

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「次世代FPD生産用のオゾン添加常圧CVDプロセスの開発」

研究開発成果等報告書

令和元年5月

担当局 関東経済産業局

タマティーエルオー株式会社

目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 第4-6世代対応の試作機の開発
 - 2-1-1 反応システム機構の開発
 - 2-1-2 ガラス基板加熱システムの開発
 - 2-1-3 ガラス基板搬送システムの開発
 - 2-1-4 オゾン添加常圧CVD全体システムの設計製作
 - 2-1-5 ガスヘッドの開発
 - 2-1-6 ガス排気システムの開発
- 2-2 成膜特性値評価
 - 2-2-1 SiH₄ と O₃ の低温による Si 酸化膜の均一な成膜
 - 2-2-2 Si 酸化膜の膜質の最適化とデバイスへの展開

第3章 全体総括

- 3-1 複数年の研究開発成果
- 3-2 研究開発後の課題
- 3-3 事業化展開

第1章 研究開発の概要

1-1 背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景】

FPD は TV、タブレット、スマートフォン等に大量に使用され、今後も市場拡大が期待されている。その一方で、FPD の大型化・高精細化が進む中、更なる低コスト化、高品質化が求められている。FPD の製造プロセスではパターン形成の為に露光・エッチング、導電体層電極形成の為にスパッタリング等の様々な技術が用いられるが、トランジスタのゲート絶縁膜、層間絶縁膜、保護膜として機能する絶縁膜も多く使われる。このような絶縁膜の形成方法としては、ガラス上へ成膜するために低温プロセスが必須であり、現状、第4世代以上の大型 FPD では、プラズマ CVD 法(PECVD) やスパッタリング法による薄膜形成が一般的である。

・ガラス基板のサイズ比較

第4世代: 680mm × 880mm

第5世代: 1000mm × 1200mm

第6世代: 1500mm × 1850mm、大型ディスプレイ対応、小型ディスプレイの取数増加

FPD 製造プロセスではモノシラン(SiH_4)、亜酸化窒素(N_2O)、テトラエトキシシラン(TEOS)を用いたプラズマ CVD 法またはスパッタリング法により、ゲート絶縁膜、保護膜を形成する。この方式では、①装置の大型化、プラズマ発生電源、真空機器類の設置、高価な反応・クリーニングガスの消費による投資コスト、ランニングコスト増によるコストアップ、②電子損傷による導電体層へのダメージ発生、異常放電によるパーティクルの発生とこのような品質低下を回避する為のプロセス付加によるコストアップが課題となっている。特に、今後高精細、低消費電力化に向けて導入が加速される酸化物半導体(例えば IGZO)のプロセスでは低温化、低損傷化は更に必須の技術である。

(2) 研究目標

第4世代以上の大型 FPD への良質な Si 酸化膜が従来のプラズマ CVD 法やスパッタリング法よりも低コストで実現できれば、FPD 製品の開発及び市場展開がさらに加速される。特に、用途の広い高精細なタブレットやスマートフォンの低コスト化、高品質化が実現できる。

現在、第4世代以上の大型 FPD 基板の薄膜形成に一般的に使われているプラズマ CVD 法やスパッタリング法は、複雑な真空系やプラズマ発生電源を必要とし、装置の大型化に伴い装置価格やランニングコストが大幅に増加している。また、プラズマ CVD 法やスパッタリング法では、電子損傷やパーティクル発生等の膜質的な課題もあり、TFT の性能の低下や品質低下を招いており、これらを防止するために付加的な工程を導入する必要がある為、製造コストの増加の原因となっている。

従来、プラズマもしくはスパッタでのみしか成膜できなかった FPD 基板対応の酸化膜の成膜を低温常圧 CVD プロセスにより、市場規模の大きい第4世代以上の FPD にも適用し、製造コストの大幅な削減と品質の向上を図っていく。

(3) 開発項目と技術的目標値

低温常圧 CVD 膜を第 4 世代以降の FPD に対応させる為、以下のプロセス・装置開発を行う。

【1】第 4-6 世代対応の試作機の開発

- 【1-1】反応システム機構の開発（高稼働率、高品質性を維持する為のガスヘッド、排気システムの自動 PM(Preventive Maintenance)機構の開発。）
- 【1-2】ガラス基板加熱システムの開発（1500×1850mm ガラス基板(100～500 μ)を±5°Cで加熱するシステムの開発。ヒーター制御方法、分割ヒーター数、ガラス吸着機構等の検討。）
- 【1-3】ガラス基板搬送システムの開発（1500×1850mm のガラス基板のヒーターへの装填、脱着機構とガスヘッド下への搬送システムの開発。）
- 【1-4】オゾン添加常圧CVD全体システムの設計製作（ガス制御、オゾナイザー、防塵用トンネル、ガス安全防護カバー、オペレーションパネル等の付帯機能を集約し、それぞれ大型 FPD 基板への低温成膜用に最適化して構築する。）
- 【1-5】ガスヘッドの開発（成膜範囲 1500mm で±10%以内の膜厚均一性が達成可能なガスヘッドの開発。ガスプレートの最適形状、枚数、重量、材質等の検討。）
- 【1-6】ガス排気システムの開発（成膜範囲 1500mm で±10%以内の膜厚均一性が達成可能なガス排気システムの開発。移動速度 500～1500mm/分での最適な排気管の構造、形状、重量、加工性特性、材質等の検討。）

