



6. NBI 技術の波及効果

渡邊和弘, 安東靖典¹⁾
(日本原子力研究開発機構, ¹⁾日新イオン機器株式会社)

Application of NBI Technologies

WATANABE Kazuhiro and ANDOH Yasunori¹⁾

Japan Atomic Energy Agency, Naka 311-0193, Japan

¹⁾*Nissin Ion Equipment Co., LTD., Kyoto 601-8205, Japan*

(Received 1 October 2005)

Technologies of a large ion source developed for neutral beam injectors (NBI) have been applied to various fields of industries such as ion beam machining for semiconductors, electronics and optical devices, and manufacturing process of a large size liquid crystal display. Power supply technology of a high performance core snubber for NBI has also been applied to high energy particle accelerators to improve the efficiency.

Keywords:

NBI, ion beam application, ion source, ion beam milling, ion beam sputter, liquid crystal display, power supply, magnetic core, accelerator

6.1 はじめに

中性粒子入射装置 (NBI) の開発では、1970年代から80年代にかけて、米国の TFTR [1], EU の JET [2], 原研の JT-60 [3] に向けて NBI 用イオン源の大出力化開発が行われた。これらの NBI で採用されたイオン源方式は、多極磁場型イオン源 (バケット型イオン源) [4] である。バケット型イオン源の原理は、放電室の壁を永久磁石で囲みカスプ磁場を形成した陽極チェンバーと、その内部に配置したフィラメント陰極との間で低気圧直流アーク放電を点弧し、プラズマを生成させるものである。生成したプラズマ中のイオンは、陽極チェンバーの開口部に設けた複数枚の多孔電極間に電界を印加して引き出し、加速してイオンビームとなる。本方式のイオン源は、①大型化が比較的容易である、②生成するプラズマが一様で、ビームの発散角が小さい、③構造が比較的簡単で保守が容易である、などの特長を持つ。

原研では、100 keV, 40 A, 10秒出力の水素イオンビームを 27 cm × 12 cm の領域から一様に生成でき、原子イオンの比率も91%以上の高性能バケット型イオン源が開発された [3]。さらに大面積ビームの開発では、100 cm × 8 cm の矩形領域から 2.5 kA/m² のイオン電流密度で原子イオン比率93%の水素イオンビームを一様に生成する大型イオン源が開発された [5]。

これらの核融合用イオン源開発で培った大出力、大面積ビーム発生技術は、イオンビーム応用装置の性能向上に活用された。即ち、直径が 50 cm を超えるような大面積ビームやメートル級の幅広ビームの発生が可能になったこと

corresponding author's e-mail: watanabe.kazuhiro@jaea.go.jp

で、イオンビーム加工機や液晶製造装置の性能が向上し、それらを用いることによりデバイス開発が大幅に進展した。

NBI においてイオン源と同様に重要なのが、イオン源用電源である。特に、高電圧電源におけるサージ抑制素子の開発で得られた大型の磁性材コア [6] は、高エネルギー加速器にも適用され加速器の高性能化に大きく寄与している [7]。

本章では、NBI 開発によって進展したイオンビーム技術が、今日の IT 化時代を支える柱の一つとなっていること、さらに、加速器などの分野へも貢献していることを具体的な例をあげながら紹介する。

6.2 イオンビーム加工機

NBI で開発されたイオン源技術が産業用装置に応用された一つの例として、イオンビーム加工機をあげることができる。イオンビーム加工機とは、イオンによって種々材料の加工、表面処理などを行う装置であり、大別して、①イオンビームの運動エネルギーを用いて材料の表面を物理的に切削加工 (ドライエッチング) するミリング装置、②イオンビームをターゲットに入射してターゲット材をスパッタリングさせ、このスパッタされた物質を別の基板上に堆積させて薄膜を作るイオンビームスパッタ装置 (成膜装置)、③イオンビームを基材に打ち込み (インプラネーション) 材料改質を行うイオン注入装置、さらにイオンビームと蒸着物質の混合物を同時に材料表面に照射するミキシング装置 (表面改質装置) 等がある。以下本節では、市

