

[48]

氏 名 (国籍)	姚 永 昭 (中 国)		
学 位 の 種 類	博 士 (工 学)		
学 位 記 番 号	博 甲 第 4511 号		
学位授与年月日	平成 19 年 12 月 31 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
審 査 研 究 科	数理解物質科学研究科		
学 位 論 文 題 目	<b>Growth and Characterization of Indium Nitride Synthesized by Plasma-Assisted Molecular-Beam Epitaxy</b> (プラズマ支援分子線エピタキシー法による窒化インジウムの成長と評価)		
主 査	筑波大学教授	博士 (理学)	関 口 隆 史
副 査	筑波大学教授	理学博士	秋 本 克 洋
副 査	筑波大学准教授	博士 (工学)	末 益 崇
副 査	筑波大学准教授	博士 (理学)	中 山 知 信

## 論 文 の 内 容 の 要 旨

三族窒化物半導体は直接遷移型であり、光半導体として重要な材料である。三族窒化物の混晶半導体は、深紫外から近赤外までの範囲を網羅しており、既に InGaN は青色発光ダイオードなどで広く使われている。一方、窒化物半導体のなかで、InN は最も研究が遅れており、バンドギャップの値も確定していない。これは、良質な InN 結晶が得られていないことが原因である。InN は真空中での分解温度が約 550℃ と低く、高温では高い窒素分圧を保たないと成長できない。本論文では、プラズマ支援分子線エピタキシー (PA-MBE) 法を用いて、サファイア基板上に良質な InN 薄膜を育成し、光学測定により、信頼できるバンドギャップの値を求めることを目的としている。

前半の成長の章では、良質な InN 薄膜を成長させるための条件設定を検討している。まず、サファイア基板表面を窒素ラジカルで窒化し、800℃ の高温において GaN バッファー層を成長させた。その後 500℃ で InN を 1 時間成長させた。結晶成長を 500℃ で行うために、 $\bar{c}$  面 (N 面) 成長を選択した。それぞれの処理の最適条件を得るとともに、各処理で起きている現象を考察した。さらに、InN 成長開始直前に、In を 1 層程度挿入することによって、InN の結晶性が飛躍的に向上することを発見した。In 層挿入の効果は、0.9 から 1.8 層で最大となった。原子間力顕微鏡、透過電子顕微鏡、X 線回折によって、成長前、成長初期、成長後の薄膜表面、InN/GaN 界面、InN 薄膜の結晶性を比較した結果、In 挿入によって、成長初期の GaN 面が窒素プラズマから保護され、平坦に保たれることが InN 薄膜の結晶性を向上させるのに有効であることが明らかになった。

後半では、InN の成長条件によって、結晶の特性がどのように異なるかを調べている。パラメーターは、成長温度と III/V 比である。成長温度を 420℃ から 520℃ まで変化させると、480℃ までは島状成長であるが、480℃ から 500℃ で二次元成長になっており、X 線の半値幅も温度が高くなるにつれて小さくなっていた。しかし 500℃ 以上では InN の分解が始まり、膜が十分成長しなかった。III/V 比は、窒素ガスの流量を一定にし、In の K セル温度を変化させて調整した。低い III/V 比、すなわち N 過剰雰囲気では、InN 表面に小さな島が多く観察された。これは、表面に到達した In の拡散が、表面の N によって阻害されていることを

示唆している。一方高いⅢ／Ⅴ比では、2次元成長がおきるが、高くしすぎると表面にIn液滴ができてしまう。X線回折の結果、化学量論的組成に対応するⅢ／Ⅴ比で、結晶質が最も良くなることが明らかになった。次に、Ⅲ／Ⅴ比の違いによって、結晶の特性がどのように変わるかをフォトルミネッセンス法によって調べた。その結果、500℃の成長温度のとき、N過剰雰囲気では0.73eVに発光ピークが現われ、In過剰雰囲気では0.69eVにピークが現れることが明らかになった。Ⅲ／Ⅴ比の違いにより、このような発光の変化が現れることを示したのは、本研究が初めてである。この現象を説明するために、化学量論的組成から外れた際にでき易い点欠陥を仮定して、発光スペクトルを系統的に説明した。この計算から導かれたバンドギャップは0.68eVであり、最近報告されている値と同等の値を示している。本研究では、成長時間の制約からInNの厚みは100nmと小さいにもかかわらず、良い値を示している。

この論文における特筆すべき成果は、

- ・ GaN バッファー上に InN を成長する際、1 層程度の In を挿入することによって、InN の結晶性が向上することを発見したこと。
  - ・ Ⅲ／Ⅴ比の違いによって、InN の発光ピーク位置が異なる事を発見したこと。そしてこれを欠陥の種類に関連付けて説明したこと。
- である。

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

本研究の成果は、

- (1) PE-CVD 法により、サファイア基板上に、GaN バッファーを介して、InN を成長させる際の、最適条件を見出した。
  - (2) GaN バッファー上に InN を成長する際、の結晶成長条件を1層程度のInを挿入することによって、InNの結晶性が向上することを発見した。
  - (3) Ⅲ／Ⅴ比の違いによって、InN の発光ピーク位置が異なる事を発見した。
  - (4) InN の発光スペクトルのⅢ／Ⅴ比依存性を、欠陥の種類に関連付けて説明したこと。
- に要約できる。

In 層の挿入は、投稿論文として出版されており、その有効性は今後実証されていくものと思われる。

Ⅲ／Ⅴ比の違いによる InN の発光スペクトルが変化する現象も、解釈にはまだ不十分な点があるが、InN の結晶欠陥を理解するうえで重要な示唆を与える。

以上の理由から、本論文は博士論文として十分と判断された。

よって、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。