

同軸試料台と2連微小電流計を用いたスパッタ深さ方向 分析用イオンビームの収束及び位置合わせ

井上雅彦, 倉橋和之, 児玉圭司

摂南大学工学部電気電子工学科 〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8
inoue@ele.setsunan.ac.jp

(2003年3月15日受理, 2003年5月21日掲載決定)

スパッタ深さ方向分析に用いるイオンビームのフォーカシングや位置合わせのために同軸試料台と除算表示機能付き2連微小電流計を製作し性能評価を行った。イオンビーム電流密度分布がガウス分布とみなせる場合には同軸試料台の内側円筒電極の直径Dの10%から数倍の範囲にわたってビーム径(FWHM)をメータ指示値より求めることが可能であることがわかった。またビーム照射位置の中心をDの10%以下の精度で同軸試料台中央に位置合わせ可能であることがわかった。

Focusing and Positioning of Ion Beam for Sputter Depth Profiling using a Coaxial Sample Stage and a Dual Nano-ammeter

Masahiko Inoue, Kazuyuki Kurahashi and Keiji Kodama

Setsunan University, Ikedanakamachi 17-8, Neyagawa, Osaka 572-8508, Japan
inoue@ele.setsunan.ac.jp

(Received: March 15, 2003; Accepted: May 21, 2003)

The simple method for rapid focusing and positioning of ion beam using a coaxial sample stage and a dual nano-ammeter have been developed for AES sputter depth profiling. It was found that the method enables us to estimate the Gaussian ion beam diameter (FWHM) ranging from ~10% to few times of the diameter of the inner electrode of the coaxial sample stage, and to adjust the beam spot position to the center of the inner electrode with the accuracy of < 10% of the diameter of the inner electrode.

1. はじめに

スパッタオージェ深さ方向分析を行う上での技術的ポイントとして、イオンビームをきちんとフォーカスさせることと、イオンビーム照射位置とオージェ分析点である電子ビーム照射位置を正確に合わせることがあげられる。これはイオンビームをラスタスキャンせず、スポットモードで測定する際には特に重要である。従来、蛍光板やSiO₂酸化膜のスパッタ痕のSEM像などを利用してビーム調整が行われてきたが、前者は目視のためあまり精度が望めず、後者は正確であるが調整に時間がかかるという問題がある。これに対してMizuharaらは同軸試料台を用いてイオンビームのフォーカス状態をリアルタイムでモニターする方法を提案している[1]。

本研究では、Mizuhara型同軸試料台の特徴を生かすための除算表示機能付き2連微小電流計を作製した。そしてこれらを使ってイオンビーム径をどの程度定量的に測定できるか、またビーム位置あわせにどの程度有効であるか検討を行ったので報告する。

2. Mizuhara型同軸試料台の改良と測定原理

Mizuharaらは低速イオン銃の特性評価実験において同軸試料台の外側環状電極に流れ込むビーム電流 I_{OUTER} と内側円筒電極に流れ込むビーム電流 I_{INNER} の比 I_{OUTER} / I_{INNER} をビーム拡がりパラメータ (Beam Broadening Parameter, BBP) と定義し、BBPを最小とするようにレンズ電圧を調整すれば最適収束条件が容易に得られることを示した[1]。この時の中央円筒電極の直径は10mm φであったが、ビーム径1mm φ程度のフォーカス状況を十分検出することができた。この実験で得られた知見に基づき、さらに照射位置に関する感度を向上させるため、Fig. 1のような改良型の同軸試料台を製作した。内側円筒電極の外径は1.5mm φで、外側環状電極の内径は2mm φ、外径は30mm φである。またイオンビームから絶縁物が直接見えない構造となっている。BBPの値が最も小さくなるようにイオンビームのレンズ電圧とディフレクタ電圧を調整すれば、イオンビームが最も収束し、なおかつイオンビームの中心と試料台の中心が一致する。従って前もってSEM像で視野中央(オージェ分析点)に内側円筒電極の中心がくるように試料台の位置を合わせ、その位置で上記のイオンビーム調整を行えば電子ビームとイオンビームの軸が一致することになる。

各電極に流れ込む電流には二次電子の寄与が含まれる。外側環状電極と内側円筒電極の二次電子収率をそれぞれ γ_{OUTER} および γ_{INNER} とする。これらの電極に