場への供給が多い、ミリング装置とイオンビームスパッタ装置について紹介する。

6.2.1 イオンビームミリング装置

半導体の高集積化が進むにつれて、基板のパターン加工において従来にも増して均一で精度の高い超微細加工技術が要求されてきた。本装置はこれらの要求に応えるもので、アルゴンイオンの他、活性ガスイオンによる直径50 cm以上の大面積に一律で発散角の小さなビームを発生させることにより、指向性の高い超微細加工が可能である。

ミリング装置の構成図をFig. 1に、その写真をFig. 2に示す。イオン源には、ビームの均一性と小発散角の要求からバケット型が採用されている。NBI用イオン源で培われた大型化の技術を活かして直径58 cmのイオン源が用いられている。基板ホルダーは自転と公転機能を備え、一律なビームとあいまって基板全域に渡って均一な加工が可能である。

イオンビームミリング法は被加工物の材質を選ばず、多

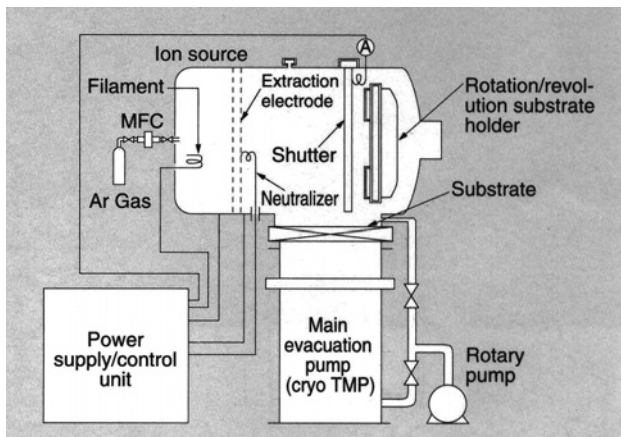


Fig. 1 Ion beam milling system. (The drawing offered by AE KiKi Engineering Co Ltd.)



Fig. 2 Photo of ion beam milling system (The photo offered by AE KiKi Engineering Co Ltd.).

層膜の一括加工も可能である。具体的には、金属(Pt, Au, Cu 他), 化合物 (GaAs, InP, YBCO 他), セラミックス (Al₂O₃, SiO₂, AlTiC 他), 磁性材 (NiFe, センダスト, Co系アモルファス), 樹脂 (ポリイミド等フォトリソ材) 等広範囲の材質の加工に適用されている。

イオンビームミリング装置は以上の特長を生かし、次のような幅広い分野で製造や加工に使用されている。

- ① 産業・民生用薄膜磁気ヘッドの製造
- ② シリコンおよび化合物半導体の加工
- ③ 液晶デバイス製造
- ④ センサ, 回折格子, SAWデバイス等各種デバイス製造

ミリング装置によって微細加工を行った薄膜磁気ヘッドの拡大写真, メモリ材であるPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)のSEM写真をFig. 3とFig. 4にそれぞれ示す。本手法によってサブミクロン・ナノスケールの精密微細加工が可能となり、例えば磁気ヘッドのピックアップコイルの小型化が進み、ハードディスクの記録密度の飛躍的な向上が実現された。

6.2.2 イオンビームスパッタ装置

イオンビームスパッタ法による成膜法は、材質を問わず高機能薄膜を容易に再現性良く製作できるという利点がある。イオンビームスパッタ装置の構成図をFig. 5に示す。スパッタイオン源からイオンビームを引き出し、ターゲットに衝突させてスパッタさせる。スパッタされた粒子は基板上に堆積し薄膜を形成する。ターゲットを複数個用いることで、多層膜や複合膜の形成が可能となる。さらに、薄

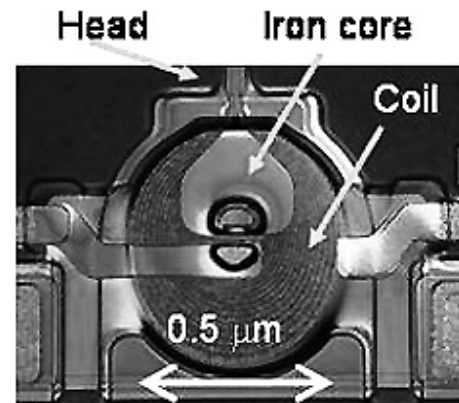


Fig. 3 Magnified photo of a pickup coil for hard disk fabricated by the ion beam milling system (The photo offered by AE KiKi Engineering Co Ltd.).



