

## 1993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	European Research Conference on Quantum Optics	8
光 学 第21巻第12号	a-0	放射光学会第6回年会	9
第22巻第n号	a-n	SPIE 37th Annual Symposium	10
応用物理 第62巻第n号	b-n	X-ray Microscopy '93	11
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 32, No. n	c-n	US-Japan Workshop on EUV Lithography	12
(2) Vol. 32, No. n	d-n	第3回ソルテック研究発表会	13
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 32, No. n	e-n	第11回光センシング技術研究会	14
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 10, No. n	f-n	第12回光センシング技術研究会	15
(B) Vol. 10, No. n	g-n	第19回液晶討論会	16
Appl. Opt. Vol. 32, No. n	h-n	SID '93	17
Opt. Lett. Vol. 18, No. n	i-n	IDRC (Euro Display '93)	18
Opt. Commun.	j-m-n*	第4回強誘電性液晶国際会議	19
J. Opt. Vol. 24, No. n	k-n	3次元画像コンファレンス '93	20
Waves in Random Media Vol. 3, No. n	l-n	第1回国際シンポジウム「立体動画像通信技術」	21
Phys. Rev. A Vol. 48, No. n	m-n	第5回相変化記録研究会シンポジウム	22
Phys. Rev. B Vol. 47, 48	n	ISO/ODS 合同国際会議 '93	23
Phys. Rev. Lett.	o-m-n*	光ディスク標準化委員会	24
Nature No. n	p-n	平成4年度光ディスク懇談会報告書	25
Appl. Phys. Lett. Vol. 63	q	平成5年度光ディスク懇談会報告書	26
Chem. Phys. Lett. Vol. 211	r	OAA '93	27
テレビジョン学会技術報告 Vol. 17, No. n	s-n	LN 結晶研究会調査報告書	28
MacWorld No. 7, 1993	t	電子情報通信学会 春	29
IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 5	u-n	電子情報通信学会 秋	30
Electron. Lett. Vol. 29, No. n	v-n	電子情報通信学会集積光技術研究会資料	31
IEEE Trans. Electron. Vol. E-75-C	w	IPT 93-5	
Vision Vol. 5	x	OFS-9	32
テレビジョン学会誌 Vol. 47	y	日本物理学会講演会 '93 春	33
Perception Vol. 22, No. n	z-n	第8回強誘電体国際会議	34
照明学会誌 Vol. 77	za	第9回3元および多元化合物国際会議	35
◆講演会関係	記号	ARVO Annual Meeting	36
第40回春季応用物理学関係連合講演会	1	9th TMIN International Symposium	37
第54回秋季応用物理学学会学術講演会	2	日本視覚学会冬期研究会	38
第18回光学シンポジウム	3	日本視覚学会夏期研究会	39
光学連合シンポジウム 旭川 '93	4	照明学会全国大会	40
第10回色彩工学コンファレンス	5	電気関係学会関西支部連合大会	41
CLEO/QELS '93	6	照明学会研究会	42
OSA Annual Meeting (Toronto)	7	生理人類学会大会	43
		ICO-16	44

\* Opt. Commun. は、m: Vol. (95~104), No. n, Phys. Rev. Lett. は、m: Vol. (70, 71), No. n で表記。

## 1. 光 物 理

北大電子科学研 魚住 純  
東工大 五神 真

### 1.1 基礎的・伝統的光学

基礎的・伝統的光学がカバーすべき範囲は広いが、ここでは筆者の興味と紙面の都合から、コヒーレンス・散乱・回折・光操作等の分野に絞って述べることをお許しいただきたい。

#### 1.1.1 コヒーレンス

近年、部分的コヒーレント光のスペクトルが場の伝搬に伴ってシフトする現象が、Wolf 効果として世界的に話題となっている。国内でも、これに関する研究が進められており、3次元の広がりを持つ非等方的な Gaussian Shell 型光源から出射する光のスペクトル変化<sup>1</sup>、および伝搬光のスペクトルシフトに対する開口の影響<sup>1,2</sup>が、またこれらに関連する現象として、ランダム媒質中を伝搬する光のスペクトル変化<sup>3</sup>が議論された。コヒーレンスの制御法としては、液晶ディスプレイを用いて光源強度分布を制御することによる空間コヒーレンスの制御法<sup>4</sup>、および Talbot 効果を利用して、アレイ状の部分的コヒーレント光源を実現する方法<sup>1</sup>が提案された。また、Gaussian Shell 型光源からのコヒーレンスの伝搬特性を Ambiguity 関数を使って表現する方法<sup>1,3</sup>が興味を引いた。

#### 1.1.2 回折

回折に関しては、近接場顕微鏡や光ディスク技術などとの関連から、微小スポットの形成法や微小開口・プローブからの回折・輻射場の研究が活発化している。昨年は、ファブリ・ペローエタロンを用いた超解像スポットの形成法<sup>1</sup>、近接場顕微鏡の誘電体チップからの輻射場の数値解析<sup>1</sup>、微小開口による回折場における Bethe 回折理論と Fourier 光学との比較<sup>2</sup>、微小開口および微小ファイバプローブから発生するエバネッセント場の湯川ポテンシャルによる解析<sup>1</sup>、光ディスクからの反射光の入射偏光依存性に関するベクトル回折理論による解析<sup>6,7</sup>、導体面上の矩形溝からの TM 波散乱<sup>1-5</sup>などがあった。その他、フラクタル境界を持つ開口<sup>1,2</sup>や複数の相似比を持つフラクタル<sup>3</sup>などの各種のフラクタル構造からの回折場の特性、クサビ形および針状物体からの境界回折波<sup>1,2</sup>などが議論された。

#### 1.1.3 散乱

光散乱の研究は、光 CT 等の計測技術に関連して活発に行われているが、ここでは基礎的なもの限定して述

べる。昨年は、スペックルの基礎的性質に関する研究が比較的多く見られた。ガウスビーム照射された散乱体からのスペックルの3次元空間における動特性<sup>f-2</sup>、コロイド溶液からの動的スペックルの2波長相関特性<sup>j-103-5</sup>、粗曲面からの動的スペックル<sup>j-98-4,k-3</sup>およびスペックル位相<sup>3,j-101-3</sup>の統計、コントラストが1を越えるガウスのスペックルの特性<sup>1</sup>などである。このほか、粉体層からの後方散乱エンハンスメント現象の粒径依存性<sup>2</sup>、ランダム媒質中の伝搬ビーム強度の相関関数に関するラグランジュの変分原理に基づく理論解析<sup>1-3</sup>などが研究された。

#### 1.1.4 光操作・微小共振器

ここ数年、レーザービームやエバネッセント場による微粒子操作が大きな盛り上がりを見せている。昨年は、これらの現象の基礎的な検討として、エバネッセント場に置かれた薄膜に作用する放射圧の数値解析<sup>1</sup>、吸光性基板上的ラテックス粒子がレーザービームに誘起されて起こす振動現象の観測<sup>2</sup>、光圧力が液体中の微粒子系に及ぼす影響の光子相関分光法による観測<sup>1,2,44</sup>が議論された。さらに、実用技術の確立に向けての動きとして、マイクロマシンングで作製した非球形微小回転体の光回転駆動<sup>1</sup>、マスクのパターン投影や干渉縞による複数粒子の同時トラップとパターン配列<sup>2</sup>、走査レーザービームの光圧力による空気中の浮遊微粒子の排除<sup>1</sup>など、多様な試みが見られた。また、誘電体微粒子による光共振器に関しては、光トラップされた微小球からの発振レーザー光の特性解析<sup>2</sup>、誘電体微小円柱共振器の whispering-gallery モードの数値解析<sup>1</sup>、誘電体微小球共振器内への光の時空間閉じ込めの可能性<sup>3</sup>、二つの誘電体微小球間のモード結合<sup>1-17</sup>など、種々の特性の解明が進んでおり、新しい光デバイスとしての可能性が高まってきた。

#### 1.1.5 展望

コヒーレンスおよび回折について述べる。これらはやや地味な研究分野であるが、光デバイスや半導体素子の微小化およびアレイ化に伴って、場の強度分布やコヒーレンス特性をマイクロなスケールで制御する必要性が高まっており、それに関連した研究はさらに活性化するであろう。また、昨年は、光波やコヒーレンスの伝搬という古典的な現象を全く新しい視点で捉える動きが目立った。フレネル回折現象を開口関数のウェーブレット変換として捉える考え<sup>1-11</sup>や、GRIN ファイバ中の光波伝搬を非整数次元のフーリエ変換という新しい概念により記述する動き<sup>1-10,44</sup> (いずれも海外) がそれである。非整数次元のフーリエ変換は、原関数のウィグナー分布関数表示における座標軸の回転と等価であることから、光情報

処理の観点からも興味深い。また、前述の Ambiguity 関数によるコヒーレンス伝搬の記述も、同様の動きに含められよう。今後、これらの新しい視点に基づく研究の展開が期待され、そこからどのような応用が生まれてくるかが楽しみである。(魚住)

## 1.2 量子光学・非線形光学

量子光学、非線形光学の1993年の進展として、筆者が興味を持ったトピックスを中心に概観し、今後を展望したい。

微小共振器関連の研究は前年同様活発に行われた。特に、半導体量子井戸を DBR 共振器で挟む構造を用いて、微小共振器中の輻射場と量子井戸励起子の“結合系”の様々な性質が調べられた。広島大学のグループは量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE)を用いることにより、量子井戸励起子の発光寿命の共振器効果を系統的に調べ、微小共振器の中の励起子の自然放出寿命が変化することを実証した<sup>2,6,9-21</sup>。さらに、自然放出寿命のキャリア分布依存に着目し、広帯域の光子数スクイズド光の発生が可能であることが提案された<sup>2,m-4</sup>。

NTT(+スタンフォード大)のグループはDBR共振器の中の励起子を共鳴励起し、“結合系”からの発光が $\beta \sim 1$ を示唆する入出力特性を示すことを見いだした<sup>2,6</sup>。この発光の物理的なメカニズムについて励起子系の協力現象等の観点から議論が行われている。また、前年に報告された“結合系”における励起子の真空ラビ分裂に関し、パルス応答の実験が行われ、分裂に対応するビートが観測された(東大生産研+ミシガン大)<sup>6</sup>。このほか、 $\chi^{(3)}$ 輻射場を制御する方法として微小球や微小円盤構造の Whispering Gallery Mode を用いるもの<sup>2</sup>や、誘電体の周期構造を用いたフォトリックバンドの研究が進展している<sup>6,7</sup>。

1980年代の後半以降、盛んに研究されてきたスクイズド状態や量子非破壊測定の研究は少なくなった。長引く不況の影響で民間の研究機関(主に米国)の研究者がより実用的な研究を優先せざるを得なくなったことも一因であろうか。その中で、東大物性研グループが行った光子相関計数実験は新たな展開といえるであろう。これまでスクイズド状態の実験研究でもっぱら量子雑音の増減という側面が注目されてきた。しかし、理論的にはスクイズド光がコヒーレント光や熱放射光とは異なった、特有の非古典的な性質を示すことが知られていた。物性研グループは、量子光学の伝統的手法であるフォトンカウンティング法を用いてパルススクイズド光のアンチバンチング特性を明瞭に示すことに成功した<sup>9-71-8</sup>。

レーザークーリング・トラップの技術は確立し、応用の段階に入ったといえるであろう。冷却原子のドブロイ波の干渉を用いた原子干渉計は原子の分極率の測定等実用に近い計測が行われるようになった(東大+電通大, MIT)<sup>b-9,8</sup>。Csのatomic fountainによる原子時計の研究も世界の20ヵ所程で進められており、現在のクロックを凌ぐ結果も報告された(スタンフォード大)<sup>8</sup>。また、トラップ原子を用いて原子衝突実験や準安定状態の寿命測定<sup>9-70-8</sup>なども行われ、究極の原子分光法として今後も色々な測定に利用されることが期待されている。我が国でも、Rbのトラップが数カ所で行われるようになり、この技術は着実に普及して来ている。今後はトラップ原子を用いた量子光学や非線形光学等の展開も大いに期待される。

非線形光学の分野では、第3高調波発生による有機共役系ポリマーやポリシランの非線形分光に注目したい。東大グループは可視から赤外域まで広い範囲にわたり、 $\chi^{(3)}(3\omega)$ の実部と虚部のスペクトルを測定した<sup>9-70-24</sup>。 $\chi^{(3)}(3\omega)$ のスペクトルは理論的解析(電総研)によると、1次元励起子の電子状態について線形分光と相補的な情報を与えることが知られており、分光法としての意義は大きい。これらの実験では、波長領域ごとに異なるレーザー装置を用いて測定したデータをつないで一つのスペクトルに仕上げなければならず、かなり労力がかかる。しかし、今後は最近急ピッチで開発が進んでいるパラメトリック発振器<sup>7</sup>を用いることによって、この分光法は劇的に簡便化されることが期待できる。したがって、この分光法は今後様々な物質に対して広く応用されると思われる。

凝縮系の非線形光学現象としては、励起子系の高密度励起効果の研究が進展を見せている。Cu<sub>2</sub>Oの励起子を高密度に励起すると励起子の分布が量子縮退したボーズ分布を示すことは以前から知られていた。この励起子の伝播特性を測定したところ、励起子の“超流動”を示唆するようなバリスティックな伝播が観測された<sup>9-70-25</sup>。また、そのパルス波形がソリトンのようなものであることも報告され、現在メカニズムの解明が進められている。

分子性結晶の多励起状態が理論実験両面から調べられた。スピンモデルを用いることによって1次元のフレンケル励起子系の超放射現象や多励起状態が理論的に示された<sup>n-47,48</sup>。また、実験的には色素のJ-会合体でポンプ・プローブ分光が行われた(分子研<sup>6</sup>, 東大)。観測された高エネルギー側の誘導吸収の原因として、励起子間相互相互作用やサイズ効果が議論された。

最後にその他の話題で、筆者が興味を持ったものを列挙しておく。単一分子分光で、光検出磁気共鳴分光を行い、1個のスピンの磁気共鳴信号が初めて観測された<sup>P-363</sup>。有機ポリマーのヘテロ接合による電界発光が観測された<sup>P-365</sup>。光走査型顕微鏡の進展<sup>B-2</sup>。これらの今後の展開が楽しみである。(五神)

## 2. 結像素子・光学機械

大日本スクリーン 林 尚久  
キャノン 福田恵明

### 2.1 結像素子・光学機械一般

結像素子・光学機械は、特に光学技術上の基礎を支える分野であるが、ここでも周辺技術の発展の影響を受け、電子化、能動化、集積化、高機能化と低コスト化がますます追求されるようになってきている。

結像素子としては、回折光学素子やホログラフィック素子、GRIN レンズ、光導波路といったものの研究がさらに進展し、実用化も進んだ。これを反映して性能向上や設計手法の改善に関する研究が多く見られると共に、低コスト化、小型化のためだけでなく、これらの素子独自の特徴を活かそうとする傾向が多く見られた。

この他、周辺技術の発展を受けて、例えば液晶パネルとレンズの組合せのような新しい光学素子の提案が見られた。

光学機械に関しては、電子デバイス等の微細化に伴う高解像化への要求に対して、新しい様々な顕微鏡の提案や、超解像化へのアプローチが盛んになっている。

以下、光学系と光学素子、測定・評価に分けて 93 年をふりかえる。

#### 2.1.1 光学系

##### 1) 光学設計

光学レンズ設計においては、計算機能力の向上を反映した設計・評価支援の手法の提案がなされた。

自動設計手法として最も使われる DLS 法で、局所解に陥る度に脱出させ、次の局所解を求めていく手法が提案された<sup>1</sup>。DLS 法の手法を活かしたまま、実用的な時間でより良い解を探索できる手法として注目される。

