
デカボランイオン注入技術の開発

Development of the Decaborane Ion Implantation Technology

濱 本 成 顕*	海 勢 頭	聖*
N. Hamamoto	S. Umisedo	
木ノ山 俊 昭*	永 山	勉*
T. Kinoyama	T. Nagayama	
丹 上 正 安*	酒 井 滋 樹*	
M. Tanjyo	S. Sakai	
長 井 宣 夫*		
N. Nagai		

概 要

次世代の半導体素子製造では、信頼性のある極浅接合を形成することが重要な課題の一つとして挙げられている。ホウ素イオンを使用する場合に必要なエネルギーは1keV以下であるが、強い空間電荷効果によるビーム発散のためビーム電流が少なく、生産性が極めて悪い。このような極低エネルギー領域にて生産性を改善する方法としてデカボランのようなクラスターイオンを使用する方法が有効と考えられ、本注入システムを開発中である。本稿では現状得られたビーム特性および、注入特性について紹介する。

Synopsis

One of the key issues for the next generation semiconductor device fabrication is the reliable formation of the ultra shallow junction (USJ). Required energy range for B⁺ ion implantation to achieve USJ is less than 1keV. However, the productivity of semiconductor devices in such energy range will quickly fall down due to the low beam current caused by the significant effect of space charge blow-up. To achieve a high productivity in such energy region, cluster ion such as decaborane (B₁₀Hx⁺) ion implantation is proposed as a promising solution and this implantation system is being developed. We are to show the present results of the beam and implantation characteristics.

1. はじめに

昨今の半導体製造において、信頼性のある半導体接合形成を可能にするイオン注入プロセスは必要不可欠な技術になっている。しかしながら、次世代のイオン注入プロセスでは生産性および、半導体素子信頼性の観点から様々な技術的ブレークスルーが必要とされている。例えば、ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductor) 2003にも示されている通り、65nm ~ 45nm ノードと呼ばれる次世代の半導体素子製造プロセスに注目すると、デバイスの微細化に伴いソース/ドレイン領域の浅い接合は深さ数十nmの領域に入りつつある。これらの極浅接合を形成するためには、イオンの注

入エネルギーをできるだけ低くすることが重要である。

半導体製造工場における量産的な観点から考えると、例えば、低エネルギーホウ素イオンのビーム量は、0.2 ~ 1keVで数mAのビーム量が必要とされている。ところが、特にエネルギーが1keV以下になると、エネルギーの減少に伴い急速にビーム電流が減少する。これは空間電荷効果の増大によって、ビームが急速に発散するためである。この現象はイオンビームを発生、輸送するうえで本質的な問題であり、生産性向上の観点から大きな問題となっている。特に、ソース・ドレイン・エクステンション形成と呼ばれる、イオン注入プロセスの中で最も低い注入エネルギーが必要とされるプロセスは、ビーム

* 日新イオン機器(株)

量だけではなくビームの品質、特に注入角度が問題となる。一般的にこの接合部形成において必要とされるビーム条件はホウ素イオンの場合エネルギー500eV以下において ± 0.5 度以下の発散角に抑えることが要求されている。しかし、前述した空間電荷効果増大のためビームが発散し、所望の注入角度を得ることが極めて難しい。

この課題を解決する一つの方法として、デカボランイオン ($B_{10}Hx^+$) のようなホウ素を数多く含むクラスターイオンを用いる手法が提案された⁽¹⁾。例えばデカボランイオンビームを用いれば、ホウ素イオンに比べて約10倍のエネルギー、約1/10のビーム電流量で、単原子ホウ素イオンと同等の注入結果を得ることができる。この効果は単原子ホウ素イオンと比べ空間電荷発散力を1/100に抑えることが可能で、すなわちビームの発散角が同じ場合デカボランの方が等価的に100倍のホウ素を輸送できることを意味する。

