

# 超解像近接場構造 Super-RENS 技術による 超高密度近接場光メモリ

Optical Near-field Ultra-high Density Memory by Super-Resolution Near-field Structure

富永淳二



1998年に我々が開発した Super-RENS と呼ばれる近接場光応用超高密度光ディスクは、第3世代まで開発が進み、次世代青色レーザを搭載した光ディスクドライブを用いて 75nm ビットのランダム記録・再生が可能となった。また、その派生技術として、ナノテクノロジー用の微細パターン加工機、ナノ粒子を応用したプラズモンデバイスの開発も始まっている。Super-RENS の経緯と読み出し原理について紹介する。

キーワード：光ディスク、近接場光、プラズモン光、光超解像、Super-RENS

## 1. はじめに

光記録技術の極限を追求する手段として、1990年代後半から従来の光学系を超えた「近接場光」と呼ばれる局在光を応用した光ストレージ技術の研究開発が盛んに行われてきた<sup>(1)~(12)</sup>。研究の初期段階においては、近接場光を高効率でファイバプローブ先端から発生させる記録・再生ヘッドの開発に主眼が置かれた。また、プローブ表面の金属コート上にプラズモン光を励起させる、いわゆる光散乱形と呼ばれる記録・再生ヘッドの研究開発も加わった<sup>(13)~(14)</sup>。しかしながら、過去10年間の近接場光発生効率は、当初研究者等が期待した以上には向上せず、現在でもその効率は10倍から100倍止まりで、レーザ入力約10%の出力エネルギーしか記録・再生に取り出せていない<sup>(6)~(8)</sup>。また、近接場光やプラズモン光といった、「局在光」は非伝搬光であることから、その強度は空間方向に対して指数関数的に減衰する。有効距離はだいたい  $1/10\lambda$  (ここで  $\lambda$  は光の波長) 以下といわれ、可視光を用いる記録・再生の場合には局在光の発生源を記録媒体表面に対して 50nm 以下に維持する必要がある<sup>(15)</sup>。特に高速回転する光ディスク表面では、その距離を数 nm 以内に精密に制御することが必須であるが、

プローブを用いる近接場光記録方式ではこれらの技術開発もそれほど進展していないのが現状である。このように「局在光」を応用した「正統派形近接場光メモリ」の開発はいまだに多くの未解決な問題を抱えており、応用技術としてのシステム開発とその検証が具現化されていないのが現状である。

しかしながら、これとは異なる近接場光メモリの開発は着実に進展が見られてきたといってもよからう。これらを「異端派形近接場光メモリ」技術と呼ぶことにしよう。異端派の代表格は、半球レンズや超半球レンズを用いてレンズの実効開口数(NA)を2.0近くまで向上させ、従来の集光スポット径の1/2~1/3を実現し、光ディスクの記録容量を4~10倍程度向上しようとするものである<sup>(16)~(21)</sup>。この技術は、SIL (Solid Immersion Lens) 技術と呼ばれている。1990年代に米国の研究者らによってその利用法が開発され、いったん、米国のベンチャー企業が近接場光ストレージの事業化を図ったが、技術的な問題点が未解決で実用化に至らず研究は沈静化したかに見えたが、今ではソニーやオランダのフィリップスが中心となって実用化に向けた研究開発が加速されている。SIL方式では、実効NAを向上させて近接場光をSIL底面に発生させる。したがって「正統派形」と同様にSIL底面を回転する記録媒体に対して50nm以下に制御する必要があるが、近年、SIL底面からの反射率を計測し、近接場光領域に近づいた時点で反射率が急激に変化する現象をとらえて距離制御を行う技術が開発され

富永淳二 独立行政法人産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センター  
Junji TOMINAGA, Nonmember (Center for Applied Near-Field Optics Research,  
National Institute of Advanced Industrial Science & Technology, Tsukuba-shi,  
305-8562 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.89 No.11 pp.1000-1008 2006年11月

た。最先端の SIL 方式では、既に直径 80nm 程度のピットを記録・再生することが可能である<sup>(20),(21)</sup>。

さて、紹介が遅れたが「異端派形近接場光メモリ」にはもう一つの技術が存在する。それは超解像近接場構造 (Super-Resolution Near-Field Structure) であり、略称 Super-RENS と呼ばれる技術である。Super-RENS は産業技術総合研究所の前進である産業技術融合領域研究所 (旧工業技術院傘下の研究所の一つ) の筆者と中野、阿刀田 (現 NEDO) が 1998 年に発表した異端技術である<sup>(22)</sup>。「異端」たる理由は、正統派と SIL 技術では、信号の記録・再生を行う「光ヘッド」あるいは「光ピックアップ」部に近接場光を発生させる仕組みを持たせるのに対して、Super-RENS ではその名の示すとおり、「記録媒体側に近接場光の発生源を持たせる」という発想がそもそも異端のゆえんである。しかしながら、媒体側に近接場光の発生源を持たせることで、近接場光発生ヘッドと媒体表面との空間制御と発生効率の問題が原理的には同時に解決できる。1998 年に第 1 世代と呼ばれる Super-RENS 光ディスクが報告されてから 8 年が経過するが、Super-RENS 実用化に向けては、局在光の未知なる現象の解明、信号増強の手法、そのための材料にまつわる物理化学的な問題の克服といった数多くの改良が、特に従来の固定観念に捕われぬ若く柔軟な英知によって行われてきた。この解説では、Super-RENS の開発の経緯と派生技術、及び将来展望について紹介する。

## 2. Super-RENS の変遷 (第 1 世代, 第 2 世代)

### 2.1 第 1 世代形 (開口形)

Super-RENS は、その名のとおりに近接場光を発生させ

るために媒体側に形成された薄膜構造のことをいう。Super-RENS は、「Super-Lens」とスペルが一字違うが、Lens と同様の働きをする。積層した薄膜構造そのものが、あたかも「近接場光を集光する Lens」として機能するかのよう設計されている<sup>(22),(23)</sup>。第 1 世代と呼ばれる Super-RENS 光ディスクにおいては、図 1 のように純アンチモン薄膜が薄い透明な誘電体 (窒化シリコン) の膜を挟んで相転移記録膜 (現在 DVD-RAM で用いられている代表的な相転移記録材料) の下に配置された構造を用いている。このような三層構造で、しかも、誘電体薄膜の膜厚を数十 nm 以下に限定した積層構造のことを特に「Super-RENS 機能層」と呼ぶ。Super-RENS 機能層の上下に配置された誘電体薄膜は保護層であり、基本的な原理にはそれほど関与するものではない。

