

特 集 論 文

新型クラスターイオン注入装置 “ CLARIS ” の開発

Development of new cluster Ion Implanter “ CLARIS ”

濱 本 成 顕*	海 勢 頭 聖*
N. Hamamoto	S. Umisedo
前 原 憲 明*	河 村 泰 典*
N. Maehara	Y. Kawamura
中 島 良 樹*	橋 野 義 和*
Y. Nakashima	Y. Hashino
古 賀 雄 二*	宇 根 英 康*
Y. Koga	H. Une
丹 上 正 安*	永 山 勉*
M. Tanjyo	T. Nagayama
鉄 田 博*	
H. Onoda	

概 要

イオン注入のプロセスにおいて、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。このような市場の要求に対応するため、クラスターイオンを注入する新型イオン注入装置 “ CLARIS ” を開発した。本稿では装置開発の背景、装置特性、及びクラスターイオンの注入プロセス特性について報告する。

Synopsis

One of the key issues of an ion implantation process to fabricate the next generation semiconductor device is a reliable formation of the Ultra Shallow Junction (USJ). To meet with these market requirements, we have developed a new cluster ion implanter “ CLARIS ”. In this paper, we are to describe the background of development, tool performance, and implantation process results.

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、生産性及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、45 ~ 32nm ノード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。このような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。

現状のイオン注入プロセスにおいて、特に技術的ブレークスルーを要求されているのがソースドレインエクステンション (SDE) プロセスである。このプロセスは量

*日新イオン機器(株) I/I事業センター

産および信頼性の観点から、特にボロン注入の場合0.5keV以下のエネルギーで数mAのビーム量かつ、良好な面内注入均一性および精密な注入角度コントロールが要求されている。ところが一般的にこのようなエネルギー領域では、イオンビームの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ビーム電流が減少する。空間電荷効果によるビーム発散の例として、ビーム内の低速電子による空間電荷中和がないと仮定し、ボロン1mAのビームを各エネルギーで輸送したときのビームの発散シミュレーションを図1に示す。初期ビーム半径を20mmとした場合、例えば5keVのビームではビームサイズが倍(40mm)になる距離は420mmであるが、500eVのビームでは75mmである。つまりエネルギーの減少に伴いビームが急速に発散し、ビーム輸送が困難になることが解る。この現象はイオンビームを輸送する上では本質的な問題であり、逆に上記のようなSDE形成における生産性およびビームの注入角に起因するデバイスの信頼性向上の観点からいえば大きな問題である。

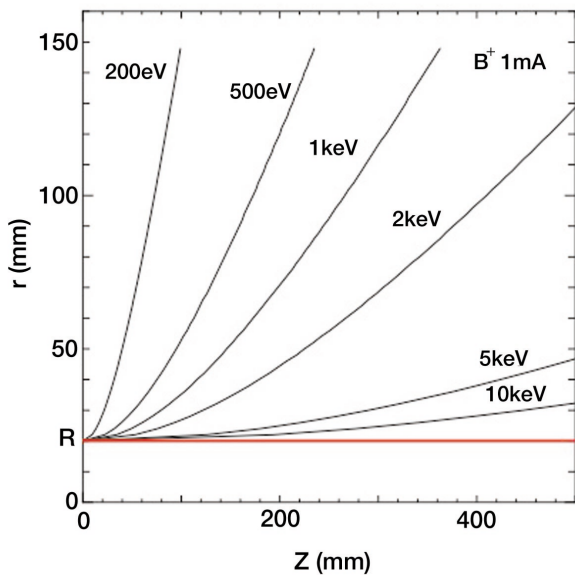


図1 空間電荷によるビームの発散

この課題を解決する一つの方法がクラスターイオン注入である。ボロンの場合、10個のボロンを含むデカボラン、18個のボロンを含むオクタデカボラン(以下総称してボロンクラスターと呼ぶ)のデバイスへの応用が提案されている^{1),2)}。図2にデカボラン($B_{10}H_{14}$)およびオクタデカボラン($B_{18}H_{22}$)の分子構造を示す。たとえばオクタデカボランの場合一つのイオンで18個のボロンを含有しているため、イオンビームのエネルギーは単原子ボ

