

1. 光 物 理

産総研 有本英伸

1.1 コヒーレンスと波動伝搬

これまでに成熟してきた光コヒーレンス理論・光伝搬理論を基盤として、新たな応用分野を築く流れが注目される。体積インターフェログラムの測定に基づき、空間的にインコヒーレントな光源の三次元形状および光源上の各点におけるスペクトルを再生する手法が報告され、シミュレーションの結果が示された³。また、マイケルソン型の二光束干渉計を用いて、空間コヒーレンス関数の三次元分布を簡易に可視化する技法が報告された³。伝統的に、部分コヒーレント光の伝搬および関連物理現象の記述は偏光を考慮しないことが多かったが、近年コヒーレンスと偏光の統一理論が提唱された。そこで、任意のコヒーレンスと偏光を有する電磁ガウシアンシエルモデル光源を空間位相変調器を用いて実現する手法が提案された¹。

空間的なコヒーレンス特性と光波の伝搬を関連づける研究として、大気擾乱媒質中を伝搬する部分コヒーレント光の特性に関する解析結果が報告された⁸⁻¹¹。先に紹介したコヒーレンスと偏光を統一的に記述する理論の研究とも関連し、今後とも興味深い分野である。不均質な媒質中を伝搬し乱れた波面を補正する技術は補償光学として知られ、従来より天体観測技術などに応用されてきた。近年、欧米諸国を中心として補償光学に関連する大規模なプロジェクトが開始されたこととも関連し、国内においても補償光学技術を工業・医療分野へ応用しようとする動きに対する興味と期待が高まっている。これら内外の動向を整理するとともに、国内で保有される補償光学技術をテーマに包括的な報告と討論が行われた³。

1.2 回折と干渉

媒質の体積占有率をコントロールすることで位相分布の作成を可能とする有効屈折率法を用いたマルチレベル回折格子設計に関する研究が報告された³。詳細な電磁場解析から位相補間が可能となることが示され、今後の展開が期待される。

回折光学素子の設計に関連して、反復回折法と位相回復のための逐次近似アルゴリズム (HIO アルゴリズム) を組み合わせる技術が提案された³。ホログラム記録に関連した進展としては、高分子分散型液晶² やアゾベンゼン高分子材料を用いる手法² が報告された。また、偏光による位相差を用いた位相シフトデジタルホログラフィーが提案された²。ドーナツ状の強度分布を有するラゲールガウスビームの発生と特性評価に関して、これまでにビームプ

ロファイルの変形と光トラップ力との関係などが研究されてきたのに続き、ホログラム構造とビーム変形の関係が報告された³。そのほか、ホログラフィック光学素子の結像特性評価など、多くのテーマが活発に報告された。

1.3 散 乱

低コヒーレンス干渉を利用して、散乱媒質に入射した光の伝搬距離分布を求める研究が報告された³。媒質中に吸収を有する物質が含まれる場合は、散乱のみの場合の光路長分布を計測しておくことで、吸収係数を決定できる点も大変に興味深い。加えて、微粒子のブラウン運動がガラス界面近傍で抑制される Wall-drag 効果が、低コヒーレンス動的散乱法による実験と理論検証の結果から確認された¹。

人の皮膚における光散乱をテーマとした研究の増加も近年の特徴である。ファンデーションなどを肌に塗布した際の化粧仕上がりや、仮想的に作成し評価するシステムの開発が行われ報告された³。また、メラニンやヘモグロビンといった色素の濃度を定量測定する手法が提案された³。皮膚裏面において光が全反射する際に生じるエバネセント波を表面方向へ散乱させることで、化粧の効果を向上させようとする研究報告も、新規性が高く興味深い²。

1.4 光放射圧

光放射圧の分野では、微粒子制御を扱う具体的な応用研究が多数報告された。集束光による液面ピックアップを用いた方法¹、空間変調レーザービーム形成法によるもの¹、光周波数シフトにより干渉縞を移動させるもの¹、位相CGH (computer-generated hologram) を応用したもの²、アレイ導波路格子を利用する手法²、空間光変調器と回折光学素子の利用を融合するアイデア³ など多くの独創的な研究が注目を集めた。

また、微少球レーザーを光マニピュレーションによって複数捕捉し、複合共振器を構成する興味深い技術が報告された³。

1.5 展 望

ポテンシャルの実用化や応用研究への国家的な推進・奨励もあり、光物理分野で地道に育まれてきた研究が応用分野において活躍する機会を得ることは大変に喜ばしいことであり、励みにもなる。しかしながら、その一方で大学や公的研究期間の組織改編に伴い、これまでの光物理学の発展を支えてきた基礎的な現象の発見や解明といった分野の将来を憂慮する向きも確かに存在する。調和のとれた発展を目指して自戒するとともに、当分野の今後の展開に期待したい。

2. 結像素子・光学機械

トブコン 鈴木 等

光学素子については、レンズ系に用いる回折光学素子だけでなく、サブ波長オーダーの周期構造をもつ素子の設計から、加工技術、評価、用途を含め広範囲な報告が行われた。また、光学薄膜については、屈折率勾配をもたせた成膜技術の進展が続いており、ルゲートフィルターなどの実用化も近いと思われる。

光学機械では、デジタル関連の光学機器に関して、各誌で多くの特集が生まれ、活発な開発が継続されていることがうかがえる。この分野の投影型ディスプレイでは、数方式の光学エンジンが採用されており、各方式とも画質向上の継続した技術開発が行われている^{m-9}。また、光リソグラフィでは、ArF エキシマレーザーを光源とした開口数 (NA) 1.0 を超える液浸露光機の実用化に伴い、多くの報告があった⁰⁻⁵⁷⁵⁴。

2.1 光学素子

2.1.1 回折光学素子

回折光学素子の結像系の応用として、デジタルカメラ用テレコンバーターレンズの小型化と色収差補正を目的に、2つの位相フレネルレンズ面を密着させた回折光学素子の開発が紹介され⁴、2つの格子を密着させる加工技術、材料の選択についても報告された³。また、ゲルマニウムの平面基板上に、精密切削加工でフレネル面を形成したベツバルタイプの回折型赤外光学系が報告された。この2枚の凸フレネルレンズで構成される光学系の近軸解析、三次収差解析が示され、最適設計の結果、30度以上の視野角にわたって解像が得られている^{p-2}。

回折光学素子の結像系以外の応用として、光を色分解した後、2または3つの波長を合成する DOE (diffractive optical element) の設計の報告^{q-6}、また、基板の両面に回折面を形成することにより、製造誤差と波長誤差で発生する不要回折光を低減する回折光学素子が解説されている^{q-15}。

サブ波長構造の光学素子の製作については、電子線またはリソグラフィで露光後エッチングでパターンニングする方法、また、ナノプリント、ナノインプリント用に量産化に向けた方法が、多くの光学誌で報告された^{1,r-32,s-2}。サブ波長構造素子の用途として、樹脂レンズの表面に波長以下の微細な凹凸を射出成形により製作した反射防止機能¹、フォトリソグラフィの原理を応用した共鳴格子型の高透過率偏光板²、周期構造による複屈折性を利用した1/4波長板³が報告された。

2.1.2 光学薄膜

光学薄膜に屈折率勾配をもたせる方法として、エッチングによりシリコン基板をポーラス状にして、基板の屈折率を変えた波長1~2 μm 帯域のルゲートフィルターの報告¹⁻²⁶、また CaF₂ 基板に多孔性の MgF₂ の屈折率勾配を持たせた反射防止膜を成膜し、波長 266 nm の透過率を向上させた報告があった²。

2.1.3 光学材料

今後も利用が拡大し続けるプラスチック材の開発と応用例が光設計研究グループの研究会で報告された^{r-32}。シクロオレフィン系光学用樹脂材料の紹介、そしてプラスチックレンズの課題である温度特性、複屈折性などの解説があり、実用例として、自由曲面と回折面を用いコリメーターとシリンドラーの機能を一体化した走査光学系用プラスチック光源光学素子、射出成型によるピックアップ用の両面非球面樹脂レンズと回折レンズが報告された。

また、セラミック材について、現在量産されている透光性の高屈折率セラミックスは1種類であるが、アッペ数の異なる材料の開発が報告された⁴。

2.2 光学機械

2.2.1 光ディスク

光ディスクは、ブルーレイと HD-DVD の規格統一がなされず、商品化が発表された。両方式に関する総合的な解説特集^{s-4}はあったが、前年に比べ光ディスクの報告は少なかった。光ディスク光学系では、液晶への電圧印加によって光の位相を制御することにより、ディスクの傾きで発生する対物レンズのコマ収差を軸ずれの影響を低減し補正する液晶素子を用いたピックアップの報告があった^{3,4}。

2.2.2 光リソグラフィ

光リソグラフィは ArF エキシマレーザーの液浸露光によるハーフピッチ 45 nm 世代の実現が予想され、原理から課題まで多くの報告がされた^{c-9,0-5754}。液浸による利点として焦点深度の拡大はあるが、高 NA 化での P 偏光成分による解像の低下があるため、S 偏光で照明する工夫が必要になる。現在、液浸用の液体として使われている純水の屈折率は約 1.44 であるが、より高 NA にするために液体の屈折率を高める検討がされていることが報告された。また、露光装置の光学特性のシミュレーションは、マスクのパターン寸法が波長と同程度または波長以下になることから、マスクパターンのベクトル回折の解析が行われている³。

2.2.3 顕微鏡

顕微鏡は古典的な光学機械であるが、現在もいろいろな用途への技術開発、改良がなされている。LED 光源で2

方向から照明することにより透明および半透明物体の立体観察のできる顕微鏡システム⁴、一对の半導体レーザーを用いた透過型立体顕微鏡³、また、入射光の偏光変調に1/2, 1/4 波長板を用い、複屈折および旋光の二次元分布の画像計測が可能な偏光顕微鏡の報告があった³。

2.3 光学設計法

2.3.1 光学系の設計

自由曲面を含む一般化された非共軸系の近軸理論と収差論的解析、そして設計例として反射ズーム系の報告がされた⁴。非共軸の反射光学系では、反射鏡3枚で構成されたコンパクトで明るい光学系 ($F/2.2$) の設計例が報告されている¹⁻⁵。また、円形開口に近い瞳をもつ非共軸系の三次の波面収差の展開式が解説され⁶⁻⁷、非共軸光学系の実用化は基礎理論とともに着実に進んでいる。

人口知能、エキスパートシステムを組み込んだレンズ設計ソフトが過去に開発されたが、設計の多様性に対応できず、広く利用されることはなかった。実用的なエキスパートシステムの使い方として、ズームレンズのデータベースを効率よく設計初期値に用いるシステムが紹介されている¹⁻¹。

2.3.2 微細構造素子の設計・解析

波長以下の微細構造をもった光学素子の設計と解析に、厳密結合波解析 (RCWA)、時間領域差分 (FDTD) 法などの手法を用いた報告が多くなされた。

RCWA 法を用いた設計として、RGB に色分解するレリーフ型ダンマン格子の最適設計の検討¹、低屈折基板に高屈折率の格子構造を設け、強い共鳴反射現象を利用した狭帯域波長選択フィルターの設計が報告された¹。

FDTD 法では、エアーグリッド構造による複屈折率性を利用した偏光分離素子の計算³、マルチレベル回折格子のレベル間の位相補間で作りやすく、効率のよい格子の設計³、また、発光素子の光が全反射する入射角度でも周期構造の回折で光を効率よく取り出すための計算方法¹ が報告された。

2.4 加工・評価測定

エキシマレーザーでマスクパターンを樹脂に投影露光するアブレーション加工により、プリンター部品のバブルジェットノズルが製造されている¹⁻³⁴。また、YAG レーザーの基本波 (波長 1064 nm)、2 倍波 (532 nm) または 3 倍波 (355 nm) を水ジェット (水流) の内面で全反射するように光を入れることにより、レーザー光を光ファイバーのように水ジェットで誘導し、そのレーザー光で加工する装置の紹介がされた³。

光ピックアップの集光レンズの集光面とデフォーカス面

のスポット強度分布の測定から、光ピックアップの収差が評価されている¹⁻³⁴。また、青色半導体レーザーを光源とした位相シフト干渉計により、光ピックアップ用非球面レンズの波面収差を計測している⁴。

2.5 展 望

データプロジェクターは LED を照明光源とした小型機が実用化された。デジタル光学機器に限らず、多くの光学機器で、装置の小型化とコスト削減のため、今後も LED 光源の採用が進むと思われる。

光学素子の微細加工技術の進展で、サブ波長構造の回折光学素子の実用化、応用展開が期待される。光学系の結像特性の解析においても、物体の微細構造化と大きな NA の光学系の実用化に伴い、ベクトル回折によるシミュレーションが多く行われるであろう。

光リソグラフィについては、液体およびレンズ材料の高屈折率化の開発も含め、液浸露光技術の進展が期待できる。

3. X 線結像光学

理化学研究所 香村芳樹

3.1 概 要

2005 年には、X 線結像光学では新技術が開発され、X 線集光素子では第三世代放射光源の低エミッタンスと高輝度性を用いた究極の性能達成へ進展がみられた。

3.2 硬 X 線領域における結像光学

筑波大・SPring-8 のグループより、2 枚のフレネルゾーンプレート (FZP) の (1 次, 0 次) と (0 次, -1 次) を干渉させるコモンパス干渉顕微鏡法が報告された。試料手前にダブルピンホールを用い、2 か所にビームストップを用いることで、フレネルゾーンプレートの不要な次数の回折光を除くことに成功した⁸。

空間コヒーレンス長を上げて波面分割を実現する干渉顕微鏡の開発も進んだ。FZP による X 線顕微鏡で、ビーム偏向素子を併用する。兵庫県立大のグループは FZP を追加し⁹、SPring-8 では X 線プリズムを用いている^{9,10-9}。X 線 Talbot 干渉計は、等周期の 2 枚の透過回折格子が生じるモアレ干渉縞を精密計測する。Swiss Light Source ではこの干渉計を用いて、X 線ミラーの表面粗さの評価や、放射光源の空間コヒーレンスの評価を行った^{10-86-5,10-94-16}。東大グループは、シリコン単結晶のラウエ回折を用いた X 線干渉計を、ポリマー系材料の三次元観察に応用した^{8,9}。

3.3 軟 X 線領域における結像光学

32 nm 世代のリソグラフィ技術では、極紫外線リソグラフィ (EUVL) 技術が最も期待されている。日本をは

じめ、米国と欧州でも精力的に研究がなされ、光源、露光装置、無欠陥マスク、レジスト材料プロセス等の開発が進められている。2005年8月にはIntelがレジスト評価を目的に露光評価装置(MET2)を導入した。ASML社は6枚系からなるNA 0.25の露光光学系を搭載した露光装置(α 機)を開発中であり、2006年後半にリリースの予定である。ニュースバル放射光施設では、EUVマスクの欠陥検査を目的に位相差極端紫外光顕微鏡の開発が進められ、70 nmの大きさの位相欠陥の検出に成功した^{d-7}。同施設ではレジスト評価用に実露光波長を用いたレジスト評価装置の開発が行われ、エッジラフネス低減に向けてEUV露光に有効な酸発生剤の探索に成功した^{d-7}。さらに同施設では実機の実波長波面収差計測に向けた干渉計測法開発がEUVAと共同で進められている⁹。

