

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420297

研究課題名(和文) 中赤外～テラヘルツ帯用超高性能偏光子の開発とその技術応用に関する研究

研究課題名(英文) Research on polarizers with high performance in mid-infrared and terahertz regions

研究代表者

白石 和男 (SHIRAIISHI, KAZUO)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：90134056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：金属薄膜サブ波長格子構造偏光子に用いる金属として、銀が中赤外およびテラヘルツ帯の双方において有効であることを明らかにした。テラヘルツ帯においては、三角断面構造を持つ銀薄膜を樹脂基板上に形成し、0.5-2.2THzにおいて45dB以上のTE波損失を、また0.5-3THzにおいて0.75dB以下のTM波損失を得ることができた。中赤外域用には裏面に反射防止膜を設けたシリコン基板を用い、断面が三角形の二重構造銀薄膜サブ波長格子を作製した。波長16-21 μm においてTE波損失27dB以上、波長19 μm 付近でTM波損失3.5dBを得た。これらの特性は、従来の偏光子では達成できなかった高い性能である。

研究成果の概要(英文)：Silver is proposed as a useful metal for thin metal-film subwavelength-grating polarizers in both the terahertz and mid-infrared regions. A triangular Ag-film grating for a terahertz-region polarizer fabricated on a resin substrate showed measured TE-wave losses of higher than 45 dB in the frequency range of 0.5-2.2 THz, while TM-wave losses were lower than 0.75 dB in the range of 0.5-3.0THz. A triangular double Ag-film grating structure on a thin silicon substrate with an anti-reflection layer on its reverse side was fabricated for the polarizer in the mid-infrared region. Measured TE-wave losses were higher than 27 dB in the wavelength range of 16-21 μm , while the minimum TM-wave loss was 3.5 dB at around the wavelength of 19 μm . Silver films are confirmed to be promising candidates for fabricating high-performance polarizers in the terahertz and mid-infrared regions.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：偏光子 サブ波長格子 テラヘルツ 中赤外

1. 研究開始当初の背景

偏光は光の最も重要な性質の一つであり、特定の偏光を選択する偏光子は古くから研究されてきた。光通信、医用光学、ディスプレイ、光記録等々、光技術の応用範囲が拡大された現在では、偏光子の性能(消光比と挿入損失)・形状・適用波長範囲は、高度化・薄型化・広帯域化が要請されている。

光通信用近赤外波長(0.85~1.55 μm)帯を除き、50dB以上の消光比、0.5dB以下の挿入損失を満たす性能を有し、かつ薄型・堅牢な偏光子は無い。特に、センシングや材料研究で重要な中赤外やTHz帯では、金属細線を並べた古典的なワイヤグリッド型しか存在しなかった。この方式は消光比が低く、挿入損失が大きく、偏光子利用機器の感度や分解能の制限要因になっていた。

2. 研究の目的

(1) 中赤外域(波長10~20 μm)とTHz帯(0.5~3THz)においてTE波損失50dB以上、TM波損失0.5dB以下の特性を達成する。

(2) 量産性に優れた作製方法を確立する。中赤外用はSi結晶基板の異方性エッチング、THz帯用は金型による樹脂のインプリント技術を適用する。

3. 研究の方法

(1) 最適な金属材料を見出す。これまで中赤外域用はAlを、THz用はAuを金属サブ波長格子の材料としてきた。この前提を見直し、最適な金属種を見出して、偏光子特性の目標値達成を目指す。

(2) 光学特性の波長依存性を改善する。格子形状のアスペクト比を大きくして光学特性を向上させる。

(3) 実用化を念頭に生産性に優れ、経時変化のない偏光子の作製方法を確立する。

4. 研究成果

(1) テラヘルツ帯用: サブ波長格子構造偏光子用の金属種としては、複素屈折率の絶

対値が大きいことが望ましい。過去の文献より、AuとAgの0.5~3THzにおける複素屈折率を比較した結果、AuよりAgの方が複素屈折率の絶対値が大きく、Agを金属層に用いると高特性が期待できることが分かった。

