

1994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		
光 学 第22巻第12号	a-0	Topical Meeting of the International Commission for Optics	9
第23巻第 <i>n</i> 号	a- <i>n</i>		
応用物理 第62巻第12号	b-0	日本物理学会第49回年会	10
第62巻第 <i>n</i> 号	b- <i>n</i>	日本物理学会 '94秋	11
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 32, No. 12	c-0	SHB 94	12
Vol. 33, No. <i>n</i>	c- <i>n</i>	3次元画像コンファレンス '94	13
(2) Vol. 32, No. 12	d-0	IQEC 94	14
Vol. 33, No. <i>n</i>	d- <i>n</i>	OSA '94	15
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 33, No. <i>n</i>	e- <i>n</i>	1994年電子情報通信学会春季大会	16
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 11, No. <i>n</i>	f- <i>n</i>	1994年電子情報通信学会秋季大会	17
(B) Vol. 11, No. <i>n</i>	g- <i>n</i>	電子情報通信学会技術研究報告	18
Appl. Opt. Vol. 33, No. <i>n</i>	h- <i>n</i>	電気学会開閉保護研究会	19
Opt. Lett. Vol. 19, No. <i>n</i>	i- <i>n</i>	第4回位相共役・光波ミキシング研究会	20
Opt. Commun. Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	j- <i>m-n</i>	第20回液晶討論会	21
J. Lightwave Technol. Vol. 11, No. 12	k-0	SID '94	22
Vol. 12, No. <i>n</i>	k- <i>n</i>	15th Int. Liquid Cryst. Conf.	23
J. Mod. Opt. No. <i>n</i>	l- <i>n</i>	1994 IDRC	24
Phys. Rev. Lett. Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	m- <i>m-n</i>	1994 Int. Workshop on AM-LCD (AM-LCD '94)	25
Phys. Rev. A. Vol. <i>m</i>	n- <i>m</i>	SOM '94	26
Appl. Phys. Lett. Vol. 64, No. <i>n</i>	o- <i>n</i>	ODS '94	27
IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 6, No. <i>n</i>	p- <i>n</i>	Moris '94	28
Electron. Lett. Vol. 30, No. <i>n</i>	q- <i>n</i>	LEOS '94	29
Infrared Phys. and Tech. Vol. 35, No. <i>n</i>	r- <i>n</i>	LEOS 1994 Summer Topical Meeting on Smart Pixels	30
Science No. <i>n</i>	s- <i>n</i>	19th Int. Conf. on IR and MM Waves	31
日本物理学会誌 Vol. 50, No. <i>n</i>	t- <i>n</i>	The 6th Forum on the Frontiers of Telecommunication Technology	32
VISION Vol. 6, No. <i>n</i>	u- <i>n</i>	CLEO/QELS '94	33
照明学会誌 Vol. 78, No. <i>n</i>	v- <i>n</i>	IEEE 半導体レーザー国際会議	34
◆講演会関係	記号	光ファイバ通信会議	35
第41回春季応用物理学関係連合講演会	1	欧州光ファイバ通信会議	36
第55回秋季応用物理学学会学術講演会	2	オプトエレクトロニクス会議	37
光学連合シンポジウム '94	3	InP 及び関連材料国際会議	38
第19回光学シンポジウム	4	カラーフォーラム JAPAN '94	39
第11回色彩工学コンファレンス	5		
第24回画像工学コンファレンス	6		
視覚学会冬期研究会	7		
視覚学会夏期研究会	8		

1. 光物理

神戸大工 吉村武晃
NTT 基礎研 光永正治

1.1 基礎的・伝統的光学

1.1.1 回折・干渉・コヒーレンス

空間的に部分コヒーレントな光は、伝搬に伴ってそのスペクトルがシフトすることが知られている。この現象は光源のコヒーレンス性や形状に依存する。光源を2次元から3次元に拡張し、球対称等方的光源¹⁻⁸、非等方的 Gaussian Schell モデル光源^{1-105-1,2}としたときの性質が解析的に示された。このシフトを実験的に検証するため、任意に2次元空間コヒーレンス度を変化させる光源の実現法¹、光源のスペクトルコヒーレンス度を変化させる方法³、光源の大きさとコヒーレンスサイズ依存性の測定法³、時間領域での測定法^{1-109-3,4}などの提案がなされた。またランダム媒質中での散乱現象とを組み合わせ、空間的・時間的に揺らぐ光源からのスペクトルシフトを1次の Born 近似で解析した結果¹も示された。

部分的コヒーレント光による結像特性を調べることは高解像化、特殊な光源の開発に道を開くものである。部分的コヒーレント光とガウス型振幅透過率の回折格子とによるアレイ光源の実現¹⁻⁷、そのアレイ光源の強度分布と空間コヒーレンス性の解析²、重み付けられた光強度をもつ点光源による結像特性から等価的に部分コヒーレント結像特性を導く方法³が示された。

回折現象に関しては、主に回折物体のフラクタル構造と回折パターンとの関係が取り扱われた。回折パターンのパワースペクトルやバイスペクトルからフラクタル次元の求め方^{1-4,1-8}、格子状照明光を利用することによる粗面の特性を示すスケールファクタの求め方¹、このファクタと rms 粗さとの対応関係²が議論された。また銅電析によるフラクタル成長表面の評価法²が示された。このほかに基礎的現象として、境界回折波の相互干渉性が遮閉物体の厚み効果があること^{1,2}、またウェーブレット変換特性はフレネル回折と類似性があること¹、表面粗さの解析^{1-107-1,2}に利用できることなどが示された。

1.1.2 散乱

散乱現象は単一粒子系散乱と多粒子系散乱に分けられる。単一粒子系散乱に関しては解析方法が確立しており、応用としての測定法の研究が多い。球形微粒子に対しては粒子径とその分布を決定する方法として2重インラインホログラフィ法¹や相関法¹が取り扱われ、円柱微粒子に対しては2波長と偏光度との利用法¹が提案され

た。また、バックライト用高輝度導光体として光散乱ポリマー導光体内部の多重散乱過程²が解析された。

多粒子系に属する多重散乱現象には shadowing 効果、後方散乱エンハンスメント効果をどう扱うかが取り上げられた。この中で shadowing 効果は、表面粗さと入射角による依存性を Kirchhoff 近似に shadow 関数を組み入れて数値的に解析する方法^{1-106-4,5,6}、表面プロファイルの勾配分布関数を用いて幾何学的 shadow 効果を解析的に求める方法^{2,1-2}の提案があった。特に後者においては海表面に適用し赤外線の実効放射率、実効反射率¹⁻⁶を求め、海水温度分布の測定^{1,3,1-1,1-30}が行われた。トピック的現象の後方散乱エンハンスメント効果に対しては、フォトレジストによって製作したランダム粗面¹⁻⁹、PMMA 微粒子の凝集沈澱によるフラクタル媒質¹による散乱が実験結果として報告された。数値計算としては高濃度粒子系に対してモンテカルロ法を適用し、粒子径と偏光度とによる依存性³が報告された。

吸収過程を含む多重散乱現象の研究は光 CT の実現に向けて活発に行われている。まず生体情報抽出の基礎実験として、生体通過光の偏光解消特性²、偏光解消度の過渡特性²、局在する吸収体による透過光量特性^{2,1-10}、散乱体中のヘモグロビン濃度の定量化^{2,3}、生体試料の分光特性²等の諸特性が示された。多重散乱媒体中での光の振舞いから CT としての基本問題を解明するため、輸送方程式、拡散方程式の解析法^{3,1-8}と吸収係数や散乱係数の決定法^{1,1-5}などの提案があった。また装置としての測定法としては、タイムゲート法の改善^{2,1-13}、コヒーレンス領域での測定法^{1,1-8}、周波数領域での測定法^{1,3}、光子密度波の位相測定法³が示され、さらに測定された吸収係数からの画像構成アルゴリズム²が提案された。

1.1.3 展望

散乱、回折、干渉による現象の解明については視点を変えた研究に移りつつある。たとえば散乱物体をより現実に近いフラクタル構造モデルに置きなおした解析^{1,2}が挙げられる。一方、近年のデバイスの開発に見受けられるように、直接発光デバイスのコヒーレンス制御^{9,1-8}、適応デバイスの活用¹といった能動的分野が開けつつある。また最近の光トラッピングにおける局在光の原子、微粒子の捕獲問題¹、光 CT における高密度媒体での吸収と散乱の問題²などは基礎分野の発展があってさらに一段と技術の向上が望める。基礎光学分野の研究はその名のとおり基礎科学的な研究に重点があるが、工学、医学、生物学、農学にまたがる社会的ニーズに応える分野への研究展開が期待される。(吉村)

1.2 量子光学・非線形光学

1994年の量子光学, 非線形光学の分野は, 原子の冷却と制御, 非古典光の発生と応用, 微小共振器からの光生成等を中心に進展が見られた. その中から主だった話題を拾い上げてゆきたい.

レーザークーリング, トラッピングは, もはやブームと呼ぶ以上に隆盛および定着の気配があり, さらに原子の持つ波動的性質を積極的に利用した原子光学 (ドブロイ波光学) が台頭してきた. なかでも原子波干渉計の研究が盛んである. 干渉の方法としては, 大別してスリット型のものでレーザービームによる運動量移行型のものがあるが, 運動量移行型では近年光を一切吸収しない暗い状態 (ダークステート) を経由して原子の分布を別のサブレベルに断熱的に移動させる研究が盛んで, 6個^{m-72-7} (ハーバード大), 8個^{m-72-7} (NIST) ないし 140個^{m-73-19} (スタンフォード大) の光の運動量の原子への移行が報告されている. 原子干渉計におけるビームスプリッターとしては原子の波動関数のコヒーレンスを保持するものが望ましいが, その点, ダークステートを使うこの手法は光の吸収, さらにコヒーレンスを破壊する自然放出を伴わないため理想的なものかもしれない.

また関連する話題としては, スリット型の原子干渉計^{10,11}や冷却原子のイオン化衝突^{m-73-19} (東工大), エヴァネッセント光を利用した原子鏡^{m-49} (コンスタンツ大), 反跳温度以下の2次元レーザークーリング^{m-73-14} (エコーノルマル), 冷却原子を用いた高分解分光ⁱ⁻¹⁸ (カリフォルニア工科大) 等, 枚挙に暇がない.

光波長より小さいサイズの先鋭化された光ファイバースプロブを用いた分光および原子制御も発展している. 光ファイバースプロブは, 試料表面の形状を探索するフォトン走査型顕微鏡として用いられ, 微小球¹¹ (東工大) あるいは単一分子¹² (太平洋北西研) からの蛍光の観測等が報告される一方, スプロブ先端付近のエヴァネッセント光を利用した単一中性原子捕獲の手段としても期待が高まる¹².

また半導体の分野でもナノ加工技術の進歩により, マイクロ共振器の実現と量子閉じ込め効果による, しきい値の低い, スペクトル幅の狭い, 温度特性の良いレーザーの研究が盛んである. NTTからは微傾斜 GaAs 基板上に AlAs および GaAs を交互に結晶成長させる分数層超格子を用いて, 室温, 光ポンピングにおいて量子細線レーザー発振の報告がなされた¹³. レーザー発振においては, 媒質の発光スペクトル密度 (状態密度) のレーザーモードへの集中と自然放出光のレーザーモードへの

高い結合効率が鍵となるが, 今回の発表により両者を同時に実現する可能性がでてきた.

半導体のもう一つのトピックとしては, 半導体あるいは半導体量子井戸表面にパルスレーザーを照射して発生する, 遠赤外電磁波 (THz 電磁波) が注目される (AT&T ベル研²², 理研, 東工大, 東北大^{2,11}). 3準位系の場合は量子ビートの解釈もあるが, より詳細な発生機構の解明とともに種々の応用が期待される.

スクイズド光の発生にも進展が見られた. これまで定電流動作半導体レーザーによる振幅スクイズド光の生成は確立された技術であったが, ほとんど低温動作に限られてきた. 今回, ミシガン大のグループは室温で波長可変の振幅スクイズド光の発生に成功した¹⁴. 彼らは回折格子を用いた外部共振器の配置で単一周波数で発振させることにより, 831~841 nm の範囲で 1.5 dB 以上, 最高 1.8 dB のスクイーミングに成功した.

光の量子論の分野でも興味ある報告がある (東大物性研¹¹). 非古典的な光の示す現象として光のアンチバンチングが知られているが, これは今まで単一原子や単一分子等の単一量子系からの蛍光等で観測されていた. 今回, レーザー光 (コヒーレント光) とその2次高調波から発生し, 強くバンチングをおこしたパラメトリック蛍光をビームスプリッターで重ね合わせて, デストラクティブな干渉効果により, アンチバンチング光の生成に成功した. これは光の波動性に基づく非古典的光の生成として興味深い.

固体の非線形レーザー分光の分野では, 筑波大のグループにより CdSe 微結晶や CuCl 微結晶等の試料で初めて永続的ホールバーニングが観測された^{10,11}. 永続的ホールはこれまで色素分子や不純物希土類イオン等では十分研究されているが, 半導体における報告はない. 既存の材料との性能の違いがどう出てくるか楽しみである. また, 米国, フランスで始まった単一分子分光も, やっと日本でも阪大¹¹等数箇所が進められるようになった. (光永)

2. 結像素子・光学機械

松下電器 塩野照弘
筑波大物理工 青木貞雄

2.1 一般的な結像素子, 光学機械

結像素子, 光学機械は, 光学システムのキーデバイスとなる重要な分野であるが, この分野でも低コスト化を目指した小型化, 集積化, 高機能化が追求されている. 以下, 回折光学系, 幾何光学系, 光学系の測定評価およ

び光学部品加工に分けて1994年の進展について述べる。

2.1.1 回折光学系

OSA (アメリカ光学会)の主催により、6月に米国のロチェスターで開催された Topical Meeting on Diffractive Optics では90件もの発表がなされ、回折光学素子を用いて従来の光学系の限界を打ち破ろうとする試みが数多く行われており、実用化も進んでいるようである。日本においても興味深い発表がなされている。

回折型レンズと屈折型レンズを組み合わせて色収差をキャンセルするハイブリッドレンズはこれまで多く提案されているが、従来のものでは回折型レンズは平坦部に形成されていた。非球面部に基準波長に対して位相差が 2π radになる段差の階段状の回折型レンズを形成した光磁気ディスク用回折色収差補正対物レンズ¹の発表が行われた。このレンズは1枚で、半導体レーザーのパワー変動による対物レンズの焦点距離変動を打ち消すことができ、回折型レンズの使い方のうまさが見込まれた。

プレーナオプティクス(平板形光集積回路)の応用例として、対物レンズを含む全光学系を種々の回折型レンズにしてガラス板上に集積化したプレーナ集積化光ピックアップ¹が提案・検討された。光導波路デバイスに比べて、半導体レーザーからの光の入力効率の大幅な向上と回折型対物レンズの高性能化が期待できる。また、平板内のジグザグ光路を用いているが、対物レンズは従来の非球面レンズにした薄型の光ピックアップ²も検討された。

バイナリオプティクスといわれる断面が多段階の階段形状で構成された回折光学素子は特殊な描画装置がなくても高効率化が実現できるため、近年特に注目を集めている。赤外用の素子は波長が長い分作製が容易であるが、SiやZnSe等の赤外域で透明な材料は屈折率が高いことが特徴である。このことに注目して、これらの素子の回折効率がベクトル回折理論を用いて詳細に検討され、大きい受容角と高NA化が実現できる³ことが示された。また、可視光用のバイナリ光学素子が作製され、並列光演算への適用³を検討した報告もあった。

液晶パネルとの組合せの発表も多かった。液晶表示体に2値位相格子を用いて光学的ローパスフィルタリングを行い、映像に重なるサンプリングノイズを減少させる検討^{2,4-11}や、液晶SLM(空間光変調器)を用いたキノフォームの反復設計法²、フレネルゾーンプレートと液晶SLMを用いて光学的ウェーブレット変換を行い、実時間での個人の顔の同定^{1,2,4}等の報告があった。

新規用途が楽しみなものとして、特殊なキノフォーム

を2枚重ね合わせ、互いに回転あるいは横ずらしを行うことによって収差を可変できる光学系⁴の提案があり、今後、回折光学素子の可能性を追求した研究開発がいつそう盛んに行われるであろうと期待される。

2.1.2 幾何光学系

3次元光学系の集積化実装技術として、折返し光路を用いてコンパクト化と集積化構造が実現できる反射型ブロック光学系^{1,2,4}が検討された。この光学系は立方体の偏光ビームスプリッターに1/4波長板、反射型レンズを一体化した構成であり、ブロックを並べるようにして光学系を安定に拡張することができた。また、同じく集積技術として、ファイバプレートとその上に形成された微小傾斜面で空間光変調器の画像への均一照明と読出しが可能な読出し光供給素子^{2,4}が報告された。この素子によれば、従来ビームスプリッターとレンズ等で構成されていた光学系が、コンパクトな積層型の集積光学系で構成されることが可能になる。

ポリマーの応用に関する検討も精力的に進められているようである。液晶ディスプレイ用のバックライトに光散乱ポリマー導光体を用いて、通常の光拡散処理よりも50%以上の高輝度の実現¹が示された。また、GRIN(屈折率分布型)ポリマーによるイメージ伝送光ファイバ¹、大口径(径80mm)ラジアルGRINポリマーの作製と多焦点眼鏡レンズ¹への応用、さらには、多焦点GRINコンタクトレンズ¹への応用等の興味深い検討が行われ、早期の実用化が期待される。またポリマーではないが、負屈折力型ラジアル型GRINレンズをゾルゲル法により作製⁴した発表があり、色収差の補正がラジアル型GRINレンズ系においても実現することが可能になった。

走査光学系としては、低コスト化のためポリゴンミラーをプラスチック成形にして内部全反射を用いたポリゴナルレーザービーム偏向器¹の検討、LDアレイ・飛び越し走査により高速化を可能としたマルチビーム走査光学系^{2,8}等の発表があった。またバーコード読取り装置用光学系として、3枚構成のレンズの1枚だけを光軸方向に移動させるだけで集束ビーム径を一定にしたまま像面を変化できるため、焦点深度を実効的に拡大することができる光学系²が報告された。

光ディスクの光学系に関しては、光ディスクの大容量化のための原盤作製用の高NA・短波長用対物レンズ(波長351nm, NA0.9)^{2,6}の紹介、フォーカス検出光学系で、単レンズでテレフォト光学系を構成する場合の球面収差と正弦条件を同時に満足させる設計手法³に関する

る発表等があった。

光学設計としては、光学レンズ自動設計において原理的に解が求められない状態 (ill-condition) 時の対処策^{a-7,1,3}について議論された。またエスケープ関数なるものを導入してレンズ設計の最良の解を求める手法^{a-2,2}が紹介された。収差論を種々の光学系の光学設計に活用することができる収差係数の正規化^{a-10}の方法、防振光学系への収差論の応用⁴、またフレネルレンズに光路長を用いた収差解析³に関する発表があった。

照明光学系に関しては、フレネルレンズを用いたもの^{2,3}、液晶プロジェクタ用として高い光利用効率を有する異形開口レンズアレイを用いたもの³等の発表があった。HDTV用のズームレンズの設計技術^{a-2}も紹介された。

2.1.3 光学系の測定評価, 光学部品加工

光学系の測定評価に関する報告も多くみられた。光ディスクのピックアップの集光回折像の光強度分布から収差を特徴づけし、高速に光学特性が測定できる光ピックアップチェッカー^{a-2}や、コンパクトカメラ等で多用される非球面レンズの偏心量を簡単な構成で測定する方法^{a-2,a-12}、また、ステッパレンズの空中像評価装置⁴、投影光学リソグラフィの評価法^{a-1}、断面干渉縞解析による特殊トロイダル面の面精度測定装置⁴等の発表があった。

加工関連としては、 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以内の高精度加工ができるEEM (elastic emission machining)を用いたSiC非球面ミラーの加工と形状精度¹に関する検討、高解像結像技術を用いたエキシマレーザーステッパ^{a-10}の紹介や、デフォーカス量を変化させることによって高速に描画できる自動焦点検出機能を備えたレーザー光描画装置^{1,2,3,a-5}の試作等が報告された。

2.1.4 まとめ

本分野は、種々の光学装置・光学システムの基礎になるだけに、応用範囲は多いが、特に今後、DVD (デジタルビデオディスク)の規格化に伴い、数多くこの応用を踏まえた新しい提案・試みがなされるであろう。

(塩野)

2.2 X線光学

本年度の秋の応用物理学会から中分科会「X線・粒子線基礎技術」が「X線技術」となり、X線光学関連がひとつの分科会として独立した。10年ほど前はこの分野の研究発表が極めて少なく、どこの分科会で発表すべきか迷っていたのが昔話になりつつある。同学会の「X線リソグラフィ」とともにX線光学研究者の良い発表の場

なってきた。X線光学に深く関わりのある文部省の重点領域研究と通産省の大プロが一段落し、基礎研究から応用研究への進展が見られるようになった。

研究の流れを大きく見ると、光源、光学素子、素子の評価法、顕微鏡の応用、微小領域分析への利用などに分けられる。

光源関係では、パルス列を利用した小型レーザープラズマX線源の高出力化^{1,2}とレーザープラズマターゲットからの飛散粒子をバッファガスによって除去する報告があった。これらの問題はレーザープラズマ光源を利用しているグループの共通の課題であり、関連の発表でもそれぞれの工夫が報告されている。X線レーザーはいくつかのタイプが提案され増幅の報告がなされているが、一般的な利用にはまだ遠い感じである^{b-1}。

光学素子の開発は地味ながらも着実に進められている。従来、軟X線用の素子開発が目立ったが、昨年は比較的波長の短いX線用素子の報告も見られるようになってきた。放射光用放物面鏡²、積層型ゾーンプレート^{2,a-9}が製作され、1.5 nm前後の放射光X線を使い数ミクロンのマイクロビームを生成している。多層膜の製作も数多く報告があったが、応用を考慮した楕円筒内への周期勻配成膜の研究²や耐熱性の研究^{b-19}が注目された。光学素子表面の新しい評価法として偏光X線を利用する方法が提案され、その予備的な成果が報告された²。

顕微鏡的な応用は一昨年度に引き続き活発に行われている。生体用顕微鏡光学系はゾーンプレートの高分解能化¹、ウォルターミラー^{a-9}やゾーンプレート^{d-9}とレーザープラズマX線との組合せによる高速観察、シュバルツシルト多層膜ミラーによる走査型²の報告があり、実用化が間近に迫ってきた感がある。生体用としてはそのほかに密着法の応用例が示された^{1,2,a-9}。密着法は光学系が簡便で比較的高分解能が得られるので、高分子材料などの評価にも使われ始めている^{1,2,c-8}。

微小領域分析用にはほとんどの場合マイクロビーム形成光学系が用いられている。集光用の光学素子としては適用波長範囲の大きな全反射斜入射ミラーが主として使われている。

蛍光X線を利用した元素分析には、サブ nm以下の短波長X線が励起用として必要なため、斜入射角の極めて小さなミラーが使われる。実験室で十分な信号強度を得るために回転放物面のガラスキャピラリーが開発され、1 μm 以下のマイクロビームを得た²。この方法は以前から注目されていたが、最近になって性能向上の報告が出てきた。同様な研究はロシアと米国で活発に行われ

ている。放射光マイクロビーム用のミラーも開発が積極的に進められ、結晶を利用した平行性の高いビームによる放物面ミラー評価法の報告があった²。

マイクロビームの新しい応用として微小領域光電子分光が注目されている。光電子の励起には比較的波長の長い軟 X 線が利用される。軟 X 線の集光は硬 X 線に比べ容易でありかつ集光効率が高い。国外では集光素子としてゾーンプレートやシュバルツシルトミラーを使うことが多いが、国内ではウォルターミラーの報告が目立つ^{1,2,d-4}。マイクロビームスポット径も 1 μm 前後が得られるようになり、サブミクロンパターンの光電子検出も可能になってきた。

X線リソグラフィ関連ではプロキシミティ法の大半が X線マスクの作製法や耐久性の報告であった^{1,2}。光リソグラフィの短波長化が進み、光学的なアラインメント機構や精度に共通する部分が見られる。X線光学の立場からは縮小光学系に魅力が感じられる。縮小光学系はどのグループも多層膜を利用したシュバルツシルトミラーが基本になっている^{1,2,a-9,-10,e-1}。使用される波長は、シリコンの吸収端より少し長い 13 nm が大半であるが、炭素の吸収端近辺の 4.5 nm への短波長化も進められた^{1,d-8}。波長が短くなるにつれ多層膜の反射率が低下するので、実用的な波長域の検討が必要と思われる。

そのほか、軟 X 線画像検出器の開発²や X 線マイクロトモグラフィの生体試料観察への応用^{d-4}、全反射を利用した薄膜や多層膜の分析²など新しい分野への展開が見られた。

X線光学は、当初、放射光を中心にして発展してきたが、この数年レーザープラズマ X 線を利用した研究発表がしだいに増加してきた。日常的な X 線源の確保は広範な研究者の参加と新しい応用への展開が期待できる。

(青木)

3. 光応用計測

千葉大工 岡田勝行

三菱電機半導体基礎研 田井修市・久間和生

3.1 光応用計測一般

計測技術に関する研究は本年度も活発に行われている。一般に計測技術は計測する対象が異なるとそれぞれに対して最適な方法が異なるために、常に新しい研究の報告がある。さらに最近では半導体レーザーなど新しい素子の開発が進んでいるため、従来の測定対象に対してもそれらを用いた新しいアイデアによる高精度で容易な測定法の研究が盛んである。

3.1.1 干渉計測

計測、特に干渉計測において注目されている新しい素子の代表格が半導体レーザーであろう。手軽に使用でき、周波数変調や強度変調が容易にかけられる半導体レーザーを用いた計測法についての報告が数多く見られた。

半導体レーザーの駆動電流-波長変化特性を利用し、用いる受光素子の応答時間より高速に波長を掃引して、等価的に波長幅の広いコヒーレントの短い光源を実現する方法が複数提案された。例えばこの方法を干渉計測に用い、干渉縞の検出に用いる CCD カメラの積分時間より早く変動させることで 2 本の腕の光路長差がゼロの干渉縞のみを検出する方法が示された³。また、光周波数領域後方散乱測定法において干渉光強度の時間平均を求め、物体光と参照光の光路長差がゼロの情報のみを取り出すことに応用された³。また、同様の方法が特定の光路長差の像を選択的に結像するのにも使用された³。

半導体レーザーのもう一つの特徴である強度変調の容易さを利用した報告として、パルス発振させたレーザーにより微小振動を測定する方法が報告された²。また、血液などの吸収散乱体に半導体レーザーからのパルス光を入射し、反射光強度の時間変化から光の散乱方程式を考慮することで対象物体の吸収率と散乱率を求める方法が提案された³。

このように半導体レーザーはいろいろとおもしろい特性をもっており、実験室レベルではいろいろな応用が考えられるが、実際の装置に組み込む場合を考えると駆動電流-波長変調特性のばらつきや温度などの条件による不安定さが問題になるであろう。また、温度安定装置や戻り光除去のためのアイソレーターの必要性などのために、単に光源の置き換えだけではコスト的に従来の光源に対抗できないようである。今後、半導体レーザーの特徴を生かせる応用を確立する必要がある。

