

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20676003

研究課題名（和文）

大気圧プラズマによるプラスチックフィルム上薄膜デバイスの高効率作製技術の開発

研究課題名（英文）

Development of highly efficient fabrication process of thin film devices on plastic materials using atmospheric-pressure plasma

研究代表者

垣内 弘章（KAKIUCHI HIROAKI）

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10233660

研究成果の概要（和文）：狭い電極－基板間ギャップにガス流れを乱さずに成膜原料ガスを能率的に供給するとともに、ダストの基板表面への付着を抑止できる平行平板型電極システムを開発した。これにより、大気圧超高周波（VHF）プラズマを用いたアモルファス／微結晶 Si、Si の酸化膜および窒化膜の低温・高速・ダストフリー成膜を実証した。開発した電極システムを用いて厚さ 0.125 mm の PEN シート基板上にボトムゲート薄膜トランジスタを試作・評価した結果、基板に熱的ダメージを与えることなく、正常に動作する TFT の作製に成功した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a parallel-plate-type electrode system that can efficiently supply process gases into the narrow gap spacing between the electrode and a substrate and can avoid the contamination of the substrate surface by dusty particles. As a result, high-rate and low-temperature depositions of amorphous and microcrystalline Si, silicon oxide and silicon nitride films have been demonstrated using atmospheric-pressure very high-frequency plasma. Bottom-gate thin film transistors have successfully been fabricated on polyethylene naphthalate (PEN) sheet substrates of 0.125 mm thickness without causing any thermal damage of the substrate material.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009年度	37,400,000	11,220,000	48,620,000
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2012年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
総計	61,500,000	18,450,000	79,950,000

研究分野：ものづくり技術

科研費の分科・細目：機械工学（分科），生産工学・加工学（細目）

キーワード：大気圧プラズマ，低温・高速成膜，電子・電気材料，薄膜トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

大気圧プラズマ技術を実用化できれば、能率的な薄膜形成が可能になるだけでなく、成膜材料によっては高価な真空排気系が不要となり、デバイス製造コストの削減に関してもメリットは大きい。しかし、実際の応用は主

として表面処理や洗浄，エッチング等に限定されている感が否めない。この理由は、一般に大気圧プラズマによる成膜プロセスではダスト（粉）が発生し、高性能な機能薄膜形成は極めて困難と考えられているためである。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が15年以上にわたって独自に積み上げてきた超高周波(VHF, 150 MHz) 励起大気圧プラズマの発生技術とその成膜プロセスへの応用に関する実験的・理論的知見に基づき、アモルファスSi (α -Si) 薄膜や微結晶Si (μ c-Si) 薄膜、Siの酸化膜(SiO_x)および窒化膜(SiN_x)の低温・高速・ダストフリー成膜プロセスを開発するとともに、プラスチックフィルム上への薄膜デバイス(TFT等)の実証を目指す。

3. 研究の方法

大気圧のような高圧力雰囲気では、真空雰囲気と比べるとガスの拡散速度が非常に遅いため、プラズマ気相反応および形成される薄膜の厚さ・構造・特性がガス流れの影響を強く受ける。したがって、大気圧プラズマを用いた低温・高速・ダストフリー成膜プロセスを実現するためには、狭い電極-基板間ギャップにガス流れを乱さずに成膜原料ガスを能率的に供給するとともに、発生したダストの基板表面への付着を抑制することが可能な電極システムの開発が最も重要である。このような観点から、実験と理論(熱流体解析)の両面からのアプローチによって電極システムを開発し、いかにプラスチック材料に熱的ダメージを与えずに高品質な薄膜を形成できるかを追求する。