金属薄膜の光学特性は成膜条件に大きく依存するため、実際に薄膜を作製し、その透過損失を測定して複素屈折率の絶対値を評価した。高周波スパッタ法により、膜厚20nmの金属薄膜を作製し、その透過損失を測定した。金属膜が十分薄い場合、その透過損失 α は主に金属表面での反射損失に依存し、

$$\alpha \cong 10 \log \{(n^2 + \kappa^2)/16\} \text{ [dB]}$$

と近似できることを導いた。これより、作製

した金属薄膜の中で複素屈折率の絶対値が最大であったのはAgであることが分かった。金型(下館精機(株)製)を用いたインプリント法により、Tsurupica®樹脂基板に周期25μm、先端角25°の三角断面形状の1次元格子を形成した。格子面に高周波スパッタ法を用いてAg薄膜を25nm成膜し、さらにその上に20nm厚のa-Si膜を形成して保護層とした。作製した偏光子の外観を図1に示す。

特性測定には時間領域分光法(TDS)を用いた。図2はTE波およびTM波に対する透過損失の周波数依存性測定結果である。周波数0.5~2.2THzの広い範囲でTE波損失45dB以上、TM波損失0.75dB以下の良好な特性が得られた。1.5THz以下ではTE波損失約50dB、TM波損失0.5dB以下を得た。高周波域で消光比が低下している原因は測定系のダイナミックレンジの制限による。この結果は金属層にAuを用いた場合と同等の特性であり、

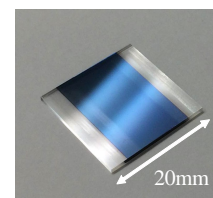


図1. 作製したテラヘルツ帯用偏光子

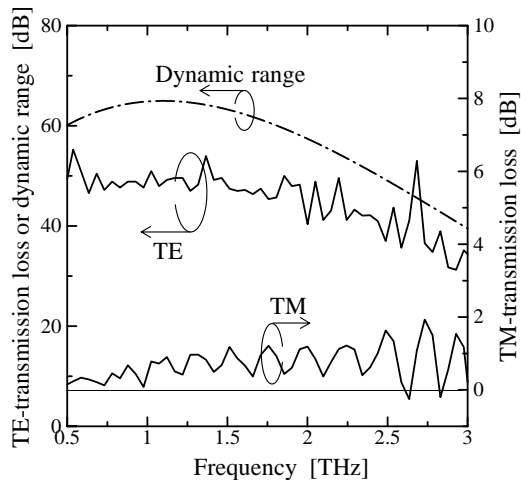


図2．作製したテラヘルツ帯用偏光子の光学特性

安価な Ag でも性能の良い偏光子を作製できることを明らかにした。また、耐環境試験も優れていることを確認した。以上のように当初の目標をほぼ達成した。

(2) 中赤外域用： 従来金属層として使用してきた Al と、新たに検討した Ag の中赤外域での複素屈折率を測定した。金属膜は RF スパッタで成膜した。測定には分光エリプソメータ (IR-VASE, J. A. Woollam Co. Inc.) を用いた。その結果、屈折率の実部は Al の方が大きい虚部は Ag の方が大きく、その絶対値は Ag の方が大きかった。一般に金属薄膜サブ波長格子構造偏光子の特性は、複素屈折率の絶対値が大きい金属を用いる方が高性能である。これらの結果より、Ag を金属層として用いる方が高い偏光特性を期待できることが判明した。

厚さ 0.3mm の Si 基板の両面に周期 2.3 μm 、高さ 1.6 μm の三角波形状のサブ波長格子を形成した。基板片面に 1 層あたりの厚さ 10nm の金属 (Ag) 層と厚さ 1.0 μm の中間層 (a-Si) を RF スパッタにより成膜した。2 層目の Ag 層の表面には保護層として 50nm 厚の a-Si 膜を形成した。基板裏面の格子上に波長 20 μm において最大の反射低減効果が得られるように、厚さ 2.3 μm の ZnS 層を RF スパッタで成

膜した。格子構造は、それ自体に反射低減効果があるほか、ZnS 層の剥がれを防止する効果もある。この格子構造による剥がれ防止効果は、付着力の弱い Ag 多層膜を形成する偏光子面でも有効に働いた。作製した偏光子の外観写真を図 3 に示す。

光学特性測定結果を図 4 に示す。波長 18 μm 以上で消光比 (TE 波透過損失) は 25dB 程度である。波長 20 μm 以上では測定系の FT-IR で制限される値となり、高い消光比を有していることが分かった。挿入損失 (TM 波透過損失) は、波長 17~25 μm で 4dB 以下であり、波長 20 μm で最低値 3.5dB を得た。波長 20 μm 付近において ZnS 成膜後の挿入損失が 0.7dB 程度低減しており、反射低減効果を確認することができた。

