

## 特異構造トピックス

### 応物シンポジウム開催

2019年3月9日 第66回応用物理学会春季学術講演会（東京工業大学 大岡山キャンパス）で、シンポジウム「窒化物半導体特異構造の科学～ナノ物性評価技術の進展と物性制御～」を開催しました。



### 領域全体会議開催

2019年4月19-20日 ホテル&リゾート長浜にて、領域全体会議を開催しました。



### 受賞報告

LEDIA'19 (2019年4月23-25日)

#### < Young Researcher's Paper Award >

##### ● 上杉謙次郎氏 (A01-2、三重大学)

共著者: Y. Hayashi, K. Shojiki, H. Miyake

#### < Student's Paper Award, "Yamaguchi Masahito Award" >

##### ● 松田祥伸氏

(B02-1、京都大学博士課程3年)

共著者: M. Funato, Y. Kawakami

##### ● 山内あさひ氏

(A01-19-1、大阪大学修士課程2年)

共著者: S. Yamaguchi, T. Onodera, Y. Hayashi, H. Miyake, K. Shiomi, Y. Fujiwara, T. Hikosaka, S. Nunoue, M. Uemukai, R. Katayama

## 令和元年度公募研究紹介

### A01-19-1: 窒化物半導体極性制御特異構造の形成技術の深化と物性・機能の制御

研究代表者: 片山竜二 (大阪大学)

深紫外帯域で発光する材料の導電性制御は困難であり、電流注入とは原理の異なる深紫外光の発生方法の開発が急務です。かたや情報分野においては、現在提案されている光量子計算機は依然として系が巨大で調整困難なうえ安定性が乏しく、その小型化が求められます。上記背景を踏まえて本研究では、窒化物半導体の「極性反転」という特異構造の更なる理解と制御技術の確立を行い、深紫外第二高調波発生と量子もつれ光子対発生の実証を行います。これにより、結晶工学的な学術的知見の掘り下げに加えて、工業・医療分野への応用や、室温動作・高安定な光導波路型量子計算機の実用化などの各分野への貢献を目指します。

### A01-19-2: 自己形成ポイドを用いた応力緩和による異種基板上への高品質結晶成長技術の実現

研究代表者: 出浦桃子 (東京大学)

従来の薄膜成長では、欠陥や凹凸のない高品質基板を用いることが常識でした。本研究では、基板表面近傍に存在する「ポイド (空隙)」という特異構造を用いた内部応力緩和による、異種基板上への高品質結晶成長の実現を最終目標とし、Si 基板上の窒化物半導体成長で実証します。そのために、まず Si 基板表面炭化により SiC 薄膜直下に自己形成されるポイドを積極的に利用して、「表面平坦な自己形成ポイド SiC/Si 基板」を実現します。その上に高品質窒化物半導体層を成長し、内部応力と成長層の結晶性との関係を定量的に解析することにより、材料によらない普遍的な学理を構築することを目指します。

### **A01-19-3 : 非対称性酸化物人工格子による空間反転対称性の破れと特異物性創出**

**研究代表者 : 田畑仁 (東京大学)**

機能性酸化物の多彩な物性とイオン結合の高い結晶歪許容性を生かし、双極子とスピン結合融合による新規物質創成を試みます。原子レベル特異構造制御して結晶学的な空間反転対称性を破った“非対称人工格子”による双極子ゆらぎ誘起の新規磁気誘電体創成を狙います。スピンと双極子秩序が共存するガーネット型酸化鉄薄膜を対象として、積層種、周期、対称性等を制御することで空間反転対称性の破れを実現します。これにより、フォノンソフト化：双極子強結合の発現と、傾角スピンと中心対称の破れの相乗効果による Dzyloshinski-Moriya(DM)相関によりスピン・フォノン結合型マグノン誘起、複合物性創発を目指します。

### **A01-19-4: GaN 系 LED の転位に起因する V ピットの形状操作と転位無効化メカニズムの解明**

**研究代表者 : 岡田成仁 (山口大学)**

GaN における特異構造効果の最も特筆すべき点は転位密度が高いにもかかわらず LED の効率が非常に高いことが挙げられます。転位の無効化に超格子 (SL) が用いられ、「SL 構造」・「ピット形成」が有効であることが分かってきました。しかし、それぞれの効果を個別には評価し切れていないのが現状です。本研究では、V ピット形成のために超格子の代わりに中温成長 GaN やエッチングガスによるピットの形状操作を利用し、超格子の構造的要因を排除します。そして、V ピットの形状の要因が高効率化に及ぼす各要素の個別解明を推し進めます。最終的にさらなる高効率 LED の開発に貢献します。

