

2007 年 光 学 界 の 進 展

「光学界の進展」は、過去1年間の光学の研究活動状況ならびに進歩発展について解説したものです。本解説における検索範囲は、応用物理学会を中心として、他に関連する学会・研究会・国際会議等における発表（口頭および論文）で、本文中での検索学会等の名称は下表のごとく略記法を用いています。

表 「光学界の進展」引用学会等の省略表記

略 称	学会・講演会名称
秋季応物講演会	秋季応用物理学会学術講演会
春季応物講演会	春季応用物理学関係連合講演会
秋季物理講演会	日本物理学会秋季大会
物理学会年会	日本物理学会年次大会
照明学会	照明学会全国大会
信学会	電子情報通信学会
<i>OPJ</i>	Opics and Photonics Japan
<i>ASPE</i>	American Society for Precision Engineering Annual Meeting
<i>CLEO/Europe-IQEC</i>	The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference
<i>CLEO/QELS</i>	Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics
<i>ECOC</i>	European Conference on Optical Communication
<i>EIPBN</i>	International Conference on Electron, Ion, Photon Beam Technology and Nanofabrication
<i>FOE</i>	Fiber Optic Exposition
<i>GFP</i>	International Conference on Group IV Photonics
<i>ISCS</i>	International Symposium on Compound Semiconductors
<i>ISOM</i>	International Symposium on Optical Memory
<i>Int. EUVL Symp.</i>	International Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) Symposium
<i>MNC</i>	International Microprocesses and Nanotechnology Conference
<i>MOC</i>	Microoptics Conference
<i>ODS</i>	Optical Data Storage
<i>OFC</i>	Optical Fiber Communication Conference
<i>SID</i>	Society for Information Display

1. 光物理

東北大 石原照也

1.1 概要

2007年10月にマイクロ波から光波までのメタマテリアル全般に関するはじめての国際会議がローマで開かれた¹⁾。メタマテリアルとは電磁波の波長よりも小さい構造を用いて、電磁場を制御し、負の屈折率、超分解能イメージング、クローキング（透明化）などの異常な現象を生じさせるものである。日本においてはまだ認知度が低いが、メタマテリアルという名で呼ばれていなくても関連する話題は多い。そのような観点から2007年の光物理を振り返ってみる。

1.2 フォトニック結晶

3層積層型二次元フォトニック結晶スラブの熱輻射スペクトルがFDTD法で解析された²⁾。

ダブルヘテロ型光ナノ共振器でモード体積が小さく、 Q 値10億の設計が報告された³⁾。また Q 値の動的制御について進展があった⁴⁾。フォトニック結晶において、強い屈折率変調がある場合の等方的な負の屈折に基づく結像現象について数値的な解析が行われ、屈折率比が1に近い条件で収差が劇的に減少することが確認された。さらに2つの結晶の間にself-collimator条件を満たすフォトニック結晶をはさむことで、結像を長距離伝送できることも確かめられた⁵⁾。フォトニック結晶スラブスーパーレンズを用いた集光の様子が実験的に測定され、収差についての検討が行われた^{6,7)}。また入射端の反射抑制構造を最適化することにより反射損失を抑え、負の屈折が確認された⁸⁾。

1.3 メタマテリアル

サブ波長構造による光学特性の制御はメタマテリアルの観点から重要である。一次元周期構造をもつサブ波長格子の実効屈折率を求め、複屈折が最大となる構造が検討された⁹⁾。無機有機複合化合物における誘電率のサブ波長の異方性に注目して超分解能イメージングが検討された¹⁰⁾。金属微小共振器アレイの熱輻射スペクトルが擬似表面プラズモンを考慮することでよく説明できることが示された¹¹⁾。ナノシートプラズモン共振器が増強ラマン散乱に有効であることが電磁場解析から明らかにされた^{12,13)}。アミノ酸ラセミ体薄膜に紫外円偏光を照射することにより、キラル構造が導入されることが示された¹⁴⁾。サブ波長周期構造の複屈折を用いた石英1/4波長板が設計され、実証された¹⁵⁾。金属/誘電体を入射波長より短い周期で交互に重ねた構造について透磁率が1から有意にずれる共鳴が見いだされた¹⁶⁾。金属誘電体多層プリズムのための導波路が議論され

た¹⁷⁾。テラヘルツ領域では金属ねじ配列¹⁸⁾やワイヤードリッド偏光子の金属線のわずかな切れ目¹⁹⁾が、透過スペクトル特性に与える大きな影響について議論された。また凹型の金属薄膜キラル格子を用いた偏光操作が可視およびテラヘルツ領域で報告されている²⁰⁾。構造色のパラメータを工夫・調整することにより、赤と緑の原色モルフォカラーが実現できることが示された²¹⁾。

1.4 展望

メタマテリアルに関しては本誌でも10月号に特集が組まれ²²⁾、また日本で初めてのメタマテリアルに関する書籍も11月に出版された²³⁾。今回取り上げたサブ波長の光学、フォトニック結晶など日本における研究ポテンシャルは高い。これまでメタマテリアルという観点を意識していなかった研究者が連携して日本でもこの新しい分野の開拓が進むことを期待したい。

文献

- 1) <http://www.metamorphose-eu.org/Congress/>
- 2) 望月敬太他：春季応物講演会（2007）27p-ZB-18.
- 3) 田中良典他：春季応物講演会（2007）29a-ZB-7.
- 4) 永島拓志他：春季応物講演会（2007）29p-ZB-2.
- 5) 納富雅也他：秋季応物講演会（2007）8p-ZS-1.
- 6) 朝妻智彦他：春季応物講演会（2007）28a-ZB-7.
- 7) 朝妻智彦他：秋季応物講演会（2007）8p-ZS-2.
- 8) 松本 崇他：春季応物講演会（2007）28a-ZB-8.
- 9) 反本啓介他：春季応物講演会（2007）28p-SB-5.
- 10) 佐々木真正他：物理学会年会（2007）22p-TR-4.
- 11) 谷岡寿一他：春季応物講演会（2007）27a-ZW-6.
- 12) 黒川要一他：春季応物講演会（2007）27a-ZW-7.
- 13) 宮崎英樹他：春季応物講演会（2007）27a-ZW-8.
- 14) 高橋淳一他：秋季応物講演会（2007）6p-R-15.
- 15) 田村仁志他：秋季応物講演会（2007）6a-R-16.
- 16) 岩長祐伸他：物理学会年会（2007）22p-TR-3.
- 17) 亀田信治他：秋季応物講演会（2007）7a-R-11.
- 18) 高野恵介他：春季応物講演会（2007）29a-J-8.
- 19) 高野恵介他：秋季応物講演会（2007）7p-ZB-3.
- 20) 神田夏輝他：物理学会年会（2007）22p-TR-5.
- 21) 宮村友輔他：春季応物講演会（2007）30a-S-5.
- 22) 石原照也他：光学，**36**（2007）554.
- 23) 石原照也監修：メタマテリアル—最新技術と応用—（CMC出版，2007）。

2. 結像素子・光学機械

コニカミノルタオプト 福嶋 省

2.1 概要

Optics & Photonics Japan 2007のスペシャルセッションとして、日本光学会と韓国光学会の共催による初めての日韓交流シンポジウムが開催され、日本から携帯電話に搭載されるマイクロカメラ用ズームレンズの最新技術¹⁾など3件と韓国から平行平板上に形成された反射屈折系による

超薄型撮影光学系²⁾など2件の合計5件、両国の光設計に関する最近のトピックスについての講演が行われた。また、本原稿執筆時点ではODF '08 TaipeiのFinal Call for Paperが出されている。今後、日・韓・台・中、さらには東南アジアをも含めたアジア地域における光学技術の情報交流がより一層活発に行われるようになるものと期待される。

2.2 光学素子

光学素子においては、液晶を用いた空間位相変調素子の研究開発が活発であり、眼底イメージングのための補償光学系への応用例³⁾や光ディスク用ピックアップ光学系の収差補正への応用⁴⁾などが紹介されている。フィルターの分野では、スパッタリングで2種類の材料の混合膜を作成することで得られる任意の中間屈折率層を用いてルゲートフィルターと同等の特性を有するオプティカルフィルターの設計・作製技術が紹介された⁵⁾。

また、すでに一部は製品として実現されているが、自己クローニング型フォトリソグラフィ結晶を用いた偏光子や波長板の、偏光イメージングカメラなどへの応用が紹介された⁶⁾。

2.3 光学機器

2.3.1 撮像光学系

撮像光学系では、デジタル撮像素子の高画素化がさらに進み、コンパクトタイプのデジタルカメラでは1200万画素、一眼レフタイプでは2000万画素の製品が発売されている。撮像用ズームレンズの高変倍化も進んでおり、スチルカメラ用ズームレンズとして最高倍率となる18倍ズームを搭載したデジタルカメラが発売された。こうした高画素化・高変倍化と歩調を合わせるように、デジタルカメラ用撮像光学系では手ぶれ補正機構を有するものが一般化してきている。

携帯電話に搭載されるマイクロカメラ分野では、ズームレンズが搭載されたものが2機種発売されたが、この分野の全体的な流れとしてはズームレンズが普及するという印象には至っていない。一方、この分野では、マイクロカメラのモジュールを電気部品と同様、回路基板上に半田リフロー工程にて実装することを目指し、高耐熱性を有するモジュール開発技術の動きが活発である。例えば、平面ガラス基板上に硬化性樹脂によってレンズ部を成形して光学系の耐熱性を高めるという技術が発表されている⁷⁾。

また、画像変換機能を含む撮像システムとして、4台の超広角カメラからの映像を合成して真上からの俯瞰映像を得る車載カメラシステム（を搭載した乗用車）が発売された。このような、安全面の補助を目的とする車載用カメラシステム分野の動きも活発である。

2.3.2 レーザー走査光学系

レーザー走査光学系では、二次元走査可能なMEMSを用いたレーザー走査型プロジェクターが各種の展示会にて発表され話題となった⁸⁾。技術の動向としてはMEMS駆動の高周波数化が挙げられ、表示解像度としてXGAクラスが達成できるレベルに至っている。

また、現在レーザー走査式が主流のプリントヘッド分野で、LEDを用いて走査機構を不要とした製品の開発が発表され、注目を集めた⁹⁾。

2.3.3 プロジェクション光学系

プロジェクション光学系の分野では、リアプロジェクターに用いられる全反射・屈折ハイブリッド型スクリーンの輝度ムラ低減に関する検討結果が報告された¹⁰⁾。

また、各色ごとに複数の半導体レーザーの光を凸凹のレンズとライトパイプで集光・均一化し、ライトパイプの入射側に配置したレンズアレイを回転させることによりスペckル除去するという照明光学系を用いたLCD方式のレーザープロジェクションシステムの試作結果が報告された¹¹⁾。製品としては反射系と屈折系を組み合わせた投影光学系を有して薄型あるいは短距離投影を特徴とするリアプロジェクションTVやフロントプロジェクターが発売され、前者についての開発報告が行われた¹²⁾。

2.3.4 ピックアップ光学系

光ディスク分野では、青色半導体レーザーを用いた製品の本格的普及が始まった。光学技術としては、位相構造による回折作用を応用したBD/DVD/CD三波長互換対物レンズやHD DVD/DVD/CDの三波長互換対物レンズの設計手法と製品例が紹介された^{13,14)}。

2.4 光学設計法

光学設計の最適化手法として、サンプル光線の入射角および屈折角のRMS値 θ を光学系の製造誤差感度評価尺度とし、 θ がある基準より小さいことを条件にグローバル最適化を行うことにより、通常グローバル最適化で得られる複数の局所解から製造に有利な解を選択するという方法が提案された¹⁵⁾。また、奇数次非球面の有効性に関して数学的な観点および具体的光学設計による研究が行われ、多くの無収差でない光学系では奇数次非球面は実質的に偶数次非球面で近似できるが非球面係数のパラメーター数節約に有効であることなどが示された¹⁶⁾。

2.5 材料・加工

光学材料分野では、各種光学系からのニーズに対応し、高屈折率材料の研究が活発であり、日本光学会光設計研究グループにて「光学材料の高屈折率化最前線」と題した研究会が開催された。この中では、有機材料に希土類-金属

ナノクラスターをドーブすることにより、PMMA ベースでアップ数が70を超える低分散化の可能性が示され¹⁷⁾、有機材料(プラスチック)光学素子の新たな適用領域拡大が期待されている。また、水に代わる液浸露光光学系用液体として、193 nmにおける屈折率1.64(水は1.44)という高屈折率材料の開発と、これによる32 nm線幅の解像実験結果が報告された¹⁸⁾。加工技術分野では、ナノサイズ構造体の微細加工技術として、ガラスモールド法による一次元高アスペクト比構造体の成形技術¹⁹⁾や光ディスクのマスタリング技術を用いた無反射構造(ARS)作成技術²⁰⁾が発表され、大面積化実現への期待が高まっている。

2.6 展 望

光学機器の分野では、材料・生産技術を含めた撮影光学系の進展、特にマイクロカメラ分野におけるリフロー工程対応技術が展開してゆくことが期待される。また、車載システムに代表されるような画像変換や画像修復/補正のシステムと一体となったカメラシステムが、デジタルカメラや携帯電話用マイクロカメラの分野にまで拡大していくであろう。また、プロジェクション光学系分野を中心に自由曲面を含んだ特徴ある設計/製品が数多く発表されて行くものとする。材料分野では、光学樹脂材料のさらなる高屈折率化、高耐熱化、低複屈折化への取組が続けられていくであろう。加工分野では無反射構造に代表される微細加工技術が大面積化、低コスト化に向けて進展し、われわれの身近な製品に適用されるようになることを期待したい。

文 献

- 1) K.Matsusaka *et al.*: *Joint Symposium by OSK and OSJ on Optics Design & Fabrication* (2007) 講演番号 1.
- 2) Ho-Seop Jeong *et al.*: *Joint Symposium by OSK and OSJ on Optics Design & Fabrication* (2007) 講演番号 2.
- 3) 白井智宏: 光学, **36** (2007) 136.
- 4) 橋本信幸: 光学, **36** (2007) 149.
- 5) 豊原延好他: 光学, **36** (2007) 339.
- 6) 川嶋貴之他: 光学シンポジウム (2007) 講演番号 3.
- 7) 例えば, 特許第 3929479 号など.
- 8) 化学工業日報: 2007 年 10 月 4 日号 p. 5.
- 9) 日刊工業新聞: 2007 年 11 月 30 日号.
- 10) 遠藤貴雄他: *OPJ* (2007) 28aM6.
- 11) T.Itoh *et al.*: *MOC* (2007) K7.
- 12) 秋山和哉他: 光学シンポジウム (2007) 講演番号 8.
- 13) 橋村淳司他: 光技術コンタクト, **45** (2007) 473.
- 14) 野村英司他: *OPJ* (2007) 26pD5.
- 15) 一色真幸他: 光学シンポジウム (2007) 講演番号 4.
- 16) 谷川剛基他: 光学, **36** (2007) 646.
- 17) 股木宏至: 光設計研究グループ機関誌, No. 37 (2007) 31.
- 18) 中野隆志他: 光設計研究グループ機関誌, No. 37 (2007) 37.
- 19) T.Mori *et al.*: *MOC* (2007) B2.
- 20) 遠藤惣銘他: *OPJ* (2007) 28aA2.

3. X線結像光学

兵庫県立大 渡邊健夫

3.1 概 要

X線結像光学は、理学と工学あるいは科学と技術の接点に位置し、宇宙科学、生体科学、物質・材料科学、放射光科学、プラズマ・核融合科学、医療科学、精密工学等の分野における研究の進展に大きな役割を果たしている。X線結像光学を必要とする分野は多岐に及んでおり、基本技術が広範な科学の基礎を担っている。2007 年は、X線結像光学では新技術の開発と第三世代放射光源の組み合わせにより大きく進展した。

3.2 軟 X 線の結像光学素子の開発

フレネルゾーンプレート (FZP) は、X線顕微鏡、光電子顕微鏡、蛍光 X線微量元素マッピング、 μ -XAFS、 μ -X線回折、結像マイクロ CT 等の微小領域観察・分析用に集光および結像用レンズとして有用な素子である。NTT-AT では、SiC のメンブレンに膜厚 175 nm の Ta 吸収体を最外周輪体幅 35 nm で直径 180 μ m の FZP を製作し、8 keV の X 線で集光スポット径 \pm 34 nm (FWHM) を達成した。ほかにも、X 線のさらなる集光効率向上を目的に Kinoform 型に近似的な階段状に加工された FZP の製作も進められている¹⁾。産総研、関西医科大、SPRING-8 の研究グループでは、Cu と Al の 2 種類の元素による混合膜からなる 6 段構造の多層膜 FZP を開発し、一次光について理論値の 70% 程度の集光効率を、そして、理論値より大きな集光ビームサイズを達成している²⁾。

ナノメートルオーダーの局所照射が可能な電子線励起を含む軟 X 線領域での発光現象を利用した物性研究のニーズは高まっており、1~3 keV 領域での発光・蛍光分析用に高効率軟 X 線発光分光の開発が進められている。原子力機構を中心とした研究グループでは、1~3 keV 領域で使用可能な多層膜ラミナー型ホログラフィック球面回折格子(格子定数: 2400 本/mm)の開発が行われ、0.7 nm の設計波長に対して約 20% の高い回折効率を実現している。さらに、Si-K α_1 の半値幅から求めた分解能は 145 (0.005 nm) であり、分光器と検出器の組み合わせによりほぼ限界に近い分解能を実現している³⁾。

東北大学のグループは、多層膜の表面層を周期毎にミリング除去することでサブナノメートル精度の反射波面補正できることを提案し、そのためのイオンミリング装置を開発した⁴⁾。

3.3 軟 X 線の結像光学素子を用いた応用研究

EUV リソグラフィ技術は 32 nm 以降の半導体微細加

工の量産技術として期待されており、2011年以降に量産ラインに導入される予定である。ASML社が開発した6枚のMo/Si多層膜鏡から構成される露光光学系(NA 0.25)をもつ露光装置(α -Tool)は2005年にすでにIMECとSEMATECHに導入されている^{5,6)}。日本では2007年にSeleteが、キヤノンが開発した2枚のMo/Si多層膜からなる露光光学系をもつ露光装置(FSET)^{7,8)}を導入した^{9,10)}。ニコンは6枚のMo/Si多層膜鏡からなる露光光学系をもつ実露光装置EUV1の開発を進めている^{11,12)}。露光装置の光源用にレーザープラズマX線源(LPP)または放電型プラズマX線源(DPP)の開発が進められている。LPP方式でEUVはIntermediate Focus位置で50Wの光源パワーを^{13,14)}、Cymerは100Wを達成した^{15,16)}。また、兵庫県立大学のグループは、EUVマスク欠陥検査用に極端紫外線顕微鏡を開発し¹⁷⁾、この装置を用いた欠陥の観察結果がSEMATECHの露光装置MET2を用いたレジストへの欠陥転写結果とよく一致しており、極端紫外線顕微鏡のマスク欠陥検査技術の有効性を確認している^{18,19)}。またこの顕微鏡用に大面積のビームスプリッターの開発に成功し解像性能向上を実現している^{20,21)}。さらに顕微方式によるパターン観察では分解能に限界があり、22nmhpから15nmhpでのマスクパターン観察には、顕微鏡光学系によらないコヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡の開発が進められている。この顕微では、コヒーレントEUV光を試料に照射し、CCDカメラにより検出した反射回折像を逆フーリエ変換して像を構成する。このようにして得られたマスクパターンは、現在主流のSEM像とよく一致している²²⁾。また、EUVレジストの開発では高感度かつ低LERをもつ酸発生剤内包型レジストの開発が進められている²³⁻²⁵⁾。

3.4 硬X線の結像光学素子の開発

大阪大学の研究グループは、任意形状の表面に対して原子レベルの平滑性を得るナノメートルレベルの表面創製プロセスを開発して領域100mmにわたって形状精度0.1nm(RMS)を有する硬X線集光ミラーを試作し、15keVの硬X線においてサブ50nm、サブ30nm集光を実現している²⁶⁾。さらに、集光ビームの強度プロファイルを用いた位相回復法による、「At-wavelength波面計測」を用いたミラー上での波面誤差測定と、これに基づくミラー上流での波面補正などを用いて、サブ10nm硬X線ナノビームの実現を目指している²⁷⁾。

理化学研究所の研究グループでは、ELID(electrolytic in-process dressing)法をコアテクノロジーとしたナノプレジジョン・マイクロメカニカルファブリケーション技術

を開発し、この技術を用いて超精密光学素子の開発を進めている。砥石・ワーク回転軸には空気静圧軸受を採用することで、直線分解能1nmをもつ油静圧案内機構により、きわめて滑らか、かつナノ精度の運動転写加工が実現できる。また、4軸以上の多自由度化により、自由曲面や複雑形状加工に対応できる。これにより10nm分解能をもつ大型非球面加工機を開発し、X線多重ミラー金型の加工を行っている。ほかにも科学分野への用途として、天文用レンズ・ミラーおよび放射光用ミラーの超精密加工への適用の検討も進められている²⁸⁾。中部大学では、超精密非球面金型製作加工装置が開発された。この装置を用いて次世代の硬X線望遠鏡に対応できる口径600mmおよびミラー長400mmまでの非球面反射鏡を製作できる²⁹⁾。

3.5 硬X線の結像光学素子を用いた応用研究

SPring-8ではFZPを対物レンズとする結像CT顕微鏡の開発が進められており、8keVのX線で160nmの分解能を実現し、Modulation Transfer Functionの実験値は理論値と合致している。一方、CT像計測では回転系の軸ぶれや測定時のドリフト等の影響により再構成像の空間分解能は200~300nm程度である。また、楕円Kirkpatrick-Baez(K-B)を用いて、X線のエネルギーが80keVでビームサイズ0.35(H)×0.4(V) μm^2 を、90keVで $1\mu\text{m}$ 以下のビームサイズを実現した³⁰⁾。この系により、Cdの吸収および蓄積能力が非常に高いハクサンハタザオを対象に植物体内におけるCd分布の測定に成功している。東大新領域のグループはX線Talbot干渉計を開発し、マウス小耳骨の位相CT像等の位相コントラスト撮像に成功している³¹⁾。兵庫県立大のグループは、2種類のFZPを用いた硬X線顕微干渉計により、X線エネルギー8keVで粒径 $7\mu\text{m}$ のポリスチレン微粒子の観察と50nmのライン・アンド・スペースのテストチャートパターンの観察ができています。そして、この干渉計を顕微位相トモグラフィーに応用し、微細試料の高感度・高分解能三次元観察に成功した³²⁾。さらに、全反射ダブルスリットを用いたヤング干渉計を開発し、蛍光体と高速カメラを組み合わせた高速X線画像検出器と試料高速回転システムを組み合わせることにより高速CTの構築を進め、X線エネルギー10keVでの四次元CT像の撮像に成功している³³⁾。筑波大のグループは、結像型蛍光X線顕微鏡によりフォトンカウンティング・イメージングトモグラフィーを行うことで、生体試料中の金属元素の三次元マッピングを実現した。また、ツェルニケ型硬X線位相差顕微鏡により、微小試料の位相コントラスト三次元イメージングを実現している³⁴⁾。

文 献

- 1) 竹中久貴他：第9回 X線結像光学シンポジウム (2007) p. 32.
- 2) 田村繁治他：第9回 X線結像光学シンポジウム (2007) p. 35.
- 3) T. Imazono *et al.*: Appl. Opt., **46** (2007) 7054.
- 4) 戸坂垂季他：秋季応物講演会 (2007) 5a-V-4.
- 5) N. Harned *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) ET-05.
- 6) N. Harned *et al.*: MNC (2007) 6A-3-3.
- 7) S. Uzawa *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) ET-07.
- 8) T. Hasegawa *et al.*: MNC (2007) 6A-3-2.
- 9) H. Tanaka *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) ET-03.
- 10) K. Tawarayama *et al.*: MNC (2007) 7A-5-3.
- 11) T. Miura *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) ET-06.
- 12) K. Murakami *et al.*: MNC (2007) 6A-3-1.
- 13) A. Endo *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) SO-07.
- 14) K. Komori *et al.*: MNC (2007) 6A-3-4.
- 15) D. C. Brandt *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) SO-06.
- 16) D. C. Brandt *et al.*: MNC (2007) 6A-3-5.
- 17) H. Kinoshita *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **46** (2007) 6113.
- 18) T. Yoshizumi *et al.*: EIPBN (2007) 4B.2.
- 19) T. Yoshizumi *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) DI-P02.
- 20) Mizuta *et al.*: Proc. SPIE, **6517** (2007) 651733-1.
- 21) K. Hamamoto *et al.*: EIPBN (2007) 4B.4.
- 22) D. G. Lee *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) ME-P07.
- 23) T. Watanabe *et al.*: J. Jpn. Appl. Phys., **46** (2007) 6118.
- 24) T. Watanabe *et al.*: J. Photopolym. Sci. Technol., **20** (2007) 373.
- 25) Y. Fukushima *et al.*: Int. EUVL Symp. (2007) RE-10.
- 26) H. Miura *et al.*: Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 051903.
- 27) 山内和人：第9回 X線結像光学シンポジウム (2007) p. 23.
- 28) ELID 研究会ホームページ <http://www.elid.ne.jp>
- 29) Y. Namba *et al.*: Proc. ASPE (2007) p65.
- 30) Y. Suzuki *et al.*: Rev. Sci. Inst., **78** (2007) 05713.
- 31) 百生 敦：第9回 X線結像光学シンポジウム (2007) p. 51.
- 32) 小山貴久他：放射光, **20** (2007) 289.
- 33) 高野秀和他：第9回 X線結像光学シンポジウム (2007) p. 49.
- 34) S. Aoki *et al.*: J. X-ray Sci. Technol., **15** (2007) 65.

4. 分 光

京都大 田中耕一郎

4.1 はじめに

この数年の分光学の進展をみると、光源、検出器の発展に支えられてすすむ従来のケースに加えて、光をもちいた物質制御が中心課題になる論文もずいぶん増えてきた。本稿では、この視点から著者の興味で3つほどのトピックをとりあげたい。本論に進む前に、最近の光源や検出器の動向に関して述べる。

光源に関しては、ファイバーレーザーの進展が著しい。1.5 μm 帯の Er ファイバーレーザーにおいては、従来の通信用の増幅器としての性能があがるとともにモードロック動作によりフェムト秒の商用製品が多数現れてきた。780 nm のフェムト秒パルス光も 20~50 mW の出力であれば PPLN (周期分極反転 LiNbO₃ 結晶) を用いた第二高

調波 (SHG 光) 発生により容易に発生可能である。これにより、比較的簡単に時間分解分光やテラヘルツ時間領域分光が可能になってきた。また、最近では、1 μm 帯の Yb ファイバーレーザーの性能も飛躍的に向上し、フェムト秒かつ平均出力 10 W 以上というような大型レーザー並みの出力が得られるようになってきた。フォトニック結晶ファイバーをもちいた白色光発生により可視域から近赤外領域での連続光発生もこなれた技術となってきており、高輝度な白色光源として製品化されている。この数年で、超短パルス光源から通常分光用光源のすべての範疇でファイバーレーザーが主流となる時代がくるような勢いである。

検出器に関しても、アバランシェフォトダイオードの高性能化が目立つ。小型で高圧電源がいらぬ特性は大変魅力的であったが、それに加えて、大口径、高ゲインのなどの特徴をもった製品が市場に現れてきている。これにより、時間相関分光などの装置や光電子増倍管を用いていたような分光装置は大きく小型化することは必然である。ラマン散乱の測定においては、これまでのスーパーノッチフィルターに加えて、スペクトル領域の片側だけをシャープに落とすエッジフィルターがより低価格で現れてきた。グリーンレーザーポインターで巷にあふれている 532 nm レーザーと組み合わせることで、ラマン散乱がかなり安価で測定可能になってきている。今後、MEMS 技術と組み合わせると高速スキャン可能な小型分光装置やラマン散乱装置が主流になると考えられる。

4.2 2007 年度に印象深かった3つの話題

(ア) 高出力テラヘルツ波発生と非線形分光への展開

テラヘルツ電磁波は従来遠赤外線と呼ばれていた周波数帯域の光であるが、最近フェムト秒レーザーによる発生技術・検出技術の進展がブレイクスルーとなって、遠赤外領域の分光研究に盛んに用いられている^{1,2)}。しかし、その出力はまだ小さく、数 kV 以上のバイアスを印可した大口径ギャップ GaAs 光伝導体と 1 kHz のチタンサファイアレーザー再生増幅器から得られる 1 mJ (800 nm, 100 fs) パルス光を用いてもせいぜい 100 nJ が最大出力であった。この数年、それを超えるための工夫がさまざまになされてきた。2007 年には2つの独立な手法で大きな進展がみられたので紹介する。

パリのエコールポリテクニクの Mysyrowicz 等のグループはいわゆるテラワット級の高出力フェムト秒レーザーを用いて、大気中に 1 cm から 30 cm の長さをもつ「フィラメント」をつくり、そこからのテラヘルツ放射を観測した^{3,4)}。高出力のフェムト秒レーザーをゆっくりと空気中に集光すると、自己収束効果によって非常に細いビームに

集光され、空気中のガス分子がイオン化する。このようなイオン化領域は自己安定的に 1 cm から数 10 cm の長さになることが知られており、イオン化したガスプラズマからの発光で明るく線のように輝くことから、「フィラメント」と呼ばれる⁵⁾。Mysyrowicz 等は「フィラメント」の長さが長くなると前方に集中的にテラヘルツ放射が出ることを確認した。後に出た論文⁴⁾では、2本の「フィラメント」を近接するように配置すると独立な場合に比べて 10 倍以上の強度が得られるとともに、2本の「フィラメント」を結ぶ方向にテラヘルツ電磁波の偏光が向くことも示している。

以前から、それほど長くない「フィラメント」をもちいた研究は、マックスボルン研究所の Elsaesser 等やレンセラー工科大学の Zhang 等によっても進められてきた。Elsaesser 等は 2005 年に同様の方法で 400 kV/cm のテラヘルツ電場の生成に成功している⁶⁾。この電場強度は 1 THz のバンド幅を仮定すると、1 μ J を遥かに超えるパルスエネルギーとなり、従来の 1 桁以上のエネルギーとなっている。Zhang 等は 2006 年に生成に SHG 光を同時照射すると、生成効率が格段に向上するとともに、基本波と SHG 光の間の位相が生成効率に大きく影響を与えることを示した⁷⁾。さらに、2008 年 1 月には、これを用いて 0.1 から 10 THz 以上の全領域をカバーするテラヘルツ分光装置の構築に成功している⁸⁾。Mysyrowicz 等の長いフィラメントを使った方法と組み合わせると、非常に遠い遠隔地にむけて指向性の高いテラヘルツ波を投射することや、レーザーを遠隔地で集光し「フィラメント」をつくることで現場でのテラヘルツ分光情報を高感度で得るような測定手法が可能になってきたといえる。

上記の「フィラメント」を使った分光法とは独立に、マサチューセッツ工科大学の Nelson と Hebling 等は LiNbO₃ をもちいたチェレンコフ放射による高出力テラヘルツ波発生に取り組んできた。2002 年から系統的にはじめられた研究はフェムト秒レーザーの波面をいわゆる「チェレンコフ角度」に傾斜させることが特徴であり⁹⁾、それにより全空間方位に放射されていたテラヘルツ波の出力を単一方向に集中させることに成功した。最新の研究ではパルスエネルギーとして 10 μ J を確認しており、「フィラメント」の方法とほぼ同等な 250 kV/cm の電場強度の達成に成功している¹⁰⁾。

この電場強度になるとテラヘルツ波によるさまざまな非線形光学効果が期待される。オレゴン大学の Danielson とフィリップス大学の Koch らは、GaAs/AlGaAs 量子井戸戸耕造において、10 kV/cm 程度のテラヘルツ波の照射で

可視域の光に対する巨大な非線形応答を観測している¹¹⁾。今後、高出力テラヘルツ波をもちいたテラヘルツ領域の非線形分光や、テラヘルツ波と可視光を組み合わせた非線形分光が盛んになっていくことは間違いない。

(イ) 分子や固体の光冷却

光で物質を冷却することは多くの研究者の夢である。光により高度に制御されたかたちで物質の温度を制御できれば、量子多体系の物理/化学に大きな進展がもたらされることが期待される。原子系ではすでに多くの手法が開拓され、ボーズ・アインシュタイン凝縮体 (BEC) やフェルミ縮退した原子系の生成が世界中で行われている。最近では、光格子を用いた研究も盛んに行われている。それに対して、分子や固体に関する光冷却の研究は数少ない。これは、分子になると振動や回転などの内部自由度が存在するために、並進運動を止めるだけでは冷却につながらないからである。振動や回転などの内部自由度の制御に踏み込まなければならない。もちろん、数年以上前から「共冷却」(sympathetic cooling) — 冷却原子と分子のクーロン相互作用を利用して分子を冷やす手法 — は多くの研究者によって試みられてきている。しかし、分子の大きさは 2-3 原子からなる小さいものに限られていた。最近、デュッセルドルフ大学の Ostendorf, Schiller 等は、イオントラップされた Ba⁺ イオンを用いて 42 原子からなる Alexa Fluor 分子 (C₁₆H₁₄N₂O₉S) を 115 mK 以下に冷却することに成功した¹²⁾。これにより生体高分子などの大きな分子の冷却への道が開かれたといえる。

一方、固体になるとなかなか有効な手段が開発されていない。ひとつの方法はアンチストークス発光を用いた手法である。これは、ガラスや絶縁性の結晶に希土類イオンを添加し、希土類イオンの吸収帯のうちのフォノンを吸収して遷移をおこす吸収帯に光を照射する手法である¹³⁾。励起状態からは多くの場合フォノンを伴わずに発光するために、励起光の高エネルギー側に発光が生じる (アンチストークス発光) ことになる。この方法で、常温から 208 K までの冷却が報告されている¹⁴⁾。最近、これまで用いられてきた Yb³⁺ にかわって赤外に遷移をもつ Tm³⁺ に 1855 nm の赤外線照射することで 3 K の冷却に成功した報告がなされた¹⁵⁾。これにより、Si や GaAs などの光学的に重要な物質の冷却に向けての一步が踏みだされたといえる。

最近、もっとマクロな物体の冷却を光照射で行うことが試みられている。たとえば、小型の光学ミラーからなる共振器のミラーのブラウン振動を、外部からの光照射によって生じる光圧力を用いて止める試みがなされ、有効温度が 40 分の 1 になったと報告された¹⁶⁾。また、AFM などに用

いられるような Si カンチレバーを同様な方法で冷却し、有効温度として 18 K が得られたとの報告もある¹⁷⁾。最近では、Si カンチレバーの両側を金電極ではさみ、その間にカンチレバーの固有振動数の ac 電場 (7 kHz) を共鳴的に印可することにより 45 K まで冷却したという報告があった¹⁸⁾。最後の例はラジオ波をつかう手法であり、今後の発展性が非常に高い手法である。いずれにしても、10 μm から 100 μm の大きさの Si を冷却したというのであるから、大変面白い試みである。問題は、確かにカンチレバーの固有モードのような振動モードの冷却は達成されたのは本当であろうが、他のアコースティックモードや電子系はそのような温度まで冷やされたかどうかである。モード間のエネルギー交換がどの程度の時間で起きるかに依存している。今後、他の振動モードや電子系の温度を含めた検討が必要である。

(ウ) 光誘起相転移

光誘起相転移は現在の光科学の中でもっとも重要な研究課題のひとつである。光照射によりマクロな物質相を変化させることは次世代の高密度光メモリーや演算素子の候補であるし、非平衡開放系での相転移とは何であるかという根本的な問題に対するよい実験の舞台を与えてくれる¹⁹⁾。これまでは、可視域のフェムト秒ポンププローブ分光により多くの研究がなされてきたが、この 2~3 年で急速に時間分解 X 線構造解析や時間分解電子線構造解析が可能になってきた。非常に速い時間領域で起きる構造変化現象を、あたかも見てきたように実空間や波数空間で記録することの重要性はいうまでもあるまい。時間分解 X 線構造解析に関しては、レンヌ大学の Collet と Cailleau、東工大の腰原のグループによる光誘起相転移を示す電荷移動錯体 TTF-CA における研究²⁰⁾ や、カリフォルニア大学 (当時) の Cavalleri 等による VO₂ における光誘起絶縁体金属転移²¹⁾ など、数多くの研究が始まっている。2007 年になって、時間分解電子線構造解析で同様な現象を観測した報告が続いた^{22,23)}。電子線パルスは、フェムト秒レーザーの第三高調波 (266 nm) を用いて生成した光電子を電圧 30 kV で加速したものである。パルス幅は、電子数により大きく変わることが報告されているが、サブピコ秒 (300 fs) 程度と十分に短く、時間分解分光により VO₂ における光誘起相転移の構造変化ダイナミクスがはっきりととらえられている。なかでも、電子線のブラッグ回折点はフェムト秒の時間領域で変化するものと 9.2 ps でゆっくりと変化するものがあることが明らかになった点は非常に興味深い。今後、さまざまな系に適用されることにより、非平衡開放系での相転移である光誘起相転移の本質が明らかにな

っていくことが期待される。

4.3 ま と め

2007 年の分光分野で興味深い進展があった分野を 3 つとりあげて、その内容を紹介した。科学と技術は螺旋階段のように互いの間をめぐりめぐって高みに登っていく。測定技術の進歩は科学を前進させ、それにより生まれた新しい概念が新しい測定技術を生み出すわけである。20 年前に積み残した研究課題がいままさに手の届くところにあるかもしれない。温故知新は科学技術の世界にも成り立つことわざだ、と実感するこのごろである。本稿がそのような観点で、皆様のお役に立つことがあれば幸いである。

文 献

- 1) D. Mittleman (ed.): *Sensing with Terahertz Radiation* (Springer-Verlag, Berlin, 2003).
- 2) K. Sakai (ed.): *Terahertz Optoelectronics* (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
- 3) Y. Liu *et al.*: Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 135002.
- 4) C. D'Amino *et al.*: Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 235002.
- 5) A. Couairon *et al.*: Phys. Reports, **441** (2007) 47.
- 6) T. Bartel *et al.*: Opt. Lett., **30** (2005) 2805.
- 7) X. Xie *et al.*: Phys. Rev. Lett., **96** (2006) 075005.
- 8) N. Karpowicz *et al.*: Appl. Phys. Lett., **92** (2008) 011131.
- 9) J. Hebling *et al.*: Opt. Express, **10** (2002) 1161.
- 10) K.-L. Yeh *et al.*: Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 171121.
- 11) J. R. Danielson *et al.*: Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 237401.
- 12) A. Ostendorf *et al.*: Phys. Rev. Lett., **97** (2006) 243005.
- 13) R. I. Epstein *et al.*: Nature, **377** (1995) 500.
- 14) J. Thiede *et al.*: Appl. Phys. Lett., **86** (2005) 154107.
- 15) W. Patterson *et al.*: Opt. Express, **16** (2008) 1705.
- 16) P. F. Cohandon *et al.*: Phys. Rev. Lett., **83**, 3174-3177.
- 17) C. H. Metzger *et al.*: Nature, **432** (2004) 1002-1005.
- 18) K. R. Brown *et al.*: Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 137205.
- 19) K. Nasu (ed.): *Photo-induced Phase Transition* (World Scientific, 2004).
- 20) E. Collet *et al.*: Science, **300** (2003) 612.
- 21) A. cavalleri *et al.*: Phys. Rev. Lett., **87** (2001) 237401.
- 22) N. Gedik *et al.*: Science, **316** (2007) 425.
- 23) P. Baum *et al.*: Science, **318** (2007) 788.

5. レーザー

富士通研究所 山本剛之
福井大 川戸 栄

5.1 半導体レーザー

本節では、半導体レーザー、および発光素子についての 2007 年の進展を、応用物理学会、電子情報通信学会、OFC、ECOC での発表を中心にまとめる。なお、内容が筆者 (山本) の専門である光通信用のレーザーが主になってしまっている点、および誌面の都合もありすべての成果を網羅しきれない点、ご容赦いただきたい。

光通信用の半導体レーザーでは、実システムへの搭載が

進んでいる波長可変レーザーの研究開発が引き続き盛んである。将来の高速波長切り替え応用に向けて、電流制御により5~7 nm程度の連続波長可変が可能な波長可変レーザーをアレイ化し、カップラー、半導体光増幅器までモノリシック集積した広帯域波長可変レーザーがいくつか報告された。n型ドープ活性DBRを用いた短共振器DBRレーザーを8チャンネル集積した素子では32 nmの波長可変幅が得られ¹⁾、活性領域とチューニング領域を交互に配置したDFBレーザーであるTDA (tunable-distributed-amplification)-DFBレーザーを集積した8チャンネルのアレイ素子では、ファイバー結合光出力+13 dBmで38.6 nmの波長可変動作が実現された²⁾。一方、バーニア効果を利用したモノリシック集積素子では、2個のリング型のフィルターを用いた構造で50 nmの波長可変幅を7 mA以下と小さな波長制御電流で実現している³⁾。反射型の半導体光増幅器を利得媒質として液晶チューナブルミラーと組み合わせた外部共振器型の波長可変レーザーでは、半導体光増幅器の活性層に結合量子井戸を採用することで利得帯域を拡大し、1つの半導体光増幅器を用いてC, Lバンドにわたる77 nmの広波長範囲での動作が確認された⁴⁾。さらに波長可変レーザーへの変調器集積も進められており、電界吸収型変調器を集積したTDA-DFBレーザーにおいて50 GHz間隔、8波長可変で10 Gb/s、80 km伝送が実現されている⁵⁾。

アクセス系などの応用では光モジュールの低コスト化要求が強いため、アイソレーターなしでも動作可能な直接変調レーザーの検討が進められている。利得結合DFBレーザー⁶⁾や部分回折格子型レーザー⁷⁾を用いると通常のDFBレーザーよりも戻り光耐性が5~6 dB向上し、-14 dBの反射戻り光がある状態でも1.25 Gb/sでの20 km伝送が確認されている⁶⁾。

従来のInGaAsP系に代わる材料系のデバイスとして、10 Gb/sの直接変調レーザーから製品化が始まっているAlGaInAs/InP系のレーザーで材料系の優位性を利用して高温、高速動作化が進められている。直接変調レーザーでは共振器長が100 μm と短いDFBレーザーで60°Cでの40 Gb/sアイ開口が確認された⁸⁾。また、DFBレーザー部と電界吸収型変調器部の双方にAlGaInAs系歪量子井戸を利用した変調器集積レーザーにおいて、15~95°Cのアンクルド動作での10 Gb/s、80 km伝送⁹⁾が実現され、L帯デバイスでも0~80°Cのアンクルド動作¹⁰⁾が報告された。さらに三次元の量子効果により従来にないユニークな特性が期待されている量子ドットレーザーでは、性能向上に向けた量子ドット結晶の改良が継続して進められて

いる。MBE法でSbを利用することによって量子ドットを高密度化し、波長1.3 μm 帯量子ドットレーザーの利得の向上とそれに伴う変調帯域拡大が報告された¹¹⁾。また、量産性で有利とされるMOVPE法を用いた場合には、これまで1.3 μm を超える発振波長のGaAs基板上の量子ドットレーザーは実現できていなかったが、成長時にSbを利用すること¹²⁾やGaInNAsキャップ層の採用¹³⁾によりそれぞれ1.336 μm 、1.33 μm でのレーザー発振が得られている。

短距離データ伝送用の面発光レーザー (VCSEL) でも素子の高速化が進んでおり、埋め込みトンネル接合を導入して低抵抗化を図った波長1.1 μm 帯のVCSELにおいて30 Gb/s直接変調動作が実現された¹⁴⁾。また、10 Gb/s直接変調での高温動作化も進んでおり、850 nm帯のVCSELで100°C動作¹⁵⁾、InGaAs/GaAsP歪み量子井戸活性層を用いた1 μm 帯VCSELで150°C動作が実現された¹⁶⁾。

短波長帯の半導体レーザーについては、次世代DVDに向けて実用化が進んでいるGaN系の青色レーザーで、従来から進められている高出力化に加えて、DFBレーザー化による405 nm単一モードCW動作¹⁷⁾や過飽和吸収帯を導入したセルフパルセーションレーザー¹⁸⁾といった検討が始まっている。また、これまで用いられているc面上のGaN系量子井戸では内部電界の影響でデバイスの性能が低下することが指摘されており、非極性面上のデバイスの研究も活発になってきている。非極性のm面GaN基板上に形成した波長400 nmの量子井戸レーザーでCW発振が実現された¹⁹⁾。さらに短波長の紫外領域では発光ダイオード(LED)の性能向上に向けた研究開発が盛んである。AlNバッファ層の改善により、波長261 nmでのCW駆動でのmW出力やパルス駆動での波長231 nmでの単一ピーク発光が実現されている²⁰⁾。また、可視光レーザーでは光ディスク以外の応用としてディスプレイ用途の高出力レーザーの開発も、赤色レーザー²¹⁾、青色レーザー²²⁾で進んでいる。

一方、2 μm 以上の長波長帯のレーザーもセンサー用光源として注目されており、通常の半導体レーザーと量子カスケードレーザーの2方向から研究開発が進んでいる。InP基板上のレーザーの長波長化で、高歪みInAs/InGaAs量子井戸を採用することで波長2.3 μm を超える長波長発振が埋め込み型のレーザーで実現された²³⁾。また、InGaAs系量子カスケードレーザーの短波長化では、InGaAs、InAlAsの歪量を増大させることで波長4 μm までの短波長化が報告された²³⁾。

新たな構造の半導体レーザーとして、フォトニック結晶

構造の導入について、面発光レーザーのモード制御をはじめとして、さまざまな試みがなされている。フォトニック結晶構造を制御することでドーナツ型のビームを出射する二次元フォトニック結晶レーザーでは、ガウシアンビームよりもスポットを絞れることが示されている²⁵⁾。また、フォトニック結晶を用いることでシリコンからの発光強度が増大することも報告された^{26,27)}。シリコン系発光素子に向けた取り組みのひとつとして注目される。

以上、半導体レーザー関連の動向を駆け足でまとめた。光通信用では 10 Gb/s の光源、光ディスク用では青色レーザーが実用化され、従来の流れの半導体レーザー技術は成熟期に入ってきているようにも思われる。半導体レーザーのさらなる発展には、新たな材料技術やフォトニック結晶などの新たな構造の導入、新しい波長域の開拓なども含めて、既存の分野だけにとどまらない幅広い研究開発が今後期待される。

(山本)

5.2 半導体レーザー以外のレーザー

5.2.1 概要

今年のレーザーの研究開発もファイバーレーザー、セラミックレーザー、ガスレーザーなど、幅広い分野において進展があった。フェムト秒～アト秒域の超短パルスレーザー、パルス出力のピークパワーがサブ PW～10 PW クラスや、エネルギーがジュール～メガジュール級の高出力レーザー、非線形波長変換・増幅、さらにはレーザーの研究開発に必要とされる回折格子などの各種光学素子の発展も著しいが、筆者(川戸)には専門外であるため割愛した。また、固体レーザーの会議として著名な ASSP 2007 に関してはレーザー研究 35, 6 (2007) にまとめられているので、それ以外に特に重要な会議である CLEO 2007 および CLEO/Europe 2007 をまとめた。もちろん、本稿に掲載できたのはこの分野の進展のごく一部分にとどまっていることは、筆者の能力のなさに起因することであり、ここにお詫びしたい。

5.2.2 ファイバーレーザー

モード面積の面積化、出力増大化、直線偏光出力化、発振波長域の拡大、ノイズの低減、スペクトル幅の低減、全ファイバー化、コヒーレントおよびスペクトルビーム加算、結晶化ファイバーなど多くの領域で進展があった。このなかで、光学素子をファイバーにインライン化・全ファイバー化する研究としては、例えば、複屈折ファイバブラックグレーティングを用いてすべての光学素子がファイバーにインライン化された直線偏光出力のファイバーレーザーが開発され、平均出力 8 W、スロープ効率 87%、スペクトル幅 20 pm 以下が実現された²⁸⁾。また例えば、Cr

イオンドープの可飽和吸収ファイバーを用いた全ファイバー型の Q スイッチファイバーレーザーも実現された²⁹⁾。

ファイバーの発振波長域の拡大としては、例えば発振波長 1940 nm において、CW 出力 415 W、スペクトル幅 1 nm 以下の全ファイバー型 Tm ファイバーレーザーが実現された³⁰⁾。

ファイバーレーザー増幅器の研究も活発であった。まず、ナノ秒パルス増幅器の例では、コア径が最大 100 μm という大口径の Yb 添加フォトニック結晶ファイバー(PCF)を用いて、パルス幅 1 ns、エネルギー 4.2 mJ、ビーム品質 $M^2 < 1.3$ という特性が得られた³¹⁾。また、ピコ秒域の増幅器では、チャープドポリウムブラックグレーティングのパルス延伸-圧縮器を用いた、平均出力 50 W のチャープパルス増幅システムが開発された。ポリウムブラックグレーティングの帯域制限のためスペクトル幅 1 nm、圧縮後のパルス幅は 4.6 ps であるが、ポリウムブラックグレーティングコンプレッサーの透過率は 83.8% と比較的高かった³²⁾。フェムト秒域の増幅器では、ストレッチャーにチャープドファイバブラックグレーティング、コンプレッサーには誘電体グレーティングを用い、平均出力 135 W、パルスエネルギー 13.5 μJ 、パルス幅 360 fs を実現した³³⁾。B 積分が 16 と非常に大きい条件での増幅も研究されている³⁴⁾。パルス幅 63 fs、ピーク出力 4 MW、平均出力 7.5 W という短パルスかつ高平均出力の増幅器も実現された³⁵⁾。

大口径ファイバーとしては、例えば、LP₀₁ シングルモード伝搬のファイバーコア径を螺旋状に巻かれたファイバー構造を用いることにより拡大できることが示された。現状ではコア径 34 μm であるが、100 μm 程度まで拡大が可能であるとのことであった³⁶⁾。

そのほか、励起波長 978.1 nm に対して、レーザー発振波長 980.6 nm および 983.0 nm、量子欠損 0.26% および 0.50% というきわめて量子効率の高いレーザー発振も実現された³⁷⁾。

5.2.3 ファイバーレーザー以外の固体レーザー

ディスク(マイクロチップ)型レーザー、セラミックレーザー、低温冷却レーザー、高平均出力レーザーなど、数多くの研究で進展があった。薄ディスク型のレーザーの研究成果はむしろ ASSP 2007 のほうに多く成果が発表されていたが、例えば、Yb:Lu₂O₃ 結晶を用い、励起波長 976 nm において発振波長 1034 nm、CW 出力 32.6 W を、スロープ効率 80%、入射光-光変換効率 72% という高い効率が実現された³⁸⁾。

また、これまでのモード同期薄ディスク型 Yb:YAG レ

レーザーの共振器をさらにのぼし、パルス繰り返し周波数 4 MHz, パルスエネルギー 11 μ J, パルス幅 791 fs という特性が実現された³⁹⁾.

高平均出力の固体レーザーとしては、例えば、2006 年に Nd:YAG の MOPA のコヒーレントビーム結合により平均出力 19 kW, 回折限界の 2 倍以下を実現していたものが、平均出力 15 kW, 回折限界の 1.3 倍以下のビーム品質に改善された⁴⁰⁾.

セラミックレーザーでは、セラミックのコアドープ型 Nd:YAG レーザーロッドを MOPA に応用した例⁴¹⁾, Nd レーザーイオンの添加濃度の空間分布を制御して温度勾配を制御した例⁴²⁾, 太陽光励起固体レーザーの実現を目指して Nd イオンと Cr イオンを YAG 結晶に共添加し吸収スペクトル帯域を広げた Nd/Cr:YAG セラミックレーザーの高効率動作⁴³⁾, 寄生発振の抑制のために Nd:YAG セラミックレーザー結晶コア周りに Sm:YAG セラミック結晶のクラディングを配置した例⁴⁴⁾, さらにこれを用いて Q スイッチ発振した例⁴⁵⁾ など、セラミックの特性を生かしたレーザー利得媒質のさまざまな構造が研究された。

レーザー上準位直接励起では、ここ数年 Nd 系レーザーの波長 880 nm 帯励起に関するものは数多く研究されているが、少し変わったものとして、励起波長 946 nm にて発振波長 1064 nm を吸収パワーに対するスロープ効率 40% 程度、励起パワー 295 mW で CW 出力 30 mW を実現した⁴⁶⁾ ものがあった。

5.2.4 ガスレーザー

ポリュームブラックグレーティングなどによるレーザーダイオードの線幅狭窄化が実用化されたことに伴い、このレーザーダイオードを励起光源としたガスレーザーの研究が進んだ。例えば、レーザーダイオード励起のセシウムガスレーザーで平均出力 13 W, スロープ効率 68%, 励起光-出力光変換効率 62% という結果が得られた。真の電力効率を知りたいところではあるが、熱光学効果が少ないといわれているガスレーザーをレーザーダイオードで効率よく励起できたということは興味深い⁴⁷⁾。

5.2.5 低温冷却レーザー

チタンサファイアやイッテルビウム系のレーザーの極低温冷却に始まった低温冷却レーザーは、量子効率の低い中赤外域のレーザー材料に及んでいる。

例えば、Er:YAG を 85 K にまで極低温冷却してレーザー動作を行い、波長 1532 nm の Q-CW レーザーダイオード励起で発振波長 1618 nm, 吸収励起パワーに対してスロープ効率 58%, 励起エネルギー 260 mJ に対して出力エネルギー 105 mJ 程度の特性が得られた⁴⁸⁾。

同様に、Er:YAG を 78 K に冷却し、Q-CW の吸収励起パワーに対してではあるが、レーザーダイオード励起でスロープ効率 71.5% の特性を得た⁴⁹⁾。

Yb 系のレーザーは、例えば CW 発振では 2005 年に角柱ロッド型 Yb:YAG 結晶を液体窒素冷却することにより、ビーム品質 M2 \sim 1.2 で平均出力 308 W, 光-光変換効率 64% という優れた特性を得ていたが、今回はディスク型 Yb:YAG 結晶をサファイアディスクで挟み冷却するという冷却効率が劣る方式を用いても、CW 218W, 吸収励起パワーに対するスロープ効率 63%, 光-光変換効率 58% という特性を実現した⁵⁰⁾。

短パルスの増幅器では、OPCPA の励起レーザーとしてパルス幅 35 ps, パルスエネルギー 7.5 mJ, スペクトル幅 0.5 nm の特性が得られたり⁵¹⁾, スペクトル幅 3.4 nm, パルスエネルギー 5.5 mJ という特性が得られた⁵²⁾。

5.2.6 レーザー材料など

二準位群のみしか存在しない Yb レーザーにアップコンバージョンが存在する可能性が指摘されており⁵³⁾, 実に興味深い。ファイバーレーザー用の材料に関しては、信頼性向上のためにフォトダークニングやブリーチングに関する研究^{54,55)} が数多くなされていた。今後の可能性のひとつとして面白いものは、Tb³⁺ と Yb³⁺ を共添加されたホウケイ酸ガラスにおいて、Yb³⁺ イオンから Tb³⁺ イオンへのエネルギー移動が 60% 程度となり、励起帯域 980 nm 帯で発振帯域 540 nm 帯の可視固体レーザーの可能性が示された例⁵⁶⁾ などがあげられる。

5.2.7 展 望

以上、2007 年の研究開発の動向を、レーザーダイオード励起の固体レーザー中心に示させていただいた。レーザーダイオードやファイバー、レーザー結晶など、さまざまな光デバイスの性能が向上したことに伴い、幅広い分野における研究開発の進展がみられた。今後、これらの成果が、持続可能性を考慮した社会全体に受け入れられるためには、小型化、高効率化、安定度や信頼性の向上、低コスト化などのさらに重要な諸特性が要求されるものと考えられる。例えば、ファイバーレーザーの全ファイバー化などはその取り組みの一例であるといえるかも知れない。筆者の個人的な意見ではあるが、現状をみる限り、本稿で触れなかった導波路レーザーやガスレーザーにもそのポテンシャルは十分あると考えられる。

ところで近年特に感じられることであるが、世界全体のレーザー研究に占める日本の寄与が余り高くないことが読み取れる。セラミックレーザーは例外かもしれないが、その他のほとんどは国外に研究の中心があるように思われ

る。今後、この分野における日本の寄与率を上げるためには、国内のレーザー研究開発のグループが、産・産・学・学、産官学の連携など、互いに win-win 関係を構築する必要性を強く感じる。(川戸)

文 献

- 1) 有本英生他：信学会総合大会 (2007) C-4-21.
- 2) 高林和雅他：春季応物講演会 (2007) 28p-SG-17.
- 3) T. Segawa *et al.*: IEEE Photon. Technol. Lett., **19** (2007) 1322.
- 4) S. Sudo *et al.*: ECOC (2007) 9.2.3.
- 5) S. Sekiguchi *et al.*: OFC (2007) OMS4.
- 6) K. Nakamura *et al.*: OFC (2007) OMK5.
- 7) 後藤田光伸他：秋季応物講演会 (2007) 7p-C-5.
- 8) K. Nakahara *et al.*: IEEE Photon. Technol. Lett., **19** (2007) 1436.
- 9) S. Makino *et al.*: OFC (2007) OMS1.
- 10) 小林 亘他：信学会ソサイエティ大会 (2007) C-4-12.
- 11) 石田 充他：秋季応物講演会 (2007) 7p-C-11.
- 12) D. Guimard 他：春季応物講演会 (2007) 29a-T-3.
- 13) 橋本 玲他：春季応物講演会 (2007) 28a-SG-5.
- 14) K. Yashiki *et al.*: IEEE Photon. Technol. Lett., **19** (2007) 1883.
- 15) 幸田倫太郎他：春季応物講演会 (2007) 29a-SG-2.
- 16) 赤川武志他：春季応物講演会 (2007) 29a-SG-4.
- 17) 津嘉川和隆他：春季応物講演会 (2007) 27a-ZQ-1.
- 18) S. Tamura *et al.*: ISCS (2007) TuA LN-2
- 19) K. Okamoto *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **46** (2007) L187.
- 20) H. Hirayama *et al.*: ISCS (2007) ThA II-6.
- 21) 若林和弥他：秋季応物講演会 (2007) 7a-C-3.
- 22) 田中隆之他：秋季応物講演会 (2007) 7a-C-2.
- 23) 佐藤具就他：秋季応物講演会 (2007) 6a-C-10.
- 24) 枝村忠孝他：秋季応物講演会 (2007) 7p-C-14.
- 25) K. Sakai *et al.*: ISCS (2007) ThB I-5.
- 26) 富士田誠之他：春季応物講演会 (2007) 28p-ZB-2.
- 27) 岩本 敏他：春季応物講演会 (2007) 28p-ZB-3.
- 28) A. Shirakawa *et al.*: CLEO (2007) CMC5.
- 29) B. Dussardier *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CJ8-2-FRI.
- 30) D. Gapontsev *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CP2-3-THU.
- 31) F. Di Teodoro *et al.*: CLEO/QELS (2007) CFI3.
- 32) G. Chang *et al.*: CLEO/QELS (2007) CMEE4.
- 33) F. He *et al.*: CLEO/QELS (2007) CMEE5.
- 34) D. Schimpf *et al.*: CLEO/QELS (2007) CMEE6.
- 35) D. N. Papadopoulos *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CP2-5-THU.
- 36) C.-H. Liu *et al.*: CLEO/QELS (2007) CTuBB3.
- 37) S. Matsubara *et al.*: CLEO/QELS (2007) JWA81.
- 38) R. Peters *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CP1-7-THU.
- 39) S. V. Marchese *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CF3-2-MON.
- 40) S. Redmond *et al.*: CLEO/QELS (2007) CTuHH5.
- 41) A. Sträber: CLEO/QELS (2007) CThT2.
- 42) T. Kamimura *et al.*: CLEO/QELS (2007) CThT6.
- 43) T. Saiki *et al.*: CLEO/QELS (2007) CThT3.
- 44) D. Kracht *et al.*: CLEO/QELS (2007) CThT5.
- 45) R. Huss *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CA3-5-MON.
- 46) S. G. Goldring *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CA-28-MON.
- 47) B. Zhdanov *et al.*: CLEO/QELS (2007) CPDB2.
- 48) M. Dubinskii *et al.*: CLEO/QELS (2007) CTuN1.

- 49) M. Mark *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CA6-5-TUE.
- 50) D. Brown *et al.*: CLEO/QELS (2007) CTuHH4.
- 51) Y. Akahane *et al.*: CLEO/QELS (2007) CWD6.
- 52) K. Ogawa *et al.*: CLEO/QELS (2007) CWD7.
- 53) S. Fredrich-Thornton *et al.*: CLEO/QELS (2007) CFJ6.
- 54) M. Engholm *et al.*: CLEO/QELS (2007) JTUA61.
- 55) J. Bouillet *et al.*: CLEO/QELS (2007) JTUA76.
- 56) Y. Yamashita *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) CJ-4-TUE.

6. 量子光学・非線形光学

NiCT 大館 暁
産総研 吉澤明男

6.1 概 要

筆者の専門は、量子情報技術への応用を目的とした量子光学分野である。そのため本報告が、やや偏った分野の進展に対してのみ記載することをはじめにお詫びしたい。

光の量子力学的状態の生成と制御は、量子情報技術に適用されることを念頭に置いて、現在世界的に盛んに研究されている。量子光学では、基本的に非線形光学技術を利用して光の量子力学的な状態の生成・制御が行われるので、量子光学の進展とは非線形光学技術の発展と密接に関連している。量子光学では光のさまざまな自由度を量子力学的状態に用いるが、これらの分類は大きく分けて連続変数と離散変数という2つに大別される。しかしながら近年、これら2つの境界領域、もしくはハイブリッドに用いるような動きがみられるようになってきた。また光の量子状態検出には近年まで半導体のAPDが使われるのが主流であったが、2007年に入って、超伝導体を用いたものが多く使われるようになってきた。

6.2 量子力学的状態の生成とその制御

連続変数の量子テレポーテーションや、その量子力学的状態の生成・制御は、スクイズド光の生成とそれら測定精度の向上によって年々進歩している。非古典的状态であるスクイズド光を、高品質に量子テレポーテーションした報告があった¹⁾。0.76という高いフィデリティー値でこの量子テレポーテーションを実現させるため、高レベルのスクイズド光(-6.2 dB)が用いられた。また同じグループから、コヒーレント状態の超高品質な量子テレポーテーションが行われた(フィデリティー値:0.83)²⁾。連続変数の分野は、非ガウス状態の生成と制御技術も重要である。スクイズド光から単一光子を除去する手法を用いて、巨視的なシュレーディンガーの子猫状態が生成された³⁾。このことによって、連続変数での基底状態の生成とその状態制御への応用が期待される。

離散変数に関しては外部環境からの統計ゆらぎを抑える

技術や、多光子での量子力学的状態生成、クラスター量子計算のアルゴリズム検証などに興味をもたれている。単一量子ビットを伝送するときに補助量子ビットを並行して伝送させ、受信時にそれらを混合させることによって、外部環境から受ける統計ゆらぎを抑える実験が報告された⁴⁾。一方、通信波長帯の量子力学的状態生成はこれまで可視光領域に比べてやや遅れを取っていたが、コンパクトで冷凍機のいらぬ量子もつれ光子対源が報告された⁵⁾。

6.3 量子鍵配布

IPA, NiCT, AIST の共同主催で、10月に国際量子暗号会議 (UQC 2007) が開かれた。世界各国の量子暗号研究者が秋葉原に集結し、量子鍵配布技術の標準化の枠組みを作る必要があるというコンセンサスが得られた。最近のプレスリリースなどを見ると、量子鍵配布技術は成熟してきている感があるが、実は安全性に関する議論はまだ尽きていない。現在これらの技術は、理想的な単一光子状態を用いるものと、おとり状態と不完全な単一光子状態とを用いる場合の2つの手法に分かれている。これらの実験は、それぞれ異なるグループで報告された^{6,7)}。量子鍵配布のひとつの重要な技術に、光子検出器の高速化と高効率化がある。従来用いられてきた半導体 APD にかけるゲートバイアスを正弦波にした場合、繰り返し周波数 500 MHz まで高速動作可能である。この検出器を用いて、15 km の量子鍵配布の伝送実験が行われた⁸⁾。超伝導ナノワイヤー光子検出器を用いて、さらなる高速化と長距離化を目指した報告も行われた⁹⁾。これらはいずれも、世界記録を塗り替える成果であった。理論面では、おとり状態の光子源として自然放出パラメトリック下方変換過程を用いる方法が提案され、その解析が行われた¹⁰⁾。

6.4 量子デバイス

量子ビットの候補となりえる新たなデバイスの探索もされている。励起子分子における共鳴ハイパーパラメトリック散乱過程を用いて、波長 390 nm 付近でノイズの少ない量子もつれ光子対源が報告された¹¹⁾。強誘電体導波路をシリコン上で実現するハイブリッドシリコンフォトニクスは、今後さまざまな分野で適用される技術であることが予想されている。シリコン上に、マグネシウム添加ニオブ酸リチウム分極反転導波路を形成したことが発表された¹²⁾。量子光学技術を用いて量子情報処理を実現する場合、これらがキーテクノロジーとなることが期待される。

6.5 検出器と計測技術

光の量子力学的状態の測定には、検出器の開発も重要である。半導体 APD の性能を超えるような、超伝導体を利用した光子検出器の開発が活発になってきた。超伝導体を

用いた光子検出器は、現在大きく分けて2種類存在する。1つは、入力された光子によって超伝導体のクーパー対を破壊し、抵抗値ゼロの超伝導状態から常伝導状態に変化したときの抵抗値を読み出すことによって光子を検出する方法。もう1つは、超伝導臨界温度付近における抵抗値と温度に関する直線性を利用することによって、入力光子のエネルギーを温度から抵抗値に読み直して光子を検出する方法である。後者は入力光子のエネルギーがわかることから、入力された光子数を識別することが可能となる。これら両者とも、日本の研究機関で精力的に研究されている。後者の光子検出器は通信波長帯で、時定数 300 ns という高速なものが報告された¹³⁾。

光の量子力学的状態を用いると、古典光学における測定限界を超えることが可能になると期待されている。4光子の量子もつれ状態を用いて、古典力学的な限界を超えた高感度な光の位相測定が行われた。光を用いた精密測定分野において、量子光学は新たな手法となる可能性もある。

6.6 展望

量子光学の研究テーマは、基礎科学から応用研究に至るまで広く分布している。量子光学が今後どのような方向に発展をみせるか、筆者の能力では到底語ることはできないが、今後も自然科学と応用技術の両面で進展していく必要がある。応用研究に関して日本は常に先頭集団にいるが、未開拓な量子論の基礎研究もさらなる充実が必要であろう。また技術的な観点では、現在、量子力学的な光の状態は光励起で生成するものが主流にある。将来的には、半導体レーザーのような電流注入タイプで量子力学的な光の状態生成や制御が行われることが期待される。

文 献

- 1) H. Yonezawa *et al.*: Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 110503.
- 2) M. Yukawa *et al.*: arXiv:0710.0242 (2007).
- 3) K. Wakui *et al.*: Opt. Express, **15** (2007) 3568.
- 4) T. Yamamoto *et al.*: New J. Phys., **9** (2007) 191.
- 5) S. Odate *et al.*: Electron. Lett., **43** (2007) 1376.
- 6) 独立行政法人科学技術振興機構 2007/01/16 ニュースリリース。
- 7) 日本電気(株) 2007/01/17 プレスリリース。
- 8) N. Namekata *et al.*: Appl. Phys. Lett., **91** (2007) 011112.
- 9) H. Takesue *et al.*: Nat. Phys., **1** (2007) 343.
- 10) Y. Adachi *et al.*: Phys. Rev. Lett., **99** (2007) 180503.
- 11) G. Oohata *et al.*: Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 140503.
- 12) M. Harada *et al.*: CLEO (2007) JTuA116.
- 13) D. Fukuda *et al.*: CLEO/Europe-IQEC (2007) IC-16-TUE.

7. 近接場光学

東京大 田丸博晴

近年の光近接場の利用は、光を回折限界を超えて局在させることによる解像度の向上もさることながら、集光に伴う輝度の増強（電場増強効果）に注目した研究が増えてきている。特に、電場増強効果が光子の量子力学的な状態密度の変調であることに注目した発光効率の増強などは、急速に盛んになってきている。科研費・特定領域研究「光-分子強結合場」など分野横断的なプロジェクトも開始され、ますます盛り上がりを感じさせる1年であった。ここでは、金属系微細構造の話題を中心にこの1年を振り返る。

7.1 表面増強ラマン散乱 (SERS)

ナノ構造に伴う電場増強効果について最も盛んに研究が進められているのは、現在も SERS 関連である。単一の金属構造によるプラズマ共鳴光散乱とラマン散乱との関係は実験的に精力的に調べられており¹⁻³⁾、電磁気学的な効果と化学的な効果の関係などもまもなく定量的な議論が一般的になるものと期待される⁴⁾。応用を目指す研究としては、強い電場増強をもたらす均質・大面積な構造作製が議論されているが、ポーラスアルミナをベースにしたものがいくつか提案されている⁵⁻⁷⁾。一方で、1分子 SERS に必要な輝度をもたらす構造を設計するにあたり、数値計算と直接比較できる、よく定義された構造を微細加工によって作製し、その光学応答の詳細な議論も進められている⁸⁾。

7.2 非線形光学

SERS 以外の電場増強効果利用としては、プラズマ共鳴と非線形光学材料の組み合わせによる光双安定を目指した研究において、光励起によるプラズマ共鳴の変調の実験が報告された⁹⁾ ほか、微細構造のホットスポットにおける二光子吸収重合反応やそれを用いたホットスポットの可視化などが報告された¹⁰⁾。非線形光学の観察は局所増強度を直接的に確認するよい指標となるため、研究上重要であることはもちろんであるが、平均輝度を低く保ったまま尖塔値を高く取る、すなわち材料の熱破壊を避けつつ非線形現象を発現させるという研究は、特徴的な系が提案されればさらに盛んになるであろう。

7.3 発光・吸収制御

電場増強効果の逆の過程として、光の場の量子力学的状態密度を上げることにより、蛍光分子・量子井戸などからの発光確率（レート）を無輻射過程に対して増強させる研究が増えつつある¹¹⁻¹⁴⁾。一方で空間選択性を持ち高効率で電子系に光エネルギーを渡すための構造としてブルズアイ構造を有するナノフォトダイオードが提案されてい

る^{15,16)}。現在のフォトニックデバイスの主役である量子力学的な系と、プラズモニクな系との組み合わせは、既存の発光・吸収デバイスの機能を電場増強を伴う光近接場発生構造で高性能化するという概念的なわかりやすさの面からも、需要の面からも、最も産業応用に近い系と考えられ、金属系のナノ構造作製の精度が上がり設計通りの構造が作れるようになるにつれて重要度をさらに増していくであろう。

7.4 空間分布の観測

これら金属構造の増強場は微細構造の小さな曲率をもつ場所の近傍に局在していることは、おもに数値計算などの結果によって検証されてきているが、それを精密に観測する実験も引き続き報告されている。SNOM による金ナノロッドや微粒子ダイマーの二光子励起発光像¹⁷⁾ や、金属粒子間相互作用におけるトポグラフィと光応答の関係の観察¹⁸⁾ などが報告されている。7.2 節で紹介した二光子吸収重合反応による可視化¹⁰⁾ も *in situ* ではないが、空間分布の観察となっている。また、よりダイナミックな観測として、蛍光相関法を用いた光近接場の局在サイズの計測なども提案されている¹⁹⁾。

7.5 その他

光近接場相互作用によって、量子ドット間のエネルギー移動を制御し、光情報処理を行う研究が進められているが、複数の量子井戸をナノサイズの半導体ロッド上に形成し、カップリングを人為的に設計した結果が報告されている²⁰⁾。今後ともより厳格に制御・設計された系への展開が期待されている。

ところで、波長以下の人為的な構造によって負の屈折などの特異的な光学現象を発現させるメタマテリアルの研究が盛んになっているが、それら構造の中には、微細な構造に伴う強く局在した電磁場が鍵となっているものも多い。平面状にパターンニングされた凹型の構造による偏光回転現象について、可視域においてはプラズマ共鳴を用い²¹⁾、テラヘルツ域においては二重構造を用いることにより²²⁾ 強い空間的な電場分布をつくり出し、大きな旋光性が得られる様子が報告されている。

7.6 展 望

近接場光学は単純に分解能を上げるだけの光学ではない、といわれるようになってから久しいが、いくつかの芽が具体的な応用へと向けて動き始めていると感じられる。光子場の状態密度制御や、双極子禁制な励起など原理的なものはもちろんであるが、電場増強の利用にしても偶然起こる現象が必然として理解できるようになるにつれて、具体的に設計されるようにと移り変わってきた。局在するフ

ォトンを操るという意味での近接場光学は、ナノテクノロジーにおける光学としてみますその重要度を増していくであろう。

文 献

- 1) 伊藤民武他：春季応物講演会 (2007) 28a-ZX-5.
- 2) 伊藤民武他：秋季応物講演会 (2007) 7a-Q-5.
- 3) T. Ito *et al.*: Phys. Rev. B, **76** (2007) 085405.
- 4) M. Futamata *et al.*: Anal. Bioanal. Chem., **388** (2007) 89.
- 5) 近藤敏彰他：春季応物講演会 (2007) 28a-ZX-4.
- 6) 近藤敏彰他：秋季応物講演会 (2007) 7a-Q-7.
- 7) 納谷昌之他：秋季応物講演会 (2007) 7a-Q-1.
- 8) Y. Kurokawa *et al.*: Phys. Rev. B, **75** (2007) 035411.
- 9) 岡本敏弘他：秋季応物講演会 (2007) 7a-Q-14.
- 10) 村澤尚樹他：秋季応物講演会 (2007) 8a-Q-6.
- 11) 高見澤昭文他：春季応物講演会 (2007) 29p-ZX-8.
- 12) 望月有吾他：春季応物講演会 (2007) 29p-ZX-5.
- 13) Y. Ito *et al.*: Phys. Rev. B, **75** (2007) 033309.
- 14) 山本 巧他：秋季応物講演会 (2007) 7a-Q-6.
- 15) 藤方潤一他：春季応物講演会 (2007) 27a-ZW-4.
- 16) 岡本大典他：春季応物講演会 (2007) 27a-ZW-5.
- 17) 岡本裕己：春季日物講演会 (2007) 19aWH-7.
- 18) 島田透他：秋季応物講演会 (2007) 7p-Q-11.
- 19) 小幡昌宏他：春季応物講演会 (2007) 29a-ZX-6.
- 20) T. Yatsui *et al.*: Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 223110.
- 21) K. Konishi *et al.*: Opt. Express, **15** (2007) 9575.
- 22) K. Kanda *et al.*: Opt. Express, **15** (2007) 11117.

