

TFT研究開発ことはじめ

船田 文明

ディスプレイ技術開発本部

はじめに

今日の液晶ディスプレイ (LCD) の市場規模は、近々10兆円／年の大台に乗る巨大なものとなり、LSIと並び情報通信社会を支える基盤産業となってきました。そして、この市場の売上高シェアから見ると薄膜トランジスタ (TFT) を画素スイッチング素子としたアクティブマトリックス型のLCDが大半を占めてきています。このアクティブマトリックス型の「液晶ディスプレイ」ですが、ビジネス面からはむしろ「TFTディスプレイ」と呼んでもおかしくないくらいその生産工程面や性能面でTFTに大きく依存しています。

ところで、トランジスタといえばショックレー達による1947年の点接触トランジスタや1948年の接合型トランジスタの発明がスタートポイントの様一般では認識されていますが、実は、その約20年も前の1925年に既に今日のトランジスタの中心技術であるMOS型の電界効果トランジスタに属するTFTの原形が発明されていた事はあまり知られていないようです。

そこで、この「物語」では、TFTの発明の時点からその実用化への動き、更には本格的な産業へのトリガーの役を担ったシャープの14型TFT液晶ディスプレイの開発に至るまでのTFT産業立上期の研究開発活動に関しその場に技術者として参画した当事者としての視点からレビューを行い、今後の新技術開発によるイノベーション創出に対しての先行事例として参考にして頂ければと思います。なお、LCDに係る初期の研究開発の状況については、「薄型ディスプレイ事始め」等の総説^{1)~3)}をご参照ください。

1 TFTに関する初期の発明

TFTに関する最初の発明は、1925年にカナダで出願されたリリエンフェルトによる電流制御素子の提案⁴⁾であるとされています。図1がその素子の構成図です。発明の狙いは、真空管が保有していた問題点としてのフィラメントによる短寿命性、高電圧駆動、そして構成の複雑さから来る高価格等に対する解決策の提案でした。図1に示す様な簡単な構成でガラス基板に3極の電極と半導体相当の機能膜を形成した構成の提案でした。しかしながら、実際には上手く動作をしなかった模様で、継続的な研究活動は行われませんでした。

そして、次なる提案が、1934年にドイツで出願されたハイルの増幅素子の提案でした⁵⁾。その特許に記載の構造図を図2に示します。彼もフィラメントを有する真空管を置き換える素子の開発を狙い、3端子の電界効果素子を提案し、ここでは半導体を用いる事やゲート絶縁膜の明示が既になされています。

す。正にこの発明は、TFTやMOSトランジスタなど、今日の電界効果トランジスタの基本構造に関したものであると言って良いでしょう。しかし、ここでも試作実験による成功が得られなかった様子でこれ以上の発展は、見られませんでした。

1936年に大学院博士課程を終えベル研究所に入社したショックレーは、真空管に変わる固体増幅素子の開発を夢見て研究を開始しました。そして、1939

年には図3に示すいわゆるショットキーゲート型のTFTを検討したことが彼の研究ノートに記されており、更に1945年には実際に半導体に真空蒸着したシリコン薄膜を用いて試作実験をおこないました。残念な事に、トランジスタ効果は予想の1500分の一と極めて僅かで実験はまたしても失敗に終わりました。しかし、彼はこの結果を同僚のバーディーンに相談し、その討議と考察を経て1947年の暮には点接触型トラ

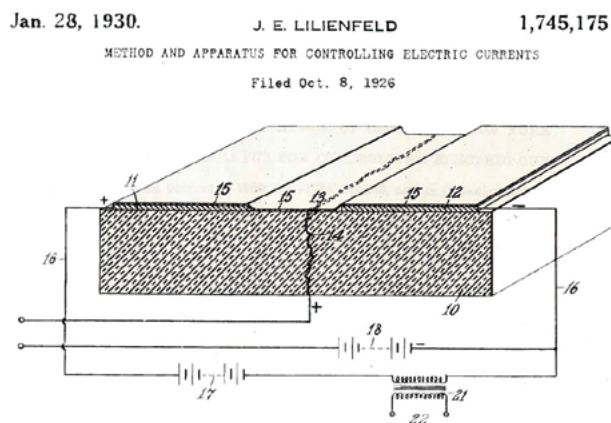


図1 LilienfeldによるTFTに関する最初の発明 (1925出願)

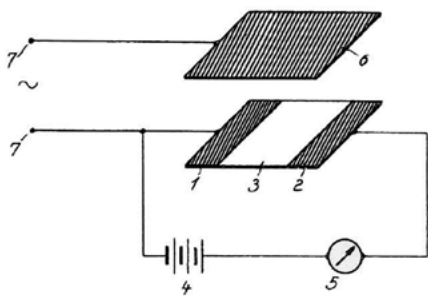


図2 もう少し現実のTFTに近づいたHeilの発明 (1934出願)

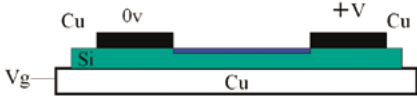


図3 Shockleyの考えたショットキーゲート型TFT (1939)

ンジスタがバーディーン達によって発明され、そしてついに1948年にショックレー達により始めての実用的な固体増幅機能素子としての接合型トランジスタが発明されたのでした。

ここに至る過程でショックレー自身は、失敗したTFT研究の事を「Creative failure」と呼び、その失敗原因追求の研究姿勢が後のノーベル賞に繋がる接合型トランジスタの発明に大きく寄与をした事を回顧録⁶⁾で述べています。

接合型トランジスタの発明により開花した固体エレクトロニクスは、1958年のキルビー達による集積回路の発明を経てシリコン単結晶を基材とする素子に集約されると共に更なる研究開発が行われ、数々の技術成果に裏打ちされ「半導体産業」と呼ばれる大きな産業に成長して来た事は周知の通りです。

しかし、この華々しい成功は、一方で、失敗に終わったTFTを敗者として研究開発の表舞台から追い出す結果となりました。

2 TFT研究開発のルネッサンス

ところが、裏街道に行くこのTFTに注目した一人の技術者がいたのです。RCAのワイマーという人でした。彼は、コンピュータを一枚の基板に集積する、今で言う、システム・オン・パネルを

実現する技術としてこのTFTに注目しました。このトランジスタは、素子の寸法を制限する原因となっているシリコンウエハーなどの単結晶基材を必要とせず、ガラスの様な絶縁基板上に蒸着という工程で作る事ができ、比較的大きな寸法の素子の実現も容易である事が予想されたからでした。

図4は、彼が試作実験したTFTの構造模式図です。半導体には、当時、一般的に検討されていたGeやSi等の単結晶材料ではなく、ワイドバンドギャップを有した多結晶の化合物半導体薄膜であるCdSを適用し、合せて、ゲート絶縁膜にはSiO₂を、そしてゲート・ソース・ドレインの各電極にはAuをそれぞれ真空蒸着で形成して使用しました⁷⁾。

彼は、このTFTが良好な電気的特性を示す事を見出し、その後、このTFTを用いてセルフスキャン機能を有したイメージセンサを試作実証しました。しかし、彼の提案はその後に台頭してきたCCDと言うシリコン半導体素子にまたしても打ち負かされてしまいました。

