

氏名	杉山 岳
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第 9363 号
学位授与年月日	令和2年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	

Chalcogenide Plasmonic Devices Employing Photo- and Electrical- Induced Phase Transition
(光および電気誘起相転移を用いたカルコゲナイドプラズモニックデバイス)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	神田 晶申
副査	筑波大学教授	博士(理学)	岡田 晋
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	池沢 道男
副査	筑波大学講師	博士(理学)	久保 敦
副査	産業技術総合研究所 研究部門長	博士(工学)	中野 隆志

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、カルコゲナイド超格子を用いたプラズモニックデバイスの設計・製作、ならびに、デバイスへの光パルス照射、および電圧パルス印加による相転移動作について論じたものである。併せて、カルコゲナイド超格子の特徴である、高屈折率・高消衰係数の複素誘電材料から構成されるスラブ型導波路の導波モード解析により導出される、新規な高空間閉じ込め伝搬モードについて記述している。

第1章では、本論文の導入として、微小領域への電磁場閉じ込めを可能とする表面プラズモンの利用により光デバイスが小型化され、より大容量のデータ通信帯域が求められる現代の要求に応え得ること、また、プラズモニックデバイスの具体的な例として「金属-酸化物-半導体」型、「金属-絶縁体-金属」型、相変化材料を利用するもの、等のプラズモニック変調素子の報告例があることを述べている。また、カルコゲナイド相変化材料は結晶-アモルファス相転移により抵抗値や光学定数が大きく変化する材料であり、代表例である $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 合金は相変化メモリや光ディスクの記録層として広く用いられていること、また、近年開発された $[(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_1]_n$ 超格子(GST-SL)により低消費エネルギー、かつ高速動作するデバイスが可能になったことを述べている。その上で、GST-SLの主要な応用例である相変化メモリ(iPCM)におけるGST-SLセルの大きさが約100nm四方に過ぎないのに対し、プラズモニック変調デバイスに必要なGST-SLセルはミクロメートル四方とはるかに大きく、このような大サイズのセルにおいて繰返し相転移動作を実現した報告はない事を指摘している。本論文では、プラズモン導波路に埋め込んだGST-SLの電氣的に駆動される繰返し相転移について研究し、併せて、光パルス誘起による相転移、および、GST-SL

のような複素誘電率の材料の多層膜構造における導波モードの数値解析についても記述することを述べている。

第 2 章では、研究背景として、カルコゲナイド材料である $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 合金、および、 $[(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_n$ 超格子の相転移特性、ならびに、 $[(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_n$ 超格子の光学特性について述べ、加えて、表面プラズモンポラリトンの物理的性質や、時間領域差分 (FDTD) 法の基礎的知識について記述している。

第 3 章では、GST-SL 多層膜を用いて作製した、光パルス照射により相転移する単スリット型光導波デバイスの透過率変調について記述している。幅 $0.7\text{--}2\mu\text{m}$ のスリットを形成した $\text{Au}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{GST-SL}$ 積層膜型導波路デバイスを作製し、パルスレーザー光照射によって誘起される GST-SL の相転移によって生じる波長 1550 nm 光の透過強度変調について述べている。GST-SL を高抵抗 (RESET) 相から低抵抗 (SET) 相に相転移させることで、最大 7% の変調度を観測している。FDTD シミュレーションでスリット構造部の電磁場分布を解析した結果、SET 化に伴う透過率の減少が GST-SL の消衰係数の低下に伴うスリット内部へのモード閉じ込め性能の低減に起因することを見出している。

