

メタサーフェスを用いた円偏光発光微細素子 および円偏光を用いた癌検出技術に関する研究

ビジネスエンジニアリング専攻 産学官共創コース
アルバック未来技術協働研究所 堀内 宏太郎

1. 研究背景と目的

円偏光とは、電界ベクトルの振動方向が光の進行方向に対して垂直な面内で回転し、振幅がその向きによらず一定な光のことである (Fig. 1)。その特異な性質から、情報通信や記録媒体、病理診断など幅広い応用が提案されており、本研究では円偏光内視鏡技術に着目する。円偏光内視鏡とは、癌細胞の検出に円偏光を利用する内視鏡のことで、微小な癌細胞や埋没している癌細胞の検出を可能にする新たな技術として期待されている^[1]。また、通常の内視鏡は既に社会実装されており、多くの周辺技術が既に確立されていることも本技術に着目する理由である。しかし、円偏光による癌検出に最適な測定および解析手法は未だ確立されておらず、物理的に未解明な部分も多い。さらに、デバイス開発の面では、実用的な円偏光発光単一微細素子が存在しないことが円偏光応用技術発展の障壁となっている。円偏光発光単一素子の研究例として、スピン偏極電子を再結合することで円偏光を発生させる spin-LED があるが^[2]、取り出し光の円偏光度や素子の耐久性、電力効率などの課題が残る。これらの課題を解決しうる技術としてメタサーフェス (Metasurface : MS) に注目が集まっている^[3]。MS とは、光の位相や反射、屈折等に対して特定の操作を可能にする周期構造的薄膜のことである。本研究では、MS を利用することで高効率に動作する円偏光発光微細素子の開発を行った。対象波長は生体透過性の高い 800 nm とした。さらに、円偏光を用いた病理診断技術の実証をもう一つの研究目的として定め、測定手法や解析手法の検討を行った。

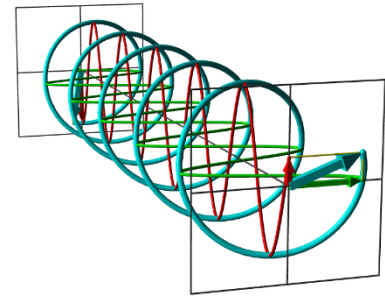


Fig. 1 円偏光の概念図

円偏光発光単一微細素子として、直線偏光性の高い面発光レーザーと位相変調 MS を組み合わせた単一微細素子を考える。MS の構造は Si のラインアンドスペース構造とした。まず、マグネトロンスパッタリング法でガラス基板上に Si を成膜し、反射率分光法によって膜の屈折率を解析した。その結果、波長 800 nm において屈折率 3.43 の薄膜が得られた。次に、有限差分時間領域法によって Maxwell 方程式を解く電界シミュレーションを行い、目的の光位相変調性能を有する MS の設計を行った。ここで、MS の膜厚、Si の線幅、空気の線幅をそれぞれ d 、 W_{Si} 、 W_{Air} と定義する (Fig. 2)。 $d=160$ nm の MS の下面から垂直に直線偏光を入射する系において、 W_{Si} と W_{Air} を 50~300 nm の範囲でそれぞれ変化させたときの光の透過率 T と透過光の円偏光度 $P_{CP} = |I_L - I_R| / (I_L + I_R)$ を算出した。 I_L と I_R は透過偏光を左回り円偏光 (Left-handed Circular Polarized light : LCP) と右回り円偏光 (Right-handed Circular Polarized light : RCP) の合成として考えたときのそれぞれの光強度である。Fig. 3 に透過率 T (左) と円偏光度 P_{CP} (右) それぞれの算出結果を示す。これらの両方が高い領域が目的の性能を有する構造である。さらに、加工性も考慮して $d=160$ nm、 $W_{Si}=100$ nm、 $W_{Air}=150$ nm が最適な構造であると考えられる。

2. メタサーフェスの設計

円偏光発光微細素子として、直線偏光性の高い面発光レーザーと位相変調 MS を組み合わせた単一微細素子を考える。MS の構造は Si のラインアンドスペース構造とした。まず、マグネトロンスパッタリング法でガラス基板上に Si を成膜し、反射率分光法によって膜の屈折率を解析した。その結果、波長 800 nm において屈折率 3.43 の薄膜が得られた。次に、有限差分時間領域法によって Maxwell 方程式を解く電界シミュレーションを行い、目的の光位相変調性能を有する MS の設計を行った。ここで、MS の膜厚、Si の線幅、空気の線幅をそれぞれ d 、 W_{Si} 、 W_{Air} と定義する (Fig. 2)。

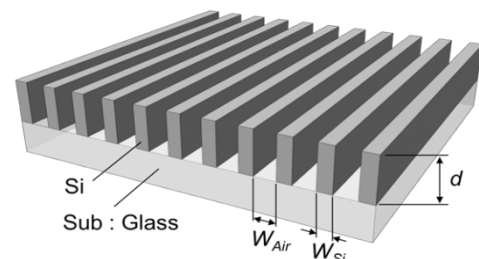


Fig. 2 MS の模式図

ここで、MS の膜厚、Si の線幅、空気の線幅をそれぞれ d 、 W_{Si} 、 W_{Air} と定義する (Fig. 2)。 $d=160$ nm の MS の下面から垂直に直線偏光を入射する系において、 W_{Si} と W_{Air} を 50~300 nm の範囲でそれぞれ変化させたときの光の透過率 T と透過光の円偏光度 $P_{CP} = |I_L - I_R| / (I_L + I_R)$ を算出した。 I_L と I_R は透過偏光を左回り円偏光 (Left-handed Circular Polarized light : LCP) と右回り円偏光 (Right-handed Circular Polarized light : RCP) の合成として考えたときのそれぞれの光強度である。Fig. 3 に透過率 T (左) と円偏光度 P_{CP} (右) それぞれの算出結果を示す。これらの両方が高い領域が目的の性能を有する構造である。さらに、加工性も考慮して $d=160$ nm、 $W_{Si}=100$ nm、 $W_{Air}=150$ nm が最適な構造であると考えられる。

