

令和 3 年度研究開発成果概要書

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 4 年度までの総額 80 百万円 (令和 3 年度 30 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開発 (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)

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)

(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	0	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	6	6
	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

(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

目標(年度別記載)：厚さ 20nm 以下の GST 薄膜について、熱的/非熱的に均一なアモルファス化。新規材料についても非熱的アモルファス化の試み。

実施内容：厚さ 20nm の $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜に対し、フェムト秒パルス照射による非熱的アモルファス化、サブナノ秒パルス照射による熱的アモルファス化を実施した。また、MnTe 薄膜に対してもフェムト秒パルス照射による構造相転移を試みた。

成果： $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜に対しては、テラヘルツ電磁波の波長に相当する 0.1mm 四方の均一なアモルファス化を実証した。MnTe 薄膜においては、単一フェムト秒パルス照射にとりもなう反射率変化を観測した。

(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

目標：モデル化とシミュレーションの開発環境を準備し、相変化材料の電子構造をモデル化。

実施内容：相変化材料の物理的・光学的特性を予想するために、計算クラスター・モデリング環境を整備した。

成果：光スイッチングに関連する MnTe のすべての相について、最低自由エネルギー構造まで緩和した相変化材料のモデルを ab-initio シミュレーション技術で開発、広い範囲の誘電応答・光特性を明らかにした。

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開発

目標：MnTe 系薄膜をスパッタリング成膜により作製し、その光学物性や電気物性を定量的に評価し、光スイッチ用材料としての課題を炙り出す。

実施内容：本年度は、①スパッタリング成膜条件依存性、②各相の光学物性評価、③各相の電気物性評価および④多形変化挙動について実験を行った。

成果：①スパッタ Ar 流量により相状態や配向性が変化する、② $\beta \rightarrow \alpha$ 変化により光学物性が大きく変化する、③両相共に p 型伝導を示し多形変化により電気物性が大きく変化する、④界面応力の存在により $\beta \rightarrow \alpha$ 多形変化を制御できる、こと等が明らかとなった。

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

(i) 低損失三元テルライド相変化材料の開発

目標：三元テルライドについて、成膜条件の確立と、成膜ままアモルファス状態において、通信波長帯で消衰係数 k が 0.5 以下となる組成を 3 種類見出す。その中で、熱処理結晶化後も 0.5 以下を維持している組成を 1 種類見つける。

実施内容：Co-Ge-Te, Hf-Ge-Te, Nb-Sb-Te について成膜条件を調べた。今回作製した膜については、消衰係数を評価した。第一原理計算に基づくシミュレーションの手法を検討した。

成果：Co-Ge-Te, Hf-Ge-Te, Nb-Sb-Te について、成膜条件を確立し、組成の異なる試料の作り分けに成功した。熱処理後の結晶相が組成に応じて異なることが分かった。消衰係数が予想より大きいことが分かった。シミュレーションにおいて、ハイブリッド汎関数を用いることで光学定数を高精度に予測することが可能であるとの見通しを得た。

(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

目標：(i) で見出した材料の 100GHz-1THz 周波数域における誘電特性を評価。材料の電子的特性(バンド構造など)や電気的特性(キャリア濃度など)とテラヘルツの受光特性の相関を明らかにする。

実施内容：テラヘルツ波時間領域分光法による材料評価を実施するための測定系を検討した。

成果：光学システム内の湿度を低く保つための専用パーシボックスを導入し、大型の除湿機付きコンプレッサを導入することで、安定かつ高速の測定が実施できる評価測定系を構築した。Ge-Sb-Te など既存の相変化材料の評価を終え、新材料の検証を行う体制を整えた。

(iii) 光学特性評価

目標：MnTeの光学特性の評価。シミュレーションに必要な熱物性特性の測定を開始する。また、三元系テルライド相変化材料の光学特性を可視から赤外領域で評価。

実施内容：MnTe薄膜について、分光エリプソメトリー測定を行い、そのフィッティングを試みた。

成果： α 相、 β 相のMnTeについて、光学定数 n, k を決定した。特に、 α 相で、通信波長帯において k が十分に小さいことを発見した。

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

目標：SOI層にヒータ機能を形成する製造工程を検討、最適なイオン注入条件を決定。シリコン光回路チップ上に相変化材料の装荷サイトを形成するため、エリア選択的に上部酸化膜を除去する工程を開発。相変化材料の装荷に最適な方法を見出す。

