

採 択 番 号        03701

研究開発課題名    B5G超低消費電力高効率ネットワーク構成に向けた高機能材料の研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発は、テラヘルツの開拓による B5G システムの広帯域化/大容量化と光ファイバ網の省電力化を目的とする。テラヘルツデバイス/光通信デバイス向けの新規相変化材料を探索し、低損失材料を見出す。その利用例として、集積型光スイッチに装荷し、低消費電力動作を実証する。探索した新規相変化材料は、そのテラヘルツ域の誘電特性と通信波長帯の光学特性を評価し、用途に応じた材料の使い分けを判断するためのデータとして解析し整理する。さらに、応用上重要な相変化材料の初期化工程やテラヘルツ光源・受光器デバイス向けに相変化材料の構造最適化ツールを開発する。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立研究開発法人産業技術総合研究所<代表研究者>  
学校法人慶應義塾  
国立大学法人東北大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 5 年度までの総額 104 百万円 (令和 5 年度 24 百万円)  
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 テラヘルツ帯機能材料及び自己保持型光スイッチ用相変化材料の研究開発

1-a) テラヘルツ帯光物性と相変化機構解明 (学校法人慶應義塾)

1-b) テラヘルツ帯及び光スイッチ用新規二元系相変化材料 (国立大学法人東北大学)

1-c) テラヘルツ特性・光通信波長特性評価と新規三元系相変化材料開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

研究開発項目 2 相変化材料を用いた省電力高密度光マトリックススイッチの研究開発

2-a) 相変化材料を装荷したシリコンフォトンクス光スイッチ製造技術 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

2-b) 相変化材料を用いたシリコンフォトンクス光スイッチの設計と評価 (学校法人慶應義塾)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	1	0
	外国出願	1	1
外部発表等	研究論文	6	4
	その他研究発表	60	28
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	0	0
	展示会	0	0
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1：テラヘルツ帯機能材料及び自己保持型光スイッチ用相変化材料の研究開発

1-a) テラヘルツ帯光物性と相変化機構解明 (学校法人慶應義塾)

(i) 相変化スイッチング安定化のための材料・光励起法の探索と最適化

GeSbTe 薄膜に対して、サブナノ秒光パルスによる 2 次元的に均一な熱的アモルファス化を試みた。フルエンスと試料走査速度を最適化し、膜厚 50 nm に対して目標を達成した。膜厚 150 nm に対しては、狭領域でのアモルファス化を実現した。GeSbTe 薄膜に対して、フェムト秒光パルスによる 2 次元的に均一な非熱的アモルファス化を試みた。フルエンス、パルス繰り返し周波数、試料走査速度を最適化し、膜厚 50 nm に対して目標を達成した。結晶多形相変化を示す MnTe に対して、フェムト秒パルス二光子励起による相変化を試みた。低フルエンス多数パルス励起による熱的相変化、高フルエンス単一パルス励起による非熱的相変化を実施し、ともに  $\beta$  相から  $\alpha$  相への変化を確認した。

(ii) 相変化材料のテラヘルツ帯物性の解明とシステムティック材料設計

MnTe の  $\alpha$  相と  $\beta$  相の誘電応答を第一原理計算から調べた。圧力と温度の関数として各相のギブス自由エネルギーを計算することにより、MnTe の  $\alpha$  相と  $\beta$  相の相対的安定性に対する外部ひずみの重要性を確認した。この計算では、圧力によるエンタルピーへの寄与だけでなく、フォノンによるエントロピー的な寄与もギブス自由エネルギーに取り込んでいる。CrMnTe のテラヘルツ帯応答が改善されたことを踏まえて、SPring-8 の放射光施設で硬 X 線光電子分光を用いて、MnTe への Cr の導入に伴う構造変化を調べた。

1-b) テラヘルツ帯及び光スイッチ用新規二元系相変化材料 (国立大学法人東北大学)

結晶多形相変化を生じる MnTe の光学特性を決定し、既存相変化材料に比して小さな消衰係数を有することを明らかにした。ドーブ型 MnTe において、同一結晶構造であっても価数変化により電気及び光学物性を制御できることを見出した。X-Te 化合物の相変化挙動や電気及び光学物性を明らかにした。光学物性の観点から、光スイッチに好適な材料は MnTe 系薄膜であるとの結論に至った。

