

# 電漿科學與平面顯示器

文/藍永強、鍾岳宏、徐兆鈺、張德安、柳克強

電漿科學在平面顯示器相關產業應用極廣。本文將介紹二種重要平面顯示器技術：電漿顯示器與場發射顯示器。電漿顯示器是利用電漿放電產生之紫外線，激發螢光粉，形成動態畫面，為目前大尺寸數位平面顯示器主流技術之一。場發射顯示器顯示原理與陰極射線管顯示器非常類似，但它使用閘極控制場發射電子源，因此具有優異的顯示特性，是非常有潛力的次世代平面顯示器，本文將介紹這二種顯示器的基本原理、發展現況以及未來展望。除了上述兩種顯示器外，近年來電致發光顯示器的研究也顯示，在電致發光元件金屬電極與介電材料介面所形成的表面電漿子激發現象會改變元件的發光效率，本文也將介紹此電漿現象對電致發光顯示器的影響與應用。

## A. 電漿顯示器

### 前言

在早期氣體放電的歷史與電學密不可分，早在西元 1675 年天文學家 Jean Picard 攪動汞氣壓計內的汞液體進而產生靜電，使得管內的汞蒸氣發生氣體放電(微弱的光閃爍)。西元 1927 年，Bell System 首次將氣體放電應用在平面顯示器上，在  $60 \times 75 \text{ cm}^2$  的顯示區域內製作出  $50 \times 50$  陣列共 2500 個氣體放電區間，每個放電區間都有各自的交流電壓驅動電路，並填充氬氣，表現出每秒 16 張畫面的全灰階影像；這實驗成功地為平面顯示器立下了重要的里程碑。西元 1970 年代，Burroughs Corporation 公司的 Holz 與 Ogle 發展出 Self-Scan™ 顯示器、Fujitsu 公司的 Takashima 等開發出表面放電結構；T. Urade 等在介電層上加保護層；Owens-Illinois 公司的 D.C. Hinson 等發展以氬氣與螢光粉來產生全彩的畫面；西元 1980 年代，Illionis 大學的 L. F. Weber 與 M. B. Wood 開發出用於 AC-PDP 的能量回收電路。可以大大減少電能在驅動電路上的浪費，AT&T Bell 實驗室的 G. W. Dick 引進寫入電極而發展出三電極結構，對於發光效率改善有很大的幫助。西元 1990 年代，Fujitsu 的 T. Shinoda 等發表三電極反射式面放電結構，主要可以減少螢光粉受氣體放電時帶電粒子的撞擊且利用反射原理增加可見光利用率；K. Yoshikawa 等發表了寫入顯示分離子圖場法(ADS, Address Display period Separated sub-field method)來驅動波形以形成 256 灰階，奠定了現今驅動波形的主要架構。

### 交流電漿顯示器基本原理

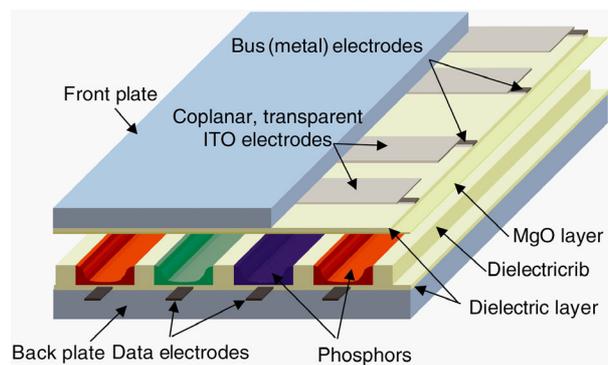
電漿顯示器為自發光顯示器(emissive display)之一，其所顯示之畫面由多個“光點”所組成，而每一光點所發出之可見光為電漿放電所產生之紫外線激發螢光粉而發出，其基本原理與傳統日光燈(fluorescence lamp)相同。現今電漿顯示器皆操作於交流模式(Alternate current plasma display panels, ACPDP)，並由三個電極控制放電之產生與強度，電極上接覆蓋一層介電材料，因此放電模式數為介電層障放電(dielectric barrier discharge, DBD)，放電區中所填充之氣體以氬-氙氣(Ne-Xe)之潘寧式混合氣體(Penning mixture)為主，比例約在 4%:96% 至 15%:85% 之間，氣壓則在 400-500 Torr 左右。其中 Xe 所放出之 147 nm 與 Xe 分子之 150 與 173 nm 真空紫外光為激發螢光粉之紫外線主要來源，而 Ne 之主要貢獻為降低放電所需電壓。本文將針對交流電漿顯示器作一簡介，包括放電區結構、基本放電與發光原理、以及顯示器驅動工作原理。

### 基本結構

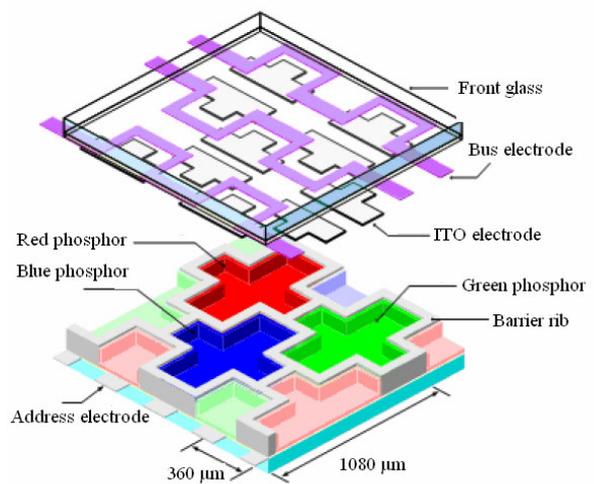
目前一般交流電漿顯示器面板結構如圖一所示[1]。首先是前玻璃基板(front glass)與後玻璃基板(rear glass)，作為整體結構的基板，其厚度約為 3 mm 左右的鈉玻璃材質。每一放電區由前板之二維持電極(sustain electrodes)與後板之定址電極(address electrode)控制其中放電。前板維持電極為透明電極，為厚度約 150 nm、線寬約 100~400  $\mu\text{m}$  之薄膜，目的是讓可見

光穿透以增加面板亮度，主要材料為銦錫合金氧化膜 (ITO film)或二氧化錫膜(SnO<sub>2</sub> film)。電極上再覆蓋一層厚約 20 μm 之透明介電層(dielectric layer)，主要功能為限制放電電流，材料上以低熔點玻璃為主成份。此外，為避免氣體放電時，介電層受離子轟擊而耗損，縮短使用壽命，在介電層上另形成厚度約 500~1000 μm 的保護層(Protective Layer)，其離子濺射率低，絕緣性與透光率要高，並具高二次電子放射係數，以降低放電所需電壓。目前以氧化鎂(MgO)為主要材料。氧化鎂與氬氣配合所形成的二次電子放射係數最高 (~ 0.2-0.5)，故常以氬氣作為主要氣體成份。另一方面，由於透明電極電阻值比金屬電極大(42 吋電漿電視電極的電阻值約為 100 Ω)，電極上所形成的電壓降造成不同位置放電區之施加電壓不同，影響畫面色彩與亮度之準確度，故在透明電極表面上另形成金屬材料的輔助電極(bus electrode)，其材料主要為錫膜或鉻-銅-鉻膜(Cr-Cu-Cr film)。輔助電極必須儘可能纖細，以免阻擋光的穿透，造成亮度降低，通常線寬約為 50~100 μm 左右。

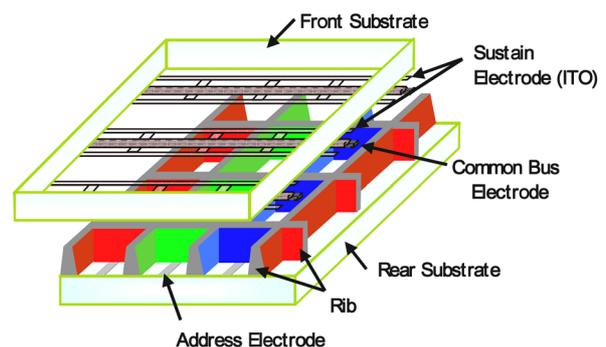
在背面基板除定址電極與其上之介電層外，另以阻隔壁(Barrier Rib)區隔氣體放電空間，防止紅綠藍三色螢光體發出的可見光混合，其線寬約 50~100 μm 且高度約 150 μm，主要為低熔點玻璃中加入鋁等金屬氧化物混合而成的材料，為增加可見光亮度與畫面對比度，阻隔壁的底部為白色且頂部為黑色。在阻隔壁間底面與側面塗佈紅、綠、藍三原色螢光粉(Phosphors)，以產生全彩畫面。材料上一般作為紅色(波長 611 nm 為主)的螢光粉為(Y, Gd)BO<sub>3</sub>: Eu<sup>3+</sup>；作為綠色(波長 525 nm 為主)的螢光粉為 Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>: Mn；作為藍色(波長 454 nm 為主)的螢光粉為 BaMgAl<sub>14</sub>O<sub>23</sub>: Eu<sup>2+</sup>，在冒號後的粒子為冒號前螢光體母體的發光中心，原理為發光中心在螢光體母體內受真空紫外光激發後，藉碰撞降激伴隨著長波長的可見光放射。阻隔壁所形成之放電區除傳統之長條狀(圖一)外，近年多進展為十字(圖二)或格狀(圖三)等，其共同特色為皆有較大的螢光粉塗布面積，以增加面板之放光效率。



圖一 交流電漿顯示器面板基本結構[1]



圖二 十字型面板結構[2]

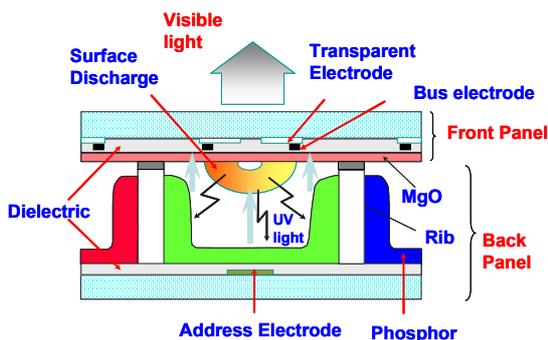


圖三 格子型面板結構[3]

## 發光基本原理

圖四為交流電漿顯示器面板結構剖面圖，當維持

電極間產生面向放電時，所輻射出的紫外光，會激發塗在下玻璃基板的紅、綠、藍三種不同的螢光粉，受激發的螢光粉，藉碰撞降激伴隨著長波長的可見光放射，所放出的可見光，會透過上玻璃基板，傳到人們的眼裡。一般而言，電漿顯示器的電極間距約在  $10^4$  m 左右，總氣壓約為  $10^3$  torr 數量級左右，在此情況下，由於電子碰撞的平均自由徑(mean free path)與氣壓成反比，陰極層會變薄並且貼近陰極表面，正極區(positive column)會因電極間距過小而變得較不明顯，所以主要是靠負輝光放電發光。



圖四 交流電漿顯示器面板結構剖面圖[5]

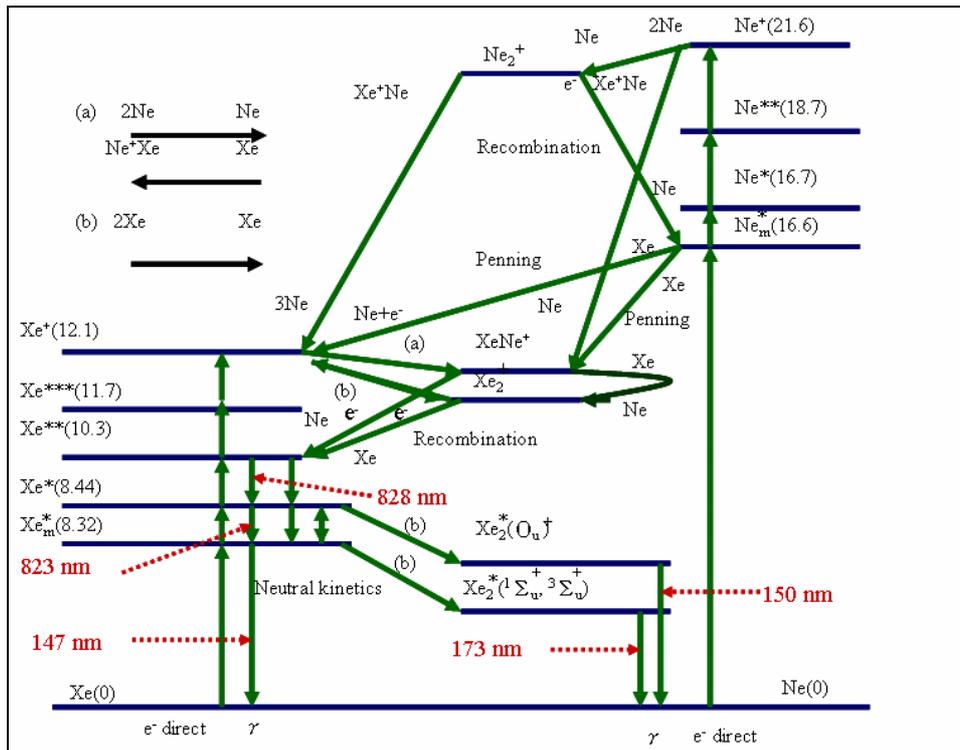
### 電漿化學反應

氣體放電反應是由相當多不同機制的反應所構成，主要分為氣體空間反應(gas volume reaction)與陰極表面反應(cathode surface reaction)兩種。產生氣體空間反應主要包括游離(ionization)、激發(excitation)、半穩態生成(metastable generation)與 Penning 游離(Penning ionization)。在此我們以 Ne-Xe 混合氣體為例，主要氣體空間反應如表(一)所列，其中亦包括游離與激發等反應之底限能(threshold energy)，以及部份反應之反應速率(reaction rate,  $K$ )。圖五為反應機制對照原子能階圖[4]。綜合表一及圖五可以發現，較高能激發態氙氣原子會先降激發出近紅外光，其中共振激發態的中性氙氣原子會先行降激發出 147nm 的紫外光，其餘的再經

由三體碰撞反應產生激發態雙原子分子，激發態雙原子分子再行降激回到基態中性氙氣原子而放射出 173 nm 與 150 nm 的近紫外光。可推測出：(1)近紅外光會較早從氣體放電放射出來，且其光強度較大。(2)147 nm 緊接著 828 nm 近紅外光放射出來，強度較紅外光小(一部份  $Xe^*$  會發生三體碰撞)，但為近紫外光中強度最強，這是因為 173 nm 近紫外光的降激來源為一部份  $Xe^*$  發生三體碰撞的產物。(3)150 nm 又較 173 nm 為弱，因為它是一部份的  $Xe_2^*(0_u^+)$  產生與中性氙氣原子發生碰撞的產物  $Xe_2^*(^1\Sigma_u^+)$  再降激發光的結果，故連開始放射的時間也是最慢的。而在 Penning 游離中可發現，加入氬氣或氙氣可增加更多的雙原子分子離子或原子離子的生成，反應提高電子崩潰效應的效率來降低崩潰電壓，經由與電子的再結合與雙體能量交換反應產生更多的激發態中性氙氣原子來降激發光以提升發光效率。

表一、交流電漿顯示器中反應示及反應係數[9]