4. 研究成果

(1) 大気圧VHFプラズマ発生用電極システムの開発

本研究では、まず、高品質エピタキシャルSiの低温成長のために開発した多孔質カーボン電極を活用し、Siの低温・高速成膜に適した電極システムの開発に取り組んだ。開発した電極(図1)は、 $30 \times 100 \text{ mm}^2$ の領域に一樣な大気圧プラズマを発生させることができる。また、ガスの局所的吸引機構を備えており、汎用熱流体解析ソフトPHOENICSを用いた吸引口形状最適化の結果、成膜時に電極エッジ部(プラズマ界面)で発生するダストを完全に除去できることが示された。さらに、電極内部に放熱機構を有しているため大気圧プラズマを間接的に冷却でき、基板への熱負荷を低減することも可能である。しかし、本電極システムを用いて種々の成膜条件で形成した α -Siや μ c-Si薄膜を活性層に用いたボトムゲートTFTや薄膜Si太陽電池の性能を評価した結果、十分な電子移動度や変換効率が得られず、特に μ c-Si薄膜においてその傾向が顕著であった(μ c-Si TFTの電界効果移動度: $0.3 \sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)。これは、形成された膜中の欠陥密度が高かったためである。欠陥密度の高いSi薄膜しか得られなかった原因は、多孔質カーボン電極のガス供給特性に

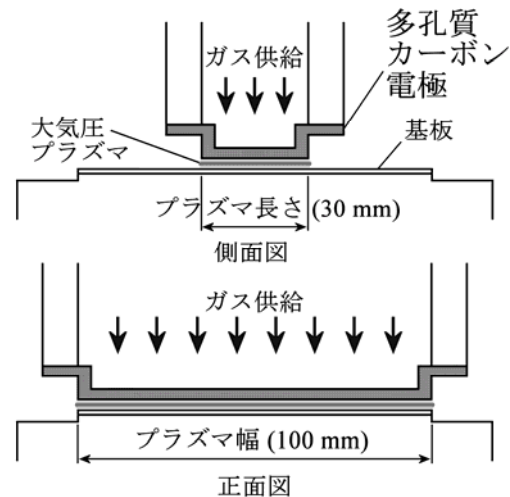


図1 多孔質カーボン電極

あることが分かった。多孔質カーボン板を通して基板の上方からプラズマ領域に均一に成膜ガスが供給され、プラズマ中に入ったガスは電極エッジ部に向かって流れていく。そのため、電極の中央部ではガス流速が非常に遅く、電極エッジ部に向かって次第に増加する。その結果、ガス流速が比較的遅い $20 \times 80 \text{ mm}^2$ の領域に膜厚および結晶性がほぼ均一な μ c-Si薄膜が形成される。しかし、ガス流速が遅いためプラズマ中でのガス滞在時間が長くなり(1ms以上)、結果として SiH_4 分子の分解が進みすぎ、付着係数の大きな短寿命ラジカル(SiH や Si 等)やナノパーティクルさえも成膜に寄与するようになると推測され、このことが欠陥密度の高い膜成長につながったと考えている。したがって、多孔質カーボン電極は高品質な μ c-Siの低温・高速成膜には適していないと判断した。

一方、 SiO_x および SiN_x の成膜に多孔質電極が適しているかどうかについても検討した。特に、 SiO_x 用には多孔質カーボンを使用できないため、多孔質の金属やアルミナを用いた電極を検討した。その結果、多孔質金属は二次電子放出によるプラズマの局所集中が生じやすいことや、多孔質アルミナを用いた電極はガス透過性および洗浄時の耐薬品性の観点から使用できない、といった問題が生じ、Siと同様に多孔質電極は適していないと結論した。

以上の結果を受け、新たに平行平板型電極システムを開発した(図2)。本電極のサイズは長さ16 mmまたは30 mm、幅80 mmで、 $30 \times 80 \text{ mm}^2$ または $16 \times 80 \text{ mm}^2$ の領域に一樣な大気圧プラズマを発生させるとともに、一次元的でシンプルなガス流れがプラズマ中に形成される。プラズマからの排出ガスの吸引により、ダストの基板表面への付着も防ぐことができる。本電極システムを用いることにより、ガス流速を変える、あるいはプラズマの長さを変える(長さの違う電極を用いる)こ