【2】成膜特性値評価

【2-1】SiH₄と O₃の低温による Si 酸化膜の均一な成膜

目標値：①膜厚均一性：±10%、@膜厚：50～200nm

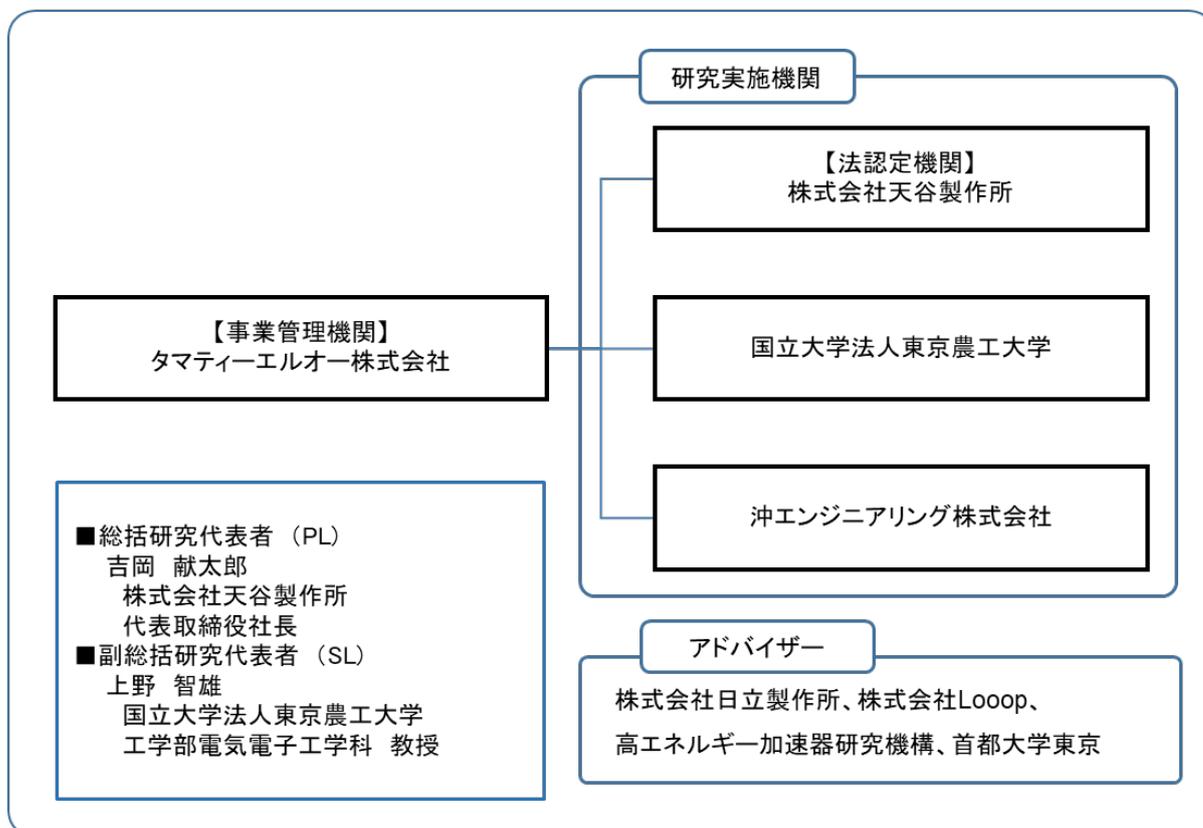
【2-2】Si 酸化膜の膜質の最適化

目標値：

- ①膜応力：±150MPa、
- ②エッチング速度：≤150nm/分（1%希釈 HF @25°C）、
- ③屈折率：1.450～1.470
- ④FT-IR：1060～1080-cm 内に Si-O 主のピークがあること、
- ⑤耐圧特性：3MVcm⁻¹ 以上
- ⑥ステップカバレッジ：30%以上(@アスペクト比 1:5)
- ⑦フラットバンド電圧：6.0V 以内
- ⑧CV ヒステリシス幅：1.0V 以内
- ⑨界面準位密度：8.0E11/cm² 以内

1-2 研究体制

株式会社天谷製作所が量産試作機の開発を行い、成膜特性値評価は、株式会社天谷製作所、東京農工大学、沖エンジニアリングで行った。アドバイザーからは、膜質性能の市場要求など専門的な知見による助言を得て進めた。

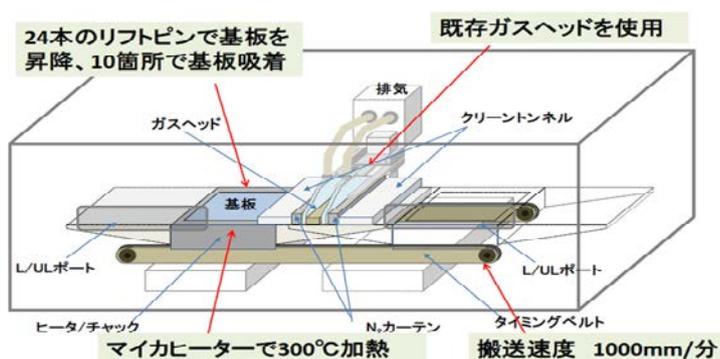


1-3 成果概要

【1】第4-6世代対応の試作機の開発

・平成28年度に、第4-6世代対応の試作機(FPD用常圧CVD装置)の開発を行ない、平成29年度にはソフトウエアのインストールおよびサブヒーター追加設置を行った。

<開発した装置の仕様の特徴>



<開発した装置の外観>



- ・平成30年度は、試作した第4.5世代対応のFPD用常圧CVD装置で成膜実験を行うなかで、問題点の抽出と改良を行ない、スループット向上、金属汚染対策、面内特性均一化などの装置性能向上を実施した。また、第6世代ガラス基板SiO₂膜成膜システムのガスヘッド・排気ダクトモデルのシミュレーションを行い、リアクター構造を具体化した。

【2】成膜特性値評価

設定した成膜特性の目標値は全て達成していることを確認した。TFT上のパッシベーション膜に適用し従来プロセスと同等であることを確認した。また、I-V特性の更なる改善を行いパッシベーション膜としての適用だけでなく、トランジスタのゲート絶縁膜としての適用が可能になった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

タマティーエルオー株式会社 代表取締役社長 山県通昭

電話:042-631-1325 FAX:042-649-2269

E-mail: yamagata@tama-tlo.com

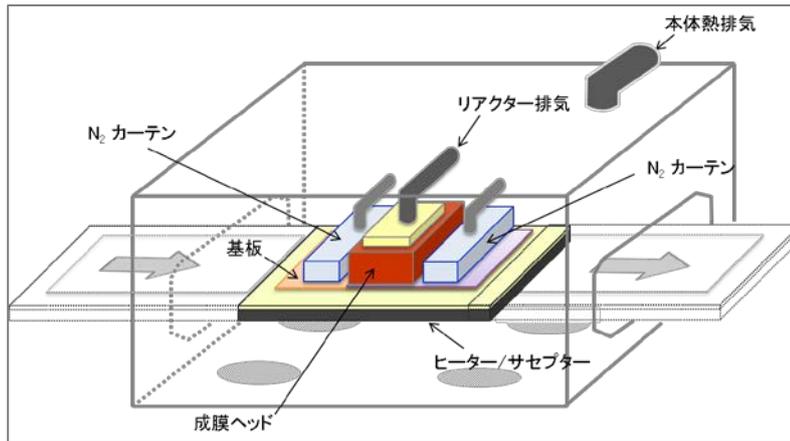
第2章 本論

2-1 第4-6世代対応の量産試作機の開発

2-1-1 反応システム機構の開発

高稼働率、高品質性を維持する為の反応システム機構の開発。SiH₄ と O₃ のガスヘッドと上方排気システムを備えたガラス基板上への成膜が可能な反応炉を開発した。

- ① ガスノズルとガラス基板の平行度および間隔を保持、維持し成膜の均一性を実現
- ② ガスの層流を均一化するための噴出と排気のバランス調整を可能
- ③ N₂ カーテン機構により外気を遮断し、安定した成膜を行なう



