5. 走査に関連した最近の話題

5-1 新しく見出された物性を利用した走査

日本電気株式会社 中央研究所 安 藤 隆 男

1. ま え が き

最近の電子装置の小形化の要求、またテレビ電話、ファクシミリ等の画像通信サービスに対する経済性、高頻化の要求、さらにパターン認識など情報処理の分野での画像変換の必要性などの高まりから、より適切な画像走査の問題が話題を集めている。現在、画像走査の手段としては、電子ビームを偏向することが主として実用に使われているが、電子ビームは真空中でしか使用できないこと、高電圧を必要とすること、電子銃のため平面構造のデバイスを作りがたく、小形化には本質的に不利であることなどの欠点がある。

平面構造の撮像デバイスには、すでに電子ビーム以外の走査手段が一部実用化されている。この場合、走査は主に IC 化された回路素子の組合せ、もしくは IC 技術を用いてシフトレジスタ等の走査機能を有する電子回路を同一の半導体上に集積化したものによって回路的に行なわれている。したがって、集積を行わずにそれぞれの能動素子などの構成部品を、いわば古典的に結線したとしても、その動作は体質的に可能なものであった。しかし、この方式では、たとえ LSI 技術を駆使しても、画像変換デバイスの解像度を高めようとすると構造が複雑化し、走査回路を構成する繰返し要素の数が増し、技術的な困難度は飛躍的に増大する。

この観点から電子ビームを使用しない走査方式としても、理想としては走査機能自体を目的として一体化された機能素子が期待されるのである。

ここでは、いままで走査に応用可能な物理的性質として考えられている圧電結晶中の音響ドメイン、圧電結晶表面を伝わる表面弾性波、半導体と絶縁膜の界面における電荷の移動を利用した電荷結合デバイスおよびプラズマ放電の移動について、画像走査への応用および、それ

ぞれについての問題点を展望する。

2. 圧電結晶中の音響ドメイン

2.1 音響ドメインの発生

抵抗の小さい CdS や GaAs のような半導体は、機械的な圧縮、膨張に応じて内部に電荷が発生する、いわゆる圧電性を持ち、圧電結晶と呼ばれる。このような結晶の両端に図1に示すようにオーミック電極を設け、両電極間に立上りの鋭いパルス電圧を加えると、その衝撃で試料の不連続点、すなわち試料の陰極および陽極と結晶面の間で種々の周波数成分をもつ音波がパルス状に発生し、それぞれ結晶の密度 ρ と剛性率 c でできる速度 $v_s = \sqrt{c/\rho}$ で伝搬する。

最初、結晶中には図2の実線で示される一定の値の電

図1 音響ドメインの発生

図2 結晶中の電位分布、電荷分布および電界分布
(a) ドメイン発生前、(b) ドメイン発生後

"5. Recent Topics Related to Scanning; 5-1. The Physical Properties in Solid and Gas Available to the Scanning Devices" by Takao Ando (Central Research Laboratories, Nippon Electric Co. Ltd., Kawasaki)

界が発生するか、この値が一定の臨界値 (CdS の場合 $E_{th} \approx 1 \text{ kV/cm}$) 以上になると、結晶内部を陰極から陽極に向かって走る電子群の速度 $v_0 \geq \mu E_{th}$ は音波の速度 v 以上にまで加速される。一方、結晶は大きな圧電性をもっているので、音波 (結晶格子点の変化) に伴って音速で移動する高電界部分 (音響ドメイン) が発生する。このドメインの前縁では、電子の速度が音速よりも速いために、この部分の電子密度は減少するが、ドメインの後縁では電子はこのドメインの壁にさえぎられ、その谷間の部分に捉えられて電子密度が増大する。この電子密度の疎密の程度は $\sigma = \rho(x)/\rho_0 = \epsilon/n_0 e \cdot dE/dx$ で与えられる。ここで ρ_0 は平均の電荷密度、 n_0 は平均の電子密度、 E は電圧を示す。

この状態になると、後縁の電子はドメインの壁を押す形となり、電子群の運動エネルギーが音波に流れこんで音波の振幅が次第に増加する。この現象は超音波増幅と呼ばれ、ベル研究所の Hutson らによって発見された。最初、陰極で発生した音波の周波数は、非常に広範囲に広がっていたものが、この過程で次次の関係を満足する周波数成分の音波 ω_m だけが選択増幅され他は減衰する。

$$\omega_m = \sqrt{\omega_i \cdot \omega_0} \quad (1)$$

ここで ω_i は結晶の誘電緩和角周波数、 $\omega_0 = v_i^2/D$ 、 D は拡散定数である。

一方、陽極で生じた音波はその伝搬方向と電子の進行方向が互いに逆方向であるため、電子流との間で増幅作用が起らず、ただちに減衰する。

一度音響ドメインが形成されると、ドメインの両端には強く分極した電氣的二重層ができるために、内部は高抵抗になり、非常に高い電界の領域が音速で走る。このときの結晶中の電位分布を図2の点線で示す。したがって、結晶に印加した電圧は、ほとんどこの音響ドメイン内部で消費されるが、ドメイン外での電界は、このドメインを維持する値、すなわち電子を音速に等しい速度で加速する値に保持される必要がある。

図3は結晶に印加した電界による電子の移動速度と音波の増幅度との関係を示す。点線は熱的な格子振動との相互作用によって起る音波の損失を示す量で、増幅度とこの損失とが平衡した電界で音響ドメインは安定に伝搬する。このときの音響ドメインの移動速度は、使用する物質によるが、 $v_s = 10^5 \sim 10^6 \text{ cm/sec}$ で、ほぼ CRT 上での電子ビームの走行時間と同程度であるため、固体の画像走査手段として期待される。図4は $3 \Omega\text{cm}$ の CdS 結晶を 9 mm に切断した試料に加えた電圧と、音響ドメイン内に発生する電圧との関係を示す¹⁾。ドメイン内に発生する電圧は、被走査媒体、たとえば光電変換および表示素子の駆動電圧になる。

