21 世紀の照明を展望する[†]〔1〕光関連材料・デバイスの新展開^{††}

光関連材料・デバイス研究専門部会

委員長 一ノ瀬 昇*

1. はじめに

照明学会は本年 11 月をもって 75 周年を迎える。これを記念して各種のイベントが計画されているが、その一環として照明学会誌では「照明学会創立 75 周年記念特集号」が企画された。筆者が編集委員長時代の企画であり、大いに協力したいところであるが、光関連材料・デバイス研究専門部会長を仰せつかったのがこの 6 月であり、充分任を果たせないかも知れない。しかし、あえて私見を交えて 21 世紀の照明を展望してみることにする。最初におことわりしなければならないのは、筆者は専門が材料なので、材料的な側面からの話が中心になることをお許し願いたい。また、専門部会の立場もあるので、まず、光源用新素材について述べた後、デバイスについても多少触れることにする。

2. 光源用新素材

今日「新素材」という言葉は、広く使われ定着しているものの、その範囲・定義については必ずしも共通の理解が存在しているわけではない。過去に新素材を定義すべく、表 1 に示すような提案がなされているが、決定版といえるものはない。先般、基礎新素材研究会がまとめた「新素材産業の今後のあり方について」という報告書¹⁾の中に次のように定義しているので参考までに紹介しておく。

「新素材とは、金属系・無機系・有機系の原料及びそれらを組合せた原料を基にして、高度な製造・加工技術（例えば原子・分子レベルのミクロな構造制御・高純度化・複合化等）または商品化技術を駆使することによって、従来に無い新しい画期的な特性および新しい社会的価値を生み出す付加価値の高い素材」としている。

また、上記の報告書では、新素材 4 分野（新金属材料、高機能性高分子材料、ファインセラミックスおよび複合材料）の 2000 年における市場規模を表 2 のように年間、9.5～12.6 兆円と推定している。どのような根拠からこの

表 1 新素材の定義（例）

1. 産業構造研究会（通商産業省産業政策局）の定義（1984 年 3 月）
新素材とは、物性研究、材料設計、材料加工、試験・評価の研究を通じて、既存素材の欠点を補ったり、優れた特性を引き出すことにより、高度な機能、構造特性を実現した付加価値の高い材料
2. 日本興業銀行の定義 興銀資料 Na 227 1985 Na 4
新素材とは、金属・無機・有機の原料及びそれらを組み合わせた原料に、新しい製造技術あるいは商品化技術を掛け合わせることで、従来に無い新しい物性価値（性能・機能・特性）と社会的価値（用途）を産み出す素材
3. 日刊工業新聞社の定義 新素材・新材料の全て 1986 年 8 月
新素材とは、金属系・無機系・有機系の単独又はそれらの二つ又は三つを組み合わせた素材に、新しいユニットオペレーション、さらに必要があれば、新しい商品化技術を組み合わせることによって、社会の強い要請・需要に応えられる新しい物性的価値（性能・機能）と社会的価値（用途）を持つようになったもの

表 2 新素材 4 分野の 2000 年における市場規模（予測値）（単位：億円）

新素材分野	1987 年	2000 年
有機系新素材	8,452	21,700
金属系新素材	6,448	21,800
無機系新素材	10,844	34,800～65,300
複合材料	5,348	16,800
合 計	31,092	95,000～126,000

ような数字が出てくるのか詳細はわからないが、これが実現されれば新素材は万々才というところであろう。新素材 4 分野の 1 つであるファインセラミックスについてもファインセラミックス産業基本問題懇談会から報告書²⁾が出されており、表 3 のように 2000 年には年間 6 兆円になると強気の数字が発表されている。この 5 月幕張メッセで開催された「新素材展」の賑わいぶりをみているとまんざら嘘にも思われないが、まずは新素材の順調な発展を期待したいものである。

さて、話を照明あるいは光源という分野に限った場合に新素材はどのように位置付けられるであろうか。光源の歴史は材料の歴史といわれるくらいに新材料の開発が、新光源の開発に大きなインパクトを与えてきたことは事実である。この関係は 21 世紀になっても変わることはあるまい。したがって、光源という比較的枯れた分野にあっても新素材あるいは新材料の影響は大いにあるものと思われる。

照明学会では、光源分野における新素材の利用状況をまとめるため、昭和 63 年 8 月に光源用新素材研究調査委員

† View & trends of lighting engineering toward 21st Century

†† New development of opto-electronic materials and devices

* 早稲田大学理工学部教授・理博

Noboru Ichinose

(単位: 億円)

