スマートフォンディスプレイ製造における エキシマレーザシステム

ラルフ・デルムダール

携帯電話からスマートフォンへのマーケットの変化とともに、ディスプレイサイズ、解像度、バッテリー寿命など、より高度な要望が増えている。

エキシマレーザアニーリング（ELA）は、アモルファスシリコン（a-Si）を数百倍もの電子移動度を持つポリシリコン（p-Si）に改質する重要なプロセスで、ハイエンドの中小型ディスプレイにおいては画素密度を増加させるための技術として使用されている。

エキシマレーザを用いたラインビームシステムは、スマートフォンやOLED-TV用に大型化してきた基板のアニーリングの発展を支えており、最新のELAシステムでは専用光学系で均一化された750mm×0.4mmラインビームを基板に照射し、第8世代パネルの高速アニーリングを実現している。

図1　VYPERエキシマレーザ＋750mmラインビームシステム

イントロダクション

フラットパネルディスプレイ（FPD）製造業界は、より高い解像度、より高いコントラスト、より高速なレスポンスタイムに加え、ディスプレイの省電力化も要求されている。

これらの要求はアモルファスシリコンで製造される従来のディスプレイの性能限界を超えているが、Appleの iPhone 5 Retina ディスプレイに代表される300pixel/インチ（ppi）以上の解像度を持つスマートフォンやタブレット用高性能ディスプレイには、アモルファスシリコン基板をELAシステムで改質し、大きな電子移動度を実現したポリシリコン基板が使用されている。

エキシマレーザアニーリング（ELA）は、フラットパネルディスプレイ業界においてアモルファスシリコン基板からポリシリコン基板への改質を実現するテクノロジーで、LTPS（低温ポリシリコン）の語源となっている。このエキシマレーザを使った低温プロセスにより、著しく成長するOLEDディスプレイやフレキシブルディスプレイの製造に適用できるようになった。

LTPS基板の優位性

アモルファスシリコン薄膜はPECVDの様な従来の蒸着技術により透明なガラス基板に蒸着され、シリコンは個々のピクセルを制御する薄膜トランジスタ（TFT）用半導体ベースとして機能している。しかし、アモルファスシリコンTFTは高性能なAM-LCDやAM-OLEDディスプレイに要求される性能を満たしていない。

高い画素密度、高い開口率、電気効率の良い高輝度ディスプレイを実現するためには、より小さいTFTが好ましい。しかし、アモルファスシリコンは電子移動度が低くトランジスタの最小サイズが制限されてしまう。これに対しELAシステムを用いたLTPSであれば、100倍もの電子移動度のおかげで、小さくても十分な電力を供給できるTFTを実現できるというのが最初の理由だ。

2番目の理由として、LTPSを用いることでドライバーや周辺回路をディスプレイに直接実装でき、外部信号線の数、ディスプレイの重量及び厚さを減少させることができる。3番目は、非結晶な構造を持つアモルファスシリコンは、生来不安定であり、徐々に閾値電

圧のドリフトを生じ、AM-LCDや特にAM-OLEDディスプレイにおいて輝度のばらつきを引き起こすが、LTPS化することで安定させることができる。

これらの結果、LTPS基板を用いたTFTは、高解像度のAM-LCDや成長著しいAM-OLEDディスプレイ用として理想的な高い性能と信頼性を実現する。

LTPSに依存するFPD業界

200℃で改質出来る308nmエキシマレーザアニーリング（ELA）は、現在のディスプレイ製造過程において、ポリシリコン層を形成する最適な方法であり、通常のガラス基板だけでなくフレキシブルディスプレイ用のポリマー基板にも使用できる。

ELAは非常に高いエネルギー安定性で最大2Jの高パルスエネルギーを600Hzで出力するVYPERエキシマレーザ（波長:308nm 出力:1.2kW）と適切なラインビーム光学系（**図2**）の組み合わせが必要とされる。

ELA技術とLTPS

様々なアプリケーションで使用されているELA技術において、エキシマレーザから出射されるRawビームは、専用光学系で均一なエネルギー分布を持つラインビームに成形される。アモルファスシリコンが成膜された基板に、このラインビームが照射され、基板を載せたステージが移動することで基板全面にスキャンされる（図2）。

ラインビームは基板面で約500mJ/cm^{2}のエネルギー密度でスキャンされ（10～20ショット/エリア）、長軸均一性としては1%未満を実現している。アモルファスシリコンは波長308nmの吸収係数が 6×10^{6}cm^{-1}と高くわずか1パルスの照射でほぼ完全溶融となる。そしてレーザエネルギーの急激な吸収により、アモルファスシリコン薄膜は1400℃近くで溶融し、さらに冷却されることで結晶粒に変化を起こしポリシリコンとなる。

エキシマレーザのパルス幅はおよそ30nsと短く、また308nmレーザ照射が貫通する深さは数nmと非常に浅いため、熱影響による下部のガラス基板への損傷は無い。そして完全溶融に近