この様な状況でもTFT技術を生かす道を考え、イノベーションの言葉の提案者であるシュンペーターの言う「新結合」の概念に相当する新たな提案を行った人がいました。それはWH (Westinghouse) 社のブローディという技術者でした。

彼もワイマーの仕事に共鳴し、TFTを用いて独自の集積回路を実現させる事を夢見て種々検討を行っていました⁸⁾⁹⁾。彼は1963年から具体的研究を始めました。シリコンウエハー基材ではできない集積回路として「ペーパーTFT」のコンセプトでプラスチックやAlフォイル基板上へのTFT形成も試みまし

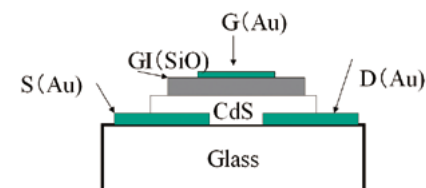


図4 Weimerによる本格的なTFTの提案・試作 (1962)

た。種々の検討の結果、彼はTFTならではの応用先としてディスプレイに目をつけたのでした。ディスプレイは、見易さや迫力という観点から素子の寸法が価値を生む商品であるからです。

その後、ブローディ達の開発グループは、1971年から米国空軍の開発援助も得てTFTをアドレス素子として用いたアクティブマトリクス型の無機ELディスプレイ (8.5型、120×120画素モノクロ表示) の試作を1973年に成功させました。そして、その成果は学会誌で発表され、世界中のディスプレイ技術者から注目を浴びました。著者も驚きと感動を持ってその論文¹⁰⁾を読んだ事を覚えています。

WH社と平行してRCA社のレクナー達の研究グループがアクティブマトリクス型LCDに関する総説論文を1971年に発表し、LCDに於ける将来の大表示容量化のためにはこの技術が有効であることを主張しました¹¹⁾。図5に彼らが提案した等価回路を図示します。これらWH社の試作やRCA社の総説論文発表の以降は、ディスプレイ技術者の多くはここにLCDの発展の道があると信じ、各社こぞってTFTを用いたLCDの開発を開始させました。まさに、この「TFT」、「ディスプレイ」そして「液晶」は、シュンペーターの言う「新結合」を生み、「液晶イノベーション」を生むキー技術となったのです。

ところで、この折角の提案を行ったWH社とRCA社は、その後の社内事情でそれぞれディスプレイから手を引く結果となり、TFT-LCDの研究開発の主体

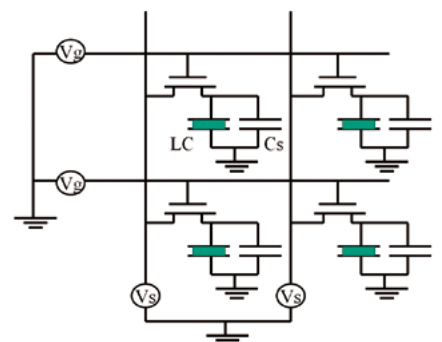


図5 Lechner達によるTFT-LCDの概念 (等価回路) 図 (1971)

は、シャープを含むそれまでとは異なった企業群へ異動する事となりました。

3 シャープに於ける TFT-LCDの研究開発の始まり

1964年に世界で始めて固体演算素子(トランジスタやダイオード)を用いた電子式卓上計算機CS-10がシャープから商品化されました。そしてこの机の大半を占める正に「卓上型」の電卓を、ポケットに入り何処へでも持ち運びし使用できる商品にしようと言う若手技術者達の強い思いから、先ずは、そこで用いられていた機能素子としての演算素子を数千個のトランジスタやダイオードを配線接続した回路基板から数個のLSIへ置き換えました。また表示素子については、数字形状の電極を有したニキシー管と呼ばれた放電管からLCDへと進化させました。そして、1973年には夢の実現としてのポケットに入る液晶電卓EL-805を実用化させるに至りました¹²⁾。

ところで、この電卓用の動的散乱モード(DSM)を適用したLCDの完成に続き、更に低消費電力で駆動できるツイステッドネマティック(TN)型のLCDの開発を1975年に完了した中央研究所では、次なるテーマとして、それまでの電卓用の数字表示型LCD開発時にはひとまず横に置いていた「夢の液晶テレビの実現」をテーマとしその実現を目指す事に決定しました。テレビができればその当時は未だ発展途上にあつたパーソナルコンピュータへも当然応用が可能なはずだとの思いがあつたからです¹²⁾。

具体的には、1976年の初めからマトリックス電極構造を有した大容量表示LCDの開発に着手しました。ただし、方法論としては単純マトリックス方式とアクティブマトリックス方式を平行して推進する事としました。なぜなら当時は液晶材料、液晶表示方式の発展も著しく構造が簡単な単純マトリックス方式でも画像表示の可能性が残されていると判断したからです。

しかし、一方、CRTに勝る表示性能

を得ることは一方で困難さも予想されていきました。そこで、構造は複雑になり製造コストの上昇は止むを得ないものの原理的に機能分離分担効果で良質な表示性能が期待されるアクティブマトリックス方式もリスクヘッジとして平行推進する事としたのです。

当初は、単純マトリックス方式に注力しました。1978年度には放送文化基金の援助も得て5.5型の160×120画素のモノクロタイプLCDを試作しました¹³⁾。

ここには、当時としては考えられる限りの液晶技術(弾性係数等の物性定数の最適化を図った液晶材料、液晶リタレーションや液晶分子配向の最適化、**図6**に示す液晶2層化・2重電極構造・上下引出し方式電極パネル技術と合せたマルチプレックス駆動のデューティ比低減駆動(1/15デューティ)技術等)が導入されました。

その結果もあり、確かに、LCD技術を用いてテレビ信号を受け、**図7**の放送画像がその試作品で表示されました。「液晶でテレビができた!」この感動を関係した技術者全員で分かち合いました。

そして、この技術をベースに更に液晶材料の物性値の改良と液晶分子配向技術で表示特性を向上させ、1/64デューティ比の高マルチプレックス駆動でコスト的にも商品ターゲットに入る目処を得るレベルに辿り着きました。

また、並行して中央研究所内で開発が行われていた薄いアルミ板の上に有機絶縁膜をコートしてLSIの高密度実装が行えるMO基板(Metal Based Organic Film Substrate)が開発され、そ

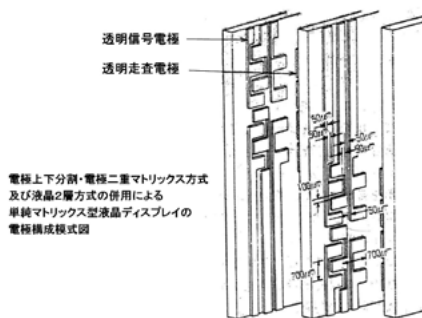


図6 シャープで最初に試作した単純マトリックス型液晶テレビの電極構造

の技術とこのLCDパネルを組み合わせ、情報表示も行えるコンパクトな白黒液晶テレビを開発する計画が提案され、MO基板の開発リーダーであつた中武係長(当時)がチーフとなり、緊急開発プロジェクトA169が1982年から1年2ヶ月の期間で推進され、**図8**に示す2.5型の白黒液晶テレビの試作品が完成しました。

