

G10F-ELA 装置の開発

10th Generation Floating Stage Type - Excimer Laser Annealing System



藤 貴洋
Takahiro Fuji



山口 芳広
Yoshihiro Yamaguchi

要 旨

スマートフォン等の中小型の高精細ディスプレイのバックプレーンの製造工程にエキシマレーザーアニーリング装置 (ELA 装置) は不可欠である。今後は、フォルダブルディスプレイの実現による画面の大型化、TV においてはモバイルディスプレイと同等の性能が求められ、大型ディスプレイのバックプレーンにも ELA プロセスの適用が期待されている。ディスプレイメーカーではガラス基板サイズの拡大が進み、モバイルディスプレイでは第 6 世代 (G6) から第 8 世代 (G8) への移行が検討されており、65 インチを超える大型ディスプレイでは第 10 世代 (G10) に移行している。

当社では、すでに G6 対応フロートステージ方式エキシマレーザーアニーリング装置 (F-ELA 装置) を商品化し、ディスプレイメーカーの生産ラインで運用されている。フロートステージはガラス基板をガスによって浮上させるため非接触の基板搬送が可能となる。F-ELA 装置ではこのフロートステージの特長を最大限に活かし、レーザー照射の基板送り時の等速性と基板の平坦度の向上により Si 膜の結晶化のムラ低減といったメリットが得られ、大型化した G10 サイズに対応する ELA に適した基板搬送を実現する。

大型ガラス基板に対応する ELA 装置では、さらにエキシマレーザーのランニングコスト低減が求められる。当社ではその要求に適したフロートステージ方式の G10/G10.5 対応 F-ELA 装置を新たに開発した。

— Synopsis —

Excimer Laser Annealing System (ELA system) is indispensable for the manufacturing process of backplanes for small and medium-sized high-definition displays such as smartphones. In the future, the realization of foldable displays will increase the size of the screen, and TVs will be required to have the same performance as mobile displays, and it is expected that the ELA process will be applied to the backplane of large displays. Display manufacturers are expanding the size of glass substrates, and mobile displays are being considered for transition from the 6th generation (G6) to the 8th generation (G8), and large displays larger than 65 inches are being considered for the 10th generation (G10).

We have already commercialized a G6 compatible Floating Stage Type -Excimer Laser Annealing System (F-ELA system) that has adopted the floating stage method, and it is in operation on the production line of display manufacturers. Since the floating stage floats the glass substrate with gas, it is possible to transport the glass substrate in a non-contact manner. The F-ELA system makes the best use of the features of this floating stage, and has the advantages of reducing uneven crystallization of the Si thin film by improving the constant velocity and flatness of the glass substrate when the glass substrate is fed by laser irradiation, resulting in an increase in size. It is able to realize a glass substrate transfer method suitable for ELA corresponding to the G10 size.

For ELA system that supports large glass substrates, it is required to further reduce the running cost of excimer lasers. We have newly developed a floating stage type G10 / G10.5 compatible F-ELA system that meets the requirements.

1. 緒言

当社は、低温多結晶シリコン(LTPS)製造用の ELA 装置⁽¹⁾を、1995年に世界で初めて出荷し、これまでに200台を超える装置をディスプレイメーカーに納入してきた。ELAとは、フラットパネルディスプレイ(FPD)の基板となるマザーガラス(以下、ガラス基板)上に成膜されたSi膜にエキシマレーザのビームを瞬間的に照射し熔融させ、ガラスを低温に保ったまま結晶化させる工程である^{(2)~(5)}。高解像度のFPDのバックプレーンで、各画素の輝度を制御するスイッチング素子を構成する薄膜トランジスタ(TFT)を製造する工程でELA装置は欠かせない。FPDは高画質化・高解像度化・表示の高速応答化・低消費電力化等の性能向上が求められるが、これら性能の向上にはスイッチング素子の高速化が必要である。スイッチング素子を構成するTFT半導体薄膜には、1)非晶質シリコン(a-Si)、2)酸化物、3)LTPSの3種類あり、これらの中でもLTPSは電子の移動度が高いため、高性能化するディスプレイに最適な半導体である。

