

称号及び氏名 博士（工学）飯川 裕文

学位授与の日付 平成 17 年 3 月 31 日

論文名 「電子-光融合デバイス用複合半導体基板の創製と
評価に関する研究」

論文要旨

半導体 Si を用いた集積回路(IC)は、半世紀にわたり微細加工技術の進歩と一体となって目覚ましい進展を遂げてきた。最先端の研究報告によれば、代表的な Si デバイスである電界効果型トランジスタ(MOSFET)において、ゲート長 15nm が実現されており、ゲート酸化膜に至っては 1nm 程度まで極薄化されている。まさに加工寸法が原子レベルに肉薄していると言えよう。このことはデバイス作製において、微細化の物理的限界に近い将来に到来しつつあることを示唆しており、Si デバイスのさらなる進展が難しいことが予想される。現在、IC レベルでの性能向上を図るため、ゲート酸化膜に高誘電率材料を、層間絶縁膜には低誘電率材料の適用が進んでいるのもこのためである。また、チャンネル領域におけるキャリア移動度の向上のために、Ge を用いて Si 結晶格子を歪ませた歪 Si も注目されており、Si 以外の異種材料との融合が図られている。

一方、化合物半導体においては、近年、短波長(約 400nm)発光の GaN の結晶成長技術が一段と高まり、実用化が大いに進展している。

Siデバイスの進展に見られるように、これまで異質とされてきた技術や材料でさえも融合され、より複雑に多機能化かつ高機能化される傾向が強まっている。その先には演算処理には電子を、信号伝送には光を用い、その相乗効果により従来よりも一段と進化したデバイス、すなわち電子-光融合デバイスを実現しようという概念がある。言うまでもなく、これを実現するための半導体基板はまだない。そこで本研究では、この時代の要請に応えるべく、Silicon-on-Insulator(SOI)技術による電子デバイスと、GaNによる光デバイスとをモノリシックに作り込んだ形の

電子-光融合デバイス用複合半導体基板の創製に取り組んだ。以下は、本研究で得られた成果の要約である。

本論文第1章では、本研究で対象とする電子-光融合デバイス用複合半導体基板について、歴史的観点からその必要性について述べた。なお、本研究の第1の目的は、この複合半導体基板作製において出発材料としたSOI(111)基板を Separation by Implanted Oxygen法(SIMOX)で実現することであり、第2の目的はGaN結晶層成長の下地材料としたSiC結晶層をSOI(111)基板上に作製し、SiC-on-Insulator(SiC-OI) 基板を実現することである。

第1部第2章ではSi(111)基板への酸素イオン($^{16}\text{O}^+$)注入によりSIMOX(111)基板を作製するのに先立ち、 $^{16}\text{O}^+$ 注入直後(as-implanted)の基板内のドーズ量を分光エリプソメトリで非接触・非破壊かつ簡便に見積もる技術を開発した。試料作製条件は、ドーズ量 6 水準：3, 4, 5, 6, 7, $10 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, 加速エネルギー：180keV, 基板温度：約 550°Cとした。ドーズ量をパラメータとした試料に対し、分光エリプソメトリを用いて光学特性を調べた結果、異なるドーズ量で固有の反射振幅比角(Ψ)-波長(λ)スペクトルが得られた。 Ψ - λ スペクトルにおいて、 $^{16}\text{O}^+$ 注入前のSi基板では見られなかった振幅がそれらの試料では存在し、その振幅がドーズ量の増加に伴って線形的に大きくなる結果を得た。この結果を応用して、振幅の接線の傾きとドーズ量との相関を導き、新しい分析技術を確立した。

第3章では、第2章で作製したas-implanted Si(111)基板を試料に用い、分光エリプソメトリで試料内の酸素の深さ方向濃度分布を非接触・非破壊で分析する技術を開発した。分光エリプソメトリから得られた Ψ - λ と位相差(Δ)- λ スペクトルの解析において、 $^{16}\text{O}^+$ 注入領域に対してSiとSiO₂との組成比が深さ方向に連続的に変化する遷移層を想定してモデルを構築した。このモデルに基づき、有効媒質近似法を適用したシミュレーションにより Ψ - λ と Δ - λ との関係を逆算した。この際、計算スペクトルが実測スペクトルに合うように、SiO₂組成の深さ分布をフィッティング・パラメータとして合わせ込みを行なった。シミュレーション解析の結果、 Ψ - λ および Δ - λ ともに実測スペクトルと計算スペクトルが、全波長範囲にわたりよく一致した。そこから得られたパラメータ、すなわちSiO₂組成の深さ分布を用いることによってas-implantedで、初めて酸素の深さ方向濃度分布を高精度に得ることに成功した。

