

特 集 論 文

フラットパネルディスプレイ用
イオン注入機の技術動向

Technology Trends of Ion Implantation Machines for
Manufacturing Flat Panel Displays

土 肥 正二郎*	甲 斐 裕 章*
S. Dohi	H. Kai
永 尾 友 一*	松 本 武*
T. Nagao	T. Matsumoto
小野田 正 敏*	中 尾 和 浩*
M. Onoda	K. Nakao
井 内 裕*	立 道 潤 一*
Y. Inouchi	J. Tatemichi
糠 山 正 明*	
M. Nukayama	

概 要

フラットパネルディスプレイの需要は、スマートフォンやタブレットだけでなく、ヘッドマウントディスプレイや車載用モニタにも拡大してきている。それらの製造に用いられるイオン注入機の市場においてベストセラーとなったイオンドーピング装置iG4（以下、iG4）の市場投入以来、現在の装置iG6（以下、iG6）に至るまで、当社は高いシェアを維持してきた。市場の成長とともに、より高精細化・多機能化してきたお客様製品の生産に対応すべく、当社の装置技術も成長してきた。本稿では現在の主力製品であるiG6に搭載されている最近の技術について紹介する。

Synopsis

Application fields of Flat Panel Displays (FPD) have expanded from smart phones and tablet computers to Head Mounted Displays (HMD) and in-vehicle monitors. We have been keeping an overwhelming market-share of the ion implantation machines for manufacturing FPDs since we released our first ion doping equipment iG4. From the first machine iG4 to the latest one iG6, we have brushed up our technologies in order to respond to the increase of our customers' requirements like higher resolution and multi-functionality, as the FPD market grows. In this report, we will report the recent technology progress introduced into our new machine iG6.

1. はじめに

平成22年以降、日本でも爆発的な勢いで成長を遂げたスマートフォン市場⁽¹⁾において、その成長に大きく貢献したと自負する当社のイオンドーピング装置iG6は、今日、フラットパネルディスプレイ（以下、FPD）製造用イオン注入機の市場において、非常に高いシェアを獲得しており、広くお客様に受け入れられている。その登場以来、年々高精細化・多機能化するFPDへの要求

に対して、当社の装置も処理能力の向上、静電破壊対策、パーティクル低減などで応えてきた。近年では、FPDの用途はスマートフォンに限らず、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）や車載モニタなど、多様なアプリケーションに展開してきている。そこで、お客様は新しいアプリケーションの実現に必要な製造装置への要求と期待を当社に寄せてきた。本稿では、当社がそれらに応えるべく開発してきた最近の装置技術を紹介すると共に、

*日新イオン機器株式会社

イオン注入技術の新しい分野への適用可能性についても報告する。

2. イオンドーピング装置

イオンドーピング装置は、FPD製造工程のひとつである不純物（ドーパント）注入に用いられる装置である。スマートフォンで用いられるような解像度の高いFPDでは、膨大な数の画素を制御するため、画素ひとつひとつに薄膜トランジスタ（Thin Film Transistor; TFT）が備えられている。その薄膜の種類によって、アモルファスシリコン（Amorphous Silicon; a-Si）型、低温ポリシリコン（Low Temperature Polycrystalline Silicon; LTPS）型やIndium Gallium Zinc Oxide（IGZO）のような酸化物半導体型などがある。従来のa-Si型と比較して、LTPS型は製造コストが高いという不利な点があるものの、トランジスタの微細化や、画面の表示性能に影響する電子移動度の点で有利であり、近年のFPDの高精細化や高コントラスト化の流れに乗って広く普及してきた。なお、酸化物半導体型は既存のa-Si型の製造ラインが流用可能で低コストが期待されることやa-Si型よりも高精細化が可能であることから、近年、その研究が盛んに行われているが、市場においては、未だLTPS型を脅かす存在になったとは言い難い⁽³⁾のが現状である。

当社のイオンドーピング装置は、このような市場の要求に応え得るLTPS型TFTを製造する際に、トランジスタ性能に関わるキャリア濃度を自在に制御するために用いられている。