8. 光応用計測

大阪電気通信大 日坂真樹

8.1 概 要

近年の光応用計測は、高出力レーザーと高感度低ノイズ光検出器のめざましい進歩に伴って大きな変革を遂げてきた。特に、高出力・超短パルスのフェムト秒パルスレーザーは種々の物理現象を利用した新しい非線形光計測を実現し、また、レーザーの短パルス化に伴う波長の広帯域化はフーリエ面での新しい光計測法や高波長帯域光源の技術をもたらした。さらに、高感度かつ低ノイズな光検出器の進歩は、多光子吸収や高調波を利用した顕微計測・分光計測における微弱光検出やイメージングを可能にしてきた。これらの革新的な光学機器の発展にあいまって、非線形計測や医用光計測、テラヘルツ計測などの新しい光計測技術を可能とし、近年、光計測は活気ある研究がなされている。ここではこれらの新しい光技術を応用した光計測を中心に、進展がみられた種々の光計測についてふれる。

8.2 顕微計測

顕微計測では非線形計測をはじめ、プラズマ共鳴やラマン散乱に関する報告があった。フェムト秒レーザーを利用した顕微計測では、第二高調波を利用したコラーゲン繊維

分布の *in vivo* 光断層観察^{1,2)} やガラス中に生成した衝撃波のポンプ・プローブイメージング³⁾ の報告があった。また、表面増強ラマン分光を利用した計測では、酵母細胞壁上の単一銀ナノ粒子の観察⁴⁾ がなされた。プラズマ共鳴を利用した計測では、0次ベッセル光を用いた局所励起表面プラズモン顕微鏡⁵⁾ やアレイ状銀ナノロッドのナノイメージング⁶⁾ が興味深かった。さらに、単一細胞の表面形状や弾性力を計測するためのマイクロプローブ非接触振動システム⁷⁾ や収差の影響を低減した傾斜型共焦点三次元計測システム⁸⁾、観察画像の勾配成分を抽出するための位相変調型微分干渉顕微鏡⁹⁾ などの進展もみられた。

8.3 テラヘルツ計測

テラヘルツ波に関連する研究は2007年も非常に活発に議論された。その中で、テラヘルツ波応用計測では、光ファイバープローブとレーザーテラヘルツ放射顕微鏡とを融合した高分解能計測¹⁰⁾ や大口径アンテナを用いた三次元テラヘルツ光断層像の高S/N観察¹¹⁾、金属開口アレイによる微量試料の高感度テラヘルツイメージング¹²⁾、テラヘルツ帯フォノンを用いた分極反転LiNbO₃のCARSイメージング¹³⁾、機械的走査を除去した動的サンプルの線集光型テラヘルツ時間領域分光イメージング¹⁴⁾ など、実用計測に向けた進展がみられた。

8.4 光ファイバー応用

光ファイバーを利用した光計測では、Erドープのフッ化物ファイバーレーザーの第二高調波による血中酸素濃度測定¹⁵⁾ やシングルモード光ファイバーを点光源としたPS/PDI (phase-shifting point diffraction interferometer) による大口径ミラーの真球面ずれ測定¹⁶⁾、長周期光ファイバグレーティングの透過スペクトルやピーク波長の変化を利用した振動計測¹⁷⁾ などのセンシングに関する報告があった。

8.5 そ の 他

試料面に垂直な偏光成分 (z成分) の電場を形成するラジアル偏光ビームを用いた研究も興味深かった。ラジアル偏光ビームによる第二高調波を利用した自己組織化単分子膜の観察¹⁸⁾ やラマンシグナルを選択的に計測する偏光分解顕微ラマン分光観察¹⁹⁾、誘電体球に作用する光トラッピング力の検討²⁰⁾ などが報告され、新しい偏光ビームとして期待できる。

また、光ピンセットで補足した2つの微粒子の相互作用から流体力学的な相互作用の計測²¹⁾ やレーザー光の周波数コムを利用した三次元計測による三次元プロファイル計測²²⁾、空間分解能を有する蛍光相関分光計測のためのEM-CCDを用いた臨界角照明の検討²³⁾ などの新しい試み

も興味深かった。

8.6 展 望

短パルスレーザーや高感度検出器など種々の光学機器の発展によって、非線形物理を用いた新しい計測法の開拓が積極的に進められてきた。それらの恩恵は物理現象の解明だけではなく、工学や医学・生物学の広い産業分野にも大きな貢献をもたらしている。今後も技術革新に伴って新しい光計測法の開拓が続くと期待できる。また、それと並行して、それらの最先端の光学機器にとらわれない、新しい計測原理を利用した光計測法の開拓も引き続き必要である。

文 献

- 1) 高橋 由他：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-10.
- 2) 伊藤誠啓他：光学, **36** (2007) 35.
- 3) 古賀正晃他：OPJ (2007) P23.
- 4) 伊藤民武他：OPJ (2007) P22.
- 5) 渡辺向陽他：秋季応物講演会 (2007) 5a-R-8.
- 6) 小野篤史他：秋季応物講演会 (2007) 8p-Q-8.
- 7) 下所和弘他：OPJ (2007) 26aA5.
- 8) 久野雄也他：OPJ (2007) 26aA6.
- 9) 原野良彦他：OPJ (2007) 26aA8.
- 10) 内田直次他：春季応物講演会 (2007) 29p-J-14.
- 11) 北原英明他：春季応物講演会 (2007) 29p-J-9.
- 12) 鈴木貴裕他：春季応物講演会 (2007) 29p-J-4.
- 13) 四方潤一他：秋季応物講演会 (2007) 7a-ZB-2.
- 14) 井原淳之他：OPJ (2007) 26aC2.
- 15) 山根 大他：春季応物講演会 (2007) 28a-S-10.
- 16) 松浦敏晋他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-1.
- 17) 杉友宏行他：秋季応物講演会 (2007) 6p-N-18.
- 18) 蘆田幸一郎他：OPJ (2007) 26aC5.
- 19) 平賀大吾他：OPJ (2007) 26aF2.
- 20) 川内 光他：春季応物講演会 (2007) 27a-ZX-11.
- 21) 市橋和明他：OPJ (2007) 26aC1.
- 22) 崔 森悦他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-14.
- 23) 松本将宜他：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-13.

9. 干 渉 計 測

産業技術総合研究所 尾藤洋一

9.1 はじめに

干渉計測は、光源の波長を測定の基本(目盛り)とし、非接触、高分解能、かつ高精度に測長や形状計測が可能な技術としてさまざまな場面に応用されている。11月に開催された Optics & Photonics Japan 2007 においても、約 30 件の干渉計測に関連する発表があり、活発な議論が交わされた。干渉計測に利用される光源としては、伝統的な He-Ne レーザーをはじめとして、低コヒーレンス光源 (SLD, 白色光源) や波長走査レーザー (半導体レーザー) 等が挙げられるが、近年は (超短) パルスレーザーなどの新しい光源も使用されるようになってきている。また、位

相測定に関しても、デジタルホログラフィーが用いられる等、さらなる広がりをみせている。ここでは、干渉計測に関連した研究の進展状況を、手法ごとに分類し概観する。

9.2 白色干渉計・低コヒーレンス干渉計

白色光源や SLD を光源として用いた白色干渉計及び低コヒーレンス干渉計は、近年最も活発に研究が行われている分野のひとつである。なかでも、光コヒーレンストモグラフィ (OCT) は生体計測に応用され、実用的な研究がなされている。具体的な応用例としては、精神性発汗¹⁾ や人指小動脈・小静脈²⁾ の測定に関する報告がなされた。また、測定手法に関しては、回折光を参照光に用いる非走査タイムドメイン OCT の改良に関する報告³⁾、波長走査型 OCT 用の光源としてプログラマブル高速波長走査レーザーの提案⁴⁾があった。生体計測以外への応用例としては、波長可変超短パルス光源を用いた全ファイバー型の高速三次元光計測システムの開発⁵⁾、光周波数コムとリニア・イメージセンサーを用いた三次元計測法の提案⁶⁾等、これまでにない新しい光源を利用した手法に関する報告がなされた。

OCT 以外では、位相ゼロクロス情報を用いた白色干渉計測法の提案⁷⁾、幾何学的位相によるナル干渉計の波長無依存性⁸⁾、広視野白色干渉計によるフィルム歪みの解析⁹⁾に関する報告がなされた。

9.3 波長走査干渉計

波長走査干渉計に関する報告は、近年減少傾向にあるように感じられる。高精度な測定を目的とした、波長走査と機械式位相シフトを組み合わせた段差形状の干渉計測法の提案¹⁰⁾、半導体レーザーの周波数変調を利用したフリンジカウント法の提案¹¹⁾、液晶フィルターを利用した広帯域正弦波波長走査干渉計¹²⁾に関する報告などがなされた。また、波長走査干渉計用の光源として、ピエゾ素子の代わりにレンズ駆動を利用した外部共振器型の半導体レーザーの報告があった¹³⁾。

半導体レーザーの波長走査を利用した干渉計は、生体計測用の OCT と同様に完全に実用化された技術ではあるが、平面度測定用干渉計など市販の装置においては PZT 駆動を利用したものがいまだ主流である。今後、波長走査干渉計のさらなる進展に期待したい。

9.4 従来型干渉計

従来型の干渉計に関しては、対象を限定した測定法に関する報告が数多く見受けられた。マッハ・ツェンダー干渉計を用いた光ディスク基板の欠陥計測¹⁴⁾、プリズムペアを利用した高精度固体屈折率測定¹⁵⁾、シャリング干渉法を利

用した水中衝撃波の観測¹⁶⁾、ファブリー・ペロー干渉計を用いた太陽光の時間的コヒーレンス評価¹⁷⁾などが報告されている。また、フィードバック位相制御を利用した微小位相物体計測システム¹⁸⁾に関する報告もあった。ヘテロダイン干渉計においては、擬似ランダム変調を用いた高感度化、高機能化に関する提案がなされた¹⁹⁾。

位相シフト干渉計に関しては、ウォラストンプリズムを用いた共通光路位相シフト干渉顕微鏡の応用²⁰⁾や偏光回転位相シフト干渉計の二波長への展開に関する報告²¹⁾、AOMによる周波数シフトを利用した高精度位相シフトの提案²²⁾などがあった。実用的な応用例としては、ファイバーコアを点光源とした大口徑ミラー計測用干渉計の精度評価に関する報告がなされた²³⁾。また、縞解析の手法としてウェーブレット変換の検討に関する報告もあった²⁴⁾。

9.5 デジタルホログラフィー

デジタルホログラフィーは近年進展の著しい分野である。位相シフトデジタルホログラフィーを基本として、上述した、低コヒーレンス干渉、波長走査干渉計、多波長干渉計などを適用することにより、さまざまな展開をみせている。

位相シフトデジタルホログラフィーにおいて、90度位相シフトした2枚の干渉縞画像による位相情報取得が提案された^{25,26)}。低コヒーレンス干渉関連では、低コヒーレンスデジタルホログラフィーにおける測定誤差の評価や形状計測精度の考察に関する報告があった^{27,28)}。波長走査関連では、半導体レーザーの波長走査を利用した多波長デジタルホログラフィー干渉法による不連続段差計測が報告された²⁹⁾。また、具体的な応用として、デジタルホログラフィーによる塗料の乾燥状態モニタリングに関する報告があった³⁰⁾。

9.6 その他

その他、デバイスに関してワイヤグリッド偏光子を参照ミラーに用いた共通光路干渉計の提案³¹⁾、サブナノメートルの精度を有する装置として、STMと光波干渉計を用いたエンコーダー校正装置に関する報告³²⁾などがあった。

9.7 展 望

光干渉計測分野の大まかな分類を行い、昨年の研究発表および論文を概観した。デジタルホログラフィーの応用など新しい展開をみせている分野もあるが、全般的に新しい手法の提案に関する報告が減少しているように感じられた。この状況はここ数年来の傾向であり、この欄においても同様の指摘が続いている。これは、研究がより実用的な方向へ進んでいることもあるが、一方で、新しい手法の提案につながるような新しいデバイスが少ないことも原因と

考えられる。従来、この分野の研究は測定手法やアルゴリズムに関するものが中心であったが、今後、干渉計測のさらなる進展のためには、計測手法だけではなくデバイスも含めた研究開発が重要となってくると思われる。

文 献

- 1) 山田晃寛他：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-1.
- 2) 桑原光巨他：OPJ (2007) 26aM3.
- 3) 渡部裕輝他：春季応物講演会 (2007) 28a-R-2.
- 4) 興梠元伸他：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-6.
- 5) 太田健史他：秋季応物講演会 (2007) 4p-R-9.
- 6) S. Choi *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **46** (2007) 6842.
- 7) 木村高啓他：OPJ (2007) 26aB1.
- 8) 横地界斗他：OPJ (2007) 26aB3.
- 9) 菅原 滋他：OPJ (2007) P35.
- 10) 日比野謙一他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-2.
- 11) R. Onodera *et al.*: Rev. Sci. Instrum., **78** (2007) 093104.
- 12) O. Sasaki *et al.*: Appl. Opt., **46** (2007) 5800.
- 13) 丸山司峰他：秋季応物講演会 (2007) 4p-R-13.
- 14) 大澤剛志他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-13.
- 15) 堀 泰明他：秋季応物講演会 (2007) 4p-R-11.
- 16) 深山誉章他：OPJ (2007) 28pB4.
- 17) 依田秀彦他：OPJ (2007) 28pB3.
- 18) 羽根坂円彩他：OPJ (2007) P33.
- 19) D. A. Shaddock: Opt. Lett., **32** (2007) 3355.
- 20) 永田光次郎他：OPJ (2007) P30.
- 21) 喜入朋宏他：秋季応物講演会 (2007) 4p-R-6.
- 22) M. Atlan *et al.*: Opt. Lett., **32** (2007) 1456.
- 23) T. Matsuura *et al.*: Opt. Rev., **14** (2007) 401.
- 24) 清原 亮他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-4.
- 25) 喜入朋宏他：OPJ (2007) P29.
- 26) 田原 樹他：OPJ (2007) 26aB6.
- 27) 尾高光恵他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-10.
- 28) 宮下陽平他：OPJ (2007) P34.
- 29) 加藤 誠他：OPJ (2007) P31.
- 30) 井田登士他：春季応物講演会 (2007) 28p-S-8.
- 31) 中田俊彦他：OPJ (2007) 28pB2.
- 32) M. Aketagawa *et al.*: Meas. Sci. Technol., **18** (2007) 503.

10. 光情報処理

京都工芸繊維大 栗辻安浩

10.1 概 要

近年の光情報処理分野においては、三次元計測、三次元表示などを要素技術とするビジュアルインターフェース、情報セキュリティなどを目指した研究が多く報告されており、実用化を目指した研究が進みつつある。一方、量子計算やDNA計算など新規アイデアに基づく光演算や光メモリなどの基礎研究も報告されており、基礎・応用の両面においても着実に進展している。

本会の情報フォトニクス研究グループでは、新たに情報技術におけるフォトニクスワーキンググループ、デジタルホログラフィーワーキンググループが発足し、高度ビジ

ュアルインターフェースフォトニクスワーキンググループとともにこれらの研究分野を牽引している。2008年11月に淡路島でInternational Topical Meeting on Information Photonics 2008 (IP 2008) が開催される予定であり、この国際会議のプレミーティングが2007年12月に淡路夢舞台国際会議場にて行われた。このプレミーティングでは、情報フォトニクスに関して国内の研究者、特に中堅で今最も活動的な研究者の最新の研究成果の発表と討論が活発に行われた。

10.2 高度ビジュアルインターフェースフォトニクス

ホログラフィーが究極の三次元画像形成技術として研究が続けられている。実物体を対象とした全方向視差ホログラフィックステレオグラムの記録¹⁾、計算機合成円筒ホログラムの高速計算法²⁾、ホログラム表示のための空間光変調素子の水平・垂直解像度変換³⁾について報告された。超高速現象のビジュアルインターフェースとして、光の伝搬の三次元像をスローモーション動画として観察できるホログラフィーでは、フェムト秒光パルスの再生像の解析についてが報告された⁴⁾。非ホログラフィックな技術として、光三次元計測と体積走査型ディスプレイによる三次元映像伝送⁵⁾や両眼表示時間差により知覚される距離の測定⁶⁾の報告がされた。

10.3 デジタルホログラフィー、複眼撮像技術

光学的暗号化を行うために半導体レーザー位相シフトを行うデジタルホログラフィーシステム⁷⁾、低コヒーレンス光源を用いた形状・反射率計測⁸⁾、二段階の位相シフト計測法を一度の撮影で行う位相シフトデジタルホログラフィー⁹⁾について報告がされた。複眼撮像技術を用いた画像取得計測として近接被写体に対する連立眼撮像モジュールの開発¹⁰⁾、物体抽出¹¹⁾が報告された。

10.4 情報セキュリティ

暗号化された二次元画像パターンを観察する際に、表示される条件や観察される視覚復号暗号についての近年研究が行われている。周期パターンを復号鍵とする視覚複合型暗号法が報告された¹²⁾。ランダム位相符号化を用いた光学的暗号に対する脆弱性への対処法について^{13,14)}の報告もされた。

10.5 光演算、光メモリー

情報を二次元画像に展開し、並列情報処理を行う光演算について用途を特定した新たな技術が報告された。素因数分解の基礎となる剰余演算の光学的実現方法について報告された¹⁵⁾。物体認識として、全光型相関顔認証システム¹⁶⁾、非線形特性を最適化した結合変換相関計¹⁷⁾が報告された。DNAの自律性や反応並列性を利用して光を用い

てDNAを制御し情報を処理する光DNA計算が研究されている。連続ヘアピンDNAの逐次制御に基づく階層的分子アドレッシング¹⁸⁾、光駆動型DNAナノマシンのステップ動作制御が報告された¹⁹⁾。また、ナノ形状制御による近接場光を応用した階層性メモリーが報告された²⁰⁾。

10.6 展 望

これまでに光情報処理ではさまざまな研究が行われてきたが、光がもつ高速性、情報の多重伝送・処理性、非接触性など多くの特長の中でも、とくに画像伝送・取得、形成能力、可視性を利用した技術や装置が最近では盛んに研究されている傾向にある。この背景には、最近の計算機の大容量化・高速化、撮像素子の画素数の向上と画素の高密度化、空間光変調素子の画素数の向上と高速化などデバイスの進展が大きく貢献し、当時ではアイデアレベルの研究が具現化・装置化できる可能性が見えてきたことにある。情報処理・通信技術、デバイスの今後の進展を考えると、これらの光情報処理技術や装置化研究も加速し、三次元デジタルカメラ・スキャナー、三次元ディスプレイが生産現場、教育現場、家庭で近い将来に利用できることが大いに期待できる。

文 献

- 1) 小崎遼太他：秋季応物講演会 (2007) p. 1027.
- 2) 柏木暁史他：OPJ (2007) p. 426.
- 3) 林 勇樹他：OPJ (2007) p. 474.
- 4) 葛原あゆみ他：OPJ (2007) p. 428.
- 5) 宮崎大介他：秋季応物講演会 (2007) p. 1027.
- 6) 西村勇人他：春季応物講演会 (2007) p. 1080.
- 7) 高橋 毅他：春季応物講演会 (2007) p. 1073.
- 8) 宮下陽平他：春季応物講演会 (2007) p. 1075.
- 9) 田原 樹他：OPJ (2007) p. 92.
- 10) 田邊浩之他：春季応物講演会 (2007) p. 1078.
- 11) 堀崎遼一他：春季応物講演会 (2007) p. 1078.
- 12) 生源寺類他：春季応物講演会 (2007) p. 1072.
- 13) 田島英朗他：春季応物講演会 (2007) p. 1073.
- 14) 北濃元樹他：秋季応物講演会 (2007) p. 1023.
- 15) 南 智之他：OPJ (2007) p. 422.
- 16) 太田真衣子他：春季応物講演会 (2007) p. 1074.
- 17) 高橋 毅他：OPJ (2007) p. 466.
- 18) 豎 直也他：春季応物講演会 (2007) p. 1079.
- 19) 堀口裕一郎他：OPJ (2007) p. 462.
- 20) 成瀬 誠他：春季応物講演会 (2007) p. 1077.

11. 画 像 処 理

科学警察研究所 赤尾佳則

11.1 概 要

画像処理、三次元画像情報の取得および再構成、計算機ホログラム等の分野では、着実な研究開発の進展があり、活発な研究発表が行われた。本稿では、Optics & Photo-

tics Japan, 応用物理学会講演会の画像処理のセッションで発表された講演を中心として, 2007年の進展を概観したい。

11.2 色と見えにかかわる画像処理

顔の見える再現に関して, 顔の形状と双方向反射率分布関数 (BRDF) を線光源の配光分布を考慮したスキャナシステムで測定し, 計測値の客観評価, 再現画像の主観評価を行った研究¹⁾, さらに, 顔の動画から得られた色成分, 陰影成分, 位置, 方向の情報との融合により, 任意照明環境下での見えを実時間レンダリングする方法²⁾が報告された。照明環境の測定方法では, 鏡球配列を用いる方法において, 隣接鏡球の相互反射等を考慮し, 最適な測定条件を求めた報告³⁾, また透明物体の見えるに関して, 空間コード化法による光線経路の決定, 透明物体配置前後の比率画像からの透過率算出, さらにGPUの利用により, リアルタイムな画像再現を行った研究⁴⁾が報告された。構造色の色再現に関しては, BRDFをモデル化し, 3バンドカメラ信号からエンボスホログラムの回折光スペクトルの中心波長と幅を推定した報告⁵⁾があった。その他, 印刷物の色再現に関して, 網点面積率の計測を目的とした網点抽出アルゴリズム⁶⁾, PCディスプレイの色補正に関して, 小型LCDを色票とした目視比較法による調整法⁷⁾について報告された。

11.3 マルチバンド画像処理

RGB画像情報と被写体スペクトルの多点計測データとの融合により, 色再現性を向上させる研究に関して, スペクトルの計測点数とスペクトルセンサーのバンド数と事後確率最大化 (MAP) 推定精度の関係について報告され⁸⁾, 低SNマルチスペクトル画像における色推定誤差とノイズの低減法に関しては, 波長方向に空間方向を加えた三次元のウィナー推定法を適用する方法が提案された⁹⁾。また, H&E染色病理標本の色強調手法として, 16バンドのマルチスペクトル画像のKL変換, 重み係数の設定により, コラーゲン繊維と平滑筋との違いを可視化する方法¹⁰⁾について報告された。

11.4 三次元画像処理・計算機ホログラム関連

光線再生法による三次元画像再生に関して, 円筒型ディスプレイを用いた三次元ディスプレイの表示領域・解像度・ぼやけの3つのファクターを考慮した設計指針が提案, 検証され¹¹⁾, また三次元空間上に二次元画像を階層的に配置して表示するアルゴリズムが提案された¹²⁾。物体の傾斜二次元切断面画像を順次表示して三次元像を形成する体積走査三次元ディスプレイに関しては, 表示画像のディザリング処理により, 三次元画像を多諧調化する方法が報

告された¹³⁾。ホログラフィック・ステレオグラムに関して, 再生光線の角度特性測定システムの構築とその特性評価について報告された¹⁴⁾。また, 計算機ホログラムにおける量子化誤差低減に関して, ヒストグラム分布を利用した変動量子化値を用いる方法が提案され¹⁵⁾, 低量子化数キノフォームの最適化では, 直接探索法の初期分布を繰り返す法により求める方法が報告された¹⁶⁾。そのほか, スペクトルのない点状再生像が得られる計算機ホログラムのコーディング法¹⁷⁾, 焦点系列画像からの三次元情報取得に関して, 合焦位置決定に影響を受ける物体条件の調査¹⁸⁾などが報告された。

11.5 セキュリティ関連

春期応物講演会では, 新画像システム研究会企画のシンポジウム「光・画像に基づく本人認証システムの展開」が開催された¹⁹⁾。周期的パターンを鍵画像として用いる視覚復号型暗号法に関して, 液晶ファインダーへの縮小表示を復号として利用し, その際の位置合わせを考慮して補助画素を回転させる方法が提案された²⁰⁾。暗号画像情報の高速な光復号, 照合に必要となる二値暗号ホログラムの最適化に関して, 同時反転処理するピクセル数の割合の減少法などが検討された²¹⁾。そのほか, 所有物認証に関して, 三次元散乱物体の内部に埋め込んだ吸収体の内部吸収情報をデータ記録および認証に利用する方法²²⁾が提案された。

11.6 展 望

光学に基礎を置く画像処理は, 単なる画像情報の処理ではないオリジナリティーがあり, 質感, 見え, 分光情報, 三次元情報などの高次元情報を扱う画像処理, また立体ディスプレイやセキュリティ応用など, 時代が求める応用分野とのかかわりにより, 今後も着実な進歩が期待できる。従来のかかわりにとらわれない新しい研究, 開発に関する講演があり, 今後の進展が楽しみである。

文 献

- 1) 本間隆介他: *OPJ* (2007) 26aE3.
- 2) 牧野貴雄他: *OPJ* (2007) 26aE4.
- 3) 矢野奈津三他: 春季応物講演会 (2007) 27aSB3.
- 4) 落合桂一他: *OPJ* (2007) 26aE7.
- 5) 山口雄也他: 春季応物講演会 (2007) 27aSB8.
- 6) 畔岡健太他: *OPJ* (2007) P43.
- 7) 櫻井裕樹他: *OPJ* (2007) P45.
- 8) 家富邦彦他: *OPJ* (2007) 26aE5.
- 9) 村上百合他: 春季応物講演会 (2007) 27aSB7.
- 10) パウティスタ ピンキー他: *OPJ* (2007) 26aE8.
- 11) 安川智規他: *OPJ* (2007) 26aE1.
- 12) 井上文彦他: 春季応物講演会 (2007) 27aSB2.
- 13) 本田武士他: *OPJ* (2007) 26aE2.
- 14) 樋口晴彦他: 春季応物講演会 (2007) 27aSB1.
- 15) 中田成紀他: *OPJ* (2007) 28aC3.

- 16) 小城心平他：OPJ (2007) 28aC4.
- 17) 鳥居康弘：秋季応物講演会 (2007) 7pX18.
- 18) 原田康浩：秋季応物講演会 (2007) 7pX11.
- 19) 鈴木裕之：春季応物講演会 (2007) 27pSB1.
- 20) 生源寺類他：OPJ (2007) 28aC2.
- 21) 佐野辰臣他：春季応物講演会 (2007) 28aSB2.
- 22) 松木紳一郎他：OPJ (2007) 26aE6.

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

住友電工 勝山 造

12.1 概 要

本稿では、光通信およびその関連分野のデバイスを中心に、2007年の技術動向について述べる。2007年は、国内ではFTTH (fiber to the home) の加入者が1000万を突破し、ブロードバンド化が浸透した年であった。通信バブルからの回復と同時に、光部品の低価格化と技術革新がよりいっそう進んだ。その中で長距離・大容量伝送では、これまでの波長多重 (WDM) 伝送の次の方式として、多値伝送関連の技術開発が活発に行われ、これにかかわるデバイス技術の進展がみられた。アクセス系では、FTTHを中心としたデバイスの開発が、低価格化と高速化の流れの中で進んだ。さらに、機能集積が、InPベースとSi-Photonicsベース双方の技術を駆使して大きく進展した。また、環境問題への意識の高まりとともに、システム・デバイスの消費電力量の削減についての議論が活発化し、インターコネクション/光配線技術等の省電力化技術がこれまで以上に注目された年であったといえよう。

12.2 変 調 素 子

化合物半導体では、波長可変光源との集積化を想定して、広波長帯域のInPベースのマッハ・ツェンダー変調器 (MZM) の開発が進んでおり、10 GbpsでC+Lバンドをカバーするものや¹⁾、長距離用途としてのゼロチャープ駆動²⁾が報告されている。また、Siベースの変調器では、導波路コア内にp-n接合を形成し、コプレーナ電極構造での40 Gbps動作の実現³⁾や、SiGeでの電界吸収による変調の報告⁴⁾など、その技術革新には目を見張るものがある。また変調器応用のひとつの流れとして、周波数効率を改善するための多値変復調方式への適用が進んでいる。LN変調器を用いた80 Gbpsの差動四値位相変調 (DQPSK)⁵⁾や電界吸収型変調器 (EAM) を集積した80 Gbps DQPSK変調⁶⁾が報告されている。

12.3 ス イ ッ チ

光インターコネクション用途等のゲートスイッチとして半導体増幅器 (SOA) が注目されているが、90 nmの広波

長帯域化⁷⁾、32×32ポートの集積スイッチ⁸⁾、量子ドットアンプを用いたピコ秒オーダーのスイッチング⁹⁾などの進展がみられている。波長選択スイッチ (WSS) は、再構築可能なスイッチング・ルーティング (ROADM) 市場の立ち上がりに伴い、MEMS、PLC、液晶、ビエゾ素子等をベースとした方式の製品化が進んでいるが、今後波長選択の自由度の拡大や柔軟な運用への適合性が重要な課題となるであろう。

12.4 受 光 素 子

超高速化とSi-Photonics応用に関する進展がみられている。高速受光素子では、100 GHz以上の帯域で動作する高出力受光モジュールの報告¹⁰⁻¹²⁾が、Si-Photonics応用では、導波路結合型受光素子による30 GHzの周波数帯域の実現¹³⁾が報告されている。

12.5 集積素子・光インターコネクション

InPをプラットフォームとした集積化では、異種デバイスとの機能集積が進み、集積度も増加している。対称SOA-MZM構造による波長変換器¹⁴⁾、SOA、AWG、PDを40チャンネル集積した受信モジュール^{15,16)}などが注目すべき進展である。Si-Photonicsをプラットフォームとしたものでは、ウェハー貼り付けによる集積化と、Geに代表されるCMOSコンパチプロセスによる集積化のアプローチがある。前者では、シリコン導波路の導波モードにエバネセント結合するレーザーの性能向上や受光素子との集積化¹⁷⁾が、後者では、CMOSプロセスで電子デバイスとモノリシック集積した4×10 Gbpsトランシーバーの報告が注目される¹⁸⁾。光インターコネクション関連では、ノード、ボード間でテラビット級の高速データ伝送を低コスト、低消費電力で可能とする取り組みが活発に進んでいる。CMOSチップ上にVCSELとPDを集積した10 Gbps×16チャンネルのfull-duplexトランシーバーに関する報告¹⁹⁾、MMFシート上に送受デバイスを実装し、IC側と分離することで全体の信頼性を高める試み²⁰⁾や、8チャンネル×3列の導波路群をガラスブロックとして集積した直角コネクタ²¹⁾などの光接合技術の開発が進んでいる。

12.6 展 望

伝送応用の光デバイス開発は、ビット・距離積あたりのコスト低減に向けて、波長多重、高速化、多値化などの取り組みの中で、性能改善が進められてきた。今後もこの指標での性能・機能の向上が進む一方で、グリーンIT、エネルギー問題への意識が高まり、ビット・距離積あたりの消費エネルギー低減が新たに重要な指標となるであろう。このため、高効率、低消費電力で駆動可能なデバイスや、それらの集積化技術、光配線、光インターコネクション等

の省電力化のための光技術が大きく進展すると思われる。そして、さらにこれらの光技術が新たな応用分野を創出していくことを期待したい。

文 献

- 1) M. Nielson *et al.*: *ECOC* (2007) 10.3.2.
- 2) I. Betty *et al.*: *OFC* (2007) OWH6.
- 3) A. Liu *et al.*: *GFP* (2007) ThA6.
- 4) J. Roth *et al.*: *GFP* (2007) ThA1.
- 5) T. Kawanishi *et al.*: *OFC* (2007) OWH5.
- 6) C. Doerr *et al.*: *OFC* (2007) PDP33.
- 7) S. Tanaka *et al.*: *ECOC* (2007) 9.2.5.
- 8) E. Aw *et al.*: *ECOC* (2007) 4.3.2.
- 9) H. Wang *et al.*: *ECOC* (2007) 8.6.3.
- 10) J. Campbell *et al.*: *OFC* (2007) PDP29.
- 11) J. Sinsky *et al.*: *OFC* (2007) PDP30.
- 12) H. Bach: *ECOC* (2007) 5.5.1.
- 13) T. Yin *et al.*: *GFP* (2007) FD1.
- 14) J. Summers *et al.*: *OFC* (2007) OThT2.
- 15) F. Kish *et al.*: *OFC* (2007) OWP1.
- 16) R. Nagarajan *et al.*: *OFC* (2007) PDP32.
- 17) J. Bowers *et al.*: *OFC* (2007) OTuK4.
- 18) G. Masini *et al.*: *OFC* (2007) PDP31.
- 19) C. Schow *et al.*: *OFC* (2007) OThG4.
- 20) H. Hamasaki *et al.*: *ECOC* (2007) P048.
- 21) S. Hiramatsu *et al.*: *ECOC* (2007) P028.

13. 光 通 信

NTT 宮本 裕

13.1 概 要

総務省の統計によれば、日本国内のブロードバンド契約者数は2007年9月末時点で2776万となり、そのうち光ファイバーを用いたFTTH (fiber to the home) 光アクセスサービスの契約数が全体の38%を占め、初めて1000万を超えた¹⁾。光の広帯域性を活用したさまざまなアプリケーションの発展により、データ通信トラフィックは増え続けており、光アクセスネットワークとともに、メトロ・基幹光ネットワークのさらなる大容量化、経済化が必須となっている。以下では、光アクセスネットワークとメトロ・基幹光ネットワークの2つの分野から本年の光通信の進展について述べる。

13.2 光アクセスネットワーク

ユーザーと直接接続される光アクセスネットワークでは、経済的なFTTH光アクセスサービスの実現が可能なpassive optical network (PON) が広く実用化されている。PONでは、光ファイバー一芯で双方向通信を行い、上り・下り回線それぞれに異なる2波長を割り当てる。途中で光スプリッターと呼ばれる受動光分岐部で各ユーザーに分岐することで1つの信号帯域を複数のユーザーで効率

的に共有する。IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) で標準化され、国内で広く使われているGE-PON (Gigabit Ethernet PON) では、光信号の時間スロットを各ユーザーに割り当てるTDM (time division multiplexing) アクセス方式により、16ユーザー以上で1Gbit/sの帯域を共有する。さらなる大容量化に向けた次世代光アクセス方式の研究開発がすすみ、おもに、i) TDMアクセスの高速化方式、ii) 複数の波長を各ユーザーを割り当てるWDM (wavelength division multiplexing) アクセス方式、さらにはiii) 直交符号を各ユーザーに割り当てるCDM (code division multiplexing) アクセス方式の各観点から検討が進んでいる。TDMアクセス方式では、各ユーザーからのレベルが異なる信号が時間領域でTDMされ、上り信号が光バースト信号となる。よって、基地局側の装置OLT (optical line terminal) における上り光バースト信号の高感度光受信回路の実現がキー技術である。現在、IEEE 802.3 av委員会において、10Gbit/s級TDMアクセス方式(10GEPON)の標準化が進展しており、その実現にむけた10Gbit/s級光バースト受信回路が初めて報告された²⁾。また、1Gbit/s級PONから10G級PONへのスムーズな移行を想定し、1Gbit/sと10Gbit/sのデュアルレート光バースト受信が可能なOLTが報告された³⁾。一方、WDMアクセス方式は、10Gbit/sを超える大容量アクセス方式として検討されている。分岐数の増大とともに原理的な分岐損が増大し受信回路の高感度化が必要なTDMアクセス方式と比較すると、WDMアクセス方式は、波長合分波カップラーにより分岐するため、分岐損が分岐数によらず一定であり、信号光もストリーム信号となるため大容量化・高速化に適している。しかしながら、光アクセスネットワークにおける波長多重の経済化技術、特に各ユーザー側に配置される装置ONU (optical network unit) の波長制御を不要とするシステム構成(カラーレス化)がキー技術であり、種々の検討が進んだ⁴⁾。その他の光アクセス方式として、CDMアクセス方式や、OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 等を用いた方式⁵⁾が報告され、研究が活発化しているが、誌面の都合で省略する。

13.3 メトロ・基幹光ネットワーク

長距離基幹光ネットワークでは、1波長あたり40Gbit/s容量を伝送する大容量波長多重伝送方式が国内外で実用化された^{6,7)}。従来の強度変調・直接検波方式に代わり光位相変調・遅延検波方式が採用され、光通信分野においても位相変調方式が本格的に実用化された。関連部品技術に関し、四値差動位相変調光信号(DQPSK: differential qua-

drature phase shift keying) の実用的な 40 Gbit/s 光送受信モジュール技術^{8,9)}が報告された。このような中で、本年はさらなる高速信号の国際標準化活動が活発化した。IEEE では LAN (local area network) の高速化にむけ、40 Gbit/s Ethernet (40 GbE) ならびに 100 Gbit/s Ethernet (100 GbE) 規格の 2010 年完了目標にした標準化推進が合意された。一方、ITU-T SG 15 (International Telecommunication Union-Telecommunication Study Group 15) では、次世代高速イーサネット信号等の多様な信号を WAN (wide area network) に多重・収容し、長距離伝送する新しい超高速信号階梯 OTU4 (Optical Transport Unit 4) の国際標準化推進が合意された。OTU4 は、現在、光ネットワークの ITU-T 国際標準 G.709 勧告で標準化されている 40 Gbit/s 信号 (OTU3) の上位の信号階梯である。各国通信会社間等での 100 Gbit/s 級の超高速光信号の相互接続、ならびに長距離伝送を目的にしており、伝送速度や多重化構造等について標準化が加速すると考えられる。

上記の背景から、研究開発では、光ネットワークにおける 100 Gbit/s 級の長距離光伝送方式が活発に検討されている¹⁰⁾。80-100 Gbit/s 級 DQPSK (differential QPSK) 変復調とアナログ的な偏波多重分離による 20 Tbit/s 超の大容量伝送実験^{11,12)}が報告され、1 本のファイバーによる伝送容量記録が更新された。文献 12 では、上述した 100 GbE 長距離伝送に適した OTU4 信号階梯が実現可能な伝送速度 (111 Gbit/s) での超大容量伝送実験を報告している。一方、遅延検波からさらに進んで、電気デジタル信号処理を駆使してコヒーレント同期検波を行うデジタルコヒーレント伝送方式が近年注目されている。デジタルコヒーレント検波により、偏波多重分離¹³⁻¹⁵⁾や光 OFDM^{15,16)}等の新しい多重分離技術や、多値数が 4 値をこえる多値変復調符号技術¹⁷⁾など、光通信システムでは従来適用が困難であった技術の適用が可能となる。時間領域以外の偏波、周波数、多値化の自由度を用いることで、高速伝送時のシンボル速度を低減でき、超高速信号伝送で課題となる偏波モード分散や波長分散による距離制限を飛躍的に改善できる可能性がある。デジタルコヒーレント伝送方式では、従来のコヒーレント光通信方式では必要であった送信信号と局部発振光の周波数の厳密な一致が不要となり、電気段でのデジタル信号処理により光位同期が可能となる利点がある。電気段でデジタル信号処理を行うためには、高速の A/D、D/A コンバーターとリアルタイム動作が可能なデジタル処理回路が必要であるが、ほとんどの報告では、試験信号の一部をメモリーに取り込

んで計算機上で信号処理するオフライン処理で原理確認が行われている。2007 年は、超高速リアルタイム動作の実証した唯一の報告例として、20 Gbit/s QPSK (quadrature phase shift keying) 信号を偏波多重して生成した 40 Gbit/s 信号 (シンボル速度 10 Gbaud) のデジタルコヒーレント伝送実験¹³⁾が報告された。上述した以外にも、さまざまな超高速デジタル信号処理技術の光通信への応用が勢力的に検討され、今後の発展が期待される。

13.4 展 望

今後の光通信は、ますますユーザーに身近になり、専門知識がなくても容易に光通信を扱える運用性が求められると同時に、メトロ・基幹伝送ネットワークにおいては、通信需要の変動に応じて必要な超高速リンクを瞬時に設定するためのネットワーク制御技術や光伝送技術が必要となってくるであろう。無線伝送分野で培われたさまざまなデジタル変復調信号処理技術を応用することで、より使いやすい光通信技術を実現できる可能性があり、今後、これらの方式を実現するシステム技術、光デバイス技術が進展してゆくと考えられる。

文 献

文 献

- 1) http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/071218_4.html
- 2) S. Nishihara *et al.*: OFC (2007) PDP8.
- 3) S. Ide *et al.*: ECOC (2007) 8.4.5
- 4) H. Suzuki *et al.*: ECOC (2007) PD3.4.
- 5) D. Qian *et al.*: ECOC (2007) 5.4.1.
- 6) C.T Rice: FOE (2007) 基調講演.
- 7) K. Tomoyoshi *et al.*: OFC (2007) JThA45.
- 8) H. Hoshida *et al.*: ECOC (2007) P064.
- 9) Z. Tao *et al.*: ECOC (2007) 3.5.2.
- 10) Y. Miyamoto *et al.*: ECOC (2007) 10.5.1.
- 11) A. H. Gnauck *et al.*: OFC (2007) PDP19.
- 12) H. Masuda *et al.*: OFC (2007) PDP20.
- 13) K. Roberts: ECOC (2007) WS5.
- 14) G. Chalet *et al.*: ECOC (2007) PD1.6.
- 15) S. Jansen *et al.*: ECOC (2007) PD1.3.
- 16) A. Sano *et al.*: ECOC (2007) PD1.7.
- 17) M. Nakazawa *et al.*: OFC (2007) PDP26.

14. 光 記 録

大阪産業大 入江 満

14.1 概 要

2007 年、光記録分野では音楽 CD の誕生後 25 年を経て、ハイビジョン映像記録を目的とした青紫色レーザーを用いた高密度光ディスク (Blu-ray, HD DVD) の本格的な市場導入に到達し、民生用途を目的とした高 NA、短波長化による高密度記録のための技術開発の転換期を迎えた。

光メモリーはインターネット高度情報化社会における新たな用途として、その大容量性、安価・可搬性、互換性に着目し、e-文書法による公文書などの書類の電子化保存やハイビジョン映像などデジタル情報のアーカイバル保存のための業務用途への展開が注目されはじめた。アーカイバル用途としては、テラバイト (TB) 級の記録容量、記録された情報の信頼性確保が要求されるため、これらの課題の解決に向けた光記録技術の要素技術の研究が進展した。

14.2 次世代記録技術 (ホログラム, 多層, 二光子吸収等)

ホログラフィック記録では、マイクロリフレクターを用いるマイクロホログラムの四層記録 (波長 405 nm, 層間 50 μ m) の実証報告¹⁾が行われ、同軸型コリニア方式では、シフト多重記録特性の解析^{2,3)}より 1 TB 実現のための条件が導出され、高速記録再生を目的とした光ディスクの回転に同期して光スポットを移動させる記録方式⁴⁾やフォトリフレクティブ媒体を用いた ROM 高速複製^{5,6)}の提案が行われた。二光束方式ではドライブ設計のための記録再生時における各種のトレランス⁷⁾や ROM 型ホログラムの複製、簡易再生光学系の提案⁸⁾も報告され、実用化に向けた検討が進んだ。

多層記録では、0.1 mm のフィルム状ディスク 48 枚をカートリッジに収納して 2.7 TB を実現した複数光ディスク構成による媒体と装置^{9,10)}が報告され、テラバイト級光メモリーが実現された。1 枚あたりの記録容量を高める技術として、多層化記録では、多層化によって減少する再生信号の S/N 比を改善するため光通信分野で用いられているホモダイン検出法を応用した光信号検出方法¹¹⁾や、超解像媒体の多層化を実現するための三次元ピット選択方式の新たな記録媒体¹²⁾の提案が行われた。二光子吸収方式では、直径 102 mm, 厚み 4.5 mm のディスクに 300 層の記録を行い 250 GB を実現した報告¹³⁾や、108 層での安定な記録再生特性を検証し、200 層記録で 1 TB の可能性が提示¹⁴⁾され、導波路構造を用いたページ再生の報告¹⁵⁾も行われた。Super-RENS の超解像記録では、GeN 中間層を用いることにより 10^5 回の再生が可能であることが報告¹⁶⁾された。

14.3 要素技術 (コンポーネント, ヘッド等)

現行光ディスクのドライブ互換性を確保するための BD, HD DVD, DVD および CD 互換レンズを搭載した光ヘッドが開発¹⁷⁾され、SIL を用いた近接場記録のために球面収差補正 SIL¹⁸⁾やギャップサーボ, ティルト補正¹⁹⁾などの制御方式の改良²⁰⁾も報告された。

14.4 展 望

テラバイト級の記録容量を有する光メモリーが、アーカイバル情報保存媒体という新たな用途の開拓を目的として、その実現に向けて動き出した。既存技術を集積したカートリッジ方式の複数枚光ディスクの構成を用いて 1 TB を超える記録容量が達成され、実用化の検討が始まった。一方、単一光ディスクでは、ホログラフィック記録により実現の可能性が提示されたが、種々の記録方式による模索も続いている。今後の展開は、記録情報を安定に保持できる媒体の開発に依存しているといっても過言ではないと考える。ここでは媒体の開発状況には触れることはできなかったが、ホログラフィック, 二光子吸収記録の高感度化, 安定化に向けた媒体の改良も報告されている。

2006 年, ISOM の技術委員会では、光メモリーのロードマップを策定し、記録容量 1 TB, 転送速度 1 Gbps の光メモリー開発のマイルストーンを公表しているが、今後、光記録技術と媒体などの要素技術が連携して研究開発されていくことが期待される。

文 献

- 1) K. Saito *et al.*: ODS (2007) MB1.
- 2) T. Shimura *et al.*: ODS (2007) TuD1.
- 3) 寺田 優他: 春季応物講演会 (2007) 29p-SG-13.
- 4) K. Takasaki *et al.*: ODS (2007) WDPDP2.
- 5) T. Ito *et al.*: ODS (2007) TuD2.
- 6) 伊藤輝将他: 秋季応物講演会 (2007) 6p-Q-13.
- 7) A. Hoskins *et al.*: ODS (2007) WB2.
- 8) E. Chuang *et al.*: ISOM (2007) Th-PP-01.
- 9) M. Tani *et al.*: ODS (2007) MA1.
- 10) A. Inaba *et al.*: ISOM (2007) Tu-E-01.
- 11) H. Mikami *et al.*: ODS (2007) MA4.
- 12) T. Shintani *et al.*: ODS (2007) TuC1.
- 13) E. Walker *et al.*: ODS (2007) WDPDP1.
- 14) O.M. Alpert *et al.*: ISOM (2007) Tu-G-04.
- 15) 石塚知明他: 秋季応物講演会 (2007) 6p-Q-18.
- 16) T. Shima *et al.*: ODS (2007) TuC2.
- 17) R. Katayama *et al.*: ISOM (2007) Tu-F-02.
- 18) Y.S. Shin *et al.*: ODS (2007) WA3.
- 19) K.T. Lee *et al.*: ODS (2007) WA7.
- 20) T. Ishimoto *et al.*: ISOM (2007) Tu-E-02.

15. 視 覚 光 学

千葉大 溝上陽子

15.1 概 要

近年、視覚研究は心理物理学, 脳科学, 生理学など学際的なオーバーラップがさらに進んでおり、2007 年もその流れは継承されている。多様なテーマに関する研究が活発に行われ、質の高い研究成果が国内外で発表された。特に質感は注目を集め、日本色彩学会誌でも特集が組まれた。

また、ユニバーサルデザインへの取り組みも、複数の学会でシンポジウムや特別セッションが設けられるなど、大きく進展したといえる。ここでは数多くの研究のうち、ほんの一部ではあるが特に筆者の目を引いたトピックについて紹介する。

15.2 質感, テクスチャー

物体表面の質感(光沢感や明るさ)は、画像の単純な統計的性質である輝度値分布の歪みの情報と相関があることを示す研究が反響を呼んだ¹⁾。質感が脳の比較的単純な情報処理に基づくことを示唆しており興味深い。光沢感は刺激の呈示時間が短いほうが高く、また一定時間以上になると安定するという報告もなされた²⁾。テクスチャー弁別に関しては、複数色相を含む場合でも輝度と彩度の相関関係の違いが影響することが示された³⁾。

15.3 色 覚

色の恒常性や色のモードに関する研究が多く発表された。背景がテストパッチに与える局所的対比効果が奥行き分離により変化する度合いは、有彩色照明下のほうが白色照明下より大きいことが示された⁴⁾。複数の照明下での色の恒常性についても検討された⁵⁾。色の恒常性とモードとの関係では、テストパッチがその空間にある物体として不自然に明るくなると恒常性は成立しなくなることが示された⁶⁾。変化する照明下における色の見えモードの検討も行われた⁷⁾。

生理学的研究では、サルの下側頭皮質のニューロンの多くは、微妙な色差の弁別よりも色のカテゴリー判断をする際に強く活動する、つまりニューロンは判断や行動に応じて情報処理を切り替えていることを示唆する報告がなされた⁸⁾。

15.4 ユニバーサルデザイン (UD)

2色覚者における色弁別・色分類とカラーネーミングとの関係⁹⁾など、カラーUDに関連する研究が数多く発表された。擬似白内障における散乱光がコントラスト感度と与える影響についての報告もあった¹⁰⁾。また、並列型リアルタイム動画像によるカラーUDデザイン評価システムも発表された¹¹⁾。産業界においても、色覚シミュレーションモニター、カラーUDパレット、眼鏡型の色弱模擬フィルター、高齢者水晶体擬似メガネなどが相次いで発売され、視覚UDへの取り組みが活発であった。

15.5 L E D

LEDの普及に伴い、LEDに関連した視覚特性の研究も引き続き盛んに行われた。グレアと色温度の関係¹²⁾や眩しさ感の個人差の検討¹³⁾、LED照明を含む光源の演色性評価手法の提案¹⁴⁾などがされた。

15.6 そ の 他

ターゲットの向きに頭部を回転する課題を行う際、頭部・眼球の物理的位置が頭部の位置知覚に影響するという報告¹⁵⁾、VDTによる文章表示の視認性における文字の大きさとコントラストの効果についての系統的な検討¹⁶⁾も行われた。空間視・立体視の研究も盛んであり、本誌では立体視の発達、可視性、個人差についての特集が組まれた。

視覚的注意でも、運動物体追跡時のコントラスト感度は注意の空間的広がりの影響を受けること¹⁷⁾、注意により分光感度が受ける影響¹⁸⁾など、さまざまな研究が発表された。

脳科学の分野では、近年注目を集めている回転運動錯視に対して脳活動計測の試みが行われ、錯視観察時の脳活動の変化が示された¹⁹⁾。fMRIによる他覚的視野検査の臨床応用についても報告があった²⁰⁾。

15.7 展 望

fMRIなどの脳活動測定による研究、サルや動物を用いた生理学的研究は引き続き活発に行われていくだろう。心理物理学的研究も含めて多角的・融合的な視覚研究の発展が期待される。また、質感や顔認識、自然画像など、より複雑な対象や環境に注目した研究がますます増えていくと考えられる。UDに関連する研究、産業界の取り組みもさらに普及していくことが望まれる。

文 献

- 1) I. Motoyoshi *et al.*: *Nature*, **447** (2007) 206.
- 2) M. Nagata *et al.*: *Opt. Rev.*, **14** (2007) 406.
- 3) 齋藤晴美他: *光学*, **36** (2007) 154.
- 4) K. Rattanakasamsuk *et al.*: *Opt. Rev.*, **14** (2007) 319.
- 5) 松尾啓史他: *OPJ* (2007) 26pF5.
- 6) P. Pungrassamee *et al.*: *Opt. Rev.*, **14** (2007) 139.
- 7) 森川貴世: *OPJ* (2007) 27aD2
- 8) K. Koida *et al.*: *Nat. Neurosci.*, **10** (2007) 108.
- 9) 小峰央志他: 視覚学会夏季大会 (2007) 3o2.
- 10) 渡辺健一他: *OPJ* (2007) 27aD1.
- 11) 神戸 秀他: カラーフォーラム JAPAN (2007) 05-02.
- 12) 塚田由紀他: 照明学会 (2007) 108.
- 13) 木村能子他: 照明学会 (2007) 109.
- 14) 大山照一他: カラーフォーラム JAPAN (2007) 02-01.
- 15) 山口大志他: *光学*, **36** (2007) 280.
- 16) M. Ayama *et al.*: *Opt. Rev.*, **14** (2007) 48.
- 17) K. Matsubara *et al.*: *Opt. Rev.*, **14** (2007) 57.
- 18) 滝 祐平他: *OPJ* (2007) 26pF3.
- 19) 栗木一郎他: 視覚学会夏季大会 (2007) 2o3.
- 20) 古田 歩他: 視覚学会冬季大会 (2007) 3o2.

16. 光源・測光・照明

NHK 田中 功

16.1 概 要

二酸化炭素などの温室効果ガスの排出削減を義務づけた京都議定書の約束期間が2008年からいよいよスタートし、省エネで長寿命、環境に優しい照明光源がますます望まれている。固体光源である発光ダイオード (light-emitting diode: LED) を用いた照明器具が市場に投入され、LED照明元年ともいえる2007年であった。

16.2 光 源

現在、一般照明の主力を担っている光源は水銀蛍光ランプであるが、光源の無水銀化は環境問題の点からきわめて重要である。外部電極付加による水銀フリーキセノン蛍光ランプの輝度と発光効率改善の報告がなされた¹⁾。

ノート PC 用や大型液晶 TV 用などの中大型液晶表示装置用バックライトや車載関連、照明用途などの需要が開拓されている白色 LED については、近年、発光効率の改善に加え屋内用の一般照明に重要な演色性の改善報告が増加している。現在の白色 LED は、青色 LED と黄色酸化物蛍光体とを組み合わせた方法が主流であるが、擬似白色のために演色性が低いという課題があり、一般照明用途には適さない。青色 LED と4種類の窒化物・酸窒化物蛍光体を組み合わせて、95もの高い演色評価指数を有する素子が報告されている²⁾。2007年11月には、第1回白色 LED と固体照明国際会議が東京で開催された³⁾。蛍光ランプと同様の原理で、赤・緑・青色蛍光体を InGaN 近紫外 LED によって励起することできわめて優れた演色性を有する自然光 LED 照明が発表された⁴⁾。

また、サファイア基板上に高品質な AlN バッファ層を形成することにより、波長 231 nm の紫外線を約 2 mW という高出力で発する AlGaIn 深紫外 LED が報告され⁵⁾、浄水の殺菌、医療分野などさまざまな分野での応用が期待される。

液晶、プラズマディスプレイに続く薄型パネルとして注目を浴びている有機エレクトロルミネセンス (electroluminescence: EL) に関しては、2007 年末についに有機 EL テレビが発売された。その一方、照明への応用も展開され、白色有機 EL の報告が多数なされた。最近では、発光ユニットが光透過性の中間層を介した積層によって電氣的に直列接続されたマルチユニット構造の有機 EL が報告されている。マルチユニット構造は発光層が厚くなるために駆動電圧が高くなるが、電流量が減少し透明電極での電圧降下も小さくなるので、大面積パネルの面内輝度むらを低

減することができる。長寿命蛍光材料と高効率燐光材料のそれぞれの長所を生かして、青色発光層からなる単色発光ユニットと緑・赤色燐光発光層からなる多色発光ユニットからなる2段マルチユニット構造を有する白色有機 EL 素子が報告された⁶⁾。

16.3 測 光

LED 照明の普及障害となっていた測定誤差による製品の信頼性を改善するために、JIS-C8152 (照明用白色 LED の測光方法) が制定された⁷⁾。CIE 平均化 LED 光度や CIE 部分 LED 光束など国際照明委員会 (CIE) 規格との整合性を図った上に、新たに光源色度測定方法が追加された。さらに、標準 LED との比較測定方法を採用するとともに、点灯条件なども規定された。この JIS-C8152 に準拠し、分光感度と LED モジュール自体の指向性による測定誤差を軽減し、精度を高めた照度・光度・配光・全光束の自動測定システムが開発された⁸⁾。

そもそも LED モジュールから発せられる光は紫外・赤外光を持たないために、文化財・美術品などへの照明に適している。白色 LED の美術・博物館用照明としての適正⁹⁾、ポータブルマルチ LED 蛍光分析装置による美術用水彩絵の具の評価が報告された¹⁰⁾。

16.4 照 明

2007年3月に開催されたライティング・フェア 2007 (第8回国際照明総合展) では、半数以上のブースで LED 照明が展示された。今回は白色 LED による照明器具が展示の中心となり、LED 照明へのシフトを予感させるものとなった。

高出力化と長寿命を両立した LED ユニット¹¹⁾、総合効率 50 lm/W もの高効率 LED ダウンライトが開発された¹²⁾。また、光取り出し効率の向上を目的としたレンズアレイや回折格子フィルムを用いた LED の配光制御¹³⁾、自己組織化膜によるナノ凹凸構造を利用した LED 高輝度化技術が報告された¹⁴⁾。一般照明以外の応用面では、自動車ヘッドランプ¹⁵⁾、救命浮環に連結し夜間の位置標示信号となる自己点火灯¹⁶⁾、サンマ漁用集魚灯¹⁷⁾、回収後再使用されるリターナルびんの異物残留物検出¹⁸⁾などの多岐にわたる応用が報告された。

有機 EL については、ライティング・フェア 2007 で、1 ピクセル 14 cm 角、30 cm 角の有機 EL パネルを用いた照明器具などの展示が行われた。現在実用されているのは一部の放送用照明¹⁹⁾に過ぎないが、今後、面光源である特長を生かした薄型の有機 EL 照明^{20,21)}の実用・普及が期待される。

16.5 展 望

テレビ市場は、CRT から液晶、プラズマディスプレイの薄型ディスプレイと劇的な変化を遂げた。照明の世界でも、白熱電球、蛍光灯から固体光源である白色 LED、さらに有機 EL を用いた従来なかった形態の照明の登場が期待される。材料、デバイス、装置、照明、建築など各分野の企業および研究機関が連携し積極的に取り組むことで、照明の変革は地球環境保護だけでなく新たな文化の創生につながるものと期待する。

文 献

- 1) M. Jinno *et al.*: J. Phys. D: Appl. Phys., **40** (2007) 3889.
- 2) N. Kimura *et al.*: Appl. Phys. Lett., **90** (2007) 051109.
- 3) 田口常正: 照明学会誌, **91** (2007) 627.
- 4) H. Sakuta *et al.*: *Int. Conf. on White LED and Solid State Lighting* (2007) 10.5.
- 5) H. Hirayama *et al.*: Appl. Phys. Lett., **91** (2007) 071901.
- 6) S. Ishihara *et al.*: SID (2007) 47.4L.
- 7) 照明学会ホームページ: http://www.ieij.or.jp/event/2007/07LED_JIS.html
- 8) 岩永敏秀他: 照明学会 (2007) 113.
- 9) 石井美恵他: 照明学会誌, **91** (2007) 78.
- 10) 谷島千明他: 春季応物講演会 (2007) 27p-R-8.
- 11) 杉本 勝他: 照明学会 (2007) 105.
- 12) 井上 優他: 照明学会 (2007) 106.
- 13) 待田整人他: *OPJ* (2007) 28aA3.
- 14) 藤本 明他: 第 318 回蛍光体同学会 (2007) 4.
- 15) 佐々木勝: 第 319 回蛍光体同学会 (2007) 5.
- 16) 久保田歩他: 照明学会 (2007) 115.
- 17) 細金晃一他: 照明学会 (2007) 116.
- 18) 仮屋一昭: オプトロニクス, **26** (2007) 135.
- 19) 田中 功他: マテリアルライフ学会誌, **18** (2006) 159.
- 20) 城戸淳二: Mol. Electron. Bioelectron., **18** (2007) 15.
- 21) 菰田卓哉: 第 319 回蛍光体同学会 (2007) 4.

17. 医学・生物応用光学

筑波大 安野嘉晃

17.1 概 要

2007 年, 国内における生体・生物応用光学の進展における特徴はアプリケーションへのシフトが著しかったことがあげられる。生体画像化技術では光コヒーレンストモグラフィ (OCT), 第二高調波 (SHG) イメージング, ラマン, コヒーレントアンチストークスラマン (CARS) イメージングなどが基礎的な装置開発の段階を脱し, 特定のアプリケーションにむけた実用化研究の段階に入った。光と音波を同時に用いる光音響トモグラフィも着々とアプリケーションレベルへの進展をみせている。また, 眼科イメージング技術では上記 OCT のほかに, 可変鏡を用いて眼の収差を動的に補正する補償光学の高分解能眼底イメージングへの応用の開発が日本国内でも本格化している。ま

た, 酸素飽和度分布など眼底の光学特性から眼底の生態的な機能をイメージングするための技術の開発も継続されている。また, より間接的な光イメージングとして生体医の深部を光でとらえることを可能とする光拡散トモグラフィの進展も継続されている。

上記のような光を用いた生体計測技術のほかに, 光を用いた生体制御の試みも注目に値する。

17.2 光コヒーレンストモグラフィ

国内における OCT 研究の本年の最大の特徴は, アプリケーションへの研究対象のシフト, および, その逆のデバイス開発への研究シフトであろう。アプリケーションでは血管の動的な断層計測¹⁾, 断層血液流速の断層計測に基づいた循環器系検査への OCT の応用²⁾, 汗腺など末梢器官の形態を観察することによる神経興奮状態の観察^{3,4)}などが試みられた。これらは, 従来の OCT のテーマであった「形態の観察」から「機能の観察」へのパラダイムシフトととらえることが可能であろう。これらのアプリケーションへのシフトは海外でも顕著な傾向ではあるが, 日本国内では特にその傾向が強いようにみうけられる。

また, 2007 年は国内でも OCT で用いることを前提とした広帯域光源⁵⁾, 高速波長走査光源⁶⁾の開発が盛んに行われた。

17.3 SHG, ラマン, CARS イメージング

SHG, ラマン, CARS など生体分子の特性を反映する光学計測の開発も盛んに行われた。これらは前記 OCT と同様光生体イメージング技術であるが, 分子そのものの特性をイメージングするという点で他と大きく異なる。これらの技術は従来から開発が継続されてきたものの, 2007 年の特徴は, OCT 同様アプリケーションへのシフトであろう。SHG イメージングでは *in vivo* ヒトのコラーゲンのイメージングが試みられた⁷⁾。イメージング速度も従来に比して向上し, より実用化に近づいたといえるのではないだろうか。

17.4 光音響イメージング

光音響イメージングは音響波によるアシストを用いることで, 通常の光イメージングよりも深部を計測するための技術である。大きくわけて光の吸収によって発生した音響波を計測する手法, および, 音響派の生体内部での振る舞いを光で読み出す手法に分類される。2007 年は, 従来からのスタンダードな光音響イメージングのほかに, 生体内部での音響波の速度分布のイメージングなど機能イメージングへの取り組みがみられた。

17.5 光眼科計測

眼科における光計測装置の応用では, 補償光学を用いた

高分解能眼底計測への取り組みがみられた。この技術は、可変鏡を用いて眼の収差を動的に補正することで回折限界に近い分解能での眼底画像計測を試みるものである。国内で複数のグループが開発を行い、初期的なデモンストレーションが行われている⁹⁾。実際に臨床研究を開始しているグループ、および、基礎的な装置を作成し検討実験を行っているグループがある。本課題は国内において着実な進歩があるものの、海外、特に米国の研究と比した場合、その開発の遅れは大きいと思われる。しかしながら、2006年度みられた低迷期は脱した感があり、今後の発展が期待される。

また、眼底の分光計測に基づいた眼底酸素飽和度の計測も試みられている。本テーマは数年来開発が継続してきたものではあるが、2007年には大きく完成度が上がり、実証試験を行う段階まで達したものと考えられる⁹⁾。

17.6 光生体制御・光治療

従来、光を用いた治療は広く医療分野で用いられてきた。しかしながら、2007年は、それらの光治療技術をもとに、さらにそれらの発展研究が大学の研究室レベルで試みられていたように感じる。光線力学療法では従来とは異なった薬剤の使用が試みられ、また、光を用いた動脈硬化治療なども試みられている¹⁰⁾。これらに、従来の企業と医学だけの枠組みだけではなく、工学系研究機関・大学などが参画しはじめたことは特筆に値する。

17.7 展 望

繰り返しになるが、本年の医学・生物応用光学の進展の特徴はアプリケーションへのシフトであった。ひとつには、これは従来の企業中心の開発とその後の医学界中心の治験という流れに、新たに大学・研究所中心の研究・開発という要素が加わったものであると考えられる。その一方で、従来からいわれてきた医工の連携が十分であるとはいえない。医学者の「医療工学の最先端がどのようになっているか」という理解が十分であるとはいえないし、同時に工学研究者の医療における需要の理解が十分であるとはいえない。

需要・基礎技術の「現在の」状況がある程度無視した研究開発は、大学・研究所における研究の利点でもある。しかしながら、これは需要・基礎技術の発展を無視していいということではない。

研究のアプリケーションへの移行が加速しつつある今、より適確に医療現場、応用現場における需要を理解し、それを咀嚼した後に研究開発を行うこと、また、よりの確に基礎技術の動向を見極めた上で医用・生体光学システムを構築することが必要とされているのではないだろうか。こ

れは、従来から続いている「医療の応用は医師にまかせ、基礎デバイスはデバイス開発者にまかせる」というフレームワークからの脱却が要求されている、ということなのではないだろうか。

文 献

- 1) 桑原光巨他：OPJ (2007) 26aM3.
- 2) 卷田修一他：日本網膜硝子体学会 (2007) O-01.
- 3) 山田晃寛他：OPJ (2007) 26aM4.
- 4) 三枝裕之他：OPJ (2007) 26aM5.
- 5) 住村和彦他：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-7.
- 6) 興梠元伸他：OPJ (2007) 28pA2.
- 7) 高橋 由他：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-10.
- 8) 竹野耕平：OPJ (2007) 27pE2.
- 9) 有本英伸：秋季応物講演会 (2007) 6p-X-15.
- 10) 石井克典：OPJ (2007) 26aM8.

18. 光 学 教 育

東京大 黒田和男

大学や大学院で現に行われている光学教育と、産業界が期待する教育に相当のずれが生じている。いや、産業界からは、そもそも光学教育なぞ行われていないとみられているようである。教育に関する産と学のずれは、光学だけの問題ではなく、エンジニアリング全般に存在する深刻な問題となっている。実際、機械の卒業生が機械の設計ができないとか、電気を出たのに回路がわからないという話をよく聞くようになった。とはいえ、(名称はしばしば変わるが) 機械学科や電気電子学科は健在であるからまだよい。光学の場合、出身母体となる学科は物理か応用物理(東大では物理工学)である。そこから光学の研究室が消えつつある。これが問題である。

学部教育では光学はいまでももちろんカリキュラムに入っている。しかし、企業に就職する学生の学歴が修士卒に移り、修士論文研究を通じた教育が人材育成の基本となっている現状では、教育をも研究が支配しているといつてよいであろう。ところが、大学では古典的な光学を基盤とする研究室が年々減っている。東大の例をあげると、筆者の学生時代には理学部、工学部、教養学部、生産技術研究所、それぞれに光学の研究室があった。そのほとんどは、世代交代で量子エレクトロニクスや光物性や量子光学の研究室に変わってしまった。最近ではレーザーの研究室ですらめっきり減っている。もちろんこれらの新しい研究室でも主役は光であり、実験遂行にあたっては幾何光学や波動光学の知識も必要なのであるが、自分の専門を光学設計や光計測に結びつける感覚は失われている。自らのアイデン

ティティを光学技術、光学設計におく卒業生は皆無とい
ってよいのではないだろうか。これが、新入社員をゼロか
ら再教育しなくてはならないという産業界の嘆きの根源で
あると思われる。一方で、大学側からの釈明はいくらでも
ある。国際的な学界の潮流、研究費の動向、学生の研究テ
ーマに対する嗜好など、さまざまな要素がからみ、その結
果、必然的に現在の姿がある。産業界からの要請を無視し
たつもりはないが、大学を突き動かす要因として力が弱か
ったことは事実であろう。

最近、このような状況に一石を投じる動きが産業界のほ
うから出てきた。ひとつは、ニコンが東京大学生産技術研
究所に「ニコン光工学寄付研究部門」を設立したこと¹⁾。
もうひとつは、キヤノンの全面的なバックアップの下に、
宇都宮大学に「オプティクス教育研究センター」が創設さ
れたこと²⁾である。

ニコンの寄付研究部門は、大木裕史氏を客員教授にむか
え、これに筆者が兼務教員として加わっている。趣旨は、
光学産業分野で次世代を担うリーダーとなる人材を育成す
ることにある。2006年11月に発足し、数か月の準備期間
を経て、2007年度の大学院の講義と、大学1,2年生を対
象としたゼミを開講した。いずれも、大木教授をはじめニ
コンの研究者が講師となり、光学産業で用いられるさまざ
まな光学技術の講義に加え、Code-Vによるレンズ設計の
実習を含む意欲的なものである。また、これと並行して、
ニコンの鶴田匡夫氏に大学院の光学の講義を担当していた
だいた。鶴田氏は「光の鉛筆」シリーズで高名であるが、
大学でまとまった講義をするのは初めてであると聞いている。
われわれ関係者としては、長年の念願がかなったという
心境であった。ニコン寄付研究部門では、今後は大学内
からの光学に関する諸相談にも応じてゆく意向であり、産
学連携に果たす効果を期待したい。

寄付講座（寄付研究部門）は光学界では初めての試みで
あるが、医学部や法学部など文系の学部では珍しくはな
い。その意味では既存の仕組みを活用したものである。こ
れに対し、キヤノンと宇都宮大学による組織づくりは前例
のない試みである。これまでも寄付金で建屋を立てるとい

う例は多くみられたが、センターを設立するというのは初
めてであろう。発足は2007年4月であるが、1年以上を
準備にかけている。組織は、谷田貝豊彦教授が筑波大学か
ら移られ、センター長に就任した。これに、宇都宮大学の
光学関係の教員が兼任教員としてセンターの運営に参画し
ている。さらに、荒木敬介氏が客員教授職につき、キヤノ
ンからの他の講師とともに光学理論や光学設計の講義を担
当している。これとは別に、センター長の下に諮問委員会
が組織されている。センターである以上、教育だけでは許
されず、研究機関として実績を上げていかなくてはならな
い。将来はアリゾナ大学光科学学部に匹敵する研究機関に
するという目標を掲げ、同学部と交流を深めるため、学術
交流協定を結んだ。また、センター憲章を制定し、教育研
究の理念を掲げたこともユニークな試みである。学内公募
による研究支援制度も新たに設けた。今後、教育研究スタ
ッフを充実させ、さらなる発展を期待したい。なお、諮問
委員の一人であるキヤノンの鶴澤俊一氏が設立の趣旨を光
技術コンタクトの巻頭言³⁾に書いておられるので、参考に
されたい。

以上の動きとは逆に、学から産への働きかけもある。東
京大学では理学系研究科においても光学技術分野における
産学連携効果を狙ったコンソーシアム CORAL (Consortium on Education and Research on Advanced Laser Science) が国内企業 11 社の参加を受けて立ち上がり、これら企業の企画による講義・実習からなるパイロット授業が行われた。2008年度からは正規に単位取得可能な授業に移行予定である。このコンソーシアムには、東大のほか電通大と慶応大が参加していて、講義の大学間交流という意味でもユニークな試みとなっている。

文 献

- 1) ニコン光工学寄付研究部門：<http://www.optics.iis.u-tokyo.ac.jp/>
- 2) オプティクス教育研究センター：<http://www.opt.utsunomiya-u.ac.jp/>
- 3) 鶴澤俊一：光技術コンタクト，45 (2007) 621.