

1998 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 27 卷第 n 号	a- n	第 45 回春季応用物理学関係連合講演会	1
応用物理 第 67 卷第 n 号	b- n	第 59 回秋季応用物理学学会学術講演会	2
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 37, No. n	c- n	OPTICS JAPAN '98	3
(2) Vol. 37, No. n	d- n	第 23 回光学シンポジウム	4
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 37, No. n	e- n	カラーフォーラム Japan '97	5
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 15, No. n	f- n	第 31 回光学五学会関西支部連合講演会	6
(B) Vol. 15, No. n	g- n	International Optical Design Workshop '98	7
Appl. Opt. Vol. 37, No. n	h- n	CLEO/IQEC 1998	8
Opt. Lett. Vol. 23, No. n	i- n	OSA Annual Meeting 1998	9
Opt. Commun. Vol. m , No. n	j- $m-n$	日本物理学会第 53 回年会	10
J. Light Wave Technol. Vol. 16, No. n	k- n	日本物理学会 1998 年秋分科会	11
電子情報通信学会誌 1998 年 n 月号	l- n	Advanced Solid State Lasers '98 (ASSL '98)	12
レーザー研究 第 26 卷第 n 号	m- n	応用物理学会量子エレクトロニクス研究会研究討 論会	13
Science Vol. m , No. n	n- $m-n$	近接場光学研究グループ第 7 回研究討論会	14
Phys. Rev. A Vol. 57, No. n	o- n	精密工学会 1998 年春季大会	15
Phys. Rev. Lett. Vol. 80, No. n	p-01- n	SPIE's 43 rd Annual Meeting	16
Vol. 81, No. n	p-02- n	Optical Fiber Communication Conf. (OFC) '98	17
日本物理学会誌 第 53 卷第 n 号	q- n	電子情報通信学会 1998 年総合大会	18
Opt. Rev. Vol. 5, No. n	r- n	電子情報通信学会 1998 年ソサエティ全国大会	19
Opt. Eng. Vol. 37, No. n	s- n	European Conf. Optical Communication (ECOC) '98	20
Vision Vol. 10, No. n	t- n	Optoelectronics and Communication Conf. (OECC) '98	21
照明学会誌 Vol. 82, No. n	u- n	Optical Amplifiers and their Applications (OAA) '98	22
Optics Design No. n	v- n	電子情報通信学会技術研究報告 ODS '98	23
◆ ホームページ	A	第 12 回回路実装学会 ISOM '98	24
The Bose-Einstein Condensation (BEC) Homepage (http://amo.phy.gasou.edu/bec.html/)		第 10 回相変化記録研究会シンポジウム MORIS '99	25
		映像情報メディア学会年次大会講演予稿集 Proc. of the 8th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources, 1998	26
		電球工業会報 ANSI/IESNA RP-27	27
		照明学会第 74 回通常総会	28
		4th Draft: Lighting of Indoor Work Places, CIE TC3-21	29
			30
			31
			32
			33
			34

1. 光物理

立命館大 左貝潤一

1.1 基礎的・伝統的光学

部分的コヒーレンスに関する基礎研究や、これを計測や結像などに応用する研究が活発である。

1.1.1 干渉・コヒーレンス

コヒーレンスに関しては、コヒーレンスの記述法、スペクトル分布とコヒーレンスの関係、コヒーレンス度測定からの光源強度分布の再現などが重要である。

コヒーレンスの記述法関係では、エルミート・ガウス関数で記述されるモードを重ね合わせると、部分的コヒーレントビームが得られることが知られている。問題は各モードをどのように重みづけするかであり、コヒーレンス測定、 M^2 因子解析などが試みられてきたが、強度分布測定とフーリエ変換を利用する方法が提案された¹⁻¹³。部分的コヒーレント光での放射一様性を記述するために、減少因子が導入された⁹⁻¹⁰。空間的コヒーレンスを記述するのに相互強度が利用されるが、サニャック干渉計を用いることにより、相互強度の表示が可能となった¹⁻¹⁴。

強度分布の再現関係では、3次元強度分布が光の伝搬方向に垂直な面に関する相互スペクトル密度の伝搬則に基づいて再生されている²。また、複素スペクトルコヒーレンス度測定から、2点光源のスペクトル復調が行われた¹。その他、部分的コヒーレント光を広がりのある線像として照射するため、定常位相法を用いた設計法が示された¹⁻²¹。

1.1.2 干渉・コヒーレンスの応用

1998年はガボアによるホログラフィー誕生以来50年という記念すべき年であり、特集号が組まれている⁸⁻⁵。周知のように、ホログラフィーは干渉を基礎にした技術であり、1960年のレーザーの発明以来、光波を利用した技術が進展した。その後、電子線、原子線、X線などにも幅が広げられ、電子線ホログラフィーによる磁力線の観測により、基本問題との接点も出ている。

ホログラムの応用研究も盛んであり、ホログラムレンズをRGBの3層構造にして、フルカラーの3次元像投射に成功している¹。ピンホールアレイとフーリエ変換レンズを利用した、非ホログラフィー型の3次元画像の記録・再生も行われている¹。

顕微鏡や半導体露光装置などの結像光学系では、照明系が結像特性に大きな影響を及ぼす。これは光源のコヒーレンスが結像特性に関与しているためであり、古くから、アッペ理論をはじめとして、空間的コヒーレンスを制御することが試みられている。コヒーレンス制御の改善が液晶空

間位相変調器を用いてなされた¹。また、コヒーレンス制御のため、光源形状の最適化、被投影原版の位相物体化などに加えて、超解像技術との関連が議論されている⁸⁻⁹。この分野に限定されないが、計算機合成ホログラムを超解像に利用することが提案されている¹。

干渉顕微鏡の分野では、部分的コヒーレント結像理論が、微分干渉顕微鏡の縞走査法に適用された¹。少し毛色の変わったところでは、干渉顕微鏡のその場自律較正法が進展した⁴。

スーパーluminescentダイオードなどの低コヒーレンス光源を用いた光干渉法は、その空間分解能が光源のもつ短いコヒーレンス長で決まるため、高精度計測に利用される。この方法を光センシングに利用する場合、光路長情報の再生のために、従来機械的走査が必要であったが、液晶空間光変調器を用いて位相変調することにより、機械的走査なしの計測法が前年に引き続き提案¹された。また、マイケルソン干渉計を用いた光干渉法で、生体組織の薄膜¹も含めて、薄膜の厚さと屈折率の同時計測^{1,2}がなされている。

フォトニック結晶（光波長程度の周期的屈折率分布を3次元的に有する媒質）では、その周期構造によりブラッグ回折を受け、多光波の干渉の結果、光波が伝搬し得ないフォトニックバンドギャップが存在するため、近年脚光を浴びている⁸⁻⁹。国内でも、特性のすぐれたフォトニック結晶が、回折素子を高精度な位置決めにより利用することにより作製されている^{8-11,12}。また、自己形成作用を利用して同種の結晶が作製されている¹⁻⁷。フォトニックバンドギャップを透過した際に受ける位相シフトを測定するのに、マッハ・ツェンダー干渉計が利用されるなど⁸⁻¹¹、フォトニック結晶は原理が干渉に基づいているだけでなく、測定にも干渉が利用されている。

1.1.3 展 望

部分的コヒーレンスに関する研究が根強くあるものの、このような伝統的光学の範疇に収まる研究が減少している。代わって、結像、計測、材料、医療などと密接な関係を有する研究の比重が増しており、今後もこの傾向が続くと予想される。

2. 結像素子・光学機械

コニカ 宮前 博

2.1 結像素子・光学機械（一般）

国内外で関連の国際学会が開かれ、光学シンポジウムでは参加者が300名を超え過去最高となるなど、光学設計や光学素子分野での活気に満ちた年であった。

2.1.1 光学素子

(1) 幾何光学的素子

結像レンズ系では、負正負正の4群構成の第1群でフォーカシングを行う方式で一眼レフ用マクロズームレンズ70~150 mm F 4.5~5.6の開発が行われ、1.3倍までの高倍率が実現された⁷。100万画素を超えるCCDに対応した、正群先行4群の一眼レフ方式⁴と負群先行3群方式⁴のズームレンズの設計が報告された。大口径、広画角化に有利な天体望遠鏡用の正正2群分離型アポクロマートの設計⁴、プラスチックレンズを用いつつ温湿度の影響を低減した、高精細投射型テレビ用の大口径広角レンズの設計が報告された⁸。ゾルゲル法による低分散分布GRINレンズの作成法も改善され、屈折率差を従来よりも拡大できることが示され⁴、屈折率差0.034の低分散GRINを用いたビデオカメラ用の単焦点Woodレンズの設計・試作³を行い実用性能を得た。また広角レンズや10倍ズームレンズのマスター系への適用も検討された⁷。

ルーフミラーレンズアレイのレンズ部分とミラー部分を一体化したルーフプリズムレンズアレイ⁴の開発、回帰型マイクロプリズムアレイを用いた光インターコネクション用素子の結像特性の報告²などがあった。

レーザーバーコードリーダー用にアナモフィック光学系でフレネル回折シミュレーションの有効性が示された¹。

(2) 回折光学素子

回折光学素子については、加工技術のいっそうの進展を背景に、実用化を前提とした報告が活発に行われた。

ビームスプリッターやマイクロフレネルレンズなどをプラスチック基板の表面に一体集積させたFDD用トラッキングセンサーの提案²や、赤外用の2波長用回折・屈折ハイブリッドSiレンズ系の設計・製作²が報告された。

光通信用レンズとして、プラスチックレンズの両面に回折格子を設けることで温度変化によるLDの波長変動と屈折率低下による焦点移動がキャンセルされるよう構成したものが発表された¹。試作に当たっては加工用バイトの先端の丸みを考慮し、各輪帯で回折効率が均一となるようにした³。バイトの形状の影響については、ベクトル理論によってより厳密に解析した報告⁴⁻⁵もあった。

新規な回折格子として、格子周辺にスプリング部を設けた可変周期格子を高アスペクトSiエッチングにより作成したもの²や、0次光を遮蔽するために断面形状を傾けたマイクロレンズアレイの作成²などが目を引いた。境界断面が鋸状となるように低融点ガラスと紫外線硬化樹脂を2層構造に組み合わせた回折効率の高い回折素子が製作された^{2,3}。またレーザー加工用の回折ビームアレイの0次光低

減についての報告がされた²。

(3) 液晶光学素子

液晶を用いた素子の検討も継続されている。セル厚による球面収差の最適化¹、電極の多層化による高NA化^{1,2}や多極分割による非点収差の改善¹が検討された。またTN液晶上に記録された物体光の複素振幅を、アフォーカル光学系で縮小し、参照光とともに感材上に繰り返し転写することでCGHアレイを作成する提案²があった。

2.1.2 光学機械

(1) 光ディスク

引き続きDVD/CD互換光学系に関する報告が行われている。光源側に可動補正レンズを配置したもの¹⁻²、また追記型CD(CD-R)を再生できる2波長方式では、干渉フィルターと段差のある位相フィルター付き平面板を設け開口制限と球面収差補正を行うもの⁴、開口制限をせずに再生波長差を用いて双方で収差を低減するような輪帯位相シフターをレンズに付加したもの⁴が報告された。

MO光学系では書き込み時と読み込み時でLD出力差による波長変化が瞬時に起こるため、AF機構があっても光学系自体にある程度の軸上色収差の補正が必要である。一方LDの波長は温度によっても変化し、プラスチックレンズではこれによる球面収差の色収差の補正も肝要である。これらを両立させる回折レンズの報告がされた⁷。

次世代光ディスクに向け、2枚玉の高NA非球面レンズにSHGブルーレーザーを適用する可能性が検討された⁴。

(2) 観察・表示装置

反射・屈折面の偏心によって発生する偏心収差を軸対称でない自由曲面によって補正した、偏心自由曲面プリズムによる薄型のHMD光学系の開発が報告された⁹⁻¹⁶。また群偏心量の大きなレンズ系で偏芯による歪曲を補正したOHP用の光学系の設計例が報告された⁷。

2.1.3 光学設計法、最適化

(1) 光学設計法

レンズ系を曲率、屈折率などを要素とするベクトルで表し、複数のベクトルの線形結合により新仕様の系を合成するadditive method⁸⁻²や、屈折率や分散値の最適化後に実在硝材へ置き換える方法⁴の提案がされた。

アプラナティック条件を満たす厚肉単レンズで、後面における正弦条件を補正することで面偏芯に対する許容度の広い設計が可能となることが確認された⁸⁻¹²。

(2) 最適化

エスケープ関数を使って得られた解のメリットに大域的な下限値があること、ひとつのすぐれた解があれば同等の

解領域が連続して遠くまで続くことが報告された⁴。

遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適化では、枚数の多い大規模系の場合に実行不可能な形状を抑制する「強制オペレーター」を導入し効率化を図る方法の提案⁴がされ、未知の仕様に対する初期解の代替案生成器として、従来の最適化法と相補的に用いる有効性が主張された³。

自動設計ソフトのメリット関数に、3次の球面収差、コマ収差の2乗和を加えることにより、製造公差の緩和という設計意図を簡易に実現する方法が提案された³。

2.1.4 加工, 評価測定

(1) 加工

紫外線硬化樹脂を用いたレンズ素子作成の報告が目立った。マイクロレンズアレイ¹、表面張力を利用した両面レンズの作成¹のほか、樹脂が硬化すると周辺よりも屈折率が高くなる現象を利用した柱状光学素子の作成¹が報告された。

(2) 評価測定

OH, H₂ に依存した ArF エキシマレーザー照射による合成石英ガラスの透過率変化の測定が詳細に行われた²。

ミラー面の凹凸を変化することにより波面歪みを補正する補償光学系で、ミラーの駆動素子ごとに直交する波面平均値と素子位置での波面との差を用いて制御演算量を低減する方法の有効性が確認された^{a-10}。

光学系の生産性向上のため、鏡筒構造や機構部品公差を含めた複合的な観点から最適公差割り付けを行う試みが報告された³。

3. X線結像光学

NTT 通信エネルギー研究所 芳賀恒之

X線結像光学分野の本年度の大きな話題のひとつは、SPring-8の運用開始により、SPring-8での実験結果が学会等で報告されはじめたことである。また、SPring-8サイトに建設されたニュースバルも本年度末には運用を開始し、SPring-8サイトにおけるこれら2つの第三世代の放射光施設が本格稼働することにより、X線結像光学分野もコヒーレントX線光学等の新たな分野への展開が期待される。

もうひとつは、超先端電子技術開発機構 (ASET: Association of Super-Advanced Electronics Technologies) で将来の半導体製造技術として、X線縮小投影リソグラフィ (EUVL: Extreme Ultraviolet Lithography) のプログラムが始動したことである。ASETでは、70 nm ルール (64 GbitDRAM) 以降のリソグラフィ技術として EUVL を位置づけ、実現の鍵を握る多層膜ミラー光学系の加工・

評価等の課題に取り組む。X線光学の産業応用としては最も規模の大きなものである EUVL は、世界に先駆け日本で検討が始められ、以来 X線結像光学分野の牽引力であった。一方、米国は90年代に入って国家プロジェクトとして EUVL を取り上げ、近年では、EUV-LLC (Limited Liability Company) からの出資により、3つの国立研究所をまたぐ VNL (Vertual National Laboratory) で、EUVL の実用化研究が強力に進められており、先行していた日本としてはここ数年水をあけられた感があった。ASET の EUVL プログラムが求心力となり、日本における EUVL 研究、さらには X線結像光学分野の研究がいつそう活気づくことが大いに期待される。

以下に本年度の X線結像光学分野の進展について述べる。

X線光源に関しては、EUVL 用を目的としたレーザープラズマ光源の研究が活発化してきている。レーザープラズマ光源は、高エネルギーのレーザーをターゲットに照射し、プラズマ化したターゲット材料からの X線発光を光源とする。EUVL の光源として用いる場合、レーザーの高出力・高繰り返し化ならびに X線変換効率の向上により露光に必要な X線強度を確保すると同時に、ターゲット材料をプラズマ化する際に生じるデブリ (飛散粒子) による光学系の汚染をなくすことが重要となる。デブリの問題を解決する方法として、ガスパフターゲットやクライオターゲットを用いる方法が提案されているが、固体ターゲットに比べ X線の変換効率が低いという問題がある。高压ガスパフターゲットを用いたレーザープラズマ光源の Xe, Kr, O₂, CO₂ 等における X線のスペクトル、光源サイズ、X線変換効率等が報告され、固体ターゲットとほぼ同等の変換効率が得られる可能性が示された。

多層膜ミラーに関しては、波長 2.3~4.4 nm の水の窓領域での高反射率多層膜の作製が報告された。水の窓領域は、生物試料の水中生体顕微鏡観察のために重要な波長領域であるが、界面粗さによる反射率の低下が著しく高反射率多層膜の作製は非常に困難であった。報告では、Sc/Cr の組み合わせにより 15% と高い反射率が得られており、これまでの水の窓領域の最高反射率 10% を大きく上回るものである。この成果により、水の窓領域での X線顕微鏡開発の加速が期待される。X線望遠鏡用の反射鏡では、エネルギー領域の拡大を目的とした Pt/C 多層膜スーパーミラーの作製が報告され、25~35 keV の領域で 20% 以上の反射率が得られている。多層膜スーパーミラーは多層膜の周期長を深さ方向に変化させることにより広い波長領域で高反射率を得るもので、今後ますます適用範囲が広がってい

くと考えられる。

X線光学系の分析技術への応用に関しては、微小領域の光電子分光や蛍光X線分析のためにX線をマイクロビーム化するためのX線光学系の開発・適用が活発化している。従来からの、シュバルツシルト光学系、ウォルター型光学系、フレネルゾーンプレートに加え、ポリキャピラリーやブラッグフレネルゾーンプレート等の新たなX線光学素子の適用も報告されている。微小領域分析のニーズは高まっており、レーザープラズマ光源との組み合わせによりスタンドアロンでの装置化の可能性もあり、今後いっそうマイクロビーム光学系の研究が重要になると思われる。

X線イメージングに関しては、軟X線ホログラフィーを用いた3Dトモグラフィーが報告された。X線レーザーの開発や、アンジュレーター光源の進展を受け、X線ホログラフィーの研究も現実味を帯びてきた。また、屈折コントラスト撮像法による生体のイメージングが報告された。従来のレントゲンが発散光源からの拡大吸収投影法により吸収の違いを利用してコントラストを得ているのに対し、屈折コントラスト法では、微小点光源あるいはSRによる平行X線を利用し、サンプルと検出器(フィルム)との間隔を広げて、サンプルの境界部でのX線の屈折によるコントラストにより鮮明な像を得ている。これら新しいイメージング法が癌の早期発見等につながることを切望する。

4. 分 光

東京農工大 田久保嘉隆

分光学が包含する範囲は大変広い。分光方法、分光装置、物質の分光的性質とそれを用いた分析、構造解析[例えば、原子・分子分光、固体分光(光物性)、分光分析]など、多岐にわたっている。当然のことながら、これらすべてを網羅することはできないので、ここでは筆者の関心をもつ分野に限定して述べる。

4.1 分光装置

分光装置として2種の分光光源をとりあげる。

4.1.1 テラヘルツ電磁波

テラヘルツ域(通常100 GHz~30 THzの周波数域を指す)は光波と電波の境界にあり、分光学でも古くから関心をもたれてきたが、光源、検出器など技術的問題からこの領域の研究は少なかった。しかしながら、ここ数年この分野が脚光を浴びるようになり、本年も応用物理学会¹でシンポジウムが開かれ、また本誌を含めて数誌で解説・特集が組まれている^{2-8,m-7}。この背景にはフェムト秒レーザー技術の進展、普及によって、これを用いた短パルス電磁波(THzまでの周波数域が含まれる)発生が注目され、さら

にこれに刺激されて従来の方法についても活発に研究されるようになってきた。分光光源としては、波長可変範囲、分解能の点から、複数の赤外ガスレーザーによる差周波発生が注目されてきた。またパラメトリック周波数変換を用いる方法によって、非線形結晶を含む光学系に工夫を加えて150~310 μm 域で発振が得られ、小型で簡便な方法として注目されている。

4.1.2 中赤外域(Mid-IR)光源

環境計測、特に気体の微量分子種検出のために、ミクロン域の分光光源が注目されている。高感度、高分解能に加えて小型簡便な装置を目標にして、半導体レーザーを基礎とした光源が数多く発表されている^{9,9}。例えば、InP系、GaSb系半導体レーザーを基礎とした2 μm 域のレーザーとその分光分析への応用が報告されている⁹。通信用1.3 μm DFBレーザーによって水蒸気の検出実験がなされている。また2台の近赤外半導体レーザーからの差周波発生で3 μm 域の波長可変光源を作り、CH₄、H₂COなどの検出に用いている^{9,i-19}。

4.2 原子分子の分光計測

気体の原子・分子の検出の高感度化、すなわち検出のSN比の向上は分光計測の基本的課題のひとつである。この分野では過去に数多くの分光法が提案されてきたが、それらの方法の感度を比較した論文が発表された⁸⁻¹。ここでは有力な検出法がほとんど網羅され、原理および実用の両側面から検討されており、実際に分光測定法を使ううえで参考になる。著者らは、光共振器による信号増強と周波数変調(FM)による雑音の低減を組み合わせる方法が高感度分光法として有力であると述べている。現状ではYAGレーザーを用いているために波長域が制限されており、検出対象が限定されるが、C₂HD分子の検出で5×10⁻¹³の吸収まで検出されている。

光共振器による信号増強は、高フィネスの共振器が実現されるようになったことから、各種分光計測で積極的に用いられている。例えば、気体の磁気光学効果の検出ではフィネス75000(共振器長2.14 m)の共振器を用いて高感度の検出が行われている⁸⁻⁴。また、半導体レーザーに外部光共振器をつけて、光帰還と光路延長を同時に行う方式も提案されている¹。その他、レーザー共振器内吸収法による微量気体分子検出も報告されている²。

気体の原子分子検出の応用として、反応系の計測・診断がある。従来から引き続き、燃焼、プラズマ、CVD反応系などを対象にした計測が行われている。最近、レーザーアブレーションがシリコン微粒子、超伝導物質など新材料の生成法として関心を集めており、これにともなって、アブ

レーション過程での生成物質の同定，それらの空間分布，時間変化の測定を通して反応生成機構を明らかにする研究が，応用物理学会を中心に数多く発表されている^{1,2}．ここでは，発光，光散乱，あるいはレーザー励起蛍光などの時間分解測定が行われている．たとえば，超伝導材料にレーザーを照射して，その後生じるブルームについてレーザー励起蛍光強度分布の画像を時間を追って撮影して，生成物の挙動を明らかにしている．

4.3 量子ドットの分光

固体分光（光物性）として半導体量子ドットの分光計測をとりあげる．量子ドットは，いわゆる人工原子として，その構造，物性に興味をもたれ，また各種の光電子デバイスへの応用からも注目を集めている．このような対象に対しては分光的研究が重要な役割を果たすと考えられており，本年，日本物理学会¹¹でシンポジウムが，また IQEC でも単独の分科会が開かれている⁸．GaAs系の量子ドットが主としてとりあげられ，ドットに生成された励起子の構造，緩和過程，あるいはキャリア注入と励起子形成の動的挙動などに関心が集まっている．分光測定法としては，四波混合など非線形分光法，光励起発光の時間分解測定，ポンプ-プローブ分光などがあり，時間分解測定では，超短パルスレーザーを用いてフェムト秒，ピコ秒の時間領域での測定が行われている．さらに，近接場顕微分光法の手法が導入され，単一ドット選択による研究も開始されている．このように，量子ドットをめぐる多彩な分光測定が展開されている．これらの研究から，例えば，単一ドット内の励起子の波動状態（関数）を光によって制御する可能性が示されているⁿ⁻²⁸²⁻⁵³⁹³．

4.4 レーザー冷却

1995年に原子気体においてボーズ凝縮が観測されて以来，その物性に関心が寄せられている．特に，超流動の性質について理論，実験両面で活発な検討がなされており^{8,10,11}，レーザー光によって凝縮系に回転を与えて渦状態を作る試みなど，興味深い研究が報告されている⁰⁻⁵．ボーズ凝縮系の生成に関する研究も国内外で引き続き行われている．例えば，磁気光学トラップで生じた凝縮体を，さらにレーザー光によって光学的にトラップする方法が開発されている^{p-01-10}．この方法は凝縮系の操作技術に応用されると期待されている．凝縮系ではないが，レーザー冷却された原子をレーザーによってイオン化近傍準位に励起すると，イオン，電子，VUV光が10ms以上にわたって観測されており，冷却プラズマ状態の存在と関連して議論されている⁹．

5. レーザー

東工大 小山二三夫
千葉大 尾松孝茂

5.1 レーザー（半導体レーザー）

5.1.1 面発光レーザーと微小共振器レーザー

光データリンク，光メモリーなどへの応用のために，低消費電力で動作し，2次元的に多数の素子を集積できる面発光レーザーの研究開発が進められている．特に北米では，ギガビットイーサネット用光源として，850nm帯面発光レーザーの実用化が進められている．軸対称構造の面発光レーザーは，円形状の出射ビームが得られるが，偏波面が定まらないという問題があった．これは，偏光依存性のあるコンポーネントを含む光データリンクや光メモリーのシステムに用いるとき，大きな過剰雑音を生じてしまう．また偏光依存性のないシステムにおいても，閾値の異なる2つの偏光モードの存在は，過剰雑音の発生や高速変調特性に影響を及ぼす恐れがある．偏波面制御を実現するために，傾斜基板を用いた面発光レーザーの研究が行われ，量産性にすぐれる有機金属気相成長法を用いて，(311)B面基板上に(100)面基板上の素子と同等以上の性能を有し，かつ，偏波面が強固に安定化された素子を実現されるようになった¹．さらに，図1に示すような酸化膜狭窄構造で横モード制御を行い，縦モード，横モード，偏波面のすべてを制御した完全単一モード面発光レーザーが実現された²．今後，このような完全単一モード面発光レーザーを用いた超高速光伝送や光メモリーへの展開が期待されている．

また，微小な薄いディスク共振器を用いたマイクロディスク半導体レーザーも，1.55 μm 帯で低閾値化の進展が見られた(図2)．最低で150 μA の長波長帯半導体レーザーでは世界最低閾値が達成された¹．また，この微小共振器を用いた近接場光を用いた新しい光検出の手法が提案され，

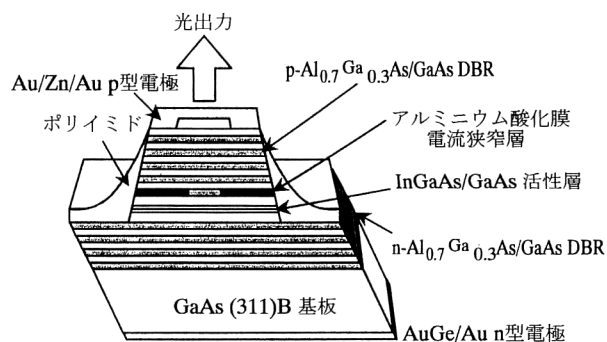


図1 (311)B基板上に形成し，縦，横，偏波のすべてを完全に単一モード化した完全単一モード面発光レーザー²．

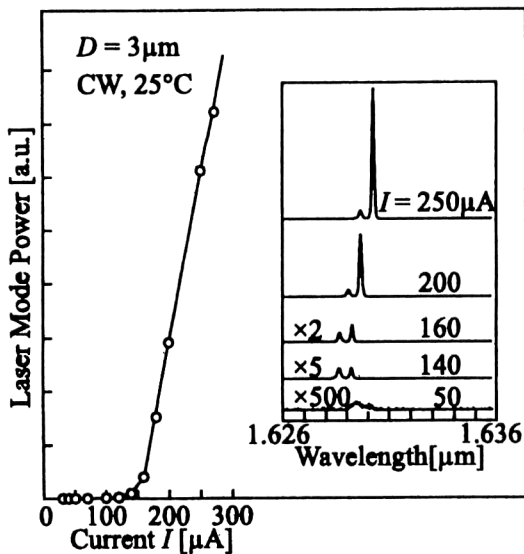


図2 マイクロディスクレーザーの長波長帯世界最低閾値動作¹.

分解能 150 nm 程度の回折限界を超える分解能の可能性が示された².

5.1.2 量子ドット・細線レーザー

InAs/GaAs 系の歪みによる自己形成量子ドットレーザーの特性改善が進められた。ドット層を近接して多層化することにより、結晶性と均一性の改善が図られ、低閾値電流密度での室温連続動作が実現された¹。また、InP 基板上でも、InAs の自己形成量子ドットのレーザー動作が報告された。さらに、長波長帯量子細線レーザーでは、温度特性や利得特性などのレーザー特性が明らかにされ、特に低温では、量子薄膜レーザーを凌ぐような低閾値動作も報告された¹。量子ドットレーザーの課題は、ドットサイズをいかに均一良く形成できるかにあり、また、研究の方向のひとつとして、ドットサイズの拡大による長波長化、すなわち GaAs 基板上で 1.3 μm 発光の可能性を探るのも面白い²。

5.1.3 長波長帯通信用半導体レーザー

GaAlInAs 系レーザーでの温度特性向上が進められた。波長 1.55 μm では、GaAlInAs 系歪み補償量子井戸と AlAs/AlInAs 超格子多重量子障壁を導入して、世界最高の 125 K の動作が報告された。また、GaInAs 3 元基板を用いて、GaInAs 系で、波長 1.3 μm の室温連続動作が実現された。今後の課題は、大口径化と 3 元基板の品質改良である。

また、埋め込み構造に代わる新しい酸化膜狭窄構造が導入され、低閾値化が進められた¹。ここでは、AlAs の超格子あるいは AlAs 薄膜を選択的に酸化させることにより、電子と光を閉じ込めることができる。加工プロセスが簡便化

されるため、埋め込みレーザーに代わる低コスト素子への期待がかかる。

GaAs 基板上で 1.3 μm 発光を得るために、GaInNAs/GaAs や GaAsSb/GaAs 量子井戸レーザーの研究が進められた^{1,2}。両者いずれの場合も、結晶品質が課題となっている。これらの研究が進めば、GaAs 基板上の高性能レーザーが実現できる。また、高歪みの GaInAs 量子井戸の成長に成功し、良質な品質を保持しながら、1.2 μm までの発光波長が GaAs 基板上で確認されている²。

レンズフリーで光ファイバーと接続できるスポットサイズ変換器付きレーザーについては、周期構造を用いた DFB レザーにスポットサイズ変換器を集積した素子も開発され、ファブリー・ペロー共振器同様、低放射角を実現している²。

5.1.4 可視光半導体レーザー

可視光レーザーについては、DVD 用の赤色レーザーの高出力化や、青色レーザーの信頼性向上の研究が進められた。赤色 (波長 650 nm) レザーは、実屈折率構造による横モード安定化が進められ、50 mW 以上の単一横モード動作が実現されている¹。GaN 系青色レーザーについては、酸化膜上の横方向成長を用いることで、大幅に転位が減少し、高温信頼性試験の結果から、室温では 10,000 時間以上の寿命が予測されている²。また、閾値についても、16 mA 程度の他の波長帯のレーザーと同程度の素子が実現された。また、GaN 系青色レーザーは、今年度には、サンプル出荷を行うなど実用化に向けて大きく前進した。

(小山)

5.2 レザー (半導体レーザー以外)

5.2.1 気体レーザー

ここ数年の半導体レーザー励起固体レーザーの進展は目覚ましく、国内外におけるレーザー関連の会議から気体レーザーのセッションが消え、学術講演件数の比重が気体レーザーから半導体レーザー励起固体レーザーへ完全に移行して久しい。しかしながら、気体レーザーの開発はエキシマーレーザーを中心にレーザーリソグラフィ、レーザーアブレーション等、産業応用へ場所を移し、精力的に研究が続けられている。256 Mbit LSI 用 KrF レザーは狭帯域化が進み、0.6 pm 以下が実現されている^{1,2}。1~4 Gbit クラスの DRAM 用次世代半導体リソグラフィ用光源としての希ガスエキシマーをはじめとする 150 nm 以下の真空紫外レーザー開発には、大きな期待がかかるものの、現在のところ放電励起、レーザー励起による Ar₂* エキシマーの生成過程に関する基礎研究段階で、大きなブレークスルーは見られない^{1,2}。

KrF等の希ガスハライドエキシマーレーザーを用いたレーザーアブレーションはSi等のナノ微粒子生成を中心に、加工用光源としてのCO₂レーザー、沃素レーザーの気体レーザー研究は、放電プロセスの基礎研究、高効率化、光ファイバーによるエネルギー伝送等を中心に引き続き地道に行われている^{1,2}。全般に、装置の完成度も高く、実用ニーズに応じ、堅実に性能向上が進められている感がある。

5.2.2 固体レーザー

固体レーザーは半導体レーザーの高出力化、コスト低下と歩調を合わせ、半導体レーザー励起固体レーザーが完全に主流となっている。研究の中心はレーザー装置の大出力化、新しいレーザー材料、非線形光学材料の探索、評価、波長可変レーザーの開発、超短パルス光発生、レーザー共振器の設計、評価等、多岐にわたる。

Nd³⁺に比べ量子効率が高い、吸収スペクトルが広い、イオン濃度が大きくできる等の利点を持ち、大出力レーザーに適した材料として、数年前からYb:YAGレーザーが注目されているが³、TEM₀₀モードで100Wに達するレーザー装置が発表された¹²。今後、大出力レーザーの主役としてのYb:YAGレーザー開発に拍車がかかるであろう。

レーザー材料で注目された結晶にCa₄YO(BO₃)₃(YCOB)、Ca₄GdO(BO₃)₃(GCOB)等のホウ酸カルシウム系結晶がある^{8,12}。これらの結晶は非線形光学結晶としても興味深い⁸、Nd³⁺、Yb³⁺をドープすることで、自己周波数通倍レーザー結晶として機能する。NYAB以来久しく現れなかった実用レベルの自己周波数通倍レーザーとして関心を大いに引いた。非線形光学定数こそKDPの1.4倍程度とそれほど大きくないが、NYABと異なり、CZ法で引き上げられるので、大型結晶が作りやすい。ただ、Nd³⁺をドープした場合に530nm近辺に自己吸収が残るので、パワースケーリングの面で問題になるだろう。

また、セラミックスNd:YAGも着実に性能向上し、縦シングルモード発振が確認された⁸。この材料は、Nd:YAG単結晶に比べNd³⁺濃度を9at.%まで高くできる、Nd:YVO₄に比べ熱伝導にすぐれる、という特長をもつ。マイクロチップレーザーから大出力小型レーザー装置まで、幅広く応用可能な材料として有望であろう。

光パラメトリック発生、発振は波長可変コヒーレント光発生技術として定着してきた感がある。特に、PPLN(periodically poled lithium niobate)を代表とする分極反転による疑似位相整合型素子を用いた光パラメトリック発振は、Nd:YLF(1.047μm)をポンプ光にして、シグナル光、アイドラー光波長を合わせると近赤外1.4~5.3μmまでの広い波長域にわたるピコ秒パルス発生を可能にし

た⁸。CWでもNd:YAG(1.064μm)をポンプ光にして、1.45~4μmの波長域でシグナル、アイドラー光出力を合わせ最大30%の高い変換効率が実現された¹²。また、光パラメトリック発振によるTHz光発生もLiNbO₃の損傷閾値の検討等、基本研究が進められ、着実な進展を見せている^{1,2}。

500~700nmの領域はチタンサファイアの2倍波、Nd:YAGの2倍波励起による光パラメトリック発振を用いてもカバーできない波長域で、手ごろな波長可変レーザーがない。この波長域は生体細胞の蛍光診断、レーザー医療等で重要な波長域である。この波長域を埋める固体レーザー材料としてポリマー色素等の固体色素レーザーが研究開発されている。励起光に対する損傷閾値の向上が望まれるが³、Pyrromethene-BF₂色素ドープしたPMMAディスクで2.5J/cm²の高い損傷閾値が報告された⁸。応用を限定すれば、簡便な波長可変光源として有用であろう。

チタンサファイアレーザーによる超短パルスレーザーの高ピークパワー化は進み、10Hz、100TW(19fs)に達している。同じく、TWクラスチタンサファイアレーザーの高繰り返し化も進み、1kHz、0.53TW(23fs)も開発された^{1,2}。これらのレーザーを用いた高次高調波発生をはじめ今後の展開が興味深い。

半導体レーザー励起固体レーザーの最適共振器設計する上で、レーザー結晶に誘起される熱レンズ効果を定量評価することは重要であり、熱レンズ効果に関する活発な研究が行われている。特に興味深かったのは、Nd:YAGにおける熱レンズの大きさが共振器内の光子密度に大きく依存するという報告である。励起光エネルギーが同じでも、非発振時における熱レンズはレーザー動作中の2倍近くに大きくなるということが定量的に測定された⁹。これまでも熱レンズ効果の共振器内光子密度の依存性は定性的には知られていたが、干渉計測を用いて定量化された点が大いに関心をひいた。これはNd³⁺の交差緩和、アップコンバージョンによるクエンチング過程が要因と考えられ、Qスイッチレーザーやアンプ設計に重要な指針を与えるものである。

レーザー発振器、増幅器を含むシステムでは、熱レンズ効果等によるレーザービーム品質の劣化が起こる。ビーム品質劣化補償には高性能位相共役鏡の開発が急務である。誘導ブリュアン散乱を用いた位相共役鏡がすでに商品化されているが、媒質が有機溶剤であること、ストークスシフトがある、などの問題点を残す。ブリュアンセルの固体化をめざす研究が国内では盛んであるが^{1,2}、一方、海外では、フォトリフラクティブ効果や、レーザー素子の飽和増幅効果等の非線形光学効果を用いた位相共役鏡の研究が活発化

している。従来、固体レーザーの標準光源ともいえる Nd:YAG レーザーの $1.06 \mu\text{m}$ で、適当な材料がなかったフォトリフラクティブ結晶も Rh:BaTiO₃ の登場により実用のめどがたった⁸。また、レーザー素子自身を飽和増幅型の位相共役鏡として用いる自己適応型レーザー装置も、半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーで実現された¹⁻¹⁴。Nd:YAG レーザーシステムでは全固体型の位相共役共振器レーザー装置が実現間近にせまってきた感がある。この流れは他の固体レーザーシステムにも今後波及する勢いがある。

5.2.3 ま と め

ここ数年のレーザー装置、特に半導体レーザー励起固体レーザーの性能向上には、目を見張るものがある。レーザーへのニーズはさまざまな分野で日に日に高まりつつある。今後は個々のニーズに合わせたレーザー装置開発が重要となってくるであろう。1998 年暮れに台湾で行われた International Photonics Conference において Stanford 大学の Byer 教授が半導体レーザー励起固体レーザーの産業的な“Take-off”も近いという話をされていたが、1999 年が“Take-off”の年になることを願う。最後に、これ以外に、1998 年に進展した分野は多々あるが、紙面の関係で割愛させていただいたこと、また、気体レーザーに関する記載が少なくなってしまうことをこの場を借りておわびしたい。(尾松)

6. 量子光学・非線形光学

電通大 中川賢一

6.1 量子光学(原子光学, 量子コンピューター, フォトニクス結晶)

ここ数年の量子光学に関連する話題において多くの関心を集めているのは、ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) と量子コンピューターであろう。前者は 1997 年のノーベル物理学賞の対象となったレーザー冷却法を用いて原子を極低温にし、多数の原子が同一の量子状態を共有する量子縮退を実現するもので、1995 年にコロラド大学のグループが Rb 原子によって初めてこれを実現して以来、実験および理論の両面から非常に多くの関心が寄せられており、1998 年にはついに MIT のグループが水素原子においてこれを実現したことが報告された^{P-02-18}。日本においてもこの 1, 2 年の間に理論および実験の研究報告が非常に増え、わが国における BEC 実験の実現が待ち望まれていたが、ついに東大のグループがこれを実現したことが年末の研究会で報告され¹³、さらにこれがきっかけとなり年末ぎりぎりには京大のグループもこれに追随した^A。また従来の

BEC が磁気トラップ中の蒸発冷却を用いているのに対して、これを Sr 原子を用いてレーザー冷却のみによって実現する新しい方法の開発が進められ^{11,13}、BEC 実現まであと一歩のところまで来ていることが報告された。この BEC からコヒーレントな原子波を発生する原子レーザーの実現、フェルミオン原子によるフェルミ縮退など、これからますます多彩な研究に発展することはまちがいないだろう⁹⁻⁹。この BEC 以外の原子光学の研究も着実に進んでおり¹¹、原子線ホログラフィーにおいては階調のある像の再生が報告され、今後実用的なりソグラフィ技術としての発展が期待される。なお、この原子線ホログラフィー等の一連の先駆的な研究において原子の波動性を明確に示したことに対して、清水富士夫氏 (電通大) が 1998 年の仁科賞を受賞した。原子干渉計においてはエール大のグループが、これを用いた重力勾配の測定実験において従来の方法と同程度の感度が得られ、将来的にはこれを上回る感度が得られることを示した^{P-02-5}。

また BEC と同様に、量子コンピューティングもわが国においてここ数年研究報告の数が増え、1998 年には関連するシンポジウムが相次いで学会等で催され^{2,11}、多くの関心を集めていることがうかがえる。米国においてはすでにイオントラップ中のレーザー冷却イオンを用いた原理検証の実験が行われているが、残念ながら日本においてはまだ理論的な研究が中心である。その中で NMR や光を用いた量子コンピューティングの実験の準備が進められていることが報告されており²、今後の、特に実験を中心とした本格的な研究の進展が期待される。

今まで量子光学の話題の中心であったスキューズド光、共振器内量子電気力学 (QED)、フォトニクス結晶などは、その基本的な原理および物理に対する理解が大きく進み、実験においてもある程度その限界および問題点がわかり始めてきており、現在は新しい方法および材料などを模索している状況にあるといえよう。光領域のフォトニクス結晶は、高誘電材料および微細加工の困難さから、まずは比較的容易な 2 次元結晶から実現しようというものから^{1,2}、2 次元構造の重ね合わせとして 3 次元結晶を実現しようというものが報告されている^{2,a-1}。

6.2 非線形光学

非線形光学においては、PPLN (periodic polled LiNbO₃) に代表される擬似位相整合による波長変換が広い波長域において幅広く用いられるようになった。PPLN による第二高調波発生 (SHG) はすでに実用化されており、現在では差周波数発生 (DFG) や光パラメトリック発振器 (OPO) による近赤外から、赤外域の波長可変光源の開発に

研究の興味が移っている^{b-9}。またこのPPLNにおいて用いられたドメイン反転擬位相整合の手法は電気光学変調器にも応用でき、高効率な位相変調による超短光パルス発生が実現可能になる^{b-9}。従来のLiNbO₃結晶においてもOPOを用いたTHz領域の波長可変光源の開発が東北大学のグループを中心に行われており^{b-9,1,2}、最近注目されているTHz領域における有力な光源として期待される。

また3次の非線形効果による四光波混合を用いた波長変換や光スイッチが最近再び特に光通信への応用において注目され、多くの研究が報告されている^{a-3,1,2}。半導体レーザーおよび光増幅器を用いた四光波混合により高効率に波長変換が可能であるが、自然放出光(ASE)によるS/N比劣化をいかに小さくすることが課題で、これに対しては光増幅器と可飽和吸収媒質を組み合わせる方法によるS/N比向上が報告されている²。

7. 近接場光学

神奈川科学技術アカデミー 斎木敏治

日本光学会の中に近接場光学研究グループが創設され、さらには応用物理学会講演会において近接場光学のセッションが誕生してから3年が経つ。口頭での成果発表の場はおもにこの2つである。生体科学、物性物理、量子光学などいわゆる「光学」以外の分野の研究者からの参入も多く、非常に活発な議論がなされてきた。通例のセッションでの分類に沿って、この1年の進展を振り返る。

7.1 2次元面におけるエバネセント波の応用

十分に接近した2次元平面(球面)間のフォントントンネリングについて、複数のグループで研究が進められている^{1,2,14}。特に、最近注目されているフォトニックバンド形成の基礎となるプロセスであるため、その明瞭な物理描像を得ることを目的に、単純な系に対して測定あるいは数値計算が試みられている。また、金属膜のプラズモンモードを利用した2次元光波の伝搬²は、波長に制限されない細い光導波路という観点から非常に重要である。またさらに、金属針による1次元光波についても考察がなされており、将来の近接場プローブ、光デバイス配線などへの応用として期待が大きい。エバネセント波の特徴をいかした原子分光なども数例報告されている^{1,14}。

7.2 近接場光学顕微鏡プローブおよび装置の開発

従来型光ファイバプローブの改良としては、銀の特性の利用や、テーパ形状の工夫による高感度化¹、高分解能化¹、STM動作を同時に可能とするプローブ¹などがあげられる。プローブの基本型として、その性能は着実に伸びつつあるが、むしろそれ以外の新型プローブに大きな進展

がみられたといえる。レーザートラップされた単一金粒子をプローブとして用いることにより、背景光の除去、電場増強などの効果を狙った例^{b-12,2,14}や、実用化までを見据えた平面開口プローブアレイ^{2,14}、使用可能な波長域の拡大を目指した中空型プローブ²、金属化カンチレバー²、共振微小球¹⁴などがその主なものである。分解能の向上をもたらしたプローブの報告は全体的に少なかった。

装置の工夫としては、最も重要な力検出の方法がある程度確立しつつあり、特殊環境動作ヘッドの開発も一区切りがついたため、特に大きな進展はみられなかった。白色光源による波長可変化¹、全反射かつ微小スポットによる照明^{1,14}、多方位での反射信号のピックアップ²、デュアルプローブをもつヘッド^{1,2}などが報告された。

7.3 理論的考察と計算機シミュレーション

近接場素過程の理論的考察、モデル化については、微視的理論に基づく仮想光子モデルの再考がなされ、その物理的基礎が明らかとなった¹⁴。また、より実際的な情報として、ファイバプローブ中の光伝搬のようすや近接場光学像の解釈のための計算機シミュレーションがいくつかのグループから報告された^{1,14}。手法としては、比較的高速かつ簡便なことから、時間領域有限差分(FDTD)法を用いたものがその大半であった。実験結果をよく説明している例も多く、今後、基本的なツールとなっていくことが期待される。

7.4 近接場光学顕微鏡の新たな応用分野の開拓

コントラストのメカニズムとその増強法、および近接場の特徴が生かされる観察対象の模索が最も重要なテーマである。前者としては、複屈折性やファラデー回転などを観測する上で偏光情報をコントラストとして利用した例¹や、結晶相とアモルファス相の反射率の違いを観察する¹などの報告がなされている。また、試料近傍のエバネセント光がもたらす表面起電力を、AFMによって感知することにより、間接的に光学像を得ることに成功している^{1,2,14}。高性能AFMの寄与もあり、非常に高い空間分解能が達成されている。

応用が強く期待される生体試料観察に関しては報告例が少なかったが、前出の銀を利用したファイバプローブによって、単一のDNAを数nmの分解能で観察したという結果は特筆に値する¹。そのほかの観察対象としては、有機、無機発光体(おもに薄膜)の観測例が非常に多く、表面凹凸像との比較から光学像特有の情報を得るという試みが大部分を占めていた^{1,2,14}。そのような意味で、蛍光スペクトルにとどまらず、パルスレーザーとの組み合わせにより、蛍光寿命を新たな情報として取り込むこと¹は非常に意義

のある進展である。

7.5 近接場光学の産業分野への応用

大きな市場という観点からも、これまで蓄積された近接場光学の知識、技術を産業分野において有効に活用することが望まれる。光記録と光加工が現段階での大きな柱である。近接場光記録の新たな手法として、Super-RENSが大きな注目を集めた²。これは記録媒体上のマスク層に、光を使って微小開口(窓)の開閉を行うものである。機械的強度の不安がないことと、高速性という重要な要素を備えている。前出の平面開口アレイ²もそのような点を意識しており、実用化を目指したものである。また、光加工に関しては、紫外光を用いた近接場技術による化学気相堆積が唯一報告されている^{1,2}。ガラス上にZnを堆積し、太さ20nmのパターンを描いている。

昨年(2002)の12月、和歌山県白浜において第5回近接場光学国際会議が開催された。国内外のバランスのとれた350名を超す参加者があり、盛況のうちに幕を閉じた。プローブなど主要な要素技術において、日本は世界をリードしているという印象を強く受けたことを一言付け加えておく。

8. 光応用計測

室蘭工大 相津佳永

光応用計測における過去10年あまりの進展は、半導体レーザー、光変調デバイス、高機能光ファイバー、高速高感度光検出・撮像素子、コンピューター等の飛躍的な発展に依るところが大きく、この傾向は本年度も大きく変わっていない。一方、90年代に入ってSPIE(国際光学会)やOSA(米国光学会)で活発化した医用光学が日本でも近年急速に発展しており、生体計測は本年度も興味深い報告がみられた。光応用計測に関連した国内動向として「光と音の工学的接点」ならびに「多光子顕微鏡の新展開」と題した各シンポジウムが開催された²。また、ホログラフィーの発明からちょうど50年を迎え、特集記事も掲載された^{a-5}。この他、レーザーによる非破壊検査と診断に関する小特集も発行されている^{m-9}。以下、本年度の進展について概観する。

8.1 形状、距離等の計測

超短パルスレーザーの利用は従来容易でなかったが、近年の著しい発展のもとにフェムト秒パルス光を用いたさまざまな計測技術が開発されつつあり^{b-6}、増幅機能をもったフェムト秒光カーゲートの開発¹と3次元形状計測への応用が報告された^{1,2}。また、スペクトル感度特性が逆転した2台のCCDを用いて形状に応じた色画像を良好に得るための手法が開発された²。これらは散乱体計測への応用も含め

て高速・高機能化が期待でき、今後の発展が楽しみである。一方、指数フィルターを用いた位相回復法により超短光パルスの振幅と位相を求める方法が提案された¹。モアレ法では、計算機モアレによる干渉縞走査法の利用¹や非等高線モアレ縞を用いた立体形状再生³などが報告された。三角測量を基礎とした従来投影法の欠点を解決する試みとして、投影系と観測系を同軸配置しながら3次元計測を実現する格子パターン投影法が示された³。また、粗面のrms粗さにのみ依存するコントラスト強調スペックルを用いた表面粗さ計測¹や、計算機生成ホログラムセンサーによる紙面の光学的性状検査^{s-5}が報告され、複屈折測定では回転位相シフト法による精度向上が図られた²。距離計測では半導体レーザーの光強度変復調により、距離100mの高分解能測定が達成されている²。

顕微鏡関連では、微分干渉顕微鏡に位相変調を導入した位相定量化の試み、共焦点光学系で高コントラストと3次元分解能を実現したレーザー走査型偏光顕微鏡、粒子の3次元位置を測定する位相シフトデジタル・ホログラフィー顕微鏡、位相物体を可視化するハイブリッドホログラフィック顕微鏡が報告された^{1,2}。

8.2 変位、変形、速度、微粒子の計測

光学系を遮断せずに使用できる透過型Siフォトダイオードが開発され¹、変位計測や位置決めへの有用性が示された²。日頃の実験でも透過型はあれば便利と感じることが多く、幅広い利用方法が考えられよう。また、集積化した超小型マイクロエンコーダーやマイクロ変位センサー²、半導体レーザーの戻り光を利用したナノメートル変位計²、試験片塑性変形を実時間観察する高速ビデオスペックル干渉法^{1,2}、反射型共焦点光学系を用いた直線計²などの報告があった。デジタルカメラを用いて、電子的スペックル干渉におけるデータ圧縮縞画像を簡易に得る方法が示された^{s-5}。

速度計測では、金属蒸気フィルターを用いたドップラライダーによる風速測定^{a-11}、レーザー光熱効果による乱流計測^{1,3}、偏光分離方式の位相ドップラー法による粒径・速度同時計測^{1,2}が報告された。その他、レーザートラップした粒子からの散乱光を用いて粒子位置¹と弾性係数²の計測および粒子識別^{1,2}が行われた。また、CVDプラズマ中ナノ微粒子検出のための光子計数レーザー光散乱法が報告された^{m-6}。

8.3 生体計測

生体医用計測は、光CT(computed tomography)やOCT(optical coherence tomography)など生体内構造・機能の断層画像計測が中心となって、大きく発展しつつ

ある。本年度も Optics Japan でスペシャルセッション“Biomedical Optics and Imaging (II)”³が開催され、活発な討論が展開された。断層像の可視化では生体内光散乱の影響を取り除く手法が重要で、従来、超短光パルスによる時間分解計測法や CW 光のコヒーレンス、干渉、偏光などを利用した測定法が報告されているが、国内では後者の研究がより活発なようである。

光ヘテロダイン法に基づくコヒーレント検出イメージング法では、分光計測の可能性^{a-1}や光学系等^{1,2,3}の検討がなされ、個別生体部位への応用が試みられた^{1,2,3}。また、和周波混合と光子計数法を用いたコヒーレント光成分の新規抽出方法が議論され³、光波の干渉性を利用した 2 次元映像法では試料内部位相分布を補正する方法が研究された¹。血中ヘモグロビン等の生理活性物質の近赤外分光に基づく光 CT では、言語機能計測、吸収体定量計測、反射光利用マンモトポグラフィ等の可能性が検討された¹。一方、X 線 CT アルゴリズムを用いずに光と超音波の相互作用で光 CT を実現する手法³や、超音波をプローブとして利用することで信号光経路を特定する断層像計測法が提案された³。

CW 光の利用では、低コヒーレンス光干渉を用いた OCT が注目されている。断層像の選択にはコヒーレンスゲートを利用するほかに、半導体レーザー光の周波数変調を利用する方法^{1,3}もあり、これによれば深さ方向の走査が不要となる。低コヒーレンス光による生体硬組織の屈折率・厚さ同時計測も報告されている¹。散乱媒質計測リフレクトメトリーでは、低コヒーレンス光を光スペクトル領域で干渉させる方式¹や、光波コヒーレンス関数の合成を利用する方式²が研究された。さらに、超短パルスレーザーにより得られる広帯域高輝度白色光を使って、試料の深さ情報と分光情報を推定するコヒーレンス分光トモグラフィ^{1,3}が研究され、断層像計測の新局面が期待できる。関連研究として、強散乱媒質中の吸収体形状測定を目指した拡散波リフレクトメトリーの報告があった³。

その他の生体計測として、単一レーザーパルス照射アブレーションで得られる発光ブルームをナノ秒時間ゲート分光し、生体サンプルの組成分析を行う手法が最近提案され、実際に Ca 等の微量元素が高感度に検出された^{1,2,3}。また、分光画像による人体表面血液量・発汗量の 2 次元計測²、薄膜導波路センサーによるヘモグロビン誘導体の吸収係数測定¹⁻⁴、多重散乱光時間相関に基づく凝集過程計測²、スペックル血流画像化法による網膜・頭皮血流計測³等の報告があった。顕微鏡関連では、高速広視野レーザー走査二光子蛍光顕微鏡による生体試料動的観察^{2,3}、コヒーレン

トアンチストークスラマン散乱 (CARS) の顕微鏡への適用²、生体微小器官観察用極細光ファイバーバンドル顕微鏡の開発^{1,2}が行われ、関連技術として生体内微小機器への近赤外光遠隔電力輸送や情報伝達手法が研究された^{1,2}。

8.4 光ファイバー応用計測

光ファイバーセンサーはひとつの技術分野を確立しつつあるが、同時に光計測全般に広く浸透している面も見逃せない。本年度は特集「光ファイバーセンサー応用の新展開」^{a-7}や「光ファイバジャイロ技術の進展小特集」^{m-4}も発行され、最近の研究動向を伺うことができる。光ファイバジャイロは、レーザー内部光を干渉計の入力として用いる方式が議論された²。また、デジタルセロダイン変調を用いた共振方式ジャイロでは、その特長を生かした後方散乱光誘起雑音対策が検討された¹。リフレクトメトリーでは、プレーナー光波回路や光モジュールの診断を目的とした低コヒーレンス方式が研究された²。電流センサーとしては、光弾性定数やベルデ定数などの点で有利な鉛ガラスファイバーを用いた干渉方式が報告された¹。

ファイバグレーティングによる高温・低温計測¹、水中音響計測¹、プラスチックファイバーによるアルカン蒸気¹や酸素^{1,4}のセンシング、エルビウム添加ファイバーを用いた周波数シフト帰還型レーザー²による距離計測³が報告された。また、ヘテロダイン計測用光源としてのリング共振器型ファイバーレーザー²、歪み等の物理計測用ヘテロコア型センサー²、界面活性剤の吸着検出用センサー^{1,2}なども紹介された。

8.5 展 望

光応用計測はその発展対象として、医学・生物学や環境科学への展開が今後ますます拡大されていくであろう。そのためには「超」^{b-5}をキーワードとするような、光学とエレクトロニクス全体の技術融合を見据えた研究開発が、よりいっそう重要になると思われる。

9. 干 渉 計 測

東京農工大 大谷幸利

干渉計測は本年度も光計測の分野で最も発表件数が多く盛況であった。新しいアイデアによる計測法の提案から工業技術等の向上に伴う精度、分解能、測定領域や使い勝手等の要求に呼応した計測法の開発に至るまで、幅広く報告された。

干渉計測でここ数年間特に活発な分野は、低コヒーレンス干渉計やリフレクトメトリーによる断層計測、および光ヘテロダイン検出によるコヒーレントイメージングである。Optics Japan '98 においてはイメージサイエンスペ

シャルセッション “Biomedical Optics and Imaging” が開催され、これらの生体内部情報検出への利用について議論がなされた³。これに関連した研究は本年度も非常に多くの発表があった^{1,2,3}。スーパールミネセントダイオード (SLD) を光源としたマイケルソン干渉計で別途に基準ミラーを用意した低コヒーレンス複合干渉計が提案され、水晶振動子の厚さ計測への有効性が確認された³。低コヒーレンス干渉縞の実時間で高精度な解析法として、参照光に正弦波位相変調を与え、光強度をフィードバックすることにより干渉縞の可視度を得る SLD 干渉計が提案された³。海外においても、低コヒーレンス干渉計をはじめとする断層計測の応用は一部に偏光の利用へと発展して活発な報告があった^{h-5,h-12,h-16,h-25,i-3,i-4}。さらに、チタンサファイヤレーザーからの超短パルス光を光源としたマイケルソン干渉計に参照面として回折格子を用いることによって、参照面の機械的な移動を必要としないコヒーレンス顕微鏡も報告され、断層情報が空間的に得られた¹⁻²³。ここ数年来報告されている波長走査干渉計は、波長以上の大段差形状計測に適用できるため注目される手法であるが、今回はフィゾー干渉計に適用した報告がなされた¹。また、波長可変半導体レーザーを用いて、Carré のアルゴリズムによる位相シフト法によって距離計測が可能であることが示された¹。SLD からの光を回折格子とレンズによって波長分散を空間的に与え、その焦点面に正弦的に移動するスリットをおく正弦波長可変 SLD 干渉計が提案された^{1,16}。

干渉縞解析法に関する報告は一時期に比べて少なくなってきたように感じられる。干渉縞のキャリア周波数がイメージセンサーの分解能を超える場合にも適用可能とするサブナイキスト法が報告された³。海外では環境等で発生する外乱振動の影響を理論的に低減する手法が提案された^{f-8,i-1}。干渉縞の解析の高速化においてはビデオレート有位相検出法を目的としてこれまでもいくつかの手法が提案されているが、今回は半導体レーザーの注入電流変化を CCD カメラと同期させることによって位相シフト法での解析が可能となり、熱ゆらぎの計測例が紹介された¹。干渉縞の解析で最も高精度が期待できる光ヘテロダイン法においては、周波数の異なる 2 光波が必要とされる。ここ数年来、この 2 周波光源とその応用について報告されているが、超磁歪素子と複屈折光ファイバーを用いたもの¹、Nd³⁺:YAG マイクロチップレーザーによるもの¹、ファイバーレーザーによる偏光ホールバーニングによるもの²、He-Ne レーザーの共振器中に複屈折板を入れ周波数を可変とする手法⁵⁻⁶が提案された。さらに新たな手法として、ハロゲンランプ光を光源として 2 個の音響光学素子と凹面鏡による

白色ヘテロダイン干渉計が報告された。この干渉計においてビート信号の位相計測と同時に振幅光強度が検出でき、白色干渉縞のプロファイルも得られた^{1,2}。これに関連した新しい白色干渉縞の解析法の研究として、M 系列にしたがって光路差を与えた参照ミラーを用いて干渉縞の解析を行う手法が報告された^{1,2}。

干渉縞の位相解析は、得られた 2 次元の位相が 2π ごとに折り畳まれてしまうため、アンラップが必要となる。この問題に関して急激に位相が変化する部分での渦問題が検証された²。また、2 台の受光素子を用いた実時間のアンラップ法も提案されている^{h-28}。一方、干渉縞の 1 フリンジ以上の形状変化をもつ計測対象や、アンラップ処理の負担を低減する試みが報告されている。非球面形状を合成開口によって計測することを目的とした 2 波長法による計測³や、2 つの半導体レーザーを用いて相補的に駆動することによる時間多重 2 波長ヘテロダイン干渉計が提案された³。また、光ヘテロダイン法の位相とびを補完する目的で、焦点法を組み合わせたハイブリッド法が報告された¹⁵。その他、干渉計による形状計測を行う際のより高精度化を目指して、干渉計上での自律校正の概念が提案された⁴。

格子を利用した干渉計測法は新たな可能性を示している。2 枚の格子を用いて干渉縞間隔が格子ピッチと入射角のみに依存する干渉計が提案されている。ここでインコヒーレントな光源を利用することにより干渉縞が形成される領域を変化させることができるので、ガラス等の表裏面計測での有効性が示された¹⁶。また、X 線干渉計への適用²は格子干渉計の応用として今後期待できる。

重力波検出への試みとして 300 m の干渉型重力波検出器建設計画の経過が報告された¹。また、その際に用いられる複合共振器についてさまざまな研究がなされているが、本年度はフィードバック信号を用いた安定化が検討された³。

干渉計測の変位・形状以外の適用として、平行平板を用いて多重干渉シリング干渉計を作りレーザービームのコリメーションを高精度に行う方法が提案された²。また、高精度の角度計測を達成するために 3 本のビームでホモダイン干渉をさせ、1 本を常にダークフリンジになるように位相変調器を用いたフィードバック法が提案され有効性が示された¹。また、半導体レーザーを光源としたトワイマン・グリーン干渉計で光カオス系をつくる吸光度センサーが試みられた²。複屈折計測としては偏光状態を変化させたトワイマン・グリーン干渉計の干渉縞から複屈折情報を捕らえる試みがなされた^{1,3}。また、光学薄膜評価のため音響光学チューナブルフィルターにより得られる異なった波長にお

いての2周波光を用いた光ヘテロダイナミック分光計測法が報告された²。

位相共役や非線形光学を干渉計測に積極的に利用した報告は少なかったが、フォトリフラクティブ結晶をコヒーレンスゲートとして用いて干渉信号の検出が試みられた¹。

今後の新しい技術として、近接場光学における光干渉の利用としてウィーナー縞による計測法と、光ヘテロダイナミック干渉法によるエバネセント波の高精度な検出法の報告があった³。また、マイクロマシン技術を用いた干渉計測機器の小型化も興味深い。Ti:LiNbO₃光導波路の一部に位相変調の機能を取りつけた、3方式の変位計測システムが構築された³。また、石英上に成膜された結晶シリコン製の薄膜光センサーによって入射光とセンサーを透過し、被測定ミラーからの反射光とでセンサー上で得られる干渉縞を検出する変位計が提案された²。このようにマイクロ化は従来とは異なった使い方が可能となり、新たな発展の可能性を秘めている。これまでの干渉計測というと除振定盤が必要であるといった概念が一掃され、将来的には光ICとして実用化が期待できる。このように干渉計測の技術は新しい周辺デバイスとともに発展している。これらの技術がますます実用化へと展開していくことが望まれる。

10. 光情報処理

東工大 山口雅浩

10.1 デジタル光コンピューティング

スマートピクセル関連の研究発表件数はあまり多くはなかったが、CMOS LSI上にGaAsフォトダイオードを集積したデバイス的高速動作の検証¹、ゲート数の少ないスマートピクセルをアレイ化して各種の機能を実証した結果^{1,2,3}等が報告された。人工網膜チップの実用化^{b-4}の後、これからの方向性を模索しているようにも思われる。並列度を高くすることを目指すのではなく、小画素数・高速処理デバイスを活用するべきではないかとの問題提起³もなされた。「光コンピューター」という用語もほとんど使われなくなりつつある状況であり、今後の新しい展開が期待される。

10.2 光演算

アナログおよびデジタルの光演算については、目的を特化した光電子処理システムや光並列認識システム等に関する報告があった。フラクタルを用いた画像圧縮を光フラクタル合成器で実現する効率的な符号化の方法の提案¹、光を用いた暗号化をホログラムの応用により行う方法²、セルラーオートマタを用いてブロック暗号やストリーム暗号を行う方法^{1,2,2,1-3}等についての研究が進展している。光パター

ン認識関連では、セキュリティー応用を目的として進められてきたジョイントトランスフォーム相関を用いた顔認識システム^{1,2}を、顔写真の検索に対して応用するための検討^{1,3}が行われた。また、多重光学系を用いた内積演算により医用画像のパターン認識を行うシステムの提案、平板マイクロレンズアレイを用いた小型の並列パターン認識システムが完全並列動作されたことの報告があった。

汎用プロセッシングエレメントアレイと自由空間光インターコネクションを用いた超並列光電子処理システムを用いて画像検索を行うシステムについても興味深い³。報告では、画像データベースから特徴画像を作成して登録し、登録された画像を用いて画像内容検索を高速に行う方法が示された。フェムト秒パルスを用いた時空間光情報処理の研究では、信号変換の手法等の開発^{1,2}が進んでいる。

10.3 ホログラフィー

国際的にもホログラフィーに関する発表が減少している中、計算機合成ホログラフィー (CGH) に関する報告が多かった。ホログラフィック光学素子や回折光学素子の応用は広がりを見せており、光学素子、光メモリー、光計測の分野での利用が進んでいることが一因と思われる。なお、銀塩感光材料の供給停止等の影響もあり、ハードコピーとしてのホログラムは厳しい状況が続いている。

CGHに関する研究としては、LiNbO₃:Fe結晶にCGHを記録する場合の特性に関する報告¹、超解像強度画像を発生させるためのCGHをシミュレーティッド・アニーリングを用いて設計する方法の研究^{1,2}、ハーフゾーンプレート処理を伴ったシングルサイドバンドホログラフィーにおいて時分割でサイドバンドを切りかえることで視域拡大を図る方法³等が挙げられる。

10.4 イメージング

可視光画像入力・画像形成関連の1998年の特徴は、分光イメージングおよびカラー画像に関する発表の比率が高かったことである。

可視分光画像の入力システム関連として、グレーティングと液晶空間光変調素子を用いた照明光変調システム³、回転フィルター型マルチスペクトルカメラシステム¹等の完成度は高まってきた。また、線形可変フィルターを用いて任意の分光感度をもつ画像入力を行う方法²等の報告がなされた。これらの可視分光画像入力技術は、物体の識別、生体計測、カラー画像再現等の幅広い分野に応用できる可能性があり、今後の発展が期待される。

分光画像データの解析に関する研究発表として、肌分光画像に独立成分分析を適用することでヘモグロビンとメラニンの成分を分離できることが示された^{1,3}。また、内視鏡

を用いて光ファイバーによる分光測定プローブを消化管に挿入し、胃粘膜の分光反射率を測定して解析した結果等が報告された^{1,2}。

生体計測等に関わる発表は、画像処理・信号処理のセッションと光計測等他のセッションに分散している傾向があるが、Optics Japan '98で行われたISG (イメージサイエンスグループ)スペシャルセッション“Biomedical Optics and Imaging”は、医用・生体光学関連の発表が集められて盛況であった³。

10.5 その他

この分野は、「光」による情報処理と「光情報」の処理という2つの側面をもっている。近年、情報技術が社会に与えるインパクトがきわめて大きくなっており⁴⁻¹、マルチメディア情報の入出力・流通・処理等の各ステージにおいて、光情報処理関連技術が重要な役割を担うことが期待される。動きの速い社会の動向との連携も保ちつつ、各種の新しい応用分野を開拓してゆくことが必要であろう。

11. 画像処理

徳島大 西田信夫

この項目は今回新しく設けられたものなので、何を展望すればよいものかと困っていたところ、編集委員会からいただいた執筆分担表には、「画像処理」の内容として、「計算機による画像処理、光以外の波動による画像および処理」と書かれており、「光による画像の形成 (ホログラフィーを含む)、伝送、検出、処理に関するもの」は「光情報処理」の項に含まれている。そこで、応用物理学会講演会とOptics Japanから本項目に合致すると思われるものをピックアップしてみた。その結果、計算機合成ホログラム、断層画像形成および近接場光学顕微鏡による画像形成の3つの領域の発表が非常に多いことがわかった。そこで、今回はこれらの領域について進展状況を展望することにした(断層画像形成、近接場光学顕微鏡については、「分光」や「光応用計測」で取り上げられると思われるので、ここでは画像形成・処理に限って取り上げることにする。また、どの領域を展望すべきかということについて今後ご議論いただければ幸いである)。

11.1 計算機合成ホログラム

計算機合成ホログラム (CGH: computer generated hologram) は、現実には存在しないものの立体像を再生できる可能性があることから期待されているが、その発展は必ずしもはかばかしいものではない。しかし、昨年もCGHについて多くの研究が報告され、足取りは遅いものの、着実に前進しているように感じられた。

CGHから高品質の再生像が得られない理由のひとつは、計算されたホログラムをプロッター、プリンターあるいは電子ビーム描画装置で描いたり、液晶テレビパネルに表示する際に高画素数化が困難なことである。

制限された画素数での再生像の質を改善するために、従来シミュレーテッドアニーリングアルゴリズムなどを用いた研究が多数報告されてきており、昨年もこれに類する報告^{1,2,3}が多かったが、さらに視域の拡大^{3,a-9}、再生像の解像度の向上^{1,2}の報告が目立った。

CGHの実時間的な製法として、鉄をドーブしたニオブ酸リチウム結晶への記録の報告¹があった。液晶テレビパネルに記録する方法に比べて、画素数を増やせる可能性があり、今後の発展が期待される。

CT (computed tomography) とCGHを結合してX線投影画像群からホログラムへ直接変換する方法²、セキュリティを目的としたCGHの多重化³などCGHの応用についての報告、また、計算機により作成した物体光の複素振幅パターンを液晶テレビパネル上に形成し、それと参照光を干渉させたホログラムを記録材料面に多数配列するという従来のCGHとは概念を異にする製法²の提案もあった。

11.2 断層画像形成

断層画像を得る映像法の研究はますます盛んになっており、Optics Japanのスペシャルセッションで多くの報告があった。

X線CTと同じ原理による光CTの研究は10年ほど前に始まったが、光CTの場合は、生体内における光散乱をいかにして回避するかがキーポイントであり、その方法として、超短光パルスを用いた透過光の時間分解測定法、光ヘテロダイン検出法に基づくコヒーレント検出イメージング (CDI: coherent detection imaging) 法、検光子を介して入射光の偏光を保存する成分のみを選択検出する偏光検出法などが研究されてきているが、昨年は、CDI法についての報告^{1,2,3}が目立った。CDI法の工業製品¹やヒトの歯¹、植物体^{2,3}への応用も報告された。時間分解測定法については装置化研究の報告³があった。また、共焦点光学系をコヒーレント (光ヘテロダイン) 検出法と組み合わせて不要な散乱光を除去する方法²や、非線形光学効果による和周波混合と光子計測法を組み合わせて散乱媒質透過光からコヒーレント光成分を検出する方法³が報告された。

以上の方法では、被測定物体をコヒーレント光で走査しているが、最近では、低コヒーレント光の干渉を用いて生体内で光が反射される位置を特定し、その反射直進光強度を測定することにより、画像再構成を必要としない断層像検

出 (OCT: optical coherence tomography) の研究³ や、光源に波長可変レーザーを使用し、周波数掃引を行うことにより機械的スキャニングをなくした OFDR (optical frequency domain reflectometry) の研究³ が注目されているようである。今後この方法による断層像形成の研究が増加していくと予想される。

11.3 近接場光学顕微鏡

近接場光学は、非伝搬の近接場光を微小な散乱体 (プローブ) で伝搬光に変換させて検出する技術で、最近急速に研究が盛んになっており、昨年の Optics Japan ではスペシャルセッションが企画された。

画像処理の立場から近接場光学を眺めた場合、興味の対象となるのは、プローブを走査して散乱光を検出する近接場光学顕微鏡 (SNOM: scanning nearfield optical microscope) により得られるナノメートルオーダーの分解能の画像である。

SNOM は、構成的には走査トンネル顕微鏡 (STM: scanning tunneling microscope) や原子間力顕微鏡 (AFM: atomic force microscope) など走査プローブ顕微鏡 (SPM: scanning probe microscope) とよく似ており、事実 STM 像や AFM 像などのフォース像を近接場光学像と同時に形成して、種々の情報を得る努力が行われている。すなわち、AFM 像と近接場光学像の両方を得る AFM-SNOM による磁性体の微小な磁気構造の観察¹、相変化記録媒体の観察¹、固体フタロシアニンからの発光の観察¹、有機エレクトロルミネセンス素子のダークスポットの観察¹、表面起電力の検出¹などが報告され、また STM-SNOM による MoS₂ (二硫化モリブデン) 基板の欠陥構造の画像化¹、MoS₂ 上のシアノビフェニル系液晶分子と色素分子の混合系の観察²などが報告されている。

SNOM で得られる画像は、試料の光学的な情報だけでなく、構造的な情報も含んでいる。したがって、光学像を構造像から分離する必要が生じるが、これに関しては、有限差分時間領域 (FDTD: finite difference time domain) 法による数値計算で解析する方法^{1,3} や同一試料に対して条件を変えて形成した複数の画像から目的の画像を得る方法³ が提案されている。

なお、本稿では特に触れなかったが、もちろんプローブの改良についての研究^{1,2,3} も精力的に行われている。また、レーザー光でトラップした単独の金コロイド粒子をプローブとして用いた DNA (deoxyribonucleic acid: デオキシリボ核酸) 分子の蛍光像の観察² や、プローブを用いずに、光の場を感光材料の凹凸分布に変換し、それを AFM で検出する方法² の報告もあった。

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

NTT 伊藤弘樹

光通信の分野においては、波長多重通信 (WDM) ネットワークの実現に向けた検討にいいよ拍車がかかり、米国を中心に WDM 伝送の商用化も活性化している。この動きに時分割多重通信 (TDM) のほうは多少押されきみではあるが、個々の TDM 関連のデバイスにおいてはかなりの進展がみられている。また、光非線形効果等を用いた波長変換素子や光-光スイッチ等の光制御デバイスに関しても着実な進展が見える。本稿ではこれら TDM 関連デバイスおよび光制御デバイスの 1 年間の動きを概観してみる。

12.1 光変調器

半導体 EA 変調器では内部光損失が大きいという問題があるが、この点を解決するため半導体光アンプ (SOA) と EA 変調器をモノリシックに集積したデバイスが作製されている¹。入出力用のファイバー間の損失が 0 dB に改善され、また、飽和ファイバー出力 5 dBm が達成されている。ミリ波の光伝送を目的として 60 GHz 変調用の EA 変調器モジュールの検討も進められている¹⁷。モジュール実装後にインピーダンス整合部をレーザーカッターを用いてトリミング調整することにより、電気信号の戻り損失を 15 dB 以上に高めている。LiNbO₃ (LN) 変調器では限られた基板内で素子長を長くすることが低電圧動作等につながるが、この観点から、LN の折り返し導波路が検討されている¹⁹。折り返し部に交差導波路構造 (0-gap 方向性結合器) を導入することにより、幾何学的反射構造に比べて作製寸法のトレランスがかなり緩和されている。変調器応用の新規なデバイスとして、焦点を EO 効果で変調できるレンズ変調器が提案されている²。短光パルス発生等の広い用途が考えられ、今後の展開が期待される。

12.2 光検出素子

昨年から今年にかけて単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) の研究が進展している。この PD は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っている ($V_{bias} = -4$ V で $f_{3dB} : 115$ GHz, ピーク出力: 1.92 V)¹⁸。これまでにこの高出力特性を利用した電気アンプなしの 40 Gb/s 受光識別や共鳴トンネルダイオード (RTD) と組み合わせた 80 Gb/s DEMUX 等が試みられている。光検出素子と電子回路をモノリシック集積した OEIC の分野では、40 Gb/s 以上の高速動作の報告が相次いでいる。これまでに GaAs をベースにした PIN-HEMT で 40 Gb/s²⁰、InP をベースにした PIN-HEMT で 50 Gb/s²⁰、導波路 PD と HEMT の組み合

わせで 50 Gb/s²⁰ 等の報告がなされている。新構造の PD として端面入射屈折型 PD が検討されている¹⁹。逆メサ構造の端面で屈折した入射光が光吸収層を斜めに通過する設計により、軸合わせのトレランスが導波路 PD 等には比較になり緩和されている。実装等における低コスト化が期待できる。

12.3 光ファイバー

長距離光伝送を阻害する要因として光ファイバーの波長分散と非線形効果がある。これらの影響を抑える特殊構造の光ファイバーの検討が進められている。基本的に分散が平坦でかつ実効コア面積 (A_{eff}) が広いことが望ましく、これに向けて A_{eff} が $120 \mu\text{m}^2$ でかつ分散スロープ値が $0.1 \text{ ps}/\text{nm}^2 \text{ km}$ 以下の分散シフトファイバー等が作製されている²⁰。光ファイバーアンプに関しては、広帯域化と利得の平坦化の検討が進められている。Er 添加テルライトファイバーと利得等化器の組み合わせにより平坦利得帯域 76 nm のファイバーアンプが実現されている¹⁷。また、利得帯域の拡大にファイバー中のラマン増幅を利用する方法も検討されている¹⁷。分散補償等を目的に、ファイバークレーティング素子の研究も活性化している。ファイバークレーティングの場合、フェーズマスクのつなぎ目の位相ずれに起因する分散リップルが問題になるが、この解決策として 10 cm 程度のフェーズマスクを一括して作製する試みが行われている¹⁹。また、ファイバークレーティングをピエゾ素子で機械的に伸縮させ、分散補償値を可変にする検討も行われている¹⁷。

12.4 導波路デバイス

アレイ導波路格子 (AWG) をベースにした各種光機能デバイスの検討が進展している。2つの石英系 AWG と SOA アレイをハイブリッドに集積した 8 チャンネル高速波長フィルターモジュールが作製されている¹⁷。また、InP 基板上に 2つの AWG と SOA アレイをモノリシックに集積した 8 チャンネルの波長セレクターも報告されている²⁰。光信号処理関連では、AWG と空間位相フィルターを組み合わせた分散補償器²⁰ や位相変調-強度変調変換素子¹⁹ 等の検討が行われている。光スイッチ関連では、石英系プレーナー光波回路 (PLC) で構成した 16×16 の熱光学 (TO) 効果利用のマトリクススイッチが報告されている¹⁸。

12.5 波長変換素子

昨年と同様、SOA の利得変調、相互位相変調、四光波混合を利用した $1.5 \mu\text{m}$ 帯波長変換素子の研究が活発である。相互位相変調を利用したものでは、信号光と参照光用にそれぞれ光プリアンプがモノリシックに集積された干渉計型波長変換器が作製されている¹⁷。四光波混合を利用し

たものでは、DFB レーザーと SOA を集積した波長変換器が作製され、離調帯域 300 GHz において 0 dB 以上の高い変換効率を達成している²。また、光ファイバーの四光波混合を利用した波長 $1.55 \sim 1.58 \mu\text{m}$ 間における 32 波長信号の一括波長変換も報告されている²⁰。2 次非線形効果を利用した波長変換では、ポンプ光の基本モード励起用のテーパー導波路および信号光とポンプ光を合波する WDM カップラーがモノリシックに集積された周期的分極反転 (PP) LN 導波路が作製されている¹⁷。この導波路を用いて差周波発生過程を利用した波長 $1.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 間の波長変換が試みられている。また、液相エピタキシャル (LPE) 成長による Zn 添加 LN 結晶薄膜を用いた PP 波長変換素子の検討も行われており²、光損傷耐性の向上等が期待される。第二高調波発生 (SHG) 青色光源としては、PPLN 導波路と LD を直接結合したモジュールが開発されている¹。体積が 0.8 cc ときわめて小型であり、かつ 2 mW の青色連続光を出力している。

12.6 光-光スイッチ

半導体をベースにした各種光-光スイッチが検討されている。制御光の波長である $1.3 \mu\text{m}$ で利得をもち、信号光の波長である $1.55 \mu\text{m}$ で利得をもたない SOA が挿入されたサグナック干渉計型スイッチ (GT-SOA スイッチ) が報告されている¹⁷。SOA 内で信号光は制御光により位相変調のみを受け振幅変調を受けないため、消光比等の向上が図られている。半導体中のキャリアの緩和時間の差分を利用した対称マッハ・ツェンダー (SMZ) 型光スイッチは 200 fs の高速動作が可能である。今期は pin 型導波路のビルトイン電界を利用してキャリア蓄積量を抑えることにより、波長 $1.7 \mu\text{m}$ の信号光を 20 GHz という高繰り返しでスイッチングすることに成功している²。低温成長 Be ドープ歪 InGaAs/InAlAs MQW 光スイッチはキャリアの緩和時間がきわめて短く 250 fs での動作が可能である。今期はこれにスピンの選択励起という手法を用いることにより、20 dB 以上の消光比の改善を図っている²。

12.7 将来展望

WDM の進展に伴い、AWG 等の導波路をベースにした光集積回路や広帯域波長変換素子の研究が今後よりいっそう加速するものと思われる。また、超大容量通信に向けた TDM と WDM の融合 (例えば 40 Gb/s \times 波長多重) などが検討対象になることも考えられ、それに向けた分散制御素子や 3R 素子等の検討が進められることと思われる。将来のノードを含めたネットワークの全光化というターゲットに対しては今のところ解は見えないが、波長ルーティングや光-光スイッチ等の技術を足掛かりに光信号処理素子の

地道で着実な進展が望まれる。

13. 光 通 信

NEC 田口剣申

光通信に関連したシステム/デバイスのこの1年の進展を振り返ると、エポック・メイキング的な報告はないものの、WDM (波長多重通信) への関心が昨年にも増して強まっているのが特徴といえる。インターネットの爆発的需要増への対応という観点からも、WDM 伝送の普及・商用化が北米を中心に日本にも波及してきた。WDM を包含した超高密度テラ (T)・ビット (bps) 伝送が国際会議で発表されて2年が経過したが、これらの高密度伝送が実験室レベルの特別なものではなく、現実味を帯びた技術に進展してきている。これらは長距離/都市間等、主に幹線系対応の伝送技術であるが、一方、多量の情報をローコストで伝送・処理することがアクセス系、光インターコネクションにも求められており、Tbps 級の光 ATM 交換機等の研究開発が活発化している。FTTH, FTTC の実現とそれに向けたデバイス開発も着実に進展している。以下、本稿では OFC '98¹⁷, ECOC '98²⁰ 等の国際会議の発表をもとに光通信分野でのシステム/デバイス技術の開発動向を述べる。

伝送容量の増大には波長の独立性を最大限に利用することが効果的であり、高速化とともに多重度を上げる高密度 WDM 化の検討・進展が著しい。超高密度伝送では、1 Tbps (10 Gbps-100 ch)-400 km 伝送¹⁷、一般の敷設ファイバーと波長 1580 nm 帯を使用した 1 Tbps (20 Gbps-50 ch)-600 km 伝送¹⁷ 等の報告に代表されるようにテラビットの時代が現実味を帯びてきた。1580 nm 帯 EDFA を使用しての伝送は一般化してきており、新波長域の開拓として、1400 nm 波長での OH 基による損失を徹底的に低減した (0.3 dB/km) “allwave” ファイバーの開発とこれを用いての 1400 nm 波と 1550 nm 波の帯域合波伝送²²、1400 nm はラマン増幅器で 1550 nm は EDFA をブースターアンプとして用いた無中継伝送²² 等が注目される。最近、これらの高速高密度 WDM の開発/実用化を効率的に行うためには、シミュレーション技術とネットワーク・マネジメントが波長・光出力の監視/フィードバック技術の開発とともに重要と認識されている^{17,20}。商用として 2.5 Gbps-100 波、10 Gbps-数十波の WDM 伝送が数年のうちに稼働するであろう。高速化に関しては、特に 40 Gbps での進展が著しい²³。分散マネジメント初期位相変調の適化による 40 Gb/s ソリトン-8600 km 伝送²¹、40 Gb/s-35 ch-85 km 伝送²¹、通常のシングルモードファイバーと、これとは逆分散特性をもつ RDF (reverse dispersion fiber) を組み合わせた分散フラ

ット伝送路で分散補償なしでの 40 Gb/s-10 ch-176 km 伝送²¹ 等の報告があった。一方、光ネットワークに関連して、光 SW (スイッチ) の高速化が進展しており、160 Gbps スループットの全光 SW²⁰、AWG (アレイ導波路格子) ルーターと波長多重インターコネクションを組み合わせた ATM 交換機²⁰、テラビット級 ATM 光 SW²⁰ 等の試作例が報告され活況を呈しはじめている。

使用波長域の拡大には、光アンプの広帯域化、平坦化、高効率化が重要であり、温度無依存化した長周期グレーティングを用いた利得平坦化光増幅器²²、twin-core ファイバーを用いた高安定利得等化器²² などファイバグレーティング (FG) を用いた平坦化技術^{17,19}、光 ATT によるダイナミックレンジ拡大^{19,20}、ゲイン・クランプ動作による 1580 nm 帯アンプ²⁰ とその出力の安定化^{19,20}、ラマンアンプと EDFA の併用による帯域拡大 (82 nm)²⁰、ラマンアンプによる NF 低減²² 等の報告があった。ラマン増幅は利得の帯域を励起光波長により任意設定可能であり、新たな利得帯域中心波長として 1390 nm, 1560 nm, 1590 nm が OAA '98²² で提案/報告された。また、特記事項として前記の “all-wave” ファイバー等との組み合わせに適した波長 1450 nm 帯用アンプとして、ツリウム (Tm) 添加ファイバー増幅器^{19,21} の開発が挙げられる。

関連する光デバイス、特に WDM 応用という観点からのモジュールレベルでの動向を中心に紹介する。小型/経済化の点から変調器集積化光源 (DFB/MOD) が不可欠となっており、DFB/MOD の 1530~1610 nm 帯異波長素子 (一括) 作製技術^{1,2,18,19} が報告され、PLC 上にハイブリッドであるいは半導体 1 チップ上に 8 異波長光源を一括形成する異波長光源集積化技術^{2,19,20} が開発された。EDFA 励起用光源モジュールとして FG との組み合わせによる波長安定化 1480 nm-LD¹⁹、FG による波長合成を用いた 1.5 W 級高出力アンプ²² 等の報告があり、商用化に関しても出力 200 mW クラスの 1480 nm あるいは 980 nm-LD モジュールの製品化がアナウンスされはじめた。光の合分波に用いられる AWG では、石英 AWG での偏波無依存化²⁰、透過波長特性の平坦化²⁰、ポリマー導波路によるチューナブル AWG²⁰、半導体一括形成で AWG をベースとした SOA (半導体光アンプ) 集積の WDM 8 チャンネルセレクター¹ と受光素子 (PD) 集積 WDM 8 分波素子^{1,21} 等の報告があった。受光に関連して、高速・高機能・簡便化の点から、単一走行キャリア型 (UTC) PD^{1,2,18} が低バイアスでも広帯域特性を有することを利用して共鳴トンネルダイオードと組み合わせたクロック抽出回路²¹、UTC-PD の出力で EA 変調器を直接駆動する波長変換器²¹ の報告が注目され

る。高速の光変調器に関して、半導体進行波型構成による帯域 50 GHz 変調器¹、電界吸収型による 60 GHz 帯の半導体変調器²¹が、また 40 Gbps 伝送対応として低電圧 (3 V) 駆動の誘電体 LN 材料変調器^{20,23}の報告があった。

アクセス系用デバイスに関して、PLC 光送受信モジュールで代表されるハイブリッド構成での ONU および関連するモジュール化技術の報告^{1,2,18,19}が多数あり着実に進展しているが、半導体ベースで送受信を一体化したピンポン伝送用として、155 Mbps 対応の WDM トランシーバー PIC の報告^{19,20}が増加しており、受信感度 -30 dBm を超える高感度特性が示された。また、コンピューター間等を光で結ぶインターコネクション、並列処理用デバイスとしての VCSEL⁸⁻¹⁰は、波長 800 nm 帯素子が北米を中心に開発がほぼ終了、商用化フェーズに移っているのと比べ、国内では新材料/新波長での取り組みが進んでおり、1300 nm 波長用として、GaAsSb/GaAs²、InGaAsN/GaAs^{1,2}等の材料開発の報告があった。

14. 光 記 録

東芝 菅谷寿鴻

14.1 マーケット動向

米国を中心に DVD-video/ROM が急速に立ち上がりつつある。全世界で 98 年までに、タイトルソフトは約 4,000 本、プレーヤーは 300 万台以上が出荷された。一方、MPU で MPEG2 のデコードが可能となり、さらにウィンドウズ 98 が DVD を標準サポートしたことから、パソコンの DVD-ROM 搭載も急激に増加し、パソコンで DVD を見るのがひとつの流れとなってきた。また DVD を用いたカーナビが急成長しており、すでに市場の半分を占めるようになった。相変化媒体を用いた DVD-RAM (2.6 GB/面, 5.2 GB/両面) も出荷され、さらにこれを用いたファイルサーバーなども現れた。このように主流の可搬形ディスクが、CD 系からこれと互換のある DVD 系へとかわりつつある。2000 年過ぎにはこれらのマーケットはクロスオーバーするとみられる。

DVD 以外では、書換形 130 mm MO や 90 mm MO が得意分野で着実に伸び、さらに 130 mm MO では 5.2 GB/両面、90 mm MO では 1.3 GB などが商品化されるなど大容量化も進んでいる。この他、小型の MD が音楽分野で大きく伸び、容量が 640 MB/ディスクも商品化された。CD-R がパソコンだけではなく音楽分野で認知され、そのレコーダーが商品化された。書き換えできる CD として、CD-RW も出はじめた。

14.2 書換形 DVD の高速・高密度化

DVD が主流の可搬ディスクに位置づけられたことから、ROM との互換がとりやすい相変化媒体が注目された^{24,26,27}。フォーマット作成中の DVD-RAM (4.7 GB/面, 9.4 GB/両面) では、媒体の性能アップで 1.8 倍の高密度・大容量化と、2 倍の高速化が要求された。GeSbTe 系記録層を GeN 層で挟むことで、結晶化速度の向上と繰り返し記録特性が向上した^{24,26}。クロスレイズ対策として低融点の Te 化合物を添加すると効果があることが示された²⁷。また初期化がいらぬ無初期化媒体が発表された²⁴。さらに片面から 2 つの記録面に記録・再生ができる 2 層ディスクが初めて発表された^{2,26}。記録層を 7 nm と薄くして透過率を高めた第 1 の記録層と、高感度・高反射層の第 2 の記録層を 40 μ m 離して 2 層構造とすることにより、オンライン容量 8.5 GB を可能とした。

DVD-RW は、ROM との互換性から同じ線密度が必要なため、消去比の高い AgInSbTe 系媒体が用いられている。従来、このタイプの媒体は書き換え回数や高速化に難点があったが、Ag を Au で置換することで書き換え回数が大幅増加し^{26,27}、また膜構成の工夫で高速化が可能となってきた^{26,27}。

14.3 次世代大容量化技術

HD 映像対応の DVD は ~15 GB/面の容量が必要といわれ²⁵、この実現には波長 400~430 nm クラスの青紫色 LD が必須である。その候補が GaN 系紫色 LD (波長 ~400 nm, 数 mW) で、すでに 1 万時間の寿命が報告され、実用化が近づいた²⁶。

短波長化に伴いチルト対策が必要となるが、3 ビームを用いたクロストークキャンセラーや液晶チルト補償で解決できることが示された^{1,2,26}。マスタリング関係では、褪色性色素膜の利用で波長 351 nm で ~15 GB/面相当のピット形成が可能なが示された²⁶。さらに波長 266 nm の SHG 固体レーザーと化学増幅型レジストで、20 GB/面の可能性が示された²⁶。将来技術として EB 方式も検討されている²。

一方、相変化媒体を用いた書換形では、20 GB/面の高密度・大容量化の発表があった^{24,26}。ゴミ・傷などの課題はあるが、2 枚のレンズで NA を 0.85 まで高め、0.1 mm の保護層を通して青色レーザーで記録・再生した。さらに媒体超解像技術では、超解像マスクとして Co 系酸化物薄膜や半導体材料を分散した膜などが検討された²⁶。この他、PRML など高密度化方式の発表もされた^{25,26,27}。

14.4 MO、近接場メモリーほか

MO では微細なマークが再生できる磁区拡大方式

(MAMMOS) で¹, クロストーク, ジッター, エラーレートなどが調べられ, 実用化の可能性が指摘された²⁸. MAMMOS と異なる原理の磁壁移動方式では¹, 課題であった長マーク再生時のゴーストが媒体の工夫で解決された²⁸. さらに MSR (磁気超解像) 技術を用いた AS-MO の検討で, 9~10 GB の可能性があることが示された²⁸.

将来の超高密度技術として, 例年通り近接場メモリー, ホログラムメモリー, 3次元メモリーが報告された^{1,2,24,26}. プローブや SIL を使わない新しい近接場メモリーとして, 非接触のスーパーレンズ方式が提案された². マスク層に Sb 薄膜を使用し, GeSbTe 記録膜との間に 20 nm の隔離層を設けることで近接場が検知できる. 実験によれば, 従来の光学系で 60 nm 程度のマークの記録・再生ができた^{26,27}.

このほか, 40 Gbps 以上の記録密度では磁気記録媒体の熱ゆらぎが問題になる²⁴. ポスト HDD 技術として光記録技術と磁気記録技術の融合が検討され始めた^{26,27}.

14.5 今後の動向

可搬ディスクは, DVD の延長で, 高速・高密度・大容量化が進むものとみられる. 一方, 光記録技術を取り入れたポスト HDD がもうひとつの流れになりそうである.

15. 視覚光学

東工大 栗木一郎

15.1 一般的な傾向

発表内容については, 一昨年に比べ fMRI, MEG などの脳のイメージングを行う装置を用いた研究の報告数が増加しており, これらの装置を用いた研究はもはや特殊なものではなく, 研究の一手法として定着の傾向を示しているのではないかと思われる.

また, 視覚科学研究者の一部のグループにおいて, e-mail を用いたディスカッションが行われたり, SCS (space collaboration system, 衛星回線を用いたテレビ会議システム) によるディスカッションが定期的に行われるなど, 遠隔地での成果の発表や意見の交換が活発に行われるようになった. 従来より, 研究者数が少ない分野である上, 研究場所が分散していることから, 学会以外での研究交流の機会が少ないという問題点があったが, 情報通信網の整備によってこのような問題が解消されうる好例ではないかと思われる.

以下, 研究分野別に研究内容について概観する.

15.2 色 覚

色覚の基礎特性に関する研究としては, 従来の研究手法による研究に加えて, 新たな研究手法による研究が目立っ

た. 前者としては背景色・輝度レベルによる色弁別の変化に関する研究^{1,3,t-1,t-3}, 色コントラスト感度の時空間周波数特性^{t-1,t-2}などが挙げられる. 色弁別特性の特性に関しては, 研究によって差はあるものの, 錐体コントラスト空間のプロファイルで説明ができる部分と, そうでない部分とが明らかにされつつある.

新たな課題に対する試みとしては, 表面色モード知覚の限界輝度を判断基準とした分光感度の測定¹, 背景色置換法による錐体応答の選択的な抑制^{t-3}, 被験者ごとの色分類実験^{t-3}, 分子生物学的な色覚の個人差に関する研究^{t-3}が挙げられる. 背景色置換法は 1960 年代に報告された方法であり, 近年の錐体分光感度測定において, 分光感度の重なっている錐体応答の分離に有効な手法として報告されたが, 選択的応答抑制のメカニズムに関する研究はきわめて興味深い. また, 色覚の個人差を遺伝子の塩基配列の個人差に関連づけた, 視物質に関する研究発表も行われた. これらの手法に関してはさらなる研究の進展が期待される.

そのほかに昨年につづいて研究が報告された研究課題として, 周辺視野における視覚特性やその低照度下での特性をカラーネーミング^{2,3}などの手法で測定した結果や, 異種照明下での物体色の見えおよびそのモデルによる検討などが報告された^{1,3,f-9,t-1,t-3}.

異種照明下での物体色の見えについては, 一昨年の国際照明委員会の色の見えモデル (CIE CAM 97s) の提唱をうけて研究が活発化している. 応用的には遠隔地における画像観察など, 情報環境の高度化に伴って知見の需要が増えつつある研究課題である.

15.3 空間視・立体視

仮想現実 (virtual reality) 環境における知覚の基礎特性の需要からか, 研究報告が増加している分野のひとつである. 主として, 運動視差からの奥行き知覚^{3,t-1,t-3}, 大視野における自己運動知覚 (ベクシオン) と姿勢制御への影響^{1,3,t-3}などが代表的な研究項目である. 今年新たに加わった研究報告としては, 大視野の視覚刺激によって自己運動感覚と姿勢制御がどのような影響を受けるのか, という問題に対する研究が挙げられ, 主として重心動揺を計測する方法による報告が複数の機関からなされた. ただ, 姿勢制御を重心動揺だけで論ずるのは基本的に困難であり, 今後新たな測定方法による研究が期待される研究課題である.

立体視に関する研究については, 水平・垂直視差, サイズ視差などのさまざまな両眼視差 (網膜像差) による奥行き知覚の変化^{t-3}, 輻輳眼球運動と刺激サイズの運動による奥行き知覚の変化^{t-1,t-3}などが挙げられる. 垂直視差は水平視差とは異なる目的から発生したメカニズムであり, 特

に大視野での刺激提示において効果が観察される、という意味で、これまでの両眼網膜像の差が奥行き知覚以外の目的に用いられている可能性を示唆する研究として今後の展開が期待される。

15.4 眼球運動

一昨年との比較において、研究対象となる現象の中心が、跳躍眼球運動（サッカード）とそれに伴う知覚から、追従眼球運動（パシュート）にともなう定位や眼球運動へ移行する傾向がみられた^{2,29,1-3}。サッカードは主として読書や静止画の観察に用いられる眼球運動であり、パシュートは動画において初めて生ずる眼球運動である。このような研究テーマの移行は、コンピューターなどの画像提示装置の性能の向上により、静止画だけではなく質の高い動画が提示できるようになってきたためだけではなく、VR環境で視覚環境を提示する際に必要となる知見に対する要請が生じつつあるためであろうと思われる。

15.5 運動視

運動視については、1次・2次の運動の特性の違いについての研究^{1-1,1-3}、またそれらの運動刺激を用いたときに、奥行き知覚や面としての運動知覚などの空間的な視覚特性がどのように変化するかという問題に関する報告がみられた¹⁻¹。研究課題の傾向としては、運動検出器の特性や、その応答の単純な組み合わせで説明できる部分から、空間的な刺激の認識などの高次の視覚情報処理過程の関与を含む課題への移行がみられる。

15.6 視覚的注意

脳の視覚情報処理の中心（あるいは焦点）を説明するための概念である「視覚的注意」(visual attention)は発表件数が年々増加している研究分野である。注意課題周辺での色・輝度感度の変化¹⁻¹や色・輝度差を手がかりとした視覚探索¹⁻³、注意の時空間特性¹⁻¹、物体の遮蔽構造と注意の広がり¹⁻³などの注意課題を用いた研究に加え、注意による目標追跡³や運転時の有効視野と音声情報の関係^{1,1-1}など、視覚的注意そのものをどのようにとらえるか、という基礎的な研究も新たに報告された。

視覚的注意、すなわち視覚的な処理の中心となる空間が必ずしも眼球の方向と一致しないため、眼球運動だけでは視覚的注意を追跡することにはならない。また眼球運動のように外部から客観的にとらえることのできない現象であるだけに、視覚的注意の移動をどのようにとらえるかは未解決な問題として今後もさらなる進展が期待される。

15.7 その他

一昨年と比較し、f-MRIやMEGなどの脳イメージング装置を用いた研究¹⁻³のみならず、基本的な視覚メカニズ

ムの解明^{2,1-3}においても医学分野との交流の増加がみられた。

15.8 まとめ

視覚科学は、工学、医学、生理学、心理学などの他分野に跨った境界的研究領域である。医学的な診断装置を用いた研究もさることながら、脳損傷者の視覚特性を参考にした研究は視覚科学研究の原点のひとつである。過去の例においては、色覚の遺伝子的特性や錐体分光感度の基礎的な研究は色覚異常の特性に関する研究に負うところが大きい。脳の機能として視覚情報処理をとらえる場合、大脳に起因する視覚機能の異常や欠損がどのように生じているかを調べることは視覚科学研究において新たな一石を投じる可能性が秘められている。

今後、分野を超えた情報や人材の交流のさらなる発展により、研究成果が進展することが期待される。

16. 光源・測光・照明

日本電球工業会 河本康太郎

16.1 光源、照明業界の概況

人間が生活をしていく上で、照明システムは必要不可欠な要素であり、日本経済の厳しい不況下ではあるが、照明産業の製品出荷高は、1998年もここ数年来の安定微増傾向が維持される見通しである。1998年の製品出荷高は、光源約4,200億円、照明器具約6,200億円の合計1兆400億円の見込みであり、最終的に前年比105%程度の生産高になるものと推定されている。以下に、1998年の光源・測光・照明分野の進歩、発展の代表的事項の概況および展望について述べる。

16.2 光源

16.2.1 第8回・光源の科学と技術に関する国際会議

光源に関する代表的な事項としては、3年に1回開催される光源を対象とした国際会議：LS-8 [The 8th International Symposium on the Science & Technology of Light Sources (第8回・光源の科学と技術に関する国際会議)]が、8月30日から9月3日までの間、ドイツのグライフスワルド大学で開催されたことが挙げられる³⁰。地元ドイツをはじめ、アメリカ、オランダ、日本など世界19か国から招待論文を含む合計143件の論文が発表された。

発表論文の部門別の内訳としては、HIDランプが21件と最も多く、蛍光ランプの20件がこれに次いでいる。内容的には、無電極放電を含む放電プラズマのmodellingに関する論文が多数発表され、活発に議論された。光源はエネルギー変換システムであるが、エネルギー変換機構の基礎検討によるエネルギー変換効率向上の研究は、地味ではあ

るが重要な項目として世界的に広く研究されていることを裏付けていると考えられる。

16.2.2 光源の安全基準の国際規格化

光源についてのいまひとつの重要事項は、IEC（国際電気技術標準会議）において（一般照明用）光源の安全基準の国際規格化を推進するための活動が開始されたことである³¹。IECでは、アメリカからの国際規格化の提案を受けて、TC34A: Lamps（光源）の中にCIE（国際照明委員会）との連携の下に、IEC/CIE Joint Panel: Photobiological Safety for Lamps（IEC/CIE 合同パネル：光源の光生物的安全性）が組織され、第1回の会合が1998年1月12日、13日の両日ロンドンで開催された。アメリカでは、光源の安全基準がすでにANSI（アメリカ国家規格）として規格化されており³²、前記のアメリカの提案はこのANSIに基づいている。

内容的には、光源の光生物的安全性のリスクの定量評価方法を標準化し、そのリスクに基づいて光源をクラス区分し、リスクの大きい光源については出荷時にそのリスクについての内容を適切にラベリングすることを骨子としている。そして対象とする光源は、レーザーは含まないが、一般照明用光源およびLEDを含む産業用光源とするとし、将来は光源だけでなく光システムや照明器具についても逐次適用範囲を広げていくとしている。

現在までにパネルの会合が3回行われており、基本原則、定量評価方法、リスクグループ区分の方法についての第1次原案がまとまっている。

16.3 測 光

CCPR（測光放射測定諮問委員会）では、貿易等の国際化の進行に対応し、光関連の計測の国際的同等性を確立することを目的として、1997年6月の第14回会議で、6種類の機軸国際比較項目を決定し、各項目についての国際比較を進めた。この結果に基づいてBIPM（国際度量衡局）より国際認証についての提案が出され、1998年2月に36か国による仮調印が実施された（正式調印は1999年10月の予定）。

この経過により、参加各国の国立機関は認証に対応していく必要が生じ、電総研でも光度、光束、極低温放射計の分光応答度、分光拡散反射率について対応進行中である。

照明学会においては、“短波長紫外放射測定方法研究調査委員会”が、波長150～250 nmの標準光源、検出器による測定法の確立等を目指して活動継続中である。この波長域の測定法確立は、前項の光源の光生物学的リスクの定量評価を実施する上で必要な事項であり、国際的同等性の確立を含めた成果が期待されている。

16.4 照 明

16.4.1 光環境設計に関するガイドライン、基準

わが国においては、光環境設計の際のガイドラインとして、「JIS Z 9110-1979：照度基準」が制定され活用されている。これは光環境の視作業面の平均水平面照度値を規定したものであり、それなりに有効ではあったが、均斉度、グレア、演色性等、照明の質については規定されていなかったため（照明の質が低ければ、照度の高さによる照明の効果が低下する）、照明の質についての推奨基準も合わせ制定することが必要であるとの意見が出され、屋内照明については1998年に、照明学会において“屋内照明基準原案検討委員会”が設置された^{33,4-7}。

国際的には、CIE Publication No. 29. 2: Guide for Interior Lighting-1989が制定されている（ISO 8995-1989として、同じ内容のものが制定公布されている）。このガイドラインでは、照度のほかに、照明の質である均斉度、グレア、演色性の項目も含まれている。

このガイドラインの改訂のために、CIE-ISOの連携の下に、1991年Joint CIE/ISO Technical Committee CIE TC 3-10 & ISO-TC159/SC5 WG2が組織され、活動を開始しているが、1996年に改訂案(3rd Draft)がまとめられ、さらに国際的議論を経て1998年に第4案(4th Draft)が作成されている³⁴。

これは、作業場所・作業の種類ごとに、照度、グレア制限値、演色評価数についての推奨基準値を制定しているもので、前記のわが国の屋内照明基準はこの基準との整合を図りつつ検討することになる。

屋内照明以外の分野についても、従来の照度基準に質的基準を追加し、分野別の照明基準の整備を逐次図っていくことが検討されている。

17. 光学関連の規格

日本光学工業協会 岩崎郁也

当協会は昭和21年1月に設立された光学精機工業協会を母体に、昭和29年6月、日本光学工業協会と改名し、本邦における光学精密機器工業の健全な進歩発達に寄与することを目的に発足した。現在の会員は、日本写真機工業会、日本顕微鏡工業会、日本測量機器工業会、日本望遠鏡工業会、日本映画機械工業会、日本光学測定機工業会、日本写真映像用品工業会、日本医用光学機器工業会の8工業会である。

実施している事業の中でも重要なもののひとつは、国際規格に関する活動で、国際標準化機構（ISO）のTC172 国内委員会（光学及び光学機器）とその下部機関のひとつで

ある SC1 分科会（基本規格）の事務局を兼ねている。

「貿易の技術的障害に関する協定」（TBT 協定）の締結、JIS のゼロベース見直し、工業標準化法の改正までの経緯はすでに既刊誌で報告されているので、TC172 の概要と 1998 年の状況について報告する。

はじめに、各方面からの問い合わせが多いので、委員会と分科会の事務局を記す。

国内委員会・分科会	事務局
TC172（光学及び光学機器）	日本光学工業協会
SC1（基本規格）	日本光学工業協会
SC3（光学材料及び構成物）	日本光学硝子工業会
SC4（望遠鏡）	（財）日本望遠鏡検査・技術協会
SC5（顕微鏡）	日本顕微鏡工業会
SC6（測量機器）	日本測量機器工業会
SC7（眼科光学及び眼科、眼鏡機器）	日本医用光学機器工業会
SC9（エレクトロオプティカルシステム）	光産業技術振興協会

当協会では隔年、約 100 ページの ISO/TC172 国内委員会報告を発行、過去 2 年間の国内委員会・分科会の活動状況を詳細に報告している。前回は 1997 年に No. 8 を、今年 No. 9 を発行の予定である。

なお、国際規格関係書類の処理・配布は、SC9 は光産業技術振興協会が行い、ほかはすべて日本光学工業協会が実施している。

次に、1998 年（歴年）中に当協会が受領した国際規格を到着順に列挙する（制定日が 1997 年であるにもかかわらず、1998 年に受領したものも含む）。

SC1

10110-8	Optics and optical instruments—preparation of drawings for optical elements and systems—Part 8: Surface texture (1st edition, 1997-11-01)
10110-13	Part 13: Laser irradiation damage threshold (1st edition, 1997-11-01)
10110-12	Part 12: Aspheric surfaces (1st edition, 1997-08-15)
7944	Optics and optical instruments—Reference wavelengths (2nd edition, 1998-06-01)
9022-3	Optics and optical instruments—Environmental test methods—Part 3: Mechanical stress (2nd edition, 1998-07-15)
9022-10	Part 10: Combined sinusoidal vibration, dry heat or cold (2nd edition, 1998-07-15)

9022-13	Part 13: Combined shock, bump or free fall and dry heat or cold (2nd edition, 1998-07-15)
9022-15	Part 15: Combined digitally controlled broadband random vibration and dry heat or cold (2nd edition, 1998-07-15)
9022-16	Part 16: Combined bounce or steady-state acceleration and dry heat or cold (2nd edition, 1998-07-15)
9022-21	Part 21: Combined low pressure and ambient temperature or dry heat (1st edition, 1998-07-15)

SC5

11884-1	Optics and optical instruments—Minimum requirements for stereomicroscopes—Part 1: Stereomicroscopes for general use (1st edition, 1998-05-01)
15362	Optics and optical instruments—Stereomicroscopes—Information provided to the user (1st edition, 1998-07-01)

SC7

10940	Ophthalmic instruments—Fundus cameras (1st edition, 1998-05-01)
10942	Ophthalmic instruments—Direct ophthalmoscopes (1st edition, 1998-05-01)
10943	Ophthalmic instruments—Indirect ophthalmoscopes (1st edition, 1998-05-01)
10944	Ophthalmic instruments—Synoptophores (1st edition, 1998-05-01)
10938	Ophthalmic instruments—Chart projectors (1st edition, 1998-05-15)
12865	Ophthalmic instruments—Retinoscopes (1st edition, 1998-06-15)
12867	Ophthalmic instruments—Trial frames (1st edition, 1998-06-15)
11715-1	Ophthalmic optics—Format of digital data files for data transfer for the profiling of spectacle lenses (1st edition, 1998-07-01)
10939	Part 1: Two-dimensional tracers Ophthalmic instruments—Slit-lamp microscopes (1st edition, 1998-07-15)
9394	Ophthalmic optics—Contact lenses and contact lens care products—Determination of biocompatibility by ocular study with rabbit eyes (2nd edition, 1998-08-15)

- 13666 Ophthalmic optics — Spectacle lenses —
Vocabulary (1st edition, 1998-08-01)
- 9339-2 Optics and optical instruments—Contact
lenses—Determination of thickness—Part 2:
Hydrogel contact lenses (1st edition 1998-10-

15)

なお、ISO7944 (基準波長) と 10110 (光学素子及びシステム用の製図手法) の第1部から第12部までのJIS化を推進中である。