カラープラズマディスプレイ

Color Plasma Displays

内池 平樹*

1. はじめに

長期間の地道な研究と開発により、面放電電極構造を持つカラープラズマディスプレイ (PDP) の輝度および発光効率が向上して、実用に耐える性能が実現した。さらに、テレビ表示のための表示品質も改善されたことにより、人類究極の夢の1つともいえる「壁掛TV」がカラー PDP によって、今実現しようとしている。したがって、カラー PDP の方式や構造を議論する段階から、多量生産における歩留りの向上や高スループットに適した新しい製造プロセスの検討に多くの関心が移ってきている。

カラー PDP の要素材料や部品に対して、新しい概念に基づいて革新的な技術の展開を試みる新しい企業の参入が激増して、従来からの製造プロセスが根本的に見直され始めている。

CRT 生産の世界の最新の生産高1億7千万本/年の25%は、韓国の三星電管が製造している。ほんの数年前には、日立、松下、東芝、三菱による CRT の生産数量が世界の大半を占めていたから変化が生じてきた。ディスプレイ産業における日本の地位の長期低落を予知しているのではと心配されている。このような状況で、日本から世界をリードする発光型ディスプレイが現れることが期待されている。1995 年初春からディスプレイ界を震撼させた「対角 40 インチのカラー PDP の量産化」のニュースがこれに応えた。

最近の各種のセミナーで、数年後には発光効率が 5 lm

/Wまで向上させることができると予想されるようになり、21 世紀のディスプレイはカラー PDP が支配することと期待されている。このような高い目標を達成するためには、相当大きなブレイクスルーが要求される。しかし、ごくまれにしか出現しないブレイクスルーを期待することだけでは、「壁掛 TV」を普及させる最終目標を達成することは困難となろう。したがって、日頃の地道な技術的課題の達成も極めて重要である。本稿では、これらについても若干触れた。

2. プラズマディスプレイの基本的特性

2.1 プラズマディスプレイの特長

PDP は LCD に比べて、次のような特長を有している。

①極めて強い非直線性：選択された放電セル以外は全く発光しないので、1 ラインあたり 1,000 個以上のセルがある場合でも、全くコントラスト比が低下しない。このため、PDP は 100:1 程度のコントラスト比を容易に実現可能である。非直線性の弱い LCD は、TFT や MIM (Metal-Insulator-Metal) アクティブ素子の助けを借りてコントラスト比を改善している。

②メモリ機能：PDP の持つメモリ機能は、パネルの表示面積、容量が大きくても輝度を低下させることなく、一定の駆動周波数で動作させることができる。高表示密度で大画面ディスプレイに最適である。

③長寿命：MgO を保護層とする単色 ac 形の寿命は 35 万時間以上、カラー PDP では 3 万時間以上の高信頼性を有している。

*Heiju Uchiike

広島大学工学部/Plasma Display Laboratory Dept. of Electronics, Hiroshima University

④高輝度・高発光効率：対角20インチカラー PDP の消費電力より TFT-LCD の消費電力の方が高くなる。対角40インチのカラー PDP の輝度および発光効率は、 $350\text{cd}/\text{m}^2$ および $1.2\text{ lm}/\text{W}$ である。多くの日本企業がカラー PDP の大量生産を目指す理由がここにある。

⑤高視野角：視野角が極めて広い。ほとんどの PDP の視野角は、おおよそ 160 度である。IPS (In-Plane Switching) などの新技術で LCD の視野角もかなり広がった。しかし、PDP と比較するとまだかなりの差があり、大画面の LCD を多人数で利用することは困難である。

⑥フルカラー化容易性：放電に伴う紫外線による蛍光体励起により、極めて良好で CRT と同等以上の R, G, B の発光が既に得られている。

画面の大きさが20型以上のディスプレイでは、直視型および投写型カラー TFT-LCD, DMD (Digital Micromirror Devices), ILA (Image Light Amplifier) の中で、カラー PDP の総合的な特性が際だっている。また、カラー PDP の生産の最終目標をインチ数千円とした製造プロセスを構築している。したがって、コストの面から比較しても、直視型カラー TFT-LCD がカラー PDP に対抗するにはかなりの困難が予想される。

