

# アクティブ・プラズモニクス

博士(工学) 梶川浩太郎  
工学博士 岡本 隆之  
博士(工学) 高原 淳一 共著  
博士(理学) 岡本 晃一

コロナ社

## ま え が き

表面プラズモンとは、金属中の自由電子波の表面近傍のモードであり、光の消衰波（エバネッセント波）をその近傍に付随する。そのため、一般には自由空間中を伝搬する光とは相互作用を起こさない。しかしながら、波長に対して十分小さい金属構造体を用いたり、回折格子やスリットを利用したりするなど、さまざまな工夫を施すことにより、自由空間中を伝搬する光とも強く相互作用することができる。また、自由空間中を伝搬する光に変換することができるようになる。

表面プラズモンの特徴には、結合条件が表面状態に強く依存すること、結合時には周辺に大きな増強電場が発生すること、などが挙げられる。結合条件が表面状態に強く依存することを利用して、90年代に蛋白質<sup>たんぱくしつ</sup>やDNAなどの生体由来分子を高感度に検出する分析機器が開発され商業的にも成功をおさめている。また、周辺に発生する増強電場を用いて、表面増強ラマン散乱や各種分光法の増感などが行われてきた。銀のナノ粒子対を使った単一分子からのラマン散乱光の測定はそのよい例といえるであろう。しかし、これらの古典的な表面プラズモンの利用法は、それがもつ特徴の一部を使っているにすぎない。表面プラズモンには、われわれが利用すべきさらに多くの特徴がある。

2000年ごろからフォトニクスやエレクトロニクス分野における表面プラズモンの利用が数多く研究されるようになってきた。表面プラズモンを利用した光技術はプラズモニクスとも呼ばれ、既存のフォトニクスにはないいくつかの特徴をもつ。その一つに、光の波長を超えた狭い領域への光のエネルギー閉込めが可能であることがある。光には回折限界があり、一般に波長より小さい領域に光を閉じ込めることは難しい。しかし、表面プラズモンを用いれば、光の波長よりも狭い領域に光を閉じ込めたり、それを空間的に導いたりすることがで

きる。また、光の状態密度を自由に変えることができるという特徴ももつため、光の閉込め効果と組み合わせ、波長より小さい共振器を有する微小なレーザーの実現を可能とする。さらに、能動素子を組み合わせることにより光を変調したりスイッチングしたりすることもできるようになってきた。すなわち、プラズモニクスの範疇においては、既存の光学素子では実現できない狭い空間でのレーザー光源、導波路、変調、そして検出と一連の素子の実現を可能とする。そのため、光素子の集積化には欠くことのできない技術となってきた。

このような新しい表面プラズモンの利用を目指した研究をするうえでは、そのメカニズムの基礎的な理解は重要である。光学の本や電磁気学の教科書はそのヒントを与えてくれるが、これらを表面プラズモンという切り口で丁寧に解説してくれる書籍や解説論文はほとんどない。本書では、このような新しい表面プラズモンを使った光学技術をアクティブ・プラズモニクスと呼び、それを大学院生や研究者に解りやすく解説することを目標とした。すでに、表面プラズモンやプラズモニクスの解説書はいくつか出版されている。それらは分野を概観するうえではよい内容となっている。一方、本書は光の能動的な利用に特化した内容となっており、研究の第一線で直接役立つような内容であると考えている。筆者らはプラズモニクスのそれぞれの分野で研究を行っており、梶川が1章、4章を、岡本隆之が2章、5章、6章を、高原が3章を、岡本晃一が7章、8章を担当した。企画から出版まで辛抱強くお世話をして頂いた、コロナ社に感謝を申し上げる。

2013年3月

著 者

# 目 次

## 1. 表面プラズモン

1.1 はじめに	1
1.2 伝搬型表面プラズモンの分散関係	1
1.3 表面プラズモンの励起	3
1.4 局在プラズモン共鳴	6

## 2. プラズモニックモードの結合

2.1 表面プラズモンにおける結合	10
2.1.1 同一の二つの共振器の結合	10
2.1.2 一般的な二つの共振器の結合	12
2.1.3 正規モード分裂	15
2.1.4 表面プラズモン誘起透明化	18
2.1.5 ファノ共鳴	22
2.2 励起子ポラリトン	24
2.2.1 弱結合と強結合	24
2.2.2 ラビ分裂の古典論的取扱い	25
2.2.3 ラビ分裂の観測	26
2.2.4 表面プラズモンとの強結合	27
2.3 入力の共振器への結合	29

### 3. プラズモニック導波路

3.1	プラズモニック導波路の概要	36
3.2	導波路解析のための準備	38
3.2.1	マクスウェル方程式	38
3.2.2	分散関係と波長	40
3.2.3	導波路解析の概要	42
3.2.4	直交座標系におけるマクスウェル方程式の成分表示	43
3.2.5	円筒座標系におけるマクスウェル方程式の成分表示	45
3.2.6	媒質の誘電率と透磁率	49
3.3	基本構造	52
3.4	導波路としての誘電体・金属界面	53
3.4.1	平面誘電体・負誘電体界面の特性方程式	53
3.4.2	電磁場分布	56
3.4.3	ポインティングベクトル	57
3.4.4	分散関係	58
3.5	平面型プラズモニック導波路	61
3.5.1	特性方程式	61
3.5.2	負誘電体薄膜導波路	67
3.5.3	負誘電体ギャップ導波路	69
3.5.4	ナノ光導波路	70
3.6	円筒型プラズモニック導波路	71
3.6.1	負誘電体ロッドの特性方程式	71
3.6.2	負誘電体ロッドの伝搬モード	77
3.6.3	負誘電体ロッドのビーム半径	78
3.6.4	その他の円筒型負誘電体導波路	79

3.7 プラズモニック導波路の損失	79
3.8 超 集 束	82
3.8.1 テーパー型プラズモニック導波路	82
3.8.2 楔形負誘電体導波路	83
3.9 ナノ光集積回路への応用	87
3.9.1 光集積回路と回折限界	87
3.9.2 その他のプラズモニック導波路	88
3.9.3 カ ッ プ ラ ー	91
3.9.4 受動型機能性 PWG	92
3.9.5 能動型機能性 PWG	93

## 4. 非線形プラズモニクス

4.1 非線形光学効果	95
4.1.1 は じ め に	95
4.1.2 非線形分極を起源とする非線形光学効果	95
4.1.3 非線形分極を起源としない非線形光学効果	98
4.2 層構造からの高調波発生	101
4.2.1 金属表面からの SHG	101
4.2.2 界面における高調波発生の反射と透過	102
4.2.3 多層膜における反射率の計算	108
4.2.4 多層膜からの SHG	109
4.2.5 表面プラズモン増強 SHG の計算結果	112
4.3 球構造からの高調波発生	117
4.3.1 コアシエル構造	117
4.3.2 コアシエル構造の吸収と散乱	118
4.3.3 コアシエルからの光高調波発生	124

4.4	ハイパーレイリー散乱	128
4.4.1	ハイパーレイリー散乱	128
4.4.2	金属ナノ粒子におけるハイパーレイリー散乱	129
4.5	光整流とフォトンドラッグ効果	134
4.5.1	はじめに	134
4.5.2	表面プラズモンと光整流	136
4.5.3	表面プラズモンとフォトンドラッグ効果	139
4.6	多光子蛍光	140
4.6.1	はじめに	140
4.6.2	2光子蛍光強度	141
4.6.3	金ナノ構造からの2光子蛍光の利用	148

## 5. 蛍光増強および有機 EL 素子の光取出し

5.1	表面プラズモンによる蛍光増強	151
5.1.1	はじめに	151
5.1.2	パーセル因子と自然放出増強度	153
5.1.3	自由空間における振動双極子のエネルギー散逸	154
5.1.4	基板上の振動双極子のエネルギー散逸	155
5.1.5	層内に置かれた振動双極子のエネルギー散逸	158
5.1.6	表面プラズモンへのエネルギー移動	159
5.1.7	電子-正孔対の生成の波数依存性	162
5.1.8	金属ナノ粒子へのエネルギー散逸	163
5.1.9	FDTD 法による自然放出増強度の計算	167
5.1.10	表面プラズモンによる蛍光増強	169
5.2	プラズモニック構造による有機 EL 素子の高効率化	175
5.2.1	はじめに	175

5.2.2	有機 EL 素子における励起子のエネルギー散逸	180
5.2.3	プラズモニック結晶による光取出し効率の向上	182
5.2.4	高指向性有機 EL 素子	185
5.2.5	金属/誘電体/金属構造電極を用いた波長選択有機 EL 素子	186

## 6. 表面プラズモンの増幅とプラズモニック・レーザー

6.1	利得媒質との相互作用	189
6.1.1	利得媒質との界面における全反射	189
6.1.2	利得媒質との界面における伝搬型表面プラズモン	193
6.1.3	局在型表面プラズモン共鳴における利得媒質	195
6.2	表面プラズモンの増幅	196
6.2.1	単一界面表面プラズモンの増幅	196
6.2.2	長距離伝搬型表面プラズモンの増幅	197
6.3	プラズモニック・レーザー	200
6.3.1	プラズモン導波路を用いた量子カスケードレーザー	200
6.3.2	MIM 導波路を用いた半導体レーザー	202
6.3.3	spaser	203
6.3.4	ハイブリッド・プラズモンモードを用いたレーザー	204

## 7. プラズモニック LED

7.1	固体発光デバイスの現状	209
7.1.1	InGaN/GaN 系 LED の問題点	209
7.1.2	LED の発光効率の改善方法	211
7.2	プラズモニクスを利用した光取出し効率の改善	212
7.2.1	GaAs 系 LED の光取出し効率の改善	212



7.2.2	ナノ回折格子による光と表面プラズモンの相互作用	214
7.3	プラズモニクスを利用した輻射再結合速度の改善	215
7.3.1	GaAs 系赤外発光 LED の高効率化	215
7.3.2	InGaN/GaN 系 QW におけるパーセル効果	216
7.3.3	InGaN/GaN 系 QW による青色発光の高効率化	217
7.3.4	自然放出速度の増加とパーセル増強因子	220
7.4	さまざまな材料系におけるプラズモニク発光増強	221
7.4.1	有機材料や半導体ナノ微粒子への応用	221
7.4.2	シリコンナノフォトニクスへの応用	223
7.5	プラズモニク LED の可能性	225
7.5.1	プラズモニク LED の動作原理	225
7.5.2	プラズモニク LED デバイスの可能性	227
7.5.3	光取り出し効率の向上を目指したプラズモニク LED	229
7.5.4	金属アイランド構造を埋め込んだプラズモニク LED	232
7.5.5	ドライエッチングを用いたプラズモニク LED	234
7.5.6	プラズモニク LED の将来展望	237

## 8. プラズモニク太陽電池

8.1	太陽電池の現状と問題点	239
8.2	プラズモニク太陽電池の基本タイプ	241
8.3	伝搬型表面プラズモンを利用した太陽電池	242
8.3.1	プリズムによる減衰全反射法の利用	242
8.3.2	ナノグレーティング構造の利用	244
8.3.3	透過光増強効果の利用	246
8.4	局在型表面プラズモンを利用した太陽電池	250
8.4.1	金属微粒子による光散乱・吸収増強の利用	250

8.4.2	金属微粒子の近接場相互作用の利用	252
8.4.3	その他の表面プラズモン共鳴の利用	255
8.5	お わ り に	258
<b>付</b>	<b>録</b>	<b>260</b>
A.1	クレッチマン配置における共鳴曲線	260
A.2	ポインティングの定理	262
A.3	基板上の双極子の輻射	263
A.4	遅延が無視できない場合の局在表面プラズモンへのエネルギー移動	269
<b>引用・参考文献</b>		<b>274</b>
<b>索</b>	<b>引</b>	<b>300</b>

# 1

# 表面プラズモン

## 1.1 はじめに

金属中の自由電子は、高い電気伝導度などの金属物性において重要な役割を担っている。自由電子の集団振動をプラズマ波と呼び、それが量子化されたものがプラズモンである。一般に電子の疎密波であるプラズモンは縦波であるのに対して、光波（フォトン）は横波であるためプラズモンと相互作用を起こさない。そのため、金属は高い光の反射率を示し、鏡などに用いられる。しかしながら、表面に局在するプラズモンモードは横波であるため、光と相互作用を起こすことが可能である<sup>1)~4)</sup>。これを表面プラズモンポラリトン、あるいは単に表面プラズモンと呼ぶ。表面プラズモンを大きく分けると、金属表面を伝搬する「伝搬型表面プラズモン」とナノメートルサイズの金属ナノ構造に局在する「局在型表面プラズモン」がある。ただし、両者は明確に区別されるわけではなく、例えば、粗い表面における表面プラズモンなど、それらの中間に位置づけられる表面プラズモンもある。

## 1.2 伝搬型表面プラズモンの分散関係

図 1.1 (a) に示したように、空気などの周辺媒質（誘電率  $\epsilon_1$ ）と金属（誘電率  $\epsilon_2$ ）があり、ここへ波数  $k$  をもつ p 偏光の光が入射した場合を考える。表面における境界条件、電場と磁場の接線成分が連続であること、電気変位と磁気

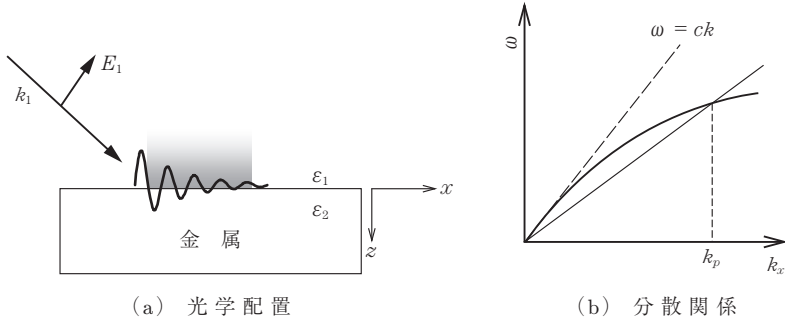


図 1.1 表面プラズモンの光学配置と分散関係

変位の法線成分が連続であることから、以下の式が導かれる。

$$\frac{k_{1z}}{\varepsilon_1} + \frac{k_{2z}}{\varepsilon_2} = 0 \quad (1.1)$$

ここで、 $k_{iz}$  は媒質  $i$  における光の波数ベクトルの  $z$  方向成分である。

スネルの法則により波数ベクトル  $\mathbf{k}$  の  $x$  方向成分が保存されることから、 $k_{iz}$  は光の波数ベクトルの  $x$  方向成分である  $k_x$  との間に下記の関係をもつ。

$$k_{zi} = \sqrt{\varepsilon_i \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - k_x^2} \quad (1.2)$$

これを用いて、式 (1.1) を解くと

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}\right)} \quad (1.3)$$

となる。 $k_x$  は金属層の波数の  $x$  成分でもあるので、これを表面プラズモンの波数  $k_{sp}$  に直せば、表面プラズモンの分散関係となる。金属の誘電率にドルーデモデルを用いたときの表面プラズモンの分散関係を図 1.1 (b) に実線で示す。ドルーデモデルでは、周波数  $\omega$  における誘電率  $\varepsilon$  は、その金属のプラズマ周波数  $\omega_p$  を使って以下のように記述される。

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^2 \quad (1.4)$$

また、自由空間中を伝搬する光の分散関係 (ライトライン) を破線で示した。ここに示すように、同じ周波数では、表面プラズモンの波数は自由空間のそれよ

りもつねに大きい。表面プラズモンを励起するためには、両者が一致する必要があるため、自由空間中を伝搬する光では表面プラズモンを励起できないことがわかる。そこで、後に示すように、励起には全反射減衰法を用いたり、回折格子を使って、それらを一致させる必要がある。

表面プラズモンの波数  $k$  の実部  $k'$  と虚部  $k''$  は、金属の誘電率の実部  $\varepsilon_2'$  と虚部  $\varepsilon_2''$  を用いて

$$k'_x = \left(\frac{\omega}{c}\right) \sqrt{\frac{\varepsilon_1' \varepsilon_2}{\varepsilon_1' + \varepsilon_2}} \quad (1.5a)$$

$$k''_x = \left(\frac{\omega}{c}\right) \left(\frac{\varepsilon_1' \varepsilon_2}{\varepsilon_1' + \varepsilon_2}\right)^{3/2} \left(\frac{\varepsilon_1''}{2\varepsilon_1'^2}\right) \quad (1.5b)$$

と表される。これより、表面プラズモンの伝搬長  $L_p$  は下記のように求めることができる。

$$L_p = \frac{1}{2k''_x} \quad (1.6)$$

これより求まる伝搬長は赤～緑の領域の光を用いた場合、銀では 20～30  $\mu\text{m}$ 、金では 5  $\mu\text{m}$  程度となる。

### 1.3 表面プラズモンの励起

光を用いて伝搬型の表面プラズモンを励起するためには、光と表面プラズモンの分散関係を一致させる工夫が必要である。図 1.1 (b) に示したように、表面プラズモンの波数は自由空間中を伝搬する光の波数より大きいためである。これを実現する一つの方法に全反射減衰法 (attenuated total reflection, ATR) の利用がある。ATR 配置を用いると反射する表面を隔てて、入射光と反対側の表面近傍にエバネッセント光が生じる。エバネッセント光は、波数ベクトルの表面法線方向成分が虚数であるため表面から離れると急激に減衰する。一方、表面に沿った方向の波数は実数であり、その  $x$  成分  $k_x$  は下記のように表される。

$$k_x = \left(\frac{\omega}{c}\right) \sqrt{\varepsilon_1} \sin \theta_1 \quad (1.7)$$

#### 4 1. 表面プラズモン

となる。これを図 1.1 (b) にプロットすると、波数の面内成分はその中の細線のようになる。両者の交点が存在するため、ここ  $k_x = k_p$  において表面プラズモンを励起することが可能となる。最初にこの考えを取り入れて、表面プラズモンを励起したのは、オッター (Otto) 配置と呼ばれる図 1.2 (a) のような光学配置である。全反射の際に生じるエバネッセント光は、式 (1.7) のような関係をもつためこれを利用して表面プラズモンを励起することができる。この配置における入射角-反射曲線は 4.2.3 項に示した伝搬行列法などを用いて求めることができる。その計算例を図 (b) に示す。全反射角  $\theta_c$  よりも高角度側で表面プラズモンが励起され (表面プラズモン共鳴), 入射光のエネルギーは金属薄膜に吸収され反射率が急激に低下する。反射率が最小の角度を共鳴角  $\theta_r$  と呼ぶ。

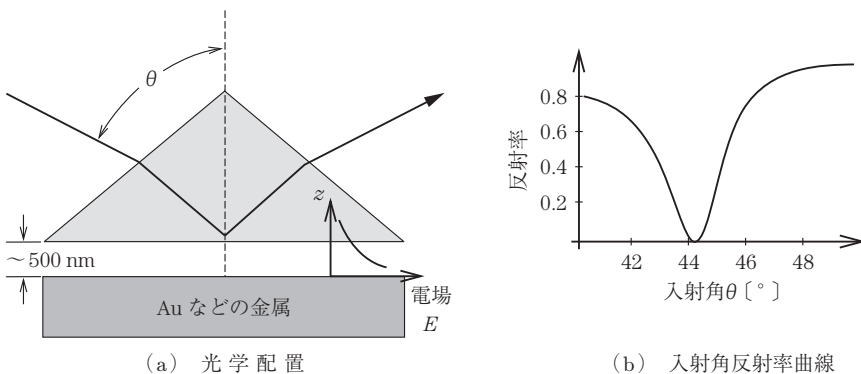


図 1.2 オッターが考えた表面プラズモン励起

しかしながら、実際にオッター配置を実現することは容易ではない。オッター配置では、数百ナノメートルのギャップ層が必要であり、空気ギャップをつくるのは困難である。また、ギャップ層に高分子薄膜などを用いた場合でも、その膜厚を精密に制御しなければならない。ギャップの厚さがその反射率特性に大きな影響を与えるためである。また、応用上もギャップが非常に狭いことは好ましくない場合が多い。そのため、今日では、図 1.3 (a) に示したような、プリズム底面に直接金属薄膜を堆積したクレッチマン (Kretschmann) 配置がよく用いられる。金属薄膜の厚さは、金や銀では約 50 ナノメートル、アルミニ

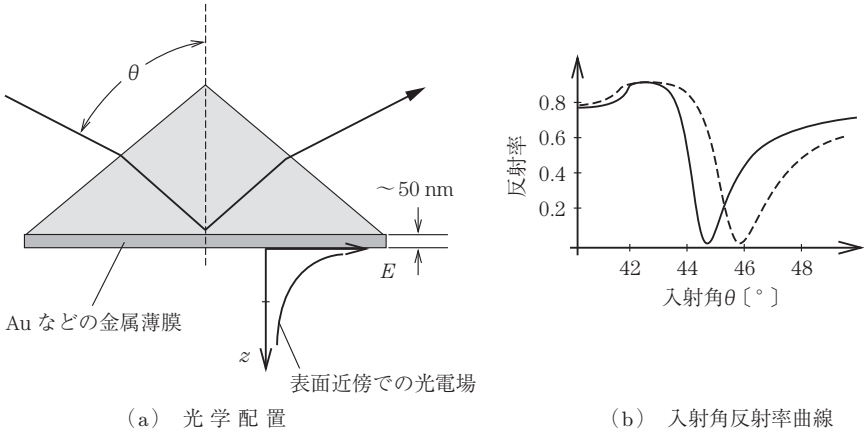


図 1.3 クレッチマンが考えた表面プラズモン励起

ウムでは 10 ナノメートル程度である。この場合も入射角に対する反射曲線は伝搬行列法などで求めることができる。この様子を図 (b) に示す。実線で示したように、表面プラズモンが励起されると入射光のエネルギーは金属薄膜に吸収され反射率が低下する。共鳴条件は金属表面の状態に敏感であるため、表面に物質が存在する場合には、破線で示したように  $\theta_r$  はわずかに高角度側にシフトする。これを利用すれば、表面近傍における物質の脱離や吸着を高い感度でモニターすることができ、この原理は化学や生物学の分野で物質の検出に広く利用されている。

伝搬型表面プラズモンのもう一つの励起方法に回折格子の利用がある。図 1.4 (a) に示すように、回折格子ベクトル  $\mathbf{G}$  をもつ金属の回折格子に波数  $k_1$  をもつ p 偏光の光を入射する場合を考える。グレーティングベクトル  $\mathbf{G}$  は格子定数  $\Lambda$  を用いて以下のような関係がある。

$$|\mathbf{G}| = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{1.8}$$

すると、回折格子により入射光が散乱され、図 (b) に示すようにその分散関係は回折格子ベクトル  $\mathbf{G}$  の整数倍だけシフトする (あるいは表面プラズモンの分散関係がシフトすると考えてもよいが、図が煩雑になる)。これを式で表すと以

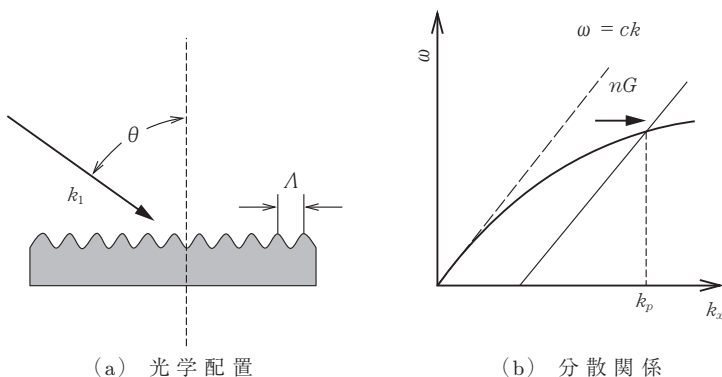


図 1.4 金属回折格子を用いた表面プラズモンの励起

下のようになる。

$$k_{sp} = |k_1| \sin \theta \pm N|G| \quad (1.9)$$

ここで、 $k_{sp}$  は、表面プラズモンの波数であり、 $N$  は整数である。その交点に対応する波数ベクトルをもつように入射角  $\theta$  を調整すれば表面プラズモンを励起することができる。

表面プラズモンの一つの特徴に電場の増強効果がある。表面近傍には距離とともに指数関数的に減衰するエバネッセント場が生じる。共鳴時にはこれが著しく増強するため、ラマン散乱や蛍光強度、非線形光学効果などを強めることができる。電場の増強率は計算により求めることができ、金属種や条件によっても異なるが、おおむね 5~20 倍である。

## 1.4 局在プラズモン共鳴

金属表面の表面プラズモン共鳴の他にナノメートルサイズの金属微粒子中の電子波も光と相互作用して共鳴する。これを局在型表面プラズモン共鳴、あるいは単に局在プラズモン共鳴と呼ぶ。金属薄膜中に生じる伝搬型の表面プラズモン共鳴と同じように、共鳴条件が金属微粒子の表面近傍の状態に敏感である



# 索引

<b>【あ】</b>	カップラー	91	金属薄膜導波路	53, 61	
アイランド構造	232	過飽和吸収	98	<b>【く】</b>	
アクションスペクトル	244	がん細胞のイメージング	149	空間電荷領域	136
アクティブ・プラズモニクス	88	緩和レート	153	偶結合モード	66
アモルファスシリコン	245	<b>【き】</b>		駆動電流依存性	229
アレニウスプロット	224	幾何学的パラメータ	14	クラウジウス・モソツティーの式	100
<b>【い】</b>		規格化されたポテンシャル	127, 144	グリーンギャップ問題	210
位相速度	59	規格化したポテンシャル	118	グレイン構造	218
位相変化	108	奇結合モード	66	クレッチマン配置	4, 33, 243, 260
<b>【う】</b>		擬似静電場近似	7, 118	群速度	59, 60
ウィスパリング・ギャラリー・モード	208	機能性 PWG	93	<b>【け】</b>	
<b>【え】</b>		基板モード	176	蛍光増強	169
エバネッセント波	41	基本逆格子ベクトル	182	蛍光量子効率	171
エピタキシャルリフトオフ	215	球座標系	144	係数行列	103, 107
円筒型導波路	53	吸収断面積	7, 120	結合共振器誘起透明化	19
エンドファイヤー法	92	境界条件	103	結合定数	31
<b>【お】</b>		境界における連続条件	102	結合モード	15
オットー配置	4	強結合領域	24	結晶シリコン	250
オーミックコンタクト	228	共振器	216	原子間力顕微鏡	232
オーム損失	80	共振器ポラリトン	25	検出限界	133
<b>【か】</b>		共鳴透過	184	減衰全反射法	241
回折限界	36	局在型表面プラズモン	92, 230, 240	<b>【こ】</b>	
回折格子	5, 138, 140	局在型表面プラズモン共鳴	6, 126	コアシェル構造	117
外部損失レート	30	局在・伝搬混在モード	256	抗原	133
外部量子効率	210	局在プラズモン共鳴	6	高効率シリコン LED	224
カットオフ	68, 69	局所状態密度	200	抗体	133
		局所場因子	117	高調波発生	124
		近赤外光	148	光電変換効率	239
		近接場相互作用	222	光熱治療	150
		金属ギャップ導波路	53, 61		
		金属導波路	53		

<b>【さ】</b>		<b>【せ】</b>	<b>【て】</b>
再生利用エネルギー	239	正規モード分裂	15
三角格子	182	性能指数	80
酸化チタン	257	石英平面光波回路	87
散乱断面積	7, 120, 195	切断球	143
		全反射減衰法	
<b>【し】</b>			3, 91, 136, 139
時間分解発光測定	220	<b>【そ】</b>	
磁気双極子生成	130	増強因子	8
磁気双極子モーメント	20	増強自然放出	197
色素自己組織化単分子膜	136	走査型電子顕微鏡	218
色素増感太陽電池	254		
色素分子	222	<b>【た】</b>	
磁気ダイポール	101	対称モード	66
四重極子	129	太陽光発電	239
四重極子モーメント	18	太陽電池	239
自然放出増強度	154	ダークモード	18
自然放出レート	153	多光子吸収	99
浸み込み深さ	219	多光子蛍光	100, 140
弱結合領域	24	多重極	164
集束ビーム	99	多重極係数	119, 126, 145
縮退 4 波混合	97	多重極子	129
準変数分離法	83	多層膜	108
消光	172	ダブル・プラズモン導波路	
消衰定数	80		202
状態密度	151, 221	ダブルヘテロ構造	213
焦電効果	135	短距離伝搬表面プラズモン	
ショットキーダイオード	213		16, 68
シリカビーズ	236	断熱的ナノ集束	83
シリコンナノ微粒子	223	<b>【ち】</b>	
真空波長	41, 42	遅延	130
真空ラビ分裂	25	チャンネル導波路	90
シングル・プラズモン		チャンネルプラズモンポラリ	
導波路	202	トン	90
浸透膜厚	138	長距離伝搬表面プラズモン	
侵入長	57		16, 68
<b>【す】</b>		超集束	82
スペーサー層	219	超集束モード	
スラブ型導波路	88		71, 77, 82, 87
スリットアレイ構造	249	超分極率	132
スロット型導波路	88		
		テラヘルツ	201
		テラヘルツ波	137
		電気カー効果	97
		電気感受率	95
		電気光学効果	96
		電気磁気双極子結合	130
		電気四重極子	101
		電気四重極子生成	130
		電気四重双極子結合	129
		電気双極子	154
		電気双極子近似	95
		電気双極子生成	129
		電子移動	257
		電磁エネルギー密度	263
		電子線描画	231
		電磁誘起透明化	18
		電子流体力学モデル	101
		伝送損失	79
		電場行列	108
		伝搬型表面プラズモン	1
		伝搬距離	80, 81
		伝搬定数	42
		電流注入	229
		<b>【と】</b>	
		等価屈折率	42, 205
		透過係数	109
		透過光増強	246
		透過率	109
		導体	51
		導波モード	42
		特性方程式	43
		ドナーアクセプター界面	242
		ドルーデモデル	50
		<b>【な】</b>	
		内部損失レート	30
		内部量子効率	211
		七量体	23
		ナノアイランド構造	250
		ナノ開口アレイ	246

ナノ回折格子	212, 242
ナノキャピティ	216
ナノグローブ構造	245
ナノシート構造	256
ナノ集束	82
ナノトライアングル	133
ナノトライアングル構造	236
ナノパン・レーザー	208
ナノ光カップラー	92
ナノ光集積回路	88
ナノ光導波路	36, 71
ナノ微粒子	228, 250
ナノブロック構造	258
ナノロッド	148
<b>【ね】</b>	
熱光学効果	100
<b>【の】</b>	
能動型機能性 PWG	94
<b>【は】</b>	
ハイパーレイリー散乱	128
ハイブリダイゼーション	15, 134
ハイブリッド・プラズモン モード	204
ハイブリッドモード	46, 75, 77
パーセル因子	153
パーセル効果	178, 216
パーセル増強因子	216
発光増強	218
発光ダイオード	209
発光の高効率化	217
バルクヘテロ接合	252
反結合モード	15
反射係数	109
反射率	109
反対称モード	66
反転対称性	98
バンド間遷移	160
バンド内遷移	160

**【ひ】**

光アンテナ	92
光アンテナ効果	252
光カー効果	96, 97
光高調波発生	96
光自己集束効果	97
光集積回路	87
光整流	134, 136
光整流効果	96
光双安定	96, 97
光第 2 高調波発生	96, 129
光第 3 高調波発生	97
光・電子集積回路	87
光電流	240
光取出し効率	211
光・光集積回路	87
光飽和吸収	98
光和周波発生	96
非線形光学効果	95
非線形光電効果	138
非線形分極	95, 104
非線形分極ベクトル	110, 111
非輻射緩和	170
非輻射再結合速度	211
非輻射領域	60
ビーム半径	78
表面波	37, 55
表面プラズモン	59, 213, 240
表面プラズモン増強 SHG	112
表面プラズモンポラリトン	37, 240
表面プラズモン誘起透明化	20
微粒子アレイ構造	230
<b>【ふ】</b>	
ファノ共鳴	22
ファノモード	56

ファブリー・ペロー共振器	188
フェルミの黄金律	221
フェルミ波数	162
フォトダイオード	248
フォンドラッグ効果	134, 139
フォトン-SP 結合	226
輻射再結合速度	211
輻射領域	60
負誘電体	36, 51
負誘電体ギャップ	64, 65, 69
負誘電体薄膜	62, 64, 67
負誘電体光導波路	36
負誘電体ロッド導波路	71
プラズマ角周波数	50
プラズモニク結晶	172, 182
プラズモニク導波路	36
プラズモニク発光増強	218
プラズモニク・バンド ギャップ	246
プラズモニク LED	225, 227
ブルズアイ構造	247
分極波	105
分極ベクトル	105
分極率	119
分散関係	2, 5, 41, 58, 214, 220
分布ブラッグ反射	249

**【へ】**

平面型導波路	52
ベッセルの微分方程式	47
ベッセルの変形微分方程式	47
ヘルツベクトル	263
ヘルムホルツ方程式	41, 45
変数分離	83
変数分離法	47

