

双対性とメタマテリアル：接続・非接続のはざままで

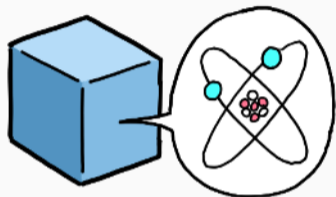
中田 陽介

Apr. 28th, 2022

大阪大学大学院基礎工学研究科 真田研究室

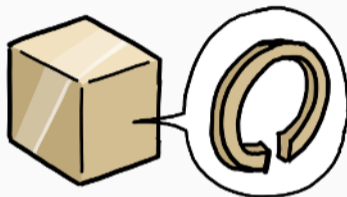
メタマテリアルとメタ表面

物質



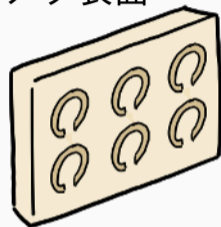
原子

メタ物質



メタ原子

メタ表面

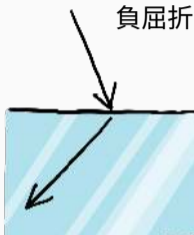


- メタマテリアル: メタ原子で構成される人工媒質
- メタ表面: 2次元メタマテリアル

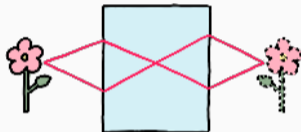
L. Solymar and E. Shamonina, "Waves in Metamaterials" (Oxford, 2009).

メタマテリアル・メタ表面関連分野がなしとげてきたこと

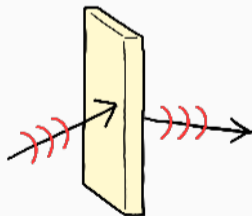
負屈折



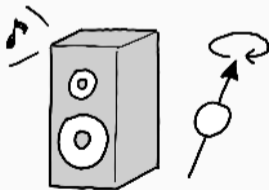
完全レンズ



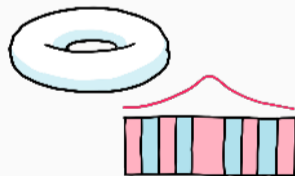
透明マント



ホイヘンスメタ表面



電磁気を超えた波動制御



トポロジーと波動局在

本日のトピック

私の問題設定：

- メタマテリアルの1つのパワーの源は**金属**にある
 - 例えば負の屈折率を実現する際にも金属構造が活用される
- なぜ金属は特別なのだろうか？

本発表：メタマテリアルの特異応答を**金属構造の繋り**の観点から議論する

1. 金属構造の接続・非接続の間には**特異点**がある
2. 特異点を横切る操作により様々なデバイスが作り出せる
3. 時間的に接続を変化させると時不変系では起きないような**時変現象**が現れる

金属構造の繋りと波動伝搬制御

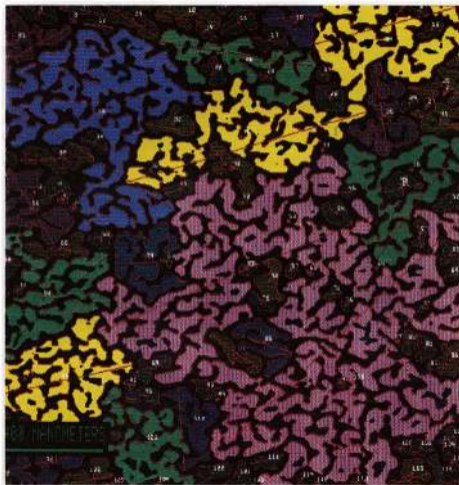
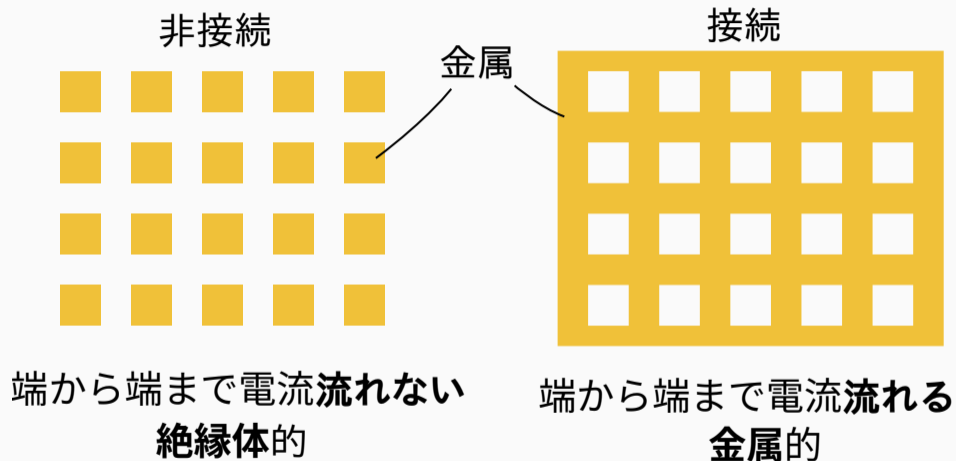


