

審査の結果の要旨

氏名 王 云 鵬

光ファイバー通信の普及に伴い、発光デバイス、受光デバイス、光スイッチ、光アンプ、導波路などを集積した、光電子集積回路(Opto-Electronic Integrated Circuit, OEIC)への期待が高まっている。OEIC を作製するには、個々の部品を個別に作製して張り合わせるハイブリット方式と、1枚の半導体基板に集積作製するモノリシック集積がある。後者の方がアライメントなどの問題がなく、高密度集積も望めるが、従来の薄膜形成とエッチングを繰り返す作製手段では、製造歩留まりが低く、現実的でない。そこで、少ない結晶成長により OEIC を作製する技術の開発が要求される。有機金属ガスを原料とするMOVPE(有機金属気相エピタキシー)による化合物半導体の結晶成長は、良質な結晶を大面積基板上に一括して成長できるだけでなく、シリコン酸化膜などをマスクとして形成して部分的に被覆すると、マスク上には結晶成長せず、開口部のみに結晶が選択的に成長する。この選択成長では、マスク面積が大きいほど、開口部へ集まる原料濃度が高くなるため、マスク形状や大きさの制御により、成長する結晶の膜厚や組成を制御することが可能となる。このことを利用すれば、1回の成長により基板上に局所的にアンプや発光素子などを作りこむことができ、OEIC 作製に応用することが可能となる。

本論文は、“Process development of selective area MOVPE for Opto-Electronic Integrated Circuits based on InGaAsP”(InGaAsP系光集積回路用MOVPE選択成長プロセスの開発)と題し、上記選択MOVPEプロセスの開発とInGaAsP系OEIC作製への展開を検討した結果をまとめたものであり、全部で7章からなる。

第1章では、研究背景と既往の研究をとりまとめ、選択成長技術を利用してOEICを作製する際の課題などを取りまとめ、第2章では、実験に用いた装置や実験結果の解析方法について述べている。

第3章では、選択成長により形成した膜厚分布の解析から、表面反応に関する情報が得られることを示している。すなわち、選択成長領域の膜厚分布は、気相中での拡散と表面での反応のバランスによって決まる。そのため、選択成長のプロファイルをシミュレーション結果と比較することにより、 D/k_s (D は拡散係数、 k_s は表面反応速度定数)の値が求まり、 D は予測可能な物性値であることから、表面反応速度に関する情報を得ることが可能であることを示している。その際にマスク端から $20\mu\text{m}$ くらいは表面拡散の影響があるため、解析対象から除外することにより解析の精度が高まることを、表面拡散を考慮したシミュレーションから明らかにしている。

第4章では、InP, InAs, GaP, GaAsの2元系化合物での選択成長を利用した表面反応機構の解析結果についてまとめている。まず、InP, InAs系では、表面反応速度定数が大きく、比較的小さな活性化エネルギーを持っていること、低温・高濃度の条件では、表面反応速度定数に濃度依存性が表れることなどを報告している。特に、表面反応速度定数に濃度依存性が表れることについては、

Langmuir-Hinshelwood 型の速度式を用いて整理することにより、実験結果をうまく再現できることを示しており、これによりマスクが大きい場合(実効的な濃度が高い場合)の選択成長形状の再現性を高めている。GaP については、選択成長を行うと異常成長が起こり、選択成長の解析から表面反応に関する情報を得ることができなかった。このため、GaAsP 成長での成長プロファイルから、GaP 成長時の表面反応に関する情報を推測している。なお、GaAs については既往の研究結果を利用できるため、本論文では実験的解析を行っていない。

第5章では、3元系、4元系の結晶成長における選択成長の解析と予測について検討を行っている。まず、InAsP 系では、InAs と InP 成長での In 種の表面反応性が異なり、P 上への In 種の反応性の方が、As 上への反応よりも高いことを示している。このため、InAsP 成長では、In 種の反応速度は、P 上への反応速度と As 上への反応速度の線形的な和として与えられると考え、解析を行っている。解析の結果からは、3元系での反応速度は2元系での成長速度の線形結合として評価することではば問題がないことが示されている。このため、第4章で構築した2元系での In 種、Ga 種の反応速度を基に、3元系、4元系での選択成長プロファイルを予測可能であることを示している。さらに、実際に InGaAsP4元化合物半導体をマスク幅が異なるパターンを用いて成長させたところ、PL(Photo Luminescence)発光波長のマスク幅依存性が予測と良く一致することを示し、今回の研究で得た速度パラメータが正しく、選択成長を利用した化合物半導体の成長をうまく設計・制御可能であることを証明した。

第6章では、選択 MOVPE プロセスを利用した OEIC 作製において、問題となるいくつかの事項についての検討結果を示している。まず、マスク上に多結晶薄膜が成長する場合があります、この場合にはマスク上へも析出が起こるために選択成長プロファイルが予測どおりに形成されない。このマスク上の多結晶薄膜の成長は臨界濃度が存在するため、これを実験的に求め、実際のマスク設計においては、マスク上の濃度がこの臨界濃度を超えないように設計する必要があることを示している。また、マスク同士が隣接すると選択成長に他のマスクからの干渉が現れる。この効果について定量的に検討を行い、マスク間の干渉を考慮したマスク設計が必要となることを示している。さらに、急峻な膜厚変化、膜組成変化を実現するためのマスク形状に関する考察を行い、通常マスクの外側と内側に三角形のテーパー状マスクを追加することにより上記要求を満たせることを示している。

第7章では上記の成果を取りまとめ、本論文の結論を述べている。

このように、本論文は、OEIC のモノリシックインテグレーションを実現する選択成長プロセスの基礎となる表面反応速度定数のデータベースを構築し、これをもとに OEIC 作製プロセスの設計を可能としたものである。マテリアルプロセスの高度化を具現化した本研究は、マテリアル工学の発展に多大な貢献をするものであり、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。