LTPS-TFTを用いたディスプレイは携帯電話やデジタルカメラ用として普及し始め、特にスマートフォンやタブレット端末などの高精細モバイルディスプレイの発展にELA装置は大きく寄与してきた。現在では、モバイルディスプレイの多くに使用される有機ELディスプレイのバックプレーンの製造工程にもELA装置は適用されている。

加えて今後は、フォルダブルディスプレイの実現による画面の大型化、TVにおいてはモバイルディスプレイと同等の性能が求められ、大型ディスプレイのバックプレーンにもELAプロセスの適用が期待されている。ディスプレイメーカーではガラス基板のサイズの拡大が進みつつあり、モバイルディスプレイでは現在主流である第6世代(G6:約1800mm×1500mm)から第8世代(G8:約2500mm×2200mm)への移行が検討されており、65インチを超える大型ディスプレイでは第10世代(G10:約3000mm×2900mm、G10.5:約3400mm×3000mm)に移行している。

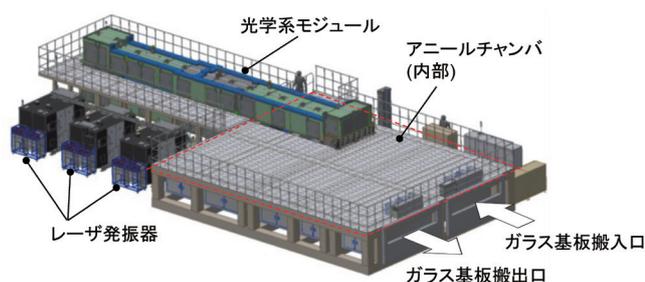


図1 G10対応のF-ELA装置の構成

大型ガラス基板に対応するELA装置には、基板全面を均一にレーザ照射できて、エキシマレーザのランニングコストを低減できることが求められる。当社ではその要求に適したフロートステージ方式のG10/G10.5対応F-ELA装置を新たに開発した⁽⁶⁾。図1にF-ELA装置の構成図を示す。本報ではこれまでに開発した技術について報告する。

2. 技術的優位点

従来型ELA装置の基板搬送方式は、大型の石定盤をベースとして、位置が固定されたレーザビームに対して基板を吸着したステージ部を石定盤上で大出力のアクチュエータにより移動搬送させる形態である。この装置コンセプトをそのままG10サイズに適用すると、石定盤は巨大化して重量も増大し、その入手性、加工精度の維持や輸送に困難をきたす。基板サイズに合わせて相似形に装置をサイズアップすることは各部位で装置の構成上無理が生じる。

当社では、すでにフロートステージ方式を採用したG6対応F-ELA装置を商品化して、ディスプレイメーカーの生産ラインでの運用実績を持つ。フロートステージによる基板の搬送方式は、基板をガスで浮上させることにより基板への接触を最小化できることから、ほぼ非接触の基板搬送が可能となる。F-ELA装置ではこのフロートステージの特長を最大限に活かし、レーザ照射の基板送り時の等速性と基板の平坦度の向上によりELAプロセスの安定化とマージンの拡大を得られ、Si膜の結晶化のムラ低減といったメリットも享受できる。このフロートステージの特長は基板が大型化するほどその効果が大きくなりG10サイズに対応するELAに適した基板の搬送方式といえる。

ここではF-ELA装置の技術的な概要を述べる。説明する項目は順に、1)大型ガラス基板の浮上搬送方法、2)レーザ照射位置でのガラス基板の変形量、3)結晶化処理中の搬送速度安定性、4)ガラス基板のハンドリング動作イメージの一例と生産性、5)レーザ照射後の結晶の評価である。

