可変色放電のディスプレイ装置への応用

専門会員 青野 正明* 黒河 久悦*
 専門会員 竜子 雅俊** 藤野 達士**
 専門会員 板谷 良平***久保 寔***

1. は じ め に

情報伝達手段としてのディスプレイ装置には、正確に表示できることと見落とされることが必須の条件である。従来、交通案内標識等の表示は、ランプの点滅によって行なっている。情報を多色で表示すれば、見落とし防止と同時に、装置の故障の発見にも効果があり、標識の信頼性を高めることができる。

広告や宣伝用のいわゆる“ネオンサイン”によるカラー表示は、美しさと楽しさを与え、見る者に印象強く訴えることができる。しかし、現在、実用になっているランプの発光色は、一色に限定されているため、カラー表示するには異色のランプを並置して選択点灯しなければならない。この方法は、色を変えると発光位置がずれて不自然さが目立し、連続的に色を変えることができない。

光源の発光色は、電子のエネルギー分布を制御してやれば変えることができる。電子のエネルギー分布は、混合気体のパルス放電においては比較的容易に制御できる。

筆者らは、光源の発光色の制御を目的とするパルス放電—これを「可変色放電」と呼んでいる—の研究を進めている。

本稿では、可変色放電に関して今までに報告したもの等^{1)~6)}をまとめて、以下にその原理と発光色の制御範囲およびディスプレイ装置への応用を説明する。

2. 放電発光と電子エネルギーの制御法

気体放電の発光色は、封入気体原子固有の色を示し、同じ放電管でも陰極部分（負グロー）と陽極部分（陽光柱）とで発光色が異なる。このように負グローと陽光柱で異色の発光を示すのは、電子のエネルギー分布が放電空間内の位置によって異なるためである。負グローにおいては電子のエネルギーが大きく、高い準位からのスペクトルが放射するが、陽光柱においては電子のエネルギーが小さく、低

い準位からのスペクトルのみしか放射しない。

陰極直前（負グロー部）の高電界は放電を維持するうえに不可欠であるから、負グロー部の電子のエネルギーを小さくすることはできない。しかし、陽光柱は荷電粒子の導電体としての役割を果たしているに過ぎないから、電子のエネルギーを定常放電時より高くしても、放電維持の点からは何ら支障を来たさない。そこで、陽光柱部分は、電子のエネルギー分布を変えて発光色を制御することが可能である。

電子のエネルギー分布は放電管へのエネルギーの注入方法によって変わる。エネルギーの注入方法には電気、光および放射線などがあるが、制御が容易で高速度の切り替えが可能なものは、電気、または、電気と光の併用である。しかし、光の吸収断面積は共鳴線以外は極めて小さく、効率が悪いので光の利用は実用的でない。よって、ここでは電氣的なエネルギーの注入法に関してのみ説明する。

(1) 電 流 変 化 法

気体放電においては、放電電流の増加は主として電子密度の増加をもたらし、電子エネルギーの増加とは直接つながらない。それゆえ、明るさを変えることはできるが、発光色を変えることはできない。

(2) 周 波 数 変 化 法

周波数を変えると放射スペクトルの強度が変化する⁷⁾⁸⁾。このことは次のように説明できる。いま、電子の衝突周波数を ν 、電界の角周波数を ω 、電子の電荷を e 、電子の質量を m_e 、電界強度を E とすると、電界による電子の運動から、電子のエネルギーは

$$Ue = \frac{e^2 E^2}{2 m_e \nu^2} \left\{ 1 + \left(\frac{\omega}{\nu} \right)^2 \right\}^{-1} \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。 $\omega/\nu > 1$ になると、 ω を高くすると Ue が低下し、高準位からの放射が弱くなり発光色が変わる。

(3) パ ル ス 法

放電電流密度 j は次式で与えられる。

$$j = en_e v_e \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 n_e は電子の密度、 v_e は電子のドリフト速度である。電子は、衝突電離によって生成され、拡散によって失われるから、 n_e の時間的変化は