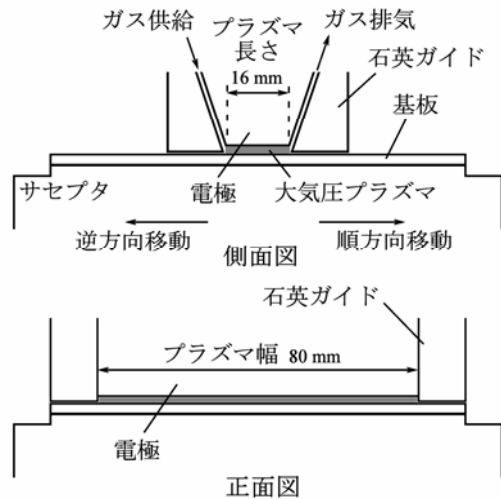


図2 平行平板型電極

とによってプラズマ中での平均的なガス滞在時間を変えることができ、大気圧プラズマ中での膜成長反応を把握しやすい特長がある。したがって、Si 成膜だけでなく、 SiO_x および SiN_x の成膜においても有用である。

(2) a-Si および $\mu\text{c-Si}$ の低温・高速成膜

まず、多孔質カーボン電極を用いて成膜検討を行った。原料ガスとしては H_2/SiH_4 (He で希釈) を用いた。基板温度 220°C における検討の結果、基板界面から直接結晶化した (非晶質の初期層が無い) $\mu\text{c-Si}$ 薄膜が安定して得られることが分かった。特徴的な点は、 H_2 を混合しなくても結晶化度約 70% の $\mu\text{c-Si}$ 薄膜が得られることである。また、成膜温度を 90°C まで低温化した場合についても、十分な電力を投入すれば結晶化度を維持できることが確認された。膜厚および結晶性は、電極エッジ部を除くプラズマ領域内 ($20 \times 80 \text{ mm}^2$) においてほぼ均一であり、成膜速度も最大で約 15 nm/s を得た。さらに、厚さ 0.125 mm の PEN フィルム上に $\mu\text{c-Si}$ 薄膜を 2.5 nm/s の成膜速度で形成することにも成功した。 SiH_4 流量や H_2/SiH_4 比等の成膜パラメータを最適化すれば、プラスチックフィルム上においても成膜速度のさらなる向上は十分達成可能である。

次に、新たに開発した平行平板型電極を用いて Si 成膜検討を行った。種々の条件 (基板温度は 220°C 一定) でガラス基板上に Si を成膜し、成膜領域 (ガス流れ方向の長さ: 16 mm , 幅: 80 mm) における膜厚と結晶性の変化を評価した。その結果、① SiH_4 はプラズマ領域に入って直ちに分解して膜成長が生じる。したがって、膜厚はプラズマの上流側においてピークを持ち、その後下流側に向かって減少する (図 3)、② アモルファスから結晶への膜の相転移は、 0.1 ms のタイムスケールで生じる (図 3)。また、ガス流速が同じ条件であれば、投入電力や原料 SiH_4 の H_2 による希釈割合

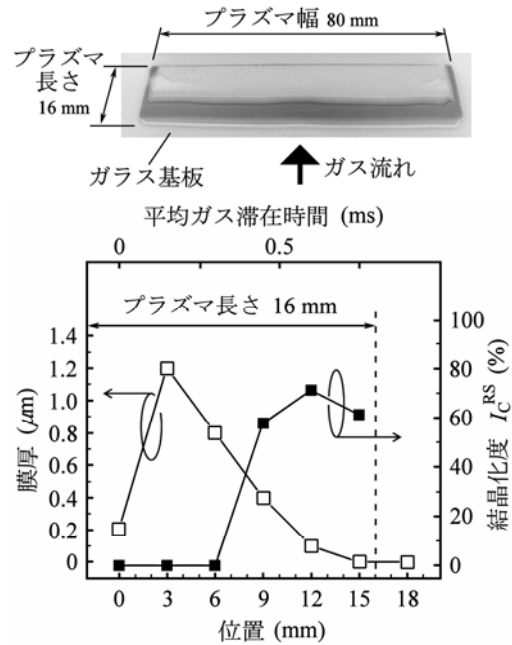


図3 平行平板型電極により形成した Si 薄膜の外観および膜厚・結晶化度のガス流れ方向の変化

(H_2/SiH_4 比) が変わると、形成膜の相転移が生じる時間が敏感に変わる (プラズマ入口からの距離が mm 単位で変わる)、③ プラズマ条件に関わらず、成膜領域の内外にダストの付着は一切ない、ことが分かった。前述の多孔質カーボン電極を用いた Si 成膜では、プラズマ中ガス滞在時間は 1 ms 以上であり、そのような長すぎるガス滞在時間が欠陥密度の高い $\mu\text{c-Si}$ 成膜につながったといえる。