Fig. 4 An example of the milling processed material (The photo offered by AE KiKi Engineering Co Ltd.).

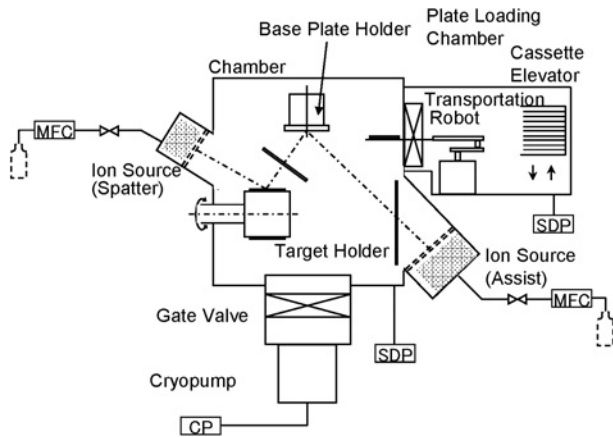


Fig. 5 Configuration of ion beam sputtering system (The drawing offered by AE KiKi Engineering Co Ltd.).

膜に直接イオンビームを照射可能な位置にアシスト用イオン源を設置し、成膜前の基板または成膜中に各種のイオンビームを照射することにより、膜の電気的、機械的、光学的或いは結晶学的性質などを制御することも可能である。本装置の特長を以下に示す。

- ① 金属、絶縁物を問わず高融点物質の薄膜化が可能である。
- ② 高真空中での成膜が可能であり、不純物などの影響を防ぐことができる。
- ③ 高エネルギーのスパッタ粒子の堆積が可能である。
- ④ 低温で薄膜を成長させることができ、材質への熱の影響を防ぐことができる。
- ⑤ 膜がプラズマに曝されないため、高エネルギーイオンや電子による損傷がない。
- ⑥ アシスト用イオンの照射により膜質の制御が可能である。

これらの特長を活かして、イオンビームスパッタ装置は下記に示すような幅広い分野で、薄膜の製造や研究開発に利用されている。

- ①光学膜 (AIN, SiN など)、②超伝導膜 (YBaCuO など)、③ミラー用超多層膜 (MoSi, NiTi など)、④エピタキシャル膜 (Si, GeAs など)、⑤磁性膜 (FeC, NiFe など)

原研では、ニッケルとチタンの多層膜で形成される中性子ミラー(スーパーミラーと呼ぶ)の開発を進めている。その積層面の断面写真を Fig. 6 に示す。これは、大強度陽子加速器施設や研究炉で、中性子の輸送、分岐、集束、偏極に用いられる重要な中性子光学デバイスである。その原理は、中性子に対して屈折率の異なる非等厚の金属多層膜を形成してこれを人工結晶格子とし、ブラッグ散乱を利用して中性子の反射率を飛躍的に増加させるものである。従来のミラーでは、多層膜形成時の結晶粒成長による表面粗さの増大や界面拡散によって界面構造が乱れ、中性子反射率が低かった。原研のスーパーミラーでは、多層膜の成膜過程において界面を 100 V 程度で加速した低エネルギー Ar ビームで照射し、なめらかにしながら積層させることで、界面粗さを従来の 0.7 nm から世界最高の 0.3 nm に改善し

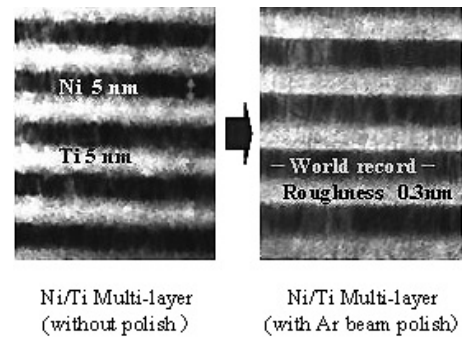


Fig. 6 TEM picture of Ni/Ti layered film for neutron super mirror developed by using the ion beam sputtering system.

