

解説

光ピックアップヘッドにおける超分解能の可能性

栖原 敏明・西原 浩

大阪大学工学部電子工学科 〒565 吹田市山田丘 2-1

(1992年3月31日受理)

Possibility of Super-Resolution Readout in Optical Disc Pickup Heads

Toshiaki SUHARA and Hiroshi NISHIHARA

Department of Electronics, Faculty of Engineering, Osaka University,
2-1, Yamada-Oka, Suita 565

1. ま え が き

光ディスクメモリシステムは既に完成された技術として広く実用されているが、応用が広まるに伴って、光メモリの最大の利点である高密度・大容量データ記録の可能性をさらに拡大する必要性が高まっている。この要求に対応するため、光源の短波長化、光学系の改良、記録媒体や記録様式の改良、周辺電子回路・周辺機構による改善などの種々の方法によるデータ記録・読出しの高密度化が活発に研究されている。このようなアプローチの一つとして、最近、超分解能(超解像)*1)の応用に関する研究が関心を集めている。

光ディスクシステムで超分解能を実現する方法は、ピックアップヘッド(光ヘッド)の光学系の特性を超分解能化するものと、記録媒体(光ディスク自体)の特性を超分解能化するものに大別できる。本稿では、ピックアップ(PU)ヘッド光学系の特性によるディスクデータ超分解読出しの可能性について概説したい。

2. 歴 史 的 背 景

光ディスクピックアップヘッドは、光ディスクデータの高速自動読取りに専用化された走査型レーザー顕微鏡であると言えることができる。図1は走査型顕微鏡とディスクヘッドに関する超分解能の歴史的背景の概略を示す。

走査型光学顕微鏡(scanning optical microscope; SOM)¹⁾は1950年代に先駆的研究がなされ、1960年代末からは光源がレーザー化されて発展した。1961年にはMinskyによりSOMの光学系の一つである共焦点顕微鏡の特許が成立している。1970年代以後は、SheppardとWilsonの研究を中心として、共焦点SOMが従来の顕微鏡や他のSOMより高い分解能を持つことなどSOMの多くの利点が示され、理論が確立されるとともに技術もさらに発展し、現在では実用化・商品化がなされている。

顕微鏡の分解能は対物レンズで集光された光スポットの大きさと深く関連している。レンズ開口内で光振幅が一樣な場合の焦点面上強度分布はエアリーパターンであり、そのメインローブ径は光波長 λ とレンズの開口数(NA)で決まる。その値は回折限界スポット径と呼ばれ、通常はこの値が実現可能な最小スポット径であるとされる。しかし図2に示すようにレンズ開口面内振幅分布(瞳関数)を中央部で小さく外周部で大きくなるように変形すれば、焦点スポットのメインローブ径を通常回折限界値より小さな値にできる。ただしこのときサイドローブの高さは増大する。このようなアポディゼーション(apodization)*2)によるスポット径の縮小は古く1940年代から知られており²⁾、古典的な(非走査型)顕微鏡の分解能改善を目指した研究がなされたが、サイドローブ高増大の悪影響のため良好な結果はほとんど得られな

*1 “超分解能”, “超解像” はともに super resolution の訳語であり, 画像処理の分野では“超解像”が多用されるが, 光ディスクはデータを記録・再生するものであり画像を直接に取り扱わないから, 本稿では“超分解能”の語を用いた。

*2 “アポディゼーション”の本来の意味は焦点サイドローブを低減する目的で開口外周部の振幅を小さくすることであるが, 本文中では拡張された(逆の場合を含めた)“瞳関数の変形”の意味で用いている。

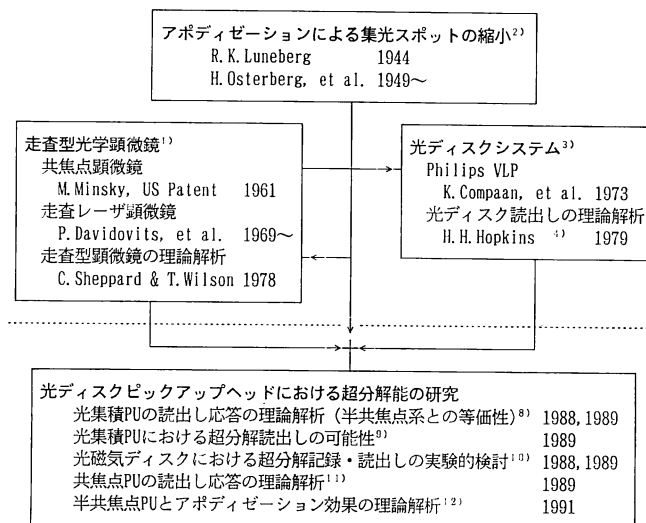


図1 走査型顕微鏡とディスクヘッドに関する超分解能の歴史的背景

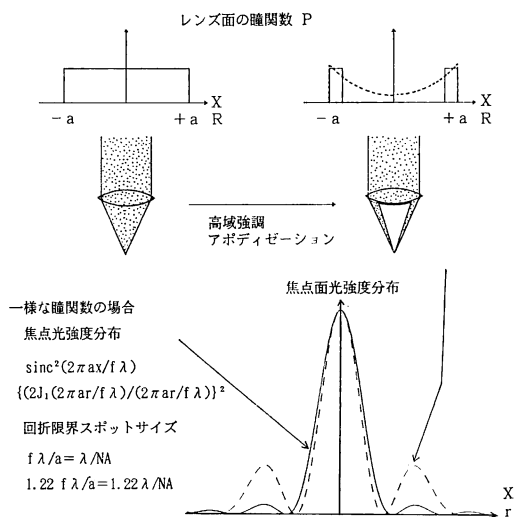


図2 アポディゼーションによる焦点スポット縮小

かった。しかし共焦点 SOM では、アポディゼーションを加えたときのサイドローブ高増大は大きな問題とならず、有効な分解能改善法として利用されている¹⁾。

一方、光ディスクシステム³⁾は SOM とほぼ同時期に開発され、1973 年に最初のビデオディスク (VLP) システムが発表された。1979 年には Hopkins によりビデオディスク読出し特性に関する理論が完成され⁴⁾、この理論が拡張・発展^{3,5,6)}されて現在の各種ディスクに関する理論的基礎となっている。これらのシステムには高分解能が期待できる共焦点光学系は採用されなかったが、その技術的な理由はディスクシステムで要求される高速化・自動化が困難と考えられたためと思われる。

光ディスクピックアップの分解能改善の研究は 1988 年頃から始められた。光導波路を用いた光集積ディスクピックアップ (integrated optic disc pickup; IODPU)⁷⁾の読出し応答の理論解析による IODPU と半共焦点光学系の等価性の解明⁸⁾、超分解読出し特性の解析⁹⁾、光磁気ディスクにおける超分解記録・読出しの実験的検討¹⁰⁾、共焦点ピックアップの読出し特性の理論解析¹¹⁾、半共焦点ピックアップとアポディゼーション効果の理論解析¹²⁾などである。これらは以下で詳述する。

3. 超分解能の定義について

ここで混乱を避けるために“超分解能”の定義について述べておきたい。Sheppard と Wilson¹⁾は SOM の分解能に関して super resolution (SR) と ultra resolution (UR) を詳細かつ明確に定義している。これによれば SR と UR は共に通常の分解能を上回る分解能であるが、SR は伝達空間周波数域の拡大を伴う改善、UR はこれを伴わない改善を意味する。この定義はコヒーレント系、インコヒーレント系などの光情報伝達形態分類のそれぞれの範囲内での定義であり有意な比較ができる。すなわち同範囲内の顕微鏡を比較するとき、UR は通常より高い分解能、SR は UR より高い分解能を実現する。しかしディスク PU では部分的コヒーレント系に属する従来の PU と他の範囲の新しい PU とを比較する必要があるため、UR と SR を区別することは必ずしも妥当ではない。また、顕微鏡は不特定の物体を観察することを目的とするのに対し、PU は特定の様式でデータ記録されたディスクの読出しのみを目的とするの

で一般物体での分解能改善を要しない。そこで、新しいPUの分解能を議論する本稿では、URとSRを区別せず、分解限界に近い記録単位のディスクに対する読出し信号の品質が同じ開口数を持つ従来のPUのそれに比べて改善される場合に対して“超分解能 (super resolution)”の語を用いることにする。なお、以下で述べる全ての分解能改善は伝達空間周波数域を拡大するものではない。

4. 共焦点ピックアップの光学系と特性

4.1 走査型顕微鏡とディスクピックアップ

従来からの光ディスクピックアップ (PU) は、点光源と見なせるレーザーと回折限界スポットサイズに比べて十分大きな受光面積をもつ光検出器を用いており、この光学系は Sheppard と Wilson の定義¹⁾による type I の SOM に属する。図3 (a)はその基本光学系を実際の反射型ディスク光学系と等価な透過型光学系で図示したものである。簡単のためフォーカシング/トラッキング誤差検出のための構造は省略されている。このPUによる読出しは空間情報の部分的コヒーレント伝達に基づいている。レーザー光はコヒーレント光であるが、情

報を走査により時系列信号として読み出す際には異なる位置の情報は異なる時刻に伝達されるのでその空間情報伝達形態は画像並列結像系のようなコヒーレント伝達であるとは限らない。この場合は受光側で積分強度が検出されるので、集光スポットサイズ程度の距離内では干渉効果が生じるが、同時にはスポット内に入らない距離間ではインコヒーレントな情報伝達、すなわち部分的コヒーレント伝達となる。

4.2 共焦点ピックアップの構造と分解能改善の原理

共焦点ピックアップ (confocal PU) は共焦点 SOM すなわち type II の SOM でディスクの読出しを行うものである。共焦点PUは点光源と点検出器を用いるものであり、図3 (b)のように受光側レンズの後方焦点面に置いた検出器の直前にピンホールを挿入することにより構成される。この共焦点PUによる読出しは受光側で点強度検出を行うことから、空間情報のコヒーレント伝達の特性を示す。

Type I と type II の SOM の分解能はピンホールのような点振幅物体の観察を考えることにより最も簡単な比較ができる。Type I SOM では物体面で単一ピンホールを走査したときの出力信号は点像振幅分布関数の2乗 (焦点光強度分布) と同一の波形となることは明らかである。一方、type II SOM では受光側も点像分布関数で表される伝達特性を持つので、出力信号は点像分布関数の4乗の波形となる。したがって図4に示すように type II SOM の点物体に対する応答は type I SOM のそれに比べて急峻なピークとなり、前者の方が高い分解能を示す。また type II SOM ではアポディゼーションを加えたときのサイドローブ高増大の悪影響が小さい。すなわち type I では投光側レンズの集光作用のみが空間分解に寄与するのに対し、type II では投光側・受光側の両方の集光作用が分解に寄与するので高分解能となると理解できる。しかし、ディスクの記録単位は有限な大

