

微細トランジスタにおけるゲートの微小ラフネス測定とエッチングによるその低減化技術

谷畑 篤史 小池 理
橋本 潤 倉知 郁生

半導体デバイスの高集積化、低消費電力化が進む近年、トランジスタはより微細かつ低リークな電流特性が求められる。トランジスタ寸法、特にその電気特性を決めるゲート長は縮小化され、実行チャンネル長が短くなるために、トランジスタ特性に与えるゲート長ばらつきの影響は無視できなくなっている。これは、ゲート長ばらつきが、局所的な短チャンネルトランジスタを形成し、リーク特性を低下させるためである。ゲート長がばらつく原因は、ゲートパターンエッジ部の微小なラフネスであり、Line Edge Roughness (LER) と呼ばれている。LERは特に65nmルール以降のトランジスタで顕在化しており、ArFレジストを用いたリソグラフィ工程ではレジストパターンのLERを低減する研究¹⁾やエッチングによるLERの低減化技術の開発が行われている。

本稿ではゲートのLER測定を3Dimensional Atomic Force Microscope (3-D AFM) で行うことにより、より正確かつ統計的なデータを取得、特にLERに対するエッチングの影響について調査し、エッチングによるLERの低減化技術の評価と分析を行った。

ゲートLER測定方法

現在のLER測定はCritical Dimension Scanning Electron Microscopy (CD SEM) を用いた手法が主流であり、その特徴は図1-aに示す通り、ゲートエッジ位置を上部から2次元的に検出し、その位置のばらつきをLERとして定量化する。パターン上部からの測定となるため、ゲート上部または底部のみのLERが得られ、その測定分解能は2~3nmである。

一方、今回用いた3-D AFMは図1-bに示す通り、プローブがゲート側壁を直接測定することを特徴とする。プローブ先端がフレア状となっており、その先端がゲート側壁と接触できる機構となっている。プローブはゲート底部、側壁、上部と往復し、ゲートの長さ方向に移動しながら側壁全体のエッジ位置を検出する。これによりCD SEMではできなかったLERのゲート高さ方向の情報を得ることができ、ゲート構造が積層となる場合も、各層で

のLERの定量化が可能となっている。測定分解能は0.1nmとCD SEMに比べて高く、微小ラフネスを高精度に捉えることができる。

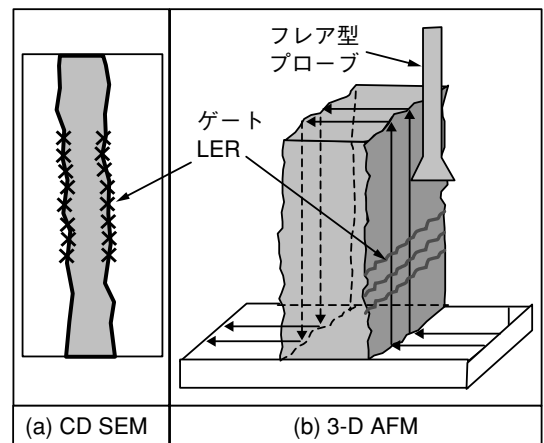


図1 ゲートLER測定イメージ

ゲートLERのトランジスタ特性に与える影響

トランジスタ特性がどの程度のLERで変動するのが把握することは、ゲートの形成工程を構築する上で重要である。そのため、トランジスタ特性に対するLERの依存性をモンテカルロシミュレーションを用いて調査した。150nmの標準ロジックCMOSプロセスによって試作されたNch MOSFETの各チャンネル長に対する測定されたオン電流 I_{on} 、およびオフ電流 I_{off} から、ゲート長と I_{on} 、ゲート長と I_{off} の関係をResponse Surface Model (RSM) により求めた。RSMはサンプリング点で得られた入力(ゲート長)と出力(I_{on} 、 I_{off})の結果を、多項式で近似曲線に当てはめてモデル化するものである。さらにゲートを幅方向に1000分割し、各分割に対しゲート長を正規分布関数に従う乱数として発生させ、前述の I_{on} 、 I_{off} に対するRSMよりLERの度合いに対する I_{on} - I_{off} 関係を求めた。図2に I_{on} - I_{off} 特性に対する、LER依存性を示す。同一の I_{on} において I_{off} はLERと共に著しく増加する。 I_{on} が約400 $\mu A / \mu m$ の付近では、LERが5nmか

ら11nmと6nm増えただけで、 I_{off} は2桁近くも増加することがわかる。以上より150nmスケールのトランジスタでも、数nmのLERで特性は大きく変動するため、ゲートLERの低減化はより安定なデバイス製造には重要な課題である。

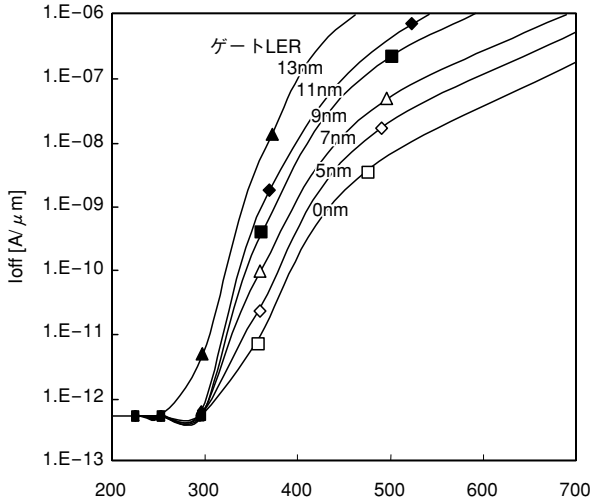


図2 Ion-off特性に対するLER依存

ゲート形成過程におけるLER変動

ゲート形成の各工程でLERがどのように推移するのが把握することは、LERを低減させる上で重要な情報となる。したがって、各ゲート形成工程後にLERの測定を行い、その推移を調査した。ゲート形成はまず、電極となるポリシリコン上にBottom Anti-Reflection Coating (BARC) とレジストを塗布し、リソグラフィ技術によりパターンニングを行う。その後、レジストパターンをマスクにBARCエッチング、さらにポリシリコンエッチングを行い、レジスト除去、洗浄を経て形成される。BARCおよびポリシリコンのエッチングはInductive Coupled Plasma (ICP) タイプの高密度プラズマエッチング装置を用い、BARCエッチング、ポリシリコンメインエッチング、ポリシリコンオーバーエッチングの3ステップを同一チャンバで連続して行った。

図3にレジストのパターニング後と各エッチングステップ後のLERの測定結果を示す。LERは初期レジストで最も大きく15.8nmある。しかし、次のBARCエッチングでは10.4nmと大幅に減少し、さらにポリシリコンメインエッチングでは8.9nmまで減少する。次のオーバーエッチングでは変わらないものの、リソグラフィ工程で形成されたLERは、エッチング工程で低減していることが分かる。

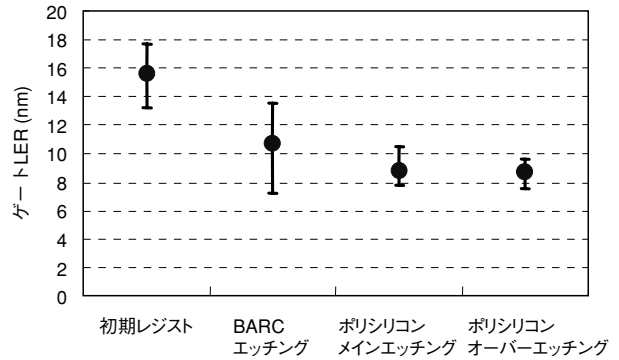


図3 ゲート形成過程におけるLER変動

LERに対するBARCエッチングの影響

エッチングによるLER低減化技術の検討として、BARCおよびポリシリコンエッチングについて評価を行った。BARCエッチングではエッチングガスの最適化、ポリシリコンエッチングでは、LERに対するポリシリコン結晶の影響を低減させる評価を行った。まず、BARCエッチングにおいて、レジストのLERが大幅に減少したことから、その原因をエッチングガスに注目して調査した。エッチングガスはCF₄を用いており、エッチング後のレジスト寸法は約5nm太る。レジスト側壁にはBARCエッチングで生成されるフルオロカーボンポリマー（炭素-フッ素結合を持つ高分子有機化合物）が堆積していると考えられ、BARCエッチング後のレジストのLERは側壁に堆積したポリマーのラフネスを測定している。

フルオロカーボンポリマーによるLERの低減効果は、既に他の研究でも報告されており²⁾、本稿もその効果の検証を行った。まず、BARCエッチングガスをCF₄からフルオロカーボン成分の無いCl₂に変更した。その結果、レジスト寸法は約30nm太り、レジストの側壁には厚いポリマーが堆積した。図4にBARCエッチング後のレジストのAFMイメージを示す。CF₄のポリマーの表面は滑らかでラフネスが少ないのに対し、Cl₂はスジ状のラフネスが観察される。また、Cl₂のLERは30.3nmとCF₄の10.4nm

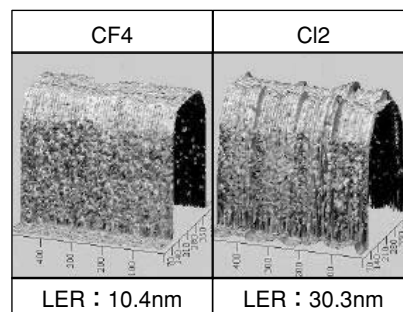


図4 BARCエッチング後の3-D AFMイメージ

と比べ、約3倍にまで増加している。図5にX-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) による各ガスのポリマーの元素分析結果を示す。CF₄のポリマーにはCl₂のポリマーでは検出されないCF₂とCF₃のスペクトルが検出され、やはりフルオロカーボンポリマーがラフネスを低減させている可能性が高いと言える。

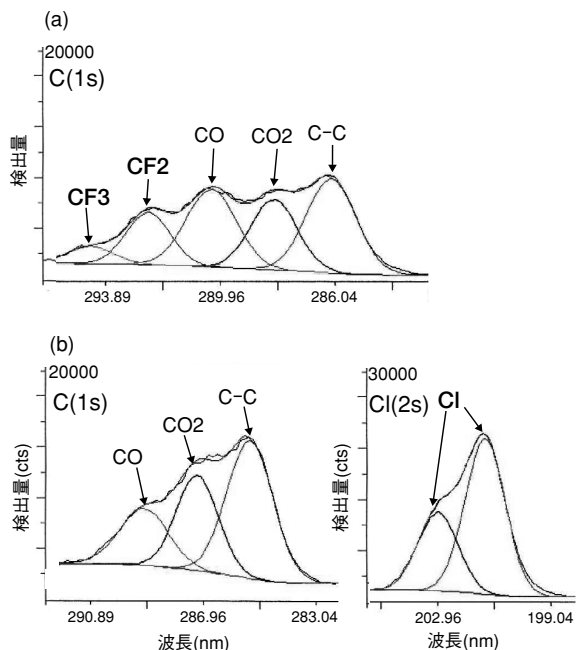


図5 XPSによるポリマーの元素分析結果
(a) CF₄ガスによるBARCエッチング
(b) Cl₂ガスによるBARCエッチング

ゲートLERに対するポリシリコン結晶の影響

ゲートLERを形成する他の要因として、ポリシリコン膜の結晶性が考えられる。図6はポリシリコンエッチングを途中で止めたゲートパターンであるが、LERがポリシリコン表面の結晶粒界（結晶間の溝）と同じ位置に形成されている。両者の相関を検証するため、LERに対するポリシリコン結晶の依存性を調査した。ポリシリコン結晶は不純物であるPhosphorus (P) のドーピング方法、濃度、アニール処理（不純物を活性化させる熱処理）で著しく変わるため、結晶性の制御はこれらに水準を設けて行った。

