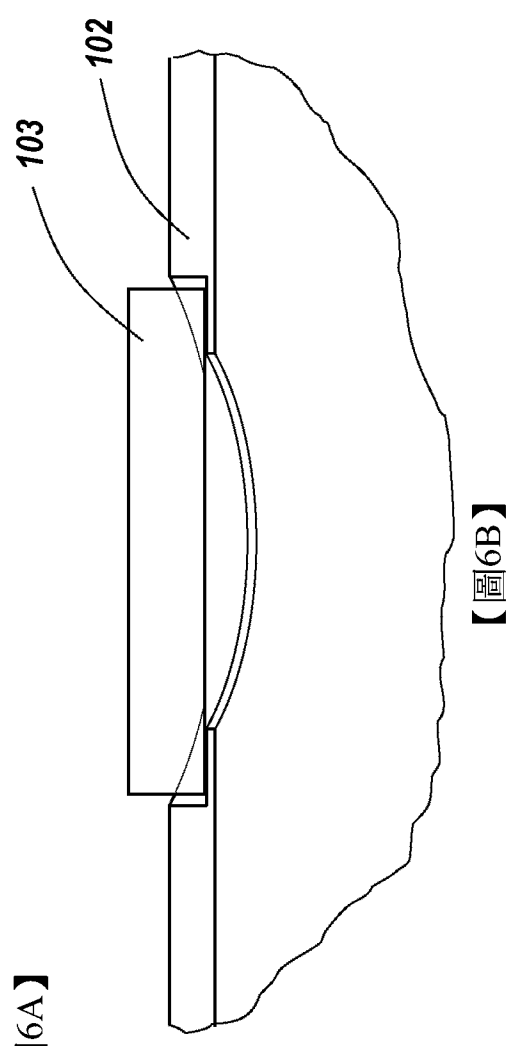
【圖5A】



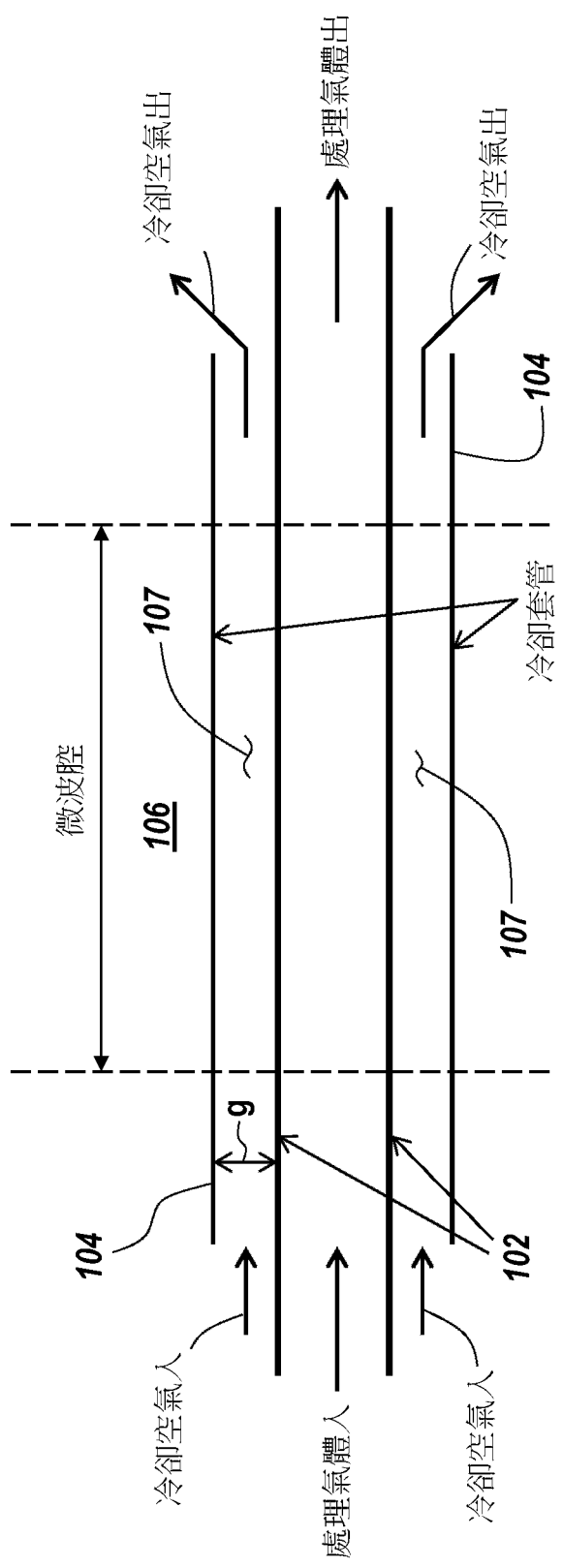
【圖5B】



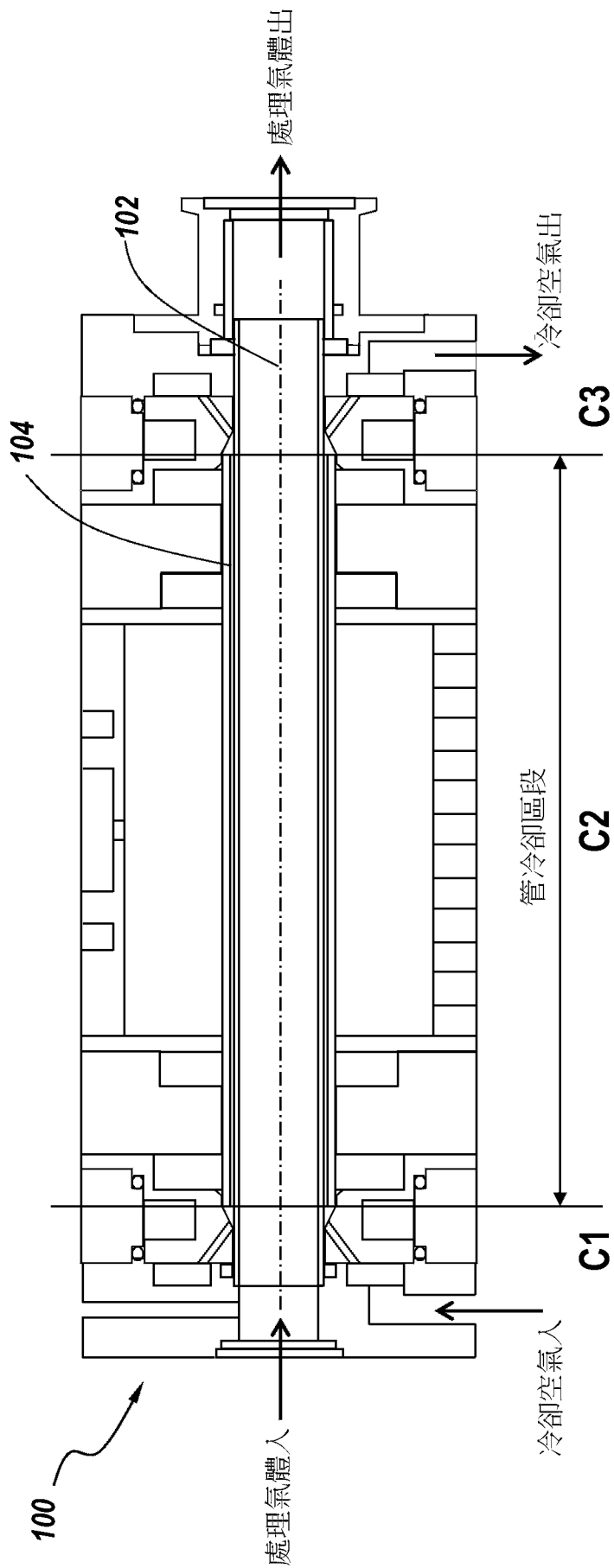
【圖6A】



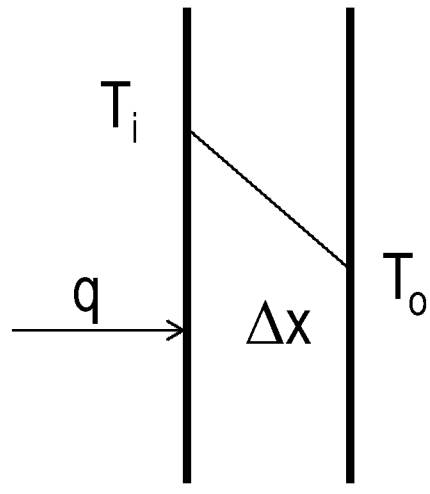
【圖6B】



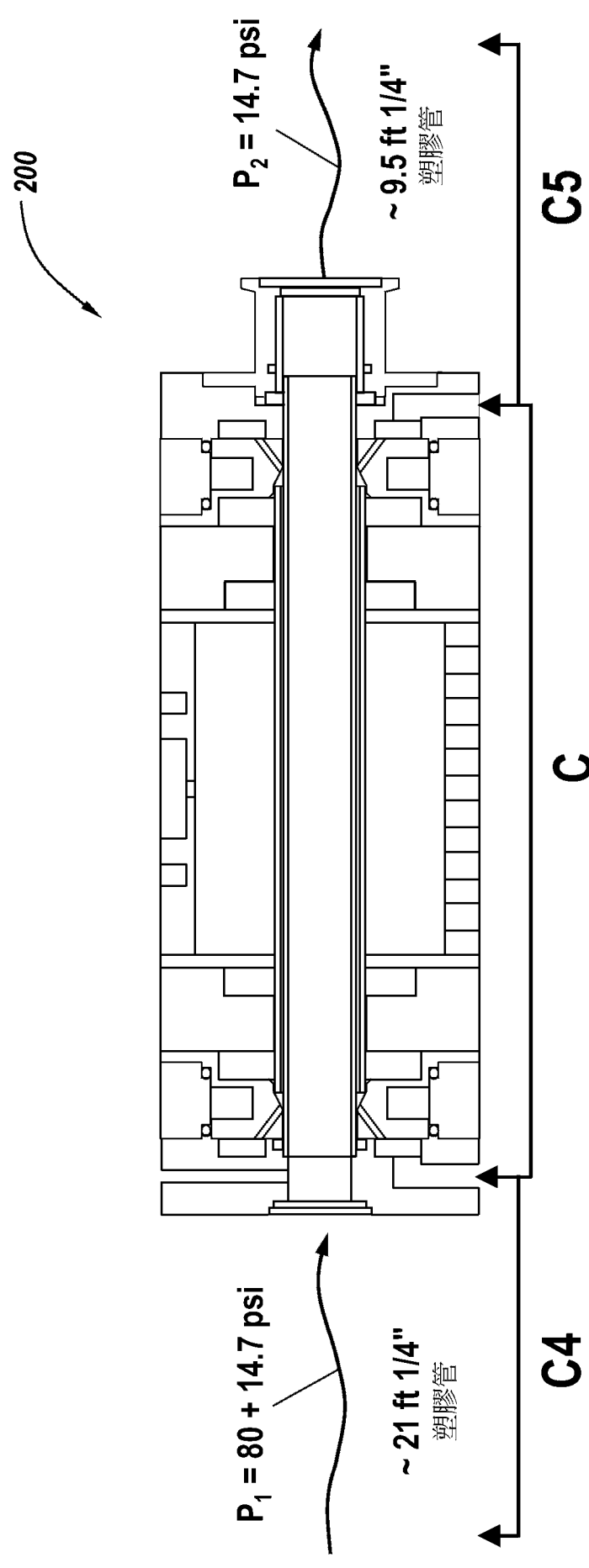
【圖7】



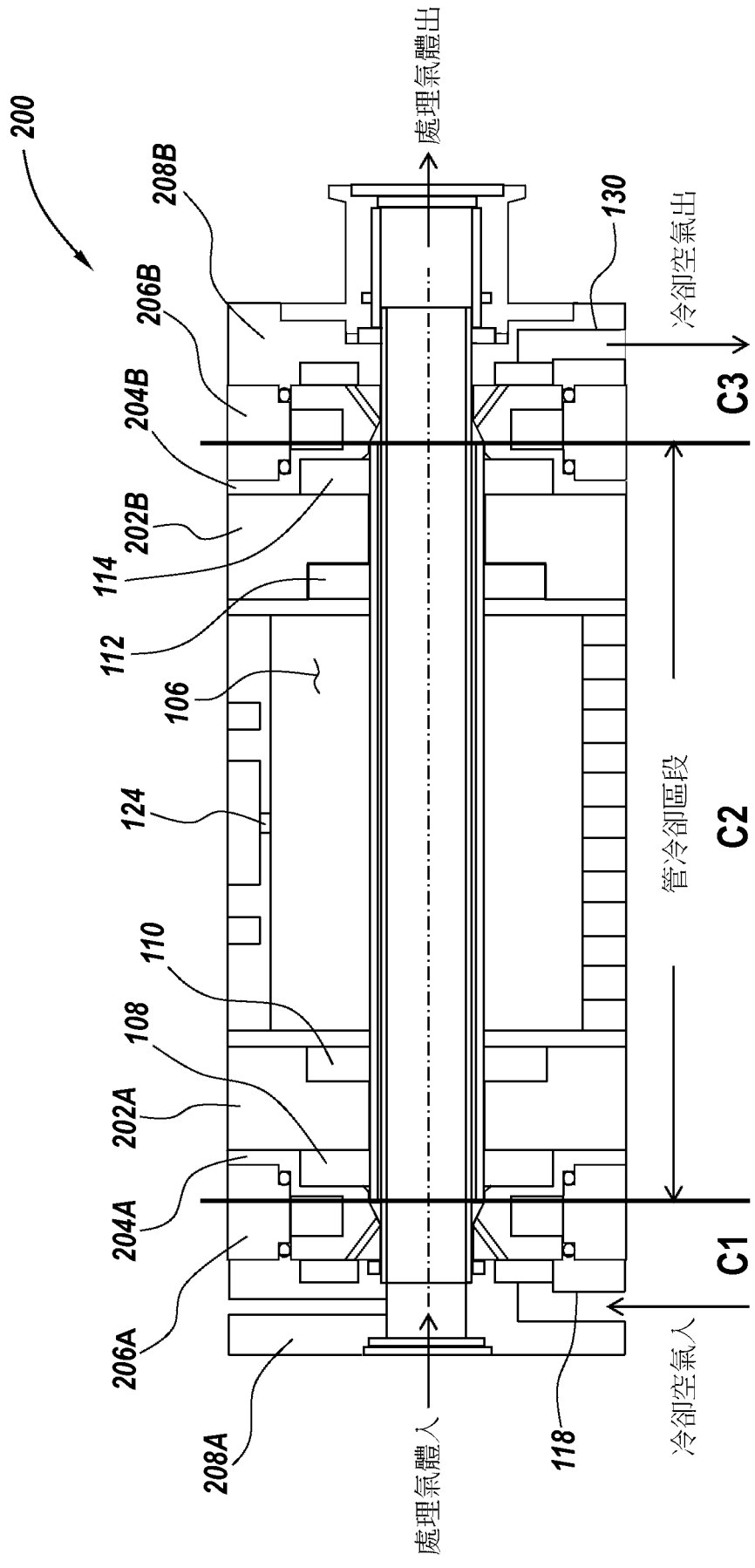
