

Atomic Scale Dynamics of Non-Equilibrium Surface Layer and Synthesis of New Materials

非平衡表面層の原子スケール ダイナミクスと新物質の創生

プロジェクトリーダー 大 野 英 男

東北大学 電気通信研究所 教授

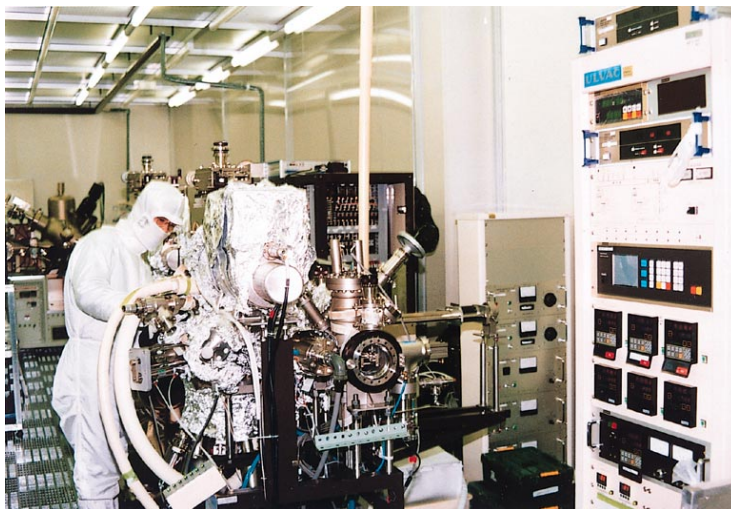


図1 磁性体／半導体非平衡表面層・融合構造を形成する MBE 装置

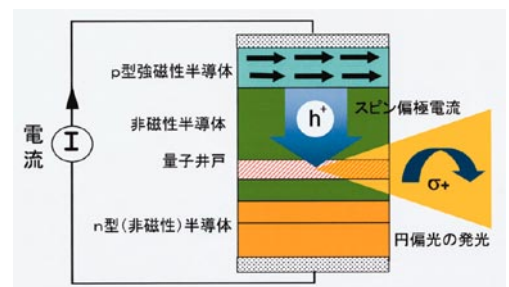


図2 強磁性半導体 (Ga, Mn) As を用いた半導体 pn 接合中へのスピン偏極電流注入 (Nature より)

1. 研究の目的

半導体電子・光デバイスの極微細化・高性能化を図るため、分子線エピタキシ (MBE) 法や化学気相堆積 (CVD) 法などの結晶成長技術は大きく発展してきた。そこでは、きわめて清浄かつ平坦な表面が得られ、1原子層レベルで結晶成長を制御することが可能である。このような結晶成長法を用いて極端な非平衡条件下に表面を置くと、そこに形成される表面層は平衡状態とは大きく異なる特異な原子スケールのダイナミクスを有する。この非平衡表面層を利用することにより、従来形成することのできなかった新しい物質を創生することが可能となりつつある。

本プロジェクトは、半導体表面に出現する非平衡表面層における原子スケールのダイナミクスを理解すると共に、それを利用した新物質の創生とその応用をめざす。具体的には、MBE や CVD 法を用いて、(1) 非平衡表面層での原子スケールのダイナミクスを種々の走査プローブ顕微鏡と時間分解スペクトロスコピーを用いて明らかにする。(2) さらに非平衡表面層を結晶成長の場として用いることにより、従来困難とされてきた磁性体と半導体、絶縁体と半導体、金属と半導体を融合した新しい物質群を創生し、これら融合系物質群を用いた多層構造や量子構造を実現する。(3) これらの新しい構造で初めて発現する電子・光・磁気物性を用いた新しい電子・光・磁気機能デバイスの実現をも目指す。

本研究により、金属・絶縁体・磁性体と半導体を自在に組み合わせ、融合して用いることが可能となれば、次世代の半導体エレクトロニクスに大きなブレークスルーがもたらされると期待される。

