

2003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31巻第12号	a-0	第50回春季応用物理学関係連合講演会	1
第32巻第n号	a-n	第64回秋季応用物理学会学術講演会	2
Opt. Rev. Vol. 9, No. 6	b-0	Optics Japan 2003	3
Vol. 10, No. n	b-n	第28回光学シンポジウム	4
応用物理 第71巻第12号	c-0	カラーフォーラム JAPAN 2003	5
第72巻第n号	c-n	第36回光学五学会関西支部連合講演会	6
Jpn. J. Appl. Phys. (1) Vol. 41, No. 12	d-0	International Symposium on Optical Memory 2003 (ISOM 2003)	7
Vol. 42, No. n	d-n	The 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2003)	8
Jpn. J. Appl. Phys. (2) Vol. 41, No. 12	e-0	第7回X線結像光学シンポジウム	9
Vol. 42, No. n	e-n	第17回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジ ウム	10
Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 41, No. 12	f-0	半導体MIRAIプロジェクトリソグラフィー関連計測技 術ワークショップ	11
Vol. 42, No. n	f-n	EUV Optics Lifetime/Contamination Workshop	12
J. Opt. Soc. Am. (A) Vol. 19, No. 12	g-0	平成15年度レーザー励起X線源とその応用研究会	13
Vol. 20, No. n	g-n	第5回光量子科学研究シンポジウム	14
J. Opt. Soc. Am. (B) Vol. 19, No. 12	h-0	第1回日独セミナー	15
Vol. 20, No. n	h-n	第4回アジア太平洋近接場国際会議	16
Appl. Opt. Vol. 41, No. 34	i-01	近接場光学研究グループ第12回研究討論会	17
Vol. 41, No. 35	i-02	The 10th International Workshop on Femtosecond Technology	18
Vol. 41, No. 36	i-03	The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim 2003)	19
Vol. 42, No. n	i-n	第17回日本エム・イー学会秋季大会	20
Opt. Lett. Vol. 27, No. 23	j-02	日本機械学会2003年度年次大会	21
Vol. 27, No. 24	j-03	The 11th International Conference on Terahertz Elec tronics	22
Vol. 28, No. n	j-n	3次元画像コンファレンス 2003	23
Opt. Commun.	k-m-n	Optics in Computing 2003	24
J. Light Wave Technol. Vol. 20, No. 12	l-0	2003年電子情報通信学会総合大会	25
Vol. 21, No. n	l-n	Optical Fiber Communication (OFC 2003)	26
Opt. Express Vol. m, No. n	m-m-n	The 29th European Conference on Optical Communication (ECOC 2003)	27
光設計研究グループ機関誌 No. n	n-n	The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2003)	28
J. Phys. IV Vol. m, No. n	o-m-n	Optical Data Storage (ODS 2003)	29
Rev. Sci. Instrum. Vol. 74, No. n	p-n	電子情報通信学会電子部品・材料研究会 (CPM 2003)	30
日本物理学会誌 第58巻第n号	q-n	日本視覚学会2003年冬季大会	31
分光研究 第52巻第n号	r-n	日本視覚学会2003年夏季大会	32
Phys. Rev. Lett. Vol. m, No. n	s-m-n	第8回日本バーチャルリアリティ学会大会	33
Science Vol. m, No. n	t-m-n	日本心理学会第67回大会	34
Nature Vol. m, No. n	u-m-n	日本基礎心理学会第22回大会	35
Phy. Rev. A Vol. m, No. n	v-m-n	第36回照明学会全国大会	36
e-print quant-ph	w		
レーザー研究 第31巻第n号	x-n		
Appl. Phys. Lett. Vol. m, No. n	y-m-n		
Vision Vol. 15, No. n	z-n		
Vision Res. Vol. 43, No. n	A-n		
日本バーチャルリアリティ学会論文誌 第8巻第n号	B-n		
照明学会誌 第87巻第n号	C-n		
LD+A 2003, No. n	D-n		
電球工業会報 第455号	E		
Licht Vol. 1-2	F		
J. Illum. Eng. Soc., Winter, 2003	G		
Lux, April, 2003	H		
J. Biomed. Opt. Vol. 8, No. n	I-n		
Proceedings of SPIE Vol. m	J-m		
Phys. Med. Biol. Vol. 48, No. n	K-n		

1. 光 物 理

茨城大 鵜野克宏

1.1 概 要

この1年の「光物理」の分野を振り返ると、回折や散乱問題に計算機シミュレーションを用いる研究が増加しているようである。また、表面プラズモン増強などの光と物質の相互作用を扱った分野が注目されていることから、こうした分野に関連した研究を、「光の共鳴現象」として新たに各論のテーマに加えた。

1.2 コヒーレンス・伝搬

コヒーレンスと光波の伝搬に関する研究として、大気擾乱媒質中を伝搬する部分コヒーレント光の伝搬に伴うビーム広がりに関する検討^{1,g-6,j-8,k-216-4~6}と、低次ツェルニケモードの制御による空間コヒーレント制御への応用³が挙げられる。また、スケール性を有するコヒーレンス度をもつ部分コヒーレント光によるスペクトルスイッチ現象の発生起源の解明^{g-10}、Besinc型のコヒーレンス度をもつ部分コヒーレント光によるフランホーファー回折像の変化に関する研究^{m-11-4}が挙げられる。また、低コヒーレンス干渉計用の光源の検討として、裾広がりの大きいスペクトル形状が、より短いフリンジ幅を実現できることが数値計算により示された²。

光波の伝搬に関しては、非点収差をもつラゲールガウスビームの伝搬に伴うエルミートガウスビームへの変換過程をθパラメーターにより分類した報告³が印象に残った。

1.3 回折・散乱

最近の回折・散乱に対する関心は、より微細で複雑な散乱モデルに移行している。そのため、従来のスカラー理論では扱えない問題をベクトル数値計算で解析する研究が増えているようである。例として、ランダムな散乱問題を統計的に扱う従来の手法に代わり、個々の散乱モデルを時間領域差分法(FDTD)により直接解き、光の局在効果を確認した研究³が挙げられる。また、周期的な微細構造からの回折問題に対しても、金属回折格子によるパルス圧縮のフーリエモード法による解析^{k-223-4~6}、周期型反射板の反射角依存性のC method法による解析³、蝶の鱗粉モデルの厳密結合波解析(RCWA)³、シリコン基板上のポリスチレン微小球の散乱を三次元境界要素法により計算した例²など、さまざまなアルゴリズムによる解析がなされた。さらに、散乱の順問題のみならず、逆問題に対してもアルゴリズムの検討が行われ、前方後方時間分解法(FBTS)を用いて逆散乱問題を解き、時間領域での場から三次元物体の良好な再構築が行われた^{g-10}。その他、高速フーリエ変

換(FFT)と座標変換に伴うJacobi行列を用いた角スペクトル法(angular spectrum)による傾いた面の回折場の計算^{g-9}、指数フィルターおよび同等な手法による物体の位相回復^{1,2}、チャージの異なる位相特異点をもつビームを生成する2枚のホログラムを用いた位相特異点の制御³などが目を引いた。

スペックル関連の研究報告では、スペックルの統計に内在するフラクタル的性質を抽出した研究^{2,3}や、高密度の粉体からのスペックルの強度相関と粒径との関係を解析した研究^{k-227-1~3}が注目される。

1.4 光の共鳴現象・光放射圧

光の共鳴現象に関する研究例として、波長以下の微小開口二次元配列による透過光増強効果のFDTD解析¹、表面プラズモンバンド付近の周波数をもつ、貫通していない周期構造をもつ金属の異常透過に関する検討²等の物質内の電子と光の相互作用に関する研究や、導波路中を併走する電子による光增幅の実験結果¹が目を引いた。また、光の共鳴現象と光放射圧に関する研究として、表面プラズモン増強による金属粒子の捕捉と入射光強度依存性が報告された^{1,2,3}。また、光放射圧と円偏光による運動量付加により、粒子を捕捉および回転させた実験例があった^{1,b-3}。その他、微小流体領域内の微粒子にエバネセント光による回転力を発生させ流体を攪拌した実験例²、ハリネズミ点欠陥をもつ液晶液滴のレーザー捕捉による回転における粒径とパワーとの関係に関する研究²、Fokker-Planck方程式に基づいた一般化ローレンツ・ミー散乱理論を用いた集光ビームにおける微粒子凝集過程の計算および実験的な検証が報告された^{2,3}。

1.5 展 望

回折・散乱の分野に代表されるように、対象となる物体が複雑化するに伴い、数値計算による解析が増えてきていく。今後はこれらの結果に対する実験的な検証が必要であろう。そのためには、計算モデルと同等な対象、あるいは環境をいかにして作り上げるかが鍵となると思われる。例えば、光硬化性樹脂を用いたランダム媒質の作成¹などが参考となるかもしれない。

また、FDTD法の活用によって任意の物体に対する回折・散乱問題をシミュレーションできるようになった反面、計算時間やメモリー資源の増大という問題に直面している。これらの問題を解決するための新しいアルゴリズムの開発への努力が、今後払われていくものと予想される。

2. 結像素子・光学機械

リコー 鈴木清三

2.1 概 要

デジタルカメラの市場は活況を呈しており、モバイル性を重視した小型薄型化、銀塩写真並の高解像度を狙った多画素化、および多目的用途の高変倍・高画角化など、ユーザーの要望の多様化に対応した機種が発売されてきている。

また、光ピックアップは青色レーザーを用いた次世代大容量メモリーとDVDとの互換性に対応した技術開発が活発であり、ISOM 2003において多くの発表があった⁷。

結像素子に用いられる非球面、自由曲面、回折面の高精度加工・評価技術が大きく向上してきており、光学系の進展に貢献している。

2.2 撮像光学系

デジタルカメラ用撮像素子の高密度化、多画素化の技術発展は著しく、特に小型CCDセンサー(1/1.7~1/1.8型)では有効画素数600万画素を超える素子が、大型CCDセンサー(約52mm×37mm)では有効画素数2068万画素を実現した素子も開発され、一部搭載されはじめた。

ズーム比3倍程度でモバイル性を重視した小型薄型化の動きが活発であった。負正正の3群ズームレンズの第2群を退避収納する沈胴機構を採用し、第2群に両面非球面を導入することにより群間偏心感度を低減させる試みがなされた⁴。またプリズムやミラーを用いて光路を90°折り曲げる方式を搭載した機種も増えている。この方式は光路折り曲げ素子周りの誤差要因による片ボケを低減するための偏心調整方法がキー技術となっている²⁻²⁷。

デジタル一眼レフ用交換レンズでは、APSサイズのセンサーにイメージサークルを特化した設計により、広角域からのズームの普及層への展開が図られている。

またカメラ付き携帯電話の技術躍進も大きく、200万画素、オートフォーカス付きが発売されはじめ、コンパクトディジタルカメラはカメラ付き携帯電話との差別化がいつも求められてきている。

2.3 プロジェクター光学系

屈折レンズと非球面凸ミラーで構成される大画面リニアプロジェクター光学系の報告があった³。本方式は非球面ミラーで歪曲収差と倍率色収差を低減し、屈折レンズに凸ミラーで発生する諸収差の補正機能を分担させることにより、高画角(136°)と低歪曲(約0.1%)の投影光学系を実現している。

また屈折レンズを使用せず、4枚の非球面ミラーを採用することにより、近距離投影(60型で投影距離25cm)を実現する全ミラー投影型プロジェクターも発売された。

プロジェクター用の一次元空間光変調器GLV(grating light valve)の紹介があった。GLVは6000本以上の窒化シリコンのリボンで構成され(1画素分が6本で1080画素配列)、クーロン力で約λ/4変位させることにより回折変調を行うデバイスであり、新たに階調特性、色再現特性などに関する評価結果が報告された⁴。

2.4 ヘッドマウントディスプレイ

ホログラフィック光学素子(HOE)とプリズムを用いた眼鏡型シースルーヘッドマウントディスプレイ(HMD)において、R, G, B三原色に対して異なる波面再現性をHOEにもたらすことで、他の光学部品で発生する色収差を補正する設計手法が紹介され、フルカラー化への対応可能性が示された⁴。

2.5 レーザー走査光学系

レーザー走査光学系は高速・高密度化に向けたマルチビーム光源の採用が活発化しており、面発光LDアレイ(VCSEL, 32ビーム)を搭載したレーザープリンタ(密度2400dpi, 速度が12.5PPM)が発売された。また4つの半導体レーザーチップを500μm間隔で配列し、ポリイミド光導波路で24μm程度に狭ピッチ化することで高密度化に対応し、電極材質等の最適化により温度変化に伴う光量変動を低減する提案もなされた^{b-6}。

2.6 光ピックアップ光学系

光ピックアップは、青紫色レーザーを用いた次世代光大容量メモリーのBD(Blu-ray Disc)/HD DVD(high definition DVD)と、赤色レーザーを用いたDVDとの互換性を狙った球面収差の補正技術に関する発表が多くあった。まず、互いに直交した偏光特性をもつ2枚の液晶パネルとλ/4板で構成される素子を対物レンズの手前に配置し、BDとDVDとの球面収差を電気的に補正する技術の紹介があった⁴。

また対物レンズに直接回折面を形成、あるいは回折面を形成した補正素子を対物レンズの手前に配置することにより、回折素子の波長依存性を利用して、BDとDVDとでそれぞれ異なる次数の回折光を用いることにより、球面収差補正する方式が数多く提案された⁷。

またHD DVD, DVDとCDへの互換性を狙って、干渉フィルターを用いた波長選択アパチャードでNAを可変とする方式も提案されている⁷。

また光の回折限界を超える記録密度をめざした近接場記録において、高NA集光系の半放物面ソリッドイマジ

ヨンミラーを試作し、青紫色レーザーにて半値全幅で $0.23 \times 0.27 \mu\text{m}$ の光スポットを得たとの報告があった⁴.

2.7 光リソグラフィー

線幅 50 nm 以下の次世代半導体リソグラフィー技術として EUV (extreme ultraviolet; 13.5 nm) リソグラフィー技術の開発が進められており、この波長域では適当なレンズ材料がないため、照明、投影系とともに反射光学系が採用されている。そこでミラー反射膜の高精度な膜厚制御が必要となるため、EUV 用の反射率計測機を製作し、良好な結果を得たとの報告があった¹⁻²⁸.

2.8 光学材料

粒径 15 nm の酸化ニオブ粒子をポリマー中に均一に分散固定することにより、温度変化に対する屈折率変動を低減させる光学材料の提案があった².

2.9 光学設計法

反射型偏心光学系において、Hamilton の特性関数に基づいた収差解析から収差を低減する設計手法が提案された³.

2.10 加工・評価測定

電子ビーム描画により曲面上にサブ波長オーダーの微細構造を形成する技術が紹介され、ブレーズ型格子付きレンズの金型を製作し 20 nm 以下の高精度が得られたとの報告があった³.

非球面レンズの測定評価技術も年々向上してきており、例えば両面非球面レンズの偏心測定機の紹介があった⁴.