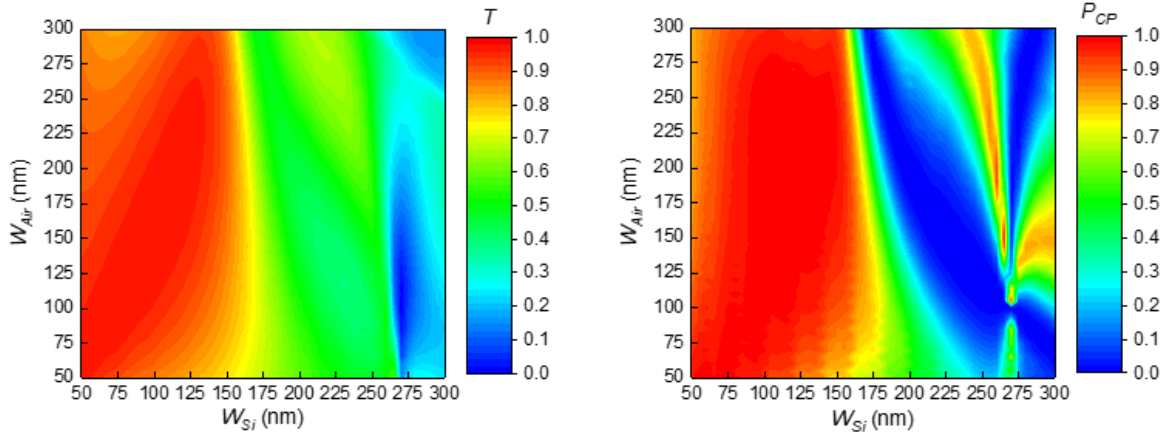


Fig. 3 MSの透過率（左）と透過光の円偏光度（右）

3. 癌細胞の円偏光特性評価

ヒト肺由来の正常細胞 BEAS-2B および癌細胞 A-549 をガラス製シャーレにそれぞれ培養した試料を作製した。試料に波長 350~850 nm の白色 LCP および RCP を入射し、透過光の P_{CP} の波長依存性を評価した。その結果を Fig. 4 に示す (BKG : 試料無し、Normal : 正常細胞、Cancer : 癌細胞)。RCP と LCP のいずれの場合においても、試料透過後の P_{CP} は正常細胞より癌細胞の方が低くなっていることが分かる。これは細胞核による光の多重散乱が原因であると考えられる。正常細胞と癌細胞では細胞核のサイズが異なるのでその散乱形態も異なっている。そして、円偏光が散乱されたときの偏光解消度はその散乱形態に依存する^[4]。また、癌細胞による偏光解消は RCP においてより顕著であった。これは生体分子の吸収円二色性が主な原因であると考えられる。

4. 結言

本研究では、生体透過性の高い波長 800 nm で動作する円偏光発光単一微細素子の設計指針が得られた。また、円偏光を用いた癌細胞のイメージングが可能であることを示唆する結果が得られた。これらの成果は円偏光内視鏡技術のために非常に重要であるといえるが、その実現にはまだ課題残る。デバイス開発における全体設計や MS の微細加工精度は今後検討する必要がある。癌検出においては、偏光解消度やその円二色性および波長依存性に対する理解が定量的にも定性的にも不十分である。したがって、本研究のさらなる発展が期待される。

5. 参考文献

- [1] N. Nishizawa *et al.*, *J. Biophotonics* **15**, e202200062 (2022).
- [2] K. Etou *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **19**, 024055 (2023).
- [3] H. S. Khaliq *et al.*, *Adv. Optical Mater.* **11**, 2300644 (2023).
- [4] B. Kunnen *et al.*, *J. Biophotonics* **8**, No. 4, 317 (2015)

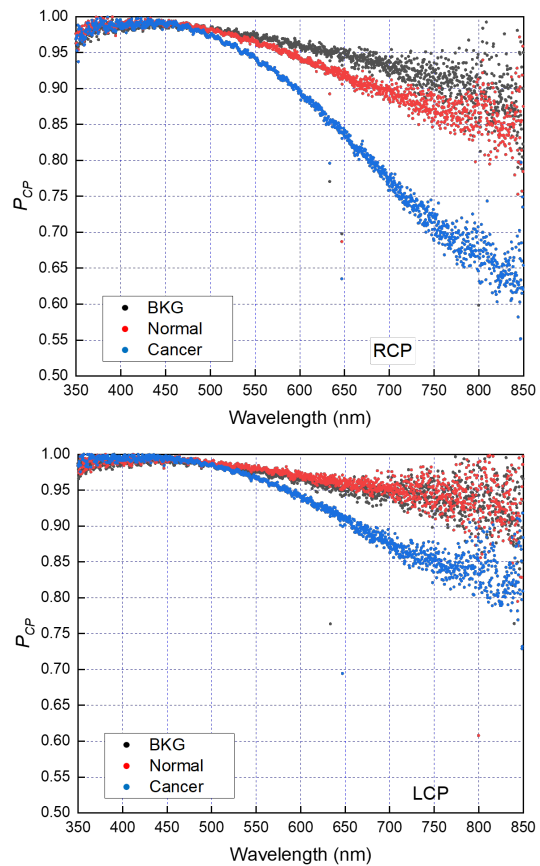


Fig. 4 試料透過光の円偏光度の波長依存性