

ホログラフィックストレージ用液晶性 フォトクロミック材料

海田由里子・山本 祐治・坂本 寛・小野 元司・桜井 宏巳

Liquid Crystalline Photochromic Materials for Holographic Storages

Yuriko KAIDA, Yuji YAMAMOTO, Hiroshi SAKAMOTO, Motoshi ONO and Hiromi SAKURAI

Holographic storage is most promising as the next-generation storage, over 200 GB capacity is achieved. Photopolymer materials for write once type (WORM) holographic storage disks (HSDs) have been actively developed. Finally the first WORM HSDs will be soon released for practical use. On the other hands, development of rewritable type (RW) HSDs are extremely behind, because of problems of nondestructive playback and response speed. In this report, progress in development of materials for RW HSDs are reviewed. Furthermore our approach using diarylethene derivatives (DEs) as excellent photochromic materials is presented. Photo-induced phase transition of our liquid crystalline DEs is discussed. Then, holographic recording in our materials by blue laser is also discussed.

Key words: holographic storage, rewritable, diarylethene derivatives, liquid crystal, photo-induced phase transition

ホログラフィック・データストレージ (HDS) は青色レーザーを用いた Blu-ray や HD-DVD に続く次世代光ディスクの方式として大きな期待が寄せられている。特にホログラムならではの多重記録性を利用した大容量化、また他の大容量化を目指す方式がビット・バイ・ビット記録であるのに対して、100万画素を超えるページデータ単位での高速記録再生が可能なることから、この数年、最も注目されている光記録方式である。しかしながら、HDSを実現するうえで、依然としてシステムおよび記録材料の面において数多くの難問が存在するため、現状では実用化には未だしばらくの時間がかかると考えられている。

しかし近年になって、高性能かつ安価なプロジェクター向けの数百万画素の液晶素子や DMD (digital micromirror device) が量産され、市販品として比較的容易に入手可能な状況になってきた。また、高性能のデジタルスチルカメラやビデオカメラの広範な普及により、数百万画素の CCD や CMOS 撮像素子も大量かつ安価で市販されており、数年前に比べてシステム環境は予想以上に整ってきて

いる。さらに、国内ベンチャーのオプトウエア社が提案するコリニア方式は、信号光と参照光を同軸上の1光束にして媒体に記録照射できるようにしたもので、システム面での大きなブレイクスルーとなっており、これまで何度も開発の盛り上がりとは低迷を繰り返してきた HDS 実現性を大きく前進させるものである¹⁻³⁾。現在、実用化の点で残された最大の課題は、事実上ホログラム記録材料そのものであろう。ライトワンスタイプの記録材料としては、フォトポリマー材料の開発が大きく先行している。なかでも米国ベンチャー企業のアプリリス社、インフェーズ社より、最大の材料開発課題であった記録時の光重合収縮を大幅に改良した独自のフォトポリマー材料があいついでサンプル販売されるに至り、実用まであと一歩の段階にきている⁴⁾。また、国内材料メーカーによるフォトポリマー材料開発の進展も著しく、数多くの材料メーカーが開発にしのぎを削っている^{5,6)}。一方、リライタブル (RW) 用記録材料については、非破壊再生の問題や応答性の著しい悪さなど材料の開発課題が多く、実用化が大幅に遅延している。

旭硝子(株)中央研究所 (〒221-8755 横浜市神奈川区羽沢町 1150) E-mail: yuriko-kaida@agc.co.jp

表1 代表的なリライタブル (RW) 用記録材料とその特徴.

	材 料	企 業	特 徴
RW		富士ゼロックス 豊田中研 リソー	側鎖にアゾベンゼン基を有する結晶性/ 液晶性ポリエステルまたはポリウレタン T_g , T_m (融点) 制御容易
		バイエル	側鎖型液晶性ポリマー $T_g \sim 120^\circ\text{C}$ T_c (等方相転移温度) $> 160^\circ\text{C}$ $\Delta n \sim 0.5$ 1~2 mm 厚: $M\#$ (ダイナミックレンジ) $\sim 2-5$

本稿では、RW 用記録材料の最近の開発状況について詳細に紹介する。また、筆者らが、開発を行った液晶性ジアリールエテンを用いた記録材料とその記録特性についても紹介する。

