

令和元年6月21日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26249010

研究課題名(和文) 大気圧プラズマの制御と反応解析に基づいた薄膜デバイス作製プロセスの高機能化

研究課題名(英文) Development of highly efficient formation process of thin film devices based on atmospheric-pressure plasma science

研究代表者

垣内 弘章 (Kakiuchi, Hiroaki)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：10233660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、投入電力をパルス変調し、そのON時間を制御することにより、短寿命ラジカルやナノパーティクルの生成を可能な限り減少させ、プラスチックフィルムが使用可能な低温における高品質Si成膜プロセスの確立を一つの大きな目標として目指した。同時に、TFTのゲート絶縁膜としてのSiO_x薄膜の電気特性向上についても検討を行った。その結果、一般的な減圧プラズマCVDと同等の電気特性を有するa-SiおよびSiO_x薄膜を120℃の低温でも形成可能となった。このことは、TFTだけでなく、今後の種々のフレキシブル薄膜デバイスの高効率作製プロセスの開発に向けた大きな成果と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、研究代表者ら独自の超高周波励起大気圧プラズマに関する知見・技術を生かし、一般的な減圧プラズマ技術や他の大気圧プラズマ源では困難なSi系高機能薄膜の高効率作製プロセスの創成を目指したものであり、研究代表者の知る限りにおいて他に同様の試みは見られない。低温・高速・高品質成膜に適した大気圧プラズマとはどのようなものが実質的に明らかになりつつあり、この意味で、本研究の学術的意義は大きいといえる。本研究の成果を大気圧プラズマの実用化に繋げていけば、将来のフレキシブルエレクトロニクスへのみならず、種々の基材上への高効率の機能性コーティング技術開発にも貢献でき、その社会的意義も大きいと考える。

研究成果の概要(英文)：We have aimed at reducing the generation of short-lifetime radicals and nanoparticles in atmospheric-pressure (AP) very high-frequency (VHF) plasma by controlling the ON time of pulse-modulated input power, and investigated a highly efficient deposition process of good-quality silicon (Si) and silicon oxide (SiO_x) films at low temperatures. The results have demonstrated that the pulse modulation of input power is very effective on generating precursor radicals useful for the creation of high-quality films. As a consequence, we have achieved the deposition of amorphous Si layers with good electrical property at a substrate temperature as low as 120 C. It has also been shown that SiO_x layers with reasonably good dielectric property can be formed at a temperature of 120 C. By combining the depositions of both Si and SiO_x layers using AP-VHF plasma, highly efficient formation processes of various functional thin film devices on flexible polymer substrates will be strongly expected.

研究分野：薄膜工学，大気圧プラズマプロセス

キーワード：特殊加工 薄膜作製技術 大気圧プラズマ 薄膜デバイス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フレキシブルディスプレイ、フィルム型センサー、シート照明、電子ペーパーといったフレキシブルデバイスは、軽量・低コスト・環境保護の観点から近未来の新しいエレクトロニクスのキーデバイスとして期待されている。シリコン(Si)やその酸化物(SiO_x)および窒化物(SiN_x)等の機能薄膜をプラスチックフィルム上に高速形成できれば、そのような安価で高機能な薄膜デバイスを具現化できる。一般に、それら機能薄膜は減圧下でのプラズマ CVD 法により作製されているが、今後、プロセスをより一層高速化し、しかも耐熱性の低いポリマー材料を基板として用いるためには、従来のプラズマ CVD 技術の改良や洗練だけでは困難と考えられる。これは、減圧下という希薄な雰囲気では、基板表面への反応種の供給量に限度がある上、基板表面での膜形成反応も基板温度を高めないと活性化されないからである。このため、気相や表面での反応過程を本質的に変えられるプラズマ源の使用が必須となり、近年、大気圧プラズマが注目されている。

