

# 1997 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、本文中での検索雑誌・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」引用学会等の省略記号

◆学会誌関係	記号	◆講演会関係	記号
光 学 第 26 卷第 $n$ 号	a- $n$	第 44 回春季応用物理学関係連合講演会	1
応用物理 第 66 卷第 $n$ 号	b- $n$	第 58 回秋季応用物理学学会学術講演会	2
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 36, No. $n$	c- $n$	OPTICS JAPAN '97	3
(2) Vol. 36, No. $n$	d- $n$	第 22 回光学シンポジウム	4
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 36, No. $n$	e- $n$	第 14 回色彩工学コンファレンス	5
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 14, No. $n$	f- $n$	第 27 回画像工学コンファレンス	6
(B) Vol. 14, No. $n$	g- $n$	第 30 回光学五学会関西支部連合講演会	7
Appl. Opt. Vol. 36, No. $n$	h- $n$	日本物理学会第 52 回年会	8
Opt. Lett. Vol. 22, No. $n$	i- $n$	日本物理学会 1997 年秋の分科会	9
Opt. Commun. Vol. $m$ , No. $n$	j- $m$ - $n$	CLEO/Pacific-rim '97	10
J. Light Wave Technol. Vol. 15, No. $n$	k- $n$	QELS '97	11
Phy. Rev. Lett. Vol. 78, No. $n$	l-01- $n$	MOC/GRIN '97	12
Vol. 79, No. $n$	l-02- $n$	1997 International Workshop on X-ray and Extreme Ultraviolet Lithography (XEL '97)	13
Science Vol. $m$ , No. $n$	m- $m$ - $n$	第 20 回光波センシング技術研究会	14
Nature Vol. $n$	n- $n$	第 9 回外観検査の自動化ワークショップ	15
Opt. Rev. Vol. 4, No. $n$	o- $n$	1997 OSA Annual Meeting	16
Opt. Design Vol. $n$	p- $n$	Optical Information Science and Technology (OIST) '97	17
レーザー研究 Vol. 25, No. $n$	q- $n$	Joint MORIS/ISOM '97	18
Opt. Eng. Vol. 36, No. $n$	r- $n$	Optoelectronics and Communication Conf. (OECC) '97	19
Appl. Phys. Lett. Vol. 70, No. $n$	s- $n$	LEOS '97	20
Vision Vol. 9, No. $n$	t- $n$	European Conf. Optical Communication (ECOC) '97	21
分光研究 Vol. 46, No. $n$	u- $n$	CLEO '97	22
照明学会 平成 9 年 $n$ 月号	v- $n$	Optical Amplifiers and Their Applications (OAA) '97	23
日本建築学会計画系論文集 1997 年 $n$ 月号	w- $n$	Optical Fiber Communication Conf. (OFC) '97	24
ディスプレイアンドイメージング 1997 年 $n$ 月号	x- $n$	LUX PACIFICA '97 Nagoya	25
		IESNA Annual Conference '97	26
		1997 年電子情報通信学会総合大会	27
		1997 年電子情報通信学会ソサイエティ大会	28
		日本視覚学会 1997 年冬季研究会	29
		日本視覚学会 1997 年夏季研究会	30
		平成 9 年度照明学会全国大会	31
		日本建築学会 1997 年度大会	32
		AIC Color 97 Kyoto	33

# 1. 光物理

静岡大 中島伸治  
大阪大 北川勝浩

## 1.1 基礎的・伝統的光学

### 1.1.1 コヒーレンス・回折・干渉

光のスペクトル変化現象では、各周波数成分の空間相関が重要となる。この相関を表す複素スペクトルコヒーレンス度の波面折り畳み干渉計による測定が報告された<sup>1</sup>。さらに、この干渉計を用いて、異なるスペクトルを有する独立な2点光源のフラウンホーファーおよびフレネル領域での複素スペクトルコヒーレンス度から、Van Cittert-Zernikeの定理に基づき光源の位置およびスペクトルを再生する実験が示された<sup>2,3</sup>。また、放射伝達理論とコヒーレンス理論を調和させる試みで従来用いられていた準単色仮定を、多色場へ拡張する定義が提案された<sup>2</sup>。

光源のコヒーレンス制御に関しては、グレーティングと位相変調型液晶を用いた超短光パルスの周波数領域制御法によるコヒーレンス関数の合成実験の報告<sup>2</sup>が注目される。このような方法によって、機械走査が不要な振動に強く高速測定性をもつ低コヒーレンス干渉計が実現できる。また、空間的コヒーレンスを変化させるコヒーレンスフィルターにおける光強度損失の低減法<sup>2</sup>、位相変調型液晶を用いた波面時間変動法による空間コヒーレンスの定量的制御実験<sup>3</sup>などが報告された。

回折現象に関しては、フラクショナル・フーリエ変換を光情報処理に応用する際問題となるレンズ開口の影響について、コヒーレント光および部分的コヒーレント光入射の条件<sup>1,2</sup>の場合に調べられた。また、ガウスビーム伝搬則を用いた回折場近似のない方法による位相ゆらぎをもつ2次元アレイ光源のフレネル像の検討<sup>1</sup>、原子干渉計によるLauイメージングの観測<sup>2</sup>などの発表があった。

光干渉性を利用した素子の実現に関する基礎的研究として、1次元の周期・フラクタル状構造をもつ利得媒質による光増幅特性の検討<sup>1</sup>、多光束干渉を利用して3次元フォトニック結晶を実現するための系統的な光強度分布決定法の提案<sup>3</sup>などの報告があった。

### 1.1.2 光放射圧

微粒子の光捕捉および操作の研究や微粒子が受ける光放射圧および変位の検出に関する研究の報告が多数あった。光捕捉に関しては、一本のレーザー光による空気中でのガラス粒子の光捕捉<sup>1</sup>、上方および下方からのガウスビーム照射によって微粒子が受ける光圧の理論解析と実験<sup>1</sup>、ガウスビームによる金属粒子の捕捉<sup>2</sup>、空間光変調素子を用いた微

粒子の操作<sup>1</sup>、光導波路のモード間干渉を利用した微粒子の運動制御<sup>2</sup>、光駆動回転子の種々の形状におけるトルクの比較<sup>1,2</sup>などが報告された。また、光トラップされた微粒子の微小変位の臨界角法による検出<sup>1</sup>、微粒子に働く光放射圧のカンチレバーセンサーによる検出<sup>1</sup>、微粒子に作用する放射圧ポテンシャル測定による粒子の表面電荷密度測定<sup>1</sup>およびエバネッセント場から受ける放射圧測定<sup>2</sup>などの報告があった。

### 1.1.3 散乱

ここ数年、コヒーレント強調後方散乱現象に関する研究が盛んである。特に計算機シミュレーションが多く、例えば、フラクタル媒質の後方散乱における偏光異方性<sup>1</sup>・吸収依存性<sup>1</sup>の検討および計算アルゴリズムの改良<sup>1,2</sup>、多粒子系ランダム媒質からの後方散乱光特性<sup>1</sup>、高濃度ランダム媒質の内部と後方における散乱光強度分布の関係<sup>1</sup>などのシミュレーション結果が報告された。理論解析としては、後方散乱理論の輸送平均自由行程をミー散乱理論から計算する方法の提案<sup>2</sup>、利得散乱媒質からの後方散乱光強度に対する3準位系レート方程式に基づく理論解析<sup>3</sup>などがあった。実験結果の報告としては、凝集媒質の強調後方散乱の形状からの媒質のフラクタル次元決定<sup>3</sup>、後方散乱強度と光路長分布関数からの吸収体の位置測定<sup>3</sup>などがあった。

光CTの実現に向けて、散乱媒質中の吸収物体観測の基礎実験、シミュレーション、理論解析に関する多くの報告があった。実験では、光拡散方程式において従来広く信じられていた光拡散係数の吸収依存性の誤りが指摘され、最近、吸収に独立な光拡散係数の形に修正された光拡散方程式が高い吸収条件下でも成立することが実証された点が注目される<sup>3</sup>。その他、ヘテロダイン検出法による生体・工業製品の計測<sup>1,2,3</sup>、偏光保存フォトン検出法による光CT装置の開発<sup>1</sup>、光CT用64チャンネル時間分解光システムの開発<sup>3</sup>などの報告があった。シミュレーションでは、光路長と検出器の時空間フィルタリング効果の解析<sup>3</sup>、光拡散方程式に基づく強度変調光の位相遅れの検討<sup>1</sup>などの発表があった。理論解析では、任意の時間分解ゲート計測出力光と媒体の吸収係数との関係を表す解析式の導出<sup>3</sup>、時間分解計測波形から散乱・吸収係数を算出する方法の提案<sup>3</sup>などがあった。

### 1.1.4 展望

各領域で着実な発展がみられるが、特に、コヒーレンス計測・制御での光の周波数領域に関する研究と、拡散係数が修正された光拡散方程式に基づく研究の進展が目についた。今後、応用分野への展開が期待される。(中島)

## 1.2 量子光学・非線形光学

### 1.2.1 レーザー冷却・捕獲, ボーズ・アインシュタイン凝縮

気体原子のボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) に関連した実験と理論が多数発表された。まず最初のニュースは原子レーザーの実現であった<sup>1-01-4</sup>。MIT のグループは、磁気トラップ中でボーズ・アインシュタイン凝縮した Na 原子に、基底状態のハイパーファイン分裂 ( $m=0, \pm 1$ ) に共鳴した高周波パルスを印加することによって、トラップ状態 ( $m=-1$ ) と非トラップ状態 ( $m=0$ ) の重ね合わせを作り、トラップから原子を任意の結合率でコヒーレントに取り出すことに成功し、最初のパルス原子レーザーの誕生を示唆した。彼らはさらに、磁気光学的に作られたダブルウェルポテンシャル中の Na 原子を蒸発冷却して 40  $\mu\text{m}$  離れた 2 つの BEC を作り、ポテンシャルをスイッチオフして、2 つの BEC が 40 ms 空間的に広がり重なったことによる 15  $\mu\text{m}$  周期の明瞭な干渉縞を観測した。これによって、BEC 原子はレーザーのようにコヒーレントで長距離相関をもつと結論した<sup>m-275-5300</sup>。BEC の位相や干渉<sup>1-01-22,11</sup>、BEC 間のトンネル効果<sup>1-02-24</sup>について、議論が展開された。JILA と NIST のグループは、共同冷却によって <sup>87</sup>Rb の異なるスピン状態からなる空間的に重なった 2 つの BEC を作り、それらの間の相互作用などを調べた<sup>1-01-4</sup>。<sup>7</sup>Li の BEC で原子間の相互作用が引力的であることによる占有数の上限が観測された<sup>1-01-6</sup>。

東大・慶応大のグループはドーナツビームによる新しい原子トラップを実現した<sup>1-01-25</sup>。また、 $\text{Yb}^{+3}$  ドープトファイバー (固体) の 16 度のレーザー冷却が報告された<sup>1-01-6</sup>。

原子干渉計によるジャイロの感度として、 $\sqrt{\text{Hz}}$  あたり 3  $\mu\text{rad/s}$ <sup>1-01-5</sup>~ファイバージャイロに匹敵する 20  $\text{nrad/s}$ <sup>1-01-11</sup> が報告された。また、パルス光の定在波を位相格子として使ったフォトンエコー類似の時間領域の原子波干渉計が報告された<sup>1-02-5</sup>。

NIST のグループは、光格子のポテンシャルを急激に変化させて Cs 原子の重心運動の波束の古典領域でのスクイジングを観測した<sup>1-01-15</sup>。

1997 年のノーベル物理学賞は、「レーザー光による原子の冷却および捕獲法の開発」の業績によって、Steven Chu (Stanford 大)、Claude Cohen-Tannoudji (France 大、École Normale Supérieure)、William D. Phillips (NIST) の 3 氏に贈られた。

### 1.2.2 スクイジング・量子非破壊測定

スクイジングや量子非破壊 (QND) 測定に関する実験的な進歩が目立った。Orsay のグループは磁気光トラップ中

の <sup>87</sup>Rb 原子を非線形媒質として使って、1 段の QND 測定としてはこれまでで最良の結果を得た<sup>1-01-4</sup>。MOT と QND を両立して同時に連続的に実現し、冷却原子を使った量子非線形光学実験の新しい可能性を開いたことが特に注目される。

Konstanz 大のグループは、ホモダイン・トモグラフィによってスクイズド状態のウィグナー関数や密度行列<sup>8,9</sup>を再構成してみせた<sup>n-387</sup>。また、縮退パラメトリック増幅による QND 測定のメーター入力光をスクイズして感度を改善したり<sup>1-01-7</sup>、ビームスプリッターの空きポートに低電力のスクイズド光を入力してシャピロ・タップを実現したり<sup>1-02-1</sup>、CW 光に縮退パラメトリック増幅とシャピロ・タップによる 2 つの QND 測定を続けて行ったり<sup>1-02-8</sup>、いずれもサーボループを駆使して数時間から数十時間の安定性を実現しているのが素晴らしい。CNET は縮退パラメトリック増幅によるタップを 2 段カスケードにして無雑音光バスの実験を行った<sup>1-01-1</sup>。

東大・広島大のグループは、集団的クーロンブロッケイドによる LED のサブポアソン発光を観測した<sup>10</sup>。

理論では、スクイズド光による原子のスピン・スクイジング<sup>1-02-24</sup>、スクイズされた原子からの発光<sup>1-02-20</sup>、スピン・スクイジングによる周波数標準の改善<sup>1-02-20</sup>等が報告された。

### 1.2.3 量子暗号・量子情報・量子コンピューター

量子暗号の実験では、通常の光通信用に敷設されている数 km~数十 km のファイバーを使って安定に単一光子干渉を実現する方法が Genova 大と阪大から発表された<sup>11</sup>。

理論では、非対称な干渉計を使って 1 bit の情報を 2 段階に分けて送る直交 2 状態だけを使った量子暗号が NTT から提案された<sup>9,1-02-12</sup>。量子暗号の安全性について、量子メモリ<sup>1-02-4</sup>が使われた場合等に一般化した議論があった<sup>1-01-11,1-02-20</sup>。量子ビットコミットメントは不可能であることが証明されたが<sup>1-01-17</sup>、1 方向の通信によらない新しい可能性が NTT で検討された<sup>9</sup>。

遠く離れた原子の間で光ファイバーを通して量子状態を伝送する量子ネットワーク<sup>1-01-16,22;1-02-25,26</sup>や量子チャネル容量<sup>1-01-16</sup>に関する報告があった。

非局所性に関しては、通信用ファイバーを使った遠隔地間での EPR 実験<sup>s-277-5325</sup>、より明確な証明実験<sup>1-02-15</sup>、1 cm 離れたリドベルグ原子の EPR ペアの発生<sup>1-02-15</sup>が報告された。量子情報や EPR に関連して、エンタングルメントに関する研究が盛んである<sup>1-01-4,12,16,26;1-02-26</sup>。

核磁気共鳴を使った量子コンピューターが提案され<sup>m-275-5298</sup>熱平衡状態から開始しても純粋状態に対応する

結果を抽出できることや、決定論的な量子計算を行えば波束の収縮を伴わないマクロな数の量子コンピューターに対する平均値測定でよいことなど、実験の可能性を大きく広げた。

イオントラップ量子コンピューターのシミュレーションに関する報告があった<sup>1-01-2,20</sup>。デコヒーレンスを回避するための量子誤り訂正に関して、多くの研究がなされた<sup>1-01-3,11;1-02-5,10,17</sup>。

