

中高エネルギー集束イオンビームの 現状とその応用

高井 幹 夫

大阪大学基礎工学部・極限物質研究センター 〒560 豊中市待兼山町 1-1

(1995年7月31日受理)

Present Status and Applications of Medium-to-High Energy Focused Ion Beams

Mikio TAKAI

Faculty of Engineering Science and Research Center
for Extreme Materials, Osaka University
Toyonaka, Osaka 560

(Received July 31, 1995)

局所分析への応用を目的とした中高エネルギー集束イオンビーム技術について、半導体微細構造の分析例を中心に、その現状と最近の発展について解説する。特に、多層配線層の非破壊3次元分析、集束イオンビーム注入層のチャネリングコントラストマッピング分析、および半導体メモリの信頼性分析法であるソフトエラーマッピングとイオンビーム誘起電流測定法について、これらの分析技術の特長について述べ、最後に将来の展望について言及する。

1. はじめに

ラザフォード後方散乱とチャネリング効果を用いたイオンビーム分析技術は、半導体集積回路(IC)の飛躍的発展の基盤技術となったイオン注入技術の開発期にその重要な役割を果たしたが¹⁾、ICの集積度が高まり、最小加工線幅が数ミクロンからサブミクロンに至る最近のVLSI(超大規模集積回路)やULSI(超超大規模集積回路)の開発プロセス過程に対しては、プローブのビーム径が数百ミクロンと大きいため有効な分析手段とならなかった。一方、プローブビーム径を集束してPIXE分析に用いる、いわゆるニュークリアマイクロプローブ技術は、70年代から80年代にかけて、主としてヨーロッパにおいて生物医学試料や環境学・考古学試料および冶金学試料に対して用いられた²⁾。

本報告では、数百keVからMeVのエネルギー領域の集束イオンビームによるマイクロプローブ分析を目的とした中高エネルギー集束イオンビームの現状とその応用の動向について、主として半導体プロセスによる微細構

造の分析^{3,4)}を中心として述べ、この方法の特長を明らかにし、今後の展望について言及する。

2. マイクロプローブの形成と3次元非破壊分析

数百keVからMeVのエネルギーに加速されたプロトンまたはヘリウムイオンを対物スリットと4重極ダブレットまたはトリプレット電磁レンズを用いて集束することにより、約1.0 μ m径のニュークリアマイクロプローブを得ることができる^{5,6)}。さらに、イオンの加速系と一体化した中エネルギーの集束イオンビーム装置によれば、液体金属イオン源を用いることによりビーム径は100nm以下まで集束できる⁷⁾。このマイクロプローブを、図1に示すように試料上を走査し、試料上のそれぞれの点に対する後方散乱スペクトルを測定する。この局所後方散乱データを計算機処理することにより、ある特定の深さの構造の面内マッピング、またはある特定の断面マッピング図(トモグラフィ)を得ることができる⁸⁾。さらに、データを3次元処理することにより、試