以上のように当初目標とした特性の数値には至らなかったが、既存の中赤外用偏光子の特性を大きく上回る性能を有する偏光子を実現した。

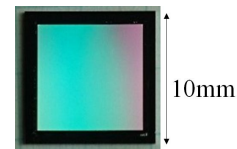


図3．作製した中赤外用偏光子

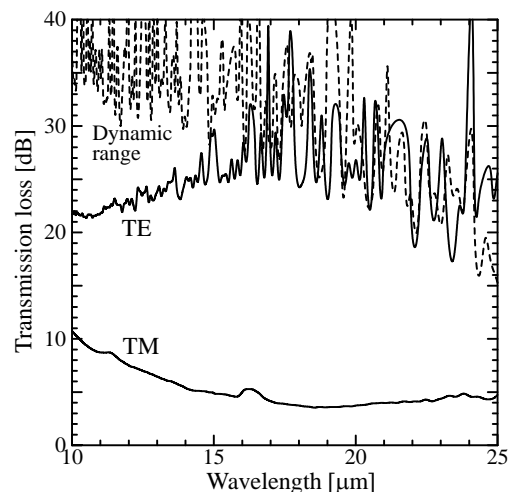


図4．作製した中赤外用偏光子の光学特性

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

K. Shiraishi and K. Muraki, "A metal-film subwavelength-grating

polarizer with low insertion losses and high extinction ratios in the terahertz region,” Optics Express, 査読有, vol. 23, pp. 16676-16681, 2015, <https://doi.org/10.1364/OE.23.016676>
K. Shiraishi, S. Higuchi, K. Muraki, and H. Yoda, ” Silver-film subwavelength gratings for polarizers in the terahertz and mid-infrared regions,” Optics Express, 査読有, vol. 24, pp. 20177-20186, 2016, <https://doi.org/10.1364/OE.24.020177>

[学会発表](計8件)

K. Shiraishi, S. Higuchi, H. Kakinuma, J. Shimizu, H. Yoda, and H. Ohno, ” Triple metal-film subwavelength gratings on both sides of a silicon substrate for mid-infrared polarizers,” Conference on Lasers and Electro Optics 2015, 査読有, San Jose, CA, U.S.A., May10-15, 2015, paper JTu5A.54.

諏訪翔也、村木兼吾、白石和男、“テラヘルツ帯用金属薄膜サブ波長格子構造偏光子の高性能化”、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2014年09月23日~2014年09月26日、徳島大学(徳島県・徳島市)。

村木兼吾、諏訪翔也、白石和男、“テラヘルツ帯用高性能金属薄膜サブ波長格子構造偏光子の作製”、応用物理学関係連合講演会、2014年09月17日~2014年09月20日、北海道大学(北海道・札幌市)。

村木兼吾、諏訪翔也、山本浩輔、白石和男、“テラヘルツ帯金属薄膜サブ波長格子構造偏光子の金属膜厚分布と光学特性の金属種依存性”、応用物理学関係連合講演会、2015年03月11日~2015年03月14日、東海大学(神奈川県・平塚市)。

樋口翔吾、柿沼洋、清水淳、白石和男、依田秀彦、六本木誠、“中赤外用金属薄膜サブ波長多重格子構造偏光子の挿入損失低減化”、応用物理学関係連合講演会、2015年03月11日~2015年03月14日、東海大学(神奈川県・平塚市)。

柿沼洋、樋口翔吾、清水淳、白石和男、依田秀彦、大野泰司、“中赤外金属薄膜サブ波長多重格子構造偏光子の格子形状変化が光学特性に及ぼす影響”、電子情報通信学会総合全国大会、2015年03月10日~2015年03月13日、立命館大学(滋賀県・草津市)。

樋口翔吾、柿沼洋、白石和男、依田秀彦、大野泰司、“中赤外用銀薄膜サブ波長多重格子構造偏光子”、応用物理学関係連合講演会、2016年03月19日~2016年03月22日、東京工業大学(東京都・目

黒区)。

村木兼吾、白石和男、依田秀彦、大野泰司、“銀薄膜を用いたテラヘルツ帯金属薄膜サブ波長格子構造偏光子”、応用物理学関係連合講演会、2016年03月19日~2016年03月22日、東京工業大学(東京都・目黒区)。

6. 研究組織

(1)研究代表者

白石 和男 (SHIRAISHI, KAZUO)
宇都宮大学・大学院工学研究科・名誉教授
研究者番号：90134056

(2)連携研究者

依田 秀彦 (YODA, HIDEHIKO)
宇都宮大学・工学研究科・准教授
研究者番号：30312862

(3)海外研究協力者

Chen S. Tsai
University of California, Irvine、教授