決定論的でユニバーサルなプログラブル量子ゲートアレイは存在し得ないことが示された<sup>1-02-2</sup>。

量子コンピューターによるソートされていないデータベースの高速検索アルゴリズム<sup>1-02-2,23</sup>や、フェルミ多粒子系のシミュレーションアルゴリズム<sup>1-02-13</sup>が提案された。

BECも量子コンピューターも量子光学にとどまらず広く一般からの関心が高まってきた。これら2つの流れがいずれも量子力学の基礎にかかわっていて、われわれの理解を試しているところが面白い。ちょうど今世紀の初めに光に関する2つの綻びから相対論と量子論が生まれたように、この分野から物理や情報の世界を変える発見がもたらされそうな予感がする。(北川)

## 2. 結像素子・光学機械

キヤノン 荒木敬介  
ニコン 村上勝彦

### 2.1 結像素子・光学機械 (一般)

結像光学に関する光技術は、よりマイクロなもの、より多機能なもの、より高精度なものへと進歩していつているが、その中で特に回折型素子や液晶光学素子を使うものが大きな流れとなっている感がある。

#### 2.1.1 光学素子

##### (1) 幾何光学的素子

上下方向の視野が $\pm 20^\circ$ で全周囲監視可能なタイプの広視野反射光学系用リレーレンズとして、反射鏡によって発生する非点収差を補正するものが設計報告された<sup>1</sup>。収差補正能力の高いラジアルGRINを含んだ光学系で枚数削減や高性能化を図った設計例もいくつか報告されている。ひとつは特性行列と固有係数を用いた初期設計手法を導入することにより、各群を1枚のラジアルGRINレンズで構成した3群ズームレンズの設計<sup>4</sup>であり、もうひとつは低分散のラジアルGRIN物質を用い、ベッツパール和と色収差低減を解析的に抑えて設計されたシングルレンズ、広角レンズ、ズームレンズ等である<sup>12</sup>。いずれも材料面でも製作可能なGRINをにらんだ設計検討となっている。

##### (2) 回折光学素子

回折素子と非球面レンズとの一体化設計技術を用い、精密成形技術を用いて可視全域における色消し機能を有する回折素子付きプラスチック1枚レンズ ( $f=5\text{ mm}$ ,  $F/2.8$ )が開発された<sup>3</sup>。また、屈折レンズ系で用いたアサーマルチャートの手法を回折光学系にも拡張し、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ の波長帯で $-30\sim +70^\circ\text{C}$ の温度範囲でも収差変動が非常に小さい、非球面と回折面からなるハイブリッドシングルレンズの設計検討がなされ、その有効性が示された<sup>0-4</sup>。

##### (3) 液晶光学素子

液晶を使った光学素子の検討が多く行われた。ネマティック液晶を使い、2または4分割ホールパターン電極構造のビーム制御機能をもったマイクロレンズが提案製作され、 $300\ \mu\text{m}$ の直径2V加圧でフォーカシング位置シフト量 $\pm 10\ \mu\text{m}$ が得られた<sup>h-20</sup>。DVD/CD互換光学系に対し、それぞれのディスクの厚み差に起因する球面収差を補正するために、液晶を用いた新規のアクティブ素子が開発された<sup>2</sup>。また、ディスクティルト補正とDVD/CD互換を1枚の液晶セルで実現した例が報告された<sup>2</sup>。

#### 2.1.2 光学機械

##### (1) 結像装置

国立天文台すばる望遠鏡の高分解能分光器用カメラの光学系として、3枚の補正レンズをもったカタディオプトリック光学系が設計され ( $f=761.23\text{ mm}$ ,  $F/1.02$ )、このタイプでは従来タイプに比して広い波長域にわたって色収差および他の収差がより良好に補正されることが示された<sup>4</sup>。回折素子を用いた系の新たな展開として、走査光学系の第2結像光学系に反射型回折素子を用いた系の提案がなされ、スポット径 $60\ \mu\text{m}$ 、 $f\theta$ 特性 $\pm 0.1\%$ 以下のものが可能であることが示された<sup>1</sup>。

##### (2) 光ディスク

DVD/CD互換光学系に対する研究開発がいくつか行われている。2.1.1で述べた液晶を用いた素子を用いるタイプの他にも、2波長の光を用い回折格子を用いた収差補正機能をもつ波長選択フィルターで使い分けるタイプも開発された<sup>2</sup>。また、ホログラムを用い回折次数により使い分けるタイプも、対物レンズの曲率の大きな第1面に一体型でホログラムを設けたことで、ディスクティルトに対するマージンが取れる上に、部品点数も削減が図られたものが発表された<sup>a-1</sup>。

##### (3) 観察光学系

回折レンズを利用して色収差補正を行った双眼鏡が試作され、不要回折次数光の眼視系への影響が検討された<sup>p-13</sup>。顕微鏡の焦点深度拡大のために、広いデフォーカス範囲において画像を取りこみ、それを積算したものに回復フィル



ターの逆フーリエ変換をコンボリューションして合焦画像を回復するという画像処理を使って、焦点深度を増大する装置について報告がなされた<sup>14</sup>。

#### (4) 表示装置

カラーフィルターのかわりに、回折格子とスリットアレイ（またはマイクロレンズアレイ）により分光された光を単板液晶パネルにあてて表示を行う多原色ディスプレイが提案され、カラーフィルター方式に比べて広い色域を再現できることが示された<sup>5</sup>。ホログラム照明板、ウェッジ基板、高分子分散型液晶パネルから構成されるシースルーディスプレイが提案試作され、この系ではウェッジ基板が回折されなかった0次光を全反射で分離するのに有効であることが示された<sup>3</sup>。

#### 2.1.3 光学設計理論

レンズの設計法、最適化手法について、いくつかの提案がなされた。異なる距離にある複数の軸上物点の共役な像点を評価点とし、その球面収差を適切にコントロールしてレンズシステムを最適化する手法が提案された<sup>4</sup>。また、変数のひとつを除外して最適化をかけ、除外した変数を規則的に変化させることでその変数と大局解との関係を解析できるパラメトリックな設計法が提案された<sup>4</sup>。また、遺伝的アルゴリズムによるレンズ系の多目的最適化が試みられ、複数の性能の異なるレンズを一度に探索できるなど、その有効性が示された<sup>4</sup>。重みづけされたチビシェフノルム法を応用した多目的最適化によるレンズ自動設計の検討が行われ、DLS法に比べて有効性が高いことが示された<sup>6</sup>。

理論的解析では、像面全面にわたって光束の形状と結像特性の均一な無収差両側テレセントリックレンズが、無収差フーリエ変換レンズを2組連ねたものとみなせることが示された<sup>4</sup>。また、内部応力分布があるガラス内の光線追跡の手法が、異方性がある屈折率分布の光線追跡を解析して提案された<sup>12</sup>。

#### 2.1.4 加工、評価測定

##### (1) 加工

引き続き紫外レーザー光のレーザーアブレーションを用いたプラスチックや光学ガラス表面の表面加工の研究が続けられている。直接照射系で平面、球面加工を行う自動加工システムが構築される一方、集光レーザー光を用いて微小レンズを製作する場合には低出力の炭酸ガスレーザーでアシストするほうがクリアな微小レンズになることが示された<sup>1,2</sup>。

色収差低減に有効な低分散特性をもったラジアルGRINがSiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>-BaO-K<sub>2</sub>O系にゾルゲルプロセスを適用することによって得られた<sup>12</sup>。

##### (2) 評価測定

プラスチック材料の成形レンズ内部の屈折率の不均一性を相対値ではなく絶対値として非破壊で測定するために、CT解析を用いた屈折率分布測定干渉計の手法が検討され、屈折率の絶対値精度が $2 \times 10^{-4}$ 以下で計測できることが示された<sup>4</sup>。

複屈折測定については軸ゼーマンレーザーを用いた光ヘテロダイン法による検討が続けられており、軸ゼーマンレーザーのビート周波数を高くすることで複屈折位相差、主軸方向をより高速化できることが確認された<sup>1</sup>。また、光ファイバプローブを先鋭化し、試料の近接場まで接近して走査することで、ナノメートルオーダーの高空間分解能を得られることが報告された<sup>2</sup>。（荒木）

#### 2.2 X線結像素子、X線光学機械

X線結像素子では多層膜ミラーについて多くの進展がみられた。多層膜ミラーは波長13 nm付近でMo/Si多層膜が高い反射率を示すことが知られているが、これよりも短波長側と長波長側でそれぞれ新しい多層膜ミラー作製の試みが行われた。短波長側では、ヘテロエピタキシャル成長によるAlP/GaP多層膜や、原料ガス吸着の自動的停止機構を利用した原子層成長によるTiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>多層膜など、新しい作製手法によりWater Window領域（波長2.3~4.4 nm）で従来のものを上回る高い反射率を有する多層膜が開発されており、X線顕微鏡等への応用が期待される<sup>1,9-5</sup>。長波長側では、波長30.4 nm用のMg/Sc多層膜、波長18.5 nm用のMo/Al多層膜などがスパッタリングにより作製され、新しい材料の探索が進められている<sup>1</sup>。

X線光学機械ではX線望遠鏡に関する研究が目立った。従来のX線望遠鏡はレプリカフォイルで作製された斜入射ミラーを用いるものが主体であったが、多層膜を使って垂直入射で使用するX線望遠鏡が実用レベルになっており、宇宙の高温天体からの極端紫外線の撮像分光観測に実際に使用されている<sup>1</sup>。斜入射のX線望遠鏡では、反射面に多層膜を形成することによって短波長側の測定領域を拡大する試みがなされており、中性子ミラーで用いられているスーパーミラー（周期長を徐々に変化させた多層膜）の概念が取り入れられている<sup>1,2</sup>。

X線望遠鏡以外には分析装置への応用が展開されており、軟X線を用いた偏光解析や軟X線光電子分光の研究が行われている。軟X線エリプソメーターでは、多層膜ハーフミラーを透過型偏光子に用いた軟X線エリプソメーターが開発された。多層膜ハーフミラーは、入射角を変えることによって1/4波長板としても機能することが示された<sup>2</sup>。また、金属薄膜の干渉効果を利用することにより非常

に高感度の計測(膜厚感度  $10^{-3}$  nm, 屈折率感度  $10^{-4}$ , 消衰計数感度  $10^{-5}$ ) の可能性が示された<sup>2</sup>. これらの軟 X 線の偏光を利用した分析法は, 半導体デバイス等の新しい評価手法として今後の展開が期待される.

軟 X 線光電子分光では, レーザープラズマを光源とし多層膜楕円ミラーやヴォルターミラーで試料上に集光し, 飛行時間法で光電子スペクトルを取得する手法の研究が進められた. 空間分解能  $60 \mu\text{m}$ , エネルギー分解能  $0.6 \text{ eV}$  で試料表面数原子層からの Si, C などの検出に成功し, 2 次元のマッピングも示された<sup>1,2</sup>. 放射光光源を用いる必要のないコンパクトな分析装置として今後の展開が期待される.

X 線光学機械の中では産業として最も規模の大きい軟 X 線縮小投影露光技術(EUVL: extreme ultraviolet lithography) では, 投影光学系の設計検討や付加加工による非球面創生の試みなどが行われたが<sup>2</sup>, アメリカと比べると国内の研究開発はまだまだ低調である. アメリカでは Intel, Motorola, AMD が出資して EUVL 装置を開発するためのコンソーシアムである EUV-LLC (Limited Liability Company) が設立された. サンディア国立研究所, ローレンス・リバモア国立研究所, ローレンス・バークレイ国立研究所からなる VNL (Vertual National Laboratory) と複数の露光装置メーカーに EUV 露光装置の開発を本格的に行わせようとしている<sup>13</sup>. これまでの基礎研究の段階から一歩踏み出し, 実用化へ向けての取り組みが開始された. 残念ながら国内ではまだ EUVL は認知度が低く, ごく限られた研究しか行われていないのが現状である. 今後多くの方々がこの分野の研究開発に参加されることを期待する. (村上)

### 3. 光応用計測

能開大 小野寺理文  
理研 加藤 純一

#### 3.1 光応用計測一般

光応用計測は, ものを計測するというシンプルでみじかな目的をもつ工学分野であり, その歴史は長く, 今までに数多くの測定原理・方法が提案され, 実際の応用に供されている. 近年, 今までにない物理特性を有するオプトエレクトロニクス・デバイスや新しい機能を有する計測機器が次々に誕生し, それらを利用した計測技術が発展してきている. また, コンピューターの発達による計算能力の向上, 処理可能な情報量の増大により, これまで困難と思われてきた測定方法が可能となり, 測定精度の向上が図られている. 本年度も光応用計測分野について活発な研究活動があり, 新しい研究の報告がある. 以下に, 干渉計測に主点を

おき, 本年度の進展について述べる.

光応用計測の本年度におけるひとつの話題は, 近赤外光を用いて生体内の構造・機能情報を断層像として検出・可視化することができる光 CT (computed tomography) に関するもので, この分野の発展がひとつの区切りをむかえ, 個別の測定対象に対して実用的な研究開発を行う段階に移行しているように感じられる. 「光 CT の新展開—CW 光で生体内を探る—」というシンポジウムが開催され, 前方多重散乱直進光成分の検出と投影定理に基づく画像再構成法についての発表があった<sup>2</sup>. また, 生体のような強散乱体の中を伝搬する光の散乱過程や吸収のメカニズムについてのスペシャルセッションが行われ, 活発な議論が展開された<sup>3</sup>. この話題に関連するものとして, 測定対象物にレーザー光を照射し, 反射光を測定, 分析することにより, 対象物体に関する情報を得ることができるレーザーリフレクトメトリーについての報告がある. 半導体レーザーの直接周波数変調特性を利用した光周波数領域リフレクトメトリーが提案され, 散乱媒質の断層画像が測定された<sup>4</sup>. 共振器内に音響光学素子が挿入されている周波数シフト帰還型レーザーを利用したリフレクトメトリーが示され, 測定距離  $2 \text{ km}$  に対して  $100 \mu\text{m}$  以下の精度が得られた<sup>2</sup>. マルチモードレーザーを光源として, 各モードに対応する干渉光強度をスペクトロメーターで測定し, そのフーリエ変換から反射光位置が特定された<sup>5-8</sup>.

干渉計測の分野で注目されたものとして, 干渉光源の諸特性を制御するための方法についての研究があげられる. 多電極分布反射型 (DBR) 半導体レーザーの注入電流を変化させ, 光源のスペクトル形状を合成することにより, 光波コヒーレンス関数が制御され, 散乱媒体の計測に応用された<sup>2,14</sup>. 広い発振周波数帯域を有するスーパールミネセントダイオード (SLD) からの光をグレーティングにより空間的に分散し, 光学的フーリエ変換面に配置された液晶空間位相変調器により, 分散した光を周波数領域で並列処理して所望のコヒーレンス関数をもつ光源を合成し, リフレクトメトリーへ応用した<sup>14</sup>. 同様な光学系を用いて任意のスペクトル分布をもつ光を作り, 分光画像解析へ応用した報告があり<sup>2</sup>, 光源のスペクトルの制御に関する研究と位置づけられる. また, 液晶をファブリー・ペロー・エタロンのキャビティー中に配置し, 液晶に印加する電圧を変えることにより, 波長可変フィルターを構成するスペクトル干渉顕微鏡についての報告があった<sup>3</sup>. この分野については分光法への応用についての国外の研究報告もあり<sup>1-23</sup>, 今後の発展が期待される. SLD を光増幅器として利用し, 出力が一定で周波数変調が可能な半導体レーザー光源についての

報告があり<sup>h-24</sup>、光源の振幅制御が行われた。

ここ数年来、研究発表が盛んに行われている分野として、光源の広帯域性を利用して光学波長よりも大きい測定精度を有する干渉計測法についての報告があり、さらにサブフリンジ干渉計測と組み合わせて広いダイナミックレンジを実現した測定法が発表されている。本年度もこの分野について多くの研究報告が行われた。外部回折格子により、半導体レーザーの利得スペクトル幅(約 200 nm)以内で、発振周波数を連続的に走査することができる広帯域光源が市販されるようになり、この光源を用いた周波数走査型ヘテロダイン干渉計についての報告があった<sup>2</sup>。今後この光源を利用した計測法についての発展が期待される。光源の波長を掃引することにより、波長掃引幅と干渉に寄与する 2 光束間の光路差との積に比例した干渉位相の変化が現れる。したがって波長掃引幅が既知な場合、位相変化量を検出することによって光路差を測定することができる。半導体レーザーに注入電流変化を与えて 100 pm 程度の波長掃引を行うことにより、数 mm から数十 mm の距離測定が示された<sup>h-25,2</sup>。色素レーザーを光源として、25 nm の波長掃引を行い、高精度な表面形状計測が実現された<sup>h-19</sup>。光源の波長を掃引するかわりに、広い波長帯域を有する白色光、SLD などの低いコヒーレンス光源を用いた干渉計測が実現されている。閾値電流以下で駆動された半導体レーザーを用いた共焦点干渉顕微鏡が報告され、多層構造試料の厚さと屈折率を同時に測定している<sup>i-01</sup>。低コヒーレンス干渉法において、屈折率の波長分散を考慮し、透明石英板の厚さと群屈折率と位相屈折率が同時に精密測定された<sup>14</sup>。低コヒーレンス干渉で得られる干渉縞の包絡線の一次微分を用いた実時間低コヒーレンス干渉法が示された<sup>1</sup>。

近接場光学の分野は、平成 8 年から応用物理学会の分科会が設けられ、本年度も活発な研究活動が展開された。近接場走査光学顕微鏡法 (NSOM) を表面プラズモン等のいくつかの対象物へ応用したセンシングと計測、それらの測定結果に対する解析についての報告があった<sup>1,2</sup>。また、金属プローブに代表される新たなセンシングに向けた NSOM 用のプローブの作成法についても示された<sup>1,2</sup>。

その他の興味ある報告例として、位相共役鏡を用いた 4 $\pi$  共焦点顕微鏡による蛍光試料の 3 次元観察についての報告があった<sup>2</sup>。Ar 準安定準位原子によるグレーティングイメージが微細加工された 3 つの回折格子で形成された原子干渉計で観測された<sup>2</sup>。白色光シアリング干渉計についての報告があり、4 枚の回折格子を利用した等価型のもの<sup>1</sup>と反射型のものが提案された<sup>2</sup>。レーザースペックルを利用し

た血流分布の可視化についての研究紹介が行われた<sup>b-5</sup>。ホログラフィック顕微鏡についての報告があり、像再生とその計算法について提案された<sup>1,3</sup>。位相シフト干渉計測において、空間的に非一様な位相シフト量に起因する系統誤差を補償する縞解析法が報告された<sup>i-4,2</sup>。バクテリオロドプシン・フィルムを利用した周期パターン中の欠陥が実時間検出された<sup>i-5</sup>。

今後光応用計測の分野で大いに進展が期待されるものとして、次のような研究分野があげられる。モードロックチタンサファイアレーザーは、近年性能が向上し、価格もだいぶ手頃となってきた。チタンサファイアレーザーを光源として、超短(フェムト秒)光パルスを用いた 2 色干渉計<sup>j-138-1,2,3</sup>や、光ホモダイン検波法を用いた Si 表面からの第 2 高調波 (SHG) の振幅と位相の高感度同時計測<sup>2,14</sup>についての報告があった。また、超短光パルスの 3 次元計測への応用に向けた研究紹介が与えられた<sup>14</sup>。干渉計測により得られる 2 次元位相分布は、 $2\pi$  の主値内で折り畳まれた不連続な分布となるため、そのトビの部分で  $2\pi$  の位相を加算、減算する位相アンラッピングが必要となる。位相アンラッピングの手法を周波数多重フーリエ変換法へ応用した報告がある<sup>h-22,3</sup>。位相アンラッピングについての研究は国外においても盛んに展開されており<sup>f-10,12,r-2</sup>、今後の進展が楽しみである。電子回路技術をフルに利用し、2 次元干渉縞画像から位相マップを高速に導出する縞解析システムについての研究で、電気的復調技術を利用する方法<sup>r-9</sup>、位相シフト電子モアレ法に基づく方法<sup>h-32</sup>についての報告があった。「実時間位相シフト干渉計とその応用」というシンポジウムが東京工芸大で開催され、具体的な応用計測例を含め、この分野の活発な意見交換が行われた。今後この分野に限らず、物理・化学・生物などの理学関係との共同研究により、さまざまな対象物体を計測するという応用がますます重要となってくると思われる。(小野寺)

### 3.2 光ファイバー応用計測, 光応用測定器

#### 3.2.1 光ファイバー応用計測

1997 年度における国内の光ファイバー応用計測の進展動向は、1996 年 5 月開催の OFS-11 における発表が活況であった反動からなのか、やや落ちついた感がある。OFS-11 での動向については昨年度の展望に詳しいが、その一部の内容については Optical Review Vol. 4, No. 1A に特集されているのでそちらを参照されたい<sup>0-4-1A</sup>。1997 年度で従来の意味での光ファイバー応用計測に関する報告は、応用物理学会講演会、Optics Japan 両者併せても 10 件に満たなかったようである。学会誌への発表も少なかった。しかしながら、発表された内容にはそれぞれ特徴のあるアイ

デアや工夫が盛られており、今後の発展が期待できるものも多かった。また、光ファイバーは光応用計測全般でさまざまな形で利用されており、それだけこの分野分けが難しくなっているということかもしれない。

光ファイバーそのものをセンシングエレメントとして用いたものとしては、複屈折シングルモードファイバー中で外圧により生じるモード結合成分と、伝搬成分の干渉を広帯域光源を用いてスペクトル領域で検出する手法<sup>1</sup>、2本の偏波面保存ファイバーの軸を直交して交互に接合したものをコイル状にした外乱に強い変形センサー<sup>0-1</sup>、光ファイバー先端のコア表面につけた金属薄膜界面で生じる表面プラズモンを利用した溶液濃度センサー<sup>1</sup>、球面加工光ファイバーやファイバー端近傍に置かれた薄板ガラスの光熱振動の検出を用いた膜厚センサー<sup>1,2</sup>などが報告された。また、ファイバーではないが光導波路を用いたセンサーとして、単一プリズム型の導波路を用いた溶液の微小吸収測定法<sup>1</sup>、ダブルモード導波路入射端での波面の傾きをモード干渉で高感度検出する原理を用いた1 nmの分解能をもつ微小変位センサー<sup>1</sup>が報告された。光ファイバージャイロの研究も着実な進展をみせており、共振方式ジャイロのデジタルゼロダイン変調特性<sup>1</sup>や、プリルアン方式におけるロックイン現象<sup>2</sup>、ファイバーの曲げ誘起複屈折を利用した干渉型ジャイロ<sup>3</sup>などの研究が行われた。全体としてこの分野では、ファイバーの複屈折性や非線形性を積極的に利用するものや、近接場光学現象や光機能性材料と複合して新たな機能を創成しようとする研究が増えている感を受けた。

ファイバーの可撓性、ポイント光源またはレシーバーとしての特徴を生かしたものとして、光集積化素子と投光・受光用光ファイバーを複合して小型化した2次元レーザードップラー流速計<sup>8</sup>や先端を先鋭化したファイバーをプローブとすることで複屈折位相差測定をマイクロメートルオーダーに高空間分解能化する<sup>2</sup>ような従来法を拡張したものの以外に、近接場顕微鏡のプローブに代表される光の分解能を超えた検出を目指したものが多数発表された。後者では相変わらずさまざまな試み・提案があり、微細管中や先鋭化ファイバー先端に光機能性物質を付加し新しい機能をねらったもの<sup>1,2</sup>、ファイバー先端・開口の形状やコーティングを工夫することで分解能や感度の向上を目指したものの<sup>1,2</sup>、2本のプローブを近接して配置するデュアルプローブSNOM<sup>2</sup>などが報告された。その中で興味深かったものとして、誘電体ファイバーを金属クラッドで被った負誘電体孔の解析により、負の群速度をもちコア径をいくらでも小さくできる伝搬モードが存在することが報告された<sup>2</sup>。従来のファイバーとは異なる機能をもった導波素子としての

発展が期待でき興味深かった。

ファイバーセンサーの他の代表的特徴である分布型センシングやブラッググレーティングを利用したセンサーについては、海外では散見されるものの<sup>0-1, i-5, 21</sup>、応用物理学会関連での発表は光ファイバー網を用いた音圧の分布計測についてのみであった<sup>14</sup>。また、日本でも盛んになりつつあるOCT (optical coherent tomography) などの生体表層の断層計測については、海外では光ファイバーと50/50結合器を組み合わせたマイケルソン型干渉計と、低コヒーレンスまたは波長走査干渉を組み合わせたものが多数を占め<sup>i-1, 5, 13, 14, 15, 21</sup>、皮膚下の血流の速度計測なども試みられているのに対し、応用物理関係学会では1件のみの報告であった<sup>2</sup>。こうした技術は上記応用領域ではかなり実用域に達しており、原理的に新規な提案が難しくなっているということであろう。逆にいえば、国内での光ファイバー応用計測も、より具体的な応用面で新機軸を打ち出すべき時期なのかもしれない。

その他ひと味変わった事例としては、鉛ガラスファイバーの大きなファラデー効果を利用してフーリエ分光を試みた例<sup>2</sup>、2次元のファイバーアレイを他端で1次元配列としストリークカメラと組み合わせることにより、プラズマ現象を2次元画像として超高速サンプリングする方法<sup>2</sup>などについても報告があった。

### 3.2.2 光応用測定器

光応用測定器については、必ずしも全産業分野をカバーすることはできないが、光通信分野、半導体関係の計測装置を中心として着実な実用機の開発が行われているようである。前者ではOTDRで多重波長通信回線の検査をねらったものなどが多く、これからの日本での通信事情の変化を感じさせる。

工業分野でのいわゆる外観検査でも光の性質の有効利用が図られており、電子回路基板上のバンプなど微細表面形状測定では、マイクロレンズアレイと共焦点撮像の原理を複合したものや、ポリゴンミラーによるビームの高速走査と多段焦点検出方式の共焦点顕微鏡を利用した高速な測定法など<sup>15</sup>が実用化され、共焦点顕微鏡の原理に人気がある。また、光切断法やステレオ画像方式など3角測量法に基づいた3次元形状測定装置も多く実用器が開発され、CADや光造形などのラピッドプロトタイピングと組み合わせられたことで、自動車産業、意匠の分野で応用されつつある。またサブマイクロメートルオーダーの光触針方式の高精度3次元形状測定機も新たに開発されつつあり、金属金型の高精度化やウェハーの広面積化、X線光学素子への需要の高まりに対応している。光触針センサーとして、conoscopic

holography の原理を利用した方式が実用化された点が目新しい。干渉の原理をストレートに用いた測定器は、学会レベルでの報告が多い割に新しく開発されたものは意外と少ない、このあたりの原因についてはよく考えてみる必要がある。しかし、広帯域の波長走査光源や LD 励起の固体レーザーなどの性能が向上し、手軽に使えるようになったため、今後新しい測定器の開発へとつながっていくのではないだろうか。

海外では、先に述べた OCT による眼底網膜の断層イメージング装置が実用化され、乳がんなどの光診断もかなり進んでいるようであるが、国内では生体・医用関係の光応用計測器は筆者が知る限りあまり新規なものはないようである。最近の環境問題への対応の必要性の高まり、今後の高齢化社会の到来を考えると、環境や生体の実用的かつ多様な測定器の実現への期待がいつそう高まってくるものと思われる。光を応用したセンシング技術はさまざまな可能性をもっているため、今後この分野での新しい光応用測定器の開発が期待される。(加藤)

## 4. 光情報処理

日大 高木康博

### 4.1 光メモリー

海外ではホログラム光メモリーの研究が急速に進展した。高密度化を実現するために、角度多重法、波長多重法、空間シフト多重法などの手法に加えて、位相コード多重化法が用いられるようになった。特に米国では研究が盛んで、DVD の次の光メモリー技術として 2, 3 年後の実用化に向けて研究開発が活発に進められている<sup>16</sup>。動画を符合化圧縮して記録・再生するシステムが試作され、実際にデモンストレーションが行われたのが印象的であった。従来の光情報処理で培われてきた空間光変調器や CCD 撮像素子などの周辺技術の進歩による部分も大きく、光メモリーの研究開発の進展により、これらの周辺技術の底上げが期待できる。

国内においては、過去の反省からか海外ほどの盛り上がりはないものの、春の応物学会で「高密度三次元光メモリー」と題してシンポジウムが行われた<sup>1</sup>。ホログラフィックな記録方式に加えて、日本独自の方式であるビット記録型の三次元光メモリーや、ガラス材料中への光ビット記録に関する講演があった。

### 4.2 スマートピクセル

三菱電機が研究開発を進めてきたシリコン人工網膜チップが実用化された。これは、感度可変受光素子と積和演算機能を集積したチップで、従来のイメージセンサーでは不

可能な画像処理機能を実現したもので、ビデオレートを超えた信号の読み出しが可能である。学会では、30 万画素の集積<sup>1</sup>、位置角度検出法<sup>1</sup>、空間フィルタリングの実現方法<sup>2</sup>などについて報告があった。

入出力とも光で行うスマートピクセルを光インターコネクトする超並列・超高速視覚情報処理システムについても研究が進み、光インターコネクション光学系の改良<sup>1,2</sup>や、スマートピクセルのワンチップ化も進められた。8×8 のプロセッサエレメントと受光素子の集積化を終え、発光素子との結合が進められている。

スマートピクセルの実現においては、受光素子、発光素子、および電子回路のハイブリッド集積化が技術的課題であるが、Si 基板上に GaAs 面発光レーザーとフォトダイオードをポリイミド接着する方法が提案され<sup>1</sup>、光通信用の 16×16 バンヤンスイッチに応用された<sup>2</sup>。

また、TFT 液晶を用いたスマートピクセルの構成方法に関する提案も行われた<sup>2,3</sup>。

### 4.3 光アナログ処理

温故知新の感もあるが、最近では光コンピューティングの原点ともいえる光アナログ処理に関する報告件数が増えている<sup>1,2,3</sup>。光デジタル処理の行き詰まりも一因としてあるが、ジョイントトランスフォーム相関に代表される新しい演算手法や、周辺デバイス技術の進歩によるところが大きい。特に、位相変調型の液晶空間光変調素子の開発の寄与するところが大きい。

光相関器では、フィルターの位相化による相関出力の SNR 向上が知られているが、入力画像の 2 値位相化による性能向上と位相変調器による実現方法の提案があった<sup>2</sup>。

顔画像に対する処理が各所で進められた点も興味深い<sup>1,2,3</sup>。多重相関光学系を用いた研究では、データベースの改良による認識トレランスの向上が報告された<sup>3</sup>。

液晶位相変調素子による波面補正に関する研究も進み、補正位相を求めるアルゴリズムの検討が行われた<sup>1a-11</sup>。また、デコンボリューションによる画像回復問題に関する研究も盛んになり、シフトバリエーションによる劣化を回復する方法<sup>a-5</sup>などのさまざまな提案があった。

### 4.4 回折光学素子

回折光学素子では、ベクトル回折理論をもとにした素子設計の研究が進んだ。特に、偏光に対する回折特性の違いを利用して再生像を偏光で切り替える計算機合成ホログラムの研究が海外で進み、光インターコネクションへの応用が報告された<sup>17</sup>。

#### 4.5 新しい話題

高度情報化社会，マルチメディア社会の到来を受けて，光の並列処理を生かした効率のよい暗号発生法<sup>1</sup>や画像圧縮技術<sup>3</sup>に関する報告があった．電子技術との融合が今後の課題であろう．

Optics Japan で「時空間融合フォトニック信号処理の新展開」と題したスペシャルセッションが行われ盛況であった<sup>3</sup>．時間軸と空間軸の変換を用いた技術であるが，それぞれの軸での処理を巧みに組み合わせることで今までにない新しい光情報処理の可能性が期待できる．今後，この分野の研究が盛んになることが予想される．新しい画像形成方式として位相コントラストイメージングの提案があった<sup>1</sup>．これは位相変調だけで像形成を行う技術で，光の利用効率が高いことが特徴である．また，“生体に学ぶ”ということであろうが，生体の初期視覚や複眼をモデルにした光情報処理システム<sup>1,2,3</sup>に関する提案の件数が増えてきた．

(高木)

### 5. 画像表示

電通大 御子柴茂生

#### 5.1 各種ディスプレイデバイスとそのすみ分け

対角 10～16 インチ程度の画像表示デバイスでは CRT (cathode ray tube : ブラウン管)，LCD (liquid crystal display)，EL (electroluminescent display)，FED (field emission display) が実用化，あるいは研究されている．20 インチ程度の EWS (engineering work station) 用は，CRT が支配的である．現状の技術では LCD や EL には大きすぎ，PDP (plasma display panel) には小さすぎる．今後の各種 FPD (flat panel display) の技術の進展とともに賑やかになろう．

PDP は投射型ディスプレイとともに 40～60 インチの大画面表示に適する．対角 2 m 程度は投射型の独壇場である．学校や会議室の黒板などの代替として需要は大きい．屋外用大型ディスプレイは，CRT，LCD，VFD (vacuum fluorescent display : 蛍光表示管)，LED (light emitting diode : 発光ダイオード)，PDP 等の発光原理を用いた素子を並べて構成している．

#### 5.2 C R T

CRT は輝度，コントラスト，解像度などすぐれた表示品質を誇るが，真空容器が必要なため 40 インチ以上の大画面化が困難である．パソコンなどのモニター用 CRT の生産は年率 30% 増大し，家庭用テレビの 70% 程度にまで肉薄してきた．また表示内容の高度化に伴い，対角 41 cm 以上の普及が本格的に始まった．

画面の見やすさや外光の写りこみ抑制のため，面を完全にフラット化した CRT，電子ビーム偏向電力を 20～30% 低減した小ネック断面積 CRT などが発表された．

#### 5.3 L C D

LCD は液状の有機分子を用いて低電圧・低電力駆動を可能としている．種々の材料を合成することが可能であるため，多様な用途に対応することができる．直視型と投射型に大別され，直視型はさらにバックライト光源を用いた透過型と，光源不要で超低消費電力化の可能な反射型とに分けられる．

透過型 LCD の開口率は，遮光構造の工夫により 70% にまで向上した．LCD の最大の欠点である視野角は，IPS (in-plane switching) などの採用により CRT 並みとなった．高精細化に対してはモノクロで 630 万画素，カラーで 157 万画素と，印刷物に迫る精細度が実現された．

反射型 LCD の反射率は従来の 2 倍程度に向上し，paper-like display に近づいてきた．低価格化に対しては，駆動回路を 400°C 以下の低温プロセスでガラス基板上に表示部と一体に作りこめるようになった．

#### 5.4 投射型ディスプレイ

CRT 投射型の米国での需要の伸びは，ここ数年 20% に達している．解像度と輝度の向上が進んでいる．LCD 投射型は，数インチの液晶パネル上の画像を拡大投射する．高輝度化が進み，発光効率も 6.3 lm/W に向上した．DMD (digital micromirror device) の研究はすでに 20 年を越えるが，最近，輝度や画質で他の投射型を追い抜く勢いである．

#### 5.5 P D P

近年の FPD の最大のニュースは大型 PDP の事業化であろう．各社が数百億円規模の投資を行っている．広く用いられている 3 電極 AC 面放電型は，前面に表示電極ペアを，背面にアドレス電極，ストライプ状障壁，および蛍光体を設ける．仕様の一例は，対角 42 インチ，画素数横 852×縦 480，輝度 300 cd/m<sup>2</sup>，発光効率 1.0 lm/W，階調数 256，暗所コントラスト 400 : 1 である．

#### 5.6 E L

EL は固体発光素子であり，素子厚さが 1～2 μm と薄い．この特徴を生かして，画素サイズが 10 μm 程度の超小型ディスプレイが作成可能であり，HMD (head-mounted display) への応用が期待されている．有機 EL については，長年の課題であった寿命の改善が進み，5000 時間が達成された．

#### 5.7 L E D

LED に関しては，青色および緑色発光 InGaN/AlGaIn



の特性向上が目ざましい。赤色 LED は GaAlAs ですでに良好な特性が得られており、これで R, G, B の 3 原色高輝度 LED が揃い、フルカラー化が可能となった。

## 5.8 F E D

1993 年に 10 時間程度であった寿命が、エミッターの下部にアイランド状抵抗層を挿入して 5000 時間に延びた。p-n 接合や電界効果トランジスターをエミッターに直列に接続して、電流を安定化、均一化する研究もある。

## 6. 光 記 録

NTT 山本 学

### 6.1 光ディスク装置の開発動向

CD-ROM は、FDD に代わる安価な大量データの配布手段として、またマルチメディアアプリケーションにおいても、インタラクティブ性を備え、かつデジタルビデオ情報を収容可能な大容量情報蓄積手段として、ゲーム機、電子出版、パーソナルコンピューターへの展開が進んでいる。このような CD-ROM のインフラ形成の中で、追加記録可能な CD-R も急激に普及しつつある<sup>18</sup>。これら CD-ROM, CD-R は基本的にはソフトの頒布用として使われているが、バックアップ用途としてのイレーザブル CD (CD-RW) も商品化された。

最近では、コンシューマーエンターテイメント分野でビデオ情報のデジタル化が進展し、さらにビデオ情報をコンピューター上に取り込むことが可能になり、操作環境がマルチメディア化する中で、デジタル映像を 2 時間以上蓄積可能な片面 5~10 GB クラスの大容量光ディスクメディアの要求が増えている。それらの環境動向に対応して DVD が開発された<sup>1,2,18</sup>。すでに DVD-ROM は 4.7 GB 容量で市場に出されており、DVD-RAM も当初容量は 2.6 GB ではあるが開発が進められた<sup>a-1</sup>。さらに技術的には、青色レーザー (SHG) の使用により 15 GB 容量の DVD-ROM あるいは DVD-RAM が技術的に確認されている<sup>2,18</sup>。DVD は当初は映像ソフト内蔵の再生専用装置であるが、再生専用タイプだけでは映像ソフト蓄積、大容量 CD の領域に留まる。本格的な普及は書き換え型 DVD によると予想される。

一方、書き換え可能な 130 mm 径光磁気ディスクの国際標準化は、すでに市場に出ている総容量 650 MB~2.6 GB の光磁気ディスクのさらなる容量増加を狙って、5.2 GB (8 倍密度) に関するものが進められた。130 mm 径光磁気ディスクは、情報処理システムにおけるライブラリーサブシステムの情報蓄積媒体としてその適用領域が拡大しつつある。90 mm 径光磁気ディスクの国際標準化は、5 倍密度

が完了した<sup>18</sup>。従来採用されている 1 セクターあたりの容量 512 B では 540 MB 容量を、さらに 2048 B のセクター容量を採用し、容量 640 MB がサポートされている。また、媒体は光変調記録方式によるオーバーライト媒体もサポートされた<sup>18</sup>。これら 130 mm 径、90 mm 径光磁気ディスクは、可換メディアでは必須な既存ソフト資産の継承 (下位互換) を念頭に開発されており、今後も基本的には互換性を維持しつつ大容量化が進められるものと思われる。

### 6.2 高密度・高速記録技術

書き換え型光ディスクの記録密度を高める技術は以下が進展した。(1) レーザーの短波長化、集光レンズの高 NA 化などの光ヘッドに関わる技術<sup>1,2,18</sup>、(2) 磁気超解像技術<sup>1,2,18</sup>、(3) PRML などの信号処理技術<sup>18</sup>、(4) ランド&グループ記録<sup>1,2,18</sup>。最近ではさらに、磁気拡大再生<sup>1,2,18</sup>、多値・多層記録<sup>1,2,18</sup> が検討されてきており、さらなる大容量化に向け技術革新が著しい状況にある。特に最近では、磁区拡大再生についての研究開発が盛んであり、0.4  $\mu\text{m}$  のビットサイズが十分な CN 比で再生可能であることが確認されている<sup>18</sup>。また、実用化を目指し、超解像技術 (MSR) を用いて 5 Gb/in<sup>2</sup> の記録密度の確認<sup>2,18</sup>、あるいは 2.6 GB/90 mm ディスクの提案が行われた<sup>18</sup>。また、多層化については、相変化媒体の追記型メディアで 5.2 GB/120 mm が提案されている<sup>18</sup>。

このような光ディスクの開発のステップは、高密度化の流れで進められていたが、CD-ROM がパソコンに内蔵され書き換え型はバックアップファイルへの適用が進むにつれて、高速化の検討が進み CD-ROM は当初の転送速度に比べ 16~32 倍速化が達成されているほか、光磁気ディスクでは記録時の転送速度を高めるオーバーライト媒体の商用化が進められた<sup>18</sup>。

一方、超高密度記録技術としては、近接場メモリー<sup>a-0,1,2,18</sup>、フォトンモードメモリー<sup>a-7</sup>、ボリュームホログラムメモリー<sup>a-0,1,2,18</sup>、電子トラップメモリー<sup>a-7</sup> の検討が報告されている。原子間力を用いた AFM 技術で 200 nm トラックピッチ、40 nm ビットサイズの技術確認が報告されている<sup>18</sup>。

### 6.3 ライブラリーサブシステム

光ディスク媒体の高密度・高速化の進展に伴って、媒体を複数枚搭載してテラバイトクラスの総記憶容量を構成するライブラリーサブシステムの、低コスト化、省スペース化が進展し、高速バックアップファイルあるいはマルチメディアデータベースへの適用が拡大している。このようなライブラリーサブシステムの特徴はテラバイトメモリーが低ビットコストで提供可能な点にあるが、種々のサーバー用



メモリーとして適用されるためには、ドライブ転送速度の向上とともに媒体の自動交換に伴うハンドリング時間の短縮が求められている。一方、媒体として 90 mm 径ディスクあるいは CD-R, DVD-ROM を搭載したライブラリーサブシステムも商品化が進められた。

## 7. オプトエレクトロニクス・光デバイス

NTT 岩野真一  
NEC 小松啓郎

### 7.1 光通信分野

WDM (波長多重通信) 元年といわれた昨年の流れに引き続き、今年は WDM 伝送の商用化、システム化に向けた研究開発が進展し、米国を中心とした WDM 伝送の商用化が始まった。クロスコネクトについてはまだ研究開発の段階であるが、D-WDM 用光源、波長変換素子、波長チューニング素子や、半導体アンプ (SOA) ゲートを組み込んだ波長セレクター、アレイ導波路格子 (AWG) を用いたアドドロップマルチプレクサー (ADM) などの報告が相次いだ。高速化についてはターゲットが 2.5 Gb/s から 40 Gb/s クラスへと移ってきた。一方、FTTH, FTTC の商用化は日本が先行して進みつつあり、光デバイス関連でも商用化に向けた信頼性の確認が進んだ。FSAN における標準化も進展し、今後はこれに合わせた光デバイス・光モジュールの開発が進むと考えられる。

本稿では、OFC '97, ECOC '97 等の国際会議における発表をもとに光通信分野での光デバイス技術の開発動向を述べる。

#### 7.1.1 レーザー

高速光源では 40 Gb/s 級の光源の研究開発が進んだ。電界吸収型 (EA) 変調器と DFB レーザーをモノリシックに集積した変調器集積 DFB レーザーによる 24 GHz 動作<sup>19</sup> の報告、さらに 40 Gb/s の NRZ 動作<sup>19,20</sup> の報告があり、明瞭なアイパターンとエラーフリー動作が確認された。波長可変光源についても研究が進み、電流注入により半導体の屈折率を変化させて発振周波数を変化させる超周期構造分布ブラッグ反射型 (SSD-DBR) レーザーの波長変換特性について、30~60 nm の範囲でモードホップをなくして 1.6 nm 間隔、16 波を安定に制御する安定化の報告<sup>21</sup> や、DBR レーザーの波長ドリフトを 0.01 nm/年とする報告<sup>21</sup> があった。また多波長集積化光源については、スポットサイズ変換部を集積したレーザー (SS-LD) と SOA ゲートアレイを集積した 4 チャンネル光源<sup>23</sup>、Si 基板上の石英系導波路に設けた UV グレーティングと SS-LD とをハイブリッド集積した 2 nm 間隔の 4 チャンネル多波長光源<sup>19</sup>、ファイバーク

レーティングを外部共振器として用いた多波長光源の 10 Gb/s 動作<sup>21</sup> などが報告された。またモードロックレーザーへ RZ 信号を入力し 80 Gb/s から 10 Gb/s のクロックを抽出できることも報告されている<sup>22</sup>。

一方、FTTH の商用化に向けた発表も相次いだ。ONU 用 WDM 光送受信モジュールに用いられる SS-LD の信頼性に関して 85°C, 10 mW, 10 万時間の動作が確認され<sup>20</sup>、同モジュールの樹脂封止状態での SS-LD についての 85°C, 10 mW, APC, 5000 時間動作の確認<sup>21</sup>、および SS-LD の 100°C, 360 mA, 168 時間の burn-in テストでの動作確認<sup>21</sup> などが報告された。また経済化のひとつとしてペルチエ素子による温度制御を不要とすることをめざし、40~85°C の範囲での度制御なしで用いる場合についてのレーザーの動作特性について検討がなされた<sup>24</sup>。

#### 7.1.2 光検出器

この数年光検出器/受光素子単体の発表は少なくなってきたが、一方でアンプや AWG と集積化した高速・広帯域受信 OEIC の研究開発が進んできた。導波路型 (WG) PD と HEMT 分布型アンプをモノリシック集積したモノリシック受信 OEIC で 46 GHz の高速動作が実現された<sup>21</sup>。また導波路集積型 pinPD と HEMT による分布型アンプの集積による 40 Gb/s 動作<sup>21</sup> や、ヘテロバイポーラトランジスター (HBT) を用いたトランスインピーダンス型 16 チャンnelアレイ化受信 OEIC での 11 GHz 動作<sup>21</sup> の報告があった。また WDM 用受信回路として、半導体 AWG と PD を InP 基板にモノリシック集積した 8 チャンネル、200 GHz 間隔の 8 チャンネル PD アレイ<sup>21</sup> が報告された。このほか、導波路に装荷した長波長 PD による帯域 70 GHz, 150 mW 動作<sup>21</sup> や進行波電極構造と光・マイクロ波の速度整合構造をもつ MSM 型 PD の 100 G 高速動作<sup>20</sup>、Si と InGaAs のウェハー融着による APD での 31.5 GHz の利得帯域の実現<sup>20</sup>、AlGaInAs マルチモード導波路型 pinPD による 40 Gb/s 動作などの報告があった。

