

ナノ構造局在プラズモンにおける電磁誘導透過の FDTD 計算追試

Calculation of plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency

草場 美幸 (B4)

Kusaba Miyuki

Abstract

We numerically re-examine the paper of ‘plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at drude damping limit’ and ‘three-dimensional plasmon rulers’ reported by N. Liu in 2009[1] and 2011[2], respectively.

1. はじめに

電磁誘導透過(EIT)は量子干渉効果で、狭いスペクトル領域で光の吸収を減らすことが可能であり、近年はスローライトの発生等にも利用されている。媒質の分散関係の急激な変化は透過率の増加と関連しており、屈折率が等価的に大きくなるので光を十分に遅くすることができる。最近、EITのような効果を古典的な発振器において生じさせることができる、という事実に注目が集まっているが、プラズモン誘導透過は先送りされてきた。しかし、2009年 Liu らによって実験的にプラズモン EIT 現象が実証された。彼らはまず二つの層から成る金試料を作製した。上の層は励起光と強く結びつき広いスペクトル幅を持つダイポールアンテナの役割をする。一方、下の層は非放射の四重極子アンテナとして働き、共鳴周波数はダイポールアンテナの吸収と一致する。四重極子アンテナの減衰は、ほとんど固有の金属ロス(ドルーデ減衰)のみに起因し、ダイポールアンテナの放射減衰に比べてとても小さい。これらを接近させることにより、二つのアンテナは強く結合する。結果として、二つの励起経路が干渉し打ち消しあうことにより EIT のような現象が生じさせ

た。また、彼らはさらにダイポールアンテナ層の上に四重極子アンテナ層を加えた三つの層から成る金試料についても同様の実験を行い、それぞれの四重極子アンテナとダイポールアンテナの結合について詳しく検証を行った。我々は、彼らが実験的行なった実証をシミュレーションにおいて検証した。

2. シミュレーション方法

富士通社製の Poynting for Optics という FDTD 法のソフトを用いてシミュレーションを行った。

3 準位 EIT シミュレーションモデルを Fig. 1 に示す。励起光は、x 偏光のパルス光で周波数帯域は 100~350THz とした。金試料は、誘電体(PC403, $n=1.55$)に埋め込まれている。金はドルーデモデルとして設定し、複素屈折率は 170THz において $n=0.254+12.3i$ とした。

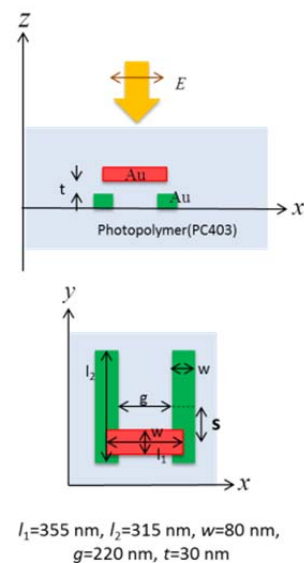


Fig. 1. Structural geometry (three-level).

Fig. 1 における変位 s を変化させることによって、上下の金バーの振動が干渉し EIT 現象を生じる様子をシミュレーションによって検証した。

また、変位 s を 90 nm としたときの透過窓(=170 THz)の周波数を持つ光を照射した際の、試料近傍の電界分布についての検証も行った。電界分布図は、上下の金バーの中間面で取得した。励起光は周波数 170 THz の CW レーザと設定し、他の周波数成分の影響がなくなるように十分に時間が経ったときの電界分布図を取得した。

次に、4 準位 EIT シミュレーションを行った。シミュレーションモデルを Fig. 2 に示す。4 準位モデルでは、3 準位モデルの金バーの上にさらに 1 層の金バーが配置されている。また、これらの金バーは全て誘電体内に埋め込まれている。金および誘電体、励起光のパラメータは 3 準位モデルのそれと同じである。4 準位モデルでは、上下の金バーの振動と真ん中の金バーの振動のそれぞれを干渉させることによって EIT 現象を生じさせた。

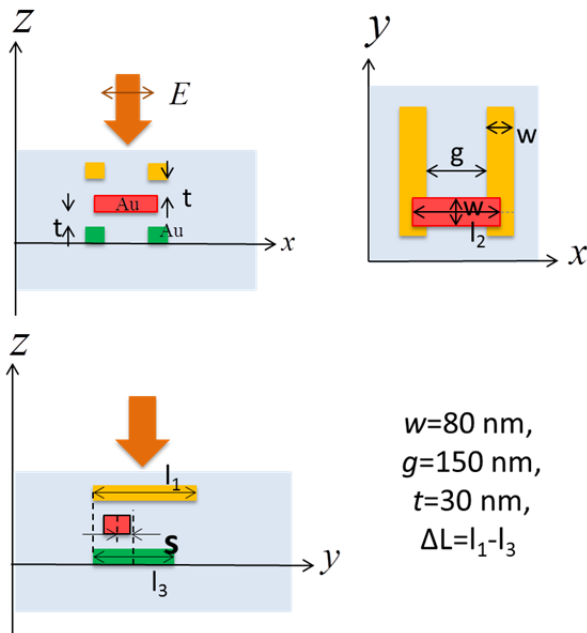


Fig. 2. Structural geometry (four-level).

3. シミュレーション結果

A. 3 準位モデルの EIT 現象

変位 s を 0 nm, 50 nm, 90 nm と変化させたときの透過率 T , 反射率 R , および吸収率 $A(=1-T-R)$ を Fig. 3 に示す。変位 s が 0 nm のとき、吸収率のピークは 161 THz に見られる。実験においてはこの吸収ピークは 170 THz に見られ、ほぼ一致する結果が得られた。また、変位 s を増大させることにより、吸収率のピーク付近にくぼみが生じ、そのくぼみは変位 s が大きくなると顕著になることが確認できた。そして、変位 s が 90 nm のときにそのくぼみは 170 THz であった。このことから、シミュレーションにおいても変位 s によって EIT 現象が生じ、その深さは変位 s を大きくすることにより大きくなることが確認された。透過窓は 170 THz であった。

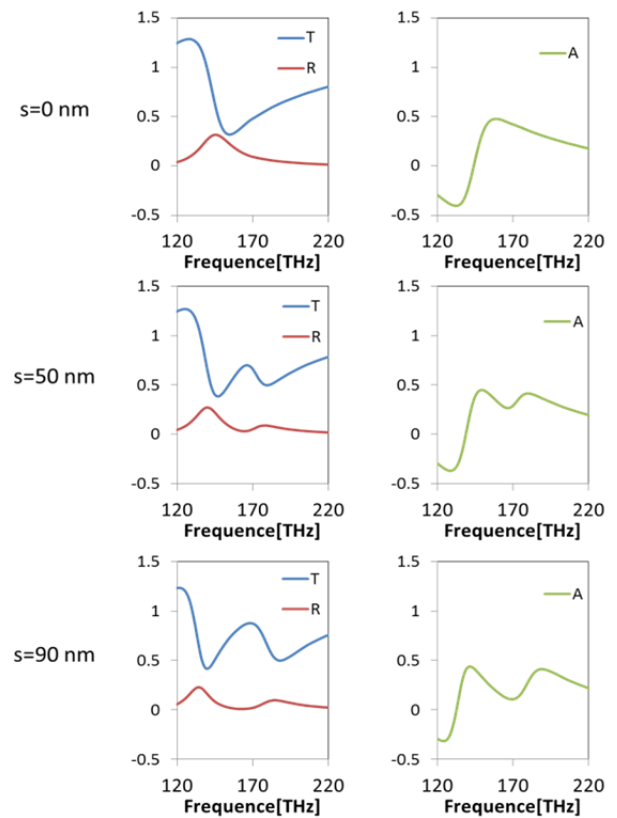


Fig. 3. Transmittance, reflectance and absorbance spectra.

B. 3 準位モデル透過窓における電界分布

上下の金バーの中心面における電界分布図を Fig. 4 に示す。ただし、ここで取得した電界成分は z 方向の電界成分である。Fig. 4 から、透過窓において、上下の金バーが強く結合していることが確認できた。

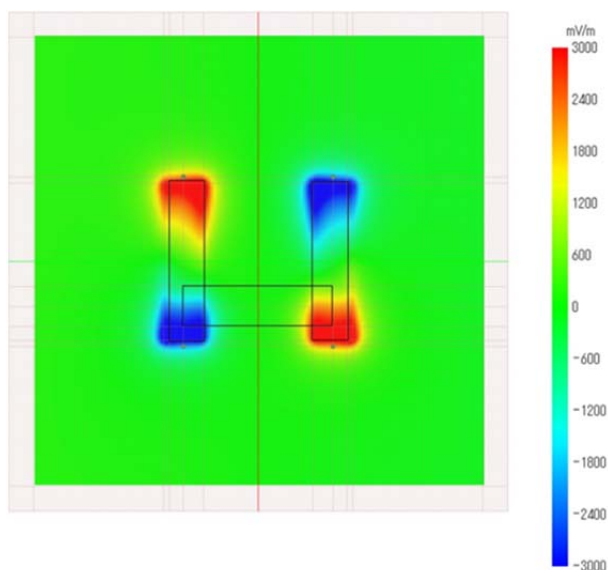


Fig. 4. Electric field distribution.

C. 4 準位モデル EIT 現象

はじめに $l_1=340$ nm, $l_2=260$ nm, $l_3=270$ nm と固定して、真ん中の金バーの下の金バーに対する変位 s を変化させたときの透過率の計算を行った (Fig. 5)。変位が 0 のときは上の金バーと真ん中の金バーの間でのみ非対称性があるため、透過率のピークは 1 つだが、変位 s を大きくしていくと下の金バーと真ん中の金バーの間でも非対称性が生じた。このことから、Fig. 5 に示した I が上の金バーと真ん中の金バーの干渉によるもので、II が下の金バーと真ん中の金バーとの干渉によるものであると確認できた。

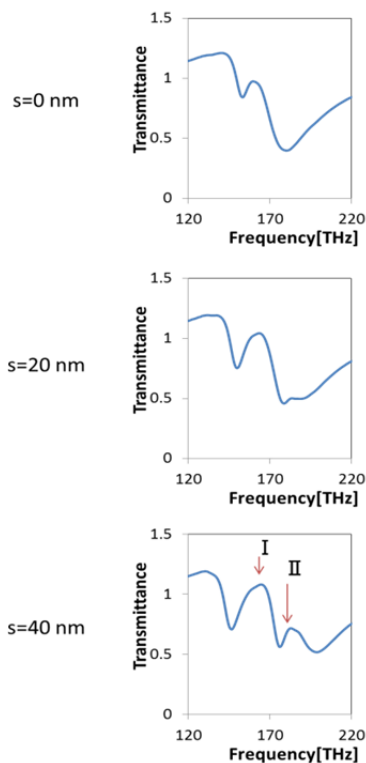


Fig. 5. transmittance spectra of in dependence on s .

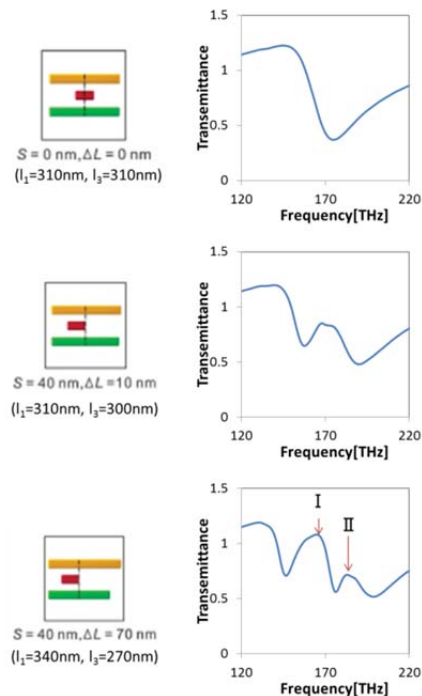


Fig. 6. transmittance spectra of independence on s and ΔL .

Fig. 6 に真ん中の金バーの長さを 260 nm に固定して、上下の金バーの長さや位置を変化させたときの金試料の透過率をシミュレーションした結果を示す。ここで、I の示すピークは上の金バーと真ん中の金バーの振動が干渉したことによるピークで、II に示すピークは下の金バーと真ん中の金バーの振動の干渉によるものである。

また、 $l_1=360$ nm, $l_2=290$ nm, $l_3=290$ nm, $s=50$ nm としたときに、真ん中の金バーを上下の金バーに接近させたときの透過率の計算結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 から金バーを接近させることにより、I および II のピークが大きくなることが確認できた。

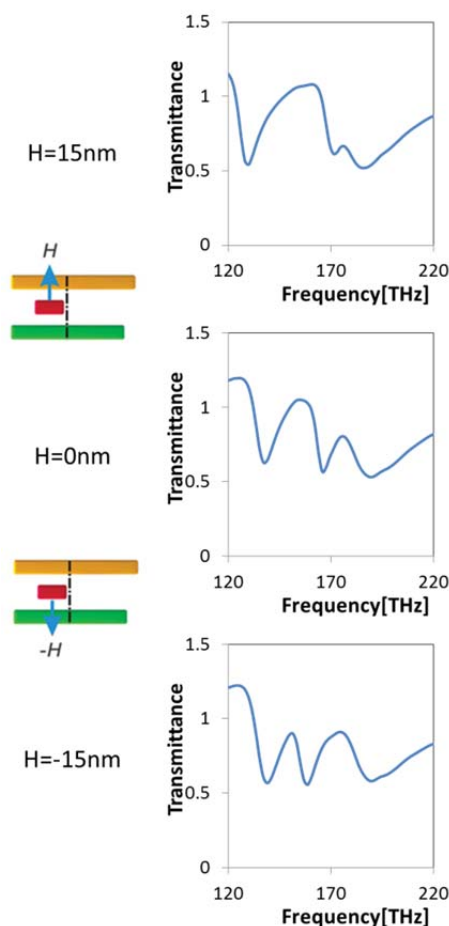


Fig. 7. transmittance spectra of independence on H.

4. まとめ

ダイポールアンテナと四重極子アンテナを非対称に接近させることによってアンテナ間の振動が干渉し、EIT 現象が生じることが確認できた。その深さは非対称性の大きさ(変位)やアンテナ間の距離に依存していることが確認できた。

References

- [1]N. Liu, L. Langguth, T. Weiss, J. Kästel, M. Fleischhauer, T. Pfau, Harald Giessen, Nature Materials, 8, 758 (2009)
- [2]N. Liu, M. Hentschel, T. Weiss, A. P. Alivisatos, H. Giessen, Science, 332, 1407 (2011)