

# 「ナノ光回路」の調査研究

徳島大学 福井萬壽夫

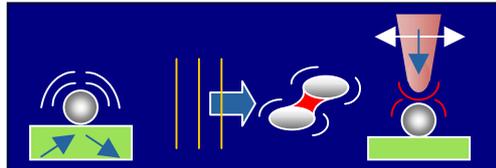
## 1. ナノ光回路の研究の現状

ナノ光回路を実現するためには、回折限界を考慮する必要のない近接場光を用いる必要がある。その観点に基づき調査研究を進めた。その結果、近接場光を用いたナノ光回路の研究は東工大の天津グループで実験・理論研究がなされていることが判明した。天津グループの研究は、半導体量子ドットに存在する電子エネルギーの離散化を巧みに利用して光スイッチを開発したもので、画期的な成果であると言える。しかし、天津グループの研究成果は極低温でなされたもので、実用化には多くの障害を克服する必要がある。また、天津グループは、ファーフールドをナノサイズデバイスに導入する実験研究にも取り組み、成果を挙げていて、この分野をリードしている。一方、世界的に見ると、光ナノ回路の研究は殆どなされていないのが現状であることも判明した。

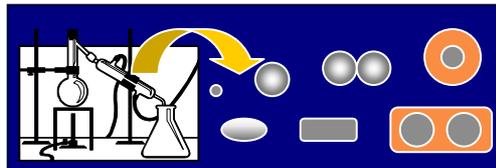
近接場光を用いた局在プラズモンを利用してナノ光回路を作製する、という考えでの研究は皆無である。局在プラズモンは、室温で可視光を効率良く局在できる唯一の電磁波モードと言って良い。その局在プラズモンの基本的な性質でさえ、殆ど研究されていないことが調査で判明した。

このように、21世紀の早い時期に技術確立が必要であるナノ光回路の研究・開発状況は遅々としてとして進展していない状態と言える。このような状況を踏まえて検討すると、ナノ光回路の開発に必要な研究課題は図1に示すような事柄である。第一に、電磁界分布、

・局在プラズモンの  
基本的性質の解明



・金属ナノ粒子の作製



・インターフェース



・非線形光学現象解明



・デバイス作製基本技術

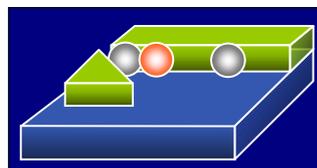


図1 光ナノ回路開発に必要な研究課題

分散関係、エネルギー局在度などの局在プラズモンの基本的性質を解明することである。第二に、種々の形態、組み合わせの金属微粒子を作製する技術を確認することである。第三に、ファーフィールド光をナノ光回路に結合する技術を確認することである。第四に、ナノ光回路を構成する重要な光デバイスを作製する技術を確認することである。第五に、ナノサイズの微粒子等を操作して、ナノ光回路を構築できる技術を確認することである。

図 2 にナノ光回路の一例を示す。中心の光情報処理部には、光変調器、光スイッチ、合波器、分波器、光メモリーなどが必要である。いずれにしても、このようなナノ光回路を作製するには、ナノサイズの光デバイス、光学素子を作製する技術、それらを自由に移動し固定する技術など、多くの重要な技術開発を必要とする。