大気圧プラズマを薄膜作製プロセスに応用できれば、低温かつ高速なプロセスの創成に止まらず、装置の大型化や真空排気系の簡略化など、コスト削減に関してもメリットは大きい。しかし、代表的な大気圧プラズマ源である誘電体バリア放電は、ストリーマやフィラメントの集合体であり、放電自体が不均質なため、原料ガスの分解・凝集によってダスト(パーティクル)が多量に発生し、基板表面汚染や形成膜の膜質劣化が生じやすいことが知られている。このため、Si 成膜への応用はもちろん、大気圧プラズマの薄膜作製プロセスへの応用そのものも制限されている感が否めない。さらに、一般に、大気圧プラズマは減圧プラズマに比べて高温になりやすく、プラスチックフィルムを基板として使いにくい。

安定かつ均一な大気圧プラズマを発生させ、低温・高速に高品質薄膜を形成するためには、ストリーマの集合体のような不均質な放電ではなく、一般的な減圧プラズマと同様の熱的に非平衡で電極全面に渡って均一なグロー放電の使用が望ましい。その一つの有効な方策は、電極間に電子を捕捉できる程の高周波電界(RF: 13.56~27.12 MHz, 又は VHF: 40~150 MHz)の利用である。過去に実施した「若手研究(S)」では、150 MHz の VHF 励起大気圧プラズマによるダストフリーの低温・高速成膜のための電極システムの開発により、100°C 程度の低温において電界効果移動度 $1\text{--}1.5\text{ cm}^2/\text{Vs}$ の高性能なアモルファス Si チャネルの薄膜トランジスタ(TFT)の試作に成功し、ポリエチレンナフタレート(PEN)シート上の TFT も実証した。一方、大気圧プラズマ中での気相反応が 0.1 ms オーダの非常に短い時間スケールで進行し、しかも反応種の輸送がガス流れおよび拡散により律速されるため、プラズマ領域全体に膜質の均質な薄膜が得られない(優れた膜質の領域が制限)、という大気圧プラズマプロセスならではの課題も顕在化した。

2. 研究の目的

上記のような大気圧プラズマ特有の課題を克服し、可能な限り均質な薄膜を作製するためには、第一に、プラズマ中での反応時間を精密に制御する必要がある。そこで、これまでの研究で培った TFT の主要材料(Si, SiO_x)の低温・高速・高品質成膜技術を発展させ、より汎用性が高く高性能かつ低コストの大気圧プラズマによる薄膜作製プロセスを開発したいと考え、本研究を着想した。具体的には、平成 20 年度から 5 年間に渡って実施した「若手研究(S)」の成果や知見を基盤とし、超高周波(VHF)電力で励起した均一な大気圧プラズマによる、他に類を見ない低温・高速・高品質な薄膜作製プロセスの創成を目的として本研究を実施した。

3. 研究の方法

均一な大気圧プラズマ(連続放電)中での気相反応は 0.1 ms オーダの非常に短い時間スケールで進行し、しかも反応種の輸送がガス流れや拡散により律速される。具体的には(図 1 参照)、Si 成膜の場合、原料 SiH_4 分子や H_2 分子はプラズマに入って直ちに分解し始め、流れとともに拡散しつつ他の分子や原子状水素と頻りに反応し、状態や密度を変えながら膜成長に寄与する。その結果、流れ方向に膜厚分布が生じるとともに、基板上に形成される Si 薄膜の膜質(構造や結晶性)がガス流れ方向に変化し、上流側では $\alpha\text{-Si}$ が、下流側ほど原料濃度が減少して水素リッチな (H_2/SiH_4 比が大きい) 雰囲気になるため結晶化率の高い $\mu\text{c-Si}$ が成長する。電極に対して基板を水平方向に一定速度で移動させ、プラズマ領域よりも広い範囲に成膜すると、そのような膜質分布が膜厚方向に積分されるため、膜厚は一定になるものの厚さ方向に不均質な Si 薄膜が形成される。このように、大気圧プラズマでは、プラズマ領域全体に膜厚や膜質の均質な薄膜が得られない点が、減圧プラズマとの大きな相違点である。この成膜特性は、TFT のように、電気特性が要求される活性層が薄くてよい(部分的でよい)薄膜デバイスでは許容されるが、太陽電池のように膜全体に渡って均一な膜厚方向の電気特性が求められる薄膜デバイスには不都合である。

このような大気圧プラズマ中特有の成膜特性は、プラズマが連続放電である以上本質的に変えることができない。したがって、大気圧プラズマを ON/OFF 制御(パルス変調)し、プラズマ領域における膜質の均質化を図る。つまり(図 1 参照)、大気圧プラズマ中での気相反応が

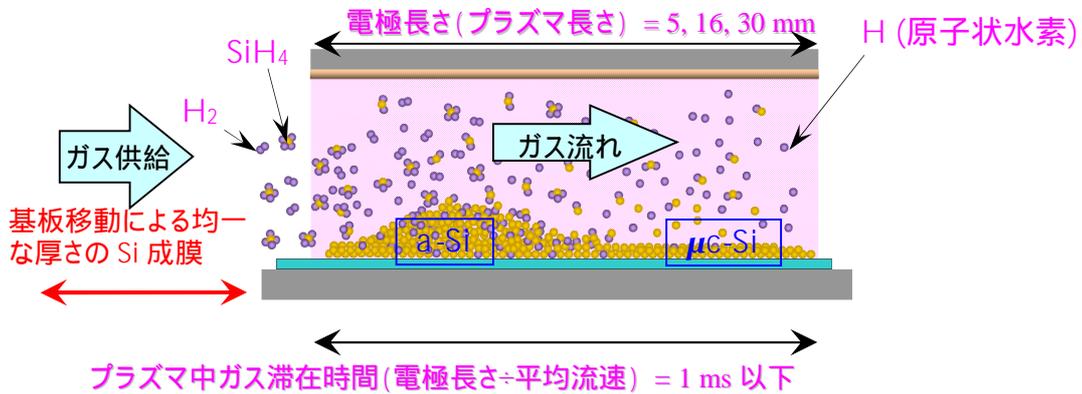


図1 大気圧プラズマ中での Si 薄膜成長のイメージ

0.1 ms オーダの非常に短い時間スケールで進行するため、プラズマの ON 時間も 0.1 ms オーダで制御して、 SiH_4 や H_2 の分解により $a\text{-Si}$ と $\mu\text{c-Si}$ それぞれの成膜に必要な反応種 (SiH_3 や H) が十分に生成した時点でプラズマを OFF にし、反応種が基板に付着あるいは排出されてガスが入れ替わる (プラズマ中ガス滞在時間) まで OFF 状態を保つ。例えば、プラズマ中での平均ガス流速が 20 m/s、電極長さ (プラズマ長さ) が 16 mm とすると、プラズマ中ガス滞在時間は 0.8 ms となるため、プラズマ ON 時間を 0.1~0.3 ms とし、残りの 0.7~0.5 ms の間プラズマ OFF となるように投入電力をパルス変調する。その結果、 SiH_4 や H_2 の濃度がプラズマ領域全体で常に同じ状態でプラズマが ON になるため、ガス流れの上流側、下流側によらず反応種の形態やその密度が毎回ほぼ同じになり、それらの反応種がプラズマ OFF の間に拡散して基板の上に Si 薄膜が成長すれば、膜質の均質化につながるものと考えられる。しかも、プラズマのパルス変調は、プラズマへの平均投入電力の減少に繋がるため、プラスチックフィルムを基板とする場合でも、基板への熱的影響をほとんど考慮しなくて済む。

本研究では、上記の考え方を、現有装置による成膜実験により検証した。実験結果の考察を目的とし、現有の熱流体解析ソフト PHOENICS-CVD を活用して流れ・反応過程の数値シミュレーションを実施し、また COMSOL Multiphysics を導入し、大気圧プラズマの内部パラメータ (電子密度、電子温度) の見積りを行った。

得られた成果を基に、 $a\text{-Si}$ 、 $\mu\text{c-Si}$ 、 SiO_x の成長過程とプラズマ励起周波数の影響を理解し、低温・高速・高品質成膜に最適な成膜プロセスの確立を目指した。

4. 研究成果

(1) Si 成膜プロセスにおける投入電力のパルス変調の効果

基板温度が 220 °C の場合は、大気圧プラズマの上流側で形成される $a\text{-Si}$ は、一般的な減圧プラズマ CVD によるものと同等の高品質性を有している。しかし、基板温度を 120 °C (ポリエチレンナフタレートを基板として使用可能な温度) に下げると、プラズマの上流側で形成される $a\text{-Si}$ の電気特性も大幅に低下することが明らかとなった。また、基板温度 220 °C においても、ガス流れとともにプラズマケミストリが急速に変化する結果、プラズマの下流側ではナノパーティクルの生成とその膜成長への寄与を抑止することができず、形成される $\mu\text{c-Si}$ は、電気特性に関して $a\text{-Si}$ に対する明確な優位性を示すには至らなかった。基板温度の低下による膜質低下は、熱エネルギーの不足により、基板表面での膜形成反応が不十分になったためと考えられる。したがって、低基板温度においても膜の高品質性を維持するためには、膜形成反応を促進し得る熱エネルギー以外のエネルギー源が必要となるが、そのエネルギー源としては原子状水素の反応性を活用することが有効である。プラズマ中の原子状水素密度を向上させる観点から考えると、プラズマの上流側よりも下流側の方がよいと考えられる。そこで、成膜条件として H_2/SiH_4 比を大きくすると同時に、原料 SiH_4 の過分解および二次反応によるナノパーティクル生成の抑止を目的とし、(本研究課題の目的である) 投入電力のパルス変調の効果を検討した。TFT の試作においては、プラズマの下流部がチャンネル層となるよう、基板を逆方向移動させて Si 層を形成した。

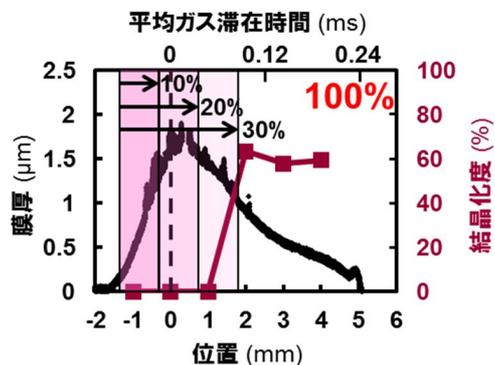


図2 静止基板 (熱酸化膜付 Si ウエハ) 上における Si の膜厚と結晶化度 (基板温度: 120 °C, 投入電力: 60 W/cm², He: 50 slm, H₂: 500 sccm, SiH₄: 10 sccm)

基板を静止した状態で Si を成膜した結果の一例を図 2 および図 3 に示す。パルス変調の Duty 比は 10% , 20% , 30% とした。トータルのプラズマ ON 時間が同じになるように、成膜時間を調節している。どの Duty 比においても、図 2 中に記載の矢印で示しているように、平均ガス流速と ON 時間を元に計算すると、プラズマに流入したガスがプラズマ部を通過する前にプラズマが OFF となり、プラズマ ON 時に生成されたラジカルが下流方向に拡散して Si が成長する。その結果、図 3 のように、膜厚のピーク位置が下流側にシフトし、膜厚分布も大きく変わっている。注目すべきポイントは、同じプラズマ ON 時間に対し、パルス変調を行った場合の方が Si 薄膜の体積が増加していることである。これは、プラズマ中（特に下流側）での二次反応によるナノパーティクル生成が抑止されたことを反映したものであるといえる。

図 2 および図 3 と同条件において、基板を逆方向に移動させながら形成した Si 薄膜の断面を SEM で観察した。熱酸化膜付 Si 基板と膜の界面付近では、膜は結晶化しておらず μ -Si が成長していた。図 3 のデータを見ると、プラズマ下流側では微結晶化しているが、基板との界面付近は a -Si のインキュベーション層となっているものと考えられる。

同条件で熱酸化膜付 Si 基板上に成膜した Si 薄膜を用いてボトムゲート型 TFT を試作し、その特性を評価した。結果を図 4 に示す。連続波電力 (Duty 比 100%) による成膜では、 $0.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度の電界効果移動度しか得られていないが、Duty 比を小さくすることによってチャネル Si 層の品質が向上し、Duty 比 10% において基板温度 120°C においても最大 $1.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の移動度を達成した。つまり、プラズマ ON 時間を $50 \mu\text{s}$ 程度に抑えることにより、 SiH_4 の過分解やナノパーティクル生成を効果的に抑止でき、このことが低基板温度においても高品質の a -Si 層の形成を可能にしたといえる。

(2) SiO_x の低温・高速成膜

Si 成膜と同様の平行平板型電極システムを用い、原料ガスとして HMDSO と O_2 を使用した SiO_x の成膜検討を行った。TFT のゲート絶縁膜として使用可能な絶縁破壊強度、固定電荷密度、界面準位密度や表面平滑性が得られるかどうかを重点的に検討した。

種々の条件下での成膜サンプルを評価した結果、基板温度 120°C 、He 流量 50 slm 、 O_2 流量 50 sccm 、HMDSO 流量 1.5 sccm ($\text{O}_2/\text{HMDSO} \approx 33$)、投入電力密度 $20 \text{ W}/\text{cm}^2$ の条件が、緻密性が高く無機物の SiO_x 薄膜 (SiO_2 -like 薄膜) の形成に最適であることが分かった。図 5 は、この最適条件において基板を正方向に移動させながら成膜した SiO_x 薄膜の蛍光灯下写真および膜厚 / 屈折率分布である。膜厚および屈折率は分光エリプソメトリによって測定した。プラズマが通過した領域にほぼ均一かつ均質の SiO_x 薄膜が形成されていることが分かる。

この SiO_x 薄膜の電気特性を評価するために、膜表面にアルミニウム電極 (面積: $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) を真空蒸着し、 C - V 特性および J - E 特性を測定した。 C - V 特性を基に、ターマン法を用いて計算した固定電荷密 (Q_f) および界面準位密度 (D_{it})、 J - E 特性から求めた絶縁破壊電界 (E_{br}) を表 1 にまとめている。文献によると、減圧下での一般的なプラズマ CVD によって形成された SiO_2 層 (成膜速度: $0.1 \sim 1 \text{ nm}/\text{s}$) の Q_f および D_{it} (成膜後のアニール処理無し) は、それぞれ $\sim 10^{12}$

