

一般論文

関連するSDGs

フラットパネルディスプレイ製造用
イオン注入装置iG8の開発Development of Ion Implanter iG8 for Flat-Panel Display
Processing

宇井利昌 Ui Toshimasa	川瀬一貴 Kawase Kazuki
川村昌充 Kawamura Masamitsu	永尾友一 Nagao Tomokazu
高橋元喜 Takahashi Genki	土肥正二郎 Dohi Shojiro

本稿は「MRS Advances, Volume 10 (2025) 244-248.」に掲載された論文を加筆・修正したものである。

概要

有機ELディスプレイを中心とするIT製品向け大型ガラス基板に対応したイオン注入装置iG8を開発した。本装置は、量産実績のある従来機iG6のビームラインコンセプトを継承しつつ、8世代ガラス基板に対応した装置である。本装置は、均一で高密度なイオンビームの注入が可能であり、プラズマ生成部の電子を発生させるカソードの寿命延長およびイオンビームを効率的に出力させる磁場分布を実現し、メンテナンス性も向上できた。さらに、装置構成をユニット化したことで機能拡張の容易性が向上した。

本稿では、本装置の基本コンセプトおよびこれらを実現するため導入した3つの要素技術について紹介する。これらの要素技術を有するiG8は、高ビーム密度・均一性、カソード寿命延長によるメンテナンス性向上、機能拡張性が実現でき、今後のIT製品市場の拡大に貢献していく。

Synopsis

We developed the ion implanter iG8 for large glass substrates used in IT products with OLED displays. The iG8 inherits the beamline concept of the conventional iG6 system with proven mass-production performance, while extending applicability to 8th generation glass substrates. The system enables uniform, high-density ion beam implantation and improves maintainability by extending the lifetime of the electron-emitting cathode in the plasma source and by optimizing the magnetic field distribution for efficient beam extraction. In addition, a modularized system architecture enhances flexibility for functional expansion. The iG8 achieves high productivity and uniformity, supporting the expanding IT products market.

キーワード：フラットパネルディスプレイ (FPD)、8世代ガラス基板、iG8

1. はじめに

OLED：有機発光ダイオード（有機EL）を用いたフラットパネルディスプレイ（FPD）の市場は、IT製品と呼ばれ

るスマートフォン、スマートウォッチ、スマートTV、タブレット、PC、拡張現実（AR）/仮想現実（VR）グラスなどの発展・改良により急速に拡大している。それに伴い、

高解像度、低消費電力、高電子移動度、透明性、柔軟性といったディスプレイ機能への要求も高まっている。これらの要求に対応するためには、低温多結晶シリコン⁽¹⁾⁽²⁾や酸化物半導体⁽³⁾⁽⁴⁾を用いた薄膜トランジスタ (TFT) 作製プロセスの開発・改良が重要である。TFTのソース/ドレインやチャンネルと呼ばれる部分の作製に不可欠な当社のFPD用イオン注入装置iGシリーズは、これらTFT作製プロセスの開発・改良に貢献しており、学術的分野における寄与のみならず、産業界でも実証・応用されている。一方、ディスプレイメーカーは、多彩なOLED IT機器の大量生産能力確保、コスト削減の観点から、8世代 (Gen.8) ガラス基板 (サイズ: 約2200mm×2500mm×0.5mm) の生産ライン構築を始めている。図1にOLEDパネル工場のガラス基板世代別の半導体製造装置投資割合を示す⁽⁵⁾。2019年頃はテレビ向けにGen.8ガラス基板用イオン注入装置 (Gen.8装置) へ投資がされており、IT製品向け設備投資は当社のiG6を含むGen.6ガラス基板 (サイズ: 約1500mm×1800mm×0.5mm) 対応のイオン注入装置が主流であった。2024年からは、IT製品向けのGen.8装置への投資が大半を占めるようになり、今後も需要増大が予測されている。これを受け、当社は図2に示す大型ガラス基板に対応した新しいイオン注入装置「iG8」を開発した。本装置のビームラインの設計コンセプトは、量産で実績のあるGen.5ガラス基板対応の装置iG5やiG6とほぼ同じである⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。具体的には、リボンのように横に広がったイオンビームをプラズマ生成部からガラス基板まで輸送することにより、大面積ガラス基板に対して、注入イオン密度の高い均一性を実現しやすい構成としている。また、一度に処理可能な面積を大きく取ることができるため、高い量産性が実現可能なビームラインである。このコンセプトを基に、さらに大面積ガラス基板に対し、高密度イオンビーム (高ビーム電流) の注入が可能で、高イオン注入量 (高ドーズ) が必要な用途でも高生産性を実現できる装置「iG8」を開発した。

