

ナノポーラスシリコンのインプリントによる 新規テラヘルツ偏光子の開発

A terahertz wire grid polarizer fabricated by imprinting porous silicon

神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 助教 今北 健二

Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering,
Kobe University, **Kenji Imakita**

1. はじめに

テラヘルツ波は、X線のように高い透過性を有し、しかも、X線と異なり人体に対し無害であることから、セキュリティ分野、バイオ分野等でのイメージング技術への応用が期待されている。ワイヤグリッド偏光子は、テラヘルツ波の偏光を制御するデバイスであり、テラヘルツイメージングに必要な不可欠なデバイスである。テラヘルツ技術の進展に伴って、高性能化、低コスト化が強く求められている [1-3]。一般的に普及しているワイヤグリッド偏光子は、太さ数 μm 程度の細い金属線を機械的プロセスによって数 μm 程度の間隔で並べることによって製造されている。しかし、この方法では、原理的にコストが高く、また、高い消光比を実現することが難しい [4]。

本研究では、ハイスループットなテラヘルツワイヤグリッド偏光子の作製方法として、ポーラスシリコンのインプリントに注目した。ポーラスシリコンは、シリコンが赤外不活性であるため、テラヘルツ領域で高い透明性を持つ。しかも、ポーラス構造の圧縮により、室温でインプリント可能であることが知られている [5]。本研究では、ポーラスシリコンのインプリントによって作製したワイヤグリッドが、5THzから18THzという非常に広いテラヘルツ領域で、偏光子として動作することを明らかにする。ポーラスシリコンのインプリントが、ハイスループットなテラヘルツワイヤグリッド偏光子の作製方法として有望であることを示す。

2. 実験方法及び結果

図1に作製方法の概略図を示している。まず、ポーラスシリコンを陽極化成法によって作製する。その後、ポーラスシリコンの表面にグレーティング構造を形成するために、石英モールドを用いてインプリントを行う。そして最後に、ポーラスシリコンに対し、銀を斜めから蒸着する。グレーティングの影の部分には銀は形成されないため、図1に示すように、銀のワイヤアレイが形成される。

ポーラスSiの作製には、(100)配向したpタイプSiウェハを用いた。抵抗率は11-15 Ωcm である。陽極化成電流は80mA/cm²とし、エッチング液にはフッ酸(46質量%)とエタノールの混合溶液を用いた。フッ酸とエタノールの体積比は7:3とした。エッチング後のポーラス層の厚みは30 μm 程度である。ポアサイズは数ナノメートル程度、ポロシティは80%程度である。

ポーラスSi作製後、インプリントを用いて、グレーティング構造を形成した。

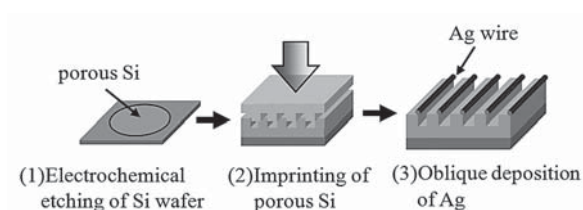


図1 ワイヤグリッド偏光子の作製方法

インプリントは、室温大気下で行い、モールドには市販の石英モールド (NTT advanced

technology, NIM-1000UL) を用いた。グレーティングの周期と高さはそれぞれ $2\mu\text{m}$ と $1\mu\text{m}$ である。離型剤には HARVES 社の 5210TH を用いた。インプリント圧は 20MPa とし、1 分間インプリントを行った。図 2 (a) はインプリント後のポーラスシリコンの SEM 写真である。モールドのグレーティング構造が、ポーラスシリコンに精度よく転写されていることがわかる。図 2 (b) には、図 2 (a) の白線内の拡大図を示している。グレーティングの横の壁の表面粗さは 100nm 以下であり、非常に小さい。テラヘルツ波の波長と比較しても十分小さいため、散乱ロスを無視することができる。

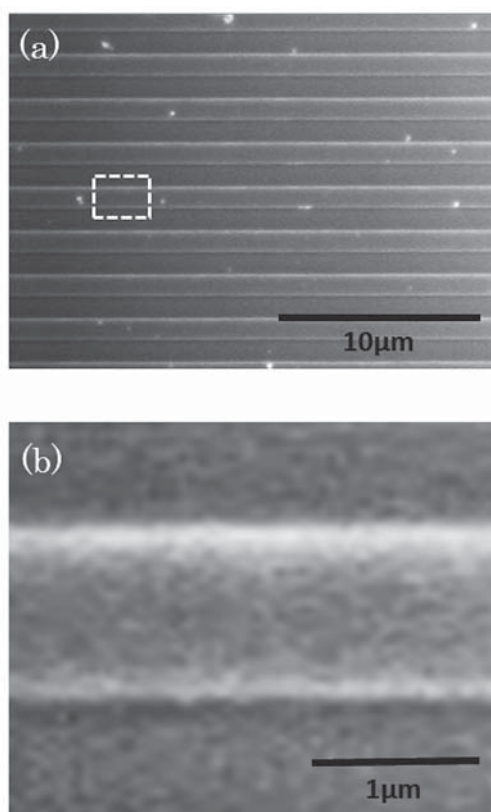


図 2 (a) インプリントしたポーラスシリコンの SEM。(b) は、(a) 中の白枠の内部を拡大したものである。

銀のワイヤー構造は、インプリントしたポーラスシリコンに銀を斜め蒸着することによって、形成した。インプリント後のポーラスシリコンサンプルを、蒸着角度 85° 、銀-サンプル間距離 10cm の条件で蒸着した。図 3 (a) は銀の斜め蒸着後のポーラスシリコンの SEM

写真である。図 2 (a) と図 3 (a) を比較すると、グレーティングの上面のラフネスが斜め蒸着によって増加していることがわかる。一方、グレーティングの底面のラフネスには、斜め蒸着前後に大きな差はない。ラフネスの増加した部分が蒸着された銀に対応する。図 3 (b) は同じサンプルの断面 SEM 写真である。銀のワイヤーアレイが、グレーティングの上面に形成されていることがわかる。銀が蒸着された面積はおおよそ 50% 程度であり、高い消光比を得るために最適な構造となっている [6]。

ワイヤーグリッド偏光子としての特性を調べるために、同じ条件で作製した二つのサンプルを重ね、その透過率を測定した。一つめのサンプルは、無偏光の光源からの光から直線偏光の光を生成し、二つ目のサンプルが、その直線偏光の光から、 θ ずれた偏光成分を抽出する。ここで θ は二つのサンプルの偏光軸の間の相対角度である。消光比は $-10\log(T_{\perp} / T_{\parallel})$ で定義される。 T_{\parallel} と T_{\perp} はそれぞれ、 θ が 0° の時と 90° の時の透過率である。テラヘルツ帯での透過率の測定には、FT-IR を用いた。また、一つめのサンプルをリファレンスとして使用し、その透過率を 100% とした。

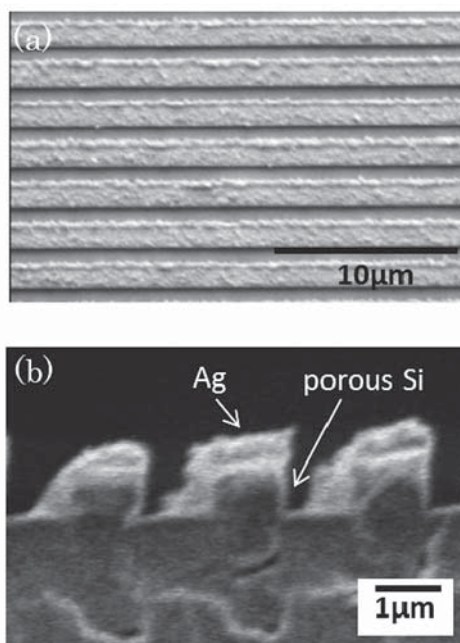


図 3 斜め蒸着後のサンプルの (a) 上面及び (b) 断面 SEM 写真。

図4は透過率を θ の関数として評価した結果である。 θ が0度の場合、10THz以下では透過率は50%に達する。15THz付近には小さいディップ構造が見られる。このディップ構造は、ポーラスSi表面のSi-O結合の振動モードの吸収によるものである。 θ の増加とともに、透過率は減少する。図4(b)に、消光比を横軸に θ をとってプロットしている。周波数領域全域で消光比が10dB程度であることがわかる。この結果は、作製したサンプルが5THzから18THzという広い領域でワイヤーグリッド偏光ライザーとして機能していることを示している。

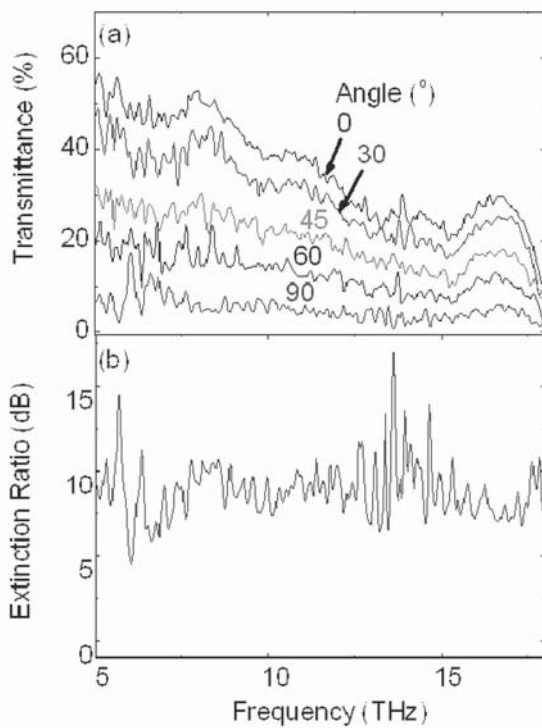


図4 (a) 2枚のサンプルを重ねあわせて測定した透過スペクトル。サンプルの偏光軸の関数としてプロットしている。(b) 透過率から見積もった消光比。

より定量的に議論するために、RGWA (rigorous coupled wave analysis) 法に基づくシミュレーションを行った。図5(a)に計算に用いたモデルを示している。Si基板、ポーラスシリコン層、インプリント層、Ag層の厚みはそれぞれ、700, 30, 1, 0.15 μm である。これらの値は、図3(b)のSEMの結果と一致す