2. 1 当社装置iG5、iG6の特徴

現在市場に広く受け入れられている第5及び第6世代ガラス基板に対応するイオンドーピング装置iG5、iG6は、第4世代ガラス基板（73cm×92cm）対応機のベストセラーであったiG4の基本コンセプトを継承することで、高い信頼性と生産能力を有している。iG4最大の特徴である大電流密度での注入も、より高いレベルで継承している。例えば、iG6で扱えるガラス基板は第6世代（150cm×180cm）と呼ばれるサイズであり、このサイズに対応するため、高さ約2mの大型イオン源を備えている。そこから射出される縦長の面積イオンビームは質量分離器である分析電磁石の中を通ることで不要なイオンが除去され、質の高い所望のイオンビームとなってガラス基板に到達する。iG6の生産能力は、対応ガラス基板の大型化とビーム電流密度の向上との相乗効果により、iG4の約2.5倍に達している。



図1 iG6装置外観図

3. 最近の技術紹介

3. 1 イオン生成効率の改善

iG6のイオン源では、熱陰極フィラメント（以下、フィラメント）を使用したアーク放電によるプラズマ生成方法を採用している。プラズマの原料ガスには三フッ化ホウ素（以下、 BF_3 ）と水素で希釈したフォスフィン（以下、 PH_3 ）を採用し、イオン源内でこれらの分子をアーク放電によって分解・電離することで、ドーパントイオン（ B^+ 、 P^+ ）を生成している。その過程で必ず余分なイオンも生成されてしまうが、質量分離器は下流にあるため、一旦は不要イオンも含むビームがイオン源から射出されることになる。余分なイオンの生成はフィラメント寿命やイオン源のメンテナンス周期を短くするという点からも低減させることが望まれる。 BF_3 の場合には、iG4においてビーム電流密度を増加させるために開発された加速電極バイアス電圧制御技術⁽⁴⁾によって、不要イオンの低減を実現した。その当時、お客様の要望の多くが P^+ よりも B^+ のビーム電流増大にあったため、イオン源も BF_3 用に最適化されていた。近年では、多種のプロセスを採用するお客様が増え、以前よりも P^+ のビーム電流密度に対する要望が増してきたので、イオン源の構造を見直し、 P^+ イオンの生成効率を改善する方法を開発した。以下に、その詳細を紹介する⁽⁵⁾。

PH_3 ガスを使用してプラズマを生成すると、ドーパントイオン（ P^+ ）の他にも種々の不要イオンが生成される。

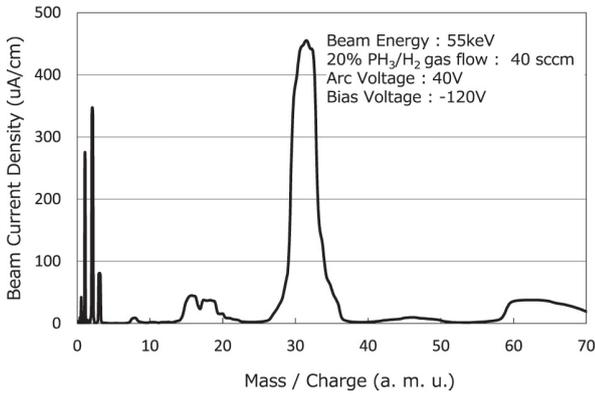


図2 PH₃プラズマから引出されたイオンビームのマススペクトル

図2は、iG6においてPH₃を使用した場合にイオン源から引き出されるイオンビームのマススペクトルの代表例を示している。この図の横軸はイオンの質量数、縦軸は各イオンの電流密度を示している。この場合の目的イオンはP⁺ (31a.m.u.)であるが、図に示されているとおり、それ以外の不要イオンも数多く生成している。BF₃用に最適化されたイオン源であることも、その原因であるため、PH₃用にプラズマ点火位置すなわち、フィラメントからの熱電子供給位置を最適化することによる改善を試みた。

