電子線レジストの超高スループット潜像イメージング

現 東京大学大学院新領域創成科学研究科及び連携研究機構マテリアルイノベーション研究センター (研究当時 物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター) 藤原 弘和 東京大学大学院新領域創成科学研究科及び連携研究機構マテリアルイノベーション研究センター 谷内 敏之

[研究背景]

半導体産業は、シリコントランジスタの高集積化によっ て成長してきました。先端半導体製造では波長13.5 nmの 極端紫外線(EUV)を光源に用いたリソグラフィが実用化さ れ、シリコントランジスタを微細化するトレンドは今後も 継続するものと思われます。

現状の EUV リソグラフィでは 10 nm-20 nm のパター ンを形成することに成功しています[1]。しかし、さらに 微細なパターンを形成するには、レジストの感光メカニズム を解明する必要が出てきました[2]。そのためには、レジスト 塗布、露光、ベーク、現像から構成されるリソグラフィプロ セスの各段階でレジストに形成されたパターンを調査する必 要があります。しかし、現状では現像後のレジストの凹凸 パターンしか高速かつ高精度で検査することができません。

本研究では、露光後に形成される、ほとんど凹凸のない 化学的なパターン(潜像)を可視化することを目的とし、レ ーザー励起光電子顕微鏡(laser-PEEM)を用いて潜像を形 成した電子線レジスト ZEP520A を観察しました[3]。

[研究成果]

今回の laser-PEEM 実験では、励起光のスポットサイズを 100 µm、出力を 3.2 mW に設定しました。

図 1(a)に設計ハーフピッチ 500 nm のライン&スペース(LS)パターンを観察した PEEM 像を示します。像中の 縦方向に伸びる周期的なパターンが明瞭に可視化されてい ることがわかります。黄線に沿って抽出した強度プロファ イル(図 1(b))から、この周期パターンのハーフピッチが設 計値の 500 nm と一致することも確認されました。

潜像コントラストが観測されたメカニズムを調査するために、露光領域と非露光領域で光電子エネルギー分布を取得しました(図1(c))。露光領域では、*E*-*E*vac ~ 0.15 eV付近で最も大きな強度減少が観測されました。この強度減少が図1(a)における潜像コントラストの支配的要因であることがわかります。



図 1: (a) 潜像を形成した ZEP520A の PEEM 像。スケールバーは 2 µm。(b) (a)中の黄線に沿って抽出した強度プロファイル。(c) 露光領域(マゼンタ)と非露光領域(シアン)で解析した光電子エネ ルギー分布。

ここで、得られた光電子エネルギー分布から ZEP520A の感光メカニズムについて議論します。図 1(c)では、 *E-E*vac~1.2 eVの肩構造(構造 1)と*E-E*vac~0.15 eVのピ ーク構造(構造 2)が見られます。構造 1 は、フェルミ準位 以下の占有状態の中で最もエネルギーが高いため、電子線 照射時に優先的に壊される化学結合に由来すると推測され ます。ZEP520A の分子構造から、C-CI 結合がこの肩構 造を形成していると考えられます[4]。一方、構造 2 は、 構造 1 に比べてボリュームが大きくエネルギーも低いこと がわかります。また、潜像コントラストにも大きく寄与す

ることから、構造2はZEP520Aを構成するポリマーの 主鎖(C-C 結合)に起因するものであると推測できます。 すると、電子線照射による構造2の強度減少は、主鎖切断に よる C-C 結合の減少によるものと解釈することができます。

図 1(a)の PEEM 像では、潜像コントラストの他に、 一見ノイズにも見える規則性のないコントラストも観測さ れました。しかし、このコントラストは、laser-PEEM の電子光学系の焦点を変えると「ボケる」ことから、試料 由来の本質的なコントラストであることが確認されていま す。このコントラストの起源を調査するために、非露光領 域において顕微光電子分光を行なった結果を図 2(a),(b)に 示します。光電子エネルギー分布から、この規則性のない コントラストは *E-E*_{vac} ~ 0.15 eV 付近の電子状態で形成さ れていることがわかります。実際に *E-E*_{vac} ~ 0.15 eV でエ ネルギーフィルターした PEEM 像(図 2(c))では、100 nm 程度のサイズのコントラストがより強調されました。

一方、Pos.1 と Pos.2 において抽出した光電子エネルギ 一分布において、ほとんど強度差がない *E*-*E*_{vac} ~ 1.25 eV でエネルギーフィルターした PEEM 像から興味深い結果 が得られました。図 2(d)から、図 2(c)で見られたコントラ ストよりもさらにサイズの小さなコントラストが存在する ことがわかります。上述の化学結合の考察を踏まえると、 これらの結果は、C-C 結合と、C-Cl 結合は異なる不均一 性をもつことを示唆しています。我々の高分解能 laser-PEEM によって、レジストには 2 種類の化学的不均一性 が潜んでいることを初めて解明することに成功しました。



