

フラットパネルディスプレイ概論(9) FPDの製造技術(2)新規導入技術

Introduction to Flat Panel Display (9) Production Technology of FPD (2) Introducing New Technology

Ukai Display Device Institute 代表 工学博士 鵜飼 育弘
YASUHIRO UKAI Ph.D.

Ukai Display Device Institute

1. はじめに

前号では、「a-Si TFTアレイ製造」と題してa-Si TFTアレイ製造工程を中心にTFT-LCD製造の概略を述べた。低温ポリシリコン(Low Temperature poly-Si : LTPS) TFTは高精細TFT-LCDやTFT-OLEDのバックプレーンとしては欠かせない。一方、大型化、高精細化、高品位化には従来のラビング技術に代わる配向技術が目され、量産適用されている。今回は、LTPS-TFT製造の固有技術と、液晶セル工程に新たに導入された光配向技術を紹介する。

2. LTPS TFT-LCD製造の固有技術

2.1 ELA(Excimer Laser Annealing)による結晶化技術

poly-Si膜の形成方法は大きく分けて、(1)a-Siのエキシマレーザーアニール(ELA)による結晶化、(2)a-Siからの固相成長、(3)poly-Siの直接堆積(as-depo poly-Si)があるが、ここでは現在量産プロセスに用いられているELAによる結晶化を取り上げる。なお、(2)のa-Siからの固相成長は、高温poly-Si膜の製造に適用されている。

レーザー光源としてはガス寿命の長いXeCl(波長 $\lambda = 308\text{nm}$)を用いることが多く、a-Si膜の吸収の大きい紫外光のエキシマレーザーが使われている。レーザーの照射法としては図1に示すように、光学系を組んでラインビーム形成し、ラインを重ね打ちするのが一般的である。面ビームによる一括照射も検討されているが、現時点での主流はラインビーム照射である。プリカーサに用いるa-Siは内部エネルギー

が高い状態にあるが、結晶化によって内部エネルギーが小さい状態に移る。単発のレーザー照射でTFT作製に最適な結晶化状態が実現できれば量産的にみて好ましいが、現実には複数発のレーザー照射(マルチショット)をした方が良好なTFT特性が得られる。これは、結晶粒界エネルギーおよび結晶粒界内の欠陥が複数発照射中に減少し、より安定状態に移行するためと考えられる。ラインビームを走査しながら重ね打ちする場合、大面積にわたってpoly-Si膜の結晶均一性を確保するためには、照射ビーム強度の安定性は極めて重要なパラメータである。図1に示したように、良好な結晶が得られるレーザーエネルギーマージンが非常に狭いこともあって、ビームエネルギー強度の厳密な制御が要求される。この方法では、矩形ビームの長軸ビーム長によって再結晶化される領域が制限される。LTPS TFT-LCDが量産され始めた1999年頃の装置は200mmのビーム長を有し、つなぎ合わせなしで作製できるパネルサイズは12.1型であった。現在では750mmの装置が量産に適用され55型OLED-TVの量産にも寄与している。

エキシマラインビームレーザー(308nm)

