小特集

有機 EL ディスプレイとディスプレイ 50 年の歩み 〈その 2〉 ディスプレイ 50 年を振り返って

1. LCD の 50 年

正会員 堀 浩雄[†]

キーワード：液晶，ディスプレイ，歴史

1. ま え が き

液晶は有機化合物であり，低温で固体，高温で等方性の液体，中間の温度域で結晶的な性質をもつ液体である。

液晶はオーストリアの Reinitzer により 1888 年に発見され，相変化と色変化を起こすと報告した彼からドイツの Lemann への一通の手紙が液晶研究の広がり契機となった¹⁾。1920 年代後半から 1930 年代初めにかけて多くの研究がなされた。表示への応用は液晶の電気光学効果の研究から始まるわけであるが，Fredericksz らの電界による液晶相の変形，Williams の電界による“ウィリアムスドメイン”パターンの発生²⁾がその第一歩である。

液晶は，電気・光学的な異方性，すなわち細長い分子の長軸方向とそれに直角な方向で，誘電率や屈折率などが異なる性質をもっており，電圧印加により光学的変化が生じるので表示素子（液晶表示デバイス，Liquid-Crystal Display: LCD）に応用できるのである。

液晶は 110 年前から知られていたわけであるが，LCD の出現は 1960 年代後半からである。以下，液晶の種々の電気光学効果ないし動作モードや LCD の研究開発の歴史を振り返ることにする。

2. LCD 誕生の歴史的背景

LCD が誕生した 1960 年代はカラー

[†] 東京工業高等専門学校 電子工学科
“A Review of the Historical Development of LCD Research” by Hiroo Hori (Dept. of Electronic Engineering, Tokyo National College of Technology, Tokyo)

図 1 LCD と関連技術および応用機器の発展

CRT を用いたテレビ受像機が出始めた頃であり，テレビの撮像および表示のデバイスは CRT，イメージオルシコンあるいはビジコンなどの電子ビーム走査による電子管だけであったが，将来は固体撮像板やパネル形表示器が出現し，テレビ受像機は壁掛け形となるとの夢を懷いた研究がすでに進められていた。その中で CCD (Charge Coupled Device)³⁾ は，光電変換と走査の機能を備えた固体撮像板として輝

かしい発展を遂げ，今日の普及となった。

一方，表示デバイスは EL (Electroluminescence) や PDP (Plasma Display Panel) などの研究がなされていたが，撮像デバイスと異なり，発光のエネルギーを各画素に送り込む必要があり，しかもより大形であるとの重荷を背負っていた。このような中で LCD は非発光形で，低電圧・低消費電力駆動形であることが，その後の技

術進展と普及に幸いした。また、パネル形の表示デバイスでは何らかの走査機能が必要であるが、ほぼ同時期に出現した走査機能を有する MOS シフトレジスタなどの集積回路が LCD の実用化に大きな役割を果たしたといえる(図 1)。

Fredericksz らの電気光学効果の研究後、表示を意識した液晶の研究はテレビ技術の殿堂であった米国の RCA 研究所のグループによるものであった。ここで、そのグループによる初期の LCD 研究の一端を見てみる⁴⁾⁵⁾。

光変調器の低電圧化を進めていた Heilmeyer らは、Williams が発見した電界による液晶の配列変化に関心を示し、液晶の研究を始めた。1964 年秋、液晶に 2 色性色素を混ぜ、ガラス板で挟んだセルに数 V の電圧を印加

し、赤色から無色へと変化するのを見出している。電界で液晶の配列が変わると色素の配列も変化するという、正にゲストホスト (GH) モード⁶⁾である。Westinghouse 社の温度センサへの応用など、多くがコレステリック液晶の熱効果に注目していた中で、RCA は Sarnoff の夢であった壁掛けテレビへの応用を目標にネマティック液晶の研究に集中し、表示デバイスに向く多くの電気光学効果を発見していった。

GH モードの改善中の 1964 年に、83~100°C で動作する液晶で動的散乱モード (Dynamic Scattering Mode: DSM)⁷⁾を見出している。電圧により透明から白濁状態に変化する現象である。さらに、蓄積機能をもつ相転移モード⁸⁾を発見している。

