

巻頭言

Preface

量子放射部長 小林 直人

N. KOBAYASHI

新たな世紀を目前とした現在，地球規模における堅実で豊かな人間生活の展開とそれを可能にする持続的成長およびさまざまな有効環境の実現を図るためには，エネルギーの安定供給とその有効活用ならびに地球環境への配慮が必要であることは論を俟たない。そのためにはエネルギー源の選択肢の一つとしての原子力エネルギーの安全利用や人間生活のさまざまな分野における放射線・加速器の有効利用など，今後とも原子力の平和利用を推進していくことは我々に課せられた重要な課題の一つである。

しかしながら原子力の利用にあたってはシステムの安全性の確保がもっとも望まれており，原子力システムに使用される機器及びその構成部品の高機能化と高信頼化が必要不可欠とされている。特に原子炉や核燃料再処理施設等において高温かつ高放射線照射下の苛酷な環境でも安定に作動する半導体素子の開発は，常に強く待望されているところである。

一方，宇宙環境においては，今般スペースシャトルでの宇宙実験が数多く実施され，近い将来には国際宇宙ステーションの実現も期されているなど，その利用に向けた技術開発が各国において推進されており，21世紀においてもその利用がますます拡大していくことが予想される。ここにおいても宇宙放射線の影響を考慮することが重要であり，地上とは異なる格段に高い信頼性を必要とする各種機器に使用される半導体素子には宇宙環境特有の耐放射線特性が必要とされる。

しかし現在のエレクトロニクスを支えるSiを主体とする半導体素子では耐熱性と耐放射線性にその物性値から来る限界があるため，新しい半導体材料とそれを利用した素子構造の開発およびその評価法の開発が必要である。この課題に応えるため，電子技術総合研究所においては平成5年度から9年度までの5年間に亘り，原子力特別研究の枠組みの中で「耐熱・耐放射線半導体素子のための材料基礎技術に関する研究」を行った。

この研究では高温かつ高放射線照射環境下において安定に動作する半導体素子の実現のための材料基礎技術の開発を目標として，具体的には耐熱・耐放射線性半導体

材料としてSiよりも物性値において優れた特性を有する炭化けい素(SiC)をとり上げ，その結晶成長，不純物制御等の材料の高品質化と素子構造の作製等に関する研究を行うこと，およびこれら素子の高放射線照射環境下での動的特性を解明する研究により，耐放射線素子用材料開発のための基礎技術を開発することを目的とした。

特に当所においては従来よりSi基板上の3C-SiCの結晶成長技術の研究開発を実施してきており，本研究ではその技術を高度化し，高品質のSiC薄膜の形成を行うこととその素子化のための要素技術開発を目標とした。またX線や線の集積放射線量による素子としての劣化特性(いわゆるトータルドーズ効果)を評価し，SiCの耐放射線性がSiのそれより優れていることを明らかにしてきたが，本研究ではさらに素子に対する放射線効果のダイナミックな評価手法を適用することによって，耐放射線性評価法を確立することを目標とした。

本研究の開始時期には，上述のようにSiCの耐熱・耐放射線素子材料としての高いポテンシャルが確認されていたものの，その可能性と実現性の間には大きな乖離があった。すなわちSiC素子の特性としては，利得が小さい，耐圧が不十分である，高温でのリーク電流が大きいなどの問題点があった。また素子の耐熱・耐放射線性を充分発揮するためには電極の種類や構造の適切な選択，最適なMOS構造実現のための技術開発が必要であった。さらに中性子線や高速イオンビームなどの照射によるはじき出し損傷に起因する過渡的効果(トランジェント・ドーズ効果)の評価法の確立や材料特性との関連性の評価などが不十分であった。これらの背景を考慮し，本研究開発では(1)結晶成長技術，(2)素子化技術，(3)放射線効果評価技術の3技術領域において，克服すべき課題を抽出し，それを実現する具体的方法を設定し，最終目標を掲げることにより研究開発を効果的に推進することに注力した。

まず(1)結晶成長技術開発においては，従来の成長試料中の残留キャリア濃度が 10^{16}cm^{-3} と高く接合特性も悪い点を克服するために高品質のSiCエピ膜の成長技術を確立することを課題として挙げ，超高クリーンガス供

