



解説

交流 (AC) 型プラズマディスプレイの放電特性と技術開発

鈴木 敬三
(株)日立製作所 日立研究所)

Discharge Characteristics and Technology Development of Alternating-Current Plasma Display Panels

SUZUKI Keizo

Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., C/O Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,

Higashi-koigakubo, Kokubunjishi, Tokyo 185-8601, Japan

(Received 20 December 2002)

Abstract

Comparison of luminosity-modulation switching principles in matrix displays showed that an AC-PDP (alternating-current plasma display panel) can produce 30 to 50-inch diagonal displays of superior motion-picture quality and of a low price. Comparison with a process plasma and a thermonuclear fusion plasma showed that an AC-PDP plasma in each cell has extremely low degrees of ionization, uniformity, and steadiness. The mechanism of VUV (vacuum ultraviolet) production in an AC-PDP was theoretically studied, and ways to increase VUV production efficiency were discussed. It was then shown that the development of a vertical discharge AC-PDP of low driving voltage is expected and that precise and dynamic control and measurement of the non-uniform and non-steady discharge-radiation process will become even more important in the future development of new AC-PDP technologies.

Keywords:

plasma display panel, AC-PDP, luminous efficiency, direct excitation, indirect excitation, energy flow, electron temperature, electron energy distribution function, electron density, vertical discharge

1. はじめに

いよいよ PDP テレビ (PDP-TV) 時代の到来である。基本原理の発明から30余年の歴史を経て [1], プラズマディスプレイパネル (Plasma Display Panel, PDP) 事業が家庭用大型 TV 市場をターゲットとして大きく成長しようとしている。PDP の持つ薄型, 軽量, 平面, 高画質, 完全デジタル駆動の特徴, さらには家庭内 WIDE (Window for the Digital Entertainment) 環境の提案 [2] が, 一般消費者に実感を持って評価されるようになった結果である。特に, 富士通日立プラズマディスプレイ (株) (FHP) と (株) 日立製作所が業界をリードして行った「高精細 PDP-

author's e-mail: suzukikz@crl.hitachi.co.jp

TV を一般消費者に購入可能な価格で広く提供する」戦略が徐々に現実味を帯び, 消費者に理解された結果である [2b]。具体的には, (株) 日立製作所が2001年4月に32V, 続いて同年に 37V, 42V 型高精細 PDP テレビ (Woo PDH2100 シリーズ, ALIS (Alternate Lighting of Surfaces) 方式 [3], FHP 製造モジュール使用) を画期的な低価格で市場投入したことが, 市場における認知・成長の契機であった。この戦略は, 日本国内および国外の PDP-TV 市場の潮流として定着し, さらなる高画質化と低価格化が進行している。

PDP 技術は, その基本放電方式により直流 (DC) 型

PDP(DC-PDP, Direct-Current PDP)と交流(AC 型 PDP (AC-PDP, Alternating-Current PDP)に分類される。DC-PDP では電極は裸で放電空間と接しており、放電時において放電空間に定常電圧が印加される。一方、AC-PDP では電極は誘電体で覆われており、放電時において放電空間に変動電圧が印加される。パネル寿命、放電安定性、低コスト性等において AC-PDP が優れており、現在テレビを含めた PDP 製品には AC-PDP 方式が主に用いられている。

AC-PDP の基本原理は、1964年にイリノイ大学の D.L. Bitzer 博士と H.G. Slottow 博士により発明された[4]。当初は対向表示放電を用いており、単色のコンピュータ用表示装置として実用化が行われた[5]。その後、蛍光体を安定に用いることが可能な 3 電極構造の面表示放電技術が開発され、1992年の富士通(株)による 21 型フルカラー PDP の製品化[6]とともにカラー PDP の実用化が始まった[7 8]。さらにその後、ALIS 駆動方式の開発[3]とともに高精細 PDP-TV を低価格で提供することが可能となり、上記した如く PDP-TV 時代が到来した。

現在の PDP-TV 市場の飛躍的発展を支えているのが、輝度、発光効率を代表とする PDP 性能の急速な進展である。特にここ数年における総合的ディスプレイ性能の向上には目を見張るものがある[2]。これを可能にしているのが、表示装置としてのシステムの技術開発とともに、放電技術、材料技術の基盤技術開発の進展である。

本稿は、このような状況を踏まえて AC-PDP 技術開発の現状と将来展望の解説を目的とし、プラズマ・放電専門家の同分野への積極参加を期待して執筆するものである。なお、本稿の一部、特に発光効率に関する議論(第 4 章)は、筆者による既発表論文の内容の多くを引用・加筆して執筆する[9, 10]。

2. AC-PDP の発光・表示原理と表示装置としての特徴

現行 3 電極面放電(Three Electrode Surface Discharge)AC-PDP の構造を Fig. 1 に示す[7 8]。維持放電電極対(Pair of Sustain Discharge Electrodes)とアドレス電極(Address Electrode)は互いに直交したマトリクスを形成し、交差点が表示セルとなる。両電極への印加電圧制御によるアドレス放電の有無で、明/暗セルを選定する。明セルでは維持放電電極を覆う誘電体(Insulating Film + Protective Film)表面に壁電荷(およびこれにより誘起される壁電圧)が形成され、その後の維持放電電極対への電圧印加により明セルのみに表示放電(維

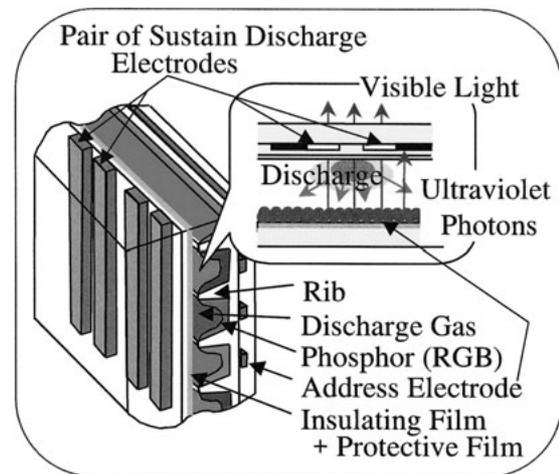


Fig. 1 AC-PDP structure (reference [9,10]).

持放電)が発生する。表示放電で発生する紫外線で赤、緑、青の蛍光体(Phosphor (RGB))を可視光発光させ、これにより画像表示を行う。

セル内に充填する放電用ガスは通常(Ne+Xe)の混合ガスであり、発生する紫外線は励起 Xe 原子(主に Xe^3P_1 ($Xe5p^5 6s^2(P_1)$) (以降 Xe^3P_1 と略す)) および励起 Xe_2 分子($Xe_2^*(^3\Sigma_u^+)$, $Xe_2^*(^1\Sigma_u^+)$) および $Xe_2^*(1_u)$, $Xe_2^*(O_u^+)$)からの真空紫外線(VUV (Vacuum Ultraviolet))である。波長は 147 nm(光子エネルギー 8.44 eV)と 173 nm(7.17 eV)領域が主であり、152 nm(8.16 eV)領域も若干発生する。

以上の説明でわかるように、AC-PDP の画像表示で用いる基本物理現象は、放電の非線形性と誘電体表面壁電荷によるメモリー効果である。ここで、「放電の非線形性」とは放電発生のための有限な最低電圧が明確に存在することで、明/暗セルの選定に不可欠である。Table 1 に、各種マトリクス・ディスプレイにおける輝度変調スイッチング機能を比較して示してある。マトリクス・ディスプレイとは、縦横マトリクス状に形成した電極群とこれら電極群の交点が形成するセルより構成され、縦横電極群への電圧印加により明/暗セル選定と輝度変調を行うディスプレイのことである。マトリクス・ディスプレイは一般的に平面・薄型であり、FPD (Flat Panel Display)である。マトリクス・ディスプレイの画像表示のためには、当然各セルで発生する何らかの“物理現象(Physical Phenomena)”の選択的スイッチング機能が必要である。これらスイッチング機能の性能比較を代表的なマトリクス・ディスプレイである AC-PDP Display, LCD(Liquid Crystal Display), OLED(Or-

Table 1 Comparison of luminosity-modulation switching principles in matrix displays.

Function		AC-PDP Display	LCD	OLED Display	FED a)
Switching Principle	Physical Phenomena	Rare Gas Discharge	Optical Characteristics of Liquid Crystal	Light Emission from Organic Materials	Tunnel Effect of Electrons
	Switching Object	VUV Production	Visible Light Transmissivity	Visible Light (RGB) Production	Electron Beam Emission
	Switching Time (s)	$10^{-9} \sim 10^{-8}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$< 10^{-9}$	$< 10^{-9}$
Cell Selection	Non-linear Property b)	Large	Small	Small	Medium
	Necessity of an Active Matrix Substrate b) c)	Unnecessary	Necessary	Necessary	Unnecessary
Wiring	Coupling Distance (m)	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-7}$	$10^{-8} \sim 10^{-7}$
	Coupling Capacitance (F/line) b)	$10^{-10} \sim 10^{-9}$	$10^{-10} \sim 10^{-9}$	$\sim 10^{-7}$	$10^{-7} \sim 10^{-6}$
	Wiring Delay Time (s) b) d)	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
Driving	Driving Method	Digital (Pulse Driving)	Analogue (Time Modulation)	Analogue (Current Modulation)	Analogue (Current Modulation)

a) Plane-surface-structure FED displays such as SED (Surface-conduction Electron-emitter Display) and MIM (Metal-Insulator-Metal field-emission) are supposed. b) 30 to 50-inch diagonal panels and wiring resistance of approximately $100 \Omega/\text{line}$ are supposed. c) For example, TFT (Thin Film Transistor) substrate. d) Usage of the active matrix substrate is not supposed. AC-PDP: Alternating-Current Plasma Display Panel, LCD: Liquid Crystal Display, OLED: Organic Light-Emitting Diode, FED: Field Emission Display.

ganic Light-Emitting Diode) Display, FED (Field Emission Display) について示してある。

Table 1 より, AC-PDP, LCD, OLED, FED がスイッチング機能に用いる“物理現象”は, 各々希ガス放電, 液晶の光学特性, 固体(有機物質)電気発光, 強電界下における電子のトンネル効果である。また, それらがスイッチングする対象は, 真空紫外線発生, 可視光透過率, 可視光 (RGB) 発光, 電子ビーム放射である。スイッチング時間 (Switching Time) を見ると, LCD の値 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}$ が他の値 $< 10^{-8} \text{ s}$ に比べて極端に大きいことがわかる。このことが LCD の動画像特性 (Motion-Picture Quality) を悪くしており, 改善のためにさらに別な技術が必要になる。

次に明セル選定のための非線形性 (Non-linear Property) について議論する。一般に, 画面サイズが大きくなると配線の電気抵抗, 容量, 誘導係数 (インダクタンス) の増大により駆動波形電圧の変動が大きくなり, 全画面セルを一様に駆動するためにはより大きな非線形性が要求される。Table 1 より, AC-PDP の非線形性 (放電の非線形性) が最も大きく, LCD と OLED の非線形性が小さいことがわかる。この結果, 30~50型ディスプレイを想定すると, LCD と OLED においては非線形性を補強するためにアクティブ素子マトリックス基板 (Active Matrix Substrate) の使用が不可欠である。アクティブ素子マト

リックス基板とは, 例えば, 各セルごとに TFT (Thin Film Transistor) を作りこんだ基板のことであり, これを使用することはパネルコストが大幅に増大することを意味する。即ち, アクティブ素子マトリックス基板を全く必要としない AC-PDP では, 廉価なパネル製造が可能である。