RCA は、DS モードを企業秘密とし、室温液晶の開発を行い、時計など

の応用モデルを試作した上で、1968 年 6 月に世界初の LCD 誕生の発表を行った。図 2 は 1967 年の数字表示例である。この発表に大きな関心が寄せられ、LCD の研究開発競争が始まったのである。

液晶の初期の応用研究は米国、ヨーロッパ、日本で理論の構築と実験のもとに精力的に行われ、多くの電気光学効果の発見と、実用化で問題であった動作温度範囲の拡大などの液晶材料開発が行われた。次に、これらの主要な電気光学効果の発見と LCD の実用化の変遷について述べることにする。

3. 液晶動作モードと実用化展開

LCD 開発の歴史は、LCD のひとつの大きな課題である表示容量の増加の歴史でもあるが、図 3 に最近までの画素数の変遷を示しておく。

3.1 動的散乱モード (DSM) と最初 of LCD

1968 年の RCA によるプレス発表後、Heilmeyer らは動作域が 83~100°C の APAPA と略称される液晶を用いた液晶初の電気光学効果 DSM の内容を公表した⁷⁾。光散乱モデルの提案とともに、45 V の電圧印加で 3.5 インチ×4 インチの LCD で固定文字を表示した例を示している。DSM は文字表示に適し、線順次走査のマトリクス駆動による実時間表示にも使えようと結論している。

室温動作液晶の開発がひとつの目標でもあった。動作電圧は 25 V 程度、液晶分子の擾乱を起こすために、電解質を液晶に添加することが必要である。

初期の液晶時計や電卓(図 4)、ガソリンスタンドの白黒表示器などに一時期実用された。また、小規模の単純マトリクス形や後述の TFT-LCD 開発の基礎となった Si ベースの LCD の試作検討に使われたが、動作電圧が高く消費電力が液晶としては大きい、信頼性上の課題が十分に解決されていないなどの理由で、後述の TN モードの出現によりほとんど使われなくなった。

図 2 RCA が 1967 年に開発した DS モードの LCD⁴⁾ (© 1976 IEEE)

図 4 LCD を用いた初の商品化電卓 (シャープ⁸⁾提供)

図 3 LCD の表示容量の変遷

3.2 ゲストホスト(GH)モードへの期待

発明はDSMより早いですが、発表は逆に1カ月後にHeilmeyerらによってなされた⁹⁾。電界で液晶分子が配列変化する時、添加された色素分子も追従する。色素は光吸収度の異方性と波長選択性のため、透明と色づき状態間のスイッチが起こる。これがゲストホスト(Guest-Host)モードである。

液晶も白黒からカラー表示への動きで、1975年頃から数字表示や車載用などへの採用を目指した開発が行われた時期があったが、モノカラー表示であり応用には限界があり、カラーフィルタ方式の出現で廃れてしまった。また、視角特性が良いため、黒色色素によるLCDの開発も進められたが、コントラストの低さなどの問題があり、実用に至っていない。

なお、相転移形GHモード⁹⁾と呼ばれる偏光板不要の方式が1974年に発表されている。最近、反射形への応用が試みられた例がある。

3.3 ねじれネマティック(TN)モードと本格的LCDの台頭

1971年にスイスのロッシュのSchadtとHelfrichが、今日最も一般的な動作モードのTN(Twisted Nematic)を発表¹⁰⁾した。電界効果形で電流を流す必要がなく、低電圧・低電力であり、コントラストが高く液晶の本命として現在まで使われてきている。2枚のガラス基板間で水平配向の方位が90°ツイストするようにし、2枚の偏光板で挟んで使われる。

ほぼ同時期に開発された、低電圧・低電力のCMOS ICをドライバとしたTNモードのLCDは、まず時計や電卓、その他のセグメント形数字表示器に使われるようになった(図1)。この時期、米国、ヨーロッパ、日本の多くの企業が開発に加わった。米国では発光ダイオードを時計や電卓に使う動きが進み、一方、日本は、インフラの広がりや優れた生産技術による高信頼性と価格競争で、LCD事業では優位になり始めた。

