

開口型 Super-RENS の相変化メカニズム

田頭 剛*・浮田 宏生**

*立命館大学大学院理工学研究科 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

**立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

A Phase Change Mechanism for a Transparent-Aperture Type Super-RENS Optical Disk

Tsuyoshi TAGASHIRA* and Hiroo UKITA**

*Graduate school of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu 525-8577

**Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu 525-8577

A working mechanism for a transparent-aperture type super-resolution near-field structure (Super-RENS) optical disk is clarified. Experimental results show that the disk has two states; one is due to the change of only mask layer, and the other is due to the change of both mask and recording layer. Theoretical analysis for the six layer medium shows that the reflectivity decreases by 91% for amorphous-mask and crystal-recording layers, and that it decreases by 73% for amorphous-mask and amorphous-recording layers. These reflectivities correspond to the two states obtained experimentally. From these results, the mechanism that both mask and recording layers change from as-depo to amorphous in write process and the mask layer uniformly changes to amorphous in read process is presented. According to the conventional super-resolution mechanism, the very small high temperature region in the focused spot behaves as an aperture and makes it possible to detect marks less than diffraction limit on the recording layer.

Key words: optical memory, Super-RENS, near-field, phase change, diffraction limit, super-resolution

1. はじめに

光ディスクはCD (compact disc) からDVD (digital versatile disk) へ、時代のニーズとともに大容量化してきた。次世代のDVR (digital video recording) は波長 $\lambda=405$ nm, レンズ開口数 $NA=0.85$ により, 直径12 cmの円盤に25 GBの記録を可能にしようとしている。しかし, さらなる大容量化には波長と開口数で決まる分解能(スポットサイズ)に限界がある。この検出限界($\lambda/4NA$)を打破するため新たなブレイクスルーが必要になっている。

本稿では, 光の波長やレンズの開口数に依存しないSuper-RENS (super-resolution near-field structure) 方式¹⁾に着目し, 記録再生過程における動作メカニズムを解明する。これまで, 開口型では90 nmの微小マークの検

出(媒体速度 $v=2.0$ m/s, $\lambda=686$ nm, $NA=0.6$)¹⁾, SNOM (scanning near-field optical microscopy) による微小開口の観察²⁾, 散乱型では信号CN比の再生パワー依存性, 記録パワー依存性³⁾が報告されている。しかし動作原理は不明確なままであった。

以下では, 開口型Super-RENSディスクを用い, 検出限界以下の微小マークとそれ以上の長マークに対し, 再生パワーと記録パワーが信号レベルへ及ぼす影響を, 実験と理論の両面から系統的に解析した。その結果, 記録パワーに対して再生信号が連続的に変化するのではなく, 2段階に変化することを見出した。さらに6層媒体の合成反射率解析から, 上記の2状態はマスク層がアモルファスで, 記録層が結晶のときの91%, マスク層と記録層がともにアモルファスのときの73%に対応することが判明し, 本結

**E-mail: ukita@se.ritsumei.ac.jp

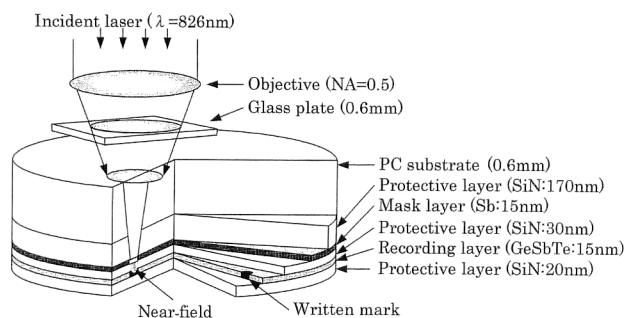


Fig. 1. Read/write configuration for a Super-RENS optical disk.

Table 1 Experimental conditions for read power dependence.

| | Write | Read |
|------------------|----------|------|
| Laser power (mW) | 7 | 1~7 |
| Velocity (m/s) | 1.9 | 3.9 |
| Mark length (nm) | 100~3000 | |

果と従来の超解像理論を合わせることにより，Super-RENS方式の相変化メカニズムが明らかになったので報告する。

2. 実験解析

2.1 実験装置

実験には，Fig. 1に示す Super-RENS ディスクに対し市販の媒体評価装置 (DDU-1000：パルステック社) を使用した。まず，長さの異なる光パルスで任意長のマークを書き込み，次に，連続光を照射して再生信号をオシロスコープ (長マーク)，スペクトルアナライザ (微小マーク) で観測した。レーザー波長は 826 nm，対物レンズの開口数は 0.5 なので，本実験の検出限界 ($\lambda/4NA$) は 413 nm になる。また，ディスク基板厚は 0.6 mm なので厚み補正用のガラス板 0.6 mm を光ヘッドに取り付け，対物レンズ (1.2 mm 用) の球面収差を補正した。

2.2 超解像再生条件

記録パワー P_w ，媒体速度 v を一定にし，再生パワー P_r を変化させ (1~7 mW)，超解像信号が得られる再生パワー条件を見つけた。実験条件を Table 1 に，信号の最大 CN 比を Fig. 2 に示す。検出限界より十分大きいマーク長 (1000~3000 nm) に対しては， P_r に依存しない高 CN 比が得られた。しかし，検出限界以下の微小マーク (200~400 nm) に対しては， $P_r=6$ mW 付近でしか信号が現れない。 P_r が低いとマスク層に微小開口が形成されず，微小マークを検出できないという Super-RENS の特性を反映している。また P_r が高すぎるとマスク層に形成される開口が大きくなり，その下にある連続した微小マ

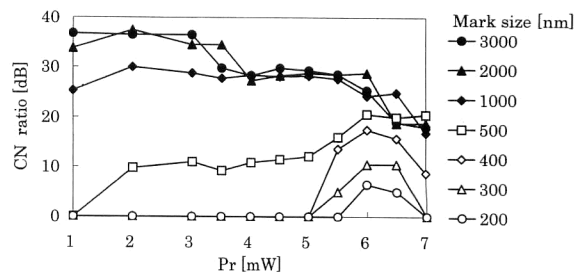


Fig. 2 Read power dependence of CN ratio.

Table 2 Experimental conditions for write power dependence.

| | Write | Read |
|------------------|---------------|------|
| Laser power (mW) | 3~9 | 6 |
| Velocity (m/s) | 1.9 | 3.9 |
| Mark length (nm) | 200~500, 3000 | |

ークを分解 (区別) できないので，信号がなくなる。ここで，検出限界以下の微小マークを再生できるこの P_r (6.0 mW) を Super-RENS 再生パワーと定義する。

2.3 相変化レベルの測定

マスク層と記録層の相変化レベルを検知するため，記録パワー P_w を変えてマークを記録し，再生信号レベルを観測した。マスク層，記録層の相変化レベルを個別に測定できないため，観測条件を変えて信号を測定し，得られた結果からそれぞれの相状態を推測した。

実験手順は，①再生パワー $P_r=2$ mW で無記録状態の信号レベルをオシロスコープで観測する。②マークを記録し，記録直後の信号をオシロスコープで観測する。③ Super-RENS 再生パワー ($P_r=6$ mW) を照射する。ここで，超解像信号が時間とともに劣化するので，再生直後の最大信号レベルと安定化後 (1~2 秒) の信号レベルをスペクトルアナライザで観測する。④ P_r を再び 2 mW に戻し，Super-RENS 再生後の信号をオシロスコープで観測する。実験では，Super-RENS 再生条件を適用する前後の②記録直後と④ Super-RENS 再生後に得られた信号に着目し，比較検討する。実験条件を Table 2 に示す。

まず，オシロスコープで直接観測可能な長マーク (3000 nm) の実験結果を示す。この場合，長さ方向に対しては記録マークによるサイズ効果がないので，十分な記録パワーでは再生信号出力と媒体の合成反射率が直接対応する。Fig. 3 は再生波形例で，初期状態を as-depo，光パルス照射 (記録) 後の再生波形のマーク部を V_2 ，マークでない部分を V_1 (余熱により相状態が変化する)，信号のピークツーピークを V_{pp} と定義する。

Fig. 4 はマーク部の信号レベル V_2 の記録パワー P_w 依

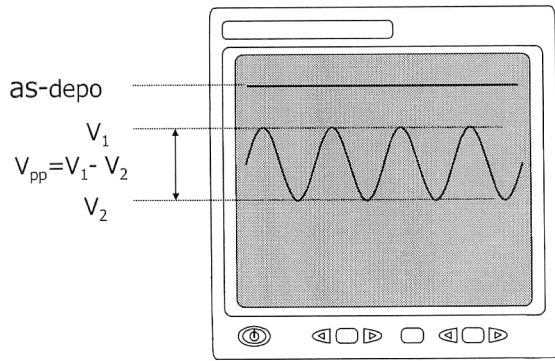


Fig. 3 Definition of an oscilloscope signals. as-depo: Initial level (before writing), V_1 : Non mark level (maximum), V_2 : Mark level (minimum), V_{pp} : Peak to peak (amplitude).