さらに, 縦横電極配線の結合容量 (Coupling Capacitance) と配線遅延時間 (Wiring Delay Time) を比べてみる。配線遅延時間の計算には, 1 ラインあたり 100Ω の配線抵抗を想定した。パネルサイズと精細度 (セル数) が同じとすれば, 結合容量は縦電極と横電極の結合距離 (Coupling Distance) で概略決定される。Table 1 より, OLED と FED の場合の結合容量が大きく, 配線遅延時間が $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}$ と極めて大きいことがわかる。表示画像 1 フレーム (通常約 16.7 ms) の間に約 1,000 ラインの走査を行うことを考えると, 通常の駆動方法では配線遅延時間は約 $2 \times 10^{-5} \text{ s}$ 以下であることが望ましい。この条件が満足されない場合, 上記のアクティブ素子マトリックス基板により縦横電極配線の結合を絶つ必要がある。この場合, 上記した如く当然パネルコストが増大する。即ち, 配線遅延時間の少ない AC-PDP では, 優れた動画像特性を廉価に実現することが可能である。

Table 1 において, このようなスイッチング機能を用いた駆動方法 (Driving Method) を比べて見ると, AC-

PDPでは完全なデジタル駆動が可能であることがわかる。すなわち、近年進展しているデジタル画像信号に対する忠実な画像再現が可能である。

以上述べたごとく、AC-PDPは他のマトリックス・ディスプレイに比べ、優れた動画像特性の30~50型ディスプレイを廉価に実現することが可能である。また、デジタル画像信号に対する画像再現性が優れている。

3 . AC-PDP 放電の特徴

この章では、AC-PDP プラズマの特徴を他の代表的プラズマと比較して議論する。Table 2に AC-PDP プラズマ、半導体素子製造用プロセスプラズマ (Process Plasma)、熱核融合プラズマ (Thermonuclear Fusion Plasma)の各種プラズマパラメータを比較して示してある。表中、特に熱核融合プラズマにおいて、ガス圧力 (Gas Pressure)、ガス粒子密度 (Gas Particle Density)は放電前の値である。電子平均自由行程 (Electron Mean Free Path)は、AC-PDP プラズマとプロセスプラズマでは電子 - 中性粒子衝突を、熱核融合プラズマでは電子 - 電子、電子 - イオン衝突を想定して算出した[11]。プラズマ状態変動時間 (Plasma Condition Changing Time)

は、AC-PDP プラズマとプロセスプラズマではイオンのプラズマサイズドリフト時間を、熱核融合プラズマではエネルギー閉じ込め時間を想定して算出した。

Table 2より、AC-PDP プラズマのガス圧力が他のプラズマと比べて高く、この結果として電離度 (Degree of Ionization)がプロセスプラズマと比べても $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 倍小さいことがわかる。電離度とは、中性粒子密度 n_g に対する荷電粒子密度 (電子密度 (Electron Density) n_e) の割合 n_e/n_g である。このように電離度が低いことは、AC-PDP プラズマ中の物理化学反応において荷電粒子 (イオン、電子) より励起中性粒子がより重要な役割を担うことを意味しており、このことが高効率な真空紫外線発生の可能性を示している。

AC-PDP プラズマのもう一つの特徴は、プラズマサイズ (Plasma Size)が $10^{-4} \sim 10^{-3}$ m と極めて小さいことである。いわゆるマイクロプラズマと呼ばれるものである [12]。この結果、一様度 (Degree of Uniformity)は 1 ~ 10であり、他のプラズマの値 $10^3 \sim 10^6$ に比べ極めて小さい。一様度とは、プラズマサイズ L_p とデバイ長 λ_D の比 L_p/λ_D である。すなわち、AC-PDP プラズマは空間的に極めて非一様である。特に、電荷中性 (Charge Neutrality)

Table 2 Comparison of plasma characteristics.

Parameter a)	Symbol	Unit	AC-PDP Plasma	Process Plasma	Thermonuclear Fusion Plasma b)
Gas Pressure	p	Pa	$10^4 \sim 10^5$	0.1~10	0.1~1
Gas Particle Density	n_g	m^{-3}	$10^{25} \sim 10^{26}$	$10^{20} \sim 10^{22}$	$10^{20} \sim 10^{21}$
Electron Density	n_e	m^{-3}	$10^{18} \sim 10^{19}$	$10^{16} \sim 10^{18}$	$10^{20} \sim 10^{21}$
Degree of Ionization n_e/n_g	R_i	-	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	1
Electron Temperature	kT_e	eV	0.1~4	1~10	$10^4 \sim 10^5$
Electron Mean Free Path	λ_e	m	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	0.01~1	$10^3 \sim 10^5$
Debye Length	λ_D	m	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$
Plasma Size	L_p	m	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	0.1~1	1~10
Degree of Uniformity L_p/λ_D	R_u	-	1~10	$10^3 \sim 10^5$	$10^4 \sim 10^6$
Plasma Condition Changing Time	τ_{pc}	s	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-2} \sim 1$
Discharge Continuance Time	τ_{dis}	s	$\sim 10^{-7}$	continuous	1~continuous
Degree of Steadiness τ_{dis}/τ_{pc}	R_t	-	1~10	∞ (static)	$10^2 \sim \infty$ (static)

a) The values of gas pressure and gas particle density are those before discharge breakdown, especially for the thermonuclear fusion plasma. The values of electron mean free path for the AC-PDP plasma and process plasma are calculated supposing the collision between electrons and neutral gas particles, and that for the thermonuclear fusion plasma is calculated supposing the electron-electron collision and electron-ion collision. The plasma condition changing time is ion drift time through the plasma size for the AC-PDP plasma and process plasma, and is energy confinement time for the thermonuclear fusion plasma.
 b) See reference [11].