この異端方式の最大の特徴は、CD、DVD、Blu-ray、HD DVD に搭載された記録・再生用光ヘッドをそのまま用いて近接場光を発生できることにある。しかし、そのために何か特殊な光学部品を挿入したりすることはない。レーザービームは、それぞれのピックアップが持つ NA によって回転している Super-RENS 機能層に集光される。従来の光学ヘッドを用いるため数十 nm まで対物レンズを接近させる必要はなく、CD や DVD ヘッドの場合と同様に空間距離は数 mm でよい。したがって Super-RENS 媒体を高速で回転させても衝突の心配は全く不要である。Super-RENS 機能層の中心になるアンチモン薄膜は、光透過性が著しく小さく (吸収係数が大きい)、集光されたビームを吸収し効率良く発熱する。発熱分布はレーザーと同様にガウス分布となるが、アンチモン薄膜はある温度域以上で相転移 (開発当初は、それが一次相転移か二次相転移か不明であった) を生じ、レー

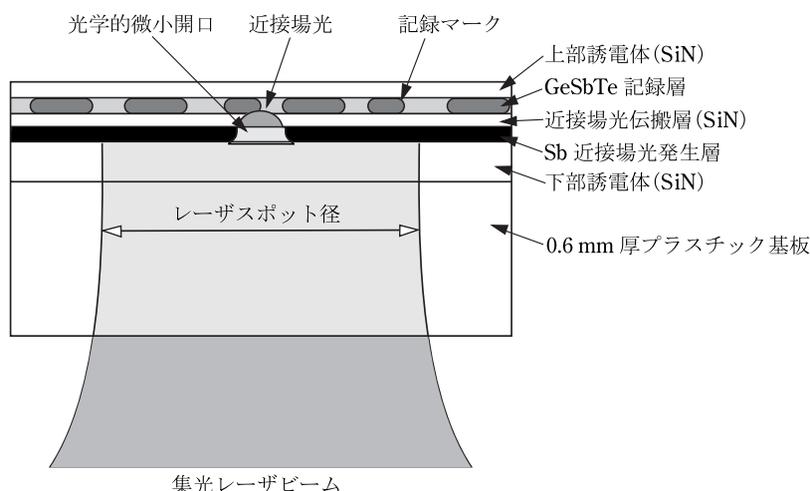


図 1 第 1 世代 Super-RENS 光ディスクの構造 Sb 近接場光発生層/近接場光伝搬層/GeSbTe 記録層を特に Super-RENS 機能層と呼ぶ。レーザーは基板を透かして入射され、Sb 層に発生する光学的微小開口で絞られるが、このとき近接場光が発生する。近接場光は SiN でできた伝搬層 (厚さ 20 ~ 40nm) を透かして記録層に記録された結晶-アモルファスの情報パターンを読み出す。Super-RENS 光ディスクは、約 800 ~ 2,400rpm で回転する。

ガスポットの中央部により小さな光の開口を発生させる。この発生する開口こそが近接場光の発生源となる。近接場光発生源となる微小開口と記録膜は数十 nm 厚の透明誘電体で隔離されているため、誘電体を透して近接場光によって記録膜の微小マークを再生できる。しかし、透明誘電体の膜厚が 80nm 以上になると、近接場光の強度がほとんどゼロとなり、発生する開口と同程度の大きさのピットは読み出せない、あるいは読み出せてもその信号強度は Super-RENS 媒体に比べて著しく低い。このような「厚い誘電体を透してのぞき見る」超解像方式は、既に Super-RENS が開発される前までに発表されており、これを特に「光超解像」と呼び、Super-RENS 方式とは区別している。Super-RENS 方式は、開口端で発生する近接場光をピットやマークと相互作用させ、その光散乱効果を信号として取り出す技術であり、従来の光超解像方式は微小開口からの高空間周波数成分を変調伝達関数 (MTF: Modulation Transfer Function) として取り出す技術である。更に、もう一つ読者の混乱を避けるために付け加えるが、「記録マークはディスクの回転とともに高速で移動するが、アンチモン薄膜はレーザーが集光された箇所のみ活性になるので、あたかも開口はレーザーポットの中央部に停止しているかのように振る舞う。」。実際、Super-RENS 光ディスクは線速度で 2 ~ 6m/s (800 ~ 2,400rpm) で記録・再生され、100nm の記録マークで 25 ~ 30dB の信号強度を得ることができた。

しかし、第 1 世代の Super-RENS 開発において、研究を展開する中で実用化に向けて克服すべき様々な問題が明らかになってきた。第 1 に熱干渉の問題がある。これは Super-RENS に限ったことではない。正統派を含めてすべての近接場光メモリに課された大きな十字架の一つである。近接場光の発生源と記録媒体 (Super-RENS の場合は記録膜) が数十 nm と近接しているため、信号強度を上げようとして入力パワーを上げると、そのほとんどのエネルギーは最終的に熱エネルギーに変換されて隣接する記録膜に熱的なダメージを与えてしまい、記録信号が再生によって劣化してしまう。第 2 に、図 2 で示すように 200nm 記録マーク付近の信号強度が極度に低下するというもう一つの大きな問題がある<sup>(23)</sup>。

一般に、CD を含めた光ディスクでは、マークエッジ記録が主流であり、クロック信号に合わせて、6 ~ 9 種類の長さの異なるマークを記録・再生する。したがって、1 種あるいは 2 種類のマークの信号強度のみが極端に低下することは致命的な欠陥を開口形が有していることを意味する。これまでの我々のシミュレーション等による解析によって、いかなる開口形近接場メモリも同様の致命的欠陥を必然的に持つことが分かっている。この欠陥は、開口端で急激な屈折率変化が発生するため、高空間周波数成分が多く発生してしまうことが原因である。

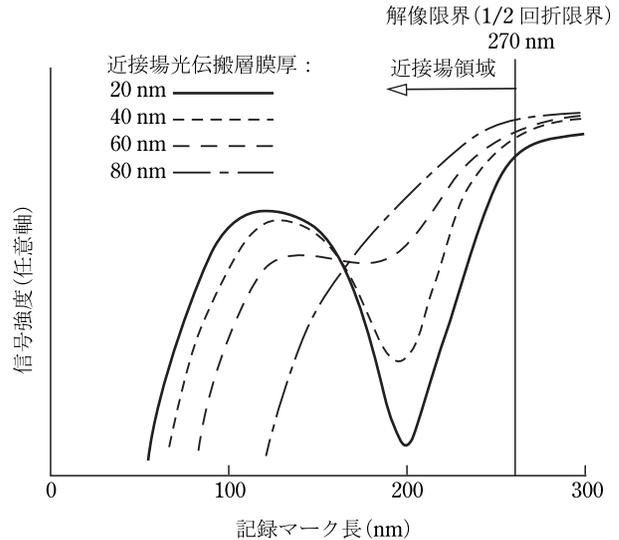


図 2 第 1 世代 Super-RENS 光ディスクの解像特性と信号強度  
第 1 世代では、近接場光伝搬層の膜厚が薄いほど小さな記録マークを読み出せるが、200nm 付近の信号が極端に低下する問題がある。膜厚を厚くすると信号低下は次第に改善されるが、解像度は次第に低下し、光超解像と同程度の特性を示すようになる。

言い換えれば、開口端に強く近接場光が局在することを意味する。これは長手のマークを再生する場合には問題とならないが、開口径と同程度の長さのマークを読み出す場合には、再生マークの両端を開口のそれぞれ前方及び後方端の近接場光が同時に読み出すことで信号劣化が発生する。200nm 付近の信号低下を防止する手段として、誘電体薄膜の膜厚を厚くする解決方法があるが、この場合には、より小さなマークの解像度と信号強度が低下してしまう (従来の光超解像に近づく)。実際、双方を同時に解決する手段は開口形には存在しない。これらの理由によって、我々は 2000 年初頭には開口形 Super-RENS 光ディスクの開発を断念せざるを得なかった。しかし、このころから世界各国で Super-RENS の追試や新たな現象が発見された。特に、TDK の菊川らは、微細な ROM 基板を用いて半導体薄膜を成膜すると、同様の光超解像効果が得られることを示した<sup>(24)</sup>。この現象は、その後の Super-RENS の進展に大きな効果を及ぼすこととなる。また、第 1 世代の Super-RENS 開発からは、「熱リソグラフィー」と呼ばれる微細加工技術が生まれている<sup>(25)~(28)</sup>。産総研の桑原らが開発したもので、アンチモン薄膜の光吸収による局所的な発熱現象を応用して、アンチモン薄膜の下部にフォトレジストを塗布し、フォトレジスト上に回折限界以下のナノパターンを描画する技術である。既に熱リソグラフィー描画法は、光吸収膜は異なるが、Blu-ray Disc のマスタリング作製等に应用され商品化に至っている<sup>(29)</sup>。初期の段階では、描画のメカニズムとして近接場光が関与するものと考えられていたが、その後の詳細な検討から温度こう配による効果の方がはるかに勝ることが分かっている。

## 2.2 第2世代（光散乱形）

第2世代 Super-RENS 光ディスク開発は、第1世代（開口形）の欠点を克服する手段の開発であることはいうまでもない。まず、第1の問題である熱干渉効果の低減は必須課題である。第1世代のアンチモン薄膜は、相転移温度は約600℃程度と実験から推定されており、相転移温度を200℃以下までに抑える必要があった。それでも相転移記録膜の転移温度は150～170℃付近にあり、したがって、記録膜においても、金属ドーパや誘電体との同時スパッタリング等を用いて結晶成長を不純物効果で阻害する「パーコレーション阻止効果」を考慮して、結晶化転移温度を200℃から250℃以上に引き上げる研究も行われた。また、第2の問題は、単一の光散乱体を Super-RENS に導入することで解決できるはずである。しかし、単一光散乱体を可逆的に光ディスクに発生させるための材料探索はその当時まで行われたことはない。ただ、近接場光学の分野では、銀や金のナノ粒子は強力な光散乱体になり得ることはミー散乱等の理論からよく分かっている。銀薄膜はその目的としては魅力的であるが、実際にアンチモン薄膜を銀薄膜で置換しても Super-RENS 効果は発生しない。今では銀薄膜はいわゆる近接場光を集光できる「負の屈折率」（ただし、透磁率が負ではないため Poor man's lens といわれる）を持っており、実験的にも銀薄膜は近接場光を集光できることが確認されているが<sup>(30)</sup>、転写すべきパターンが刻まれていない Super-RENS 積層膜においてはこれを利用できない。

第2の問題を克服するために、我々が用いたのは酸化銀薄膜である。酸化銀薄膜は、銀ターゲットとアルゴンガスと酸素ガスからなる混合ガスを用いてスパッタリングによって容易に作成できる<sup>(31), (32)</sup>。銀と酸素比率 ( $Ag_xO_{1-x}$ ) は、酸素ガス流量をアルゴンに対して変化させることで銀リッチな組成から、化合物組成である  $Ag_2O$  及び  $AgO$  へと変化させることが可能である。特に第2世代では、常圧下において160℃で  $Ag+O_2$  に分解する  $Ag_2O$  を用いた。  $AgO$  は100℃付近でも不安定で、酸素をかき離して次第に  $Ag_2O$  に変化するが、このとき大きな反射率（あるいは透過率）変化を引き起すため、応用の面で問題があった<sup>(33), (34)</sup>。さて、  $Ag_2O$  の分解温度である160℃は常圧下でのみのデータであり、高压化でのデータではない。現在でも特に海外において、酸化銀を用いた Super-RENS の発表が見られるが、そのほとんどは反応を常圧下として考えており、明らかに解釈に誤りがある。標準的な物理化学のテキストを御覧になれば分かると思うが、相変態の状態図において、混合組成比と温度の関係ではなく、温度と圧力による状態図を用いなければならない。このような  $Ag_2O$  に関する状態図は今のところ世界中を探しても残念ながら見当たらない。酸化銀薄膜の上下には誘電体が積層されており、

160℃で分解しようとしても、自己の圧力によって160℃では分解できない。また、実際には積層膜間に発生する内部応力も加わり、簡単に FDTD のような光学シミュレーションのみで解釈を加えてはならない。一般的な物質の圧力—温度状態図に従えば、  $Ag_2O$  は160℃では分解せず、より高い温度で分解しなければならない。このとき、内部圧力は増加し、上下の誘電体を押し上げようとする力と誘電体自身がこの力によって弾性変形することで元に戻ろうとする復元力がきつ抗する。つまり、レーザを集光し酸化銀薄膜を加熱（実際には記録膜である相転移膜に光を吸収させ、その発熱によって間接的に昇温する）すれば、酸化銀は  $Ag+O_2$  に分解するが、レーザを切れれば（あるいはディスクが回転すれば）温度が急速に下がるため上限の誘電体の復元力が勝って、元の  $Ag_2O$  に還元される。しかし、レーザパワーが強いと上下の誘電体による弾性変化が降伏点を越えて塑性変形に達すれば、酸化銀薄膜は銀のナノ粒子と酸素のバブルを残す（第3世代の開発においてはこの反応が重要なのだが）。したがって、酸化銀薄膜を用いる場合には、レーザパワーには誘電体の降伏点を越えてはならないという上限が課せられる。

