

# ERATO「中村不均一結晶プロジェクト」追跡評価報告書

## 総合所見

本プロジェクトは、結晶内の「不均一性」すなわち組成揺らぎや、マクロ欠陥(貫通転位や積層欠陥など)、ミクロ欠陥(点欠陥など)、および内部電場などに着目し、この物理的本質を解明するとともに、それを自在に制御することにより、さらに高輝度・高性能・多機能デバイスの基盤技術を創出することを目指して、2001年10月から約5年間実施されたものである。今回指名された4人の評価委員は、配布された「ERATO「中村不均一結晶プロジェクト」追跡評価用資料」を精読するとともに、「中間評価用報告書」、「事後評価用報告書」も参考にしながら、それぞれ異なる立場からプロジェクト終了後約5年間の追跡評価を行った。

その結果、本プロジェクトは主として以下の3点において重要な意義をはたしたと評価出来る。

- 1)従来から用いられてきたc面上のInGaNでは、青色よりも波長の長い緑色等の発光色を目指してInNモル分率を高くすると、圧電分極が大きくなり、分極不連続のため発生する固定電荷により生じる電界によって外部量子効率の低下やピーク波長の注入電流依存性が顕著になる。また、LDの場合、しきい電流密度が高くなるなどの課題がある。これに対し、a面やm面などの非極性面や半極性面を用いれば、LED、LDの特性を改善出来るとの指摘がされていた。本プロジェクトでは、HVPE、MOCVDなどの薄膜成長技術の研究も同時に進めながら、その原理検証を行い、プロジェクト終了後も世界トップレベルの特性を発表し続けることにより、非極性面、半極性面の利用に関する世界の大きな潮流を作った。
- 2)LEDの高輝度化・高出力化、LDの低コスト化にむけて、さらに第1項で指摘した非極性面あるいは半極性面のエピタキシャル成長に対して、特に積層欠陥の駆逐にはGaN基板結晶開発が重要なことをいち早く指摘し、なかでも低コスト化に大きな可能性を有するアンモノサーマル法について先駆的な検討を行い、実用技術としての可能性を示した。
- 3)プロジェクトの推進を通じて、3社のベンチャー企業を創設した。特にSoraa社は世界トップレベルの性能を有するデバイスの開発に成功し、その大量製造が出来る会社として発展しつつある。また我が国の企業の中にも、新規事業部門創設への動きがある。このように新規事業開拓の面で果たした役割も評価できる。

これ以外にも、貫通転位密度が高いにも係らず強い発光が起こるメカニズムに関連して非発光再結合過程のモデルを提案するなど、本プロジェクトで得られた成果は多くの

論文で発表され、それらの引用件数も極めて多いことから、学術的貢献の大きさも評価できる。

さらに GaN を用いた光触媒作用による水素発生の実証や、炭酸ガスの還元とギ酸の作成、窒化物半導体による高効率太陽電池の可能性など、地球環境問題解決にむけて新しい芽を示したという意味において、その貢献は評価に値する。

このように、本プロジェクトでは、基礎的な研究により多くの知見を世に与えるとともに、実用化・量産化まで期待できる成果が得られた。さらに、プロジェクト終了後も高機能素子の実現・実用化に向けて確実に研究開発が進展している。このようなプロジェクトが、ERATO 制度のもとわが国で実施されたことは、窒化物半導体研究の源流を生み出した日本として意義が大きいと考えられる。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

プロジェクト終了後、UCSB においては、Solid State Lighting and Energy Center (当初は SSLDC) を立ち上げ、研究成果を実用に結びつける体制が整えられた。

バルク結晶成長については、プロジェクト終了時点において、アンモノサーマル法を用い、塩基性鉍化剤( $\text{NaNH}_2$ )を用いて  $3\text{x}4\text{cm}$  厚さ  $45\mu\text{m}$  の GaN 厚膜の成長に成功し、ベンチャー企業 SixPoint が立ち上げられた。その後大型化などの明確な発表はないが、c面、m面の青色 LED 作成用基板として活用されている。また、協同でアンモノサーマル結晶成長を行ってきた三菱化学㈱は、プロジェクト成果を一部取り入れたバルク結晶事業化の計画を発表している。

アンモノサーマル法については、この間、ポーランドのベンチャー企業 Ammono 社が 1~1.5 インチの、大型、高品質、高結晶性基板の成長に成功するなど、長足の進歩を遂げ、製品のリリースを開始したが、まだ成長速度、生産性、残留不純物と着色の除去という問題点を抱えている。

我が国でも、これらの動きに触発されて、Na フラックスを用いた独自技術によりバルク結晶開発が精力的に展開されてきている。

非極性面、半極性面を用いた LED、LD の開発においては、プロジェクト終了時において、非極性 m 面青色 LED において、最大 41% の外部量子効率と、25mW の出力を、半極性面 LED においては、最大 30% の外部量子効率と、18mW の出力を実現していた。プロジェクト終了後、非極性 GaN 基板を用いた LD、緑色 LED の生産を目的とした Soraa 社を立ち上げ、447nm の青色 LD で出力 750mW、効率 23% の世界最高レベル、緑色 LD(521nm)では、出力 60mW、効率 1.9% を発表している。これは、波長の点で住友電工の発振波長 530nm 域 LD におよばないが、世界最高のレベルであると言える。