+ Principles and Applications to the Display Apparatus of Multi-Colored Discharge

*愛媛大学工学部電気工学科 Masaharu Aono, Hisayoshi Kurokawa

**明石工業高等専門学校 Masatoshi Ryoko, Tastsushi Hujino

***京都大学工学部電子工学科 Ryouhei Itatani, Makoto Kubo

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = n_e \sum K_{ki} n_k + D_a \nabla^2 n_e \dots (3)$$

と表わせる。ここに、 K_{ki} は k 準位原子の電子衝突電離速度係数、 n_k は k 準位原子の密度、 D_a は電子の両極性拡散係数である。

電子の生成と拡散の緩和時間をそれぞれ τ_i 、 τ_D と表わすと、式(3)は

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{n_e}{\tau_i} - \frac{n_e}{\tau_D} \dots (4)$$

となる。

よって、 n_e の増減には必ずおくれを伴うことになる。したがって、立ち上がりの十分に速い電流パルスで放電管に加えると、衝突電離による電子の増加が間に合わず、電子の移動速度の増加が余儀なくされる。その結果、電子のエネルギーが増加して高準位からの発光が得られる。

(4) 荷電粒子供給法

放電空間内には通電に必要な荷電粒子、とくに中和に必要なイオンは衝突電離によって作られる。空間にはそれに必要なだけの電界が形成されている。荷電粒子を放電空間内に供給するか、または管壁への損失を減らせば電子のエネルギーは低下する。逆に、供給を減少するか、または損失を増加すれば、これを補給するために電子のエネルギーは上昇する。

荷電粒子を供給する手段としては、補助的な熱陰極や光電陰極の設置、あるいは光電離、高周波電界の重畳などがある。損失を減らすには縦磁界を用いればよく、損失を増加させるには補助電極による荷電粒子の吸収や、横磁界の印加などの方法がある。これら各種の方法のうち応答速度の速いものは光または高周波を用いるものである。磁界を用いる方法は応答速度が遅いことと、所要の設備とエネルギーが大きくなるため放電灯への応用には向かない。

以上(1)~(4)の方法のうち放電灯に補助的な装置を必要とせず、容易に電氣的に電子のエネルギー分布を制御できるものは(2)と(3)である。そのうち(2)の周波数変化法は、(3)のパルス法においてパルスの繰り返し周波数を変えることにより達成できるから、パルス法に含めることができる。したがって、放電中の電子のエネルギーを迅速に変化させて発光色を制御するにはパルス放電が適している。

図1 パルス放電における電子温度と電界強度⁷⁾

3. パルス放電による変色法

アルゴンと水銀を封入した放電管(蛍光灯に相当)を、0.42Aで直流放電させているときに0.73Aの矩形波変調電流を重畳するときの電界強度と電子温度の時間的変化を図1⁹⁾に示す。電界強度は、矩形パルスを印加した直後に定常放電時の約3倍に増加し、電子温度は、11,500Kから19,600Kまで約1.8倍に急上昇する。このことから、パルスごとに、直流放電におけるより高い電子温度が得られることがわかる。この過渡的な非平衡プラズマ期間では高準位からの発光が生じ、定常状態に落ち着いた平衡プラズマでは低準位からの発光のみとなる。

この現象を変色に利用する方法には、次の二通りが考えられる。一つは非平衡期間の高準位からの発光量と平衡期間の低準位からの発光量の割合を変える方法であり、他の一つは非平衡期間の電子温度を変える方法である。

前者はパルス幅を変えることによって、後者は印加電圧を変えるかパルスの繰り返し周波数を変えることによって達成できる。それぞれをパルス幅変化法、電圧変化法、周波数変化法と呼ぶことにする。周波数変化法では、前パルスからのイオンや準安定原子の存在が電子のエネルギーを低下させる。これらは、パルス幅変化法や電圧変化法においても、非平衡期間の電子温度に影響を及ぼす。

以上の基本的な3変色法以外にも、電流の立ち上がり時間によって非平衡の程度を変える方法と、直流電流によってパルス印加直前のイオン量を制御する方法がある。

前者を電流波形変化法、後者を直流電流重畳法と呼ぶ。

以上の変色法をまとめると図2のようになる。

図2 各種変色法

輝度を高くするとき、電圧変化法と電流波形変化法とでは高準位の発光量が増し、パルス幅変化法と周波数変化法および直流電流重畳法では低準位の発光量が増す。

それゆえに、それぞれの変色法を単独で使用すると、発光色とともに、明るさも変化してしまうが、上記2グループの方法を組み合わせることにより、明るさを一定に保ちながら発光色を変えることができる。

4. 試作放電管

4.1 構造

供試放電管は、内径 28 mm、電極間距離 15 cm のパイレックスガラス製である。電極は、グロー放電には平行平板電極を、アーク放電にはパルス放電用陰極¹⁰⁾を使用した。この放電管を 10 Ω の安定抵抗を介して電源に接続した。

4.2 封入気体

電子のエネルギー分布を変えて気体原子を選択励起させるには、励起電圧の差が大きいほど制御が容易である。励起電圧の差が大きく、放電しやすい気体の組み合わせは水銀と希ガスである。水銀と希ガスの電離電圧と主な励起電

表 1 希ガスと水銀の電離電圧・準安定・共鳴電圧

	電離電圧 (eV)	共鳴電圧 (eV)	準安定電圧 (eV)	
He	24.59	21.2	19.82,	20.61
Ne	21.56	16.54	16.62,	16.72
Ar	15.76	11.61	11.53,	11.72
Kr	14.00	9.98	9.82,	10.51
Hg	10.43	4.89	4.66,	5.43

圧を表 1 に示す。ヘリウムとネオンの励起電圧は水銀との差が約 10 eV 以上あるが、アルゴンとクリプトンでは水銀との差が小さい。

可視領域における、水銀のスペクトルは紫色 (400 nm) から黄橙色 (580 nm) までの波長範囲にあり、ネオンのスペクトルは橙色から赤色の範囲 (585 nm 以上) にあって両者に重なりがなく、色差が大きい。このことは、2種類の気体の発光強度の割合を変えて発光色を制御するとき、変色範囲が広くとれることを意味する。

ネオン以外の希ガスの放射スペクトルの波長範囲は、いずれも水銀スペクトルの波長範囲と重なる部分がある。ま

図 3 水銀とネオンのエネルギー準位の概略

た、発光強度は水銀に比べて弱い。

以上の結果から、可変色放電には、水銀とネオンの組み合わせが最適なことが明らかになる。

水銀とネオンのエネルギー準位の概略を図 3 に示す。ネオンの励起準位は 18 eV 付近に集中しており、水銀の励起準位は 8~9 eV にある。

5. グロー放電における変色範囲と輝度

パルス放電による陽光柱の発光色を CIE 色度図によって図 4 に示す。図中の Hg と Ne の点は、水銀とネオンのスペクトルを分離して求めた水銀とネオンの発光色であり、座標は、それぞれ $(x_{Hg}, y_{Hg}) = (0.217, 0.198)$ と $(x_{Ne}, y_{Ne}) = (0.705, 0.295)$ である。これらの点は、印加電圧が 500 V 以上では、パルス幅、繰り返し周波数および印加電圧のいずれを変えてもほとんど影響を受けない定点となる。3. において説明した変色法によって、水銀とネオンの発光量の割合を変えるとときの発光色は、これら 2 定点を結ぶ線分を、両者の強度の逆比で内分した点で与えられる。繰り返し周波数と電圧とを一定に保って、パルス幅のみを変えるとときの発光色を、図 4 に × 印で示してある。パルス幅を 80 μs 以上に広くすると水銀のみの青白色に発光させることができるが、印加電圧を 1,000 V とし、パルス幅を 5 μs まで狭くしても、発光色はネオンの赤色より純度が落ちる。これはネオンが発光しているときは必ず水銀も発光して、ネオンのみを発光させることができないためである。

図 4 矩形波パルスによる変色範囲

色度図の y 座標はほとんど変化しないので、x 座標と輝度 B との関係を示す図 5 のようになる。ただし、繰り返し周波数が 50 Hz の場合である。この図から、希望する発光色と輝度を得るために設定すべき電圧とパルス幅を、直ちに読み取ることができる。

純度の高い赤色を得ようとしてパルス幅を狭くし過ぎると、十分な輝度が得られなくなるから、グロー放電における実用的な変色範囲は x 座標で 0.22 から 0.55 程度までであ

図 5 発光色と輝度との関係 (グロー放電)

る。

周知数を高くすると輝度は上昇して、印加電圧が 800 V、パルス幅が $10\mu\text{s}$ 、周波数が 400 Hz のときには 360 nt に達する。しかし、赤色は得にくくなる。

6. アーク放電における変色法

6.1 矩形波パルスによる変色

アーク放電では、放電回路の安定抵抗を減らすと放電電流が増加し、輝度を高めることができる。安定抵抗を 1Ω まで下げると、放電電流のピーク値は 135 A となり、輝度は 3,800 nt に達する。また、管壁に緑色蛍光体を塗布した放電管を放電電流 2.5 A で直流放電させると、23,000 nt の高輝度を得ることができる。

次に、安定抵抗を 10Ω として、印加電圧と繰り返し周波数を一定に保って、パルス幅を変えときのアーク放電の発光色を図 4 に $\triangle$ 印で示す。アーク放電では、パルス幅を $3\mu\text{s}$ まで狭くするとほとんどネオンの赤色に近い発光色を得ることができるが、逆に $80\mu\text{s}$ まで広くしても赤白色までしか変わらず、青色光を得ることができない。

繰り返し周波数を変えときの輝度と x 座標の関係を図

図 6 発光色と輝度との関係 (アーク放電)

6 に示す。印加電圧が 600 V のとき、繰り返し周波数を 50 Hz から 1,200 Hz まで上昇すると、発光色は赤色から青色まで広範囲に変色する。しかし、このとき、輝度は 140 nt から 1,640 nt まで約 12 倍に増加する。つまり、矩形波の周波数変化法では、変色範囲を広くとれるが輝度が大幅に変動してしまう。したがって、アーク放電の変色法には矩形波パルスは有効でない。

6.2 合成波パルスによる変色

アーク放電では、一定輝度のもとで発光色を制御するには、アーク移行直後のネオンの強い赤色発光を抑制することが必要である。

図 7 合成波パルスによる変色範囲

電流波形を矩形と三角形の合成波として、繰り返し周波数を 50 Hz でパルス放電させるときの発光色を図 7 に示す。ただし、矩形波の幅は $7\mu\text{s}$ であり、三角波の幅と高さは、それぞれ $180\mu\text{s}$ と 0.46 A である。(a) は、矩形波電流が 2 A と大きいとき、(b) は、矩形波の電流を (a) の約 $1/4$ にしたとき、(c) は、三角波のみとした場合である。

このように矩形と三角の合成波を使用して、三角波は変えないで矩形波の大きさのみを変えることによって、広い範囲にわたって変色させることができる。(a)、(b)、(c) の各点における輝度はそれぞれ 180 nt, 93 nt, 163 nt である。

幅の狭い複数個の矩形波で合成した階段波で放電させるときも、各段の高さを変えることによって、矩形と三角の合成波の場合と同様に、輝度を一定に保って、ネオンの発光が強い赤色から、水銀のみの青色まで広範囲に変色させることができる。

6.3 可変色放電のドット型表示管への応用

時事刻々の情報を素早く、かつ、正確に伝達するには、任意の文字や記号を画像表示できることが望ましく、そのためにはディスプレイ装置の画素は“ドット”であることが必要である。