図 2: (a) 非露光領域の全電子収量 PEEM 像。(b) (a)中の Pos.1(マ ゼンタ) および Pos.2(シアン) で解析した光電子エネルギー分布。 (c), (d) それぞれ *E*-*E*_{vac} = 0.15 eV および 1.25 eV でエネルギーフ ィルターした PEEM 像。スケールバーは全て 500 nm。

次に、他の顕微手法との測定のスループットを比較しま す。図3にlaser-PEEM、AFM、SEMの観察結果と観察 時間を示します。それぞれの像は同等の画素数、解像度に なるように測定条件を設定して取得しました。



図 3: laser-PEEM、AFM、SEM で観察した潜像および現像後パ ターンとそれぞれの測定時間。

まずは潜像観察で比較します。レジストに電子線を照射 すると膜がシュリンクすることが知られており、AFM は 膜厚の減少部分を潜像パターンとして可視化することがで きます。SEM での潜像観察は、SEM が化学敏感性に乏し いことに加え、SEM 観察そのものが EB 露光になり潜像 を消失させるので、ここでは SEM 像を示していません。 潜像観察では、laser-PEEM は AFM よりも、すでに 80 倍以上速く観察可能であることがわかります。さらに、技 術的に励起光のスポットサイズを径 10 µm (観察視野のサ イズ)、出力を1W に設定することが可能なため、laser-PEEM はさらに 30,000 倍のスループットが実現可能です。

次に現像後パターン観察で比較します。laser-PEEM の測定時間は SEM の測定時間と同程度であることがわか ります。上述のレーザーの最適化により、laser-PEEM のスループットは SEM のそれよりも 30,000 倍程度高く なるポテンシャルを持つと言えます。SEM は半導体製造 における検査装置としてすでに大きな市場を形成している 高速検査手法です。SEM のスループットを大きく上回る

5 物性研だより第 65 巻第 1 号

可能性がある laser-PEEM は、潜像を可視化できるユニ ークな手法であることにとどまらず、既存の検査プロセス を劇的に高スループット化し、半導体製造コストの低下お よび歩留まり向上に貢献可能な検査技術であることが示さ れました。

今後の課題は2点あり、1点目は検出器系の改良です。 今回示したスループットの理論値を達成する上でのボトル ネックは検出器系(MCP+蛍光スクリーン)です。これにダ メージを与えないように、現状では単位時間あたりの光電 子強度を抑える必要があり、この検出器系の改良または脱 却が必要です。2点目はフォトレジストでの潜像イメージ ングです。フォトレジストは電子線レジストよりも市場規 模が大きく、より重要な材料です。フォトレジストでも電 子線レジスト同様、露光部分では化学変化が生じるため、 laser-PEEM による潜像イメージングが可能であると考 えられます。今後、実証実験を進める予定です。

[まとめ]

本研究では、laser-PEEM を用いて電子線レジストに 描画された潜像の可視化、および他手法とのスループット 比較を行いました。ZEP520A に形成された LS パターン の潜像を可視化することに成功し、潜像を可視化可能な AFM よりもはるかに高いスループットで観察できること を示しました。さらに、現像後パターンの観察では、すで に半導体製造で大きな市場を形成している SEM よりも 30,000 倍高いスループットで検査可能であるポテンシャ ルがあることを示しました。また、潜像の他に、レジスト に内在する2種類の化学的な不均一性があることを示唆す るコントラストを観測することに成功しました。これらの 成果は、先端リソグラフィ技術開発を加速するだけでなく、 検査工程の高速化やレジスト材料の高解像度化にも貢献す るものと期待されます。

[謝辞]

本研究成果は、東京大学物性研究所 Cédric Bareille 特任 研究員(現 株式会社日立ハイテク)、大川万里生特任研究 員、東京大学特別教授室の辛埴特別教授(元物性研究所附 属極限コヒーレント光科学研究センター教授、2022 年 6 月に逝去)との共同研究によるものです。また、試料作製 において、Q-NanoLabの遠藤彰助教、橋本義昭氏のサポ ートをいただきました。

[参考文献]

- [1] S. Mukesh et al., Electronics 11, 3589 (2022).
- [2] 例えば J. Torok *et al.*, J. Photopolym. Sci. Technol. 5, 625 (2013).
- [3] H. Fujiwara *et al.*, Appl. Phys. Express **17**, 086505 (2024).
- [4] T. G. Oyama *et al.*, Appl. Phys. Express 5, 036501 (2012).