た。本ミラーによって従来型ニッケルミラーの 4 倍の臨界角まで 90% の高反射率を得ることが可能となっている [8]。

また産業界では、モリブデンとシリコンの多層膜で形成される EUV ミラーの製作が検討されており、LSI 用次期ステッパーへの適用が期待されている。

6.3 大型液晶製造装置への NBI 技術の波及

イオン注入技術は、半導体産業、とりわけメモリや CPU など大規模集積回路 (以下、LSI/Large Scale Integrated Circuit) の分野では、P/N 制御、コンタクト抵抗の制御、トランジスタの閾値制御など、素子特性の精密な制御のために不可欠な技術として発達してきた。その過程でイオン注入装置は量的な精度の向上だけでなく、コンタミネーションの低減、深さ分布や注入角度の精度向上など、種々の観点からの精度の追求が行われてきた。一方、NBI 用大電流イオン源技術の発達とともに、1980年代には、耐腐食性能の改善、耐摩耗性能の向上など、イオン注入技術の他の産業分野への応用に関する取り組みが盛んに行われた。

液晶ディスプレイ (以下、LCD/Liquid Crystal Display) の分野では、1980年代の終わり頃から大型化が始まり、1990年代の初めにはノート PC に向けた本格的な LCD の生産が始まった。液晶画面を構成する画素部に非晶質シリコン薄膜トランジスタ (以下、a-Si TFT/amorphous Silicon Thin Film Transistor) を配したアクティブ型 LCD は画質が大きく向上し、LCD 市場の拡大につながった。これと平行して、さらに次の世代を目指し、レーザー照射による結晶化技術による低温ポリシリコン (以下、LTPS/Low Temperature Poly Silicon) を用いた LCD の開発が活発に行われた。LTPS は a-Si TFT に比べてキャリアの移動度が大きいという特長を生かして、画素を駆動させるためのドライバー回路やメモリ回路、D/A 変換回路など、a-Si TFT LCD ではシリコンチップに依存していた種々の回路がガラス基板上に作製されるようになった。その結果、LTPS LCD の製造プロセスは LSI 製造と同等となり、シリコンウェハに比べて遥かに大きなガラス基板へのイオン注入技術の要求が高まった。

6.3.1 液晶用イオン注入装置

LCD 用イオン注入装置は、1990年頃からイオンドーピング装置 (以下、I/D/Ion Doping) と称して市場に出回るよ

うになった。当時のガラス基板の大きさは約30 cm×40 cmで、比較的小型の基板であったため、基板サイズ相当の円形あるいは矩形のイオン源を用い、イオンの質量分離を行うことなく面状のイオンビームで基板に照射するものであった。まさに核融合用に開発された大面積大型イオン源の特徴を生かした装置技術であったと言えよう。

その後、ますます大型化するガラス基板に対応するために、イオン源は矩形で長手方向に伸張され、リボン状の幅広イオンビーム発生と基板の走査を併用する構成となった。また、LTPSプロセスでは低ドーズ領域($10^{11} - 10^{12}$ ions/cm²)で高い注入精度が要求されるようになり、大面積ガラス基板対応の質量分離されたイオンビームの要求が高まってきた。さらに、 $10^{14} - 10^{15}$ ions/cm²の高ドーズ領域においても非質量分離ビームから質量分離ビームへの要求が高まった。つまり、LCD製造分野でも半導体分野と同様に高精度なイオンビームが要求されるようになった。

Fig. 7に、Ion Doping iG4 (以下、iG4)と呼ぶ質量分離機能をもつ装置のビームライン概念図を示す[9]。複数のフィラメント陰極をもつ矩形のバケット型イオン源と質量分離用マグネットで構成されている。イオン源電極の約80 cm長さの多孔領域から引き出された幅広イオンビームは、磁場で必要なイオンが選別されて下流側の基板へ輸送される。磁場領域の出口には分離スリットが配置され選別

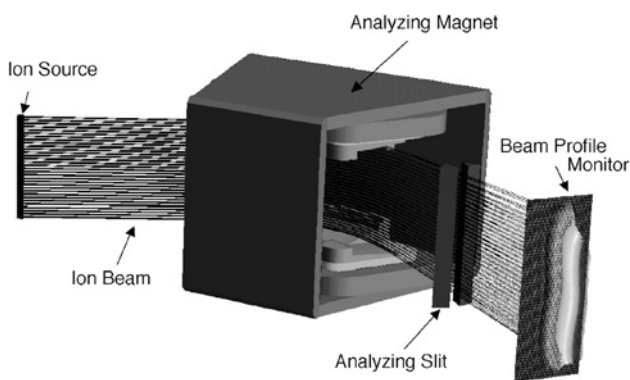


Fig. 7 Concept of beam optics in an ion doping system iG4.