液晶の歴史は情報化社会の進展につれた表示容量の増加の歴史でもあると

いえるが、LCDはセグメント形から単純マトリクス形へ展開が図られ、小規模ながら文字表示やグラフィック表示がTNモードで進められた。1970年代後半には4行ほどの文字表示が実用化され、1980年代には半導体メモリーの開発に従い、ワープロには1~4行表示のLCDが採用され始めた。さらに行数を増すための液晶材料開発が続けられ、表示容量の増加が進んだ。しかし、少なくとも20行表示が必要というワープロやパソコン用の要請には、コントラストが低下して使えないことが明らかとなった。

一方、後述のアクティブマトリクス形では表示容量への制限が緩和されるので、表示性の良いTNモードが使われてきた。

3.4 超ねじれネマティック(STN)モードによる大容量化

TNモードが、ワープロやパソコン用の表示容量の大きい単純マトリクス形LCDに向かないと判断され、関係者が挫折感を懐き始めていた1984年の11月に、ねじれ角が270°の複屈折モードであるSBE(Supertwisted Birefringent Effect)が、スイスのBrown BoveriにいたSchefferらにより発表された¹¹⁾。翌年の国際会議SID 85では、540×270ドットのLCDの開発とデューティ比が1/600の時分割動作の可能性が発表された。青色モードでの動作実演が行われ、大変な関心と呼んだ。

SBEは生産に困難を伴う工程を使う方式であり、ねじれ角が240°でポリミド配向膜を使う生産性の良いSTN(Super Twisted Nematic、広義にはSBEも含む名称)が主として日本で実用化され、1985年にはワープロやパソコン用が製品化された。液晶層の厚さが4μmと薄く、そのむらが表示性に敏感であり、難しい製品管理がクリヤされたのである。また、時分割駆動特性に優れ、TNモードで成し得なかった表示容量の増大が図られて、ワープロ、パソコンに採用されるようになった。液晶事業の救世主となった感があった。

波長分散性のある複屈折現象のた

め、黄緑などの着色のある表示であるが、真の白黒表示化とカラーフィルタとの組合せによるカラー化、さらには視角特性改善に応える開発が引き続きなされた。すなわち、光学的に位相補償する2層方式¹²⁾¹³⁾、さらに薄形化とコストメリットのある位相差フィルムを重ねる方式^{14)~16)}が生み出された。STNモードのLCDは、高画質のTFT-LCDに対して低価格が特長であり、液晶産業の主役の一方となっていた。

なお、液晶の応答速度が速くなると線順次走査ではコントラストが低下するが、この対策としてMLA(Multi-Line Addressing)¹⁷⁾¹⁸⁾が提案された。

3.5 複屈折制御(ECB)モードとその発展

液晶層の分子配列を電界で変化させ、光透過率を変える方式(ECB: Electrically Controlled Birefringence)である。

1971年のMailerらによるリタレーションと透過率の解明¹⁹⁾、Schiekelらによるその電氣的制御(DAP, Deformation of Vertically Aligned Phases)を使ったLCD²⁰⁾²¹⁾の発表、さらに配向方式を変える提案があった^{22)~24)}。

表示容量を大きくできる特性があるが、視角が狭く直視形には不向きとの考えで当初は投写形用が検討され、1980年にはテレビ画像表示²⁵⁾が試みられたが、実用化には至らなかった。その後、視角の狭さの原因である液晶の複屈折性を光位相差フィルムで光学的に補償する手法が考案された。これがDAP形に適用され、直視形の単純マトリクス形カラーLCDの誕生となった²⁶⁾。新しい関連技術の進歩で、見捨てられていた液晶技術が再登場するという良い例である。さらに、このモードは液晶材料や配向技術、光補償法が改良され、垂直配向(VA)液晶と称し、後述のTFT-LCDで主として採用されているTNモードの対抗馬として、時間応答とコントラスト、視角などの特性で優位性を示すまでになった²⁷⁾。