2.11 展望

カメラ付き携帯電話の技術躍進は著しく、デジタルカメラの市場を凌駕するほどの勢いにも感じられるが、ユーザーの使用目的はますます多様化しており、デジタルカメラはより高画質化、多機能化に対応した開発が求められていいくであろう。

またデジタル情報技術の発展に伴い、今後の光学機械の光学系は、撮像素子、変調素子、画像処理などの電気系と、ズーム機構、調整機構などのメカ系とのトータルパフォーマンスを引き上げる光学設計が必要となる。そのためにはデジタル画像にとって最適な光学設計の考え方を明確にする必要があると思われる。

さらに、今後の光学系のさらなる小型化・高画質化・信頼性向上に対応した設計自由度を確保するため、フォトニック結晶、HOE などの新機能素子、ナノガラス、環境変動の少ないプラスチックなどの新規光学材料の発展を期待する。

3. X 線結像光学

NTT アドバンステクノロジ 竹中久貴

X 線のマイクロビーム化、それに必要な X 線光学素子の開発が着実に進んでいる。また位相型顕微鏡の研究、レーザープラズマ X 線源と X 線集光素子を利用した顕微光電子分光などの応用研究が進展をみせている。X 線基板の研磨技術においても著しい進展があった。

3.1 硬 X 線領域における結像光学

ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) では 2 枚のゾーンプレートを用いたツェルニケ型位相顕微鏡を用い、4 KeV のエネルギーで 60 nm の分解能を達成した。高分解能ゾーンプレートの最外殻線幅は 50 nm である。この装置で IC 中の 0.1 μm 程度の欠陥を検出している⁸。また、同じグループで Kirkpatrick-Baez (K-B) ミラーと最外殻線幅 70 nm のゾーンプレートを用いて 13 KeV の X 線で 85 nm 以下の分解能を達成した⁸。日本においても、筑波大・SPring-8 のグループが最外殻線幅 0.1 μm で厚さ 1 μm の Ta 製ゾーンプレートと位相板を用いたツェルニケ型硬 X 線位相差顕微鏡を開発し、Photon Factory の 9 KeV の X 線を用いて吸収コントラスト像で水平・垂直方向で共に 0.1~0.2 μm の L & S の解像度を得、また、SPring-8 での 10 KeV の X 線を用い、ゾーンプレート 2 枚を並べた干渉系を開発し、レンズレス・フーリエ変換ホログラフィーの実験を行い 0.1~0.2 μm を分解結像している^{2,10-12,9,10}.

硬 X 線用の厚いゾーンプレートに関してはスパッタ成膜法で形成した Cu/Al 多層構造のゾーンプレートの開発がさらに進められ、100 KeV の高エネルギーで 0.5 μm 程度の半値幅のビームが形成された¹⁰⁻¹²。高エネルギー照射でのゾーンプレートの耐久性の問題も、放射光を前もって照射しておくことで大きく改善されることが見いだされた¹¹。

3.2 軟 X 線領域における結像光学

EUV (extreme ultraviolet) 分野では各研究機関から光源・光学系・評価技術等が報告されはじめている。新しい応用として、最近、実験室、製造現場で顕微光電子分光により材料や部品の微小部電子状態分析、欠陥検査を行うため、レーザープラズマ X 線光源、シュワルツシルト光学系、試料ホルダー、TOF (time of flight) 型の検出系からなる小型の顕微光電子分光装置の開発が進められている。この研究を進めている産官学のグループでは、波長 13 nm 程度 (100 eV 程度) で 0.3 μm 径のマイクロビームを実現している^{2,11}。また、波長 6 nm (200 eV 程度) でのマイクロ

ビームも実証できる状況になりつつある。この方式は時間分解能がナノ秒、試料の損傷が少ないなどの特徴がある。

別のグループでも、13.1 nm のレーザープラズマ X 線光源、シュワルツシルト素子、半球型検出器を用いた顕微光電子分光装置の開発を進めている。点光源ではなく、線光源を用いることでより大きな強度が得られることが特長である⁹。

東北大ではシュワルツシルト光学系の結像鏡に要求される波面誤差 $\lambda/28$ 以下、13 nm 用だと 0.1 nm 以下の波面誤差を評価する干渉計の開発が進んだ。これはビームスプリッターと参照多層膜ミラーを利用した多層膜反射鏡の波面誤差を 0.1 nm の精度で計測する三角交差光路干渉計である。この装置の光源は Sn ターゲットにレーザーを照射するレーザープラズマ X 線源で、円筒型シャッターの回転によるデブリ防止機構にも特徴がある^{2,11}。

3.3 光学素子

EUV リソグラフィー (EUVL) 用多層膜ミラー（波長 13.5 nm 用 Mo/Si 多層膜）の高反射率化や高耐久性化が進んだ。10 年近く前に、日本から各層間に C バリアー層を挟んだ Mo/Si ミラーでは反射率や耐熱性・耐久性が向上することが報告されて、EUVL 関係者には知られていたが、LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) では各層間に C の代わりに B₄C バリアーを挟んで反射率 70% を達成し、さらに表面に Ru 層を形成することで酸化に対する耐久性を大きく向上させた¹²。

多層膜ミラーは、波長 6 nm 領域という B 吸収端の直下では反射率が 10% に満たないなど低い反射率しか得られず、高エネルギー軟 X 線領域での応用が考えられるものの、多層膜ミラーの反射率がとても低いため、実現が難しいとされていた。しかし、CoCr/C 多層膜で 16% 以上が、Cr/C 多層膜で 18.9% が得られ、実用化への道が開かれた²。応用として例えば短波長 EUV を用いた顕微光電子分光が進んでいる。一方、波長の長い 30 nm 近傍で 40% 以上の直入射反射率をもつ多層膜ミラーが実現し²、また、反射型 Si ビームスプリッターが開発されたことにもより²、フェムト秒高強度レーザーを希ガスに集光して得られる高次高調波による XUV (extreme ultraviolet) 領域への応用、特にアト秒レベルの超高速科学が大きく進展はじめている¹³。

レーザープラズマ計測の分野では、X 線レーザー光の高コヒーレンス、高単色性、高輝度という特長を生かした高精度計測が行われた。ガラスレーザーからのポンプ光を銀薄膜ターゲット上に照射し、数ピコ秒のパルス幅をもつ波長 13.9 nm の X 線を発生させ、発生したコヒーレント

な X 線レーザーパルスの一部をレーザー生成部に一部透過させた後、バイミラーと多層膜イメージングミラーによって透過させなかったビームを重ね合わせて X 線干渉像を CCD カメラに結像する。これでプラズマの時間変化を 1.1 μm 程度の空間分解能で観察した¹¹。

干渉型の顕微鏡にはビームスプリッターが必要になる。波長 13 nm 近傍用の Mo/Si 多層膜ビームスプリッターはすでに開発されていたが、最近になって、特性と安定性の向上が図られ、ようやく市場に供給されるようになってきた。昨年、13 nm 以外のビームスプリッターとして 6 nm 用が開発された。外形 20 mm 角、Cr/C 多層膜の自立膜（ウインドー）部分 10 mm 角のもので、80 度入射の場合（直入射角 10 度）、透過率、反射率がそれぞれ 6% 程度という特性をもつ²。これにより、13 nm より波長の短い 6 nm 領域でも干渉型顕微鏡が組めることになった。

X 線ミラーの研磨技術も大きく進展し、原子スケールで平滑、かつ、形状精度 1 nm レベルで 10~数百 mm の面積の研磨ができる方法を開発しつつある。これには 2 つの方法がある。1 つは EEM (elastic emission machining) で、微粒子（通常 SiO₂ など酸化物）と加工物表面間の化学反応を利用する。微粒子を超純水の流れによって加工物の表面に供給し、微粒子が加工物の原子を取り去っていく方法である。超純水の流れで任意形状の創製を可能としている。Si 基板の研磨では原子間力顕微鏡 (AFM) による 500 nm 角の面積内測定で表面粗さ 0.087 nm を実現している。2 つめは PCVM (plasma chemical vaporization machining) で、高圧ガス中（大気圧 He）で高周波プラズマを発生させ、ラジカルを作る。このラジカルで加工物表面原子を揮発性の物質に変えて除去加工を行っている。この方法で、長さ 400 mm の硬 X 線用ミラーで平面度 1 nm を達成した。また、長手方向 100 mm で曲面の最大深さ 3 μm と 6 μm の K-B ミラーの研磨を行い、ミラーの形状誤差 3 nm というきわめて高い形状精度が実現された。SPring-8 の BL29XUL でこのミラーの集光性を評価し、半値幅が水平、垂直方向でそれぞれ 180 nm, 90 nm という K-B ミラーでの世界最小値が実現された^{10,c-4}。

4. 分光

千葉大 久世宏明

4.1 概観

分光という用語は広い領域にかかわっている。試みに AIP の SPIN データベースで spectroscopy と入力してみると、約 129 万件の論文のうち、扱うエネルギー領域の差はあるとしても、13.6% に相当する 17 万 6 千件の論文が

この語を何らかの形で使用している。そのうち、所属として日本の研究機関が掲げられている論文数は1万6千件余である。全体での日本の寄与は8万9千件余なので、その中の広い意味での分光にかかる論文は約18.6%を占めている。もちろん、明示的にspectroscopyという語を用いていなくても、実質的に光学的スペクトル情報を利用する研究は多数あると思われ、多くの学問分野において分光的手法は不可欠の手段となっていることはいうまでもない。

4.2 基 础

分光にかかる技術的進展として、紫外および真空紫外域での分光応答度計測技術^{a-2}、高効率光学素子としてベクトル回折理論によるブレーベー構造の解析^{a-8}、プリズムと回折格子を組み合わせ、任意の次数、任意の波長を直進させる直視分散素子である分光素子グリズム^{a-8,3}、アレイ導波路回折格子（AWG）を用いた小型分光センシングについての紹介³などがあった。原子・イオンの分光では、冷却イオンの量子状態を通じての量子情報制御について議論され^{a-4}、量子標準体系の高度化シンポジウムにおいて高精度周波数標準に関する最新の進展について議論された²。また、波長400 nm近辺での原子の吸収線によるレーザーの周波数安定化^{e-3,e-7}、反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光についての報告^{q-3}があった。

4.3 応 用

X線天文学についての小特集^{q-6}が組まれるとともに、すい星からのX線の観測とその発生機構についての解説がなされた^{q-9}。レーザーパルスによって誘起されるプラズマによる紫外域での分光分析について報告された^{d-6}。fsレーザーによる時間分解分光の特集があり^{a-3}、コヒーレント極紫外光を用いたアルカリハライド結晶の内殻正孔の研究、レーザープラズマ軟X線を組み合わせた吸収分光測定について報告された。より長い波長域では、マイクロ波放電Ar流中のCNラジカルの分光^{d-11}、各種プラズマからの分光データをもとにしたプラズマ中の非平衡原子過程の研究^{q-1}、1 TW、50 fsのレーザーを薄膜に照射したときの分光測定^{e-12}の報告などがあった。

広い意味での生体の分光計測としては、蛍の光計測^{a-3}、電子内視鏡における病変部の分類をめざす分光データの解析手法^{a-5}、散乱の非等方性を考慮した反射型時間分解法による生体組織の光学特性測定^{a-5}についての報告があった。生体と並び、環境測定は分光の有力な応用分野である。ナノ多孔質材料によるガス濃縮と波長230～280 nmでの分光検出法を用いたマイクロBTX（ベンゼン、トルエン、キシレン）ガスセンサー^{r-4}、差周波による中赤外

光の発生とメタン吸収線の測定^{d-3}などの報告があった。

4.4 展 望

超短パルス光を用いた分光測定は今後、多くの分野で実利用が増えていくものと思われる。超高速の時空間変換を用いた信号処理により、時間と周波数の二次元情報を二次元空間に展開する手法がまとめられた^{a-10}。fs領域のモード同期レーザーによってマイクロ波と光周波数を結ぶ光周波数計測技術について報告があり^{q-3}、また、量子力学の応用技術としての量子情報処理についてタイムリーな特集が組まれた^{c-2}。さらに、微小共振器を用いた原子-光結合系の量子状態制御として、量子情報ネットワークへの展開^{a-4}の道筋が示された。光が拓く複合領域サイエンスについての特集が組まれ、従来とは異なる光の形態、光によって誘起される相転移、光で制御される細胞発光素子などについて紹介された^{c-6}。

おわりに、分光学におけるいろいろな意味での極限を探る試みとして、高分解能高精度レーザー分子分光、極限的時間分解分光、光学顕微鏡の空間分解能、微弱光計測、光電子放出デバイスによる極微弱光分光、サブミリ波・遠赤外天文学と分光学などの分野での進展・展望が議論された^{r-1~5}ことを挙げておきたい。

5. レーザー

NEC 佐々木達也

レーザー技術総合研究所 藤田雅之

5.1 レーザー（半導体レーザー）

IT不況は底を打ったとはいえ、厳しい市場環境が続いている昨今ではあるが、半導体レーザーの短波長化、高出力化、高速化、高機能化といった基本的な性能の向上は、それに魅力的な将来の市場に結びついており、高度情報社会の進展に欠かせない半導体レーザーの研究開発は依然として精力的に行われている。

2003年のトピックスとしては、光記録の分野では青色半導体レーザーに関する研究開発が引き続き活発であったほか、赤色レーザーの高出力化が達成された。また光通信分野では、従来の基幹系超高速大容量伝送からデータ通信市場への需要のシフトを反映して、長波長帯面発光レーザーの研究開発が活発化している。一方で、以前に目立っていた高出力半導体レーザーや波長可変レーザーの報告はやや減少した。

DVDなどの記録媒体への読み書きを行う光源としては、波長650 nm付近の赤色半導体レーザーが実用化されているが、書き込み速度の高速化を実現するための高出力化の検討が進み、200 mWのパルス光出力が得られてい

る。さらなる記録密度の増加に向けての青色半導体レーザーの研究開発は引き続き広範に進められている。結晶成長技術の進展や導波路構造の改善によって内部光吸収損失や駆動電圧が低減し、1 W 出力が CW動作で得られているほか、130 mW パルス出力で 2000 時間を超える推定寿命が報告されている。また波長域の拡大も進み、355 nm の紫外域から 480 nm の青緑色までの範囲でレーザー動作が得られている。またレーザープリンターなどへの適用も視野に入れた、マルチビーム多波長半導体レーザーの報告もなされている。

光通信においては、10 Gbit Ethernetなどの大容量データ伝送向けに直接変調半導体レーザーの開発が製品化段階である。これらのレーザーは低コストでの実現が不可欠であり、素子温度の安定化機能を省くために 70°C 以上の高温でも動作する性能が求められる。また光ファイバーとの結合において、レンズ結合系の大幅な簡略化は有効である。基板に垂直な方向にビームが放射される面発光レーザー（VCSEL）は微小な共振器を用いているために発振スペクトルの單一性にすぐれ、従来の端面発光ファブリー・ペロー型共振器レーザーに比べて変調性能の改善が期待できる。さらに素子作製や検査の工程が簡略化できるうえ、マイクロレンズアレイを用いた VCSEL アレイとファイバーアレイとの面型実装なども可能であり、データ通信用途を中心に今後の需要拡大が期待されている。近年は新しい化合物半導体材料の検討が進み、伝送距離の拡大が可能な波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯素子の性能が向上している。これにより発振閾値電流が低下しているほか、10 Gb/s での変調動作が確認されている。またマイクロマシン技術を用いて共振器ミラーを可動とした波長可変 VCSEL やウェハー内で共振器サイズを変化させた多波長 VCSEL アレイなども検討されている。なお端面発光型の波長可変レーザーとしては、外部共振器を用いた波長可変幅の拡大が検討されており、波長 $1.51 \mu\text{m}$ から $1.60 \mu\text{m}$ にわたって 10 mW 以上の光出力が得られる单一モード動作光源などが報告されている。