反応システムの構成

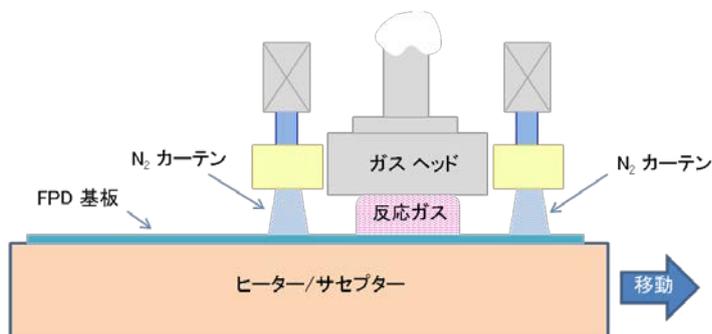
2-1-2 ガラス基板加熱システムの開発

1500×1850mm ガラス基板 (100～500 μ) を ±5°C で加熱するシステムを開発した。

2-1-3 ガラス基板搬送システムの開発

1500×1850mm のガラス基板のヒーターへの装填、脱着機構とガスヘッド下への搬送システムを開発した。

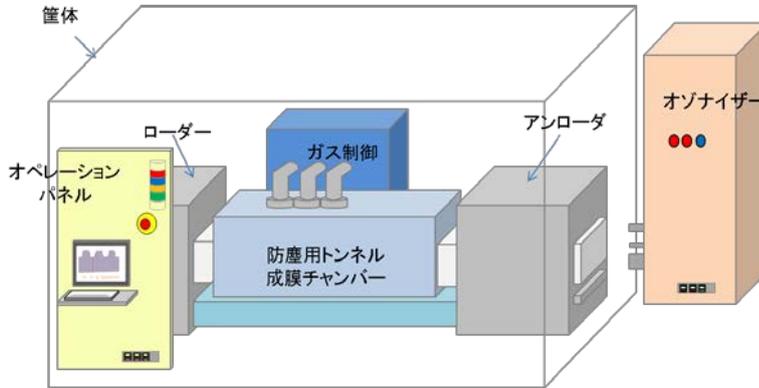
- ① ガス噴出と排気のバランスを考慮し、基板温度を 300°C 以下で精緻な温度制御
- ② ガスヘッドと基板の平行度を保ち、サセプタに移動速度を一定に制御することにより、成膜する Si 酸化膜の膜質の均一性と膜質を確保



搬送システムの構成

2-1-4 オゾン添加常圧CVD全体システムの設計製作

ガス制御、オゾナイザー、防塵用トンネル、ガス安全防護カバー、オペレーションパネル等の付帯機能を集約し、それぞれ大型 FPD 基板への低温成膜用に最適化して構築した。