### **A01-19-5 : 歪場・表面構造の自在制御による窒化物半導体の新奇物性創製**

**研究代表者 : 市川修平 (大阪大学)**

III 族窒化物半導体では、結晶成長過程において内包される歪や成長最表面の構造によって、デバイス特性や発現する物理が大きく変化します。有機金属気相成長法による窒化物半導体の結晶成長過程において、希土類元素を含めた特異な不純物の in-situ 添加技術を駆使することにより、歪場や成長最表面のステップ・テラス構造を自在に制御し、窒化物半導体における新奇物性の発現を試みます。この技術を微傾斜(0001)基板上的エピタキシーに適用することで、従来にない高密度原子ステップ構造を有する新機能素子実現を目指します。

### **A01-19-6 : 一般化アンサンブル法を用いた GaN 結晶成長の解析**

**研究代表者 : 洗平昌晃 (名古屋大学)**

窒化ガリウム (GaN) の結晶成長における気相反応ならびに表面反応の解析に対して、密度汎関数法を基にした統計力学的計算手法はかなりの成功をもたらしています。しかしながら、この手法ではそれぞれの反応プロセスのエネルギー論しか明らかにできず、速度論の観点に欠落しています。本研究では、申請者が開発した自由エネルギー解析手法 (一般化アンサンブル法) を駆使して、GaN 結晶成長の各反応プロセスに対してエネルギー論のみならず速度論に関するものも明らかにすることを目指しています。得られる速度論パラメータを利用することで、最終的には GaN の結晶成長の全貌が明らかになると期待しています。

### **A01-19-7 : 結晶欠陥を生かすための GaAs 系混晶半導体の低温成長技術の確立**

**研究代表者 : 富永依里子 (広島大学)**

テラヘルツ (THz) 時間領域分光法において THz 波の発生検出に用いられる代表的な素子の一つが光伝導アンテナ(PCA)です。本研究では、省スペースと低コストを満たした THz 時間領域分光システムの実現を最終目的とし、従来光源よりも小型で比較的安価な光通信帯光源が利用可能な PCA の開発を行います。本助成期間においては特に、研究代表者が提案している PCA 用候補材料の低温成長による結晶欠陥制御に着目し、PCA 用材料に求められる高抵抗・短キャリア寿命・高移動度の3つの特性を同時に満たすことのできる結晶成長条件を明らかにしたいと考えております。新奇な GaAs 系混晶半導体の新しい Defect engineering を切り開く研究を遂行したいと思っております。

### **A01-19-8 : 有機ラジカルの分子内自由度を利用した特異構造の創成**

**研究代表者 : 細越裕子 (大阪府立大学)**

有機磁性体結晶における特異構造の創出と、これによって誘起される量子磁気状態の解明を行います。有機分子が単結合周りの回転の自由度を持つことに着目し、非対称有機ラジカル分子を用いて結晶構造に乱れを導入します。分子配向の乱れによって生じる分子間磁気相互作用の乱れを評価し、磁気状態の変化を低温物性測定から明らかにします。研究代表者は、有機ラジカルの分子設計により、スピン空間構造が制御された多彩な磁気格子を合成する方法論を確立しています。本研究では、二次元磁性体に特異構造を導入し、量子磁気状態との相関を明らかにします。



### **A02-19-1: GaN による特異構造を利用した縦型 FET の作製と高性能化に向けた評価技術の検討**

**研究代表者：本久順一（北海道大学）**

GaN 系トランジスタはパワーエレクトロニクス応用が期待されていますが、近年、縦型多重ゲート構造が、素子特性向上のため重要な構造として注目を集めています。本研究では特異構造である GaN 系ナノワイヤを利用し、その形状を活かすことによって、縦型多重ゲート FET を実現することを目的とします。このため FET 応用に適したナノワイヤの形成技術および FET の作製技術を確立させるとともに、個々の特異構造・微細構造の電気的特性を評価する手法を確立します。そして、提案評価手法を利用することによって、特異構造の電気的特性やデバイス応用上の問題点を明らかにし、解決することによって FET の高性能化を目指します。