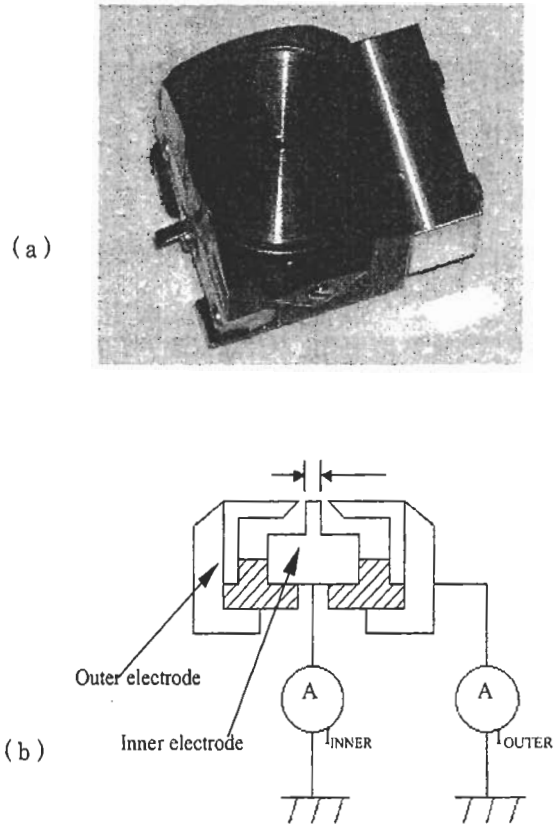


Fig. 1. Photograph of the coaxial sample stage (a), and schematic drawing (b).

流れ込む真のビーム電流をそれぞれ I_{OUTER}^0 および I_{INNER}^0 とすると実際に測定される電流はそれぞれ $I_{OUTER} = (1 + \gamma_{OUTER}) I_{OUTER}^0$, $I_{INNER} = (1 + \gamma_{INNER}) I_{INNER}^0$ となるので、これらの電極の材質をそろえ、 $\gamma_{OUTER} = \gamma_{INNER}$ とすると、 $I_{OUTER} / I_{INNER} = I_{OUTER}^0 / I_{INNER}^0$ 。つまり試料台表面からの二次電子放出の影響については比をとることでキャンセルアウトされる。従って試料台に二次電子抑制用のバイアス電圧を印加する必要は無い。

3. 除算表示機能付き2連微小電流計

ビーム調整の迅速化のために、BBPの値をリアルタイムでメータ表示できるような除算表示機能を持つ2連微小電流計を作製した。ブロックダイアグラムをFig. 2に示す。微小電流計部はオペアンプLF356を一個使った簡単なものであるが、1nAから100 μAまでの測定(ダイナミックレンジ5桁)が可能である。この値をメータ表示するとともにフルスケール±1Vの電圧として出力する。電流計1と電流計2の出力電圧

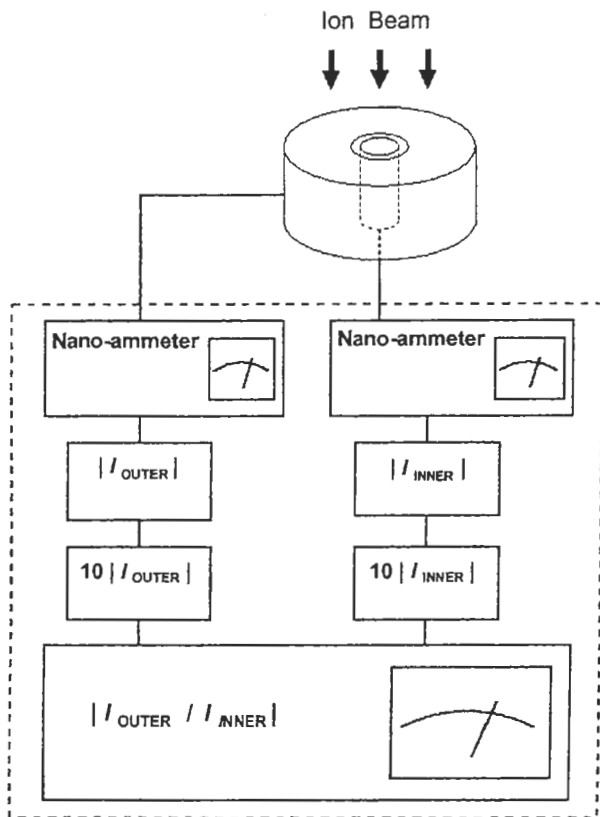


Fig. 2 Block diagram of the dual nano-ammeter

を、モノリシック乗除算器 AD534 を用いて除算する。ただし、分母に相当する電圧は正でなければならないので入力前に絶対値回路を通し、またフルスケール 10V となるようレベル調整用の増幅器をおいている。除算表示用のメータ自体に 2 桁のダイナミックレンジがあるので、微小電流計のレンジ切り替えと組み合わせることによって BBP 測定のダイナミックレンジとして原理的には 11 桁、実質的にも 10 桁は十分確保できるものと思われる。AD534 自体の総合演算誤差は最大で ± 2.5 % 程度である。微小電流計ユニットと除算ユニットの回路図をそれぞれ Fig. 3 および Fig. 4 に示す。

4. BBP とイオンビーム径 (FWHM) との関係

ビーム拡がりパラメータ BBP とビーム径の関係について簡単な計算機シミュレーションを行ってみた。ここではイオンビームの電流密度分布としてガウス分布を仮定し、ビーム径としてガウス分布の半値幅 FWHM を用いた。内側円筒電極の直径を D [mm] とし、また外側環状電極の外径を 1SD [mm] とする。イオン

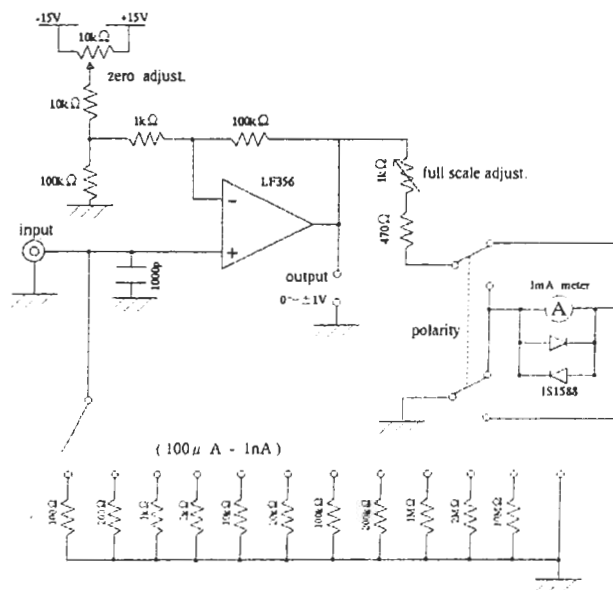


Fig. 3 Circuit diagram of a nano-ammeter unit

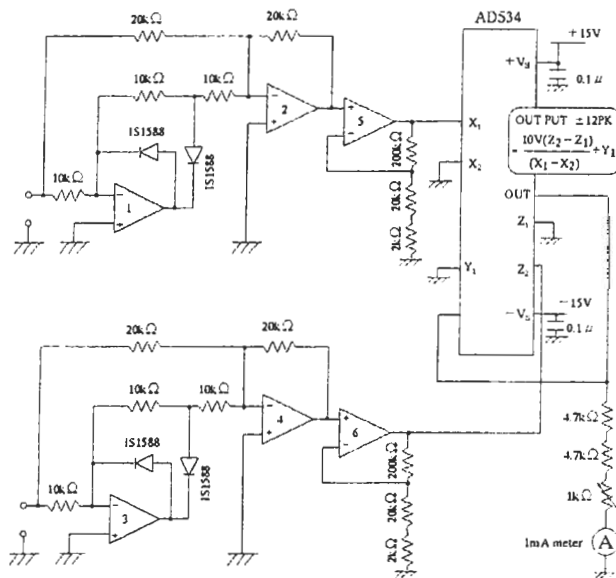


Fig. 4 Circuit diagram of a divider unit including absolute-value circuits (op-amps 1-4: TLP084) and level adjusters (op-amps 5, 6: TLP082).

ビームの入射角を θ とし、D を長さの単位にとると

$$\sigma_x = \frac{\text{FWHM}/D}{2\sqrt{2\ln 2}}, \quad \sigma_y = \sigma_x / \cos\theta \quad \text{となり,}$$

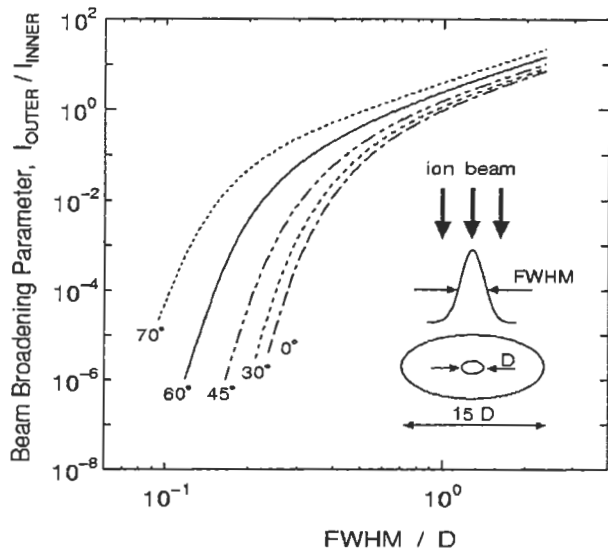


Fig. 5 Calculated beam broadening parameter, BBP, as a function of Gaussian ion beam diameter (FWHM / D) for several incident angles of ion beam measured from the surface normal. D is the diameter of the inner electrode.

$$I_{INNER} = \iint_{x^2+y^2 < (D/2)^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) dx dy,$$

$$I_{OUTER} + I_{INNER} = \iint_{x^2+y^2 \leq (15D/2)^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) dx dy \quad (1)$$

となる。これらより $BBP = I_{OUTER} / I_{INNER}$ を求めた。計算した BBP の値を $FWHM / D$ に対してプロットしたグラフを Fig. 5 に示す。イオンビームの入射角（試料表面垂直方向から測定）をパラメータにとっている。またここでは内側と外側電極間の隙間は無視している。前項で述べたように 2 連微小電流計の除算表示範囲は 10 桁程度あるので、Fig. 5 より、内側円筒電極直径の 10% から数倍程度のビーム径についてこの方法により十分計測可能であることがわかった。ただし正確に計測できるのはガウスビームの場合に限る。

Mizuhara らは 100eV から 500eV の加速電圧の範囲で低速イオン銃の最適収束条件を調べ、その条件下でのイオンビーム径をナイフエッジ法を用いて直接測定している [1]。今回、同じイオン銃で、Mizuhara らの

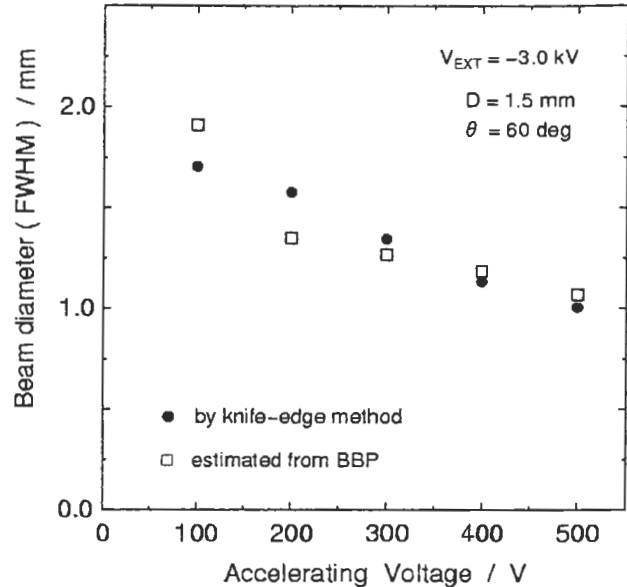


Fig. 6 Ion beam diameter (FWHM) as a function of ion accelerating voltage at the optimum focusing conditions. Comparison between the direct measurement by knife-edge method [1] and the estimation from beam broadening parameter measured by the coaxial sample stage. $V_{EXT} = -3.0$ kV, ion specie is Ar^+ , incident angle is 60 deg.

実験とほぼ同じと思われる最適収束条件を再現し、得られた BBP の値から Fig. 5 の関係を用いてビーム径を見積もった。イオン種は Ar^+ で入射角は 60 deg である。結果を Fig. 6 に示す。Mizuhara らのデータを同時に示している。これらの結果は良く一致しており、イオンビームの電流密度分布がほぼガウス分布とみなせること、及び BBP の値からビーム径を定量的に見積もれることが確認された。

5. BBPとイオンビーム照射位置との関係

同軸試料台を使ってビームの照射位置のずれをどの程度の感度で検出できるかシミュレーションを行ってみた。Fig. 7 は同軸試料台に垂直に入射したガウスビームの中心点と同軸試料台の中心点とのずれに対する BBP の変化の様子を示したものである。

この図から、ずれがビーム径と同程度になると、BBP の値はずれの無い場合に比べて一桁程度大きくなるのがわかる。従って位置のずれに対しても BBP は敏感であるといえる。実際に計測した結果を Fig. 8 に示す。イオンビームの加速電圧 500V で、ビーム径は $FWHM / D = 0.74$, $D = 1.5$ mm, 入射角 60 deg,

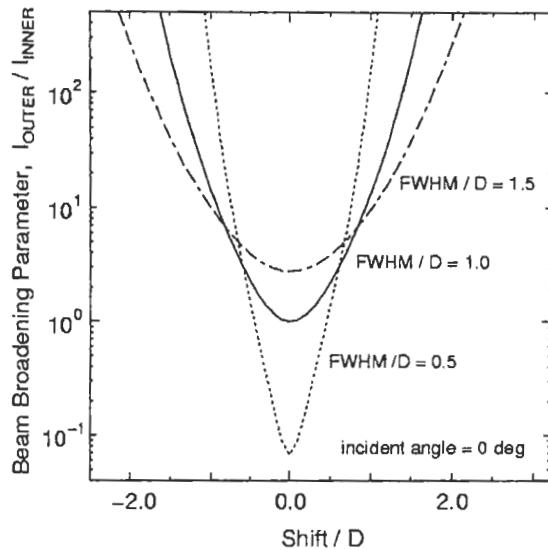


Fig. 7 Calculated beam broadening parameter as a function of the distance between centers of the inner electrode top surface of the coaxial sample stage and the normally incident gaussian ion beam spot on the stage. D presents the diameter of the inner electrode

イオン種は Ar^+ であった。この時の試料台表面でのビームスポット形状は Fig. 8 に図示しているように、長径と短径の比が 2:1 の楕円形となる。この状態で試料台を試料台表面に平行に Fig. 8 の図の矢印の方向へ移動させながら BBP を測定した。

実験結果はガウス分布を仮定した計算結果と良く一致しており、ここでもイオンビームの電流密度分布はほぼガウス分布とみなして良いことが確認された。また斜入射の場合であっても BBP はビーム照射位置のずれに対して敏感であることがわかった。メータから読みとれる BBP の有効桁数は 2 桁以上あるので、内側円筒電極の直径の 10% 以下の誤差で位置合わせが可能であると考えられる。

6. AES 深さ方向分析への応用

製作した同軸試料台と除算機能付き 2 連微小電流計を実際の AES 深さ方向分析に適用してみた。スパッタ用イオンビームの入射角は 60 deg, イオン種は Ar^+ , 加速電圧は 150V 及び 300V であった。ビームのラスタースキャンは行っていない。この実験の詳細についてはすでに報告している [2]。

イオンビームの調整は、まず I_{INNER} を最大とするようにディフレクタ及びレンズ電圧のおおまかな調整を行い、最後に BBP を最小とするように微調整を行う。

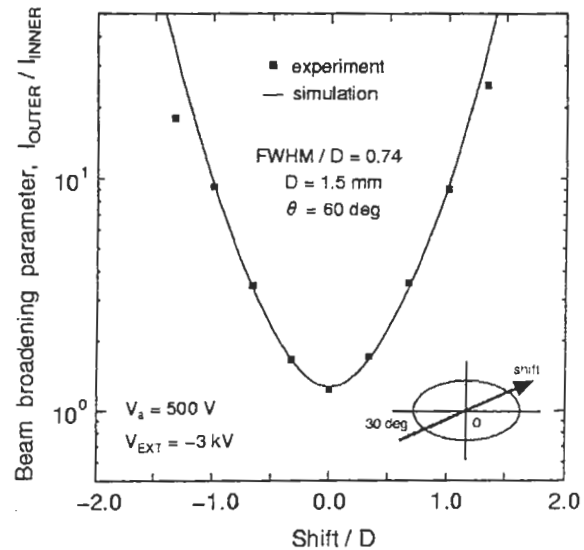


Fig. 8 Beam broadening parameter, BBP, as a function of the distance between centers of the inner electrode and the gaussian ion beam spot with the incident angle of 60 deg. The center position of the inner electrode with respect to the ion beam spot on the stage was shifted toward the direction as illustrated in Fig. 8. Comparison between the experiment and the simulation.

この方法により数分程度でビームの収束および位置調整が完了した。次に試料台を交換し、測定試料をセットした。試料は GaAs/AlAs 超格子標準物質 (物質工学工業技術研究所) である。Al-LVV オージェ信号強度を用いてデプスプロファイルを測定し、信号強度が 16% から 84% となる界面幅から深さ分解能を見積もると、Al-LVV リーディングエッジにおいて、イオン加速電圧 150V の場合に 1.8nm, また 300V の場合に 2.2nm という値が得られた。これらの値はイオンビームをラスタースキャンして得られた従来の値とほぼ同レベルのものであった。従って今回提案した方法によって簡単にかつ迅速にイオンビーム調整ができることが確認された。

7. まとめ

スパッタ深さ方向分析用イオンビームの収束と位置合わせのための同軸試料台および除算表示機能付き 2 連微小電流計を作製した。イオンビームの電流密度分布がガウス分布とみなせる場合にはビーム広がりパラメータ, $BBP = I_{OUTER} / I_{INNER}$, からビーム径を求めることができる。ビーム径の測定可能範囲は内側円筒電

極の直径 D の 10% から数倍程度である。また、ビームスポットと同軸試料台の中心位置のずれが D 程度になると BBP が一桁近く大きくなることがわかった。このことを利用すると、 D の 10% 以下の精度でビーム照射位置を同軸試料台中央に合わせることが可能である。

謝辞

今回製作した同軸試料台の設計にあたっては、水原 諒氏 (大阪大学大学院物質生命工学専攻) にご協力いただきました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Y. Mizuhara, J.Kato, T.Nagatomi, Y.Takai, T.Aoyama, A.Yoshimoto, M.Inoue and R.Shimizu, *Surf. Interface Anal.*, 35, 382 (2003).
- [2] 井上雅彦, 志水隆一, 宇多勝明, 佐藤達志, *J. Surf. Anal.*, 10, 31 (2003).

編集部が付加した質疑応答(参考資料)

[査読者]

実用的な試料台開発と機能に関する報告で興味深いものがありますが、下記の質問があります。

1) 5節最後に「直径の数%程度の誤差で位置合わせが可能」とあります。Fig. 8の横軸で直径の数%に相当するのは、 $(1/100)D$ 程度です。縦軸は対数軸ですが数%程度のシフト量で変化する内側/外側電極電流比は観測量として十分有意差のあるものとなりますか。

[著者]

メータから読みとれる BBP の有効桁数は少なくとも 2桁はありますので、少なくとも $(1/10)D$ の誤差の検出は可能です。ビーム電流が安定しておればさらにその数割程度の検出も可能と思われませんが、これについては定量的に確認したわけではありませんので、表現を「数%程度」から「10%以下」に修正しました。

[査読者]

2) 現状では内側電極の外径が 1.5 mm ですが、通常私たちが使用しているイオン線の直径は数百ミクロン程度以下です。内側電極の径を $1/5$ から $1/10$ にすることは可能でしょうか。もし実現すれば、利用範囲は大きく広がると思います。

[著者]

内側電極の径を 0.3mm から 0.15mm ということになりますが、これは線材を利用することで何とかなりそうです。これに対応する外側電極の穴も電子顕微鏡の絞りの穴径程度なので加工そのものはできそうです。ただ、これらの中心軸を合わせ込むのは難しそうですね。何かうまい方法があればよいのですが。

なお、今回の見積もりによりますと、内側電極の直径 1.5mm でも、150ミクロンくらいまでのビーム径なら十分測定可能のはずです。

[査読者]

本論文はイオンビームを用いた電子分光法による深さ方向分析で重要なビームの位置合わせ及びイオンビームの収束の状況の簡便なチェック法およびその手順について述べたものであり、非常に貴重である。また、その方法も簡便であり、実用分析に十分用いることができるであろう。内容的には問題ないが、語句および図の説明が分かり難いところがあります。この点を論文のコピーに直接書きましたので、参考にしてください。

[著者]

ご指摘に従い、文章表現と図の説明の修正を行いました。ただ、Fig.6のデータの誤差範囲の表示につきましては、ビーム電流密度プロファイルのガウス分布からのずれなども関係してくるため、その見積もりはよくわからず、そのままにしております。