が必ずしも成立しない領域が多く存在すると考えるべきである。

AC-PDP プラズマのさらなる特徴は、放電持続時間 (Discharge Continuance Time) が約 10^{-7} s と短く、プラズマ状態変動時間 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ s と同程度であることである。この結果、定常度 (Degree of Steadiness) は 1 ~ 10 であり、他のプラズマの値 $10^2 \sim$ に比べ極めて小さい。定常度とは、放電持続時間 τ_{dis} とプラズマ状態変動時間 τ_{pc} の比 τ_{dis}/τ_{pc} である。即ち、AC-PDP プラズマは時間的に極めて非定常である。例えば、表示放電の持続時間は約 200 ns であり、この間に放電空間への印加電圧が約 300 V から 0 V 近傍に急減し、陰極降下部 (カソードフォール (Cathode Fall)) の成長と消滅が行われる。

即ち、AC-PDP は、極めて低電離度で非一様かつ非定常なプラズマを用いている。

4. AC-PDP 技術開発の課題と技術開発戦略

AC-PDP 技術開発の中心課題は、高輝度・高画質化、低電力化そして低価格化である。これらを総合的に解決する技術課題が、発光効率の増大である。発光効率増大により、低電力化と高輝度・高画質化を両立させることが可能となり、さらに回路コスト低減による低価格化も可能となる。

本章では、発光効率増大技術を中心に現状と開発戦略を議論する。

4.1 発光効率の定義と紫外線発生効率

AC-PDP の発光効率 (現行代表値) を、同様の原理で発光する蛍光灯と比較して Table 3 に示してある。通常、AC-PDP の発光効率 (Luminous Efficiency) η は、〔表示に用いられる可視光電力〕 / 〔放電に用いられる電力〕で定義される。発光効率の次元は、可視光電力を光束で表現すれば lm/W に、可視光電力と放電電力ともに W で表現すれば無次元になる。発光原理より、発光効率は、紫外線発生効率 (VUV Production Efficiency) η_v 、紫外線輸送効率 (VUV Transportation Efficiency) η_t 、蛍光体発光効率 (Phosphor Emission Efficiency) η_p 、可視光利用効率 (Visible Light Utilization Efficiency) η_u で表される各発光要素効率の積で表現される。現在、AC-PDP の発光要素効率に関する実測報告はなく、表中の値は文献 [13, 14] を参考にした筆者の推定値である。蛍光灯の発光要素効率は文献値 [13] である。

Table 3 より、「蛍光灯と比較して AC-PDP の発光効率を低下させている最大の要因は紫外線発生効率 η_v が低いことである」ことがわかる。AC-PDP 発光効率増大の当

Table 3 Efficiency of an AC-PDP and a fluorescent lamp (reference [9,10]).

Efficiency		AC-PDP	Fluorescent Lamp
Luminous Efficiency $\eta = \eta_v \times \eta_t \times \eta_p \times \eta_u$		2.5×10^{-3} (1.2 lm/W)	0.20 (60 lm/W)
Efficiency Elements	η_v VUV Production Efficiency	0.06	0.6
	η_t VUV Transportation Efficiency	0.40	0.9
	η_p Phosphor Emission Efficiency	0.25	0.4
	η_u Visible Light Utilization Efficiency	0.40	0.9

面の目標値は、CRT (Cathode-Ray Tube) 並の 5 lm/W である。このためには、紫外線輸送効率、蛍光体発光効率、可視光利用効率の継続的な高効率化を実行すると同時に、紫外線発生効率増大の抜本的な技術開発が不可欠である。

4.2 紫外線発生原理

AC-PDP における紫外線発生過程の概略と、それに伴う電力フローを Fig. 2 に示してある。電力フロー値は、シミュレーション結果 [14, 15] を参考にした筆者の推定値である。放電に投入した電力 (Plasma Input Power) の内約 40% が電子の運動エネルギーに投入され、この電子運動エネルギーの一部 (投入電力の 3 ~ 6%) が紫外線を発光する励起 Xe 原子 (Xe^*)、分子 (Xe_2^*) の形成に用いられる。その他の電力 (イオン運動エネルギーへの投入電力も含むと、94 ~ 97%) はすべて、放電ガスおよびセル壁の加熱に消費される。さらに、励起 Xe 原子、分子の一部が紫外線発光を行い、他は紫外線発光を行わずに基底準位に脱励起 (失活) する。

すなわち、紫外線発生効率 η_v は、

$$\eta_v \equiv W_v/W_p = \eta_{ep}\eta_{xe}\eta_{vx} \quad (1)$$

$$\eta_{ep} = W_e/W_p \quad (2)$$

$$\eta_{xe} = W_x/W_e \quad (3)$$

$$\eta_{vx} = W_v/W_x \quad (4)$$

ただし、

W_v : 単位体積プラズマからの紫外線発生電力 [Wm^{-3}],

- W_p : 単位体積プラズマへの投入電力 [Wm^{-3}],
- W_e : 単位体積プラズマ中の電子運動エネルギーへの投入電力 [Wm^{-3}],
- W_x : 単位体積プラズマ中の紫外線発光励起 Xe 原子, 分子形成への投入電力 [Wm^{-3}],
- η_{ep} : プラズマへの投入電力が電子運動エネルギーに変換される効率,
- η_{xe} : 電子運動エネルギーが紫外線発光励起 Xe 原子, 分子形成に用いられる効率,
- η_{vx} : 紫外線発光励起 Xe 原子, 分子が紫外線発光を行う効率

と表現される[16]. η_{ep} を電力投入効率 (Power-Input Efficiency), η_{xe} を励起効率 (Excitation Efficiency), η_{vx} を放射効率 (Radiation Efficiency) と呼ぶことにする. (1)式より, 紫外線発生効率 η_v の増大は, (a)電力投入効率 η_{ep} の増大, (b)励起効率 η_{xe} の増大, および (c)放射効率 η_{vx} の増大の 3 つの方法により実現できることがわかる.