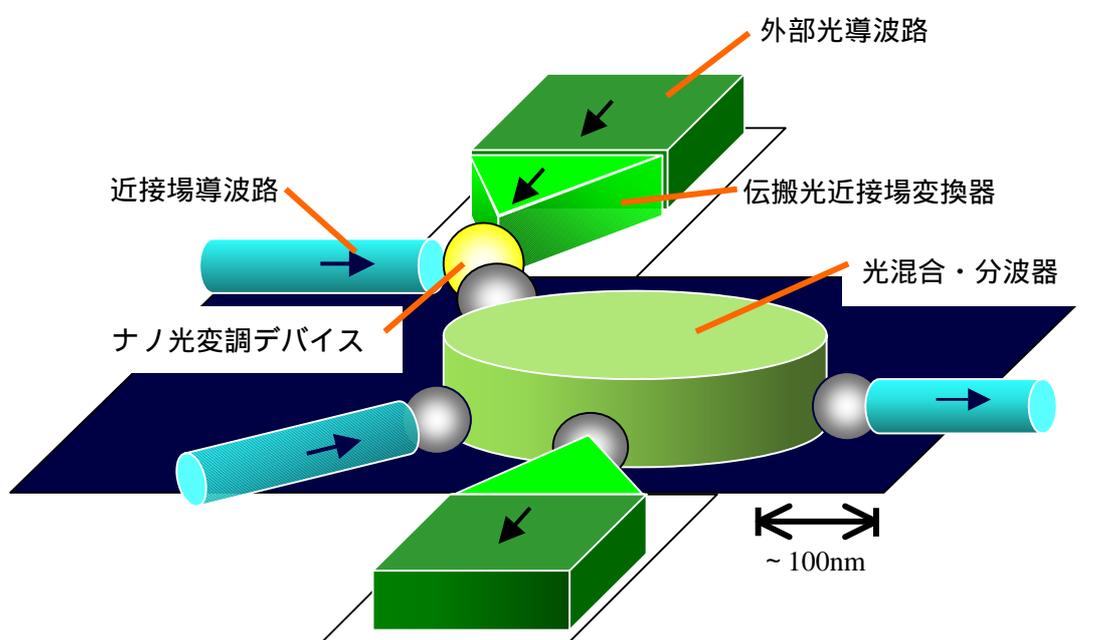


図 2 光ナノ回路の一部

## 2 . ナノ光回路技術の確立のための研究

調査の結果に基づき、ナノ光回路の開発に必要な研究をスタートさせた。すなわち、局在プラズモンの基本的性質の解明、3 次の非線型光学現象を用いた光スイッチの開発研究を行ったので、以下に述べる。

### 2 - 1 Ag 球の線形光学応答

図 3 は、Ag 微小球の局在プラズモンの分散関係である。印と 印はモード番号  $n$  が 1 と 2 に対応し、光散乱断面積のピーク値から求められた結果である。一方、実線、鎖線、一点鎖線は局在プラズモンの分散式を解くことによって求められたものである。両者の一

致は悪い。一致が悪い理由は、光散乱断面積の場合は光の角周波数が実数であるのに対して、分散式の場合は複素数であることによると思われるが、その理由は明確にまだなっていない。

