

物理限界に挑戦する ハードディスク製造設備技術

Manufacturing Equipment Technologies for Hard Disk's Challenge of Physical Limits

森 恭一
Mori Kyoichi

ブライアン ラットレイ
Brian Rattray

松井 裕一
Matsui Yuichi

世界の情報量は、コンピュータだけでなく情報のデジタル化や動画などで、拡大の一途である。これに対応して、HDD (Hard Disk Drive) の大容量化は潮流であり、省電力・グリーンIT化の観点からも要望は大きい。

HDDは、これまで多くの技術革新により高密度化を実現してきた。今後も高密度化を継続していくためには、新たな革新的技術が必要であると言われている。現在、このための技術開発が活発に行われている状況である。

高密度化を支える基幹部品であるディスクとヘッドにおいては、効率的な生産と安定した品質保証のため、製造・検査設備に対して高い性能と信頼性が要求される。

株式会社日立ハイテクノロジーズは、これに応えるため、これまで高周波回路技術やサーボ位置決め技術、あるいは光学検査技術を開発し製品を提供してきた。このようなHDDの増産や次世代技術の採用などの市場ニーズに応えながら、ディスクやヘッドの製造・検査技術を開発して関連設備を供給し、高効率生産の実現に貢献していく(図1参照)。

To meet the world's growing demands for volume information, not just with computers but digitalization and video etc. the HDD (hard disk drive) must continually increase its capacity and meet expectations for reduced power consumption and green IT. Up until now the HDD has undergone many innovative technological developments to achieve higher recording densities. To continue this increase, innovative new technology is again required and is currently being developed at a brisk pace.

The key components for areal density improvements, the disk and head, require high levels of performance and reliability from production and inspection equipment for efficient manufacturing and stable quality assurance. To meet this demand, high frequency electronics, servo positioning and optical inspection technology is being developed and equipment provided.

Hitachi High-Technologies Corporation (HHT) is doing its part to meet market needs for increased production and the adoption of next generation technology by developing the technology and providing disk and head manufacturing/inspection equipment (see Fig. 1).

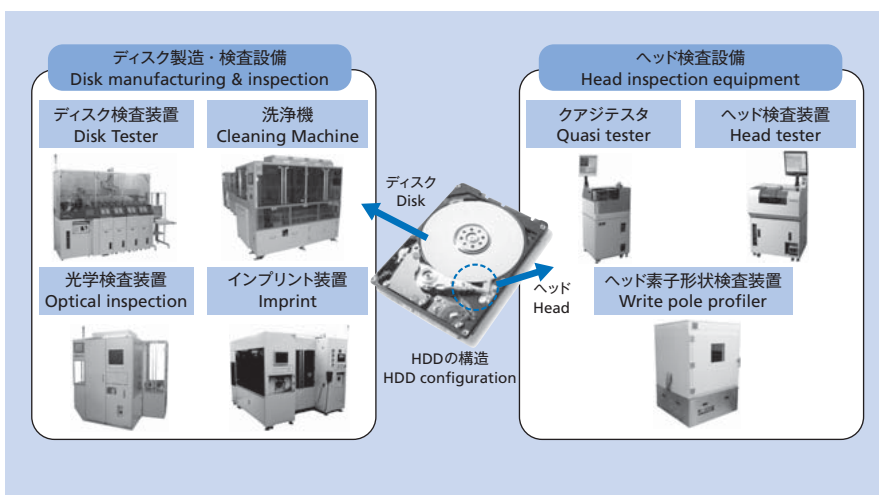


図1 | ハードディスク製造・検査設備の製品

Fig.1 HDD manufacturing and inspection equipment products

1. はじめに

HDDはコンピュータ市場を中心に拡大してきたが、近年はさらにクラウドや情報家電などで、急速にアプリケーションが拡大している(図2参照)。

HDDには、情報量の拡大に伴って、大容量化・高密度化が求められている。

また近年のデータセンターは膨大な情報を管理するようになっており、その電力消費は数百メガワットにもなると言われている。環境・省エネルギーの観点からITの省電力化を進める動きが、日本でも経済産業省の「グリーンITイニシアティブ」のように活発化している。この点においてもストレージの高効率化、すなわちHDDの高密度化は大きな潮流である。

高密度化の実現に対しては、HDDの基幹部品であるディスク(媒体)とヘッドの性能や品質が大きく影響する。したがってこれらの製造・検査装置においても、計測技術や高精度メカ技術への対応要求は一段と厳しく、さらなる技術の進化が望まれている。

高密度化になるに従い、データを記録するビットの大きさはますます小さくなり、最近の面記録密度650 Gbit/in²のディスクでは、1μm角の大きさに1,000個もの記録ビットが存在している。日立ハイテクノロジーズは、これに対応してヘッド位置決めの高精度化や信号の微小化による高周波数化を進めてきた。

ここでは、HDD高密度化への市場ニーズと技術動向、およびその生産を担う製造・検査装置の技術展望について述べる。

2. HDDの高密度化技術

2.1 HDD技術の変遷

磁気ディスク装置(HDD)の歴史は長く、1956年に世

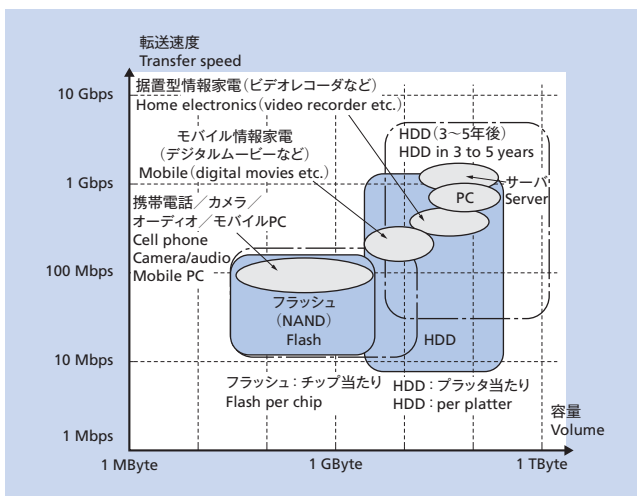


図2 | ストレージ技術の主な適用用途
Fig.2 Storage technology adoption

1. Introduction

HDDs have long relied on the computer market for growth but in recent years there has been a shift towards cloud computing and consumer electronics etc. along with a rapid expansion of data storage applications (see Fig. 2).

In line with the increasing volumes of information, the HDD requires increases of both capacities and densities.

Furthermore, in recent years, data centers controlling massive amounts of information are said to consume hundreds of megawatts of power. From an environmental perspective, low power consumption IT must be promoted and is being actively pursued in Japan through the “Green IT Initiative.” In this regard, higher efficiency storage, namely higher density HDDs will play a major role.

To increase density, the performance and quality of the HDD’s key components, disks (media) and heads have most effect. Therefore further technological advances in manufacturing and inspection equipment are sought to support these.

Increased areal density has caused bit size to get ever smaller, resulting in recent areal densities of something like 650 Gbit/in² or the equivalent of 1,000 bits of data in a 1-micron square. To cope with this HHT has promoted development of high precision head positioning technology along with high frequency electronics for the smaller signals.

2. Technology for increasing HDD density

2.1 HDD technology transitions

HDD have a long history dating back to the world’s first HDD announced by International Business Machines Corporation (IBM) in 1956. Since then recording density has grown massively, increasing by 8 digits.

To maintain the fast and continuous pace of areal density improvements over the years has taken many technological innovations (see Fig. 3). In the 1990s the read method changed from the electromagnetic induction of thin film heads to a magnetoresistive type and a decade or so later traditional longitudinal recording was surpassed by perpendicular recording.

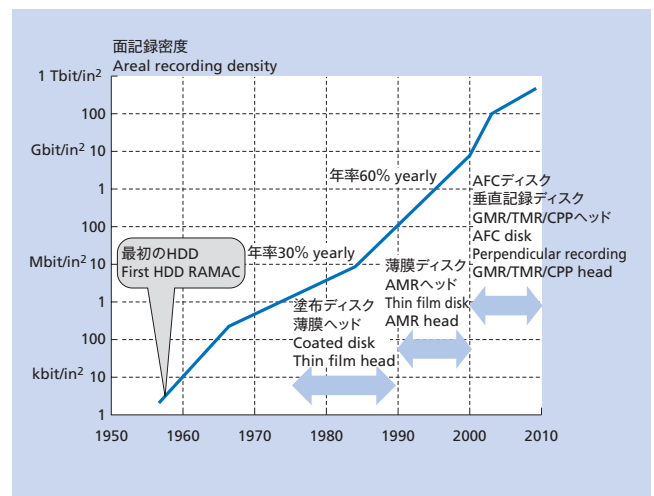


図3 | HDD面記録密度推移と固有技術の変遷
Fig.3 HDD areal density & technology transitions

界初のHDDがIBM社から発表されている。これから現在までに記録密度は大きく向上し、その拡大率は実に8桁にも達している。

記録密度を継続して増大させるため、これまでも多くの技術革新がなされてきた(図3参照)。1990年代にかけては読み出し方式が電磁誘導型の薄膜ヘッドから磁気抵抗効果型のMR系ヘッドに、2000年代にかけて記録磁化がディスク面に平行な方向から垂直な方向に大きく技術が変化した。

2.2 製造・検査設備技術

効率的な生産と安定した品質の保証のため、検査装置は重要な役割を担っている。さらに、近年の高密度化による記録磁区の微小化とヘッドとディスク間の間隙(げき)減少に伴い、検査装置に求められる性能も年々高度化してきた。

トラックピッチは、現在では70 nmを下回るまでになっており、ヘッド検査装置には高精度な位置決めサーボ技術が求められる。検査用信号を正しく読み出すために、ディスクとヘッド間の相対変位がトラックピッチの3%以下という性能が要求されている。

ディスク上の信号をヘッドが繰り返し横切って読み出したときの、トラック方向の位置と信号強度の関係を図4に示す。位置決め再現性は1 nm程度であり、高い安定性のあることがわかる。

2.3 高密度化への技術動向

従来技術で面記録密度1 Tbit/in²を超えることは困難である、と言われている。記録ビットを小さくするためには、記録層の結晶粒径を小さくしてS/N比を改善する必要があるが、小さくすると熱揺らぎで記録磁化が消失してしまう。それを抑えるため記録層のKu(異方性エネルギー)を大きくすると小磁界ヘッドでは書き込めないという、いわゆる

2.2 Manufacturing & inspection equipment technology

Inspection equipment plays an important role in trying to maintain highly efficient manufacturing and assure stable quality.

Furthermore, recent areal density increases have been accompanied by miniaturization of the magnetic domains and decreases in the head-disk spacing, warranting ever sophisticated inspection equipment year after year.

Currently, track pitch is being squeezed down to around 70 nm, requiring high precision head positioning servo technology for inspection equipment.

To read the test signals correctly requires track mis-registration of the head to less than 3% of track pitch. Fig. 4 shows the signal on a disk, read as the head is repeatedly scanned sideways across it, plotting the signal strength relative to the distance from the track center. From this we determine that positioning repeatability is of the order of 1 nm, and thus highly stable.

2.3 Technical trends for high density

Increasing areal density beyond 1 Tbit/in² is said to be extremely difficult with existing technology. In order for the recorded bit to be smaller the grain size of the recording layer must be smaller requiring an improvement in SNR (signal-noise ratio) to read. Data though would then be vulnerable to decay from the super paramagnetic effect's thermal instability, which in turn would require a high Ku (anisotropy energy) recording layer but the small magnetic field head could no longer write to it and this vicious circle is the so-called "tri-lemma in magnetic recording." Several innovations are proposed to break through this barrier (see Fig. 5).

(1) Shingled recording

Technically there are no great hurdles so this is said to be close to implementation. Large Ku recording layers with large magnetic field heads overwriting part of the previous data leave a narrow remnant to form the track. The drawback is that conventional random access writing will not be possible

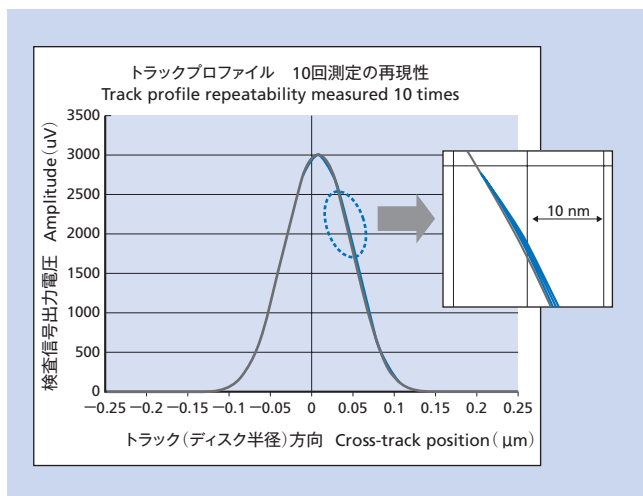


図4 | ヘッド位置決め再現性
Fig.4 Head positioning & repeatability

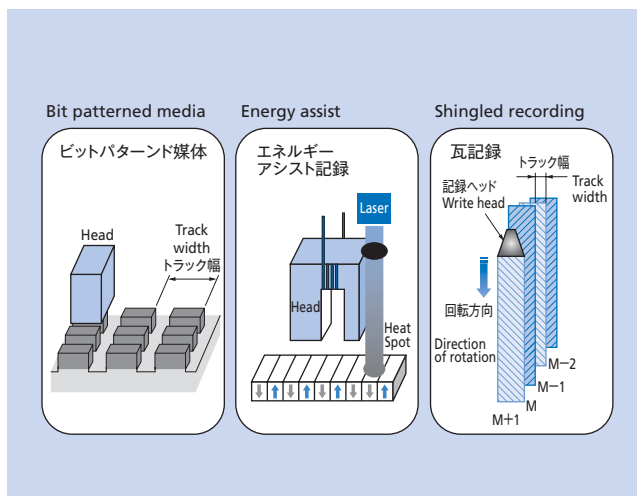


図5 | HDDの高密度化技術
Fig.5 Technologies for increasing HDD density

トリレンマの状態である。これをブレイクスルーする幾つかの革新的技術が提案され、開発されている(図5参照)。

(1) 互記録

技術的ハードルが低く、実用化には近いと言われている。Kuの大きな記録層に対し大磁界ヘッドで記録した後、次のトラックでは一部を重ね書きして消去し、残った狭い記録磁化を実効的にトラックとするものである。ただし、従来のようにランダムな消去や書き込みができず、また新たなフォーマット技術や外部メモリの付加が必要となる。

(2) エネルギーアシスト記録

ヘッドにおける革新的技術であり、記録時にビットの周囲にエネルギーを加えて、高いKuの記録層でも小ビット記録ができるようにする。エネルギーとしてはレーザー光による近接場光や、高周波発生素子によるマイクロ波磁界が検討されている。ただし、微小エリアに集中してエネルギーを加える機能を、新たにヘッドに組み込む必要がある。

(3) ビットパターンド媒体

ディスクにおける革新的技術であり、従来のグラニューラー構造の連続な記録層ではなく、孤立した磁区をあらかじめ形成し、1ビットずつ記録するものである。隣接ビット間の相互干渉を低減でき、Kuの小さな記録層であってもS/N比と熱揺らぎの影響を改善できる。ただし、ビット位置との記録タイミングの同期化や、新たなディスク加工プロセスの量産化対応などの課題がある。

これらの革新的技術が検討されているが、面記録密度4 Tbit/in²の実現には、「エネルギーアシスト記録」と「ビットパターンド媒体」の組み合わせが必須、と言われている。

ビットパターンド媒体では、サーボ情報はあらかじめディスク上に形成されるので、偏心補正や汎用復調などの位置決め技術が必要となる。このような技術動向をとらえ、以下の設備技術を重点に開発を行っている。

and must be accounted for with new formatting methods and additional memory.

(2) Energy assisted recording

This is primarily an innovation for the head, when writing a bit of data, additional energy is applied to the area enabling the use of low field strength to switch polarization. Thus, small bits can be recorded in high Ku recording layers. Assist energy solutions in the form of laser light utilizing near-field optics or microwaves from high frequency magnetic field oscillators are being considered. However, focusing of the energy into a minute spot is something that must be built in to a new head.

(3) Bit patterned media

An innovation of the disk sees a move away from the traditional continuous granular recording layer to one of isolated magnetic domains with each one representing a single recorded bit of data. The mutual interference between adjacent bits is minimized so, even for low Ku recording layers, SNR and thermal instability effects are improved. However, the bit location/synchronization not to mention the high volume production of the new disk manufacturing processes still pose problems.

These innovative technologies are being considered but to achieve areal density of 4 Tbit/in² will likely require a combination of both energy assist recording and bit patterned media.

Bit patterned media has servo information pre-embedded on the disk and requires positioning technology to account for eccentricity and otherwise implement track following. To cope with these technology trends, the following equipment technology is being developed:

- Non-write-read certify inspection technology
- Head inspection technology for early process stage
- Patterned media volume manufacturing technology

3. Optical media testing equipment

The last step of the disk manufacturing process is performing a glide test, checking the surface for asperities to assure the fly

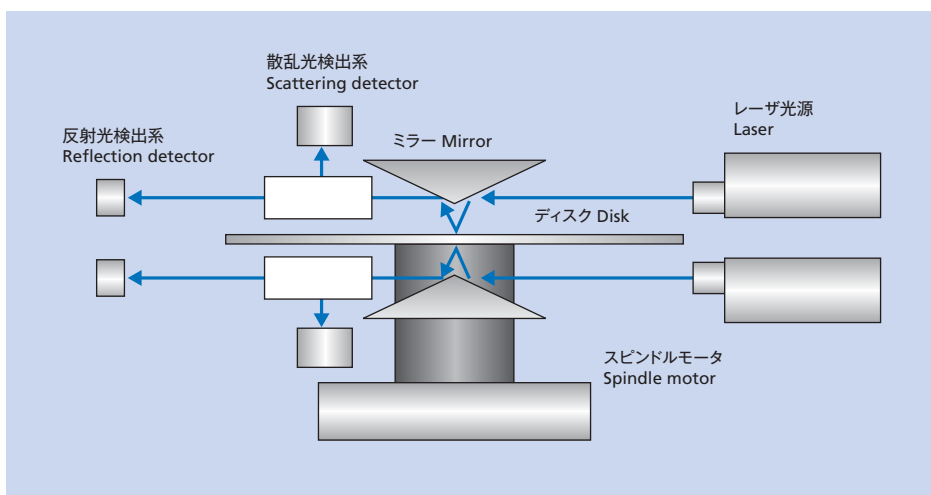


図6 | 光学系の構成

Fig.6 Optics configuration

- (1) サーティファイにおける、記録再生不要の検査技術
- (2) ヘッド検査における、前段階プロセスでの検査技術
- (3) パターンド媒体の量産製造技術

3. 光学式メディア検査装置

ディスクの最終工程では、表面の突起を検査し、ヘッド浮上量を保証するグライド検査と、記録再生に影響する磁気的特性と欠陥を調べるサーティファイ検査が行われている。

3.1 開発コンセプト

サーティファイは、ヘッドで記録・再生した信号の品質により判定を行う。高密度化により検査すべきトラック本数は膨大となり、現在では全トラックの検査は行われていない。本装置では、高速な検査を実現するため光学方式を採用した(図6参照)。レーザスポット径の最適化により多トラックを一度に走査できるので、ディスク全面を短時間で検査することが可能となる。また記録再生する必要がないので、Kuが大きいエネルギーアシスト記録向けディスクにも対応が可能である。

3.2 性能と効果

光学系は上面用と下面用の2式で構成され、両面同時検査による高速化を図っている。従来は2.5インチディスクをトラックピッチ80 nmで全面を検査するために、20分程度を要していた。しかしこの装置では、レーザスポット径などの条件にもよるが、10秒程度で全面を検査することも可能である。

また、検査ヘッドは定期的に交換する必要がなく、キャリブレーションやランニングコストでも優位である。測定結果を図7に示す。ディスク表面の欠陥が検出できていることがわかる。

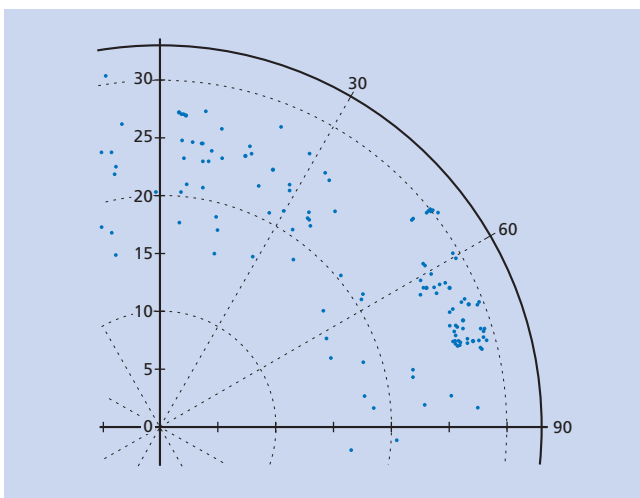


図7 | 測定結果
Fig.7 Measurement results

ability of the head, and a certify inspection to examine magnetic characteristics and defects that influence read and write.

3.1 Development concept

Certify testing involves writing to a disk and judging the quality of the signals read back. With the rise in areal densities, the number of tracks has become immense, so not all the tracks are tested these days.

By adopting an optical method in this system, fast and stable inspection has been achieved (see Fig. 6). Optimization of the optical unit's laser spot size offers simultaneous scanning of multiple tracks enabling full disk surface inspection in a short time. Furthermore, without the need for write and read, it can be applied to high Ku disks intended for energy assist recording.

3.2 Performance & results

The optical system is composed of two sets, top and bottom, so that both sides of a disk can be inspected simultaneously. A regular 2.5" disk with 80 nm track pitch would normally take 20 minutes or so to do a full surface inspection but with this tool it can take just 10 seconds depending on laser spot size and other conditions.

Furthermore, there is no need for regular replacement of heads, calibration etc. leading to superior running costs. Measurement results are as shown in Fig. 7. From this we can see the detection of disk surface defects.

4. Write pole profiling equipment

During the mass production of magnetic heads, measurement of the write pole's track width involves recording a signal onto a disk and scanning the signal read back (see Fig. 8). Consequently, this must be done at the final HGA (head gimbal assembly) stage, when it is fully read-write capable, but there is a strong desire for this inspection at an earlier stage to improve process efficiency.

4. ヘッド素子形状検査装置

磁気ヘッドの量産工程において、記録素子のトラック幅は、ディスクに信号を記録再生し検査されている（図8参照）。したがって記録再生機能が整う最終HGA工程で行われているが、プロセス効率化のために前工程での検査へのニーズは強い。

4.1 開発コンセプト

信号の記録再生を必要としない方式として、記録素子からの微小磁界をプローブで直接検出する技術を開発した。この方式ではプローブを走査して素子からの磁力分布を測定し、その結果からデータ処理により記録トラック幅を求める。ナノメートルレベルの微小な空間磁界を検出することから、外部振動や気流、温度などの影響を受けやすく、構造設計に際しては環境外乱のシールドを考慮した。

4.2 性能と効果

この装置によりローバー工程での記録素子トラック幅検査が可能となり、早期のプロセスフィードバックができ、さらにロスコスト低減による生産効率化が期待できる。性能としては、測定再現性 σ 1 nm、サイクルタイムはスライダ当たり8.5秒を確認しており、ヘッドプロセスソリューションの提供に向けて、よりよい製品化を進めていく。

5. ディスク用ナノインプリント装置

ビットパターンメディアでは、10 nmサイズの孤立磁区がディスク全面に形成される。このような微細構造の量産技術として、従来のフォトリソグラフィ技術では対応が困難であり、新たな技術として光ナノインプリントが必須であると言われる（図9参照）。

4.1 Development concept

In order to inspect the write pole without the need for writing to a disk we have developed a method of directly detecting the minute magnetic field produced from the write pole with a probe. In this method the probe is scanned across the write pole to measure the distribution of magnetic field strength. From the results, data processing yields the required write track width. The measurement of a minute spatial magnetic field to nanometer level is highly susceptible to external vibration, air currents and thermal effects, so careful consideration of the structural design is required to mitigate environmental disturbance.

4.2 Performance & results

This tool measures write pole track width at the rowbar stage enabling early process feedback from which we can expect production efficiency to further reduce costs. In terms of performance, measurement repeatability of 1 nm and cycle time of 8.5 sec per slider have been confirmed; with this aiming to offer a head process solution further improvements are being pursued as it is commercialized.

5. Disk nano-imprinting equipment

In bit patterned media isolated magnetic domains as small as 10 nm are formed over the entire disk surface. It is difficult to manufacture these minute structures with conventional photolithography techniques so it is said that photo cure imprinting technology is essential (see Fig. 9).

5.1 Development concept

Photo nano-imprint is a pattern transfer and replication technology whereby the minute structures on the stamper are pressed on to the resist coated surface of a disk. This is basically a low cost process without the miniaturization limitations seen with the exposure wavelength in photolithography technology.

Despite strict contamination controls, however, micron-sized foreign material may be found on disk surfaces. While

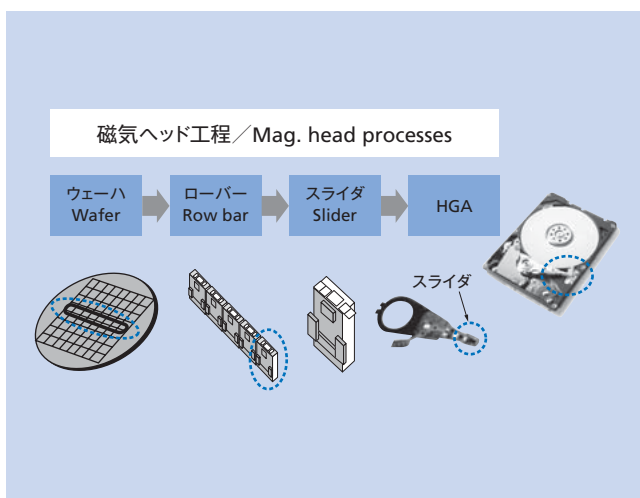


図8 | 磁気ヘッドの一般的製造工程
Fig.8 Magnetic head main production processes

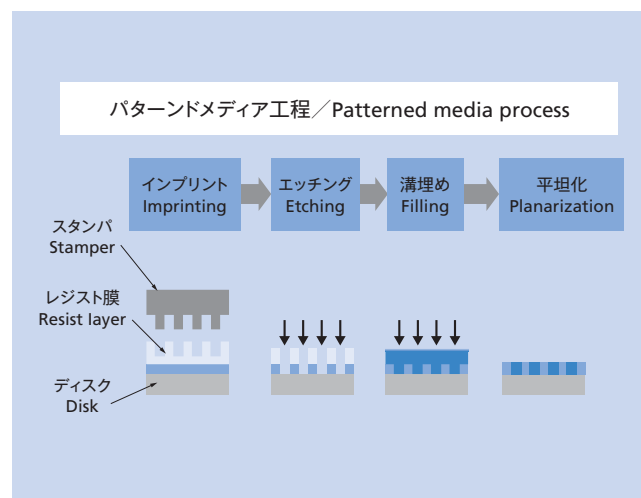


図9 | 一般的なパターンメディアの製造工程
Fig.9 Patterned media production processes

5.1 開発コンセプト

光ナノインプリントは、微細な構造を有するスタンプをディスク表面のレジスト膜に押し当て、微細構造を転写複製する技術である。フォトリソグラフィ技術のように、露光波長による微細化の制約がなく、基本的に低コストプロセスである。ディスク表面には、塵埃（じんあい）管理されているとはいえ、ミクロンサイズの異物が存在する場合がある。ディスクとスタンプは、転写時には10 nm程度のレジスト膜を介してほぼ接触状態にあるので、異物があるとこの状態が保てずに周囲が欠陥となる。欠陥を小さくするためには、異物に沿ってスタンプが変形追従できる必要がある。このため適度な弾性を有し、連続転写性にも優れたスタンプを開発した。

また、ディスクでは両面に記録面があり、効率的な生産を行うためには両面同時に転写することが望ましい。本装置では、スタンプの変形をコントロールする独自の技術により、両面同時転写を実現した。さらに膜形成時間や光硬化時間を短縮するレジスト材料の開発など、装置の高速度生産性を図った。

5.2 性能と効果

このインプリント技術による微細構造の転写例を **図10** に示す。20 nm程度の孤立ドットが整列した構造をもつ原版を用いて、これからスタンプを複製したのち、基板上のレジストに微細構造を転写した。パターンド媒体に相当する微細構造の転写に適用可能であることが確認できた。

異物に対するスタンプの追従性は、直径1 μm のシリカ製ビーズを噴霧した基板を用いて、転写形状から推定した。その結果、ビーズ近傍の転写不良は直径2.2 μm の領域であり、スタンプがビーズに十分に追従することがわかる (**図11** 参照)。

imprinting, the disk and stamper are virtually in contact through just 10 nm or so of resist coating. This pressed condition cannot be maintained in the presence of a foreign body and the surrounding area becomes defective. To minimize the size of defects the stamper needs to be flexible enough to mold itself around the contaminant. To achieve this and to develop a stamper with superior capabilities for continuous replication required the right amount of elasticity. Also, disks have recording surfaces on both sides, so for efficient manufacturing a simultaneous dual-sided imprint process was preferred. In this tool, it was achieved through a unique replication technology for controlled deformation of the stamper. In addition, resist materials development for fast pattern formation and photo curing were included with the overall equipment high speed mass production plans.

5.2 Performance & results

Fig. 10 shows the minute structures achieved with this imprint technology. Using a master arranged with rows of isolated dots of approximately 20nm, stampers were replicated and used to transfer the pattern to resist coated disks. The suitability of this pattern transfer for patterned media has been confirmed. As for contamination, the stampers mold ability was assessed from the imprint deformation using a disk sprayed with 1- μm diameter silica beads. As a result, the defective imprint area around the beads had a diameter of 2.2 μm suggesting the stamper molds sufficiently well around the beads (see **Fig. 11**).

6. Conclusion

Here in, we have given an account of the HDD's density improvements in response to market needs and technology trends along with the prospects of production and inspection equipment for manufacturing.

The HDD is no longer driven just by the computer market, from here on the digital consumer electronics market will further accelerate it into the future. As the HDD is continuing

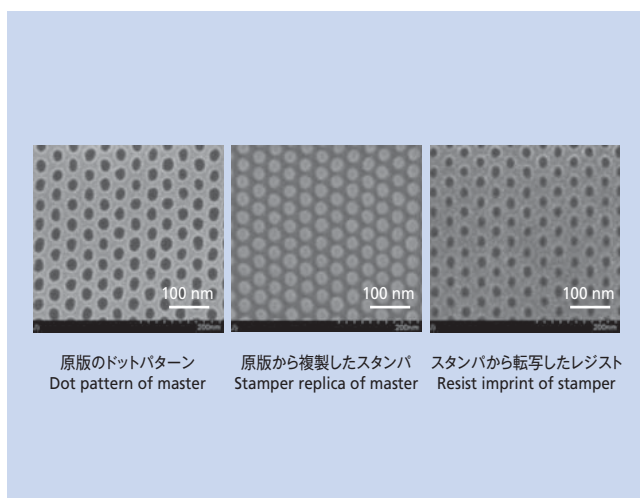


図10 | 微細構造の転写例
Fig.10 Fine pattern replication

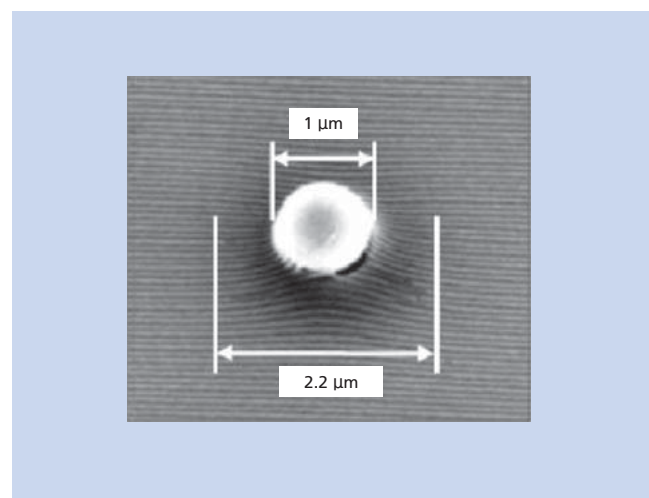


図11 | 異物周囲の欠陥領域
Fig.11 Defect area around contaminant

6. おわりに

ここでは、HDD高密度化への市場ニーズと技術動向、およびその生産を担う製造・検査装置の技術展望について述べた。

HDDはコンピュータ分野だけでなく、今後はデジタル家電分野への搭載がますます加速されるであろう。HDDが微細化の磁気的限界への挑戦を続ける中で、日立ハイテクノロジーズは、今後も顧客ニーズに応えた設備を提供するとともに、将来を見すえた技術の先行開発に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) 中村, 外: 垂直磁気記録の最新技術, シーエムシー出版, p. 236~308 (2007)
- 2) 技術戦略ロードマップ, 経済産業省, p.72~89 (2010)
- 3) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: 次世代大容量省電力ストレージ技術のための革新的技術開発, (2010.10)
- 4) Ishii, et al.: Investigation on Pattern Fidelity in UV Soft Nanoimprint Lithography, The 9th International Conference on NNT (2010.10)

執筆者紹介



森 恭一

1979年日立電子エンジニアリング株式会社入社, 株式会社日立ハイテクノロジーズ ファインテック製品事業本部 テストシステム部 所属
現在, ハードディスク関連の製造検査設備の開発・設計に従事



松井 裕一

1992年日立製作所入社, 中央研究所 エレクトロニクス研究センター 先端ストレージ研究部 所属
現在, ハードディスク, 光ディスク, SSDなどのストレージデバイスの研究開発に従事
博士(工学)
応用物理学学会会員, IEEE会員

to challenge the limits of magnetic miniaturization, Hitachi High-Technologies Corporation will continue to respond to its customers' needs in providing equipment and timely development of future technology.

REFERENCES

- 1) Y. Nakamura, et al., Advanced Technologies of Perpendicular Magnetic Recording pp. 236-308 (2007) CMC Publishing Co.,Ltd.
- 2) Strategic Technology Roadmap, pp. 73-89 (2010) Ministry of Economy, Trade and Industry (in Japanese)
- 3) Innovative Technology Developments for Next Generation Super High Density Low Power Storage, New Energy and Industrial Technology Development Organization (Oct. 2010)
- 4) Ishii, et al.: Investigation on Pattern Fidelity in UV Soft Nanoimprint Lithography, The 9th International Conference on NNT (Oct. 2010)



ブライアン ラットレイ

1998年株式会社日立ハイテクノロジーズ入社, ファインテック製品事業本部 テストシステム部 所属
現在, ハードディスク関連の製造検査設備の開発・設計に従事