この試作結果を受け、事業化に進むべきか否かの議論が天理の中央研究所と栃木のテレビ事業部の間で連日のように行われました。

しかし、結論は「否」でした。「確かに液晶テレビとしては他社が試作発表しているものより良い事は認めるが、国産テレビのパイオニアとしてのシャープが発売するテレビの画質にはマッチしていない」というテレビ事業部からの見解を踏まえての会社としての最終判断でした。

そこで、液晶パネル開発の我々は、「こけてもただではおきへんで!」の精神で、この単純マトリックス方式は、テレビほどの高速応答速度が要らないワープロ、パーソナルコンピュータ、ゲームへの応用を目指す事とし、大和郡山の情報機器の事業部へ提案をしました。また、「テレビはアクティブマトリックス方式に集中する」と結論付けを行いました。

この方向付けを受け、単純マトリックス方式LCDは、その後はSTN技術や位相差補償技術の開発と合せ、ワープロ、ノートパソコン、ゲーム機器、産業機器用ディスプレイ等を始めとする多



図7 シャープで最初に試作した単純マトリックス型液晶テレビの表示画像(1978年)



図8 A169P.T.により開発試作された2.5型白黒液晶テレビ

くの電子機器に発展活用され1980年代の液晶事業の中核技術となり、平行で進められた当社のTFT-LCDの開発と事業化立上げを資金面で支える役目を担いました。

ところで、テレビを目指しTFTの探索研究に着手したものの当初は具体的にどうして良いのかが分からない状況でした。WH社やRCA社の論文を読んでも具体的に試作を行えるまでの情報はなかなか得られませんでした。ともかく多くの情報を得るために世界中の学会誌はもちろんの事、国会図書館から全国の大学の博士論文なども手当たり次第に調査しました。

またTFTの試作実験を行っていた当時の実験室は、一般の回路や機械工作を行う実験室と同様な状況でクリーンルームではありませんでした。その事もあり試作品は作っても作っても電極の断線やショートで特性は得られませんでした。真空装置内のクリーニングも行いましたが良好な結果は得られませんでした。

その様な中で、一番の原因は数百nm膜厚のゲート絶縁膜のショートである事が分かって来ました。なお、ゲートのチャンネルは数十 μm の細さのタングステンワイヤを治具でピンと張って蒸着マスクとして製作していました。この様な状況の下、研究室内の討議の中で電界コンデンサの絶縁膜の活用が話題になり、TFTのゲート絶縁膜にこの

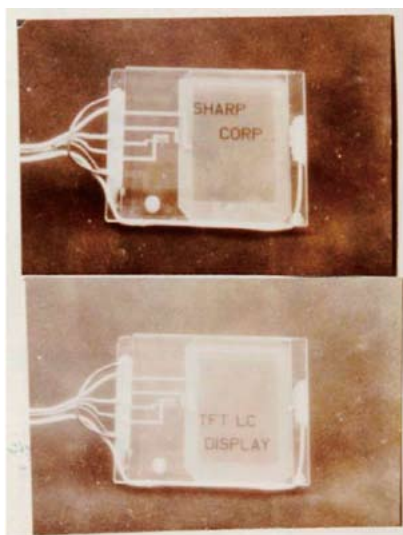


図9 シャープで最初に試作されたTe-TFTを用いたTFT-LCD(2画素, 2TFTで構成, JEIDA委託事業の初年度(1979)成果

技術を使い、濾過した純水を用いて陽極酸化膜を使えばダストの影響を減らす事が可能かもしれないという仮説が提案されました。

この仮説は、当たりました。Alをゲート電極とし、その陽極酸化膜の Al_2O_3 をゲート絶縁膜としたCdS-TFTが初めて動作をしたのです。シンクロスコープ上に出たその信号に関係者は喜びの声を上げました。

この様な試行錯誤の2年間を経て、1978年頃にはようやく試作実験を行う蒸着装置や蒸着マスクの製作にも目処がつき、CdSを半導体としたTFTが試作できるようになり、トランジスタ特性も出るようになりました。

しかし、イタイイタイ病の原因物質であるCdは特定化学物質に認定され、日本では使用が禁止となりました。そこで、再度、材料調査を行った結果、Te薄膜を半導体として利用できる事が分かり、以後、この材料を用いて試作を行う事としました。

TFTの探索研究を始めてから2年が経ち、いまだスタート地点からほとんど離れていない状況からこのテーマを如何に継続させるかが現実的な問題となって来ました。その打開策として、公的助成を受ける事とし、具体的には日本電子工業振興協会(JEIDA)の開発

委託テーマ「画像表示用材料」に応募し、3ヶ年計画の認定を受け1979年から1981年まで資金援助の下に研究開発が行える事となりました。また、資金面に加えJEIDAの開発委員長を担当されていた東大教授(当時)の田中昭二先生から半導体デバイス開発に関する基本の指導を頂きました。この分野に関してほとんど知識の無かった我々にとって先生からのアドバイスは有益な支援となりました。

図9に、このJEIDAの開発依頼テーマに於てシャープで最初に試作したTFT-LCDの写真を示します。2つのTFTと2つの表示セグメントからなる単純なパネルですが初めてTFTで液晶をアドレスする事が可能である事を検証しました。

この試作品ではゲート絶縁膜に陽極酸化膜の Al_2O_3 を使用しましたが、この陽極酸化技術を調査するとTaの酸化膜 Ta_2O_5 が大きな誘電率を有しているためゲート絶縁膜の膜厚を増してもゲート駆動電圧は低く押える事が可能である事も分かり、その後は電解液の最適化も行い、Taゲート・ Ta_2O_5 ゲート絶縁膜をTFTの基本構成として使用していく事としました。この時以来、後述のa-Si TFTの量産展開時の後でもシャープではTaゲートとその陽極酸化膜 Ta_2O_5 を基準プロセスとしてその後10年ほど活用して来ました。

液晶の負荷インピーダンスに合わせるためにTe半導体膜には約4nmの超薄膜が要求されましたが、これは蒸着内に回転ロータを組み入れ、その円盤の開口面積と回転数を制御してフラッシュ蒸着で対応しました。

そして1981年度には 17×10 ドットのマトリクス駆動に相当する英数字10文字表示の試作品(図10)を完成させ、この開発委託テーマを計画通り完了させました¹⁴⁾¹⁵⁾。

この成果は、松浦研究室長(当時)によりSID'82で発表が行われ、シャープのTFT研究開発活動を世界にアピールし、その表示完成度の高さから注目を集めました。

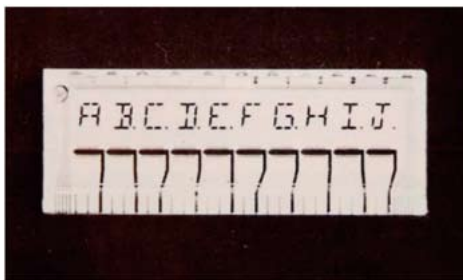


図10 JEIDA委託事業の最終(1981)年度に開発したTFT-LCD(170画素,170TFTで構成)