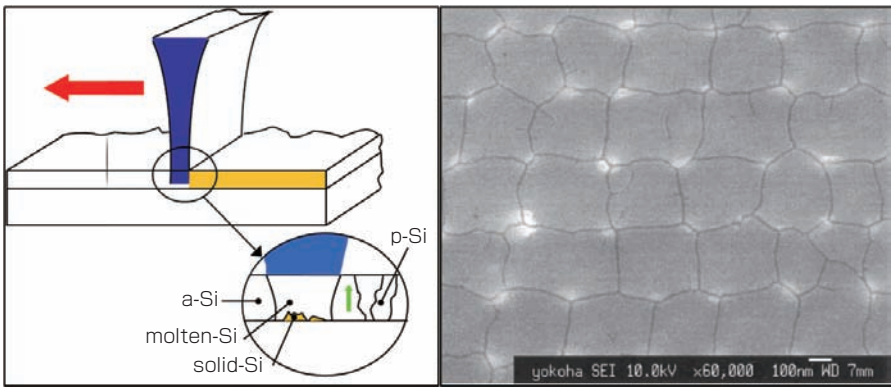

図2 垂直方向の結晶成長メカニズム模式図(左)とELAによる典型的な結晶粒パターン(右)

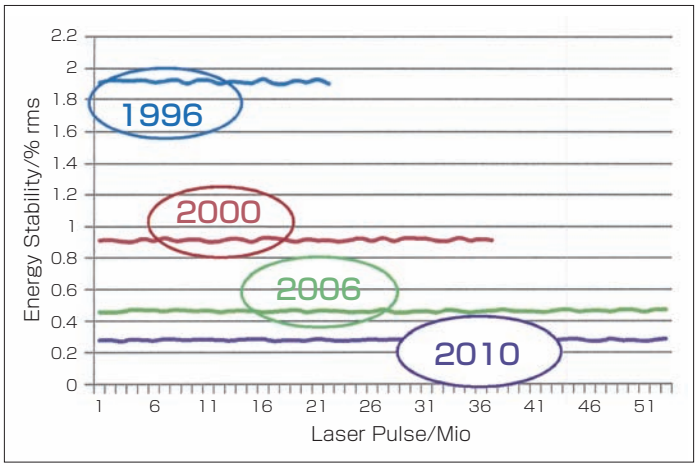

図3 ガス寿命と高出力エキシマレーザの出力安定性の歴史

い状態になることで、ランダムな垂直方向への結晶成長が起こり、効率的に結晶が成型される。

ラインビームの長さは基板の幅もしくはその1/2の幅に適合するよう選択される。

第8世代基板のアニーリングを効果的に行う750mmラインビームは最新のVYPERエキシマレーザとの組合せにより初めて作り出すことが可能となった。

エキシマレーザの出力と安定性

エキシマレーザの出力と安定性がそろって初めてFPD用のLTPSアニーリングが実現するが、より大型のパネルサイズへの要求とそれを実現するための長く均一なラインビームが、高出力308nmエキシマレーザ光源の継続的開発を後押しする主な理由となっている。

LTPSのELAプロセスでは基板に照射されるレーザパルスの1発1発を非常に精密に制御する必要があり、レーザのパルス間安定性は非常に重要なパラメーターとなっている。10年以上にわたるこの分野での進化により、308nmエキシマレーザの出力と安定性は大きく改善している。**図3**に示されている様に、これらの要素は、大型パネルにおいて高い歩留まりを得るために必要であり、特にAMOLED用LTPS基板において必要性が高い。

ここ10年の間、エキシマレーザのパルスエネルギー安定性は標準偏差(rms)とピーク・トゥ・ピークエネルギーにおいて劇的に向上し、ELAプロセス自体の安定性も向上したため、結果としてAM-LCD及びAM-OLED用のLTPS基板の量産において99%以上の歩留まりが得られている。高出力VYPERエキシマレーザと大型の基板サイズに適用されている750mmラインビームのコンビネーションはLTPSパネル製造において実に4倍も生産性を向上させた。

最近まで、LTPSベースのほとんどの高性能AM-LCDとAM-OLEDディスプレイは、第4世代のパネル上に315W/500Wのエキシマレーザと370mm/465mmラインビームを使用して製造されていたが、2011年初頭に導入された最新のVYPER/LB750プラットフォームは現在製造現場で広範に使用されており、エキシマレーザアニーリングを第4世代から第8世代に移行させている。

結果

より高解像度・高速・高輝度で、より薄いAM-LCDやAM-OLEDディスプレイをマーケットに投入するために、308nmエキシマレーザは先駆者的役割を果たしている。LTPSのディスプレイ製造メーカは、LTPSベースのシェアが増加するにつれて、スケールメリットを十分に得られ、また今後増加が期待されるOLED-TVパネルの製造を行うため、より大型なガラスフォーマットを採用することが期待される。

ELAシステムの生産性は劇的に向上し、最新のVYPER/LB750システムは、すでに第8世代大型基板の結晶化量産ラインにおいて活躍している。

著者紹介
ラルフ・デルムダール(Ralph Delmdahl, Dr.)は独コヒレント社(Coherent GmbH)のエキシマレーザ事業部のプロダクトマーケティングマネージャ。

LEDJ