投写型カラー TFT-LCD などのランプの寿命が2,000～3,000時間であるのに対して、ac 形カラー PDP の寿命がすでに 3 万時間以上を達成していることから、メンテナンスの面からみても、カラー PDP の優位性は揺るがない。

2.2 プラズマディスプレイの研究開発の歴史

ガス放電を利用したディスプレイとして最初に実用化されたものとして、1950年代に開発されたニクシー管がある¹⁾。dc 形 PDP の特性の安定化と長寿命のために、現在でも多用されている水銀を封入する方法は、パロウズ社によるニクシー管の開発研究の過程で見出された。

ニクシー管の性能を越える表示品質を持つ、ドットマトリクス方式のガス放電現象を用いたディスプレイの研究が、1950～1960年代にかけて行われた。ガス放電を利用したディスプレイでは、全ての放電セルに抵抗を付けて放電電流を制御する必要がある。しかし、全てのセルにかなりの高抵抗を付加することは、当時の製造技術では不可能であり、ドットマトリクス方式の PDP は実用化に至らなかった。

1964年、イリノイ大学の Bitzer と Slottow 両教授による ac 形 PDP により、この困難を初めて乗り越えることができた²⁾。金属電極の上部を誘電体で一様に覆うことにより、それぞれのセルに容量を付加することを可

能にした。この構造により、上述の欠点が改善された。これに加えて、メモリ機能という予想しなかった大画面表示に有効な機能をも得ることができた。

ac 形 PDP は1968年、Owens-Illinois 社によって実用化された。ac 形 PDP の発明に刺激されて、1970年、パロウズ社の Holz 博士と Ogle 氏がセルフスキャン形の PDP を発明し、実用化した³⁾。

最近の対角40インチクラスのカラー PDP 開発製造競争は、日本国内にとどまらず韓国や台湾にまで及んでいて、開発研究するエンジニアの数が世界的に枯渇している。このためか、面放電型の創始者の Dick 博士や上述の Ogle 氏などが研究開発の担当者として再登場している。大量生産ラインが構築されつつある日本では、従来からの PDP のエンジニアに加えて、TFT-LCD や LSI のエンジニアが従事するようになっている。このような状況を見ると、カラー PDP の大量生産に勝利するのはやはり日本以外にないと確信している。

PDP は、ガス放電特性を巧みに利用したものである。PDP の放電開始電圧特性に大きな影響を及ぼす因子として、タウンゼント第一係数 (α) とイン衝撃によるカソード表面からの2次電子放出利得 (γ_i) がある。 α は、ペニング混合ガス組成に大きく依存しているため、カラー PDP の応用目標に適応した最適な混合ガス組成が適用される。 γ_i が大きいほど、PDP の放電開始電圧は低くなり、 γ_i の大きなカソード材料が PDP に適している。現在使用されている MeO は、広島大学の研究によって ac 形 PDP の最適なカソード材料として見出され⁴⁾、富士通研究所によって実用化された。

誘電体の上に通常 5,000Å 程度真空蒸着される MgO は、低電圧駆動の役割に加えて、イオン衝撃によるスパッタにも極めて強い特性を有している。このため、この役割を果たす部分に保護層 (Protecting Layer) の名称が与えられている。適切な処理がなされた場合、モノクロで 35 万時間を越える長寿命の結果が得られている⁵⁾。

MgO よりさらに低電圧駆動が可能な MgO 以外の保護層材料として、CaO と SrO の混合酸化物がある⁶⁾。これまで MgO が極めて安定性がよく長寿命であるので、MgO 以外の保護層材料を実用化する動きがみられなかった。しかし、対角40インチの PDP を用いてハイビジョン表示を行うということになると、これまで用いられてきた MgO よりも低電圧駆動可能で長寿命に加えて、147nm の真空紫外線をよく透過する保護層材料を見出すことが極めて重要となってきた。

3. プラズマディスプレイの基本動作機構

PDPの電極構造に関してac形とdc形とに大別され、異なったディスプレイと見なされた時期もあった。しかし、最近ではそれぞれの基本構造がアノードとカソードから構成され、気体放電に伴う発光現象を利用する同一

のディスプレイとする見方が主流となっている。

Fig.1は、モノクロのPDPの動作を原理的に図示している。Ne+Xeのペニング混合ガスが封入されている放電空間で、カソードに接近するイオンによるオージェ中和により、カソード表面から2次電子が放出する。カソード・アノード間に印加された電界で、2次電子はタウンゼント第一係数 α に従って、アノードに到達する

Fig.1 Discharge processes model of plasma displays.