1-c) テラヘルツ特性・光通信波長特性評価と新規三元系相変化材料開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

(i) 低損失三元系材料の探索

新規三元系相変化材料の探索方法を含めて検討、探索の結果 RuSbTe の開発に成功した。アモルファス GST を凌駕する高い耐熱性を有することを発見した。屈折率実部は変化せず虚部 (消衰係数) のみが変化する特異な光学特性を発見、光デバイス応用を検討した。

(ii) テラヘルツ帯における誘電特性や変調・受光デバイスへの展開

MnTe のテラヘルツ帯誘電応答を評価、導伝率は変化しているものの、テラヘルツ帯の誘電応答にはそれが現れないという興味深い現象を観測した。ドーブ型 Mn-Te のテラヘルツ帯透過率の特

異なる振る舞いを観測した。三元系材料の母材  $\text{Sb}_2\text{S}_3$  の可視・赤外波長における光学特性を評価した。テラヘルツ域誘電率のシミュレーション方法を検討した。相変化材料の電流瞬断効果に基づくテラヘルツ発生デバイスを検討した。

### (iii) 光通信波長帯における光学特性の評価

MnTe の屈折率を分光エリプソメトリで評価、光通信波長帯での  $n$ 、 $k$  を推定し、低損失であることを確認。Co/GeTe、Hf/GeTe 等新規三元系の複素屈折率を評価、光通信波長帯で GST 等の従来材料より低損失であることを発見した。研究開発項目 1-b) (東北大)、1-c) (i) (産総研) と連携して、新規二元系 XTe、新規三元系 XGeTe、XSbTe の屈折率評価を行った。シングルターゲットで成膜した MnTe の屈折率を評価、東北大の MnTe 膜に準ずる低損失性を確認した。

## 研究開発項目 2：相変化材料を用いた省電力高密度光マトリックススイッチの研究開発

### 2-a) 相変化材料を装荷したシリコンフォトニクス光スイッチ製造技術(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

シリコン光回路への装荷までの相変化材料の劣化を抑制するためシングルターゲットによる MnTe 成膜技術を開発した。MnTe の熱物性を評価解析し、シリコン光回路に備わる加熱機構で相変化を駆動できることを確認した。シリコンフォトニクスによる光スイッチデバイスを試作した。シリコンフォトニクスに相変化材料を装荷する工程を開発した。

### 2-b) 相変化材料を用いたシリコンフォトニクス光スイッチの設計と評価(学校法人慶應義塾)

シリコン光導波路上で GST、GSST および MnTe 等の相変化材料を装荷した場合について、相変化に伴う伝搬光の位相変化から必要な相変化材料薄膜の構造を明らかにした。クロスポイント型光駆動光スイッチの設計を行い、GST では一つ、GSST では二つのクロスポイントで光スイッチ動作に必要な位相変化が得られることを確認した。電気駆動型相変化光スイッチの相変化材料装荷部として、pin 加熱型、導波路加熱型、TiN ヒータ加熱型の伝熱シミュレーションを実施した。pin 加熱型が最も効率よく相変化材料を昇温できることを明らかにした。相変化材料装荷用シリコン光回路の設計を行い、また、試作した回路の損失波長特性を評価して、装荷部付加による過剰損失が 1.0~1.8 dB であることが分かった。シリコン光回路に相変化材料を装荷して光スイッチを作製するための相変化光スイッチプロセス用マスクの設計と試作を行った。

## (8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

〈計画〉相変化材料を成膜するためのスパッタターゲットについて、現在入手可能な製品では品質に課題があり、ターゲット製造メーカーと品質改善に向けた協議を続ける。相変化材料を装荷したシリコン光回路については、不揮発動作の実証実験を実施する。また、技術移転を目指して、相変化材料を装荷するサービスを請け負える事業者を探す。

〈展望〉相変化材料の CMOS への導入は、ストレージクラスメモリとして米国大手が一旦事業化し現在休止した形であるが、ストレージ以外にも、ニューロモーフィック応用に向けた In-memory Computing など、相変化材料の取り込みを想定した新たな潮流が起きている。本課題の新規相変化材料は、従来型材料に取って替わる可能性がある。将来的には CMOS 製造設備でシリコンフォトニクスとともに量産性の展望が開ける。