

## 出張報告

第 80 回応用物理学会秋季学術講演会

佐藤勝昭

(ナノテク材料ユニット特任フェロー)

標記学術講演会が9月18日-21日、北海道大学で開催されました。私は、18日～20日の3日間のみ参加しました。いくつかのシンポジウムに参加したので報告する。



2019年9月18日(水) 13:30 ~ 17:30 (大講堂)

「窒化物半導体特異構造の科学 ~新機能性の発現と電子・光デバイスへの展開~」

科研費新学術領域「得意構造の結晶科学」成果報告

「イオン注入を用いた GaN MOSFET の進展と高性能化への課題」高島 信也(富士電機)



縦型 GaN MOSFET の性能向上には Mg 注入層の特性向上が鍵となる。例えば、耐圧向上には Mg 注入領域の活性化向上や欠陥低減が重要である。また、実際のスイッチング動作を安定化させるためには良好な p+コンタクトの形成や注入層でのホール伝導性が必要となる。広い濃度範囲で注入層特性を向上させるための課題把握として、特に高濃度 Mg 注入層で生じる欠陥構造や Mg 分布についての評価を進めた。高分解能 TEM 分析により、高温熱処理を行った Mg 注入層においてピラミッド状や線状の欠陥構造が形成されることが分かった

「高周波 GaN HEMT の高性能化に向けたデバイス開発」尾崎 史朗 (. 富士通)



ミリ波向けデバイスでは、ゲート近傍の高電界による電圧ストレスによりドレイン電流が低下する電流コラプスが顕著となり、パワーアンプの出力低下に繋がる。この現象を抑制するためには界面準位の起源を明らかにするとともに、制御技術の開発が必要である。デバイスの配線層間絶縁膜には、寄生容量低減のため低誘電率(Low-k)であることに加え、低い吸湿性が求められる。高周波 GaN HEMT の電流コラプスと寄生容量を低減するため、ALD-A1203 を用いた界面制御技術、ならびに低吸湿 Low-k 絶縁膜を用いた“ゲート周辺の空洞化技術”について開発した。

「ナノラミネート特異構造ダイヤモンドデバイス」小出 康夫 (物材機構)



ALD 法によって作製した[TiO<sub>x</sub>(0.5~0.7nm)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.3~0.5nm)]ナノラミネート膜(膜厚 40~160nm)の誘電特性をダイヤモンド MOSFET に応用した結果を述べた。同時に GaN/AlN ナノラミネート膜を作製する試みやその誘電特性について報告し、ナノラミネート特異構造を利用したダイヤモンド FET の可能性について言及した。

「GaN 系ナノワイヤによる縦型 FET に向けて」本久 順一 (北大)



結晶成長を用いた III-V 族化合物半導体ナノワイヤの作製と、縦型サラウンドイングゲート FET を始めとするデバイス応用の研究を行っている。講演では、縦型 FINFET についても触れつつ、GaN の材料物性的な特徴を利用したナノ構造縦型 GaN 系 FET の利点・可能性と問題点について述べるとともに、選択成長を用いた GaN ナノワイヤの作製など、GaN 系縦型ナノワイヤ FET 実現に向けた取り組みを紹介した。

“Recent progress and future of GaN and GaAs-based THz-QCL” Ke Wang (Nanjing Univ., RIKEN)



THz 領域の量子カスケードレーザー(QCL)を室温動作させるには、さまざまなボトルネックの解決が必要。(1) 3 井戸 GaN THz QCL (2) GaN QCL の準位広がり  
の原因である不純物による電子フォノン相互作用抑制による Gain が Cavity Loss を凌駕するバイアス条件 (3) 伝導帯オフセットの変動への耐性 (4) 金属-金属導波路、半絶縁-表面プラズモン導波路 などによって THz-QCL の実現 などについて述べた。

「GaN 系面発光レーザーの進展と応用展開」竹内 哲也 (名城大)



窒化物半導体の VCSEL は 2008 年に誘電体 DBR を用いて、2010 年に半導体 DBR を用いたものが発表されたが、最近 SONY やスタンレーから 10mW を超えるものが発表された。竹内らは、格子整合 AlInN/GaN 導電性多層膜反射鏡や、埋込トンネル接合電流狭窄構造、そして埋込酸化層光閉じ込め構造の開発を進め、多層膜反射鏡の界面における「アンチ分極ドーピング」、低抵抗 GaN トンネル接合のための「同時ドーピング」という、従来の III-V 族半導体には見られない特異構造の有効性を見出した。

「ワイドギャップ半導体を用いた新規波長変換デバイスの開発 —極性反転導波路と微小共振器—

片山 竜二 (1. 阪大工)