第4章では、現在、市販されているLow-Dose SIMOX(100)基板の作製条件を参考に、連続した埋め込み酸化膜をもつSIMOX(111)基板の作製条件を検討した。Si基板の面方位が(100)の場合、その適正条件は加速エネルギー：180keV、ドーズ量： $4 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ 、熱処理：1350°C- 4時間とされている。この条件をSi(111)に適用した結果、連続した埋め込み酸化膜が形成されることはなく、横方向へ伸長したSiO₂島の形成が観察された。そこでドーズ量を $5 \times 10^{17}/\text{cm}^2$ へ増加させた結果、Si(100)では埋め込み酸化膜内にSi島が形成される過多ドーズ量に分類されるが、Si(111)では連続した埋め込み酸化膜が形成される適正ドーズ量であることを明らかにした。これによりSIMOX基板作製においては、作製条件にSi基板面方位依存性が存在することを初めて示した。

この面方位の異なるSi基板間で、ドーズ量がSOI構造に与える影響の差を調べるために、断面透過型電子顕微鏡法を用いて、埋め込み酸化膜へと成長するSiO₂島の成長過程と形状に着目して構造解析を行なった。その結果、主に{111}と{100}のファセット面をもつ高密度な微小SiO₂島が観察され、熱処理時間の経過に伴ない微小SiO₂島が成長し、隣接するSiO₂島と合体していく様子を明らかにした。このSi(111)基板とSi(100)基板内でのSiO₂島の成長形態が異なることに着目して数値解析を行なった結果、両基板間で適正ドーズ量の異なる要因が、SiO₂島の成長速度の結晶方位依存性にあることを明らかにした。また、この解析で得られたSIMOX(111)基板の適正ドーズ量が、実験結果とよい一致を示した。

第5章では、第4章で実現したSIMOX(111)基板の高品質化を狙いとして、1350°CでのInternal Thermal Oxidation(ITOX：内部熱酸化)処理を検討した。SIMOX(100)基板とは異なり、SIMOX(111)基板では埋め込み酸化膜の増厚、すなわちITOX層の形成はITOX処理4時間までは確認できたが、それ以降では見られなかった。すなわち、ITOX層形成のSIMOX基板面方位依存性が存在することを明らかにした。一方、表面Si層/埋め込み酸化膜界面については、ITOX処理前後を問わずSIMOX(111)基板は、SIMOX(100)基板よりも界面ラフネスが小さいことを示した。

ITOX層の形成を埋め込み酸化膜の表面ラフネスから検討した結果、表面ラフネスが大きいときには、表面Si層内に発生しているITOX層に寄与する酸素原子の濃度勾配が大きくなり、結果としてITOX層の形成が促進されるが、逆にその表面ラフネスが小さいときには、この濃度勾配は小さくなりITOX層の形成が抑制されると推論した。

第Ⅱ部第6章では SiC エピタキシャル成長のための SiC 層を、埋め込み酸化膜上に形成する手法を検討した。SOI 基板の表面 Si 層が厚い場合には、炭化により形成された SiC 結晶は炭化初期では層状成長するものの、炭化の進行に伴ない三次元的な粒状成長に転じ、均一な SiC 層は形成されないことを明らかにした。そこで、SiC 粒状成長を抑制することを狙いとして、SOI 基板表面 Si 層を極薄化し、同様の炭化処理を行なった。その結果、SiC 粒状成長のない極薄 SiC 層(シード層)が埋め込み酸化膜上に形成できた。しかしながら、極薄 Si 層のために炭化処理中に Si の熱凝集がおこり、形成されたシード層/埋め込み酸化膜界面に未反応な Si 島および揺らぎが発生した。そこで、炭化反応時間の短縮化によりこれらの問題を解決すべく、急速加熱法(RTP)を導入して極薄 Si 層の炭化処理を行なった。その結果、未反応な Si 島および界面揺らぎが発生することなく表面 Si 層が完全に炭化され、均一な SiC-OI 構造が実現できた。また、形成された極薄 SiC シード層表面の平坦性も極めて良好であることを確認した。以上から、埋め込み酸化膜上の SiC シード層の形成において、SOI 基板表面 Si 層の極薄化および RTP による炭化が、極めて有用であることを明らかにした。

第7章では、従来型電気炉および RTP 装置により極薄 SiC シード層上へ SiC エピタキシャル成長を行ない、SiC 層の増厚を試みた。いずれの手法でも SiC 層の成長が確認された。SOI 基板を用いて SiC-OI 構造を実現するには、表面 Si 層の極薄化、炭化による SiC シード層の形成および SiC エピタキシャル成長の三段階プロセスが有効であることを明らかにした。各プロセス条件の最適化を図ることで、十分な品質をもつ SiC-OI 構造が実現できる見通しをつけた。

第8章では、本論文を総括し主要な結論をまとめ、今後の課題および展望について述べた。また、本研究の成果は今後の電子-光融合デバイスの実現に向けて大きく寄与するものであると結論した。

