

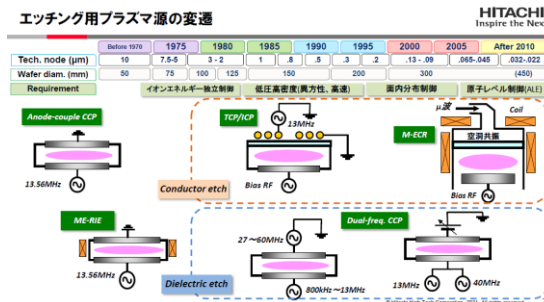
第三回 エッチング用プラズマ源の変遷 ～過去を紐解き未来に繋げる～ 前田賢治

2021年12月11日(土) 9:00～ モデレータ 石川 健治

概要

半導体デバイス製造にプラズマプロセスが大きな役割を果たすようになってから、はや三十数年。リソグラフィ技術とプラズマプロセス技術が両輪となり、デバイス微細化の進展を今もなお強力に牽引している状況であろう。本講義では、これまでのエッチング装置技術、プラズマ制御技術の変遷を解説し、未来に繋げる議論をもちたいと思う。

エッチング用プラズマ源は、過去の開発の長い歴史を経て、現在では大別すると導電材料の加工に使われる「誘導性結合プラズマ (TCP/ICP)」や「マイクロ波電子サイクロトロン共鳴 (M-ECR)」と、絶縁材料に深い孔を掘る用途に使われる「二周波重畳容量性結合プラズマ (Dual frequency CCP)」の二つに集約されている。これらの特徴を解説したので、クイズ形式でその理解を各自確かめて欲しい。



代表的なエッチング用プラズマ源の概略

方式	ICP/TCP	DF-CCP(VHF)	μ波ECR
模式図			
ソース周波数	2.0 - 13.56 MHz	60 - 200 MHz	2.45 GHz
波長 λ / 2 (真空中)	75 - 11 m (λ/2 < 450 mm)	2.5 - 0.75 m (λ/2 < 450 mm)	0.06 m (λ/2 < 450 mm)
プラズマ源の特徴	<ul style="list-style-type: none"> 誘導電場でプラズマ維持 Gap 100~150mm 低圧・高密度 モード分けモード コンタクタエッチング 	<ul style="list-style-type: none"> シースでの統計加熱 Gap 20~60 mm 中圧・中密度 絶縁膜エッチング 	<ul style="list-style-type: none"> ECR加熱 Gap ~240 mm 低圧・高密度 磁場で分布制御 コンタクタエッチング
プラズマ分布制御ノブ	2系統アンテナ	Gap調整	<ul style="list-style-type: none"> 増幅制御 (ECR高) μ波パワー

デバイスを作製するために使われるエッチング装置には、その機能として加工性能（形状制御性、材料高選択比、ローディング (RIE-Lag) 抑制、粗密差抑制）の制御が求められる。その実現の為には、プラズマ源の各種制御技術がつかわれており、Time modulation bias, パルス変調プラズマ, ガスパルスなどの手法について解説した。時間変調されるプラズマ源では、Off-time 時に反応生成物の排気が促され、またガスパルスでは表面改質とエッチングのステップを独立に制御できるため、加工形状の垂直性やパターン粗密差による加工形状差も改善できる。

最新の学会での報告を何例か紹介した。シリコン窒化膜のエッチング除去を材料高選択的に精密に制御して行う方法として最近では、サイクルプロセスによる原子層レベルエッチング (ALE) が使われる。この ALE 技術について、材料選択的に表面を改質させ、その改質層をイオン照射によって実現する方法、次ぎに、改質層を赤外ランプ加熱により除去する方法を紹介した。

本講義では、エッチング用プラズマ源の変遷から、そのプラズマ源の制御技術、さらに ALE 手法の取り組みについて紹介した。将来的に鍵となる技術には、新材料や新構造に対応する ALE 手法が挙げられるだろう。その一方で、プラズマ源にも表面反応の制御においても膨大な制御パラメータを取り扱っていかねばならず、機械学習の活用には期待がもたれる。しかしながら、機械学習といえども、学習させる実験条件がパラメータを決め、予測の精度にも大きく影響する。そのことから、現象理解 (計測科学) と装置技術 (応用・産業化)、そして AI 技術 (情報科学) の三位一体の使いこなしが今後の展望を開くに違いない。

謝辞 本資料を纏めるにあたり、(株)日立ハイテクの伊澤勝博士、(株)日立製作所の篠田和典博士、松井都博士、Hitachi High-Tech America, Inc.の石井洋平博士、関係者の皆さまに感謝の意を表す。

付録

参考文献

Time modulation bias について T. Ono, et al, Jpn. J. Appl. Phys. 38, 5292 (1999)
パルス変調マイクロ波 ECR について M. Matsui, et al, 61st AVS Symposium (2015)
ガスパルスについて M. Izawa, et al., ECS Transactions, 66(4), (2015) pp. 143-150
異方性 ALE (SiN 向け) Y. Ishii et al, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 06HB07 (2017)
等方性 ALE (SiN 向け) K. Shinoda et al., Appl. Phys. Express 9, 106201 (2016)
等方性 ALE (TiN 向け) K. Shinoda et al., J. Phys D: Appl. Phys. 52, 475106 (2019)

エッチング用プラズマ源にまつわるクイズ

1. 平行平板型プラズマ(CCP)において、ソース電力一定でソース周波数を上げた場合、プラズマ密度は(高くなる・低くなる・変わらない)。またそれは何故か？
2. 誘導結合型プラズマ(ICP)において、ソース電力一定でソース周波数を上げた場合、プラズマ密度は(高くなる・低くなる・変わらない)。またそれは何故か？
3. 誘導結合型プラズマ(ICP)において、誘導アンテナのターン数を増やした場合、プラズマ密度は(高くなる・低くなる・変わらない)。またそれは何故か？
4. ECR プラズマ源において、ソース周波数(一般的には 2.45GHz)を下げた場合、ECR 共鳴を起こすための磁場強度は(強くなる・弱くなる・変わらない)。
5. あるプラズマ源において、RF バイアス電力一定のもと、バイアス周波数を上げると、ウエハに入射するイオンエネルギーは(上がる・下がる・変わらない)。それは何故か？