コヒーレンスを制御した光源を用いる研究として、シングルモードのレーザーを用いる代わりにマルチモードの半導体レーザーやスーパーluminescentダイオード (SLD) を用いる研究が見られた。マルチモード半導体レーザーの利用ではマイケルソン干渉計により被測定物体からの距離を測定した結果、25 μm 程度の分解能が得られることが示された²。また、SLD により生じる干渉縞のコヒーレンス度を、SLD を正弦波変調することで測定し、大きな段差の測定を行った^{1,2}。さらに、波長掃引幅が大きな光源を実現するために、SLD からの光をファブリペローのエタロンに入射し、エタロンをスキャ

ンすることで波長変化を実現する光源が提案され、大きな段差の測定が行われた³。

干渉測定の光学系の研究としては振動に強い共通光路干渉計の研究が目立った。例えば、試料表面の凸凹を測定するために2重焦点レンズを用いた差動型の干渉計が提案され²、横ずらし干渉計においては横ずらし量が測定の精度に影響することが示され、それを精度よく測定する方法が示された²。また、干渉計測により球面や平面の絶対計測を行う方法について、被験面をわずかに移動してその前後2回の測定値の差から形状の絶対値を求める方法が提案された^{1,3,9}。さらに従来にない新しい共通光路干渉計として、一度二つに分割した光をビームコープラーで合成し、被測定面の前面と中心に照明してそれらを干渉させる干渉計が提案された^{1,3}。

干渉縞の縞解析の研究も進んでいる。干渉縞の位相アンラッピングの方法として、干渉縞の振幅成分が大きい経路を選び、その経路において位相を連続とする方法が提案され¹、位相の関数の留数の位置をさけて位相接続する方法も考案された²。位相シフト干渉計において位相シフト量にキャリブレーション誤差があり、さらに受光子の応答性が非線形であっても干渉縞から誤差のない位相分布を求める位相計算法が示された^{3,9}。縞位相の計算を高速に行う装置が開発され、スペックル干渉計測および干渉計測における干渉計の制御に利用した^{1,2,3,9}。

3.1.2 干渉計測以外の計測

干渉計測以外の計測法についての研究は研究対象の多様性が反映され、非常に広い範囲にわたっている。

まず、幾何光学的方法による三次元形状計測は光切断法による装置化が数多くなされた¹³。これに対してモアレ法に関しては本年度は国内からの研究はあまり見られなかった¹³。これらの方法は流行があるので一概にはいえないが、高速化が可能で計算機に座標入力が容易な方法が今後の主流になるものと思われる。カメラで用いられるアクティブ型の距離計を複数並べて、二次元面を高速に測定する方法の研究も見られる。複数の位置検出素子(PSD)を並べた方法が提案され、さらにレンズとPSDを集積化するセンサーの提案があった²。

光の伝達時間を直接測定する距離測定法の一つとして、発振波長が時間的に変化する光パルスを三次元的な被写体に照明し、反射光を超高速度シャッターで切り取り、切り取られた光の波長から三次元計測を行う方法が提案された^{1,9,d-9}。測定に必要な装置があまりに大がかりではあるが、新鮮な方法として興味深い。

光を用いた走査型の顕微鏡についても、幾つかの報告

が見られた。微細部分のエバネッセント場をとらえることのできる光トンネル顕微鏡について、回折格子など伝搬光成分の大きな試料に対してもエバネッセント場のみをとらえる方法として、先鋭化したファイバー先端部を金メッキして微小な孔をあけたプローブを用いる方法が提案され、エバネッセント場のみを選択的に検出でき分解能も高くなることが理論的・実験的に示された¹。また、走査力顕微鏡において、測定物体に光を入射しておき、誘電体で作った針に入射するエバネッセント波のエネルギーでカンチレバーが熱変形することを示し、その変形量を測定することで力顕微鏡が構成可能であることが示された²。また、エバネッセント波の位相を測定するために、ヘテロダイン干渉型の光走査顕微鏡により導波路などの周辺での光場の位相を測定する方法を示し、実際に位相測定ができることが示された²。光熱変位顕微鏡を高速化するため、光による振動の励起を従来の点から一次元状の線で行うことが提案され、シリコンウエハの熱膨張の振幅が測定された¹。

偏光や光弾性試験の複屈折の測定の研究も活発に行われた。光弾性試料の複屈折性を高速に測定する際に試料透過光に二つの互いに直交する偏光の参照光を加え、それぞれにより生じる干渉縞を空間キャリアの違いにより分離して二つの直交する偏光の位相を測定する方法が提案された^{1,3,9}。また、複屈折の測定において、左右円偏光の2周波レーザーを用いて試料透過後のビート信号の強度と位相から複屈折率を測定する方法が提案された³。偏光測定的应用として干渉偏光計により液晶の動的屈折率が測定された²。また、ガラスレーザーに用いられるレーザー媒質の複屈折を測定するため、1枚の偏光干渉縞から屈折率分布を求める方法が提案された²。

3.1.3 展 望

計測技術は原理そのものとしては幾何光学や干渉計測など、すでに既知の方法が多いが、新たに開発された素子を用いて、いかに従来の方法に比べてより実用的な方法とするかが研究課題である。今後、半導体レーザー、計算機技術、高解像度のTVカメラなどの活用が重要になるう。(岡田)

3.2 光ファイバ応用計測, 光応用測定器

分布型光ファイバセンサーは光ファイバの特長を生かしたユニークなセンサーであり、すでに後方ラマン散乱光強度の温度変化と OTDR (optical time domain reflectometry) の原理を利用した分布型温度センサーが実用化されている。その主な用途は火災検知や電力ケーブル、パイプラインなどの温度監視であるが、このような

用途では長距離測定化が不可欠である。測定距離を延長するために、光源に波長 $1.5 \mu\text{m}$ 帯の LD と Er ドープ光ファイバアンプを用いて測定距離を 30 km まで延長できたという報告がある。このシステムでは光ファイバの伝送帯域による光パルス広がりの影響を受けているため、光パルス幅を 16 ns にしたときの 30 km 先端部での温度分解能は 5.5°C 、距離分解能は約 7 m である¹⁶。

コアに Ge をドープした光ファイバに、波長 $0.24 \mu\text{m}$ 付近の紫外光を照射するとコア部の屈折率が上昇することを利用して作製した、光ファイバ回折格子を用いた分布型センサーの提案がなされている。これは Ar レーザーの第 2 高調波 (波長: $0.247 \mu\text{m}$) を 2 方向から照射して形成した干渉縞によって光ファイバ中に回折格子を形成するものである。回折格子作製後、水素添加処理 (200 気圧, 1 週間) を行うことにより、 GeO_2 濃度 6 wt%, コア径 $8 \mu\text{m}$ の光ファイバで反射率 99% 以上の回折格子が得られている。この回折格子を用いた光ファイバレーザーや多点光ファイバセンサーが報告されている¹⁶。例えば、回折格子のピッチの温度依存性を利用すると光ファイバ温度センサーが構成できる。この例として、Er ドープ光ファイバアンプの自然放出光を広スペクトル光源に用い、5 個の光ファイバ回折格子を直列に接続したセンサーが報告されている。光スペアナで測定された回折格子からの反射光波長の温度依存性は 0.026 nm/deg である¹⁸。

光ファイバジャイロは、需要が最も多いと期待されていた自動車ナビゲーション用途がコストの関係で圧電振動ジャイロに駆逐されてしまった感があるが、低価格化をめざした地道な研究は依然として続けられている^{17,18}。

非接触測定という光のメリットを生かした応用に、光ファイバレーザードップラ流速計がある。これに関しては、LD を光源に用いて超小型化するとともに、電流注入による LD の周波数変調特性を利用し、2 本の投光用光ファイバの長さに差を持たせることにより、検出されるドップラ信号光に周波数バイアスを与えた FM ヘテロダイン方式の報告がある¹。また、光源に LD を、光周波数シフターに NiNbO_3 光導波路を用いて小型化を図ったという報告もある¹⁶。その他の光ファイバ干渉系を使用したセンサーについては、温度測定への応用が試みられているが、実用的なものは少ない^{1,2}。

光ファイバの絶縁性能に着目した電力用途のセンサーとしては、温度特性、長期信頼性に優れた電圧センサーの報告がある。これは、1,000 kV 系統への適用を目的と

したものであり、光センサーに使用するポッケルス素子 ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$) の旋光性の温度特性とポッケルス効果の温度特性を相殺させることにより、 $-20\sim 60^\circ\text{C}$ において測定誤差 $\pm 0.2\%$ を達成している。周波数特性、耐振動特性、外部磁界の影響などについても検証試験がなされており、実用性能が確認されている¹⁹。

その他の関連する技術として、偏光を利用した結露センサー、光弾性を利用したトルク測定、単一モード光ファイバの曲げ損失を利用した圧力センサーなどが報告されているが、いずれも実用性を強く意識したものである¹。

以上、1994 年の光ファイバ応用計測分野の進展について概説した。光ファイバセンサーは実用化研究を主体にして地道に続けられており、いよいよ本格的実用化の時期が来たという感がある。新しい応用としては光ファイバ回折格子を用いたセンサーが注目されるものの、他には特に目新しいものは見当たらない。実用化研究とともに、新しい手法を取り入れることによりますます光ファイバセンサーの裾野が広がることを期待したい。

(田井・久間)

4. 光情報処理

筑波大物理工 伊藤雅英

1994 年 4 月には ICO 主催の国際会議が京都で開催された。テーマは“Frontiers in Information Optics”で世界各国から多くの研究者が来日し、活発な議論が展開された⁹。また、光学論文賞¹および光学会奨励賞¹⁰のいずれも光情報処理の分野であり、本分野の研究活動の活発さを示している。

画像形成の分野ではホログラフィが注目されていた。ホログラフィック 3D プリンター^{1,3}や動画ホログラフィ^{2,4-8}など並列計算機や光機能デバイスの発展により実用化レベルが見えてきた技術がいくつかあった。それとともに計算機ホログラムやキノフォームの位相の最適化の手法も研究され^{2,3}、今後の 3 次元ディスプレイの発展が期待される。またホログラムの材料としてのフォトリマーに関する報告もいくつかあり、大画面・高分解能化への可能性が示唆された^{1,2}。

画像処理の分野では光 CT 像の回復法の提案があった¹。特に色調まで考慮した解析は興味深い³。散乱問題はさまざまな角度から研究が進められており、必要性が高まれば大きな発展が見込まれる。画像の回復法であるブラインドデコンボリューションにニューラルネットワークやシミュレーティッドアニーリングを組み合わせ、

性能を向上させた報告があった^{1-8,3}.

フォトリフラクティブの分野は、応用物理学会の講演会の中分類において光コンピューティングから分離独立し、また新しい研究グループの活動もあいまって進展がみられた。材料探索としては SBN を母体とし、Cu, Cr, Co, Ce などをドーブした結晶について波長特性、感度、性能指数などの報告が数多くあった^{1,2,3}。また、GaP, CdTe などの半導体材料も半導体レーザーを光源とする場合有望である²。有機薄膜材料についても研究が引き続き行われている^{3,i-1}。しかしながら材料全体としては、未だ決定的なものは見いだされておらず、今後も精力的に継続されていくであろう。結晶のファイバー化も光密度を上げ、システムのコンパクト化の点で有望であろう³。一方、フォトリフラクティブ効果の応用としては画像やデータの記録^{1-14,i-22}、実時間相関器⁹、サブミクロン欠陥検出^{h-5}、ノベルティフィルター^{1,2,9}などが提案されたが、特に新しい原理に基づくものではなく、技術的に進歩した応用研究という感じである。フォトリフラクティブ結晶中に3次元導波路を形成するというアイデア^{3,i-9}はあとで述べるインターコネクションの一手法として興味深い。また、材料中の干渉縞の解析^{1,2}や位相共役鏡の動特性の解析¹など、基礎的な研究も進んできている。

光コンピューティングにおいてはインターコネクションの部門で研究の進展があった。ボード間の接続において光の優位性が確立しつつあり、それに関して多くの報告があった。波長多重化の試み³、実時間ホログラムの利用^{3,i-17}、回折光学素子による座標変換の考えに基づくもの⁹などが提案された。実装技術により近いものでは、平板光学系を用いた光バス^{2,9}や S-SEED を用いたもの^{h-8}の発表があった。フォトリフラクティブ効果の応用も期待される^{h-14}。ニューラルネットワークでは、光ニューロチップの応用が検討された^{1,2,3,9}。あるアーキテクチャーをデバイス化した素子の供給は、その応用を考える上で大きな力になる。その他、液晶テレビ⁹や液晶アクティブレンズ¹、あるいは電気光学素子を用いたもの⁹などが提案された。それに対して、光デジタル演算³および光アナログ演算¹の分野では従来のものを発展させるにとどまった。全システムを光で構成するのではなく電子的な計算機とどう折り合いをつけるかが課題となろう。

周波数フィルタリングに関しては、バイナリ光学の進展がある³。LSI 作成技術を利用した回折光学素子でコンパクトで高い効率を得ることができる。原理的にはキノフォームや純位相フィルターと同じで、設計にはシミ

ュレーティッドアニーリングや遺伝的手法を用いた発表もあった⁹。液晶空間光変調器やフォトリフラクティブ結晶を用いた実時間フィルターも興味深い^{1,2}。新しいフィルタリングの手法として注目されてきているのは、ウェーブレット解析である³。これはフーリエ解析を補うものとして局所性の解析に大きな威力を発揮する。光学系との相性もよく純光学的にシステムを構築することができる(図1)²⁰。今後の発展を期待したい。

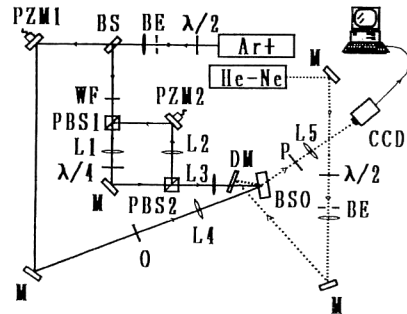


図1 光学的ウェーブレット変換光学系

5. 画像表示

金沢工大 福田一郎

5.1 液晶ディスプレイ (LCD)