オゾン添加常圧CVD全体システム

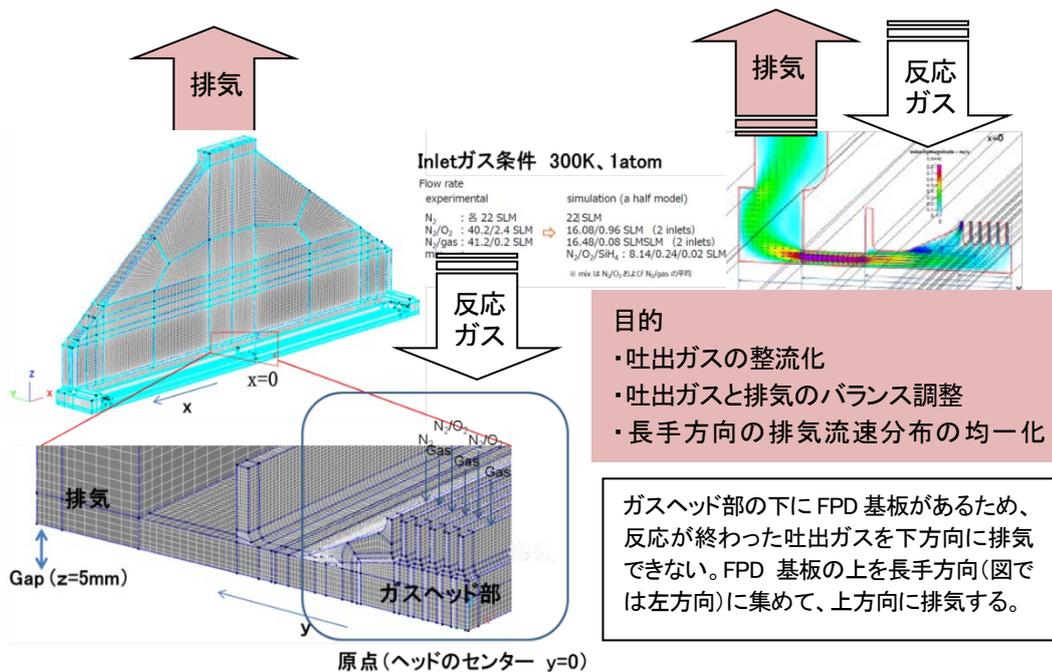
2-1-5 ガスヘッドの開発

2-1-6 ガス排気システムの開発

第6世代向けサイズ(成膜有効幅: 1500mm)のガスヘッド、排気システムのシミュレーションにより、第6世代リアクター構造の絞り込みを行った。

- ・ガスヘッド下面のガス濃度分布
- ・ガスヘッド下面から排気ダクトへのガスの流速
- ・ガスヘッドの温度

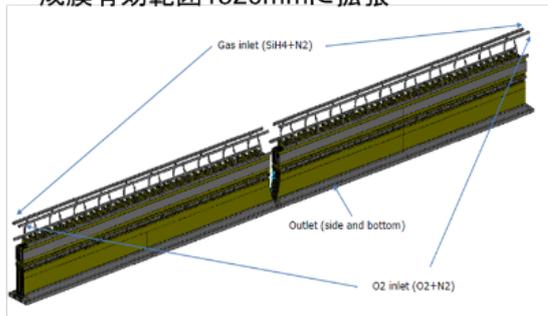
その結果、最適なガスヘッド形状、排気系形状が得られた。



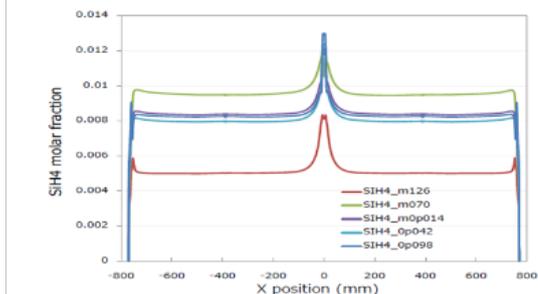
シミュレーションのモデル

<G6ガスヘッドのシュミレーション結果>

G4.5対応ヘッドを対向で並べ
成膜有効範囲1520mmに拡張

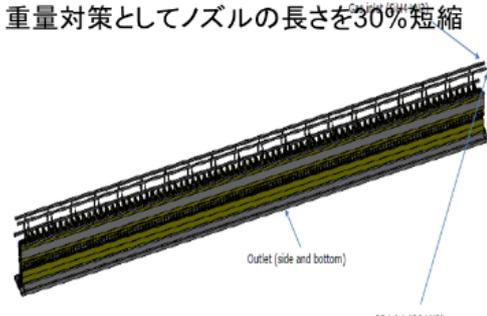


SiH4 molar fraction (under O2 lines) at Z = 2 mm

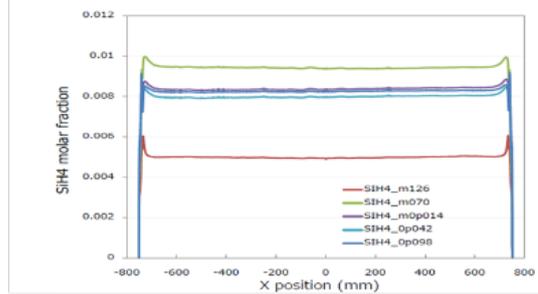


対向部でガス濃度大きく変化し、膜厚均一性の悪化が懸念される

G4.5対応ヘッドの長さを2倍にして、
成膜有効範囲1520mmに拡張
重量対策としてノズルの長さを30%短縮



SiH4 molar fraction (under O2 lines) at Z = 2 mm



成膜有効範囲1500mm (G6) の範囲でガス濃度がほぼ均一であり、安定した膜厚均一性が確保可能と判断される

2-2 成膜特性値評価

2-2-1 SiH₄ と O₃ の低温による Si 酸化膜の均一な成膜

<Si 酸化膜成膜条件への要件>

成膜対象	成膜温度	プロセス条件を最適化	酸化膜の同定方法
Si 基板 (社内デモ機) (成膜実験機)	150°C~ 300°C	①SiH ₄ 流量、O ₂ 流量、O ₃ 濃度等 ガス流量条件 ②ガスノズルと FPD 基板間隔 ③FPD 基板の搬送速度 ④成膜温度、ガス流量、搬送速度等 の条件をフィードバック管理	①エリプソ測定器での 膜厚と屈折率の確認 ②FT-IR、ESCA 等による 主要な Si-O 結合の確認 (1060-1080cm ⁻¹)

プロセス条件 (項目)	最適化目標値
①膜厚均一性	±10%
②膜厚	50~200nm

試作した第 4.5 世代基板対応の試作機によって成膜した試料で、膜厚均一性の評価を行い、目標値を満たしていることを確認した。

2-2-2 Si 酸化膜の膜質の最適化

膜質の基本性能	基本性能の確認と分析		最適条件の目標値
①膜応力	成膜した Si 酸化膜の確認と分析を行う	最適プロセス条件を決定する	±150MPa
②エッチング速度			≤150nm/分(1%希釈 HF @25°C)
③屈折率			1.450-1.470
④FT-IR			1060~1080-cm 内に Si-O 主のピークがあること、Si-H(2300cm ⁻¹ 近辺)の伸縮振動ピークが見られないこと
⑤耐圧特性			3MVcm ⁻¹ 以上
⑥ステップカバレッジ			30%以上(@アスペクト比 1:5)
⑦Vfb とヒステリシス幅			6.0V 以内、1.0V 以内
⑧界面準位密度(Dit)			8.0E11/cm ² 以内

第 4.5 世代基板対応の試作機によって成膜した試料で、膜質の最適化に向けての特性評価と成膜条件を求めた。また、Si 酸化膜の膜質性能の市場要求も変わってきている可能性もあるので、随時、国内外のパネルメーカーのニーズ調査を進め、必要に応じて評価項目を追加する等の見直しを行った。

<評価項目と評価結果>

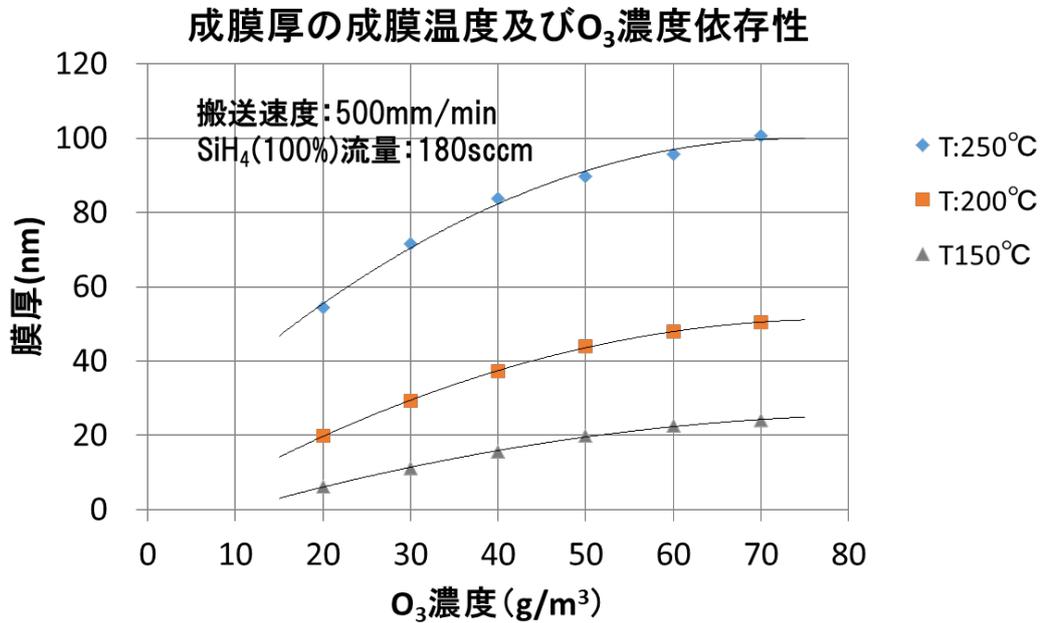
- ・事業計画書で設定した成膜特性の目標値は全て達成していることを確認した。
- ・TFT 上のパッシベーション膜に適用し従来プロセスと同等であることを確認した。
- ・TFT のゲート膜に導入しトランジスタ特性が確認できた。

<評価項目と評価結果>

評価目的	項目	目標値	評価方法	結果	備考
装置性能評価	成膜速度	100nm 以上 @搬送500mm/min	膜厚vs搬送速度	100nm @搬送500mm/min	成膜速度25%upで100nm達成
	膜厚均一性	±10%	エリブソ	±9%: 目標クリア	9%はガラス基板上にSiウエハを載せた間接評価の結果
	屈折率	1.45~1.47	エリブソ	1.450~1.454: 目標クリア	-
	膜応力	+/-150MPa	反り測定器	0~150MPa	
	段差被覆性	30%以上 (AR 1:5)	SEM	60%以上(AR 1:3.3) 成膜温度:300°C	
	パーティクル	1000個以下 (1.0umUP)	KLA	707個: 目標クリア	金属汚染対策により更に低減見込み
膜質評価	エッチレート	150nm/分 以下	HF	37~40nm/分: 目標クリア	
	界面準位密度 Dit	8.0E11/cm ² 以下	SCA	1E11/cm ² 以下: 目標クリア	
	フラットバンド電圧	0~6.0V	C-V	Max. 5.5V: 目標クリア	
	CVヒステリシス幅	1.0V 以内	C-V	Max. 0.6V: 目標クリア	
	脱ガス	大面積ガラス基板上で均一な脱ガス分布	TDS	Siの脱離温度は800°C以上あり、P-CVDと同等	P-CVDと比べて膜質の悪化は認められない
	膜耐圧	3MV/cm 以上	I-V	5MV/cm以上: 目標クリア	
	TFTゲート膜・パッシベーション膜特性	既存と同等	Tr特性	パッシベーション膜・ゲート膜共に特性を確認した	ゲート膜に対してプロセス改良実施中
膜組成(H,OH比率)	Si-OH/Si-O高さ比 既存と同等	FT-IR	ピーク値は初期評価と同等		

