

2000 年 光 学 界 の 進 展

「光学界の進展」は、過去1年間の光学の研究活動状況ならびに進歩発展について解説したものです。本解説における検索範囲は、応用物理学会を中心として、他に関連する学会・研究会・国際会議等における発表(口頭および論文)で、本文中での検索雑誌・学会等の名称は下表のごとく略記法を用いています。

表 「光学界の進展」引用学会等の省略記号

◆ 学会誌関係	記号	◆ 講演会関係	記号
光学 第 28 巻第 12 号	a-0	第 47 回春季応用物理学関係連合講演会	1
第 29 巻第 <i>n</i> 号	a- <i>n</i>	第 61 回秋季応用物理学学会学術講演会	2
Opt. Rev. Vol. 6, No. 6	b-0	Optics Japan 2000	3
Vol. 7, No. <i>n</i>	b- <i>n</i>	第 25 回光学シンポジウム	4
応用物理 第 68 巻第 12 号	c-0	第 17 回色彩光学コンファレンス	5
第 69 巻第 <i>n</i> 号	c- <i>n</i>	第 33 回光学五学会関西支部連合講演会	6
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 38, No. 12	d-0	ODF 2000	7
Vol. 39, No. <i>n</i>	d- <i>n</i>	日本写真学会年次大会	8
Jpn. J. Appl. Phys. (2) Vol. 38, No. 12	e-0	第 21 回光設計研究グループ研究会	9
Vol. 39, No. <i>n</i>	e- <i>n</i>	ISOM 2000	10
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 38, No. 12	f-0	第 13 回日本放射光学学会・放射光科学合同シンポジウム	11
Vol. 39, No. <i>n</i>	f- <i>n</i>		
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 16, No. 12	g-0	日本物理学会 2000 年秋の分科会	12
Vol. 17, No. <i>n</i>	g- <i>n</i>	日本物理学会第 55 回年会	13
J. Opt. Soc. Am. (B) Vol. 16, No. 12	h-0	7th International Conference on Synchrotron Radiation Instrument (SRI 2000)	14
Vol. 17, No. <i>n</i>	h- <i>n</i>		
Appl. Opt. Vol. 38, No. 34	i-01	IQEC 2000	15
Vol. 38, No. 35	i-02	第 17 回半導体レーザー国際会議	16
Vol. 38, No. 36	i-03	近接場光学研究グループ第 9 回研究討論会	17
Vol. 39, No. <i>n</i>	i- <i>n</i>	6th International Conference on Near Field Optics & Related Techniques (NF-06)	18
Opt. Lett. Vol. 24, No. 23	j-02		
Vol. 24, No. 24	j-03	MORIS/APDSC 2000	19
Vol. 25, No. <i>n</i>	j- <i>n</i>	Optics in Computing 2000	20
Opt. Commun.	k- <i>m-n</i>	映像情報メディア学会冬季大会 (2000)	21
J. Light Wave Technol. Vol. 17, No. 12	l-0	OFC 2000	22
Vol. 18, No. <i>n</i>	l- <i>n</i>	CLEO 2000	23
写真工業 Vol. 58, No. <i>n</i>	m- <i>n</i>	ECOC 2000	24
Rev. Sci. Instrum. Vol. 71, No. <i>n</i>	n- <i>n</i>	2000 電子情報通信学会総合大会	25
J. Synchrotron Rad. Vol. 7, No. <i>n</i>	o- <i>n</i>	2000 電子情報通信学会ソサイエティ大会	26
日本放射光学学会誌 Vol. 13, No. <i>n</i>	p- <i>n</i>	Proc. SPIE, Vol. 4090 (2000) Optical Data Storage 2000	27
Ultramicroscopy Vol. 84, No. <i>n</i>	q- <i>n</i>		
Phys. Rev. Lett. Vol. 84, No. <i>n</i>	r- <i>n</i>	Phase Change Optical Information Strange 2000	28
日本物理学会誌 Vol. 55, No. <i>n</i>	s- <i>n</i>		
分光研究 第 49 巻第 <i>n</i> 号	t- <i>n</i>	ODS 2000	29
Appl. Phys. Vol. 69, No. <i>n</i>	u- <i>n</i>	日本視覚学会 2000 冬季大会	30
レーザー研究 第 28 巻第 <i>n</i> 号	v- <i>n</i>	日本視覚学会 2000 夏季大会	31
Appl. Phys. Lett. Vol. <i>m</i> , No. <i>n</i>	w- <i>m-n</i>	第 33 回照明学会全国大会	32
Opt. Eng. Vol. 39, No. <i>n</i>	x- <i>n</i>		
映像情報メディア学会誌 第 54 巻第 <i>n</i> 号	y- <i>n</i>		
Vision Vol. 12, No. <i>n</i>	z- <i>n</i>		
照明学会誌 Vol. 84, No. <i>n</i>	A- <i>n</i>		

1. 光 物 理

岩手大 吉森 久

1.1 基礎的・伝統的光学

1.1.1 コヒーレンスと波動伝搬

伝統的な光学におけるコヒーレンスの記述は時間と空間、または周波数と空間をパラメーターとする光の場の相関関数で扱われるが、近年は従来のパラメーターに加えてそれらとフーリエ共役なパラメーターを直角座標とする多次元の位相空間で定義される各種の光強度分布で扱うことも多い。この方面の研究として、コヒーレンスとラジオメトリーの古典光学がディラックの記法を利用した演算子形式で再定式化された^{b-1}。また、光学で利用される位相空間強度分布の代表はウィグナー関数と一般化放射輝度であるが、これらの分布は光の場の多くのパラメーターを同時に扱えることから干渉イメージングや光パルスの解析・整形の分野で利用されている。この分野の報告には一般化放射輝度を逆伝搬させることによる3次元単色光源像の実験的再生^{b-1}と、光源の波長と位置を特定するフィルター関数を用いて体積インターフェログラムから3次元多色光源像を再生した場合のパフォーマンス解析³、ウィグナー関数を用いた光パルスの時空間情報の解析^{a-8}があった。次にフラクショナル・フーリエ変換 (FRFT) は位相空間におけるウィグナー関数の回転写像をあたえるがフレネル回折とも密接な関連があり、光波伝搬の扱いに多次元情報処理の視点から新しい考え方を導入している。この分野では次数が異なる FRFT 波動場のコヒーレンス特性の解析¹、FRFT によるデジタルホログラムの像解析³、FRFT を利用した結合変換相関器の小型化検討³などの報告がみられた。

他のコヒーレンス関連の理論的研究としては、回転すりガラスのような移動拡散板による光波コヒーレンスの変換特性の再検討³、コヒーレントモードで定義された一般化放射輝度の自由空間伝搬特性の解析^{b-2}が報告された。また低コヒーレンス干渉計において時間相関を測定することの実験的・理論的検討³や、干渉イメージングの SN 比の実験的検証^{b-2}などが報告された。

1.1.2 回折・干渉・偏光

計測・イメージングなどの応用分野と関連した研究が多岐にわたり報告された。光線の複数回反射によって発生する偏波面の回転に起因した位相のずれ (スピンリダイレクション位相) を利用した干渉計測手法³、フェムト秒レーザーの長距離伝搬特性の実験³、回折格子と干渉計を組み合わせた分光トモグラフィーによる生体計測³、ホログラ

ムを用いて発生させたラゲールガウスビームに関する理論的実験的研究³が発表された。偏光状態の画像計測に関しては、空間キャリアを用いて短時間で画像計測するもの³、マイクロ波長板アレイを用いて実時間計測するもの³、SLD (super-luminescent diode) の表面形状の干渉計測に偏光解析を利用する手法³が発表された。

1.1.3 散 乱

散乱性媒質中の多重散乱現象の研究とその他の特殊な散乱問題の研究に大別される。前者には2次散乱近似にもとづく凝集媒質からの後方散乱エンハンスメントの解析¹、多重散乱光の時空間分割解析法の検討¹があるが、計測的応用を念頭においたものには、光子拡散理論による拡散光トポグラフィック像の再構成²、多重散乱過程における多層 PSF (point spread function) モデルの提案³、後方散乱光エンハンスメントを用いた濃厚媒質の光学係数の推定³、微粒子粉体層から生じる後方散乱スペックル場の相関特性³、動的エバネセント光散乱法による粒径計測³がある。その他の散乱問題としては、べき則強度照射された粗面からの散乱強度の相関特性¹、拡張型ミー散乱理論を用いた平面基板上微小球近傍の電磁場解析¹、光散乱ポリマー導光体内部の多重散乱解析²が報告された。

1.1.4 光放射圧

光放射圧の分野では、具体的な応用研究が主導的である。微小球のレーザー補足技術¹と光圧測定²、楕円偏光を利用した液晶液滴の回転制御¹、微粒子の集合体形成¹、非球形粒子の操作技術の研究²、アレイ光源をトラップ技術へ適用するアイデア³など、多岐にわたる。また光子力を利用して微粒子による吸収を測定する方法³の提案や、パルスレーザーを利用した微粒子ポテンシャルの解析¹が報告された。

1.1.5 展 望

位相空間光学とでもよぶべき新しい研究の流れが感じられる。波動としての光のイメージと光線 (粒子) としての光のイメージを両立させうるキャンバスである量子力学的位相空間は20世紀前半のアイデアであり、新しいものではない。しかし最近の現代的・近未来的な研究対象に対し、これらの一般的数学的枠組みを役に立たせ、魅力あるものにするために必要な光学現象の再認識と数学的整備を、近年の研究者は丹念に作り上げた。今後さらに多次元フォトンクス、多次元光イメージング、極短パルス応用分野などに浸透していくものと予想される。

2. 結像素子・光学機械

旭光学 伊藤孝之

近年、メガピクセルカメラの登場に伴い、デジタルスチルカメラ市場が急速に拡大しており、デジタル関連技術の特集が生まれ多くの発表があった。また光学素子、光学機械、光学設計法、加工法まで広範囲な発表が行われ、特に回折光学、光記録に関する報告が多かった。

国際学会の ODF 2000 (第 2 回) には、10 数か国から約 200 名の参加があり報告件数も約 100 件と盛況であった⁷。

2.1 光学素子

2.1.1 幾何光学的素子

スチルカメラ用ズームにガラスモールド非球面レンズが多用され、高変倍化 (4 倍) と小型化が正正負 3 群ズームとしては必要最小限と思われる 6 群 6 枚構成で達成された⁸。同様にデジタルスチルカメラ用ズームにおいても非球面の利用により、小型化、300 万画素を超える高画質化が達成された⁴。またマイクロスコブ対物系に、直径 3.6 mm, $\Delta n = 0.052$, 厚さ 3.76 mm のラジアル GRIN の Wood レンズが開発された⁷。

レーザービームプリンター用の走査光学系に、小型化、コスト低減のため反射型が実現されてきている。反射型走査光学系で発生しやすい走査線湾曲と波面収差を同時に補正する方法として、曲面ミラーと面倒れ補正レンズの偏心を組み合わせる方法⁹や、ねじれ形状を有する自由曲面ミラーによる方法が示された⁴。

2.1.2 回折光学素子

波長以下の短い構造を有する光学素子の製造が可能になり、短い格子周期をもつ回折素子が注目されている。複素振幅変調を行う方法の提案¹、反射防止膜の作製^{1,2}、また、スカラー領域と共鳴領域の境界の検討報告がされた³。液晶プロジェクター光学系に用いる、複屈折材料とブレース型回折格子を積層した複屈折 DOE (diffractive optical element) をレンズアレイと組み合わせた偏光変換光学系が報告された⁴。

一眼レフカメラ用超望遠レンズの色収差補正用に 2 つの素材による回折面を数 μm の間隔で向かい合わせることで、広い波長範囲の回折効率を高めた積層型回折素子が開発された。回折素子のアッペ数は負の値で絶対値は 3.45 ときわめて高分散で、他の収差に影響を及ぼすことなく色収差をコントロールでき、小型化と軽量化に飛躍的な効果があることが紹介された^{m-12}。

2.1.3 液晶、結晶光学素子

一眼レフカメラファインダー表示スーパーインポーズに PN (ポリマーネットワーク) 液晶の応用例が紹介された⁸。光磁気ディスク用集積光学系として、従来 8 個の光学部品を使っていたものに対し、複屈折結晶 KTP (KTiOPO_4) マイクロプリズムのみを用いた非常にシンプルな集積光学系が紹介された²。

2.2 光学機械

2.2.1 光ディスク

青色光源を用いた高密度記録へのアプローチ、DVD (digital versatile disc) と CD の基板厚差に対応する対物レンズが多数報告されている。青色用光学系では、20 GB 以上の高密度化のために起こる光学系製造の困難に対応するよう、NA 0.85 の 2 枚組レンズの第 2 番目マイクロレンズをプラズマエッチングによって作製する方法、2 枚組レンズの相対位置の公差緩和設計、液晶によるなめらかな波面収差補正、実時間球面収差補正用の球面収差検出方式の提案など実用化に向けた報告がなされている¹⁰。

一方、現行 DVD、CD 用では光学系簡素化のため、ツイン LD (laser diode) を用いた光学系、5 次の球面収差に着目し内外周の位相ステップを決定した基材厚補正レンズ^{2,8}、レンズに階段状の位相構造を組み合わせ、色収差補正、温度変化補正、DVD-CD 互換特性をもたせた対物レンズ等が報告された⁷。

2.2.2 画像結像装置

レーザービームプリンターにおいては、高密度化、高速化の要求が高まっており、マルチビームレーザー走査装置が開発されている。マルチビーム特有に発生する副走査倍率不均一性と倍率色収差を、2 次元多項式自由曲面ミラー 2 枚を用いて解決したことが報告された⁴。また光源部にファイバーアレイを用いた 5 ビーム走査により、17 インチ幅で毎秒 400 mm の印刷が可能となった⁸。

リソグラフィーに関しては直径 200 mm を超える 3 つのミラーシステムを採用した EUVL (extreme ultraviolet lithography) において、ミラー反射率のピークが 65%、および解像度 $0.056 \mu\text{m}$ が達成されたことが報告された⁷。

2.2.3 観察装置

ヘッド・マウント・ディスプレイ (HMD) の小型化が急速に進んでいる。数年前は 1 kg 前後と大型だったものが、偏心自由曲面プリズムを用いることによって眼鏡レンズのような光学系を最適化し 85 g まで軽量化され⁴、さらに 3.4 mm のプリズムにホログラム光学素子 (HOE) を採用してわずか 25 g の HMD が報告された⁷。

2.3 光学設計法

2.3.1 設計, 評価方法

画像そのものをコンピューター内に設定し, 光学系を通したときに収差を含め, その画像全体がどのように再現されるかという画像シミュレーションによる評価方法が開発されてきている. ソフトフォーカスレンズとテッサータタイプの被写界深度の違いを近景, 中景, 遠景の3次元シミュレーションにより解析できた^{3,4,7}. また, レンズ表面, 鏡枠によるゴースト, フレアの解析, 3次元の被写体や回転物を照明したときの画像シミュレーションが紹介された⁷.

ホログラムの設計ツールとして, 再生光の方向と強度等の再生特性と, 波面収差や収差係数計算等の結像特性の両方が解析できるホログラム設計支援シミュレーターが紹介された⁴.

2.3.2 最適化

従来のDLS (damped least square) 法等による局所的な最適化手法から脱却する手法が開発されてきている. メリット関数に次元降下関数を加えたDDF (dimension descent function) 法に, 非球面ファクターを加えることによって, 性能劣化なくズームレンズの構成枚数の低減がはかられることが示された⁴. また遺伝的アルゴリズムによる最適化手法の開発が引き続き行われており, 離散的なガラス材質も最適化のパラメーターに取り入れ, 7枚構成の望遠レンズの実例が紹介された⁷.

2.4 加工・評価測定

回折光学素子や微細光学部品の加工, 評価測定方法の報告が目立った. バイナリーオプティクス作製技術を使った, 鋸歯形状をデジタル的な階段形状で近似するマルチレベル化の製造技術では, 紫波長用の透過型素子として周期 $2\mu\text{m}$ までブレード構造の良好な微細化が確認された⁴. また波長以下の周期構造がその構造によってもつ有効屈折率特性を利用し, バイナリー形状でマルチレベル位相型CGH (computer-generated hologram) 素子を設計する手法および作製法が紹介された⁴.

2.5 展望

21世紀を迎え, IT関連技術が広範囲にかつ急激に展開されようとしている. IT革命に対応して光学機械も重要な役割を担い, それに伴う光学素子, および光学設計手法の開発もその重要さは増す一方であろう.

3. X線結像光学

筑波大 渡辺紀生

最近のX線結像光学の進歩は, 第3世代放射光施設

Spring-8の利用開始に伴って, エネルギー数keVから数10keVの硬X線領域での進展がいちじるしい. ゾーンプレート, 全反射ミラー, 屈折レンズ等の結像光学素子の進歩とともに, それらを用いた結像光学系も結像型, 走査型双方でサブミクロンの分解能をもつのがあたりまえになってきた. また, 1keV以下の軟X線の領域では, ゾーンプレートを用いた軟X線顕微鏡が分解能約30nmで特に生物を対象とした応用段階に達している. 以下, 本年度の進展について概観する.

3.1 硬X線結像光学

ゾーンプレートを10keV前後の波長で用いるには1 μm 程度の厚みが必要なため, 輪帯幅が狭く分解能の高いゾーンプレートを作ることが困難であった. しかし, プロセス技術の進歩により比較的アスペクト比の高いゾーンプレートも作成可能となり, 20keV程度のX線まで電子線リソグラフィーで対応可能となってきた. ゾーンプレートを用いた結像型硬X線顕微鏡では, 最外輪帯幅0.25 μm , 厚さ2 μm 前後のゾーンプレートを用いて10~15keVで0.3 μm 程度の構造が分解結像されている^{e-5, k-180}. また, 走査型でもサブミクロンの分解能が報告されている¹¹.

積層型ゾーンプレートは, 逆に薄くすることが困難なため, より高エネルギー側にそのターゲットを移した感があり, 28keVでサブミクロンのスポットが得られているほか, 80keVのX線でも集光させることができている¹¹. また, これを用いた結像型硬X線顕微鏡も報告されており, 25keVで17 μm ピッチのメッシュ像が得られている¹¹.

X線領域の屈折率は1よりわずかに小さいので, 凹面レンズを透過したX線は集光する. 直径1mm程度の小さなレンズを数10個並べるとエネルギー10keV以上のX線では, 十分な集光・結像能力をもつ. このようなX線屈折レンズでは, プレス加工したアルミ製の放物面レンズを62個組み合わせたものを対物レンズとして用いた結像系で, 23.5keVのX線を用いて0.3 μm のパターンが分解できている¹⁴. また, Si基板上に放物面レンズを作成することも行われ, 1次元方向の集光に限られるが8keVのX線を用いて光源に縮小率を掛けた値に等しい, 線幅5 μm の集光が得られている^{k-177}. 国内でもガラスキャピラリー内のグリセロール中に均一に泡を並べる方法で, 18keVのX線を用いた結像光学系で17 μm ピッチのメッシュ像が得られている¹¹.

X線の全反射を用いたウォルターミラーを用いた光学系では, その色収差がない利点を利用した結像型蛍光X

線頭微鏡の構築^{a,3}, およびそれを用いた元素分析^{a,1}, 蛍光 X 線トモグラフィー¹が報告された。また, ウォルターミラーを用いた X 線望遠鏡の分野では, 平滑な母型の表面に多層膜スーパーミラーを形成してこれを基板側に転写する技術が開発され², それを用いて 20~40 keV 領域の硬 X 線望遠鏡が開発された²。

位相コントラスト CT (computerized tomography) は, X 線干渉計を用いて試料による X 線の位相変化量を画像化する方法で, 最近は特に医学利用を目指した X 線干渉計の大型化による観察領域の拡大に力が注がれている^{a,5,c,4}。一体型^{a,4} および分離型¹¹の X 線干渉計が作成されており, 25 mm×15 mm の干渉図形が生成できている。

干渉性の高い X 線で試料の投影像を撮ると, 透過率の高い試料でもエッジが強調された像が得られる。このいわゆる屈折コントラストによるイメージングでは, 放射光 X 線アンジュレーターと結晶の非対称反射によるビームの拡大を組み合わせることにより, ビデオレートで生体試料の動的観察が行われている^{a,4}。

また, 半導体結晶の局所歪みの画像化を目的に, X 線アンジュレーターからの X 線を結晶の非対称反射で縮小し, 発散角約 1.7 秒, ビームサイズ 7×5 μm の高平行マイクロビームが作成された^{a,6}。このビームを用いた実験では, シリコン酸化膜の歪みや赤外発光ダイオードの動的な結晶歪みが測定されている¹¹。

硬 X 線の偏光状態を変化させる素子としてダイヤモンド移相子があるが, 最近移相子への入射ビームの角度発散に伴う収差を補償する収差補償型 X 線移相子が開発された^{a,4}。これは, 2 枚の透過型移相子を組み合わせたもの (2 象限移相子) で, 偏光状態の高速スイッチングにも対応できる。また, 4 枚の移相子を組み合わせると色収差も補償する 4 象限移相子も開発された。これを用いて偏光状態を変化させて試料の投影像の差をみる偏光顕微鏡が開発されている^{a,6,2}。

3.2 軟 X 線結像光学

ゾーンプレートを用いた軟 X 線顕微鏡は, 波長 2~5 nm の軟 X 線領域で現在分解能が約 30 nm で, 生物試料を対象とした応用研究が活発に行われている。たとえば最近では, 直径 10 μm のキャピラリーチューブの中に緑藻を入れて瞬間凍結して角度を変えて観察し, 分解能約 60 nm で 3 次元再構成するといった報告がある^{a,15}。国内でも分解能 50 nm で試料を大気中に置いて観察できる顕微鏡が完成し, 応用へ向けての努力が続けられている^{a,1,11,14}。

波長 13 nm 付近の軟 X 線では, EUV リソグラフィーに関連した研究が活発に行われている。リソグラフィー用

反射型マスクの検査用にシュワルツシルトミラー光学系および多層膜ビームスプリッターを用いた軟 X 線干渉顕微鏡が作成され, マスクの位相欠陥が検出可能であることが示された¹。また, 3 枚非球面ミラー投影光学系では, 56 nm の微細パターン作成に成功している¹。

3.3 展 望

最近の光学素子の進歩により, 硬 X 線領域の結像光学素子もかなり出揃ってきていると思われる。今後は分解能 0.1 μm を目指した高分解能化とともに位相, 偏光や XAFS (X-ray absorption fine structure) を利用した結像技術が進んでいくものと思われる。また, X 線アンジュレーターのような干渉性の高い高輝度 X 線源の一般化に伴い, X 線ホログラフィー等の干渉性を利用した光学系が大きく進歩するものと考えられる。

4. 分 光

東理大 盛永篤郎

20 世紀最後の年 2000 年を飾る分光分野での輝かしい進展として, フェムト秒レーザーを用いた可視周波数測定法の成功がある。レーザーのすぐれた単色性のゆえに, レーザーの誕生以来レーザー高分解能分光学はいちじるしく発展してきた。その精度はすでに波長測定の限界 (10⁻¹¹) を超え, マイクロ波領域のセシウム周波数標準 (10⁻¹⁴) にもとづく可視領域での絶対周波数測定を必要とした。そのため, 1970 年代から, 可視周波数測定に, 少なくとも 5 台以上の中間周波数レーザーを用い, その間を位相制御で結び周波数を橋渡しする周波数チェーンが開発されてきた。しかし, この装置は非常に大型で複雑であり, さらには目標の可視周波数に合わせて, 異なるレーザーの組み合わせからなる周波数チェーンを開発せねばならなかった。そのため, 波長標準レーザーの開発にかかわる特定の標準研究所で主に開発され, 誰もが使える一般的な周波数測定法ではなかった。そこで, 東工大津村により光周波数コム発生器が研究され, 電気光学結晶を用いて一定の周波数間隔の側帯波を櫛の歯状に発生し, 2 台の可視周波数差を測定する方法が開発され実用化された。測定の差周波数は 20 THz 以上まで可能になった¹。

新しく開発された方法は, モードロックフェムト秒レーザーの広いスペクトル幅にわたる規則正しい軸モード周波数を用いる方法である。開発したのは水素原子の 1S → 2S 遷移の精密測定をしてきた Hänsch らのグループで, まず最初に, セシウム周波数標準器でモード間周波数を制御したモードロックチタンサファイアレーザーを用いて約 50 THz のコムを発生させ, メタン波長安定化レーザーを

基準とした波長 846 nm と 1S → 2S 遷移の 8 倍の波長の 973 nm の間の 45 THz の周波数差を測定し、1S → 2S 遷移の真空紫外波長を 10^{-13} の精度で決定した¹⁵。続いて、フェムト秒レーザー光をマイクロ構造光ファイバーにとおすことにより、コムが発生範囲を 500 nm から 1200 nm までの 300 THz に拡大し、この範囲にある Nd:YAG レーザーの基本波と 2 倍波の周波数間隔を測定した¹²。これにより、可視周波数がたった 1 台のコム発生器用フェムト秒レーザーを用いることでセシウム周波数標準から直接測定できた。この手法は可視周波数測定をいちじるしく容易にし、近年のレーザー線幅狭窄化研究の進展とともに超高分解能分光学での画期的な手段になると期待される。

精密周波数測定に対して一見矛盾する特徴のフェムト秒レーザーが有効な手段として用いられたのは興味深い。フェムト秒レーザーはこの多様な応用の側面をもっており、研究が富みに盛んであることはここで指摘するまでもない。分光分野においても分子振動の実時間分光の手段としても期待されており、その解説が書かれた^{5,5}。

分光分野で研究が盛んになってきているものに高感度分光技術の開発がある。これは地球環境問題と絡んで微量物質の検出技術の開発が急務であることにもよる。微量物質や分子の倍振動など小さな吸収係数の物質の検出には長行路吸収法が一般的であるが、長行路の代わりに共振器を用いる方法が研究されている。そのひとつはパルスレーザーを用いた共振器リングダウン分光法であり、赤外域への応用が研究されている¹³。もうひとつは、ショット雑音限界の検出感度を得るために開発された FM 分光法を共振器に応用した NICEOHMS 法である。この方法を用いて分子の倍音の飽和吸収スペクトルを詳細に研究し、rf・近赤外 2 重共鳴信号が測定された^{12,13}。また、共振器を共振器内吸収分光法のひとつとして多モードレーザーの発振立ち上がりの吸収の成長を測定する方法が古くから行われており、昨年その成果の詳説が出ているが^{14,2}、そのグループは実に色素レーザーで 70000 km の実効吸収長を達成したと報告している。長行路法では半導体レーザーがメタンや水蒸気のアイソトポマー分析へ応用され高い精度の測定が実証された^{1,2}。半導体レーザーを用いた微量気体検出技術が展望された⁶。この他、希ガスの非共鳴磁気複屈折を偏光分光で測定する研究²、シート状気体分子の形状測定を非共鳴多光子イオン化で行う試みが報告された²。

20 世紀後半のレーザー分光学の重要な成果のひとつである気体原子のレーザー冷却研究や原子操作・原子光学技術の開発、さらに気体原子のボーズ凝縮についての研究はますます活発化している¹⁵。日本においても、それらに関

するシンポジウムが、第 47 回応用物理学会関係連合講演会では「原子光学技術の最前線と 21 世紀への展開」¹、日本物理学会年会では「レーザー冷却の応用と物理」¹³ として企画された。また、レーザー研究では「レーザー冷却とボーズ・アインシュタイン凝縮」小特集³、日本物理学会誌に「原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮」^{5,2}、応用物理学会誌に「原子波レーザーと物質波増幅」¹¹ の解説がなされている。新世紀を迎えてこの分野の進展が楽しみである。

5. レーザー

東大 中野義昭

京大 宮崎健創

5.1 レーザー（半導体レーザー）

5.1.1 概要

2000 年は、半導体レーザー分野で最も権威のある 2 年に 1 度の「IEEE 国際半導体レーザー会議 (ISLC)」が開催される年にあたり、今回の第 17 回会議は米国カリフォルニア州モンレーで行われた¹⁶。米国においては、量子カスケードレーザーやマイクロマシンベースのレーザーが、欧州においては光 3 R 中継などを可能とする半導体光アンプベースの全光デバイスが、特徴的な先端研究テーマになっている。一方、半導体レーザーの分野を長らく牽引してきた日本からは、質的に新しい研究成果が出にくくなっている印象があった。昨今の厳しい経済情勢によって基礎研究体制が変化したことが原因と思われるが、せっかく築いてきた日本の得意分野なので、特に若手研究者にバトンを渡して世界の先頭を走り続けたいものである。国内学会においては、以下に記すように堅実な研究の進展がみられた。

5.1.2 光通信用長波長レーザー

アクセス系応用を念頭に置いた 1.3 μm 帯ローコスト半導体レーザー (LD) 構造が種々報告された。有機金属相エピタキシー (MOVPE) の選択成長だけで形成される LD 構造、誘導結合プラズマ (ICP) エッチングによる埋め込みヘテロ構造、InAlAs 層の選択酸化による電流狭窄などである^{1,2}。

1.3 μm 帯 LD の温度特性を向上し温度調節の必要をなくすための努力も続けられている。GaAs 基板上で高歪みの InGaAs 活性層を用いるアプローチでは、1.2 μm の発振波長ながら、180°C までの発振が達成されている。一方、上記活性層に窒素を添加した GaInNAs 活性層を用いるアプローチに関しては多くの研究機関で進展がみられ、波長 1.2~1.3 μm 、室温近傍で 200 K 以上の特性温度が

実証されている。最高動作温度としても 200°C に迫る値が報告された。さらに、GaInNAs 活性層に Sb を微量添加すると、活性層の結晶性が向上して低閾値が得られるとの新たな報告もあり、期待される²。

温度特性向上法としてはむしろ古典的な、InP 基板上の InGaAlAs 量子井戸を用いる方法でも着実な進展がみられ、ギガビットイーサナーなどへの適用を念頭に置いた 10 Gbps 直接変調・温度調整フリーの 85°C 動作が実証された。一方、InGaAs 3 元基板を用いる方法でも、1.3 μm 低閾値電流密度発振が得られている。今後は、基板品質のいっそうの向上と大口径化が課題となる^{1,2}。

LD の温度特性を根本から見直すために、新たな温度無依存半導体材料を探索する試みも始まっており、タリウム系やビスマス系の半導体材料で、バンドギャップ波長温度依存性の理論的検討と、結晶成長・基礎物性評価実験が行われている。

5.1.3 光通信用単一縦モードレーザー

幹線系の光通信では、単一モード性にすぐれる分布帰還型 (DFB) 半導体レーザー (LD) が主流であり、その次世代の形態を探る研究が進展した。活性層分離型 DFB-LD においてはサブミリアンペア動作が達成され、位相シフト DFB-LD においては、非対称周期変調による片端面効率の向上や伝送特性の位相シフト量依存性が報告された。また温度特性の向上をねらった InGaAlAs/InP 系の DFB-LD や、マストラנסポート InAsP 埋め込み回折格子 DFB-LD の試作、同一の活性層による利得結合 DFB-LD と電界吸収型 (EA) 光変調器の集積化、DFB-LD 多機能化のための線型チャープ回折格子の電子線露光技術、10 Gbps イーサナーネットをターゲットとした 1.3 μm 帯 InGaAsP 位相シフト DFB-LD の伝送特性評価などが報告された^{1,2}。

DFB-LD と並んで単一モード性にすぐれる分布ブラッグ反射型 (DBR) LD に関しては、垂直高アスペクト比の溝形成技術を応用して半導体/低誘電率媒質 (ポリマーや空気) 周期構造を形成し、コンパクトな DBR を得るアプローチが試みられている。半導体/ベンゾシクロブテン (BCB) DBR-LD の低閾値・高効率動作や、同様の溝形成技術を適用した垂直回折格子分布反射 LD および多重短共振器 LD などが報告された^{1,2}。

5.1.4 面発光レーザー、量子効果レーザー

GaAlAs 系の垂直共振器面発光レーザー (VCSEL) では、AlAs 層の選択酸化による電流狭窄や横モード制御が検討された。また、(311)B 傾斜基板上に成長することによる偏波面制御にも進展がみられ、3×3 レーザーアレイ

が作製されるに至っている。従来からの異形状共振器による偏波面制御も引き続き試みられている。長波長帯 VCSEL を目指した研究開発も盛んで、GaAsSb/GaAs VCSEL の室温連続発振、トンネル接合による電流窄溝構造、ウェハー融着法による作製、光励起による 1.55 μm 帯多波長アレイなど、着実に進展している。プラスチック光ファイバー (POF) 用に期待される InGaAlP 赤色 VCSEL については、60°C の高温連続発振が報告された。一方、VCSEL 自体を光ディスクの近接場ヘッドに適用するため、金属微小開口を設けることも試みられており、出力の向上と近接場強度分布が報告されている^{1,2}。

異種の微小共振器レーザーとしてマイクロディスクレーザーがある。これに関しても、1.55 μm 帯での低閾値 (40 μA) 発振、InAlAs 層の選択酸化による構造強化、マイクロギア化によるモード制御、ディスクをプローブとしたセンシングなど、興味深い研究報告が相次いだ。

一方、量子ドットレーザーにおいては、スペクトラルホールバーニング・空間ホールバーニングの理論解析など基礎理解が進んだほか、低チャープ性や閾値温度依存性の低減に関し、実験的な検証が進んだ^{1,2}。

5.1.5 光ディスク用レーザー、励起用レーザー

DVD 用 InGaAlP 赤色 (~660 nm) 半導体レーザー (LD) については、広い温度範囲における自励発振動作や、CD 用波長 (~780 nm) との 2 波長モノリシック集積化、高出力化などが、また 780 nm 帯 GaAlAs/GaAs LD に関しては、CD-R 読み書き用の高出力化が、主な研究対象になっている。特に高出力化に関しては、窓構造を用いることにより 660 nm 帯 LD で 150 mW、780 nm 帯 LD で 300 mW を超える COD/キックフリー動作が報告されている²。

ここ数年のホットトピックスであった次世代 DVD 用 InGaN/GaN 青紫色 LD であるが、中心人物の日亜化学の中村氏が UC Santa Barbara へ移ったため、研究成果発表という観点では多少ペースダウンした感があった。むしろ重心がビジネスに移行したと考えるべきであろう。日亜化学をはじめ国内外数社が有力製品を開発している模様である。GaN 系半導体の材料科学的側面は、多数の大学、研究機関で、引き続き精力的に研究されている。

一方、EDFA (エルビウム添加光ファイバー増幅器) 励起用光源として重要な 980 nm 帯の高出力 LD について、基板モード・クラッド層厚の影響、静電気放電耐性などが研究されている^{1,2}。

5.1.6 半導体レーザーにもとづく機能光デバイス

最近では、半導体レーザー (LD) 技術にもとづいて作製

されるさまざまな能動光デバイス、集積光デバイスが各所で利用されるようになっており、これらはLD研究の一面を占めるに至っている。半導体光アンプ(SOA)もそのひとつで、2000年は光利得の偏光無依存化、飽和光出力の向上などに一定の進歩がみられた^{1,2}。また、多モード干渉(MMI)導波路をSOAに組み込むことによって飽和光出力の向上がはかられたり、SOAのスポットサイズ変換領域に曲がり導波路を導入して低反射化・高出力化がはかられるなど、集積化の手法による高性能化が報告された²。

そのほかに、キャップアニールによる量子井戸の選択的無秩序化でLDと受動導波路とを集積化した事例、テーパ型SOAと回折格子結合器を集積化して外部共振器波長可変レーザーを構成した事例、光空間伝送のための傾斜リッジ導波路高速スーパーミネセントダイオード(SLD)やスペクトルスライス多波長光源用の高出力SLDを試作した事例などが発表された²。

5.1.7 展 望

半導体レーザーの研究は、基礎研究フェーズから実用化フェーズに移行した部分が多く、単体としての研究発表件数は漸減傾向にある。他方、光エレクトロニクスシステムの高度化に合わせ、光デバイスにはより高い性能や多くの機能が求められており、半導体レーザーを基礎とする機能デバイス、集積デバイスの研究は今後伸びていくものと思われる。また、窒化物や酸化物、Tl, Bi系半導体、有機物など、新規の発光材料の研究開発も加速しており、これらが新たなLDの研究分野を今後形成していくものと思われる。半導体レーザー技術は、光エレクトロニクス技術の母体であるから、景気に左右されることのないたゆまぬ研究開発が望まれる。(中野)

5.2 レーザー(半導体レーザー以外)

先端科学技術開発のためのツールとしてレーザーの役割はますます増大しており、代替不可能なレーザー機能の高度化、また新機能の追及などを目的としたレーザー研究が活況を呈している。ここでは、未踏の物理領域へのアプローチを可能とするような先端レーザー開発、および産業応用を目的とした実用レーザー技術開発の2つの視点から、わが国におけるこの1年の動向を概観する。

5.2.1 完全固体化レーザー

加工や各種計測などの産業応用を目的としたレーザー開発では、フォトンコストの低減、および装置寿命などを含む信頼性の向上が最重要課題である。そのため、高効率発振の期待できる高出力半導体レーザー(LD)を励起源とした完全固体化レーザー開発プロジェクトが世界各国で進

められている。わが国では、通産省工技院の「フォトン計測・加工技術」プロジェクト(平成9~13年度)において、1) 平均出力10 kW以上/発振効率20%以上/レーザーヘッド体積0.05 m³以下の仕様を満たす「高出力完全固体化レーザー技術」および、2) 平均出力1 kW以上/発振効率20%以上/加工対象物上で集光径50 μm以下の特性を有する「高集光完全固体化レーザー技術」の開発が進んでいる。

1) については、ロッド型Nd:YAGレーザーで、LD励起レーザーとしては世界最高平均出力7.2 kWが達成された(東芝)。発振効率(電気-光変換効率)は22%である。また、スラブ型Nd:YAGレーザーでは、発振効率20%、cw出力3.0 kWが実現した(ファナック)。一方、2) については、ロッド型Nd:YAGレーザーの側面LD励起方式や、熱レンズ効果の抑制できる共振器構成などの工夫により、高集光可能な高品質ビームを維持したまま、効率20%以上で500 Wの平均出力が達成された(三菱電機)。また、このレーザーを基本とした波長変換により、532 nmで平均出力140 W、266 nmで世界最高の紫外光出力23 Wが実現している。なお、このプロジェクトとは独立に行われた研究開発で、平均出力2 kWクラスの完全固体化Nd:YAGレーザーが国内では初めて製品化された(NEC)。

高性能な完全固体化レーザーには励起源として的高出力LD技術が不可欠であり、上記プロジェクトでも開発が進められている。高出力LDの発振効率は約50%であるため熱の除去が大きな課題であったが、噴流冷却方式などの開発により、1 cmのLDバーから効率~50%で連続出力115 W以上の出力が得られるようになった(浜松ホトニクス)。また、同研究では、AlフリーのInGaAsP活性層を採用することにより、劣化しにくく光損傷閾値の高い高性能なLD(出力40 W、効率50%)も開発されている。

関連レーザー技術として、大型の高性能レーザー結晶製造が比較的容易なYAGセラミックス、小型高出力が期待できるYb:YAG等のYb系レーザー、高効率短波長変換用の非線形光学結晶の開発などが進められている。

5.2.2 超短パルスレーザー・高強度レーザー

1990年代初頭から今日に至る超短パルスレーザーとその増幅技術の急速な進展は、すぐれた波長可変固体レーザー媒質、カーレンズモード同期、チャープパルス増幅がほぼ同時期に実現したことによる。最近では、Ti:sapphireレーザーをベースとするフェムト秒レーザーとその増幅システム技術は高度に確立され、10~100 fsのパルス幅、あるいは~TWの尖頭出力をもつさまざまなレーザーが標

準的な実験室で手軽に使えるようになっており、それらを利用した研究領域も急速に拡大している。

関連レーザー技術の研究開発では、光モノサイクルの発生やアト秒パルス発生、ペタワットパルスの発生など、超短パルスレーザーが潜在的に有している機能を極限まで追求する方向とともに、産業応用を強く意識した高繰り返し高平均出力レーザーや、小型高効率レーザーを目標とした取り組みが進んでいる。

短パルス化では、Ti:sapphireの利得幅から期待できる限界値に近い約5 fsのパルス発生まで報告されていた。これ以下の短パルス化には、スペクトルの広帯域化とともにその位相制御が必須である。気体中での自己位相変調過程などを利用した光スペクトルの広帯域化、異なる波長域での位相同期、広帯域スペクトルの位相制御などの研究が行われており、液晶を用いた能動的な空間位相変調によって4 fsレベルのパルス発生が報告された。しかし、光領域のレーザーではアト秒域への短パルス化を望むことは難しく、高次高調波発生による短波長域のコヒーレント光によってアト秒域へのアプローチが行われている。

超短レーザーパルスの増幅によって実現できる超高強度レーザーの開発は、尖頭出力100~200 TWのレーザー装置が世界でいくつか開発されている。わが国(原研)で開発された100 TWレーザー(20 J/20 fs)をPWシステムへ増強するための開発が進んでいる。一方、レーザー核融合(阪大)における高速点火用として、ガラスレーザーをベースにしたPWレーザー(500 J/0.5 ps)が開発されつつある。

Ti:sapphire以外では、通信応用のためのCr:YAG、LD励起による小型高効率なCr:LiSAF、小型高出力を目指すYb:YAGなどの超短パルスレーザー開発が行われている。

5.2.3 真空紫外~X線レーザー

既存の装置を用いて発振できる真空紫外域のレーザーはArFレーザー(193 nm)とF₂レーザー(157 nm)だけである。いずれも、KrFレーザー(248 nm)の次のリソグラフィ用光源として活発な研究開発が進んでいる。前者については実用化が射程内に入っている。後者についてはまだ課題が多いが、157 nmで高透過率をもつ合成石英が発見されたこともあって実用技術への道がみえはじめた。繰り返し周波数2 kHz、パルス出力10 mJのF₂レーザーが報告され、当面の出力目標である25 Wは間もなく実現するであろう。

従来、希ガスエキシマーレーザーは電子ビーム励起でしか発振例がないが、広く用いられている紫外線予備電離容

量移行型の放電励起によってKr₂レーザー(147 nm)の発振が観測された(宮崎大)。高繰り返し可能な励起方式であり今後の発展に期待したい。

波長100 nm以下の極端紫外域から軟X線域のレーザーについては、固体標の上での高密度プラズマを媒質とするレーザー励起方式、および超短パルス高強度レーザーの高次高調波発生によるコヒーレント光の短波長化、高輝度化研究が続いている。世界的にはいずれのアプローチでも水の窓領域(3~4 nm)までの短波長化が観測されているものの、高輝度化が難しく応用に供せるX線レーザーは実現していない。実用性能の実現に向けたブレイクスルーが望まれる。(宮崎)

6. 量子光学・非線形光学

徳島大 原口雅宣

徳島大 岡本敏弘

量子光学・非線形光学分野では、全般的に研究が活発化している。特に、昨年に続きフォトニック結晶関連分野で進展がいちじるしかった。1990年代後半から特に研究が活発となったこの分野は、バックグラウンドの異なる多数の人材が続々と研究に加わり、研究が活発化している。フォトニック結晶関連分野があまりに突出したため、他の分野においても着実な進展があったにもかかわらず、それが目立ちにくくなってしまったほどである。

フォトニック結晶関連分野の研究は、実用化が目前に迫っているような印象を与える内容にまで広がってきた。野田³、馬場ら^{4,5}をはじめとして、半導体リソグラフィ技術により作製した結晶を利用する研究は進展がいちじるしい。特に、野田らは、発光デバイスを作製し易いIII-V族半導体を用いて初めて1 μm帯用の3次元フォトニック結晶の作製に成功した。この技術は、現在の光通信技術と整合性が高いとみられ、機能が単純なものならば、波長多重通信用のデバイス等への応用が近い将来実現される可能性がある。

フォトニック結晶特有の性質を十分生かした大規模な光集積回路を実現するためには、1) プロセスの問題、2) 動作原理を含めた素子構造の問題がまだ残っており若干の時間が必要と思われる。特に光集積回路の作製行程を考えると、必ずしも半導体リソグラフィ技術が結晶作製に有望ということではない。そのため、リソグラフィ技術を一部使用する自己クロニング法^{1,2}や、半導体リソグラフィを使用しない、異なるアプローチによる結晶の作製^{c-5, g-3, 1, 2}とその評価の研究も活発に行われている。現在、日本のフォトニック結晶作製の技術は世界の先端を進んで

いるといっても過言ではないだろう。

フォトニック結晶関連分野の活況に隠れてしまったが、竹内ら³の光の量子的性質を積極的に利用した量子暗号技術(量子コンピューティング技術)は、IT関連技術として社会的なニーズも高く重要である。今後、この研究は実用化を目指し活発に行われると考えられる。

非線形光学においては、疑似位相整合のデバイス応用が盛んであり、第二高調波発生(SHG)のような波長変換のほか、周期分極反転構造を用いたLiTaO₃導波路の光変調・光周波数シフター²や、和周波発生による光スイッチングの研究¹などが報告されている。また、差周波発生や光パラメトリック発振を用いたテラヘルツ電磁波発生に関する研究が進められ、出力2 mW以上の波長可変テラヘルツ波発生に成功している^{1,2}。

さらに、有機非線形光学結晶DAST(4'-dimethyl-amino-N-methyl-4-stilbazolium-tosylate)を用いた疑似位相整合導波路の作製など、結晶の育成加工から光導波路作製にわたる報告^{1,2}もあった。先のテラヘルツ電磁波発生も差周波発生用結晶にDASTを用いており、有機非線形光学材料の応用に向けた研究が盛んになっている。

半導体量子井戸を用いた光変調においては、電界印加光変調や光誘起屈折率変調²のほか、最近サブバンド間遷移の光吸収変調効果が注目されている。AlAsSb系量子井戸を用いたサブバンド間遷移による光吸収変調効果が1.55 μm波長帯で初めて実証され、さらにGaN系の量子井戸では、使用波長4.5 μmであるが100 fs光応答速度を達成している。これより、通信波長帯でサブピコ秒の応答速度で動作する超高速全光スイッチ実現の可能性が高まった²。

IT社会の発展に伴い、量子光学・非線形光学分野の重要性はますます高まる。21世紀に入り、この分野は、フォトニック結晶を筆頭に非常に楽しみかつ重要な分野となっている。

7. 近接場光学

ミノルタ 波多野洋

昨年の本稿「1999年光学会の進展」をみても「分光」、「光応用計測」、「光記録」といった多くの分野に“近接場”の文字がみうけられる。これは、光近接場が1つのテクノロジーではなく新しいパラダイムであったため、多くの分野に相乗的な効果を生み出した結果であろう。2000年においても、近接場光学の理論解析や装置開発から、さまざまな応用など、精力的に研究が進められている。

7.1 理論・数値解析

光近接場領域の解析手法としては、体積積分方程式を用いる方法の提案¹⁷があったが、依然としてFDTD(有限差分時間領域)法を用いた数値解析が主流である。

FDTD法をプローブ先端付近の電磁場分布解析に応用した例として、イルミネーションモードでのピラミッド型プローブ光強度分布や^{1,2}、コレクションモードでのプローブ構造の最適化²が挙げられる。

NSOM(近接場光学顕微鏡)像の解析では、屈折率分布を有する試料の像¹、金属酸化物パターンで得られる像²、や散乱型プローブでの像解析¹、積分球NSOMでの像解析^{1,2,17}が報告された。また、近接場光メモリーへの応用を考慮した微小散乱体を有する平面開口での再生特性の解析¹も報告された。

7.2 プラズモン

ナノテクノロジーの発展とともに、光と物質との結合モードであるプラズモンがますます注目されている。1次元の閉じ込めである表面プラズモンに関しては、ファイバークローブを用いて表面プラズモンを励起した例¹や、プラズモン表面波の反射に関する研究²が報告された。より次元の高い2・3次元の局在プラズモンに関しては、金属微粒子の局在プラズモン共鳴の研究¹⁷が報告された。また、Alをコートした近接場光プローブにおけるSHG(second harmonic generation)の発生³や、散乱型のスーパーレンズにおいても、プラズモンが重要な役割を担っていることが確認されている¹⁰。また、近接場光メモリー用として、ガラス基板上の三角形金属による局所増強電場を利用したヘッドが考案された¹⁸。

7.3 プローブ・装置

NSOMの装置やプローブに関しても着実に進展がみられる。ファイバー型プローブでは、イルミネーション-コレクションモード用に高い集光効率をもつ単一モード多モードのファイバークローブ¹や、UV光を発光する機能性ファイバークローブ^{1,6}が開発された。一方AFM(atomic force microscope)とのカップリングの容易さから、カンチレバー型が多く提案された。SiO₂製で突起部に開口をもったもの¹やSiNカンチレバーの先端に金微粒子を成長させたもの¹に加え、薄膜導波路型カンチレバー¹や、LED(light emitting diode)・導波路・光検出器を集積化したカンチレバー²も開発された。開口作製法としては固相拡散を用いて金属膜に開口を作製する方法が報告された^{1,2,w-77-23}。

NSOM装置では、レーザートラップした金微粒子を散乱型プローブとして用いたもの^{1,2}が展開をみせている。

7.4 近接場顕微鏡応用

近接場光学顕微鏡は、微小領域の観察ツールとして定着した感がある。例えば、蛍光¹、プロトンの拡散過程¹、半導体デバイス¹、単一量子ドット^{1,w-76-1}、LCD (liquid crystal display)¹⁷、強誘電体薄膜¹⁷、磁気光学効果^{c-10}などの観察に適用されている。DVDの記録マークの観察ツールとしても広く用いられ、MOマークに対するMFM (magnetic force microscope)と同様に、強力なツールとなり得る¹。

また新たな試みに、微小領域の分子ダイナミクス観察法として、近接場増強ラマンスペクトル測定装置が提案され、ラマンスペクトルのマッピングが行われた^{2,17}。これは、カンチレバーにコートした銀によりラマン散乱が局所的に増強され、そのスペクトルをプローブ先端径と同オーダーの分解能で検出するものであり、従来法の100倍以上の高分解能が得られる。今後1分子ごとのダイナミクスの解明が期待される。

7.5 近接場光記録・加工

スーパーレンズに関しては、従来のアンチモン層を用いた開口型に対して、酸化銀による散乱型に関する解析¹や実験^{a-11,c-10}が精力的に行われた。散乱体となる酸化銀形成のメカニズム解明¹や、中間層厚依存性の測定¹、MOの再生²に加え、スーパーロム (super-ROM) と名づけられた再生専用ディスクの再生特性¹や、偏光依存性の測定³が報告された。

近接場光メモリー用のヘッドとしては、Si^{1,2d-3B,j-17}や屈折率の高いGaP^{2,10}の突起をアレイ状に配置したものや、スルーポット向上のための長四角錐状プローブ³や、突起型開口と集光用レンズ、導波用光ファイバーを一体化したヘッド^{1,10}などが試作された。また、突起型プローブによる高速読み出し^{w-76-7}の報告もあった。

SIL (solid immersion lens) やSIM (solid immersion mirror) 関係では、GRIN型のロッドレンズとSILを組み合わせたもの^{1,10}が提案されたほか、GaP製のSILを用いた記録^{d-2B}や、焦点位置に微小開口を設けた新形式のSIM⁹による記録の報告があった。浮上スライダーでの実験として、スライダーにマウントしたSILを用いた相変化媒体^{a-11}やMO媒体^{10,19}への記録実験や、スライダー上に形成した平面開口を用いた高速読み出し^{j-1}や記録の実験¹⁰が報告された。

7.6 展 望

以上のように、エバネセント光のパッシブな利用から、アクティブな利用へとシフトしてきた感がある。すなわち、物質(特に金属)との相互作用を積極的に起こし、プラズモンなどを介して変換したエバネセント光を加工・計

測に利用するのである。今後この動きがますます加速され、「近接場光学」をはじめ「分光」、「光応用計測」、「光記録」の各分野における研究の進展と、他分野への展開が期待される。

8. 光応用計測

産総研 山内 真

21世紀の門出にあたり、地球温暖化等の環境問題など、地球規模の思考が要求される問題が山積みされており、われわれ科学技術者においてもそれらを常に意識して研究活動を行うことが求められている。その一方で、日本国内においては平成不況からの脱出がままならず、経済に活力を与える即効型新産業が求められている。

このような外的状況の中で、光を用いた計測は、非接触、非破壊、高精度、高速といったそれ自体の特徴に加え、今後はコンパクトで取り扱いの容易な計測機器が強くと求められるであろう。幸いにも前世紀においてわれわれは半導体レーザーというきわめて微小で高効率の光源を得、光ファイバーによって光学系配置の自由度が高くなり、液晶素子等でその波面を調製することが可能となり、CCD (charge coupled device) 等の取り扱いにすぐれた受光体が揃った。またコンピュータの発展によりデータ解析はますます容易かつ高速になった。

このような状況をふまえ、本報告では、従来の枠にとらわれず、時代背景を映した分類に趣向を凝らしてみた。

8.1 環境計測

おりしも「光学」第29巻第1号では「環境と光」、第9号では「地球環境リモートセンシング」が特集された^{a-1,9}。ライダーによる計測では、雲の光学的厚み測定に関する検討が行われ^{b-1}、風速とエアロゾルの同時計測^{b-3}、雨滴の大きさの計測^{b-3}、風速と気温の測定^{b-6}が行われた。また、太陽光の分光による二酸化窒素とエアロゾルの計測が行われ^{b-1,d-2}、2波長レーザーを用いた雷雲下の電界分布を計測する手法が提案された^{d-11}。

河川の水位と堤防の歪みを調べるためのファイバーセンサーが開発された³。環境が植物の植生に与える影響を調べるため、葉の分光反射率測定¹やスペckル差画像法により²植物の活性状態が測定された。

8.2 計測機器の小型化、改良、計測用デバイス

計測機器がより広範に使用されるには、安定で取り扱い性にすぐれていなければならない。そのためには小型で測定原理が簡素なほどよい。コンパクトな波長可変の短パルスファイバーレーザーが開発され、光ファイバーの色分散測定に使用された^{d-8}。半導体レーザー励起のマイクロチッ

プレーザーと音響光学素子を用いたコンパクトな振動測定装置が提案された^{c,7}。多層光導波路を用いて、変位センサーの小型化がはかられた^{i,31}。紫外発光ダイオードとデジタルオシロスコープを用いて、色素の蛍光寿命測定を簡素化する試みが行われた^{b,6}。

高速化や高精度化、測定範囲の拡大も重要である。補償光学への応用を目指し、2次元回折格子を用いた光波面センサーの高速化がはかられた²。空間光変調器を用いた波面測定では、ローカルアルゴリズムによる高速化が試みられた¹。非線形ラマン散乱分光顕微鏡での3次元分子分布の計測において、マイクロレンズアレイを用いることにより高速化に成功した²。光検出器と回折格子を一体化したマイクロエンコーダーにおいて、S/Nの改善がはかられた²。電子モアレ位相シフト法による段差測定では、測定時間の短縮および精度改善が検討された¹。また、位相シフトデジタルホログラフィー法では、合成波長法との組み合わせにより段差をもつ物体の表面形状が測定され¹、被測定物体サイズの拡大や液面計測への応用がなされた³。大きな段差のある物体にも対応するため、縞投影法による3次元形状測定の改良が行われた^{x,1,3}。

計測用デバイスでは、分光測光用の白色パルス光源を安定化するための制御手法が開発された¹。また、透過型フォトダイオードを用いた新たな変位計測手法が紹介された^{c,6}。半導体レーザーの新しい利用形態として、戻り光を積極的に利用する試みが続いている。振動計への応用¹、長さの変位の検出³、回転速度の検出³、受光器との兼用^{a,10}、イオンセンサーの開発^{b,2}などが行われた。

8.3 新たな計測手法の提案

液晶素子等の空間光変調素子やフォトニックデバイスでは、変調性能が偏光状態に依存する。偏光状態を測定するため、2枚のサバル板と半波長板を用いて、楕円偏光の方位角と楕円率の空間分布が測定され¹、また分光偏光計測によりストークスパラメーターが測定された²。光ファイバー伝搬中に生じる伝搬時間の偏波状態依存性が測定された¹。その他の光学定数、係数の測定も盛んである。フォトリソグラフィ装置用レンズの高次の収差測定が行われた^{i,7}。3次元光導波路を用いた半導体極薄膜の光学定数の測定が試みられた^{1,2}。プリズムにクラッド層と導波層を付加したセンサーにより、色素の吸収係数が測定された^{8,10}。また重力波検出器の開発のため、低損失光学材料の微小な吸収係数測定が試みられている^{1,2}。回折格子の共振を利用した屈折率センサーが提案された²。プリズムカップリング法による屈折率測定では高精度化がはかられた³。後方散乱光検出による濃厚媒質の光学定数の推定が

行われた³。金粒子の吸収スペクトル中にみられるローカルプラズモン共鳴を利用した屈折率、膜厚センサーが提案された^{i,6}。温浴や日焼けによる皮膚の吸収スペクトル変化が測定された^{b,4}。これは、応用分野として医用だけではなく、化粧品が視野に入っていることがおもしろい。

温度、距離、変位、形状、粗さ、力等の物理量の計測も多数行われた。マルチモードファイバグレーティングを用いて、温度、歪み計の性能向上のため、二重フォトダイオードを用いる方法が検討され¹、透過光、反射光スペクトル変化を利用した温度・変位の同時計測手法が提案された^{d,3}。また2波長を用いてキャビティー表面の放射温度分布が測定された^{8,7}。光周波数変調による距離測定において、時間領域のみでの実時間計測が行われた³。フェムト秒モードロックレーザーを用いて、カー効果を利用した超高速ゲートとの組み合わせにより、散乱物体の3次元形状計測が行われ^{i,1}、またビート信号の位相変化を検出することにより、240 m という長距離の精密測定が行われた^{i,30,3}。色の情報を用いた3次元形状測定法が提案された³。多重散乱がある場合のレーザースペックル相関法による表面粗さ測定法が検討された¹。反射光強度むらの影響を受けにくい光触針粗さ計が提案された³。原子間力顕微鏡を用いて原子面の粗さを測定するためのモデルが構築された^{i,16}。光ピンセットによる微小球のトラップ力が測定された³。縞投影法による微小回転角計測手法が提案された²。液晶セルの透過率が最低になる配置を決定することにより、液晶分子の固着エネルギーが測定された^{d,4}。

8.4 展 望

最先端の科学技術を底辺で支える横断的技術として、光応用計測の重要性は、今後も失われることなく続いていくであろう。さらに、光学測定機器を小型、可搬型にし、実験室から現場、屋外へと持ち出す試みが今後ますます必要になると思われる。

9. 干 渉 計 測

新潟大 鈴木孝昌

干渉計測は、波長をものさしとする測長技術といえる。従来の干渉計測では、ものさしの目盛り、すなわち波長は固定のものが一般的であったが、波長走査干渉計や低コヒーレンス干渉計に代表されるように、目盛りが伸縮自在のものや複数の目盛りを同時に使うタイプのものがここ数年盛んに研究され、粗面や生体など干渉計が従来苦手としてきた分野への適用の可能性が広がりつつある。

干渉計測の分野を世界との比較でみると、昨年 Applied Optics に掲載された干渉計測に関する論文 41 編のうち、

日本人研究者によるものが7編で17%とその健闘ぶりが窺える。また日本国内においても Optics Japan 2000 を例にとると 194 件の講演中 23 件、12%が干渉計測に関連した発表であった。本稿では、干渉計測の進展状況について、筆者が最近特に活発に研究が行われていると感じるテーマをおおまかに分類し、概観してみたい。

9.1 波長走査干渉計

光源の波長を広範囲に走査する波長走査干渉計は相変わらず精力的に研究が行われた。大型物体の測定を容易にする発散光照射型の波長走査干渉計¹、位相シフト法を併用し、測定精度を向上させた波長走査干渉計^{1,3}、形状の連続性を予見データとするサブナイキスト干渉法を波長走査干渉法で実現するもの¹、波長可変レーザーを用いた奥行き分解能の改善手法に関する提案¹、波長走査に伴う縞次数の変化を SLM によりカウントする干渉計¹、液晶ファブリー・ペロー波長走査素子を用いたスペクトル干渉法による3次元形状計測³、正弦波状の波長走査により、波長以上の光路差を波長程度の精度で実時間測定する SLD 干渉計^{a,3}、通常の LD を電流変調で波長走査し、位相シフト法で位相を求めることにより、狭い波長走査幅でサブミクロンの高さ分解能を得ることのできる干渉計^{b,2}、波長走査レーザー光源を用いた光コヒーレンストモグラフィー(OCT)^{b,5}などの報告があった。今後、取り扱いが容易で安価な波長走査光源が普及すれば、干渉計測の適用範囲がさらに拡大するものと期待できる。

9.2 白色干渉計および低コヒーレンス干渉計

白色光源や SLD を光源として用いる白色干渉計あるいは低コヒーレンス干渉計は、特に Optics Japan 2000 での報告が目立って多く、より実用レベルに近づいた研究がなされた。低コヒーレンス干渉を用いた屈折率と厚さの高速同時測定^{b,5,1}、変調 LD 低コヒーレンス光源を用いる位相共役波面合致干渉計^{2,3}、回折格子による白色光の周波数シフトを利用したヘテロダイン干渉計³とヘテロダイン・フーリエ分光計³、低コヒーレンス干渉法を用いた生体内部の鉛直断面画像計測³、前方ミラーとして高屈折率結晶を部分的に用いる部分遅延型フィゾー干渉計³、低コヒーレンス干渉計を用いて得られる情報に対する低次散乱光の影響の実験的解析³、低コヒーレンス光源を用いたタンデム型干渉計による距離情報の伝送³、半導体レーザーを高周波変調して得られる利得変調パルスを利用する、低コヒーレンス光源の提案とその応用³、連続白色光パルスを用いる干渉分光トモグラフィー³、ストークスパラメータの測定から表面形状計測を行う SLD 干渉計³などの報告があった。また、測定物体の変位による干渉信号の可視度変

化をフィードバックによって打ち消し、実時間で変位計測を行う SLD 干渉計が提案された^{a,10}。さらに、Optical Review 誌上では、生体に関する OCT^{b,5} および、媒質内部の深さ情報とスペクトル情報を同時に検出できる OCT^{b,5} 等、最近の OCT 研究についてのレビューが行われた。

9.3 従来型干渉計

位相シフト干渉計においては、新しい着想のもとに、さまざまなタイプのものが提案された。光ファイバーコアから発散する回折球面波を絶対的な計測基準面とするもの¹、3枚の位相シフト干渉縞を同時に撮像・処理するもの^{1,2}、液晶を位相変調素子として用いる位相物体の定量的観察システム¹、位相変調の非線形性に起因する誤差とその低減法に関する検討²等の報告があった。

スペckル干渉計では、スペckル相関を用いた塑性変形波動的動的観察¹に関する報告があった。また、スペckルグラムが通常の干渉計測で用いられる一般的な縞解析手法で解析可能であることが示され、スペckル干渉法の利用分野拡大の可能性が示唆された^{a,4}。

帰還型干渉計としては、2周波ヘテロダイン干渉技術を導入し、半導体レーザーの FM 特性を利用して干渉縞の安定化と位相シフトを同時に行うもの¹、光熱変調を用いたフェーズロック位相シフト半導体レーザー干渉計¹、距離計測を行える位相シフトロック干渉計における S/N 比向上の検討²、初期光路差をブロックゲージで正確に設定する干渉計³についての報告があった。

セルフミキシング干渉計に関しては、光ファイバーを用いた自己混合型半導体レーザー振動計¹、光周波数基準レーザーを周波数マーカーとして用いセルフミキシングにより長さと変位を計測するもの³、セルフミキシング干渉信号の非対称性とフリンジの傾き方向に対する線幅狭窄化の程度とフィードバック量の影響に関する検討が行われた^{b,6}。

2波長型干渉計については、2波長ヘテロダイン干渉を用いた段差測定²、2色干渉による段差測定³に関する報告があった。波長走査干渉計、低コヒーレンス干渉計に研究の流れが向いているせいか発表件数は比較的少なかった。

ホログラフィック干渉計の分野では、LD を温度制御し、波長差を大きくした2波長型のホログラフィック干渉計の提案²、ホログラフィック干渉法を用いた凹面格子の評価^{a,3}と誤差解析^{a,2}がなされた。

サンヤック干渉計の応用として、ファイバー長および光分散の同時測定¹、直流大電流の測定²に関する発表があった。

シェアリング干渉計に関連したものとして、回折格子により空間微分と位相シフトを実現させた位相シフト・スペ

ックル・シェアリング干渉計が提案され、面内の2次元的な歪み分布計測が行われた³。また、流体など透明媒質の屈折率分布の時間的変動を計測する干渉型の光CT (computed tomography)^{b,5}、および機械的走査を必要としない位相シフト X 線シェアリング干渉計が提案された^{b,6}。

9.4 干渉応用計測・その他

その他の干渉計測法として、散乱媒質中の物体の情報抽出¹や位相解析¹を行うもの、偏光状態の2次元空間分布計測¹、測長の高精度化を目指した大気の高精度屈折率測定装置¹、高次回折光を用いることで高精度化した回折光干渉方式のエンコーダー²、レーザー干渉計を用いた高感度加速度計の開発²、レーザー干渉法によるシリコン片持ち梁の超微小振動計測²に関する報告があった。また、プリズム走査型干渉計を用いた携帯型フーリエ変換分光分析装置^{1,2}についての報告があり、携帯型干渉計の実現という意味で、今後の実用化が期待される。大掛かりなものとしては、重力波検出用の干渉計の現状と今後についての報告があった^{1,3}。

9.5 干渉計測の高精度化

干渉計の性能あるいは精度を向上させる技術として、干渉計の構成部品の熱ゆらぎを抑制するための検討²、光検出器の空間分解能と位相特異点の空間構造との関係に関する検討³、トルボット干渉法における位相差検出精度の向上に関する検討³、位相変調の空間的不均一性に起因した誤差を抑圧できる位相解析アルゴリズムの提案^{b,6}がなされた。新しい干渉計測装置の研究開発のみならず、測定精度、空間分解能等に関する問題提起、検討も活発に行われ着実な進展をみせている。

9.6 まとめ

筆者の主観により、おおまかな分類を行い、昨年の干渉計測に関する話題について概観した。光の干渉を利用しつつ、従来の干渉計測の域にとどまらないフレクトメトリ型の計測手法に関する研究が活発なようである。今年は特に、日本光学会とSPIEの共催により、6月に横浜で第2回目のICOSN (International Conference on Optical Engineering for Sensing and Nanotechnology) が開催される運びとなっている。国外の動向をつかむ絶好の機会であると同時に、干渉計測技術のいっそうの進展が期待される。

10. 光情報処理

徳島大 早崎芳夫

10.1 はじめに

本誌投稿票の分類番号をみると、「10. 光情報処理(画像

形成、光演算、光接続、ニューラルネット)」と記されている。ここ数年の研究の進展と変化を考えると、この分類のサブタイトルの更新が必要である。2000年の進展を明確にするために、過去の光情報処理の研究を概観してみる。アナログ光情報処理関連では、空間光変調素子やフォトリフレクティブ素子を利用して光相関を原理とするパターン認識システムの構築と定量的な性能評価がなされ、現状デバイスを利用した光相関システムの限界とデバイスの克服すべき問題点が明らかにされた。空間光変調素子が比較的入手容易になったこともあり、国内外問わず、光相関システムに関して多くの発表があった^{1,2,3,20}。光相関システムの光情報処理研究への寄与は、指紋や顔の認識の研究や暗号化技術との融合の研究において、光情報技術をセキュリティ^{a,7}にリンクさせたことにある。Optics Japan 2000では、「情報セキュリティに向けた光技術からのアプローチ」と題するシンポジウムが開催されるに至り、セキュリティに関連した種々の光情報処理システムの研究が発表された³。1980年後半以降、光ニューラルネットワークの実証システムも数多く構築され、興味深いデモンストレーションが行われたが、ここ数年、研究発表は多くない。ニューラルネットワークは、学習機能を有するため、デバイスの空間的な一様性を保証しなくても動作することから、有効なデモンストレーションが可能であり、光情報処理のシステム化の進展を促す上で重要な役割を果たした。一方、デジタル光情報処理では、純光学システムから光電子融合システムへと研究の流れが変化し、原理検証の研究からシステム実証の研究に移った。実証システムを構築するためには、スマートピクセル等の光電子集積化デバイスを製作するための高度な半導体設計・製造技術、高密度の光接続を実現するための高精度なパッケージング技術を要するため、それらの技術を併せもついくつかのグループによって、デモンストレーションが行われた²⁰。このような状況の中、ここ2,3年は、既存の範疇には収まらない新しい原理にもとづいた光情報処理や新しい応用を目指した光情報処理が起こってきたといえる。光情報処理分野の研究の新しい動きを、以下のようにまとめ、報告する。

10.2 超高速光技術と光情報処理

超高速光技術^{a,8}を用いた光情報処理は、時間と空間、信号領域とスペクトル領域が自由に入れ変わった多次元空間の情報処理を可能とし、情報の伝送と処理が一体となった形で瞬時に回答を出す。フェムト秒パルスレーザーを光源として、パルス整形技術と空間フィルタリング技術を融合した時間信号と2次元空間信号との間を超高速に変換するインターフェイスが開発された^{1,3,20}。また、スペクトラルホ

プログラマーを光ルーターに適用する研究²も進められている。さらに、ピコ秒オーダーの応答速度を有する半導体材料¹や有機材料²を用いた超高速な時間-空間変換の研究が行われている。

10.3 時間・空間ダイナミクスと光情報処理

半導体レーザーに外部から電流変調や外部光注入を加えることにより、出力光強度が時間的に不安定となり、容易にカオス状態を作り出せる。さらに、2つのシステムを結合させるとカオス同期が起こることは知られている。このカオス同期を秘匿通信に利用する研究が進められている^{1,2,3}。また、空間光変調素子を2次元の光回路で接続したシステムにおいて、外部のダイナミックに変化する波面を実時間で補正する研究^{1,2}や時空間ダイナミクスを利用した信号処理の研究²が進められている。時間的・空間的なダイナミクスを有するシステムの光情報処理への応用は、発展途上ではあるが、まったく新しい原理にもとづいたシステムを構成できる可能性がある。

10.4 生体と光情報処理

生体や生命、医療に関連する光情報処理の研究も少しずつではあるが増えてきた。光によるエネルギー供給と光通信を可能とする体内埋め込み型機器の研究³や空間コード化とモアレ技術を用いたDNA塩基配列マッチングの研究²などである。生体医用研究と光計測の整合性が高いことを考え併せると、ここ数年で、生体光情報処理ともいえる研究分野は、大きくのびると予想される。

10.5 ナノテクノロジーと光情報処理

近年の微細加工技術の進歩が、波長と同程度か波長以下の構造を有する、高効率で機能的な光学素子の作製を可能にしており、偏光方向や波長に対して異なる回折光を得られる素子¹、微細周期構造による反射防止膜¹、400 nm帯のブレース化グレーティング¹、ファイバー端面¹の加工等の多くの研究が進められている。近年、非常に盛んであるフォトニック結晶⁴の研究によって、超小型光集積回路の実現が可能になりつつある。フォトニック結晶は、半導体への微細加工^{1,2}、微小球の配列^{1,2}、光干渉法¹、レーザー書き込み³等の方法により作製され、無反射フォトニック結晶¹、曲がり導波路^{1,2}、アッド・ドロップ素子²、波長選択素子²等が実現されている。

11. 画像処理

日本大 吉川 浩

11.1 計算機合成ホログラム

計算機合成ホログラムは、任意の波面のホログラムが生成できるので、2次元画像だけでなく3次元画像の生成も

可能である。計算機の能力が向上したことにより、最近では3次元画像の生成の発表も増加してきている。

2次元画像のCGHでは、透かし情報をフーリエ変換型ホログラムとし、元画像の高域部分に埋め込む電子透かし法³や、埋め込み画像のCGHの複素振幅を文字パターンでコーディングして種々の攻撃に対する耐性を高めた電子透かし法⁷⁻¹⁰が提案された。また、セキュリティ情報を暗号化して2値CGHとして記録する場合の画質の劣化を防ぐため、シミュレーテッドアニーリングの手法を応用した最適化法³や、4値の位相型CGHに制限を加え最終的に2値CGHを求めることで再生像の誤差を低減する方法³が報告された。

3次元画像のCGHでは、物体を点光源の集合で表し、1点ごとの干渉縞を積算していくフレネルホログラムの計算方法での報告があった。計算の高速化の手法として、フレネル回折式を配列化演算に置き換えることで3.5倍の計算時間を達成³したものや、ネットワークに接続されたコンピュータをオブジェクト指向型Java言語におけるJavaSpacesを利用した分散並列処理により効率的に計算する条件の解析^{4,5}、ファイルの共有機能を利用して特別なネットワーク処理を用いずにWindowsで分散並列処理を行う方法の提案²¹などがあった。

解像力が不十分な媒体に出力したCGHを光学的に転写して視域を拡大するホログラムでは、フルカラーレインボウの計算法が提案され試作ホログラムの再生像が報告された³。

11.2 医用画像処理

秋季応物学術講演会では光コヒーレンス断層画像化法として、光周波数コム発生器による超高速測定²や、超低コヒーレンス光源による高分解能化²、猫の脳内の視覚の深さ計測²など多数の報告がなされた。また、これまであまり報告のない流動性のある組織として割卵した鶏卵をOCTにより計測し、鮮度の違いを識別できた^{4,3}との報告があった。

SPECT (single-photon emission CT) では、画像の逐次の再構成法である共役勾配法に ordered subsets 法を導入して最良の再構成画像を得る組み合わせが検討された³。

画像診断においては、医用画像データベース解析を目的として可変サイズのセグメンテーションにより階層的に分割し、病理診断に用いる組織標本から良性・悪性の領域などを抽出できた^{4,4}との報告がなされた。

11.3 マルチバンド画像

4色以上の原色を用いてより自然なスペクトルを再現す

るマルチバンド画像では、7種類の発光ダイオードを利用して色域を拡大した電子色票システムの提案³や、目の分光感度を考慮した重み付けをしてKL変換することで誤差の少ない圧縮を行う手法の提案²がなされた。また、物体を回転させマルチバンドで撮影し、照明光と直交する成分を利用して鏡面反射と拡散反射成分を推定する方法³が報告された。

色の時間的変化を位置ずれや照明の変化を排除して正確に検出するため、マルチバンド画像の分光反射率を求めて2枚の画像間のスペクトル空間におけるヒストグラムの差分をとることで変化を検出する方法が提案され、指の血流を止めた画像で変化が検出できることが示された³。

11.4 天体画像

天体画像の処理としては、同一視野を時間間隔をあけて観測した3枚の画像を処理し一直線上に並ぶ小惑星を修正Hough変換により検出する手法³や、観測画像とその画像に超解像処理を施した画像から現在の望遠鏡では分解して見ることのできない明るい領域を推定する手法³の報告があった。

11.5 展望

計算機能力の急速な向上により、デジタル画像処理は順調に発展していくことは想像にかたくない。それを象徴する一例はOptics Japan 2000におけるシンポジウム、「コンピューター援用によるイメージサイエンス」に12件の発表があり、盛況であったことである。そのいくつかは本稿でも紹介している。

計算機合成ホログラムでは、計算自体の問題よりも、結果をハードコピーあるいはソフトコピーとしてどのように出力するかが問題となってきた。

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

NTT 横浜 至

インターネット等による通信容量の急激な増加傾向はいっそう加速しており、波長多重伝送(WDM)ネットワークの実現が進展しつつある。さらなる通信容量の増大に対応するためWDMの高速化が具体的になってきており、それに対応する光デバイスの研究開発が進展してきている。さらに、将来のフォトニックネットワーク実現に向けて、光の適用領域をどこまで広げられるかという観点から、従来電子素子で行われてきた処理機能を有する光処理素子の検討も活発になってきている。これらの光デバイスについて1年間の動きを概観してみる。

12.1 光ファイバー

伝送用光ファイバーに関しては、WDM光伝送の阻害要

因である光ファイバーの波長分散と非線形光学効果を抑制する構造の検討が進められており、実効コア面積が大きく、かつ分散スロープの小さな光ファイバーの作製が進められ、曲げ損失、信頼性など実用化に向けた検討が進展している²⁵。光ファイバーアンプに関しては、適用帯域の拡大が進んでおり、1480~1510 nm帯のファイバーアンプとして、高濃度ドープTm添加ファイバーアンプ(TDFA)²²、2波長励起方式利得シフトTDFA²⁵が実現されている。また、ラマン増幅を利用したファイバーアンプの検討も盛んに行われており、Er添加ファイバーアンプ(EDFA)と組み合わせる利得平坦化を行う²²など、増幅帯域拡大にとどまらない適用が検討されている。ファイバークレーティングに関しては、短周期型に加えて、ファイバーアンプの利得等価等を目的に、長周期グレーティングの研究が活発となっており、位相シフト構造で、0.45 dBのゲイン平坦性が37 nm範囲で実現されている²⁴。

12.2 光検出素子

アクティブキャリアとして電子のみを用いるため高速動作と高飽和出力の両立が可能となる単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)の研究が引き続き進展しており、光の入射構造として端面入射屈折型構造を導入し偏波無依存性と高効率化を実現している²⁴。光検出器と電子回路をモノリシック集積した光電子集積回路(OEIC)の分野では、導波路型フォトダイオードの受光感度改善等によりO/E変換効率を従来の3倍(125 V/W)向上させ出力振幅 $1 V_{p-p}$ の40 Gb/sモノリシック受信OEICが実現されている²⁵。

12.3 光変調器

半導体電界吸収型(EA)変調器に関しては、半導体レーザーや半導体光アンプ(SOA)とモノリシックに集積化する方向が継続しており、石英系平面光波回路(PLC)にEA変調器集積分布帰還型(DFB)レーザー4個をハイブリッド集積した10 Gb/s動作の多波長光源の報告²⁵などがなされている。さらに半導体EA変調器の波長変換機能や過飽和吸収機能を利用して、光信号処理素子へ適用する検討がなされている²²。ニオブ酸リチウム(LN)変調器に関しては、高速光変調器としての実用化が進んでいるのに加え、並列に4個配置したLN変調器に位相差をつけた変調信号を印可する構成の単一サイドバンド変調器が提案され²²、波長シフターなどへの応用展開が期待される。

12.4 平面光波回路

石英系PLCは、波長合分波機能を有するアレイ導波路格子(AWG)を中心に、WDMネットワークの重要パーツとして実用化が進んでおり、技術面では、多チャネル化や

温度無依存化などで進展がみられている。多チャンネル化では、高比屈折率差導波路による小型化256チャンネルAWG²²、AWGのタンデム接続構造による10GHz間隔1010チャンネルAWG²⁴など、1000チャンネルに対応可能な段階に到達してきている。また、樹脂挿入溝による温度無依存構造と入力導波路の接続位置調整による中心波長調整機能を有するAWG²²や低損失温度無依存AWGモジュール²²など実用上重要となる技術が進展している。さらに、光伝送で問題となる分散制御に石英系PLCの適用も検討されており、非対称マッハ・ツェンダー構造の集積化による8×40Gb/s用の分散スロープ等価器²⁴やAWGと空間位相変調器による16×40Gb/sの分散スロープ補償器²⁴などが実現されている。LNの導波回路に関しては、音響光学可変波長フィルター(AOTF)において、課題となっていた雑音の解決法として、電極への印加信号の位相調節による音響ビート平均化法が提案され、雑音低減の効果が確認されている²⁵。また、微小光回路を目指したSi細線導波路に関しては、損失評価およびY分岐構造の報告²や、偏波無依存積層マイクロリング共振器が実現されており²⁴、今後の展開が期待される。

12.5 光スイッチ

ミリ秒オーダーの低速光スイッチでは、光クロスコネクタ等への応用を目指して、多チャンネル化がターゲットとなってきた。石英系PLCによる熱光学型光スイッチは引き続き進展しており、低消費電力8×8マトリクススイッチ等²⁵が実現されている。また、熱毛管効果によるマッチングオイル移動を利用した16×16光スイッチが実現されている²²。大規模多チャンネル化の可能性から近年米国を中心に注目されているマイクロメカニカルスイッチに関しては、日本からも、可動ミラーによる2×2光スイッチ²²などが報告されている。超高速の光制御光スイッチに関しては、高効率化と伝送システムにマッチした動作などが目指されており、半導体中のキャリア緩和時間の差分を利用して高速動作を行う対称マッハ・ツェンダー干渉計構造SOA光・光スイッチで168Gb/sのdemux動作²²や、LN疑似位相整合(QPM)SHG-DFGの2次非線形効果のカスケード動作によるピコ秒光スイッチング¹が報告されている。

12.6 波長変換素子

2次非線形効果を用いた波長変換素子では、LN-QPMが主となっており、高効率化のための高耐光損傷性や高比屈折率差実現のため、ストイキオメトリックLNの適用¹、Zn拡散LNの検討²など材料ベースの検討も進展している。LN以外では、副格子交換エピタキシによる半導体QPM-

SHG素子構造が実現されている²。また、SOAの利得変調、位相変調、四光波混合を利用した、光通信波長帯での波長変換素子の研究が引き続き活発である。位相変調を用いたものでは、パケット信号光をパケットごとに4波長への選択変換²⁶が、利得変調を用いたものでは、AWGとSOAアレイにより等間隔から不等間隔WDM信号への一括変換²⁶などが報告されている。

12.7 光信号処理素子

従来電子素子で行われている信号処理機能を、今後の伝送容量の増大、ネットワークの高機能化に対応して、より高速に処理できる光デバイスによって行うことを目指した光信号処理素子の検討が着実に進展してきている。3R素子の関連では、EA変調器の波長変換効果と過飽和吸収効果を用いた光リミッターの提案²²、EA変調器を組み合わせた光再生機能の40Gb/s伝送での実証²²、モードロックLDによるクロックリカバリー機能の実証²²、対称マッハ・ツェンダー全光スイッチによる84Gb/sパルス再生²、2段の非線形ループミラーを用いた光3R再生²⁴など種々の構成の検討が進められている。他の処理機能では、高速光パケットのアドレス読み取り応用を目指した全光シリアル・パラレル変換で、半導体面型光スイッチによる100Gb/s相当の8ビットシリアル信号の空間的なパラレル変換²などが報告されている。

12.8 展 望

高速WDMネットワークの進展に伴い、大規模光スイッチ、PLCをベースとした光集積回路、波長変換素子、分散制御素子の研究が、システム側からの要求を背景にいつそう加速するものと考えられる。さらに、超高速光スイッチ技術や波長変換素子技術の進展を基盤とし、近年新規光素子として注目されているフォトニック結晶技術などの進展を加味する形で、フォトニックネットワーク実現に向けた光信号処理素子技術が着実に進展していくことが重要と考えられる。

13. 光 通 信

NEC 江村克己

米国を中心として急速に展開しているブロードバンド化の波は留まるところを知らない。アクセス系の高速度の進展を背景に、基幹系の大容量化が急速に進んでいる。このような環境のもと、テラビット/秒クラスのWDM伝送システムの実用化がアナウンスされるに至っている。光通信の研究開発ではさらに先をみた展開が始まっている。

13.1 WDM 基幹伝送

学会レベルでは、40Gb/sベースのWDM伝送の検討が

主流となっている^{22,24}。その狙いは装置の小型化にあるが、コンポーネント技術が十分に成熟して、真の小型化が達成されるまでには、もう少し時間がかかりそうな印象である。学会報告の伝送実験のトータル容量はマルチテラビット/秒領域に入ってきた。現状のEDFA(エルビウム添加光ファイバー増幅器)と強度変調を用いるWDM方式での容量限界は3.2 Tb/s前後にあるが、そのレベルの実験がいくつか報告されている。さらなる大容量化に向けての取り組みも、新しい波長域の開拓と周波数利用効率の向上の2方向で進められるようになってきた。新しい波長域としては、EDFAの利得帯域の短波長側にあたるSバンドが注目されている。この波長域の光増幅器としては、ラマン増幅器のほかにTDFA(トリウム添加光ファイバー増幅器)があり、特に利得帯域を長波長側(1480 nm帯)にシフトしたゲインシフトTDFAの特性改善が進んでいる²⁶。周波数利用効率の向上に関しては、偏波多重・分離の利用、SSB/VSB(single side-band/vestigial side-band)変調の利用、双方向伝送化等が検討され、5 Tb/s以上の伝送実験の報告もなされるようになってきた²⁴。

WDM伝送に関しては、総容量を伸ばす議論と並行して、波長数を増やす議論も進められている。これは、ノードでの処理の容易さや地域網(メトロ)での信号伝送の自由度の向上を波長数の増大で狙うものである。1000波レベルのWDMの議論が進められ、1000波長をスーパーコンティニウム光源と12.5 GHz間隔のAWGにより作り出した報告等がなされた²⁴。将来を睨んで、波長域1.2~1.7 μm の光ファイバーの低損失域を利用して、3000波クラスのWDMを実現する可能性についても議論されるようになってきた。

海洋伝送を意識した超長距離伝送についてもチャンネル速度の高速化が検討されている。チャンネル速度を20 Gb/sにした超長距離伝送(例えば64波、6200 km)の報告がなされるとともに²⁴、40 Gb/sでの長距離化の検討も進められた。陸上系でも伝送コストの低減とネットワークの効率的な構築を目指して、伝送距離の長距離化の検討が進められている。このための要素技術としては、RZ符号の導入、分布ラマン増幅の利用、Super FEC(誤り訂正符号)の利用、伝送路への分散マネジメントの導入等が検討されている。チャンネル容量10 Gb/sのシステムでは、中継間隔80 km以上で、総伝送距離1000 km以上が狙われており、研究レベルでは、3000 km以上の伝送が議論されている。80 km中継で最長のものでは、7000 kmを超えるレベルにまで達するようになった²⁴。

13.2 光波ネットワーク

WDMの導入により伝送容量の増大と伝送コストの低減が劇的に進んだこともあり、コアノードの規模の増大とコストの低減が大きな課題となってきた。特に処理すべき容量はテラビット/秒レベルから近い将来にはサブペタビット/秒レベルにまで増大することが予想される。光レベル(あるいは2.5 Gb/s、10 Gb/sといった大束)での処理を導入することで、効率的にノードを構成する検討や、光の透明性を利用、長距離伝送技術との組み合わせでネットワーク全体での効率化を目指す検討が進められている。大容量な基幹ノードを実現するためにIPレイアでのパケット転送を担うルーターと光レイアでの波長ルーティングの機能を提供する光クロスコネクタをうまく組み合わせることが検討されている。光クロスコネクタの入出力ポート数は、将来的に数千の規模になると考えられている。これを実現するものとしてMEMS(microelectromechanical systems)光スイッチの利用が考えられる。アナウンスレベルでは1000ポート以上への対応も可能ということもあり、今後の展開が注目される。さらに将来をみた検討としては、光領域での信号処理を導入するフォトリックルーターの検討も始まっている。電子回路での限界をブレイクスルーする技術としての期待がある一方で、光メモリーがない等の困難な課題への挑戦が必要であり、長い目でみていく必要がある。

13.3 光アクセス

ブロードバンド化の波が押し寄せる中で、究極の大容量アクセスを実現できる光アクセスへの期待が急速に高まってきた。これまでのパッシブ光ネットワークをベースとした検討に加え、Ether技術をベースとしたアクセス系の検討も活発になってきている。ADSL(asymmetric digital subscriber line)やCATV等の他技術との競合に加え、光アクセスの中でコンペティションが始まったことは、その展開を加速する要因と考えられ、今後の進展が期待される。

13.4 今後の展望

ブロードバンド化は、光技術への依存度をますます高めながら進展していくと予想される。光アクセス系には、急速な立ち上がり期待される。その狙うところは100 Mb/s以上の広帯域アクセスであり、ギガビット/秒以上も近いうちに視野に入ってくるであろう。WDM技術のアクセス、メトロ系への導入が、大容量化の視点のみならず、各種インターフェイスを自由に収容できるという面からも進展すると予想される。基幹ネットワークについては急速な大容量化に対応することのできる技術開発が重要である。

みえはじめた現行 WDM 技術による大容量化限界の打破と、今後必要となってくるペタビット/秒レベルのノードを実現するためのブレークスルーの出現が望まれる。新サービスを光レベルで提供していくことも考えられており、光技術の果たす役割がますます高まっていくことと期待される。

14. 光 記 録

松下電器 太田威夫

光ディスクのこの 10 年は音楽用の容量 650 MB の CD から、映画用の容量 4.7 GB の DVD フォーマットへの進化であった。同時に 2000 年は、12 月に BS デジタルテレビ放送がスタートし、HDTV (high definition TV) に向けた容量 20 GB 以上の次世代高密度光ディスク要素技術提案の年でもあった。ここでは 2000 年、OSA (米国光学学会)、SPIE (国際光工業会) 主催のカナダ ODS 2000 (Optical Data Storage) 学会 (5 月)、応用物理学会主催の千歳 ISOM 2000 (International Symposium on Optical Memory) 学会 (9 月)、応用磁気学会主催の名古屋 Joint MORIS/APDSC 2000 (Magneto-Optical Recording International Symposium, Asia Pacific Data Storage) 合同学会 (11 月)、応用物理学会札幌 (9 月) を中心に光記録の進展を述べる。

14.1 次世代 DVD 向け要素技術

14.1.1 DVR-Blue: 青紫色レーザー Digital Video Recording

ディスクは、DVD の薄型基板 $t=0.6$ mm よりさらに薄いオーバーコート層 $t=0.1$ mm を通して記録を行う構造。光学系は、青紫色半導体レーザー $\lambda=405$ nm、そして高開口数レンズ $NA=0.85$ の適用による容量 22.4 GB (記録密度 16 Gbit/in²) の提案である^{27,29}。

14.1.2 青紫色レーザー相変化 2 層光ディスク

磁気ヘッドによる光磁気記録は表面記録であるが、相変化光ディスクでは、多層記録面への記録が可能である。第 1 層の高透過率化、第 2 層のディスク高感度化により、DVD 光学系で容量 27 GB (記録密度 20 Gbit/in²) への大容量化を可能にした¹⁰。

14.1.3 多値マルチレベル記録

相変化光ディスクへの ML (multilevel) 記録は、すでに CD-RW (rewritable) ディスクを用いて 8-level 記録で 650 MB から、2 GB への高密度記録の提案があり、今回青紫色レーザー DVD 光学系で、DVD-RW への 22 GB の高密度記録の提案が行われた¹⁰。

14.2 相変化および光磁気ディスクの進展

14.2.1 相変化光ディスク

書き換え型 DVD は 2000 年には 4.7 GB の DVD-RW、DVD-RAM が出揃い、いずれも VTR に代わる DVD レコーダーを可能にし、さらに 12 月にはディスク直径 8 cm の容量 1.4 GB の DVD-RAM ビデオカメラの商品化が行われた²⁸。

次世代高密度、高速記録に対し、新相変化材料が提案された。これは、結晶成長型 Sb₇₀Te₃₀-Ge、Sb 共晶点系材料で、核生成型の GeTeSb 系の材料に対して、結晶成長速度が早く、50 Mbps 以上の高速応答材料 FGM (fast growth material) である^{7,27}。また、CD-RW 用の AgInSbTe 系に Ge を添加した材料は、70 Mbps 以上の高速応答特性が示された¹⁰。

14.2.2 光磁気ディスク

光磁気 MO ディスクでは、2000 年 12 月の iD (intelligent disk) の商品化が行われた¹⁹。ディスクは小径 50.8 mm、基板厚 $t=0.6$ mm、赤色半導体レーザー $\lambda=650$ nm、レンズ開口数 $NA=0.6$ で、容量 740 MB、記録密度は 4.6 Gbit/in² であり、MSR (magnetic super-resolution) の技術を採用して高密度化を実現している。

次世代高密度記録方式には、DWDD (domain wall displacement detection) や、MAMMOS (magnetic amplifying magneto-optical system) の提案がある。2000 年は、100 nm 以下のマークの記録再生時の動的信頼性の課題抽出などの取り組みがなされた¹⁹。

14.3 光ディスク産業の成長

2000 年、初めて光ディスク CD-R が FDD の生産を超えて 36 億枚に到達し、ドライブは、CD-R/RW の生産が 3950 万台に達した。CD-ROM のドライブは 1999 年 1 億 200 万台に成長したものの、2000 年には 7800 万台に減少した。一方、DVD-ROM ドライブは 3300 万台、DVD プレーヤーは 1200 万台と年率 30% 以上成長し、DVD のコンテンツメディアの生産も初めて VTR テープコンテンツメディアの生産を超えて、8600 億円と年率 2 倍以上の成長を呈している。

次世代高密度 DVD に必要な青紫色レーザー光源は、2000 年 GaN 半導体レーザーで出力 30 mW、寿命 5000 時間のサンプル出荷が開始された。しかしながら、高寿命、量産技術に関するラテラル成長法、GaN 層上に SiO₂ ストライプを介した製造方法に関し、日亜化学工業と米国 Cree, Inc. の間で特許論争が勃発する年でもあった。

14.4 将来光記録技術

高密度記録については、回折限界以上のナノメートル記

録技術が国家プロジェクトとして研究推進が行われている^{a-11}.

14.4.1 ニアフィールド相変化光ディスク SIL (solid immersion lens) 記録再生

屈折率 $n=1.83$, 直径 $d=1$ mm の超半球レンズで実効開口数 $NA=1.5$ の SIL が開発された. 青紫色レーザー $\lambda=405$ nm でフォーカスはディスクとレンズのギャップ 50 nm をキャパシタンスで制御. その結果, 記録パワー $P_w=1.5$ mW, マーク長 $M_1=107$ nm, 再生パワー $P_r=0.12$ mW, ジッター評価レベルで最高の記録密度 40 Gbit/in² を実現^{10,28}.

14.4.2 散乱型 LSC (light scattering center) 2層 AgOx マスク Super-RENS

Super-RENS は従来 DVD 光学系 ($\lambda=635$ nm, $NA=0.6$) でニアフィールド記録再生する方法である. マスク AgOx 膜を記録膜の上下 2 層用い, マーク長 200 nm で C/N 比 38 dB, DVD (マーク長 400 nm) に対し 4 倍の密度向上が期待できる¹⁰.

14.4.3 多値再生専用 ROM ディスク GBR (groove based recording) 方式

ディスクの溝の径方向の位置の変位に信号を入れる GBR の多値記録の方法が提案された. 光学系は $NA=0.6$, レーザー波長 $\lambda=640$ nm で, DVD の 1.5 倍の高密度化の結果を得ている^{27,29}.

14.4.4 高密度電子線記録 EBR (electron beam recording) マスタリング

電子ビームの加速電圧 100 kVmax., 位置はレーザー干渉法で ± 2.5 nm の偏向を制御. フォーカスはディスク面の光学検知でレンズを制御, トラックピッチ 300 nm, マーク長 185 nm で容量 25 GB を実現した²⁹. 化学増幅感度のレジストにより, マスタリング速度 8 m/s, スポット径 150 nm, トラックピッチ 200 nm で容量 50 GB も実現^{27,29}.

14.4.5 再生専用 ROM 多層ホログラム

高速読み出しメモリーとして, 積層導波路ホログラムメモリーの提案がある. この方法は, ホログラムパターンを, スタンパから UV 光を用いて 2 P (photo-polymer) 層に転写し, コア層, クラッド層, 2 P 層ホログラムの積層導波路を 10 層積層し, 45 度鏡面の端面から各層にレーザー光を入射して画像信号の高速再生読み出しを行う².

14.5 光ディスク記録密度の展望

容量 4.7 GB, 記録密度 (3.4 Gbit/in²) の DVD は映画コンテンツ 2 時間を可能にしている. 現在, BS デジタル TV 放送の開始を受けて, HDTV の高品質画像 2 時間の提供, 記録には 25 GB 以上, 記録密度 18 Gbit/in² 以上, 24

Mbps 以上の性能が求められる. このニーズに対して, すでに 14 章 1 節で述べてきたように, 2000 年はその要素技術の提案が出揃っている. ユーザー資産である DVD との互換性をどのように位置づけるかで, 次世代 HD (high density) 光ディスクの技術が定まる. さらに, Super-RENS, SIL などの将来技術の提案もあり, これらの組み合わせで 2010 年には, 記録密度 100 Gbit/in² 以上の光ディスク進展が見込まれている²¹.

15. 視覚光学

九芸工大 須長正治

視覚光学の領域においては, 色知覚, 形態知覚, 立体知覚や運動知覚などのそれぞれの分野でより詳細な情報処理メカニズムが検討され, 明らかになってきている. しかし, それらを視覚情報処理機構全体で捉えようと, 各々の知覚メカニズムがどのような関連性を持ち, そして, どのようにして統合され, ひとつの視覚世界を作り上げているのかという問題に対してはあまり近づいていないようにも思われる. この問題に対し, 近年, 複数のメカニズムが関与する視知覚を検討する研究も多くみられるようになり, メカニズム間での時間的な同期の検討^{30,31} という新しい研究の方向性も出てきた点などは大変興味深いことである.

15.1 脳イメージング

視覚刺激に対する脳の活動度を測定し, 視覚情報処理の脳地図をつくる研究は, 機能的 MRI の登場により, 引き続き精力的に行われている. 具体的には, 基本 4 色相に対する応答³¹, 色恒常性にかかわる脳活動^{30,32}, V4 野における応答の時空間周波数特性^{30,31} などが測定された. また, 大脳皮質の活動の測定だけではなく, 外側膝状体への適用³¹ も試みられた. fMRI は色覚の分野で多く用いられているようにも思われるが, 今後, 光ファイバーを使用した新たな刺激呈示装置などを用いることで, 複雑な刺激の呈示が可能となり, さらなる研究の進展が期待される.

15.2 色覚

色覚の分野においては, 全体的に色の見えに関する研究が多く報告された. 色の恒常性に関しては, 非対称色合わせの結果は, 順応により生じる白色点の移動により説明できること^{b-3}, 色が異なる照明光下における白色領域の評価¹, 照明認識視空間の色特性^{b-4} や 3 次元空間の認識によって色の見えが変化すること³ などが報告された. また, 刺激サイズが 10° であれば周辺視野でもカテゴリカル色知覚の特性に変化がないこと^{A-2}, また, 色の見えへの照度レベルの影響が網膜全体にわたって測定され^{a-3}, 周辺視での色の見えに関する研究も行われた. さらに, 眼内レンズ眼と

正常眼での色の見えの比較³, 色同化現象が知覚的な刺激サイズに依存すること³, 反対色知覚とカテゴリカル色知覚間を結びつけるニューラルネットワークモデル¹, カテゴリカル色知覚による演色性の評価法³が報告された。

また, 刺激として不均一な色分布をもつパターンを用いた新しい研究の流れがあり, 色弁別^{30,31}, 色を手掛かりとした視覚探索^{2,4}, 色彩の印象^{1,30}が検討された。その他の色覚の分野では, 背景光による錐体抑制下での色弁別特性³, 錐体応答の順応モデル^{a,5}, 透明視知覚が形成される色彩条件^{b,2}, 評価することができる色差^{a,5}, 視感評価にもとづく色差式³などが報告された。

色覚研究の全体的な傾向としては, いまだ解決されていない網膜レベルの問題も存在しているが, 低次レベルよりも高次レベルに重点が置かれ, 研究が進んでいるように思われる。

15.3 形態視

エッジ検出の方位選択性を端点検出の方位を一致させることで端点検出オペレーターの偽反応を抑えた T 型接合検出モデルの提案があった^{a,6}。また, 同時に, モデルは透明視を説明できる可能性を示していたが, 刺激形状や刺激の呈示方法を変えたときの心理物理的結果を説明することができず, モデルに改善の余地があることも示された³。陰影知覚は, 一般的な画像を用いた場合でも, 明るさの差ではなく輝度差によって形成されること^{b,3}も報告された。

15.4 奥行き視

両眼立体視の分野では, 両眼立体視における対応点検出に色情報が寄与すること^{3,30}が報告された。また, 3次元画像において, 焦点ぼけが奥行き感を増大させること¹や光学系のコマ収差によって生じた非対応点が知覚される奥行きに影響を与えること³も報告された。

運動視差からの奥行き知覚については, せん断運動刺激と拡大縮小運動の空間周波数特性が測定され, 低い空間周波数領域で差があることが報告された³。

15.5 運動視

運動視の分野では, 立体視と関連が深い奥行き運動に対して, かなり精力的に研究が進められている。昨年も多くの研究の報告があった。奥行き運動は運動情報のみにもとづく刺激からでも知覚することができ, これには水平方向の運動検出メカニズムが深く関与していること^{1,31}, さらに, 奥行き運動知覚を引き起こす運動視と立体視のメカニズムに対する色情報と輝度情報の感度が検討され, 運動検出メカニズムは輝度情報に対して高い感度をもつこと³が報告された。このことは, 輝度情報と色情報の役割を考えるうえでも大変興味深い結果である。

また, 仮現運動からの形態復元には 100 ms 以内での呈示が重要であることが, ダイナミックランダムドットキネマトグラムを分割した研究より示された^{2,4}。頭部運動があるときの運動残効は頭部運動がないときよりも増大すること³が報告された。

15.6 視覚的注意, 眼球運動および自己運動知覚

視覚的注意に関しては, 1次運動と2次運動知覚への視覚的注意の影響から視覚的注意の処理レベルを推定しようとする試みがなされた¹。

眼球運動の研究分野では, ビデオレフラクションを用い, 輻輳, 調節, 瞳孔を同時に測定する方法および測定結果が報告された^{2,4}。眼球運動時の視知覚に関しては, 跳躍眼球運動時の変位検出への刺激視野サイズの影響が検討された^{2,4}。また, 水平方向の追従眼球運動時には, 水平方向に拡張するように定位がずれるという報告^{b,3}があった。

自己運動に関する研究分野では, 視覚運動情報が頭部運動と非整合にあるとき, 数分間でその非整合環境に順応効果が現れるが, 身体の方角判定には順応効果が現れないこと^{a,3}, また, 順応効果が水平方向と垂直方向との間で転移が起こること³が報告された。このことは, 視野安定のメカニズムを解明するうえで大変興味深い結果と思われる。

15.7 その他

応用的な観点から, 有効視野への視聴覚的作業の負荷をかけたときに有効視野にどのような影響があるか¹, 条件等色を抑えた電子内視鏡の光源の分光特性¹が報告された。また, 高齢者の視覚機能に関する研究も引き続き行われている^{30,31}。

2000年は日本視覚学会から「視覚情報処理ハンドブック」(朝倉書店)が発行され, これまでの国内外の視覚研究全般の研究成果がまとめられている。21世紀に向けた視覚研究を考えるうえでも, 大いに役立つ本が出版されたと思う。

16. 光源・測光・照明

日立照明 赤塚美津雄

16.1 概要

新世紀を迎える中, 「地球環境保全」に対する関心がにわかにか高まっている。照明業界でも, このテーマに対応すべく, 光源, 回路, 器具を含めた照明分野での省エネルギー, 省資源をターゲットとした研究開発, 商品化が積極的に進められている。一方, 極端な省エネルギー化により照明の質を落とさないよう, 照明の質の評価にスポットを当てた研究が進められていることは, 特筆すべきことである。以下, これらを中心に各項目につき, この1年を振り

返ってみる。

16.2 光 源

直管 40 W タイプの管径 25.5 mm の高周波点灯専用蛍光ランプがわが国に導入されてから約 10 年を経過し、ようやく定着化してきた。そして今年、このシリーズとして、直管 110 W タイプの管径 25.5 mm の高周波点灯専用蛍光ランプが新たに市場導入された。

このランプは、これまでの直管 40 W タイプと同様、専用薄形インバーターと組み合わせることにより、省エネルギーと小型、軽量化による照明器具としての省資源、省施工も実現している³²。

高周波点灯専用蛍光ランプに関しては、直管 40 W タイプを蛍光体技術の集大成により、さらにエネルギー効率を改善し、32 W 形で従来、全光束 3200 lm であったところ、3360～3520 lm (従来比 105～110%) にアップしたランプを各社発表した。

白熱電球に代わる省エネルギー光源として注目されている、電球形蛍光ランプとして、白熱電球用調光器対応型が発表された。これまで形状を白熱電球に近づけること、密閉形器具にも使用できること等、各種改良がはかられてきたが、適用拡大のひとつとして白熱電球用調光器に使用でき、100～10%まで連続的に調光可能な 100 W 電球相当の電球形蛍光ランプが開発された。

HID (high intensity discharge) ランプに透光性セラミック発光管を採用することで、省エネルギーをはかるとともに、寿命期間中の色温度変化が少なく、しかもランプ取り付け時の初期色温度のばらつきや色むらが改善されるセラミックメタルハライドランプとして、これまでは E 26 口金タイプのもので 150 W まで商品化されていたが、水平点灯専用ではあるが、220 W、360 W タイプが発売された。しかも点灯装置としては、水銀灯安定器がそのまま使用できることも特長のひとつとしている。

無電極ランプは、電極切れによる不点がないため注目され、一部商品化もされている。このうち、無電極蛍光ランプの用途拡大をはかるため、引き続き寿命を決定する光束劣化性能解析、高光出力化ならびに、これに伴う放射ノイズおよび効率等を課題としたシステム研究が進められた³²。

一方、無電極メタルハライドランプに関しては、一般のメタルハライドランプでは困難であった調光についての検討が行われ、適切な設計により実用上問題ないレベルにできることがわかった旨報告された³²。

16.3 測 光

平成 12 年度照明学会全国大会にて「照明用白色 LED 光

源および測定」と題したシンポジウムが開催され、次の報告がされた³²。

この分野では、LED (light emitting diode) 開発を含め、日本は国際的にも重要な立場にある。CIE (Commission Internationnale de l'Eclairage) では照明用光源として最も重要な項目である“全光束”について論議が進められている。国内では(社)日本電球工業会に「照明用白色 LED 光源標準化委員会」を組織し、「製品仕様標準化分科会」「測定標準化分科会」活動を行っている。

「測定標準化分科会」では、現状の測定水準を把握するために、LED の光度、全光束測定を参加部署による巡回試験により実施した報告が行われ、種々の要因により部署間のばらつきが大きいことが明らかとなり、LED 測定に関するトレーサビリティや測定方法の必要性を再確認できた旨報告された。

なお、“製品仕様の標準化”を中心に推進している IEC (International Electrotechnical Commission) での TC34 メンテナンスエージェンシーハルシンキ会議にて、“LED 測定巡回試験”につき紹介したところ、出席者より参加したいとの要望を受け、基本的に了承した旨の報告がなされた。日本の活動が注目されている良い例である。

LED 光源が、照明用の主力光源の一翼となり得るかどうかは、今後の性能向上に掛かっているが³、その過程で蛍光ランプをはじめとする一般光源との性能比較が正確に実施できることが重要となり、測定技術の果たす役割が大きいことが報告された。今後の成果に注目していきたい。

16.4 照 明

省エネルギーは継続的技術課題であり、これまでもハード的には、高周波点灯専用蛍光ランプとインバーター点灯回路を組み合わせたシステムが提案され、それに制御装置を組み合わせることにより、さらに省エネ化をはかってきた。

その中でインバーターに関しては、引き続き省エネ率の向上、スイッチング半導体素子数削減等を狙った回路開発が行われている³²。

照制御システムとしては、インターネット技術を導入した照明コントローラーが商品化されたことが特筆に値する。ネットワーク/リモートアクセス機能がその特長であり、今後インターネットへの常時接続に関する接続料および通信料の大幅なコストダウンが実現しつつある環境の中、インターネット技術の利用が本格的に推進されることが予想されている^{A-10}。

これらはいずれも市場要求である省エネルギーにターゲットを絞った開発であり、これからもさらに拡大がはから

れていくであろう。ただ、このときに忘れてはならないこととして、照明の質への考慮が取り上げられ、人感センサー、照明制御による明るさ変動における快適性の維持と省エネルギーに焦点を当てた発表が行われた³²。

また「オフィス照明における質的評価の考え方」は多様な評価視点、特に評価視点間のトレードオフ関係を考慮に入れたオフィス光環境評価を行った内容が興味深い。今後省エネ化が進む中、ここで述べられている空間あるいは設備の総合的な評価が論議されることとなるであろう^{A-12}。

一方、明かりの生理、心理面への影響等についても研究・開発が進められ、睡眠・覚醒リズムの解明にもとづく照明器具や医療分野での光療法への適用が推進された^{A-6,32}。

16.5 展 望

インバーター化を中心とした省エネルギー化が進む中、色々な切り口で心理・生理面を加味した照明の質についての検討が進められているが、今後さらに掘り下げた研究開発が進められると推測する。

一方、白熱電球、蛍光灯、HID ランプに続く第4の光源として注目を集めている白色発光のLEDにも注目しておきたい。

またインターネットをはじめとする、通信技術を活用した省エネルギーの推進とともに、効率、使い勝手がよく、しかも質のよい照明を提供するための研究開発が進められることと思う。

17. 医学・生物応用光学

長寿研 田村俊世

17.1 概 要

光は、生体を侵襲することなく生体内部情報を計測できる無侵襲計測法として広く応用されている。SPIE (国際光工学会)、OSA (米国光学会) で光断層イメージング (光CT) や光コヒーレンストモグラフィ (OCT) が盛んに討議されている。特に光CTの分野では実用化に向けた研究が行われている。Optical Review では特集号が企画された^{b-5}。また、眼科領域でのOCTの普及をはじめ、近赤外分光法の医療への応用が研究発表されている。一方、光を治療に用いることも盛んに行われている。コヒーレント性を利用したレーザー治療や薬剤がレーザー光によって反応し、ガン組織を壊死させる光化学治療 (photo dynamic therapy: PDT) などの研究が報告されている。

17.2 各 論

近赤外分光法による脳機能計測や筋組織酸素濃度の定量化が試みられている^{b-5,1,2}。近赤外分光法は、無侵襲で脳内

局所の血流変動や酸素代謝変動をリアルタイムで追跡し、血流量酸素化 Hb および脱酸素化 Hb をそれぞれ独立に測定できる利点をもっている。しかし、脳機能計測では、光が生体組織により強い散乱を受け、定量計測のためには検出光の脳内における部分実効光路長や伝搬経路分布を求める必要がある。これをモンテカルロ法や光拡散方程式で数値解析を用いて光伝搬解析を行っている。一方、筋組織においても介在する皮下脂肪の影響を補正しなければならない。これらに対して数値解析によるシミュレーションと核磁気共鳴法などとの比較実験により測定パラメーターの妥当性を検討している。光CTの研究ではアルゴリズムの研究、時間分解測定法の実験、強度変調法の基礎研究、光学物性の基礎データ測定について、引き続き研究成果が報告されている^{b-5,1-3}。

OCTは、眼科での応用あるいは生体表皮下の高分解能イメージングに適しており、世界的に研究が盛んである^{2,3}。このOCTをベースとして新しい共焦点光学系を用いた幾何学的サイズでの生体断層像検出法 (confocal optic reflection imaging: CRI) が提案されている²。OCTの断層イメージは光学的厚さで与えられる。それに対しCRIの奥行き分解能は共焦点系の光軸方向の反射強度プロファイルで決定される。両イメージから断層画像を得ることができ、これは多波長光イメージングによる生体機能検出、および内視鏡への組み込みが考えられる。

生体アプレーションはレーザーパルス照射による生体組織の蒸散であり、これまではレーザーメスに代表されるような外科手術の一手技として用いられてきた。これに対して、蒸散した組織が放つ発光のスペクトルを高速で分光することにより、生体中に含まれる微量元素を検出することができる。この原理にもとづく新たな光診断法が提案され、アプレートされた組織の表面形状と深さをOCTで観察測定する。生体組織を剥離・除去しながらその断層像を観察することが可能となった²。

さらに生体膜の機能検出のために低コヒーレンス光干渉による光プローブが試作され生体膜と人工生体膜の相転移温度シフトを検出している²。

光によるエネルギー伝送の例もみられる³。ペースメーカーなどの人工臓器駆動のためのエネルギーを供給するために近赤外レーザーを利用している。検出器には、光電変換効率の高いシリコンのPIN (p-type impurity, intrinsic and n-type impurity) フォトダイオードを用いている。

フォトンを使う生体情報計測も検討されている。近赤外フェムト秒パルスレーザーを集光することで、そのフォーカス点においてのみ2つ以上のフォトンが同時に生体内分

子によって吸収され得るという多光子過程を利用したレーザー走査顕微鏡装置により、リアルタイムで生体の3次元組織を観察する装置が試作されている。

また、生体機能の可視化を目指して近赤外分光法、X線、超音波などを用いた3次元情報の再構築の研究が進められている⁴⁶。

パルスオキシメーターは臨床で広く普及しているが、その多波長化により酸素飽和度のみでなく心拍出量を算出する試み（パルスフォトメトリー）や近赤外分光、ラマン分光により無侵襲にグルコース濃度を測定する方法が研究されている。

治療面では近赤外（半導体）レーザーの消化管治療、中赤外(Er-YAG)レーザーの歯科治療、波長可変(YAG-OPO: optical parametric oscillators)レーザーの光線力学治療への応用などが報告されている。

光ファイバー応用ではカテーテル搭載用光導波路型圧力センサー、酸素濃度センサーや光ファイバー屈折センサーによる生体内流動情報の計測が研究されている。

17.3 展 望

臨床への光応用はますます盛んになってくる。特に、医療福祉機器技術研究開発プロジェクト「光断層イメージングシステム」の研究成果をもとに光CTの製品化が各社によって進んでおり、普及が期待される。

18. 光学関連の規格

日立 有本 昭

光関連の標準化はIEC(国際電気標準会議)/ISO(国際標準化機構)の数多くのTC/SCで検討されてきた。今年はここ数年IEC, ISO間で係争となったレーザーの特性に関する標準化の経緯に特定して報告したい。

1960年に発明された人工的な光であるレーザー光は、輝度が高く位相が揃っていてもすすぐ進みかつ小さな集光スポットが可能、マイクロ波に比べて高い周波数変調が可能等の多くの特徴を有するため、通信、民生用に数多くの応用が検討されてきた。

レーザーの国際規格は、IEC, および、ISOにおいて、過去下記のような経緯をたどって標準化がなされてきた。

- (1) IEC/TC 47/SC 47 C (標準化スコープ: 光半導体) は、1983年より半導体レーザー(以降: LD)に関する標準化作業を開始した
- (2) ISO/TC 172/SC 9 (標準化スコープ: 電気光学システム) は、1989年よりレーザー(種類特定せず)に関する作業を開始した
- (3) IEC は、1992年に規格IEC 747-5(現在の規格番号:

IEC 60747-5) を発行、1994年に一部を改訂した

(4) ISO は、1993年以降いくつかの規格(語彙, 出力, 偏光, 位置安定性等) を発行した

すなわち、IECではLDの語彙, 特性に関する標準化作業を、一方ISOでは主として気体/固体レーザーを念頭に入れた標準化作業を行ってきた。レーザーに関する上記標準化の経過をみると各々の組織がお互いに情報交換なく独立に標準化作業を行ってきた。このように独立に作業を行ってきた大きな論拠には、1976年にIEC/ISO間で電気デバイス関係はIEC, それ以外のものについてはISOという取り決めができたことが大きい。また、1989年にISO/TC 172/SC 9とIEC/TC 76(レーザー装置, および安全性)の間で、医療用レーザーの安全性の取り扱いを巡る標準に端を発し、レーザー標準に関するISO/IEC間の取り決めがなされたが、玉虫色解決にすぎず両者勝手に解釈しており、ISOではすべてのTCに適用と合意内容を拡大解釈している。IEC側ではTC 76の範疇, すなわちレーザーの安全性に限定した取り決めで、その部分以外にはなんの拘束力もなく、したがってIEC/TC 47は関与していないとの解釈である。ごく最近までLDの出力は、最大でも数十mWにすぎず、応用範囲は通信, 情報処理機器(光ディスク, レーザープリンター等)に限られていたものの、生産個数は莫大である。一方、光学機器の一部としての取り扱いから、ISO側が主として検討してきた固体/気体レーザーは、最大数kWの出力が可能で、医用, 加工, 情報処理, 計測等の応用分野で幅広く使われている。しかし、最近のLD性能のいちじるしい向上により、その応用範囲が広がり、過去ISOが担当してきたレーザーの応用分野にも進出する可能性が高まってきた。応用分野が異なっていたときには、各々のユーザーは従来使っていた標準化文書にのみ注意を払っていただければよかった。しかし、応用分野が重複してくると、ユーザー(メーカーも含む)はどちらの規格に準拠すべきか迷う事態が生じてきた。

1994年から1996年に行った予備調査では、種類は異なっても同じレーザーであることから、両規格の技術内容は70%程度は共通であるが、残りの部分に関しては差があることが判明している。その差を埋めるため、1994年以来、IEC/ISO間で打ち合わせが行われてきた。技術面での実際の打ち合わせについては、LDと応用製品の主要生産国が日本であること、またIEC/SC 47 Cの幹事国は日本でありISO側での本問題取り扱いについては筆者がリーダーとして一任されたため、まず国内のSC 9/SC 47 C間のチャネルを通して行われた。幾多の紆余曲折をへて、1997年ドイツで開かれた両中央事務局を含んだ非公式打ち合わせ

で、IEC/ISO 双方のレーザー専門家からなる JWG(共同作業部会) の設立が決定された。その結果は同年秋に IEC/ISO 両機関において正式に承認され、JWG の主査には ISO 側から ISO/TC 172/SC 9 を代表し筆者が、書記には IEC 側から IEC/SC 47 C を代表し福田氏(当時 NTT, 現 NEL) が就任し日本主導で作業を進めることになった。なお、書記は、後に仲野氏(NEC) に交代した。

このような流れが確固たるものになった要因は、1995 年、日本国内に JWG の正式な発足に先立ち検討グループを設立して IEC, ISO という壁を取り外してこの問題を純技術的に検討してきたことが大きい。メンバーは、LD, 気体/固体レーザー、およびその応用分野の専門家(通信、情報処理、加工、計測) の幅広い人材の構成となっている。これらのメンバーは、国際 JWG 発足後はその委員も兼ねている。なお、Spectral Characteristics (波長) については ISO 側の標準化作業がいちじるしく遅れていることもあり除外してある。ISO での文書化がなされた時点で既存の IEC 文書との整合性を JWG では審査することになっている。さらに IEC/SC 47 C, および ISO/SC 9 では、全世界にレーザー関連専門家の JWG への参加を呼びかけ、1998 年 2 月に第 1 回 JWG 会議 (San Jose, USA) を開催、以下 1998 年 6 月に第 2 回 (留寿都, 日本)、10 月の第 3 回 (Houston, USA)、1999 年 1 月の第 4 回 (San Jose, USA) と会議を重ね、ISO, IEC 双方の文書の技術的相違点を調べ、規格共通化のための勧告書の作成を行ってきた。

最終勧告案は 1999 年 5 月末に完成、JWG 勧告書として SC 9, および TC 47 に提出された。

しかしこの動きも順調なものではなかった。両団体の規格とも JWG からの勧告書の完成を待ち、現行規格の改正に着手するとの非公式会議の申し合わせにもかかわらず、ISO 側では JWG での検討結果を待たずして LD に関する項目を ISO 文書に組み込むという暴挙に出、JWG 主査がその中断を求める緊急アピールを出す等の緊張が生じた。その他随所で IEC/ISO 両組織のエゴが出て、そのたびに作業の中断を余儀なくされた。最終的には 1998 年 6 月の留寿都で開催の IEC/ISO 間の非公式打ち合わせで、以下の方針が固まった。

- (1) ISO の半導体レーザーに関する作業は JWG が逐一内容をチェックしながら進め、既存の IEC 文書との整合をはかるものとする
- (2) JWG は、ISO, および IEC に向け問題点の指摘、改訂する場合の勧告を行う。この勧告書は 1999 年 6 月までに ISO, IEC 両中央事務局に送付する。その後の対応は再度、ISO/IEC 上部機関で協議を行う

(3) ISO/IEC の改定文書は、発行前の段階で JWG がチェックし、新たな矛盾が生じていないことを確認する。本来ならレーザーの標準化文書は統一化が望ましいことはいうまでもないが、LD は半導体デバイスという IEC の主張、レーザーは光学機器との ISO の主張、また長い間の両者の政治的葛藤からして、規格統一は不可能に近い。それでも JWG 勧告に沿って両者の規格改正がなされれば、現行文書から技術的な矛盾はなくなり IEC 文書に慣れ親しんだユーザーは、そのまま IEC 規格を、他方、気体/固体レーザーを使ってきたユーザーが半導体レーザーを新たに導入する場合でも、ISO 文書のみを読めばよいという便宜がはかれるはずであった。ところが、IEC のテクニカルディレクターが留寿都の結論に反対を表明、にわかに合意の実現が不透明となった。その本音は、先に記した 1976 年の合意に沿って IEC の領域を維持したいこと、LD の標準化に対する優先権の確保である。これらの問題点を解消するため、両中央事務局、関連 TC を含めた会合が開催される予定であったが (1998 年 9 月) IEC 側の一方的な都合 (政治的戦略) でキャンセルされてしまった。この結末は、その 1 か月後の 10 月 23 日、IEC 総会の開催されているヒューストンで突然現れることとなった。技術専門家に事前に意見聴取することもなく、JTAB (ISO/IEC 合同技術諮問委員会) の場でこの問題が審議され、予想もつかない勧告となって現れた。その勧告は折角 JWG が TC および非公式レベルでつみあげてきた合意を完全に覆すものであった。

- (1) JWG は技術報告書 (勧告書) を 1999 年 6 月までに完了させる
- (2) ISO はその標準化範囲を気体/固体レーザーに限定、IEC は半導体レーザーに限定する
- (3) ISO 提案の 3 つの NP は半導体レーザーに踏み込まない範囲で作業を進めてよい
- (4) IEC は IEC 文書改正時には ISO 専門家を迎えて作業を行う

以上の結論は 1976 年の古い合意に準じた結論が導かれたと考えざるを得ない。例えば気体レーザーから半導体レーザーへの移行を考えているユーザーにとっては ISO, および IEC の 2 種類の分厚い標準化文書を読まないと実際のことがわからない。また最近では半導体レーザー励起の固体レーザーといった新しいタイプのレーザーについての取り扱いに対する問題に対しての解決策ももたないことになる。前回合意から 4 半世紀が経った今、IEC/ISO の旧来の枠組みを乗り越えなければ、広範なユーザーの要求・要望に、標準化が対応できないことを両首脳はまったく理解

していない。要するに本件のみに関すれば時計の針を逆回転させ4年前の話し合い以前に戻ってしまった。JTAB勧告が実際に拘束力をもつためには、ISO/TMB(専門運営委員会)、IEC/CA(技術管理委員会)という、各々の団体での主要国代表を含む最高技術審議会での承認が必要となる。1999年1月25、26両日に開催されたTMBでは、JTABの結論に対して主要各国が反対を表明、わが国も同調し、(1)を除きJTAB勧告は否決された。一方、1999年2月8日のCAでは、ISO側の勧告否決に対する憂慮を表明したが審議は棚上げとし6月まで態度を保留した。

JWGの作業は従来方針通り進行し、予定の1999年5月末に勧告書が完成し提出された。同勧告書は、ISOではただちに1999年6月7日付けISO/TC 172/SC 9 N 149 “Technical suggestions related to laser diodes prepared by ISO and IEC experts (JWG) since 1997”として1999年6月21~24日にニースで開催のSC 9年次総会で決議207として承認された。これにより、凍結されていた3件のNPを含め、ISO規格の改正の審議が開始された。他方、IECではJWG勧告は1999年8月付けで、47/1441/DC(意見陳述用原案) “Technical suggestions from JWG5” および、47/1442/INF “Minutes of JWG5 meetings and membership list”として、公式のIEC文書となり、ようやく日の目をみることとなった。1999年10月のIEC京都総会時に開催のTC 47において、本勧告書を審議、その結果、

TC 47ではJWGの審議を引き継ぐ形でSC 47 Eに審議の場を移し、勧告書に沿って既存規格の見直しを行う保守作業グループを組織するべく、2000年8月末を締切として、各国に専門家の招集を呼びかけた。その後、2000年10月にロンドンで開かれたIEC/TC 47/SC 47 Eで保守作業グループが発足され、JWG書記のNECの仲野氏がリーダーとなり1年の予定で文書の改訂が行われることになった。双方の文書改訂により気体/固体レーザーを念頭に入れてきたISO文書とLD念頭のIEC文書で語彙、諸特性の測定法について調整がなされることになり、双方の文書で互いの領域がカバーされ、表現が異なるが内容の類似した2つの文書が存在することになった。これはとりあえず双方の文書のユーザーにとって慣れ親しんだ文書をみることでレーザー全体の標準化内容がわかることになり便利なものである。しかし、類似文書の併存は将来この技術の進歩が早く次々に改訂の必要性があることを考えるときにいちいちIEC/ISO間の調整を取り続ける必要があり手間である。SC 47 Eの議長はISO側に統一文書の作成を提案する努力をしたいと決意を述べた。JWGのかつてからの希望に沿うものである。同じようなIEC/ISO間の確執はデジタルカメラ、電気自動車でも起こっておりレーザー関連の調整結果が2つの他の調整に影響を与えるものと思われる。