2.1 大型ガラス基板の搬送方法

ガラス基板搬送の平面視の概略図を図2に示す。ガラス基板搬送方法は二つの重要な機構を有している。一つがガラス基板を均一に浮上させる浮上機構⁽⁷⁾⁽⁸⁾であり、もう一つがガラス基板を正確に搬送させる搬送機構である。搬送機構はガラス基板を吸着保持する機構と移動させるためのアクチュエータから構成される。

浮上機構は、図2に示すようにアニールチャンバ内でガラス基板が移動する領域全面に設置している。当該機

構にはガラス基板を浮上させるためにガスが常時供給されており、その供給量は浮上時のガラス基板変形状を考慮して適切かつ安全に調整されている。

また、基板照射点に於いてエキシマレーザービームをライン状に成形されたビーム長さは750mm/1,000mm/1,500mmと予め決まっており、ガラス基板サイズに応じて照射領域を複数に分けて照射するため、アニールチャンバ内でガラス基板を複数の方向へ搬送する。そのため、アニールチャンバ内に複数の搬送機構が搭載されている。各搬送機構は、それぞれの搬送方向に精度良くガラス基板を搬送して、ガラス基板の搬送位置を μm オーダーで正確に制御する機構を有している。

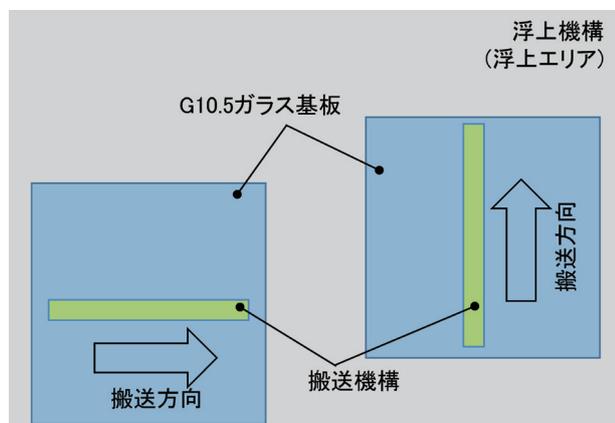


図2 ガラス基板搬送の概略図(平面視)

2.2 レーザ照射位置でのガラス基板の変形量

ELA プロセスにおいて、a-Si 膜が成膜されたガラス基板が、レーザー照射時にその高さの変動すると多結晶シリコン膜(p-Si 膜)の製造品質に影響を及ぼす。そのため、ガラス基板はラインビームの焦点深度範囲に収まるように正確に浮上量を制御しながら搬送する必要がある。レーザー照射時に浮上量が変動すると p-Si 膜の結晶化の構造にムラが生じる可能性があるため、レーザー照射時のガラス基板の平坦度を良好な状態に保っておく必要がある。

レーザー照射位置での G10 ガラス基板の浮上量の測定結果を図3に示す。なお、測定に使用したガラス基板は成膜されていない素ガラスである。ラインビーム長を1,500mmとした範囲内で、ガラス基板の浮上量は照射位置上方の定点で測定した(図3上方の概略図を参照)。図示の結果は、ガラス基板の端部から5mm内側を基点として、搬送方向と直交する方向に5mmピッチで合計31点測定した。31点のうち、搬送方向3点を抽出しており、端部からそれぞれ(a)5mm、(b)755mm、(c)1,505mmの位置を示す。また、(d)はガラス基板の中央

位置が照射位置に到達している際の搬送方向に直交する方向の浮上量を示す。これらのグラフでは、ガラス基板が浮上搬送されている際の測定点における浮上量は15~28 μm (Peak to Peak)である。ここで、図示のない測定点も含めてすべての測定点での浮上量を考慮すると、最大の浮上変化量は50 μm (Peak to Peak)であった。参考までに、G6.1対応従来型ELA装置におけるレーザー照射位置でのガラス基板の変化量は、吸着ステージの平坦度や傾きも含めて約95 μm (Peak to Peak)であった。このことから、ガラス基板サイズが大きくなり、ラインビーム長が長くなったとしても、G10/G10.5対応F-ELA装置は、G6.1対応従来型ELA装置よりもレーザー照射位置のガラス基板の高さ変化量を十分に制御することが出来るといえる。

