

φ300mm 基板対応固体ソースプラズマ成膜装置の開発

Development of the ECR Plasma Sputtering System
for φ300 mm Substrates田中 こずえ
Kozue Tanaka鳥居 博典
Hironori Torii博士(工学) 嶋田 勝
Dr. Masaru Shimada

要 旨

JSW アフティ社が製造販売している固体ソース ECR (Electron Cyclotron Resonance) プラズマ成膜装置はその優れた膜質から様々な電子デバイスに採用されている。これまで枚葉処理を行っていた半導体レーザなどの小口径化合物半導体分野において、生産性向上のため一度に複数個の処理を行うバッチ処理が求められるようになってきた。またスマートフォン以外にも搭載され始めた SAW フィルタ市場では量産性向上に伴い、LN (LiNbO₃)、LT (LiTaO₃) 基板の大口径化が検討されている。そこで、小口径基板のバッチ処理から大口径の基板処理まですぐれた膜厚均一性成膜に対応できる装置としてφ300mm 基板対応の ECR プラズマ成膜装置を開発し、代表的な ECR 膜について特性評価を実施した。その結果、装置を大型化することなく膜厚分布の高均一化を実現し、φ300mm 全面で従来装置と同様の高品質薄膜形成を確認できた。

— Synopsis —

The solid-source ECR (Electron Cyclotron Resonance) plasma systems, which have been developed and manufactured by JSW-AFTY Corporation, are used for various electronic devices because of its excellent film quality. In the field of small diameter compound semiconductors such as laser diodes, single wafer processing has been adopted, but recently batch processing has been demanded to improve throughput. On the other hand, in the field of SAW devices, the enlargement of the LT and LN substrates have been considered for increasing productivity. We developed the ECR plasma system for φ300 mm substrates in order to realize the batch processing of small substrates and processing of a large substrate. In this paper, the principal ECR films were deposited and evaluated. As a result, we succeed to get good uniformity and excellent film quality in the whole area.

1. 緒 言

JSW アフティ社が製造販売している固体ソース(スパッタリングターゲット)を用いた ECR プラズマ成膜装置は、その優れた膜質から⁽¹⁾半導体レーザの端面コートやハードディスクヘッドの絶縁膜など様々な電子デバイスに採用されている。また、無加熱でも緻密な膜を形成できるため、高周波フィルタのひとつである SAW (Surface Acoustic Wave) デバイスの保護膜として SiN 膜が採用されている。近年、SAW フィルタはスマートフォンの広い周波数帯への対応の

為一台あたりの搭載数が増加している⁽²⁾ほか、自動車用機器、医療機器などにも適用されはじめ急速に需要が高まっている。SAW デバイス市場の拡大により、生産ラインは4インチから6インチ基板へと大口径化の検討が進められる。一方、半導体レーザも新たな通信インフラの拡大、自動車向けヘッドライト、レーザディスプレイなど生産性が求められるアプリケーションに採用され始め、ECR プラズマ成膜装置が使われているレーザ出射面のコート工程でもバッチ処理によるスループット向上を求める傾向がある。現在 JSW アフティ社が製造販売している ECR プラズマ成膜装

置は最大φ200mm 基板対応までであるが、さらに大口径の基板から小口径のバッチ処理まで対応できる装置としてφ300mm 基板対応の ECR プラズマ成膜装置を開発した。本報告では、装置の構成法及び代表的な ECR 膜の特性評価結果について述べる。

2. 既存 ECR 成膜装置

図 1 に、固体ソース ECR プラズマ成膜装置（大口径対応）の基本構成を示す⁽¹⁾。本装置は、真空チャンパ内に ECR プラズマを発生させる ECR プラズマ室と、成膜基板の置かれる成膜室とから成る。ECR プラズマ室で発生したプラズマ中の電子は磁力線の周りを回転しながら磁場勾配に沿って成膜室へ移動するが、イオンもまた電子の作る電位に引きずられるように成膜室へ引き出される。このとき ECR プラズマ室出口に設置した円筒型ターゲットに高周波 (RF: Radio Frequency) 電力を印加しプラズマ中のイオンをターゲットに衝突させることで、スパッタリング作用により基板上に薄膜が形成される。ここでターゲットに純金属を用い酸素ガスや窒素ガスを供給すると、活性な ECR プラズマにより基板上で酸化または窒化反応が起こり、無加熱でも高品質な金属酸化膜・窒化膜を得ることができる。