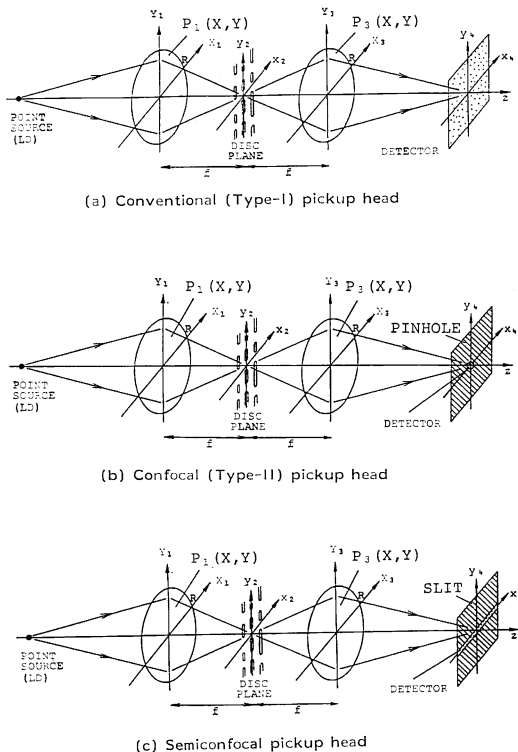


図3 光ディスクピックアップヘッドの基本光学系：(a)従来型、(b)共焦点型、(c)半共焦点型

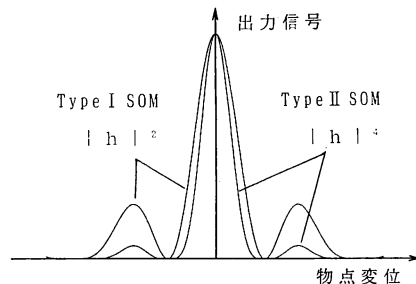


図4 Type I SOM と type II SOM の点物体応答の比較 (hは焦点における点像振幅分布関数を表す)

きさを持っており、多くのディスクは位相物体であるので、この特殊な一例だけでディスク PU についての結論を得ることはできない。

4.3 読出し信号の理論式

情報記録した光ディスクは、近似的に周期構造とみなして、その複素反射率 $R(x, y)$ をフーリエ展開表示したときのフーリエ係数 R_{mn} の組で表すことができる⁴⁾。ここで x, y はそれぞれ radial 方向, tangential 方向の座標, m, n は x, y 方向のフーリエ次数であり整数 ($\dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots$) をとる。このとき読出し信号 J は一般に

$$J = \sum_{mm'nn'} Q_{mm'nn'} R_{mn} R_{m'n'}^* \times \exp[-2\pi j \{u(m-m')/A_x + v(n-n')/A_y\}] \quad (1)$$

の形で表される^{4,8)}。ここで A_x, A_y はディスクの基本周期, u, v は x, y 方向のディスクの変位を表す。 $Q_{mm'nn'}$ は PU の特性を表す伝達係数である。積分強度を検出する従来の PU に対しては $Q_{mm'nn'}$ は部分的コヒーレント伝達係数であり、投光側と受光側のレンズ (焦点距離 f) の開口に対する瞳関数をそれぞれ $P_1(X, Y), P_3(X, Y)$ とすれば、

$$Q_{mm'nn'} = \iint P_1(\xi_m - X, \eta_n - Y) \times P_1^*(\xi_{m'} - X, \eta_{n'} - Y) P_3(X, Y) \times P_3^*(X, Y) dXdY$$

$$\xi_m = \lambda f m / A_x, \quad \eta_n = \lambda f n / A_y \quad (2)$$

で与えられる。PU の分解能を簡単に説明するときよく用いられる伝達関数 (OTF) は Q_{00n0} を n に対応する連続な空間周波数の関数として表したものであり、PU の特性を完全に表すものではなく、完全な記述には (2) で与えられる 4 変数の $Q_{mm'nn'}$ が必要である。

一方、点強度を検出する共焦点 PU では読出し信号は

$$J = |\sum_{mn} Q_{mn} R_{mn} \exp[-2\pi j (um/A_x + vn/A_y)]|^2 \quad (3)$$

の形で表され、 Q_{mn} は PU の特性を表すコヒーレント伝達係数であり

$$Q_{mn} = \iint P_1(\xi_m - X, \eta_n - Y) P_3(X, Y) dXdY \quad (4)$$

で与えられる。(4) の Q_{mn} に対して、 $Q_{mm'nn'} = Q_{mn} \times Q_{m'n'}^*$ と置けば、(3) は (1) と同形になり比較が容易となる。SOM に関しても同様の取扱いが可能であり、同じ開口数の type I SOM と type II SOM を比較したとき、高空間周波数域の $Q_{mm'nn'}$ には type I では零であるが type II では非零のもの (例えば正に大きな n

と負に大きな n' の $Q_{00nn'}$) がいくつか含まれるので、type II の方が分解能が優れていることが示される¹⁾。しかし、PU ではより妥当な比較をするために具体的なディスク読出しについて読出し信号を解析する必要がある。

4.4 共焦点ピックアップの特性

Braat は (3), (4) 式を用いて共焦点 PU による CD 読出しを僅かなディフォーカシング (焦点ずれ) のある場合も含めて解析し¹⁾、読出し信号の品質を rms (自乗平均) アイジッタを計算して評価した。ディスク PU からの読出し信号は弁別レベルとの比較でデジタル信号に変換されるが、PU の分解能は有限であるのでトラック間のクロストークや同トラック上前後の符号間干渉が生じて、デジタル信号の立上り・立下り時刻が理想的な時刻からずれる。このずれがジッタ^{6,11)}である。rms ジッタはジッタを多数のデータ配列について自乗平均をとって表したものであり、読出し信号の品質を表す便利な指標として用いられる。CD 読出しは rms ジッタが $0.15T$ (T はピット長単位) 程度以下であればクロック再生が可能であり誤りなくデータを再生できる。

図 5 に示すように、共焦点 PU ではディフォーカシングが生じると読出し信号レベルが顕著に低下するが、各ディフォーカシングに対してデジタル弁別レベルを最適に選べば良好な読出しが可能である。このとき rms ジッタは非零のあるディフォーカシング値で最小となることが見出された。非零ディフォーカシングでジッタ最小となるのは、ディフォーカシングによる検出光量の減少が空間周波数全域で一様ではなく、最適ディフォーカシング近傍では情報を伝達しない零周波数成分に較べて情報をもつ高周波数域成分の減少は小さいので相対的に伝

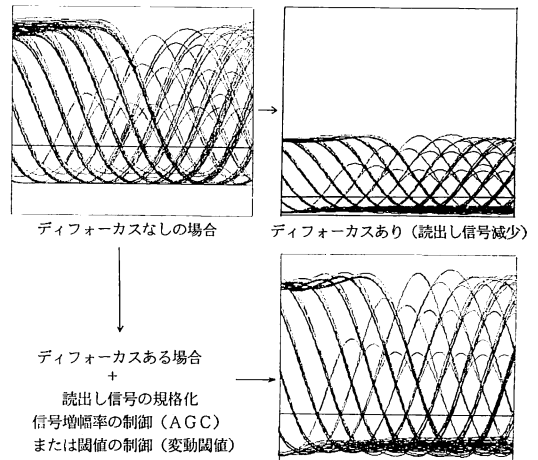


図 5 共焦点ピックアップのディフォーカス読出し特性

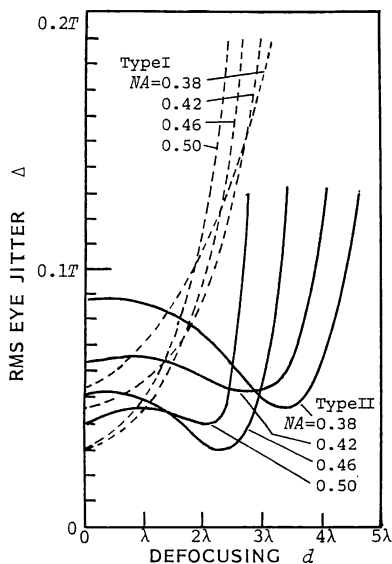


図6 共焦点ピックアップの rms アイジッタのディフォーカシング依存性¹¹⁾

達度が增大するためである。図6は種々の開口数の共焦点PUのディフォーカシングとジッタの関係を示す¹¹⁾。図6は共焦点PUでは従来のCD用PU(NA=0.46)より15~20%小さな開口数で従来のCD用PUと同等の読出しが可能であり、また共焦点PUを用いればディフォーカシング許容範囲を拡大できることを示している。このことはまた従来のPUと同じ開口数の共焦点PUを用いれば約30%の高密度化が可能であることを意味している。

以上では検出器前のピンホールの径は無限小としたがこのとき出力信号の絶対値は無限小となる。すなわち共焦点PUは読出し信号レベルが小さい欠点がある。実際的な信号レベルを得るためには有限径のピンホール(空間フィルタ)を用いる必要があるが、Braatによればピンホール径を $0.4\lambda/NA$ 程度まで拡大しても無限小の場合とほぼ同じ読出し信号波形が得られる¹¹⁾。しかしピンホールを用いて点強度を検出する共焦点構造にはPUに必要なディフォーカシング/トラッキング誤差検出機能を組み込むことはできないので、共焦点PUは読出し部とは別に構成した誤差検出部を組み合わせる必要がある、このため複雑な構成となる欠点がある。

5. 半共焦点ピックアップの特性

5.1 半共焦点ピックアップの構造と特徴

半共焦点ピックアップ(semiconfocal PU)¹²⁾は、共焦点PUの欠点を取り除くため、共焦点PUで用いたピ

ンホールをスリットに置き換えた(線検出器を用いた)PUである。その基本光学系を図3(c)に示す。ディスクシステムでは情報はtangential方向にピット長の形で記録され、この方向と垂直なradial方向に光波面を処理することによりフォーカシング/トラッキング誤差検出機能が実現されている。したがってPUは必ずしも顕微鏡のように全方向で様な特性(分解能)を実現する必要はない。図3(c)のスリットは、PUがtangential方向にはtypeII(共焦点)の特性をもち、radial方向には従来のtypeI特性となる方位で挿入されている。このとき誤差検出機能付加を阻害することなく分解能改善を行うことが可能である。またこのPUは、共焦点PUに較べて弁別レベル変動や読出し信号レベルの低下が小さく、従来のPUと共焦点PUの長所を折衷した特性となると期待できる。

図3(b),(c)のようなレンズを用いた(半)共焦点PUが提案・検討される以前に、栖原らは光導波路と集光グレーティングカップラを用いた光集積ディスクピックアップ(integrated optic disc pickup; IODPU)⁹⁾の読出し応答を理論解析し、IODPUが半共焦点PUと等価であることを見出した⁹⁾。IODPU(図14(a)参照)では導波モードの離散性により無限小幅のスリットの挿入と等価なフィルタリング効果が生じる。またこの共焦点特性と指数関数的な瞳関数のため、IODPUは元来、超分解特性を持つことを示した⁹⁾。すなわちIODPUは矩形開口を持つ半共焦点PUの一例であり、図3(c)は円形開口の通常のレンズを用いた半共焦点PUを示したものである。

