

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20360029

研究課題名（和文） 光学異方性を有する光波電界ベクトル記録媒体を用いた3次元ベクトルホログラムの創成

研究課題名（英文） Formation of three-dimensional vector hologram using light-electric-vector-recording-medium with optical anisotropy

研究代表者

小野 浩司（ONO HIROSHI）

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：10283029

研究成果の概要（和文）：

本研究課題において、「3次元ベクトルホログラム」と呼ぶホログラム記録における新しい概念を提案した。3次元ベクトルホログラムは、一軸に初期配向され、結果として大きな光学異方性を有する光反応性の液晶材料中に記録された。異方性媒体中の光波伝搬速度が偏光状態に依存する効果によって、液晶分子の光再配向の3次元空間分布が誘起される。これらの光学異方性の高度な3次元空間分布によって引き起こされる種々の興味深い光学現象についての系統的な考察を行った。

研究成果の概要（英文）：

We presented a novel concept for vector holograms called three-dimensional vector holograms. The three-dimensional vector holograms were recorded in photoreactive liquid crystalline materials with initial alignment. By considering an effect that the propagation velocity of light in anisotropic media depends on the polarization state, we induced higher-order molecular reorientation with periodicity, and observed their optical properties. As a result, it was demonstrated that the three-dimensional vector holograms exhibit many interesting features.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	11,200,000	3,360,000	14,560,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：光制御

1. 研究開始当初の背景

光波は大容量の情報を効率よく取り扱うのに適しており、今後の高度情報化社会のさらなる進展に伴い、大容量の情報を高速に取り扱う光技術の重要性がますます増大す

ることが予想される。このような社会の要請に応えるためには、限られた空間でより多くの情報を適切なコストで取り扱うことが重要である。このような問題を解決するためには、①多次元光学系の構築、②ベクトル波制

御光デバイスの開発、③ベクトル波としての概念を取り入れた光情報処理技術の提案、といったことが重要となる。多次元光学系を構築するためには、光波の伝播方向を多次元的に制御することが必要であり、多次元回折格子素子を用いることが有効である。またベクトル波制御可能な光デバイスを創成するためには、多次元的な光学異方性分布を高度に制御することが必要である。例えば、多次元回折と同時に偏光状態を制御するといったことが可能となれば、偏光素子が不要となり、コンパクトで高機能な光学システムの構築に大きく貢献すると考えられる。このような観点から、我々は、「基盤研究（B）183600365001」において、光波照射による液晶分子の熱安定配向制御が可能な光架橋性高分子液晶を用いて、2次元の周期的光学異方性分布が制御された偏光変換型回折格子素子の研究を行ってきた。本提案では、この研究をさらに発展させ、光記録媒体の光学異方性を巧みに利用した、素子の厚み方向の光学異方性分布の制御が可能な新手法を提案し、3次元ベクトルホログラム素子の構築を目指す。さらに、本研究では、上記新手法を実時間ホログラムの概念にも取り入れ、3次元の光学異方性を実時間で制御し、ベクトル波としての概念を取り入れた高度な光情報処理技術の新規概念の提案を試みる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、特に液晶性に起因する光学異方性を有するホログラム記録媒体を用い、光学異方性媒体中におけるベクトル波の伝搬特性（伝搬に伴う偏光変調特性）を利用し、①ホログラム記録媒体の厚さ方向も含めた3次元の光学異方性分布（分子配向分布）を制御する手段とその光学理論を確立し、②高機能光デバイスやベクトルホログラム光情報処理の概念を提案することにある。例えば一軸異方性を有する光学媒体中で、光波ベクトルは、常光と異常光の2つの伝搬モードで伝搬するため、光波伝搬に伴い偏光状態が変調される。もし、上記要素技術の研究状況で示したような偏光によって分子配向させることが可能な材料を用いると、厚さ方向に分子の配向方向が変調された構造を創成することが可能となることを期待される。現在までに、ホログラム記録とその回折特性に関する研究は数多くなされてきているが、記録媒体の光学異方性を考慮し、3次元的な異方性分布を有するホログラム記録（3次元ベクトルホログラム）及びその光学特性に関する研究は見当たらない。また、我々が現在までに行ってきた研究も含め、ホログラム記録媒体としての光機能性液晶の材料研究が盛んになされているが（「液晶」第11巻、第

3号、207頁（2007）、「3次元ベクトルホログラム」の概念の導入はなされておらず、本申請による研究によってホログラム記録・再生分野への新規な分野の確立がなされることを期待できる。

さらに上記研究の実施状況で示したように、本申請者等が研究してきている光架橋性高分子液晶を用いた光配向技術は、他の方法に比べて多くの利点を持っており、このような特徴を有した光配向技術は他には見当たらない。さらに、本申請に関わる研究が目的とする3次元ベクトルホログラムの概念を導入した高機能光デバイスを指向したものは見当たらない。

以下に本研究によって科学研究費の交付を希望する期間内に明らかにする点、あるいは達成が期待できる成果を示す。

(1) 分子配向（光学異方性）が3次元に分布した「3次元ベクトルホログラム」の概念を新規に提案する。

(2) 光学異方性を有するホログラム記録材料を用いた「3次元ベクトルホログラム」の形成技術を確認する。

(3) 分子配向（光学異方性）が3次元に分布した「3次元ベクトルホログラム」の光学特性のシミュレーション手法を確立し、ホログラム分野に新たな展開を図る。

(4) 「3次元ベクトルホログラム」を本申請者等が研究してきた光架橋性高分子液晶に適用し、新規な高機能光学デバイスを提案する。さらに、実時間ホログラム材料への展開も図り、偏光を積極的に利用した光情報処理分野へと発展させる。

高度に制御された分子配向制御に関する研究は国内外で注目されている。本研究では、光学異方性媒体中での偏光変調に着目した3次元ベクトルホログラムの概念の確立とその応用を目指す。

3. 研究の方法

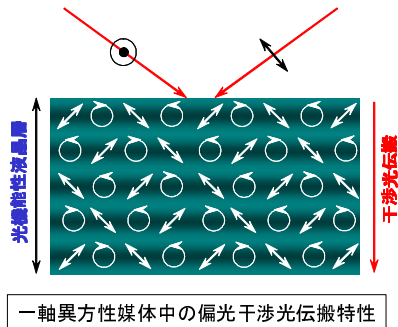
以下に目的を達成するための方法を順次示す。

(1) 3次元ベクトルホログラムの概念の提案と実験的・理論的実証

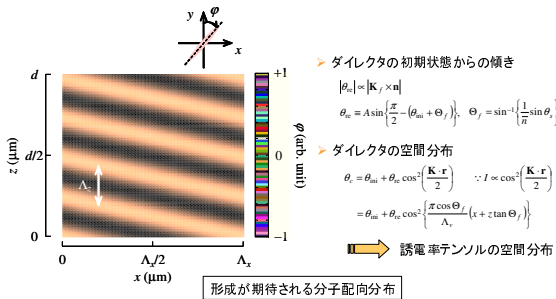
3次元ベクトルホログラムの概念を新規に提案し、光学異方性を有する光機能性液晶を用いて、実験及び計算によって実証を行う。具体的には、前述したアゾベンゼンをドーブした光機能性液晶を一軸配向したホログラム記録媒体を用い、偏光ホログラムの手法を用いて3次元ベクトルホログラムの形成を試みる。さらに3次元的に分布した光学異方性媒体の光学特性について、シミュレーション技術を確認する。

光学的異方性を有する媒体中を伝搬す

る光波は、偏光状態が変調されながら伝搬する。そのような媒体に、干渉光を照射すると、膜内部で特有の偏光分布が形成されると考えられる。



この時の変調の周期は、書き込み光の波長と媒体の異方性の大きさの関数として与えられる。大きな光学異方性を有する液晶系材料を用いることによって光波伝搬方向への周期が $2\mu\text{m}$ 程度となり、 $10\mu\text{m}$ 程度の厚さの媒体中に5周期程度の変調構造がなされることとなり、意図した3次元ベクトルホログラム構造が形成されることが十分に期待できる。今、光波電界によって分子配向方向が制御可能な光機能性液晶媒体をホログラム記録材料として用い、分子再配列角度が光波電界振幅に比例すると仮定し、分子配向分布をシミュレーションすると下図のような3次元ベクトルホログラムの形成が期待できる。