る。Si基板とポーラスSiの屈折率には、3.48と1.45を用いた。吸収の効果は考慮していない。図5(b)は10THzにおける透過率を θ の関数としてプロットしたものである。実験値(四角のプロット)と計算値(実線)が、おおよそ一致していることがわかる。この結果は、作製したサンプルの吸収の効果が非常に小さいことを示している。また、より定量的には、計算結果は、実験結果を完全には再現できていない。計算で求めた T_{\perp} と T_{\parallel} はそれぞれ32.0%と0.093%であった。この結果から見積もられる消光比は25dBであり、実測された消光比よりも15dBも大きい。この消光比の差は、銀の薄膜のラフネスか、あるいはグレーティング構造上の欠陥に起因するものであると考えている。計算結果は、サンプル作製条件を最適化することで、消光比をさらに改善することが可能であることを示している。

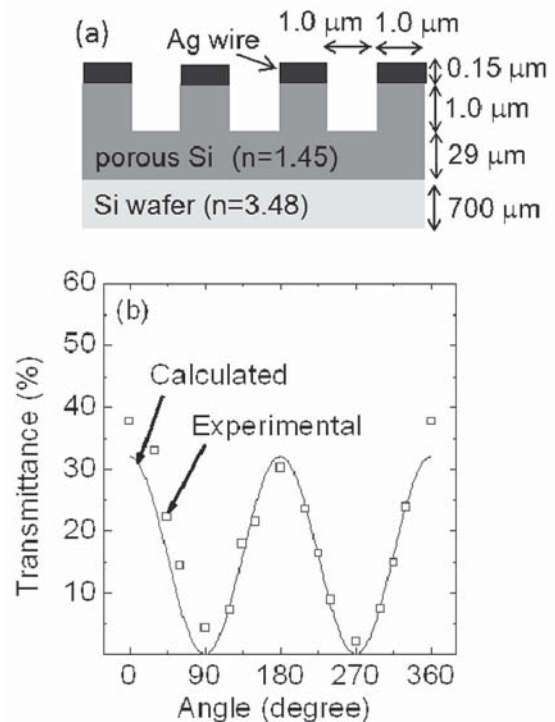


図5 (a) 作製したワイヤーグリッド偏光子の計算モデル。(b) 10THzにおける透過率。2つの偏光子の偏光軸の間の相対角度の関数としてプロットしている。実線は計算結果で四角のプロットは実測値。

3. 結論

我々は、ポーラス Si のインプリントによってワイヤーグリッド偏光子を初めて作製した。作製したワイヤーグリッド偏光子は 5THz から 18THz の広い範囲で偏光子として機能し、その消光比は 10dB であった。その周波数領域における動作範囲は、樹脂を用いる従来のインプリントによる偏光子よりもはるかに広い。我々の結果は、ポーラスシリコンのインプリントがテラヘルツ領域で動作する偏光子の作製方法として非常に有望であることを示している。

4. 謝辞

本研究を援助して頂いた、公益財団法人京都技術科学センターに感謝致します。

参考文献

[1] N. C. J. van der Valk, W. A. M. van der Marel, and P. C. M. Planken, *Opt. Lett.* 30, 2802–2804 (2005).

[2] I. Yamada, K. Kintaka, J. Nishi, S. Akioka, Y. Yamagishi, and M. Saito, *Opt. Lett.* 33, 258–260 (2008).

[3] D. Kim, *Appl. Opt.* 44, 1366–1371.

[4] D. E. Yi, Y. B. Yan, H. T. Liu, Si-Lu, and G. F. Jin, *Infrared Phys.*, 19, 437–442 (1979).

[5] J. D. Ryckman, M. Liscidini, J. E. Sipe, and S. M. Weiss, *Nano Lett.* 11, 1857–1862 (2010).

[6] I. Yamada, K. Takano, M. Hangyo, M. Saito, and W. Watanabe, *Opt. Lett.* 34, 274–276 (2009).

研究成果発表

1) 鎌田 威、今北 健二、藤井 稔、林 真至, “ナノポーラスシリコンの室温インプリント加工によるテラヘルツ帯ワイヤーグリッド偏光子の作製”, 秋季第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 11 日 -9 月 14 日