5.1.1 アクティブマトリクス

直視型のアクティブマトリクス LCD では、フルカラーのパネルの大型化と低消費電力化、および昨年開発された種々の広視野角技術^{a-4}や低反射率技術²⁵を用いたパネルの製品化や開発が目立った^{22,24,25}。視野角は左右・上下ともに ± 40 度以上に達し^{22,24}、表面反射率は1%以下に抑えられるようになった²⁴。低消費電力化のキー技術の一つである開口率の向上も進み、例えば9.5インチのカラー VGA パネルで70%に達した²⁴。また、21インチのフルカラー TFT パネルが開発され、マルチメディアなど新しい応用への道が開かれた。

次世代技術として期待されている低温 p-Si では、425°C や 450°C の低温プロセスでも大型のガラス基板上に高性能の TFT アレイが得られるようになった²⁴。

HDTV に要求される広視野角と高速応答を達成し得る表示方式の候補の一つとして、TN 液晶を DHF (deformed helix ferroelectric) 型液晶に置き換えた LCD が発表され^{22,24}注目された。

5.1.2 単純マトリクス

単純マトリクスでは、アクティブアドレッシング駆動法を採用して表示特性の改善が進められ、完成度の高い技術になってきた。例えば、複数電極を同時に選択走査

する駆動法を用いた 9.4 インチ VGA フルカラーディスプレイでは、ビデオ表示可能な 50 ms の応答時間と 40 : 1 以上の高コントラストが達成された²²。

STN LCD 用の光学補償フィルムとして、ねじれメタリック配列を固定化した高分子液晶位相差フィルムが開発された^{21,22,24}。このフィルムでは原理上可視光すべての波長を同時に完全補償できることから今後特にコントラストの改善が期待される。

すべての LCD の基盤技術である配向分野ではメカニズムの解明や新しい配向方法の提案^{1,2,21,24}、また強誘電性液晶や反強誘電性液晶では材料の合成、層構造解析、スイッチング応答のメカニズム解明とその制御に関する発表が引き続き多くなされた^{1,2,21,23,24}。

5.1.3 反射型 LCD

携帯用機器向けのバックライトを必要としない薄型・低消費電力の反射型 LCD の開発が活発になった。カラー表示では、カラーフィルタと相転移型ゲストホストモードを組み合わせた 4 色表示の TFT パネル、液晶と位相差板の両方の複屈折性を利用する 4 色表示の STN パネル¹が発表された。また、高輝度・高コントラストの白黒表示を目指した方式として、TN-MIM 方式¹、偏光板を 1 枚に減らした位相差板補償 STN 方式^{21,24}や位相差板補償複屈折性方式^{21,23}、PDLC-TFT 方式²⁴、プリズムを用いて反射強度を高めた PDLC-TFT 方式²⁴、コレステリック液晶を用いた PDLC 方式²⁴などが発表された。今後ペーパーホワイトやフルカラー表示の実現に向けて研究開発が加速されると期待される。

5.2 投射型ディスプレイ LCD

p-Si を用いた LCD ライトバルブは確実に小型・高精度・高コントラスト化の道を進んでおり、TFT も 100 cm²/V・s 以上の易動度が達成された^{22,24}。開口率も向上し、HDTV 用では 1.9 M 画素のドライバー完全内蔵 3.3 インチパネルで 36%²⁴、カラーフィルタを用いた完全ドライバー内蔵の 1.3 インチ単板方式フルカラー VGA パネルでは 41% に達した²⁴。また、単板方式のライトバルブからカラーフィルタを外し、3 枚のダイクロイックミラーとマイクロレンズの構成を改善して明るさを従来の 4 倍に上げた 3.6 インチの単板方式 a-Si-TFT 液晶ライトバルブが開発された²⁴。その他 PDLC を用いたリア型プロジェクター²⁴、強誘電性液晶 PDLC²² にも進展がみられた。

昨年注目を浴びた DMD は構造を改良し、100 : 1 以上のコントラスト比と 65% の光利用効率を達成した²²。

5.3 発光型ディスプレイ

プラズマディスプレイ、EL、発光ダイオードともにフルカラー化に大きな進展があった。DC プラズマでは昨年発表したフルカラー 40 インチ HDTV に新しい駆動法を採用して、駆動回路の消費電力を従来の 5 分の 1 に低減させた²²。また、各表示セルに電流制限抵抗を設けることで 1 万時間の長寿命を達成した²²。AC プラズマではドットサイズ 0.32 mm × 0.30 mm の高精細なフルカラー 22 インチパネルが発表された²²。EL ではチオガレート青色発光材料を用いた 2 層型構造で 320 × 256 画素・4.8 インチのフルカラーパネルが開発され、その製品化が発表された²⁴。発光ダイオードでは従来の 100 倍の 1,200 mcd の発光輝度が得られる青色ダイオードが開発され^{1,a-11,b-12}、数万時間におよぶ長寿命が特長の発光ダイオードによるフルカラーディスプレイ実現への道が開かれた。

6. 光 記 録

日立中研 釘屋文雄

光記録技術を用いた製品では、再生専用の光ディスクである CD-ROM がパーソナルコンピュータの外部ストレージとして大量普及するとともに、書換え型も第 2 世代の製品が出揃い、しだいに世の中に浸透しはじめている。今後さらに普及してゆくには市場ニーズに応じて大容量低コスト化が必須であり、今年度の学会報告も次世代以降の大容量化技術にテーマが集中している。したがって、本報告では今年度の大容量化に関する新たな進展を中心に述べる。

6.1 高密度媒体技術

高密度媒体技術では、再生専用層により光スポット走査時の隣接符号間干渉を低減する媒体超解像方式についての発表が目立った。

6.1.1 MSR (磁気超解像)

交換結合を用いた MSR 方式が 1991 年に発表されて以来、さまざまな MSR 方式が提案されている。1993 年には面内磁化再生層を設け再生時に外部磁界が不要である CAD 方式が提案された。今年は MSR の実用化に向けた重要課題である C/N 改善に関する成果報告が目された。例えば、面内磁化再生層と中間層を用いた 3 層構造媒体では、0.5 μm ドメイン長で CNR = 47 dB が得られている²⁸。MSR と他の高密度化技術を組み合わせたアプローチでは、MSR + ランドグループ (以下 L/G) 記録 + 可視赤色レーザーで第 1 世代の 8 倍容量が実現可能であることが示された²⁶。左記報告では、L/G はトラ

ッキングとドメイン幅制御が主目的であり、クロストーク低減にはダブルマスクの MSR を適用している。これによりトラックピッチが $0.7 \mu\text{m}$ 、ドメイン長 $0.39 \mu\text{m}$ で $\text{CNR}=47 \text{dB}$ が達成された。今後は MSR に適した再生信号処理技術の検討等が実用化に向けて重要になると考えられる。

6.1.2 PSR (相変化超解像)

相変化媒体の超解像技術として、ROM ディスクの反射層の上に相変化膜を設けることで実効的光スポットを微小化する高密度媒体が提案された²⁷。この媒体と SHG グリーンレーザーの組合せにより、CD-ROM サイズで 7.8GB が実現可能であることが示された²⁶。

6.1.3 多値媒体

媒体からの再生信号を有効活用する多値レベル検出方式での注目すべき二つの新提案が報告された。一つはマークのエッジ位置を多値検出する方式で、従来の2倍の高密度化が実現できることが示された²⁷。エッジ位置の高精度制御が要求されるが、再生信号処理が簡素であることが特徴となっている。他の提案は、同一ドメインサイズで再生レベルが異なるドメインを形成する技術を利用したもので、これにより4値記録が可能であることが実証された²⁸。

6.2 高密度記録再生技術

6.2.1 微小マーク形成

高密度化の基本となる微小マーク形成の新たな試みとして、微小にパターンニングされた基板を設け、磁壁の制御を行い、微小ドメインを安定に記録する方法が提案された²⁸。光ディスクの市場のニーズに合わせて高密度化を図ってゆくには、光源の短波長化とともに光スポットの筆先で安定に記録する技術が要求されると考えられ、興味深い。また、高密度 ROM ピット形成技術として、紫外レーザーにより最小 $0.25 \mu\text{m}$ 幅のピット形成を可能とするマスタリング技術が報告された²⁶。

6.2.2 ランドグループ方式 (L/G 方式)

隣り合うトラック上に光学的位相差を設けることで、隣接トラックからのクロストークを打ち消すことを原理とした L/G 方式の報告^{1,26}が注目を集めた。従来の $1/2$ に狭トラック化が可能であることが示された。このように L/G 方式は、狭トラック化の有力な方式として注目されている。一方で、クロストーク量のパターン依存性、ランド部とグループ部でのクロストーク量のアンバランス等、解決すべき課題も多い。今後、実用化のための詳細な検討を進めていく必要がある。

6.3 信号処理技術

製品化に適用されているフルレスポンス検出に代って PRML 技術が本格的に検討されはじめています。

(1, 7) RLL, 8-9 符号などの各種符号と PRML による高線密度化の発表^{26,27}の中では、L/G 記録+赤色 LD $680 \text{nm} + (1, 7)$ PRML 検出の組合せにより、 $0.5 \mu\text{m}/\text{bit}$ 、トラックピッチ $0.6 \mu\text{m}$ で $\text{BER}=10^{-5}$ を検証した発表²⁷が注目された。第1世代の8倍容量に相当する高密度化技術である。また、従来のセルフクロッキングに PRML 技術を適用させるための方式の提案も行われた²⁶。また将来技術としては、2次元信号処理技術が検討されはじめています。3ビームヘッドによる2次元での等化処理を適用することで、従来の2倍の高密度化を達成可能であることが報告された²⁶。

6.4 その他

将来に向けたエバネッセント記録、ケミカルホールバーニング、ホログラムメモリ等の超高密度光記録技術の発表²⁶も最近増加する傾向にある。特にエバネッセント記録の研究は大いに盛り上がり、注目してゆく必要があろう。

7. オプトエレクトロニクス・光デバイス

東工大 荒井遼久

NEC 光エレ研 笠原健一

7.1 光通信分野

第41回応用物理学関係連合講演会¹および第55回応用物理学学会学術講演会²に発表された内容を中心に、オプトエレクトロニクス・光デバイス(光通信関連を主に)分野における1994年の進展を振り返ってみよう。応用物理学学会の光エレクトロニクス分科に属する分科細目に関する発表件数は、表1に示すように概ね250~270件で推移している。光記録は第6項で、半導体レーザーは第9項で扱われているので、ここでは光ファイバー、光

表1 応用物理学学会講演会でのオプトエレクトロニクス関連の発表件数の推移

中分類分科	92春	92秋	93春	93秋	94春	94秋
光ファイバー	15	17	30	36	25	25
光検出	11	8	8	8	7	9
光記録	44	36	48	38	43	26
光制御	79	83	76	84	82	88
半導体レーザー工学	102	92	112	95	104	69
合計	251	236	274	261	261	217

検出, 光制御の項目に関連する内容について述べる.

7.1.1 光ファイバー

1.5 μm 波長帯光ファイバー通信用として, 既に実用化段階に入っている Er ドープ光ファイバー増幅器 (EDFA) に関する発表が約 2 割を占めており^{1,2}, 通信用光増幅器としての基本的性能よりも新たな応用に向けた研究が報告されている. これに対して, 通信用光ファイバーの低損失波長域として有望な 1.3 μm 波長帯を狙った Pr ドープフッ化物光ファイバー増幅器 (PDFA) も 40 dB 以上の信号利得が達成されている¹⁷. 現状の光ファイバー通信用とは用途が異なるが, 波長 0.55 μm 帯のポリマー光ファイバー増幅器 (POFA) も高利得 (30 dB 以上), 高出力 (1 kW) が達成されており, 光ファイバー増幅器の応用範囲拡大の研究が盛んである².

7.1.2 光検出

超高速通信システムへの応用を目指した研究として, 光検出デバイスと受光用電子素子の集積化研究が進展している. 従来の面型フォトダイオード (PD) に対して, 高速性と効率を独立に設計可能な導波路型デバイスの研究が着実に進展しており, 波長 1.55 μm 用 GaInAs/InP 導波路型 pin-PD 単体で 3 dB 帯域 110 GHz が, また, これと HEMT をモノリシック集積した 10 Gb/s 伝送受信用 OEIC が報告されている¹⁷. APD でも導波路構造と超格子構造を組み合わせるにより, 7 V 程度の低電圧動作が実現されている. 超大容量光並列リンクのための PD アレイやモジュール化のための種々の方法が報告されている¹⁷.

7.1.3 光制御

(1) 光変調器

光強度変調器として LiNbO₃ 材料による Mach-Zehnder 型 (MZ 型) 素子や量子閉じ込めシュタルク効果 (あるいは量子閉じ込めフランツケルディッシュ効果) を用いる電界吸収 (EA) 光変調器および MZ 型光変調器において, 高速化と低電圧動作化の研究が進められている.

LiNbO₃ 材料 MZ 型変調器では, 従来から問題であった DC ドリフトの原因が作製プロセス中に導入される組成変成層 (厚さ 30 nm 以下) によるものであることが解明され, それを除去することによって DC ドリフトフリーの特性が報告された¹⁶. また, 進行波電極による広帯域化が進み, 電極長 20 mm, 電極厚 10 μm の進行波駆動形素子において帯域 75 GHz, 駆動電圧 5 V が達成されている¹⁷.

一方, 半導体材料系では, 10 Gb/s 伝送応用を目指し

た EA 変調器と DFB レーザーをモノリシック集積したデバイスの低駆動電圧化および単体変調器での高速化¹⁷, 半導体レーザ共振器中に EA 変調器を集積することによる能動モード同期による超短光パルス (2 ps) 発生などが進んでいる. 変調器を用いる原理として, フランツケルディッシュ効果や量子閉じ込めシュタルク効果による吸収だけでなく, 屈折率変化による位相変化も用いることによって面入射型デバイスでありながら大きな消光比 (5,000) が達成されている¹⁶.