5.2 半共焦点ピックアップの特性

半共焦点PUの読出し信号 J は検出器線上($y_4=0, -\infty < x_4 < \infty$)の積分光強度で与えられ、一般式(1)の形で表されるが、このとき伝達係数 $Q_{mm'nn'}$ は

$$Q_{mm'nn'} = \int S_{mn}(X) S_{m'n'}^*(X) dX$$

$$S_{mn}(X) = \int P_1(\xi_m - X, \eta_n - Y) P_3(X, Y) dY \quad (5)$$

で与えられる¹²⁾。とくに瞳関数 P_1, P_3 が X, Y の変数分離形となる場合には、 $Q_{mm'nn'}$ は X 方向(m, m')の一次元部分的コヒーレント伝達係数と Y 方向(n, n')の一次元コヒーレント伝達係数の積となる。なお、プッシュプル法によるトラッキング誤差信号は、受光側レンズ開口の半分($X > 0$ および $X < 0$)を通過した光がつくる検出器線上積分強度の差で与えられる。またフォーカシングによるフォーカシング誤差信号は、受光側レンズ開口の

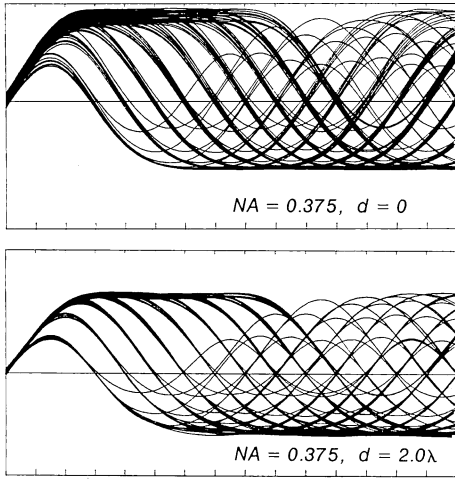


図 7 半共焦点ピックアップの読出し信号の計算例¹²⁾ (d はデフォーカシングを表す)

半分 ($X > 0$ または $X < 0$) を通過した光がつくる検出器の正軸上 ($x_4 > 0$) と負軸上 ($x_4 < 0$) の積分強度の差で与えられる。

5.2.1 円形開口半共焦点ピックアップ

図 7 は円形開口をもつ半共焦点 PU (図 3 (c)) について計算した標準 CD の読出し信号 (アイパターン) の例を示す。図 8 は種々の開口数の半共焦点 PU におけるデフォーカシングと rms アイジッタの関係を示す。これらの結果は、デフォーカシングによる信号レベル低下、最適弁別レベルの変動、非零デフォーカシングでの rms アイジッタの最小値、従来の PU に較べての分解能改善・デフォーカシング許容範囲の拡大など、定性的には共焦点 PU と共通の特性を示している。半共

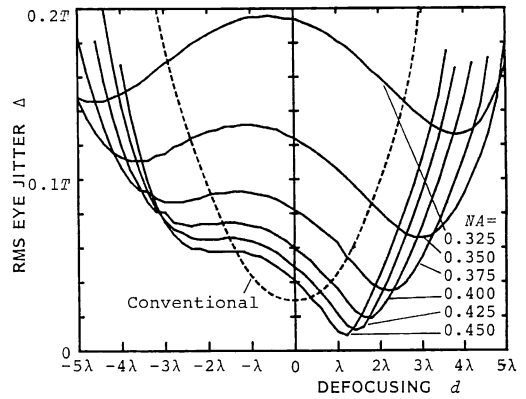


図 8 円形開口半共焦点ピックアップにおける rms アイジッタのデフォーカシング依存性¹²⁾

焦点 PU が従来の PU と共焦点 PU の中間的な構造であるにもかかわらず分解能に関して共焦点 PU に近い特性を示すのは、半共焦点 PU がディスクの情報記録座標である tangential 方向に関して共焦点系であるからである。図 8 は、開口数 NA が 0.37 程度の半共焦点 PU で従来の CD 用 PU (NA=0.46) と同等の読出し性能が実現できることを示している。

図 9 (a), (b) はトラッキング誤差信号、フォーカシング誤差信号の計算例を示す。これらの結果は、スリットを用いて線上積分強度を検出する半共焦点型の検出法でも適当なレベルと波形の誤差信号が得られることを示している。なお、半共焦点 PU の読出し信号の rms ジッタは非零デフォーカシングで最小となるので、この最良読出し点と図 9 (b) の誤差信号の零点の間にはオフセットが存在することになるが、このオフセットは検出

