

機関番号：3 2 6 6 3
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：2 0 5 6 0 2 4 3
 研究課題名(和文) 光ナノセンシングデバイスのオプティクス・メカニクスの融合設計法の研究
 研究課題名(英文) An Investigation of a Fused Design Method on Both Micro-Optics and Mechanics of an Optical Sensing Devices Having High Spatial Resolution
 研究代表者
 大久保 俊文(OHKUBO TOSHIFUMI)
 東洋大学・理工学部・教授
 研究者番号：6 0 3 4 9 9 3 3

研究成果の概要(和文):本研究では、近接場をベースとした光記憶方式の高密度化を狙い、光の波長以下の三角開口と偏光とを組み合わせ、金属パターンド媒体を透過で検出する系を構築してその基本特性を明らかにした。得られた主な結論は以下の通り。読み出し信号に対する偏光方向の影響は、偏光方向を底辺に直交させることで、最も分解能を高くでき、また直流通過光も抑制できる。トラック幅が狭小化するにつれて、信号振幅はオントラック位置から内外にずれた2つの位置で極大となる。信号振幅は、開口周縁の定在場の広がりに対する実際のトラック幅の比にほぼ比例する。

研究成果の概要(英文):Near-field recording that utilizes extremely compact laser-power focusing onto an aperture and a minute triangular aperture mounted flying head slider have been promising breakthroughs in overcoming difficult optical diffraction limits. The purpose of this research was to experimentally clarify the fundamental characteristics of a triangular aperture which was combined with a polarized light. Obtained main results were as follows. Firstly, clear tendency was obtained that when the polarization direction was perpendicular to the bottom side, the highest spatial (readout) resolution could be obtained suppressing DC offset light power. Detected signal waveforms when changing track width from 500 nm to 100 nm indicated that readout signal amplitude corresponding to the track pattern had its local maximums when the aperture located slightly apart from the geometrical track centre. Readout pattern signal amplitudes were estimated to be approximately proportional to the ratio of the field spread to the track width. Finally, we could successfully confirmed clear readout signal waveform corresponding to the 120 nm L/S pattern formed on the 100 nm wide track, on the condition of 27 nm aperture-to-medium spacing and 12 MHz frequency band.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・ 知能機械学・機械システム

キーワード：情報機器、知能機械システム、光記憶、近接場、微小開口、光浮動ヘッドスライダ、FDTD法、パターンドメディア

1. 研究開始当初の背景

電磁波の波長以下の大きさの開口に定在して伝搬しない光の場(「近接場」)の存在と、それに基づく回折限界を超えた高分解能検出の基本概念は1920年代にすでに提案され、また1970年代には可視光よりも波長の大きな電波を用いて、「近接場」のもつ基本特性が検証された。可視光を用いた本格的な高分解能検出は、微細な開口作製や、試料と開口の超微小かつ精密位置決めや画像処理が進展し始めた1980年代から、走査型プローブ顕微鏡の一種である走査型近視野顕微鏡技術として研究開発がなされる中で進展した。当初、走査型近視野顕微鏡は、高分解能化の方向で改良が進められたが、その一方で、開口近辺に定在する微細な光の場を、光を用いた高密度の記録や再生に用いようとの提案もなされ、1990年代初頭には、光磁気媒体を用いて、先鋭化ファイバプローブによる熱記録と、偏光照射時の偏光面の回転角を検出する読み出し方式で、直径80~60nmのピットの記録特性が実証された。これ以降ファイバプローブ搭載のスタイラスをディスク上に低速接触走行させる、あるいは顕微鏡の固定対物レンズを用いてヘッドスライダの開口に直接光パワーを伝送するなどの手法により、チャンピオンデータを得るべく、幾多のデモンストレーション報告が行われた。当該報告の一期前の科学研究費助成期間(2005~2007年度)において、報告者は、上記のような技術背景に鑑み、単純に記録(あるいは再生)ピットサイズの大小(記録密度)だけではなく、実記憶装置のデータ転送速度に近い周波数帯域において、また実装置に近いヘッド・アセンブリ形態において、信号採取を実証もしくは性能向上を進展させることが不可欠と考え、実空間分解能、実速度、実(コンパクト)寸法・形態条件下において、それぞれ達成目標や仕様を定め、記録性能の向上を図ってきた。

2. 研究の目的

既述のように第一期(2005~2007年度)の科学研究費助成期間においては、すでに単純な円形開口では、仮に開口背面におけるレーザー光の集光性が向上したとしても、生成される定在場の局在化や場の増強化には限界があり、早晚、読み出し信号のS/N劣化は避けられないことが明らかになっていた。これに替えて、偏光と組み合わせることで場の大幅な局在化が実現可能な「三角開口」が提案され、シミュレーション上では、相反する高分解能化と高出力化の両立が可能なが示唆され始めていた。