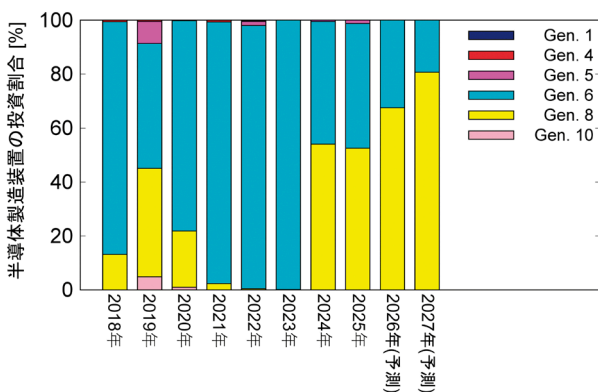


図1 OLEDパネル工場におけるガラス基板世代別の半導体製造装置の投資額割合の推移⁽⁵⁾

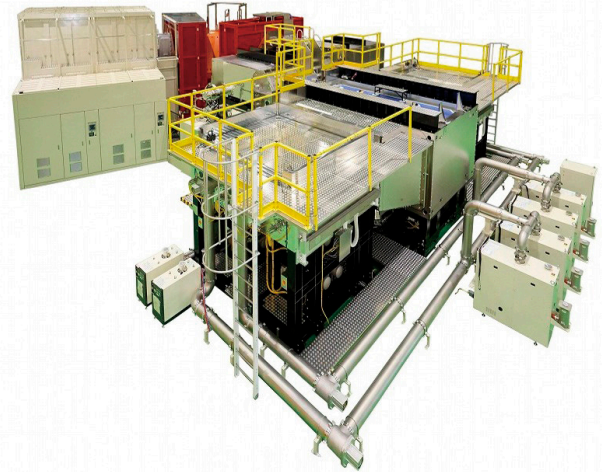


図2 Gen. 8ガラス基板用イオン注入装置「iG8」

2. iG8の基本コンセプトと装置概要

2.1 基本コンセプト

1章に記載したビームラインコンセプトを基本として、以下のコンセプトのもと、開発に着手した。

- ①高ビーム電流での注入が可能であること
- ②高ビーム電流の利点を活かし、高ドーズ量が求められる用途でも高いスループットを実現可能であること
- ③プラズマ生成用カソード部材の寿命延長技術を追加することで、ビームユニットのメンテナンス頻度が低減し、装置の非生産時間 (ダウンタイム) を削減すること
- ④iG6と同等またはそれ以上の生産性を達成すること

2.2 装置概要

図3 (a) にiG8の概略図を示す。また、比較のために図3 (b) にイオン注入装置iG6の概略図も示す。iG8 (図3 (a)) はイオン源とイオン質量分離マグネットからなるビームユニット、ガラス基板へのイオン注入用スキャンユニット、ガラス搬送ユニットの3つのユニットで構成されている。各ユニットのサイズはGen.8基板サイズに強く依存しており、全体の幅、奥行き、高さはそれぞれ20m、15m、5.5mであり、iG6と比べて幅1.45倍、奥行き1.75倍、高さ1.5倍と巨大である。次にiG8のコア技術であるビームラインの概要について述べる。イオン源から高さ2200mmを超える大型イオンビームがイオン質量分離マグネットに導入され、選択されたイオン種のみがビームユニットを通過してスキャンユニットに到達する。スキャンユニット上に到達したビームは、2200mmを超えるガラスに十分な高さで、ガラスのスキャン方向