**【ほ】**

ポインティングベクトル  
40, 57, 263

放射モード 60

ボーズ・アインシュタイン  
凝縮 25

ポッケルス効果 97

ポラリトン 37

ポラリトンレーザー 25

ホールアレイ構造 234

ホログラフィック露光法 183

ボンデロモーティブ効果 139

**【ま】**

マクスウェル方程式 38

**【む】**

無損失導波路 79

無損失ドルーデモデル 51

**【め】**

面内波数 160

面発光レーザー 247

**【も】**

モード体積 153

モード密度 151

**【ゆ】**

有機薄膜太陽電池 249, 253

有機 EL 237

有機 EL 素子 175

有限差分時間領域法 167, 216

有損失導波路 79

誘電体 36

誘電体光導波路 36

**【ら】**

ライトコーン 183

ライトライン 60, 214

ラディアル偏光 74, 77

**【り】**

利得係数 189

量子井戸 209

量子カスケードレーザー 200

量子ドット 222

臨界結合 33

**【る】**

ルミナスモード 18

**【れ】**

励起子 211, 240

励起子ポラリトン 25

励起子-SP 結合 226

励起子-SP 結合速度 220

連成振動 12

連成振り子 10

**【A】**

AFM 232

ATR 3

ATR 配置 3

ATR 法 136, 139, 140, 241

**【C】**

CdSe 222

CPP 90

CPS 理論 152

**【D】**

D 36

DBR ミラー 249

DNA 134

**【E】**

EGFR 149

EIT 18

EQE 210

**【F】**

FDTD 法 167, 216

FOM 80

**【G】**

GaAs 213

**【H】**

HRS 128

**【I】**

IMI 53

IMIMI 186

InGaN/GaN 211

I-V 特性 234, 245

**【K】**

Kretschmann 配置 4

**【L】**

LED 209

light line 60

LRSP 16, 68

LSP 92, 230, 240

LSW 160

**【M】**

MIM 53, 186

MIMI 201

**【N】**

ND 36

**【O】**

OEIC 87

Otto 配置 4

overcoupling 33

	<b>[P]</b>	SEM	218		<b>[U]</b>	
		SHG	97, 104, 129		undercoupling	33
PIC	87	SP	59, 213, 240		<b>[W]</b>	
PLC	87	SP 共鳴振動数	214		Wood's anomaly	23
pn 接合	228	SP ポラリトン	214		<b>[Z]</b>	
PWG	36	spaser	203		Zenneck 波	156
	<b>[Q]</b>	SPP	37, 214, 240		ZnO	222
QD	222	SPP の存在条件	56		<b>[記号・数値]</b>	
	<b>[R]</b>	SRSP	16, 68		$\pi$ 電子系共役ポリマー	222
					2 光子蛍光	148
		<b>[T]</b>			2 光子蛍光強度	141
RNA	134	TE モード	44		2 次電気光学効果	97
	<b>[S]</b>	THG	97, 104			
		TM モード	44			
SAM	136	TPL	148			
SCR	136					

—— 著 者 略 歴 ——

梶川 浩太郎 (かじかわ こうたろう)

1987年 東京工業大学工学部有機材料工学科卒業  
1989年 東京工業大学大学院修士課程修了  
(有機材料工学専攻)  
1989年 東京工業大学教務職員  
1991年 東京工業大学助手  
1992年 博士(工学)(東京工業大学)  
1993年 理化学研究所フロンティア研究員  
1994年 理化学研究所基礎科学特別研究員  
1996年 名古屋大学助手  
1999年 東京工業大学助教授  
2007年 東京工業大学准教授  
2008年 東京工業大学教授  
現在に至る

岡本 隆之 (おかもと たかゆき)

1981年 大阪大学工学部応用物理学科卒業  
1986年 大阪大学大学院博士後期課程修了  
(応用物理学専攻)  
工学博士  
1986年 理化学研究所(現 独立行政法人理化学  
研究所)勤務  
現在に至る

高原 淳一 (たかはら じゅんいち)

1990年 大阪大学基礎工学部電気工学科卒業  
1995年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期  
課程修了(物理系専攻)  
博士(工学)  
1995年 大阪大学助手  
2003年 大阪大学助教授  
2010年 大阪大学教授  
2010年 大阪大学フォトンクス先端融合研究セン  
ター教授(センター長代理)  
現在に至る

岡本 晃一 (おかもと こういち)

1991年 同志社大学工学部化学工学科卒業  
1994年 京都大学大学院修士課程修了(化学専攻)  
1998年 京都大学大学院博士後期課程修了  
(化学専攻)  
博士(理学)  
1998年 京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラ  
トリー講師  
2001年 カリフォルニア工科大学博士研究員  
2004年 カリフォルニア工科大学上級博士研究員  
2005年 カリフォルニア工科大学シニア・リサー  
チ・フェロー  
2007年 京都大学特命准教授  
2011年 九州大学先端物質化学研究所准教授  
現在に至る

# アクティブ・プラズモニクス

Active Plasmonics

© Kajikawa, T. Okamoto, Takahara, K. Okamoto 2013

2013年5月23日 初版第1刷発行



検印省略

著者 梶川 浩太郎  
岡本 隆之  
高原 淳一  
岡本 晃一  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00836-4 (金) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします