

プラズモン超集束を用いた光駆動トランジスタのナノ集積化技術の開発

Development of nanoscale integration technique for optically-driven transistor using plasmon nanofocusing

大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 助教 馬越貴之

Takayuki Umakoshi, Department of Applied Physics, Osaka University

要旨

光照射によって半導体や絶縁体へと変化するフォトクロミック材料は、光で動作するトランジスタを実現できる。ワイヤレス制御や電圧と組み合わせた精密制御など、独創的な次世代トランジスタとして期待されている。しかしながら、光照射のスポット径をマイクロオーダーにしか集光できないため(光の回折限界)、電気電子デバイスにとって必須の集積化が困難であった。本研究では、プラズモン超集束を用いて光異性化反応をナノスケールで誘起することによって、光駆動トランジスタのナノ集積化技術を開発することを目的とする。プラズモン超集束は、先鋭なテーパー型金属構造上を伝搬する自由電子集団(プラズモン)によってナノ光源を生成する技術である。電極上にテーパー構造を作製すれば、チャンネル層でナノサイズに光異性化できるため、回折限界を超えたナノ光駆動トランジスタを実現できる。

1. はじめに

紫外光によって半導体へ、可視光によって絶縁体へと異性化するフォトクロミック材料は、様々な応用が期待される材料である。特に、これをトランジスタに応用すれば、「光で動作するトランジスタ」を実現できるため、近年大きな注目を集めている[1]。ワイヤレス制御や、電圧と組み合わせた精密制御など、独創的な次世代トランジスタの実現、さらにはそれ基としたユニークな新奇デバイスを創出できる。光強度制御を組み合わせることによって、2段階(on/off)ではなく256段階ものデータ処理を1つトランジスタでこなせる事も報告されており、大幅な省エネ化にも大きな期待が寄せられている[2]。しかしながら、光照射のスポット径をマイクロオーダーにしか集光できないため(光の回折限界)、電気

電子デバイスにとって必須の集積化が重要な課題であった。

そこで本研究では、プラズモン超集束を用いて光ナノ異性化反応を誘起することによって、光駆動トランジスタのナノスケール化技術を開発することを目的とする。プラズモン超集束は、先鋭なテーパー型金属構造上を伝搬する自由電子集団(プラズモン)によってナノ光源を生成する技術である[3,4]。電極上にテーパー構造を作製すれば、チャンネル層でナノサイズに光異性化できるため、回折限界を超えたナノ光駆動トランジスタを実現できる。加えて、プラズモン超集束は任意波長で動作するという特長を有するため、2色の光を必要とする光異性化反応のナノスケール化にうってつけの技術である。これまでマイクロオーダーだった光駆動トランジスタを、ナノスケール化する技術として、極

めて大きな意義を有すると共に、これを端として新たな電気電子デバイスの創出につながるとも期待できる。

2. 実験結果

2.1 プラズモン超集束を誘起する金属構造の最適化

プラズモン超集束は金属の種類や構造によって、動作する波長域や強度が異なる。高効率かつ安定的に紫外域及び可視光域でプラズモン超集束を誘起できるよう、電磁場計算を用いてプラズモン超集束を誘起するテーパー型金属構造の最適化を行った。金属材料として、今回は金・銀・アルミニウムを用いた。膜厚を 40 nm、テーパー角度を 20 度、先端径を 20 nm とした。図 1 に示すように、材料に応じてプラズモン超集束の応答が異なることを見出した。金や銀を用いた場合では、700 nm 付近の長波長では高強度なナノ光源を生成できているが、フォトクロミック材料の半導体化に必要な紫外域ではナノ光源を生成できていない。一方で、アルミニウムを用いた場合では紫外域から可視光域に渡って満遍なくナノ光源を生成できている。長波長領域こそ金・銀と比べれば強度は低いですが、紫外光と可視光を用いたナノスイッチングに最適な材料であると考えられる。

2.2 フォトクロミック材料の光異性化反応検証

本研究で要となるフォトクロミック材料の光異性化反応の種々特性を検証した。フォトクロミック材料としては、高い応答速度と熱安定性を有するジアリールエテンを用いた[5]。図 2 に示すように、紫外光照射によって closed-form に、可視光照射によって open-form に構造変化することが知られてお