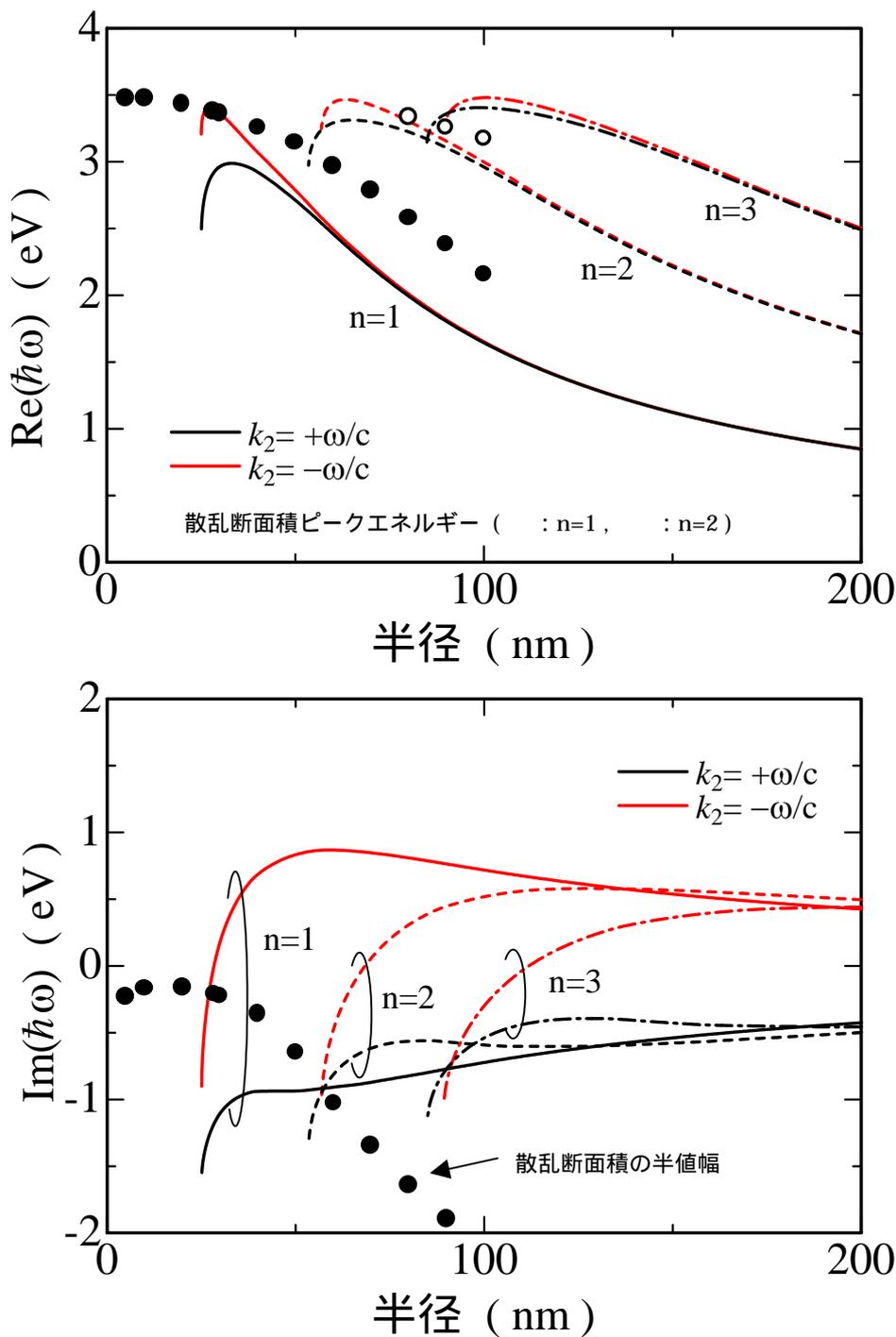


図3 Ag 微小球の局在プラズモンの分散関係

図4に半径20nmのAg球の局在プラズモンの電界分布を示す。z方向に平面光を入射した時のx-z面での分布である。極座標で考えていて、 $E_R$ は半径方向成分の電界であり、 $E_\theta$ は $\theta$ 方向成分の電界である。すなわち、球面に垂直方向の電界は、入射光の伝搬方向と垂直な方向で最大となり、球面に平行方向の電界は、入射光の伝搬方向で最大となっている。