1. RW 用記録材料の開発動向

書き換え可能な RW タイプの有機系記録材料は、フォトリフラクティブ系とフォトクロミック系に分類される。フォトリフラクティブ系材料としては液晶複合体⁷⁾や NLO 含有液晶ポリマー⁸⁾などがあげられるが、いずれも低電圧での駆動、および高速応答が課題である。一方、フォトクロミック系としては、欧州および国内ともにアゾベンゼンを含有する材料系を中心に研究開発が活発に進められてきた。いずれの記録材料も、基本的にはアゾベンゼン分子のシス-トランス (*cis-trans*) の光異性化反応を利用して屈折率変調 (Δn) を誘起するもので、現時点で最も盛んに研究されている。ドイツのバイエル社は、表1下段に示したフォトアドレシブポリマーとよばれる、側鎖にアゾベンゼンと液晶性部位を導入したポリマーを提案した^{4,9)}。この材料においては、直線偏光を照射するとアゾベンゼンはシス-トランスの光異性化反応を繰り返しながら、偏光方向に対して垂直に一軸配向していく。それに伴い液晶性部位の配向が誘起され、ポリマーは偏光方向に平行な光学軸をもつ複屈折性を発現する。この様子を図1に模式的に示した。バイエル社では、側鎖にアゾベンゼンと液晶性部位を有する共重合体構造の最適化を行い、薄膜において 0.5 を超える非常に大きな Δn を得た。ガラス転移温度 (T_g) は約 120°C であり、 160°C という高温であっても非常に安定した Δn を発現し、室温下で1年以上記録が

保持されることを報告している。しかし、この記録材料では、 568 nm , 100 mW/cm^2 のレーザー光で1つのホログラム記録に10秒以上の時間を要するため、感度を大幅に向上する必要がある。現状、バイエル社は単独の開発を断念し、2005年よりインフェーズ社との共同開発に移行している。また、デンマークのリソー (Risø) 国立研究所は、ハンガリー/スイスのオプティリンク社との共同開発により表1上段に示す側鎖にアゾベンゼンをもつポリエステル構造の記録材料を開発し、ホログラフィックメモリーカードの提案を行っていたが¹⁰⁾、2003年秋以降、事実上開発から撤退している。

一方、国内では富士ゼロックス社が、同様に側鎖にシアノアゾベンゼンを導入したポリエステル系の材料を用いて、ベクトル・ホログラフィックメモリーとよばれる偏光多重記録方式を提案している¹¹⁾。この方式は他の多重方式との組み合わせが可能であるため、高密度化の利点がある。また、豊田中研と静岡大学のグループも、ほぼ同系統の記録材料を発表している¹²⁾。この材料は 476.3 nm に大きな吸収ピークを示し、 600 nm 以上ではほとんど吸収がない。ガラス転移温度 T_g は 142°C で、記録されたデータは、 T_g 以上の温度である 150°C で1時間アニール処理した後も変化がないことが示された。この記録材料を用いて、2ウェイホログラム法¹²⁾により高密度記録の提案を行っている。2ウェイホログラム法では、表面レリーフホログラム記録、体積ホログラムの消去、偏光ホログラムの記録、そして2ウェイホログラム再生の順でプロセスが進み高密度記録が可能となるが、現状では実用レベルの光応答性と高い Δn を両立するまでには至っていない。そのほかにも、電気光学効果に基づいた有機フォトリフラクティブ

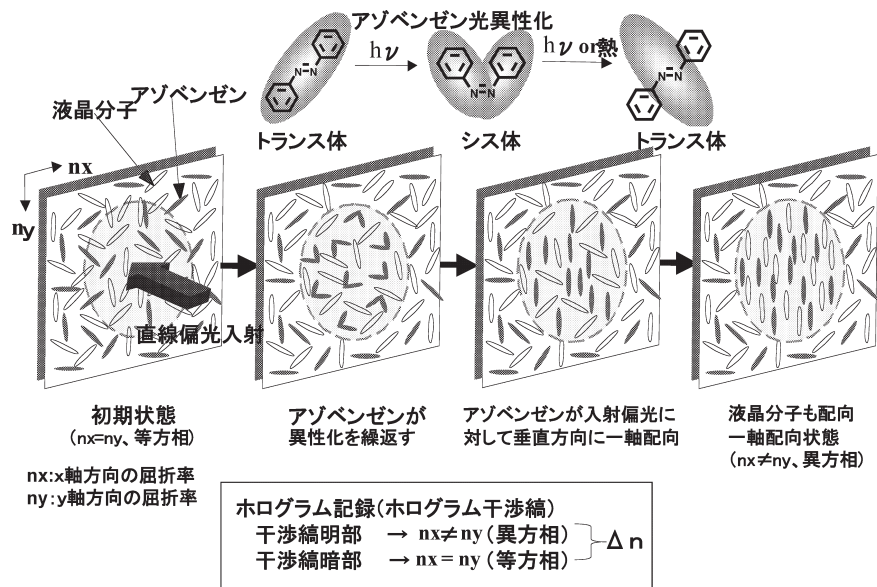


図1 直線偏光照射によるアゾベンゼン分子配向に誘起される液晶再配向の模式図。

材料系も盛んに研究されており、低電圧駆動、高速応答性および非破壊再生実現の可否がこれらの材料系の最大の課題である¹³⁻¹⁶⁾。

前述のインフェーズ社も、同社フォトポリマー材料と同様に、“2ケミストリー”¹⁷⁾とよばれる材料系でリライタブル用記録材料の開発を行っている。“2ケミストリー”材料系では、互いに相溶性の良好なマトリックスポリマーと感光性モノマーが化学的反応をすることなく光記録媒体を構成しており、光照射により感光性モノマーとマトリックスポリマーの二量化が可逆的に進行し、光記録が達成可能である¹⁸⁾。文献18によれば、感光性を有する材料としてアントラセン誘導体を用いており、記録光波長は410 nm、消去光波長は290 nmとのことであるが詳細は不明である。

次章以降では、筆者らが開発を行った液晶性ジアリールエテン (diarylethene; DE) を用いた記録材料について、その詳細を述べる。

2. 液晶性ジアリールエテン (DE) を用いた記録材料

2.1 基本材料コンセプト

フォトクロミック材料が示す高速応答性の光反応と液晶材料の大きな屈折率異方性を最大限に生かし、これらを複合化することでより大きな協奏効果を引き出すことにより高性能のRWタイプのHDS用記録材料が期待される。筆者らのグループでは図2に示すような、フォトクロミック化合物の異性化を、液晶の配向変化に誘起し、屈折率変調を発現させるというコンセプトに基づき、材料検討を行

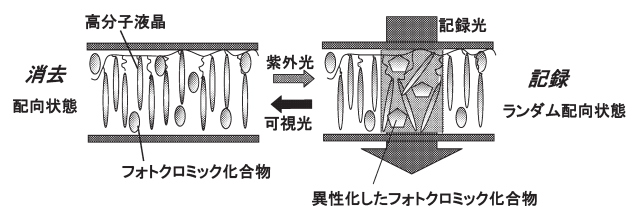


図2 フォトクロミック化合物の光異性化による液晶配向変化と記録/消去のコンセプト。

った。例えば、フォトクロミック化合物を含有する配向した高分子液晶 (図2左) に光を照射すると、フォトクロミック化合物が異性化し、光照射部の液晶がランダム配向状態へと変化する (図2右)。この液晶の配向変化により観察される屈折率変調を記録に用いる。DEは代表的な熱非可逆性フォトクロミック材料で¹⁹⁾、ホログラムに代表される光子モード記録において非常に有望な材料である。

典型的な光異性化反応による分子構造の変化と分光スペクトルを図3に示す。その開環-閉環反応は分子構造の最適化によりピコ秒応答を示し、かつ $10^4 \sim 10^6$ 回の繰り返し耐久性があることから、DEは次世代RW用の光記録材料の候補として非常に期待されている。

ホログラム記録材料として重要なファクターである屈折率変調量 (Δn) に関しては、光異性化によるDE単体の Δn はあまり大きくない¹⁹⁾。そのため、屈折率異方性の大きい液晶との組み合わせによる複合材料として有望と考えられることから、筆者らは液晶に対して高い相溶性を有し、かつ光異性化に伴うDEの物性変化を液晶配向状態に誘起可能なDE構造の探索を行っている²⁰⁻²²⁾。具体的に

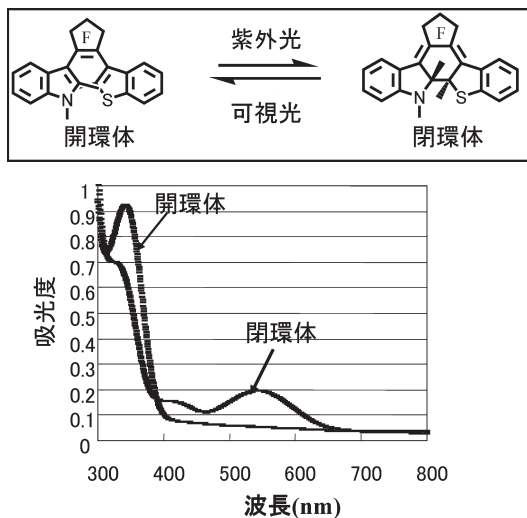


図3 典型的なジアリールエテン (DE) の光異性化反応と両異性体の分光スペクトル。

は、DE へのメソゲン基導入で、(1) 液晶性を発現する DE の創製、(2) 光異性化による DE の物性変化を液晶配向状態に誘起可能な構造、の検討を実施した。DE の光異性化により変化する物理量としては、一般的に吸収スペクトルおよび屈折率が知られているが、そのほかに誘電率あるいは立体構造が変化することが知られており、後者2つの物性変化を液晶配向に誘起させることが目的である。DE の異性化による液晶相転移の例としては、キラルな DE によるコレステリック (Ch)-ネマチック (N) 相転移が報告されているが²³⁾、N-等方 (I) 相転移については知られていない。

2.2 液晶性 DE 誘導体の創製

図4に示す対称性構造をもつジチエニル型およびジベンゾチオフェン型 DE において、数種類のメソゲン基を導入した DE 誘導体を合成し、それぞれについて液晶性を検討した。結果、図のメソゲン基 R に対して、アルキル鎖長 $n=8$ および 6 を導入した DE 誘導体の開環体でモノトロピックな液晶相の発現が確認された。液晶相は DE 骨格構造により異なっており、ジチエニル型 DE (a) はネマチック (N) 相のみを示し、ジベンゾチオフェン型 DE (b) はスメクチック相 (Sm) と N 相を示した。ジチエニル型 DE (a) (DEBO8: $n=8$) およびジベンゾチオフェン型 DE (b) (DEABO6: $n=6$) それぞれの相転移温度を図4に示す。DEABO6 は Sm 相由来の高い秩序性を示し、着色した閉環体ではその ϵ_{\max} ($=566$ nm) での二色比が15以上と高い値であった。しかしながら、DEABO6 開環体は、記録光に使用予定の 400 nm 帯に感度をもたない。一方、DEBO8 はその開環体が 400 nm 帯の光に対して感度を有