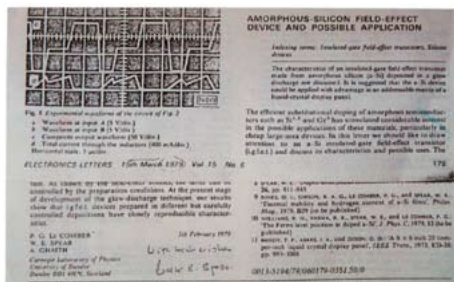


図11 Dundee大学のSpear教授から頂いた論文と記念に頂いたサイン

この様な状況の中、1975年にプラズマCVD技術を用いて形成した水素化a-Si薄膜が良質の半導体材料になる事を発見した¹⁶⁾ イギリスのダンディ大学のスペア教授が当社に招聘され、技術本部内でアモルファスシリコン(a-Si)とその応用につき講演をされました。話の内容は、太陽電池への応用が主体でしたが、最後にTFTについても言及され、最近、良い特性が得られるようになったと特性図を示されました。また、講演後にスペア教授の研究グループがこの特性が記載されている論文¹⁷⁾に記念にとサインをして貰いました(図11)。ともかく、出席していた私達は、Teと比べ桁違いに良好なその特性に圧倒され、研究室に戻るや否や仲間共々これからはTeを止めてa-Siにシフトしようとのことになりました。

早速、追試実験を行う事に成りましたが、我々の研究室にはプラズマCVD装置がありませんでした。中央研究所の中を調べて見ると太陽電池の研究グループがその装置を保有している事が分かり、その技術者に「一度だけだよ!」との条件でa-Si薄膜を着けて貰いました。シャープで初めて作ったa-Si TFTは、それまでのTe-TFTの経験・技

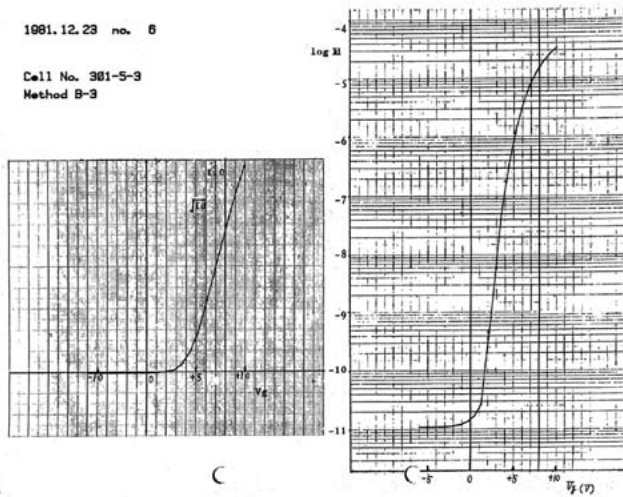


図12 シャープで最初に試作したa-Si TFTの特性図(1981.12.23)

術が活かされたのかもしれませんがスベア教授の成果に匹敵する素晴らしい特性(図12)を示しました。1981年12月23日の事でした。

ここで、a-Si TFTを採用する方針が実質的に固まりました。しかし、そこにまた大きな壁がはだかっていました。良質のa-Si薄膜は、一般の蒸着装置では形成できず、専用のプラズマCVD装置が必要なのです。それもゲート絶縁膜と半導体膜が連続して形成できる2室型の装置が望まれました。しかし、その装置は数千万円以上とかなりの高額であり、既定の研究費予算内で工面できる状況ではありませんでした。

そこでJEIDAの開発依託テーマの3月終了に引き続き、別の公的助成を受けこの予算でこの問題を乗り切ろうと考え、今度は通産省の開発助成プロジェクトに総予算2億円強の計画で応募する事を決め、1982年の2月に大阪通産局へ申請を行いました。その後、続いて行われた霞ヶ関の通産省での応募ヒアリングで、「既に某社がシャープさんと同様なa-Si TFT-LCD開発の提案をし、このテーマはその会社で対応する事が決まっています。シャープさんがこの方面で行いたいのなら異なる半導体の材料を用いてください。それなら助成の可能性は有ります」との通産省の担当者の返答でした。

その日は、頭の中は真っ白になり失意の内に帰宅しました。

翌朝、仲間達と緊急打合せを行い、対策検討を行いました。その結果、苦肉の策として通産省対応の助成テーマはTe-TFT LCDの開発とし、その中で高精細のマトリクス表示には精度の高い露光装置と特性・寿命信頼性の確保のためにはプラズマCVDで作成したSiNxの保護膜が有効と考えられるのでその設備導入が必要であるとのシナリオを作成しました。

このシナリオを持って再度、通産省を訪問し担当員に長時間をかけて説得し、ようやく了解を得る事ができ、1982年の4月から3ヵ年計画の研究が開始されました。1982年度には1年目の成果であるTe-TFTを用いた50×50ドットの試作品(図13)を計画通り作り上げました¹⁸⁾。

この試作で自信も付き、2年目からは全体計画を1年繰り上げて3年目の最終目標を2年目で完了させる事としました。

プラズマCVDの装置が入ってからは、定時には通産省テーマの実行を行い、時間外にはそのプラズマCVDを用いてガスを変えa-Si TFT-LCDの研究を行う日々が続きました。研究グループのメンバー共々会社内で泊り込む日々も多くなり、確かに肉体的には大変な時期でしたが、日々の技術的進展は著しく、精神的には充実し苦勞などを忘れての「わくわくの毎日」でした。

その結果、1983年には正式テーマの



図13 通産省の補助金(初年度1982)を受けて試作したTe-TFTを用いた50×50ドットのマトリクス型LCD



図15 独自テーマとして試作した階調付き白黒表示の3型a-Si TFT-LCD(248×204ドット)(1983年6月)



図14 通産省の補助金(次年度1983)を受けて試作したTe-TFTを用いた文字放送対応の3.2型248×204ドットのマトリクス型LCD

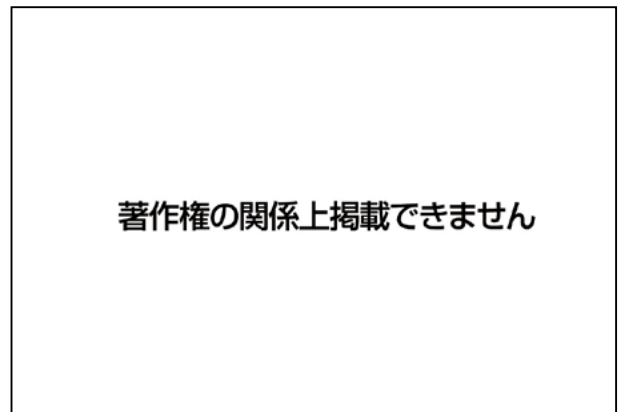


図16 シャープで最初のカラー液晶テレビの試作品:3型248×204ドットa-Si TFT-LCD(1983年9月24日に放送中の番組「Dr.スランプアラレちゃん」を表示させた写真)

計画目標である3.2型248×204ドットのTe TFT-LCD(図14)を試作すると共に、6月頃には自主研究、いわば裏テーマとしてのカラー液晶テレビを目指したa-Si TFT-LCDの研究の中で図15に示すようなTeよりはるかに特性の良い中間調が表示できるa-Si TFT-LCD(白黒)も試作できてきました。

