



(19)中華民國智慧財產局

(12)發明說明書公告本

(11)證書號數：TW I564928 B

(45)公告日：中華民國 106 (2017) 年 01 月 01 日

(21)申請案號：102130984

(22)申請日：中華民國 102 (2013) 年 08 月 28 日

(51)Int. Cl. : **H01J37/32 (2006.01)**

(30)優先權：2012/08/28 美國 61/694,148  
2013/08/27 美國 14/011,305

(71)申請人：先驅能源工業公司 (美國) ADVANCED ENERGY INDUSTRIES, INC. (US)  
美國

(72)發明人：布羅克 維克多 BROUK, VICTOR (US)；霍夫曼 丹尼爾 J HOFFMAN, DANIEL J. (US)；卡特 丹尼爾 CARTER, DANIEL (US)；寇瓦勒斯基 迪米崔 KOVALEVSKII, DMITRI (US)

(74)代理人：閻啟泰；林景郁

(56)參考文獻：

|    |                |    |            |
|----|----------------|----|------------|
| TW | 514967         | TW | 200952560A |
| US | 7520956B2      | US | 7777179B2  |
| US | 2012/0318456A1 |    |            |

審查人員：鄧人豪

申請專利範圍項數：33 項 圖式數：53 共 126 頁

## (54)名稱

用於對電漿處理進行廣動態範圍離子能量偏壓控制的方法和系統，以及體現此方法的相關電腦可讀取的儲存媒體

METHOD AND SYSTEM FOR WIDE DYNAMIC RANGE ION ENERGY BIAS CONTROL OF PLASMA PROCESSING, AND RELATED COMPUTER READABLE STORAGE MEDIUM EMBODYING SAID METHOD

## (57)摘要

此揭露內容係描述用於操作一電漿處理室之系統、方法及裝置。尤其，一週期性的電壓函數結合一離子電流補償可被提供成一修改後的週期性的電壓函數，而作為至一基板支撐座的一偏壓。此接著在該基板的表面上達成一 DC 偏壓，其係控制入射在該基板的一表面上的離子之離子能量。該週期性的電壓函數之一波峰至波峰的電壓可以控制該離子能量，而該離子電流補償可以控制該些離子的一離子能量分佈函數的一寬度。量測該修改後的週期性的電壓函數可以提供一手段以計算在該電漿中的一離子電流以及該電漿鞘的一鞘電容。該離子能量分佈函數可被調適，並且多個離子能量波峰可被產生，此兩者都是藉由該修改後的週期性的電壓函數的控制。

This disclosure describes systems, methods, and apparatus for operating a plasma processing chamber. In particular, a periodic voltage function combined with an ion current compensation can be provided as a bias to a substrate support as a modified periodic voltage function. This in turn effects a DC bias on the surface of the substrate that controls an ion energy of ions incident on a surface of the substrate. A peak-to-peak voltage of the periodic voltage function can control the ion energy, while the ion current compensation can control a width of an ion energy distribution function of the ions. Measuring the modified periodic voltage function can provide a means to calculate an ion current in the plasma and a sheath capacitance of

the plasma sheath. The ion energy distribution function can be tailored and multiple ion energy peaks can be generated, both via control of the modified periodic voltage function.

指定代表圖：

符號簡單說明：  
1700 . . . 方法  
1702~1708 . . . 步驟

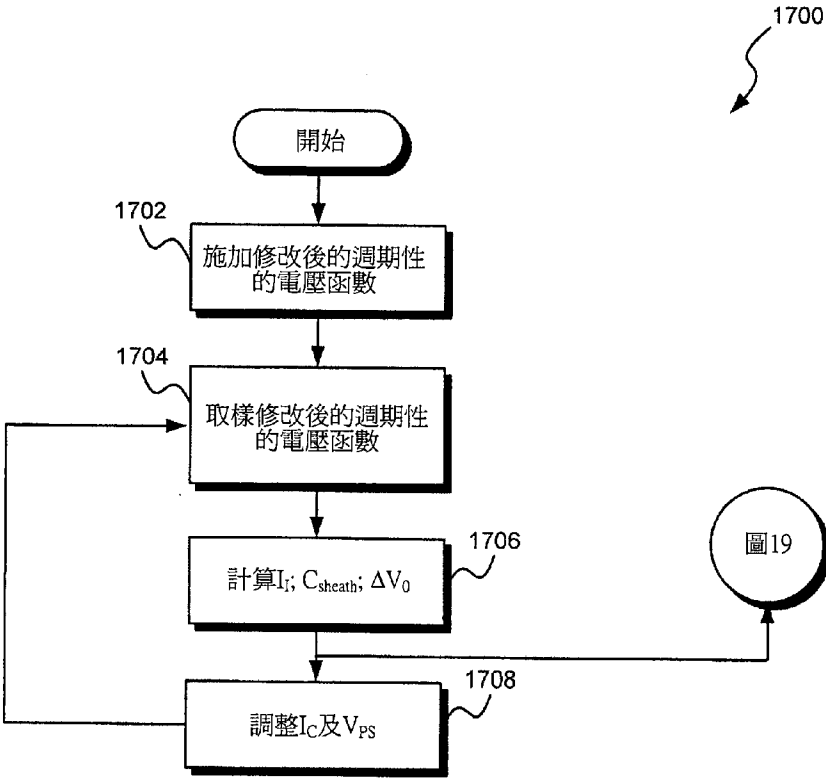


圖17

## 發明摘要

※ 申請案號：102130984

※ 申請日：102.8.28

※ IPC 分類：H01J 31/32 (2006.01)

## 【發明名稱】(中文/英文)

用於對電漿處理進行廣動態範圍離子能量偏壓控制的方法和系統，以及體現此方法的相關電腦可讀取的儲存媒體

METHOD AND SYSTEM FOR WIDE DYNAMIC RANGE ION ENERGY BIAS CONTROL OF PLASMA PROCESSING, AND RELATED COMPUTER READABLE STORAGE MEDIUM EMBODYING SAID METHOD

## 【中文】

此揭露內容係描述用於操作一電漿處理室之系統、方法及裝置。尤其，一週期性的電壓函數結合一離子電流補償可被提供成一修改後的週期性的電壓函數，而作為至一基板支撐座的一偏壓。此接著在該基板的表面上達成一 DC 偏壓，其係控制入射在該基板的一表面上的離子之離子能量。該週期性的電壓函數之一波峰至波峰的電壓可以控制該離子能量，而該離子電流補償可以控制該些離子的一離子能量分佈函數的一寬度。量測該修改後的週期性的電壓函數可以提供一手段以計算在該電漿中的一離子電流以及該電漿鞘的一鞘電容。該離子能量分佈函數可被調適，並且多個離子能量波峰可被產生，此兩者都是藉由該修改後的週期性的電壓函數的控制。

**【英文】**

This disclosure describes systems, methods, and apparatus for operating a plasma processing chamber. In particular, a periodic voltage function combined with an ion current compensation can be provided as a bias to a substrate support as a modified periodic voltage function. This in turn effects a DC bias on the surface of the substrate that controls an ion energy of ions incident on a surface of the substrate. A peak-to-peak voltage of the periodic voltage function can control the ion energy, while the ion current compensation can control a width of an ion energy distribution function of the ions. Measuring the modified periodic voltage function can provide a means to calculate an ion current in the plasma and a sheath capacitance of the plasma sheath. The ion energy distribution function can be tailored and multiple ion energy peaks can be generated, both via control of the modified periodic voltage function.

【代表圖】

【本案指定代表圖】：第（ 17 ）圖。

【本代表圖之符號簡單說明】：

1700 方法

1702~1708 步驟

【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：

無

# 發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動)

## 【發明名稱】(中文/英文)

用於對電漿處理進行廣動態範圍離子能量偏壓控制的方法和系統，以及體現此方法的相關電腦可讀取的儲存媒體

METHOD AND SYSTEM FOR WIDE DYNAMIC RANGE ION ENERGY BIAS CONTROL OF PLASMA PROCESSING, AND RELATED COMPUTER READABLE STORAGE MEDIUM EMBODYING SAID METHOD

## 【技術領域】

【0001】 本揭露內容係大致有關於電漿處理，並且尤其是有關於控制離子能量。

【0002】 本專利申請案係主張 2012 年 8 月 28 日申請的臨時申請案號 61/694,148 之名稱為“廣動態範圍離子能量偏壓控制；快速離子能量切換；離子能量控制與脈波式偏壓供應；以及虛擬前面板”的優先權，並且該申請案係讓與給在此的受讓人而且藉此明確被納入在此作為參考。

## 【先前技術】

【0003】 電漿處理可受益於對離子能量的精確控制，並且進一步受益於控制在處理期間入射在一基板上的離子的一離子能量分佈函數(IEDF)之能力。然而，精確的控制係受阻礙於缺少用於監測離子能量及 IEDF 的非侵入性且即時的手段。

【0004】 此外，有各種可以經由知道離子電流  $I_i$  及鞘電容  $C_2$ (或  $C_{sheath}$ ) 來加以監測的度量。然而，同樣缺少可以非侵入性且即時地監測這些值之系統及方法。

**【發明內容】**

**【0005】** 本發明被展示在圖式中之範例的實施例係在以下加以概述。這些實施例及其它實施例係更完整地敘述在詳細說明的段落中。然而，將被理解是，並無意圖要限制本發明至在此發明內容中或是在該詳細說明中所敘述的形式。熟習此項技術者可以體認到有許多落在如同在申請專利範圍中所表示的本發明的精神與範疇內之修改、等同物以及替代的結構。

**【0006】** 此揭露內容有五個主要的特點：成為在離子能量上的不準確性之一原因的電路‘記憶’、廣動態範圍、快速離子能量切換、脈波式離子能量控制以及虛擬的前面板。廣動態範圍係牽涉到一電漿處理室的一偏壓供應，其中該偏壓供應可以在該電漿處理室的一電漿內達成兩種或多種離子能量。該兩種或多種離子能量可以在準確性、穩定性以及一廣動態範圍(離子能量具有一個大的離子能量分佈)下加以達成。快速的離子能量切換係牽涉到該偏壓供應在一短的時間期間內達成該兩種或多種離子能量，例如從一個偏壓供應脈波或週期至下一個偏壓供應脈波或週期(脈波或週期亦以一修改後的週期性的電壓函數的期間著稱)。快速的離子能量切換亦包含該偏壓供應在單一週期內補償在離子能量上的干擾之能力。脈波式離子能量控制係牽涉到偏壓供應週期的一脈波化的波封相對於該電漿電源供應器的一脈波化的波封之時序。該虛擬的前面板係牽涉到一個致能控制在這前三項特點中所論述的系統、方法及裝置的使用者介面。

**【0007】** 在揭露內容的一特點中，一種操作一電漿處理室之方法係被描述。該方法可包含在該電漿處理室內維持一電漿接觸在一基板支撐座上的一基板。該方法可進一步包含存取該基板支撐座之一有效電容  $C_1$ 。該方

法可以又進一步包含提供一修改後的週期性的電壓函數至該基板支撐座，以便於在該基板的一表面上達成一電位，該修改後的週期性的電壓函數係由一週期性的電壓函數以及一離子電流補償  $I_c$  的一組合來加以形成。最後，該方法可包含以該修改後的週期性的電壓函數的量測的一函數來計算在該電漿中的離子電流  $I_i$ 。

【0008】 在該揭露內容的另一特點中，一種電漿處理系統係被揭示。該系統可包含一在一電漿處理室中的基板支撐座。該基板支撐座可以支承一基板。該系統亦可包含一提供一週期性的電壓函數之基板支撐座偏壓供應。該系統可進一步包含一提供一離子電流補償的離子電流補償構件。該離子電流補償可以和該週期性的電壓函數結合以形成一修改後的週期性的電壓函數，該修改後的週期性的電壓函數可被提供至該基板支撐座。於是，其係在該基板的相對於該基板支撐座的一表面上達成一直流電壓。此於是控制入射在該基板的相對於該基板支撐座的該表面上的離子的一離子能量。該修改後的週期性的電壓函數可具有一第一部分、一第二部分以及一第三部分。該第一部分可包含一快速增加的電壓，而該第二部分可包含一實質固定的電壓。該第三部分可包含一具有一開始電壓的斜坡電壓，該開始電壓是低於該實質固定的電壓一電壓步階  $\Delta V$ 。該電壓步階  $\Delta V$  可以對應於該離子能量，並且一斜率  $dV_0/dt$  可藉由該離子電流補償來加以控制。該系統可進一步包含一控制器，該控制器係具有一被編碼有處理器可讀取的指令之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，該些指令是用以：存取該基板支撐座之一有效電容  $C_i$ ；對於至少兩個離子電流補償值量測該斜率  $dV_0/dt$ ；並且以該有效電容  $C_i$  以及該斜率  $dV_0/dt$  的一函數來計算離子電流  $I_i$ 。



【0009】 在該揭露內容的又一特點中，一種非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體係被揭示。該儲存媒體可被編碼有處理器可讀取的指令以執行一種用於控制來自一電漿的離子的一離子能量分佈函數的特徵之方法，該些離子係入射在一電漿處理室內之一基板上。該方法可包含存取一支承該基板的基板支撐座之一有效電容  $C_1$ 。該方法亦可包含控制一由一基板偏壓供應所提供之週期性的電壓函數以及一由一離子電流補償構件所提供之離子電流補償。該週期性的電壓函數以及該離子電流補償之一組合可被稱為一修改後的週期性的電壓函數。該修改後的週期性的電壓函數可被提供至該基板支撐座，以便於在該基板的相對於該基板支撐座的一表面上達成一電位，並且藉此控制從該電漿入射在該基板上的離子的一離子能量  $eV$ 。該方法可進一步包含進行該修改後的週期性的電壓函數的量測並且根據該些量測反覆地計算在該電漿中的一離子電流  $I_1$ 。

#### 【圖式簡單說明】

【0010】 藉由結合所附的圖式來參照以下的詳細說明以及所附的申請專利範圍，本發明的各種目的及優點以及更完整的理解會是明顯且更容易體認到的：

圖 1 是一種電漿處理系統的一實施例；

圖 2 是可被利用以實現一開關模式的偏壓供應之構件的電路圖；

圖 3 是描繪兩個可被施加至  $T_1$  及  $T_2$ (作為  $V_2$  及  $V_4$ )以便於在  $V_{out}$  產生該週期性的電壓函數的驅動信號波形之時序圖；

圖 4 是描繪  $V_{bus}$  相對於時間、在該基板的表面之電壓相對於時間、以及對應的離子能量分佈之圖；

圖 5 是操作該開關模式偏壓供應的單一模式，其係達成一集中在一特定的離子能量之離子能量分佈(或是離子能量分佈函數(IEDF))；

圖 6 是描繪其中一離子電流補償構件係補償在該電漿室中的離子電流之一實施例的方塊圖；

圖 7 是一範例的離子電流補償構件；

圖 8 是描繪在  $V_0$  之一範例的電壓(例如，該修改後的週期性的電壓函數)之圖；

圖 9 係描繪一在開關構件  $T_1$  及  $T_2$  之間的電感  $L_1$  以及串聯電容  $C_{series}$ ；

圖 10 是一具有該能量排空構件的一特定實施例之偏壓供應；

圖 11 係描繪各種的 IEDF 形狀之圖；

圖 12 是一修改後的週期性的電壓函數，其中一干擾可見於一第一週期，其係影響下一個週期的  $\Delta V$ ；

圖 13 係展示一類似的修改後的週期性的電壓函數，但是在此例中一干擾係使得下降的電壓所依循的路徑不是該路徑；

圖 14 是一波形，其中在此揭露的系統及方法係被用來達成一所要的離子能量，儘管在一先前的週期中有不同的干擾；

圖 15 是一波形，其中在此揭露的系統及方法係被用來達成一所要的離子能量，儘管在一先前的週期中有不同的干擾；

圖 16 是一電流源之一範例實施例，其可被實施以實現參考圖 7 所述的電流源；

圖 17 是一種控制撞擊一基板的一表面之離子的一離子能量分佈之方法的一實施例；

圖 18 是一種控制撞擊一基板的一表面之離子的一離子能量分佈之方法的另一實施例；

圖 19 係展示用於設定該 IEDF 寬度及離子能量之方法；

圖 20 係描繪在一電源供應器電壓  $V_{PS}$  以及一離子能量分佈函數之間的三種關係；

圖 21 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數之間的關係之圖表的一實施例；

圖 22 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數之間的關係之圖表的另一實施例；

圖 23 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數之間的關係之圖表的又一實施例；

圖 24 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數之間的關係之圖表的又一實施例；

圖 25 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數之間的關係之圖表的另一實施例；

圖 26 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數

之間的關係之圖表的又一實施例；

圖 27 是展示在電源供應器開關時序、週期性的電壓函數、離子電流補償、修改後的週期性的電壓函數、基板表面電壓、以及離子能量分佈函數之間的關係之圖表的另一實施例；

圖 28 是一被脈波化在一藉由虛線所指出的脈波波封之內的電源供應；

圖 29 是一被脈波化在一藉由虛線所指出的脈波波封之內的用於一偏壓供應之修改後的週期性的電壓；

圖 30 係展示針對電漿密度及偏壓供應之量測到的波形；

圖 31 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 32 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 33 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 34 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 35 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 36 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 37 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 38 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 39 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 40 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 41 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 42 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 43 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 44 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 45 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 46 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 47 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 48 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 49 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 50 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 51 是一虛擬的前面板的一實施例；

圖 52 是一虛擬的前面板的一實施例；以及

圖 53 係展示一控制系統的一實施例之一概略的表示圖，一組指令可以在其中加以執行以用於使得一裝置執行或實行本揭露內容的特點及/或方法中的任一或多個。

### 【實施方式】

【0011】 一種電漿處理系統之一範例實施例係大致被展示在圖 1 中。如同所描繪的，一電漿電源供應器 102 係耦接至一電漿處理室 104，並且一開關模式的電源供應器 106 係耦接至一支撐座 108，一基板 110 係在該室 104 內靜止在該支撐座 108 之上。亦展示的是一耦接至該開關模式的電源供應器 106 之控制器 112。

【0012】 在此範例實施例中，該電漿處理室 104 可藉由具有實質習知的結構的室(例如，其包含一藉由一或多個泵(未顯示)而被抽空的真空外殼)來加以實現。此外，如同具有此項技術的通常知識者將會體認到的，在該室 104 中的電漿激勵可以是藉由包含例如是一螺旋類型電漿源的各種來源中之任一種，其係包含磁性線圈及天線以在該反應器中點燃且維持一電漿

114，並且一氣體入口可被設置以用於導入一氣體到該室 104 中。

【0013】 如同所描繪的，該範例的電漿室 104 係被配置並且組態設定以實行利用該基板 110 的高能離子轟擊之電漿輔助的材料蝕刻以及其它的電漿處理(例如，電漿沉積以及電漿輔助的離子植入)。該電漿電源供應器 102 在此實施例中是被配置以經由一匹配網路(未顯示)來在一或多個頻率(例如，13.56MHz)下施加電力(例如，RF 電力)至該室 104，以便於點燃且維持該電漿 114。應瞭解的是，本發明並不限於任何特定類型的電漿電源供應器 102 或電源來耦合電力至該室 104，並且各種頻率及功率位準可以是電容性或電感性耦合至該電漿 114。

【0014】 如同所描繪的，一待處理的介電基板 110(例如，一半導體晶圓)係至少部分藉由一支撐座 108 來加以支承，該支撐座 108 可包含一習知的晶圓夾頭(例如，用於半導體晶圓的處理)的一部分。該支撐座 108 可被形成以具有一在該支撐座 108 與該基板 110 之間的絕緣層，其中該基板 110 是電容性耦合至該平台，但是可浮接在一不同於該支撐座 108 的電壓。

【0015】 如上所論述，若該基板 110 及支撐座 108 是導體，則施加一非變化的電壓至該支撐座 108 是可行的並且因此導電通過該基板 110，該被施加至該支撐座 108 的電壓亦施加至該基板 110 的表面。

【0016】 然而，當該基板 110 是一介電質時，一非變化的電壓至該支撐座 108 的施加是無法將一電壓施加橫跨該基板 110 的被處理的表面。因此，該範例的開關模式的電源供應器 106 係被配置以受到控制，以便於在該基板的表面 110 上達成一電壓，其係能夠吸引在該電漿 114 中的離子來和該基板 110 碰撞，以便於實行該基板 110 之一受控的蝕刻及/或沉積及/或其

它的電漿輔助的製程。

【0017】 再者，如同在此進一步論述的，該開關模式的電源供應器 106 的實施例係被配置以運作，以使得在由該電漿電源供應器 102 所施加(至該電漿 114)的電力以及由該開關模式的電源供應器 106 所施加至該基板 110 的電力之間有一無實質的互動。例如，由該開關模式的電源供應器 106 所施加的電力是可控制的，以便於使得離子能量能夠在不實質影響該電漿 114 的密度下加以控制。

【0018】 再者，描繪在圖 1 中之範例的開關模式的供應器 106 的許多實施例係藉由價格相當低廉的構件來加以實現，其可藉由相當簡單的控制演算法來加以控制。而且相較於習知技術的方法，該開關模式電源供應器 106 的許多實施例是更為有效率的；因此降低和移除過多的熱能相關的能量成本以及昂貴的材料。

【0019】 一種已知用於施加一電壓至一介電基板的技術係利用一與複雜的控制方案有關之高功率的線性放大器來施加電力至一基板支撐座，其係在該基板的表面感應一電壓。然而，此技術尚未被商業實體所採用，因為其尚未證實是符合成本效益、也未證實是足夠容易控制的。尤其，所利用的線性放大器通常是龐大、非常昂貴、效率差而且難以控制的。再者，線性放大器本質上需要 AC 耦合(例如，一阻擋的電容器)，並且像是夾持(chucking)的輔助功能係利用一平行的饋電(feed)電路來加以達成，此係損傷對於具有夾頭的電源之系統的 AC 頻譜純度。

【0020】 另一種已經被考量的技術是施加高頻電力(例如，利用一或多個線性放大器)至該基板。然而，此技術已經被發現是不利地影響電漿密

度，因為施加至基板的高頻電力會影響電漿密度。

【0021】 在某些實施例中，描繪在圖 1 中之開關模式的電源供應器 106 可藉由降壓、升壓及/或升降壓類型的電源技術來加以實現。在這些實施例中，該開關模式的電源供應器 106 可被控制以施加變化位準的脈波式電力，以在該基板 110 的表面上感應一電位。

【0022】 接著參考圖 2，其係可被利用以實現一開關模式的偏壓供應之構件的電路圖。如圖所示，在此實施例中的該些開關構件  $T_1$  及  $T_2$  係以一種半橋(或是亦被稱為推拉輸出電路)類型拓撲來加以配置。 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $C_1$  及  $C_2$  係整體代表一電漿負載， $C_{10}$  是一有效電容(在此亦被稱為一串聯電容或是一夾頭電容)，並且  $C_3$  是一選配的實體電容器，以避免來自該基板的表面上感應的電壓或是來自一靜電夾頭(未顯示)之 DC 電流流過該電路。 $C_{10}$  係被稱為有效電容，因為其係包含該基板支撐座以及靜電夾頭(或是 e-夾頭)的串聯電容(或是亦被稱為一夾頭電容)以及一例如是絕緣及基板的偏壓的施加之固有的其它電容。如同所描繪的， $L_1$  是雜散電感(例如，饋送電力至該負載的導體之固有電感)。並且在此實施例中有三個輸入： $V_{bus}$ 、 $V_2$  以及  $V_4$ 。

【0023】  $V_2$  及  $V_4$  係代表驅動信號，並且在此實施例中， $V_2$  及  $V_4$  可被定時(例如，該脈波的長度及/或相互的延遲)，使得  $T_1$  及  $T_2$  的閉合可被調變以控制該電壓輸出  $V_{out}$  的形狀，該電壓輸出  $V_{out}$  係被施加至該基板支撐座。在許多實施方式中，被用來實現該開關構件  $T_1$  及  $T_2$  的電晶體並非理想的開關，因而為了到達一所要的波形，電晶體特定的特徵係列入考慮。在許多操作模式中，單純改變  $V_2$  及  $V_4$  的時序係使得一所要的波形能夠被施



加在  $V_{out}$ 。

【0024】 例如，該等開關  $T_1$ 、 $T_2$  可被操作成使得在該基板 110 的表面之電壓大致是負的，其中週期性的電壓脈波係接近且/或稍微超過一正電壓參考。在該基板 110 的表面之電壓值是界定該些離子的能量者，該能量可以用一離子能量分佈函數(IEDF)來描述特徵。爲了在該基板 110 的表面達成所要的電壓，在  $V_{out}$  處之脈波可以是大致矩形的，並且具有一足夠長的寬度以在該基板 110 的表面感應一短暫的正電壓，以便於吸引足夠的電子到該基板 110 的表面以達成該所要的電壓以及對應的離子能量。

【0025】 該接近且/或稍微超過該正電壓參考之週期性的電壓脈波可具有一受限於該等開關  $T_1$ 、 $T_2$  的切換能力之最小的時間。該電壓之大致負的部分可以延長，只要該電壓並不會累積至一損壞該開關的位準即可。同時，該電壓之負的部分的長度應該超過一離子橫過(transit)時間。

【0026】 在此實施例中的  $V_{bus}$  係界定在  $V_{out}$  之處量測到的脈波的振幅，而  $V_{out}$  係界定在該基板的表面之電壓，並且因此界定該離子能量。

【0027】 該兩個信號  $V_2$ 、 $V_4$  的脈波寬度、脈波形狀及/或相互延遲可加以調變，以在  $V_{out}$  之處達到一所要的波形(在此亦被稱爲一修改後的週期性的電壓函數)，並且施加至  $V_{bus}$  的電壓可能影響該些脈波的特徵。換言之，該電壓  $V_{bus}$  可能影響該信號  $V_2$ 、 $V_4$  的脈波寬度、脈波形狀及/或相對的相位。例如，簡略地參考圖 3，所展示的是描繪可施加至  $T_1$  及  $T_2$  的兩個驅動信號波形(作爲  $V_2$  及  $V_4$ )以便於在  $V_{out}$  產生該週期性的電壓函數之時序圖。爲了調變在  $V_{out}$  之處的脈波形狀(例如，爲了在  $V_{out}$  達成用於該脈波之最小的時間，但是達到該些脈波的一波峰值)，該兩個閘驅動信號  $V_2$ 、 $V_4$  的

時序可加以控制。

【0028】 例如，該兩個閘極驅動信號  $V_2$ 、 $V_4$  可施加至該開關構件  $T_1$ 、 $T_2$ ，因而該些脈波的每一個被施加在  $V_{out}$  之時間相較於在脈波之間的時間可能是短的，但為足夠長到能夠在該基板 110 的表面感應一正電壓以吸引電子到該基板 110 的表面。再者，已經發現到藉由改變在該些脈波之間的閘極電壓位準，控制在該些脈波之間被施加至  $V_{out}$  的電壓的斜率是可能的(例如，用以在脈波之間於該基板的表面達成一實質固定的電壓)。在某些操作模式中，該些閘極脈波的重複速率是大約 400kHz，但是此速率當然可隨著應用不同而變化。

【0029】 儘管並非必須的，但實際上，根據在實際的實施上建立模型以及微調，可被用來產生所要的(或是所界定的)離子能量分佈的波形可加以定義，並且該些波形可加以儲存(例如，在參考圖 1 所述的波形記憶體部分中儲存為一系列的電壓位準)。此外，在許多實施方式中，該些波形可以直接被產生(例如，在無來自  $V_{out}$  的回授下)；因此避免一回授控制系統之非所要的特點(例如，趨穩時間)。

【0030】 再次參照圖 2， $V_{bus}$  可被調變以控制該些離子的能量，並且該些儲存的波形可被用來控制該閘極驅動信號  $V_2$ 、 $V_4$  以在  $V_{out}$  之處達成一所要的脈波振幅，同時最小化該脈波寬度。同樣地，此係根據該些電晶體之特定的特徵而被完成，該些特徵可被建立模型或實施並且憑經驗地加以建立。例如，參照圖 4，所展示的是描繪  $V_{bus}$  相對於時間、在該基板 110 的表面之電壓相對於時間、以及對應的離子能量分佈之圖。

【0031】 在圖 4 中的圖形係描繪操作該開關模式偏壓供應器 106 的單

一模式，其係達成一集中在一特定的離子能量之離子能量分佈(或是離子能量分佈函數(IEDF))。如同所描繪的，爲了達成在此例子中的單一濃度的離子能量，被施加在  $V_{bus}$  之處的電壓係被維持爲固定的，而施加至  $V_2$  及  $V_4$  的電壓係被控制(例如，利用描繪在圖 3 中的驅動信號)以便於在該開關模式的偏壓供應器 106 的輸出處產生脈波，此係達成在圖 4 中所示之對應的離子能量分佈。

【0032】 如在圖 4 中所繪，在該基板 110 的表面之電位是大致爲負的，以吸引轟擊且蝕刻該基板 110 的表面之離子。施加至該基板 110(藉由施加脈波至  $V_{out}$ )之週期性的短脈波係具有一藉由施加至  $V_{bus}$  的電位所界定的大小，並且這些脈波係在該基板 110 的電位上造成一短暫的改變(例如，接近正或是稍微正的電位)，此係吸引電子到該基板的表面以沿著該基板 110 的表面達成該大致負的電位。如圖 4 中所繪，施加至  $V_{bus}$  之固定的電壓係達成在特定的離子能量之單一濃度的離子通量；因此一特定的離子轟擊能量可藉由單純設定  $V_{bus}$  至一特定的電位來加以選擇。在其它操作模式中，兩個或多個個別的濃度的離子能量可被產生(例如，見於圖 5、20、23、25、26、27)。

【0033】 具有此項技術的技能者將會體認到，該電源供應器不須限於開關模式的電源供應器，並且因此該電源供應器的輸出亦可被控制以便於達成某一離子能量。就此而論，不論是開關模式或者是其它，當該電源供應器的輸出在不結合離子電流補償或離子電流下被考慮時，其亦可被稱爲一電源供應器電壓  $V_{PS}$ 。

【0034】 接著參考圖 5，例如所展示的是描繪一種雙模式的操作模式之圖，其中在離子能量分佈中，兩個個別的波峰係被產生。如圖所示，在

此操作模式中，該基板係遭受到兩個不同的電壓位準以及週期性的脈波，並且因此兩個個別的濃度的離子能量係被產生。如同所描繪的，爲了達成該兩個不同的離子能量濃度，被施加在  $V_{bus}$  之處的電壓係交替在兩個位準之間，並且每個位準係界定該兩個離子能量濃度的能量位準。

【0035】 儘管圖 5 描繪該兩個在基板 110 之電壓在每個脈波之後交替(例如，圖 25 及 27)，但是當然此並非必須的。例如，在其它操作模式中，施加至  $V_2$  及  $V_4$  的電壓係相對於施加至  $V_{out}$  的電壓來加以切換(例如，利用描繪在圖 3 中的驅動信號)，因而在該基板的表面處感應的電壓係在兩個或多個脈波之後從一第一電壓交替到一第二電壓(並且反之亦然)(例如，圖 26)。

【0036】 在習知技術中，已經做成嘗試來施加兩個波形(藉由波形產生器產生)的組合至一線性放大器並且施加該兩個波形之放大後的組合至該基板，以便於達成多個離子能量。然而，此方法是遠較參考圖 5 所述的方法複雜，並且需要一昂貴的線性放大器以及波形產生器。

【0037】 接著參考圖 6，其係描繪一個其中一離子電流補償構件 660 係補償在電漿室 604 中的離子電流的實施例之方塊圖。申請人已經發現到，在較高能的位準下，在該室內之較高位準的離子電流會影響在該基板的表面處之電壓，並且因此該離子能量分佈亦受到影響。

【0038】 該離子電流補償構件 660 可被實現爲一個別的配件，其可以選配地被加至該開關模式電源供應器 606 及控制器 612。在其它實施例中(例如，如圖 7 中所繪)，該離子電流補償構件 660 可以和其它在此所述的構件(例如，該開關模式的電源供應器 106、606 以及離子電流補償 660)共用一共同的殼體 766(參見圖 7)。在此實施例中，提供至該電漿室 604 之週期性的電

壓函數可被稱爲一修改後的週期性的電壓函數，因爲其係包括藉由來自離子電流補償構件 660 的離子電流補償來加以修改之週期性的電壓函數。該控制器 612 可以在不同的時間，在該開關模式電源供應器 606 的輸出以及該離子電流補償 660 結合之處的一電氣節點取樣一電壓  $V_0$ 。

【0039】 如圖 7 中所繪，所展示的是一範例的離子電流補償構件 760，其係包含一耦接至一開關模式供應器的一輸出 736 之電流源 764 以及一耦接至該電流源 764 與該輸出 736 兩者的電流控制器 762。同樣描繪在圖 7 中的是一電漿室 704，並且在該電漿室內的是電容性元件  $C_1$ 、 $C_2$  以及離子電流  $I_i$ 。如同所描繪的， $C_1$  係代表和該室 704 相關的構件之固有的電容(在此亦被稱爲有效電容)，其可包含但不限於絕緣、基板、基板支撐座、以及一 e-夾頭，並且  $C_2$  係代表鞘電容以及雜散電容。在此實施例中，提供至該電漿室 704 並且可量測爲  $V_0$  之週期性的電壓函數可被稱爲一修改後的週期性的電壓函數，因爲其係包括藉由該離子電流補償  $I_c$  加以修改之週期性的電壓函數。

【0040】 該鞘(在此亦被稱爲一電漿鞘)是在一電漿中靠近該基板表面的一層並且可能是該電漿處理室的壁，其係具有高密度的正離子並且因此具有整體過多的正電荷。該鞘接觸到的表面通常具有負電荷的優勢。該鞘是起因於電子比正離子快的速度，因此使得較大比例的電子到達該基板表面或壁，因此留下該鞘是匱乏電子的。該鞘厚度  $\lambda_{sheath}$  是例如爲電漿密度及電漿溫度的電漿特徵的一函數。

【0041】 應注意到的是，因爲  $C_1$  在此實施例中是和該室 704 相關的構件之一固有的(在此亦被稱爲有效的)電容，其並不是在處理期間可被控制

的電容。例如，某些利用一線性放大器之習知技術的方法係利用一阻擋電容器來耦合偏壓電力至該基板，並且接著利用一受監測的橫跨該阻擋電容器之電壓作為回授，以控制其線性放大器。儘管在此揭露的許多實施例中，一電容器可以耦合一開關模式電源供應器至一基板支撐座，但如此做是不必要的，因為利用一阻擋電容器的回授控制在本發明的數個實施例中不是必須的。

【0042】 當參照圖 7 時，亦同時參考到圖 8，其係描繪在圖 7 中所描繪的  $V_0$  處之一範例的電壓(例如，該修改後的週期性的電壓函數)之圖。在操作中，該電流控制器 762 係監測在  $V_0$  處之電壓(該修改後的週期性的電壓函數)。離子電流係在一段間隔  $t$  或是其之某個子部分(描繪在圖 8 中)上被計算為：

$$I_i = C_1 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{方程式 1})$$

【0043】 離子電流  $I_i$  以及固有的電容(亦被稱為有效電容) $C_1$  中之任一或兩者可以是隨時間變化的。因為  $C_1$  對於一給定的工具而言是實質固定且可測量的，所以只需要監測  $V_0$  以致能持續的控制補償電流。如上所論述，為了獲得更為單一的離子能量的高能分佈，該電流控制器係控制該電流源 764，使得  $I_c$  是和  $I_i$  實質相同的(或者在替代方案中，其係根據方程式 3 相關的)。以此種方式，一個窄分佈的離子能量可加以維持，即使當該離子電流到達一會影響在該基板的表面處之電壓的位準。

【0044】 同樣描繪在圖 7 中的是一回授線 770，其可以與控制一離子能量分佈有關地被利用。例如，描繪在圖 8 中的  $\Delta V$  的值(在此亦被稱為一電

壓步階或是第三部分 806)係指出瞬間的離子能量，並且可被用在許多實施例以作為一回授控制迴路的部分。在一實施例中，該電壓步階 $\Delta V$  係根據方程式 6 而相關於離子能量。在其它實施例中，波峰至波峰的電壓  $V_{PP}$  可以相關於該瞬間的離子能量。或者是，在該波峰至波峰的電壓  $V_{PP}$  與第四部分 808 的斜率  $dV_0/dt$  乘上時間  $t$  的乘積之間的差值可以關連於該瞬間的離子能量 (例如， $V_{PP} - dV_0/dt \cdot t$ )。

【0045】 接著參考圖 16，所展示的是一電流源 1664 之一範例實施例，其可被實施以實現參考圖 7 所述的電流源 764。在此實施例中，一與一串聯電感器 L2 相關之可控制的負 DC 電壓源係作用為一電流源，但是具有此項技術的通常知識者將會體認到，根據此說明書，一電流源可藉由其它構件及/或配置來加以實現。

