

基礎から学ぶ光物性

第5回 回折限界を超えて：超解像、近接場



東京農工大学
佐藤勝昭

第5回講義で学ぶこと

回折限界を超えて微細なものを観察する手段としての超解像および近接場について学びます。

超解像

- マスクの開口を使った超解像
- 磁気誘起超解像
- 位相シフトを利用した超解像（リソグラフィ用）

近接場

超解像(super-resolution)とは

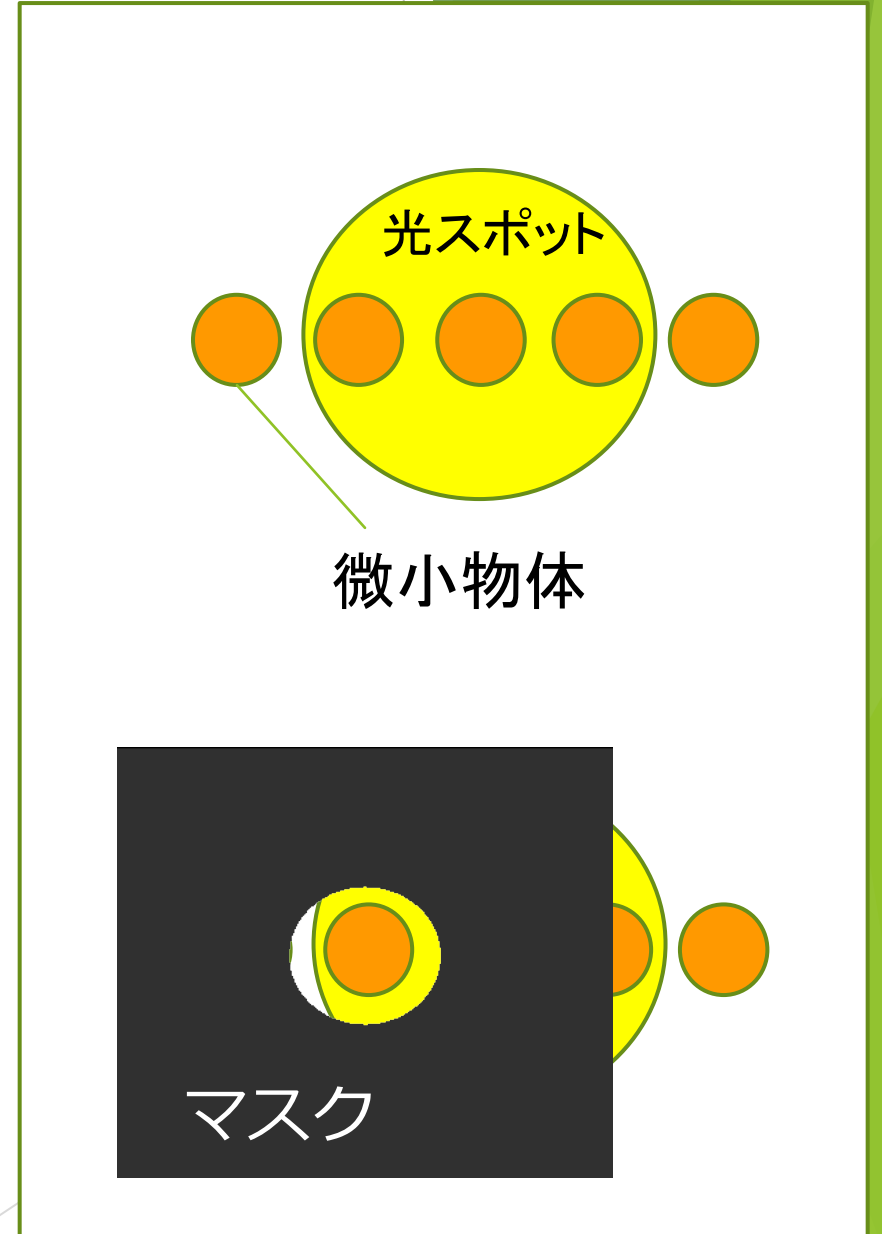
- ▶ 第4回講義で学んだように、結像系における分解能は $d=0.61\lambda/NA$ で与えられる回折限界を越えることがむずかしいのです。
- ▶ しかし、回折限界以下の小さな開口(aperture)を使ったり、位相シフトを使ったりして、回折限界を超える分解能を得る技術が使われています。

超解像のいろいろ

- ▶ マスクの開口を使った超解像
- ▶ 磁気誘起超解像
- ▶ 位相シフトを利用した超解像（リソグラフィ用）

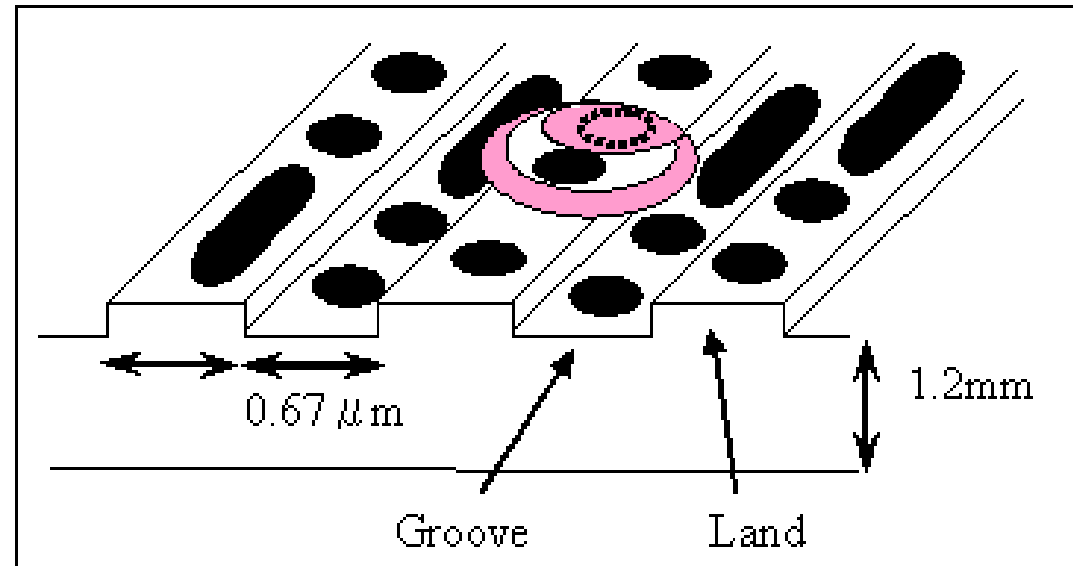
微小開口を用いた超解像

- ▶ 回折限界によって光スポット半径は $0.61\lambda/NA$ より小さくできません。このため、上の図のように微小物体のサイズが光スポットのサイズより小さいと、1つ1つの物体を区別できません。
- ▶ しかし、下図のようにマスクに開口部を作って移動すると、1つ1つを区別できるようになります。
- ▶ この原理はGIGAMOディスクに使われています。



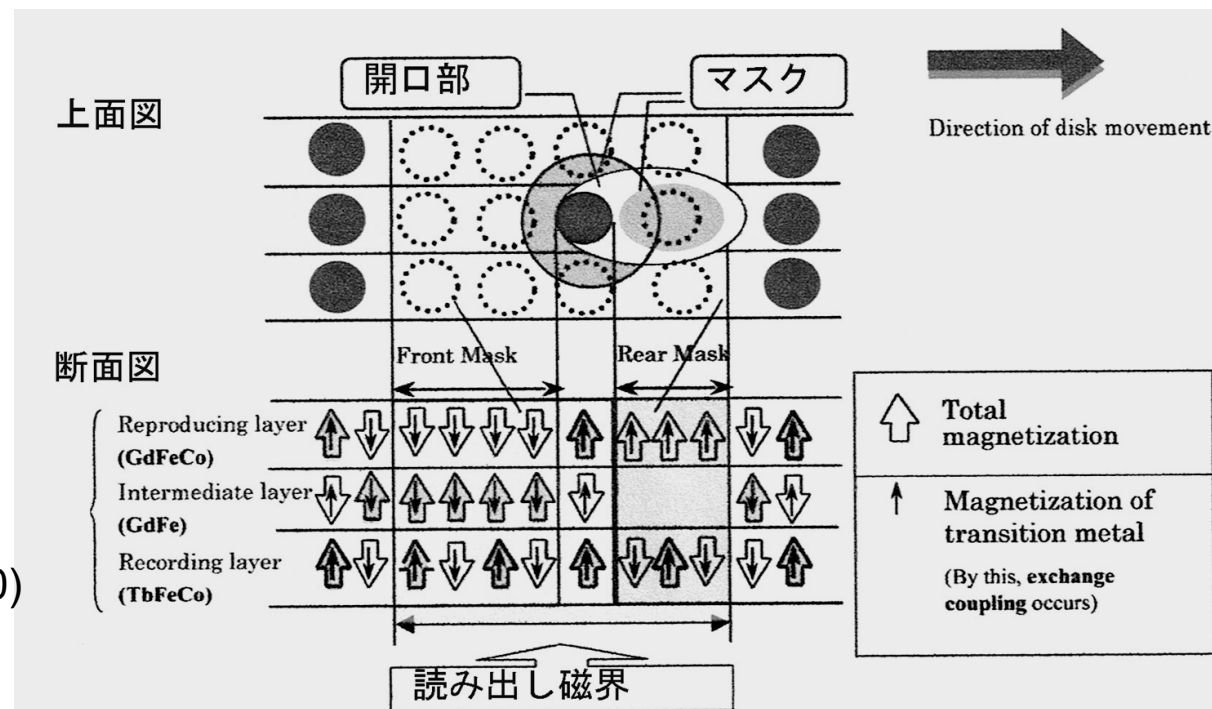
磁気誘起超解像技術(MSR)

- ▶ 光磁気記録では、磁気誘起超解像(MSR)技術が実用化されており、これを採用したGIGAMO (2.3GB規格)では、 $\lambda=650\text{ nm}$ (赤色レーザー)を用いて回折限界を超える直径 $0.233\mu\text{m}$ のマークを読みとっていました。



GIGAMOの磁気超解像の原理

- ▶ GIGAMOではDRAD (double-mask rear aperture detection)という磁気超解像の方式が使われています。磁気超解像では、記録層と読み出し層に分け、記録層を磁界で消去しておき、光があたったときに転写するとともに中間層を熱スイッチとして用いて、読み出したいマーク以外が転写されないように工夫しています。



K.Itoh et al.: JJAP 39 (2000)
Pt 1. No. 2B, 714-718

位相シフト法

- ▶ 半導体のフォトリソグラフィにおいては、エキシマーレーザーの深紫外光を利用して露光を行っていますが、位相シフト技術を使うことによって、通常の結像系で得られるものの倍の解像力を得ています。
- ▶ 左図のように単純なマスクの配列では、回折限界のため、3つのパターンが分解していませんが、右図のように位相を 180° ずらせてやると中間に光強度の極小部ができて、分解するようになるのです。

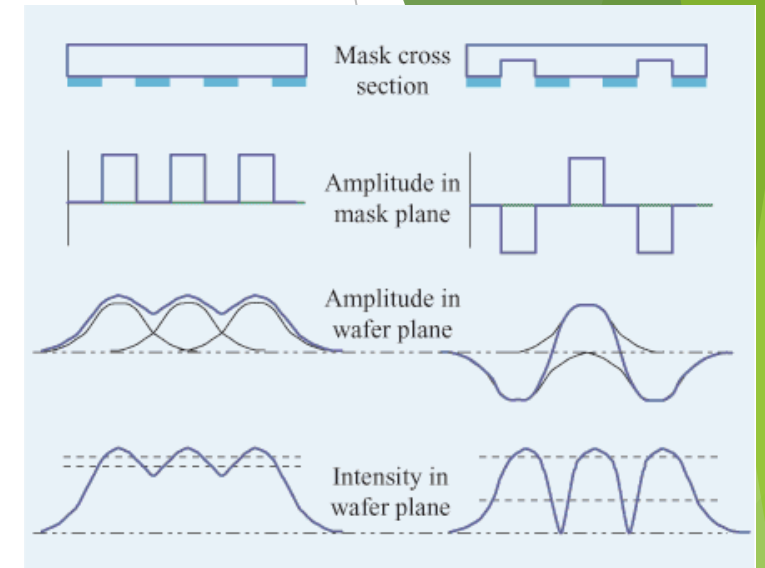


Figure 13

Schematic diagram comparing conventional binary mask lithography (left) and phase-shifted-mask lithography (right). The path-length difference in alternate patterns in the phase-shifted mask causes light with amplitudes of equal magnitude but opposite sign to be transmitted through neighboring mask openings.