膜厚と結晶性

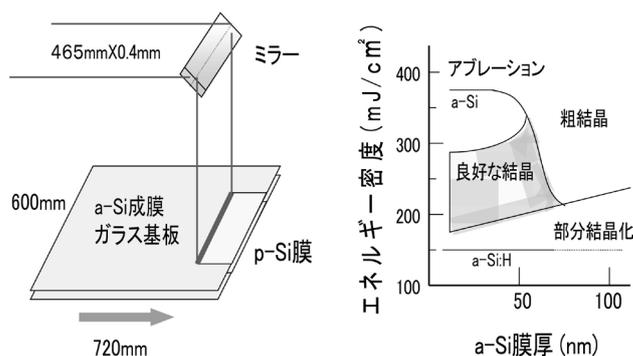


図1 ELA装置の概念とa-Si膜厚と結晶性の関係

図2に示すように現在量産に用いられている装置では、レーザー発信周波数が最高600Hz、最大出力1200W、パルスエネルギー密度Max. 2J/cm²の矩形パルス・ビームをa-Si膜上に照射させ、a-Si膜を溶かし過冷却状態にした後に再結晶化させる。プリカーサ膜としてPECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 法で形成したa-Siを用いた場合、膜中に~10%の水素を含むのでいきなりレーザー照射を行うと、結晶化と同時に膜中の水素が爆発的に抜け出る「爆発的結晶化(Explosive Crystallization)」が起こってしまう。従って、結晶化に先立ちプリカーサ膜を400~450℃程度で熱処理して膜中の水素を数%以下に脱離させるか、もしくはまず低エネルギー密度でレーザー照射して膜中の水素を脱離させる脱

水素工程を導入することが必要になる。

2.2 イオンドーピング技術

LTPS TFT構造は、a-Si TFTと同様にボトムゲート型とトップゲート型に大別される。ELA法による結晶化の観点から両者の違いは、前者は下側のSiO₂膜と接している結晶の初期成長側をチャンネルに使い、後者は上側の自由表面側をチャンネルに用いるものである。いずれの構造においてもイオンドーピングが必要な箇所は駆動回路部と画素部である。駆動回路の低消費電力化のためCMOS構造が採用されている。CMOSのソース/ドレイン(S/D)部はトランジスタの動作信頼性を高めるため、画素部のn-ch TFTはリーク電流低減のため図3に示すLDD (Lightly Doped Drain) 構造が必要である。ドレイン端での電界を緩和させてホットキャリアによる劣化を低減させることで信頼性が向上する。またリーク電流は、逆バイアスを印加した場合、ドレイン近傍の空乏層にある欠陥準位で電子とホールが生成される速度で決まる。これをLDD構造にすることで低減できる。また、TFTのしきい値電圧(V_{th})制御のためにリン(P)またはボロン(B)を精度良く注入することもTFTの開発およびTFT-LCDの応用が進むにつれ必要になってきた。これらS/D、LDD、チャンネルドーピング(V_{th}制御)それぞれについて必要なイオン種とドーズ量をまとめると、次のようになる。

- (1) S/D部:P, B, $5 \times 10^{14} \sim 5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$
- (2) LDD部:P, $1 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$
- (3) V_{th}制御:BまたはP, $5 \times 10^{11} \sim 2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$

エキシマレーザー

- ・波長 308nm
- ・パルスエネルギー密度 Max.2J/cm²
- ・最大出力 1200W
- ・繰り返し周波数 600Hz
- ・エネルギー安定性 <0.45% rms



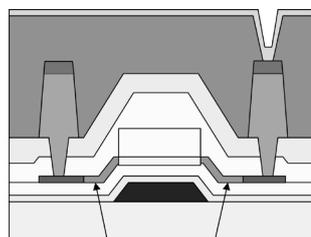
ラインビーム用光学系

- ・ライン長 750mm
- ・ライン幅 ~480μm
- ・均一性 <1.8% 2s
- ・Active Beam Stabilization
- ・Online Monitoring
- ・Line Beam Profiler

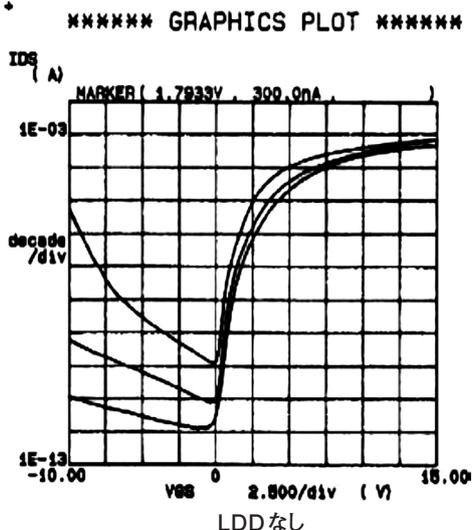
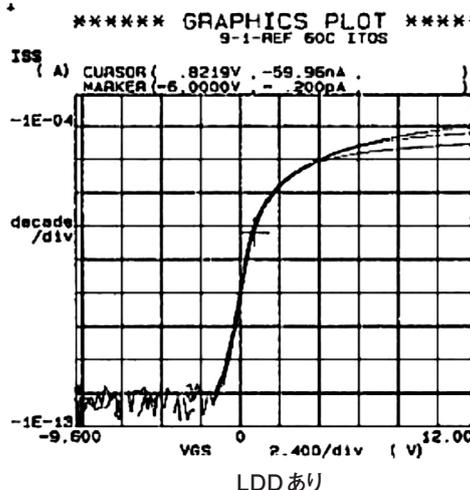