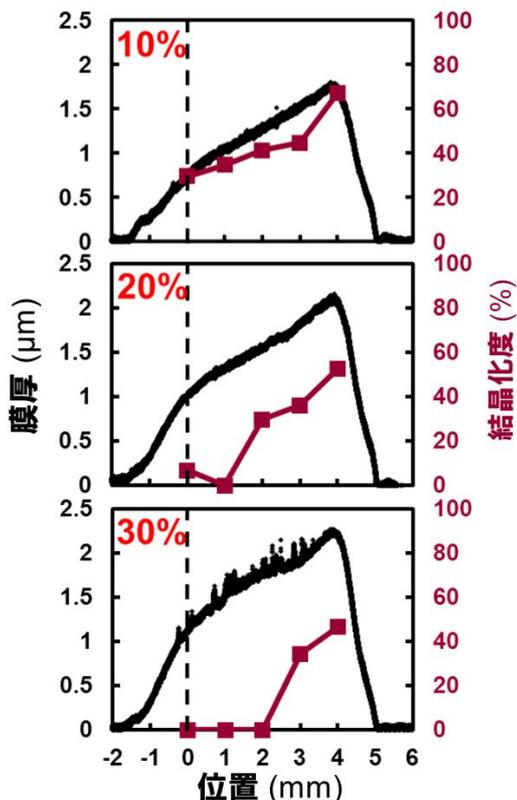


図 3 静止基板 (熱酸化膜付 Si ウエハ) 上における Si の膜厚と結晶化度の Duty 比依存性 (基板温度: 120°C 、投入電力 (プラズマ ON 時): $60 \text{ W}/\text{cm}^2$, He: 50 slm , H_2 : 500 sccm , SiH_4 : 10 sccm)

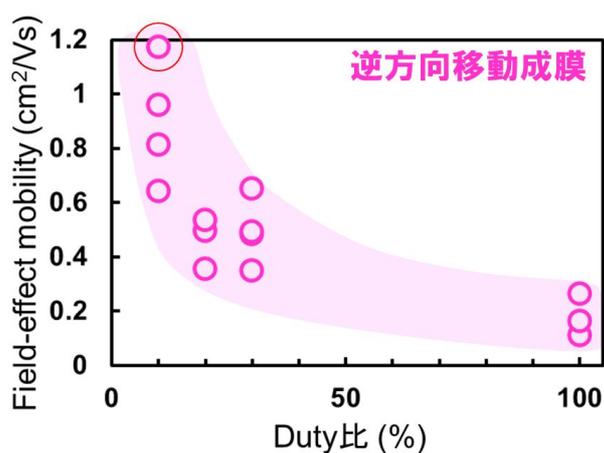


図 4 TFT の電界効果移動度の Duty 比依存性 (5 mm 電極使用、投入電力 (プラズマ ON 時): $60 \text{ W}/\text{cm}^2$, He: 50 slm , H_2 : 500 sccm , SiH_4 : 10 sccm , 基板移動 (逆方向) 速度: $0.5 \sim 0.08 \text{ mm}/\text{s}$)

cm⁻² および 10¹¹ ~ 10¹² eV⁻¹cm⁻² である。よって、本研究の低温形成 SiO_x 薄膜は、成膜速度が格段に速い (~5 nm/s) にもかかわらず、同等の高品質性を達成できたといえる。Q_f の値について見ると、最適な O₂ 流量 50 sccm で形成した SiO_x 薄膜の Q_f が最小となっており、膜中の欠陥密度が最も少ないことを示していることから、TFT のゲート絶縁膜として使用可能な電気特性を有しているものと考えられる。実際、ほぼ同じ条件で形成した SiO_x 薄膜は、十分な表面平滑性を有し、ガラス基板上的ボトムゲート型 TFT のゲート絶縁膜として正常に機能することが確認されている[雑誌論文 2]。

最後に、厚さ 0.125 mm の PEN シート上に SiO_x 薄膜を形成し、エリプソメトリによって膜厚および屈折率を測定した結果を図 6 に示す。基板温度の低下に伴い、膜厚と屈折率は両方とも低下する傾向が見られる。これは、基板表面での膜形成反応が熱エネルギーの不足によって不活性化したことが原因である。Si 上の膜に比べ、PEN 上の方が全体的に膜厚が厚く、逆に屈折率は低くなっており、SiO_x 薄膜の緻密性が低いことを示している。この一因としては、PEN による誘電損失により、実質的なプラズマへの投入電力が低下していることが考えられるが、現段階では詳細は不明である。表 1 に示す通り、Si 上のものに比べて E_{br} が低下していることも確認された。つまり、同じプラズマ条件でもかかわらず、基板材料によって SiO_x 微細構造が変化してしまったといえる。TFT を作製する際、SiO_x 成膜後の Si 成膜の際にも同様の現象が確認されており、今後の研究において詳細な成膜メカニズムの検討が必要である。