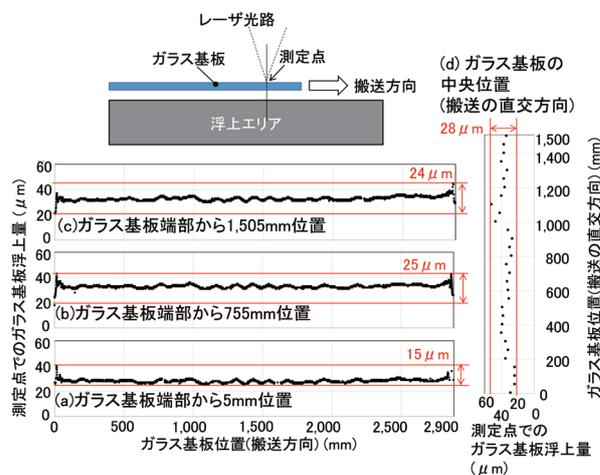


図3 レーザ照射位置でのガラス基板浮上量の断面プロット

2.3 結晶化処理中の搬送速度安定性

レーザー照射中の搬送機構の搬送速度安定性は、ELAプロセスの性能を左右する重要な特性となる。図4に搬送機構の速度安定性の一例を示す。この図は、ガラス基板がレーザー照射エリア外からレーザー照射位置へ浮上搬送される際の搬送機構の搬送速度変化率を1往復分測定した結果である。図中の縦軸は指令速度に対する実際の速

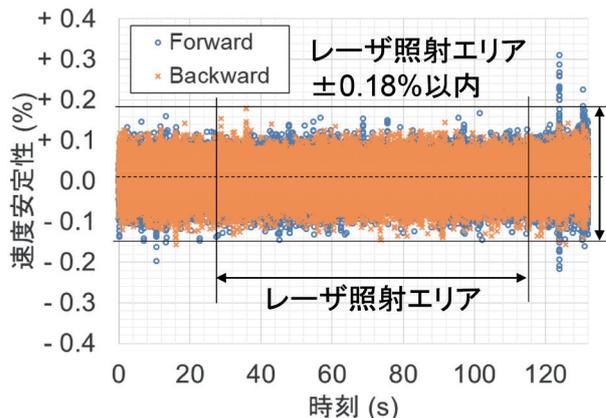


図4 搬送機構の速度安定性一例

度のズレを示す。図示のとおり、ガラスがレーザー照射されるエリアにおいて実際の搬送速度は指令速度に対して ± 0.18% 以内に収まっている。測定された搬送機構の速度安定性は、G6.1 対応従来型 ELA 装置と比較してほぼ同等の性能となっている。

2.4 生産性

図 5 に平面視での G10/G10.5 ガラス基板のハンドリング動作イメージを示す。本図は大別して、左側は当社の F-ELA 装置アニールチャンバ内、右側はお客様設備を表す。F-ELA 装置のアニールチャンバは、カタカナの「コ」を 180° 回転させたような形状を示している。ラインビーム長は 1,500mm であり、1 枚のガラス基板は 2 回に分けてレーザー照射することを想定している。