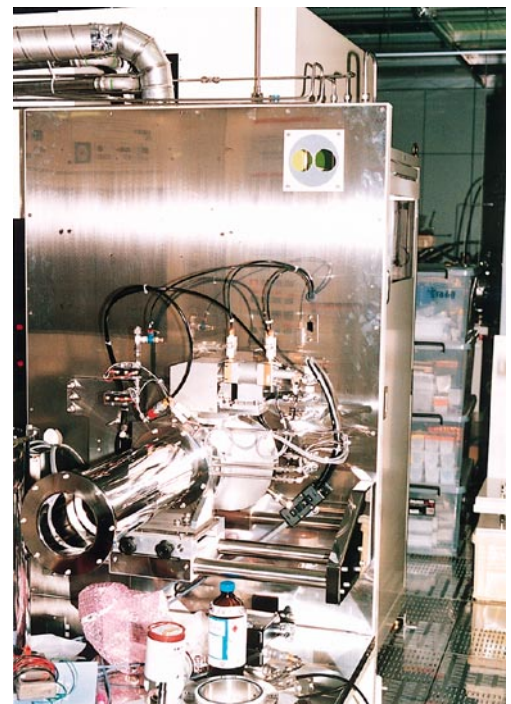


図3 CVD 装置

2. 研究の内容

(1) 磁性体／半導体融合材料の創生

現在、一般に電子・光デバイスに用いられている半導体材料は非磁性であり、磁性体との融合あるいはキャリアスピンの積極的な利用はほとんど試みられていない。もしこれらが可能になれば、次世代のエレクトロニクスに大きな技術革新をもたらすと期待される。しかし一方で、非磁性の半導体中において巨視的な磁気的秩序が発現するようにするためには、平衡状態における固溶度を遥かに超えた数の磁性原子を導入する必要がある。近年、MBE法で形成される非平衡表面層を用いることにより、固溶限度をはるかに超えた磁性原子（遷移金属、希土類）を非磁性半導体内に導入することが可能であることが、本研究グループを中心に実証されつつある。本研究では、このような非平衡表面層の形成機構を、走査プローブ顕微鏡や電子線回折などを用いて超高真空中でのその場観察を行い、表面における原子レベルのダイナミクスから明らかにする。また、多様な磁性体／半導体融合材料とその量子ナノ構造の創生を行い、その電子・光・磁気物性を明らかにし、新しいデバイスを実現するための基盤技術を確立する。

(2) 絶縁体／半導体融合材料の創生

Siをベースとした集積回路技術では、デバイスの微細化に伴い、不純物を極限まで除いた清浄な半導体表面を実現し、より禁制帯幅の大きい絶縁体と半導体を原子層オーダーで制御しつつ融合することが求められている。本研究では、CVD法を用いて、水素終端されたSiやGeの表面状態、およびCH₄やNH₃分子の吸着・反応過程を調べ、非平衡表面層を用いたSiCやSiNなどの絶縁膜の1原子層成長を実現する。さらに、絶縁膜と半導体の多層構造を形成し、走査トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡による原子レベルの評価を行う。またB₂H₆やPH₃などを用いた原子層ドーピング技術や微細加工技術を確立し、Si系材料におけるヘテロ構造の利用を飛躍的に促進させ、高性能シリコンデバイスの実現を目指す。

(3) 金属／半導体融合材料の創生

半導体と金属の融合構造および融合材料は、デバイス応用の観点からはきわめて有用かつ魅力的ではあるが、これら融合系のエピタキシャル成長は従来困難であるとされていた。これを実現するためには、平衡相には存在しない非平衡状態の材料を創生する必要がある。本研究では、MBE法と超高真空において独自に開発したテンプレート法を用いて、さまざまな金属／半導体からなる高品質のヘテロ界面および多層構造を創生すると共に、非平衡表面層の原子レベルのダイナミクスを調べることによりその形成機構を明らかにする。さらに、半導体／金属融合構造の物性を解明・制御し、新しいデバイスを提案・実証する。