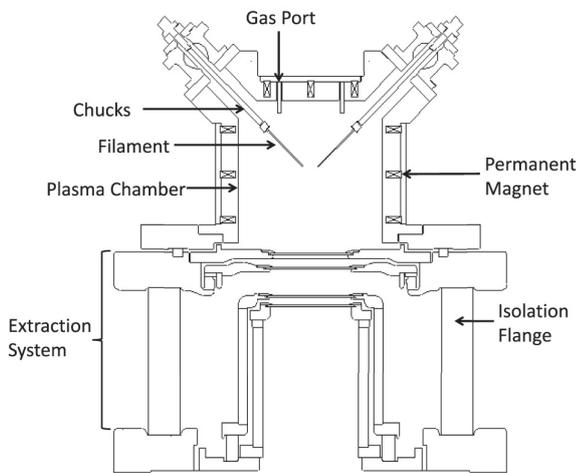


図3 イオン源断面図

図3はイオン源の断面図である。図の上部中央の箱型に囲まれた空間でプラズマが生成され、図中央をまっすぐ下方向にイオンビームが引き出されていく。イオン源は熱電子を供給するフィラメントが斜め45度から挿入されたY型チャンバと呼ばれる形をしている⁽²⁾。フィラメントは、その先端がほぼチャンバの中央に来るように設置されているが、この先端をより深く差し込み、ビーム引出口に近い位置でプラズ

マが点灯されるように変更した。

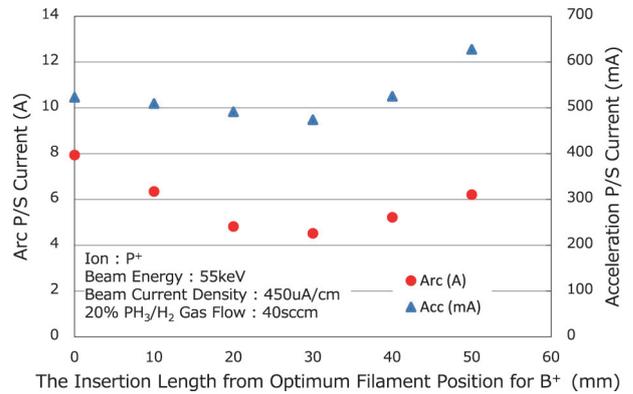


図4 フィラメント差込深さと同一ビーム電流密度時のアーク電流と加速電流の関係

図4は、フィラメントの差込深さを変えた時に、質量分離後にP⁺ビーム電流密度450μA/cm (μA/cm:ビーム電流面密度μA/cm²をガラス基板のスキヤン方向に積分した単位)を得るために必要なアーク電流と加速電流の値をプロットしたものである。ここで、前者はプラズマ生成に必要なパワーに比例し、後者は引き出されたイオン電流の総量を示す。したがって、前者の値が小さくなることは、効率の良いプラズマ生成が行われていることを意味し、後者については引き出された不要イオンが少ないことを意味する。オリジナルの位置(横軸0mm)に対して、差込深さが増えるとともにアーク電流と加速電流は徐々に低下し、30mm付近で最も低くなり、その後、また上昇する結果となった。これらのデータは、すべて一定のビーム電流密度(450μA/cm)を得た時のものなので、差込深さ30mm付近が、PH₃にとって最も効率の良いプラズマ生成位置であると言える。

ここで、図2に示すとおり、PH₃プラズマで生成される不要イオンのほとんどは水素分子イオンなので、この生成効率向上の理由は、水素分子イオンの減少によるものであると推定される。

