不規則面を有する青色レーザ光ディスクモデルにおける 検出信号特性のFDTD法解析

FDTD Method Analysis of Detected Signal Characteristics from a Blue Laser Optical Disk Model with Random Rough Surfaces

河合孝典[†], 小嶋敏孝[†]

Takanori Kawai[†] and Toshitaka Kojima[†]

キーワード：青色レーザ光ディスク，光ビーム散乱，FDTD法，クロストーク，不規則面

1. ま え が き

光ディスクは，情報の高速記録および高密度記録が可能な媒体の一つとして様々な分野で利用されている．これら光ディスクは，ディスク基板上に設けられた記録マークにレーザ光を照射し，生じた散乱光の強度を利用して情報の再生を行っている．そのため，ディスク構造と検出信号特性の関係を理論的に明らかにすることは，情報の記録・再生特性を向上させるための重要な要素の一つである．これまで，我々はベクトル解析理論に基づく数値シミュレーション法によって様々なタイプの光ディスクからの光散乱特性の解析を行ってきた^{1)~3)}．

近年，光ディスクの更なる高密度化のために，狭トラックピッチと短波長レーザが用いられている．しかし，狭トラックピッチを用いることにより，隣接記録マークからの影響すなわちクロストークが増加し信号検出特性の劣化が増える恐れがある³⁾．光ディスクモデルからの光散乱解析において，そのほとんどはディスク表面を平坦面と仮定したモデルを用いている．しかし，光ディスクの各層の表面はミクロな凹凸を有すると考えられ，その表面の不規則性は，狭トラックピッチと使用レーザの短波長化にともなって検出信号におけるノイズ増加を引き起こす主要な要因となり得る^{4)~7)}．

そこで本研究では，計算機によって作成された不規則面を有する相変化光ディスクモデルによる光ビーム散乱と検出信号特性のシミュレーションを時間領域差分法（FDTD法:Finite Difference Time Domain Method）によって求め，統計処理を行い，不規則面が散乱特性に与える影響に

ついて述べる．

2. 解 析 理 論

2.1 FDTD 法

FDTD法の基本概念は，解析領域をセルと呼ばれる微小領域に分割し，このセルに配置された電界および磁界の各ベクトル成分に対して，マクスウェルの方程式を時間および空間的に差分化し適用していくことにある．以下に，電界 $\mathbf{E}$ および磁界 $\mathbf{H}$ の計算に用いる式を示す．

$$\mathbf{E}_z^n = \frac{1 - \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon}} \mathbf{E}_z^{n-1} + \frac{\frac{\Delta t}{\epsilon}}{1 + \frac{\sigma \Delta t}{2\epsilon}} \left(\frac{\partial \mathbf{H}_y^{n-\frac{1}{2}}}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{H}_x^{n-\frac{1}{2}}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_x^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}_x^{n-\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}_z^n}{\partial y} \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_y^{n+\frac{1}{2}} = \mathbf{H}_y^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu} \frac{\partial \mathbf{E}_z^n}{\partial x} \quad (3)$$

ここで， ϵ は誘電率， μ は透磁率， σ は導電率， n は時間軸上における離散座標値および Δt はタイムステップを表す．また，解析領域の最外壁で発生する反射波を抑えるため，PML(Perfect Matched Layer)吸収境界条件を用いる．

2.2 計算機による不規則面の生成

与えられた統計量（分散，相関）を有する不規則面を以下のような重み付け算術移動平均法によって作成する^{8)~11)}． x および y 軸方向は平坦なディスク面に平行および垂直方向を表すとすれば， x 軸に沿うサンプル点座標 x_i におけるランダム面の y 座標はその平均値 y_0 とランダム変数 y_i により

2007年2月27日受付，2007年5月10日再受付，2007年6月9日採録
† 関西大学 大学院 工学研究科

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35, TEL 06-6368-0849)

† Graduate School of Engineering, Kansai University

(3-3-35, Yamate-cho, Suita-shi, Osaka, 564-8680, Japan)

$$y = y_0 + y_i \quad (4)$$

と表され、 y_i は次式に従う。

$$y_i = \sum_{j=-m}^m W_j \sigma_{i+j} \quad (5)$$

ここで σ_i は平均ゼロ、標準偏差 σ の正規分布する無相関のランダム変数である。上式において y_i は相関を表す $2m+1$ 個の重み W_j を用いて移動算術平均に基づくランダム面の y 座標を与えている。相関長 T なるガウシアン相関を仮定すれば、

$$W_j = A \exp \left\{ -\frac{2(i\Delta x)^2}{T^2} \right\} \quad (6)$$

であり、 Δx は隣接するサンプル面の微小間隔を表している。 A は次のように与えられる。

$$\frac{1}{A} = \sum_{j=-m}^m \exp \left\{ -\frac{2(i\Delta x)^2}{T^2} \right\} \quad (7)$$