【0046】 圖 17 係描繪一種控制撞擊一基板的一表面的離子的一離子能量分佈之方法的一實施例。該方法 1700 係開始以施加一修改後的週期性的電壓函數 1702(見於圖 8 中之修改後的週期性的電壓函數 802)至在一電漿處理室內支承一基板的一基板支撐座。該修改後的週期性的電壓函數可以經由至少兩個‘旋鈕’，例如一離子電流補償  $I_c$ (見於圖 21 中的  $I_c$  2104)以及一電源供應器電壓  $V_{PS}$ (見於圖 21 中的電源供應器電壓 2106)來加以控制。一用於產生該電源供應器電壓之範例的構件是圖 1 中的開關模式電源供應器 106。為了幫助解說該電源供應器電壓  $V_{PS}$ ，其係在此被描繪成就像是在無耦合至該離子電流及離子電流補償下量測的。該修改後的週期性的電壓函數係接著在一離子電流補償  $I_c$  的一第一及第二值加以取樣 1704。該修改後的週期性的電壓函數的一電壓的至少兩個樣本係對於該離子電流補償  $I_c$

的每個值來加以取得。該取樣 1704 係被執行以便於致能該離子電流  $I_i$  以及一鞘電容  $C_2$  (例如，圖 2 中的  $C_2$ ) 的計算 1706 (或判斷)。譬如，離子電流  $I_i$  可利用方程式 1 來加以判斷。此種判斷可能牽涉到找出一離子電流補償  $I_c$ ，若其被施加至該基板支撐座 (或是當施加至該基板支撐座時)，將會產生一個窄的 (例如，最小的) 離子能量分佈函數 (IEDF) 寬度。該計算 1706 亦可以選配地包含根據該修改後的週期性的電壓函數的波形之取樣 1704 來決定一電壓步階  $\Delta V$  (亦以該修改後的週期性的電壓函數 1406 的一第三部分著稱)。該電壓步階  $\Delta V$  可以相關於到達該基板的表面的離子之一離子能量。當第一次找出該離子電流  $I_i$  時，該電壓步階  $\Delta V$  可被忽略。該取樣 1704 及計算 1706 的細節將會在以下的圖 18 的討論中加以提出。鞘電容  $C_2$  可經由以下的方程式而被計算出：

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot (I_i + I_c)}{I_c - C_1 \cdot \frac{dV_0}{dt}} \quad (\text{方程式 2})$$

【0047】 一旦該離子電流  $I_i$  以及鞘電容  $C_2$  是已知的，則該方法 1700 可以移到圖 19 的方法 1900，該方法 1900 係涉及設定與監測該 IEDF 的一離子能量以及一形狀 (例如，寬度)。譬如，圖 23 係描繪在該電源供應器電壓上的一改變是如何可以達成在該離子能量上的一改變。尤其，該舉例說明的電源供應器電壓的大小係被降低，此係產生該離子能量之一降低的大小。此外，圖 24 係描繪給定一個窄 IEDF 2414，該 IEDF 可以藉由調整該離子電流補償  $I_c$  而被加寬。替代或平行地，該方法 1700 可以執行利用該離子電流  $I_i$ 、鞘電容  $C_2$  以及該修改後的週期性的電壓函數的波形的其它特點之各種的度量。



【0048】 除了設定該離子能量及/或 IEDF 寬度之外，該方法 1700 可以調整該修改後的週期性的電壓函數 1708 以便於維持該離子能量以及 IEDF 寬度。尤其，由一離子電流補償構件所提供的離子電流補償  $I_c$  的調整以及該電源供應器電壓的調整可加以執行 1708。在某些實施例中，該電源供應器電壓可藉由該電源供應器的一匯流排電壓  $V_{bus}$  (例如，圖 2 的匯流排電壓  $V_{bus}$ ) 來加以控制。該離子電流補償  $I_c$  係控制該 IEDF 寬度，並且該電源供應器電壓係控制該離子能量。

【0049】 在這些調整 1708 之後，該修改後的週期性的電壓函數可以再次被取樣 1704，並且離子電流  $I_i$ 、鞘電容  $C_2$ 、以及電壓步階  $\Delta V$  的計算可以再次加以執行 1706。若該離子電流  $I_i$  或電壓步階  $\Delta V$  是定義值(或者在替代方案中是所要的值)之外的值，則該離子電流補償  $I_c$  及/或該電源供應器電壓可被調整 1708。該取樣 1704、計算 1706 及調整 1708 的迴圈可以發生，以便於維持該離子能量 eV 及/或 IEDF 寬度。

【0050】 圖 18 係描繪一種控制撞擊一基板的一表面的離子的一離子能量分佈之方法的另一實施例。在某些實施例中，如上所論述，達成一個窄的 IEDF 寬度(例如，一最小的 IEDF 寬度、或者在替代方案中是~6%的半峰全寬)可能是所期望的。就此而論，該方法 1800 可以提供一修改後的週期性的電壓函數至該室並且至該基板支撐座，使得一固定的基板電壓以及因此鞘電壓存在於該基板的表面處。此於是加速離子橫跨利用一實質固定的電壓之鞘，因此使得離子能夠以實質相同的離子能量(換言之，一個窄的 IEDF 寬度)來撞擊該基板。譬如，在圖 22 中可看出的是調整該離子電流補償  $I_c$  可以使得該基板電壓  $V_{sub}$  在脈波之間具有一固定或是實質固定的電壓，

因此使得該 IEDF 是窄的。

【0051】 假設沒有雜散電容，此種修改後的週期性的電壓函數係在該離子電流補償  $I_c$  等於該離子電流  $I_i$  時被達成(見於圖 22 中之週期性的電壓函數( $V_0$ )的最後五個週期)。在替代方案中，其中雜散電容  $C_{stray}$  係被考慮，該離子電流補償  $I_c$  係根據方程式 3 而相關於該離子電流  $I_i$ ：

$$I_i = I_c \frac{C_i}{C_i + C_{stray}} \quad (\text{方程式 3})$$

【0052】 其中， $C_i$  是一有效電容(例如，參考圖 2 及 9-10 所述的固有的電容)。該有效電容  $C_i$  可以隨時間變化或是固定的。爲了此揭露內容之目的，當  $I_i = I_c$ 、或是在替代方案中當方程式 3 符合( $I_i$  及  $I_c$  的等效考量雜散電容)時，該窄的 IEDF 寬度可以存在。圖 21-27 係使用術語  $I_i = I_c$ ，但應瞭解的是此關係是假設可忽略的雜散電容。更嚴格的關係係經由方程式 3 加以展示，並且因此方程式 3 可以取代圖 21-27 中所用的等式。該雜散電容  $C_{stray}$  是該電源供應器所看到的電漿室之一累積的電容。在圖 22 中描繪有八個週期。

【0053】 該方法 1800 可以開始以一修改後的週期性的電壓函數(例如，在圖 8 中描繪之修改後的週期性的電壓函數、或是在圖 21 中之修改後的週期性的電壓函數 2102)的施加至該基板支撐座 1802(例如，圖 1 中的基板支撐座 108)。該修改後的週期性的電壓函數的一電壓可以兩次或是多次加以取樣 1804，並且從此取樣，對於該修改後的週期性的電壓函數的一週期的至少一部分之一斜率  $dV_0/dt$  可被計算出 1806(例如，在該些脈波之間的部分或是該第四部分 808 之一斜率)。在決策 1810 之前的某一點，一有效電容  $C_i$ (例如，在圖 13 中之固有的電容  $C_i$  以及在圖 2 中之一固有的電容  $C_{i0}$ )之一先前判斷出的值可被存取 1808(例如，從一記憶體擷取出之一先前量測到

的值、藉由使用者輸入的一值、或是一即時量測的值)。根據該斜率  $dV_0/dt$ 、有效電容  $C_1$  以及離子電流補償  $I_c$ ，一函數  $f$ (方程式 4)可以如下地對於該離子電流補償  $I_c$  的每個值來加以評估：

$$f(I_c) = \frac{dV_0}{dt} - \frac{I_c}{C_1} = 0 \quad (\text{方程式 4})$$

【0054】 若該函數  $f$  成立，則該離子電流補償  $I_c$  等於該離子電流  $I_i$ 、或是在替代方案中，其係使得方程式 3 成立，並且一個窄的 IEDF 寬度已經達成 1810(例如，見於圖 22)。若該函數  $f$  不成立，則該離子電流補償  $I_c$  可進一步被調整 1812，直到該函數  $f$  成立為止。另一種看待此的方式是該離子電流補償  $I_c$  可被調整直到其符合該離子電流  $I_i$ (或者在替代方案中，符合方程式 3 的關係)為止，在該點，一個窄的 IEDF 寬度將會存在。此種對於該離子電流補償  $I_c$  的調整以及所產生的 IEDF 的窄化可見於圖 22 中。該離子電流  $I_i$  以及對應的離子電流補償  $I_c$  可在儲存操作中加以儲存(例如，在一記憶體中)1814。如同該有效電容  $C_1$ ，該離子電流  $I_c$  也可以在時間上變化。

【0055】 當方程式 4 符合時，離子電流  $I_i$  是已知的(不是因為  $I_c=I_i$ 、就是因為方程式 3 成立)。因此，該方法 1800 係使得離子電流  $I_i$  能夠在不影響該電漿下即時地遠端且非侵入性的量測。此導致有一些例如是電漿密度的遠端監測以及電漿源的遠端錯誤偵測之新穎的度量。

【0056】 當調整 1812 該補償電流  $I_c$  時，該離子能量將可能會比一  $\delta$  函數寬，並且該離子能量將會類似圖 21 的離子能量。然而，一旦該補償電流  $I_c$  被發現符合方程式 3，則該 IEDF 將會看起來像是圖 22 的右邊部分一像是具有一個窄的 IEDF 寬度(例如，一最小的 IEDF 寬度)。這是因為當  $I_c=I_i$ (或者是當方程式 3 成立)時，在該修改後的週期性的電壓函數的脈波之間的電

壓係造成一實質固定的鞘或是基板電壓，以及因此是實質固定的離子能量。在圖 23 中，該基板電壓 2308 係包含在該些固定的電壓部分之間的脈波。這些脈波係具有如此短的持續期間，使得其在離子能量及 IEDF 上的影響是可忽略的，並且因此該基板電壓 2308 係被稱為實質固定的。

【0057】 以下係提供有關描繪在圖 18 中的方法步驟的每一個之進一步細節。在一實施例中，該修改後的週期性的電壓函數可具有一像是描繪在圖 8 中的波形，並且可包含一第一部分(例如，第一部分 802)、一第二部分(例如，804)、一第三部分(例如，第三部分 806)、以及一第四部分(例如，第四部分 808)，其中該第三部分可具有一電壓步階 $\Delta V$ ，並且該第四部分可具有一斜率  $dV_0/dt$ 。該斜率  $dV_0/dt$  可以是正的、負的、或是零。該修改後的週期性的電壓函數 800 亦可被描述為具有包括該第一部分 802、第二部分 804、以及該第三部分 806 之脈波以及一在該些脈波之間的部分，亦即一第四部分 808，此經常是傾斜的。

【0058】 該修改後的週期性的電壓函數可以被量測為在圖 2 中的  $V_0$ ，並且可以出現為在圖 21 中之修改後的週期性的電壓函數 2102。該修改後的週期性的電壓函數 2102 係藉由結合該電源供應器電壓 2106(亦以該週期性的電壓函數著稱)與該離子電流補償 2104 來加以產生。該電源供應器電壓 2106 係大部分負責產生及成形該修改後的週期性的電壓函數 2102 的脈波，並且該離子電流補償 2104 係大部分負責產生及成形在該些脈波之間的部分，該部分經常是一直線的斜坡電壓。增加該離子電流補償  $I_c$  係造成在該些脈波之間的該部分的斜率大小上的減少，即如同在圖 22 中可見者。減少該電源供應器電壓 2306 的大小係造成在該些脈波的振幅以及該修改後的

週期性的電壓函數 2302 之波峰至波峰的電壓的大小上的減少，即如同在圖 23 中可見者。

【0059】 在其中該電源供應器是一開關模式的電源供應器的情形中，一第一開關  $T_1$  以及一第二開關  $T_2$  的切換圖 2110 可以適用。譬如，該第一開關  $T_1$  可被實施為圖 2 中的開關  $T_1$ ，並且該第二開關  $T_2$  可被實施為圖 2 中的第二開關  $T_2$ 。該兩個開關係被描繪為具有相同的切換時間，但是為  $180^\circ$  的反相。在其它實施例中，該等開關可具有一個些微的相位偏移，例如在圖 3 中描繪者。當該第一開關  $T_1$  是導通(到達一第一時間  $\tau_1$ )時，該電源供應器電壓( $V_{PS}$ )係被拉向一最大的大小(一負電壓，因為該電源供應器係具有一負的匯流排電壓)。該第二開關  $T_2$  在此期間係被關斷，因而該電源供應器電壓 2106 係與接地隔離開。當該等開關反轉(在該第一時間  $\tau_1$ )時，該電源供應器電壓 2106 係斜坡上升且稍微超過接地，並且接著趨穩在此正電壓。此斜坡上升及趨穩係發生在該第一時間  $\tau_1$  以及一第二時間  $\tau_2$  之間。該第一開關  $T_1$  係接著再次被導通，並且該第二開關  $T_2$  係被關斷直到一第三時間  $\tau_3$  為止。導通該第一開關  $T_1$  係使得該電壓下降一電壓步階  $\Delta V$ ，其接著是一具有一斜率  $dV/dt$  之傾斜的區域，直到該等開關在該第三時間  $\tau_3$  再次反轉為止。該第三時間  $\tau_3$  也是該修改後的週期性的電壓函數之一後續的週期或期間的一第一時間。

【0060】 在該舉例說明的實施例中，有兩個脈波寬度，但是此並非必須的。在其它實施例中，該脈波寬度對於所有的週期而言可以是相同的。在其它實施例中，該脈波寬度可以隨著時間被改變或調變。

【0061】 該修改後的週期性的電壓函數可被施加至該基板支撐座

1802, 並且在該修改後的週期性的電壓函數到達該基板支撐座之前的最後一個可接達的點(例如, 在該開關模式電源供應器與該有效電容之間)加以取樣 1804 為  $V_0$ 。未修改的週期性的電壓函數(或是在圖 21 中的電源供應器電壓 2106)可以是源自於一例如是圖 12 中的開關模式電源供應器 1206 之電源供應器。在圖 21 中的離子電流補償 2104 可以是源自於一例如是圖 12 中的離子電流補償構件 1260 或是圖 13 中的離子電流補償構件 1360 之電流源。

【0062】 修改後的週期性的電壓函數的一部分或整體可加以取樣 1804。譬如, 該第四部分(例如, 第四部分 808)可被取樣。該取樣 1804 可被執行在該電源供應器與該基板支撐座之間。譬如, 在圖 1 中, 該取樣 1804 可被執行在該開關模式電源供應器 106 與該支撐座 108 之間。在圖 2 中, 該取樣 1804 可被執行在該電感器 L1 與該固有的電容 C10 之間。在一實施例中, 該取樣 1804 可被執行在該電容 C3 與該固有的電容 C10 之間的  $V_0$  處。由於該固有的電容 C10 以及代表該電漿(R2、R3、C1 及 C2)的元件是無法接達以用於即時的量測, 因此該取樣 1804 通常是執行在圖 2 中之固有的電容 C10 的左邊。儘管該固有的電容 C10 通常並非在處理期間加以量測, 其通常是一已知的常數, 並且因此可以在製造期間加以設定。同時, 在某些情形中, 該固有的電容 C10 可以隨著時間變化。

【0063】 儘管在某些實施例中只需要該修改後的週期性的電壓函數的兩個樣本, 但是在其它實施例中, 可以對於該修改後的週期性的電壓函數的每個週期取得數百個、數千個或是數萬個樣本。譬如, 該取樣速率可以是大於 400kHz。這些取樣速率係致能該修改後的週期性的電壓函數以及其形狀之更準確且詳細的監測。同理, 該週期性的電壓函數之更詳細的監

測係容許在週期之間、在不同的製程條件之間、在不同的製程之間、在不同的室之間、在不同的來源之間等等的波形之更正確的比較。譬如，在這些取樣速率下，描繪在圖 8 中之週期性的電壓函數的第一、第二、第三及第四部分 802、804、806、808 可加以區別，此在傳統的取樣速率下可能是不可行的。在某些實施例中，較高的取樣速率係致能該電壓步階 $\Delta V$  以及該斜率  $dV_0/dt$  的解析，這在習知技術中是不可行的。在某些實施例中，該修改後的週期性的電壓函數的一部分可加以取樣，而其它部分並不加以取樣。

【0064】 該斜率  $dV_0/dt$  的計算 1806 可以根據在該時間  $t$  期間(例如，該第四部分 808)所取得的複數個  $V_0$  量測。譬如，一線性擬合(fit)可被執行以將一線擬合至該些  $V_0$  值，其中該線的斜率係給出該斜率  $dV_0/dt$ 。在另一實施例中，該些在圖 8 中的時間  $t$ (例如，該第四部分 808)的開始及結束之  $V_0$  值可加以確定，並且一線可以擬合在這兩個點之間，其中該線的斜率係被給出作為  $dV_0/dt$ 。這只是許多種可計算在該些脈波之間的部分之斜率  $dV_0/dt$  的方式中的兩種而已。

【0065】 該決策 1810 可以是一被用來調諧該 IEDF 至一個窄的寬度(例如，一最小的寬度、或是在替代的方案中為 6%的半峰全寬)之疊代的迴圈的部分。方程式 4 只有在該離子電流補償  $I_c$  等於該離子電流  $I_i$ (或是在替代方案中是根據方程式 3 相關於  $I_i$ )的情形中才成立，此只發生在具有一固定的基板電壓並且因此唯一固定且實質單一的離子能量(一個窄的 IEDF 寬度)的情形中。一固定的基板電壓 2308( $V_{sub}$ )可見於圖 23 中。因此，離子電流  $I_i$  或者是離子電流補償  $I_c$  都可在方程式 4 中加以利用。

【0066】 或者是，兩個沿著該第四部分 808(亦被稱為在該些脈波之間

的部分)的值可對於一第一週期以及一第二週期來加以取樣，並且一第一及第二斜率可分別對於每個週期來加以判斷出。從這兩個斜率，一離子電流補償  $I_c$  可被決定，其係預期將會使得方程式 4 成立於一第三、但尚未量測的斜率。因此，一離子電流  $I_i$  可被估計出，其係被預測是對應於一個窄的 IEDF 寬度。這些只是許多種可決定一個窄的 IEDF 寬度、並且可以找到一對應的離子電流補償  $I_c$  及/或一對應的離子電流  $I_i$  的方式中的兩種而已。

【0067】 對於該離子電流補償  $I_c$  的調整 1812 可能牽涉到在該離子電流補償  $I_c$  上的增加或減少，並且對於每次調整而言，在該步階大小上並沒有限制。在某些實施例中，在方程式 4 中的函數  $f$  的一正負號可被利用以決定是增加或減少該離子電流補償。若該正負號是負的，則該離子電流補償  $I_c$  可被降低，然而正的正負號可以指出需要增加該離子電流補償  $I_c$ 。

【0068】 一旦一離子電流補償  $I_c$  已經被識別等於該離子電流  $I_i$  (或是在替代方案中係根據方程式 3 而相關於其)，則該方法 1800 可以前進到進一步的設定點的操作(見於圖 19)或是遠端的室及來源監測的操作。該進一步的設定點的操作可包含設定該離子能量(亦見於圖 23)以及離子能量的分佈或 IEDF 寬度(亦見於圖 24)。該來源及室監測可包含監測電漿密度、電源供應器異常、電漿電弧以及其它。

【0069】 再者，該方法 1800 可以選配地迴圈回到該取樣 1804 以便於持續地(或是在替代方案中，週期性地)更新該離子電流補償  $I_c$ 。譬如，給定一目前的離子電流補償  $I_c$ ，該取樣 1804、計算 1806、決策 1810 以及調整 1812 可以週期性地來加以執行，以確保方程式 4 係持續符合。同時，若符合方程式 4 的離子電流補償  $I_c$  被更新，則該離子電流  $I_i$  亦可被更新，並且該更



新後的值可加以儲存 1814。

【0070】 儘管該方法 1800 可以找出及設定該離子電流補償  $I_c$ ，以便於等於該離子電流  $I_l$  或是在替代方案中符合方程式 3，但是達成一個窄的 IEDF 寬度所需的離子電流補償  $I_c$  的一個值可以在不設定該離子電流  $I_c$  至該值下(或者在替代方案中是在此之前)來加以決定。譬如，藉由在一第一週期施加一第一離子電流補償  $I_{c1}$  且量測在該些脈波之間的電壓之一第一斜率  $dV_{01}/dt$ ，並且藉由在一第二週期施加一第二離子電流補償  $I_{c2}$  且量測在該些脈波之間的電壓之一第二斜率  $dV_{02}/dt$ ，一和一第三離子電流補償  $I_{c3}$  相關的第三斜率  $dV_{03}/dt$  可被決定，方程式 4 在該決定的值之處是預期會成立的。該第三離子電流補償  $I_{c3}$  可以是一個若施加的話將會產生一個窄的 IEDF 寬度之值。因此，符合方程式 4 並且因此對應於離子電流  $I_l$  的離子電流補償  $I_c$  可以只利用該離子電流補償的單一調整來加以決定。該方法 1800 接著可以在不曾設定該離子電流  $I_c$  至一達成該窄的 IEDF 寬度所需的值之情形下，前進到圖 19 中所述的方法。此種實施例可被實行以便於增快調諧的速度。

【0071】 或者是，給定一第一斜率  $dV_{01}/dt$  及一對應的第一離子電流補償  $I_{c1}$ 、一第二斜率  $dV_{02}/dt$  及一對應的第二離子電流補償  $I_{c2}$ 、以及該有效電容  $C_1$ ，該離子電流  $I_l$  可以在不調整該離子補償電流  $I_c$  至相等的該離子電流  $I_l$ 、或是調整其符合方程式 3 下，利用以下的方程式而被估計出：

$$I_l = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})} \quad (\text{方程式 5})$$

【0072】 圖 19 係描繪用於設定該 IEDF 寬度以及離子能量之方法。該方法係源自於圖 18 中描繪的方法 1800，並且可以採取左邊路徑 1900(亦被

稱爲一 IEDF 分支)或是右邊路徑 1901(亦被稱爲一離子能量分支)中的任一個，其係分別需要該 IEDF 寬度以及離子能量的設定。離子能量 eV 係成比例於一電壓步階 $\Delta V$  或是圖 8 之修改後的週期性的電壓函數 800 的第三部分 806。在離子能量 eV 與電壓步階 $\Delta V$  之間的關係可被寫成方程式 6：

$$eV = \Delta V \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (\text{方程式 6})$$

【0073】 其中  $C_1$  是有效電容(例如，夾頭電容；圖 2 中之固有的電容  $C_{10}$ ；或是圖 13 中之固有的電容  $C_1$ )，並且  $C_2$  是一鞘電容(例如，圖 2 中的鞘電容  $C_2$  或是圖 13 中的鞘電容  $C_2$ )。該鞘電容  $C_2$  可包含雜散電容並且依據該離子電流  $I_i$  而定。該電壓步階 $\Delta V$  可被量測爲在該修改後的週期性的電壓函數 800 的第二部分 804 與第四部分 808 之間的電壓上的一改變。藉由控制及監測該電壓步階 $\Delta V$ (其係一電源供應器電壓、或是一例如爲圖 2 中的匯流排電壓  $V_{bus}$  的匯流排電壓之一函數)，離子能量 eV 可被控制而且知道。

【0074】 在此整個揭露內容中，離子能量 eV 係被參照像是一單數值。然而，離子能量 eV 的意義係根據該 IEDF 寬度而具有稍微不同的意義。在該 IEDF 寬度被最小化的情形中，該離子能量 eV 是該 IEDF 之一平均的離子能量。當該 IEDF 寬度並未被最小化時，該離子能量 eV 係根據  $I_i < I_c$  或是  $I_i > I_c$  而被標記成該 IEDF 之一最小值或是最大值。在  $I_i < I_c$  的情形中，該離子能量 eV 係對應於該 IEDF 之一最小的離子能量 eV。在  $I_i > I_c$  的情形中，該離子能量 eV 係對應於該 IEDF 之一最大的離子能量 eV。在該 IEDF 寬度是小的情形中，此技術性不是非常重要的，並且因此離子能量 eV 將會被視爲像是代表一 IEDF 之一平均的離子能量。但是，爲了嚴格的緣故，吾人應該要記住以上的說明。

【0075】 同時，該 IEDF 寬度可以根據方程式 7 來加以近似：

$$IEDF\ width = V_{pp} - \Delta V - \frac{It}{C} \quad (\text{方程式 7})$$

【0076】 其中 I 是  $I_1$ ，其中 C 是  $C_{series}$ 、或者 I 是  $I_c$ ，其中 C 是  $C_{effective}$ 。

時間 t 是在脈波之間的時間， $V_{pp}$  是該波峰至波峰的電壓，並且  $\Delta V$  是該電壓步階。

【0077】 此外，鞘電容  $C_2$  可被利用在各種計算及監測的操作中。譬如，德拜(Debye)鞘距離  $\lambda_{sheath}$  可被估計如下：

$$\lambda_{sheath} = \frac{\epsilon A}{C_2} \quad (\text{方程式 8})$$

【0078】 其中  $\epsilon$  是真空的介電係數，並且 A 是該基板的一面積(或者在一替代的方案中是該基板支撐座的一表面積)。在某些高電壓的應用中，方程式 8 係被寫成方程式 9：

$$\lambda_{sheath} = \sqrt{\frac{T_e \cdot \epsilon_0}{n_e q}} \cdot \left(\frac{V}{2 T_e}\right)^{.75} \quad (\text{方程式 9})$$

【0079】 此外，一在該鞘中的電場可以用該鞘電容  $C_2$ 、鞘距離  $\lambda_{sheath}$  以及離子能量 eV 的一函數來加以估計。鞘電容  $C_2$  以及該離子電流  $I_1$  亦可被利用以從方程式 10 來判斷出電漿密度  $n_e$ ，其中對於單獨離子化的電漿而言，飽和電流  $I_{sat}$  係線性地相關於該補償電流  $I_c$ 。

$$I_{sat} = \sum n_i q_i \sqrt{\frac{k T_e}{m_i}} A \approx n_e q \sqrt{\frac{k T_e}{\langle m \rangle}} A \quad (\text{方程式 10})$$

【0080】 在該基板表面處之離子的一有效質量可以利用該鞘電容  $C_2$  以及飽和電流  $I_{sat}$  而被計算出。電漿密度  $n_e$ 、在該鞘中的電場、離子能量 eV、離子的有效質量、以及該基板的一 DC 電位  $V_{dc}$  是基本的電漿參數，其在此項技術中通常是僅經由間接的手段來加以監測。此揭露內容係致能這些參

數的直接量測，因此致能電漿特徵之更準確的即時地監測。

【0081】 如同方程式 6 中可見的，該鞘電容  $C_2$  亦可被利用以監測及控制該離子能量  $eV$ ，即如在圖 19 的離子能量分支 1901 中所繪。該離子能量分支 1901 係開始以接收一使用者選擇的離子能量 1902。該離子能量分支 1901 接著可以設定用於供應該週期性的電壓函數之開關模式的電源供應器之一最初的電源供應器電壓 1904。在一取樣的週期性的電壓操作之前的某個點 1908，該離子電流亦可被存取 1906(例如，從一記憶體加以存取)。該週期性的電壓可被取樣 1908，並且該修改後的週期性的電壓函數的第三部分的一量測可被量測 1910。離子能量  $I$  可以從該修改後的週期性的電壓函數的電壓步階  $\Delta V$ (亦被稱為第三部分(例如，第三部分 806))而被計算出 1912。該離子能量分支 1901 接著可以判斷該離子能量是否等於該界定的離子能量 1914，並且若是的話，該離子能量是在所要的設定點，並且該離子能量分支 1901 可以結束。若該離子能量不等於該界定的離子能量，則該離子能量分支 1901 可以調整該電源供應器電壓 1916，並且再次取樣該週期性的電壓 1908。該離子能量分支 1901 接著可以迴圈通過該取樣 1908、量測 1910、計算 1912、決策 1914 以及設定 1916，直到該離子能量等於界定的離子能量為止。

【0082】 用於監測及控制該 IEDF 寬度的方法係被描繪在圖 19 的 IEDF 分支 1900 中。該 IEDF 分支 1900 係包含接收一使用者選擇的一 IEDF 寬度 1950 並且取樣一目前的 IEDF 寬度 1952。一決策 1954 係接著判斷該界定的 IEDF 寬度是否等於目前的 IEDF 寬度，並且若該決策 1952 符合時，則該 IEDF 寬度是如同所要的(或界定的)，並且該 IEDF 分支 1900 可以結束。

然而，若該目前的 IEDF 寬度並不等於該界定的 IEDF 寬度，則該離子電流補償  $I_c$  可被調整 1956。此決策 1954 以及調整 1956 可以用一種迴圈的方式繼續，直到該目前的 IEDF 寬度等於該界定的 IEDF 寬度為止。

【0083】 在某些實施例中，該 IEDF 分支 1900 亦可以被實施以確保一所要的 IEDF 形狀。各種的 IEDF 形狀可被產生，並且每一種形狀可以和一不同的離子能量及 IEDF 寬度相關。譬如，一第一 IEDF 形狀可以是一 delta 函數，而一第二 IEDF 形狀可以是一平方函數。其它 IEDF 形狀可以是杯形的。各種 IEDF 形狀的例子可見於圖 11 中。

【0084】 在知道該離子電流  $I_i$  以及電壓步階  $\Delta V$  之下，方程式 6 可以解出離子能量  $eV$ 。該電壓步階  $\Delta V$  可藉由改變該電源供應器電壓而被控制，其於是使得該電壓步階  $\Delta V$  改變。一較大的電源供應器電壓係造成在該電壓步階  $\Delta V$  上的一增加，並且一在該電源供應器電壓上的減少係造成在該電壓步階  $\Delta V$  上的一減少。換言之，增加該電源供應器電壓係產生一較大的離子能量  $eV$ 。

【0085】 再者，由於以上的系統及方法是運作在一持續變化的回授迴路上，因此所要的(或是界定的)離子能量及 IEDF 寬度可被維持，儘管由於該電漿源或室狀況有改變或是蓄意的調整而造成在該電漿上有變化。

【0086】 儘管圖 17-19 已經就單一離子能量來加以敘述，但是具有此項技術的技能者將會體認到這些產生及監測一所要的(或是界定的)IEDF 寬度(或 IEDF 形狀)及離子能量之方法可以進一步被利用以產生及監測兩種或多種離子能量，每一種離子能量都具有其本身的 IEDF 寬度(或 IEDF 形狀)。譬如，藉由在第一、第三及第五週期中提供一第一電源供應器電壓  $V_{ps}$ ，以

及在第二、第四及第六週期中提供一第二電源供應器電壓，對於到達該基板的表面之離子而言，兩個不同且窄的離子能量可被達成(例如，圖 20 中最上面的兩個圖)。利用三個不同的電源供應器電壓係產生三個不同的離子能量(例如，圖 20 中的中間兩個圖)。藉由改變在多個電源供應器電壓的每一個被施加期間的時間、或是在每個電源供應器電壓位準被施加期間的週期數目，具有不同離子能量的離子通量可加以控制(例如，圖 20 中底下的兩個圖)。

● 【0087】 以上的討論已經展示結合由一電源供應器所提供之一週期性的電壓函數以及由一離子電流補償構件所提供之一離子電流補償是如何可被利用以在電漿處理期間控制到達一基板的一表面的離子之一離子能量以及 IEDF 寬度及/或 IEDF 形狀。

● 【0088】 至此提及的控制中的某些個係藉由利用以下的某種組合而被致能：(1)一固定的波形(該波形之連續的週期是相同的)；(2)一具有成比例於一離子能量以及一 IEDF 的至少兩個部分(例如，在圖 8 中描繪的第三及第四部分 806 及 808)之波形；以及(3)一個致能準確的監測該波形的不同特點之高的取樣速率(例如，125MHz)。譬如，其中例如是線性放大器的習知技術係傳送一類似於該修改後的週期性的電壓函數之波形至該基板的情形中，在週期之間非所要的變化係使得使用那些習知技術波形來特徵化該離子能量或 IEDF 寬度(或 IEDF 形狀)變成困難的。

【0089】 在線性放大器已經被用來偏壓一基板支撐座的情形中，尚未看到以高速率取樣的需要，因為該波形在不同的週期並不是一致的，並且因此解析該波形的特點(例如，在脈波之間的一部分的一斜率)通常將不會提

供有用的資訊。此種有用的資訊確實出現在一固定的波形被使用時，即如同在此及相關的揭露內容中可見者。

【0090】 在此揭露的固定波形以及高取樣速率係進一步導致更準確的統計觀察成為可能的。因為此增大的準確性，該電漿源以及在該室中的電漿之操作與處理特徵可以經由監測該修改後的週期性的電壓函數的各種特徵來加以監測。譬如，該修改後的週期性的電壓函數的量測係致能鞘電容及離子電流之遠端的監測，並且可以在不知道該室製程或是其它的室細節下加以監測。一些例子係在以下僅描繪至此所提及的可被利用於該來源及室的非侵入性監測及錯誤偵測之系統及方法的許多方式中的某些方式而已。

【0091】 作為一個監測例子並且參考圖 8，該波形 800 的 DC 偏移可以代表該電漿源(在以下被稱為“來源”)的一健康狀況。在另一例子中，該修改後的週期性的電壓函數之一脈波的一頂端部分 804(該第二部分)的一斜率可以相關於在該來源內之阻尼效果。該頂端部分 804 的斜率與水平(被描繪為具有一等於 0 的斜率)的標準差是另一種根據該波形 800 的一特點來監測來源的健康狀況之方式。另一特點係牽涉到量測沿著該修改後的週期性的電壓函數的第四部分 808 取樣的  $V_0$  點的一標準差，並且將該標準差關聯到室的阻尼振盪(ringing)。譬如，在此標準差是在連續的脈波加以監測，並且該標準差係隨著時間過去而增加的情形中，此可能是指出在該室內(例如在該 e-夾頭中)有阻尼振盪。阻尼振盪可能是劣質的電連接至該室、或是在該室內的劣質電連接、或是具有額外非所要的電感或電容之一徵兆。

【0092】 具有此項技術的技能者將會體認到，在圖 17、18 及 19 中描

繪的方法並不需要任何特定或是所述的操作順序、它們也未被限制為任何由該些圖中所描繪或意涵的順序。譬如，度量可以在設定及監測該 IEDF 寬度及/或該離子能量 eV 之前、期間或是之後來加以監測。

【0093】 圖 21 係描繪在此揭露的系統中的不同點處之各種的波形。給定舉例說明的用於一開關模式電源供應器的開關構件之切換模式 2110、電源供應器電壓  $V_{ps}$  2106(在此亦被稱為一週期性的電壓函數)、離子電流補償  $I_c$  2104、修改後的週期性的電壓函數 2102、以及基板電壓  $V_{sub}$  2112，該 IEDF 係具有該舉例說明的寬度 2114(其可能未按照比例繪製)或是 IEDF 形狀 2114。此寬度是比此揭露內容所已經稱為的“窄寬度”寬。如圖可見的，當該離子電流補償  $I_c$  2104 大於該離子電流  $I_i$  時，該基板電壓  $V_{sub}$  2112 並非固定的。該 IEDF 寬度 2114 係成比例於在該基板電壓  $V_{sub}$  2112 的脈波之間的傾斜的部分之一電壓差。

【0094】 給定此非窄的 IEDF 寬度 2114，在此揭露的方法需要該離子電流補償  $I_c$  被調整，直到  $I_c=I_i$ (或在替代的方案中是根據方程式 3 相關的)為止。圖 22 係描繪在離子電流補償  $I_c$  上做成最後一個增量的改變的效果，以便於使其匹配離子電流  $I_i$ 。當  $I_c=I_i$  時，該基板電壓  $V_{sub}$  2212 變成是實質固定的，並且該 IEDF 寬度 2214 從不窄變成窄的。

【0095】 如在圖 23 中所繪，一旦該窄的 IEDF 已經達成，吾人可以調整該離子能量至一所要或是界定的值。在此，該電源供應器電壓(或在替代的方案中是一開關模式的電源供應器的一匯流排電壓  $V_{bus}$ )的大小係降低(例如，該電源供應器電壓 2306 的脈波之最大的負振幅係被降低)。因此，如同該波峰至波峰的電壓從  $V_{pp1}$  減小到  $V_{pp2}$ ， $\Delta V1$  係減小至  $\Delta V2$ 。因此，該實質