一方、プラズマ室の大きさはマイクロ波 (2.45GHz) の波長程度 (12.2cm) に制限され大型化が難しいという問題がある。そこで、プラズマ源を大型化することなく高い膜厚均一性を得るために ECR プラズマ室を傾斜配置させ、基板を回転させる機構を持たせた。

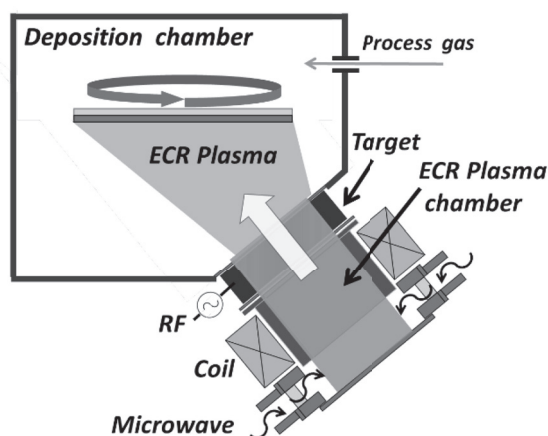


図1 固体ソース ECR プラズマ成膜装置（大口径対応）

さらに、図 2 に示すように ECR プラズマ成膜装置は基板位置を上下に移動することが可能で、スパッタターゲットの消耗やプロセス条件によって膜厚均一性を保持できる構造を持っている。ここで、ターゲット - 基板中心間距離を T-S 間距離、ターゲット中心から基板中心のずれ量を X_s と呼ぶこととする。

図 3 に、φ200mm 対応 ECR プラズマ成膜装置で Si 基板上に成膜した SiN の成膜速度分布を示す。ポジションを変えることにより分布形状も変化し、最も成膜特性の良いポジション 6 ではφ200mm 面内で±1%以下と非常に優れた膜厚均一性を得ることができていることがわかる。

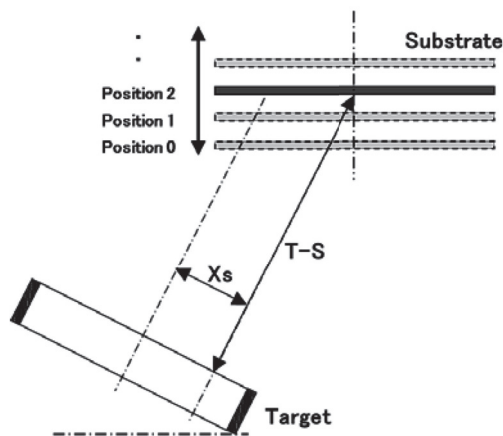


図2 ECR プラズマ成膜装置の基板移動機構

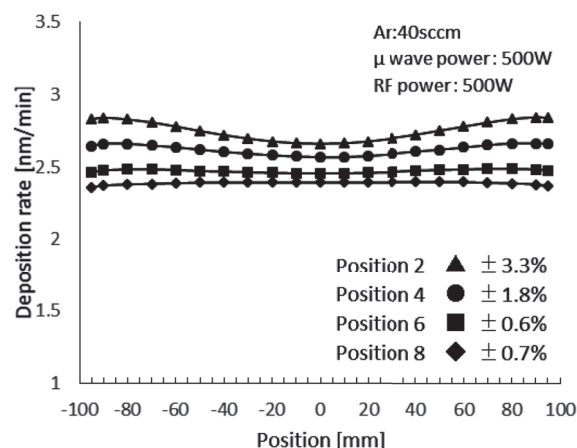


図3 AFTEX-8800 の SiN 膜成膜速度分布

3. φ 300mm 対応 ECR 成膜装置

これまで JSW アフティ社が製造販売してきた ECR プラズマ成膜装置は、上下に移動できる基板位置調整機構により適当なポジションで成膜することで優れた膜厚均一性を得ることができたが、φ200mm より大きな基板サイズでは基板位置の上下調節だけでは十分な膜厚均一性が得られないことがシミュレーションにより予測された。