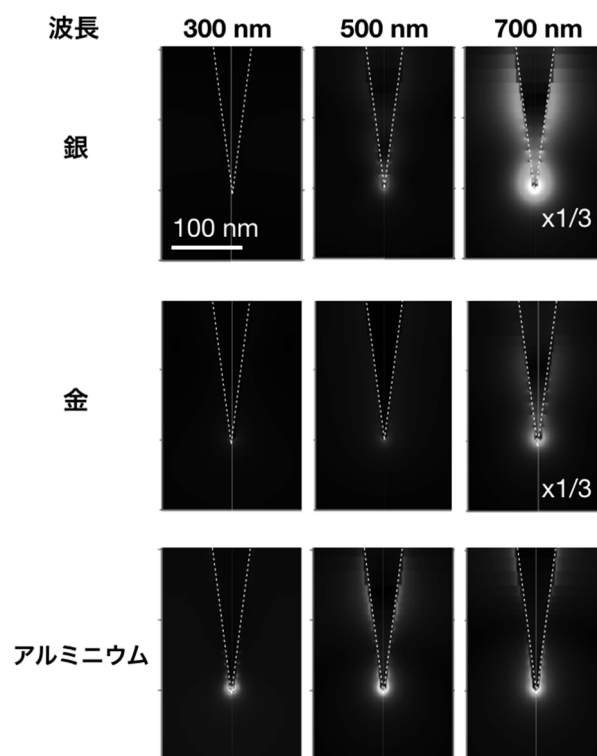


図 1. 電磁場計算によって求めた金、銀、アルミニウムを用いた場合のテーパー型金属構造先端付近の電場分布

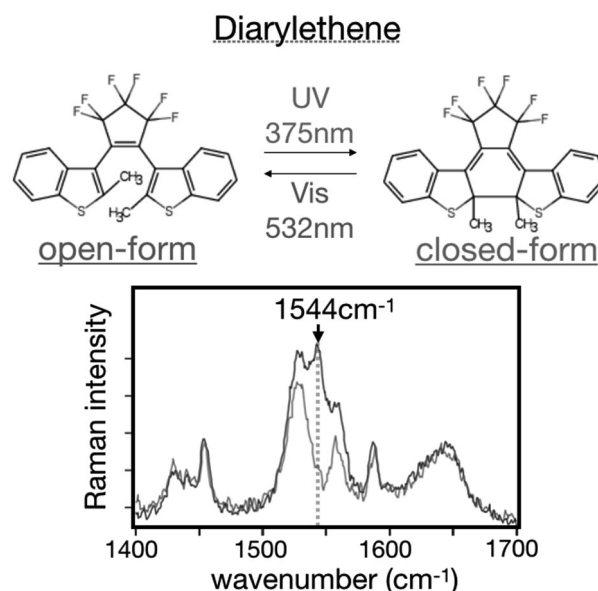


図 2. ジアリールエテン(open-form 及び closed-form)の分子構造と、それぞれのラマンスペクトル

り、それぞれ半導体と絶縁体の特性を示す。また、紫外光照射によって閉じた構造から発生する 1544 cm^{-1} 付近のラマン散乱光で、ジアリールエテンがどちらの構造を取っているかを判別する事も可能である。

まずは、PMMA にジアリールエテンを溶解し、ガラス基板上にスピコートすることによって、ジアリールエテン/PMMA 薄膜を作製した。プラズモン超集束によるナノ光源ではなく、通常のレーザー光でジアリールエテンの応答を検証した。図 3(a)に示すように、波長 532 nm のレーザーを薄膜に照射し、波長 785 nm のレーザーでラマンイメージングを行うことによって、異性化反応が起きているかを検証した。また、その後紫外光を照射することによって、異性化反応がリセットされるかも確認した。図 3(b)に示す通り、波長 532 nm のレーザーを 10 秒照射した点で異性化反応が起きていることを、ラマンイメージングを通して確認することに成功した。また、異性化していた領域は、直径 $3.75\text{ }\mu\text{m}$ 程度であった。どの程度の照射時間で異性化反応が起こるのかも検証した所、 0.1 秒 の照射時間でも十分に異性化反応を確認することができた(図 4)。