固定的基板電壓  $V_{\text{sub}}$  2308 的大小係減小，因此該離子能量的大小係從 2315 減小至 2314，同時維持該窄的 IEDF 寬度。

【0096】 如同在圖 24 中所示，不論該離子能量是否被調整，該 IEDF 寬度都可以在該窄的 IEDF 寬度被達成之後被加寬。在此，給定  $I_i = I_c$  (或是在替代方案中，方程式 3 係給定在  $I_i$  及  $I_c$  之間的關係)， $I_c$  可被調整，因此改變在該修改後的週期性的電壓函數 2402 的脈波之間的部分之一斜率。由於離子電流補償  $I_c$  以及離子電流  $I_i$  是不相等的，因此該基板電壓係從實質固定的移動到非固定的。一進一步的結果是該 IEDF 寬度 2414 從該窄的 IEDF 2414 擴張至一非窄的 IEDF 2402。該  $I_c$  越被調整成遠離  $I_i$ ，則該 IEDF 2414 的寬度越大。

【0097】 圖 25 係描繪該電源供應器電壓的一種可被利用以達成超過一離子能量位準的模式，其中每個離子能量位準都具有一個窄的 IEDF 2514 的寬度。該電源供應器電壓 2506 的大小係每個週期交替。此係對於該修改後的週期性的電壓函數 2502 的每個週期產生一交替的  $\Delta V$  以及波峰至波峰的電壓。該基板電壓 2512 於是具有兩個在該基板電壓的脈波之間交替的實質固定的電壓。此係產生兩種不同的離子能量，其分別具有一個窄的 IEDF 2514 的寬度。

【0098】 圖 26 係描繪該電源供應器電壓的另一種可被利用以達成超過一離子能量位準的模式，其中每個離子能量位準係具有一個窄的 IEDF 2614 的寬度。在此，該電源供應器電壓 2606 係在兩個不同的大小之間交替，但是兩個週期才交替一次。如圖所示，平均的離子能量是相同的，就如同  $V_{\text{ps}}$  2606 每個週期都交替。此只是展示各種其它的  $V_{\text{ps}}$  2606 的模式是如何可

被利用以達成相同的離子能量的一個例子。

【0099】 圖 27 係描繪電源供應器電壓  $V_{ps}$  2706 以及離子電流補償  $I_c$  2704 的一種可被利用以產生一定義的 IEDF 2714 的組合。在此，交替的電源供應器電壓 2706 係產生兩個不同的離子能量。此外，藉由調整該離子電流補償 2704 遠離該離子電流  $I_i$ ，每個離子能量的 IEDF 2714 的寬度可被擴張。若該些離子能量是足夠靠近的，即如同在該舉例說明的實施例中的離子能量，則兩種離子能量的 IEDF 2714 將會重疊，此係產生一個大的 IEDF 2714。其它變化也是可行的，但是此例子係意味來展示對於該  $V_{ps}$  2706 以及  $I_c$  2704 的調整之組合是如何可被利用以達成界定的離子能量以及界定的 IEDF 2714。

#### 電路記憶為不準確的離子能量之一原因

【0100】 參照圖 2 及 8，一修改後的週期性的電壓函數 800 可以見到是產生在該開關模式的電源供應器 206 之一輸出處。該修改後的週期性的電壓函數 800 係開始於該第一開關構件 226' 閉合且充電一串聯電容  $C_{series}$  時的電壓  $V_0$  的一上升，該串聯電容  $C_{series}$  係包含該基板支撐座 208。當  $C_{series}$  被充電時，該第一開關構件 226' 係被開路。該第一及第二開關構件 226' 及 226'' 可以兩者都是開路一段短的時間( $t_c - t$ )，此係使得橫跨  $C_{series}$  的電壓保持固定的。當來自該離子能量控制 220 的離子電流補償被提供至該基板支撐座 208 時，該第二開關構件 226'' 係接著被閉路，此係使得  $V_0$  下降一電壓  $\Delta V$ ，該修改後的週期性的電壓函數 800 在該點之後係以一斜率  $dV_0/dt$  開始斜坡向下。該電壓步階  $\Delta V$  係相關於該電漿處理室 204 中撞擊一基板表面的離子之離子能量。該修改後的週期性的電壓函數 800 係在無干擾下加以

描繪及敘述。

【0101】 然而，干擾實際上可能影響到 $\Delta V$ ，並且因此影響到離子能量。譬如，在一個窄的離子能量分佈函數 IEDF 是所要的情形中， $\Delta V$  在不同的週期中都應該是固定的。若一干擾使得 $\Delta V$  在某些週期中是不同的，則該 IEDF 將會具有一髒污或是抖動。

【0102】 此問題係被描繪在圖 12 及 13 中。圖 12 係描繪一修改後的週期性的電壓函數 1200，其中一干擾 1212 可見於一第一週期中，其係影響下一個週期的 $\Delta V$ 。圖 12 亦展示在每個週期的開始處之電壓上升的一更準確的表示—此形狀是比在圖 8 中描繪的垂直形狀更為正弦曲線的。該正弦曲線的形狀是透過  $L_1$  再充電  $C_{series}$  的結果，此係發生在此電壓上升期間。

【0103】 一干擾 1212 係見於該第一週期之向下傾斜的部分的期間(其它類型的干擾也是可能的，並且此種干擾可能發生在一週期中的任何地方，而不只是在該傾斜部分的期間)。在無該干擾 1212 下，該電壓將會以實質相同的斜率沿著線 1214 繼續下降。然而，該干擾 1212 係使得該電壓繼續以相同的斜率下降，但是為沿著一具有一較高的電壓之線 1208。因此，當該第一開關構件 226' 再次閉合並且  $V_0$  開始上升時，其並非依循在先前的週期中所依循的路徑 1214，而是  $V_0$  依循該路徑 1208，此係導致一低於該先前週期的 $\Delta V$  而且低於所要者的 $\Delta V'$ 。此影響可被稱為‘記憶’，因為每個週期都會記得先前週期結束時(例如，當該第一開關構件 226' 閉合時)所在的電壓。

【0104】 圖 13 係展示一類似的修改後的週期性的電壓函數 1300，但是在此例中，一干擾 1312 係使得該下降電壓依循該路徑 1308，而不是該路

徑 1314。因此，當該第一開關構件 226' 閉合並且  $C_{series}$  開始充電時， $V_0$  是較低的。因此，當該第一開關構件 226' 開路時， $V_0$  係依循該路徑 1308 而不是 1314。該結果是一大於所要者而且大於先前週期的  $\Delta V$  的  $\Delta V'$ 。

【0105】 因此，此‘記憶’係造成在該離子能量上的不準確性以及潛在的不穩定性。因此，在此項技術中有需要消除此記憶並且達成準確且穩定的離子能量，同時仍然是使用節約能源的諧振的切換。

【0106】 該記憶部分是過多的能量儲存在一串聯電容  $C_{series}$  中的結果，該過多的能量通常將會在該第一開關構件 226' 閉合時從  $C_{series}$  完全被移除。然而，在有一干擾(例如，1312)的情形中，當該第一開關構件 226' 閉合時，能量係維持在  $C_{series}$  中。一種移除此能量的方式是將  $C_{series}$  耦接至一電阻器，使得該能量耗散到該電阻器中。這是一種從  $C_{series}$  消除該記憶的快速方法，但是有浪費能量的不利面，因為該能量僅僅是被轉換成熱而不是置於工作。

【0107】 一種較佳的操作體系是以諧振著稱的，因為能量係來回地傳遞在一電容器以及一電感器之間，並且因此是被再利用，而不是被浪費在一電阻器中(某些在固有電阻中的耗散是不可避免的，但至少是小於在一電阻性體系中者)。然而，電感器並未被快速地充電，並且因此在一諧振的系統中之一電感器並未有效的在每個週期的結束時從該電容器移除過多的電容。

【0108】 因此，在此項技術中對於操作在該較有效率的諧振的體系中，同時亦能夠快速地從該系統的一電容器移除過多的電荷以便於避免由所謂的記憶引起的不準確性及不穩定性之系統、方法及裝置係有所需求。

【0109】 圖 14 及 15 係描繪其中在此揭露的系統及方法被用來達成一所要的離子能量的波形，儘管在一先前的週期中有不同的干擾。在圖 14 中，該干擾 1408 原本會使得 $\Delta V$  高於所要的(回想圖 13)，但反而是隨著  $V_0$  在一週期的開始時上升(其中一第一開關構件是閉合的)，該偏壓供應係監測該上升的電壓，並且在  $V_0$  到達一對應於所要的離子能量之電壓 1408 時切斷該增加的電壓。換言之，該偏壓供應是在預設的用於該電壓上升的期間之前一或是在  $C_{series}$  被完全充電之前切斷該電壓的增加。在圖 15 中，該干擾 1508 原本會使得 $\Delta V$  低於所要的(回想圖 12)，但反而是，隨著  $V_0$  在該週期的開始時上升，該偏壓供應係監測該上升的電壓，並且在  $V_0$  到達一對應於該所要的離子能量 1508 的位準時切斷該增加的電壓。在此例中，該電壓係被容許上升比一段用於該電壓上升的預設期間長的時間一但仍然是在  $C_{series}$  被完全充電之前被截斷。

【0110】 在圖 14 中，關鍵是在一預設的期間之前截斷該電壓上升。然而，在圖 15 中，該方法有兩個關鍵：首先該匯流排電壓  $V_{bus}$  係被設定成使得  $V_0$  理論上可被容許上升遠高於至今所需者(例如，位準 1514)。換言之， $V_{bus}$  係被設定成使得  $C_{series}$  通常將不會被完全充電，以便於達成任何所要的離子能量。以此種方式， $V_0$  可以在該預設的期間之後才被截斷，並且因此可以上升超過原本由於該干擾 1512 所到達之處。

【0111】 然而，當  $V_0$  是在該電壓被容許上升至一  $Max V_0$  之前被截斷時，則能量係維持儲存在該偏壓供應的一電感器中及/或在該偏壓供應的固有電感中。假設該偏壓供應被容許完全充電  $C_{series}$ ，則該電感器的能量將會已經被完全放電到  $C_{series}$ 、或是與  $C_{series}$  交換。因此，儘管在此敘述的切換法

則係致能諧振的操作以及從該先前的週期清除‘記憶’的能力而因此消除不準確及不穩定性，但是一項新的問題被產生在該偏壓供應的電感器且/或電感是永遠不會完全被耗盡。此儲存能量可能對於後續的週期造成進一步的‘記憶’問題，並且因此有進一步的需要來快速且有效率地移除在該偏壓供應的電感器及/或電感中剩餘儲存的能量。此問題的解決方案係參考在圖 9 中所描繪的系統來加以描述。

【0112】 圖 9 係描繪在開關構件  $T_1$  及  $T_2$  以及該串聯電容  $C_{series}$  之間的一電感  $L_1$  ( $C_{series}$  的使用係假設沒有雜散電容；在雜散電容被考量的情形中， $C_{effective}$  可被利用，其中  $C_{series}$  可以是  $C_{effective}$  的一部分)。該電感  $L_1$  可以代表一離散的電感器、或是一離散的電感器以及固有的電感的一組合。在該開關構件  $T_1$  中亦有一固有的電阻  $R_1$ ，並且在開關構件  $T_2$  中亦有一固有的電阻  $R_2$ 。 $R_1$  及  $C_{series}$  的串聯組合係作用為一 RC 電路，每當該開關構件  $T_1$  是開路並且開關構件  $T_2$  是閉路時，其係導致  $C_{series}$  的一指數的衰減或放電。固有的電感  $L_1$  以及串聯電容  $C_{series}$  的串聯組合係運作為具有一諧振本質之一 LC 電路，其係導致在  $C_{series}$  及  $L_1$  之間以一週期性的方式之能量交換。假設  $R_1$  比  $L_1$  占優勢，則此 RLC 電路將會電阻性地運作並且從  $C_{series}$  釋放的能量將會是被浪費成耗散在  $R_1$  中的熱。此將會是一效率差且非所要的情況。

【0113】 一種替代方案是使得此 RLC 電路運作在一諧振的體系中，其中  $L_1$  比  $R_1$  占優勢，並且能量主要是在  $C_{series}$  及  $L_1$  之間交換，其中只有一小部分的能量損失到  $R_1$ 。以一種諧振的方式操作的不利面是儲存在該電感器  $L_1$  及  $C_{series}$  中的能量係導致將被稱為一‘記憶’者，其中在一週期中的干擾會影響到一後續的週期的波形。因為此記憶的關係，提供至  $C_{series}$  的右手邊

的電壓(其係代表在一電漿內之一基板表面)可能會看到不準確性或是不穩定性。

【0114】 例如，在圖 12 中，在圖 9 中的  $V_0$  量測到的修改後的週期性的電壓函數中之一干擾 1212 係造成一不準確性，其在於該  $\Delta V'$  小於原本在無該干擾下將會有的值而且小於在先前週期中的  $\Delta V$ 。此係導致某些離子是以  $\Delta V$  被加速，而某些則是以  $\Delta V'$  被加速，其導致一寬於所要或是髒污的 IEDF。在圖 13 中，一干擾 1308 係造成一不準確性，其在於  $\Delta V'$  大於原本在無該干擾下將會有的值而且大於先前週期的  $\Delta V$ 。在兩種情形中，由於  $\Delta V'$  是預期且所要之以外的值，因此在離子能量上有一不準確性。

【0115】 再者，由於在一週期中的一不準確性係在後續的週期中造成一進一步的不準確性，因此單一干擾可能在每個週期於  $\Delta V$  上造成不穩定性，即一增加的誤差。

【0116】 爲了使得該偏壓供應 902 運作在一有效率的諧振的體系中，該離散的電感器  $L_1$  係被使用，其係使得  $R_1$  的電阻性效應可忽略。儘管  $L_1$  係代表一離散的電感器的至少一電感，但是在某些實施例中其亦可以代表固有的電感，儘管這些固有的電感相對於該離散的電感器的電感而言應該是小的。爲了此揭露內容之目的，在圖 9 中的  $L_1$  可以指稱一離散的電感器的一電感、或是一離散的電感器以及固有的電感之一電感。不論何種方式， $L_1$  都比  $R_1$  占優勢，因而該偏壓供應 902 係諧振地操作。但是如上所述，此以及該新穎的切換法則係導致在每個週期的結束時之非所要的儲存的能量在  $L_1$  中。

【0117】 爲了解決和開關構件  $T_1$  開路時儲存在  $L_1$  中之過多的能量相

關的問題，一能量排空構件 908 可被利用以移除此儲存的能量，並且是在一週期長度的一部分中進行此動作。該能量排空構件 908 可以在圖 14 及 15 中標示為  $T_{\text{evac}}$  的任何時點或是任何期間從  $L_1$  移除能量。換言之，該能量排空構件 1408 可以在  $T_{\text{evac}}$  期間的任何時點被啟動。該能量排空構件 908 開始從該電感器  $L_1$  移除能量的特定時點係藉由控制器 910 以及被提供至該控制器 910 的  $eV$  設定點來加以管理。尤其，該開關構件  $T_1$  係閉合以開始一個週期並且充電  $C_{\text{series}}$ 。 $V_0$  係上升，並且若該開關構件  $T_1$  並未在某個時點開路，則其將會到達一最大的電壓( $\text{Max } V_0$ )。換言之，若  $C_{\text{series}}$  被無限期地充電，則  $V_0$  將會到達且趨穩在該  $\text{Max } V_0$ 。 $V_{\text{bus}}$  可被設定成使得  $C_{\text{series}}$  可被充電超過一對應於一所要的離子能量之位準。以此種方式，若在一先前的週期中有一干擾，則該開關構件  $T_1$  可以閉合並且接著在  $C_{\text{series}}$  被完全充電之前開路，因此達成一所要的  $V_0$ ，而不論干擾為何。當  $V_0$  上升時，該控制器 910 可以從  $V_0$  接收電壓量測，並且比較這些電壓量測與該  $eV$  設定點。當  $V_0$  符合該  $eV$  設定點時，該控制器 910 可以指示該開關構件  $T_1$  開路，因此切斷在  $V_0$  上的增加。在此時、或是在  $T_{\text{evac}}$  期間的任何時點，該控制器 910 可以指示該能量排空構件 908 啟動或開始從  $L_1$  移除能量。

**【0118】** 該能量排空構件 908 可包含任何種類的電路，例如電池、電容器、電阻器、開關及/或電連接至該偏壓供應 902 的其它部分或是任何可以受益於從  $L_1$  被移除的能量之構件。譬如，該能量排空構件 908 可包含一電池或是電容性元件，其係儲存從  $L_1$  被排空的能量以用於之後的使用(例如，提供該能量回到  $V_{\text{bus}}$  以補充該軌電壓)。

**【0119】** 圖 10 係描繪一具有該能量排空構件的一特定實施例之偏壓



供應。在此，該能量排空構件 1008 的一開關 1014 係在  $T_{\text{evac}}$  期間的一時點閉合，並且任何在  $L_1$  中的能量係被排空到該能量排空構件 1008 中，並且被耗散在一電阻器 1012 中。

【0120】 在某些實施例中，該控制器 910 及 1010 可包含一類比比較器、或是一饋入一數位比較器的類比至數位轉換器。

### 廣動態範圍

【0121】 在低能量下，以上論述的不準確性及不穩定性會變成更有問題的。這使得達成一廣動態範圍之離子能量是困難的，因為一廣動態範圍之離子能量通常需要至少一具有一低值的離子能量。以上論述的系統及方法因此可被實施以移除在高能量以及尤其在低能量下的不準確性及不穩定性，因此致能一偏壓供應在一電漿中達成一廣動態範圍的離子能量。

### 快速的離子能量控制

【0122】 某些應用係需要在離子能量上之一‘快速的’改變，其中‘快速的’可包含在該修改後的週期性的電壓函數的幾個週期內、或甚至是逐週期地在離子能量上的改變。一種改變離子能量的方式是調整  $V_{\text{bus}}$ ，但是此係難以進行用於‘快速的’應用之足夠的快速。然而，利用以上論述的切換法則以及該能量排空構件以移除儲存在一偏壓供應的一電感器中之過多的能量，離子能量可逐週期地被調整(亦即，其中一第一週期係產生一第一離子能量，而下一個週期係產生一第二離子能量)。

【0123】 在此揭露的系統及方法可以在  $V_{\text{bus}}$  沒有改變下調整該離子能量。譬如，在圖 12-15 中可看出的是，對於一給定的  $V_{\text{bus}}$ ，各種的離子能量(不同的  $\Delta V$ )可被達成。離子能量的切換是‘快速’到針對一週期的離子能量甚

至可以在  $V_0$  上升時就加以選擇。換言之， $\Delta V$  或是該離子能量可以在該開關構件  $T_1$  被開路之前的任何時點來加以決定。

【0124】 儘管‘快速的’離子能量控制在切換於不同的離子能量之間時可能是有利的，但其亦有利於一電漿被點燃時，因為在一確切的 eV 設定點停止充電  $C_{series}$  的能力即使未消除，也大為降低在電漿離子能量中的暫態，該暫態是有時見於一電漿被點燃時。

### 脈波式離子能量控制

【0125】 許多電漿處理的處方係需要一脈波化的波封用於由一電漿源所提供的 RF 電力。圖 28 係描繪一脈波式電源供應為時間的一函數。如圖可見，該 RF 正弦波係根據一利用虛線指出的脈波波封而被脈波化。譬如，脈波化係致能離子與自由基的比例能夠受到控制。尤其，自由基通常具有一比離子長的使用壽命，並且因此當該 RF 被關斷時，自由基相對離子的比例係隨著時間而增加。譬如，自由基之一增大的比例可以影響在一工件的表面上之各種材料之相對的蝕刻速率，這在某些處方中是有利的。然而，為了維持自由基與離子之一所要的位準，該 RF 電力係再回到導通，因此該電源供應器的脈波化係加以實行。在某些情形中，為了在該處理室內維持更一致位準的離子及自由基之目的，該電源供應器可被脈波化在兩個不同的 RF 振幅之間，而不是一 RF 振幅與 0 之間。

【0126】 當脈波式 RF 電源供應器被使用時，偏壓供應通常是以某種方式同步至該些電源供應器的脈波(見於圖 29)。在雙位準的電源供應器電壓被使用的情形中，該偏壓供應亦可被脈波化在兩個不同的偏壓供應電壓之間。然而，在脈波化多個供應器的技術中的系統及方法係遭遇到各種的缺

點。譬如，每次該偏壓供應被導通時，脈波式偏壓供應可能看到在該離子密度及離子能量上的暫態。一個例子可見於圖 30 中，其中除了在被導通不久之後而且在趨穩成爲一所要的電壓體系之前，該所要的電壓目標的一過衝之外，該偏壓供應係描繪一緩慢的導通暫態。類似地，見於該電源脈波波封上之脈波內的導通暫態係受到該偏壓供應的導通之影響。這些暫態可能部分產生自傳統的偏壓供應以及電漿密度是非獨立的實際狀況，亦即一在偏壓供應電壓上的改變係具有在該電漿密度上之一實質的影響。這些暫態不僅使得準確的處理處方難以設計，而且當監測偏壓供應電壓時，許多在此項技術中的方法並不使用來自該暫態體系的資料點，因此其係注入可能的量測及調節之誤差，同時潛在地增加處理的時間。某些處方亦可能需要在一定給定的電源供應器脈波內，在離子能量上之快速的改變。傳統的系統及方法在以準確性及穩定性控制該離子能量上有困難，而且在一段短到該偏壓供應的幾個週期的時間期間內完成此種改變是絕對有困難的。

【0127】 在此揭露的系統及方法係解決這些問題中的一些問題。圖 29 係描繪一用於例如是圖 9 的偏壓供應 902 之一偏壓供應之修改後的週期性的電壓，其係被脈波化在一藉由虛線指出的脈波波封內。該偏壓供應的脈波係與在圖 28 中的電源供應器的那些脈波同步化。例如是見於圖 30 中的暫態可被降低並且可能被消除，因為藉由在此揭露的偏壓供應所產生之修改後的週期性的電壓函數的最大電壓可以經由在達成一所要的離子能量所需之確切的時點開路一開關構件  $T_1$  而準確地受到控制。這些系統及方法亦致能在該離子能量控制以及該電漿密度控制之間的獨立性。因此，先前所敘述爲降低在離子能量上的不準確性及不穩定性之相同的系統及方法係具

有避免在脈波式偏壓供應的操作期間的暫態並且致能在該離子能量及電漿密度的控制之間的獨立性之額外的益處。

【0128】 暫態亦因為在此揭露的系統及方法達成在離子能量及電漿密度之間的一幾乎獨立的關係而加以避免—因此該偏壓供應(例如，902)的脈波化係在電漿密度上具有一可忽略的影響。

【0129】 再者，因為在此揭露的系統及方法可被利用以達成‘快速的’離子能量改變(例如，逐週期的改變離子能量)，因此離子能量可以在單一電源供應器或偏壓供應的脈波之內被改變一或多次。

【0130】 相關於該廣動態範圍所論述的系統及方法亦可被利用在脈波式偏壓供應的實施例中，以在該偏壓供應的單一脈波內達成廣動態範圍的多種離子能量。

【0131】 在其它實施例中，該離子能量分佈函數(IEDF)和如上所論述的離子能量之改變可以一起逐週期地加以調整。換言之，在該偏壓供應之一給定的脈波內，該 IEDF 及/或離子能量可被調整一或多次。

【0132】 脈波式偏壓供應的實施例可進一步受益於設定用於  $I_c$  的預設值之能力。因此，在一偏壓供應脈波的開始處， $I_c$  可以‘被猜測’，因而一所要的離子能量可以在較短時間內被達成。譬如，如先前所論述的，可能需要一些疊代來決定一最小的 IEDF，在該時間之後，所要的離子能量可被設定。藉由利用一根據先前的 IEDF 設定的  $I_c$  來開始此種疊代，該最小的 IEDF 可較快被找到，並且因此所要的離子能量可較快地加以建立。在其它實施例中，在一先前的脈波所用的  $I_c$  可以在一後續的脈波的開始時被利用作為一最初的條件，以再次減少被用來設定用於該脈波的離子能量之時

間。再者，若在一給定的脈波中欲設定多種離子能量，則在先前的一或多個脈波所用的  $I_c$  可被利用作為用於設定在後續的脈波中之各種的離子能量之最初的條件。類似地， $C_2$  或是其更精確的導數  $C_{series}/(C_2+C_{series})$  可以結合  $I_c$  或是替代  $I_c$  而被利用作為最初的條件。

【0133】 脈波化的實施例亦可以受益於經由如同較早所論述的離子電流及  $C_2$  來量測電漿密度的能力，但是在此適用於脈波化的偏壓供應情況。此係導致進一步的實施例，其中該偏壓供應可根據在脈波操作期間的電漿密度之量測來加以控制。譬如，偏壓供應的脈波可以根據一電漿密度臨界值而被觸發、或是在振幅、任務因數等等上加以調節(例如，該偏壓供應可以在該電漿密度下降到低於一臨界值時導通)。在另一例子中，對於離子能量或是該 eV 設定點的改變可以藉由該電漿密度下降到低於或是上升到超過一電漿密度臨界值而被觸發。在一偏壓供應的脈波內之離子能量及 IEDF 亦可以用電漿密度的一函數來加以控制。

【0134】 在其它實施例中，該電源供應器可以用電漿密度的一函數來加以控制。譬如，根據該電漿密度穿過一電漿密度臨界值或是為了維持電漿密度接近一所要的位準之目的，該電源供應器的脈波可以被觸發、或是該脈波波封的振幅、任務因數等等可以被調節。

### 虛擬的前面板

【0135】 圖 31 至 52 係描繪和一如同稍早所揭露的偏壓供應相關的各種‘虛擬的前面板’(VFP)的顯示畫面。該些 VFP 可具有各種控制(例如，按鈕、滑塊、單選按鈕)、指示器(例如，色彩指示器、條形指示器、數字指示器)、以及圖或圖表(例如，電壓相對於時間)。該些 VFP 可包含用於控制一

偏壓供應及/或一電源供應器之控制及監測圖表與指示器。譬如，該些 VFP 可以致能 eV 設定點及 IEDF 形狀與寬度的控制以及所達成的離子能量及 IEDF 形狀與寬度的監測。該些 VFP 亦可被利用以監測離子電流  $I_i$  以及一偏壓供應及/或電漿處理室的校準。這些只是一 VFP 可被利用在其中的許多實施例中之一些而已。

【0136】 該些 VFP 可被體現在單一顯示器(例如，內嵌在一偏壓供應中或是耦接至一偏壓供應的 LCD 平面顯示器)或是多個顯示器中。該 VFP 可包含觸敏的控制。

【0137】 圖 31 係描繪一種繪圖一修改後的週期性的電壓函數之 VFP。該 VFP 進一步包含一電力輸出控制，以切換一偏壓供應的輸出之通斷。一些警告指示器係被配置該 VFP 的左下側。也具有用於顯示一離子能量(eV)、一離子電流補償  $I_c(I_{\text{compensation}})$  以及一波峰至波峰的電壓( $V_{pp}$ )之條形及數字的指示器。

【0138】 圖 33 係描繪一 VFP，其係展示一偏壓供應的兩個控制，其中一控制是用於一離子能量設定點(eV Setpoint)，而另一控制是用於一離子電流補償(Current Offset)。該 VFP 亦具有一用於量測到的離子能量(eV)之條形指示器。

【0139】 圖 35 係描繪一 VFP，其係具有一用於三個離子能量的圖表。該圖表可以是一讀數螢幕、或是一輸入螢幕。譬如，該圖表可被利用以指出所達成的離子能量以及在該三種離子能量的每一種的離子濃度、或者該圖表可被利用以顯示離子能量以及該系統所欲嘗試且達成的濃度。

【0140】 圖 36 係描繪一 VFP，其係具有一擁有梯形形狀的離子能量

分佈函數之圖表。該 IEDF 係從稍低於 500eV 至稍高於 1000eV 延伸，其中離子的濃度係隨著離子能量而增加。該 VFP 亦包含在左邊的控制，以用於控制該 IEDF 的低端與高端以及在兩端的離子濃度。

【0141】 圖 37 係描繪一用於控制在一離子能量  $V_1$  附近的離子能量分佈(Spread<sub>i</sub>)之 VFP。在該舉例說明的實施例中，對於遠離  $V_1$  的能量，在每一種能量的離子濃度係朝向 0 而降低。

【0142】 圖 38 係描繪一用於控制兩個窄的 IEDF 以及一具有一界定的分佈的 IEDF 之 VFP。如圖可見，兩個窄的 IEDF 可以存在於  $h_1$  及  $h_2$ ，並且具有等於  $v_1$  及  $v_2$  的離子濃度。該些 IEDF2 參數係控制寬的 IEDF( $V_1$ )的中心離子能量以及 IEDF 分佈(Spread<sub>i</sub>)。

【0143】 圖 39 係描繪一用於控制一包括四種分別具有特定濃度的離子能量之 IEDF 的 VFP，其中在任意兩種相鄰的離子能量之間的一分佈係具有一線性連接兩個相鄰的離子能量之濃度。

【0144】 圖 40 係描繪一種繪圖離子能量  $I_{ion}$  為時間或位置的一函數之 VFP。

【0145】 圖 43 係描繪一種繪圖電漿密度  $N_e$  為時間或位置的一函數之 VFP。

【0146】 圖 44 係描繪一種繪圖一基板電位  $V_{DC}$  為時間或位置的一函數之 VFP。

### 脈波式加熱器

【0147】 在一典型的夾頭中具有一電氣加熱系統，其可以從該處理室被容納於其中之建築物的 AC 配電系統而被供電。已知的是 RF 電力潛在可

能傳遞至該 AC 配電系統。爲了避免此非所要的電流路徑，一 RF 濾波器可被置放在該加熱系統中，使得其係通過該 60Hz 或 50Hz 的配電電力，但是對於該 RF 頻率(例如，13.56MHz 或 60MHz)則作用爲一捕捉器(trap)。但是在某些實例中，並沒有足夠的物理空間給一濾波器(或是兩個濾波器)，因爲該濾波器必須處理大量的電力，並且當一偏壓基板供應被利用時，有數個被施加的頻率(例如，從 0.4 至 5MHz)，因而一濾波器是難以設計的。

【0148】 因此，並非是利用一典型的濾波器，一脈波可以利用一加熱器電源供應器來加以產生，該加熱器電源供應器係被施加至一具有低的跨繞線電容的變壓器之一主要側。該電力係被傳遞到該變壓器之一次要側，接著被整流且施加至該加熱器。該變壓器的低電容阻障並不容許一廣範圍的頻率從該次要側通過而回到該變壓器的主要側；因此防止非所要的頻率傳遞至建築物的 AC 配電系統。

【0149】 除了在此先前所述的特定實體裝置之外，在此所述的系統及方法可以與一控制及處理構件相關地加以實施。圖 53 係展示一控制系統 5300 的一實施例之一概略的表示，一組指令可以在其中執行，以用於使得一裝置履行或執行本揭露內容的特點及/或方法中的任一或多個。例如，該控制系統 5300 可被利用以實現該控制構件 112、612、762、910、1010。但是，在圖 53 中的構件只是例子而已，因而並不限制任何實施此揭露內容的特定實施例之硬體、軟體、韌體、內嵌的邏輯構件、或是兩個或多個此種構件的一組合的用途或功能之範疇。該些舉例說明的構件中之某些或是全部都可以是該控制系統 5300 的部分。譬如，該控制系統 5300 可包含一個一般用途的電腦或是一內嵌的邏輯元件(例如，一 FPGA)，此僅舉例兩個非限



制性的例子。

【0150】 控制系統 5300 在此實施例中係包含至少一處理器 5301，例如一中央處理單元(CPU)或是一 FPGA，以舉例兩個非限制性的例子。該控制系統 5300 亦可包括一記憶體 5303 以及儲存 5308，兩者係經由一匯流排 5340 來和彼此通訊，並且和其它構件通訊。該匯流排 5340 亦可以將一顯示器 5332、一或多個輸入裝置 5333(其例如可包含一小型鍵盤、一鍵盤、一滑鼠、一指示筆、等等)、一或多個輸出裝置 5334、一或多個儲存裝置 5335、以及各種非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體 5336 彼此連結，並且和該處理器 5301、記憶體 5303 及儲存 5308 中的一或多個連結。這些元件的全部都可直接介接到該匯流排 5340、或是經由一或多個介面或轉接器來介接到該匯流排 5340。譬如，該各種的非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體 5336 可以經由儲存媒體介面 5326 來和該匯流排 5340 介接。控制系統 5300 可具有任何適當的實體型式，其包含但不限於一或多個積體電路(IC)、印刷電路板(PCB)、行動手持式裝置、膝上型或筆記型電腦、分散式電腦系統、網格計算、或是伺服器。

【0151】 一或多個處理器 5301(或中央處理單元(CPU))係選配地包含一快取記憶體單元 5302 以用於指令、資料或處理器位址之暫時的本地儲存。一或多個處理器 5301 係被配置以協助執行儲存在至少一非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體上之非暫態的處理器可讀取的指令。控制系統 5300 可以由於該一或多個處理器 5301 執行被體現在一或多個例如是記憶體 5303、儲存 5308、儲存裝置 5335 及/或儲存媒體 5336(例如，唯讀記憶體(ROM))之非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體中的指令來提供功能。譬如，

用以達成參考圖 17-19 所述的方法的一或多個步驟之指令可被體現在一或多個非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體中，並且一或多個處理器 5301 可以執行該些指令。記憶體 5303 可以從一或多個其它非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體(例如，大量儲存裝置 5335、5336)或是透過一例如是網路介面 5320 之適當的介面而從一或多個其它來源讀取該些指令。實行此種方法或步驟可包含定義儲存在記憶體 5303 中的資料結構以及如同由該軟體所導引地來修改該些資料結構。

● **【0152】** 該信號輸入構件 5350 大致上係操作以接收提供有關該開關模式電源供應器 106、開關模式電源供應器 606、離子電流補償 660、電漿處理室 604 以及電流源 764 的一或多個特點的資訊之信號(例如，數位及/或類比信號)。在某些實施方式中，控制器 112 及 612 可提供一輸出信號(例如，一個二進位位元)以通知該開關模式電源供應器 106 及 506 來調整脈波的一工作週期或是電源供應器電壓。在其它實施方式中，該控制系統 5300 可部分被利用以實現該離子電流補償 660、電流控制 762、控制器 910、控制器 1010。

● **【0153】** 該信號輸出構件 5360 可包含該項技術中具有通常技能者已知的數位至類比構件，以產生開關控制信號來控制開關  $T_1$  及  $T_2$ 。當開關  $T_1$  及  $T_2$  被實施為場效電晶體(FET)時，該信號輸出構件 5360 例如可產生閘極驅動信號以控制該等開關  $T_1$  及  $T_2$ 。

**【0154】** 該記憶體 5303 可包含各種的構件(例如，非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體)，其包含但不限於一隨機存取記憶體構件(例如，RAM 5304)(例如，一靜態 RAM “SRAM”、一動態 RAM “DRAM、等等)、

一唯讀構件(例如，ROM 5305)、以及其之任意組合。ROM 5305 可作用以單向通訊資料及指令至處理器 5301，並且 RAM 5304 可作用以和處理器 5301 雙向通訊資料及指令。ROM 5305 及 RAM 5304 可包含在以下敘述之任何適當的非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體。在某些實例中，ROM 5305 及 RAM 5304 係包含用於實行在此所述的方法之非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體。

【0155】 固定的儲存 5308 係雙向地連接至處理器 5301，選配的是透過儲存控制單元 5307。固定的儲存 5308 係提供額外的資料儲存容量，並且亦可包含在此所述的任何適當的非暫態的實體的處理器可讀取的媒體。儲存 5308 可被用來儲存作業系統 5309、EXEC 5310(執行檔)、資料 5311、API 應用程式 5312(應用程式)、與類似者。儘管並非一定，但儲存 5308 經常是一次要的儲存媒體(例如，一硬碟)，其係比主要的儲存(例如，記憶體 5303)慢。儲存 5308 亦可包含一光碟機、一固態的記憶裝置(例如，快閃為基礎的系統)、或是以上的任一個之組合。在適當的情形中，在儲存 5308 中的資訊可被納入成為在記憶體 5303 中之虛擬記憶體。

【0156】 在一例子中，儲存裝置 5335 可以是經由一儲存裝置介面 5325 而可移除地和控制系統 5300 介接(例如，經由一外部的埠連接器(未顯示))。尤其，儲存裝置 5335 以及一相關的機器可讀取的媒體可提供機器可讀取的指令、資料結構、程式模組及/或其它用於該控制系統 5300 的資料之非揮發性及/或揮發性的儲存。在一例子中，軟體可以完全或是部分地常駐在儲存裝置 5335 上之一機器可讀取的媒體內。在另一例子中，軟體可以完全或是部分地常駐在處理器 5301 之內。