ここでは当社が想定している G10/G10.5 ガラス基板の搬送の一例を説明する。まず ELA プロセスの一つ前の工程から運ばれてきたガラス基板は、ロボットハンドを使ってアニールチャンバ内に搬入される。搬入された 1 枚目のガラス基板はレーザー照射位置に浮上搬送され、レーザー照射される。1 枚目のガラス基板がレーザー照射されている間に、2 枚目のガラス基板がアニールチャンバ内に搬入されて、待機位置へ搬送して、1 枚目のガラス基板のレーザー照射が完了するまで待機する。レーザー照射が終わると、1 枚目のガラス基板はアニールチャンバ内部を進み、一度アニールチャンバの外へ搬出される。搬出後に、お客様設備の回転装置で 180° 回転させて、再びアニールチャンバに搬入される。1 枚目のガラス基板が搬送されている最中に、2 枚目のガラス基板のレーザー照射が開始する。1 枚目のガラス基板はアニールチャンバに再び搬入されると、前述の動作を繰り返して未照射部分をレーザー照射する。2 回目のレーザー照射が完了して全面を結晶化したガラス基板は、アニールチャンバの外に搬出されて次の工程へ搬送される。

エキシマレーザー工程では、これらの動作を繰り返して a-Si 膜のガラス基板から p-Si 膜のガラス基板を製造する。なお、ガラス基板内で製作されるディスプレイサイズに

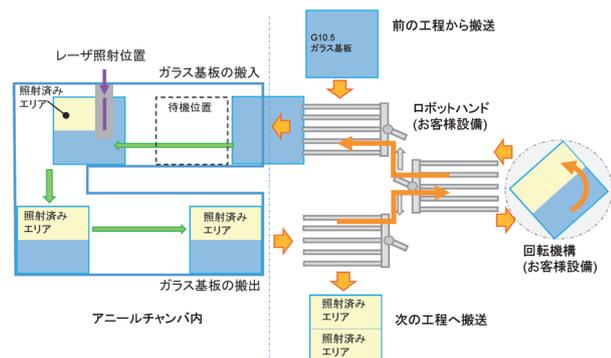


図 5 F-ELA 装置のガラス基板ハンドリング動作イメージ一例

よってはレーザー照射を 3 回行う場合もあり、F-ELA 装置でも対応可能である。

次に G10 ガラス基板における F-ELA 装置での生産性評価を表 1 に示す。この表では、レーザービーム長 1,500mm でガラス基板を 2 回に分けてレーザー照射して結晶化処理するものとする。評価結果から、ガラス基板 1 枚あたりのレーザー照射時間は 137s、搬送、搬入、搬出に伴うガラス基板交換時間を意味する搬送時間は 23s であり、タクトタイムは 160s となる。ガラス基板 1 枚あたりの結果を考慮すると、F-ELA 装置では 1 時間あたり 22.4 枚、年間 154 千枚を生産することが可能と算出される。

表 1 G10 対応 F-ELA 装置の生産性評価

No	項目	数値
1	レーザービーム長	1,500mm
2	ガラス基板1枚あたりの照射時間*1	137s
3	ガラス基板1枚あたりの搬送時間*2	23s
4	ガラス基板1枚あたりのタクトタイム	160s
5	1時間あたりの生産数	22.4枚
6	1年あたりの生産数*3	154千枚

*1) レーザ発振周波数: 600Hz, オーバーラップ率: 87.5%

*2) 25枚分の平均 *3) 稼働率: 80%

2.5 レーザ結晶化の評価

TFT 特性は、TFT 内のチャンネル領域における p-Si 結晶粒界の数に依存するため、均質な p-Si 結晶サイズが要求される。当社の従来型 ELA 装置で製造される p-Si 結晶サイズはおよそ 300nm で周期的に配列し、ラインビームの焦点深度内のガラス基板の浮上高さや速度安定性を含む最適な工程条件で製造される。ここで、F-ELA 装置で作製した G6.1 ガラス基板の p-Si 結晶の AFM 画像を図 6 に、SEM 画像を図 7 にそれぞれ示す。AFM 画像の中にある明るい点が p-Si 結晶境界の突起である。各突起はおよそ周期的に現れており、AFM での評価から 301nm であった。また、図 7 より突起の間には結晶粒界が観られなかった。この結果から、p-Si 結晶の形状と均一性は当社の従来型 ELA 装置と同等といえる。

