

# 1995 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 23 卷第 $n$ 号	a- $n$	第 42 回春季応用物理学関係連合講演会	1
応用物理 第 63 卷第 12 号	b-0	第 56 回秋季応用物理学学会学術講演会	2
第 64 卷第 $n$ 号	b- $n$	光学連合シンポジウム '95	3
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 34, No. $n$	c- $n$	第 20 回光学シンポジウム	4
(2) Vol. 34, No. $n$	d- $n$	第 12 回色彩工学コンファレンス	5
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 34, No. $n$	e- $n$	第 25 回画像工学コンファレンス	6
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 12, No. $n$	f- $n$	第 26 回画像工学コンファレンス	7
(B) Vol. 12 No. $n$	g- $n$	第 28 回光学五学会関西	8
Appl. Opt. Vol. 34, No. $n$	h- $n$	Int. Workshop on X-ray and Ultraviolet Lithography	9
Opt. Lett. Vol. 19, No. 23	i-01	The 11th Int. Conf. on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics	10
No. 24	i-02	第 15 回光波センシング技術研究会	11
Vol. 20, No. $n$	i- $n$	1995 年電子情報通信学会春季大会	12
Opt. Commun. Vol. $m$ , No. $n$	j- $m-n$	1995 年電子情報通信学会秋季大会	13
J. Light Wave Technol. Vol. 13, No. $n$	k- $n$	電子情報通信学会技術研究会	14
Nature Vol. $n$	l- $n$	第 1 回画像センシングシンポジウム講演論文誌	15
Optical Review Vol. 2, No. $n$	m- $n$	CLEO/PACIFIC RIM	16
Optical Engineering Vol. 34	n	Optical Data Storage (ODS) '95	17
分光研究 第 40 卷第 $n$ 号	o- $n$	Int. Symposium on Optical Memory (ISOM) '95	18
Appl. Phys. Lett. Vol. 66	p	第 7 回相変化記録研究会	19
IEEE J. Quantum Electronics Vol. 30	q	Int. Conf. on Integrated Optics and Opt. Fiber Commun. (IOOC) '95	20
信学技報 Vol. 95	r	European Conference on Optical Communication (ECOC) '95	21
		日刊工業新聞 12/13 '95	22
		IPRM '95	23
		秋季電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会講演論文集	24
		CLEO '95	25
		QELS '95	26
		日本視覚学会夏期研究会	27
		第 28 回照明学会全国大会 (1995)	28
		SID '95 Digest	29
		Proceedings of Asia Display '95	30

# 1. 光 物 理

防衛大通信 岡本 卓  
山形大工 河口仁司

## 1.1 基礎的・伝統的光学

### 1.1.1 コヒーレンス

ここ数年、部分的コヒーレント光源から発した光の自由伝搬によるスペクトル変化 (Wolf effect) の研究が盛んである。この変化は光源のコヒーレンスが重要なファクターであるが、ある条件を満たした空間的に非定常な光源からの伝搬光はスペクトル不変である<sup>3</sup>ことが示された。逆に部分食を受けた結像系がスペクトルシフトを引き起こすこと<sup>1,3,f-5</sup>が明らかになった。さらに、時空間的にゆらぎをもつランダム媒質によって散乱された光波が、ドップラーシフトに類似したスペクトル偏移を受けることが、各種近似法を用いて理論的に示された<sup>1,3,a-3,f-6</sup>。また、マイクロキャピティからの自然放出光の遠方場スペクトル変調<sup>1</sup>が報告された。

光源のコヒーレンス制御および計測に関しては、液晶空間変調器を用いた照明系の制御<sup>3</sup>、インコヒーレント光源強度分布を変化させることによる空間コヒーレンス制御<sup>3</sup>、くさび形遮光体による空間コヒーレンスの計測法<sup>2,3</sup>が報告された。

従来のコヒーレンス理論を拡張する研究も現れた。特に、光の時間定常性の仮定を取り外し、時空間的に非定常な多色光のコヒーレンスを定式化する試み<sup>g-2,g-8</sup>が興味深い。この場合、非定常性により異なる単色光成分同士に相関が現れる。この理論により、パルス光のコヒーレンスを従来理論に取り組みることが可能となった。

### 1.1.2 回折・干渉

この分野の基本問題では、フレネル回折の性質を利用した各種数学的変換の実現が注目を浴びている。フレネル回折場に生じるフラクショナル・フーリエ変換 (FRT) パターンを利用した空間フィルタ<sup>j-119-3,4</sup>や、 $xy$  軸で異なるオーダーをもつ FRT の光学的実現法<sup>j-120-3,4</sup>が報告された。さらに、フラクショナル相関 (FC) が提案され<sup>h-2</sup>、シフトバリエーション性質を利用した物体認識の可能性が示された<sup>f-8</sup>。また、ある関数をフーリエ変換したものがその関数自身に等しい自己フーリエ関数の光学的生成法<sup>j-119-3,4</sup>が報告された。光学的ウェーブレット変換についても、より自由度の高い方法<sup>3</sup>が提案された。計測への応用では、自己ウィグナー分布関数を用いた屈折率分布の光学的測定<sup>3</sup>や、周期的照射光を用いたフラクタル状粗面の評価<sup>1,3</sup>が目についた。

ついで、

### 1.1.3 散 乱

最近ではコヒーレントな多重散乱光の基本特性に関する研究が盛んである。特に、後方散乱光に生じる強度ピーク (enhanced backscattering) は、光の弱局在の現れとして重要である。動的な後方多重散乱光の偏光特性<sup>1,3</sup>、散乱媒質のフラクタル性の影響<sup>1,3</sup>、照明光のコヒーレンスの影響<sup>1</sup>などが明らかとなった。さらに、微小周期構造をもつ媒質中の光の強局在に関する研究も報告された<sup>1</sup>。媒質の散乱がより強くなると、散乱光波同士の独立性が失われ、光子拡散モデルが適用できなくなる。このような強散乱媒質中における光波の非ガウス特性<sup>1,3</sup>が報告された。それに対し、弱散乱媒質に特徴的な後方散乱面に現れる十字パターンに関する考察<sup>1</sup>が行われた。具体的な対象をもつ研究としては、波浪のある水表面の高次散乱特性<sup>1</sup>がある。

スペックルの研究はより複雑な系の解析へと移ってきている。動的スペックルの二波長相関特性<sup>1,3</sup>、波長変調によるスペックル像の動的変化<sup>2</sup>が解析された。その他、多重散乱体にパルス光を照射したとき生じる、時間領域のスペックルを含めた時空間スペックル特性<sup>g-1</sup>が目についた。

### 1.1.4 光放射圧

光放射圧については、微粒子駆動およびトラッピングを目的として活発な研究が続けられている。エバネッセント波を用いた粒子駆動に関する研究が多く報告され<sup>1</sup>、中空ファイバーを利用した原子誘導路の実現性が検討された<sup>3</sup>。トラッピングについては、補捉力を強めるための工夫がなされ<sup>1,a-7</sup>、微小回転物体の回転トルク増強法<sup>2</sup>や光ファイバーによる光トラッピング<sup>1</sup>が示された。光散乱との関連では、トラップされた回転微粒子の散乱光による回転数測定および制御<sup>q-6A</sup>、放射圧によって運動制限されたブラウン粒子からの動的散乱光の特性<sup>1,3</sup>が報告された。

### 1.1.5 展 望

最近のいわゆる伝統的光学と呼ばれる分野の研究をみると、もはや古典論の枠組みに入りきらないものが増えてきている。コヒーレンスは量子エレクトロニクスとは不可分の関係にあり、フラクショナル・フーリエ変換は量子光学における位相空間に関係づけられている<sup>j-120-3,4</sup>。また、光放射圧によって規則的微粒粒子配列を作り<sup>1-5,i-9</sup>、それによってフォトリソニック・バンドギャップを実現すること、あるいは散乱微粒子を含む色素媒質からの超放射やレーザー様の動作<sup>a-9,i-9,i-373</sup>が注目を浴

びている。このように、伝統的光学という言葉自体が意味を成さなくなってきたおり、これからは上記研究テーマをより広く基礎的光学一般の範疇で捉えることが必要であろう。(岡本)

## 1.2 量子光学・非線形光学

量子光学・非線形光学の分野の進展を半導体と超高速現象を中心に述べる。この分野では1994年4月より科学研究費重点領域研究「輻射場と物質系の相互量子制御」が発足し、本誌「光学」においても、その一部が特集として取り上げられている<sup>a-9</sup>。微小光共振器、近接場光学顕微鏡、量子干渉効果、原子の干渉・回折など興味深いテーマがとりあげられ、いっそうの発展が期待できる。

輻射場を制御する方法としてフォトニックバンド結晶が話題をよんでいる<sup>b-1</sup>。フォトニックバンド結晶とは誘電率の大きく異なる2種類以上の、誘電体を光の波長程度の格子定数をもつように周期的に配列した複合誘電体結晶をいう。この系の中では電磁波の波長とエネルギーの分散関係は、結晶構造、2種類の誘電率の差および相互の充填率、ならびに“原子”の形に依存してある条件の下では、分散関係にエネルギーのギャップを生ずる。すなわち、ブリルアンゾーンのあらゆる方向にわたって電磁波のモードが存在していないエネルギー域が生ずる。この領域をフォトニックバンドギャップという。このような結晶では、半導体レーザーのしいき値電流をゼロとしたり、新しい光非線形効果が出現することが期待されている。作製法が種々検討され、反応性イオンビームエッチングのような微細加工技術を駆使した二次元的なもの(横浜国大)<sup>1,2</sup>に加え、ウェハー直接接着による三次元構造作製(京都大)<sup>3</sup>も報告された。

半導体の分野ではナノ加工技術がいっそう進歩し、量子細線・量子ドット構造のデバイスへの応用が盛んになっている。作製法では、基板結晶の方位を選び、微細構造の自然形成(自己組織化)をねらったものが多くなっている。例えば、GaAs(311)B基板上のInGaAs歪量子ディスクレーザー(NTT)<sup>1</sup>、(111)BGaAsへのInGaAs量子ドット(富士通、北海道大)<sup>2</sup>、(111)BGaAsへのInAs量子ドット(北海道大)<sup>2</sup>である。量子ドットの電流注入によるレーザー発振(富士通)<sup>2</sup>やInAs量子ドットを用いたメモリの検討も行われている(富士通、北海道大)<sup>2</sup>。なお、この分野の進展は「光学」1996年8月号に特集が予定されている。

面発光半導体レーザー(VCSEL)の低しいき値化はますます進み、8.7 $\mu$ Aの低しいき値動作が実現してい

る(南カリフォルニア大)<sup>25</sup>。VCSELを光機能素子として用いようとする試みも盛んである。活性領域がほぼ正方形のVCSELでは、偏光が直交する2つの固有モードが存在する。InGaAs系VCSELでこの2つの共振偏光間にピッチフォーク型双安定が見出され、全光型フリップ・フロップ動作が実現された(山形大)<sup>1,2</sup>。従来のS字型双安定に比べてきわめて高速の動作が期待され、5.3 Gbit/sまでの動作が確認されている。

超高速の光スイッチを実現する有力な方法は、三次の光非線形効果による屈折率変化を用いたものである。一般に三次の非線形係数は小さく、大きな材料の探索が長い間続いている。二次の非線形性を用いたカスケード効果(cascaded second-order process)ではより大きな屈折率変化が得られることが理論的に示されていた。Ti拡散LiNbO<sub>3</sub>光導波路により非線形位相シフトが観測され、マッハ・ツェンダー干渉計により光出力の変化が実験的に確認された(中央フロリダ大)<sup>25</sup>。位相整合型のスイッチ構成も提案されている(NTT)<sup>2</sup>。

半導体量子井戸のサブバンド間遷移における大きな振動子強度と速い緩和時間に注目した、サブバンド間光によるバンド間光の高速変調の可能性が検討され、無添加およびn型量子井戸における屈折率変化の比較がなされ、位相変調にはn型量子井戸のほうが有利であることが示された。また、サブバンド間遷移の短波長化が検討され、吸収飽和も確認されている(京都大)<sup>1,2</sup>。低温で成長したキャリア寿命時間が短い歪MQW(multiple quantum well)を用いた高速多出力全光型光分離回路の21.3 Gbit/sでの動作(NTT)<sup>2</sup>も報告されている。また、半導体中のバンドフィリング効果を利用した対称マッハ・ツェンダー型光-光スイッチの超高速動作が相互相関法により確認された(日本電気)<sup>2</sup>。スイッチングのオン動作、オフ動作ともパルス幅1.1 psの制御光に追隨していることが示された。

光パルス発生では、研究の進展が著しかった固体レーザーの分野では、半導体レーザー励起のCr:LiSAFレーザーの97 fsパルス発生(ストラスクライド大)<sup>1-01</sup>以来一段落しているように思える。一方、半導体レーザーと共振器をモノリシックに集積したモード同期レーザーの検討が盛んになっている。電界吸収型変調器を集積した能動モード同期レーザーによる20 Gbit/sパルス発生(NTT)<sup>1</sup>および1/2周波数変調による48 GHzパルス発生(NTT)<sup>2</sup>、モノリシックDBR(distributed Bragg reflector)レーザーを用いた受動およびハイブリッドモード同期(沖電気)<sup>1</sup>、非対称衝突パルスモード同期半導

体レーザーによる 380 GHz 光パルス列発生 (日本電気)<sup>1</sup> などである。また、これらのレーザーを用いた光注入同期による光クロック抽出 (日本電気<sup>1</sup>, 沖電気<sup>2</sup>) も報告されている。また、偏光を 90° 回転した自己パルスを半導体レーザーに戻すことにより能動モード同期のトレイリングパルスが除去できることが示された (山形大)<sup>2</sup>。(河口)

## 2. 結像素子・光学機械

キャノン 松居 寛  
オリンパス 堀川嘉明

### 2.1 一般的な結像素子, 光学機械

結像系関連技術は比較的歴史が長い分野である。第 42 回春季応物学会でこの分野に関する初めてのシンポジウム「光設計の新しい可能性」が開催された際には、広い会場が埋め尽くされるほど盛況であったことからその裾野の広さを再認識させられた。しかし、ここ数年の主要学会での本テーマに関する発表件数は減少傾向にある (表 1)。今後増加傾向に転じることを期待したい。