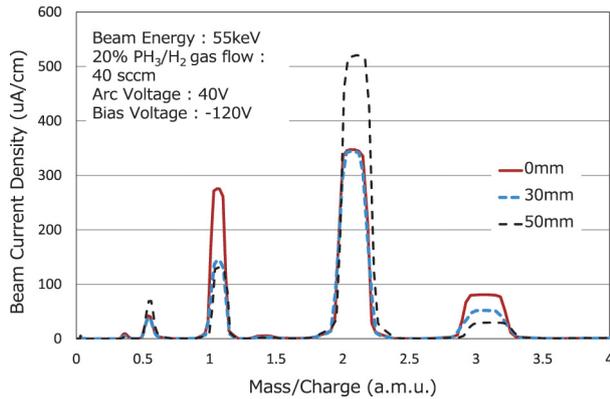


図5 PH₃プラズマから引出された水素イオンビームのマススペクトル

図5は、差込深さ0, 30, 50mmの時の水素分子イオン付近のマススペクトルを示す。

H⁺ (1a.m.u.)とH₃⁺ (3a.m.u.)のビーム電流密度は、差込深さが増えるにしたがって低下しているのに対して、H₂⁺ (2a.m.u.)の電流密度は、0mmと30mmではほぼ変わらず、50mmでは逆に増加する結果となった。よって、30mm付近で加速電流とアーク電流が最小値を取り、それ以降は上昇するという図4に示した結果の原因は、このH₂⁺の生成量の増加にあると思われる。

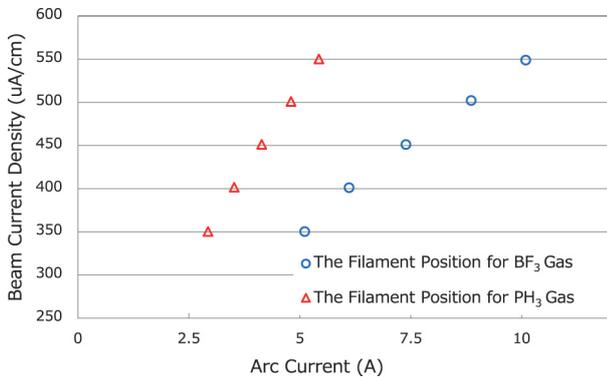


図6 BF₃用およびPH₃用フィラメント配置時のアーク電流とP⁺ビーム電流密度の関係

図6は、差込深さ30mm、および、0mm (BF₃での最適フィラメント位置)において、PH₃プラズマに対するアーク電流とビーム電流密度の関係のプロットしたものである。縦軸はP⁺ビームの電流密度、横軸はその時のアーク電流を示している。ビーム電流密度350μA/cm時の比較でアーク電流が約50%に低減している。また、アーク電流5A時の比較でビーム電流密度が約15倍に増加しており、ビーム発生効率が向上していることが分かる。

しかし、この最適化はPH₃に対して有効なものであり、BF₃に対しては逆に効率を下げる結果になる。そこで、PH₃用とBF₃用のフィラメント配置を瞬時に高

真空を維持したままで切り替えられる機構を開発した。本機構では、フィラメントと真空容器の間を金属ベローズ管で接続し、それをエアシリンダで駆動させる方法を採用している。また、当該ユニットのサイズを従来の固定型とほぼ同等にすることで、既存装置への適用も可能にしている。

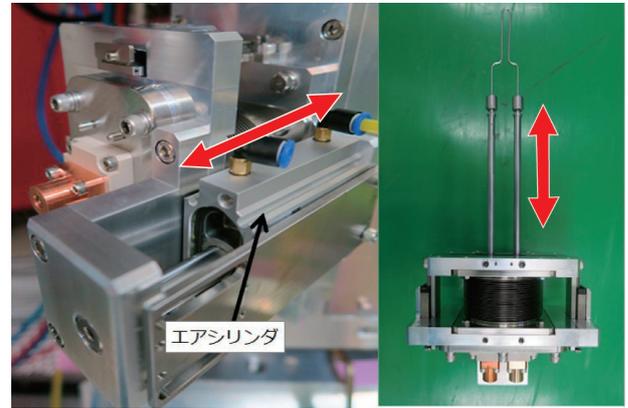


図7 最適位置切替え機構

3. 2 静電破壊対策

お客様の製品回路がより微細化していくことで、その回路間で静電破壊が起こる問題が議論されるようになってきた。iGシリーズ (iG4, iG5, iG6) には当初からガラス基板に中和用の電子を供給するPlasma Flood Gun (PFG) と呼ばれる機構を搭載してきた。現在、iG4開発当初と比較して、回路が微細化されると同時に、ガラス基板サイズが大きくなっており、その全面を一様に中和することが、求められている。ここでは、iG5, 6搭載のPFGが、第5.5世代ガラス基板(130×150cm)全体を一様に中和できることを示す⁽⁶⁾。