【0157】 匯流排 5340 係連接廣泛多樣的子系統。在此，在適當情況下，對於一匯流排的參照可涵蓋一或多個用作一共同的功能之數位信號線。匯流排 5340 可以是數種類型的匯流排結構中之任一種，其包含但不限於一記憶體匯流排、一記憶體控制器、一週邊匯流排、一本地匯流排、以及其之任意組合，其係利用各種匯流排架構的任一種。作為一個例子而非限制的是，此種架構係包含一工業標準架構(ISA)匯流排、一延伸 ISA(EISA)匯流排、一微通道架構(MCA)匯流排、一影像電子工程標準協會本地匯流排(VLB)、一週邊元件互連(PCI)匯流排、一 PCI-Express(PCI-X)匯流排、一加速圖形埠(AGP)匯流排、超傳輸(HTX)匯流排、序列先進附加技術(SATA)匯流排、以及其之任意組合。

【0158】 控制系統 5300 亦可包含一輸入裝置 5333。在一例子中，控制系統 5300 的一使用者可以經由輸入裝置 5333 來輸入命令及/或其它資訊到控制系統 5300 中。一輸入裝置 5333 的例子係包含但不限於一觸控螢幕、一字母數字的輸入裝置(例如，一鍵盤)、一指向裝置(例如，一滑鼠或觸控板)、一觸控板、一搖桿、一遊戲手把、一音訊輸入裝置(例如，一麥克風、一語音響應系統、等等)、一光學掃描器、一視訊或靜止影像捕捉裝置(例如，一攝影機)、以及其之任意組合。輸入裝置 5333 可以經由各種輸入介面 5323 的任一種(例如，輸入介面 5323)而被介接到匯流排 5340，其包含但不限於串列、並列、遊戲埠、USB、FIREWIRE、THUNDERBOLT、或是以上的任意組合。

【0159】 資訊及資料可透過一顯示器 5332 來加以顯示。一顯示器 5332 的例子係包含但並不限於一液晶顯示器(LCD)、一有機液晶顯示器

(OLED)、一陰極射線管(CRT)、一電漿顯示器、以及其之任意組合。該顯示器 5332 可以經由該匯流排 5340 來介接至該處理器 5301、記憶體 5303 及固定的儲存 5308、以及例如是輸入裝置 5333 的其它裝置。該顯示器 5332 係經由一視訊介面 5322 而連結至該匯流排 5340，並且在該顯示器 5332 以及該匯流排 5340 之間的資料傳輸可經由該圖形控制 5321 來加以控制。

【0160】 額外或替代的是，控制系統 5300 可提供由邏輯固線連接、或者是被體現在一電路中所得的功能，其可運作以取代軟體、或是和軟體一起來執行在此敘述或描繪的一或多種方法、或是一或多種方法的一或多個步驟。再者，對於一非暫態的實體的處理器可讀取的媒體之參照可涵蓋一儲存用於執行的指令之電路(例如，一 IC)、一體現用於執行的邏輯之電路、或是在適當情況下為兩者。本揭露內容係包含硬體與相關的軟體之任何適當的組合。

【0161】 與在此揭露的實施例有關而敘述的各種說明的邏輯區塊、模組及電路都可以利用被設計以執行在此所述的功能之一般用途的處理器、一數位信號處理器(DSP)、一特殊應用積體電路(ASIC)、一現場可程式化的閘陣列(FPGA)或是其它可程式化的邏輯元件、離散的閘或電晶體邏輯、離散的硬體構件、或是其之任意組合來加以實施或執行。一般用途的處理器可以是一微處理器，但在替代方案中，該處理器可以是任何習知的處理器、控制器、微控制器、或是狀態機。一處理器亦可被實施為計算裝置的一組合，例如，一 DSP 及一微處理器的一組合、複數個微處理器、一或多個微處理器結合一 DSP 核心、或是任何其它的此種配置。

【0162】 總之，除了其它方面，本發明係提供一種用於在電漿製程期

間的電弧處理之系統及方法。熟習此項技術者可以容易地體認到許多的變化及替代可以在本發明、本發明的用途及其配置中完成，以達成和如同藉由在此敘述的實施例所達成者之實質相同的結果。於是，並沒有意圖要限制本發明至所揭露的範例形式。許多變化、修改及替代的結構都落在如同在申請專利範圍中表示之所揭露的發明的範疇及精神內。

**【符號說明】**

**【0163】**

102 電漿電源供應器

104 電漿處理室

106 開關模式的電源供應器

108 支撐座

110 基板

112 控制器

114 電漿

204 電漿處理室

206 開關模式的電源供應器

208 基板支撐座

220 離子能量控制

226' 第一開關構件

226'' 第二開關構件

602 電漿電源供應器

604 電漿處理室

606 開關模式的電源供應器

608 支撐座

610 基板

612 控制器

660 離子電流補償構件

704 電漿室

736 輸出

760 離子電流補償構件

762 電流控制器

764 電流源

766 殼體

770 回授線

800 波形

802 修改後的週期性的電壓函數(第一部分)

804 第二部分(頂端部分)

806 第三部分

808 第四部分

902 偏壓供應

908 能量排空構件

910 控制器

1008 能量排空構件

1010 控制器

1012 電阻器

1014 開關

1200 修改後的週期性的電壓函數

1206 開關模式電源供應器

1208 線(路徑)

1212 干擾

1214 線(路徑)

1260 離子電流補償構件

1300 修改後的週期性的電壓函數

1308 路徑

1312 干擾

1314 路徑

1360 離子電流補償構件

1406 週期性的電壓函數

1408 干擾

1508 干擾

1512 干擾

1514 位準

1664 電流源

1700 方法

1702~1708 步驟

1800 方法



1802~1814 步驟

1900 方法(左邊路徑、IEDF 分支)

1901 右邊路徑(離子能量分支)

1902~1956 步驟

2102 修改後的週期性的電壓函數

2104 離子電流補償  $I_c$

2106 電源供應器電壓

2110 切換圖(切換模式)

2112 基板電壓  $V_{sub}$

2114 IEDF 寬度(形狀)

2212 基板電壓  $V_{sub}$

2214 IEDF 寬度

2302 修改後的週期性的電壓函數

2306 電源供應器電壓

2308 基板電壓  $V_{sub}$

2314、2315 離子能量

2402 修改後的週期性的電壓函數

2414 IEDF 寬度

2502 修改後的週期性的電壓函數

2506 電源供應器電壓

2512 基板電壓

2514 IEDF

2606 電源供應器電壓  $V_{PS}$

2614 IEDF

2704 離子電流補償  $I_c$

2706 電源供應器電壓  $V_{PS}$

2714 IEDF

5300 控制系統

5301 處理器

5302 快取記憶體單元

5303 記憶體

5304 RAM

5305 ROM

5307 儲存控制單元

5308 儲存

5309 作業系統

5310 EXEC(執行檔)

5311 資料

5312 API 應用程式

5320 網路介面

5321 圖形控制

5322 視訊介面

5323 輸入介面

5325 儲存裝置介面

5326 儲存媒體介面

5332 顯示器

5333 輸入裝置

5334 輸出裝置

5335 儲存裝置

5336 非暫態的實體的處理器可讀取的儲存媒體

5340 匯流排

5350 信號輸入構件

5360 信號輸出構件

$C_1$  固有的電容

$C_2$  鞘電容及雜散電容

$C_3$  實體電容器

$C_{10}$  有效電容

$C_{series}$  串聯電容

$C_{stray}$  雜散電容

eV 離子能量

f 函數

$I_c$  離子電流補償

$I_i$  離子電流

$I_{sat}$  飽和電流

L1 雜散電感

L2 串聯電感器

$n_e$  電漿密度

$t$  間隔

$T_1$ 、 $T_2$  開關構件

$V_2$ 、 $V_4$  驅動信號

$V_{bus}$  匯流排電壓

$V_{PP}$ 、 $V_{PP1}$ 、 $V_{PP2}$  波峰至波峰的電壓

$V_{PS}$  電源供應器電壓

$V_{out}$  電壓輸出

$V_{sub}$  基板電壓

$\lambda_{sheath}$  鞘厚度

$\tau_1$  第一時間

$\tau_2$  第二時間

$\tau_3$  第三時間

$\Delta V$  電壓步階

## 申請專利範圍

1.一種操作一電漿處理室之方法，其係包括：

在該電漿處理室內維持一電漿接觸在一基板支撐座上的一基板；

存取該基板支撐座之一有效電容  $C_1$ ；

提供一修改後的週期性的電壓函數至該基板支撐座，以便於在該基板的一表面上達成一電位，該修改後的週期性的電壓函數係從一週期性的電壓函數以及一離子電流補償  $I_c$  的一結合來加以形成；以及

調整該離子電流補償  $I_c$ ，直到  $C_1 \frac{dV_0}{dt} = I_c$ ，其中  $V_0$  是該修改後的週期性的電壓函數的一個電壓。

2.如申請專利範圍第 1 項之方法，其中該修改後的週期性的電壓函數係包括：

一稱為一第一部分之快速增加的電壓；

一開始在該第一部分的結束處且稱為一第二部分之實質固定的電壓；

一開始在該第二部分的結束處且稱為該第三部分之低於該實質固定的電壓之電壓步階  $\Delta V$ ；以及

一開始在該第三部分的結束處且稱為一第四部分之開始在低於該實質固定的電壓的  $\Delta V$  處之斜坡電壓，該斜坡電壓係具有一受該離子電流補償控制的斜率  $dV_0/dt$ 。

3.如申請專利範圍第 1 項之方法，其進一步包括調整該離子電流補償  $I_c$  遠離該離子電流  $I_1$ ，以便於從該最小的寬度來增加該離子能量分佈函數的一寬度。

4.如申請專利範圍第 1 項之方法，其中，當該方程式符合時，以下的方

程式係成立：

$$I_l = I_c \frac{C_1}{C_1 + C_{\text{stray}}},$$

其中  $C_{\text{stray}}$  是該修改後的週期性的電壓函數所見到的雜散電容之一累積的電容。

5.如申請專利範圍第 2 項之方法，其中離子電流  $I_l$  係藉由以下來加以計算：

針對一第一離子電流補償  $I_{c1}$  判斷一第一斜率  $dV_{01}/dt$ ；

針對一第二離子電流補償  $I_{c2}$  判斷一第二斜率  $dV_{02}/dt$ ；以及

以該有效電容  $C_1$ 、該第一斜率  $dV_{01}/dt$ 、該第二斜率  $dV_{02}/dt$ 、該第一離子電流補償  $I_{c1}$ 、以及該第二離子電流補償  $I_{c2}$  的一函數來計算該離子電流  $I_l$ 。

6.如申請專利範圍第 5 項之方法，其中該離子電流  $I_l$  係經由以下的方程式來加以計算：

$$I_l = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})}。$$

7.如申請專利範圍第 2 項之方法，其進一步包括藉由控制該電壓步階  $\Delta V$  以控制入射在該基板表面上的離子之一離子能量  $eV$ ，藉此達成在該基板表面上的電位。

8.如申請專利範圍第 7 項之方法，其進一步包括藉由在該修改後的週期性的電壓函數之兩個相鄰的週期提供兩個不同的電壓步階  $\Delta V$  以達成兩個或多個離子能量分佈的波峰。

9.如申請專利範圍第 2 項之方法，其進一步包括即時且非侵入性地計算

該電漿鞘  $C_2$  的一電容。

10.如申請專利範圍第 9 項之方法，其中  $C_2$  係以離子電流  $I_i$  的一函數來加以計算。

11.如申請專利範圍第 10 項之方法，其中  $C_2$  係從以下的方程式來加以計算：

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot (I_i + I_c)}{I_c - C_1 \cdot \frac{dV_0}{dt}}。$$

12.如申請專利範圍第 1 項之方法，其進一步包括監測入射在該基板表面上的離子的一離子能量  $eV$  為該電壓步階  $\Delta V$  的一函數。

13.如申請專利範圍第 12 項之方法，其中該離子能量  $eV$  係如下地從該電壓步階  $\Delta V$ 、該有效電容  $C_1$ 、以及該鞘電容  $C_2$  來加以計算：

$$eV = \Delta V \frac{C_1}{C_2 + C_1}。$$

14.如申請專利範圍第 1 項之方法，其中該修改後的週期性的電壓函數係包含一或多個週期性重覆的固定波形。

15.如申請專利範圍第 1 項之方法，其進一步包括遠端且非侵入性地監測該電漿的一密度為該離子電流  $I_i$  的一函數。

16.如申請專利範圍第 15 項之方法，其進一步包括響應於該電漿的密度穿過一或多個臨界值來調整該週期性的電壓函數的一波峰至波峰的電壓。

17.如申請專利範圍第 1 項之方法，其中存取係包含從一記憶體擷取該有效電容。

18.一種電漿處理系統，其係包括：

一在一電漿處理室中支承一基板的基板支撐座；

一提供一週期性的電壓函數之基板支撐座偏壓供應；

一提供一離子電流補償之離子電流補償構件，該離子電流補償係和該週期性的電壓函數結合以形成一修改後的週期性的電壓函數，該修改後的週期性的電壓函數係被提供至該基板支撐座，並且藉此在該基板的相對於該基板支撐座的一表面上達成一直流電壓，其於是控制入射在該基板的相對於該基板支撐座的該表面上的離子之一離子能量，該修改後的週期性的電壓函數係具有：

一包括一快速增加的電壓之第一部分；

一包括一實質固定的電壓之第二部分；以及

一第三部分，其係包括：

一具有一開始電壓以及一受該離子電流補償控制的斜率  $dV_0/dt$  的斜坡電壓，該開始電壓是低於該實質固定的電壓之一電壓步階  $\Delta V$ ，該電壓步階  $\Delta V$  係對應於該離子能量；以及

一控制器，其係具有一被編碼有處理器可讀取的指令之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，該些指令是用以：

存取該基板支撐座之一有效電容  $C_1$ ；

對於至少兩個離子電流補償值量測該斜率  $dV_0/dt$ ；以及

調整由該離子電流補償構件所提供的該離子電流補償，直到

$$C_1 \frac{dV_0}{dt} = I_c \text{。}$$

19.如申請專利範圍第 18 項之電漿處理系統，其中離子電流  $I_i$  係藉由以下來加以計算：



對於一第一離子電流補償  $I_{c1}$  判斷一第一斜率  $dV_{01}/dt$ ；

對於一第二離子電流補償  $I_{c2}$  判斷一第二斜率  $dV_{02}/dt$ ；以及

在不調整該離子電流補償  $I_c$  成為實質等於  $I_1$  的情形下，以該有效電容  $C_1$ 、該第一斜率  $dV_{01}/dt$ 、該第二斜率  $dV_{02}/dt$ 、該第一離子電流補償  $I_{c1}$ 、以及該第二離子電流補償  $I_{c2}$  的一函數來計算該離子電流  $I_1$ 。

20.如申請專利範圍第 19 項之電漿處理系統，其中該離子電流  $I_1$  係經由以下的方程式來加以計算：

$$I_1 = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})}。$$

21.如申請專利範圍第 18 項之電漿處理系統，其中該電壓步階  $\Delta V$  係週期性地在該修改後的週期性的電壓函數的週期之間加以改變，藉此產生兩個或多個不同的離子能量分佈函數。

22.如申請專利範圍第 18 項之電漿處理系統，其中該基板支撐座偏壓供應的一工作週期係控制穿過該鞘而且入射在該基板表面上的離子之一離子通量，其中用於一或多個不同的離子能量分佈函數的每一個之該離子通量係依據該修改後的週期性的電壓函數用於一或多個電壓步階  $\Delta V$  的每一個的一工作週期而定。

23.如申請專利範圍第 18 項之電漿處理系統，其中該基板支撐座偏壓供應係包含一第一開關以及一第二開關，兩者係並聯配置在一電源以及該基板支撐座偏壓供應的一輸出之間。

24.如申請專利範圍第 18 項之電漿處理系統，其中該第一開關係選擇性地耦接一匯流排電壓至該輸出，並且該第二開關係選擇性地耦接該輸出至

接地。

25.如申請專利範圍第 18 項之電漿處理系統，其中該控制器：

在一第一期間開路該第一開關並且閉合該第二開關，其中一電壓係朝向 0V 斜坡上升一波峰至波峰的電壓  $V_{pp}$  並且稍微超過 0V；

閉合該第一開關並且開路該第二開關，此係造成在電壓  $\Delta V$  上的一瞬間下降，接著是一斜坡的區域，其中該電壓的一斜率是  $dV/dt$ ；以及

再次開路該第一開關並且閉合該第二開關。

26.一種非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其係被編碼有處理器可讀取的指令以執行一種用於控制來自一電漿的離子的一離子能量分佈函數的特徵之方法，該些離子係入射在一電漿處理室內之一基板上，該方法係包括：

存取一支承該基板的基板支撐座之一有效電容  $C_i$ ；

控制一由一基板偏壓供應所提供之週期性的電壓函數以及一由一離子電流補償構件所提供之離子電流補償，該週期性的電壓函數以及該離子電流補償的一組合是一修改後的週期性的電壓函數，該修改後的週期性的電壓函數係被提供至該基板支撐座以便於在該基板的相對於該基板支撐座之一表面上達成一電位，並且藉此控制從該電漿入射在該基板上的離子的一離子能量  $eV$ ；以及

進行該修改後的週期性的電壓函數的量測；

根據該些量測來反覆地計算在該電漿中的一離子電流  $I_i$ 。

27.如申請專利範圍第 26 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其中該修改後的週期性的電壓函數係包含一電壓步階  $\Delta V$ ，接著是一具有一

斜率  $dV/dt$  之傾斜的部分。

28.如申請專利範圍第 27 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其中該離子電流  $I_1$  是該電壓步階  $\Delta V$  以及該傾斜的部分的斜率  $dV/dt$  的一函數。

29.如申請專利範圍第 28 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其中該斜率  $dV/dt$  係利用來自該修改後的週期性的電壓函數的兩個不同的週期的每一個之至少一電壓量測來加以計算。

30.如申請專利範圍第 26 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其中該電壓步階  $\Delta V$  係對應於在該基板的相對該基板支撐座的表面上之一平均電位，並且藉此達成入射在該基板上的離子之一平均離子能量  $eV$ 。

31.如申請專利範圍第 30 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其中該傾斜的部分的斜率  $dV/dt$  是來自該離子電流補償構件之一離子電流補償  $I_c$  的一函數。

32.如申請專利範圍第 26 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其進一步包括調整該離子電流補償  $I_c$ ，直到其等於該離子電流  $I_1$  為止，因此經由在該基板的相對該基板支撐座的表面上達成一固定的電位以最小化一離子能量分佈函數的一寬度。

33.如申請專利範圍第 26 項之非暫態的實體的電腦可讀取的儲存媒體，其進一步包括調整該離子電流補償  $I_c$ ，以便於變化在該基板的相對該基板支撐座的表面上的電位，因此增加該離子能量分佈函數的一寬度至一所要的寬度。