#### 2.1.1 光学素子

##### (1) 幾何光学的素子

液晶マイクロレンズにおいて、対称円形パターン電極直径の最適値が検討された<sup>1</sup>。平板マイクロレンズ焦点近傍の回折像実測値からの球面収差量の推定が試みられた<sup>1</sup>。液晶プロジェクター照明系用マイクロレンズアレイ作製時のイオン交換用マスクパターン形状を円形から矩形に変更し効率向上が図られた<sup>1</sup>。

高屈折率ラジアル GRIN レンズを用いることで、より良好な性能のコンタクトレンズが設計/試作できたとの報告があった<sup>h-25</sup>。

##### (2) 回折光学素子

異なるレベル数を組み合わせることにより高回折効率フレネルゾーンプレートが得られたとの報告があった<sup>1</sup>。VLSI (very large scale integration) の複数のチップ間光接続用の素子を設計/試作し 8 レベルの量子化で実用上十分であることが確認された<sup>3</sup>。赤外線光学系の片面回折型単レンズによって従来の 2 枚レンズより良

好な特性が得られたとの報告があった<sup>3</sup>。LiNbO<sub>3</sub> 基板上にマイクロフレネルレンズを作製し、従来材料によるものと同等の特性が得られたことが報告された<sup>3</sup>。回転マスクで照射パルス数を制御したエキシマレーザーアブレーション法によりフレネルレンズを試作し、任意の深さの加工が可能であることが確認された<sup>3</sup>。8 レベルと 4 レベルとを組み合わせることで作製誤差の影響が緩和されることが確かめられた<sup>3</sup>。

#### 2.1.2 光学機械

##### (1) カメラレンズ

ある面の収差を他の非球面で打ち消す補正方法で非球面を積極活用することにより、レンズ枚数が削減された設計例が示された<sup>4</sup>。レンズ部分系シフト方式防振光学系の設計に残存ブレ係数を適用することにより有効な指針が得られたとの報告があった<sup>4</sup>。

##### (2) Head mounted display (HMD)

アナモルフィック非球面の偏芯凹面鏡と特殊形状プリズムからなる広画面角 HMD の設計、試作、評価に関する報告があった<sup>4</sup>。非対称非球面ミラーを off-axial に構成した HMD の設計<sup>4</sup>、試作、評価<sup>3</sup> に関する報告があった。

##### (3) 光ディスク

ディスクキューで生ずる 3 次コマ収差を、4 次非球面板の横ずらしで生ずる収差によってキャンセルする新たな補正サーボ系が検討された<sup>4</sup>。2 分割反射形回折レンズを用いた新 AF 方式が提案された<sup>a-10</sup>。

##### (4) バイナリーレンズ応用機器

回折形レンズを用いることにより良好な集光特性の超小型赤外センサーが実現できたとの報告があった<sup>2</sup>。正立等倍系バイナリーレンズアレイを試作し理論値に近い MTF (modulation transfer function) 特性が得られたとの報告があった<sup>2</sup>。バイナリーレンズアレイとアパーチャーアレイとを軸外して構成することで超コンパクト高解像度結像系が実現できたとの報告があった<sup>3</sup>。

##### (5) 波面補償光学系

岡山天文台 188 cm 望遠鏡カセグレン焦点用イメージスタビライザーを試作し理論限界近くまで恒星像を小さくできることが実証された<sup>a-2</sup>。液晶素子を用いた波面補償方式が提案され、有効性が実験的に確認された<sup>1</sup>。デフォーダブルミラーを用いたレーザー強度分布成形光学系が検討され、実用レベルに必要な誤差量が見積られた<sup>1</sup>。

#### 2.1.3 光学設計, 理論

##### (1) レンズ自動設計

エスケープ関数による大域的最適化法に関し、局所解

表 1 主要 4 学会における光関連 (カッコ内: 光設計, 結像系関連) 発表件数の推移。

年	応物(春)	応物(秋)	連合シンポ	光学シンポ	合計
91	267 (19)	281 (35)	—	20 (15)	568 (69)
92	251 (28)	203 (26)	89 (12)	29 (20)	572 (86)
93	259 (28)	190 (25)	122 (16)	31 (18)	602 (87)
94	232 (27)	157 (25)	158 (11)	23 (11)	570 (74)
95	224 (24)	143 (21)	210 (14)	22 (13)	599 (72)

から抜け出するためのパラメーター制御方法は多次元ほど容易になること<sup>m-1</sup>、レンズ設計問題に適用して様々な形状の異なる解が検出されたこと<sup>a-7</sup>、他の局所解への最短経路として saddle point を経由するようにパラメーター値を設定したこと<sup>2,m-6</sup>、等の報告があった。Moore-Penrose 形一般逆行列により様々な最適化手法の解が統一的に記述できることが示され<sup>4</sup>、非対角減衰項を有する新たな最適化手法が提案された<sup>3</sup>。DLS (damped least square) 法の変数差分量に関し、その適正を判定する解析的な手法が提案された<sup>n-7</sup>。

## (2) レンズ設計法

Off-axial 系に近軸展開手法を適用することにより近軸諸量が導出され、ガウシアンプラケットを用いて従来の共軸系に対する表式を拡張した形式にまとめられた<sup>4</sup>。複数のレンズパラメーターに重み付けして加え合わせることで新しいレンズ系を生成する方法が提案された<sup>4</sup>。

### 2.1.4 加工、評価、測定

#### (1) 加工

UV (ultra violet) レーザーアブレーションにより石英/ガラス素子を加工する際、照射条件を変えて表面粗さを制御する可能性について検討された<sup>2</sup>。光学薄膜作製工程にアルミナ作製プロセスを応用することにより良質な膜を形成する技術が報告された<sup>2</sup>。

#### (2) 評価

光学系を非剛体とみなしたシミュレーションにより、振動による点像劣化の様子が解析された<sup>2</sup>。変形ハルトマン法とニーポアの収差論とを適用して写真レンズの各収差成分が解析された<sup>4</sup>。光学系の回転対称性を利用して光線追跡本数を削減することにより最終画像シミュレーションの高速化およびカラー化が検討された<sup>4</sup>。

#### (3) 測定

主に波面補償光学系の検査に用いられるシャックハルトマン式センサーのコリメーターレンズ軸外収差について波面収差実測値からの解析が行われた<sup>1</sup>。魔鏡現象を光学的に解析してレンズ表面の凹凸検査への応用を試み、実験的に実用性が検討された<sup>4</sup>。JIS 校正用ニュートンゲージの精度規格値を満足することができる測定点真値推定方法が検討された<sup>4</sup>。光ディスク溝形状測定において被測定ディスクに応じてスカラー理論とベクトル理論を併用した回折計算法を採用し測定精度向上が図られた<sup>4</sup>。被検面を光軸方向に移動させるゾンプレート差動干渉計を構成し凹面ミラー曲率半径測定への適用が試みられた<sup>m-1</sup>。CGH (computer generated holo-

gram) による不要な回折光をピンホールで除去した大口径非球面検査用コモンパス干渉計が提案された<sup>m-1</sup>。デジタル・ラテラル・シェアリング干渉計で得られたデータから波面を再構成するための新たなアルゴリズムが提案された<sup>m-6</sup>。

(松居)

## 2.2 X線光学

1895年レントゲンによってX線が発見されてから百年が経ち、すでにX線は様々な分野で使われている。しかし、光学の立場で興味のある結像光学系を考えるとようやく軟X線に限って使えるようになってきたのが実状であり、今後の進歩が切望される。現在、活発な研究領域はX線リソグラフィーであり<sup>b-11</sup>、顕微鏡や顕微分析への応用も光学素子の開発と併せて進められている。

SR (synchrotron radiation) を用いた縮小露光リソグラフィーでは、20×25 mmの面積露光領域が得られるシステムが提案されている<sup>1</sup>。また、水平方向と垂直方向の開口数を等しくする照明光学系が提案され0.15 μm L & S パターンの解像が得られている<sup>2</sup>。レーザープラズマ光源を用いた縮小露光でも、Mo/Si 多層膜のシュヴァルツシルト光学系を用いてサブ μm パターンの形成が報告されている<sup>1</sup>。レジストシミュレーション、反射型マスクの吸収体加工時におけるダメージ低減法の提案、光学系へのMo/Si 多層膜形成に伴う基板変形の解析、波長4.5 nmの縮小露光における多層膜の膜厚誤差の影響の解析、ゾンプレートによる縮小転写の検討など要素技術の研究も活発である<sup>1,2</sup>。等倍SR露光では、アラインメント精度や重ね合せ誤差の検討、転写特性の実験的検証、X線マスクの種々の特性評価など実用化に即した成果報告が多い<sup>1,2,9</sup>。

生物応用に関する顕微鏡では、ウォルター型顕微鏡による水の窓領域でのイースト菌の観察や軟X線照射によるダメージについて報告があり<sup>2</sup>、水の窓領域での多層膜反射鏡を用いたX線像の観察も報告された<sup>3</sup>。また、積層型個体撮像素子を用いたシュヴァルツシルト型顕微鏡による観察も報告され<sup>1</sup>、密着型ではステレオ観察が試みられた<sup>2</sup>。軟X線・紫外線二重共鳴吸収過程を用いた顕微法の理論解析も行われた<sup>1</sup>。硬X線を用いたマイクロトモグラフィーによる未処理生体試料の観察も試みられている<sup>1</sup>。今後は、X線顕微鏡の有用性を実証することが課題である。

光電子顕微鏡に関する研究も活発に進められている。レーザープラズマ光源を用いたウォルター型顕微鏡では3 μm径のプロープで光電子が観察され<sup>1,10</sup>、SRを用いたウォルター型顕微鏡では0.3 μmの空間分解能が得ら

れている<sup>2</sup>。また、シュヴァルツシルト光学系で45 nm径のマイクロプローブが得られている<sup>10</sup>。飛行時間法による光電子分光の研究もあり、阻止電界印加によるエネルギー分解能向上が報告された<sup>1-3</sup>。X線による光電子をSTMを用いて大気中で検出する方法が提案されている<sup>4-11</sup>。

その他、密着型顕微鏡では高分子膜中の硫酸浸透状況の観察が行われ<sup>1c-9</sup>、ホログラフィー顕微鏡では、物体の存在領域を拘束条件とした像再生も試みられた<sup>2-4</sup>。コーデッドアパーチャを用いたX線顕微鏡も提案された<sup>c-1</sup>。

ソリグラフィと顕微鏡以外では、ピンホールとイメージングプレートを用いた蛍光X線による三次元元素分布測定やポリスチレン中の50  $\mu\text{m}$ 径気泡のCT (computed tomography) 観察が行われている<sup>2</sup>。X線回折装置ではガラスキャピラリーの応用が提案され<sup>1</sup>、X線干渉計では外乱の影響を受けにくいシアリング干渉計が考案された<sup>3</sup>。

光学系の研究も地道に進められている。原子層成長による多層膜製法やMo/Si多層膜の界面反応層低減法が提案された<sup>2</sup>。X線定在波法により多層膜の界面粗さと密度が独立に評価され<sup>c-6</sup>、スパッタリングによるMo/Si多層膜の面積積化では、6インチウエハー上で周期変動が $\pm 1\%$ 以下に抑えられた<sup>c-9</sup>。ゾーンプレートでは、Taを用いて最外周線幅0.1  $\mu\text{m}$ の集光用ゾーンプレートが開発された<sup>2</sup>。また、ゾーンプレートの大きな開口数を満たす楕円ミラー照明光学系も提案されている<sup>1</sup>。より短波長の光学系も研究されており、多層膜ゾーンプレートとX線分光結晶の組合せによる8 keV用ブラッグフレネル集光素子が作製され、レーザープラズマ診断用として2.5 keVのX線に対し3  $\mu\text{m}$ 以下の空間分解能が得られるKirkpatrick-Baez光学系が開発された<sup>2</sup>。基板と多層膜の間にカーボンコーティングを施すことにより界面粗さを低減し従来より高い回折効率を得たMo/Si多層膜グレーティングも報告された<sup>h-28</sup>。

光源では、水の窓領域に鋭いピークスペクトルの得られるガスパフ型プラズマ光源が開発された<sup>1</sup>。縮小露光に適したレーザープラズマ光源も考えられている。ターゲットに水を用いることで、Snターゲットに比べて明るさを57%に保ちながらデブリを3桁減少させている<sup>h-25</sup>。SR光源では、X線ビーム形状変化を利用したリソグラフィビームラインの光軸調整法が提案された<sup>a-12,c-10</sup>。

X線光学系の研究もかなり進歩し、従来、通常の光学系に取り入れられていた技巧的な工夫もみられるようになってきた。ますますの進展が期待される。(堀川)

### 3. 光応用計測

埼玉大工 門野博史  
北大工 岡 和彦

#### 3.1 光応用計測一般

本年度も光応用計測では各分野において活発に研究が行われている。光応用計測を活性化し発展させる原動力は新しい計測手法の導入であり、もうひとつは新しいデバイスの出現であろう。現在、キーデバイスは半導体レーザー(LD)であり、液晶素子であろう。液晶材料はネマティック、強誘電性、反強誘電性液晶など変化に富み、様々な機能を有している。残念ながら液晶素子のもつ柔軟性、多様性にもかかわらず、光応用計測においてはその一部が利用されているにすぎない。今後、新機能素子としてのいっそうの発展を期待したい。検出素子に関しては、100万画素を超える高解像CCDカメラが次々と発表された。これらの素子はまだ高価であるうえ、読み込み速度を犠牲にしているため、その高解像性を生かした応用研究はほとんどみられなかった。撮像素子に対応した高解像空間光変調器の開発も望まれるところである。以下に各分野の進展について述べる。

##### 3.1.1 干渉計測

干渉計測においては年々新しい手法が提案され着実な進歩をみせている。測定精度が向上し、高感度になるほど振動や空気揺らぎなどの外乱が大きな問題となり、生産現場でも使用に耐える技術が望まれている。この問題の解決法には光学系を外乱に対して強い共通光路型とする方法、外乱を検出しそれを位相変調素子等を通してフィードバックするアクティブ型、その他の方式に大別することができる。共通光路型の例としては位相差顕微鏡の定量化の報告があった<sup>1,2</sup>。位相差顕微鏡は物体からの鏡面波成分を参照波として用いる共通光路干渉計である。液晶を用いた可変位相板をフーリエ面上に置くことにより位相シフト干渉法を実現した。アクティブ型としては、外乱による干渉縞の動きを空間フィルター検出器で検出し、半導体レーザーの注入電流にフィードバックすることにより干渉縞をロックする位相シフト干渉計が提案された<sup>1,2,11</sup>。このほかの方法として以下の研究がある。空気の分散特性を利用し光路中の空気の屈折率変動のみを測定するために2波長干渉計をレーザー測長機に付加した空気揺らぎモニター型変位干渉計<sup>1,2</sup>、物体光の

位相共役波を参照光として用いる位相共役干渉計では、物体の振動の影響を受けることなく表面形状を測定できることが実験により示された<sup>2</sup>。

干渉計測用光源としてLDはますます重要な位置を占めており急速に従来のレーザー光源に置き換わりつつある。言うまでもなく、LDの利点は軽量、コンパクト、安価であり注入電流により容易に波長チューニングが行える点である。この特性を利用した位相シフト干渉計、ヘテロダイン干渉計、アクティブな干渉計の研究はここ数年の傾向であり、本年度も非常に多くの発表件数があった<sup>1-3</sup>。

LDの広範囲な利用に伴い、光学素子表面からのLDへの戻り光により誘起される出力変動、ノイズが大きな問題となっている。この種の不安定な出力変動をカオス制御の立場から、注入電流変調あるいは外部共振器により抑制を試みる報告があった<sup>1</sup>。

これとは反対にLDへの戻り光を積極的に計測に応用する試みも多くみられる。レーザーフィードバックと呼ばれるこの方式による液晶セルギャップなどの膜厚測定<sup>2</sup>、微小変位センサー<sup>3</sup>、合成開口顕微鏡への応用<sup>3</sup>などがある。また、閾値以下で駆動されるLDが戻り光の大小によりレーザー発振を起こすことを利用したイメージング法が報告された<sup>2</sup>。

低コヒーレンス干渉計では、光源の可干渉距離が非常に短いために干渉計の2つの光路差がゼロになる面のみが干渉信号として検出される。LD直交2周波光源によるヘテロダイン法との併用による大段差測定<sup>3</sup>、スーパーミネッセントダイオードを光源として用いた正弦波位相変調干渉計による複数の表面形状の絶対測定が行われた<sup>3,11</sup>。この手法は断層画像を得るのにも利用され、干渉信号の2次モーメントを用いることにより光軸方向の分解能が改善された<sup>3</sup>。

白色干渉に関しては、種々の光路差に対して得られた干渉色（スペクトル）に主成分分析の手法を用いることにより、干渉色から光路差を推定する方法が提案された。この手法を微分干渉計に応用し干渉色から光路差を10 nmの精度で推定した<sup>3</sup>。

そのほか、合致法によるブロックゲージの自動測定<sup>1</sup>、自己ウィーグナー分布関数を用いた光ファイバーの屈折率分布計測<sup>3</sup>が行われた。

### 3.1.2 スペックル

この分野ではスペックル場そのものの基礎研究が非常に少なくなり、また計測手法においても特に新しい提案はみられなかった。研究の中心は完全にその応用および

実用化に向けた技術へと移っている。

電子的スペックル干渉法（ESPI）によって得られる相關縞はノイズが多く、その位相解析法やノイズ除去に関してさらに研究の余地がある。時間平均スペックル干渉法では、位相走査法による縞のコントラスト改善およびスペックルサイズの影響が議論された<sup>3</sup>。従来、ESPIでは微小変形を高精度に測定することに多くの注意が払われたが、短時間で参照画面を更新することにより、構造物の破壊に至るまでの変形が総合的に観測された<sup>1</sup>。このほか、スペックル場の確率密度分布に基礎を置く統計的干渉計測法による物体の熱歪み計測が報告された<sup>3</sup>。表面粗さに関連して、フレネル回折場に生じる動的スペックルの2波長相關特性が理論的に解析された<sup>1</sup>。

### 3.1.3 近接場光学顕微鏡

近接場光学顕微鏡の分野では、分解能の向上、微小領域の分光<sup>1,3</sup>、他の方式の顕微鏡を併用したハイブリッドシステムの提案など発表件数も増加し着実な進展がみられた。エバネッセント波検出用の金属プローブを走査トンネル顕微鏡の探針として併用したシステムが報告された<sup>1</sup>。尖鋭化光ファイバーを用いて、2つのモードを含む近接場光学顕微鏡と走査力顕微鏡を一体化したシステムによる異なる情報の同時観測が行われた<sup>3</sup>。生体試料の観測も多く行われた。水中での生きた細胞の観測<sup>1</sup>、また細胞内の微小器官の観測により20 nmの構造が分解された<sup>1</sup>。理論解析も盛んに行われている。特に、ハイブリッドシステムにおいては、同時に得られた異なる情報をいかに統合し解釈するかが今後の課題である。

### 3.1.4 その他

医用計測あるいは生体計測への関心の高まりとともに強い散乱媒質を透過した光の特性に関する研究が増加している<sup>1-3</sup>。光CT（computed tomography）においても生体内での強い散乱による広がり考慮した画像再構成法が議論された<sup>1</sup>。散乱成分の抑制法に関して、偏光解消による抑制法が報告された<sup>1</sup>。生体計測では、光の透過性がよいことから通常近赤外線が用いられるが、可視短波長領域において血管の脈波信号が検出可能であることが報告された<sup>1</sup>。

光熱効果の分野では、光ファイバーのコアで作製されたカンチレバーの光熱振動による液体の密度測定<sup>2</sup>の報告がある<sup>2</sup>。光トラッピングに関連して、エバネッセント波の微粒子による散乱光強度を用いたレーザートラッピングの力学的ポテンシャルの測定<sup>2</sup>、光トラップされた微粒子からの散乱パターンによる形状推定<sup>3</sup>がある。

粒径測定では、ホログラム解析による粒径の計測<sup>3</sup>、位相ドップラー法における誤差が議論された<sup>3</sup>。新しい素子を用いた計測の例として、電力設備監視を目的として液晶を電界センサーとして用いた<sup>2</sup>。面発光レーザーを変位センシングに応用した<sup>1</sup>。また、色素ドープ液晶の特性が報告された<sup>2</sup>。(門野)

### 3.2 光ファイバー応用計測, 光応用測定器

低損失な光ファイバーが容易に入手可能となった現在では、実用上もっとも興味深い光ファイバーセンサーの一種は、分布型センサーであろう。ラマン散乱とOTDR (optical time domain reflectometry) の原理に基づく温度分布センサーなど一部はすでに実用化されており、これに続くいろいろな応用が様々な分野で検討されている。応用分野の拡大に伴い、測定距離の延長や距離分解能および精度の向上など、基本性能の改善も精神的に進められている。たとえばOTDRについては、距離分解能の向上を目的として、光ソリトンの利用が理論的に検討された<sup>1</sup>。また、コヒーレントOFDR (optical frequency domain reflectometry) については、光源のスペクトルを狭帯化して測定距離を延長するために、DFB半導体レーザーと2重外部共振器を組み合わせた方法<sup>4-5</sup>や、外部位相変調器を用いる方法<sup>12</sup>などが発表された。後者では、16.3 km 遠方において100 mの距離分解能で光ファイバーの損失が測定可能であることが示されている。一方、白色干渉の原理に基づくOCDR (optical coherence domain reflectometry) については、半導体レーザーの直接周波数変調を利用した光波コヒーレンス関数の合成・掃引法についていくつかの報告がなされた<sup>12,13,14-5</sup>。この方法では、測定距離は数十cm程度までであるが、その中で数 $\mu\text{m}$ の距離分解能が実現できる。さらに、コヒーレンス関数の幅や形を電子的に制御可能である。非線形光学効果を利用した分布型光ファイバーセンサーでは、ブリルアン散乱を利用した温度センサーと歪みセンサーが注目されている。センシング原理には、OTDRと同様に後方散乱光を用いる方法と、誘導ブリルアン散乱を用いる方法があり、それぞれBOTDR (Brillouin optical-fiber time domain reflectometry) とBOTDA (Brillouin optical-fiber time domain analysis) と呼ばれている。BOTDAを用いた温度センサーにおいて、51 kmの光ファイバー中で5 mの空間分解能と $\pm 1^\circ\text{C}$ の温度分解能が同時に得られている<sup>6-7</sup>。

光ファイバーセンサーの多重化に関しても、実用化に向けての研究が盛んに行われている。実装技術について

は、光ファイバーハイドロホンによる海中の音圧の測定<sup>14</sup>や、光ファイバーブラッグ回折格子を使った鉱山の歪み計測<sup>6-7</sup>などが発表された。また、光源の位相ゆらぎや光ファイバー中の偏波ゆらぎがセンサーの多重化に及ぼす影響について、理論的な検討がなされた<sup>6-7</sup>。分布型あるいは多重型ファイバーセンサーでの利用を目的としたスパイラル状ファイバー歪みセンサーも提案されている<sup>2</sup>。

実用化に向かっている光ファイバーセンサーの代表例のもうひとつは、光ファイバージャイロである。干渉方式は1995年就航のボーイング777に実装され、カーナビゲーション、無人搬送車、アンテナ/カメラ安定機構など、新しい応用の開拓が進展している。さらに、これに続く他の方式のジャイロに関しても、基本性能の改善は着実に進められている。たとえば受動共振型光ファイバージャイロについては、共振に関与する偏光状態の安定化のため、捻り単一モード光ファイバーを用いたリング共振器が発表された<sup>12</sup>。また、導波路位相変調器を使ったデジタルセロダイン方式によるリング共振器ジャイロも試作された<sup>13</sup>。一方、光ファイバーブリルアンレーザージャイロについては、光ファイバー中の温度分布が発振特性に与える影響について実験的に調べられた<sup>13</sup>。なお、最近では、応用分野の拡大に伴って、低価格な光ファイバージャイロのニーズも高まっている。これに対するひとつの方策として、ファラデー素子を使った構造が簡単な共振器ジャイロが発表された<sup>14</sup>。

干渉型光ファイバーセンサーに関しては、多モード光ファイバーを用いた干渉型センサー<sup>2</sup>、多色光源と複屈折光ファイバーを用いた歪み/温度センサー<sup>6-7</sup>、光ファイバーの群遅延を使った歪み/温度センサー<sup>6-7</sup>、ならびに干渉強度の半導体レーザーへのフィードバックを利用した歪みセンサー<sup>6-7</sup>など、新しいセンシング原理に基づく研究がいくつか報告された。また、非線形光学効果を利用した干渉型光ファイバーセンサーについては、光ファイバーブラッグ回折格子を使ったErドープ光ファイバーレーザー歪みセンサーが発表された<sup>6-7</sup>。この方法は、センシング部がすべて光ファイバーで構成されているため、多重化に適している。最小検出歪みとして $7 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ が示されている。

ファラデー素子を用いた磁界センサーでは、歪みや強度変化などにより誘起された直線複屈折が誤差の原因となる。この除去のため、光ファイバー中を逆方向に伝搬する2光波を使った新しい信号処理法<sup>6-7</sup>や、応力誘起複屈折の小さなフリントガラス光ファイバーを用いた磁



界センサー<sup>6-7</sup>などが発表された。そのほかに、温度変化に無感な差動型磁歪センサーも報告されている<sup>8</sup>。

光ファイバーに加工を施して、新たなセンシング機能を光ファイバー中にもたせようとする試みも、いくつかなされている。先球光ファイバー振動センサー<sup>1</sup>、光ファイバー光熱振動センサー<sup>12</sup>、中空光ファイバーを使ったファブリー・ペローエタロン<sup>6-7</sup>などが報告された。また、歪みセンシングを目的として、サイドホール型光ファイバーにおいて引っ張り誘起の複屈折を増大させるための設計指針が示された<sup>3</sup>。

実用期を迎えつつある光ファイバーセンサーについて、最近国内での関心は今一つであり、応用物理学会や電子情報通信学会などでの発表件数も一時期に比べて減少している。しかしながら、視点を国外に転じてみると、光ファイバーセンサー国際会議 (OFS) や SPIE のシンポジウムなどでは、質、量ともに充実した活発な議論がなされている。1996年5月にはOFSが札幌で開催される。これを機に、多くの方が、再びこの分野で活躍されることを期待する。(岡)

## 4. 光情報処理

通信総研 北山研一

### 4.1 指紋照合<sup>15</sup>

アナログ光相関演算を用いた指紋照合装置が興味深い。従来、特徴抽出を基本とする方式が開発されているが、精度と処理速度の両立が困難であった。指紋、網膜、署名、声紋等の個人固有の特徴のうち、使いやすさと高い照合率をもつのは指紋照合である。指紋は周期的な縞情報であり、基本的にはパターン認識である。今回の方法は、個人差が空間的なフーリエ変換の空間周波数成分に表れることに着目し、これを用いた光相関演算の結果に基づいて識別するものである。試作装置の性能は、処理時間が0.1秒以下で600人の指紋データを4.1%以下の誤認率で照合できる性能を有している。

光相関演算は世の中で最高速の2次元相関演算といえる。入力像の回転や拡大・縮小には弱いという欠点があるが、指紋の場合には入力装置によってこれらの曖昧さを除去しているので、まさに niche といえる。セキュリティ対策に対する社会の関心が高まるなかで、今回の成果が光情報処理の実用化の突破口のひとつになることが期待される。

### 4.2 ホログラムメモリー

90年代に入って再び活性化し始め、高速・大容量メモリーを目標とする研究が主に米国で進展している。今年

になって、体積ホログラムに角度と位置をページごとに交えて多重に記録する角度・空間多重ハイブリッド記録方式を用い、40 $\mu$ 秒以下のランダムアクセス時間で約200メガバイトが達成されている<sup>9</sup>。ホログラム媒体には微量のFeをドーブしたフォトリフラクティブLiNbO<sub>3</sub>結晶を用いているので、実時間で書換えられる。メモリー容量の限界に近い1テラビット (CDの約200倍に相当) に向けたチャレンジも既に始まっており、今後の成りゆきが注目される。

もうひとつの話題は、ホールバーニングによる動画ホログラムの動体認識への応用である<sup>12</sup>。理論上10<sup>7</sup>ビットという大容量が魅力であり、既にEu<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>を用いた動画ホログラムが実現 (@約6K) されている。動体認識は、参照物体の動的なフーリエ変換ホログラムを予め記録しておき、被測定動体と参照物体との光相関演算によって生じる相関スポットの移動を観察するというものである。記録媒体のメカニカルな移動を伴わず、時間的に連続な記録が可能であるという特徴を生かした応用といえる。

自由空間光インターコネクションではホログラムを用いた大規模な光制御型ホログラム光スイッチが実現された<sup>10-12</sup>。入力面のある1点から出た光信号を出力面の任意の位置へ実時間でスイッチできるというのが特徴である。アレイミミネーターから出たビームのなかから、出力位置に対応した2本のビームを選択し、強誘電性液晶空間光変調器に干渉縞を記録すると、信号光はこの干渉縞によって回折され所定の出力面上の位置に導かれる。動的なビーム偏向器には光制御型ホログラムを用いている。既に入出力が1×1104と4×222の動作が確認されている。電気スイッチに比べ広帯域で大規模化ができるので、数千端子以上の大規模な加入者系光スイッチとして適用が期待される。

### 4.3 ステレオグラム<sup>7</sup>

立体画像の表示法の中でホログラフィックステレオグラムは、眼鏡なしで見ることができる方法として注目を集めている。ノートパソコンの液晶ディスプレイとデジタルカメラを用いて、ホログラフィックステレオグラムを作成する方法が示された。まだ画素数の不足、中間調が不十分という問題があるが、従来のようにプロジェクター用LCD (liquid crystal display) と投影光学系を用いずに、手軽に作製できるのが利点である。ステレオグラムに用いる画像の作成方法では、任意の方向からの撮画像を計算機により合成する方法や、3次元プリンターの開発も進んでいる。

#### 4.4 バイナリー光学素子の応用

光学素子では、バイナリー光学素子の光情報処理への応用が注目される。バイナリー光学素子はレンズの球面から波面変換に機能する部分だけを $2^N$ レベルで近似することによって平面化した回折素子である。異なったレベルの組合せによって、80%を越す回折率が得られるようになっている<sup>3</sup>。また高解像度の液晶パネルを用いて光波を動的に制御する試みもいくつか報告されている。例えば、焦点距離や位置が変化できるマイクロレンズアレイ、アレイイルミネーター、実時間制御の光ビーム偏向器、位相フィルター等が報告されている<sup>16</sup>。

以上、この1年を振り返ってみていくつかの話題を取り上げてみた。特に気が付くことは、液晶デバイスが非常に幅広く使われており、いまや光情報処理には欠くことのできないデバイスになりつつあるということである。液晶デバイスは活発な民生需要に応じて高機能化、多品種化、経済化が進んでいるので、今後ますます利用分野が広がるであろう。最後に、デジタル演算、ニューロコンピューティング等の光コンピューティングの分野では、人工網膜チップや光デジタル画像処理には地味ながら進展がみられるものの、全般的にはインパクトに乏しかった。今春、Topical Meeting on Optical Computing 96 が日本で6年振りに開催されるので、これをきっかけに再び活気が蘇ることが期待される。

### 5. 画像表示

広島大工 内池平樹

人類究極の夢のひとつである「壁掛けTV」が実現しようとしている。1995年、対角40インチのカラープラズマディスプレイ(PDP)に対する大規模な投資を開始する計画が複数の企業から発表され注目を集めた。この結果、これまでディスプレイに関する研究・開発の関心がカラーTFT(thin film transistor)-LCD(liquid crystal display)に集中していたが、カラーPDPに加えて直視型LCD、投写型LCD、プラズマ・アドレス方式カラーLCD、ILA(image light amplifier)、およびDMD(digital micromirror devices)など大型ディスプレイに対する関心が極めて高くなってきた。

#### 5.1 カラープラズマディスプレイ

カラーPDPにはac型とdc型があり、それぞれ実用化に向けた研究が進められている。ac型には面放電電極方式と対向電極方式があり、現在、大量生産の計画に採用されているのは、面放電電極方式である。

面放電電極方式では、反射型の蛍光体塗布方法の採用

により、350 cd/m<sup>2</sup> および 1.2 lm/W の高発光効率および高輝度化が実現している。最近の結果では、3万時間以上駆動した後の輝度の減少が10%以下と極めて実用性の高い結果が得られている。

今後、蛍光体の性能の改善、大量生産に適した障壁の形成方法の確立などにより、1放電セルの大きさが0.39 mm×1.19 mm程度であれば、400 cd/m<sup>2</sup>で1.5 lm/Wの輝度と発光効率を実現することはそれほど難しくない。NTSC方式のTV表示用ディスプレイとしては十分な性能を発揮して大画面表示のディスプレイ分野の一角を占めることは確実となった。

#### 5.2 液晶ディスプレイ

LCDの開発の方向は、広視野角化、携帯情報端末用ディスプレイとして低電力駆動を実現するための反射型LCDが中心である。しかし、カラーPDPの活発な開発動向に刺激されて大型化に関してもいくつかの動きが出てきた。

現在広く普及しているTN(twisted nematic)型は視野角が狭い欠点がある。視野角を広くすることは、比較的大きなLCDにとって極めて重要であるので、数年前から開発研究の中心となっている。これまで光位相差板、複屈折補償板、容量分割駆動法などによる光学的補償法により視覚特性を改善している。最近、デュアルドメイン画素方式の研究開発が活発であり、ひとつの画素を二分割し、それぞれにおいて液晶分子のプレティルトの方位が180度異なるように配向して視野角を改善している。ラビング処理をしないマルチドメイン方式、これを改善する軸対称配向マイクロセルASM(axially symmetric aligned micro-cell)モード<sup>29</sup>が提唱されている。また、液晶自体でなくバックライトからの光をコレクターフィルムでLCDに垂直入射させて、パネルから拡散させる方式<sup>29</sup>などで目に見える改善効果を上げている。さらにTN型以外のモードとして、OCB(optically compensated bend)モード<sup>29</sup>や短ピッチ螺旋の強誘電性液晶などで視野角特性の改善が行われている。とくに、インプレーン方式<sup>30</sup>は、その原理は1993年に提案されているが、Asia Display '95で試作した結果が初めて展示され、視野角が狭いという欠点をほとんど解消できることを実証して、最も関心を集めた論文のひとつとして注目された。また、開口率が小さいため消費電力が高いという欠点があるが、高性能なコンピューターモニター用として今後の発展が期待されている。

カラーTFT-LCDの低消費電力化を図る現実的な解決策のひとつに、開口率を大きくすることが挙げられ

る。日本の企業の努力で1994年に70~80%程度の開口率を得て解決しているが、1995年に入り、韓国からも同様な内容の発表があり注目されている<sup>29</sup>。

大型の直視型LCDでは、対角21インチのものが試作されて注目された<sup>1</sup>。一方、48枚のパネルを張り合わせ対角226cmの大型ディスプレイが試作され、直視型LCDによる大型ディスプレイの可能性を示した<sup>30</sup>。直視型LCDを大型化する場合に問題となるのは現在進行している大量生産ラインの基板ガラスの大きさである。1996年頃から550×650mmが採用されようとしているが、この基板から得られるHDTV (high definition TV) 対応の最大寸法は対角28インチとなる。したがって、対角40インチを実現するための基板ガラスの大きさは、1000×600mm以上となり、これに対応する製造装置が必要となる。

LCDの欠点のひとつであった狭い視野角が、インプレイン方式のいわゆるsuper TFT-LCDでCRT (cathode ray tube) 並に改善され、LCDの大画面化への道が切り開かれた。しかし、現在大量生産のためのプロセスを構築しているカラーPDPが1インチ当たり2,500円を目標としていることを考えると、対角40インチ以上の直視型LCDの実用化には、価格低減にかなりの困難が予想される。

### 5.3 投写型およびその他のディスプレイ

投写型LCDでは1995年に3枚式LCDを用いて性能を向上させるとともに、価格を投写型CRTと同等以下にすることに成功して注目を集めている。光源用ランプの短寿命の問題が消費者に理解されることが前提であるが、投写型LCDが大画面ディスプレイの台風の目になると予想される。

プラズマ・アドレス方式カラーLCDは、価格を低減するために、TFTの代りに放電セルを用いている。PDPとLCDの長所を生かした大型ディスプレイであるが、LCDの視野角が狭い短所はそのまま残っている。

DMDは、1993年シアトル市で開催されたSID国際会議の展示では、一見して画質に問題があり、またコンパクト化が難しいように見受けられた。しかし、1995年オランダ市で開催されたSID (Society for Information Display) 国際会議では、極めてコンパクトになりまた画質も見違えるように改善され、投写型CRTやLCDに対する有力な対抗馬として浮かび上がってきた<sup>29</sup>。家庭用として受け入れられる程度まで価格を低減することができるかが問題である。アジアディスプレイ'95でDMDと類似のAMA (actuated mirror array)

が報告された<sup>30</sup>。DMDが静電力を利用して微小な鏡を駆動するのに対して、AMAはPLZTの piezo 効果を利用して、DMDよりも大きな鏡を駆動することで高輝度を実現できることが特長である。

ILAは、a-Siの光センサーと液晶層で構成されるデバイスにCRTで書込んだイメージを、Xeランプで照射した光を95%以上反射させるディスプレイである。1,600×1,200画素で600:1のコントラスト比が得られるなどの優れた性能を有していて、対角1~4m程度の劇場用ディスプレイとして認められてきた。しかし、最近の改良により、対角1m以下の利用もターゲットになり、カラーPDPなどとも競合して、刺激を与えるものと期待される<sup>30</sup>。

LEDはこれまで青色の発光の輝度が低く色純度が悪く、LEDを用いたカラー表示への応用として対象外であった。従来、青色系のLEDの開発研究は、広いバンドギャップをもつII-VI半導体を用いて作成する方向で行われてきたIII-V半導体を出発点にして、p形Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nとn形In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>Nのpn接合を形成することで高輝度で色純度に優れた結果を得た。屋外用ディスプレイあるいは交通信号用として実用化され始めてきた<sup>29</sup>。

### 5.4 展 望

カラーPDP、DMD、大型の直視型LCD等は、展示会で見る段階から市販されるところにきている。したがって、これまで新奇ということで関心を集めていた状況から、CRTの価格や性能と本格的に対抗することが要求されることになった。

大型ディスプレイの開発あるいは製造の競争は、しばらくの間対角40インチクラスのカラーPDPがその中心となってゆくものと思われる。しかし、カラーCRTと完全に置き代わるためには、カラーPDPでとくに問題となっている疑似輪郭の問題を解決することが緊急の課題である。現在の段階を第一期とすると、第二期の目標性能としてのハイビジョンあるいは高性能モニターを実現するために、さらに高輝度・高発光効率化が要求される。

## 6. 光 記 録

茨城高専 畠山 巖

パーソナルコンピュータの爆発的伸びに従って、再生専用光ディスクであるCD-ROMもさらに大量に普及してきた。また、書換え型光ディスクも第2世代の3.5インチ230MB容量が主流となり、張り合わせ5インチ

では第1世代の4倍である2.6 GB容量ディスクが発売されつつある。国際標準化動向としては5インチ2.6 GB光磁気ディスクとともに、3.5インチ540/640 MB光磁気ディスクの審議がほぼ終了し<sup>18</sup>、5インチ両面で第1世代の8倍容量である5.2 GB光ディスクが審議に入ろうとしている状況である。一方、DVD（デジタルビデオディスク）としてのROMあるいは書換え型光ディスクの規格化の動きも活発になってきた。本年はこれらの動きに対応した高密度化の報告が多くなされた。さらに次世代、次々世代の超高密度光記録としての新技術についても興味ある発表がなされた。

## 6.1 光ディスク高密度化技術

### 6.1.1 光磁気記録関連

MSR (magnetic induced super resolution: 磁気超解像)の安定性やSN (signal to noise ratio) 改善の報告がなされた。一つは読出し時に光スポット温度が高い中心部のみを磁化反転させて再生するR-MSR (reversal type-MSR)において、微小ビットの反磁界を低減するためにCo層を媒体表面に積層させ、読出し磁界によるSN劣化を改善した<sup>18</sup>。また、光スポットの前方部に磁気的な開口部を開けて読みとるFAD (front aperture detection)-MSRにおいて記録時に補償パルスを加えることで1.15  $\mu\text{m}$ トラックピッチ、0.27  $\mu\text{m}$ ビット長記録で $\pm 11.3\%$ の広い記録パワーマージンを得ている<sup>18</sup>。

### 6.1.2 相変化記録関連

相変化記録はレーザー波長、光パワーやヘッド構成でCD-ROMと相性がよい、120 mm径単板、650 MB容量の書換え型で、しかも既存のパソコンのCD-ROMドライブで再生できる光ディスクがPD (power disk)として商品化された。一方、従来の光磁気ディスクとの継続性を考慮した90 mm径相変化光ディスクの国際標準化もすでに議論が進んでおり、0.6 mm板を2枚張り合わせ、カートリッジとして1.3 GB容量とすることが審議の俎上に載せられている<sup>18</sup>。

相変化媒体であるGe-Sb-Teは繰り返しオーバーライトするうちに、媒体物質の流動現象が起り、再生信号歪みが生じ問題であったが、媒体に高融点成分であるCr-Teを添加することにより信号の歪みが防止できることがわかった<sup>18,19</sup>。媒体の安定化にとって大きな進歩である。

相変化媒体からなる書換え層と再生専用層をそれぞれ0.6 mm基板に作製し張り合わせた。片側から両方の層にアクセスし、いずれから8%以下のジッター値を得

ている<sup>2,19</sup>。用途によっては面白い試みである。

### 6.1.3 再生技術

従来の光磁気ヘッドの対物レンズの前に2分割したジャイレーターを置き、カー信号を差動検出することによって、MO信号の空間分解能を示す伝達関数が大きくなる<sup>17</sup>。シンプルで高分解能ヘッド構成として期待される。また、セグメント導波路構造としたKTP (KTiOPO<sub>4</sub>)による425 nm波長のSHG (second harmonic generation)でピックアップを作り、120 mm径で10 GBの高密度DVDを実証した。HDTV (high definition TV) 3時間分の再生に当たる<sup>18</sup>。

### 6.1.4 集積型光ヘッド

光源やミラー、受光素子をハイブリッドに集積化した集積型光ヘッドで光磁気ディスクをCN 45 dBで再生したもの<sup>1</sup>や、CD-ROMをジッター5 ns以下で再生したもの<sup>2,18</sup>等の報告が目される。

## 6.2 将来型光記録

### 6.2.1 近接場光学技術

SNOM (scanning near field optical microscope)を用いて相変化媒体に80 nmの結晶層マークを書き込んだ。先端径約50  $\mu\text{m}$ の光ファイバーに入射した8.4 mWの光パワーで記録し、同じファイバーで0.2 mWで再生している<sup>19</sup>。媒体の表面形状も変化している問題もあるが、15.5 Gb/cm<sup>2</sup>相当の記録密度が示された意義は大きい。

### 6.2.2 STM (scanning tunneling microscope) 応用技術

ポリカーボネート基板上にカンチレバーを接触させ、レバー先端のチップに反対側からレーザー光を照射加熱し、その熱で基板を変形させて記録する。再生はカンチレバーで変形マークを機械的に読みとる。3.1 Gb/cm<sup>2</sup>相当の信号を再生した<sup>18</sup>。

### 6.2.3 ホログラフィー記録

フォトリソマーを用い、2次元の角度多重を行うことにより、590 kbitsの2次元デジタル信号を1.5 mm径光スポット上に32多重記録した<sup>17</sup>。これは1 Gb/cm<sup>2</sup>の記録密度に相当する。ビットエラーレートは $10^{-4}$ であった。そのほか、書換え型ホログラフィー記録としてSBN (strontium barium niobate) フォトリフラクティブ結晶を用いた波長多重記録の発表<sup>18</sup>、Ce:SBN結晶ファイバーで記録保持時間を大幅に延ばした発表<sup>18</sup>等が目される。

ポスト光ディスクとしての各種将来型光記録も着実な歩みを始めた感がある。

## 7. オプトエレクトロニクス・光デバイス

日立 井上宏明  
東北大電通研 谷内哲夫

### 7.1 光通信分野

本年(1995年)6月には IOOC (International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication: 集積光学および光通信に関するアジア・北米・欧州地域で隔年持ち回り開催される国際会議)<sup>20</sup>が香港において(日本以外のアジア地域で初めて)開催された。本分野の日本のアクティビティーの高さを反映し、多くの参加者(約160名/総参加者数約500名)・論文(約80件/総採択数約220件)が日本から寄与された。ここでは、この IOOC '95<sup>20</sup>、第42回応用物理学関係連合後援会<sup>1</sup>および第56回応用物理学学術後援会<sup>2</sup>にて発表された内容を中心に本分野(半導体レーザーを除く、第9節参照)の進展を光ファイバー・光検出・光制御の項目に分けて振り返る。

#### 7.1.1 光ファイバー

ポリマー光ファイバーの低損失化とそれを用いた応用実験の報告が活発化している<sup>1,2</sup>。特に、100mの分布屈折率型ポリマー光ファイバーと波長647nmの半導体レーザーを用いて、2.5Gb/s高速伝送実験が報告され注目された。従来のSi系光ファイバーの適用分野での応用を一部置き換えるだけでなく、光インターコネクション分野等で新しい光部品として光配線分野をいっそう拡大させる可能性を秘めており、今後の展開が期待される。

長距離通信用光ファイバーの分野では波長1.5 $\mu\text{m}$ のErドープ石英ファイバー増幅器(EDFA)の実用化に伴い<sup>20,21</sup>、波長1.3 $\mu\text{m}$ のファイバー増幅器としてのPrドープフッ化物光ファイバー増幅器(PDFA)の研究が盛んである。EDFAに比べて遜色のない増幅特性に加えて、懸案であるフッ化物光ファイバーの高信頼化に対しても着実な進歩がある<sup>1,2</sup>。

#### 7.1.2 光検出

本分野の全体の発表件数は近年減少が著しい<sup>1,2</sup>。超格子構造をAPD(avalanche photo diode)の光増倍層に導入することにより、既存の材料系では得ることの困難な大きさの電子と正孔のイオン化率比が達成できる。これを利用した新しい光検出器の報告が盛んである。超高速光伝送システム応用の分野では150GHzのGB(利得帯域)積をもつ超格子APDが報告された<sup>20</sup>。高信頼化に対する検討も進んでいる。導波路型APDの報告も

活発である。いっそうの超高速化を目指す際に生じる吸収層の薄膜化による感度劣化の問題の回避、動作点の低電圧化による大容量並列光リンク等への応用領域拡大が期待できる<sup>1,2</sup>。InAlAs/InGaAs超格子を用いた導波路型APDにおいて波長1.5 $\mu\text{m}$ でGB積120GHz、11GHzの高周波帯域が報告され、30GHz以上の帯域実現の可能性が示された<sup>1</sup>。

#### 7.1.3 光制御

マイクロマシオン技術を応用した新しい光制御デバイスの発表が相次いだ<sup>1,2,20,21</sup>。静電力を利用した可動部となる薄膜構造をもつ波長可変フィルターや光変調器の報告が主である。従来の電気光学効果等による屈折率変調でなく、直接共振器を形成するエアーギャップを変化させる方式であるのできわめて大きな光位相変化が容易に得られる点の特徴である。今後の進展が注目される。導波路デバイスの分野では有機ポリマー導波路の発表件数が増加している。低損失(0.4dB/cm@1.3 $\mu\text{m}$ )で容易に作製できるようになり<sup>1</sup>、低コスト化技術としても今後研究の活発化が予想される。半導体レーザーと一体化した凸レンズ形状ポリマー導波路による出射ビーム整形への応用<sup>1</sup>や、屈折率の温度係数が負値をもつポリマーを用いた光路長温度係数ゼロのアサーマル導波路の実現<sup>2</sup>が報告され注目された。また、ポリマー光導波路を用い温度制御型4 $\times$ 4光スイッチが報告された。この単位スイッチでの消費電力は30mWと従来のSi系光スイッチと比べて約2桁近く小さく、50万回の動作が確認された<sup>21</sup>。信頼性にも見通しが得られてきている。

LiNbO<sub>3</sub>光変調器の長期信頼性に関して、65°Cでの50%DCドリフト寿命20年が報告された。DCドリフトの問題が実用システムでの信頼性問題として議論されてきた<sup>20</sup>。

半導体デバイスに関しては、長波長材料の多重量子井戸構造(MQW)を用いた電界吸収型(EA)光変調器の応用研究が進展しており、EA光変調器およびその集積化光源に関する発表が多かった<sup>1,2,20,21</sup>。伸長歪と質量依存井戸幅量子井戸による広波長域偏光無依存動作<sup>2</sup>、光電変換されたフォトキャリアの周波数応答特性をもとに電子と正孔の掃出時間を巧妙に求める手法<sup>1</sup>が報告され注目された。単体のEA光変調器では変調帯域50GHz以上、駆動電圧2.8Vの発表があり、性能指数は $\sim 20\text{GHz/V}$ に達した<sup>20</sup>。一体どこまで行き着くのか? 凄まじい一言である。応用の面では、モード同期半導体レーザーからの20Gb/sの光パルス列から100Gb/sの光パルス信号を生成するパルスパターン発生器(5つ

のEA変調器と遅延線、合/分波器を一体集積)が報告<sup>1</sup>された。バットジョイントで形成したEA/DFB (distributed feed-back) 集積化光源により負チャープ状態で10 Gb/s-60 km (通常ファイバー) 伝送された<sup>20</sup>。今後とも、伝送応用では新しい進展が期待できる。1.3  $\mu\text{m}$  帯のEA光変調器として新しい材料系InAsP/InGaP歪MQWによる光変調器<sup>2</sup>も報告された。1.5  $\mu\text{m}$  帯の特性には未だ及ばないが、従来系(InGaAsPバルク系)に比べて約1/3の駆動電圧が得られており、今後の発展が期待される。アナログ伝送の分野でも、EA光変調器の高速変調特性に着目し、変調歪特性が評価され<sup>2</sup>サブキャリア多重伝送への適用可能性の検討も進んでいる。

また面型の光機能デバイスの分野では、面発光レーザー/電界効果トランジスタ/受光器を集積した光スイッチが試作され、amp型/inverter型の2種類の動作<sup>1</sup>が報告された。面型光増幅器の検討<sup>2</sup>も進んでいる。短共振器長による低利得の問題を解決することが課題である。面発光半導体レーザーの偏光双安定を用いた5.3 GHzの高速全光型フリップ・フロップ動作<sup>2</sup>が実現された。

光結合/モジュール化技術での進展もまた著しい<sup>20</sup>。マイクロキャピラリーSi-V溝を用いた位置合せ技術により $\pm 0.5$  dB精度の4チャンネルの半導体レーザーアレイモジュールや、32チャンネルのファイバーアレイをPLC(planar lightwave circuit)と光結合させ挿入損失0.3 dB/pointが実現された。この技術を用いて64 $\times$ 64のスターカプラー(PLC)と64チャンネルのファイバーアレイを接続し、過剰損失0.2 dBというきわめて良好な結合技術の報告があり、注目された。(井上)

## 7.2 信号処理、情報機器用光デバイス

ここでは信号処理、情報機器に応用される光デバイスの1995年の進展を概観する。

1995年における光ディスク関連技術者の最大の関心は、DVD(デジタル・ビデオ・ディスク)の規格であり、厚み0.6 mmの基材を用いる方式が合意に達した。そこで、従来の厚み1.2 mmのCDと互換性を達成するため2焦点光ヘッド等種々の提案が行われた。基板厚差により生じる収差を低減するためにホログラム一体型2焦点対物レンズは、対物レンズの入射側の非球面にホログラムを一体成形する構造であり、レンズ設計からガラス成形プロセスまでの一連の研究結果が報告された<sup>2</sup>。

記録再生可能な光ディスク材料に関しては、狭トラックピッチに有利な相変化方式の報告が多く、DVDに関

連し2層積層構造による高密度化とその片側読取りの検討が行われた。内部からGeSbTe系相変化書換え層、40  $\mu\text{m}$ の分離層および再生専用層を積層する構造において、波長680 nm、NA 0.6の光学系を用い記録パワーは11 mWで従来の単層構造に比べ1.5 mW程度増加はするもののC/N 54 dBの信号品質が得られた<sup>2</sup>。

DVDに向けての短波長光源、光メモリー材料、レンズおよびマイクロモジュール技術が急速に進展しており、光学界全体のレベルアップに大きく貢献することが期待される。

非線形光デバイスの進展としては、LiNbO<sub>3</sub>、LiTaO<sub>3</sub>結晶のドメイン反転を用いた擬位相整合(QPM)方式を用いて青色から300 nm帯の紫外光発生に研究がシフトしている。周期長3.3  $\mu\text{m}$ の2次のバルク形ドメイン反転LiTaO<sub>3</sub>(厚み0.2 mm)により680 nmの赤色半導体レーザー(30 mW)光を340 nmの紫外光(14 nW)に変換した<sup>2</sup>。また、周期長5.83  $\mu\text{m}$ の3次のドメイン反転LiNbO<sub>3</sub>光導波路(基板厚み0.15 mm)を用いてTi:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>レーザーから382 nmの紫外光発生を行った<sup>2</sup>。紫外光発生に必要なドメイン反転周期は2  $\mu\text{m}$ 以下になるためにいずれも高次のQPMで行っており、また基板厚みも0.2 mm以下と作製プロセスの改良が図られている。また、紫外光発生の点からは、吸収端が短いLiTaO<sub>3</sub>の方が有利と考えられるが、いずれのQPM方式SHG(second harmonic generation)においても、紫外光に対する光ダメージの影響が青色以上に大きな課題になり、ドメイン超格子における光ダメージの低減対策が待たれる。周期長3.8  $\mu\text{m}$ のドメイン反転LiTaO<sub>3</sub>は、バルクLiTaO<sub>3</sub>に比べ5倍以上の光ダメージ耐性を有することが実験的に確認されたが<sup>1</sup>、詳細なメカニズムの解明とともにさらに光ダメージ特性の優れた結晶の開発が待たれる。

本年度は、SHGデバイスだけではなく、半導体レーザーを組み込んだ青色SHG光源を搭載した超高密度光ディスクの再生特性の報告が行われた。QPM-LiTaO<sub>3</sub>とQPM-KTPを用いた光導波路デバイスであり、いずれもフィードバックにより半導体レーザーの波長ロックを行っており、中でもQPM-KTP光導波路を用いたSHGデバイスをレンズなしで半導体レーザーと結合させた超小型青色光源<sup>1</sup>(波長425 nm、光出力2 mW)は、相対雑音強度(RIN)が-140 dB/Hzの低ノイズ光源として、学会報告だけではなくエレクトロニクスショーでも実動展示されたことは、モジュール実装技術を含め大きな進展と考えられる。また、超高密度記録再生をめ

ざしてGeSbTe系相変化光ディスクを波長430 nmのSHG光源とNA 0.6の光学系により再生を行った結果、マーク長 $0.4\ \mu\text{m}$ でのCNは50.6 dB、 $0.3\ \mu\text{m}$ では45 dBと680 nmの半導体レーザーを用いたときより8 dB以上優れた特性が得られることを確認した<sup>2</sup>。今後、記録再生可能な超高密度光ディスクの方式評価にも使用可能な10 mW以上の変調可能な青色光源の開発が待たれる。

レーザー材料であるNdドープLiTaO<sub>3</sub>結晶(厚み1 mm)に対しても、電荷量の精密制御によりドメイン反転が可能であることが示された<sup>1</sup>。これにより、電気光学(EO)効果によるQスイッチ、周波数変調器のほか、QPMによるSHG、光パラメトリック発振等、半導体レーザー-励起固体レーザーと非線形光学デバイスのモノリシック化が可能になり、小型固体レーザーの応用が大きく広がることが予想される。

ドメイン反転形成法に関しては、直流電界印加法に集約しつつあり、LiClを用いた液体電極を用いてLiTaO<sub>3</sub>結晶に周期電界を印加する方法が提案された<sup>2</sup>。この方法は空気中でドメイン反転が可能になり、電荷が均一に供給されるために20 mm以上の比較的大型QPMデバイスの作製に有利と考えられる。

QPM方式の非線形光学デバイスは、SHGだけではなく差周波発生による $1.3\ \mu\text{m}$ 帯と $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の波長変換デバイスの検討が行われ、周期長 $14.6\ \mu\text{m}$ のドメイン反転LiNbO<sub>3</sub>を用いて3.6 mWのポンプ光に対して約-31 dBの変換効率が得られた<sup>1</sup>。また、周期 $31\ \mu\text{m}$ のドメイン反転LiNbO<sub>3</sub>を用いて、 $1.06\ \mu\text{m}$ ポンプ光の発生<sup>1-1</sup>が行われており、結晶の温度を145°Cに上げることでしきい値を80  $\mu\text{J}$ 程度に低減することができた。これらの結果からも、QPM非線形光技術により小型半導体レーザー-励起YAGレーザーの波長を可視から赤外域まで広い範囲で制御できることが実証された。

レーザーアブレーションや液相成長法(LPE)による薄膜結晶作製の進展も大きく、LiNbO<sub>3</sub>光デバイスも新たなステージに飛躍できるための基礎技術が固まりつつあるように思える。レーザーアブレーションによりサファイア基板のLiNbO<sub>3</sub>薄膜光導波路の作製が行われ、光導波および変調特性の評価が行われた。Li/Nb=2.1のLiリッチLiNbO<sub>3</sub>ターゲットにArFエキシマレーザー(パルス幅10 ns, 繰返し10 Hz)を照射することにより、基板温度650°Cで光伝搬可能な結晶薄膜が得られ

ており、導波損失は5 dB/cmと大きいポッケルス定数は $r_{33}=4.9\ \text{pm/V}$ とバルク結晶のほぼ1/6が得られた<sup>1</sup>。LiTaO<sub>3</sub>基板に対してはC軸配向性のよい伝搬損失3 dB/cm、 $r_{33}=8\ \text{pm/V}$ の結晶薄膜が得られており、組成の最適制御により今後さらに特性向上が期待される。

従来からLPE法によるLiNbO<sub>3</sub>結晶薄膜作製が行われてきたが、最近LPEの改良によりバルク結晶より結晶性のよいLiNbO<sub>3</sub>単結晶薄膜が得られることが報告された<sup>1</sup>。LiNbO<sub>3</sub>を基板に用いたホモエピタキシーにおいて、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>系フラックスを用いた固液共存状態からLPE成長させると、XRC(x-ray rocking curve)で6秒以下の高品質なLiNbO<sub>3</sub>単結晶薄膜(膜厚 $30\ \mu\text{m}$ )が得られた。本方法を用いて、Li(NbTa)O<sub>3</sub>単結晶薄膜の成長も可能であり、LiNbO<sub>3</sub>基板/Li(NbTa)O<sub>3</sub>クラッド層/LiNbO<sub>3</sub>光導波路の多層エピタキシャル成長の報告も行われた<sup>2</sup>。

光導波路デバイスの比較的新しい応用として、レーザー走査顕微鏡とLiNbO<sub>3</sub>光導波路を組み合わせてレーザー走査モード干渉顕微鏡の開発が行われた<sup>1</sup>。受光部にダブルモード領域を備えた光導波路デバイスを配置し、0次および1次モードの干渉を利用して被検物体の微分像を得るものであり、シングルモードTi拡散光導波路とダブルモードプロトン交換光導波路を組み合わせた3分岐デバイスを用いて、電気光学効果により0次および1次モード間の結合長の調整を行っており、光集積機能デバイスとして今後の進展が期待される。

また、光通信とも多少関連するが、LiNbO<sub>3</sub>光導波路を用いた光電界センサー<sup>14</sup>の開発が行われた。LiNbO<sub>3</sub>光導波路を用いたマッハツェンダー形光変調器の電極にアンテナを取り付け、放送用電波信号を光信号に変換するもので、変調帯域よりも変調感度が優先するために特殊な電極構造をとっている。本デバイスは、光ファイバーと組み合わせて落雷等の電氣的障害の大きい山頂の放送中継局の無電源受信システム化へのメリットが大きく、また事故検出システムとしても有望視されており、LiNbO<sub>3</sub>光導波路デバイスの新たな応用として今後の展開が期待される。(谷内)

## 8. 分 光

東北大理 寺前紀夫

### 8.1 線形分光法

赤外分光法を始めとする吸収分光法やラマン分光法、ホトルミネッセンスなどの発光分光法は種々の材料の評

価のみならず製造過程をその場 (*in-situ*) でモニターする手段として用いられている。

赤外分光法ではフーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 計が用いられ、測定法としては反射吸収 (RAS) 法が多用されている。FT-IR の基本光学系であるマイケルソン干渉計は今から 100 年以上も前に作製されたものであるがコンピューターの発展とともに 1970 年代から広く普及し始めた。マイケルソン干渉計の問題点は可動鏡の移動時の傾きで、この問題を解決する手段としてコーナーキューブ鏡の利用やダイナミックアライメント法が取り入れられている。新しい干渉光学系として、4 枚の反射鏡で構成される光学系を回転して光路差を作る方法が提案され、干渉計の小型化、安定性の向上に有利となるとの報告がある<sup>h-27</sup>。環境計測などで、遠隔操作などの研究室レベルよりも悪い環境下での利用を目的として、従来の可動鏡の直線的移動を回転運動に置き換えた回転反射鏡によるマイケルソン干渉計の測定原理と環境計測への応用が報告されている<sup>o-3</sup>。また、光路すべてにシングルモードの光ファイバーを利用し、2~4  $\mu\text{m}$  領域で InSb 検出器を用いた干渉計の理論的、実験的検討も報告されている<sup>h-21</sup>。面精度  $\lambda/200$  の ZnSe を基板とするエタロンで、間隙を精密可変としたファブリー・ペロー干渉計についての理論とプロトタイプ装置による  $\text{N}_2\text{O}$  気体の Q-枝の測定データが報告されている<sup>h-24</sup>。2次元相関分光法は FT-IR で、2つのスペクトルの相関をとることにより行われ、外部摂動によるスペクトル変化の解析が容易な形で与えられる。この方法の基礎的側面の解説と近赤外領域への応用<sup>o-5</sup>、FT-ラマンへの適用<sup>o-1</sup>が報告されている。マイケルソン型 FT-IR と異なり、三角光路コモンパスのような干渉計でアレイ検出器で干渉縞を測定するマルチチャンネルフーリエ分光計は機械的駆動部分がなくスループットも高い特徴を備えている。これに関して、2次元撮像管である CCD 検出器を用いて干渉縞情報の他にもうひとつの次元として空間あるいは時間情報をとる 2次元マルチチャンネルフーリエ分光計が提案されている<sup>o-3</sup>。また、マイクロ波領域でのフーリエ分光法の特徴について解説が書かれている<sup>o-3</sup>。

RAS 測定では基板の薄膜の配向性に関する情報が得られる。偏光変調の利用により配向基のみの情報も取り出せ、アモルファスシリコン上に MO-CVD で Al 膜を作製する過程をモニターした結果が報告されている<sup>d-68</sup>。窒化チタン上への MO-CVD 薄膜の配向性<sup>c-5A</sup>の検討など多くの研究がある。塩素ガスプラズマ中での Si のエッチングによる反応生成物の解析への応用では、

気体中には  $\text{SiCl}_4$  のみが測定されたのに対して基板上では  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiCl}_x$  ( $x=1\sim 3$ ),  $\text{SiO}$  が生成物として確認されている<sup>c-7A</sup>。顕微 RAS により材料中の配向性の空間分布を検討でき、コロナポーリング処理したポリウレア薄膜で針状電極の位置からの配向性の変化の状態をマッピングした報告がある<sup>d-1A</sup>。

ラマン分光法も材料解析によく利用されるが、その基礎<sup>o-1,2</sup>と応用<sup>o-3</sup>の解説記事がある。ラマンでは紫外または可視光のレーザーがよく利用され、顕微測定での空間分解能は赤外分光法に比較して約 1 桁高い。結晶の方位解析や材料中の残留ストレスの解析へ応用されているが、レーザーアブレーションにより作製した  $\text{CuInSe}_2$  の薄膜についてストレス解析が行われた<sup>d-1B</sup>。また CVD 法により作製した  $\text{SiO}_2$  薄膜の評価が行われている<sup>d-8B</sup>が、赤外法に比較して低波数側の測定が容易というラマン法の特徴は重原子の関与する振動や格子振動の解析時に有利である。

## 8.2 非線形分光法

非線形材料の特性を調べる手段としてレーザーの利用が一般的であるが、和周波発生 (SFG) や第二高調波発生 (SHG) は反転対称をもたない表面、界面の計測手段としてその利用が広がりがつつある。GaAs 表面の評価への SHG の利用の研究紹介がある<sup>b-0</sup>。Si (111) 上の酸化膜について厚さ (2~300nm) 依存性が検討され、s 偏光入射では多重反射の影響で SHG が大きくなることが示された<sup>f-4</sup>。また、Si (100) 上に CVD により  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  膜をエピタキシャル成長させてバンドギャップを変化させて共鳴 SHG で検討する<sup>d-1B</sup> ことも行われている。

SHG はバルク非線形結晶の評価にも用いられ、レーザー析出法により作製した  $\text{BaTiO}_3$  の評価<sup>d-11B</sup> など多くの研究が行われている。ゾルゲル法、溶融法、蒸着法で作製された  $\text{SiO}_2$  ガラスについて OH 濃度、構造欠陥、ポーリング処理と SHG 測定による非線形光学特性の検討が行われ OH 濃度の増大に依存して SHG が大きくなることが報告されている<sup>f-4</sup>。

## 8.3 時間分解分光法

ラマン分光法、FT-IR を用いた時間分解測定は化学結合に関する直接的情報が得られるので有用である。ピコ秒時間分解ラマン分光法については測定時の問題点などをわかりやすく説明した解説<sup>o-2</sup>がある。FT-IR では高速走査型、ステップ走査型干渉計の利用による時間分解測定が行われているが、後者の干渉計を用いて 40ns~100ps の時間分解能をもつ結果が報告されてい



る<sup>a-9</sup>。

コヒーレントなパルス光源として、チタンサファイアレーザーのように高繰返しのレーザーによりピコ秒、フェムト秒領域の測定が容易となり、広く利用され始めている。現在の課題のひとつに赤外領域で利用しやすいレーザーの開発がある。そのような開発の試みのひとつにエネルギーは $10^{-12}$  Jと弱いものの四波混合を利用して2~3 psのパルス幅で近赤外から $800\text{ cm}^{-1}$ までの波数領域での発振が報告されている<sup>j-121-1,2,3</sup>。パルスレーザーを用いる時間分解測定ではポンププローブ法がよく利用される。自由電子レーザーとTunamiの同期を3 ps以内のジッターに抑えた報告がある<sup>j-115-1,2</sup>。時間分解能100 fsの近紫外-可視-近赤外領域の過渡吸収測定、時間分解ラマン利得スペクトル測定、時間分解周波数領域干渉分光測定<sup>9-15</sup>について測定系と典型的なスペクトルが報告されている<sup>b-1</sup>。

#### 8.4 その他

共焦点顕微分光法は蛍光測定で実際的に利用が行われているが、ニアフィールド顕微鏡および顕微分光法は今後ますます発展する領域と考えられる。これと関連して、単一分子の計測は固体中のローカルな分子間相互作用を直接的に計測する手段<sup>j-114-1,2</sup>としてその重要性が認識されることになるとと思われる。

### 9. レーザー

早大理工 宇高勝之  
九大工 岡田龍雄

#### 9.1 半導体レーザー

1995年の半導体レーザー分野におけるトピックス的な進展および動向として、暮れにGaN系による青色レーザーの室温発振が実現されたこと、また、光加入者系・光インターコネクション用 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯レーザーの開発に大いに加速がかかっていることなどが挙げられよう。特に、前者はエポックメイキングな成果としてそのニュースがインターネットで関係者に配信された。そのほか、面発光レーザーの光増幅素子化などの試みや、超高速パルス列レーザー、 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯波長可変レーザー、さらに量子ドットレーザーなどの研究に進展が得られ、さらに、赤色レーザー、II-VI族青緑色レーザー、10 Gb/s伝送用集積化光源などの分野において地道な検討が進められたりした。今年も例年と同様に、以下に波長別に進展・動向を紹介する。

##### 9.1.1 青緑色レーザー

光ディスクおよびディスプレイ用光源として、今年も

II-VI族系およびGaN系それぞれの材料面から研究が活発に行われた。特に、GaN系材料は、InGaN/AlGaNGダブルヘテロ構造で1993年に青色(波長450 nm)、1994年に青緑色(500 nm)に引き続き、今年緑色(525 nm) LED (light emitting diode) が商品化されるとともに、信号機やフルカラーディスプレイへと実用化された。これらのLEDが数カンデラと高輝度であり、転位密度が約 $10^{12}\text{ cm}^{-2}$ もあるにもかかわらず信頼性への問題はなさそうであることから注入型レーザー発振への期待が高まっていたが、ついに12月青紫色での室温パルス発振が報じられた<sup>22</sup>。量子井戸構造を有し、波長410 nm、しきい値電流密度 $4\text{ kA/cm}^2$ 、出力約10 mWが得られた。基板はサファイアであるが、その他レーザー構造の詳細は不明である。今後室温連続発振、さらに量子効率の落ちる緑域でのレーザー発振などが期待される。また、共振器形成の容易なへき開性のある基板として6H-SiCや(111) MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>上への成長などが試みられた<sup>2</sup>。

他方、II-VI族のZnCdSe/MgZnSSe系半導体レーザーの最大の課題は信頼性であろう。現在青緑色で約1時間の室温連続動作が得られているが、劣化の原因と考えられる基板界面からの積層欠陥の振舞いなどの解明が詳細に行われた<sup>9</sup>。また、青色レーザー化に向けて不可欠なMgZnSSeクラッド層のワイドギャップ化にともなうp型ドーピングについても、 $E_g\sim 3.0\text{ eV}$ で $p\sim 1\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ が得られるようになってきた<sup>9</sup>。オーミック電極については、コンタクト層を超格子にすることによるpドーピングの向上<sup>9</sup>、さらにHgSeの採用によるしきい値電圧低下<sup>9</sup>などが試みられている。また、レーザーの空白波長帯である550~630 nm帯発振を目指してInP基板上のZnCdSe/MgZnCdSeレーザーが試み始められた<sup>23</sup>。

##### 9.1.2 赤色レーザー

光ディスクのピックアップ用としてAlGaInP系レーザーの研究が今年も盛んに行われた。特に、低雑音化を図る上で装置構成の簡略化が可能な、可飽和吸収領域をストライプに沿って設けた自励発振型レーザーにおいて雑音特性向上が図られた。活性層に多重量子井戸を導入し、端面コートを実施効屈折率導波路構造レーザーにより18 mWまでの自励発振、最大出力120 mW、相対雑音強度-130 dB/Hz以下という高出力・低雑音特性が得られた<sup>2</sup>。さらに、温度特性についても高ドーピング可飽和吸収層を用いることにより20~60°Cにわたって-135 dB/Hz以下という低雑音特性が報告された<sup>2</sup>。

### 9.1.3 1.3 $\mu\text{m}$ 帯レーザー

光インターコネクションもしくは光加入者系が具体性を帯びてきたことから、光源として1.3  $\mu\text{m}$  帯レーザーの研究が種々の面から盛んに行われた。この波長帯においても、低しきい値化などの観点から活性層への歪量子井戸の導入が常識となりつつあり、圧縮歪み、引張歪み、歪み補償、変調ドーブなどの最適化がInGaAsPレーザーで行われたが、他方、実用面で問題となる温度特性の改善策として種々の材料が検討された。いずれも伝導帯のバンド不連続値を300 meV以上と大きくすることを目的としたもので、InGaAs基板上のInGaAs/InGaAlAs歪量子井戸、GaAs基板上のInGaAs/InGaP歪量子井戸、GaInNAs/AlGaAs量子井戸、InP基板上のInAsP/InGaAsP歪量子井戸などの各レーザーで、特に最後の構造で160°Cでの連続発振が得られた<sup>1</sup>。また、低コスト化に向けた課題についての研究が活発に行われた。その一つはファイバーとの光結合の簡略化に関するものであり、スポットサイズ変換機構付きレーザーが各所で研究された。基本的にはいずれもテーパー状導波路の導入であり、水平方向はもとより、従来問題であった垂直方向も10°以下という低放射角、分散シフトファイバーへの結合損失約2 dB、結合損失1 dBのアラインメント許容値が約2  $\mu\text{m}$  という値が得られている<sup>24</sup>。もう一つの課題は量産化であり、MO-VPE成長やドライエッチング技術の向上により、2インチInP基板をそのまま用いたスポットサイズ変換機構付き歪量子井戸レーザーの作製が報告された<sup>24</sup>。まだ基礎的な評価の段階であるが90%程度の歩留りが得られている。また、部品実装の手間を省き、低コスト化を図るべくレーザー、受光器、WDMカプラーがモノリシックに集積された双方向WDM通信用光集積素子が選択MO-VPE技術を用いて作製された<sup>24</sup>。これまで高級・高価のイメージが強かった光通信用半導体レーザーも量産・低価格の時代到来の幕開けを印象づけた。

### 9.1.4 1.5 $\mu\text{m}$ 帯レーザー

この波長帯では、主に超高速・広帯域光通信用光源への適用の観点からの研究が引き続き進められた。超高速パルス列発生では、電気吸収型変調器集積レーザーでは繰返し周波数20 GHz<sup>1</sup>が、またいっそうの高周波化に有効な方法として非対称可飽和吸収構造を用いた受動モード同期で基本周波数の7倍に相当する繰返し380 GHz、パルス幅0.72 ps<sup>1</sup>が報告された。また、AlGaAs系レーザーではあるが、外部回折格子による2波長発振のビートを利用して、0.15~7 THzの繰返し周波数可

変および波長可変な超短パルスレーザーが報告され<sup>1-11</sup>、新しいテラヘルツ光パルス列発生方法として、今後コントラストの向上や1.5  $\mu\text{m}$  帯への適用が期待される。他方、波長多重通信用光源として、波長可変レーザーの特性向上が図られた。DBR (distributed Bragg reflector) 領域の電極を楕形にした構造で4.6 nmの波長域でサイドモード抑圧比30 dB以上の安定な単一波長連続可変特性が得られた<sup>24</sup>。単一波長の安定性や耐戻り光特性に優れた利得結合型DFB (distributed feed back) レーザーも検討が進められた<sup>1</sup>。そのほか、レーザー計測用光源として目に安全な1.5  $\mu\text{m}$  帯高出力レーザーの研究が進められ、4段スタック構造で55 Wの高い光パルス出力が得られた<sup>1</sup>。

### 9.1.5 その他

光並列インターコネクション用光源として面発光レーザーの研究も引き続き活発であった。種々の波長域で反射器特性、低しきい値化、放熱特性、偏波特性など多岐の項目にわたり検討が行われたが、レーザーとしてのみならず新たに面型光増幅器としての適用が試みられた<sup>1</sup>。まだ増幅を確認した段階であるが、2次元アレイ型光情報処理への発展が期待される。また、いっそうの低しきい値化を目指してInGaAs/GaAs量子細線構造を導入した面発光レーザーやCdZnSe青色面発光レーザーなどが果敢に試みられた<sup>2</sup>。低次元量子井戸レーザーとして、成長時の自己組織化を利用したInGaAs量子ドットレーザーで80 Kではあるが初めてレーザー発振が得られた<sup>2</sup>。面被覆率は10%であり、今後体積充填率の向上による室温発振が期待される。

そのほか、数多くの進展がみられたが、紙面の都合で割愛させていただくことをご容赦願いたい。(宇高)

## 9.2 気体・固体レーザー

気体レーザーは最近の固体化の流れに押されて応用物理学講演会やCLEOなどでも発表は少なくなっている。そんな中、KrFエキシマレーザーリソグラフィが本格的に導入されようとしているのは明るい話題である。今後ArFレーザーリソグラフィの実用化研究が活発になると思われる。高出力CO<sub>2</sub>レーザーでも、共振器ミラーに空間変調特性をもつコーティングを導入するなど、ビーム質の高品位化の努力が続けられている<sup>1</sup>。

固体レーザーでは、特に極短パルスの発生とOPO (optical parametric oscillator) で進展が著しい<sup>1-11</sup>。極短パルスの発生に関しては、チタンサファイアレーザーで8 fsが<sup>11-6</sup>、半導体レーザー励起全固体Cr:LiSAFレーザーではカーレンズモードロックにより18 fsが発

振器から直接得られている<sup>25</sup>。その第2高調波フェムト秒チタンサファイアによる同期励起によるOPOにより、紫外から中赤外域でフェムト秒パルスの発生が可能になった。国内でも「フェムト秒プロジェクト」がスタートし、応用も含めて今後の進展が期待される。

固体レーザーによる短パルス発生技術の進展に伴う大きな成果の一つはチャープパルス増幅によるテラトップTWレーザーの出現である。出力パワーでは繰返し10 Hzで数TW<sup>-1</sup>、繰返しの遅いものでは10 TW級が得られた<sup>1-10</sup>。一方、1 kHzの高繰返しでも0.05 TWが可能になった<sup>1-19</sup>。いずれ、kHz、TWのテラトップレーザーの実現も速くないと思われる。この種のレーザーを利用すれば実用性の高いテラトップX線レーザーを実現できよう<sup>26</sup>。

半導体レーザー励起のQスイッチやcw動作に関しては、Nd:YAGレーザー、アイセーフレーザーを中心に、出力だけでなくビームの高品位化、マイクロチップ化などを中心に国内外で活発な研究が続いている。この種のレーザーは、半導体レーザー、結晶、光学系のアセンブルに当たって原理に立ち返った工夫がないと性能改善は難しい。国内でも、励起配置などに独自の考察に基づく装置の報告がみられた<sup>2</sup>。市販品でも、従来のフラッシュランプ励起QスイッチNd:YAGやArイオンレーザーに匹敵するものが得られるようになってきた。

このほかにも、筆者が直接の興味をもっている波長可変固体レーザーではCr:LiSAFレーザーで全固体シングルモード化や、OPOのシングルモード化のための共振器構成が種々報告された。OPOではバルクLiNbO<sub>3</sub>結晶の疑似位相整合による動作も報告されたが、同調には問題がある。波長可変レーザーでも固体化の進展は目覚ましいが、構成はいまだ色素レーザーのそれと同じである。媒質の固体化とともに、共振器の固体化はできないものであろうか。

固体レーザーは大部分が近赤外域での発振であるので、波長変換技術の開発が不可欠である。波長変換材料に関して阪大グループにより開発された紫外光発生用CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>結晶は、わが国で開発された数少ない非線形光学結晶のひとつである<sup>4-1</sup>。深紫外域においてはβ-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>を上回る変換効率が得られるということであり、固体化深紫外レーザー光源実用化へ向けて今後の発展が期待される。(岡田)

## 10. 視覚光学

京大工 石田泰一郎

視覚光学の研究分野は、ここ数年、活況を呈している。1995年もその傾向に変わりはなく、国内外で多くの研究が発表された。視覚光学が、光学・映像技術の基礎学問であり、また、科学のフロンティアである脳研究とも深く関わる分野であることを考えると、研究が活発であって不思議ではない。それに加えて、画像情報が社会の様々な場面で利用されるようになったこと、視覚の初期過程の研究が通常科学的に行われるようになったこと、研究者の層が厚くなってきたことなどが、当分野の活性化に寄与していると思われる。

さて、このような状況における1995年の視覚光学であるが、印象に残ったことは仮想現実感技術が大きなテーマとして取り上げられたことである。立体・奥行き知覚についても、より進んだ問題が活発に検討されていた。また、明るさや色に関する研究も、より一般的な視環境に対応すべく推進された。以下、簡単に紹介する。

### 10.1 仮想現実感技術

視覚研究者にとって、仮想現実感技術の原理そのものは取り立てて新しいものではない。ただし、本格的に動き出した仮想現実感技術は2つの意味で視覚光学分野にインパクトを与える可能性がある。ひとつは、この技術をより優れたものとするために、視覚光学の専門家が貢献するチャンスが生じたことである。もうひとつは、仮想現実感技術を視覚光学研究の道具とすることである。

1995年の視覚光学分野では、日本光学会視覚研究グループが共催する日本視覚学会の夏期研究会で、「バーチャリアリティーの動向と視覚研究」<sup>27</sup>と題されたシンポジウムがもたれたのははじめ、この技術に関する研究が目をついた。例えば、仮想照明空間における物体の影の認識と視覚情報の効果に関する研究<sup>3</sup>では、本格的な仮想現実感システムを利用して、能動的な影の変化を人間がどのように認識しているかについて検討がなされた。また、視点追従型の画像表示システムを想定して、奥行き方向の視点移動に伴う対象物の見えの変化(ボケ)が、認識される空間の現実感に与える効果なども調べられている<sup>27</sup>。一方、ヘッドマウントディスプレイの装着によって、疲労や頭痛、不快感といった症状が出るのが指摘されているが、眼光学の立場からこのような問題が検討された<sup>3,27</sup>。今後、注意を要する問題である。

### 10.2 立体・奥行き知覚

立体・奥行き知覚の研究は、人間の空間認識機構を探

求する基礎研究としての側面と、立体映像システム開発への応用という側面をもち、いずれも重要性が高い。しかしなんといいても、このテーマが研究者を引きつけるのは、ある意味で立体視ほど視知覚の不思議さや面白さを体験させてくれるものはないからではないだろうか。

現在、実用となっているステレオ立体画像システムの大部分は、両眼水平視差を利用しているが、現実には水平視差以外の視差も存在する。それについて両眼立体視における垂直剪断視差の役割が研究された<sup>27</sup>。視差以外の画像性の奥行き手がかりについても、陰影からの奥行き知覚と画像の空間周波数との関係<sup>3</sup>や、奥行き情報と両眼視差との相互作用についての研究<sup>2</sup>が報告された。また、自己運動による奥行き知覚に関しても、前後方向の頭部運動に伴う奥行き知覚についての検討<sup>3</sup>がなされた。今後は、このような研究によって蓄積された知見を、立体映像システムに実装してゆくための研究も必要となるだろう。

### 10.3 明るさ・色

明るさや色の研究でも、より一般的な視環境を想定した研究が増えている。当然、色のモード、複数色の存在、照明の効果、眼の順応変化など様々な要因を考慮する必要が生じる。

色のモードに関して、色度図の広い領域にわたる色光について、光源色・表面色のモード変化が測定され、総合的なデータから見えのモードを決める要因が検討されている<sup>3</sup>。測光システムに関しては、国際照明委員会(CIE)で検討されている新しい測光システムのための明るさモデルが、均等色空間全域に分布する色光の明るさデータに基づいて比較検討された<sup>3</sup>。また、将来のより汎用的な測光システムの開発を目指して、周辺光の影響も取り入れた色光の見えの定式化が研究された<sup>27</sup>。照明の変化と視覚系の順応に関しては、異なる照明下における物体の色の知覚を、見かけの色と本来の色という判断基準で測定する研究がなされた<sup>1</sup>。そのデータに基づいて、色の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ている。また、全照度レベルでの物体色の明るさ尺度の統一化が検討され、そのためには隣接した照度レベル間における逐次比較法が適していることが示された<sup>3</sup>。今後、全照度レベルに対応する明るさ測光システム開発への糸口となることが期待される。

### 10.4 その他

運動知覚や眼球運動に関する研究も、これまでどおり多くみられた。特に運動知覚は心理系の研究者を中心にかなり詳細な検討が行われている。また、記憶や注意と

いった問題も、新たな観点から取り上げられた。

さらに、視環境を人間の視覚特性から評価し、よりよい視環境を創出しようとする研究も芽生えつつある。ひとつは、照明認識視空間という概念によって、照明空間の認識を評価・検討する研究である<sup>2-7</sup>。あるいは一般の光景のような複雑な色彩環境における視覚探索の定量化を試みた研究も報告された<sup>27</sup>。今後、このような研究がどのように発展するか注視しよう。

### 10.5 まとめ

視覚光学の研究分野は、人間の視覚メカニズムの解明というサイエンスとしての貢献と、画像技術、測光システム、視環境といった応用分野へのエンジニアリングとしての貢献が求められており、また、そのための力も有していると思う。サイエンスとしての視覚光学研究では、すべての通常科学がそうであるように、領域の細分化と研究の精緻化が進行している。1995年もそうであったが、ここしばらくは研究の加速と新たな知見の蓄積が進行するだろう。それと同時に、新たな研究パラダイムの模索が試みられるはずである。応用研究としては、1995年は、測光システムに関して着実な進展がみられたが、立体視や運動視からの出力はやや物足りなかった印象を受ける。今後、関連する分野の研究者・技術者とも連携して、応用研究にも積極的に取り組むことが望まれる。それがまた、新たな基礎研究の種にもなるはずである。

これから新しい世紀に向けて、視覚光学分野が、視覚メカニズムの解明に向かう流れと、視覚関連工学への応用に向けた流れを、互いに絡ませながらさらに力強いものにして、学際的な大きな渦に成長してゆくことを期待する。

## 11. 光源・測光・照明

松下電器産業 武内徹二

今年度の光源・測光・照明の分野では、照明学会の全国大会や支部大会に加え、第7回光源シンポジウム、第23回国際照明委員会といった3年ないし4年に一度開催される、この分野での重要な国際会議が開催された。これらの大会での研究発表をもとに、1995年度の動向を述べる。

### 11.1 光源

この分野の研究に共通する目標は、省エネルギーと省資源であり、電球、蛍光灯、high intensity discharge (HID) ランプのそれぞれの分野で、より効率の高い、省資源の光源や照明器具の研究が続けられている。

電球では、空洞量子力学の理論を応用し、フィラメントの表面に微細な空洞を施すことによって赤外線放射を抑制して入力電力の可視放射への変換効率を高める電球の研究が試みられた<sup>28</sup>。現在までのところでは必ずしも成功したとはいえないが、白熱電球の大幅な効率改善の方法として期待される。

蛍光灯では、省エネを目的に電球代替の蛍光ランプの開発・商品化が進められているが、これらの電球代替の蛍光ランプのさらなる小形化、高効率化の研究が報告された。また、従来これらの蛍光ランプで問題とされてきた点灯直後に暗いという問題を改善するため、光束の立ち上がり特性の改善が進められた<sup>28</sup>。また、蛍光灯の効率改善のために普及しつつあるインバーター回路の特性改善や回路の簡易化が研究された<sup>28</sup>。

HIDランプでは、高光出力を狙った2 kW、3 kWといった高ワットの高圧ナトリウムランプやメタルハライドランプの研究が、一方では、これらと対極的な小形のメタルハライドランプについては始動および再始動特性の改善が進められた<sup>28</sup>。また、無電極のHIDランプの始動特性を改善するための誘導コイルや点灯回路が検討された<sup>28</sup>。

この他、一般照明用以外の分野では、近年増加するディスプレイのバックライト用の光源に関しては、ノート形パソコン用の冷陰極蛍光ランプやその点灯回路の高効率化や低電力化の研究が進められ、また、液晶ディスプレイ用のメタルハライドランプの長寿命化、高輝度化の研究が続けられている。

## 11.2 測 光

各国の光の標準を担当する研究機関において高精度な測光標準の確立を目的とし、極低温放射計が開発され、それによる絶対分光応答度の測定が検討された<sup>28</sup>。また、紫外波長域での放射測定に関して、波長依存性の少ない検出器の研究や、検出器の特性評価、またシリコンフォトダイオードを利用した受光標準の検討が進められた<sup>28</sup>。

また、応用的な研究として、写真画像を用いた輝度分布の計測に対する高輝度光源の影響や輝度の解析方法の研究や、CCDカメラの画像を用いた輝度分布の計測やそのための校正方法が検討された<sup>28</sup>。

## 11.3 照 明

近年、明所視や薄明視での輝度と明るさの違いが研究されているが、これに関して、色度座標全域での輝度と明るさの差異や、縞状パターンの刺激を使ったときの薄明視領域での分光感度特性が求められたり、さらに、明

さ感覚のメカニズムの研究が続けられている。また、これらの研究をもとに、明るさ感覚を数的に表す方法として、「等価輝度」の概念とその求め方が検討された。

また、目の輝度順応の影響を考慮して対象物の明るさを数量化したブライツネスの計測方法とその実用性が検討された。さらに、このブライツネスの計測を応用して、トンネル入口部での先行車の視認性を改善するトンネル照明方式が研究された<sup>28</sup>。

色の見えに関する研究としては、これまでに報告されている色知覚モデルを使って、様々な色の見えの現象の解析が続けられている。また、カテゴリカル・カラーネーミング法を使って視環境内の色の概要を把握して視環境を評価・解析する研究が進められた<sup>28</sup>。また、国際照明委員会で光源の演色評価方法の改正を検討しており、これに関連して、検討中の方法による演色評価の結果が報告された<sup>28</sup>。

照明環境全体に関する研究として、室内空間の明るさの印象が光源の輝度や大きさによって、また光源の光色によって影響されることが研究された<sup>28</sup>。また、物体の色の認識が、人間がその物体がどのような光の照明空間に置かれていると認識しているかによって影響されることが研究された。また、今後の照明の重要課題である高齢者に対する照明について、視環境内でのグレアの軽減を目的とした視環境内の輝度分布の解析や、高齢者に適した配色、夜間の通路の照明要件などの検討が進められた。

一方、近年、照明の評価に心理的評価に加え、様々な生理的反応の指標を用いる研究が増加しつつある。オフィス照明の評価に対して、様々な作業面照度の条件において脳波や心拍数などの生理量が測定され、それらの測定結果、および作業能率や主観評価の結果をもとに適切な作業環境を求める研究が進められた<sup>28</sup>。また、集中度に関係する脳波の指標を応用して作業者が集中する光環境の条件が検討された<sup>28</sup>。

照明設計の分野では、什器がある場合の精度の高い照度の計算方法、球面照度の算出方法、また、投光器の最適照射条件を計算解析するシステムなどが検討された<sup>28</sup>。また、昼光によるオフィス内の照度の測定や予測方法の研究が引き続き進められている。

## 12. 光学関連の規格

日本板硝子 西澤敏一

光学関連機器の国際標準化については、主としてISO (International Organization for Standardization) で扱

われている。TC 172-SC 9がその中心の委員会であり、正式な名称は Laser and Laser Related Equipment と呼ばれる。SC 9には、7つのワーキンググループがありレーザーに関する光学素子の標準化作業を実施している。1991年SC 9の国際会議が神戸で開催され、その後パリ、ミラノ、北京、ツーソンと毎年各国が持ち回りで主催している。1995年度は、6月5日から8日まで米国ツーソンで開催され、各種の標準文書が議論された。詳しい内容については、光産業技術振興協会が発行している光標準化ニュース第43号に詳しく紹介されており参照されたい。

中でも日本が convener (主査：筆者) をしている WG 7について最近の活動を紹介しておきたい。この WG は、非レーザーの電子・光システム (electrooptical systems other than lasers) を扱い、特に従来の光学素子と異なる新しい話題を積極的に取り上げることがその主旨である。

WG 7は、1991年の神戸会議から本格的な活動が始まり光集積回路 (integrated optics)、マイクロレンズアレイおよび干渉計の3つのプロジェクトが取り上げられた。その後干渉計はWG 1に移り現在最初の2つの標準化作業が継続している。いずれのトピックスもオプトエレクトロニクスの専門分野に深く関係しており、各専門学会に隣接して開かれることになっている。

1995年度は2月末に米国サンディエゴで開催された OFC (Optical Fiber Conference) '95に併催の形で会議を行い、OFC 出席者の中から何人かの専門家の参加を求め光集積回路の議論を深めたのが効果があった。

光集積回路については、ドイツ国内の DIN (Deutsches Institute für Normung e. v.) で審議されたものを基本に提案され、ようやく用語の定義 (Part 1) の議論が煮詰まり DIS (Draft of International Standard) に向けての作業が始まろうとしている。IEC (International Electrotechnical Commission) がどちらかというデバイスや部品として標準化を進めているのに対し、ISO では光導波路回路もレンズやプリズムのように1つの光学素子として定義をしようとしている。光通信システム上の分岐回路がその主たる用途ではあるが、将来センサーなど光学素子としての広い応用を前提に今から互換性を確保しておこうというのがその主旨である。

マイクロレンズアレイは日本からの提案で英国の NPL (国立物理研究所) の支持も受けてミラノ会議から議論をしているトピックスである。1995年10月に広島で開催された MOC (Microoptics Conference) に隣接

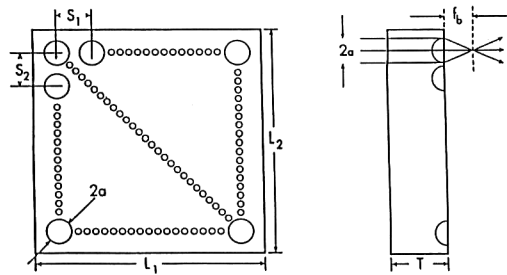


図1 マイクロレンズアレイの構造パラメーター。

して WG 7 会議を開き光導波路とともにマイクロレンズアレイの標準化の議論も行った。

マイクロレンズアレイは、欧州で盛んに研究されており、3D 画像や共焦点系の計測システムへの応用で用途が広がっているという。単独のレンズでは十分定義されているが、2次元にレンズが配列しているレンズアレイでは、レンズの間隔、平面度、基板厚み、レンズの充填度 (密度) などの物理的な定義および焦点距離のばらつき、隣接レンズからのクロストーク、基板からのフレアーなどの光学的な定義、また均一屈折率型、分布屈折率型、および回折型などの構造的な分類などレンズアレイ独自の特徴をもっている。今後並列光学系の応用の進展をにらんでレンズアレイの互換性や接続性を確保するための標準化の必要性が認識されてきている (図 1)。

また今回の広島会議で新しい提案として回折光学素子 (diffractive optical element) が議論された。従来のホログラフィック素子と最近の話題であるバイナリー光学素子を包含した概念で、そろそろ用語や定義の標準化を進める機運となってきたことがわかる。

以上3つのトピックスは、1996年5月に開催される英国グラスゴーでの会議のテーマとなり、標準化が進むであろうと期待している。

MOC '95 広島会議で標準化に関する特別セッションが持たれた。標準化が遅れたために困ったことは、標準化はどのタイミングで行うべきか、また標準化は産業を活性化するかなどの課題でパネル討論を行った。

オプトエレクトロニクスの世界は、中小ベンチャーの事業機会が多く提供されており、種々の新製品が日常的に出てきている。したがって互換性、整合性、用語の使い方や定義などでユーザーが混乱を起こしているケースが多いことがパネラーから指摘された。また標準化のタイミングとしては、革新プロセスがスローダウンしたときがよいとのことであった。すなわち初期不良が解決され、信頼性が確保された段階でまず最初の標準化を開始

するのが望ましいというのである。また新規製品やアイデアの進展を阻害しないよう考慮しつつ以下の項目の標準化は産業の進歩を促進するはずであるとの結論であった。すなわち用語、モードの定義、互換性の確保、特性の測定法とその信頼性試験法の確立である。

そのほか、光ディスクの標準化の動きも変化が現れてきた。光産業技術振興協会内に設置されている光ディスク標準化委員会（委員長：板生清氏）では、130 mm、90mmの追記型および書換え型光ディスクの標準化が一段落したのに続いて、新しく市場に現れたPC（相変化型媒体）、そして従来のMO（magneto optical memory）およびCD-ROM（read only memory）の分科会を作り標準化活動を展開している。現在MOに関して130 mm、1.3 GbのJIS化が進んでいる。また現在話題となっているDVD（digital video disc）についてもAVからROM、RAM（random access memory）まで広い応用が展望されており、MO、PC（phase change memory）を軸に調査研究が始まっている。またDVDに関しては、デファクトスタンダードをJIS化する検討も進んでいる。

また同協会内に設置されている光ハンディーメモリー標準化委員会では、現在健康・福祉情報システムなどで一部実用化されている光カードに対する標準化活動も地道に進められている。

最後に光学における最近の標準化の動きは、古典光学素子からレーザーを中心とした光学素子に完全に変わってきている。したがって、従来のようにISOで閉じた規格は存在し得ずIECなどの電気機器における規格との整合性をとる必要がきわめて重要となってきた。また光ディスクなどのように進歩の激しい分野においては、デファクトスタンダードの考え方も取り入れざるを得ない状況となってきている。標準化活動は、多様なアイデアの創造をある程度制限する反面、産業の活性化と普及に多大の貢献をする。したがって、何時のタイミングにどのような規格や標準を作るかが課題となっており、光学の分野も例外ではない。光学分野における標準化の動きは、現在光産業技術振興協会の各種委員会に集約されており、素子・部品、システムなどを事業として扱う技術者は常に関心をもってフォローをしてゆく必要がある。