

研 究 課 題 名

ZnO 基板を用いた窒化物半導体光導波路の作製

研究代表者名

東京大学・生産技術研究所・藤岡洋

研究分担者名

東京大学・生産技術研究所・小林篤
東京大学・生産技術研究所・太田実雄

1. はじめに

GaN に代表される窒化物半導体を用いたフォトニック結晶や光導波路の作製が精力的に行われている。これまで、窒化物半導体には適切な基板が存在しなかったため、ヘテロエピタキシャル成長に由来する高密度の転位や積層欠陥の導入が問題となっていたが、申請者は GaN 成長用基板として ZnO を採用し、パルス励起堆積法 (PXD)による低温エピタキシャル成長技術を用いることで、高品質窒化物薄膜の作製を実現している。

しかしながら、ZnO 基板上に作製された GaN 薄膜を非線形光学、共振器 QED などに応用する場合、両材料の屈折率コントラストが小さいため、高密度の光閉じ込めが実現しないことが予想される。本研究では、この問題を解決するために、エアギャップ構造の提案と試作を行い、その効果を確認することを目的としている。

2. 研究経過

- ・ ZnO 基板上にエピタキシャル成長した窒化物半導体の歪み解析
- ・ 低温成長窒化物半導体の構造特性（主に界面・表面平坦性）の評価
- ・ エアギャップ構造に適した窒化物/ZnO 低温結晶成長の実現
- ・ GaN/ZnO エアギャップ構造の試作と評価

3. 研究成果

"Atomic scattering spectroscopy for determination of the polarity of semipolar AlN grown on ZnO"
A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka, Appl. Phys. Lett. **103**, 192111 (2013).

4. ま と め

今年度は、ZnO 基板上に構造完全性の高い窒化物半導体薄膜を得る技術開発に注力し、組成や成長温度を変化させることで薄膜中の残留歪みを制御できることを見出した。これにより、ZnO 基板上に窒化物半導体をコヒーレントに成長させることが可能となり、エアギャップ構造作製プロセスに耐えうるテンプレートを作製することに成功した。また、低温成長窒化物/ZnO 界面は原子レベルで平坦であることを各種評価により確認しており、ZnO のアンダーエッチングの際にも窒化物薄膜がブリッジとして保持されることが期待できる。

研究課題名 局所ドーピング構造半導体による量子相関光子生成に関する研究

研究代表者名
埼玉大学・大学院理工学研究科・矢口裕之

研究分担者名
埼玉大学・大学院理工学研究科・八木修平, 高宮健吾, 金日国

1. はじめに

単一光子及び量子もつれ光子対は、量子暗号や量子情報通信において重要な役割を担うことが期待され、その生成に向けて様々なアプローチが検討されている。本研究では、局所ドーピング構造半導体を利用した、高純度、完全ランダム偏光、かつ優れた波長再現性を有する単一光子および量子もつれ光子対の生成を目指した。そのために、共同利用では、フーリエ変換赤外分光によって測定した試料の反射率スペクトルから残留キャリア濃度を非破壊的に評価し、試料作製にフィードバックさせることを目的として研究を実施した。また、光子生成効率向上を目指して作製する分布ブラッグ反射構造の評価のために高分解能 X 線回折測定を行った。

2. 研究経過

本研究では、分子線エピタキシーあるいは有機金属気相エピタキシーを用いて、局所ドーピング構造半導体を作製して、これを評価した。昨年度までは GaAs 中に局所ドーピングされた窒素原子対によって形成される空間的に孤立した等電子トラップを対象として研究を進めてきた。今年度は、これに加えて、分子線エピタキシー法を用いて作製した希土類元素局所ドーピング GaAs および GaAs/AlAs 多層構造からなる分布ブラッグ反射構造をフーリエ変換赤外分光や高分解能 X 線回折測定によって評価した。

3. 研究成果

共同利用による成果の一例として、分子線エピタキシー法を用いて作製した GaAs/AlAs 多層構造から得られた X 線回折の結果を図 1 に示す。図中に示した赤線は測定結果、青線は、設計した構造である GaAs 層厚 114 nm, AlAs 層厚 133 nm からなる 10 周期の多層構造に対するシミュレーション結果である。複数のサテライトピークの位置について、測定結果とシミュレーション結果は良く一致しており、設計通りの多層構造を作製できたことが確認できた。しかしながら、シミュレーション結果と比較すると、測定結果におけるサテライトピークの半値幅が広く、さらなる結晶性の向上を図る必要があることが明らかになった。なお、この多層構造には希土類元素を局所的にドーピングしてあり、発光特性を調べた結果、多層構造のない場合と比べて、発光強度が増強されていることがわかった。この結果は、分布ブラッグ反射構造が光子生成効率向上の寄与したことを示していると考えている。また、結晶性の改善を図ることによってさらに発光強度の向上も期待される。