### **A02-19-2: 完全結晶に存在する空間自由度および乱れが創出する機能と応用**

**研究代表者：谷垣勝己（東北大学）**

結晶が有する結晶の完全性と同時に存在する空間の自由度および表面・界面の局所構造としての結晶の不完全性を利用して、次の研究項目を公募研究として探求します。(1)空間・間隙物質（運動の空間自由度を単結晶内に有する物質）において発現するフォノンの非調和性を統一的に理解して、高効率な熱エネルギー変換を実現します。(2)有機半導体結晶における分子配列の乱れを利用して、金属/半導体接合におけるバーディーン極限を実現すると共に、連続した乱れ準位を創出して、有機半導体用における高効率両極性電極を創出します。そして、達成される大電流注入を基盤として、有機半導体発光素子へ適用します。

### **A02-19-3: グラフェンの乱層構造に起因する特異物性の研究**

**研究代表者：小林慶裕（大阪大学）**

積層方向の周期性を乱す特異構造である乱層構造をもつ多層グラフェンを合成し、そこから単層グラフェンに類似した優れた物性を引き出すことが目的です。新奇ナノ炭素材料である低欠陥・乱層・多層グラフェンを合成するため、酸化グラフェンの超高温熱処理やテンプレートグラフェン上 CVD 成長という新たなプロセスを開発します。乱層構造でグラフェンシート層間の相互作用が抑制される効果を利用し、多層グラフェンの電気的・熱的物性の飛躍的な向上を目指します。本研究により、高機能グラフェン薄膜をスケラブルに製造する技術が開拓され、エレクトロニクス材料や電極・放熱シート等の構造材料へのグラフェンの応用が可能となります。

### **A02-19-4: レーザープロセス技術を利用した新奇ランダムレーザー光源作製法の開発**

**研究代表者：藤原英樹（北海学園大学）**

多重散乱に基づくフィードバックにより動作するランダムレーザーは、熱光源のような低空間コヒーレンスとレーザーのような高輝度を同時に実現できるため、強度ムラが無く、明るい像を取得可能な全視野イメージングやセンサー用光源として注目されています。しかし、従来のランダムレーザーは、高しきい値動作、発振モード制御が難しい、深紫外や赤外領域での報告例が少ない、といった問題があります。本研究では、レーザープロセス技術を駆使し、マクロなフィードバック構造制御だけでなく、レーザー照射時のアニール効果などの影響をも考慮することで、結晶性改善や意図的な欠陥構造導入を試みる新しいレーザープロセスの開発を目指します。

### **A02-19-5: チェノイソインジゴ骨格を基本とする近赤外光応答型単結晶トランジスタの創出**

**研究代表者：芦沢実（東京工業大学）**

近赤外光は高い生体透過性を示し、この領域のエネルギーを有効活用する技術が必要とされています。トランジスタの観点からは、従来のスイッチング機能に加えた高機能化が求められています。本研究は単結晶トランジスタに光熱変換現象を利用して特異構造を組み込み、近赤外光センシング機能を付与することを目的とします。本研究で開発するチェノイソインジゴ (TII) 分子は、近赤外光吸収を可能にする TII 骨格のオリゴマーと、アルキルシリルアセチレン基から構成されます。近赤外光を熱エネルギーに変換し、結晶構造中のアルキルシリルアセチレン部位のディスオーダーを、時分割してトランジスタ特性の変化として捉えます。

### **A02-19-6: 結晶不完全性の積極利用による高機能テラヘルツ帯機能素子**

**研究代表者：河野行雄（東京工業大学）**

これまで高品質半導体にとって不完全性の要因であった不純物や格子欠陥等は、対応するダイナミクスの多くがテラヘルツ (THz) 周波数帯に属するものの、これら不完全性を制御して THz デバイスへ積極的に応用する試みはほとんどありません。本研究は、外場への敏感な応答性等、不完全結晶電子材料ならではの特異な特徴を活かすことで、従来にはない新規な THz デバイスの開拓を目指します。不完全性を巧みにデザインすることで、THz デバイスの新機能付加や性能向上につなげます。

### **A02-19-7: 機械学習を応用した原子層物質チャネル FET のシミュレーションと最適化設計**

**研究代表者: 相馬聡文 (神戸大学)**

グラフェン、フォスフォレン、遷移金属カルコゲナイド物質等の原子層新材料をチャネル材料として用いる FET のシミュレーションにおいて必要となる原子レベルの材料パラメータ (強束縛近似法パラメータ) の遺伝的アルゴリズム・機械学習を応用した低計算負荷抽出法、非平衡グリーン関数法に基づくデバイスシミュレータの機械学習を応用した高速化法の提案を行います。更に、原子層新材料をチャネル材料とした FET、特にディラック電子エンジニアリング素子のロジック、増幅等の異なる目的に応じたパフォーマンス最適化のための、デバイスシミュレータと機械学習を組み合わせた設計指針探索手法の確立と設計指針提案を行います。