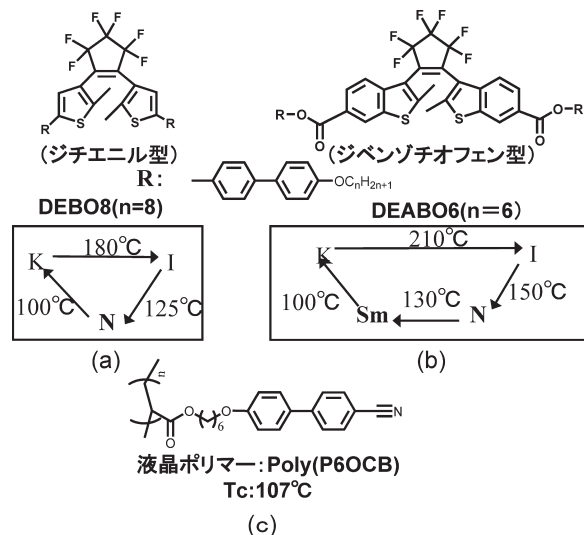


図4 (a) 液晶性を示すジチエニル型 DE 誘導体構造と相転移温度、(b) 液晶性を示すジベンゾチオフェン型 DE 誘導体構造と相転移温度、(c) 液晶性ポリマー構造と相転移温度。

しているため、青紫色レーザー光による記録材料として有望である。そこで、今後は DEBO8 について詳細な評価を行った。

2.3 DEBO8 の光誘起相転移

図5に示すように、配向膜付きガラスセル ($9 \mu\text{m}$ ギャップ) に等方相 (I 相) を示す温度で DEBO8 を注入し徐冷することで、DEBO8 が一軸配向したサンプルを作製した。このサンプルに、開環体が感度を有する 405 nm レーザー光と、閉環体が感度を有する 633 nm レーザー光をそれぞれ交互に照射し、両異性体が感度をもたない 830 nm のレーザー光で透過率をモニターしたところ、クロスニコル下において DEBO8 の光異性化に伴う可逆的な透過率変化が観測された。これは、DEBO8 の異性化により、液晶の配向状態が変化していることを示唆している。詳細な検討により、両異性体が異なる N-I 相転移温度 (T_c) を示すことが明らかになった。図6 (a) に示すように、閉環体は開環体に比べ低い T_c を示し、N 相-I 相の可逆的相転移は $120 \sim 125^\circ\text{C}$ の範囲で生じる。さらに、 $9 \mu\text{m}$ ギャップのガラスセルに DEBO8 と図4 (c) に示す液晶ポリマー (Poly(P6OCB)) との混合物を I 相にて注入し、前述の方法と同様にして液晶ポリマーが一軸配向した評価サンプルを作製した。DEBO8 と液晶ポリマーとの相溶性は良好で、DEBO8 を $5 \text{ mol}\%$ 含む材料系では、図6 (b) に示すように $105 \sim 108^\circ\text{C}$ の温度領域で可逆的 N-I 相転移が観察されている。これは、液晶ポリマー中に含まれるわずかに $5 \text{ mol}\%$ の DEBO8 の異性化により、液晶ポリマーの T_c が変化することを示しており、DEBO8 の異性化が液晶物性

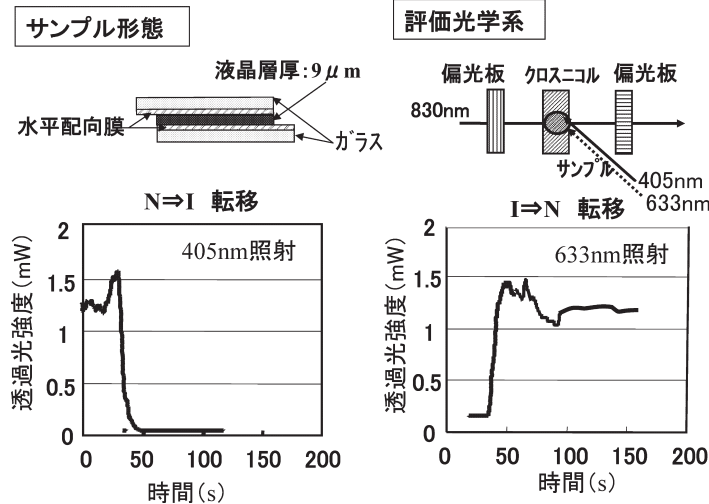


図5 レーザー照射時のDE光異性化によるクロスニコル下における830 nm モニター光の透過率変化。

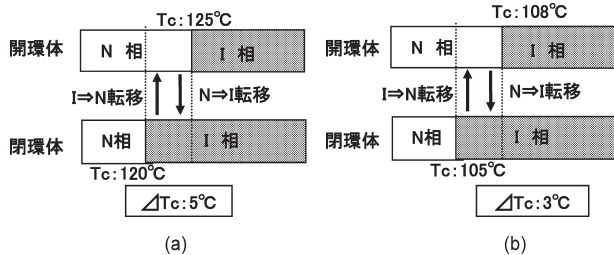


図6 (a) DEBO8の光異性化による相転移温度 (T_c) の変化, (b) DEBO8の光異性化により誘起されたDEBO8含有液晶ポリマー (Poly(P6OCB))の相転移温度 (T_c) の変化。

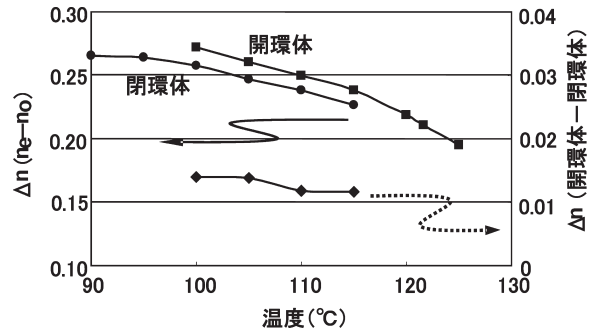


図7 480 nmにおける液晶性DE (DEBO8) 両異性体の Δn と光異性化による Δn の変化量。

に大きな影響を与えることを示している。DEBO8単体の場合と同様に、閉環体含有液晶ポリマーが開環体含有物に比べ低い T_c を示す。

DEと類似の反応により異性化するフルギド化合物をネマチック液晶に含有させた系においても、異性化により液晶の T_c が変化することが報告されている²⁴⁾。しかし、フルギドの場合は閉環体が開環体よりも高い T_c を示し、DEBO8の場合とは逆であることは興味深い。

480 nmにおけるDEBO8の開環体と閉環体のそれぞれの液晶温度領域での Δn の測定結果を図7に示す。光異性化に伴う Δn の変化量は0.01から0.015程度であり、前述したように、DEの場合と同様に液晶性を示すDEBO8単体においても屈折率変化そのものは非常に小さい。

3. 液晶性ジアリールエテン誘導体を用いたホログラム記録

3.1 回折効率の評価

筆者らの検討材料においては、材料中のDEが光異性化

することによって液晶ポリマーの配向が微視的に変化し、結果として記録層内に屈折率変調 (Δn) が発現する。ホログラム干渉記録では、記録レーザーの波長と入射角に応じた周期で Δn の分布として回折格子が記録される。本研究では、図8²⁵⁾に示したホログラム記録評価光学系を用い、開発材料の記録特性の評価を実施した。DEBO8の開環体が異性化可能な405 nmの青紫色半導体レーザーを記録光に、またDEBO8の両異性体が感度をもたない830 nmの赤外光半導体レーザーをプローブ光に用いたところ、上述の温度域において、405 nmレーザー光によるホログラム記録が可能であることが確認された。図9 (a)にDEBO8系でのホログラム記録メカニズムを、9 (b)にDEBO8単体と液晶ポリマー (Poly(P6OCB)) 複合体に対する Δn を、また図9 (c)に回折効率を示した²²⁾。二光束露光によりサンプル内部に光の強度分布が形成されると、DEBO8開環体は強度の強い領域 (明部) では閉環体へと異性化し、それに伴いN相から等方相への転移が起

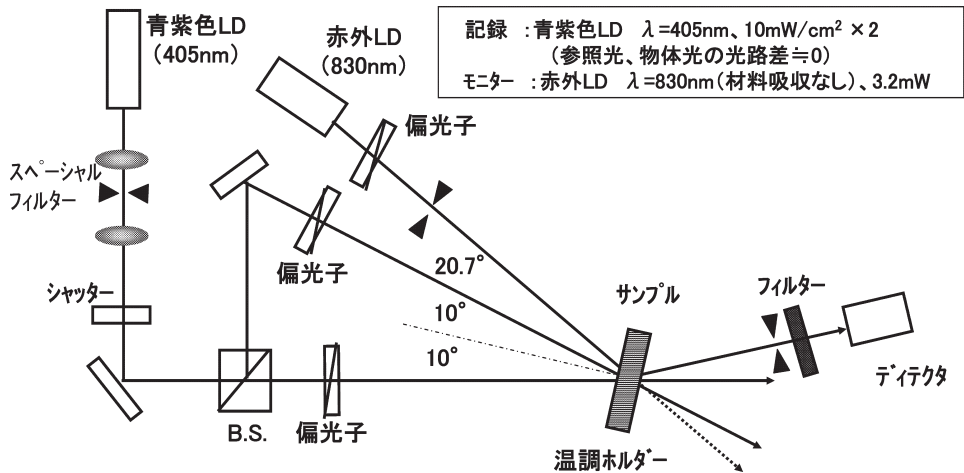


図8 実験に用いたホログラム記録評価用光学系セットアップ。

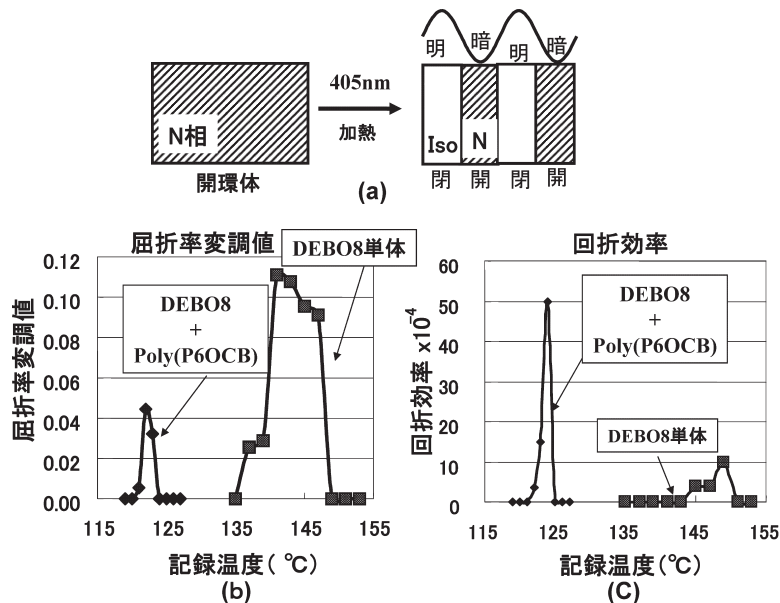


図9 (a) DEBO8系でのホログラム記録メカニズム, (b) 液晶性DE単体 (DEBO8) および液晶ポリマー (Poly(P6OCB)) 複合系でのホログラム記録結果, 屈折率変調値, (c) 回折効率。

こる。一方、暗部はN相を保持する。この屈折率変調によりホログラムが記録される。DEBO8単体は液晶ポリマー複合体より大きな Δn を示すが、回折効率は非常に小さい。これは、DEBO8単体が大きな屈折率異方性を有するものの配向保持性が非常に悪く、回折効率として観測されないことを意味している。一方、DEBO8を含む液晶ポリマーは狭い温度域ではあるが、比較的大きな回折効率を示し、DEBO8の異性化に誘起された配向変化の保持が確認された。しかし、現状では相転移温度の幅 ΔT_c が 3°C 程度と狭く、非破壊再生など実用化に向けた ΔT_c の拡大など、今後の継続的な材料開発が不可欠である。

3.2 ΔT_c 拡大の試み

ΔT_c の拡大のために、筆者らはDE誘導体の液晶への添加量増加が必須と考え、液晶に対しDE誘導体の相溶性を高める検討を行った。図10に示すDEBO8からベンゼン環の数を減らし、融点を低下させたDE-O8は、液晶性は示さないが、DEBO8に比べ液晶ポリマーに対する相溶性が良好である。このDE-O8を低分子液晶であるペンチルシアノビフェニル(5CB)中に添加したところ、DEBO8の場合と同様に液晶光誘起相転移が観測され、光誘起相転移を発現するためには液晶性は必須ではなく、液晶との相溶性がより重要であることが推察された。DE-O8は10

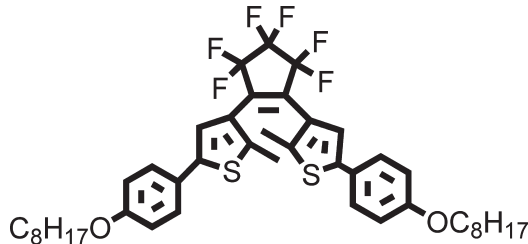


図10 DE-O8の構造。

mol%以上5CBに混合し、N-I相転移が生じる温度幅 ΔT もわずかであるが拡大を示した。

また、本稿では詳細を省略したが、DE単体の光異性化収率¹⁹⁾の増大も ΔT 拡大のためには重要な課題である。

DEBO8は開環体から閉環体への異性化収率が15%以下と小さい。異性化収率を増大することができれば、より大きな物性変化が発現すると予想される。

3.3 散乱特性の評価

また、ホログラム記録で問題となる散乱特性の評価を行った。光記録特性のひとつとして材料系の散乱強度は非常に重要なファクターである。ホログラフィックメモリーの場合、再生信号光強度が入力光に対して 10^{-5} 程度なので、再生方向への散乱はそれよりも1桁以上低くないとS/N比が低下し信号検出が不可能になる。散乱レベルは入力光に対して 10^{-6} Srad⁻¹/μm程度以下であることが望まれる。ここで、Srad(ステラジアン)とは単位立体角を表す単位で、図11に示すように半径1cmの球面上で1cm²の表面積を切り取る立体角を表す。アプリリス社フォトポリマーに関して、メディアスペックとして「 $\leq 10^{-6}$ Srad⁻¹/μm (@200~300 μm厚)」としている。

材料の散乱評価法としてヘイズ測定が知られているが、ヘイズ値は再生光に対する全散乱光の割合であり、ホログラフィックメモリーで問題になる信号光方向の散乱レベルを表しているわけではない。そのため、図11に示す測定

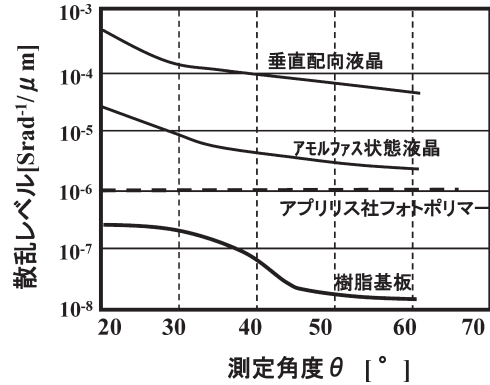


図12 散乱特性評価結果。

系を用いて散乱光強度を測定し、単位立体角、単位厚さ当たりの散乱強度への換算式を用い算出した。波長532nmの固体レーザーをサンプルに照射し、その散乱光をディテクターの位置(角度、距離)を変えて測定した。散乱光の角度依存性から、信号(回折)光方向の散乱強度も定量化が可能となる。

アモルファス状態の液晶材料と垂直配向した液晶および樹脂基板単体の散乱レベルの角度依存性を測定した例が図12である。サンプル垂直方向を0°として、20°から60°の測定角度(θ)にて測定を行った。アプリリス社フォトポリマーの散乱レベル 10^{-6} Srad⁻¹/μmに対して、液晶系材料は20°の角度において、アモルファス状態の液晶材料系で数十倍、さらに垂直配向した液晶材料系では数百倍も高い散乱レベルにあることがわかった。記録材料として、液晶のもつ Δn を有効に活用する材料構成はダイナミックレンジを拡大するうえで効果的と考えられるが、一方、多重記録の際に生じる配向乱れに伴う散乱の増大はダイナミックレンジを著しく低下させるだけでなく信号ノイズも増大させる。そのため、これらのバランス可能な材料構成の最適化が液晶系記録材料の成功の可否を握っていると思われる。

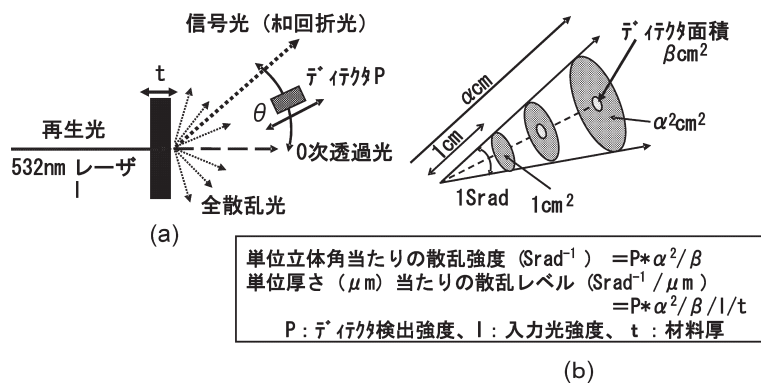


図11 (a) 散乱強度測定光学系, (b) 単位系の換算方法。

RW型記録材料の最大の課題は非破壊再生の実現である。信号光と参照光の干渉によって形成された透過型回折格子は、信号読み出し時の再生光によって媒体全域にわたり光反応が進むため、回折格子のコントラストが徐々に低下する。その結果、再生信号光は弱まり、最終的には全く読み出しが不可能になる。この現象が、記録された情報の再生破壊である。これを防止するためには、材料設計の面では記録光と再生光に対して有効な非線形光学効果の取り込み、二光子吸収、熱あるいは電界・磁界などをゲート機能として考慮に入れた材料開発が不可欠である。非破壊再生が可能な材料の報告例もいくつかみられるが、未だ十分なものは開発されていないのが現状である。さらに、その他の課題として、フォトポリマーなどのライトワンスタイルの材料と同様に、高い回折効率、高感度化、低散乱性、均一な厚膜形成および長期信頼性などがあげられる。インフェーズ社や日立マクセル社のロードマップによれば、フォトポリマー媒体によるライトワンスタイルのホログラフィックメモリーは2007年中にははいよいよ市場投入される見込みである。一般に、RW型記録材料における一連の課題はフォトポリマー材料に比べて格段に難易度が高く、材料開発の面でもすでに数年の遅れがある。現時点で未だ性能の見通しが十分に得られていない項目も多く、実用化の時期は2010年以降になると考えられる。