第 4 章では、電圧パルス印加により相転移を誘起する、GST-SL を包埋したハイブリッドプラズモニック導波路型の変調器の設計、試料作製、および相転移動作の評価について述べている。通信帯波長 1550 nm の光に対しサブ波長スケール厚さの導波コア層を有するプラズモニック変調デバイスを構築するにあたり、コア層に酸化インジウムスズ (ITO) を用いた $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{ITO}/\text{Au}$ 積層型ハイブリッド表面プラズモン導波路を基本構造とし、変調部となる GST-SL セルを Si_3N_4 層内に包埋し ITO パッチで覆った構造を提案している。表面プラズモン導波モードの空間的な電磁場分布形状、および、導波に伴う振幅減衰の様子を FDTD シミュレーションにより計算し、電磁場エネルギーの大部分がコア層内部に閉じ込められ大気側への染み出しが抑制されること、クラッド層である Si_3N_4 内に埋め込まれた GST-SL の相転移に伴う消光比が最大化されること、の 2 点を満足する最適なクラッド層・コア層の膜厚を決定し、デバイスの設計を行っている。さらに、設計を基にデバイスの作製プロセスの検討を行い、マスクレス光リソグラフィ法や反応性イオンエッチング、物理プラズマエッチング等を駆使したプロセスを考案し、 Si_3N_4 クラッド層に厚さ 80nm 、伝搬方向の長さ $5\mu\text{m}$ の GST-SL セルを包埋したデバイスを作製している。作製したデバイスにおける GST-SL の相転移動作を評価するため、 $0.5\text{--}5.0\text{ V}$ の範囲で電圧が段階的に上昇する電圧パルス列 (パルス時間幅: 500 ns 、パルス繰り返しサイクル: 1 kHz) を印加し、各パルスの電圧立ち下がり後の抵抗値を測定している。その結果、典型的な計測例において、デバイスの抵抗値は測定開始時に RESET 相 ($>1\text{M}\Omega$)、印加電圧 $\sim 1.9\text{ V}$ で SET 相 ($\sim 10\text{ k}\Omega$) に相転移、印加電圧 $\sim 3.2\text{ V}$ で再度 RESET 相 ($>1\text{ M}\Omega$) に相転移する、繰返し RESET-SET-RESET 相転移動作を測定したことを報告している。

第 5 章では、複素誘電体積層構造における電磁場モード解析の結果得られた、新たな導波モードについて述べている。近赤外光に対する GST-SL の複素屈折率は、特に RESET 相で実部 (屈折率)、虚部 (消衰係数) とも大きな値を持つことから、RESET 相の GST-SL に入射した光は搬送波電場がごく少数回振動するだけで急速に減衰することに着眼し、GST-SL 内部の波数に対し、従来行われる方法である誘電体を光学的に透明とみなし実数近似する手法は不適切であり、複素波数として取り扱う必要性を指摘している。このため、本論文では、GST-SL 中に微細なスリット構造を形成し導波路を構築した場合の構造モデルに相当する、「複素誘電体-誘電体-複素誘電体」からなる二次元スラブ型導波路構造における導波モードを吟味するため、従来の電磁場解析では実数近似されてきた伝搬定数 (β) を複素数に拡張し、

伝搬電磁場の解析を行った結果について記述している。幅 $2T$ の誘電体 (大気、 $n_1 = 1$) を半無限厚の複素誘電体 (GST-SL、 n_2) で挟んだ平面型積層構造に対し、TM および TE 偏光それぞれの固有モード方程式の導出を行い、さらに幅 $2T$ の範囲が光波長に対しサブ波長からマルチ波長の場合に対し TM、TE 偏光のモード固有解を数値解法によって求め、モードの空間分布の特徴を検討している。複素誘電体に波長 $1.55 \mu\text{m}$ 光に対する RESET 相 GST-SL の複素屈折率をあてはめた場合、TE 偏光では $2T$ が半波長以下となる微小領域で固有解を持たないカットオフを呈するのに対し、TM 偏光ではカットオフが生じず、サブ波長幅の誘電体領域に電磁場が強く束縛され、GST-SL 内で急速に振幅が減衰する導波モードを有することを明らかにしている。またこれに対し、SET 相の GST-SL の複素屈折率の場合、電磁場は誘電体領域には束縛されず、GST-SL 内部へ浸透することを併せて示している。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、近年研究が急速に進む、相変化材料を素子の能動的動作に適用する不揮発性 (non-volatile) 光デバイス、中でもデバイスの小型化、高集積化が見込まれるプラズモニックデバイスの実現を目的とし、近赤外光領域で動作する変調デバイスの設計、作製、および評価を行ったものである。光学的変調デバイスでは、光-物質相互作用の弱さのため、相変化メモリデバイス等の電子デバイスに較べ信号変調により大きな相互作用長を要し、大面積の相転移駆動が必要となる問題に対し、 $[(\text{GeTe})_2/(\text{Sb}_2\text{Te}_3)]_n$ 超格子の利用により、実用デバイスで必須となる電圧パルス印加による繰返し相転移を実現した成果は、高く評価できる。また、複素誘電体の積層構造の導波モード解析によって見出した、金属-絶縁体-金属構造における表面プラズモンモードに類似する、強い閉じ込めを伴った導波モードの提案は、今までに報告のない新規な成果であり高く評価できる。

[最終試験結果]

令和2年2月20日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

[結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士 (理学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。