そこで、本研究では、ブレークスルーとなる三角開口を搭載した新たな光浮動ヘッドスライダ・アセンブリを構成するとともに、

開口における光集光パワーの増大のために回折型マイクロレンズに替えて非球面型マイクロレンズを、また開口を媒体のスペーシングロス(ロス)を低減する観点から、1.5mm長の小型光浮動ヘッドスライダの採用と、スライダ浮上面からの「開口突出配置」とを、新規創案として採用することとした。開口の読み出し性能の検証には、半導体マスク材として耐久性にも定評のあるクロム膜を遮光膜とし、電子線リソグラフィにより描画したパターン媒体(最小線幅50nm)を用いてその実証を行うこととした。

これらに基づき、照射偏光の方向が読み出し信号に及ぼす影響を明かにするとともに、開口と媒体とのスペーシング(ロス)が読み出し信号に及ぼす影響についても、これを明らかにする。一方、従来は、このようなパターンの読み出しは、開口寸法に比して無限大とも言える幅広トラックを用いて行われてきた。これには、同心円状のサブミクロン幅以下の狭トラックに関して、ヘッドアセンブリに追従制御をかけてオントラック信号を評価することの技術的難度の高さも要因としてある。本研究では、後述するように、直線配置のトラックパターンをヘッド開口が過ぎる際の信号を処理して、等価的に正確なオントラック信号を得る手法も提案しており、この手法に基づいて、実際のドライブに近い狭トラック・高密度記録パターンにおける読み出し信号を採取し、偏光方向や開口スペーシングの及ぼす影響も併せて評価することとした。

3. 研究の方法

既述のように、高(再生)空間分解能化と高出力化の相矛盾する基本性能を両立可能な「三角開口」については、シミュレーション上でその性能が確認されつつある。三角開口の基本的な作製手法は、開口への集光レンズがその背面に事前加工された石英基板(光ヘッドスライダの本体を兼ねる。)をベースに、異方性エッチングによる外形形成を行うフォトリソグラフィであり、詳しくは開口周囲へのアルミ遮光膜の形成と、スライダ浮上面もしくはマーカ面との機械プレスによる同一面出しなどのマイクロな機械加工がこれに含まれる。これに加え、スライダ背面に設置され、光ファイバによる伝送レーザーパワーを反射して集光レンズに導くマイクロシリコンミラーの加工とアセンブル、開口と同じ側のスライダコア面に配置されるスライダ浮上面の加工、レーザーパワーを伝送する光ファイバ(シングルモード、偏波面保存型)のスライダ(背面ミラー)への位置決め調整と固定、サスペンションとスライダコアの位置決めと固定など、幾多の精密作業工程を経て、光ヘッドスライダ・アセンブリが作製される。

三角開口に集光投射されるレーザ光（波長=408nm、直線偏光、半導体レーザ）については、レーザ発振器と光ファイバへの光導入光学系に間に挿入される1/2板（波長板）をレーザ光軸に関して適切な角度関係となるよう回転させることで、偏光の方向と三角開口の底辺との角度位置関係を任意に設定することが可能となる。

スライダを媒体上に数10nmのスペーシングで浮上させ、記録パターン領域が開口周辺の定在場を過ぎることで生じる遠隔伝搬の散乱（変調）光は、媒体に関してスライダ浮上面側とは反対に設置された顕微鏡によって集光され、光電子増倍管に集められる。近年は、超小形（光スライダのコア程度のサイズ）で、しかも高感度なアバランシェ・フォトダイオードなども開発されており、光検出系も併せてより実ドライブに近いコンパクトな再生ヘッド構成も実現可能であるが、本研究では、採取信号として最良のS/Nが得られることを第一義として、敢えて光電子増倍管を用いることとした。

光ヘッドアセンブリと並ぶ重要な要素部品となる光パターン媒体については、平坦度、表面粗さなどの基板の表面加工精度や、清浄性、コストなどの観点から市販の主力ハードディスク基板となる2.5インチサイズのガラス基板を用いた。遮光膜には、単に光学特性のみならず、低浮上条件におけるトライボロジカルな耐久性を考慮し、加工実績のあるクロム膜（25~23nm厚み）を用いた。本遮光膜には、さらに10~8nmのアモルファス・カーボン保護膜、1nm（平均）のPFPE液体潤滑膜を形成し、磁気ディスク装置の記録媒体と類似の信頼性の高い層構成とした。

遮光膜は1:1の長さで「ある」、「なし」を繰り返すライン・アンド・スペースパターンを基本のパターン構成とし、単位長あたりに含まれるラインまたはスペース部の数をもって記録密度として、読み出し信号を評価するようにした。記録パターンについては、最小100nmの狭トラックについても、難度の高いトラック制御系を導入することなく評価が可能となるよう、全長1mmの直線状のパターン加工を行い、開口が円弧軌跡をもってこのパターンと交叉（横断）した際の信号波形から、理想的に「オン・トラック」した際の信号に変換できるようにした。

4. 研究成果

本研究では、既述のような目的に沿って作製した開口、開口搭載ヘッドアセンブリ、パターン媒体、さらに、信号読み出し系を駆使して以下に述べる研究成果を得た。

三角開口と偏光（直線偏光レーザ）とを組み合わせ、開口に対する代表的な3つの配置において、開口寸法に比して事実上無限幅ト

ラックパターンを走査した際の典型的な読み出し信号波形を得ることができた。この信号波形は、シミュレーションにおいて得られた場の局在状態を極めてよく反映するものであることが分かった。

詳細には、まず開口の底辺がスリット状パターン媒体のパターン長手方向に一致するものとし、このパターン長手方向に直交する方向に走査する場合を基本に据えた。ここで、三角開口の底辺に直交する方向に偏光を照射すると（「**直交配置**」）、この底辺に沿って定在場が細長くかつ強く励起されるので、この励起場は最も効果的にスリット状の媒体パターンからの変調を受ける。この結果、読み出し信号振幅（変調成分）は最も大きくなり、また余分な直流的な通過光成分は十分抑制されるので、パターンによる変調成分と直流成分の比として定義される信号コントラストは非常に良好となる。

次に、三角開口の底辺に平行な方向に偏光を照射すると（「**平行配置**」）、開口の頂点近傍を中心にほぼ輝点状に場が励起される。このため、走行方向の場も直交配置と同等に局在化され、読み出し空間分解能も高くなるため、読み出し信号振幅（変調成分）は大きくなる。一方、直流的な通過光は、開口部を通してかなり通過しやすくなり、この結果、信号コントラストとの観点では、かなり不良な値を示すこととなる。

底辺に対して偏光の方向が45度の場合（「**斜め配置**」）は、二つの斜辺のうち、一方の斜辺に沿って場が斜めに局在化するために、走行方向の読み出し（空間）分解能は先の2つの場合に比して最も悪くなる。直流的な通過光の強度レベルは、直交配置と平行配置の中間的な特性を示す。

さらに、三角開口に特有な現象として、開口が金属遮光膜部分（ライン部）から非遮光膜部分（スペース部）に走査移動する場合（あるいは逆の場合）、境界部から一定の距離だけ離れたスペース部領域の位置において、強い「**スパイク状**」のピーク波形を生じることが明らかとなった。これは、開口の定在場が、ライン（金属）部のエッジとの間で強い相互作用を起こすことに起因するもので、底辺に沿って線状に強く励起される「**直交配置**」の場合に、特に顕著に発現することが分かった。このスパイク状のピーク波形の読み出し信号に及ぼす影響は、パターン密度が低く読み出し信号の振幅レベルが高い場合にはさほど顕在化しないが、120nm~100nmL/Sなどの中・高密度パターンの場合には、信号波形中の、スペース部通過に対応する明部（山部）が潰れる、あるいはライン部通過に対応する暗部（谷部）が埋まるなどで、正確なパターンに対応した信号読み出しが阻害される（読み出しエラーとなる）可能性がある。

次に、狭トラックパターンの読み出し特性について述べる。ここでは、トラック(長さ1mmの直線状パターン)内のパターン密度を200nmL/Sと一定とし、トラック幅を $T_w=500\text{nm}$ 、200nm、100nmに変えた場合の再生信号振幅を評価した。通常、狭トラックのパターン読み出しは、記憶装置のように同心円状に形成された記録トラックパターンに対し、アクチュエータを用いてトラッキングサーボかけることによってヘッド(開口)を追従させるやり方が一般的である。本研究ではトラッキングサーボを行うための技術的難度を回避し、同等の結果を得るために以下に示す手法を適用した。まず、媒体円周の接線方向に沿って1mmの長さ形成した直線トラックパターンに対し、光ヘッドスライダ・アセンブリの面内位置を微動することで、開口の軌跡が、丁度トラックを2カ所で横断するように調整した。このような条件で波形を採取し、簡単な幾何的な処理を施すことで、真円トラックを開口が半径方向に沿って移動する際の読み出し波形と等価な波形を得ることができる。トラック幅が500nmと比較的広い場合には、読み出し信号中のパターンに対応した成分は、i)偏光が底辺に直交する場合、ii)平行な場合、iii)45度の場合、の順で小さくなるのが分かった。またトラック中央(オントラック位置)から開口が外れるに従って信号振幅は減少するが、iii)45度の場合、かなり外れても信号振幅を維持(もともと信号振幅の絶対値は小さいが)する傾向にあることが分かった。トラック幅がさらに200nmと狭小化すると、トラック中央(オントラック位置)においてはパターンに対応した成分はむしろ小さくなり、トラック中央から外れた位置で、極大値を示す。またこの傾向は、i)偏光が底辺に直交する場合、ii)平行な場合、iii)45度の場合の順に顕著になることが分かった。さらに、トラック幅が100nmの場合には、トラック幅が200nmの場合と類似の傾向を示すことが分かった。信号振幅が最大となる位置は、オントラック位置から内外方向に $\pm 100\sim 150\text{nm}$ 付近であり、これには開口の寸法形状が主体的に影響しているものと考えられる。

最後にトラック内のパターン密度を120nmL/Sと高くした場合の狭トラック信号の評価を行った。これに先立ち、事実上無限幅トラックとなる10 μm 幅トラックについても読み出し信号評価を行い、特にパターンの縁(エッジ)を利用して定在場の「広がり」状態を評価した。この広がり、偏光の方向やパターン密度にも依存するが(一般的には、低密度の方が広がり小さい。)おおむね開口の代表寸法の1.5~1.6倍程度にも達することが分かった。無限幅トラックにおいては、高密度のパターンにおいても、ある程度信号

振幅(S/N比)が確保され波形確認が可能となるが、この理由は開口の代表寸法以上の広範囲にわたって光エネルギーが媒体を通過することによるためと考えられる。ここでも、既述のパターン密度が200nmL/Sの場合と同じ手法によって評価を行ったが、その結果、トラック幅に対する読み出し信号振幅の特性は、開口の代表寸法に対するトラック幅の比ではなく、無限幅トラックにおける定在「場の広がり」に対するトラック幅の比で、おおそ推定できることが分かった。

スライダ開口にレーザパワーを伝送する光ファイバのねじりトルクの影響を可能な限り低減できるよう調整を進めた結果、開口と媒体のスペーシングが27nm、走行速度が2.76m/sの条件において、100nmのトラック幅、120nmL/Sのパターン密度に対応する明瞭な読み出し信号を確認できた。ちなみに、これは、ビット長、トラック幅ともに開口の代表寸法の1/3の大きさに相当する条件で得られたものである。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計4件)

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, K. Nakajima, 100-nm-Wide Track Pattern Readout Using a Protruded Triangular Aperture Mounted Optical Head Slider, *Microsystem Technologies, Springer*, (査読あり), (2011), (印刷中).

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, K. Nakajima, Tracking Characteristics of a Triangular-Aperture Mounted Optical Head Slider to Which a Polarized Violet Laser Is Applied, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, JSME Technical Journal*, (査読あり), Vol.4, No.1, (2010), pp.416-427.

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, K. Nakajima, Read-out Characteristics of a Triangular Aperture Mounted Optical Head Slider Applied to a Polarized Light, *Microsystem Technologies, Springer*, (査読あり), Vol.16, (2010), pp.169-177.

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, and K. Nakajima, Sub-100-nm ROM Pattern Readout Using a Triangular Protruded Aperture Mounted Optical Head Slider, *Microsystem Technologies Springer*, (査読あり), Vol.15, No.10-11, (2009), p.1481-1488.

〔学会発表〕(計3件)

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, K. Nakajima, 100-nm-Wide Track Pattern Readout Using a Protruded Triangular Aperture Mounted Optical Head Slider, *ISPS10 - 20th ASME Annual Conference on Information Storage & Processing Systems 2010*, pp.301-303, (June 15, 2010), Santa Clara University, California, USA

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, K. Nakajima, Tracking Characteristics of a Triangular Aperture Mounted Optical Head Slider Applied a Polarized Violet Laser Source, *Proceedings of the 2009 JSME - IIP / ASME - ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, pp.431-432, (June 20, 2009), Tsukuba International Congress Center, Ibaraki, Japan

T. Ohkubo, M. Park, M. Hirata, M. Oumi, K. Nakajima, Read-out and Tracking Characteristics of a Triangular Aperture Mounted Head Slider Applied a Polarized Violet Laser Source, *18th Annual ASME Conference on Information Storage and Processing Systems*, (June 16, 2008), Santa Clara University, California, USA

〔その他〕

ホームページ等

http://ris.toyo.ac.jp/details/index.php?user_id=1120

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 俊文 (OHKUBO TOSHIFUMI)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：60349933

(2) 研究分担者 (0)

(3) 連携研究者 (0)

(4) 研究協力者 (研究者番号なし)

中島 邦雄 (NAKAJIMA KUNIO)

大海 学 (OUMI MANABU)

平田 雅一 (HIRATA MASAKAZU)

朴 馬中 (PARK MAJUNG)