当社は低～高エネルギーにおいて注入角度および、注入均一性の精密なコントロールが要求される中電流イオン注入装置の技術分野では世界トップレベルであるが、上記のようなデカボランビーム発生技術と既存技術を組み合わせることによって、極低エネルギー領域における良質かつ、十分なビーム発生が可能となり、結果的に高品質かつ、生産性のあるUSJの形成に寄与するイオン注入装置を市場に提供できることが期待される。また、デカボランのようなクラスターイオンは単原子と比べ複雑な構造をとるため、Si基板に注入された時の挙動が異なることが予想される。このような挙動が半導体素子の生産性および、性能改善に寄与することも期待される。

以上に述べた観点から、独立行政法人、科学技術振興機構の支援を受けデカボランイオンビーム注入装置の開発を実施してきた。また、デカボランが注入プロセスの観点から適用可能であるかを明らかにするため、富士通研究所と共同で注入特性評価を実施してきた。本稿ではこれまでに得られた成果を以下に報告する。

2. 中電流イオン注入装置

デカボランビーム発生に使用した中電流イオン注入装置 (EX2300H) の概略を図1に示す⁽²⁾。半導体デバイスに注入するイオンはイオン源と呼ばれるプラズマ発生装置に、所望の注入元素を含むガスまたは蒸気を導入することによって発生させる。一般的なイオン注入では、通常ホウ素 (B)、リン (P)、砒素 (As) が使用される。イオン源では導入されるガス成分によって様々なイオン状態が生成されるが、実際に必要な成分はほとんどの場合このうちの一成分 (例えば B^+ , P^+ , As^+) であり、プラズマからイオンを高電圧で引き出した後、分析電磁石で磁界をかけることによってイオンの分離を行う。



図1 中電流イオン注入装置 (EX2300H)

イオン源および分析電磁石は高電圧BOXの中に搭載され、大地電位にあるビームラインと接続される加速管に高電圧を印加することによってイオンが加速される。また、加速管内にはイオンビームを効率的に輸送するために収束電極が搭載されている。なお、高電圧BOXは大地電位に対して負の電圧を印加することも可能である。これは、減速モードと呼ばれ、低エネルギーのビームを効率よく輸送するために用いられる。

加速管を通過し最終エネルギーに達したイオンビームはFEM (Final Energy Magnet) 電磁石によって再度、質量分離される。これは、分子イオン (例えば BF_2^+) を加速した時に生成する分子の解離成分 (BF^+ , B^+) や加速された多価イオン (例えば P^{3+}) が荷電変換して生成されるエネルギーコンタミナント (P^{2+} , P^+) を除去するためである。

このようにして、純粹にフィルタリングされたイオンは水平方向に高速走査するビーム走査マグネットに導入される。ビームは水平方向に走査された後、ビームをウェハーに対して平行に注入するため平行化マグネットによって再偏向され、ウェハーにビームが注入される。通常ウェハーに対するビームの面内入射角偏差は $\pm 0.5^\circ$ 以下であり、これまでに述べたような構成にてエネルギー純度および、注入角度精度の高い注入が可能である。

3. デカボラン発生技術

1) デカボランの特性

デカボランは化学式 ($B_{10}H_{14}$) で表され、常温では白色の固体である。また、融点が99.6℃に対して、室温での蒸気圧は6.65Pa (0.05 Torr) である。また高温になると熱分解を起こす⁽³⁾。デカボランをイオン化したときのイオン化スペクトルを図2に示す。デカボランはホウ素が10個、水素が14個結合した多原子分子の

ため、イオン化された場合非常に多くの異なる質量数を持つイオンに分解される。これはホウ素（B）と水素（H）の組み合わせおよび、ホウ素の同位対比（質量数11と10のものが4：1）によって様々なイオン状態が発生するためである。しかし、大きなピークの塊で見るとホウ素がそれぞれ10, 9, 8, 7個含まれるイオンピーク群に分けることができる。これらの相対比はイオン源のパラメーターによって大きく変化するため、できるだけ分子を破壊することなく電離を行うことが効率的なデカボランイオンの発生に必要であることが理解できる。

