

Development of Ultra-high Rate Thermal Plasma  
Cluster Deposition Method for  
Well-controlled Nano-scopic Electronic Materials

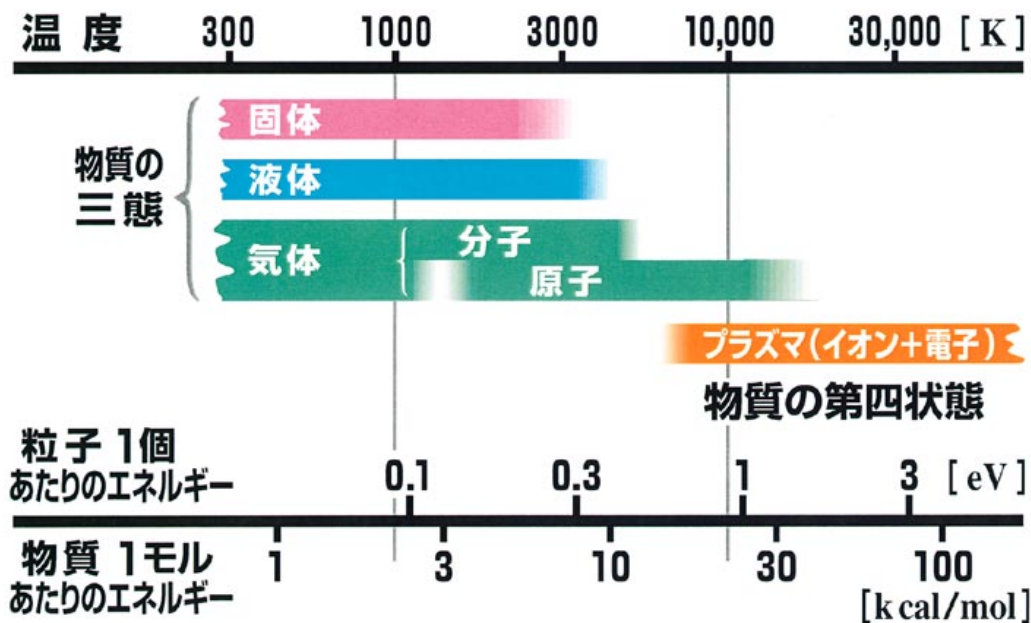
高次制御ナノスコピック電子材料の  
熱プラズマ超高速クラスター成膜法創製



プロジェクトリーダー 吉田 豊 信

東京大学 大学院工学系研究科 教授

## 物質の4つの状態



固体物質に順次エネルギーを加えて行くと、液体となり気体となります。この固体・液体・気体の状態を物質の三態と呼びます。何らかの方法で気体に更にエネルギーを加えるとイオンや電子が生成しプラズマが得られるので、プラズマ状態を「物質の第四状態」と呼んでいます。本プロジェクトではこのプラズマ状態からなる「小宇宙」を利用します。

### 1. 研究の目的

一般に、新規プロセスが産業に組み込まれる要件の一つに、そのプロセスの特性時間と産業固有の特性時間との適合性が挙げられます。しかし、プロセスの高速化には新たな原理の導入が必要であることが多く、実験室レベルでの手法の延長線上に実用プロセスが存在することは稀であることは多くの事例が示しています。気相成膜分野で特にこのことが顕在化するのは、各プロセスが固有の物理・化学的律速過程に支配されており、高速化には律速過程の変更、即ちプロセス原理の本質的変更が必要となるからです。例えば、21世紀の材料基盤技術の一つとして現在精力的に研究されている分子線エピタキシーの様に、原子や分子一個一個を積み木の様に並べ積み上げる成膜法、言わば、素から目的とするある秩序状態の形成を意図した成膜法に堆積速度の限界があることは明らかです。あらゆる産業領域から、薄膜と同程度に制御された厚膜に関する研究への強い要求が在るにもかかわらず遅々として進展しない理由もここにあります。この状況を打破するには、混沌とした気相空間や気相・表面相互作用を特殊な「小宇宙」内で高度に制御し、高速成膜を可能とする新たな原理に基づくプロセス開発が必要であることは明白です。本プロジェクトでは「小宇宙」として太陽表面温度5700K以上10000Kに達する物質の第4状態である熱プラズマを選び、プラズマ境界層で生成する、その特異な属性から違った意味で物質の第4状態とも言えるナノクラスターを成膜種とする、言わば次元の異なる第4状態の融合による“熱プラズマ超高速クラスター成膜法”を創製し、超高速・大面積・エピタキシャル成長、更にはナノ構造厚膜堆積を可能とし、多様な新規ナノスコピック電子材料の展開を図ることを目的としています。本プロジェクトの成功により、新たな学問分野の展開が期待され、さらには、電子・オプト・エネルギー産業など、多くの産業領域に対する波及効果、曳いては新産業創出の可能性が確信されます。