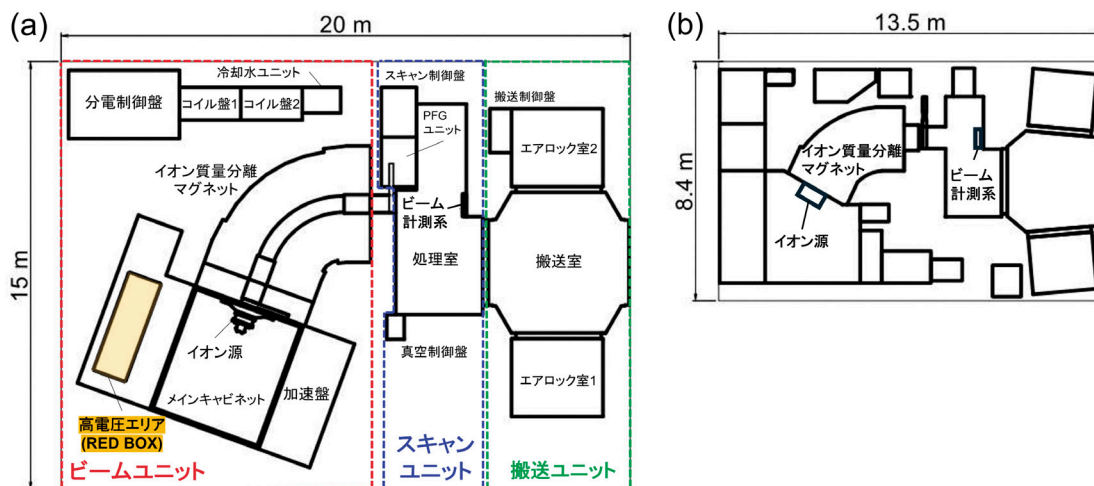


図3 (a) iG8の概略図 (b) Gen.6ガラス基板用イオン注入装置iG6の概略図

に垂直な方向で良好な均一性を有する。

Gen.8ガラス基板搬送方法については、複数のガラス基板が搬送ユニットのエアロック室から搬送室を経由しつつ、スキャンユニットの処理室に導入される。ガラスはプラテンと呼ばれる基板保持部によって直立し、イオンビームが到達する位置に搬送され、ガラス上の半導体デバイスにイオン注入される。さらに、ガラスはビームに対して前後に水平移動する。この動きを制御することで、所望の注入条件を実現できる。

3. iG8の要素技術

FPD業界における最終製品メーカーのIT製品生産量、ディスプレイ製造を専門とするファウンドリ^{*1}企業の実生産量、iG8以外の半導体製造装置スペック、iG8構成のための部材メーカーが生産可能な部品スペックとの整合性、いわゆる業界全体の要求あるいは都合により、iG8に求められる性能はさまざまなものがある。具体的には以下に示すものなどがある。

- ①Gen.8.6 (2290×2620mm²) ガラス基板対応のビーム・ガラス保持ユニット
- ②2290mm以上のビーム高さ
- ③ビーム電流密度の均一性3%以下
- ④三フッ化ホウ素 (BF₃) あるいはホスフィン (PH₃) ガス使用によるBあるいはPを含むイオンビーム出力
- ⑤ビーム電流密度400 μA/cm以上の大電流ビーム輸送
- ⑥イオン注入量10¹²-10¹⁶ions/cm²、従来カソード寿命の延長による装置の非生産時間削減
- ⑦システムのユニット化による装置生産および改造の容易化 (機能拡張性の保持)

本章では、これらを実現するため、当社が開発した3つの重要要素技術について説明する。

3. 1 Gen.8ガラス基板用の大型ビームユニットとスキャンユニット技術

3. 1. 1 大型ビームユニット

本項ではFPD業界からの要求①のビームユニットおよび②を実現するための大型ビームユニットの開発について述べる。ビームユニットを構成する主要要素としてはイオン源およびイオン質量分離マグネットがある。前者について、図4 (a) にiG8イオン源の3次元モデルを示す。比較のため、図4 (b) にiG6イオン源モデルも示す。iG8イオン源は、iG6イオン源をさらにイオンビーム高さ方向に伸ばした形に設計されている。また、プラズマ生成部およびイオンビーム加速のための構造の多くをiG6と共通にすることで、量産実績のあるビーム電流密度およびビーム均一性を保ちながら、2500mmの高さのイオンビームを出力することが可能である。一方、後者のイオン質量分離マグネットについて、図3 (a) および (b) を比較すると、基板サイズの違いからiG5・iG6のビームラインと同条件の設計ができないため、ビーム高さのみならず、イオン源とGen.8基板 (基板はビーム計測系とほぼ同じ位置) との距離も増加しており、ビームの発散や密度不均一が生じやすい。これらを抑制しつつイオンビームを搬送できるよう、イオンを質量分離する電磁石コイルを大型化し、ビーム発散や密度不均一抑制を目的とした磁場制御のための小型コイルをビームライン上に多数配置した。以上により、高さ2290mm以上でありながらも、均一なイオンビームを輸送する技術を実現した。

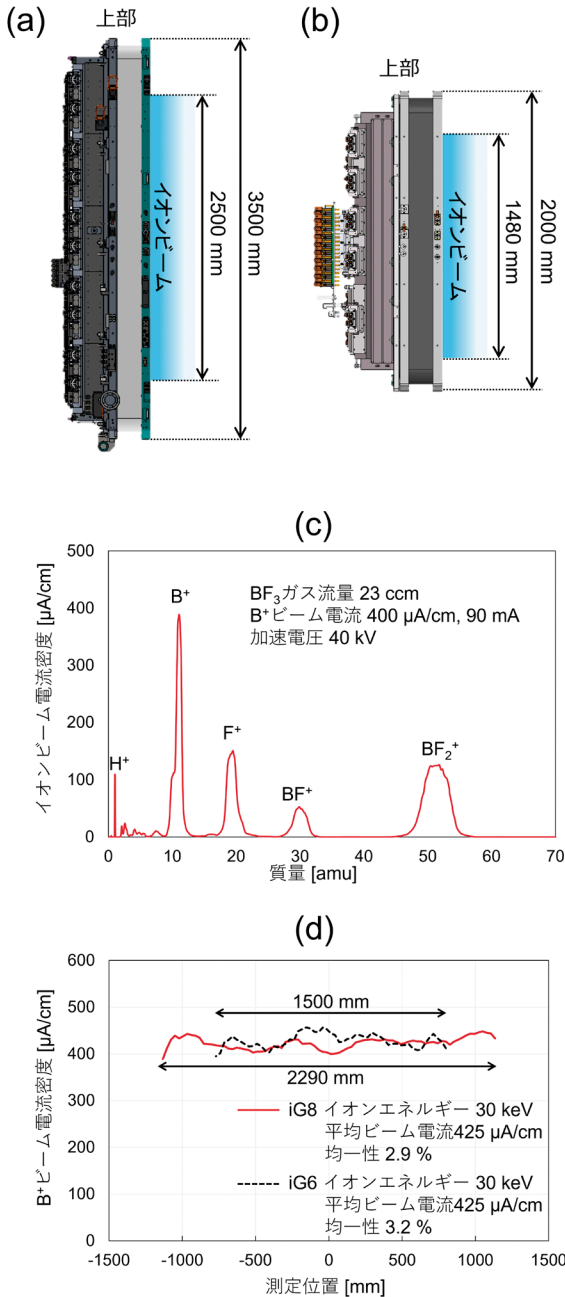


図4 (a) iG8のイオン源3Dモデル (b) iG6のイオン源3Dモデル (a) (b) 高さ2500mmと1480mmのイオンビームを出力可能 (c) iG8におけるBF₃ガス源プラズマから抽出されたイオン質量スペクトル (d) iG8およびiG6の測定位置ごとのビーム電流密度 イオン種B⁺

3. 1. 2 ビーム性能評価

本項では、要求③～⑤への対応として、ビーム性能評価と結果を述べる。前提として、ガラス基板に均一なビーム電流密度でイオン注入を行うためには、当然ながら基板表面付近に均一なイオンビーム密度を形成する必要がある。一方、イオンビームはイオン源および質量分離マグネットを通過する過程で、電場・磁場の影響を受けつつ、加速されたり曲げられたりする。