Lawrence Berkeley National Laboratoryでは、15 nmの最外輪帯幅をもつFZPが開発され、これを用いた結像顕微鏡で、半周期15 nmのLine & Spaceパターンが解像された^{x-435-7046}。東北大学では、波長13.5 nm用のMo/Si多層膜を用いた多層膜顕微鏡の高度化が継続されている。膜厚を精密に制御し多層膜を作製するため、速度可変シャッターや、エリプソメーター方式の成膜速度モニターの開発が進められた^{1,8}。

3.4 光学素子

ナノメートル領域のX線集光実験は直実な進展をみせた。Argonne National Laboratoryでは、膜厚に積層方向の勾配をもたせた多層膜構造体をスライスして多層膜ラウエレンズを実現した。ラウエ回折を利用し^{v-86-15}、19.5 keVのX線を一次元集光し、60 nm以下(FWHM)を達成した⁸。大阪大では、スティッチング光干渉法など干渉法による表面形状評価^{u-4}と、plasma chemical vaporization machining法、elastic emission machining法の併用で、表面精度の高い楕円面形状のX線反射鏡が製作された。表面にプラチナを蒸着し、数開口を稼いでいるが、peak-valleyで2 nmの表面形状精度を達成した。SPring-8での実験で、15 keV X線での回折限界に近い36 nm×48 nmの集光ビームが達成された^{e-18,8}。HASYLABグループは、シリコン材料のエッチング加工を行い、一次元X線屈折レンズ素子を製作し報告した。曲率半径が2 μ mのレンズピースを100枚重ねた素子2つを直交して並べ、二次元集光した。ESRFで、21 keV X線を用いた実験がなされ、10.7 mmの焦点距離と、47 nm×55 nmのサイズの集光ビームが達成された⁸。原理の異なる集光素子による集光サイズが競合するレベルに収束しており、回折限界を超える挑戦が必要となっている。

関西医大とSPring-8のグループでは、アルミニウムと銅の混合比の異なる4種類の層を順番に蒸着し、キノフォーム型を近似したFZPを製作した。50 keV X線を用いた実験で、一次焦点への集光効率約50%が観察され、2種のゾーンによる位相FZPの理論上効率40%を超えた⁸。

4. 分 光

東北大 四方潤一

4.1 概 要

新しい周波数領域・時間領域のレーザー光源の開拓や光制御技術の進展にともなって、分光技術とその応用分野が著しく進展しており、周波数コムを利用した高精度レーザー分光も2005年度のノーベル物理学賞の対象となった。分光の分野は非常に広範囲にわたっており、全領域をカバーして紹介することは浅学な筆者には不可能であるが、応用物理学関係連合講演会・学術講演会^{1,2}、CLEO/QELS 2005¹⁰、IQEC/CLEO-PR2005¹¹等の会議で分光に関連したホットなトピックスとして、ファイバー中での非線形波長変換、モードロックレーザーの高精度位相制御、高速波長同調光源、量子カスケードレーザー(QCL)などの光源技術のほか、微小周期構造やナノプラズモニクス、バイオセンシング/イメージング、テラヘルツ(THz)波関連分野などが目立った。ここでは、おもに光波領域のバイオフォトンクスや、テラヘルツ領域の分光に関連した光源や計測手法・分光応用に着目して、その進展について述べる。

4.2 光波領域の分光

超短光パルスと高非線形性ファイバーにより生成されるスーパーコンティニューム(SC)光は、光通信や超短光パルス生成のほか、光コヒーレンストモグラフィ(OCT)等の分野でも有用な光源として、注目を集めている^{1,2,e-6}。従来のSC光はスペクトルに微細な構造をもつものが多かったが、近赤外域での超広帯域フラットスペクトルの生成が報告され²、分光の分野でも新たな応用展開が期待される。バイオフォトンクスに関連したSC光の新しい応用例としては、これを励起光源に用いて3色の蛍光イメージを同時に得る、マルチスペクトル二光子蛍光顕微鏡が報告されたほか^{1,e-4}、SC光をブロードバンドのストークス光源に用いて広帯域な振動スペクトルを一気に得るマルチプレックスCARS(coherent anti-Stokes Raman scattering)顕微鏡が報告された^{1,v-4}。

また、ラベルフリーで高い空間分解能(サブミクロンオーダー)が得られるバイオイメージング手法として、近年、非線形光学効果を利用したバイオ顕微鏡に関心が高ま

っており、生体物質の境界面や組織の異方性をみる第二高調波 (SHG)・第三高調波 (THG) 顕微鏡, 振動分光に基づいて物質 (分子) をみる CARS 顕微鏡などが代表的である。多光子蛍光に基づくラベルフリー計測手法として, ブロードバンドの二波長光源を用いた誘導パラメトリック蛍光顕微鏡が新たに提案され, 精細な生細胞のイメージが報告された^{1,2}。一方, 従来の自然ラマン分光や赤外フリーエ分光に基づく高感度なバイオセンシングとしては, 励起光やシグナルのファイバー伝搬に中空ファイバーを用いたフレキシブルなラマンプローブが生体組織の計測に応用され, バックグラウンド・ノイズ (ファイバー中での自然ラマン散乱光や蛍光等) を抑制したシャープな自然ラマンスペクトルが報告された^{1,21} ほか, Si プリズム中の多重内部反射を用いた表面赤外分光法による DNA 構造・機能解析の応用例が報告された^{1,2,c-12}。

4.3 テラヘルツ領域の分光

テラヘルツ領域の分光では, 超短テラヘルツパルスに基づく THz-TDS (THz time-domain spectroscopy) と, 波長可変な単色テラヘルツ波に基づく周波数領域テラヘルツ分光の双方から, 技術・応用分野の開拓が進展している^{1,2,10,11,z-1~6,A-12,m-4,C}。

テラヘルツ波光源としては, 非線形係数の高い有機結晶を用いた差周波混合による超広帯域な周波数可変テラヘルツ波発生が報告され, DAST (4'-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate) ではサブ THz~40 THz^{2,e-21}, 新材料 DASC (4'-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium p-chlorobenzenesulfonate) では 1~20 THz の可変域が得られ, 常温の焦電型検出器でも検出できることが報告された^{2,e-29}。また, GaSe 結晶中の光整流による超短テラヘルツパルス発生と光伝導性アンテナ検出器により, 120 THz におよぶ超広帯域のテラヘルツ波発生・検出が報告された¹¹。なお, 海外では QCL の低周波動作として, 2 THz を切る領域 (現在 1.39 THz) までレーザー発振が報告されており^{B-1}, 上記の光源も含め, 今後, テラヘルツ~中赤外領域の分光に活用されていくものと思われる。

テラヘルツ分光システムとしては, 光サンプリング方式の THz-TDS, 二次元 CCD を用いた実時間テラヘルツ分光イメージング等の超高速分光計測システム¹, テラヘルツ帯の磁気光学効果, 電子スピン共鳴測定のためのテラヘルツ磁気光学分光システム^{1,2}, 半導体・超伝導体等のホール測定, 生体分子等の VCD (vibrational circular dichroism) 測定などに有用な円二色性 THz-TDS システム^{1,e-21} が報告された。また, 高空間分解能で高感度なテ

ラヘルツセンシングに有用なオプティクスとして, 表面プラズモンを介したテラヘルツ波の微小孔異常透過に基づくテラヘルツ帯ブルズアイ素子が報告され, 高空間分解能 (サブ波長オーダー) のテラヘルツイメージングにも応用された^{1,e-29,e-32}。

テラヘルツ分光の応用研究において関心が高いもののひとつにバイオ・メディカル応用があり, 基礎となる生体分子のテラヘルツ分光データ収集・解析が進められている^{1,2,h-11}。テラヘルツ領域に特異な長所がある例として, 医薬品の結晶多形分析に関する報告があり, 中赤外域の振動スペクトルでは結晶多形の識別が難しいが, テラヘルツ帯では明瞭な差が出てくる例が示された^{1,A-12}。生体分子水溶液については水による吸収損失が大きいので, 従来テラヘルツ波を直接利用した分光測定例は少なかったが, 全反射減衰分光 (ATR) による水やアミノ酸水溶液のテラヘルツ分光・解析が報告された^{1,A-12}。また, タンパク質分子の動態解析の新しい手法として, THz-TDS による複素誘電率測定から動的構造因子や平均自乗変位など, 中性子散乱と同等な情報を得るスキームが報告された²。特にタンパク質分子の機能発現 (コンホメーション変化) など, 従来, 中性子散乱等の大掛かりな実験が主流であった分野において, 測定の簡便性や高速性を生かした新しいツールとしての可能性を拓くものとして重要性が高いと考えられ, 今後の展開が期待される。

4.4 ま と め

以上, 国内の研究を中心に紹介を行った。技術が高度に成熟してきている光波領域の分光では, 半導体技術や光通信等に関連した小型・高精度なデバイスの応用も含め, 新しい測定対象に基づく研究の新展開にも期待したい。また, これまで未開拓であったテラヘルツ分光技術も急速に進展しており, 今後, 「テラヘルツ」に特異な長所のある研究展開に期待したい。特に, この分野は日本が主導的な立場にあり, 独自の発展を育む研究支援体制にも期待したい。

5. レーザー

日立製作所 青木雅博
分子科学研 平等拓範

5.1 半導体レーザー

半導体レーザー (LD) や半導体発光ダイオード (LED) は, 光通信, 情報記録に限らず照明, 環境, ディスプレイ, センシングなど多岐にわたる応用技術に採用されている。シーズとしての新たな技術分野として, 昨年度は紫外領域, 中赤外 (超長波長) 領域に加え, サブミリ波領域 (テ

ラヘルツ帯)の半導体光源の研究開発が本格化してきたことが特徴的である。本稿では半導体レーザーを各波長帯(周波数帯)に分類し、トピックス的な進展について述べる。

5.1.1 紫外～青色 LED/LD

波長 250～350 nm 帯の半導体紫外光源は長寿命白色光源、次々世代高密度光ディスクメモリー、化学分解、殺菌など幅広い分野への展開が期待されている。ウルツ鉱結晶である AlGaIn 系材料はこの紫外領域で直接遷移発光する材料として精力的な研究開発がなされている。すでに類似の InGaIn/GaN 量子井戸材料で構成されるとする青色(405 nm 帯) LD は技術的にはすでに実用化レベルに達したが、さらなる短波長化(紫外化)と発光の高効率化は大きな課題となっている。2004 年に日亜化学から 365 nm 帯 InGaIn-LED の外部量子効率 26%が報告されたが、これより短波長になると効率は数%と急激に低下する。その直接の原因である AlGaIn 結晶の転位密度の悪影響を低減する目的で、InAlGaIn 四元混晶が検討され 305 nm 帯での高輝度 LED が実現されている¹⁰⁻⁹⁷⁻²。今後、もうひとつの課題である AlGaIn 結晶への高濃度 p 型ドーピングが実現されると、深紫外 LD/LED 実現への大きなステップとなる。

405 nm 帯青色 LD は GaN 基板の出現により、性能と信頼性が飛躍的に進歩した。数年先に迫るブルーレイや HD-DVD 等次世代光ディスクの市場の本格立ち上がりと呼応し、各 LD メーカーが GaN 基板を用いた数百 mW クラスの青色 LD を実現するに至っている^{12,13}。ただ 2005 年度時点では、GaN 基板の値段や安定した数量の供給に改善の余地があるようである。低出力時の雑音特性やビーム縦横比の改善など、光ディスク応用に向けたブラッシュアップと合わせ今後の課題である。

5.1.2 緑色 LED/LD

モノリシック対応のタイプの緑色 LED/LD は現状、材料探索のフェーズにある。おもに、2 通りの材料アプローチがなされている。発光効率に関してははまだ赤色、青色に比するレベルには達していない。ひとつは青色材料の長波長化であり、InGaIn 系結晶の In 組成を増やすことで 540～560 nm 帯をカバーする試みである。LED 発光効率としては、405 nm 帯の半分程度と低いことが、LD 実現を阻む最大の課題である。また、もう一方の試みとして II-VI 材料に Zn を導入して結晶の共有結合性を増し、結晶の安定性を向上させた ZnCdTe 系の緑色発光の検討が注目される¹⁴。また、モノリシック LD ではなくなるが、外部共振器を用いた W 級出力をもつ面発光型緑色光源の

実用検討も進んでいる⁷。

5.1.3 通信用 LD

2000 年前後の通信インフラへの過剰投資により生じたいわゆる通信バブルの崩壊後、光通信は基幹系通信に代わり、アクセス・メトロ系通信や、Ethernet に代表される LAN/WAN に牽引されるようになってきた。通信用 LD では、ブロードバンド通信網のバブとなるルーターやスイッチの省スペース化、省電力化や FTTH 向けの廉価対応の観点から、無温度調動作や経済性が主要課題となってきた。また、波長多重(WDM)光源の経済化の観点から、波長可変 LD のニーズが強まってきている。

活性層に InGaAlAs/InP 材料を用いて高温特性を改善した新型の波長 1.3 μm 帯 LD^{15,2}が開発され、10 Gbit/s で 10 km 程度の短距離伝送が可能となってきた。同応用の楽しみな技術として、GaAs 基板上の InAs 量子ドットレーザーにおいて、70°C 程度までの無温調、無調整 10 Gbit/s 動作が達成された¹¹。また、従来無温調動作が困難であった電界吸収型光変調器をモノリシック集積したコンパクト長距離光源が開発され、10 Gbit/s で 40 km のファイバー無中継伝送が可能となった¹⁵。一方、通信向け InP 系 LD の基本構造のひとつである埋め込みヘテロ構造に関し、電流阻止層に新型ドーパントであるルテニウム(Ru)を用いて高温・高速特性を改善する試み^{1,16}がなされている。

波長可変 LD では、ここ数年開発が進められてきた多波長分布帰還(DFB)型 LD のモノリシックアレイの本格実用化が始まった。また、別方式として液晶や石英導波路で構成される波長可変フィルターを外部共振器の反射鏡に用いるハイブリッド集積型の波長可変 LD の研究開発が活発になってきている。例えば、160 nm の広範囲にわたる可変動作が実現されており、いわゆる WDM 通信の波長帯である S, C, L バンド全域をカバーする全チャンネル光源が現実味を帯びてきた¹⁷。

5.1.4 光配線(インターコネク)用面発光 LD (VCSEL)

従来電気信号伝送に頼ってきた数 m 程度の極短距離伝送の分野では、10 Gbps 級の超高速化に伴い、伝送ロス、波形歪みや EMI(電気クロストーク)等の本質問題が顕在化してきている。この抜本的解決に向け、光をこのような超高速・短距離伝送に適用する試みが、ここ数年活発化してきた。しかし、本来電気ですべての信号を光電変換する必要があるので、光伝送の OE/EO 変換部には、電気伝送と遜色のない小型・低消費電力性と経済性とを両立させる技術が不可欠である。面発光 LD(VCSEL)は数 mA 程度の極小電流で 10 Gbps 級の超高速動作が可能であ

り、また光実装も比較的容易であることから、このような応用に向け、さらなる高速化、省電力化が検討されている。例えば、波長 $1.1\ \mu\text{m}$ の GaAs 系 VCSEL で、20 GHz に迫る高速動作が 6 mA 程度の極少電流駆動下で実現されている¹。今後、超高速ルーターのバックプレーン配線やスーパーコンピュータ等へのハイエンド領域への展開とともに携帯端末などへの展開が期待されている。