管軸方向のエンドライトを利用する放電管を図 8 に示す。“ドット”の径を小さくするためと、輝度を向上させるため放電管の直径を 2 cm と細くしてある。

図8 エンドライト用放電管

陰極にはスパッタ粒子が付着したガラス面を水銀が濡らしている箇所が必要である¹⁰⁾ため、陰極は、導入線の先端に直径約2mmのスプリング状のニッケル線を巻き付け、その内側(陽極側)に直径約4mmのガラス玉を取り付けた構造にしてある。放電管の封着部からガラス玉までの導入線には細いガラス管を被せて、放電空間とは絶縁してある。このようにすると、陰極点はスプリング側のガラス玉表面に発生して前面(陽極側)からは見えない。

陽極は、直径18mm、幅5mmのニッケル製のリングで、陰極から7cmの位置に配置してある。陽極への導入線にもガラスを溶着して絶縁してある。

この放電管を全体のパルス幅が250 μ sの矩形と三角の合成波を用い、100Hzで放電されるときの変色範囲は、サイドライトによって得られる図7と同程度であり、このときの中心部の輝度は1,670nt、周辺部の輝度は1,220ntである。また、放電管への平均入力は4.2Wである。

7. 三原色放電

電流波形変化法では、電流の立ち上がりを変えることによってネオンの赤色から水銀の青色まで変色させることができる。放電管に緑色の蛍光体を塗布して、その発光を水銀とネオンの発光から独立して制御すると、三原色光源が可能である。

図9 三原色放電用パルス波形

図9の(a)のように立ち上がりが速い三角波によって赤色に、(b)のように立ち上がりが緩やかな三角波によって青色に発光させる。赤色と青色に発光させるときの繰り返し周波数は100Hz程度である。次に、(c)のように約20kHzの矩形波でパルス放電させると、水銀の紫外線が強く放射して蛍光体が緑色に発光する。

図10 三原色放電の変色範囲

これらの波形を組み合わせるときの変色は、水銀とネオンの加法混色による直線変化に対して、図10の三角形内の面変化になる。すなわち、フルカラー化を実現することができる。さらに、蛍光体の色を変えると、蛍光体と気体の任意の2色間で変色させることもできる。例えば、図10の緑色(□印)と赤色(△印)間、あるいは、赤色(△印)と青色(▽)間で連続的に変色させることができる。この方法は、2色ネオンサインに応用できる。

三原色放電の輝度は1,000ntを超えていて、充分実用に供することができる。

8. 三原色プラズマ・ディスプレイパネル

三原色放電を利用した5 $\times$ 7と12 $\times$ 12のマトリクス型プラズマ・ディスプレイパネルを試作し実験した結果を説明する。

8.1 構造

試作したディスプレイパネルの構造を図11に示す。厚さ10mmのセラミックガラス(マコール)板をくり抜いてスペーサ兼真空壁とし、互いに直交する陽極と陰極のマトリクス電極を埋め込む。両極の交差する箇所に穴を開けてセルとする。各放電セルは直径6mm、奥行き12mm程度の円筒形となっている。

可変色放電で発光色を変えることができるのは陽光柱であり、負グローは常に赤色のままであるから、電極は、両極ともに厚さ2mm、幅7mmのニッケルで手前に陽極、

図11 パネル構造(断面)

奥に陰極を配置し、陽極が見えるように陽極にはセル径と同じ 6 mm の穴を開け、陰極にも同径の穴を開け、その周囲に負グローが形成されるようにしてある。負グローの厚さはネオンの封入圧によって異なるが、今回の試作パネル (32 Torr) では 0.3 mm 程度である。この負グローが見えないように陰極直前のセル径を狭めて 2.5 mm とし、半径にして 1.7 mm の差をとってある。

陽極側 (前面) は透明ガラス板で覆うが、このガラス板の内面には緑色蛍光体を薄く印刷してある。最近開発中の放電ディスプレイ・パネルでは各セルの側壁に 3 色の蛍光体を塗り分けているのに比べるとこの工程は極めて容易である。赤色と青色の発光時は紫色線が弱いのでこの蛍光体はほとんど光らず、セル中の可視光は蛍光体を透過して外に出る。一方、緑色発光時には紫外線が強いので、この蛍光体が発光してセルは緑色に見えるのである。

