

博士論文審査報告書

論文題目：放射光 X 線を用いた窒化ガリウム結晶中の格子欠陥に関する研究

申請者：平岩 美央里

1. 論文内容の要旨

省エネルギー社会の実現に向けた蛍光灯代替技術として白色 LED (Light-Emitting Diode) 技術が広く世の中に普及してきている。一般的に白色 LED は、青色 LED と黄色蛍光体の組み合わせで構成されており、その実現には青色 LED の材料である窒化ガリウム (Gallium Nitride; GaN) 結晶の高品質化が大きく貢献してきた。現在 GaN 結晶の成長方法として主流となっている HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法では、サファイア等の異種基板上への結晶成長が行われている。このため、基板との格子定数の違いによって生ずるミスフィット転位等の欠陥の発生が避けられない。結晶の無欠陥化に向けた結晶成長技術開発では、結晶に導入される欠陥の性質を知る事が重要である。これまで、GaN 結晶中に存在する転位の評価には透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy: TEM) による電子線回折技術が大きな役割を果たしてきた。しかし、結晶の高品質化にともない、ナノメートルスケールでの局所評価技術では欠陥を検出する事が逆に困難となってきた。今後、高品質な GaN 結晶中の欠陥やその挙動を評価するためには、広域での評価が可能な欠陥検出手法が求められている。

本論文は、X 線トポグラフィにより、市販のウエハレベル(300 μm)の膜厚を持つ GaN 結晶中の転位を詳細に評価した。まず、Mo-K α の実験室光源を用いて、GaN 結晶中に存在する転位線を可視化した。この場合、吸収の大きさを示す μt は約 12 であり、異常透過による回折像の取得である。その結果、1-210 回折で現れた $\langle 1-210 \rangle$ に伸びる複数の転位線のコントラストが、0002 回折で消失することがわかった。これから、転位線の歪みを表すバーガスベクトルは、 $\langle 0001 \rangle$ と直交していることがわかるが、バーガスベクトルの完全な決定には至っていない。

通常、バーガスベクトルの決定には、それと直交する 2 つ以上の回折ベクトルで撮像する必要があるが、GaN は Si 結晶等と比べて線吸収係数が大きく、非対称反射を用いた場合、結晶中での透過距離が長くなり、十分な回折透過強度が得られないためである。

そこで、バーガスベクトルの完全な決定のため、高エネルギーの X 線が利用できる放射光 X 線トポグラフィを実行した。実験は SPring-8 BL08B2 でおこなった。用いた X 線のエネルギーは約 40 keV である。この場合の μt は約 2 であり、消衰効果による回折像の撮像である。複数枚の回折像を取得した結果、1-210 回折で現れた転位線のコントラストが、0004 回折と非対称回折の 50-55 回折でほぼ消失していることがわかった。このことから、転位線のバーガスベクトルが $\langle 1-210 \rangle$ に平行であり、また転位線の伸びる方向と平行であるため、らせん転位であることが明らかになった。

さらに詳細な解析により、 $\langle 1-210 \rangle$ に伸びた転位線が、数箇所曲がりが生じていることがわかった。この曲がりの生じた場所では、0004 回折像や 50-55 回折像でもわずかにコントラストが残っている。これらの場所では、(0001)をすべり面としていたらせん転位が、交差すべりによって、すべり面を(10-12)もしくは(10-11)に変更していることを示唆している。

さらに、これら転位の存在が結晶の格子定数や格子面傾斜に与える影響を、微小領域高精度 X 線回折により評価した。実験は SPring-8 BL24XU でおこなった。その結果、100 ~ 200 μm 間隔で、ロッキングカーブのピークシフトが確認された。これらのピークシフトが起こる位置での逆格子空間強度マッピング測定から、この変動は主に格子面傾斜が原因で

あることがわかった。このピークシフトの変動間隔は、転位線の間隔にほぼ等しい。

本論文において、GaN 結晶の放射光 X 線トポグラフィ観測から、これまで報告されていない転位の詳細な振る舞いを明確にした。

2. 論文審査結果

本論文は、白色 LED やパワーデバイスとして期待されている GaN 結晶中の転位の挙動について、詳細に評価したものであり、さらにその転位が格子歪みに与える影響についても述べている。

GaN 結晶中の転位挙動は、これまで主に透過電子顕微鏡により調べられてきた。これが対象とする結晶の転位密度は 10^{8-10}cm^{-2} 程度であるが、近年の結晶の高品質化により、評価が困難になりつつあった。そこで、申請者はより高品質な GaN 結晶中の転位挙動の評価法として、X 線トポグラフィに着目しそれを実行した。

まず、Mo-K α 線を用いた X 線トポグラフィにより、市販のウエハレベル(300 μm)の膜厚を持つ GaN 結晶中の転位が、十分評価可能な密度であることを確認した。しかし、GaN 結晶は線吸収係数が大きく、非対称反射の回折強度が弱いため、バーガスベクトルの決定は困難であった。

そこで、高エネルギー X 線が利用可能な放射光トポグラフィを実行し、GaN 結晶中にバーガスベクトルが $\langle 1-210 \rangle$ のらせん転位が存在することを明らかにした。また、このらせん転位が交差すべりによって、すべり面を(0001)から(10-12)や(10-11)に変更している箇所があることを示した。

さらに、微小領域高精度 X 線回折実験により、これらの転位の存在が結晶格子面の傾斜を与える可能性があることを示した。

これらの結果は、我が国の基幹産業である半導体製造技術の高度化にも重要な貢献をなすものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成 27 年 1 月 20 日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査： 籠 島 靖 印

副査： 小 林 寿 夫 印

: 田 中 義 人 印

: 酒 井 朗 印

(大阪大学大学院基礎工学研究科、教授)

: 津 坂 佳 幸 印

博士論文審査報告書

論文題目：全反射および回折を利用した硬X線集光素子に関する研究

申請者：辻 卓也

1. 論文内容の要旨

近年の半導体デバイスの微細化・多層構造化に代表されるように、幅広い分野においてナノメートルレベルの空間分解能を有する非破壊分析技術への要求は極めて強い。硬X線顕微鏡はこのような要求に応え得る潜在能力を有しているため、その実用化を目指して世界各国で開発が進められており、現在 50 nm を超える空間分解能が得られている。硬X線用光学素子として、フレネルゾーンプレート (FZP) とキルクパトリック・バエズ型反射鏡 (KB ミラー) が代表的である。FZP では輪帯幅が狭くなるとX線が伝播しなくなり、KB ミラーでは全反射臨界角によって開口数が制限され、いずれにおいても 10 nm 以下の空間分解能を得ることは困難である。これらの問題を解決するために、多層膜ラウエレンズや多層膜ミラーが開発され、10 nm 前後の集光サイズが実現されている。これらの素子を用いれば原理的に数ナノメートルの集光が可能であるが、極めて高度な作製技術を必要とするため、簡便な製法と高性能を両立する新しいX線集光素子の開発が望まれている。

本論文では、(1) 硬X線領域において空間コヒーレンスを測定する方法として、全反射ダブルスリットによるヤングの干渉計を考案・製作し、SPring-8 の兵庫県ビームライン (BL24XU) における空間コヒーレンスを実験的に評価した。第三世代放射光源の特長として高い空間コヒーレンスがあるが、ビームラインには分光器などの光学機器が存在するため光源本来のコヒーレンスが保たれて伝播している保証は無い。従って、コヒーレンスを利用するX線光学研究を行う場合、実際に入射するX線ビームのコヒーレンスを測定することが重要である。本研究では、斜入射光学系による見かけの線幅の縮小効果を利用して通常の透過配置では困難な微小スリット幅を可能とすることにより、新しい空間コヒーレンスの測定法を提案した。実際にBL24XUに適用し、その有効性を実証した。(2) 全反射ダブルスリットのアイディアを発展させた全反射ゾーンプレートを考案・設計・製作し、その性能評価を行い回折限界の集光サイズを実現した。全反射を利用しているため透過型のFZPのような輪帯幅の制限がない、集光作用がFZPの原理に基づくため開口数は最小輪帯幅で決まる、斜入射光学系による見かけの線幅の縮小効果を利用しているため狭い線幅が得易いなどの特徴を有することから、新しいタイプのX線集光素子と位置づけられる。また、パターンを描画には透過型FZPのような高い精度を要しない、平面基板なので曲面加工が不要であるなど、作製が比較的容易な点も大きな特徴である。本研究では、斜入射配置における光路差を考慮したゾーンパラメータを設計し、入射X線のエネルギーは 10 keV、斜入射角は 6 mrad、焦点距離は 4.16 mm、回折限界集光サイズは 14.7 nmとした。基板にはシリコン基板、ゾーンパターンには白金を用いた。集光ビームプロファイルを測定した結果、14.4 nmのビームサイズが得られ、回折限界と同等の集光サイズを達成した。また、集光効率は 7 %であり、理想的な値とほぼ一致した。一方、集光ビームプロファイルにおいて不

要なサイドピークが存在することもわかった。光軸方向の焦点距離近傍におけるビームプロファイルの変化の様子を、基板の形状誤差を考慮した回折積分による計算結果と実験による測定結果との比較から詳細に検討し、サイドピークが主に基板の反りに起因することを明らかにした。

2. 論文審査結果

本論文は、ナノメートルレベルの硬X線集光ビームの生成を目的として、全反射型のゾンプレートを考案・設計・製作し、回折限界に達する 14.4 nmという集光ビームサイズを実現したものである。現在までに開発されているX線集光素子の限界を超える可能性を有する新しいタイプの硬X線光学素子を提案し、その有効性を実証した点が高く評価できる。基板の形状誤差を考慮した回折積分を実行することにより、集光ビームプロファイルにおけるサイドピークが主に基板の反りに起因することを示した。この結果は、今後ナノメートルレベルの集光を目指して高度化を進める上で重要な指針を与えるものである。また、第三世代放射光源やX線自由電子レーザーの利用研究においてはコヒーレンス度の測定が不可欠となるが、その測定法の1つを提示したことも評価に値する。本研究で開発した全反射ゾンプレートは、微細化・複雑化が進む半導体材料や機能性材料等の非破壊内部微細構造観察への応用が期待できる有意義な研究成果といえる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成22年1月28日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査： 籠 島 靖 印

副査： 高 木 芳 弘 印

: 小 林 寿 夫 印

: 松 井 真 二 印

: 鈴 木 芳 生 印

(財団法人高輝度光科学研究センター、
副主席研究員)

: 津 坂 佳 幸 印

博士論文審査報告書

論文題目：高精度X線顕微回折法による歪み Si ウェーハの結晶性に関する研究

申請者：仙田 剛士

1. 論文内容の要旨

デバイスプロセスにおけるスケーリング則の限界により、高速デバイスを実現する次世代ウェーハが望まれている。歪み Si ウェーハはその有力な候補である。しかしながら、歪み Si ウェーハを用いたデバイスプロセスにおいて、歪み Si 層膜厚の増加に伴いデバイス特性が劣化することが知られている。これは、歪み Si ウェーハの作製方法が複雑であること、さらに薄膜および多層膜構造ゆえの結晶性の劣化が原因として考えられる。よって、その結晶性を微細かつ高精度に解析することで、高品質なウェーハの作製が期待される。

本論文では、まず歪み Si 層膜厚と、この歪み Si 層中に発生する転位密度との定量的な関係性を評価した。歪み Si 層の膜厚を増加させるに従い、貫通転位密度およびミスフィット転位密度が増加することを見出した。特に前者は、歪み Si 層厚約 17 nm において、 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 程度まで増加する。また歪み Si 層の臨界膜厚は、同一の格子不整合を有する SiGe 層の単結晶 Si 基板上臨界膜厚に比べて大幅に小さいことが分かった。この原因として、歪み Si 層が成膜される緩和 SiGe 層の結晶性の劣化が考えられる。そこで、SiGe 層の成膜条件を変化させ、緩和 SiGe 層の結晶性および歪み Si 層の転位密度を評価した。組成傾斜 SiGe 層に発生するミスフィット転位の伸長を促進させる成膜条件(成膜温度増加、成膜時間増加等)を適応することにより、SiGe 層の貫通転位密度と緩和 SiGe 層の格子面傾斜分布幅は減少し、その結果として歪み Si 層の転位密度が減少することが分かった。

さらに、同ウェーハを SPring-8 放射光マイクロビームで評価した結果、これまで報告されているような、SiGe 層の格子面傾斜分布および表面形状に類似した格子面傾斜ドメインが存在することが分かった。このことは、緩和 SiGe 層の結晶性が、組成傾斜 SiGe 層で転位が発生した際の 3 次元変形により悪化することを意味する。