2000年に、シャープの藤、当時ポスドクであった金（現在、サムソン電子）らとともに酸化銀薄膜を用いた第2世代の Super-RENS 光ディスクの開発に成功し<sup>(35)</sup>、その特性を図3に示すが、明らかに第1世代 Super-RENS の第2の問題点であった、開口端の近接場光干渉によるマーク長に依存した信号欠落は消失している。しかし、第1世代の解像度に比べて第2世代は解像度の点で劣り、100nm程度となった。また、第1の問題であった

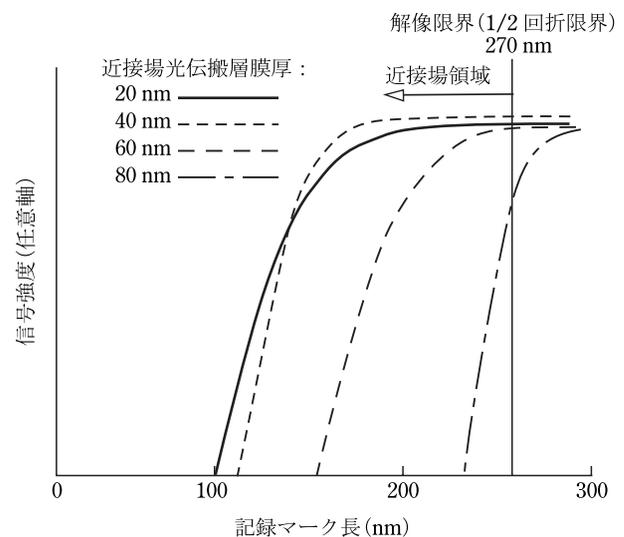


図3 第2世代 Super-RENS 光ディスクの解像特性と信号強度  
第2世代では、第1世代 Super-RENS 光ディスクで見られた200nm付近の信号低下は改善されるが、超解像特性が100nm止まりとなる。また、近接場光伝搬層膜厚を厚くすると超解像特性は消失する。

熱干渉の問題は、ある程度は改善され、短い時間ではあるが信号挙動の解析が容易になったが、実用化にはまだまだ超えなければならない数多くの問題が残った。この解決には、Super-RENS のメカニズムを根本から見直す、また、近接場光の発生の問題を改めて問い直す、という自己矛盾を含んだかつとうが必要であり、実用化に向けた第3世代 Super-RENS の開発は、それらの多くの自己矛盾の中から生まれてきた。

第2世代 Super-RENS の開発過程でも、興味深い派生技術が開発されている。その代表となるのが酸化銀薄膜を用いた分子センサである。当時、我々のポストドクであった D. Buechel と C. Mehalcea (現シーゲートテクノロジー) は、顕微ラマン分光によって酸化銀薄膜の基礎光学特性を測定中に偶然発見したものである。安息香酸の希釈な 2-プロパノール溶液に、ガラスや Si 基板に成膜した酸化銀薄膜を浸し、酸化銀薄膜表面上にレーザを集光してラマン分光を行うと、 $10^{-8}\text{M}$  まで安息香酸分子を効率良く検出できる<sup>(36),(37)</sup>。これは、顕微ラマン分光中に集光したレーザによって酸化銀が分解し、銀ナノ粒子が発生することで局在プラズモン光が発生して強力な表面増強ラマン信号が得られるためである。彼らは、また、銀ナノ粒子とは別に、直径 50nm、長さ数ミクロンにも達する銀ナノワイヤも生成できることを示した。産総研では、既にこの技術を応用した分子センサの実証を終了しており、商品化へ向けた開発研究段階に移行している。またナノワイヤ等の基礎研究は、大学院生の研究テーマとして現在も受け継がれている<sup>(38)</sup>。もう一つの大きな派生技術は、酸化銀薄膜をある特殊な環境下で還元し、大面積の基板上に均一な銀ナノ粒子を発生させる技術である<sup>(39),(40)</sup>。15cm 直径の基板一面に直径 50nm 程度の三次元に凝集した銀ナノ粒子を約 5 分程度で作製できる。このナノ粒子を用いて実際に局在プラズモン光を用いた光ディスクを作製しての基礎実験や、分子センサの開発も行われるようになっていく。

### 3. 第3世代の超解像特性

第2世代の欠点は、解像度、熱干渉のほかに、誘電体の弾性変形を利用する可逆反応過程のために、レーザパワーをある一定以上に上げられないことである。この最後の制約によって、信号感度は 30 ~ 35dB 止まりで、実用化に必須といわれた 40dB 以上を確保できなかった。しかし、第3世代開発の鍵は偶然によってもたらされた。上で述べた「制約」を破ることで 40dB 以上の信号感度を達成できることが次第に分かってきた。しかし、「制約」は可逆反応にとって不可欠なもので、ガスピットが発生する不可逆過程では、そもそも Super-RENS 特有の再生レーザパワーに依存し、かつ、明確なしきい値を持って信号が立ち上がる現象を説明できない。しかし

ながら、自然は簡単に我々のもくろみの裏をかくように見える。この一見不思議な現象は、これまでの Super-RENS の原理の解釈に大きな変更点をもたらす結果となった。つまり、酸化銀がなくとも回折限界を超えるような小さなガスピットをディスク内に形成できさえすれば、これまで記録膜に用いてきた GeSbTe や AgInSbTe といった相転移膜が、「これまで知られていない大きな超解像現象」を生み出し、その結果、Super-RENS からの信号強度を高められることを意味する。我々に偶然が重なったのは、第3世代で記録膜として使われるようになる酸化白金 (PtO<sub>x</sub>) 薄膜も酸化銀に替る材料として研究対象に含めていたことも幸いした。こうした偶然の中で、TDK の菊川、シャープの藤、産総研の金、島、中野、筆者、及びほかの共同研究等によって、第3世代の Super-RENS の開発が 2002 年から精力的に展開されてきた<sup>(41)~(47)</sup>。酸化白金はその分解温度は 550°C と高く、酸化銀等と比較して熱的な安定性が抜群に優れている<sup>(42)</sup>。銀ではナノ粒子が発生すると熱的な作用ですぐに凝集して大きな粒子に成長していくが、酸化白金においては分解して発生する白金粒子は 10nm 程度の粒子径で、しかも熱的な凝集は見られない。一方、これまで記録膜として考えられてきた相転移膜は、一転して超解像膜として作用し、その動作温度が 350°C 付近にあることが最近の研究によって確認されている<sup>(41)</sup>。このことは、Super-RENS が第1の問題である熱干渉の課題から解き放されたことを意味している。記録は 550°C 以上の高い温度で行われ、再生は 350°C から 400°C 程度で行われれば、150°C 以上の温度差があるため記録マークが熱干渉によって劣化することが事実上なくなる (実際にはそれでも少しあるが、第1世代、第2世代と比較すれば格段の差である)。このため、「これまで知られていない大きな超解像現象」の解明は後回しになるが、様々なディスク構造を検討できるようになり、第3世代 Super-RENS 光ディスクの開発は一挙に進展した。しかし、逆にこれらの実験的な特性が詳細に得られて初めて、秘められた超解像現象の機構が少しずつ明らかになったといった方が正しいかもしれない。

第3世代の特徴は、第1、第2世代をはるかにしのぐ。第1の特徴として、その超解像性能の良さが挙げられる。波長 635nm、NA0.60 光学系でも 100nm の記録ピットにおいて 40dB をはるかに超える<sup>(41)</sup>。特に、ダブル相転移膜形の第3世代 Super-RENS 光ディスクでは 45dB 程度の性能を安定に出せる<sup>(43),(45),(46)</sup>。また、エコライザ等がなくとも再生信号を確認できる。更には、波長 405nm で NA0.85 の Blu-ray 光学系では、37.5nm のピットでさえ 40dB を超える安定な信号強度を 10 万回程度の連続再生でも確保できる<sup>(46),(48),(49)</sup>。第2の特徴は、図4に示すように再生のしきい値がピット長によらず一定パワーである点が挙げられる。第1世代の Super-

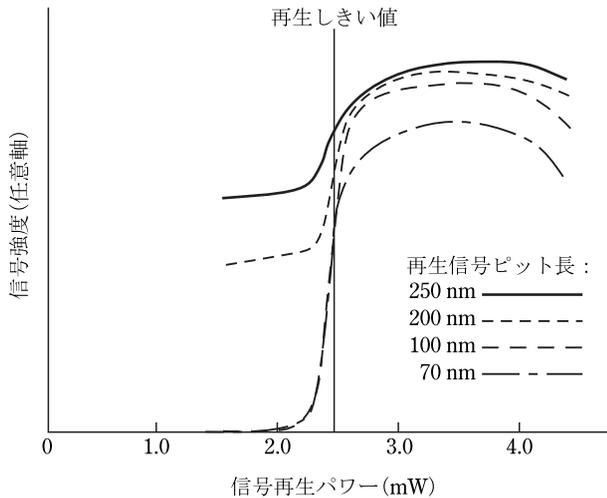


図4 第3世代 Super-RENS 光ディスクの再生パワーしきい値  
第3世代 Super-RENS 光ディスクの信号再生パワーのしきい値は、いかなる再生信号ピット長においても同じ値を示す。第1世代ではマークが小さいほど再生パワーしきい値は小さい。したがって、第3世代 Super-RENS 光ディスクの超解像信号は単純な開口モデルでは説明できない。

RENS においては、開口を用いるため信号を最大に得るための再生パワーは、近接場光の特性からピット長と開口径がほぼ一致したときに最大となるが、第3世代ではその依存性がなく、どのピット長においてもあるしきい値を超えると急しゅんに信号が出現する。この特徴は、実用化に非常に都合が良い。第3の特徴は、相転移膜を酸化白金膜の前方（レーザー入射側）においても後方（レーザーの透過側）においても信号強度に差がないことである。第4に再生可能なピットの大きさは、レーザースポット径で決まり、波長にほとんど依存しない。上記のような特性により、Super-RENS 光ディスクの開発は各国で研究の激しさを増している。

第3世代の Super-RENS は、次々世代超高密度光ディスクの開発のみならず、より広範囲な応用がナノテクノロジーの分野で期待できそうなことが分かってきている。再生技術によって格段の超解像効果と信号強度が得られるということは、裏を返せば、格段に均一な微細ピットが高速で書き込めることを意味している<sup>(50)</sup>。既に我々は、民間企業とともにナノテクノロジーで応用可能な光による高速微細ピット作製装置を開発し商品化へ向けたスタートを切った。図5に見られるように、100nmのピットパターンを電子ビーム描画の数百倍の速さで実現し、しかも12cmの光ディスクと同じ大きさのガラス基板上に作製し、ナノピットによる反射防止膜を実現している。この技術は、酸化白金の超高速熱分解過程と超解像膜を微細ピット描画用に転用したもので、本技術においては現像が不要で、直接ドライエッチングによって深溝やピットを作製できることが特徴であり、既に各方面からサンプル作製依頼や作製装置の間合せが殺到している。

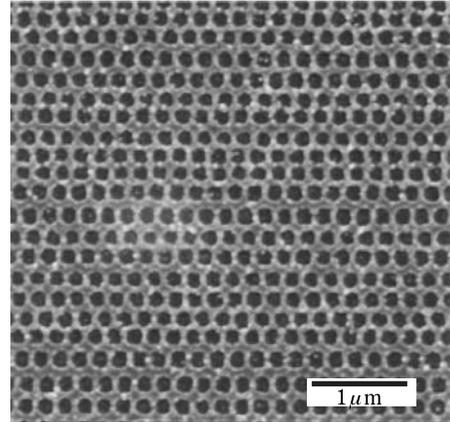


図5 第3世代 Super-RENS の派生技術として開発された100nmピット加工 第3世代 Super-RENS 光ディスクの応用として開発された光によるナノメートルサイズパターンの高速描画技術。1秒間で約数千万個の任意パターンを作製できる<sup>(50)</sup>。

#### 4. 超解像現象の原理

第3世代 Super-RENS の超解像原理とその驚くほど強い信号強度の原因についての研究は、応用展開に比べてかなり立ち後れている。これには理由がある。まず、第1にレーザー強度の増加に伴って発生する超解像源が回折限界以下と非常に小さく、従来の光学系を用いては解析がほとんど不可能であるためである。もう一つ解析を困難なものとしているのは、超解像源が温度こう配に伴って可逆的に変化することにある。つまり、回転しているディスク内では容易に超解像現象が観察できるが、静止した状態では超解像源は発生しないか、発生してもある瞬間のみで、それを詳細に観察・測定するために必要な時間内では存在できない。したがって、間接的な様々な手段を用いてデータを取得し、総合的に解析する以外に第3世代 Super-RENS の原理を理解する手法はない。

第3世代 Super-RENS の超解像原理を理解する上で最も重要となる因子は温度である<sup>(41)</sup>。ここで利用される相転移材料は、アモルファス（実際に完全にランダムであるかは最近の研究によって否定されているが）と結晶状態の屈折率変化が大きく、これが信号強度に影響を与えていることには間違いはないが、一概にいわずの一次の相転移によってのみ超解像現象が起るといったモデルは正しくない。第2の特徴として既に述べたレーザーのしきい値問題をこのモデルでは説明できない。レーザー強度の増加に伴って、超解像膜（相転移材料）の温度も上昇し、融点に達するが、強度を更には上げると融解領域が次第に大きくなる。融解領域が超解像現象の源泉であるとすれば、強度が低ければその領域は小さく、したがって、より小さなピットほど低いパワーから超解像信号を発生することになる。また、強度を上げると徐々に大きなピットが読めるようになることから、再生強度のしきい値にピット長との相関が観測されなければならない（事実、

第1世代 Super-RENS では明らかにこの傾向が観測されている)。しかし、実験結果はそれを否定している。更に驚くべきことに、50nm 径のピットでも 250nm のピットでも、信号劣化を発生するレーザー強度は同じで、しかも、超解像しきい値から 1.5 ~ 2.0mW も高い。開口形であるとすれば、大きな開口内に 2 個以上のピットが入った場合には、超解像においても信号は消失することから、この実験事実は開口モデルに明らかに反する。また、MTF の解析結果からも、単純な光学的開口モデルは否定された。

それでは、第2世代と同様に第3世代 Super-RENS は、光散乱形なのだろうか。この単純な単一光散乱モデルも実験結果と明らかに矛盾する。なぜなら、融解する領域の屈折率は結晶部のそれと比較して屈折率の複素数部が小さい。つまり、より光を透過する傾向が強い。他方、結晶層はより金属的に振る舞うため、むしろ、開口端部が光散乱体として作用する、「リング散乱体」ととらえるのがよい。しかし、リング散乱体ができるとしても、今のところそれによる巨大な信号増強の原因を説明できてはいない。ただし、幾つかの原理解明に向けた研究の中で、Sb-Te 合金薄膜を用いた場合には、超解像現象が発生するディスク内部の温度は約 350℃ と複数の実験から見積もられており、融点 (550℃) より 200℃ も低いことが分かっている<sup>(51)</sup>。この結果が何を意味しているのかは明らかで、第3世代の Super-RENS による超解像現象は、融点が絡んだ現象というより、二次の相転移を含んだより高次の相転移現象によるものととらえるべきである<sup>(52), (53)</sup>。Sb-Te 系の一般的な相図には、350℃ 付近に何ら特別な相状態は存在しないが、あくまでもその相図は、常圧において測定されたものであり、薄膜による界面張力や内部応力下において得られたものではないことに気づくべきである。また、Super-RENS においては、読出し時に相転移膜はすべて結晶層に変化する。このため、約 5 ~ 12% の体積収縮が発生し、誘電体との界面にかなり大きな応力が発生することは特筆すべきことである。現在、高圧状態下における詳細な構造解析が日本、EU の放射光施設で行われており、今後、次第に高温加圧下での相状態の挙動が明らかとなり、これによって原理解明が一層進むことを期待したい。

## 5. 将来への課題

第3世代の Super-RENS の期待は非常に大きい。また、その超解像現象にも非常に興味のある隠れた物理が存在することも確かである。特に第3世代の応用としての微細ピットの記録・加工技術は立ち上がったばかりではあるが、その可能性は大きい。一方、本筋の超高密度光記録ディスク開発の方は、規格の問題やライセンスを含めてまだまだ時間がかかりそうである。技術的には、

Blu-ray 光学系において、線密度方向を 2 倍高密度化 (最短ピット長 75nm) した Super-RENS 光ディスクは既に完成の域にあり、エラーレートも実用段階のレベルにまで入っている<sup>(54)</sup>。一方、半径方向への高密度化技術の開発は始まったばかりである。これは、現状の光リソグラフィでは作製困難で、電子ビーム描画が必要なためである。しかし、我々が ODS06 において発表したグループトラッキング方式等を応用すれば、1.5 倍の高密度を達成できる可能性がある<sup>(55)</sup>。このグループトラッキング基板は、前述した第3世代 Super-RENS の派生技術で作製したもので、Super-RENS は既に光ディスクのマスタリングにも十分転用できる技術になりつつある。更に、第3世代の超解像現象が解明されれば、更に小さなピットを大きな信号強度で記録・再生できる可能性がある。現段階でも 30nm 程度のピット記録においても 40dB 近い信号が得られており、現状の第3世代の Super-RENS でも線密度方向で 4 倍密を達成できる可能性が大いにある。例えば、SIL 等による光ヘッドを用いれば、更に 20nm 以下のピットの記録・再生も夢ではない。このように、Super-RENS はまだまだ発展段階にあり、研究者の興味を引きつけ続けるものと確信する。

## 6. まとめ

Super-RENS と呼ばれる純国産の近接場応用超解像光ストレージ技術について、その開発から現状までを派生技術を含めながら紹介した。Super-RENS は発明以来、多くの若き研究者を引きつけ、若き研究者たちの既存概念に捕われぬ自由な発想によって成果を上げてきた。共同研究に携わってきた多くの方々にこの場を借りて深く感謝したい。

## 文 献

- (1) E. Betzig, J.K. Trautman, R. Wolfe, E.M. Grygoy, P.L. Finn, M.H. Kryder, and C.H. Chang, "Near-field magneto-optics and high density data storage," *Appl. Phys. Lett.*, vol.61, pp.142-144, 1992.
- (2) S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsune, M. Terao, M. Yasuda, K. Fujita, and S. Kammer, "Scanning near-field optical microscope with a laser diode and nanometer-sized bit recording," *Thin Solid Films*, vol.273, pp.122-127, 1996.
- (3) S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsune, M. Terao, M. Yasuda, K. Fujita, and S. Kammer, "Nanometer-sized phase-change recording using a scanning near-field optical microscope with a laser diode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.35, pp.443-447, 1996.
- (4) F. Issiki, K. Ito, K. Etoh, and S. Hosaka, "1.5-Mbit/s direct readout of line-and-space patterns using a scanning near-field optical microscopy probe slider with air-bearing control," *Appl. Phys. Lett.*, vol.76, pp.804-806, 2000.
- (5) M. Muranishi, K. Sato, S. Hosaka, A. Kikukawa, T. Shintani, and K. Ito, "Control of aperture size of optical probe for scanning near-field optical microscopy using forced ion beam technology," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, vol.7, pp.L942-L943, 1997.
- (6) M.B. Lee, N. Atoda, K. Tsutsui, and M. Ohtsu, "Nanometric