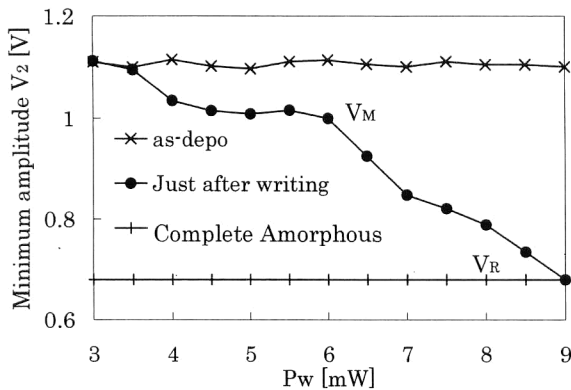


Fig. 4 Write power dependence of signal amplitude for long marks (just after writing).

存性である。 V_2 は P_w に対し連続的に変化するのではなく、 P_w が 4 mW と 6 mW 付近で 2 段階に変化している。このときの飽和再生信号レベルをそれぞれ V_M 、 V_R レベルとする。 Fig. 5 は記録直後と Super-RENS 再生後の CN 比である ($P_r=2$ mW)。記録直後は P_w に依存せず CN 比が高い。しかし、 Super-RENS 再生後は $P_w=4\sim 6$ mW 付近で信号が激減している。 Fig. 4 と Fig. 5 の信号が変化する P_w はほぼ一致しており、マーク長 3000 nm では $P_w=4$ mW と 6 mW 付近でディスクの相状態が急変していることがわかる。

同様の実験を検出限界以下の微小マークで行った結果を Fig. 6 に示す。微小マークでは 1 段階の変化が $P_w=5$ mW 付近で顕著で V_M レベルに達しているが、 2 段階の変化は 8~9 mW 付近で緩やかに現れている。これは記録マークが微小なため、スポット内に複数の記録部と未記録部が存在するので、再生信号がそれらの平均値になるためである⁴⁾。

また、 Fig. 7 は Super-RENS 再生時 ($P_r=6$ mW) の

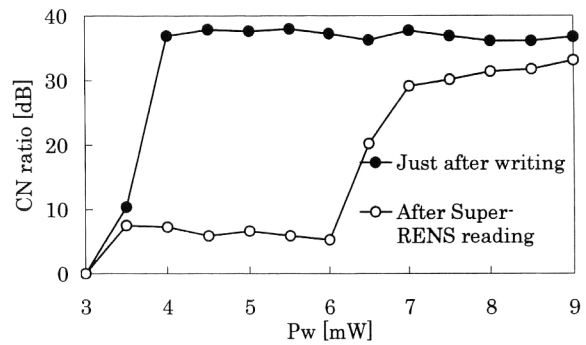


Fig. 5 Write power dependence of CN ratio for long marks.

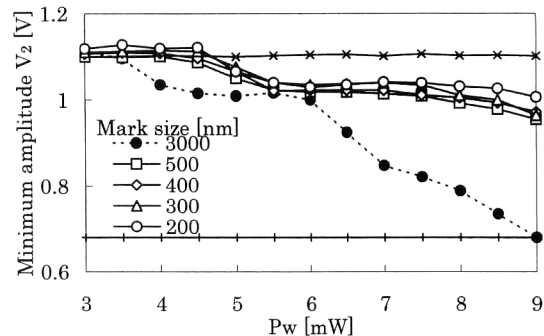


Fig. 6 Write power dependence of signal amplitude for short marks (just after writing).

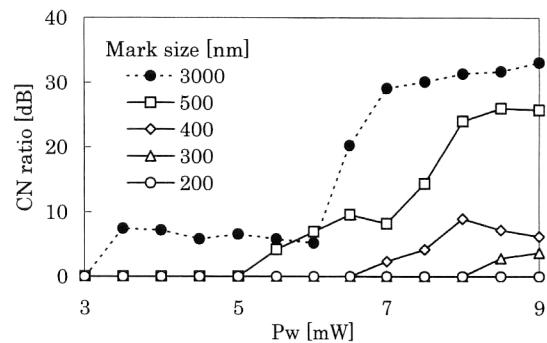


Fig. 7 Write power dependence of CN ratio for short marks (under Super-RENS reading).

安定信号レベルで、マーク長が短くなるにつれ CN 比が小さくなっている。これはマークサイズによる従来の CN 比低下のほか、記録レーザーパルスが短いため熱が十分に記録層に及んでいないことも考えられる⁵⁾。今後の検討課題である。

いずれにしろ、微小マークも長マークと同様の熱記録再生メカニズムと考えられる。

3. 理論解析

Super-RENS ディスクのマスク層と記録層の相状態が

Table 3 Physical properties of a Super-RENS disk.

| Layer | Material | Thickness [nm] | Phase | n | k |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|-----------|------|------|
| PC substrate | Polycarbonate | 0.6×10^6 | | 1.56 | |
| Protection | SiN | 170 | | 2.35 | |
| Mask | Sb | 15 | as-depo | 3.52 | 5.3 |
| | | | Crystal | 3.52 | 5.48 |
| | | | Amorphous | 3.6 | 4.75 |
| Protection | SiN | 30 | | 2.35 | |
| Recording | $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ | 15 | Crystal | 4.29 | 2.09 |
| | | | Amorphous | 3.97 | 4.41 |
| Protection | SiN | 20 | | 2.35 | |

変化したときの合成反射率をシミュレーションした。Super-RENSは6層構成なので、各層間の反射率を下から1層ずつ合成し合成反射率 r_{012} を求めた。各層間の反射率を r_{ij} とし、合成反射率を r_{ijk} とおく。垂直入射の場合、それぞれは以下の式で与えられる^{6,7)}。

$$r_{ij} = (n_i - n_j) / (n_i + n_j) \quad (1)$$

$$r_{ijk} = \{r_{ij} + r_{jk} \exp(i2\beta_j)\} / \{1 + r_{ij}r_{jk} \exp(i2\beta_j)\} \quad (2)$$

ただし、 n_i , d_i , θ_i はそれぞれ*i*番目の層の屈折率、膜厚、入射角、 β_j は*j*番目の層の位相シフトで、 $\beta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$ で表される。

計算パラメータをTable 3に⁸⁾、計算結果をFig. 8に示す。ディスク初期状態の反射率を基準(100%)にマ

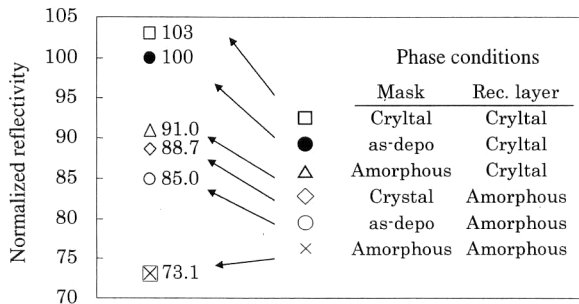


Fig. 8 Normalized reflectivity for several phase conditions.

スク層、記録層がFig. 8右の組み合わせのように変化したときの合成反射率を、相状態と対応して示している。

初期状態よりも反射率が高くなる(103%)のはマスク層が結晶状態に変化したときのみで、マスク層と記録層ともにアモルファス状態では反射率が最も低く(73.1%)なっている。

4. 実験結果と理論解析の比較

以上の実験解析と理論解析を比較する。まず、マーク長3000 nm、周期的マーク列におけるマーク部の割合(デューティ比)が20%のマークを記録したときのオシロスコープ観測画像をFig. 9に示す。初期状態の信号レベルを100%とする。記録パワーが不十分な場合($P_w = 4 \sim 8$ mW, $v = 1.9$ m/s)は、信号が91%に減少する(V_M)。そしてSuper-RENS再生条件($P_r = 6$ mW, $v = 3.9$ m/s)により、マーク未記録部が V_M まで減少し信号が消滅する。一方、記録パワーが十分な場合($P_w = 9$ mW, $v = 1.9$ m/s)は、信号が73%に減少する(V_R)。そしてSuper-RENS再生により、マーク未記録部が V_M まで減少する。

この結果、 V_M レベルは上層のマスク層のみが変化し記録層は変化しない、 V_R はマスク層と記録層がともに変化していると推測される。また、Super-RENS再生により、

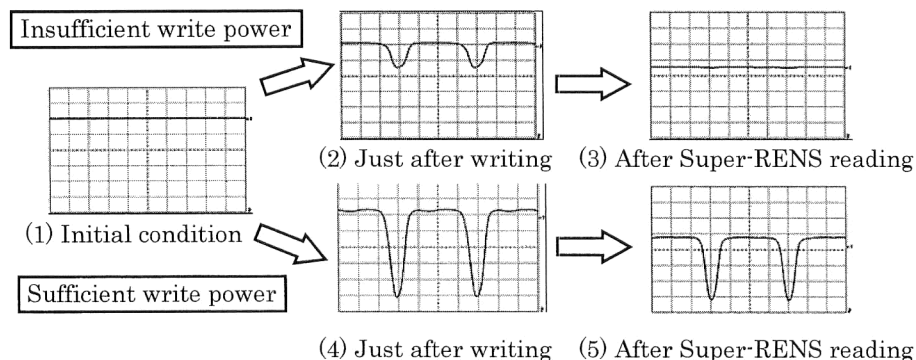


Fig. 9 Signal levels readout experimentally.

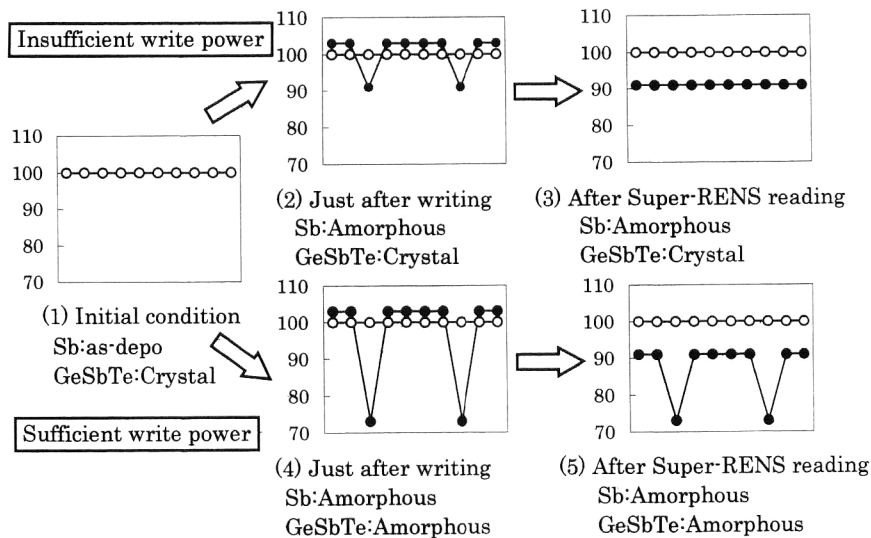


Fig. 10 Simulated signals normalized by as-depo.

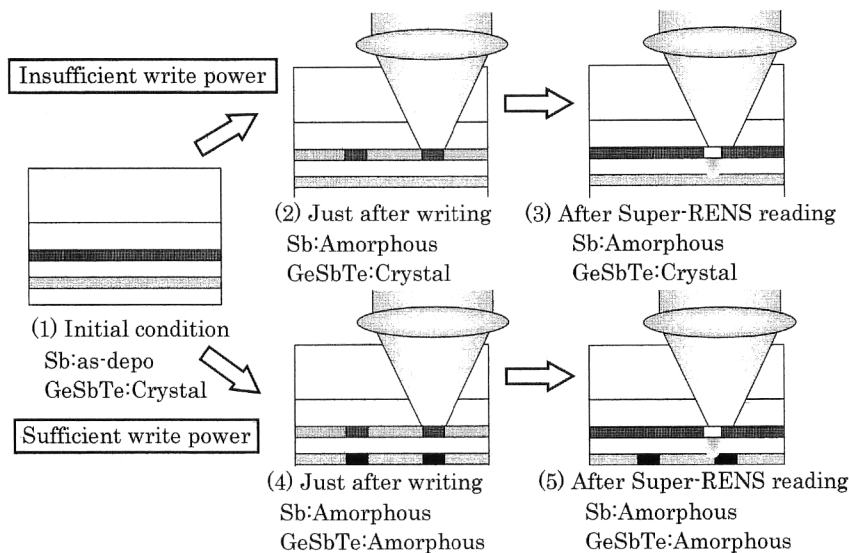


Fig. 11 A proposed read/write mechanism for a transparent aperture type Super-RENS optical disk.