されたイオンのみが基板へ到達する。現状のLTPS LCD用ガラス基板の最大サイズが73 cm×92 cmであり、これに対応した73 cm幅のイオンビームを得ることができる。必要なイオンのエネルギー範囲は、イオン種や素子構造によって異なるが、10–90 keVである。分離能力は $M/\Delta M \geq 10$ を達成している。

6.3.2 ビームのスペクトル

LCD用TFTに必要なイオン種は半導体製造の場合と同様にリン(P)、ホウ素(B)などが主なものである。iG4では、これらのイオンビームを発生させるためのガス種として、それぞれPH₃、BF₃が使用される。

BF₃を用いた場合のイオンスペクトルの一例をFig. 8に示す[9]。同図から主なイオン種としてBF₂⁺、B⁺以外にBF⁺、F⁺などが生成されていることがわかる。また、LTPSプロセスに必要な単位長さあたりの電流密度約150 μA/cmのB⁺イオンが得られていることがわかる。これは、基板幅73 cmとすると、ターゲット電流としては約11 mAに相当する。

BF₃分子の分解はイオン源のアーク放電電力に依存する。すなわち、放電電力を増加させると分解が進むためBF₂⁺イオン量が減少し、B⁺イオン量が増加する。しかしながら、半導体用装置におけるスペクトルと比較すると、iG4ではBF₂⁺イオン量が多く、このデータから半導体用装置で使用されているフリーマン型あるいはバーナス型イオン源に比べてバケット型イオン源ではガス分子の分解効率が低いことがわかる。なお、分解効率に着目し、バケット型イオン源の電力効率を改善することで、B⁺/BF₂⁺比を改善できることが確認されており、更なる分解効率の改善とこれに伴ういっそうのイオン電流増加が期待される。

6.3.3 今後期待される大型イオン源技術の応用

近年、ガラス基板上にトランジスタを作るための前工程に対して、液晶材料を挟み込みLCDとして組み立てる、いわゆる後工程におけるイオンビームの利用が注目されている。後工程では、液晶分子を一定方向に並べるための配向プロセスにおいて、従来技術では、ガラス基板表面に塗布された配向材料を回転円筒表面に巻いたベルベット布で擦

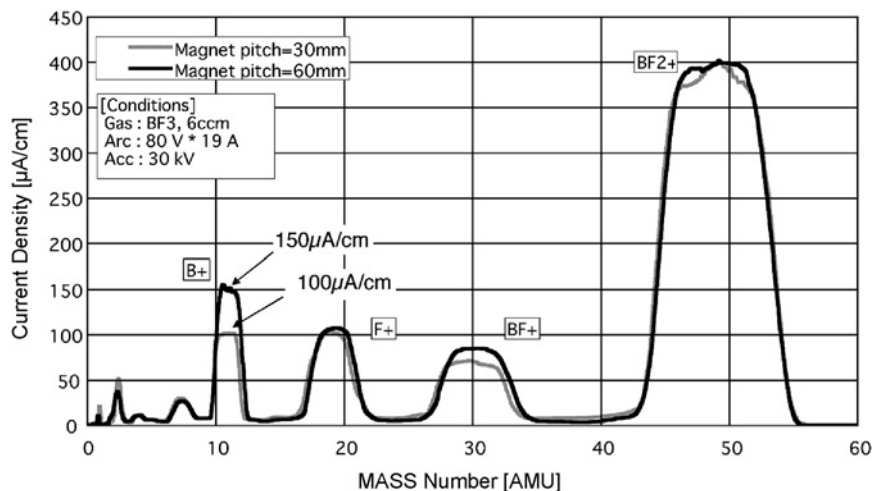


Fig. 8 Beam spectra of BF₃ on ion doping system iG4.