5.1.5 超長波長帯 LD~テラヘルツ帯光源

分光分析用途に中赤外 ($5\sim 10\ \mu\text{m}$) の量子カスケード LD の研究が活発してきた¹。また近年、0.1 THz-10 THz の周波数帯域を有するテラヘルツ電磁波を用いた技術は、新しい分光、イメージング、計測技術を提供するものとして、工業・医療・バイオ・農業・セキュリティなどのさまざまな分野に対する応用の道が開かれつつある。種々のテラヘルツ波の発生法が検討されており、代表的なものはフェムト秒レーザーによる光スイッチングやテラヘルツ LD がある。本項の調査対象であるテラヘルツ LD に関し、GaAs/AlGaAs 系量子カスケード構造により 2~4 THz 程度の低温 CW 発振が得られるようになってきており¹⁸、今後の展開が期待される。

5.1.6 展 望

以上、半導体レーザーと関連発光デバイスを発光波長ごとに分類し、駆け足で昨年の研究・開発状況を概観した。2000 年前後のいわゆる通信バブルからの市場回復を反映し、光通信用半導体レーザーの R&D が再び活性化してきた印象がある。また、冒頭に述べたように、紫外、中赤外、テラヘルツ領域等人類未開の波長/周波数帯へのデバイス・応用両サイドからの挑戦が今後ますます重要になってくると思われた。最後に、誌面の都合もあり、昨年の半導体レーザーの進展の全成果を列挙できていないことをお断りさせていただく。

(青木)

5.2 半導体レーザー以外

年が明けてすぐに開催される Advanced Solid-State Photonics (ASSP)¹⁹ は、この分野の 1 年の世界的な動向を予測するに最適な会議である。これを中心に、応用物理学会、CLEO²⁰、CLEO/Europe²¹、CLEO/Pacific Rim¹¹ を含め 2005 年の傾向を総括したい。

5.2.1 $1\ \mu\text{m}$ レーザー

この波長域のレーザーとしては従来からの Nd³⁺ 系レーザーと、最近台頭の著しい Yb³⁺ 系レーザーが代表的であろう。ASSP 2005 をみても、Nd:YAG に関する発表は 261 件中 43 件と最も多い¹⁹。次に多いのは Yb ガラスで 33 件 (主としてファイバーレーザー)、次いで Nd バナデートレーザーの 27 件、Ti サファイアレーザーの 21 件と

なっている。

(a) Nd レーザー

すでに多くの製品が出ている Nd:YAG に関する研究発表が最も多いのは驚きである。最近話題の透明 YAG セラミックス実用化も、この理由のひとつと考えられる。次に、従来の 808 nm 励起 ($^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{5/2}$ 遷移) に代わり、レーザー上準位への直接励起 ($^4I_{9/2} \rightarrow ^4F_{3/2}$) の進展の影響も大きい。波長 880 nm~885 nm 半導体レーザー (LD) は InGaAs 系で構成可能なため、Yb 系レーザーの励起 LD 同様に Al フリーとなり信頼性が向上することも見逃せない。直接励起による $1.06\ \mu\text{m}$ 発振では量子欠損が 17% 程度まで改善され、発熱も 30% 以上低減できる。特に、 $1.3\ \mu\text{m}$ 発振では、発振そのものは容易なものの発熱が出力を制限していた。直接励起では 50% も発熱が低減され、その効果が期待される。しかしながら、この波長域の吸収断面積は小さく、当初、高濃度添加の可能なセラミック YAG が注目された。最近では Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄ をはじめ種々のバナデートに注目が集まっている。この分野で日本の貢献は大きく、CLEO-PR ではセッションが組まれた¹¹。これらの材料では、 $1.06\ \mu\text{m}$ における誘導放出断面積が Nd:YAG に比し 6 倍程度大きいだけでなく、熱伝導率も YAG 並に高く話題となっている。特に、直接励起波長域での吸収断面積も大きく実用的 1 at. % でも $30\ \text{cm}^{-1}$ にも至る高い吸収係数が期待できる。ちなみに 1 at. % Nd:YAG の 808 nm における吸収係数が $9\ \text{cm}^{-1}$ 程度である。このため、直接励起バナデートレーザーでは低閾値かつ 80% を超すスロープ効率が室温で得られている¹¹。

(b) Yb レーザー

Yb 系レーザーでは、 $1\ \mu\text{m}$ 以外での発振は困難なもの、量子効率が高くアップコンバージョン損失がないため高出力化が望める。近年のフォトニックファイバーの進展と併せ CW で 1 kW を超える TEM₀₀ モード発振が報告されているが、偏光や短パルス化が問題とされていた。ASSP 2005 では、曲げファイバーによる 306 W 直線偏光発振¹⁹ やフォトニックファイバーによる 7 ns、 $500\ \mu\text{J}$ パルスによる平均出力 30 W 発生も報告される¹⁹ など、意欲的な試みがなされていた。また、Yb レーザーでは、広い蛍光幅を利用した LD 励起の高平均出力超短パルス発振器への期待も高い。そこで短パルス化のため蛍光幅を広げる材料の探索が行われ、これまでに Yb:SYS を用いて 100 fs 動作¹⁹ が確認されている。また、薄ディスク Yb:YAG レーザーからの 72 fs パルスをフォトニックファイバーで圧縮することにより 24 fs で 32 W 平均出力を得ている¹⁹

など進展が著しい。

(c) セラミックレーザー

焼結法による透明多結晶，すなわち“セラミック”レーザー媒質は，1) 短期間で育成が可能，2) 固相状態で相転移が存在する材料の育成が可能，3) 均質で大型の材料育成が可能，4) 任意形状整形による複合材料構成が可能，といった溶融成長法に比べ多くの利点を有するもので，日本が世界に先駆け提案，推進してきた経緯を有する。Nd や Yb 添加 YAG，YSAG，Y₂O₃，Lu₂O₃ など種々の材料での発振が報告されている。米国ではすでに国家プロジェクトがスタートしているほか，その名を冠した国際シンポジウムがワルシャワで開かれるなど，欧州からも注目が集まっている²²。特に高出力化，高エネルギー化の観点よ

り，結晶の高い熱機械特性とガラス同様に，大型で均質材料育成が可能なが注目されている。さらに，Yb 系の特長である低い量子欠損，広い蛍光幅特性を利用した提案がなされている。また，セラミックスの任意整形性を利用したコンポジット構造による機能向上の提案もなされた。直径数 mm の Yb: YAG 単結晶のコアに，YAG セラミックスのクラッドを接合したハイブリッド構造のロッドを，厚み 300 μm のマイクロチップに加工し金属ヒートシンクにマウントすることにより CW 発振により 340 W 出力が得られている²⁰。また Nd: YAG に，YAG クラッド，エンドキャップの複雑なコンポジット構造もセラミックでは比較的容易に形成できる。直径 1.5 mm，長さ 27 mm の Nd: YAG コアを端面励起することで，スロープ効率

	X-ray	UV	VIS	Near IR		Mid IR	Far IR / THz	Total
		100~390nm	390~760nm	760~1400nm	1.4~3mm	3~25mm	25~5000mm	
Nonlinear Optics	BPM	MB20, MF35, TuB16, TuB39, wb24, (5)	MB23, MF19, MF22, MF25, MF36, TuA2, TuB4, TuB16, TuB21, TuB22, TuB23, TuB24, TuB25, TuB26, TuB39, WA5		MB19, MF20, MF21, MF23, (4)	MB19, MD5, MD5, MF20, (4)	WB4,	33
	QPM		MB18, MB20, MB25, MB27, MB29, MF26, TuB18, TuB25, WA2, WA7, (10)	MB5,	MB21, MB26, MF12, MF27, TuA5, TuB18, WA3, (7)	MD5, MB17, MB21, MF27, WA3, (5)	WA4, WB4,	25
	Raman / SBS			MF22, WA5(KGW), WA6(KGW)(3)				3
Solid-State Laser	WB9, WB15,	MF4, MF11, MF40, WB16, WB17, WC2, (6)	MA2, MA3, MA4, MA5, MA6, MB1, MB3, MB4, MB6, MB7, MB8, MB9, MB15, MB17, MB18, MB21, MB23, MB25, MB26, MB27, MB28, MB29, MB34, MB35, MB37, MB38, MB39, MB40, MB41, MB42, MB44, MB45, MB46, MB47, MB48, MB49, MB50, MC1, MC2, MC3, MC4, MC5, MC6, ME2, ME4, ME5, MF2, MF3, MF4, MF5, MF6, MF7, MF8, MF10, MF11, MF12, MF15, MF19, MF20, MF21, MF22, MF23, MF25, MF26, MF27, MF28, MF29, MF32, MF33, MF35, MF36, MF38, MF39, MF40, MF41, MF42, MF43, MF44, MF45, MF46, MF47, MF48, TuA2, TuA3, TuA5, TuA6, TuB1, TuB4, TuB5, TuB6, TuB7, TuB8, TuB9, TuB10, TuB11, TuB15, TuB16, TuB17, TuB18, TuB19, TuB20, TuB21, TuB22, TuB23, TuB24, TuB25, TuB26, TuB29, TuB33, TuB34, TuB36, TuB37, TuB38, TuB39, TuB40, TuB42, TuB43, TuB44, TuB45, TuB47, TuB48, TuB49, TuC1, TuC2, TuC3, TuC6, WA2, WA3, WA4, WA5, WA6, WA7, WB5, WB6, WB8, WB9, WB10, WB12, WB13, WB14, WB16, WB17, WB21, WB24, WB26, WB27, WB28, WB29, WB30, WB32, WB33, WC3, WC4, WC5, WD2, WD3, WD4, WD5, WE2, WE3, WE5, WE6, WE7, PD1, PD3, PD5, (166)	MA2, MA3, MA4, MA5, MA6, MB1, MB3, MB4, MB6, MB7, MB8, MB9, MB15, MB17, MB18, MB21, MB23, MB25, MB26, MB27, MB28, MB29, MB34, MB35, MB37, MB38, MB39, MB40, MB41, MB42, MB44, MB45, MB46, MB47, MB48, MB49, MB50, MC1, MC2, MC3, MC4, MC5, MC6, ME2, ME4, ME5, MF2, MF3, MF4, MF5, MF6, MF7, MF8, MF10, MF11, MF12, MF15, MF19, MF20, MF21, MF22, MF23, MF25, MF26, MF27, MF28, MF29, MF32, MF33, MF35, MF36, MF38, MF39, MF40, MF41, MF42, MF43, MF44, MF45, MF46, MF47, MF48, TuA2, TuA3, TuA5, TuA6, TuB1, TuB4, TuB5, TuB6, TuB7, TuB8, TuB9, TuB10, TuB11, TuB15, TuB16, TuB17, TuB18, TuB19, TuB20, TuB21, TuB22, TuB23, TuB24, TuB25, TuB26, TuB29, TuB33, TuB34, TuB36, TuB37, TuB38, TuB39, TuB40, TuB42, TuB43, TuB44, TuB45, TuB47, TuB48, TuB49, TuC1, TuC2, TuC3, TuC6, WA2, WA3, WA4, WA5, WA6, WA7, WB5, WB6, WB8, WB9, WB10, WB12, WB13, WB14, WB16, WB17, WB21, WB24, WB26, WB27, WB28, WB29, WB30, WB32, WB33, WC3, WC4, WC5, WD2, WD3, WD4, WD5, WE2, WE3, WE5, WE6, WE7, PD1, PD3, PD5, (166)	MB11, MB12, MB13, MB15, MB16, MB20, MB32, MB33, MB36, MD1, MD2, MD3, MD4, MD6, MD1, MD2, MD3, MD4, MD6, ME3, MF4, MF9, MF10, MF11, MF13, MF14, MF16, MF17, MF30, MF31, MF34, MF37, MF48, TuA4, TuB1, TuB2, TuB3, TuB12, TuB13, TuB14, TuB15, TuB17, TuB20, TuB25, TuB41, TuB46, TuC4, TuC5, WB2, WB3, WB7, WB23, WB25, PD2, PD4, (55)	MD4, MB10, MB22, MF10, MF31, MF34, MF37, TuB10, TuC5, (6)		235
Total	1	6	35	170	66	15	3	296

表 1 Advanced Solid-State Photonics 2005 における発表動向。

67%, CW 143 W 出力が報告されている¹⁹.

(d) Q スイッチレーザー

簡便な構成でナノ秒パルスが得られる受動 Q スイッチレーザーとして, Cr⁴⁺:YAG に関する研究が広く行われている。しかし, その多くは Nd:YAG との組み合わせであり, 誘導放出断面積の大きなバナデートに関してはいくつかの問題があった。そこで, 吸収断面積の大きな LiF:F₂⁻ を可飽和吸収体として用いたり, バナデートの軸を変え等価的な誘導放出断面積を小さくし Cr:YAG に合せるなどの工夫が行われている¹⁹。小型化も進んでおり, 共振器長 15 mm のマイクロ固体レーザー構成で尖頭値 1.7 MW (パルス幅 480 ps, パルスエネルギー 0.9 mJ) に達する直線偏光 (Cr:YAG の結晶軸を選ぶことで偏光制御) 単一縦モード発振が報告されている¹。M² 値は 1.05 と輝度にして 0.14 TW/sr-cm² が得られている。さらに, THz 発生光源としても供されている^{11,11}。一方, ファイバーレーザーにおいても従来困難とされていたナノ秒パルスの高出力化も精力的に行われている。コア径 40 μm の Yb フォトニックファイバー増幅器により受動 Q スイッチ Nd:YAG マイクロチップレーザー出力 (パルス幅 450 ps, エネルギー 5 μJ) を 540 μJ まで増幅することにより, 尖頭値で 1.1 MW が得られるまでに至っている¹¹。

5.2.2 非線形光学波長変換

(a) 可視, 紫外レーザー

一方で, レーザーディスプレイやフォトプリントなどの応用から, RGB 可視域レーザーが求められている。Nd 系では 0.9 μm (⁴F_{3/2}→⁴I_{9/2}), 1.06 μm (⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}), 1.3 μm (⁴F_{3/2}→⁴I_{13/2}) 発振が可能なことより, 非線形波長変換方式と併せ Nd バナデートへの期待が高まっている。特に, 緑色 LD では困難とのことより, Nd:GdVO₄ マイクロレーザーの共振器内部に LBO を配置した構成により CW で 5.3 W が得られている¹⁹。また, パルス動作の Yb ファイバーレーザーとストイキオメトリック MgO:LiTaO₃ (MgSLT) の擬位相整合 (QPM) 素子を併用した構成により, 平均出力 7.05 W の緑色光発生の報告もなされている¹⁹。

(b) 中赤外レーザー

この波長域では, 固体レーザーからの直接発振と非線形光学波長変換による発生との両方が精力的に研究されている。KTiOPO₄ (KTP) による光パラメトリック発振 (OPO) および増幅四段を経て ZGP による差周波発生により 3.7~4.3 μm 領域で 28 mJ と高エネルギーのナノ秒パルスが報告されている¹⁹。特に, 厚み 5 mm の MgO:LiNbO₃ (MgLN) による OPO により 77 mJ のナノ秒パルス²¹ も報告される

など中赤外域での QPM 素子の展開は著しい。また, Cr²⁺:ZnSe により 18.5 W 出力で 2.2~2.7 μm 領域を高速可同調なシステムの報告²¹ もあり, この波長域における Cr:ZnSe, ZnS 系の地位が定着してきた。