ところで、カラー化の研究は、既に平行して1981年から東北大学の内田助手(当時)と共同研究を行っていました。それは内田助手がLCDの将来のフルカラー化を狙って世界で始めて視差のないカラーフィルタの液晶パネル内付け方式を考案し、1981年に国際学会発表¹⁹⁾をされた事に注目したからです。

この様な研究開発状況下で一つのアンダーグラウンド情報が1983年の1月頃に飛び込んできました。

それは諏訪精工舎がカラー液晶テレビの技術を5月に米国で開催されるディスプレイの国際会議SID'83に発表するらしいと言う情報でした。尤も、パネルは石英基板上にSi MOS-LSIのプロセスを利用し作成した高温プロセスの多結晶Si TFTであり、小型のLCDらしいと言う内容でした。

そこで我々の開発グループは東北大学との共同研究の成果を活用し、即、カラー化へハンドルを切り直しました。しかし、当時としては高精細3型248×204ドットのカラーフィルタの製作は容易ではありませんでした。何とかして早くカラーフィルタを入手しようと社内を駆け巡りました。そうすると、IC事業部で製造しているCCDで高精細のカラーフィルタが使用されており、それは凸版印刷が製作していると言う

事が分かりました。早速、コンタクトを行ったものの「そんなに大きなものは作った事がない」とのネガティブな返事でしたが、「とにかくやってみてください」と繰り返し試作を依頼した結果、「根負けしました。やってみましょう」との回答を得る事が出来ました。

9月になりようやくカラーフィルタの試作品が出来上がり、カラーTFT-LCDの試作が行えました。

そして1983年9月24日に図16に示すカラーの動画像が初めて表示されました。感激の一瞬でした。「ばんざい! やった!」の音が実験室に轟きました。研究開始から8年目の到達点でした。

通産省正式テーマとしての白黒表示の文字放送用Te TFT-LCDについては、経営トップはあまり興味を示しませんでした。オン・エアーのカラーテレビ

著作権の関係上掲載できません

図17 クリーンルームのお陰で断線の無い試作品が完成(1984年3月に放送中のテレビ番組を表示させた写真)。この試作品(3.2型255x240ドットのカラー液晶テレビ)を用いて本格的な開発事業化を提案し、緊急開発プロジェクトA190が発足



図19 A190P.T.の開発成果の小型カラー液晶テレビセットの試作品(図18はこの試作品の画面を撮影したもの)。この試作品によりa-Si TFT-LCDの事業化が決定され、事業化緊急開発プロジェクトA208P.T.が発足

著作権の関係上掲載できません

図18 A190P.T.の開発成果の3.2型360x240ドット(デルタ画素配列)カラーa-Si TFT-LCDの試作品の表示例(1985年9月に放送中のテレビ番組を表示させた写真)

表示が行えるa-Si TFT-LCDを見るや否や目の色が変わりました。また、諏訪精工舎による2型液晶テレビのSID'83での素晴らしい試作発表²⁰⁾は、結果的にはむしろ我々の背中を押すポジティブな役割を担ってくれました。

そこで、我々もこの時とばかりに中央研究所内にクリーンルームを作成して欲しい旨の直訴を行い、その許諾を得て1984年にはクリーンルーム内で製作した断線欠陥のない良好な表示の3.2型の試作品(図17)を作る事ができました。そして、その結果を受けて緊急開発プロジェクトA190が1984年5月に発足し、私はそのチーフを担当しました。

A190プロジェクトでは、携帯型の液晶テレビセットを開発する事を目標と

して1.5年の期間で研究開発が行われ、a-Si TFTも良好な特性が得られるようになりSID'85へも発表を行いました²¹⁾。

1985年の秋には計画通り図18の画面が表示できる小型液晶テレビの試作品(図19)が完成しました。この小型テレビセット試作品を役員会へ呈示すると共に事業化提案を行い、了承されました。役員会の承認を受けた後、即、事業化緊急開発プロジェクトA208が発足し、私は引き続き量産技術開発チームのチーフを担当しました。

その頃、ほぼ同時期に松下電器でもTFT-LCDを応用した小型カラー液晶テレビの事業化への動きが具体化しだしたとの情報が入ってきました。

4 1980年頃に於けるTFT研究活動状況

1985年頃には上述の様にa-Si TFT-LCDの実用化の動きが当社以外でも活発になってきていました。その背景には、先にも述べましたが1975年にダンディ大学のスベアのグループが、低温プロセスのプラズマCVD法により荷電子制御が可能な良質の半導体特性を示すa-Si薄膜が作成可能であることを実証し、太陽電池を始めとする薄膜機能素子にこの技術が応用可能であることを示した事がありました¹⁶⁾。

この論文に続き、1979年には同じスベアのグループが良好な特性を示すa-Si TFTを試作し、その特性を論文発表¹⁷⁾した事でより一層この分野の研究者達の注目が一斉に集まったのでした。それまでのCdS薄膜等によるTFT研究で悩んでいた研究者にとってこれはブレイクスルー技術として認識され、TFT実用化への動きとして急展開したからでした。

その様な動きの中で、特に日本に於いて特筆すべき4つの機関の注目すべきTFTの研究開発に関する活動がありました。

その第一は、1979年7月に特許出願²²⁾され、翌年に論文²³⁾としても発表された日立の丸山達のグループによるMBE技術を半導体膜やゲート絶縁膜に応用

し製作した低温型多結晶Si TFTの開発でした。

彼らは、プラズマCVDとは異なるMBEという成膜技術を用いてガラス基板が適用可能な低温プロセスでありながら良好な特性の多結晶Si TFTを実現し、平面ディスプレイへの応用可能性を示したのです。

この論文は、我々にとってもTFTの将来発展に対する希望とビジョンを与えてくれた点で忘れる事の出来ないものでした。その後、彼らは1982年には実際に10×10ドットの多結晶Si TFT-LCDの試作品を発表し、LCDへの適用性を実証しました²⁴⁾。

第二は、1979年9月の応用物理学会で東京工業大学の松村達から発表されたプラズマCVD技術により形成したa-Si TFTの試作と特性呈示でした²⁵⁾。

基板とゲート電極をSiウエハーで兼用し、ゲート絶縁膜に熱酸化のSiO₂膜を使用し、半導体層とソース・ドレインの接合部にそれぞれa-Si層とn+層を適用した構造でした。

まだ、この時点ではスペアの論文発表は日本ではほとんど知られておらず、太陽電池で検討が始まりだしたプラズマCVDが低温形成のTFTにも活用できることを我々も始めて知りこの技術に興味を覚えました。彼らは翌年の春の学会ではガラス基板上に試作をして特性発表²⁶⁾を行い、この技術のICへの応用可能性をアピールし、注目を集めました。

第三は、キャノンの動きでした。キャノンの中桐達は、1980年3月にa-Si TFTに関する特許出願²⁷⁾を行いました。その明細書にはガラスを基板として使用し、半導体材料とゲート絶縁膜にプラズマCVDで形成したa-Si薄膜とSiNx膜をそれぞれ使用すると共にソース・ドレインのコンタクトにプラズマCVDでPを添加したn+型a-Si膜を用い、そして各電極にAlを適用するという今日標準となっているスタガー形TFTの構造の提案でした。