また UCSB では半極性青色 LED で、注入電流  $200\text{A}/\text{cm}^2$  において 250mW 出力、外部量子効率 45.3% を実現している。これも日亜化学の世界最高効率青色 LED (外部量子効率 85%) には及ばないが、注入電流  $200\text{A}/\text{cm}^2$  においても外部量子効率の低下は 14.3% にと

どまり、ピーク波長のシフトもわずかに抑えられる等、半極性の特長を立証している。今後の一層の長波長化により、グリーンギャップの課題克服の可能性も示唆している。

GaN の光触媒作用による水素の発生の実証に続き、プロジェクト終了後は、炭酸ガスを還元してギ酸に変化させることに成功して、地球環境保護への可能性に結び付く発表として話題になっている。また基礎光物性評価については、本プロジェクトの成果が萌芽となり、「高精度フェムト秒電子線を用いた半導体ナノ微細構造の時間空間同時分解分光計測」が提案され、新規評価装置の開発として注目されている。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な効果・効用及び波及効果

### 2.1 科学技術への貢献

従来のサファイア c 面を用いた極性基板に代わって、非極性面や半極性面の GaN を基板とした LED、LD などの発光デバイスが、特に緑色領域に対応した In-rich InGaN で有用であるとの原理検証を行った価値は高く、この研究分野を活性化させることを通じて、本分野の発展に寄与したことが、特筆する点としてあげられる。

また、原料使用効率が高いことにより低コスト化の可能性をもつアンモノサーマル法が GaN バルク結晶の成長手法として有効との方向を示した。特に上記非極性 GaN 基板作成の点から特に重要ととらえ、その技術の潮流を作ることに貢献した。技術レベル的には、ポーランド Ammono 社が先行しており、Na フラックス法によるバルク GaN 成長技術も大阪大学で最近急速に進展している。

時間分解 PL および陽電子消滅を用いた非発光再結合中心の起源の解明、光触媒による水素発生や炭酸ガスのギ酸への還元など、新しい概念や新分野の創出にも貢献した。

なお、本プロジェクトで発表された多くの論文とその引用件数の多さは、本プロジェクトが科学技術の進歩に大きく寄与したことを裏付けている。

本プロジェクトの終了前後において、世界的に省エネルギーの観点から特に LED が注目されるようになり、世界の多くの機関からの発表が相次いでおり競争が激しくなっている。その中でも本プロジェクトによる非極性・半極性に関する発表は新しい流れを生み出すきっかけとなった先駆的な研究であり、科学技術上の知見のみならず、実際のデバイスによりその効果を実証したことは、今後の発光デバイスの日本および世界における実業的な多大な貢献を示したと認められる。

### 2.2 応用に向けての発展

本プロジェクトの研究開発活動により、多くの特許が日本はもちろん国際出願されており、その多くが既に米国で成立している。アンモノサーマル法や非極性・半極性結晶の成長・デバイスに関するものなど、日本でも順次特許が成立してきている。これらを有効に活用することが、日本の LED・発光デバイスに関係する業界の今後の世

界における競争力・優位性を維持・確保することになると思われ、今後の特許活用に関する推移を期待するものである。

UCSB の SSLEC あるいは Soraa 社を中心にして、青色および緑色 LD、高輝度、高効率 LED の開発と実用化にむけた研究が、着実に進展している。

これらは高効率照明の実現、液晶表示のバックライト、自動車のヘッドライトなど、今後の低炭素社会の構築に不可欠な高効率デバイス実現にむけ、大きなインパクトを与えてきている。また新しい原理に基づくプロジェクタの開発や、インバータ・コンバーターとしての高効率電力スイッチングデバイスとしての応用などにもその成果が及んでいる。さらに内視鏡や手術用ゴーグルなどの医療分野や、LED による都市型農業など農業分野にもその応用が波及している。

今後の応用展開においては、いかにして高品質、大面積、高生産性、低価格な GaN 基板が作成出来るかにかかっており、アンモノサーマル法のみでなく、Na フラックス法、などの他の技術も含めた競合状態にある。また各種加工を施したサファイア基板の利用技術、さらには大型、低価格性の観点から Si 基板上の GaN 結晶利用技術も進んでおり、未だにゴールには到達していないのが現状である。

アンモノサーマル法を用いたバルク結晶を基本とした、非極性デバイス開発の今後の進展が注目される。

### 2.3 参加研究者の活動状況

UCSB の中で中心的役割を果たした研究者は、特に非極性・半極性関連分野で、世界の学会を先導して活躍している。

新しくベンチャー企業 3 社が、プロジェクトに参加した研究者により設立されている。

また我が国の企業から協力研究員として参加した研究者も、企業に戻り、プロジェクトの成果をもとにバルク基板の新規事業開始にむけ、取り組んでいる。

東北大学(当初筑波大学)、東京理科大学から参加した研究者は、現在も各大学で教授として、窒化物半導体に関する研究を引き続き活発に推進している。

### 3. その他

今回のプロジェクトのように、国際共同研究の形態でおこなうケースでは、近年諸外国では、国境を跨ぐ公的研究開発投資が著しく拡大してはいるものの、「国益」と「世界への貢献」という、二律背反しうる可能性のある課題に対して、今後どのように助成制度を発展させていくかについて、なお多方面からの検討が必要と考えられる。

それについても、国益に結びつく方向で本技術が発展してくれることを願っており、中でも三菱化学の水島事業所の計画が予定どおり進んでくれることを期待している。