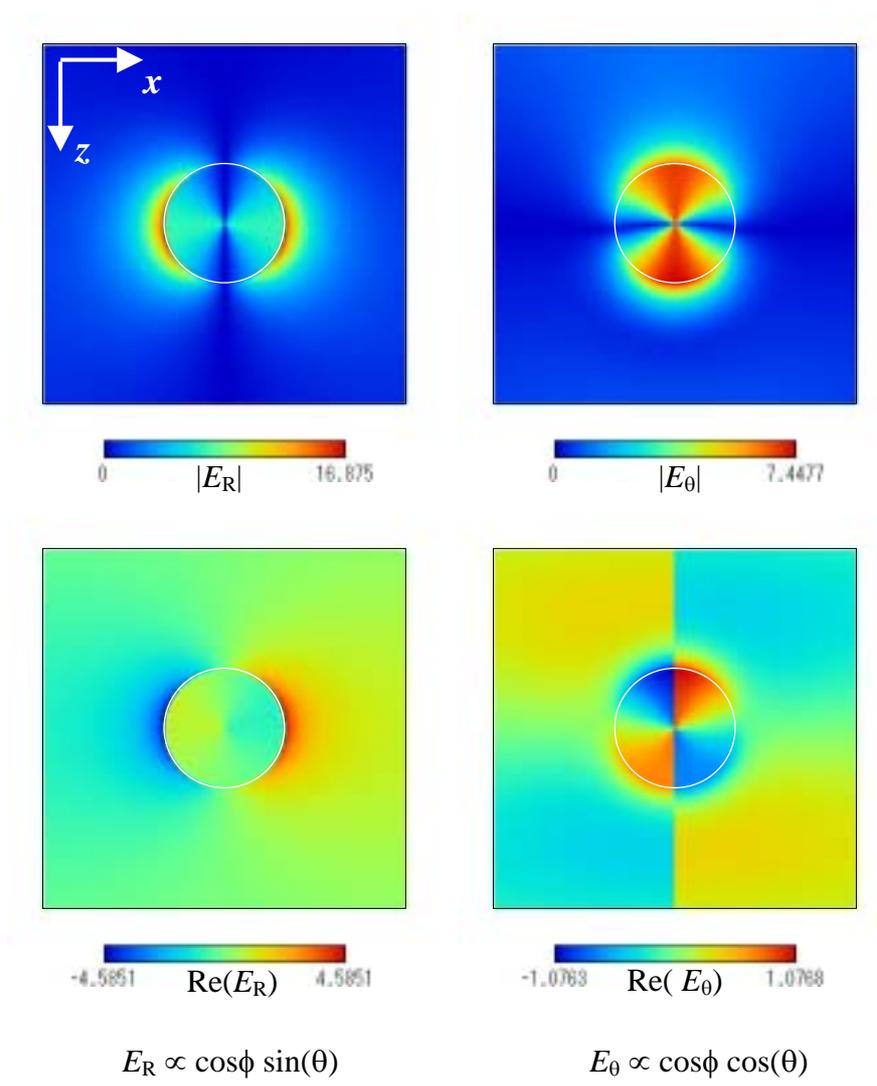
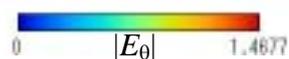
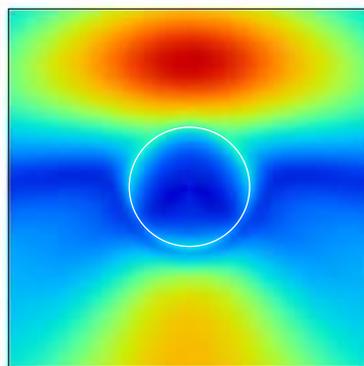
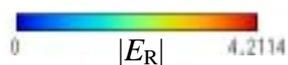
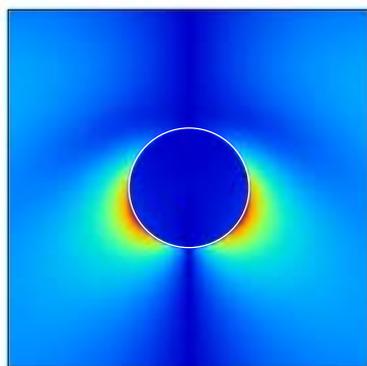


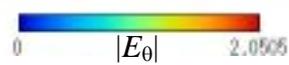
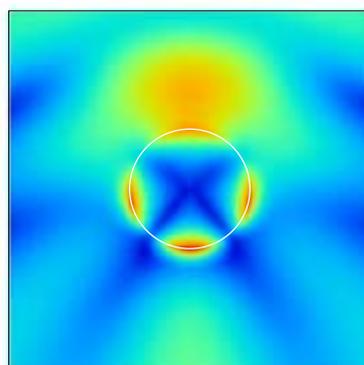
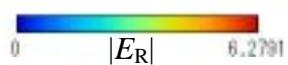
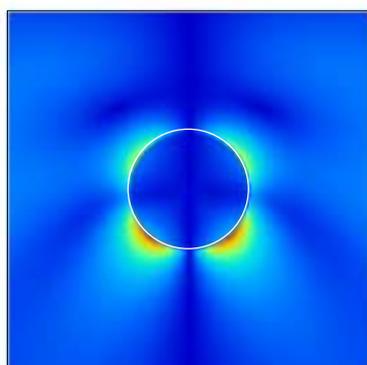
図4 半径20nmのAg球の局在プラズモンの電界分布  
 $\hbar\omega=3.435\text{eV}$ ,  $n=1$