実施内容：SOI層の高濃度ドーパ部のヒータとしての適用可否を検討した。装荷サイト形成の工程を検討した。成膜後、装荷に至るまでのMnTeの劣化状況を調べるため、MnTe(1:1)のスパッタ成膜を試み、結晶構造解析、組成分析、熱分析を実施した。

成果：SOI層へのイオン最適注入条件として、 $5e15(\text{cm}^{-2})$ を得た。上部酸化膜除去工程に用いるフォトリソマスクを設計作製した。各種分析の結果、MnTe(1:1)シングルターゲットでは成膜直後にアモルファス相が形成されること、アニールを経て形成される結晶相が相分離していること、成膜中に酸化が進行していることが分かった。

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

目標：MnTeの相転移に伴う屈折率変化を用いた光スイッチの光学的な構造について、光学的シミュレーションを行い、最適化構造を明らかにする。また、様々な形状の光スイッチの部分構造を設計する。

実施内容：GST, GSST およびMnTeをシリコン光導波路上に装荷した場合の材料寸法と位相変化、損失の関係を検討した。また、熱伝導シミュレーションにより、適切なヒータ構造を検討した。

成果：MnTeの α 相と β 相の転移を利用すると仮定する場合、50nmの膜厚に対して約160nmの長さで位相の π シフトが達成できることが分かった。また、0.2Wの電力を消費する、長さ50nmのTiNヒータに挟まれたシリコン導波路近傍の温度を1100K以上に50ms以下で昇温できることを明らかにした。

(8) 今後の研究開発計画

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

(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

相変化材料を用いた光波・電磁波制御デバイスのスイッチング、チューニングに不可欠なアモルファス化過程を大面積かつ均一に実現するため、近赤外域デバイスを想定し材料探索と励起波長の最適化を行う。サブナノ秒/フェムト秒パルスによるGeSbTe、XGeTe、XSbTe薄膜の大面積均一アモルファス化を実施する。

(ii) 相変化材料のテラヘルツ帯物性の解明

相変化材料の電子構造をモデル化し、動的なモデリングのプロセスを構成する。電子的・構造的情報は、SPRING-8での新たな専用測定によって補完する。また、プロセスパラメータや材料組成の最適化を実施する。大面積スイッチングのための相変化材料の特性と、テラヘルツ領域での相変化材料の電子的挙動の最適化を実施する。

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開発

前年度の知見を基に、元素ドープ型 MnTe 薄膜や X-Te (X: 遷移金属等) 二元系相変化薄膜をスパッタリング成膜により作製し、光学物性を評価すると共に、相変化による物性変化 (反射率、屈折率、電気物性など) を調査し、テラヘルツ帯及び光スイッチに適した相変化材料を創成する。

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

(i) 低損失三元テルライド相変化材料の開発

X-Ge-Te および X-Sb-Te (X: 遷移金属) 三元テルライドについて、引き続き、理論計算による効率的材料探索と、実際の成膜条件の確立を目指す。成膜ままアモルファス状態において、通信波長帯である 1500-1600nm における消衰係数 k が 0.5 以下となる組成を 3 種類見出す。また、その中で、熱処理結晶化後も 0.5 以下を維持している組成を 1 種類見つける。今後は実験・シミュレーション両方の観点から材料組成制御や新たな添加元素も検討する。

(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

低消衰係数三元材料の 100GHz-1THz 周波数域における誘電特性を評価する。通信波長帯で低消衰係数を示す材料におけるテラヘルツ特性を明らかにする。ピコ秒相変化時の急峻抵抗変化を利用したテラヘルツ発生デバイスの試作を行う。

(iii) 光学特性評価

分光エリプソメトリーを用いて、MnTe を含む二元系、三元系相変化材料の光学特性を可視から赤外領域で測定し、通信波長帯での評価を完了する。

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

装荷に至るまでの MnTe の劣化を抑制するため、成膜直後に純粋な β 相を得る条件を探る。SOI 層にヒータ機能を有するシリコン光回路を試作する。このシリコン光回路に、相変化材料を装荷する。

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

MnTe の相転移に伴う屈折率変化を用いた光スイッチの材料加熱構造と光学的な構造について、それぞれ、熱的及び光学的シミュレーションを行い、最適化構造を明らかにする。また、様々な形状の光スイッチを設計・試作して部分構造を評価する。製造状況に合わせて、順次集積化された構造の光スイッチの特性評価を行う。