広義の複屈折制御モードであり、 π

セル²⁸⁾と呼ばれる方式は、応答性が良く光スイッチングによるCRTのカラー表示と立体表示に応用された。さらに階調性の付与と光学補償による視角特性の改善が図られたOCB(Optically Compensated Bend)モード²⁹⁾へと発展し、TFT-LCDへの応用が検討された。

3.6 高分子分散液晶(PDLC)

-高分子化への第一歩-

液晶と高分子の混合体の光散乱現象を使う高分子分散液晶(PDLC: Polymer Dispersed LC)は、偏光板が不要のため輝度向上が必要な反射形として当初は開発されたモードである。高分子中に液晶を閉じ込めてマイクロカプセル化する方法³⁰⁾や、光重合³¹⁾などによる相分離法で高分子中に液晶を分散させる方法で製作される。

投写形では、輝度向上のためTFT-LCD³²⁾³³⁾に、あるいはSiベースの反射形LCDに検討された。

この高分子を混合する考えは、次にふれるように、高分子安定化、あるいは液晶分子が電圧印加後に再配列する方向などを規定する応用に積極的に採用されようとしている。

3.7 蓄積機能が注目される相転移(PC)モード

ここでも液晶技術のリバイバル現象が見られる。1968年にHeilmeyerら³⁴⁾やWysockiら³⁵⁾は液晶の相転移(PC: Phase Change)を利用した蓄積機能を有するモードを発表している。表示容量を大きくでき、日本でも旧電電公社などで研究が進められたが、実時間表示性に欠けるなどのため、実用されないままであった。

消費電力が少ない電池駆動の携帯形通信端末が要求される時代となり、米国のケント州立大学では、蓄積機能があり比較的明るい単純マトリクス駆動の反射形高分子安定化コレステリックLCD³⁶⁾³⁷⁾を開発し、注目されてきた。

3.8 高速応答性が注目された強誘電性液晶

DOBAMBCと略称される液晶で強誘電性の確認がなされ、1975年に報告された³⁸⁾。その後Clarkらは液晶を間隙が1~2 μm の狭いセルに挿入

することにより、分極を2つの方向にそろえる方法を1980年に発表した³⁹⁾。

Clarkらの方法で得られるLCDは、表面安定化強誘電液晶(SSFLC: Surface Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal)と呼ばれ、印加する電界の向きにより2安定状態間でスイッチングが起こる。この場合、電界と自発分極との作用で液晶が応答するのでその速度が速く、数十 μs で動作することによって、注目されてきた。1985年には大形単純マトリクスパネル⁴⁰⁾が発表され、関心を呼んだ。蓄積機能があり、視角特性が良いことも良い評価を受けているが、配向の機械的圧力などへの耐性向上が必要である。

東工大で発見された反強誘電相(Anti-Ferroelectric Phase)⁴¹⁾は、配向破損の自己修復能などがあり注目され、TFT-LCDでも駆動の検討がなされてきたが、実用化までには至っていない。

4. アクティブマトリクス形LCD

4.1 アクティブマトリクス形の概念

DSモードの発表でLCDの研究開発が一斉に始まり、1971年には電界効果形のTNモードが発表された。しかし、液晶は動作電圧の閾値特性が緩やかであり、単純マトリクス駆動ではコントラストが低く、表示容量の増大には困難が伴った。1971年に、これを解決するアクティブマトリクス駆動法⁴²⁾の概念がRCAのLechnerらにより発表された。これが、現在主流となっている高性能TFT(Thin Film Transistor)-LCDなどのルーツであり、各画素にクロストークを防ぐスイッチ素子としての電界効果トランジスタあるいはダイオードと信号蓄積容量を付加するというものである。DSモード液晶を用いた2 $\times$ 18ドットの実験素子で動作が確認されている。大形LCDの一候補であるPlasma Addressed LCD⁴³⁾⁴⁴⁾では3端子形の放電を使っているが、Lechnerらは2端子形の放電を使う例を示している。

4.2 アクティブマトリクス方式LCDの実現

(1) CdSeと単結晶Siなどによる試み

CdSe TFTは撮像素子用⁴⁵⁾として1950年以前に開発されていたが、Brodyらは1973年にTNモードを用いた6インチ角TFT-LCDに採用している。Liptonら⁴⁶⁾もTFT-LCDを試作して動作の確認をしている。1984年には128 $\times$ 192ドット白黒LCDが発売されるまでに至ったが、アモルファスSi(a-Si)の出現で長く続かなかった。特性の再現性や安定性に課題があったようである。

単結晶Si基板にMOSトランジスタアレイを形成する反射形のアクティブマトリクス形LCDは、Ernstoffら⁴⁷⁾によりDSモードで1インチ角 $\cdot$ 100 $\times$ 100ドットが試作され、1973年に発表された。このタイプは駆動回路も同時に形成できる特徴があり、1980年代の初めまで日本でも研究開発が行われたが、表示性の良いTNモードが使えず、またカラー化と大形化が困難であり、a-Si TFT-LCDへ技術が引き継がれる結果となった。しかし、この方式は高解像度化に向き、CMOSの微細加工技術が使えることもあり、最近では投写形用の反射形LCDなどへの応用に返り咲いている。

(2) a-Si TFT-LCD

a-Si膜の開発からTFTの開発およびTFT-LCDの試作検証まで、英国のDundee大学で行われた。SpearらがSH₄のグロー放電分解法⁴⁸⁾でa-Si:H薄膜の開発に1975年頃に成功している⁴⁹⁾。Siのダングリングボンドに水素を結合させキャリアを動きやすくしたり、不純物ガスを添加して導電形の制御を可能としたわけである。

1979年にはLeComberらがTFT-LCD用素子としての条件をほぼ満足するa-Si TFTの製作に成功している⁵⁰⁾。

引き続き、1981年にはSnellらが5 $\times$ 7ドットのTFT-LCDを世界で初めて試作している⁵¹⁾。

Dundee大学の成果に刺激され、

1982～1983年には日本、フランス、オランダなどでも多くの小形 TFT-LCD の試作研究結果が発表され、1986年には松下電器産業が3形240×372画素カラーLCDを搭載したテレビの初の商品化を行った。その後、大形・高精細化開発が進められ、1991年には10形級カラーTFT-LCD搭載のノートPCが各社から発売され、1993年からはTFT-LCDの大量生産が始まり、マザーガラス基板の大判化が進み、今日の全盛を迎えている。

この間、欠陥につながるゴミや静電気破壊の対策、数々の液晶表示不良対策が大々的に行われた。最近では、大きなものでは30形、継ぎ合わせたものでは40形が試作され、解像度の高い例では2560×2048画素のパネルが開発されるまでに至っている。

a-Si TFT-LCDは、直視形だけでなくスクリーンに拡大投影する投写形もある。

実用化されているTFT-LCDに使われる液晶モードは主としてTNである。低電圧・低電力駆動と高コントラスト、カラー化に適する性能が受け入れられたのである。TNモードのTFT-LCDは視角が狭いことが欠点であったが、改善が種々進められた。光学的に正の一軸性結晶を負の一軸性結晶で補償する²⁶⁾光学補償法は、ディスコティック液晶フィルム⁵²⁾を使用するものに発展した。デュアルドメイン⁵³⁾の方式はTNモード以外へも応用され、検討されている。

TN以外のモードで視角特性改善を図る方法も実用化されている。Baurらにより1992年に視角改善効果が確認されたIPS(In-Plane Switching)方式⁵⁴⁾は、1995年に日立製作所によりTFT-LCDへ適用され⁵⁵⁾、超広視野角特性が検証され、実用されている。なお、ここで使われている櫛歯電極は、技術未熟のため対向電極方式での間隙制御が難しいとの理由で、1970年代初めに採用されたことがあるものの再登場である⁵⁶⁾。視角特性改善のもうひとつは、既述の垂直配向液晶²⁷⁾である。

(3) 多結晶 Si TFT-LCD

多結晶(Polycrystalline)Siには低温プロセスによるものと高温プロセスによるものがある。1980～1982年頃からa-Si TFTの開発と並んで、a-Siを再結晶化して多結晶Si膜を得る500～600°Cの低温プロセスによる開発がすでに進められ、小規模のTFT-LCDが試作されていた。しかし、低温法による多結晶Si TFT-LCDの実用化は1996年まで待たねばならなかった。結晶化は種々の方法が検討されたが、一般にはエキシマレーザアニリング法が採用されるようになった。一方、900°C以上で熱酸化してゲート絶縁膜を形成する高温多結晶Si TFT-LCDは、a-Si TFT-LCDよりも2年早い1984年に2形240×220画素カラーLCD⁵⁷⁾として、セイコーグループからテレビに搭載され発売された。この方式は高精細性が要求される投写形TFT-LCD⁵⁸⁾に現在も採用されている。

多結晶Siは移動度が大きいので、駆動回路も表示部の周辺に同時にCMOSで作り込むことができる。低温プロセス法はガラス基板が使用でき、大形化に有利であり、21世紀へ向けてその発展が期待されている。低温プロセスによる11.3形TFT-LCDを図5(2頁口絵)に示す。

(4) ダイオード駆動 LCD

双方向性のZnOバリスタを非線形素子として用いた70×175ドットのLCD⁵⁹⁾が1980年に発表され、当時としてはコントラストの良い表示がなされた。しかし、動作電圧が60Vと高く、実用化には至らなかった。

Baraffらは、Taの陽極酸化膜を金属電極で挟んだ構造の双方向性非線形素子MIM(Metal Insulator Metal)で駆動するLCD⁶⁰⁾を1980年に発表した。これはTFTに比べて作りやすく安価であることが特徴で、セイコーエプソンで改良され製品化されている。

a-Siダイオードを用いるものとして、2つのショットキ形を逆向きに直列接続したもの⁶¹⁾、2つのpin形ダイオードを逆向きに並列接続したもの、および、さらにその直列接続したもの⁶²⁾などがあり、テレビ画像表示に使われてきた。

の⁶²⁾などがあり、テレビ画像表示に使われてきた。

5. むすび

LCD誕生から発展への経緯をたどってみると、LCDとCMOSとの二人三脚の様子が読み取れる。LCDは初めCMOS回路とともにデジタル時計や電卓に応用され、次にマトリクス形LCDはCMOSドライバICで駆動され、さらにLCDの画面の大形化とLSIの高密度化の進展により、ワープロやパソコンなどに应用されたのである。今後はシステムオンガラスなどの方向に向かうと予測されている。

液晶の初の電気光学効果であるDSモードが発表されて30年余が過ぎ、多くの動作モードや技術が誕生したが、一度見放されたものが新たな関連技術の誕生で再登場し実用に供される例がいくつか見られる。技術を振り返って見直すことの大切さがうかがえる。

なお、紙面の都合で熱・電気効果による液晶動作⁶³⁾⁶⁴⁾は割愛した。

(2000年6月12日受付)

【文 献】

- 1) H. Kelker: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **165**, p. 1 (1988)
- 2) R. Williams: J. Chem. Phys., **39**, p. 384 (1963)
- 3) W. S. Boyle, G. E. Smith: Bell Syst. Tech. J., **49**, p. 587 (1970)
- 4) G. H. Heilmeyer: IEEE Trans. Electron Devices, **23**, p. 780 (1976)
- 5) J. A. Castellano: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **165**, p. 389 (1988)
- 6) G. Heilmeyer, L. A. Zanoni: Appl. Phys. Lett., **13**, p. 91 (1968)
- 7) G. H. Heilmeyer, L. A. Barton, L. A. Zanoni: Proc. IEEE, **56**, p. 1162 (1968)
- 8) G. H. Heilmeyer, J. E. Goldmacher: Appl. Phys. Lett., **13**, p. 132 (1968)
- 9) D. L. White, G. N. Taylor: J. Appl. Phys., **45**, p. 4718 (1974)
- 10) M. Schadt, W. Helfrich: Appl. Phys. Lett., **18**, p. 127 (1971)
- 11) T. J. Scheffer, J. Nehring: Appl. Phys. Lett., **45**, p. 1021 (1984)
- 12) 奥村治, 永田光夫, 和田啓志: テレビ学技報, **11**, p. 79 (1987)
- 13) K. Katoh, Y. Endo, M. Akatsuka, M. Ohgawara, K. Sawada: Jpn. J. Appl. Phys., **26**, p. L1784 (1987)
- 14) 長江慶治, 平方純, 小村真一: テレビ学技報, **12**, p. 29 (1988)
- 15) S. Matsumoto, H. Hatoh, A. Murayama, T. Yamamoto, S. Kondo, S. Kamagami: Proc. 1988 IDRC, p. 182 (1988)
- 16) H. Odai, T. Hanami, M. Hara, K. Iwasa, N. Tatsumi: Conf. Record 1988 IDRC, p. 195