図3 電子の移動速度と音波の増幅との関係

図4 印加電圧と音響ドメイン電圧

2.2 音響ドメインの幅

音響ドメインの幅に関しては、まだ明確に定量化した報告がないが、定性的には次のようにして説明できる。結晶中に音響ドメインが形成されると、ドメイン内では電子と音波の相互作用によって電子をせまい幅に押込めようとする。理想の場合として、この相互作用が無限に強いとすれば、ドメインの幅は平均の電子濃度 n_0 に関係してきまり、 $5 \sim 50 \mu\text{m}$ と推定される。しかし、電子の不足しているドメインの前縁や過剰に存在する後縁と他の部分との濃度差により、著しい電子拡散が起り、この2つの過程すなわち音波との相互作用による電子のとりまとめと電子の拡散とが、ちょうど平衡する点で音響ドメインは安定する。このため、実際に観測されるドメインの幅は、理想の場合よりも相当広く、 $100 \sim 150 \mu\text{m}$ に達する。この幅は音響ドメインを走査に利用するデバイスの最小分解能を定める。

2.3 応用

音響ドメインを画像の走査として使用したのは、ベル研究所の Hakki²⁾ が最初であろう。彼は抵抗率 $1 \Omega\text{cm}$ の CdS で幅 $400 \mu\text{m}$ 、厚さ $100 \mu\text{m}$ 、長さ 0.35 cm の棒を作り、この上に図5に示した構造の、互いに $54 \mu\text{m}$ の

図5 音響ドメインを走査に利用した光スキャナー

図6 結晶を流れる電流および発光の時間的推移

間隔で分離した長さ $175\mu\text{m}$ 、厚さ $5\mu\text{m}$ の p 形の Cu_2S を化学反応を利用して設けた。CdS と Cu_2S との界面では pn 接合が形成される。結晶軸 c が結晶表面に直交するように選んであるので、発生する音波は室温で $1.76 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ の速度をもつ shear wave である。図6は 660V のトリガーパルス、 460V の維持電圧を加え、 200V のドメインを発生したときの結晶を流れる電流と、それに対応する発光強度との関係を示す。

音響ドメインが pn 接合の下を通過するとき、ドメイン電圧 V_d が pn 接合の逆バイアス領域のどこかで破壊電圧以上になると、局所的な電圧破壊で電流は高抵抗のドメインをさけて Cu_2S の方を流れ、瞬間的に増大する。この電流が電圧破壊部から $0.8 \sim 0.9\mu\text{m}$ に中心波長をもつ赤色の発光を起す。

図7にドメインが通過したときの電流経路と発光領域の模様を示す。

図8は音響ドメインを画像の撮像デバイスに利用した例である³⁾。 $1 \times 0.5 \times 0.05 \text{ cm}$ の低抵抗 CdS の上に光

図7 ドメインが通過中の pn 接合内の電流通路と発光領域

図8 音響ドメインを画像検知器の走査に応用した例

導電体として9つの感光素子 ($0.1 \times 0.1 \times 0.05 \text{ cm}$) を一列に並べ、光導電体自身は互いに 0.001 inch の In メッキされた金板によって接続されている。基板の CdS の両端に $5\mu\text{s}$ の間 10^3 V のパルス電圧を印加すると、陰極に音響ドメインが発生し、 $1.75 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ の速度で陽極に向かって走行する。1つの光導電体の下をドメインが通過すると、基板内を流れる電流はドメイン内が非常に高抵抗なので光導電体を偏流し、光導電体の抵抗値に応じて電流の大きさが変調をうける。したがって光が光導電体を照射すると、それに応じた光電流成分が、負荷抵抗 R_L の両端からとり出される。

このデバイスのひとつの応用として、パンチカードの読取りが考えられる。基板の電子濃度 n を $4 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ とすると、典型的なドメイン幅はドメイン電圧 250V のとき $150\mu\text{m}$ 程度であるから、ドメインの走行速度を考慮すると 10^6 bit/sec オーダーの変換速度が容易に得られる。

RCA の Pankov らは、GaAs 中の音響ドメインを用いて発光素子の走査を試みた⁴⁾。 $10^{16} / \text{cm}^3$ の電子濃度をもつ GaAs のウェハを $[110]$ 方向に長さ 5 mm 、幅 $300\mu\text{m}$ に切り出し、この上に $10^{19} / \text{cm}^3$ の正孔濃度をもつ p 形層を $5\mu\text{m}$ の厚さに成長させた試料が用いられた。 p 層は幅 $50\mu\text{m}$ 、ピッチ $175\mu\text{m}$ になるように溝が入れられ、互いに分離した絵素を構成する。この試料の場合、 $200 \sim 300 \text{ V/cm}$ の電界を印加すると 77°K で $3.5 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ の速度で音響ドメインが陰極に向かって伝搬する。

図9に示すように、電気的に浮いた pn 接合部に音響ドメインが伝搬してくると、ドメインは高抵抗であるか

図9 GaAsの電気音響ドメインを応用した光スキャナーの原理図

ら、その前縁では接合が逆方向に、後縁では順方向にバイアスされる。 pn 接合を流れる全電流は零であるから逆方向にバイアスされる部分と順方向にバイアスされる部分の面積比は、順方向電流が逆方向電流と等しくなるようにきめられ、順方向の電流密度がはるかに大きくなって、この部分で注入形のEL発光を起す。ドメインの移動に伴って発光位置も順次陽極方向に移動する。この発光はCdS-Cu₂Sの構成による発光と異なり、順方向電流のELであるから、効率の高い発光が期待できる。

音響ドメインは、一定速度および幅をもって一方向に移動するので、各種の画像読取デバイスの走査に適用することが検討されているが、表示デバイスの場合には、発光を映像信号で変調する手段を工夫するという問題がある。

GaAsのガン効果を用いても、音響ドメインと類似な走行高電界ドメインが発生し、走査が可能であるが、この場合の走行速度は 10^7cm/sec と著しく大であるため画像を走査する目的には適当でない。ガン効果ドメインは、むしろ超高速、極小距離の走査あるいは信号処理に適合していると考えられている。

圧電結晶における音響ドメインの特徴は、まず電界から常にエネルギーが補給されることである。すなわち途中で発光および検出素子を駆動するためにドメイン内のエネルギーを失っても、それに見合ったエネルギーを音波の形で受けとれば、減衰をおこすことなく一定の強度で進行する。さらに陽極にドメインが着くと、そのfeedback effectとして第2のドメインがただちに陰極から自動的に発生する点などである。しかし、低抵抗の結晶に高い電界をかける必要があるため、消費電力が大きく、温度の上昇があり、現在では比較的ドメインの繰返しが遅い応用に限られる。この他に、ドメインに伴う高い周波数の音響フラックス（数百MHz～2GHzに達する）が増幅されて、数 kW/cm^2 もの強度に達し、結晶が破壊されるなどの欠点がある。音響ドメインについては、現在でもこのような宿命とも思われる材料的、物理的側面から解決しなければならない問題点が存在する。

3. 表面弾性波

3.1 表面弾性波の発生

半無限弾性体において、図10に示すように、その自由表面に沿って伝搬する弾性波は、いわゆるレイリー波として、また表面近くに密度、弾性率の違う層のある場合には、横波がこの層に沿って伝わり、ラブ波として知られている。ここでは主として前者、すなわちレイリー波を取る上げる。

レイリー形表面弾性波(以後表面波と略す)の振動は基板媒質上に、縦あるいは横振動をする振動子をのせ、板の表面をたたけばよく、どんなたたき方をしても振源より相当離れたところで表面波成分を観測することができる。たとえば図11に示す、くさびの上に厚み振動をする圧電板変換器をおくと、縦波がくさびの中を伝搬し基板中をたたく。このとき u_w をくさび形の物質の縦波伝搬速度、 u_r を基板中のレイリー波の速度とすると、 $u_w/u_r = \sin \theta$ を満たす角度で最も能率よく縦波がレイリー形表面波に変わる。

圧電板を波動の伝搬媒体として用いることができる場合には、圧電波を直接励起する“すだれ状電極”が最近のICの方向にも向いているので、盛んに利用されてい

図10 レイリー波による自由表面の変形

図11 くさび形電極による表面波の励振

図12 すだれ形電極による表面波の励振

る。これは、対向する電極間に高周波電界を加え、その電界変化に伴う機械的な変化で超音波を発生するものである(図12参照)。この電極は、電極のピッチ d 、電極幅 h および電極の対数 N によって中心波長 $\lambda=2d$ と、 $\Delta f/f_0=(1.8-2.0)/N$ の形で経験的に与えられる周波数特性をもっている。ここで $\lambda=2d=v_s/2\pi f$ は、励振される表面波の幅に関係する量であるから、走査の分解能を高めるためには電極のピッチ h をせまくし、同調する励振周波数を高くする必要がある。 N はまた、表面波の波束を $2N$ 倍にすると同時に、表面波の最大出力エネルギーを N 倍に増加する。すだれ形電極は、このように簡単な構造で効率の高い電界-表面波の変換ができるので、通常よく用いられる。

ここで1対のすだれ形電極、すなわち $N=1$ のときの表電波パルス走査の場合の分解能を考えてみる。このときには正弦波の半サイクルのみが励振されるので、10 MHz の波の場合には、この半サイクルの波は $0.05\mu\text{s}$ に対応する。このパルスによって占められる空間的な幅は、表面波の速度を仮りに $3.2\times 10^5\text{cm/sec}$ とすると、 $160\mu\text{m}$ に相当する。この値が表面波を用いた場合の代表的な分解幅で、20 cm の長さを走査するとすれば、1 水平線あたり約1200絵素の解像度に相当する。したがって、通常の画像走査の応用には充分な解像能力をもっているといえる。

図 13 ガン発振器内の電界ドメインによる表面波の効率的な励振

図 14 ガン発振器電圧と表面波出力の関係

さらに最近、ガンダイオードを圧電物質の上に平行にならべ、ガン効果ドメインで表面波を励振する方法が報告されている⁵⁾。この励振法の特徴は、図13に示すようにガンダイオードを周期的な金属電極群をつけた圧電板(LiNbO₃)の上にせまい間隔をへだてて配置してあることである。このため変換効率が高く、ガンダイオード内を走行するドメインと結合して励振される表面波のエネルギーと、ダイオードに印加するパルス電力との比は 2.5×10^{-6} にも達する。実験では 10^{14}cm^{-3} の電子濃度をもつ、長さ 0.25 cm のガンダイオードを y -cut の LiNbO₃ 上に置き、ダイオードにパルス幅 320 ns、周期 100 Hz のパルス電圧を印加して表面波を励振した。印加した電圧と発生した表面波のエネルギーとの関係を図14に示す。表面波の周波数は金属電極の間隔にも依存するが、ダイオードに印加する電圧を 70 V から 96 V に変えると 215~225 MHz に変化した。16 対の周期性電極を用いたときの励振表面波エネルギーは、尖頭値で $250\mu\text{W}$ であった。

3.2 表面弾性波の減衰

表面弾性波は、物質のひずみが stress free な境界付近のみを伝搬する弾性的変位である。無限長の均質な等方性の物質について、深さ方向 x_3 に垂直な表面 x_1 に伝搬する弾性的変位 u_i は、 A を振幅、 v_s を伝搬速度、 ω を角周波数とすると、一般に次式で与えられる⁶⁾。

$$u_i = A \exp[-a\omega x_3/v_s] \exp[i\omega(t - x_1/v_s)] \quad (2)$$

a は変位に関する運動方程式と stress free の境界条件の両方を満足するように定められた実数であるから、表面波の振幅は内部に向かって指数関数的に減衰し、波長 $\lambda_s=2\pi v_s/\omega$ のオーダーで消滅する。このことは次式(3)で計算されるように、表面波の伝搬速度が内部を伝わる速度に比較して遅いので、表面にとじ込められると考えても良い。Viktorov は表面波の速度を近似的に次式で与えた⁷⁾。

$$v_s = v_t \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \quad (3)$$

ここで ν は物質によって定まる Poisson ratio で、0~0.5 の値をとる。 v_t は Bulk shear-wave の速度で、

表 1 各種物質の表面波速度

物 質	速度 (10^3m/sec)
Bismuth germanium oxide	1.6
Cadmium sulfide	1.7
Fused silica	3.42
Gallium arsenide [110] [1 $\bar{1}$ 0]	2.4
Lead-zirconate silica (PZT-4)	2.1
Silicon [111] [1 $\bar{1}$ 0]	4.5
Yttrium iron garnet [1 $\bar{1}$ 0] [111]	3.5
Zinc oxide	2.6

v_s は $0.87 v_t \sim 0.96 v_t$ と Bulk shear-wave 速度より小さく、この値は周波数には無関係である。 v_t は音速であるから、表面波も音響ドメインと同様に画像走査に応用できる速さである。表1にいくつかの物質についての表面波の伝搬速度を表わす⁸⁾。

表面波は一般に音響ドメインのように途中で増幅機構を持たないので、次第に減衰する。この減衰は主として次の4つの原因による。①熱的な格子振動による散乱損失、②表面での air loading、③弾性的な性質の不連続点による Bulk wave へのエネルギー変換による損失、④伝導電子群へのエネルギー伝達など。King と Sheard は①の原因である phonon-phonon 衝突による水晶中の減衰定数 α が次式で与えられることを導いた⁶⁾。

$$\alpha = 8.7 \omega^2 \eta_{\text{eff}} / 2 \rho v_s^3 \quad (\text{dB/cm}) \quad (4)$$

ここで η_{eff} は物質の実効 viscosity 定数、 ρ は密度、 ω は表面波の角周波数である。減衰定数は周波数の自乗で増加する。

図15はLiNbO₃の室温での表面波の減衰の様態を示す⁸⁾。減衰は周波数の自乗で大きくなり、格子振動による散乱損が支配的であることを示している。しかし数百MHz以下の周波数では、表面波の減衰はほとんど問題にならず、画像走査に都合が良い。減衰は温度の上昇とともに急激に増加するが、高温では飽和する傾向にあ

る。図16はLiNbO₃での温度依存性を示す⁸⁾。

表面波はこの他に、画像走査に有効と思われる guiding と focusing という現象がある。guiding は、たとえば2つの平行な反射壁をもつせまい通路や、周囲よりも表面波の位相速度が遅い溝の中に波をとじこめることで(図17参照)、この現象を用いれば1カ所で発生した表面波を、いくつかの通路に分配することができる。画像走査には有効な手段となる可能性がある。

圧電物質の場合には、導電性のストリップも表面波の guide として働く。この構造は導電性ストリップが電極として使えるので、画像の変調に利用できる可能性がある。guide の幅としては、表面波の波長程度の幅が有効である。

伝搬している表面波を、図18に示す光学的なレンズに類似な形の金属を用いて集束したり発散することができる。この現象は表面波の強度を制御するのに使われる。

3.3 応用

表面波を画像走査に用いた面白い例をあげる。Black-

図18 表面波の集束構造 (focusing)

図15 LiNbO₃ 上での表面波の減衰特性

図16 LiNbO₃ 中の表面波の温度特性

図17 表面波のとじ込み構造 (guiding)

図19 光電子放射の走査に表面波を利用した平板形ブラウン管の原理図

ledge らは、圧電性物質上に伝搬するレイリー波に伴う電界を用いて、光電子放射面からの電子放射を制御し、ブラウン管の走査ができることを示した⁹⁾。この原理はレイリー波は単位幅あたりのエネルギーが 100 mW/cm のとき、波のうねり間の電圧が 1 eV のエネルギーに相当するため、表面波が光電子放射面から電子放射を可能にすることである。管の構造を図19に示す。 y -cut、 α -水晶板上に Sb-Cs 光電子放射面を蒸着し、片側より 0.8 MHz の表面波を伝搬させる。波の伝搬につれて電子が放出される位置が順次移動し、表面波の速度で水平の走査ができる。この電子は 10 kV で加速され、蛍光膜を発光させるので、光電子放射面を映像信号に応じて照明すると、蛍光膜上に画像が再生される。

さらに彼らは、表面波を用いて全固体化ディスプレイの可能性を検討している¹⁰⁾。一般に表面波の運びうるエネルギーは小さく、途中でエネルギーを取り出すと急激に減衰するので、発光素子や感光素子との結合が容易ではない。このために、表面波を画像走査に利用するときには、各絵素を走査することと変調および駆動するという2つの機能を分離して、走査機能にのみ限ってやる必要がある。この点は前述した音響ドメインの応用の場合と異なる。

この目的のために Blackledge は、駆動するのにエネルギーをほとんど必要としない MOS FET で発光素子を制御することを考えた。このディスプレイは、圧電性基板上に垂直方向に必要な絵素数の wave guide を設け、この guide 中を伝搬する表面波を垂直の走査回路で順番に切換えて垂直走査する計画であるが、現在は1次元の走査特性のみを実験的に検討している。

表面波による画像走査の原理を図20に示す。 $1 \times 3 \times 0.25 \text{ inch}$ の PZT の基板上に各絵素に相当する位置に

図20 発光素子の走査に表面波を応用したディスプレイの原理図

図21 ディスプレイの構成図

図22 表面波の走査を利用した画像検知器

それぞれ $160 \mu\text{m}$ 間隔で1対の受信用電極 T_n を設け、発光ダイオードの発光を制御する MOS FET のゲート電極に接続する。MOS FET には 10 pF のコンデンサをドレインとアースとの間に設け、信号の蓄積を行なわせる。PZT の左端から 10 MHz の高周波電界で発生した半サイクルの幅のせまい表面波が伝搬し、受信用電極対 T_n の下を通過するとき約 $0.05 \mu\text{s}$ の間に電極間に約 10 V の走査パルスが発生する。このパルスは MOS FET を“ON”状態にし、ドレイン電極に接続された発光素子が発光する。

実際に 10 V の走査パルスが発生させようとするとき、入力変換器として働く1つの電極対では、非常に大きな高周波電圧が必要で、電極間で絶縁破壊を起す。したがって、実験には高周波電圧を下げる目的で4対のすだれ形電極と、受信用電極に生じた小さな電圧を MOSFET のゲートを励振するのに必要な電圧にする増幅器を用いた。使用した受信用電極および発光素子等は、それぞれ5組で、このディスプレイの構成を図21に示す。この構成のディスプレイは表面波の幅が大きく、充分な解像度がとれない他に、発光の持続のために大きなコンデンサを、また走査パルスの増幅に MOS FET 部品等を用いているので、このままの形ではまだ実用性がない。さらに集積化および機能的な組合せを工夫する必要がある。