#### 7.1.3 その他の光半導体デバイス

半導体による平面光波回路の研究も進んでいる。半導体 AWG では InGaAsP/InP 系半導体 AWG で波長変動 0.01 nm/K の温度無依存化が実現され<sup>19,24</sup>、また 50 GHz 間隔、64 チャンネル規模の大規模 AWG<sup>22</sup> が実現された。波長変換素子では、分布帰還型 (DFB) レーザーをモノリシック集積したマッハ・ツェンダー (MZ) 干渉型波長変換素子での波長変換範囲 1567~1582 nm, 2.5 Gb/s 動作<sup>24</sup> や、マイケルソン干渉型波長変換モジュールでの波長変換範囲 1559~1562 nm, 40 Gb/s 動作<sup>24</sup> などの報告があった。

#### 7.1.4 石英系平面光波回路 (PLC)

石英系のAWG, スプリッター, 熱光学スイッチ (TOSW) などの石英系 PLC デバイスは各種システムのキー部品として盛んに使用されており, その高性能化・大規模化ともに光半導体デバイスと組み合わせた高機能ハイブリッド集積回路の研究開発が進んできた。石英系 AWG では, すでに実現されている偏波無依存化に加えて温度無依存化が実現された<sup>21</sup>。負の屈折率温度係数をもつシリコン樹脂を装荷することにより石英系導波路の屈折率温度依存性を補償し, 温度無依存化を達成している。また波長特性の平坦化については, 従来の手法のほかに 2 焦点設計による平坦化も提案された<sup>24</sup>。光半導体とのハイブリッド集積回路に関しては, 前述の多波長光源, ONU 用 WDM 光送受信モジュール等のほか, PLC プットフォーム上に実装した SS-SOA ゲートと石英系 AWG とを組み合わせた超広帯域高速波長セレクターの報告があった<sup>21</sup>。消光比 35 dB を 1530~1600 nm にわたって実現している。また新しい機能回路として, 非相反偏光回転機能を有する導波路型 MZ 干渉計を用いた導波路型平面光サーキュレーターの提案がなされた<sup>21</sup>。偏光合成・分離回路が不要であり, 集積化に適する構造である。

PLC と光ファイバーとの接続についても研究開発が進み, リボンファイバーを上下に重ねることにより狭ピッチ化を図った小型化, 高密度化 2×16 スプリッター<sup>19</sup> や, PLC と光ファイバーのコネクター接続を実現する PLC コネクター<sup>24</sup> 等の報告があった。

#### 7.1.5 光ファイバーアンプ

光ファイバーアンプでは広帯域化の研究が精力的になされた。1.58  $\mu\text{m}$  帯ファイバーアンプと 1.55  $\mu\text{m}$  帯ファイバーアンプとを接続する構成により 20 dB 利得で 80 nm の増幅帯域が得られた<sup>23</sup>。また超広帯域光ファイバーアンプ材料として帯域を倍増できるテルライト材料が発見され, テルライト EDFA で 20 dB 利得で 80 nm の増幅帯域の可能性が示された<sup>24</sup>。WDM 伝送の商用化に向けて重要な課題であるゲインコントロールについて発表も相次いだ<sup>24</sup>。また高密度実装したプラグインタイプの 1.3  $\mu\text{m}$  用ファイバーアンプも報告された<sup>24</sup>。

#### 7.1.6 その他の光デバイス

光インターコネクションの研究開発は特に米国で盛んであり, 商用化に向けて経済化/低コスト化志向の開発が進んでいる。一方, 日本でも ATM 交換機でのテラビット級のスループットの実現に向けた光インターコネクションの研究が進み, 面発光レーザー VCSEL, ポリマー導波路を用いて構成した 700 Mb/s, 40 チャネルの 25 Gb/s のスループットをもつ光インターコネクション ParaBIT の提案

がなされた<sup>20</sup>。

またマイクロマシン応用の光デバイスについての発表も多く, 熱毛管現象により液面を駆動させて光路を切り替える自己保持型マイクロメカニクススイッチの報告<sup>21</sup> など商用化に向けて研究が進んでいる。(岩野)

## 7.2 オプトエレクトロニクス・光デバイス

光変調, 光偏向, 光導波路, 光ファイバーなど, 主に光の時間変調を利用するデバイスについて, 過去 1 年の進展を振り返るとともに, 今後の展望について述べる。本節では, 光通信用途以外のデバイスを主に対象とする。

### 7.2.1 非線形光学素子・超高速デバイス

非線形光デバイスについては, 引き続き, 周期分極反転を利用した疑似位相整合 (QPM) による第 2 次高調波発生 (SHG) で進展があった。光ディスクの記録密度向上等を目的として, 分極反転 LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> 結晶を用いた青色および紫外光発生への検討が盛んに行われた。バルクの分極反転 LiNbO<sub>3</sub> を用いた青色発光では, 耐光損傷性にすぐれる MgO:LiNbO<sub>3</sub> で最大 SHG 出力 10 mW (基本波 500 mW) が実現された<sup>1</sup>。波長は基本波 946 nm, SHG 波 473 nm であった。一方, LiTaO<sub>3</sub> は吸収端が 280 nm と短波長であることから紫外域への波長変換素子として研究されている。バルクの LiTaO<sub>3</sub> に周期 1.7  $\mu\text{m}$  の分極反転を形成し, 波長 684 nm の赤色半導体レーザー光が紫外光 (342 nm) に規格化変換効率 1.2%/W で変換された<sup>5-10</sup>。50 mW の入力光に対して, 最大 30  $\mu\text{W}$  の出力を得ている。導波路型 SHG デバイスでは, 主に LiNbO<sub>3</sub> 材料で検討が行われ, 大きな進展がみられた。分極軸を傾けた 3° Y-cut MgO:LiNbO<sub>3</sub> の基板を用いた導波路型デバイスで, 波長 950 nm の半導体レーザー光に対して変換効率 300%/Wcm<sup>2</sup> が達成され, 最大 SHG 出力 20 mW (基本波 80 mW) の 475 nm 光が得られた<sup>1</sup>。また, クラッド層の屈折率を高くして, 基本波-SHG 導波モード間のオーバーラップを向上させる工夫<sup>1</sup> もなされ, X 板 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 導波路型デバイスで変換効率 1200%/Wcm<sup>2</sup> (波長 434 nm) を得ている<sup>2</sup>。さらに, MgO:LiNbO<sub>3</sub> 導波路型デバイスとチューナブル DBR 半導体レーザーとを組み合わせると, パルス化された青色光 (425 nm) を発生させ, 相変化光ディスクへの書き込み実験までもが行われた<sup>2</sup>。この場合の青色光出力は, CW で 6 mW (基本波 100 mW), パルスでピーク出力 17 mW であった。

Dense WDM, 波長分割交換用途の 1.5  $\mu\text{m}$  波長帯間の波長変換用デバイスとしては, 半導体光増幅器 (SOA) における相互位相変調 (XPM) を利用した干渉計型素子の研究が相変わらず活発であった<sup>21</sup>。従来の, SOA モジュール

と受動回路を光ファイバーで接続したものに加えて、InP 基板上にそれらを集積化したもの<sup>2</sup>や、石英系 PLC 上に SOA をハイブリッド実装した構成<sup>27</sup>が実現された。

超高速光デバイスの分野では、モード同期半導体レーザー (MMLD) の進捗が目立った。電界吸収型光変調器を集積した MMLD で 102 GHz のパルス発生が実現された<sup>2</sup>。また、超高速光クロック抽出 (200 Gb/s データ列からの 10 GHz クロック抽出<sup>2</sup>)、超高速光ゲート動作 (8 ps 応答<sup>28</sup>) など、MMLD の光信号処理への応用の進捗が著しく、2 個の MMLD のみで 40 Gb/s の時間多重データ列から 10 Gb/s の信号を抜き出す全光 DEMUX 動作が達成されるに至った<sup>28</sup>。

### 7.2.2 導波路デバイス

導波路デバイスの分野では、引き続き石英系 PLC の着実な進捗がみられるとともに、低コスト化・機械的 flexibility の点で有利な有機ポリマー導波路の研究が活発であった。耐熱性、耐湿性にすぐれるフッ素化ポリイミドやシリコン系ポリマーを用いての、方向性結合器<sup>27</sup>、光スイッチ<sup>28</sup>、偏光分離素子<sup>1</sup>などの検討が盛んに行われた。特に、石英よりも 10 倍以上大きな熱光学 (TO) 効果が着目された光スイッチでは、フッ素化ポリイミドを用いた 1×8 スイッチ<sup>28</sup> が実現された。また、ボード間配線等のインターコネクション用途のポリマー導波路としては、重水素化ポリメチルメタクリレートをコア、紫外線硬化型エポキシ樹脂をクラッドとするマルチモード導波路で、波長 0.68, 0.83, 1.31  $\mu\text{m}$  における伝搬損失が各々 0.011, 0.018, 0.073 dB/cm と、超低損失性が確認された<sup>2</sup>。さらに、将来の光・電気混載マルチチップモジュール用基板への適用を目指し、銅ポリイミド基板上のポリイミド導波路の検討なども行われた<sup>2</sup>。

コア径が大きく光の結合が容易なポリマー光ファイバー増幅器は、Rhodamine B 添加型の利得特性が調べられ、波長 580 nm の信号光に対して 37 dB と大きな利得 (励起光波長 550 nm) が確認された<sup>2</sup>。

### 7.2.3 面型デバイス・インターコネクション用デバイス

面発光レーザー (VCSEL) の新しい電流狭窄の方法として、AlAs の選択酸化が各所で検討されている。従来、酸化の均一性が不十分という課題があり、酸化を自然停止するセルフパターニング法<sup>2</sup> や AlAs/AlInAs 超格子酸化構造<sup>2</sup> などが検討された。自己形成量子ドットを適用した 985 nm 帯面発光レーザーで、量子ドットの構造異方性に依存する偏光選択性<sup>1</sup>が確認された。デバイス形状の制約を受けない偏光制御の可能性もある。VCSEL の実用化面では、2 次元ファイバーコネクタへ対応した 2 次元 VCSEL モ

ジュール<sup>28</sup> が特筆される。8×2 VCSEL をパッケージへ無調芯一括実装し、コネクタ本体、パッケージ、アダプターをいずれも樹脂製として低コスト化を意識しながら、GI ファイバーアレイとの結合が全チャンネル 1 dB 以下に抑制された。

また、新規な面型商用デバイスとしては、光検出器アレイとマイクロプロセッサ等が CMOS プロセスを用いて集積化された人工網膜チップ<sup>27</sup>が、今後高まると予想される高速の画像処理需要にマッチしており注目される。

### 7.2.4 光集積素子

光集積に関しては、引き続き、石英系導波路グレーティング (AWG) 素子や、AWG とアクティブ導波路素子を InP 基板上に集積化した WDM 用デバイスに進展<sup>21</sup> がみられた。また、石英系 PLC にアクティブ光デバイスをハイブリッド実装する新しい展開も見え始めた年であった。そのひとつの例として、UV 光照射により形成されたグレーティング部を有する PLC 導波路アレイに、スポットサイズ変換レーザーをハイブリッド実装して製作された PLC 外部共振器型異波長レーザーアレイ<sup>21,27</sup> が挙げられる。新しい WDM 用光源の構成法として注目に値する。また、PLC プラットフォーム上へスポットサイズ変換部付き SOA アレイを実装した光ゲート・アレイ<sup>21</sup> も実現された。SOA は、光増幅用途というよりも増幅機能付きの光ゲート素子として昨今注目されており、種々の機能を光集積素子で実現するための基本エレメントとなりつつある。そのような SOA を PLC プラットフォーム上にハイブリッド実装する技術が確立されれば、非常に意義深い。

### 7.2.5 将来展望

疑似位相整合による SHG は、微細ピッチの分極反転構造を製作する技術や MgO 添加による耐光損傷性の向上などにより、実用的な技術となってきた。ただし、GaN 青色半導体レーザーの進捗も一方では急であり、今後はさらに短波長光の発生へ向かうと推定される。超高速光デバイスの分野では、10 Gb/s 以上の領域では電子デバイスを用いての複雑な処理は困難であり、モード同期半導体レーザーによる識別再生などの全光処理が期待される。導波路デバイスは、石英系、半導体系、LiNbO<sub>3</sub> 系、有機ポリマー系と、多彩な材料系での研究開発が継続されよう。中でも、アクティブ光デバイスを石英系 PLC へハイブリッド実装したデバイスが、光集積素子の停滞を打破する可能性を秘めており注目される。

(小松)

## 8. 分 光

北大 金 幸夫

分光法は測定原理もさることながら、光源、光学系、検出系、信号処理・解析など、さまざまな周辺技術の集大成の上で成り立っていることはいうまでもない。ここ数年、半導体レーザーや極短パルスレーザーなど、高性能かつオペレーションが容易なレーザー、あるいは ICCD 検出器など高感度で高速応答性の検出器が簡単に入手・利用できるようになってきた。また、光ファイバーや光導波路の進展に加え、微細加工技術を用いて導波路や光学素子を集積化・チップ化したマイクロ光学系などの報告も増加している<sup>3</sup>。さらに、コンピューターの急速な発展で、高度なデータ処理・解析もパソコンレベルで行えるようになってきた。これら周辺技術はただちに分光領域へ応用され、またその手法および測定対象は広範な研究領域にわたっている。それらすべてを限られたスペースで紹介できるものではなく、ここでは秋季応物学会を中心に、主に可視光を利用する分光法について、空間分解測定をキーワードにして紹介させていただくことを、あらかじめお断りしておきたい。

### 8.1 分光 CT 計測

非破壊・非接触的に測定対象から必要な情報を引き出すことが分光測定の大きな特徴である。物理的損傷を与えず非侵襲性が最も要求される分野である生体計測では、光はきわめて有用なプローブである。古くから光学顕微鏡が利用されてきただけでなく、生体の分光測定についていえば、吸収度測定を基本とする酸素モニターや種々の蛍光試薬を用いる蛍光診断法・画像化等々は必要不可欠である。さらに進んで、断層像測定のための光 CT が種々のアプローチから活発に研究されており、秋季応物学会ではシンポジウム「光 CT の新展開」がプログラムされるなど<sup>2</sup>、この分野への期待の大きさと活発さがうかがわれる。

生体の断層像測定では多重散乱の影響を除くことが大きな課題となっている。光 CT 計測のアプローチとしては大別すると極短パルスレーザーによる時間分解測定法、光干渉法、偏光検出法等に分類されるが、いずれにおいても活発に研究が展開されている。中でも、生体透過光または反射光から直進成分だけを選択検出する手法として、もっとも有力と考えられる光干渉法に関する報告が多かった<sup>2</sup>。

光ヘテロダイン検出法により測定された歯の断層像では、断層像が光源の波長で変化し、Ar レーザーを用いた場合には従来の X 線像では得られなかった象牙質の光学的コントラスト変化を反映することが認められた<sup>4-3</sup>。このこ