ただし、この特許出願は、その後、東京高裁の審判決定で上述のスペア論文と

東京工大の学会発表資料によって進歩性が否定され、無効判決となりました。

第四は、半導体エネルギー研究所からの特許出願でした。それは1980年6月に山崎により発明・出願²⁸⁾されました。

この特許のポイントは、上述のキャノン特許の構造に加えて、更にソース・ドレイン構造とゲート絶縁膜や保護絶縁膜に関するSiNx絶縁膜が接触関係にあるという実施構造上必須要件の限定を加えたものでした。

この特許は、発明者の執念を持った権利化活動、即ち、米国特許法に於ける分割出願・継続出願の仕組みの活用、発明者自らの多数回に及ぶ面接審査を踏まえた効果的な特許請求範囲の作成等により2002年3月に登録・権利化²⁹⁾され、その有効期限は2019年まで及ぶものとなっています。

1980年ごろには、当社や上述の研究機関以外にも、次に示すような世界中のエレクトロニクス関連のメーカーや大学・研究機関がこのa-Si TFTを中心とした研究開発に参入する状況となっていました³⁰⁾。

例えば、(蘭) フィリップス、(仏) CNET、(米) IBM, HP, Xerox, 東芝、三菱、三洋、スタンレー、第二精工舎、ソニー、旭硝子、NEC、富士通等でした。

5 TFT-LCDの事業化への始動

シャープに於けるa-Si TFT-LCDの事業化の決定がなされた1985年の当時では、TFTの量産工場は未だ存在せず、世界で初めての経験でした。その工場設計にあたり、まず問題になったのが基板サイズの問題でした。当時、TFTとの技術的関連性が近い6インチウエハーサイズのLSIの工場を参考にして先ずは検討を開始しました。

しかし、高精度の露光機等や現像装置などのホトリソグラフィ装置やスパッタ、P-CVDなどの成膜装置などのいわゆる半導体装置は全て高価であり、そのスループットからするとデバイスサイズが小さいLSIチップ程には数が多く取れず、比較的大きい約3型

のパネルでは1枚がやっとの状況なので結局の所、一枚当たりの原価が途方も無く高くなり市場価格ゾーンとは乖離してしまうのでした。

その様な中で松下電器が半導体の6インチウエハー装置を改造して15cm角の基板を検討している様子だとの情報が装置メーカーから入ってきました。「原価と松下電器には勝たねばならない!」との思いもあり、単純マトリックス型LCDの生産経験者から「TFTでもA4サイズの大画面ができ、また小型では高い生産性が期待できる大型基板を導入しよう。」との提案が行われました。

早速、メンバーが分担し各装置の大型化の調査を行うために装置メーカーを訪問し、その経営者・技術者たちにその具体化を要請しました。

折しも先述のスペア教授の影響もあり各社がa-Si太陽電池の実用化を検討していた頃でもあり、またスパッタやP-CVD装置は大型化が可能になり、合せて現像・洗浄装置や液晶パネル工程の装置は単純マトリックス用LCDの生産のために30cm角程度のものは実用化されていました。残された課題は4μm程の解像度を30cm角に渡って保証できる露光装置の確保でした。単純マトリックス用はその精度が15μmレベルのため到底、特性の良いTFTの作成には適用できませんでした。国内外の半導体露光機メーカーの営業責任者からも「対応不可」との回答でした。

その様な中で、ある日、著者が光学協会の依頼でLCDのセミナーを担当する事になりました。そして、たまたま講師控え室で日本光学のレンズ設計技術者に会い、「大型基板で精度の良い露光機はできないのでしょうか?」と質問しました。その光学技術者は、「今丁度、半導体用で縮尺露光でない1:1対応のレンズを試作している所です。それを用いてステッパを作れば30cm角も可能かもしれません」との事でした。そこで、「是非、装置化をお願いしたい」と述べたところ、数日して「やりましょう」との答えがその技術者から返ってきました。

この答えはチーム全員から喜びを持って迎えられました。早速、TFT工場の全体設計を、大型基板を用いて行う方針が決定され、その計画が経営トップの「あえて挑戦すべき」との暖かい支援発言を含め確認されました。大型基板によるTFT工場建設が本格的に開始されたのでした。

当初の計画では、1年後の1986年末のクリスマスシーズンに合せ量産出荷する予定で計画が作られていました。1986年10月のエレクトロニクス・ショーではシャープブースの表舞台を飾るべく試作品の開発が中央研究所の15cm角の試作ラインを用いて工場建設と平行推進されました。しかし、ここで、一つの大きな経営課題に直面しました。

それは、TFT-LCDに適用する液晶表示モードの選定³¹⁾に関したものでした。

使用する液晶表示モードの基本は、TN型と呼ばれる従来の電卓時代から使用してきたものでしたが、その表示方法のオプションとして無電界時に黒状態を表示するノーマリーブラックの偏光フィルタ設定のケースと一方の偏光フィルタを90度回転させた無電界時に白を表示するノーマリーホワイトの設定のケースにするかの選択でした。

前者のメリットは、駆動電圧が低く設定できるためTFTへの負荷が低く、また、表示欠陥も目立たないため歩留まりは比較的高い値が得られ、原価上は有利でした。

一方、後者は歩留まりが低くなり、また駆動電圧も高くせざるを得ない欠点はあるものの、コントラストが高く、色再現性も良好で表示品位が高いという特長がありました。言わば、原価を優先すべきか商品性能を優先すべきかの経営課題に直面したのでした。プロジェクトの内部でも連日の議論が続きました。商品化を目前にした技術アピールのためのSID'86への国際学会発表はノーマリーブラックの方式で行う事となりました³²⁾。折しもSIDの同じセッションで、松下はRGBの3原色で液晶層厚を変化させた改良版のマルチギャップ方式のノーマリーブラック方

式を適用した小型カラー液晶テレビ用のa-Si TFT-LCDを発表しました^{33) 34)}。

この様な状況の中で、プロジェクトの統轄責任者でもある事業本部長は、「原価を優先すべき」と判断し、その事を辻社長(当時)へ報告しました。その後直ぐに、辻社長は本部長を始めとするプロジェクトの関係責任者を招集した会議で、「店頭で二つが並んでいたら君達はどちらを買う? 良い見え方のモノしか買わないだろう」と述べて商品化は「ノーマリー・ホワイトで行くべき」と決断されました。

この方向付けに基づき以後の試作はノーマリーブラック方式を止め、全てノーマリーホワイト方式へ変更されました。

そして、1986年10月のエレクトロニクスショーではノーマリー・ホワイトの試作品(図20)がシャープのブースの正面で展示され、他社のノーマリーブラックの試作品と比較し格段の高表示性能でシャープのカラー液晶テレビは見学者やマスコミから高く評価されました。この点に関しては、数年の後、市場から他社が製造していたノーマリー・ブラックの商品がすべて消失した事から見ても正しい経営判断でした。