<p><b>Momentum transfer</b></p> $e^- + Ne \rightarrow e^- + Ne, K_{10}^{el}$ $e^- + Xe \rightarrow e^- + Xe, K_{10}^{el}$	<p><b>Molecular ion formation</b></p> $Ne^+ + 2Ne \rightarrow Ne_2^+ + Ne, K_{10}^{im} = 4.4 \times 10^{-32} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Ne^+ + Xe + Ne \rightarrow NeXe^+ + Ne, K_{10}^{im} = 1 \times 10^{-31} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe^+ + 2Ne \rightarrow NeXe^+ + Ne, K_{10}^{im} = 1.0 \times 10^{-31} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe^+ + 2Xe \rightarrow Xe_2^+ + Xe, K_{10}^{im} = 2.5 \times 10^{-31} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe^+ + Xe + Ne \rightarrow Xe_2^+ + Ne, K_{10}^{im} = 1.5 \times 10^{-31} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
<p><b>Direct ionization</b></p> $e^- + Ne \rightarrow Ne^+ + 2e^-, K_{10}^{di}, e_{10}^{di} = 21.6 \text{ eV}$ $e^- + Xe \rightarrow Xe^+ + 2e^-, K_{10}^{di}, e_{10}^{di} = 12.1 \text{ eV}$	<p><b>Spontaneous emission</b></p> $Xe^{**} \rightarrow Xe^* + h\nu, \tau_{Xe^{**}}^{sp} = 16.7 \times 10^{-9} \text{ s}$ $Xe^{**} \rightarrow Xe^* + h\nu, \tau_{Xe^{**}}^{sp} = 16.7 \times 10^{-9} \text{ s}$ $Xe^* \rightarrow Xe + h\nu(147 \text{ nm}), \tau_{Xe^*}^{sp} = 370 \times 10^{-9} \text{ s}$ (trapping) $Xe_2^*(^1\Sigma_u^+) \rightarrow 2Xe + h\nu(173 \text{ nm}), \tau_{Xe_2^*}^{sp} = 5.5 \times 10^{-9} \text{ s}$ $Xe_2^*(^3\Sigma_u^+) \rightarrow 2Xe + h\nu(173 \text{ nm}), \tau_{Xe_2^*}^{sp} = 96.0 \times 10^{-9} \text{ s}$ $Xe_2^*(0_u^+) \rightarrow 2Xe + h\nu(150 \text{ nm}), \tau_{Xe_2^*}^{sp} = 2.1 \times 10^{-9} \text{ s}$
<p><b>Excitation</b></p> $e^- + Ne \rightarrow Ne_m^*(^3P_0, ^3P_2) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 16.6 \text{ eV}$ $e^- + Ne \rightarrow Ne_m^*(^1S_0) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 16.7 \text{ eV}$ $e^- + Ne \rightarrow Ne_m^*(^3P_1) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 18.7 \text{ eV}$ $e^- + Xe \rightarrow Xe_m^*(^3P_2) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 8.32 \text{ eV}$ $e^- + Xe \rightarrow Xe_m^*(^3P_1) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 8.44 \text{ eV}$ $e^- + Xe \rightarrow Xe_m^*(^1S_0) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 10.3 \text{ eV}$ $e^- + Xe \rightarrow Xe_m^*(^3P_2) + e^-, K_{10}^{ex}, e_{10}^{ex} = 11.7 \text{ eV}$	<p><b>Neutral kinetics</b></p> $Xe^{**} + Ne \rightarrow Xe_m^* + Ne, K_{10}^{nk} = 1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe^{**} + Xe \rightarrow Xe_m^* + Xe, K_{10}^{nk} = 1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Xe \rightarrow Xe_m^* + Xe, K_{10}^{nk} = 0.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Ne \rightarrow Xe_m^* + Ne, K_{10}^{nk} = 3.11 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Xe \rightarrow Xe_m^* + Xe, K_{10}^{nk} = 1.62 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Xe \rightarrow Xe_m^* + Xe, K_{10}^{nk} = 2.18 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Xe \rightarrow Xe_m^* + Xe, K_{10}^{nk} = 1.26 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + 2Xe \rightarrow Xe_2^*(0_u^+) + Xe, K_{10}^{nk} = 1.55 \times 10^{-31} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + 2Xe \rightarrow Xe_2^*(^3\Sigma_u^+) + Xe, K_{10}^{nk} = 8.53 \times 10^{-32} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Xe + Ne \rightarrow Xe_2^*(0_u^+) + Ne, K_{10}^{nk} = 4.07 \times 10^{-32} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_m^* + Xe + Ne \rightarrow Xe_2^*(^3\Sigma_u^+) + Ne, K_{10}^{nk} = 1.35 \times 10^{-32} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_2^*(0_u^+) + Xe \rightarrow Xe_2^*(^1\Sigma_u^+) + Xe, K_{10}^{nk} = 2.6 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
<p><b>Penning ionization</b></p> $Ne_m^* + Xe \rightarrow Ne + Xe^+ + e^-, K_{10}^{pi} = 7.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Ne_m^* + Xe \rightarrow NeXe^+ + e^-, K_{10}^{pi} = 2.3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	
<p><b>Recombination</b></p> $Ne_2^+ + e^- \rightarrow Ne_m^* + Ne, K_{10}^{re} = 2.7 \times 10^{-8} T_e^{-0.43} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $Xe_2^+ + e^- \rightarrow Xe_m^* + Xe, K_{10}^{re} = 2 \times 10^{-7} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $NeXe^+ + e^- \rightarrow Xe_m^* + Ne, K_{10}^{re} = 8 \times 10^{-8} T_e^{-0.5} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	
<p><b>Charge Exchange</b></p> $Ne_2^+ + Xe + Ne \rightarrow Xe^+ + 3Ne, K_{10}^{ce} = 4.0 \times 10^{-30} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $NeXe^+ + Xe \rightarrow Xe_2^+ + Ne, K_{10}^{ce} = 5.0 \times 10^{-32} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $NeXe^+ + Xe \rightarrow Xe^+ + Ne + Xe, K_{10}^{ce} = 5.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	



圖五 重要氣體放電反應能階示意圖[4]

除了在空間中產生電子崩潰效應外，陰極表面反應也是提供二次電子的重要來源，主要是由正離子、半穩態原子或光子在陰極表面發生反應產生自由電子。正離子會吸引表面電子產生再結合反應，當再結合能量大於其他表面電子的功函數(work function)時，則表面電子有機會脫離導帶(conduction band)成為自由電子，稱為「二次電子(secondary electron)」；當光子和陰極表面碰撞並且被表面吸收，若入射光子的能量大於表面電子功函數時，則表面電子有機會脫離表面成為自由電子，亦即「光電效應(photoelectric effect)」；當半穩激發態中性氣體原子漂移到陰極表面產生碰撞時，會降激至基態而把能量傳到陰極表面電子並超越其功函數，產生二次電子。上述三種二次電子產生機制以正離子較重要，因為正離子會受電場加速得到較多能量，絕大多數都會打在陰極表面，半穩激發態中性原子與光子由於不受電場加速影響，等向性行進，與陰極表面產生的二次電子自然較少。氣體放電的崩潰電壓與氣體參數、電極距離及表面材料息息相關，其關係式為

$$V_f = B(pd) / \ln \left[ \frac{A(pd)}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right] \quad (1)$$

其中  $p$  與  $d$  分別為氣體壓力與電極距離， $\gamma$  為二次電子放射係數， $A$  與  $B$  為與氣體相關之參數，如表二與表三所列。由表二與表三的數值，可發現由氧化鎂與氬氣搭配可以得到較低的崩潰電壓值，且氧化鎂的硬度與透明度以及製程應用上都符合要求，這也是一般交流電漿顯示器在電極上鍍上一層氧化鎂，並且選擇氬氣為主要氣體成分的原因。

表二、不同氣體的氣體放電參數值[7]

Gas	A (Cm <sup>-1</sup> Torr <sup>-1</sup> )	B (V m <sup>-1</sup> Torr <sup>-1</sup> )
He	3	34
Ne	4	100
Ar	12	180
Kr	17	240
Xe	26	350
Hg	20	370
H <sub>2</sub>	5	130
N <sub>2</sub>	12	342
Air	15	365
CO <sub>2</sub>	20	466
H <sub>2</sub> O	13	290

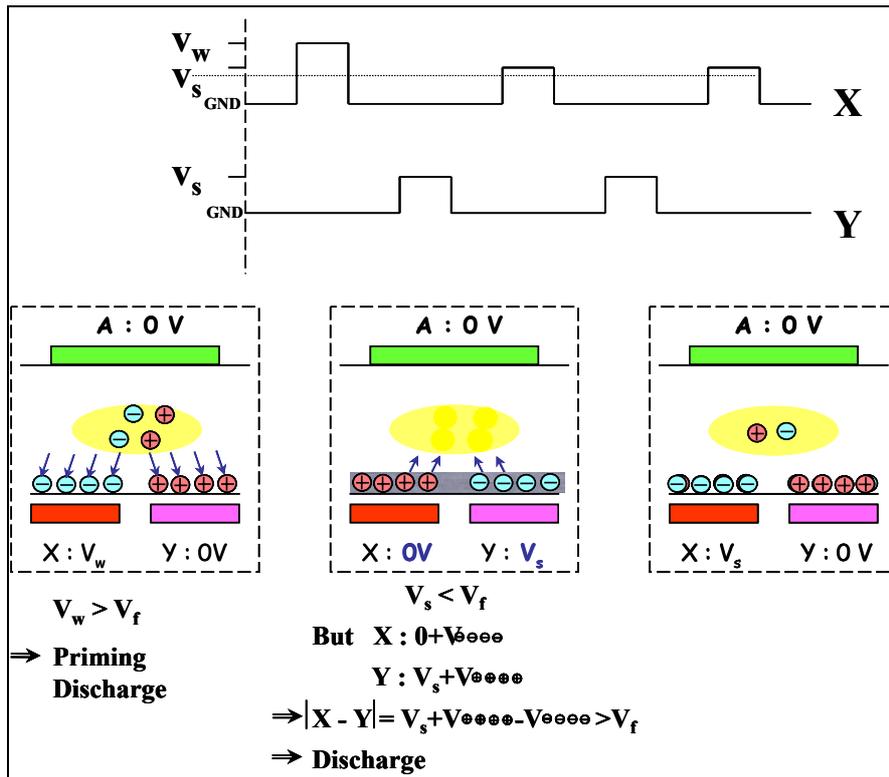
表三、同電極表面材料在氬氣為主體氣體的二次電子放射係數[6]