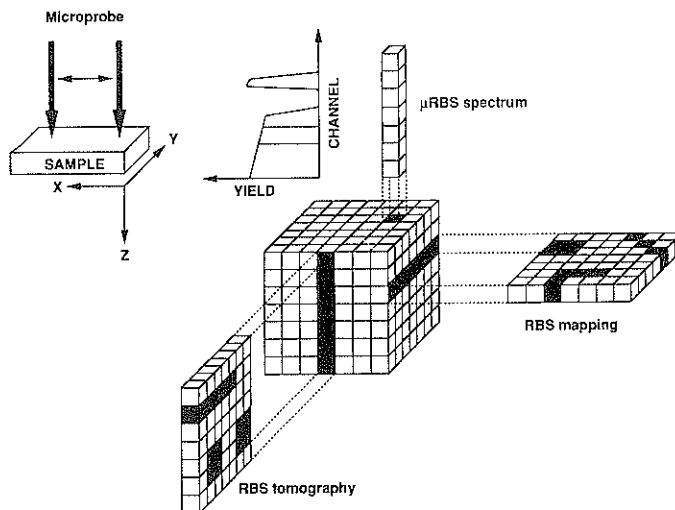


図1 ラザフォード後方散乱マッピング技術の原理図

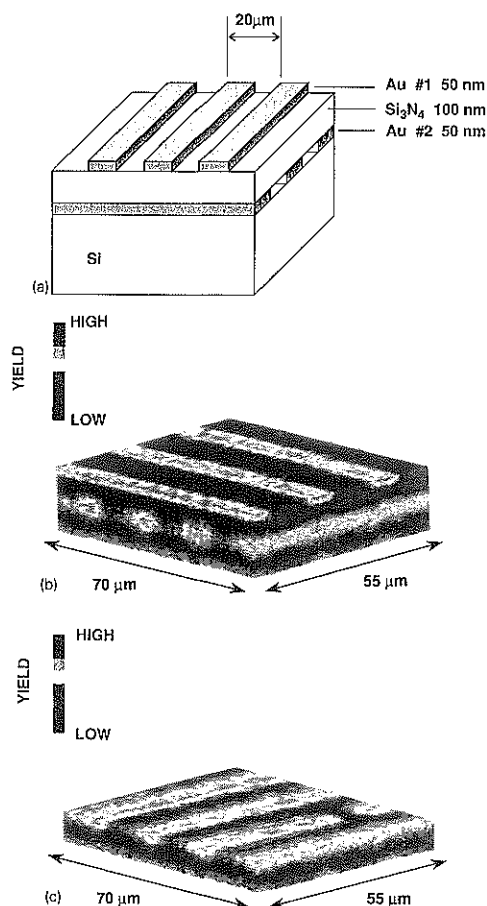


図2 2層電極構造の模式図(a)と分析後の3次元像(b)および計算機処理により第1層を除去した3次元像(c)

料の3次元構造を非破壊で知ることができる⁹⁾。

図2に、2層の電極構造をもったシリコンのテストデバイス構造(a)と、これに対する3次元分析像((b), (c))を示す。2層の電極構造を非破壊で測定することが可能(b)で、第2層目の電極構造を試料をエッチングすることなく非破壊で検査することができ、図2(c)では、プロセス欠陥による配線の断線が起こっていることがわかる³⁾。さらに、マイクロプローブの径を小さくすることにより、100nm以下の構造もこのように3次元分析および可視化することが可能である。

図3に、半導体超高集積メモリー素子のゲート電極として用いられている自己整合型高融点金属シリサイド(SALICIDE: Self aligned refractory metal silicide)による電極構造のマイクロRBS測定結果を示す。シリサイドプロセスでは、イオン注入によるミキシング過程を用いない場合にはシリサイド層の横方向広がりが起きているが、ミキシング過程を用いれば横方向広がりを抑制することが可能であることがわかる。さらに、イオンビームミキシング過程によるものでは、電極以外の酸化膜上にコバルトの信号が観測されている。これは、酸化膜界面でミキシングによるシリサイドが形成されコバルトが残留しているためである¹¹⁾。このような情報は、通常の走査型電子顕微鏡では得ることができない。

図4に、局所的に集束Gaイオン注入したガリウム砒素試料のチャネリングコントラスト像を示す。局所的にイオン注入された領域では、非晶質層が形成されチャネリング方向に入射したプローブイオンの散乱収率が部分的に増加するためコントラスト像が得られる。図4では、イオン注入量が増加するにつれて、局所的な結晶欠

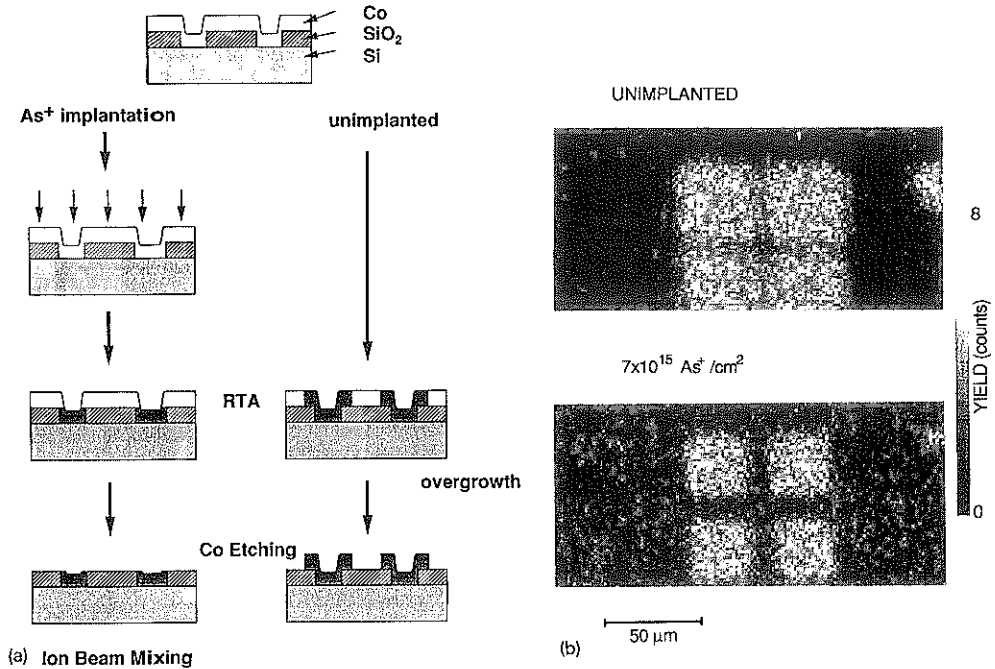


図3 サリサイド (SALICIDE) プロセスとコバルト電極の2次元マッピング像

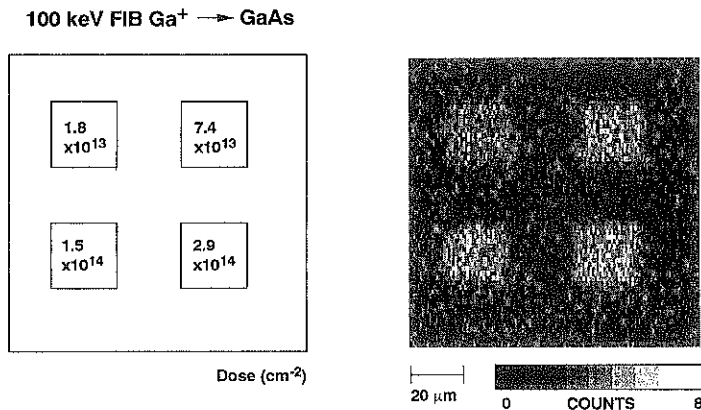


図4 局所イオン注入領域のチャネリングコントラスト像

陥が増加するためにコントラスト像の濃度が増加しているのがわかる。このように、集束イオン注入した局所的な欠陥を非破壊で分析することができる¹²⁾。さらに、この方法により欠陥の3次元分布や重元素の局所分布を得ることができる。

以上のように、集束イオンビームによるマイクロプローブと局所後方散乱を組合せることにより、微細構造の非破壊3次元分析が実現できる。

さらに、最近では、薄膜試料についてチャネリング走査透過イオンマイクロスコピイ (CSTIM) 像を得たり¹³⁾、プローブイオンにより励起されるルミネッセンス

(Ionoluminescence) を用いた2次元マッピング法¹⁴⁾が試みられている。

3. DRAM のソフトエラー耐性評価

マイクロプローブをアメリカウムなどの放射線源の代わりに用いてシングルイベントアップセット (SEU) を起こすことにより、従来では不可能であった ULSI メモリー (DRAM) のソフトエラー耐性を局所的に明らかにすることができる^{15,16)}。マイクロプローブによる SEU 耐性評価については、衛星搭載用のスタティックランダムアクセスメモリー (SRAM) に対して高エネルギー重イ

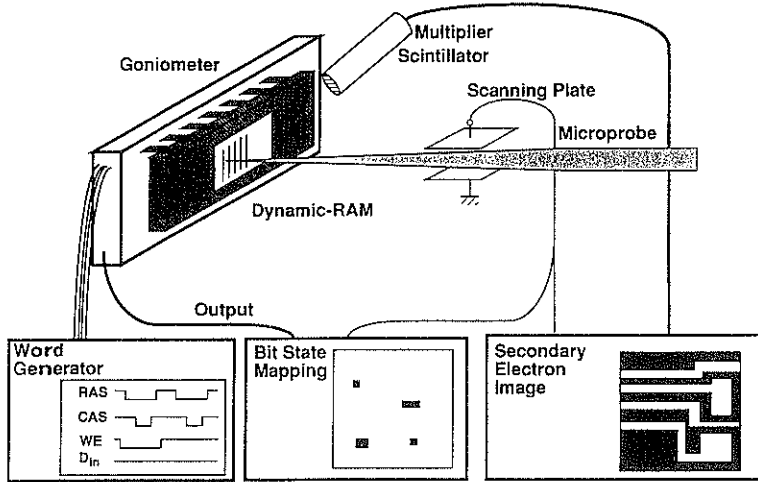


図5 DRAMのソフトエラーマッピング測定法概念図

オンを照射する試みがサンディア研究所にて行われているが¹⁷⁾、照射時の同時測定が困難なDRAMに関する試みはこれまでほとんど行われていない。DRAMのソフトエラーとは、DRAMチップの配線材料やパッケージ材料に含まれるウランやトリウムなどの放射性同位元素より放出されるアルファ線によってメモリー素子の記憶状態が乱されることである。DRAMの開発の問題点の一つに、情報記憶のためのメモリーセルの低容量化縮小化があるが、これによりソフトエラー耐性が劣化する。このため、DRAMの局所的なソフトエラー耐性を明らかにすることができれば、次世代の素子設計のための問題の一つを解決することになる。

図5に、マイクロプローブを用いたSEU(またはソフトエラー耐性)計測の概略図を示す。高真空試料室中に被試験DRAM試料(テスト用試料)を設置し、動作中のメモリーセルの一つをモニターしながら試料全面をプローブイオンで走査し、このときに起こるSEUを走査位置に対応してマッピング表示する。走査位置は、試料表面の2次電子像で確認することができる^{15,16)}。

この方法の特長は、イオンの入射位置、角度、深さ、照射量(シングルイオンから多数イオンまで)を自由に变化させて、シリコン基板内部に雑音キャリアを発生できる点にあり、これにより極微構造のメモリー素子の耐性やキャリア補集の機構を明らかにできる。

図6に、マイクロプローブを放射線源の代わりに用い、動作状態の16メガビットDRAMテストチップ上を走査したときの2次電子像とソフトエラーマッピング像を示す。図には、メモリーセルの位置を明確にするため電極配置図があわせて示してある。これより、プローブがモニターしたセルの位置とビット線のノード位置に達

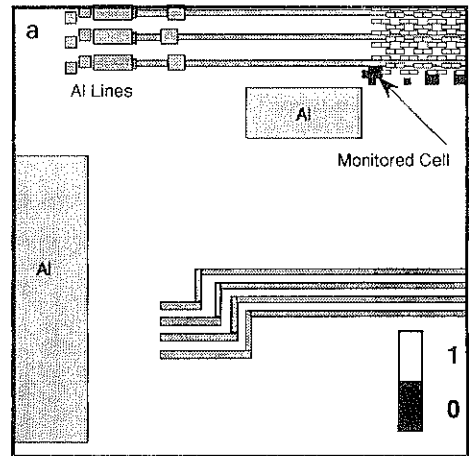


図6 16メガビットDRAMテストチップのビット状態マッピング図

したときに情報「1」が「0」となるソフトエラーが起きていることがわかる。さらに、場所によりソフトエラーの起こるモード(セルモードとビット線モード)が異なっていることがわかる。また、この測定は、シングルイオンを用いるばかりではなく、多数のイオンによる加速度試験法として利用することができる。

図7に、ソフトエラー感度マッピングを示す。測定法は、通常のマッピング時にプローブビームの滞留時間内のビット状態「1」の出力パルス数を計数したもので、ソフトエラーが発生すると10000パルスより出力が減る。これが、ソフトエラー感度となる¹⁸⁾。図7より、モニターしたメモリーセルの近傍 $6\mu\text{m}$ 以内でソフトエラーが起きやすく、 $4\mu\text{m}$ 以内で完全にソフトエラーが誘起されることがわかる。この結果は、ソフトエラーが誘起さ

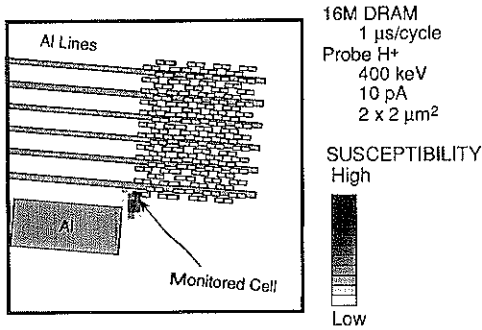


図7 DRAMのソフトエラー感度マッピング図

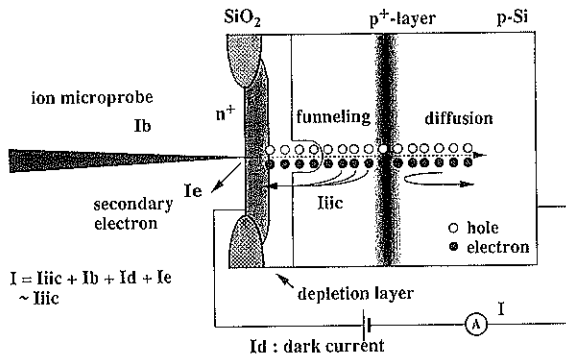


図8 IBICの測定概念図

れるのがメモリーセルのノード下のファネリング ($2\mu m$ 以内) によるキャリアの補集ではなく、近傍 $6\mu m$ 付近からの拡散がキャリア補集の機構であることを示している。さらに、この方法とマイクロプローブによる誘起電流 (IBIC) を測定することによりメモリー素子の構造の最適化を行うことができる¹⁹⁾。