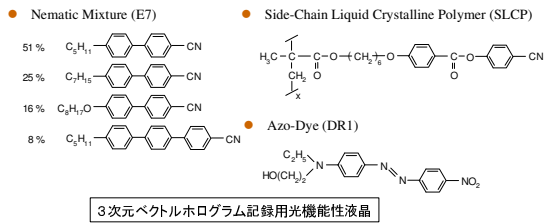


このような分子配向分布は3次元的に分布した光学異方性を与え、特徴ある偏光制御機能の発現が期待され、従来にない概念の高機能光デバイスや偏光の概念を取り込んだ光情報処理等への応用も検討する。

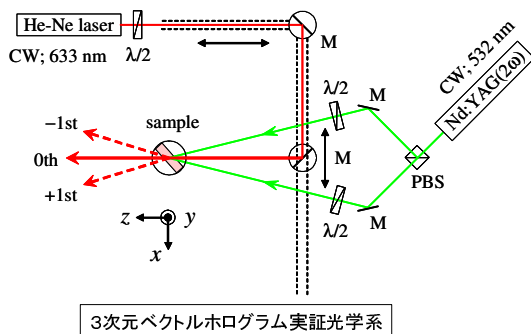
(2) 実験的実証

実験的に実証するためには、光波電界によって分子配向方向が制御可能な光機能性液晶媒体をホログラム記録材料として用いる必要がある。我々は、現在までにアゾベンゼン色素を低分子液晶にドーブした材料系の光機能に関する研究を行ってきており (Opt. Lett. 30 (2005) 1950, Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 1579)、下図に示すような、

低分子ネマチック液晶、高分子液晶、アゾ色素、からなる複合材料系が、3次元ベクトルホログラム記録用光機能性液晶材料の候補となりうる基本特性を示すことを見出しており、本研究の実証実験に用いる。



具体的には、下図に示すような「3次元ベクトルホログラム実証光学系」を構築し、3次元ベクトルホログラムの書き込み・評価・実証を行う。



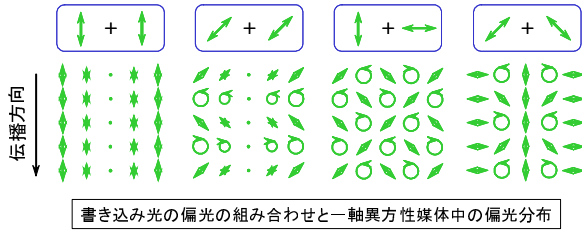
上図の実証光学系は、実時間3次元ベクトルホログラムの実証を目的としており、書き込み光として用いる高出力 Nd:YAG レーザー (波長 532 nm)、プローブとして用いる He-Ne レーザー (波長 633 nm) からなる。さらに、3次元ベクトルホログラムでは、光学的異方性が3次元的に分布した構造が形成されるため、書き込み光の入射角依存性を観察するための回転試料台、読み出し光の入射角依存性を観察するための移動式ミラー、などの光学系からなっている。以上のような光学系を高性能防振台の上に構築し、3次元ベクトルホログラムを様々な角度から形成・観察する。

(3) 光学計算

我々は、現在までに、光架橋性高分子液晶を用いた1次元偏光ホログラムに関する研究を行ってきており、異方性を有する回折格子偏光解析の方法として Jones 法が有効であることがわかっている (J. Appl. Phys. 94 (2003) 1298, J. Appl. Phys. 100 (2006) 013522)。しかしながら通常の Jones 法は、光波の伝搬方向に複雑な異方性構造を含む媒体中の伝搬をシミュレーションするには適切でないことが予想され、適宜 Extended Jones Matrix 法、 4×4 Matrix 法、

FDTD(Finite Different Time Domain)法、と自由空間における角スペクトルによる光波伝搬理論を組み合わせることで、3次元ベクトルホログラムの光学特性の計算手法を確立する。

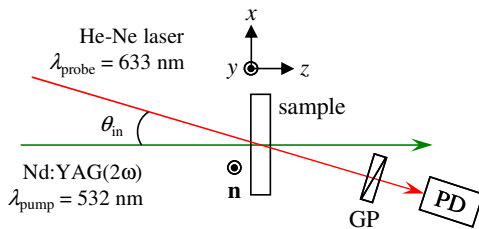
(4) 種々の3次元ベクトルの創成



「3次元ベクトルホログラム」は、光波照射による分子配向制御機能を有するホログラム記録媒体の光学異方性を巧みに利用することによって形成される。このため、入射する書き込み光の偏光状態や記録媒体の持つ異方性(配向状態)を制御することによって様々な種類の3次元ベクトルホログラムの形成が期待できる。例えば、種々の偏光の組み合わせの干渉光を一軸異方性媒体に照射すると、上図のような偏光の空間分布が形成されることが期待される。さらに、ホログラム記録媒体として液晶を用いると、捻れた配向構造(Twisted Nematic, TN構造)など、特異な異方性構造を容易に形成でき、そのような媒体を用いることによってさらに多様な3次元ベクトルホログラムの形成が可能となることが考えられ、ホログラム分野における新規な技術的・学問的分野の形成が期待できる。