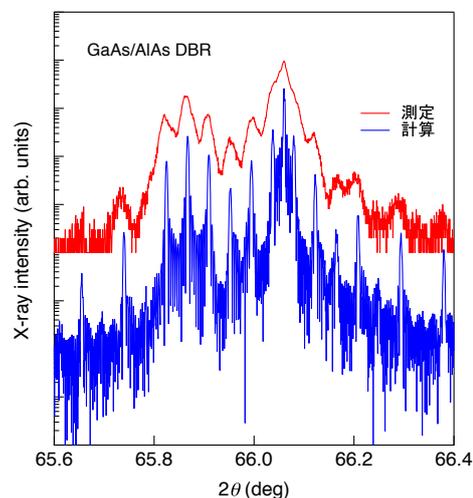


図 1 GaAs/AlAs 多層膜分布ブラッグ反射構造からの X 線回折

4. まとめ

共同利用では、フーリエ変換赤外分光を用いて測定した反射率スペクトルから試料中の残留キャリア濃度を非破壊的に評価し、試料作製にフィードバックさせることができた。また、光子生成効率向上を目指して作製した GaAs/AlAs 多層膜分布ブラッグ反射構造に対する高分解能 X 線回折測定から構造の決定や結晶性の評価を行なうことができた。これらは、局所ドーピング構造半導体を利用した単一光子および量子もつれ光子対の生成を目指す本研究において大変有用であった。

昇華法を用いた結晶成長における多形制御

九州大学・応用力学研究所・柿本浩一

東北大学・金属材料研究所・宇田 聡

はじめに：現代社会の喫緊の課題の一つである環境問題とエネルギー問題は、早急に解決されなければならない。このためには、電力変換装置や電気自動車等に用いられる高出力パワー半導体の高効率化を実現させる必要がある。この高効率化の実現には、炭化珪素(SiC)高機能半導体結晶の結晶多形の制御が重要である。本提案は、過去45年にわたって解決できなかった結晶多形制御を、表面エネルギーや成長の過飽和度などの結晶成長パラメータの精密制御により実現することである。具体的には、結晶成長炉内の動的圧力制御による過飽和度の制御法の開発や、従来ほとんど定量的に議論されていなかった不純物ドーピングによる表面エネルギーを制御することにより、これを可能にすることが目的である。これにより、SiCの結晶多形の精密制御と結晶中の不純物ドーピングの精密制御が可能となり、従来使用されてきたシリコンに代わるパワーデバイス用半導体用結晶となりえるSiC結晶育成を実現できる。今年、特に転位密度に注目して解析を行った。

2. 研究経過：本研究で研究対象としているSiCバルク結晶成長法は、現在主に使用されている昇華法である。図1は本研究で使用している昇華炉の概念図である。本育成炉では、高周波により加熱する方法を採用しており、下部からガスの導入が可能な形となっている。現在、炉内温度の解析が終わり、結晶多形に影響を及ぼす転位の計算が一部終了した。この解析結果の例を図2に示す。

3. 研究成果

本研究では、本研究室ですべて開発した多相流解析コードを用いて、温度、流速、化学種の輸送に関する解析を行っている。図2は、SiC結晶中の転位分布の解析結果の例を示します。これらの解析から、高温では転位密度が増加することが明らかになってきている。すなわち、結晶の温度の高低により、結晶中に導入される転位密度が大きく左右されることが分かり、転位密度の観点から、結晶育成時の最適化が可能であると考えられる。さらに、結晶内の転位は、冷却中に導入されるのではなく、結晶育成中に主に導入されることがわかった。