間にアバランシェ増倍し、電子およびイオン密度は指数関数的に増加し、それぞれ $10^{12} \sim 10^{13}/\text{cm}^2$ の値となり放電に至る。放電を維持する電圧は、イオン衝撃によるカソードからの2次電子放出比(γ_i)に直接的に左右され、 γ_i が大きなカソードほど低電圧で駆動することを可能にする⁷⁾。

4. カラープラズマディスプレイの開発の現状

PDPのカラー表示は、ペニング混合ガス (Ne+Xeなど)のXeから放射される147 nmの真空紫外線による蛍光体の励起発光現象 (フォトルミネッセンス)を用いる。TVを表示する最初の実用的な成果が、1993年、富士通から市販開始された21型フルカラーac形PDPである⁸⁾。現在では、富士通、NEC、パイオニア、三菱電機、松下電器産業、日立製作所が面放電電極構造の40型フルカラーac形PDPで大量生産を開始、あるいはその準備に取りかかっている。日立製作所が対角25型XGAカラーPDPを試作し、三菱電機が対角46型のSXGA、あるいはMUSE対応のハイビジョン表示用カラーPDPの試作を行っていることが注目される。

海外ではPhotonics Imaging社とThomson CSF社が対向型、Plasmaco社は面放電型の電極構造を採用してカラーPDPの製造、あるいは開発を行っている。米国のPhotonics Imaging社は36型、Plasmaco社は42型フルカラーac形PDPの開発を完了して、SID国際会議などで積極的に展示している。1996年の初頭、松下電器産業はPlasmaco社をその傘下に治めてac形PDPへの展開をも図り、ディスプレイ関係者を驚愕させた。フランスのThomson CSF社は、セルピッチ0.125mmで19型のXGA表示可能な高精細化に成功した⁹⁾。

アジア諸国では韓国のSamsung社、LG社、Hyundai社、Orion社および台湾のEiser社が大量生産の準備を進めている (Tab.1)。

Tab.1 The present development of color PDPs.

Fujitsu* NEC* Pioneer* Mitsubishi* Matsushita Electronics* Industry* Hitachi*	Photonics Imaging** Thomson CSF** Plasmaco*
	Sumsung* LG* Hyundai DAEWOO* Acer*

* : Surface-discharge electrode structure.
** : Two-substrate electrode structure.

5. カラープラズマディスプレイの今後の課題

カラーPDPの製造工程をFig.2に示した。大量生産を目指すカラーPDPの工程中で、前面板の保護層形成、背面板のバリヤリブ形成と蛍光体の塗布は、カラーPDPに特有の重要な工程である。したがって、この工程の改善、あるいは新しい形成方法の確立が、歩留りやスループットの向上に直接的に結びつくものとして、現在最も注目されている。

カラーPDPの今後の問題となる課題の理解を容易にするために、面放電電極構造を持つフルカラーac形PDPを例として説明する。そのパネル構造をFig.3に示す。対角40型の場合には、表示面側のガラス基板に維持電極対 (XおよびY)をピッチ約1.0mmで形成する。各表示電極は、ITOやネサ透明電極と抵抗を下げるための母電極 (Cr-Cu-Crや銀ペースト)とで形成される。それらの電極の上に印刷焼成により誘電体層が形成され、その上にMgO保護膜が蒸着される。一方、対向する裏側ガラス基板には書込電極と、放電空間を保ち光学的クロストークを防ぐためのストライプ状の隔壁がピッチ約0.3mmで形成されている。

隔壁の幅は約50 μm 、高さは約100 μm である。さらに、書込電極上と隔壁の側面に、RGBの蛍光体を3本で1画素を構成するように形成されている。封入ガスはNe+Xe (4%)ペニング混合ガスである。

5. 1 高輝度化と高発光効率化方式の現状と今後の課題

カラーPDPを広く実用化するための現在最も重要な課題は、高輝度化と高発光効率化である。現在主流となっている面放電電極方式のac形PDPでは、Fig.4に示したように、裏側基板の蛍光体の表面で発生した光を表面基板の透明電極から透かして見る反射型構造が採用されている。このため、蛍光体を透過してくる光を見る従来の透過型に比べて約2倍以上の輝度向上の結果が得られた。隔壁の側面全体に蛍光体を塗布することも、輝度の向上の大きな理由になっている。

結論として、面放電電極構造と反射形蛍光体塗布方式を採用することで、高輝度・高発光効率化に成功し、初めて実用性の高いカラーPDPを実現することができた。したがって、現時点で上述の面放電電極構造と反射形蛍光体塗布方法を組み合わせる以外の方式では、「壁掛TV」を実現することは不可能である。

マルチメディアに対応するワークステーション用ディスプレイとしてのカラーPDPということになると、17~20型を実現しなければならない。Thomson CSF社

Fig.2 Fabrication flow of color PDPs.

Fig.3 Standard electrode structure of ac color PDP.

Fig.4 Schematic cross-sectional view of two-substrate and surface-discharge type ac PDPs.

の試作結果は、平均輝度が50cd/m²とまだ低い。したがって、放電セルの大きさが0.1~0.15mmで高輝度・高発光効率を図るために、現在のPDPにおける要素技術、製造プロセス技術を相当改善することが必要である。

ac形PDPでは、Fig.4に示した対向電極構造と面放電電極構造のいずれかの方式によりカラー表示が行われている。比較的大きなピッチのカラーPDPでは、面放電電極構造以外に考えられないことが結論されている。しかし、高精細カラーPDPを実現する場合には、1放電セルあたりの静電容量を小さくできる可能性のある対向電極構造が再登場する可能性がある。

対向電極構造では、少なくともどちらかの電極近傍に蛍光体を塗布し、放電に伴う紫外線放射により励起発光している。しかし、交流電圧が印加されるので、蛍光体は1周期に1度は必ずスパッタリングを受け、長寿命が望めない。イオン衝撃に強いカソード材料として現在用いられているMgOは、バンドギャップが狭く147nm付近の真空紫外線を吸収する特性がある。

したがって、蛍光体をMgOで被覆保護すると、真空紫外線を吸収して輝度を低下させる原因となる。対向型電極構造を採用しているPhotonics Imaging社とThomson-CSF社は、輝度・発光効率の面からは不利であるが、長寿命を保つ目的で蛍光体をMgOで被覆する方式を用いて、カラーac形PDPの実用化を図っている。

面放電電極構造は、Fig.4に示した基本電極構造からも明らかなように、イオン衝撃を受けないガラス基板上に蛍光体を塗布し、放電に伴う紫外線放射によって蛍光体を励起発光させる方式である。

ハイビジョンおよびワークステーション用のディスプレイとしてのカラーPDPは、性能をさらに向上させる必要がある。マルチメディア時代を迎えて、17~20型でXGA表示可能なカラーPDPの実用化では、いずれの電極方式でも1放電セルあたりの蛍光体塗布面積を増加させる必要がある。この結果、蛍光体がイオンによるスパッタリングを受ける確率が高くなり、寿命を短くすると予想される。したがって、MgOに代わる147nmの真空紫外線を透過する高性能な保護層材料の必要性が要求されている。

現時点では、単一の材料でこの目的を達成する材料は見出されていない。MgF₂とMgOの複合保護層を採用することにより、蛍光体を被覆しても輝度を低下することなく長寿命を達成できる可能性が指摘されている¹⁰⁾。

現在、ac形PDPの保護層材料として用いられているMgOは、電子ビーム蒸着法によって形成されている。しかし、大面積のパネルの製造工程を簡略化し、コストを低減するために新しい薄膜形成技術の開発が試みられ

ている。In-line製造プロセスを構築する上では有利なスパッタリング法は、MgO膜の形成速度が電子ビーム蒸着法の約1/10であるため、現状では製造方法として適していない。今後、従来の概念に捕らわれない高速蒸着速度を持つ新しい薄膜形成方式の出現が期待される。

5.2 プラズマディスプレイの障壁作製

現在市販されている20型程度のPDPの障壁は、当初厚膜印刷法によって作製された。厚膜印刷の技術も進歩しているが、40型以上のカラーPDPを多量生産する場合、厚膜印刷法による障壁の作製が高スループット実現の障害となる。厚膜印刷法に代わる障壁の作製方法として、サンドブラスト法^{11),12)}やドライフィルム法¹³⁾が注目され、富士通によるカラーPDPの製造では、サンドブラスト法が用いられている¹⁴⁾。この方式はフォトレジスト加工を行うため、50μm幅の障壁まで作製可能であり、高精細化に有利である。