- aperture arrays fabricated by wet and dry etching of silicon for near-field optical storage application," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol.B17, pp.2462-2466, 1999.
- (7) H. Yoshikawa, T. Ohkubo, K. Fukuzawa, and L. Bounet, "Readout characteristics of a near-field optical probe as a data-storage readout device: submicrometer scan height and resolution," *Appl. Opt.*, vol.38, pp.863-868, 1999.
  - (8) M.B. Lee, M. Kourogi, T. Yatsui, K. Tsutsui, N. Atoda, and M. Ohtsu, "Silicon planar-apertured probe array for high-density near-field optical storage," *Appl. Opt.*, vol.38, pp.3566-3571, 1999.
  - (9) Y.J. Kim, K. Suzuki, and K. Goto, "Proposal of ultrahigh density optical disk system using a vertical cavity surface emitting laser array," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.37, pp.2274-2278, 1998.
  - (10) A. Partovi, D. Peale, M. Wuttig, C.A. Murry, L. Hopkins, K. Bladwin, W.S. Hbson, J. Wynn, J. Lapata, and L. Dhar, "High-power laser light source for near-field optics and its application to high-density optical data storage," *Appl. Phys. Lett.*, vol.75, pp.1515-1517, 1999.
  - (11) T. Yatsui, M. Kourogi, K. Tsutsui, M. Ohtsu, and J. Takahashi, "High-density-speed optical near-field recording-reading with a pyramidal silicon probe on a contact slider," *Opt. Lett.*, vol.25, pp.1279-1281, 2000.
  - (12) Y. Martin, S. Rishton, and H.K. Wickramasinghe, "Optical data storage read out at 256 Gbits/in<sup>2</sup>," *Appl. Phys. Lett.*, vol.71, pp.1-3, 1997.
  - (13) T. Matsumoto, T. Shimano, and S. Hosaka, "An efficient probe with a planar metallic pattern for high-density near-field optical memory," *Conf. Program. of 6th International Conference on Near-Field Optics and Related Technologies (NFO-6)*, p.55, Twente, Netherlands, 2000.
  - (14) E. Oesterschultz, G. Georgiev, M. Mueller-Wiegand, A. Volkof, and O. Rudow, "Transmission line probe based on a bowtie antenna," *J. Microsc.*, vol.202, pp.39-44, 2001.
  - (15) J.M. Vigoureux, F. Depasse, and D. Courjon, "Detection of nonradiative fields in light of the Heisenberg uncertainty principle and the Rayleigh criterion," *Appl. Opt.*, vol.31, pp.3036-3045, 1992.
  - (16) S.M. Mansfield and G.S. Kino, "Solid immersion microscope," *Appl. Phys. Lett.*, vol.57, pp.2615-2617, 1990.
  - (17) I. Ichimura, S. Hayashi, and G.S. Kino, "High-density optical recording using a solid immersion lens," *Appl. Opt.*, vol.36, pp.4339-4348, 1997.
  - (18) B.D. Terris, H.J. Mamin, D. Ruger, W.R. Studenmund, and G.S. Kino, "Near-field optical data storage using a solid immersion lens," *Appl. Phys. Lett.*, vol.65, pp.388-390, 1994.
  - (19) I. Ichimura, K. Kishima, K. Osato, K. Yamamoto, Y. Kuroda, and K. Saito, "Near-field phase-change optical recording of 1.36 numerical aperture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.39, pp.962-967, 2000.
  - (20) K. Saito, T. Ishimoto, T. Kondo, A. Nakaoki, S. Masuhara, M. Furuki, and M. Yamamoto, "Readout method for read only memory signal and air gap control signal in a near field optical disc system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.41, pp.1898-1902, 2002.
  - (21) T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki, M. Furuki, M. Takeda, and M. Yamamoto, "Gap servo system for a biaxial device using an optical gap signal in a near field readout system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.2719-2724, 2003.
  - (22) J. Tominaga, T. Nakano, and N. Atoda, "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film," *Appl. Phys. Lett.*, vol.73, pp.2078-2080, 1998.
  - (23) J. Tominaga, T. nakano, N. Atoda, H. Fuji, and A. Sato, "The characteristics and the potential of super resolution near-field structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.39, pp.957-961, 2000.
  - (24) T. Kikukawa, T. Kato, H. Shingai, and H. Utsunomiya, "High-density read-only memory disc with super resolution reflective layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, pp.1624-1628, 2001.
  - (25) M. Kuwahara, T. Nakano, and J. Tominaga, "High-speed optical near-field photolithography by super resolution near-field structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.38, pp.L1079-L1081, 1999.
  - (26) M. Kuwahara, T. Nakano, C. Mihalcea, T. Shima, J.K. Kim, J. Tominaga, and N. Atoda, "Less than 0.1 $\mu$ m linewidth fabrication by visible light using super-resolution near-field structure," *Microelectron. Eng.*, vol.57, 58, pp.883-890, 2001.
  - (27) M. Kuwahara, C. Mihalcea, N. Atoda, J. Tominaga, H. Fuji, and T. Kikukawa, "Thermal lithography for 0.1 $\mu$ m pattern fabrication," *Microelectron. Eng.*, vol.61, 62, pp.415-421, 2002.
  - (28) M. Kuwahara, J.M. Li, C. Mihalcea, N. Atoda, J. Tominaga, and L.P. Shi, "Thermal lithography for 100-nm dimensions using a nano-heat spot of a visible laser beam," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.41, pp.L1022-L1024, 2002.
  - (29) A. Kouchiyama, K. Aratani, Y. Takemoto, T. Nakao, and S. Kai, "High-resolution blue-laser mastering using an inorganic photoresist," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.769-771, 2003.
  - (30) N. Fang, H. Lee, C. Sun, and X. Zhang, "Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens," *Science*, vol.308, pp.534-537, 2005.
  - (31) J. Tominaga, S. Haratani, K. Uchiyama, and S. Takayama, "New recordable compact disc with inorganic material, AgO<sub>x</sub>," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.31, pp.2757-2759, 1992.
  - (32) S. Haratani, J. Tominaga, H. Dohi, and S. Takayama, "Property change of AgO<sub>x</sub> recordable compact disc with various dielectric films," *J. Appl. Phys.*, vol.76, pp.1297-1300, 1994.
  - (33) A. Kolobov, A. Rogalev, F. Wilhelm, N. Jaouen, T. Shima, and J. Tominaga, "Thermal decomposition of a thin AgO<sub>x</sub> layer generating optical near-field," *Appl. Phys. Lett.*, vol.84, pp.1641-1643, 2004.
  - (34) T. Shima and J. Tominaga, "Optical transmittance study of silver particles formed by AgO<sub>x</sub> thermal decomposition," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol.21, no.3, pp.634-637, 2003.
  - (35) H. Fuji, H. Katayama, L. Men, T. Nakano, and J. Tominaga, "A near-field recording and readout technology using a metallic probe in an optical disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.39, pp.980-981, 2000.
  - (36) D. Buechel, C. Mihalcea, T. Fukaya, N. Atoda, and J. Tominaga, "Sputtered silver oxide layers for surface-enhanced Raman spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.79, pp.620-622, 2001.
  - (37) C. Mihalcea, D. Buechel, N. Atoda, and J. Tominaga, "Intrinsic fluorescence and quenching effects in photoactivated reactively sputtered silver oxide layers," *J. Am. Chem. Soc.*, vol.123, pp.7172-7173, 2001.
  - (38) H. Iwanabe, T. Horiuchi, J. Tominaga, D. Buechel, and C. Mihalcea, "Fabrication of silver nano-noodles," *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.*, vol.42, pp.L1208-L1209, 2003.
  - (39) J. Tominaga, "The application of silver oxide thin films to plasmon photonic devices," *J. Phys. Condens. Matter.*, vol.15, pp.R1101-R1122, 2003.
  - (40) T. Arai, C. Rockstuhl, P. Fons, K. Kurihara, T. Nakano, K. Awazu, and J. Tominaga, "Characteristics of nanostructured Ag films by the reduction of sputtered AgO<sub>x</sub> thin films," *Nanotechnology*, vol.17, pp.79-82, 2006.
  - (41) T. Kikukawa, T. Nakano, T. Shima, and J. Tominaga, "Rigid bubble pit formation and huge signal enhancement in super-resolution near-field structure disk with platinum-oxide layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol.81, pp.4697-4699, 2002.
  - (42) T. Shima and J. Tominaga, "Optical and structural property change by the thermal decomposition of amorphous platinum oxide film," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, pp.3479-3480, 2003.
  - (43) J.H. Kim, I. Hwang, D. Yoon, I. Park, D. Shin, T. Kikukawa, T. Shima, and J. Tominaga, "Super-resolution by elliptical bubble formation with PtO<sub>x</sub> and AgInSbTe layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.83, pp.1701-1703, 2003.
  - (44) Q. Liu, J.H. Kim, T. Fukaya, and J. Tominaga, "Thermal-induced optical properties of a PdO<sub>x</sub> mask layer in an optical