本論文の基礎となる発表論文

No.	論文題目	著者名	発表誌名	本論文との対応
1	$^{16}\text{O}^+$ 注入Si基板の 光エリプソによる ーズ量の見積り法	飯川裕文 中尾 基 泉 勝俊	電子情報通信学会 論文誌, J86-C , pp.74-75 (2003).	第 2 章
2	Estimation of Oxygen Dose by Spectroscopic Ellipsometry and Investigation of Oxide Formation Mechanism by FT-IR for $^{16}\text{O}^+$ -implanted Si Wafers	H. Iikawa M. Nakao K. Izumi	Proc. of 11th International Symposium on Silicon-on-Insulator Technology and Devices, Paris, pp.87-92 (2003).	第 2 章 第 3 章
3	High-Precision Analysis of Oxygen Depth Profile in $^{16}\text{O}^+$ -Implanted Silicon Substrates by Spectroscopic Ellipsometry	H. Iikawa M. Nakao K. Izumi B. Gruska	Journal of the Electrochemical Society, 151 , pp.G373-G376 (2004).	第 3 章
4	Dose-Window Dependence on Si Crystal Orientation in SIMOX Substrate Formation	H. Iikawa M. Nakao K. Izumi	Journal of Materials Research, 19 , pp.3607-3613 (2004).	第 4 章
5	Metamorphosis of Ultra-Thin Top Si Layer of SOI Substrate into 3C-SiC Using a Rapid Thermal Process	H. Iikawa M. Nakao T. Yokoyama S. Kobayashi K. Izumi	Proc. of International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, pp.59-60 (2004).	第 6 章

6	Formation of Robust 3C-SiC(100) Seed Layer on Buried Oxide Layer Using Rapid Thermal Processing	M. Nakao H. Iikawa K. Izumi H. Ishikawa T. Yokoyama S. Kobayashi	Proc. of 4th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials, Hawaii, pp.396-401 (2004).	第 6 章
7	Challenge to 200 mm 3C-SiC Wafers Using SOI	M. Nakao H. Iikawa K. Izumi T. Yokoyama S. Kobayashi	Materials Science Forum, 483-485 , pp. 205-208 (2005).	第 6 章

本論文に関するその他の発表

No.	論文題目	著者名	発表誌名
1	Quasi-Three-Dimensional Devices Simulation of Fully Depleted MOSFET/SOI Focused on Surface Roughness	M. Nakao H. Iikawa K. Izumi	Proc. of 11th International Symposium on Silicon-on-Insulator Technology and Devices, Paris, pp.373-378 (2003).
2	Development of Simulation Method for Buried Oxide Formation of SIMOX Structure During Post-Implantation Thermal Annealing	M. Nakao K. Sudoh H. Iikawa K. Izumi H. Iwasaki	Proc. of 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials, Tokyo, pp.782-783 (2004).

審査結果の要旨

本論は、電子-光融合デバイスを1チップ上に実現するために必要な複合半導体基板の創製と評価に関して行った研究をまとめたものであり、主な研究成果は次のとおりである。

- (1) Si 基板への酸素イオン注入において、酸素イオン注入量（ドーズ量）をパラメータとした分光エクソメトリを導入し、ドーズ量に固有の反射振幅比角（ Ψ ）-波長（ λ ）スペクトルおよび位相差（ Δ ）- λ スペクトルが存在することを初めて明らかにした。
- (2) 当該 Ψ - λ スペクトルの解析から、ドーズ量とスペクトルとの関係が定量的に示せることを見出し、ドーズ量の非接触・非破壊測定に分光エクソメトリが適用できることを初めて示した。
- (3) 当該 Ψ - λ および Δ - λ スペクトルに対し、酸素イオン注入領域をSiとSiO₂との混合物から成ると仮定してモデル化した。このモデルに対して有効媒質近似法によるシュミレーション解析を適用し、酸素の深さ方向濃度分布を非接触・非破壊、かつ高精度で分析する手法を開発した。
- (4) 埋込み絶縁物型Si基板（Silicon-on-Insulator:SOI）形成技術のうち、Siへの酸素イオン注入技術を主体としたSeparation by Implanted Oxygen（SIMOX）技術においては、結晶面方位の異なるSIMOX（100）基板とSIMOX（111）基板とではその基板作製の適正条件が異なることを見出した。
- (5) SiO₂ 基板の表面 Si 層をプロパンと水素との混合ガス雰囲気中で高温炭化してSiC結晶層を變成するに際し、当該SOI基板の表面Si層が十分に厚い場合には、炭化の進行に伴ない三次元的な粒状成長へ転じることを明らかにした。
- (6) 当該SiC結晶の粒状成長を抑制するため、SOI基板の表面Si層を極薄化したあと炭化処理を行なった結果、埋め込み酸化膜上に粒状成長のない極薄SiCシード層を形成することに成功した。
- (7) 当該炭化処理に際し、高速昇温熱処理の導入は極薄SiCシード層/埋込み酸化膜界面でのSi島の消滅と均一性向上に効果的であることを明らかにした。

以上の諸成果は、電子-光融合デバイスを実現する上で基本となる複合半導体基板の研究開発を大いに前進させ、本分野の学術および産業上の発展に寄与するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行なうのに必要な能力と学識とを

有することを証したものである。

最終試験結果の要旨

審査委員会は平成 17 年 3 月 3 日、委員全員の出席のもとに、申請者に内容の説明を行なわせ、関連する諸問題について試問を行なった結果、合格と判定した。

公聴会に日時

平成 17 年 3 月 3 日 9 : 00 ~ 10 : 30

審査委員会の所見

本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。