

---

# トポロジカル転移制御によるオプトエレクトロニクスデバイス開発

## Optoelectronic Device Based on Topological Phase Transition

---

H28助自72

代表研究者	牧野 孝太郎	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門	研究員
	<i>Kotaro Makino</i>	<i>Researcher, Nanoelectronics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology</i>	
共同研究者	齊藤 雄太	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門	研究員
	<i>Yuta Saito</i>	<i>Researcher, Nanoelectronics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology</i>	
共同研究者	中野 隆志	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門	副研究部門長
	<i>Takashi Nakano</i>	<i>Deputy Director, Nanoelectronics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology</i>	
共同研究者	富永 淳二	産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門	首席研究員
	<i>Junji Tominaga</i>	<i>Prime Senior Researcher, Nanoelectronics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology</i>	

In this study, we proposed new class of terahertz (THz) devices that is based on topological nature of multi-layered phase change memory material. Phase change technology have been used for optical and electrical data storage. Recently multi-layered Ge-Sb-Te phase change material GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> is attracting attention due to its good phase change performance and topological property caused by layered structure of topological insulator and normal insulator. We carried out two types of THz measurement that are time-domain spectroscopy (TDS) and emission spectroscopy for conventional Ge-Sb-Te Alloy and GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>. It was found that the alloy is basically transparent for THz pulse yet GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> absorbs. Furthermore, it was revealed that, by means of femtosecond laser excitation, GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> emits THz wave, but the alloy does not. The difference in the results between the alloy and GeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> can be attributed to the difference in the electronic structure induced by topological property. Then, we fabricated antenna-coupled THz device by photolithography. We employed bowtie type antenna which can also be used as electrodes. In addition, we fabricated “slot” and “stripe” type devices for sub-THz radiation. At the same time, we have developed opt-electro device test system which enables to mixed-mode characterization by both optical and electrical measurement. By means of this system, we can also induce phase transition by electrical pulse or optical heating. In terms of characterization, we can measure electrical resistance change as well as refractivity or transmittance for visible light, IR, and THz.

## 研究目的

相変化材料は記録材料として光ディスクや電気記録材料として用いられている。その相変化は光や電気により制御可能であるとともに、相変化によって光や電気に対して異なる応答を示すため、様々なオプトエレクトロニクス材料として注目を集めている。近年、超格子型相変化材料は電気記録材料として優れた特性を示すことから注目を集めているが、より最近では超格子構造によりトポロジカル材料としての特性を示すことが明らかになりつつある。従って、この材料が持つ相変化特性とトポロジカル特性を組み合わせることで実現される新しい機能を持った材料及びデバイスの開発が重要な意味を持つと見込まれる。特に、相変化によりトポロジカル特性のスイッチングが可能となれば、制御が困難であったトポロジカル絶縁体応用研究において大きな意義を持つ。本研究では特にテラヘルツ波の変調デバイスをターゲットに研究を行った。テラヘルツ波は電磁波のうち電波と光の中間に位置するテラヘルツ帯の周波数を持ち、ミリエレクトロンボルト程度の低いエネルギーとマイクロメートルオーダーの波長を有する。応用範囲としては次世代の高速大容量通信、メディカル・バイオ・セキュリティ分野でのイメージングなどが挙げられ、様々な基礎的・応用的研究が展開されてきた。しかし、従来の光学技術や電波技術ではテラヘルツ波に対する操作が不可能であり、新たなオプトエレクトロニクス技術が求められている。我々はこれまで超格子型相変化材料を用いたテラヘルツ波の検出に成功しており、テラヘルツ波の発生に関しても研究を行っている。トポロジカル絶縁体はディラックコーンと呼ばれる特殊なバンド構造を融合、ディラック点においてバンドギャップが閉じているためテラヘルツ波を吸収

することが可能である。相変化特性との組み合わせにより、トポロジカル転移が可能となれば、バンドギャップの開閉を誘起することでテラヘルツ波に対しての吸収が失われ、透明となる。この特性を利用し、トポロジカル絶縁体の発生・変調・検出デバイスの実現が可能となると見込まれる。本研究では実際にデバイスを作製し、上述のような式デバイスの可能性を模索することを目的として行われた。

## 概要

Ge-Sb-Te相変化材料は長年に渡り書き換え可能型の光ディスクや、より最近では電気記録メモリとして用いられている。可逆のアモルファス結晶の相変化を利用して記録を実現しており、この相変化はレーザーや電気パルスによる加熱で制御が可能である。近年、この材料を超格子状に積み重ねることにより記録デバイス特性を向上させられることに加え、トポロジカル絶縁体としての機能を持つ可能性が明らかになった。超格子GSTと称されるこの材料では結晶-結晶相変化により記録を行っているため、原子の移動が少なく、消費電力を低下させられることから商品化に向けた研究開発が盛んに行われている。さらに、トポロジカル絶縁体と呼ばれる特殊な量子状態が実現れることが明らかとなりつつある。トポロジカル絶縁体とは、内部は絶縁体であるにもかかわらず、その表面にディラックコーンと呼ばれる特殊な電子構造を持つ物質である。従って、表面でのみバンドギャップが閉じており、テラヘルツ波のようなバンドギャップ以下の小さいエネルギーの光子とも相互作用することが可能である。本研究では相変化の機能とトポロジカル特性を併せ持つ超格子相変化材料に着目し、トポロジカル相転移を含めた新奇のテラヘルツ波デバイスの実現を目指した研究を行った。実

験ではテラヘルツ波分光による材料のテラヘルツ波に対する応答を評価し、また実際にデバイスの作製と評価システムの開発を行った。

サンプルには層数の異なるGeTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>超格子GSTを用いた。また、比較のため一般的によく用いられるGST合金に対しても測定を行った。まずテラヘルツ波時間領域分光により、テラヘルツ波を吸収することが可能かどうかを評価した。その結果、GST合金は透明であるのに対して、超格子GSTは層数に依存して吸収することが明らかとなった。一方、テラヘルツ波放出分光の結果では、超格子GSTからのテラヘルツ波放出が確認されたが、GST合金はテラヘルツ波をほぼ放出しないことが確かめられた。これらの結果を総合すると、GST合金はバンドギャップが空いており、キャリア数も少なく、テラヘルツにはに対して応答を示さないが、一方で、超格子GSTはその原子配置によりトポロジカル性に関連すると考えられるバンド構造を有しており、エネルギーの低いテラヘルツ波を吸収するとともに、表面状態に起因して光パルス励起によるテラヘルツ波の放出を示すことが明らかとなった。さらに、テラヘルツ波の吸収率は層数により変化することが分かった。また、単純に膜厚に依存しないことから、バルクにおける特性ではなく、界面のトポロジカル状態の数に依存している可能性が確かめられた。この他、p型とn型のトポロジカル絶縁体およびそれらを接合させたサンプルを作り、テラヘルツ波放出分光を行った。その結果、p型とn型において反転した信号を得たが、これは表面におけるバンドベンディングの方向で説明される。しかし、接合サンプルでは全く異なる波形が観測された。この原因は現在考察中であり、トポロジカル特性との関連は明らかになっていない。

デバイスの作製に関しては、まず全てのデバ

イスを設計するにあたり、FDTD法と呼ばれる電場シミュレーションを実施し、最適なデバイス形状を決定している。その後、これまで用いてきたテラヘルツ波検出用のデバイスを改良したものなどを作製した。保護層のついた超格子GSTを製膜し、その後、リソグラフィにより電極を兼ねたボウタイタイプのアンテナをパターンニングして、ドライエッチングにより特定の波長に対応したアレイ状のデバイスを作製した。また、サブテラヘルツ帯に対応するストライプ状に金属を配置したものと、スロット状に配置したものを作製している。評価装置には相変化メモリ測定システムを改良し、作製した。テラヘルツ波だけではなく可視光、赤外線を照射し、その反射率や透過率を測定すると同時に、電気的な計測を行える仕様となっている。さらに、電気パルスに印加に伴う相変化が及ぼす影響を、電気的な測定だけではなく、光学的な測定により評価することも可能である。これらのデバイスに関しては基本的な特性評価を行った段階である。

－以下割愛－