

光技術分野における「研究の現状と今後の展開の方向」

光技術部長 矢嶋 弘 義
量子放射部長 小林 直 人

1. はじめに

本特集号では当所における光技術並びに量子ビーム技術に関する研究活動を特集する。ここでは、光技術並びに量子ビーム技術を次のように定義する。すなわち、光技術は「光(光子:フォトン)を情報やエネルギーの媒体(メディア)とする技術」、量子ビーム技術は「量子ビームを情報やエネルギーのメディアとする技術」とする。これに対して、電子技術は「電子を情報やエネルギーのメディアとする技術」である。20世紀後半の人類社会の発展はエレクトロニクス技術の展開に大きく依存し、そこでは電子が情報やエネルギーのメディアとして大きな役割を果たしてきた。しかし、21世紀の高度情報・高福祉社会を支えるより柔軟で多様な技術基盤の構築に向けて既存のエレクトロニクス技術で対応する事は困難と考えられる。例えば、今日のインターネット社会を支えるインフラでは光通信技術への依存度がますます増大している。情報処理についても、電子計算機を使った数値情報(抽象情報)処理から、「実世界情報」を取り扱う技術の重要性が今後ますます増加する状況にある。これらは従来、計測・制御、センシング、あるいは「科学技術」と位置づけられ、既存の情報処理とは一線を画す技術分野と考えられていたが、今後はこれらを統一的に扱う新しい情報処理の概念の構築が必要となるであろう。このようなニーズに対して、電子、光、量子ビーム等の媒体を駆使する新しい技術体系の構築が今後ますます重要になる。情報とエネルギーという概念も従来は別のものであった。しかし、情報の伝送処理にはエネルギーが不可欠であることは言うまでもないし、物理的情報を直接扱うところでは、情報とエネルギーの区別がますます不明瞭になるだろう。光を用いた情報処理は光ファイバーによる情報伝送にとどまらず、画像情報の直接的取り扱いや、物質の発光現象や色(波長)等の「物理情報」を直接的に伝送、処理する事が出来る。

量子ビームについても、物質との直接的相互作用を通じて物理世界の情報将我々に伝達するメディアとしての重要性が今後より高まるものと考えられる。21世紀社会では既存の技術分野の壁がより低くなり、それらに跨る汎用的な技術基盤の確立が多様なニーズへの対応を可能にする。光技術や量子技術は既存のエレクトロニクス技術を横断する総合技術であり、電子をメディアとするエレクトロニクスに対して、光(光子)や量子ビームをメディアとする新しい技術基盤として「フォトンクス」が21世紀社会を支える大きな柱となるだろう。電子技術総合研究所では、1960年代後半よりメディアとしての光波を有効活用する技術の研究開発をリードし、日本における光産業育成の一端を担ってきた。そこでの成果は産技プロジェクトのような応用技術研究の中で開花していったものも多々ある。ここでは、デバイス機能的視点を中心に電総研での研究開発の歴史を振り返る。以下、将来のフォトンクスを支える個別技術領域のこれまでの歴史を簡単にレビューするとともに、今後の展開を述べ、各研究ラボの位置付けを示す。

2. 個別領域の歴史と展開

2.1 レーザー技術

ここでは、レーザー物理への取り組みを通じて赤外線から軟X線領域にわたる未踏波長域での新コヒーレント光源技術を開発し、システムの高品質化、高信頼化、高機能化と共に、レーザー応用技術の研究開発を進めている。1960年に発明されたレーザーは、人類が利用可能なコヒーレント電磁波の波長領域を電波から一挙に光領域まで拡大した。コヒーレント電磁波の特徴は位相操作性にあり、情報通信技術から高密度光パルスエネルギー利用技術まで幅広い応用分野を提供する。電総研ではいち早く固体レーザー並びに気体レーザーの研究を開始し、同時に空間伝搬を利用した

光通信、海中通信、ホログラム技術への応用展開を図った。1970年初頭に半導体レーザーの室温連続発振が成功した後は、レーザーの高コヒーレンス性、高密度エネルギー性の極限を追い求める研究を中心に、その高出力化、超短パルス化、の研究開発が行われた。1980年代は高出力レーザーの産業応用を目指し、超LSIプロセス用露光光源への応用が期待されるエキシマレーザーや、機械加工や解体に用いられる連続出力数kW級の炭酸ガスレーザーなどの開発プロジェクトに貢献した。医学応用の見地からは、光化学反応を利用したレーザー治療法技術が登場し、電総研はレーザー技術面での協力を行った。1990年代は半導体レーザー励起による全固体レーザーの研究開発が進展すると共に、科学技術応用から産業応用への展開を図るフェムト秒レーザー技術の研究開発が主流となった。これらの詳細は、「高密度パルスレーザー技術ラボ」並びに「超短光パルス技術評価ラボ」に記述されている。また、未踏のコヒーレント光源であるX線レーザーの実現に向けた努力も続けられており、「X線レーザーラボ」でその詳細が述べられる。

2.2 光材料

光材料は、誘電体、半導体、有機、無機、といった分類から、発光、受光、線形(非線形)導波材料といった機能別分類、さらに通信、記録、表示、エネルギー等の用途、また同じ用途でも波長によって扱われる材料が異なり、その全容は膨大である。対象も異なる。従って、限られた研究者人数では特定分野に特化する必要がある。電総研では、1970年代初頭に石英コア光ファイバーの開発に世界で初めて成功したのをはじめとして、光記憶材料、光半導体分野、光表示材料の研究開発に全所的な広がりを持って取り組んできた。光半導体材料関連では、赤外から可視、紫外領域にわたる光波と電子の新しいインタフェース材料を求めて研究開発を行ってきた。近年はCIS等の高効率太陽電池材料の開発で成果を挙げるとともに、最近では新しい光エレクトロニクス材料の展開を目指して酸化物半導体の研究に着手し、超ワイドギャップ半導体としてのZnO半導体の研究開発を「光機能性材料・素子ラボ」が、SiO₂発光素子の研究開発を「IV族元素酸化物光エレクトロニクスラボ」がそれぞれ担当している。また、様々な光機能の実現可能性を有する有機材料の分野で

は、光-光制御機能デバイスの実現を目指して、高光非線形が期待されるメゾスコピック材料の研究開発が「低次元集合形フォトニクスラボ」を中心に展開されている。さらに「極限時空間フォトニクスラボ」では、近接場顕微鏡とフェムト秒光パルスを組み合わせることにより、極微小領域、極短時間領域での有機光材料の物性評価で独自の研究成果をあげている。また、本特集号では紹介されないが、スピンエレクトロニクス材料をベースとする導波路型光アイソレーターの研究や、環境調和型材料として注目される鉄シリサイドを用いた光半導体材料の研究も展開されている事を特筆しておく。

2.3 光デバイス、光情報処理、光計測

光デバイス開発の究極的課題は、情報メディアとしてのコヒーレント光の時間、空間、波長域での極限的制御性を引き出す新光デバイス機能の実現にあり、同時に、光と電子の機能的融合を実現することにある。1970年代は新しい光エレクトロニクスデバイスの萌芽期であり、現在の光エレクトロニクスデバイスの原型がこの時代に生まれたと言える。電総研では前述の石英コア光ファイバーの提唱と実現、誘電体分岐線路における新導波概念の提唱、半導体レーザーの戻り光を用いた光ディスク用ピックアップの研究開発が光ディスクメモリー開発の先駆けとなったこと等、当所が果たしてきた役割は大きい。1980年代は、光通信の実用化に向けて光デバイス技術が国内外で大きく進展した時代である。電総研においてもOEICの概念を世に問うとともに、光-光導波スイッチや、周期構造ミラーの共振器構造を有する面発光半導体レーザーを世界に先駆けて提唱した。さらに、ビームの空間走査を可能とする機能半導体レーザーや注入電流の空間分布と光導波モードの相互作用に基づく非線形光スイッチング現象の発見などが当時のトピックスとして挙げられよう。現在は、フェムト秒テクノロジーの研究開発を中心に、超高速光デバイス及びその周辺技術の研究開発が行われている。「超高速電子回路技術評価ラボ」ではサブピコ秒電気パルスの発生を中心に超高速光電子融合回路の実現を目指している。「超短光パルス光エレクトロニクスラボ」ではフェムト秒光パルスのジッタ制御、II-VI族サブバンド間遷移を応用した光スイッチ素子、パルス圧縮素子等の研究開発を

行っている。「フェムト秒光エレクトロニクスラボ」では、超高速光電子デバイス内での電子現象の可視化技術を、「光電子機能制御ラボ」では量子振動のコヒーレント制御を利用した新しい超高速光デバイスの研究開発を行っている。光情報処理分野では、1980年代に光コンピューティングの実現を目指して光ニューロ演算や空間コード化による光論理演算法が脚光を浴びたが、当時は要素技術がアーキテクチャをサポートするまでに至らなかった。現在は光演算よりも光通信技術の延長上にある光インターコネクションやインターネットへの光技術の応用が大きく展開されている。しかし、要素技術の成熟は改めて超並列情報処理としての光演算技術の可能性を世に問おうとしており、新たなニューロ演算処理技術の研究が「情報光学ラボ」で展開されている。光計測技術分野では、古典的な干渉計測に変わり、量子的な揺らぎを制御するスクイーズ状態制御や量子干渉をベースとする新しい光計測技術の研究開発が「創造フォトニクスラボ」によって進められている。

2.4 シンクロトロン放射光及び自由電子レーザー

電総研においては1979年のつくば移転を機に、1980年500MeV電子線形加速器TELL、1981年0.6GeV(後に0.8GeV)電子蓄積リングTERAS、1986年小型蓄積リングNIJI-I、1989年同NIJI-II、超伝導小型リングNIJI-III、1991年自由電子レーザー専用小型蓄積リングNIJI-IVの建設・稼動を行い、産業応用を念頭に小規模小型シンクロトロン(SR)装置群の開発とその利用研究を行ってきた。今後のSR利用研究としては、情報・エレクトロニクス、生命科学、物質・材料、環境科学、光・放射線の標準計測、次世代産業科学技術などが挙げられよう。特に次世代産業科学技術の中では、産業用の新たな光プロセス技術や分析技術のための新たな放射光源開発(入射器、蓄積リング、挿入光源、次世代放射光技術)も大きな開発課題の一つである。SRの高度な利用技術である自由電子レーザー(Free Electron Laser; FEL)はマイクロ波からX線に至る広大な可変波長域と、高出力・高効率といった優れたポテンシャルを有しており、魅力のあるレーザー光源であるが、当所においては1980年代半ばより上記のTERAS、NIJI-IVを用いて、可視光から遠紫外領域の研究開発を行ってきた。特に1998年には212nmという当時の世界最短波長での発振を達成

している。これらの研究の進展によりFEL波長は間もなく真空紫外域に達するものと思われ、可能な限り早期に150 nm程度までの短波長化を実現させたいと考えている。一方マイクロ波から赤外域にかけての長波長は比較的発振が容易で、RFリニアックを用いた比較的小型のFELシステムが我が国でも実現されている。当所ではNIJI-IVを使った赤外域FEL発振を計画している。応用面においては世界的にもFELを利用した治療(腫瘍)が行われるなど新しい局面に入っている折、当所においても標準用光源や化学反応の励起源を視野に入れた研究開発に力を入れたいと考えている。現在これらの研究開発は「自由電子レーザーラボ」で行われている。

2.5 高エネルギー電子線の高度利用

光速に近い高エネルギー電子線の高度利用の一つとしてエネルギー可変単色X・ γ 線の発生があり、電子ビームとレーザーとの衝突により発生する散乱光を利用するレーザー逆コンプトン散乱法が最近注目されている。当所では1980年代半ばからこの研究に着手しており電子蓄積リングTERASを利用した先駆的な成果を挙げて来た。現在この手法によってエネルギー可変単色X・ γ 線を発生させる施設が世界で5箇所稼動している。また我が国においてはフェムト秒テクノロジーのプロジェクトの中で、フェムト秒レーザーを用いて、超短パルス逆コンプトン散乱X線の発生の研究開発を行っており、超高速現象への利用にも期待が持たれている。当所においてはさらに直線加速装置とレーザーを組み合わせたX線源やFELと蓄積リングを用いたX・ γ 線源等、さまざまな研究開発の試みを行っている。現在装置開発の課題としては高輝度化やエネルギー単色性の向上などが必要とされている。今後は、上記のようなフェムト秒X・ γ 線の発生と応用、FELなどと組み合わせたエネルギー可変単色X・ γ 線の大収量・高度化、及びそれらを用いた応用研究が望まれる。また、これらを安定したビームとして応用研究に供給するため加速器までを含めたトータルのシステム化が必要になってくるが、このことは本手法によって未整備領域のX・ γ 線標準場を確立する際の場の安定性、信頼性という点においても重要である。現在この研究開発は「レーザーコンプトンラボ」で行われている。一方、当所においては10数年以上前から電子線形加速器

TELLを利用したエネルギー分散の少ない低速陽電子ビームの発生・制御技術を開発しており、現在陽電子消滅分光法(PAS)、陽電子励起オージェ電子分光法(PAES)などにより物質中・表面近傍や最表面の欠陥、不純物、原子・電子状態、分子構造などを極めて高感度で知ることができるようになってきた。この施設は世界的にも有数の貴重な施設であり、共同研究の要請が多数寄せられている。この超低速パルス陽電子ビーム発生・利用技術をさらに発展させ、特に超高強度・高品質の陽電子発生・制御とその応用を目指している。陽電子は従来にはない物性特性を分析できる新たなツールであり、現在電子デバイスや光デバイスのための材料評価を念頭に研究を進めている。今後はさらに対象範囲を広げ、ナノ構造、ヘテロ構造や量子細線、単分子層構造等の解析に利用して革新的物質・材料の創製につなげるための最適な分析ツールとして利用していきたいと考えている。現在この研究開発は「陽電子利用物性研究ラボ」で行われている。

2.6 光検出技術

光を利用した計測は、現在あらゆる分野で欠かせない技術の一つである。そのためには高性能の光検出器が必要である。一種類の検出器で、光の有する様々な特性(波長、振幅、位相、偏光性、時間、位置)を計測するのは困難であるが、可能な限りの複合機能を有する検出器の開発は学術分野並びに産業分野において特に重要である。広帯域フォトニック・センシング技術では、幅広いエネルギー範囲の光子を対象として、従来利用されてこなかった側面をセンシングする技術を開発することを目指して、光子一個がもつ種々の光源の情報(エネルギー、時間、位置)を高感度に検出・計測する技術の開発を行っている。特に当所では超伝導現象を利用した技術(超伝導フォトンクスセンシング技術)により、近赤外から可視光の範囲を包含した広い波長範囲(赤外線から γ 線)において、光を光子単位で利用して、光源の情報をセンシングする新たなシーズを提供することを目指している。超伝導検出器は、X線の領域だけでなく、赤外から可視の領域において光子一個の情報を測定できる唯一の検出技術となる可能性がある。今後、原子力分野、天文観測、エレクトロニクス産業から寄せられているX線領域のニーズに応え

るとともに、赤外からX線の幅広い領域において、生命工学、医療などの分野に新たな光子情報利用の可能性を提供していきたいと考えている。現在この研究開発は「極低温放射エレクトロニクスラボ」で行われている。

3. 将来展望

光技術は、その工学への応用可能性の一端を見せ始めたにすぎない。その膨大な可能性を有効に実現するためには数々の新しい要素技術の実現が必要であるが、そのレベルは現時点においてまだまだ未成熟であり、今後も一層の研究開発努力が必要である。光技術は、その波長領域が赤外から可視、紫外、さらにその外側の波長資源までをも視野に入れた技術体系であり、それを支える材料技術分野も広大な裾野を持つ。光技術は既存のエレクトロニクス技術を横断する新しい総合技術であり、電子をメディアとする従来のエレクトロニクスに対抗して、光をメディアとするフォトンクスという新しい技術基盤を21世紀社会に提供するという見方も成り立つ。材料、デバイス、システムに亘る研究者が位相をあわせ、これまでの成果をベースに新しい取り組みに挑戦する事を期待している。

特に平成13年度から発足する独立行政法人産業技術総合研究所においては、光技術研究部門において光技術の新たな研究推進を図ることが期待されている。ここでは従来当所で展開してきた光及び量子技術の研究に加えて、物質工学工業技術研究所における有機光材料研究や大阪工業技術研究所におけるガラス系光材料研究、機械技術研究所における精密光計測技術研究を推進し、我が国の産業基盤や生活基盤となる光技術の新展開を行うこととなる。新研究部門で対象とする技術分野は、光を主として情報のメディアとして利用するソフト・フォトンクス、主としてエネルギーのメディアとして利用するハード・フォトンクス、この両側面を利用し特に快適な人間生活や環境への光の利用をめざすアメニティ・フォトンクスから構成されると考えられる。これらの技術分野は相互に密接に関連して、光の有する様々な優れた特性を利用し、その可能性を大きく広げることを目的としている。しかしながら研究成果が実用となる技術として結実するまでには、研究者の独創性に根ざした研究開発の努力のみ

ならず、それを現実化するための種々の取り組みが必要である。関係各位の今後の一層のご協力とご支援を期待する次第である。

4. 各ラボ紹介

高密度パルスレーザー技術ラボ	鳥塚健二
超短光パルス技術評価ラボ	鳥塚健二
超短光パルス光エレクトロニクス評価ラボ	狭間壽文
フェムト秒光エレクトロニクスラボ	渡辺正信
光電子機能制御ラボ	渡辺正信
IV族元素酸化物光エレクトロニクス・ラボ	柴田 肇
光機能性材料・素子ラボ	仁木 栄
超高速電子回路技術評価ラボ	杉山佳延
創造フォトニクスラボ	土田英実
情報光学ラボ	森 雅彦
極限時空間フォトニクスラボ	時崎高志
低次元集合系フォトニクスラボ	小林俊介
自由電子レーザーラボ	山田家和勝
レーザーコンプトンラボ	大垣英明
陽電子利用物性研究ラボ	鈴木良一
極低温放射エレクトロニクスラボ	大久保雅隆
X線レーザーラボ	富江敏尚