表 1 に ASSP 2005 で発表された論文の波長域で分類した表を示す。これより, 大まかではあるが, 特定の波長域に関する研究傾向を知ることができる。なお, ここで取り上げた話題以外にも興味深い発表が多くなされている。

(平等)

6. 量子光学・非線形光学

北大 竹内繁樹

6.1 概要

筆者は量子光学がおもな専門であり, 非線形光学分野での重要な進展が漏れている可能性があることを怖れる。特に, 応用物理学学会での非線形光学での発表件数が多いテラヘルツ関連について記述がないことをはじめにお詫びする。

量子光学に関しては, 2005 年のノーベル物理学賞が, この分野を創成したロイ・グラウバー教授, およびテオドル・ヘンシュ博士, ジョン・ホール博士の 3 名に授与されたことは銘記すべきだろう。アインシュタインの光量子仮説提唱から 100 周年に当たる年でもあり, さまざまな記念会議等が催されるなど, 量子光学の分野にとってまことに喜ばしい年であった。また, 現在 JST (CREST), JSPS (学術創成), 総務省 (SCOPE) 等による重点的な支援がなされ, 日本においても分野全体が活気づいている。

また, 非線形光学に関して執筆に際し気づいたことを述べたい。筆者にとっての「非線形光学」とは, 二次や三次の非線形光学効果を利用した波長変換や光スイッチ, そのための高非線形材料の開発, および共振器構造などによる非線形効果の増強に関する分野で, いわゆる「テラヘルツ光学」とは関連はあるが別分野, という認識であった。しかし, 2005 年の春季の応用物理学学会において, 「4.5 非線形光学」項目の中で「テラヘルツ (THz)」をタイトルに含むものは, 数えたところ 48 件あった¹。これは同項目の発表件数の 3 分の 2 を占めるのみならず, 他の今回の「光学界の進展」の大項目における発表数と同等, あるいは凌いでいる。改めてテラヘルツに関する研究の興隆を認識するとともに, 分野の適正な発展のためにも, 新しい項目「テラヘルツ光学」を設置すべきなのではと, 門外漢ながら思った。

6.2 量子光学基礎

量子光学基礎の研究は, 光の量子状態そのものを制御す

る研究、ならびに光の量子状態と他の量子系との相互作用（量子状態転写など）の研究に分けることができる。前者に関しては、二光子干渉を利用した伝送路位相ゆらぎの消去実証実験（阪大）^{W-95-4}、経路干渉不要の二光子間線形光学量子ゲートの実証実験（北大）^{W-95-21}、連続量量子テレポーテーションによる量子もつれ合い状態の伝送実験（東大）^{W-94-22}などが報告された。中程度（ 10^{-5} ）の相互位相変調を用いた光子の量子状態制御方法の新規提案（NII, HP スタンフォード大）^Eがなされた。

後者に関しては、量子ドット電子準位のラビ振動観測（物材機構）の報告をはじめとして、量子ドットと光の相互作用に関する研究が国内外で活発であった。量子ドットからのもつれ合い光子対の発生も、あとほんの一步まで来ている。

6.3 量子鍵配布

1月の、京阪奈-大阪間の96 km敷設ファイバーによる伝送実験^{F-9}（三菱電機）を皮切りに、5月の16 km敷設ファイバー2週間連続耐用実験^{F-9}（NEC）、差動位相シフト法による高速105 km伝送実験（NTT, スタンフォード大）^Eなどの実験が相次いで報告された。これらの研究はいずれも世界的に第一線の成果である。国外では、欧米ともにネットワークを構築した耐用試験等が組織横断的に行われており、今後国内でも実用化を目指した同様の仕組みづくりが急務だろう。また、デバイス面では検出器に注目が注がれ、PPLN導波路を用いたアップコンバージョンによる、通信波長帯での高繰り返し・高量子収率での光子検出（スタンフォード大）^{F-9}、超伝導光子検出器（産総研ほか）などの報告がなされた。

6.4 非線形光学材料

新しい非線形光学材料を探る動きとして、カーボンナノチューブを利用した新規材料の報告^{G-4}（産総研）が目についた。最適化された直径をもつナノチューブを透明ポリマー媒質中に分散し、通信波長帯で優れた過飽和吸収特性をもつという。同様の探索として、低分子系の有機強誘電体による新しい強誘電材料の開発報告^{G-2}（産総研）も興味深い。ほかにペロブスカイト結晶を用いた非線形光学材料の研究も報告されている。

6.5 非線形光学素子・計測技術

トピックス的な研究としては、フォトニック結晶との結合による非線形光学効果の増強（理研・東工大）^{W-94-10}が目につく。ほかに共振器との結合に関しては、非線形材料を用いた微小球共振器の研究報告（カルフォルニア工科大）¹¹などがある。応用物理学会¹では、アップコンバージョンによる紫外光変換技術についての報告が複数あった。

6.6 展 望

量子光学に関しては、基礎分野での光の量子制御のさらなる進展とともに、量子鍵配布システムの実用化への研究がいつそう進むだろう。それに伴い、セキュリティー評価の基準の明確化、標準化が課題となっている。非線形光学は、実用面での紫外光変換技術、導波路技術と並行して、さらにフォトニック結晶をはじめとする微小共振器や量子光学的効果との融合的な研究が進められるだろう。テラヘルツ光学には触れられなかったが、もはや項目にとどまらず、ひとつの領域を形成している感を強くした。

7. 近接場光学

産総研 山本典孝

ナノテクノロジーとフォトニクスが融合したナノフォトニクスは、広範な技術分野に大きな影響を与えると期待されている。近接場光学に関する国内の関心の高さ、精力的な研究に加え、11月にはアジア・パシフィック地域の近接場光学の国際会議（AP-NFO5）が開催され、新しい技術の流れを感じた1年であった。局在プラズモン、金属微粒子と分子分光、量子ドットとナノデバイス、産業応用の各項目について、この1年間を振り返る。

7.1 局在プラズモン

平面界面での表面プラズモンの研究から、複雑な構造と配置をもつ金属界面の研究、局在プラズモンの研究が盛んになってきた。金属微粒子や金属ナノロッドに局在するプラズモンの数値計算シミュレーション^{1,2}、金属ロッド列からなる導波路や二次元シート状の金属クラッドにおける局在プラズモンのシミュレーションと実験的検証^{2,23}が報告された。また、さらに一歩進んだプラズモンデバイスの具体例として、“プラズモニック結晶”と有機エレクトロルミネセンス（EL）素子の組み合わせによる発光の増大¹⁻¹⁷が報告され、これを用いたプラズモニック導波路、プラズモニック・レーザー^{V-85-18}なども提案されている。

7.2 金属微粒子と分子分光

金ナノ微粒子の局在プラズモンは、有限差分時間領域（FDTD）法を主流とする数値計算と実験によって進められてきた。その光学特性は金属の形状や環境によって変化するため理論と実験を定量的に評価することは難しいが、二光子誘起発光によるプラズモンモードのイメージングは理論と実験をつなぐ結果を示している^{2,23,24,H-27}。金属微粒子間のプラズモン電場増強はさらに興味ある対象である。プローブ顕微鏡をベースとする近接場光学顕微鏡では1個の粒子を観察することは比較的容易に行えるものの、粒子間のギャップを精密に制御した試料づくりは難しい。電子

線リソグラフィーを使い、金属微粒子間の距離を精密に制御して作製した試料を二光子誘起発光スペクトルで系統的に調べることで、理論計算とよい結果を示すことが報告された点は興味深い^{2,24}。

7.3 量子ドットとナノデバイス

ナノフォトニクスには伝搬光を近接場光に変換する素子、スイッチ、演算デバイス、近接場光配線などが必要となるが、それぞれの素子の試作と加工技術などで多くの進展があった。NaCl 中の CuCl 量子ドットの研究は理論計算のための礎として役割を果たしてきた。化学安定性の問題を回避し室温動作可能な GaN 系、ZnO 系の量子ドットの作製技術が進んできたことで、これらのデバイスの実現は現実味を帯びてきている^{2, v-87-3}。金属導波路にかわる効率的な近接場伝送として、金属突起の配列による“ナノドットカプラー”などの作製やシミュレーションがいくつかのグループで行われた²。作製法に関しても、トップダウンの手法では現状の半導体加工技術の歩みと同じ問題に直面することになるが、自己組織化手法による微粒子の配列技術などが現れてきたことは特筆すべきである¹⁻¹²。扇型に配列した金属突起による“プラズモン集光器”に関する報告や、それに対するプラズモン伝導の結果が示された^{v-86-18,2}。プラズモニクスデバイスの研究は米国でも精力的に行われており、米アルゴンヌ国立研究所のグループでも同様の研究が進められている¹⁻⁷。

7.4 産業応用

集積回路 (LSI) の微細加工化に向けての問題を解決し、より高性能化するためにはナノフォトニクスの開発が必要不可欠である。金属薄膜に微小開口と同心円状のプラズモンアンテナを配置した、ブルズアイ構造のナノフォトダイオードが試作されている^{2,23}。既存の電子マイクロプロセッサの約 10 万倍の光周波数をもつプラズモンを利用することで、データ転送量や速度を 100 倍程度上回ることが期待できる。光ほどのスペースを必要とせず、しかも低消費電力で行える“プラズモニクスデバイス”の発展に大いに期待したい。

7.5 その他

近接場光を使った光記録²⁵ やリソグラフィー^{v-86-20,1} なども行われている。エバネセント光を用いた高感度分析法、光増強効果による界面付近での高感度計測、表面プラズモン共鳴現象を用いた測定法などの“光センシング”^{2,23,25} においても、興味ある発表が行われていた。これらの光学計測法や光学デバイスは、物理、化学、生物学、医学、情報など広い分野にわたって重要である。

7.6 展 望

ナノレベルでの革新的な計測・分析技術の開発がナノテクノロジーの新しい分野につながってゆくものと考えられ、そこで開発された機器やデバイスは新たな産業を形成してゆくと思われ、これら技術をバイオテクノロジーに応用していくとさらなる波及効果が期待される。

8. 光応用計測

奈良先端大 杉浦忠男

8.1 概 要

このところ、超短パルスレーザーを光源に用いた計測が盛んに行われている。顕微鏡技術との組み合わせで光の利用効率が高く、原理的には一分子レベルで分子配向がみられるなど、これまでの光計測の常識を打ち破る可能性をもっており、その成果が得られつつある。このように急速に進展している理由としては、強力なレーザーパルスが得られる光源の普及がまず挙げられるが、生物物理学や分子生物学等の分野で応用サイドからのニーズが高まっていることも大きな要因となっている。特定のアプリケーションと結びつくことで急速に進展していくことも光応用計測の醍醐味のひとつであると思う。

また最近の傾向として、冷却 CCD をはじめとする低ノイズかつ高感度な検出器が安価で利用できるようになってきたことが挙げられる。これらのデバイスを用いれば比較的簡単に一分子からの蛍光も検出できるので、これまでノイズに埋もれてしまい利用されなかった物理現象も、積極的に計測に利用できるようになる。そして光を単に情報媒体として用いるだけでなく、力学的作用や熱エネルギーへの変換、他の振動現象 (音波、プラズモンなど) との相互作用に着目した計測法も進展している。

8.2 フェムト秒レーザーによる計測

超短パルスレーザー光で誘起した非線形光学現象を利用した計測が多数行われている。集光スポットが小さいほうが高効率なので、多くは顕微鏡をベースにしているが、計測原理は顕微鏡に限ったものではない。非線形光学現象を利用した顕微鏡では、生体試料の観察に際して低侵襲で、比較的簡単に三次元分解能が得られ、利用する非線形光学現象によっては分子配向や分子固有のスペクトル情報が得られる、などの特徴がある。

第二次高調波を利用した顕微鏡 (SHG 顕微鏡) では、皮膚中のコラーゲン繊維の第二高調波を利用した真皮の *in vivo* 三次元構造観察が報告された¹。また、このイメージング法を火傷の診断に用いるための基礎的な報告があっ

た³。SHG 顕微鏡の三次元空間分解能に加えて、各々の分子の配向方向を三次元計測が可能な六次元 SHG 顕微鏡が報告された²。分子配向を計測するために空間位相変調器を用いてビーム断面内の偏光方向を制御することで特殊偏光ビームを作り、三次元配向計測が実現されている^{b-1}。

二光子電子共鳴により増強された四光波混合過程に基づいた顕微鏡（誘導パラメトリック顕微鏡）が報告された^{1,3}。本手法を用いて生体組織の無染色イメージングが報告された³。1台のレーザーからの広帯域光パルスを生成し、単一パルス内でポンプ光とダンプ光を作り誘導パラメトリック蛍光を得る手法について報告された³。

コヒーレント反ストークス・ラマン散乱（CARS）顕微鏡では、フォトニック結晶ファイバーからのコヒーレント白色光を用いた超広帯域マルチプレックスコヒーレント・反ストークス・ラマン散乱（CARS）顕微鏡が報告された^{1,2}。ラマンイメージングに関しては、計測時間を大幅に短縮するスリットスキャンラマン顕微鏡が報告された³。

フェムト秒レーザーによる細胞内ナノサージェリー³、二光子励起による細胞内小器官のマーキング³は生細胞をより詳細に計測するために重要な技術になると予想される。

8.3 光音響計測、分光計測

生体組織の深部を高い空間分解能で観察することを目的に、超音波パルスを試料中に伝搬させ、超音波によって散乱された光を検出することで断層像を計測する手法について報告された^{1,a-12}。超音波バブル照射による生体組織の拡散透過光近赤外分光が報告された¹。パルスレーザーを集光して媒質を誘電破壊（レーザー誘起ブレイクダウン）させ、発生したプラズマやショックウェーブを使って計測する方法が報告された^{a-2}。

超短パルスレーザーを用いて表面音響波を熱弾性的に励起してイメージングする手法が開発された²。レーザー干渉光熱変換法を用いた微量生体分子の検出が報告された¹。光吸収による超音波速度変化から光断層画像を得るイメージング法が報告された²。波長合分波機能をもつアレイ導波路回折格子を分光センサーとして利用した報告がなされた¹。

8.4 プラズモン共鳴、表面増強ラマン散乱

局所プラズモン共鳴は、近接場光学の分野でここ数年詳細に調べられてきた。金属粒子や微細な構造をもつ金属に光を照射した場合に生じるもので、金属近傍の誘電率によって敏感に共鳴条件が変化することから、粒子近傍の分子を高感度に検出可能と見込まれる。この特長を利用して、局在プラズモン共鳴によって特定塩基配列をもつ DNA を

検出する DNA チップが報告された²。またポリマー複製を用いたシングルモード導波路型表面プラズモン共鳴センサーが報告された²。

表面プラズモン共鳴現象を使った顕微鏡も開発された。増感走査型ポッケルス顕微鏡では二次の非線形光学効果であるポッケルス効果を利用して分子の分極が計測された²。走査型局所励起表面プラズモン顕微鏡では、金属表面を伝搬する表面プラズモンを周方向から収束させてプラズモンのスポットを形成できることが報告された²。

微細構造を用いた計測技術として、二次元周期共鳴格子を用いた高感度屈折率センサーが開発されている。二次元周期構造をもつ格子中の媒質の屈折率が変わると共鳴反射の条件が変化するので、この現象を利用して高感度に屈折率変化が検出された¹。