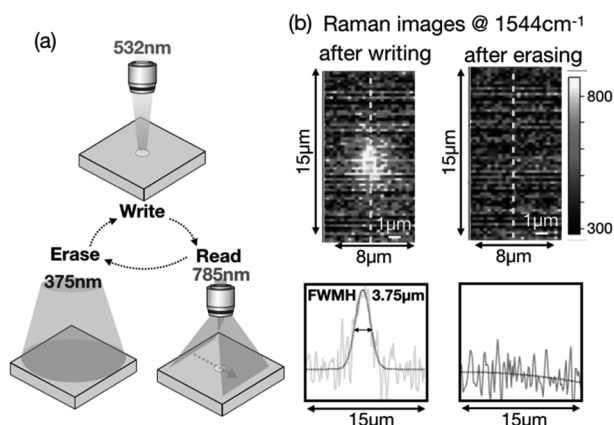


図 3. (a)ジアリールエテンの光異性化反応の実験手順 (b)ジアリールエテン/PMMA 薄膜のラマン像。

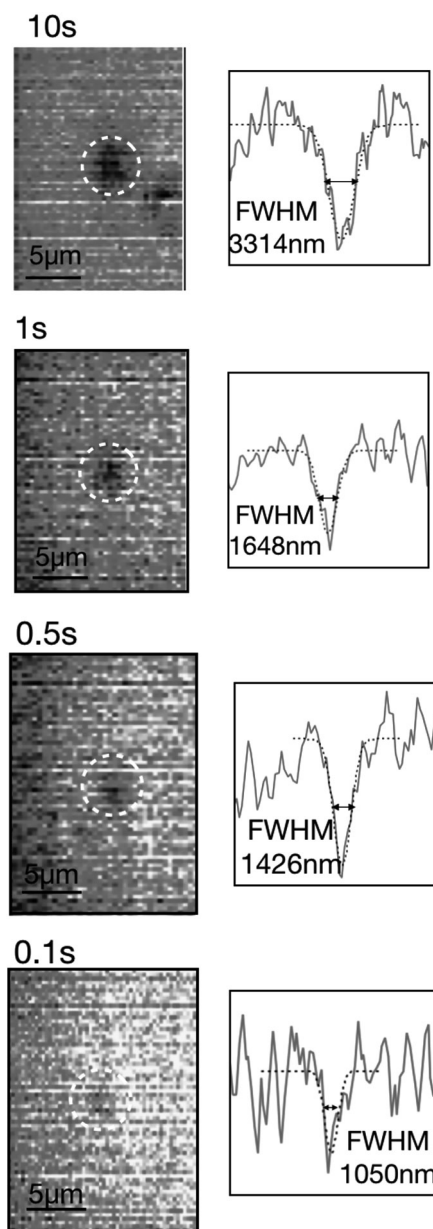


図 4. 波長 532 nm のレーザー照射時間を変化させた場合の光異性化反応の変化。左はラマン像、右はラマン強度ラインプロファイル

2.3 テーパー型金属構造の作製

次にプラズモン超集束を誘起するためのテーパー型金属構造を作製した。電子線リソグラフィと真空蒸着法を用いて、アルミニウムのテーパー型金属構造を作製することに成功した。また、先端もナノスケールに先鋭であることを電子顕微鏡によって確認した(図 5)。作製した構造でプラズモン超集束を誘起できることも検証した。図 6(a)は作製したテーパー型アルミニウム構造の光学像である。波長 532 nm のレーザー光をスリット構造に照射することによって、テーパー構造先端でプラズモン超集束による発光を確認することができた(図 6(b))。加えて、ジアリールエテン/PMMA 薄膜をコートしても、同様にプラズモン超集束を誘起できる事も確認できている(図 6(c))。

2.4 プラズモン超集束によるナノスケール異性化反応

ジアリールエテンの光異性化反応及びアルミニウムテーパー構造でのプラズモン超集束現象を確認できたため、実際にナノスケール異性化反応を試みた。ジアリールエテン/PMMA 薄膜を塗布したアルミニウムテーパー構造のスリットに 532 nm を照射し、テーパー構造全体を波長 785 nm でラマンイ