ロンと比較して約20倍(水素の数 H_x を考慮するため)電流量は18分の1で等価な注入が可能である。図3にボロン500eV、1mAの等価ビームを各イオン種で輸送した場合の空間電荷によるビーム発散を示す。図3からもわかるように、ボロンの数が大きくなるほどイオンビームのエネルギーを高く、また実ビーム電流を小さくすることができるため結果的にビームの発散が小さくなり、より多くのボロンビームを輸送できることが理解できる。

このような背景からボロンクラスターを注入可能な生産機型クラスターイオン注入装置 “ CLARIS ” の開発を実施し、製品化を行った。本稿では装置特性、プロセス特性および今後の展望について報告する。

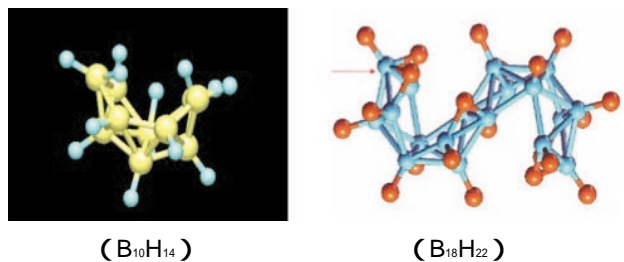


図2 デカボラン、オクタデカボランの分子構造

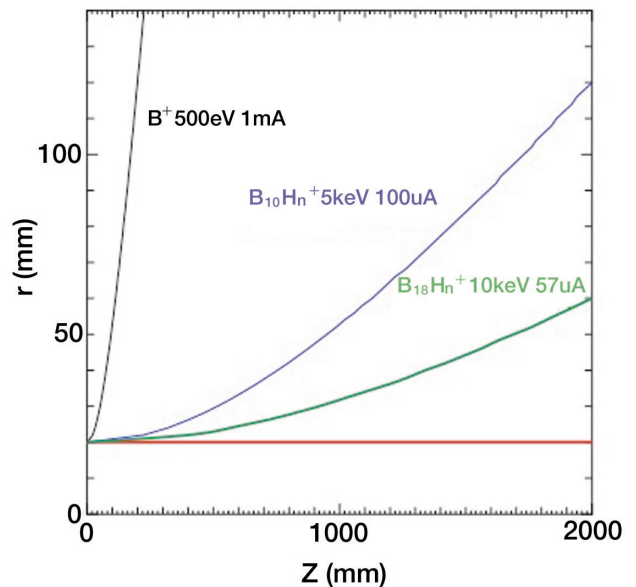


図3 クラスターイオンによる空間電荷発散緩和

2. クラスターイオン注入装置 CLARIS

装置のレイアウトを図4に示す。 $B_{18}H_x^+$ イオン引き出し時、最大で等価エネルギー3keV(イオンエネルギーでは60keV)、デカボランでは7keVの注入が可能である。

