

まえがき

新しい材料の出現はこれまで常に社会的に大きな変革をもたらしてきた。とくに半導体材料は、20世紀はじめからゲルマニウム(Ge)、シリコン(Si)、さらには砒化ガリウム(GaAs)をはじめとする各種化合物半導体が次々に開発され、近年の情報化社会、さらには4G、5G、6Gなどのデジタル社会を支える基盤材料となっている。これらの半導体の製造技術の一つがエピタキシャル成長で、とくに化合物半導体ではこの方法が極めて重要である。エピタキシャル成長とは、下地結晶上にその格子配列と同じ、または一定の方位関係を持って新しい結晶が付着していく過程で、化合物半導体を用いたデバイスの製造ではもっとも基本的な技術の一つである。このようなエピタキシー現象は、下地結晶の格子配列によるポテンシャルの谷を、新たに供給される原子が次々に埋めていくことによって生じる。このため良好なエピタキシャル成長のためには結晶構造や格子間隔が同じ、または似通った材料の組み合わせが適している。エピタキシャル成長には液相からの析出や気相からの析出がある。液相からの成長には液相成長や電気メッキなど、気相からの成長には各種気相成長、分子線成長などが含まれる。

第1章では半導体の種類と特徴について述べる。Ge、Siをはじめとする共有結合主体のIV族半導体はLSIの中心的材料である。これに対し原子価の変化を補償する形でIII-V族化合物、II-VI族化合物のように共有性を保ちながらもイオン性が大きく増加するような組み合わせの化合物が存在し、これらが化合物半導体である。第2章ではこれら化合物半導体のエピタキシャル成長の概要について述べる。それらは液相エピタキシャル成長法、塩化物/水素化物気相エピタキシャル成長法、有機金属気相成長法、分子線エピタキシャル成長法などである。第3章、第4章ではこれら半導体のエピタキシャル成長のうちとくに重要なIII-V族化合物半導体を中心に、液相エピタキシャル成長法(Liquid Phase Epitaxy : LPE)および有機金属気相エピタキシャル成長法(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy : MOVPE)についてやや詳しく述べる。ただしこれら

は分野を網羅するのではなく、筆者らが実際に経験したごく少数の半導体についての研究を紹介するものである。少数とはいえ具体的な実験例が含まれているので実験研究者には参考になろう。第5章では分子線エピタキシャル成長法(Molecular Beam Epitaxy: MBE)によるⅢ-V族化合物半導体の成長と応用について述べる。第6章、第7章ではそれぞれ MOVPE 法および MBE 法における材料供給プロセスを変調したエピタキシャル成長について述べる。前者は流量変調エピタキシー(Flow-rate Modulation Epitaxy: FME)、後者はマイグレーション・エンハンスド・エピタキシー(Migration-Enhanced Epitaxy: MEE)と呼ばれているが、結晶成長における制御性や結晶の品質向上に極めて大きな効果を及ぼすため、やや詳しく述べることにする。

FME や MEE の特徴の一つに選択エピタキシャル成長法(Selective Area Epitaxy: SAE)に対する大きな効果がある。第8章ではこの効果について詳しく述べる。第9章では上記の研究で製作された半導体レーザー(Laser Diode: LD)の発振特性と LD の寿命推定に関わる加速寿命試験の結果について述べる。

2023年10月

堀越 佳治
河原塚 篤

む す び

本書は、筆者が共同研究者と共に電電公社電気通信研究所基礎研究部(現 NTT 基礎研究所)で 25 年間、続いて早稲田大学理工学部で学生と共に 19 年間続けてきた研究の一部を記したものである。NTT 基礎研究所では古川吉孝氏、伊澤達夫氏、岩根眼蔵氏、岡本紘氏をはじめ実に多くの方々に教えをいただき、またご協力をいただいた。また早稲田大学では着想豊かな多くの学生と共に研究を進めることができた。共著者の河原塚篤氏は学生諸君の代表として准教授の立場で研究を推進した。成果の一部は第 5 章、第 8 章にまとめられている。本書はこれらの方々に感謝の意味を込めてまとめたものである。

本書でも述べたように、化合物半導体のエピタキシャル成長技術は、歴史的にいろいろな種類のもが開発されてきた。これらの技術はそれぞれの時代に重要な半導体デバイスの製造法として用いられてきた。エピタキシャル成長技術に要求される性能は、時代に拘わらず、高い結晶品質、高い膜厚制御性、低い製造コスト、そして量産性である。このような環境の中、エピタキシャル成長技術はそれぞれ発展を遂げてきた。1970 年代は LPE が主流であったが、現在は MOVPE 法および MBE 法が化合物半導体の主な成長技術となっている。

第 6 章、第 7 章には MOVPE 法、MBE 法を用いた新しい流量変調エピタキシーを提案している。これらは NTT 基礎研究所で独自に開発したもので、それぞれ Flow-rate Modulation Epitaxy (FME)、Migration-Enhanced Epitaxy (MEE)と呼ばれる。これらの方法は MOVPE、MBE の性能を大きく改善する可能性を秘めており、ぜひ利用してほしい。

筆者は幸運にも上記の様々なエピタキシャル成長技術に直接触れ、経験する機会に恵まれた。それぞれの成長技術は大変に奥深く、個々について十分な理解に至っているわけではないが、これらの経験をまとめておきたいという希望を持った。本書執筆の動機の一つである。