

〔研究〕

ワイドギャップ窒化物半導体エレクトロニクス材料の研究

Research on Widegap Nitride Semiconductor Materials

奥村 元 石田 夕起 吉田 貞史
H. OKUMURA Y. ISHIDA S. YOSHIDA

For nitride semiconductors such as GaN and AlN, which had been hard materials to be prepared, we developed crystal growth and alloy/heterostructure fabrication methods, by molecular beam epitaxy technique using chemically excited species as a nitrogen source and controlling the reaction with substrate surfaces (sapphire, GaAs, SiC etc.). Basic knowledge of the crystal growth by molecular beam epitaxy with excited species has been established investigating the growth mechanism of the hexagonal and cubic nitride crystals. Doping of these nitride epilayers were carried out, and their electronic structures, electronic properties of impurities and defects, and their crystal structure dependence were examined. Through these investigations, basic properties of nitride semiconductors as electronic materials were clarified.

§ 1 研究目的

GaN等の窒化物半導体は、ワイドギャップ系半導体の一種であると共に、他のIII-V族化合物半導体と同様に混晶やヘテロ構造が作製できるなど、エレクトロニクス分野において多様な応用の可能性が期待されている。特に、ワイドギャップの特性を活用した短波長の発光ダイオードやレーザーダイオード、高い絶縁破壊電圧と飽和ドリフト速度に基づくハイパワーデバイス等の用途への期待が大きい^{1,2)}。実際、GaNをベースにしたダブルヘテロ構造による青色発光ダイオードや量子井戸構造を用いた青色半導体レーザーが開発され³⁾、窒化物半導体に対する世の中の関心が最近急速に高まってきている。

しかしながら、これら一群の物質は、高い窒素の解離圧のために今まで一種の難合成材料であって、物質としての基礎物性や良質の単結晶作製法など、解明開発すべき点が多く残されていた。これらの物質をエレクトロニクス材料としてのレベルに引き上げるためには、単結晶膜成長のための基板、その上への高格子不整合単結晶膜成長技術、低残留キャリア低欠陥の単結晶膜形成技術、ドーピング制御技術、ヘテロ構造の形成技術やその特性評価法などの早急な開発が望まれる。

また、窒化物化合物半導体は通常六方晶構造をとるが、最近これらの物質に立方晶の相があることが明らかにされ、その基礎特性や結晶成長様式の違いが注目されている。立方晶の結晶は六方晶に比べて対称性が高く、基板や

光学特性の面でレーザーダイオード等への応用にもより有利であると期待される。立方晶の窒化物半導体材料が開発されれば全く新しい半導体グループを生み出すと共に、六方・立方両相を組み合わせた異型ヘテロ構造が可能になるなど、エレクトロニクス材料に大きなブレイクスルーをもたらす。

そこで本研究では、六方晶及び立方晶の窒化物半導体とその混晶・ヘテロ構造を対象に、励起種を用いたMBE(分子線エピタキシー: molecular beam epitaxy)法による高品質の単結晶膜作製技術及び構造制御技術を開発すると共に、その過程における結晶成長メカニズムの解明、得られた単結晶膜・ヘテロ構造の基礎特性評価を行い、窒化物半導体エレクトロニクスのための材料基礎技術を確立することを目的として、平成7～9年の期間で以下の研究を行った。

§ 2 研究方法

本研究では、III族窒化物半導体エピタキシャル膜を対象に、非平衡状態での成長法であり制御性に優れていて成長中のその場観察が可能なMBE法を主たる結晶成長法として採用した。具体的な研究目標としては以下のようなものを設定した。

- (1) 窒化物半導体結晶成長のための活性窒素源の探索。
- (2) 化学励起種を用いたMBE法等による窒化物半導体の結晶成長手法の確立。

KEY WORDS : 窒化物半導体, 六方晶 GaN, 立方晶 GaN, 励起種分子線エピタキシー

- (3) 化学励起種を用いたM B E法等による窒化物半導体混晶・ヘテロ構造の作製。
- (4) 立方晶及び六方晶の構造形成機構の解明とその制御。
- (5) 窒化物半導体とその混晶のためのドーピング源の探索とドーピング制御法の確立。
- (6) 窒化物半導体やその混晶・ヘテロ構造の電氣的・光学的測定による物性評価とそのための手法の開発。
- (7) 窒化物半導体系やその混晶・ヘテロ構造のバンド計算と応用可能性探索。

更に、次の3つの研究項目のもとに研究を進めた。

(1) 窒化物半導体及び混晶ヘテロ構造の作製の研究

窒化物半導体結晶成長のための活性窒素源の探索を行い、その化学励起種を用いたM B E法等による高品質結晶成長手法を確立し、混晶・ヘテロ構造の作製技術や窒化物半導体に適したドーピング技術を開発すると共に、立方晶及び六方晶の構造形成機構の解明とその制御を試みる。

(2) 窒化物半導体及び混晶ヘテロ構造の特性評価の研究

窒化物半導体エピタキシャル膜やその混晶・ヘテロ構造の電氣的・光学的測定による物性評価を行い、六方晶結晶と立方晶結晶の特性の違いを明らかにすると共に、ワイドギャップ窒化物半導体のための新しい評価手法を開発する。

(3) 窒化物半導体及び混晶ヘテロ構造の電子構造の研究

窒化物半導体やその混晶・ヘテロ構造のバンド計算を行い、バンド不連続値等のヘテロ構造における基礎特性を予測してヘテロ構造設計の指針を確立する。また、予測したヘテロ構造特性をもとにその応用可能性を探索する。

§ 3 研究成果

平成7年度は、高品質窒化物半導体エピタキシャル膜の作製を目指して、まず励起種分子線エピタキシー結晶成長装置を設計・導入し、結晶性の良い六方晶及び立方晶GaNエピタキシャル膜が成長する条件の確立を目標とした。

平成8年度は、結晶成長技術として、窒化物半導体へのドーピング、混晶やヘテロ構造の成長、同一基板上での立方晶/六方晶構造制御を行った。また評価技術として、ワイドギャップという特徴を持つ窒化物半導体の評価に適していると期待される集束電子線励起特性評価装置の設計・導入・整備を行った。

