

# 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会 分科企画シンポジウム報告

## 新デバイス・材料開発のためのナノスケール2次元/3次元分析(II)

薄膜・表面物理分科会：古川貴司(日立ハイテク), 松本祐司(東北大)

去る2019年3月10日(日), 東京工業大学・大岡山キャンパスにて, 第66回応用物理学会春季学術講演会 分科企画シンポジウム「新デバイス・材料開発のためのナノスケール2次元/3次元分析(II)」を開催した。本シンポジウムでは, 7件の招待講演と2件の一般講演が行われた。

半導体の縮小化が限界を迎え, 従来のSiトランジスタに代わり, 今後は立体チャネル構造や微細化に頼らない高性能化など, 新たな機能や動作原理を有するデバイスや材料に注目が集まっている。そのため, 高精度・高感度で表面や内部を評価できるナノスケール2次元/3次元分析がますます重要となる。前回2017年秋季講演会でのシンポジウムではその第一弾として新デバイスやナノスケール材料解析を念頭に, FIB-SEMによる加工法と表面分析法の組合せ, アトムプローブ, TEM-STEM, X線解析などの伝統的な分析手法について議論した。そこで今回のシンポジウムでは, 第二弾として, 各種SPM計測法, 電子顕微鏡応用計測法, X線応用計測法など特徴的な分析手法の現状と課題, 応用例などを議論した。講演プログラムは次の通りである(敬称略, 下線は講演者)。

13:30 招待講演 臼田 宏治 (東芝メモリ)

「デバイスから見た2D/3Dナノ計測の必要性」

14:00 一般講演 横町 伝, 院南 皓一, 小林 圭, 山田 啓文 (京大工)

「周波数変調走査型容量原子間力顕微鏡(FM-SCFM)による有機薄膜トランジスタのキャリアダイナミクス評価」

14:15 招待講演 戸野 博史, 木村 邦子, 小林 圭, 山田 啓文 (京大院工)

「原子間力顕微鏡によるナノスケール表面下構造イメージング」

14:45 招待講演 辻 俊宏 (東北大)

「超音波原子間力顕微鏡によるナノ領域弾性特性評価法」

15:15 一般講演 李 智蓮<sup>1</sup>, Kim Jeong Rae<sup>2, 3</sup>, Mun Junsik<sup>2, 4</sup>, Kim Yoonkoo<sup>2, 4</sup>, Shin Yeong Jae<sup>2, 3</sup>, Kim Bongju<sup>2, 3</sup>, Das Saikat<sup>2, 3</sup>, Wang Lingfei<sup>2, 3</sup>, Kim Miyong<sup>2, 4</sup>, Kim Tae Heon<sup>5</sup>, Noh Tae Won<sup>2, 3</sup>, リップマー ミック<sup>1</sup> (1.東大物性研, 2.CCES, IBS, 3.ソウル大物理天文学部, 4.ソウル大新素材研, 5.蔚山大)

「イオン散乱分光法(CAICISS)を用いたLaAlO<sub>3</sub>(001)基板の終端面解析」

15:45 招待講演 長谷川 正樹, 小林 健二, 兼岡 則幸, 尾方 智彦, 大平 健太郎, 川上和弘, 郡司 毅志, 小貫 勝則 (日立ハイテクノロジーズ)

「ミラー電子顕微鏡によるSiCウエハ表面微小欠陥検出」

16:15 招待講演 筒井 一生<sup>1</sup>, 松下 智裕<sup>2</sup>, 名取 鼓太郎<sup>1</sup>, 小川 達博<sup>1</sup>, 室 隆桂之<sup>2</sup>, 森川 良忠<sup>3</sup>, 星井 拓也<sup>1</sup>, 角嶋 邦之<sup>1</sup>, 若林 整<sup>1</sup>, 林 好一<sup>4</sup>, 松井 文彦<sup>5</sup>, 木下 豊彦<sup>2</sup> (1.東工大, 2.高輝度光科学研究センター, 3.阪大, 4.名工大, 5.分子研)

「光電子ホログラフィーによる半導体中の不純物の3D原子イメージング」

16:45 招待講演 山下 良之 (物材機構)

「硬 X 線 XPS によるオペランド分析」

17:15 招待講演 表 和彦, 伊藤 義泰 (リガク X 線研究所)

「X 線によるデバイス構造および格子欠陥の三次元観察」

臼田宏治様(東芝メモリ)には、今世紀に入って劇的な変化を伴いながらもなお開発が進む Si 系半導体デバイスの開発動向について、最新の成果も含めてご紹介頂き、さらにその開発を支える解析技術への期待についてお話頂いた。半導体開発を支える物理評価・解析技術の役割は増々重要になること、従来の 2D デバイスの観点では sub-nm の解析精度が様々に必要となること、加えて、今後発展が期待される 3D デバイスに関しては、任意の埋もれた素子の深さ(奥行き)方向評価・分析への対応に迫られることなどについて詳細にご講演いただいた。