■装置性能と成膜特性評価結果（抜粋）

<成膜速度の成膜条件依存性>



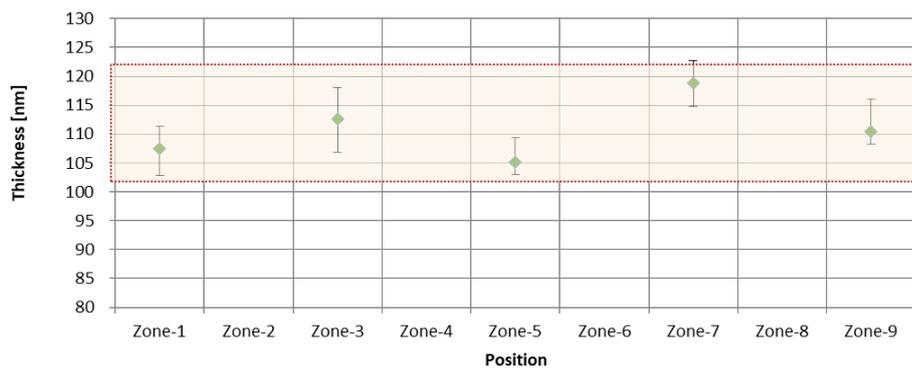
成膜温度250°Cでは、搬送速度: 500mm/min、SiH₄流量180sccm、O₃濃度70g/m³で100nmの成膜が可能である

<膜厚均一性>

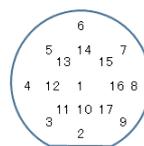
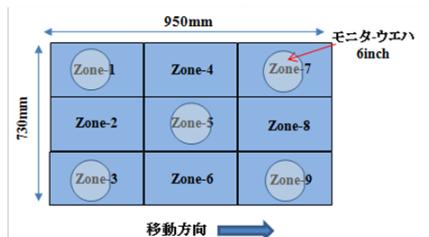
ターゲット: +/-10%
@膜厚50nm~200nm

- 成膜温度 : 250°C
- 搬送速度 : 400mm/min
- O₃濃度 : 60g/m³
- ターゲット膜厚: 100nm@2HEAD

膜厚面内分布



モニタウエハの位置

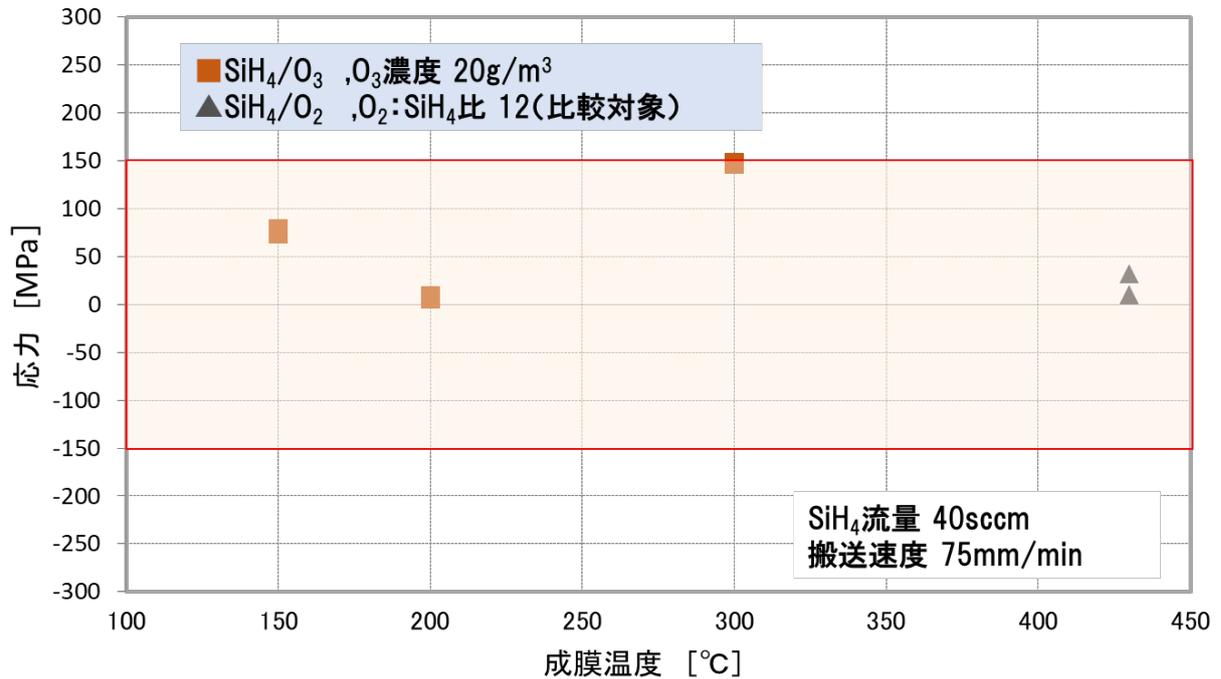


測定点

	平均 nm	Unif. %
ウエハ内	108/119	3.00/4.96
ウエハ間	111	6.12
Allover	111	8.95

110nm目標値での均一性は8.95%で、目標の10%を達成

<膜応力の成膜温度依存性>

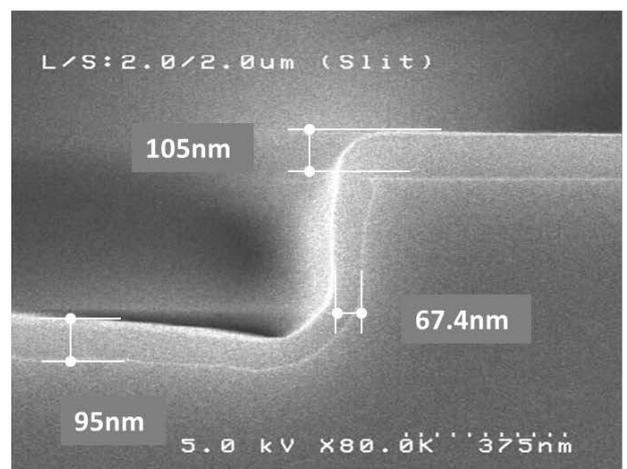
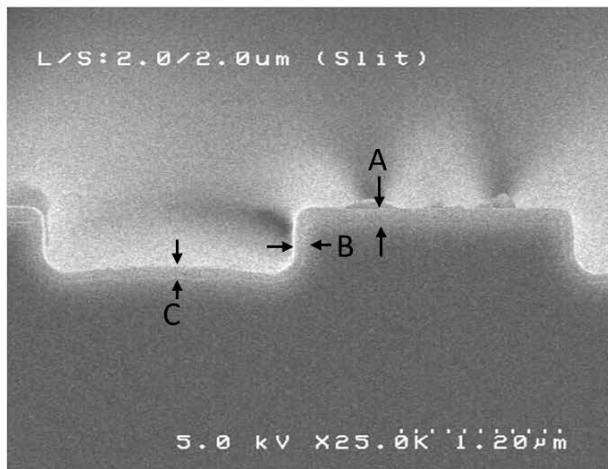