より研究領域に近いトピックスとしては、量子ドット半導体レーザーが挙げられる。注入キャリヤーを三次元的に活性媒質内に閉じ込めた量子ドット（量子箱）レーザーはキャリヤーの速い緩和による高速変調動作が期待できるほか、利得スペクトルの対称性に基づく低チャーピ性（変調時のスペクトル広がりが少ない）により、ファイバ分散の影響が少なく長距離の伝送が可能となることが期待されている。最近の結晶成長技術の進展により、比較的のサイズがそろったドットが得られるようになってきたが、これら

を多層に配置することにより利得の向上が図られ、課題であった光出力も徐々に改善されてきている。また、電子ビームリソグラフィー技術とドライエッティング技術を用いて作製した量子細線レーザーも室温連続動作している。このほか、二次元フォトニック結晶を用いたレーザーの研究も進んでおり、今後のさらなる進展が期待される。（佐々木）

5.2 レーザー（半導体レーザー以外）

2003 年度のレーザー研究の特徴は、ハイパワーレーザー・超短パルスレーザー分野での世界記録の達成と、セラミックスレーザー開発に代表される国産技術の成長であろう。また、Yb 系固体レーザーの研究発表が増加してきており、半導体レーザー直接励起の固体レーザーとして注目を集めている。

高出力超短パルスレーザーにおいては、光量子研の山川らが Ti : Sap レーザーでは世界最高ピーク出力である 0.85 PW（パルス幅 33 fs）を達成した¹。励起エネルギー 65 J に対して 37.4 J という理論限界に近い 50% 以上のエネルギー取り出し効率を得ている。また、4 次までの分散補正を設計に取り入れ、かつ光学素子の波面歪みを低減することで 33 fs のパルス圧縮に成功している。一方、Ti : Sap レーザーの高平均出力化のために液体窒素冷却の増幅器開発も進められている²。液体窒素温度ではサファイアの熱伝導率は金属銅を上回るため、高出力化の手法として注目を集めている。サイバー社は 10 kHz, 1 mJ, 10 W の製品開発を行い、20 W 化へ向けた改良を進めている。励起パワーは 100 W を優に超えるため熱設計が重要となる。数十ワットクラスの一体型フェムト秒レーザーの実現によりフェムト秒レーザーの産業応用への道筋が開けたことは意義が大きい。

高平均出力レーザーでは、光量子研の桐山らが LD 励起 Nd : YAG ジグザグスラブレーザーにおいて繰り返し 1 kHz で世界最大の 362 W を得た¹。ジグザグスラブ増幅器と SBS 位相共役鏡およびファラデーローテーターにより、熱複屈折と熱レンズ効果を補償している。また、Yb : YAG レーザーの高出力化が国内でも進められている。福井大の末田らは厚さ 0.3 mm のスラブ状 Yb : YAG を 344 W の半導体レーザーで励起し、CW 出力 128 W を達成した。レーザー結晶はディフュージョンボンディングされたサファイア板にはされ、励起光は全反射で閉じこめられる構造となっている。また、冷却面は 4 mm × 50 mm の面を利用して伝導冷却で動作させている¹。

Yb 系固体レーザーの研究報告が増えてきている。2003 年の応用物理学会では春に 6 件、秋には 7 件の講演があった。レーザー材料としては、Yb : YAG はもとより Yb :

YLF, Yb:KYW, Yb:YGW, Yb:Y₂O₃, Yb:GdVO₄ と種類が増え、レーザー媒質の形状も薄ディスク、コンポジットマイクロチップ、微細ロッド、極薄スラブと多種多様であり、共振器構成では、極低温冷却や SESAM (semiconductor saturable absorber mirror), 非線形結晶との組み合わせなどバリエーションに富んだ研究がしげを削っている（電通大、福井大、光量子研、理研、分子研、産総研、阪大レーザー研/レーザー総研、古河機械金属）^{1,2}。前出の CW 100 W 出力に加え、パルスエネルギーでも高出力化が進展している。光量子研の河仲らはファイバーカップルの半導体レーザーで Yb:YLF を励起し、再生増幅器からパルスエネルギー 60 mJ (@20 Hz) を得ている。ファイバーでストレッチしたチャーピング光を増幅し圧縮後に 800 fs となることを確認している¹⁴。最適化により 100 fs 程度のパルス出力が期待される。また、同様のシステム構成で Yb:YAG の Q スイッチ発振を試み、50 mJ を得ている。レーザー結晶を液体窒素で冷却することで高効率動作が実現された。液体窒素冷却に関しては実用性の面で賛否両論であるが、熱伝導率の向上や四準位レーザーと等価のレーザー発振（発振閾値の低下、スロープ効率の向上）など Yb 系にとってメリットが大きく、量子限界に近いスロープ効率の実現が期待されている。

セラミックスレーザーの展開もめざましくなっている。Nd:YAG や Yb:Y₂O₃ ではじまったセラミックスレーザー開発も Nd:Y₂O₃, Yb:Sc₂O₃, Nd:Y₃Sc_xAl_(5-x)O₁₂, Nd:CNGG など材料のバリエーションが増えており、レーザー発振においては CW からモードロックへと展開が進んでいる。電通大グループでは共振器ミラーに SESAM を用いて Yb:Y₂O₃ で 615 fs, 4.3 nJ, 98 MHz のモードロック発振を実現している。また、核融合ドライバーとしてのセラミックスレーザーの検討が進められている²。

1997 年、英国 Rutherford 研の Ross らにより 10 PW 実現のために提案された高エネルギー OPCPA (optical parametric chirped pulse amplification) の超高強度レーザーシステムへの導入が進んでいる。PW レベルの増幅実験は行われていないが、Ti:Sap 再生増幅器を OPCPA で置き換えるパルスコントラストの向上をめざす方向で阪大レーザー研/レーザー総研、筑波大 TARA でシステムへの導入が進んでいる¹。また、フォトニックファイバーで帯域を広げた光源をシード光とする実験がはじまった²。

（藤田）

6. 量子光学・非線形光学

学習院大 平野琢也

量子光学の分野では、国からの競争的研究資金の影響もあり、量子情報科学の観点からの研究が国内でも増えている。これは、直接的に量子情報処理を行うといった研究だけでなく、そのための技術基盤を開発するという視点で従来の研究を見直すことも含まれる。レーザー冷却・原子光学では、2001 年のノーベル物理学賞がボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現に対して与えられたことが記憶に新しいが、その後も爆発的な進展は継続しており、国内からも注目すべき成果が報告されている。非線形光学に関する研究には、新しい非線形光学材料・導波路素子、テラヘルツ電磁波、フォトニック結晶など多くの重要な研究テーマが含まれ、応用物理学会や *Jpn. J. Appl. Phys.* (JJAP) などで活発に研究成果が報告されているが、筆者の浅学のため紹介することができなかった。

6.1 レーザー冷却・原子光学

レーザー冷却を用いると、ミリ秒程度の時間スケールでマイクロケルビン程度の冷却原子集団を生成することができ、さらに蒸発冷却を行うことにより BEC が実現される。これまでルビジウム、ナトリウムなど 7 種類の原子で BEC が実現されていたが、全光学的な手法を用いることにより、2003 年は初めてイットリビウムの BEC が実現された年となった^{s-91-4}。イットリビウムの基底状態はスピンをもたないこと、5 つのボソンと 2 つのフェルミオンという多くの安定同位体が存在することから、時間標準や基礎物理などへの展開が期待される。低温を実現するという点では 2 段階の蒸発冷却を行うことにより、450 ピコケルビンの実現が報告された^{t-301-5639}。このほか、重要な進展として、フェルミ原子を冷却することにより原子のペア（分子）の BEC の実現が、Li と K を用いて報告された^{t-302-5653, u-426-6966}。原子光学においては、原子波のスキャナーの実現が電気通信大のグループから報告された^{v-68-1}。

6.2 量子情報・量子制御

量子暗号の研究は実用化に向けて日進月歩の展開をみせた。2002 年 11 月に、それまでの 48 km という世界記録を大きく上回る 87 km という通信距離の実現が三菱電機から報道発表されたあと、2003 年 6 月には 100 km を超える実験が東芝欧州研究所から発表され、7 月には日本電気・通信放送機構も 100 km の実験の成功を発表した。单一光子検出を用いない量子暗号の実験も行われた^{u-421-6920, v-68-4}。また、従来の量子暗号に比べて高い伝

送レートを実現できる新しい暗号方式が提案され、実験も行われている^{s-90-22,w}。

量子情報処理では、2つの離れた地点間に量子的な相関を与える量子エンタングルメントが重要な役割を果たす。しかし、量子エンタングルメントは光損失などにより容易にその特徴的な性質を失ってしまう。そこで、不完全な複数のエンタングルメントから完全なエンタングルメントを抽出することができれば、大変有用な技術となる。まさにこのような実験が国内で行われた^{u-421-6921}。

量子的な状態を遠隔地に送る技術である量子テレポーテーションの研究でも大きな進展がみられた。世界で初めて量子テレポーテーションの実験が報告されたのは1997年であるが、その実験は光子の偏光状態を破壊的に測定するという条件を課さなければならぬ不十分なものであった。この不完全性を解消した実験が2003年2月に発表された^{u-421-6924}。また、通信波長帯の光を用い、長さ2kmの光ファイバーを伝送路として用いた実験も行われた^{u-421-6922}。光の量子状態を送る実験では、非古典的な性質をもつスクイーズド光の量子テレポーテーションが世界で初めて東大工学部で実現されたほか、連続的な変数に関する三者間の量子エンタングルメントの生成が報告された^{w,s-91-8}。

量子情報通信の実験では、超加法的量子符号化利得とよばれる量子通信路符号化の基本原理を実証する実験やシーマッハの量子データ圧縮法の実証実験という、国際的にみても独創性がありレベルの高い研究が通総研のグループにより行われた^{s-90-16,s-91-21}。同グループからは、量子相関をもつ光子対ビームの生成実験や光子検出器に関する研究成果も報告されている^{x-9,i-12}。スクイーズド状態の発生に関しては、名工大のグループにより光ファイバーとスペクトルフィルターを用いる実験が行われた^{d-8}。

物質と光の強結合的な相互作用を探る実験では、1原子レーザーが初めて実現されたことは特筆に値すると思われる^{u-425-6955}。また、原子のスピン自由度を利用して、原子系の情報をコヒーレントに光に移して軌道角運動量をもつ光ビームを発生させる実験は興味深い^{v-67-2}。原子ガスの中に光を凍結する実験も行われている^{u-426-6967}。室温のアレキサンドライト結晶を用いて、光の群速度を秒速91mまで遅くしたり、あるいは真空中の光速より速くする実験も行われた^{t-301-5630}。風変わりな光たちに関しては、応用物理学会誌の総合報告が参考になる^{c-6}。この総合報告で3つめに取り上げられている負の屈折率をもつ物質に関して、2つのYVO₄結晶を用いて532nmの光ビームが負の屈折を示すという新しい可能性を感じさせる実験が報告さ

れている^{s-91-15}。

6.3 擬似位相整合導波路

紙数も尽きてきたので、最後に強誘電体結晶光導波路について簡単に述べる。この話題についてはタイムリーな解説記事を読むことができる^{c-11}。擬似位相整合と同時に群速度分散を補償する可能性は大変興味深い^{e-7B}。

6.4 展望

以上、国内の研究を中心に紹介した。基礎的な研究は国際的な競争のもとで行うものであり、今後ますます日本発のアイディアが進展し、願わくば数年後に世界中で研究されることになるテーマのおおもとが日本発であるというような研究が進展すること、そして、そのような研究を促進するような研究制度が整うことを祈って展望としたい。

7. 近接場光学

科学技術振興機構 八井 崇

近接場光の特性に基づく新原理、およびナノテクノロジーなどの新技術に立脚した近年のナノフォトニクスのめざましい進展に伴い、近接場光の光メモリー産業への応用開発が本格化し、さらにはナノ光加工とナノ光デバイスへの期待が高まっている。本稿では、この状況の中で進展した近接場光学の1年について、3月に開かれた日独セミナー⁻¹⁵、シンポジウム¹、10月に開かれたアジア太平洋会議¹⁶での発表などを中心に振り返る。

7.1 近接場光プローブおよび装置

これまでの高効率近接場光プローブの発展として、キャピラリーフォースを用いた散乱型プローブの作製¹⁷や、光メモリー用ヘッドの実現をめざしたプラズモン増強型プローブの開発^{2,y-83-22}、さらにはソリッドイマジンレンズ付シリコンウェッジプローブの開発およびそれを用いた記録再生実験の結果¹が報告された。

顕微鏡の進展としては、力を通して局在光の分布を感度よく検出し、1nm以下の分解能を達成したとの報告があった¹。さらには、近接場光の微弱な偏光成分を制御することにより、透明物質の2nmの段差が観測可能であることが報告された²。

7.2 局所電場増強

金属微粒子における局所電場増強効果は、かねてからバイオセンサーなどへの応用等盛んに研究されていた。しかし、これらを説明する解析理論は球などの特殊な形状に限られ、FDTD (finite-difference time-domain) 等による数値計算では波長分散やセルの分割など計算手法に問題があった。この状況下においてFDTDと理論とを対応させた計算手法が提案され、球以外形状に対しても実験とのよ

い一致が報告された^{1,2,16,17,y-83-22}。さらには、このような局在プラズモンによるデバイスをめざした複数の金属球共鳴モードや非線形物質を用いた双安定状態の計算などの発表があった^{1,2}。

分光への応用として、3次の非線形光学過程であるCARS（コヒーレントアンチストークスラマン散乱）も単一金ナノ微粒子により局所的に増強可能であることが実験的に示された¹。さらには、近接場ラマン分光により原子間力による吸着分子の変形や^{1,17}、単層カーボンナノチューブのカイラリティーの評価に関する報告があった²。

7.3 ナノ光デバイス

これまでに光近接場相互作用による量子ドット間のエネルギー移動を制御したスイッチング素子の提案および検証実験が報告されていたが、この応用として量子ドット間で発生する近接場光エネルギー移動を利用した集光素子の提案および原理実験の報告があった^{1,15}。スイッチング素子以外の機能性素子としては、結合した2量子ドットの励起状態を、さらにもうひとつの量子ドットのエネルギー準位を選択することにより論理演算が実現可能であるという理論予測が報告された^{2,17}。さらには、このような複数のドットの配置およびエネルギー準位を選択することで、近接場エネルギーを蓄えるメモリー素子への応用が提案された^{2,17}。

さらには、複数の量子ドットをリング状に配置することにより、局在光子と一次元量子ドット系の相互作用の結果、量子ドット全系に集団的コヒーレントな電気双極子振動状態が出現するという報告があった^{1,17}。

7.4 近接場光加工

近接場リソグラフィーでは、2層レジストなどレジストの改良等によりドライプロセス後の線幅として最小20 nmのパターン形成が可能であることが示された^{1,17}。さらには、近接場光が本来有する局在性を利用して、レジストには非共鳴な光である可視光を用いたリソグラフィーの可能性が示された^{1,2,15,16}。

近接場光を用いた化学気相堆積法（CVD）によるナノドット作製技術も大きな進展を遂げ、プローブを用いて20 nmの亜鉛ドットを隣接して堆積させた結果が示された²。また近接場光の局在性を利用した、非共鳴光CVDの応用として光に対して不活性な原料ガスに対しても適用が可能である結果が示された^{1,15,16}。さらには、堆積物の光吸収の寸法依存共鳴に基づき、プローブを用いずに自己組織的に複数のドットが堆積可能であることが示された^{1,15}。

近接場光加工のさらなる応用として、突起型シリコンに

対する光化学エッチングの報告がなされ、ウェットプロセスにおいて位置およびサイズの制御が可能であることが示された¹。

7.5 展望

従来の近接場光学顕微鏡に直接かかわる研究から、デバイスを意識したナノ粒子・ナノ構造の作製とその動作のデモンストレーションをめざした研究が多くみられた1年であった。今後デバイスを具体的に設計するにあたり、これを可能とするだけの信頼度の高い計算法の確立が求められるが、このためには従来用いられていた物性値や理論等の適用範囲をより明確にする必要があると思われる。そして、これまでの進展をさらに後押しするためにも、フォトニックシステムや材料からデバイスへの要求を明らかにし、ナノフォトニクスでなくては実現しない新しいデバイスの出現およびシステム構築が期待される。

8. 光応用計測

大阪大 安井武史

8.1 概要

最近、光応用計測においても、フェムト秒（fs； 10^{-15} 秒）パルス光の利用が多くみられるようになってきた。fsパルス光は、超短パルス幅、高ピークパワー、広帯域スペクトルなど光として極限的な特徴を有しており、超高速現象の分光学的手段としてだけでなく、光応用計測においても魅力的である。一昔前は高嶺の花だったfsパルスレーザーも汎用化が進み、この間、サブ10 fsパルス幅・広帯域スペクトル・スーパーコンティニュウム発生・広帯域波長可変・GHz繰り返し・繰り返し周波数制御・超小型といった具合に市販fsレーザーのバリエーションも増え、特定性能に特化したfsレーザーも市販品として利用可能になっている。また研究レベルでは、電池駆動可能な超小型・高効率fsレーザーも報告されている。一方、近年のfsレーザー制御技術に関する著しい進歩には目をみはるものがある。その結果、fsレーザーは、極限性だけでなく、安定性という点でも従来の周波数安定化CWレーザーと遜色がなくなってきたおり、極限性と高精度性の両立が可能な光応用計測の土壤が整いつつある。また、fsパルス光のフーリエ領域特性を利用した高精度光周波数コムや非線形光学を介した多光子顕微分光・テラヘルツ計測などの新しい研究分野が創出され、光応用計測の裾野が拡大している。

8.2 フェムト秒計測

時間領域計測では、究極の光パルスであるモノサイクル光の実現が現実味を帯びてくるなか、fsパルス光の包絡

波成分と搬送波成分の位相関係、すなわちキャリヤー・エンベロープ位相の重要性が光計測においても注目されている。パルス整形技術を、化学反応・半導体量子状態・非線形光学現象の選択的制御や非熱加工といった用途に導入する試みが目についた。例えば、fs レーザー光の波形整形による光イオン化反応の制御² や GFP² 光子蛍光の増強と褪色化軽減² が報告された。また、レーザーパルスの強度・位相のみでなく、偏光制御の試みも行われている。例えば、時間的偏光制御を利用した多光子イオン化の制御¹ や、ビーム断面内の偏光分布制御による高強度縦電場 fs パルス光の発生が報告された²。

一方、時間領域とフーリエ変換の関係にある周波数領域計測では、fs モード同期レーザーから出力される多数の等間隔に並んだ縦モード光を周波数領域における光の物差しとみたてた、いわゆる fs 光周波数コムに関する研究が、活発に行われている。fs 光周波数コムによって値付けされた光周波数シンセサイザーを実現する手段として、CW 光パラメトリック発振器からの高出力シングルモード光を安定化 fs 光周波数コムにオフセットロック制御する手法が報告された¹⁸。多色モード同期ファイバーレーザーと非線形光ファイバーの利用により、可視から通信波長帯までの大部分をカバーする広帯域光コムが実現された^{2,18}。距離計測関連では、fs 光周波数コムを多数の変調光波の集合とみなし、その位相測定から距離を求める fs コム距離計において、コム切り出し法の改善により、無補正で世界最高レベルの長距離測距分解能が実現された^{1,2}。

8.3 多光子・顕微計測

第二高調波発生光 (SHG 光) と二光子蛍光の時間応答の違いにより両者の分離が可能な、ピコ秒時間ゲート付き多光子顕微鏡が報告された²。コヒーレント反ストークスラマン散乱 (CARS) 顕微鏡において、電子共鳴による高感度化¹ および金属ナノ粒子による局所増強¹ が報告された。レーザー走査型表面プラズモン共鳴顕微鏡において、プラズモン励起角の試料屈折率依存性を利用することにより、分子配向の実時間観測が報告された²。アダプティブミラーによるデフォーカス制御を利用した、軸方向走査の不要な共焦点顕微鏡が報告された¹⁹。生体関連では、カルシウムイオンプローブの蛍光寿命特性を利用した、カルシウムイオン濃度定量法が提案された²⁰。生体 SHG 光を用いたコラーゲン線維配向分布測定が報告され^{2,3}、皮膚診断応用への可能性が示された²¹。超短パルス光を用いた細胞刺激^{1,3}、細胞破壊³、爪光記録¹ に関する報告が行われ、超短パルス光による生体ナノ加工や生体機能制御に関する今後の展開が期待される。

8.4 環境計測

ライダー関連では、二周波交互発振の光パラメトリック発生器を光源とした長光路吸収レーザーが開発され、温室効果ガスであるメタン分子の濃度計測に応用された¹。ファイバープラググレーティングを用いた簡素・低損失インコヒーレントドップラーライダーが提案され、風観測の可能性について報告された²。レーザー光源を用いないものとして、航空障害灯に使われるキセノンランプの高輝度性と広波長域性を利用した、多種大気微量成分の同時計測法が提案された¹。ライダー関連以外では、生物からの自発的極微弱発光であるバイオフォトンを用いた植物モニタリングが報告された^{1,2}。

8.5 光ファイバ計測

左右両回り光間の発信周波数差制御が可能な半導体光増幅器ファイバーリングレーザーが開発され、周波数検出型圧力センサーへの適用が報告された¹。光ファイバーランプと半導体レーザーを用いることにより、シンプル・光学調整不要・安定なリングダウン分光法が提案された^{1,2}。スマートストラクチャー用光ファイバー神経網のひとつとして、低コヒーレント干渉計を利用した 2 モード光ファイバーフラッシュ型振動センサーが提案された¹。

8.6 テラヘルツ計測

反射型テラヘルツ (THz) 分光における位相決定や液体試料測定に関する問題点を解決する手法として、THz 全反射によるエバネセント場を用いた全反射減衰分光法が報告された²。THz 波の回折限界に制限されないレーザー THz 放射顕微鏡が提案され、IC 断線評価に応用された¹。また、THz 領域における生体高分子や薬品類の指紋スペクトルを利用した研究も盛んである。例えば、近赤外光パラメトリック発振器を用いた低周波 CARS 分光法が提案され、従来の THz 分光法では困難とされた水溶液中の生体高分子に応用された^{1,2}。一方、実用的なところでは、波長可変 THz 光源を用いた THz 分光イメージングに主成分分析法を導入した非破壊化学成分分析法が提案され¹、封筒中の禁止薬物検査への応用が報告された^{m-11-20}。これら以外にも、スペースシャトル断熱材²²、DNA²²、ヘモグロビン²²、ビタミン²²、アミノ酸^{1,2,22}、環境ホルモン¹、皮膚²²、植物^{2,22}、塗装膜^{2,22} といった測定対象に対して、THz 波の応用が報告された。

8.7 その他

犯罪捜査において必要な塗抹文字判読に対して、減衰全反射型フーリエ変換赤外分光 (ATR-FTIR) マッピング法が応用され、その有用性が示された¹。自然界における超微細構造によって生じる生体構造色は産業応用という点か

らも興味深いが、アンモナイトやモルフォ蝶の構造色が分光計測などを通して評価された³。

8.8 展望

光応用計測におけるfsレーザーの利用は、極限性、高精度性、多次元性、応用性といった観点からさまざまな選択肢を与えてくれる。幸いにもレーザー光源技術や周辺デバイス技術は着実に進歩しており、今後は光計測サイドのさらなるブレークスルーが期待される。

9. 干渉計測

山形大 佐藤 学

9.1 はじめに

干渉計測は、光波の位相(波長)と振幅を高感度に測定できる技術であり、測長からイメージングまでその応用は幅広い。干渉計測に関する研究発表は今年も活発に行われ、12月上旬の Optics Japan 2003 では、約 30 件の発表があった。ここでは、干渉計測に関する研究の進展状況を概観する。

9.2 干渉計基礎

汎用性のある基礎技術を以下に取り上げる。コモンパス干渉計のひとつに点回折干渉計(PDI)があり、照射系・レンズ・像面においてレンズと像面の間の焦点上にフォトクロミック膜を光軸に垂直に配置する方法が提案された。フォトクロミック膜の光強度に対する非線形性を用いることにより、自動的に焦点にピンホールが形成され光学調整が容易な干渉計の原理実験が報告された^{3,i-25}。

物体に回折格子で発生した±1 次の回折波を照射し、その物体波を回折格子で一致させ CCD で干渉画像を測定する二重回折格子干渉計は、測定範囲が回折格子の周期と波長に比べて長いのが特徴で、ステンレス鋼表面が高精度に測定された^{j-19}。また、被検光学系の前後の共役な位置に回折格子を設けることにより入射光の波面収差の影響をなくす提案がなされた²。 $N \times N$ ($N > 2$) の光カップラー解析をモード結合理論で行いポート間の振幅・位相の関係を明らかにし、 3×3 の光カップラーを用いた実験で確認された^{j-22}。

非線形光学の応用は、光強度による新機能性の展開に有効と考えられ、回折格子や $N \times N$ 光カップラーなどの導入による新規干渉計や性能向上が大いに期待される。

9.3 白色光干渉計・低コヒーレンス干渉計

低コヒーレンス干渉計関連も、基礎から応用まで幅広い報告がなされた。まず、タンデム型低コヒーレンス干渉計の群速度屈折率測定が報告され、試料の厚さが不明でも群速度屈折率が高い精度で測定された^{2,j-21}。また、ファイバ

ーブレーティングの評価では、干渉信号のエンベロープから屈折率変化の空間分布が測定された^{2,3}。フェムト秒パルス干渉法を用いてグルコースの濃度測定が検討され²、低コヒーレンス動的光散乱法を用いた実験では、変調干渉信号のパワースペクトルから時間相関、粒径分布関数が得られ、粒子の分布関数が測定された³。また、ディジタルホログラフィー技術を用いて、ホログラムから散乱体の背後にあるテストパターンが再生された²。

光学素子や生体試料などの特性測定からディジタルホログラフィー技術との融合まで多方面にわたる進展がみられ、今後も活発に進められると予想される。

今年も光コヒーレンストモグラフィー(OCT)に関しては多くの発表がなされ、特集も企画された^{x-10}。高空間分解能化では、ハロゲンランプを用いて $1 \mu\text{m}$ の軸方向分解能で豚皮膚の断層画像が測定された^{1,3,b-5}。光源については、スーパー・コンティニュウム光²、ファイバーラマンレーザー¹、変調電流型 LD^{2,3}、LED の合成光源¹などの発表があり、コーナーキューブを回転させる光軸高速走査型 OCT も報告された^{1,i-19}。

偏光感受型スペクトル干渉 OCT では、ガルバノミラー等を用いたスペクトル干渉 OCT で 10 frames/s の速度で人の親指の画像が測定され、非対称分散を補償するスペクトルモアレ法も報告された^{1,2,3,b-5}。角分散イメージング型 OCT では、カバーガラスなどの断層画像が測定され^{1,3}、並列ヘテロダイイン検出法を用いた OCT では、100 Hz で生体試料の鉛直断面画像が測定され^{1,3,j-10}、さらに傾斜ミラー表面からの位相マップも測定された^{1,2,3,b-5}。GRIN レンズ型 OCT では、深さ $140 \mu\text{m}$ にわたってタマネギの鉛直断層画像が測定された^{1,3,b-5}。機能的 OCT では、ネコに視覚刺激を加えて反応する視覚野の深さ方向に違いがあることが確認された^{2,c-6}。内視鏡融合型 OCT では、気管支用内視鏡画像と OCT 画像との対応や感度などの基礎特性が示された³。穿刺針の位置検出に OCT を用いた報告もなされた³。

今後 OCT は、一般産業分野への応用と臨床分野での細分化が目立つと思われる。

9.4 波長走査干渉計・波長変調干渉計

波長・位相を制御する干渉計についても精力的に研究が進められた。測長では、DBR-LD (distributed Bragg reflection-laser diode) に 64 kHz と 1 kHz の二重正弦波位相変調を加えて、1 桁高い測定精度が実現され^{1,i-1}、また液晶 FP (Fabry-Perot) 型可変フィルターを二重正弦波位相変調干渉計に用いて高分解能化と測定範囲の拡大が報告された¹。参照干渉計からの信号で帰還をかけて周波数チャ-

ズを安定化させて精度を向上させる方法や^{1,b-4}、原子吸収線のマーカーを用いた精度向上も報告された³。LDと外部ミラー・サンプルによる二重外部共振器で10 nmオーダーの変位計測がなされた³、またLDの変調電流振幅を制御する位相シフトロック干渉計が報告され、精度0.007で測定がなされた¹⁻¹。

形状測定では、PI方式帰還回路を用いたヘテロダイン位相シフト干渉計により安定性が向上し、振動30 Hzで再現性6.8 nmの報告があり¹⁻¹⁰、またLDの周波数変調による位相シフト法と高速カメラを用いて、空気の揺らぎが高時間分解能で測定された³。LDのFM変調特性を用いて干渉縞の安定化を行い、 $\lambda/100$ の精度で径5 mmの表面形状が測定された¹。光学素子の評価では、SHG青紫レーザーを光源に用いた位相シフト干渉計でDVD用非球面集光レンズの収差計測が報告された^{2,3}。

生体の画像測定では、1.5 μm 帯SSG(super structure grating)-DBRレーザーを用いたOFDR(optical frequency-domain reflectometry)-OCTにおいて分解能19 μm などの基本特性が報告され²、ダイナミックレンジの検討もなされた³。また、新規の光断層画像測定法として多波長逆伝播法が提案され、原理確認実験がなされた¹。