高効率な InGaN レーザーと波長変換デバイスをモノリシック集積した深紫外レーザーと併せて、同様に InGaN レーザーを励起光源、波長変換デバイスを量子光源として用い、全構成要素を光導波路型素子で置き換え実装した小型・安定な光量子コンピュータの開発を目指している。片山らは、従来強誘電体で作製されてきた周期的分極反転構造をエピタキシャルに形成した GaN 導波路型波長変換デバイスによる第二高調波発生を実証した。さらに近年、横型擬似位相整合および微小共振器位相整合なる新規な超小型波長変換デバイスを提案し、そのプロトタイプの作製と原理実証に成功した。

2019年9月18日(水) 13:30 ~ 17:45 (N302)

「新しいスピントロニクス材料と物性」

(招待講演のみ紹介する)

「界面マルチフェロイク材料の創製とその機能応用」谷山智康 (名大)



強磁性 [Cu/Ni] 多層膜と強誘電体 BaTiO<sub>3</sub> との界面に着目。[Cu/Ni] 多層膜では格子不整合歪みにより Ni の磁化が面直配向する。この強磁性多層膜と強誘電体 BaTiO<sub>3</sub> とをエピタキシャル接合すると、BaTiO<sub>3</sub> の a-ドメインと c-ドメインの違いにより異なる界面歪みが多層膜に伝達される結果、界面において a-ドメイン上では垂直磁気異方性が、c-ドメイン上では面内磁気異方性が発現する。BaTiO<sub>3</sub> に電界を印加することで a-c-ドメイン境界を可逆的に駆動し、面直磁化配向と面内磁化配向が切替わることが可能である。

「n型およびp型 Fe 系強磁性半導体 Fe 系強磁性半導体—高いキュリー温度の実現とヘテロ構造デバイスへの展開」Le Duc Anh (東大)



III V :Mn 系の磁性半導体は、T<sub>c</sub> が低く n 型ができないなどの欠点があった。また、高いキュリー温度を得るホストはワイドギャップ半導体という理論があり ZnO, GaN などが研究された。東大の田中グループでは、Mn の代わりに Fe に注目、T<sub>c</sub> > RT の n 型磁性半導体 (In, Fe)As、p 型磁性半導体 (Ga, Fe)Sb などを得た。InAs/GeFeSb ヘテロ接合において近接磁気抵抗効果を見出した。

「4d, 5d 強磁性酸化物の分子線エピタキシー成長と機械学習の援用」若林 勇希 (NTT)



絶縁体酸化物の中で最高の TC (~1060 K) を持つ B-サイト秩序型ダブルペロブスカイト Sr<sub>3</sub>OsO<sub>6</sub> を世界に先駆けて合成・発見した。これは、絶縁体の TC を 88 年ぶりに 100° C 以上更新する結果である。また、SrTiO<sub>3</sub> 基板上に高い伝導度と化学的安定性を有する SrRuO<sub>3</sub> 薄膜を MBE 成長する成長条件に対し、統計的機械学習手法であるベイズ最適化の手法を取り入れて、残留抵抗比 RRR の最適化を行い、24 回の MBE 成長で RRR > 50 の高品質の SrRuO<sub>3</sub> 薄膜を得ることに成功した。

「磁性絶縁体における創発マヨラナ・フェルミオン、非可換エニオン」笠原 裕 (京大理)



キタエフ・スピン液体候補物質  $\alpha$ -RuCl<sub>3</sub> では面内磁場により磁気秩序が抑制され、磁場誘起スピン液体状態の実現が様々な実験から示唆されている。この磁場誘起スピン液体状態において熱ホール効果を測定した結果、熱ホール伝導度が磁場に対して一定値を示し、量子プラトーを観測した。その量子化値は、2次元電子の量子ホール効果状態において期待される値 ( $K_0 = \pi^2 k_B^2 / 3h$ ) の半分、 $K_0/2$  となった。このような半整数量子化は、キタエフ模型における理論予測と一致し、試料の端にマヨラナ・フェルミオンのエッジ流が存在することを示すだけでなく、試料内部に非可換エニオンが存在することの直接的な証拠を与えた。

### 「反強磁性体スピントロニクス」森山貴広（京大）



スピントロニクスにおいて反強磁性体は、これまで研究が積極的に行われてこなかった材料・物理系である。しかしながら、ごく最近の研究成果から、強磁性体と同様に、伝導スピンの反強磁性体の局在磁化との相互作用が存在することが実験的に明らかになり、反強磁性体を用いた超高密度磁気メモリやテラヘルツデバイスなども考案されており「反強磁性体スピントロニクス」の研究が活発化している。講演では、FeMn や NiO 等と電子スピンとの相互作用の定量評価、スピン流を利用した反強磁性磁化の制御および反強磁性体を用いたメモリ素子の実証、反強磁性磁気ドメインの XMLD-PEEM による観測、反強磁性体のスピンプンピング効果を紹介した。

### 「高移動度有機半導体のスピン緩和」竹谷純一（東大/NIMS）



高移動度の有機半導体アルキルジナフトベンゾジチオフェン（C10-DNBDT）の単結晶トランジスタを作製し、ESR 測定によってスピン-スピン緩和時間  $\tau_1$  の温度変化を測定した結果、フォノン散乱に支配される運動量緩和時間  $\tau_p$  の温度依存性と比例関係にあり、比例係数から求めたスピン軌道相互作用の大きさが  $g$  値のシフトとも一致することがわかり C10-DNBDT 単結晶のスピンは、Elliott-Yafet 機構による格子自由度への緩和が支配的であること、室温で 800 nm にも及ぶスピン拡散が可能であることも示唆された。

### 「BiSb トポロジカル絶縁体を用いる超高性能純スピン流源」Pham N. Hai（東工大/JST-CREST）



様々な組成の  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x(001)$  薄膜の GaAs(111)A 基板上へのエピタキシャル成長を行い、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  薄膜の伝導率は  $10^5 \sim 10^6 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  台と他のトポロジカル絶縁体よりも 1~2 桁高いことを確認した。また、90 nm 程度以下のサンプルにおいて量子サイズ効果によりバンドギャップが増大し、少なくとも  $x \sim 0.4$  までに金属的な表面と絶縁的なバルクを持つことが分かった。さらに  $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}(012)$  面/MnGa 垂直直磁性膜の接合において、 $\text{Bi}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}(012)$  面のスピン軌道トルクを評価したところ、室温において超強大なスピンホール角  $\theta_{\text{SH}} \sim 52$  を観測した。BiSb/MnGa の接合において、従来より 1~2 桁少ない超低電流密度で MnGa のスピン軌道トルクによる磁化反転を実証した。

### 秋季講演会第 80 回記念シンポジウム

#### 「北緯 43° からの独創研究発信－はやぶさ宇宙科学、雪と氷の科学、粘菌数理科学、新光触媒科学－」

大会三日目の午後、標記シンポジウムが応用物理学会主催で行われた。

#### 【趣旨説明】



はじめに主催者を代表して、本久順一さん（北大情報科学研究所）が、応用物理学会 80 回記念として、北大の 4 名の北大のユニークな先生方に講演を依頼したと趣旨を説明した。

### 「はやぶさ2がもたらす科学」 冨本 尚義 (北大理学院/JAXA)



はやぶさが持ち帰った小惑星イトカワの微粒子の分析で有名な冨本さん、いまは、はやぶさ2のチームに加わってリュウグウの石を調べる仕事をしている。話は「隕石で何がわかるか」からスタート、はやぶさ2から贈ってきたリュウグウの貴重なビデオ映像を示しながら、リュウグウの岩石は地球のふるさと、生命のふるさとに繋がりが、「はやぶさ2の持ち帰る試料の分析から、46億年以前の地球姿が見えるかも」と期待をのべた。

### 「ゼロ℃以下の温度でも融けている氷表面の不思議」 佐崎 元 (北大低温科学研究所)



結晶成長学が専門の佐崎さん、世界で初めて人工的に雪の結晶を作ったのは「雪は天から送られた手紙である」の言葉で有名な中谷宇吉郎(北大低温研の創設者)であるという話からスタート、宇宙で有機物生成の鍵を握っているアモルファスの氷、寒冷地の動植物の凍結の抑制する不凍タンパク質など話は広範囲におよぶ。本論では、「氷表面ってどんなだろう」と最先端のレーザー共焦点顕微鏡などを使い、たった1原子層の氷結晶のステップを観察、融点以下の温度でも、氷の上には形の違う水があって、表面は濡れていることなどを熱っぽく語りました。

### 「粘菌に学ぶ知能と数理科学」 中垣 俊之 (北大電子科学研究所)



「粘菌」の研究で2008年、2011年と2度のイグノーベル賞に輝いた中垣さん、真正粘菌という単細胞生物は、管の流路ネットワークを自在に変えて、迷路のような複雑な状況で最適な経路を作って採餌行動をとる。原形質流動による管の形成のメカニズムとして、流動→管の太り→流れ抵抗低減という「流量強化則」に行き着く。粘菌は、一見勝手な管が集まって司令官のいない集団運動をする自律分散処理をしており、粘菌式カーナビや、構築物のリモデリングなど応用範囲が広いと話しました。

### 「無機固体材料「同定」のこころみ」 大谷 文章 (北大触媒科学研究所)



大谷さんは、クラーク博士の有名な“Boys be ambitious”というフレーズにあるambi-という接頭辞についてのうんちくを披露、物事をunambiguousに明らかにするのが科学であると説きます。無機固体は表面、欠陥、サイズなどの多くの外因があり名前だけでは物性をunambiguousに定義できませんが、大谷さんの開発したERDT/CBB\*という指標をfingerprintにすれば、そのパターンだけでほぼunambiguousに同定できるという話をされました。

\*ERDT=電子輸送のエネルギー分布、CBB=伝導帯底

4名の先生方、いずれも大変ユニークで、それぞれの分野でご自分の世界観をしっかりとお持ちで、しかもお話も上手。聴衆をすっかり魅了しました。