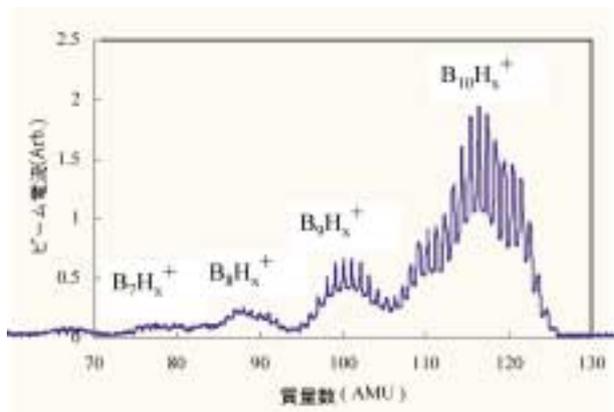


図2 デカボランのイオン化スペクトル

2) デカボランイオン発生部

デカボランイオンは第2章で述べた装置構成のうちイオン源部分を交換することによって発生し、イオン源と蒸気供給部で構成される。通常イオン注入装置では熱陰極型イオン源が使用される。すなわち、タングステンフィラメントを通電加熱し、そこから出る熱電子を加速してプラズマを生成する。他のイオン種も発生させなければならないという観点から、デカボランイオン源の基本的な構成は熱陰極型と同様である。ただし、標準のイオン源に比べ、デカボランを効率よく発生させるための改良が施されている。

またデカボラン蒸気は、イオン源の外に設置された蒸気供給部（専用ガスボックス）より供給される。

3) ビーム電流

前項で述べた基本コンセプトのもと、様々な異なる構成を持つイオン源を試作、ビーム検証を行った⁽⁴⁾。検証の結果、最適なイオン源の運転条件下ではイオン源より引き出されるデカボランビームの引出電流密度はほぼ同じ。すなわち、イオン源の構成が異なってもイオン源からビームが引き出される開口部の面積が同じであれば、ビーム電流もほぼ同じとなる結果を得た。

つまり、ビーム電流を改善するためにはできるだけ引出開口面積を多くする必要があることを認識した。実際に開口面積を現状のビームラインで許容される面積（約2倍）まで拡大した場合、ビーム電流も約2倍になることが確認されている⁽⁵⁾。

また図2で示されているように、デカボランは非常に多くのピークに分解するため、1ピークあたりのビーム電流は非常に少ない。このため、通常のイオン注入で行われるような1ピークのみでの使用では大幅なビーム電流改善は見込めない。逆に言えば数々のピークの内ホウ素を10個持つイオン成分 ($B_{10}H_x^+$, xは水素の数) を可能な限りビームラインに導入すればビーム電流が改善可能である。具体的には分析電磁石の分析スリット幅を調整することによって図2で示される質量数の113~122の10ピークを導入し、ビーム電流が約3.5倍改善されることを確認している⁽⁴⁾。なお、多ピークを同時に注入する場合、それぞれの運動量が極わずかに違うため、注入した時のホウ素濃度分布が1ピーク注入の場合と比べて異なる可能性があるが、実際に注入した結果を比較すると、ほぼ同じ濃度分布が得られている。従ってこのような手法が注入特性の面からも有効であることが確認された。

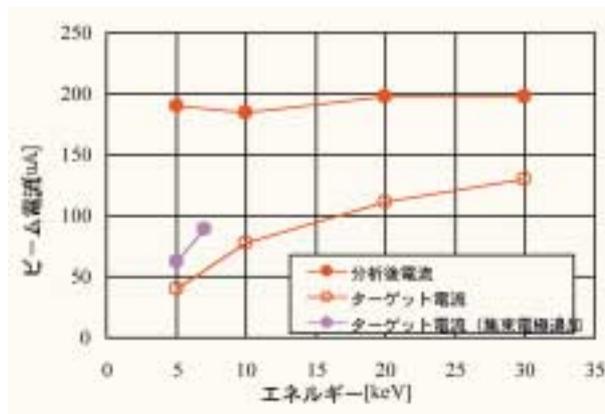


図3 デカボランビーム電流

以上に述べた改良を実施することによって得られたビーム電流を図3に示す。横軸はビームのエネルギー (keV)、縦軸はビーム電流である。なお、エネルギーを0.1倍、ビーム電流を10倍にすると単原子ホウ素に換算した値となる。また、ビーム電流は加速管直後（分析後電流）および、ウェハー注入部（ターゲット電流）で測定されている。加速管直後ではビーム電流は約200 μAでエネルギーに対しほぼ平坦な特性が得られているのに対し、ターゲット電流はエネルギーが下がるとともにビーム電流も低下している。これは、ビームが加速管を通過した後で、空間電荷効果により

ビームが縦方向に発散しているためである。この現象は加速管から下流のビームラインに縦方向集束電極を追加することによって低エネルギー側のビーム電流が改善されることからわかる(図3)。現状得られた低エネルギー領域における最大電流は5keVにおいて約60 μ A、すなわち、単原子ホウ素に換算すると500eV-600 μ Aのビーム電流を達成した。

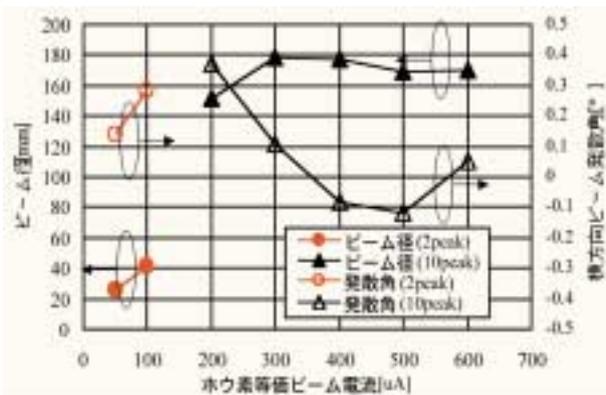


図4 デカボランビーム径、発散角

4) ビーム発散角

前項で述べたとおり、ホウ素に換算すると1keV以下で数百 μ Aのビーム電流が得られているが、次世代の半導体素子製造にはビーム量に加え発散角の低いビームが要求されている。このため、デカボランを使用しても発散角を抑えることができればメリットが少ない。エネルギー5keV(等価ホウ素エネルギー0.5keV)におけるビーム径と横方向ビーム発散角を2ピークと10ピーク加速で比較した。測定結果を図4に示す。横軸がターゲット電流、縦軸がビーム径および、ビーム発散角に相当する。図4によると、2ピーク加速ではビーム径が20~30mm、ビーム発散角は0.3度以下であり、次世代半導体素子製造で要求される0.5度以下を達成している。一方10ピーク加速ではビーム電流20~60 μ Aに対して150~180mmと2ピークの場合に比べ約5倍程度大きい。これは、各ピークにおけるイオンの運動量が異なるため、その軌道がわずかに異なることに起因する。ところが発散角に注目するとビーム径が大きいにもかかわらず、その角度は0.4度以下である。これは、加速管の中に搭載された収束電極によるビーム軌道の収束効果と、加速管以降のビームライン特性に起因すると考えられる。すなわち、本装置のようなビーム輸送部を構成することによって多ピーク加速でも発散角度を抑えながら輸送できる。通常単原子ホウ素加速でこのような1keV以下のビームにてビーム発散角を0.5°以下に抑えることは極めて難し

く、デカボランを使用することによって注入角度を抑えることができる実証を得た。

4. デカボラン注入特性

これまでにデカボランと単原子ホウ素イオンの注入特性比較は幾度と無く報告されているが⁽³⁾⁽⁶⁾、高ドーズ量領域ではデカボランを使用した場合にホウ素とは違った特性を示すことが明らかになった。

