

解説

VLSI トレンチ深さ測定技術

野田 壽一・高田 和正

NTT 光エレクトロニクス研究所 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

(1988年7月11日受理)

VLSI Trench Depth Measurement Method

Juichi NODA and Kazumasa TAKADA

NTT Opto-electronics Laboratories, 162, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11

1. はじめに

1 Mbit 以上の DRAM・VLSI では、高密度化を図るために Si 基板にトレンチ(溝)を形成し、それをキャパシタあるいは素子間分離とすることが主流になってきている。このため、トレンチの深さならびに形状を、正確にかつ簡単に測定することが LSI 製造上重要な課題である。しかし、トレンチ幅が $1\mu\text{m}$ 以下で深さが $7\sim 8\mu\text{m}$ になると、非破壊でトレンチ形状を測定することがきわめて困難になる。最近、サブミクロン幅のトレンチ深さ・形状を電子ビームあるいは光干渉を利用して非破壊で測定する方法が相次いで発表され、一部の測定方法が製品化されている。ここでは主に光計測を中心に、これまで報告されている各種の測定方法の原理ならびに性能について紹介する。

これまで報告されているトレンチの深さ・形状を測定する方法を表1に示す。トレンチの測定方法は、大きく電子ビームを利用する方法と、光を利用する方法に分類される。一般的に行なわれている方法は、トレンチ破断面を SEM で観察する断面観察法である。この方法はトレンチの深さ・形状を簡単にかつ正確に測定できる半面、試料を犠牲にする、測定時間がかかる、孤立トレンチの場合には狙ったトレンチの測定が困難である、インプロセス測定には適用できないという問題があった。このため、非破壊で短時間に測定したい、トレンチ全体を測定したいという要求に対して、以下に述べるような新しい方法が必要になってくる。

2. 電子ビーム法

2.1 レプリカ法

レプリカ法¹⁻³⁾は、トレンチの深さを正確に測定するというのではなく、むしろトレンチの形状観察、ウェハ全体におけるトレンチの欠陥の検査として有効である。そのプロセスは以下の方法で行なわれる。まずウェハに酢酸メチルを塗布後、アセチルセルロースのフィルムを押し付ける。乾燥後この酢酸メチルフィルムをはがし、その上に Au 膜を約 10 nm 程度蒸着し SEM で観測する。トレンチ幅 $0.2\mu\text{m}$ の場合、転写できる深さ $2\mu\text{m}$ である³⁾。この方法は、比較的簡単に、またウェハには傷を与えないで測定できるが、アセチルセルロースが一部残る可能性がある。

2.2 ステレオスコピー法

2通りあり、SEM の中に左右対称に配置した2個の2次電子検出器の信号からトレンチ形状を測定する方法⁴⁾と試料の設定角度を変えて観察した二つの SEM 像から測定する方法⁵⁻⁷⁾がある。前者の方法ではそれぞれの検出器の信号を E_1 , E_2 とすると、Si 基板面とトレンチ側壁の角度 ϕ が、次式で与えられる⁴⁾。

$$\tan \phi = k(E_1^2 - E_2^2)/(E_1^0 - E_2^0)^2 \quad (1)$$

ここで E_1^0 , E_2^0 は Si 基板面からの検出信号である。この近似式は $\phi = \pm 75^\circ$ まで成立し、断差の測定精度は 2nm できわめて高い。しかし直角に近いトレンチ側壁に対しては、この方法は適用できない欠点がある。実際コンパクトディスクのスタンプの表面形状の測定例はあるが、VLSI トレンチ測定に適用した報告がない。

この問題を解決する方法が2番目の方法である。図1

表1 トレンチ深さ・形状測定の種類

	方法	長所	短所	研究機関
電子ビーム法	断面観察法	高精度形状測定可	ウェハ再使用不可	各所
	レプリカ法	非破壊形状測定可	測定精度悪い, ウェハ再使用不可	松下 ¹⁾ , 日立 ^{2,3)}
	ステレオスコピー法	非破壊形状測定可	測定時間長い, 真空中	東芝 ⁵⁻⁷⁾
	X線吸収法	非破壊, 短時間測定	形状測定不可, 真空中	日立 ^{2,3)}
光学的方法	マイケルソン干渉計法	非破壊, 短時間測定 大気中	形状測定不可, 膜測定難	NTT ^{8,9)}
	干渉分光法	非破壊, 短時間測定 大気中, 高精度 膜測定可	形状測定不可	日立 ^{3,11)} , スクリーン ¹³⁾ , 日本分光 ¹⁴⁾ , NTT ¹⁵⁾