材料	二次電子係數	崩潰電壓
MgO	0.57	100
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55	130
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		170
CeO <sub>2</sub>	0.41	167

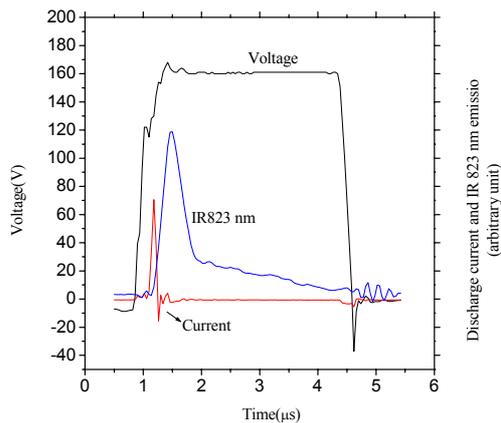
### 交流電漿顯示器工作原理

我們首先以 ACPDP 放電區中維持電極間之放電來說明 ACPDP 放電機制，如圖六所示。當我們在電極上先提供一個寫入電壓脈衝( $V_w$ )使其大於崩潰電壓( $V_f$ )，讓子畫素產生放電，電荷會向電極兩端累積形成壁電荷(Wall charge)。在陽極所累積的壁電荷為負電荷，在陰極所累積的壁電荷為正電荷(在圖六中以(+)、(-)表示)。由於累積在電極兩端的壁電荷，會屏蔽我們原本所提供的電壓，因此，過了一段時間之後，當壁電荷累積到一定數量時，放電會熄滅。到了下一個週

期時，我們只需提供一個小於崩潰電壓( $V_f$ )的維持電壓脈衝( $V_s$ )，再加上壁電荷的加乘作用，使得電極兩端的總電壓大於崩潰電壓( $V_f$ )而放電發光。反之，若原無足夠之電荷累積，在電極施加維持電壓脈衝則無法產生放電，亦即 ACPDP 中之 DBD 放電具記憶效應，任一次之放電皆與該放電區之過去放電歷史有關(壁電荷量)，通稱為交流記憶效應。圖七所示為 ACPDP 一次放電中，維持電壓脈衝、放電電流、與氬氣所放出的紅外光(823 nm)隨時間之變化，我們可以發現，在交流電漿顯示器中，一次放電的時間約為 0.2 ~ 0.3 微秒( $\mu s$ )，因此，交流電漿顯示器具有放電發光時間短暫、反應時間快等特性。在交流電漿顯示器中，要控制影像亮度時，並非改變維持電壓強度的大小，而是利用其發光放電時間短暫的特性。若要得到較亮的畫面，就在一次顯示畫面時間內施予多次的維持電壓脈衝，使其產生多次放電發光，疊加至足夠亮度。

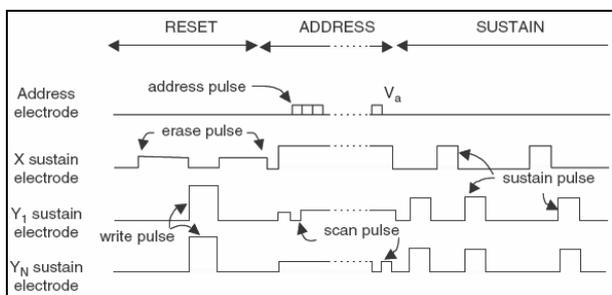


圖六 交流記憶效應。[5]

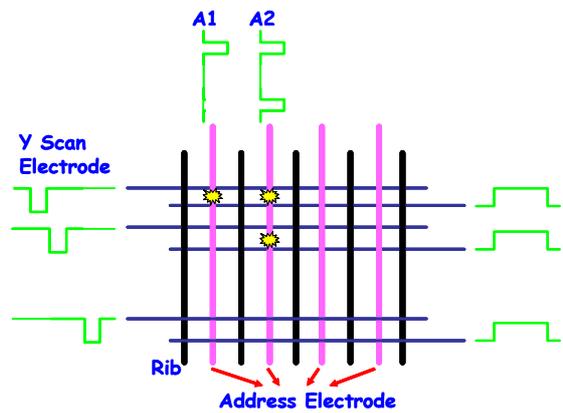


圖七 交流電漿顯示器放電與發光隨時間變化量測結果[10]

現今一般交流電漿顯示器，其產生動態影像所使用的波形多為 ADS(Address display separated) 驅動方式 [8]，如圖八所示，其中分成三個時間區段，分別為重置區段(Reset)、定址區段(Address)、維持區段(Sustain)。首先，重置區段會將全部子畫素(Sub-pixel)的壁電荷清除，讓所有的子畫素，都在同一個狀態下。接著會在定址區段，決定此子畫素是否要發光(有被定址到的子畫素會囤積壁電荷)。到了維持區段時，被定址到的子畫素會產生放電而發光，反之，沒被定址到的子畫素則是不發光。讓我們更近一步來說明定址的原理，如圖九所示，所有的 X 維持電極固定給相同的波形，Y 維持電極在不同時間點由上至下依序給一個掃描脈衝(Scan pulse)，定址電極隨著時間給不同的定址脈衝(Address pulse)。當定址電極的脈衝，和 Y 電極的脈衝在同一個子畫素、同一個時間點相遇時，此子畫素就會產生放電並且累積壁電荷，之後在維持區段時(Sustain)發光。



圖八 ADS 電路驅動波形[1]

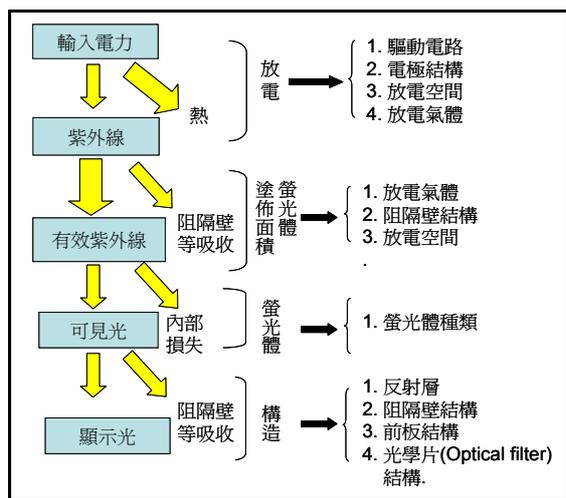


圖九 ADS 波形定址方法示意圖。[5]

對 PDP 顯示器特性的評估，基本上是可以從 PDP 顯示器的畫質亮度(Brightness)、解析度(Resolution)、對比度(Contrast ratio)、灰階能力(Gray scale)、色彩數目(no. no of color)與色彩真實度(color reproducibility)、影像銳利度(Sharpness)、消耗電力(power consumption)以及是否有動畫影像的擬似輪廓(dynamic pseudo contour) 產生等項目來判定產品的好壞。PDP 顯示器最早是由日本廠商在 1996 年將其商品化，至今已經有十年左右的時間，其間各方面皆已有長足進步。表四[11]為日本 Pioneer 公司在 50 吋 PDP 顯示器產品上的演進，就商品化 PDP 顯示器的品質而言，已經可以符合消費者的需求。目前研發重點以提高發光效率與畫質(解析度)，並降低成本，以提高競爭力。其中發光效率之提昇與放電機制有最大關連，從能量轉換效率的分析，改善 PDP 的發光效率可以從驅動電路、電極結構、放電空間、放電氣體、阻隔壁結構、螢光體種類、反射層、前板結構、光學片(Optical filter) 結構等方向進行，如圖十所示。目前在已經發表的文獻中[3] PDP 的最高發光效率已經達到 8.7 lm/W。其主要特點為在前板結構中的放電電極與掃描電極間增加輔助電極，且使用高 Xe 比例 (20%) 的放電混合氣體。

表四、Pioneer 公司 50 吋 HD PDP 演進[1]

特性	產品	1997年 第一代	1999年 第二代	2001年 第三代	2003年 第四代	2004年 第五代	2005年 第六代
亮度 (cd/m <sup>3</sup> )		350	560	900	1000	1000	1100
暗室對比		220 : 1	560 : 1	900 : 1	1000 : 1	1100 : 1	4000 : 1
消耗電力(W)		500	470	385	381	377	358
發光效率 (lm/W)		1.00	1.15	1.80	1.80	1.80	2.20
本體重量 (kg)		42.5	42.5	38.9	38.9	32.8	31.8



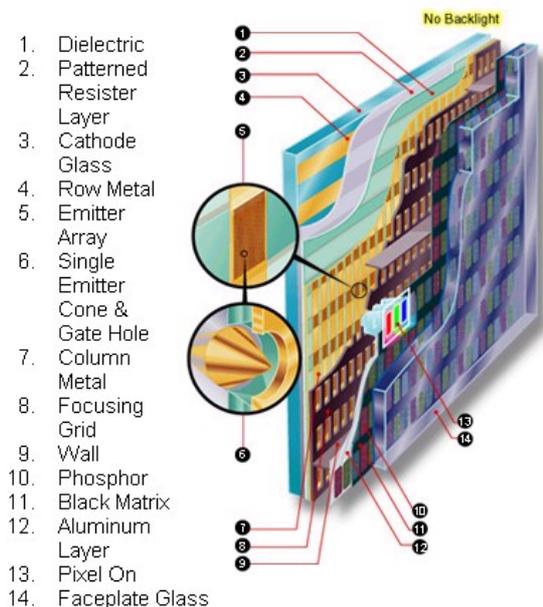
圖十、改善 PDP 發光效率的可能方法

## B. 場發射顯示器

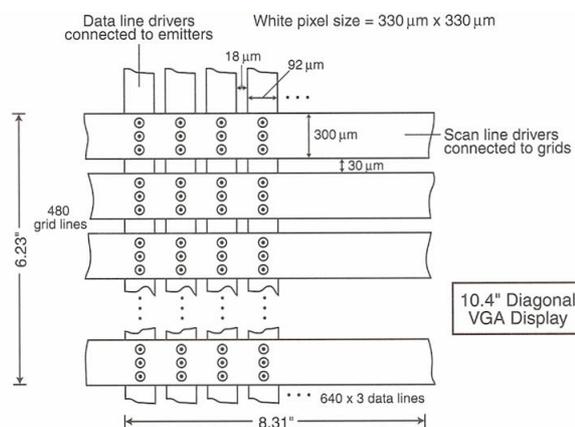
### 簡介

場發射顯示器(field emission display, FED)是一種新型顯示器,它最早的概念是由 Crost、Shoulder 與 Zinn 等人於 1970 年提出[12],並於 1993 年由 Pixel/LETI 這家公司開發出第一個 6 吋全彩顯示器原型[13]。場發射顯示器的顯示原理與陰極射線管(cathode ray tube, CRT)顯示器非常類似,都是以電子束激發紅、綠、藍三原色的螢光材料來發出三原色光,以達到顯示影像的目的,但它與陰極射線管顯示器不同之處在於它使用閘極控制場發射電子源,而非熱陰極電子源,圖十一為場發射顯示器結構示意圖[14],圖十二為典型的 10 吋 VGA FED 電極排列與驅動方式示意圖[15],在顯示面板(陽極)上每一組畫素(pixel)都包含紅、綠、藍三個色素,每一個色素下方都有一組閘極控制場發射電子源發射電子,在特定畫素需要顯示特定顏色時,才使該組電子源發射電子,因此顯示器不需要複雜的驅動電路,也不需要外加電場與磁場控制電子束的偏轉,因此發射極至陽極的距離可以大幅縮短至 1 至 2 毫米(mm),同時場發射過程在閘極與發射極間加電場的瞬間就會發生,所以顯示器幾乎可瞬間啟動,而不像熱陰極電子源需要預熱的過程,此外它是以電子直接激發螢光材料而發光,因此也具有功率消耗少、亮

度高與廣視角等優點,由於場發射顯示器具有許多優異的顯示特性,是非常有潛力的次世代平面顯示器[16],而且它可算是陰極射線管顯示器真正薄型化,因此也常被稱為”thin CRT”。



圖十一 場發射顯示器結構示意圖 [14]



圖十二 典型的 10 吋 VGA FED 電極排列與驅動方式示意圖 [15]

### 場發射原理與場發射電子源

電子從金屬表面的場發射過程為一種量子力學穿隧效應[17],圖十三為一般的金屬材料表面附近電子能階與態密度(density of state, DOS)分佈示意圖[18],在無外加電場時,金屬表面附近電子的費米能階  $E_F$  小

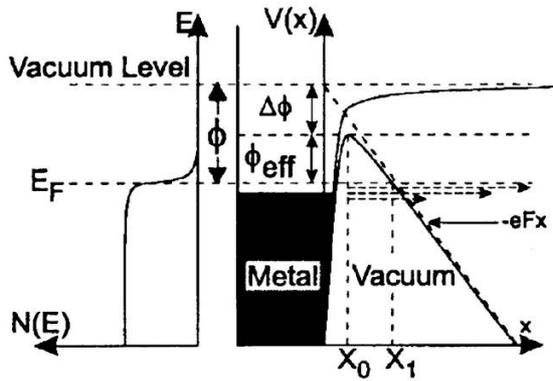
於真空能階  $E_v$ ，它們的差異稱為金屬表面的功函數  $\phi$  (work function)，一般金屬其值約為 2 ~ 5 eV，在如此大的位能障壁下，電子穿隧出表面的機率非常低，因此室溫下金屬表面無法發射出電子。如果提高金屬的溫度使在費米能階附近的電子獲得能量而具有高於真空能階的位能，電子將可從導體表面發射，這就是導體表面的熱陰極發射；反之，如果在導體表面施加強電場，導體表面附近之真空能階會變成位置的函數(三角形位障，triangular potential barrier)，同時金屬表面的功函數也會被減小(此效應稱為 Schottky effect)，因此電子穿隧真空能階而發射的機率大幅提高，這就是導體表面的場發射機制，由於電子的發射並不靠加熱，因此場發射陰極又稱為冷陰極(cold cathode)。1928 年 Fowler 與 Nordheim 在無限大平面的假設下，根據一維的三角形位能障壁條件，求解量子力學薛丁格方程式(Schrödinger's equation)而推導出場發射電流密度與外加電場及功函數的關係為[19]

$$J = \frac{AE^2}{\phi t^2} \exp\left(\frac{-BV(y)\phi^{3/2}}{E}\right) \quad (2)$$

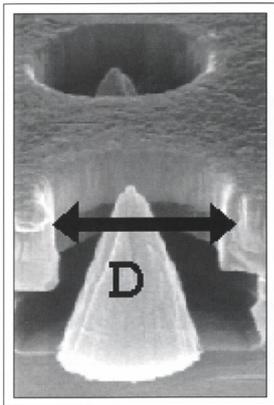
其中  $J$  為場發射電流密度， $E$  為垂直於金屬表面的電場大小，為金屬表面的功函數， $A$  與  $B$  為材料相關常數，而  $t^2$  與  $V(y)$  都是 Schottky 效應導致功函數減少量  $y$  的函數。(2)式就是著名的 Fowler-Nordheim (F-N)場發射方程式，由此方程式可清楚的看到，要提高場發射電流密度可經由增加表面電場與選擇功函數較低的材料這兩方面著手。要在金屬表面產生合理的場發射電流必須要外加非常大的電場(大於 10 MV/cm)，這在半導體製程技術開始蓬勃發展以前幾乎是無法做到的，1968 年史丹福研究院(Stanford Research Institute, SRI)的 Spindt 等人首次成功使用真空薄膜沉積技術製造出成長於矽基板上、微米大小的鉬閘極/二氧化矽絕緣層/鉬圓錐體發射極場發射結構(圖十四)[20]，這種結構後來被稱為 Spindt 型發射極，它的閘極與發射極尖端距離約為 0.5 - 1 微米，由於鉬圓錐體發射極的尖端附近電場會被大幅增加，因此這樣的發射極較易於產生場發射，這種薄膜製程也可同時製造出數以千計的 Spindt 型發射極陣列，因此它非常適合作為場發射顯