(2) 光スイッチ

LiNbO₃ 材料では 8×8 マトリックススイッチを 112 個の 1×2 スイッチで構成し, プリント基板に単一モード光ファイバーピグテイルとともに実装したなど実用レベルの報告がある¹¹.

半導体材料では, キャリア注入による屈折率変化を用いる交差型光スイッチの 4×4 マトリックス化¹², QCSE を用いる方向性結合器 (DC) 型 2×2 スイッチの低動作電圧化², また, DC 型スイッチの入出力端にビームスポットサイズ変換用のテーパ部を設けた 10 Gb/s 対応モジュール¹³, および 3 dB 分岐素子と半導体光増幅器を集積したゲート型光スイッチ²などの光路切替え型スイッチに関する研究が進んだ.

半導体材料系固有の光スイッチとして, 光吸収で生成されるキャリアの制御を行うタイプの素子が幾つか報告された. トンネル障壁量子井戸 (TBQ) 構造や量子井戸のサブバンド間における自己誘導透過 (SIT) 現象を利用した光制御光スイッチの高速可能性が提案された². キャリア注入の代わりに光励起を用いる光制御 MZ 型光スイッチが試作され, ps 領域でのスイッチング動作が報告された¹⁰⁻¹³.

(3) その他の光制御デバイス

半導体材料の電界屈折率変化を利用する導波路アレイ型光偏向素子で, 約 2 V の印加電圧で約 2 度の偏向角が報告されている¹. 2 次回折格子による回折を利用すれば偏向角を 5 度程度まで増加できることが検討されている. 一方, LiNbO₃ を用いた導波路型電気光学変調器 (EOM) と音響光学偏向器 (AOD) を集積した素子で, 約 1 ns の応答と偏向角 1.7 度が報告された².

LiNbO₃ や LiTaO₃ 材料において, 分極反転構造による疑似位相整合 SHG デバイスの研究が非常に活発であり, 励起光として半導体レーザの緩和振動によるピークパワー増大を利用した SHG の高効率化, 半導体材料系による高効率 SHG 素子の提案など多くの報告があった^{1,2}.

(荒井)

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1994年の進展を概観する。

光メモリ用の光デバイスに関しては, ホログラム素子(HOE)を用いた光ヘッドの研究が引き続き活発であった。高密度光ディスク用のHOEとして, 一つの光源で常時二つの焦点を形成し, 薄型(0.6mm)の高密度光ディスクと従来の光ディスク(1.2mm厚)の両方の再生を可能としたホログラム素子(HOE)が報告された²⁾。0.6mm厚ディスク再生時にはHOEの透過光(0次光)を用いるので, 組立誤差や色収差の影響を受けない。また, 1.2mm厚ディスク再生時には+1次回折光を用いて収差補正をする。高密度光ディスクの再生時で, ジッタ15%を基準としてデフォーカスのマージンは $\pm 0.7 \mu\text{m}$ 以上, ラジアルチルトのマージンは ± 0.65 度以上確保できる。また, CDの再生特性は, デフォーカス, チルトマージンともに従来と同等であるということである。

プッシュプルトラッキング誤差(TE)検出法では, ホログラム素子を対物レンズと一体駆動させる方法が提案された²⁾。この方法を使うとトラック追従によって誤差信号に発生するオフセットが低減できる。偏光性ホログラム素子, $\lambda/4$ 板を用い, 光利用効率を向上したTE信号検出系でオフセットの溝深さ依存性を測定した結果, 良好な特性が得られることが確認された。

光ヘッドの小型化関連では, 半導体レーザー, 光検出器などのチップ実装技術と偏光性ホログラムを組み合わせた光磁気用小型光ヘッドモジュールが実現された²⁾。カー効果による信号成分を損失なく光磁気信号検出系に導くことができ, 再生C/Nの向上が可能なのが特徴である。無偏光ホログラム(HOE)と偏光性単純格子(グレーティング)を有し, 光磁気信号はグレーティングの ± 1 次回折光から, 光検出器上のマイクロプリズムを検光子として, プリアンプを介して差動検出する。一方, フォーカス, トラック誤差信号は, HOEを四つの領域に分割し, 各々の ± 1 次回折光からフーコー法, プッシュプル法により検出する。光ヘッドモジュールの大きさは, W 14.4mm×D 5.6mm×H 13mmである。波長685nmの半導体レーザーとTbFeCo光磁気ディスクを用いた実験で, ISO標準の4倍容量の条件で良好な再生信号波形が得られている。

また, 光導波路を用いた光ヘッドの小型化も報告された²⁾。透明基板表面にLD, 対物レンズ, ホログラム, PDなどの光学素子を集積化する。光は基板内部を反射伝搬

するのでピックアップの小型/薄型化が実現できる。サイズは5.4mm×15.8mm×5.0mmである。LD光は透明基板中を伝搬した後, 対物レンズにより光ディスク上に集光される。ディスクからの反射光は同じ経路を逆方向に進み, ホログラムビームスプリッタによりPD上に集光され, 検出される。スポット径は x, y 方向ともに理論値に近い, 1.5 μm 前後の値が実現されている。

光ディスクの記録密度向上を目的とした導波路SHGの研究は, 緑青色半導体レーザーの研究活発化の影響のあおりを受けたことがあるものの, いくつかの試みが引き続き報告された。

LiTaO₃を使った擬位相整合SHG素子では, LDに高周波(RF)重畳して変換効率の向上を図る方法が提案された²⁾。LDに高周波重畳すると, 緩和振動によってピーク強度を増大できる。SHGは2乗変換特性を有するので, これによって平均変換効率が増加する。LDに高周波(850MHz)を重畳した実験で, 導波基本パワー20mWに対して, 2.2mWのSHG光(波長428nm)が得られている。効率は11%である。この値は従来のcw法に比べて5倍の改善である。最大SHG出力は4.5mW(LD出力54mW)であった。

また, LiTaO₃光導波路型QPM-SHG素子では, 位相整合波長の安定なチューニングが報告された²⁾。薄膜ヒーターを集積化し, 熱光学効果による屈折率変化を利用したものである。Ti薄膜(厚さ: 200nm, 抵抗600 Ω)を集積し, 温度を変化させることで, 2nmの波長チューニングが実現されている。SHG出力は2mWである。

QPM-SHG素子の実用化には環境温度や波長に対する許容幅を広げる必要があるが, 従来の構造にランダムな非周期性変調を加え, シミュレーテッドアニーリング法によって, 高い変換効率を保ちつつ, 波長/温度許容幅を拡大する設計法が提案された²⁾。最適化したSHG素子の許容幅は約13倍に広がり, 変換効率の低下は1/7に抑えられることが可能となり, 波長許容幅は13nm, 変換効率は39%/Wという値が得られている。

また, LiTaO₃基板にプロトン交換することで周期的分極反転層と光導波路を同時に形成できるセグメント型QPM-SHG素子が実現されている。この際に, セグメント型プロトン交換用マスクに高電圧を印加することで, 表から裏まで突き抜けるような分極反転格子が形成できることが報告された²⁾。

光インターコネクション用のデバイスとして, 国外ではスマートピクセルの研究開発が米国を中心に活発に行

われた。スマートピクセルの作製方法としては、1)モノリシックと、2)ハイブリッドの二つの方法がある。1)では、米国の ARPA がスポンサーとなっている CO-OP (Consortium for Optical and Optoelectronic Technologies In Computing) が FET-SEED のワークショップを開催し、研究機関がそれを利用しようとする動きが出てきている。これは一種の研究のオープン化である。2)ではこれも米国が中心であるが、Si 回路に光素子を搭載しようとする試みが目立った。米国では周知の MOSIS が、研究者に利用されて役立っている。

1)のモノリシック化では、AT&T を中心に FET-SEED 回路の報告がされた。入力部 (2個の SEED と 2個のクランプ用ダイオード) と、中間部 (6個の FET と 2個のレベルシフター)、出力部 (2個の SEED) からなる FET-SEED では 300 Mb/s RZ single-ended 動作が得られている³⁰。必要な入射光エネルギーは 20 fJ/ビットである。また、4×4 FET-SEED を使った光バックプレーン動作も報告された²⁹。現状では対向するボード間での信号伝送で、動作速度は 155 Mbps である。Univ. Southern California (光のバイパス/スイッチ回路)³⁰ や、Optivision Inc. (8ビットのトランスマッタ/レーザアレイ)³⁰ といった会社でもこういった素子を研究に利用しようとする動きがある。

2)のSiとのハイブリッド化では、AT&T から CMOS-IC 上に GaAs MQW 変調器を In メタルを使って張り付けた回路が試作された³⁰。32×80 個の素子のうちで不良は 3 個ということである。これは、AT&T で従来から進められてきたモノリシックな FET-SEED 回路を歩留まり良く作ろうとする試みである。

同様の試作は Heriot-Watt 大学などでも行われている³⁰。2×1 や 2×2 の光セルフルーチングノードを作製しようとするものであるが、1 μm ルールの CMOS を使うので速度 (現状は設計段階) は 70 MHz である。

米国の MOSIS には GaAs メーカーも参加している。カルテックでは、光ニューロチップ用の GaAs winner-take-all 回路を作るのにこれを利用している³⁰。MSM フォトディテクタと GaAs MESFET からなる回路部分を外部で作製してもらった後、その上に自分達で GaAs LED を作製した。ニューロチップのようなアナログ回路は、むしろ技術的に成熟した Si/CMOS で作ったほうが良いように思われるが、winner-take-all 回路のような場合には GaAs MESFET の方が回路が簡単になるといったメリットがあるということである。また、Georgia Inst. of Technol. ではエピリフトオフによる集積化が進

められているが、これを使った 4×4 GaAs pin/Si 回路も作られている³⁰。

面発光レーザー (VCSEL) の研究は米国で盛んに行われており、短波系では実用に耐えうるレベルのものができようになってきている。VCSEL との集積では、コロラド州立大より、光ゲートフィルタを目的として、4 HPT と VCSEL を集積した XOR ゲートが報告された³⁰。

国内では、MSM と、MESFET, MQW 変調器を集積した面型光 3 端子素子 FET-EARS で、排他的論理和動作の実現が報告された¹。また、さらに MQW 変調器の代わりに VCSEL を集積した光スイッチ素子も初めて実現された³⁰。スイッチングエネルギーは 700 fJ, f3 dB は 220 MHz である。

また VSTEP の発展形態として、マスクシャッター MBE 法による VCSEL と PD 集積化の報告があった¹。マスクシャッター法では、MBE 成長室に開口列を持つシャッター板を装着し、その開閉で選択的な層形成が可能となる。マスクシャッター法では、これを使った多波長 VCSEL アレイも作製されている¹。

VCSEL と HBT の縦型集積素子では、アノード側に高濃度層を挿入することで室温連続発振が可能になった¹。

光ニューロチップでは VSPD+LED 素子が報告されている²。32×32 VSPD では画像蓄積や輪郭抽出、移動物体の検出などが実現されている。

またチップ間光インターコネクション用のマイクロミラーでは基板に垂直に入射する光を水平方向に変換する単結晶 Si ミラーが作られている¹。Poli-Si ミラーでは方向変換効率 62% が達成されており、また Al ミラーも報告されている。(笠原)

8. 分 光

大阪市大工 曾我部 伸

レーザーや機能性光学素子の技術的進歩により、ますます広い波長領域において高コヒーレンス、広帯域波長可変性、高い周波数安定度、極超短パルス発生などの性能を備えた光源が次々と開発され、それぞれの応用目的に適した高度の性能を備えた光源が手軽に使用できる環境が整いつつあるように見える。また、レーザー冷却された原子やイオンを用いた高分解能分光や新しい分光法、トラップ法も提案された。

8.1 光 源

紫外から近赤外域における極短パルス光源として、モ

ード同期 Ti: サファイアレーザーとそれによる光パラメトリック発振器 (OPO) が標準化してきたが、前者に関して優れた解説があった^{a-0}。モード同期 Ti: サファイアレーザーのコンパクト化ⁱ⁻²¹や高出力化ⁱ⁻⁸に進展がみられた。

また、2台の互いに垂直に偏光した極短パルスレーザーを組み合わせ、原子ガスを非線形媒質として高次高調波光のサブフェムト秒パルス発生が報告されたⁱ⁻¹¹。

中赤外域では、2色発振 Ti: サファイアレーザー光の AgGaS₂ による差周波光発生により、波長可変 (9~13 μm) なパルス光 (パルス幅 560 fs, エネルギー 5 μJ) が³³, また、単一モードの高圧 CO₂ レーザーより自由誘導緩和 (FID) を利用することで、パルス幅 90 ps の赤外光パルス発生が^{r-1}, 報告された。

高輝度のコヒーレント光源が乏しいサブミリ波域においても新しい光源が報告された。LINAC の短バンチ (1 mm 程度) した電子ビームから、強いコヒーレントな放射パルス (パルス幅: ns~μs) が得られることが明らかにされた^{1, b-3}。また、半導体多重量子井戸³² や GaAs (1, 0, 0), InP (1, 1, 1)⁸⁻³ をサブピコ秒の可視光パルスにより照射することで広帯域で高輝度のコヒーレントなサブミリ波が発生することが報告された。これらに加えて、単一キャリアの遷移による量子カスケードレーザーが新しい赤外レーザーとして注目される^{b-9}。AlInGa/GaInAs 超格子を用いて、波長 4.3 μm において 30 mW の尖頭出力が、動作温度 100 K において報告された^{s-264, 33}。発振波長がバンド・ギャップによる制限を受けないこのタイプのレーザーは、中赤外からサブミリ波にわたる分光用光源として期待される。

軟X線レーザーの小型化が期待される報告がある。ひとつは、高出力・極短パルスレーザー光の電場による光電離低温多価イオンプラズマを媒質とする軟X線レーザー^{b-1, 2}であり、もうひとつは、キャピラリー中で放電励起により得られた軟X線 (Ne-like Ar, 波長: 46.9 nm) レーザーである^{m-73-16}。

半導体レーザー (LD) に関しては、ZnMgSSe 系の緑、青色の LD の室温発振^{b-6} につづいて、窒化ガリウム系でより短波長化が期待される^{b-12}。また、高出力・単一モード LD の波長変換による短波長光の発生も、モノリシックな共振器や周波数変換素子の技術的發展により高効率化が進んでいる^{1, h-6}。分光用光源として必要な LD の単一モード化と線幅の狭窄化について優れた報告があった^{b-0}。

8.2 光学素子

国産高性能多層膜ミラーの開発が進んだことにより、広帯域・低損失の高性能レーザー共振器や高フィネス (finesse) の Fabry-Perot (F-P) 干渉計の広範な利用が可能となった。Ti: サファイアレーザーの広い波長域 (670~1,081 nm) における連続発振², LD を用いた光領域における周波数コム発生器^{b-9} や重力波検出用の超高安定化 LD 励起固体レーザーの開発³² も、このような基礎的技術の発展に負うところが大きい。

8.3 受光素子

市販 (国産) の Ge AVP ダイオードを用いて、波長 1.3 μm において 85 ps の時間分解能で光子計測が可能であることが示された^{h-30}。また、ミリ波~サブミリ波域の検出器として超伝導体-絶縁体-超伝導体 (SIS) ミキサが注目を集めた。雑音量子限界以下であり、変換利得があることからこの波長域の極限的な検出器として多くの報告があった^{b-0, -5, 31, 32}。

8.4 分光装置・技術

金属表面に吸着した分子の動的挙動^{t-5} や光励起分子の変換ダイナミクス^{t-7} の観測技術が進展している。フェムト秒ポンプ=プローブ装置が提案され、I₂ 分子内波束のダイナミクスが観測されたⁱ⁻¹⁵。

中赤外領域のサブピコ秒分光用多チャンネル分光器ⁱ⁻²⁰ やウォラストン (Wollaston) プリズムを利用し、可動部品のない、単一ショットで全スペクトルが得られる偏光フーリエ (FT) 分光器^{h-25} が提案された。また、LiNbO₃ 単結晶製のソリッド・エタロンで構成した、調整が不要で直線性、高透過率、高屈折率を特徴とした新しい高分解能 F-P 干渉計が報告された^{h-10}。

8.5 分光・レーザー分光

成膜プラズマの制御を目的として、原子、分子、ラジカル等の密度の分光測定に関する研究が進んでいる^{e-7}。近赤外 LD による光音響分光法を用いる微量気体の高感度検出^{h-9} や高フィネス (10⁴~10⁵) の F-P 共振器内分散特性を利用した微量成分気体のヘテロダイン検出法² 等、特徴ある微量検出法が報告された。また、短パルスレーザー光のスペクトル広がりを利用したヘテロダイン分光法は多チャンネルの検出法として期待される^{d-11, 2}。

エキシマレーザー光によるアブレーションと色素レーザーによる LIF 法を結合させた微量元素の分光検出法により、純水中の Na 原子が 1 ppt の感度で検出された²。

周波数可変の LD を局所発振器として用いた高分解能ヘテロダイン分光により、NH₃, CO₂, O₃ の回転スペク

トルや H_2 の電気四重極子回転スペクトル線 $S_0(3)$ のスペクトル線幅が測定された⁷⁻¹。また、ヘテロダイン検出法を用いたドップラー・フリー分光法⁶⁻⁹等、光ヘテロダイン検出法の広範囲な応用が注目された。

また、エキゾチック原子、反陽子 $He(\bar{p}He^+)$ がレーザー誘起共鳴を用いて確認された^{10, m-72-8}。

8.6 レーザー冷却・トラッピング・周波数標準

原子・イオンのトラッピングとレーザー冷却、冷却された原子・イオンの高分解能分光、原子干渉実験、3D光格子等に関する多数の報告があった。そのうちのいくつかについて述べる。

マイクロ波の磁場により最低エネルギーのスピ状態にある Cs 原子がトラップされた。ボーズ凝縮を実現するのに有利な磁気双極子力によるトラップとして期待されている^{m-72-20}。

高フィネスの F-P 干渉計で安定化したレーザーを用いて冷却した水素原子の $1s, 2s$ 状態のラムシフト^{m-72-3} やアイソトープシフトⁿ⁻⁴⁹ の高精度測定が着実に進んでいる。また、レーザー冷却した原子に共鳴光を照射して光結合 (photoassociation) を起こさせ、LIF の減衰を観測して寿命や長距離力の分子状態を観測する新しい分光法が提案された^{33, m-73-5}。

冷却準安定 Ar 原子を用いた原子波の干渉¹¹ や Na, Na_2 の原子波の美しい干渉縞が高いコントラストで観測され、ガス中を透過させた場合の原子波の減衰と位相シフトも観測された³³。さらに高い Q 値をもつマイクロ波空洞中の弱い非共鳴場によるリュードベリ原子 (Rb, $n=50, 51$) の波束が 125 fm 遅延したのに相当するエネルギーシフトがラムゼー干渉計により観測された。空洞中の真空場の揺動が直接的に測定できるのではないかと期待されている^{m-72-21, 33}。

4本のレーザービームによる電気双極子力を利用して 100 ms の寿命をもつ Li 原子の 3D 光格子が実現された³³。さらに、ゼーマン状態のコヒーレントな重ね合わせにより 'dark state' が初めて実現され、光学的に励起することなく光子の運動量を原子に移動させることに成功した^{m-72-7}。

光周波数標準の研究は、高安定化レーザーや冷却、トラッピングの研究と密接に関連しながら進展している^{b-5, a-11}。

9. レーザー

日立中研 茅根直樹
電通大レーザー研 植田憲一

9.1 半導体レーザー

1994年における半導体レーザー分野の進展について述べる。本年は、隔年に開かれる半導体レーザー国際会議がハワイで開かれ、この分野の最新の論文が発表された。全体的な傾向を簡単に記すと、可視光のレーザーでは、昨年初めて室温連続発振を達成して華々しく取り上げられた II-VI 族青緑色レーザーが今年は信頼性などを主体としてやや地道な研究が進められていること、光通信用レーザーの分野では加入者系通信などを意識して、高動作化や光結合のための狭ビーム化などが活発に研究されていることなどが挙げられる。一方、ユニポーラレーザーや量子ドットレーザーの実現に関する新たな提案も発表された。以下波長別に紹介し、最後に比較的基礎的な研究に関する話題について触れる。

9.1.1 青緑色レーザー

高密度光ディスクなどの応用を目指して半導体レーザーの短波長化の研究が活発化している。II-VI 族の Zn-CdSe/ZnMgSSe 系レーザーについては昨年波長 489.9 nm の室温連続発振が発表されたが、今年は 480.5 nm のパルス発振が発表された¹。また GaAs 基板と ZnSe エピタキシャル層の間に GaAs バッファ層をエピタキシャル成長したレーザーで 509 nm で 9 分の連続動作が発表された²。今後実用化を目指して、信頼性を向上する研究を地道に進めるフェーズに入ったと思われる。また高輝度の LED が発表されて話題となった GaN 系の材料では^{a-11}、GaInN/AlGaIn のダブルヘテロ構造で光励起で室温におけるレーザー発振が観測され³⁷、電流注入動作の期待が高まっている。発振波長は 400 nm 近傍である。

9.1.2 赤色レーザー

InGaAlP 系の赤色レーザーに関しては、主として He-Ne レーザーとほぼ同程度の波長 630 nm 付近で発振するレーザーの高信頼性の研究と、680 nm 付近での高出力化が進められている。前者については、この材料系では短波長になるにつれて伝導帯の間接遷移が問題となるので、しきい値の増加や温度特性の劣化が問題となるが、歪量子井戸技術などの導入によりこれを軽減する研究が行われている。活性層に伸張歪を導入した量子井戸構造を用いて、5 mW で 2,000 時間以上 (50°C) の信頼性が報告されている³⁴。680 nm 帯では光ディスクの書き込み光

源としての応用をねらって、40~50 mW の出力が得られるレーザーの研究が活発である。40 mW 付近で数千時間の信頼性の発表がされている²。またさらに高出力化を狙って、端面にエピタキシャル成長した保護膜を設ける構造で 295 mW の最高出力が得られている¹。

9.1.3 980 nm 帯レーザー

ファイバー増幅器用の励起光源を目的として、高出力化の研究が引き続き進められている。この波長帯では短波長帯のレーザーと同じく端面の破壊現象があり、高出力時の信頼性が問題となっている。高出力化を目指した報告では端面付近を非励起にした構造で 470 mW までの光出力が得られた¹。また RIBE を用いて導波路形成を行ったレーザーで、出力 250 mW、光ファイバ出力 180 mW が得られた¹⁷。一方信頼性に関する報告では、出力 100 mW 前後における信頼性試験で、50°C で数千時間以上の信頼性が報告されている¹⁶。また光ファイバへの結合効率向上も進められており、4枚の組合せレンズを用いて、結合損失 2 dB 以下を得た報告もされている¹⁷。今後実用フェーズでの高信頼性と高結合効率化が進められるものと思われる。

9.1.4 1.3 μm 帯光通信用レーザー

InGaAsP/InP 系の 1.3 μm 帯光通信用レーザーの研究では、加入者系通信や光インターコネクトなどの応用を目指して、低しきい値化、高温動作化などの報告と、一方で光ファイバへの結合効率向上を目指したテーパー導波路などの集積化や光実装などの報告が活発化している。

(1) 低しきい値化

短共振器化、端面の高反射率化、また歪量子井戸構造の導入などにより、波長 1.3 μm 帯で、20°C で 0.4 mA、85°C で 3.0 mA の報告がされている³⁴。また別の報告では、20°C で 0.58 mA、90°C で 1.62 mA の報告もされている³⁴。低しきい値レーザーを用いて無バイアス変調実験も報告されている。しきい値 2.5 mA のレーザーを用いて、1 Gb/s まで良好なアイ開口が得られている¹⁷。

(2) 高温動作化

加入者系などの応用では環境条件が厳しいこと、また冷却素子がコストの面で使えないことなどから、高温まで安定に動作する光源が求められている。温度特性の向上のために、活性層からクラッド層への電子のオーバーフローによるリーク電流の低減、埋込み構造を用いている場合は埋込み層へのリーク電流の低減などが試みられている。前者については、クラッド層と活性層との伝導帯のエネルギー差を大きくとるために、クラッド層に従

来の InP 層に代って InGaAlAs を導入する、GaAs 基板上に成長した InGaP を用いる、また InGaAlAs/InGaAlAs 多重量子障壁層を導入するなどの報告がされている³⁴。InGaAlAs を導入した例では、100°C まで 122 K の高い特性温度が報告されており、しきい値の温度特性が大幅に改善されている。また活性層の材料として InGaAsP の代わりに InAsP 歪層を導入する報告もある³⁸。これによれば 150°C までの連続発振が報告されている。

埋込み層のリーク電流の低減については、埋込み層の一部に InGaAsP 層²あるいは InAlAs 層を挿入することにより¹、リーク電流を低減する方法が報告されている。また埋込み構造を用いないリッジ型構造の検討も進められている¹⁷。

(3) ビーム拡がりの低減および光実装の容易化

加入者系などの応用では光デバイスを実装するために要するコストが問題となる。特に半導体レーザーでは光ビームの出射端面におけるスポット径が小さいためにビーム拡がり角が大きく、光ファイバへの結合に高精度な位置合せが要求される。この問題を解決するために、波長 1.3 μm 帯のレーザーにテーパー状の導波路を集積化したデバイスがいくつか報告されている³⁴。一例として従来は縦方向 27°、横方向 25° あったビーム拡がり角がレーザー光の出射端面側にテーパー状の導波路を集積化すると、各々 11°、6° に低減され、単一モード光ファイバへの結合に対する位置裕度が ±1 μm から ±3.6 μm まで改善された。今後上記の低しきい値化や高温動作化などの特性が向上すれば、実用化が期待される。

また半導体レーザーなどの光デバイスの実装に関する発表も活発化している。半導体レーザーを動作させることなしに光結合のための位置合せを行う実装方法や、大量の光デバイスモジュールを供給するための組立て装置の自動化などが報告されている⁸⁻¹²。

9.1.5 1.5 μm 帯光通信用レーザー

InGaAsP/InP 系の 1.5 μm 帯のレーザーでは大容量の長距離光通信に向けた研究が引き続き行われている。波長多重通信方式に向けたデバイスの研究では多波長レーザーアレイの研究が活発化している。絶縁物のマスクを設けた基板上に MOCVD により選択成長する方法で、波長の異なる 5 チャンネルのレーザーをモノリシックに集積化したレーザーアレイが報告されている¹。同様な方法で 10 チャンネルの多波長レーザーの集積化、および 4 チャンネルのレーザーと合分波器を集積化したデバイスも報告されている¹⁷。一方超高速の時間多重通信に向け

たデバイスの研究では、過飽和吸収領域と導波路を集積化したレーザーにおいて、パッシブなモードロックにより、繰返し周波数 1.54 THz、パルス幅 650 fs のパルス列発生が報告されている³⁴。これらのデバイスは来るべき大容量通信方式に向けて今後の発展が期待される。

9.1.6 その他

ここでは、波長帯によらずに新しいレーザーに関するトピックスについて触れる。

面発光レーザーについては、2次元集積化などの利点を目指して、引き続き研究が活発化している。波長 980 nm 帯において高効率化 (スロープ効率 21%)³⁴ や高出力化 (4×12 アレイにおいて 3.4 W)³⁴ などの報告のほか、10 GHz までの広帯域化などの報告がされている³⁵。

量子細線、量子ドット構造のレーザーに関する研究についても新たな進展がみられた。MBE や MOCVD による結晶成長法において、大きな格子不整合と原料供給量の制御によって生ずるドット形状の自己形成を利用して、活性層を量子ドット構造にしたレーザーが報告されている³⁴。また元素の異なる 2 元化合物の超格子を成長した時に形成される量子細線構造を用いたレーザーも報告されている³⁴。いずれの場合も量子細線、量子ドット構造に期待されるはっきりした特性の改善は確認されていないが、今後の進展が期待される。

特に新しいところでは、量子井戸構造において伝導帯内に形成されるサブバンド間の遷移によるレーザーが報告されている³⁴。これは、レーザー発振に伝導帯における電子しか関与していないので、ユニポーラレーザーと名付けられている。サブバンド間のエネルギーギャップが小さいので波長は 4 μm 付近であるが、新しい方向として注目される。

9.1.7 まとめ

以上、1994 年の発表について概観した。以上述べた以外にもトピックスは多数あるが、紙面の都合上割愛した。今後も応用分野の拡大につれて、半導体レーザーの研究活発化が期待される。(茅根)

9.2 気体・固体レーザー

1994 年の気体レーザー・固体レーザーの研究の進歩状況を見た率直な印象を述べると、気体レーザーから固体レーザーへの移行が大きな流れを形成している。気体レーザーでは、日本の大型プロジェクト「超先端加工プロジェクト」の中で開発された高出力エキシマレーザーシステム (出力 2 kW, 三菱, 繰返し 5 kHz, 東芝) などがあるだけで、画期的な研究は見当たらない。むしろ当初はエキシマレーザーで研究された光化学反応や短波

長リソグラフィについても、固体レーザーの波長変換で実用化する動きがある。一方、位相シフト法など高度な光学技術の応用で水銀灯の時代が延長されている超高密度半導体製造では、256 メガビットのメモリからエキシマレーザーリソグラフィが本格的になる傾向にある。エキシマレーザー技術も成熟し、研究段階から生産装置の一部になってきたといえるだろう。

半導体レーザー励起が一般化してから、高出力レーザーの分野で、全固体化レーザーに対する期待が高まっている。米国ローレンス・リバモア研究所では、YAG のスラブレザーを 16 kW の半導体レーザーで励起して、1 kW を越える平均出力を 1993 年に達成した。現在は 6 kW を目標にした研究が GM など産業界と国立研究所の共同研究で進められている。

固体レーザーの出力ビーム品質を改善するために、新しい光学技術を応用してモード選択性を高める方式が提案、実験されたのが今年の特長である。高効率の cw 発振をめざす方向では、LD 励起分布の波形を整形して、発振モードとの整合性を高める方法が Walker¹, Ueda³³ らによって提案、実験された。Eichler³³は位相共役鏡の応用で高出力パルス YAG レザーのビームを高品質化し、加工用レーザーとしての性能を大きく向上させた。Green³⁴は増幅器で生じた波面の乱れをリング共振器に挿入した利得媒質内のホログラムで補償して熱レンズ効果を除去し空間モードを制御した。回折光学系、とくにバイナリ光学系をレーザー共振器に応用して必要な強度分布を持ったレーザーを発生させる手法が Leger³⁵らによって開発された。図 1 のような回折光学系共振器で空間周波数を制御すれば空間モードに対する損失をかなり自由に制御できて、基本モード損失が 0.8% のときに高次モードの損失を 59% にまで高められた。回折光学系のミラーデザインを調整すれば任意の出力パターンを作り上げることができ、平坦度 0.2% の平坦な正方形分布ビームを発生させた。また、Couderc³⁶は self-imaging confocal (SIC) cavity を端面励起固体レーザーに応用すれば利得体積の 3 次元形状が空間フィルターとして働いて自己最適化できると報告した。

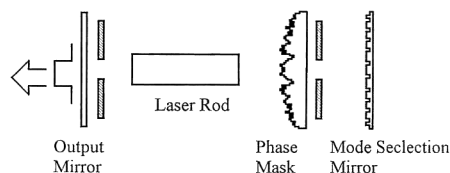


図 1 回折光学系を応用してモード選択を行うレーザー共振器

高品質のレーザー光を用いた応用例として、Yang^ら¹による光学的パラメトリック発振が挙げられる。ランプ励起 YAG レーザーの第2高調波で KTP を励起して 1,039 nm の波長で 1.9 W のパラメトリック発振出力を得た。固体レーザーの品質向上と良質の KTP 結晶の組合せで、パラメトリック発振の実用化が近づいたことを実感させる。連続発振レーザーでは、高品質のレーザー発振と高効率波長変換の組合せによって、原子のエネルギー準位に拘束されていたレーザー発振波長が自由に変化させられる時代が近づいている。

チタンサファイアレーザーが中心となった超短パルスレーザーでは、パルス幅の短縮、超短パルスの実際的な応用の両面で激しい競争が繰り広げられている。チタンサファイアレーザーは 8.5 fs¹⁵ を発生するようになり、広帯域の負分散をチャープド誘電体ミラーで補償する方式でも 11 fs¹ が得られている。さらに超短パルスの高調波発生も可能になり、Backus^ら¹は 100 μ m 厚の LBO 結晶を用いて共振器内波長変換をして 14 fs の紫外線パルス ($\lambda=416$ nm) の発生に成功した。同時に、20 fs 以下の超短パルスを実際の応用に用いる時代となった。Lemoff^ら¹はテラワット出力によるトンネリング・イオン化で発生させた高エネルギー電子で衝突励起して、Xe の 8 価のイオンによる X 線レーザーに成功した。こうして、これまで巨大なレーザーで研究されてきた X 線レーザーはテーブルトップの装置で実現するようになった。

このように、固体レーザーの進歩はめざましく、同時に実用的な応用が近づくにつれてレーザーの品質の重要性が再認識され、新しく、基本に戻った光のモード制御の研究が最新の技術的基礎の上に再構築されようとしている。(植田)

10. 視 覚 光 学

防衛大応物 岡嶋克典

まず、表 1 を見ていただきたい。これは視覚学会・日本光学会視覚研究グループ共催の 1989 年と 1994 年の冬期研究会における一般講演を分野ごとに分類・比較したものである。5 年間で発表件数の合計が 2 倍近く増えており、これは視覚研究の量的増加の様子を表している。また内容を見ると、「色・色覚・明るさ」の発表件数は変わらないが、運動視や立体視およびパターン認識の発表件数が大幅に増大しており、研究層の拡大も同時に進行中であることがわかる。これらの分野は、コンピュータビジョンや生理学と関連した学際的研究が現在盛んに行われており、特に運動視や立体視の分野は「色・色

表 1 視覚学会冬期研究会一般講演の分野別件数 (1989 年, 1994 年)

	1989 年	1994 年
色・色覚・明るさ	14	14
運動視	3	13
両眼立体視	1	4
パターン認識	1	7
眼球運動・調節	2	4
眼科・色覚異常	3	1
その他	0	2
合 計	24 件	45 件

覚」と並ぶ 2 大勢力となっている。件数としては増えていない色・色覚の分野もその内容は大きく変わりつつある。色に関係した高次認識メカニズムを取り扱う研究が増えてきており、人間の高次認識機能への本格的解明が現代的アプローチによって進められていることを物語っている。このことはパターン認識に関する発表も増えていることから伺える。また、眼球運動時の錯視的現象も定量的に測定・検討されつつあり、これも大きな流れとなりつつある。以下、概略的ではあるが順に述べていく。

10.1 色覚・色彩工学・明るさ知覚

色覚のメカニズムに関しては、色同化色対比の偏心度による違いを 2 重反対色細胞の受容野の違いから検討したもの³や、明るさ知覚の個人差を反対色型神経節細胞の統計的分布から説明した研究³が目をひく。点滅光の知覚から視覚系の非線形性を推測した研究^{1,7}や反対色応答に関する研究^{7,8}とともに、これら生理学還元主義的な色覚研究の展開がこれから本格化することが期待される。

色覚の基本特性である色弁別の時間特性¹や等色相線⁹、黒味誘導特性¹⁻⁹および知覚遅延時間²が測定され、色記憶における聴覚と視覚の相互作用³や探索時間に及ぼす色差の影響³、局所照明認識の特性⁴⁻¹等の高次レベルに関する知見も蓄積されつつある。呈示方法による両眼色融合の違い³や等色時の誤差特性等^{7-2,7-10}が求められ、新しい等輝度設定法³や等価明度の実験式⁷⁻²も提案された。

色のカテゴリー知覚特性に関する研究^{7-2,1}およびその基本色の応答を利用した恒常性の研究³や記憶の研究¹も行われ、基本色の知覚応答の有効性が強調された。基本色名の応答は、色覚研究における新しい方法論としてさらに幅広く活用されていくことが予想される。基本色知覚の妥当性を、生理学のおよび言語によらない心理

物理学的方法で検討⁷していくことも今後重要な課題であらう。

色彩工学の分野では電子画像時代の色再現に必須なカラーマネージメントに関するシンポジウムも催された^{5,7}。人間の知覚に忠実な色再現が近い将来にも実現可能になる基盤ができつつある。また、国際カラーフォーラム (Color Appearance with Environment) も開催され、色彩・色覚の研究者らの国際的交流が実現した。その時の模様は参加報告¹⁴として詳しく掲載されているのでこちらを参照されたい。

10.2 運動視・立体視・陰影知覚

運動視には1次・2次機構が関与しており、2次機構に関する知見も豊富に蓄積されつつある。この1次・2次という考え方が最近では立体視においても適用され、その特性が研究されている。2次の運動視に関して運動残効⁷およびMT野神経細胞の応答性⁷が検討された。また、奥行き運動⁷や相対運動の空間周波数特性に関する研究⁷も注目される。運動視差に関しては周辺視野における特性⁷やメカニズム¹が検討され、頭部速度によって運動閾を決定する戦略が変化しているなど^{1,11}、運動視差の情報処理過程が明らかになりつつある。運動刺激から生じる自己運動感覚であるベクシオンに関する研究も行われ、ベクシオン知覚時の視空間の歪み^{2,8}や姿勢制御⁷についての報告もなされた。また、両眼立体視の時間周波数⁷および空間周波数特性¹が求められ、2次機構の関与も報告されている⁷。

また、陰影知覚に関する研究も目立ち、陰影知覚メカニズムの分光特性への時空間周波数の影響¹や3次元知覚における奥行き手掛かり間の整合性²などが新しい手法の提案とともに検討された。陰影知覚は照明や形状などの高次認識とも関連しており、今後の展開が注目される。

10.3 パターン認識と眼球運動

フィリングインに関する研究が目まぐるしく⁸。動的雑音がフィリングインを活性化させること^{12,13}が明らかにされた。また、周辺視野の空間周波数成分の画像認識における効果²や視覚像の再認に及ぼす色・輝度変化の影響^{2,5}も検討された。錯視のコンピュータビジョン関係では、クレークオブライアン錯視の大域特性^{10,9}や回転速度と幾何学的特性変化の知覚¹、ポッケンドルフ錯視に奥行き手掛かりが影響していること¹などが明らかとなった。ほかにも主観的輪郭線形成場の時空間特性⁸や窓枠問題⁷が検討され、空間的位相の類同によって生じる知覚的群化はサイズによらないこと²も示された。

跳躍眼球運動中に輝度メカニズム、特に運動検出メカニズムが選択的に抑制されており¹、跳躍前後の情報統合に背景の網膜情報が使われている¹⁴ことが示された。また、跳躍眼球運動時には抑制だけではなく、等輝度刺激や点滅光の空間定位の誤り^{1,3}が生じ、注意レベルや点滅状態の違いによってその誤差がどのように変化するかが巧妙に測定された³。跳躍眼球運動時には視覚空間や時間空間が歪んでおり、その興味深い現象に対して精緻な実験手法と解析が展開され、これは今後の眼球運動に関する研究の大きな流れとなることが予想される。眼球運動の基礎概念については特集号¹¹を参照されたい。

10.4 まとめ

視覚光学の研究分野も最近特に細分化が進み、各分野が精緻化されつつある。これは、それぞれ学際的な研究の蓄積が急速に増大していることに起因しよう。今後は最終的な「見る」というレベルに対して、それぞれの知識を統合していく姿勢が重要になってくると思われる。一方、コンピュータやモニター表示技術が運動視や立体視等の研究を大きく進展させたように、バーチャルリアリティとその表示装置^{15,7}が、人間の高次認識処理機構を調べるための有効なツールとして今後重要になってくる可能性がある⁸。新しい方法論や技術を駆使しながら人間の眼と脳の仕組みを解明し、その知見を工学的に応用していく「視覚光学」のさらなる発展に期待したい。

11. 光源・測光・照明

東芝ライテック 沢田隆義

従来の青色LEDの100倍以上の輝度をもつGa₂N系青色LEDが前年度に開発されたが、応用開発を含めていっそうの高輝度化、低価格化のための努力が引き続き行われている。また、無電極ランプなどの新光源の研究も進んでいる。以下にこの1年間の研究、開発について概要を紹介する。

11.1 光源

環境問題の面から、水銀を用いない蛍光ランプの開発が期待されている。希ガス蛍光ランプは水銀レスであることと周囲温度に依存しないその特性とから最近注目されている。現在のところオプティカルリレー用光源としてキセノンを用いたランプが実用化されているが、その発光効率は水銀を用いた蛍光ランプに比べかなり低い。

液晶バックライト用蛍光ランプの改良研究も進んでいる。その一つとして平面形の蛍光ランプの放電を均一に

広げるための電極形状が検討され、誘電体でおおわれた電極間の放電を利用したものを平面形ランプに応用した場合などが報告されている。

無電極ランプは寿命が長く、ランプ交換など保守が難しいところへの応用が可能なことや、光が点発光に近く配光制御がしやすいことなどから、一部でその実用化が始まっている。無電極ランプの放電励起には、電解結合、誘電結合、マイクロ波放電によるものの3タイプがあるが、それらに対する詳しいレビューが報告された。

無電極ランプとしてイオウを封入したものをマイクロ波で励起したランプは太陽光に近い白色光が得られるが、これを投写型液晶ディスプレイのバックライトに応用することが提案されている。

さらに、無電極ランプの紫外励起源として、希ガスとハロゲンガスの混合ガスを使ったエキシマランプの試作例が報告された。

LEDに関しては、赤色LEDは高効率素子がすでに開発されており、現在では信号灯、自動車用尾灯、ストップライト、広告灯など広く屋外使用にも耐える高輝度タイプが実用化している。また、緑色LEDもGaPタイプのものが高輝度タイプとしてすでに実用化され、さらに今なお高輝度化が進められている。LEDのフルカラーディスプレイを実現するためには、残る青色LEDの高輝度タイプ実現が必須である。青色LEDとしては従来からSiC系、GaN系、ZnSe系などの材料系で研究が行われてきたが、1993年にGaN系のきわめて高効率の青色LEDが開発され、これによりフルカラーLEDの実現が一気に加速された。新開発のこの青色LEDは従来のSiC青色LEDの実に100倍以上の輝度を得られ、早速フルカラーディスプレイとしての応用例も出始めている。

11.2 測光・測色

測光・測色技術としては従来からの基礎検討が引き続き行われている。例えば、白色光を用いたシリコンフォトダイオードの自己校正法の実験的検討が報告されている。また、従来の光度値と分光応答（自己校正法）に基づく検出器標準による光度標準との比較も報告されている。さらに日電検における標準受光器、紫外域測定、3波長蛍光ランプの測光システム内容が報告された。

測色計算の精密化では三刺激値計算に用いる重係数をさまざまな波長間隔で求め、精度向上と計算の簡便化方法が報告された。また、測色機器校正用の白色標準反射面の一つであるPTFE粉末圧着面の作成条件の検討と拡散反射特性の測定が行われ、高い拡散反射特性と圧

着面作成上の再現性がよいことが報告されている。

測色の実用例の問題として、観察方向によって色が変わって見える蝶の羽の色の変角測色結果や織物の3次元分光反射率の自動計測装置が開発された。

表色系の問題についてもいくつかの報告があった。カラーオーダーシステムは色彩表示システムの一つであり、マンセル系やNCS系などの優劣等が議論されているが、その基本およびその変遷についての解説がなされた。また、視覚系の非線形性を考慮してXYZ系を座標変換することによって導かれた新しい色空間が提案され、その均等性の良さが報告されている。さらに、OSA均等色空間の格子点から10度視野に対する均等色度図が導かれた。

11.3 照明

心理物理的実験評価では、3人の被験者による20試験色に関する色識別楕円を求め、CIE 1931色度図と錐体興奮空間上で既存の結果との比較が報告された。また、刺激視野の大きさによる周辺視の色識別閾の変化について測定され、視野が大きくなると識別閾が小さくなることが報告された。また、若年者と高齢者の色識別に与える照明光の光色および照度の影響について測定され、低照度域において光色によって色識別に差が生じることが報告された。

白色度の評価に関して、従来提案されているCIE白色度式などの色相および純度の制限条件を排除した白色度式が提案された。また、白色度は紙や布など物体色の白さを評価するものであり、これまで光源の白さについて検討したものはなかった。それに関して、光色の異なる蛍光ランプを用いて光源色の知覚的白さを評価し、物体色の白色度式とは異なった考えに基づく白色度式を定義する試みが行われた。

演色、色再現の問題では、同じ光源下でさまざまな分光反射率をもつ多数の物体色を同時に観察した場合の光源の演色を評価する新しい尺度として‘演色能力’が提案された。また、素肌色および化粧肌色の見え方と照明環境、特に光色との関係が検討され、肌色の見え方は生き生き、色白、目立ちの3因子で説明されることが示された。また、同じ3波長蛍光ランプでも、蛍光体の違いによる分光分布の異なる3種類を用いた同様の実験では、深赤色発光を付加したタイプにおいて生き生き感が増す。さらに肌の見え、顔の総合的印象、色むらやシミの目立ちなどが評価され、加えて本人と他人との肌色の好みに関する評価の違いとこれに関わる心理的要因が調べられた。

カラー写真の色再現に関して、色調、濃度、階調、粒状性などの物理的画質要因の変化と主観的画質の好ましさの関係について検討され、色調および濃度の影響が大きいことが示された。また、カラープリンターについても肌色を対象に好ましい色再現について検討され、肌色の色再現許容範囲が示された。

視覚情報の見え方に関する研究として、非常灯における矢印表示の明瞭度、まぶしさ、明るさ、色対比効果などがさまざまな環境下において視認距離を変えて評価された。その結果、矢印の大きさや緑地背景の適正輝度値などの現状に対する改善点が示された。

道路交通標識の視認性では、道路標識の鮮明な画像およびそれに画像処理を施したぼけた画像の視認性が評価された。その結果、画像のぼけによる見難さは、単純な標識ほど見やすく、複雑なものほど他の標識との誤認が高まることが示された。また、道路交通標識として文字表示、標準ピクトグラフおよびそれを改善したものが見え方が評価された。道路走行時の見え方と同じ条件でCRT上に標識を提示し、識別できる距離が年齢別に調べられた。文字表示が最も視認距離が短く、年齢による影響も少ないのに対して、ピクトグラフでは視認距離が長く、若年層ほどさらに長くなる傾向が示された。

高齢者における視覚研究として、高齢者では相関色温度7,000 Kの光源に対する不快グレアの許容値が3,000 Kの光源におけるその65%に相当するなど、相関色温度の高い光源ほど不快グレアを感じやすいことが示された。また不快グレアに関する継続研究(10年間)の実験結果から、評価式の提案、ビルエネルギー計画上の利用についてまとめられた。

12. 光学関連の規格

キヤノン 桑山哲郎

日本の国家規格としての工業規格はJIS(日本工業規格)であり、これに対応して全世界を対象とする工業規格としてはISOとIECがある。1994年の光学関連の規格の大きな動きは、ISO規格が多数制定・発行されたことであり、本年の報告はこれを中心に行う。

12.1 制定された JIS

下記の5件のJISが、制定・発行されている。

K 7538 プリンター用ロール印画紙の寸法, K 7641 写真一現像処理済み安全写真フィルム—保存方法, K 7642 写真一現像処理済み写真印画紙—保存方法, R 3532 ガラスのレーザ干渉法による均質度の測定方法, T 8143 レーザ保護フィルタ及びレーザ保護めがね,

12.2 改正された JIS

下記の19件のJISが改正され、発行されている。なお一部、1993年に官報公示された規格と、解説だけが単独で発行された規格を含んでいる。

B 7118 カメラ用三脚, B 7141 顕微鏡—対物ねじ, B 7177 写真引伸し機, C 5980-93 F 11 型光ファイバコネクタ, C 5981-93 F 12 型光多心ファイバコネクタ, K 7512 写真—フィルムの寸法—120型及び220型, K 7520 一般撮影用シートフィルムの寸法, K 7523 一般用シート写真印画紙の寸法, K 7604 スチル写真用連続階調黒白ネガタイプフィルムのISOスピードの求め方, K 7612 一般用連続階調黒白写真印画紙のISOスピード及びISOレンジの求め方, K 7613 スチル写真用及び映画用カラーリバーサルフィルムのISOスピードの求め方, K 7614 スチル写真用カラーネガタイプフィルムのISOスピードの求め方, K 7618 工業用X線フィルムのISOスピード及びISO平均階調度の求め方, K 7620 写真フィルム及び写真印画紙—寸法変化の測定方法, K 7652 写真—濃度測定—第2部 透過濃度の幾何条件, L 0804 変退色用グレースケール, Z 6009 銀—ゼラチンマイクロフィルムの処理及び保存方法, Z 8721-93 色の表示方法—三属性による表示 解説, Z 8722 色の測定方法—反射及び透過物体色, Z 8729 色の表示方法— $L^*a^*b^*$ 表色系及び $L^*u^*v^*$ 表色系。

12.3 廃止された JIS

下記の9件のJISが廃止された。

B 7105 写真レンズの撮影距離目盛の表示方法, B 7108 写真撮影用ニュートラルガラスフィルタ, B 7114 写真用せん光電球発光器, B 7116 カメラ用セルフタイマ, B 7125 写真撮影用色温度変換ガラスフィルタ, B 7142 顕微鏡対物レンズ及びレボルバのねじ部, B 7176 16mmカメラ用パトローネの形状・寸法, R 3207 光学用赤外線吸収ガラス, R 7301 映写用カーボン。

12.4 光学関連の ISO 規格

全世界をカバーする国際標準の制定機関として、ISO(国際標準化機構)およびIEC(国際電気標準会議)がある。これらの機関では、技術分野別に設置されたTC(Technical Committee, 技術委員会)が標準の審議を分担している。光学の分野に最も関連の深いTCとしてはISO/TC 172(光学及び光学機器)がある。国際規格に対応する国内の審議は、一つの審議団体が、あるTC全体の国内対策委員会を担当している。光学の分野では日本光学工業協会がISO/TC 172の担当であり、この中のSC(Sub Committee, 分科委員会)はさらにいろいろ

るな協会、工業会が担当している。

表1は、今までに発行されたISO/TC 172の規格をTCと各SCに分けて整理したものである。ISO規格の名称は英語およびフランス語で定められているが、読者の便を考え日本光学工業協会による和文名称を掲載している。また、規格の名称には原則として「光学及び光学機器」が最初に付されるが、ここでは省略している。累計52件のISO規格のうち、1994年の発行は27件で過半数に当たる。長年国際標準制定に携わってきた多くの方の努力が、この1年にまとめて成果として得られたといえる。例年の、1年間だけの動きを解説するやり方では、とかく断片的な取り上げ方になってしまうので、この機会に全部の規格を掲載する次第である。

光学に関連するTCとしてはISO/TC 36映画、ISO/TC 42写真、ISO/TC 171マイクログラフィックス、IEC/TC 76レーザ装置、IEC/TC 86光ファイバなどがあるが、これらについての報告は割愛する。

表1 「光学及び光学機器」分野のISO規格(和文名称は日本光学工業協会による)

規格番号(制定年)	規格名
TC 172: 光学及び光学機器	
7944 (1984)	基準波長
SC1: 基本規格	
9022-1 (1994)	環境試験法—第1部: 定義と試験範囲
9022-2 (1994)	環境試験法—第2部: 低温, 高温, 湿度
9022-3 (1994)	環境試験法—第3部: 機械的応力
9022-4 (1994)	環境試験法—第4部: 塩霧
9022-5 (1994)	環境試験法—第5部: 低温, 低圧
9022-6 (1994)	環境試験法—第6部: 塵埃
9022-7 (1994)	環境試験法—第7部: 滴下, 降雨
9022-8 (1994)	環境試験法—第8部: 高圧, 低圧, 浸せき
9022-9 (1994)	環境試験法—第9部: 太陽光放射
9022-10 (1994)	環境試験法—第10部: 正弦波振動, 乾燥高温と低温の複合
9022-11 (1994)	環境試験法—第11部: カビの生育
9039 (1994)	光学系の品質評価—歪曲の決定
9336-1 (1994)	光学的伝達関数—応用—第1部: 35 mm スチルカメラ用交換レンズ
9336-2 (1994)	光学的伝達関数—応用—第2部: 複写機用レンズ
9336-3 (1994)	光学的伝達関数—応用—第3部: 望遠鏡
9358 (1994)	結像系のフレア—定義と測定方法
10109-1 (1994)	環境試験条件—第1部: 一般的情報, 定義, 気候帯とそのパラメーター
10109-6 (1994)	環境試験条件—第6部: 医用光学デバイス

10109-8 (1994)	環境試験条件—第8部: 極端使用条件機器
SC 3: 光学材料及び構成物	
8424 (1987)	光学ガラス素材—25°C酸性溶液に対する耐久性と分類
9211-3 (1994)	光学コーティング—第3部: 耐環境性
9385 (1990)	ガラス及びガラスセラミックスーパー硬さ試験
9689 (1990)	光学ガラス素材—50°Cに於ける洗剤を含むアルカリ磷酸塩水溶液に対する浸蝕抵抗性—テスト方法及び分類
SC 4: 望遠鏡	
	[制定された規格はまだない]
SC 5: 顕微鏡	
8036-1 (1986)	顕微鏡—第1部: 光学顕微鏡用一般液浸油
8037-1 (1986)	顕微鏡—スライドガラス—第1部: 形状寸法, 光学的性質及び表示
8038 (1985)	顕微鏡—対物レンズのねじ
8040 (1986)	顕微鏡—検板及び検板挿入穴の形状寸法
8255-1 (1986)	顕微鏡—カバーガラス—第1部: 寸法公差, 厚さ及び光学的性質
SC 6: 測量機械	
9849 (1991)	測量機器—用語
SC 7: 眼鏡用及び眼科用, 内視鏡及び度量衡の器械と試験方法	
8429 (1986)	眼科学—目盛付ダイヤルスケール
8596 (1994)	眼科光学—視力検査—標準視標とその表示
8597 (1994)	眼科光学—視力検査—視標の相関
SC 8: 眼鏡光学	
7998 (1984)	めがね枠—用語及び同意義語
8320 (1986)	コンタクトレンズ—用語及び記号
8321-1 (1991)	コンタクトレンズ—第1部: 角膜及び強膜用ハードコンタクトレンズの規格許容
8624 (1991)	眼科光学—眼鏡枠の測定システム
8980-1 (1992)	眼科光学—単焦点レンズ—第1部: 一般的要求事項
9456 (1991)	眼科光学—眼鏡枠の表示
10322-1 (1991)	眼科光学—半製品レンズ—第1部: 単焦点と多焦点レンズの半製品規格
10322-2 (1991)	眼科光学—半製品レンズ—第2部: 累進焦点レンズの半製品規格
11380 (1994)	眼科光学—半製品レンズ—玉型板
SC 9: エレクトロオプティカルシステム	
11252 (1993)	レーザ及びレーザ関連装置—レーザ装置—文書に対する最小限の要求
11253 (1993)	レーザ及びレーザ関連装置—レーザ装置—機械的インタフェース