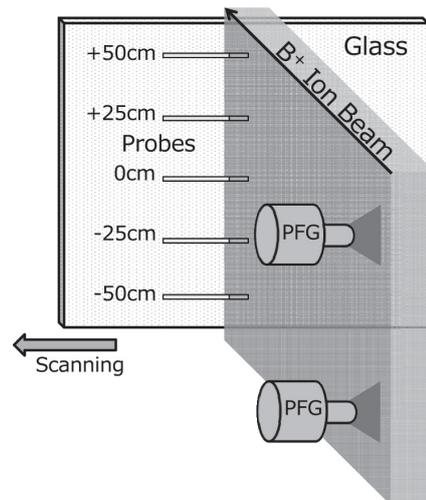


図8 PFG配置図

図8は、iG5およびiG6のPFG、イオンビーム、ガラス基板の位置関係を示した概略図である。PFGはガラス基板の直前、縦長のイオンビームの側面に配置され、2つのユニットから中和用の電子を供給する。

$1 \times 10^3 \text{Pa}$ 程度の真空中で大電流密度のイオンビームが通過すると、残存するガス分子が電離され、イオンビームの周辺にビームプラズマと呼ばれる薄いプラズマが形成される。ガラス基板付近にも存在するプラズマのポテンシャルは、ガラス基板のチャージアップの影響を受けて変動するので、このポテンシャルを測定することで、ガラス基板のチャージアップ状態を観測することが出来る。そこで、ガラス基板直前でのビームプラズマ特性を測定するために5本の静電プローブを設置した。プローブは接地電位から高抵抗 (10M Ω) で絶縁され、ビームプラズマのポテンシャルを測定できるようにしている。ここでは計測機器の都合によりビームポテンシャルを浮動電位で代用している。

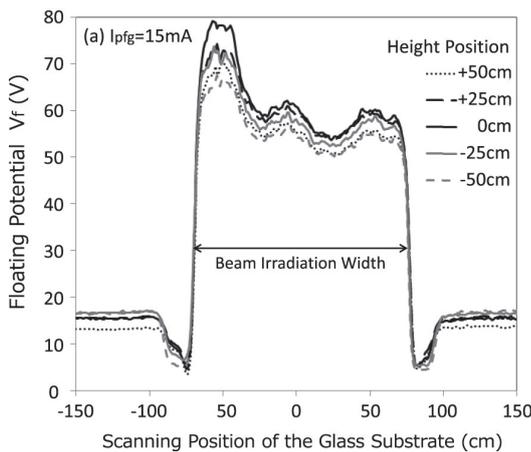


図9(a) 浮動電位測定結果 (I_{pfg}=15mA)

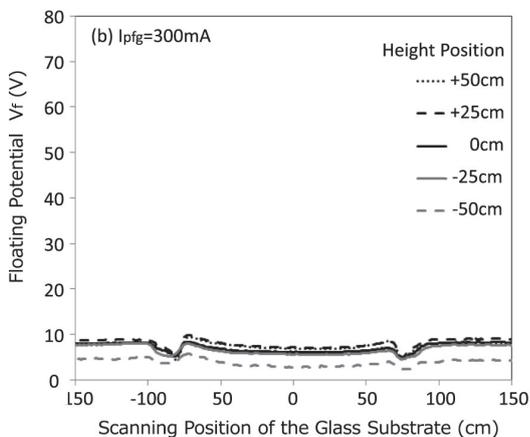


図9(b) 浮動電位測定結果 (I_{pfg}=300mA)

図9 (a), (b) は、ガラス基板にイオンビーム (B⁺ 40keV, 52mA) を照射している時に、プローブで測定されたビームプラズマの浮動電位の分布を示している。(a) はPFGからの電子供給量を15mAにした場合、(b) は300mAにした場合である。