膜応力は成膜温度150°C~300°Cの範囲で±150MPa以内

<段差被覆性>

SiH₄/O₃ 300°C成膜

L/S TEG(L/S=2.0/2.0μm, aspect ratio=0.3) SEM pictures



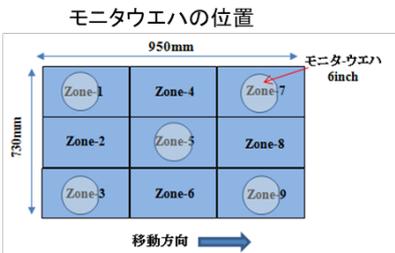
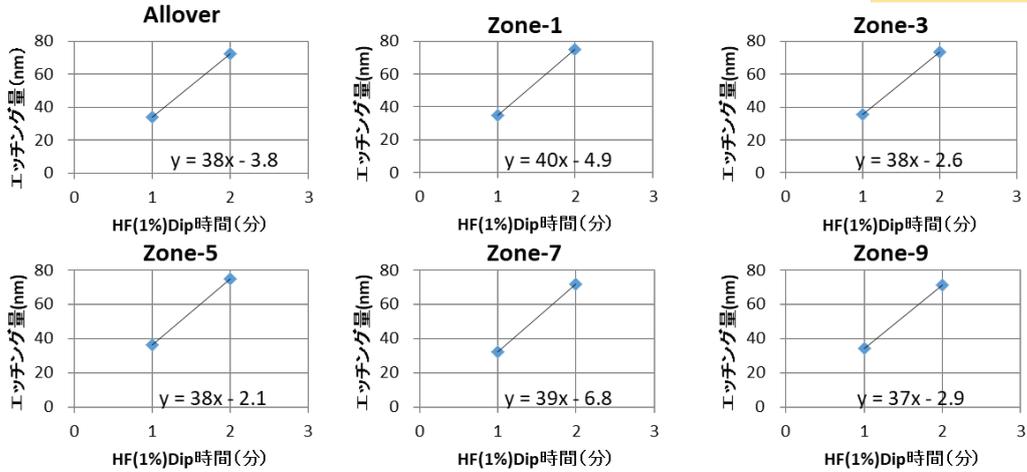
pitch (μm)	top: A(nm)	side: B(nm)	bottom: C(nm)	coverage: B/A(%)	coverage: C/A(%)
2.0	105.0	67.4	95.0	64.2%	90.5%

アスペクト比0.3で段差被覆性60%と目標値達成

<エッチング速度>

ターゲット ≤ 150nm/分
(1%希釈HF @25°C)

- 成膜温度 : 250°C
- 搬送速度 : 400mm/min
- O3濃度 : 60g/m3
- ターゲット膜厚 : 100nm@2HEAD



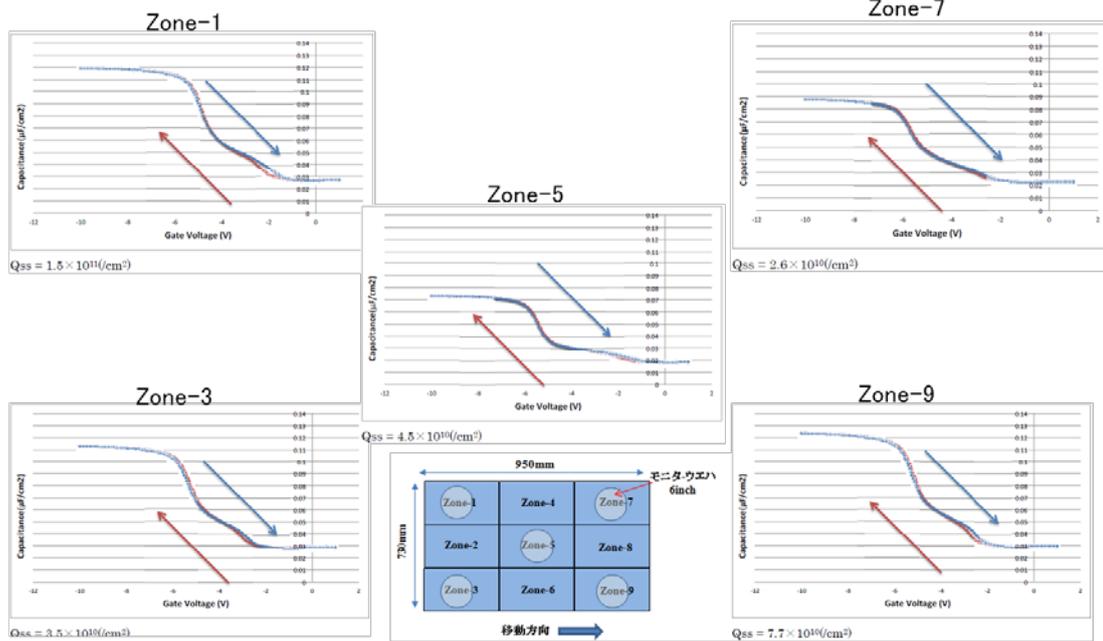
HF(1%)Dip時間	1分	2分	差分
z1レート (nm)	35	75	40
z3レート (nm)	35	73	38
z5レート (nm)	36	75	38
z7レート (nm)	32	72	39
z9レート (nm)	34	71	37
Allover	34	72	38