クラスターイオンを発生するイオン源はSemEquip社

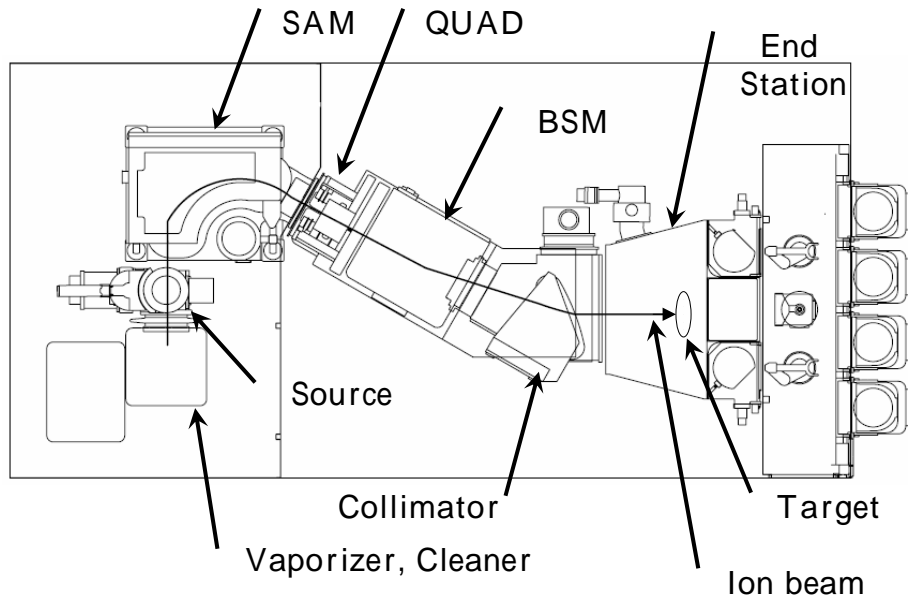


図4 クラスターイオン注入装置レイアウト

のClusterIon^(注)Sourceを搭載する。一般的にデカボランに代表される高級ボランは高温状態になると自己分解しやすいため³⁾、イオン源の温度が適正にコントロールされ、またイオン化に際して分子を壊しやすいプラズマ生成ではなく電子衝撃によってイオン化される。一般的なイオン注入装置用イオン源に比べ大きなビーム引出スリットを持ち、 $B_{18}H_{22}$ を使用した場合等価的に1keVで30mA以上のボロンビームがイオン源より発生可能である⁴⁾。オクタデカボラン等の材料は常温では固体であるため、材料を加熱してガス化しイオン源に供給する必要があり、イオン源近辺に取り付けられた蒸気発生および流量制御システムによって安定に供給される。またこれらの材料をイオン化した場合、イオン源に絶縁性堆積物が生じるため、 NF_3 リモートプラズマによるクリーニングシステムが搭載され、運転時間に応じて自動的にクリーニングが可能である。

イオンを輸送するビームラインは当社の主力製品である中電流イオン注入装置“EXCEEDシリーズ”のコンセプトで構成される。イオン源より引き出されたクラスターイオンビームは、分析電磁石(SAM)で分析された後、磁界型四重極トリプレットレンズ(QUAD)で収束される。尚SAMは電氣的に大地側とは切り離されていて、電圧を切り替えることによりドリフト及び加速減速モードでビーム加速が可能である。収束したビームは磁界型ビームスキャナー(BSM)で高速に横方向にビームスイープされ、平行化マグネット(Collimator)によって平行化される。

クラスターイオンビームを注入するとき特徴的なのが、マルチピーク加速である。通常のイオン注入では、質量分離を行うことによって所望の単ピーク(例えば B^+)を選別後、注入を行う。一方、例えばオクタデカボランをイオン化するとボロンに含まれる同位体($^{11}B, ^{10}B$)の存在確率および水素の数による組み合わせによって多くの異なる質量数を持ったピークが生成する²⁾。このようなビームを有効利用するため、分析電磁石(SAM)に取り付けられた分析スリットを調整することによって、同じボロンの数を持ったビーム($B_nH_x^+$)を多ピークで同時に加速、注入する。この場合懸念となるのが、質量数が異なるビームが磁界中を走行するときの軌道変化である。この各ピークの軌道偏差は磁界型四重極トリプレットレンズ(QUAD)で補正される⁵⁾。図5は $B_{18}H_x^+$ イオンを15ピーク($210 \pm 7AMU$)で加速したときの質量数210のイオンビーム中心軌道に対する各ピークのビーム軌道偏差シミュレーションである。図5によると質量数の違いによって分析電磁石(SAM)出口では軌道の発散がみられるが、四重極レンズを調整することによってウェーハ上ではすべて垂直に入射することが確認できる。

このように精密に角度制御され、かつ高速にスイープされたビームは機械的に垂直方向にスキャンされるウェーハに注入され(Hybrid Scan)、中電流装置EXCEEDシリーズの注入コンセプトのもと精密な制御をもって注入が可能である。

(注) ClusterIonはSemEquip Inc. の登録商標です。

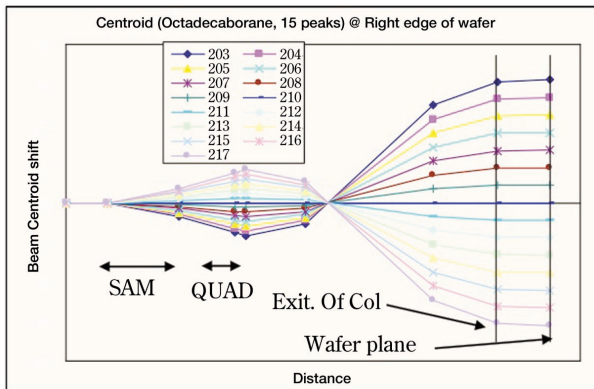


図5 質量数の異なるピークの中心軌道に対する軌道偏差

3. 装置特性

45nmノード以降でSDEプロセスに要求されるボロンのエネルギーは500eV以下でありドーズ量も $5E14 \sim 1E15/cm^2$ と比較的高いため、スループット改善のためには数mAのビーム量が必要である。図6に $B_{18}Hx^+$ を引き出し、等価エネルギー300eV、ドーズ量 $5E14/cm^2$ にて1ロット（25枚）を処理したときのスループットデータを示す。等価ビーム電流3.5mAにおける1ロットのウェーハ処理時間は1625s、サイクルスループットに換算すると55.4枚/Hである。すなわち、このような極低エネルギーの注入でも非常に高いスループットで注入が可能である。

一方信頼性のあるSDE形成のためにはビーム電流もさることながら、注入角度の制御性が要求される。図7に200eV～2keVのドリフトモードビーム発生時における、ウェーハに対するビーム入射角の面内ばらつき（平行度）およびビーム発散角を示す。ビームの平行度についてはいずれのエネルギーでもウェーハの法線に対して ± 0.3 度以下の精度で制御されている。またビーム発散角についてもビームラインに取り付けられた磁界型四重極トリプレットレンズを調整することによって300eV以上のエネルギーでは0.5度以下に抑えることができる。

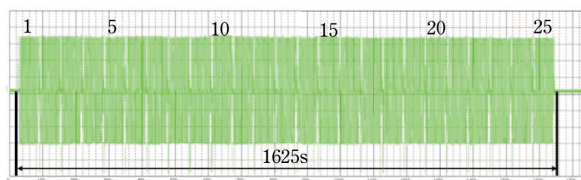


図6 300eV : $5E14/cm^2$ 注入時の処理時間

注入を行ったときの注入均一性を図8に示す。左側はオクタデカボランを使用して等価600eV、ドーズ量 $9E14/cm^2$ を注入したときのサーマウェーブマップ（TW、