示器的電子源[21]，早期的場發射顯示器即是以這種 Spindt 型金屬發射極作為電子源。隨著半導體製程技術的進步，其它的製程方法也陸續被提出以提昇 Spindt 型發射極的場發射特性，如韓國首爾大學的 Prof. Oh 以 LOCOS 製程製造出閘極與發射極尖端距離小於只有 0.25 微米的鉬發射極(閘極與發射極愈接近，則相同的閘極-發射極電位差會有更大的場)[22]，或者以非等向性蝕刻技術製造出尖端更尖的矽發射極[23]等。目前 Spindt 型發射極所採用的材料以鉬、鈦、鎢與多晶矽等為主，元件密度可達  $10^9$  tips/cm<sup>2</sup>，總電流密度可達 2400 A/cm<sup>2</sup>[24]。提高場發射電流除了改變場發射元件的設計外，採用功函數低而又穩定的發射極材料是另一種可能的選擇，因此新材料的開發也是場發射顯示器研究的重要課題，目前最有潛力的發射極材料是所謂的碳基(carbon-based)材料，包括鑽石薄[25][26]、類鑽石碳薄膜(diamond-like carbon, DLC)[27][28]與奈米碳管(carbon nanotube, CNT)[29-31]等。鑽石是碳原子以  $sp^3$  鍵結形成四面體(tetrahedral)結構[16]，它具有負的電子親和力(negative electron affinity)以及強的化學與機械穩定性，因此是非常好的場發射材料，以使用化學氣相沉積(chemical vapor deposition, CVD)法成長鑽石薄膜於陰極上或是金屬/多晶矽發射極上作為發射極；類鑽石碳薄膜是由碳的  $sp^2$  與  $sp^3$  鍵結所共同形成的三維結構[16]，它具有類似於鑽石薄膜的場發射特性，但卻擁有較低的製程溫度，可應用於對製程溫度敏感的基板上，因此比鑽石薄膜有更多的應用。奈米碳管是 1991 年 Prof. Iijima 在研究碳簇時發現的[32]，圖十五為奈米碳管結構示意圖，它可視為由層狀的石墨(graphite)捲曲而成的管狀結構，它的長度可超過 1 微米而直徑小於 50 奈米，具有很大的縱橫比(aspect ratio)，在碳管頂端附近電場增強係數(field enhancement factor)很大，因此雖然它的功函數與鉬、鎢等金屬接近，但它的場發射特性比這些金屬要好，目前正在開發的新一代大尺寸場發射顯示器都是以奈米碳管作為場發射電子源。奈米碳管發射極的製作可分為塗佈與催化成長[30][33]兩種，前者製程成本較低而且易於做到大尺寸，但很難控制奈米碳管陣列中每

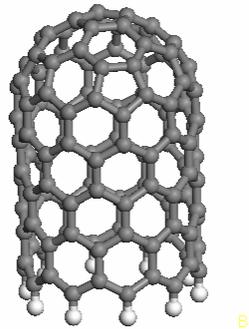
一根碳管的方向，後者可以長出排列整齊的奈米碳管，再配合由 Prof. Milne 等學者發展的單一光罩與自對準技術[34]，可製作出高品質的奈米碳管發射極(如圖十六所示)，但製程成本較高，因此開發適合大尺寸面板、排列整齊而且成本低的奈米碳管發射極製程仍是需要努力的方向。



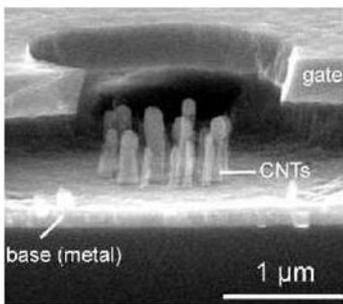
圖十三 金屬表面附近電子能階與態密度分佈示意圖[18]



圖十四 Spindt 型發射極結構(SEM) [20]

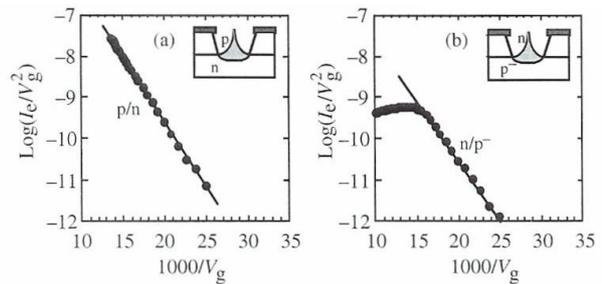


圖十五 奈米碳管結構示意圖 [Zigzag (10, 0)]

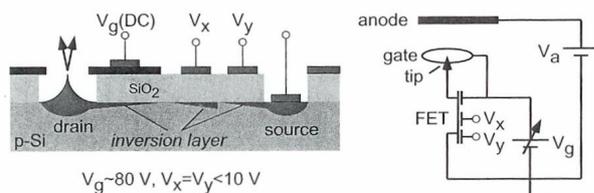


圖十六 自對準奈米碳管發射極[34]

除了發射極本身的場發射特性會影響發射電流大小外，為做成積體電路元件發射極通常都成長於矽基板上，而矽基板本身通常都摻有雜質而成為 p 型或 n 型，當發射極材料為多晶矽或是一維奈米結構如奈米碳管時，它們與矽基板間所形成的同質或異質界面效應[35]也會對發射電流造成影響，舉例而言，當矽基板為 p 型而多晶矽或奈米碳管為未摻雜或 n 型，由於閘極與發射極間所加電壓對此界面而言為反向偏壓，因此當反向偏壓夠大時流經界面的電流將為反向飽和電流，而電子實際上是從陰極經界面再從發射極發射出來，因此場發射電流也會在高電壓時顯現飽和電流的特性，反之當矽基板為 n 型時，外加電壓對界面而言為順向偏壓，因此界面效應不會對發射電流造成限制(矽發射極 F-N plots 如圖十七所示[36]，奈米碳管的實驗與模擬結果可參考文獻 37 與 38)。發射極與基板的界面效應對場發射顯示器應用而言具有正面的意義，將發射極操作在反向飽和電流附近可以增進每一個發射極發射電流的均勻性，避免因製程條件微小的變異造成發射電流的大幅差異。此外，界面效應還提供設計真空金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)元件的可能性，圖十八為一種三閘極式真空 MOSFET 元件結構與等效線路示意圖[39]，透過控制閘極  $V_x$  與  $V_y$  可設計邏輯線路來控制場發射電流，並進而可將” system-on-panel” 的概念引入場發射顯示器中 [40]。



圖十七 n 型矽基板/p 型發射極與 p 型矽基板/n 型發射極之 F-N 圖[36]

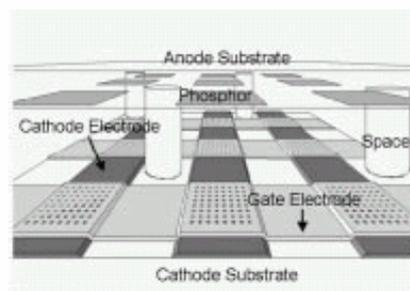


圖十八 三閘極式真空 MOSFET 元件結構與等效線路示意圖 [39]