2.3 検出器による検出信号特性

図1に散乱光を集光するための対物レンズ系を示す。対物レンズによって集光される成分は、遠方領域における散乱光の光軸から角度 α の範囲のものだけとし、その他の成分は影響しないものとする。ここで α は、基板の屈折率を n 、対物レンズの開口数を NA とすると次式のように表される。

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{NA}{n} \right) \quad (8)$$

ここでの解析では、基板の屈折率 $n = 1.6$ 、対物レンズの開口数 $NA = 0.85$ を用いるので、 $\alpha = 32^\circ$ となる。再生和信号は光軸方向を中心に $\pm 32^\circ$ 以内の光信号強度を計算したもので、対物レンズに集光される散乱光強度の総和で表される。

3. 解析モデル

図2に解析モデル、表1に解析モデルにおける各層の媒質定数を示す¹²⁾。入射波は波長が $\lambda_0 = 405\text{nm}$ の2次元ガウスビームとし、ビームウエストにおけるスポットサイズは $W_0 = 0.37\lambda_0$ とする。また、グループランド (Groove-Land) 間の高さをここでは $h = 20\text{nm}$ とする。なお、ここでは、入射ビームの側から見て凸および凹形状のトラックをそれぞれグループおよびランドと呼び、その平均面か

図1 対物レンズ系
Object lens system.

図2 相変化光ディスクモデル
Phase-change optical disk model.

表1 各層における媒質定数
Constants of each layer.

Composition	Medium	Index of Refraction	Thickness
Protect Layer 1	$ZnS - SiO$	$n = 2.273$	110nm
Recording Layer	$Ge_2Sb_2Te_5$	$n_C = 1.828 + i3.546$ (non-rec.) $n_A = 2.582 + i2.806$ (rec.)	20nm
Protect Layer 2	$ZnS - SiO$	$n = 2.273$	20nm
Reflection Layer	Al	$n_{Al} = 0.49 + i4.86$	80nm
Substrate	$Polycarbonate$	$n = 1.6$	Semi-infinity

らの変動幅を表す標準偏差 $\sigma(0.005\lambda_0, 0.01\lambda_0)$ と相関長 $T(0.05\lambda_0)$ を持つ不規則面を計算機で作成する。 σ の値は厚さが 20nm である記録層が形成可能な範囲で選択した。なお、DVDを製造するにあたり、要求される表面粗さは 5nm 以下といわれている¹³⁾。本解析において、 σ の最大値は $0.01\lambda_0 = 4.05\text{nm}$ である。同一の標準偏差と相関長を持つサンプル面を100個生成する。個々の不規則面を持つ光ディスクからの散乱界は、FDTD法によって求められる。100個の散乱界に対して、統計処理を行えば平均散乱強度パターンが求められる。FDTD法の適用において、セルサイズは 2nm 、解析領域は x 方向を2000セル、 y 方向を880セルとする。

4. 解析結果

不規則面が検出信号特性に与える影響について示す。 $\sigma = 0.005\lambda_0, 0.01\lambda_0$ の場合のグループ照射時における再生和信号の生起分布のシミュレーション結果を図3に、ランド照射時における再生和信号の生起分布を図4に示す。これらは不規則面を有さないモデルにおいて、記録前の状態で隣接記録マークがない場合の再生和信号を1として規格化されている。

図3より、グループ照射時は、グループに記録の在る無しに関わらず、隣接記録マークの有無による再生和信号分布の差はほとんど見受けられない。しかし、図4より、ランド照射時は、隣接記録マークの有無による再生和信号分布に差異が生じている。さらに、グループ照射、ランド照

図 3 グループ照射時における再生和信号の生起分布
Occurrence-distribution of sum-signal output
for the groove illumination.

図 4 ランド照射時における再生和信号の生起分布
Occurrence-distribution of sum-signal output
for the land illumination.

