

第 81 回応用物理学会秋季学術講演会 「6. 薄膜・表面」分科企画シンポジウム報告

### 第 3 世代異種材料接合と膜成長自在制御：界面ナノ・キベルネテス（舵手）

西川博昭（近畿大）、山本哲也（高知工科大）、喜多隆（神戸大）、土屋哲男（産総研）、  
阿部友紀（鳥取大）、川原村敏幸（高知工科大）、中村吉伸（東京大）

薄膜成長技術の発展とともに、さらなる機能とその融合を可能にする新たなヘテロ接合が注目を集めている。従来の半導体や金属などのヘテロ接合において構築されたコンセプトや限定領域（格子定数相違が小さいなど）などを凌駕する「異種材料接合」は、新規機能の創成、さらには機能調和を具現する「マルチマテリアル」を目指した新たなマテリアルズデザインが期待できる。市場性（規模や成長など）および実装技術の観点から、融点や線熱膨張係数の大きく異なる金属、ガラス、さらには軽量でかつフレキシブルな樹脂基材表面上への低温・低ダメージ薄膜成長や常温・常圧接合など変革への学術的観点からはもちろん、産業界からも注目が集まりつつある。

本シンポジウムではマルチマテリアルの創成をもたらす異種材料接合の実現性可否を決定する接合・界面の支配因子を界面ナノ“キベルネテス”（ギリシャ語：船で「舵を取る者」）と名付け、サイエンスの解明を目指した。異種材料の組み合わせによってこれまでにない機能の創成が期待されている各種デバイスにおける接合と界面のエンジニアリングについて、基調講演 1 件、招待講演 11 件、一般講演 1 件とともに最新的话题を議論した。

シンポジウムは表面活性化による常温接合（Surface Activated Bonding, SAB）の第一人者である須賀唯知先生（明星大）の基調講演「表面活性化による常温接合」で幕を開けた。接着剤などを使わず加熱も必要ない、常温での直接接合である SAB について、実験および理論・計算の成果を多角的にご講演いただいた。異種材料接合技術において、ホモエピタキシーなどの第一世代、ヘテロエピタキシーなどの第二世代に続く第三世代異種材料接合を実現する最も有効な概念のひとつであり、本シンポジウムの趣旨・目的を達成するうえで重要なトピックである。続いて小川和洋先生（東北大）からは「常温異種材料接合におよぼす界面酸化物の効果」と題して SAB の具体的な成果をご講演いただいた。アーク溶接・スポット溶接が困難な Al 合金の表面に高速原子ビーム照射することで自然酸化皮膜を除去すれば鉄鋼材料へ従来にはない強固な接合を実現できることが注目される。

長田実先生（名古屋大）からは「2次元酸化物が拓く常温原子膜制御技術」についてご講演いただいた。電子・イオン伝導性、超伝導性、強誘電性、強磁性など多彩な機能を呈する遷移金属酸化物にウェットプロセスでイオンをインターカレーションさせ、機能性を保った単原子層の（グラフェンや2次元層状材料のような）ナノシートを得る手法と、その積層

による人工格子構成、およびその機能性についての挑戦的な研究成果である。続いて山本真人先生（関西大）から、2次元層状材料である六方晶窒化ホウ素(hBN)と巨大金属絶縁体転移材料 VO<sub>2</sub> のヘテロ接合作製プロセス・その FET 構造をはじめとするデバイス特性についてご講演いただいた。これら 2 件の研究は、機能性酸化物と 2 次元層状材料の異種材料接合という観点から、将来の融合的なトピック創成が期待できる。

続いての 3 件は共有結合性の性格が強い半導体材料のパワーデバイス、太陽電池に関する研究であった。小出康夫先生（NIMS）からは「ワイドギャップ半導体異種接合とデバイス応用」として、ダイヤモンドをはじめとするワイドギャップ半導体をパワーデバイスへ応用するための、バッファ層を含む基板表面の構造的・化学的改質など、幅広い膜成長界面制御技術についてご講演いただいた。田辺克明先生（京都大）からは「高効率太陽電池応用に向けた半導体ウェハ接合技術」と題したのご講演では、吸収スペクトルの異なる半導体材料を、格子不整合にかかわらずウェハレベルで劣化フリーで直接接合する技術と、その太陽電池としての効率向上結果についてご講演いただいた。宮下直也先生（東京大）からは「エピタキシャルリフトオフ法を用いた薄膜太陽電池の作製」では、リリース層（犠牲層）のみを溶解するウェットプロセスを用いて薄膜と基板を分離するエピタキシャルリフトオフ技術の解説およびリリース層の反応過程、また分離された薄膜の軽量化、フレキシブル化、さらには高価な基板の再利用についてご講演いただいた。

続いての 3 件はセラミックス系の機能性材料を中心とした研究で、先ず一般講演の平岡壮大氏（近畿大）「水溶性 Sr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> エピタキシャル薄膜を犠牲層に用いたアナターゼ型 Nb: TiO<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜のフレキシブル化」では、先の宮下先生によるエピタキシャルリフトオフの機能性酸化物版といった発表であった。透明導電性材料として注目されるアナターゼ型 Nb: TiO<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜をフレキシブルな高分子シートに転写する手法が紹介された。奈良崎愛子先生（産総研）からは「レーザー転写による物質デリバリー技術と界面形成の展望」として新たな転写技術についてご講演いただいた。生体セラミックスのハイドロキシアパタイトをはじめとする各種材料を「レーザー光で飛ばして別の基板に移し替える」興味深い成果である。黒岩芳弘先生（広島大）からは「セラミック材料の化学結合の特徴と常温衝撃固化現象」では、高品質な結晶性セラミックスコーティングが可能な技術として注目されるエアロゾルデポジション法で得られた強誘電体（チタン酸ジルコン酸鉛など）の膜成長の仕組みを放射光 X 線回折実験により原子スケールで調べた結果についてご講演いただいた。膜成長界面の原子スケール理解および構造・特性の分析技術に関する話題との橋渡しとしての興味深い研究成果をご提供いただいた。

佐々木拓生先生（量研）からは「放射光 X 線散乱による窒化物薄膜成長表面のその場構造解析」では、膜成長界面の原子スケールその場観察手法として、放射光施設 SPring-8 にお

いて表面に敏感な散乱として知られる Crystal Truncation Rod (CTR) 散乱を反射高速電子線回折 (RHEED) と同時にその場測定するシステムを構築し、液体 Ga が GaN 表面上で秩序構造を形成していく様子をダイナミックに観測した結果についてご講演いただいた。本田善央先生 (名古屋大) からは「GaN による pn 接合ダイオード中の光学的手法および電気的手法による欠陥評価」では、高光密度のレーザーを照射することで起きる多格子励起の非線形光吸収を利用して結晶内の転位を可視化し、伝搬の全体像を捉えてデバイス性能の評価についてご講演いただいた。

マルチマテリアルの実現を目指した新しい異種材料接合を模索する講演者と、常時 100 人以上、ピーク時には 150 人を超える参加者の熱い議論が展開され、注目度の高いプログラムが企画できたと世話人は自負したい。もちろんこれは、応用物理学会では初めての試みであるオンライン講演会ということで、座長を担当した我々世話人がもたついた場面があったにもかかわらず、興味深い話題をご提供くださった基調講演・招待講演および一般講演の先生方にご参加くださった皆様のご協力によるところが大きい。この場を借りて深く感謝申し上げます。ご講演いただいた特異な技術を通して萌芽的な共同研究を気軽に呼び掛けてくださった基調講演・招待講演ご担当の先生方を中心として、本シンポジウムを起点に分野横断的な研究ネットワークが構築されれば我々世話人としては非常にうれしく思う。近い将来、ここで開拓されたネットワークから生み出された新しい研究成果を集めた続編企画の実現を期待する。