

TODAY

材料研究の「機能ロードマップ」策定の提言



京都大学大学院工学研究科

教授 村上正紀

ここ20年来、材料の用途が年々拡大しているにもかかわらず、“材料”に対して学生の人気がない。しかも大学でせっかく材料を専攻した学生でも、素材産業及び他のメーカーで、材料研究・開発に従事することを希望する学生は年々少なくなっているように思える。材料分野だけでなく、物づくり産業全般にわたり学生に人気がない。

しかし、日本人はもともと農耕民族であるがゆえに、物づくりに適した民族であるはずだと思う。実際、長年の間「土農工商」の封建制度で社会秩序が成り立ち、「土」を除けば、日本人は物づくりの「農工」が主役であることになんの異論も唱えていなかった国民である。封建時代まで遡らなくても、われわれの学生時代は「鉄は国家なり」で、物づくりを主とする製造業（特に鉄鋼業）に就職することが一種の憧れであったようにも思える。

何故、過去は自発的に物づくりを主とする製造業に憧れ、職を求めていたのか？「日本は物づくりでしか生き残れない」という共通認識のもとに、学生にも「わが日本の将来を支えねばならぬ」という潜在的使命感（志）があったように思える。鉄鋼業は給与が他の業種よりかなり高く、給与に魅力を感じた者、超巨大企業に安心感を抱いた者等さまざまであるが、物づくり業に対する憧れは

今とは全く比べものにならなかった。学生には鮮明な「馬の鼻先の人参」の「人参」が、過去の製造業にはぶら下がっていたような気がする。

現在の材料工学での「人参」は何であろうか？

これが学生のみならずスタッフでも答えが出てこない。材料はいつの時代でも社会の高度化を支える基盤であることに異論はないと思う。社会がいまだ単純なときは、求められる材料も単純な機能を満足させるものであれば十分役立ち、かつては「重厚長大」を目指して、材料開発は進められた。

社会が高度化すれば材料に求められる機能は多様化し、「強い」「軽い」だけでは全く相手にされない。例えば、電子デバイス用の材料に要求される機能は十指を超える。既存の材料では要求される機能が満足できそうもないものばかりである。汗水流して開発した新材料を用いて新電子デバイスが完成しても脚光を浴びるのはデバイス屋であり、材料屋はいつも黒衣役である。それを知りながら、材料屋が要求された機能を満足させる材料創製及びプロセス開発に打ち込む姿をIBM在職中に目の当たりにし、材料屋の研究・開発の原動力（人参）は何かと考えさせられた。

導き出した結論は、電子材料開発には「新材料の機能」と「新デバイスの性能」が1対1に対応づけられ、新材料が新デバイスを創成しているという材料屋の“自負心”であるということである。デバイス屋の要求を満たす材料創製には“材料の限界に挑戦”しなければならないことに何度も出くわす。この挑戦する意欲が材料への憧れの原動力の一つになっていることは間違いない。

材料の種類が多様化して、材料研究へのニーズが増加したにもかかわらず、材料への学生の憧れが少なくなってきた理由の一つは、あまりにも材料が多様であり、材料の機能と完成品の性能の関

連が不透明になり、材料屋の貢献度が希薄になっているからではないかと思われる。学生のみならず多くの材料屋の研究・開発意欲を駆り立てるには、完成品の性能と材料の機能との関連を明確に

し、「求められる材料機能」と「次世代製品の高性能化」を明示する「機能ロードマップ」の作成を系統的に行い、材料屋の自負心を高揚させることが必要と思われる。

JRCM REPORT

21世紀のあかり計画(高効率電光変換化合物半導体開発)の研究開発状況

21世紀のあかり推進部 竹端賢二郎

1. はじめに

JRCMは、「21世紀のあかり計画」を新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から1998年8月に委託を受けて、2003年3月までの約5年間の計画で進めている。現在までに、外部量子効率24%の世界最高レベルの紫外発光を確認する等の成果を得ている。

2000年度は、全体5か年計画のうち中間の年に当たることにより、産業構造審議会による中間評価が行われた。その結果、「研究開発の重点化へ向けてのテーマの絞り込み」「スケジュールの再検討」「外部成果の活用」及び「本プロジェクト終了後の事業化へ向けての特許の出願及び市場調査の実施」等の提言を受けた。

2. 研究開発の目的

「国連気候変動枠組み条約締約国会議(COP3)」が、1997年12月京都において開催され、この会議においてわが国は温室効果ガスを6%削減することとなり、産業及び民生の部門における省エネルギーの推進が喫緊の課題となった。