Fig. 3 に, プラズマの電子運動エネルギーが紫外線発光する原子, 分子 (Xe^* , Xe_2^*) の励起エネルギーに変換される過程を示してある. 図は ($Ne+Xe$) の 2 元系放電ガスを想定して示してある. 基底状態の中性原子と加速電子との衝突により Ne, Xe のイオンおよび励起原子が生成される. この時, 紫外線発光の励起原子 (Xe^*) が生成される. これが, 直接励起過程である. シミュレーション結果 [14, 15] から推定した直接励起過程による電力投入比率の概数をアンダーラインを付した数字で図中に示してある. その後, 原子, 分子間の衝突遷移および発光遷移により, 紫外線発光の原子, 分子 (Xe^* , Xe_2^*) が生成される. これが, 間接励起過程である. 主な間接励起過程の反応経路を図中に矢印で示してある. すなわち, η_{xe} は

$$\eta_{xe} = \eta_{xed} + \eta_{xei} \quad (5)$$

- η_{xed} : 電子運動エネルギーが直接励起過程を経て紫外線発光励起 Xe 原子, 分子形成に用いられる効率 (直接励起効率 (Direct Excitation Efficiency)),
- η_{xei} : 電子運動エネルギーが間接励起過程を経て紫外線発光励起 Xe 原子, 分子形成に用いられる効率 (間接励起効率 (Indirect Excitation Efficiency))

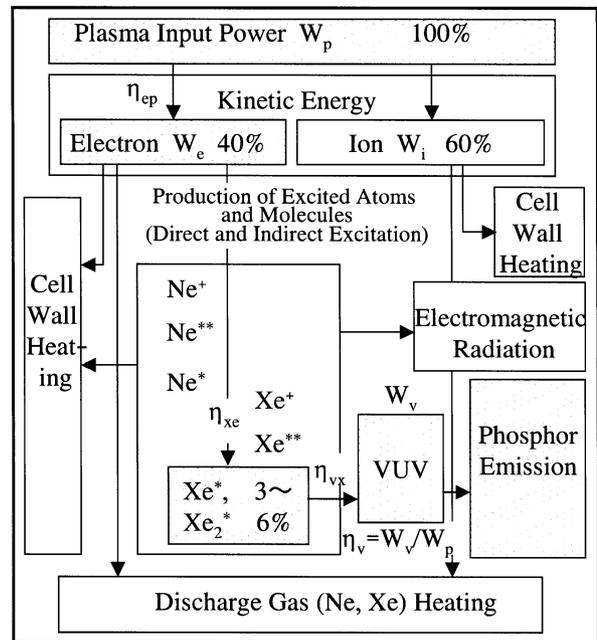


Fig. 2 VUV production process in an AC-PDP (reference [9,10]).

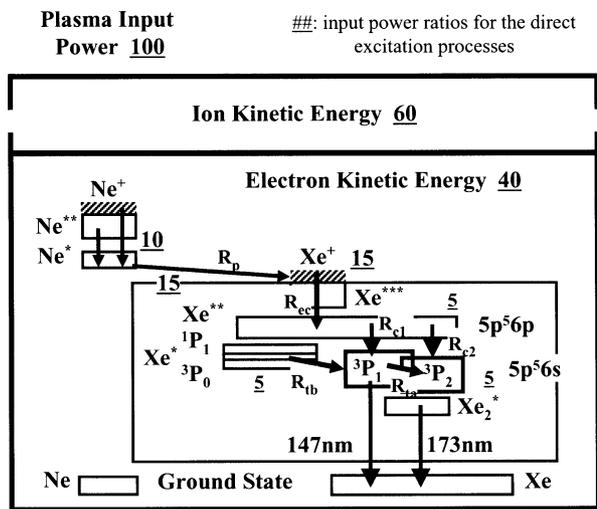


Fig. 3 Direct and indirect excitation processes for forming Xe^* and Xe_2^* (reference [9,10]). R_p : Penning reaction, R_{ec} : electron-capture reaction, R_{ta} : transformation reaction from 3P_1 to 3P_2 , R_{tb} : transformation reaction form 1P_1 or 3P_0 to 3P_1 or 3P_2 , R_{c1} : cascade reaction to 3P_1 , R_{c2} : cascade reaction to 3P_2 .

と表現される. (5)式より, (b)励起効率 η_{xe} の増大は, (b 1)直接励起効率 η_{xed} の増大, または(b 2)間接励起効率 η_{xei} の増大により実現できることがわかる.

4.3 直接励起効率増大の戦略

一様でかつ電子の運動エネルギーがマクスウェル分布をしているプラズマを仮定すると, 直接励起過程により

準位 u の励起 Xe 原子を生成する効率 η_{ud} は、

$$\eta_{ud} = \eta_{ep}\eta_{ued} \quad (6)$$

$$\eta_{ued} = \left\{ \frac{2^{3/2}\alpha_{Xe}}{(\pi m_e)^{1/2}(kT_e)^{1/2}} \varepsilon_u^2 \bar{\sigma}_u \exp[-\varepsilon_u/(kT_e)] \right\} / \left\{ \frac{2^{3/2}}{(\pi m_e)^{1/2}(kT_e)^{1/2}} \sum_{i=1}^I \alpha_i \varepsilon_{ia}^2 J_i \bar{\sigma}_{ia} \exp[-\varepsilon_{ia}/(kT_e)] + \frac{2^{7/2} m_e^{1/2} (kT_e)^{3/2}}{\pi^{1/2}} \sum_{i=1}^I \frac{\alpha_i \bar{\sigma}_{ie1}}{m_i} \right\} \quad (7)$$

η_{ud} : プラズマへの投入電力が直接励起過程を経て準位 u の Xe 励起原子形成に用いられる効率 (準位 u の直接生成効率 (Direct Production Efficiency)),

η_{ued} : 電子運動エネルギーが直接励起過程を経て準位 u の Xe 励起原子形成に用いられる効率 (準位 u の直接励起効率)

と表される [16]. (7) 式中, α_{Xe} は放電ガスにおける Xe ガス分圧比 (Xenon Partial Pressure Ratio), T_e は電子温度 (Electron Temperature), k はボルツマン定数である. 他の記号および式の意味は, 論文 [16] を参照願いたい.

