

令和元年6月3日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03880

研究課題名（和文）バルクシリコンを用いたシリコン・ゲルマニウムフォトリソグラフィプラットフォームの形成

研究課題名（英文）Formation of silicon/germanium photonics platform using bulk silicon wafers

研究代表者

石川 靖彦（Ishikawa, Yasuhiko）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：60303541

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、一般的なバルクSiウエハを利用したSiフォトリソグラフィの実現を目的として研究を行った。実現の鍵は相反する2つの特性、(1)表面の光導波路からSiウエハへの光放射の防止、(2)表面の光導波路からSiウエハ直上のGe受光器への効率的な光結合、を両立する点にある。計算機シミュレーションの結果、波長1.31ミクロン帯においてSiNxチャネル光導波路が利用できることを明らかにした。有効性の実証に向けデバイスの試作を行った。光透過測定を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インターネットをはじめとする情報通信において、光技術は通信の大容量化ならびに低電力化に不可欠となっている。本研究では高性能な光デバイスを低価格化する手法を検討した。半導体集積電子回路の作製技術を利用することで、基本素子の形成が可能であることを理論的に示した。学術的に大きな意義があり、実用化できれば社会に広く貢献できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to realize Si photonics utilizing ordinary bulk Si wafers. Two conflicting issues are solved, i.e., (1) suppression of radiation from the optical waveguides on the surface to the bottom Si wafer, and (2) efficient optical coupling to Ge photodetectors formed on the Si wafer. Based on the theoretical simulations, SiNx channel waveguides operating in the 1.31 micrometer range were found to be applicable. In order to experimentally verify the results, the SiNx waveguides were fabricated. The optical transmission measurements are under investigations.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：シリコンフォトリソグラフィ バルクシリコン 光導波路 低損失 窒化シリコン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

Siフォトンクスは、Si集積電子回路の作製で培われた微細加工プロセスを用いて光デバイスを作製・集積する技術である。基本構造はSiO₂層上のSi光導波路であり、SOI（Si-on-insulator）ウエハの上部Si単結晶層をサブミクロン幅に細線加工することで作製できる。光通信波長帯（1.3–1.6 μm）の単一モード光導波路として機能する。Si光導波路とともに、Si合分波器、Ge受光器等をモノリシック集積した光受信チップは、主にデータセンタにおけるラック間通信用の光トランジューバで利用され、実用化されている。しかしながら、作製に用いられるSOIウエハは、埋め込みSiO₂層が数μmと厚いなどエレクトロニクス用と仕様が大きく異なり、さらに高価格（約6万円/枚）である。低価格（数千円/枚）で入手できる「一般的なバルクSiウエハを利用したSiフォトンクス」が望まれる。実現の鍵は相反する2つの特性、

- (1) 表面の光導波路から下地のバルクSiウエハへの光放射の防止
- (2) 表面の光導波路からバルクSiウエハの直上に形成されるGe受光器への効率的な光結合

を両立する点にある。光導波路からバルクSiウエハへの光の放射損失を、1 μm程度の薄いクラッド層を用いて抑制すること（数 dB/cm以下）が要求される。

2. 研究の目的

バルクSiウエハを利用したSiフォトンクスの実現を最終目標とする。

様々なクラッド層や光導波路構造を検討し、バルクSiウエハを利用したSiフォトンクスの実現可能性を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

非晶質SiN_x堆積膜を光導波路に用いることにする（他の候補としては非晶質Siがある）。光通信波長帯におけるSiN_xの屈折率は約2.0である。Si（約3.5）よりも小さいが、SiO₂クラッド（約1.5）よりも十分に大きいので、光導波路のコアとして機能する。Si導波路（幅0.4 μm、高さ0.2 μm程度）に比べて導波路サイズは若干大きくなる（幅0.9 μm、高さ0.6 μm程度）が、導波路側壁の加工揺らぎに起因する散乱損失が小さい利点がある。さらに熱光学係数が小さい特長があり、光の干渉・共振を利用するデバイスの動作が温度変動に対して堅牢である。化学気相堆積法によるSiN_xでは、原料ガス由来のN-H結合に起因した光吸収損失が1.5 μm付近で発生する欠点があるが、反応性スパッタ膜を用いることでN-H結合による吸収損失を除外できる。