わが国では、照明用エネルギーの消費量が民生用全体の約20%を占めることから、照明装置の省エネルギーへ向けての技術開発が極めて重要視されている。

3. 2000年度の研究開発の成果

(1) 紫外LEDにおけるエピタキシャル成長とLEDの開発

成果：紫外LEDの外部量子効率が目標値40%に対して24%まで向上。

AlGaIn/InGaInからなる多重量子井戸(MQW)紫外LEDの特性が評価された。AlGaIn障壁層の成長温度が上昇するにつれ、MQW層の表面モフォロジーはステップフロー成長モードによって形成されるステップを生じ、井戸と障壁層の界面は滑らかになった。紫外LEDは室温で390nm(20mA)に発光ピークをもち、順方向電圧3.7V、光出力約1mWであった。

紫外LEDにおいてバリア層への微量Si添加により発光出力が向上することが判明した。また、新規転位低減技術としてLEPS(Lateral Epitaxy on Patterned Substrate)法を考案し、転位密度低減の検討を行った。その結果、転位の低減及び紫外LEDの出力向上に非常に有効な方法であることが確認され、フリップチップ構造のLEDにおいて、発光波長382nm、発光出力15.6mW、外部量子効率24%(20mA)を得た。

ArFレーザーを用いた光照射MOCVD法によりGaNP系結晶薄膜及びGa_{0.9}P_{0.1}/GaInのSQW(Single Quantum Well)LEDを作製し、室温で425nmに青色発光を観測した。

(2) 発光機構に関する基礎理論の研究

成果：局在エネルギーと欠陥密度が発光効率に大きくかわることを解明。

InGaIn混晶半導体及びInGaIn/GaIn量子井戸構造における発光機構を明らかにすることを目的として、時間分解発光分光及び選択励起発光分光の温度依存性の測定を行った。InGaIn混晶半導体の励起スペクトル分光では、これまでに報告のないInGaInの吸収構造を低温から室温まで明瞭に観測し、ストークスシフトの値に温度依存性がないことを明らかにした。

また、発光スペクトル(PL)において観測される本質的な2つの発光成分に関しては、その発光に寄与するキャリアが同一の励起状態から緩和してきたものであることを明らかにした。

その2つの発光成分に対するストークスシフトの値は、電子光学フォノン結合エネルギーと正孔光学フォノン結合エネルギーの理論計算値とほぼ一致していることから、ポーラロン効果が高効率な発光再結合過程に大きく寄与していることを明らかにした。これは、組成ゆらぎの制御されたGaIn系紫外LEDの高効率発光機構を説明し得る重要な成果と考えられる。

発光波長が同一で発光効率の異なるLED試料における発光寿命特性の違いを評価し、発光効率とキャリアの局在状態との関係を調べた。この結果よ

り、効率の高い試料においてキャリアがより深く局在し、非発光再結合中心への遷移が抑制されていることを明らかにした。高空間分解能近接場プローブPLシステムを用い、InGa_N/Ga_N量子井戸LEDの発光スペクトル面内分布の評価を行い、発光強度の不均一分布が明らかにされた。活性層へのSiドナー添加がデバイス特性に及ぼす影響を、InGa_N/Ga_N量子井戸LED試料の逆バイアスPL、時間分解PL特性から調べ、ドナー濃度の最適値が存在することがわかった。

(3) ホモエピタキシャル成長のための基板開発

成果：溶液成長法により世界最大レベルの単結晶を得た。

圧力制御溶液成長(PC SG)法によるGa_N結晶成長において、窒素圧力の増加速度がGa_N単結晶の大きさ及び表面状態に及ぼす効果について検討し、種結晶を用いない自然核成長により334mm²(約21mm径相当)の単結晶を得た。

また、種結晶を用いた液相エピタキシャル成長を実施し、50mm径のサファイア基板上において(100)成長軸を有する47mm径のGa_N結晶薄膜が得られた。ホモエピタキシャル成長によりバンド端発光強度を大幅に改善した。ラザフォード後方散乱分析(写真参照)により、極性制御されたGa_Nエピタキシャル薄膜の最小イオン収率(μ_{\min})を評価し、結晶性が極めて高いことを確認した。

FACELO (Facet Controlled ELO: ファセット制御ELOG)法により、転位密度を $10^4\text{cm}^{-2} \sim 10^6\text{cm}^{-2}$ 台に低減できた。初期核密度を抑制し低転位のGa_N下地結晶上にFACELO成長を、{11 $\bar{2}$ }FACELO、次いで{11 $\bar{2}$ }FACELOと2段に重畳して行うことにより、順次転位密度が低減した。FACELOでの低転位化メカニズムをTEM、SEM観察等により解明した。

擬閉管気相成長法の成長条件を最適化して、N₂ガスのマイクロ波放電方式において最大100 $\mu\text{m}/\text{h}$ の合成速度で結晶性の向上に必要な条件を得るとともに、高周波方式では1mm/hまで可能であることを実験的に確認した。さらに、サファイア基板10 \times 4mm²の範囲でc軸に配向した緻密な膜状のGa_N結晶の成長が確認され、5mm角Ga_N基板上では表面荒れがなく、対称性のよい表面モフォロジーをもつ結晶を合成できた。