(7) 式右辺において, α_{Xe} と T_e 以外は自然物理定数であり励起準位 u を定めると自動的に定まる. すなわち, 直接励起効率 η_{ued} は実質的に α_{Xe} と T_e の関数である. 準位 u として Xe^3P_1 を想定した時の直接生成効率 η_{ud} の計算結果を Fig. 4 に示してある. 計算において $\eta_{ep} = 0.4$ を仮定した. 通常のグロー放電では電子温度 kT_e は, 2 ~ 10 eV と推定される. よって, Fig. 4 より Xe^3P_1 の η_{ud} は, Xe 分圧比 α_{Xe} が増大するほど, または電子温度 kT_e が減少するほど増大することがわかる. 他の紫外線発光励起 Xe 原子, 分子の準位も同様だから, 直接励起効率 η_{ued} の増大は, (b1-1) Xe 分圧比 α_{Xe} の増大, または (b1-2) 電子温度 kT_e の減少により実現できる.

(Ne+Xe) 放電ガス中の Xe 分圧比を増大することにより AC-PDP の発光効率が Xe 分圧比に概略比例して増大することが, すなわち (b1-1) の効果が実験的に確認されている [17, 18]. また, ガス圧力を増大すること [15, 17, 18] または高周波放電 RF 放電とも言う, 周波数は数十 MHz で AC-PDP の駆動周波数約 0.1 MHz より十分大きな値) を用いること [19] により発光効率が増大することも確認されている. これは, こうすることにより電子温度 kT_e が減少したため, すなわち (b1-2) の効果によるものと考えられる. ただし, 高周波放電の場合は, 4 2節

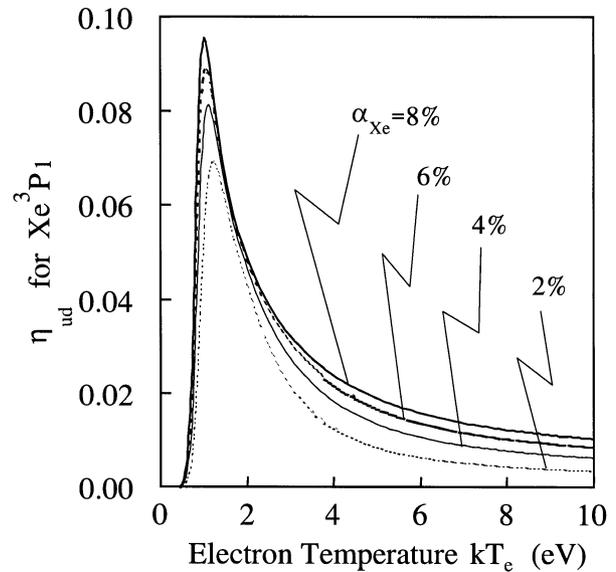


Fig. 4 Direct production efficiency η_{ud} for Xe^3P_1 (reference [9,10]).

(a) 電力投入効率 η_{ep} の増大も寄与していると考えられる. さらに最近, 維持放電電極対とアドレス電極への印加電圧波形を制御して表示放電を 2 段 (前置放電 + 主放電) に分割することにより発光効率が 30% 以上増大することが報告された [20]. これは, 2 段分割により放電空間に印加される電圧 (Discharge-Space Voltage) が実効的に低下し, 電子温度 kT_e が約 0.2 eV 減少したためである [20].

4.4 間接励起効率増大の戦略

Fig. 3 に示した (Ne+Xe) の 2 元系放電ガスを想定する. 紫外線発光に關する準位は, Xe の最低励起準位群 $Xe5p^5s$ にある Xe^3P_1 と Xe^3P_2 (励起エネルギー 8.32 eV) である. $Xe5p^5s$ にある他の準位 Xe^1P_1 (9.57 eV) と Xe^3P_0 (9.45 eV) からの発光は微弱である [21]. したがって, 間接励起効率を増大させるには, Xe^3P_1 または Xe^3P_2 へのエネルギーフローを増大させることが必要である. これを行うには基本的に下記の 3 つの方法が考えられる.

- (b2-1) $Xe5p^5s$ 準位群内での転換反応 (Fig. 3 の R_{1a} , R_{1b}) の促進: 特に準安定準位 Xe^3P_0 からの反応 (R_{1b}) が期待される.
- (b2-2) 上位励起準位群からのカスケード反応の促進: 特に直上の $Xe5p^5p$ 準位群からの反応 (R_{c1} , R_{c2}) が期待される.
- (b2-3) Xe^+ の電子捕獲反応 (R_{ec}) の促進: 各種反応中間体の生成はあるが, 実効的に

$Xe^{+}+e+A \rightarrow Xe^{*}+A$ の反応が期待される。

上記方法の実現には、主に放電ガス組成を工夫することになる。(Ne+Xe)ガスにHeを添加することにより発光効率が增大することが確認されている[21]。これは原子質量の小さいHeの添加により衝突遷移が加速され、カスケード反応(R_{c2})と転換反応(R_{ta})が促進された結果である[21]。

4.5 放電・発光シミュレーション技術の活用

AC-PDPの放電・発光過程を計算機シミュレーションでかなり良く再現できる。これは、AC-PDPを主に支配する物理現象が希ガスの気相反応であり、比較的単純なモデルで全体を記述できるからである。一般的なものは、2次元の局所場近似流体モデルを用いたシミュレータ(SIPDP)である[14,15]。Fig.5に、SIPDPを用いて発光効率のガス圧依存性を検討した結果を示してある[15]。放電ガスは(Ne+5%Xe)ガスである。実験結果とシミュレーション結果が良く一致していることがわかる。今後、実パネルでの物理現象を理解するための技術開発ツールとして放電・発光シミュレータを活用できる。さらに将来的には、設計ツールとしての活用も期待できる。