とは、用いる波長により得られる像が含む情報を選択できることを意味する興味深い結果である。可干渉距離で空間分解能が決まる低コヒーレンス光源を用いた最近の成果に関しても、多くの報告がなされた。散乱媒質透過光の偏光状態が散乱の履歴に依存することを利用し、準直進光成分のみを抽出する偏光保存検出法による植物組織の断層像の報告があった。光 CT は実用段階に近づいており、実際の生体計測への展開、フィードバックが重要な段階にきているものと考えられる。

### 8.2 蛍光顕微鏡

波長オーダーの空間分解能が容易に得られる顕微分光法は、すでに広く応用されており重要な分光測定法となっている。検出法の高感度化に伴い、近年、単一分子の分光検出と応用に関する報告が増えている。この領域においても、DNA やたんぱく質など生体関連物質をターゲットとした報告が多く、さらにレーザートラッピングと組み合わせ、1分子をマニピュレートしその応答をみるレベルに達している<sup>4-9</sup>。

蛍光顕微鏡の手法としては、共焦点顕微鏡に位相共役光学系を組み合わせることで、通常の共焦点顕微鏡に比べ光軸方向の分解能が高くなることが実験的に示された<sup>2</sup>。試料のダメージを防ぐとともにバックグラウンドノイズも低減できる2光子励起によって、散乱体からの3次元イメージングに関する報告もされた。2光子励起では長波長レーザーを使って紫外域の吸収バンドを励起できるので、紫外域用の光学系を必要としないメリットもある。また、蛍光顕微鏡に時間分解蛍光偏光解消法を組み合わせることにより、ノイズの低減だけでなく、夾雑物による妨害、さらには遊離プローブなどからの信号を分離できることが示された<sup>4-9</sup>。既存の装置をベースとした蛍光顕微鏡の高性能化に関するアプローチは、今後とも期待したい。

### 8.3 近接場光学

「走査型近接場光学顕微鏡の原理と応用」の特集記事が組まれるなど<sup>4-10</sup>、この分野への関心は高い。また秋季応物学会の近接場光学のセッションでは34件の報告があり<sup>2</sup>、SNOM (NSOM) の大きな課題である高分解能・高効率プローブの開発などを中心に多くの報告があった。局在プラズモンによる近接場の増強効果を利用した局在プラズモン共鳴プローブ、収束イオンビームを用いた多段テーパ形状プローブなど興味深い報告がなされた。また半導体マイクロディスクレーザー自体をプローブチップとする定在波固定型プローブが報告され、高分解能センサーの可能性が示唆された。また、光ファイバープローブに機能性材料を固定化したイオン選択性プローブの報告があった。

測定対象としては、集合状態で光学物性が変化する色素会合体について、AFM 観測と比較し構造との関連が報告された。また LB 膜中でのドメイン構造およびドメイン内の分子配向性について調べられた。時間分解測定のためのピコ秒近接場蛍光顕微鏡について報告され、蛍光減衰から 2 成分有機昇華膜中でのエネルギー移動から、2 分子の混合状態に関する議論がなされた。半導体デバイスの微細構造の測定評価を目的に、近接場光励起による光電流の測定が行われ、電子および正孔の拡散長が求められることが示された。SNOM を用いた光加工の応用も活発で、フォトレジスト膜に 100 nm 程度のパターン加工ができることが示された。

エバネセント光の利用という観点からみれば、光ファイバーや導波路を用いた種々のバイオ・化学センサーへの応用、単一分子・微粒子をみるための蛍光顕微鏡のプロブ光としての利用、全反射分光法など界面近傍を測定する他の手法など応用領域は広く、これからの発展が期待される。

以上、分光領域のごく限られた分野について述べたが、はじめに述べたように周辺技術の進歩と相まって、この分野はさまざまな分野と互いに影響しあいながら、今後ますますの発展が期待される。

## 9. レーザー

三菱電機 大村悦司  
慶大 神成文彦

### 9.1 半導体レーザー (Laser Diode)

21 世紀に向けて、音声のみならず画像までも双方向伝送を可能とする高度情報通信、いわゆるマルチメディアの世界が具現化されつつある。このマルチメディアの世界は“高速・大容量”をひとつのキーワードとして特徴づけられる。その中で、光デバイスは情報処理・通信システムにおいて決定的な役割を有している。本稿では、最近の半導体レーザー (laser diode, 略して LD) を中心にその動向および展望について述べる。

#### 9.1.1 市場動向

幹線系通信の使命は、より大容量の信号を遠くまで経済的に伝送することにある。この大原則に従い通信速度の向上は留まるところを知らない勢いである。通信速度および受信感度を上げるため、これまでに光の電磁波としての特徴を生かしたコヒーレント光通信方式、短パルスの特徴を生かした光ソリトン方式なども検討されてきたが、現在では時分割多重方式および波長分割多重方式の 2 方式が幹線系の主流になっている。この 2 方式の中でもここ数年、波

長分割多重方式は 1) 信号形態・速度の異なる信号を同時に伝送可能、2) 通信需要に応じ波長数の増減が可能、3) 波長を使った新しい分岐処理が可能 (特定波長の分岐・挿入など)、などの特徴をもつため急速にその規模を拡大している。現在 2.5 Gbps×4~8 波 (=10~20 Gbps/ファイバー) が用いられ、さらに要求波長数は増え続けている。波長分割多重方式は多波長を一括して増幅できる光直接増幅方式と組み合わせ、伝送距離の長距離化に用いられる。光増幅用として発振波長 980 nm のファイバー励起用高出力 LD が重要なデバイスとなる。この LD は高出力で用いられるため、レーザー光が射出されるレーザー端面の損傷による信頼性に不安がもたれた時期もあったが、端面保護膜の工夫、特殊な端面構造の採用により信頼性が向上し、最近では光海底ケーブル用の中継器用としてすでに実績のある波長 1.48  $\mu\text{m}$  の励起用高出力 LD に換え、この 980 nm LD を海底中継器に用いる試みも本格化してきた。

光ファイバーを各家庭まで敷設することを目指した光加入者系の分野では、低価格・小型化への要求がきわめて強い。幹線系では LD を温度調整して用いることが一般的であるが、加入者系では低価格・小型化の障害となる電子冷却装置は用いることができない。そのため LD には広い温度範囲 (例えば -40~85°C) で安定した動作が求められる。また LD にファイバーをとりつけたモジュールについてもレンズ等の光学部品を用いない構造や、組み立てコスト削減のため LD を発光させない状態でファイバーとの位置関係を決めるパッシブアライメント技術が重要となってきた。また、小型化のため表面実装型と称する小型モジュールの開発・実用化の動きが活発化してきている。さらに将来の加入者系でのサービスの充実を図るため、波長 1.3  $\mu\text{m}$  および 1.55  $\mu\text{m}$  帯の波長多重が考えられており、これに対応すべく合・分波機能を有する光導波路基板をモジュールの中に組み込んでしまおうとする動きもある。

LD を光源とする光 CATV 網は北米中心に大きく進展し、今後欧州、東南アジアにも広がっていく勢いである。局から数千軒の家庭に多チャンネルのサービスを配信するこれまでのブロードバンドに加え、組め細かいサービスを可能にするため、分岐点から 50 軒以下程度の小規模の家庭をカバーするナローキャスト (下り) や家庭から局にサービスの選択をリクエストするリターンパス (上り) のシステムが普及しつつある。

マルチメディア時代に入り、情報処理の分野では産業レベルのみならず個人が扱う文書および画像データの量も飛躍的に増大した。光磁気ディスク (MO) は波長 780 nm の LD を用いた 230 MB 容量から波長 685 nm の LD を用

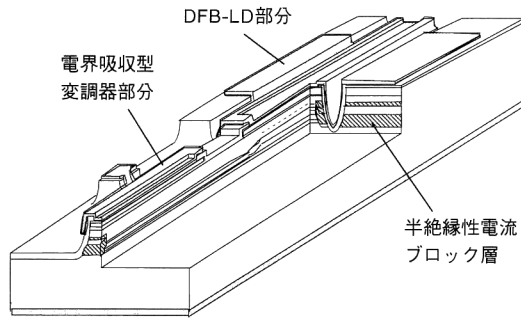


図1 DFB-LDと変調器がモノリシックに集積化された素子。

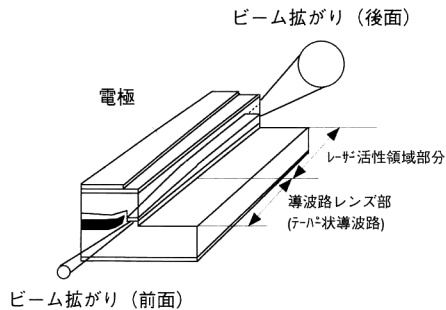


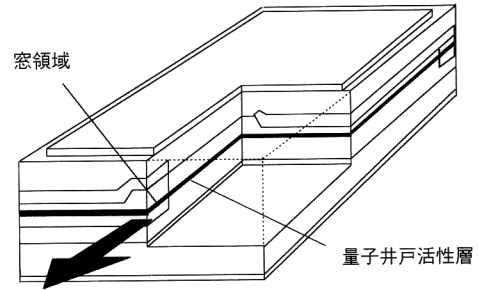
図2 レンズ機能を集積した素子の構造図。

いた 640 MB へ移り変わりつつある。また大容量の画像およびデータの蓄積，ならびに読み書きができる DVD (digital versatile disc) 市場もいよいよ立ち上がる段階に達した。

### 9.1.2 技術動向

LD の高性能化はその製造技術の進歩に支えられ，過去 10 年の間に飛躍的に向上した。数 nm の層厚制御が必要とされる多重量子井戸構造，歪み量子井戸構造，さらには歪み補償多重量子井戸構造が，ほとんどすべての LD に用いられるようになった。通信用 LD では，単体素子での高性能化以外にも，システム要求に応えるために LD 発光以外の機能をワンチップに作りつけた，いわゆる複合デバイスも実用化されるようになった。図 1 は DFB (distributed feedback: 分布帰還型)-LD と変調器がモノリシックに集積化された素子の模式図である。DFB-LD 部分は直流で駆動し，高速の信号は変調器に加えるという機能を分担したデバイスである。この集積化 LD と光中継器を用いることで 2.5 Gbps-600 km の伝送も可能である。また，この LD も波長分割多重に用いられるため，狙った波長を狙いどおりに作る技術が求められるが，LD の活性領域幅の高精度制御，結晶組成の高精度制御技術の進展により，製品レベルでの高精度な波長制御が可能となりつつある。

機能集積化 LD のほかの例として，LD の発光スポットサイズを変換するレンズ機能を集積した素子の構造図を図



レーザー光：650nm  
図3 レーザーの反射端面での光吸収を抑制する窓構造 LD の模式図。

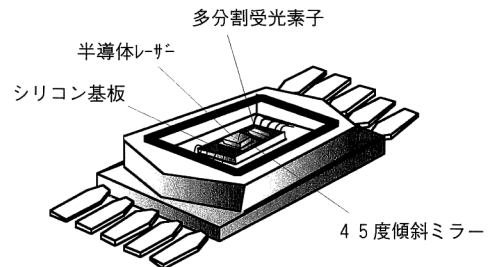


図4 LDと多分割受光素子を同一パッケージに搭載したユニットの模式図。

2 に示す。レンズ部分は LD の活性領域の延長上にあり，長さ方向にその厚みが徐々に薄くなり，そこを伝搬する光が徐々に広がりその発光スポットサイズが大きくなる。その結果，LD ビームの広がり角は狭くなり，集光レンズを用いなくても光ファイバーに高効率で結合が可能となり，パッチアライメントを可能にしている。

高密度情報の記録のため，LD には 1) 波長は短いこと，2) 出力が大きいこと，3) 信頼性が高いこと，が求められる。高出力・高信頼化を実現するため，LD 端面でのレーザー光による溶融破壊を抑制するため，端面付近に不純物を拡散しその部分のバンドギャップを LD 発光エネルギーより大きくした窓構造が有望である (図 3)。この窓構造の採用により，60°C，30 mW (連続発振) の動作条件で 1 万時間の平均寿命が得られている。

光ディスクヘッドには，LD とともにディスクからの反射信号光を受ける受光素子が不可欠である。これまで，LD と受光素子は別々に用意したが，ヘッドの小型化要求のために，LD が搭載されるパッケージの中にこの受光素子を内蔵する方式が注目されている。図 4 にこの要求に対応した LD のパッケージの模式図を示す。LD は Si 基板上にマウントされ，光をパッケージ窓に垂直に打ち上げるため 45°の傾斜ミラーが内蔵されるとともに，ディスクからの反射光を受ける多分割受光素子が Si 基板に直接作りつけられている。

### 9.1.3 ま と め

半導体レーザーが用いられる情報処理, 通信分野の動向, およびデバイス状況を簡単に述べた。情報・通信システムの高度化により半導体レーザーはますますその重要性を増してきている。今後もデバイスの高性能化・低コスト化の流れは続き, 半導体レーザーは高度情報化社会を支えるキーデバイスとしてその重要性はますます増すであろう。

(大村)

## 9.2 気体・固体レーザー

レーザー装置および応用技術の進展を眺める場合には, 既存技術の成熟という連続的な流れと, 鍵となる要素技術あるいは新材料の開発による非連続な流れをみる必要がある。気体レーザーにおいてはまさしく前者であり, 大きなブレークスルーはみられない。しかし 1~4 Gbit の DRAM 用露光光源として, ArF レーザーからさらに 150 nm 以下のレーザーへの期待は増える一方であり, このような明確な応用目標が先行しているのはきわめて珍しい例である。固体レーザーに関しては, 半導体レーザー(LD), 励起固体レーザー, およびフェムト秒光源開発の流れは衰えをみせないが, ここにおいてはいくつかのキーデバイスが出現している。以下, 気体と固体レーザーに分類して, 1997 年における進展について述べる。

### 9.2.1 気体レーザー

国際会議, 国内学会講演会から気体レーザーのセッションが消えてしまったが, エキシマレーザーによるアブレーション加工などのマイクロプロセッシング技術は今やさまざまな応用分野を形成している。レーザーアブレーションに特化した国際会議も増えつつあり, 成熟したレーザー装置技術を背景にして活発な応用技術の開発が盛んである。わが国においては, 電子回路におけるマイクロプロセッシング, 酸化セラミック薄膜形成等への応用が活発であるが<sup>1,2</sup>, もはやレーザー装置という側面からの開発はごくわずかである。諸外国においては, 自動車産業, 鉄鋼業界等との連携によるエキシマレーザー応用開発はさらに活発である。米国では角膜形成術用に特化された KrF レーザーが認可され, 新しい応用分野を形成しつつある。

一方, DRAM の露光光源としての短波長レーザー開発においては, その市場の大きさに対して国内のレーザー装置開発は追従できないのが現状である。昨年の報告にあるように, 2001 年頃に予定されているルール幅約 0.18  $\mu\text{m}$  の 1 Gbit の露光用に期待されている ArF レーザーに要求される性能は, 特に  $\text{CaF}_2$  の長寿命化をはじめとした光学材料特性に大きく依存する。しかしながら, 5, 6 年前に高出力・高繰り返し動作エキシマレーザー開発とし