平成9年度は、結晶成長技術として、六方晶及び立方晶窒化物半導体エピ膜へのドーピング、混晶やヘテロ構造を

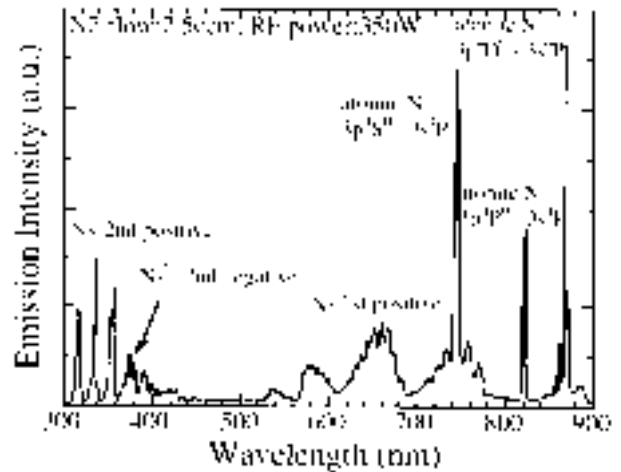


Fig.1 高周波N₂プラズマからの発光スペクトル

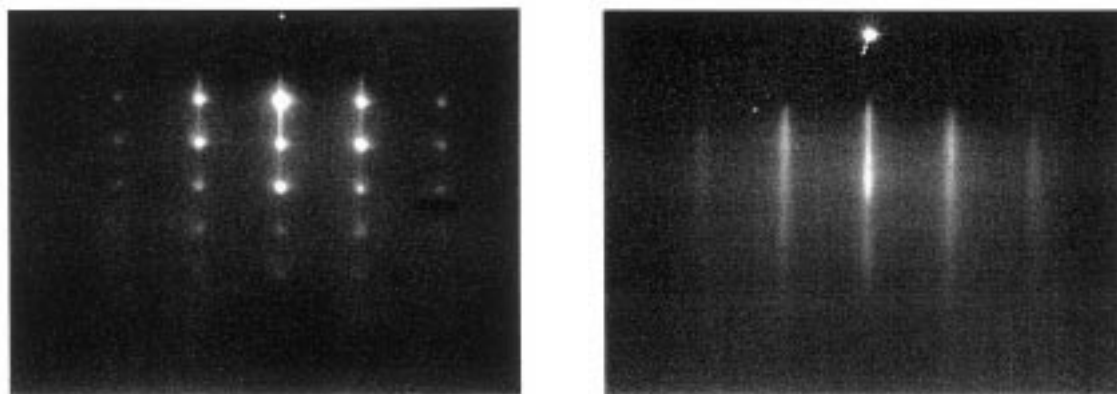
対象に、表面モニタリングの手法を用いて成長の高度化を行った。また評価技術として、ワイドギャップという特徴を持つ窒化物半導体の評価に適していると期待される電子線励起発光法や温度可変Hall効果、光伝導度測定等を用いて、成長したエピ膜試料の特性を評価し、その電子物性制御への指針を得た。

以下に各研究項目における具体的な成果を述べる。

3.1 窒化物半導体及び混晶ヘテロ構造の作製の研究

各種プラズマソースの窒化物半導体結晶成長のための窒素源としての適性を調べ、プラズマ中の活性種に関して、窒素分子励起種より窒素原子励起種の方が成長に寄与する度合いが高いことを明らかにした。また、窒素分子イオンはエピ膜の特性を劣化させることを確認した。Fig.1に数5000~7000Å/hの成長速度が得られるときのN₂プラズマからの発光スペクトルを示す。650~800nmに見られる鋭い原子状窒素からの発光が、窒素源としてのプラズマ特性の良い指標になることがわかった。このような窒素プラズマソースを用いた結果、数ミクロンのより厚い試料を得ることができるようになり、ヘテロ界面からの影響の低減化の効果としてエピ膜の特性を向上させることができた。

六方晶GaNの成長に関して、表面平坦性と成長表面に供給される実効的なV/III原子数比との関係を調べた。窒素励起種を用いた成長においては、Ga-rich側では表面を平坦に保った2次元成長が起こり、N-rich側では3次元核成長が支配的になることを明らかにした。更に、平坦表面を得るためにはGaの表面拡散を促進させることが重要で、Ga液滴を生じない程度のGa-rich条件が望ましいことを明らかにすると共に、ヘテロエピタキシャル成長初期の荒れた表面を改善するのに、窒素ビームを断続的に供給する「窒素フラックス変調操作」が極めて有効であることを



(a) 操作前のスポット状パターン

(b) 操作後のストリーク状パターン

Fig.2 窒素フラックス変調操作前後の六方晶 GaN(0001)面からの RHEED パターン

| | 低圧 | 窒素フラックス変調 | 高圧 |
|------------------------------|-------|-----------|--------|
| 六方晶 GaN (on sapphire (0001)) | (1x1) | (2x2) | (1x1) |
| 立方晶 GaN (on GaAs (001)) | (1x1) | (2x2) | 2(2x2) |
| 立方晶 GaN (on 3C'-SiC (001)) | (1x1) | (1x1) | (1x1) |
| 立方晶 AlN (on 3C'-SiC (001)) | | (2x2) | |

Fig.3 GaN エピ膜の表面再配列構造

示した。 Fig.2 に「窒素フラックス変調操作」前後の RHEED (反射高速電子線回折: reflection high energy electron diffraction) パターンを示す。操作後には平坦表面からのストリーク状パターンが明瞭に観測される。

六方晶及び立方晶 GaN 及び AlN エピ膜の成長時の表面構造に関して、上記のような方法で平坦表面を実現し、Fig.3 のような表面再配列構造及びその間の転移があることを初めて見いだした。これらの表面再配列構造と成長条件との関係を調べ、Fig.4 のような相図を得た。このような結果の解析から、表面再配列構造が表面ストイキオメトリーに関係しており、その転移線が成長中の Ga 及び励起窒素種のストイキオメトリーバランスの良い指標になることを提案した。そしてストイキオメトリー条件で作製したエピタキシャル膜の特性が優れていることを六方晶及び立方晶結晶で確認した。

六方晶 GaN の MBE 成長に関して、成長初期過程としてサファイア基板の窒化プロセスが低温パuffers 層プロセスに比べて XRD (X 線回折: X-ray diffraction) 回折幅や界面近傍の欠陥の低減等の構造特性の点から最も有効であることを示した。サファイア上のヘテロエピタキシャル初期プロセスやエピ膜成長条件を最適化した結果、XRD 半値幅 51 arcsec という MBE 法での世界最高の結晶性品質