そこで今回開発したφ300mm 対応 ECR プラズマ成膜装置（図 4）は上下（Z 方向）移動機構に加え、水平（X 方向）移動機構も備えた構造とした。さらに各パラメータは 1mm ずつ移動させることができ、成膜位置を自由に変えることが可能である。すなわち図 5 に示すように X_s を固定し T-S 間距離だけを変化させることや、その逆に T-S 間距離を固定し X_s だけを変化させることができる。

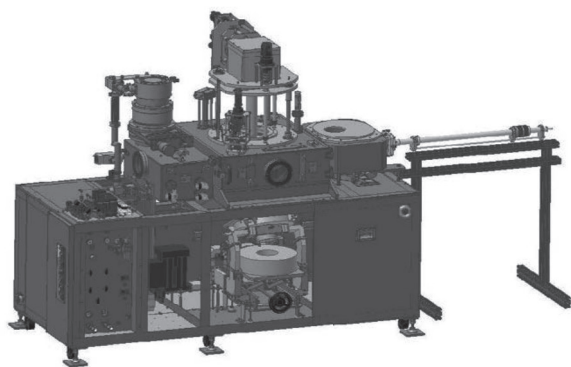


図4 φ300mm 対応 ECR プラズマ成膜装置

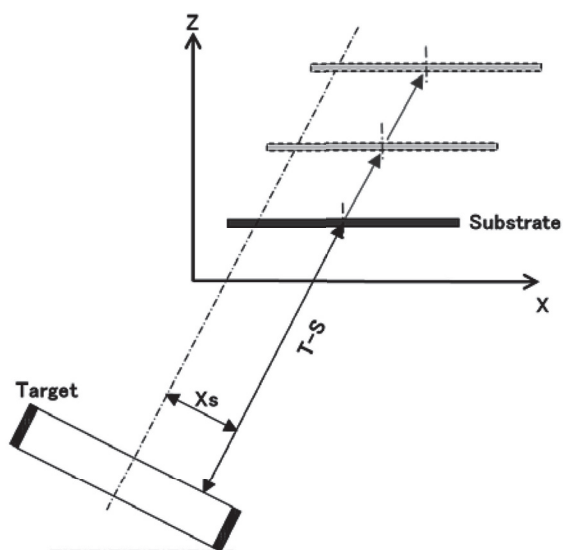


図5 φ300mm 対応 ECR プラズマ成膜装置の基板移動機構

4. 膜厚シミュレーションと実験比較

JSW アフティ社開発のシミュレーションソフトを用いて求めた SiN 膜の成膜速度分布 (±140mm φ) を、図6に示す。モデルには、Si 系でよく使われているアンダーコサイン分布を適用した。T-S 間距離を 250mm に固定し Xs を 68mm、70mm、72mm と変化させると、面内分布が ±2.7%、±3.1%、±3.5% と悪化する。そこで T-S 間距離を 230mm、250mm、270mm に固定し、それぞれ Xs を変化させたときの面内均一性を図7に示す。同時に、同条件で実際に SiN 膜を成膜し分光エリプソメトリで測定した実験結果も示す。いずれの結果も Xs を大きくするほど (あるいは小さくするほど) 面内均一性が改善するわけではなく、ある Xs 値で最小値をもつことがわかる。例えば T-S 間距離が 230mm のとき、最も面内分布が良くなる Xs 値はシミュレーションで 69mm、実験では 70mm である。同様に T-S 間距離が 250mm ではシミュレーションが 69mm、実験は 70mm、T-S 間距離が 270mm ではシミュレーションが 66mm、実験は 69mm であり、シミュレーション値と実験値で同様の結果となっている。