## 2. 研究の内容

先端材料開発において、エピタキシャル技術に代表されるナノ空間制御成膜プロセス技術が21世紀の基盤技術として精力的に研究されています。しかし、現在技術では原理的に、堆積速度・膜厚に限界を有し、その打破を目指す革新的なナノ空間制御プロセス技術の創製が望まれています。その社会的・時代的要求に応えるため本プロジェクトでは、過去20年間の我々の成果を基礎とし提案してきた“熱プラズマクラスタープロセス”を具現化し、エピタキシャル膜やナノ構造制御膜など、ナノ空間で高次微細制御された材料の創製を試みています。具体的には、クラスターのもつ、高付着率、2次元核としての役割など、従来法の成膜種である原子や分子にはない特異なプロセス物性に加え、熱プラズマ環境下で生成するクラスターの高い内部エネルギー状態及びその高いフラックス、に着目し、従来法では実現不可能であったSi系、又はTiO<sub>2</sub>系太陽電池用結晶性厚膜の超高速成膜、及びLi(Nb<sub>1-x</sub>Tax)O<sub>3</sub>を例とする誘電体エピタキシャル厚膜の超高速成膜を重点課題として、成膜装置開発、系統的成膜実験・膜物性評価、及び成膜機構解明のための個立クラスター評価を三位一体として研究を進めています。

### 熱プラズマ超高速クラスター成膜装置開発。

成膜装置開発に当たっては、今日まで、熱プラズマプロセスでは試みの対象とさえ看做されてこなかった、プロセスの超清浄性と超高速制御性に力点をおいて開発を行っています。特に、多様なモードの熱プラズマの高効率発生のため、世界的にも余り例のない他励式40kW高周波電源を導入するとともに、新たなトーチを開発しています。又、原料として、気体・液体・固体いずれも使用可能な装置開発を行っています。

### 高次制御性ナノスケピック電子材料成膜。

現在のプラズマプロセスをはじめとして、従来法では困難であった、ナノ空間で高次制御されたナノスケピック電子材料の創製を試みています。具体的には、太陽電池作製の高速化による低コスト化を目指したSi系、及びTiO<sub>2</sub>系厚膜の超高速・大面積成膜、及び光エレクトロニクス用Li(Nb<sub>1-x</sub>Tax)O<sub>3</sub>の超平坦性エピタキシャル厚膜の高速堆積を検討し、ナノスケールでの構造解析、及び各種物性評価などにより、プロセスの最適化をはかるべく研究を進めています。

### クラスター成膜機構の解明。

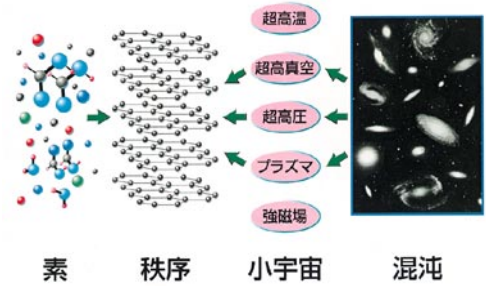
イオントラップクラスター成長・分析システム、及びプラズマ環境オプトSTM装置設計・試作しています。これらにより、本プロジェクトに対応する各クラスターの成長過程、安定性、更にはプラズマやレーザー照射環境下での孤立クラスターの構造、電子・光物性などの同時in-situ評価が可能となり、クラスター成膜シミュレーションとともにクラスター成膜機構解明を目指し研究しています。

## 3. 研究の体制

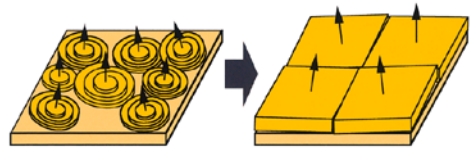
期 間：1997年6月～2002年3月

構 成：プロジェクトリーダー1名、コアメンバー3名、研究協力者4名ほか

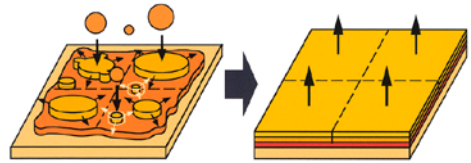
実施場所：東京大学大学院工学系研究科材料系専攻吉田研究室をコアとして、同専攻の3研究室及び東京大学生産技術研究所の1研究室で研究を進めています。



先端材料作製法の多くは、素からある秩序状態を形成する手法を採用していますが、本プロジェクトでは混沌状態を「プラズマ小宇宙」で制御し秩序状態を形成する手法を開発しています。

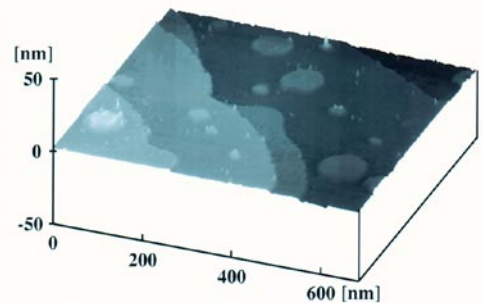


(a) Spiral growth

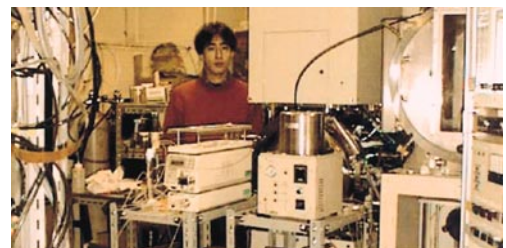


(b) 2D cluster nucleus growth

(a) は主に「素」からの成膜過程でしばしば観察される成長様式で、(b) は本プロジェクトで意図する成長様式です。(a) に比べ結晶方位の完全性が期待されます。



本プロジェクトで成膜した酸化物超電導体厚膜表面のSTM像です。様々な形態が観察されますが、ステップ(段)の高さは全て1格子長(1.2nm)であることが確認されています。



酸化物厚膜用熱プラズマ超高速クラスター成膜装置。