HF(1%)に対するエッチング速度は37~40nm/分で目標達成

<フラットバンド電圧> <CVヒステリシス幅>

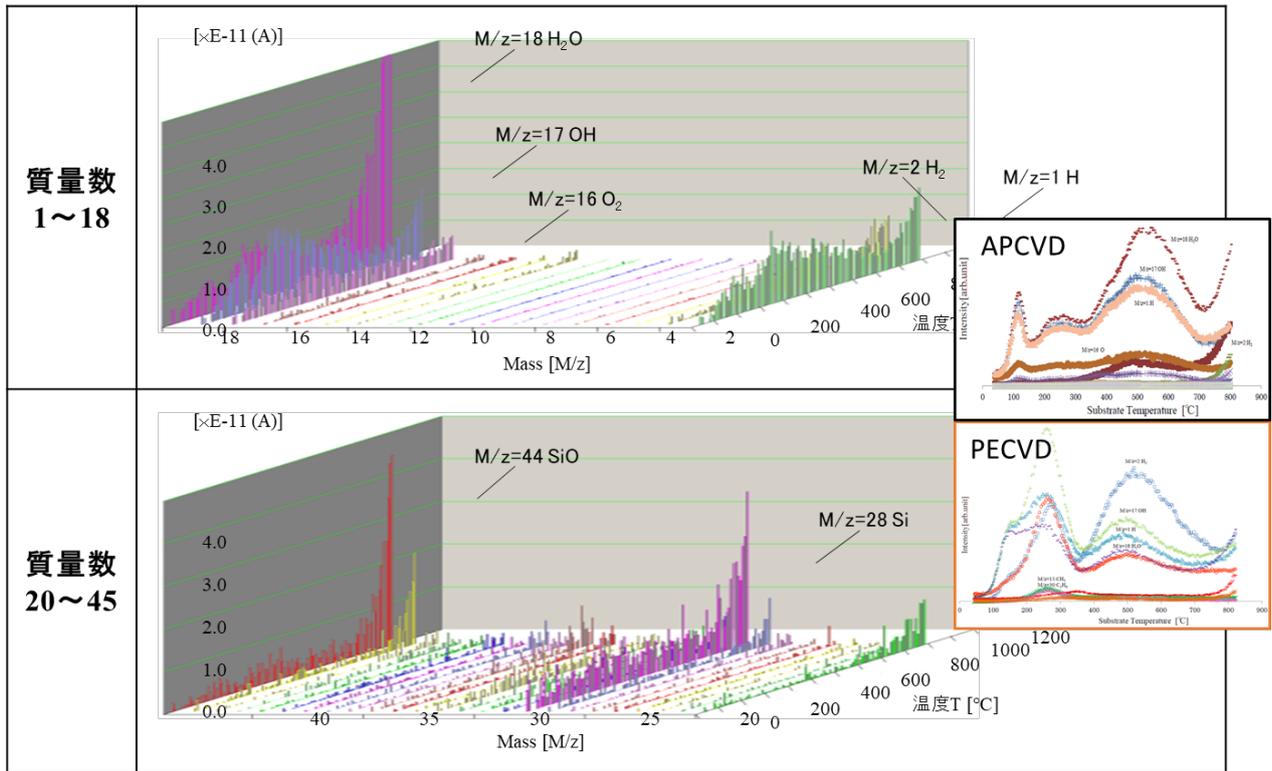
ターゲット : 6.0V以内
ターゲット : 1.0V以内

- 成膜温度 : 250°C
- 搬送速度 : 400mm/min
- O3濃度 : 60g/m3
- ターゲット膜厚 : 100nm@2HEAD



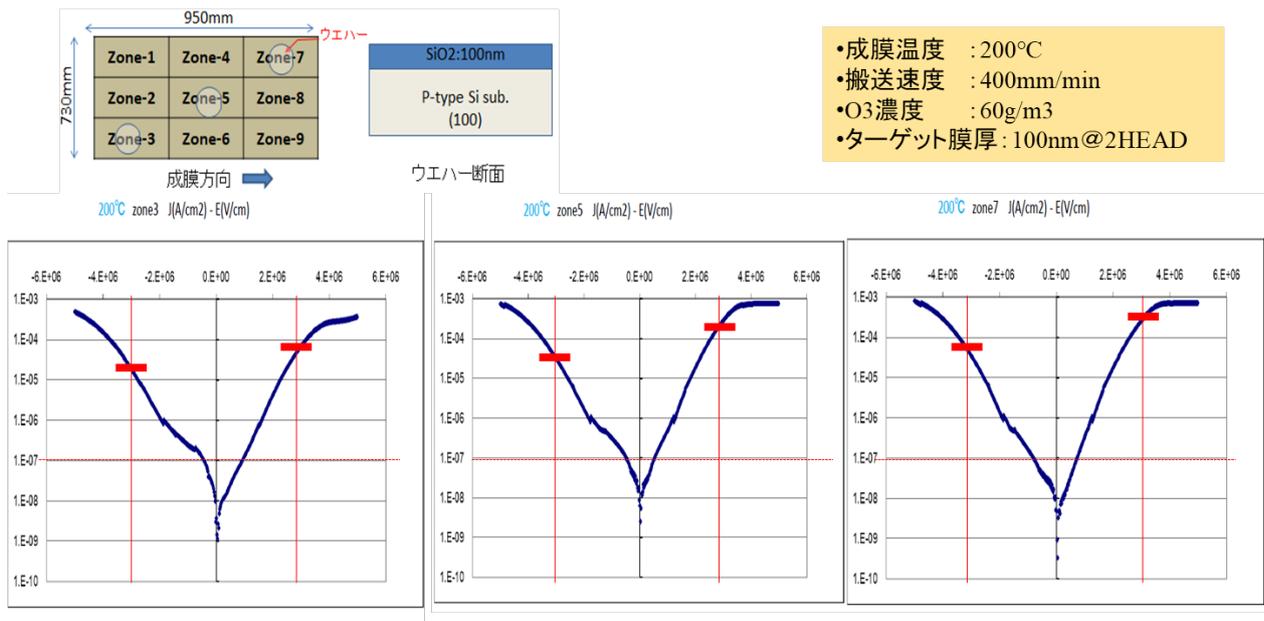
フラットバンド電圧は最大5.5V、CVヒステリシス幅は最大0.6Vで目標達成

<脱ガス(TDS)評価>



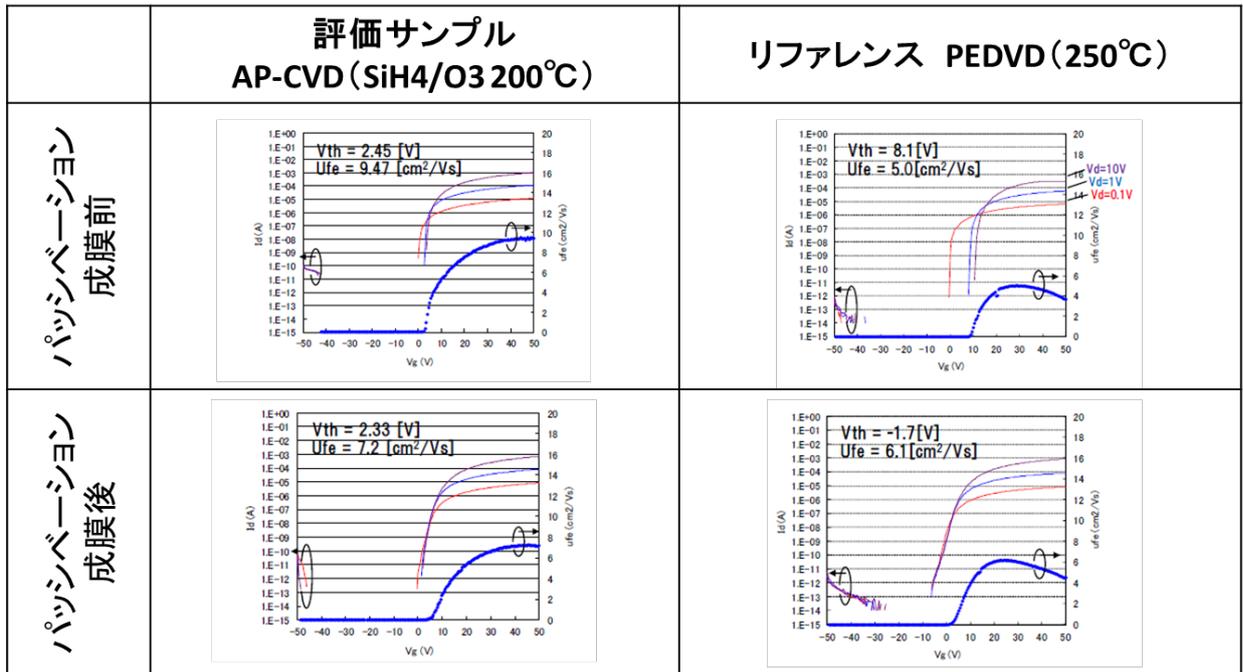
全体として従来のプラズマCVD膜と同等

<耐圧・リーク特性> 200°C



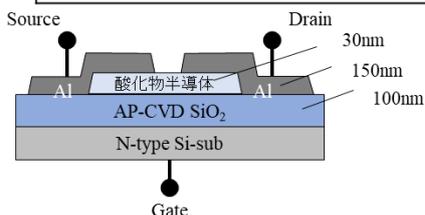
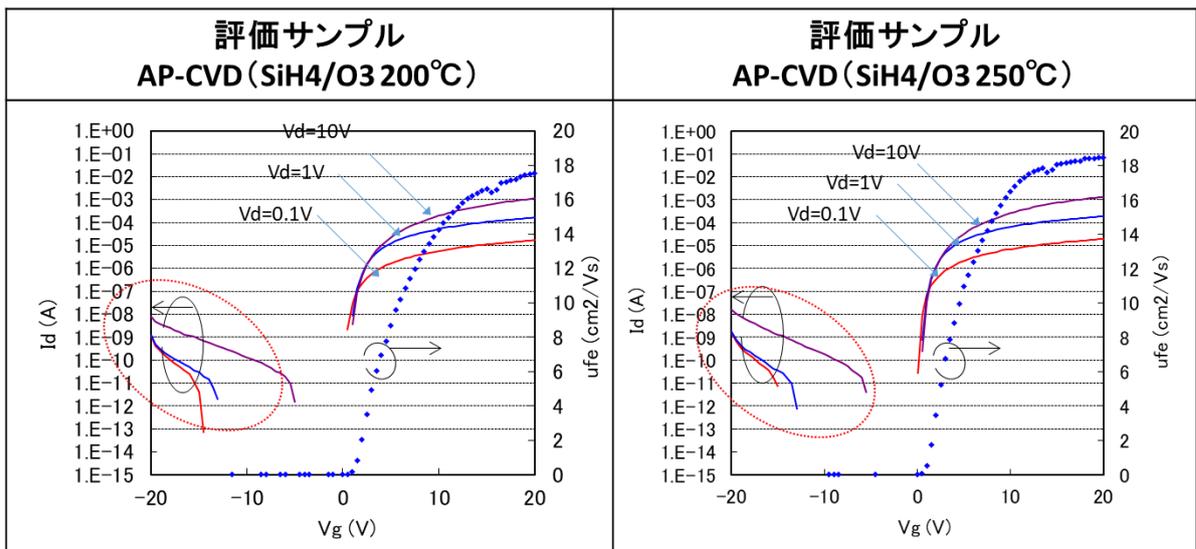
印加電圧5MV/cm²でも絶縁破壊せず目標値達成

<TFT評価結果> (酸化物半導体TFTのパッシベーションに適用)



リファレンスのPECVDと比べて、評価サンプルは特性変動 (V_t シフト) が少なく良好な結果が得られた

<TFT評価結果> (酸化物半導体TFTのゲート絶縁膜に適用)



トランジスターのON/OFF特性は確認

第3章 全体総括

3-1 複数年の研究開発成果

本事業でFPD 大型基板対応の低温常圧 CVD 装置を開発した。この装置は、従来のプラズマ CVD 装置、スパッタリング装置と異なり真空系を必要としない為、装置価格で 1/2 程度のコストダウンが見込まれる他、ガス流量、電気系統のランニングコストの低減も可能となり、FPD 製品の更なるコストダウンが実現できる。本開発装置の FPD プロセスへの導入(①LTPS のゲート絶縁膜、②IGZO のゲート絶縁膜、パッシベーション膜)が実現可能となれば、プラズマ CVD 法やスパッタリング法によって成膜する事による電子損傷、パーティクル発生リスクが低減される為、製造プロセスの単純化、TAT の短縮、歩留まり向上が期待される。

