

Si集積光デバイスの研究 - バルクSi上への光集積に向けたSiGe光導波路の検討 -

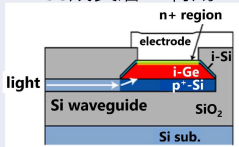
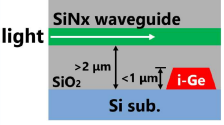
豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系

石川 靖彦 佐藤 真希斗 西依 輝 Jose A. Piedra-Lorenzana

E-mail: ishikawa@ee.tuf.ac.jp

1. 背景

・ Siフォトニクスにおけるプラットフォーム

ウェハ	SOI (Si on insulator) : 従来	バルクSi
ウェハコスト	数万円	数千円
導波路コア	Si : 屈折率 $n = 3.48$	SiN_x : $n = 2.00$
Ge ($n = 4.14$) とコアの屈折率差	比較的小さい : $\Delta n = 0.66$	大きい : $\Delta n = 2.14$
Ge受光器との集積	Si導波路上 Ge成長層の利用 	下地Si基板上へ 成長したGe層が必要 

・ バルクSiプラットフォームにおける課題: Ge受光器との集積

- 非晶質 SiN_x 上へ高品質なGe成長は不可
- Siウェハ上へエピタキシャル成長した単結晶Ge層
 SiN_x 光導波路との光結合困難 : Geと SiN_x の距離大(屈折率差も大)
 SiN_x 光導波路とSiウェハは厚い SiO_2 クラッド層により光学的に分離

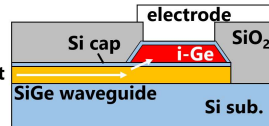
2. 目的

・ 単結晶SiGeをコアとするバルクSi上光導波路の可能性

- SiGe層はGeエピタキシャル層の下地基板としても機能: Ge受光器との集積
- 有限要素法(FEM)による電界強度(光強度)分布の計算
- 光閉じ込め係数: コアサイズ依存性
- 曲げ損失

・ 超高真空化学気相堆積(UHV-CVD)法によるSi上SiGeエピタキシャル成長

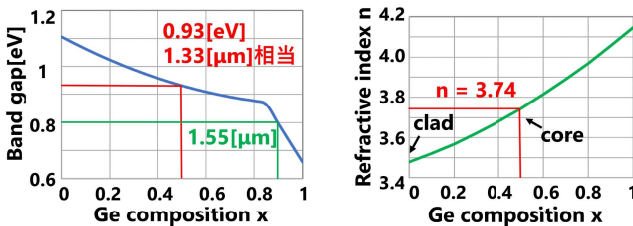
- Si上への直接成長: バッファ層なし
- SiGeエピタキシャル層の平坦性および組成性



3. 単結晶SiGeをコアとするバルクSi上光導波路の設計

・ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ の組成

- バンドギャップおよび屈折率に対するGe組成の影響



- 設計条件
波長 1.31 / 1.55 μm で透明 かつ $n > 3.48$ (高い光閉じ込め > 50%)

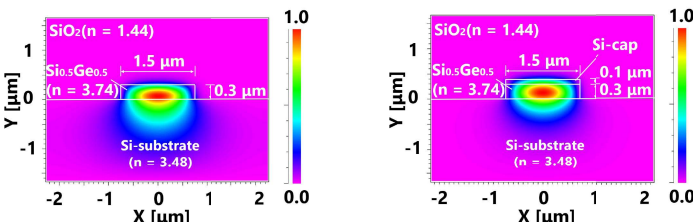
ターゲットの組成: $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$

・ FEMによる電界強度分布計算 — 例: 幅 1.5 μm × 高さ 0.3 μm

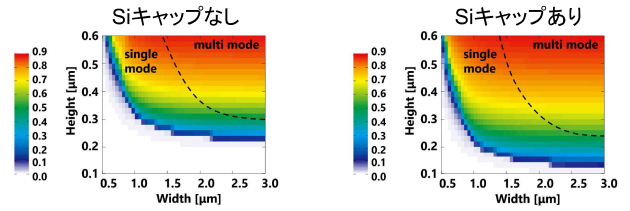
- 波長 1.55 μm : TE偏波
- Siキャップ層(膜厚0.1 μm)による電界強度分布引き上げ
- SiGeコアへの光閉じ込め向上

Siキャップなし: 光閉じ込め33%

Siキャップあり: 光閉じ込め58%

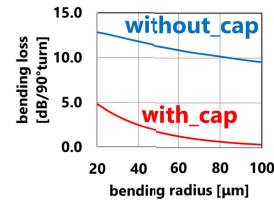


・ SiGeコアサイズの影響: モードと光閉じ込め係数



幅 1.5 μm × 高さ 0.3 μm : シングルモード伝搬

・ 曲げ損失(導波路の曲げ半径) — 幅 1.5 μm × 高さ 0.3 μm の場合



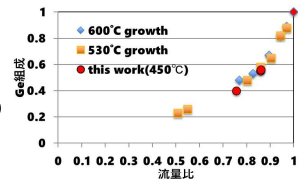
- Siキャップ層あり → 高い光閉じ込めと低い曲げ損失を両立

4. Si上 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 層のエピタキシャル成長

- 使用ガス: Ar希釈 9% GeH_4 および Ar希釈 10% Si_2H_6

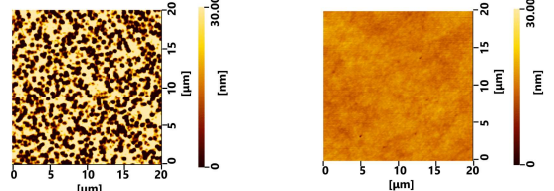
・ Ge組成の制御

- 流量比で制御可能
- 設定値(ターゲット50%)
 GeH_4 12.6 sccm (9% GeH_4 140.0 sccm)
 Si_2H_6 1.0 sccm (10% Si_2H_6 10.3 sccm)



・ Siウェハ上への直接成長: バッファ層なし

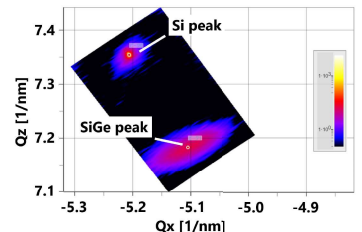
- 成長温度の影響: AFMIによる表面粗さ測定
 温度530°C RMS粗さ 25.7 nm 温度450°C RMS粗さ 1.3 nm



低温化が有効

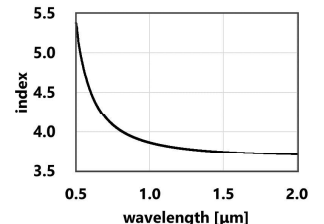
・ Ge組成

- X線回折: 逆格子空間マッピング
- 2 2 4 回折点
- Ge組成 56%: ほぼ想定通り
- 格子ひずみ -0.23% (圧縮)
 ほぼ格子緩和 (格子不整合 ~ 2.4%)



・ 屈折率

- 分光エリプソメトリ
- $n = 3.74$ @ 波長 1.55 μm
 ほぼ想定通り



5. まとめ

・ SiGeをコアとするバルクSi上光導波路の設計

- 屈折率3.74のSiGe
- バルクSiウェハ上のシングルモード光導波路として機能
- Siキャップ層により光閉じ込め向上

・ UHV-CVDによるSiGe層のエピタキシャル成長

- Si上への平坦なSiGe層(Ge組成 56%, $n = 3.74$)の直接成長を実現