

次世代 LSI プロセス・材料開発に生きる超精密製造・計測技術開発 ——光技術と精密機械技術の協働による次世代原子スケール生産技術開拓——

久保田 弘[†] 宗 勇樹[†] 松川 誠也[†]

Ultra-Precision Measurement & Fabrication Technology of LSI and Its Materials for the Next Generation——Toward the Atomic Scale Production Applying Novel Opt-Mechanical Methods——

Hiroshi KUBOTA[†], Yuki SOH[†], and Seiya MATSUKAWA[†]

あらまし 熊本大学を中心に熊本地域で開発した非共振型超音波モータ技術は、削りかすやパーティクルの出ない超精密長寿命性能の超音波モータを実現させ、半導体等の精密製造・計測技術に新たな革命をもたらした。その量産技術への代表的な応用例として、触覚センサープロセス、グラフェン新材料開発、原子レベル酸化超薄膜欠陥検査について紹介し、次世代 LSI プロセス・材料開発における日本の科学技術の方向性を示したい。

キーワード 次世代 LSI, 量産高度化, 多品種量産, 高信頼性

1. ま え が き

産業のグローバル化が進む中で、リーマンショック及び東日本大震災を経験し、日本の産業構造の転換期を迎えている。その中で、九州の半導体生産拠点の高度化が望まれ、「ものづくりの量産現場の大革新の方向性」と、「高効率・即応性・先導的な量産開発融合拠点を九州地域に配置する方向性」が、日本の成長戦略の中で強く求められている。第四期科学技術基本計画においては、「産学官協働のための「場」の構築」とともに、「地域イノベーションシステムの新たな構築」が明記された。大学等の研究開発・高度人材育成機関と量産ものづくり現場との地域における連携により、ものづくり現場への新製造科学 (newly developed manufacturing science) の組み込みを推進し、九州を中心に研究開発型の量産拠点の育成により、ものづくりの国際的競争力の強化を図ることが強く求められる。

このような背景から、地域にある大手半導体企業の量産ものづくり現場と中堅中小企業の連携推進の強

化が重要で、研究開発を使命とする研究機関と一体となった智恵の結集により、革新的な量産地域を形成する必要がある。具体的には九州(熊本)の半導体量産現場の高度化を科学的に図ることで、世界の半導体量産工場におけるリーディングインダストリーになることを目指す。ここで採用される革新的な日本の製造・検査装置や生産システムを通して、新しい製品を即座に量産できるような融通の利く日本の多品種量産システムが、世界の人々の需要を即満たし、電子デバイスによる低炭素社会の実現にも大きく寄与し、日本の国力増進につながる。

技術的な背景として、新型半導体チップの機能性が向上し続けることで、製造の複雑化が進み、処理工程が増え、開発期間が延長され、生産期間がますます長期化している。現在では、複雑なチップの製造には、個別の工程段階が平均 550 程度必要であり、これには約 12~16 週間を要する。一般的な生産工程では、1 時間に 50~100 枚のウェーハが製造され、1 品種のウェーハが製造された後、次の生産のために生産ツールをリセットしなければならない。このような状況下において、「綿密かつ柔軟な製造設計・計画に基づく状況監視」と、「インラインリアルタイムのナノ計測技術に

[†] 熊本大学大学院自然科学研究科, 熊本市
Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, 860-8555 Japan

よる保全予測」は、日本の半導体競争力を向上する上で重要な要素となる。また、設計から前工程、更に、後工程組立テストまでを一貫してウェーハレベルで成し遂げる新製造技術が必要不可欠である。

本論文では、次世代量産システムにおける具体的な方法として、

- レチクルフリー露光装置
- 圧力センサのセンサ感度ばらつき抑制プロセス
- グラフェンへの形状観測後の電極露光
- パルス光伝導法 (Pulsed Photoconductivity Method) による絶縁膜の非破壊・非接触検査等、研究の取組み例を紹介する。

2. レチクルフリー露光装置 [1], [2]

図 1 (a) にレチクルフリー露光装置の構成を示す。本露光装置は、露光光源、LCD (Liquid Crystal Display) パネル、LCD 制御及びマスクデータ管理用 PC、ウェーハ観察スコープ、精密位置決めステージによって構成されている。従来の露光装置に使用される固定パターンのガラスマスクの代わりに LCD パネルをマ

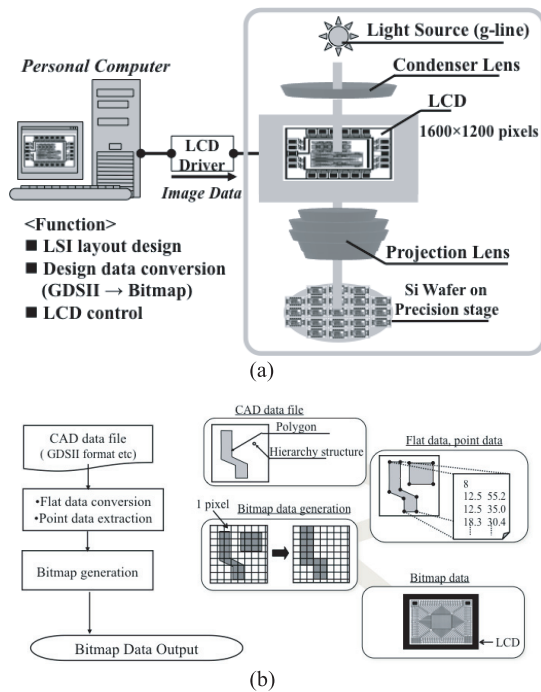


図 1 レチクルフリー露光装置 (a) 装置概要 (b) マスクデータ変換シーケンス

Fig. 1 Reticle-free exposure. (a) Device configuration. (b) Sequence of mask data conversion.

スクとして使用することで、フレキシブルなパターンをリアルタイムに表示し、露光することが可能である。LCD パネルの画素数は 1600 × 1200 pixels であり、マスクデータは制御 PC から転送される。このとき、CAD データをビットマップデータに変換して LCD に転送、表示する (図 1 (b))。ウェーハ観察スコープは、ウェーハと LCD マスクとのアラインメント及びウェーハの表面観察を行うことができる。精密位置決めステージは本研究室で研究開発を行った非共振型超音波モータ [3] を駆動源とした X-Y-θ ステージであり、それぞれの軸は 10nm の位置決め分解能をもつ。

2.1 圧力センサのセンサ感度ばらつき抑制プロセス

微細な圧力センサを高密度に実装することによって、触覚センサとしての応用が可能である。ピエゾ抵抗型メンブレン圧力センサは、MEMS 技術を用いることにより微細に加工することが容易であり、微細加工による感度劣化も少ない。なぜならば、そのセンサ感度は、容量型のようにメンブレン面積に強く依存することではなく、メンブレン端に集中する応力によるピエゾ抵抗変化で決まるからである。しかし、メンブレン作製に深掘りエッチングを用いるため、センササイズが小さくなるほどメンブレン端の形成位置にばらつきが生じるという問題がある。従来のプロセスでは、ピエゾ抵抗素子を含む回路パターンを形成した後に、メンブレンのエッチング加工を行っていたため、メンブレン端の形成位置がピエゾ抵抗素子に対して相対的に位置ずれを生じ、センサ感度の低下に加えて高密度に集積したセンサ間に感度ばらつきが生じていた。この問題を解決するために、レチクルフリー露光装置を用いた新しいプロセスを提案、実証した [4]。図 2 に提案したプロセスフローを示す。提案したプロセスでは従来のプロセスの順序とは逆に、まずメンブレンをエッチング形成し、スコープでメンブレン端の位置を観察する。その後メンブレン端の位置に合うようにピエゾ抵抗素子パターンを補正し、露光する。露光の結果を図 3 に示す。位置補正前はメンブレン端よりも外側にピエゾ素子パターンが見えているが、本方式によってメンブレン端に位置補正することが可能である。

2.2 グラフェンへの形状観測後の電極露光

グラフェンは Beyond CMOS 技術の有望な材料として注目されている。本研究室においてもグラフェンの量産プロセス開発と作製したグラフェンの特性計測

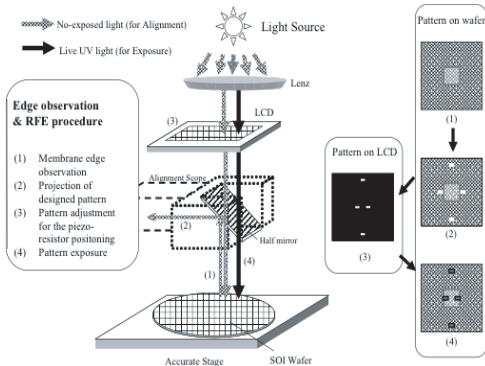


図2 レチクルフリー露光によるピエゾ抵抗素子の位置補正プロセス

Fig. 2 Piezoresistor of correcting-position-process by reticle-free exposure.

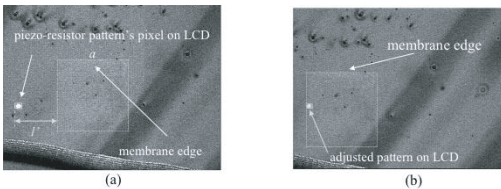


図3 位置補正したピエゾ抵抗パターンの露光検証結果 (a) 位置補正前 (b) 位置補正後

Fig. 3 Exposure verification results of position corrected piezoresistor pattern. (a) Before position corrected. (b) After position corrected.

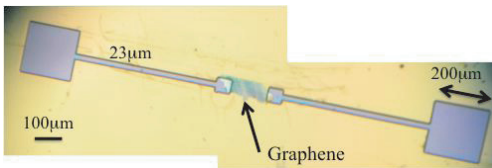


図4 レチクルフリー露光によるグラフェンへの電極形成
Fig. 4 Electrode exposed process after observing the shape of graphene.

に取り組んでいるが、電気特性計測のためにグラフェンに電極を付ける場合にもレチクルフリー露光によるパターンニングが有効である。なぜならば、レチクルフリー露光装置によって、形成されたグラフェンを観察しながら、形状に合わせた電極パターン形成することができるためである。図4にグラフェンにレチクルフリー露光装置によって電極パターンを形成した例を示す。

このように、レチクルフリー露光は、非露光対象物の形状を観察した後に、その形状に合わせるようにマスクパターンを自在の変更することが可能であり、次

世代量産システムにおける柔軟な製造設計をサポートする。

3. パルス光伝導法 (PPCM: Pulsed Photoconductivity Method) による絶縁膜の非破壊・非接触検査

パルス光伝導法 [5] は、光伝導技術によってシリコンウェーハ上に成膜された絶縁薄膜の絶縁特性を非破壊・非接触にて検査するインライン計測技術の一つである。内部光電効果を利用して電子を励起させ SiO_2 薄膜の伝導特性を測定する方法である。MOS 構造の試料にパルス電圧を印加し、キャパシタの充電が完了し電場が一定になった後にパルス光を照射する。するとパルス光により Si 基板中にある電子が Si/SiO₂ 界面に微量の光電子として励起する。このときパルス光のエネルギーが非常に大きいと (4 eV 以上) 電子は Si/SiO₂ 界面のエネルギー障壁を超えて SiO₂ 薄膜内へ侵入する。侵入した電子は移動すると SiO₂ 薄膜内の電子をたたき出す。そのたたき出された電子は SiO₂ 薄膜内の欠陥にトラップし電子をたたき出す。こうして次々と電子は移動していく。この電子の信号を外部に組んだ抵抗にかかる電圧を測定することによって SiO₂ の絶縁性能を評価していく。発生するキャリアは非常に微量の信号であるので SiO₂ 薄膜の絶縁性能を非破壊で評価可能と考えている。したがって、絶縁破壊時に至るまでの現象を、絶縁破壊を生じさせずに評価する有用な手段として、このパルス光伝導法は期待される。

4. むすび

次世代量産システムにおける具体的な方法として、

- レチクルフリー露光装置
- 圧力センサのセンサ感度ばらつき抑制プロセス
- グラフェンへの形状観測後の電極露光
- パルス光伝導法 (Pulsed Photoconductivity Method)

による絶縁膜の非破壊・非接触検査における研究の取り組み例を紹介した。これらを要素技術とした新製造技術のコンセプトが、多品種量産システムの礎となると期待されている。

文 献

- [1] T. Morimoto, K. Nakamura, H. Kubota, A. Nakada, T. Akamichi, T. Inokuchi, and K. Kosaka, "Arbitrary pattern fabrication with a LCD reticle-free exposure method," Proc. SPIE Reprint, vol.5130, pp.347-356,

- 2003.
- [2] K. Wakasugi, S. Wakimoto, A. Nakada, H. Kubota, K. Nakamura, and T. Morimoto, "Design and fabrication of MOS device circuits with reticle-free exposure method," Proc. SSDM, vol.44, pp.2279-2283, 2004.
- [3] K. Kosaka, T. Iwabuchi, T. Baba, T. Endo, H. Hashiguchi, H. Furukawa, Y. Egashira, S. Hashimoto, M. Touge, K. Uozumi, A. Nakada, H. Kubota, and T. Ohmi, "Wear reduction method for frictionally fast feeding piezoactuator," Jpn. J. Appl. Phys. 45, pp.1005-1011, 2006.
- [4] 宗 勇樹, 林 直毅, 遠藤泰史, 若杉雄彦, 市川武史, 松本繁幸, 久保田宏, "レチクルフリー露光により感度揺らぎを抑えたピエゾ圧力センサの超高密度実装," 信学論 (C), vol.J91-C, no.11, pp.617-626, Nov. 2008.
- [5] Y. Nishi, T. Hirano, Y. Soh, H. Kubota, K. Kobayashi, A. Yoshino, and T. Kanayama, "Non-destructive measurement of nonlinear conduction of nanoscale materials, nanoscale SiO₂, and K_{0.3}MoO₃ by pulse photoconductivity method," Jpn. J. Appl. Phys., vol.50, 116602, 2011.

(平成 24 年 2 月 3 日受付)



久保田 弘

1979 東大・教養・基礎科学卒. 1981 同大学院理学系研究科修士課程了. 1986 東京大学理学博士取得. 1991~1992 カリフォルニア工科大学電気工学科・応用物理学科客員研究員. 1984 熊本大学工学部助手に就任後, 1989 同学部助教授, 1991 同大学院自然科学研究科助教授に就任. 2001 同研究科教授に就任し半導体デバイス関連研究に従事.

宗 勇樹



松川 誠也

2012 熊本大学大学院自然科学研究科修士課程了. 現在, 博士後期課程において半導体デバイス・デバイス新材料に関連する研究に従事.