## 場發射顯示器系統

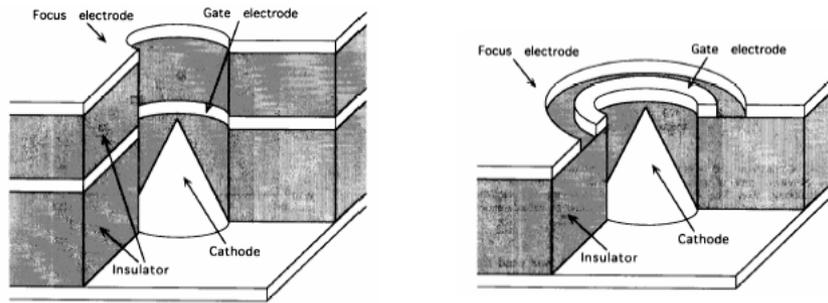
整個場發射顯示器除了場發射電子源外，還有許多重要的材料與元件會影響顯示器的特性，如螢光材料、空間支撐器(spacer)以及電子光學系統等，本節將概略介紹這些材料與元件。場發射顯示器的螢光材料直接關係到顯示器影像的品質，它可區分為低電壓與高電壓螢光材料兩大類[16]，前者的操作電壓在 200~2000 伏特間，後者的操作電壓則需要 2000 伏特以上。低電壓螢光材料可避免在陰極與陽極間因為產生高壓放電而損壞元件，但由於目前所開發的低電壓螢光材料效率很低，而開發高效率螢光材料尚需投入大量研發成本，因此大部份的研發廠商都已不再採用低電壓螢光材料；另一方面，由於陰極射線管顯示器就是採用高電壓螢光材料，其中 P22(藍色為 ZnS:Ag:Cl、綠色為 ZnS:Cu:Au:Al、紅色為 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:S:Eu)更是已發展了數十年[16]，它的發光效率已相當高，因此場發射顯示器現在多已採用 P22 這類的螢光材料，但採用這類螢光材料為避免元件因高電壓放電而造成元件損壞，陰極與陽極間距離不能太靠近，同時也需要發展能耐高電壓的空間支撐器。場發射顯示器必須操作在高真空環境中(10<sup>-7</sup> torr 以下)，否則環境中的雜質分子被電子游離後可能損害發射極，因此面板內外壓力差很大，為維持陰極面板與陽極面板的間距，避免玻璃面板彎曲變形，必須在兩片面板間加入空間支撐器(如圖

十九所示)[41]，但它對所使用的材料有許多額外要求，包括它要具有高縱橫比、好的機械強度、在真空環境中不會釋氣、禁得起電子與離子撞擊並不會發射二次電子、好的介電強度、透明、與上下面板的熱膨脹係數接近、成本低等，目前主要以玻璃或聚醯胺(polyimide)等材料為主。

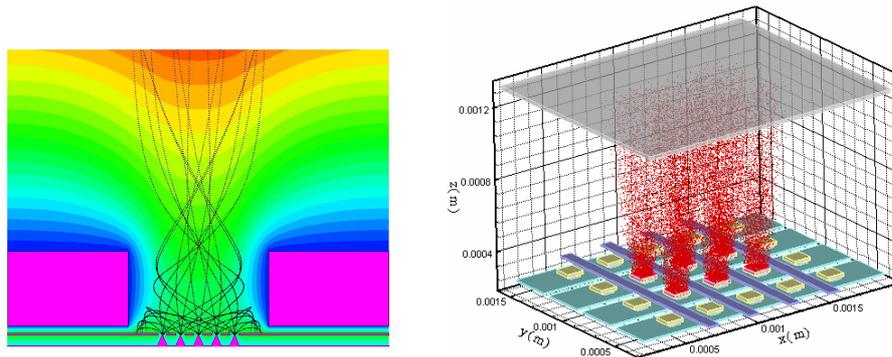


圖十九 空間支撐器(spacer)示意圖 [41]

由於場發射電子源的閘極通常設計在發射極的側邊，因此電子束在發射後本質上是向側邊擴散的，然而場發射顯示器採用高電壓螢光材料，陰極與陽極間距離不能太靠近，所以側向發散的電子束會對顯示器的螢幕解析度(resolution)造成嚴重限制，為克服電子束發散的問題，場發射顯示器通常會設計電子光學系統以聚焦電子束或改變發射極與閘極的設計，其中使電子束聚焦的方法是在閘極外再製作一層聚焦電極，並調整聚焦電極與發射極的相對電壓來聚焦電子束，常用的聚焦電極有同軸式與共平面式兩類(如圖二十所示)[42]，它們並可設計成以一個聚焦電極來聚焦一組場發射陣列。不論是採用電子光學系統或改變電極設計，在實際製作前可先針對設計的結構進行電子運動軌跡以了解這個設計結構的特性，圖二十一為針對兩種場發射顯示器設計的電子軌跡模擬結果(以粒子式模擬方法)[43]，這樣的模擬對場發射顯示器設計有相當大的幫助。



圖二十 同軸式與共平面式聚焦電極結構[42]



圖二十一 場發射顯示器電子軌跡模擬(採用粒子式模擬方法)

## 結論

場發射顯示器採用場發射電子源激發螢光材料以顯示影像，具有高畫質、高亮度、無視角問題、反應時間快、可瞬間啟動、省電等諸多優點，是非常有潛力的下一代平面顯示器，發展方向主要是鎖定在具有強光背景與戶外環境使用，Spindt 型 FED 以中、小尺寸為主，而 CNTFED 則以 40 吋以上的應用要目標。場發射顯示器雖然有上述諸多優點，但它仍有許多需要改進的問題，包括發射極的穩定性與壽命、大面積奈米碳管陣列製程的開發、電子光學系統設計、面板封裝與高真空的維持以及製造成本等，因此需要學界與業界共同努力。除了 Spindt 型發射極或奈米碳管發射極場發射電子源外，近年來還有兩種新型態的場發射電子源，即表面傳導發射 (surface conduction emission, SCE)[44]與彈道電子發射(ballistic electron surface emitting device, BSD)[45]元件，它們的電子發射原理與第二節所述有很大的不同，但限於本文篇幅我

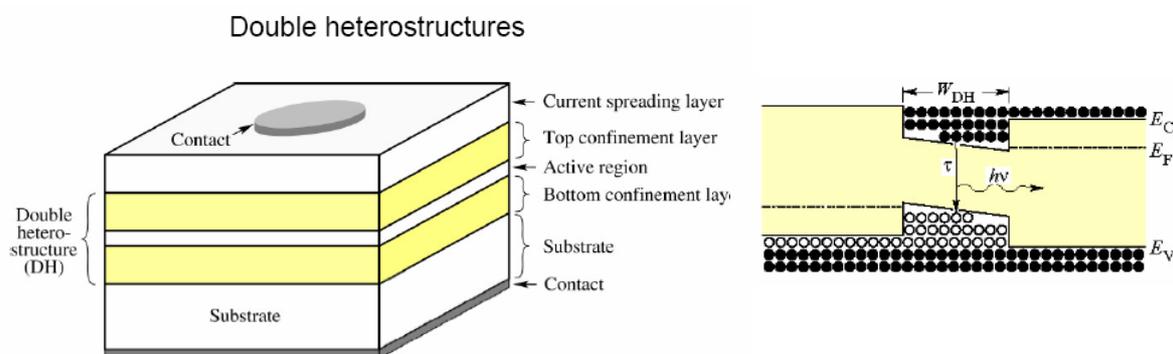
們在此不做介紹，有興趣的讀者可參閱相關文獻。

## C. 電致發光顯示器

除了電漿顯示器及場發射顯示器與電漿有密切關係外，還有一種顯示器的發光效率與表面電漿子 (surface plasmon, SP)[46]的激發現象有密切關係，那就是電致發光顯示器(light emitting display, LED)。電致發光顯示器是以電致發光元件為光源，它的結構如圖二十二所示[47]，其發光原理是從元件的陰極與陽極分別注入電子與電洞(載子)，由外加電壓所產生的電場會驅動載子經過傳輸層，最後電子與電洞在半導體發光層相遇與再結合，並將再結合所產生來的能量以光子的形式釋放出來。電致發光元件根據發光層所採用的無機半導體發光材料或有機化合物發光材料可區分為無機與有機發光二極體，前者主要是以 III-IV 族直接能隙化合物半導體材料為主，後者又可根據有機化合物分子量的大小區分為有機發光二極體(OLED)與

高分子發光二極體(PLED)。無機發光二極體可作為戶外使用的大型顯示面板，亦可作為液晶顯示器的背光源，而 OLED/PLED 則可作為中、小尺寸的平面顯示

器，並應用於家用電視、個人電腦顯示器以及行動通訊產品如行動電話、PDA 與數位相機等產品。



圖二十二 典型的無機電致發光元件結構示意圖與發光原理[47]