本研究では、主に以下の構造を検討した。

- (1) 薄膜の誘電体多層膜（SiO₂/SiN_xの一次元フォトニック結晶）をクラッド層とするSiN_xチャンネル光導波路構造
- (2) 薄いSiO₂をクラッド層とするSiN_xリブ光導波路およびSiN_xチャンネル光導波路構造

各構造について、有限要素法による導波モードの計算と有限差分時間領域（finite-difference time-domain: FDTD）法による伝搬損失・曲げ損失の計算を行い、バルクSiウエハの利用に適した構造設計を進めた。計算結果をもとに、実際に光導波路を作製した。

4. 研究成果

- (1) 薄膜の誘電体多層膜をクラッド層とするSiN_xチャンネル光導波路構造

SiN_xチャンネル光導波路のクラッド層として、SiO₂/SiN_x多層膜からなる高反射率の一次元フォトニック結晶の利用可能性を検討した。様々なSiO₂およびSiN_xの膜厚を仮定し、伝搬損失を計算機シミュレーションにより評価した。しかしながら、誘電体多層膜中のSiN_x層への光結合（SiN_x層のスラブモードへの光結合）が避けられないため、放射損失（伝搬損失）を低減できないことが明らかとなった。

- (2) 薄いSiO₂をクラッド層とするSiN_xリブ光導波路構造

計算機シミュレーションで用いた典型的な導波路構造を図1に示す。いずれの構造も波長1.55/1.31 μm においてシングルモード光導波路として機能する。波長1.55 μm の光に対する伝搬損失を SiO_2 クラッド層の膜厚に対して計算した結果を図2(a)に示す。図1(a)に示したチャンネル構造では、 SiO_2 クラッド層を1 μm まで厚くしても伝搬損失が10 dB/cm程度と大きい。Si基板への放射損失を抑制できないためである。

光の導波モードをより上方に偏らせることで、Si基板への放射損失を低減できると考え、リブ構造について計算機シミュレーションを行った。図1(b)に示した100 nm厚のリブ構造では、伝搬損失はチャンネル構造とほぼ同じであり、低減効果は見られなかった。一方、図1(c)のような厚いリブ構造にすることで伝搬損失を低減できることがわかった。1 μm の SiO_2 クラッド層で伝搬損失を数 dB/cmまで低減できる。しかしながら、図2(b)に示したように、曲率半径が数 μm の微小曲げ導波路を作製した場合、20 dB以上の損失が発生する。光閉じ込めが弱く、図3のように曲げ部分で光の放射が生じる。このためチップ上の光信号伝搬に利用できない。