本開発の延長線上では更なる低温(150~200°C)成膜の安定化を図り、フィルムに代表されるフレキシブル基板への応用展開も可能となる。

3-2 研究開発後の課題

装置としては第 4.5 世代対応試作機での評価結果を踏まえて、スマホ・タブレットを中心としてニーズの高い第 6 世代対応への拡大を図る。

FPD 以外の事業展開として、FOWLP,FOPLP 等の後工程への応用と MEMS、 μ LED 等への応用、更にはフレキシブル基板への適用などへの展開が考えられ、多様な膜のニーズに対応できるよう膜質データの充実を図ってゆく。

3-3 事業化展開

■製品化や量産に向けた体制

潜在顧客を 1. IGZO 2. OLED 3. 半導体後工程 に分解、更にG4. 5/G6の中小型に分類しアプローチする。量産に向けては、G4. 5開発機にLD/ULDを統合し、自動PM機構を搭載した量産機を出荷できる準備は出来ている。G6量産機に関しては、鍵となる反応炉はシュミレーションで確認済みであり、G4. 5のデモ評価結果で大型化へチャレンジ出来る体制になっている。

■事業化計画

FPD市場のうち当社がターゲットとするLTPS-TFT及びIGZO-TFTを搭載するFPDは、タブレットやスマートフォン等の携帯端末機器に主に使用されるが、高機能化と共に低コスト化が求められ、端末メーカーはこれらの実現に向けた課題解決に注力しており、本開発装置のニーズは高い。ただし既存の量産工場での置換えではプロセスの最適化に時間がかかり参入障壁が高い。

このような環境の中で事業化に向けたアプローチとして、2018年は以下の取り組みを行った。

1) 2018年5月「DisplayWeek2018」(米国ロサンゼルス) パンフレットの配布等実施

9月「応用物理学会」(名古屋国際会議場) 本事業の成果をポスター発表

12月「セミコンジャパン」(東京ビックサイト) 試作機と資料を展示

2) 日本・中国・台湾のFPDメーカーへ装置の概念、特徴の説明、デモ評価を実施

今後、半導体事業で培った国内販路・海外販路(含:代理店)を活用し、またFPD固有の特異性を考慮し共同研究の提案なども含めて、顧客開拓を行ってゆく。