- (1988)
- 17) T. J. Scheffer, B. Clifton: SID 92 Digest, p. 228 (1992)
 - 18) S. Ihara, Y. Sugimoto, Y. Nakagawa, T. Kuwata, H. Koh, H. Hasebe, T. N. Ruck-mongthan: *ibid.*, p. 232 (1992)
 - 19) H. Mailer, K. L. Likins, T. R. Taylor, J. L. Fergason: Appl. Phys. Lett., **18**, p. 105 (1971)
 - 20) M. F. Schiekkel, K. Fahrenschon: Appl. Phys. Lett., **19**, p. 391 (1971)
 - 21) G. Assouline, M. Hareng, E. Leiba: Electron. Lett., **7**, p. 699 (1971)
 - 22) J. Brorel, J. Robert, F. Charadjedaghi: The International Conf. on Alphanumeric Display Devices and Syst., p. 61 (1973)
 - 23) 松本正一, 中川大介, 河元正博, 水野谷清: 第1回液晶討論会予稿集, p. 41 (1975) および S. Matsumoto, M. Kawamoto, K. Mizunoya: J. Appl. Phys., **47**, p. 3842 (1976)
 - 24) 桑原道夫, 女川博義, 宮下和雄: 第1回液晶討論会予稿集, p. 43 (1975)
 - 25) J. Robert, F. Clerc: SID 80 Digest, p. 30 (1980)
 - 26) S. Yamauchi, M. Aizawa, J. F. Clerc, T. Uchida, J. Duchene: SID 89 Digest, p. 378 (1989)
 - 27) K. Ohmuro, S. Kataoka, T. Sasaki, Y. Koike: SID 97 Digest, p. 845 (1997)
 - 28) P. J. Bos, P. A. Johnson, K. R. Koehler: SID 83 Digest, p. 30 (1983)
 - 29) Y. Yamaguchi, T. Miyashita, T. Uchida: SID 93 Digest, p. 277 (1993)
 - 30) J. Fergason: SID 85 Digest, p. 68 (1985)
 - 31) J. W. Doane, N. A. Vaz, B-G. Wu, S. Zumer: Appl. Phys. Lett., **48**, p. 269 (1986)
 - 32) Z. Yaniv, J. W. Doane, J. L. West, W. Tamura-Lis: Proc. Japan Display '89, p. 572 (1989)
 - 33) M. Kunigita, Y. Hirai, Y. Ooi, S. Niiyama, T. Asakawa, K. Masumo, H. Kumai, M. Yuki, T. Gunjima: SID 90 Digest, p. 227 (1990)
 - 34) G. H. Heilmeyer, J. E. Goldmacher: Appl. Phys. Lett., **13**, p. 132 (1968)
 - 35) J. Wysocki, J. Adams, W. Haas: Phys. Rev. Lett., **20**, p. 1024 (1968) および Mol. Cryst. Liq. Cryst., **8**, p. 471 (1969)
 - 36) D. -K. Yang, L. -C. Chien, J. W. Doane: Conf. Record 1991 IDRC, p. 49 (1991)
 - 37) M. Pfeiffer, D. -K. Yang, J. W. Doane, R. Bunz, E. Lueder, M. -H. Lu, H. Yuan, C. E. Catchpole, Z. Yaniv: SID 95 Digest, p. 706 (1995)
 - 38) R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki, P. Keller: J. de Phys. Lett., **36**, p. L 69 (1975)
 - 39) N. A. Clark, S. T. Lagerwall: Appl. Phys. Lett., **36**, p. 899 (1980)
 - 40) T. Harada, M. Taguchi, K. Iwasa, M. Kai: SID 85 Digest, p. 131 (1985)