近接場

- ▶ 従来の光学と近接場光学の違い
- ▶ 近接場光の発生
- ▶ 近接場とプラズモン
- ▶ 近接場顕微鏡
- ▶ 近接場磁気光学顕微鏡
- ▶ 光アシスト磁気記録と近接場ヘッド

従来の光学vs.近接場光学

- ▶ **従来の光学**においては、波長より大きなスケールでの物質の光学応答を均質なものとみなし、平均化してマクロなパラメータである誘電率に置き換えて媒質を伝搬する電磁波の分散関係を設定することによって、電磁波の伝搬の問題を取り扱い、物質の部分系と光のミクロな電磁相互作用をあらわには取り扱いません。
- ▶ これに対して、**近接場光学**では、光学応答している物質系の表面に、光波長よりも遙かに近い距離まで小さなプローブを近づけて、物質系の光学応答を計測するので、原子レベルにいたるまでのミクロな領域での光と物質の相互作用の素過程を観察することとなります。

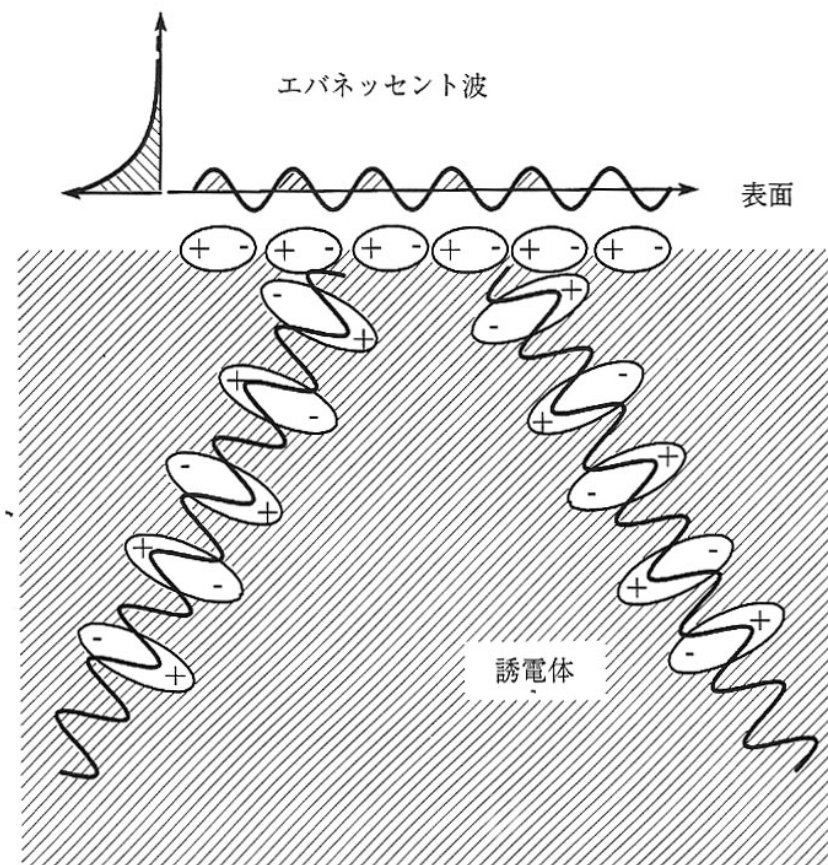


図 1・3 表面で途切れた分極の連鎖が作る物質表面の光波

近接場光学を特徴づける空間的サイズ

- ▶ **従来のスケールの波動光学**においては、物質の光学応答は、光の波長のスケールで平均化されたものなので、波動現象が有効であるような空間的スケールは、どんなに小さくても波長程度の領域にとどまります。このため、波動現象に基づく干渉効果をどのように利用しても波長の数分の1程度以下の空間に収束することができません。これを光波の回折限界と呼んでいます。
- ▶ これに対して、**近接場光**は、あらゆる相互作用にともなう物質近傍での光の場を含んでおり、近接場光を特徴づける空間的なサイズは、波長ではなく、**着目している物質の空間的な広がり**と、**プローブと物質との距離に依存し、空間的細かさに制限はありません**。ただし、原子スケールに近づくと、電子の波動関数の広がりを観測することとなって、光の場と物質とを切り離すことができなくなります。

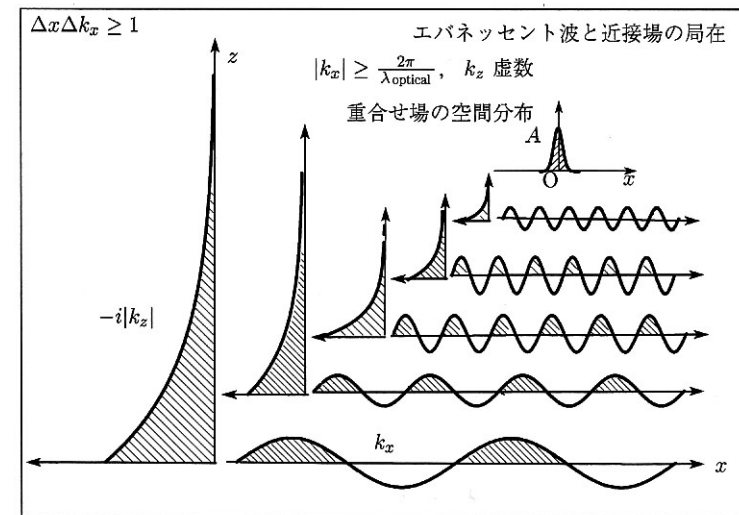
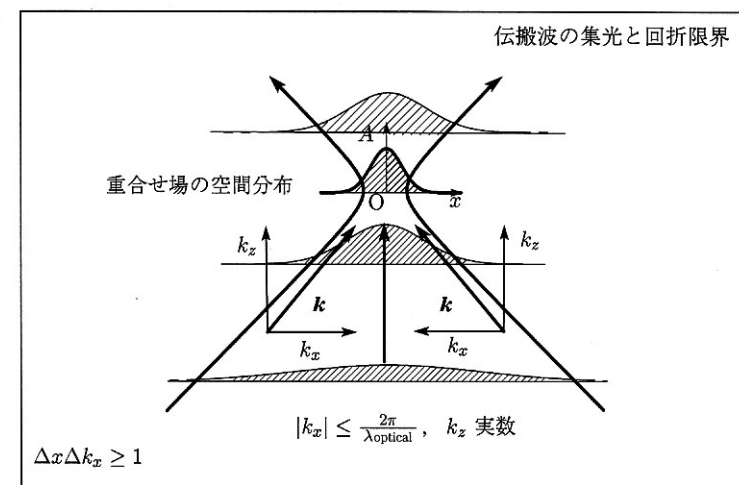


図 1・4 伝搬波の回折限界とエバネッセント波の重合せによる光の場の空間的局在

近接場における電磁相互作用の特徴

- ▶ 波長よりはるかに微小な物質の近傍には、非常に空間周波数の高い、すなわち波数の大きな電磁場分布がありますが、この場は物質から遠ざかると指数関数的に減少してしまうエバネッセント波です。
- ▶ 従って、光波長よりも遙かに短い距離に置かれた2つの微小物体は、それぞれの物体の近傍にあって互いの相手に向かって指数関数的に減衰していく2つのエバネッセント波が含まれ、**近距離に置かれた物体間でのみ相互作用しあいます**。
- ▶ 一方の物体が光源であり、他方が検出器であれば、物体間での電磁エネルギーの移動がおきる。これは、物体間での**光励起のトンネル現象**と見ることができます。

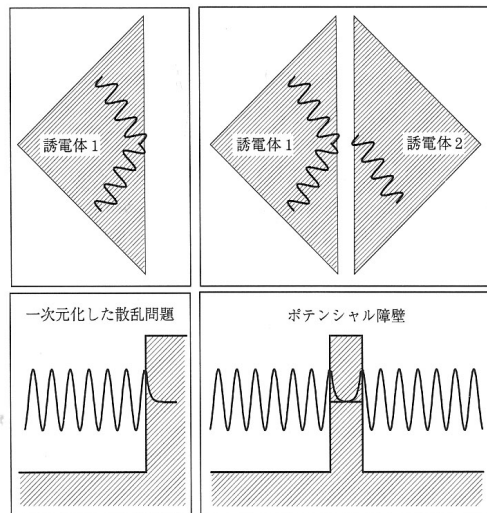


図 1・5 エバネッセント波を介しての励起の移動と一次元化された等価散乱問題としてのトンネル現象

堀・井上:前
掲書

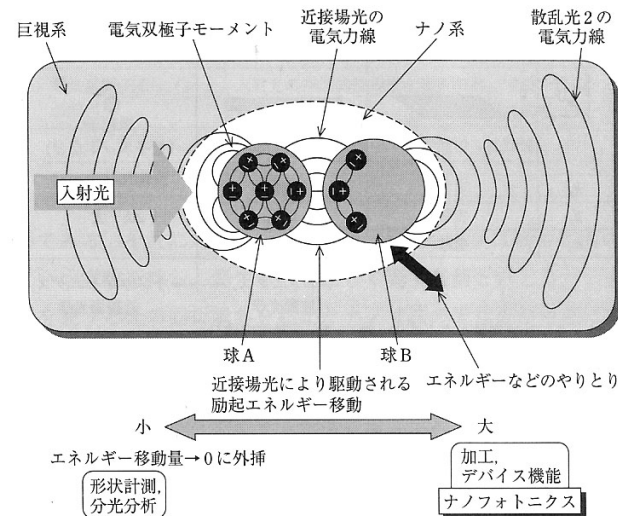


図 1・10 近接場光の測定の様子

大津・小林:
ナノフォトニクス基礎
(オーム社, 2006)

近接場光の発生

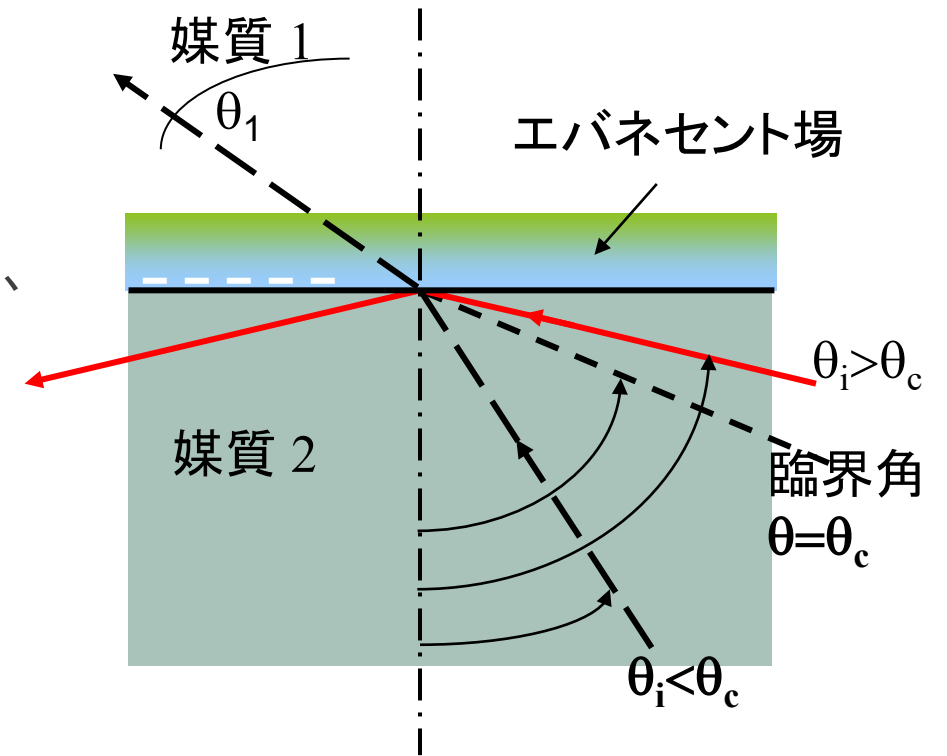
- ▶ 電磁気学において近接場という概念は決して新しいものではない。Hertzはダイポールの近くの電磁界は $1/r$ ではなく、 $1/r^3$ の依存性をもち遠隔場から予測される強さより遙かに強いということを明らかにしています。Sommerfeldは具体的にダイポールアンテナの近傍における電磁界を導出しています [i]。
- ▶ 近接場光の発生の仕方にはいくつかの方法があります。全反射光学系において反射面の裏側に生じるエバネッセント波を利用する方法、光ファイバーを波長より細く加工してその開口を使う方法、微小開口を利用する方法、波長に比べて十分小さい物質を通常の伝搬光の場に置くことによって物質のごく近傍に発生させる方法などです [ii]。

[i] A. Sommerfeld: Ann.D. Phys. IV 28. 665 (1909)

- ▶ [ii] 斎木敏治、戸田泰則：ナノスケールの光物性（オーム社、2004） p.89

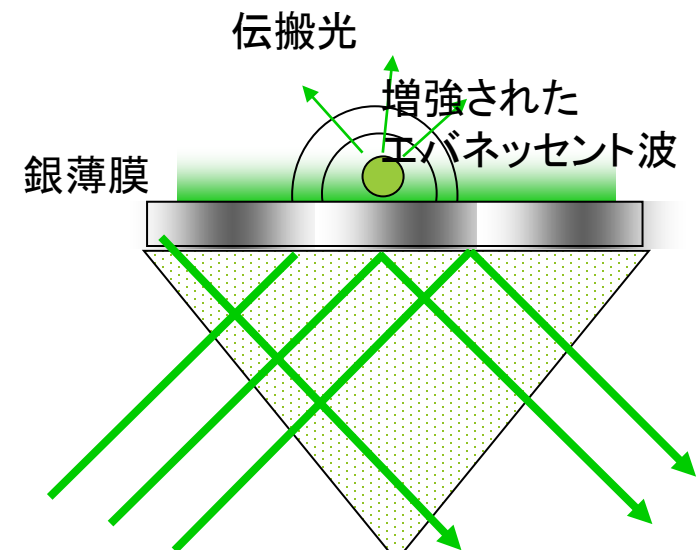
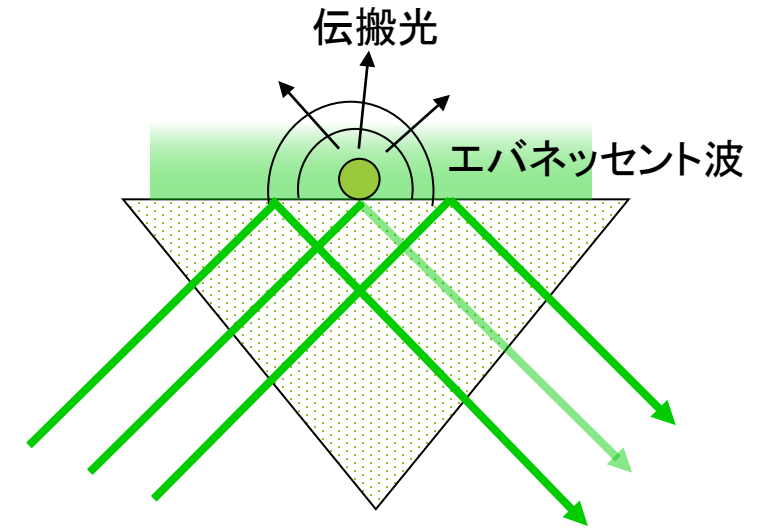
全反射とエバネッセント波

- ▶ 媒質1と媒質2が接しているとします。媒質2の屈折率が媒質1の屈折率より大きいと仮定します。
- ▶ 光が媒質2から媒質1にすすむとき、入射角 θ が臨界角 θ_c より小さいときは図の上の点線のようにスネルの法則に従って屈折しますが、入射角が臨界角になると、出射角が90度となり、面内に沿って進みます。
- ▶ 入射角が臨界角を越えると、透過せず、赤線のように全反射が起きます。
- ▶ このとき、媒質1の表面には伝搬しない電磁波であるエバネッセント波が界面から波長程度の範囲に生じます。



全反射プリズム

- ▶ 全反射プリズムの反射面の外側にはエバネッセント波があります。この波は伝わらないで減衰する波ですが、ここに微小物体を置くと散乱光は伝搬光になり観測できます。
- ▶ 全反射プリズムの反射面に銀薄膜を堆積させると、エバネッセント波が表面プラズモン増強され微小物体が観測しやすくなります。



近接場とプラズモン

- ▶ 金属においては、表面に電荷の粗密波が生じます。これを表面プラズモンといいます。表面プラズモン状態では面に垂直な電界があり、光の入射の仕方を工夫すれば、光と相互作用をして、プラズモン・ポラリトンの状態になります。表面の近傍にはエバネセント場があり、これを用いて微小物体の観察が行われています。

プラズモンポラリトン：運動方程式とマクスウェル方程式を連立で解く

- ▶ 自由電子の運動方程式

$$m d^2 u / dt^2 = q E$$

に $P = N q u$ を代入して $d^2 P / dt^2 = (N q^2 / m) E = \omega_p^2 \varepsilon_0 E$ より

$$-\omega^2 \mathbf{P} - \omega_p^2 \varepsilon_0 \mathbf{E} = 0 \quad (1)$$

- ▶ 光の場合は、マクスウェルの方程式で与えられるので、

$$\text{rot} \mathbf{H} = \partial \mathbf{D} / \partial t = -i \omega (\varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})$$

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t = i \omega \mu_0 \mathbf{H}$$

となり、 H を消去すると

$$-\omega^2 \mathbf{P} + (c^2 K^2 - \omega^2) \varepsilon_0 \mathbf{E} = 0 \quad (2)$$

(1) と (2) を連立させて解きます。

プラズモンポラリトン分散式

- ▶ (1)と(2)を連立させて、0でない解を得るためには、永年方程式

$$\begin{vmatrix} \omega^2 & \omega_p^2 \varepsilon_0 \\ \omega^2 & (\omega^2 - c^2 K^2) \varepsilon_0 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

が成立しなければなりません。これより、

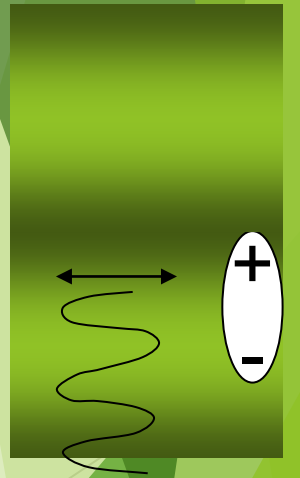
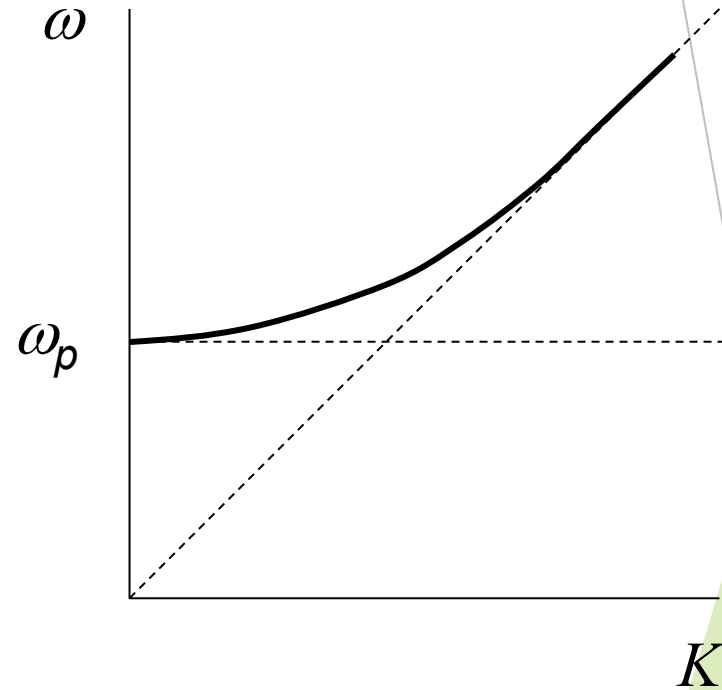
$$\omega_p^2 - (\omega^2 - c^2 K^2) \varepsilon_0 = 0 \quad (4)$$

が得られます。これが、プラズモンポラリトンの分散を与える式です。これより $\{\omega_p^2 + c^2 K^2\}^{1/2}$

- ▶ 従って、 $K \rightarrow 0$ のとき $\omega = \omega_p$ 、 $K \rightarrow \infty$ のとき $\omega = cK$ となります。

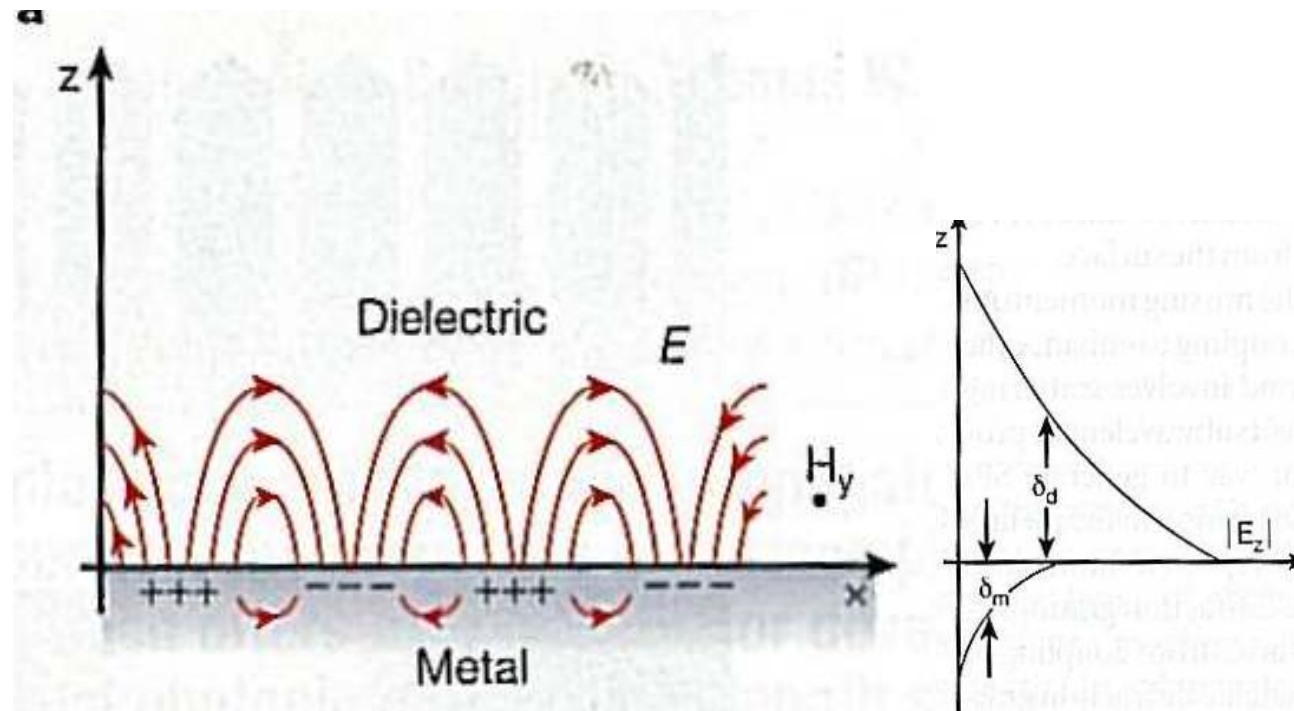
バルクプラズモンの分散式

- ▶ バルクプラズモンの分散曲線は電磁波の分散曲線と交点を持ちません。
- ▶ 光は横波で、プラズマ振動(電荷の粗密波)は縦波だからです。



表面プラズモン

- ▶ 表面に電荷の粗密波が生じると、電気力線は表面に垂直に生じます。垂直入射した光とはカップルしませんが、全反射の際に表面付近に沿ってすすむ光とはカップルできます。



表面プラズモンと電磁波の結合

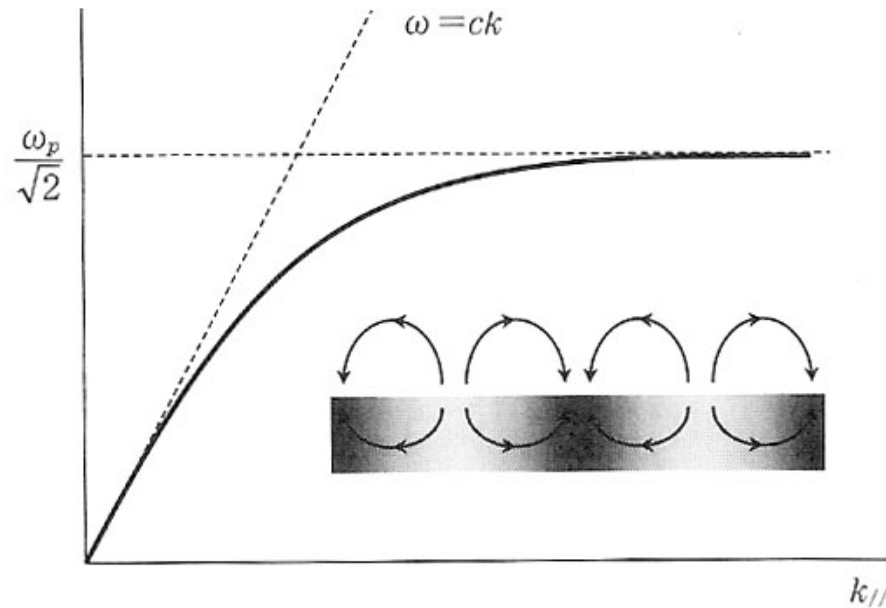


図 1・15 表面プラズモンの分散関係

——電子散乱を無視したドルーデモデルによる計算。挿入図は表面プラズモンのようすを電荷疎密波と電場ベクトルで描いている。黒い領域が電子密度の高いところ。ここでは完全導体を仮定（散乱を無視）しているので、界面での電場ベクトルは面に対して垂直である。点線は真空中を伝搬する光の分散関係。表面プラズモンの分散関係と交点を持たない（周波数と波数を同時に一致させることができない）ので、金属表面に直接光を照射しても表面プラズモンは励起できない——

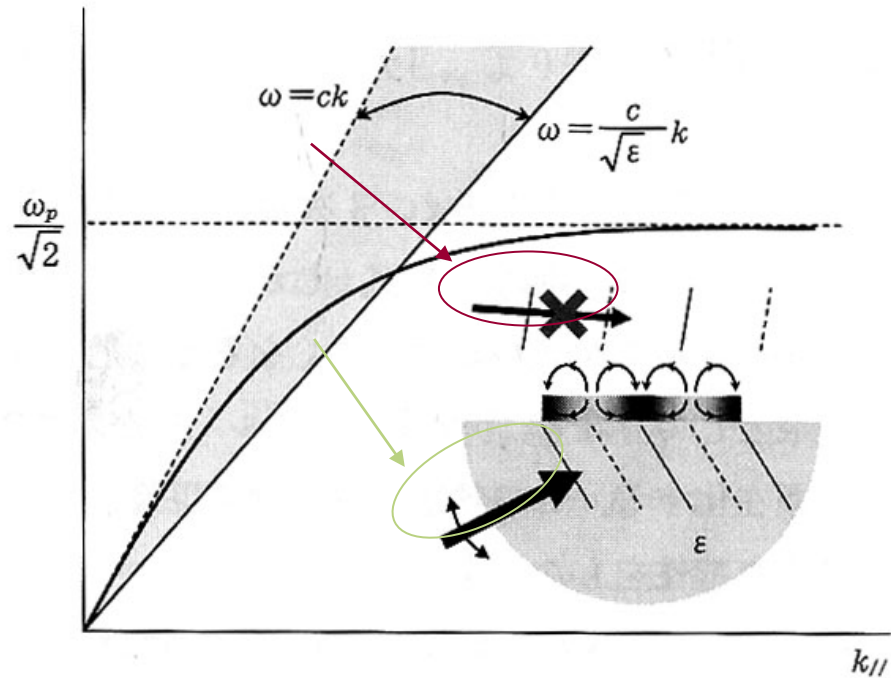


図 1・16 誘電体(ガラス)、空気、金属の3層構造による表面プラズモンの励起方法

——誘電体中で光の波長が短くなることを利用して、表面プラズモンの分散関係と交点を持つようにしている。エネルギーを固定して波数をマッチングさせる(入射角度で調整する)、あるいは入射角度を固定してエネルギーをマッチングさせることによって励起が可能である——

近接場顕微鏡の歴史

- ▶ 近接場の概念：電磁気学において古くから知られる
 - ▶ Hertz：Dipoleの近くの電場は $1/r$ ではなく $1/r^2$:かなり強い
 - ▶ Sommerfeld: Dipole antenna近傍の近接場を導出
- ▶ 1928 Synge(英):近接場顕微鏡のアイデアを提案
- ▶ 1972 Ash:マイクロ波で波長の $1/60$ の解像度達成
- ▶ 1982 Pohl: SNOMの原形
- ▶ 1985 Pohl: 20nmの分解能達成
- ▶ 1991 Betzig:マイクロピペットを使って実用性の高いSNOMを開発；光磁気記録に成功

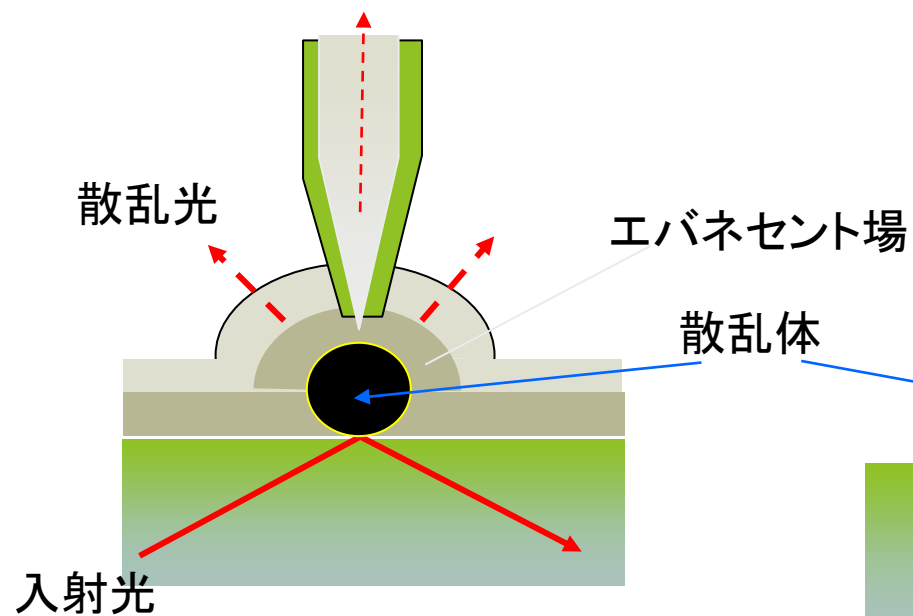
近接場顕微鏡は、英語ではscanning near-field optical microscopeの頭文字をとってSNOMといいます。near-fieldを前に出して、NSOMと呼ぶ場合もあります。

近接場顕微鏡(SNOM)

- ▶ 近接場を用いて、回折限界以下の微小な領域のイメージングをおこなうのが近接場顕微鏡である。
遠隔場を照射しプローブで近接場光を集光する
- ▶ プローブの使用形態によってつぎの3つのモードがある
 - ▶ 集光モード：対象に遠隔場を照射しプローブで近接場光を集光する。
 - ▶ 照射モード：対象にプローブからの近接場光を照射し遠隔場で検出する
 - ▶ 照射・集光モード：同じプローブを照射・集光にもちいる。

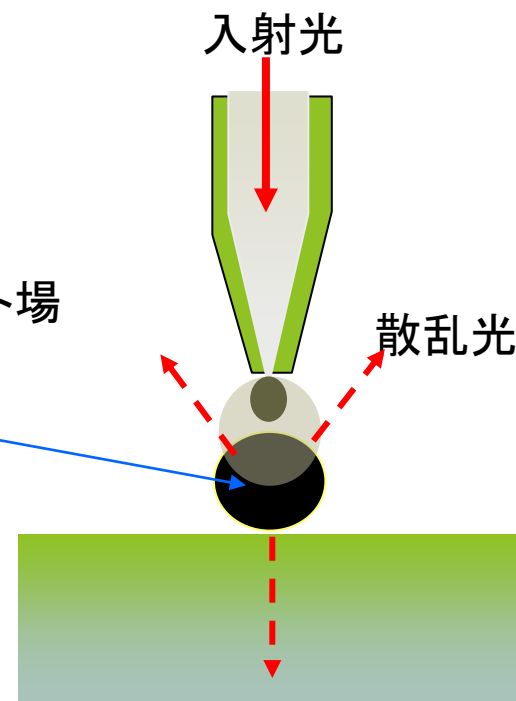
光ファイバプローブを用いたSNOM

(a)遠隔場を照射しプローブで近接場光を集光する



(a)集光モード

(b)プローブからの近接場光を照射し遠隔場で検出する

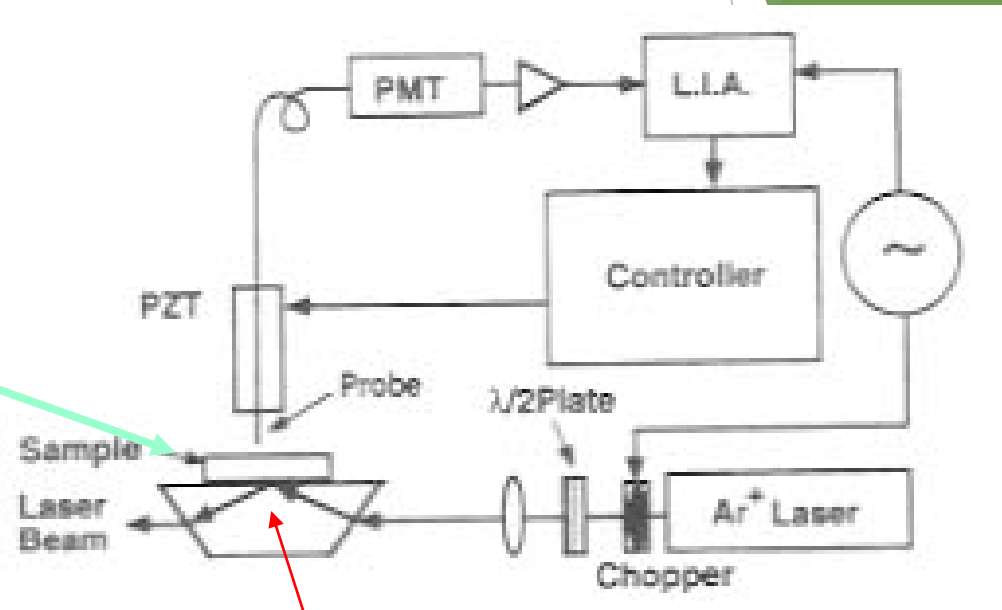
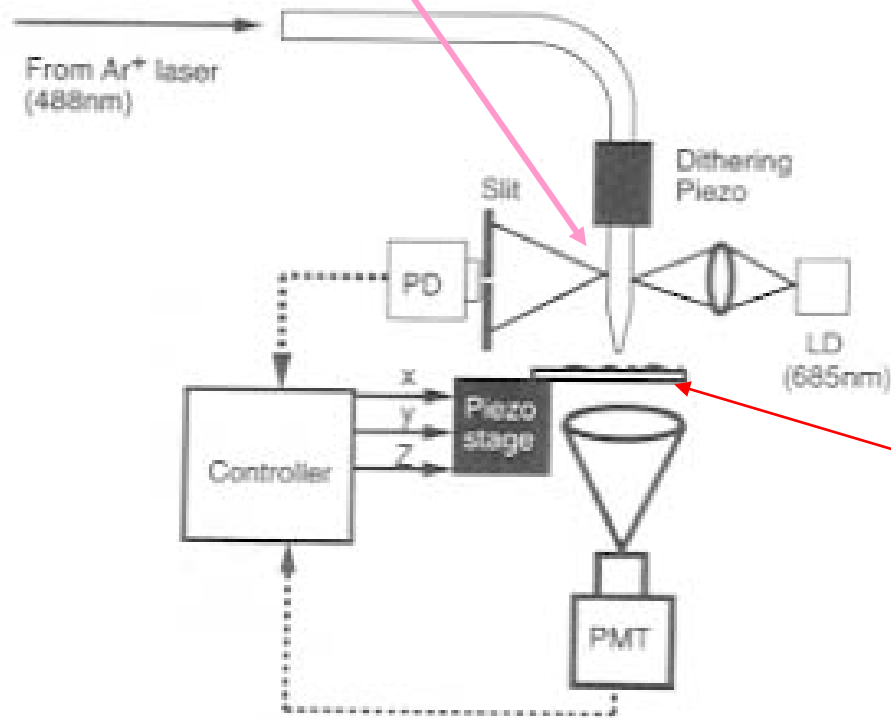


(b)照射モード

- ▶ (a)では、プローブは近接場をピックアップするために使われます。
- ▶ (b)では、プローブは近接場を試料に照射するために使われます。

集光モード、照射モードのSNOM

- ▶ 集光モード
- ▶ 照射モード



全反射光学系のエバネセント場に試料を置く。

先を細くした光ファイバープローブから近接場光を出射

照射・集光モードのSNOM

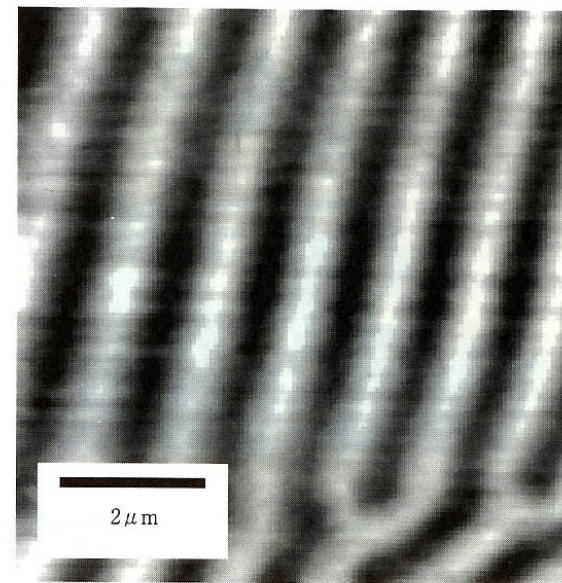
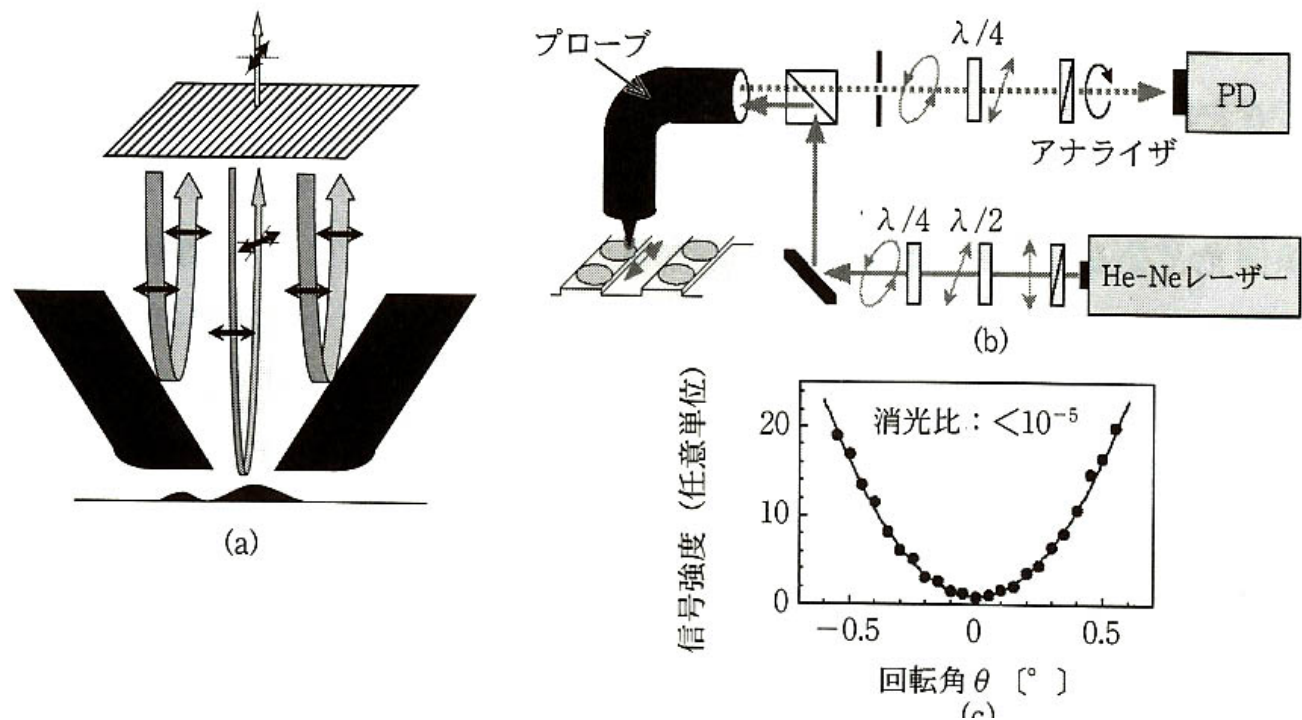
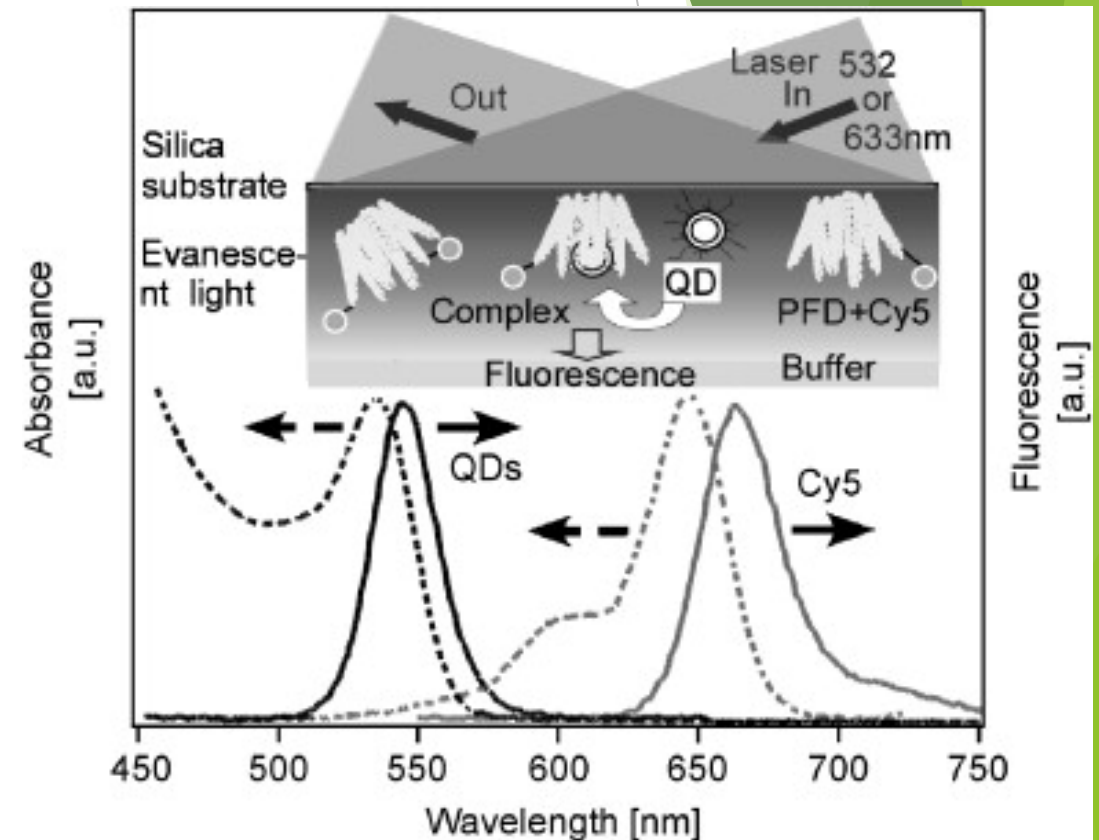


図 4・38 反射配置の磁気光学応答 (カー回転) をコントラストとして観察したガーネット薄膜の磁区構造

- ▶ テーパ部における強い反射光が背景光になることを防ぐために偏光素子を用います。

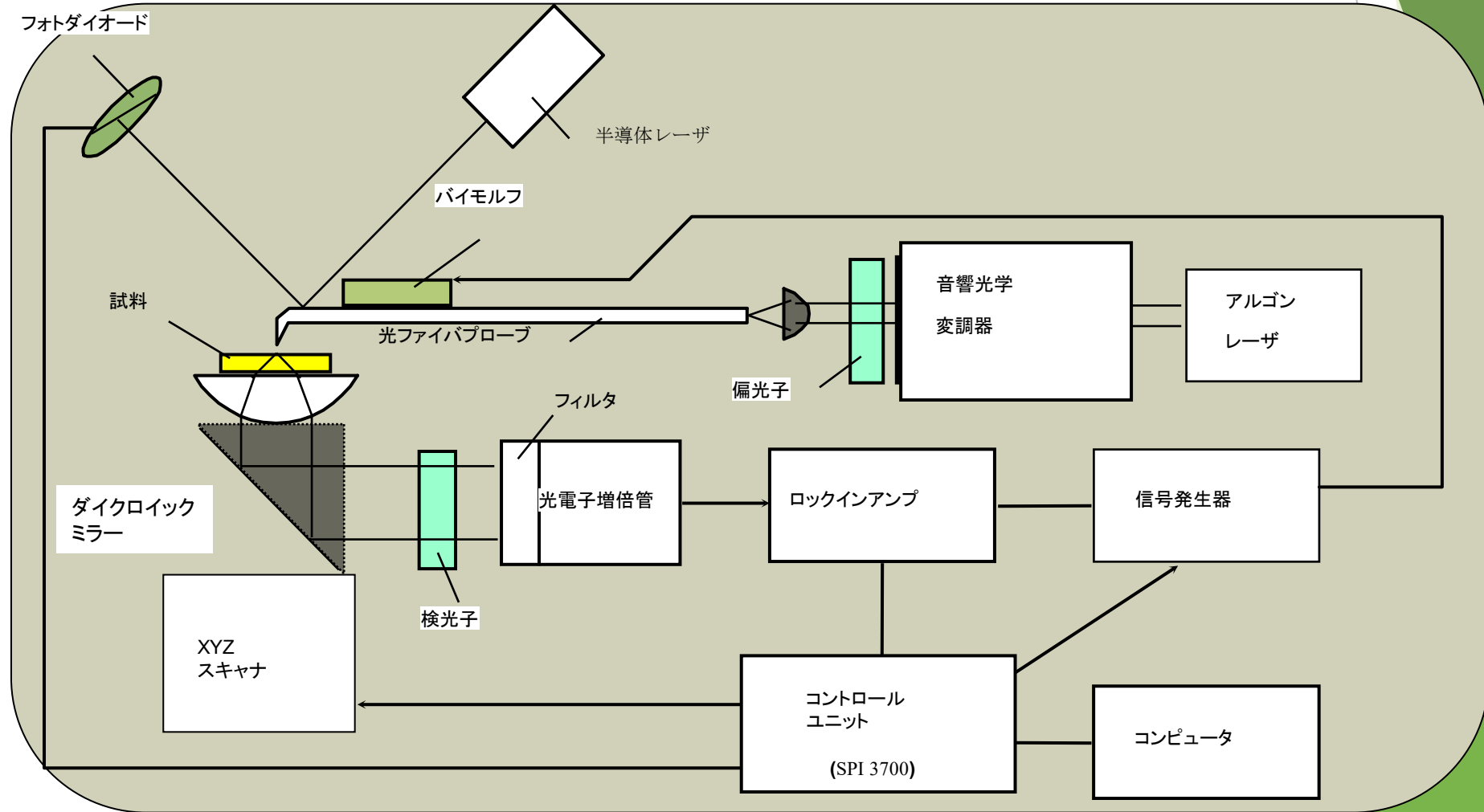
近接場照射のバイオへの応用

- ▶ 谷研究室では、半導体量子ドットを修飾した分子シャペロンプレフォルディングの発光を全反射光学系のエバネセント波を励起光源として観測しました。



H. Horiuchi, N. Iwami^a, F. Tachibana, A. Ohtaki, R. Iizuka, T. Zako, M. Oda, M. Yohda and Toshiro Tani: Journal of Luminescence 127, Issue 1, November 2007, Pages 192

SNOMのブロック図

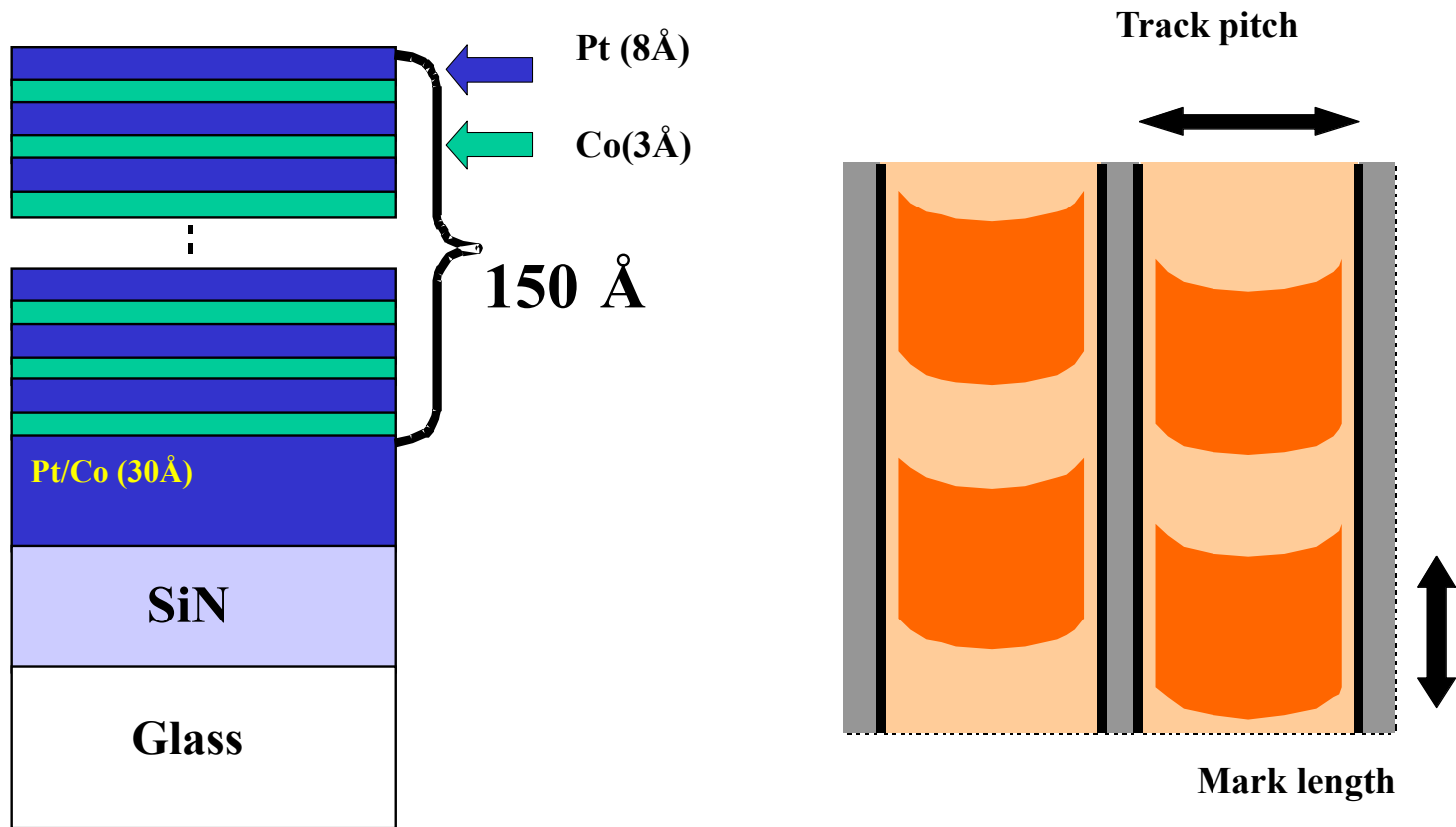


ベントファイバプローブ

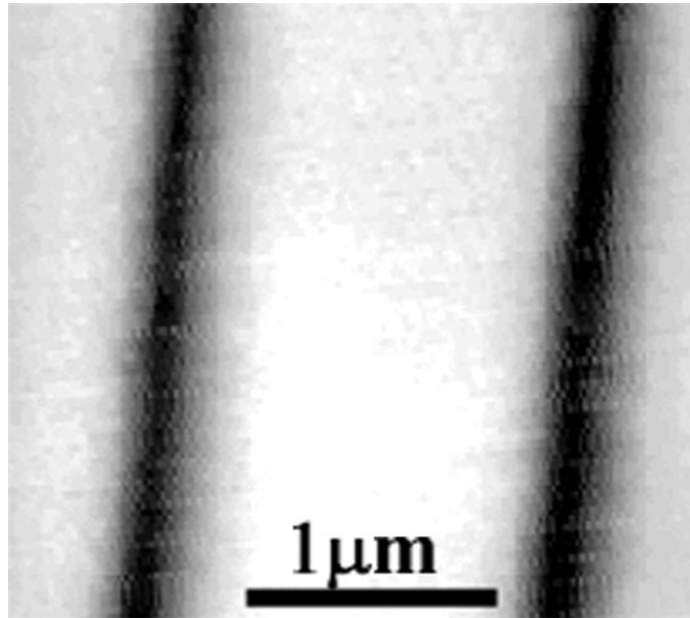
- ▶ この研究では、先端を細く加工した光ファイバーを図のように曲げて、原子間力顕微鏡(AFM)のプローブとして用いています。



試料: Pt/Co 多層膜ディスク

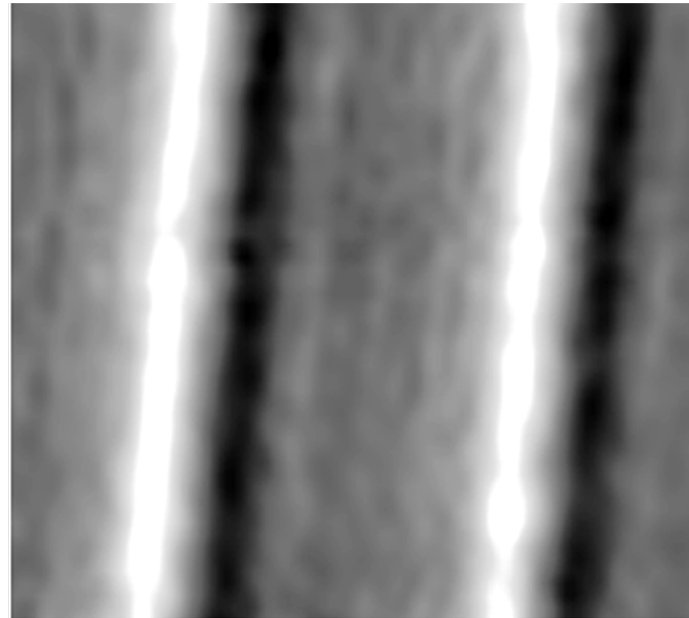


- Structure SiN/Pt(30Å)/[Pt(8Å)/Co(3Å)]₁₃ on glass
- Film thickness 150Å
- Recording System: Light pulse strobed MFM recording
- Track pitch : 1.6μm
- Mark Length: 0.1 ~ 6μm
- η_F, θ_F : $0.47^\circ, 0.74^\circ$



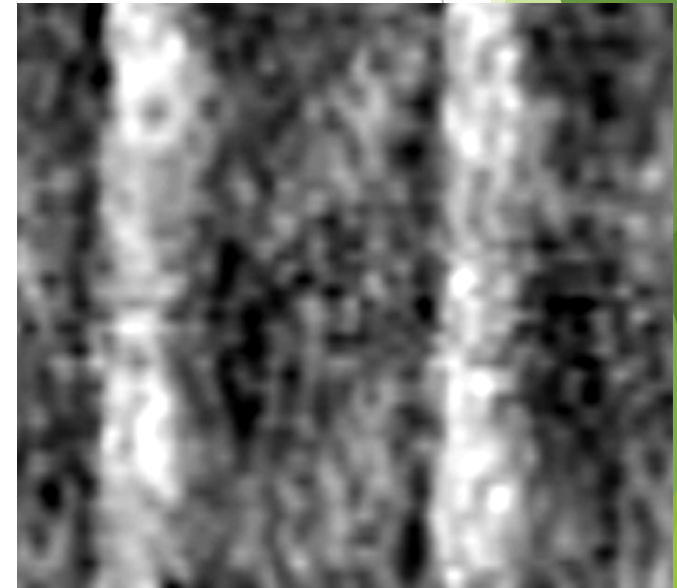
AFMトポ像

MO-SNOMによる記録マーク像
(クロスニコル法)



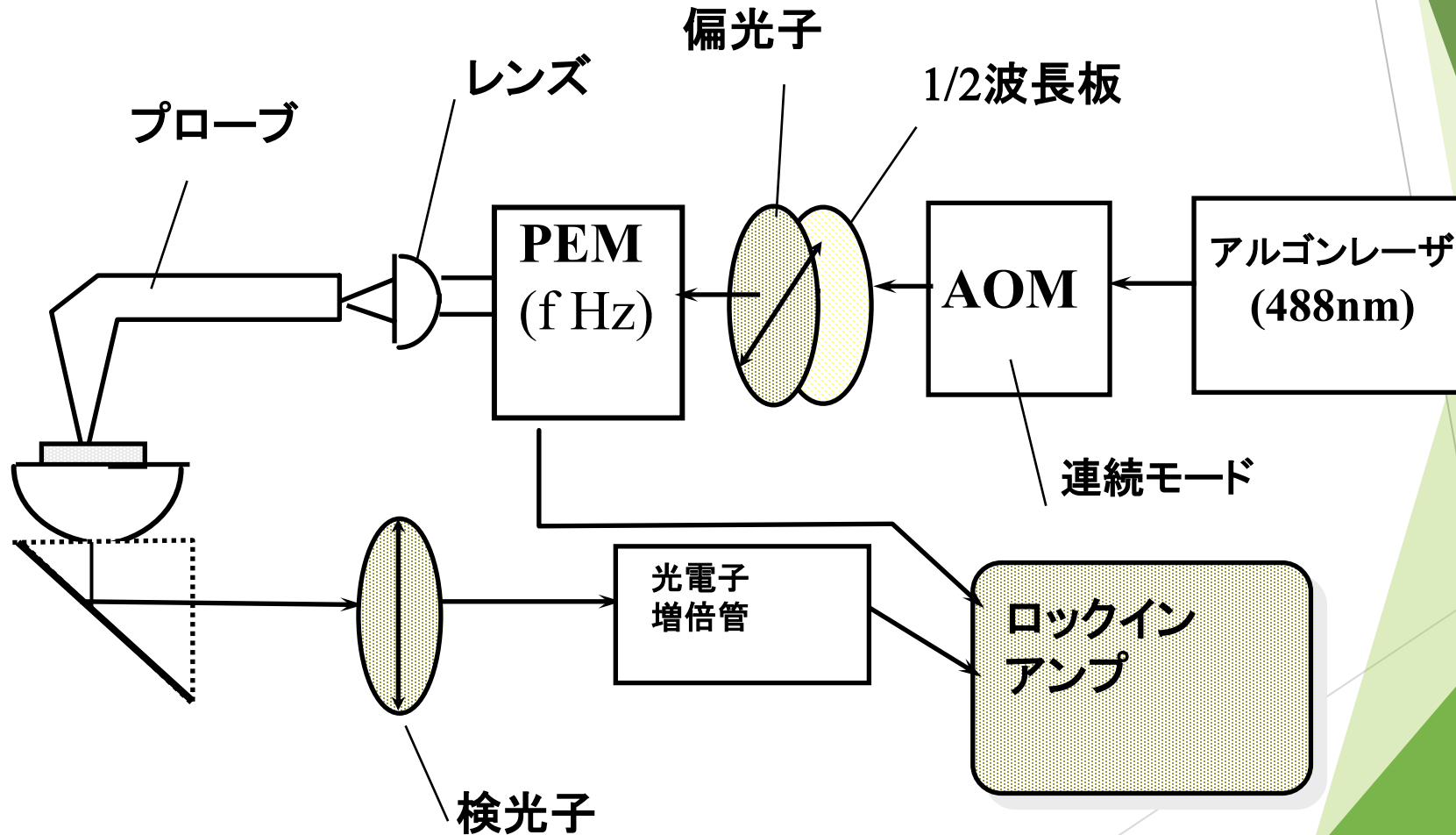
SNOM光学像

観測結果

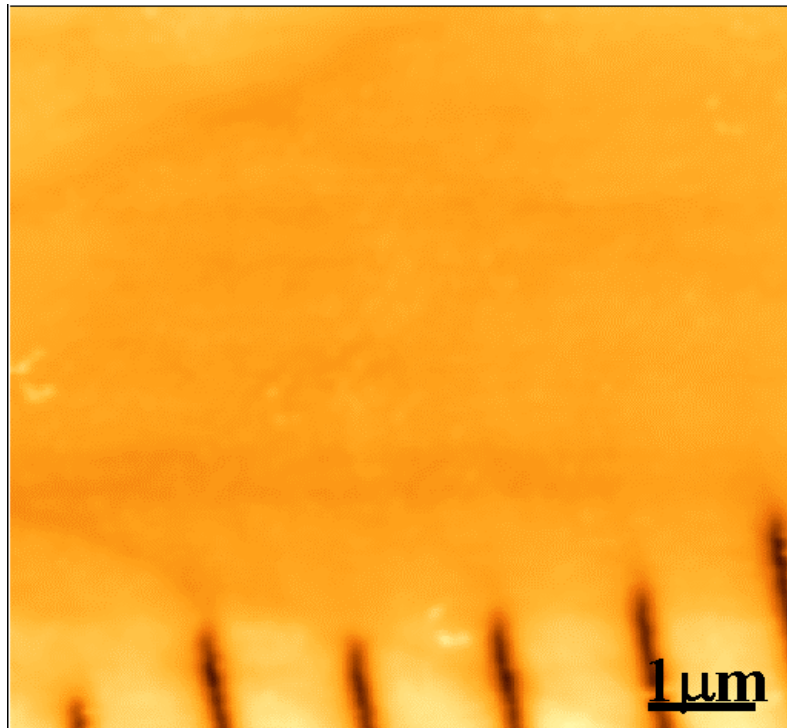


MO-SNOM像

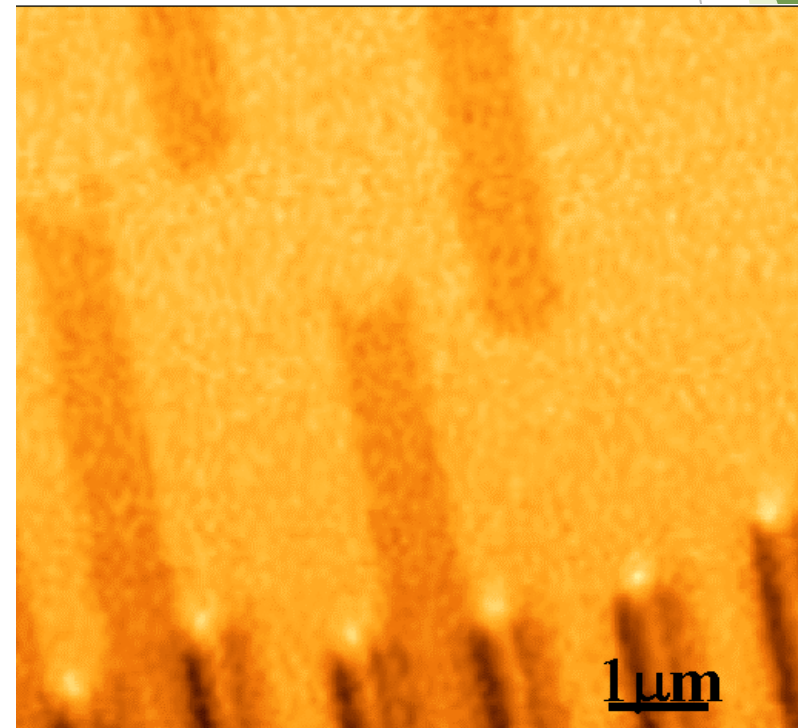
PEMを使ったSNOMシステム



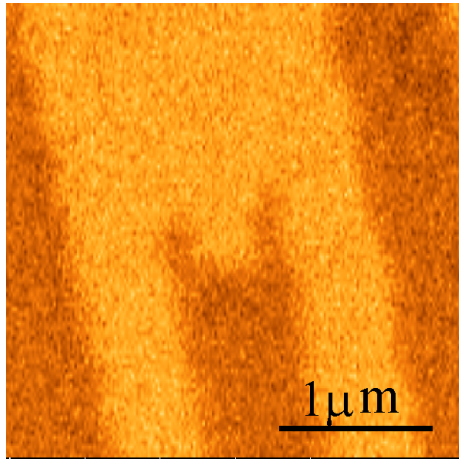
Pt/Coディスクの記録マークの トポ像と磁気光学像



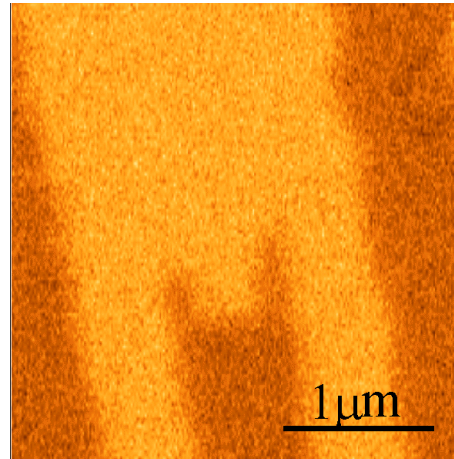
トポグラフィ像



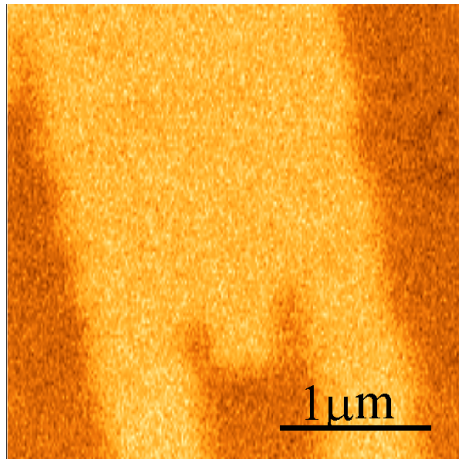
磁気光学像



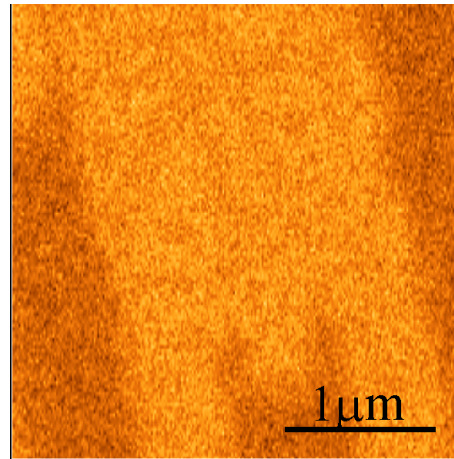
(a) 1f component ($\Delta=0$)



(b) 2f component ($\Delta=0$)

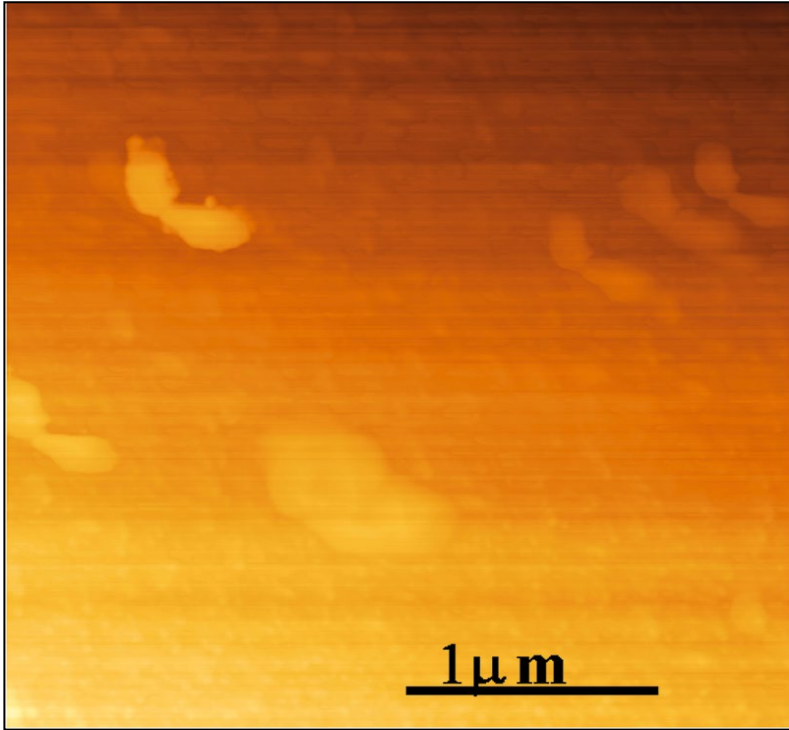


(c) 1f component ($\Delta=\pi/2$)

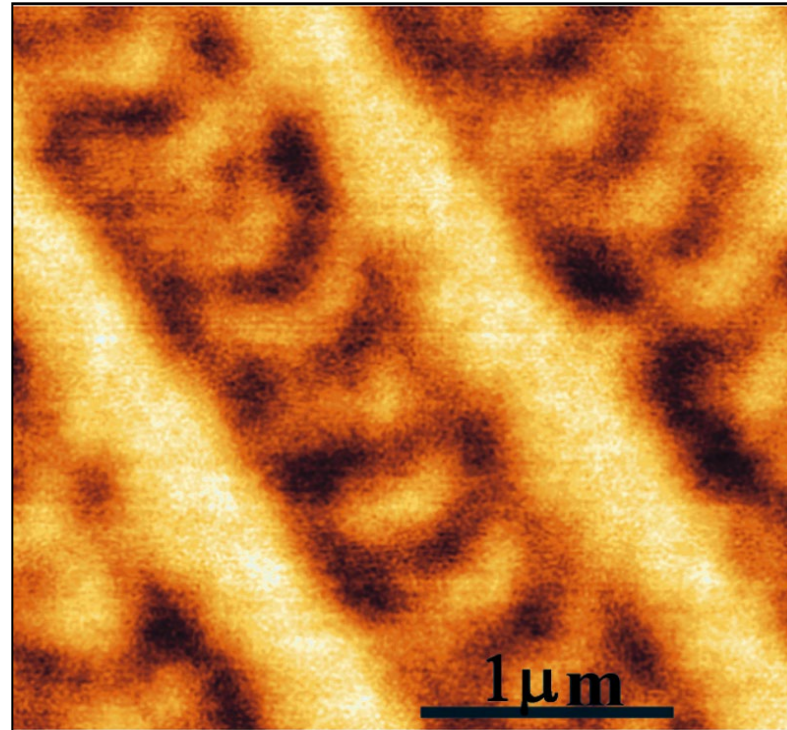


(d) 2f component ($\Delta=\pi/2$)

0.2 μm の記録マークのトポ像とMO像

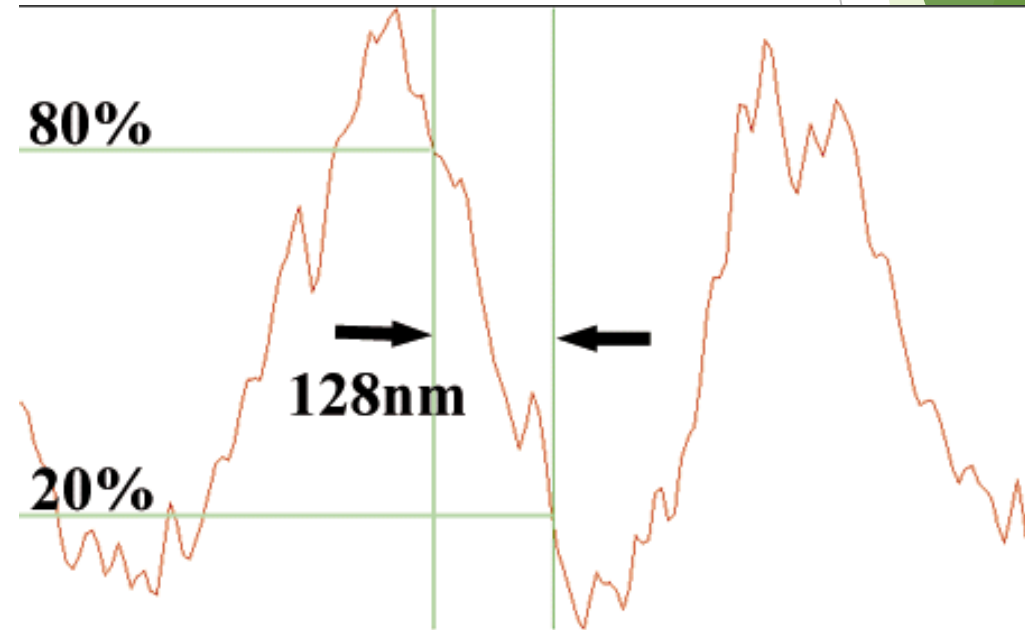
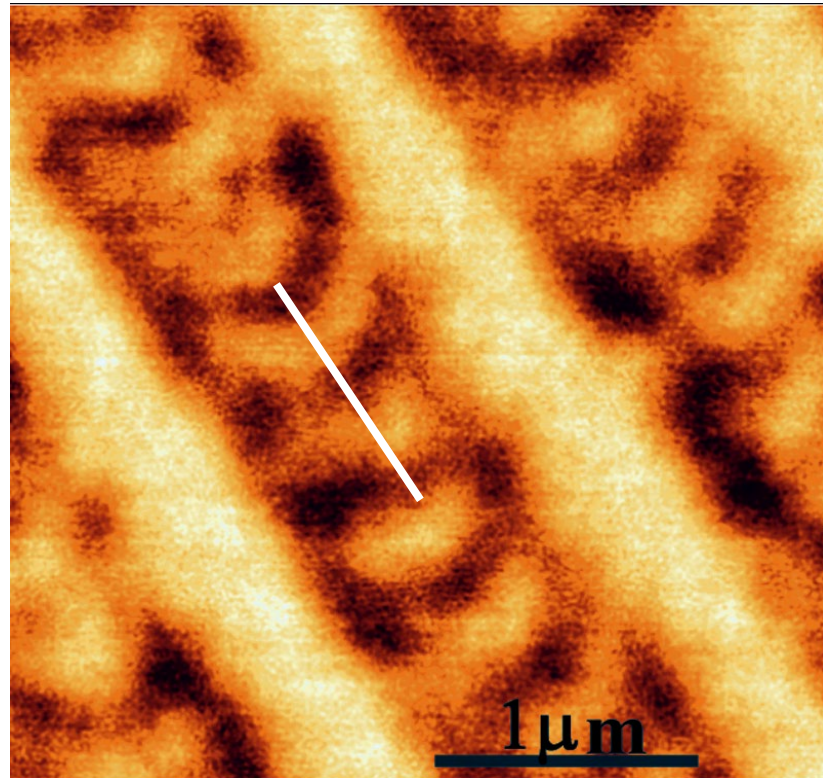


Topography



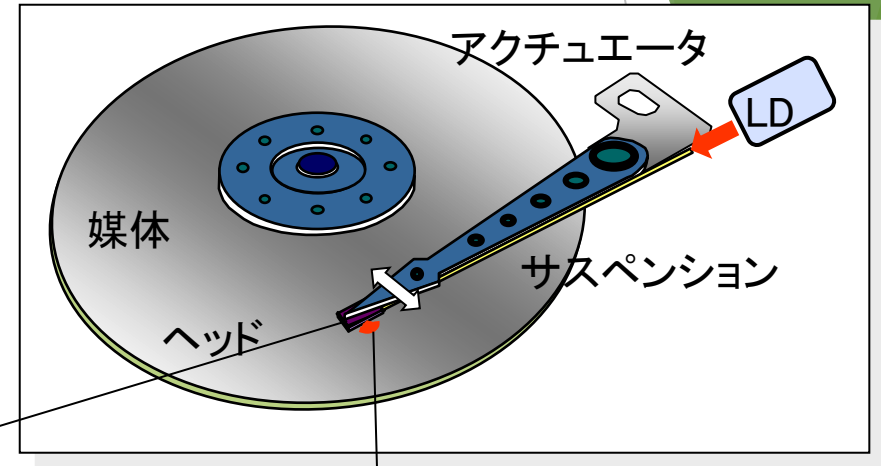
MO image

0.2 μm の記録マークのSNOM像



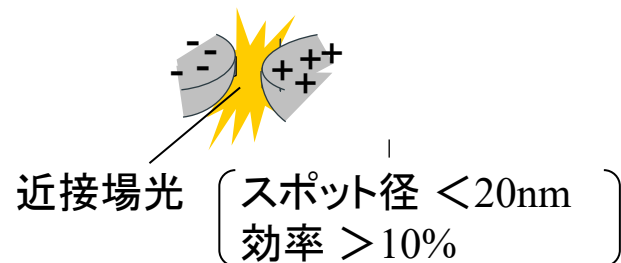
光アシスト磁気記録 (HAMR)と 近接場光ヘッド

高効率記録 / 高S/N再生の各ブレークスルー技術の両立により、テラビット記録を実用化



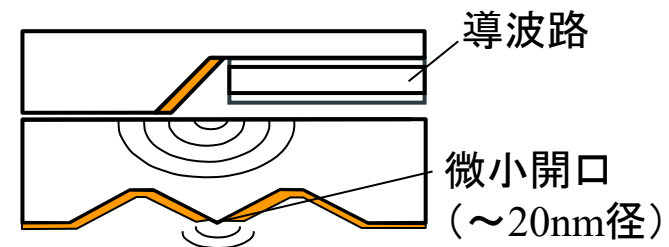
近接場光記録ヘッド + 近接場光再生ヘッド

プレーナ・プラズモンヘッド(記録)



高効率 高分解能 高生産性

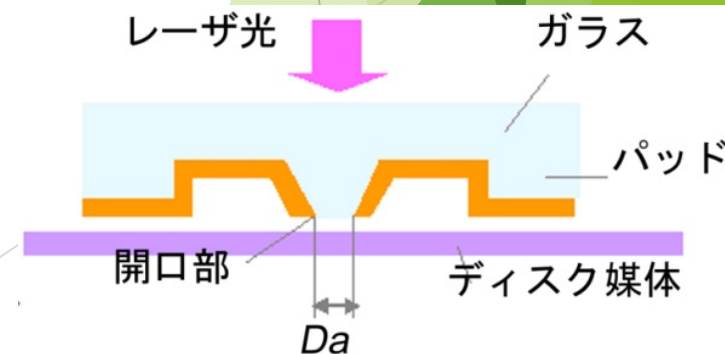
偏光制御ヘッドシステム(再生)



高C/N比 小型薄型化

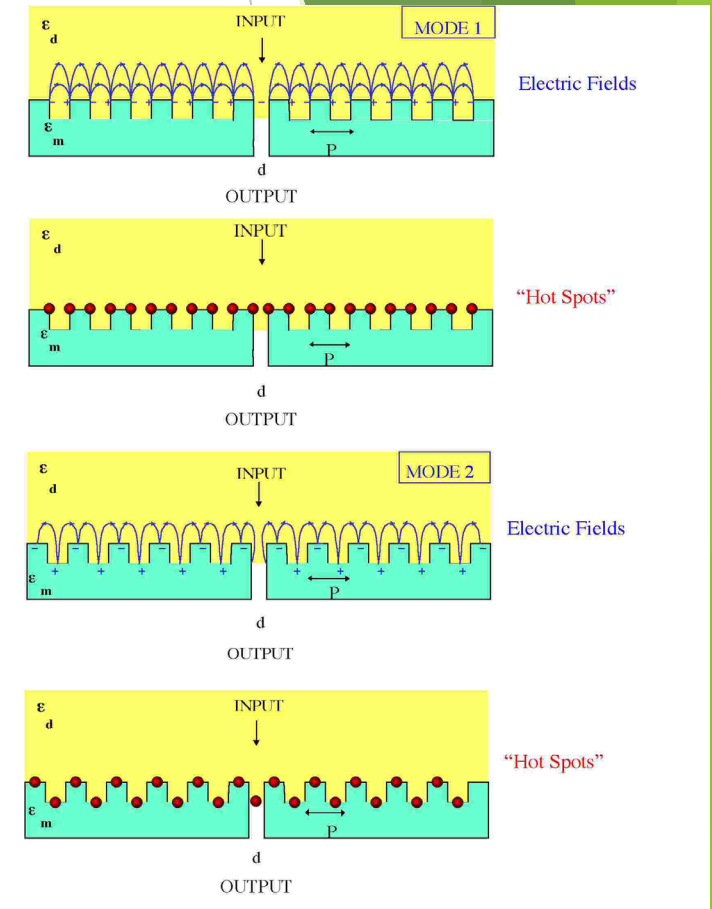
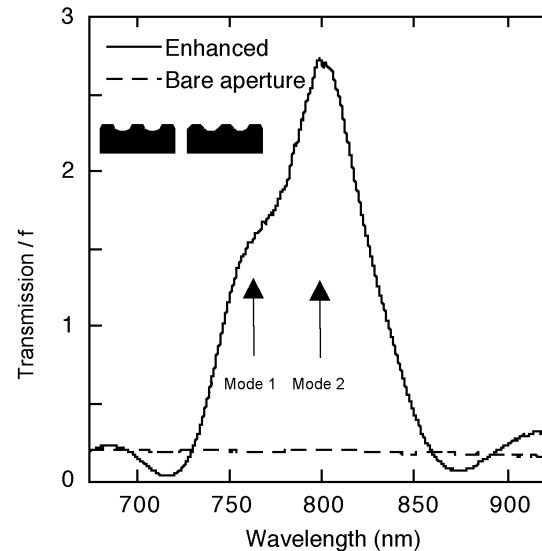
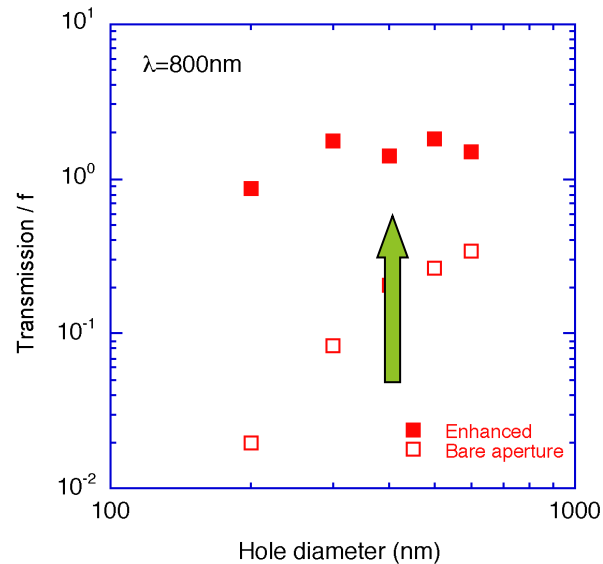
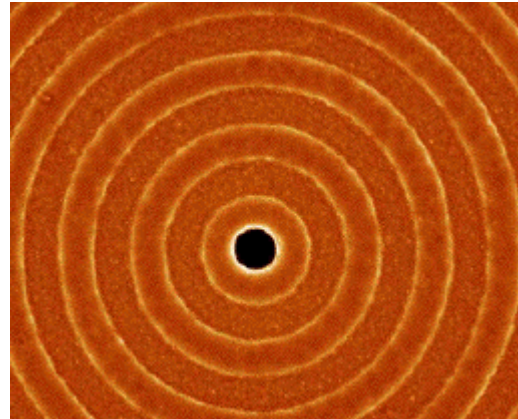
近接場光記録ヘッド

- ▶ 微小開口を利用して小さなスポットを作る試みが行われていました。金属で光学素子を覆い、その金属に波長よりかなり小さな開口を設ける方法により微小光スポットが得られます。微細孔は金属をFIB加工することによって作ります。この方法により得られる光のスポットではエネルギー密度を大きくできないという問題点がありました。
- ▶ これを解決し強いエネルギーの微小な光スポットを得る方法が、プラズモンによるエンハンスメントです。英国NEC研究所のEbbesenらは、微小開口の周りに同心円状に配置した金属リングを置くことによって、プラズモンエンハンスメントの効果で入射光より強い光が透過することを示しました。この技術を用いれば、高い効率で近接場光を利用できると考えられています。

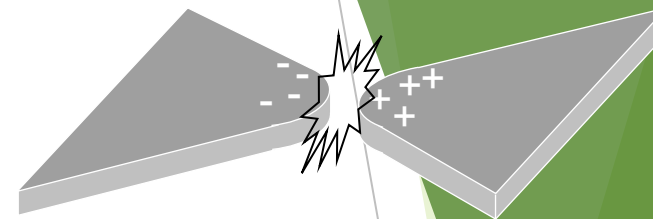


同心円凹凸構造をもつ微小開口によるプラズモンエンハンスメント

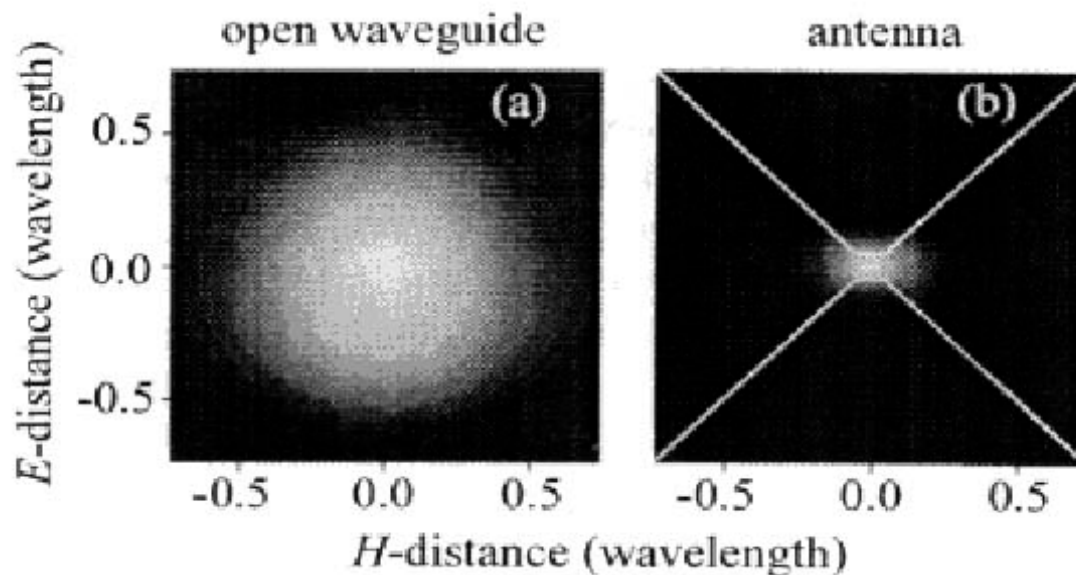
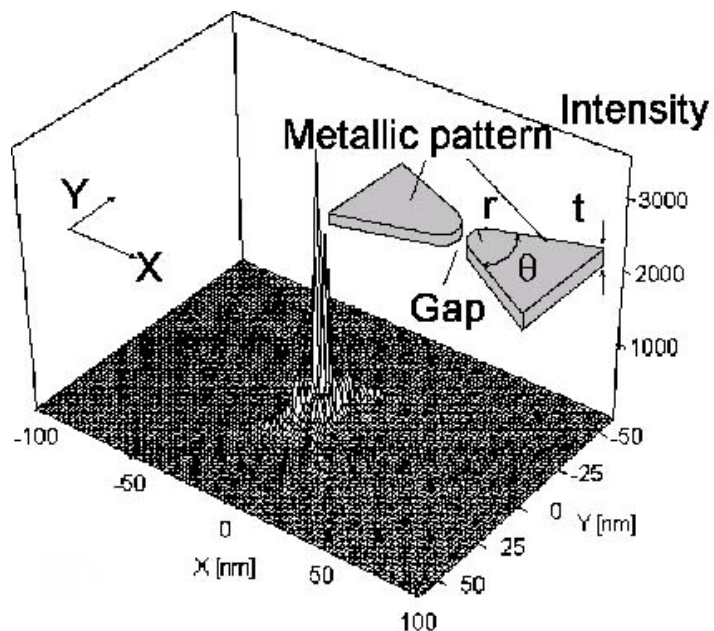
- ▶ Ebbesenらは、表面に同心円状の凹凸構造をもつ銀薄膜の中心に空けた微小開口から出る近接場光が平坦膜の開口に比べ、非常に増強されることを見出しました。



金属パターンを利用した近接場ヘッド (1) ボウタイヘッド



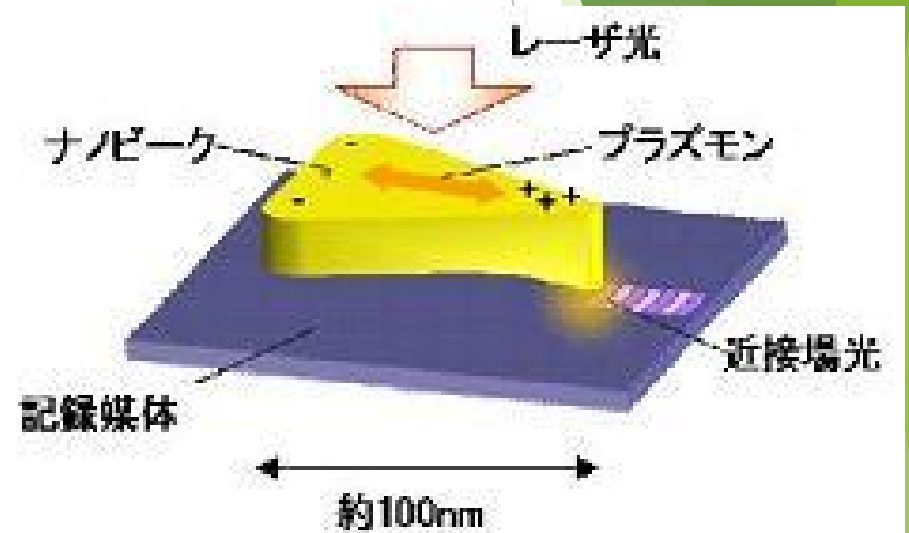
- ▶ 近接場光のエネルギー密度をエンハンスするもう1つの方法が、図に示すようなボウタイ(蝶ネクタイ)型アンテナによる電磁場の集中である。Groberらは、マイクロ波周波数に対しこの形のアンテナの中心部に電界の集中が起きることを検証し、光の周波数に対しても使用できると提案した。Matsumotoらは、電磁界計算を行い、ボウタイアンテナのギャップ程度の領域に光強度が集中していることを明らかにしている。



金属パターンを利用した近接場ヘッド

(2) ナノビークヘッド

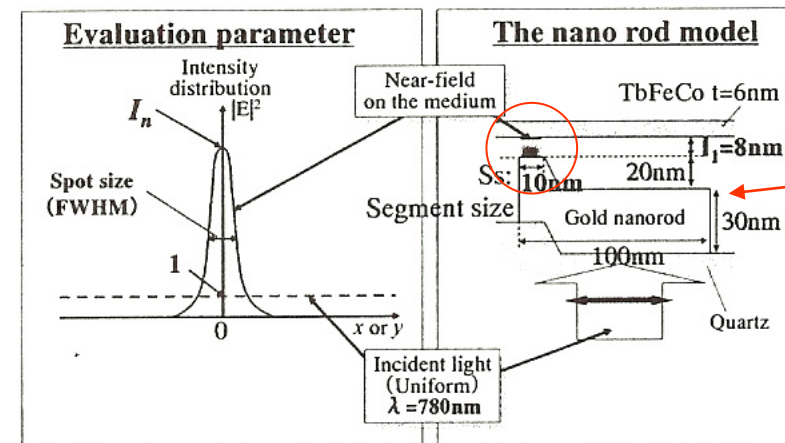
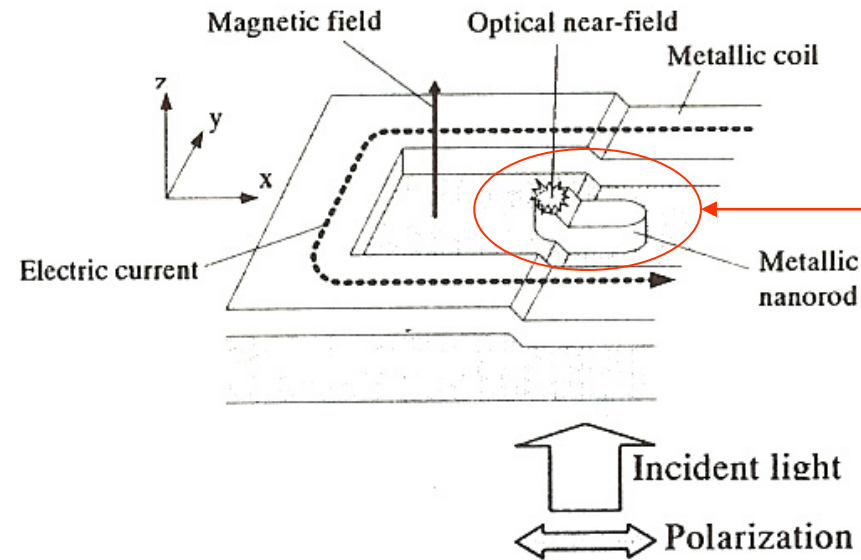
- ▶ 図のような三角形の金属パターン（ナノビーク）にX方向に偏光した光を入射すると金属プレート内の電荷が光の偏光方向に振動するが、頂点部に電荷が集中し、頂点付近に局在した強い近接場光が発生する。
- ▶ 特に電子振動がプラズモン共鳴状態になるよう入射光の波長を合わせると、頂点には非常に強い近接場光が発生する。
- ▶ 金属プレートの表面には、頂点を除いてリセスを形成する。これによりより小さな部分に近接場光を集中できる。



T.Matsumoto et al. , JJAP 95 (2004) 3901
T.Matsumoto et al., Opt. Lett. 31 (2006) 259

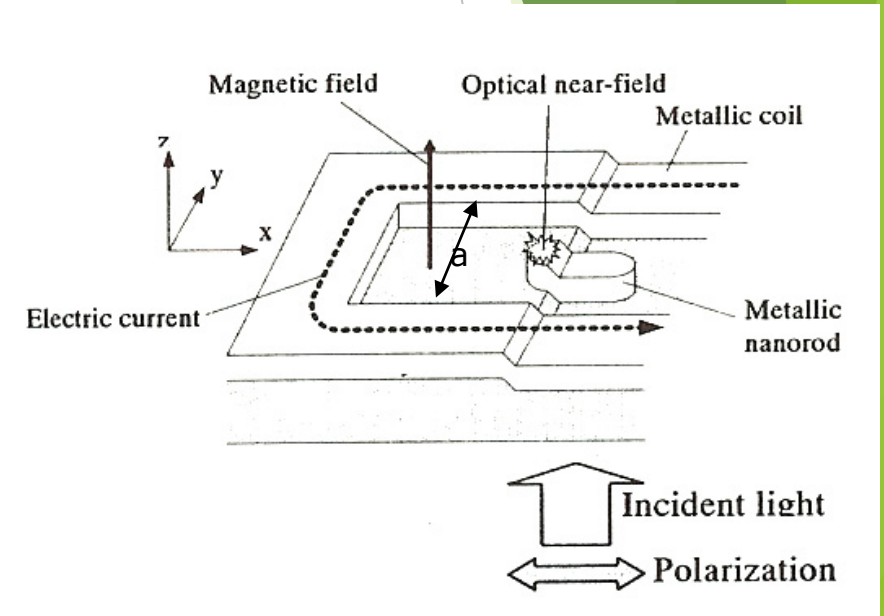
ILESヘッド

- ▶ ナノサイズ領域で微小光スポットと磁場を発生でき、かつ光学的エンハンス効果をもつコイル付き表面プラズモンヘッド
- ▶ 段差加工された石英基板にAuを用いて構成
- ▶ ナノロッドの片方のみ媒体に近づけて光強度の強い近接場のみを媒体に照射する。



ILESヘッドのAuコイルの働き

- ▶ Auコイルには2つの機能がある
 1. 記録磁界を発生させること
 2. 入射光を局所的に増強すること
- スリット間隔 a を適切に選ぶと、開口部センター付近に入射光と反射光の干渉で強い光が得られる。
- メタルロッドを置き、 a を最適化すると、コイルがない場合に比べ2.2倍の増強が得られる。
- ピコスライダにLDとILESを載せたヘッドを試作



第5回のまとめ

- ▶ この講義では、回折限界を超えて小さな対象物を観察したり、小さな像に集光したりする方法として、超解像および近接場について学びました。
- ▶ これらの技術は、実際に用いられていることも学びました。