8.2 点 灯 回 路

点灯回路は、(1)波形発生回路、(2)制御中枢回路、(3)パネル駆動回路の 3 つの部分で構成されている。

波形発生回路は、三原色に対して、 $\neg$ 形パルス (赤色発光用)、 $\neg$ 形パルス (青色発光用)、 $\square$ 形パルス (緑色発光用) の 3 種類のパルスを発生する。

制御中枢回路は、パネルに画像を表示させる制御部分で、ワンチップマイコンを中心にメモリー等の論理 IC で構成してある。このワンチップマイコンには文字、記号、図形の形成、発光色の指定はもちろん、電極の浮遊電荷放出のタイミングなど、回路の複雑な動作指令もすべて行なわせる。

図 12 点灯回路最終段

駆動回路の最終段の概要を図 12 に示す。各電極と直流電源との間にトランジスタ (TAn) を入れ、この TAn で行掃引を行なう。ダイオード Dn は陽極どうしで放電することを防ぐためのものである。TA 遮断時には陽極電位が不定となって画素選択が不確実になるので、トランジスタ TD によって浮遊電荷を放出させる。この電荷放出は各行掃引の間の 10 μ s 程度の時間を利用して行なう。この信号はマイコンから出される。各陰極はトランジスタ TKn を通じて接地され、この TK で各画素の赤・青・緑・暗 (不点灯) を選択する。

輝度は TK のベース電流で調整するが、行間に不ぞろいがある時には TA のベース電流を利用することもある。

8.3 点 灯 結 果

放電開始電圧は約 360 V であるが、可変色放電として動作させるために必要な最低電源電圧はおおよそ 440 V である。

行掃引する際の各行 (画素) 当たりの点灯周波数は 65 Hz 付近が、緑色点灯用の高周波パルスの周波数は 30 KHz (duty factor 1: 1) 付近がそれぞれ適当である。

輝度は放電電流によって変えられるが、大きくし過ぎると緑色の発光色が悪く (白っぽく) なる傾向があり、その制約により、最大で数百 nt であった。

得られた変色の範囲は図 10 と同程度であった。

青と緑の色差がやや不十分であることが、このパネルの問題点として、今後、改善の余地がある。

9. む す び

放電発光色を制御し得る可変色放電の原理と応用を説明した。この変色方式を利用した一灯多色光源によって、従来の光源では不可能であった光と色の演出が期待できる。

今後、さらに輝度の向上、変色範囲の拡大、点灯回路の簡略化を図り、広く活用できるものに改良して行く所存である。

参 考 文 献

(1) 板谷良平、久保 寛：放電光色の制御、電気学会プラズマ研究会資料 EP-73-2 (昭48)

(2) 板谷良平：総説「低圧放電の発光現象」、電気学会光応用・視覚研究会資料 LAS-82-47 (昭57)

(3) 青野、久保、板谷：放電灯の光色の電子制御法に関する実験、照学誌 60 (昭51) 529

(4) 青野、久保、板谷：アーク放電における発光色制御法について、照学誌 64 (昭51) 205

(5) 竜子、藤野、佐藤、久保、板谷：蛍光体を用いた Hg-Ne 放電管の三原色発光、電気学会光応用・視覚研究会資料 LAV-82-53 (昭57)

(6) 竜子、藤野、紀本、久保、板谷：可変色放電のネオンサインへの応用、テレビ学会技術報告 10 (昭51) 33

(7) 浅見、片山：超高周波放電の分光学的研究、電気学会論文集 2 (昭16) 238

(8) Polman J., van der Werf, J. E., Drop, P. C. : The Dynamic Characteristics of a Low Pressure Discharge, Appl. Phys. 5 (1972) 266

(9) Barnes, B. T. : The Dynamic Characteristics of a Low Pressure Discharge, Physical Review 86 (1952) 352

(10) 青野、久保、板谷：水銀陰極の改良に関する研究、照学誌 67 (昭58) 68

(受付 1987 年 9 月 21 日)