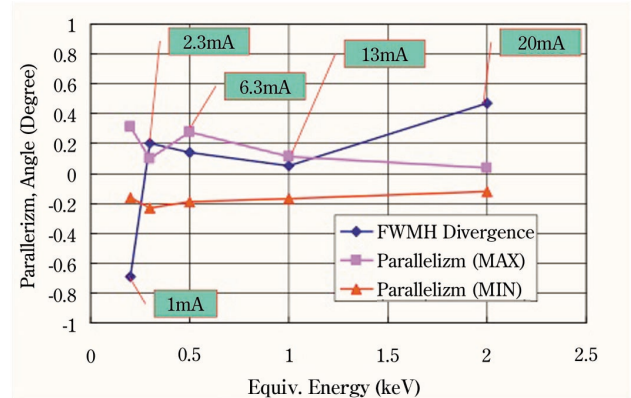


図7 エネルギーに対するドリフトモードビームの面内平行度、ビーム発散角

注入時に形成される結晶欠陥をレーザーで測定することによって均一性を評価する方法)、右側は熱処理（1,000 -10s）を行った後のシート抵抗マップである。いずれも面内均一性（標準偏差/平均値）は1%以下であり、このような極低エネルギーでも非常に均一性のよい注入が可能である。また同様に300eV、ドーズ量 $1E15/cm^2$ 注入時のウェーハ面内におけるボロンの深さ方向プロファイルを図9に示す。尚、オクタデカボラン注入時、同位体（ $^{11}B, ^{10}B$ ）が4 : 1の割合で注入されるがそのうち ^{11}B の成分のみプロットしている。またビームのスイープ方向に対してウェーハの中心および両端3点の注入深さ分布を測定している。図9に示されるとおり、いずれの深さ分布も一致していて、ウェーハの面内深さ分布についても精密に制御されていることがわかる。

また最近のイオン注入工程においては、非常にクリーンな注入環境が要求されている。メタルコンタミネーションについて500eV、ドーズ量 $1E15/cm^2$ の注入時における主要な重金属汚染元素はいずれも $1E10/cm^2$ （10ppm）以下であり、またパーティクルについても $0.12 \mu m$ 以上の粒子増加は30個以下が確認されている⁶⁾。

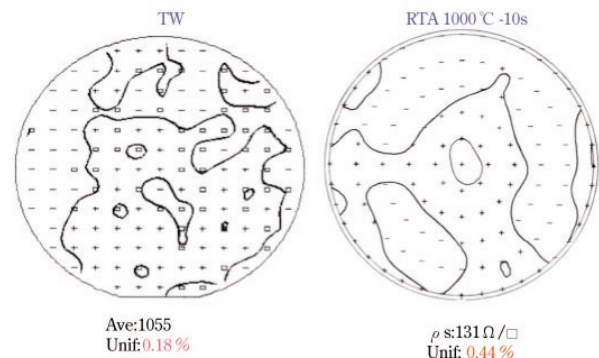


図8 注入均一性

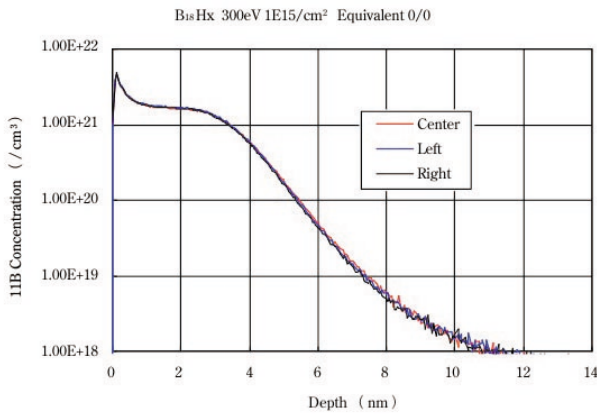


図9 深さ方向注入分布

以上述べてきたようにP型SDE形成に要求される極低エネルギーの注入でも、本装置でボロンクラスターイオンを使用することによって、角度制御に代表される注入品質を維持しながら生産性のある処理が可能である。尚、ソースドレイン (SD) およびゲート注入 (Poly) のエネルギー領域 (2~3keV) でも図7からわかるようにドリフトモードにて20mAの大電流で注入が可能である。特にPoly注入は、エネルギーコンタミ成分が酸化膜を突き抜けるのを防止するためドリフトモードで注入することが望ましく、今後ボロンクラスター注入の適用が期待される。

4. クラスターイオン注入時のプロセス特性

ボロンクラスターイオン注入のプロセス特性については2004年より精力的に評価が始まり、その結果は接合技術に関する国際学会IWJT2005~2008およびイオン注入に関する国際学会IIT2006、2008等で多数発表された。クラスターイオン注入の特徴は単原子ボロン注入とは異なり、注入時に自己アモルファス層を形成することである⁷⁾。その結果