ることにより、配向材料表面に方向性を持たせている。この“擦る(ラビング)”技術に代えて、数百 eV のイオンビーム照射を行うことにより、配向性能を付与できることが示された[10, 11]。基板の大型化に伴い従来の“擦る”技術では歩留り等の課題が浮上してきたが、イオンビーム照射による非接触技術の導入により、このような課題解決が可能になった。

この技術が対象にする LCD は、LTPS LCD だけでなく、むしろ液晶テレビなどの a-Si TFT LCD であり、そのガラス基板サイズは 110 cm × 125 cm - 200 cm × 220 cm と著しく大きい。また、配向モードによっては対角方向にも処理が必要になるため、処理する幅が 3 メートル余りにもなる。このため、さらなる幅広ビームが要求されている。今後、大型イオン源技術の応用として期待される新しい分野である。

6.4 NBI 用高電圧・大電力電源技術の応用

NBI 電源回路の概略を Fig. 9 に示す。大パワーイオンビームの加速を行う際には、イオン源加速電極間での絶縁破壊が不可避免的に発生する。その場合、安定な出力を得るためには放電によるイオン源の損傷を抑制することが必要である。つまり、電源の対地静電容量からイオン源へ流入するエネルギーを抑制吸収することが不可欠である。エネルギー流入の抑制には、磁性材コアと二次巻線回路から成るコアスナッチャー(サージブロッカ)が用いられる。電源システムの大容量化により蓄積エネルギーも増大し、従来型のフェライトコアでは、飽和磁束や周波数特性の点で限界となった。そこで、超微結晶磁性薄帯(ファインメットコア)[12-15]を用いた大型のサージブロッカが開発された[6]。このような大型サージブロッカ用コアは、直流 500 kV の JT-60U 負イオン NBI 電源[16]や 1 MV の MTF 電源に適用された[9, 17]。このコアは、最大飽和磁束密度が 1.2 T でコバルト系アモルファスの約 1.3 倍あり、かつ高周波特性でも Fig. 10 に示されるようにコバルト系アモルファスと同等の優れた特性を持ち、総合的なサージブロッカ機能として従来のフェライトコアの約 3 倍の性能を持つ[6]。

この大型コアは、医療用小型加速器として期待されている FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) 加速器[7]の他、医療用大型加速器 HIMAC[18]にも用いられ、加速器の大幅な小型化と性能向上を可能にした。また、現在建設が進められている大強度陽子加速器(J-PARC)のシンクロトロン加速器の高周波加速空洞[19-21]にも、総数で300個以上が用いられている。

7. まとめ

プラズマを加熱するための NBI の開発において進展したイオンビーム技術が、核融合分野以外の産業応用として波及し、現在の IT 化技術を支えていることを紹介した。すなわち、大面積、大容量イオン源技術は、イオンビーム加工技術に応用され、半導体や電子デバイスの高性能化を可能とした。さらに、大型液晶製造のプロセス装置に応用され、今日の大型液晶ディスプレイ技術で重要な位置を占めている。

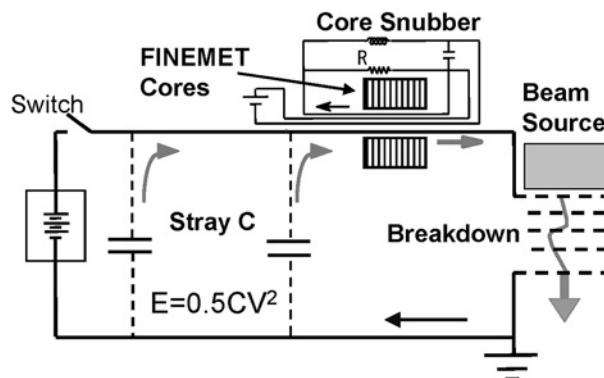


Fig. 9 Simplified circuit diagram of NBI power supply. Core snubber is utilized to protect the beam source from electric breakdown.

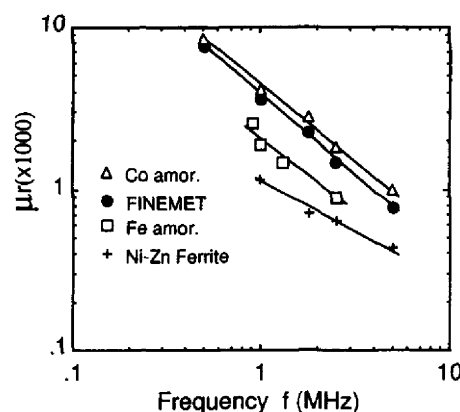


Fig. 10 Effective pulse permeability for magnetic materials (Ref. 6).