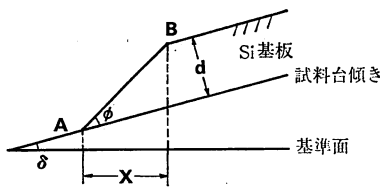


図1 ステレオコピー法におけるトレンチの角度関係

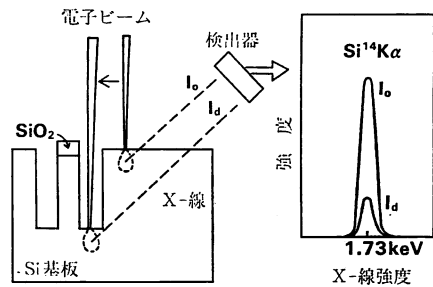


図3 X線吸収法の原理

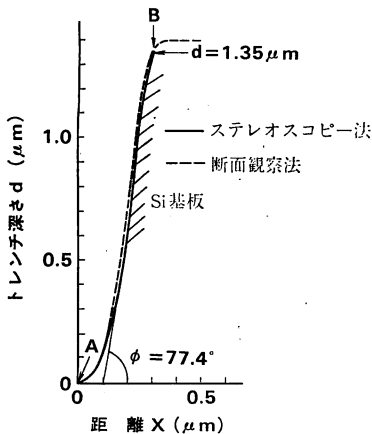


図2 ステレオスコピー法と断面観察法によるトレンチ形状の測定結果の比較

行ない、さらに精度を上げるために2枚のSEM像の重ね合わせ処理を行なう。512×512×8 bit 構成の8枚の画像メモリを用いて、A-D変換で画像を256階調にして、データ処理している。測定時間は一点について2 minである。図2に約1μm トレンチ幅、 $d=1.35\mu\text{m}$ 、 $\phi=77.4^\circ$ のトレンチを断面観察法によって測定した(点線)とステレオスコピー法によって測定した(実線)結果を示す。両者はきわめてよく一致しており、5μm 深さのトレンチで $\pm 0.1\mu\text{m}$ の測定精度が得られている。この方法は浅いトレンチに対しては非常に有効で、トレンチ形状を非破壊で測定できる唯一の手段である。測定時間をさらに短縮することが今後の課題である。

2.3 X線吸収法

以上説明した方法は、いずれもSEM像に基づくもので、電子ビームの強度は比較的弱い。一方電子ビームの強度を大きくすると、Si基板からの特性X線、すなわちSi¹⁴Kα線が励起される。X線吸収法はこの特性X線を利用する^{2,3)}。図3に示すように、電子ビームをトレンチの底に照射すると、底面で発生した特性X線が、トレンチの壁を抜ける際吸収される。この吸収されたX線強度I_dは、トレンチの深さdとX線を検出する角度δによって決まり、次式で表わされる。

に示すように、基準面からδ傾いているSi基板トレンチを考える。SEM像中側壁の長さに対応する画素数をX、倍率Mとすると、トレンチの傾斜角φおよびトレンチ深さdは次式で与えられる⁷⁾。

$$\tan \phi = (X_1 \cos \delta_1 - X_2 \cos \delta_2) / (X_1 \sin \delta_1 - X_2 \sin \delta_2) \quad (2)$$

$$d = (X_1 \sin \phi) / M \cos(\phi + \delta_1) \quad (3)$$

φの算出は画像処理によって行なう。画像処理としては16回の加算平均、空間フィルタリング、画像強調を

$$I_a = I_0 \exp(-\mu d / \cos \delta) \quad (4)$$

ここで I_0 は Si 基板表面に直接照射したときの X 線強度, μ は吸収係数である. 検出器への入射角 δ を 25° 程度に設定し, 図に示すように I_a/I_0 の比を測定することにより d が決定される.