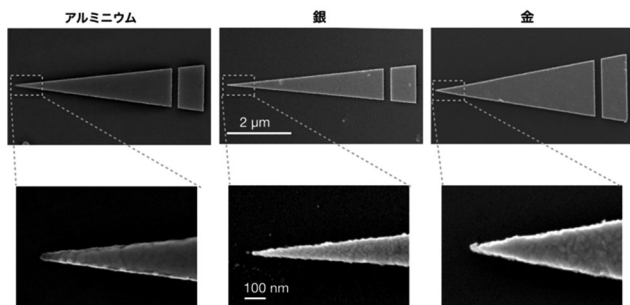


図 5. アルミニウム、金、銀を用いて作製したテーパー型金属構造の電子顕微鏡像

メージングした。図 7(a)に示す通り、可視光照射前は closed-from 由来のラマン散乱は確認されなかったが、532 nm の光を照射することによってテーパー構造先端の極小領域にてジアリールエテンの異性化反応を観察することができた(図 7(b))。スリットの方でも異性化反応が起きてしまっているが、トランジスタ応用を考えた際には問題にはならない。また、ジアリールエテン/PMMA 薄膜をコートする前にポリマーフィルム等で保護することによって、テーパー先端のみで異性化反応を発生させる事も可能だと考えられる。

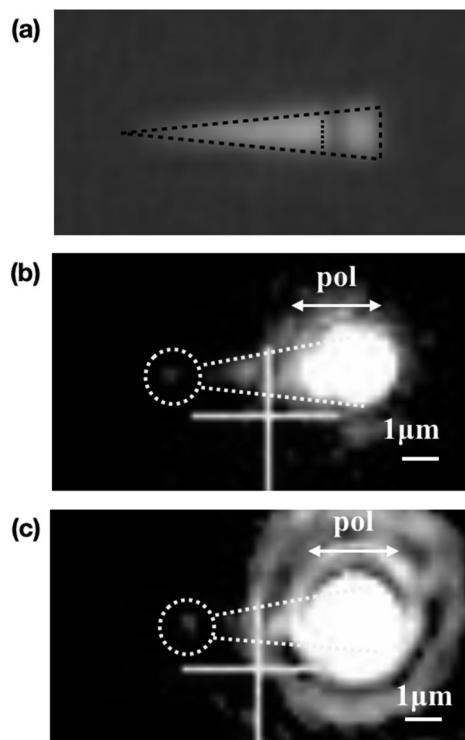


図 6. (a)作製したテーパー型アルミニウム構造の光学像 (b) テーパー型アルミニウム構造のスリットに波長 532 nm のレーザーを照射した時の光学像 (c) ジアリールエテン/PMMA 薄膜でコートしたテーパー型アルミニウム構造のスリットに波長 532 nm のレーザーを照射した時の光学像

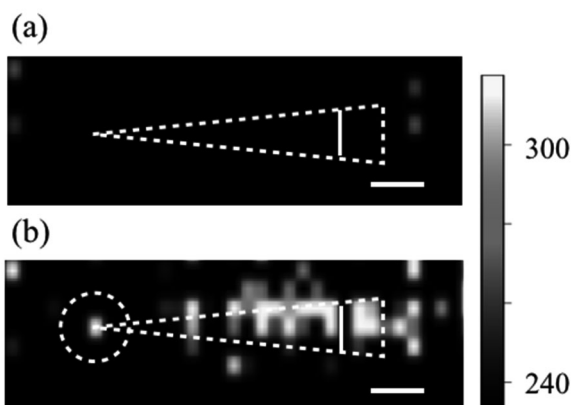


図 7. 波長 532 nm のレーザーをアルミニウムテーパー構造へ照射する前後のラマン像。(a)前、(b)後。

フォトクロミック材料のナノ異性化反応を実験実証することに成功したため、今後はテーパー構造の胴体部と先端を配線し、実際にトランジスタ実装することを目指す。

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] M. Gemayel et al., *Nature Communications*, **6**, 6330 (2015).
- [2] T. Leydecker et al., *Nature Nanotechnology*, **11**, 769 (2016).
- [3] T. Umakoshi et al., *Nanoscale*, **8**, 5634, (2016.)
- [4] M. Stockman, *Physical Review Letters*, **93**, 137404, (2011).
- [5] M. Irie et al., *Chemical Reviews*, **114**, 12174, (2014).

参考文献

1. Koki Taguchi, Takayuki Umakoshi, and Prabhat Verma, *Global Nanophotonics 2018*, Tata Institute for Fundamental Research, Mumbai, India, December 9-12, (2018).
2. 田口剛輝、馬越貴之、バルマ プラブハット、2019 年春期第 66 回応用物理学会学術講演会、9p-W621-15、東京工業大学 大岡山キャンパス、2019 年 3 月