図5には、半径100nmのAg球の局在プラズモンの電界分布を示す。同じく、z方向に平面光を入射した時のx-z面での分布である。この場合、2種類の局在プラズモンが発生する。それゆえ、お互いのモードが影響し合い、たとえば、n=1のモードの $E_R$ は入射光の伝搬方向と垂直な方向で最大となっていないことが分かる。

n=1  
 $\hbar\omega=2.16\text{eV}$



n=2  
 $\hbar\omega=3.17\text{eV}$



$$E_R \propto \cos\phi \sin(n\theta)$$

$$E_\theta \propto \cos\phi \cos(n\theta)$$

図5 半径100nmのAg球の局在プラズモンの電界分布

このように、局在プラズモンの局在エネルギーを用いる時、局在プラズモンのエネルギー分布を理解していないと、利用の際に重大な問題が生じることが容易に理解できる。

局在プラズモンのエネルギーが最大になる場所での入射光エネルギーに対するエネルギー増大度と電界の浸み出し長は、局在プラズモンを利用する上で重要な情報である。Ag 球に対する結果を図 6 に示す。エネルギー増大度は半径 20nm の時に最大となり、約 300 である。半径 20nm で増大度が最大になる理由は、半径を小さくすると、エネルギーの局在度が増すが、誘電率の虚部が増大し、その 2 者の兼ね合いによると考えられる。電界の浸み出し長は球径が増大するにつれて線形に増加する。浸み出し長の大きさは球の半径の半分程度であることが分かる。すなわち、球径を小さくすれば、ナノスケールでの光局在が簡単にできることを意味している。

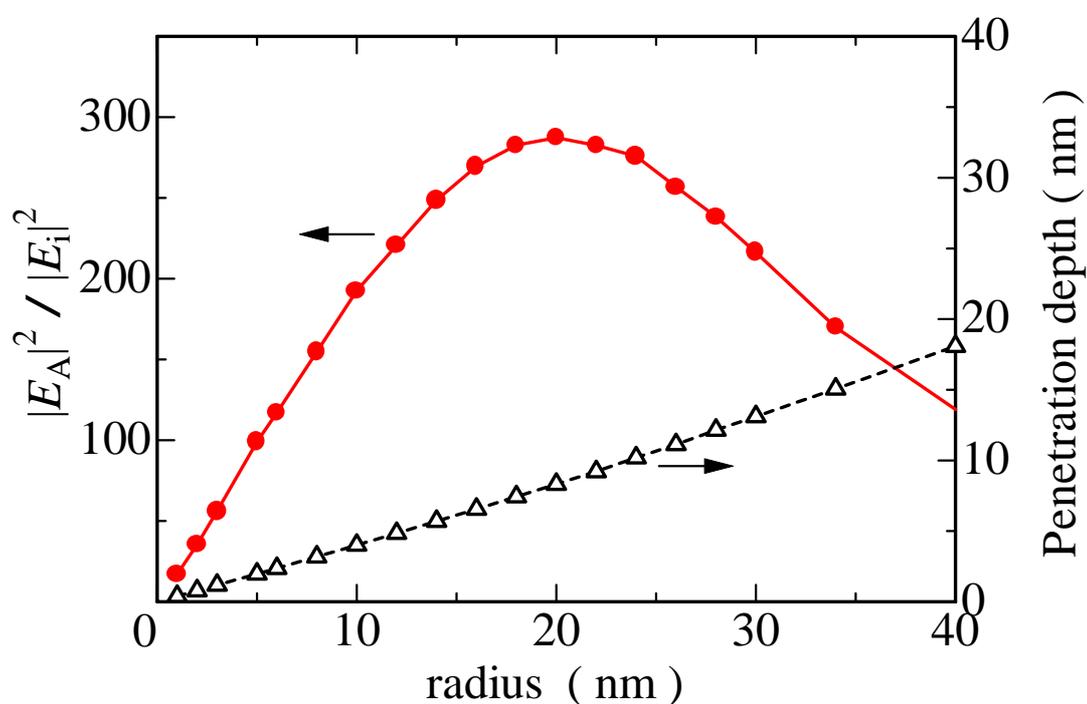


図 6 Ag 球の局在プラズモンによる光強度増強度と浸み出し長

## 2 - 2 半導体膜でコーティングされた Ag 球の非線型光学応答

Mie 理論は球の線形光学応答を解析するために開発されたものである。これを球の非線型光学応答に適用できるモデルを構築し、CdS 膜でコーティングされた Ag 球の非線型光学応答を解析し、数値計算した。