$Si^{24}K\alpha$ 線は, 電子ビームを 1.7 keV 以上にすれば励起されるので, 測定では 10 keV に設定されている. この程度の強度であれば, 電子ビーム照射による Si 基板の損傷を受けない. また電子ビームの直径は約 10 nm であるから, 深さ 5 μm 程度のトレンチであれば, 電子ビームはトレンチ幅 1 μm 以下の底面に十分照射到達する. 断面観察法で測定した $d=5.2 \mu\text{m}$ に対して, この方法で測定した結果は 5.1 μm であった. したがって 0.1 μm 程度の測定精度がある. 一方, (4)式からわかるように δ によって測定値が大幅に変わるので, 試料の設定には十分注意を要する. またトレンチが浅いと, 電子ビームが底面に照射する位置によって I_a の値が変わるおそれがある. しかし, この方法は個々のトレンチを非破壊で, 20 s という短時間で測定できるので有望な手段の一つといえよう.

3. 光学的方法

3.1 マイケルソン干渉計法

電子ビームを利用する方法は, いずれも真空中で測定しなければならないので, プロセス中における検査には向いていない. 一方, 光を利用する方法は, 大気中で測定

できるので, プロセスへの導入が容易である. 光学的方法は, いずれも白色光源を用いた干渉法に基づいている. 干渉光信号を時間領域で測定するか, 周波数領域で測定するかによって光学系の構成が多少異なってくる. しかし時間領域と周波数領域との関係はフーリエ変換で結ばれるので基本的には同じ結果が得られるはずである.

マイケルソン干渉計法は時間領域の測定法で, 図 4 に

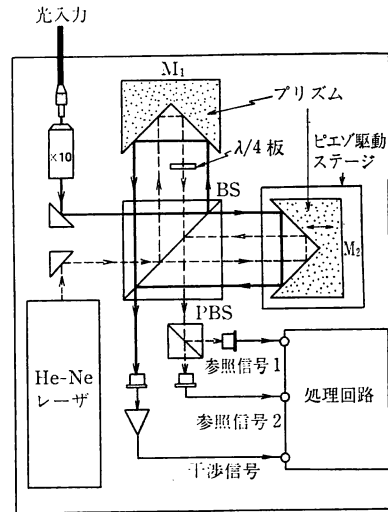


図 5 マイケルソン干渉計の構造

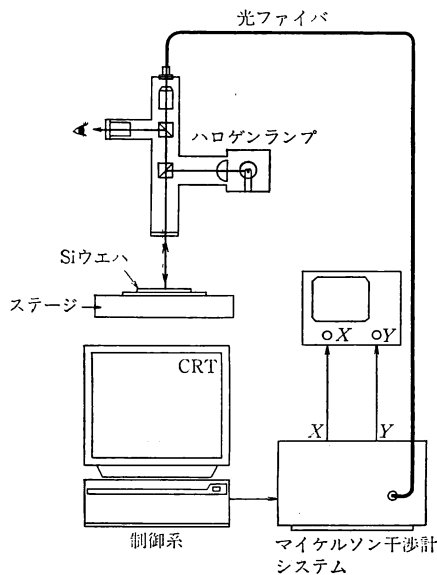


図 4 マイケルソン干渉計法の全体構成

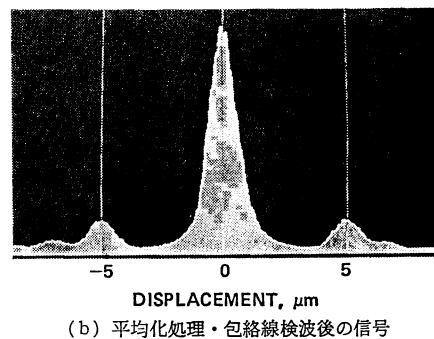
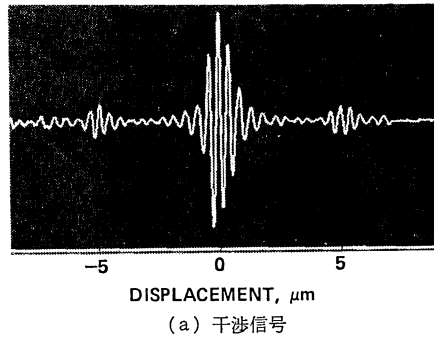