図8に、IBIC測定の原理図を示す。試料は n^+p 構造の接合下に高エネルギー B^+ イオン注入により埋め込み層を形成したもので、接合に逆バイアスを印加し、プローブビームによりキャリアを誘起させ、接合を流れる電流を計測する。IBICは、プローブ電流の3けた大きい電流となり、埋め込み層の形成パラメータを変化させることによりIBIC量を低減させる条件を決定する。

図9に、 n^+p 接合に補集されるキャリアの効率の B^+ ドーズ依存性を示す。キャリア補集効率は、埋め込み層の注入量が多くなるほど小さくなり、接合の逆バイアスが5Vのときより1Vのほうが補集効率が小さくなっていることがわかる。この結果は、埋め込みポテンシャルバリア層の濃度が高いほど補集効率を抑制することが可能であることを示す。逆バイアスが小さいほど補集効率が低くなるのは、空乏層の延びの差が原因となっている。

以上のようなイオン注入による埋め込み層を DRAM

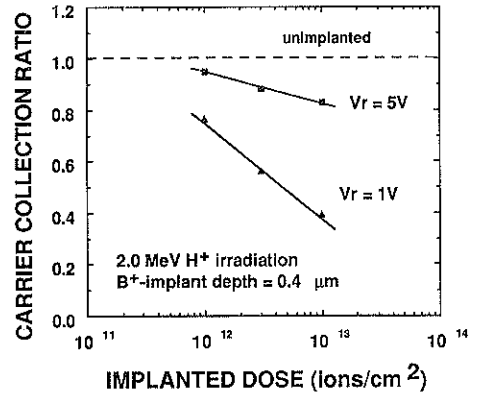
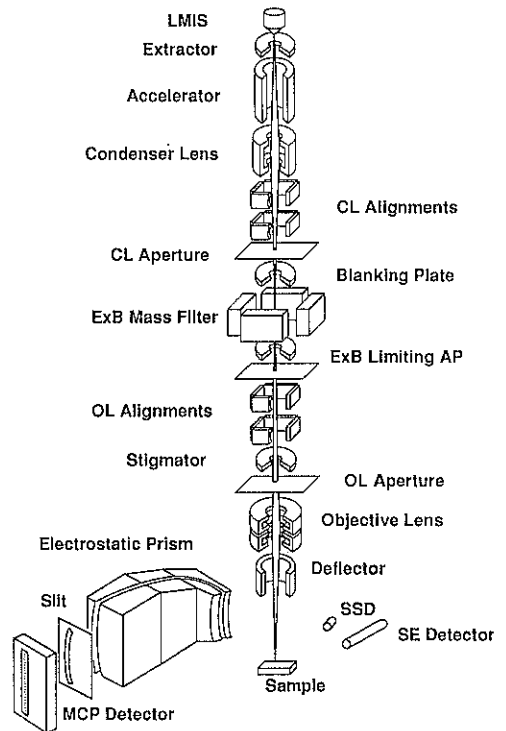
図9 キャリア補集効率の埋め込み層濃度依存性、逆バイアス印加電圧 (V_r) は5Vと1V

図10 液体金属イオン源と一体型アインツェルレンズを用いた中エネルギーマイクロプローブ装置

LMIS: Liquid Metal Ion Source, CL: Condenser Lens, AP: Aperture, OL: Objective Lens, SSD: Solid State Detector, SE: Secondary Electron, MCP: Micro Channel Plate

のメモリーセル構造に導入することにより、同条件でのソフトエラーマッピングでエラーの発生しない耐性のあるDRAM構造を形成することができる¹⁹⁾。

4. ナノメートルイオンプローブ

ULSIを代表とする半導体集積回路の超高集積化に伴

い、その加工最小線幅がクォーターミクロン以下に至り、分析のためのマイクロプローブの径も 100nm 以下のものが必要となっている。従来の高エネルギーイオンマイクロプローブでは、レンズ系の収差により pA の電流を得ることが容易ではない。図 10 に、液体金属イオン源と一体型の静電アインツェルレンズを用いた集束系による中エネルギーマイクロプローブの模式図を示す。加速エネルギーは 200kV で、共晶合金イオンソース (BeSiAu) を用いることにより、ダブルチャージで 400keV の中エネルギープローブとして用いることができ、50nm 径で 50pA の電流値を得ることができる⁷⁾。さらに、検出器のエネルギー分解能向上のため、静電型トロイダルアナライザーが用いられ、局所的な中エネルギーイオン散乱 (MEIS) 測定も可能となっている。今後は、このようなナノメートルイオンプローブによる非破壊 3 次元分析や局所部位における組成分析、汚染分析、不純物の定量測定が重要な計測技術となると考えられる。

5. ま と め

中高エネルギーイオンビームをミクロンからナノメートルまでに集束したマイクロプローブ技術の現状と、この技術の半導体プロセス開発への応用例の最近の動向について述べた。特に、微細構造の非破壊 3 次元分析や局所欠陥領域のチャネリングコントラスト分析はこれまでにない新しい技術として注目されている。さらに、この技術により、16メガビットメモリー素子のソフトエラー耐性を局所的かつ定量的に明らかにすることができ、次世代の高集積メモリー素子の設計開発の指針の一つを明らかにすることができる。本技術のさらに広範囲の応用が期待される。

謝 辞

本研究は大阪大学基礎工学部および極限物質研究センターと民間等 (三菱電機 ULSI 開発研究所, エイコーエンジニアリング, 日本真空技術, 神戸製鋼所, 大阪工業技術研究所) との共同研究の成果をまとめたものであり、関係諸氏に感謝いたします。

文 献

- 1) H. Ryssel and I. Ruge : "Ion Implantation" (John Wiley & Sons, New York, 1986) p. 39.
- 2) F. Watt and G. W. Grime : "Principles and Applications of High Energy Ion Microbeams" (Hilger, Bristol, 1987) p. 154.
- 3) M. Takai : Nucl. Instrum. Methods **B85**, 664 (1994).
- 4) M. Takai : Nucl. Instrum. Methods **B96**, 179 (1995).
- 5) M. Takai : Scanning Microscopy **6**, 147 (1992).
- 6) M. Takai : Intern. J. PIXE. **2**, 107 (1992).
- 7) M. Takai, R. Mimura, H. Sawaragi and R. Aihara : Scanning Microscopy **7**, 815 (1993).
- 8) A. Kinomura, M. Takai, T. Matsuo, M. Satou, A. Chayahara and S. Namba : Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L1286 (1989).
- 9) M. Takai, Y. Katayama and A. Kinomura : Nucl. Instrum. Methods **B77**, 229 (1993).
- 10) A. Kinomura, M. Takai, S. Namba, H. Ryssel, P. H. Tsien, E. Burte, M. Satou and A. Chayahara : Nucl. Instrum. Methods **B64**, 770 (1992).
- 11) M. Takai, Y. Katayama, T. Lohner, A. Kinomura, H. Ryssel, P. H. Tsien, E. Burte, M. Satou and A. Chayahara : Radiation Effects and Defects in Solids **127**, 357 (1994).
- 12) M. Takai, S. Hara, T. Kishimoto and J. Yanagisawa : Nucl. Instrum. Methods **B104**, 524 (1995).
- 13) P. J. C. King, M. B. H. Breese, P. R. Wilshaw and G. W. Grime : Phys. Rev. **51**, 2732 (1995).
- 14) C. Yang, N. P. O. Larsson, E. Swietlicki, K. G. Malmqvist, D. N. Jamieson and C. G. Ryan : Nucl. Instrum. Methods **B77**, 188 (1993).
- 15) H. Sayama, M. Takai, S. Hara, H. Andoh, H. Kimura, Y. Ohno and S. Satoh : Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 4541 (1992).
- 16) M. Takai, H. Sayama, S. Hara, H. Andoh, H. Kimura, Y. Ohno and S. Satoh : Nucl. Instrum. Methods **B77**, 344 (1993).
- 17) B. L. Doyle, K. M. Horn, D. S. Walsh and F. W. Sexton : Nucl. Instrum. Methods **B64**, 313 (1992).
- 18) H. Sayama, M. Takai, H. Kimura, Y. Ohno and S. Satoh : Scanning Microscopy **7**, 825 (1993).
- 19) M. Takai, T. Kishimoto, H. Sayama, Y. Ohno, K. Sonoda, T. Nishimura, A. Kinomura, Y. Horino and K. Fujii : Nucl. Instrum. Methods **B96**, 425 (1995).