不論是作為顯示器或者背光源，電致發光元件的發光效率都是非常重要的研究課題。電致發光元件的發光效率可分為內部量子效率與外部量子效率兩部份[47]，前者是指由電子與電洞在發光材料中結合放出光子的效率，因此與所使用的無機或有機發光材料有密切關係，後者則是指光子從元件發射到被取出的總效率，它是內部量子效率與光子取出率的乘積，而光子取出率則深受元件結構設計與物理特性的影響。由於發光材料的折射率比空氣的折射率大，因此只有部份光子能從元件內部輻射出來，大部份的光子能量都被局限在元件內部所形成的波導管中，最後以熱的形式被元件吸收，因而造成元件的發光效率降低。如果能有效改善元件內部的波導現象，並進而增加光子的取出效率，將能有效地提昇電致發光元件的發光效率[47-53]。另一方面，載子注入的電極通常採用銀或鋁電極，而且這層電極很薄，厚度只有 10 至數 10 奈米，當光子從量子井中發射至介電質/金屬薄膜/空氣介面時，光子會被吸收並激發出金屬薄膜/空氣介面的表面電漿子，最後能量再以熱的形式損失。Prof. Barnes 等學者的研究顯示[54]，在 OLED 中甚至有 40 % 的光子能量損耗於表面電漿子的激發，如果能避免表面電漿子被激發或是使表面電漿子的能量再次轉換為光子並向元件外部發射，將有助於提昇電致發光元件的發光

效率。

關於表面電漿子現象以及金屬薄膜表面的表面電漿子特性請參閱本期物理雙月刊中，由邱國斌、蔡定平所撰之「金屬表面電漿簡介」。基於光子與表面電漿子的共振耦合特性，如果能在金屬薄膜電極上製作適當的週期性圖案(光柵)，就能避免薄膜電極表面的表面電漿量子被激發，或是使表面電漿量子被激發後再轉換成光子發射出元件，也可以製作一層介電質/銀奈米顆粒/介電質三明治式光取出層，經由局域化表面電漿子的被激發與輻射，將元件發射的光子取出，這些特殊的設計都將有助於增進電致發光元件的發光效率[55-58]。

表面電漿子光學(plasmonic)是目前奈米光學中最蓬勃發展的領域之一，它對提昇電致發光顯示器效率的研究正在開展之中，值得且需要學界與業界共同努力研究。

### 參考資料

- [1] J. P. Boeuf, Plasma Display Panels: Physics, Recent Developments and Key Issues, J, Phys. D: Appl. Phys. **36**, 2003
- [2] Bo-Sung Kim *et al.*, "Cross-Shaped Cell Structure

- Employing Auxiliary Address Pulse Driving Scheme in AC-PDP” SID 04 DIGEST, 2004
- [3] Hirohito Kuriyama *et al.*, “High-Performance 55-inch Diagonal WXGA PDP with Extended ALIS Technology” SID 04 DIGEST, 2004
- [4] Y. Ikeda *et al.*, “Global modeling of a dielectric barrier discharge in Ne-Xe mixtures in an alternating current plasma display panel.” *J. Appl. Phys.*, vol.86, no.5, pp.2431~2441, 1999
- [5] 吳智瑋, “電漿顯示器內烙痕線象生成機制的分析與研究” 國立清華大學工程與系統科學研究所碩士論文, 2005。
- [6] T. N. Criscimagna and P. Pleshko, “AC Plasma Display.” *Display Devices*, J. I. Pankove *et al.*, Ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1980, pp.91~150.
- [7] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1991.
- [8] Yoshikawa K,*et al.*, *Japan. Display*, **92**, 605, 1992.
- [9] Y. Ikeda, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **86**, 2341, 1999
- [10] 徐兆鉉, “電漿顯示器電壓波形與放電特性研究” 國立清華大學工程與系統科學研究所碩士論文, 2001。
- [11]. FPD Show in Yagohama (2005).
- [12] U. S. Patent No. 3500102, 1970.
- [13] R. Meyer, Eurodisplay Workshop Digest, p. 56, 1993.
- [14] T. S. Fahlen, Proc. IVMC, p. 56, 1999.
- [15] C. C. Wang *et al.*, Proc. IVMC, p. 557, 1996.
- [16] W. Zhu, Vacuum Microelectronics, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [17] R. Shankar, Principles of Quantum Mechanics 2<sup>nd</sup> Ed., Plenum, 1994.
- [18] J. A. Nation *et al.*, Proceeding IEEE 87, p. 865, 1999.
- [19] R. H. Fowler and L. W. Nordheim, Proc. R. Soc. London, Ser. A 119, 173 (1928).
- [20] C. A. Spindt, *J. Appl. Phys.* 39, p. 3504, 1968.
- [21] C. A. Spindt *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices 38, p. 2355, 1991.
- [22] *J. Vac. Sci. Technol. B* 16, p. 807, 1998.
- [23] R. B. Marcus *et al.*, *Appl. Phys. Lett* 56, p. 236, 1990.
- [24] L. Parameswaran *et al.*, Vacuum Electronics Annual Review Abstracts, p. IV-7, San Diego, CA, May 2, 1997.
- [25] C. Wang *et al.*, *Electron Lett.* 27, p. 1459, 1991.
- [26] M. W. Geis *et al.*, IEEE Elect. Dev. Lett. 12, p. 456, 1991.
- [27] B. C. Djubua *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices 38, p. 2314, 1991.
- [28] K. L. Park *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 70, p. 1381, 1997.
- [29] W. A. De Heer *et al.*, *Science* 270, p. 1179, 1995.
- [30] C. Bower *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 77, p. 830, 2000.
- [31] J. M. Bonard *et al.*, *Solid-State Electronics* 45, p. 893, 2001.
- [32] S. Iijima, *Nature* 354, 56 (1991).
- [33] C. Bower *et al.*, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 593, p. 215, 1999.
- [34] G. Pirio *et al.*, *Nanotechnology* 13, p. 1, 2002.
- [35] S. M. Sze, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons (2001).
- [36] J. Itoh, *Appl. Surf. Sci.* 111, p. 194, 1997.
- [37] C. S. Cheng *et al.*, *Phys. Rev. B* 68, 125322 (2003).
- [38] Y. C. Lan *et al.*, accepted for publication in *J. Vac. Sci. Technol. B* 24(2), 2006.
- [39] J. Itoh *et al.*, *Inf. Display* 14, p. 12, 1998.
- [40] W. Werner, *Inf. Display* 14, p. 128, 1998.
- [41] S. Itoh *et al.*, *Proceeding IEEE* 87, p. 514, 2002.
- [42] W. Dawson *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices 42,p. 340, 1995.
- [43] Y. C. Lan *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, p. 1244, 2006.
- [44] E. Yamaguchi *et al.*, *J. SID* 5, p. 345, 1997.
- [45] Y. Nakajima *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 81, p. 2472, 2002.
- [46] H. Raether, *Surface Plasmon on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*, Springer-Verlag, 1988.

[47] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press (2003).

[48] A. Scherer et al., *IEEE Transactions on Nanotechnology* 1, p. 1, 2002.

[49] B. J. Matterson et al., *Adv. Mater.* 13, p. 123, 2001.

[50] J. M. Lupton et al., *Appl. Phys. Lett.* 77, p. 3340, 2000.

[51] I. Schnitzer et al., *Appl. Phys. Lett.* 63, p. 2174, 1993.

[52] C. C. Lin et al., *Appl. Phys. Lett.* 87, 021102, 2005.

[53] E. F. Schubert et al., *Science* 265, p. 943, 1994.

[54] P. A. Hobson et al., *Adv. Mater.* 14, p. 1393, 2002.

[55] P. A. Hobson et al., *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 8, p. 378, 2002.

[56] J. Vuckovic et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics* 36, p. 1131, 2000.

[57] K. Okamoto et al., *Nature Material* 3, p. 601, 2004.

[58] M. Westphalen et al., *Solar Energy Materials & Solar Cells* 61, p. 97, 2000

---

---

#### 作者簡介

藍永強<sup>1</sup>、鍾岳宏<sup>2</sup>、徐兆鈺<sup>3</sup>、張德安<sup>4</sup>、柳克強<sup>2</sup>

<sup>1</sup>成功大學光電科學與工程研究所

<sup>2</sup>清華大學工程與系統科學系

<sup>3</sup>中華映管光電事業部

<sup>4</sup>經濟部視訊工業發展推動小組

E-mail: lanvc@mail.ncku.edu.tw