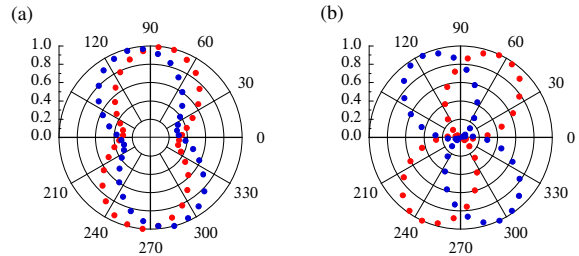
4. 研究成果

低分子ネマチック液晶、高分子液晶、アゾ色素、からなる複合材料系が、3次元ベクトルホログラム記録用光機能性液晶材料となり得るかどうかについて、下図の実験系により実証した。

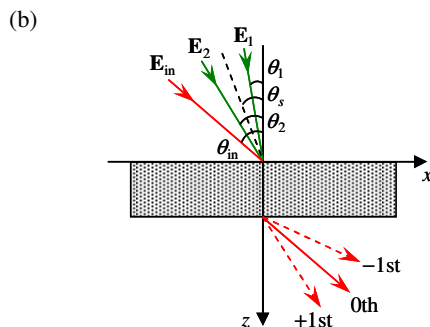
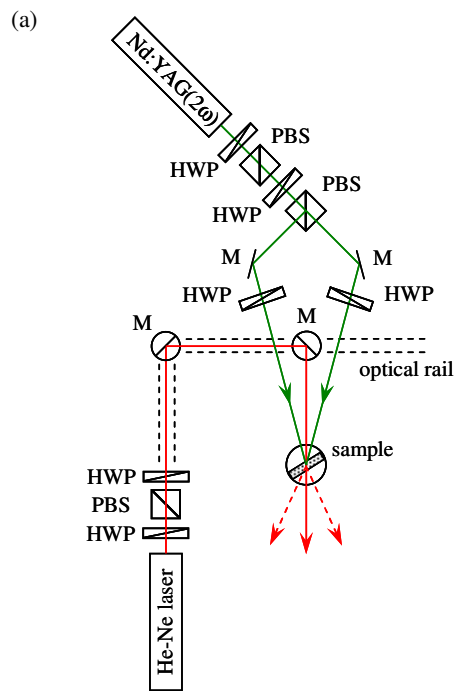


励起光には波長 532 nm の Nd:YAG レーザーの第 2 高調波を、観測光には波長 633 nm の He-Ne レーザーを用いた。サンプルはダイレクタが y 軸と平行、基板法線が x 軸と平行となるように配置し、これを垂直入射で励起する。このとき、入射面を xz 面、偏光を s

偏光として観測光を照射し、サンプル透過後の偏光状態を観測することにより誘起された配向変化について検討を行なっている。(a)励起光を±45度方位の直線偏光とした場合、(b)励起光を左右の円偏光とした場合、における透過観測光の偏光状態の測定結果(polar plot)を下図に示す。

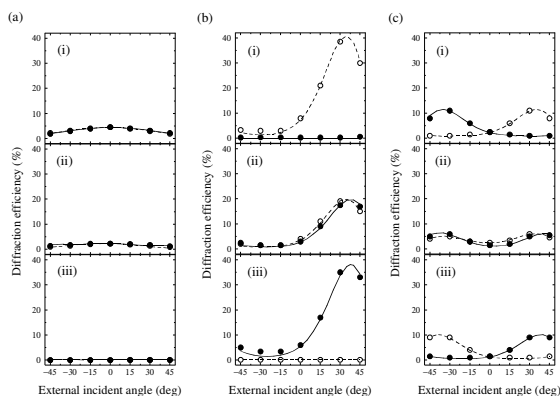


この結果から、xy面における液晶ダイレクタの傾きが生じたことが推測される。励起光の偏光変調に起因した膜厚方向への配向分布を考慮することにより、アゾ色素の偏光選択的な分子再配列に基づいて説明することが可能となり、励起光の伝播方向への偏光変調に基づく3次元ベクトルホログラム記録の可能性を示唆している。