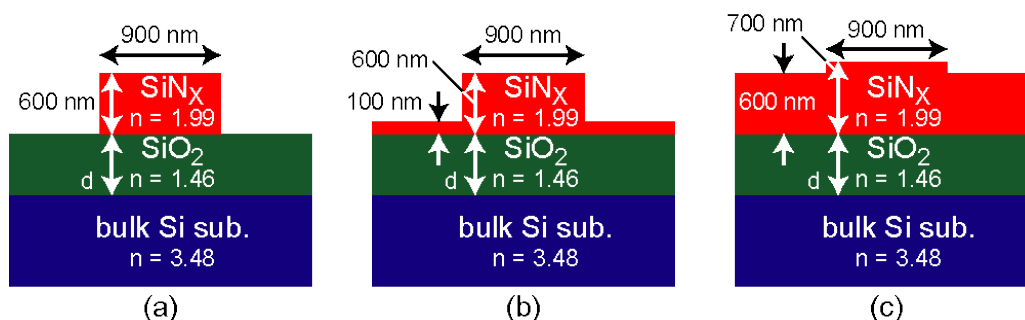


図1 計算機シミュレーションで用いた典型的な導波路構造

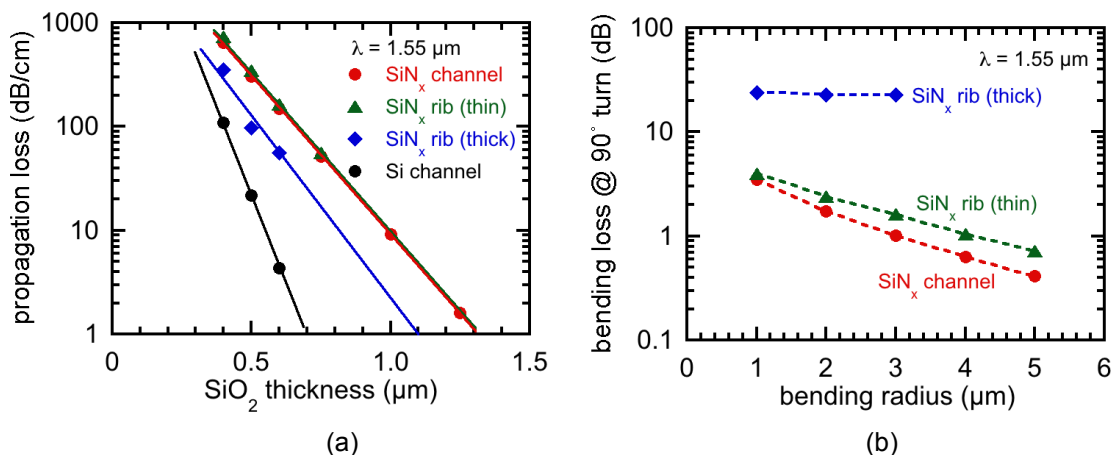


図2 SiN_x チャンネル/リブ光導波路における波長1.55 μm での伝搬損失の計算結果：(a) SiO_2 クラッド層の膜厚に対する伝搬損失および (b) 90度曲げ導波路の損失の曲げ半径依存性

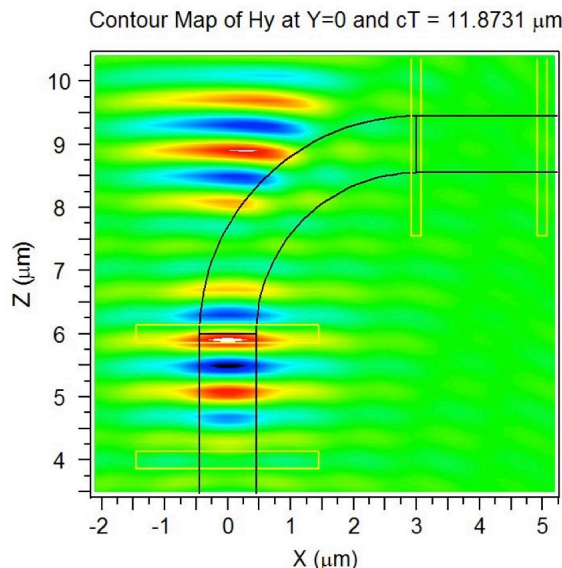


図3 厚いリブ構造 (図1(c)) の90度曲げ部における光伝搬特性：FDTDシミュレーション結果

光通信域の短波長側の1.31 μm 帯についても計算を行った。より短波長の光を利用することで、 SiN_x 導波路中への光閉じ込めが強化され、伝搬特性の改善が期待されるためである。図4 (a)に SiN_x チャネル光導波路に対する波長1.31 μm および1.55 μm での伝搬損失の計算結果を示す。波長1.31 μm においては、1 μm 程度の薄い SiO_2 下部クラッド層でも放射損失を1 dB/cm以下に抑制できることが明らかとなった。図4 (b)に示したように、曲率半径数 μm の曲げ導波路でも損失が十分小さいため、チップ上への光集積に適用可能である。