図 6 干渉信号

示す構成からなる^{8,9)}。インコヒーレント光を Si 表面ならびにトレンチ底面に照射すると、二つの反射光の波面にはトレンチ深さの2倍の光路差 $2d$ を生じる。この反射光を、光ファイバを通じて図5に示すマイケルソン干渉計に導く。この干渉計で、一方のミラー M1 を固定し他方のミラー M2 を可動すると、二つの反射光の間で干渉を生じ、図6(a)に示すように三つの干渉縞のピークが現れる。これらの干渉ピークは、0次回折の交流成分のみに着目すると

$$4I^{(0)}/I_0 = (1 + \alpha B/A)R(t) + \sqrt{\alpha B/AR}(t + 2d/c) + \sqrt{\alpha B/AR}(t - 2d/c) \quad (5)$$

で表わされる。ここで $I^{(0)}$ 、 I_0 は0次回折光および入射光の強度、 A は Si 表面面積、 B は溝底面面積、 α は溝内を伝播する際の光減衰係数、 c は光の速度、 $R(t)$ は光電界自己相関関数である。インコヒーレントな光源では $R(t \pm \tau) \rightarrow 0$ となるので、(5)式の第2、3項を完全に分離できるので、二つのピーク間を正確に測定できる。

ここで、トレンチ底面からの反射光は微弱なため、両端の干渉ピークが雑音光に隠れてしまうので、ミラー M2 を機械振動の小さい圧電素子で数回往復し信号の平均化処理を行なっている。平均化処理を行なう際、ミラー M1 と M2 の位置ずれが生じないように、He-Ne レーザーの干渉信号でミラー M2 の移動量を監視している。ミラー M2 の最小移動量は一般的に用いられている方法によっており、 $\lambda/2$ 周期の干渉信号光を偏光ビームスプリッター (PBS) を介して $\sin(\eta)$ と $\cos(\eta)$ の出力とし、この信号を8分割回路に通して $\lambda/16$ のサンプリングパルスとして決めている。ピーク間の距離は、インタフェログラムが10回平均処理された後、最終的に図6(b)に示すように、包絡線検波により決定される。

この測定装置の性能は、トレンチ幅 $1\mu\text{m}$ 、深さ $1\sim 7\mu\text{m}$ に対して測定精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ を有する。測定時間は

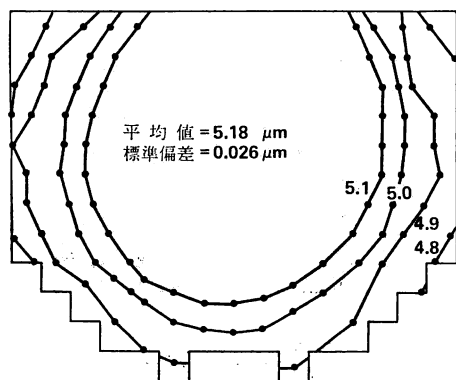


図7 ウェハ内のトレンチ深さのばらつき

約10sで、トレンチの面積比率が $A/B=2\%$ まで測定できる。光学系の特徴として、光照射部とマイケルソン干渉計を光ファイバで分離している点である。これにより干渉計への振動の影響を防止できるので、製造装置等への導入が可能になる。また短時間の信号処理なので、ウェハ全体のトレンチ深さの傾向を容易に測定できる。

図7は、幅 $0.8\mu\text{m}$ 、深さ約 $5\mu\text{m}$ のトレンチ深さの分布で、ドライエッチングによる不均一性を示している。

この方法の欠点は、光源のコヒーレント長より浅いトレンチになると、図6(a)のインタフェログラムに見られるリングングによって測定が困難になることである。このリングングは、光源のインコヒーレンシが十分でないことを示している。マイケルソン干渉計による測定では、使用したハロゲンランプのコヒーレント長は、光ファイバ通過後 $L_c=1.1\mu\text{m}$ であった。コヒーレント長をさらに短くするにはより短波長を有する光源あるいはレンズを用いない光学系が必要である¹⁰⁾。この点では次に述べる干渉分光法の光学系のほうが有利である。

3.2 干渉分光法

干渉分光法は周波数領域の方法で、波長を変化させると干渉信号が変化することを利用する。この方法は、すでに透明薄膜の膜厚測定装置として各社から製品化されている。これをトレンチ測定に適用する場合、トレンチ底面からの弱いかつ光回折を伴う反射光の影響を考慮しなければならない。

トレンチ底面と Si 基板表面からの反射光の干渉光強度は、トレンチ底面と Si 基板表面の面積をそれぞれ A 、 B とすると光の回折の影響を考慮すると次式で表される^{11,12)}。

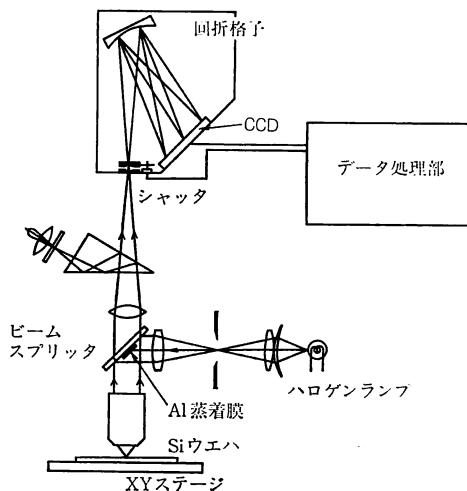


図8 高次回折光を利用する干渉分光法の装置構成

$$I^{(0)}/I_0 = A^2 + \beta B^2 + 2\sqrt{\beta} AB \cos(4\pi d/\lambda) \quad (6)$$

$$I^{(n)}/I_0 = (1 + \beta)AB - 2\sqrt{\beta} AB \cos(4\pi d/\lambda) \quad (7)$$

ここで $I^{(n)}$ は n 次回折光強度, I_0 は入射光強度, β は補正係数である。(6)式の0次回折光の場合, $I^{(0)}$ は $\lambda = 2d/n$ および $\lambda = 2d/(n+1/2)$ ($n=0, 1, 2, \dots$) のときにそれぞれ極大値, 極小値をとる。したがって, $I^{(0)}$ の極値を与える波長からトレンチの深さが求まる。これは高次の回折光の場合も同様である。(6), (7)式に基づく測定構成として2通りあり, 光検出器側に分光器を置く構成^{3,13,14}と光源側に分光器を置く構成¹⁵が報告されている。

光検出器側に分光器を置く構成を図8に示す¹³。この装置の特徴は, ビームスプリッタの中心部に Al 膜を蒸着することによって0次回折の反射光を遮光し, 高次回折光のみが分光器に入るようにしたことである。0次回折光には(6)式からわかるように直流成分と交流成分から成り立っている。トレンチの占める割合が小さくなると, 直流成分が大きくなって波長変化に対する干渉光変化が小さくなる。たとえばトレンチの面積が1%になるとコントラスト比は $2\sqrt{\beta} AB/(A^2 + \beta B^2) \approx 0.01$ ($\beta \approx 1$) で, 測定がきわめて困難になる。一方, (7)式からわかるように, 高次回折光の場合には理論的にコントラスト比 $2\sqrt{\beta}/(1 + \beta) \approx 1$ となる。この原理により, トレンチの面積比率が小さい孤立トレンチ深さ測定にはとくに有効と考えられる。なお光検出器側に分光器を置く構成では, 固定回折格子と CCD の組合せが主流になっており, 装置の小型化, 可動部の除去, 測定の高速化が図られることが特徴である。

トレンチ幅の測定限界は, トレンチを導波管とみなし

たとき, トレンチ幅 w とカットオフ波長 λ_c の関係から $w \geq \lambda_c/2$ でなければならない。たとえば幅 $0.2 \mu\text{m}$ のトレンチの測定では測定波長を $0.4 \mu\text{m}$ 以下にする必要がある。この波長になると光源ならびに光学系の構成に注意しなければならない。この点を考慮して, 反射鏡のみで構成し, 波長 $0.25 \mu\text{m}$ が使用できる装置が提案されているが¹⁴, まだ幅 $0.2 \mu\text{m}$ の測定例はない。

