

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630130

研究課題名（和文）極薄シリコン/シリコン酸化膜二次元量子構造への電子トンネル注入発光デバイスの研究

研究課題名（英文）A STUDY OF TUNNEL ELECTRON INJECTION LIGHT-EMITTING DEVICES WITH A TWO-DIMENSIONAL QUANTUM STRUCTURE OF ULTRATHIN SILICON/SILICON DIOXIDE

研究代表者

森田 瑞穂 (MORITA, Mizuho)

大阪大学・工学研究科 教授

研究者番号：50157905

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：インジウムスズ酸化物/極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層/埋込シリコン酸化膜デバイスから、シリコン層厚さが薄くなるとエネルギーが高くなるエレクトロルミネッセンスピークを観測した。ピークは、二次元構造における量子閉じ込め効果に因ることを示している。プロジェクター縮小光学系を使用し、N-フルオロピリジニウム塩を用いた光エッチングにより所定表面領域の極薄シリコン層厚さ均一性を向上させる薄膜化法を開発した。

研究成果の概要（英文）：An electroluminescence peak at the increasing energy with decreasing silicon layer thickness has been observed in indium tin oxide/ultrathin silicon dioxide film/ultrathin silicon layer/buried silicon dioxide devices. This indicates that the peak is due to quantum confinement effects in a two-dimensional structure. A thinning method to improve the thickness uniformity of an ultrathin silicon layer in a defined area by photoetching with N-fluoropyridinium salts using a system with a projector and reduction optics has been developed.

研究分野：工学

キーワード：シリコン シリコン酸化膜 発光デバイス 量子井戸 トンネル効果

1. 研究開始当初の背景

大規模集積回路の高性能化に伴い、配線における電気信号遅延が問題となっており、光配線技術への期待が高まっている。光配線を構成する発光部、導波路、受光部として、シリコン大規模集積回路に組み込みやすいシリコンデバイスの開発が国内・国外において開始されている。

バルクシリコンは、バンド構造が間接遷移型であるために発光デバイスに適していない。国外において、理論計算と X 線光電子分光法により、シリコン層の厚さがナノメートルスケールまで薄くなると、シリコン層のエネルギーギャップが増加することが報告されている。また、理論計算により、シリコン層の厚さが薄くなると、シリコン層のバンド構造はサブバンドが形成されて準直接遷移型になることが報告されている。国内においては、極薄シリコン層に横方向 pn ダイオードを形成し、横方向からのキャリア注入により、pn 接合部から線状の電ロルミネッセンスが観測されたことが報告されている。また、シリコン層厚さが 8.5nm の多結晶シリコンをゲート電極とする金属/酸化物/半導体電界効果トランジスタを製作し、バルクシリコンバンドギャップ (1.12eV) より小さいエネルギーの電ロルミネッセンスが観測されたことが報告されている。しかし、バルクシリコンバンドギャップより大きいエネルギーの発光は報告されていない。

国内・国外の研究から、シリコン層を薄くすると、先ず (1) シリコンのバンドの縮退が解けてサブバンドが形成され、バンド-サブバンド間遷移あるいはサブバンド間遷移により、バルクシリコンのバンドギャップより大きいエネルギーの発光が予測される。次に、(2) バンドギャップが増大し、可視光の発光が予測される。そして、(3) バンド構造が準直接遷移型となり、高効率の発光が予測される。

研究代表者らは、インジウムスズ酸化物の透明導電膜をゲート電極とする極薄シリコン酸化膜を有する金属/酸化物/バルク半導体構造の電ロルミネッセンス特性を測定したところ、近赤外領域 (1130nm, 1.10eV) と可視領域 (650nm, 1.91eV) の発光を観測した。波長が 650nm の発光は初めての観測である。金属/酸化物/バルク半導体構造からの可視発光は肉眼で見える強度であった。しかし、発光波長の制御が課題であった。研究代表者らは、金属/酸化物/バルク半導体構造の発光の研究成果を踏まえ、将来の大規模集積回路基板として期待されている極薄シリコン層のシリコン・オン・インシュレータ基板上に極薄シリコン酸化膜の金属/酸化物/半導体構造を製作することにより、極薄シリコン層厚さにより発光波長を制御可能な二次元量子構造発光デバイスの研究を行った。そし

て、研究代表者らは、シリコン・オン・インシュレータ基板を用いて透明ゲート電極/極薄シリコン酸化膜 (2nm) /極薄シリコン層 (1.1~4.1nm) /埋込酸化膜/シリコン基板構造を試作し、電ロルミネッセンス特性を測定したところ、バルクシリコンバンドギャップより大きいエネルギーの新しい発光を観測した。シリコンバンドギャップより大きいエネルギーの発光は、二次元量子構造の量子準位を介した発光と考えられる。また、発光外部量子効率のシリコン層厚さ依存性を測定したところ、シリコン層の薄膜化に伴い、効率が高くなることを初めて見いだした。これは、シリコン層バンド構造が準直接遷移型に近づいていることを示唆している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模集積回路チップ内に微細発光部・受光部を組み込んだ光配線を集積化する研究の全体構想の中で、透明導電膜/極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層/埋込シリコン酸化膜/シリコン系により、極薄シリコン層の二次元量子構造への電子のトンネル注入による発光デバイスを開拓することにある。

具体的には、次のことを明らかにする。(1) 極薄シリコン層の量子準位を明らかにし、発光波長の制御法を開発する。(2) トンネル注入による電子の励起状態を明らかにし、高効率発光電子注入法を開発する。(3) 極薄シリコン層の厚さ均一化法と非発光中心低減化法を開発して高効率発光デバイスを開発する。

3. 研究の方法

研究代表者らが開発した光エッチングによる厚さが均一な極薄シリコン層の形成法を開発する。次に、透明導電膜/極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層のシリコン・オン・インシュレータデバイス構造を微細加工により製作する。そして、発光特性を測定し、発光スペクトルの印加電圧依存性を解析し、電子と正孔の輻射再結合過程を明らかにする。さらに、発光特性のシリコン層厚さ依存性を解明し、シリコン層における量子準位の生成を明らかにする。次に、発光特性のシリコン酸化膜厚さ依存性を解明し、シリコンへ注入される電子の励起状態、高効率電子注入を明らかにする。そして、研究代表者らが開発した超清浄精密制御熱酸化による非発光中心が少ない極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層界面の形成法を開発し、高効率発光デバイスを開発する。

4. 研究成果

(1) 光エッチングによりシリコン・オン・インシュレータ基板の所定表面領域のシリコン層厚さ均一性を向上させる薄膜化法を確立した。分光エリプソメータを用いてシリコン層の厚さ分布を測定し、エッチング速度の光照

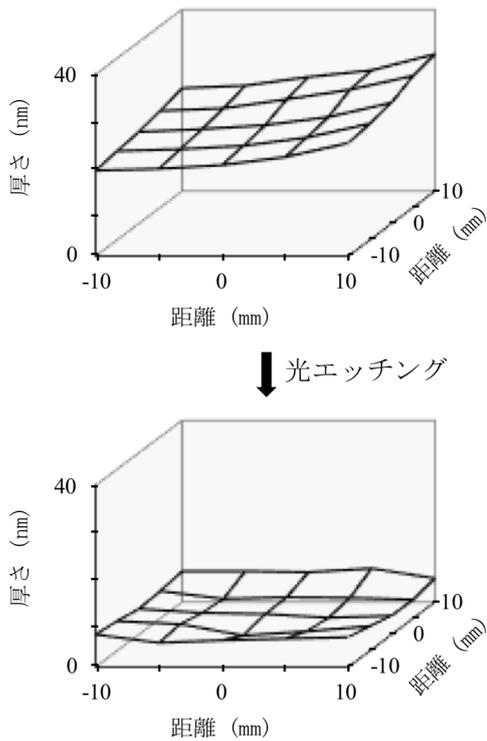


図1 シリコン層厚さ均一性向上
薄膜化

射強度依存性を基に、設計エッチング量を光強度に反映させた光強度分布パターンを作成した。基板の温度を 28℃ に制御し、プロジェクター縮小光学系を用いて N-フルオロピリジニウム塩を塗布したシリコン層表面にパターンを投影した。光エッチング後、N-フルオロピリジニウム塩を除去し、分光エリプソメータを用いてシリコン層の厚さ分布を測定した。1 回の照射により、所定表面領域で厚さの面内ばらつきが小さい極薄シリコン層を形成した(図 1)。所定のエッチング領域の外側に比較的厚いシリコン層がフレームとして残るため、光エッチング後の極薄シリコン層の剥がれや熱酸化後のシリコン島の形成は観測されなかった。

(2) シリコン・オン・インシュレータ基板上にインジウムスズ酸化物/極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層/埋込シリコン酸化膜構造の発光デバイスを製作する技術を開発した。そして、光エッチングによるシリコン層厚さ均一化プロセスを組み込んだデバイス製法を開発した。極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層界面は、極薄シリコン層の超清浄精密制御熱酸化法を開発し、形成した。

(3) インジウムスズ酸化物/極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層/埋込シリコン酸化膜構造デバイスのエネルギーバンド図を明らかにした。インジウムスズ酸化物のバンドギャ

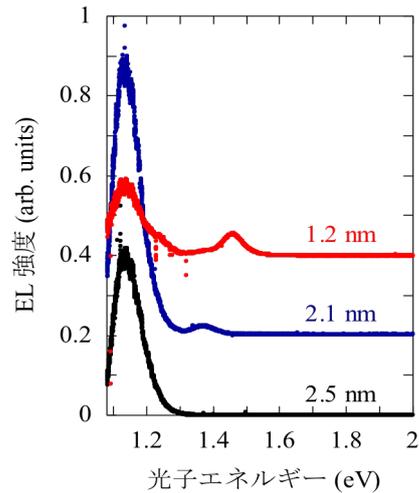


図2 エレクトロルミネッセンス(EL)
スペクトルのシリコン層厚さ依
存性

ップは分光光度計を用いて測定し、インジウムスズ酸化物と極薄シリコン酸化膜の価電子帯上端の差は X 線光電子分光法により測定した。エネルギーバンド図は、高いエネルギーの電子がシリコンの励起状態へトンネル注入されることを示唆している。

(4) シリコン・オン・インシュレータ基板上に製作した極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層/埋込シリコン酸化膜構造の室温でのフォトルミネッセンス特性のシリコン層厚さ依存性において、バルクシリコンバンドギャップより大きいエネルギーの発光を観測し、シリコン層の薄膜化に伴って高エネルギー側へシフトするピークと、シリコン層厚さに依存しないピークに分離された。シリコン層厚さに依存してシフトするピークは、二次元構造における量子閉じ込め効果に因る発光であると考えられる。ピークの高エネルギー側へのシフトは、シリコン層のエネルギーギャップの増大を示唆している。シリコン層厚さに依存しないピークは、シリコン/シリコン酸化膜界面のトラップ準位を介した発光であると考えられる。

(5) シリコン・オン・インシュレータ基板上に製作したインジウムスズ酸化物/極薄シリコン酸化膜/極薄シリコン層/埋込シリコン酸化膜構造デバイスの室温でのエレクトロルミネッセンス特性において、バルクシリコンのバンドギャップ (1.12eV) に近いエネルギーの発光に加えて、バルクシリコンのバンドギャップより大きいエネルギーの発光を観測した(図 2)。そして、エレクトロルミネッセンス特性のシリコン層厚さ依存性において、バルクシリコンのバンドギャップより大きいエネルギー領域で、シリコン層が薄いとエネ

ルギーが高いピークとシリコン層厚さに依存しないピークを観測した。シリコン層厚さが薄くなるとエネルギーが高くなるピークは、二次元構造における量子閉じ込め効果に因る発光であると考えられる。発光波長のシリコン層厚さ依存性は、発光波長をシリコン層厚さにより制御できることを示唆しており、光配線発光部への応用上重要である。また、シリコン層の薄膜化に伴ってピークが高エネルギー側へシフトする発光において、ピークの半値幅が狭い発光を観測した。半値幅が狭いピークは、シリコン層の厚さのばらつきが小さいことを示唆している。さらに、デバイスの室温でのエレクトロルミネッセンス特性の印加電圧依存性において、印加電圧を増加させると電流の増加に伴い、発光強度が増加することを確認した。極薄シリコン層へトンネル注入される電子数を増加させることにより、発光強度が増加することを示している。

(6) 極薄シリコン酸化膜を形成しないインジウムスズ酸化物／極薄シリコン層／埋込シリコン酸化膜構造デバイスのエレクトロルミネッセンス特性において、バルクシリコンバンドギャップより大きいエネルギーの発光は観測されなかった。極薄シリコン酸化膜を形成したデバイスでは、バルクシリコンバンドギャップより大きいエネルギーの発光を観測した。極薄シリコン酸化膜は、高いエネルギーの電子のシリコンへの注入に寄与していることを示唆している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Yuki Miyata, Yasunori Nakamukai, Cassia Tiemi Azevedo, Miho Morita, Junichi Uchikoshi, Kentaro Kawai, Kenta Arima, Mizuho Morita, Photoetching method that provides improved silicon-on-insulator layer thickness uniformity in a defined area, Microelectronic Engineering, Peer-reviewed, in press.

[学会発表] (計 2 件)

- ① Cassia Azevedo, Yuki Miyata, Yasunori Nakamukai, Yasushi Oshikane, Kentaro Kawai, Kenta Arima, Mizuho Morita, Photoluminescence in Si/SiO₂ Single Quantum Wells, 応用物理学会、2015 年 09 月 14 日、名古屋国際会議場、愛知県名古屋市。
- ② 宮田 優希、中向 保徳、Cassia Tiemi Azevedo、押鐘 寧、川合 健太郎、有馬 健太、森田 瑞穂、光エッチングによる均一層厚を有する極薄 SOI の形成、応用物理学会、2015 年 03 月 14 日、東海大学 湘南キャンパス、神奈川県平塚市。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 瑞穂 (MORITA, Mizuho)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50157905