(4) 非平衡結晶成長のマテリアルデザイン

第一原理計算に基づいて、化合物半導体中のドーパントの溶解度極限に関する結晶成長条件依存性を予測し、非平衡状態で結晶成長条件を変えることにより、熱平衡状態では実現が不可能な磁性体／半導体、絶縁体／半導体、金属半導体などの新物質創生のためのマテリアルデザインをおこなう。特にII-VI族及びIII-V族化合物磁性半導体に高濃度までキャリアをドーピングして低抵抗の半導体を作製し、高い強磁性転移温度をもつ強磁性半導体を実現するための新しい価電子制御法のマテリアルデザインを行う。これらの結果に基づいて、高い強磁性転移温度を持つ磁性半導体の物質創生のための具体的な結晶成長方法を実験グループに提供する。

(5) 非平衡表面層のダイナミクスと電子物性の解明

非平衡表面層では、構成する原子の結合状態や電子状態、さらには励起状態などはバルクのものとは大きく異なり、光や磁場を印加したときに特異な応答を示すことが明らかになりつつある。本研究では、近接場顕微鏡などの走査プローブ顕微鏡を用いて、サブミクロン領域からナノスケールでの空間分解能とピコ秒の時間分解能を有する蛍光・吸収分光測定技術を確立し、非平衡表面層の表面・界面における原子・分子の吸着・反応・振動・構造変化などのダイナミクスを調べ明らかにする。これら表面・界面で発現する非線形光学現象や超高速応答を調べて得られた知見をもとに、非平衡表面層のダイナミクスの制御を行い、その特異な物性を解明する。

3. 研究の体制

期 間：1997年7月～2002年3月

構 成：プロジェクトリーダー：大野 英男（東北大学・電気通信研究所・教授）
コアメンバー：5名、研究協力者：7名（内ポストドク2名）

実施場所：東北大学電気通信研究所 仙台市青葉区片平2-1-1

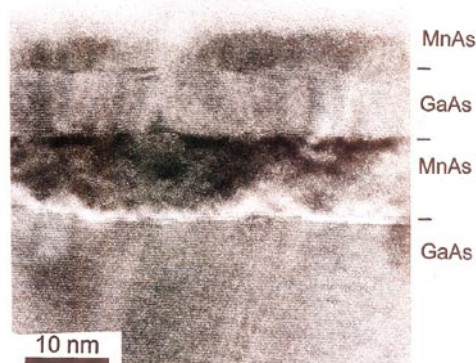


図4 金属（MnAs）／半導体（GaAs）多層構造の断面TEM写真図

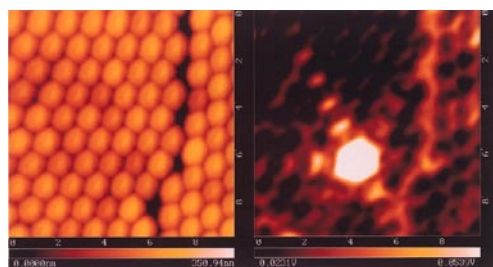


図5 原子間力顕微鏡によるポリスチレン微小球の1層配列結晶の表面形状像（左）と、近接場顕微鏡による蛍光励起像（右）

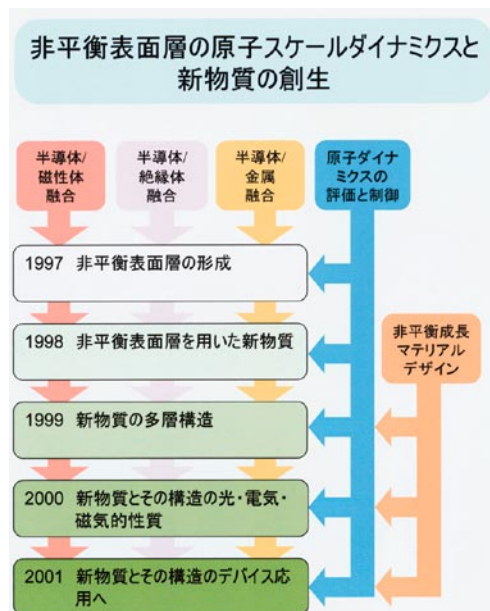


図6 本研究の実施計画のチャート