(Coherent: SID' 11 Business Conference)

図2 ELA用レーザーと光学系



この部分がLDD



ソース、ドレイン領域とチャンネルの間に比較的低濃度の不純物を添加する。(=Lightly doped drain)

- ・チャンネル-ソース間の電界を緩和することによりオフ電流(リーク電流)を下げる効果がある。
- ・ソース-ドレイン耐圧を向上させる。

図3 LTPS-TFTのLDD構造と特徴

イオンエネルギーは、デバイス構造に依存するが5～100KeVである。量産当初、図4に示すような非質量分離型装置が使われていた。この方式は基板上へのイオンビームの一括照射が可能であるため、あまり高いビーム電流密度を必要とせず高濃度注入が可能である。しかし、イオンビームの均一性を確保するためにはイオン源を大型化する必要があるが、これは低濃度注入での制御性に乏しく、基板サイズの大型化には適さない。LTPSを用いたTFT-LCDの高機能化が進むにつれ、図5に示す質量分離型のイオン注入装置が量産に適用されている。これは、非質量分離型装置の欠点である

(1)低真空領域でのイオン注入で生じるイオンの中性化と水素イオンのコンタミネーションによるドーズ量制御の困難性、(2)H⁺やその他多量の不純物イオンの混入による基板温度の上昇、特にレジストをマスクに用いた場合のレジスト焼けなどの欠点を解消できる。図6に示すように第5.5世代の基板サイズ(1300mm×1500mm)に対応できる装置が実用化されている。

イオンドーピングプロセスでは、それに引き続き活性化プロセスも重要である。活性化の手段としては、電気炉によるバッチ式アニール法、ELA法、RTA(Rapid Thermal Annealing)法がある。電気炉によるアニール法は単純で安定しているが活性化率が低く、低抵抗のドレイン・ソース領域を実現するには多量の不純物ドーピングが必要である。ELA法は活性化率が高いが、配線などが熱損傷を受ける場合がある。しかも装置価格が最も高い。RTAによる活性化プロセス装置は、ガラス基板をキセノンアークランプと反射鏡の隙間を枚葉搬送するものである。この装置の特徴は、高スループットでの活性化が可能であり、しかも大型ガラス基板への対応も容易であることにある。最近、ゾーンコン

トロール誘導加熱によるアニール装置が開発され量産工程に導入され始めた。この装置の特徴は、基板温度を短時間で制御可能でしかも面内の温度分布も良好であることが挙げられる。従来のアニール方式と比較して処理時間が1.3倍早く、COO(Cost of Ownership)を改善できる装置である。

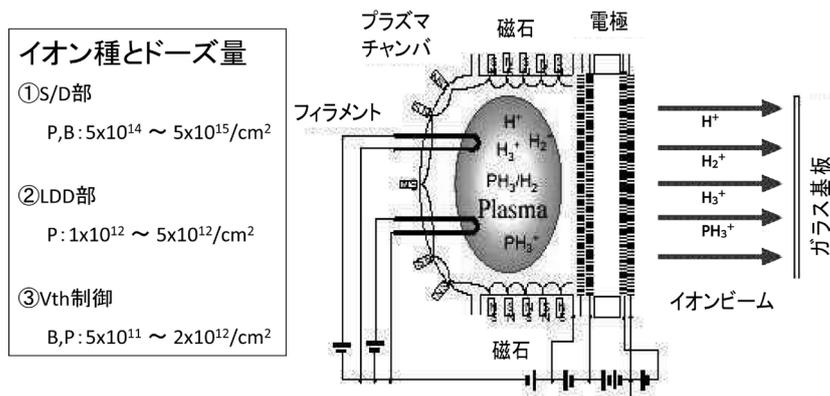


図4 非質量分離型イオン注入装置の概念図

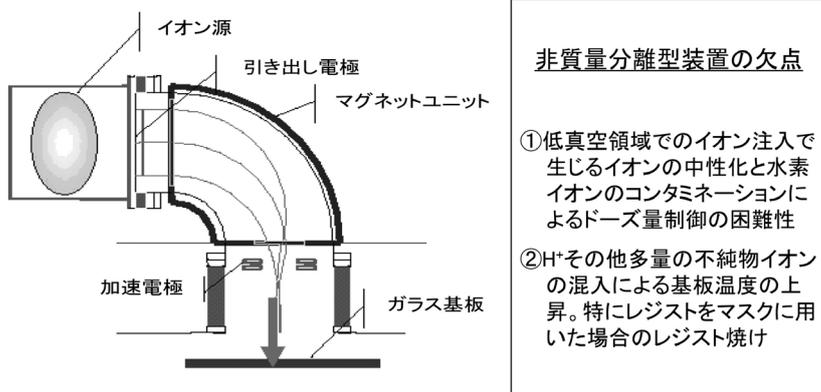
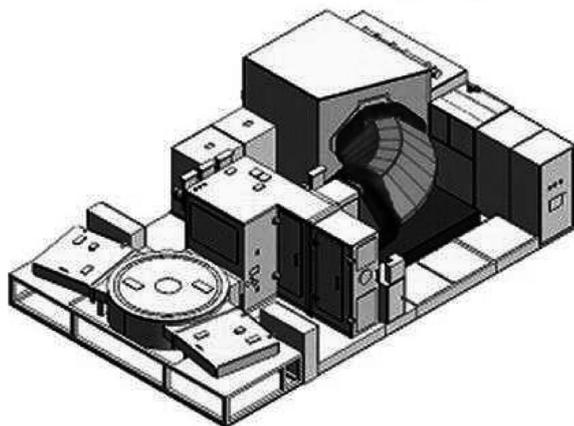


図5 質量分離型イオン注入装置の概念図

ガラス基板サイズ : 1300mm × 1500mm
 イオン種 : リン、ホウ素
 装置寸法 : W7500mm × L12500mm × H3908mm
 装置重量 : 約102t



(日新イオン機器)

図6 第5.5世代用イオン注入装置概略図

3. 光配向技術

前号の図2に示したように、液晶の配向処理としてはポリイミド(PI)膜を布でこする、いわゆるラビングが用いられている。しかし、ラビングには次の問題点があった。①ラビングによる生産歩留まりの低下、すなわち、布を高速でこすりつけるため発塵(抜けたラビング布の毛や、配向膜の削りカス)が避けられず、この異物が布やガラス基板表面に付着すると、ラビングローラーそのものが異物を引きずってしまうため、スジ状の表示ムラが発生。②またガラス基板表面に付着した異物は洗浄工程により完全に取り除く必要があり、もし残存すれば、後の工程で液晶層の厚みが均一にならないため、液晶パネルの不良要因となる。③ラビングでは布がPI(絶縁膜)を擦るので静電気を発生し、TFTが静電破壊を起こすことがある。そこで、ダストおよび静電気フリーのクリーンプロセスとして光配向が注目されてきた光配向技術が量産工程に導入され始めた。

3.1 UV²A(Ultraviolet induced multi-domain Vertical Alignment) 技術

VA-mode TFT-LCDにおいては、マルチドメインの形成法として斜め電界法が用いられている。しかし、この方法では液晶パネルの透過率の低下をもたらすため、PSA(Polymer-Sustained Alignment)方式が提案され実用化されている。この方法は液晶に光重合性のモノマー(Reactive Mesogen: RM)を微量添加し、硬化させることで配向を安定化させる。しかも、液晶に電圧を印加し液晶分子を傾斜させた状態で紫外線を照射して硬化させることで、液晶分子が傾斜配向する方位を制御するため、均一性や信頼性の課題が皆無とは言えない。シャープは、テレビ向け次世代液晶パネルの中核技術として、「光配向技術」を実用化した。これはシンプルなパネル構造で、液晶分子の向きを精密に制御できる光配向技術「UV²A技術」を開発し、世界で初めて本格的に生産導入した。この技術は、図7に示すように、紫外線

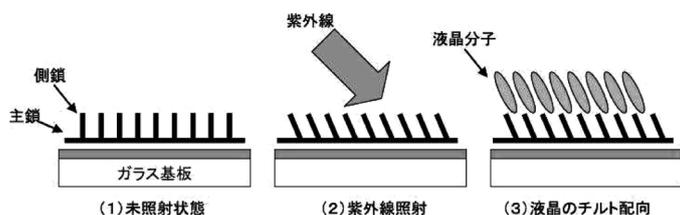


図7 UV²A技術の光配向の模式図

(シャープ資料)

によって反応する特殊な材料を配向膜として採用し、照射方向によって液晶分子の並びを高精度に制御するものである。独自の材料開発や照射装置、プロセス技術の結集による成果で、大きさがわずか2ナノ程度の液晶分子を、ピコスケールの精度で傾斜制御できるナノテクノロジーを超えた「ピコテクノロジー」という。バックライトユニット(Buck Light Unit: BLU)からの光モレがなく、「沈み込んだ黒」の表示が可能のほか、液晶パネルの開口率も高く、高効率にバックライト光を活用できるのであざやかな色を表示しながら、省エネ化も図れる。光配向技術「UV²A技術」を採用した液晶パネルの特長は、

①高コントラスト5000:1(従来比:1.6倍)

②開口率従来比:20%以上アップ

③高速応答(従来比2倍の速さ)

④パネル構造のシンプル化による生産効率の向上

である。なお、この技術を実用化するにあたって、開発した課題は主に3つある。第1は配向膜材料の開発、第2は従来にない斜め露光装置の開発、第3は前後の工程を含む、まったく新たな配向プロセスの確立である。配向の安定性は液晶分子を配向する方位角が経時変化しないこと。配向膜の加工は、UV光の照射方向に揃うように配向膜表面の高分子の主鎖を傾ける方法を用いる。

3.2 IPS-ModeおよびFFS-Mode用光配向技術

スマートフォンやタブレットの高精細化および高品位化の要望が高まっている。ここで用いられるFPDは、IPS/FFSモードTFT-LCDが大きな地位を占めている。その理由はタッチパネルとの相性が良く、本質的にタッチムラが生じないことによる。しかし、IPS/FFSモードの配向処理は旧態依然としてラビングが用いられている。ところが、高精細化および大型ガラス基板対応が困難で、しかもコントラスト比の改善にはラビングに代わる技術が求められる。

(1) UV光配向技術の課題

LCD-TVの代表的な表示モードは、VA-ModeとIPS-Modeが市場を二分している。VA-Mode TFT-LCDの配向処理方法としては、PSAやUV²Aが実用化されている。しかし、IPS-Modeの配向処理法は旧態依然としてラビングが用いられている。ラビング処理は基板表面にポリイミドなどの高分子膜を塗布・焼成後、クロスでラビング(PI表面をこする)することで水平配向を得ている。この配向処理で液晶分子は基板に水平に配向する。