 - 41) A. D. L. Chandani, T. Hagiwara, Y. Suzuki, Y. Ouchi, H. Takezoe, A. Fukuda: Jpn. J. Appl. Phys., **27**, p. L 729 (1988)
 - 42) B. J. Lechner, F. J. Marlowe, E. O. Nester, J. Tufts: Proc. IEEE, **59**, p. 1566 (1971)
 - 43) T. S. Buzak: SID 90 Digest, p. 420 (1990)
 - 44) T. Kakizaki, S. Tanamachi, M. Hayashi: SID 96 Digest, p. 915 (1996)
 - 45) P. K. Weimer: RCA Rev., **10**, p. 366 (1949)
 - 46) L. T. Lipton, et al.: SID 73 Digest, p. 46 (1973)
 - 47) M. N. Ernstoff, A. M. Leupp, M. J. Little, H. T. Peterson: 1973 IEDM, p. 548 (1973)
 - 48) R. C. Chittick, et al.: Solid State Science, **116**, p. 77 (1969)
 - 49) W. E. Spear, P. G. LeComber: Solid State Commun. **17**, p. 1193 (1975)
 - 50) P. G. LeComber, W. E. Spear, A. Ghaith: Electr. Lett., **15**, p. 179 (1979)
 - 51) A. J. Snell, K. D. Mackenzie, W. E. Spear, P. G. LeComber, A. J. Hughes: Appl. Phys., **24**, p. 357 (1981)
 - 52) 森裕行, 伊藤洋士, 西浦陽介, 中村卓, 品川幸雄: ディスプレイアンドイメージング, **5**, p. 3 (1996)
 - 53) K. H. Yang: Conf. Record of 1991 IDRC, p. 68 (1991)
 - 54) R. Kiefer, B. Weber, F. Windscheid, G. Baur: Proc. Japan Display '92, p. 547 (1992)
 - 55) M. Ohta, M. Oh-e, K. Kondo: Proc. Japan Display '95, p. 707 (1995)
 - 56) J. Wargin, P. Herczfeld, T. Matcovich, R. Fischl, Z. Turski, W. DaCosta: IEEE Conf. Record 1972 Conf. on Display Devices, p. 155 (1972)
 - 57) S. Morozumi, K. Oguchi, S. Yazawa, T. Kodaira, H. Oshima, T. Mano: SID 83 Digest, p. 156 (1983)
 - 58) S. Morozumi, T. Sonehara, H. Kamakura, T. Ono, S. Aruga: SID 86 Digest, p. 375 (1986)
 - 59) D. E. Castleberry: IEEE Trans. Electron Devices, **26**, p. 1123 (1979)
 - 60) D. R. Baraff, R. Boynton, B. Gribbon, J. R. Long, B. K. Maclaurin, C. J. Miner, N. M. Serinken, R. W. Streater, W. D. Westwood: SID 80 Digest, p. 200 (1980)
 - 61) D. G. Ast: Conf. Record 1982 IDRC, p. 152 (1982)
 - 62) 富樫清吾ほか: テレビ学校報, **10**, 47, p. 7 (1983)
 - 63) D. Maydan, H. Melchior and F. J. Kahn: IEEE Conf. Record 1972 Conf. on Display Devices, p. 166 (1972)
 - 64) A. Sasaki, K. Kurahashi and T. Takagi: *ibid.*, p. 161 (1972)

ほり ひろお
堀 浩雄

1961年, 東北大学工学部通信工学科卒業。同年, ㈱東芝入社。マイクロ波電子管・光導電形撮像管・LCDなどのパネル形ディスプレイデバイスの研究開発に従事。1999年, 東京工業高等専門学校電子工学科教授。工学博士。正会員。