サンドブラスト法やドライフィルム法は、フォトリソグラフィの技法を用いて障壁を作製する上で、基本的に高精細化に有利である。しかし、サンドブラスト法、ドライフィルム法のいずれもフォトリソプロセス後に障壁を形成するためには、最低さらに1回のプロセスが必要である。また、サンドブラスト法は、カラーPDP製造歩留りを低下させる原因となる。絶縁体材料自体が感光性であれば、一度のフォトリソプロセスで障壁を形成することが可能となり、障壁製造方式に新しい時代が出現する。今後この技術の発展が期待されている¹⁵⁾。

カラーPDPを本格的に多量生産する時期にさしかかり、障壁を印刷技術法で製造する方式を改善するため、サンドブラスト法、ドライフィルム法、感光性絶縁体を用いる方式などの実用化の可能性について検討が進んでいる。これらの新しい方式のどれが最適なのか、あるいはさらに新しい障壁作製に有効な方式が現れるのか、この1~2年でその解答が現れよう。

5.3 プラズマディスプレイの電極材料

ac形PDPの金属電極材料には、Cr-Cu-Crが用いられてきた。現在では、銀ペーストなどコスト低減のための多くの試行がなされている。反射形蛍光体塗布法の採用により、前面のガラス基板に形成される対の表示電極を透明にする必要がある。透明維持電極として、ITO以外にネサ膜でも形成されている。大型のガラス基板に透明電極をパターンニングする専門メーカーも最近では現れた。

5.4 プラズマディスプレイ用蛍光体および基板ガラス

PDPのカラー化は、蛍光ランプと同様な真空紫外線

によるフォトルミネッセンス現象を利用している。これまで、CRT 用 R, G, B の蛍光体を改良する方向で開発が進められてきた。R 用として $(Y, Gd)BO_3 : Eu^{3+}$, G 用として $Zn_2SiO_4 : Mn$, B 用として $BaMgAl_{14}O_{23} : Eu^{2+}$ の蛍光体が使用されてきた。しかし、G 用の蛍光体は、残光時間がかなり長いので、最近では $BaAl_{12}O_{19} : Mn$ が使用されている。

輝度 350 cd/m^2 が実現した現在、蛍光体による数%の輝度向上でも、輝度の絶対値として $20 \sim 30 \text{ cd/m}^2$ 程度の改善が期待でき、カラー PDP の全体の性能を向上させるのに極めて重要な因子になってきた。CRT の性能改善がたどってきた道を、カラー PDP もたどれる可能性が出てきた。したがって、カラー PDP 用蛍光体を本格的に改善する動きが出てくるのが極めて重要である。

PDP の大型化の生産に伴って最も重要な問題の 1 つに、基板ガラスがある。PDP の製造プロセスの中、連続焼成炉で焼成するプロセスがある。現在、PDP の基板として用いられているガラスは、窓ガラス用と基本的に同じであるので、連続焼成炉を出てきたガラス基板は先頭部分が広がった扇形になり、精度良く形成した障壁などが変形、破壊するケースもあり、PDP 製造の歩留りを低下させる原因となる。このため、旭硝子から連続焼成炉を用いても変形が小さい高歪み点を持つ基板用ガ

ラス PD-200 が市販されている。

最近では、コーニングジャパンや他のガラスメーカーからも高歪み点を持つ PDP 基板用ガラスの製造が計画され、この方式でもカラー PDP 関連事業が活発化しようとしている。

6. おわりに

TV 表示あるいはマルチメディア用ディスプレイとして、とくに大画面表示で際立った特性を有するカラー PDP に対する最近の関心は、異常なほどまでに高まっている。フィールド内時分割法を用いるカラー PDP の階調表示に特有に発生する疑似輪郭が、TV 表示としての実用化を阻害するのではと危惧されてきた。

しかし、最近この方面での技術発展によりほとんど問題ない程度まで改善され、カラー PDP の TV 表示実用化の将来が極めて明るくなってきた。この結果、対角 1 m 程度のカラーディスプレイの分野で、他のディスプレイに対してカラー PDP の持つ総合的な特性の絶対的な優位は揺るぎないものとなっている。

大型カラー PDP の今後の進展が期待されている。その予測の一例を Fig. 5 に示した。この図に示された予測を実現するために、カラー PDP の基本構造および特性、

Fig. 5 Prospect for production of large color PDPs.

構成要素材料およびその製作技術の一層の向上が期待される。

参考文献

- 1) McLoughlin N., Reaney D., Turner A.W.: "The DIGITRON: A Cold-Cathode Character Display Tube", Electron. Eng., 32, pp. 140~143 (1960).
- 2) Bitzer D.L., Slottow H.G.: "The Plasma Display Panel-A Digitally Addressable Display with Inherent Memory", AFIPS Conf. Proc., 29, p. 541 (1972).
- 3) Holz G.E.: "The Primed Gas Discharge Cell-A Cost and Capability Improvement for Gas Discharge Matrix Displays", SID, 13, pp. 2~5 (1972).
- 4) Uchiike H., Nakayama N., Ohsawa M.: "Secondary Electron emission Characteristics of Dielectric Materials in Plasma Display Panel", 1973 Int. Electron Devices Mtg. (IEDM) Tech. Digest, pp. 191~194, Washington D. C. (Dec. 1973).
- 5) Pleshko P.: "AC Plasma Display Aging Model and Lifetime Calculations", Proc. SID 22, pp. 228~232 (1981).
- 6) Uchiike H., Hashimoto T., Shinoda T. and Fukushima Y.: "Optimum Composition of Dielectric Materials, (Ca, Sr) Oxides, in AC-Operated Plasma Display Panels", 1978 Int. Electron Devices Mtg. (IEDM) Tech. Digest, pp. 279~281, Washington D. C. (Dec. 1978).
- 7) 内池平樹: "プラズマディスプレイ", 小林駿介編著, 電子ディスプレイ, pp. 50~51, 電子情報通信学会, 1993.
- 8) 篠田 伝, 吉川和生, 金沢義一, 鈴木正人: "AC型PDPの高階調化の基礎検討", 信学技報, EID91-97, pp. 13~18, 1992.
- 9) Foyeux H., Deschamps j.: "A High Resolution 19-in,

1024×768, Color ac PDP," SID'95 Digest, pp. 811~814, 1995.

- 10) Sasaki T., Harano Y., Kawai Y., Kamiya M., Uchiike H.: "Improvement of Luminance Efficiency in Barrier-Electrode Color ac Plasma Displays by Using a Double Protecting Layer", SID'96 Digest, pp. 283~286, 1996.
- 11) Terao Y., Masuda R., Koiwa I., Higemoto N., Sawai H., Kanamori T.: "Fabrication of Fine Barrier Ribs for Color Plasma Display Panels by Sandblasting", SID'92 Digest, pp. 724~727, 1992.
- 12) Fujii H., Tanabe H., Ishiga H., Harayama M., Oka M.: "A Sand-blasting Process for Fabrication of Color PDP Phosphor Screens", SID'92 Digest, pp. 728~731, 1992.
- 13) 有本浩延, 永野眞一郎, 上崎勝人, 吉川皖造: "大画面, 高精細プラズマディスプレイ製造技術", 信学技報, EID 93-123, pp. 67~72, 1994.
- 14) Hirose T., Kariya K., Wakitani M., Otsuka A., Shinoda T.: "Performance Features of a 42-in.-Diagonal Color Plasma Display", SID'96 Digest, pp. 279~282, 1996.
- 15) 加藤俊宏, 河合貴志, 村上 宏, 宗本英治, 大友省三, 田中一成: 感光性絶縁材のPDP障壁への応用", 1994年TV学会年次大会, pp. 45~46, 1994.

【執筆者紹介】

内池平樹 (うちいけ へいじゅ)

1969年3月, 東北大学・大学院博士課程電子工学専攻修了(工学博士)。同年4月, 広島大学工学部講師。1975年7月, 広島大学工学部助教授。1978~79年, イリノイ大学客員準教授。1989年, ジャパンディスプレイ'89プログラム委員長。1993~96年, SID日本支部長。1997年, 電子情報通信学会電子ディスプレイ研究専門委員長。1996年, SID副会長。