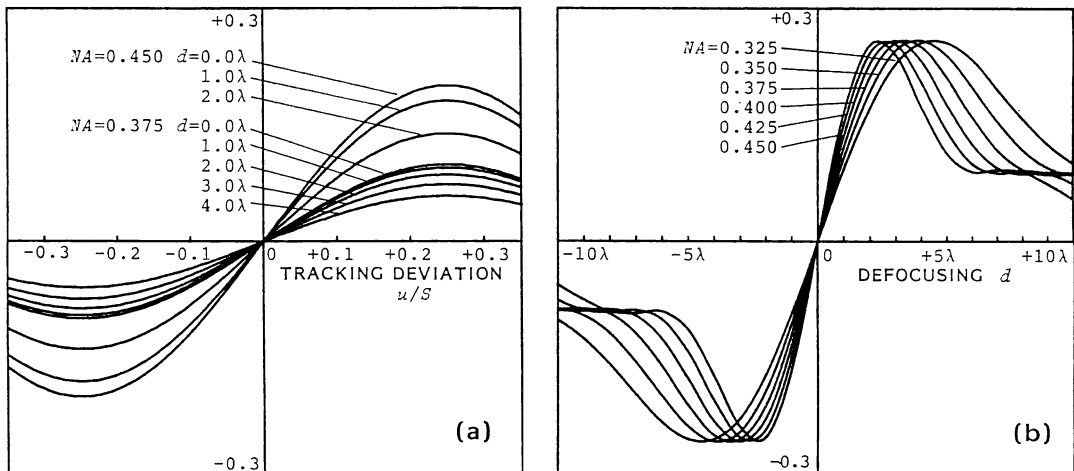


図 9 半共焦点ピックアップの誤差信号¹²⁾: (a) トラッキング誤差信号, (b) フォーカシング誤差信号

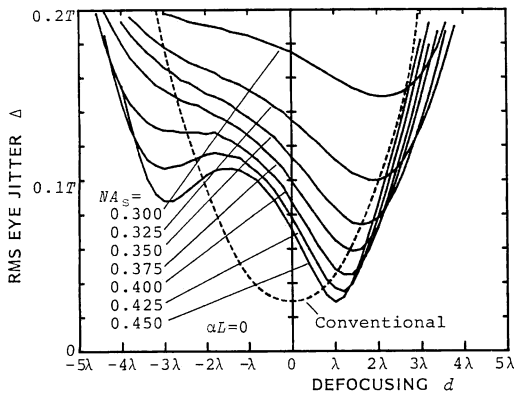


図 10 矩形開口半共焦点ピックアップにおける rms アイジッタのディフォーカシング依存性¹²⁾

器をオフセット配置するなどの方法で補正できる。

5.2.2 矩形開口半共焦点ピックアップ

図 10 は矩形開口をもつ半共焦点 PU について計算したディフォーカシングと rms アイジッタの関係を示す。矩形開口に対しては、円形開口に対して定義された通常の開口数 NA に対応する開口パラメータとして、図 11 に示すような量を定義できるが、ここでは(半辺長/焦点距離)で定義した NA_s(辺 NA)を用いた。矩形開口と同面積の円形開口の NA を NA_a(面積 NA)とすれば、NA_aは NA_sの 1.13 倍である。図 10 は図 8 と同様の傾向であり、矩形開口半共焦点 PU も定性的には円形開口のものと同様の特性であることを示している。

6. アポディゼーションの効果

6.1 共焦点顕微鏡における分解能改善

共焦点 SOM ではアポディゼーションを加えたときのサイドローブ高増大の悪影響が小さいので、適当なアポディゼーションで分解能を実質的に改善できる。例えば、投光側開口と受光側開口のいずれか一方を円環状開口(高空間周波数域透過アポディゼーション)として他方を通常の円形開口とすれば、OTF を全空間周波数域にわたって増強できるので分解能改善 (ultra resolution)

が可能であることが知られている¹⁾。共焦点 PU でも同様に分解能改善が可能と類推される。しかし、光ディスク PU には、軸対称な 2 次元アポディゼーションの共焦点 PU より、1 次元 (tangential 方向) アポディゼーションの半共焦点 PU の方が適している。

6.2 書き込み分解能の改善

山中らは遮光帯または双菱形プリズムによる 1 次元アポディゼーションを用いて実験的に光磁気ディスクの書き込み分解能を改善した¹⁰⁾。ディスクの書き込み特性に非線形性(閾値)があることを利用すればサイドローブ高増大の問題を避けることができる。この実験の読出しにはスリットを挿入した光学系(本質的には半共焦点 PU)が用いられ、20% の記録線密度改善がなされた。

6.3 読出し分解能の改善

読出し分解能を改善する 1 次元アポディゼーションの例が CD の読出しシミュレーションにより理論的に見出されている¹²⁾。図 12(a) は円形開口半共焦点 PU の投光側開口に高域透過アポディゼーションを加えた場合のディフォーカシングと rms ジッタの関係を示す。このとき 1 次元コヒーレント OTF (または Q_{00n0}) は中高周波数域で増強されたものとなる。同図を図 8 と比較すれば、小さな NA の場合について僅かではあるが分解能改善(最小ジッタの減少)が見られる。また図 12(b) は投光側開口に高域カット、受光側開口に高域透過のアポディゼーションを加えた場合の結果を示す。このとき OTF はほぼ全空間周波数域にわたって増強される。図 12(b) を図 8 と比較すれば、最小ジッタはほとんど減少しないが、小さな NA (NA=0.325, 0.350) の PU においてはディフォーカシングのない位置 (d=0) での読出しが改善されることがわかる。

図 13 は指数関数型の 1 次元アポディゼーションを加えた矩形開口半共焦点 PU のディフォーカシングと rms アイジッタの関係を示す。IODPU では導波光が集光グレーティングカップラ (FGC) で導波路外に回折(放射)されるので導波光振幅は伝播に沿って指数関数的に減衰し、このため瞳関数も exp(-αY) の形の指数関数とな

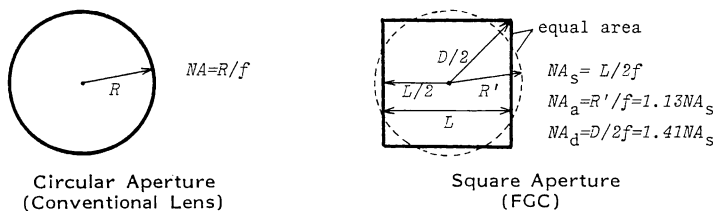


図 11 円形開口と矩形開口に対する開口数の近軸近似における定義

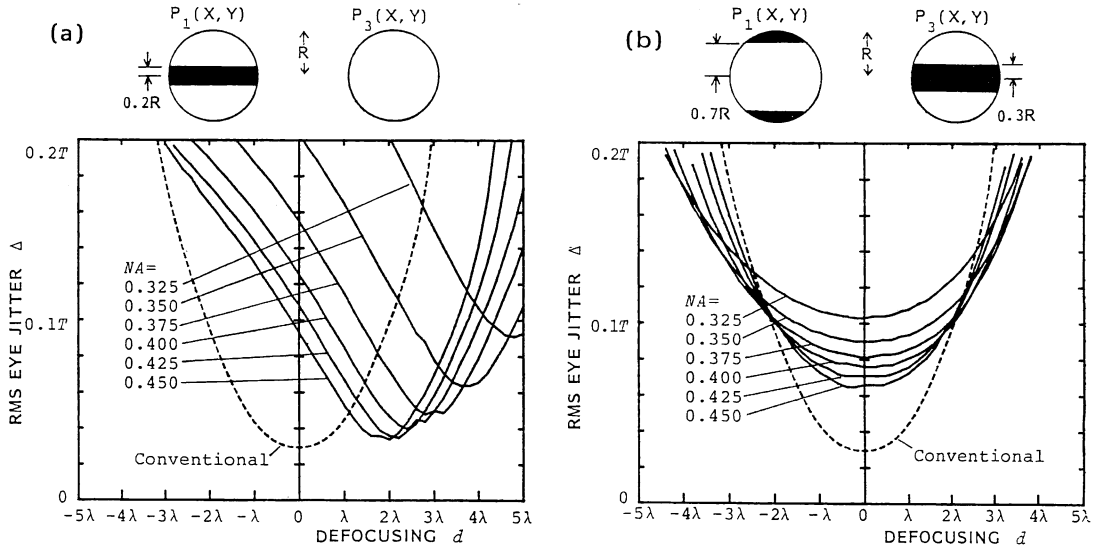


図 12 アポディゼーションを加えた円形開口半共焦点ピックアップにおける rms アイジッタ¹²⁾

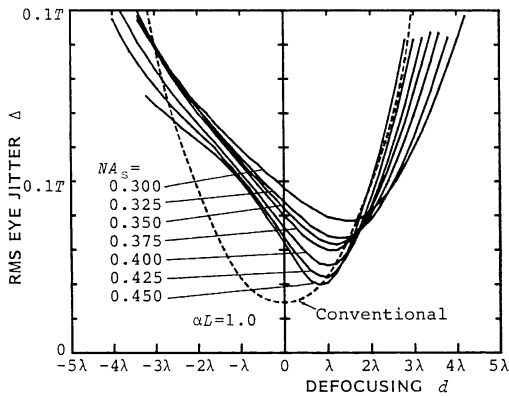


図 13 指数関数型アポディゼーションを加えた矩形開口半共焦点ピックアップにおける rms アイジッタ¹²⁾

る。FGC の往復 (入出力) 効率を最大化する条件は放射減衰係数 α と開口長 L を使って $\alpha L=1$ で与えられる。図 13 はこのように効率最大化した IODPU で実現される $\alpha L=1$ のアポディゼーションについて計算したものである。このとき瞳関数は (Y の符号反転に関して) 非対称であるので、OTF も非対称であるが、片側波帯 (負の空間周波数) 全域で OTF が増強される。図 13 の結果を図 11 と比較すれば小さな NA_s の PU で分解能が改善されており、 NA_s が 0.32 程度の IODPU で従来の PU と同等の読み出し性能が得られることがわかる。また従来の PU の NA と同じ辺 NA ($NA_s=0.45$) の IODPU では標準 CD の 2 倍の面密度のディスクを読み出せることが示されている。

なお、このようなアポディゼーションを加えた場合も加えない場合とほぼ同様にトラッキング/フォーカシング誤差信号が得られることが理論的に確認されている。

7. 光ヘッドへの適用方式と今後の課題

(半)共焦点光学系を用いて超分解特性と誤差検出機能をもつ PU を実現する方法にはいくつかの構成が考えられる。図 14 にその例を示す。同図 (a) に示す光導波路を用いた光集積ディスクピックアップ (IODPU)⁷⁾ はスリット幅無限小の理想的な半共焦点 PU と等価であり、超分解読み出し特性を実現する最もコンパクトなデバイスであるが、実験的にはこれまで実働性能は達成されておらず、超分解特性の実証は今後の課題である。図 14 (b) はレンズ、プリズム、スリット等の通常の光学素子を用いた半共焦点 PU の構成例を示す。光磁気ディスク超分解読み出しの実験¹⁰⁾ には、読み出し系と誤差検出系を分離した類似の光学系が用いられている。読み出し専用ディスクに関しても各所で実験が行われていると思われるが、これまで詳細な報告は見当たらない。誤差検出機能やアポディゼーションを付加した (半)共焦点 PU は従来の PU より複雑な光学系となるが、ホログラフィック素子を用いれば単純化が可能である。図 14 (c) はビームスプリッター・プリズム・アポディゼーションマスクの機能を面分割や多重化で実現するホログラフィック素子を用いた構成の概念図を示す。(半)共焦点 PU の利点を活用するにはディフォーカシング変動に対して常に弁別レベルを最適化する必要があるが、これは自動利得制御 (AGC)