また、イオン源内部には複数種のイオンが共存しており、プラズマ密度は本質的に不均一である。このため、基板表面でのビーム均一性は、イオン源内部のプラズマ分布を直接反映したものではなく、ガス流量（圧力）、イオン源の電極配置および電圧、イオン質量分離マグネットの磁場分布など、複数のパラメータを総合的に制御することで実現されている。iG8ではiG6と比較してビーム高さが増大しており、ビーム制御はより複雑となる。そのため、均一なビームを安定的に生成するためのガス圧力条件や、イオン源および質量分析マグネットにおける電場・磁場分布を再検討した。検討結果を以降に示す。図4 (c) は、iG8でBF₃ガスを用いた場合のイオンビームのイオン質量スペクトルを示している。ここで、BF₃ガス流量23ccm、カソードとプラズマ生成部内壁の電位差（アーク電圧）約100V、イオンビーム加速電圧40kVである。このスペクトルから、純粋なB⁺ビーム400 $\mu\text{A}/\text{cm}$ のイオンビームを実現できることが分かる。以上より、iG8用のB⁺イオン質量分離と大電流ビーム搬送の基礎技術が得られている。さらに、図4 (d) は、iG6およびiG8のイオンビームがガラス基板に当たるすぐ傍のビーム計測系位置におけるビーム電流密度を示している。ここで、イオン種はB⁺、イオンエネルギーは30keV、両者の平均ビーム電流密度は425 $\mu\text{A}/\text{cm}$ である。iG8のビーム計測系は90個のビーム電流計測素子で構成されており、iG6の1.5倍の素子数でありつつ、iG8のビーム電流の均一性は3%以内であり、iG6のビーム均一性と同じである。したがって、この結果は、これまでにないビーム高さを有する大型イオンビームをガラス基板全体へ均一に注入可能であり、当社の優れたビーム制御技術の一例を示している。

3. 1. 3 大型スキャンユニット

ここからは、要求①のガラス保持のための大型スキャンユニットの技術開発について述べる。まず、Gen.8ガラス基板の厚みは0.5mm程度であり、面積に対して非常に薄い。このため、iG8のガラス搬送やイオン注入中のスキャンユニットの歪み、例えばガラス保持システム（プラテン）の変形を抑制する必要がある。これは、大きな歪みはガラス基板表面へのイオン注入角度誤差の増大、およびガラスの破損を引き起こす可能性があるためである。また、iG6プラテンをGen.8ガラスサイズにスケールアップした場合、プラテン変形量が大幅に増加し、ガラス搬送すらできなくなるため、新たな設計が必要となった。図5に設計したiG8用プラテン3Dモデルにおけるプラテンおよびガラスの変形シミュレーション結果を示す。プラテ

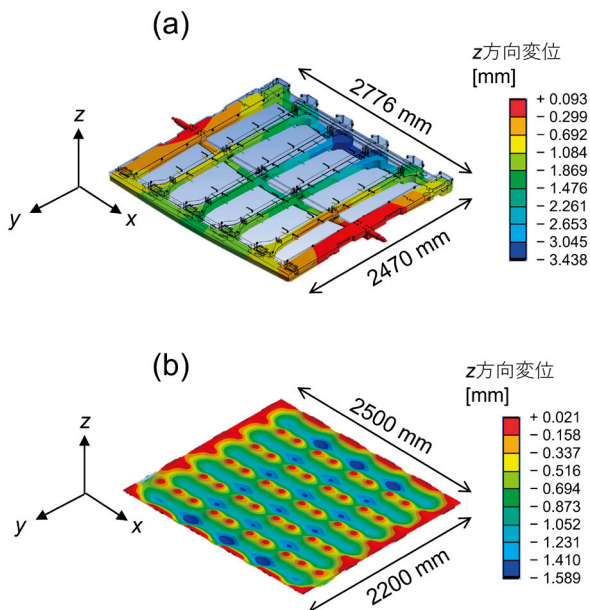


図5 (a) Gen.8ガラス保持システム(プラテン)本体のz方向の変位シミュレーション (b) プラテン上のGen.8ガラス基板のz方向の変位シミュレーション結果