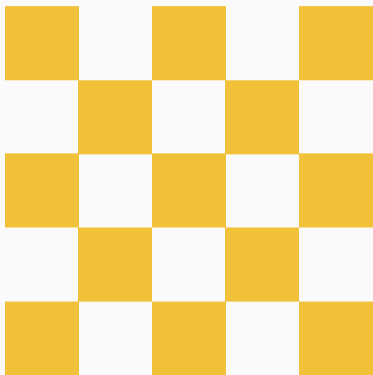
Fig. 11. Digitized image of the film AG25, showing separate clusters in different colours. The area concentration of metal in this image is 5.53%, and there is no connected metal regime which spans the field of view. Note that the clusters contain away horizontally wandering paths of roughly constant width.

構造による金属・絶縁体の違い



実空間の金属の繋りが重要である (実空間トポロジー)

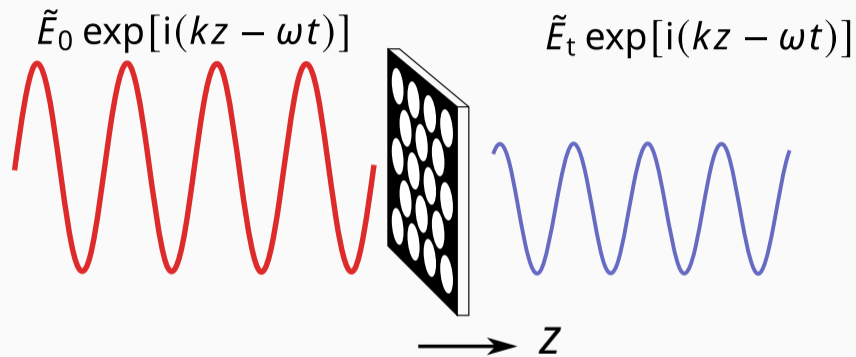
接続・非接続の間を探す：チェッカーボード



萩行正憲 教授
(1953-2014)

点接触している \Rightarrow 少しでも繋がると接続, 少しでもはずれると非接続

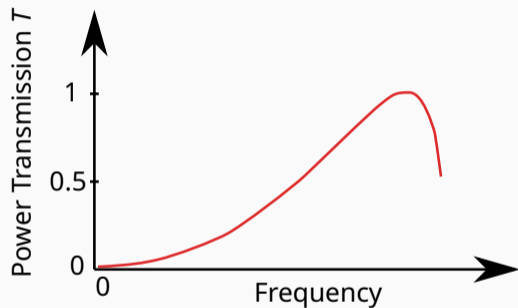
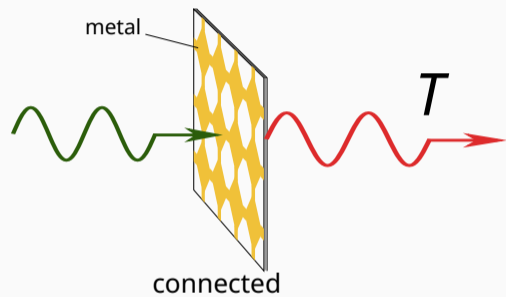
電磁応答による特徴付けのために：振幅透過率とパワー透過率