圧電基板とすだれ形の電極の間に CdS の光導電膜を入れてやると、画像の撮像デバイスができる¹¹⁾。図22に

その構造を示す。光が入射していないときは、光導電膜の抵抗が非常に大きいため、すだれ形電極間に入る並列抵抗は無視でき、各電極対間には信号源の全電圧が加わる。その結果、振幅の大きな表面波が圧電基板上に発生する。一方、光が光導電膜に入射すると、膜の抵抗が下り、信号源の電圧は電極に直列に入れた抵抗と光導電抵抗で分割され、電極対の励振電圧が減少する。したがって、表面波の振幅も減少する。この結果、表面波の振幅は光導電膜に入射する光強度の関数となる。同じような現象は光の強度が空間的に分布している場合にも起り、この場合には、光の量に比例して振幅変調された表面波が励振され、それぞれ反対方向に伝搬する。圧電板の端に検出用の受信電極をつけておけば、この電極から時系列信号に変換された電圧を取り出すことができる。 α -水晶と6対のすだれ形電極の間に高抵抗のCdS膜をはさみ、1 MHzの信号で励振された表面波を用いた実験結果によると、分解能は3.15 mmと悪い。この値は、すだれ形電極のリアクタンスと、光照射された光導電膜の抵抗の比によって制限される。計算によれば、100~200本/cmの分解能まで改良が可能であるという。

4. CCD (電荷結合素子)

最近、ベル研究所から提案された Charge Coupled Device¹²⁾ (CCD と略して呼ばれる) と称するデバイス概念は、機能素子的な感覚をもった走査デバイスとして注目される。

4.1 動作原理

CCD は、半導体表面に小面積で少数キャリアに対するポテンシャルのくぼみを多数一列に並べてつくり、これらのくぼみに、たとえば画像情報に応じて電荷(少数キャリア)のかたまりを注入蓄積し、上記ポテンシャルのくぼみ全部をその配列に沿って移動させることによ

り、蓄積電荷を配列の1単位ずつ順次移動させるもので、情報を移動させることについては、一種のシフトレジスタである。

CCDの基本的な構造は図23に示すように、たとえば n 形の Si の表面に SiO_2 等の絶縁膜を介して金属電極を多数密接して列状に並べたものである。配列された金属は3つごとにそれぞれ共通の導線で結ばれている。

いま、ひとつの MIS 構造の金属電極に絶縁ゲート電界効果トランジスタの turn-on 電圧 V_T 、すなわち半導体の表面に p 形反転層を生ずるに必要な最小ゲート電圧を越す負電圧 $V(V > V_T)$ を加えたとして、電圧印加の瞬間には(表面準位を無視すると)電圧 V は絶縁膜と半導体表面に生じる空乏層とに分割されるが、時間の経過とともに熱励起によって正孔が半導体表面に供給される。その結果、表面ポテンシャルは正方向に動き、空乏層はせまくなってゆく。そして、ついには表面に p 形反転層が生じる。CCDの動作は、このような定常的な反転層が生じる前の過渡的な短時間内に蓄積および移動に関するすべての動作が行なわれるので、以下の説明では熱的な励起で供給される正孔がないものとして話を進める。

いま図23(a)において、3種の電極 a, b, c のうち、b, c には負電位 $V_1 > V_T$ を、電極 a には V_1 よりも大きい負電位 V_2 をかけたとすると(n 形 Si はゼロ電位)、各 MIS 構造が充分密接していれば、半導体表面近くの空乏層は重なり合い、そのひろがりは図23(a)の点線で示したようになり、電極 a の直下には正孔に対するポテンシャルのくぼみが生じる。いま、たとえば a の電極下の空乏層周辺を光照射するなどの方法で各ポテンシャルのくぼみに画像情報に応じて正孔を注入したとする。なお、この場合の注入量は、注入によって上昇した電極 a の下のポテンシャルが、電極 b, c 下のポテンシャルよりも正にならないような範囲であるとする。注入された電荷(正孔)は、電極 a の下に図23(a)のように蓄積される。

このようにして蓄積された情報は、つぎのようにして蓄積電荷を転送することによって走査される。いま電極 b に V_2 よりもさらに大きい負電位 V_3 を加えたとする

図 23 CCD の基本構造と電荷の転送過程

図 24 CCD における信号処理

と、ポテンシャルの様子は図23(b)の点線で示すように電極bの下で低くなり、電極aの下に蓄積されていた電荷は電極bの下に流れ込む。正孔がほとんど全部電極bの下に移ったらaの電位を $-V_2 \rightarrow -V_1$ へ、bの電位を $-V_3 \rightarrow -V_2$ へそれぞれ戻せば、蓄積電荷はちょうど1電極分だけ右方に移動したことになる。

そこで図24左方に示すような、互いに重なり合う部分をもつ三相のクロックパルス（負パルス）を電極a, b, cに繰返し加えてゆけば、蓄積された正孔のかたまりは順次右方に移動してゆく。CCDの右端に、たとえばMIS電界効果トランジスタのゲートとドレインに相当する構造の検出部を設けて出力ゲートの負電位 V_{0p} を $V_{0p} > V_3, V_2, V_1$ とし、ドレインを逆バイアスしておけば、クロックパルスに応じて左方から順次送り込まれてくる正電荷のパターンを、電流波形として時系列上に読出すことができる（図24参照）。この動作では、最初に電極a下に注入した電荷量を右の方から順次に走査したことになる。この現象は撮像デバイスとして応用できる。

ポテンシャルのくぼみへの正孔注入は、光によらなくても、たとえば図24の検出部のp形領域を逆にソースとして前と逆に電荷を左方に送り出せばできる。したがって、CCDは注入EL半導体で映像信号に応じて送り出した電荷をMIS構造を順バイアスして再結合発光させることができれば、表示デバイスとして働かせる可能性もでてくる¹²⁾。

4.2 転送効率と転送時間

CCDの動作は、前述したように、半導体表面に定常的反転層が生じない時間内に行なわなければならないが、この時間は近似的に表面の空乏層内で発生する単位体積あたりの少数キャリア（正孔）の数がn形半導体のドナー密度 N_D に等しくなる時間で与えられる¹³⁾。半導体としてSiを用いた場合には、空乏層内から発生する正孔の割合は、真性キャリア密度を n_i 、キャリアの寿命を τ とすると、近似的に $n_i/2\tau$ で表わされるので¹⁴⁾、表面に反転層を生ずるまでの時間 t は、

$$t \approx 2\tau \cdot \frac{N_D}{n_i} \quad (5)$$

で与えられる。この値は空乏層中の不純物単位、表面単位、ドナー濃度等により、ms以下から秒単位まで変化するが、現在のSi technologyからすれば秒程度の過渡時間は実現可能である。