ンの剛性向上・たわみ抑制のための骨組み構造を改良し、歪み低減可能な形状にした。さらに、プラテンの変形許容値よりも、ガラス基板の変形許容値はさらに小さいため、プラテン剛性の向上に加え、プラテンとガラス基板間のピン構造についても見直しが不可欠であった。よって、プラテンおよびピン構造を一体で再設計し、構造シミュレーションによる検証を行った。検証結果として、プラテンと業界要求であるガラスのz方向（ガラス表面に垂直方向）変形許容値はそれぞれ5mmと1.6mmに対し、構造シミュレーション結果においては、プラテンの変形量は約3.5mm、ガラス基板の変形量は1.6mmとなり、両者ともに許容値内に収まった。当社はこのシミュレーション結果を基にiG8用スキャンユニットに適用するプラテンを作製した。

3. 2 装置の非生産時間削減のための技術

本節では、要求⑥への対応として、カソード交換などに伴う装置の非生産時間削減の技術について述べる。非生産時間の削減は量産性向上に大きく寄与するため、当社の競争力確保において非常に重要である。一方、 PH_3 プラズマと比較して、 BF_3 プラズマ中のカソード寿命はかなり短く、この寿命が非生産時間に大きく寄与するため、 BF_3 プラズマに対する長寿命カソードを開発した。加えて、従来よりも少ないプラズマ密度でビーム出力可能な改良マルチカスプイオン源^{*2}も開発した。前者については、iG6を参考にして、カソード形状と電源システムを再

設計した。図6 (a) はカソード寿命の推移を示す。2005年に開発された従来カソードの形状を変更しつつ、対応する電源容量を増大させることで、寿命が伸長した。なお、プラズマ生成部の大型化に伴い、生成すべきプラズマ体積も増加している。その結果、プラズマ生成を支援するカソード数を大幅に増やす必要がある。一方、カソード数の増加は、カソードを制御する電源の増加を伴うので、結果としてユニットサイズの大型化につながってしまい、装置の保守性、信頼性などにデメリットがある。そこで、カソード制御用の

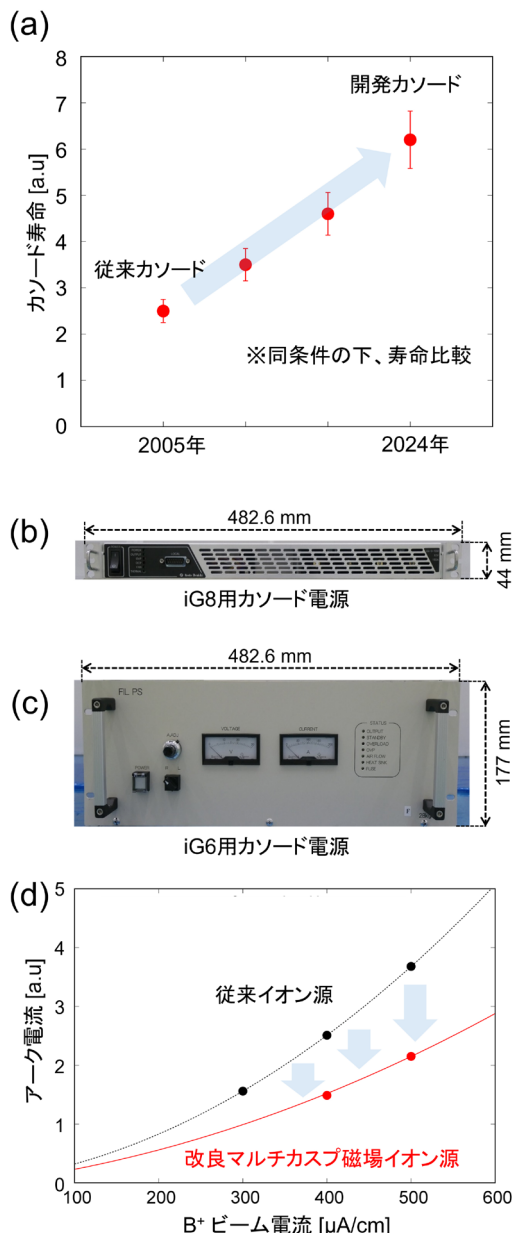


図6 (a) 試作カソード寿命の推移 (b) シリコンカーバイド (SiC) スイッチングデバイスを使用したiG8のカソード電源 (定格直流電流は150A) (c) Siスイッチングデバイスを使用したiG6のカソード電源 (定格直流電流は130A) (d) 従来型イオン源と改良型マルチカスプイオン源における、 B^+ ビーム電流に対する BF_3 プラズマアーク電流の関係

電源サイズを大幅に縮小(図6 (b)) することで、ユニットサイズ増大を抑制した。さらに、シリコンカーバイド (SiC) スイッチングデバイスを用いた新しい回路を設計し、導入することで高負荷による電源の故障率も低減できている。図6 (b) はiG8カソード電源であり、高さ44mm、幅482.6mm、奥行き432mm、重量7kg、定格直流150Aである。一方、比較のために示すiG6のカソード電源(図6 (c)) はSiスイッチングデバイスを使用し、高さ177mm、幅482.6mm、奥行き550mm、重量28kg、定格直流130Aである。これにより、従来のカソードと比較してBF₃プラズマに対して1.5倍以上の寿命を実現できるようになった。後者については、磁場分布の変更による磁場のカस्प全幅⁽⁹⁾の縮小、プラズマ生成部の内壁形状を大幅に変更するなどし、改良型マルチカスパイオン源を開発した。図6 (d) にB+ビーム電流に対するBF₃プラズマアーク電流を示す。ここから、改良型マルチカスパイオン源は従来型のイオン源と比較して、同じイオンビーム電流を取り出すのに必要なアーク電流(プラズマ量に比例)が大幅に低減できていることが分かる。これらの技術を組み合わせることで、カソード寿命は2倍以上になると期待している。

3.3 システムのユニット化技術

本節では要求⑦への対応として、システムのユニット化について述べる。図3 (a) に示すようにiG8は3ユニットに分割されている。一方、図7は、装置を構成するユニットおよび部品(機構システム)の制御を担うシステム(制御システム)間のネットワーク構成を示している。iG8の制御システムも3ユニットに分割された構成を採用しており、各ユニットはネットワークを介し、接続されている。各ユニットにはコントローラが配置された独立した制御ネットワークが存在しており、各々で生産・調整・改良できるよう設計

されている。具体的には、これらネットワークは2台のPCと5台のコントローラで制御され、互いにイーサネットケーブルで接続されている。また、ネットワーク内の高電圧領域の接続(図3 (a)、図7)においては、サージなどによる機器故障を防ぐため、光ファイバーを採用している。一方、各ユニットはコントローラによって独立操作でき、電源、センサー、モーター、ロボット、ポンプなどの電気部品を個別に制御できる。各ユニットにコントローラを配置することで、例えばiG8のビームユニットのみで新しいイオンビームの設計開発、イオン注入用スキャンユニットのみで基板温度変更機能などの設計開発ができるようになり、従来よりも大きな追加機能拡張性を有するようになった。さらに、ユニット化により、生産に必要な面積を分割することができるため、今後の安定した生産システム構築への貢献も期待できる。

4. まとめ

当社は、第8.6世代ガラス用のイオン注入装置「iG8」を開発した。ビームラインの基本コンセプトの多くは、量産で実績のあるiG5およびiG6と変わらない。一方で、業界の要求に応じて、Gen.8基板用の大型ビームユニットとスキャンユニット技術、装置のダウンタイム短縮技術、システムのユニット化技術という3つの構成技術を開発・検証した。その結果、iG8は大型基板でもiG5やiG6と同等あるいはそれ以上のスペックのイオン注入が可能であり、カソード寿命の延長によるダウンタイム削減、機能拡張性を備えた装置となった。よって、iG8は、さまざまなIT製品の開発・生産において非常に有用であると期待される。今後も当社は技術力の向上に努め、FPD製造用イオン注入装置の提供を通じて業界の発展に貢献していく所存である。

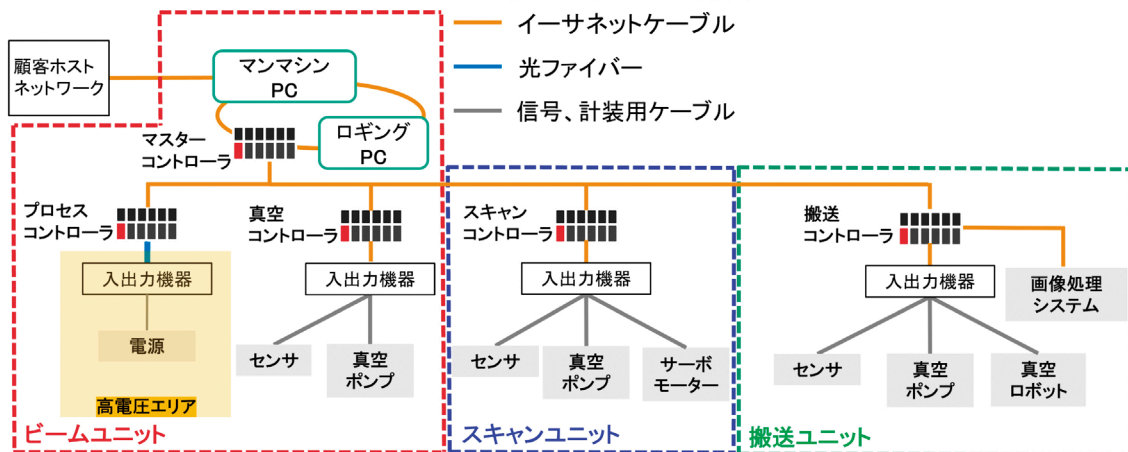


図7 iG8を構成する部品(機構システム)の制御を担うシステム(制御システム)間のネットワーク

用語集

- ※1 ファウンダリ
自社で設計を行わず、他社からブランド製品などを受託して、製造のみを専門に行う企業や業態
- ※2 マルチカスプイオン源
イオン源内部で、イオンあるいはプラズマが閉じ込められる磁場分布 (カスプ磁場) となるように磁石を配置した構造を有し、プラズマを安定して大量に閉じ込め、高電流・均一なイオンビームを作るための磁石付きプラズマ発生装置

参考文献

- (1) T. Sameshima, K. Yasuta, M. Hasumi, T. Nagao, and Y. Inouchi, Appl. Phys. A 124 (2018) 228.
- (2) T. Nagao, Y. Inouchi, J. Tatemichi, M. Hasumi, and T. Sameshima, The 30th International Workshop on Active Matrix Flatpanel Display and devices (2023) 118.
- (3) T. Ui, K. Yasuta, Y. Yamane, and J. Tatemichi, ECS Transactions 109 (2022) 67.
- (4) Y. Yamane, K. Yasuta, T. Ui, and J. Tatemichi, The 30th International Display Workshops (2023) 282.
- (5) Counterpoint Research 2025 4Q Reports (2025).
- (6) T. Matsumoto, K. Imai, I. Nishimura, Y. Inouchi, S. Dohi, G. Takahashi, M. Tanii, J. Tatemichi, M. Konishi and M. Naito, Proc. of 19th International Conference on Ion Implantation Technology (2012) 324.
- (7) Y. Inouchi, T. Matsumoto, J. Tatemichi, M. Konishi, and M. Naito, Proc. of 19th International Conference on Ion Implantation Technology (2012) 328.
- (8) S. Dohi, H. Kai, T. Nagao, T. Matsumoto, M. Onoda, K. Nakao, Y. Inouchi, J. Tatemichi, M. Nukayama, The Nissin Electric Review 62 (2017) 17.
- (9) A. T. Forrester, Large Ion Beams (1988).

執筆者紹介



宇井 利昌 Ui Toshimasa
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業部 主任
博士(マテリアルサイエンス)



川瀬 一貴 Kawase Kazuki
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業部



川村 昌充 Kawamura Masamitsu
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業部



永尾 友一 Nagao Tomokazu
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業部
主任



高橋 元喜 Takahashi Genki
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業部
主任



土肥 正二郎 Dohi Shojiro
日新イオン機器株式会社
FPD装置事業部
執行役員