圖式

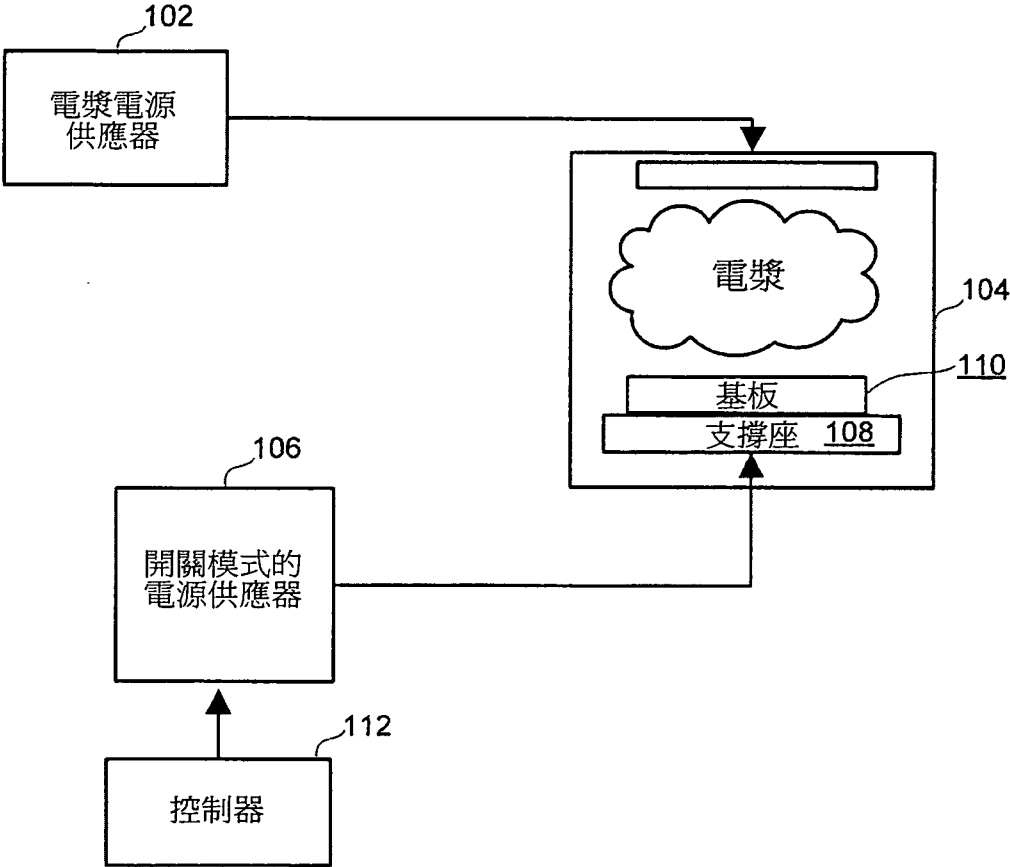


圖1

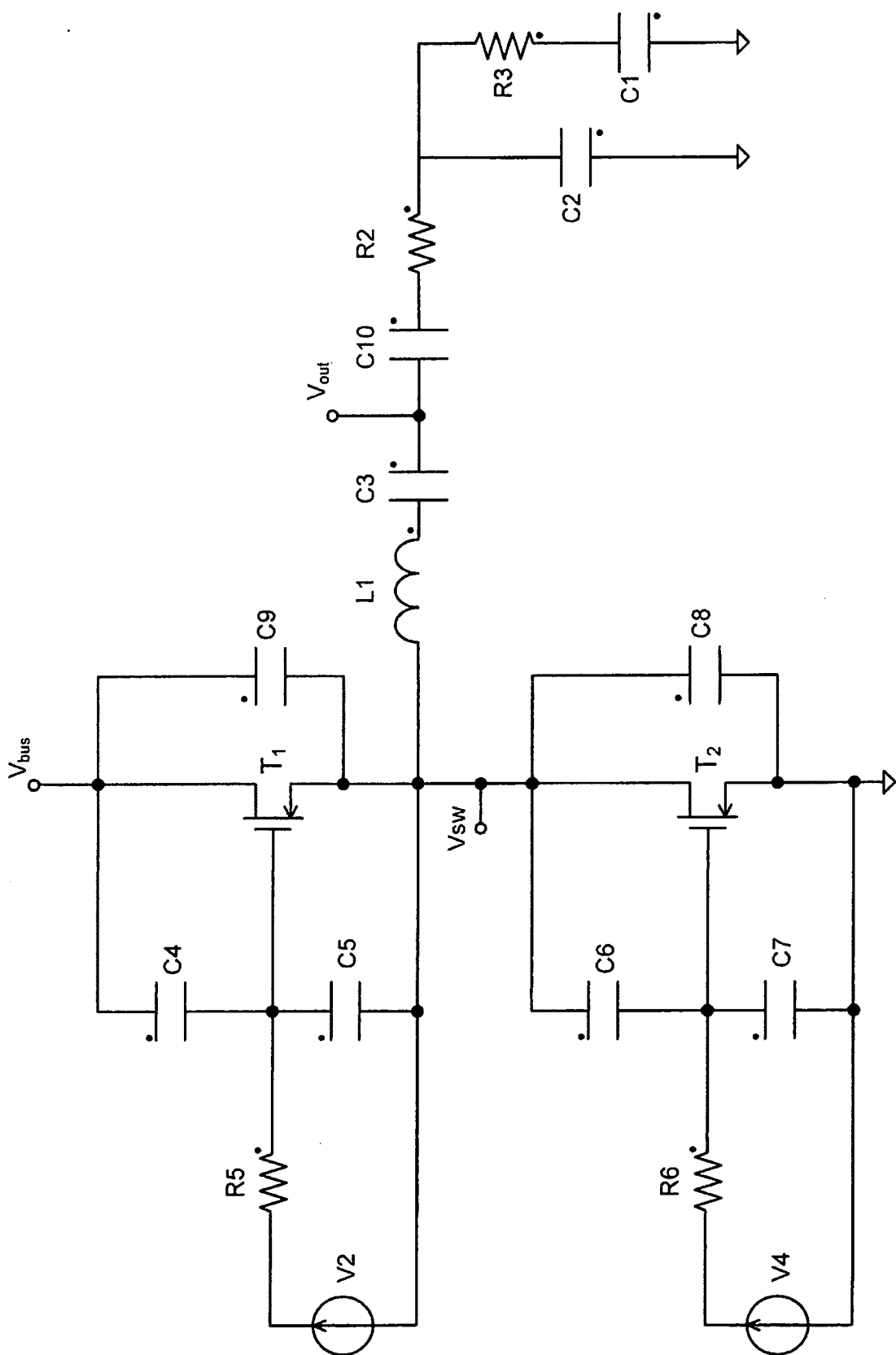


圖2

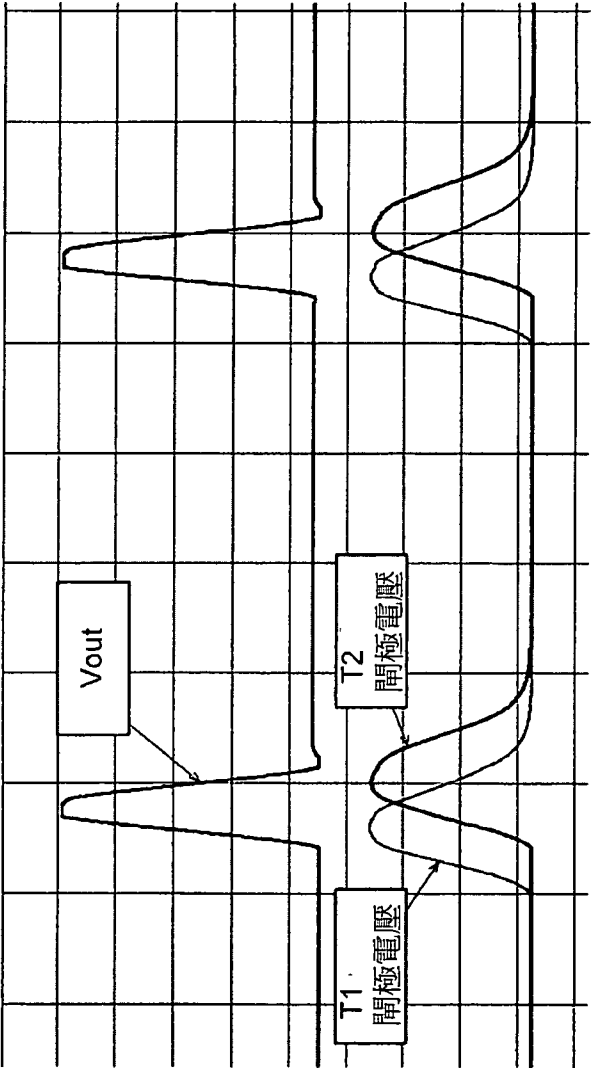


圖3

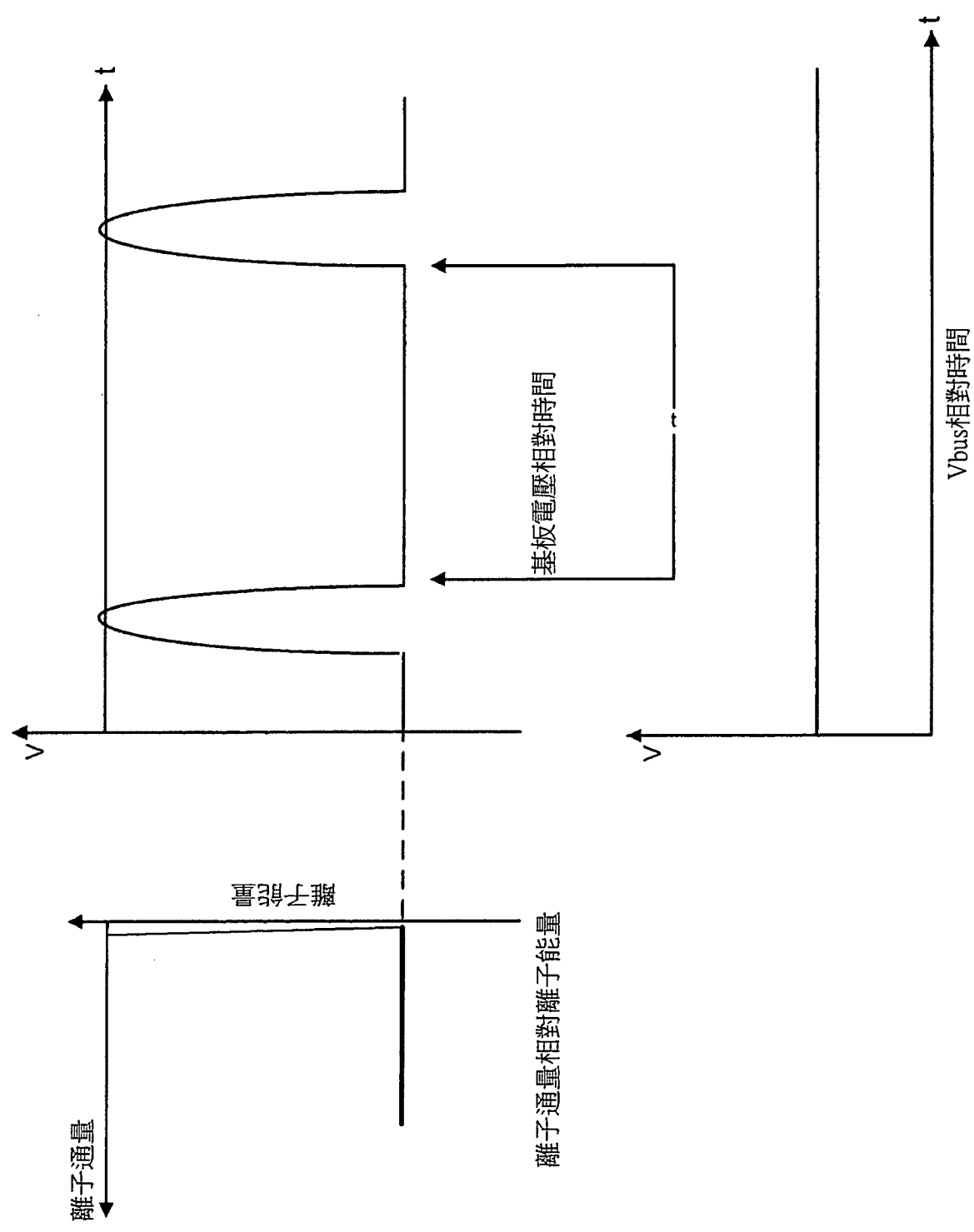


圖4

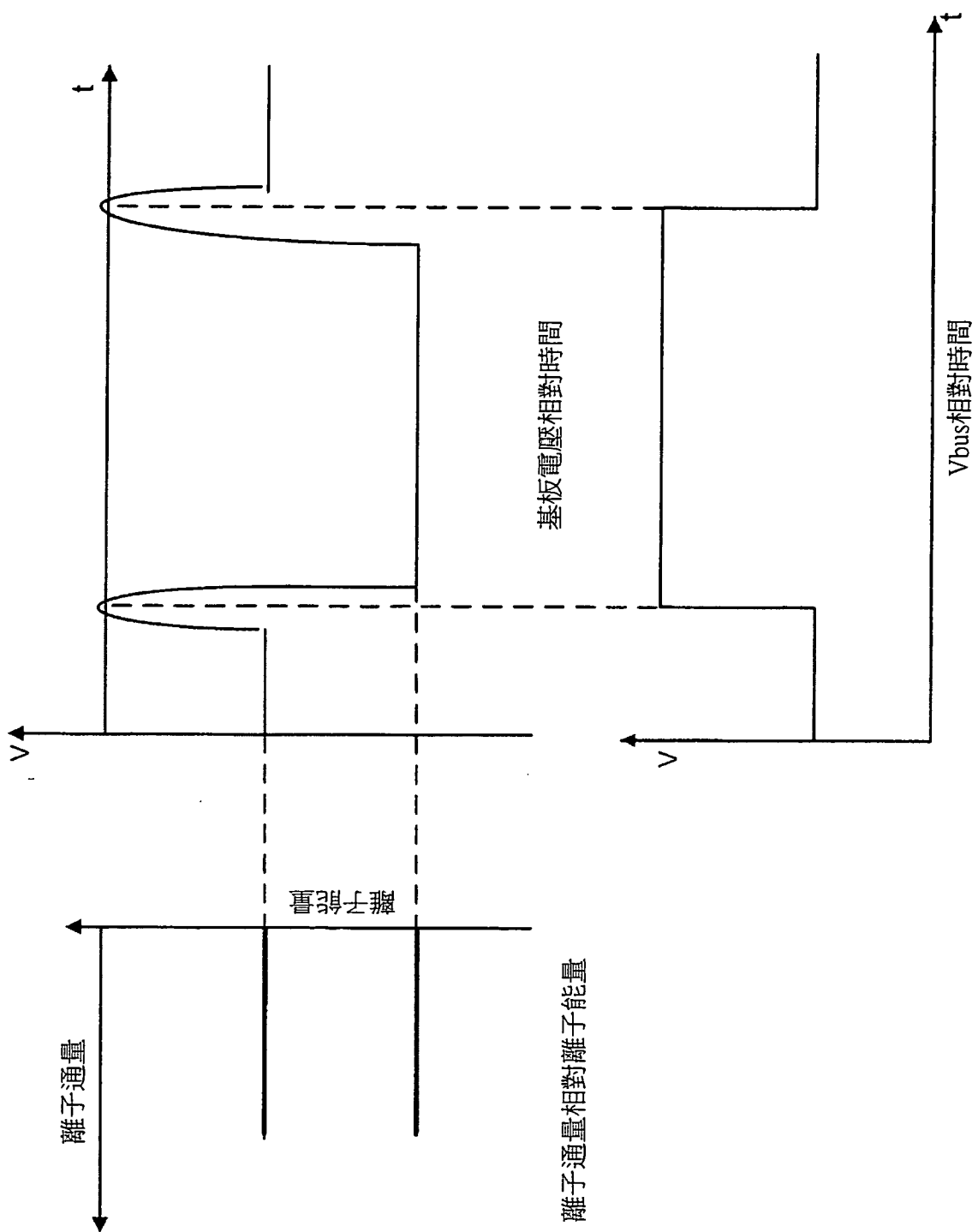


圖5



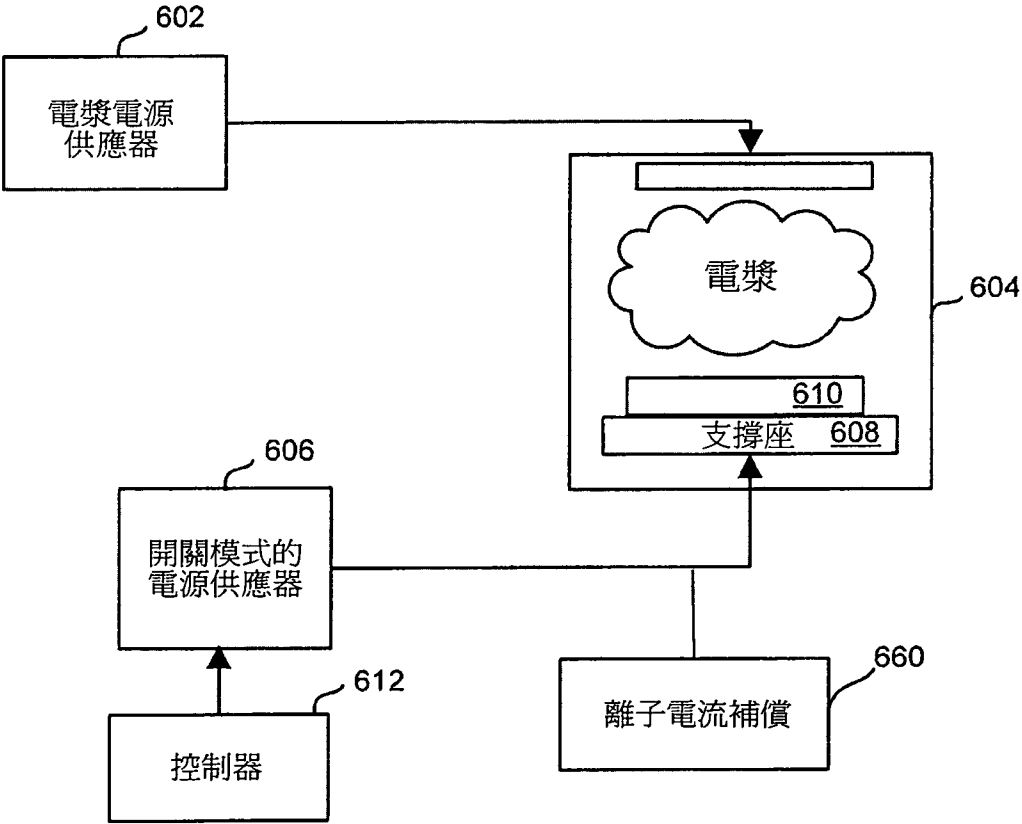


圖6

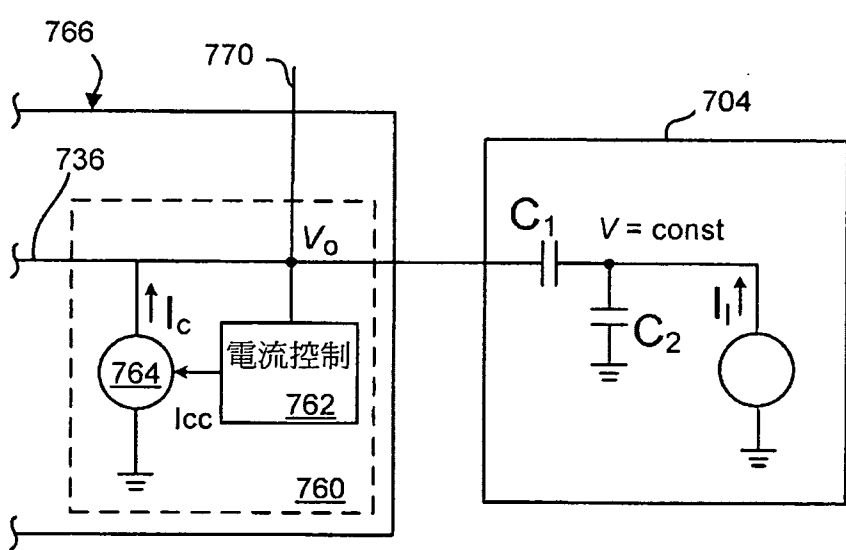


圖7

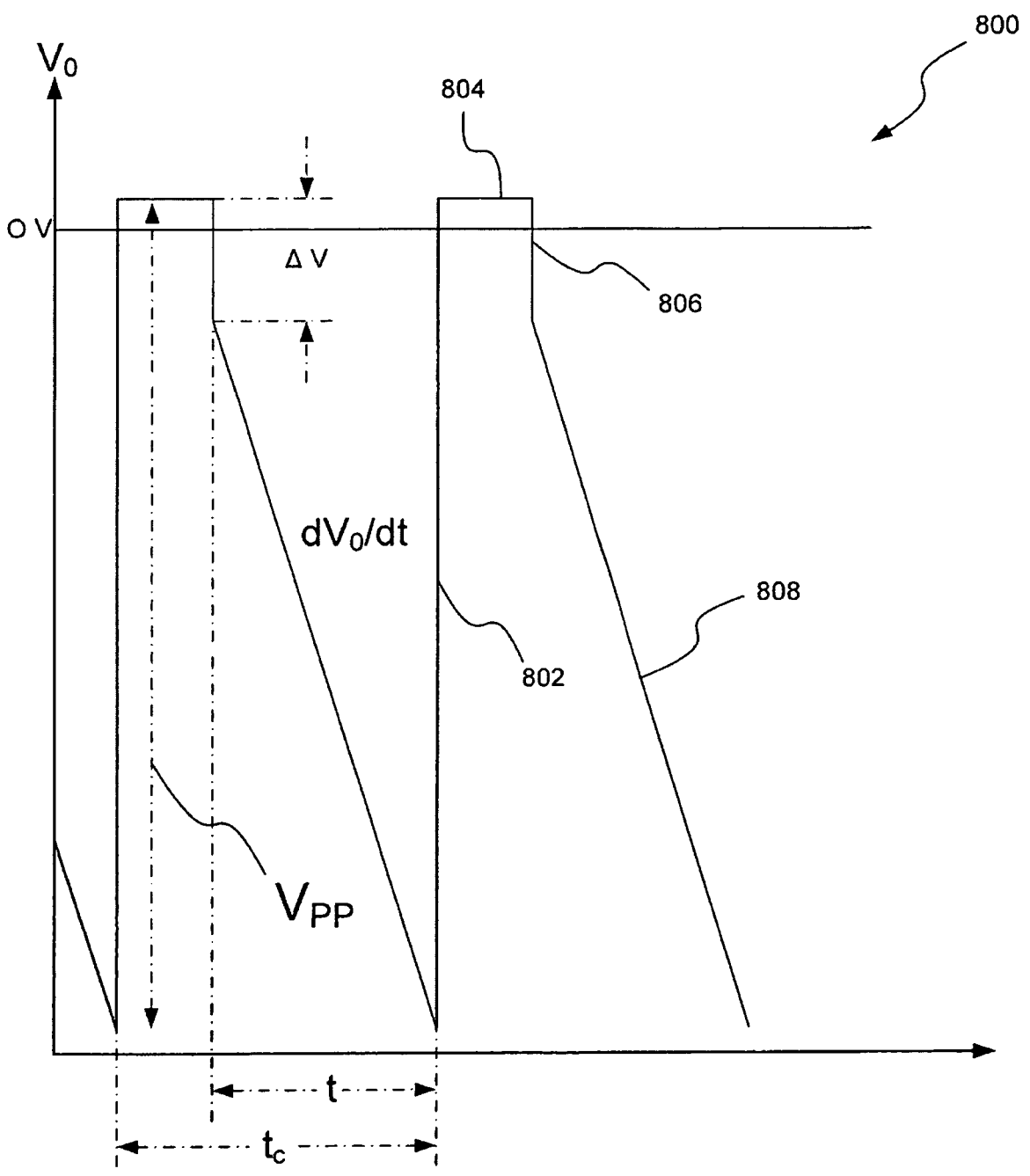


圖8

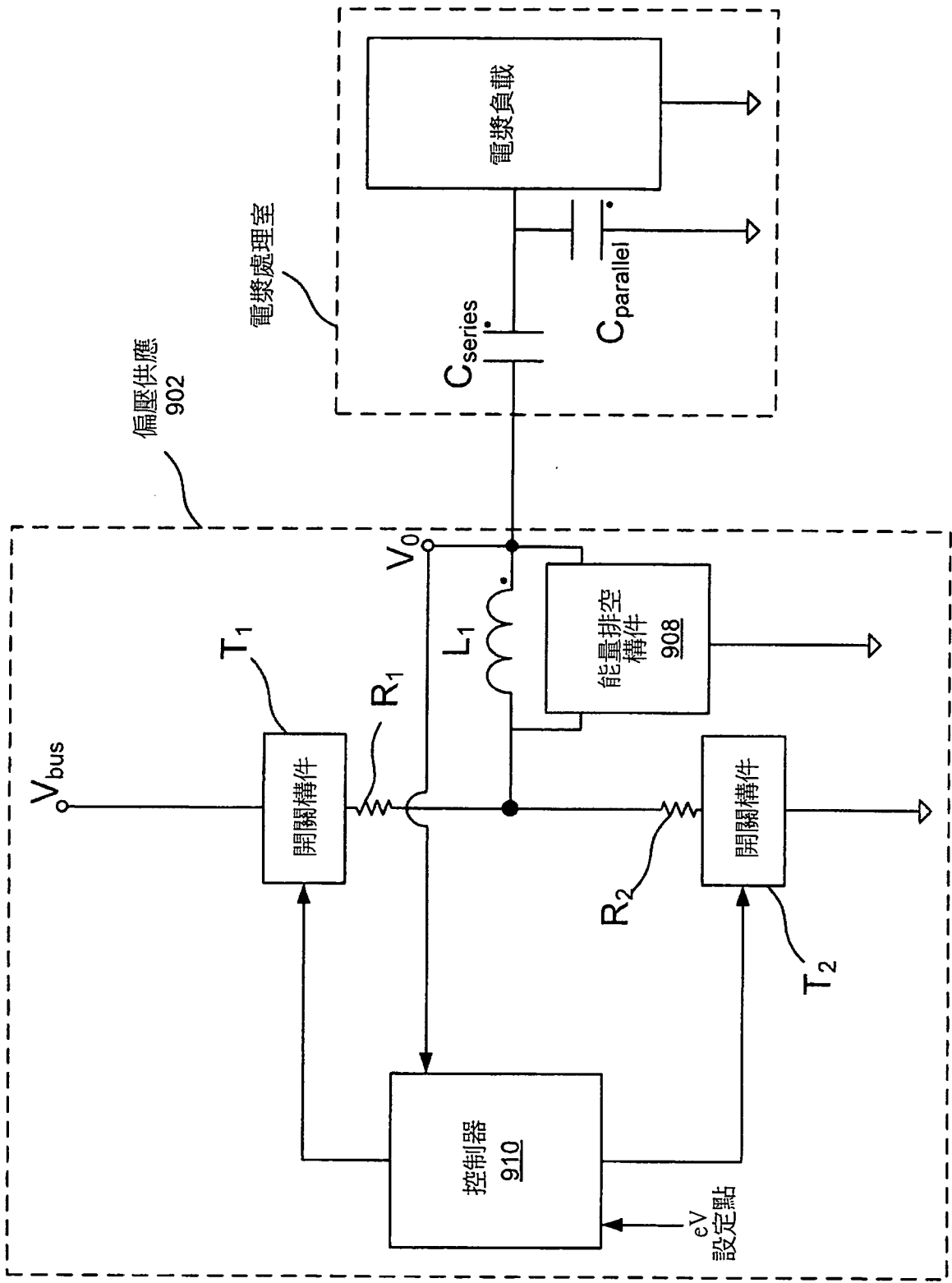


圖9

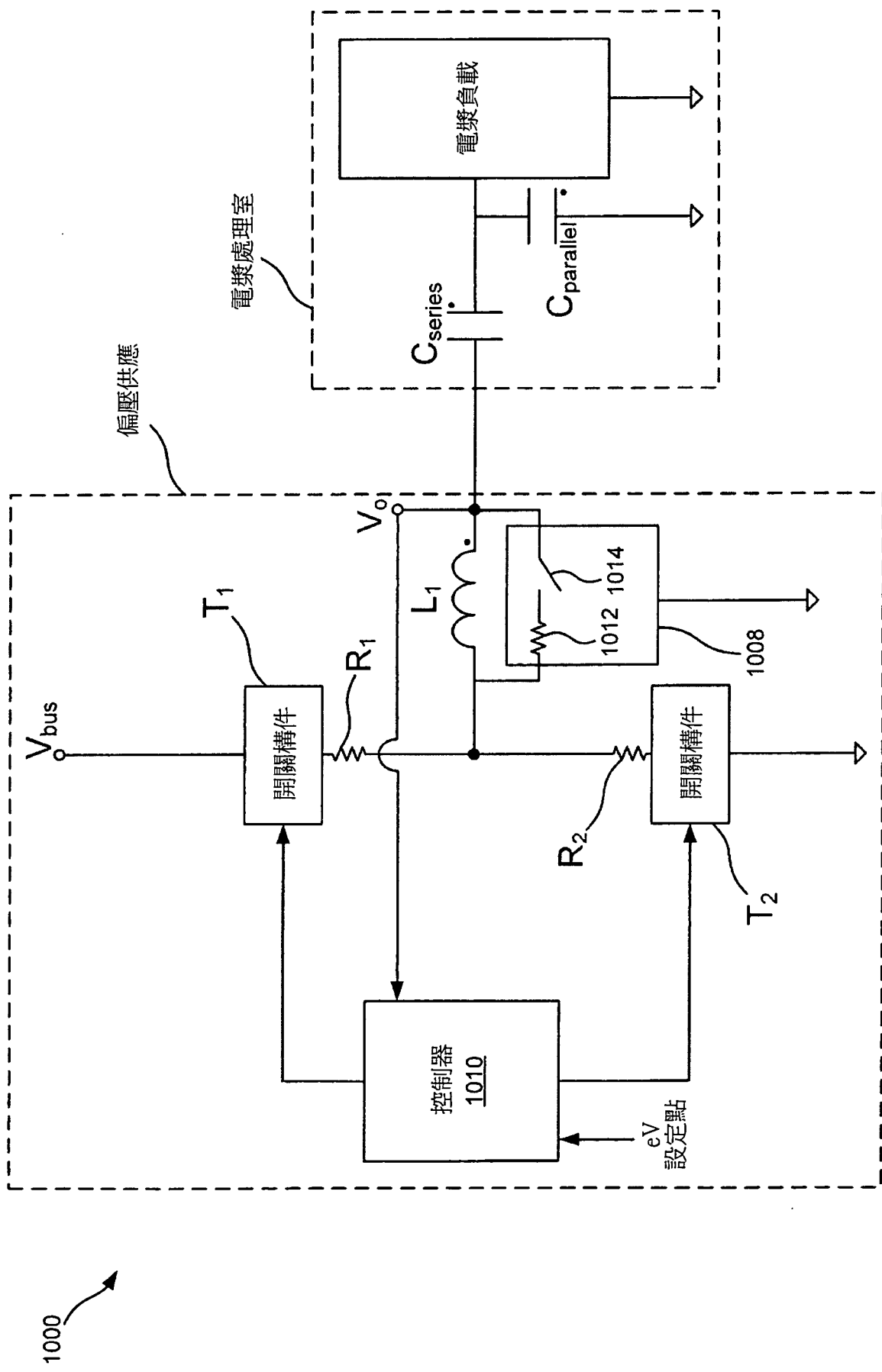
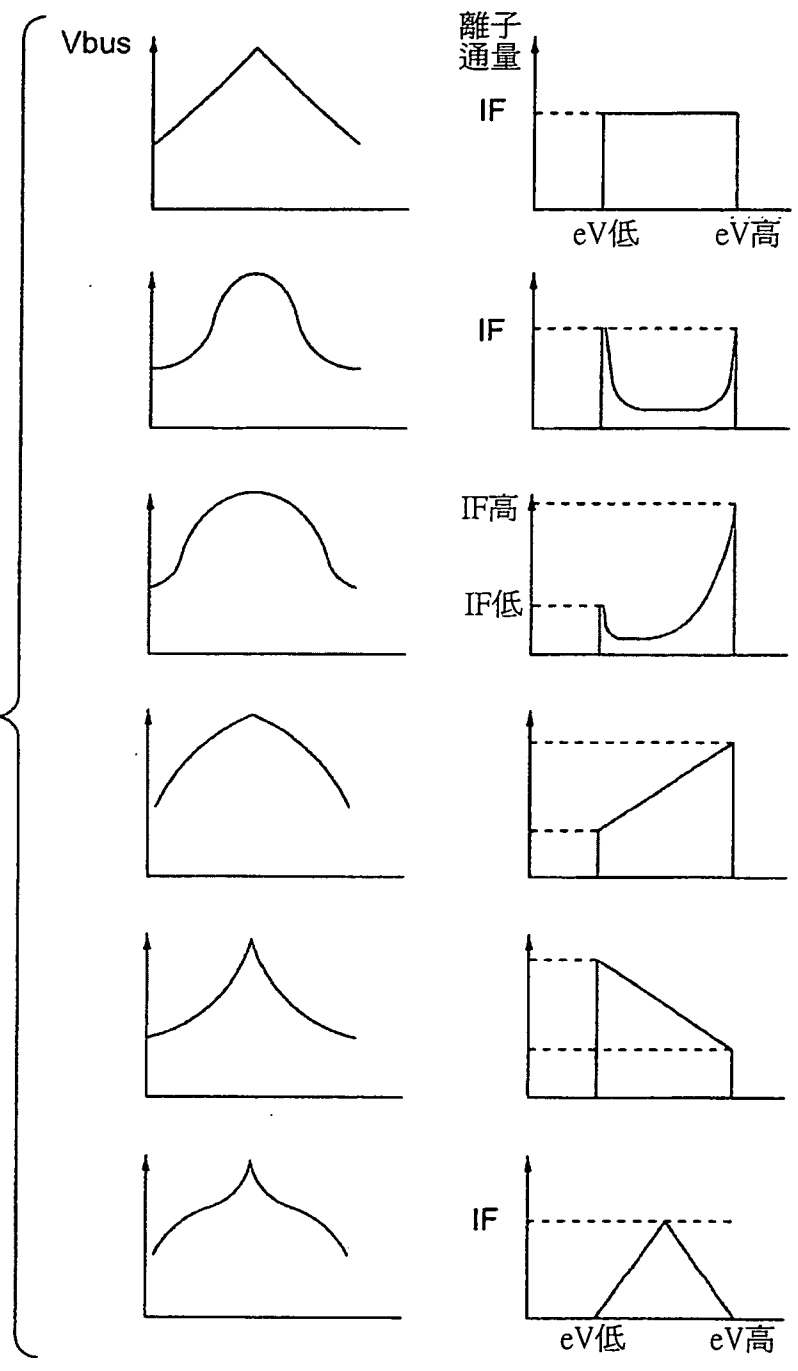


圖10

圖11



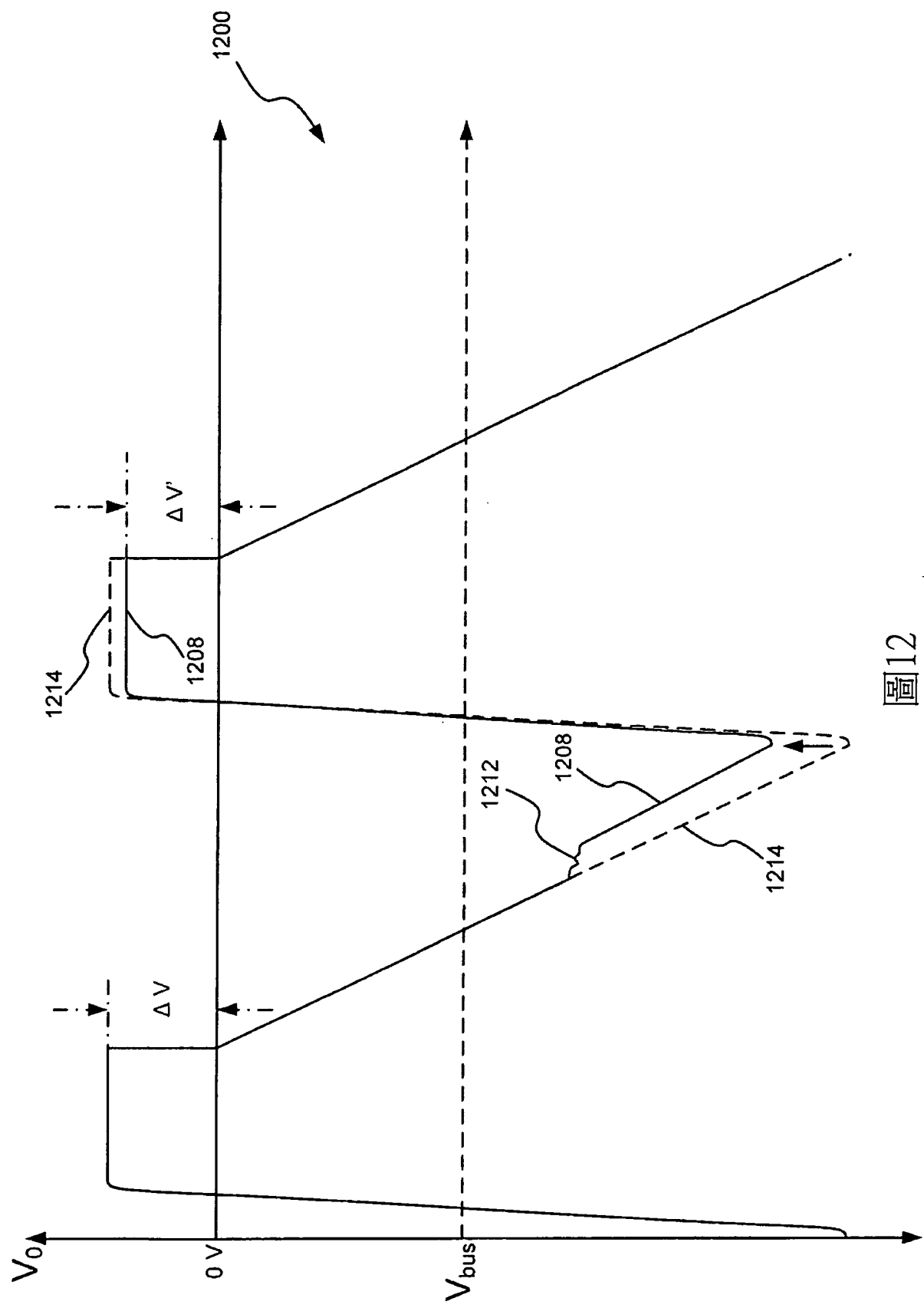


圖12

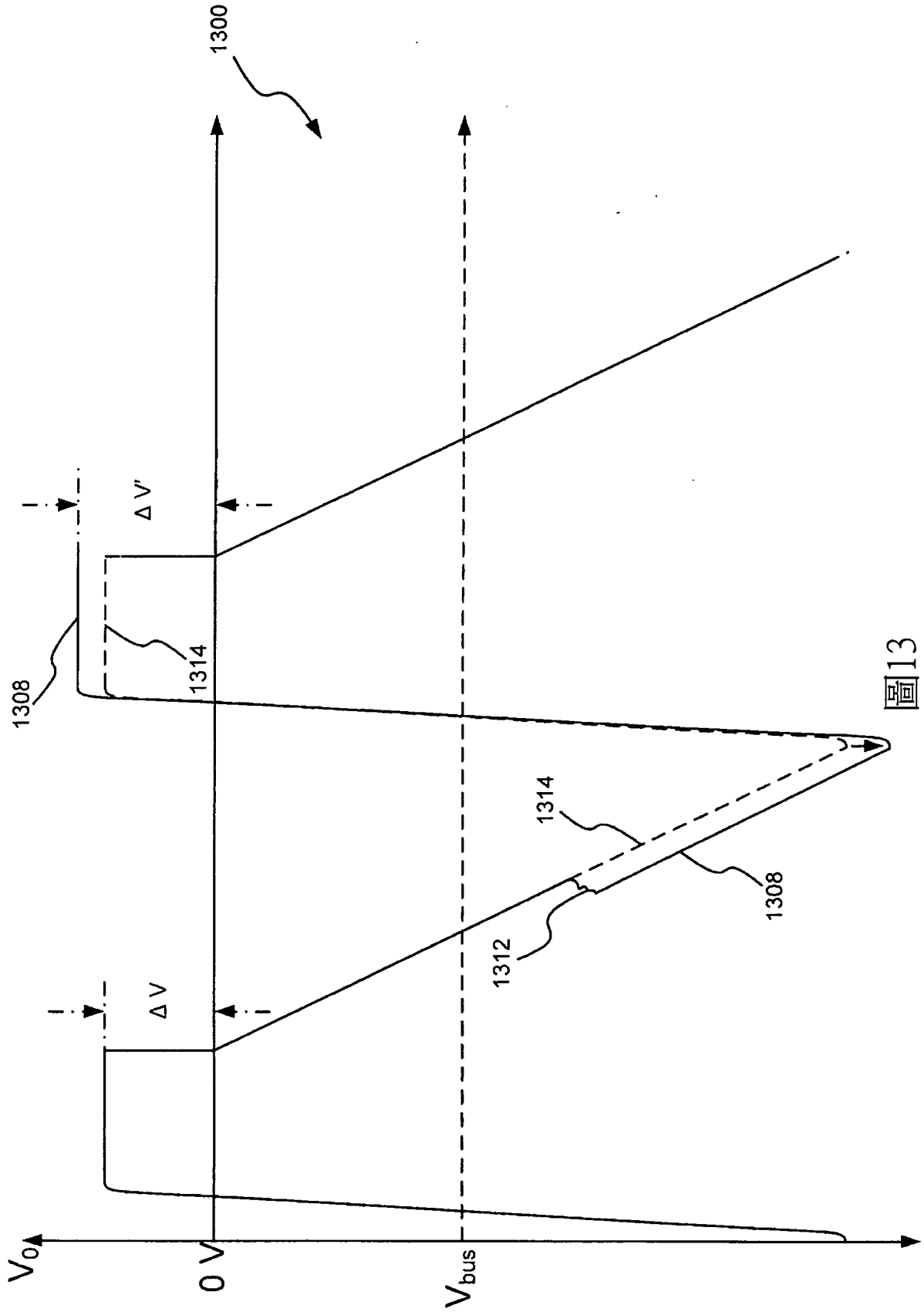


圖13



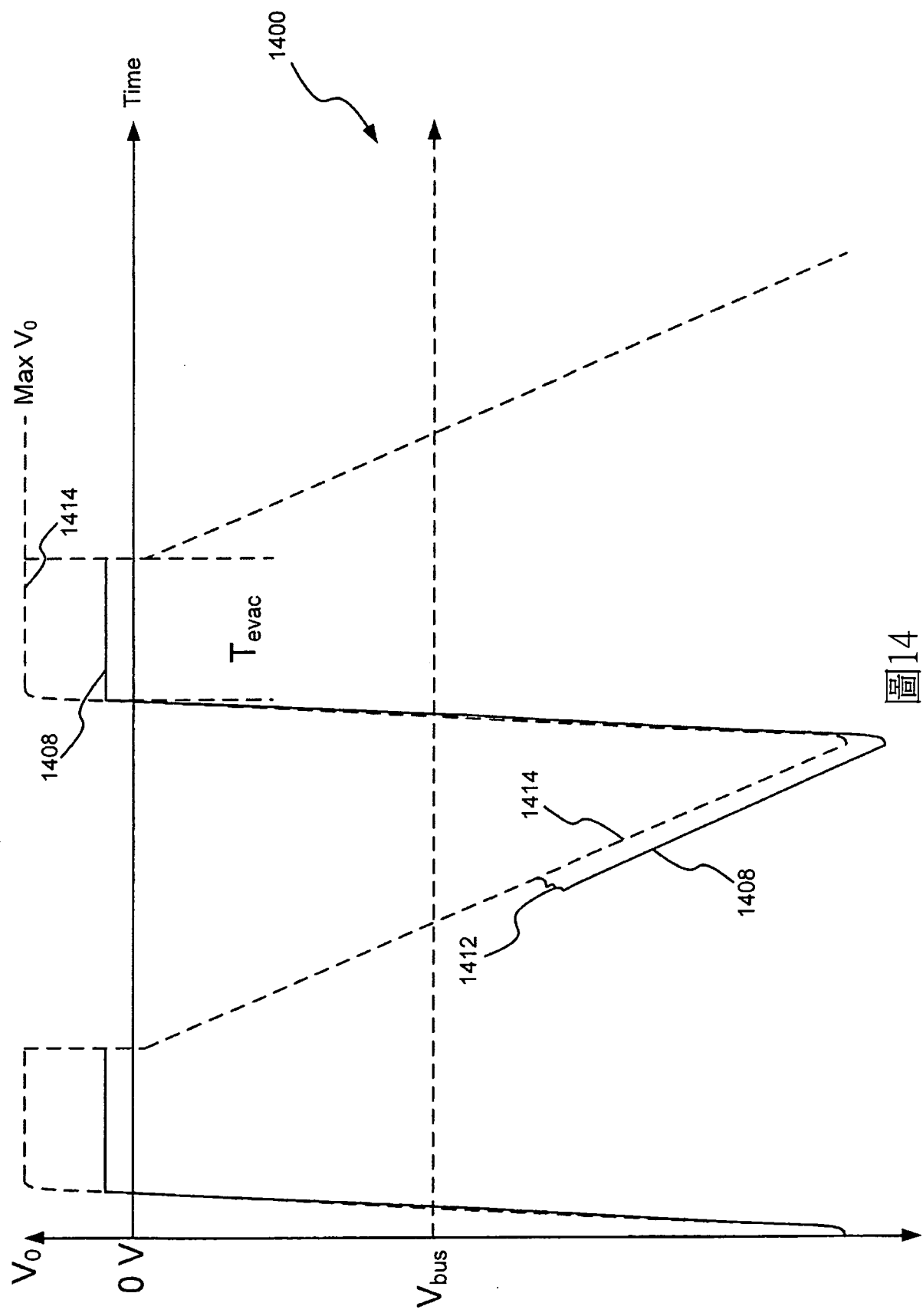


圖14

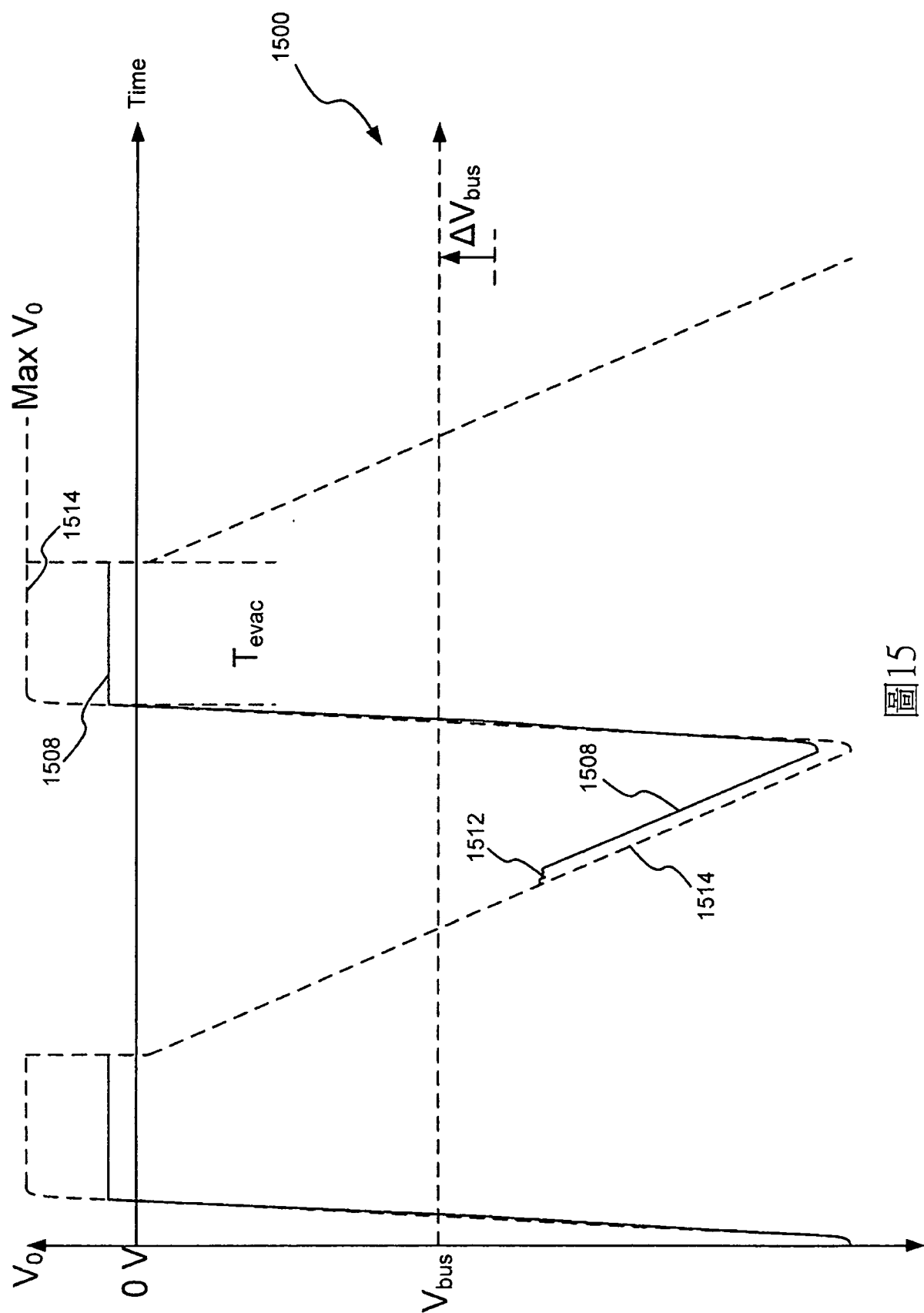


圖15

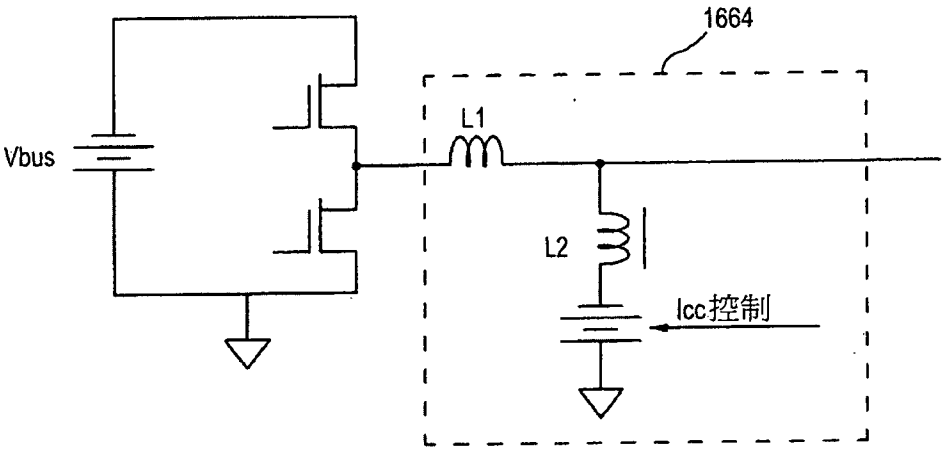


圖16

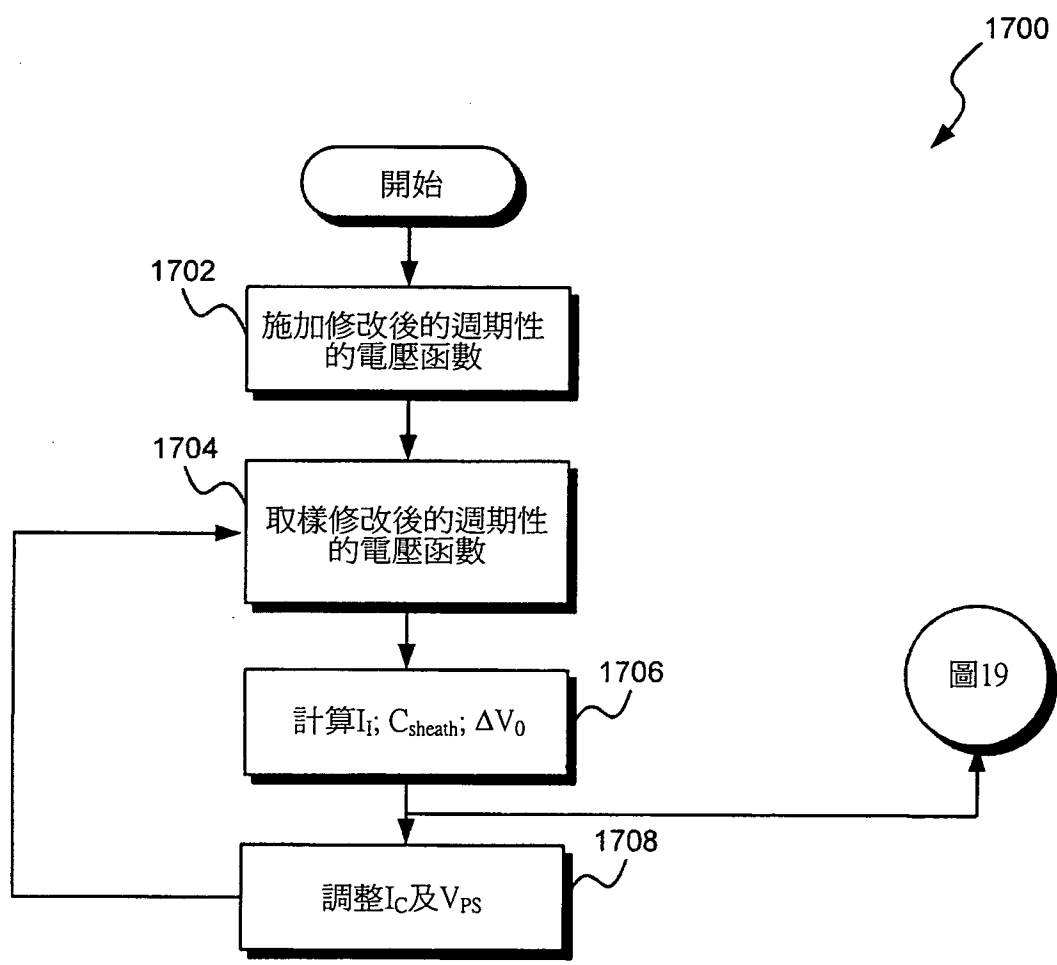


圖17

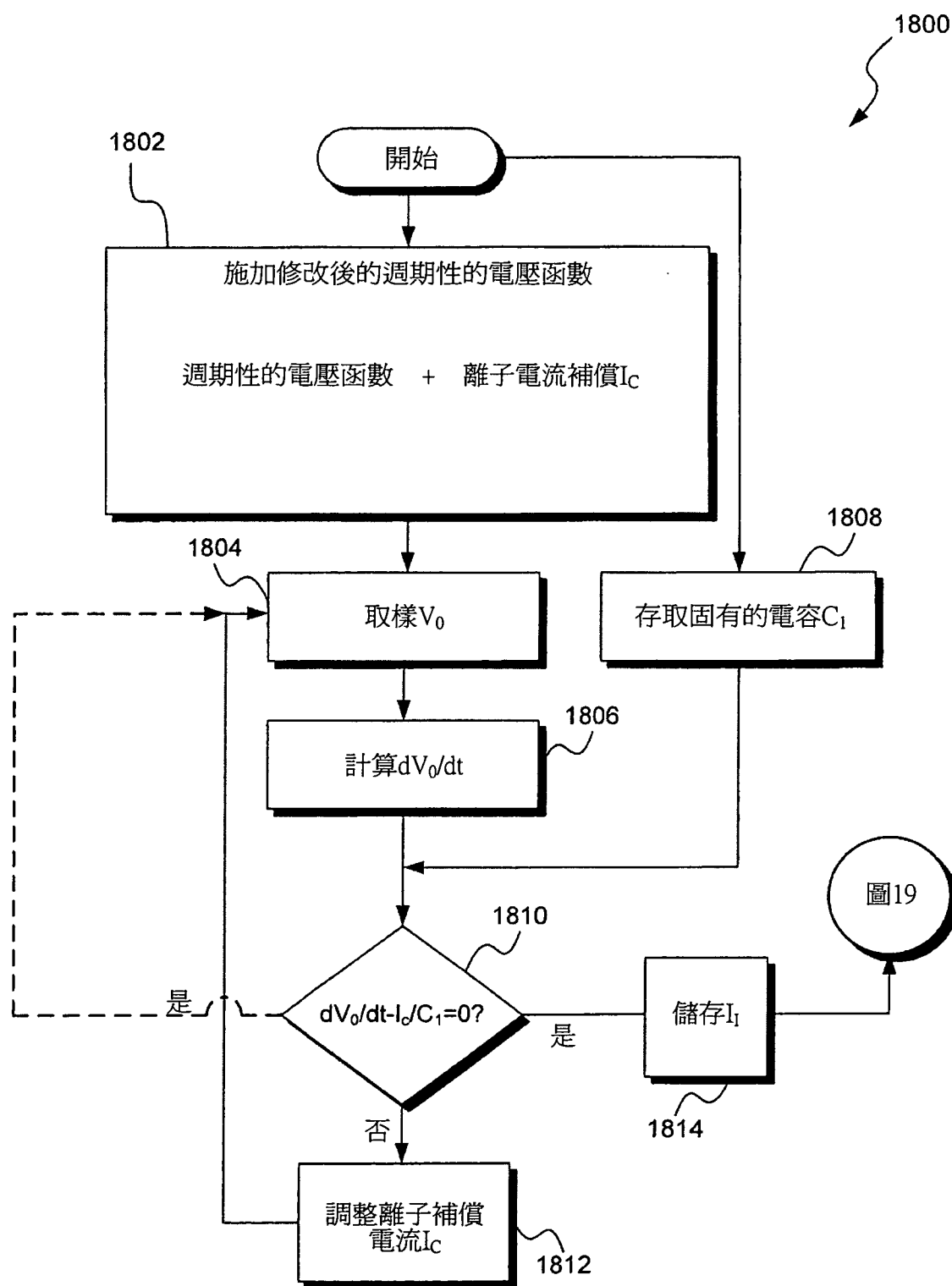


圖18

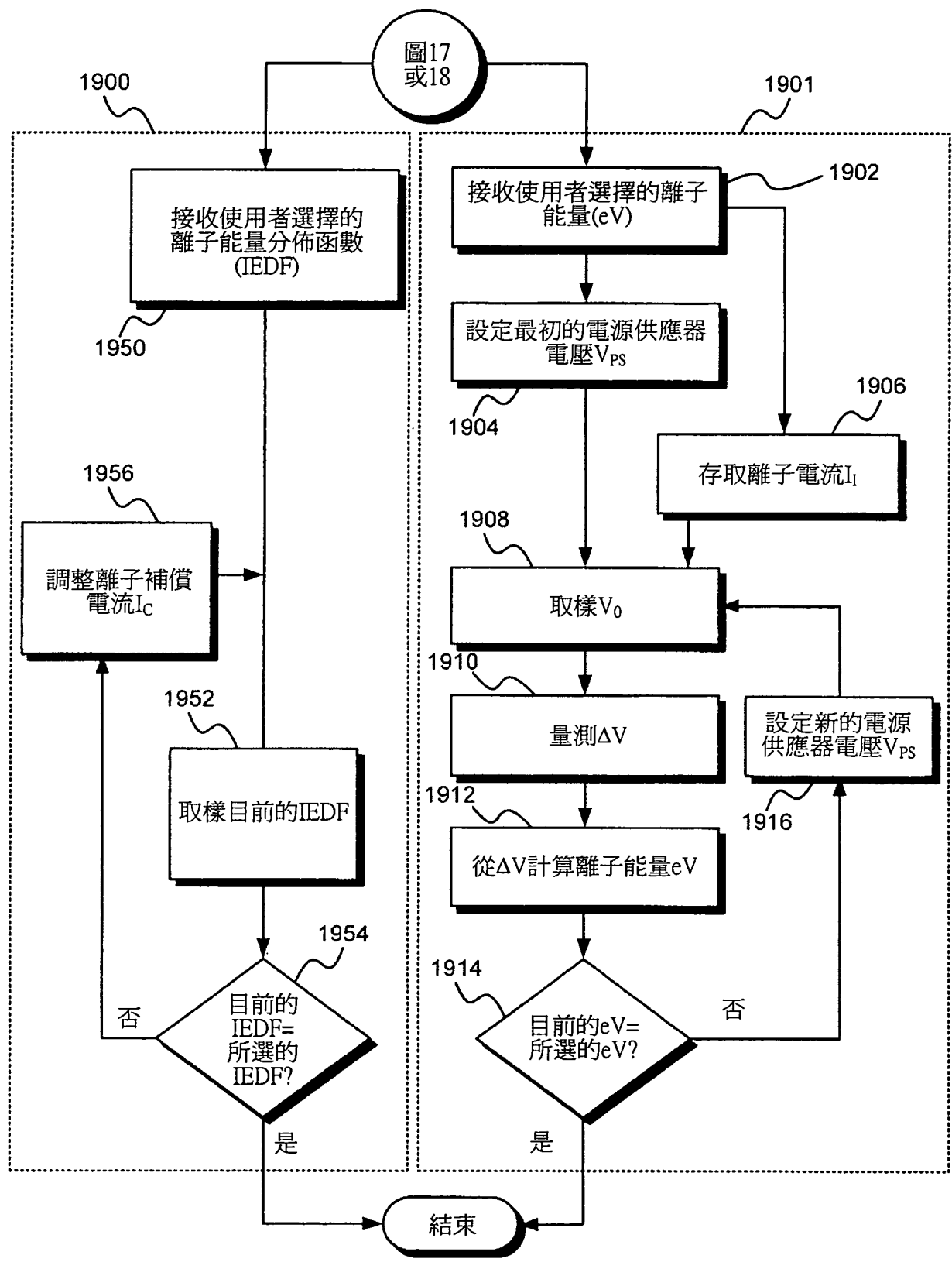


圖19

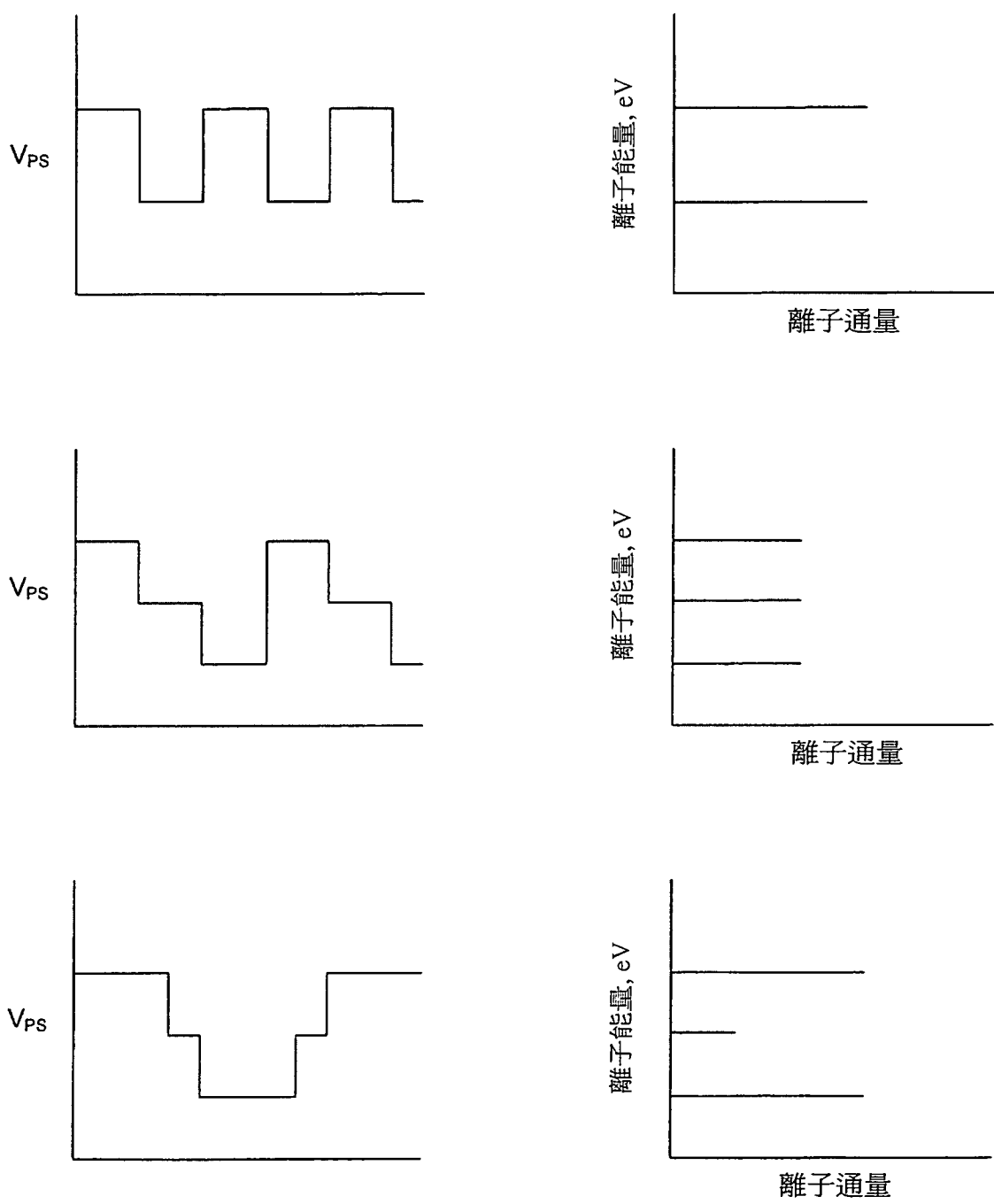


圖20

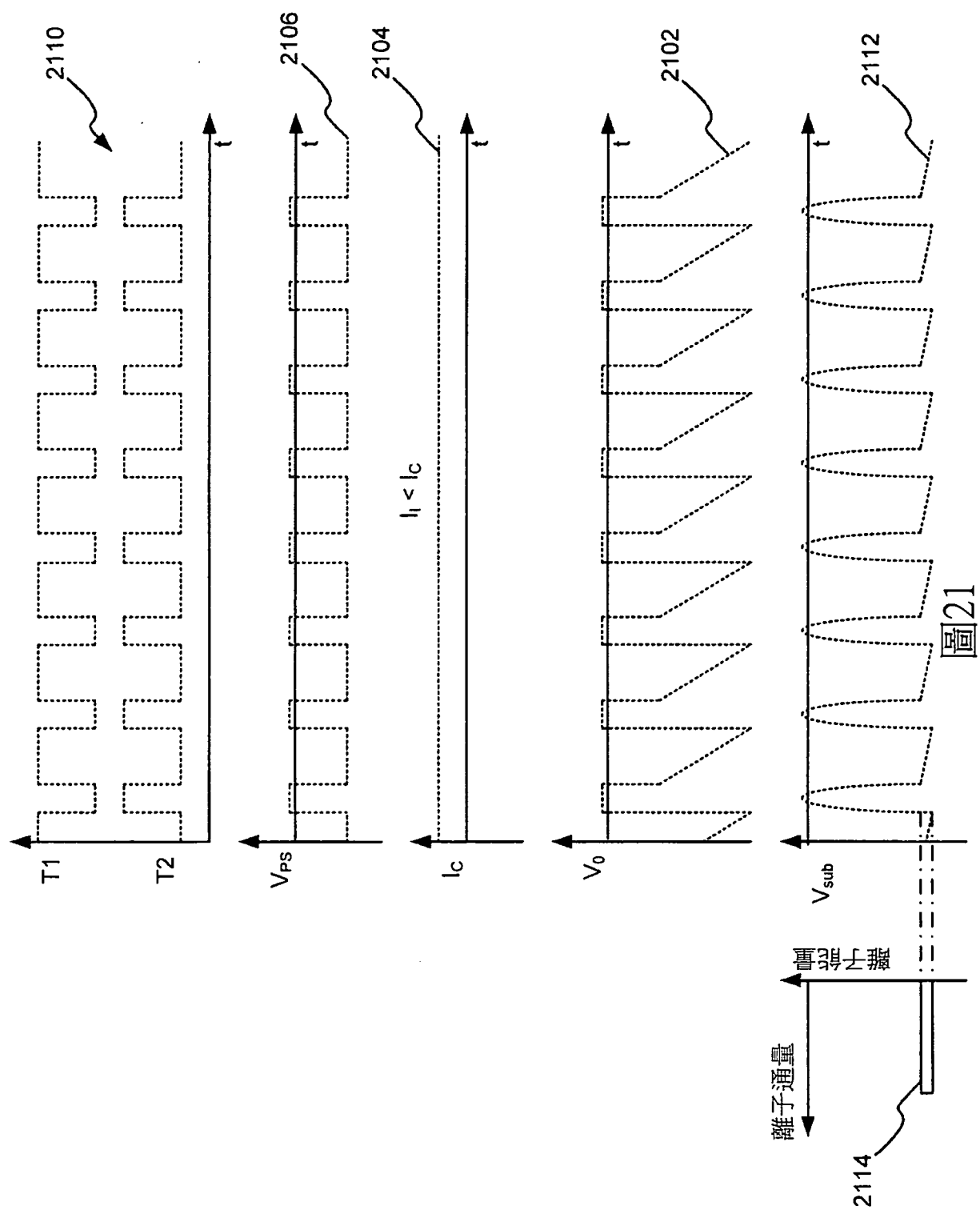


圖21



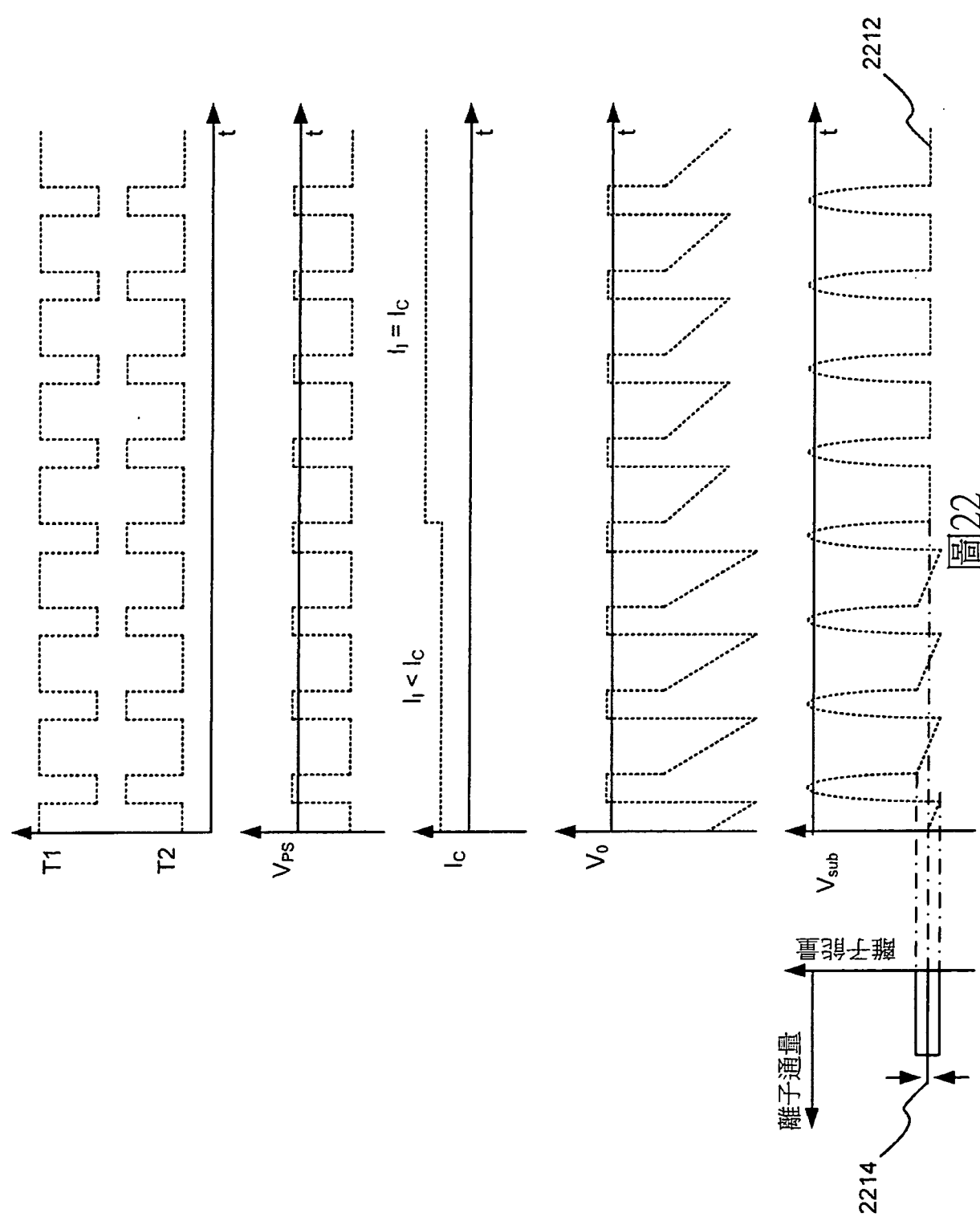


圖22

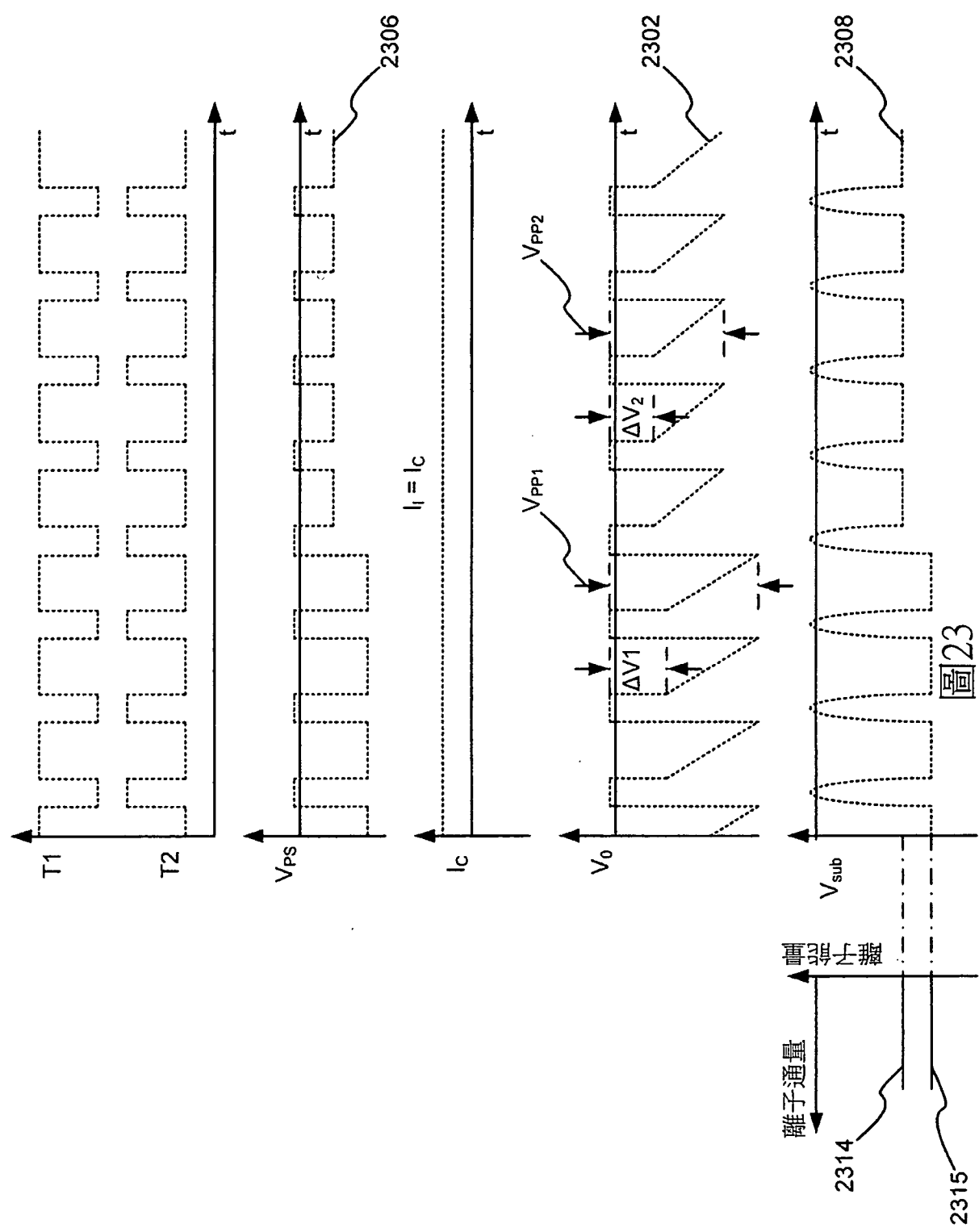


圖23

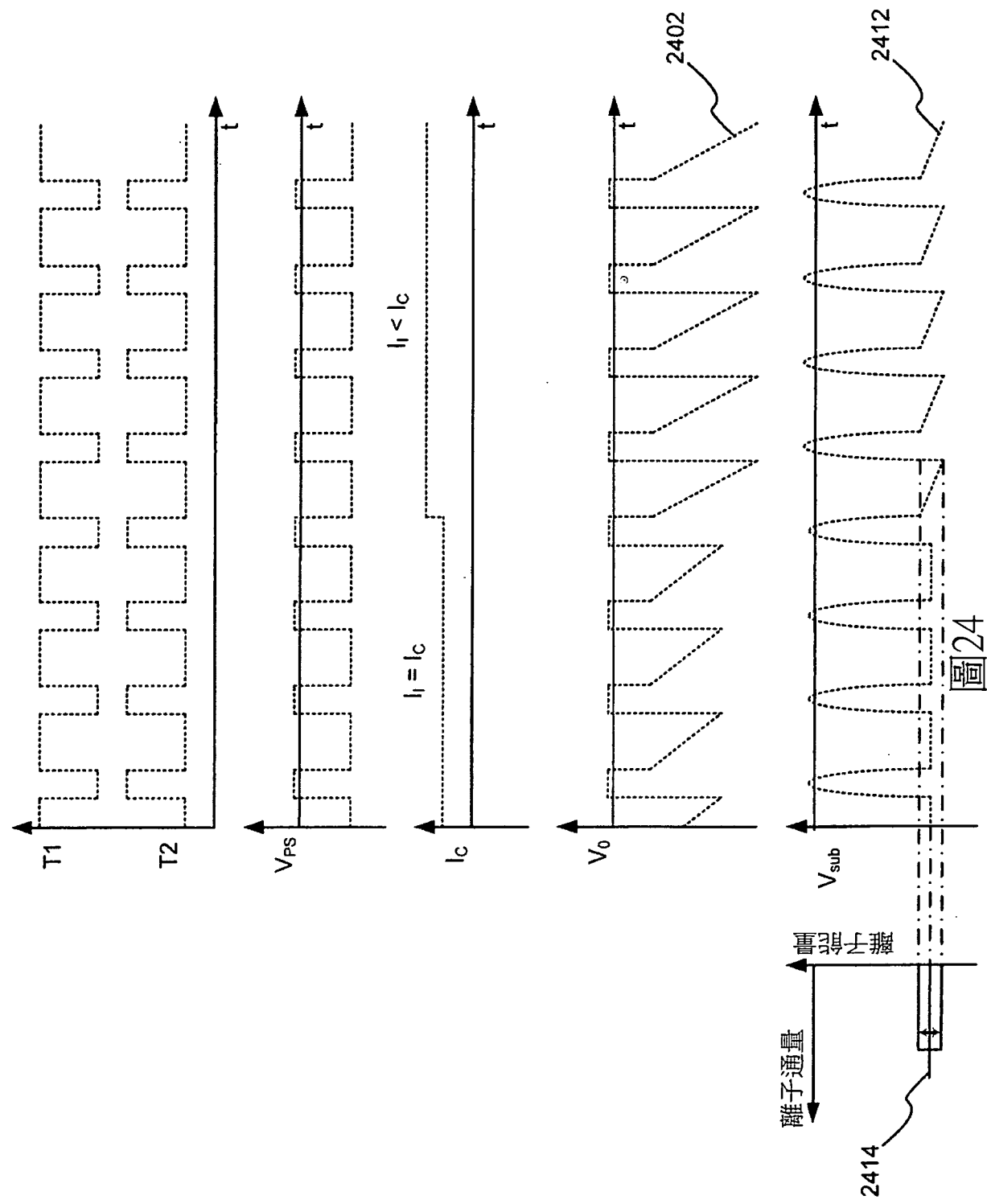
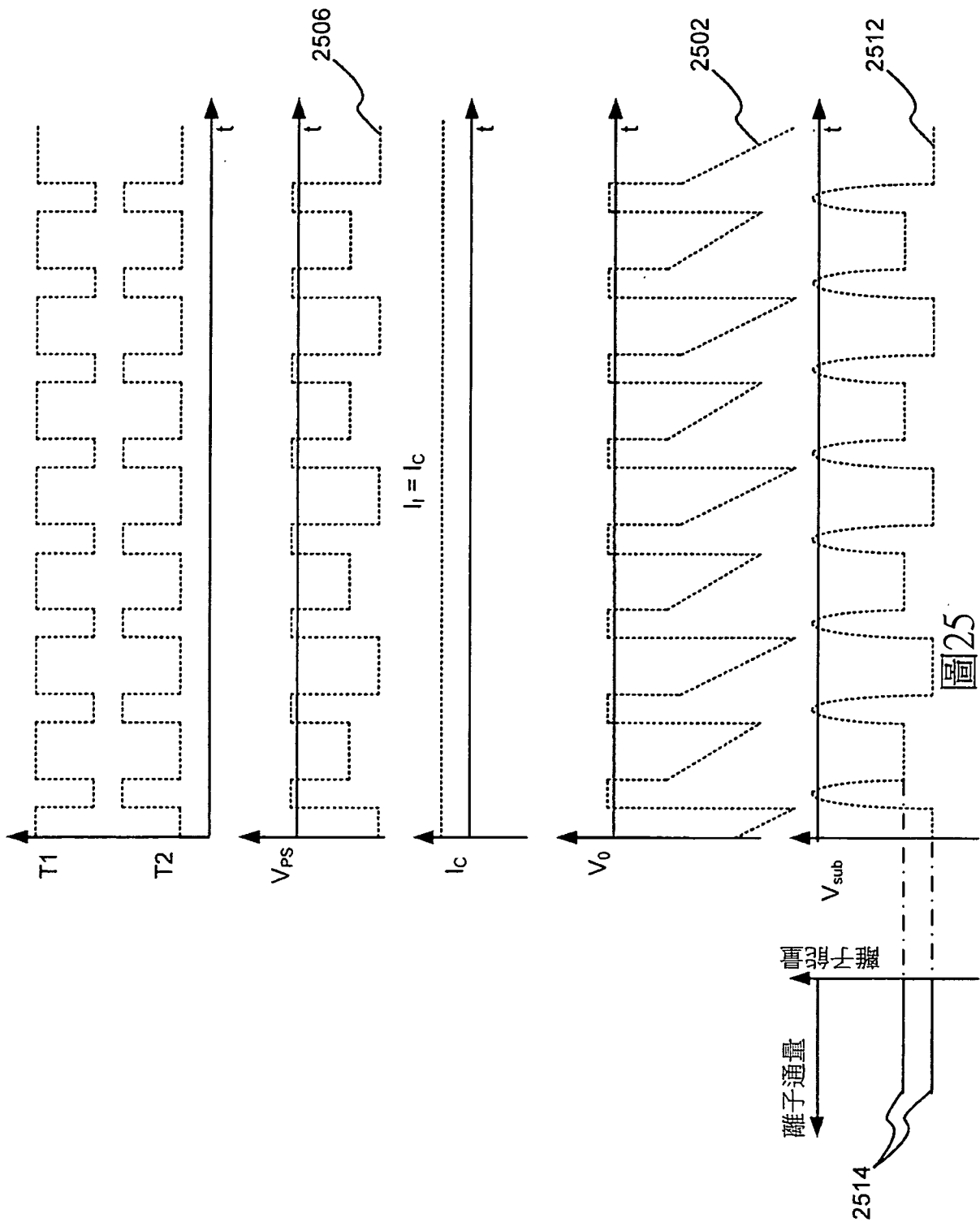
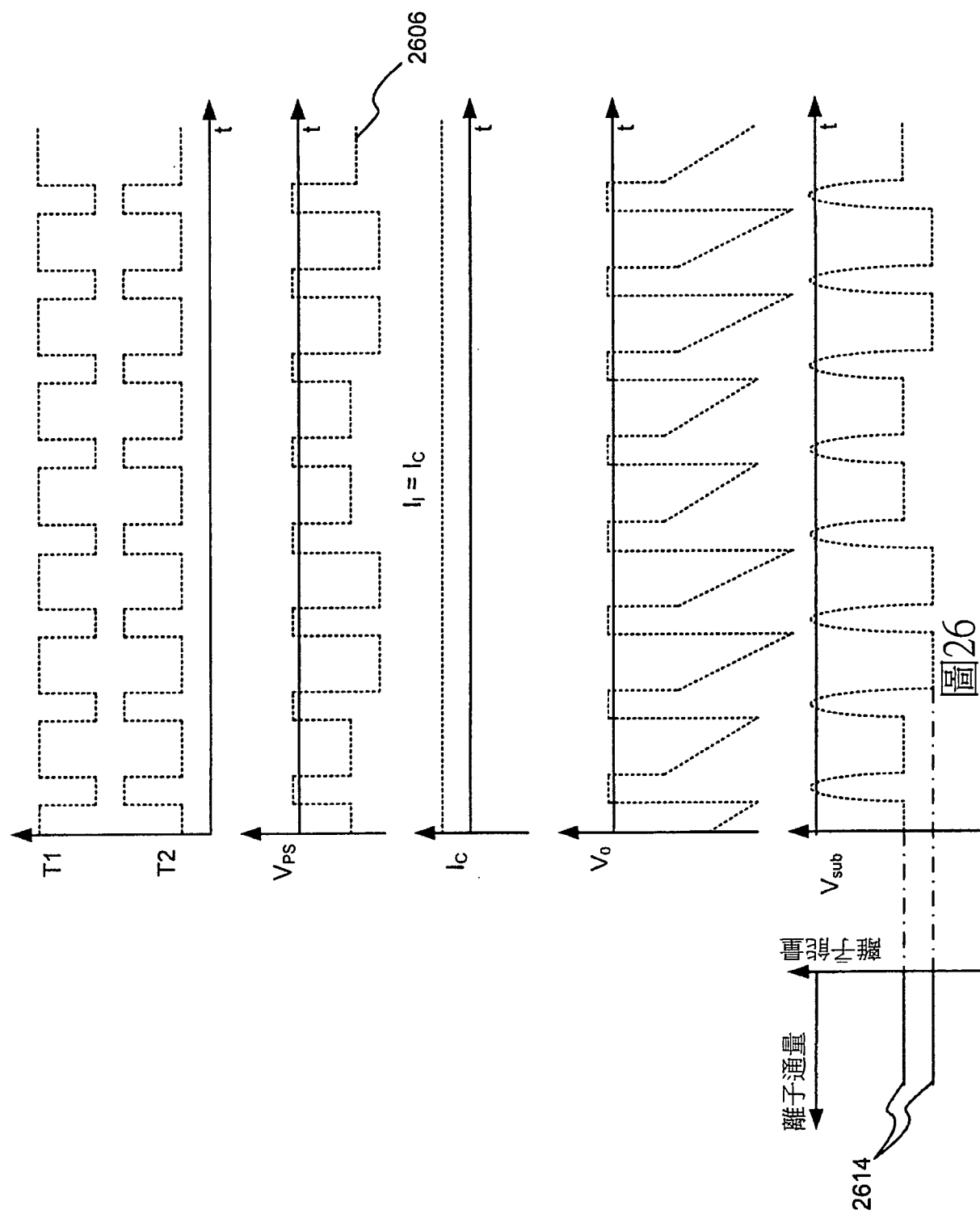