文 献

- 1) Y. Kaneko, N. Kitazaki, J. Li, X. Tan, H. Narumi, M. Kinoshita, K. Suzuki, H. Horimai, S. Satoh and H. Sasaki: "High density recording of collinear holographic data storage," *ISOM/ODS2005*, MP22 (2005).
- 2) 堀米秀嘉: "コリニア方式ホログラフィックメモリー", *光学*, **32** (2003) 542-545.
- 3) K. Ishioka, K. Tanaka, N. Kojima, A. Fukumoto and M. Sugiki: "Optical collinear holographic recording system using a blue laser and a random phase mask," *ISOM/ODS2005*, ThE3 (2005).
- 4) L. Dhar, M. G. Schnoes, H. E. Katz, A. Hale, M. L. Schilling and A. L. Harris: "Photopolymers for digital holographic data storage," *Holographic Data Storage*, eds. H. J. Coufal *et al.* (Springer, New York, 2000) pp. 199-208.
- 5) S. Satoh, S. Hattori and H. Sasaki: "Evaluation of multiplex hologram by variable pitch spiral method," *ISOM 2004*, Th-J-06 (2004).
- 6) 服部 覚, 佐藤 伸: 東亜合成研究年報 TREND, **8** (2005) 26-28.
- 7) H. Ono, T. Kawamura, N. M. Frias, K. Kitamura, N. Kawatsuki, H. Norisada and T. Yamamoto: "Holographic Bragg grating generation in photorefractive polymer-dissolved liquid-crystal composites," *J. Appl. Phys.*, **88** (2000) 3853-3858.
- 8) G. B. Jung, T. Akazawa, T. Mutai, R. Fujimura, S. Ashihara, T. Shimura, K. Araki and K. Kuroda: "Highly stable host-guest photorefractive polymer composite with low glass transition temperature," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 102-106.
- 9) J. Eickmans, T. Bieringer, S. Kostromine, H. Berneth and R. Thoma: "Photoaddressable polymers: A new class of materials for optical data storage and holographic memories," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1835-1836.
- 10) E. Lorincz, P. Koppa, F. Ujhelyi, P. I. Richter, G. Szarvas, G. Erdei and P. S. Ramanujam: "Holographic memory card system using polarization holography," *ODS Conference Digest*, WA5 (2000) pp. 161-163.
- 11) K. Kawano, J. Minabe and T. Ishii: "Digital data storage and computing by a vector holographic memory system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) 1841-1845.
- 12) Y. Aoshima, C. Egami, Y. Kawata, O. Sugihara, M. Tsuchimori, O. Watanabe, Y. Che, J. Fujimura and N. Okamoto: "Two way holographic image storage in photosensitive polymers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) 1619-1623.
- 13) H. Ono, T. Tamoto, A. Emoto and N. Kawatsuki: "Holographic recording in photoreactive monomer/polymer composites," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 1781-1786.
- 14) 佐々木健夫: "液晶フォトリフラクティブ材料", *液晶*, **6** (2002) 168-180.
- 15) N. Tsutsumi, T. Murao and W. Sakai: "Photorefractive response of polymeric composites with pendant triphenylamine moiety," *Macromolecules*, **38** (2005) 7521-7523.
- 16) 平尾明子, 松本一紀, 塚本隆之, 西沢秀之: "フォトリフラクティブポリマーとその応用", *レーザー研究*, **30** (2002) 166-170.
- 17) L. Dhar, M. G. Schnoes, T. L. Wysocki, H. Bair, M. Schilling and C. Boyd: "Temperature-induced changes in photopolymer volume holograms," *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 1337-1339.
- 18) ティモシー トレントラー, メリンダ シュノーズ, マイケル コールズ, シュアン ファン: 特表 2006-505807.
- 19) M. Irie: "Diarylethenes for memories and switches," *Chem. Rev.*, **100** (2000) 1685-1716.
- 20) 桜井宏巳: ホログラフィックメモリーのシステムと材料, 志村 努監修 (シーエムシー出版, 2006) pp. 1685-1716.
- 21) Y. Kaida, Y. Yamamoto, H. Sakamoto, M. Ono and H. Sakurai: "Liquid crystalline diarylethenes for holographic storages," *Abst. of XXIst IUPAC Sym. on Photochemistry* (2006) p. 223.
- 22) Y. Kaida, Y. Yamamoto, H. Sakamoto, M. Ono and H. Sakurai: "Liquid crystalline diarylethenes for holographic storages," *Proc. of 7th Int. Sym. on Functional π -Electron Systems*, IL-8 (2006).
- 23) C. Denekamp and B. L. Feringa: "Optically active diarylethenes for multimode photoswitching between liquid-crystalline phases," *Adv. Mater.*, **10** (1998) 1082-1083.
- 24) H. Allinson and F. Gleeson: "Physical properties of mixtures of low molar mass nematic liquid crystals with photochromic fulgide guest dyes," *Liq. Cryst.*, **14** (1993) 1469-1478.
- 25) 桜井宏巳, 小野元司: "フォトポリマーを用いたホログラフィックデータ・ストレージ", *オプトロニクス*, **272** (2004) 118-124.

(2007年6月14日受理)