- data storage system with a superresolution near-field structure,” *Opt. Express*, vol.11, no.21, pp.2646-2653, 2003.
- (45) J.H. Kim, I. Hwang, H. Kim, D. Yoon, I. Park, D. Shin, Y. Park, and J. Tominaga, “Signal characteristics of super-resolution near-field structure disk in blue laser system,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.43, pp.4921-4924, 2004.
- (46) J.H. Kim, H. Kim, I. Hwang, D. Yoon, I. Park, D. Shin, Y. Park, and J. Tominaga, “Super resolution read only memory disc using super-resolution near-field structure technology,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.43, pp.4945-4948, 2004.
- (47) T. Shima, T. Nakano, and J. Tominaga, “An approach to lower the threshold laser power of super-resolucional-readout optical disk using silver telluride layer,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.43, pp.L1499-L1501, 2004.
- (48) T. Kikukawa, N. Fukuzawa, and T. Kobayashi, “Properties of super-resolution near-field structure with platinum-oxide layer in blu-ray disc system,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.44, pp.3596-3597, 2005.
- (49) H. Fuji, T. Kikukawa, and J. Tominaga, “Observation of eye pattern on super-resolution near-field structure disk with write-strategy technique,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.43, pp.4212-4215, 2004.
- (50) K. Kurihara, Y. Yamakawa, T. Nakano, and J. Tominaga, “High-speed optical nanofabrication by platinum oxide nano-explosion,” *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, vol.8, pp.S139-S143, 2006.
- (51) J. Tominaga, T. Shima, M. Kuwahara, T. Fukaya, A. Kolobov, and T. Nakano, “Ferroelectric catastrophe: beyond nanometre-scale optical resolution,” *Nanotechnology*, vol.15, pp.411-415, 2004.
- (52) A. Kolobov, P. Fons, A. Frenkel, A. Ankudinov, J. Tominaga, and T. Uruga, “Understanding the phase-change mechanism of rewritable optical media,” *Nature Mater.*, vol.3, pp.703-708, 2004.
- (53) W. Weinic, A. Pamungkas, R. Detemple, C. Steimer, S. Blugel, and M. Wuttig, “Unravelling the interplay of local structure and physical properties in phase-change materials,” *Nature Mater.*, vol.5, pp.56-62, 2006.
- (54) J. Bae, J.H. Kim, I. Hwang, H. Kim, J. Lee, H. Park, I. Park, and J. Tominaga, “Error rate improvement of 75 nm Super-RENS signal in 405 nm, NA 0.85 system,” *Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting (ODS2006)*, no.WB-3, pp.200-202, 2006.
- (55) K. Kurihara, Y. Yamakawa, T. Shima, T. Nakano, and J. Tominaga, “Super-RENS ROM disc with narrow track pitch,” *Technical Digest of Optical Data Storage Topical Meeting (ODS2006)*, no.WB-3, pp.203-205, 2006.

(平成 18 年 5 月 8 日受付)



とみなが じゅんじ  
富永 淳二

1959 宮城県生まれ。1990 英国クランフィールド工科大博士課程了。Ph.D. (材料科学)。TDK, 工業技術院産業技術融合領域研究所を経て、現在、独立行政法人産業技術総合研究所近接場光応用工学研究センターセンター長。