実用化研究も多く、今後、高速広帯域波長走査光源の研究開発が生かされる分野である。

9.5 干渉応用計測

多岐にわたる応用計測が報告された。生体や物体表面で生じるスペックルを用いて、ナノオーダーの精度で成長や変形を測定する研究が活発である^{1,2,3,b-5}。スペックル干渉信号から位相分布を求め、精度 $\lambda/20$ で材料の熱変形が測定され³、白色光照射で発生した散乱物体のスペックルパターンから求められる擬似位相情報から変位分布も測定された³。またレーザー入射角の異なる複数のスペックル画像から表面粗さが求められた¹。スペクトル干渉顕微鏡¹⁻⁴や音響光学フィルターとミラー干渉顕微鏡を組み合わせた計測システム¹⁻⁷では100 μm のギャップが測定された。投影パターンの空間周波数を走査する形状計測法が提案され、高さ60 mmの物体が計測された³。2つの波長を用いた90°位相シフト法では、ノイズ低減が検討され^{2,3}、また擬似的な2ステップ位相シフト法でのSN比や最適条件の検討もなされた^{b-10}。

受光素子の二光子吸収を利用した形状計測では、直交偏光方式^{2,j-6}や二波長方式を利用した方法³の原理確認や精度検討がなされた。また、イメージセンサーを用いた超短光パルスの測定では、時間分解能0.43 fsも報告された³。

ファイバーセンサーでは、時間領域リフレクトメトリー

(OTDR)とマッハ・ツェンダー干渉計を組み合わせてワイドレンジな温度測定を行った¹⁻¹⁹。光ファイバージャイロでは、セロダイイン波形振幅の自動調整が雑音の低減に有効であることが確認された³。また、光ジャイロとGPSに関して解説もなされた^{a-11}。アレイ導波路回折格子とASE(amplified spontaneous emission)光源を用いた小型分光計測システムでは、近赤外域で各波長における透過率のグルコース濃度依存性が報告された³。また、白色光源を用いて指からの透過光を分光する複屈折干渉計を用いたFTIR(Fourier transform infrared spectrophotometer)システムが報告された³。薄膜光センサーを用いたレーザー干渉計では、感度と信号波形の改善がなされ²、また複数のステージの位置・姿勢を計測する多方向干渉計システムの自己校正法も提案された³。

9.6 まとめ

以上、干渉計測を大分類に沿って概観した。多くの方々から新しい提案と実用化に向けた研究成果が精力的に報告された。今後、ユニークな提案とさまざまな技術融合が予想されるが、特に新規光源、非線形光学およびマイクロマシンの研究は、干渉計測技術の進展に大きな影響を与えると思われる。この分野のさらなる発展を期待したい。

10. 光情報処理

武藏工大 吉川宣一

10.1 概 要

光情報処理分野では、エレクトロニクス技術やバイオ技術などさまざまな研究分野の技術を光技術と融合することにより高機能なフォトニックシステムをめざす動きが盛んになっている。以下、2003年度の進展について概観する。

10.2 三次元情報処理

三次元情報を取り扱う光学の研究分野は、干渉計測などの三次元形状計測、ホログラフィーや多重画像方式などの立体ディスプレイ、光相関処理による物体認識、立体視に関する視覚研究など多岐にわたる。これまで、それぞれの研究が個別に行われており、相互の結びつきはあまりみられなかった。近年、三次元関連の研究を有機的に結合して三次元情報処理を行う研究が広がりをみせている。

立体ディスプレイ関係では、高密度指向性画像方式、フルカラー発光ダイオードパネルを用いたパララックスパリア方式、光線再生方式、ホログラフィー方式、単一赤外光ビーム励起による蛍光方式などさまざまな方式の研究が報告された^{1,2,3,a-7}。多視点画像生成のための三次元カメラや三次元表示に対する人間の調節応答の測定など、三次元情報の取得から観察者までを考慮した研究が報告され

た^{3,23}。また、産業界からも三次元入出力機器や三次元コンテンツの開発促進や普及を目的とした3Dコンソーシアムの設立があり、関連業界の活動も活発になっている。

三次元認識関係では、近年の撮像デバイスとコンピューターの高速化に伴い、三角測量を基本とした三次元画像計測に加えて光計測により得られた高精度な三次元情報の利用が提案されている。デジタルホログラフィーを用いた三次元物体認識³、フーリエ変換形状計測法に基づいた顔の三次元形状を用いた個人認識³、インテグラルイメージングによる三次元物体認識³、カラー画像と距離画像を同時に撮像する三次元カメラ²³が報告された。

三次元情報処理においては、そのデータ量の多さから、記録および伝送に関する研究も重要であり、デジタルホログラムによる多重記録、三次元情報記述方式、情報圧縮などの検討も行われた^{3,23,a-7}。

10.3 VLSI フォトニクス

光波を用いた計測や情報処理では、高機能な波面制御デバイスと受光デバイスが重要であり、空間光変調器、イメージセンサー、光MEMS (micro electro mechanical system) などの光エレクトロニクスデバイス、半導体微細加工技術を応用した微細回折光学素子に関する研究が盛んである。最近ではLSIファンドリーサービスを利用したSi-LSIの微細化集積化技術に基づいた光情報処理デバイスの設計・試作、微細回折光学素子の作製が光分野の研究者により行われるようになり、多彩な光情報処理システムの構築が行われはじめている。

センシング関係では、光無線LAN用高速ビジョンチップの開発^{1,2,3}とMEMSミラーを用いた光無線コネクション実験⁴、パルス周波数変調方式人工視覚イメージセンサー^{a-7}、変調光検波方式イメージセンサーによる物体認識^{1,a-7}、1kHz高速可変焦点レンズの収差補正³、複眼式薄型イメージセンサーの機能拡張²⁴、三相時間相關イメージセンサー³、レーザーレーダーを利用した位置情報に基づいた光無線システム^{2,3}などが報告された。

空間光変調器関係では、光アドレス型液晶空間光変調器、光MEMS、高速変調が可能な有機非線形材料を用いた空間光変調器などが盛んに研究されている。プロジェクター用として高精細反射型液晶デバイスLCOS (liquid crystal on silicon) が開発されており、光情報処理への応用が期待される。空間光変調器の応用として1000 face/sの高速演算を実現する光並列顔認識システム^{1,2,3}や空間光変調器とフィードバック光学系で構成される光パターン制御システム^{1,2,3}などが報告された。また誤差情報を用いた最適化アルゴリズムの改良による実時間での計算機ホログ

ラム合成が報告されており^{2,3}、計算機プログラムと空間光変調器を組み合わせた光領域における適応信号処理が期待される。

10.4 バイオ技術と光情報処理

バイオの分野においてDNAチップ解析における蛍光検出、光ピンセットによる生体材料の移動や固定など光のもつ多彩な機能が利用されている。このような背景もあり、生体材料を情報媒体として利用する情報処理において、生体材料と外部機器とのインターフェースや生体材料の制御法として光技術を用いることはごく自然な成り行きであろう。光制御によるバイオセンサー^{c-6}などバイオ系からのアプローチが盛んになっている。一方、光分野からもVCSELアレイによる複数の細胞などの同時移動技術²³やレーザー照射による局所領域でのDNA分子反応制御法の提案³などが報告された。

DNAチップ解析では大量の情報から必要な情報を抽出することが重要であり、効率的なパターン識別技術が必要とされている。これに関して、空間符号化モアレ技術を応用したDNA比較法¹とアミノ酸配列解析への応用¹、DNAチップ解析における画像処理³、光アレイロジックによる遺伝子ネットワーク解析^{3,b-2}が報告された。

光技術とバイオ技術の融合により多機能なバイオセンサーや莫大な情報を並列的に短時間で処理するような情報処理システムが期待される。そのためには高密度集積化を可能とするナノパターン形成技術や生体材料の取り扱いなど光分野以外の技術の導入とともに、光技術応用におけるいっそうの創意工夫が必要であろう。

10.5 時空間情報処理

超短光パルスを光分散素子で空間並列的に展開し時間および空間並列信号制御により時空間情報処理を行う研究が、フォトニックネットワークへの応用を中心に行われている^{a-10}。光相関処理を用いた超高速光ラベル認識処理による光パケットスイッチングシステムの開発^{3,a-8}、SHG結晶を用いた超高速時間-二次元空間変換システム^{3,b-3}、アレイ導波路回折格子のフーリエ変換機能を利用したパルス整形技術³、時空間変換を応用した超短光パルスの分散補償技術³などが報告された。

時空間情報処理は、エレクトロニクス技術では追従できないような超高速信号処理を光領域で空間並列的に行うという点でフォトニックネットワークに関する研究が中心であるが、時空間変換を利用して多次元情報を検出する光計測への応用にも広がっており、今後の発展が期待される。

10.6 展望

2003年を振り返ってみると、その大部分が立体ディス

プレイ、物体認識などの高次情報処理、光通信、光計測などと密接に関連した応用指向の研究であった。一方、量子光論理演算のような基礎的な研究も着実に進展している。光情報処理は、たんなるフォトニクス技術を用いた情報処理にとどまらず、情報、フォトニクス、エレクトロニクス、バイオなどの研究分野を情報媒体としての光を用いるという点で融合した概念と考えることができる。ただし、研究分野が広範囲にわたるため研究対象が曖昧になることが多い。今後の光情報処理は、さまざまな分野において基礎と応用を密接に関連させながら発展していくと思われる。

11. 画像処理

東工大 村上百合

11.1 概 要

光学に基づく画像処理分野において近年活発に研究が行われているテーマとして、マルチバンド画像関連、3D表示システム、バイオメトリックス認証、計算機ホログラム、光暗号化などが挙げられる。マルチバンド画像を用いた正確な色再現に関する研究は、電子商取引や遠隔医療等をターゲットとして活発に研究が進められてきたが、今年度はさらに、色だけでなく質感や光沢の再現に関する多くの研究が報告された。また、特殊な眼鏡等を必要としない自然な3D表示を可能とする表示システムについても、昨年に引き続き報告があり、画像入手法等での改善がみられた。また、顔や指紋画像の相關演算に基づくバイオメトリックス認証に関する研究も複数報告された。

11.2 マルチバンド入力・多原色表示

画像再現における色再現性向上を目的として、マルチバンドカメラで画像撮影を行う方法や、多原色ディスプレイで表示を行う研究の流れがある。今年度は、2分岐光学系と偏光フィルターを用い、さらに照明変調を組み合わせることで、マルチバンド偏光画像を実時間で撮影するシステムが提案された¹。また、新しい撮影システムとして、複眼光学系を用いた薄型画像入力装置TOMBOにより、7バンド画像入力装置を実現する方法についての検討が報告された¹。一方、データ容量の大きなマルチバンド画像の効率的な伝送・保存に不可欠である圧縮手法について、再現時の色再現性を考慮した圧縮手法をJPEG 2000に基づき実装した結果が報告された³。

多原色表示では、色調変化の滑らかな再現について、実験的に検討した結果が報告された¹。さらに、人間の視覚特性（等色関数）の個人差が色再現に与える影響を多原色表示により抑制しようとする研究の一環として、等色関数

の個人差の計測¹や、加齢による等色関数の変化の影響についての報告²があった。

11.3 質感・光沢感の解析と再現

色の正確な再現については、マルチバンド画像の利用などにより実現されつつあるが、いまだ「質感」再現は十分でないとの認識がある。質感は、対象のテクスチャーや光沢の様子に大きく依存すると考えられており、これらの計測・解析・合成・再現等の研究が多く発表された。

高輝度の光沢部分を画像として取得することを目的として、バンド間の相関を利用して、高ダイナミックレンジ画像の取得を行う方法が報告された¹。また、視線・光源方向によって変化するテクスチャーの様子を表す双方向性テクスチャー関数を用いて、テクスチャー特徴量と主観評価の対応を解析し、任意の視覚的印象に対応したテクスチャー画像の合成が試みられた¹。さらに、肌の色素成分画像のテクスチャーを画像ピラミッド法により解析することで、個人の肌の色素分布に基づいて異なるテクスチャーの肌画像を合成する手法が提案された¹。金属の反射特性を利用し、被写体を回転させて撮影したマルチバンド画像から、任意の視線・光源方向における光沢を正確に再現する手法も示された³。

11.4 3Dディスプレイ

眼の調節機能に矛盾なく、特殊な眼鏡等を必要としない自然な3Dディスプレイやそのための画像入力・処理方法の研究報告が行われた。指向性画像を高密度に配することで3D表示を実現するシステムでは、今年度は複数のカメラにより画像入力を方法についての改善³やカメラ数と画質の関係の解析¹などの面で進展がみられた。また、光線再生法を用いた全方位型の3Dディスプレイを、ピンホールアレイを用いて実現するシステム^{1,2}が試作された。

11.5 バイオメトリックス認証

顔に近赤外の格子パターンを照射して画像を撮影し、そのフーリエ変換パターンに含まれる顔の三次元形状情報をより認識を行う格子パターン相關法³が提案された。また、光相關演算に基づく顔画像認識システムでは、2000演算/秒の高速化を実現した¹。また、指紋画像の暗号化^{1,2}や、指紋画像を鍵としてICカード所有者情報を光暗号化する手法¹なども報告された。

11.6 展 望

画像再現においては、色だけでなく質感再現に対する注目が高まってきた。質感は、人間の主観的な評価にかかわり、物理量との対応関係が示されているわけではない。それだけに、その計測・再現・評価には新しい手法が求められている。また、3DCG技術や画像入力・処理技術の進展

に伴い、実用レベルの自然な 3D ディスプレイへの期待が、今後ますます高まると考えられる。

12. オプトエレクトロニクス・光デバイス

東工大 宮本智之

本節では、光通信用デバイスを中心に取り上げる。インターネット等による通信量の増加は今後も引き続くと考えられ、波長多重伝送 (WDM) やアクセス系なども含めたネットワークの拡大に対応する研究開発が進展している。幹線系などのネットワークの高度化への対応と、アクセス系など低コスト化や使用環境拡大への対応、また、デバイス自身の性能向上とデバイス集積による高機能化といった広範囲の検討がなされている。これらの光デバイスについて 1 年間の動きを概観する。

12.1 光ファイバー

光ファイバーについては、ホーリーファイバー、高非線形ファイバー、ファイバープラググレーティング、ポリマーファイバーなどの研究が活発である。

ホーリーファイバーは高機能性から注目され、損失は 0.28 dB/km まで低減された²⁷。すぐれた曲げ損失特性を生かすための細線化²⁵ や、単一モードファイバー (SMF) との接続損失低減²⁵ などが検討された。スーパー・コンティニュウム光応用では、分散フラット偏波保持型で帯域 40 nm 以上の発生が報告された²⁵。従来形状ファイバーでは、高非線形分散フラットファイバー²⁵ や、SMF とノンゼロ分散シフトファイバーの間の分散による、累積分散の低減が示された²⁵。ファイバーグレーティングでは、分散補償用チャーブ型の多チャネル化法²⁵ や、超短パルス用に広帯域の群遅延曲線上のリップル低減¹ や温度勾配による二次分散可変が検討された²⁶。ポリマー光ファイバー (POF) では、高帯域化のため W 型屈折率構造や全フッ素化が検討された¹。