振幅透過率 $\tilde{t} = \tilde{E}_t / \tilde{E}_0$

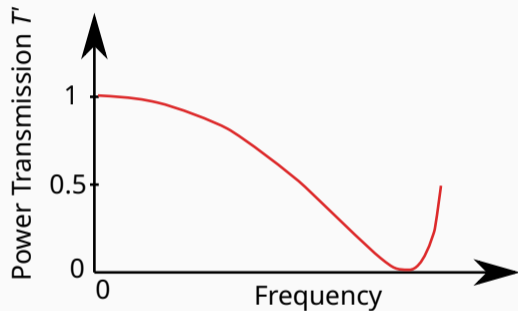
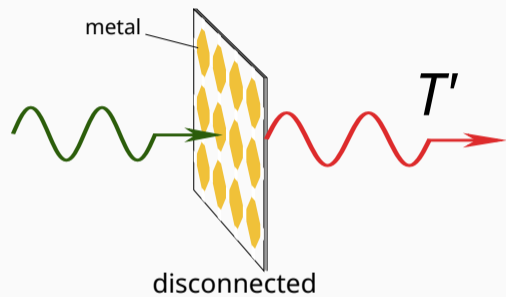
パワー透過率 $T = |\tilde{t}|^2$

接続状態のチェッカーボードの透過スペクトル

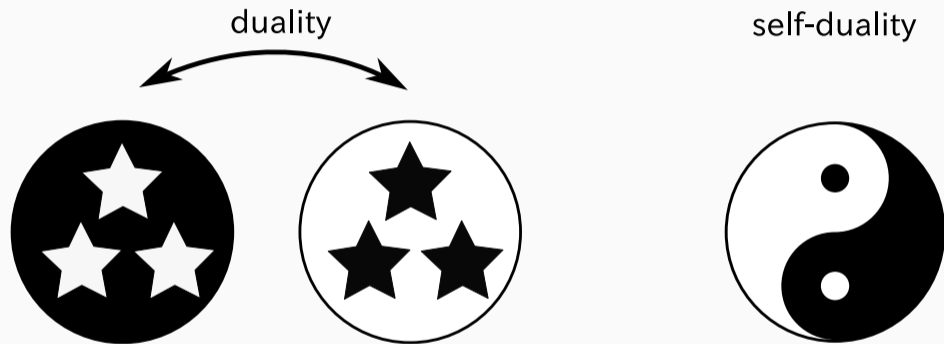


- 低周波数で完全反射

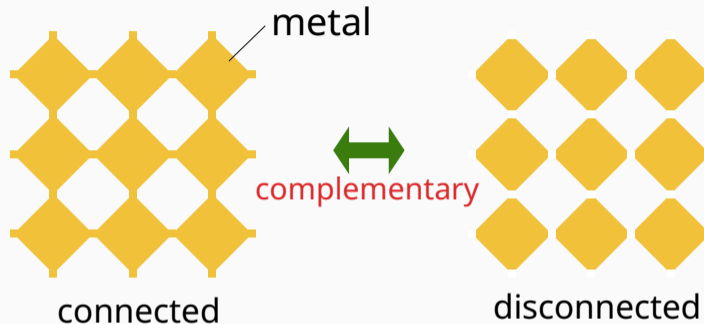
非接続状態のチェッカーボードの透過スペクトル



- 低周波数で完全透過



双対性：一見異なる二つの系が対応付く 自己双対性：自分が自分自身と双対

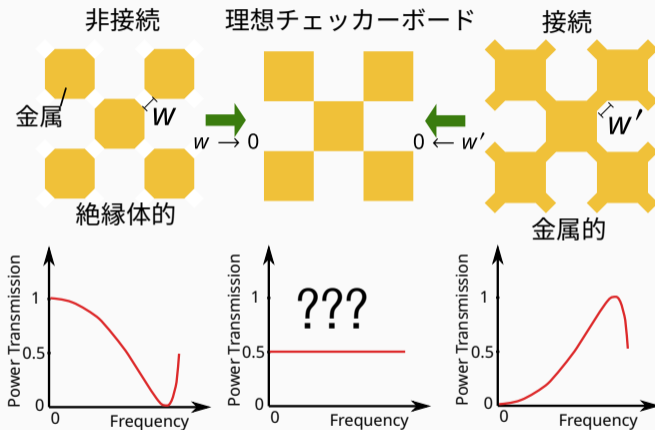


- 補対: 金属 \leftrightarrow 空隙の入れ替えで移り合う

ナイーブなバビネの原理: $T + T' = 1$

T : パワー透過率, T' : 補対問題のパワー透過率

チェッカーボード構造の相転移



- 応答が劇的に接点状態に依る
- 接続状態の変化による“メタマテリアルの相転移”

自身と補対

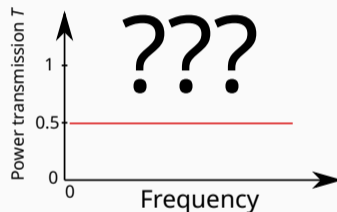
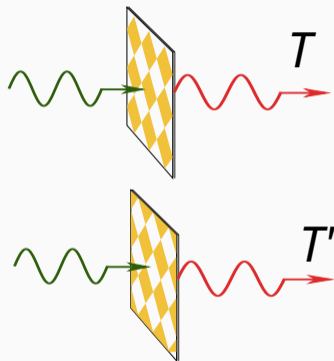


self-complementary

接続状態と非接続状態の間の臨界的構造

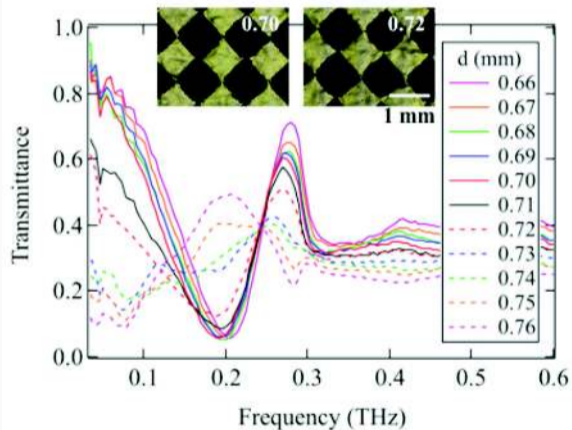
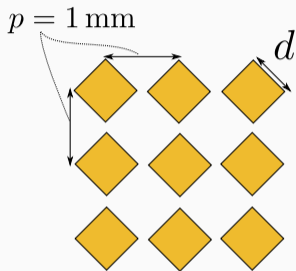
理想チェッカーボードのパワー透過率

- 理想チェッカーボード: $T + T' = 1$ & $T = T' \rightarrow T = T' = 1/2$ 周波数無依存応答?



R. C. Compton *et al.*, *Opt. Acta Int. J. Opt.* 31, 515 (1984).

K. Takano *et al.*, *Opt. Express* 22, 24787 (2014).

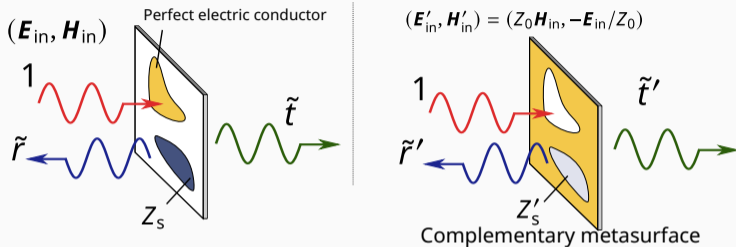


K. Takano *et al.*, in Proc. 34th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves (IEEE, New York, 2009).

K. Takano *et al.*, Opt. Express **22**, 24787 (2014).

理想チェッカーボードは**特異点**になっているのではないか？

抵抗体に対するバビネの原理



- インピーダンス反転：

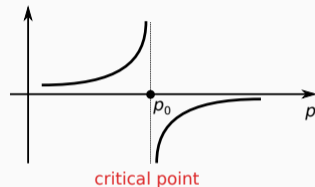
$$Z_s Z'_s = \left(\frac{Z_0}{2}\right)^2 \quad (Z_0 : \text{真空のインピーダンス})$$

バビネの原理

振幅透過率: \tilde{t}, \tilde{t}' に対して $\tilde{t} + \tilde{t}' = 1$

理想チェッカーボードの特異性

- 自己補対性 $\rightarrow \tilde{t} = \tilde{t}'$
- バビネの原理 $\tilde{t} + \tilde{t}' = 1 \rightarrow \tilde{t} = \tilde{t}' = 1/2$
 $T = |\tilde{t}|^2 = |\tilde{t}'|^2 = 1/4$ (反射 $R = 1/4$)
- 吸収: $A = 1 - T - R = 1/2$
- ロスレスなのに吸収はできない
- マクスウェル方程式の解が存在しない