以上のように、大気圧プラズマ中では、一般的な減圧プラズマ中に比べてケミストリが非常に急速に変化するため、高品質 Si 成膜に不適な短寿命ラジカル (SiH_x, x ≤ 2) やそれに起因して生成するナノパーティクルの影響が顕著に現れやすい。本研究課題では、投入電力をパルス変調し、その ON 時間を制御することにより、短寿命ラジカルやナノパーティクルの生成を可能な限り減少させ、プラスチックフィルムが使用可能な低温における高品質 Si 成膜プロセスの確立を一つの目標として目指した。同時に、TFT のゲート絶縁膜としての SiO_x 薄膜の電気特性向上についても検討を行った。μc-Si の電気特性の向上、および膜特性の基板材料依存 (PEN シート上と Si 上で形成される膜の微細構造が変化) の存在については引き続き検討する余地が残されている。しかし、一方で、5 年間の研究期間中に一般的な減圧プラズマ CVD と同等の電

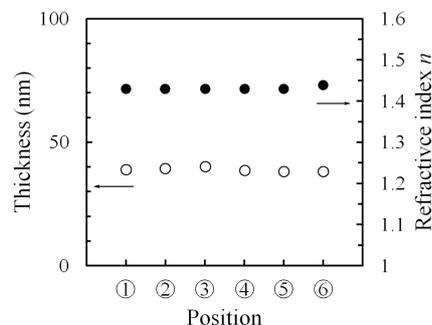
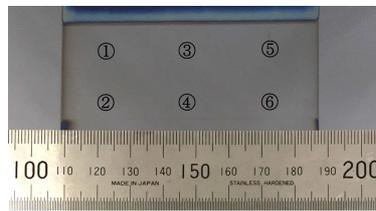


図 5 基板移動 (4 mm/s) により成膜した SiO_x 薄膜の蛍光灯下写真および膜厚 / 屈折率分布 (基板温度: 120 °C, He: 50 slm, O₂: 50 sccm, HMDSO: 1.5 sccm)

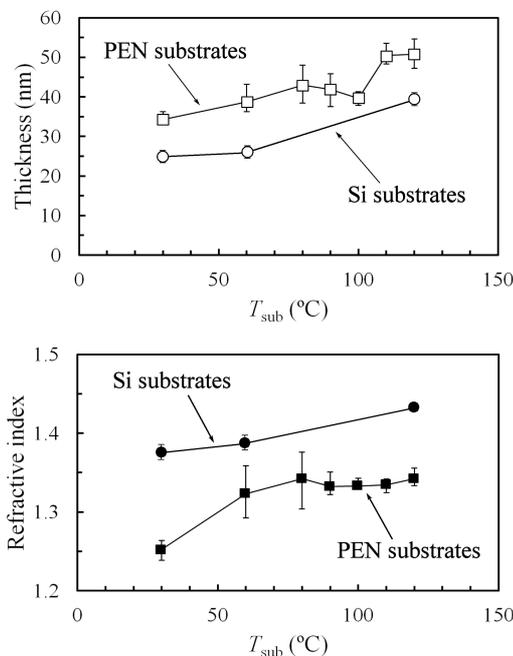


図 6 PEN 上に基板移動 (4 mm/s) により成膜した SiO_x 薄膜の膜厚 / 屈折率の基板温度依存性 (投入電力: 20 W/cm², He: 50 slm, O₂: 50 sccm, HMDSO: 1.5 sccm)

表 1 固定電荷密度 (Q_f), 界面準位密度 (D_{it}), 絶縁破壊電界 (E_{br}) の測定結果 (基板温度: 120 °C, 投入電力: 20 W/cm², He: 50 slm, HMDSO: 1.5 sccm)

O ₂ (sccm)	T _{sub} (°C)	Q _f (cm ⁻²)	D _{it} (eV ⁻¹ cm ⁻²)	E _{br} (MV/cm)
2.5	120 (Si sub.)	3.0 × 10 ¹²	1.1 × 10 ¹²	-
5	120 (Si sub.)	2.1 × 10 ¹²	1.0 × 10 ¹²	-
50	120 (Si sub.)	1.5 × 10 ¹²	1.9 × 10 ¹¹	9.8.
50	90 (PEN sub.)	-	-	6.9.

気特性を有する a -Si および SiO_x 薄膜を 120 °C の低温でも形成可能となったことは、TFT だけでなく、今後の種々のフレキシブル薄膜デバイスの高能率作製プロセスの開発に向けた大きな成果と考えている。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)【全て査読有】

- [1] H. Kakiuchi, H. Ohmi, and K. Yasutake, Highly efficient formation process for functional silicon oxide layers at low temperatures (≤ 120 °C) using very high-frequency plasma under atmospheric pressure, *Precis. Eng.* to be published.
- [2] H. Kakiuchi, H. Ohmi, and K. Yasutake, Controllability of structural and electrical properties of silicon films grown in atmospheric-pressure very high-frequency plasma, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 355203 (11pp) (2018).
- [3] M. Shuto, H. Ohmi, H. Kakiuchi, T. Yamada, and K. Yasutake, Determination of plasma impedance of microwave plasma system by electric field simulation, *J. Appl. Phys.* **122**, pp. 043303-1 – 043303-8 (2017).
- [4] H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, S. Tamaki, T. Sakaguchi, W. Lin, and K. Yasutake, Characterization of Si and SiO_x films deposited in very high-frequency excited atmospheric-pressure plasma and their application to bottom-gate thin film transistors, *Phys. Stat. Sol. A: Applications and Materials Science* **212**, pp. 1571–1577 (2015).
- [5] H. Kakiuchi, H. Ohmi, and K. Yasutake, Atmospheric-pressure low-temperature plasma processes for thin film deposition, *J. Vac. Sci. Technol. A* **32**, 030801 (16pp) (2014).

他 1 件

〔学会発表〕(計 34 件)

- [1] 垣内弘章, 大参宏昌, 安武潔, 大気圧下におけるプラズマ生成と薄膜作製プロセスへの応用, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会(2018 年 9 月 5 日 ~ 7 日, 函館アリーナ)【招待講演】
- [2] H. Kakiuchi, H. Ohmi, K. Yasutake, Structural and electrical characterization of silicon and silicon oxide films prepared in atmospheric-pressure very high-frequency plasma at low temperatures, The 21st International Colloquium on Plasma Process (2017 年 6 月 26 日 ~ 30 日, Nice, France)
- [3] H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, W. Lin, T. Sakaguchi, S. Tamaki, K. Yasutake, Investigation on the deposition characteristics of silicon and silicon oxide thin films in atmospheric-pressure very high-frequency plasma for their application to thin film transistors, 20th Biennial European Conference on Chemical Vapor Deposition (EuroCVD 20) (2015 年 7 月 13 日 ~ 17 日, Festhalle Seepark Sempach, Switzerland)
- [4] H. Kakiuchi, H. Ohmi, S. Tamaki, T. Sakaguchi, W. Lin, K. Yasutake, Characterization of Si films deposited at 220 °C in atmospheric-pressure very high-frequency plasma and their application to thin film transistors, 22nd International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 2015) (2015 年 7 月 5 日 ~ 10 日, University of Antwerp, Belgium)

他 30 件

〔図書〕(計 1 件)

- [1] H. Kakiuchi, H. Ohmi, and K. Yasutake, Atmospheric Pressure Plasmas: Low-Temperature Processes, in *Encyclopedia of Plasma Technology, First Edition* (Taylor & Francis, 2016), pp. 82–91.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-ms.prec.eng.osaka-u.ac.jp/jpn/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 押鐘 寧

ローマ字氏名： Oshikane Yasushi

所属研究機関名： 大阪大学

部局名： 大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻

職名： 助教

研究者番号(8桁)： 40263206

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。