図 7 に、右の図中の A 点で観測されるエネルギーの入射光エネルギー依存性の結果を示す。入射光角周波数 $\omega$ が 2.191eV のとき、光双安定現象が生じていることが分かる。2.206eV

になると、光スイッチング現象となり、それより大きくなると、興味ある変化は生じない。上記の非線型光学現象は、球の散乱断面積の局在プラズモンの共鳴形とコート膜の屈折率の光強度依存性の兼ね合いで生じる。

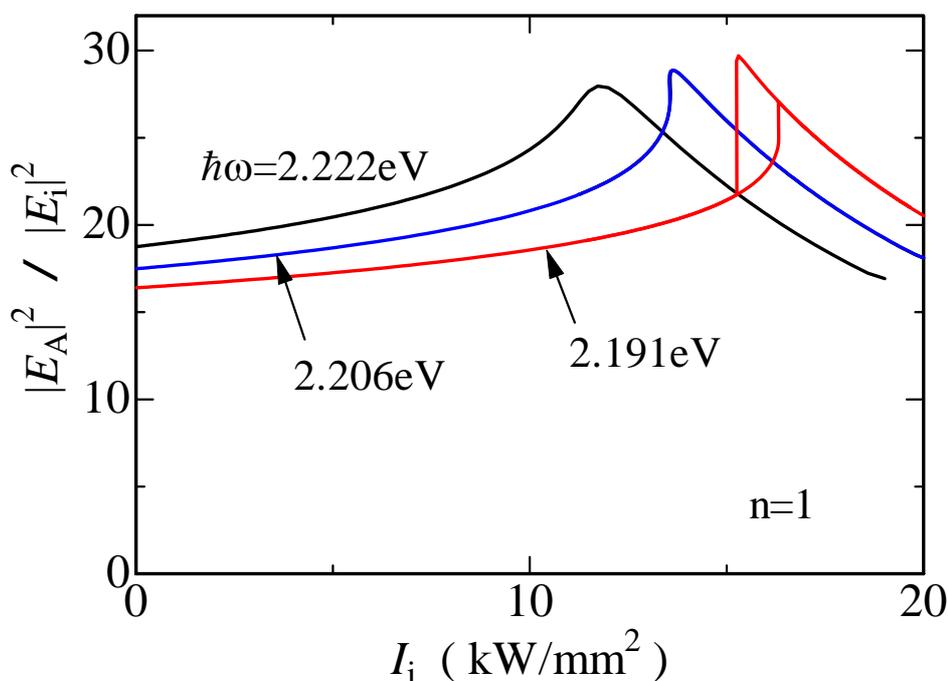


図7 CdS 膜でコーティングした Ag 球の非線形光学応答

図8は、スイッチング強度の Ag 球径依存性である。コート膜の厚さは 20nm 一定である。球半径  $a$  を 60nm から 14nm まで変化させると、 $a=20\text{nm}$  でスイッチング強度が最小になる。消光比は、 $a$  の減少と共に小さくなる。スイッチング強度を決めているのは、Ag 球面でのエネルギー局在度であるが、消光比はコート膜内の電界分布とコート膜表面での光強度の関係で決まる。

図9は、スイッチング強度のコート膜厚依存性である。Ag 球の半径は 20nm 一定である。コート膜厚を減少させると、スイッチング強度と消光比は単調に減少する。この理由も図8について述べたことと同じである。

以上のスイッチング現象は2端子でのものである。実際には、3端子のものが必要である。すなわち、信号光をゲート光で制御する必要がある。このような場合のスイッチング現象もすでに数値計算を開始し、有益な結果が得られつつある。今後の課題は山積して、光ナノ回路を実用化するには、図1に示す研究課題がすべて重要な研究対象となる。