【圖8】



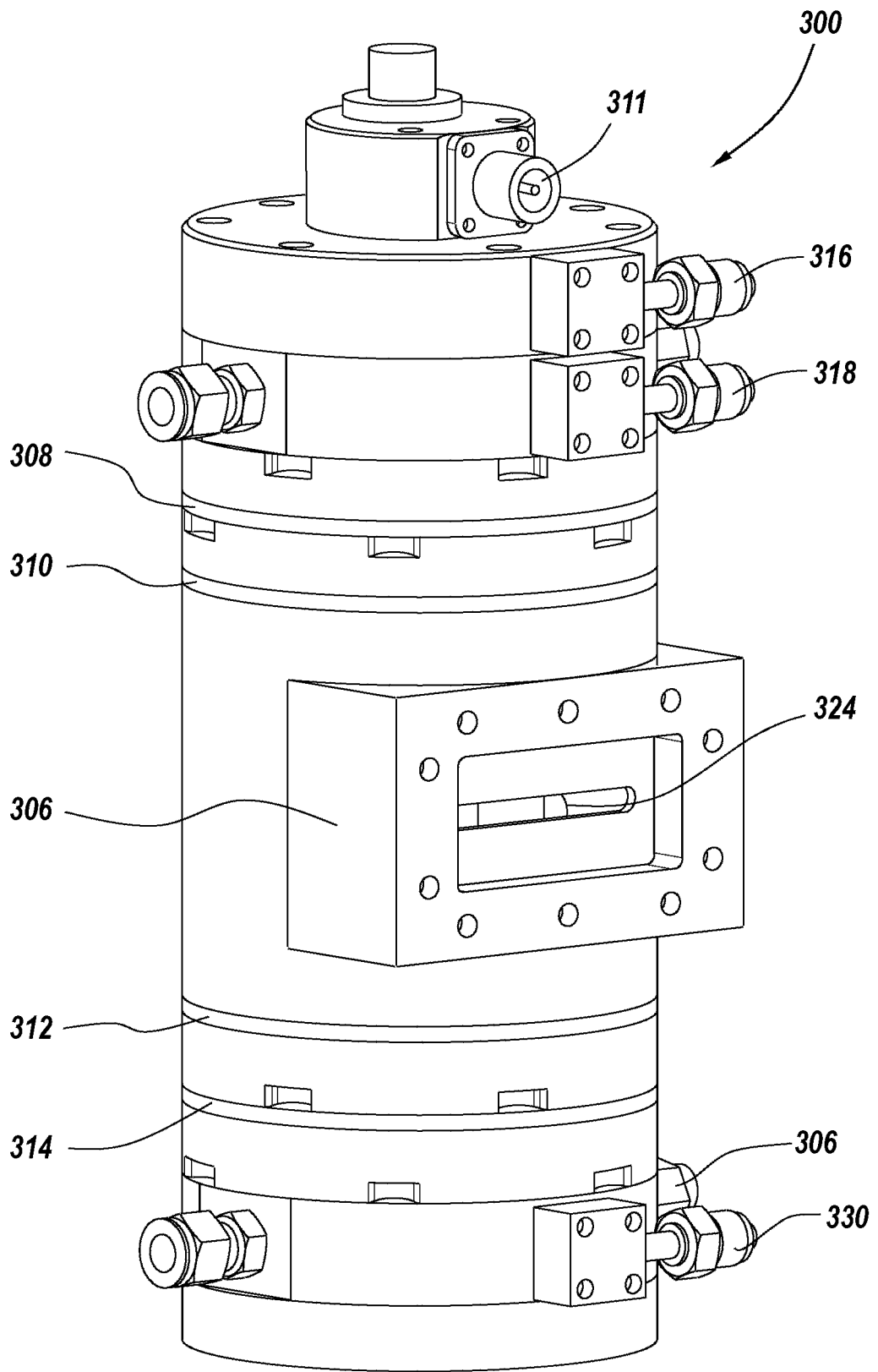
【圖9】



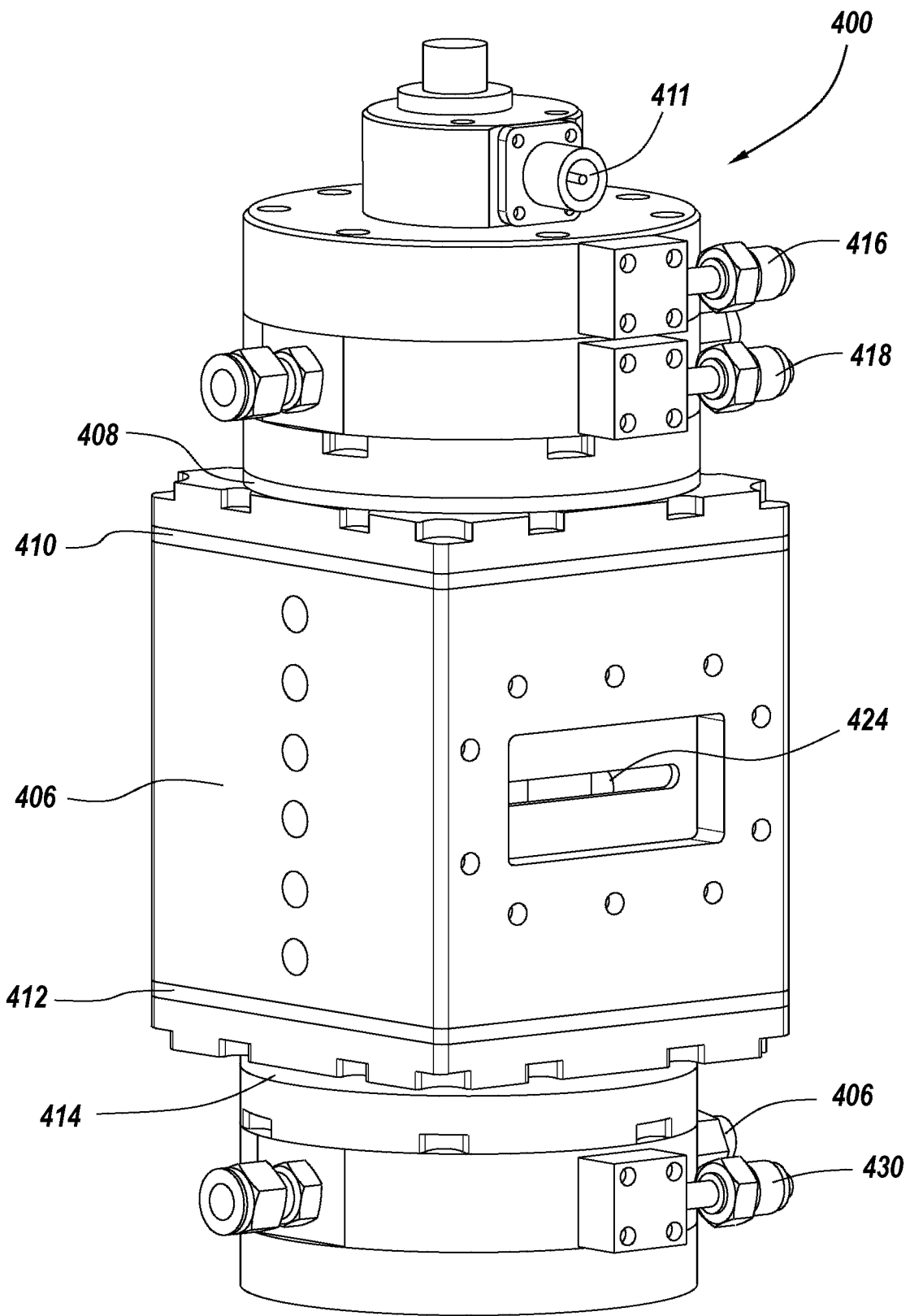
【圖10】



【圖11】



【圖12】



【圖13】

with an evanescent electric field generated from the coupling iris, such that a combined electric field in the microwave cavity is substantially uniform along the longitudinal axis of the plasma discharge tube. A plurality of radial microwave chokes is disposed over an exterior of the plasma discharge tube. Positions of the microwave chokes are such that microwave energy propagating in the TE mode and a transverse electric magnetic (TEM) mode is attenuated.

【指定代表圖】

圖1

【代表圖之符號簡單說明】

- 100 小型低功率電漿施加器
- 102 電漿放電管
- 103 IR透明窗
- 104 冷卻套
- 106 微波腔
- 108 充氣徑向波導扼流圈
- 110 充氣徑向波導扼流圈
- 112 充氣徑向波導扼流圈
- 114 充氣徑向波導扼流圈
- 116 製程氣體入口
- 118 空氣冷卻入口
- 120 出口
- 122 外殼

- 124 耦合虹膜
- 126 選用監測孔
- 130 空氣冷卻出口
- 132 O型環密封件
- 136 縱向軸線
- H 電漿施加器之高度
- W 電漿施加器之寬度

【發明申請專利範圍】

【第1項】

一種電漿施加器，其包括：

一電漿放電管，其中可產生電漿，該電漿放電管具有用於容許一電漿製程氣體(plasma process gas)進入該電漿放電管之一製程氣體入口，該電漿放電管具有一縱向軸線；

一微波腔，其至少部分包圍該電漿放電管之一部分；及

一耦合虹膜(coupling iris)，在其處微波能量可耦合至該微波腔，使得該微波能量可在該電漿放電管之該部分中產生一電漿；

其中

自該微波能量產生之主電場(primary electric fields)與自該耦合虹膜產生之一消散(evanescent)電場組合，使得該微波腔中之一組合電場沿著該電漿放電管之該縱向軸線係實質上均勻的。

【第2項】

如請求項1之電漿施加器，其中該微波腔具有三個正交尺寸，包含一長度、一寬度及一高度，該等正交尺寸之至少兩者經選擇使得該微波腔中之該微波能量在一橫向電(TE)模式中傳播。

【第3項】

如請求項1之電漿施加器，其進一步包括複數個徑向微波扼流圈(chokes)，其安置於該電漿放電管之一外部且安置於該微波腔之末端處用於實質上將該微波能量圍阻(containing)在該微波腔中，該等微波扼流圈之位置係使得在該橫向(transverse)電模式及橫向電磁模式中傳播之微波能量衰減。

【第4項】

如請求項3之電漿施加器，其中該複數個徑向微波扼流圈包括定位於該微波腔之一第一末端處之一第一內部扼流圈及一第一外部扼流圈及定位於該微波腔之一第二末端處之一第二內部扼流圈及一第二外部扼流圈，該第一內部扼流圈與該第一外部扼流圈之間之一第一空間及該第二內部扼流圈與該第二外部扼流圈之間之一第二空間經選擇以提供在該橫向電模式及該橫向電磁模式中傳播之該微波能量之衰減。

【第5項】

如請求項4之電漿施加器，其中該第一空間及該第二空間之至少一者係約0.38英吋。

【第6項】

如請求項4之電漿施加器，其中該第一空間及該第二空間實質上相等。

【第7項】

如請求項1之電漿施加器，其中該微波能量具有約1 kW之一功率。

【第8項】

如請求項1之電漿施加器，其中該微波能量之一源包括一固態產生器。

【第9項】

如請求項1之電漿施加器，其中該微波能量之一源包括一磁控管。

【第10項】

如請求項1之電漿施加器，其中該電漿放電管係由包含石英、藍寶石、陶瓷、氮化鋁及氮化硼之至少一者之一材料製成。

【第11項】

如請求項1之電漿施加器，其中該製程氣體包括氧氣、氮氣、氫氣、氟化氣體、合成氣體、 NF_3 、 NH_3 、 C_2F_4 及 C_2F_6 之至少一者。

【第12項】

一種電漿施加器(applicator)，其包括：

一電漿放電管，其中可產生電漿，該電漿放電管具有用於容許一電漿製程氣體進入該電漿放電管之一製程氣體入口，該電漿放電管具有一縱向軸線；

一微波腔，其至少部分包圍該電漿放電管之一部分；

一耦合虹膜，在其處微波能量可耦合至該微波腔，使得該微波能量可在該電漿放電管之該部分中產生一電漿；及

複數個徑向微波扼流圈，其等安置於該電漿放電管之一外部且安置於該微波腔之末端處用於實質上將該微波能量圍阻在該微波腔中，該等微波扼流圈之位置係使得在一橫向電(TE)模式及一橫向電磁(TEM)模式中傳播之微波能量衰減。

【第13項】

如請求項12之電漿施加器，其中該複數個徑向微波扼流圈包括定位於該微波腔之一第一末端處之一第一內部扼流圈及一第一外部扼流圈及定位於該微波腔之一第二末端處之一第二內部扼流圈及一第二外部扼流圈，該第一內部扼流圈與該第一外部扼流圈之間之一第一空間及該第二內部扼流圈與該第二外部扼流圈之間之一第二空間經選擇以提供在該橫向電模式及該橫向電磁模式中傳播之該微波能量之衰減。

【第14項】

如請求項13之電漿施加器，其中該第一空間及該第二空間之至少一者係約0.38英吋。

【第15項】

如請求項13之電漿施加器，其中該第一空間及該第二空間實質上相等。

【第16項】

如請求項12之電漿施加器，其中該微波腔具有三個正交尺寸，包含一長度、一寬度及一高度，該等正交尺寸之至少兩者經選擇使得該微波腔中之該微波能量在一橫向電(TE)模式中傳播。

【第17項】

如請求項12之電漿施加器，其中自該微波能量產生之主電場與自該耦合虹膜產生之一消散電場組合，使得該微波腔中之一組合電場沿著該電漿放電管之該縱向軸線係實質上均勻的。

【第18項】

如請求項12之電漿施加器，其中該微波能量具有約1 kW之一功率。

【第19項】

如請求項12之電漿施加器，其中該微波能量之一源包括一固態產生器。

【第20項】

如請求項12之電漿施加器，其中該微波能量之一源包括一磁控管。

【第21項】

如請求項12之電漿施加器，其中該電漿放電管係由包含石英、藍寶石、陶瓷、氮化鋁及氮化硼之至少一者之一材料製成。

【第22項】

如請求項12之電漿施加器，其中該製程氣體包括氧氣、氮氣、氫氣、氟化氣體、合成氣體、 NF_3 、 NH_3 、 C_2F_4 及 C_2F_6 之至少一者。