トレンチ幅 $0.2 \mu\text{m}$ を具体的に測定した例を示す。この構成は, 光源側に分光器を置く方法である¹⁵。図9に装置構成を示す。光源として Xe ランプを, 分光器として TeO_2 音響光学フィルタを用いている。このフィルタに 10 Hz の周期で 40 から 110 MHz まで掃引信号を印加することによって, $0.70 \sim 0.35 \mu\text{m}$ の波長域を高速に分光する。分光された光は, 多モード光ファイバを介してウェハ設置部に入る。光は, ビームスプリッタを介して, 一方は測定ウェハへ, 他方はトレンチの形成されていない参照ウェハに照射され, それぞれの反射光が2個の光電子増倍管へ受光される。音響光学フィルタの分光波長域が $0.35 \mu\text{m}$ の短波長まで可能なので, $0.2 \mu\text{m}$ 幅のトレンチ深さの測定が可能になる。さらに音響光学効

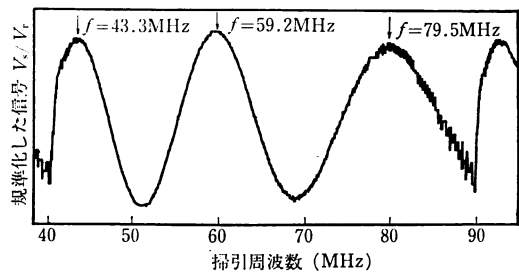


図10 波長掃引形干渉分光法によるトレンチ深さ測定信号

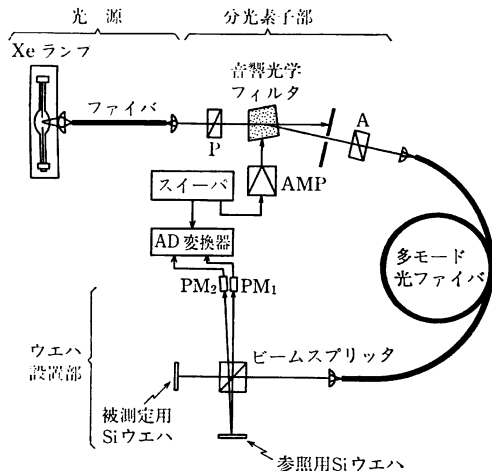


図9 波長掃引形干渉分光法の構成

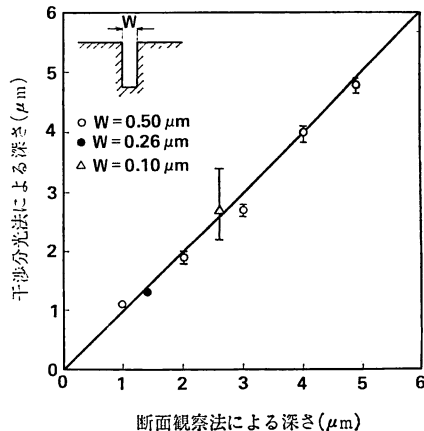


図11 波長掃引形干渉分光法と断面観察によるトレンチ深さ測定結果の比較

果を利用するので、高速の分光ができる。参照光も同時に受光し、測定信号と参照信号の割算を行なうので、光源の出力変動の影響を大幅に低減できる。

図10は、幅 $1\mu\text{m}$ 、深さ $1.15\mu\text{m}$ (SEM実測値)のトレンチ深さの測定結果である。横軸は掃引RF周波数、縦軸は V_s/V_r (測定信号/参照信号)を示す。Xeランプ光源には約5%の出力変動があったが、両信号の割算処理により光源出力変動の影響はほとんど観測されず、図に示したように明確な周期特性が観測されている。トレンチ深さの測定値は $1.19\mu\text{m}$ となり、SEMによる測定値($1.15\mu\text{m}$)とよい一致を得ている。図11に本装置と断面観察による測定結果の比較を示す。トレンチ幅 $0.26\mu\text{m}$ までは $0.1\mu\text{m}$ の精度で測定できることを示している。

Si基板に SiO_2 等の透明膜がある場合について述べる。トレンチの深さが膜厚より十分大きいときには、分光特性に短周期と長周期の曲線が現われる。短周期はトレンチに対応し、長周期は膜に対応するので、信号処理によりトレンチ深さと膜厚を分離して測定できる。しかし両者の値が近い場合には、両者の曲線の区別が困難になるので、何らかの工夫が必要である。