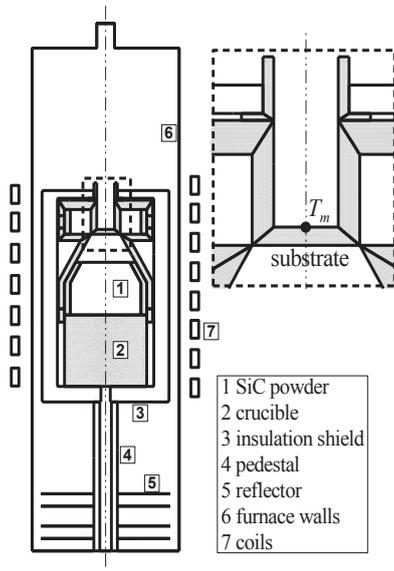


図1 昇華法炉の構成図

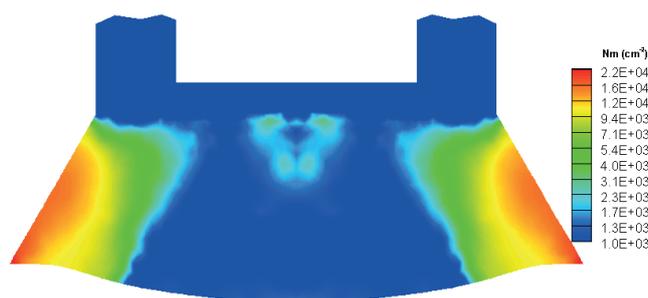


図2 結晶中の転位密度分布

4. まとめ

本発表では、従来の昇華法における結晶成長中および成長後の転位密度の解析を行った。その結果、成長温度が高温では転位密度が増加することが明らかになってきている。結晶中に導入される転位密度は成長温度に大きく左右されることが分かり、転位密度の観点から、結晶育成時の最適化が可能であると考えられる。さらに、結晶内の転位は、冷却中に導入されるのではなく、結晶育成中に主に導入されることがわかった。

研究課題名

疑似金属基板を用いた集積化 GaN 系面発光素子製作のための基本検討

研究代表者名

工学院大学・工学部情報通信工学科・本田徹

研究分担者名

工学院大学・工学部情報通信工学科・山口智広
 工学院大学・工学部情報通信工学科・大澤真弥
 工学院大学・工学部情報通信工学科・渡邊悠斗
 工学院大学・工学部情報通信工学科・田沼圭亮
 工学院大学・工学部情報通信工学科・渡邊菜月
 工学院大学・工学部情報通信工学科・磯野大樹

1. はじめに

屋外大型ディスプレイの分野では、III-V 族窒化物半導体を利用した LED を用いる方法が大きな市場を獲得しており、これは同材料がディスプレイ応用に適していることを意味している。LED の小型化・集積化は、今後の更なる市場拡大における必須基盤技術となる。金属基板上への半導体成長ならびにデバイス製作は、縦方向電流注入による素子動作を可能にし、LED の集積化を可能にする。しかしながら、半導体成長に適する原子層単位の平坦性を有する金属基板表面を得ることは難しい。それに対し我々は、低コストで原子層単位の平坦性を有する金属基板表面を実現する手法として、エピタキシャル金属層を基板として用いる「疑似金属基板」を提案している。

本研究では、「屋外で使用可能なマイクロディスプレイへの応用を目指した集積化 GaN 系面発光素子の実現」を目指した「疑似金属基板を用いた集積化 GaN 系面発光素子の製作と評価」を研究目的とする。

2. 研究経過

縦型デバイス応用への展開へと進むために、 Al_2O_3 上に行っていた疑似 Al 基板の製作を、導電性を実現できる SiC 上への疑似 Al 基板の製作へと発展させた。また、ケルビンフォース顕微鏡 (KFM) を用いて、疑似 Al/ Al_2O_3 基板上に成長した GaN 薄膜の極性評価を行った。

3. 研究成果

4H-SiC 上に疑似 Al 基板を製作したところ、反射高速電子回折 (RHEED) で明瞭なストリークパターンを確認し、SiC 上においても、平坦性の高い疑似 Al 基板が製作されたことを確認した。疑似 Al 基板上への GaN 成長を行ったところ、XRD 2θ - ω 測定において、GaN 成長前後で(111)Al のピーク位置がシフトしていることが確認された (図 1)。これは、本来であれば Al_2O_3 や SiC 基板上にヘテロエピタキシャル成長する GaN にひずみが生じるが、疑似基板として挿入された軟金属の Al 自身が形態を変えながら GaN を成長させることにより、Al が GaN 成長に対する緩衝層としての効果を持つことが明らかとなった。

また、疑似 Al/ Al_2O_3 基板上に成長した GaN の表面の KFM 測定を行ったところ、 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ サイズで極性の反転領域 (Ga 極性と N 極性の混在) は確認されなかった。この GaN は、Ga 極性であると予想される結果が得られた。

4. まとめ

疑似 Al 基板上成長 GaN の XRD 測定結果より、疑似 Al 基板成長に対する新たな利点を確認された。また、疑似 Al 基板上 GaN の極性評価に対する可能性が示唆された。

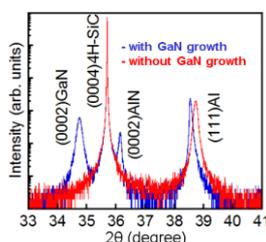


図 1 疑似 Al 基板上への GaN 成長前後の XRD 2θ - ω 測定結果

研究課題名
シリサイド半導体による Si 系薄膜結晶太陽電池

研究代表者名
筑波大学・数理物質系・末益崇

研究分担者名
東北大学・金属材料研究所・松岡隆志

1. はじめに

半導体 BaSi₂ は、バンドギャップが約 1.3eV と Si より大きく、光吸収係数が 1.5eV で結晶 Si の 100 倍とカルコパイライト半導体に匹敵するほど極めて大きく、Si(111)基板に a 軸配向で格子整合してエピタキシャル成長が可能である。さらに、不純物ドーピングにより伝導型およびキャリア密度の制御が可能という太陽電池材料として優れた特徴を有する。申請者は、SiO₂ 基板上に、<111>配向した単結晶ライクな高品質 Si 薄膜多結晶（膜厚約 0.1μm）を成長する技術を利用して、さらに、新材料である BaSi₂ の高品質薄膜多結晶（膜厚約 1 μm）の pn 接合を<111>-Si/SiO₂ 基板にエピタキシャル成長することで、高効率な薄膜結晶太陽電池を実現することを目指している。本研究では、薄膜結晶成長および結晶物理学の分野において長年の経験と知識、さらに研究設備を有する松岡隆志先生と共同研究を行うことで、上記の研究を強力に推進し、目標を達成することを目的とする。

2. 研究経過

これまでの研究で、Si(111)基板上に形成したアンドープ n 型 BaSi₂ 膜（電子密度約 10¹⁶cm⁻³）では、電子線誘起電流法で評価した少数キャリア拡散長が約 10μm と、結晶粒径が 0.2μm であることと比較して、極めて大きいことが分かっている。結晶粒径が小さいのは、基板表面の Si 原子の対称性を反映して 3 つの等価なドメインで構成されているためである。このような膜においても、内部量子効率が 70% に達する厚さ 0.4μm の BaSi₂ 膜が得られている。このため、BaSi₂ の粒界の性格について明らかにすることが極めて重要である。本年度は、Si(111)基板上に形成した BaSi₂ 膜の結晶粒界におけるポテンシャル分布を、ケルビンプローブ顕微鏡 (KFM) 法により評価することを目的として実験した。

3. 研究成果

KFM 観察の結果、アンドープ n-BaSi₂ 膜では、結晶粒界において正孔に対して高さ約 30meV の障壁が存在することがわかった。このため、アンドープ n-BaSi₂ 膜の結晶粒界には、少数キャリアである正孔は結晶粒界から離れる方向に力が働き、結晶粒界の影響を受けにくいと思われる。このことが、アンドープ n-BaSi₂ は結晶粒径が小さいにもかかわらず、少数キャリア拡散長が長い理由であると考えている。次に、Sb を軽くドーブした n-BaSi₂ 膜（電子密度約 6×10¹⁶cm⁻³）を評価したところ、結晶粒界において、正孔に障壁が存在し、その大きさはアンドープ n-BaSi₂ 膜と殆ど変らなかった。引き続き、Sb を重くドーブした n-BaSi₂ 膜（電子密度約 10¹⁸cm⁻³）を評価したところ、結晶粒界では、アンドープ n-BaSi₂ とは異なり、電子に対して高さ約 20meV の障壁が存在し、正孔を引き寄せる力が働いていることがわかった。このように、Sb のドーピング量により、結晶粒界でのポテンシャル障壁の符号と大きさが変化することは、結晶粒界でフェルミ準位がピンニングしていると考え、結晶粒内のフェルミ準位が Sb ドーピングにより電子密度が増加するにしたがい、伝導帯下端に近づくと考えると説明できる。同じ実験を、B ドープ p-BaSi₂ 膜についても行ったところ、Sb ドープ BaSi₂ 膜と同様に、B ドープにとまなう BaSi₂ 結晶粒内でのフェルミ準位の変化により、結晶粒界でのポテンシャル障壁の大きさの変化を説明できた。

4. まとめ

太陽電池動作に極めて大きな影響を与える結晶粒界のポテンシャル分布を KFM 法により評価した。その結果、太陽電池の光吸収層となる電子密度の低い n-BaSi₂ においては、結晶粒界は少数キャリアである正孔のトラップにはならないといえる。この結果は、BaSi₂ が薄膜結晶太陽電池材料として大きなポテンシャルをもっていることを示す。

次世代太陽電池に向けた高品質窒化物半導体薄膜の選択成長

研究代表者

三重大学大学院・工学研究科・三宅 秀人

研究分担者

東北大学・金属材料研究所・松岡 隆志, 片山 竜二, 谷川 智之

東北大学・多元物質科学研究所・福山 博之

大阪大学大学院・工学研究科・森 勇介, 今出 完, 今西 正幸

三重大学大学院・工学研究科・岡田 俊祐

1. はじめに

Ⅲ族窒化物半導体によるデバイスは、混晶の組成比制御により 0.7eV(InN)~6.2eV(AlN)までの広い範囲でバンドギャップを変化できるため、赤外域から紫外域にまで対応することから次世代太陽電池応用が期待されている。 GaN 系窒化物半導体は基板としてサファイアや SiC などの異種基板上へ成長が行われているが、成長層と基板との間の熱膨張係数差や格子定数差によって大きな応力が発生し、基板の反りやクラック、転位が発生する問題がある。これまでの研究では、主に GaN<1-100>方向にマスクを形成して溝加工を行い、選択成長により転位低減が行われてきた。しかし、GaN<1-100>方向から off が有る選択成長については、形成されるファセット面や転位・反りの低減効果は明らかでない。本研究では、溝加工の方向を変えて選択成長を行い、形成されるファセット面及び表面形態の違いを調べ、GaN 膜の結晶性向上と反りの低減を目指した。

2. 研究経過

選択成長用の基板は、GaN テンプレート上に方向を<1-100>から「0° 3° 6° 12° 18° 24° 27° 30°」off を付けて約 4.5μm の深さで溝加工を行ったもの(GaN Stripe 加工基板)と、別の GaN テンプレート上に 100nm の SiO₂ 膜で同様に off を付けてスタンプマスクを形成したもの(SiO₂ Mask 加工基板)を作製した。両基板共に MOVPE 法を用いて GaN 成長を行った。

3. 研究成果

0°off の選択成長(図 1(a)(b))では、側面は主に{11-20}であるのに対して、12°off の基板上(図 1(c)(d))では、側面は{11-22}と{1-101}で形成されていると考えられる比較的平滑な斜面が形成されていた。また、180min 成長後の XRD を用いた結晶性評価については、どの基板においても off 角で形成したマスク上及び溝加工で成長を行った結晶では、<1-100>方向よりも良好であった

上記結果を踏まえ、さらなる高品質な GaN 成長基板を作製するために、ボイド形成技術を用いて作製した基板(Void 加工基板)にも同様な off を付けて基板を作製した。下地基板からの貫通転位を低減するために斜めファセットによる成長を行い、さらに GaN を成膜した(図 1(e)(f))。その結果、通常の GaN テンプレートや選択成長基板と比較して(0004)のみならず、(10-10)でも結晶性が大幅に改善された(図 3)。しかしながら、18°off 以上基板では平滑な表面が得られなかった。この理由として考えられるのは、{1-101}と{11-22}の出現頻度の違いが横方向成長に影響し、最終的に GaN 膜の合体に影響していると考えられる。

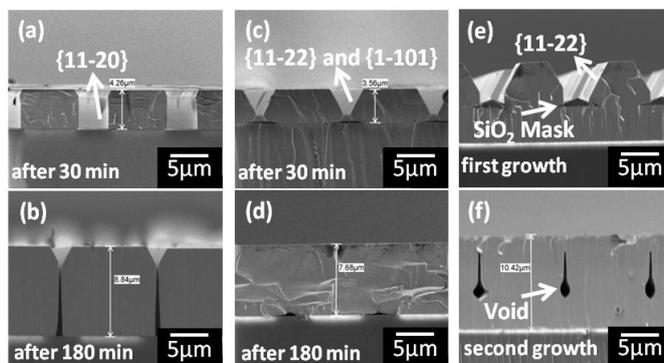


図1: 成長後の断面と表面のSEM画像

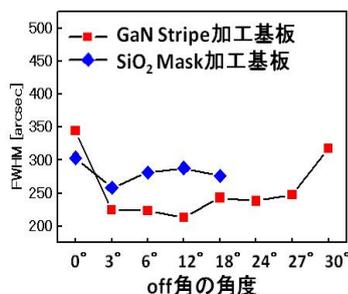


図2: XRD測定(0004)

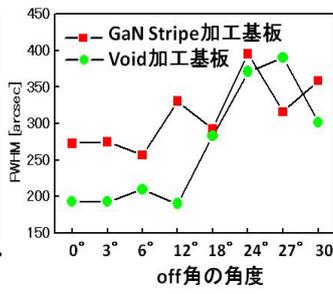


図3: XRD測定(10-10)

4. まとめ

選択成長における溝加工の方向を変えてその効果を明らかにした。<1-100>に沿った SiO₂ マスクの選択成長では側面に{11-20}が形成されて、表面が平滑にならない場合がある。それに対して 3° off した溝加工基板を用いた選択成長で、(0004)(10-10)XRC がともに 250arcsec 程度の高品質基板の作製に成功した。

研究課題名 高圧下における窒化インジウムの結晶成長機構の解明

研究代表者名
九州大学・応用力学研究所・寒川義裕

研究分担者名
東京農工大学・共生科学技術研究院・熊谷義直、富樫理恵
東京工芸大学・工学部・曾根順治
九州大学・工学府・末次弘茂

1. はじめに

InN と GaN の混晶である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ は、その混晶組成 x を制御することにより、吸収波長を InN ($x=1.0$) の~1800nm (赤外) から GaN ($x=0.0$) の~350nm (紫外) までの範囲で任意に制御できる材料である。近年、この赤外~紫外の広範な範囲で吸収波長を制御できる InGaN を多接合太陽電池に応用する試みがなされている。ここで、多接合太陽電池とは、吸収波長の異なる太陽電池を複数層積み重ねた、高効率の期待できる太陽電池である。InGaN 材料を多接合太陽電池に応用する上で重要となるのは薄膜結晶の高品質化 (低欠陥化) である。しかし、当該材料の開発では、InN の分解温度が低いため、典型的な常圧 MOVPE 成長では高 In 組成材料の成長温度を高く設定することが難しく、高品質薄膜結晶を得ることが困難であった。この課題克服のためには、加圧 MOVPE により最適な成長温度を上昇させ、得られる薄膜の結晶性を向上させることが一つの解決手段として考えられる。本研究では、高 In 組成 InGaN の加圧 MOVPE に着目し、その結晶成長機構を理論的に解明することを目的とする。

2. 研究経過

本研究課題は前年度からの継続課題である。2013 年度は、東北大学・九州大学・東京農工大学に東京工芸大学を加えた 4 研究機関で研究を実施した。それぞれの担当は次の通りである。[東北大学] 加圧 MOVPE 成長、[九州大学] 高圧環境下における InN 成長表面の再構成構造の理論予測および成長機構の解明、[東京農工大学] 熱力学解析による気相-固相反応解析、[東京工芸大学] 原料ガスの熱物性解析。2013 年度は、前年度の共同研究遂行時に抽出されたテーマ「InN 加圧 MOVPE における異相の混入」に注目して研究を進めた。

3. 研究成果

本課題実施機関の共同研究により、次の知見が得られた：(1) InN 加圧 MOVPE における異相混入と表面モフォロジー ((1-1-1)ファセット面形成) に相関が見られる、(2) 第一原理計算に基づく計算技術を用いて高圧下における InN 表面構造状態図を作成し、成長表面の再構成構造の変化によりファセット面が形成されることが示された、(3) 異相混入の要因となるファセット形成条件を表面構造状態図により明らかにした。ここで得られた知見を、2014 年春季 応用物理学会学術講演会にて報告した。また、2014 年 6 月 1 日~5 日に韓国済州島で開催される The 5th International Conference on White LEDs and Solid State Lighting にて報告予定である。

4. まとめ

本課題研究では、第一原理計算および熱力学解析法を基にした理論解析手法により、成長条件 (原料ガス分圧、成長温度、全圧) と InN の気相成長機構の相関を理解することを目的としている。H25 年度の共同研究により、InN 加圧成長条件 (温度、供給ガス分圧) と異相混入との相関を明らかにした。これまでに得られた知見を実験にフィードバックし、結晶成長条件の更なる最適化を図ることで、高品質 (低転位密度、高相純度) InN 結晶の作製が期待できる。加えて、加圧 MOVPE に関する結晶成長機構の理解が深まり、同手法を他の材料へ展開する基盤を構築することができる。

Si_{1-x}C_x/Si ヘテロ構造の形成における格子間炭素組成の低減による高正孔移動度化

研究代表者名

山梨大学大学院・医学工学総合研究部・有元圭介

研究分担者名

東北大学・金属材料研究所・米永一郎

1. はじめに

Si に圧縮応力を印加することにより、一般的な Si と比較して正孔有効質量が半減し、正孔移動度は2倍になると期待されている。この構造を安価な Si(100)基板上に形成するためには、まず自然格子定数を有する Si_{1-x}C_x バッファ層を形成し、その上に Si 薄膜を結晶成長する、という手法が有効である。我々は、ガスソース分子線エピタキシー法を用い、高品質な Si_{1-x}C_x バッファ層を形成する方法を研究している。その過程で、Si_{1-x}C_x 層中に置換位置炭素原子数以上の格子間炭素が存在することが分かった。格子間炭素原子は歪み緩和過程で転位の伝搬に影響するだけでなく、電気伝導特性にも影響を与えらる。本研究では、格子間炭素を低減させることによる正孔移動度の向上を目的として研究を行った。

2. 研究経過

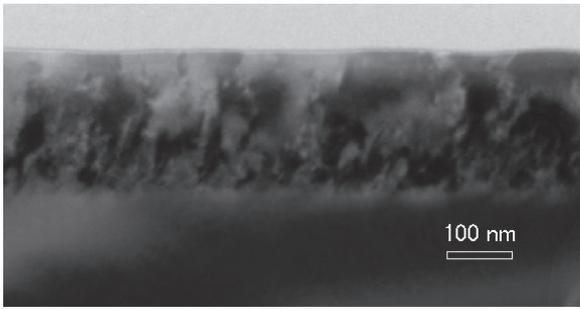
試料の結晶成長は、ジシラン (DS) およびトリメチルシラン (TMS) を原料としてガスソース分子線エピタキシー法を用いて行った。置換位置炭素組成・格子間炭素組成は X 線回折法と二次イオン質量分析 (SIMS) 測定を併用することで求めた。結晶性の観察は、透過電子顕微鏡を用いて行った。また、FTIR、分光エリプソメトリおよび DLTS 測定により、炭素原子や欠陥の存在と吸収スペクトル、複素誘電率、キャリア・トラップ準位との相関を調べた。また、p 型 MOSFET を作製し、格子間炭素組成と電気伝導特性との相関を調べた。

3. 研究成果

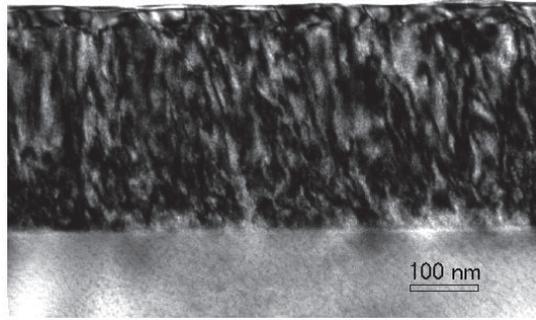
歪みが緩和した Si_{1-x}C_x バッファは、DS・TMS 流量をそれぞれ 1.75 sccm・0.5 sccm (TMS 流量比 22%) として 550°C で結晶成長した場合および DS・TMS 流量をそれぞれ 4.0 sccm・1.0 sccm (TMS 流量比 20%) として 570°C で結晶成長した場合に得られた。両者とも、X 線回折測定から求めた置換位置炭素原子密度が 8.2×10^{20} atoms/cm³ であったのに対し、SIMS 測定から求めた炭素の総量 (格子間炭素を含む) は、前者では 1.3×10^{21} atoms/cm³、後者では 1.5×10^{21} atoms/cm³ であった。図 1 にこれらの試料の断面 TEM 像を示す。これらは明視野像であり、結晶欠陥について詳細に比較することはできないが、両社とも多量の結晶欠陥を含んでいることが分かる。次に、p 型 MOSFET を作製し、正孔移動度の評価を行った。これまでの研究では、ゲート電圧によるドレイン電流変調には成功していたが、リーク電流が大きいという問題点があった。本研究においては、電極形成後の熱処理温度の検討を行い、リーク電流が小さい良好な動作を得ることに成功している。正孔移動度は、スプリット CV 法と IV 測定の結果から評価した。図 2 に、上記 2 試料と比較のために作製した単結晶 Si-MOSFET の正孔移動度を示す。横軸はチャンネルにおけるキャリア面密度である。図 1 に見られるように欠陥が多いにもかかわらず、圧縮歪み Si/Si_{1-x}C_x 構造では単結晶 Si-MOSFET と比較して 30~50% 近く移動度が向上している。過去の研究から、Si_{1-x}C_x 層をチャンネルとする MOSFET では移動度が単結晶 Si-MOSFET のそれより低下していたため、この移動度の向上は圧縮歪み Si における有効質量の低減効果の表れであると考えられる。また、両試料の置換位置炭素組成はほぼ同等であることから表面 Si 層の歪み率にも大きな差はないが、TMS 流量比を 20%、基板温度を 570°C として成長した試料の方がわずかに高い正孔移動度を示した。これは、この試料の方が格子間炭素組成がわずかに低いことと対応していると考えている。さらに、FTIR、分光エリプソメトリおよび DLTS 測定により、炭素原子や欠陥の存在と吸収スペクトル、複素誘電率、キャリア・トラップ準位との相関を調べた。特に DLTS 測定からは深い準位の存在が確認されており、引き続き測定データを蓄積し、詳しく調べてゆく計画である。

4. まとめ

本研究で歪み緩和 Si_{1-x}C_x バッファを得られた試料は TMS 流量比に近い上記 2 試料のみで、格子間炭素組成の違いは大きくなかった。この為、移動度の違いはわずかであったが、格子間炭素組成を低減させることが移動度の向上につながる可能性を示唆する結果が得られた。



TMS 流量比 22%、550°C



TMS 流量比 20%、570°C

図 1 透過電子顕微鏡による断面観察

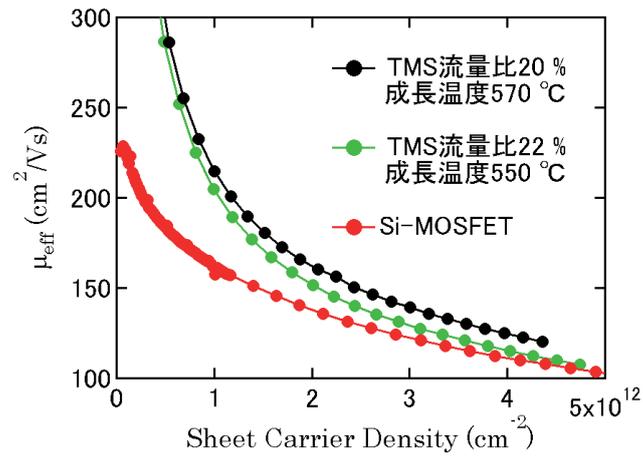


図 2 p 型 MOSFET の正孔移動度

研究課題名

タンデムセル太陽電池に向けた $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄膜の結晶成長と電気的特性評価

研究代表者名

名古屋大学大学院・工学研究科・本田 善央

研究分担者名

名古屋大学大学院・工学研究科・天野 浩
 名古屋大学大学院・工学研究科・光成 正
 山口大学大学院・理工学研究科・只友 一行
 山口大学大学院・理工学研究科・岡田 成仁
 山口大学大学院・理工学研究科・山根 啓輔

1. はじめに

窒化物半導体を用いた高効率太陽電池の実現に向けて、現行の太陽電池として用いられているシリコンを結晶成長用基板として InGaN 系太陽電池を作製し、シリコンと窒化物半導体のタンデム型太陽電池を実現することを目的とする。しかし、シリコン基板上に窒化物半導体を積層する場合、 Ga と Si が反応するため、中間層として AlN が必要とされている。この AlN は電気的には絶縁となることから、タンデム構造実現に向けて障害となる。さらに、タンデム構造のうち、窒化物半導体 InGaN 混晶を作製する技術は確立していない。特に In 組成 0.3 以上の InGaN 結晶は相分離が発生し良質な結晶が得られない。

本課題では、上記の課題を解決するため、以下の2つのテーマについて研究を行った。

1. AlN 中間層の作製および電気的特性の向上
2. MOVPE 法を用いた InGaN の結晶成長における面方位依存性の影響解明と高品質化手法の確立

2. 研究経過

AlN 中間層の成膜は名大グループにより遂行した。 AlN 中間層の作製にはスパッタリング法を用いた。スパッタリング法では MOVPE 法と比べ低温で成膜するため結晶配向性が悪い。そこで AlN 成膜直前に Ti を初期配向層として導入し結晶配向性の向上を試みた。 AlN 中間層を成膜したのち、MOVPE 法を用いて GaN を結晶成長し、 GaN 膜の配向性評価を行った。

InGaN 結晶成長は名大・東北大・山口大グループにより別々に遂行し、多面的な検討を行った。名大： (0001) 面 GaN 上に InGaN/GaN 多重量子井戸を成長し、成長中に試料表面に光を入射し、散乱光強度をモニタすることで表面モフォロジーの変化を高精度で評価するシステムを構築した。東北大： (0001) 面および $(000\bar{1})$ 面 GaN 上に InGaN を結晶成長し、成長面方位による In 取り込みの比較を行った。山口大：面方位の In 取り込み依存性を調べるための初期実験として、サファイア加工基板上を用いて様々な結晶面を持つ GaN の成長を行い、その結晶品質の評価を行った。

3. 研究成果

・ Ti 初期配向層導入による AlN 配向性の向上

初期配向層の有無による GaN 膜の配向性を X 線回折測定により評価した結果、 Ti 初期配向層を導入することによって AlN の c 軸配向性が向上していることが分かった。これは通常 AlN の配向性向上に用いられる Al 初期層 に対して Ti が立方最密構造であり c 軸配向を取りやすい結晶構造であることが起因していると考えられる。

・ InGaN 結晶成長

名大：散乱光をモニタすることにより、 InGaN 結晶成長中に発生するピットなどのサブミクロンオーダーの表面荒れを精度よく検出することができた。ピットが発生しない条件について、成長中の *in-situ* 評価と成長後の *ex-situ* 評価により成長条件の最適化を行った。その結果、最も発光効率の高い緑色発光を得ることに成功した。

東北大：面方位による In 取り込みを比較した。同じ結晶成長条件下では (0001) 面 で 4% 程度の InN モル分率であったのに対し、 $(000\bar{1})$ 面 では 12% と非常に InN モル分率が高く、より In を取り込みやすいことが分かった。 (0001) 面などの表面が窒素原子で被覆される面では In の再蒸発が抑制され、高 InN モル分率 InGaN を実現しうる可能性を示唆した。

山口大：様々な結晶面を得るためにサファイアの面方位を決定し、 $\{10\bar{1}1\}$ 、 $\{11\bar{2}2\}$ 、 $\{20\bar{2}1\}$ などの結晶面の GaN 結晶成長に成功した。結晶品質は高効率太陽電池には不十分であったが、HVPE 成長により高品質化に取り組んだ結果、転位密度は $10^5/\text{cm}^2$ 台まで低減可能であることを実証した。

4. まとめ

今年度はシリコン基板上 InGaN タンデム太陽電池応用に向けて AlN 中間層の作製方法および InGaN 高品質化について検討した。今後は更なる InGaN 層の厚膜化、高品質化に向けて実験を行っていく。