(a) のグラフから、イオンビームがガラス基板に照射されると浮動電位が大きく上昇すること、また5本のプローブすべてがほぼ様な電位を示しており、ガラス基板全体が均一にチャージアップしていることが分かる。グラフ中央に見られる3つの山はガラス基板を支えるプラチンのアーム位置に対応しており、基板裏面の状態がチャージアップ現象に影響を及ぼしていることが分かる。また、イオンビーム照射端の近傍で電位が下がっている理由はプラチン両端の金属部分からの二次電子による影響と考えられる。

これに対して、十分量の中和用電子を供給した (b) の場合は、ビーム照射領域の内外で電位がほぼ一定であり、基板のチャージアップが十分に抑制できていることが分かる。

4. 大面積イオンビーム利用法の模索

最後に、当社FPD製造用イオンドーピング装置技術の最大の特徴である大面積イオンビームの新たな分野への適用可能性について紹介する。

1つ目は、InPのような比較的高価なウェーハを、極薄のフィルム状に剥離する技術 (SmartCut^(注) テクノロジー) への適用である。1枚のウェーハから複数枚のフィルムを作成できるため、コストの低減が期待できる。従来は半導体製造用イオン注入機を利用していたため、生産性があまり高くなかったが、当社はSoitec社と共同で大面積イオンビームを利用した高スループット SmartCut技術用イオン注入装置iG4HYを開発した⁽⁷⁾。

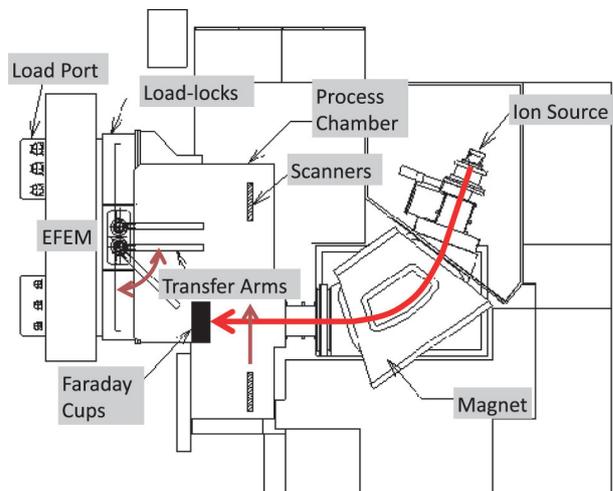


図10 iG4HY

これまでのガラス基板用装置とは搬送機構がまったく異なるため、専用の静電チャックを搭載したマルチウェーハ搬送機構も新たに開発した。本装置は複数のウェーハサイズに対応できるようにもなっている。また、イオンビームの性能は、 H^+ の場合、100keV, 80mAを達成しており、高いスループットが期待できるため、SmartCut技術の更なるコストダウンと普及が期待される。

2つ目はガラスの強化を目的とするものである。イオンビーム照射によるガラスの強化は以前から研究されているが、イオン注入装置を利用して、コスト的に見合うアプリケーションが見出されていなかった。そこで、大面積・大電流イオンビームの利用によるコスト削減の可能性を探るとともに、イオン注入条件と強度との関係を調査・研究中である。図11はその結果の一例である。通常のソーダライムガラスに B^+ イオンを注入後、荷重をかけて圧痕をつけた時の亀裂の入り方を観察した。 B^+ イオンを $2\sim 6\times 10^{14}$ ions/cm² 注入した場合、未注入に対して、約10倍の強度改善が認められた。