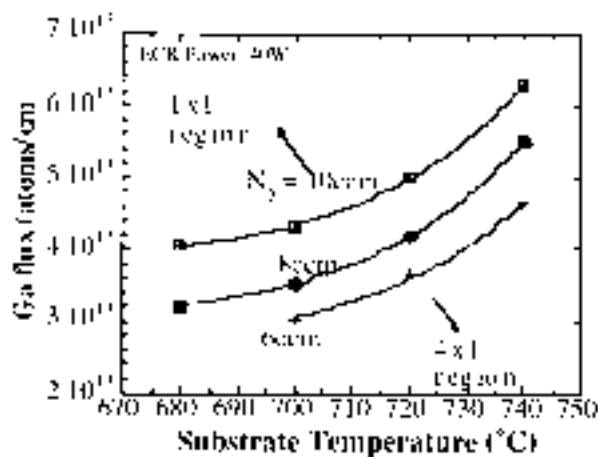


Fig.4 立方晶 GaN(001)面の表面再配列構造の相図

を持つエピタキシャル膜の作製に成功した。

また、TMAI 等のガスソースを用いた成長でも、表面構造に関して同様な結果となることを示すと共に、良好な表面モフォロジーを示す AlGaIn 混晶や GaN とのヘテロ構造を作製することに成功した。更に、成長表面からの RHEED 強度の解析からも、実効的な III/V 比を評価できること、1 原子層の成長及び再蒸発を検出できることを明らかにした。

立方晶 GaN の成長に関して、エピタキシャル膜 / 基板

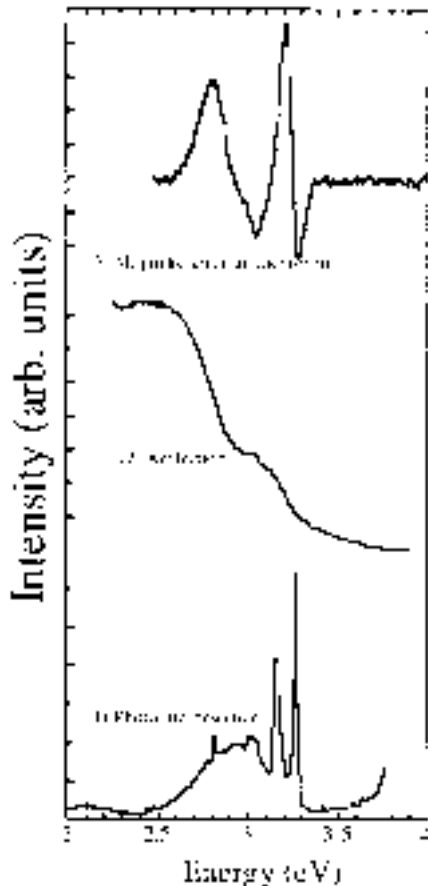


Fig.5 立方晶 GaN エピ膜の光学スペクトル

界面のTEM観察から、低温バッファ層を介したSiC基板上的エピ膜は極めて平坦な界面を持つこと、GaAs基板上的エピ膜には多くの乱れがあり、それが積層欠陥の一因になっていること、またGaAs窒化過程で表面の一部はエッチングされていること等を明らかにした。

立方晶 GaN エピ膜の特性については、上記のような各種成長条件の最適化の結果、XRD 幅 9arc min、低温フォトルミネッセンスバンド端発光幅 14meV という最高品質のエピ膜を得ることに成功した。

また、その立方晶 GaN エピ膜の表面再配列構造が 3C-SiC 基板と GaAs 基板の場合で異なることを見だし (Fig.3参照)、それが微量の残留Asの影響であることを明らかにした。残留Asはこの他にも、高温での平坦表面安定化、立方晶構造の安定化等のサーファクタント効果を持つことを明らかにした。このAsサーファクタント効果に関して、微量のAs雰囲気中で成長した立方晶 GaN エピ膜は、成長温度が低いとAsが膜中に取り込まれるが、800程度の基板温度で成長したものはAsの取り込みもなくその特性が向上することを明らかにした。更に、表面再配列構造転移とAs照射量の関係を調べ、As照射量が多いと転移点を与える III/V比がある値までは増加するがその後飽

和し、その飽和領域では GaNAs 混晶が成長していることが示唆された。

立方晶 AlGaIn の成長に関して、全組成域にわたる AlGaIn 混晶、及び立方晶 AlN エピ膜成長に初めて成功した。この時、表面からの再蒸発のため、エピ膜の Al 組成は Al/Ga のフラックス比のみならず基板温度にも大きく依存することを明らかにした。また、この AlGaIn エピ膜を用いて、立方晶 AlGaIn/GaN ヘテロ構造を作製した。

サファイア基板での成長様式を調べ、650 程度の低基板温度の Ga-rich 条件で、サファイア(0001)基板上に立方晶 GaN エピ膜が[111]方向を成長面に垂直にして成長することを示した。この結果は、サファイア(0001)の同一基板上に、成長条件を制御することによって立方晶/六方晶の結晶成長制御ができることを意味する。

3.2 窒化物半導体及び混晶ヘテロ構造の特性評価の研究

窒化物半導体エピタキシャル膜の構造評価に対し、X線回折における pole figure 法が傾斜結晶粒や立方晶/六方晶混在の解析に極めて有効であることを示した。この手法を用いて、3C-SiC 基板の成長条件を最適化した立方晶試料では六方晶の混在がほとんどないことを実証した。

反射、フォトルミネッセンス、磁気円二色性、フォトリフレクタンス等の光学的測定から、立方晶 GaN のバンドギャップが $3.27 \pm 0.01\text{eV}$ であることを明らかにした。また、これらの温度変化より、立方晶 GaN においても室温で励起子発光が支配的であることを示した。Fig.5 に、立方晶 GaN エピ膜の反射・フォトルミネッセンス・磁気円二色性の各光学スペクトルを示す。

立方晶 AlGaIn エピ膜について、電子線励起発光を測定した結果、組成全域にわたって Fig.6 のようなバンド端と思われる発光が観測され、そのエネルギーは Al 組成に対して linear な変化を示し、発光強度の減少は見られなかった。この結果は立方晶 AlGaIn のバンドは直接遷移型であることを示唆する。また、立方晶 AlN エピ膜に対して発光ピークエネルギーは 4.8eV となり、GaN に比較して六方晶と立方晶の差が大きいことがわかった。

また、六方晶 GaN エピ膜のフォトルミネッセンス測定における 2.2eV 付近の発光 (yellow luminescence) と持続性光伝導度の照射光エネルギー依存性との関係を調べ、両者が同一の欠陥に起因するものであることを実証した。

種々の方法で成長させた六方晶 GaN エピ膜の Hall 効果の温度依存性を測定し (Fig.7 参照)、特に低移動度の試料では通常のバンド伝導の他に欠陥関与の伝導機構が存在することを示した。また、成長初期過程や成長条件の最適化、Si ドーピングや AlN 層の挿入等でこれらの欠陥の関与が減って移動度が向上することを明らかにした。

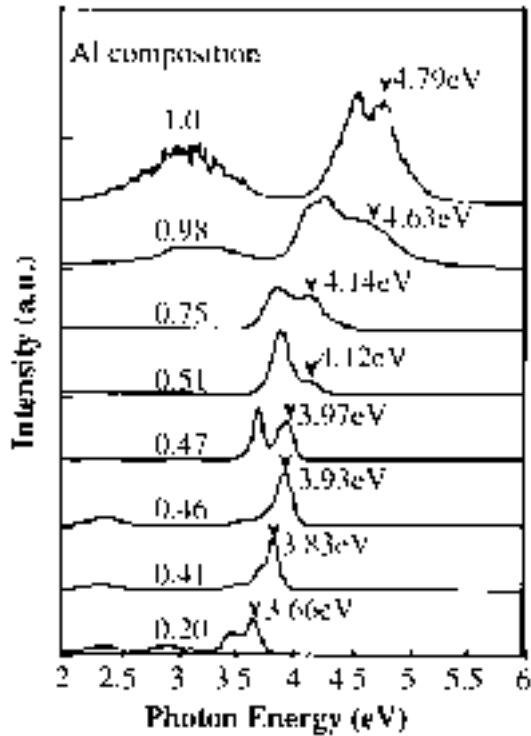


Fig.6 立方晶 AlGaIn エピ膜の電子線励起発光スペクトル

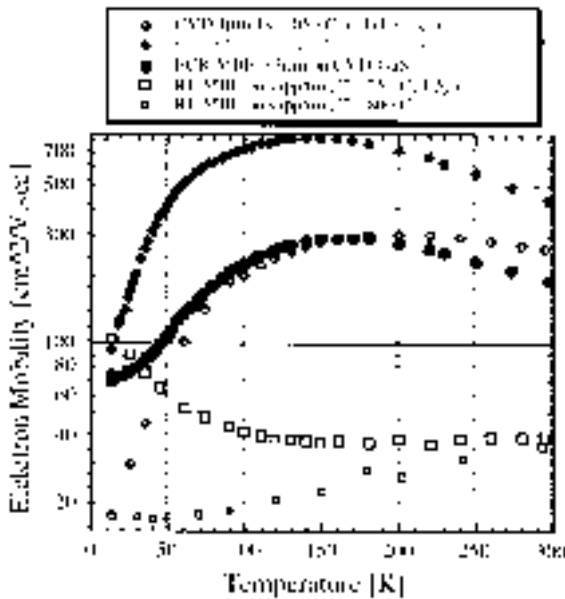


Fig.7 各種の六方晶 GaN エピ膜の Hall 移動度の温度依存性

3.3 窒化物半導体及び混晶ヘテロ構造の電子構造の研究

六方晶及び立方晶 III 族窒化物の電子構造をバンド計算により調べた結果、六方晶・立方晶 GaN のバンドギャップ差に関する実験結果を支持する理論的裏付けが明確になった。また、立方晶 AlGaIn 混晶のバンド型について、現状の理論計算では Al 組成 0.4 以上では間接遷移と予測されているが、電子線励起発光の実験結果では発光強度の減

少や発光エネルギーの組成依存性の折れ曲がりなどの間接遷移を示す証拠は見いだされず、理論と実験との食い違いが明らかとなった。更に、六方晶結晶についてバンドパラメータに関しては立方晶近似が有効なこと、立方晶 GaN について(001)面内の圧縮歪では六方晶 GaN 的、引っ張り歪では六方晶 AlN 的なバンド構造になること、等がわかった。

§ 4 成果の総括

本研究における最も大きな成果は、III 族窒化物半導体結晶の成長表面に関する知見と立方晶結晶の高品質化である。本研究がスタートした当時、窒化物結晶に関して原子レベルでの平坦表面が実現しておらず、その表面に関する情報は極めて限られたものしか得られていなかった。また、立方晶結晶については、当グループを含めて 3 グループほどがその存在を示したにすぎず、その物性に関しては実験データに基づく信頼できる値がほとんど報告されていなかった。MBE 技術も、成長速度が数 100Å/h しか得られず、プラズマ源という特徴から、実際の III/V 比など成長条件を精密に把握することが不可能であり、成長制御が極めて困難な状態にあった。

上記、成果の項で述べたように、III 族窒化物結晶の平坦表面実現によって、表面再配列構造とその転移を観測できるようになり、III 族窒化物の結晶成長のメカニズムの理解が飛躍的に進展した。更に、成長中に RHEED パターンの観測から成長条件を最適化する方法を提供することとなった。実際、このような成長中の real-time での条件最適化の手法とヘテロエピタキシャル成長初期過程の最適化を併せ用いることにより、六方晶及び立方晶の両 GaN 結晶において世界最高品質の MBE エピタキシャル膜の成長に成功した。これらの技術は、GaN より更に非平衡性が顕著であると思われる立方晶 AlGaIn にも適用してそのエピタキシャル成長が実現し、また、同一基板状での六方晶 / 立方晶制御を可能とした。更に、GaN 成長における As サーファクタント効果など、当初想定していなかったような現象も見いだすことができた。このように、「窒化物半導体作製」に関しては、予想以上の成果を達成することができた。我々のこれらの成果の影響もあって、現在では学会レベルで III 族窒化物半導体表面や立方晶結晶の研究が活発化している。

また、「窒化物半導体特性評価」では、立方晶 GaN のバンドギャップの解明、六方晶 / 立方晶混在の評価法の確立を、顕著な成果として挙げられる。これらの成果は、精密な物性評価を可能とするのに十分な程厚い、高品質エピ膜の成長を実現できたことに裏打ちされたものであると考え

られる。また、立方晶 AlGaIn の発光特性や六方晶 GaN 膜の持続性光伝導度、温度可変 Hall 効果測定等を行って、エピ膜の光学的、電気的特性を評価し、その物性的側面及び結晶品質に関する一定の知見を明らかにした。特に、化学気相成長法によるエピ膜に比べて移動度が低いとされる MBE 成長膜の電気的特性改善への指針が得られたことは重要である。しかし、これらの結果に関しては更により詳細な研究が必要であり、一手法のみからではなく、複数の評価法からのデータをもとにした総合的な特性評価の研究が望まれる。この観点から、当初予定した欠陥や不純物に関する評価が、マンパワー不足や特別仕様装置の設置に時間を要した等の理由から不十分に終わったことが惜まれる。

「窒化物半導体電子構造」に関しては、当初予定していた招聘研究者が来日できなくなり、計画のスタートが大幅に遅れた点が誤算であった。しかし、理論的側面から歪効果やバンドパラメータ等を立方晶結晶と六方晶結晶の比較も含めて行うことができ、光デバイスのみならず電子デバイスをも見据えた機能実現への指針を得ることができたと考える。

本制度による研究期間は終了したが、本研究の中で確立された窒化物半導体結晶成長法やそのエピ膜の電子物性に関する知見をもとにして、ワイドギャップ窒化物半導体混晶ヘテロ構造に基づく新しい半導体エレクトロニクス構築がより現実味を帯びてきたと考えられ、今後は窒化物半導体系材料による新機能発現を目指す所存である。

研究従事者

(1) 電子技術総合研究所職員

吉田貞史、遠藤和弘、奥村元、石田夕起

(2) 併任職員

多田哲也(産業技術融合領域研究所)、三島修、田中順三(無機材質研究所)

(3) 非常勤職員

長谷川文夫(筑波大学)、岸野克巳、菊池昭彦(上智大学)、尾鍋研太郎(東京大学)、酒井士郎(徳島大学)、秩父重英(東京理科大学)、梨山勇、伊藤久義(日本原子力研究所)、上野山雄、鈴木政勝(松下電器産業)

(4) ポストドクトラルフェロー

G. Feuillet(フランス)、P. Hacke(米国)、K. Balakrishnan(インド)、I. Koutzarov(ブルガリア)、C.V. Reddy(インド)、A. Fave(フランス)、S.H. Cho(韓国)

外部発表一覧

本プロジェクトにおける外部発表の一覧を以下に示す。

(1) 口頭発表

i) 国内会議

- 1) 太田一生、浜口寛、奥村元、長友隆男、吉田貞史、SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第4回講演会(1995)、“ECRプラズマを用いたガスソース MBE 法による立方晶 GaN の成長”
- 2) 太田一生、浜口寛、奥村元、長友隆男、吉田貞史、第43回応用物理学関係連合講演会(1996)、“ECRプラズマを用いたガスソース MBE 法による立方晶 GaN の成長”
- 3) G.Feuillet、浜口寛、石田夕起、奥村元、吉田貞史、第43回応用物理学関係連合講演会(1996)、“ECR-MBE 法による 3C-SiC 基板上への立方晶 GaN の成長”
- 4) P.Hacke、奥村元、吉田貞史、第43回応用物理学関係連合講演会(1996)、“ECRプラズマ MBE によるサファイア c 面上の GaN 成長初期過程”
- 5) 秩父重英、奥村元、G. Feuillet、浜口寛、中村修二、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“立方晶および六方晶 GaN のフォトリフレクタンスおよびフォトルミネッセンススペクトル”
- 6) 宮島泰、秦一貴、丸山隆浩、秋本克洋、奥村元、吉田貞史、加藤博雄、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“c-GaN の角度分解光電子分光”
- 7) 田中宇乙、趙晟煥、丸山隆浩、秋本克洋、奥村元、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“RF-MBE による GaN 薄膜のカソードルミネッセンス測定”
- 8) 奥村元、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“RHEED、TEMによる GaNヘテロエピタキシャル膜表界面の観察”(シンポジウム)
- 9) 太田一生、浜口寛、奥村元、長友隆男、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“GaAs 上への立方晶 GaN 成長の成長条件依存性”
- 10) 浜口寛、G. Feuillet、奥村元、秩父重英、中西久幸、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“3C-SiC 基板上の立方晶 GaN の表面再配列構造”
- 11) K. Balakrishnan、G. Feuillet、太田一生、浜口寛、P. Hacke、奥村元、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“X-ray analysis of hexagonal and cubic GaN epitaxial layers grown by MBE”
- 12) P. Hacke、G. Feuillet、奥村元、吉田貞史、第57回応用物理学学会学術講演会(1996)、“六方晶 GaN 結晶成長における RHEED パターンでの表面 stoichiometry の制御”
- 13) 奥村元、SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第5回講演会(1996)、“GaN系電子素子の現状”(依頼講演)

- 14) 太田一生, 浜口寛, 奥村元, 長友隆男, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究回第 5 回講演会 (1996), "GaAs 基板上的立方晶 GaN エピ膜の表面再配列構造の観測"
- 15) 浜口寛, G. Feuillet, 太田一生, 奥村元, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究回第 5 回講演会 (1996), "立方晶 GaN の表面再配列構造と成長条件の適正化"
- 16) K. Balakrishnan, G. Feuillet, 太田一生, 浜口寛, 奥村元, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究回第 5 回講演会 (1996), "High resolution XRD analysis of cubic GaN Grown by ECR MBE - Pole figures and reciprocal lattice mapping"
- 17) 奥村元, 吉田貞史, 第 1 回ナイトライドフォーラム (1996), "ガスソース MBE 法による立方晶及び六方晶 GaN の結晶成長" (依頼講演)
- 18) 奥村元, 八百枝徹, 浜口寛, K. Balakrishnan, 太田一生, 吉田貞史, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "サファイア (0001) 面上への六方晶 / 立方晶 GaN の成長制御"
- 19) 八百枝徹, K. Balakrishnan, 奥村元, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "RF-MBE 法によるサファイア基板上的六方晶 GaN エピ膜の成長初期過程"
- 20) K. Balakrishnan, 八百枝徹, 奥村元, 吉田貞史, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "RF-MBE 法による六方晶 GaN の成長モードとそのエピ膜の評価"
- 21) 浜口寛, 太田一生, K. Balakrishnan, 奥村元, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "GaN 成長における As サーファクタント効果"
- 22) 白井啓一, 浜口寛, 太田一生, K. Balakrishnan, 奥村元, 秩父重英, 中西久幸, 石田夕起, 吉田貞史, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "RF-MBE 法による高品質立方晶 GaN, AlGaN エピ膜の成長"
- 23) 太田一生, 浜口寛, 奥村元, 長友隆男, 吉田貞史, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "ECR-MBE 法による GaAs 基板上立方晶 GaN エピ膜の成長条件依存性"
- 24) 播磨弘, 井上俊明, 中島信一, 奥村元, 石田夕起, 吉田貞史, 浜口寛, 第 44 回応用物理学関係連合講演会 (1997), "ラマン散乱による立方晶 GaN ヘテロエピ膜の評価"
- 25) 小泉貴義, 浜口寛, K. Balakrishnan, 奥村元, 長友隆男, 吉田貞史, 第 58 回応用物理学学会学術講演会 (1997), "RF-MBE 法による 3C-SiC 上立方晶 AlN, AlGaN エピ膜の成長"
- 26) 浜口寛, 多田健司, K. Balakrishnan, 奥村元, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, 第 58 回応用物理学学会学術講演会 (1997), "As サーファクタント効果を用いた c-GaN の成長"
- 27) K. Balakrishnan, 奥村元, 吉田貞史, 第 58 回応用物理学学会学術講演会 (1997), "Analysis of RHEED intensity variation during the growth of GaN epilayers"
- 28) K. Balakrishnan, 浜口寛, 小泉貴義, 奥村元, 吉田貞史, 第 58 回応用物理学学会学術講演会 (1997), "Structural analysis of group III-nitride epilayers using X-ray pole figures"
- 29) 奥村元, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "ICSCIII-N'97, ICNS'97 MBE 関連会議報告" (依頼講演)
- 30) K. Balakrishnan, 奥村元, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "In-situ analysis of RF-MBE growth of hexagonal GaN epilayers on sapphire (0001)"
- 31) K. Balakrishnan, 奥村元, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "Structural investigation of MBE grown hexagonal GaN epilayers by high resolution XRD and TEM"
- 32) 小泉貴義, 浜口寛, 多田健司, 奥村元, 石田夕起, 長友隆男, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "RF-MBE 法による立方晶 AlGa_{0.5}N の成長"
- 33) 浜口寛, 小泉貴義, 多田健司, 奥村元, 石田夕起, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "立方晶 GaN 成長における As の効果"
- 34) C.V. Reddy, K. Balakrishnan, 奥村元, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "Persistent photoconductivity in MBE grown GaN"
- 35) I.P. Koutzarov, 浜口寛, A. Fave, 奥村元, 吉田貞史, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会第 6 回講演会 (1997), "Hall-effect studies of cubic GaN epilayers grown by RF plasma assisted MBE on GaAs(001) substrates"
- 36) 奥村元, 吉田貞史, 日本学術振興会極限構造電子物性第 151 委員会第 43 回研究会 (1997), "GaN 系窒化物半導体の電子デバイス応用の現状と課題" (依頼講演)
- 37) A. Fave, I.P. Koutzarov, 多田健司, K. Balakrishnan, 奥村元, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, 第 45 回応用物理学関係連合講演会 (1998), "サファイア上 RF-MBE 成長 GaN エピ膜のホール特性"
- 38) 趙晟煥, 石田夕起, 奥村元, 吉田貞史, 第 45 回応用物

- 理学関係連合講演会 (1998), "アルミニウム源としてケミカルビームを用いたRF-MBE法によるAlGaIn成長"
- 39) 浜口寛, G. Feuillet, 奥村元, 石田夕起, 秩父重英, 中西久幸, 吉田貞史, 第45回応用物理学関係連合講演会 (1998), "As雰囲気c-GaN成長表面における表面再配列転移とAs照射量の関係"
- 40) 小泉貴義, 浜口寛, K. Balakrishnan, 石田夕起, 趙晟煥, 奥村元, 長友隆男, 吉田貞史, 第45回応用物理学関係連合講演会 (1998), "RF-MBE法による3C-SiC上立方晶AlN, AlGaInエピ膜の成長"
- 41) C.V. Reddy, K. Balakrishnan, 奥村元, 吉田貞史, 第45回応用物理学関係連合講演会 (1998), "MBE成長GaInエピ膜の持続性光伝導度の起源"
- 42) K. Balakrishnan, 奥村元, 吉田貞史, 第45回応用物理学関係連合講演会 (1998), "MBE成長六方晶GaInのモフォロジー及び構造解析"
- 43) 奥村元, 吉田貞史, 第45回応用物理学関係連合講演会 (1998), "ガスソースMBE法におけるGaInエピ成長の表面制御とエピ膜特性制御" (シンポジウム)
- ii) 国際会議
- 1) H.Okumura, K.Ohta, T.Nagatomo, S.Yoshida, 5th Int. Conf. Chemical Beam Epitaxy and Related Growth Techniques (1995), "Observation of MBE-grown cubic-GaN/GaAs and cubic-GaN/3C-SiC interfaces by high resolution transmission electron microscope"
- 2) S. Yoshida, H. Okumura, 2nd Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (1995), "Gas source MBE growth of cubic GaN and its properties"
- 3) S. Yoshida, H. Okumura, 4th China-Japan Symposium on Thin Films (1995), "Gas source MBE growth of cubic GaN and its properties"
- 4) H.Okumura, K.Ohta, K.Ando, W.W.Ruhle, T.Nagatomo, S.Yoshida, Int. Conf. Silicon Carbide and Related Materials-1995 (1995), "Bandgap energy of cubic GaN"
- 5) H.Okumura, K.Ohta, T.Nagatomo, S.Yoshida, Topical Workshop on III-V Nitrides (1995), "Observation of MBE-grown cubic-GaN/GaAs and cubic-GaN/3C-SiC interfaces by high resolution transmission electron microscope"
- 6) H.Okumura, K.Ohta, K.Ando, W.W.Ruhle, T.Nagatomo, S.Yoshida, Topical Workshop on III-V Nitrides (1995), "Bandgap energy of cubic GaN"
- 7) G.Feuillet, P.Hacke, H. Okumura, S. Yoshida, Int. Symp. Blue Laser and Light Emitting Diodes (1996), "Monitoring growth through surface reconstructions: the case of homoepitaxial MBE-grown hexagonal GaN"
- 8) S. Yoshida, H. Okumura, G.Feuillet, P.Hacke, K. Ohta, H. Hamaguchi, 3rd Wide Bandgap Nitride Workshop (1996), "Monitoring growth through surface reconstructions: the case of homoepitaxial MBE-grown hexagonal GaN"
- 9) S. Yoshida, H. Okumura, G.Feuillet, P.Hacke, K. Ohta, H. Hamaguchi, 3rd Wide Bandgap Nitride Workshop (1996), "ECR-MBE growth and characterization of cubic-GaN"
- 10) P. Hacke, G. Feuillet, H. Okumura, S. Yoshida, 9th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (1996), "Stability of surface reconstructions for MBE grown GaN"
- 11) S.-H. Cho, U. Tanaka, T. Maruyama, K. Akimoto, H. Okumura, S. Yoshida, 9th Int. Conference on Molecular Beam Epitaxy (1996), "Cathodoluminescence of GaN films grown under Ga and N rich conditions by radio frequency-molecular beam epitaxy"
- 12) S. Chichibu, H. Okumura, G. Feuillet, S. Nakamura, S. Yoshida, Int. Conf. Solid State Devices and Materials'96 (SSDM'96) (1996), "Exciton spectra of cubic and hexagonal GaN epitaxial films"
- 13) S. Yoshida, H. Okumura, Materials Research Society 1996 Fall Meeting (1996), "Growth of cubic GaN by MBE and its properties"
- 14) H. Okumura, K.Balakrishnan, G. Feuillet, Y. Ishida, S. Yoshida, K. Ohta, H. Hamaguchi, S. Chichibu, Materials Research Society 1996 Fall Meeting (1996), "Structural and optical characterization of high-quality cubic GaN epilayers grown on GaAs and 3C-SiC substrates by gas source MBE using RHEED in-situ monitoring"
- 15) G. Feuillet, P. Hacke, H. Okumura, H. Hamaguchi, K. Ohta, K. Balakrishnan, S. Yoshida, Materials Research Society 1996 Fall Meeting (1996), "Surface reconstructions and III-V stoichiometry: the case of cubic and hexagonal GaN"
- 16) H. Okumura, G. Feuillet, H. Hamaguchi, K. Ohta, P. Hacke, K. Balakrishnan, Y. Ishida, S. Yoshida, Int. Workshop on Hard Electronics (1997), "Surface reconstruction and MBE growth optimization of GaN"
- 17) S. Yoshida, Japanese-German Workshop (1997), "MBE Growth monitoring of GaN by surface reconstruction"
- 18) H. Okumura, H. Hamaguchi, K. Ohta, G. Feuillet, K.Balakrishnan, Y. Ishida, S. Chichibu, H. Nakanishi, T. Nagatomo, S. Yoshida, Int. Conf. Silicon Carbide, III-nitrides and related materials - 1997 (1997), "Surface reconstruction and As surfactant effects on MBE-grown GaN epilayers" (invited)
- 19) H. Okumura, K.Balakrishnan, H. Hamaguchi, T. Koizumi, S.

- Chichibu, H. Nakanishi, T. Nagatomo, S. Yoshida, 2nd Int. Conf. Nitride Semiconductors -ICNS'97- (1997), "Analysis of MBE growth mode for GaN epilayers by RHEED"
- 20) H. Okumura, H. Hamaguchi, T. Koizumi, K. Balakrishnan, Y. Ishida, M. Arita, S. Chichibu, H. Nakanishi, T. Nagatomo, S. Yoshida, 2nd Int. Conf. Nitride Semiconductors -ICNS'97- (1997), "Growth of cubic III-nitrides by gas source MBE using atomic nitrogen plasma: GaN, AlGa_{0.5}N and AlN"
- 21) H. Hamaguchi, G. Feuillet, H. Okumura, Y. Ishida, S. Chichibu, H. Nakanishi, S. Yoshida, 2nd Int. Conf. Nitride Semiconductors -ICNS'97- (1997), "Surface reconstructions of cubic GaN on 3C-SiC and GaAs"
- 22) K. Balakrishnan, H. Okumura, S. Yoshida, 2nd Int. Conf. Nitride Semiconductors -ICNS'97- (1997), "Study on the initial stages of heteroepitaxial growth of hexagonal GaN on sapphire by plasma assisted MBE"
- 23) C.V. Reddy, K. Balakrishnan, H. Okumura, S. Yoshida, Int. Workshop on Hard Electronics'98 (1998), "The nature of persistent photoconductivity in MBE grown GaN"
- 24) H. Okumura, H. Hamaguchi, T. Koizumi, K. Balakrishnan, S. Yoshida, Int. Workshop on Hard Electronics'98 (1998), "Surface monitoring and surfactant effects in the MBE growth of GaN epilayers"
- 25) T. Koizumi, S.-H. Cho, Y. Ishida, T. Nagatomo, H. Okumura, S. Yoshida, Int. Workshop on Hard Electronics'98 (1998), "Growth of cubic AlGa_{0.5}N and AlN epilayers by RF-plasma assisted MBE"
- 26) H. Okumura, The 38th Japan-China Seminar on Science and Technology (1998), "Surface monitoring and its application to quality improvement in the MBE growth of GaN epilayers" (invited)
- 2) H. Okumura, K. Ohta, T. Nagatomo, S. Yoshida, J. Cryst. Growth, 164 (1996) 149, "Observation of MBE-Grown cubic-GaN/GaAs and cubic-GaN/3C-SiC interfaces by high resolution transmission electron microscope"
- 3) P. Hacke, G. Feuillet, H. Okumura, S. Yoshida, Appl. Phys. Lett., 69 (1996) 2507, "Monitoring surface stoichiometry with the (2x2) reconstruction during growth of hexagonal-phase GaN by molecular beam epitaxy"
- 4) G. Feuillet, H. Hamaguchi, K. Ohta, P. Hacke, H. Okumura, S. Yoshida, Appl. Phys. Lett., 70 (1997) 1025, "Arsenic mediated reconstructions on cubic (001) GaN"
- 5) H. Okumura, K. Ohta, K. Ando, W.W. Ruhle, T. Nagatomo, S. Yoshida, Solid State Electronics, 41 (1997) 201, "Bandgap energy of cubic GaN"
- 6) S. Chichibu, H. Okumura, S. Nakamura, G. Feuillet, T. Azuhata, T. Soda, S. Yoshida, Jpn. J. Appl. Phys., 36 (1997) 1976, "Exciton spectra of cubic and hexagonal GaN epitaxial films"
- 7) S. Yoshida, H. Okumura, G. Feuillet, P. Hacke, K. Balakrishnan, Materials Research Society Symposium Proceedings, 449 (1997) 173, "Growth of cubic GaN by MBE and its properties" (invited)
- 8) H. Okumura, K. Balakrishnan, G. Feuillet, K. Ohta, H. Hamaguchi, S. Chichibu, Y. Ishida, S. Yoshida, Materials Research Society Symposium Proceedings, 449 (1997) 435, "Structural and optical characterization of high-quality cubic GaN epilayers grown on GaAs and 3C-SiC substrates by gas source MBE using RHEED in-situ monitoring"
- 9) G. Feuillet, P. Hacke, H. Okumura, H. Hamaguchi, K. Ohta, K. Balakrishnan, S. Yoshida, Materials Research Society Symposium Proceedings, 449 (1997) 257, "Surface reconstructions and III-V stoichiometry: the case of cubic and hexagonal GaN"
- 10) S.-H. Cho, U. Tanaka, T. Maruyama, K. Akimoto, H. Okumura, S. Yoshida, J. Cryst. Growth, 175/176 (1997) 112, "Cathodoluminescence of GaN films grown under Ga and N rich conditions by radio-frequency-molecular beam epitaxy"
- 11) P. Hacke, G. Feuillet, H. Okumura, S. Yoshida, J. Cryst. Growth, 175/176 (1997) 94, "Stability of surface reconstruction on hexagonal GaN grown by molecular beam epitaxy"
- 12) K. Balakrishnan, G. Feuillet, K. Ohta, H. Hamaguchi, H. Okumura, S. Yoshida, Jpn. J. Appl. Phys., 36, 6221 (1997), "Structural analysis of cubic GaN through X-Ray pole figure generation"
- 13) H. Okumura, K. Ohta, G. Feuillet, K. Balakrishnan, S. Chichibu, H. Hamaguchi, P. Hacke, S. Yoshida, J. Cryst.

(2) 紙上発表

i) 国内誌

- 1) 吉田貞史, インテリジェント材料, 6 (1996) 34, "六方晶及び立方晶Ga_{0.5}Nとその物性 - ヘテロエピタキシャル成長による結晶型制御" (依頼原稿)
- 2) 奥村元, 日本結晶学会誌 25 (1998) 113, "分子線エピタキシー法によるIII族窒化物のエピタキシャル成長" (依頼原稿)

ii) 国際誌

- 1) H. Okumura, K. Ohta, K. Ando, W.W. Ruhle, T. Nagatomo, S. Yoshida, Institute of Physics Conference Series (Silicon Carbide and Related Materials 1995) (1996), 142 (1996) 939, "Bandgap energy of cubic GaN"

- Growth, 178 (1997) 113, "Growth and characterization of cubic GaN" (invited)
- 14) H. Okumura, K. Balakrishnan, H. Hamaguchi, T. Koizumi, S. Chichibu, H. Nakanishi, T. Nagatomo, S. Yoshida, J. Cryst. Growth 189/190 (1998) 364, "Analysis of MBE growth mode for GaN epilayers by RHEED"
- 15) H. Okumura, H. Hamaguchi, T. Koizumi, K. Balakrishnan, Y. Ishida, M. Arita, S. Chichibu, H. Nakanishi, T. Nagatomo, S. Yoshida, J. Cryst. Growth 189/190 (1998) 390, "Growth of cubic III-Nitrides by gas source MBE using atomic nitrogen plasma: GaN, AlGaIn and AlN"
- 16) K. Balakrishnan, H. Okumura, S. Yoshida, J. Cryst. Growth 189/190 (1998) 244, "Study on the initial stages of heteroepitaxial growth of hexagonal GaN on sapphire by plasma assisted MBE"
- 17) H. Okumura, Y. Ishida, S. Yoshida, H. Hamaguchi J. Cryst. Growth 189/190 (1998) 435, "Raman scattering characterization of group III-nitride epitaxial layers including cubic phase", H. Harima, T. Inoue, S. Nakashima,
- 18) H. Okumura, H. Hamaguchi, G. Feuillet, Y. Ishida, S. Yoshida, Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 3056, "Arsenic surfactant effects and arsenic mediated molecular beam epitaxy growth for cubic GaN"
- 19) H. Okumura, H. Hamaguchi, K. Ohta, G. Feuillet, K. Balakrishnan, Y. Ishida, S. Chichibu, H. Nakanishi, T. Nagatomo, S. Yoshida, Mat. Sci. Forum 264 (1998) 1167, "Surface reconstruction and As surfactant effects on MBE-grown GaN epilayers" (invited)
- 20) C.V. Reddy, K. Balakrishna, H. Okumura, S. Yoshida, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 244, "The origin of persistent photoconductivity and its relationship with yellow luminescence in molecular beam epitaxy grown undoped GaN"
- 21) H. Okumura, to be published in EMIS Daterreview Series (1998), "Cubic substrates for growth of GaN and related compounds" (invited)
- (3) 特許・実用新案等
- 1) 奥村元, 吉田貞史: 工業技術院「III族窒化物半導体膜の成長方法」特願平 9-274399, 平成 9 年 10 月 7 日

参 考 文 献

- 1) 吉田貞史, パリティ, 11 (1996) 25.
- 2) 吉田貞史: 電子情報通信学会誌 79(1996) 1219.
- 3) S. Nakamura, G. Fasol, "The Blue Laser Diode", (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1997).

(1992.2.12 受付)