基板表面と液晶分子のチルト角 (tilt angle) は1~2°で強い配向規制力 (anchoring strength) が得られる。ラビング処理を必要とするLCD-ModeはIPS-Mode以外に、広く用いられているTN-Modeがある。したがって、水平配向処理にも光配向技術の導入が急がれていたが、次の課題があり量産には適用されていない。

- ①強い配向規制力が得られないため、ラビングと同等の電気光学特性が得られない
- ②焼き付き (image sticking) が発生し、信頼性の面の大きな課題
- ③配向膜の光照射に対する感度が低く、処理時間が長く掛り量産的でない

しかし、Chimei Innolux Corporation (CMI) は、光配向技術を使ったIPS方式のTFT-LCDを開発し、FPD International 2011に出展した。画面寸法は4.5型、画素数は720×1280で、スマートフォンなどの中小型液晶パネルの量産を今年中に始める予定という。

(2) UV 配向装置

V-Technology Co.,LtdはVA-Mode TFT-LCDの光配向用露光装置としての量産実績を有す。昨年9月に北京で開催されたFPD International Chinaで植木氏から光配向用露光装置AEGISの紹介があった。この装置は表1に示すように、IPS/FFS用光配向装置である。光配向装置とは、直線偏光紫外線で配向膜に異方性を持たせ、所定の方向に液晶を並べる装置である。適用基板サイズには制限がない。なお、シャープ堺工場は第10世代対応の基板ガラスが採用されUV²A技術によ

る配光処理が行われている。光源には3kW水銀(Hg)ランプが用いられている。露光波長は285nm-320nm、主波長は313nmである。照射均一性は±5%、消光比 (Extinction ratio : ER) は30%以上である。なお、消光比の一般的定義は「光強度変調器で、透過光の強度を変化したときの最小と最大の透過光の強度の比」である。転じて光配向装置では、消光比ERは偏光の質を表す数値として、P偏光強度 I_p とS偏光強度 I_s を用いて $ER = I_p / I_s$ と表せる。照射光の偏光軸の設定は自由で、例えば、0 / 45 / 90 / 135°などが可能である。偏光軸の設定精度は±0.1°。偏光軸ムラ(±°)は、照射面における偏光方向 θ の場所ムラを表す量で、 $\pm(\theta_{max} - \theta_{min}) / 2$ で表される。

偏光板の透過率は85%以上。タクトタイムは、照射エネルギー密度30mJ/cm²で第6世代基板(1850mm×1500mm)当たり35秒である。

4. おわりに

長年、FPDのターゲットはテレビであった。しかし、今やFull High Definition (FHD)を上回る解像度のディスプレイを用いた応用製品が商品化されている。例えば、つい先ごろ発売されたApple 新iPadは9.7型、画素数2048×1536、解像度246ppiとFHD以上の画素数を有す。したがって、今後はFPDが新しい応用分野を切り開くとともに、新しい商品が我々の生活に溶け込みライフスタイルに大きな影響を与えている。

ここで紹介したLTPS-TFT製造の固有技術や光配向技術は、新しいFPDの世界を切り開く基盤技術と言える。これらの装置の多くは、依然として日本メーカーの存在価値が高い。しかし、いつまでもこの地位を維持できるかは、国内のパネルメーカーの今後に依存しているといっても過言でない。FPDに限らず物作りのなくなったところに、装置や部材メーカーの存続はあり得ないことを肝に銘ずべきである。

表1 光配向用露光装置

Item	Spec.	Remark
Application	Optical Alignment for IPS / FFS	
Applicable Glass Size	All Generation (No limitation)	
Light Source	Hg Lamp (3 kW)	
Exposure Wavelength	285 - 320nm	Main : 313nm
Illumination Uniformity	± 5 %	
Extinction ratio	≥ 30:1	
Polarization axis angle	Arbitrary Setting	0 / 45 / 90 / 135 ... deg
Polarization axis setting accuracy	± 0.1 deg	
Polarizer Transmittance	≥ 85%	
Tact Time	35 sec	G6 (1850x1500) Dose (30mJ/cm ²)

(V-Technology資料)