1) 自己アモルファス化層の形成

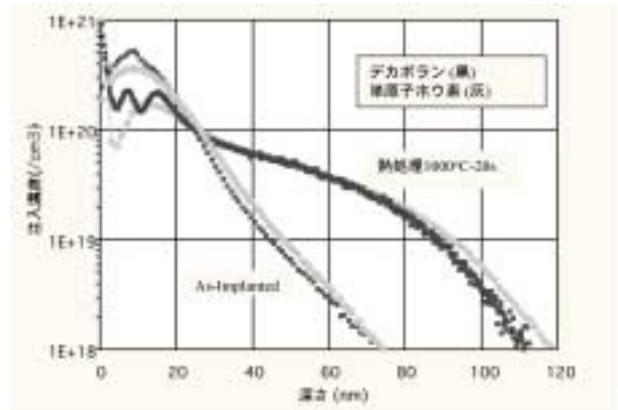


図5 等価エネルギー3keVにおける注入濃度分布

図5にエネルギー3 keV、注入量 $1E15/cm^2$ となるように、単原子ホウ素 (B^+) および、デカボラン ($B_{10}H_n^+$) を注入した後のホウ素深さ方向の濃度分布を示す。この場合デカボランのエネルギーは30keVである。黒印がデカボラン、灰印が単原子ホウ素であり、それぞれ浅い分布が注入のみ(図中ではAs-implanted)、深い分布が熱処理後(1000、20秒)の分布である。

図5からわかるように、デカボラン注入後のホウ素原子分布は、単原子ホウ素注入による場合とほぼ同じ分布深さを持っている。一方、熱処理を行うと、デカボラン、単原子ホウ素とも元素が深い方向に拡散しているのがわかる。ここで、ホウ素の深さ方向濃度が最大になる深さ (R_p) 近辺の分布に注目すると、デカボラン注入後熱処理を行ったときのホウ素分布は前記 R_p を境界として二山の分布になっている。このような分布は、不純物注入の前にGeなどあらかじめ別のイオン注入でSi結晶を破壊し、アモルファス層を形成するためのプレアモルファス化注入 (PAI) 後、単原子ホウ素を注入した場合によく見られる分布で、デカボラン注入の場合にもSiの基板表面にこのような変化が起きていることを示唆すると考えられる。

この現象を明確にするため、上記条件にてイオン注入後のSi表面の断面をTEM(透過型電子顕微鏡)にて測定した。断面を図6に示す。左側が単原子ホウ素注

入、右側がデカボラン注入によるものである。図6に示されるとおりデカボラン注入の場合、表面におよそピーク濃度深さ R_p と等しい深さまでアモルファス層が形成されていることがわかる。すなわち、デカボラン注入の場合、ホウ素の注入と同時にSi結晶のアモルファス化が進行する自己アモルファス化という現象が起こっていることが明らかとなった。

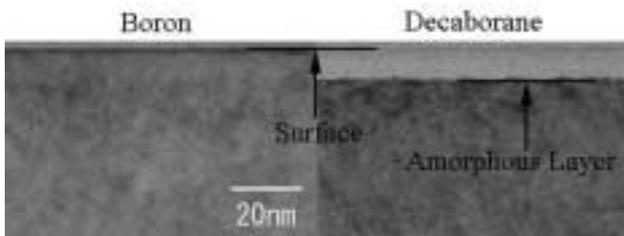


図6 TEM断面図

2) 極低エネルギーでの注入比較

前述のプレアモルファス化注入技術は、アモルファス層の存在が注入イオンのチャネリング（結晶軸および、面の隙間に沿って、注入イオンが奥深くまで潜り込んでしまう現象。注入エネルギーが小さくなるほどこの効果が顕著になる）を防ぎ、熱処理時の活性化率を向上するという特性に立脚した技術であり、デカボラン注入を適用することによってこのような、プレアモルファス化処理無しにデバイスを作成できる可能性が確認された。しかし、このような特性が極低エネルギー領域における注入においても維持されるかどうかは自明ではない。このような観点から、等価エネルギー0.5keV相当での注入特性を調べた。

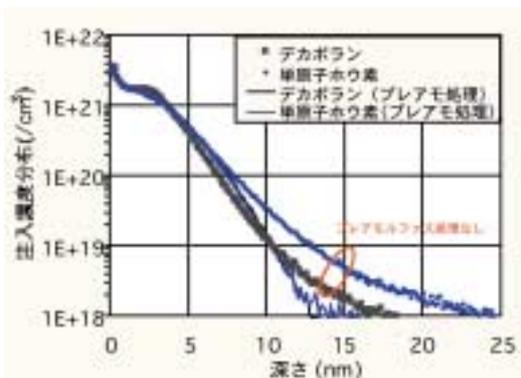


図7 等価エネルギー0.5keVにおける注入濃度分布

エネルギー0.5 keV、注入量 $1E15/cm^2$ となるように、同様に両イオンを注入した後のホウ素濃度分布を図7に示す。図7において、黒印がデカボラン、青印が単体ホウ素注入に相当する。また、図7において実線は

いずれもGeによるプレアモルファス化注入を行った後に、それぞれこれらのイオン注入処理を行ったものである。まず、プレアモルファス化処理の無い注入分布に注目すると等価エネルギーが3keVの場合（図5）と比べて分布が異なることが読み取れる。つまり、デカボランで注入した方が単原子ホウ素注入に比べ注入分布が全体的に浅くなっている。一方、プレアモルファス処理をした後注入した注入分布を見ると、デカボランと単原子ホウ素の注入プロファイルは、ほぼ一致する。前述のようにアモルファス層はイオンのチャネリングを抑えることから、単原子ホウ素の注入で現れた深い分布裾野はチャネリングに起因するものと考えられる。逆に言えば、デカボランの場合0.5keVという低エネルギーにおいてもアモルファス層が形成され、チャネリングが抑制されていると予想される。同様にTEM断面分析を行ったところ、0.5keVでの注入においても3nmのアモルファス層が形成されていることが確認された。すなわち、浅い濃度分布が得られるという点でデカボラン注入がホウ素単体注入に比較して明らかに有利であることを示している。

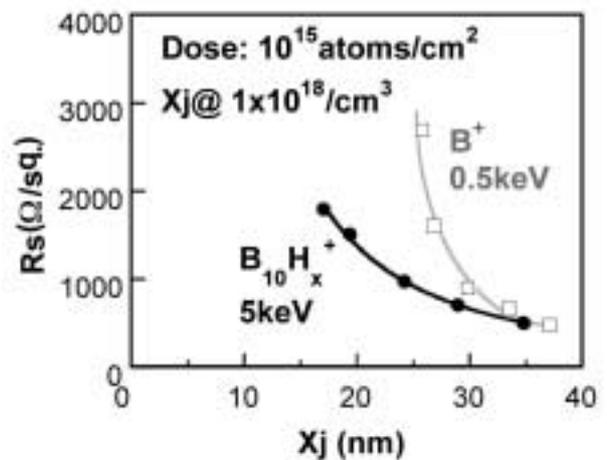


図8 シート抵抗値と接合深さの関係

図8は熱処理条件をさまざまに変化させた場合の接合深さ（ X_j 、注入濃度が $1E18 (/cm^3)$ となる深さで定義される）とシート抵抗値 R_s の関係プロットしたものである。すなわち、図8では原点側にいくほど特性が良いということになる。熱処理温度を下げるとホウ素の拡散が抑えられる（接合深さが浅い）が活性化は悪くなり、シート抵抗値は大きくなる。このような観点で見ると、デカボラン注入の方がより浅い接合深さで低い抵抗値が得られており、単原子ホウ素に比べ優れた特性を持つことがわかる。これらのデータは、デカボラン注入における既述の自己アモルファス

化効果による浅い注入分布および、活性化率向上の効果が大きく機能していることを示すものであり、デカボラン注入が通常の単原子ホウ素注入に対して大きな利点を持つことを示すものである。

なお、このようなアモルファス化技術を適用したとき問題となるのが熱処理後の残留欠陥である。同様に熱処理後のTEM断面分析が実施されており、Ge注入の場合と比べ非常にきれいな界面であることが示されている⁽⁷⁾。なお、本論文では実際にP型の半導体素子をデカボラン注入で製作し、単原子ホウ素に比べビームの角度に起因すると思われる特性が改善されていることが報告されている。

以上述べたように、デカボラン注入では通常の単原子ホウ素単体の注入に比べて、浅い分布、低いシート抵抗、ビームの低発散角注入が達成でき、今後のデバイス微小化に際し非常に有利な特性があることが分かった。

5. あとがき

デカボランのようなクラスターイオンを使用することによって、極低エネルギー領域のビーム特性(ビーム量、ビーム発散角)が改善され、また、注入特性についても単原子イオン注入では得られなかった優位な特性を有することを明らかにした。

一方、現状得られている等価ホウ素ビーム電流は0.5keVにおいて600 μ Aであるが、生産性の観点から言えば少なくとも数mAの電流量が必要である。また、半導体素子の微細化に伴い、注入エネルギーは0.2keVまで下がる傾向にあるため、ビームの品質を保ちながら更なるビーム電流の改善が必要である。このような市場の要求に答えるべく、注入装置全体(イオン源、ビームライン)を含めた総合的な開発を継続して実施中である。

最後に、本開発遂行にあたり、科学技術振興機構殿に

は開発の援助に関し、また、富士通研究所：青山敬幸主任研究員殿にはデカボランの注入特性評価に関し多大なるご支援をいただいた。ここに、深く感謝の意を表すものである。

REFERENCES

- (1) K. Goto, J. Matsuo, T. Sugii, H. Minakata, I. Yamada, and T. Hisatsugu, International Electron Device Meeting--1996, IEEE, p.17.1.1
- (2) N. Nagai, Y. Tamura, S. Yuasa, K. Iwasawa, T. Matsumoto, M. Nakaya, M. Nakamura, and T. Nagayama, Proc. Of 2000 International Conference on Ion Implantation Technology, IEEE, 2000, p.415
- (3) A. S. Perel, W. Krull, D. Hoglund, K. Jackson and T. Horsky, Proc. Of 1998 International Conference on Ion Implantation Technology, IEEE, 1999, p.304
- (4) N. Hamamoto, S. Umisedo, T. Nagayama, M. Tanjo, S. Sakai, N. Nagai, T. Aoyama, and Y. Nara, Proc. Of the 15'th International Conference on Ion Implantation Technology, Elsevier, 2005, p.443
- (5) N. Hamamoto, S. Umisedo, T. Nagayama, M. Tanjo, S. Sakai, N. Nagai, and T. Aoyama, Extended Abstracts of 6'th Workshop on Cluster Ion Beam and Advanced Quantum Beam Process Technology, 2005, p.83
- (6) S. Umisedo, N. Hamamoto, S. Sakai, M. Tanjo, N. Nagai and M. Naito, Extended Abstracts of the Fourth International Workshop on Junction Technology, IEEE, 2004, p.27
- (7) T. Aoyama, M. Fukuda, Y. Nara, S. Umisedo, N. Hamamoto, M. Tanjo, and T. Nagayama, Extended Abstracts of the Fifth International Workshop on Junction Technology, IEEE, 2005, p.27

執筆者紹介



濱本成顕 Nariaki Hamamoto
日新イオン機器（株）
I/I事業センター
エキスパート



海勢頭聖 Sei Umisedo
日新イオン機器（株）
I/I事業センター
イオンビーム技術・開発グループ



木ノ山俊昭 Toshiaki Kinoyama
日新イオン機器（株）
I/I事業センター
イオンビーム技術・開発グループ



永山 勉 Tsutomu Nagayama
日新イオン機器（株）
I/I事業センター
エキスパート



丹上正安 Masayasu Tanjyo
日新イオン機器（株）
I/I事業センター
エキスパート



酒井滋樹 Shigeki Sakai
日新イオン機器（株）
I/I事業センター
エキスパート



長井宣夫 Nobuo Nagai
日新イオン機器（株）
C.O.O. & 副社長