金の微小構造を電極表面上に形成することで表面増強効果をもたせた表面増強ラマン散乱が計測された²。銀微粒子を用いて表面増強ラマン散乱を起こすことで分子検出するセンサーが報告された²。さらにこれを用いた反射型バイオセンサーが開発された²。

8.5 その他

位相変調型微分干渉顕微鏡による細胞の三次元計測が報告された³。複屈折と旋光を計測する偏光顕微鏡が報告された³。偏光保存フォトン検出による高感度散乱係数検出法について、無侵襲血糖値モニターが試作された³。血中のグルコース濃度の計測を目的とした散乱体中における旋光角の高感度検出が報告された³。光ピンセット技術と組み合わせることで浮遊細胞を光マニピュレートして回転させて細胞の三次元分光分布を計測する手法が開発された^{3,a-12}。

8.6 展 望

光応用計測における極短パルスレーザーの利用と高感度検出器の利用は今後も進み、これまで利用困難と思われていた物理現象を使った新しい計測法が実現されると期待される。そして応用分野が明確になることで、さらに急速に発展する傾向は強まると予想される。

9. 干渉計測

産総研 日比野謙一

9.1 概 要

干渉計測は、測長や重力波検出に代表される極限感度の追求から、生物や構造物など複雑な対象物の内部形状の測定、波長走査やヘテロダイン干渉の多次元化を用いた高速化の追求など、多岐にわたる研究が報告された。前年に続き、光源としてテラヘルツ光、低コヒーレンス光、波長 1.5

μm 帯の波長走査光などが新しい流れである。波長走査を行う周波数領域の光コヒーレンストモグラフィ (OCT) の報告が増えた。位相測定では、位相シフト法、ヘテロダイン法、多波長法、フーリエ分光法などがさまざまな対象物に合わせて最適化・改良が試みられた。縞画像の位相検出法としてヒルベルト変換を用いる報告が増えてきた。

口頭発表では、春季応用物理学関係連合講演会で 23 件、秋期応用物理学会で 14 件、11 月の Optics Japan で 21 件の発表があった¹。また別に、干渉計測関連の光コヒーレンストモグラフィ (OCT) の発表がそれぞれ 11 件、12 件、12 件あった¹。発表件数は、OCT 関連を含めた比較で昨年度とほぼ同数である。OCT に関する発表は、生体関連を 17 節、医学・生物応用光学に譲り、基礎技術の発展に絞って述べる。

9.2 低コヒーレンス干渉計

基礎技術では、波長 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯超格子 DBR (distributed Bragg reflector) レーザーによる波長走査 OCT の走査速度や分解能が評価された¹⁻⁵。低コヒーレンス干渉計の参照経路の機械走査を省くため、導波路上に光スイッチと複数の遅延線を集積した可変遅延導波路が作製された¹⁻²⁰。DFB (distributed feedback) レーザーの波長・光強度を変調するコヒーレンス関数合成法で、周波数フィルターの中心周波数を走査することで、分解能向上が図られた^{3,1-3}。直交する 2 偏光成分の干渉から相互コヒーレンス関数を求めてコヒーレンス度を測定する低コヒーレンス干渉計が提案された^{k-254-1-3}。2 個の波長が異なるダイオード光を混合した光源による OCT に関して、軸および横方向の分解能が評価された¹⁻¹³。回転偏光子を用いたアクロマティック位相シフトを備えた en-face OCT を構成し、従来の位相シフトとの比較が行われた¹⁻⁸。

応用技術として、 SiO_2 薄膜の光路長より換算する温度計測で、膜厚を同時に評価することでコヒーレンス長より薄い薄膜の計測精度が向上した²。タンデム型干渉計を用いて平板ガラスの群屈折率分散が測定された²。動的散乱法により散乱媒質内の光吸収計測が試みられた³。離散的ヒルベルト変換による位相シフト位相解析法が提案され^{b-1}、MEMS の動作が計測された³。

9.3 波長走査干渉計

ファブリー・ペロー共振器を用いて、位相シフト値を厳密に等間隔にした波長走査位相シフト干渉計が提案された^{2,1-26}。ダイオード光源の白色光を音響光学素子により波長選択・走査することにより薄膜の段差形状や距離の計測が高速化した^{b-4,3}。重畳された干渉縞から周波数選択する位相シフト法で、層状に重なったガラスセルの各層の厚さ

分布・形状が同時計測された^{1,3}。電流変調のレーザーダイオードと高速度カメラを組み合わせ、段差物体の各高さの形状が弁別・測定され³、またオンマシン計測に適用された¹⁻¹²。

9.4 ヘテロダイン・位相シフト干渉計

基礎技術では、単色光で生じる干渉縞のキャリアー縞周波数を時間的に走査して、段差を含む形状計測が行われた³。走査型電子顕微鏡の反射電子を用いるモアレトモグラフィに縞走査が導入された^{a-10}。二波長の単色光を光読み出し液晶素子 PAL-SLM 上に表示された格子で回折することにより位相シフトを与える、モアレ干渉計が提案された¹⁻⁹。

測定の高速化では、一次元 CCD 出力を並列に信号処理するヘテロダイン法で、スリット形状光により励起される試料表面の熱膨張を実時間で可視化した^{3,1-27}。回折格子を調和振動させる二重回折格子干渉計で形状計測が試みられた¹⁻⁴。

応用技術では、干渉顕微鏡に複プリズムの位相シフトを導入して、光導波路の屈折率分布が測定された³。極紫外リソグラフィ光学系の評価を目指し、点回折干渉計による大口径凹面鏡の形状計測が行われた²。

9.5 干渉応用計測

デジタルホログラフィー法などの分解能向上により、植物成長など不定形状の変化を測定する研究が盛んになりつつある。また、光コム測長・形状計測への応用が図られてきた。

測長・変位計測では、光コム距離計と光測長器による 100 m の距離による連続測定と比較が報告された²。第二世代重力波干渉計の検出感度向上のため、共鳴サイドバンド抽出法の数値シミュレーションと予備実験が行われた^{1-16,1-17}。光コム周波数間隔を走査することにより、段差を含む形状を高ダイナミックレンジで計測する手法が提案された³。

顕微鏡関連では、位相コントラスト顕微鏡で試料の平坦部で起こるハローを取り扱う有効点増関数が提案された^{b-2}。マッハ・ツェンダー型 X 線干渉計で従来の位相コントラストでなくコヒーレンス度測定による像を用いることで、生体の密度変化の測定感度が向上することが報告された¹⁻¹⁶。顕微鏡下でキャリアー縞を含む干渉縞画像からヒルベルト変換による位相測定を行う方法が提案された¹⁻¹⁰。透過率が位置座標に比例して減少するフィルターを用いて波面位相を測定する微分位相測定法が提案された^{b-2}。

対象分野の拡大では、統計的干渉法によりオゾンによる

植物の成長阻害が測定された³。放電による大気密度変化が透過型干渉計で測定され、密度変化と発光強度の相関が極性で大きく異なることが明らかにされた²。ラゲルガウシアンビームの位相分布測定が行われ³、収差があるときの伝搬が解析された⁸⁻¹²。LiNbO₃ 結晶ウェハの復屈折位相遅延の面内不均一がフィゾー干渉計を用いて測定された^{d-5}。

9.6 展 望

光通信技術の発達により、波長 1.5 μm 帯で 100 nm 以上波長を走査できるダイオードレーザーが出現し、波長走査を行う周波数領域の光コヒーレンストモグラフィー (OCT) などへの応用が報告されつつあり、注目される。この光源は機械的稼働部がなく測定的大幅な高速化が期待できるため、縦モードや出力強度の安定化に伴い、より高分解能を要求される他の干渉計測への普及が期待される。

10. 光情報処理

神戸大 的場 修

10.1 概 要

ここ数年の光情報処理分野における活発な研究としては、三次元ディスプレイを核とする三次元情報処理、バイオ関連のフォトニクス技術、光学的セキュリティ、テラバイト級メモリーが挙げられる。本会の情報フォトニクス研究グループにおいても三次元情報フォトニクス、バイオインスパイア情報フォトニクスワーキンググループの2つがそれらの研究に密接に関係し、アクティブな活動を展開している。また 2005 年 6 月には、光情報処理に関するトピカルミーティングである第 1 回 Information Photonics が開催され、情報に関する幅広い光技術・システムの研究成果が発表された。

10.2 三次元ディスプレイ・情報処理

ネットワーク接続された三次元ピクセルモジュールによる大画面三次元表示の研究¹や、そのデータ圧縮に関する報告があった³。また体積走査型三次元ディスプレイのための高機能イメージセンサーの報告があった³。韓国では、インテグラルイメージングの研究が盛んであり、複数のディスプレイによる奥行き方向の表示領域拡大や遮蔽物体がある場合の表示に関する報告があった²⁶。インテグラルイメージングに関しては、2005 年度の光設計グループによる光設計賞に選ばれたことからわかるように³、実用化に関して大きな進展がみられた。デジタルホログラフィーによる三次元情報取得・再生では、回折光学素子による波長依存のない位相シフト法の提案²⁷や半導体レーザーによる波長走査位相シフト³の提案があった。また、カラー

化、並列取得^{1,2,3}に関して進展があった。三次元物体認識では、フーリエ変換形状計測法に基づく格子パターン相関法において、物体の回転に対する認識能力向上の試みがあった³。

10.3 バイオインスパイアード情報フォトニクス

生物にヒントを得た、あるいは生体への応用を目指した新しいフォトニック情報処理技術に関する研究が着実に進められている。春の応用物理学会でシンポジウムが開催され、フォトニック DNA コンピューティングや人工視覚デバイス等の講演があった¹。DNA メモリーへの応用を目指してレーザー照射によるビーズ上の DNA の結合・解離反応の実験が報告された²。また、オンチップ DNA アレイ解析のための光・電位デュアル CMOS (complementary metal oxide semiconductor) センサーの報告があった²。

10.4 光学的セキュリティ

光学的セキュリティに関しては、光の特性を生かした手法および実用化についての研究が着実に進展している。秋の応用物理学会において「光・画像技術によるセキュリティとそのシステム化」のシンポジウムが開催された²。特に指紋画像のフーリエ位相情報を利用した個人認証システムは、光で実装せずに電気的に行う実用化に向けた研究であるが、光演算手法に基づく処理システムの実装方法として興味深い。鍵の三次元化に向けての研究²や OCT を利用した画像秘匿・読み出し²、爪への情報記録に関する研究⁹⁻¹²も発表された²。複眼光学素子を用いてクレジットカードのホログラムの分光画像同時計測を行い、偏角測定から真偽識別を行う報告があった¹。また自然石を鍵とするセキュリティホログラフィックメモリーシステムや同軸型ホログラフィックディスクメモリーを用いた顔画像検索による高スループットな処理が報告された³。画像ベースのメモリーと光情報処理の融合による高い処理能力をもつ実用システムとして価値のある研究である。

10.5 要素技術

次世代光ディスクメモリーの有力な候補としてホログラフィックメモリーが注目されている。同軸型ディスクメモリーは 2006 年の実用化に向けて開発が進められており、マスターディスクからの複製方法が提案された²⁸。ホログラム関連では、高性能化・高機能化を目的として、ナノ微粒子や液晶分子を含有させたポリマー材料の研究が盛んに行われている²。また、体積ホログラムの三次元結像素子への解析も報告されている³。このほかには、量子ドットを利用したナノメモリーも提案されている。フォトニック結晶と MEMS (micro electro mechanical system) の融

合によるスイッチング素子の報告²があり、フォトニック集積化回路における動的光学素子の進展が期待される。

10.6 新規情報処理システム

近年、量子テレポーションなどの量子情報処理が注目を浴びているが、光情報処理分野においても、光論理演算による因数分解、Groverの検索アルゴリズムの実装が示された¹。また、量子情報処理に基づく位相符号化物体認識アルゴリズムも提案され、その認識能力が評価されている³。DNAコンピューティングとともに並列分散処理としての新しい方向性が考えられる。

10.7 展 望

近年の撮像素子、表示素子の性能向上に加え、ホログラフィックメモリーの実用化が現実的なものになり、画像ベースでの光情報処理が再び脚光を浴びる土台が整いつつある。一方で、量子情報処理などの新しい演算原理が古典光学では不可能であった処理を可能にする。フォトニック結晶や量子ドットなどの素子を光演算に利用することも期待できる。光の量子性を生かした処理、または光と物質の相互作用を介した高速・並列処理を利用して、集積化フォトニック回路による情報処理システムへの展開も重要である。

11. 画 像 処 理

徳島大 山本裕紹

11.1 概 要

最近の計算機の発達と高機能イメージングデバイスの開発、各種のディスプレイの実用化に伴い、画像処理分野における研究の進展が著しく、各種の実証システムが報告されている。本稿では、光学にかかわる画像処理の研究を、質感や三次元の表示にかかわる画像処理技術、セキュリティ関連技術、新しい原理に基づく画像処理にかかわる新領域技術の3つの方向に分けて2005年の進展を概観し、展望を記す。

11.2 質感と表示にかかわる画像処理技術

デジタルアーカイブや計算機援用設計において現実を忠実に取得し再現することが求められる。質感の取得に関して、偏角分光イメージング法におけるカメラ・照明方向の最適化¹、近距離照明計測からの物体の反射関数の高速推定法³、塗板表面の写り込みの画像再現²が発表された。生体医用関連では、実画像に基づく肌の透明感解析と合成¹、肌拡散反射率の経験的近似モデルを用いた肌色分光分布の再現¹、病理標本の画像の色を最適な染色状態と同一状態に補正する標準化¹が報告された。

ディスプレイにおける色・光沢再現に関して、ドーム投

影においてドーム内の多重反射を補正する画像処理³、マルチバンド画像の圧縮³、および広色域三原色表示と多原色表示における色再現精度の比較³、視線追従を可能にした投影型質感表示システム³が報告された。また、高密度指向性表示三次元ディスプレイによる質感表示の方向性が示された^{7,29}。

三次元表示のための画像処理に関しては、指向性三次元表示のためのカメラアレイによる三次元動画の取得⁷ならびにデータ圧縮³、光線に基づく自由視点画像生成システム⁷、大画面LED立体表示のためのカメラ配置^{2,7,29}、陰面処理が加えられた体積走査三次元ディスプレイ²、グラフィックアクセラレーターによる多視点画像の逐次的生成法⁷が報告された。

11.3 セキュリティー技術

セキュリティ関連の研究は、情報の認証分野と保護分野に大別される。認証においては、光相関による顔認証システム^{6-6,1-5}のeラーニング用授業支援システムへの実用化³ならびにディスク型ホログラムの導入による高速化³、光学的変化素子の偏角特性を同時に画像計測する方法^{1,2}、二重ランダム位相エンコーディングに基づいて指紋を鍵として用いる暗号システム²が報告された。情報の保護に関しては、位相符号化演算に基づく暗号ホログラムの最適化¹、二重ランダム位相変調暗号化を用いたホログラフィックメモリー²、低コヒーレンス干渉光学系の移動による光散乱体背後のデジタル画像の再生法²、複数の復号用マスクパターンの積層によるセキュア情報ディスプレイ^{1,2,29}が報告された。そのほか、垂直配光のコレスティック液晶素子の偏光パターンを用いたパターン照合¹、繊維状結晶が平行に接合された構造をもつ自然石を鍵パターン光の発生に用いる光多重記録³が報告された。これらは、改変・複製が困難であり、高いランダム性を有するため、バイオメトリクスにかかわるものと期待される。