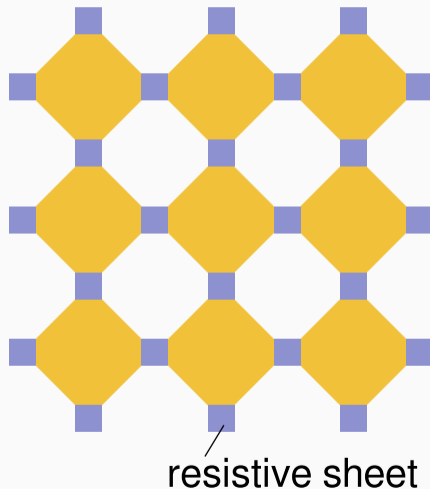


自己双対性 \Rightarrow 理想チェッカーボードは**特異点**

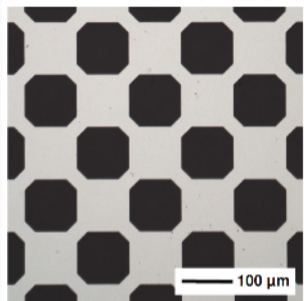
Y. N., Y. Urade, and T. Nakanishi, *Symmetry* **11**, 1336 (2019).

抵抗を持つ中間状態

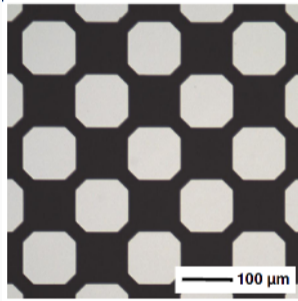
それでは中間状態は存在しないのか？ 抵抗で臨界性をおさえてみる



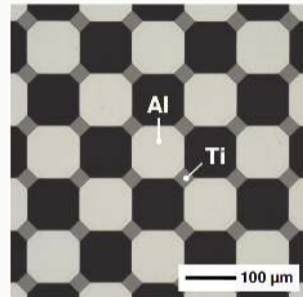
作製したサンプル



connected



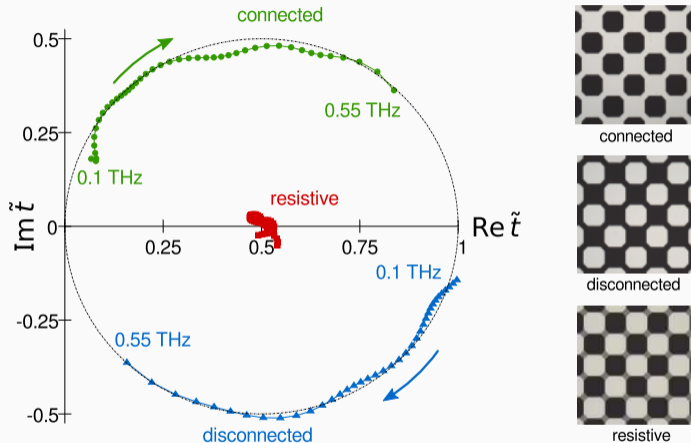
disconnected



resistive

- c 面サファイア基板 (サンドイッチ)
- 金属: アルミ (400 nm)
- 抵抗体: Ti (19 nm, appropriately selected)

結果: 複素振幅透過率



- パワー透過率 $T = |\tilde{t}|^2 \rightarrow 1/4$ for resistive one!

Proof sketch:

- 自己補対性 $\rightarrow \tilde{t} = \tilde{t}'$ (ある条件のもとで)
- バビネの原理 $\tilde{t} + \tilde{t}' = 1 \rightarrow \tilde{t} = \tilde{t}' = 1/2$
 $T = |\tilde{t}|^2 = |\tilde{t}'|^2 = 1/4$

自己補対性 \rightarrow 周波数無依存応答

Y. N., Y. Urade, T. Nakanishi, and M. Kitano, Phys. Rev. B **88**, 205138 (2013).

二酸化バナジウムの相転移

$T < T_c$: 絶縁相, $T > T_c$: 金属相 ($T_c \sim 67^\circ\text{C}$)