給システムの実現，成長過程のミクロ評価技術の開発，減圧CVD法の開発を通してSi基板上の3C-SiCエピタキシャル成長技術の高度化を図ることとした。その結果，表面平坦化機構やエピ膜表面のマクロステップ成因などを解明して成長機構を明らかにするとともに減圧CVD法により原子層オーダーで平坦なエピ膜を実現することができ，残留キャリア濃度の低減を図ることも可能となった。またこのエピ膜を用いて試作したSiCショットキー接合では従来に比べて大幅な耐圧の増加を実現することができた。

また(2)素子化技術の課題としては，素子の補償度が高くドーピング技術が不十分であること，電極やMOS構造の解析が不十分であること，p型不純物ドーピング技術が未確立であることなどが挙げられたが，これらを克服するためにイオン注入によるドーピング技術の開発，SiC/金属反応の解明，MOS構造ミクロ解析技術の開発などにより素子構造作製技術を確立することを課題とした。成果としては，特にp型不純物として従来研究が不十分であったGaやScに注目してそのイオン注入に伴う欠陥特性評価の研究を行い，高温イオン注入技術，高温ポストアニリング技術により残留欠陥の大幅な低減が図られることを明らかにし，その構造特性と電気特性の相関を明らかにすることができた。

さらに(3)放射線効果評価技術としては，素子のダイナミックな放射線応答特性をミクロにその場評価する技術の開発を課題とし，そのために過渡電流計測システムの開発，イオンビーム誘起電流測定法の開発等を通して耐放射線を評価する技術を開発することを目指した。その結果SiやGaAsのpn接合やショットキー接合ダイオードを対象に高エネルギーイオンマイクロプローブによるミクロな評価法を確立するとともに，耐放射線評価法としての有効性を明らかにし，SiC素子へも応用してその適用条件を明らかにすることができた。

本研究の推進に当たっては，材料科学部の(旧)量子材料研究室，後のSiC半導体エレクトロニクスラボ，量子放射部の(旧)放射線応用研究室，後のSiC半導体評価ラボが協力して研究を進め，前者が上記課題の(1)と(2)を，後者が(2)と(3)を主として担当した。特に(2)の素子化技術の課題推進に際して，両ラボが課題分担を行い，材料の評価法，技術的課題の抽出，研究推進方法等に関する議論を通して緊密に連携を進めることが出来たことは極めて有効であった。また外部との協力においては日本原子力研究所高崎研究所，メルボルン大学等との研究者の相互滞在や装置の相互利用を含む共同研究を行い，国内的・国際的に協力関係を構築することが出来たことは今後の研究開発に資する大き

な成果であった。

全般的な研究成果としては，上に述べた如く開始時期に設定した研究目標をほぼ達成することができたと同時に，結晶成長技術，イオン注入技術，放射線効果評価技術等において予想を上回る成果を挙げることができたことは評価すべき点である。特に減圧CVD法により世界最高品質の3C-SiCエピ膜を実現できたことは特筆すべき成果である。しかしながら素子化技術のうち特にSiC/金属反応の解明，MOS構造の評価等においては必ずしも期待していた成果を挙げることが困難であった。この主たる原因は，SiCの金属や酸化物との界面の特性を明らかにするためには，SiCエピ膜そのものの良好な特性を実現することおよびそれを適確に評価することが必要であったためであり，その課題が克服できた現在ではむしろ今後の新たな課題として研究を推進する方向性を明らかにできたことは大きな成果であったと言える。この点を踏まえて平成10年度からはSiC素子化のためのプロセス技術を大きな目標とする研究開発「原子力エレクトロニクスのための素子化プロセス技術に関する研究」を開始し，新たな研究展開を図っているところである。

本彙報特集号は，本研究開発の中で得られた特筆すべき成果を中心に課題を担った研究者による成果報告をまとめたものである。所内外の関連研究者・技術者や研究プロジェクト推進者の大きな参考になれば幸いである。また本研究開発推進にあたり多大な支援を頂いた当所関係者とりわけ山崎鉄夫前量子放射部長(現京都大学エネルギー理工学研究所教授)，荒井和雄材料科学部長および林伸行元量子放射部放射線応用研究室長(現法政大学イオンビーム工学研究所教授)，ならびに工業技術院・科学技術庁関係各位へ深甚の謝意を表したい。