(4) 白色LED照明光源への応用研究

成果：LED照明器具を試作し、「21世紀夢の技術展」等で展示。

1) 照明のための基本技術の研究

3原色蛍光体材料の量子効率の測定方法、測定値にかかわる問題点を検証した。緑色では1次モデルよりも高い量子効率を示す蛍光体を見いだした。量子効率測定プロセスから求められる吸収率、量子効率、発光効率の特性データを活用しながら、赤色蛍光体の組成改良の実験を進めた結果、発光効率が150%近くまで向上する予測が得られた。

電極形成技術では、n型電極において、Ti/Alの構造を最適化することにより、反射率70%、接触抵抗率 $2 \times 10^{-5}\text{cm}^2$ を示した。一方、P型電極では、Rh、Pt系の電極材料を検討し、Ni/Agよりも低接触抵抗率な電極材料であることを確認した。

光取り出し効率の向上に関しては、内部吸収(Ga_N層で伝播)していた光を基板側に反射するために、半導体層エッチング端面を傾斜化することを提案した。白色LEDデバイスの開発に関し、蛍光体の塗布技術を検討し、RGBモデル蛍光体の基本特性の評価を行い、その結果をもとにRGB混合白色蛍光体の混合シミュレーションを行った。



ラザフォード後方散乱分析装置(RBS)

2) 応用器具の研究

蛍光体変換方式のLED光源デバイス構造として、反射型構造が高出力化において有効であることを確認し、その反射型モデル構造を提案した。青色LEDとYAG蛍光体とを組み合わせた蛍光体変換発光方式を採用して、光学シミュレーションを実施した。本シミュレーション手法の活用が光学抑制及び最適化設計に有効であることが実証された。

白色LEDに赤色及び緑色LEDを組み合わせて相関色温度変換技術について検討を行った。さらに、照明用光源としては演色性も重要な要因であることから、その際の平均演色性評価数(Ra)についても調べた。3種類のLEDの分光分布を加法混色により検討した結果、電球色、温白色、白色、昼白色、昼光色の各相関色条件がそれぞれ得られた。

導光板の大量生産を視野に入れた設計をするために、作製許容精度の観点から、作製時のばらつきが予想されるパラメータ(パターン形状の成形時のだれ、LED設置位置等)と光利用率等の相関関係をシミュレーションにより算出し、それぞれのパラメータの許容度を明確にした。

照明用光源としてのLEDのメリットを明確にすることを主眼に、LED光源及びLED照明器具の将来の可能性を研究した。白色LEDを使用し、

照明器具の試作を行った。また、チップ型LEDの採用も検討し、器具の小型化及びその照明特性についても研究した。

4. おわりに

本計画はいま、計画された5年間の

うちの第4コーナーを回ろうとしている。中間評価の提言をふまえ、所期目標の達成へ向けて走り切る所存である。

ANNOUNCEMENT

第4回スーパーメタルシンポジウムのお知らせ

JRCMは(財)次世代金属・複合材料研究開発協会(RIMCOF)と共催で、第4回スーパーメタルシンポジウムを開催いたします。今年度は、本プロジェクトの最終年度に当たるため、平成12年度の研究開発成果のほか、5年間の成果の総括も含めて講演が行われます。

月日：平成13年12月18日(火)、19日(水)

場所：国立オリンピック記念青少年総合センター

小田急線参宮橋駅、または地下鉄千代田線代々木公園駅下車

参加費：¥20,000/人(ただし、賛助会員会社、大学、国立研究機関からの参加は無料)

連絡先：JRCM(TEL03 3592 1283~4)

概要：12月18日(火) 10:00~17:00

- ・招待講演「自動車の目指す方向と材料技術」
日産自動車株常務取締役総合研究所長 阿部栄一氏
「21世紀の材料技術と社会」
技術評論家 星野芳郎氏

- ・総括報告 鉄系、アルミ系、ナノ、アモルファス

12月19日(水)

- ・鉄系分科会 9:00~17:00 講演12件とパネルディスカッション
- ・アルミ系分科会 9:30~17:00 講演10件と総合討議
- ・ナノ・アモルファス分科会 9:30~16:55 講演16件

詳細については、JRCMホームページをご覧ください。

URL <http://www.jrcm.or.jp/>

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第181号

内容に関するご意見、ご質問はJRCM総務課までお寄せください。
本誌は地球環境保全を考慮し再生紙を使用しています。
本書の内容を無断で複写複製転載することを禁じます。

発行 2001年11月1日
発行人 小島 彰
発行所 財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105 0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
TEL (03)3592 1282(代) / FAX (03)3592 1285
ホームページURL <http://www.jrcm.or.jp/>
E mail jrcm@oak.ocn.ne.jp