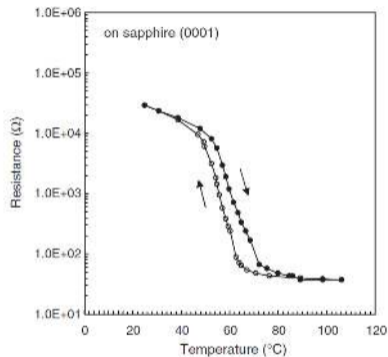
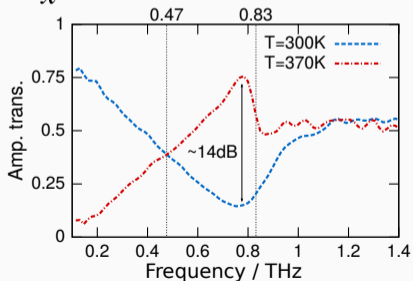
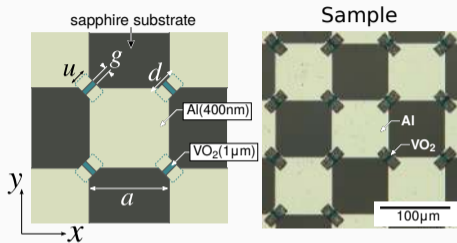


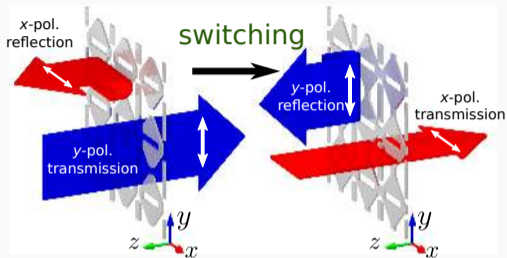
Fig. 3. Variation in resistance against sample temperature for VO_2 (M) film on sapphire (0001) deposited by ICP-assisted sputtering under conditions shown in Table I(d). Characteristics for the increasing temperature and decreasing temperature cases are shown.

K. Okimura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, L1150 (2005).

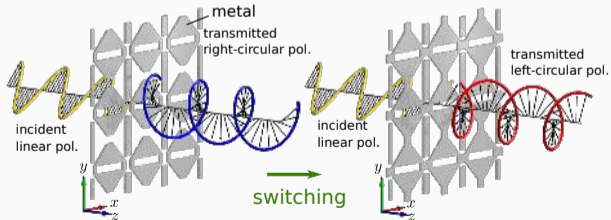
双対転移テラヘルツデバイス



Y. Urade, Y. N. *et al.*, *Opt. Express* **24**, 4405 (2016).



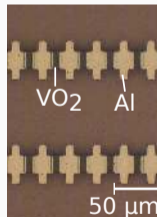
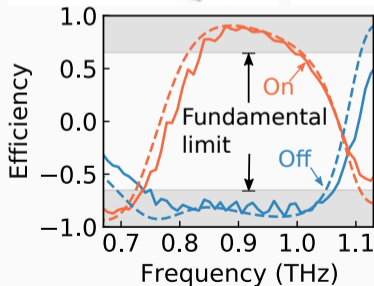
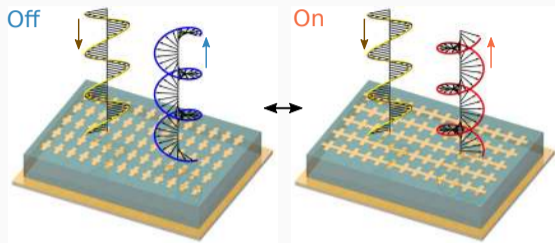
Y. N. *et al.* *Phys. Rev. Appl.* **6**, 044022 (2016).

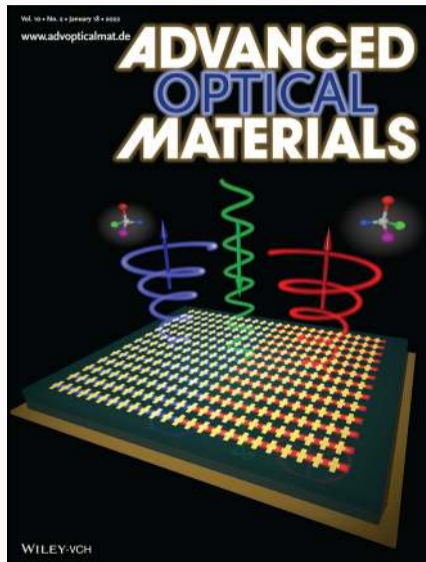


Y. N. *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **11**, 044008 (2019).

T. Nakanishi, Y. N. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **117**, 091102 (2020).

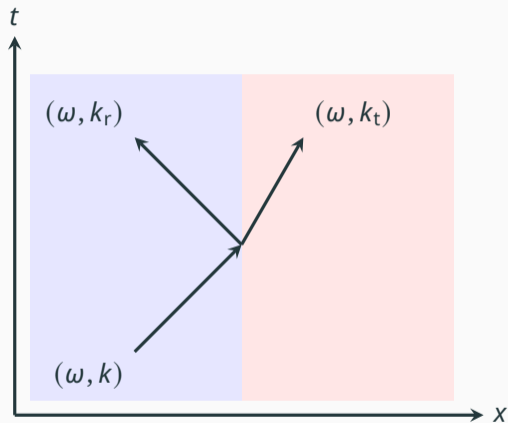
単層透過型メタ表面の限界を越える円偏光スイッチング効率の実現



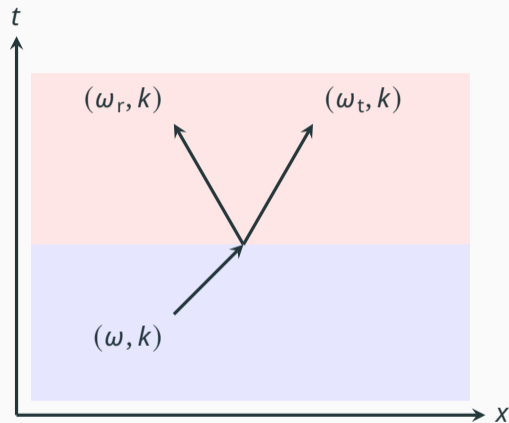


金属の繋りと時変現象

空間界面 v.s. 時間界面



角周波数 ω : 保存, 波数 k : 变化



角周波数 ω : 变化, 波数 k : 保存

問：

- ・ 時間領域で**時間壁**における周波数変換**ダイナミクス**を直接観測できるか？

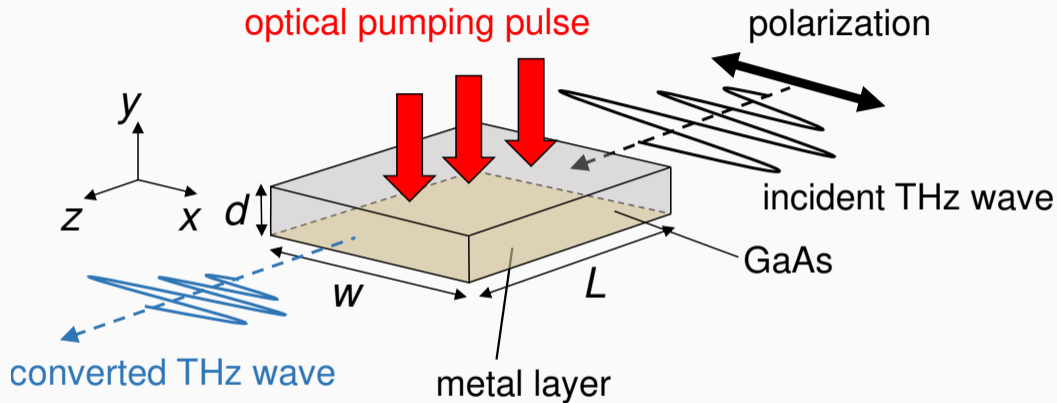
これまでの問題点：

- ・ 大きな周波数変化と高い変換効率の両立の困難

本研究での着眼点：

- ・ 金属でないものを急に金属化することで上記の問題を解決する

対象とする系

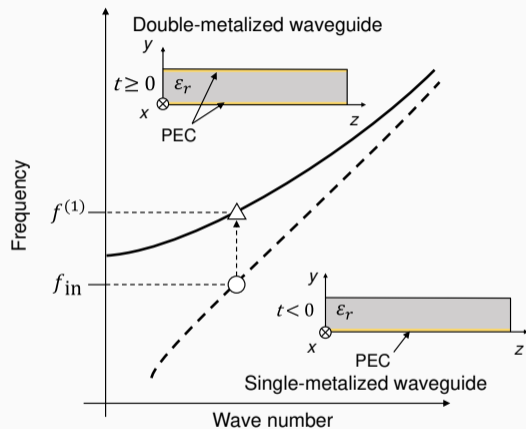


導波路下部：金属

導波路上面：パルス光によって金属化

x 方向に一様な TM モードを仮定

分散関係の変化



実際は複数のモードがでてくる

方法論：

1. $t = 0$ で片面金属導波路から両面金属導波路に変化
2. $t < 0$ の入射場を式で表す
3. $t > 0$ のモードをモード展開で表現
4. $t = 0$ で導波路内部の \mathbf{E} と \mathbf{H} を連続に繋ぐ