CCDがうまく働くためには、蓄積電荷の転送に際して電荷ができるだけ完全に隣りの電極に移ることが必要である。このときの転送効率をたとえば99.0%とすると、電極間を n 個転送させたときの総合効率は $(0.99)^n$ で、 $n=100$ とすれば36.6%と著しく低下してしまう。した

図25 全蓄積電荷および転送効率と転送時間

がって、転送効率は非常に1に近いことが必要である。

転送効率および、これと関連して転送に要する時間はCCDにおける最も重要なパラメータである。最近、これら2つのパラメータの間の関係を簡単なモデルで理論解析した報告がある¹⁵⁾¹⁶⁾。CCD内の2つの隣り合った電極が非常に接近し、その間に大きな電位差が存在するときには、転送時間と転送効率は主として半導体と絶縁物の界面に蓄わえられた電荷の放電の様子によって定められる。この現象は放電状態にある1つのMISキャパシタ内の電荷の動きに非常に類似している。このことからKimは、MISキャパシタをモデルに、放電が電荷 Q_p の転送の支配的な機構であるとして、電荷の連続の方程式、

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_p \frac{\partial Q_p}{\partial x} + \mu_p \cdot Q_p \cdot \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right] \quad (6)$$

から、初期の電荷量 $Q_{ps} \cdot L$ と、取残された電荷量 Q_T および転送効率と転送時間との関係を導いた¹⁶⁾。図25はこの関係を示す。ここで D_p は電荷の拡散係数、 μ_p は電荷の表面移動度、 ϕ_s はSi-SiO₂の界面電位である。時間軸はキャパシタの幅を L 、平衡状態の場合のSi-SiO₂界面電位と、電圧が印加され空乏層が広がったときの界面電位の差を $\Delta\phi$ としたとき、キャリアがドリフトによりキャパシタ中を通過するに要する時間 $T = L^2 / \mu_p \cdot \Delta\phi$ で規格化してある。(6)式から実効的な拡散係数 D_{eff} を近似的に求めると、

$$D_{\text{eff}} \approx D_p + \mu_p \Delta\phi \frac{Q_p}{Q_{ps}} = \mu_p \left(\frac{kT}{q} + \Delta\phi \frac{Q_p}{Q_{ps}} \right) \quad (7)$$

となる。転送時間の初期においては Q_p が多く、 D_{eff} は第2項目の値によって定まるから、ドリフトによる放電が支配的であるが、電荷 Q_p が減少するにつれて、第1項目の拡散による放電が支配的になり、電荷の減少が長く尾を引くことになる。この放電の終期における電荷の

図 26 96 絵素スキャナーの解像度特性

図 27 二相のクロックパルスで駆動する CCD

指数関数的な減少は、

$$\frac{Q_p}{Q_{ps}L} = \frac{8}{\pi^2} K \exp \left\{ -\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{kT/q}{\Delta\phi} \cdot \frac{t}{T} \right\} \quad (8)$$

で表わされる拡散状態を示す式で近似される。ここで K は拡散によって放電される電荷の全蓄積電荷中の割合を示す値で、図25の場合には $K=0.02$ の値をとると、ドリフトによる放電が $Q_p/Q_{ps} > 0.01$ のとき支配的になるという無理でない結論が得られる。このため、たとえば99%以上の高い効率を得ようとする、転送時間を犠牲にせざるを得ないことが予想される。

配列された金属電極に加える三相の電圧波形も、転送効率に大きく影響する。図24の左方に示すような非対称逆台形波形では、パルスの後縁での傾斜部分で隣の電極に加わる負電位パルスとの重なり合いが生じ、主たる転送はこの部分で行なわれる。パルス後縁の傾斜をゆるくして重なり合いをある程度増すと、転送効率は上昇する。

ベル研究所で試作した 8 bits の CCD の実験結果によると、電極幅 $50\mu\text{m}$ 電極間隔 $3\mu\text{m}$ 、印加パルス電圧 $10\sim 20\text{V}$ 、立上り 20ns 、立下り 400ns 、転送時間 $2\mu\text{s}$ の条件下で 99.9% の転送効率を得られた¹⁷⁾。

4.3 応用

CCD の応用として、1次元のスキャナーが報告されている¹⁸⁾。この実験に用いたスキャナーは $2 \times 4.5\text{mm}^2$ のチップ上に $10\mu\text{m}$ 幅の金属電極を $2.5\mu\text{m}$ 間隔で 288 個並べた96絵素のもので、転送効率を上げるために移動

図 28 磁場中でのプラズマの移動を利用した走査素子の原理図

度の大きな少数キャリアの得られる p 形 Si が用いられている。走査の速さは 1MHz 以上可能で、解像度および中間調はハードコピーの場合と同程度に良好であるという。

図26はこのスキャナーの解像度特性である。CCD が解像度の高い画像走査デバイスとして応用できるか否かの可能性は、今後 Si-SiO₂ 界面、電極形状、駆動速度をどの程度向上できるかに大きく依存するであろう。さらに駆動回路を簡単にするため、駆動方式の工夫も今後検討すべき課題である。この点については、図27に示すような構造で、電荷を動かす電界に常に方向性をもたせ、二相駆動にすることも提案されている¹⁹⁾²⁰⁾。

5. プラズマの移動

ガス放電管中の放電位置を外部からの電気信号で順次移動させることは、古くからデカトロンなどに应用されている。最近、この現象を走査に利用した実験が報告されている²¹⁾²²⁾。また、磁界の力で自動的に放電位置を移動させる試みも報告されている²⁴⁾。

5.1 磁場中でのプラズマの移動²³⁾

図 29 ガス圧と走査速度の関係

図 30 磁界強度と走査速度の関係

図 31 ガス圧と放電維持電圧の関係 (パッシェンの法則)