図7にポリシリコン表面のAFMイメージとラフネス値 (Rq: 粗さ表面の2乗平均値) を示す。図7-aから図7-cはすべてアニール処理によって、Pを活性化させたポリシリコンである。何れの表面にも数多くの結晶粒界が観察され、結晶粒界数と表面ラフネスの値はドーピング方法、濃度に応じて異なっている。不純物をドーピングしながらポリ

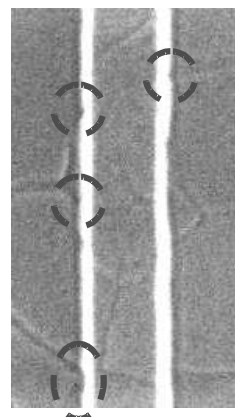
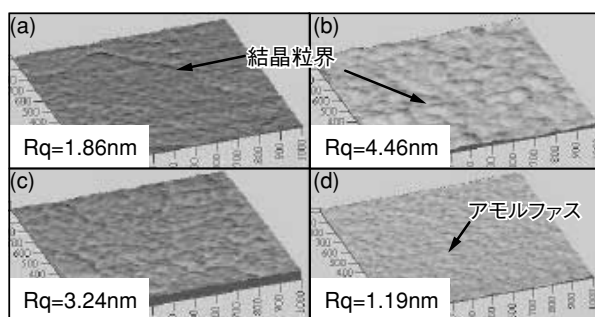


図6 エッチング途中止めでのポリシリコンゲート



(a) アニール後のIn-situドーピングポリシリコン (P濃度 $3E20cm^{-3}$)
(b) アニール後のインブラドーピングポリシリコン (P濃度 $3E20cm^{-3}$)
(c) アニール後のIn-situドーピングポリシリコン (P濃度 $5E20cm^{-3}$)
(d) アモルファスシリコン

シリコンを生成するIn-situドーピング（図7-a）は、不純物イオンを打ち込んでドーピングするインブラドーピング（図7-b）に比べて結晶粒界の数が少なく、表面ラフネスも半分程度に減っている。一方、P濃度の高いポリシリコン（図7-c）は、低いポリシリコン（図7-a）に比べ結晶粒界数は多く、表面ラフネスは約2倍となっている。また、アニール処理を行っていないアモルファスシリコン（図7-d）は結晶粒界が存在せず、その表面ラフネスは最小となっている。以上より、表面ラフネスは結晶粒界数に応じて増えており、本稿では結晶粒界数を表面ラフネスに置き換えて評価した。

図8にゲートLERに対する、各ポリシリコンの表面ラフネス（結晶粒界数）の依存性を示す。ゲートLERは表面ラフネスと共に増加しており、密接な関係がある。よって、LERの形成は結晶粒界の影響を受けていると言える。

ゲートLERの形成機構について

LERがポリシリコンの結晶粒界が強い影響を受けてい

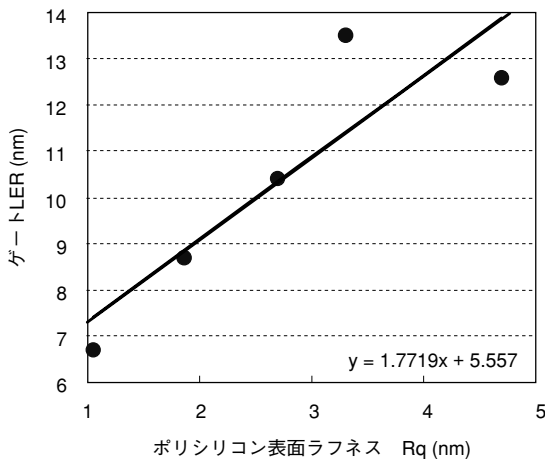


図8 LERに対するポリシリコン表面ラフネス依存

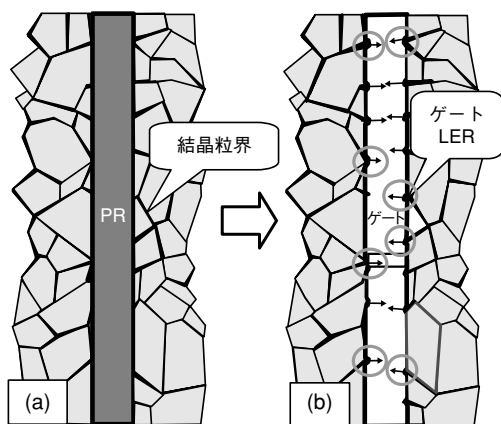


図9 ゲート上部から見たLER形成機構
(a) エッチング前のポリシリコンゲート
(b) エッチングを途中止めし、レジストを除去したポリシリコンゲート

る結果から、推定されるLERの形成機構を図9に示す。図9-aはエッチング前のレジストパターンを上部から見た図で、ポリシリコン表面には多数の結晶粒界が存在する。結晶粒界部のポリシリコンは平坦部に比べ、ポリシリコン表面に入射するエッチングイオンで容易にスパッタされ、結晶粒界部は図9-bの通り、パターン内側にもエッチングが進んでしまう。したがってLERは、結晶粒界がサイドエッチングしながらパターン底部へ転写し形成されると推定される。よって、LER低減を図るには、結晶粒界部のサイドエッチを抑制することが重要であると考えられる。

LERに対するポリシリコンエッチング条件依存

結晶粒界のサイドエッチがLER形成要因の1つであることを検証するため、LERに対するエッチング条件の依存

性を調査した。ポリシリコンメインエッチングのプラズマ制御パラメーターに水準を設けた結果、バイアスパワーとHBrガス流量比で強い依存性が認められ、LERは共に増加に伴い減少した。バイアスパワーが増加すると、ポリシリコン表面に入射するエッチングイオンの方向性（異方性）がより垂直となり、一方、HBrガス流量比が増加すると、ゲート側壁に堆積するエッチング反応生成物が増え、側壁の保護効果が増える。何れにおいても結晶粒界のサイドエッチを抑制する特性となることから、LERはやはり結晶粒界のサイドエッチによる影響を受けていると考えられる。

あ と が き

3-D AFMを用いたゲート側壁部ラフネスの直接測定によって、ゲートLERを精度良く定量化することができた。その結果、LERの形成はリソグラフィーだけでなく、ポリシリコンの結晶性やエッチング条件の影響も受けていることが分かった。

エッチングによるLERの低減化技術としては、ゲート形成工程で最大となるレジストのLERが、BARCエッチングで堆積するポリマーによって大幅に減少することから、ラフネスを決めるエッチングガスの最適化が重要となる。また、ポリシリコンの結晶粒界のサイドエッチ抑制もLERを低減させることから、ポリシリコンのエッチング特性は高い異方性、もしくは強い側壁保護効果が求められる。

今後のゲートプロセス開発は、レジストのLER低減、ゲート電極膜の結晶粒界の低減に加えて、LERの形成機構に応じたエッチング条件の最適化が重要となる。◆◆

参考文献

- 1) L.H. A.Leunissen,et.al., Proc. DPS2004, 1-01
- 2) Masaru Kurihara,et.al., Proc. DPS2004, 1-02

筆者紹介

- 谷畑篤史：Atsushi Yabata. 宮城沖電気株式会社 開発部要素技術開発チーム
 小池理：Osamu Koike. 宮城沖電気株式会社 開発部ドライバプロセス開発チーム
 橋本潤：Jun Hashimoto. 宮城沖電気株式会社 開発部要素技術開発チーム
 倉知郁生：Ikuro Kurachi. 沖電気工業株式会社 シリコンマイクロデバイスカンパニー WP生産本部