イオン注入時のチャネリング (Siの結晶軸に沿ってイオンが深く注入される現象) が抑制されるため単原子ボロン注入時に比べ浅いプロファイル形成が可能である。

スムーズなアモルファス-結晶界面が形成される。このためアニール (熱処理) 後の結晶欠陥回復が良く、接合リーク電流が少ない^{8),9)}。

ことが明らかにされた。図10にBF₂およびB₁₈H_xを注入後、様々なアニール処理をした後の透過型電子顕微鏡 (TEM) 断面像を示す⁹⁾。まずBF₂の場合、固相エピタキシャル成長 (SPE) アニールおよびレーザー (Laser) アニール後で残留欠陥 (EOR) が見られる。一方B₁₈H_xの場合、注入直後 (Control) ではアモルファス層が形

成されているが、SPE、Laser、フラッシュランプ (Flash) アニール後いずれも結晶がきれいに回復しているのがわかる。また図11にB, BF₂, B₁₀H_x, B₁₈H_xを注入し、様々なアニール処理を行った後、RsL法とよばれる測定方法で接合リーク電流を測定した結果を示す。Spikeアニールのような比較的高温かつアニール時間の長い処理では、いずれの場合もリーク電流は1E-7A/cm²でほぼ同じであり、リーク電流のベースラインと考えられる。一方SPEのような低温 (600) アニールおよびLaserアニールのようなミリ秒オーダーのアニールでは、B, BF₂注入は1E-6A/cm²以上の高い値を示すものもある。一般的に接合リーク電流はアニール後の残留欠陥が影響していると考えられ、BF₂注入時アニール後残留欠陥が残っている図10の結果からも図11の現象が説明できる。すなわちボロンクラスターを注入することによって浅い接合を形成すると同時にリーク電流を低減することができ、注入角度制御性および生産性の改善といった元々のクラスターイオン注入の目的とは異なる一つの大きなプロセスメリットであることが認知された。

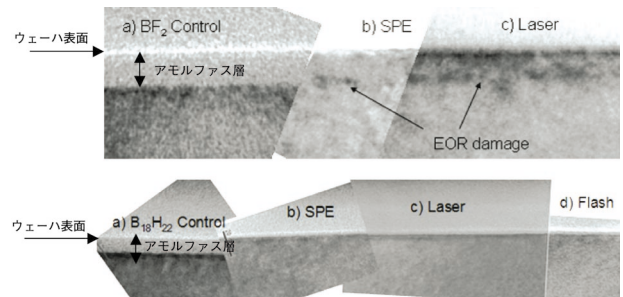


図10 TEM像 (BF₂, B₁₈H_x) [J. Borland et al., IWJT2006]

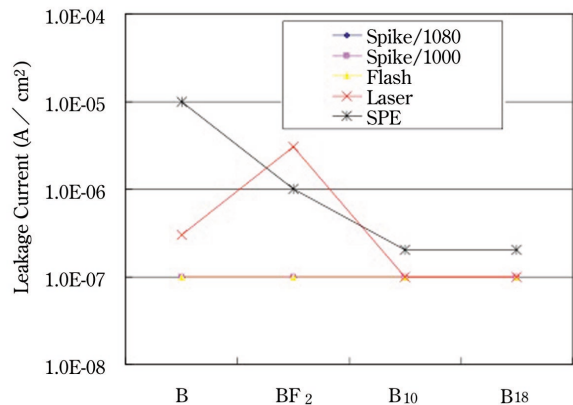


図11 接合リーク電流 [RsL] [J. Borland et al., IWJT2006]

5 . 新たな開発への取り組み

クラスターイオン注入の新たな応用としてカーボンクラスター ($C_{16}H_x^+$, $C_7H_x^+$) が提案されている¹⁰⁾。ボロンクラスターイオン注入と同じように自己アモルファス層が形成されることから