12.2 平面光回路

平面光回路では、温度無依存化や低コストなポリマー応用が進展した。他項でも関連デバイスを報告している。アレイ導波路格子 (AWG) 型合分波器で、 TiO_2-SiO_2 膜による石英系の 10 分の 1 の温度依存性² や、AWG 出力導波路をスラブ部で切り離したアサーマル構造²⁶ が報告された。ポリマー利用では、金型による導波路の 1.55/1.3 μm 合分波器挿入損失 1.1 dB²⁵ や、導波路鋸型に紫外線硬化樹脂を充填して複製する LAMM (læge-area advanced micro molding) 法²⁵ が報告された。光硬化性樹脂液中の光による自己形成導波路技術も進展した^{25,27}。温度無依存用に提案された中空導波路では、伝搬損失 1 dB/

cm^{2,25}、偏波依存性低減^{2,28}、MEMS 利用の可変群遅延素子^{1,2}、光スイッチ²、MMI (multi mode interference) カップラー²⁷、反射型凹面回折格子を導入した合分波器²⁵ が検討された。

12.3 光フィルター

光フィルターはさまざまな構成により、波長可変、低コスト化の検討が進められた。

石英系のラティスフィルター²⁵ や、波長可変幅 29 nm の半導体ラダーフィルター² などの構成が報告された。リングフィルターでは、石英系において熱光学効果による波長可変、紫外線照射波長トリミング、直列結合による箱型フィルター特性、導波路との立体交差による散乱損失低減などが報告された^{1,2,25,27}。半導体では、光論理ゲート応用²⁸ や MMI カップラーと組み合わせた高速波長可変フィルター¹ が検討された。100 チャネル対応の波長セレクターとして、半導体 AWG、半導体光增幅器 (SOA) アレイ、MMI カップラーを集積した構成が報告された^{25,27}。音響光学フィルターによる 4 チャネル波長可変フィルターなども進展している²⁵。垂直共振器型 MEMS 光フィルターでは、微小化により可変幅 1.3 nm で動作速度 1 μs の報告¹ や、2 重 MEMS 構造による箱型フィルター特性と低電圧動作の可能性が示された^{1,2,27}。

12.4 光検出素子

光検出器は、導波路型による高帯域化や単体での広波長帯域対応化が進められた。

pin-PD のノンドープ層と p ドープ層の積層光吸収構造による効率と帯域向上により、0.98 A/W-50 GHz の特性が実現された²。また、40 Gbps 用 1.3/1.55 μm 帯兼用では、導波路型 1.55 μm 帯 PD の非対称導波路化などにより、従来比 1.5 倍の 1.3 μm 帯効率などが実現された^{1,2,25,27}。低コスト導波路型 PD のため、ウェハー上端面 AR 形成による一括基板上製作技術が報告された²⁶。光検出器の応用として、単一走行キャリヤー PD (UTC-PD) を広帯域ミリ波発生に用い、120 GHz 帯で出力 17 mW と従来 PD より 2 術高い値が実現された²。

12.5 光変調器

光変調器は、半導体電界吸収型 (EA) 変調器の広帯域化^y や、サブバンド間遷移による超高速化が検討された。

EA 変調器の量子井戸厚膜化で、0.5 V の低バイアスで 3 dB 帯域幅 50 GHz が実現された²。また、InGaAlAs による消光比と光出力の特性向上の可能性が示された¹。また、EA 変調器の Zn 拡散の消光比への影響が検討され¹、Ru 添加 InP による Zn 拡散抑制による高帯域化が示された²。UTC-PD と EA 変調器の集積では、高速高消光比化

により 100 Gbps 動作が実現され、500 Gbps 相当の動作可能性が示された²⁵。半導体によるマッハ・ツェンダー変調器では、n-i-n 構造により 2.2 V の低電圧 40 Gbps 動作が報告された²⁷。このほか、大きな電気光学定数をもつ KTN 結晶を用いた 1.3 V の低バイアス化²⁷ や、チャーブ パラメーター 0.07 と小さな LiNbO₃ 変調器²⁷ が報告された。

12.6 半導体光増幅器

半導体光増幅器 (SOA) は、波長変換、光スイッチなどへの応用からも重要なデバイスである。SOA 単体としては、動作速度改善の検討や新材料の検討が進められた。

SOA の応答速度改善のため、アシスト光伝搬方向、波長、強度などの影響が詳細に検討された^{1,2}。また、SOA 材料として、広波長帯域の多チャネル信号一括増幅が期待される量子ドットにより、20 dBm の 3 dB 利得飽和特性が実現された²⁵。GaAs 基板上の 1.3 μm 帯レーザー実現に向け研究が行われている GaInNAs では、SOA において利得特性、温度特性の向上が示された¹。

12.7 光スイッチ

対称マッハ・ツェンダー (SMZ) 全光スイッチの SOA 長尺化により、42 Gbps パルス再生・波長変換特性が報告された²⁵。また、位相変調器を集積したマッハ・ツェンダー干渉計 (MZI) 型全光スイッチにより消光比 20 dB が示された²⁵。超高速光スイッチ応用に期待されるサブバンド間遷移 (ISBT) では、Sb 系結合量子井戸 ISBT 光スイッチにおいて、10 pJ で消光比 10 dB の低動作エネルギー^{1,2} や、サブバンド間励起バンド間吸収変調で 600 fs の超高速応答を実現した²。1.55 μm 帯 AlN/GaN ISBT の緩和時間 170 fs の観測^{1,19} や、有機金属気相成長法 (MOCVD) による AlN/GaN 1.5 μm 帯 ISBT も報告された^{2,28}。このほか、MEMS を用いたアレイ光スイッチについては、これまでに引き続きさまざまな構造が提案された^{26,27}。

12.8 波長変換素子、光信号処理素子

電界吸収型変調器 (EAM) 中で複数の光信号間に誘起される強度変調 (XAM) および相互位相変調 (XPM) を用いた全光波長変換において、偏光分離型の遅延干渉計を用い、100 Gbit/s での全光波長変換が報告された^{25,26,28}。また、変調によるサイドバンド発生を利用した波長変換技術で、分波/合波 AWG と SOA を用い、切替時間 5 ns 以下の動作が報告された²⁵。垂直入射型光信号処理素子として、面型光スイッチを用いた全光シリアル-パラレル変換で、差動スピン励起により消光比 30 dB 以上の超高速ゲート動作、スピンドータ列のパターン比較動作が示された²。また、外部光注入による面発光レーザーの横モード

スイッチングを利用した 2 R 素子^{1,28} や、過飽和吸収体を反射鏡で挟んだ垂直共振器型波長可変光 2R 素子が検討された¹。

12.9 展望

高速ネットワークの進展に伴い、全光信号処理などを実現するデバイス集積化が今後いっそう重要になってくると考えられる。また、構成素子の高速化、高機能化などの性能向上とともに、小型化や耐環境などの特性も高機能化やアクセス網への展開に必要である。従来型デバイスの性能向上とともに、フォトニック結晶などの技術を取り入れた進展が重要になってくると考えられる。

13. 光通信

KDDI 枝川 登

光通信関連市場の低迷もここ一年でようやく底を打った感が出てきたが、受注量の増大を価格低下が相殺し、全体としてはいまだに厳しい状況にあるといえる。しかしながら、データコム系では 40 Gbit/s・低価格 10 Gbit/s 光送受信機の開発が、光アクセス系では Gigabit Ethernet 機器の開発が着実に進んでいる。本稿では、光通信技術に関する最近の動向概略を俯瞰する。

13.1 メトロ・基幹系技術

アクセス系のプロードバンド化によってメトロ・基幹系の回線容量増大圧力が高まり、メトロ系は 10 Gbit/s 化が促進されている。基幹伝送系技術は、10 Gbit/s ベース波長多重 (WDM) によるテラビット級システムといった、当面の通信需要に十分対応できるシステム開発が 2~3 年前に完了しているため、次世代システムと目される 40 Gbit/s ベース WDM システムやマルチテラビットシステムの実用化が、すでにめどがたっているにもかかわらず、既存システム価格の大幅な下落の影響もあり、著しく鈍化している。

研究分野においては、160 Gbit/s ベース WDM による 1000~2000 km 伝送実験（実験では、誤り訂正符号の利用によるビットレートの増加を想定して 170 Gbit/s ベース WDM となっている。波長数は 6~7 程度）の報告があり、ビットレートのさらなる高速化に向けた挑戦が続いている。一方、各信号波長の波長間隔を狭め帶域利用効率（もしくは周波数利用効率）が向上すれば実績あるシンプルな C バンド増幅中継系を利用したマルチテラビット化が可能となるため、超高密度 WDM 伝送に関する検討も進んでいる。最近、特に検討が進んでいる専有帯域の狭い光信号変調方式に、Duobinary 信号や Differential Phase-Shift Keying (DPSK) 信号などを光フィルターで

帯域制限したものや、Differential Quaternary/Quadrature/Quadri PSK (DQPSK) 信号といった多値変調信号などがある。特に、DPSK 信号は既存の商用光伝送システムで用いられている強度変調信号よりも受信感度が 3 dB 程度高いので、少ない光信号パワーで中継増幅器から発生する光雑音に対して所望の信号対雑音比を確保でき、このため、非線形光学効果による信号特性劣化が著しくなる高ビットレート/高密度長距離 WDM 伝送に適している。この特性を利用して、64 多重 40 Gbit/s ベース高密度 WDM 信号（総容量 2.56 Tbit/s）を既存の C バンド中継器を使って 8200 km 伝送することに成功した実験例が最近報告されている（本実験の周波数利用効率は 80%。現在多用されている商用システムの一般的な周波数利用効率は約 10% 程度）。

光ネットワーク関連では、光クロスコネクト (optical cross-connect: OXC もしくは photonic cross-connect: PXC) と generalized multiprotocol label switching (GMPLS) を使った高機能な光ネットワーキング技術の研究が実用化に向けて着実に進んでいる。

13.2 光アクセス系技術

この 1 年、Fiber-To-The-Home (FTTH) の普及が著しく進んだ。FTTH の方式には、ユーザー宅と通信設備局を専用の光ファイバーで接続する Media Converter (MC) 方式や分歧光ファイバーを用いて複数のユーザーを集線する Passive Optical Network (PON) 方式などがあり、最大 100 Mbit/s 程度のサービスが利用可能となっている。ユーザー宅が集合住宅の場合は、集合住宅までを Fast Ethernet/Gigabit Ethernet MC で接続し、集合住宅内では、既設の電話回線を Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line (VDSL) 機器を使って各ユーザーまでサービスを提供する場合と、既設（もしくは新設）LAN ケーブルと Ethernet 機器を使う場合がある。VDSL 機器の伝送速度はこの一年で急速に高速化し、下り回線速度は最大で 70 Mbit/s 程度が商用化されており、現在 100 Mbit/s を超える技術が開発中である。このような広帯域アクセス線路を利用して、2003 年に、IP ベースの高品位な画像配信サービスや、IP 用光信号とは別の光ファイバーを使った多チャネル画像配信サービスが開始された。現在、次世代 PON システムと目される、IEEE 802.3ah (2004 年の夏ごろに標準化予定) 準拠 Gigabit Ethernet PON (GPON, または、EPON) 機器の開発が進行中で、2004 年中には商用化される模様である。また、Gigabit Ethernet MC の低価格化も急速に進行中で、2004 年には普及がいちだんと進むことと思われる。

14. 光記録

東芝 小堀博道

14.1 概要

2003 年は CD から DVD への移行が急速に進み、特に記録型 DVD はパソコン用途のみならず VTR に替わる民生用ビデオレコーダー分野でも立ち上がってきただけでなく、薄型テレビ・ディジタルカメラと合わせて“ディジタル家電の新三種の神器”とよばれるまでに至り、今後もさらに市場が拡大していくと期待されている。本稿では、国内開催の学会と研究会、ならびに光記録関係の主要な国際学会である ODS (Optical Data Storage) と ISOM (International Symposium on Optical Memory) での発表内容から、光記録技術全般にわたる 1 年間の進展について述べる。

14.2 高速記録に対応した DVD 技術

パソコン用途ではもちろんのこと、HDD 内蔵 DVD レコーダーや VTR 一体型 DVD レコーダーにおいても録画データを記録型 DVD に高速ダビングしたいとの要望から、高速記録への要求は非常に強い。書き換え型媒体では 12 倍速記録 (133 Mbps)，追記型媒体では 16 倍速記録 (177 Mbps) に関する報告があり⁷，注目を集めた。またこれに合わせて、パルス光出力 200 mW 超級の赤色 LD や²，光ヘッドの小型化や簡素化に繋がる高出力の 2 波長 (赤外/赤色) LD などでも大きな進展があった²。

14.3 青紫色 LD を採用した次世代光ディスク技術

現在、光源に波長 405 nm の青紫色 LD を用いる次世代光ディスクシステムとして、開口数 0.85 の対物レンズとカバー厚 0.1 mm のディスクを用いた BD(Blu-ray Disc)⁴ と、開口数 0.65 の対物レンズと DVD 同じ基板厚 0.6 mm のディスクを用いた HD DVD (high definition DVD)²⁹ の 2 方式が提案されている。

BD システムでは、書き換え型光ディスクを用いた民生用ビデオレコーダーが 4 月に発売され、学会では多層媒体による大容量化、高速記録媒体などに関して多くの発表があった。再生専用型では photopolymer シートを用いた 4 層 100 GB ディスク^{a-9,7}，追記型では無機材料を用いた 4 層 100 GB ディスク²⁹，書き換え型では相変化材料を用いた 2 倍速 (72 Mbps) 対応の 2 層 50 GB ディスク⁷ の実現性が示された。また高速記録媒体に関しては、追記型と書き換え型で 6 倍速 (216 Mbps) の可能性が示された^{7,29}。

一方、HD DVD システムは現行 DVD/CD との互換性・継続性を重視しており、11 月の DVD フォーラム幹事会において再生専用型光ディスク（単層 15 GB と 2 層

30 GB) 規格が承認され、今後書き換え型と追記型光ディスクについても順次規格化が進むものと思われる。学会においても、単層 20 GB と 2 層 36 GB の書き換え型光ディスクの各種マージンが示される^{7,29}とともに、1 つの対物レンズで HD DVD/DVD/CD の 3 世代にわたる互換を実現する光ヘッド技術も紹介された⁷。

デバイス関係では青紫色 LD の高出力化が進み、多層光ディスクへの記録や今後の高倍速記録で必要となる 100~200 mW 級の低ノイズ LD が報告された^{1,2,30}。

14.4 次々世代の超高密度光記録技術

100 GB 以上からテラバイト級をめざした超高密度光記録技術では、近接場光記録、多層光記録、超解像光記録、ホログラム記録などで着実な進展がみられた。

近接場記録では、SIL (solid immersion lens) 方式で実効的な開口数 2.05 の対物レンズと青紫色 LD の光学系を用いて、100 GB 容量相当の ROM ディスクから再生信号が得られた²⁹。

多層光記録では、印加電圧によって変色するエレクトロミック材料を記録層とし、これを透明電極で挟んだ構造のものを積層化して大容量化する新しい方式が提案された^{7,29}。今後大容量化とともに、高速記録再生の実現が課題と思われる。

