

第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 薄膜・表面物理分科会主催シンポジウム T10 「表面・界面の反応／成長制御による高機能性材料の創製」開催報告

日時：2025 年 9 月 8 日（月）13:30～17:40

場所：名城大学天白キャンパス S301（共通講義棟南）

司話人：牧原克典(名古屋大学)、秋山亨(三重大学)

薄膜・表面研究の分野では、薄膜の制御形成や表面・界面の計測・制御に関する学理と技術が構築され、現在では様々な分野で応用が進められている。本シンポジウムは、Si ならびに Ge 等の IV 族系材料に焦点を絞り、表面・界面での制御技術や物理について、デバイス分野および材料分野の研究者および学生が一堂に会し、議論や情報交換を行う場とすることを趣旨とした。研究開発のさらなる進展に資することを目的として 7 名の先生方を招待し、薄膜ならびにナノ構造における表面・界面の制御技術およびデバイス応用に関する講演を行って頂いた。シンポジウムの参加者は、最多の時間帯で現地参加 90 名、オンライン参加 39 名の計 129 名となり、成功裏に終了した。

シンポジウムの冒頭では、物質・材料研究機構の知京豊裕先生より「マテリアルズインフォマティクスを使った機能性界面の理解と課題」と題して、マテリアルズインフォマティクスの活用とその変遷を俯瞰的に示され、現状と今後の展望について講演して頂いた。特に、新しい材料探索の方向性として、これまで主にバルク材料を対象とした解析が中心であったが、今後の半導体デバイス開発に向けては界面へと進展していくことが期待されること、またその実現には圧倒的なデータ不足が課題となっており、データ収集や記述方法を含めた基盤整備の必要であることが紹介された。さらに、半導体デバイス製造プロセスにおける自動化（自律化）にも触れられ、今後は製造プロセスの自律化が重要な鍵となることが指摘された。

続いて、筑波大学の都甲薰先生より「Deep Learning を用いた結晶成長過程の解析」と題して、Deep Learning を援用した Ge 多結晶薄膜の作製に関して講演して頂いた。機械学習を用いた画像解析には膨大な訓練データが必要であり、その収集には多大な労力を要する。この問題の解決法として「擬似画像」を自動生成することで訓練データを準備して機械学習を実行することでデータ生成の労力を大幅に削減することが提案されて、実際に Ge 薄膜形成条件の抽出に成功したことが紹介された。また、得られた Ge 薄膜の特性も示され、機械学習を活用した薄膜作製プロセスの有用性についても説明があった。

3 番目には、名古屋大学の宇佐美德隆先生より「シリコンをモデルとした多結晶材料情報学の開拓」と題したご講演が行われた。講演ではシリコン多結晶膜の作製を題材として、宇佐美先生の提唱する「多結晶材料情報学」の枠組みについて紹介がなされた。まず、多結晶における結晶方位を予測するための機械学習データの構築手法が説明され、さらに機械学習を用いた薄膜特性予測の試みとして、転位クラスター発生の画像解析による予測が紹介された。これらの取り組みを通じて、機械学習に基づくメカニズム解明に向けた知見獲得の可能性についても

議論がなされた。

休憩後のシンポジウム後半セッションでは、主にナノ構造の作製法とその物性・機能に関する講演が続いた。まず、IHP の山本裕司先生による「歪および表面形状制御による三次元自己周期整合型 IV 族ナノドット成長」と題するご講演が行われた。Si(001)および SiGe(001)基板上での三次元自己周期整合型 IV 族ナノドット (ND) の作製とその形成機構が紹介され、歪や表面形状を制御することで多様な三次元周期配列の ND を自己整合的に形成できることが示された。これら周期配列の違いは、Stranski-Krastanov 機構と引っ張り歪みとの競合に起因することが示された。さらに、ナノドット配列と超格子構造との切り替えが可能であり、同一基板上に三次元構造と二次元構造を共存させることができることが紹介された。これにより、三次元・二次元構造を組み合わせた新規デバイス構造の設計・実現可能性についても言及がなされた。

5 番目には、物質・材料研究機構および筑波大学の深田直樹先生より「Si/Ge ナノワイヤの界面・物性制御」と題した講演があった。講演では一次元ナノワイヤにおける界面制御とその結果としての電子物性制御が示され、特にコアシェル型ヘテロ構造をナノワイヤ内部に構築することで、Si/Ge ヘテロ接合を活用した高電子移動度トランジスタ構造が実現可能であることが紹介された。さらに、不純物ドーピングを行っていない領域の界面においても、ホールガスおよび電子ガスを形成できることが示され、キャリア誘起や伝導チャネルの新たな形成法として紹介された。加えて、縦型ゲートオールアラウンドトランジスタの実現に繋がる成果として、コアシェルナノワイヤの配列や寸法の精密制御、Si/Ge 領域への選択的ドーピング手法、および Fano 干渉に基づくホールガス蓄積の実証例などが紹介された。

6 番目には神戸大学の杉本泰先生より、「広範囲にサイズ制御されたシリコンナノ粒子の機能開拓」と題して Si ナノ粒子の機能に関して講演して頂いた。シリカの熱処理による結晶性 Si 粒子形成プロセスを応用した、サイズ制御した Si ナノ粒子の作製と、無機元素による表面改質プロセスにより Si ナノ粒子が分散したコロイド溶液の実現が示された。5 nm 程度のサイズでの Si ナノ粒子においては、その構造が単結晶であり、さらに同時ドーピングにより高効率発光が実現して赤外領域での高効率発光に成功したことが紹介された。また、150 nm 程度のサイズでの Si ナノ粒子においては、その直径を制御することで紫～赤色領域までの散乱発光を制御できることが示された。この Si ナノ粒子を三次元構造物に一層だけ塗布するだけで着色が可能となる、フルカラー塗料としての実証例が紹介され、実用化が期待できることが示された。

最後に、大阪大学の中村芳明先生より「熱電応用に向けた表面・界面制御による高性能薄膜の創製」と題して、エピタキシャル成長技術を駆使した表面・界面制御による高熱電性能 IV 族元素薄膜の創製について講演を行って頂いた。格子不整合歪の制御による熱電性能の向上として、GeSn 薄膜において Sn の組成および歪みを制御することで伝導帯の縮重重度を操作し、出力因子を増大させて熱電性能の向上させることに成功したことが紹介された。また、熱伝導率の低減による熱電性能の向上に関する薄膜形成技術として、一次元螺旋を持つ非整合チムニーラダー構造の FeGe_γ ($\gamma=1.52$) の薄膜成長についても紹介された。Si 基板上でナノ結晶を結晶核

とするシードアシストエピタキシー法を開発して FeGe_γ 薄膜の成長に成功し、さらに高い熱電性能が得られることが示された。

全般として非常に闊達なディスカッションがなされ、若手からシニアまで幅広い年齢層からの質問が相次いだ。若手からは自由な発想にもとづくアイデアの提案があり、シニアからは年の功に裏打ちされたコメントがあった。今後の研究開発の進展に向けて貴重な情報交換がなされたものと考えられる。