ところで a-Si 膜を p-Si 膜に結晶化させるメリットは、Si 膜を通過する電子の移動度が、p-Si 膜の方が a-Si 膜と比較して非常に高いことが挙げられる。これは過去の研究より次のことが示されている。a-Si 膜は Si 原子が不規則に配列した構造である。そのため、キャリアは不規則なポテンシャルエネルギーの中を進み移動度が低い。一方、p-Si 膜は粒界内では単結晶と同じ立方晶に並んでいるため、キャリアは粒界内で規則的な周期ポテンシャルの中を自由に動き回ることができて移動度が高くなる⁽⁹⁾。このことから p-Si 膜は電流が流れやすくなることを意味しており、TFT 素子が小型化され、各画素サイズに占

める TFT 素子の割合を小さくできる、また TFT のドライブ回路をパネル周辺の p-Si 膜上に形成することが出来る、といった大きなメリットをもたらす。

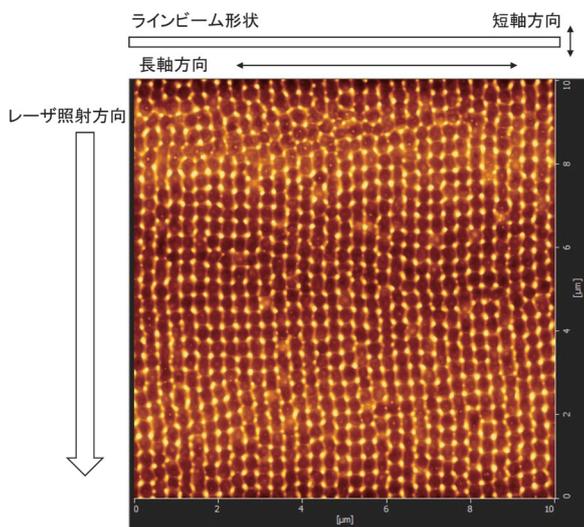


図6 F-ELA 装置で結晶化した p-Si 膜構造の AFM 画像、オーバーラップ 95%、エネルギー密度 420mJ/cm²

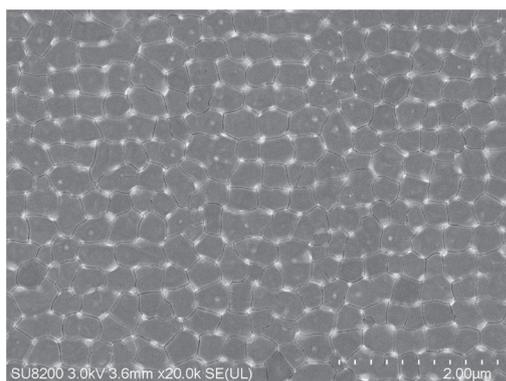


図7 F-ELA 装置で結晶化した p-Si 膜構造の SEM 画像、オーバーラップ 95%、エネルギー密度 420mJ/cm²

3. G6.1F-ELA 装置の性能評価

当社の G6.1 対応 F-ELA 装置は、パネル量産工程で使用されている。ここでは G6.1F-ELA 装置の優位点を説明する。また、タクトタイムは従来型 ELA 装置と比較して F-ELA 装置の優位性を述べる。

3.1 レーザ照射位置での酸素濃度シミュレーション

ELA プロセスでは、レーザー照射による溶融、結晶化の際に酸素が存在すると p-Si 膜の性能に悪影響を及ぼすため、レーザー照射時に酸素が存在しないことが望まれる。そのため、当社ではレーザー照射部まわりの構造を工夫して酸素濃度を極力減らしている。生産ラインにて酸素の状態を直接測定することは難しいので、ここでは設計に活用したシミュレーション結果の一例を示す。

レーザー照射位置での長軸方向の酸素濃度シミュレーショ

ン結果を図8に示す。なお、ここではラインビーム長は 1,000mm である。図示のとおり、レーザー照射部において酸素濃度がほぼ 0 から 0.1ppm 未満となっている。この結果から、レーザー照射部において極低酸素濃度を十分に維持できることがわかる。つまり生産機において、ガラス基板は酸素の影響を受けることなく良好に ELA プロセスが行われる。

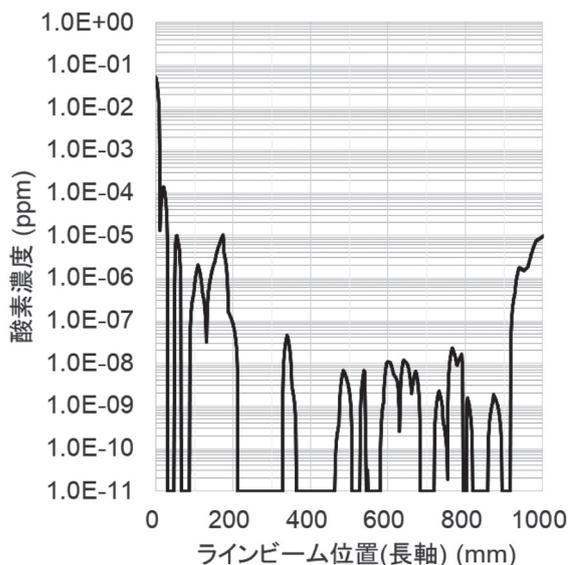


図8 G6.1 サイズでの照射位置における酸素濃度シミュレーション結果、ラインビーム長さ 1,000mm

3.2 タクトタイムの短縮

F-ELA 装置と従来型 ELA 装置でのタクトタイムイメージの比較を図9に示す。従来型 ELA 装置での ELA プロセスでは、一枚のガラス基板をアニールチャンバに搬入して、搬送、照射、そしてアニールチャンバ外への搬出を行うため、ガラス基板交換時間にかかる時間が長くなる。前述までのとおり、F-ELA 装置での ELA プロセスでは、アニールチャンバ内に複数枚のガラス基板を搬入することができるため、レーザー照射と次のレーザー照射の間のガラス基板交換時間を低減することができる。

この動作を踏まえて F-ELA 装置と従来型 ELA 装置での G6.1 サイズガラス基板に対する生産性評価の比較を表2に示す。各装置のタクトタイムは、従来型 ELA 装置は 192s に対して F-ELA 装置は 136s である。タクトタイムは 56s 短縮されており、ガラス基板一枚あたり 29% の向上となる。エキシマレーザーは、レーザー照射時だけでなく、ガラス基板の搬送や交換作業の間もレーザー発振状態の安定性を維持するために常にレーザーパルスを出し続けているため、レーザー照射時以外はレーザーパルスを無駄にしている。そのため、無駄なレーザー照射を低減することがパネル生産のコスト低減につながってくる。

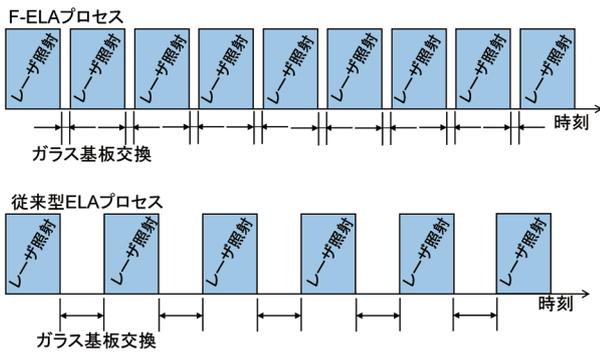


図9 F-ELAプロセスと従来型 ELA プロセスのタクトタイムイメージ比較

表2 G6.1 対応新型と従来型 ELA 装置の生産性評価の比較

No	項目	F-ELA装置	従来型 ELA装置
1	レーザービーム長	1,500mm	1,500mm
2	ガラス基板1枚あたりの照射時間*1	124s	124s
3	ガラス基板1枚あたりの搬送時間*2	12s	68s
4	ガラス基板1枚あたりのタクトタイム	136s	192s
5	1時間あたりの生産数	26.4枚	18.7枚
6	1年あたりの生産数*3	182千枚	129千枚