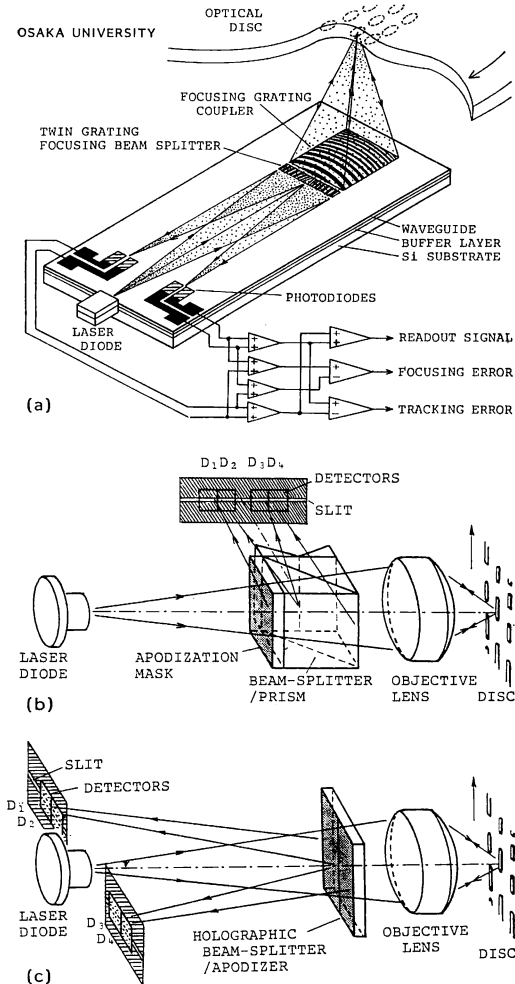


図 14 超分解ピックアップの具体的構成例：(a)光集積ディスクピックアップ(IODPU)，(b)通常の光学素子を用いた構成，(c)ホログラフィック素子(HOE)を用いた構成

回路または変動閾値発生回路などの電子回路を用いることで実現可能である。駆動のための機械系や回路を含めた実験的検討の進展が望まれる。また、アポディゼーションの最適化や各種ディスクに対する解析など、理論面での課題も残されている。

8. む す び

共焦点光学系・半共焦点光学系とアポディゼーションの技法を用いたピックアップヘッドによるディスク超分解読出しの可能性について概説した。この分解能改善は飛躍的な改善とは言えないが、より顕著な高密度化のため他の種々の方法と組み合わせることも可能であるので、次世代光ディスクシステムのための一技術としてさ

らに検討されることが望まれる。

文 献

- 1) C. Sheppard and T. Wilson: "Image formation in scanning microscopes with partially coherent source and detector," *Opt. Acta*, **25** (1978) 315-325.
T. Wilson and C. Sheppard: *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy* (Academic Press, London, 1984).
- 2) H. Osterberg and J. E. Wilkins: "The resolving power of a coated objective," *J. Opt. Soc. Am.*, **39** (1949) 553-557.
J. E. Wilkins: "The resolving power of a coated objective II," *J. Opt. Soc. Am.*, **40** (1950) 222-224.
- 3) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. van Rosmalen and K. Schouhamer Immink: *Principles of Optical Disc Systems* (Adam Hilger, Bristol, 1985).
- 4) H. H. Hopkins: "Diffraction theory of laser readout systems for optical video discs," *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979) 4-24.
- 5) J. Braat: "Optically read disks with increased information density," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 2196-2201.
- 6) S. Kubota: "Aplanatic condition required to reproduce jitter-free signals in an optical digital disk system," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 3961-3973.
- 7) T. Suhara, S. Ura, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disc pickup device," *Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, Oct. 1-4, 1985, Venezia, pp. 117-120.
S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disc pickup device," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 913-918.
T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated optic disc pickup devices using waveguide holographic components," *Proc. SPIE*, **1136** (1989) 92-99.
- 8) 栖原敏明, 西原 浩: "光集積ディスクピックアップにおける読出し応答の解析", *光学*, **18** (1989) 82-90.
- 9) T. Suhara and H. Nishihara: "Possibility of super-resolution readout in integrated-optic disc pickup," *Tech. Digest Int. Symp. Optical Memory*, Kobe (1989) 27D-16.
栖原敏明, 西原 浩: "光集積ディスクピックアップにおける超分解読出しのシミュレーション", *光メモリシンポジウム '90 論文集*, 幕張メッセ (1990) pp. 49-50.
- 10) Y. Yamanaka, Y. Hirose and K. Kubota: "High-density optical recording by superresolution," *Tech. Digest Int. Symp. Optical Memory*, Kobe (1989) 27D-17; *Proc. Int. Symp. Optical Memory*, Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. **28-3** (1989) 197-200.
- 11) J. Braat: "Optics of recording and read-out in optical disk systems," *Proc. Int. Symp. Optical Memory*, Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. **28-3** (1989) 103-108 (orally presented at ISOM '89 27A-1).
- 12) T. Suhara and H. Nishihara: "Possibility of super-resolution readout in optical disc heads," *Tech. Digest Int. Symp. Optical Memory*, Sapporo (1991) 2D-2; —: "Theoretical analysis of super-resolution readout of disc data by semiconfocal pickup heads," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) Pt. 1, 534-541.