本論文ではさらに、歪み Si ウェーハの断面より高平行度の放射光マイクロビームを入射させ、組成傾斜 SiGe 層の成長方向の結晶性変化を評価した。組成傾斜 SiGe 層の Ge 組成をステップ状に増加させた(001)表面を有する歪み Si ウェーハを作製し、 $\langle 110 \rangle$ 方向の結晶性を詳細に調べた。その結果、組成傾斜 SiGe 層が Si ウェーハ表面に垂直な軸の周りでわずかに回転していることを初めて明らかにした。また、 $\langle 110 \rangle$ 方向の SiGe 層格子面回転分布幅は、成膜されるごとに悪化するが、深さ 4 μm 程度から表面に向かうに従い減少する。さらに、 $\langle 110 \rangle$ 方向の格子緩和率も同様の傾向で減少する。これらの結果より、以下の結晶性変化のメカニズムを推定した。ウェーハ表面の SiGe 層は、自由表面であるため歪みが開放され、SiGe 層の格子緩和率は低下する。この格子緩和率低下が成長方向の応力変化を生じ、格子面回転および格子面傾斜分布幅が減少する。この自由表面の影響はある深さまでおよぶため、深さ 4 μm 程度から表面にかけて、徐々に格子緩和率、格子面回転および格子面傾斜分布幅が減少すると考えられる。つまり、SiGe 層は、成膜された際に緩和するのではなく、その層上に SiGe 層が成膜され、表面が拘束された際に転位発生を伴い緩和することが示唆される。

本論文において、これまで報告されていないウェーハ表面に対して垂直な格子面の評価もおこなうことにより、組成傾斜 SiGe 層成長方向の 3 次元的な結晶性変化を明確にした。

2. 論文審査結果

本論文は、次世代高速半導体ウェーハとして注目されている歪み Si ウェーハについて、その結晶性を詳細に評価したものであり、さらにその劣化メカニズムについても述べている。

歪み Si 層の臨界膜厚が、同一の格子不整合を有する SiGe 層の単結晶 Si 基板上臨界膜厚に比べて大幅に小さいことを示し、歪み Si 層中に発生する転位密度が、緩和 SiGe 層の格子面傾斜分布幅の大きさに依存することを明らかにした。また、SiGe 層の成膜温度増加や成膜時間増加により、SiGe 層に発生するミスフィット転位の伸長を促進させ、その格子面傾斜分布幅を減少させることで、歪み Si 層中の転位密度を大幅に軽減することができることを明らかにした。

さらに、放射光利用の高平行度 X 線マイクロビームを用いて、SiGe 層の成長方向の結晶性の変化を詳細にとらえた。(001)表面を持つ Si 基板に SiGe 層を成長させると、SiGe 層が Si 基板表面に垂直な軸の周りにわずかに回転しながら成長することを初めて明らかにした。また、SiGe 層の格子面回転分布幅と $\langle 110 \rangle$ 方向の格子緩和率は、SiGe 層の成長とともに大きくなるが、表面から深さ 4 μm 付近で最大値に達した後、表面に向かって徐々に小さくなることを明らかにした。自由表面による歪み解放がこの原因であることを示唆している。これらの結果は、我が国の基幹産業である半導体製造技術の高度化にも重要な貢献をなすものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成 20 年 7 月 30 日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査： 籠 島 靖 印

副査： 松 井 純 爾 印

： 小 林 寿 夫 印

： 小 椋 厚 志 印

(明治大学理工学部、准教授)

： 津 坂 佳 幸 印

博士論文審査報告書

論文題目：硬X線顕微干涉計の構築および三次元イメージングへの応用に関する研究

申請者：小山 貴久

1. 論文内容の要旨

硬X線はその高い透過能により、物体の内部構造の非破壊観察を可能とする強力な顕微プローブである。近年の半導体デバイスの微細化・多層構造化に代表されるように、幅広い分野においてナノメートルスケールの空間分解能を有する非破壊分析技術への要求は極めて強い。硬X線顕微鏡はこのような要求に応え得る潜在能力を有しているために、その実用化を目指して世界各国で開発が進められており、現在 50 nmを超える空間分解能が得られている。しかしながら、空間分解能の向上に伴って、顕微鏡スケールの微小な試料を観察する場合には、従来の吸収コントラスト法では十分な画像のコントラストが得られないという問題が顕著となってきている。この問題を解決する方法として、X線と物質の相互作用では位相成分の方が吸収成分よりも遥かに大きいことを利用した位相コントラストイメージング法が注目されており、近年開発研究が活発に行われている。