静止基板上に成膜すると、図 3 に示すように膜厚・結晶性に分布が生じる。基板上に一定の厚さの薄膜を形成するためには、基板を移動させながら成膜を行う必要があるが、その場合、得られた薄膜は膜厚方向に結晶性や微細構造の分布を持つことになる。このような不均質性は、膜厚方向の電気的特性の均一性が求められる太陽電池にとっては不向きであるが、TFT のように、薄いチャネル層における横方向電気伝導が重要なデバイスにおいては許容されるものと考えられる (項目 (4) 参照)。

(3) SiO_x および SiN_x の常温・高速成膜

多孔質カーボン電極による Si 成膜の検討と並行し、既に開発済みの高速回転電極を用いて SiO_x および SiN_x の成膜研究を進めた。

まず、原料ガスとして SiH_4/CO_2 あるいは HMDSO/O_2 (いずれも He 希釈) を用いた SiO_x の常温 (基板加熱無し) での高速成膜について検討した。 SiH_4/CO_2 を原料とした場合、 CO_2 の十分な分解に大きな電力が必要となることから、 200 nm/s 以上の極めて速い成膜速度が得られる一方で、プラズマ中でのパーティクル (ダスト) の発生が顕著になり、 SiO_x 薄

膜の構造がポーラスになりやすい結果となった。原料ガス濃度を低くすれば成膜速度は遅くなる (10~25 nm/s) が膜の緻密性は向上した。しかし、少なくとも 100 W/cm² 以上の投入電力が必要であったことから、プラスチックフィルム上への成膜には不向きであると考えた。一方、HMDSO/O₂ を原料とした場合は、SiH₄/CO₂ の場合よりも大幅に小さい投入電力で同等の成膜速度 (10~40 nm/s) を達成した。さらに、ポリカーボネートを基板に用いたところ、基板に熱的ダメージを与えずに SiO_x をコーティングできることも示された。

SiN_x に関しては、経時劣化の無い膜を基板加熱無しで、しかも 100 nm/s 以上の非常に速い成膜速度で形成することに成功した。得られた SiN_x 薄膜の緩衝フッ酸溶液によるエッチング速度は最小で 28 nm/min で、Si の熱酸化膜 (100 nm/min) よりも緻密性に優れており、デバイスの保護膜や絶縁膜として応用できると考えられる。

一方、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/O₂ を使用した SiO_x の成膜検討を行った。その結果、常温で完全パーティクルフリーかつカーボンフリーな SiO_x 成膜を達成した。また、MOS 構造による電流-電圧特性の評価から良好な絶縁性も確認された。

(4) TFT の試作と性能評価

平行平板型電極システムを用いた Si および SiO_x の成膜検討結果を踏まえ、ボトムゲート TFT の試作と性能評価を行った。

まず、熱酸化膜付き Si ウエハを基板として用い (Si の熱酸化膜をゲート絶縁膜として利用)、基板温度 220°C におけるチャンネル Si 成膜時の投入電力と TFT の電界効果移動度との関係を調べた。TFT の試作においては、長さ 16 mm (幅 80 mm) の電極を用い、基板を一定速度で移動させることによって 50×80 mm² の領域に一樣な膜厚の Si 薄膜を形成した。この場合、項目 (2) でも述べたように、形成された Si 薄膜の膜厚方向に結晶性や微細構造の分布が生じる。つまり、基板をガス流れ方向と同方向 (順方向) に移動させて成膜すると、プラズマの上流側で形成された α-Si 相が基板界面側に、下流側の μc-Si 相が膜表面側に堆積する。逆に、基板をガス流れ方向と逆方向に移動させると、膜厚方向の分布も逆になる。したがって、順方向移動ではボトムゲート TFT のチャンネル層は α-Si、逆方向移動ではチャンネル層は μc-Si となる。SiH₄ 流量 50 SCCM, H₂ 流量 500 SCCM, He 流量 50 SLM, 電極-基板間ギャップ 0.5 mm, 基板移動速度 1mm/s の条件において、投入電力を 8, 16, 24, 32, 40 W/cm² として Si 薄膜 (チャンネル層) を形成した (膜厚: 240~370 nm, プラズマ中で

の平均成膜速度 15~23 nm/s)。Si 薄膜形成後、表面にソースおよびドレイン電極 (アルミニウム) を蒸着し (チャンネル長: 50 μm, チャンネル幅: 100 μm), 特性を評価した。その結果、試作した全ての TFT が正常に動作することが確認された。また、電界効果移動度は、順方向移動の場合、チャンネル Si 成膜時の投入電力が大きい程高くなり、最大で 2 cm²/Vs が得られた。この値は、一般的な α-Si TFT と同程度あるいはそれ以上のものであり、プラズマの上流側で形成される α-Si の膜質が、成膜速度が速いにも関わらず良好であることを示す結果である。一方、逆方向移動の場合は、投入電力が小さい程移動度が高くなる傾向が見られた。これは、投入電力が小さいほどプラズマ中での SiH₄ の分解が緩やかに進行するため、下流側で形成される μc-Si 成長への短寿命ラジカルの寄与が少なくなったためと考えられる。逆方向移動の場合の電界効果移動度は低電力条件で 1.5~2cm²/Vs が得られ、多孔質カーボン電極の場合 (0.3~0.5cm²/Vs) よりも明らかに改善された。プラズマ長さ (電極長さ) を短くして成膜条件を検討すれば、α-Si チャンネルの場合を大幅に上回る TFT 性能の実現が見込まれる。(以上の成果については論文投稿済み)

次に、同じく熱酸化膜付き Si ウエハを基板として用い、チャンネル Si 成膜時の基板温度をパラメータとして作製した TFT の特性を評価した。その結果、試作した全ての TFT が正常に動作することが確認された。成膜条件を変えずに基板温度を単に低温化 (220 → 120°C) しただけでは TFT 特性は大幅に低下したが、H₂/SiH₄ 比と投入電力を最適化することにより、基板温度 120°C においても 220°C の場合と同等の電界効果移動度が得られることが確認された。

以上の結果に基づき、Si 成膜と同様の電極システムを用いて常温で高速形成した SiO_x 薄膜をゲート絶縁膜としたガラス基板上およびポリマー基板上への TFT について検討を行った。

まず、ガラス基板 (Corning EAGLE XG, 厚さ 0.7 mm) 上へのボトムゲート TFT 試作を行った。ゲート電極 (アルミニウム) を蒸着したガラス基板上に、原料ガスとして HMDSO/O₂ を使用して常温で SiO_x ゲート絶縁膜 (厚さ約 200 nm) 形成し、その上に基板温度 120°C で Si チャンネル層 (厚さ約 150 nm) を形成した TFT の性能評価を行った (チャンネル長: 80 μm, チャンネル幅: 100 μm)。その結果、熱酸化膜付き Si ウエハによる TFT と同等の 1.0~2.1 cm²/Vs の電界効果移動度が得られた。この結果を受けて、ポリマー基板 (ポリエチレンナフタレート: PEN) 上への TFT 試作検討を行った。その結果、SiO_x ゲート絶縁膜や Si チャンネル層の成膜条件に関わらず、基板に熱的ダ