て活発に研究されていた activity は, 狭線幅・高繰り返し・長寿命という露光用真空紫外レーザー開発には, 少なくとも学術的な場においてはほとんどみられないのが現状である。一方で, 露光用光源への要求自体はさらに短波長レーザーに向けられており, 157 nm  $\text{F}_2$  レーザー, 希ガス・エキシマレーザー等が候補には挙げられているもの, 露光用レーザーとしての技術開発の潮流はきわめて鈍い。わが国における気体レーザー用の放電技術はきわめて高いものがあり, またレーザー動力学においても高い研究実績を挙げてきている。ここにおいて現実の市場に対処できない理由のひとつに, 光学材料・素子についての国内技術のレベルの低さが指摘されている。レーザー装置技術開発と連動した光学技術の成長を支援していく必要が不可欠であり, 後述の固体レーザー用の要素技術と同様, 半導体レーザー以外のわが国のレーザー技術は決して楽観できないところにある。

その他の気体レーザー関連では, 遠赤外レーザー, 化学ヨウ素レーザーなどが研究されている<sup>1,2</sup>。特に後者は, 米国においては航空機搭載型の軍事応用として, 国内では産業応用を目的に継続されている。

### 9.2.2 固体レーザー

わが国においても LD 励起固体レーザーに関する研究は最も盛んである。国内においてもレーザー励起用の高出力 LD-bar を製作できるメーカーが複数現れており, レーザー加工への応用としての明確なターゲットが示されれば, 産業界への波及効果も大きいと予想される。現在最も期待されるのは, 電子回路等のマイクロプロセッシングに期待されている全固体 Q スイッチレーザーである。電子産業界におけるレーザー応用は, 高付加価値化・多種適量生産であり, さらに高速・高精度・クリーンな加工が求められている。こういった分野での現在の固体レーザーの主流は CW-Q スイッチレーザーであり, 平均出力 10 W, 繰り返し 1 kHz 以上の全固体レーザーが開発されており, 厚膜除去への応用も可能となっている。ここでは, 1  $\mu\text{m}$  波長での  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 可飽和吸収結晶の果たす役割も大きい。

サブナノ秒パルスによる熱影響の少ない加工はすでに実証済みであり, 2000 年には TEM<sub>00</sub> モードで 100 W クラスの全固体レーザーが実現できる見込みである。実際, 米国では出力のみでは 700 W が LD 励起スラブレザーから得られている。技術的問題は,  $\text{CO}_2$  レーザーの輝度が 100  $\text{MW}/\text{cm}^2 \text{sr}$  であるのに対して, 固体レーザーは熱付加の影響で数  $\text{MW}/\text{cm}^2 \text{sr}$  程度に抑えられてしまっていることである。しかし, SBS 位相共役鏡, 熱誘起複屈折補償等が実現されており, 光ファイバーを用いた高出力レーザー加



工応用に期待が及ぶ。国内では TEM<sub>00</sub> 出力で 80 W が CW で得られている<sup>2</sup>。

熱影響の少ない加工を極めると、フェムト秒レーザーもまた産業応用の可能性を帯びてくる。国内での報告例は決して多くないが、諸外国では活発な加工応用が進められている。多くの材料においては多光子吸収によってフェムト秒レーザーとの相互作用が可能となるため、材料の吸収特性はもはや無視できるようになる。レーザーのパルス時間内での材料内熱拡散距離はきわめて短いため、熱伝導によるエネルギー損失はほとんどなく、低いフルエンスで照射領域近傍の温度を昇華点以上にまで上昇させることができる。このため、加工に必要なレーザーエネルギーは低くでき、加工後の熱損傷も最低限に抑えられる。また、プラズマの膨張や飛散物とレーザーの相互作用もないため、細く深い穴をあけることも可能となる。レーザー加工の生体への応用は、熱および応力の点からきわめて条件が厳しくなるが、生体加工時の温度上昇、応力波の強度、および持続時間のいずれにおいても、フェムト秒レーザーがすぐれていることが実証されている。このようなすぐれた加工特性を実験室レベルから現場に移すには、現状のフェムト秒レーザーは不向きである。

KLM モード同期と CPA 増幅によって、実験室では容易に数 GW のフェムト秒レベルが発生でき、さらに OPA を用いた波長可変光源として市販製品レベルでの供給が可能である。特に、LD 励起固体レーザーを励起源とした Cr<sup>4+</sup> 系のレーザーや、2 倍波励起による Ti: サファイアレーザー、LD 直接励起によるガラスや Cr<sup>3+</sup>: LiSAF レーザーなどが活発に開発されている。前述の、工業・医用応用へのキーポイントは光伝送方式であろう。高出力フェムト秒レーザーの開発は、PW 級の出力を目標とした 10~100 TW 増幅システムが国内においても数か所で開発されつつある<sup>1,2</sup>。また、高強度レーザーを用いた高次高調波発生や、相互作用長を長くするためのレーザーチャネリングの実験などが活発である<sup>1,2</sup>。モード同期発振器のジッター低減化の研究も進められ、0.46 ps のジッターまで低減されている<sup>2</sup>。モノサイクル化の研究は国内ではあまり進展がないが、フェムト秒レーザー波形のプログラマブルな整形、CPA 増幅におけるコントラスト比の高いパルス圧縮などの研究が盛んである<sup>2</sup>。

材料開発と並行して高出力化が進められてきた固体レーザーであるが、Yb<sup>3+</sup>系の開発以来大きな材料開発の話題はない。しかしながら、これからの固体レーザーの将来を左右するような素子技術は生まれている。まず、導波路型レーザーである。特にファイバーレーザーは、シングルモー

ド化することで高品質ビームが得られ、励起種数を密度ではなく長さでかせぐことができるために、熱負荷の影響が小さい。最近ではクラッド励起方式の発明により、2 次元 LD-bar を効率よく利用可能である<sup>1,2</sup>。フェムト秒光源としても開発されており、高出力フェムト秒増幅系の発振器としても、通信応用以外の応用が期待される。現に、ファイバーレーザー励起 KLM モード同期レーザーや、ファイバーレーザーを発振器にした再生増幅装置が報告されている。

ファイバーレーザーに関連して、ファイバグレーティングも重要な要素技術である。現在はセンサー応用や波長多重通信などへの応用が主であるが、高出力レーザーの分野においても、ファイバーレーザーの開発と同調して応用されていくはずである。

非線形光学素子も特筆に値する。まず、周期的分極反転構造による SHG および OPO 光源である。疑似位相整合を用いたこの手法は、光源の波長領域を中赤外から 10 μm 近傍にまで延ばし、また高効率性を実現している。すでに、この技術を用いた RGB 光源が半導体レーザーおよび LD 励起固体レーザーをもとに製品開発されており、写真現像応用に用いられている<sup>2</sup>。人工的結晶という意味では、半導体多重量子井戸素子 (MQW) の非線形光学分野への波及効果も大きい。フェムト秒レーザー光源では多くのレーザーが MQW の可飽和吸収特性を利用して低励起強度でモード同期できるようになっている<sup>2</sup>。また、高速応答でかつ近赤外域で利用可能なフォトリフラクティブ材料としてもリアルタイム・ホログラフィーなどへの応用が期待されている。材料面ではフォニクス結晶の研究も盛んであるが、応用はまだ先である。

空間光変調素子が果たす役割も多くなりそうである。計算機ホログラムや回折光学系によってレーザーの空間モードを補正したり、プログラミングすることが今後必要である。

このように、人工的に設計された光学素子や計算機支援によって、アクティブにレーザーそのものを制御していく新しいレーザー装置技術が芽生えつつある。(神成)

## 10. 視覚光学

ATR 金子寛彦

近年、視覚光学分野の研究活動は非常に活発である。これにはいくつかの理由が考えられる。まず第 1 に、視覚研究と関わりが深い、脳機能の研究に対する学術的関心が世界的に高まっていることが挙げられる。日本をはじめ多くの国々が、脳機能の解明に向けて特別の予算を組んで研究

を奨励している。研究装置の著しい進歩も、視覚研究の推進に大きく貢献している。具体的には、コンピューターをはじめとする電子機器の高性能化、低価格化、そしてMEG (magnetoencephalogram), PET (positron emission tomography), fMRI (functional magnetic resonance imaging) といった生体脳の活動を非接触で測定できる装置の開発である。また、製品開発等の工学分野において人間の視覚機能を詳しく知る必要が生じていることも、視覚研究を活発にしている要因であろう。例えば、カラープリンターによる色再現、仮想現実感 (VR) システムの開発等は、人間の視覚過程の理解なくしてはあり得ない。

本稿を書くにあたり、筆者は1997年に国内で発表された視覚光学の分野の研究を概観したが、その中でまず印象に残ったのは、視覚研究の全体の流れが、網膜等の低次の機能の解明を目指すものから、大脳での高次の機能の解明を視野に入れたものへと移行していることであった。次に印象に残ったのは、視覚と運動系、体性感覚、聴覚などのほかの機能や感覚との相互作用に関する研究が多くみられたことであった。以下に、視覚光学分野のいくつかの項目について、具体的な研究内容を簡単に紹介する。

### 10.1 明るさ、色知覚

近年、明るさや色知覚の研究の多くは、より複雑な環境下での視覚特性を調べ、高次のメカニズムを究明することを目的としている。例えば、光源色と物体色モード、色恒常性、パターンと色、等のテーマである。

見えのモードに関しては、光源色と物体色モードを決める周辺刺激の条件を探る研究<sup>1,2,29,30</sup>や、異なるモード下での等色相線のずれを測定し比較する研究<sup>1,29</sup>が報告された。各モード下での色知覚を調べることは、人間のメカニズムを知る上で重要であるばかりではなく、カラープリンター等での色再現など、応用的な側面からも重要である。

色恒常性に関しては、色知覚に与える環境照明光の影響が調べられ、恒常性を視覚系の順応によって説明しようとする試みがなされた<sup>1,2,3,29,30</sup>。しかし異なる研究で異なる結論を導いている場合もあり、決定的なモデルを得るまでには、さらなる研究が必要であろう。

パターンと色に関しては、透明視や neon color spreading が成立する輝度と色度の範囲を測定し、それらの決定要因を探る試みや<sup>1,3,29,30</sup>、形態記憶に与える色の効果を調べる研究が報告された<sup>1,29</sup>。これらパターンと色の関係を扱った研究はこれからも増えると思われるが、単に現象をとらえるにとどまらず、メカニズムも考慮した考察が望まれる。

### 10.2 運動、奥行き知覚

運動、奥行き知覚に関する研究は古くから行われているが、近年、仮想現実感 (VR) システムの出現によって、これらの研究分野の重要性が高まっている。1997年も運動、奥行き知覚に関する多くの研究が発表された。ここでも、明るさや色知覚の分野と同様に、注意と運動、パターンと奥行きといったテーマを扱った、より高次メカニズムの究明を目的とする研究が多くみられた。

注意と運動に関しては、注意によって知覚される運動の方向が影響を受けることを示す研究が報告された<sup>8</sup>。これは、高次の過程が低次の機能を変化させることを示している。注意に関してはまだ完全に解明されているとはいえないが、運動知覚、さらに視知覚のメカニズムを解明する上で重要なポイントになる可能性がある。

パターンと奥行きに関しては、両眼視差と輝度パターンのコントラスト感度の比較をした研究<sup>2</sup>、視野の広い範囲での水平および垂直方向両眼視差の分布が絶対距離知覚に影響を及ぼすことを示した研究<sup>2,29</sup>、刺激の一部に与えられた両眼視差が何も存在しない部分の奥行き知覚に影響を与える錯視現象の時空間的特性を調べた研究<sup>29</sup>等が報告された。これらは、両眼視差によって生み出される奥行き知覚が、幾何学によって予想される奥行き量と必ずしも対応していないことを示している。3次元映像の制作、呈示を行う場合には、これらの知見を利用していくことが重要であろう。

### 10.3 視覚と他の感覚

視覚と、聴覚、体性感覚といったほかの感覚との関係を調べる研究が多くみられた。人間の感覚システム全体を解明するためには異種感覚間の相互作用の理解が絶対に必要であるし、視覚過程を解明する上でも、このような研究から得られる知見が非常に有用であると思われる。

視覚と聴覚の関係については、3次元空間内を運動する光刺激による音刺激位置の捕捉現象の性質が調べられた<sup>29,1-1</sup>。顔の形状からの音声情報が音声知覚を変化させる現象 (マガーク効果) についても、詳細な研究が進んでいる<sup>30,1-4</sup>。また、音声情報が視覚刺激からの自己誘導感覚の潜時に与える影響についての報告もなされた<sup>30</sup>。

視覚と体性感覚との関係に関しては、自己誘導感覚を生起させる視覚刺激の条件 (方向、サイズ、速度など) を探る研究<sup>29,30</sup>や、自己誘導感覚と視覚誘導運動の関係を調べる研究<sup>a-7</sup>が報告された。また、体性感覚を重心動揺や頭部誘発運動などの他覚的測定法によって定量化する試みもなされた<sup>29,30</sup>。これらの研究は、仮想現実感システムや3Dディスプレイの開発において、それらがもつ臨場感の客観的評価のために役立つであろう。

## 10.4 その他

発達、加齢に関する研究も多くみられた。この分野は、高齢化社会を迎えた現代では非常に重要であるので、これからも増えるだろう。眼球運動に関する研究もこれまでどおり数多くみられた。ここでも、視覚の高次機能を意識した研究が目についた。また、運動知覚の項目で触れたが、視覚的注意を扱った研究も数多くみられた。その中の一例は、注意が色と輝度に対し個別の感度変化をもたらしていることを示した研究<sup>3</sup>である。

## 10.5 まとめ

人間の高度の視覚機能を意識した研究や、視覚と他の感覚との相互作用に関する研究が増えたことは、視覚研究者が、視覚過程の各パーツの機能の解明より、人間の知覚システム全体をとらえようという目的をもち始めたことと解釈すれば歓迎すべき傾向である。しかし、低次の機能を解明するための新しい手法が見つからないために、今までに解明されているいくつかのモジュールを組み合わせて研究を作っているとすれば、これは憂うべきことである。また近年、視覚研究が活発になり、研究者も増え、新たな知見が蓄積されていることは喜ばしいことではあるが、反面、領域の細分化が進み、重箱の隅をつつくような研究が増えている感も否めない。いずれにしても、視覚研究がさらに大きな一歩を踏み出すためには、そろそろ大きなブレイクスルーが必要であるように思われる。今後は、このような大きな目的意識をもった、野心的な研究の出現を期待したい。

## 11. 光源・測光・照明

松下電器 明石行生

1997年には、AIC Color 97 Kyoto, LUX PACIFICA '97 Nagoya が開催された。これらの国際会議に触発され、光源、測光・測色、照明の分野に着実な進展がみられた。上述の国際会議とこの分野に関係する学会の年次大会をもとに、1997年の技術動向を述べる。

### 11.1 光源

昨年は、コンパクト(省資源)、高効率、長寿命、水銀レスなどのキーワードに代表される、地球に優しい光源を目指した研究の方向がますます明確になった。

まず、電球形蛍光ランプについては、完全電球代替に向けた研究開発が引き続き行われた。発光管の細管化、点灯回路の小型・高性能化により、外径がシリカ電球と同じ60 mmのランプや、全長が135 mmに縮小されたランプが報告された<sup>v-2,31,25</sup>。

住宅で永年使用されてきた環形蛍光ランプについても大

きな変革があった。すなわち、直径16 mmの環形蛍光ランプ<sup>31,25</sup>と管径20 mmの2重環形蛍光ランプ<sup>25</sup>が実用化されたことが、ランプ効率向上、照明器具の省資源化、デザインの自由度向上に大きく貢献した。

蛍光ランプの封入水銀量を削減する取り組みも多数報告された。点灯中の水銀消費メカニズムを検討した報告や、水銀消費量を抑える保護膜の効果を確認した報告があった<sup>31</sup>。また水銀レス蛍光ランプ実現のめどは立っていないが、今後の研究開発に期待する。

高効率、長寿命の面で注目されている無電極放電ランプについては、無電極蛍光ランプの点灯回路・保護回路の特性検討のほか、無電極HIDランプの放電内の電子密度計測技術、寿命予測技術、低ワット化と発光体の小型化、水銀に代わる新しい封入発光材料について、研究成果が報告された<sup>25,31</sup>。

また、長寿命、小型軽量、点灯回路の簡易さを特長とするLEDについては、近年、高光度の青色LEDや白色LEDの実用化により、LEDの交通信号機、一般照明などへの応用技術に目が向けられるようになった<sup>v-7,8,25</sup>。

液晶プロジェクター用光源に関しては、長寿命化と、スクリーン面での実効的な効率向上のためのショートアーク化に注力されている<sup>x-6</sup>。

その他、光源に関連する技術として、光触媒TiO<sub>2</sub>膜をトンネル照明器具の前面ガラスに試用し、高い防汚効果があることが報告された<sup>26</sup>。

### 11.2 測光

受光器の分光応答度は、測光・測色の確かさを左右する重要な特性である。昨年の照明学会全国大会では「受光器分光応答度測定の問題」のシンポジウムが開催され、測定技術の体系化・規格化に向けて取り組まれてきた委員会の活動の成果が報告された<sup>31</sup>。

近年、CCDカメラやデジタルスチルカメラを用いた輝度測定システムで、視野の輝度分布および立体角投射率の測定や不快グレア評価が盛んに試みられており、1997年もその傾向が引き継がれた<sup>31,32</sup>。照明環境の研究・設計におけるこのシステムの重要性が伺われた反面、ダイナミックレンジ、標準比視感度との整合性などの問題が残されていることも明確にされた<sup>v-3</sup>。適切な精度を有し、かつ、安価で取り扱いやすい輝度分布計測システムの早期確立が待たれる。

その他、蛍光体開発を支える技術として、蛍光体の量子効率の絶対値を計測する技術が検討された<sup>31</sup>。これは、使用される蛍光体が到達する効率の極限を知る上で重要な尺度である。

AIC Color 97の測色のセッション<sup>33</sup>では、演色性評価の新しい切り口として、カテゴリカル色知覚の観点から、RG系2波長蛍光ランプやナトリウムランプなどの光源下で道路安全色の色の見えが評価された。演色性に関しては、CIE TC1-33が提案したCIE LAB色差式に基づく新しいCIE演色評価式、より実用的な演色性評価を目指し色の見えモデルを考慮した演色性評価方法と、HIDランプの演色性評価を行う際のNC-III色空間の適用、上述のCIE演色評価数と化粧肌色の主観評価との関係の検討などが報告された。さらに、RGB蛍光ランプの複合照明と白色蛍光ランプとの分光分布の比較などが報告された。

### 11.3 照 明

照明に関しては、例年どおり多岐にわたる研究成果が報告された。誌面の都合上、可視度、読みやすさ、作業性、グレア、明るさ知覚、明るさ感について触れる。

道路カーブに設置される視線誘導灯の可視度が検討され、その可視度は、誘導灯と背景との色差、背景輝度、輝度差弁別閾値により決まることが報告された<sup>26</sup>。

読みやすさについては、OHPを使用する室の照明設計指針を提供することを目的として、実態調査と読みやすさ評価方法の検討が行われた<sup>W-3,31,32</sup>。また、黒地に白文字などの逆対比指標の読みやすさ<sup>W-2,31,32</sup>、年齢が照度と読みやすさとの関係に及ぼす影響<sup>35</sup>、印刷文書の読みやすさ<sup>W-8</sup>に関する実験結果などが報告された。

作業性に関しては、評価指標として各種生理特性が用いられている。ERPの一種のラムダ反応を生理指標として作業者の集中度が評価され、作業面照度が一定の場合、周辺照度が低いほど集中度が高くなることが報告された<sup>V-5</sup>。また、 $\alpha$ 波のパワースペクトルと心電位のR-R間隔のスペクトル解析に基づいて作業時の覚醒度が評価され、高照度ほど覚醒度が高いことが確認された<sup>31</sup>。読書時の眼球運動により、高齢者と若年齢者とのパフォーマンスの比較により、高齢者は若年齢者より視線が安定していないこと、読み取り速度が遅いことが示唆された<sup>31</sup>。

グレアに関しては、窓などの大光源の不快グレアについて、光源の形と位置の影響、新たに提案された評価式の適用範囲、年齢によるグレア感度の違いが検討された<sup>31,32</sup>。また、CIE屋外不快グレア評価式に、壁面からの等価光幕輝度の要因を加え、屋内スポーツ照明に適用できるよう修正した評価式が提案された<sup>31</sup>。

明るさ知覚に関しては、等価輝度の概念を実際の視環境に適用するために、周辺視野としてこれまで用いられてきた暗黒背景に代え、実際の街路景観を用いて明るさ効率比(B/L比)が評価された<sup>31</sup>。また、LUX PACIFICA '97に

おいて、米国の研究者から、明所視の照度レベルでも桿体が働き、瞳孔径と明るさ知覚に影響を及ぼすことが報告された。同じ照度条件下では、暗所視感度/明所視感度(S/P比)が高い光源の照明下のほうが、低い照明下よりものが見やすく、かつ明るく感じられるという<sup>25</sup>。現段階では、明るさ知覚および視力とS/P比との因果関係が明確ではないため、国内では、一部の研究者が追試を行っているだけで<sup>31,32</sup>、大方は米国での議論の成り行きを傍観している。しかし、この考え方は測光システムにも影響を及ぼしかねないため、今後の慎重な対処の必要性を感じる。

照明環境の明るさ感に関しては、昨年でも盛んに研究が行われた。これらの研究は、明るさ感判断のメカニズムの考え方により大別できる。ひとつは、目の順応を考慮した視対象物の明るさであるブライトネスの考え方を空間全体の明るさの印象にまで拡大解釈し、視野内の平均輝度および輝度分布を明るさ感の要因とする考え方である<sup>31,32</sup>。もうひとつは、より高次の認知的メカニズムで空間全体の明るさ感が判断されるという考え方である。つまり、例えば、人がある部屋に入ったときに、その空間の内装の反射率、光源の位置や輝き具合などのさまざまな情報を手掛かりとして、その空間がどのように照明されているかという照明の印象を一瞬にして理解する(この状態を「照明認識視空間が形成された」と表現される)。この照明の印象のひとつの属性として、明るさ感を判断しているという考え方である<sup>31,32</sup>。明るさ感と視環境を構成する各要因との因果関係が解明されていない現段階では、後者の考え方に立って、明るさ感判断の手掛かりとなる各要因を分析することが大事だと思う。

## 12. 光学関連の規格

キヤノン 桑山哲郎

1997年には、日本工業規格(JIS)の置かれている環境に、大きな変化があった。平成7(1995)年度より通産省工業技術院標準部の指導で進められている、JISと国際標準との整合化が徹底して行われるようになった。1995年1月、国際貿易機関(WTO)において「貿易の技術的障害に関する協定」(TBT協定)が定められ、貿易のいっそうの円滑化を目的に、各国の差別的な貿易制限の撤廃が推進されている。また、JISの法的根拠である工業標準化法の改正案が1997年3月に国会を通過、1997年9月26日から施行されている。これらの動きの基本的な方向は、工業規格の「完全な国際整合」である。

具体的には、JISのゼロベース見直しが行われている。すなわち、ISO(国際標準化機構)、IEC(国際電気標準会議)

などの国際規格と異なる記述内容がある、あるいは対応する国際規格がないものは原則廃止、どうしても日本国内で必要な規格は、団体規格として存続するというものである。この結果 JIS には、(1) 国際規格の完全な翻訳、(2) “Fast-track procedure” (迅速法による手続き) 制度を利用し、国際規格に提案するための原規格、の 2 種類がほとんどとなると考えられる。

このように国際規格の重要度が高くなってきていることから、本年は、国際規格の TC (Technical Committee) および SC (Sub Committee) と、これに対応した 1997 年に発行された国際規格を紹介する。

ISO/IEC JTC 1 (情報技術), /SC 17 (識別カード及び関連装置), /SC 23 (情報交換用カートリッジ) : ISO/IEC 14760: 1997 Information technology—Data interchange on 90 mm overwriteable and read-only optical disk cartridges using phase change—Capacity: 1, 3 Gbytes per cartridge; ISO/IEC 15041: 1997 Information technology—Data interchange on 90 mm optical disk cartridges—Capacity: 640 Mbytes per cartridge; ISO/IEC 15485: 1997 Information technology—Data interchange on 120 mm optical disk cartridges using phase change PD format—Capacity: 650 Mbytes per cartridge; ISO/IEC 15498: 1997 Information technology—Data interchange on 90 mm optical disk cartridges—HS-1 format—Capacity: 650 Mbytes per cartridge

ISO/TC 36 (映画) : ISO 4834: 1997 Cinematography—Magnetic sound test films excluding striped release prints—Basic technical characteristics; ISO 10284: 1997 Cinematography—Graphical symbols—Description; ISO 12606: 1997 Cinematography—Care and preservation of magnetic audio recordings for motion pictures and television; ISO 12611: 1997 Cinematography—Audio head tones for use in international exchange of 35 mm magnetic film masters—Specification and location; ISO 12612: 1997 Cinematography—Interchange of post-production materials

ISO/TC 42 (写真)

ISO/TC 172 (光学及び光学機器), /SC 1 (基本規格) : ISO 9022-20: 1997 Optics and optical instruments—Environmental test methods—Part 20: Humid atmosphere containing sulfur dioxide or hydrogen sulfide; ISO 10110-4: 1997 Optics and optical instruments—Preparation of drawings for optical elements and systems—Part 4: Material imperfections—Inhomogeneity and

striae; ISO 10110-8: 1997 Optics and optical instruments—Preparation of drawings for optical elements and systems—Part 8: Surface texture; ISO 11421: 1997 Optics and optical instruments—Accuracy of optical transfer function (OTF) measurement /SC 3 (光学材料及び構成物), /SC 4 (望遠鏡), /SC 5 (顕微鏡と内視鏡) : ISO 8037-2: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Slides—Part 2: Quality of material, standards of finish and mode of packaging; ISO 8038-1: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Screw threads for objectives and related nosepieces—Part 1: Screw thread type RMS (4/5 in×1/36 in); ISO 8039: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Magnification; ISO 8577: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Spectral filters; ISO 8578: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Marking of objectives and eyepieces; ISO 8600-1: 1997 Optics and optical instruments—Medical endoscopes and endoscopic accessories—Part 1: General requirements; ISO 8600-3: 1997 Optics and optical instruments—Medical endoscopes and endoscopic accessories—Part 3: Determination of field of view and direction of view of endoscopes with optics; ISO 8600-4: 1997 Optics and optical instruments—Medical endoscopes and certain accessories—Part 4: Determination of maximum width of insertion portion; ISO 10937: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Diameter of interchangeable eyepieces for microscopes with tube length 160 mm; ISO 11882: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Interfacing connection for 35 mm SLR photo cameras (T-thread adaptation); ISO 11883: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Marking of stereomicroscopes; ISO 11884-2: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Minimum requirements for stereomicroscopes—Part 2: High performance microscopes; ISO 12853: 1997 Optics and optical instruments—Microscopes—Information provided to the user /SC 6 (測量機器), /SC 7 (眼科光学及び眼科, 眼鏡機器) : ISO 9801: 1997 Ophthalmic instruments—Trial case lenses; ISO 10339: 1997 Ophthalmic optics—Contact lenses—Determination of water content of hydrogel lenses; ISO 10341: 1997 Ophthalmic instruments—Refractor heads; ISO 10342: 1997 Ophthalmic instruments—Eye refractometers; ISO 10343: 1997 Ophthalmic

mic instruments—Ophthalmometers; ISO 11980: 1997 Ophthalmic optics—Contact lenses and contact lens care products—Guidance for clinical investigations; ISO 11987: 1997 Ophthalmic optics—Contact lenses—Determination of shelf-life; ISO 12864: 1997 Ophthalmic optics—Contact lenses—Determination of scattered light; ISO 12870: 1997 Ophthalmic optics—Spectacle frames—General requirements and test methods; ISO 14534: 1997 Ophthalmic optics—Contact lenses and contact lens care products—Fundamental requirements; ISO 14889: 1997 Ophthalmic optics—Spectacle lenses—Fundamental requirements for uncut finished lenses; ISO 15004: 1997 Ophthalmic instruments—Fundamental requirements and test methods /SC 9 (エレクトロオプティカルシステム) : ISO 11149: 1997 Optics and optical instruments—Lasers and laser-related equipment—Fibre optic connectors for non-telecommunication laser applications; ISO 11551: 1997 Optics and optical instruments—Lasers and laser-related equipment—Test method for absorptance of optical laser components; ISO/TR 11552: 1997 Lasers and laser-related equipment—Laser materials-processing machines—Performance specifications and benchmarks for cutting of metals; ISO 11551: 1997 Optics and optical instruments—Lasers and laser-related equipment—Test method for absorptance of optical laser components; ISO/TR 11552: 1997 Lasers and laser-related equipment—Laser materials-processing machines—Performance specifications and benchmarks for cutting of metals

IEC/TC 34 (電球類及び関連機器), /SC 34A (電球類), /SC 34D (照明器具)

IEC/TC 47 (半導体デバイス), /SC 47C (半導体オプトデバイス) : IEC 60747-5-1: 1997 Discrete semiconductor devices and integrated circuits—Part 5-1: Optoelectronic

devices—General; IEC 60747-5-2: 1997 Discrete semiconductor devices and integrated circuits—Part 5-2: Optoelectronic devices—Essential ratings and characteristics; IEC 60747-5-3: (1997-09) Discrete semiconductor devices and integrated circuits—Part 5-3: Optoelectronic devices—Measuring methods; IEC 60747-12-6: (1997-06) Semiconductor devices—Part 12-6: Optoelectronic devices—Blank detail specification for avalanche photodiodes with/without pigtail, for fibre optic systems or subsystems

IEC/TC 76 (レーザー装置) : IEC 60825-1: 1998 Safety of laser products—Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide

IEC/TC 86 (光ファイバー) : IEC 62007-1: 1997 Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system application—Part 1: Essential ratings and characteristics; IEC 62007-2: 1997 Semiconductor optoelectronic devices for fibre optic system applications—Part 2: Measuring methods /SC 86A (光ファイバーケーブル), /SC 86B (光部品), /SC 86C (光ファイバーシステム)

これらの国際標準の最新情報は、URL アドレス (<http://www.iso.ch>) および (<http://www.iec.ch>) より得ることができるが、ANSI の検索ページ (<http://www.nssn.org>) からは多くの団体が作成している規格を検索することができる。たとえば“optical”というキーワードで検索を行うと、1350 件もの規格が見つかり、光学関係の規格の数の多さが実感される。

光学関係の ISO, IEC 規格の一覧表は、毎月 4 月に日本規格協会から発行される「JIS ハンドブック 光学」に掲載されており、光学関係の主要な JIS の内容とともに知ることができる。また、1997 年に刊行された「ISO/TC 172 国内委員会報告 No. 8」からは、1995 年 4 月から 1997 年 3 月までの TC 172 の活動を知ることができる。