11.4 新領域技術

量子計算アルゴリズムに関して、文字認識アルゴリズムの提案^{1,3}、光学系での実現に適した形での空間符号化法とアルゴリズムの検討^{1,2}が報告された。そのほか、近接場光の物理的階層性と情報の論理的階層性に注目した階層的ナノフォトニックメモリーシステム²、光フィールドバックによる自発的なパターン形成による欠損修復機能が示された^{1,1-2}。ディスプレイ分野では、画質評価のために動画像の見えをシミュレートする処理による視認性評価²⁹がなされた。インタフェース分野では、カスタムCMOSイメージセンサーを用いて画面を見ながら情報機器を操作できるユーザーインタフェースの実証システム³が報告された。

11.5 展 望

画像処理分野の研究の共通の特徴のひとつは、ユーザーとのかかわりが強い点である。質感再現や三次元表示のディスプレイ分野においては、観察者の認知にかかわって、ヒューマンファクターを考慮した画像評価が進められる方向にある。処理時間の面では、GPU (graphics processing unit) を用いた高速化が進み、ユーザーによる操作が即座に画像に反映されるようになった。今後は、ユーザーとのインタラクションを取り入れた画像処理技術の進展が期待される。

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

NEC 山田博仁

12.1 概 要

Si 基板や SOI (silicon on insulator) 基板上に、Si をベースとする光導波路や光デバイス、光回路を実現する Si フォトニクスが最近話題を集めている。特に 2005 年は、年明け早々の Si ラマンレーザーの連続発振から、10 GHz 応答超高速 Si 光変調器や、Ge/SiGe MQW (multi quantum well) による EA (electro absorption) 光変調器、Si 受光素子の高速応答、そして Si 細線光導波路による光合分波器、光スイッチ、波長変換器などの発表が相次ぎ、話題に事欠かなかった一年であった。そこで今回は特に Si フォトニクスに焦点を絞り、2005 年のオプトエレクトロニクス・光デバイスの進展について概観する。

12.2 Si 光導波路

Si 基板上に光回路を実現するにあたり光導波路が不可欠となるが、SOI 基板表面の Si 層をリッジ状に加工する SOI リブ導波路が比較的作りやすく、Si 基板上の光導波路として広く研究されている。そのような SOI リブ導波路の最小曲げ半径は数 mm 程度と石英系光導波路 (PLC) に比べて決して小さくはないが、導波路上部に酸化膜と電極を形成して MOS 構造とすることにより、単なるパッシブな光導波路ではなく、電圧印加によって導波路の特性を制御することが可能な機能性光導波路となり得る。後述するように、近年本導波路構造を用いて、高速の光変調器などのさまざまな光機能デバイスが実現されている。

12.3 Si ラマンレーザー

Si による発光素子の研究は古くからあるが、Si を光学利得媒体として用いるレーザーが実現すれば、産業応用上非常に大きなインパクトがあるであろう。近年、Si のラマン効果を用いた研究が盛んで、Si 光導波路による波長変換器やラマン光増幅器、パルス励起での Si ラマンレーザーが実現されてきたが、昨年は All Si によるラマンレ

ーザーの室温連続発振に成功した^{x-433-7027}。これにより、波長 1.55 μm のポンプ光を用いて、Si 光導波路から波長約 1.69 μm のコヒーレント光を取り出すことが可能となり、Si 光回路の光源として利用する可能性も浮上してきた。連続発振を可能にしたのは、それまでは二光子吸収過程によって生成された自由キャリアーによる光吸収損失が光学利得を低下させていたものを、Si 光導波路に p-n 接合構造を設けることにより、逆バイアスを印加して生成した自由キャリアーを電界によって引き抜くことにより、自由キャリアーによる吸収を低減することができたためである。

12.4 Si 光変調器

昨年は、10 GHz を超える高速変調が可能な Si 光変調器が開発され、大きな話題となった年でもあった。それまで高速変調が可能な光変調器といえば、電気光学効果による LN 変調器や化合物半導体による EA 変調器などに限られていた。昨年報告された Si 細線光導波路によるリング共振器を用いた Si 光変調器は、リング共振器の直径がわずか 12 μm という超小型の光変調器でありながら、1.5 Gbps の高速変調動作を実現した^{x-435-7040}。また、EA 変調器といえばそれまでは、InGaAsP などの化合物半導体によるバルクや MQW 構造のものしかなかったが、Si 基板上の Ge/SiGe MQW の量子閉じ込めシュタルク (QCSE) 効果による EA 光変調器が昨年報告され^{x-437-7063}、大きな話題となった。消光比はまだまだ小さいものの、4 V 程度の低電圧で動作している。動作波長は現状 1.4 μm 付近であり、応答速度に関しては未評価である。さらに MOS 構造を有する SOI リブ導波路による MZ 型光変調器が開発され、10 Gbps での光変調も可能となった^{y-8}。このように、Si 基板上に集積化可能な超小型で低電圧、高速応答の Si 光変調器が現実のものとなってきた。

12.5 Si 細線光導波路デバイス

ナノスケールの断面サイズの Si 細線をコアとする光導波路は、コアへの強い光閉じ込めによりわずか数 μm の曲率半径での急峻な曲げも可能となる。そのため近年では、その Si 細線光導波路を用いた光配線技術や極微小な光デバイスが報告されている。昨年は、この Si 細線導波路を用いた光デバイスにおいてもいくつか進展があった。Si 細線導波路による AWG では、70 \times 60 μm^2 の非常に小さなサイズでありながら、波長 1.55 μm 帯で 11 nm 間隔 8 波の分波を実現している^{J-14}。また Si 細線導波路による熱光学効果を用いた超小型光スイッチも報告されており、1 \times 4 光スイッチがわずか 190 \times 75 μm^2 のサイズで得られている^{y-25}。さらに、Si 細線導波路の Si コアへの強い光

閉じ込め効果を利用した高効率非線形光学導波路デバイスもいくつか報告されており、四光波混合による $1.55\ \mu\text{m}$ 帯での波長変換を実現した例⁹⁻¹²や、二光子吸収による XAM を用いた超高速 (40 GHz) 光-光スイッチ³⁰などが挙げられる。

12.6 その他

その他 Si フォトニクス分野での昨年の進展としては、表面プラズモン共鳴を用いる Si ナノフォトダイオード¹¹による 50 GHz 高速応答や、Ge on Si PD (Photo Diode) による 29 GHz 応答など、Si 受光素子に関しても話題が多かった。また、Si をベースとする発光素子やフォトニック結晶デバイス、Si を用いた光学 MEMS に関してもめざましい進展があったが、誌面の関係上割愛させていただいた。

12.7 展 望

以上述べたように、最近の Si フォトニクスの進展には、特に海外において目を見張るものがある。それらは単に Si 基板上の Si による光デバイスの実現に留まらず、CMOS プロセスという確立した Si プロセスによってあらゆる光デバイスを実現しようという CMOS フォトニクスの曙ともいえよう。つまり、あらゆる光デバイスや光機能回路を、大規模電子集積回路 (LSI) を作るのと全く同じ CMOS プロセスで実現しようというもので、これまでの化合物半導体によるモノリシック光集積回路や PLC による光回路とは全く異なる発想と考えたほうがよい。そのような CMOS フォトニクスを盛んに研究しているのは、Intel や IBM といった北米大手半導体メーカーや Luxtera のようなファブレスの半導体ベンチャー会社である。現在化合物半導体デバイスでは日本はいまだ優位にあるが、将来 CMOS フォトニクスにおいて Intel や IBM に光デバイスや光集積回路の市場を奪われないよう今から手を打っておくべきであろう。

13. 光 通 信

慶應大 津田裕之

13.1 概 要

光通信産業は、2000 年ごろからの長い低迷期を脱しつつある。アクセス網はメタル回線から末端まで光化された新しい構成に生まれ変わろうとしている。アクセス網の光化に引き続き、今後、光通信の広帯域性を活用する新規アプリケーションが隆盛になれば、メトロ/基幹網のさらなる広帯域化の需要を掘り起こすと思われる。研究開発は、目前の低コスト化要求に対応する研究と次世代のネットワーク構成を見据えた基礎的研究が平行して進められ

いている。

13.2 LAN/アクセス網

Ethernet の技術を利用した PON (passive optical network) が実用になり、LAN (local area network) とアクセス網の研究開発項目は類似の内容となってきた。すでに標準化されている GE-PON (gigabit Ethernet PON) の 1000 BASE-PX10 では、一芯の光ファイバーで双方向の通信を行うために 1310 nm 帯と 1490 nm 帯の光がそれぞれ上り回線と下り回線に利用されている。研究の焦点は、波長分割多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 技術の活用とチャネル速度の高速化によるアクセス網の大容量化である。WDM 技術を低コストに PON に適用するために、スペクトル分割による多波長光源の研究³⁰が進展している。また、同時に将来の WDM 波長帯の拡充によるアップグレードを見込んだ波長依存性の少ない網構成^{30,31}が研究されている。チャネル速度の高速化は、10 GbE (10 gigabit Ethernet) 技術の活用が検討され、GbE と混在する WDM-PON の動作検証³¹が行われている。FTTH (fiber-to-the-home) と宅内光配線技術は、今後とも日本が世界を先導していくことが期待される。さらに、Ethernet の高速化も進展し、100 GbE を可能とする、107 Gbit/s 光デュオバイナリー信号の伝送実験³⁰が行われた。

13.3 メトロ/基幹網

メトロおよび基幹網の長距離/大容量伝送用に、DPSK (differential phase shift keying), DQPSK (differential quadrature PSK) 等の位相変調方式^{30,31,1-1,K-7}を利用する実証実験と理論的検討が進展している。歴史的には、1980 年代後半にコヒーレント光通信の一環として位相変調方式が精力的に研究されていたが、EDFA (erbium-doped fiber amplifier) を利用する IMDD (intensity modulation direct detection) 通信方式と比較してコストパフォーマンスに優れないためしばらく研究が中断していた。しかしながら、基幹網の性能に対する要求が高まるとともに、位相変調方式が原理的に強度変調方式よりも高感度であり、光ファイバー中の非線形効果の影響も受けにくいことから再び脚光を浴びている。RZ (return-to-zero)-DQPSK 方式を用いて、151 チャネル×43 Gbit/s、4080 km 伝送実験³⁰が報告されている。また、光デバイス側でも位相変調方式への取り組みが始まり、半導体光増幅器を利用し波形整形機能を有する、40 Gbit/s-DPSK 信号用波長変換デバイス³⁰が報告されている。なお、超高速電子回路技術を利用する送信側での光波形制御、光電変換後のベースバンド信号処理、あるいは、伝送路特性に適応した波形制御等の進展も

著しく、純粋な光技術以外にも十分留意して研究を進めるべき状況にある。

13.4 展 望

日本では FTTH が本格的に普及期を迎え、アクセス網や宅内光配線のための光部品には大きな需要が喚起される。国内に市場がある利点を生かした研究開発、および標準化への取り組みが有効である。特に、WDM-PON と宅内光配線が重要な研究開発目標になると思われる。また、オフィスや公共空間では光ファイバーを利用しない、空間光通信も大きく進展する可能性がある。一方、基幹網では、位相変調方式が長距離/大容量伝送の主流になりつつあるので、光デバイス研究の対象もこれに合わせて変化していくと思われる。次世代の光ノードにおける光バーストスイッチ、光パケットスイッチ、光ルーティングにかかわる基礎研究も盛んであるが、位相変調方式を利用する伝送路とのシームレスな接続を考慮して、若干の見直しが必要になると思われる。

14. 光 記 録

静岡大 川田善正

14.1 概 要

2005 年度の光記録は、青色レーザーを光源とした BD (blu-ray disk) と HD-DVD (high definition digital versatile disc) の普及に向けた技術開発が進められるとともに、次世代光記録のための多くの技術開発が行われた。BD 等では高速な追記を実現するための材料および技術開発が着実に進展し、高密度化のためのマスタリング技術開発も確立されていることから、次世代の高密度光記録を目指した研究へのシフトがより明確になったと考える。従来の高密度化手法と異なり次世代光記録では、光の回折限界を超えるための大きなブレイクスルーが必要とされるため、多くの手法が提案・開発され、方向性が決まっていなのが現状である。これらに対応するため、光記録研究者の新規技術の発表の場として中心的な国際会議である ISOM (International Symposium on Optical Memory) のプログラム委員会を中心として、次世代光記録のロードマップの策定が開始され²⁸、次世代光記録の実現に向けた動きがより本格的なものになってきている。

14.2 マスタリングとレプリケーション

BD, HD-DVD の次を目指した高密度マスタリングの技術が本格化してきた。次世代の光メモリーではディスク 1 枚当たり 150~500 GB の記録容量が要求され、これに対応する記録ピットは 40~70 nm になる。この要求に応えるため、電子ビームを利用したマスタリング技術の開発が

進められている。シリコン基板上で DVD 換算で 510 GB に相当する電子ビーム露光装置が報告された²⁸。39 nm の最短ピット長の実現結果が報告されている。また、ディスク 1 枚を記録する際の安定性についても報告し、十分な安定性が得られていることが報告された²⁸。

従来のフォトンモードを利用したマスタリング技術とは異なり、レーザー光を照射した際に生じる熱反応を利用したヒートモードマスタリングが提案された²⁸。この方法では、レーザースポットの中心のみで熱反応を発生させることにより、レーザースポットよりも小さいパターンを形成することが可能である。この方式は低コストで実現できることが特徴である。ZnS-SiO₂ を用いたヒートモードマスタリングで集光スポットの 1/4 の 90 nm のピットが形成可能であることが報告されている²⁸。

ホログラム記録においても、ROM (read only memory) の複製技術が提案された。コリニア方式において、仮想参照光を導入したマスターを作製することにより、ホログラムの複製が可能であることを示した²⁸。

14.3 青色ディスクシステム

高精細テレビ (high definition TV) の普及を目前に控え、より大容量の光記録方式の需要が高まっている。これに応えるため、BD と HD-DVD の光記録システムの開発が着実に進められており、これまでの技術開発の成果がこれらのシステムに集約されてきている。

2005 年度は高速化に向けた技術開発が報告された。追記型ディスクにおいて 500 Mbps 以上の高転送レートで記録した実験が報告された²⁸。また高速な記録を実現するためにレーザー応答性を考慮した新しいレーザー制御方法なども示された²⁸。

14.4 次世代大容量化技術

次世代の高密度・大容量化を目指した光記録では、研究が活発に行われており、多くの技術開発がなされた。近接場技術を用いた光記録方式では、三角形の金属プローブ、ダイヤモンドを用いた SIL (solid immersion lens) などが提案された²⁸。ダイヤモンド SIL では開口数 2.34 を実現し、150 GB の記録密度を実現した。深紫外レーザーとの組み合わせにより、450 GB の可能性を示している。また、モノシリック 2 ビームレーザーによる転送レートの高高速化も報告された²⁸。

超解像膜を用いた方式では、相変化材料を記録材料に用いた Super-RENS と呼ばれる方式の技術開発が進められている。50 GB の ROM ディスクで 10^{-3} のビットエラーレート、write-once ディスクで 10^{-3} のビットエラーレートが実現可能であることが報告されている²⁸。