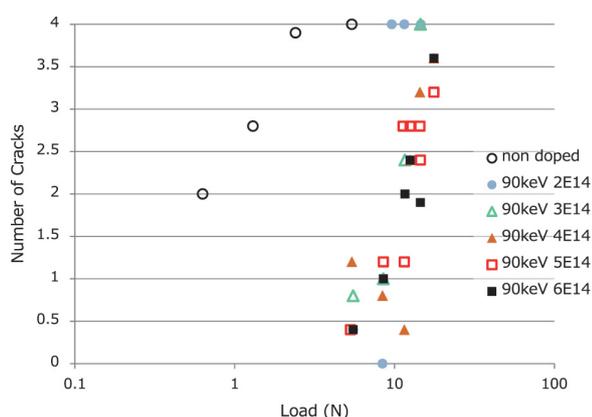


図11 イオン注入されたガラスの亀裂数と荷重との関係

最後に、イオンビーム照射により表面に微細突起を形成する技術について紹介する。この微細突起構造の導入により、反射率の制御や超疎水性の付与などが可能であり、様々なアプリケーションが期待される。図12は、

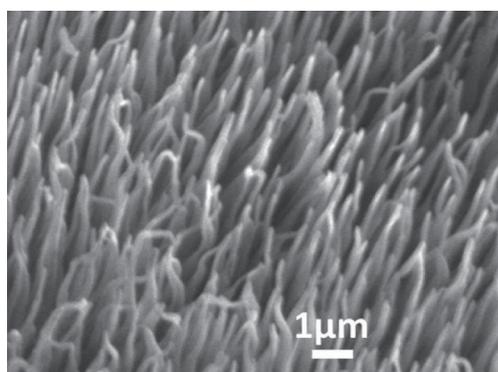


図12 iG4で作成した微細突起構造

ガラス基板上的FEP（テトラフルオロエチレン・ヘキサフルオロプロピレン共重合体）コーティングに形成された微細突起構造を示す。

近年、FPD製造企業の市場競争は激化しており、コスト低減だけでは生き残りが難しくなっているため、お客様も価格競争ではなく、製品の高付加価値化へと軸足を移そうとしている。当社においても、高付加価値品の製造に対応した装置の開発が重要であると認識しており、今後も、お客様のご要望に沿えるように努力を続けていく。

5. おわりに

当社は、これからもお客様に求められる存在であり続けるために、自らの技術を練磨しFPD製造用イオンドーピング装置の提供によって、業界の発展に貢献して行くとともに、新たな分野への展開可能性について模索し続けることで、イオンビーム技術の普及・発展に邁進する所存である。

参考文献

- (1) 総務省「平成26年通信利用動向調査の結果」
- (2) 松本武 他：「第5.5世代液晶向けイオンドーピング装置の開発」、日新電機技報 Vol. 56, No. 2, pp. 55-59(2011)
- (3) IHSテクノロジー, IHSディスプレイ世界市場データブック2016年 前期版, 30th HIS Display Japan Forum講演資料集
- (4) Y. Inouchi, et. al, "Mass Filtering Function of Magnetic Boundaries in Multi-Cusp Ion Source", Proc. of 18th International Conference on Ion Implantation Technology IIT2010, pp. 500-503
- (5) H. Kai, et. al, "Improvement Multi-Cusp Ion Source to efficiently extract B^+ beam and PH_x^+ beam", Proc. of 21st International Conference on Ion Implantation Technology IIT2016, pp. 168-171
- (6) T. Nagao, et. al, "Development of Plasma Flood Gun for Gen 5.5. Implanter", Proc. of 21st International Conference on Ion Implantation Technology IIT2016, pp. 225-228
- (7) Y. Inouchi, et. al, "Doping process and tool for surface treatment using large-area ion beams", Proc. of 21st International Conference on Ion Implantation Technology IIT2016, pp. 203-208

(注) 「SmartCut」は、Soitecグループの登録商標です。

執筆者紹介



土肥 正二郎 Shojiro Dohi
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
主任



甲斐 裕章 Hiroaki Kai
日新イオン機器株式会社
新事業推進部



永尾 友一 Tomokazu Nagao
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部



松本 武 Takeshi Matsumoto
日新イオン機器株式会社
新事業推進部



小野田 正敏 Masatoshi Onoda
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
グループ長



中尾 和浩 Kazuhiro Nakao
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
グループ長



井内 裕 Yutaka Inouchi
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
技術主幹



立道 潤一 Junichi Tatemichi
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
グループ長



糠山 正明 Masaaki Nukayama
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
プロダクトマネージャー