圖24





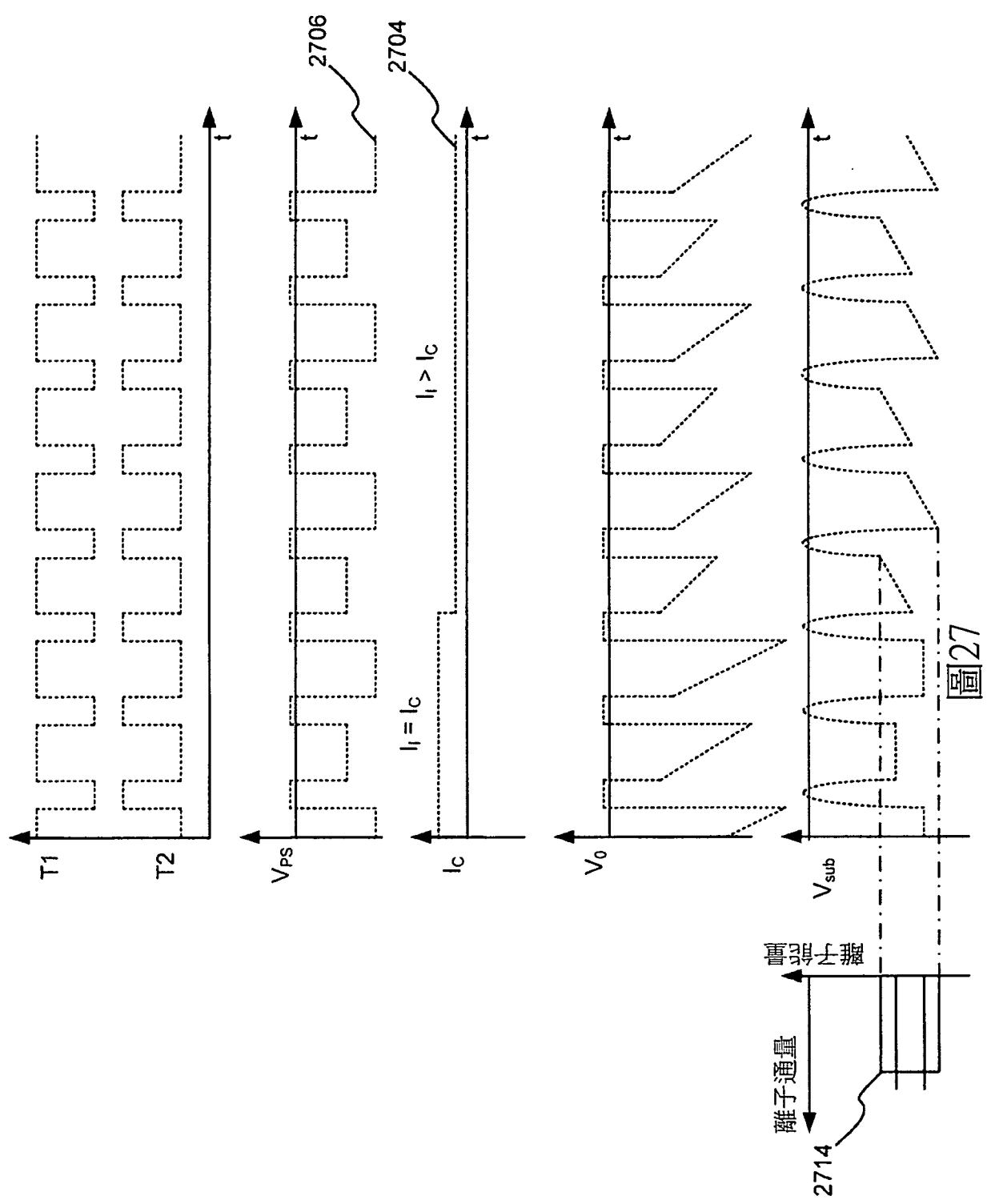


圖27

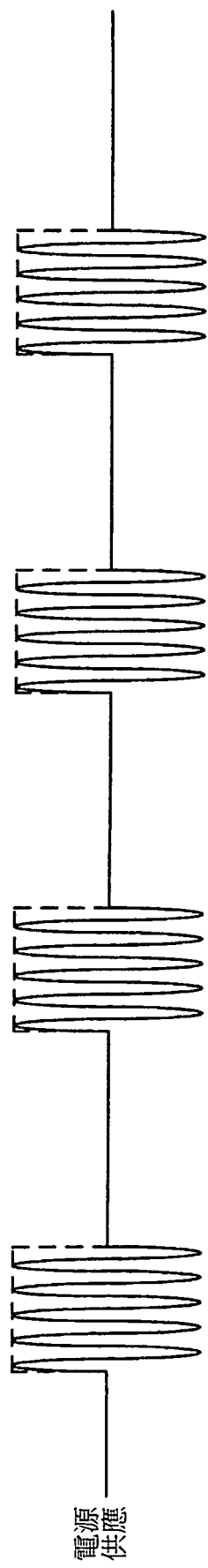


圖28

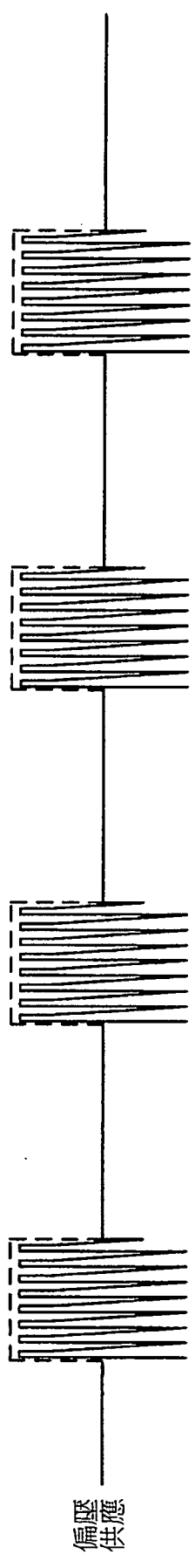


圖29



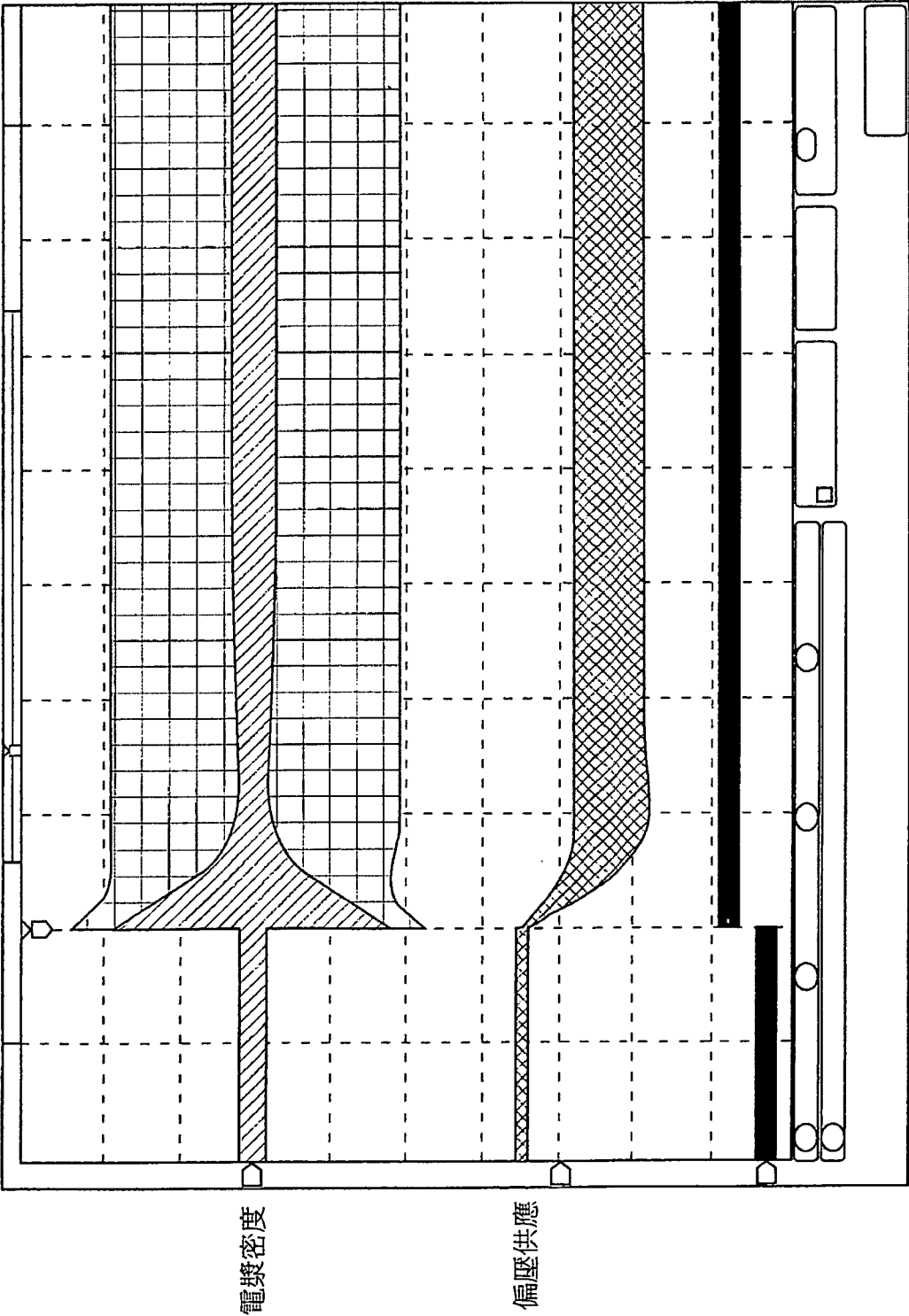


圖30

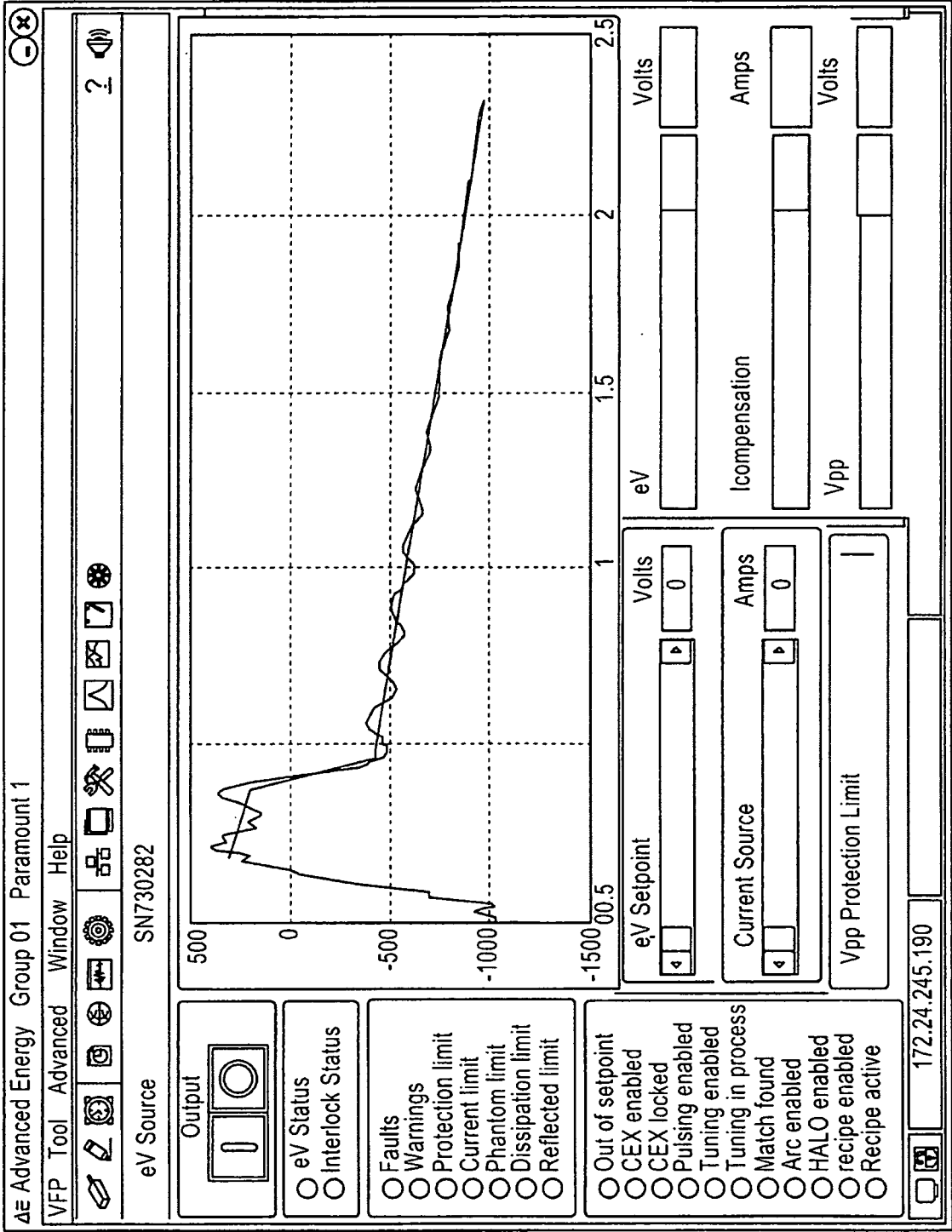


圖 31

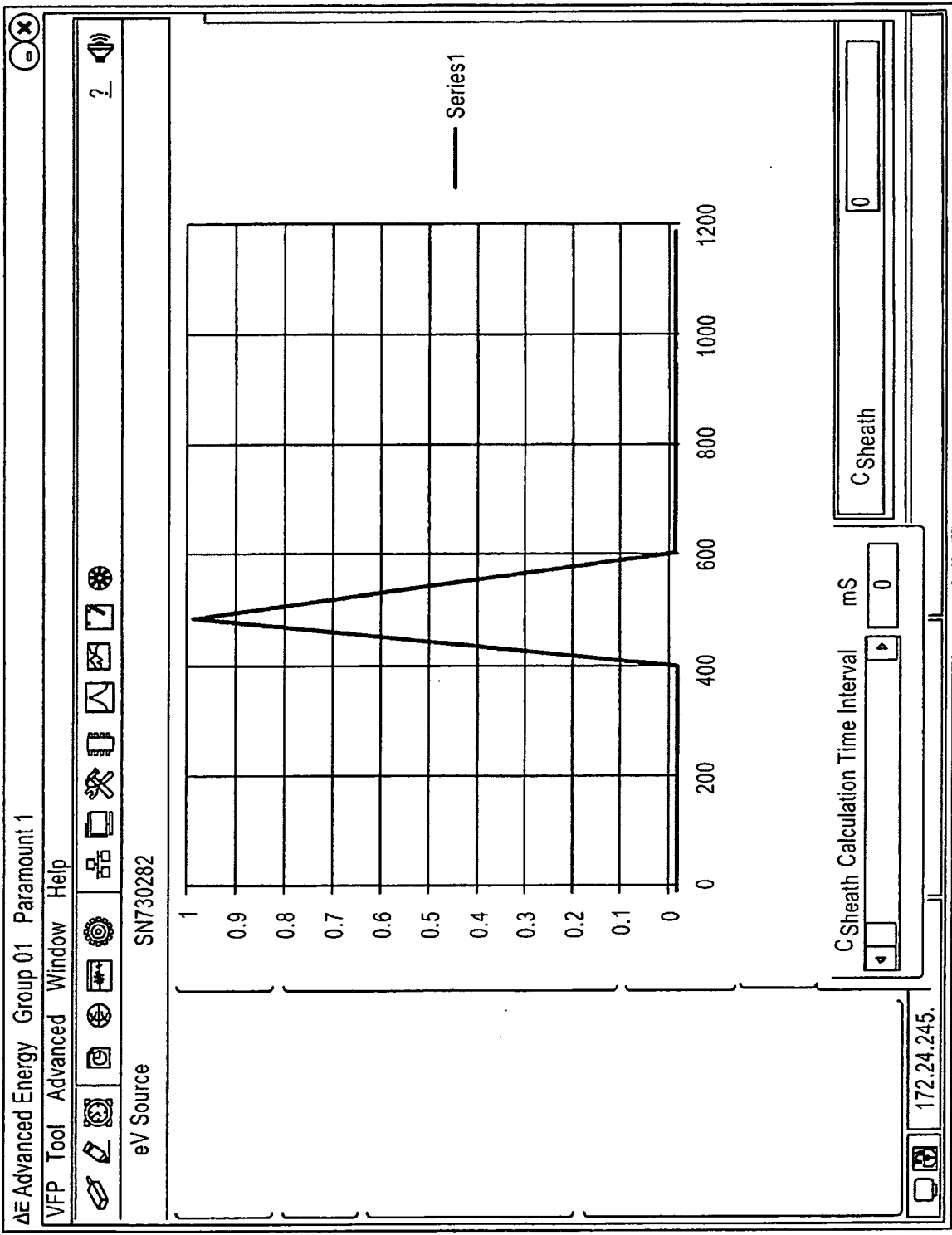


圖32

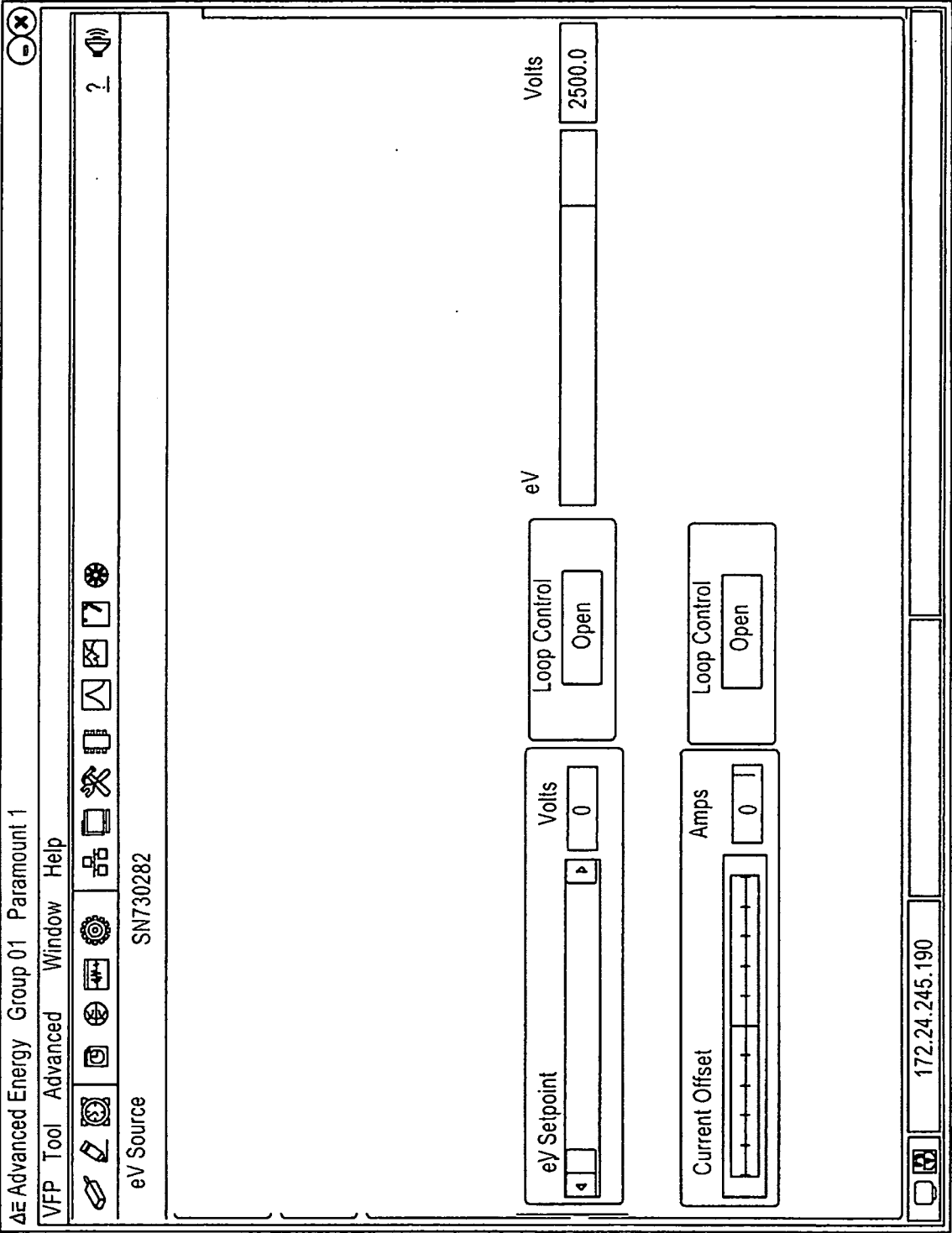


圖 33

|                                      |              |                     |             |           |            |            |  |     |  |
|--------------------------------------|--------------|---------------------|-------------|-----------|------------|------------|--|-----|--|
| Advanced Energy Group 01 Paramount 1 |              |                     |             |           |            |            |  |     |  |
| PIN                                  | Control Loop | SPI Bus ADC Data    | Measurement | User Card | Thermistor | DMA        |  |     |  |
| Masked Fault                         |              | Performance Monitor |             | LED       |            | DC Section |  | CEX |  |

**Faults and Warnings**

**Masked Faults**

**Fault Masking**

Mask Fault Number

**Fault Unmasking**

Unmask Fault Number

**Read**

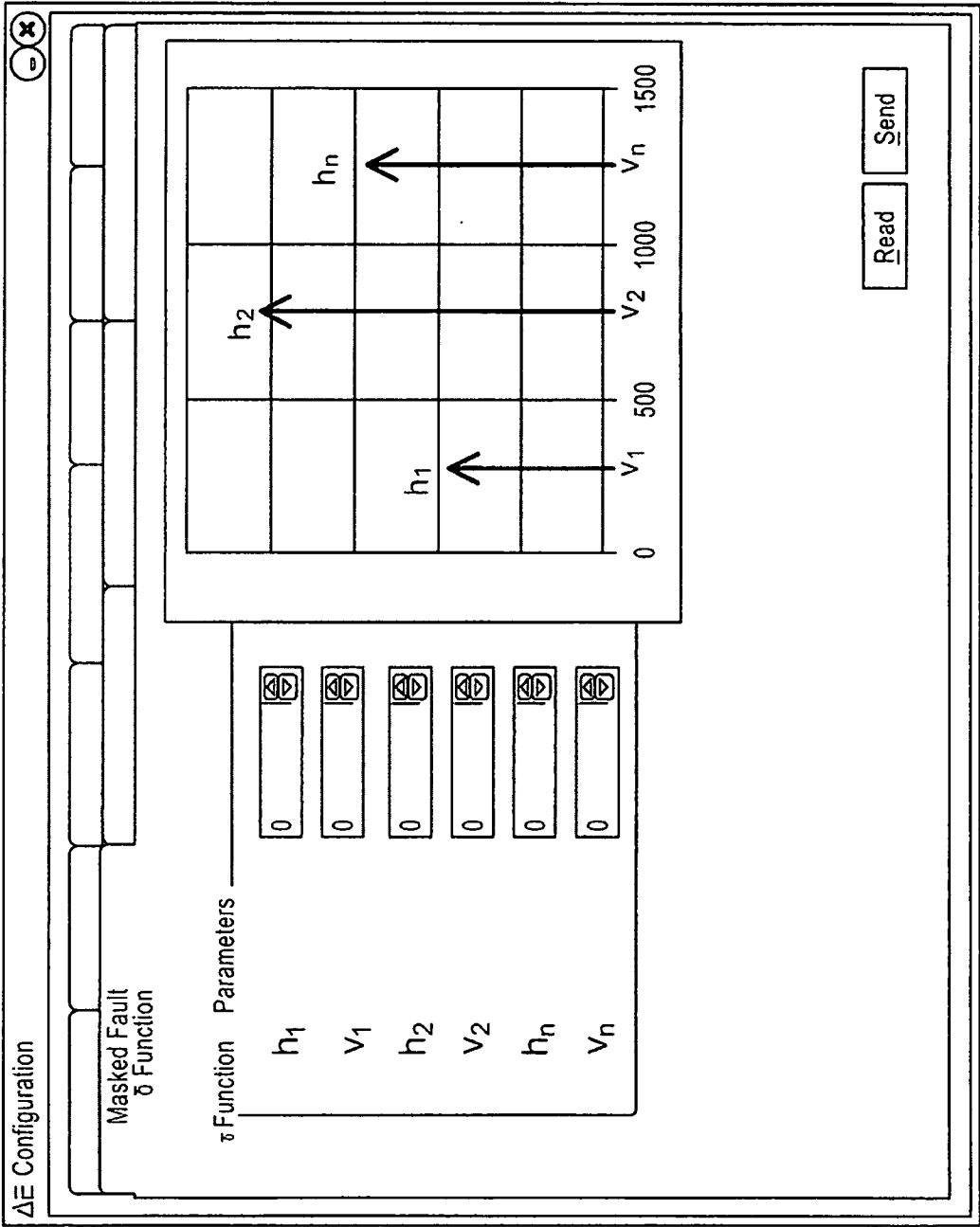


圖 35

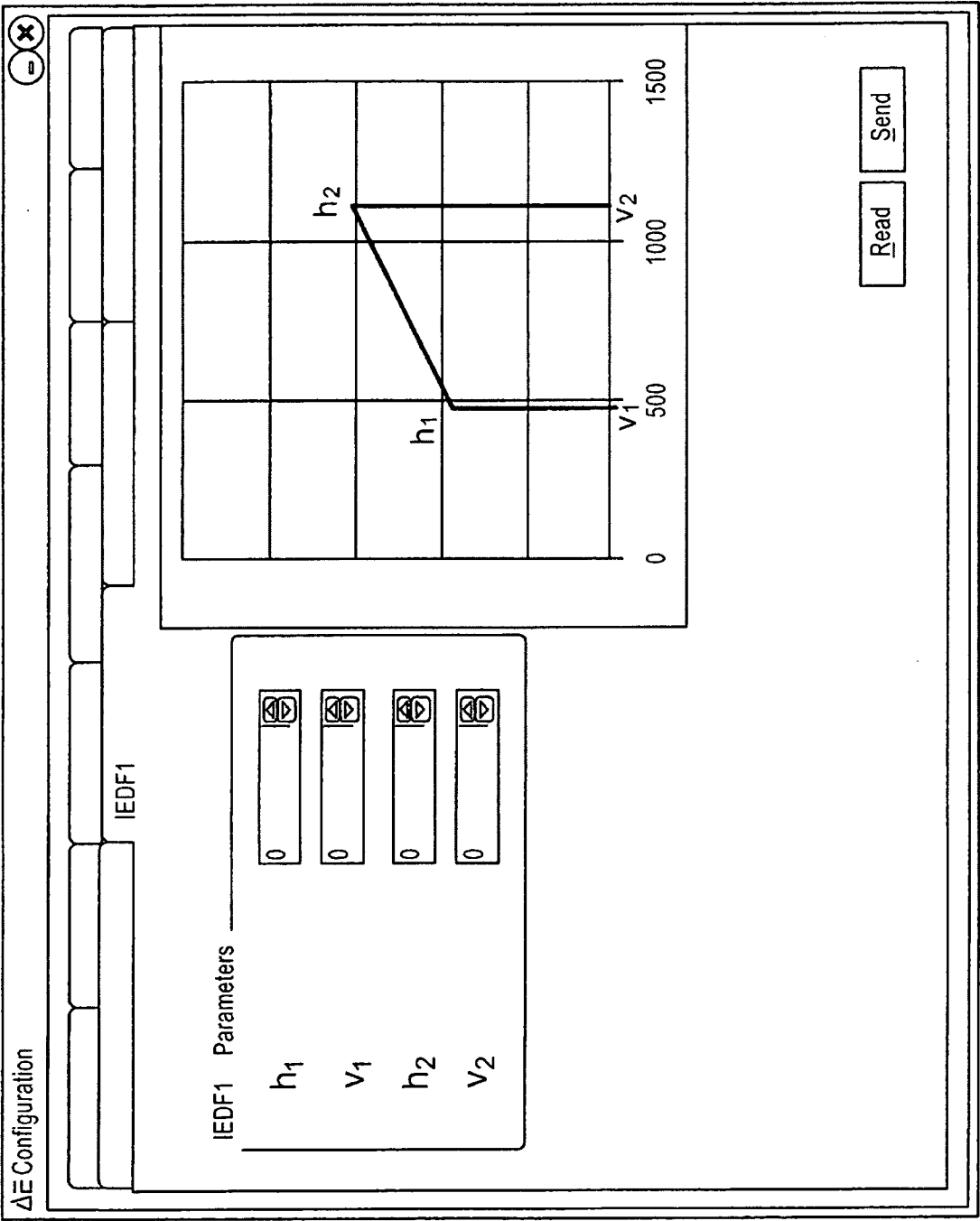


圖36

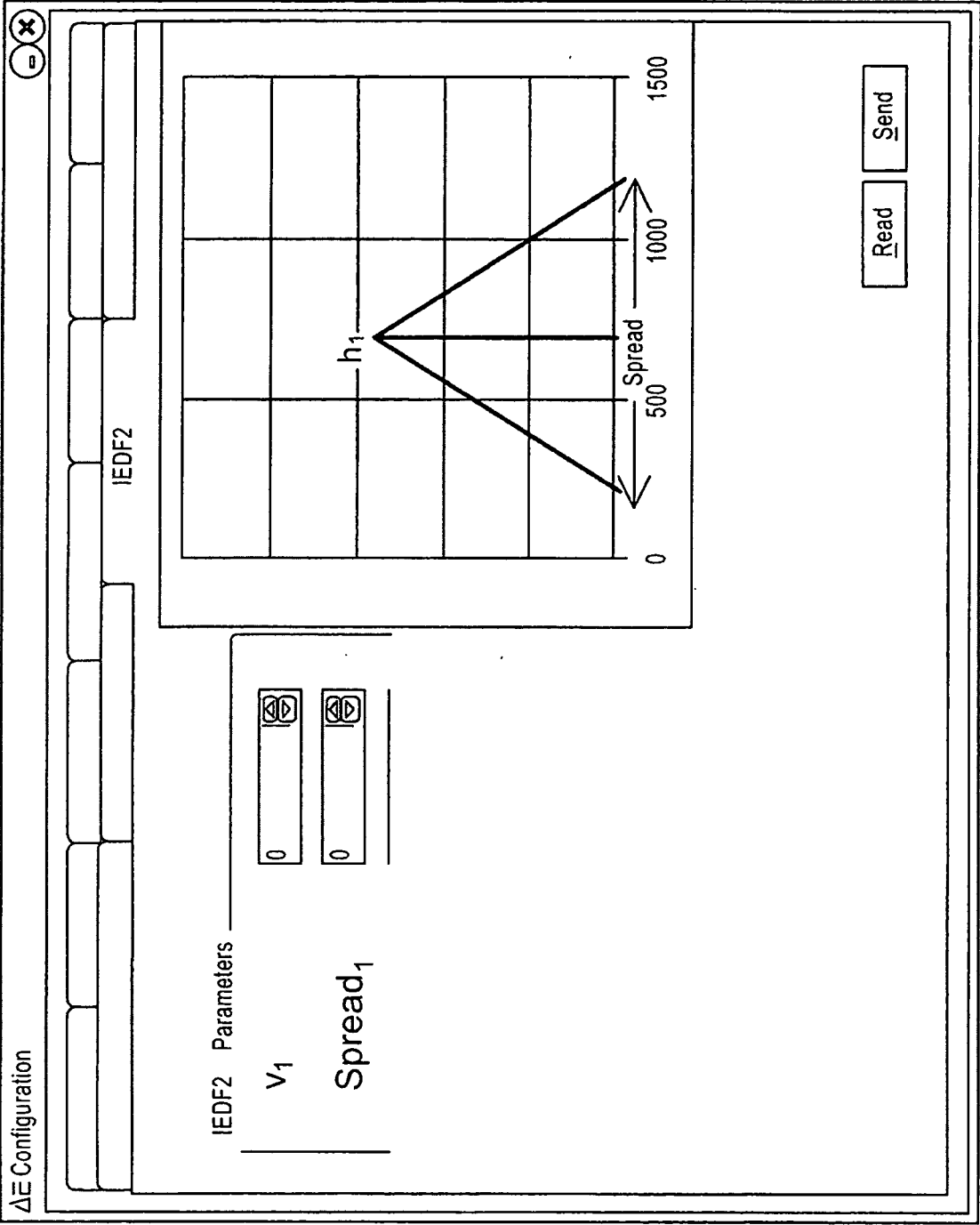
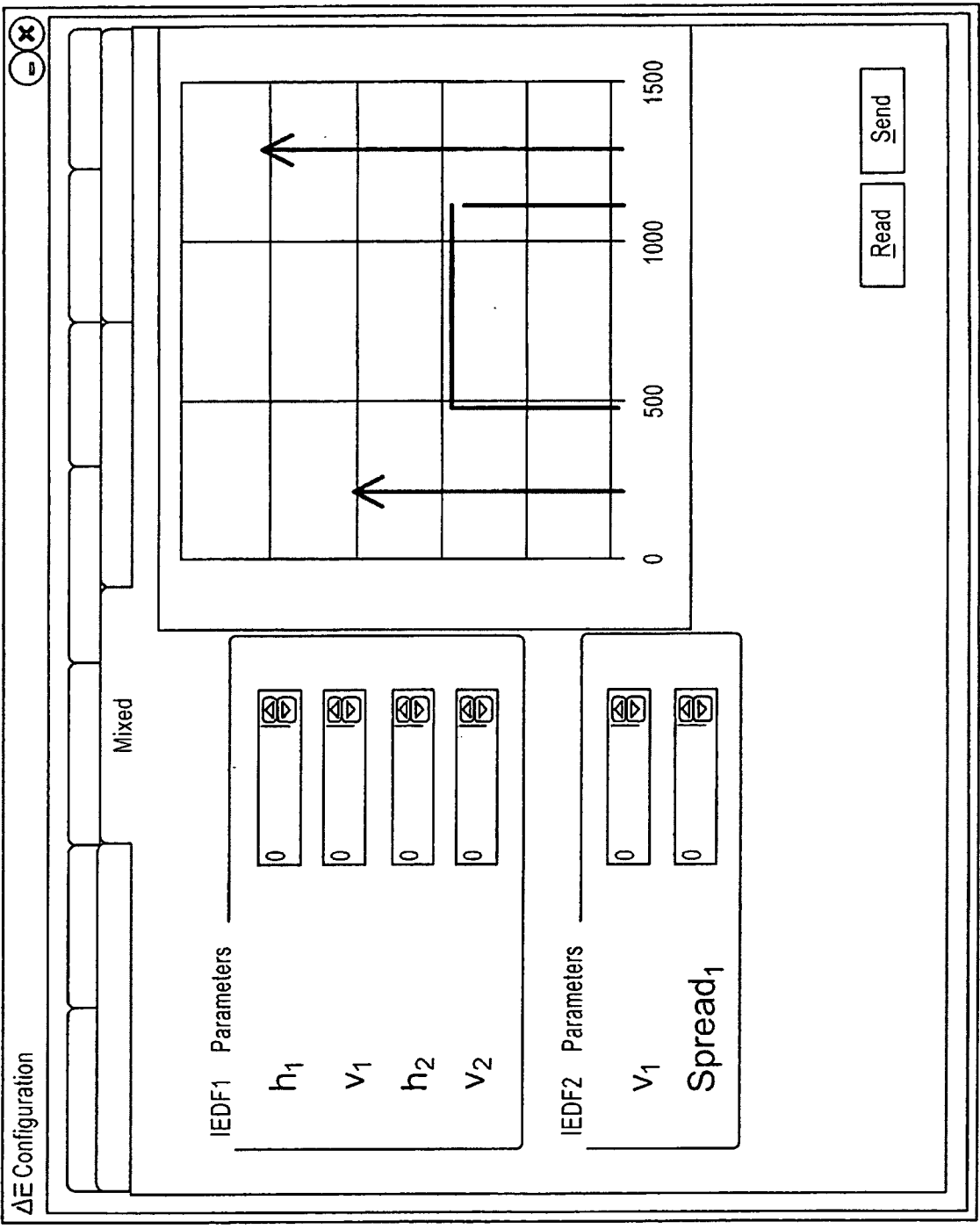


圖37





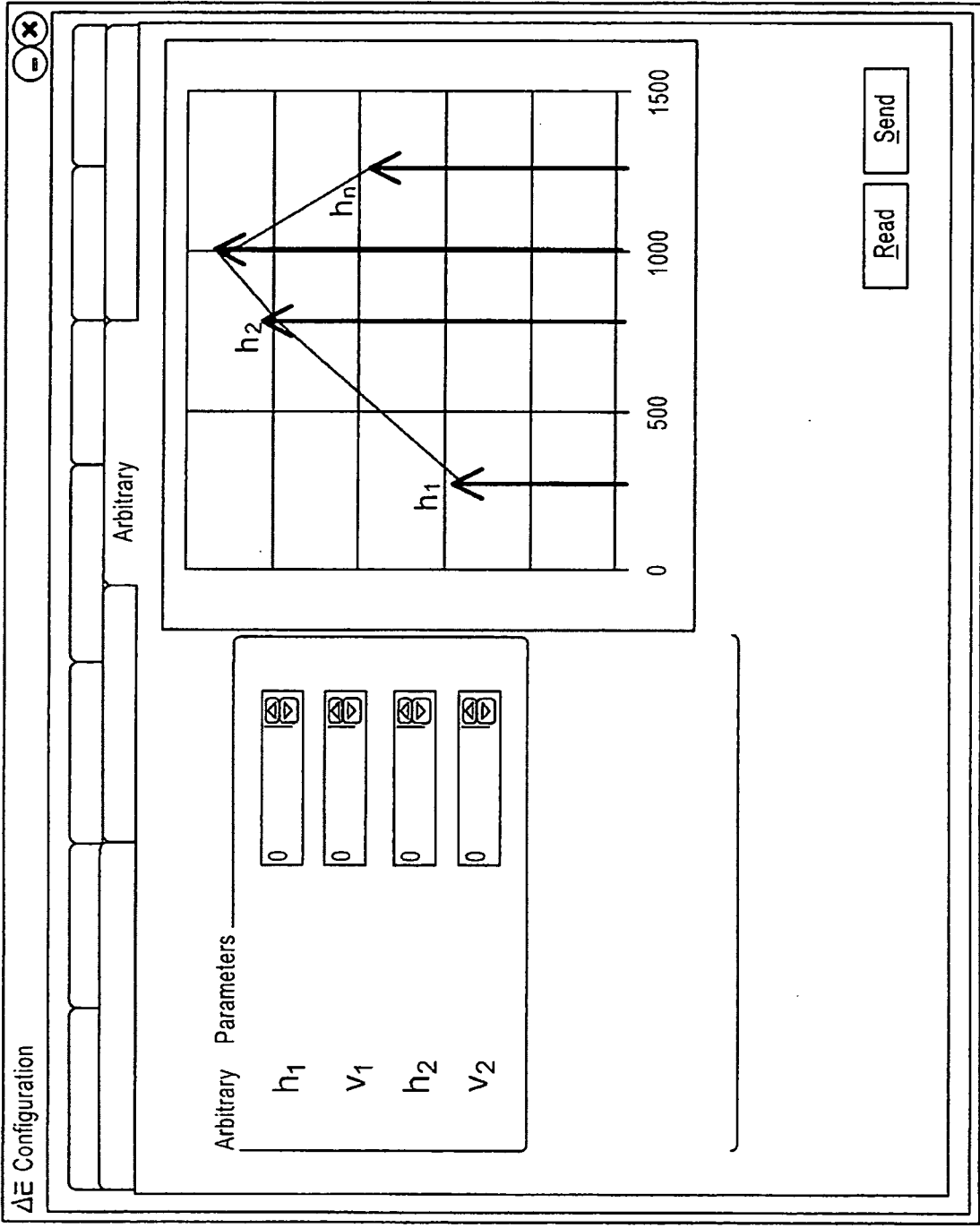


圖39

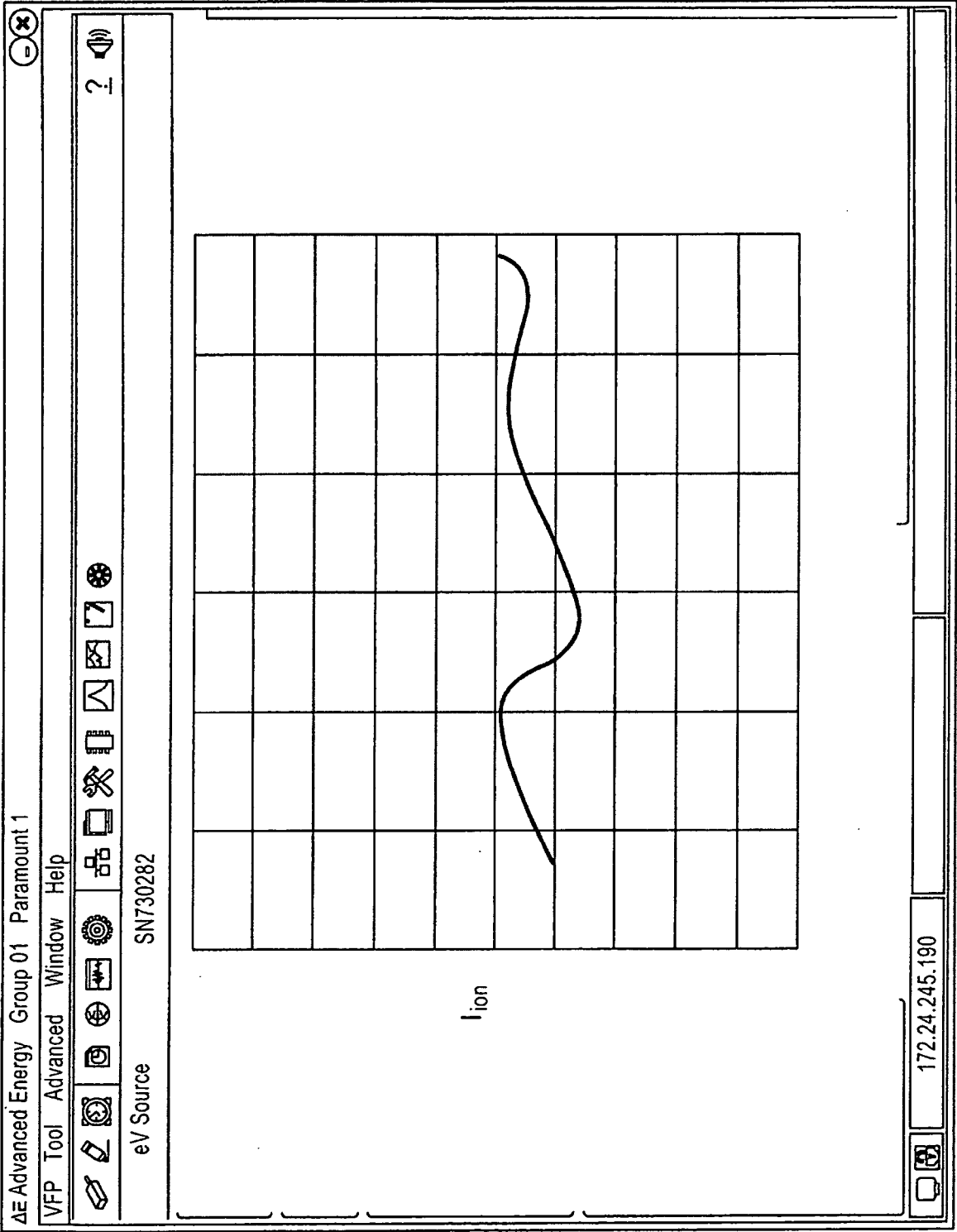


圖40

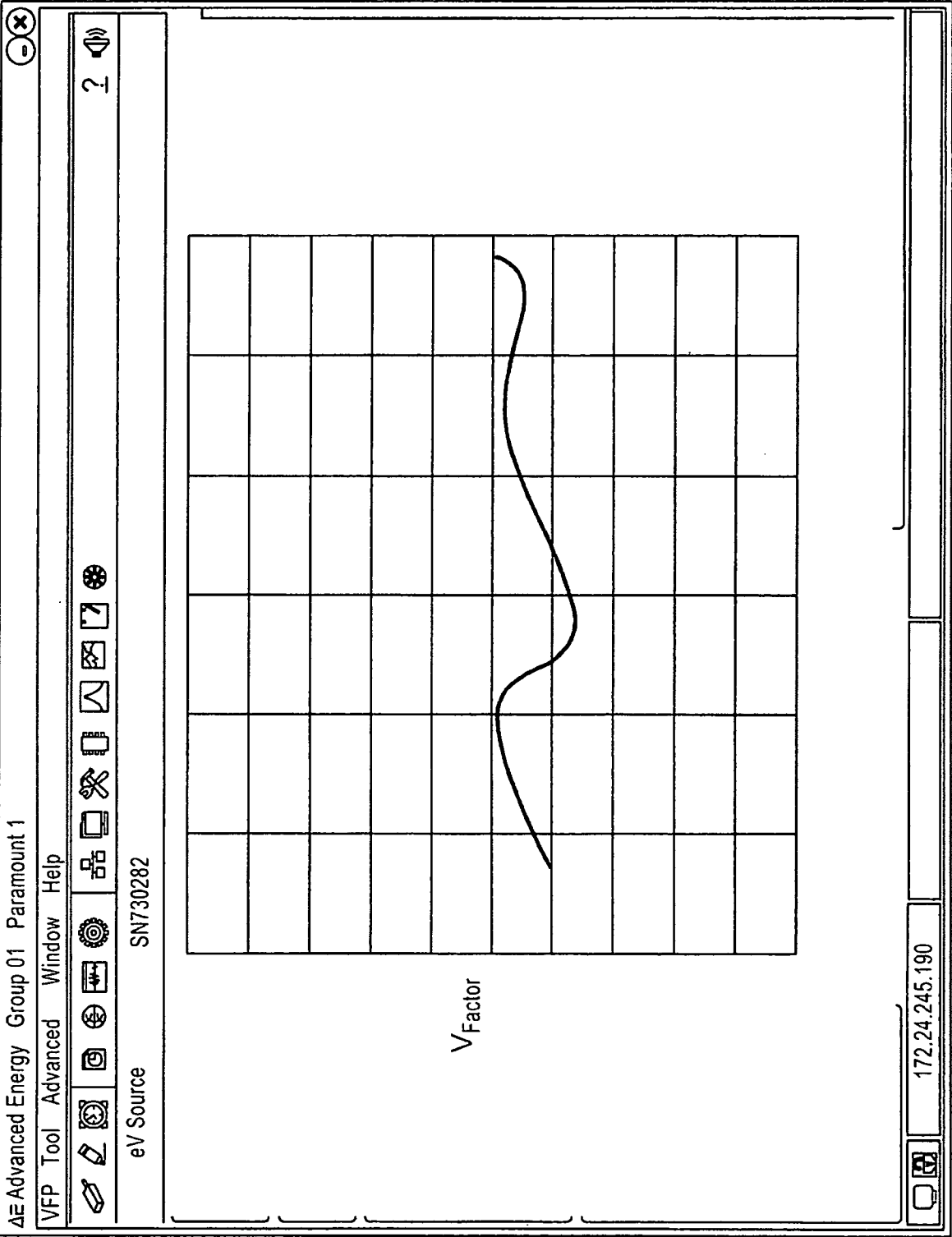


圖41

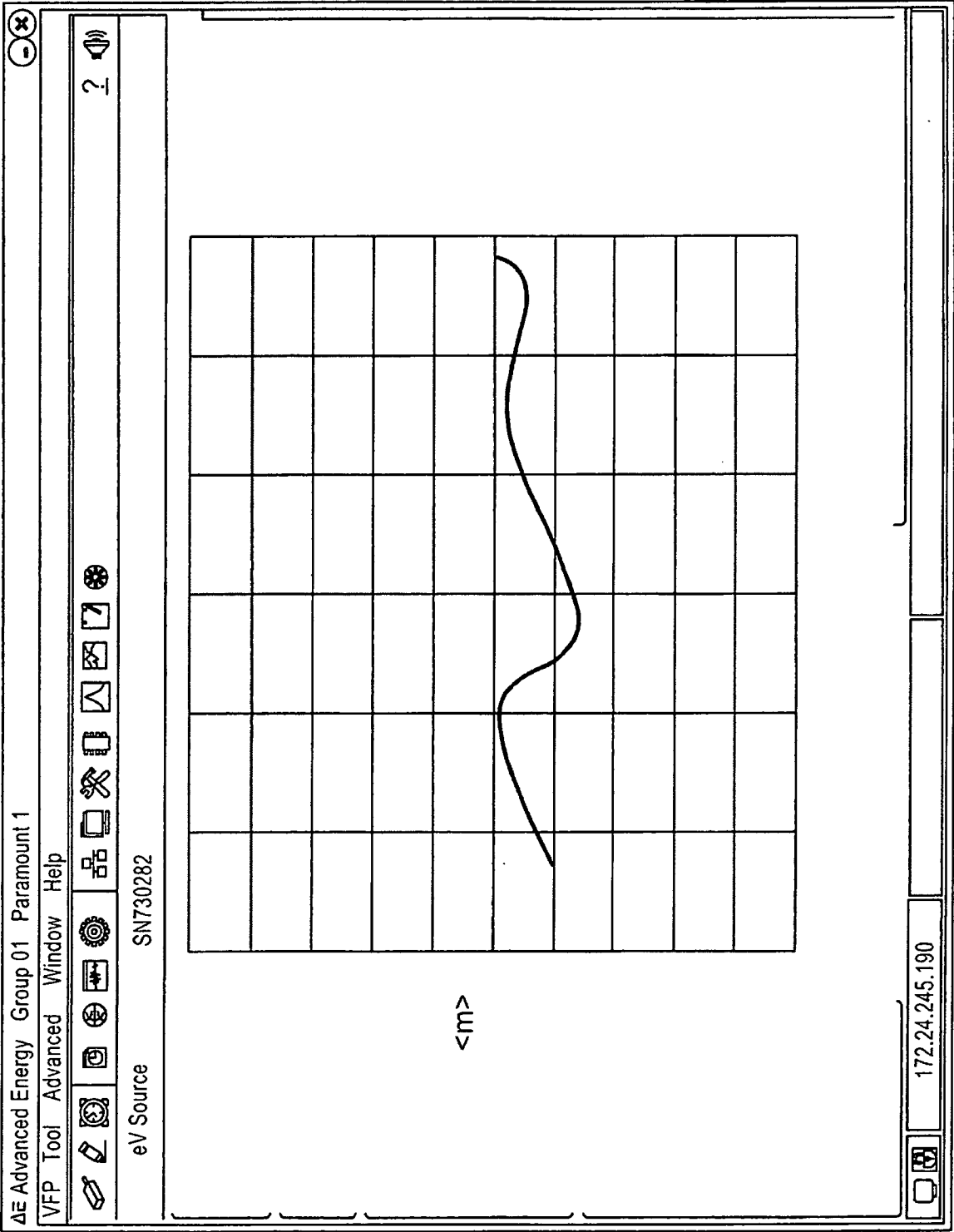


圖42

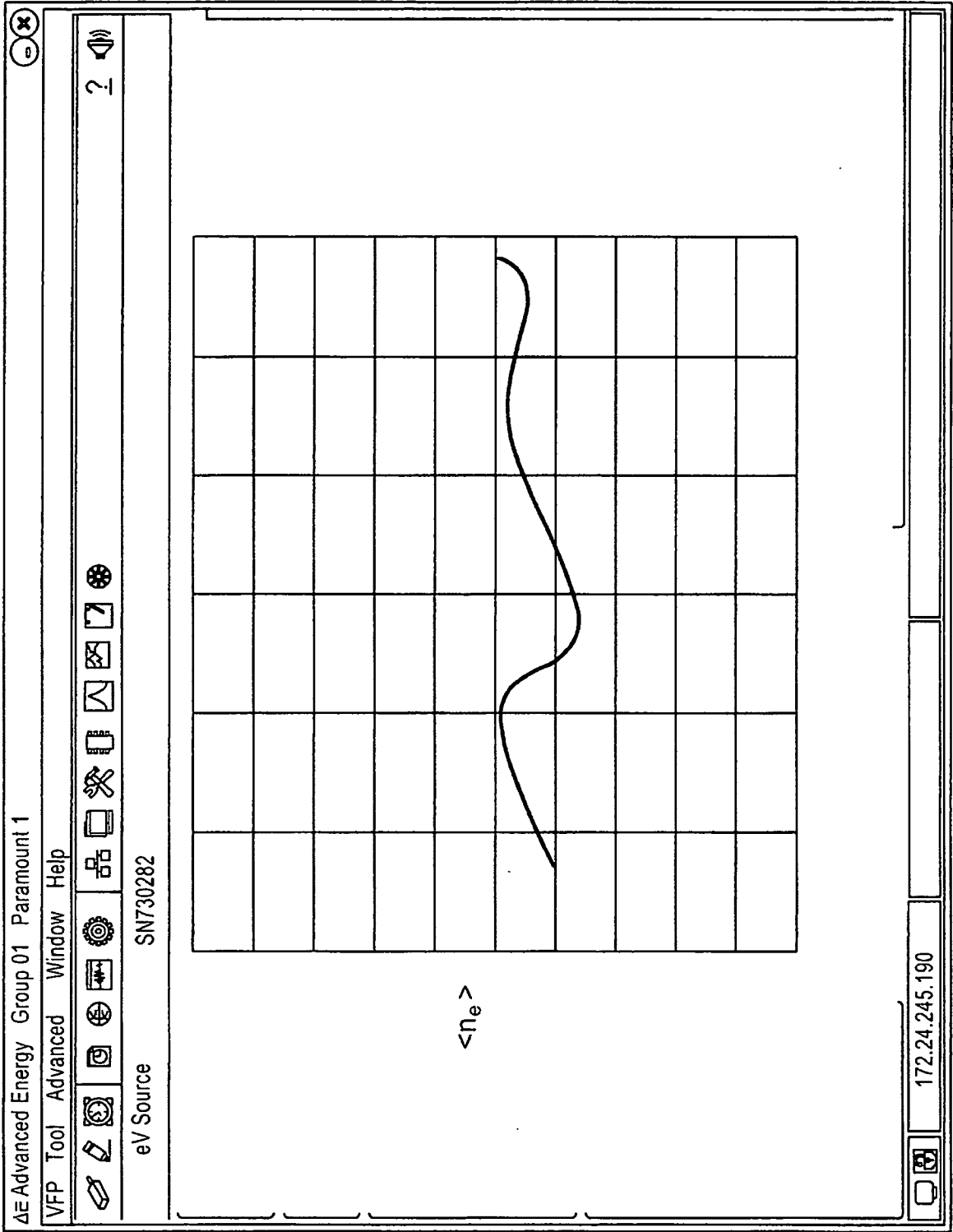


圖43

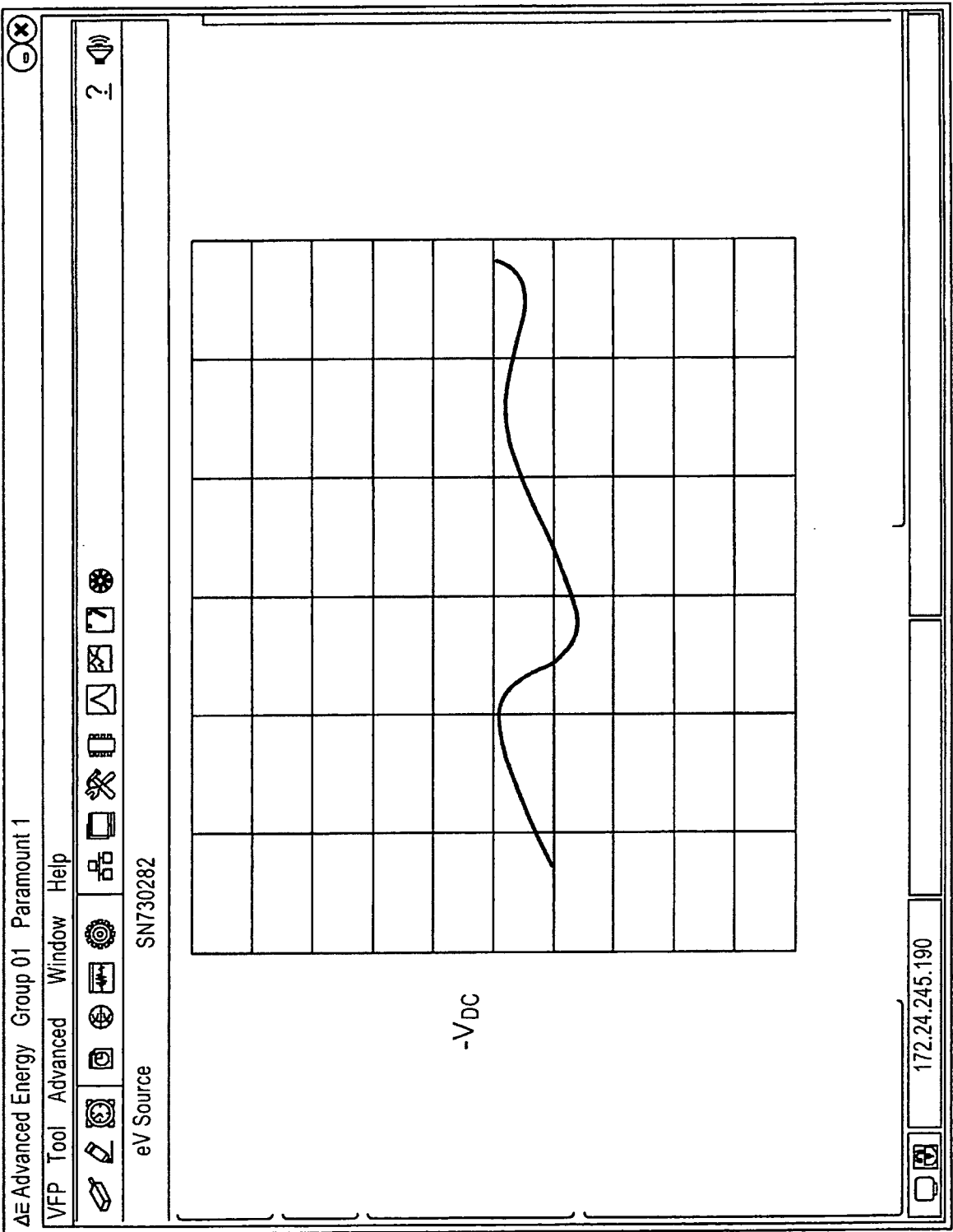


圖44

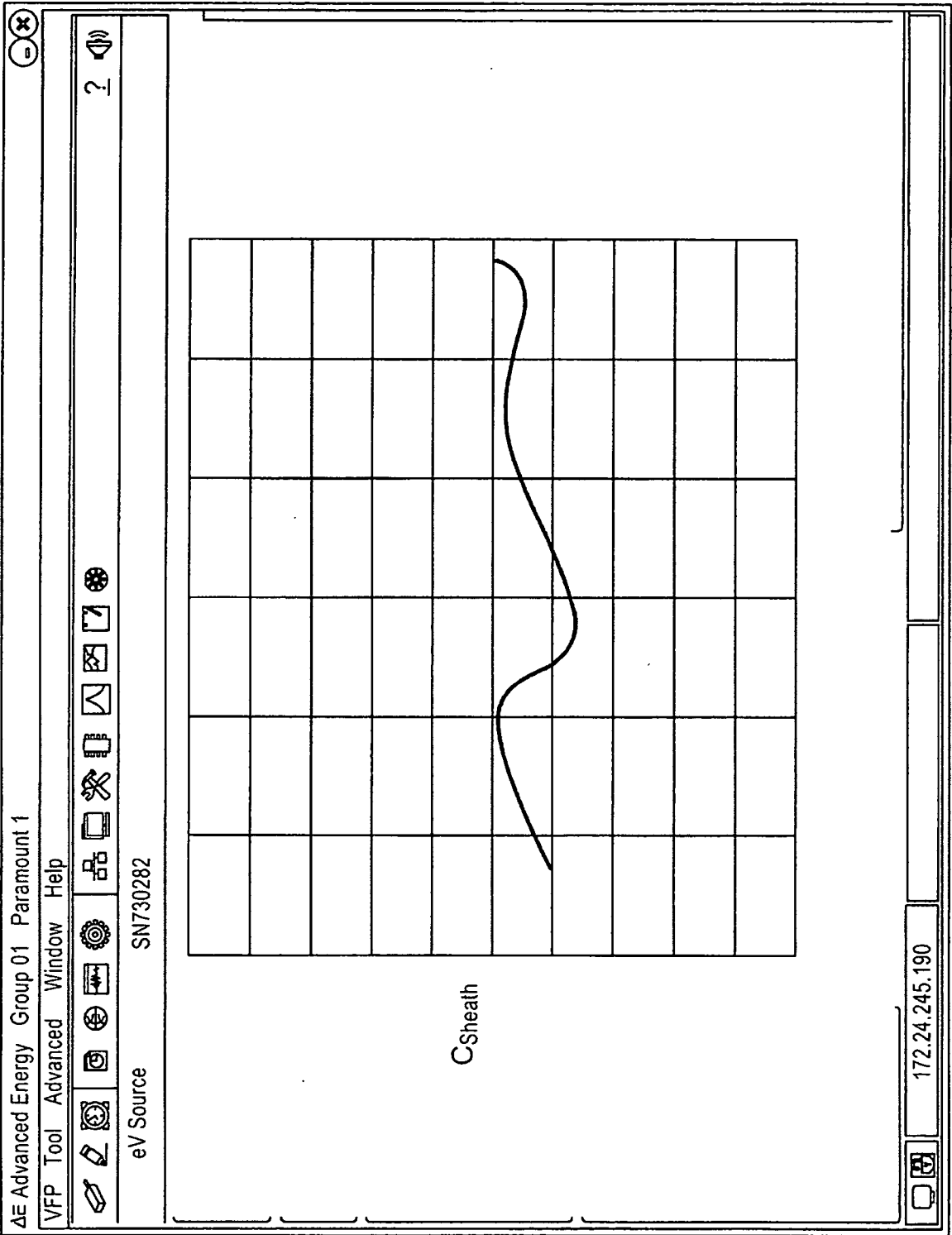


圖45



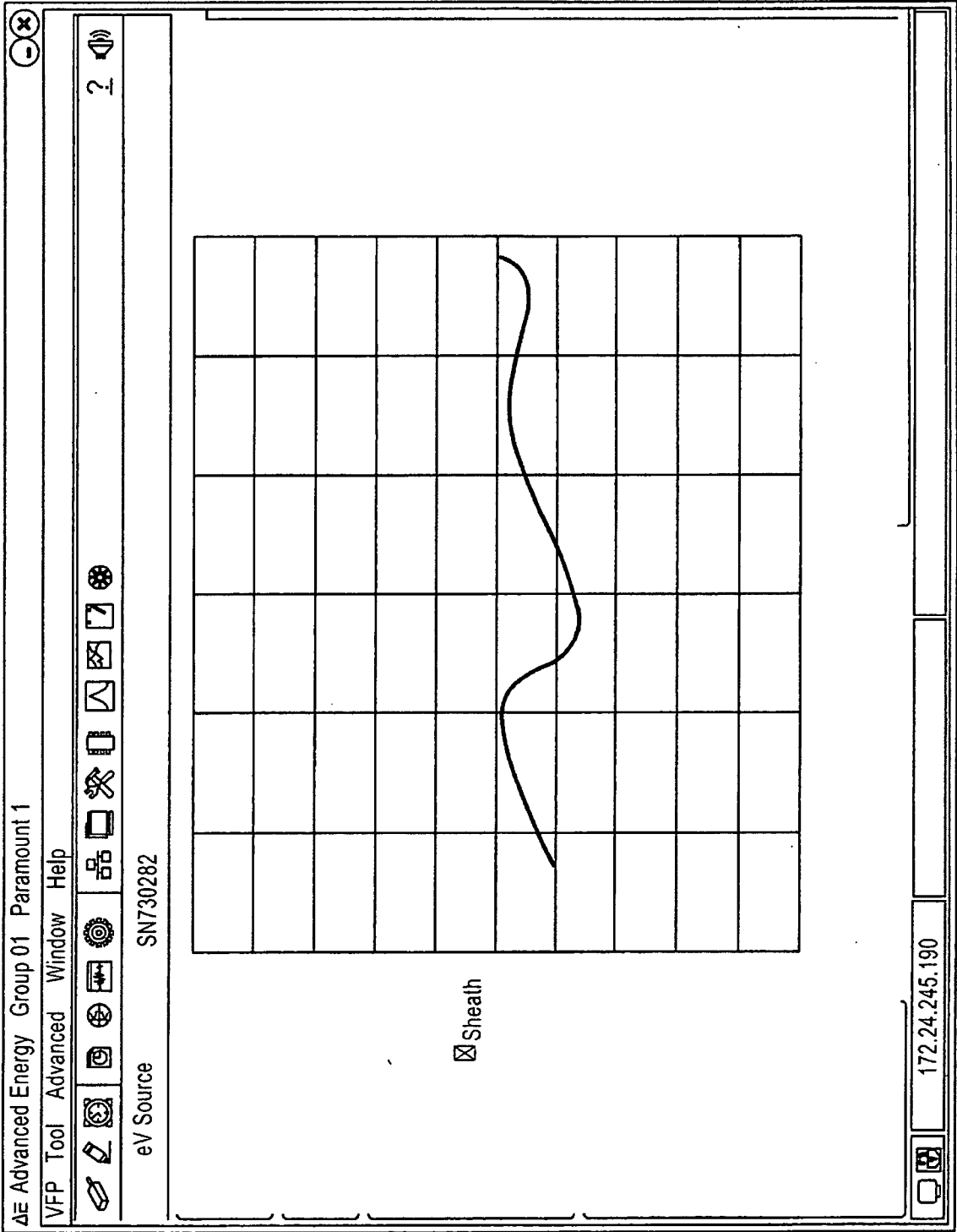


圖46

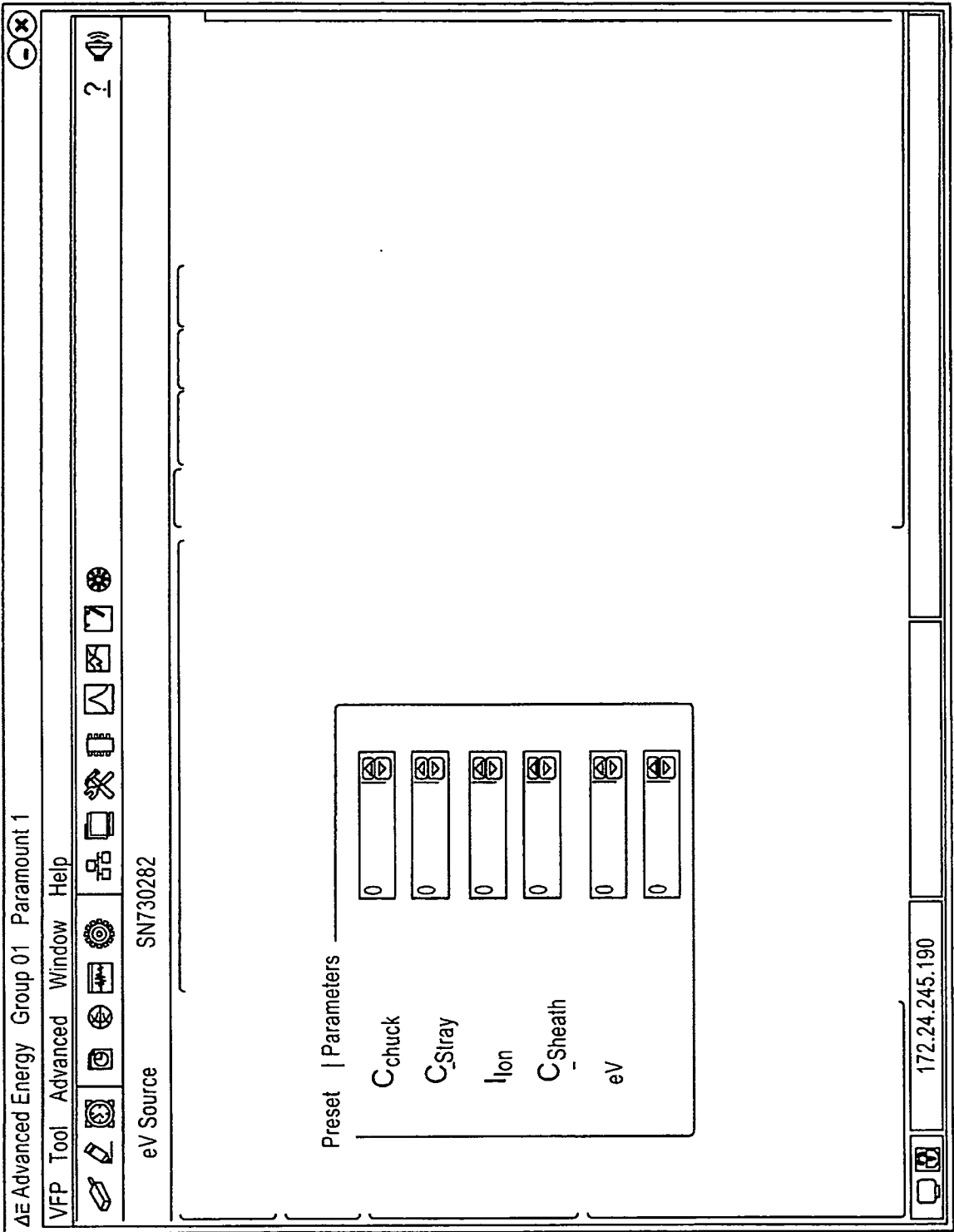


圖47

△E Logging

▶

⏸

□

✕

FileNameEdit

File Select

Path

PathEdit

Base file name

Log

File number

0

⏮

⏭

Maximum file size (KB)

0

⏮

⏭

☐ Use maximum file number

Maximum file number

0

⏮

⏭

General

Log interval (ms)

0

⏮

⏭

☐ Log only when output is on

☐ Start log after connection

Format

Header comment:

Sample log File

☐ Def Item

Select All

Unselect All

Save

Close

圖48

Serial Port

Arc Management

Network

Watchdog

Power Limits

CEX

Recipe

Frequency

RTC

ΔE Configuration

Mode

Pulsing

Master/Slave

Memory mode

Disable

Master

RAM

Slave

Slave max on time (μs)

Slave input delay (μs)

0

0

Pulsing Parameters

Frequency (Hz)

Duty cycle (%)

Enable mode

Explicit pulsing enable

0

0

Implicit

Pulsing Off

Output Control

Pulse sync output

Off

Read

Send

圖49

49

ΔE Configuration

Serial Port

Arc Management

Network

CEX

Watchdog

Pulsing

Power Limits

Ramp

Frequency

Recipe

RTC

Active recipe

0 - Disable

2

Global Recipe Parameters

Recipe number

1

Number of recipe steps

1

Number of recipe iterations

0

Final output state

Yes

Status

Current recipe iteration

0

Current recipe step

0

Recipe step parameters:

| Step | Step Type | Duration | Setpoint | Ramp Mode | Ramp Rate | Freq Mode | Frequency |
|------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |           |          |          |           |           |           |           |

Read

Send

圖50

50

Masked Fault

PIN

Control Loop

SPT Bvus ADC Data

Performance Monitor

LED

DC Section

User Card

Thermistor

DMA

CEX

Measurement Correction Factors

Source

Destination

Matrix

Real K11

Real K12

Real K21

Real K22

Reac K11

Reac K12

Reac K21

Reac K22

RAM

RAM

Meas Bd Center Freq

0

0

0

0

0

0

0

0

Read

Send

Measurement Data

Data Selection

☒Uncorrected Voltage Measurements

☐Corrected Voltage Measurements

☐Corrected Power Measurements

Reflected Q

Reflected I

Forward Q

Forward I

0

0

0

0

☐Auto Refresh

Refresh

图51

51

ΔE Technical

Masked Fault

Performance Monitor

LED

DC Section

CEX

PIN

Control Loop

SPT Bvus ADC Data

Measurement

User Card

Thermistor

DMA

Base Address

☒ Motherboard FPGA

☐ User Card PLD

☐ Measurement FPGA

☐ Measurement PLD

☐ Com Slot FPGA

☐ Com Slot PLD

☐ CPU Module FPGA

Address Offset (in Hex)

16-bit Data Value(in Hex)

Read

Send

圖 52

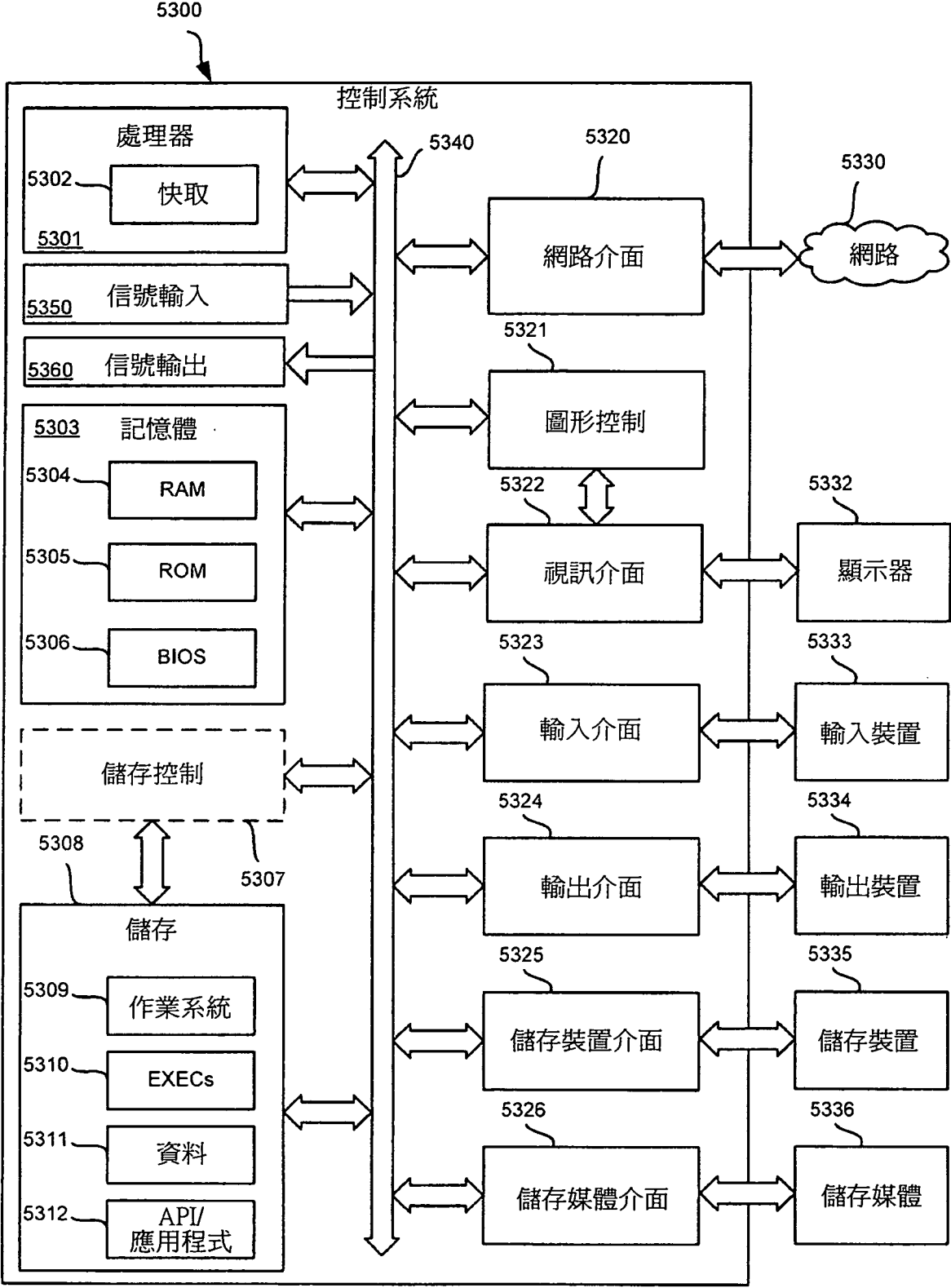


圖53