マスク層が一様にアモルファス化し、全体が V_M まで減少すると考えられる。

次にシミュレーション結果を Fig. 10 に示す。同図は、レベル関係をデューティ比 20% に対応させてモデル的に示したもので、以下のことがわかる。初期状態からマスク層だけがアモルファス化すると信号は 91% まで減少し、Super-RENS 再生によってマスク層が一様にアモルファス化すると考えれば、全体が 91% のレベルになる。また、マスク層と記録層がともにアモルファス化すると、信号レベルは 73% まで減少する。Super-RENS 再生により、マスク層が一様にアモルファス状態になるため、マーク未記録部の信号レベルが 91% まで減少する。このシミュレーション結果は実験結果とよく一致している。

5. 記録再生メカニズム

以上の実験解析、理論解析と従来の超解像理論より推定した Super-RENS ディスクの記録再生メカニズムを以下に示す。なお、Fig. 11 は微小マーク (300 nm) の場合のモデル図である。

ディスクの初期状態は、マスク層が as-depo、記録層が結晶である (1)。まず本解析から、記録直後の状態は、記録パワーが不十分な場合、マスク層のみがアモルファス化し、記録層は結晶のままである (2)。この状態で Super-RENS 再生を適用しても、記録層にマークがないため信号は検出されず、上層のマスク層を均一化 (全域がアモルファス化) するだけである (3)。このため、Super-RENS 再生後には記録直後に観測できた信号が消滅する。記録パ

ワーが十分な場合、マスク層と記録層がともにアモルファス化する (4)。この状態で Super-RENS 再生条件を適用すると、マスク層は一様にアモルファス化する。従来の超解像理論によれば、光スポット後端部に微小高温領域 (微小開口) が生じると推定されるので、この微小開口に発生する近接場光により下の記録層に形成された検出限界以下の微小マークを再生できる (5)。

6. ま と め

本研究では、超高密度光記録が期待される Super-RENS 方式の光ディスクを対象に、実験・理論の両面から動作メカニズムを解析した。

実験解析では、再生パワーを最適化することにより、本実験系の理論上の検出限界 ($\lambda/4 NA = 413 \text{ nm}$) 以下の微小マーク (200 nm) の検出に成功した。また、記録パワーを変化した結果、ディスクの相状態が、マスク層のみ状態変化するレベル V_M と、マスク層と記録層がともに変化するレベル V_R の 2 段階に変化することを見出した。

また理論解析では、初期状態を、マスク層が as-depo、記録層が結晶として総合反射率をシミュレーションした。記録直後の状態は、マスク層がアモルファス、記録層が結晶状態のとき、信号レベルが初期状態の 91% に減少し、実験結果の V_M レベル、すなわち記録パワーが不十分な場合に相当することがわかった。また、マスク層と記録層がともにアモルファスのとき信号レベルが初期状態の 73% に減少し、実験結果の V_R レベル、すなわち記録パワーが十分な場合に相当することがわかった。そして、Super-

RENS 再生条件は、上層のマスク層を一様にアモルファス化するが記録層は変化しないことがわかった。

以上の実験解析と理論解析の結果に従来から知られている超解像理論を加えると、5 章に示した開口型 Super-RENS 光ディスクの記録再生メカニズムが想定される。

最後に、Super-RENS 光ディスクを提供いただいた産業技術総合研究所富永淳二博士に感謝します。

文 献

- 1) 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.*, **73** (1998) 2078-2080.
- 2) D. P. Tsai and C. W. Yang: "Dynamic aperture of near-field super resolution structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 982-983.
- 3) H. Fuji, J. Tominaga, L. Men, T. Nakano, H. Katayama and N. Atoda: "A near-field recording and readout technology using a metallic probe in an optical disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 980-981.
- 4) 田頭 剛, 浮田宏生: "開口型 Super-RENS の光記録再生メカニズムに関する一提案", 近接場光学研究グループ第 10 回研究討論会予稿集 (2001) pp. 62-67.
- 5) T. Tagashira and H. Ukita: "A proposal for a read/write mechanism of a transparent-aperture type Super-RENS optical disk," *ISOM 2001 TOYAMA Satellite Technical Digest* (2001) pp. 74-75.
- 6) 工藤恵栄, 上原登美哉: 基礎工学 (現代工学社, 1998) p. 255.
- 7) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, New York) pp. 627-634.
- 8) T. Shima and J. Kim: "Refractive indices change at 633 nm of antimony thin films prepared by heliconwave-plasma sputtering method," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **19** (2001) 826-829.