4.6 新セル・パネル構造開発と放電・発光動的過程の制御に向けて

4.2節から4.5節において紫外線発生効率の中身を分析し、その増大へ向けた戦略を検討した。それは基本的には、(a)電力投入効率 η_{ep} の増大、(b)励起効率 η_{xe} の増大、および(c)放射効率 η_{vx} の増大である。(b)は(b1)直接励起効率 η_{xed} の増大、または(b2)間接励起効率 η_{xei}

の増大、に分解され、各々がさらに(b1-1)Xe分圧比 α_{Xe} の増大、または(b1-2)電子温度 kT_e の減少と、(b2-1)Xe $5p^56s$ 準位群内での転換反応の促進、(b2-2)上位励起準位群(Xe $5p^56p$)からのカスケード反応の促進、または(b2-3)Xe $^+$ の電子捕獲反応の促進と表現される。

戦略的には、特に(b)励起効率 η_{xe} の増大が重要である。これまで既に、最適ガス探索による(b1-1)Xe分圧比 α_{Xe} の増大技術と(b2)間接励起効率 η_{xei} の増大技術が開発され、一部実用化されている[17,18,21]。今後は、(b1-2)電子温度 kT_e の減少のための技術開発に注力すべきである。4.1章でTable3を用いて「蛍光灯と比較してAC-PDPの発光効率を低下させている最大の要因は紫外線発生効率 η_v が低いことである」と述べたが、この最大原因はAC-PDP放電の電子温度 kT_e が高く、この結果として直接励起効率 η_{xed} が低いことであると考えている。AC-PDP放電の電子温度低減を行うには基本的に2つの方法、すなわち静的(Static)方法と動的(Dynamic)方法がある。

静的方法とは、放電の pd 積を増大させる方法である。 pd 積とは放電ガス圧力 p と放電長 d との積のことであり、これを大きくすることにより平均自由行程内での電子の獲得運動エネルギーが低下し電子温度が減少する。AC-PDPのガス圧力は既に1気圧近傍にあり、逆圧(パネル内部圧力が大気圧より大きくなること)によるパネル破損を防ぐためには、ガス圧力 p を現状以上に高くすることはできない。したがって、放電長 d を大きくする必要があるが、Fig.1に示した現行の面放電(Surface Discharge)型セル構造では限界がある。維持放電電極対が同一面内にあり、電極間距離を十分にとれないからである。今後は、維持放電電極対を対向配置にした対向放電(Vertical Discharge)型セル構造技術の開発と実用化が重要になる。放電長を長くすると一般的に駆動電圧(放電電圧)が上昇するため、低駆動電圧技術を並行開発する必要がある。具体的方法として、メタル隔壁(Metal Rib)を用いた対向放電型AC-PDP技術の開発が期待される[22]。

動的方法とは、AC-PDP放電の特徴を活用する方法である。第3章で述べたごとく、AC-PDP放電の特徴は、非一様、非定常性である。Fig.6に示すごとく、AC-PDP放電では陰極降下部(カソードフォール)内で電子温度、電子密度等のプラズマパラメータが空間的に急激に変化している。しかも、放電空間全体の電界分布および放電電流が100~300nsの間に急激に変化する。このように放電・発光特性が4次元的に急激に変化すること

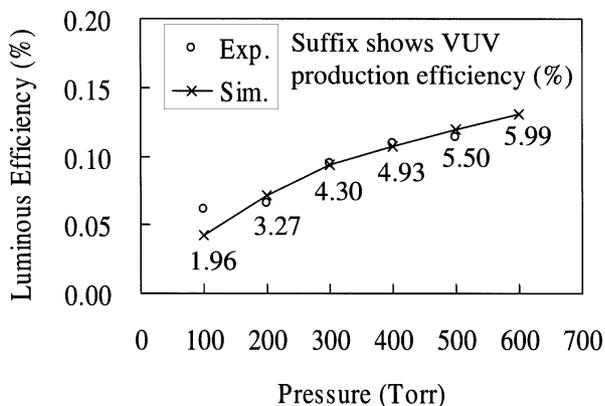


Fig. 5 Experimental and simulation results on luminous efficiency dependence on discharge gas pressure (reference [9,10]).

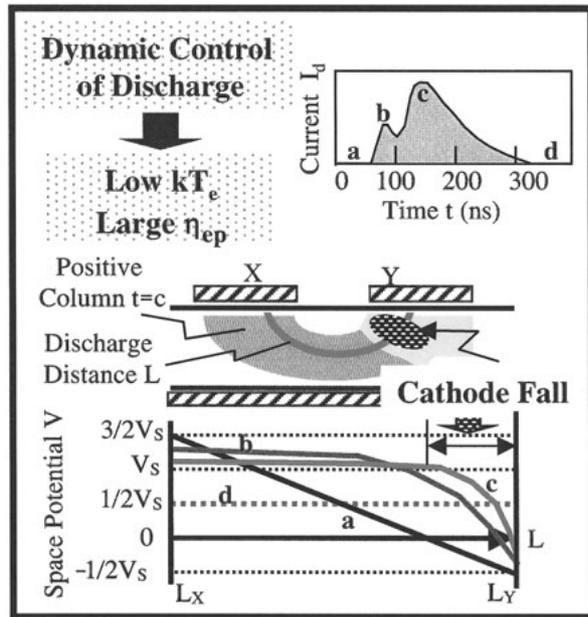


Fig. 6 Dynamic control of discharge-radiation process in an AC-PDP (reference [9,10]).