ホログラム記録では、従来のDVDとの互換性をもつコリニア方式に注目が集まっている。記録のスケジューリングを最適化することにより、42 Gbits/in²の記録密度が報告された²⁸。また新たな数値解析手法の開発も進められている。

二光子吸収を利用した多層記録メモリーの技術開発も盛んに進められた。実用化を目指したベンチャー企業からダイナミックテストの結果、新規の材料を用いた多層メモリーが報告された²⁸。また、多層媒体を容易に作製する手法として、粘着剤を用いた手法が提案され、実際に20層の記録・再生結果および各層も50 dB以上の信号対雑音比をもち、クロストークが十分小さいことが示された²⁸。

14.5 展 望

光記録は、青色レーザーを用いたシステムの普及のための技術開発が着実に進み、大容量・高速転送レートに向けたさらなる技術開発が進むものと考えられる。次世代の光記録方式では、多くの方式が提案されており、それらが競争することにより、今後も実用化に向けた多くの技術課題が克服されていくものと期待できる。

15. 視覚光学

立命館大 山内留美

15.1 概 要

近年の傾向である複数の学術領域にわたる視覚研究の報告が今年も多くみられた。2005年は脳科学と視覚の特集が生まれ、脳における活動部位の特定や処理の時間に着目した研究が活発であった。計測装置としては脳磁図装置(MEG)や機能的磁気共鳴装置(fMRI)のほかに、近赤外線を利用した比較的安価で被験者の体勢に制限が少ない近赤外分光イメージング装置(NIRS)による研究報告数も増加した。また、脳内で起こるニューロンのスパイクなどの測定ではなく、視覚表象を可視化する行動学的受容野測定法(classification image)が提案された³。

バーチャルリアリティに関する研究では、物体表面の質感、特に金属光沢を再現した画像が紹介され³²⁻¹、より現実的な物体の再現が可能になった。

15.2 明るさ・色の知覚

色覚に関する研究では、色の見えの個人差が取り上げられた。任意スペクトル呈示装置による等色関数測定では、被験者9名すべての結果が異なり、今日の新しい技術による等色関数の再検討の必要性が示唆された^{a-6}。色覚異常者の見えに関しては、正常者とのカテゴリカルカラーネーミングの比較検討^{32-1,32-2}や、色の見え再現システムが提案された³。

色恒常性に関する研究では、高次色覚におけるチャンネル間の感度バランスを系統的に変化させることが可能となる、特定の色相を除いたノッチノイズ刺激が新しい色刺激として提案された³。また、画像データの統計処理としてベイズ推定を用い、推定反射率と照明色を導き、それらと主観評価との相関が高いという報告がみられた³³。照明認識視空間の概念に基づく研究では、色特性に加え^{b-3}、視覚情報と見えの色モード変化の関連性^{b-1}が報告された。また、水平面照度では表現できない空間の明るさ感を定量的に示す新しい方法が報告された³。

脳活動計測による色覚研究では、脳活動と色知覚の関連性の証明が困難であるが、等輝度色刺激の観察時のMEGによる脳測定では、鳥距溝と後頭葉腹側における応答の連続性と時間的遅延が確認された^{N-3}。NIRSによる実験では、輝度差の異なる刺激や見えの輝度の変化に対する脳活動変化の計測結果が報告された³²⁻¹。

15.3 形態知覚

エッジ境界帰属依存の傾斜順応効果は閉じた輪郭でなくても起こることが報告された^{32-2,3}。陰影による空間形状知覚では、光源方向の情報として周囲の二次元的輝度分布が有意であり³²⁻¹、陰影と知覚形状の対応関係は経験により変化すること³²⁻²が報告された。共線的空間位置にある線分要素同士が1本の線として知覚される輪郭統合特性においては、二次元だけではなく三次元的な輪郭統合機構も存在し、奥行き次元における共線的結合であることが示唆された³²⁻²。形態情報処理に関するfMRIによる脳計測実験では、低次視覚野の応答に高次視覚野からのフィードバックの反映が確認された^{32-1,M-3}。

15.4 奥行き・運動知覚

静止状態の観測者に対し接近する物体の到達予測や、観測者が移動する状況をシミュレートした動的な視環境での物体の位置予測についての実験、また、行動の意識の有無で大きさ判断の基準が異なる可能性が示唆された研究報告³があった。これらは意識と知覚特性の関連性を示すものであり、今後の研究の動向に注目したい。高齢者の奥行き知覚に関しては、暗黒下における空間位置精度の低下が報告された³²⁻²。

自己直線運動感覚についても引き続き報告があり、重力知覚が自己運動感覚の生成に影響すること³、また、視覚刺激の二次元的な速度成分の寄与が示唆された^{a-0}。

一次、二次運動処理の機能的分離についてMEG応答と反応時間から検討した実験³²⁻²が報告された。運動刺激の検出有無における脳活動の違いは、NIRSによる計測においても測定が可能であることが報告された³²⁻¹。

15.5 視覚的注意

視覚的注意の時間周波数特性³や空間的影響についての報告が、引き続き多くみられた。注意が空間的に広がりをもつこと³²⁻²や、中心課題が難しいときは周辺視野における刺激検出可能範囲が顕著に小さくなったことが報告された³²⁻¹。また、加齢の影響が周辺刺激の検出率に顕著に出ることが報告された³²⁻²。

15.6 その他の研究

バーチャルリアリティー空間を念頭においた研究では、視聴覚統合に関する研究のほか、視覚情報と触圧感についての研究³²⁻¹やバイオロジカルモーションに関する研究^{32-1,32-2}についても引き続き報告され、より現実的なVR装置の開発に大きく貢献すると考えられる。視聴覚統合に関する研究では、聴覚刺激呈示回数が実際の視覚刺激呈示回数よりも多い場合、実際より多い視覚刺激を知覚すること、また、奥行き方向の仮現運動の見かけの距離も増大する結果が報告された^{32-1,32-2}。MEGによる脳計測では、刺激呈示後300ms以降で視覚・聴覚情報が統合される結果が報告された³²⁻¹。顔認識に関しては、視線方向による印象³²⁻¹や、注意が向けられていない周辺の顔刺激の視線弁別課題^{2,32-1,32-2}、怒り検出優先効果の一般性についての検討³²⁻¹が報告された。

運転時の視環境と視覚特性については、運転手の視野範囲とその輝度分布の関係³²⁻¹や、運転疲労の蓄積による有効視野の狭窄³²⁻²、また、ナイトビジョン表示時の視認性評価³²⁻¹や、ガラスへの写り込み時の物体認識³²⁻²や読みやすさ評価方法³についての報告があった。

15.7 展 望

報告件数が増加した脳イメージングのNIRSによる計測では、後頭葉（視覚野）の測定にはノイズが多くみられる。しかし、前・側頭葉での測定精度は高く、測定実験場所に制限が少ないことから、運動知覚時での脳活動計測が期待される。

視覚特性の経験や学習への依存性や、その個人差に関する研究報告が多くみられた。そこで引き続き、経験や学習が視覚特性の個人差に及ぼす影響度合いや、その原因解明についての研究への取り組みが期待される。特に高齢者の見えに関しては世代内の個人差が大きいことが報告されており、視覚障害者の見えに対する支援ツールとしては、一義的な対処ではなく、個々の視覚特性を考慮した開発が望まれる。

16. 光源・測光・照明

松下電工 岩井 彌

16.1 概 要

LED (light emitting diode) や有機EL (electro luminescence) に関する技術開発報告、昨今の社会環境を反映した地球環境保全や、安全・安心へとつながる照明を検討した報告、また、ここ最近の空間へのこだわりのニーズに対応した技術開発報告が目立った2005年であった。

16.2 光 源

蛍光ランプに関して、スパイラル形状発光管の採用によりコンパクト化を実現した電球形蛍光ランプの開発³³や、発光管を細径角型化することで高効率化を実現した蛍光ランプの開発³³など、発光管形状の工夫でさらなるコンパクト化と高効率化を狙った技術開発が報告された。世の中の調光ニーズに対応して、電球用調光器で調光可能な電球形蛍光ランプを開発した報告³³もみられた。

高輝度放電ランプ (HID ランプ) では、高効率で高演色、ならびに色安定性に優れるセラミックメタルハライドランプに関する技術開発報告、特に省エネルギーにつながる調光技術の報告が多くみられた³³。

携帯電話にも使われるようになり、普及が加速している有機ELは、効率が白熱電球以上の20lm/Wを超え、一般用照明用光源として使える目処がたってきた⁰⁻¹²。非発光時に透明になる透明有機ELは、他光源ではみられない特徴をもつ光源として、新たな展開が期待される⁰⁻¹²。

主として信号灯などのサイン的な照明の光源として使われてきたLEDであるが、発光効率は蛍光ランプの効率に迫る50lm/W以上のものも開発され⁰⁻³、スタンドやスポットライトなどの一般照明用の光源にも使われるようになってきた。また、LEDは、高効率化を目指した技術開発が進められている一方、LEDの欠点である演色性を高める技術開発も引き続き行われた³³。

16.3 測 光

普及が著しいLEDではあるが、その特徴的な発光特性がゆえに、従来光源に対する光度ならびに全光束の測定法が適用できず、測定法の基準化もいまだなされていない。そのため、LEDの光度ならびに全光束の測定方法に関する研究報告が多くみられた³³。一般照明器具の光源としてLEDが使われるようになってくると、今まで以上に正確なスペックが照明器具の開発側に求められる。スペックを評価する方法が開発メーカー各社まちまちでは、同じテーブルでの正当なスペック比較ができず、一般照明用光源としてのLEDのさらなる技術の発展は期待できない。全光

束、光度のみならず、寿命評価方法の早期基準化を望みたいところである。

光源の演色性の評価に関しては、実際の実用上問題の生じないレベルの演色評価数の強度を検討した報告があり、相関色温度 6000 K 以上では平均演色評価数 Ra 70 以上 4000 K 以上で Ra 80 以上あれば、日常的な色彩観察のための光源として十分であることを明らかにした^{P-2}。

16.4 照 明

照明器具の光源としてはまだまだ新しく、現在も加速的に高機能化が進んでいる LED に注目した研究報告は、やはり数多くみられた。発光部が小面積であるがゆえに生じやすい LED の不快グレアを検討した報告³³ や、LED を光源としたサインの視認性や目立ちを検討した報告³³、LED の輝度感、コンパクト性を生かして省エネルギーを実現する LED を光源とした照明器具のオフィス空間でのタスク&アンビエント照明方法への適用を検討した報告³³ などがあった。さらに、LED の発光スペクトルのコントロールにより、植物栽培³³ や農業害虫防除³³、医療用光源³³ などへの応用を検討した報告、また依然としてヘッドライトへの応用を主とした自動車用車載照明に関する技術報告³³ は数多くみられた。

2005 年 2 月 16 日に京都議定書が発効されたことにより、地球環境保全を目的とした省エネルギーに対する意識の高まりを背景として、省エネルギーを意識した技術開発報告が多くみられた。特に昼光利用を目的とした報告が目立ち、採光時の空間の印象を評価する方法を検討した報告³³ や、窓面のグレア評価へとつながる研究報告³³、直射日光の近隣ビル外壁の反射光が昼光率に与える影響を検討した報告³³ などがあった。

空間へのこだわりの意識が高まってきており、住宅の居間空間においては、従来の一室に天井中央に主照明一灯という照明方法から、複数灯配灯して、目的に応じた空間づくりをする照明方法を採用する人が増えてきている。また、ビルやパブリックな空間においても建築化照明や間接照明を採用して、雰囲気の良い照明空間づくりをしている物件が各地でみられるようになってきた。照明を変えるだけで空間の雰囲気が大きく変わるといった認識が、ようやく一般的に浸透してきたように思える。そのような背景から、照明空間の印象に注目した研究が数多くみられた。空間の観察視点に置かれた輝度の変化する指標を用い、その指標の見え方が物体色から光源色へと見える境界の輝度により、「空間の明るさ感」を定量的に数字で評価する方法が、実際の一室複数灯の住宅居間空間の照明や、反射率の異なる空間に対しても適用できることが明らかにされ

た³³。ほかには、テレビ鑑賞時の臨場感を高めつつ、眼が疲れにくい視環境を実現するホームシアター空間用の照明方法を検討した報告³³ や、「くつろぎ」の照明空間を実現するための照明方法を検討した報告³³ があった。

昨今の社会環境を反映して、安全で安心な環境づくりへとつながる研究報告も目立ってきた。高齢者の安全を意識したサイン計画や照明計画に関する研究報告³³ は継続してみられるが、最近では色弱者、ロービジョン者を対象とした研究報告³³ もみられてきた。防災につながる技術開発としては、火災煙下での視野の輝度分布を予測した報告³³ や、順応を考慮した防災時の照明方法の検討³³、災害時に安全に非難できる照明システムの検討報告³³ があった。また、防犯効果を高める照明システムの検討報告³³ もみられた。

16.5 展 望

以上述べてきた地球環境保全と照明の質とを両立させる照明方法の検討と、LED や有機 EL などの新光源の照明への応用技術開発は、今後も継続的に探求される技術課題であるといえる。これらの技術開発の進展が期待できる一方、それら開発技術が応用される照明空間の評価が、いまだ水平面照度だけという現状はあまりにも情けない。工業製品のよい発展は、多面的な評価軸により評価され、目的に応じたスペックが存在することで期待できる。高効率化を主とした技術開発のみならず、今回みられた「空間の明るさ感」の評価方法などの照明空間の評価軸を増やすことにつながる技術開発のさらなる進展が望まれる。

17. 医学・生物応用光学

産総研 渡辺 歴

17.1 概 要

医学・生物応用の分野では、日本光学会の生体医用光学研究グループをはじめ、電気学会の「次世代バイオメディカル・レーザ応用技術専門委員会」などが活発な活動を続けている。本年度、日本光学会の生体医用光学研究グループは OPTICS JAPAN 2005 において第 4 回生体医用光学研究会を開催した。発表件数は 65 件と増加し、この分野への関心の高さ、研究の活発さを示している。発表内容を分類すると、OCT (optical coherence tomography) 関連 16 件、蛍光・細胞光学 10 件 (超短光パルス利用が 7 件)、近赤外分光・拡散イメージング・光 CT (computer tomography) ・光伝搬 14 件、光音響 3 件などであった。また、「眼科における光学と医療の最前線」「補償光学技術の新しい潮流」に関するシンポジウムが開催された。

17.2 OCT

OCTでは実時間化、高分解能化、高画質化が進んでいる。実時間化に関してはフーリエ領域OCTの研究が盛んであり、時間領域では音響光変調器を用いた高速走査リアルタイムOCTの研究が報告された^{10,9-9}。高分解能化に関しては、高分解能分光器を利用した高速フーリエ領域OCTによる2 μm の深さ分解能の実現が報告された^{10,9-9}。また、高速波長スキャン光源の開発、1.3 μm 帯スーパーluminescentダイオードの開発、スーパーコンティニュウム発生技術を利用した超広帯域光源など、OCT用光源の開発研究が進んでいる³。高画質化に関しては、金ナノ粒子、色素によるコントラスト増強や、干渉による信号対雑音比の向上が報告された³⁴。上記の技術発展とともに臨床への応用段階に進んできている。