昨今SDEプロセスにおいて、アニール後のB拡散を抑制するため、GeでPAI処理を行った後、B拡散抑制のためCを注入し最後にBという注入プロセスが一般的になりつつあるが、カーボンクラスターを注入することによってPAIと拡散抑制注入を同時に行い、プロセス工数を削減できる

n-MOS用歪みSi (SiC) 形成

などの新たなプロセス適用が検討されている。図12に $C_7H_x^+$ をカーボン3keV, $1E15/cm^2+10keV, 6E15/cm^2$ 相当で多段注入し、Flashアニール処理を行った後、高分解能X線回折 (HRXRD) 測定を行った結果を示す¹¹⁾。図12のようなHRXRD測定において、左側のピークは、Si(0,0,4)反射として表されるSi格子5.43088 の基準ピークであり、右側に表れるサブピークが基準ピークからシフトしているほど格子定数が変化、すなわちSi:Cへの置換率が高い、歪みが大きいことを表す。図12からもわかるとおりカーボンクラスターを注入、アニールを行うことによってSi:Cが形成され、歪みが発生していることが確認できる。現状Si:C形成はエピタキシャル成膜によるプロセスが主流であるが、イオン注入という精密なプロセス制御によって信頼性のある歪み形成が期待できる。現在このようなカーボンクラスターを安定に発生させるべく開発を継続して実施中である。

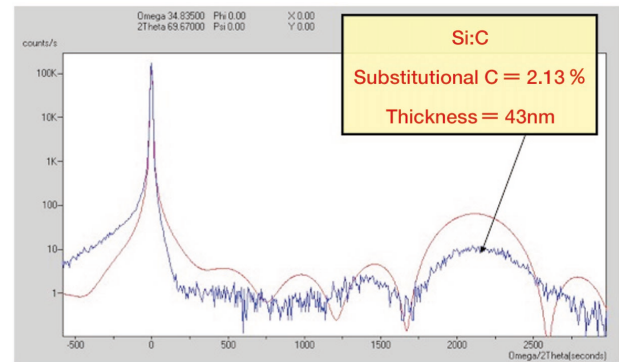


図12 HRXRDを用いた、SiC形成時のC置換率測定

[T. Nagayama et al., IIT2008]

6 . 最後に

生産性および信頼性のあるSDE形成が可能なボロンクラスターイオン注入装置の開発、製品化を実施し、装置特性および現状のプロセスメリットについて報告した。今後歪み形成などの新たなクラスター注入技術を量産技術として確立すべく継続して開発を実施中である。

参考文献

- (1) K. Goto et al., Tech. Dig. IEEE IEDM, Washington, DC, 1996, p435
- (2) D. Jacobson et al., NIM B237 (2005) p406
- (3) T. N. Horsky et al., IIT(2006) p198
- (4) A.S. Perel et al., IIT(1998) p304
- (5) H. F. Glavish et al., IIT(2006) p167
- (6) S.Umisedo et al., IIT(2008) p296
- (7) N. Hamamoto et al., NIM B237 (2005) p443
- (8) J. Borland et al., IWJT (2006)
- (9) J. Borland et al., IWJT(2007)
- (10) W. Krull et al., INSIGHT(2007) p189
- (11) T. Nagayama et al., IIT(2008) p434

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
クラスター技術開発グループ長



海勢頭聖 Sei Umisedo
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
クラスター技術開発グループ



前原憲明 Noriaki Maehara
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
クラスター技術開発グループ



河村泰典 Yasunori Kawamura
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
クラスター技術開発グループ



中島良樹 Yoshiki Nakashima
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
クラスター技術開発グループ



橋野義和 Yoshikazu Hashino
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
クラスター技術開発グループ



古賀雄二 Yuji Koga
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
I設計グループ



宇根英康 Hideyasu Une
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
S/W技術グループ



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



永山 勉 Tsutomu Nagayama
日新イオン機器(株)
I/I事業センター
カスタマーサポートグループ エキスパート



鈇田 博 Hiroshi Onoda
日新イオン機器(株)
I/I事業センター エキスパート