図28は磁場中でガスのグロー放電が移動する現象を利用した走査デバイスの原理図である。たとえば、電極構造は放電間隙、電極幅および間隔 0.5mm、ピッチ 1mm で、電極の厚みは 0.2mm である。ガス放電管の楕形多電極の上部陽極、下部陰極の放電間隙に直流電界およびこれに直交する一定磁界を印加しておき、デバイスの一端の電極にパルス幅 $10\mu\text{s}$ のトリガーパルス印加してグロー放電させると、グロー放電によって生じた荷電粒子が電界と磁界の大きさに定まるローレンツ力によって移動し、放電間隙に順次放電を誘起して他方の端まで一定の速度で各電極を順次移動する。直流印加電圧は、ガス条件（ガス圧力、ガスの種類等）、電極構造によって定まるが、放電開始電圧よりやや低く、放電維持電圧よりもやや高く設定される。

この実験には、ガスとして Ar, Ne の不活性ガスに、放電停止を早くするため少量の H_2 を加えた混合ガスが用いられた。ガス圧と走査時間との関係は図 29 に示すように、気圧のほぼ自乗に比例しており H_2 の割合が増すほど速くなる。さらに図 30 は、 $\text{Ar}+\text{H}_2$ 混合ガス放電の

図 32 拡散によるプラズマの移動を利用した走査

図 33 三相の駆動電圧パルス波形

磁界強度と走査時間の関係を示す。放電間隙のせまい場合には、走査時間は磁界強度に逆比例、もしくは電極間隙によっては自乗に逆比例し、いずれにしても磁界が増すほど走査速度は速くなる。封入ガス圧と放電維持電圧との間には、図 31 に $\text{Ar}+\text{H}_2$ ガス圧との関係で示したように、いわゆるパッシェンの法則で定められる関係が存在する。維持電圧が最小になる条件が外部回路としては望ましいが、図 29 との関係をあわせ考えたとき、必ず

しも走査速度の点で最適ではない。すなわち、放電維持電圧が最小になる点では、そのガス圧で得られる最大走査速度より走査速度が遅い。

以上の実験結果から、磁界を用いる方式では $0.15\mu\text{s}/\text{mm}$ までの走査速度はきわめて安定に得られるが、その放電電流のパルス幅（分解能に相当する）は $1\sim 3\mu\text{s}$ であった。この走査速度を制限する主な原因は、ガス圧が 10mmHg 程度までは放電の移動時間で、これ以上のガス圧では放電形成時間による。いずれにしても $0.1\mu\text{s}/\text{mm}$ 以上の走査速度は原理的に困難なようである。

この方式によるプラズマの移動は、きわめて速い走査速度を得ることが可能であるが、 10kOe におよぶ大きな磁界を必要とすること、各走査点にそれぞれ負荷抵抗を独立して設ける必要があるうえ、分解能が大きくとれない点などに実用上の問題点がある。

5.2 荷電粒子の拡散を用いたプラズマの移動

磁界によるローレンツ力を利用しないで、電離した荷電粒子の拡散を利用した画像走査の方法も報告されている²¹⁾²²⁾。この方法の特徴は外部から三相のクロックパルス印加するだけで放電が移動する機能素子的性格にある。図32は7個の放電が右側に1電極ずつ順次移動する様子を説明する原理構造図である。互いに直交する2組の電極で作られているマトリックスのうち、縦方向の電極が2つおきにそれぞれ3本の選択線に共通に結ばれ、この選択線に図33に示す三相のパルス電圧 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 が印加される。

移動の原理は、まず図32(a)のように放電発生源の縦電極(陰極)の電圧のみをゼロ電位に、それ以外の縦電極電位を 110V にすると、放電発生源においては陽極との間に放電開始電圧以上の電圧がかかり、この部分のみが放電を開始し、ただちに両極間の電位差は維持電圧(170V)に下る。この放電は走査を開始するためのスタート源の役目をする。次に、3本の選択線に三相のパルス電圧が印加され、陰極1がゼロ電位に、先の放電発生源の陰極および第2、第3の電極電位が 110V に設定されると、陰極1, 4, 7... と陽極の間にのみ 250V の電圧が加わり、先の放電発生源の放電は止まるが、この電極の周囲には準安定状態にある荷電粒子が存在するため、隣の電極の方向に拡散して行き、陰極1での放電の核を作り、急速に陰極と陽極の間にグロー放電が起る。陰極4, 7, 10... についても電圧に関する条件はまったく同じであるが、最初の放電位置から遠く離れているために、荷電粒子の影響をうける前に陰極1の場所で放電が開始され、陽極の放電維持電圧が下ってしまうので、陰極4, 7, 10... で放電が起る可能性はまったく失われてしまう。

時刻 t_2 で陰極2, 5, 8... の電圧がゼロ電位に、陰極1, 4, 7... の電圧がもとの値に戻ると(図32(c)参照)先とまったく同様な機構で、放電が隣の陰極すなわち陰極2に移動し、陰極5, 8, 11... ではなんの変化も生じない。時刻 t_3 でもまったく同じ機構で放電が陰極3に移動する。以後、三相パルス電圧を繰返し印加するだけで、放電は最後の陰極まで自動的に移動する。さらに次の周期の放電は放電発生源に放電を作り、移動を行なわせる。

Barroughs 社では、この現象を使った自己走査形のプラズマディスプレイを商品化している²⁴⁾。このディスプレイは、発光点の径が 0.036inch で、そのピッチは 0.06inch である。

この現象を利用した走査速度の限界は荷電粒子の拡散時間で制限され、ガス圧 10mmHg 程度では $10\mu\text{s}/\text{mm}$ 程度である。圧力を高めると走査速度は多少速くなるが、放電開始電圧が急激に大きくなり実用的でなくなる。ディスプレイの場合、この走査速度の限界は一度に表示しうる最大情報量をきめる。たとえば、Barroughs 社のディスプレイでは、列方向に一度に20文字程度しか表示できない。このように走査速度が遅い点が、この現象を利用した走査の最大の問題点である。ただ価格面および周辺回路が比較的簡単になる有利な面があるので、前述の問題点についてなにか抜本的な解決策が望まれる。

International Scanning Device 社では、この放電の移動を水平および垂直の走査に利用した EL ディスプレイを計画している²⁵⁾。試作したものは $1\times 3/4\text{inch}$ の小形のものであるが、表面に光導電膜と EL 膜を使用した光増幅板を用いているので、表示面の輝度は 50fL と明るい。

6. む す び

音響ドメイン、表面弾性波、CCD およびプラズマの移動等、あるひとつの空間の中で局部的に周囲と異なる物理現象を示す部分を走行させる機能を画像走査の立場から展望してみた。現在、これらの現象は荷電粒子の拡散を利用したプラズマの移動だけが文字表示板として一部実用されているにすぎないが、テレビ画像走査を対象にした場合には、まだいずれの方法にも問題があり、現在、実用の段階に達しているものはない。

適当な物理現象が見つかり、機能的走査デバイスが生まれれば、画像デバイスの固体化および平面化を著しく促すことは疑問のないことと考えられるので、ここで述べた物理現象の改良を含め、さらに新しい物理現象および機能素子の探究が望まれる。

ただ当面現実的には、確実に走査するという点で、ディスプレイな素子を多数並べて順次動作させる方式に可能性を見出してゆくことになろう。この場合、ディスプレイ素子を順次スイッチする部分だけでも機能化して簡単化し、数の障壁をいかにして打破するかが問題であらう。

(昭和46年5月29日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) M. B. N. Butler and C. P. Sandback: Characteristics and Applications of Domains in Semiconducting CdS, IEEE Trans., **ED-14**, 10 (1967) 663
- 2) B. W. Hakki: Solid-state Acoustoelectric Light Scanner, Appl. Phys. Letters, **11**, 5 (1967) 153
- 3) W. J. Clemetson: Self-Scanned Optical Transducer Using Acoustic Domains in CdS, IEEE Trans., **ED-16**, 12 (1969) 1080
- 4) J. I. Pankove and A. R. Moore: A Potential Solid-State Flying Spot Scanner, RCA Rev., **30**, 1 (1969) 53
- 5) M. L. Dakss and E. G. Lean: Excitation of Acoustic Surface waves with a Grating-Coupled Gunn Oscillator, Appl. Phys. Letters, **18**, 4 (1971) 137
- 6) R. M. White: Surface Elastic Waves, Proc. IEEE, **58**, 8 (1970) 1238
- 7) P. H. Carr: The Generation and Propagation of Acoustic Surface Waves at Microwave Frequencies, IEEE Trans., **MTT-17**, 11 (1969) 845
- 8) E. G. Spencer, P. V. Lenzo and A. A. Ballman: Dielectric Materials for Electrooptic, Elastooptic, and Ultrasonic Device Applications, Proc. IEEE, **55**, 12 (1967) 2074
- 9) U. O. Blackledge and I. Kaufman: Control of Electron Emission by Elastic Surface Waves, Appl. Phys. Letters, **15**, 4 (1969) 127
- 10) U. O. Blackledge, M. D. Sirkis and I. Kaufman: Investigation of Display Techniques Using Elastic Surface Waves and Local Storage, IEEE J., **SC 5**, 5 (1970) 244
- 11) I. Kaufmann and J. W. Foltz: Self-Scanned Optical Sensor Using Elastic Surface Waves, Proc. IEEE, **57**, 11 (1969) 2081
- 12) W. S. Boyle and G. E. Smith: Charge Coupled Semiconductor Devices, BSTJ, **49**, 4 (1970) 587
- 13) A. S. Grove: Physics and Technology of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc., New York (1967) 268
- 14) 新美: トランジスタおよびダイオード, 丸善 (1967) 103
- 15) C.-K. Kim: Carrier Transport in Charge-Coupled Devices, 1971 ISSCC Digest of Technical Papers, 158
- 16) W. E. Engeler, J. J. Tiemann and R. D. Baertsch: Surface Charge Transport in Silicon, Appl. Phys. Letters, **17**, 11 (1970) 469
- 17) Tompsett, M. F. Amelio and G. E. Smith: Charge Coupled 8-Bits Shift Register, Appl. Phys. Letters, **17** (1970) 111
- 18) W. J. Bertram: Application of Charge Coupled Device Concept to Solid State Image Sensors, 1971 Int'l Convention—Digest— (1971) 250
- 19) W. F. Kosonocky and J. G. Carnes: Charge Coupled Digital Circuit, 1971 ISSCC Digest of Technical Papers, 162
- 20) 1970 Device Research Conference
- 21) W. J. Harman: General Considerations and Circuit Techniques for Gas Discharge Flat Panel Displays, 1970 Int'l Convention—Digest— (1970) 72
- 22) 堀, 笠原, 井上: 狭帯放電の走査実験, テレビ学会固体画像変換装置研委資, No. 49 (1971)
- 23) 伊吹, 布下, 新居: 磁場中のガス放電の移動 (ガス放電走査素子), テレビ学会固体画像変換装置研委資, No. 50 (1971)
- 24) Electronics, **43**, 5 (1970) 121
- 25) Flat-Screen Television Takes Two Giant Steps Forward, Electronics, **43**, 11 (1970) 112

5-2 走 査 速 度 変 換

NHK 総合技術研究所 岩 村 総 一

1. ま え が き

映像信号あるいは音声信号などの時間軸を圧縮ないし伸長して伝送する方式は、古くから提案があるが、この時間軸変換には必然的に信号の一時メモリー、つまり記録および再生装置が不可欠で、これまで発表された時間軸変換方式は、それぞれその当時の記録再生技術水準に対応して開発されたものといえる。

映像信号の時間軸変換、つまり走査変換にかぎっていても、これまで実用化した方式として、

- ① 化学的变化を利用して記録再生する方法。
- ② 磁気テープまたはディスク上に磁気記録する方法。
- ③ 遅延線を使ってメモリーする方法。

④ コンデンサに電荷としてメモリーする方法。

⑤ フリップフロップないしシフトレジスターによるデジタルメモリー方法。

⑥ charge coupled domain を使う方法。

などが考えられる。この他に、音声ないし制御信号など、数 kHz 以下のメモリー方式としてフェロエレクトリックトランス⁴⁾を使った例もある。

①の方法には化学的処理がいるため、実時間処理が不可能で、信号直線性を安定に維持することが困難なこと、②では機械的回転機構が必要で、信頼度の他に水平走査速度変換には回転数を変える必要があり、実時間処理が困難などの問題がある。また③は信号時間軸のシフトだけで、垂直走査はともかく、水平走査速度変換は不可能である。④に関しては、初めディスプレイ素子を使った時間軸変換装置¹⁾が開発され、最近 LSI によるもの⁸⁾が発表されている。

“5-2 Scanning Speed Conversion” by Soichi Iwamura (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)