を認識した上で時間・空間平均としての低電子温度化技術の開発が可能と考える。また、当然4次元分解(空間分解 $\Delta z < 10^{-5}$ m, 時間分解 $\Delta t < 10^{-8}$ s)したプラズマ状態測定法の開発も必要である[23]。特に電子の運動エネルギー分布関数(Electron Energy Distribution Function, EEDF)と電子密度の測定が重要である。すなわち、非一様な放電・発光過程の高精度な動的制御技術および測定技術の開発が、今後ますます重要になると考える。

5. まとめ

表示装置としてのAC-PDPの特徴とAC-PDP放電の特徴を説明した。また、AC-PDPにおける紫外線発生の機構と高効率化の戦略を概観し、低駆動電圧の対向放電型AC-PDP技術の開発が期待されることと、非一様な放電・発光過程のより高精度な動的制御技術および測定技術の開発が重要であることを述べた。

近年におけるプラズマ応用技術の歴史を見ると、半導体用プラズマプロセスが反応性プラズマの学問・技術分野を形成した。今後AC-PDPが、非一様・非定常プラズマの放電・発光制御に関する新しい学問・技術分野を形成すると考える。ディスプレイ技術者と放電・プラズマ専門家の積極的な連携が期待される。

謝辞

本稿内容についてご討論いただいた九州大学の旗野嘉彦博士、東京工業大学の河内宣之博士および九州大学の村岡克紀博士に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 御子柴茂生：プラズマディスプレイ最新技術(EDリサーチ社、東京、1996)。
- [2] (a) Yoshito Tsunoda, 2001 SID International Symposium Digest of Technical Papers (2001) Volume XXXII, 3.1, p.3. (b) M. Yoshino, Proceedings of The Ninth International Display Workshops IDW '02, (2002) PDP2-1, p.677.
- [3] Y. Kanazawa, T. Ueda, S. Kuroki, K. Kariya and T. Hirose, 1999 SID International Symposium Digest of Technical Papers (1999) Volume XXX, 14.1, p.154.
- [4] 内池平樹, 御子柴茂生：プラズマディスプレイのすべて(株工業調査会、東京、1997)。
- [5] (a) H.J. Hoehn, 1977 SID International Symposium Digest of Technical Papers (1977) Volume VIII, 3.1, p.18. (b) L. Turner, 1978 SID International Symposium Digest of Technical Papers (1978) Volume IX, 7.5, p.48.
- [6] K. Yoshikawa, Y. Kanazawa, M. Wakitani, T. Shinoda and A. Ohtsuka, Japan Display '92, Proceedings of the 12th International Display Research Conference (1992) S16-2, p.605.
- [7] 篠田 傳：プラズマ・核融合学会誌 74, 109 (1998).
- [8] 篠田 傳：応用物理 68, 275 (1999).
- [9] 鈴木敬三, 植村典弘, 何 希倫, 椎木正敏：月刊ディスプレイ 7, No. 5, 48 (2001).
- [10] K. Suzuki, N. Uemura, S. Ho and M. Shiiki, 3rd International Conference on Atomic and Molecular Data and Their Applications ICAMDATA, AIP Conf. Proc. 636, 75 (2002).
- [11] 赤崎正則, 村岡克紀, 渡辺征夫, 蛸原健治：プラズマ工学の基礎(産業図書(株)東京 2001)p.210-217, 282.
- [12] 橘 邦英：プラズマ・核融合学会誌 76, 437 (2000).
- [13] H. Doyeux, Proceedings of The 2nd International Display Workshops IDW '95 (1995) Vol. 1, PDP-7, p.53.
- [14] J. Meunier, Ph. Belenguer and J.P. Boeuf, J. Appl. Phys. 78, 731 (1995).
- [15] S. Ho, M. Saji, S. Ihara, M. Shiiki, K. Suzuki, A. Yuhara, A. Yokoyama, M. Ishigaki, R. Sato, N. Kouchi and Y. Hatano, Proceedings of The Fifth International Display Workshops IDW '98 (1998) PDP1-2, p.479.
- [16] K. Suzuki, Y. Kawanami, S. Ho, N. Uemura, Y. Yajima, N. Kouchi and Y. Hatano, J. Appl. Phys. 88, 5605 (2000).
- [17] (a) T. Yoshioka, A. Miyakoshi, A. Okigawa, E. Mizobata and K. Toki, Proceedings of The Seventh International Display Workshops IDW '00 (2000) PDP1-1, p.611. (b) C. Koshio, H. Taniguchi, K. Amemiya, N. Saegusa, T. Komaki

- and Y. Sato, *Proceedings of The Eighth International Display Workshops IDW '01* (2001) PDP1-2, p.781.
- [18] (a) G. Oversluizen, S. de Zwart, S. van Heusden and T. Dekker, *Proceedings of The Seventh International Display Workshops IDW '00* (2000) PDP2-1, p. 631. (b) G. Oversluizen, S. de Zwart, T. Dekker, T. Juestel and S. van Heusden, *Proceedings of The Eighth International Display Workshops IDW '01* (2001) PDP4-3, p.833. (c) M.F. Gillies, G. Oversluizen, T. Dekker, S. van Heusden and S. de Zwart, *Proceedings of The Eighth International Display Workshops IDW '01* (2001) PDP4-4, p.837.
- [19] J. Kang, O.D. Kim, W.G. Jeon, J.W. Song, J. Park, J.R. Lim and J.P. Boeuf, *Proceedings of The Seventh International Display Workshops IDW '00* (2000) PDP2-4, p.643.
- [20] K. Yamamoto, H. Kajiyama, K. Suzuki, S. Ho and Y. Kawanami, *2002 SID International Symposium Digest of Technical Papers* (2002) Volume XXXIII, 25.4, p.856.
- [21] N. Uemura, Y. Yajima, Y. Kawanami, K. Suzuki, N. Kouchi and Y. Hatano, *Proceedings of The Seventh International Display Workshops IDW '00* (2000) PDP2-3, p.639.
- [22] 秋庭 豊, 井上良二: メタル隔壁を用いた AC型 PDP の試作評価, 信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE, EID2000-250, p.43 (2001).
- [23] Y. Noguchi, A. Matsuoka, M.D. Bowden, K. Uchino and K. Muraoka, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, 326 (2001).