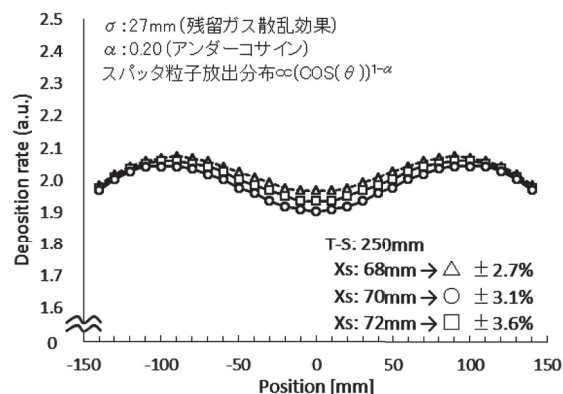
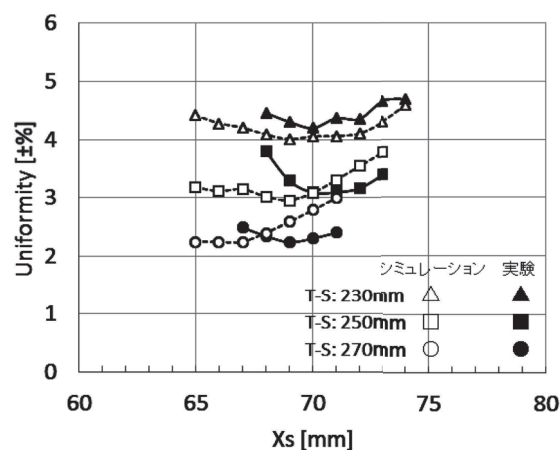


図6 膜厚シミュレーションによる SiN 膜成膜速度 (膜厚) 分布



シミュレーション
 $\sigma: 27\text{mm}$ (残留ガス散乱効果)
 $\alpha: 0.2$ (アンダーコサイン)
 スパッタ粒子放出分布 $\propto(\cos(\theta))^{1-\alpha}$

実験
 Ar:40sccm
 μ wave power:500W
 RF power:500W

図7 SiN 膜面内均一性と基板位置の関係

また、図8に示すように、T-S 間距離が 250mm で最も面内分布が良くなる Xs 値での面内分布形状もシミュレーションと実験でよく一致することがわかる。

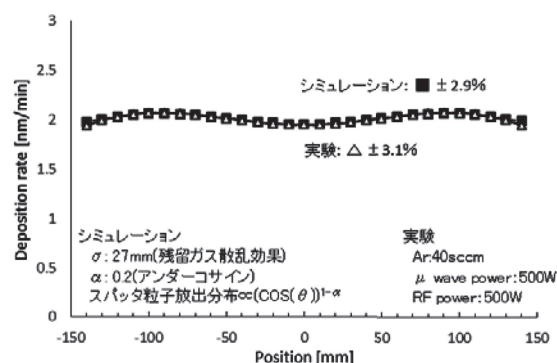


図8 膜厚シミュレーションと実験における SiN 膜成膜速度の面内分布比較

5. 各種 ECR 膜の成膜特性

固体ソース ECR プラズマ成膜法は、ECR プラズマの高密度プラズマを用いた反応性を利用することにより、各種ターゲットとプロセスガスの組み合わせで種々の膜を形成することが可能である。例えば SiN 膜の形成には Si ターゲットと Ar/N₂ の混合ガスを用いるが、N₂ ガスの代わりに O₂ ガスを用いることで SiO₂ 膜の形成が可能となる。また Ar/N₂/O₂ の混合ガスにすると SiON のような酸窒化膜を形成することもできる。表 1 に、ECR プラズマ成膜装置で主に使用されている膜種とそのターゲット材料、用途を示す⁽¹⁾。ここでは代表的な ECR 膜を成膜し、φ 300mm 面内において特性評価を行った結果を報告する。