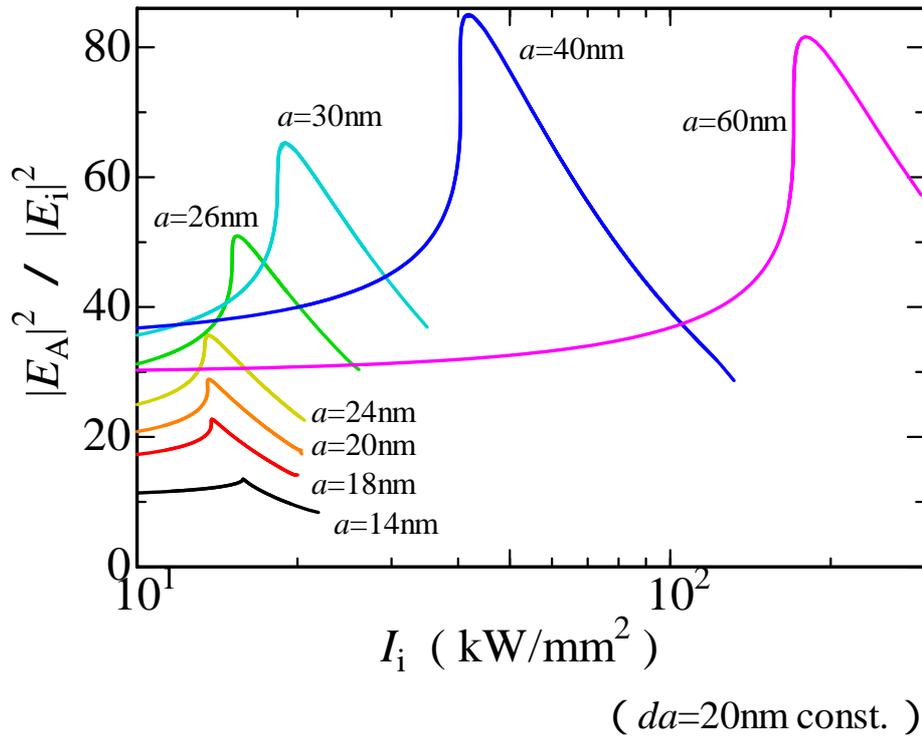


図8 スイッチング強度のAg 球径依存性

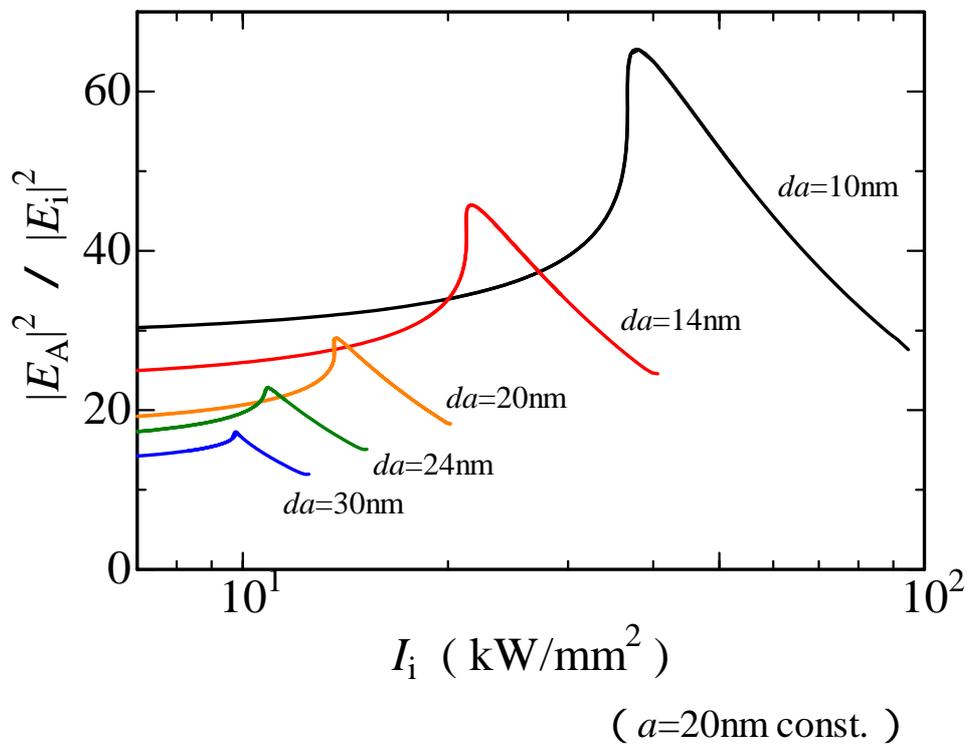


図9 スイッチング強度のコート膜厚依存性