射ともに σ の値が大きくなるにつれて、分布の幅が広がることが示されている。また、 $\sigma = 0.01\lambda_0$ の場合、記録前後において、再生和信号の値が同じ値をとる場合があり、特にランド照射時にこの傾向が強く見受けられる。すなわち、グループ照射に比べ、ランド照射の方が読取りエラーの生起頻度が高くなることが示されている。

5. む す び

本研究では、計算機によって作成された不規則面を有する相変化光ディスクモデルによる光ビーム散乱解析を FDTD 法に基づく数値シミュレーションによって試み、不規則面が検出信号特性に与える影響について検討した。その結果、グループに比べ、ランドからの散乱光による検出信号特性の劣化が大きくなることが示された。

今後の課題としては、実モデルによるラフネスパラメータの実測データ取得とそれらと検出信号特性の相関を明白にすることが必要であると考えられる。なお、本研究で用いたシミュレーション技法を他の記録メディア、例えば、光磁気ディスクに適用することができる。

〔文 献〕

- 1) 小嶋敏孝, 森川征勇, 吉田幸一, “3 次元光ディスクピットモデルからの光ビーム散乱と検出信号特性の境界要素法解析,” 信学論, **J77-C-2**, 10, pp. 453-461 (Oct. 1994)
- 2) I. Kobayashi, T. Kojima, S. Fukai, and Y. He, “Numerical analysis of light-beam diffraction from magneto-optical disk medium by FDTD method,” IEICE Trans. Electron., **E84-C**, 9, pp. 1189-1196 (Sept. 2001)
- 3) T. Kojima, H. Hotta, and Y. Asano, “Three-dimensional (FD)²TD analysis of light-beam diffraction from phase-change optical disks with land/groove recording structures,” IEICE Trans., **E86-C**, 9, pp. 1861-1867 (Sep. 2003)
- 4) Y. Honguh, “Analysis of retrieval signal deterioration caused by disk surface roughness,” Jpn. J. Appl. Phys., **28**, Suppl. 28-3, pp. 115-119 (1989)
- 5) J. M. Li, L. P. Shi, X. S. Miao, K. G. Lim, P. K. Tan, H. Meng, and T. C. Chong, “Surface roughening of recording media and readout performance of phase-change optical disk,” J. Appl. Phys., **93**, no. 1, pp.14-18 (Jan. 2003)
- 6) 宮本浩明, 小嶋敏孝, “不規則面を有する高密度光ディスクモデルからの光散乱特性の FDTD 法解析,” 信学論, **J88-C**, 7, pp. 589-591 (Jul. 2005)
- 7) T. Kawai and T. Kojima, “FDTD Analysis of Light-Beam Scattering from a Blue Laser Optical Disk Model with Random Rough Surfaces,” The 8th Asian Symposium on Information Storage Technology, IEICE Technical Report, **106**, 335, pp. 81-84 (Nov. 2006)
- 8) J. A. Ogilvy, “Computer simulation of acoustic wave scattering from rough surfaces,” J. Phys. D: Appl. Phys., **21**, pp. 260-277 (1988)
- 9) J. A. Ogilvy and J. R. Foster, “Rough surfaces: Gaussian or exponential statistics?,” J. Phys. D: Appl. Phys., **22**, pp. 1243-1251 (1989)
- 10) T. Kojima and T. Yamazoe, “Scattering of focused beam from random rough surface-analysis by computer simulation,” Proc. 24th General Assembly of the International Union of Radio Science, p. 68 (Aug. 1993)
- 11) T. Kojima and T. Yamazoe, “Computer simulation of the scattering of a focused beam from random rough surfaces,” Proc. of The Fourth Japan-China Joint Meeting on Optical Fiber Science and Electromagnetic Theory, pp. 374-379 (Oct. 1993)
- 12) J. M. Li, L. P. Shi, K. G. Lim, X. S. Miao, R. Zhao, T. C. Chong, “Optical disk structure analysis with finite-difference time domain (FDTD) method,” Optical Data Storage 2003. Proceedings of the SPIE, **5069**, pp. 173-181 (Sep. 2003)
- 13) http://www.maxellhitec.co.jp/molding/mo_seimitsu.html

かわい たかのり
河合 孝典 2005 年，関西大学電子工学科卒業．
2007 年，同大学院工学研究科博士課程前期課程修了．在
学中，光ディスクの FDTD 法解析の研究に従事．2007
年 4 月から，三菱電機株式会社に勤務．

こじま としたか
小嶋 敏孝 1966 年，大阪大学工学部通信工学科
卒業．1972 年，同大学院博士課程修了．同年工学部助
手．1988 年，同助教授．1989 年，大阪電気通信大学工
学部通信工学科教授．1997 年，関西大学工学部電子工
学科教授．2002-2006 年，学術フロンティアセンター長
(兼任)．工学博士．