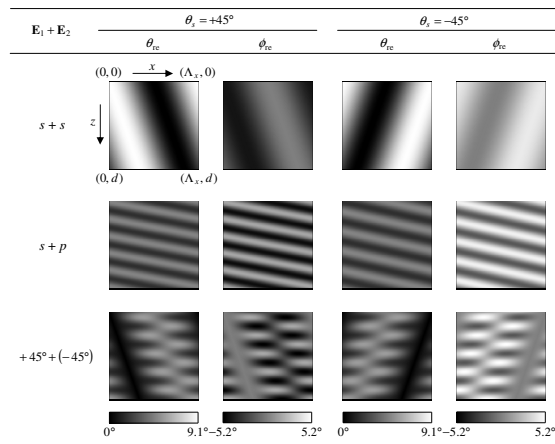


上記の検討によって本材料は3次元ベクトルホログラムが記録可能な材料であることが考えられる。そこで種々の条件下で偏光干渉光の照射によるホログラム記録を試み、誘起された格子構造の回折特性を詳細に検討することで、実際に3次元ベクトルホログラム記録がなされているか否かを検討した。用いた実験系を上図に示す。

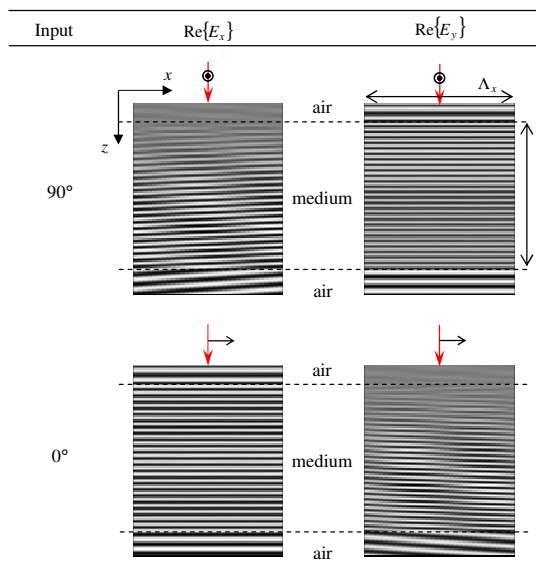
記録光には波長 532 nm の Nd:YAG レーザーの第 2 高調波を用い、2 光波に分離した後サンプル中で干渉させるような配置としている。強度はそれぞれ 900 mW/cm² とした。2 光波の偏光状態及び入射角度、或いはサンプルのダイレクタの配置は様々に変化した。このとき、観測光として波長 633 nm の He-Ne レーザー光を照射し、この偏光状態と入射角を変化させて回折光の強度や偏光状態を測定することにより形成された格子構造の評価を行なった。記録光の偏光状態を、(a) *s* 偏光と *s* 偏光、(b) *s* 偏光と *p* 偏光、(c) ± 45 度方位の直線偏光として誘起した3種類の異方的構造体に対する回折効率の測定結果を下図に示す。



いずれの条件においても、提案した3次元ベクトルホログラムの理論の正当性を実証することができた。この際に生じた分子再配列の3次元分布は下図のようになる。



異方的構造体内部及びその近傍での FDTD 法による電界分布 (複素電界の実部の分布) の計算結果を下図にそれぞれ示す。入射光を 90 度方位の直線偏光とした場合、入射光は電界の成分を持たないが、構造体中を伝播するに従って徐々に電界の成分が生じていることが分かる。また、その成分が構造体透過後、-1 次の回折方向へ伝播している (+1 次の回折方向を法線とした波面が形成されている) ことも分かる。これらは、実験事実と一致するものであり、このような異方的構造体の回折光の偏光状態についても、理論的に再現可能であることが確認されたと考えられる。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 31 件)

- 1) Coupled-wave analysis of vector holograms. 2. Reflective gratings formed in photoanisotropic medium with uniaxial birefringence, T. Sasaki, K. Miura, O. Hanaizumi, A. Emoto, and H. Ono, Appl. Opt. 50 (2011) 454-459.
- 2) Coupled-wave analysis of vector holograms: effects of modulation depth of anisotropic phase retardation, T. Sasaki, K. Miura, O. Hanaizumi, A. Emoto and H. Ono, Appl. Opt. 49 (2010) 5205-5211.
- 3) Effects of recording wavelength on three-dimensional vector holograms in photoreactive liquid crystal composites, T. Sasaki, O. Hanaizumi, T. Iwato, A. Emoto, N. Kawatsuki and H.