表3 ファインセラミックス市場の長期需要見通し (2000年)

大項目	小項目	現 状 (1987年)	2000年 見通し
電 磁 気 的 部 材	IC 基板, パッケージ等	1,360	3,370
	サーミスタ, バリスタ化合物, 半導体等	420	2,000
	磁性材料	1,520	3,370
	コンデンサー	1,800	6,200
	圧電素子, 振動子等	1,200	6,000
	スパークプラグ	440	730
	電磁絶縁体等	660	2,100
	その他	0	5,100
	(小 計)	7,400	28,870
工 具 ・ 機 械 的 部 材	工具・高硬度部材	690	2,320
	耐摩耗部材	160	1,370
	その他	150	1,350
	(小 計)	1,000	5,040
熱 的 部 材	高温耐摩耗部材	100	1,170
	高温耐蝕部材	150	1,800
	その他	250	1,970
	(小 計)	500	4,940
化 学 医 療 用 部 材	センサー	170	1,020
	触媒, 触媒担体	390	980
	生体材料	30	1,950
	その他	30	560
	(小 計)	620	4,510
光 学 的 部 材	光ファイバー	670	4,800
	その他	250	2,350
	(小 計)	920	7,150
そ の 他 部 材	原子力関連部材, エネルギー	0	820
	生活文化用品	200	1,280
	超電導材料	0	1,550
	その他	0	1,000
	(小 計)	200	4,650
小 計		10,640	55,160
ダ イ ヤ		約 820	4,980
合 計		114,460	60,140

会(委員長 一ノ瀬 昇, メンバー 15 名)を発足させ、3 年間の調査を実施し、先般報告書をまとめたところである。詳細は報告書³⁾を参照して頂くことにし、まずはその概要を紹介しておこう。

既述のように、光源の開発において材料が重要であることは、今更言うまでもないことである。昭和 63 年 3 月に終了した“セラミック材料研究調査委員会”では、光源開発におけるセラミック材料に焦点を合わせて調査結果をまとめたが、今回の光源用新素材の調査では、セラミック材料に限らず、広く新素材を取り上げ、高効率光源および光源システムの開発に必要な各種新素材の研究開発動向について調査を行っている。

この調査では、次の 3 つの分野、すなわち、(1)ポリマー、(2)アモルファス材料、(3)光デバイスについて、専門家から最近の研究動向を伺うというヒアリング形式でスタートした。しかし、ヒアリングが終つてみると、結局、有機材料、金属材料、無機材料、半導体デバイスというような分け方になり、報告書でもその分類でまとめられている。

各材料でいろいろなトピックスがあったが、有機材料では、機能性高分子材料、有機非線型光学材料、スーパーエ

ンプラが話題となり、金属材料では、アモルファス金属材料、アモルファスシリコン材料が取り上げられていた。また、無機材料は、話題も多く、光デバイス用材料、ニューガラス、電気光学結晶、光ファイバ材料、透光性 YAG などが取り上げられた。さらに、半導体デバイスとしては可視半導体レーザ、CCD 撮像素子などが話題となった。

この調査で取り上げた新素材は、比較的今日的なものが多く、21 世紀を担うような新素材とは言い難い。したがって、21 世紀の照明を担うような新素材はこれからの研究開発に待たねばならないかも知れない。現在、新素材を 21 世紀を担う先端材料とすべく、国や大学さらには企業において新素材の研究開発が積極的に行われているが、それらのターゲットは半導体産業を中心としたものであり、照明とか、光源を指向したものは皆無に近いのではなからうか。

照明学会創立 75 周年を記念して研究助成基金を募集し、照明学会の将来を担う研究に助成をしようとする動きがあるが、材料開発への注力を怠るようでは 21 世紀に向けての光源の進歩は考えられない。光源分野での新素材の導入率など測るすべもないが、この分野でも積極的に新素材を活用し、活性化を計らねばならぬことは火を見るよりも明らかなことである。

筆者が考える 21 世紀の光源にとって重要な新素材の 1 つは新機能薄膜材料である。現在、薄膜では人工超格子とか超薄膜とか原子、分子レベルでコントロールされた積層薄膜が話題となっており、半導体分野では実用化の段階に入りつつあるが、このようにナノメートルレベルで設計された膜でなくても、光源分野では薄膜の重要性は増してこよう。

われわれが物質の有する優れた特性の 1 つを利用するとき、その物質が大きな塊りでなくても、表面や界面の薄層あるいは他物質基板上の薄膜で十分機能を発揮できることが多い。すなわち、薄膜物質は、このように表面、表層、界面、層間において限られた面積を占めるのみで十分機能を果たすものであるから、機能/重量の比が高いことになる。一方、薄膜はその組成、寸法、特性などを厳密に制御しなければならないので、薄膜の作製法には高度な技術が駆使されなければならない。

一般に薄膜生成技術を大別すると、物理的方法と化学的方法がある。物理的方法とは、膜構成成分の供給が物理的に行われるものであり、蒸着法、スパッタ法、クラスタービーム法などがある。一方、化学的方法とは膜形成途中になんらかの化学反応を伴うような薄膜形成法であり、有機、無機の様々な前駆体を分解しながら膜形成をする CVD (Chemical Vapour Deposition)、スプレーパイロシス、スピニング法などがある。主要な薄膜プロセスを表 4 に示した⁴⁾。

最近レーザアブレーションという手法を、人工的な薄膜あるいは高品質の薄膜作成法として発展させようという動きがある⁵⁾。その契機となったのは、1987 年に始まった酸

表 4 主要な薄膜生成プロセスの比較

成膜法 項目	スパッタ リング	パルスレー ザ蒸着	真空蒸着	分子線エピ タキシー (MBE)	レーザ MBE	熱CVD	プラズマCVD 光CVD
原料形態	金属酸化物	酸化物	金属酸化物	金属酸化物	酸化物 (金属)	有機金属 ハロゲン化物	有機金属
原料励起	プラズマイオン スパッタ	レーザビーム	抵抗加熱 電子ビーム	抵抗加熱 電子ビーム	レーザビーム	熱	プラズマ 光
酸化源 ^{a)}	O ₂ O*	O ₂ , N ₂ O O*	O ₂ O*	O ₃ , NO ₂ O*	NO ₂ O*	O ₂	O ²⁺ O*
成膜室圧力(Pa)	10 ⁻² ~1	1~10 ²	10 ⁻³ ~10 ⁻¹	10 ⁻⁵ ~10 ⁻³	10 ⁻⁶ ~10 ⁻³	10 ³ ~10 ⁵	1~10 ³
基板温度(°C)	500~750	500~750	500~750	300~750	500~700	700~900	500~700
特長	大面積成膜	高酸素分圧 組成ずれ少ない	エピタキシャ ル膜	分子層制御 低温成膜	分子層(原子層) 制御	量産性	量産性 低温成膜
in situ モニタ				RHEED	RHEED		

a) O*: プラズマ (または光) 励起により発生する酸化化学種 (ラジカル, イオン)。

図 1 レーザアクション装置

図 2 レーザアクションを利用して、Bi₂O₃, SrCuO, CaCuO の 3 つのブロックに分けて積み上げ、Bi-Sr-Ca-Cu-O 系超伝導薄膜を作製するスキーム

化物超伝導薄膜の作成がこの手法で簡単に行われ得ることが実証され、さらに、その薄膜の品質が他の手段で作成されたものに比べて良いことが明らかになったためである。例えば、図 1 に示すように、エキシマレーザを用いて 1000 Å 以下の YBa₂Cu₃O_x 薄膜が作成され、その臨界温度 T_c は 90 K、臨界電流密度 J_c は、10⁶ A/cm² (77 K) 台の特性を有することが示されている。Bi-Sr-Ca-Cu-O 系では図 2 のような積み上げで作成できる⁶⁾。

レーザアブレーション法の特徴として、物理的、技術的なものを挙げると次のようになる。

- (1) アブレーション粒子の高い運動エネルギー（数 eV~100 eV の粒子が含まれている）
- (2) アブレーション粒子の一部は励起状態またはイオン化状態にあること
- (3) 数 ms 以内の短時間にアブレーション粒子が集団で基板に到達し、パルスの約 1 原子層の膜形成が行われること
- 以上は物理的な特徴であるが、技術的な特徴としては、
- (4) 多元系の物質でストイキオメリーの保持がスムーズに行われること
- (5) 酸化物超伝導薄膜作成の場合、最も制御の難しい酸素量を、レーザアブレーション時の広範囲な酸素圧の調整によって制御可能なこと、などがある。

レーザアブレーション法では、多くの場合短波長のエキシマレーザを使用している。それは、中速の粒子群が主に放出され、励起状態が効率よく生成されていることによって、レーザアブレーション法は超伝導薄膜だけではなく、新しい物質の薄膜作成や新機能を発現する薄膜作成にも適用できる。今後、これらの手法を光源分野に適用してゆくとして、興味ある膜としては、透明導電膜、赤外反射膜、紫外線吸収膜などがあり、これらの薄膜開発は、照明技術にも大きな進歩をもたらすことになろう。

3. 光デバイス

光デバイスを包含する分野はオプトエレクトロニクスである。オプトエレクトロニクス技術は 21 世紀に不可欠なものであるが、その意味するところは人によって、あるいは時代によって異なっている。現在、一般的に言われている定義は次のようなものである⁷⁾。

- (1) 従来、エレクトロニクスが果たしてきた機能を、オプティクスの手段・方法で置き換えるような装置ならびに技術と科学

表5 オプトエレクトロニクスデバイスの例

機 能	デ バ イ ス
1. 発光, 表示	各種レーザ, 発光ダイオード, 非線形光学による光発生デバイス, CRT, プラズマディスプレイ, 液晶ディスプレイ, ELディスプレイ, など
2. 光電変換	光電管, 光電子増倍管, 受光ダイオード, 光導電素子, 撮像デバイス, 光センサアレイ, など
3. 光制御	電気光学・音響光学デバイス, 光増幅・結合・分岐・フィルタ・アイソレータ・スイッチ・論理などの機能素子, 光集積回路, など
4. 光伝送	光ファイバおよびその周辺素子, など
5. 光記録	感光材料, 光メモリ材料, など

(2) 従来, オプティクスが果たしてきた機能をエレクトロニクス的手段・方法で置き換えられるような装置ならびに技術と科学

これら二分野がオプトエレクトロニクスであり, 境界領域であること, したがってその境界は絶えず変化していることが特徴である。

オプトエレクトロニクスを上記のように広く解釈した場合に考えられる機能, デバイスの例をまとめると表5のようになる。これらの材料・デバイスを用いて数多くの装置, システムが実用化され, あるいは開発されつつある。代表的な応用分野は, 光通信, 光情報処理, 画像記録, 表示・計測などである。

オプトエレクトロニクスでは表5のように, さまざまなデバイスが用いられ, これに対応して広範囲の材料が用いられる。これらの材料に共通している物質は, いうまでもなく光が主役を果たすということである。そして, 物質と光及び電子との相互作用の過程で生ずる有用な現象がデバイスとして利用されているのである。当然, 照明関連の光デバイスもこれらの中に含まれている。

さて, 光が物質に照射されたときに起こる現象では, 反射, 屈折, 吸収が基本的なものである。これらを記述するパラメータである反射率, 屈折率, 吸収率は, いずれも物質の状態の関数である。外部から物質の状態に働きかけ, あるいは異なる状態の適当な組合せを作ることにより, 物質から再放射される光に情報を付加することができる。光制御, 光伝送デバイスの大部分は, このような原理で動作するものである。

光ファイバは全反射現象を巧みに利用したデバイスで, ある地点から所望の別の地点まで光を伝送すること自体が, 「情報」とみなせる。光ファイバ用ガラスには, 現在, 石英や多成分系ガラスが用いられているが, フッ化ジルコニウム (ZrF_4) を主成分とするフッ化物ガラス (ZrF_4 - ThF_4 - BaF_2) が有望である。このガラスで光ファイバが作製できれば, 現在の石英系ガラスファイバで達成している伝送損失の限界0.2 dB/km よりも大幅に少ない, 0.01~0.001 dB/km の可能性もあり, 今後の期待も大きい。このようなファイバは21世紀には実現するのではなかろうか。

光が物質に入ったとき, 光のエネルギーの一部分は吸収

表6 電子ディスプレイデバイスの分類

される。光の吸収によって物質は何らかの変化が生ずるが, その代表的なものが, 外部及び内部光電効果であり, 光のエネルギーが電子のエネルギーに変換される。光変換デバイスは, この電子状態の変化を電気信号の形で取り出すものである。一方, 光でポンプされる各種のレーザ, 蛍光体などでは励起された電子系が低エネルギー状態にもどるとき, 入射光とは異なる波長の光を放出する。

光を透過させるセラミックスの研究も活発である。アルミナ (Al_2O_3), イットリア (Y_2O_3), マグネシア (MgO), ジルコニア (ZrO_2), PLZT ($PbTiO_3$ - $PbZrO_3$ - La_2O_3) 系などが知られている。耐熱性, 透光性, 耐食性, 価格性などを考慮して, アルミナは高圧ナトリウムランプの発光管に利用されているが, 今後はアルミナに代る高性能な新素材の開発が望まれる。PLZT は電気光学効果を利用して光スイッチなどに応用されつつあるが, さらに新しいデバイスが期待される。

最後に, ディスプレイデバイスについて簡単に触れておこう。表6に電子ディスプレイデバイスの分類を示した。ここで, 光情報信号が発光により表示される場合が発光形表示であり, 一方反射, 散乱, 干渉現象などによる周囲光の制御, すなわち光変調で表示される場合が受光形表示と呼ばれる。

以下, これから発展が期待されるデバイスについて簡単に述べると, まず, LCD では, CRT 並の表示情報の増大, 表示機能の拡大と高性能化を目指すマルチプレックスマトリックス表示, アクティブマトリックス表示, フルカラー表示, ビデオ表示, 大画素表示などの開発が進められている。このためのLCDの主要課題は, 高性能液晶材料の開発とならんで, 安価で高信頼性のマトリックススイッチングアレーとR・G・Bモザイクカラーフィルタの開発といえる。

LCDと同じ受光形表示デバイスのECDにおける主要課題は動作寿命の向上であり、大容量表示のためのマトリクス表示の実現である。これらの課題が解釈されてはじめてECDの実用化が促進されるといえる。このほかに、ECDの特徴であるメモリ機能、全固体化、多色カラー化などの有効活用の推進が今後期待できる。

発光形であるELの場合には、寿命、信頼性、発光輝度、コストなど多くの問題があったが、寿命と信頼性の点では実用レベルまで達したといえる。続いて、高輝度化と低電圧化のための材料と構造の探索、さらに赤色、緑色、青色発光の蛍光体の開発が進められており、全固体化構造とメモリ機能を十分に駆使したコンパクトで、CRT並の表示容量をもつ低電圧高輝度EL表示パネルの開発が期待される。

電子ディスプレイデバイスでは、それらの開発課題が解決できたとしても、ディスプレイデバイスの理想の姿（高輝度、高コントラスト、高レスポンス、大表示容量、高解像度、フルカラー、薄形・軽量、低電圧・低電力、駆動回路内蔵、長寿命・高信頼性、低価格など）の実現は、依然として困難であるといえる。したがって、この理想の姿を追求すべく、これからも引き続き多種多様な電子ディスプレイデバイスが開発されることになろう。ディスプレイデバイスの市場性は急速に拡大しており、21世紀には産業と

して重要な地位を占めることになろう。

4. おわりに

21世紀の照明を展望するとき、筆者のような材料屋の立場からは、基盤技術である材料技術を大事にして欲しいと訴えたい。冒頭にも述べたように、照明のなかでも少なくとも光源の歴史は材料の歴史であるといっても過言ではない。材料技術、その中から生まれた新素材が21世紀の照明技術の牽引車になることを期待して筆を置くことにする。

参考文献

(1) 基礎新素材研究会「新素材産業の今後のあり方について」(平成元年10月19日)
(2) ファインセラミックス産業基本問題懇談会:「ファインセラミックス産業問題懇談会報告書」(平成元年12月1日)
(3) 照明学会調査報告書:「光源用新素材」(1991)
(4) 鯉沼秀臣, 吉本護:応用物理 **60** (1991) 433
(5) 村上浩一, 升田公三:ニューセラミックス **3**, No. 7 (1990) 49
(6) 川合知二, 川合真紀:応用物理 **59** (1990) 610
(7) 一ノ瀬 昇:セラミックス **21** (1986) 3
(受付 1991 年 9 月 5 日)

〔2〕光源システム技術の展望

光の発生・関連システム研究専門部会[†]

委員長 浦山 隆*

1. はじめに

1879年にEdisonが白熱電球を実用化してから1世紀余り、蛍光ランプが1938年Inmanによって実用化されてから50有余年経過し、今やわが国は放電灯の全盛期を迎えている。

Edisonが実用化したランプの効率は、1.7 lm/Wであったといわれているが、それは今や白熱電球で約20 lm/W、その後開発された蛍光ランプやHIDランプなど放電ランプでは現在150 lm/Wのものも出現しており、効率や光色において大きく進展してきている。

照明学会が創立された1910年代は、藤岡市助博士により、わが国初の白熱電球が実用化され、タングステン電球が一応完成し、電球の普及が急速に進んだ時期であった。当時は電球の多様化がすすみ、その標準化とインテリア照明としての座敷の照明、エクステリアとしての街路照明が緊急の課題であったという。

照明学会が創立75周年を迎えるに当たり、光源システム

の発展を回顧し、21世紀に向かって現状と今後の展望を試みるには良い時期である。

表1 光源の種類

[†] View of light source system techniques

* 立命館大学理工学部電気工学科教授 Takashi Urayama