また、熟練者でも容易でない初期データの選択や最終評価を支援するために、データベースの構築<sup>3</sup>や、最終画像をシミュレートする報告が行われた<sup>1,3</sup>。今後の発展を期待したい。

自動設計に関してはこの他、種々の境界条件保持手法の比較報告<sup>4,5-8</sup>や、DLS 法における変数の差分量の評価手法<sup>3</sup>、変数や評価量のバランスが悪い場合にシュミッ

ト直交化法を用いる手法なども報告された<sup>3</sup>。

また、GRIN レンズの 3 次収差解析<sup>a-4,4</sup>、厚肉単レンズの固有係数の解の存在範囲<sup>4</sup>、正弦条件の 3 次の面収差係数<sup>4</sup>といった研究報告も行われ、今後の設計・評価に対する寄与が期待される。

##### 2) レンズ系

いわゆるレンズ設計に関する発表は、ズームレンズや紫外・赤外域波長域光学系に関するものが見られた。

ズームレンズに関しては、非球面を多用してレンズ枚数の削減と高ズーム比化を達成したレンズシャッター用多成分ズームレンズ<sup>4</sup>、広画角・高変倍比を持つ複写用レンズ<sup>4</sup>等の発表があり、紫外域光学系に関しては、顕微鏡光学系<sup>2</sup>の発表などがあった。

レーザー光学系に関しては、レーザービームの形状とスポット径の計算に関する発表があった<sup>4</sup>。光学系の収差やトランケートなど、より現実を反映できるという。また、2枚のミラーでレーザービームの強度分布を変換する発表も行われた<sup>4</sup>。

近年注目を浴びている回折光学素子の応用事例としては、非球面効果を利用して半導体露光機用レンズの性能向上を試みるもの<sup>4</sup>、レンズの一面に導入して温度変化による焦点距離・収差の変動を抑えるもの<sup>h-13</sup>、光ディスクにおいて半導体レーザーの波長変化の影響を抑える色収差補正素子<sup>3</sup>などが報告されている。いずれも回折光学素子の特徴をうまく活かしたものである。

普通に設計したレンズの周辺に最小線幅で設計した輪帯を付加することにより、バイナリーレンズの回折効率を向上させる設計手法の発表もあった<sup>2</sup>。

GRIN レンズは、ガウスビームを強度が均一な平面波に変換する光学系への適用<sup>h-25</sup>や、光接続用光学系への適用<sup>3</sup>が報告された。素材製作上の問題解決と設計理論のより一層の進展が期待されるところである。

##### 3) その他

超解像へのひとつのアプローチとして、レンズと被測定物間にフェブリーペロー・エタロンを挿入するだけで微小スポットを生成できる報告が行われた<sup>1</sup>。これにより半値幅を約 55% に小さくでき、サイドローブもほとんどないスポットを生成できるという。

この他、ホログラフィーの収差補正に液晶パネルを用いたもの<sup>3</sup>、液晶パネルで光源強度分布を変えて所望の空間コヒーレンスを得る研究<sup>1</sup>などが報告され、将来展開が期待される。

#### 2.1.2 光学素子

電子技術・加工技術の進歩により新しい光学素子が実

現される一方、新しい光学素子の提案も見られた。

レンズと液晶パネルを組み合わせて、結像だけでなく画像処理的な様々な機能を持たせた液晶アクティブレンズの提案<sup>1,a-9</sup>がその一例である。こういったハイブリッドな素子は今後ますます増えよう。

ホログラム素子は多様な応用・展開がなされ、多くの実用化の例がある一方、新しいアイデアが次々と出てくる分野でもある。ホログラムを光軸と垂直方向へ移動することにより焦点位置を変化させる合成可変焦点光学素子<sup>a-6</sup>、半導体レーザー用に色収差補正した二枚組ホログラムレンズ<sup>1-9</sup>などが発表された。

ホログラムの設計手法に関しても、アルゴリズムによる収束速度の比較報告<sup>1</sup>、二値化による量子化誤差を避けるための繰返し法の収束性の報告<sup>3</sup>、一度の処理で済ます誤差分散法による設計報告<sup>1</sup>等があった。

加工に関しては、表面プラズモン波を利用して微細周期パターンを記録する方法<sup>3</sup>、シンクロトロン軟 X 線放射光を使ったリソグラフィでリニアゾーンプレートを試作した報告<sup>1</sup>などがあつた。

光学素子としてはこの他に、2種類のガラス材料を貼り合わせて境界面を位相格子にして波長特性を持たせた光学的ローパスフィルタ<sup>3</sup>や、導波路からの出射光をガウスビーム化するグレーティングカップラ<sup>4</sup>など、実用性の高い報告があつた。

### 2.1.3 測定・評価

光学系の測定・評価に関する発表も多かった。トワイマン・グリーン干渉計で顕微鏡対物レンズの波面収差を可視・紫外域で測定した報告<sup>2</sup>、一对の格子を用いた焦点距離測定法<sup>a-8,a-9</sup>、RNF法を用いた光導波路の屈折率分布測定<sup>4</sup>などが報告された。

また、大口径光学部品をフィゾー干渉計で分割走査して表面形状を評価するもの<sup>3</sup>、マルチレンズを用いてハルトマン法を使ってレーザー光の波面を計測し、参照面なしでも評価を可能にするもの<sup>1</sup>などが発表された。

光学素子の性能は、最終的には計測技術で決まるだけに、今後も活発な研究が行われよう。

### 2.1.4 まとめ

電子技術、加工・計測技術の進歩により、新しい光学系・素子が実現可能になると共に、新たな要求が良い刺激となって、この分野も急速に変わりつつある。

今後、新しい流れとして電子化、能動化、集積化、多機能化が進むであろうし、一方ではさらなる高機能化と低コスト化が追求されるであろう。(林)

## 2.2 X線光学

応用物理学会における X 線・粒子線基礎技術の発表は春、秋とも 30 件に及び、さらに他のセッションで報告されたものもある。この領域の研究の活発さが窺える。

昨年で注目すべきは、軟 X 線縮小投影露光の転写実験が複数の研究機関で始められたこと、ミラー系・ゾーンプレートなどによる結像型 X 線顕微鏡に関する報告が目立って多くなったことである。

縮小投影露光法への応用は実用化を念頭に置いた基礎検討の段階にある。10月には山中湖畔で極端紫外縮小投影リソグラフィに関する日米ワークショップが開かれ日米より多数の研究者が参加し、合計で 28 件の成果発表がなされ、要素技術の課題に関する議論が活発に行われた。今後の展開にもこのような会議の意義は大きい。

また文部省科学研究費による重点領域研究「X線結像光学」が一昨年3月に終了したが、「X線光学系の設計と評価」に関するワークショップと締め括りの公開シンポジウムが昨年3月に開催された。昨年の本欄においても指摘されているが重点領域研究の X 線光学研究推進に果たした役割には大きいものがあつた。

さらに X 線顕微鏡に関する 3 年毎の国際会議が開催され、90 年以降の進展が報告された。特に今回は硬 X 線用ブラッグ・フレネルゾーンプレートをはじめ、短波長 X 線用の素子開発および成果報告が目立った<sup>11</sup>。

軟 X 線領域の代表的な光学素子である多層膜ミラーについて見ると、「水の窓」と呼ばれる波長域 (2.3~4.4 nm) を利用するために短周期ミラーが NiCr-Ti<sup>1</sup>、NiCu-Ti<sup>1</sup>、NiCr-BN<sup>2</sup>、W-B<sub>4</sub>C<sup>b-19</sup>などの合金材料、化合物材料を用いて作製された。多層膜反射鏡による偏光素子として Mo-B<sub>4</sub>C<sup>2</sup>、Ru-B<sub>4</sub>C<sup>2</sup> が検討され、Ru-B<sub>4</sub>C では波長 7.3 nm で 99% 以上の偏光能を持つことが報告された。

エキシマレーザー CVD を用いた面内周期勾配のある多層膜の作製、大面積化への試み、オージェ分光法によるその場分析<sup>1,2</sup>、また低エネルギーイオンビームを用いた良好な膜形成が報告された<sup>1,2,12</sup>。

多層膜の評価に関して、Mo-Si、Ni-C などの多層膜の各層形成初期に界面に化合物の生成がその場偏光解析法により確認された<sup>1</sup>。また、X 線定在波法が多層膜の界面の粗さ・密度・周期長の評価、多層構造の完全性評価に用いられた<sup>1,2</sup>が、これは膜の質の向上を意味している。

縮小投影露光への応用では、まず透過型マスクとシュワルツシルト (SC) 光学系で 0.1 μm L & S<sup>1</sup>、0.05 μm L & S<sup>13</sup> のレジスト像の形成が報告された。さらに、ミラー中心部における曲率を等しくした 2 枚非球面光学系

で組立て調整後の光学系全系での波面精度を 10nm 程度に追い込み、大きな画角 2mm×0.4mm が確認された<sup>2,12</sup>。スキャン露光に対応して、結像系の NA を最適化するための照明光学系が提案された<sup>2,12</sup>。またイオンエッチング法により多層膜を加工した反射型マスクとそれを用いた SC 光学系により 0.07 $\mu$ m の L & S を転写した結果が報告された<sup>2,12</sup>。これらはいずれも実用化に向けた研究の始まりとして期待したい。

多層膜の他の応用としては回折格子に多層膜を形成したもの<sup>1,h-25</sup>、さらに Ni-C 多層膜をフィルタとした光電子分光<sup>2</sup>の報告がある。

顕微鏡では種々のタイプのコンデンサーミラーと結像光学系の組合せが導入・評価されている<sup>1,2,9</sup>、顕微鏡の成果としてレーザープラズマ X 線 (LPX) を光源とし SC 系による透過型回折格子の像<sup>1</sup>、筋繊維顕微鏡像<sup>1</sup>とイースト菌像<sup>2</sup>の撮影が報告された。さらにウォルター系による珪藻土の顕微鏡像が得られた<sup>2</sup>。またフレネルゾーンプレート (ZP) 結像系ではアンジュレータを光源として波長 2.37nm で 50nm の分解能<sup>1,c-7</sup>、UVSOR との組合せで波長 3.2nm で 0.1 $\mu$ m が得られている<sup>1,c-10</sup>。Ti, Y を標的とした LPX と密着露光法で生体試料の顕微鏡像が記録された<sup>1</sup>。またレジスト面形状の読出し時の分解能制限因子の評価がなされた<sup>2</sup>。

斜入射鏡に関しては、切削加工面にスパッタによる Pt 膜を成膜し粗さを 0.8nm<sub>rms</sub> とした非球面鏡<sup>2</sup>、エポキシ樹脂を用い面粗さを 6nm<sub>p-v</sub> 以下としたウォルター鏡が報告されている<sup>2</sup>。また斜入射鏡の SR 光照射耐性評価が行われ、放射光照射による E' 中心の発生<sup>2</sup>、 $\alpha$ -SiO<sub>2</sub> および Si 熱酸化膜の光刺激揮発<sup>2</sup>、石英基板表面の変形<sup>2</sup>が報告された。斜入射鏡の他の応用では、宇宙 X 線観測衛星「あすか」に搭載された薄板多重望遠鏡の性能の評価結果の一部が報告された<sup>10,c-10</sup>。

その他全体の動きでは LPX 光源とその応用<sup>1</sup>、軟 X 線レーザー<sup>2</sup>、検出器関連<sup>1</sup>、ZP の材料組合せ<sup>1,2</sup>、改良 KB 光学系<sup>2</sup>、X 線 MCT の応用<sup>1</sup>など注目すべきものも多い。

雑誌では「縮小投影露光リソグラフィ」、「軟 X 線用多層膜の形成とその利用」、および「最近の 2 次元 X 線検出器」が掲載された<sup>1-7</sup>。ここ数年間の X 線結像系の応用に関する進歩は目覚ましく、基礎研究から応用・実用化までその将来を期待したい。

(福田)

### 3. 光応用計測

新潟大工 佐々木修己  
九州工大 今井 洋

#### 3.1 光応用計測一般

光応用計測では、各分野において高精度化、高速化が図られている。半導体レーザー (LD) の波長可変性を利用する干渉計測の研究が活発であり、また、スーパーレミネッセントダイオード (SLD)、波長変換素子、フォトリフラクティブ結晶などの新しい光学素子を取り入れた干渉計測に興味を持たれる。光波長以上の形状変化や距離変化を測定する研究が増えてきており、干渉を用いない方法によっても高精度な形状計測が試みられている。以下に各分野の進展について述べる。

##### 3.1.1 干渉計測

LD の注入電流変化による位相変調では LD の光出力も変化し、位相測定に影響を与える。この影響を受けない位相シフト干渉法が提案され<sup>1</sup>、ヘテロダイン干渉法についてもこの影響が明らかにされた<sup>15</sup>。

位相シフト干渉法の位相シフト量が光路差に比例して増加する性質を利用し、2次元平面内の物体に対する立体形状計測<sup>1</sup>、複数の透過物体に対する距離測定 (光リフレクトメトリー)<sup>14</sup>が行われた。また、2次元平面内の各点に対し異なる位相シフト量を与え、各点の干渉縞強度を順次検出することで得られる干渉縞パターンから仮想波面を発生する方法が提案された<sup>1</sup>。このとき、光路差の異なる二つの干渉計により、仮想波面の位相分布の拡大、縮小が行えることが示された<sup>3</sup>。

光波長以上の光路差変化を測定するための方法について以下の報告があった。温度変化による LD の周波数掃引で得られる 2 波長を用いる段差測定<sup>1</sup>、干渉信号の位相をフェーズロック干渉法でゼロとなるように 2 波長を発生させることによる距離測定<sup>1</sup>、2 波長干渉計の等価波長の位相を電子回路によって実時間で求める方法<sup>2</sup>があった。次に、白色干渉計については、色素膜の厚み測定<sup>4</sup>、光散乱トポグラフィへの応用に対する干渉信号の処理方法<sup>2</sup>が示された。また、位相シフト法、正弦波位相変調法が白色干渉計に取り入れられ、干渉信号の位相も検出された<sup>4,2</sup>。光源として SLD を使い、干渉信号の可視度変化から段差測定を行う方法が提案された<sup>2</sup>。

実時間で干渉信号を処理し、2次元表面形状を得る方法が、位相シフト法と正弦波位相変調法で示された<sup>1</sup>。

大きな球面や非球面の形状を測定するために、小口径の干渉計で測定面を小領域ごとに測定し、それらの間の

重複部が一致するように小領域を接続し、測定面全体の形状を求める方法が報告された<sup>1,3</sup>。表面形状の差分値を用いる計測としては、球面を移動することによる球面半径の測定<sup>1,3</sup>、平面を移動することによる平面形状の絶対測定<sup>1</sup>、フーリエ変換によって表面形状を求める方法<sup>1</sup>があった。

高機能な光学素子を利用した干渉計測として以下の内容があげられる。注入電流の変調により光強度が変化している LD 光を光増幅器である SLD に入力し、その出力光の強度変化を SLD の駆動回路にフィードバックすることにより、LD 光の強度変化が抑制された<sup>1</sup>。この光強度が一定の位相変調された LD 光を用い、距離の正確な測定が行われた<sup>15</sup>。波長変換素子によって得られた基本波 ( $\lambda_1$ ) と高調波 ( $\lambda_2$ ) が測定対象によって位相変化を受けた後、再び波長変換素子により  $\lambda_1$  を  $\lambda_2$  に変換し、二つの  $\lambda_2$  の光による干渉を検出することで、空気屈折率の測定や、加工表面の分散特性の測定が高精度でなされた<sup>1,3</sup>。物体の振動周波数に同期した交流電圧を BSO 空間光変調器 (PROM) に印加することにより大振幅測定に適した干渉縞パターンが得られた<sup>2</sup>。

