

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 12763 号
------	---------------

氏名 宇佐美 茂佳

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)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	天野 浩
委員	名古屋大学	教授	西澤 典彦
委員	名古屋大学	准教授	本田 善央
委員	名古屋大学	教授	白石 賢二
委員	大阪大学	教授	酒井 朗

論文審査の結果の要旨

宇佐美茂佳君提出の学位論文「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」は、パワーデバイスとして期待されるGaNのp-nダイオードに逆方向高電圧を印加したときのリーク電流に着目し、リークの起源となっている貫通転位の種類、および有機金属化合物気相成長法を用いた場合のリーク電流低減が可能な成長条件に関してまとめたものであり、八章からなる。

第一章では、研究背景、特に現在まで報告されているGaNの貫通転位とリーク電流に関する研究成果をまとめ、p-nダイオードにおける逆方向リーク解明の必要性を示している。

第二章では、結晶成長法、p-nダイオードの電界緩和構造及び作製プロセスを示した後、リーク電流と貫通転位の対応関係の評価手法、転位種の特定手法に関してまとめている。特にエッチピット法による転位の種類の評価、自立基板製法、エッチャント、不純物濃度を一定にした場合の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、貫通転位密度の高いサファイア基板上と低いGaN自立基板上のp型GaNのMg濃度に対する正孔濃度を評価し、貫通転位はMg活性化率に影響しない、すなわち二つのp型GaNの正孔濃度には差がないことを明らかにしている。サファイア基板上では高正孔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、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ている。Mgの高濃度ドープによりヒロックを形成したサファイア基板上にp-nダイオードを作製し、ヒロックの中心にナノパイプが存在すること、およびエミッション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確認した。

第四章では、液相成長GaN自立基板上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。減圧の有機金属化合物気相成長法で作製したp-nダイオードにおいて観測されたリークスポットと、大きさの異なる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。この貫通転位を透過電子顕微鏡観察による $\mathbf{g} \cdot \mathbf{b} = 0$ を利用した消滅則、および大角度収束電子線回折(LACBED)法を用いて、同一の貫通転位のバーガースペクトルを解析した結果、通常の透過電子顕微鏡観察では混合転位、LACBED法では $\mathbf{b} = [0001]$ の純粋螺旋転位と判別される特殊な転位であることを明らかにした。通常の透過電子顕微鏡観察では、転位芯の分裂は観察されなかった。従って、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 $\mathbf{b} = [0001]$ を持つ純粋螺旋転位と結論付けている。

第五章では、GaN自立基板上ホ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べ、成長条件の制御によるリーク電流の低減を試みている。高成長速度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を明らかにしている。また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を明らかにしている。ただし、リークを生じないナノパイプも観察され、GaNにおいては、貫通転位だけではリークの起源とはならず、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見出した。

第六章では、液相成長基板上、および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理解のため議論している。 $\mathbf{b} = [0001]$ の純粋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た。残留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、不純物濃度と同じに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の作製法によらず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として不純物に着目し、転位種、不純物、リーク電流の関係を見出している。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の一つであることを見出している。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ペクトルの差によりリークが変化する可能性を示している。

第八章はGaN自立基板上p-nダイオードにおいて、本論文各章で得られた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。

以上のように、本論文では高信頼性GaNパワーデバイス実現のために、できる限り低減が必要な逆方向リークの起源について、p-nダイオードを用いて初めて正確に明らかにし、かつその低減のための気相成長における結晶成長条件を見出すことに成功している。これは、極めて高い学術的意義と、産業界の発展のきっかけとなる大きな業績であると判断できる。よって、本論文の提出者である宇佐美茂佳君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。