しかし、一方でシャープに於ける量産のための障壁は、大型基板採用と共にこのノーマリーホワイトへの対応で益々高くなってしまいました。当初の年末出荷の目処が全く立たない状況に落ち込んでしまったのです。また、一方で11月には「シャープが量産を開始」との新聞報道も出てきました。

その様な中で、松下電器も製品出荷が遅れている状況でしたが少量生産ながらも販売都市を限定して1986年内に液晶テレビの出荷を行い、この分野での世界初のタイトルを奪ってしまいました。そこでは、マルチギャップと呼ばれる液晶層の厚みを3原色で変化させた改良型のノーマリーブラックの方式が採用されていました。

1987年を迎えても我々の歩留まりはなかなか上昇しませんでした。コントラストが良いだけに表示のムラやシミ



図20 事業化プロジェクトA208P.T.で開発された小型カラー液晶テレビ用の3型384X240(デルタ配列)a-Si TFT-LCD。1986年の9月に完成し10月のエレクトロニクスショーに出展し好評を得た。商品化は1987年5月から開始

が目立ちました。連日、鷲塚事業部長(当時)を議長とする検討会が深夜まで成され、全ての工程を原点に戻って一つ一つデータを積上げていきました。

その結果、TFTプロセスに於ける「洗浄」が問題点として浮かび上がってきました。TFTのスレッシュホールド電圧が経時変化をしたのでした。それは、表示には画面の「カスミ、ムラ、シミ」となって表れました。また、その汚染状況も日々大きく変化していました。このような状況の中、不良品が工場の片隅にどンドン山積に成っていきました。

毎日、多大の損失が出る事もあり、プロジェクトの統轄責任者へ毎日深夜に報告に行くという正に地獄の日々の状況でした。その様な中で、すぎる思いで白洋舎の洗濯研究所を訪問し、そこでそもそも洗浄とはの話から教授して頂き、液晶分子配向用のラビング布を徹底洗浄して頂く事などを行って貰いましたが、その研究所長も「うちではいろいろな衣類を洗浄し、それには自信も有りますが、ガラスの洗浄だけは経験がありません」と明確な答えはいただけませんでした。

もちろん、平行して中央研究所の分析グループの協力も得て、ガラス表面の化学分析も行って貰っていました。そして、原因と思われるダストなどの付着と合せて種々の化学材料の基板への付着現象が分析の結果、徐々に確認

されて来ました。

結論は、科学的な不純物の残り、結局、良く洗浄が出来ていなかったのです。

研究所の実験室で使用していたTFT基板の単位面積あたりの溶剤や洗浄液の使用量は、工場のもものと比較すると当然とは言え桁違いに多量であり、工場では法律の規制や稼働コストの点から使用量を少なくせざるを得なかったからでした。そこで抜本的に、洗浄液、洗浄方法、設備、液量・温度などの条件等を再度、見直す事とし、ようやく春頃には安定生産の明かりが見え出してきました。

しかし、未だもう一つの大きな問題が残されていました。表示の「焼付き」の問題でした。同じ表示を続けておくとその表示が記憶され、次の画面と重なり、表示が見にくくなる問題でした。TFTの時と同様に原点に戻ってまでの検討の結果、この現象は液晶プロセス、特にポリイミド材料からなる液晶分子配向膜に起因している事が分かり、その熱処理温度が200度程度に低い場合に高分子重合度が低くなり、未反応物がイオンとなり電荷を運び、それが表面に吸着して電気2重層による記憶現象としての表示不良をもたらすと言う事が分かって来ました。そしてある日、この分野を担当していた若手技術者の水嶋担当(当時)が「配向膜に予め完全重合させたポリイミド材料を使い、更にポリイミド材料をイオン吸着能の小さい脂環族化にすれば良いのではないですか」と提案を行い、メーカを彼の推薦した会社に変えて急遽開発をさせました。これでようやく解決の方向が見えてきました^{35)~37)}。そして、当初計画からは半年遅れとはなりましたが1987年5月に3型のTFT-LCDを搭載したクリスタルトロンと名づけた液晶カラーテレビの出荷が始まりました。

しかし、生産が始まって未だ歩留まりは低く、利益が得られるような状況にはありませんでした。工場では連日、歩留まり向上のための検討が深夜まで行われました。その様な中でこれ

までの歩留まり向上策を全て盛り込み、「一度、もっと大きなTFT-LCDを作ってみよう」という声が技術者の間から出てきました。そして、「どうせ作るなら基板全面を使ってCRTのモニタ並みの14型にしよう」という話がシステム担当の武係長(当時)やプロセス担当の矢野係長(当時)から出て、柘川部長(当時)を通じて鷺塚事業部長(当時)の所へも行き、「それは面白い、やろうじゃないか」と話は秋頃から具体化しました。当時の3型から推定される歩留まりでは、14型の良品歩留まりはダストに係るものだけでもゼロに近く、計算では1万枚作っても良品は取れない状況でした。

そこで、新たに冗長設計と言う概念を導入する提案が行われました。配線を複数にしてはしご状につなぎ一つが切れても他方が助ける構造としたのです。トランジスタも複数配線を活用して一つの画素に4個をつくり、一つくらい壊れても大きな表示欠陥にならないようにしました。このように考えられる設計を全て加えて14型TFT-LCDの設計が行われました。ただでさえ歩留まり向上策のために忙しい毎日の中ではありましたがこの開発検討がむしろ各技術者に夢を与える結果ともなり、両方の業務が平行して積極的に行われました。即ち、それは技術者に日々のルーチン業務に活気を注ぐインセンティブともなったのでした。

そして、翌年の1988年3月には14型のTFT-LCDが工場のラインから出来上がってきました。そして4月に入りその駆動実験が行われましたが、表示は出ませんでした。専用の駆動LSIが無かったために止むを得ず既存の3型液晶テレビ用のドライバLSIをそのまま使用していたために周波数特性などが大型のLCDの仕様に合っていないからでした。

敢えて仕様を超える高い電圧を印加させ、言わばオーバースペック状態ながらチップの発熱を扇風機で冷やしながら動作をさせました。そしてようやくゴールデンウィークの連休に入っ

た所で初めてカラーVGA仕様の14型TFT-LCD^{38) 39)}の感激の表示(図21)が表れました。辻社長にもすぐに連絡が行き、急遽、天理工場でこの成果を確認され、感動を持って技術者達の努力を労われました。連休が明けた後には天理のTFTに関係したものの全てがこの感動を共有しました。そして、当社として6月にこの技術をマスコミへ発表する事が決まったのでした。シャープの経営トップの浅田副社長(当時)、鷺塚事業部長が技術説明を行い、辻社長がその事業化展開をコミットした事もあり、翌日の各新聞に大きく掲載され、産業界に一大センセーションを巻き起こす結果となりました。その結果、日本国内の他のエレクトロニクスメーカも一斉に怒涛の如くこの事業分野へなだれ込み、一つの大きなTFT-LCDと言う産業が生まれました。14型TFT-LCDの記者発表は、正にそのトリガーとなったのでした。

ところで、大型のTFT-LCDの開発は、シャープが最初かと言うとそうではありませんでした。シャープが発表する2年前には松下が12.5型カラーVGA仕様の冗長設計を加えたa-Si TFT-LCDを学会で試作発表をしていました⁴⁰⁾。また、1年前のSID'87ではセイコー電



図21 TFT-LCDをCRTと並ぶディスプレイの有力技術として世間に認識させた14型カラーa-Si TFT-LCD。このTFT-LCDは、1973年の世界初のLCD量産事業化に関した液晶電卓EL-805と共に液晶開発史における重要なマイルストーンとなった

子工業が正に14型のカラーVGAに近い640×440画素のa-Si TFTを応用したTFT-LCDを発表していました⁴¹⁾。しかし、その表示はおせじにも美しいといえるものではありませんでした。表示欠陥もあり、画像もぼやけた感じでした。そのため、技術者の間では話題になりましたが⁴²⁾、ビジネスや社会を動かす話には至りませんでした。

逆に、当社の対応は、画素欠陥を冗長設計で解決し、合せてCRTに比較し得る良好な表示特性の実現を図ると共に、その早期商品化を経営トップがコミットした事でした。合せて、それは単なる技術開発発表では無く、プラザ合意から始まった当時の超円高状況下の独自経営戦略として発表した内容故に社会を動かす結果となったのでした⁴³⁾。

イノベーションを考える上では、技術創出に加え経済・社会との関連による価値創出がポイントですが、この「技術発表」は、正にこの事を示した好事例と言えるでしょう。

6 おわりに

その後のTFT-LCDの発展は、冒頭でも述べた様に近々その世界市場売上規模が約10兆円の大台を越すほどのエレクトロニクス基幹産業となり、LCDと並んだイノベーションとしての半導体や通信との融合効果と相まって今日の社会のあらゆる所で活用され、世界の人々に大きな貢献を担ってきました。

そこには、背景として、人類の生業の発展過程としての農業、工業に続く情報産業の時代の到来が有ったからとも言えます。そしてその情報化社会では、人とデジタル電子機器のインタフェースとしてのディスプレイの重要性が高まり、大きなビジネスチャンスがそこに存在するとの認識で、シャープは正に社運を賭けてこの領域に人的・資金的リソースを集中し四半世紀以上に渡り注力し、今日のポジションを築いて来ました。

ところで、今、世界的に見て液晶市場は巨大な規模になりましたが、しかし、

そこで事業として本当に成功している企業は当社を含めてほんの僅かな状況であると言う事には留意しなければなりません。時代背景、それは事業にとって一つの必要条件に過ぎないのです。ビジネスには、その背景を活かすための技術戦略を含めた経営戦略が必要なのです。

シャープは、それを1970年代以来、経営トップのぶれない経営戦略としての「スパイラル戦略」と「オンリーワン戦略」の下で全社員が共感を持ち日々活動を行ってきました。そして、これが今日のシャープに於ける最大の力となっています。この力を活かし、これからも今後の時代背景に適合した新たな技術を創出すると共にそれらを社会へ思いを持って展開させ、先進国市場はもちろんの事、更に発展性に満ちた開発途上・新興国を含めた真のグローバルビジネスへと繋げれば、シャープ発の新たなイノベーションが再び創出できることは間違いないと信じています。

参考文献

- 1) 船田文明：電子情報通信学会誌, Vol. 89, p. 375 (2006).
- 2) 船田文明：電子情報通信技術史, 電子情報通信学会編, コロナ社刊 (2006).
- 3) 船田文明：応用物理学学会誌, Vol. 76, p. 462 (2007).
- 4) J. E. Lilienfeld：US Pat. 1745175 (1930).
- 5) O. Heil：UK Pat. 439457 (1936).
- 6) W. Shockley：IEEE trans. on ED, ED-23, p. 597 (1976).
- 7) P. K. Weimer：Proc. IRE, Vol. 50, p. 1462 (1962).
- 8) T. P. Brody：IEEE trans. on ED, ED-31, p. 1614 (1984).
- 9) T. P. Brody：J. SID, p. 113 (1996).
- 10) T. P. Brody et. al.：IEEE trans. on ED, ED-20, p. 995 (1973).
- 11) B. J. Lechner et. al.：Proc. IEEE, Vol. 59, p. 1566 (1971).
- 12) 船田文明 他：シャープ技報, No. 69, p. 5 (1997).
- 13) 和田富夫 他：放送文化基金研究報告 4 (昭和53年度助成分), p. 208 (1980).
- 14) M. Matsuura et. al.：SID '82 Digest, p. 34 (1982).
- 15) シャープ株式会社：電子工業月報, Vol. 24, p. 65 (1982).
- 16) W. E. Spear et. al.：Solid. State Comm., Vol. 17, p. 1193 (1975).
- 17) P. G. Le Comber et. al.：Elect. Lett., Vol. 15, p. 179 (1979).
- 18) M. Matsuura et. al.：SID '83 Digest, p. 148 (1983).
- 19) T. Uchida：Eurodisplay '81 Digest, p. 39 (1981).
- 20) S. Morozumi et. al.：SID '83 Digest, p. 156 (1983).
- 21) Y. Ishii et. al.：SID '85 Digest, p. 295 (1985).
- 22) 松井誠 他：特許公報, 平5-20912 (1993).
- 23) M. Matsui et. al.：Appl. Phys. Lett., Vol. 37, p. 936 (1980).
- 24) M. Matsui et. al.：The 14th Conf. on SSD Digest, p. 141 (1982), J. J. Appl. Phys., Vol. 22, p. 497 (1983).
- 25) 葉山浩 他：応用物理学学会秋季年会, 30P-S-18 (1979).
- 26) 葉山浩 他：電子通信学会総合全国大会, S3-13 (1980).
- 27) 長田芳幸 他：特許公報, 平4-49269 (1992).
- 28) 山崎舜平 他：公開特許公報, 昭57-13777 (1982).
- 29) S. Yamazaki et. al.：US Pat. 6355941 (2002).
- 30) 林裕久：日経エレクトロニクス, 12月7日号, p. 122 (1981).
- 31) 船田文明 他：テレビジョン学会誌, Vol. 42, p. 1029 (1988).
- 32) F. Funada et. al.：SID'86, Digest, p. 293 (1986).
- 33) S. Hotta et. al.：SID'86, Digest, p. 296 (1986).
- 34) 田中誠一 他：National Tech. Rep., Vol. 33, p. 64 (1987).
- 35) 鷺塚諫 他：エレクトロニクス, 5月号, p. 93 (1995).
- 36) 鷺塚諫 他：エレクトロニクス, 6月号, p. 93 (1995).
- 37) 鷺塚諫 他：エレクトロニクス, 7月号, p. 106 (1995).
- 38) T. Nagayasu et. al.：Int. Dis. Res. Conf. '88 Digest, p. 56 (1988).
- 39) 鷺塚諫 他：エレクトロニクス, 8月号, p. 92 (1995).
- 40) M. Takeda et. al.：Japan Display '86 Digest, p. 204 (1986).
- 41) H. Tanaka et. al.：SID'87 Digest, p. 140 (1987).
- 42) 渡辺和博：日経マイクロデバイス, 1987年1月号, p. 40 (1987).
- 43) 寺山正一：決戦, 日経BP社刊 (2005).
- 44) 宮本惇夫：シャープ独創の秘密, 実業の日本社刊 (2007).