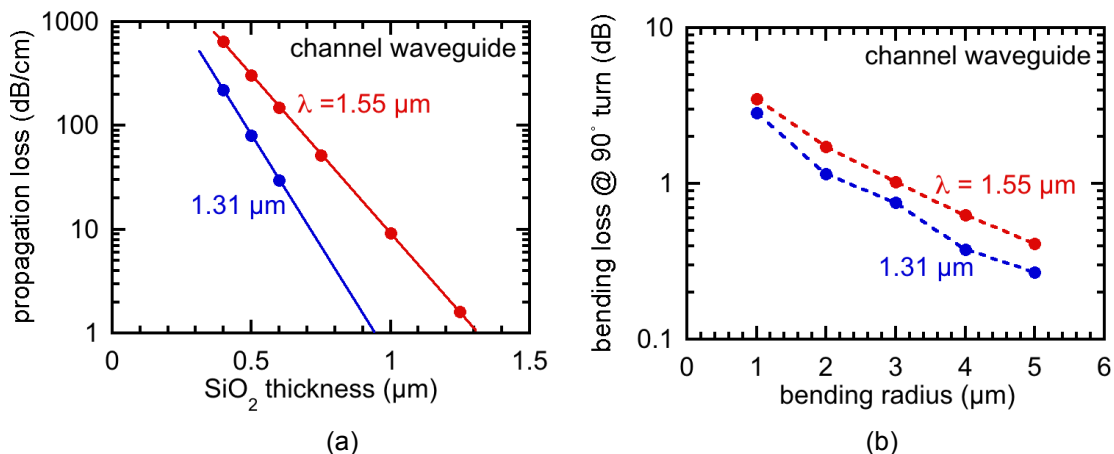


図4 SiN_x チャネル光導波路における波長1.31 μm および1.55 μm での伝搬損失の計算結果 : (a) SiO_2 クラッド層の膜厚に対する伝搬損失 および (b) 90度曲げ導波路の損失の曲げ半径依存性

波長1.31 μm で SiN_x チャネル光導波路が動作する計算結果に基づいて、デバイスの試作を行った。反応性スパッタ法を用いて、バルクSiウエハ上に SiO_2 を堆積し、さらに SiN_x を堆積した。電子線露光とドライエッチングにより SiN_x 光導波路（直線および曲げ）、多モード干渉を利用した1×2分岐導波路、リング光共振器（合分波素子）の加工を行った。作製したチップの光学顕微鏡像の例を図5に示す。想定した構造がほぼ作製できており、光透過測定を進めている。

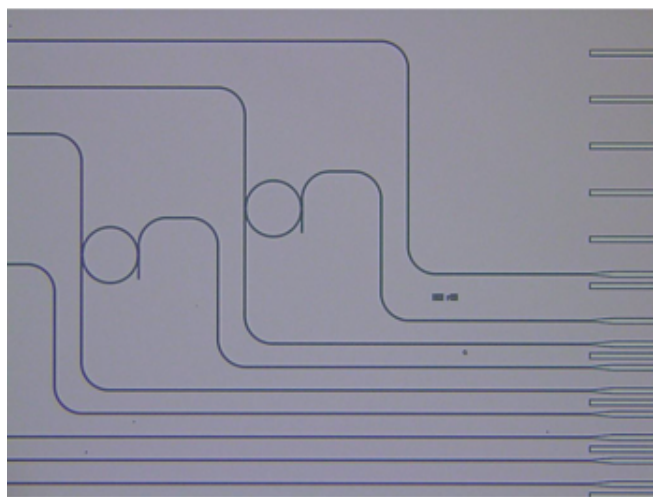


図5 作製したチップの光学顕微鏡像の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計1件)

- ① Motoki Yako, Naoki Higashitarumizu, and Yasuhiko Ishikawa, Impact of interface recombination on direct-gap photoluminescence from Ge epitaxial layers on Si, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, SBBE08 (2019). (査読有り) DOI: 10.7567/1347-4065/aafd96

〔学会発表〕 (計3件)

- ① Motoki Yako and Yasuhiko Ishikawa, Order-of-magnitude enhancement of direct-gap photoluminescence from patterned Ge epitaxial layers on Si induced by a wet chemical treatment, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo, September 11, 2018.

- ② Ryota Oyamada, Motoki Yako, and Yasuhiko Ishikawa, Thin SiO₂ under-cladding layer for SiN_x optical waveguides on bulk Si substrate, 2018 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2018), Kitakyushu, July 3, 2018.
- ③ Yasuhiko Ishikawa, Ge-based Photonic Devices on Si, Progress in Electromagnetics Research Symposium 2016 (PIERS 2016), Shanghai, August 9, 2016. (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://www.int.ee.tut.ac.jp/photon>

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし