

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656217

研究課題名（和文） 極薄シリコン／シリコン酸化膜系による二次元量子構造発光デバイスの研究

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

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

研究成果の概要（和文）：極めて薄いシリコン層を有する金属 - 酸化物 - 半導体トンネルデバイスから、バルクシリコンのバンドギャップより高いエネルギーのエレクトロルミネッセンスピークを観測した。ピークは、サブバンドを介した遷移とトラップを介した遷移に因ることを示している。シリコン層厚さが薄くなると、外部量子効率が高くなることを見いだした。極めて薄いシリコン層は、準直接バンドギャップをもつことを示唆している。

研究成果の概要（英文）：An electroluminescence peak at energies higher than the band gap of bulk silicon has been observed in metal-oxide-semiconductor tunnel devices with an ultrathin silicon layer. This indicates that the peak is due to subband-mediated transitions and due to trap-mediated transitions. It has been found that the external quantum efficiency increases with the decrease of the silicon layer thickness. This suggests that ultrathin silicon layers have quasi-direct band gap.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

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、トンネル現象

1. 研究開始当初の背景

大規模集積回路 (LSI) 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た。光配線を構成する発光部、導波路、受光部として、シリコン LSI 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た。

研究代表者らは、LSI 用金属／酸化物／半導体 (MOS) デバイスのシリコン酸化膜の特性解析の研究に取り組んできていた。そして、インジウムスズ酸化物透明導電膜をゲート電極とする極めて薄いシリコン酸化膜を有する MOS 構造のエレクトロルミネッセンス特性を測定したところ、近赤外領域 (1130nm)

と可視領域 (650nm) の発光を観測した。波長が 650nm の発光は初めての観測であった。MOS デバイスからの可視発光は肉眼で見える強度であった。近赤外光はフォノン介在遷移による発光、可視光はバンド内遷移による発光であると考えられた。

研究代表者らは、将来の LSI 基板として期待されている SOI (Silicon on Insulator) 構造を基本としたセンサの研究に取り組んできていた。そして、MOS 構造の発光の研究成果を踏まえ、極薄シリコン層 SOI 基板上に極薄シリコン酸化膜 MOS 構造を製作することにより、二次元量子構造発光デバイスの研究を提案した。

そして、研究代表者らは、SOI 基板を用い

て透明ゲート電極／極薄シリコン酸化膜／極薄シリコン層／埋込酸化膜／シリコン基板構造を試作し、エレクトロルミネッセンス特性を測定したところ、1150nm (1.08eV) のフォノン介在バンド間遷移による発光と1040nm (1.19eV) の新しい発光を観測した。バルクシリコンバンドギャップ (1.12eV) より大きいエネルギーの新しい発光は、二次元量子構造の量子準位を介した発光であると考えられた。

研究代表者らのMOS構造の光機能を引き出す研究の他に、SOI基板を用いた極薄シリコン層の物性やデバイスの研究が国内外において開始されていた。カナダの大学から、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た。フランスの企業から、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がサブバンド形成されて準直接遷移型になることが報告されていた。国内の企業からは、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接合部から線状のエレクトロルミネッセンスが観測されたことが報告されていた。しかし、エレクトロルミネッセンスのスペクトラムは報告されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、LSI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である。

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) 極薄シリコン層における高効率電子注入条件での発光メカニズムを解明して高効率発光デバイスを開発する。

3. 研究の方法

本研究の方法では、透明導電膜／極薄シリコン酸化膜／極薄シリコン層SOIデバイス構造を微細加工により製作する。次に、デバイス構造を透過型電子顕微鏡などにより解析する。これらの結果を製作プロセスに反映させて所定の構造を製作する。そして、発光特性を測定して、発光スペクトラム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、発光特性のシリコン厚さ依存性、シリコン酸化膜厚さ依存性、印加電圧依存性の解析結果を基に、発光メカニズムを解明する。これらの結果を製作プロセスに反映させて高効率発光デバイス構造を製作する。

(1) 透明導電膜／極薄シリコン酸化膜／極薄シリコン層SOIデバイス構造の製作

SOIウェハをクリーンドラフトチャンバ内でウェット洗浄した後、超清浄精密制御熱酸化装置を用いてウェット酸化によりSOIウェハ表面に厚いシリコン酸化膜を形成し、エッチングによりシリコン酸化膜を除去し、極薄シリコン層SOIウェハを製作する。次に、極薄膜SOIウェハをドライ酸化し、SOIウェハ表面に極めて薄いシリコン酸化膜を形成する。アライメント露光装置を用いてリソグラフィ、さらにエッチングを行い、シリコン酸化膜を所定形状寸法に微細加工する。インジウムスズ酸化物を真空蒸着装置を用いて微細加工ウェハ表面に蒸着し、熱処理装置を用いて加熱処理をしてインジウムスズ酸化物透明導電膜電極を形成する。リソグラフィ、エッチングを行い、インジウムスズ酸化物電極を所定形状寸法に微細加工して、シリコン酸化膜上のインジウムスズ酸化物ゲート電極とシリコン上のコンタクト電極を形成する。

(2) 透明導電膜／極薄シリコン酸化膜／極薄シリコン層SOIデバイス構造の解析

極薄シリコン層の厚さは、シリコン層薄膜化加工後に分光エリプソメータにより測定し、デバイス製作後に透過型電子顕微鏡により観察して、所定の厚さで形成されていることを確認する。極薄シリコン酸化膜の厚さは、シリコン酸化膜形成後にエリプソメータにより測定し、デバイス製作後に透過型電子顕微鏡により観察し、所定の厚さで形成されていることを確認する。インジウムスズ酸化物透明導電膜の光透過率と導電率は、デバイス製作時に石英基板上にインジウムスズ酸化物膜を形成し、分光光度計により光透過率、四探針法抵抗率測定器により導電率を測定する。これらの結果を製作プロセスに反映させて所定の構造を製作するプロセスを最適化する。

(3) 発光特性の測定・解析

発光デバイスの電極に電圧を印加して電流を流し、デバイスのエレクトロルミネッセンス特性を測定する。そして、発光スペクトラムの印加電圧依存性を解析し、シリコンへトンネル注入される電子の励起状態と電子と正孔の輻射再結合過程を明らかにする。さ

らに、カソードルミネッセンス、フォトルミネッセンス特性を測定し、発光特性を比較して、電子と正孔の輻射再結合過程を確認する。

(4) 発光特性のシリコン層厚さ依存性の解明

シリコン層の厚さが異なる発光デバイスを製作し、エレクトロルミネッセンス特性を測定する。発光スペクトラム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。特に、シリコン層におけるサブバンドの形成、シリコン層のバンドギャップの増大、シリコン層バンド構造の間接遷移から準直接遷移への移行を明らかにする。

(5) 発光特性のシリコン酸化膜厚さ依存性の解明

シリコン酸化膜の厚さが異なる発光デバイスを製作し、エレクトロルミネッセンス特性を測定する。発光スペクトラム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、注入される電子数、可視領域発光の高効率電子注入、近赤外領域発光の高効率電子注入を明らかにする。

(6) 発光メカニズムの解明

発光デバイスのエレクトロルミネッセンス特性のシリコン厚さ依存性、シリコン酸化膜厚さ依存性、印加電圧依存性の解析結果を基に、可視領域発光と近赤外領域発光のメカニズムを解明する。これらの結果を製作プロセスに反映させて高効率発光デバイス構造を製作するプロセスを最適化する。そして、高効率の可視発光デバイス、近赤外発光デバイスを開発する。

4. 研究成果

SOI 基板を用いてナノメートル厚さのシリコン層を有する透明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／埋込酸化膜／シリコン基板デバイス構造の製作においては、シリコン層厚さが最も薄い厚さで 1.1nm のデバイスを製作することに成功した。ウェット酸化とエッチングによりシリコン層を薄膜化した後、薄膜化シリコン層のドライ酸化速度を明らかにし、精密制御ドライ酸化とエッチングにより極薄シリコン層の形成を達成した。

デバイス構造の解析においては、インジウムスズ酸化物薄膜の光透過率と導電率測定結果を解析し、インジウムスズ酸化物薄膜の形成プロセスを最適化した。インジウムスズ酸化物薄膜の光学特性の形成プロセス条件依存性を明らかにした。この結果をデバイス製作プロセスに反映させ、インジウムスズ酸化物薄膜を安定に微細加工できる形成プロセス条件を明らかにした。

発光特性の測定・解析においては、デバイスのエレクトロルミネッセンス特性を測定し、発光スペクトラムの印加電圧依存性を解

析し、シュタルク効果を確認した。エレクトロルミネッセンスピークは、印加電圧を増加させると長波長側（低エネルギー側）へシフトした。ピークシフトは、シュタルク効果により説明できる。

極薄シリコン酸化膜／極薄シリコン層／埋込酸化膜／シリコン基板構造のフォトルミネッセンス特性を測定した。シリコン層厚さが薄くなると短波長側（高エネルギー側）へシフトするピークを確認した。このピークは、量子準位を介した発光ピークであると考えられる。

デバイス構造のシリコン基板裏面に電極を形成し、裏面電極に正電圧を印加することにより、ゲート電極 - 表面コンタクト電極間の電流が増加し、発光強度が増加することを確認した。これは、極薄シリコン層内の表面側の正孔密度が高くなり、擬チャネルが形成されて実効的にシリコン層の電気抵抗が小さくなったためと考えられる。

発光特性のシリコン酸化膜依存性の解明においては、透明インジウムスズ酸化物／極薄シリコン酸化膜／シリコン基板構造デバイスと透明インジウムスズ酸化物／シリコン基板構造デバイス製作し、エレクトロルミネッセンス特性を測定して比較した。シリコン酸化膜を有するデバイスから高い強度の発光が観測された。これは、電子と正孔の再結合効率が高いためと考えられる。

シリコン層厚さ依存性の解明においては、ナノメートル厚さのシリコン層を有するデバイスを製作し、極薄シリコン層への電子トンネル注入によるエレクトロルミネッセンス特性を測定した。シリコン層厚さが 1.1nm～2.9nm のデバイスから、バルクシリコンバンドギャップ (1.12eV) より大きいエネルギーのブロードなピークの発光を観測した。ブロードピークは、シリコン層の薄膜化に伴って高エネルギー側に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。ピークエネルギーがシリコン層厚さに依存するピークは、二次元量子構造の量子準位を介した発光であると考えられる。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近傍トラップを介した発光であると考えられる。バルクシリコンバンドギャップより大きいエネルギーでのエレクトロルミネッセンスは、光配線発光部への応用上重要である。

シリコン層厚さが 1.1nm～28.5nm のデバイスの外部量子効率を測定し、外部量子効率のシリコン層厚さ依存性を明らかにした。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間接遷移から準直接遷移に移行していることを示唆している。シリコン層厚さが 2.9nm での効率は約 2% と高い値が得ら

れた。しかし、シリコン層厚さが2.9nmより薄くなると効率が低下した。ナノメートル厚さのシリコン層を有する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／埋込酸化膜／シリコン基板構造の外部量子効率のシリコン層厚さ依存性を初めて明らかにした意義がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

A. Tsuchida, K. Matsumura, R. Yamada, Y. Oshikane, K. Kawai, J. Uchikoshi, K. Arima and M. Morita, Electroluminescence in Metal-Oxide-Semiconductor Tunnel Diodes with an Ultrathin Silicon Layer, Extended Abstracts of Fifth International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, Not peer-reviewed, Osaka, October 23, 2012, 220-221.

② Mizuho Morita, Ayano Tsuchida, Kei Matsumura, Ryuta Yamada, Yasushi Oshikane, Kentaro Kawai, Junichi Uchikoshi, and Kenta Arima, Electroluminescence in Metal-Oxide-Semiconductor Tunnel Diodes with Nanometer-Thick Silicon, ECS Transactions, 45(5), The Electrochemical Society, Invited, Not peer-reviewed, Seattle, USA, May 9, 2012, 229-234.

③ A. Tsuchida, K. Matsumura, R. Yamada, Y. Oshikane, K. Kawai, J. Uchikoshi, K. Arima and M. Morita, Electroluminescence in Ultrathin Silicon-on-Insulator Metal-Oxide-Semiconductor Tunnel Diodes, Extended Abstracts of Fourth International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, Not peer-reviewed, Osaka, October 1, 2011, 240-241.

[その他]

ホームページ等

<http://www-pm.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>

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