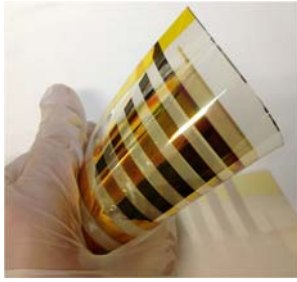


図4 厚さ 0.125 mm の PEN シート上に試作した TFT の外観写真

メージを与えることなく正常に動作する TFT の試作に成功した (図 4)。また, H_2/SiH_4 比および投入電力の最適化によってガラス基板と同程度の電界効果移動度が得られることも確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, A. Hirano, T. Tsushima, and K. Yasutake, Study on the Growth of Microcrystalline Silicon Films in Atmospheric-Pressure VHF Plasma Using Porous Carbon Electrode, *J. Phys. : Conference Series*, to be published.
- ② H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, K. Yokoyama, K. Okamura, and K. Yasutake, Silicon Oxide Coatings with Very High Rates (>10 nm/s) by Hexamethyldisiloxane-Oxygen Fed Atmospheric-Pressure VHF Plasma: Film-Forming Behavior Using Cylindrical Rotary Electrode, *Plasma Chem. Plasma Process.* **32**, pp. 533-545 (2012).
- ③ H. Kakiuchi, K. Higashida, T. Shibata, H. Ohmi, T. Yamada, and K. Yasutake, High-Rate HMDSO-Based Coatings in Open Air Using Atmospheric-Pressure Plasma Jet, *J. Non-Cryst. Solids* **358**, pp. 2462-2465 (2012).
- ④ H. Kakiuchi, H. Ohmi, K. Nakamura, Y. Yamaguchi, and K. Yasutake, Room-Temperature Silicon Nitrides Prepared with Very High Rates (>50 nm/s) in Atmospheric-Pressure Very High-Frequency Plasma, *Plasma Chem. Plasma Process.* **30**, pp. 579-590 (2010).
- ⑤ H. Kakiuchi, H. Ohmi, Y. Yamaguchi, K. Nakamura, and K. Yasutake, Low refractive index silicon oxide coatings at room temperature using atmospheric-pressure very high-frequency plasma, *Thin Solid Films* **519**, pp. 258-262 (2010).
- ⑥ H. Kakiuchi, H. Ohmi, K. Ouchi, K. Tabuchi, and K. Yasutake, Microcrystalline Si films grown at low temperatures (90-220 °C) with high rates in atmospheric-pressure VHF plasma, *J. Appl. Phys.* **106**, pp. 013521 1-6 (2009).
- ⑦ H. Kakiuchi, H. Ohmi, R. Inudzuka, K. Ouchi, and K. Yasutake, Enhancement of film-forming reactions for microcrystalline Si growth in atmospheric-pressure plasma using porous carbon electrode, *J. Appl. Phys.* **104**, pp. 053522 1-8 (2008).

[学会発表] (計 60 件)

- ① H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, A. Hirano, T. Tsushima, and K. Yasutake, Highly Efficient Formation Technology for Si-Based Functional Thin Films at Low Temperatures Using Atmospheric-Pressure Very High-Frequency Plasma, 8th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2012. 12. 11, Icho-Kaikan, Osaka University, Japan. (招待講演)
- ② H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, A. Hirano, T. Tsushima, and K. Yasutake, Characterization of Amorphous and Microcrystalline Si Films Grown in Atmospheric-Pressure Very High-Frequency Plasma, 59th AVS International Symposium, 2012. 10. 29 ~ 11. 2, Tampa, USA.
- ③ 對馬哲平, 平野 亮, 山田高寛, 大参宏昌, 垣内弘章, 安武 潔, 大気圧 VHF プラズマによる Si の低温・高速成膜と Si 成長プロセスの考察, 2012 年度 精密工学会春季大会学術講演会, 2012. 3. 14 ~ 16, 首都大学東京.
- ④ H. Kakiuchi, H. Ohmi, T. Yamada, A. Hirano, T. Tsushima, and K. Yasutake, Study on the Growth of Hydrogenated Amorphous and Microcrystalline Silicon Films Deposited with High Rates Using Atmospheric-Pressure VHF Plasma, 15th International Conference on Thin Films, 2011. 11. 8 ~ 11, Kyoto, Japan.
- ⑤ H. Kakiuchi, H. Ohmi, H. Yamada, and K. Yasutake, High-Rate Deposition of Amorphous and Microcrystalline Si Films Using Atmospheric-Pressure VHF Plasma, 2011 Korea & Japan Int. Symp.

- on Solar Cells, 2011. 9. 26~27, Mokpo, Korea. (招待講演)
- ⑥ 垣内弘章, 大気圧・超高周波プラズマの生成と Si およびその化合物の低温・高速成膜, 表面技術協会 材料機能ドライプロセス部会および関西支部表面物性研究会 合同研究会, 2010. 11. 19, 京都大学. (招待講演)
- ⑦ H. Kakiuchi, H. Ohmi, and K. Yasutake, Atmospheric-Pressure Plasma Technology for the High-Rate and Low-Temperature Deposition of Si Thin Films, 32nd International Symposium on Dry Process, 2010. 11. 11~12, 東京工業大学. (招待講演)
- ⑧ H. Kakiuchi, H. Ohmi, and K. Yasutake, Room-Temperature Deposition of Silicon Nitride Films with Very High Rates Using Atmospheric-Pressure Plasma Chemical Vapor Deposition, 63rd Gaseous Electronics Conference & 7th International Conference on Reactive Plasmas, 2010. 10. 4~8, Paris, France.
- ⑨ 田渕圭太, 尾内健太郎, 大参宏昌, 垣内弘章, 安武 潔, 大気圧 VHF プラズマによる微結晶 Si 薄膜の低温・高速形成に関する研究—熱流体解析を用いた膜成長プロセスの考察—, 2009 年度 精密工学会秋季大会学術講演会, 2009. 9. 10~12, 神戸大学.
- ⑩ 中村 慶, 山口賀人, 大参宏昌, 垣内弘章, 安武 潔, 大気圧 VHF プラズマによるシリコンナイトライドの常温・高速成膜, 2009 年度 精密工学会秋季大会学術講演会, 2009. 9. 10~12, 神戸大学.
- ⑪ Y. Yamaguchi, K. Nakamura, H. Ohmi, H. Kakiuchi, and K. Yasutake, Investigation of Deposition Characteristics and Properties of High-Rate Deposited SiNx Films Prepared at low temperatures (100-300 °C) by Atmospheric-Pressure Plasma CVD, The 23rd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS 23), 2009. 8. 24~28, Utrecht, The Netherlands.

[図書] (計 11 件)

- ① 垣内弘章, 大参宏昌, 安武 潔, 大気圧プラズマ CVD による Si 高速成膜と太陽電池への応用, OPTRONICS 2012 No. 6, pp. 88-93 (2012).
- ② 垣内弘章, 大参宏昌, 安武 潔, 薄膜 Si 太陽電池開発に向けたプラズマ CVD 技術, 「大気圧プラズマの技術とプロセ

ス開発」(シーエムシー出版, 2011), 第 II 編, 第 2 章, pp. 83-91.

- ③ 垣内弘章, 大参宏昌, 安武 潔, 大気圧プラズマを用いた低温・高速成膜技術, ケミカルエンジニアリング 55[12], pp. 1-7 (2010).
- ④ 垣内弘章, 大参宏昌, 安武 潔, 大気圧・超高周波プラズマを用いた微結晶 Si の低温・高速成膜, 表面技術, 60[6], pp. 371-375 (2009).
- ⑤ 垣内弘章, 大参宏昌, 安武 潔, 大気圧プラズマ CVD 法 (フィルムコーティングのための大気圧・超高周波プラズマ技術), 「新コーティングのすべて」(加工技術研究会編, 2009) 第 2 章, 2.2 (1), pp. 294-298.
- ⑥ 安武 潔, 垣内弘章, 大参宏昌, シリコン系 CVD, 「大気圧プラズマ 基礎と応用」(日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会編, 2009), 第 6 章, 6.7.3 [2], pp. 334-338.
- ⑦ 垣内弘章, 大参宏昌, 安武 潔, 大気圧プラズマ CVD, 「フィルムベースエレクトロニクスの最新要素技術」, 中山弘, 中山正昭, 小川倉一 監修, (シーエムシー出版, 2008), 第 4 章 低温成膜およびデバイスプロセス技術 3, pp. 166-175.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 成膜装置
 発明者: 柴田哲司, 平井孝彦, 垣内弘章, 安武 潔
 権利者: パナソニック株式会社
 種類: 特許
 番号: 特願 2010-070769
 出願年月日: 平成 22 年 3 月 25 日
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[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) 研究代表者

垣内 弘章 (KAKIUCHI HIROAKI)
 大阪大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 10233660