- Ono, Opt. Commun. 283 (2010) 528-531.
- 4) Reconstruction of polarized optical images in two- and three-dimensional vector holograms, H. Ono, K. Suzuki, T. Sasaki, T. Iwato, A. Emoto, T. Shioda and N. Kawatsuki, J. Appl. Phys. 106 (2009) 083109.
 - 5) Three-dimensional vector holograms in photoreactive polymer dissolved liquid crystal composite, T. Sasaki, H. Ono and N. Kawatsuki, Opt. Rev. 16 (2009) 338-341.
 - 6) One- and two-dimensional anisotropic diffractive gratings formed by periodic orthogonal molecular alignment in a hydrogen-bonded liquid crystalline polymer, A. Emoto, S. Manabe, T. Shioda, H. Ono, and N. Kawatsuki, J. Appl. Phys. 105 (2009) 103514.
 - 7) Vector holograms using radially polarized light, H. Ono, H. Wakabayashi, T. Sasaki, A. Emoto, T. Shioda and N. Kawatsuki, Appl. Phys. Lett. 94 (2009) 071114.
 - 8) Anisotropic photonic structures induced by three-dimensional vector holography in dye-doped liquid crystals, T. Sasaki, H. Ono and N. Kawatsuki, J. Appl. Phys. 104 (2008) 043524.
 - 9) Three-dimensional vector holograms in anisotropic photoreactive liquid crystal composites, T. Sasaki, H. Ono and N. Kawatsuki, Appl. Opt. 47 (2008) 2192-2200.
 - 10) Anisotropic gratings formed by photoinduced molecular reorientation in dye-doped polymer dissolved liquid crystal composites, T. Sasaki, H. Ono and N. Kawatsuki, Jpn. J. Appl. Phys. 47 (2008) 441-445.

[学会発表] (計 29 件)

- 1) 2010年11月8日～10日 Optics Photonics Japan 2010 (中央大学) 液晶材料中へ記録されたベクトルホログラムの結合波解析、佐々木友之、三浦健太、花泉修、江本顕雄、小野浩司
- 2) 2010年7月8日～9日 第35回光学シンポジウム (招待講演) (東京大学) 光機能性液晶へのベクトルホログラム記録と偏光制御回折格子、小野浩司、江本顕雄、塩田達俊、佐々木友之、川月喜弘
- 3) 2009年3月 第56回応用物理学関係連合講演会予稿集 第3分冊 (筑波

大学) 光機能性高分子液晶を用いた3次元ベクトルホログラム記録への記録波長の影響、佐々木友之、江本顕雄、塩田達俊、川月喜弘、小野浩司

- 4) 2009年2月 学振142委員会・有機光エレクトロニクス部会・第31回研究会 (東京理科大学) 光波による液晶分子配向制御と多次元異方性構造体による高度光制御、小野浩司
- 5) 2008年11月 Optics & Photonics Japan 2008 (つくば国際会議場) 光学異方性を有する記録媒体を用いた3次元ベクトルホログラムの形成、佐々木友之、若林宏幸、江本顕雄、塩田達俊、川月喜弘、小野浩司
- 6) 2008年6月 6th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF 08, Taiwan) Three-dimensional vector hologram in photoreactive polymer dissolved liquid crystal composites, T. Sasaki, H. Ono and N. Kawatsuki.

[図書] (計 2 件)

- 1) Photoinduced Reorientation of Photo-Cross-Linkable Polymer Liquid Crystals and Applications to Highly Functionalized Optical Devices, H. Ono and N. Kawatsuki, Hand book of Organic Electronics and Photonics (American Scientific Publishers, 2008, Edited by M. S. A. Adbel Mottaleb and H. S. Nalwa).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://optik.nagaokaut.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 浩司 (ONO HIROSHI)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号：10283029

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし