

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686049

研究課題名 (和文) 次世代ジャイアントエレクトロニクス対応メゾプラズマラテラルエ  
ピタキシー技術開発

研究課題名 (英文) Mesoplasma lateral epitaxy for next generation giant electronics

研究代表者

神原 淳 (KAMBARA MAKOTO)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：80359661

研究成果の概要 (和文)：

低温高速エピタキシャル成長を可能とするメゾプラズマ環境が、低電子温度 (1eV 以下) で有りながら高イオン密度 ( $10^{14}\text{cm}^{-3}$  以上) であり、且つ原子状水素(n=2)が高濃度で空間内に比較的均一に分布することを明らかにした。また水素分圧の増加に対して成膜前駆体ナノクラスター性状は大きく影響を受けず、特異なエピタキシャル成長様式も維持されることが判明した。これらの特徴により、従来の基板洗浄を必要とせず、堆積直前の数秒間のプラズマ照射処理だけでエピタキシャル成長が可能となり、堆積後のエピタキシャル膜の電気特性も良好な値が維持可能となる、大面積堆積に有利な特徴を確認した。

研究成果の概要 (英文)：

Mesoplasma environment for high rate and low temperature epitaxy was revealed to possess low electron temperature and high ion density characteristics. Atomic hydrogen is also distributed at high concentration uniformly spatially. Nanoclusters, growth precursors for mesoplasma epitaxy, are not affected by a change in the hydrogen partial pressure. These enable us to deposit high quality epitaxial films with no special pre-treatment for substrate prior to deposition, suggesting its advantageous characteristics for large area epitaxial deposition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
21年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
22年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
総計	19,700,000	5,910,000	25,610,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：薄膜プロセス

## 1. 研究開始当初の背景

薄膜シリコンを利用する大型デバイス向けの堆積技術には、その大面積を低コストでカバーしうる高速堆積の特徴が第一に求められる。しかし、当該デバイスの代表である

太陽電池では、高効率・光安定性の要求から、アモルファスから微結晶薄膜組織を必要とする流れにあり、また大型 TFT にも、高移動度を達成できる欠陥・粒界が少ない高品質結晶薄膜が求められるように、プロセスの高

速化と共に、高品質化の両立も求められる。大型結晶粒を有する薄膜製造技術には、アモルファスシリコンのレーザーアニール(LIC) あるいは金属誘起結晶化(MIC)が、有効な手段として用いられ、また提案されている。しかし、始めに低速堆積速度であるアモルファス層を堆積せねばならず、特に 5~10 $\mu\text{m}$  厚の膜厚が求められる結晶系シリコン太陽電池応用に対しては、大面積バッチ式であっても長時間のプロセス時間を要することになる。MIC では 10 $\mu\text{m}$  を超えるサイズの結晶も可能であるが、利用する金属元素を大面積で除去せねばならず、また熱処理に伴う当該元素の拡散により薄膜が意図しないドーピングにより品質低下する一因ともなる。

ここに、研究代表は、先行する研究により、低温度基板を維持しつつも、高速で高品質なエピタキシャル成長を可能とさせるメゾプラズマプロセスを見出した。本プロセスの特徴は、従来の熱・低温プラズマの中間的な圧力領域で高密度・高速プラズマフレームを発生させる。従って、原理的に低電子温度により薄膜特性を劣化させず、低ガス温度により比較的低い温度での堆積を可能とし、高速ガスフレームにより原料の高フラックス移送から高速堆積が期待される。特に、高密度でありながら、成膜前駆体形成・制御に関わる空間が見かけ 2 次元に集約できることから、良好なエピタキシャル薄膜を高速で堆積できるものと期待され、実際、本手法を特徴付ける、特異な構造を有する 2~3nm のナノクラスターが成膜表面直上で観測されている。

低温でも横方向沿面成長を基本とするエピタキシャル成長が可能である本プロセスの特徴を利用すれば、異種基板上でも大型の結晶粒成長が期待され、究極的には、低温基板上への高品質な単結晶級の薄膜シリコン堆積の展開も考えられる。現実的には、ホモエピタキシャル薄膜のリフトオフを含むレイヤートランスファー技術を利用することで、大型単結晶からなる高品質薄膜を安価なポリマー基板上に実現できる、新たなデバイス化の可能性が見いだせる。