### **A02-19-8: 有機-無機界面の特異構造を利用した光蓄電素子の開発**

**研究代表者: 石井あゆみ (桐蔭横浜大学)**

本研究では、有機-無機結晶界面における特異構造の制御と新しい光電気化学的機能の創出を目指し、無機半導体ナノ結晶に希土類イオンと有機化合物からなる錯体を分子レベルで配列・固定させた特異界面構造を構築します。この有機-無機界面に形成した錯体の特異的な電子状態を利用し、“光により生成した電気エネルギーを界面で蓄える”機能を促します。一素子内で光発電と蓄電の両機能を実現し、光を“蓄える”ことができれば、光エネルギーの革新的かつ有効な利用方法を確立することができます。有機化合物と無機結晶からなる界面構造を緻密に制御し利用することで、新しい光機能を持つ特異構造の創出を目指します。

### **B01-19-1: 窒化物半導体の特異構造におけるフォノン挙動の理論解析**

**研究代表者: 渡邊聡 (東京大学)**

窒化物半導体のフォノン物性は、発光デバイスではその効率を左右すること、パワーデバイスでは発熱密度を左右すること等から重要です。しかし、欠陥等の特異構造におけるフォノン物性はまだよくわかっていないといえます。本研究では、強い分極や複数の荷電状態の存在といった窒化物半導体の特徴を考慮しつつ、その特異構造におけるフォノンの振舞いを解析するための、信頼性と計算効率を兼ね備えた原子間ポテンシャルを、機械学習を用いて開発します。そして開発したポテンシャルを用いて窒化物半導体におけるフォノンバンド構造やフォノン状態密度を計算し、特異構造の導入によるフォノンの振舞いの変化を明らかにします。

### **B01-19-2: 多光子励起フォトルミネッセンスによる結晶欠陥の非侵襲観察**

**研究代表者: 谷川智之 (大阪大学)**

結晶欠陥が大量に含まれる次世代半導体材料におけるデバイス開発において、結晶欠陥を非破壊で計測する技術が求められています。本研究では、生体組織の非侵襲イメージングに用いられている多光子顕微鏡を半導体材料のイメージングに活用し、非破壊手法に基づく結晶欠陥の観察技術について研究します。GaN 結晶に大量に存在する貫通転位について、光学的性質および結晶工学的性質を調べます。次に、これらの性質を基に貫通転位を分類する方法の確立を目指します。さらに、転位同士が反応および増殖する構造を三次元観察し、それらの機構の解明を試みます。

### **B01-19-3: 窒化物および酸化物半導体の局所電子状態・光学特性に及ぼす弾性場の影響**

**研究代表者: 木口賢紀 (東北大学)**

窒化物・酸化物半導体薄膜では、転位など格子欠陥やエピタキシャル成長に伴う残留歪みといった特異構造に付随する周期性や結合状態の乱れやそれらの空間的な分布状態は結晶成長や発光デバイスやパワーエレクトロニクスに大きな影響を及ぼします。本研究では、貫通転位に代表される結晶の非完全性がもたらす局所弾性場が発光デバイスの要である量子井戸構造に及ぼす影響を局所構造・電子状態やマクロな形態をマルチスケールで調べ、非破壊 3 次元構造解析グループと相補的な立場から特異構造の解明に取り組みます。

### **B02-19-1: 輻射・非輻射再結合の同時観測とそれに基づく特異構造の電子状態の理論モデル構築**

**研究代表者: 山口敦史 (金沢工業大学)**

多様な特異構造を含む窒化物半導体においては、そのキャリアダイナミクスを理解する上で、輻射再結合と非輻射再結合の 2 つの過程の各々のメカニズムを明らかにすることが重要となります。本研究では、同一の光励起条件下で、この 2 つの過程を同時計測する光音響・発光同時計測法を用い、特異構造内での内部量子効率を正確に求めていきます。さらに、時間分解発光測定などの光学実験と理論モデル計算をこれに組み合わせることにより、特異構造の電子状態とキャリアダイナミクスを包括的に理解することを目指します。

### **B02-19-2: 電子-格子相互作用による特異構造の移動・変形の理論**

**研究代表者: 小田将人 (和歌山大学)**

窒化物半導体は、発光素子の画期的な新材料として大成功をおさめ、さらには次世代パワー素子の候補としても期待されています。しかし、応用研究が推進される一方で、点欠陥や転位をはじめとする特異構造が移動して集合することで、電流が流れにくくなり、素子劣化を引き起こすという問題が未解決になっています。本研究では、特異構造が移動・変形するミクロな機構を、電子-格子相互作用に注目することで明らかにし、その制御法を見つけることを目的としています。特異構造の移動・変形が制御できるようになると、素子寿命が長くなる、新しい機能を持つ構造を作り出す技術につながる、などが期待できます。

### **B02-19-3: 特異格子配列 InGaN ナノコラムを用いたプラズモニックナノ構造の作製と光機能制御**

**研究代表者: 大音隆男 (山形大学)**

InGaN 系発光素子は、In 組成の増加に伴う長波長化により発光効率が著しく低下し、解決が求められています。本研究では、柱状ナノ結晶である“ナノコラム (ナノワイヤ)”を用いた特異格子配列の“プラズモニック結晶”を InGaN 系発光素子に導入することで、ナノ構造効果と表面プラズモン結合を同時に発現させ、発光効率が低い領域の大幅な改善を目指します。また、特異格子配列が光学特性に与える影響について詳細に調査することで、従来構造では実現できない光機能性を有した発光デバイスを提案し、その開発を目指します。

### **B02-19-4: 特異表面ナノ構造体と酸化物半導体メタマテリアルの光学制御**

**研究代表者: 松井裕章 (東京大学)**

本研究は、II-IV 族半導体 ZnO の薄膜成長中に自己形成される特異的な表面ナノ細線構造に着目します。従来の薄膜成長では、layer-by-layer 成長による 2 次元面を持つ“完全な薄膜表面”が、異種接合や界面制御において重要な役割を果たしました。本課題は、自己成長による特異的な表面ナノ構造を導入して、ZnO に基づくハイパーパボリックメタマテリアル (ZnO-HMMs) とその表面プラズモンの光学制御を実施します。特に、表面ナノ構造の成長過程と結晶内の構造欠陥の関係を解明し、表面ナノ細線の構造サイズ制御を行います。そして、表面ナノ細線の構造制御とエピタキシャル成長技術を融合させた近赤外の光学応用を開拓します。

### **B02-19-5: 単原子層物質のナノスケール特異構造制御による新奇光デバイスの創成**

**研究代表者: 矢野隆章 (東京工業大学)**

本研究では、単原子層化合物半導体表面に特異構造 (格子歪み・格子欠陥) を局所的に (ナノスケールで) 導入し、その特異構造に起因する光物性変化を“その場”ナノ分光計測することによって、単原子層物質表面の特異構造と光・電子物性との相関をナノ分光学的に解明します。さらに、単原子層表面の特異構造を空間的に局所制御することによって、新奇な機能性ナノ光デバイスを創成します。

### **B02-19-6: プロトン欠陥有機結晶のフォトン照射による機能開拓**

**研究代表者: 小林由佳 (物質・材料研究機構)**

水素結合ネットワークによって安定化されたプロトン欠陥をドーパントとする有機結晶は、分子設計により半導体から金属に至るまで伝導性を制御することが可能です。ここでは局在した開殻分子と閉殻分子が共存しており、その基底状態はプロトン欠陥サイトと n 軌道が拮抗または混成したような特殊な電子配置で記述されます。本研究では、このプロトン欠陥有機結晶に光やマイクロ波を照射して電子励起を促し、様々な電子配置を発生させることにより、光伝導性を始めとする多彩な新規物性を開拓します。

## **今後の予定**

**[協賛国際会議]**

**2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019)**

会期: 2019 年 9 月 2-5 日

会場: 名古屋大学

<http://www.ssdm.jp>

**[共催国際会議]**

**The 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS2019)**

会期: 2019 年 11 月 10~15 日

会場: 沖縄科学技術大学院大学

<http://www.apws2019.jp>



ホームページにてニュースレターを公開しています。 <http://tokui.org/newsletter.html>



No.1 (2017年3月1日)



No.2 (2017年6月1日)



No.3 (2017年9月1日)



No.4 (2017年12月1日)



No.5 (2018年3月1日)



No.6 (2018年6月1日)



No.7 (2018年9月1日)



No.8 (2018年12月1日)



No.9 (2019年3月1日)

発行：新学術領域研究「特異構造の結晶科学」事務局  
 領域 URL: <http://tokui.org> 問い合わせ先: [info@tokui.org](mailto:info@tokui.org)