*1) レーザ発振周波数: 600Hz, オーバーラップ率: 95%
 *2) 25枚分の平均 *3) 稼働率: 80%

3.3 その他の優位点

ガラス基板浮上搬送は ELA プロセスにて他にも優位点を有する。ELA プロセスでは、1) 静電気帯電量は少ないこと、2) レーザ照射位置まわりのパーティクルが少ないこと、が求められる。ガラス基板浮上搬送はガラス基板だけを浮上させて搬送するため、レーザー照射部まわりの気流は乱れが少なく安定する。また、アニールチャンバ内のどの部品とも接触が無いことから、ガラス基板上の静電気やアニールチャンバ内のパーティクル数は低減できる。

4. 結 言

当社では G10 や G10.5 サイズのガラス基板に対応した新型 ELA 装置である F-ELA 装置の開発に成功した。F-ELA 装置は従来型 ELA 装置よりも生産性が向上している。現在、当社では F-ELA 装置を標準モデルとして販売している。

参 考 文 献

- (1) Kazutoshi Funaba, and Junichi Shida: "History and Future of Laser Annealing Systems", JSW TECHNICAL REVIEW, No.19 (2008), pp.78-84
- (2) James S Im, H J Kim, and Michael O. Thompson: "Phase transformation mechanisms involved in excimer laser crystallization of amorphous silicon films", Applied Physics Letter, Vol.63 (1993) No.14, pp.1969-1971
- (3) Klaus D Pippert, Wilhelm F Staudt, and V Pfeufer: "Optimization of 200-W excimer laser for TFT annealing", ISMA '97 International Symposium on Microelectronics and Assembly, Vol.3184 (1997), pp.138-147
- (4) Michael Fiebig, Rustem Osmanov, Uwe Stamm, Frank Vofl, Peter Oesterlin, Naoyuki Kobayashi, et al.: "High-power excimer lasers for high-throughput poly-Si annealing", High-Power Lasers in Manufacturing, Vol.3888 (2000), pp.464-469
- (5) Chun-Chien Tsai, Hsu-His Chen, Bo-Ting Chen, and Huang-Chung Cheng: "High-Performance Self-Aligned Bottom-Gate Low-Temperature Poly-Silicon Thin-Film Transistors With Excimer Laser Crystallization", IEEE Electron Device Letters, Vol.28 (2007) No.7, pp.599-602
- (6) Takahiro Fuji, Yoshihiro Yamaguchi, Yuki Suzuki, Takahiro Mikami, and Sadao Tanigawa: "Gen 10 Excimer Laser Annealing System", SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol.51 (2020) No.1, pp.196-199
- (7) Kazuki Amano, Shigeka Yoshimoto, Masaaki Miyatake, and Takuya Hirayama: "Basic investigation of noncontact transportation system for large TFT-LCD glass sheet used in CCD inspection section", Precision Engineering Vol.35 (2011) No.1, pp.58-64
- (8) Naoki Oiwa, Masaya Masuda, Tomoko Hirayama, Takashi Matsuoka, and Hiroshi Yabe: "Deformation and Flying Height Orbit of Glass Sheets on Aerostatic Porous Bearing Guides", Tribology International, Vol.48 (2012), pp.2-7
- (9) 糸賀隆志, 伊藤政隆, 高藤裕: "低温ポリシリコン TFT-LCD", シャープ技報, Vol.69 (1997), pp.64-68