## 2. 研究の目的

前述を背景に、本課題では、新たに見いだしたメゾプラズマの特徴を理解の上、制御・応用して、次世代ジャイアントエレクトロニクスに資する、単結晶を含む大型結晶粒から構成されるシリコン薄膜を低温・高速で堆積するプロセスの設計を目標とした。具体的には、プラズマ診断を行いメゾプラズマ環境の基本特性を明らかにすると共に、シリコンの成長様式並びにシリコン薄膜の品質に大きな影響を与える原子状水素の影響をその場計測システムを構築して明らかにする。また先行研究にて構築した X 線小角散乱その場計測装置を利用して、ナノクラスター成膜前

駆体性状が水素分圧を始めとするプラズマ環境変化より如何に変化するかを明らかにする。これらクラスター、メゾプラズマと基板との相互作用を理解することで、高速化・高品質化を両立するための制御指針を得る。なお、本技術の確立のためには、高速と高品質成膜が大面積で実現することが重要であり、面積に制約を受けない観点からのプロセス構築の要件も検討する。

## 3. 研究の方法

上述の目的遂行に当たり、始めにメゾプラズマ環境の特徴を、電氣的・光学的その場計測手法により定性・定量的に明らかにした。その後、水素分圧に対する成膜前駆体のクラスター性状をその場計測すると共に、基板表面とこれらプラズマ・クラスターとの相互作用について表面形態より調査した。これに基づき、種々条件下でプラズマ照射と堆積を行い、高速・高品質化と共に異種基板上への横方向エピタキシャルオーバー成長(LEO)技術としての可能性も検討した。

- 1) プラズマ診断：ダブルラングミュアプローブを利用して電子温度とイオン密度の空間分布を計測した。比較的圧力が高くガス温度の高いプラズマの為、W 製プローブに耐熱の工夫を施した。また反応容器内に直接ファイバーを導入して、強度・空間位置精度を高め発光分光計測を行った。円筒形プラズマに対して軸対称スキャンを行う治具を設計し、得られた強度分布はアーベル変換を施し、2次元の情報として水素密度・励起温度の空間分布を明らかにした。
- 2) キャビティリングダウン (CRDS) 分光法：プラズマ容器の一端に、測定対象とするバルマー系列の主量子数  $n=2$  で  $H_{\beta}$  の 486nm のレーザーを、Nd:YAG によるパルスレーザーをポンプ光に色素レーザーにて発生させ、これをプラズマを挟む形で設置する 1 対の高反射ミラー (99.99%) にてレーザーキャビティを作製し、漏れ光の時間減衰率より、吸収体の密度を絶対値計測するシステムを組み上げて測定した。
- 3) その場小角散乱(SAXS)測定：先行するプロジェクトで構築した SAXS 装置を利用した。プラズマ容器を挟む形で、一端にポリキャピラリーレンズとピンホールにより直径 300 $\mu\text{m}$  程度の直線平行ビームとした X 線(Cu K $\alpha$  線)を発生させる X 線源を設置。対向位置に 2 次元位置敏感型比例計数管(PSPC)検出器を設置して、プラズマ中心での散乱体による散乱 X 線を最大 5 $^{\circ}$  の散乱角で計測するシステムとしてゴニオを設定した。X 線ビームは、プラズマと基板間に基板と平行に入射させて、ガス凝縮に伴い形成されるナノクラスターに照射させることで、プラズマ条件によるクラスター形成状態の変化を反映した散乱強度を測定した。

- 4) メゾプラズマ照射：4MHz 発振，RF 入力を最大 22kW で，Ar-H<sub>2</sub> ガスにより ICP 型トーチにてプラズマを発生させた。シャッターを利用することで短時間の照射が制御可能となる。基板温度は BN 製シャッターのプラズマによる加熱を介して制御し～200 度程度とした。処理後の基板は，真空容器から窒素充填容器にて移動し，XPS による表面分析を行った。
- 5) エピタキシャル成長：as-received の non-dope (100) シリコンウエハを基板として堆積を行った。BN 製シャッターの堆積時のスパッタにより堆積薄膜に B 元素がドーブされ，これによりホール効果測定による堆積後の薄膜評価が可能となる。基板は水冷銅製ホルダに置く。基板/ホルダ間に種々の厚みと熱伝導度を有する材料を挟むことにより，プラズマ条件によらず一定の目的の基板温度となるよう制御した。基板温度は基板裏面より熱電対を接触させることにより測定した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 メゾプラズマ診断：

<ラングミュア測定>

ダブルプローブにより，エピタキシャル成長条件の基板位置で測定した電子温度とイオン密度のプラズマ RF 入力に対する変化を図1に示す。入力の増加と共に電子温度が低下し，イオン密度が増加する様子が確認される。15kW を境に電子温度はばらつきが若干大きくなるものの，大凡 1eV 以下であり，イオン密度は 10<sup>14</sup>cm<sup>-3</sup> 程度まで増加した。ICP 型トーチによるプラズマ発生のため，15kW で CCP からのモードジャンプが発生している可能性が考えられる。興味深い点は，堆積される薄膜組織が 15kW 以上で様な組織を呈し始め，エピタキシャル薄膜が堆積される傾向と相関がある点である。高エネルギーのイオンによる衝撃を抑えつつ，イオンフラックスを高められる特徴が，高速で高品質な薄膜を堆積可能な環境としてメゾプラズマが提供しうることを示している。

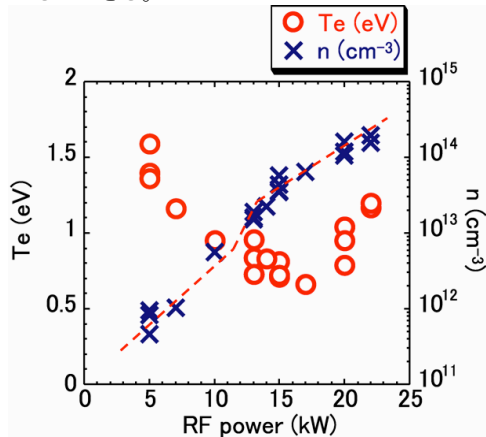


図1 電子温度とイオン密度の RF 入力依存性

##### <発光分光分析>

アーベル変換を用いたプラズマ発光分光計測により，高精度に原子状水素の空間分布を測定した。その結果を図2に示す。線速数 m/s の高速プラズマ流で有りながらも，プラズマトーチ直径 4cm 径にわたり，比較的均一に分布をしていること，また水素分圧が増加しても励起温度が著しくは低下しない特徴が確認された。

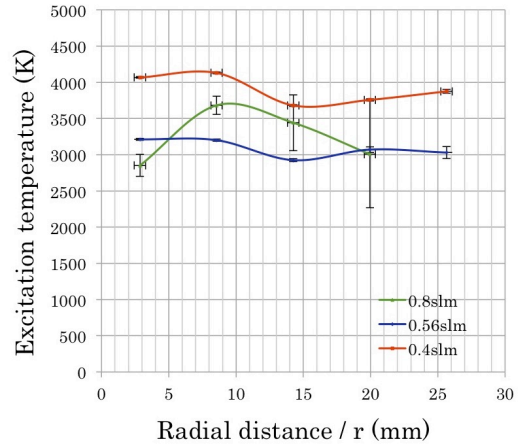


図2 H<sub>α</sub>/H<sub>β</sub> 発光強度比より求めた水素励起温度の空間分布測定結果(アーベル変換後)

##### <絶対密度測定 CRDS 計測>

始めに高精度絶対値その場合量が可能となるキャビティリングダウンシステム(CRDS)を構築し，励起水素原子をその場精密測定することで，本プロセスの特徴を明らかにした。キャビティシステムではミラー間距離を 0.76m に設定し，理想的な光路長を 7.6km としている。測定対象となる原子状水素の吸収スペクトルは，ドップラー広がり，シュタルク広がりを有することから，周波数走引して得られるリングダウンレートと文献値にある総括的な吸収断面積 (3.168 × 10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>) から吸収体密度を導出した。

図3に示すとおり，水素流量 0.2 SLM，RF 入力 22 kW 時に，H(n=2)=3 × 10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup> と高密度値が計測された。プローブ計測のイオン密度の結果と同様に，RF 入力増と共に H 密度も増加し，特に 15kW 近傍で明確な増加が確認された。同一基板位置では，水素分圧を高めるとプラズマが収縮し短くなるため，計測値は減少する結果となった。しかし一定水素分圧条件下でのプラズマトーチからの異なる距離における計測では，空間的に均一な分布をしている OES の結果を支持し，距離に依らず，10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup> 程度の H 密度を示していた。

この H(n=2)密度は，本実験条件下での熱平衡状態にある熱励起だけでは説明ができない程度の高濃度である。図1のプラズマ診断結果からすると，エピタキシャル成長のプラズマ環境では，電子温度 1 eV，イオン密度 10<sup>14</sup> cm<sup>-3</sup> 程度である。これを考慮すれば，メゾプラズマ環境では，高イオン密度の大半を占める Ar イオンによる Ar イオ

ンアタッチメント過程  $\text{Ar}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{ArH}^+ + \text{H}$  と  $\text{ArH}^+ + e \rightarrow \text{Ar} + \text{H}(n=2)$  を経た、活性化エネルギーを殆ど要しない励起過程であり、投入する  $\text{H}_2$  量に比例して原子状水素を形成させうる特異な高活性環境場である事が判明した。そのため、前述の様にプラズマフレーム下部においても高い水素原子濃度を示す空間的に均質な水素空間であることも可能となる。なお、他のプロセスと比較すると、今回得られた水素密度は、50Torr の高压プロセスと同程度であり、1Torr 前後の従来のプロセスの 1~2桁程度高い値となり、本プロセスの他手法とは異なる環境であることが確認できる。

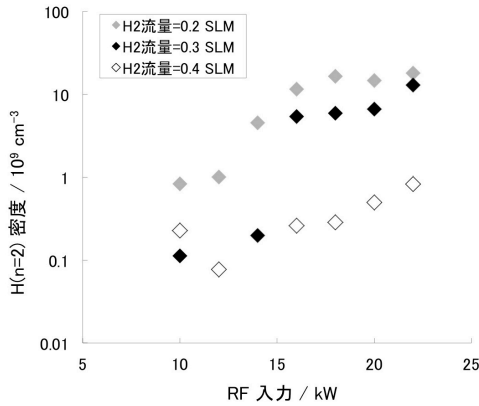


図3 原子状水素 H(n=2)密度の異なる水素流量時の RF 入力依存性 (Ar-H<sub>2</sub> プラズマ)

#### 4.2 メゾプラズマピタキシー:

##### <成膜前駆体のその場 SAXS 計測>

X 線小角散乱その場計測システム(SAXS)により、水素分圧を変化させたメゾプラズマ環境下での成膜前駆体シリコンナノクラスター性状を計測した。得られたスペクトルを図4にまとめる。シリコンナノクラスター性状は基本的に水素量に依存せず 2~3nm にモードを有する球形であることが (a)Guiner, (b)Kratky プロットにより確認され、

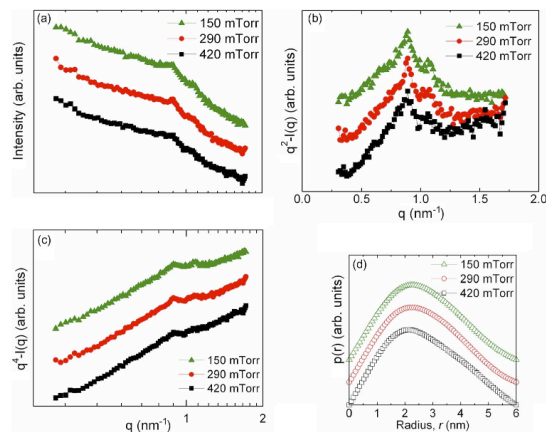


図4 水素分圧変化させた場合のクラスター性状の変化。(a) Guiner, (b) Kratky, (c) Porod プロットと (d) GNOM 解析によるサイズ分布。

また、本クラスターに特徴な、粗に結合した構造を維持しうることが(c)Porodプロットの緩やかな曲線増加より確認された。

##### <水素分圧依存性>

水素分圧を変化させた場合の堆積速度と膜質、並びにホール移動度の変化を図5に示す。200 mTorr までの低水素分圧では、多結晶組織を有する薄膜が堆積し、それ以上の水素分圧では、堆積速度を低下させることなく、一定の堆積速度にてエピタキシャル成長が維持された。

SAXS の結果では、水素分圧の増加によってもプラズマ内部での成膜前駆体形成過程、クラスター性状そのものを大きく変化させない。従って、メゾプラズマ環境での高密度の水素原子は、シリコン表面でのエッチングを促進することなく、クラスターの付着・沿面成長を維持・促進する役割である可能性が示唆された。その他、興味深い点は、多結晶膜の堆積速度は極めて速く、堆積効率が実に 85%を超える。また多結晶でありながら、エピタキシャル薄膜のホール移動度の 70~80%の高い値を示す点である。

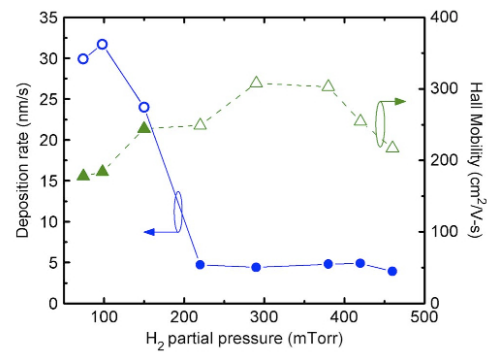


図5 水素分圧変化に伴う薄膜堆積速度変化とホール移動度変化。○▲は多結晶、●△はエピタキシャル薄膜の結果を示す。

##### <基板相互作用>

メゾプラズマを用いた薄膜堆積時のプラズマ照射により、シリコン基板最表面の自然酸化膜 (Si-O 結合) が瞬間的に除去可能であることを見いだした。プラズマ処理、堆積に伴う基板・薄膜表面形状の自己相関関係を図6にまとめる。Ar-H<sub>2</sub>照射により、瞬間的に数 nm 程度まで基板表面が荒れることで、自然酸化膜が除去されることが分かる。しかし重要な点は、堆積原料として SiH<sub>4</sub> ガスを投入することで、荒れた表面は再び RMS=0.2nm 程度の極めて平滑な表面が維持される点である。

図7に基板前処理有無で比較したエピタキシャル薄膜の堆積速度とホール移動度の結果を示す。従来の SPM+HF 堆積前処理が無い場合でも高速・低温度でのホモエピタキシャルシリコン膜の堆積が可能であり、かつ電気特性もホール移動度が前処理有りの場合と同じ 300cm<sup>2</sup>/Vs 程度を達成しうることが確認された。以上の結果

をまとめれば、低水素分圧の場合には、クラスター性状を大きく変化はさせないものの、基板表面での相互作用が沿面成長を十分に促進するほどでない場合には多結晶膜となる。一方で、高水素分圧下では、基板表面エッチング作用は相対的に強力で、表面に到達したシリコンクラスターの再離脱を促す可能性はあるものの、沿面成長を阻害するほどではない。但し、水素分圧が大きすぎる場合には、プラズマ収縮により、プラズマ/基板境界層が変調し、基板到着するナノクラスターの性状が変化し、基板到着するナノクラスターの性状が変化し、基板到着するナノクラスターの性状が変化する可能性が高くなる。なお、低水素分圧時の多結晶膜の電気特性からは、本クラスターを前駆体とする場合、比較的良好な粒界性状となる可能性を示唆している。

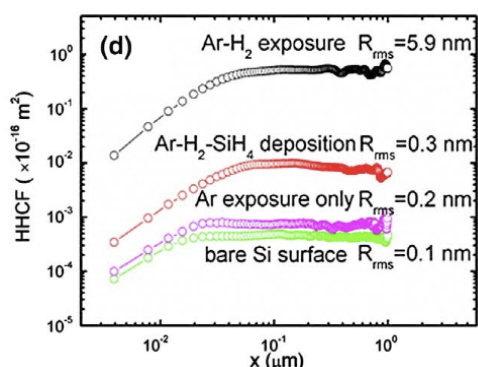


図6 プラズマ照射並びに堆積前後の基板表面荒さ自己相関関数の比較

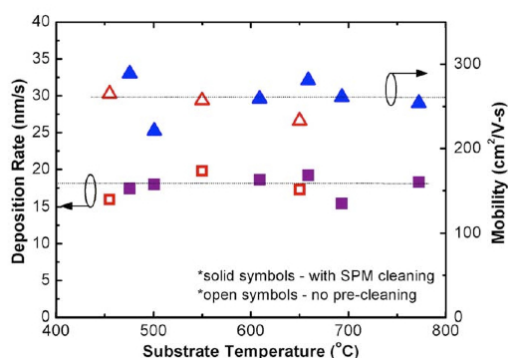


図7 ホール移動度のプラズマ洗浄有無比較

#### 4.3 結晶粒径大型化

##### <横方向エピタキシャルオーバー成長 LEO>

前述の低水素分圧条件での多結晶薄膜が示すように、メゾプラズマ条件下での多結晶組織は良好な特性を示す可能性が示唆された。そこでエピタキシャル条件下でのプラズマ/基板界面相互作用状態を維持して、ガラス基板等異種基板上への堆積を行った。その結果、石英ガラス、コーニングガラス基板上でも、直接、2~3μm サイズの結晶粒から成る多結晶シリコン薄膜が堆積可能であることを確認した。

より大型結晶の成長を意図して、高速横方向成長が顕著となり得る高入力での堆積した場合には、薄膜は一切作製されなかった。一方、多結晶シード層を作製後にエピタキシャル成長を行

う多段堆積を検討した結果、コーニングガラス基板の場合には、シード層が剥離する問題が確認された。シリコン/コーニングの熱膨張係数の違いから、堆積時にはシード層内に引張応力が働き、これが剥離に関連しているものと考えられる。Al基板に対しては、15kW までのRF入力では多結晶 Si 薄膜が堆積可能であることを確認できたものの、エピタキシャル成長条件となる 22kW 近傍では、再現良く堆積はできなかった。以上の結果を要するに、基板再表面では原子状水素の再結合の影響も含めて、局所的に極めて高い温度となっている可能性が高く、より効果的な基板冷却の方策を検討する必要があることが判明した。また、コーニング基板への直接堆積において 40° までのプラズマ斜入射堆積(oblique 堆積)を検討したが、結晶粒の粗大化への効果は限定的であることが判明した。しかし、15kW 程度の入力条件ではシリコン基板の場合と同様に(220)優先成長が強く確認された。熱的影響を抑制しつつ、高配向薄膜で面内の小傾角粒界によるキャリア再結合を低減しうる堆積条件としての可能性も考えられる。

平行して、SiO<sub>2</sub>を利用した LEO の可能性についても検討した。100nm 厚、ライン幅・ライン間 Line-Space: 4μm のパターンを施したウエハ上に、エピタキシャル成長条件下で堆積を行った結果、少なくとも XRD では多結晶化が確認されない、5μm 厚のエピタキシャル薄膜が堆積された。透過型電子顕微鏡による観察によれば、パターン近傍には欠陥が導入されており、品質向上が不可欠である。しかし、高速で有りながら、SiO<sub>2</sub>上に基板面方位と同じ特定の結晶方位を有する薄膜を堆積できる可能性を示した。今後、SiO<sub>2</sub>層を犠牲層としたリフトオフ/レイヤートランスファー技術として利用することで、異種基板上への単結晶薄膜が可能となる有意な結果であると考えられる。横方向或いは多結晶核生成後の何らかの優先成長の結果であるか、その成長様式については不明な点が多く、今後の詳細な成長の解明が待たれる。

#### 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4件)

1. J. Fukuda, M. Kambara, T. Yoshida, Low temperature silicon epitaxy from trichlorosilane via mesoplasma chemical vapor deposition, Thin Solid Films, 査読有, 2011 in press.
2. J.M.A. Diaz, M. Kambara and T. Yoshida, Evolution of Surface Morphology With Hydrogen Dilution During Silicon Epitaxy by Mesoplasma CVD, IEEE Transactions Plasma Sci., 査読有, 37 (2009) 1723-1729.
3. J.M.A. Diaz, M. Yoshioka, M. Kambara, T.

Yoshida, Instantaneous cleaning of silicon substrates for high-rate and low-temperature mesoplasma epitaxy, Thin Solid Films, 査読有, 518 (2009) 976-980.

4. 神原淳, メゾプラズマ CVD による高速低温堆積技術応用, J. Plasma Fusion Res., (解説) 85 [5] (2009) 88-93

[学会発表] (計 15 件)

1. M. Kambara, High rate and high yield silicon mesoplasma epitaxy (Invited), 7<sup>th</sup> Plasma Frontier Research Meeting, Kanazawa, 2010-11-30
2. M. Kambara, J. Fukuda, S. Wu, L. W. Chen, T. Yoshida, High rate and high yield silicon deposition under mesoplasma condition for a next generation Siemens technology, GEC-ICRP2010 (Gaseous Electronics Conference), Paris, France, 2010-11-4.
3. M. Kambara and T. Yoshida, High yield silicon deposition under mesoplasma condition for a next generation Siemens technology, SCSi (Silicon for the Chemical and Solar Industry), Auslend, Norway, 2010-6-28
4. 神原淳, プラズマスプレーによるナノコーティング技術の開発と応用(講師), 京浜ネットワーク支援活動技術セミナー「プラズマ利用で新たなものづくりを!」, 横浜, 2010-02-04
5. M. Kambara, J. Fukuda, T. Yamamoto, T. Yoshida, Feasibility study of mesoplasma CVD for direct production of high pure Si thin films from trichlorosilane, Materials Research Society Spring Meeting, Boston, USA, 2009-12-2
6. 神原淳, メゾプラズマ高速エピタキシー(招待講演), 第1回薄膜太陽電池セミナー(第36回アモルファスセミナー), 岐阜, 2009-10-28
7. K. Iwamoto, M. Yoshioka, J.M.A. Diaz, M. Kambara, T. Yoshida, Effect of substrate transfer on silicon epitaxy during mesoplasma CVD, International conference on plasma surface engineering (AEPSE 2009), Busan, 2009-9-24.
8. M. Kambara, J.M.A. Diaz, T. Yoshida, A new route for high rate and low temperature epitaxy by cluster assisted mesoplasma CVD (Invited), Thermec 2009, Berlin, Germany, 2009-08-27.
9. J.M.A. Diaz, M. Yoshioka, Y. Iwamoto, K. Harima, M. Kambara, T. Yoshida, Intermittent mesoplasma CVD for high rate and low temperature silicon epitaxy, Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco, USA, 2009-4-15.

10. 神原淳, 微結晶 Si 薄膜超高速堆積用メゾプラズマ(招待講演), プラズマ・核融合学会研究会, 九州大学, 福岡, 2009-03-26.
11. 神原淳, プラズマスプレー技術展開(招待講演), ナノサーフェス研究会, 東葛テックプラザ, 千葉, 2009-03-06.
12. 神原淳, high rate and low temperature silicon deposition via mesoplasma CVD メゾプラズマ CVD による高品質シリコン膜の低温高速堆積(招待講演), プラズマ科学シンポジウム 2009 (PSS) 第26回プラズマプロセス研究会, 名古屋大学, 愛知, 2009-02-02.
13. M. Kambara, J.M.A. Diaz, T. Yoshida, In-situ detection of Si nanoclusters by small angle X-ray scattering during high rate and low temperature silicon epitaxy by mesoplasma CVD (oral), 2008 Fall Meeting, Materials Research Society, Boston, USA, 2008-12-04.
14. J.M.A. Diaz, M. Kambara, K. Harima, M. Yoshioka, T. Yoshida, Instantaneous cleaning of silicon substrates for high-rate and low-temperature mesoplasma epitaxy (oral), Asia-Pacific Conference on Plasma Science Technology (APCPST), Huang-shang, China, 2008-10-08.
15. M. Kambara, J.M.A. Diaz, M. Yoshioka, T. Yoshida, Feasibility study of mesoplasma lateral epitaxial overgrowth for high rate and low temperature deposition of large grained crystalline Si thick films (oral), Plasma Surface Engineering (PSE), Garmisch-Partenkirchen, Germany, 2008-09-17.

[図書] (計 1 件)

1. 神原淳, ナノコーティング(第1章 2.2 担当), (財)ファインセラミックスセンター編, 技報堂出版, 2010-3-30(発行).

[その他]

ホームページ等

<http://www.plasma.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神原 淳 (Kambara Makoto)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号 : 80359661