表 1 代表的な ECR 膜とそのターゲット材料および用途

膜種	薄膜	ターゲット	用途
酸化膜	Al ₂ O ₃	Al	光学膜 絶縁膜
	SiO ₂	Si	光学膜 絶縁膜
	ZrO ₂	Zr	光学膜
	HfO ₂	Hf	ゲート絶縁膜 電極
窒化膜	AlN	Al	光学膜
	SiN	Si	光学膜 保護膜
	ZrON	Zr	ゲート絶縁膜
	HfON	Hf	ゲート絶縁膜
酸窒化膜	AlON	Al	光学膜 屈折率制御用途
	SiON	Si	屈折率制御用途
透明導電膜	ITO	ITO	透明電極

5.1 面内均一性

図 9 は、φ 300mmSi 基板上に成膜した SiN 膜の成膜速度の面内分布である。Xs は、各 T-S 間距離で面内均一性が最も良くなる場合の値とした。このときの成膜速度は、T-S 間距離 230mm で 2.35nm/min、250mm で 2.01nm/min、270mm で 1.66nm/min であり、φ 300mm 面内の均一性はそれぞれ ± 4.2%、± 3.1%、± 2.2% である。T-S 間距離が離れるほど成膜速度は遅くなるが、面内均一性は向上し、従来装置の出荷スペック ± 3.0% を満たすことができた。また、成膜速度は 6 インチ (φ 150mm) 対応装置で約 6.5nm/min であり開発機は 30% 程度となるが、基板面

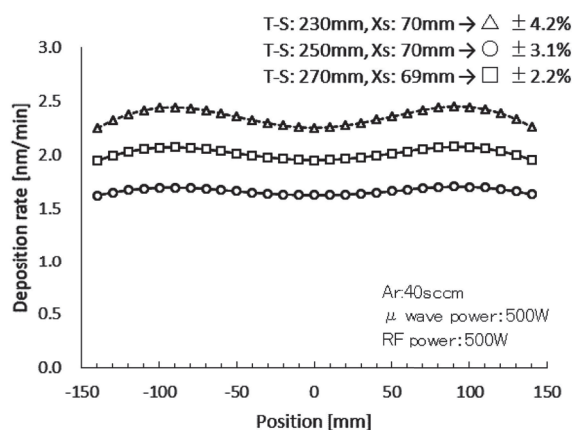


図 9 SiN 膜の成膜速度の面内分布

積が 4 倍となるため成膜効率は約 20% 向上する。

図 10 に、φ 300mmSi 基板上に成膜した SiO₂ 膜の T-S 間距離 233mm における Xs と面内均一性の関係を示す。SiN と同様に均一性が最小となる Xs 値が存在し、酸化膜についても窒化膜と同様の傾向があることがわかる。

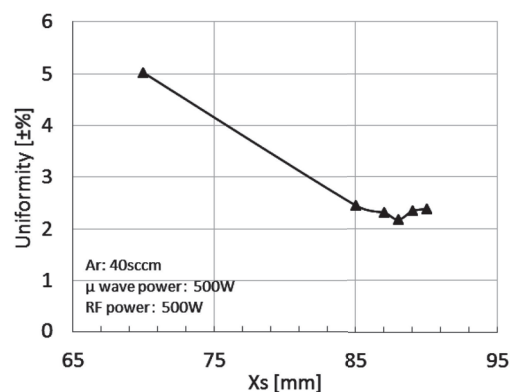
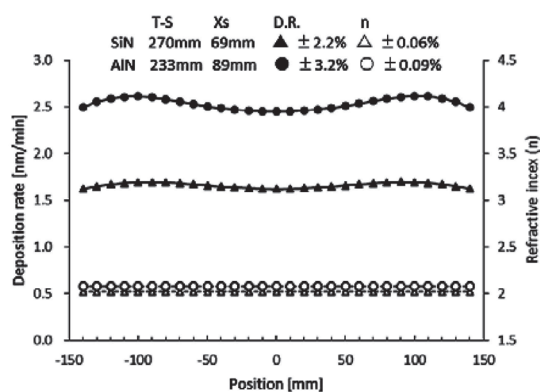
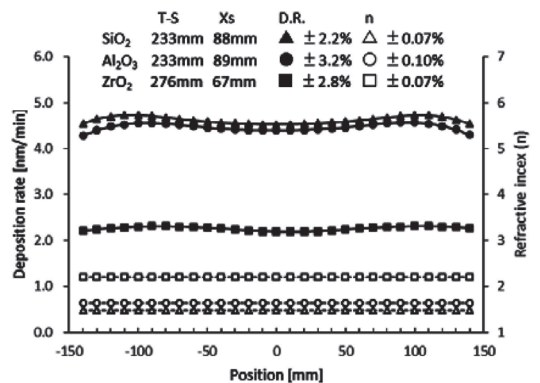


図 10 SiO₂ 膜の基板位置と面内均一性の関係

ここで代表的な ECR 膜の成膜速度 - 屈折率の面内分布を、図 11 (a), (b) に示す。基板位置は、稼動範囲内において可能な限り φ 300mm (E.E.=10mm) 領域の面内均一性が良好となる位置とした。φ 300mm 面内で ± 3.2% 以下と、非常に優れた成膜速度均一性が得られている。また、屈折率均一性は ± 0.1% 以下を実現しており、面内で均質な膜を形成していることが期待される。



(a) 窒化膜



(b) 酸化膜

図 11 代表的な ECR 膜の成膜速度 - 屈折率面内分布 (Ar:40sccm, μ wave power : 500W, RF power : 500W)

5.2 組成比

面内の膜質比較のためにウエハ中心部 (Center) と外周部 (Edge) をそれぞれラザフォード後方散乱分光法 (RBS: Rutherford Backscattering Spectrometry) で評価し、膜中組成比を比較した。表 2 に示すように面内で組成ずれは見られず、従来装置で成膜した場合と同様に化学量論比に近い良質な膜が得られている。これは純度の高いターゲットの使用や NH_4 を必要としない窒化膜の成膜方法により不純物が混ざりにくいという ECR プラズマ成膜法の原理に従っている。

表 2 RBS 評価結果

	平均原子数比					
	N / (Al or Si)			O / (Al, Si or Zr)		
	Center	Edge	従来装置	Center	Edge	従来装置
Si_3N_4 (SiN)	1.35	1.36	1.31			
AlN	1.00	1.01	0.98			
SiO_2				2.00	2.00	
Al_2O_3				1.49	1.49	1.48
ZrO_2				1.96	1.96	

5.3 平坦性

半導体レーザーなどで使用される光学多層膜では、表面粗さが大きくなると界面で光散乱が発生し性能劣化を引き起こす可能性があるため、膜の平坦性は非常に重要である。そこで Si<100> 基板上に 200nm 成膜したサンプルのウエハ中心部 (Center) と外周部 (Edge) の表面平坦性を、原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscopy) で測定した。従来装置及び RF スパッタ装置で膜厚 100nm 成膜し AFM 測定した結果との比較を、図 12 に示す。SiN, SiO_2 , Al_2O_3 は、従来装置と同様に Si 基板レベルの平坦性が面内依存なく得られた。一方、AlN, ZrO_2 の表面粗さは、JSW アフティ社の従来装置より大きい RF スパッタ装置と比べると小さい。これらの膜は材料の特性として結晶性を持つため、表面粗さは結晶粒の大きさに影響されていると考えられるが、詳細については調査中である。

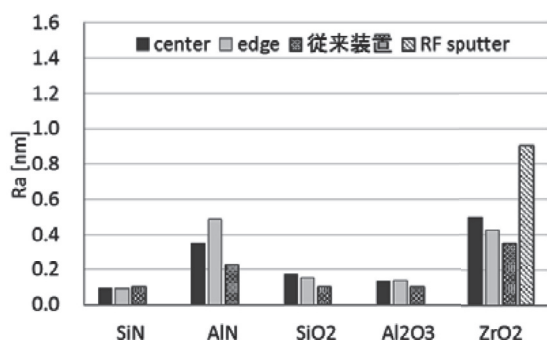


図 12 AFM による表面粗さ測定結果

5.4 AlN 膜の結晶性

AlN 膜の結晶性を調べるため、φ 300mm 面内の中央 (Center)、端 (Edge) に c 面サファイア基板を配置して AlN 膜を成膜し、X 線回折評価を実施した。図 13 のように、 θ - 2θ 回折パターンは基板中央と端のどちらも AlN (002) のピークのみを示しており、単一配向の結晶性膜であることがわかる。GaN 系半導体レーザーの端面コートに結晶性の高い AlON 膜を採用することで特性が向上する⁽³⁾という報告もあり、今後は AlON の結晶性についても評価する予定である。

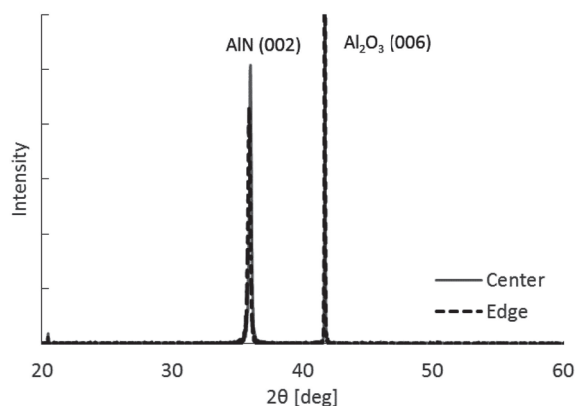


図 13 AlN 膜の θ - 2θ 回折パターン

5.5 硬度

SiN や ZrO_2 は、高い可視光透過性と高い硬度からさまざまなデバイスの保護膜として用いられている。そこで、保護膜として必要十分な膜硬度を持ち合わせているか評価を行った。硬度の評価には一般にマイクロビッカース法などが知られているが、薄膜の測定には基板の影響を受け正確な測定値が得られにくい。本評価では、超低荷重で正確な膜硬度を得られるナノインデンテーション法を用いた。

Si 基板上に 300nm 成膜したサンプルのウエハ中心部 (Center) と外周部 (Edge) に最大押し込み荷重 20mN で測定し、得られた薄膜の機械的特性を表 3 に示す。いずれの膜も面内で硬度の違いはみられず、これまでに報告されている機械的特性に近い値である。

表 3 ナノインデンテーション法による機械的特性評価結果

	Hardness [Gpa]			Young's modulus [Gpa]		
	Center	Edge	Literature	Center	Edge	Literature
SiN	19.55	20.56	-	205.42	210.87	97-370 ⁴⁾
AlN	18.81	21.43	10.56-24.79 ⁵⁾	225.86	240.43	104-243.5 ⁵⁾
SiO_2	9.65	9.24	-	98.03	96.13	-
Al_2O_3	10.88	10.84	-	173.57	172.30	-
ZrO_2	11.71	12.54	-	185.47	187.80	-

6. 結 言

JSW アフティ社で新規開発したφ300mm 基板対応の ECR プラズマ成膜装置と、その成膜特性について紹介した。新たに導入した上下・水平移動機構により、基板位置をフレキシブルに稼動させることで膜厚分布の高均一化を実現し、φ300mm 全域で従来装置と同様の高品質な薄膜を形成することができることを確認した。本装置により、SAW デバイスに代表される LT、LN 基板の大口径化対応や半導体レーザに代表される小口径基板のバッチ処理による生産性向上が期待される。

参 考 文 献

- (1) 鳥居博典 他：固体ソース ECR プラズマ装置の電子デバイス向け保護膜への応用, 日本製鋼所技報, No.66 (2015), p142-148
- (2) SEMI 通信：2016 年 6 月号 Report1
- (3) T. Kamikawa, et al.: Highly reliable 500mW laser diodes with epitaxially grown AlON coating for high-density optical storage, Appl. Phys. Lett. 95 (2009), 031106
- (4) Hyun-Jin Oh, et al.: Influence of Gas Flow Ratio in PE-CVD Process on Mechanical Properties of Silicon Nitride Film, IEEJ Trans 3 (2008), 281-289
- (5) Padmalochan Panda, et al.: Reduction of residual stress in AlN thin films synthesized by magnetron sputtering technique, Mater. Chem. Phys. Vol.200 (2017), 78-84