超解像光記録では、PtOx 層に AgInSbTe や GeSbTe 等の相変化材料層等を積層化した Super-RENS (super-resolution near-field structure) 方式において、波長 λ と対物レンズ開口数 NA で決まる光学的解像限界： $\lambda / (4 \times NA)$ の約 3 分の 1 に相当する短記録マークの再生 CNR (carrier-to-noise ratio) として 40 dB 以上を得たとの報告があった^{7,29}。今後、ランダムデータ記録での実用性検証が望まれる。また超解像光磁気記録では、表面記録に MAM-MOS (magnetic-amplifying magneto-optical system) 方式を組み合わせて、単層 50 GB の実現性が示された⁷。

ホログラム記録では、物体光と参照光とを同軸で干渉させる偏光コリニアホログラフィーにおいて実験データの一部が紹介された^{8-9,29}。今後、光源の波長変動やデフォーカス/デトラック/ディスクチルト、さらに装置間の集光ビーム品位のばらつきなど、実用化に向けた各種マージンの定量的な把握が必要であろう。

14.5 展望

光記録分野で今後の研究目標となるであろう前述の次々世代の超高密度光記録技術は、今のところいずれも一長一短がある。ROM/R/RAM の多様な光ディスク・リムーバブル性・下位互換性などの光ディスクの特長を生かし、かつ大容量と高速記録再生とを両立できる光記録技術のブ

レイクスルーが強く望まれる。

15. 視覚光学

豊橋技科大 北崎充晃

15.1 概要

視覚の研究は、心理学、医学生理学、工学など他分野にわたって学際的に行われている。この傾向は年々強まり、研究者の出身や所属の違いを超えた共同研究も盛んになってきた。特に、fMRI (機能的核磁気共鳴画像) 等の大規模な脳イメージング装置を利用する研究では、分野を超えた多数の研究者の協力なくして実施が困難なこともあり、共同研究が盛んである。従来、日本の視覚研究は研究者単独か少数からなるグループによって個別に行われることが多かったが、研究機関を超えた大きなグループによる一連の研究がよくみられるようになってきた。研究対象としては、もはや古典的分野となった明るさ・色の知覚、奥行き・空間知覚、運動知覚に加えて、注意の研究が定番となり、人間の脳イメージングによって生理学的基盤の解明をめざす研究も一定の割合を占めるようになった。最近のトレンドとしては、フラッシュラグに代表される時空間表現の問題、クロスモーダル知覚、そして特に日本で盛んなベクション（視覚性自己誘導運動知覚）を代表とするバーチャルリアリティーと視覚との関係にまつわる問題がある。

15.2 明るさ・色の知覚

色恒常性に関する話題として、照明光変化にともなうユニーク白色点を測定し錐体感度変化の非線形性が検証されたこと³¹、錐体信号の二次統計量が色恒常性の手がかりとなっていることが示されたこと³¹、また、両眼立体視による奥行きが色知覚に影響を与えるという報告²⁻⁴が注目された。色表現に関する話題としては、カテゴリカル色知覚の視覚探索への貢献^{31,32}が続報された。色情報による他の知覚への寄与として、運動視での役割^{31,32,A-10}や形態視における関与³²が報告された。その他、大脳損傷患者における色同時対比の変化報告²⁻⁴は、皮質における色情報処理を理解するために重要な知見である。また、輝度コントラスト感度について、両眼視野闘争抑制下において 2.5 cpd 付近で感度が顕著に低下するという報告³¹があり、続報が待たれる。

15.3 空間と運動の知覚

奥行き・運動知覚のメカニズム解明をめざす心理物理学的研究が引き続き行われていると同時に、複数の視覚処理間の時空間ずれの研究が脚光を浴びている。継続的運動対象と瞬間提示対象が知覚的にずれて定位されるフラッシュラグ現象については、予期の効果³¹、注意の効果³²、奥行

き方向運動での現象³²、視聴覚間での現象³¹等が報告された。また、異なる属性で定義された仮現運動が位相ずれして知覚される現象についての統報³⁵もなされ、運動視のメカニズム解明に貢献することが期待された。その他、依然として人気の衰えない錯視研究としては、カフェウォール錯視におけるフーリエ成分の寄与を解明し、ミッシングファンダメンタル縞を用いて逆転カフェウォール錯視を報告した研究^{32,34}が秀逸であった。

15.4 視覚的注意

視覚的注意の研究は、すでにあげたように空間・運動の知覚における重要な一要因として研究が数多く報告されている。注意研究を広めるきっかけとなった視覚探索、RSVP (rapid serial visual presentation: 高速系列視覚提示)、種々ブラインドネス現象などについては、現象自体の解明から、それらをツールとして用いて他の現象を探るという方向に変わってきた。また、コントラスト感度への注意の影響を調べる試み³¹や増分閾値の時間変化²⁻³に関する研究など、初期視覚処理への影響が厳密に調べられていることは特筆すべきだろう。

15.5 脳のイメージング

国内でもいくつかのグループによって視覚現象・処理に対応する脳活動部位のイメージング研究が盛んに行われている。fMRIによる主観的輪郭線³¹、フラッシュラグ³²、視野統合³²、二次運動³²の研究、MEG (脳磁計)による視覚的ワーキングメモリー³¹の研究、事象関連電位によるバイオロジカルモーションと注意の関係³²、運動に対する注意³²の研究などが報告された。脳を受動的に測定するのではなく、脳に外から刺激を与えるものとしてTMS (経頭蓋磁気刺激)があり、その理論的モデル³¹が報告された。TMSによる研究はイメージングと異なり、脳の一部に刺激を与え、それによる見えの変化を調べる。それゆえ、より能動的な実験パラダイムが可能となる。また、比較的安価なこともあり、今後いっそうの発展が期待される。

15.6 バーチャルリアリティー

視覚と工学の新しい接点として期待されるバーチャルリアリティー (VR) 研究では、国内ではベクションについてよく研究されている。本年も、ベクション中の注意シフト³¹、自己移動速度変化の検出感度³¹、移動速度の知覚手がかり^{B-1}、注意とOKN (視運動性眼振) の関係³²、注視方向の影響³⁴、合成波による二次運動成分の検討³⁴などが報告された。ほかには、視覚・触覚の非整合環境での空間認識についての研究³¹、映像酔いについての研究^{32,34}、およびHMD (頭部搭載型画像提示装置) ゲームによる眼精

疲労と動搖病³²の研究報告があった。これらは、VR装置の実用場面に適用可能な研究といえよう。また、サッケード眼球運動を利用した新しい視覚ディスプレイに関する基礎研究^{31,33}は、VR装置の新開発に関係するものである。

15.7 展望

視覚光学研究は、人間の視覚機能を理解するために心理的および心理物理学的手法を主とするが、最近は、脳イメージングや電気生理学を用いた脳機構の直接的解明、あるいはバーチャルリアリティーなどの工業技術への応用・評価へと広がっている。特に、視覚の基礎研究にとって、脳機能の解明は中核をなす問題であり、人間の脳を測定できるイメージングに多くの研究者が関心を示すのは当然である。今後、脳イメージング手法は心理物理実験と同じように一般的な研究手段となるだろう。また、現在では一部の視覚機能にしか適用されていないTMSによる研究、さらに脳内電気刺激や遺伝子レベルの操作を用いた研究が、より一般的になる可能性もある。ただし、これらの研究が従来の心理学的知見に対応する脳内部位を探すにとどまるならばそれは真の発展とはいえないだろうし、遠からず行き止まりがみえるだろう。心理学的研究は、脳イメージング研究が何をすべきかを先導することが可能であり、心理物理学的手法と生理学的、イメージング手法の組み合わせによって、これまでに見つかっていない現象発見やパラダイムシフトの基礎研究が可能となるはずである。すでにいくつかの研究がその可能性を秘めており、特に意識やアリティーの科学的解明についてその貢献が待たれる。

16. 光源・測光・照明

福岡工大 行田尚義

16.1 概要

光源の技術動向は省エネルギー化と環境に有害な物質対策になる。省エネルギー化としては、白熱電球を効率の高い蛍光ランプ (放電ランプ) に替える努力が続いている。有害な物質対策として、鉛、カドミウム等ほとんどの物質は対策を立てたが、水銀についてはそれに替わる良好な放電材料が見当たらないことから、水銀フリーの蛍光ランプの開発が行われている。また、寿命を長くして有害物の破棄量を減らす目的で、無電極放電ランプ (蛍光ランプ) の開発が進められている。一方、上記の要求を満たす固体発光素子の開発が進展している。特に蛍光体を使って光色を改善した白色LED (発光原理を表す従来の命名法に従っていないので、蛍光LEDとよぶべきと提唱したが、すでに世界的に白色LEDと呼称されているので本文でもこの

呼称に従う)が開発されて、その利用技術の開発が世界的に行われている。測光技術分野では国際的な統一の努力が続いている。照明技術では新しい光源の利用技術と、生体リズム、高齢化など生体の変化に対応した照明のありかたが検討されている。

16.2 光 源

省エネルギー目的から、電球のソケットにはまるE26口金を使った蛍光ランプはその後、世界各国で開発が進んでいる^{C-12}。発光管をコイル状に成型した40ワットの蛍光ランプが米国でも発売された。蛍光ランプの普及とともに、世界的な関心事は水銀の環境問題である。光源に含有する水銀量が半分程度に低減されてもまだ不十分で、米国では水銀の含有をランプと包装に表示することが義務づけられた^{D-8}。日本でも早晚同様の措置がとられるであろう。そこで水銀を使わない蛍光ランプの開発が進められ、希ガスの放電による蛍光ランプが研究されている。高圧放電ランプに水銀を封入しないでZnIなどの封入材料が研究されているが、実用化には至らない^{C-8}。小型高出力の光源として超高圧水銀ランプが自動車用光源や映像機器の投影用光源に使われているが、より高温高圧に耐えるセラミックが放電容器として使用されている。

内部に電極がない無電極放電ランプの開発が進んでいる。はじめ、紫外線光源用として実用化されたが、点灯回路や電力の誘導結合機構の改良により、比較的高出力の照明用に実用化が進んだ^{C-8}。さらに一般照明の蛍光ランプにも応用が検討されている³⁶。一方、青色LEDをもとに蛍光体と組み合わせて光色を改善した白色LEDが注目されている。水銀を使用していない上、現在でも電球の効率を超えており、120 Lm/Wを目標に研究が進められている^E。InGaN系のLEDの青色光や近紫外光を使って黄色や赤、緑、青の蛍光体と組み合わせ、光色を白色にして照明に利用するものである。従来の光源ほど電力を大きくできないので、光に方向性をもたせるとともに、光束量を大きくするには多数並べる方法がとられる。携帯電話・車載用・コンピューターなどのディスプレイに無機EL(electroluminescence)の利用が試みられている。特に懸案であった青色用の材料としてBaAl₂S₄:Eu, Mgが開発され、フルカラーのELディスプレイの開発が促進された^{C-8}。さらに赤色用にMaGaO₄:Eu、緑用にBaAl₂S₄:Euが開発され、色彩が良好になった。有機ELも研究は進展している。有機EL材料には低分子系と高分子系があるが、低分子系は低温多結晶シリコンTFTを用いたアクティブラチックスを使い、塗布技術の向上により17インチディスプレイが試作された。高分子系でも高効

率な大画面ディスプレイを目的に開発が進められている。

16.3 測 光

国際的な測光放射測定諮問委員会(CCPR)では国際比較が行われている。分光放射照度の測定が進行中であり、赤外、近紫外一可視一近赤外域が終了し、2003年は紫外域で行われている。分光拡散反射率は2002年より開始された。すでに分光透過率は終了した^{C-8}。

16.4 照 明

超高圧水銀ランプの自動車照明への利用に関し、光量が多く得られることから、見え方、特に周辺視が改善され安全運転に寄与している反面、グレアの増加が懸念されたが、実際には減能グレア(disability glare)は改善されている^{D-5}。しかし、不快グレア(discomfort glare)は劣化している。この原因はスペクトル分布にあるのではないかとみられている。光と生体リズムについて研究が進められているが、老人とアルツハイマー患者に対して早朝に高照度を浴びることの有用性が確認されている^{D-6}。特に短い波長(青色系)に効果がある。ヨーロッパでは、帽子のひさし状の照明器具をつけて日常作業をしながら高照度が得られる方法が開発された^F。わが国では高齢者の増加が社会問題として深刻になっているが、米国でも2030年には65歳以上の人口の占める率が20%を超えると予想されている。そこで高齢者を対象に照明環境の研究が進められている^G。その結果、1000lx以上の水平照度が作業環境として好ましいという結果が出ている。さらに背景が黒であると視認性が良い。また、光源の色温度は高いほうが見やすいという結果となった。照明手法については“かけ”(影、陰)が重要視されている。従来、壁面照明では前面を明るくする手法がとられていたが、例えば、“かけ”を利用して建物に深みを与えた、凹凸の壁面を掠めて照明してできる“かけ”によってテクスチャーを鮮明にしたりする技術が推奨されている^{D-4}。照明施設で世界的に注目されているのは、名古屋の中央部に完成した市の公園にできた都市のオアシスとしてのOasis 21の照明である^H。

16.5 今後の展望

現在、白色LEDは応用分野の開拓に取り組んでいるが、照明用に使用するには1個当たりの光束量が少ないので、多数個使用しなければならない。また、蛍光体は意外に働き特性が劣化するため、不点灯寿命になる前に取り替える必要がある。うまいレセプターができて取り替えが容易になることを期待する。その構造から光に方向性があるので、照明分野で使用するには光学系と組み合わせて使用されるケースが多いと思われ、本誌の読者の協力が必要になるであろう。蛍光ランプのように線光源や面光源とし

て取り扱うのではなく、点光源の羅列という今までにない照明形態になるので、照明技術の面で多くの研究や開発がなされるであろう。いずれにしても、照明界は当面、白色LEDの時代になろう。さらに材料の分野でさらなる進展の萌芽がみられる^{c-4}。ELディスプレイもやっと陽の目をみようとしているし、電球型蛍光ランプや無電極放電ランプもいっそう進展するであろう。このように時代に伴っていろいろな光源が生まれてくるが、近代前期の光源であるローソクがいまだに使用されているように、従来の光源が完全に消えてしまうものではないと考える。光源はそれぞれの特徴を生かしながら生き残り、人間の生活を豊かにしてくれるものであろう。それは光を使った照明空間をさらに豊かにする照明技術の進展にほかならない。

17. 医学・生物応用光学

電気通信大 山田幸生

17.1 概 要

医学・生物応用の分野では、昨年に引き続き、日本光学会の生体医用光学グループ、日本エム・イー学会の「生体情報の可視化技術研究会」、電気学会の「医療のための光応用新技術調査専門委員会」が活発な活動を行った。また、科研費基盤研究(C)（企画調査）のテーマとして「医療のための先端的光応用技術研究の企画調査」が採択され、今後の動向調査などが行われた。日本光学会の生体医用光学グループは第3回生体医用光学研究会をOptics Japan 2003³と同時開催し、多くの参加者があり約50件の発表に対し熱心な討論が行われた。さらに、2002年11月に札幌で開催された本分野の国際会議(BOPM 2002)の発表をもとにOpt. Rev.で特集^{b-5,6}が組まれ、計33編の論文が掲載された。

第3回生体医用光学研究会の発表とOpt. Rev.の特集号の論文を分類すると、OCT・干渉光イメージング：16件、蛍光・細胞光学：8件、皮膚・体液分析：9件、組織酸素モニタリング：7件、生体組織光学・光伝播：16件、拡散光イメージング（光CTや光マッピング）：16件、光と音波利用：3件、となっている。

一方、SPIEから発行されているJ. Biomed. Opt.^{1-1~1-4}に掲載された2003年(計4号)の論文数は計78編であり、次のように分類される。OCT・干渉光イメージング：3件、蛍光・細胞光学：23件、皮膚・体液分析：2件、組織酸素モニタリング：3件、生体組織光学・光伝播：7件、拡散光・蛍光イメージング：10件、光と音波利用：3件、レーザー治療：3件など。

以下に、これらの分野のいくつかについて簡単に述べ

る。

17.2 個別分野の進展

17.2.1 生体組織光学・光伝播

生体組織の光学特性値に関しては、近赤外域の広い波長範囲でスペクトルが計測され、その光学特性値の温度依存性¹⁻²などが調べられた。蛍光に関する光学特性値の測定も行われ、光伝播理論も継続的に研究された¹⁻¹⁶。

17.2.2 OCT

国内でもOCTに関する発表³は急速に増加している。測定の短時間化、広い範囲の画像化、空間分解能の向上、測定深度の向上など、技術の改良に向けて国内外において研究開発が活発に進められている。

17.2.3 皮膚・体液分析

皮膚の光学は、化粧品の分野だけでなく、血液状態や血糖値を含む体液の無侵襲測定¹⁻⁴に繋がるため、多くの研究がいろいろな角度から行われた。また、手指血管網の透視像から個人認証を行う装置の利用がセキュリティーの観点から急速に拡大している。

17.2.4 蛍光・細胞光学

この分野は欧米では分子イメージング技術に発展しており、国内でも極短パルス光を用いた細胞観察が報告され、これから生体医用光学の中でも大きな発展が期待される分野のひとつである。

17.2.5 拡散光・蛍光イメージング

拡散光トモグラフィーはいわゆる光CTとよばれるが、国内ではピコ秒時間分解データを有効に用いた画像再構成アルゴリズムが開発され、ヒト前腕の解剖学的および酸素状態の生理学的断層像が高い空間分解能をもって絶対値で表された³。この方式を反射型に拡張することにより、光マッピング（光トポグラフィー）では得られない絶対値測定が可能になると期待される。米国では、連続光あるいは強度変調光による拡散光トモグラフィー¹⁻¹が盛んであり、乳房検査を主目的に開発されている。毎秒10画像以上の高速撮影により組織の時間応答を調べて診断を行う研究^{1-49,55}などが行われている。一方、光マッピングに関しては米国でも関心が高く、日米で医療器具としての認可を得て今後ますます広い範囲で利用されていくと期待される。蛍光の拡散光イメージングは、癌などの病変部の強調が可能であり欧米での研究が多いが、日本でも今後増えていくと考えられる。

17.3 将来展望

上述した国内の発表分類と、J. Biomed. Opt.の発表分類には、日本と米国の研究内容の違いが如実に表れている。Appl. Opt.のMedical Optics & Biotechnology¹⁻ⁿお

より Physics in Medicine & Biology^{K-n} の論文分類も *J. Biomed. Opt.* に類似している。特に、米国においては 蛍光を用いた細胞レベルの顕微鏡イメージングや、蛍光を用いた拡散光イメージングが盛んに研究されている。米国においてはここ数年、分子イメージングが急速に立ち上がりつつあり、その一部を担う研究、特に蛍光を利用する研究が生体医用光学分野で活発になっていることに繋がっていると考えられ、日本でも今後、この分野の研究が盛んになるものと考えられる。また、皮膚光学に関連した研究は実用化が容易であることからさまざまな機器が開発され、思いがけない用途が開けていく可能性を秘めていると考えられる。日本は、内視鏡、パルスオキシメーター、OCT、光マッピングなどで世界をリードする医用光学機器を研究・開発してきた。この得意分野を世界的に競争力のある産業として継続させるための研究開発の推進が望まれる。

18. 光学関連の規格

NTT 鈴木扇太

光学関連の規格は、ISO（国際標準化機関）と IEC（国際電気標準会議）により国際規格の審議策定がなされ、日本国内では JISC（日本工業標準調査会）により JIS 規格の審議発行が国際標準との整合を図りながら行われている。

ここでは、筆者が標準化委員を務めている IEC と JIS 標準化委員会の 2003 年動向について、IEC 会合状況の紹介などを交えて述べることとする。

18.1 国際規格 (ISO/IEC)

光学関連の国際規格は、ISO と IEC において審議されている。ISO では TC172（光学および光学機器）が審議組織であり、現在 TC172 傘下には 7 つの SC (sub-committee) が設置されている。その中で、オプトエレクトロニクス関連は TC172/SC9（エレクトロオプティカルシステム）が担当しており、SC9 傘下の 7 つの WG (working group) と 1 つの JWG (IEC/SC47E との合同 WG) においてレーザーおよび関連装置・マイクロレンズ・集積光学素子等の規格が審議されている。2003 年末現在で、TC172 から 240 件の文書（うち、SC9 は 25 件）が発行されている。

一方 IEC においては、ファイバーオプティクス関連について TC86（光ファイバ）が、レーザー安全について TC76（レーザ機器の安全性）が審議を行っている。また、ファイバーオプティクス用途以外の光半導体デバイスについては TC47（半導体デバイス）の SC47E（個別半導体）が審議しており、おもに民生用のレーザーダイオード、発光ダイオード、フォトダイオード等を担当している。

また、電子実装技術を扱う TC91（表面実装技術）の日本標準化関連団体である JCPA（日本プリント回路工業会）が、装置内光配線板の標準化を進めている。2003 年 6 月には、スラブ導波路リジッド光配線板や光ファイバーレキシブル光配線板等の JCPA 規格が発行された。

ここでは、ファイバーオプティクス関連の TC86 の標準化状況について述べる。2003 年の TC86 は、3 つの SC と TC 直下の 2 つの WG の組織構成で活動を行ってきた。SC としては、光ファイバー関連を SC86A（光ファイバケーブル）が、光接続および受動部品を SC86B（光部品）が、能動部品およびサブシステムを SC86C（光ファイバシステム）が、それぞれ担当して審議を行っている。なお、SC86B は 2003 年より日本が幹事国となっている。また、TC86 直下の WG では、WG4 が光測定器校正を、WG8 がダイナミックモジュールの標準化規格を審議している。ただし、WG8 は 2003 年 10 月、IEC モントリオール会合において、SC86C/WG5 へ移行されることが決定した。2003 年末現在で発行されている文書は、TC86 で 12 件、SC86A で 54 件、SC86B で 204 件、SC86C で 63 件の合計 333 件であり、活発な標準化活動が行われている。

2003 年 10 月の IEC/TC 86 モントリオール会合において、SC86A ではプラスチック光ファイバー (POF)，偏波モード分散 (PMD) 関連規格の統合、マイクロダクトケーブル、ダクト・直埋ケーブルなどに関し活発な審議が行われた。特に、POF は 10G-LAN 用ファイバーとして活発な審議が進んでいる。

SC86B では、光部品の使用環境条件、ハイパワー伝送信頼性、クロージャー規格などがおもな話題として挙げられる。特にクロージャーは、光アクセス系システム普及に合わせて規格化審議が活発であり、光コネクターに関しては光学互換標準の概念を取り入れた規格体系整備が議論されている。光受動部品としては、C/L 帯フィルターや 0.98/1.55 μm フィルターの新規提案、16~64 チャネル中規模 DWDM フィルターの PAS 文書提案がなされた。

SC 86 C では、PMD 測定と理論、ハイパワー光安全性ガイドラインなどがおもなトピックスである。PMD に関しては、3 つの SC で独立に文書審議が並行されてきたが、PMD 原理や測定法等の共通箇所をテクニカルレポートとしてまとめることになった。

TC86/WG8 では、ダイナミックチャネル等化器や信頼性規格の審議とともに、日本からのダイナミック分散補償器とダイナミック利得傾斜等化器の新規文書提案、および電気制御インターフェース規格の検討がなされた。

ダイナミックモジュール等の高機能光部品や光サブシス

テム開発とともに、アクティブ/パッシブ/ダイナミック等の明確な用語定義や分類が標準規格審議の上で必要になってきた。そこで、これらの用語や分類定義を審議する検討委員会（議長は日本）がTC86傘下に設置されることになった。今後の活動に期待したい。

18.2 国内規格（JIS）

国内規格であるJIS（日本工業規格）は、JISC標準部会の下に設置された26の各分野別技術専門委員会において審議されており、オプトエレクトロニクス関連は電子技術専門委員会が担当している。オプトエレクトロニクス関連のJIS原案作成は、（財）光産業技術振興協会へ委託されており、光産業標準化総合委員会、光産業標準化技術委員会で審議されている。2003年においてJISCでは、JIS化手続きの迅速化のためにCBS（特定標準化機関）制度やTS（標準化仕様書）の取り入れの検討が行われた。

2003年末現在、オプトエレクトロニクス関連のJIS規格（テクニカルレポート含む）としては、光ファイバー関連23件、光コネクター関連19件、建物内配線関連1件、光能動部品関連14件、光受動部品関連14件、光測定器関連10件、光ファイバー増幅器関連8件、レーザー安全3件、太陽電池20件、光ディスク27件、Fプロジェクト（ユニバーサルディスクプロジェクト）2件、光ハンディメモリー2件、合計143件の規格文書が発行されている。

さらに、ファイバーオプティクス関連については、ファイバオプティクス標準化委員会と他の6つの標準化委員会（光ファイバ、光コネクタ、光能動部品、光受動部品、光測定器、光増幅器）で審議されている。ファイバオプティクス標準化委員会は関連委員会の推進的な役割を果たすとともに、傘下の4分科会（メンテナンス、光サブシステム、ダイナミックモジュール、建物内光配線システム）において先進的光技術調査およびJIS化/国際標準化の問題点抽出と改善・戦略調査を行っている。また、これらの標準化委員会と分科会はJIS規格審議組織としてだけでなく、その多くがIEC/TC86活動に対する国内サポート組織としての役目を果たしている。

18.3 今後の展望

今後、ファイバーオプティクス関連製品のさらなる低コスト高機能化に向けて、ダイナミックモジュールや光サブシステムのような光部品の機能集約化が進むものと思われる。それに伴い、光部品や光モジュールの規格化や標準化の必要性が高まり、その規格の審議・制定の迅速性と国際規格整合の需要度が高まるであろう。一部製品で進められているMSA（multi-source agreement）規格等は、迅速な規格化要望の表れといえる。このような状況を反映して

JIS規格審議の迅速化と国際規格との整合が進められており、2002年からJIS原案の電子化など規格化手続きの迅速化等の改善が図られつつある。しかし、2001年8月の光ファイバー増幅器関連文書などを最後として、オプトエレクトロニクス関連で多数の規格原案が審議待ちの状態にあり、JIS化作業の停滞解決に時間がかかりそうである。改善案のひとつとしてJISとISO/IEC規格を補完するための新しい団体規格制定の検討が行われているが、今後とも光学技術の急速な発展に整合するよう標準規格制定の仕組み改善が求められる。

19. 光学教育

筑波大 伊藤雅英

今年から「教育」分野でも進展を解説することになった。会誌「光学」でも教育に関する研究論文（原著論文および教育報告）の投稿に門戸を開いた。

19.1 日本光学会における活動

7年ぶりに会誌「光学」で光学教育に関する特集が組まれた^{a-6}。前回のものは小特集であったため、本格的な特集としては初めてとなる。今回取り上げられたテーマは、教える側の人材育成、教材の問題、高校における教育、大学における教育、産業界が期待する教育、教科書について、光学実験などであった。約30頁の解説が各界の7人の第一人者によってなされた。また、同号には教育に関する初の原著論文が2編掲載された。「光学実験教育におけるe-ラーニングの導入」と題する研究論文と、教育報告「模擬実験を取り入れた光学学習」である^{a-6}。

Optics Japan 2003においては、「光情報教育を考える有志グループ」によって「続・大学における光情報教育を考える—教育現場から—」というシンポジウムが開催された³。これは昨年のOptics Japan 2002における同グループの「大学における光情報教育を考える」の続編として開催されたものである。参加者の関心は必ずしも高いとはいえなかったが、教育における学会の役割について活発な議論が交わされた。またポスター講演では、光無線LANを用いた次世代教育スタイルについての提案があった。Optics Japanでは教育の一般講演のセッションは組まれていないが、募集要項のキーワードとして入れておくべきであろう。

会誌「光学」では「講義」シリーズが完結した。本年度は、「波長多重光通信技術」^{a-1}、「光増幅とファイバーレーザー」^{a-2}、「測光・放射標準」^{a-3}、「光コヒーレンストモグラフィーの基礎」^{a-4}であった。また、学会として教科書を出版すべきではないかという意見もあるようである。

19.2 応用物理学会における活動

会誌「応用物理」では「教育の広場」という特集が定期的に掲載されている。本年度は「物理オリンピック」という題で国際およびアジア物理オリンピックについて紹介された^①。また分科会として「応用物理教育分科会」(<http://ped.sp.u-tokai.ac.jp/>) が活発な活動を展開している。

春の大会では、日本物理学会、日本物理教育学会との3学会共同企画で「日本の科学技術教育の将来をつくる」というシンポジウムが開催され、それぞれの学会レベルの取り組みについておもに会長レベルで議論された¹。また、秋の大会では「多様化する理工系分野の人材開発と科学技術教育」に関するシンポジウムがあり、大学教育における人材育成と企業における技術者育成の整合などについて講演とパネルディスカッションが行われた²。講演内容は、大学側から「大学の就職・進路支援と学生の職業感」、企業側からは「企業における技術者育成」「企業における人材育成」「人材開発と科学技術教育」であった。パネルディスカッションでは、初等・中等教育も含めて「学ぶ」と、「教える」ことはどういうものか、という議論が活発になされた。一般講演で教育分野は、「応用物理一般」

に分類されている。ここでは、基礎教育として実験をどのように位置づけ、学生に理解させていくかという観点で、ITなどを用いた新しい教材開発の試みが提案された¹。秋の学会でもITやLANを活用した教育システムの開発、ネットワークを利用した教育効果のフィードバック法などの発表があった²。新しい実験教材の提案も定常的になされている。

19.3 その他の

財団法人光産業技術振興協会は、光産業の総合的育成を図る組織である。その中の光情報教育専門委員会（人材育成委員会）では、ビデオ教材の作成、テキストの作成などを試みている。学会と連携をとりながらアンケート調査を行い、結果はOptics Japanで紹介された。それをふまえ、魅力ある光情報教育のための副教材などについて検討を行っている。

19.4 展望

それぞれ組織ごとの活動としてまとめたが、これらの活動は有機的につながっている。2003年は日本光学会にとって、教育への試みを開始した年となる。教育に関する業績も評価されていくよう、学会として取り組んでいくことを期待したい。