4. あとがき

トレンチの深さ・形状の非接触測定法が不可欠になりつつある状況において、電子ビーム法と光学的方法のいずれがよいかの判断をするには、もう少し技術の推移をみる必要がある。形状測定の可能な電子ビーム利用法では真空中で測定しなければならないので、エッチング中の測定は不可能である。一方、光学的方法では形状測定は不可能であるが、測定時間が短い、エッチングチャンバ等への装填は容易などの長所がある。しかしいずれの方法もプロセスに適用できるので、今後は電子ビーム法と光学的方法の長所が生かされるように、LSIプロセスのなかで併用されていくと予想される。一方、現在提案された電子ビーム法あるいは光学的方法に基づくトレンチ深さ・形状の非接触測定方法は、アイデアが出つくされた感があり、今後さらに新しい原理に基づく測定方法の提案が望まれる。

文 献

1) 岩崎 裕, 内藤康志, 堀 隆, 江崎豪彌: “レプリカ法

- によるトレンチ形状の評価”, 第47回秋季応用物理学学会予稿集, 27 a-p 10, (1986) p. 516.
- 2) T. Kure, T. Komoda, H. Sunami, S. Okazaki, and T. Hayashida: “EXAD: A novel electron-beam X-ray absorption method of nondestructive depth measurement for silicon trenches,” IEEE Electron Device Lett., **EDL-7** (1986) 703-704.
 - 3) T. Kure, T. Komoda, M. Noguchi, H. Sunami and T. Hayashida: “Depth measurement techniques for silicon trenches,” Extended Abstracts of the 19th Conference on Solid State Devices and Materials, C 8-1 (1987) pp. 307-310.
 - 4) T. Suganuma: “Measurement of surface topography using SEM with two secondary electron detectors,” J. Electron Microsc., **34** (1985) 328-337.
 - 5) 小松文明, 三好元介, 奥村膳弥, 熊谷雅樹, 松田延雄, 加納正明: “Stereoscopyによる微細パターンの立体形状測定”, 荷電粒子ビームの光学への応用, 第132委員会, 第93回研究会資料 (1985) pp. 12-17.
 - 6) M. Miyoshi, F. Komatsu, N. Matsuda and K. Okamura: “Measurement of the geometrical dimensions in the VLSI using scanning electron microscope,” Proc. 11th Int. Congr. on Electron Microscopy, Kyoto (1986) pp. 657-658.
 - 7) 小松文明, 三好元介, 奥村膳弥: “サブミクロン・パターンの断面形状を非破壊で観測”, 日経マイクロデバイス, 11月号 (1987) 113-119.
 - 8) T. Takada, K. Chida, J. Noda and S. Nakajima: “Trench depth measurement system for VLSI DRAMs capacitor cells using optical fiber and Michelson interferometer,” J. Lightwave Technol., **LT-5** (1987) 881-887.
 - 9) K. Takada, K. Chida, J. Noda and S. Nakajima: “Development of trench depth measurement system for VLSI DRAMs capacitor cells using Michelson interferometer,” J. Lightwave Technol. Appl. (to be submitted).
 - 10) P. A. Flournoy, R. W. McClure and G. Wyntjes: “White-light interferometric thickness gauge,” Appl. Opt., **11** (1972) 1907-1915.
 - 11) 野口 稔, 大坪 徹, 相内 進, 久礼得夫: “バビネの原理を応用した光干渉法によるSiエッチング溝の深さ測定”, 第46回秋季応用物理学学会予稿集, 2 p-H 13 (1985) p. 59.
 - 12) M. Noguchi, T. Otsubo and S. Aiuchi: “Apparatus for measuring the depth of fine engraved patterns,” U. S. Patent No. 4615620 (1986).
 - 13) 佃喜八郎, 小川洋一: “レンチ深さ測定装置”, 電子材料, 11月号 (1987) 77-84.
 - 14) 久田秀穂, 藤平志郎, 大久保優晴, 田所利康: “メモリセルのレンチ深さ非破壊測定装置”, 電子材料, 12月号 (1987) 56-57.
 - 15) K. Takada, J. Noda and S. Nakajima: “New trench depth measurement system with wavelength-rapidly-scanning acousto-optic tunable filter for VLSI DRAMs capacitor cells,” 1988 Conference on Precision Electromagnetic Measurements CPEM '88 Digest (1988) pp. 278-279.