17.3 非線形光学顕微鏡

超短光パルスを用いた非線形光学顕微鏡（二光子励起蛍光顕微鏡、第二高調波顕微鏡（SHG）、コヒーレント反ストークス・ラマン散乱顕微鏡（CARS））による細胞内部、皮膚などの三次元イメージングに関する研究は海外で活発に研究が行われていたが、国内での発表件数が増加してきた¹⁻³。フォトニック結晶ファイバーによるスーパーコンティニュウムを用いたCARS顕微鏡¹や二光子励起蛍光顕微鏡¹、スペクトル干渉SHG（second harmonic generation）の提案¹⁻¹⁸、二光子電子共鳴により増強された四光波混合過程に基づいた誘導パラメトリック顕微鏡が報告された¹⁻³。細胞内構造の可視化から脳や皮膚などの構造の可視化への応用が期待され、今後も大きな発展が期待される分野である。

17.4 補償光学技術

補償光学技術の重要性が認識されつつあり、補償光学技術によるコンフォーカル顕微鏡や二光子励起蛍光顕微鏡の分解能の向上や、眼底イメージングに関する研究プロジェクトが行われている³。

17.5 治療、生体プロセッシング

超短光パルスの多光子吸収CALIを用いた機能分子の制御^{R-7}、細胞内小器官のナノサージェリー（細胞内手術）^{3,34}が報告され、超短光パルスを可視化だけでなく、細胞内制御に使おうとする研究が国内外で開始されている。また、ナノパーティクルを用いた遺伝子導入³⁵、ナノ秒レーザー誘起応力波によるラット皮膚への遺伝子ベクター導入³が報告された。

17.6 近赤外分光イメージング

光CT、光トポグラフィーにおけるアルゴリズムの開発が報告された³。また、近赤外分光イメージングデバイス

の開発と乳がん検診が行われている。

17.7 展 望

国内外で今後取り組むべき課題としてあげられている分子イメージングに関しては、ナノプローブ、ナノパーティクル応用³⁴や、PET（positron emission tomography）・蛍光同時イメージング³、機能イメージング、*in vivo*の応用³⁵が進んでいる。

医学・生物応用光学分野の研究は、光学のライフサイエンス、医学への応用を目指した21世紀の境界領域融合型研究と今後発展が期待できる。今後は、単一分子、タンパク質といった細胞レベルから器官や個体レベルまでの各種イメージング機器の開発、アルゴリズムの開発研究が課題である。また、バイオセンサー、表面増強プラズモンなどナノ構造によるナノメディシン、ナノバイオテクノロジーも次世代の技術として今後の進展が期待される。

18. 光学関連の国際規格

日本光学工業協会 岩橋四郎

筆者が所属している日本光学工業協会は、ISO/TC172（光学とフォトンクス）関係の国内審議団体となっており、筆者はTC172国内委員会及び同/SC1（基本規格）分科委員会の事務局を担当している。以下、2005年のTC172国内委員会関係の活動内容を紹介する。

18.1 TC172（光学とフォトンクス）

TC172の幹事国はドイツで、国内審議団体は日本光学工業協会である。

TC172の国際標準化作業は順調に進展を続け、TC172関係全体で発行されている国際規格は2005年12月1日現在で245件に達している。

2005年にTC172として審議した議題は、「光放射の分光区分」と「光学とフォトンクスの参照辞書の仕様」である。「光放射の分光区分」については、DIS(Draft International Standard)に進む段階にあり、国際照明委員会より出された意見の調整が、2005年5月に開催されたTC172ワイマール会議で行われ、その結果がDISに反映されることになった。

「光学とフォトンクスの参照辞書の仕様」は、2004年12月にドイツから提案された。ドイツではDINの方針に沿って参照辞書の作成の活動をしており、この提案もそれに沿ったものであると考えられる。この提案については2005年2月にTC172国内委員会で審議を行い、コメント付きで賛成した。投票の結果、提案は承認され、今後はSC1/WG4で検討されることになった。2006年3月にCD(Committee draft)の発行が予定されている。

現在、ISO/TC172 傘下では、次の7つの分科会が活動を行っている。

18.2 SC1 (基本規格)

SC1の幹事国はドイツで、国内審議団体は日本光学工業協会である。

2005年5月にドイツのワイマール市において国際会議が開催され6か国から25名が出席した。おもな審議項目は、新規では見本画像システムのMTF測定原理、参照辞書の仕様の進め方、定期見直しでは光学的伝達関数、製図手法および環境試験方法・条件等であった。

2005年に発行された国際規格は、以下の通りである。

ISO 9022-7: 環境試験方法—第7部: 水滴又は雨に対する耐性

ISO 9335/Cor 1: 光学的伝達関数—測定 of 的原理と手続き/正誤票 1

ISO 10109-1: 環境試験条件—第1部: 概要、用語及び定義、気候帯とそのパラメータ

ISO 10109-6: 環境試験条件—第6部: 医用光学機器の試験要求事項

ISO 10109-8: 環境試験条件—第8部: 極限使用の試験要求事項

ISO/TR 14999-1: 光学的素子及びシステムの干渉測定—第1部: 用語、定義と基本関係

ISO/TR 14999-2: 同—第2部: 測定と評価技術

ISO/TR 14999-3: 同—第3部: 干渉試験機器のめもり確認と測定

18.3 SC3 (光学材料及び構成物)

SC3の幹事国はフランスで、国内審議団体は日本光学硝子工業会である。

2005年に訂正・修正された国際規格は、以下の通りである。

ISO 9802/Cor1: Row optical glass—Vocabulary (光学ガラス素材-用語)/正誤票 1

ISO 12123/Amd1: バルク及び成型形状の光学ガラス素材-泡と異物-試験方法と等級付け/修正表 1

18.4 SC4 (望遠鏡)

SC4の幹事国はロシアで、国内審議団体は社団法人日本望遠鏡工業会である。

2005年11月にロシアのサンクトペテルブルグで国際会議が開催され、おもにナイトビジョン関係の審議が行われた。WG1(単眼鏡双眼鏡)とWG3(天体望遠鏡)は、審議が終了し解散することになった。

2005年に発行された国際規格は、以下の通りである。

ISO 14490-1: 望遠鏡の試験方法—第1部: 基本性能の

試験方法

ISO 14490-2: 望遠鏡の試験方法—第2部: 双眼鏡の試験方法

ISO 14490-4: 望遠鏡の試験方法—第4部: 天体望遠鏡の試験方法

ISO 14490-5: 望遠鏡の試験方法—第5部: 透過率の試験方法

ISO 14490-6: 望遠鏡の試験方法—第6部: ペーリンググレアの試験方法

ISO 14490-7: 望遠鏡の試験方法—第7部: 結像性能の試験方法

18.5 SC5 (顕微鏡・内視鏡)

SC5の幹事国はドイツで、国内審議団体は日本顕微鏡工業会である。

2005年9月にスイスで顕微鏡関係の国際会議が開催され、おもに対物レンズの平坦性規定、内視鏡及びその処置具について審議が行われた。

2005年に発行された国際規格は、以下の通りである。

ISO 8600-1: 医用内視鏡と内視鏡用処置具—第1部: 一般的要求事項

ISO 8600-5: 同—第5部: 光学系を有する硬性鏡の光学解像度試験法

ISO 8600-6: 医用内視鏡と内視鏡用処置具—第6部: 用語

18.6 SC6 (測量機器)

SC6 幹事国はスイスで、国内審議団体は日本測量機器工業会である。

2004年9月にアメリカのメリーランド州で国際会議が開催され、新規案件では「GPS」「GUMの測量機器の野外テスト手順への適用」「巻尺」などについて審議が行われた。

2005年に発行された国際規格は、以下の通りである。

ISO 12858-3: 測量機器の補助的器具—第1部: 整準台

ISO 17123-5: 測地及び測量機器の屋外における検査手順—第5部: トータルステーション

ISO 17123-7: 測地及び測量機器の屋外における検査手順—第7部: 光学式鉛直器

18.7 SC7 (眼光学及び関連機器)

SC7の幹事国はドイツで、国内審議団体は日本医用光学機器工業会である。

2004年10月にフランスのパリで国際会議が開催され、日本から眼底カメラ、眼軸長測定装置などの規格を提案した。

2005年に発行された国際規格は、以下の通りである。

- ISO 7998：めがね枠一用語及び同意義語
- ISO 8980-5：アンカット完成品眼鏡レンズ—第5部：
摩擦抵抗に必要とされる眼鏡レンズの最小必要条件
- ISO 9342-1：レンズメータの目盛校正用テストレンズ
—第1部：計測メガネレンズ用
- ISO 9342-2：レンズメータの目盛校正用テストレンズ
—第2部：コンタクトレンズ用
- ISO 11981/Cor1：コンタクトレンズケア用品とコンタ
クトレンズの物理的適合性の判定/正誤票1
- ISO 19980：Corneal topographers（角膜のトポグラフ
ァー）

18.8 SC9（エレクトロオプティカルシステム）

SC9の幹事国はドイツで、国内審議団体は光産業技術
振興協会である。

2005年6月にイギリスのロンドンで7か国が出席し国
際会議が開催された。会議の報告は、審議団体発行の「光
標準化ニュース第80号」に掲載されている。

2005年に発行された国際規格は、以下の通りである。

- ISO 11146-1：レーザービーム幅、発散角及びビーム伝播
係数の試験方法—第1部：スティグマティック及び単
純アスティグマティックビーム
- ISO 11146-2：同上—第2部：一般非点収差ビーム
- ISO/TR 11146-3/Cor1：同上—第3部：本質的及び幾
何学的レーザービーム分類、伝播及び試験方法の詳細/
正誤票1
- ISO 11553-1：機械の安全性—レーザー加工機械—第1
部：一般安全要求事項
- ISO 11810-1：外科用ドレープ及び/又は患者保護カバ
ーの耐レーザー性に対する試験方法及び分類
- ISO 13694/Cor 1：レーザービーム出力（エネルギー）
密度分布の試験方法/正誤票1
- ISO 14880-1/Cor 2：マイクロレンズアレイ—第1部：
用語/正誤票2
- ISO 15367-2：レーザービーム波面の形状の測定のため
の試験方法—第2部：シャック・ハートマンセンサ
- ISO/TR 22588：レーザー光学部品の吸収誘導作用の測
定及び評価

18.9 今後の課題

上記18.1で述べた「光学とフォトニクスの参照辞書の
仕様」の規格は、光学関連業界全体の利害に関係してくる
可能性があり、今後のCDの審議では、関係業界との意見
交換が不可欠である。

19. 光学教育

日本女子大 小館香椎子

19.1 日本光学会における活動

理工系離れが一層顕著になっていることを受けて、科学
技術関係人材総合プラン2006は「社会のニーズに対応し
た人材育成」「優れた研究者の確保」「次代を担う人材の裾
野の拡大」「国民の科学技術への理解の増進」などを施策
の柱とし、初等・中等教育の段階から大学学部・大学院、
社会人に至るまで、連続性のある取り組みを行うという総
合的な推進を掲げている。日本光学会でも昨年「光学
教育」の項目を置き、次世代の人材確保、そして学会にお
ける教育活動について1年間の歩みをまとめている。

今年度の特筆されるべき活動としては、まずOptics
Japan 2005での30歳以下の若手研究者を対象とするベス
トプレゼンテーション賞(OJBP賞)の設置があげられ
る。これはOJ組織委員会の発案、理事会の承認を得て実
現されたが、応用物理学会としては最初の、若手研究者の
みを対象とする賞である。講演募集時に対して自薦により
申請してきた候補者は、審査用特別セッションにおいて、
一般講演と同形式・同時間によるプレゼンテーションを行
った。今回は7つのセッションで79名の若手から独自性
の高い内容を持つプレゼンテーションがあり、活発な質疑
応答が行われた。選考委員会における慎重・厳正な審査の
結果、その中から7名が受賞され、2日目に開催された懇
親会で受賞式が行われた。その様子や受賞者の氏名などは
「光学」第35巻第2号(2005年2月)の報告に詳しく記
載されている。新たに設置されたこのOJBP賞が、次代
の光学分野を担う若手研究のエンパワーメントにつながる
ことを期待したい。

また、OJBP賞に参加した若手研究者を中心に、「若手
激励パネルディスカッション：多様性の担い手と将来を考
える」が開催された。若手からは、豊橋技術科学大の宮澤
氏、神戸大の仁田氏、日本女子大の渡邊氏、千葉大の高瀬
氏がパネリストとして出席され、アドバイザーとして(独)
日本学術振興会の久保真季総務部長、(独)科学技術振興機
構・早稲田大の中島啓幾教授、オリンパス・メディカルシ
ステムズ(株)の後野和弘シニアエンジニアに参加を依頼し
た。各パネラーからは、例えば博士課程終了後の就職、ポ
スドク問題、男女共同参画社会に向けた女性研究者のあり
方など、現状で感じている問題が提起されるとともに、ア
ドバイザーや参加者との間で活発な議論も行われた。OJ
の特別講演のためにご参加いただいたSPIE会長のMal-
gorzata Kujawinska教授からも、SPIEが日本の若手研

究者を支援していくために、ジャパンチャプターをおくことを希望するという旨の意見が出され、日本光学会として対応することになった。

光学教育の現状を踏まえれば、人材育成を目指すうえでも、研究テーマとしての「教育」は重要である。Optics Japan でも募集要項にキーワードとして掲載する必要があるだろう、との伊藤雅英氏（2003年度）の意見に大いに賛同する。また、積極的な投稿を期待したい。

19.2 応用物理学会における活動

昨年2005年は、世界物理年ということで、数々の記念行事が開催された。10月15日には、応用物理学会および世界物理年日本委員会が主催して「活かす技術、極める科学一人と地球の未来のために」が催された。企業からは最先端技術などの展示が出されたが、それらと並行して「高校生・大学生のための特別懇談セミナー」が開催され、20世紀の科学と技術の驚異的な発展の一翼を担った世界的な研究者および技術者との懇談会の場が設けられた。とりあげられた4テーマのうちの3テーマは、「物質と光の根源を極める」（講師：小柴昌俊・晝馬輝夫）、「宇宙の神秘を探る」（講師：家正則・三神泉）、「光通信の開拓と未来」（講師：西澤潤一・伊澤達夫）という光関連のテーマであった。講演者に対する質疑応答も直に行うことができるよう配慮されていたため、理工系の研究に関心をもつも

のや研究者を志す若者にとっては、自らの好奇心や未来への可能性を改めて確認するための素晴らしい機会となったようである。また、高校生を対象とした日本で最初の全国物理コンテスト、「物理チャレンジ2005」が仁科芳雄博士のゆかりの地でもある岡山県で開催され、活気にあふれる中、参加者は101名を数えた。これに加えて、応用物理で例年行われている「リフレッシュ理科教室」も開催され、理系人材育成を重視するさまざまな活動が展開された。

また、春季・秋季の学術講演会の応用物理一般/教育セッションにおいて、光学を対象とした実験教育についての報告も従来通り行われた。さらにコンピューターや携帯電話などを取り入れたeラーニング形態の光学関係実験・教材の報告も目立つようになり、今後さらに要求が高まるだろう。

19.3 展 望

以上、日本光学会、応用物理学会それぞれについて、光学教育に関する活動をまとめてきた。少子化と理工系離れが進行する現在、意欲と能力のある多様な研究者・技術者の育成が急務であることは十分認識されており、そうした趣旨で行われる活動は以前よりも活発になっている。今後は、光科学・技術を担う人材育成にむけて、日本光学会としてもシンポジウムを開催するなど、さらに真剣に取り組んでいく必要があると感じている。