本論文では、(1) 第三世代放射光源の高い空間コヒーレンスに着眼し、結像型顕微鏡と波面分割型干涉計を組み合わせた新奇の硬X線顕微干涉計を考案し、SPring-8の兵庫県ビームライン (BL24XU) の実験ハッチC1に同システムを構築した。直径、焦点距離の異なる2枚のゾンプレート (ZP) を同軸上に配置して、一方のZPで試料の拡大像 (物体波) を形成し、もう一方のZPで参照波を形成して物体波と重ね合わせることで、フリッジレスな干涉像を得ることができる顕微干涉計の光学系を考案した。ZPによる複数の次数の回折光を空間的に分離するために、環状のZP (AZP) を発案し、参照波形成用のZPとして用いた。光学系の設計に当たっては、入射光の空間及び時間コヒーレンス特性、干涉縞のコントラスト、空間分解能・視野サイズ・倍率、2枚のZPの開口数の整合など、干涉・結像条件を詳細に検討し、最適化した。また、定量位相計測には縞走査法を用いることとしたが、そのための画像再構成プログラムや実験装置の制御・駆動プログラムも新たに開発した。(2) 標準試料を用いて、吸収コントラストでは観察できない弱吸収試料の構造を可視化できること、定量位相計測が可能でありその位相検出感度が $\lambda/40$ であること、設計上の限界値である 60 nmの空間分解能が達成されていることを確認した。(3) コンピュータトモグラフィ (CT) の手法を導入することにより、高空間分解能かつ高精度の3次元X線位相計測を実現した。性能としては、CT断面像で 200 nmの空間分解能と 0.2 g/cm³の密度分解能を得た。CTではデータ取得に長時間の測定を必要とするため、ドリフトによる再構成像の性能劣化が無視できない。試料回転軸の偏心補正プログラムを開発することによりドリフトの影響を抑え、上記性能を達成した。(4) 高分子複合繊維の断面構造、珪藻土の内部微細構造、金属微粒子が添加されたポリマー繊維の微粒子分布様態等の実材料の観察に適用し、本研究で開発した顕微干涉計システムが弱吸収試料のナノメートルスケールの非破壊三次元内部構造観察に有効であることを実証した。

2. 論文審査結果

本論文は、弱吸収体試料の顕微鏡スケールでの非破壊構造観察を目的として、波面分割型の干渉計と結像型の顕微鏡を組み合わせた顕微干渉計の光学系を考案・設計・構築し、高空間分解能かつ高感度の位相コントラストイメージング法を実現したものである。定量位相計測を可能とするために、高い空間コヒーレンスというSPring-8の高輝度アンジュレータ光の利点を積極的に活かして、波面分割型の干渉計を採用している。高い位相感度を実現するために、波面分割型干渉計を拡大結像（物体波）用と参照波用の2枚のZPで構成させ、それら同軸上に配置することにより、フリッジレスの干渉像が得られる光学系を考案している。また、ZPには複数の不要な回折光が混在するという難点があるが、この影響を回避するために、環状という新しい形状のZPを発案し参照波形成に用いている。これらの基本構想に基づき、干渉・結像条件等を詳細に検討し、光学系を最適化している。2次元像で60 nmの空間分解能を有する位相シフト像を取得し、さらにトモグラフィーの手法を導入することにより弱吸収試料の3次元内部構造を200 nmの空間分解能で可視化することにも成功し、高空間分解能かつ高精度のX線位相計測を実現させている。金属微粒子が添加されたポリマー繊維の微粒子分布様態等の観察に適用し、その実用性の高さも実証している。本研究で開発した硬X線顕微干渉計は、微細化・複雑化が進む半導体材料や機能性材料等の非破壊内部微細構造観察への応用が期待できる有意義な研究成果と言える。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成19年1月29日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査：籠島 靖 印

副査：高木 芳弘 印

：石川 哲也 印

：松井 真二 印

：青木 貞雄 印

(筑波大学大学院数理物質科学研究科、教授)

：津坂 佳幸 印

博士論文審査報告書

論文題目：微小角入射 X 線回折を用いた気相中 InP 表面構造および成長素過程の研究

申請者：藤川 誠司

1. 論文内容の要旨

InP 系化合物半導体材料は、光通信として用いられる波長 1.3 および 1.55 ミクロン帯の主要な発光／受光素子としてその開発が急速に進んでいる。InP 系半導体は成長温度での P の蒸気圧が高いため、超高真空を必要とする分子線エピタキシー (MBE)は適用できず、通常気相成長法の一つである有機金属気相成長法 (MOCVD)が広く用いられている。デバイスの特性向上には良質な結晶成長が求められるので、成長層の原子レベルでの表面均一性と膜厚制御が必要不可欠であり、従って MOCVD 法における成長メカニズムを原子レベルから評価・理解することは非常に重要となる。しかしながら、気相中では電子線を用いた手法や走査型トンネル顕微鏡は適用が困難であり、また気相中で使用可能な光学的手法ではプローブが可視光であるために、原子レベルでの構造情報を得ることは原理的に困難であり、InP 結晶の詳細な成長メカニズムのみならず基本的な表面構造すらその詳細は未だ明確ではない。

本論文は、気相中の観察プローブとして透過率の高い X 線に着目し、微小角入射 X 線回折法と X 線反射率法を用いて、MOCVD 法によって成長させた InP の表面構造と成長素過程を研究したものである。結晶成長と X 線測定を同じ雰囲気で行うために、SPring-8 の兵庫県ビームライン実験ハッチ B に設置された MOCVD 成長装置を組み込んだ X 線表面回折装置を利用した。

P 原子脱離による In 過剰表面構造については幾つかの研究例はあるが、実際に成長が起きている P 過剰表面の構造を決めた例はない。そこで最初に微小角入射 X 線回折法を用いて、水素雰囲気中、室温でホモエピタキシャル成長させた P 過剰 InP(001)再構成表面構造を調べた。分数次を含む各反射次数について回折強度曲線を測定し、逆格子空間における積分回折強度分布図を作成することにより、[-110]方向にのみ分数次の回折強度が存在することを見出し、InP(001)の表面構造が P のダイマーを最表面とする(2×1)構造であることを初めて明らかにした。次に、得られた積分回折強度から Patterson 図を作成し、精密に解析することにより、この(2×1)構造が、最表面に存在する P のダイマーの影響で第 2 層 In 原子が [-110]方向に縮んだ(2×1)構造であることを導き出し、その詳細な原子位置を決定した。さらに第一原理計算を行い、その結果が Patterson 図から得られた表面構造とほぼ一致することを確認するとともに、その表面構造が水素吸着安定化表面である可能性を示唆した。

次に成長中における表面構造変化の観察のため、表面モホロジーに敏感な X 線反射率を用いて InP 成長モードの成長条件依存性を調べ、3D 成長、layer-by-layer 成長、step-flow 成長の各成長モードの成長条件を明らかにした。さらに、step-flow 成長中における表面構造変化を観察するため、(2×1)構造によって生ずる分数次回折である(5/2, 0)反射のピーク強度変化を step-flow 成長条件下において実時間測定した。その結果、(2×1)構造のドメインサイ

ズは、成長開始直後急速に減少し、成長中は減少したままの平衡状態が保たれ、成長停止後1分以上かけて回復することを見出した。これは、成長後もIn原子がしばらくの間表面をマイグレーションしていること、すなわち成長後において安定な表面が得られるまでには分のオーダーの時間を要することを示唆しており、MOCVD法におけるstep-flow成長のメカニズムに新しい知見を与えるものである。

2. 論文審査結果

本論文は、高輝度放射光を利用した微小角入射X線回折法によって、気相中の結晶表面構造が調べ得ることを示し、この方法で気相中InP表面の構造を観察した結果とその解析結果について述べている。P過剰InP(001)再構成表面は(2×1)再構成表面であり、Pのダイマーによって構成されていることを明らかにし、Patterson図を用いた解析によりその詳細な原子位置を決定している。また、X線反射率法によって、成長中においても再構成表面は(2×1)構造を維持することと、その構造の気相成長の開始/停止に対する応答特性も明らかにしている。次世代大容量光通信用デバイスの開発においては、原子層レベルで結晶層の厚さが制御された超格子構造を作製することが設計上要請される。本論文は、原子のスケールで結晶成長の様子をin situで捉えることに初めて成功したもので、超格子構造における界面の結合の乱れや原子レベルの厚さ制御など、我が国の基幹産業である半導体製造技術の高度化に重要な貢献をなすものである。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成19年1月29日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査： 籠 島 靖 印

副査： 馬 越 健 次 印

： 松 井 純 爾 印

： 水 木 純 一 郎 印

(日本原子力研究開発機構
量子ビーム応用研究部門・
放射光科学研究ユニット長)