

報告番号	甲 第 12763 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 窒化ガリウム自立基板上縦型 p-n 接合ダイオードの貫通転位解析及びリーク電流低減に関する研究
 (Study on threading dislocation analysis and leakage current reduction of vertical p-n junction diodes on gallium nitride free-standing substrates)

氏 名 宇佐美 茂佳

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、パワー半導体材料として期待される GaNにおいて、逆方向リーク電流を発生させる貫通転位とその発生メカニズムを解析し、GaN 自立基板上縦型 p-n 接合ダイオード（以下、p-n ダイオード）のリーク電流低減方法に関してまとめたものであり、八章で構成される。

第一章では、光デバイスとしての窒化物半導体の歴史と低転位密度 GaN 自立基板開発によるパワー半導体応用への転換、現状の課題を説明した後、現在まで報告されている GaN の貫通転位に関する研究成果をまとめ、縦型 p-n ダイオードにおける高電界領域での貫通転位によるリーク現象解明の必要性を示し、当該分野における本研究の位置づけを明確化している。

第二章では、本研究で用いた結晶成長装置および標準結晶成長プロセスについて述べ、高電界印加に必須となる p-n ダイオードの電界緩和構造と作製プロセスの概要を示した後、リーク電流と貫通転位の対応関係評価手法、転位種特定手法に関してまとめている。また、転位位置と転位種評価の両方面において強力なツールであるエッチピット法の GaN での現状をまとめ、自立基板製法、エッチャント、不純物濃度を統一したピット形状と転位種のデータベース構築の重要性を示している。

第三章では、自立基板上縦型 p-n ダイオードの作製にあたり、p 型 GaN 層成長に貫通転

位が与える影響について述べている。p型GaNはアクセプタであるMgの高い活性化エネルギーおよび高Mgドーピング領域での欠陥形成に伴うホールの自己補償効果により、室温における高ホール濃度化は困難である。Mgと貫通転位の関係に着目すると、Mgの後方拡散や転位コアへの凝集発生が報告されており、局所的なMg濃度増加に伴う自己補償効果の促進が懸念されるものの、貫通転位密度とホール濃度の関係は調査されていない。本論文ではサファイア基板上とGaN自立基板上のp型GaNのMg濃度に対するホール濃度を評価し、貫通転位密度がホール活性化率に影響しないことを明らかとした。サファイア基板上においては高ホール濃度においてヒロック形成に伴う表面平坦性の劣化が観察され、成長条件とヒロック密度の関係および走査型透過電子顕微鏡(STEM)解析より、ナノパイプを起点としたスパイラル成長の促進がヒロック形成の原因であることを示した。高Mgドープによりヒロックを形成したサファイア基板上横型p-nダイオードを作製し、エミッショニ顕微鏡を用いたリーク評価により、サファイア基板上においてナノパイプは逆方向リークに寄与しないこと示している。

第四章では、液相成長GaN自立基板(液相成長基板)上縦型p-nダイオードにおける逆方向リーク電流を発生する貫通転位を、エミッション顕微鏡、Cathode Luminescence、エッチピット法、STEM観察の組み合わせにより特定を試みている。減圧成長で作製したp-nダイオードにおいて観測されたリーカスポットと、大中小三水準のエッチピットの内、中ピットのみが一致し、中ピットを形成する貫通転位でリークを生じることが分かった。この貫通転位をTEMのWeak Beam(W.B.)法による「 $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ 」を利用した消滅則および大角度収束電子線回折(LACBED)法によりバーガースベクトル \mathbf{b} を解析した結果、W.B.法では混合転位、LACBED法では $\mathbf{b} = [0001]$ を持つ螺旋転位と判別される特殊な転位であることが明らかとなった。W.B.法により転位芯の分裂は観察されず、転位の歪場を総合的に捉え、誤判定の可能性の少ないLACBED法の結果より、GaNにおけるリーク源は $\mathbf{b} = [0001]$ を持つ純螺旋転位と結論している。

第五章では、GaN自立基板上モエピタキシャル成長条件がリーク電流に与える影響を調査することで、リーク源発生メカニズムを明らかとし、さらなるリーク電流の低減を試みている。HVPE-GaN自立基板(HVPE基板)上縦型p-nダイオードの成長条件精査の結果、高成長圧力および高成長レート(低V/III比)条件でリーク電流が低減され、素子歩留まりが飛躍的に向上することが明らかとなった。STEM分析および多光子顕微鏡による転位伝搬観察の結果、リーク発生は螺旋転位から変換されたナノパイプであることが明らかとなり、上記条件ではナノパイプへの変換が抑制されることで歩留まりの向上につながることが示された。ただし、リークを生じないナノパイプも観察されており、GaNにおいては転位種だけではリークを発生せず、別の要因との組み合わせによりリークを引き起こすことを示している。

第六章では、液相成長基板上、HVPE基板上においてエッチピット形状と転位種、転位種とリーク電流の統一的な議論を構築している。 $\mathbf{b} = [0001]$ の純螺旋転位でリークする液相

成長基板上と、螺旋転位から変換したナノパイプでリークを発生する HVPE 基板上で結果の相違が見られる。背景不純物濃度とホモエピタキシャル成長条件を揃えて成長圧力依存性を評価することで、液相成長基板上においても中ピットを形成する螺旋転位でのリークはなくなることが示され、背景不純物濃度を統一した層ではエッチピット形状と転位種、リークとの関係が基板を跨いて同じであることを明らかとしている。

第七章では、転位種との組み合わせでリーク電流を発生させる別の要因に関して、不純物に着目し、転位種、不純物、リーク電流の関係に言及する。中ピットを形成する螺旋転位周りの不純物を三次元アトムプローブで評価したところ、リーク電流を発生する成長条件において螺旋転位に Mg の拡散が確認され、リーク電流を生じない条件では Mg が観測されないことから、螺旋転位に拡散した Mg がリーク電流を生じる要因であることを明らかとしている。ナノパイプに関しては、リークを発生するナノパイプ、発生しないナノパイプ壁面の不純物を STEM-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy により評価し、両者に明確な差が確認されることから、単純な不純物の有無ではなく、ナノパイプの壁面終端構造や、元となる螺旋転位のバーガースベクトルの差によりリーク特性が変化する可能性を示している。

第八章は総括であり、本論文各章で得られた GaN 自立基板上縦型 p-n ダイオードにおいて逆方向リーク電流を発生させる貫通転位に関する知見をまとめ、今後の展望について述べている。