山田啓文先生(京大院工)には、AFM をベースとする新規の表面下可視化法である走査型熱振動顕微鏡法によって得られた、高分子膜内に埋め込まれたナノ粒子の可視化についてご講演頂いた。ポリイミド基板上に Au ナノ粒子(直径 40 nm)およびポリスチレンナノ粒子(直径 50 nm)を散布し、これを膜厚 300 nm の高分子(フォトポリマー)の膜で覆った試料について、試料の各点で接触共振周波数を測定しマッピングすることで、2 種のナノ粒子を可視化し、同定することに成功した実例をご紹介いただいた。

辻俊宏先生(東北大)には、従来、空間分解能をナノスケールにまで高めることが容易ではない超音波を用いた弾性特性評価法に対し、この課題解決のために新たに開発された超音波原子間力顕微鏡(UAFM)についてご講演頂いた。この UAFM は、探針が試料に接触したカンチレバーのたわみ共振振動の効果により、柔軟なカンチレバーを用いながらも固い工業材料の弾性特性評価が実現できる。ご講演ではその原理と解析法および代表的な応用例であるデバイス電極の剥離評価や強誘電体ドメイン境界の可視化などについてご紹介頂いた。

長谷川正樹様(日立ハイテク)には、結晶欠陥の局所的な帯電を利用することで可視化が可能なミラー電子顕微鏡について、その像形成から欠陥検出原理および検出事例についてご講演頂いた。実際の欠陥をミラー電子像として検出した例として、研磨過程において線状に形成された SiC 基板表面の結晶ダメージが黒い線として可視化されている様子や、4H-SiC 基底面に垂直な結晶欠陥である SiC エピ膜の貫通転位が、表面からは黒い斑点として明瞭に現れている様子をご紹介いただいた。

筒井一生先生(東工大)には、半導体中のドーパント原子をその電気的活性と結びつけながら 3 次元原子配列構造を解析する手法として非常に有用である光電子ホログラフィー法についてご講演頂いた。半導体デバイス製造において不純物ドーピングは極めて重要な技術であるが、その課題のひとつにドーパントの高濃度活性化がある。活性化にはドーパント原子の制御が必要となるが、その対象となる構造を原子レベルで 3 次元的に直接把握することが重要となる。具体例として、Si 中の As に対してこの観察評価を行った結果をご紹介頂いた。

山下良之先生(物材機構)には、硬 X 線光電子分光法はデバイス構造を保持した状態での電子状態が測定可能であるため、デバイスに電圧を印加することによりオペランド測定が可能であることをご講演いただいた。このオペランド硬 X 線光電子分光法によるゲートスタック構造中の電圧に依存したポテンシャル分布を直接観測した例および酸化物抵抗変化メモリのメカニズム解明に適用した例をご紹介いただいた。さらには 2 次元/3 次元材料への適用の可能性についてもお話いただいた。

表和彦様(リガク X 線研究所)には, X 線の有する物質透過能の高さや内部構造を非破壊で観察できる特徴を活かした, デバイス構造や単結晶材料中の欠陥の 3 次元観測について多くの実例をご紹介頂いた. LSI 製造工程においては, その微細化や複雑化に伴い, nm サイズの構造を制御する技術が必要とされており, それに伴って非破壊測定技術への技術的な要求も高まっている. ご講演では, 小角 X 線散乱法により, ナノデバイスの 3 次元構造が極めて高精度でかつ高再現性を有した測定が可能なことや, X 線 Topography による結晶内の 3 次元転位像形成についてお話いただいた.

また一般講演として横町伝様(京大工)から「周波数変調走査型容量原子間力顕微鏡(FM-SCFM)による有機薄膜トランジスタのキャリアダイナミクス評価」として, 比較的高い時間分解能が期待される FM-SCFM を用いて, 有機薄膜トランジスタのゲートにパルスを入力した際の応答を観察し, キャリア挙動の時間分解評価した結果についてご報告いただいた. また李智蓮様(東大物性研)から「イオン散乱分光法(CAICISS)を用いた  $\text{LaAlO}_3(001)$  基板の終端面解析」として, 高温アニーリングと水エッチングを組み合わせることにより, 原子レベルで平坦な  $\text{LaAlO}_3(001)$  基板を実証するプロセスを考案し, 同軸型直衝突イオン散乱分光法(CAICISS)を用いて  $\text{AlO}_2$  単一終端を確認した結果をご報告いただいた.

今回のシンポジウムは, 参加者がのべ 100 名を越え, 大盛況であった. 会場からは活発な質疑討論もあり, この分野への関心がきわめて高いことを感じられた.

最後に, ご講演いただいた諸先生方, 活発なご議論を頂いた参加者, 関係分科会の世話人各位, 薄膜・表面物理分科会 常任幹事など関係者のみなさまに深謝し, 開催報告とする.



シンポジウムの様子 (東工大・大岡山キャンパス)