導波路のモード

片側金属導波路モード：

$$H_z = \begin{cases} A_{\text{in}} \cos(k_y y) \exp[j(\omega_{\text{in}} t - k_{\text{in}} z)] & (0 \leq y \leq d) \\ A_{\text{in}} \cos(k_y d) \exp[-\kappa(y - d)] \exp[j(\omega_{\text{in}} t - k_{\text{in}} z)] & (d \leq y) \end{cases}$$



両面金属導波路モード：

$$H_z = A_{\pm}^{(l)} \cos[k_y^{(l)} y] \exp[j(\pm\omega^{(l)} t - k_{\text{in}} z)] \quad (0 \leq y \leq d)$$

$$k_y^{(l)} = l\pi/d$$



これらのモードを繋ぐだけでは接続ができない

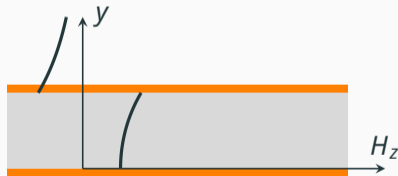
トポロジカルゼロモード

ヘルムホルツ方程式:

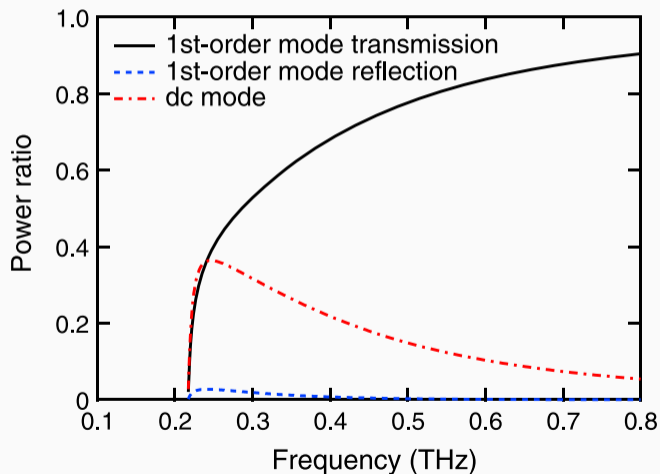
$$\left[\frac{\partial^2}{\partial y^2} - k_z^2 + \epsilon_r \left(\frac{\omega}{c_0} \right)^2 \right] H_z = 0$$

DC($\omega = 0$) でも解が**存在**

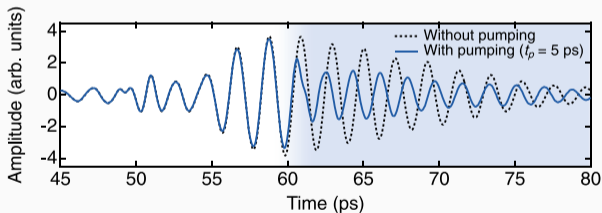
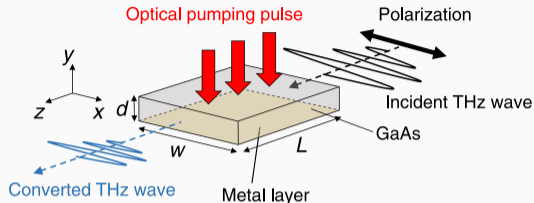
$$H_z = \begin{cases} A_0 \cosh(k_{in} y) \exp(-jk_{in} z) & (0 \leq y \leq d) \\ -A_0 \sinh(k_{in} d) \exp[-k_{in}(y - d)] \exp(-jk_{in} z) & (d \leq y) \end{cases}$$



トポロジカルゼロモードを含めると準解析的に解が構成でき変換効率が求まる



透過波の周波数変換の時間領域での観測 @信州大学



F. Miyamaru, C. Mizuo, T. Nakanishi, Y. N., K. Hasebe, S. Nagase, Y. Matsubara, Y. Goto, J. Pérez-Urquiza, J. Madéo, and K. M. Dani, Phys. Rev. Lett. **127**, 053902 (2021).

1. 金属構造の繋りと波動伝搬制御

- 自己双対 (自己補対) → 特異点
- 双対転移テラヘルツデバイスへの応用

2. 金属の繋りと時変現象

- 誘電体導波路表面をがさせ時間壁を実現できる
- 周波数変換が効率的に生じる
- DC モードも出現する