る。さらには中性子ミラーや EUV ミラーの高性能化にも寄与している。また、NBI 電源技術は、高エネルギー加速器の高性能化に貢献している。今後も、核融合技術の開発により生まれる技術が、様々な分野に貢献できるものと期待される。

謝辞

本解説記事の作成に際し、イオンビームの加工技術への応用については、(株)日立製作所の山下泰郎氏にご協力いただいた。また、中性子用スーパーミラーについては、原研中性子利用研究センターの曾山和彦氏に資料の提供をいただいた。大型サージブロッカ用磁性体コアの応用で、加速器での使用詳細に関しては、原研大強度陽子加速器開発センターの山本昌亘氏および小栗英知氏に情報の提供をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] G.M. Gammel, J.H. Kampersroer, L.R. Grisham, H.W. Kugel, R.A. Langley, A.I. Roquemore, M.C. Vella and M. D. Williams, *Proc. 12th Symp. on Fusion Eng. Monterey* (1989) p.1137.
- [2] A.J.T. Holmes, T.S. Green, A.R. Martin, R.S. Hemsworth and E. Thompson; *Proc. 4th Int. Symp. on Heating in Troi-*

- dal Plasma*, Rome (1984) p.1065.
- [3] Y. Okumura, H. Horiike and K. Mizuhashi, *Rev. Sci. Instrum.* **55** (1), 1 (1984).
- [4] R. Limpaecher and K.R. Mackenzie, *Rev. Sci. Instrum.* **44**, 726 (1973).
- [5] K. Watanabe, M. Araki, M. Dairaku, H. Horiike, Y. Ohara, Y. Okumura, S. Tanaka and K. Yokoyama, *Rev. Sci. Instrum.* **61**(6), 1694 (1990).
- [6] K. Watanabe, M. Mizuno, S. Nakajima, T. Iimura and Y. Miyai, *Rev. Sci. Instrum.* **69** (12), 4136 (1998).
- [7] Y. Mori, M. Fujieda, K. Koba, H. Nakayama, C. Ohmori, K. Saito, Y. Satoh, Y. Tanabe, A. Takagi, Y. Toda, T. Uesugi, M. Yamamoto, T. Yan and Y. Yoshii, *Proc. of EPAC 98* (1998) p.299.
- [8] K. Soyama *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **529**, 73 (2004).
- [9] S. Maeno, Y. Andoh, M. Konishi, Y. Matsuda, J. Tatemichi, Y. Inouchi, E. Murasaka, M. Nukayama, K. Nakao, S. Doi and M. Naito, *to be published in Proc. of 14th Int'l Conf. on Ion Implantation Technology*, 2004
- [10] S.-C.A. Lien, P. Chaudhari, J.A. Lacey, R.A. John and J.L. Speidell, *IBM J. Res. Development*, **42** (3/4) (1998).
- [11] J.Y. Hwang, Y.M. Jo, S.J. Rho, H.K. Baik and D.S. Seo, *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, L992 (2002).
- [12] Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi, *J. Appl. Phys.* **64** (10), 6044 (1988).
- [13] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, *J. Jpn. Inst. Metals* **53**, No.2, 241 (1989).
- [14] S. Nakajima, R. Kagawa, N. Hirao and S. Watanabe, A memo of Plasma Research Meeting, The Institute of Electrical Engineers of Japan, EP-91-13, Feb.23 (1991) (*in Japanese*).
- [15] S. Nakajima, S. Arakawa, Y. Yamashita and M. Shiho, *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A* **331**, 318 (1993).
- [16] T. Ohga, K. Usui, K. Ohmori, K. Watanabe, K. Ohshima, T. Itoh, M. Kawai and M. Kuriyama, *Proc. 17th IEEE/NPSS Symp. of Fusion Eng.* (1997) p.1091.
- [17] T. Inoue, M. Hanada, S. Maeno, K. Miyamoto, Y. Ohara, Y. Okumura and K. Watanabe, Japan Atomic Energy Research Institute Report JAERI-Tech 94-007 (1994).
- [18] M. Yamamoto *et al.*, *Proc. PAC 99* (1999) p.863.
- [19] M. Fujieda *et al.*, *Proc. PAC97* (1997) p.2992.
- [20] T. Uesugi *et al.*, *Proc. of PAC 2003* (2003) p.1234.
- [21] C. Ohmori *et al.*, *Proc. of EPAC 2004* (2004) p.123.