複屈折性の測定については、二つの位相変調器によって偏光方向が直交する 2 周波光を作り出し、ヘテロダイナミクス干渉法を用いる方法<sup>1</sup>、LD によるヘテロダイナミクス干渉法によって作り出された直交する 2 周波光源を用いる方法<sup>3</sup>、フェラデー素子<sup>2</sup>、消光型エリプソメータ<sup>2</sup>、回転直線偏光光源<sup>2</sup>を用いる方法があった。

その他、位相物体の相互ウィグナー分布関数の光学的な実現<sup>1</sup>、サバール板による分光器のインターフェログラム長の拡大<sup>2</sup>、半導体パルスレーザーによる振動物体の静止画像<sup>2</sup>に関する報告があった。

### 3.1.2 スペックル

スペックル干渉計に位相シフトを導入した計測については、実時間で位相シフト量を検出し、外乱の影響を軽減した<sup>3</sup>。回折格子により位相シフトとシアを与えるシアリング干渉計を構成した<sup>3</sup>。スペックル位相の確率密度関数から被検位相を決定する統計的干渉計測法により面内変位を高精度に測定した<sup>2,15</sup>。3次元変位を測定する方法として、照明系の光軸に対して対称な位置にある二つの像界のスペックル移動を用いた面内および面外変位の同時測定が報告された<sup>3,4</sup>。その他、スペックルによる眼底血流の実時間画像解析装置<sup>2,3</sup>、面外変位計測 ESPI におけるスペックルサイズの最適化<sup>2</sup>があった。

### 3.1.3 格子投影などによる形状計測

干渉計測以外の形状計測として、直交する格子パター

ンを用いフーリエ変換縞解析法によって二つの物体の立体形状を同時に測定する方法<sup>2</sup>、原子配列像に対しフーリエ変換縞解析法を適用し原子配列を正確に解析する方法<sup>3</sup>、1枚の変形格子像に対して位相シフトアルゴリズムを適用する方法<sup>1</sup>、液晶ディスプレイにより発生させたアクティブな正弦波格子を用いる方法<sup>3</sup>の報告があった。波面計測としては、正弦波格子を用いた位相シフトロンキーテスト<sup>1,2</sup>、タルボット効果を用いたモアレ法による測定<sup>2</sup>、マルチレンズを用いたシャックハルトマン法による高精度な波面計測<sup>1,2</sup>があった。

### 3.1.4 位相共役、フォトリフラクティブ

LD 光に対して自己励起型の位相共役鏡 (SPPCM) を実現し、位相シフト干渉法を適用した<sup>1</sup>。SPPCM を用いたフィゾー型正弦波位相変調干渉計が提案され<sup>1</sup>、入射光の位相変化に対する SPPCM の特性が調べられた<sup>2</sup>。2 光波混合による特定振動周波数成分の選択的な振幅測定<sup>1,2</sup>、微小振幅の測定<sup>1</sup>、4 光波混合による周期構造パターン中の欠陥検出<sup>2</sup>が報告された。

### 3.1.5 その他

新顕微鏡としては、近接場顕微鏡の性能改善<sup>1,2</sup>、金属チップによるエバネッセント場の検出<sup>1,2</sup>、2 波長のウィーナ縞による探針の絶対位置決め<sup>2</sup>、原子間力顕微鏡と近視野顕微鏡の一体化<sup>2</sup>、同軸ヘテロダイナミクス光プローブによる改善<sup>2</sup>があった。1次元 CCD カメラによる浮遊粒子<sup>2</sup>、雨滴径の計測<sup>2</sup>、光トラップされた粒子の回転の計測<sup>2</sup>があった。共焦点系を用いた高空間分解能を有する 2 焦点速度計<sup>1</sup>。LD を用いた小型の 2 焦点速度計<sup>2</sup>、空間フィルタ速度計の光軸方向の空間分解能の向上<sup>2</sup>が報告された。PSD による正弦波干渉縞パターンの位相検出<sup>1,2</sup>、水平面の検出<sup>2</sup>、加速器アライメントのためのビーム位置の検出<sup>1,2</sup>が報告された。音響光学偏向素子による 2 ビーム光走査を用いた微小寸法計測<sup>3</sup>、レーザー光スキャンによる超小型な物体検知システム<sup>2</sup>、野外レーザートラッキング装置<sup>2</sup>、ピンホールアレイとマイクロレンズアレイの回転スキャンによる高速・高分解能の共焦点画像装置<sup>2</sup>があった。その他、細線で形成される干渉パターンを利用する鏡面位置の検出<sup>1</sup>、液晶ディスプレイを利用する実時間電子線ホログラフィ<sup>2,3</sup>、近赤外パルス光による生体の吸光度計測<sup>1,2</sup>、光励起プラズモンセンサーによる屈折率測定<sup>3</sup>などが報告された。

新しい光学素子の効果的な活用そして電子回路や計算機などによる高度な信号処理の適用によって、今後ますます光応用計測が発展すると期待される。(佐々木)

### 3.2 ファイバ応用, 測定器

ここ2, 3年, 応用物理学会における光ファイバ分野の講演発表件数は減少傾向にあったが, 1993年は春, 秋の講演会と増加傾向を示した. この一因は, 光ファイバにおける非線形光学効果とそのセンサー等への応用や, ファイバレーザー・増幅器に関する研究が, 実用期を迎えつつある従来の物理現象を利用した光ファイバセンサー関連の研究に新たに加えられてきたものと考えられる.

光ファイバで生じる非線形光学効果に関する研究は, 光通信分野では大きな注目を浴びているが, 光応用計測分野においても今後益々その重要性が増す傾向にあると思われる. 本稿ではこのことを踏まえ, 光ファイバにおける非線形光学効果とその光計測への応用を中心に93年の進展を報告する. また, 実用期を迎えつつある光ファイバセンサーも応用物理学会に加え光波センシング技術研究会などにて多くの発表がなされており, 活発な研究活動が続けられている.

光ファイバは中心対称なので3次の非線形光学効果が最も容易に現れる. 中でも(誘導)ラマン散乱や(誘導)ブリルアン散乱は, ストックス光や反ストックス光の強度や周波数シフト, しきい値, 利得スペクトルがファイバパラメータに加えファイバの温度や歪にも依存して変化するため種々のファイバセンサーへの利用が可能である. ラマン散乱光強度の温度依存性を利用したOTDR(光時間領域反射測定法)タイプのファイバ温度センサーは数年前から提案されているが, 凹形状の励起光パルスを用いることで誘導ラマン散乱を避け, 距離分解能を改善できることが計算機シミュレーションにより示された<sup>1,4</sup>. また, 実際に敷設されている通信用ファイバを対象として単一モードファイバに対応できるラマン散乱に基づく分布型温度センサーの高性能化についても総合的に報告された<sup>2</sup>. ラマン散乱を利用する場合, やはり如何に誘導散乱を抑え微弱なラマン散乱光を検出するかが大きな課題であり, 凹形状パルスの利用による性能向上が期待される.

誘導ブリルアン散乱は光ファイバで生じる種々の非線形光学効果の中で最もしきい値が低く容易に観測される現象である. 光ファイバに温度分布がある場合にその温度差と誘導ブリルアン散乱光強度, 利得スペクトル, しきい値の関係が明らかにされた<sup>1,2</sup>. また, ブリルアンファイバレーザーについて, 2周波発振スペクトルのファイバ温度分布による制御について提案された<sup>4</sup>. 誘導ブリルアン散乱をファイバセンサーに利用する場合, スト

ークス光の周波数シフトは温度と共に歪にも依存するため, 互いの分離検出が今後の課題となる.

特殊な光ファイバのセンサーへの利用もいくつか見られた. 有機蛍光色素をドープしたプラスチック光ファイバにおいて, X線照射による発光を利用したX線センサー<sup>1</sup>, 光分子の吸脱着による非蛍光性-蛍光性の変化を利用した湿度センサー<sup>1</sup>が提案された. また, 同様の蛍光ファイバの側面から Ar<sup>+</sup> レーザーを照射し発光強度を検出する位置センシングの可能性も示された<sup>2</sup>.

光ファイバで生じるもう一つの利用性の高い非線形光学効果は光誘起屈折率変化である. Geドープ光ファイバにUV( $\lambda=244\text{nm}$ )光を照射すると屈折率が変化する. この屈折率変化の原因はまだはっきりと特定されていないが主に Ge イオンの吸収によるものと考えられている. UV光を干渉させ Geドープファイバに照射するとファイバグレーティングが形成される. これにより63%の反射率が達成された<sup>1,2</sup>. また, 同様の Geドープファイバにおいて,  $\lambda=532\text{nm}$  光照射によっても屈折率変化が生じ, これによるファイバグレーティングの作製も試みられた<sup>2</sup>. As-S系カルコゲン化物光ファイバでは通常のシリカ系ガラスファイバに比べ2桁ほど大きい光カー効果が生じることが報告された<sup>2</sup>. 光通信用光増幅器として開発された Erドープ光ファイバは可視から近赤外領域にかけていくつかの吸収ピークを有し, このピーク付近の励起光により吸収に起因した大きな屈折率変化が生じる.  $\lambda=514.5\text{nm}$  励起による通常の光ファイバに比べ4~5桁大きな屈折率変化とその非線形光ファイバカプラーへの応用が示された<sup>1,2,3</sup>.

光カー効果に起因する屈折率変化は応答速度が非常に高速であり光ファイバデバイスへの応用が第一に考えられているが, これらの光誘起屈折率変化はファイバセンサーへの利用も可能である. 特に, Erドープ光ファイバは本来の光増幅性とからめたこの現象のセンサーへの利用に興味もたれる.

従来の現象を用いたファイバセンサーも, 種々の提案や改善が試みられた. 光ファイバジャイロに関して, 偏光解消子を用いたり<sup>15</sup>, 左右両円偏光を両廻り光とし半波長板を用いて入れ替える偏光変動誘起ドリフトの低減法<sup>14</sup>が報告された. 光ファイバ多点センサーに関しては, 3本のファイバからの出射光を干渉させ, その干渉パターンをフーリエ処理して各ファイバの位相変化を検出する多点温度センサー<sup>14</sup>や, 低コヒーレンス光源と定偏波ファイバを用いた偏波干渉型多点温度・振動センサー<sup>15</sup>が提案された. 光ファイバや薄膜光導波路の欠陥,



損失、反射分布を高分解能に検査する光反射測定法(リフレクトメトリ)については、低コヒーレンス干渉を用いるOLCR(光低コヒーレンス反射測定法)の性能向上についての良くまとめられた報告があった<sup>2</sup>。また、半導体レーザーの階段状周波数掃引を、後方散乱光の位相変化をフーリエ処理するOFDR(光周波数領域反射測定法)に応用し、周波数変化幅の不均一性に起因する誤差を低減する方法が示された<sup>14</sup>。

その他、外乱除去型ファイバセンサーの開発に関して、低コヒーレンス光源を定偏波ファイバコイルに用い、温度変動と直交偏波間のクロストークによるノイズを取り除いた圧力センサーの改善<sup>1</sup>や光弾性定数が小さく大きなベルデ定数を有する鉛ガラスファイバを利用し外乱の影響を低減したファラデー型電流センサー<sup>2</sup>が提案された。

光ファイバ関連では、直接ファイバセンサーとは関係していないが、光通信用増幅器として注目されている希土類元素ドープ光ファイバ増幅器について多くの発表があった。特にPrドープ光ファイバにおける1.3 $\mu\text{m}$ 帯光増幅、Erドープ光ファイバにおける1.5 $\mu\text{m}$ 帯光増幅に加え<sup>1</sup>、TmやTm-Ho-Euドープ光ファイバにおける1.4 $\mu\text{m}$ 帯光増幅、1.9 $\mu\text{m}$ 帯光増幅が新たに報告された<sup>2</sup>。また、圧電性高分子を被覆したNdドープ光ファイバで位相変調によるファイバレーザーのモード同期が提案された<sup>2</sup>。

これらの光ファイバ増幅器・レーザーや先に述べた光誘起屈折率変化に基づく光ファイバ素子は主に光通信用部品として開発が期待されている。しかし、それら自身を間接的に光ファイバセンサー用部品として利用できるように加え、非線形光学効果や光増幅作用・レーザー作用がファイバパラメータや環境の影響を受けることから直接的にも光ファイバセンサーへの応用が考えられる。今後、これらの現象を利用した新しい光ファイバセンシングの発展が期待される。(今井)

#### 4. 光情報処理

電総研 森 雅彦

94年4月には京都においてICO主催の会議が開かれる。テーマは“Frontiers in Information Optics”であり、この分野の93年に得られた種々の研究成果がまとめられて発表されるものと思われる。

画像形成の分野では、立体動画像をめざした研究が活発化してきており、ハード的には、グレーティングイメージ、ホログラムレンズアレイの応用、投影型ホログラ

ムのそれぞれの発表があった<sup>1</sup>。また、計算機プログラムに関しては、その最適化手法として、シミュレーテッドアニーリングと遺伝的アルゴリズムの比較があったが、はっきりとした結論はでていない<sup>1</sup>。

光情報処理の分野を広くながめると、いわゆる光コンピューティングの分野では、ニューラルネットワークと共に、相関演算を用いたアナログ光情報処理が活発に発表されている。これに比べ、一時期活発であったデジタル並列光コンピューティングではアーキテクチャ的には目新しい物はあまりなかったが、それらの手法が離散デジタル相関として明確に定義された<sup>1-3</sup>。その他システムの研究は実装技術へとシフトしているように見える。

光インターコネクションではEARS, VSTEP<sup>1</sup>等の半導体オプトエレクトロニクスデバイスを用いた光スイッチモジュールの発表があり、セルフルーティングで500 Mbpsの伝送が報告された<sup>1</sup>。また、大規模光電子融合システムのための光インターコネクションを書換可能なプログラムを用いて実現する報告があった<sup>1,3</sup>。

光ニューラルネットワークでは手書き文字認識が可能となるシステムがいくつか発表されている。特に光学的な処理と、電気的な処理を組み合わせた特徴抽出光ニューロン素子<sup>1-1</sup>、感度可変受光素子アレイを用いた光ニューロデバイス<sup>2</sup>は実用化に向けて研究が進んでおり、今後の動向が注目される。

文字等の2次元画像認識を目指したシステムとして、微小レンズアレイを用いたシステムがいくつか発表されている。微小レンズアレイを用いた多重結像<sup>1,2</sup>、あるいは分割領域のフーリエ変換等の光学的な情報処理とニューラルネットワークを組み合わせ<sup>1,2</sup>、単純なベクトルマトリックス演算に比べ高機能なシステムを実現している。

光相関器を用いたパターン認識も液晶デバイスを入力に用いた実時間タイプが開発されている<sup>2</sup>。これも液晶デバイスが高機能化し、光学システムでの実用化に耐えられるようになってきたことを示している。液晶素子は電気アドレスタイプ、光による並列アドレスタイプ共その高性能化、応用が進んで来ている。

また、新しい画像処理用デバイスとしては液晶アクティブレンズが注目される(図1)<sup>1-9</sup>。これは最近高解像度化され、利用技術が急速に進んでいる液晶素子を用いて、焦点距離の制御、画像の移動等の光学処理を電気的な制御で行うことができるものである。従来のデバイスに比べ、低電圧でより高機能を実現している。

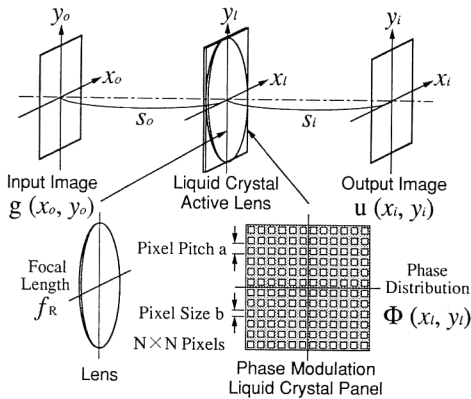


図 1 液晶アクティブレンズ

画像処理の分野では、いくつかのブラインドコンポリューション法についての発表、ニューラルネットワークを応用した例等があったが<sup>1,2</sup>、新しい提案というよりも、92年に引き続いた研究で、手法の改善といったものが多かった。

## 5. 画像表示

セイコーエプソン 曾根原富雄

### 5.1 液晶ディスプレイ (LCD)

LCD はフラットパネルディスプレイの中核として研究開発が進んでいる。今年大きな技術の流れとなったものに、アクティブマトリクスでは高視野角化技術、単純マトリクスではアクティブアドレッシング技術がある。また、反射防止処理などが採用され、見やすさについても検討が加えられるなど LCD は多面的に完成度が向上した。

#### 5.1.1 アクティブマトリクス

大型化、高精細化の追求のほかに LCD の弱点であった視野角の改善技術が数多く発表された。その手法は、位相板によるもの<sup>17</sup>、バンド配向による方法<sup>16,17,18</sup>、画素分割によるもの<sup>17,18</sup>、電極構造によって配向制御する方法<sup>16</sup>、アモルファス配向によるもの<sup>2,17</sup>、2種類の配向材料によるもの<sup>8-8</sup>、PDLC 技術<sup>18</sup>によるものがある。また一部は製品への搭載が予定されている。

アモルファスシリコンを用いた TFT では駆動の最適化<sup>17</sup>、設計手法の提案<sup>17</sup>、高精細化<sup>17</sup>など、より完成度を高める発表が多い。高精細化では 630 万画素が実現された<sup>17</sup>。

ポリシリコン TFT では 1.9 インチの HDTV 対応の高密度ライトバルブ<sup>17</sup>、有効な画素領域を 70% にまで向上した HDTV ライトバルブ<sup>18</sup>などが開発されている。

低温成長ポリシリコンでは、TFT 特性の向上によりドライバ回路を完全集積した LCD が開発されている<sup>17</sup>。

2 端子素子では新駆動方式によるダイオードマトリクスが開発され、HDTV レベルの表示を実証した<sup>18</sup>。

また従来の薄膜型のアクティブ素子とは全く異質な、プラズマ放電のスイッチング特性を利用して LC 層の電圧制御を行う、16 インチの大型カラー LCD が試作され、注目を浴びた<sup>17</sup>。

#### 5.1.2 単純マトリクス

STN 型の話は、位相板や液晶層の設計による光学特性の改善から液晶駆動方法に移った。その方法は従来の線順次選択の概念を覆すものである。1992年に発表されたアクティブアドレッシング駆動法に、複数電極を同時に選択スキャンする駆動法<sup>17</sup>なども加わり、STN 方式の応答性を 100 ms 台まで改善している。一方、ハードウェアでは従来のガラス基板を樹脂フィルム<sup>17</sup>や板材にする開発が活発化したことも話題であった。

地道な開発が続けられていた強誘電性液晶の分野では、強誘電性液晶ディスプレイの製品出荷が開始されたこと、そして反強誘電性液晶を使ったフルカラー動画表示が実証されたこともあり<sup>19</sup>、アクティブマトリクスとの競合技術の座を維持している。

配向など基礎的な分野では、地味ではあるがメカニズム解析や新しい配向方法が引き続き提案されている<sup>1</sup>。またラビングレス配向液晶のメモリ効果現象の解析も進んでいる<sup>1</sup>。

### 5.2 発光型ディスプレイ

直視型の大型ディスプレイではプラズマディスプレイの進歩がめざましい。DC プラズマでは昨年 33 インチカラーの発表につづき、今年フルカラー 40 インチ HDTV の試作報告がされた<sup>17</sup>。AC プラズマでは 21 インチのフルカラーの商品化発表<sup>17</sup>がされた。一方、EL はチオガレート青色発光材料を用いて 2 層型フルカラー VGA パネルが報告された<sup>17</sup>。また今年フラット型 CRT が商品化されたこともあり、壁掛けテレビ時代の到来を実感させるものがあった。

### 5.3 プロジェクション表示装置

LCD プロジェクタでは、PDLC (高分子分散型液晶) ライトバルブ型が低電圧化と応答のヒステリシスを改善し実用化に近づいた<sup>16,17</sup>。また光書き込みライトバルブ型の新たな商品化も行われた<sup>8-1</sup>。ユニークなところでは、20 年ほど前から継続されていた微小のアレイミラー (DMD) が完成度を上げ、768×576 画素を有するライトバルブとして発表された<sup>17</sup>。LCD に比べ応答速

度が早く、赤緑青の順次走査によるカラー投影ができること、光の利用効率が高いことがメリットである。リアプロジェクタ向けの薄型光学系の開発も行われ<sup>3,17</sup>、光学設計、光学素子の面から光学技術のバックアップが期待されている。

#### 5.4 3D 表示

今年は3D画像、人工現実感への関心が非常に高まり、第1回3次元画像コンファレンス、郵政省後援の第1回国際シンポジウムが開催された。仮想ホログラムと光学ホログラムの合成<sup>20,21</sup>、カラー化CGH<sup>21</sup>、改良型音響光学素子ホログラム<sup>21</sup>、電子ホログラムの拡大縮小技術<sup>20</sup>、追尾型レンチキュラー視差ディスプレイ<sup>18,20</sup>、振幅位相変調による中間調表示CGH<sup>1</sup>などプリミティブな試行、模索がなされている。この分野では、動画像として要求に答えられるデバイスや方式の開発など、新しいコンセプトが引き続き求められている。

## 6. 光 記 録

静岡大工 久保高啓

光記録の分野に属する科学技術は光ディスク、ホログラフィー応用、STM (scanning tunneling microscope) 技術応用、PHB に大別される。特に、産業に直結している光ディスクに関する研究開発が活発であった。実用面からはますます高密度・大容量化、小型・軽量・低価格化が求められている。1993年にはこの高密度化の展望がかなり明らかになってきている<sup>25</sup>。

光磁気方式でまとめられた書換形のデータメモリ用国際規格<sup>24</sup>は、直径130mmディスク(2枚張り合わせで両面記録可能な、いわゆるサンドイッチディスク構造)1枚のデータ容量650MBから1GB(いわゆる1.5X)、1.3GB(2X)、2GB(3X)①の時代に移ろうとしているし、2.6GB(4X)の議論も聞こえて来ている。直径90mm MOディスク(CDのような単一円板、いわゆる単板構造)の現容量128MB/ディスクも230MB、256MBの製品化や400~500MBにする規格化の議論が始まっている。このようなデータメモリとしてはデータの高速度転送のため、磁気記録のようなオーバーライト(データを書き込むと前に記録してあったデータが消え、新しいデータが記録される)機能が求められているが、さまざまな工夫、研究にもかかわらず、その技術はこれら規格の中に組み入れ可能なレベルに達していない。ただ、比較的低速で信号の出し入れをするMDの場合には問題なく実用化されている。

同じく書換形だがようやく規格化の議論が始まった相

変化方式<sup>24</sup>の光ディスクは、このオーバーライトが容易で、特に画像処理の分野で活用されている。130mmディスクは光磁気方式と同じくサンドイッチディスクで、容量1GBから製品化が始まり、1.5GBの市販と続き、今、規格化が議論されているのは2GB/ディスクである。それに対し、90mmディスクでは基板を従来ディスクの1.2mm厚さから0.6mmと薄くし、サンドイッチディスクとしたオーバーライト可能・容量600MB/ディスク②の開発が終わり、1.2GB/ディスク③の規格化案が議論されている。これら高密度・大容量化を実現するためマスタリング技術を改良し、1.6 $\mu$ m(現行)→1.34(①)→1.0(②)→0.9(③)→0.8(ピッチむら $\pm$ 30nm以下)<sup>1</sup>、0.5(同10nm以下)<sup>2</sup>とトラックピッチを小さくしている。

別の大容量化の方法として従来、1.6 $\mu$ mピッチの案内みぞ(グループ)、または案内みぞの間(ランド)のいずれかに記録する方式であったのに対し、その両方に記録することにより、トラックピッチ0.8 $\mu$ mを得る方法も実用に近づきつつある。ピッチをつめると隣接トラック間のクロストークが大きくなるが、これを低減するためクロストークキャンセラー技術研究の進展もあった。

間隔をつめたトラックにできるだけ小さいマークを書き込むことは短波長の半導体レーザーの実用化開発・市販(現用800nm→680nm(②, ③用)<sup>1,2,24</sup>ほか<sup>26</sup>)と、短波長レーザーで書き込める記録膜研究にバックアップされている。青色、緑色レーザーの適用研究も行われている<sup>25</sup>が、実用化はそれらレーザーの製品化技術完成まで待たねばならない。基板を0.6mmと薄くしたことも高NAのレンズ(0.6(②))を実機に使用することを容易にし、高密度化に寄与している。マーク長さ(ピット長)、周期に情報をのせるピット長変調(PWM)記録は、現在のデータ記録用に採用されているピット位置変調(PPM)記録に比べ、記録密度を一気に2倍近くにすることができる。そのピット長さの記録精度を向上させる多くの研究の報告は実用化に近いことを示している。次々世代の大容量化はこの技術を前提にしている。

米国ではCD-ROMの普及が本格化し始めた<sup>17</sup>が、データの取り出し高速化のためにディスク回転をCDの2倍、4倍にすることが行われ、書き込みできる追記形も実用化されている。書換え形は光磁気か、相変化のどちらを選ぶか模索の段階にある。

光ディスク装置の小型・軽量・低価格化ではホログラム素子を用いた光ヘッドが大きな役割を演じている。既に実用化しているが一層の機能向上を目指した研究が行

われている<sup>2,4-3,26</sup>.

報告が休眠状態にあった holographic storage について、ISOM/ODS 1993<sup>23</sup> では珍しく 8 件もの報告があった。しかし、実用化に向けた技術的なブレークスルーはなかったようである。

この光記録の研究発表を ISOM/ODS '93 (ハワイ)<sup>23</sup> で見ると発表件数 105 件の 56% が日本、32% が米国、残り 12% が他の 7 カ国で、日米が圧倒的に研究の主力を占めていることがわかる。ICO-16 (プタベスト) で旧共産圏から 3 件の光記録関連の発表があったが、特に注目すべきものはなかったように思う。STM 応用<sup>2,25</sup>、PHB 研究では、著しい進展はなかった。記録膜の厚さ方向に記録面を多層化して記録密度を増やす新しい試みでは、フォトポリマーに 14 層までデータを記録したと報告されている<sup>1</sup>。

## 7. オプトエレクトロニクス・光デバイス

東北大通研 皆方 誠  
松下電器光デバイス研 山本和久

### 7.1 光通信分野

#### 7.1.1 光通信

##### 1) 光位相共役ファイバ通信<sup>4-1</sup>

最近の光ファイバ通信では、信号速度が数 Gb/s 以上と高速化し、光増幅器の使用により高い信号パワーで長距離伝送が可能となった。このために、ファイバ内の Kerr 効果による自己位相変調と波長分散の複合効果に由来する光パルス歪が顕在化するようになった。一般に、電場の位相揺らぎが伝搬時間に比べて緩やかであれば、光位相共役 (OPC) を用いて時間反転を行うことにより揺らぎを補償することが可能である。この分散補償法により、パルス歪の補償が可能であることが示された<sup>1-19,27</sup>。信号光は波長 1.552  $\mu\text{m}$ 、LiNbO<sub>3</sub> 光変調器を用いて 10 Gb/s の NRZ 信号とし、光増幅器で 11 dBm まで増幅した後、長さ 50 km のファイバ (分散 18 ps/(nm·km)) を伝送し、OPC を介してさらに 50 km 伝送後直接検波している。アイパターンの乱れはなかった。実用性が高く今後の発展が期待される。

##### 2) 高速光ソリトン通信<sup>4-12</sup>

高速光通信の制限要因に光ファイバの群速度分散によるパルス広がりがあり、これを克服する方法の一つに光ソリトン通信技術がある。Er 光増幅器 (EDFA) を用いたダイナミックソリトン通信は実用に近い方式である。最近、40 Gb/s-1000 km の光ソリトン実験が報告され、ソリトン波形制御用のクロック信号を伝搬中のソリトンパ

ルス列から抽出して制御することにより、100 万 km にわたりエラーフリー伝送が可能であることが示された。

#### 7.1.2 光変調器・光スイッチ

##### 1) DC ドリフトフリー光変調器<sup>2</sup>

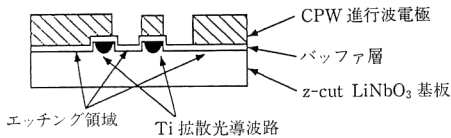
光変調器では、小さな電気信号で歪のない大きな光信号を得るために、電極に電気信号と一緒に DC バイアス電圧を加えて光の動作点を定める。一定のバイアス電圧を加えておいても、光の動作点が時間と共に動いて行く現象は「DC ドリフト」と呼ばれている。1本の光ファイバで何万チャンネルもの信号を運ぶ光伝送システムにおいて「DC ドリフト退治は極めて重要」であるが難問であり、長年の懸案となっていた。最近、光産業振興協会提案の「光学用 LiNbO<sub>3</sub> 結晶の仕様」を満足する結晶<sup>28</sup> を用い、結晶表面の組成変動を極力抑制し、表面エッチングするデバイスプロセスを用いることにより、DCドリフトフリーの LiNbO<sub>3</sub> 光変調器が実現することが示された。波長 1.55  $\mu\text{m}$  で  $V_{\pi}=2.6\text{V}$ 、消光比 25 dB、15 V-10 mHz のスウィング電圧でもヒステリシスフリーであった。

##### 2) 高速・広帯域光変調器

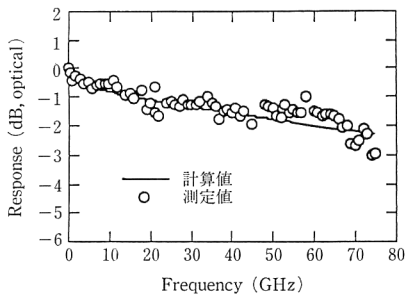
変調器の限界決定要因には、①使用する効果の動作限界周波数、②光波と印加電界との伝搬速度差、③高周波の電極損失、④材料・構造分散、などがある。電気光学効果は近赤外領域まで動作する。②～④は電極や構造に依存する。進行波形電極の光変調帯域幅  $\Delta f$  は、光波と変調波の伝搬速度  $V_0$ 、 $V_m$  の差と電極長  $l$  に反比例する。「速度整合条件  $V_0=V_m$ 」が満足されれば  $\Delta f$  は無限大となるが、電極損失で制約される。有限の電極断面寸法はマイクロ波の伝搬減衰の原因となる。変調周波数の上限および変調電圧は電極長に反比例するので、一般に低駆動電圧で広帯域光変調器を作ることは困難であるが、種々の工夫が成されてきた。最近、リッジ型導波路と進行波形電極を用いた分岐干渉形素子により速度整合を図り、波長 1.5  $\mu\text{m}$  で、帯域幅 70 GHz、半波長電圧  $V_{\pi}=5\text{V}$  を実現している<sup>30</sup> (図 1 参照)。YBaCuO 系超伝導電極を用いた共振型光変調器が報告され、77 K で電極損失は Cu の 1/10<sup>3</sup> に低減化し、中心周波数 18 GHz で  $V_{\pi-p}=2.3\text{V}$  を得ている<sup>4-1</sup>。また、テーパガイドと電極アンテナを結合することにより 94 GHz の光変調を確認している<sup>4-3</sup>。

##### 3) 無挿入損失光スイッチアレイ<sup>31</sup>

空間分割型スイッチを光交換システムに用いるには、32×32 程度のアレイが必要である。その可能性の高い素子として、InP キャリア注入型スイッチに光増幅器を集



(a) 光変調器の構造 (マッハツェンゲル型強度変調器)



(b) 変調器の光応答特性

図 1 リッジ型光導波路を用いた 70GHz 光変調器

積化した素子が提案され、スイッチ部への注入電流  $I_s=80\text{mA}$ 、アンプ電流  $I_a=250\text{mA}$  の時、ファイバとの結合損失を含む挿入損失を補償し、on/off 比 40 dB 以上を得ている。今後、駆動電流の低減化とアレイ化が待たれる。

### 7.1.3 その他

#### 1) VSTEP と光集積モジュール<sup>6-1</sup>

VSTEP は光電融合機能素子の一種で、発光、受光、メモリ、スイッチング、光増幅機能を有し、2次元集積化が可能である。GaAs 基板上に DBR 型面発光レーザーが形成され、サイリスタ構造を持ち、 $0.95\ \mu\text{m}$  で発光する。集積 VSTEP と光学素子を集積化することにより、ノード間、アレイ内、アレイ素子間光接続ができることが実証された。プロセッサ間の光ネットワークが構成できるので、光信号処理への応用の可能性がある。

#### 2) 非導波路型デバイスの光ファイバ集積化<sup>32</sup>

スポット径を局所的に拡大したファイバ間に、非導波路型短光路デバイスを挿入した構造の、ファイバ型アイソレータ、光スイッチなどが報告された。レンズやアライメントフリー集積化が特徴であり、光ファイバ用部品の生産性向上の有効な方法と考えられる。(皆方)

## 7.2 信号処理、情報機器用光デバイス

ここでは、光導波路デバイスを中心に 1993 年の信号処理・情報機器用光デバイスのトピックスを紹介する。

光ディスク、レーザープリンター等の光情報処理分野ではコンパクトな紫～青色コヒーレント光源の実現が望まれており、ここ数年光導波路を用いた擬似位相整合第

2 高調波発生 (QPM-SHG) デバイスの研究が活発である。昨年はなかでも、LiTaO<sub>3</sub> を用いた QPM-SHG デバイスに関する報告が多く見られた。この材料は光損傷に強く、また吸収端が短く 300 nm 帯の SHG に展開できるという特徴がある。デバイスの一例として、プロトン交換によりセグメントガイドを作製することで SHG デバイスを構成し、紫色光が取り出されている<sup>1</sup>。プロトン交換された領域は、同時に分極反転されており、基本波を入射することで高調波が発生し、その換算変換効率は  $86.4\%/W\cdot\text{cm}^2$  である。また、瞬間熱処理法を用いて分極反転層を形成したデバイスにおいては、Ti: サファイアレーザーを光源に使い、基本波 145 mW に対し 40 mW の SHG 出力が得られている<sup>3-11</sup>。

QPM-SHG デバイスの基本波波長に対する波長許容幅は狭く (半値波長幅:  $0.1\sim 0.2\ \text{nm}$ )、半導体レーザーの波長変換の際、工夫が必要となる。これに対して、グレーティングを用いた光フィードバックにより半導体レーザーの縦モードをロックする方法が検討され、LD 入射パワー 72 mW に対して、約 10 mW の紫色光が安定に得られている<sup>1, 3-11</sup>。この方法は LiNbO<sub>3</sub>, KTP を用いた QPM-SHG にも適用され、mW 程度の SHG 出力が得られている<sup>6</sup>。

LiTaO<sub>3</sub> は非線形光学定数だけでなく、電気光学定数も大きな材料である。この LiTaO<sub>3</sub> 基板上に電極を設け、電気光学効果を利用した屈折率制御により高調波を変調する試みが行われている。分極反転層および光導波路が形成された基板に進行波型電極を形成し、電圧 180 V で変調に成功している<sup>1</sup>。電圧の低減が今後の課題である。

X板に SHG 素子を形成することで、半導体レーザーの偏光方向 (TE 偏光) に対して同一平面での直接結合が可能となる。そのため、LiTaO<sub>3</sub> X板への反転が検討され<sup>1</sup>、 $1.6\ \mu\text{m}$  程度の厚さの反転層が確認されている<sup>2</sup>。変換効率は Z板に比べて低く、今後改善が期待される。

LiNbO<sub>3</sub> では電界印加法による分極反転が盛んに行われた<sup>2</sup>。周期状電極を形成し、パルス電圧を印加することで、周期状分極反転層が得られる。 $100\sim 200\ \text{kV/cm}$  の高電界を印加し (室温)、基板裏面にまで達する深い反転層を実現している。その上に導波路を形成し、Ti: サファイアレーザーを用いて 21 mW の SHG 出力が得られている<sup>6</sup>。

LiNbO<sub>3</sub> または LiTaO<sub>3</sub> に電子ビームを照射することで、深い分極反転層が実現されているが、集束イオンビームを基板に照射することでも、同様に深い反転層が得

られることが見いだされた<sup>2</sup>。正イオンを局所的に蓄積させ、発生する電界を利用したものである。反転幅の制御が容易で、周期に対する比が0.5の理想的な反転層が得られており、SHG デバイスへの適用が待たれる。

QPM 以外の SHG として、KTP 導波路を用いたチェレンコフ放射により 21 mW の高調波出力 (Ti: サファイアレーザー光入射) が得られている<sup>2</sup>。また、ファイバー化した KLN により青色 SHG が観測されている<sup>2</sup>。

以上のように SHG デバイスの進展にはめざましいものがあるが、一方で II-VI 族半導体レーザーの緑色光室温連続発振が報告されており、今後の実用化に向けての開発動向が注目される。

光導波路を基本とした光集積デバイスとしては、光ピックアップを目指した研究を中心に数多く報告された。集光グレーティングカップラと変調器を一体化したスポット変調デバイス<sup>1</sup>、入射許容度向上のための短結合導波路を用いた光ヘッド<sup>1</sup>等が提案された。また、DBR レーザーに導波路レンズ、グレーティングカップラが集積化されたデバイスでは、コリメート出力が確認されている<sup>1</sup>。光集積回路の要素技術として、分光分岐素子<sup>1,2</sup>、TE-TM モードスプリッター<sup>2</sup>、偏光ビームスプリッター<sup>2</sup>、ARROW 型光配線<sup>2</sup>等の報告もなされた。グレーティングを基本とした狭帯域光波長フィルター<sup>1</sup>、ブラッグ反射器<sup>1</sup>、テーパグレーティングカップラ<sup>2</sup>等も検討され着実な前進が見られた。SHG と半導体レーザーの結合と同様、ハイブリッド光集積デバイスにおいては、半導体レーザーとの直接結合の実現が今後の課題である。

光導波路の他の応用として変調器がある。導波路型変調器の主たる応用は光通信であるが、光計測用等への応用実験が行われている。マッハツェンダー型変調器を用い、高い測長分解能を有する距離計が開発されている<sup>2-3</sup>。また、光偏向器としては、分極反転を用いた構成が提案され、LiTaO<sub>3</sub> を用いた実験により理論どおりの偏向特性を有することが確認されている<sup>1</sup>。

導波路型デバイスの性能向上のため、LiNbO<sub>3</sub> または LiTaO<sub>3</sub> 導波層をエピ成長しようという研究が行われている。イオンビームスパッタリング法、レーザーアブレーション法、LPE 法を用いて導波層が形成されている<sup>1,2</sup>。結晶性の向上、低損失化が課題である。また、デバイス設計、シミュレーションに必要な光導波層の物性定数(電気光学定数、非線形光学定数、屈折率等)の評価も盛んである<sup>1,2</sup>。デバイスとして重要な光損傷評価も今後増加すると思われる。

バルク型マイクロ光デバイスとしては、ホログラム光

学素子を中心として実用化検討が盛んである。LiNbO<sub>3</sub> 偏光分離素子を用いた光ヘッド<sup>1,2</sup>、CD 用ホログラムヘッド<sup>1,2</sup>等による信号再生実験に成功している。このほかのバルク型デバイスとして、KTP を用いた緑色 SHG 光源、KNbO<sub>3</sub> を用いた青色 SHG 光源が実用化検討の段階に来ており、光ディスク応用面からのノイズ低減、小型化、さらには信号再生実験が行われ良好な特性が得られている<sup>1,2</sup>。

有機光導波路デバイスとしては、QPM-SHG 素子および光スイッチが報告されている<sup>1,2</sup>がいずれも無機デバイスの特性を上回っておらず、今後期待される。

情報処理用光デバイスは、LiNbO<sub>3</sub> を中心に研究開発が進んできたが、このところ LiTaO<sub>3</sub> によるデバイスの進展も著しい。これは、大型基板が容易に入手できること、光導波路化技術が確立してきたことによると考えられる。一方、これまでに導波路デバイスの実用化例はほとんどなく、その一つの大きな障害はアライメントの困難さである。一步先に実用化された光通信用導波路デバイスにおける実装技術が有効に活かされれば、近いうちに一部のデバイスが実用化されるであろう。現デバイスの飛躍的な特性向上、新材料(有機材料等)および新機能デバイスの実現等さらなる進展により、5~10年後には、光集積回路が実用化されていくであろう。そのためには、核となる単体の光導波路デバイス(SHG等)の成功が必要不可欠である。

(山本)

## 8. 分 光

電通大 重成 武

分光の意味する範囲は膨大で、関連する分野も研究者も多岐にわたっているのでここで取り上げるのは、固体物性への応用特に相転移研究分野にかたよっていること、また、網羅的なものではないことをお断りしておきたい。

### 8.1 分光素子、分光装置

干渉計等の微動調整用の素子として広く圧電素子が用いられているが、そのほとんどは PZT (ジルコン酸鉛) とよばれるセラミクスである。しかしその安定性、温度特性等には問題が多く、例えば微弱光の散乱スペクトルの測定を圧電掃引型フェブリペロー (FP) 干渉計で測定する際にその分解能(フィネス)を長時間良好に保つのは至って困難で手の込んだ feedback 回路を必要とする。これに対し近年 PZT に代る素子としてリラクサー (relaxer ferroelectric devices, 適当な日本語訳はまだないようである) と呼ばれる素子が注目されている。内野ら

(Penn State Univ.)によれば<sup>34</sup>, リラクサーは  $\text{Pb}(\text{BiB}_2)\text{-O}_3$  の構成の perovskite 構造の混晶 ( $\text{Bi}, \text{B}_2$  は  $\text{Mg}, \text{Nb}$  等) で, 大きな非線形光学定数を持ち, その圧電特性は温度変化が少なくまた伸縮の歪み履歴が小さいなどの特徴を持つ. 近い将来に Hubble 望遠鏡の微調整, トンネル顕微鏡のプロープ, 光学干渉計などへ応用され, 分光器の高性能化にも役立つことが期待される.

液体や固体等の凝縮系の物性研究にとって, 低エネルギーの素励起状態の測定は非常に重要であり, ゼロから数百  $\text{cm}^{-1}$  の範囲のスペクトルの測定が必要となる. 従来は光子相関法, FP 干渉計, 回折格子分光器等を使い分けねばならず, 広い周波数範囲にわたる constant な解釈をうるのは困難であった. この点を解決する手段として2通りの方法が実用化されている. ひとつは, 2連のタンデム型 FP 干渉計である. エタロン間隔を僅かに異にする二つの FP を直列に通すことによって FP の欠点であるスペクトルの折り畳み効果を減らす試みは既に20年も前から行われているが, 問題は二つのエタロン間隔の掃引をいかに安定に同期させるかであった.

Sandcock(スイス)は, 2個の FP を直線上でなくミラーで斜めに折り返すことによって二つのミラーの掃引を1個の圧電素子で行うタイプを考案しその問題を解決した. このような工夫によって約  $100\text{cm}^{-1}$  までの広範囲のスペクトルが overlap なしに取れるようになった. この装置を有効に利用した例が液体-ガラス状態間の相転移ダイナミクスのレーザー光散乱による研究であろう. Cummins, 酒井らは<sup>2</sup>, fragile glass transition をする salol 結晶のガラス転移における  $T > T_g$  での  $1\text{cm}^{-1}$  から  $100\text{cm}^{-1}$  までの三つの緩和のピーク(エントロピーの緩和, 粘性係数の発散に関係する  $\alpha$  緩和, そして高振動数の  $\beta$  緩和)を測定し, それらが川崎(九大)のモード結合理論によって統一的に説明できることを示した.

もう一つの方法は SOPRA 社(France)が出している高分解能回折格子分光器(DMDP 200)である. これは基本的には新しい方法ではないが, 大きな ( $220 \times 110\text{mm}$ ) 回折格子の高次の回折光をマルチパスで用いメカニカルな精度をあげることに従来 double grating monochromator に比べて(分解能)  $\times$  (明るさ)の積にして約40倍の性能の向上がなされ, これまで分解できなかった  $1\text{cm}^{-1}$  程度の低波数の Brillouin スペクトルが数百  $\text{cm}^{-1}$  の Raman スペクトルと同時に測定することができるという.

これらは何れも地味な改善であるが, 基礎科学にとって重要である. このような改善がハイテクを誇る日本で

なくヨーロッパでなされていることに留意する必要がある. 基礎科学の分野での地道な装置改良や新しいアイデアを大切に評価するゆとりがわが国に欠けていないだろうか.

## 8.2 分光法とその応用

レーザーを用いた高分解能分光や非線形分光法の発展は1970年代から目ざましいものがあった. しかしその応用は主に気体の分光に限られ, 固体についてはほとんどが He 温度における励起子や希土類の光物性に関するものであり, 温度変化が第一義的に重要な相転移の研究への応用はあまり見られなかった. その主な理由は, 常温固体の電子やフォノンの振舞いは, 異方性や不純物の影響もあって気体に比べはるかに複雑でレーザーの高い単色性を有効に利用することが困難であるからである. しかしレーザーの別の特徴を生かした研究方法は近年いくつか見られる. そのひとつは, レーザーの強度が強いことを生かしたもので, 既に多くの例がある Hyper-Raman 散乱はその典型であろう<sup>35</sup>.

最近注目されている impulsive stimulated Brillouin spectroscopy (ISBS) は<sup>34</sup>, 誘導ブリュアン散乱を利用したものである. 二つの(同一周波数の)パルスレーザービームを, 適当な角度をつけて試料に照射させると非線形性のため物質中に密度の周期構造が作られる. 密度格子は音波として伝播, 減衰して行くので, 同時に照射したプローブ光の回折の時間変化は, その周期構造(音波)の時間変化を反映する. 既に線形のブリュアン散乱と同じ情報が時間領域で観測できる. その特徴は, 入射角を変化させることによって, 超音波と線形ブリュアン散乱の中間の周波数帯 ( $100\text{MHz} \sim 10\text{GHz}$ ) の音響フォノンの生成が可能となることである.

音波の分散と吸収を測定する新しい方法として期待されるこの方法は, MIT の K. A. Nelson によって考案されたが<sup>34</sup>, 国内でも木下ら(北大)<sup>33</sup>によって非常によい S/N 比が得られることが例示されている. またこの ISBS によって表面弾性波の測定も可能であることが検証されており<sup>34</sup> デバイス開発の面でも応用されて行くものと思われる.

同じく時間領域の分光として, 森田(電通大)らは<sup>2</sup>, Mode-lock 短パルスレーザーによって強い1次相転移の典型である結晶の融解現象についてその前駆現象が検出できることを示した. これは固体中の励起電子状態を原子振動の揺らぎのプロープとして用いるもので, 揺らぎの相関関数の Fourier 変換を測定する通常の分光法に比べ感度が高く, 時間空間的に局所化した揺らぎを検出

できるという特徴がある。

### 8.3 その他

相転移（特に、構造相転移）に関する分光は、今後は電子状態との関連に注目した微視的な研究が必要となる。典型的強誘電体として古くから知られている KDP 結晶はいまだにその H (proton), または D (deuteron) の果たす役割について議論の多い結晶であるが, 辛 (物性研) ら<sup>2</sup> はそのメカニズムを明らかにする目的で, SOR 光を用いた真空紫外, 軟 X 線域での電子状態の分光を始めておりその結果が注目される。なお KDP の相転移のメカニズムについては長年の疑問を解決するようなモデルが山田 (早大)<sup>2</sup> によって提唱され, それが非干渉性弾性中性子散乱の結果とよく一致することが示されたことは 1993 年における分光学上の成果として特筆に値することといえよう。そのモデルは水素結合をしているプロトンがフォノン場をひきずる形で動き, ある位置で非干渉的なトンネリングを起こすというものであり, これまで提唱されている多くのモデルを内包したものとなっている。

また電子の無輻射過程の研究手段として, これまでの光音響分光法に代って吸収に伴う熱を直接サーミスター等で検出する光熱分光法が有効に利用できることが多元化合物半導体について豊田ら (電通大)<sup>2</sup> によって示された。これも今後の電子状態の研究に有用であろう。以上の例からも知れるように分光学は, 今後狭義の‘光’の分光学の枠を越えて多くの他の手段を含む総合的な研究を意味するものとなる。

## 9. レーザー

NEC 光エレ研 水戸郁夫  
理研 緑川克美

### 9.1 半導体レーザー

半導体レーザー分野における 1993 年では, II-VI 材料を用いた緑青色レーザーの室温連続動作を代表とした波長域の拡大と, 面発光レーザー, 波長可変レーザーのような構造面, 機能面での高性能化が大きな流れであった。日本の経済状況が苦しいなかで高密度光デスク, あるいは光情報処理, 通信システムの性能向上に向けてキーデバイスの開発が促進されている。以下では材料面, 機能面での分類を行い 1993 年の進捗をまとめる。

#### 9.1.1 緑青色半導体レーザー

1993 年は緑青色半導体レーザーの室温 cw 動作が達成された重要な年となった。II-VI 材料系での室温 cw 動作は国内外の半導体レーザー研究の競争であったが,

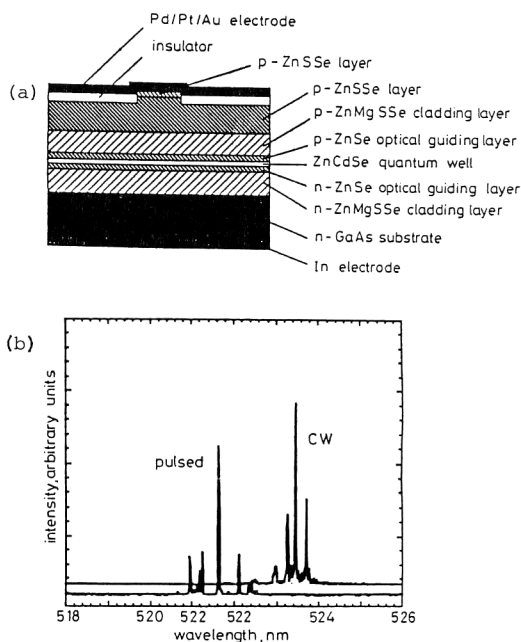


図 1 最初に室温 cw 動作した II-VI 緑青色半導体レーザー構造 (a) と発振スペクトル (b)<sup>v-16</sup>

日本のソニーが先頭を切った<sup>v-16</sup>。また年末には米国からも cw 動作が報告された<sup>v-25</sup>。最初に cw 動作が達成された半導体レーザー構造を図 1 に示す。活性層である膜厚 9 nm の ZnCdSe 量子井戸層を ZnSe 光導波層, ZnMgSSe クラッド層で挟んだ構造である。発振波長は緑青色の 523.5 nm, 発振閾値は 45 mA, 閾値密度は 1.4 kA/cm<sup>2</sup> である。最初の cw 動作としては閾値密度が小さく有望な結果であるが, 動作電圧が 17 V と非常に高い。

年末には ZnCdSe 量子井戸層の膜厚を 7.5 nm として 508.8 nm 波長, 10 mW 出力の cw 動作が米国から<sup>v-25</sup>, さらに国内では量子井戸層膜厚を 5 nm として青色の 489.9 nm の cw 動作が報告された<sup>v-25</sup>。動作電圧が 4~6 V 程度に低減されており, ZnMgSSe クラッド層とコンタクト層の間にグレーデッド層を設ける, MQW 構造にする, そして電極形成の工夫が盛り込まれている。現在実用化されている赤色半導体レーザーに比べて動作電圧が 2 V 程度高いものの, 青色レーザーの閾値密度は 1.5 kA/cm<sup>2</sup> であり, 実用に近い素子特性といえる。1994 年はさらなる性能向上とともに信頼性への取組みも始められると思われる。



### 9.1.2 AlGaInP 系赤色半導体レーザー

AlGaInP/GaAs 系の赤色半導体レーザーは 1992 年に 610 nm までの cw 動作が達成された。1993 年はこの材料系で実用的な短波長帯を 630 nm 帯として、引張り歪 InGaP 量子井戸層を活性層とする 630~640 nm 帯素子の性能向上、高信頼化の報告がなされた<sup>1</sup>。GaAs 基板の面方位を (0 0 1) から 7~15° 程度まで傾斜して、MOVPE 法により結晶成長されている。基板傾斜とともにステップバンチングと称される界面のうねりが生じることが報告され<sup>1</sup>、AlGaInP/GaAs 赤色レーザーは結晶成長技術と相まった性能向上が求められている。630~640 nm 帯素子では最高 cw 動作温度 95°C が得られ、40°C, 50°C で 20 mW, 各々 1500 時間, 500 時間の信頼性試験が報告された<sup>11</sup>。

Al を含んだ材料系であり BH 構造などを採用し難く、従来メサ埋込み型構造がほとんどであったが、新しい試みとして段差基板への成長を行い段差部位を活性層とする素子が報告された。673 nm 波長で 48 mA 閾値, 72 mW の光学損傷出力レベルが得られている<sup>15</sup>。

### 9.1.3 AlGaAs, InGaAs/GaAs 系短波長半導体レーザー

GaAs 基板上的 AlGaAs および InGaAs 歪量子井戸層を活性層とする 0.7~1 μm 帯の短波長帯半導体レーザーの動向は、光ファイバ増幅器の励起光源、あるいは固体レーザー励起光源、SHG 光源、人工衛星搭載光源などが応用対象となっており、高出力化の報告が目立つ。860 nm 素子では 50°C-200 mW のエージング条件で 1000 時間以上の安定動作が報告された<sup>4</sup>。

InGaAs/GaAs 歪量子井戸を活性層とする半導体レーザーの応用は光ファイバ増幅器が主となっている。1.3 μm 波長帯信号を増幅する Pr<sup>3+</sup> ドープファイバは Er<sup>3+</sup> ファイバよりも利得が小さく高出力励起光源が求められるが、1 個の 1.02 μm 半導体レーザーを用いて 23 dB の利得が報告されている<sup>22</sup>。0.98 μm 波長帯では波長が安定な DFB レーザーが報告され<sup>1</sup>、閾値 2.9 mA, 58 mW 単一軸モード出力が得られている<sup>10</sup>。また米国では 1.02 μm 波長の DBR レーザーで 200 mW cw 動作が報告されている<sup>24</sup>。

### 9.1.4 InGaAsP/InP 長波長半導体レーザー

光通信用の 1.3~1.5 μm 帯の InGaAsP/InP 系半導体レーザーでは、活性層を量子井戸、歪量子井戸構造とすることが一般化している。InGaAsP/InP 系半導体レーザーの閾値、吸収損失を決めるオージェ非発光再結合定数、価電子帯間吸収係数に関し量子井戸構造について

の解析が報告された<sup>1</sup>。測定結果も報告されオージェ係数は歪の増加に対し増加傾向<sup>2</sup>、価電子帯間吸収係数は大きな変化が見られていない<sup>7</sup>。これらは長波長帯の量子井戸レーザー設計に対し重要であり、評価方法の検討も含め今後さらなる検討が必要と思われる。

素子構造の最適化による性能向上が進行し 1.3 μm 波長の GRIN-SCH 構造の 1% 圧縮歪の InGaAsP 量子井戸構造素子で最高 cw 動作温度 170°C が報告された<sup>4</sup>。両端面は 85~95% と高反射率であり 170°C での閾値は 46.2 mA と小さい。同じく高反射端面を有する波長 1.5 μm 帯の 0.6% 圧縮歪の InGaAs 量子井戸素子では、150°C までの最高 cw 動作温度が得られ、100°C までの高温域まで無バイアス電流でのパルス変調が報告された<sup>9,12</sup>。また新しい材料として InAsP 量子井戸層を活性層とする素子については 1.8 mA の低閾値が得られ 120°C までの cw 動作が報告された<sup>2</sup>。1.5 μm 波長の歪 MQW-DFB レーザーでは最大 120 mW の単一軸モード動作光出力が報告された<sup>9</sup>。

半導体レーザーの高速化については国内での報告は少ないが、海外では歪量子井戸構造にさらに p 型ドーピングを行うなどによる最高 22.5 GHz の周波数応答帯域が報告されている<sup>16</sup>。多重量子井戸構造内でのキャリア輸送過程が、種々の半導体レーザー特性に影響を与えると理解され、解析、実験が進展した<sup>1,13</sup>。正孔注入効率が内部微分量子効率に影響すること、また、正孔の輸送過程が周波数応答性に影響することなどが報告された<sup>19</sup>。

この材料系での 2 μm 波長帯への波長域拡大が進行した。2 μm 波長帯は従来 GaInAsSb 系の成長が難しい材料が必要と考えられていたが、InGaAs/InP 系の歪量子井戸構造とすることで 2 μm 波長帯がカバーできるようになった。国内での報告はないが、米国では 300 A/cm<sup>2</sup> 程度の閾値密度、1.6 W の室温 cw 光出力が報告されている<sup>5</sup>。各種計測用途が考えられ、従来光通信用途がほとんどであった InGaAsP/InP 系半導体レーザーの応用範囲の拡大が期待される。

### 9.1.5 波長可変半導体レーザー

波長可変半導体レーザーは長波長半導体レーザーに分類されるかもしれないが、報告件数も多いので小分類とする。1993 年は波長可変域の拡大が報告された。多重位相シフト構造の SSG (super-structure-grating)-DBR レーザーでは最大 105 nm の波長可変幅が実現された<sup>6</sup>。半導体材料の広い利得スペクトルを最大限に利用する試みであり、従来の 10 nm 程度の波長可変 DBR レーザー

に比べると大きな変化量が得られるようになった。ただ 105 nm の範囲全部を連続的にカバーしているわけではなく、連続的波長可変動作での可変幅拡大も注目する必要がある。ドイツからは動作機構が比較的単純な TTG-LD (tunable-twin-guide-laser-diode) では 11 nm の連続波長可変動作が報告されたが、その内 4 nm は発熱の効果による動作であり、引き続きキャリアによる高速波長可変動作の素子の開発が期待される<sup>24</sup>。

波長可変レーザーのアレイ素子を作製する上で波長制御に関し選択 MOVPE 法を用いる方法が提案、実験された<sup>2, 25</sup>。ブラッグ反射鏡の導波路を形成する部分に選択成長を用いる。アレイ素子間で選択成長領域の周囲のマスク幅を変化させ、多重量子井戸構造を成長するとアレイ素子間で成長膜厚が変化するため導波路の実効屈折率が変化する。この結果アレイ素子間でブラッグ波長が変化することになる。回折格子の周期をアレイ素子間で変化させる工程を必要とせず、簡便なプロセス技術であり波長多重光源や光集積素子への応用が期待される。

#### 9.1.6 面発光レーザー

基板面に対し垂直方向に共振器を形成する面発光レーザーについては従来 InGaAs/GaAs 系、および AlGaAs/GaAs 系での cw 動作が得られていたが、1993 年は国内で InGaAsP/InP 系で室温に近い温度での cw 動作<sup>10</sup>、および海外では AlGaInP/GaAs 系で 670.4 nm 赤色波長での室温 cw 動作が実現された<sup>19</sup>。長波長帯素子は熱伝導率も大きな MgO/Si の多層膜反射鏡とすることで 14°C で発振閾値 22 mA、波長 1.374  $\mu\text{m}$  での cw 動作が実現された<sup>10</sup>。従来の材料系では出力の増大や信頼性の評価が進められた。米国では 113 mW の cw 光出力<sup>2</sup>、および約 10<sup>5</sup> 時間の平均寿命が報告されており<sup>24</sup>、信頼性の観点からの面発光レーザーは実用的に使える光素子として位置づけされた。

#### 9.1.7 光集積素子

DFB レーザーと変調器 (MOD)、DFB レーザーと光増幅器 (AMP) など、半導体レーザーと各種光素子の集積化は着実に進展している。歪量子井戸層を変調器とする DFB-MOD では 1.4 V で 20 dB の消光比が報告された<sup>12</sup>。DFB-MOD 集積素子を用いた伝送実験では、スウェーデンから 5Gb/s-150km、8Gb/s-75km の伝送実験が報告された<sup>10</sup>。MOD 端面を窓構造にし DFB レーザー領域への戻り光を減少することが光ファイバ伝送特性を安定化しており、半導体レーザーの集積素子作製においては、やはりレーザー戻り光について十分注意する必要があることがわかる。

半導体アンプとレーザーの集積化により出力増大は米国から報告された。MOPA (master-oscillator-power-amplifier) と称され、InGaAs/GaAs 系材料で 2 W の cw 出力が得られている<sup>3</sup>。光集積素子と光ファイバとの結合効率を高めるためにテーパ導波路として端面でのスポットサイズを大きくした素子の作製も行われた<sup>29</sup>。

#### 9.1.8 まとめ

1993 年も II-VI 属半導体の結晶成長技術を始めとして MOVPE 成長技術、プロセス技術が着実に進展し光素子の性能が向上した。波長域拡大による応用分野の拡大も期待され 1994 年も活発な半導体レーザー研究が予測される。

(水戸)

## 9.2 気体・固体レーザー

1993 年の気体および固体レーザーと、その関連技術分野の動向を振り返ってみると、ここ数年の傾向と同様に波長可変固体レーザーをベースとしたパラメトリック発振器や超短パルスレーザー発振器・増幅器あるいは半導体レーザー (LD) 励起レーザーなどの開発が盛んである。これに対して、液体媒質である色素レーザーの報告は、ほとんど聞かれなくなった。気体レーザーでは、超先端加工プロジェクトが大詰めを迎え、産業界を中心にリソグラフィ用の KrF エキシマーレーザーが実用化に向けて開発が進められている。短波長レーザー関連では、テーブルトップサイズの軟 X 線レーザーの実現をめざしてさまざまな試みがなされている中で、高出力超短パルスレーザーを用いた新しい励起方式による軟 X 線の増幅が報告され、注目されている。一方、レーザー応用面では、アブレーション加工が大きな広がりを見せている。

ここでは、国内の応用物理学会の春季および秋季講演会、国外では米国で開催された CLEO/QELS '93 および OSA の Annual Meeting での報告を中心に、1993 年のレーザー界の進展を紹介する。

#### 9.2.1 固体レーザー

ここ数年のパラメトリック発振器とモード同期チタンサファイアレーザーの進展により、フェムト秒領域で動作する広帯域波長可変パラメトリック発振器が実現されるようになった。すでに、その波長可変域は 0.6 から 3.5  $\mu\text{m}$  に達しており<sup>11</sup>、市販品も得られるようになった。また、チタンサファイアレーザーと LBO を用いたパラメトリック発振器の組合せにより、パルス幅は 40 fs まで短縮された<sup>6</sup>。さらに、新しい非線形光学結晶である KTA (KTiOPO<sub>4</sub>) の導入により 5.3  $\mu\text{m}$  までの波長域の拡大の可能性が示されたことが注目された<sup>14</sup>。

一方、モード同期チタンサファイアレーザー自体の短パルス化も盛んに行われており、共振器内分散の補償を最適化するとともに、高濃度 (0.15%) で短い結晶 (4.5 mm) を用いることにより 11 fs のパルス幅が達成された<sup>1-12</sup>。この時、予備的な測定では、最短で 8.3 fs のパルスの発生が報告された<sup>7</sup>。また、フェムト秒パルスの増幅に関しても大きい進展があり、チャープパルス増幅により、20 fs で 0.5 mJ のエネルギーが得られた<sup>7</sup>。このパルス幅は、増幅時における利得の狭帯域化を考慮すると、ほぼ理論的に限界である。また、高出力化に関しては、Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> を用いた 100 fs, 10 TW レーザーシステムが報告された<sup>6</sup>。この最終段のフラッシュランプ増幅器では、直径 25 mm で長さ約 100 mm のロッドを 2 本直列に使用している。繰返しは、10 分に 1 ショットで、その集光強度は  $5 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> に達する。

国内では、LD 励起による完全固体化レーザーの研究がますます盛んになっており、Nd:YAG/YLF に関しては、それぞれの応用にに応じて高出力化や単一モード発振、周波数安定化などの技術が開発されている。また、その 4 倍波変換による高効率連続紫外光の発生も注目されている<sup>2</sup>。Nd:YVO<sub>4</sub> に関しては、光情報記録等への応用を目的として、共振器内 SHG による小型高効率グリーンレーザーが盛んに研究されている。現在の主な課題は、そのノイズの低減と発振の安定化である。

### 9.2.2 気体レーザー

気体レーザーの分野では、特に新しい技術の進展は見当たらないが、CO<sub>2</sub> レーザーやエキシマレーザーは、それぞれの応用に即してその性能は着実に向上している。特に、エキシマレーザーではいくつかの顕著な性能の向上がみられた。欧州のユーレカプロジェクトからは、10 J, 100 Hz で動作する 1 kW 級 XeCl エキシマレーザーが報告された<sup>6</sup>。このときの送風機を含めた装置全体の効率は 2% である。

国内では、ArF レーザーにおいて電極材料や不純物の除去などの改良により、 $4 \times 10^8$  ショット以上の寿命を達成された<sup>2</sup>。また、 $4 \times 2$  cm<sup>2</sup> の大口径機も開発され、放電励起型 ArF レーザーとしては最大級の 1.2 J のエネルギーが得られた<sup>2</sup>。

リソグラフィへの応用を目的とした狭帯域 KrF レーザーでは、新しい共振器構造を採用することにより、スペクトル幅を 3 pm 以下に抑えるとともに用いるエタロンの寿命を 10 倍以上長くすることに成功し、600 Hz の動作で 8 W の出力を達成した<sup>2</sup>。

その他、Ar レーザーでは、それ自体の進展は見られ

ないが、共振器内に BBO 結晶を配置する方式により 10 W の 514 nm 光から 6 W の SHG 出力が得られ、コヒーレントな連続紫外光源として注目された<sup>1</sup>。また、銅蒸気レーザーでは、700 時間以上の長時間発振や大口径増幅器の増幅特性などが報告された<sup>2</sup>。

### 9.2.3 真空紫外、軟 X 線レーザー

真空紫外から軟 X 線領域の短波長レーザー関連では、まず注目されたのは、高強度超短パルスレーザーの光電界により、生成される低温多価イオンプラズマを用いた新方式の軟 X 線レーザーで、初めて増幅の報告がなされたことである<sup>6,2</sup>。励起光源には、0.5 ps で 50 mJ の KrF レーザーを用いており、初期媒質には Li<sup>+</sup> を用いた。増幅の観測された遷移は、水素様リチウムイオン (Li<sup>2+</sup>) の基底状態への遷移 (Lyman- $\alpha$  線) で、波長は 13.5 nm である。この方式は原理的に短波長化が有望であり、今後の展開が期待される。

従来の大型のガラスレーザーを用いた電子衝突励起法においては、高密度プラズマによるレーザービームの屈折を補償する湾曲ターゲットの使用により、X 線レーザーのコヒーレンスの向上と効率の改善が得られた<sup>1</sup>。

一方、高次高調波発生に関しては、その短波長化は一段落し、物理的機構の解明が進められた。その結果、得られる最短波長の光子エネルギーが媒質のイオン化ポテンシャルとレーザー強度と波長から決定されるようになった。報告された最短波長は、Ne を媒質としてパルス幅 1 ps のガラスレーザーを用いた場合で、7.4 nm (135 eV) である。

### 9.2.4 レーザー応用

レーザー応用で特に注目されたのはレーザーアブレーション加工である。特に、国内の応用物理学会等では、その報告件数が増えており、大きな分野を作りつつある。対象とする物質は生体系から有機、無機材料と広範囲であり、応用範囲も半導体関連装置の微細加工から難加工材料の切断・切削、薄膜形成など多岐にわたっている<sup>1,2</sup>。また、使用されるレーザー光源も従来の YAG レーザーやエキシマレーザーに加えて、真空紫外レーザーや超短パルスレーザーなど広がりを見せている。それらの中で注目されたのは、0.5 ps の KrF エキシマレーザーによるダイヤモンド薄膜の形成である<sup>6</sup>。超短パルスレーザーによるアブレーションにおいては、生成物のエネルギーが高いことおよびクラスターが発生しにくいことにより、通常のアナログレーザー照射に比べて品質の良い膜ができることが報告された。

地球環境の変化が大きな問題となるにつれて、大気計

測や気象観測用などのレーザーレーダーの報告も多くなってきている。ここ数年の傾向は、チタンサファイアレーザーやアレキサンドライトレーザーのような新しい波長可変固体レーザーが使われるようになってきたことである。また、汚染の監視や微量物質の検出などの工業計測分野でも波長可変固体レーザーが使われるようになってきた。

ここ数年の固体レーザー、非線形光学結晶および高出力LD等の固体材料の進展により、従来は専門家でなければ取扱いが困難であったような超短パルスレーザーや広帯域で波長可変なレーザーが、専門家以外でも比較的容易に扱えるようになってきた。今後、LD 励起による小型化が普及することにより、それらの応用はさらに大きな広がりを見せるものと期待される。(緑川)

## 10. 視 覚 光 学

千葉大工 塩入 諭

人間の情報処理機構という扱いにくいものを対象とする視覚光学の分野では、一年間で飛躍的な進展や変化があることはまれであるが、ここ2、3年盛んになりつつある興味深い研究がいくつかある。その一つは心理物理学的手法を用いた学習の視覚処理過程の研究である<sup>7,36</sup>。例えば副尺視力刺激の弁別課題という、解像度に関連するような非常に低次の視覚課題に対する学習が存在することが示されたが<sup>7</sup>、これは学習が神経系のネットワークレベルで行われていることを示唆しており、新しい研究分野として広がっていく可能性がある。もうひとつは、磁気刺激により脳内を直接刺激し、その影響を調べるものである。脳へ直接刺激を与える方法は、手術によって脳を露出し、その表面を電気的に刺激することは従来行われてきたが、非接触の磁気刺激でも同様の効果が得られることが報告された<sup>37</sup>。さらに、ある部位に磁気刺激を与えると、両眼立体視ができなくなるとの結果が得られ、視覚研究に対する有効性も示された<sup>37</sup>。この手法については、安全性などに未知な部分が多いが、視覚に限らず脳研究の重要な手法に発展していく可能性は大にある。

光学関連分野での視覚研究としては、色覚や立体視、運動視を中心に、興味深い研究が報告されている。以下に特に注目されたものを中心に概観する。

### 10.1 色 覚

色覚の研究は、人間の視覚メカニズムに関する基礎的な研究と異なるメディアの間での色再現性などの応用的な研究の両方が盛んであり、関連しながら進んでいる。

特に両者にとって重要な事柄のひとつは、標準の錐体分光感度関数を定めることであろう。この仕事は、CIE (国際照明委員会) が進めており、標準の錐体分光感度関数が近い将来決定されることになり、色度の表現も錐体の分光感度を基礎においたものに移行していくのではないと思われる<sup>7</sup>。基礎研究においては、錐体以降のメカニズムのモデル化が容易になるし、実際に色度座標などを利用する立場においても、色度座標の持つ意味が明確となり理解が容易になることが期待できる。

基礎、応用の両面で注目されている分野として、色の見えを決定する要因の研究がある。錐体の特性に基礎をおく心理物理学的な実験データから、色を数値として表現することを可能としたのが表色系であるが、そのみでは実際に観察される色の見えを表現しきれない。これについては、異種メディア間の色表示の問題と関連し、多くの研究が行われている<sup>1,3,38,39</sup>。

色の見えを決める主要な要因のひとつとして、周辺色の影響があげられるが、従来、周辺色の影響を定量的に調べる研究では、単色を用いたものが多かった。それに対して複数の周辺色を用いたの研究が増えつつあり、白色点については、複数の周辺色でも、その平均的な色と同じ効果が得られる<sup>1,39</sup>、しかし有彩色では彩度に対する順応効果があることなどの実験結果が報告された<sup>3,5,39</sup>。光源色、物体色等の色の見えのモードの研究も周辺色の効果と捕えることができるが、モードに関する研究も多く<sup>1,3,38,39,4-8</sup>、CRT 上とハードコピーの間での色の差異に関する問題も徐々に理解が深まっている。

その他、レーザー干渉法による眼光学系のバイパスと理想観測者のモデルとを用いることにより、網膜上での錐体の分布と輝度と色のコントラスト感度を詳細に比較し神経系の空間周波数特性まで予測する試み<sup>5,f-10</sup>、色メカニズムの時間特性の測定および色メカニズム間の抑制的な相互作用<sup>1,3,38,39,4-8,x-1</sup>、様々な時空間条件下での色弁別能の測定<sup>1,3,38,39</sup>、色の記憶におけるカテゴリカル性<sup>1,3,7,36,38,39</sup>などの研究が着実に進んでいる。色の記憶がカテゴリカルであるとの実験結果は、大脳の色処理にかかわる最も高次処理レベルでの生理学的な知見と類似している点で非常に興味深い。

### 10.2 立 体 視

立体視のメカニズムの解明を目的とした研究では、様々な実験データの蓄積が続けられている。立体視の研究は主に三つのタイプに分類できる。一つは、両眼立体視の諸特性の研究であり、テクスチャーの差でできた図形などいわゆる2次の刺激に対する立体視能力など貴重な

データが集められている<sup>38,39</sup>。2番目は、両眼立体視以外の奥行き手掛かりに関する研究で、運動や陰影からの奥行き知覚の研究である<sup>39</sup>。この分野の研究はその重要性に比べ、実験データが少ない感がある。現象が複雑で取扱いが難しいことがその要因であると思われるが、なんとか新しい境地を開いて欲しい分野である。

最後は、異なる奥行き手掛かりの間の相互作用に関する研究である。奥行きの知覚に係わる手掛かりは数多く存在するため、それらの間での情報の統合や相互作用の検討は、古くからの興味の対象であった。近年、刺激提示装置の発達に伴い、複雑な相互作用の検討が可能となったために発展しつつある分野であるといえる。両眼視差と運動視差の奥行きの加算機構の存在や両眼立体視の形成過程に他の奥行きの手掛かりが影響を与えることなどが明らかにされた<sup>3,38,a-1,y-3</sup>。しかし、奥行き統合の機構の全体像を理解するためには、まだまだデータが不足していると言わざるを得ない。

### 10.3 運動視

運動視も、視覚処理の基礎過程の一つと考えられるが、その役割は運動情報の処理にとどまらず広範囲にわたる。上述のように、運動情報は奥行き、立体の知覚にとって重要であるし、運動物体の背景からの分離にも使える。さらに、自己運動に伴う網膜像の流れからは、自己の進行方向や、進行方向にある対象に到達するまでの時間などの重要な情報が得られる。

ある網膜位置の刺激に対して運動方向の検出をするという最も単純な運動検出についてはおおよその機構はわかかってきており、現在はそのような単純な運動検出器では説明できない運動知覚についての研究が盛んである。特に、テクスチャーの差など輝度差以外の特徴でできた刺激図形の運動を検出するメカニズムが、輝度差刺激の運動検出器と独立に存在することを示す実験<sup>38,39</sup>は、これまで研究されてきた単純な運動検出器以外の運動検出器を考えなければならないことを意味する点で重要である。また、周辺の運動情報が注目する場所での運動知覚に影響することを示す実験もいくつか行われ<sup>38,39</sup>、単純運動検出器より相対的な運動を処理するメカニズムの重要性が示された。

### 10.4 眼球運動

眼球運動分野の研究数はそれほど多くないが、興味深い視点での研究がなされている。国内では、注視点の移動のための眼球運動であるサッケードの研究が主流であり、その多くはサッケード中の視覚認識の抑制効果、サッケード抑制に関するものである。サッケードの輝度チ

ャンネルに対してと色チャンネルに対しての影響の比較<sup>36,a-1</sup>、照明の変化に対するサッケード抑制の程度<sup>3,39</sup>、変位に対するサッケード抑制の大きさ<sup>a-10</sup>、それに対する背景とターゲットの間の奥行きの影響<sup>39</sup>、不同視の被験者の特異なサッケード抑制<sup>39</sup>、サッケード中に点滅光の観察される位置の測定<sup>39</sup>など多くの実験結果が報告された。運動刺激の速度変化の検出については抑制効果がみられないことが明らかにされた<sup>a-6</sup>ことは、予想外の報告であった。これは、視覚の処理が眼球を動かしつつ、それぞれの注視点で得られた情報を統合しているであろうことを考えると非常に興味深い。ある種の情報はサッケードによる抑制が働かず、眼球運動の前後での統合に関与する可能性があるからである。

また、日本ではじめて眼球運動に関する専門書「眼球運動の実験心理学」の発行されたことも、この分野での重要な進展といえるので付け加えておく。

### 10.5 その他

多くの対象物の中から求めるターゲットを捜し出す能力を測定する視覚探索実験、縞刺激の検出や知覚に及ぼす周辺パターンの影響など<sup>39</sup>、視覚系が広い範囲からの情報をどのように取り扱うかを考えるうえで重要な研究も増加している。同様に、広い範囲での色や明るさを考えるときの、視覚系の順応状態を示すものに対応するものとして、照明認識視空間という概念も提案された<sup>a-5</sup>。通常の視環境での色を扱う場合に有効なものに発展することが期待される。

視覚的注意の問題も、近年再び注目を集めている分野であり、運動残効との係わりなどが調べられた<sup>1,38,z-5</sup>。立体視の研究などで、両眼球の位置を固定するために用いられる、ノニウス刺激というものがあるが、これが必ずしも有効でないとの指摘もあった<sup>3,39</sup>。このような研究は、心理物理的な実験手法を改善するため役立つものであり、慣例的に用いている実験手法を常に再検討する必要があることを思い出させる。

また、大脳生理学の見解を基礎におくコンピュータビジョンの研究も様々な角度から行われているが<sup>3,38</sup>、視覚研究というよりは計算機での視覚認識の実現に重点がおかれているように思われる。

### 10.6 まとめ

心理物理学的に視覚の研究をするためには、いくつかの巧妙なしかし限られた手法に頼らざるをえない。両眼立体視について言えば、そのメカニズムを他の奥行き手掛かりから独立して刺激するためにランダムドットステレオグラムが用いられる。1993年には、その発明者であ

る Julesz の 65 歳の誕生日を記念した講演会が開催されたが、そのテーマは、「Linking psychophysics, neurophysiology, and computational vision」であった。視覚光学の今後の展開において、心理物理学、神経生理学、コンピュータビジョンの三つの分野での情報交換は必要不可欠であるということであろう。現在、国内においては、そのような情報交換の場は十分とはいえないが、視覚研究グループと日本視覚学会の主催する研究会では、ある程度の交流が実現しており、今後の発展を期待したい。

最後に付け加えると、視覚研究の中心的な役割を果たしてきている雑誌「Vision Research」は、1993年に月刊から2カ月に3号発行に変更した。また国内では、日本光学会視覚研究グループを母体とする日本視覚学会発行の「Vision」に原著論文の掲載が開始された。視覚研究がより盛んになっていく様子がうかがえ、そこから何が生まれてくるかがますます楽しみになっている。

## 11. 光源・測光・照明

松下電子工業 猪飼泰博

光源・測光・照明の分野においては、この一年特筆すべき大きな変化はなかったように思われる。ここでは、近年の傾向を踏まえて、昨年の照明学会や生理人類学会関連の全国大会、支部大会、委員会の発表内容から、この一年特に強く感じたことを述べる。

光源の分野では、近年、液晶用バックライトと無電極ランプの開発に関心が高く、昨年もこれらの光源に関する報告が目立った。

測光の分野では、シリコンホトダイオードを使った測光標準の開発および球形光束計を使った全光束の測定に関する研究が昨年も地道に続けられ、実用レベルに一步近づいた。

照明の分野では、快適照明に関する研究が増すとともに、その成果を具現化するために光色が変化する照明システムの開発が行われている。特に昨年は、照明の制御にニューラルネットワークを用いた発表があり、照明の分野にも最先端の半導体技術が活用されてきている。

### 11.1 光源

カラー液晶を用いた AV 商品として液晶プロジェクタの市場が今後大きく伸びると思われる。しかし、最適な光源の開発なしでは液晶プロジェクタの小型、軽量、大画面という特長を引き出すことができない。そこで光源としては、点光源化と長寿命化という相反する課題を解決する必要がある。

現在、液晶プロジェクタ用光源の主流は、150 W のショートアークメタルハライドランプである。電極間距離は 4~6 mm で、寿命は 1,500 時間程度（理想的には 10,000 時間必要）である。また、スクリーン照度を上げるためには、電極間距離を 1 mm 程度にまで短くする必要があるが、寿命が極端に短くなる。

昨年の発表の中には、点光源化、長寿命化を狙った発表が多かった。電極間距離を 3 mm にして光の利用効率を上げ、その分、光源の省電力化をはかり、120 W メタルハライドランプで 150 W 相当のスクリーン照度を得たという報告があった<sup>40</sup>。また、ショートアークメタルハライドランプを直流点灯することによって、石英発光管の白濁を抑制することができ、ランプの長寿命化に効果があることが報告された<sup>40</sup>。長寿命化の別のアプローチとして、耐ハロゲン性にすぐれたセラミック発光管を用いたメタルハライドランプの発光管端部の構造を改良し、寿命改善に良好な結果を得たという報告もあった<sup>40</sup>。

一方、電極を有さず高周波またはマイクロ波で駆動して可視光を発生するのが無電極ランプである。高周波駆動による無電極蛍光ランプは既に商品化されているが、無電極 HID ランプは基礎研究がほぼ終わり実用化へ向けての開発が始まったところである。無電極 HID ランプは従来の HID ランプと違って、1) 電極と封入物との反応や電極飛散がなく長寿命、2) 封入物の選択の幅が広がり、高効率、高演色性を実現可能、3) 小さな光源にすることが可能で、光束の立上りが早い、などの特長を有し、次世代光源として期待されている。

昨年は無電極 HID ランプに関する発表は少なかったが、高周波駆動無電極メタルハライドランプの基礎技術開発および点灯システムについての報告があった<sup>42</sup>。

有電極ランプでは、長寿命点光源ランプの実現に限界がある。一方、無電極ランプは点光源に近く長寿命であることから、液晶用バックライトとしても期待される。

### 11.2 測光

従来より、測光標準には電球が用いられてきた。電球は光源のなかでは比較的特性が安定しているが、寿命が短く取扱いに注意が必要である。既に知られているようにシリコンホトダイオードの自己校正法を用いることにより、ホトダイオードの絶対分光応答度を求めることができ、光放射の一次標準として利用され始めている。また、精度の高い自己校正法の技術を応用して、測光量を値付けする試みがなされている。

昨年も、シリコンホトダイオードの自己校正法に関する報告が多かった。自己校正法で得られた絶対分光応答

度に基づく光度測定の精度が向上し、真値にさらに近づいたとの報告があった<sup>40</sup>。シリコンホトダイオードを用いた相対分光応答度を国内4機関で比較測定を実施した結果、実用上十分満足できる結果が得られている<sup>40</sup>。また、白色光を用いて、シリコンホトダイオードの測光量に対する応答度を直接自己校正する方法を考案し、実際に試みた結果、十分な確度を得られたとの報告があった<sup>29</sup>。

一方、全光束の測定技術に関する研究も継続的に進んでいる。球形光束計を用いた全光束測定では、光源の形状や遮光板の形状による系統誤差を低減することが課題である。

球形光束計における相互反射計算の新しいモデルを考案し、系統誤差を低減、補正するのに有効な手段となったとの報告があった<sup>40</sup>。また、遮光板として、照明学会モデルと CIE モデルとの両方で全光束に与える系統誤差を計算し、照明学会モデルの方が誤差が小さいことが示された<sup>41</sup>。

測光の分野も昔ながらの電球を用いた測定から半導体素子を用いた測定へと変化することによって、測光が身近なものとなっていくであろう。今まで、電気計測に比べると光計測に対する関心は低かったが、近年、各社が ISO-9000 シリーズ 認証取得活動を活発に行っており、これを契機に光計測への関心が高まり、測定技術向上の研究に拍車がかかるであろう。

### 11.3 照 明

照明の分野における近年の傾向としては、照明の明るさや光色と人の生理、心理との関係を研究し、その成果をもとに照明を制御して、快適な居住空間を演出しようという動きがある。また、それを実現する新しい照明システムの開発が行われている。

昨年の発表でも、色温度の変化が心理反応に及ぼす影響、照明の色が快適性に及ぼす影響、温熱感覚と光色との関係などについて多くの報告があった<sup>43</sup>。また、自然の光のゆらぎを快適照明制御に導入すべく、ろうそくの炎のゆらぎを計測、解析した例<sup>44</sup>や、室内の温熱環境と快適性との関係をニューロ技術を用いて求め、さらに照明の快適制御をニューロプロセッサで自動的に行う方法について紹介があった<sup>40</sup>。

快適照明を実現する照明器具の研究も行われている。RGB 蛍光ランプを組み合わせた光色可変照明システムにおいて、光束が多く得られるランプの組合せを色計算シミュレーションで求め、白色蛍光ランプ(W)を加えた RGBW の組合せが良いとの報告があった<sup>40</sup>。また器具下

面の拡散面上の色むらを評価する指数を提案し、GRBW の配列が最も良いことが示された<sup>40</sup>。直管 40 W 蛍光ランプでは、光束や色むらの検討から電球色蛍光ランプ(L)を加えた RGBL の配列が良いことが示された<sup>41</sup>。また、ツイン形 36 W 蛍光ランプを用いて色温度が 3,000~10,000 K まで変化可能な照明システムを開発したとの報告があった<sup>41</sup>。

快適照明を一般家庭に持ち込むには、まだまだ制御内容や照明器具の大きさなど開発課題は多いが、光色の変化を楽しむことのできる時代が少しずつ近づいているようである。

最後に、現代のストレス社会において、「あかり」による人間性回復の一助を担いたいものである。

## 12. 光学関連の規格

キャノン 桑山哲郎

日本工業規格(JIS)は、工業標準化法に基づいて制定される国家規格であり、その件数は8,400件を越えている。新規に制定されたJISは、5年ごとに見直しが行われ、改正、確認または廃止の手続きがとられる。技術の変化が少ない分野では「確認」により同一の内容が継続されるのに対し、変化の早い分野では、頻繁に「改正」が行われることになる。

本年のこの報告では、1993年に制定・改正または廃止されたJIS規格を紹介し、規格の審議状況を知る手段について簡単に説明する。次に、規格・標準として特別な性格を持つ「JIS標準色票」関連の事柄の解説を行う。

### ●新規に制定された JIS 規格

C5932 光伝送用光アイソレータ通則, C5933 光伝送用光アイソレータ試験方法, C5980 F11 型光ファイバコネクタ, C5981 F12 型多心光ファイバコネクタ, C6184 光ファイバ用光パワーメータ試験方法, C6190 光ファイバ用光源試験方法, C6838 テープ形光ファイバ心線, C6839 テープ形光ファイバコード, K5263 光ファイバ分散データインタフェース(FDDI)―第3部―トランク物理層の媒体依存部(PUD), K7550 16mm及び35mm映画カメラ用日中装てんスプールの寸法。

### ●改正された JIS 規格

B7110 写真撮影用ガラスフィルタ通則, B7121 プリズム双眼鏡, B7122 ガリレイ双眼鏡, B7141 顕微鏡対物ねじ, B7142 顕微鏡対物レンズ及びレボルバのねじ部, B7147 生物顕微鏡用対物レンズ, B7150 測微顕微鏡, B7154 地上単眼望遠鏡, B7155 天体望遠鏡, B7156 射撃照準望遠鏡, B7181 映写レンズの解像力試験標板,

C1609 照度計, C5961 光ファイバコネクタ試験方法, C5962 光ファイバコネクタ通則, C5970 F01 形単心光ファイバコネクタ, C5971 F02 形単心光ファイバコネクタ, C5972 F03 形単心光ファイバコネクタ, C5973 F04形単心光ファイバコネクタ, C5974 F05 形単心光ファイバコネクタ, C5975 F06 形単心光ファイバコネクタ, C5976 F07 形2心光ファイバコネクタ, C5977 F08 形2心光ファイバコネクタ, C5978 F09 形単心光ファイバコネクタ, C5979 F10 形単心光ファイバコネクタ, C6834 プラスチッククラッドマルチモード光ファイバ素線, C6841 光ファイバ心線融着接続方法, C7614 照明の場における輝度測定方法, K7521 X線写真フィルムの寸法, K7542 エレクトロニック・スキャナー用写真フィルムの寸法, Z4901 胸部X線間接撮影用ミラーカメラ, Z4905 放射線用フィルムカセット, Z6012 16mm マイクロフィルム用カートリッジ, Z8721 三属性による色の表示方法.

上記, 新たに制定された JIS 10 件中9件, 改正された JIS 34 件中 14 件が光ファイバ通信に関するものである。これは, この分野の技術の進歩が大変早いため, そして担当機関(財団法人光産業技術振興協会)が計画的・集中的に審議を行ったためである。

#### ●廃止された JIS 規格

C7003 ブラウン管の形名, C7004 撮像管の形名, C7111 映写用電球, K7554 8mm タイプR映画用フィルムの寸法, C7512 投光器用電球.

この他に, 制定作業を開始した JIS 原案, 見直し作業を開始した JIS があるが, ここでは割愛する。

#### ●規格審議の経過を知るには

制定あるいは改正予定の JIS については, ほぼ毎日発行される「通産省公報」, および日本規格協会から毎月発行される「標準化ジャーナル」を通して知ることができる。施行直前の最終案に対しては, 国内・国外を問わずだれでも自由に, 内容の入手と意見の提出が可能なくみになっている。これにより, 貿易の技術的障害に関する協定(ガット・スタンダードコード)における規格審議の『透明性』を保証している。

より早い時点から制定作業の途中経過を知るには, 審議を担当している委員会に委員として加入するのが直接的な方法であるが, 間接的に情報を得る手段もいくつか存在する。前述の財団法人光産業技術振興協会では, 協会内の組織である光産業技術標準化会の会員になることで複数の委員会に参加することができ, 2か月に1回発

行される「光標準化ニュース」から, JIS, IEC および ISO の審議の状況がわかる。同様な標準化活動のニュースは情報処理学会情報規格調査会, 事務機械工業会などからも発行されている。

光学関連の JIS の審議は, それぞれ個別の工業会, たとえば日本顕微鏡工業会, 日本光学測定機工業会, 日本写真機工業会, 日本測量機器工業会ほかが分担しているが, ISO/TC 172 (光学及び光学機器) は, これらの工業会の上部団体である日本光学工業協会が担当している。「ISO/TC 172 国内委員会報告 No. 6 (1993)」はこの協会から2年毎に発行される報告書である。委員にだけ配布される資料であるが, ISO 審議の動向をまとめて知るのに便利である。

#### ●標準色票の発行

測定値のトレーサビリティを確立するには, 計測方法の規定だけでは不十分で, 「原器」に相当するものが必要な場合がある。色彩の分野では「JIS 標準色票 [光沢版] 第8版」が日本規格協会から発行された。これは, JIS Z 8721 (三属性による色の表示方法) の改正に対応したものである。色票は『色のものさし』として測定器の管理などに使用されるが, 今回は利用度の高い226色の追加, カラーチャートの寸法の B 5判から A 4判への拡大などの改良が加えられている。1994年には JIS Z 8722 (物体色の測定方法—色の測定方法), Z 8729 ( $L^*a^*b^*$  表色系及び  $L^*u^*v^*$  表色系による物体色の表示方法) が施行される予定であり, さらに Z 8701 (XYZ 表色系及び  $X_{10}Y_{10}Z_{10}$  表色系による色の表示方法) の見直し作業もアナウンスされている。これらの一連の動きは, 産業界で色の管理の重要度が増していることに対応した動きであり, 工業規格が産業界の動きを忠実に反映していることをこれからも知ることができる。

規格全体に関連した大きな話題としては, 11月1日の「新計量法」施行による国際単位系 (SI) への切り替え, 「品質保証の国際規格 (ISO 9000 シリーズ)」の認証の進展等がある。これらは産業界のすべての分野にかかわるものであり, 本格的な国際化の時代の到来に対応するものである。

これからの企業活動の上で, 規格の重要度はますます高まっていくことが予想される。ぜひ規格を十分にご活用いただくとともに, 規格の審議に積極的にご参加いただくことを切望する。