

「三次元光デバイス高効率製造技術」  
(事後評価) 分科会  
資料5-1

# 「三次元光デバイス高効率製造技術プロジェクト」

## 事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

概 要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

- 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性……………6-20
  - 1.1 NEDOが関与することの意義……………6-20
  - 1.2 実施の効果(費用対効果)……………6-22
- 2. 事業の背景・目的・位置づけ……………6-27

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標……………6-34
- 2. 事業の計画内容……………6-51
  - 2.1 研究開発の内容……………6-51
  - 2.2 研究開発の実施体制……………6-55
  - 2.3 研究の運営管理……………6-59
  - 2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性……………6-62
- 3. 情勢変化への対応……………6-64
- 4. 中間評価結果への対応……………6-65
- 5. 評価に関する事項……………6-66

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果……………6-67
- 2. 研究開発項目毎の成果……………6-83

IV. 実用化の見通しについて

(実用化の見通しについて)

- 1. 実用化の見通しについて……………6-377
- 2. 波及効果……………6-377

V. 成果リスト

- 1. 論文リスト:査読付き……………6-378
- 2. 講演・口頭発表リスト……………6-381
- 3. 雑誌投稿リスト……………6-388
- 4. 展示会、プレス発表……………6-391
- 5. 受賞実績……………6-392
- 6. 特許リスト……………6-392
- 7. 学会発表特記事項……………6-393

VI. その他資料

- 1. イノベーションプログラム基本計画……………6-394
- 2. プロジェクト基本計画……………6-396

3. 技術戦略マップ(分野別技術ロードマップ).....	6-406
4. 事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント募集の結果).....	6-410

## 概要

		最終更新日	平成 23 年 6 月 23 日
プログラム（又は施策）名	ナノテク・部材イノベーションプログラム/ITイノベーションプログラム		
プロジェクト名	三次元光デバイス高効率製造技術	プロジェクト番号	P06029
担当推進部/担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 坂井数馬（平成 23 年 06 月現在） ナノ部 担当者氏名 坂井数馬（平成 19 年～平成 23 年 06 月）		
0. 事業の概要	<p>ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化、省エネ化等のニーズに対応するためには、今後ますます高機能化が求められる。ガラスは結晶材料に比べ、組成の選択範囲が連続的で広く、かつ構造の自由度が大きい。このため組成と構造の多くの組み合わせが可能で、それに伴い種々の潜在的特性・機能があると考えられる。しかし従来技術は、組成の制御と熱処理等、マクロな構造制御に終始しており、ごく一部の特性や機能しか実現できていない。ガラスが本来有している潜在的な特性や機能を有効に引き出すためには、ガラス母材とはその物性の異なった異質相をガラス内部に作製し積極的に新たな機能をガラスに誘起する必要がある。このような基盤技術の開発は「ナノガラス技術」プロジェクト(H12～H17)で実施されてきた。</p> <p>本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトで得られた基盤技術を実用的な加工技術へと発展させるものであり、ホログラム等の波面制御素子による空間光変調技術を確立し、フェムト秒レーザーとの組合せによりガラス中に三次元造形を高精度かつ高速に一括形成できる加工プロセス技術を開発する。またこの技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。</p> <p>今回開発を行う技術によって、光情報処理の基本デバイス(光スイッチ、光増幅器、合分波)の開発が加速化されるとともに、近い将来には、集積化された光回路デバイスの実用化が可能となり、中長期的な光技術の競争力の確保につながる。また、デジカメのレンズ等の従来の光学デバイスの中に機能を付加することが可能となり、より高機能な性能を持つ部材開発を加速する。</p> <p>具体的な事業内容は次のとおり、</p> <p>【研究項目①デバイス化加工用ガラス材料技術】</p> <p>【研究項目②三次元加工システム技術】</p> <p>【研究項目③三次元加工システム応用デバイス技術】</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>【NEDOが関与する意義】</p> <p>本プロジェクトで開発するホログラムを用いたガラス内部への加工技術は、ニューガラスフォーラムが2003年9月に国内の学会で初めて報告、以降、米国の国際学会でも報告する等、我が国が世界をリードしているところであるが、将来における当該分野の競争力を確保するためには、ガラス内部に数十ナノメートルオーダーで一括加工する技術を世界に先駆けて確立することが必要であり、複数の研究機関及び企業の知見を集結する必要があるため、民間企業の自主的な取り組みでは難しい。従って、NEDOの関与により「産業化を視野に入れた基盤技術の開発」といった、市場原理のみでは、戦略的・効果的に達し得ない領域の研究開発を、重点的に実施する(科学技術基本計画)ことが必要である。</p> <p>【実施の効果（費用対効果）】</p> <p>費用:【開発予算】に記載。</p> <p>効果:本プロジェクトの成果による民間需要創出効果(平成 27 年:2015 年)は 2015 年で約 1 千</p>		

	<p>300 億円、2020 年には 2 千億円を上回るものとする。また、現プロジェクトでの本加工システムの有効性の実証対象としている導波路型デバイスと光学デバイスの市場は、三次元光デバイスの市場のほんの一部であり、そのマーケットは数兆円と見られている。従って、実証対象としているデバイス以外の市場での適用も考えられ、また材料としてガラス以外でも使用できるために、新たなその他の大きな市場を期待でき、本プロジェクトの事業規模を 16.6 億円(平成18年度から平成22年度までの総予算額)としていることから、本プロジェクトは投資より大きな需要を創出するものと見込まれる。</p> <p><b>【事業の背景・目的・位置付け】</b></p> <p>本プロジェクトは経済産業省が策定した「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の情報通信領域・光デバイス・三次元光デバイスに位置付けられ、製造業の国際競争力強化の為にナノテクノロジーの確立に必要な共通基盤技術の開発に位置付けられている。</p> <p>また、本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。</p> <p>また、「三次元光デバイス高効率製造技術」は総合科学技術会議において革新的技術戦略における高速大容量通信網技術・オール光通信処理技術の一部として登録された。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。</p>
--	---

II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p><b>【事業の目標】</b></p> <p>平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工技術と空間光変調器三次元加工技術を確立する。また具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性の実証を行う。</p> <p>尚、本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。これ等を本プロジェクトの広義での全体目標とする。</p>																		
<p>事業の計画内容</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="427 1749 619 1809">主な研究開発実施事項</th> <th data-bbox="619 1749 770 1809">H18fy</th> <th data-bbox="770 1749 948 1809">H19fy</th> <th data-bbox="948 1749 1129 1809">H20fy</th> <th data-bbox="1129 1749 1307 1809">H21fy</th> <th data-bbox="1307 1749 1418 1809">H22fy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="427 1809 619 1879">デバイス化加工用ガラス材料技術</td> <td data-bbox="619 1809 770 1879">→</td> <td data-bbox="770 1809 948 1879"></td> <td data-bbox="948 1809 1129 1879"></td> <td data-bbox="1129 1809 1307 1879"></td> <td data-bbox="1307 1809 1418 1879">→</td> </tr> <tr> <td data-bbox="427 1879 619 1955">三次元加工システム技術</td> <td data-bbox="619 1879 770 1955">→</td> <td data-bbox="770 1879 948 1955"></td> <td data-bbox="948 1879 1129 1955"></td> <td data-bbox="1129 1879 1307 1955"></td> <td data-bbox="1307 1879 1418 1955">→</td> </tr> </tbody> </table>	主な研究開発実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	デバイス化加工用ガラス材料技術	→				→	三次元加工システム技術	→				→
主な研究開発実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy														
デバイス化加工用ガラス材料技術	→				→														
三次元加工システム技術	→				→														

	三次元加工システム応用 デバイス技術					→
	成果とりまとめ					→
開発予算 (会計・勘定 別に事業費 の実績額を 記載)(単 位:百万 円)	会計・勘定	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy
	一般会計	372	356	340	313	235
	特別会計 (電源・需給の 別)					
	加速予算(成果 普及費を含む)	20	19			
	総予算額	392	375	340	313	235
	契約種類: ○をつける (委託(○) 助成( ) 共同研究 (負担率 ( ))	(委託) (助成) :助成率△/□ (共同研究) :負担率△/□				
開発体制	経産省担当原 課	製造産業局住宅産業窯業建材課				
	プロジェクト リーダー	(※プロジェクトリーダーが交代した場合は、前任者の所属・氏名も記載) (※サブプロジェクトリーダーやグループリーダーを設置している場合はその所 属・氏名を記載) 国立大学法人 京都大学 平尾 一之教授 サブプロジェクトリーダー:三浦清貴(京都大学)、原 勉(浜ホトニクス)、 田中修平(ニューガラスフォーラム)				
	委託先(*委 託先が管理 法人の場合 は参加企業 数および参 加企業名も 記載)	国立大学法人京都大学 浜松ホトニクス株式会社 社団法人ニューガラスフォーラム				
情勢変化への 対応	<p>・ 内閣府(総合科学技術会議)において革新的技術戦略(平成20年4月10日)における高速大容量通信網技術-オール光通信処理技術-の一部として「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトが登録された。この革新的技術により、スイッチ・経路処理を含め、ネットワークのオール光化技術により、爆発的に増大する情報を処理可能とする一方で、ネットワークにおける電力効率を数十倍程度向上した超高速基幹ネットワークの構築が可能となる。また、次世代イーサネット規格等の国際標準の獲得をも目指した技術確立等により、我が国の国際競争力が強化される。</p> <p>これに対応すべく、三次元光デバイス高効率製造技術の研究開発を従来以上に活発に進めていく。</p> <p>・ フェムト秒レーザー加工をより高性能化するには、レーザーの高出力化により異質相形成のメカニズムを解明する必要があることが分かり、加速資金にて京大におけるフェムト秒レーザーの高出力化を行い、異質相形成のメカニズムの解明に役立たせた。</p>					

	<ul style="list-style-type: none"> <li>定期的に開催する研究推進・業務委員会にてその他の情勢変化やその対応を議論・検討した。</li> </ul>	
中間評価結果への対応	<p>(中間評価を実施した事業のみ)</p> <p><b>京都大学</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 基礎的な技術開発にも注力すること。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・“LCOS-SLM を利用し、曲線導波路、分岐導波路を一括描画するためのホログラム作成方法の基礎検討（アルゴリズム等）を行った。</li> </ul> </li> </ul> <p><b>浜松ホトニクス</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 該当なし。</li> </ul> <p><b>ニューガラスフォーラム</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 光集積回路の実現においてアクティブ素子を如何にして実現するか。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・アクティブ素子実現のための基礎実験を行った。</li> <li>・フェムト秒レーザーの照射部のみが発光する条件を発見した。この現象を利用するとレーザー発振の可能性がある、これには数センチメートル以上の長さの光導波路が必要である。これはホログラムを使用した一括描画で作製できる。</li> </ul> </li> <li>● ホログラフィック加工に並行してその他の要素技術をどうするか。 <p>下記の種々の技術を開発した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高速長尺ホログラフィック加工による穴あけ技術の要素技術を開発した。</li> <li>・ホログラフィック加工と光学系を組合せた加工システム技術を開発した。</li> <li>・レーザー光の入射方向への伸びを抑える技術を開発した。</li> <li>・レーザー光を有効に使用できる材料作製技術を開発した。</li> </ul> </li> <li>● 基礎的な技術開発にも注力すること。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・レーザー光とガラス材料との反応の素過程を考察し、上述の入射方向への伸びの少ない加工技術を開発した。また、これらの考察を基に低エネルギーで加工できる技術を開発した。</li> <li>・デバイス作製時の加工エネルギーが少ない新型光学素子の基礎的検討と素子の試作を行いその機能を確認した。</li> </ul> </li> </ul>	
評価に関する事項	事前評価	平成 17 年度実施 担当部 ナノテクノロジー・材料技術開発部
	中間評価	平成 20 年度 中間評価実施
	事後評価	平成 23 年度 事後評価実施予定
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>ホログラムによる三次元でのミクロンレベルの一括加工が可能であることが世界で初めて実証された。また、プロジェクトの全ての目標は達成され、一部の成果は実用化に向けて展開されている。</p> <p>以下に個別テーマ毎に記す。</p> <p><b>研究開発項目①デバイス化加工用ガラス材料技術</b></p> <p><b>(1)デバイス加工用ガラス材料技術(国立大学法人京都大学、社団法人ニューガラスフォーラム)</b></p> <p>フェムト秒レーザーの集光照射により誘起される異質相の形成メカニズムを解明することで、異質相形成のガラス材料依存性を明らかにし、データの体系化を行った。また、新規な異質相形成としてガラス内部からの Si 析出や元素分布形成とその形状制御に成功すると共に、これら新しい現象のメカニズムも明らかにした。一連の研究により、ガラス材料内部加工の基礎を確立することができた。</p> <p><b>(2)三次元光学デバイス用ガラス材料技術(社団法人ニューガラスフォーラム)</b></p> <p>ホログラムを用いた一括加工での加工条件の最適化の検討を行った。具体的には、逐次</p>	

照射加工でガラス母材と異質相との屈折率差が 0.015 以上を確認されたガラスに対して、ガラス・ホログラムを用いた一括加工により～0.01 秒以下の照射時間でライン状の加工ができることを確認した。これにより、光学デバイス用の加工に適用できることが原理的に確認できた。また、上記ガラスとは別に、以前と同じ逐次レーザー加工において 75%のエネルギーで  $\Delta n=0.015$  を実現するガラス母材を開発した。

### (3)三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術(国立大学法人京都大学、社団法人ニューガラスフォーラム)

空間光変調器を利用した一括加工光学システムおよびホログラム作成プログラムを構築し、ダンマングレーティングおよび Y 分岐導波路の一括形成を各種ガラスにて試みた。その結果、Au 含有ガラスにおいて比較的低閾値にて分岐が可能な素子が得られることを確認した。また、複数の光導波路の一括描画を試み、最終達成目標である内部伝送損失が 0.1 dB/cm 以下の光導波路が描画可能であることを確認した。

## 研究開発項目②三次元加工システム技術

### (1)三次元加工システム技術目標(社団法人ニューガラスフォーラム)

異質相の更なる多層化や高集積化について改善した手法を基に設計したホログラムを用いて、一辺が 60 $\mu$  m の立方体のガラス内に 100 個の異質相を三次元に形成できるレーザー一括加工を目指し、従来比 100 倍以上の高速加工を実証した。さらに三次元ホログラムの応用例として、長焦点深度ホログラムを設計し、これを用いて厚さ 500 $\mu$  m のシリカガラス基板に微細貫通穴あけ加工(射出面穴径 1 $\mu$  m)を実現した。

フェムト秒レーザーを使用した三次元光デバイス加工システムの改良を行った。このシステムと、次項(2)で述べるホログラムの設計と作製技術を用いて作製されたガラス・ホログラムを用いることで光軸方向への伸びを制御した加工を実現し、ガラス内部の一辺 60 $\mu$  m の立方体内に三次元に分布する 100 点の異質相を一括で加工することに成功した。これらの実験により、作製したデバイスの基本情報からホログラムとデバイス設計に必要な加工基礎データを取得した。

ガラス・ホログラムを使用して、ガラス内部に長さ 1cmの直線導波路を作製し、1550nm の導波路を確認した。また、直線導波路を組み合わせて、2x2結合器、マツハツエングー型干渉計等のデバイスを試作し、基本性能の確認を行った。

ガラス内部に形成した異質相の屈折率を非破壊で測定するため、三角光路をもつ透過型干渉計を開発した。これで得られた干渉縞に位相増幅法とでコンボリューションアルゴリズムによる超解像処理とを適用しナノオーダーが測定できるサブフリンジ計測が可能となった。これを用いて数十ナノの光路長差測定により屈折率差を求めた。

### (2)波面制御三次元加工システム技術(社団法人ニューガラスフォーラム)

ホログラム設計では、異質相の更なる多層化や高集積化における改善を行い、一辺が 60 $\mu$  mの立方体のガラス内に100個の異質相を三次元に形成できるホログラムを作製した。またホログラム設計環境に、最新のGPUコンピューティングシステムを導入し、よりスケーラブルなシステムへと拡張した。

ガラス・ホログラム作製プロセスの精度改善を引き続き行い、段幅 2.5 $\mu$  m以上の階段状テストパターンでは、段幅と段の深さが最終目標である製作精度 $\pm 40$ nm 以下であることを確認した。一括加工用ガラス・ホログラムにおいても、ピクセルサイズと段の深さは製作精度 $\pm 40$ nm 以下で作製可能であることを確認した。また、複数枚のガラス・ホログラムを同時に作製するプロセスを構築した。

### (3)空間光変調器三次元加工システム技術(浜松ホトニクス株式会社)

本研究開発項目における最終目標を全て達成した。すなわち、空間分解能45万画素以上の高精細化、変調速度50 Hz、光位相変調度 $2\pi$  ラジアン以上(256レベルの中間値制御も可

能)、50 GW/cm<sup>2</sup>(100 fs、1 KHz)のフェムト秒レーザーパルスへの耐光性を有するフェムト秒レーザー光波面制御モジュールを実現した。また、フェムト秒レーザーによる高機能三次元加工のためのLCOS-SLMによる波面制御技術の開発を行い、当該加工に必要な波形成形、収差補正を実現した。

**研究開発項目③三次元加工システム応用デバイス技術**

**(1)三次元光学デバイス技術(社団法人ニューガラスフォーラム)**

改善されたホログラムと材料を用いて、光学ローパスフィルタの一括描画に取り組み、最終目標の方向無依存のモアレ低減機能を一括描画により実現するための要素技術確立の確認を行った。作製したフィルタのサイズは最終目標値の 2.5mm 以上、フィルタ厚は 0.3mm 以下であった。

さらに、実用化に向けての実製品への搭載実験を行い、異質相色味の映りこみという実用化のための新たな課題も抽出してホログラム開発とガラス材料開発に対してフィードバックをした。また、これまでの当 PJ での回折格子とは異なる異質相配置の方式の光学ローパスフィルタについても試作検討を行った。

**(2)三次元光回路導波路デバイス技術(国立大学法人京都大学、社団法人ニューガラスフォーラム)**

ホログラフィック三次元加工システム(フェムト秒レーザー+LCOS-SLM)を構築し、複数の光導波路の一括描画、2~6 分岐三次元光導波路の描画、グレーティング型分岐回路の描画を試みた。その結果、内部伝送損失が 0.1 dB/cm 以下の光導波路が描画可能であることを確認した。また、分岐ロスとなる 0 次光を入射光の 3%以下に抑えることに成功し、導波路型分岐回路にて設定した最終達成目標と同等以上の特性を有する 1×16 グレーティング型分岐回路の描画が可能であることを確認した。

投稿論文	「査読付き」50 件、「その他」41 件
特 許	「出願済」27 件、「登録」0 件、「実施」0 件（うち国際出願 7 件）
その他の外部発表（プレス発表等）	講演・口頭発表 120 件、展示会・プレス発表 17 件・米国レーザー学会ホームページで 2 カテゴリーにて取り上げ。

IV. 実用化の見通しについて

**(1) 三次元光学デバイス(光学ローパスフィルタ)**

モアレの低減が確認できた。更に改善した一括加工化を進めると同時に、モアレ以外の光学特性をも含めて実用化の観点から問題点の抽出を継続研究で行い、問題が無ければ実用化の検討を行なっていく。

**(2) 光インターコネクション**

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光インターコネクション用として発展させ、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

**(3) 光結合器**

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光結合器などとして発展させて、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

**(4) LCOS-SLM**

開発してきた LCOS-SLM で適応できる分野での実用化を検討する。

**(5) プロジェクトで開発してきた下記についても早期に市場に出るよう努力したい。**

- ・ホログラムシミュレータ・ホログラム加工プロセス
- ・三次元屈折率差測定機能付き形状測定器

	<p>(6)ホログラムを使用した<b>特殊材料の高速、微細加工</b>の問い合わせがきており、新規分野が開拓できる可能性が高い。</p> <p>(7)ホログラムとフェムト秒レーザーを使用した加工に興味を持ち、その<b>市場開拓に協力</b>を申し出られている企業が複数でてきている。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 18 年 3 月 作成
	変更履歴	平成 20 年 07 月 イノベーションプログラム基本計画の制定により (1) 研究開発の目的の記載の改訂

プロジェクト用語集

	用語	説明
あ	アッペ数： $\nu_d$	分散に対する屈折度の比を示した光学媒質の定数。異なった波長の光を異なった方向へ屈折させる度合いであり、アッペ数が高い媒質は、異なる波長に対する光線の屈折の度合いによる分散が少ない。
い	異質相	ある物質の内部に存在する、母材とは異なる物性（屈折率、密度など）を持つ相のこと。本プロジェクトでは、フェムト秒レーザーで形成する。
い	位相増幅法	周期構造を持つ干渉縞に特殊な画像処理を行い、あたかも短い波長を用いたように干渉縞の本数を増やす方法。
い	一括加工	多点を或いは加工したい形状を一度に加工する方法。
い	異方性結晶	ある結晶構造のX、Y、Z軸の長さが異なっている状態。例えばある方向にだけ長い針状の結晶など。ゼロ膨張結晶化ガラス（膨張しないガラス）などは異方性のある結晶を析出させ、その軸方向の膨張率の違いを利用して膨張を抑えている。
え	HPC	High Performance Computing の略で、自然現象のシミュレートや構造解析などの非常に計算量が多い計算処理のこと。スーパーコンピュータを使う手法や多数のコンピュータを利用するグリッドコンピューティングなどの手法が研究されている。
え	NA	開口数ともいい、顕微鏡対物レンズにおいて入射瞳が物点となす角度の正弦で表す。この値が大きいほど二点分解能が高くなる。Numerical Aperture の略。
え	エッチング	エッチング (etching) とは、化学薬品などの腐食作用を応用した塑形ないし表面加工の技法。使用する素材の必要部分にのみ防食処理を施し、腐食剤によって不要部分を除去することで目的形状のものを得る。
え	MCM(マルチチップモジュール)	基板の上に、ベアチップと呼ばれるむき出しのシリコンチップ複数個を搭載したモジュールのことである。立体的構造がとれるので、従来のパッケージよりも面積を節約することができる。あるいは、異なる製造プロセスを使用した素子を搭載することができる。
お	オートフォーカス	ピントを合わせるのに人間の目によらずメカニズムや電気素子を持ち自動的にした機構。
か	開口絞り	開口絞り（カイコウシボリ：aperture stop、aperture diaphragm） ①レンズを通過するのを可能にする軸上光線束の直径を制限して、良くレンズ保持具とも言われる物理的な束縛具。②二次的に調節可能な虹彩絞り。通常、透過光型の顕微鏡のサブステージ集光器の真下に配置されている。開口絞りを調節すると、光の強さや対物レンズに入る光の錐角が変わる。③カメラレンズの虹彩絞りも同様な役目をする。明るさ絞りとも言う。
か	回折	回折（カイセツ：diffraction） 光のある波面が開口や不透明な刃先を通るとき、その刃先で二次的な弱い波面が発生すること。これら二次的波面は初めの波面に影響を与え、相互に色々に打消し合ったり強め合ったりする回折パターンを作るようになる。つまり、不透明物体の刃先で光波が曲げられてしまうことになる。円形の開口を通して見たり、投影された光の点は、この回折によって、常に光の輪で囲まれた中心の明るい像として現れる。
か	回折格子	光の回折を利用してスペクトルを得る素子。多数の細長い刻み（隙間）を等間隔で並行に並べたもので、回折格子に平行光線を入射させ、各溝で回折される光を干渉させることにより特定波長の光を特定方向に反射（分散）するようにしたもの。
か	回折効率	回折光学素子への入射光強度に対する回折光強度の比率である。通常、回折効率は入射光の波長や偏光の状態によって変化する。
か	可変整形ビーム描画方式	電子銃（エミッタ）から発せられる電子線を成形アパーチャーと呼ばれる矩形の穴を何段か通すことにより電子線形状を矩形に変え、X-Y ステージの移動に同期させながら連続照射してパターン描画を行うことを特徴とする。

き	Q 値	Q 値は主に振動の状態を現す無次元数。弾性波の伝播においては、媒質の吸収によるエネルギーの減少に関係する値である。
く	空間光変調技術	光の位相や強度を2次元あるいは3次的に制御する技術で、デバイスとしてはガラス、フィルム（パターン固定）や空間光変調器（パターン可変）が使用される。
く	空間光変調器 （空間光変調デバイス）	アドレス材料と光変調材料から構成され、読み出し光の位相や強度の空間分布を、書き込み情報によって変調させるデバイス。
く	屈折率	屈折率（クッセツリツ：index of refraction、refractive index） ある与えられた波長で、屈折媒質中の光の速度に対する真空中の光の速度の比。
く	屈折率差： $\Delta n$	フェムト秒レーザーなどの照射によりガラス内部に形成された異質相とガラス母材との屈折率差
く	屈折率： $n_d$	d 線（波長：587.562 nm）の屈折率。
け	軽薄短小	重厚長大（じゅうこうちょうだい）とは、鉄鋼、セメント、非鉄金属、造船などの産業、またそれら産業の特質を指す経済用語。扱う製品が重く、厚く、長く、おおきいことから、それらの頭文字を取った造語。その反対語が、「軽薄短小」。電気機器などが軽量化、薄型化、小型化すること。
こ	光路長	光路長（コウロチョウ：optical path length） 屈折率が一定の媒質内で、二点間のある経路に沿って進む光線について、経路に沿っての幾何学的な長さ（距離）と屈折率との積。光は光路長を最短時間で進むような経路を通る。
こ	光線追跡	光線追跡（コウセンツイセキ：ray tracing） 光学部品や光学系を通る光線の道筋の数学的な計算。基本的には、スネルの法則と三角方程式とを用いて、光学系を通る光線の経路を計算し、決定すること。三角関数を用いることから光学設計者は、この追跡作業を三角追跡とも言っている。
こ	高速フーリエ変換	高速フーリエ変換（コウソクフーリエエンカン：fast Fourier transformation、FFT） 離散フーリエ変換を計算機で高速に計算するアルゴリズム。
こ	光学的異方性	水晶が最もわかりやすい。きれいに研磨した水晶を通して新聞の文字などをみると2重に見える。これは、X軸方向とY軸方向とで屈折率が異なるため、光の進行速度が違い、人間の目には2種類の文字が見えることにある。このように方向によって屈折率などの光学物性が異なる場合を光学的異方性という。
こ	固体撮像素子	CCD、C-MOSなどのイメージセンサー半導体素子の製造技術を用いて集積回路化された光電変換素子。ファクシミリや複写機で用いられるリニアイメージセンサ（一次元イメージセンサ）と、テレビカメラやデジタルスチルカメラなどで用いられるエリアイメージセンサ（二次元イメージセンサ）とがある。
こ	光学ガラス	光学ガラス（コウガクガラス：optical glass） レンズなどの光学製品に用いられるガラス。 透過率の波長依存性が少ないことや屈折率が高いこと、さらに熱歪みが少ないことなどが求められる。 製造中、光学的な用途を十分に満たすために、成分、溶解、熱処理その他の工程を、また光学特性を維持するために、屈折率、分散、透過率、分光透過率、均質性、無複屈折性、永久性などの性質を注意深く調整・制御したガラス。
こ	構造制御技術	原子や分子ナレベルでのミクロな意味で高い集合・配向状態で組織されている構造を人為的に制御する技術。
こ	コヒーレント光	コヒーレント光（Coherent light） 位相の揃った波形が空間的、時間的に十分に長く保たれている干渉性（コヒーレンス）をもつ光を言う。
さ	三次元光回路	光を増幅、導波、分波、合波、スイッチ等の機能を持つ素子を三次元的に配置した回路。

さ	三次元光回路形成用材料	光を増幅、導波、分波、合波、スイッチ等の機能を持つ素子を三次元的に配置した回路素子を作製できる材料
さ	散乱パターン法	マッチングオイル中に浸漬した試料をレーザーで照射し、散乱角度より屈折率を求める方法。空間分解能は使用波長以下と極めて高い。
さ	三次元測定器	物体の三次元的な寸法や形状・位置などを計測するための機器。
し	CCD カバーガラス	固体撮像素子の画素を保護するためのガラス
し	シリカガラス	SiO <sub>2</sub> を主成分とするガラス
し	シリコンフォトニクス	Si 基板上に光素子を形成する技術。従来は光素子の材料に GaAs や InP といった化合物半導体を用いていたが、Si 系材料を使えば製造コストを安価にできる。CMOS 技術で LSI に光素子を集積することで、例えばチップ間のデータ伝送のために光配線を用意して、データ転送速度を高めたり、配線遅延を抑えたりする効果が期待できる。
す	スキュー光線	スキュー光線（スキューコウセン：skew ray） 回転対称光学系で、光学系の軸を含む面（メリジオナル平面）内に含まれない光線。メリジオナル光線と異なり、光学系を一平面内だけでなく、三次元的に通過する光線。従って、この光線によってできる面は光軸を含まない。
す	スキューレー追跡	一つの平面で行う子午的光線の追跡と立体的な光線の追跡とがあり、後者をスキューレー追跡と呼ぶ。
す	スマートフォン	スマートフォン（Smartphone）は、携帯電話・PHS と携帯情報端末（PDA）を融合させた携帯端末。通常の音声通話や携帯電話・PHS 単独で使用可能な通信機能だけでなく、本格的なネットワーク機能、PDA が得意とするスケジュール・個人情報の管理など、多種多様な機能を持つ。
せ	整形ビーム描画方式	ある特定形状の開口を複数個形成したマスクをアパーチャーとして使用し、マスク内に各所で使用されている同一形状のパターンを低加速電子ビームで露光する代わりにショット数を削減し高速化する非可変成形ビーム露光方式。
せ	赤外線カットフィルター	CCD、C-MOS イメージセンサー、フォトダイオードに使用されているシリコンの受光素子の感度は、400nm 付近から近赤外領域までの広い範囲に渡っており、人間の視感度（400～700nm）に合わせるために、700nm 以上の光を除去するフィルタ。主に、多層膜によるものと、ガラスの吸収によるものがある。
そ	走査型電子顕微鏡	電子線を絞って電子ビームとして対象に照射し、対象から放出される二次電子、反射電子、X 線等を検出することで対象を観察する。
た	多波長合分波フィルター	異なる波長の光を 1 つの光導波路に集めたり、その逆を行う光回路。1 本の光ファイバに多数の波長の光を伝播する光波長多重通信に用いる。
た	対物レンズ	望遠鏡・顕微鏡などに使用されるレンズ・光学系。光学系として拡大や縮小を行うことができる。
ち	超短パルスレーザー（フェムト秒レーザー）	連続発振のレーザーと異なり、時間幅（パルス幅）がフェムト秒（10 <sup>-15</sup> 秒）領域と非常に短い光パルスを生じさせるレーザー。通常、パルス幅が 100 フェムト秒（10 <sup>-13</sup> 秒）以下のパルスレーザーを言う。時間的かつ空間的に狭い範囲にエネルギーを集中させることができるため、非常に強い光電場を生じさせることができる。
ち	逐次描画法	一点作っては試料を移動させ、移動を終えたら次の一点を作製する方法。コストと時間がかかる。
ち	超高密度波長多重通信	高密度波長多重通信を DWDM（Dense Wavelength Division Multiplex）と呼んでいる。DWDM は、1 本の光ファイバーに何種類かの違った波長に信号を乗せて通信するものです。

ち	逐次加工	一点ずつ加工する方法。
て	点描画方式	電子銃（エミッタ、またはカソード）から発せられる電子線の断面形状が円形をしており、偏向器（デフレクタ）およびX-Yステージの移動に同期させながら連続照射してパターン描画を行うことを特徴とする。
て	定量位相顕微鏡	定量位相顕微鏡 [QPM : Quantitative Phase Microscopy] 定量位相顕微鏡は光干渉技術を用いて測定試料の厚みや屈折率に基づいた定量情報を測定が出来る、いわゆるホログラフィー顕微鏡です。 定量位相イメージング技術が顕微鏡に組み込まれたものであり、空間的干渉光学像から定量的な位相像が測定される。
て	テラヘルツデバイス (THzデバイス)	テラヘルツとは、周波数 1THz（波長 300 μm）前後の電磁波を指す。範囲についての明確な定義はないが、周波数 100GHz~10THz（波長 30 μm~3mm）としたり、電波を波長で 10 倍ごとに分けたときに簡潔な名称がない、ミリメートル波の次に短波長の周波数 300 GHz~3THz（波長 100 μm~1mm）帯を指したりする。この周波数領域で使用されるデバイスをテラヘルツデバイスと呼ぶ。
て	テラビット情報通信 の国際統合網	現在の各国の光通信は少しずつ伝送方式や伝送能力が異なり、ファイバーでの接続時にトラブルや地域格差が生じやすい。今後、情報伝送容量の大幅な伸びが予想される中で、世界中の伝送方式と容量を統一する動きがある。これを国際統合網と言い、今のところ 2015 年までに幹線で 10 テラビット/秒の伝送速度と確保しようとしている。
で	デコンボリューション アルゴリズムによる 超解像処理法	レンズを通った像は正規結合位置より外れるとボケてしまう。この逆計算を行い、レンズを通る前の状態に戻し劣化した画像をより鮮明にする画像処理技術
で	電子線描画	回路のパターンを電子線により基板に転写する技術。電子線は光に比べてより微細な領域へ粒子（光）を絞り込むことができる。これにより微細加工においても所望のパターンを転写することが可能。電子線リソグラフィーとも言う。
で	デジタルカメラ	デジタルカメラ (Digital camera) とは、写真として撮影した静止画をデジタルデータとして記録するカメラ装置である。本来「デジタルカメラ」は、デジタルスチルカメラ (Digital still camera) 及びデジタルビデオカメラ (Digital video camera) の総称である。ただし一般的にはデジタルスチルカメラを指す事が多いようである。現在ではスチル撮影機能を搭載したデジタルビデオカメラや、反対に動画撮影機能を搭載したデジタルスチルカメラが一般的となっており、双方の性能の向上も手伝って、その差異が徐々に無くなりつつある。 略称は一般に「デジカメ」であるが、「デジカメ」は三洋電機株式会社の登録商標である。
で	デジカメ	デジタルカメラの略称
で	データベース	特定のテーマに沿ったデータをまとめて管理し、容易に検索・抽出などの再利用ができるようにしたもの。狭義には、コンピューターによって実現されたものを言う。
と	透過照明	光学顕微鏡の照明法の一つで試料の下側より照明し、試料を透過した光を顕微鏡へ導くようにした照明法。明視野透過照明と暗視野透過照明とがある。
ど	ドライエッチング	反応性の気体（エッチングガス）、イオン、ラジカルによって材料をエッチングする方法。
な	ナノガラス	ナノメートル・オーダーの構造制御技術で創出されたガラス

な	ナノレベル	大きさがナノメートル ( $10^{-9}\text{m}$ ) すなわち $1\text{m}$ の 10 億分の 1 のオーダーであること。原子・分子と同程度の大きさで、ナノレベルでの構造制御とは物質を原子・分子レベルで制御することとなる。
な	ナノ CMM	Nano Coordinate Measuring Machine の略 マイクロマシンやナノ光学部品の寸法や位置を三次元的に測定する装置。
に	入射瞳	入射瞳 ( ニュウシャヒトミ : entrance pupil ) レンズを物体側から見たときの開口絞りの像。つまり、開口絞りの前にあるすべての光学素子によって物体空間中に形成された開口絞りの像。この用語は、光学系内に有限の絞りが無い場合、対物レンズの口径そのものを表す言葉としても使われる。
ね	ネマチック液晶	等方性の液体に一次元の配列の規制が加わった相を有する液晶。液晶表示デバイスなどによく用いられている液晶である。
ば	バイオチップ	DNA、たんぱく質、糖鎖などのバイオ分子や、これらを有する細胞などを基板上に多数固定したもの。それぞれ DNA チップ、たんぱく質チップ (プロテインチップ)、糖鎖チップ、細胞チップと呼ばれる。チップ上のバイオ分子と特異的に相互作用する標的分子や化合物などを、大量かつ同時並行的に分析できる。DNA チップが代表的。
は	反射率	媒質の境界面で入射する波の強度と反射する波の強度の比。
は	波長	波の一周期の長さ。単位は長さの単位となる。
は	波面制御技術・素子	光の位相を 2 次元あるいは 3 次元的に制御することで結果として波面を制御する技術。ガラスやフィルム (固定の波面を作る)、空間光変調器 (波面を可変できる) が用いられる。
は	波面制御技術	レーザー光の位相の空間分布を制御する技術であり、任意な形状のレーザー光を生成する波形成形技術と、レーザーの伝搬する光路の歪や収差を補正する波面補償技術がある。
は	波長分散フィルター	「波長分散」とは、光の波長毎に光の速度や屈折角度などが異なる際に用いる言葉で、「波長分散フィルター」は、その現象を利用して光を波長順に分けたり、光信号を特定な形に整えたりする際に用いる。
ひ	光回路素子	光回路素子 ( ヒカリカイロソシ : optical circuit element ) レーザー、光検出器、光変調器、光偏向器、光減衰器、光モード変換器、光周波数変換器、光アイソレーター、フィルター、光分波器、ビームスプリッター、ビームエキスパンダー、光遅延回路、偏光子、光結合器などが含まれ、光の強さ、位相、周波数、偏光状態、進行方向、ビーム径などに種々の操作を与える素子。電気・電子回路的に組み合わせることから、この用語が生まれた。
ひ	光伝送損失	通信回路を伝送される光信号の劣化度合いのことを指す。波長によって異なる特性を示し、通信波長帯は、この損失の低いところで行われる。単位は <u>デシベル</u> (dB)。
ひ	光ファイバー	光ファイバー (Optical fiber) は、離れた場所に光を伝える伝送路である。その構造はコア (core) と呼ばれる芯とその外側のクラッド (clad) と呼ばれる部分、そしてそれらを覆う被覆の 3 重構造になっている。クラッドよりもコアの屈折率を高くすることで、全反射や屈折により出来るだけ光を中心部のコアにだけ伝搬させる構造になっている。コアとクラッドはともに光に対して透過率が非常に高い石英ガラスまたはプラスチックでできている。
ひ	光導波路、光導波デバイス	光導波路 ( ヒカリドウハロ : optical waveguide ) 屈折率の高いコアとコアの周囲を屈折率の低いクラッドを持ち、この材料界面での全反射により光を閉じこめて任意の方向に導く素子。基板上に光ファイバーのような構造を作成したもの。 放射を一定領域に閉じ込め、そのエネルギーの流れを経路の軸に平行に案内して伝送する能力を持った回路、もしくは線路。 光導波デバイスは、低損失高屈折率ガラス薄膜を利用した導波路用デバイス。

ひ	光集積回路	光集積回路（ヒカリシュウセキカイロ：integrated optical circuit、optical integrated circuit） 同一の基板上に光導波路を作り、信号処理を直接光で行う集積回路。構成的には、発光器（半導体レーザーなど）、光変調器、フィルター、屈折媒体、ビームスプリッター、ミラー、光スイッチ、受光器などの種々の光回路素子を単一の基板上に光導波路を介して結合集積化して情報伝達、処理機能が行えるような光回路系。
ひ	光 IC	光 IC（ヒカリアイシー：optical integrated circuit） 光集積回路と同義語。
ひ	光インターコネクション	光により電子回路ボードや光回路を結合させる技術。
び	ビームプロファイラー	CCD受光素子を持ち、レーザー等の光量の様子を観察する機器。
ぴ	ピエゾ素子	圧電体に加えられた力を電圧に、電圧を力に変換する圧電素受動素子。電気石やチタン酸バリウムなど様々な材料が開発されている。
び	ピークパワー密度	パルスレーザーにおいて、ピークパワー密度（W/cm <sup>2</sup> ）は次で表される。 ピークパワー密度＝1パルスあたりのエネルギー（J）/パルス幅（秒）/集光面積（cm <sup>2</sup> ）
び	微小レーザー	レーザーとは、ある閉じこめられた空間内で光が往復することで光の強度が強められる現象を利用しているが、その閉じこめる領域を非常に小さくしたレーザーを「微小レーザー」といい、例えば数ミクロンの粒子。
び	微小化学分析チップ	従来の化学実験室を、例えば切手程度のチップ上に集積化する試み。微小化により単に持ち運びが容易になるだけでなく、迅速かつ効率的な溶液の混合ができる。高価な試薬の消費量を減らせて経済的、温度サイクルの高速化が可能、並列化によるハイスループット化等の利点がある。μTAS、Lab-on-a-Chip、微小化学分析システムとも言われる。
ふ	フレネル・キルヒホッフ回折積分	フレネルの重ね合わせの原理と同じ考えであるホイエンス原理「波動の伝播を考える時に先端の上の各点が中心となる球面波ができ、その包絡面が新しい波動の先端となる。」とこの波の関数を変形したキルヒホッフの近似を用いた回折に関する式のこと。多重積分を用いる。
ふ	フレネル回折	フレネル回折（フレネルカイセツ：Fresnel diffraction） 近視野回折として知られる。光源もしくは観測スクリーンが、回折開口や障害物から有限の距離にある時に得られる回折。 回折を起こす物体に対して有限の距離にあり、入射波又は回折波が平面波とみなせない場合の回折現象。
ふ	フラウンホーファー回折	フラウンホーファー回折（フラウンホーファーカイセツ：Fraunhofer diffraction） 回折物体から無限遠の距離で観測される平行光の回折。回折を起こす物体に対して無限遠の距離にあり、入射波又は回折波が平面波とみなせる場合の回折現象。回折物体と回折像の関係はフーリエ変換の関係がある。
ふ	フーリエ変換	フーリエ変換（フーリエヘンカン：Fourier transform） 関数変換を行う線形作用の一種。周期関数を三角関数の和で表せるように、非周期関数を展開する変換方法。 一組の直交波形（三角関数）の係数に信号を分解する方法。関数 f(t) に対して -∞ から +∞ までの $f(t) \exp(itx)$ の t での積分の $1/\sqrt{2\pi}$ 倍に等しい関数 F(x) への変換。
ふ	フレネルレンズ	通常のレンズは材料の厚さを制御し光の屈折を利用したものであるが、光の回折を利用した平面型のレンズがフレネルレンズである。ある規則に従って、屈折率の高低あるいは明暗の輪帯から構成される。

ふ	フェムト秒レーザー	パルス幅がフェムト秒 ( $10^{-15}$ 秒) オーダーのパルスレーザー。通常、加工には 100 フェムト秒程度のパルス幅を利用し、超短パルスレーザーとも呼ばれる。
ふ	フォトニック結晶	光の波長程度の大きさで誘電率 (屈折率) が周期的に大きく変化するように作製した人工結晶。 フォトニック結晶 (photonic crystal) とは屈折率が周期的に変化するナノ構造体であり、その中の光 (波長が数 100-数 1000nm の電磁波) の伝わりかたはナノ構造によって制御できる。基本研究とともに応用開発がさかんに進められており、商業的な応用も登場している。
ぷ	プロセス	製造工程全体のこと
ほ	ホイヘンスの原理	ホイヘンスの原理 (ホイヘンスノゲンリ: Huygens principle) 波の伝搬の課題に対して用いる解析。光の波面上の各点は、その次の二次波の源となるという原理。これらの二次波の包絡面が、その後のある時間における波面の位置を決める。
ほ	ホログラム	光は波の性質を持っているため振幅と位相を持っている。加工したい形状の回折像の位相や振幅を計算し、この位相や振幅を書き込んだものは計算機ホログラム (Computer-Generated Hologram: CGH) と呼ばれる。ガラスに位相又は/及び振幅の CGH を持たせたガラス・ホログラムと、可変位相の CGH を持たせることのできる空間光変調器がある。これに可干渉性のレーザーを照射することにより実像を得ることができる。
ぼ	ボロシリケートガラス	$B_2O_3$ と $SiO_2$ を主成分とするガラスで硼珪酸ガラスとも呼ばれる。
ぼ	硼珪酸ガラス	硼珪酸ガラス (ホウケイサンガラス: borosilicate glass) ほぼ 380nm から 2000nm までの波長の光を透過し、強靱で、熱にも強く、最低 5% の三酸化二硼素 ( $B_2O_3$ ) を含んだ屈折率が約 1.5 程度のガラス。ショットコードで BK7 ( $n_d=1.51633$ , $\nu_d=64$ ) のガラスはその代表例。
ぼ	ポアソン比	ポアソン比 (Poisson's ratio) は、弾性限界内で、例えば引張りを加えた時に荷重方向の伸び (ひずみ%)、と荷重に直角方向の寸法の縮み (ひずみ%) の比をいう。無次元数の一つ。ポアソン比 = 横ひずみ (%) / 縦ひずみ (%) である。ポアソン比の逆数をポアソン数という。 体積が変化しない場合 (液体のような場合) のポアソン比が 0.5 となる。(断面積は直角方向の寸法の 2 乗で変化するので、伸びの 1/2 で体積一定である。) 通常の固体は体積が変化するので、(体積弾性率) ポアソン比が 0.3 ぐらいの材料が多い。
ま	$\mu$ TAS	従来の化学実験室を、例えば切手程度のチップ上に集積化する試み。微小化により単に持ち運びが容易になるだけでなく、迅速かつ効率的な溶液の混合ができる。高価な試薬の消費量を減らせて経済的、温度サイクルの高速化が可能、並列化によるハイスループット化等の利点がある。Lab-on-a-Chip、微小化学分析システム (チップ) とも言われる。
ま	曲がり導波路	導波路をできるだけコンパクトかつ高密度に形成し、効率よく信号処理するために、小面積でわん曲させた導波路のこと。微小な三次元光回路を実現するためには、回路を構成する基本素子を微小領域に造り込む必要があり、これらを複雑に結合させるためにはこのような導波路が必要となる。
ま	マッチングオイル	ガラス含む透明材質の屈折率と同じにした透明油。インデックスマッチングオイルの略
め	面ダレ	ガラス研磨時にガラス端面部での研磨圧力が多くなるため意図されずに多く削られた状態。
め	MEMS	MEMS (メムス、Micro Electro Mechanical Systems) は、機械要素部品、センサー、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料など

		の上に集積化したデバイスを指す。プロセス上の制約や材料の違いなどにより、機械構造と電子回路が別なチップになる場合があるが、このようなハイブリッドの場合もMEMSという。主要部分は半導体集積回路作製技術を用いて作製されるが、半導体集積回路が平面を加工するプロセスで作製されるのに対し、立体形状を形成する必要があり、半導体集積回路の作製には使われない犠牲層エッチングと呼ばれる可動構造を作製するプロセスが含まれる。現在、製品として市販されている物としては、インクジェットプリンタのヘッド、圧力センサー、加速度センサー、ジャイロ스코プ、DMD(プロジェクター)などがある。市場規模も拡大しつつあり、応用分野も多岐にわたるため期待される市場は大きい。そのため第二のDRAMとも言われている。
め	メリジナル光線	メリジナル光線 (メリジナルコウセン : meridional ray) 光軸を含む面内にある光線。サジタル光線も参照。
や	ヤング率	ヤング率 (Young's modulus、縦弾性係数) は、弾性範囲で応力に対するひずみの値をきめる定数である。単位は応力と同じ Pa、tf/m <sup>2</sup> など。 [ひずみ $\varepsilon$ ] = [応力 $\sigma$ ] / [ヤング率 E] (フックの法則) より、 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ である。 一方向の引っ張りまたは圧縮応力の方向に対するひずみ量の関係から求める。ヤング率は、縦軸に応力、横軸にひずみをとった応力ひずみ曲線の直線部の傾きに相当する。 結晶の原子間距離の変化に対する抵抗というモデルがイメージである。原子間の凝集力が弾性的性質をきめる。したがって応力と変形の機構が同じ種類の材質間では、融点と弾性係数の間にはある程度の相関がある。応力がある大きさ (比例限度) をこえると、結晶の不完全な部分が不可逆的にうごくことによって変形することになるので、応力とひずみの関係はリニア (線形) ではなくなり、応力を取り除いてももとの寸法に戻らなくなる。この現象を降伏という。
ゆ	誘電体多層膜ミラー	高い屈折率と低い屈折率の材料を交互に光学的厚さ (幾何学的厚さ × 屈折率) $\lambda/4$ ずつ基板上に繰り返し積層することで 100%に近い反射率のミラーを作成することができる。
ら	落射照明	光学顕微鏡の照明法の一つで顕微鏡レンズを通して試料に光をあてる照明法。明視野落射照明と暗視野落射照明がある。
ら	1 : 1 L/S パターン	照射部と未照射部とが等間隔で並んだパターン
ら	Lab-on -a-Chip	従来の化学実験室を、例えば切手程度のチップ上に集積化する試み。微小化により単に持ち運びが容易になるだけでなく、迅速かつ効率的な溶液の混合ができる。高価な試薬の消費量を減らせて経済的、温度サイクルの高速化が可能、並列化によるハイスループット化等の利点がある。μTAS、微小化学分析システム(チップ)とも言われる。
り	量子化	連続的な量を離散的な数値で表すこと。
り	量子サイズ効果	固体中の電子の波長と同程度であるナノスケールの空間に電子が閉じ込められると、電子の波動性により、そのエネルギーが離散的になる。これを量子サイズ効果という。
り	流体回路	流体回路. fluid circuit 水や空気などの流体を利用して、電気回路のスイッチングと同様の作用を行うことを目的とした部品の総称
れ	レジスト	スピンコーターやスリットコーター等で薄膜状に塗布し、光や電子線との反応を利用して不要な部分を除去する。
ろ	ローパスフィルタ	所定の周波数より低い周波数の波を透過させるデバイス。
わ	ワークディスタンス	顕微鏡対物レンズの特性を表すための言葉で顕微鏡対物レンズの先端からピント面までの距離。

わ	ワークステーション	個人用の高性能のコンピューター
---	-----------	-----------------

出典：OPTRONICS 光技術用辞典 他

## I. 事業の位置づけ・必要性について

### I. 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

#### I. 1. 1 NEDOが関与することの意義

(社)ニューガラスフォーラム、京都大学、浜松ホトニクス(株)が連携し、ガラス波面制御素子(ホログラム)等による空間光変調技術(光の立体像を空間に描画する技術)を確立し、我が国が強みを有する光技術をさらに強化するため、ガラス中に三次元の光回路を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性を確認する。

具体的な事業内容は次のとおり。

- ①デバイス別ガラス組成の最適化検討をおこない、レーザー加工用ガラスの作製
- ②波面制御素子設計用シミュレータを開発し、これを用いて波面制御素子の作製
- ③三次元加工システム技術に必要な波面制御三次元加工システム技術並びに空間光変調器三次元加工システム
- ④光デバイスの試作

今回開発を行う技術によって、光情報処理の基本デバイス(光スイッチ、光増幅器、合分波)の開発が加速化されるとともに、近い将来には図I-1に示す様な集積化された光回路デバイスの実用化が可能となり、中長期的な光技術の競争力の確保につながる。また、デジカメのレンズ等の従来の光学デバイスの中に機能を付加することが可能となり、より高機能な性能を持つ部材開発を加速する。

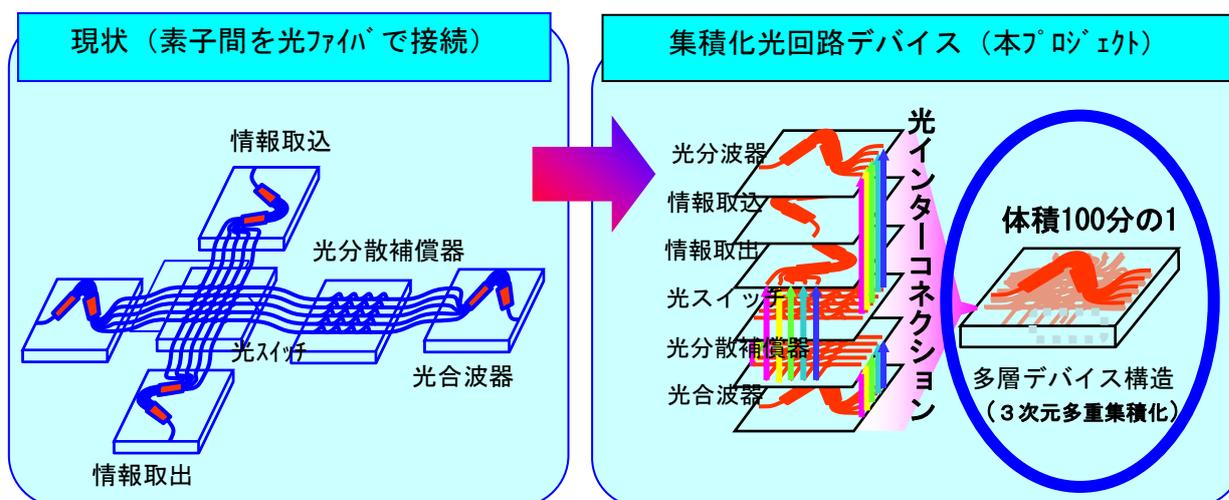


図 I-1 光インターコネクト集積化光回路デバイス

ガラスは通信・情報家電分野を始め社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化等のニーズに対応するためには、高機能化が求められている。また、ますます増加する情報量の処理に対応するためには、次世代の光回路部材・光学部材の開発が必須であり、光回路の三次元化を低コストで可能とすることが期待されている。

本プロジェクトで開発するホログラムを用いたガラス内部への加工技術は、ニューガラスフォーラムが2003年9月に国内の学会で初めて報告、以降、米国の国際学会でも報告する等、我が国が世界をリードしているところであるが、将来における当該分野の競争力を確保するためには、ガラス内部に数十ナノメートルオーダーで一括加工する技術の世界に先駆けて確立することが必要であり、複数の研究機関及び企業の知見を集結する必要があるため、民間企業の自主的な取り組みでは難しい。従って、図I-2に示す様にNEDOの関与により「産業化を視野に入れた基盤技術の開発といった、市場原理のみでは、戦略的・効果的に達し得ない領域の研究開発を、重点的に実施する（科学技術基本計画）」ことが必要である。

本技術開発は、我が国を代表するガラスメーカーで構成されるニューガラスフォーラムに集中研を設置し、民間企業、大学など産学の関係者が一体となって、研究開発を行っている。このことで、今後も拡大する通信・情報家電分野の市場を我が国が占有することが期待される。

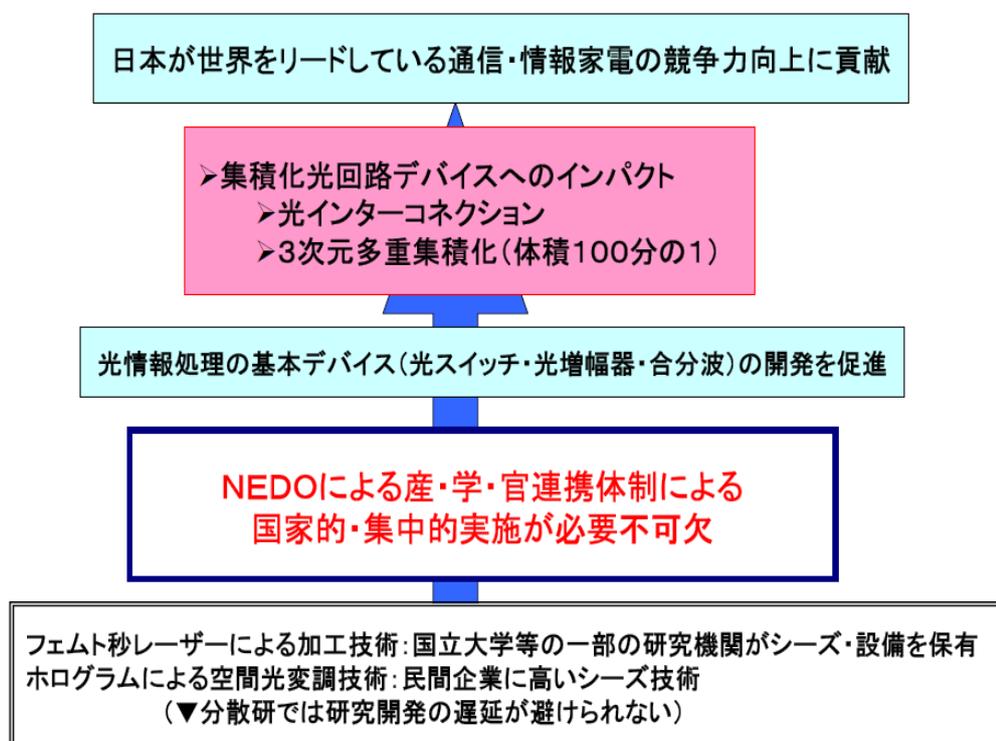


図 I-2 NEDOが関与することの意義

### I.1.2 実施の効果（費用対効果）

費用：5年間で約16.6億円。

効果：本プロジェクトの成果による民間需要創出効果（平成27年：2015年）は次の(2)2015年での本プロジェクトによる市場創出（費用対効果）に示すように、約1千300億円と考えられる。2020年には2千億円を上回るものとする。また、本加工システムは、現在プロジェクトでシステムの有効性の実証対象としている導波路型デバイスと光学デバイス以外の市場での適用も考えられ、また材料としてガラス以外でも使用できるために、新たなその他の市場を期待でき、本プロジェクトの事業規模を16.6億円（平成18年度から平成22年度までの総予算額）としていることから、本プロジェクトは投資より大きな需要を創出するものと見込まれる。

#### (1) ナノテク関連国内市場（2005年～2030年）

ナノテク関連の国内市場は2030年には26兆円、その普及時期は2020年と予測されている<sup>1)</sup>。その中でも、本プロジェクトでの成果が適用されるナノガラスの関連は2020年頃に本格的な普及期に入ると見られている。これらを、図I-3に示した。

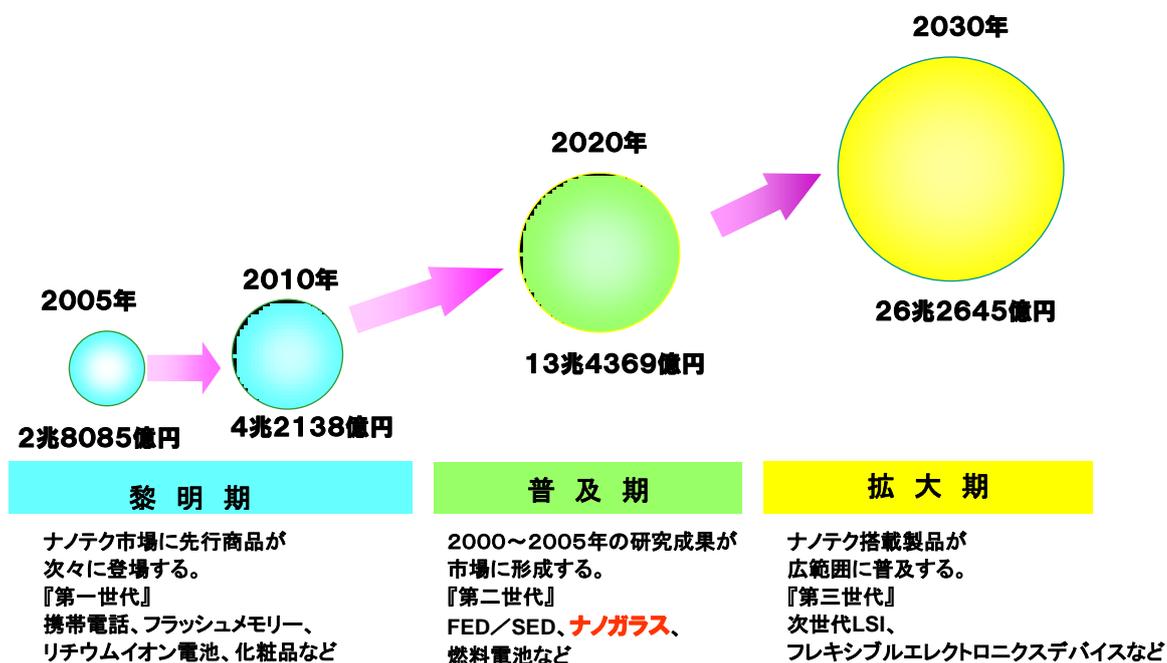


図 I-3 ナノテク関連市場予測（2005年～2030年）<sup>1)</sup>

出展：半導体産業新聞 2006.7.5 <経済産業省調査（ナノテクノロジー・材料戦略室）>

これらのニューガラス（ナノガラス）<sup>2)</sup>として開発された種々のデバイスの一部は、インターネットや高度情報通信ネットワーク分野、入出力分野、レーザー加工分野他で使用される。これ

らの分野での市場規模は膨大で、光産業技術振興協会の調査によると、2009 年度実績が対前年度比 9.5%減の 7 兆 5843 億円だったのに対し、2010 年度見込みは 8.4%増の 8 兆 2242 億円と V 字回復を遂げるとした。図 I-4 に光産業国内生産額の推移を示した。

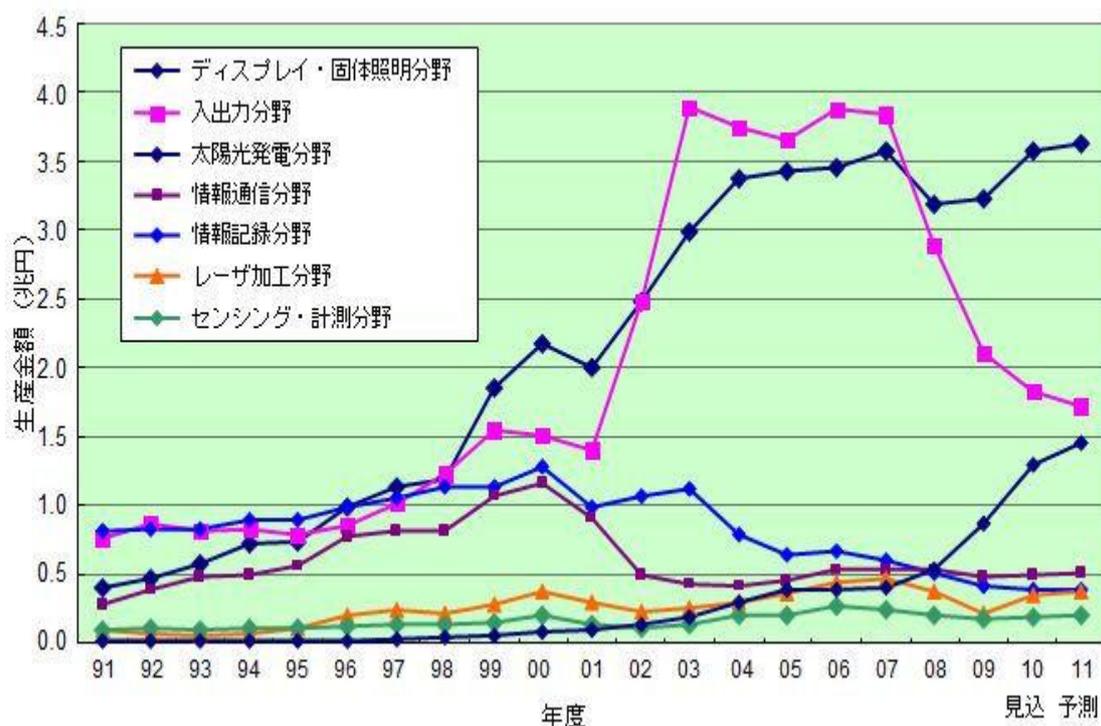


図 I-4 光産業国内生産額の推移<sup>3)</sup>

2011 年度予測は東日本大震災前の調査による。出典：光産業技術振興協会

## (2) 2015 年での本プロジェクトによる市場創出（費用対効果）

本プロジェクトで開発する加工システムの有効性を調べるために、導波路型デバイスと光学デバイスを想定している。導波路型デバイスとしては、スプリッタを取上げている。光学デバイスとしては、光学ローパスフィルタを具体的に取上げている。以下において夫々に関係する市場の規模を検討する。

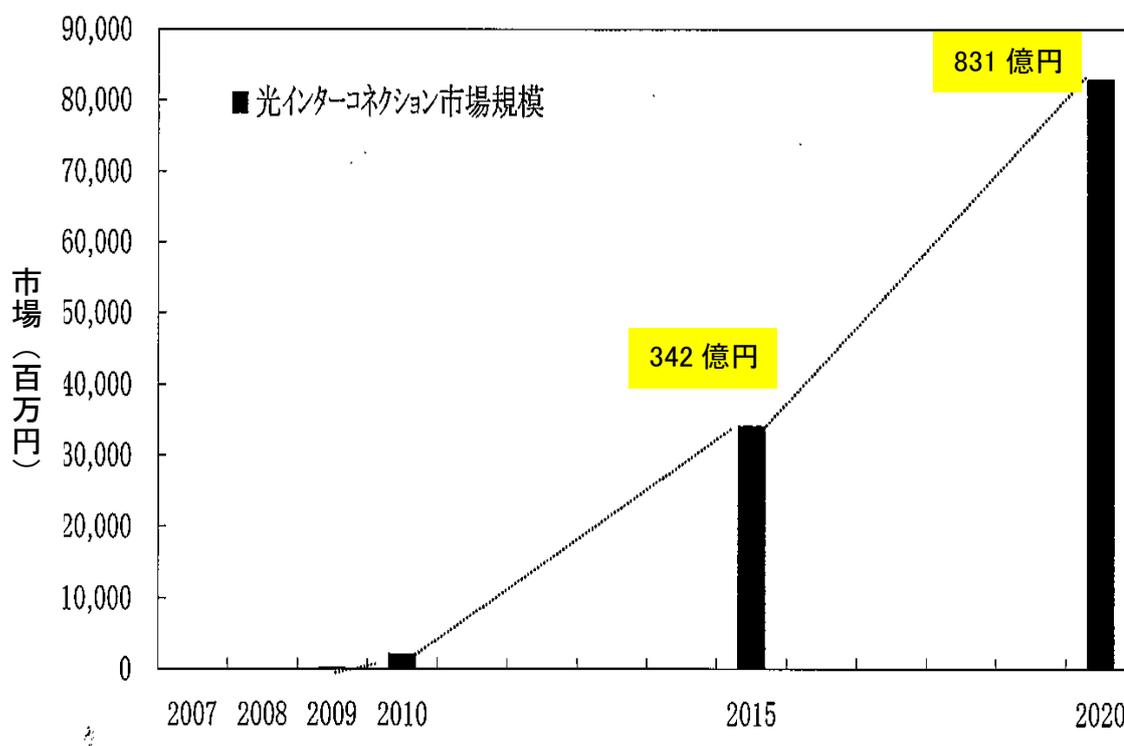
### 1) 光導波路型デバイス

財団法人光産業技術振興協会の調査によると、光産業の国内生産額の中の導波路型デバイスが関与する光回路部品及び微小光学部品での 2006 年での市場は 537 億円、光受動部品は 391 億円、光コネクタは 231 億円で、全体で 1,159 億円である<sup>3)</sup>。

本開発と直接関係が深い光インターコネクションについて、以下に簡単に記す<sup>4)</sup>。光インターコネクションを類別すると、接続距離の長い順に記すと、装置間（架間）、装置内（ボード間、

バックプレーン)、ボード内(チップ間、MCM)、チップ内(オンチップ配線、Si フォトニクス)となる。接続距離の一番長い10~100mである装置間(架間)では、2007年後半以降に需要が集中している状況である。これにより光伝送システムが向上し、ハイエンドサーバーの消費電力が従来に比べて40%程度低減していると言われており、CO<sub>2</sub>削減に寄与している。本プロジェクトが主に寄与できるのは、これよりも接続距離が短い領域である。

これ等の領域での市場規模は、2015年で約342億円、2020年では831億円と言われている<sup>4)</sup>。これ等を図I-5に示した。特に、2015年では携帯電話やスマートフォンに凡そ76%が使用され、スパコン/HPC、サーバーは13%、計測器は5%である。2020年になると、携帯電話やスマートフォンは63%になり、スパコン/HPC、サーバーは7%、計測器は24%となる。これ等を図I-6に示した。

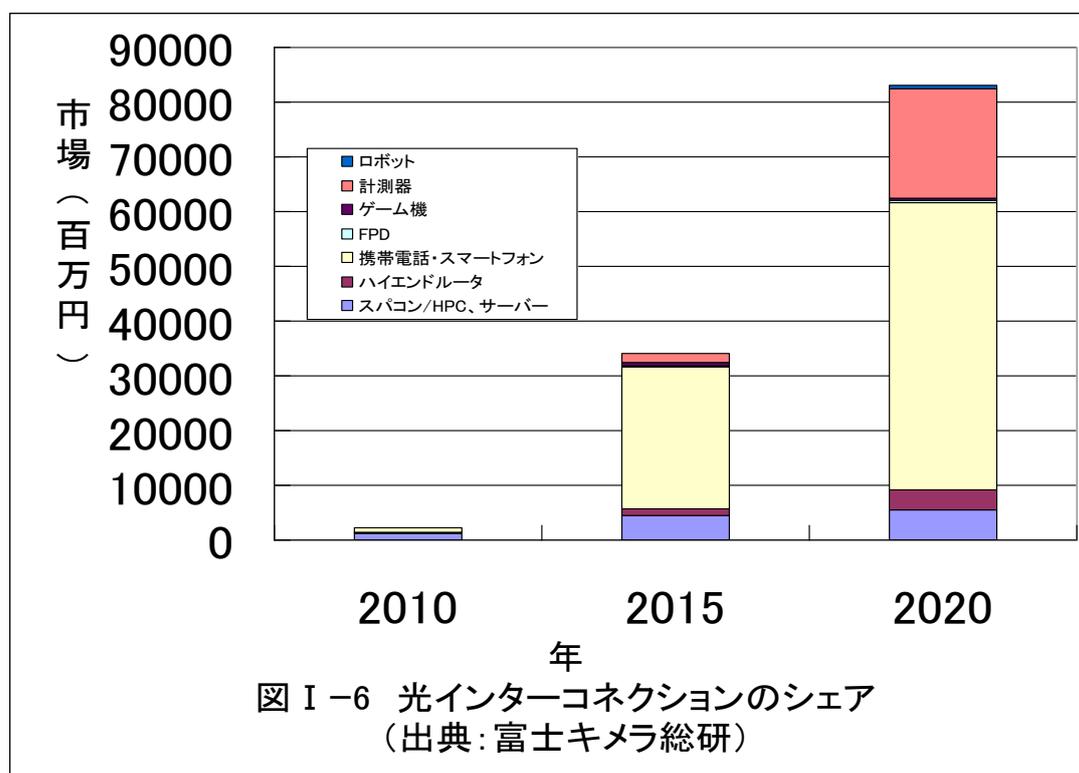


図I-5 光インターコネクション市場規模 (出典:富士キメラ総研)

## 2) 光学ローパスフィルタ

光学デバイスとして取上げた光学ローパスフィルタは普及が進んでいるデジタルカメラに使用されている。最近では、携帯電話にまで装着されマーケットが膨らんでいる<sup>5)</sup>。図I-7にそのマーケット規模を示した。2015年には、出荷台数が1億5千万台を突破し、その出荷金額は3兆5千億円を超えるまでに成長する。

表 I-1 に 2005, 2010, 2015 年における出荷台数、表 I-2 に 2005, 2010, 2015 年における出荷金額を示した<sup>5)</sup>。また、100%装着時の光学ローパスフィルタ分の価格を示した。本プロジェクトで開発している軽く、薄い光学ローパスフィルタができれば、軽薄短小が強く要求され、また益々画素数が増大している携帯電話には大きく取り上げられるであろう。また、低価格で作製できる本プロジェクトで開発している光学ローパスフィルタができれば価格の低減が要求されている一眼レフタイプカメラへの適用が増えるであろう。実際の装着は 2015 年では、一眼レフタイプカメラで 100% (556 億円)、車載カメラと監視カメラで 100% (246 億円)、そしてレンズ一体型のコンパクトデジカメで 80% (115 億円) を上回るであろう。表 I-3 に各カメラ種におけるフィルタ 1 式の価格、装着率を示した。これ等と表 I-1 の出荷台数を使用してフィルタの占める金額を算出した。その合計は 917 億円である。これは、カメラ単価の 2.6% で合理的な値である。



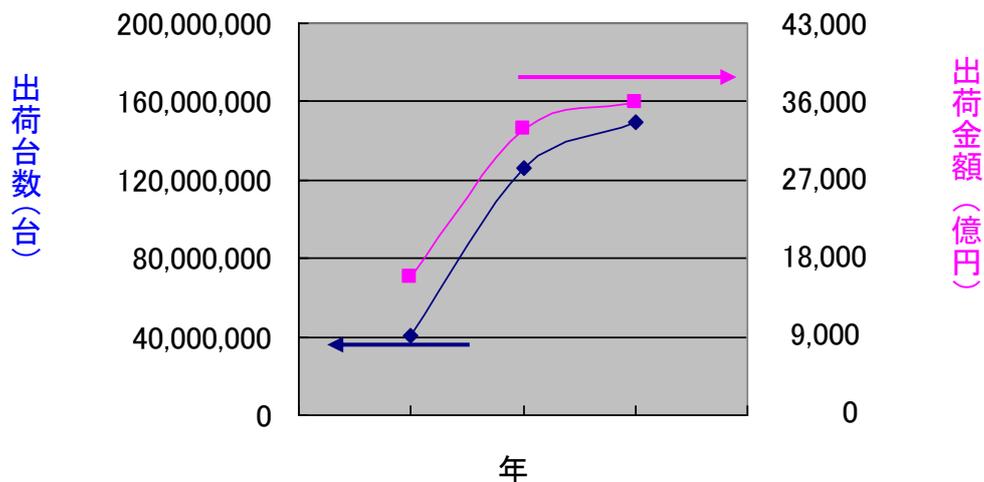


図 I-7 デジタルカメラの出荷台数・金額推移<sup>4)</sup>  
 出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA)、  
 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA)、  
 (株)矢野経済研究所

表 I-1 デジタルカメラの出荷台数<sup>5)</sup> (台)

年度	コンパクトデジタルカメラ	一眼レフタイプカメラ	車載&監視用カメラ	合計
2005	33,000,000	3,230,000	4,000,000	40,230,000
2010	101,398,200	11,212,000	13,884,800	126,495,000
2015	119,649,800	13,230,000	16,384,000	149,263,800

出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA) 「光産業・光技術動向調査 2004」と 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA) 統計、および(株) 矢野経済研究所市場予測の集荷台数および出荷金額予測<sup>5)</sup>。

表 I-2 デジタルカメラの出荷金額<sup>5)</sup> (億円)

年度	コンパクトデジタルカメラ	一眼レフタイプカメラ	車載&監視用カメラ	合計
2005	11,012	3,235	1,339	15,586
2010	22,953	6,753	2,760	32,466
2015	25,065	7,374	3,014	35,453

出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA) 「光産業・光技術動向調査 2004」と 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA) 統計、および(株) 矢野経済研究所市場予測の集荷台数および出荷金額予測<sup>5)</sup>。

表 I-3 デジタルカメラ用光学ローパスフィルタの 2015 年出荷金額予想 (億円)

年度	コンパクトデジタルカメラ	一眼レフタイプカメラ	車載&監視用カメラ	合計
2015	25,065	7,374	3,014	35,453
フィルタ1式価格:円	120	4,200	1,500	
フィルタ装着率	80	100	100	
フィルタ分金額	115	556	246	917

出典：財団法人 光産業技術振興協会 (OITDA) 「光産業・光技術動向調査 2004」と 有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会 (CIPA) 統計、および(株) 矢野経済研究所市場予測 の集荷台数および出荷金額を元にフィルタ分を NGF 予測した<sup>5)</sup>。

## I.2. 事業の背景・目的・位置づけ

### I.2.1 事業の背景

#### (1) 社会的背景

21世紀の革新的技術として、情報、環境、安全・安心、エネルギー等の広範な分野の基盤技術である材料技術を根幹から変貌させることが期待されるナノテクノロジー（物質の構造をナノレベルで制御することにより、機能・特性の向上や新機能の発現を図る材料技術）の基盤技術を構築することを目的とする「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として、本プロジェクトを実施する。

本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトの基盤技術として得られたデバイスをより高精度でより低コストで実用的なデバイスとして作製できる加工技術の基盤技術を開発するのが目的である。具体的には、フェムト秒レーザー等とホログラム技術（波面制御技術）を組み合わせ、三次元デバイスにおける加工の高精度化によるデバイス特性の向上と加工の高速化による製造コストの大幅な低減を目指すものである。

また本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている<sup>6),7)</sup>。

本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。

更に、光インターコネクタの分野では、『光インターコネクション技術の国際標準化』が日本を中心（日本メンバーが凡そ60%を占める）に進められている。Optp-electric assemblies (Opticalcircuit board, optical backplane)が対象になっている。石英ファイバフレキシブル光配線板の詳細規格（JPCA-PE02-01-01S-2008）が日本で2008年に作成された。詳細は、<http://www.jpca.net/hikari/pdf/jpca-pe02-01-01s-2008.pdf>に、IEC（International Electrotechnical Commission）の情報と共に記載されている。

## (2) 技術的背景

近年レーザーパルス圧縮技術の向上に伴い、超短パルスレーザー光を利用したガラス材料を始めとした透明材料の加工が盛んに報告されており、特にパルス幅がフェムト秒レベルのレーザー光はそのピークパワーの強さから多光子吸収過程を利用して透明材料内部に三次元的に母材と屈折率の異なる異質相を形成することが可能であり、この屈折率変化等を利用した光導波路や回折格子などの光学素子作製技術としての応用が提案されてきたが、実用までは程遠い状況である。その背景として、図 I-8 に示すように、デバイスの作製にはフェムト秒レーザーパルス光を加工形状に合わせてなぞりながら照射し加工する方法が取られており、多大の加工時間を必要とし、加工コストが高く実用化には程遠かった。また、長時間に及ぶ加工によりレーザービームの照射位置と強度を安定に制御することが不可能であった。従って、精度の良い高性能なデバイスを作製することができなかった。

従って、フェムト秒レーザーを使用した現状のデバイス作製技術では実用に耐えるデバイスを製作することは不可能で、これをブレークスルーする高度な技術の開発が望まれている。

### 一点ずつをレーザーショットで作製

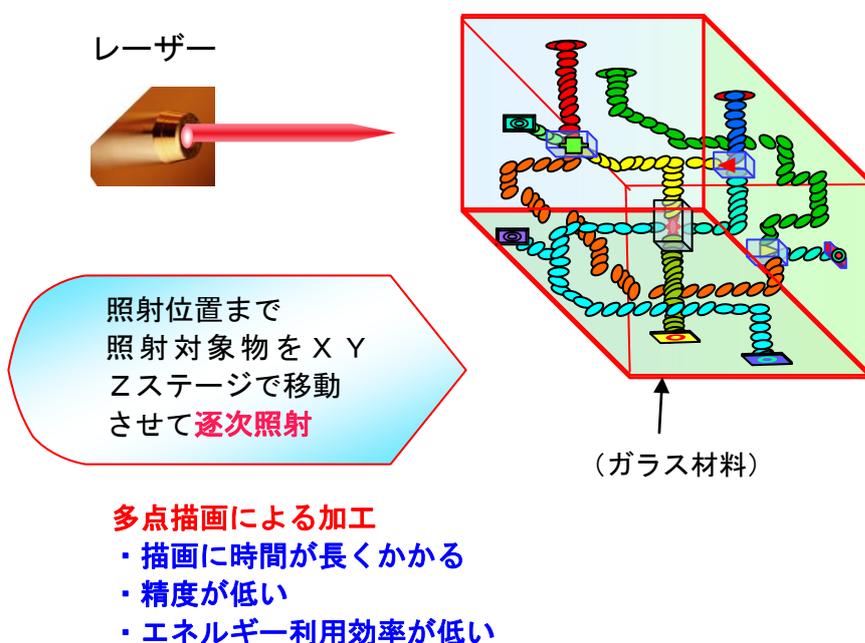


図 I-8 フェムト秒レーザー加工の課題

## I.2.2 事業の目的及び意義

本プロジェクトでは、

- (1) デバイス化加工用ガラス材料技術として、三次元光学デバイス用並びに三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術
- (2) 三次元加工システム技術に必要な波面制御三次元加工システム技術並びに空間光変調器三次元加工システム技術
- (3) 三次元加工システム応用デバイス技術として、三次元光学デバイス技術並びに三次元光回路導波路デバイス技術を開発し、具体的なデバイスを作製することにより、ガラス材料と三次元加工システムの有効性を確認する。

これ等により、日本が世界をリードしている通信・情報家電分野の部材の高機能化・低コスト化を図る為の基盤技術を構築することを目的とする。(図 I-9)

- 光情報処理の基本デバイス(光スイッチ等)
- 新しい機能を持つ光学デバイス(デジカメのレンズ)
- 集積化光回路デバイスへのインパクト



ガラス中に三次元の光回路を高精度に一括形成できるプロセス技術の開発



### 従来工法の問題点

フェムト秒レーザーを使用した従来の加工法はガラス材料をXYZステージで移動させながら1点ずつレーザ加工をする逐次多点描画法であり、加工時間が長い・精度が低い・エネルギー利用効率が低い。

図 I-9 事業の目的及び意義

ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料であり、建築、輸送機材、情報通信、医療、バイオ、さらにはマイクロ化学などの様々な分野で、今後ますます高機能化が求められるため、研究開発の重点化と加速化が必須である。しかしながら、従来からの均一な構造を制御する研究のアプローチでは世界をリードする革新的技術の発見に繋がる可能性は低く、従来にない新たなガラスの特性や機能を効果的に引き出すためには、ナノレベルでの構造制御技術の開発が不可欠である。また、このような構造制御されたデバイスの効率的な作製法の研究は殆ど成されていないのが現状である。さらに、これらの課題に関連企業が散逸的に取り組んでいては世界的競争に勝ち抜くことは困難である。したがって、NEDO のリーディングのもと、基盤技術の形成に資する技術開発に、産学の連携研究体制のもと関連企業、及び関連企業が集中研究方式で課題に取り組む本プロジェクトの実施意義は非常に大きい。

更には、本プロジェクトで開発する三次元光デバイス高効率製造技術は、対象材料をガラスのみならず、有機材料、ガラス以外の無機材料、例えば半導体材料にも適用できる汎用性の高い加工技術で、将来幅広い産業分野で利用される製造技術になることが見込まれる。

### I.2.3 事業の位置付け

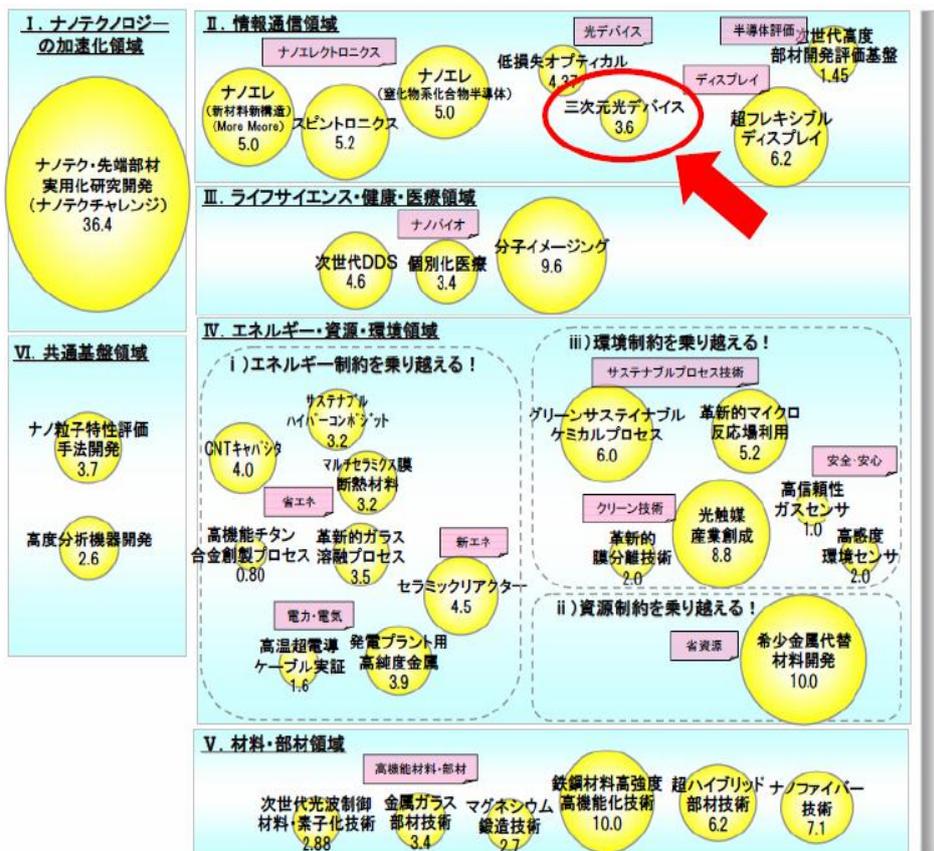
#### (1) 国の政策における位置づけ

経済産業省の全ての研究開発プログラムは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」IT、ナノテク・部材、ロボット・新機械、健康安心、エネルギー、環境安心、航空機・宇宙産業の下で体系的に推進されている。また、ナノテク・部材IPGにはナノテク加速化領域、情報通信領域、ライフサイエンス領域、エネルギー・資源・環境領域、材料・部材領域、共通基盤領域の6項目に分類され、あらゆる分野に対して高度化、不連続な革新をもたらすナノテクノロジー、革新的部材技術を確立すべく位置付けられている。(図I-10)



図I-10 研究開発プログラムにおけるナノテク・部材イノベーションプログラムの位置付け

また、図 I-11 に示すように本プロジェクトは『ナノテク・部材イノベーションプログラム』においては情報通信領域・光デバイス・三次元光デバイスに位置付けられ、ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行うことで幅広い産業の付加価値の増大を図ることを目標としている。



### IPGの目標

世界に先駆けてナノテクノロジーを活用した非連続な技術革新を実現する!

我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保するとともに、部材産業の付加価値の増大を図る!

ナノテクノロジーや高機能部材の革新を先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る!

希少金属などの資源制約の打破、圧倒的な省エネルギー社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す!

図 I-11 ナノテク・部材イノベーションプログラムにおける本プロジェクトの位置付け

また、光デバイスに関しても取上げられており、光回路分野ではナノ加工によるチップ内やチップ間のインターコネクションやそれに必要な光導波路が各所で取上げられている。また、フェムト秒レーザーによる光デバイスも取り上げられている。更に、同『技術戦略マップ2008』<sup>6),7)</sup>にて述べられているネットワーク分野の導入シナリオにおいて、その共通基盤技術として光集積技術が挙げられ、2011年から2016年にかけて進展するとロードマップに述べられている。また、ネットワークを構成するデバイス技術の一つに光インターコネクト分野が挙げられている。その内でも高速の光インターコネクション (1Gb/s~100Gb/s) が2011年から2016年に

かけて進展するとロードマップに述べられている。図 I-12 に、平成 17 年度に策定された「ナノテクノロジー分野のロードマップ（02 電子情報 光デバイス）」における本プロジェクトの位置付けを示した。このなかの光導波路・光伝送・合分波の領域・機能において三次元加工システム・三次元光デバイス・三次元光導波路用デバイスの開発・作製が位置付けられている。

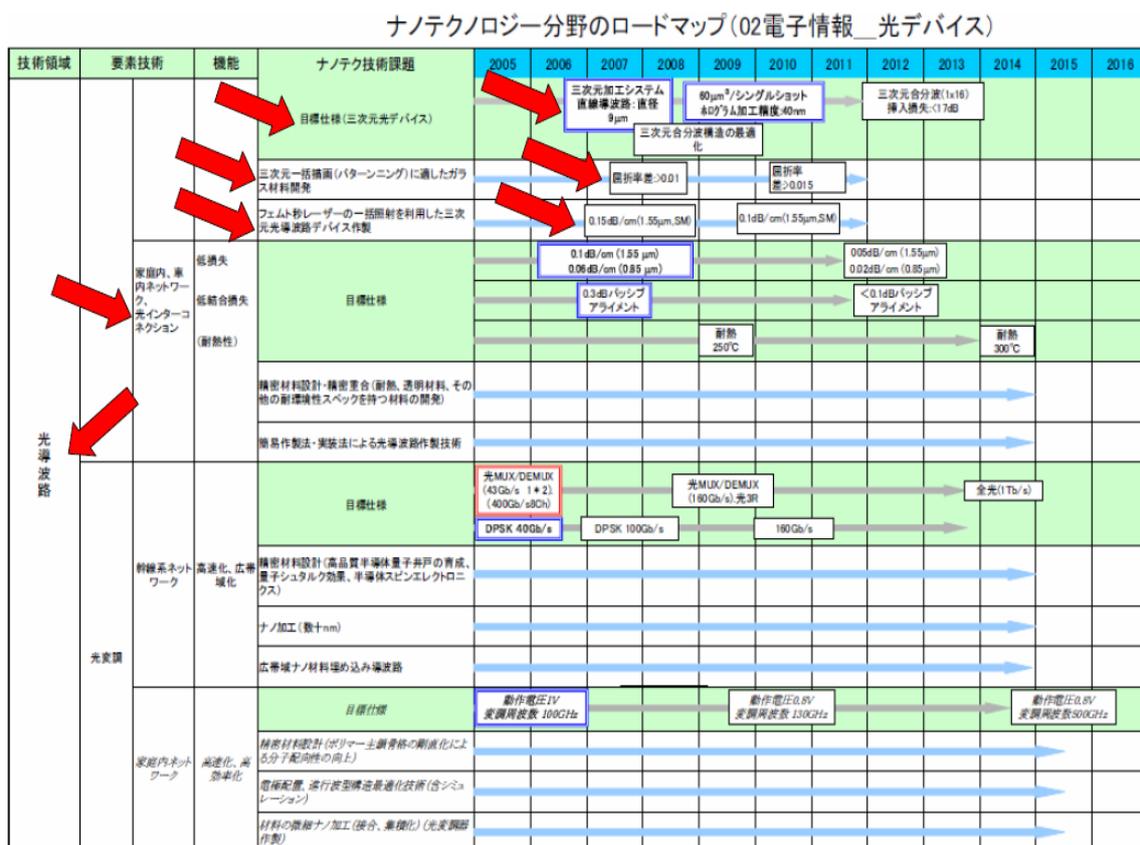


図 I-12 ナノテクノロジー技術戦略マップにおける本プロジェクトの位置付け

また「三次元光デバイス高効率製造技術開発」は、内閣府(総合科学技術会議)において検討中の革新的技術戦略(平成20年4月10日)における高速大容量通信網技術ーオール光通信処理技術ーの一部として登録された<sup>8)</sup>。この革新的技術により、スイッチ・経路処理を含め、ネットワークのオール光化技術により、爆発的に増大する情報を処理可能とする一方で、ネットワークにおける電力効率を数十倍程度向上した超高速基幹ネットワークの構築が可能となる。また、次世代イーサネット規格等の国際標準の獲得も目指した技術確立等により、我が国の国際競争力が強化される。

尚、革新的技術とは、他国の追従を許さない世界トップレベルの技術であり、持続的な経済成長と豊かな社会の実現を可能とするものである。我が国としては、グローバル化の進展の中で、

世界との競争に打ち勝つため、経済社会に大きな波及効果をもたらすと期待されるこれらの革新的技術を強力に推進してその強みを更に発展させ、資源・環境等の制約要因を転じて成長力につなげることが不可欠である。

## (2) 関連する国内外の研究開発の動向、その中での位置付け

電子情報通信学会（2008年3月）において、2015年頃から光インターコネクションのデバイス・モジュールが製品化され、光化が進み始めるとの発表があった。当技術の展開が十分に期待できる分野であり、早期に当プロジェクトでも対応する必要が出てきている。

高精度の光デバイスの効率的生産を可能とするプロセス技術については、情報家電用デバイスや光学デバイスを製造している産業界から次のような意見がある。従来の光学技術では実現できない、超短パルスレーザーを使用した新規デバイスを将来製品化したい候補があるが、現状の加工プロセスではコスト高となり、製品化が困難である。そのため、低コストの新規デバイス加工技術が開発できれば情報家電分野や光学分野に大きく寄与できる。

しかしながら、これらの技術開発の研究は殆どなされていないのが現状で早期に当プロジェクトでも対応する必要が出てきている。

## 参考文献

- 1) プレス発表、「ナノテク関連市場予測」：経済産業省調査（ナノテクノロジー・材料戦略室）、2006.7.5、半導体産業新聞
- 2) プレス発表、「2015年のニューガラス市場」、平成17年6月7日、化学工業日報
- 3) 財団法人光産業技術振興協会による光産業国内生産額に関する調査結果（2008年3月6日）、<http://www.oitda.or.jp/>
- 4) 富士キメラ総研【調査報告書】2008年版 光配線基盤；電気光混載基盤の技術・市場の将来展望、2008年2月22日。
- 5) 財団法人 光産業技術振興協会（OITDA）「光産業・光技術動向調査2004」と有限責任中間法人 カメラ映像機器工業会（CIPA）統計、および株矢野経済研究所市場予測の集荷台数および出荷金額を元にフィルタ分をNGFが予測した。
- 6) 技術戦略マップ2008（ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他）、平成20年3月、経済産業省
- 7) 技術戦略マップ2008（ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他）、平成20年4月22日、NEDO
- 8) 革新的技術戦略、平成20年5月19日、総合科学技術会議

## II. 研究開発マネジメントについて

### II. 1 事業の目標

#### II. 1.1 全体目標

平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、デバイス化加工用ガラス材料技術、三次元加工システム技術として波面制御三次元加工技術と空間光変調器三次元加工技術を確立する。また具体的なデバイスへの適用を前提に、三次元加工システム応用デバイス技術として三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性の実証を行う。

尚、本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。これ等を本プロジェクトの広義での全体目標とする。

以下に研究項目ごとに最終目標と目標値を記す。図II-1.1-1に中間目標と最終目標の内容を示す。

#### II. 1.2 最終目標

##### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

三次元光学デバイスの作製は、ガラス内部に三次元的に異質相を作製することにより形成される。異質相の三次元形状は、従来フェムト秒レーザーの照射スポットを三次元的に移動させながらガラス内部に作製された。本研究開発ではレーザーの照射スポットによる点描に代えて、ホログラム等を使用した一括照射で三次元造形を高速に行うものである。その結果として精度のよい三次元造形を低コストで実現できる技術を開発する。以下においては、この技術を試用するデバイス用ガラスの開発に関するものである。

##### ①- (1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

##### ①- (2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

三次元光学デバイスの機能発現のために、可視光領域（400nm～760nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

##### ①- (3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つである光導波路を、ガラス内部に本プロジェクトで開発する三次元加工システムで、シングルモードでの光伝搬損失として0.1dB/cm以下（導波路サイズ：直径9μm以下、波長：1.55μm）を達成できるガラス材料を開

発する。

## 研究項目②「三次元加工システム技術」

### ②- (1) 三次元加工システム技術目標

従来のフェムト秒レーザーによるガラス内部の三次元加工は、レーザー光を一点に集光させ、試料を置いたステージの三次元移動によって行っていた。本手法は、ステージの移動による三次元加工ではなくホログラム等による波面制御により一括で三次元造形を行うもので、レーザーの照射エネルギーを有効に使用でき、従来比100倍以上の高速加工を実現する。

具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 $\mu\text{m}$ 以上の立方体の中に、直径が10 $\mu\text{m}$ 以下の球状あるいは棒状の異質相を100個以上形成する。

### ②- (2) 波面制御三次元加工システム技術

加工精度として40nm以下を実現する。また、波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計ができる技術を開発する。なお、従来技術では64万画素での処理におよそ100時間が必要である。

### ②- (3) 空間光変調器三次元加工システム技術

空間光変調による波面制御をより細かく行うため、従来5万画素であった光変調器に対して45万画素以上に高精細化する。加工時間を短縮するために現状で10Hzの変調速度を50Hzに高める。光位相変調度として $2\pi$ ラジアン以上を実現すると同時に0から $2\pi$ までの中間値を制御できることとする。および、耐光性としては、ピークパワーで50GW/cm<sup>2</sup> (100fs、1kHz) を達成する。

## 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

### ③- (1) 三次元光学デバイス技術

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmから10mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。

本研究開発では、一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。これにより、光学ローパスフィルタ機能を、従来の3枚から1枚に削減し、フィルタ厚0.3mm以下の光学ローパスフィルタを実現する。また、従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 $0.236^\circ$  であり、本フィルタではこれ以上の開き角度を実現する。また解像度を維持し、モアレを抑制することを確認する。

### ③- (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

三次元光回路導波路デバイスの作製において最も重要な基本回路の一つは、光導波路である。光導波路は、異質相をガラス内部に作製することにより実現できる。異質相の形状は適用デバイスにより異なり種々雑多であるが基本的なものは直線導波路である。そこで、基本的な直線導波路として、シングルモードで光伝搬損失：0.1dB/cm 以下（導波路サイズ：直径9 $\mu\text{m}$ 以下、波長：1.55 $\mu\text{m}$ ）を開発する。また、本加工システムの加工機能・性能を確認するために分岐面が互いに直交した1 $\times$ 16の三次元光カプラ（スプリッタ）導波路について、挿入損失：17dB以下、反射減衰

量：45dB以上（波長：1.50～1.60μm）が作製可能であることを確かめる。

# 研究開発項目別目標値

研究開発項目	中間目標	最終目標
①デバイス加工用ガラス材料技術	(1)デバイス加工用ガラス材料技術共通目標 自主目標：データの体系化(異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性)	最終目標
	(2)三次元光学デバイス用ガラス材料技術 異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.01$ 可視光領域(400-760nm)	異質相と母材の屈折率差 $\Delta n \geq 0.015$ 可視光領域(400-760nm)
	(3)三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術 直線導波路(レーザー照射条件最適化)； 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55μm @Single Mode	直線導波路(三次元加工システムで作製) 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55μm @Single Mode
②三次元加工システム技術	(1)三次元加工システム技術目標 三次元基本加工機能を確認 60μm×60μm×60μm 9μm ±±0.9μm	100倍以上の高速加工を実現 100個以上の球状異質相 or 棒状異質相 60μm×60μm×60μm 9μm ±±10μm
	(2)波面制御三次元加工システム技術 ホログラム 設計速度 $\geq 3$ (従来比)	ホログラム 加工精度 $\leq \pm 40\text{nm}$ 設計速度 $\geq \times 10$ (従来比)
	(3)空間光変調器三次元加工システム技術 空間光変調器： 変調速度 30Hz 光位相変調度 $\geq \pi\text{rad}$ 耐光性 $\geq 30\text{GW/cm}^2$ (100fs、1kHz)	空間光変調器： 変調速度 50Hz 光位相変調度 $\geq 2\pi\text{rad}$ (0~2πで制御可) 耐光性 $\geq 50\text{GW/cm}^2$ (100fs、1kHz)
③三次元加工システム応用デバイス技術	(1)三次元光学デバイス技術 光学LPPFの一次設計 ・光学LPPFの試作(多点描画) ・方向無依存性の確認(シミュレーション & 試作確認)	一括描画で確認 光学LPPF(3→1枚) 2光軸開き角 $> 0.236^\circ$ モア抑制の確認 $\leq 0.3\text{mm}$
	(2)三次元光回路導波路デバイス技術 波面制御法(ホログラム)で直線導波路 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55μm @Single Mode	直線導波路 光伝搬損失 $\leq 0.1\text{dB/cm}$ 波長1.55μm @Single Mode 3次元光カプラ: 1×16 挿入損失 $\leq 17\text{dB/cm}$ 反射減衰量 $\geq 45\text{dB}$ 波長1.50~1.60μm

図II-1.1-1 中間目標と最終目標の内容

## II. 1.3 中間目標

マイルストーンとして、下記のように別途中間目標を設定した。なお中間目標の設定にあたっては、プロジェクトリーダーと協議するとともに、有識者（外部技術評価委員）の評価を受けた。

本プロジェクトでは、外部意見を取り入れ成果の実用化を促進するため、途中成果をナノテク展示会にて積極的に公表し、来場者からの意見を参考に早期の実用化のための加工システムとそれを適用したデバイス例の方向付けを行なうこととした。

以下に中間目標の具体的内容を示す。

### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

#### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

#### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

可視光領域（400nm～760nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。

#### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

レーザー照射条件（パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等）の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失：0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。

### 研究項目②「三次元加工システム技術」

#### ②-(1) 三次元加工システム技術

加工形状寸法として、直線導波路で直径9 $\mu$ mの加工を確認する。また、その加工精度として、0.9 $\mu$ mを確認する。

1パルスのレーザーショットにより、一辺が60 $\mu$ mの立方体の中に、直径が10 $\mu$ m以下の球状あるいは棒状の異質相を2層以上形成し、三次元基本加工機能を確認する。

#### ②-(2) 波面制御三次元加工システム技術

波面制御素子を従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発する。

#### ②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術

変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として $\pi$ ラジアン以上を確認する。耐光性として、30GW/cm<sup>2</sup>（100fs, 1kHz）を達成する。

### 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

#### ③-(1) 三次元光学デバイス技術

光学シミュレーションにより、方向無依存機能を達成するための形状を検討する。また、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認し、フィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認する。

#### ③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失：0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。

同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせる。

## Ⅱ. 1.4 中間目標の設定理由

ナノテクノロジー・材料技術開発部では、最終目標に対してH20年度末における研究管理上のマイルストーンとして中間目標を設定し研究開発を実施し、目標通りの結果を得た。中間目標と最終目標の設定理由を記載する。表Ⅱ-1.4-1に最終目標設定の理由をまとめた。

### 研究項目①「デバイス化加工用ガラス材料技術」

#### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

プロジェクトで開発する一括加工システムの確認用としての「光学デバイス」（例として、光学ローパスフィルタ）と「光回路導波路デバイス」（例として、スプリッタ）に加えてその他のデバイスやより広い分野で使用できるように、即ち開発する一括加工技術をより広く適用できる分野を広げるために本共通目標を置き、より優れたガラス材料のデータを系統的に調べる。

#### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

低コストで材料を加工するためには、レーザーパワーを効率良く使用することが重要となる。このためには、ガラスの加工閾値はできる限り低いことが好ましい。また、加工精度を良くするためには、低いパワーの加工においても異質相と母材の屈折率差が大きくなることが好ましい。また、同一の形状で屈折率差を大きくすることができれば、加工する領域のコンパクト化に繋がり、強いてはデバイスのコンパクト化に繋がる。そこで本研究の中間目標として、可視光領域（400nm～760nm）でガラス母材と異質相との屈折率差を0.01以上取れる透明な光学ガラス材料を開発することとした。最終目標は、デバイスとして具体的に光学ローパスフィルタを想定してきめた。即ち、ガラスの屈折率差が0.015あれば厚みが数10 $\mu$ mの光学ローパスフィルタを作製できることから最終目標値を決めた。

#### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

光導波路は通信用光デバイスにおいて非常に重要な役割を担っている。現在、光通信帯域の主流は1.3と1.55 $\mu$ m近傍であり、将来的な大容量光通信を見越したとしてもその波長域は1.2～1.7 $\mu$ mである。既に実用化されている光導波路には、石英系ガラスを基材とするものと、PMMA（ポリメチルメタクリレート）、ポリイミドやシリコーン樹脂等のポリマ材料を基材とするものがある。フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。加えて、本技術により開発する三次元光デバイスにおいては集積化することで従来デバイスより導波路長は短くなるのが想定され、伝搬損失のデバイス性能への影響は更に少なくなることから、一括描画による実用レベルの導波路形成を確認することは三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発において十分な目標と思われる。また、光通信においては光導波路との接続にシングルモード光ファイバーを用いるケースが最も多く、導波路デバイスとしてもシングルモードタイプが作製可能であることを確認する必要がある。そこで本研究の中間目標として、レーザー照射条件（パルスエネルギー、繰り返し周波数、波長等）の最適化により、直線導波路における主損失要因である散乱と

構造不整による損失低減化を実施することで、光伝搬損失：0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定することとした。最終目標としては、一括描画による光伝搬損失：0.1dB/cm以下の実用レベルの直線導波路形成を確認することとし、三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発を行うこととした。

表 II-1.4-1 最終目標の設定理由

テーマ名	目標	設定理由
①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標	異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。	開発する一括加工技術をより広く適用できる分野を広げるために本共通目標を置き、より優れたガラス材料のデータを系統的に調べる。
①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術	可視光領域(400nm~760nm)でガラス母材と異質相との屈折率差を0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。	ガラスの屈折率差が0.015あれば厚みが数10μmの光学ローパスフィルタを作製できる。尚、光学ガラス以外のガラスで得られている屈折率変化は0.01程度である。
①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	光伝搬損失:0.1dB/cm以下の直線導波路が作製可能なガラス材料を選定する。	フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。一括描画による実用レベルの導波路形成を確認することは三次元光回路デバイス用ガラス材料の開発において十分な目標と思われる。
②-(1) 三次元加工システム技術	ホログラム等による波面制御技術を開発し、三次元造形を従来比で100倍以上の高速加工を実現する。 具体的には、1パルスのレーザーショットにより、一辺60μmの立方体中に、直径10μm以下の球状或いは棒状の異質相を100個以上形成する。	最終目標では、中間目標の成果を適用して、更なる微細化と更なる高速化を目的として、微細で高精度な三次元デバイスを作製するために必要な技術開発を設定している。この目標達成により、より高精度なデバイスをより高速で作製することが可能となる。また、この目標で得られた技術と最終目標で開発する材料技術との組み合わせにより、より高精度で、より高速でデバイスを作製できる技術が確立できる。他のテーマで得られた技術を組み合わせると、従来比で10,000倍の高速加工が実現できると考えられる。
②-(2) 波面制御三次元加工システム技術	波面制御素子を従来に比べて10倍以上の高速で設計できる技術を開発する。精度40nm以下の波面制御素子を作製する。	64万画素のホログラム設計に現状では100時間掛かる。これを最終目標として1/10にし、少なくとも1日で計算できるようにする。波面制御素子の高精度化は中間評価時に既に達成している。これにより更なる高精度ホログラムを作製する。
②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術	変調速度を50Hzに高め、光位相変調度として $2\pi$ ラジアン以上を確認する。耐光性として、50GW/cm <sup>2</sup> (100fs,1Hz)を達成する。	変調速度はピコレート以上でパターンが書き換えできるように決めた。光位相変調度は波面制御のためのホログラムを表現するために必要な特性を目標とした。耐光性では、ガラスに100点以上の異質部を一度に形成するのに十分な値として設定した。
③-(1) 三次元光学デバイス技術	一括照射で2.5mm角以上の領域に異質相を形成し、フィルタリング方向の無依存性を確認する。フィルタ厚みを0.3mm以下で実現する。	従来の水晶式と性能的に同等以上に、形状的には対抗できるように決めた。厚みは従来に比べて桁違いに薄く、使用枚数は1/3に、厚みは1/10以下に決めた。尚、従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmの厚さを持つ。
③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術	波面制御法で直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失:0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証し、これを使用して1×16のスイッチを試作する。挿入損失で17dB以下、反射減衰量45dB以下を目標とする。	フォトリソグラフィとドライエッチング技術により量産されている一般的なガラス光導波路の伝搬損失は0.1dB/cm程度であり、ポリマ光導波路では0.2dB/cm程度であるが、長尺で使用する特殊なケースを除けば伝搬損失は0.1dB/cm以下であれば問題ないレベルである。このような光導波路を使用して最終目標のスプリッタを実現する。

## 研究項目②「三次元加工システム技術」

### ②- (1) 三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを、高精度で高速に作製するにはホログラムを使用して一括で異質相を形成する方法が有効である。これにより、従来の逐次形成法に比べて高精度で高速に三次元的に異質相を形成することが可能となる。

適用デバイスの代表的なものとして光導波路がある。ここでは、高精度の光導波路を高速で実現することを念頭に目標を定めた。また、三次元基本加工を確認するための目標を中間目標に、最終目標としては実用化に向かっての更にその高度化を目標として設定した。また、他の開発項目の成果をも総合化することにより従来比 10,000 倍の高速化を予想して最終目標を設定した。

### ② - (2) 波面制御三次元加工システム技術

三次元加工システムに使用されるホログラムの設計には多重積分を多用し、この演算は現在 64万画素で約100時間がかかる。これは 1 画素あたりの積分に500msかかることになる。高速演算アルゴリズムを開発することにより最低でも50ms以下にすることが必要である。中間目標としては、従来に比べて3倍以上の高速で設計できる技術を開発することとした。最終目標としては、実用化レベルを考慮して更なる高速化を考え10倍以上を設定した。

### ②- (3) 空間光変調器三次元加工システム技術

最終目標達成のためには、フェムト秒レーザー光波面制御モジュールに関し、画素数に関してはレーザービームを100点以上に分岐することおよび折り返しにより10波長以上の波面を表現できることを念頭においた。また速度はビデオレート以上でパターンが書き換えできれば実用上問題がないこと、および外部回路との整合性も考慮した。位相変調度は波面制御のためのホログラムを表現するために必要な特性を目標とした。さらに耐光性では、ガラスに100点以上の異質部を一度に形成するのに十分な値として設定した。そこで中間目標としては、最終目標達成への足掛かりを具体的に固めるべく、フェムト秒レーザー光波面制御モジュールとして、変調速度を30Hzに高め、光位相変調度として $\pi$ ラジアン以上を確認する。また耐光性として、 $30\text{GW}/\text{cm}^2$  (100fs, 1kHz) を達成することとした。

## 研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」

### ③- (1) 三次元光学デバイス技術

従来の光学ローパスフィルタは3枚の水晶と位相板から構成されており、数mmの厚さを持つ。1枚の水晶は光軸を2軸に分離し、一方向のみのフィルタリングしか行わない。上下左右のフィルタリングを行うために直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために位相板を必要とする。従って、コンパクト化のためには、一枚の薄い材料内部に二次元または三次元で形成された異質相により二方向に光線分離できることが必要である。従来のローパスフィルタに使用されている水晶での2光軸同士の開き角度は、 $0.236^\circ$  という固有の値であり、光線分離幅は水晶の厚みによって制御せざるを得ない。

一方、低コストでの製造を考えると、一括照射技術を用いてできる限り広い領域に加工できることが要求される。しかしながら、現状は従来の一括照射技術では数mmオーダ一角の領域に加工するためには数百 $\mu\text{m}$ オーダ一角の加工領域を走査機構にて広い領域に加工する必要がある。以上の理由から、上記の問題点を解決するための最終目標に対して、中間目標としては、光学シミュ

レーションにより方向無依存機能を達成するための形状を検討し、この検討に基づき、多点描画にて光学ローパスフィルタ形状を試作し、方向無依存性を確認しフィルタ枚数を従来の3枚から1枚にできることを確認することとした。

### ③ - (2) 三次元光回路導波路デバイス技術

近年、通信や情報処理等、様々なシステムの光ネットワーク化が急速に発達し、それに伴い低コスト、高性能で光集積化が容易な導波路型の合分岐や合分波器は益々重要になっている。更に、三次元化による小型・高集積化による機能集約や多機能化といった要望もあるが、フォトリソグラフィとドライエッチングによる従来の技術では三次元構造を高精度で作製することは困難である。そこで、本三次元加工システムの有効性を確認するための三次元光回路導波路デバイスとして光カップラを選定した。更に、既に実用化されている光カップラの性能を三次元光デバイスとしての形態において実現することができれば、本三次元加工システムの実用性を確認できるとともに、他の光デバイスの三次元化による機能集約や多機能化にむけた波及効果を期待することができる。以上の理由により、本研究の中間目標としては、開発したガラス材料に、波面制御法での直線導波路描画検討を行い、光伝搬損失：0.1dB/cm以下のシングルモード直線導波路が作製可能であることを実証する。同時に波面描画法の留意点や問題点の抽出を行い、三次元加工システム技術の開発へフィードバックさせることとした。以上の結果を用いて、具体的な光カップラを作製し、本技術の有効性を最終目標として確認することとした。

## II. 1.5 研究開発項目毎の詳細計画内容

### 研究項目 ① デバイス化加工用ガラス材料技術

ガラスの原子・分子レベルの構造を制御すれば、従来のマクロな構造制御では実現できなかったガラス材料の光学的、電磁氣的、機械的及び化学的等の優れた特性や機能を、有効に引き出すことが期待できる。

そのために、従来のマクロな構造制御とは異なった新たな手法、つまり、外部場（光、イオン、電子、電界、熱及び圧力等）をガラス材料に作用させることによって、母材の組成変化を起さずに、1～数百nmレベルの屈折率を変えた領域（以下において異質相と呼ぶ）の形状と配列を適正に制御することが可能となる。外部場の例としては、フェムト秒レーザーやイオンや電子ビーム等が挙げられる。従って、これらの外部場と相互作用を効率よく行えるガラス材料が必要となる。一方、このような材料で作製するデバイスに使用できることが必須の条件となる。例えば、光学デバイスにあっては、可視光での光に対して透明であることが必須である。また、光通信用の光デバイスにあっては、波長が1.2から1.7 $\mu\text{m}$ の通信帯域で光情報を低伝搬損失で伝送できることが重要である。

近年レーザーパルス圧縮技術の向上に伴い、超短パルスレーザー光を利用した透明材料の加工が盛んに報告されており、特にパルス幅がフェムト秒レベルのレーザー光はそのピークパワーの強さから多光子吸収過程を利用して透明材料内部に三次元的に母材と屈折率の異なる異質相を形成することが可能であり、この屈折率変化等を利用した光導波路や回折格子などの光学素子作製技術としての応用が提案されてきたが、実用までは程遠い状況である。その背景として、例えば、加工される材料自身が有する光学特性による収差の影響や、加工方法が未確立であり加工時間が

かかることによる加工コストの課題が挙げられる。また、上記異質相とはレーザーの強電場により誘起される分子構造の変化(密度変化)や空洞、結晶化、微粒子成長、カラーセンター生成、コロイド生成、クラック発生などであり、材料成分と異質相形成のメカニズムについては未だ明らかになっていない部分も多い。

従って、デバイスから要求されるガラス母材と外部場で異質相が形成できる材料とが一致する必要がある。このようなデバイスに適したガラス材料を作製する必要がある。

本研究では、世の中で広範囲に使用され適用範囲の広いと考えられる光学デバイスと光回路光導波路デバイスの作製に適した材料を開発する。

また、デバイス用ガラス材料におけるデータの体系化をも行う。

## 【共通】

### ①-(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標

研究項目③「三次元加工システム応用デバイス技術」と連携をとりながら研究を進める。具体的には、光学デバイスの代表的な光学ローパスフィルタと光回路デバイスの代表的な光回路導波路デバイスを作製するために必要なガラス材料を開発する。

これらの開発を通して得られたデータと異質相形成の閾値、速度やサイズのガラス材料依存性を系統的に調べたデータとの体系化を最終年度までに行う。

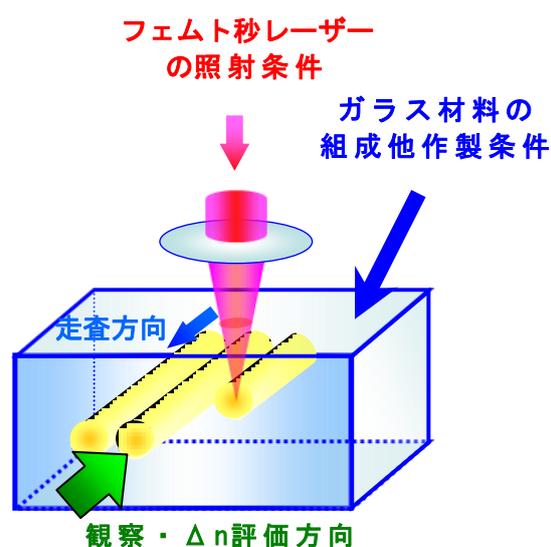
## 【デバイス用ガラス材料】

### ①-(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術

本研究では、光学ローパスフィルタを想定して、三次元光学デバイス用ガラス材料を開発する。

従来のデジタルカメラに搭載されている光学的ローパスフィルタは水晶が用いられており、CCDなどの固体撮像素子前面にはCCDを保護するためのカバーガラスや赤外線カットフィルタとともに光路中に配置される。近年、撮像素子の小型化が進むにつれて、カバーガラスを使用せず、水晶ローパスフィルタをカバーガラスとして兼用する光学系が採用されているカメラも出始めている。

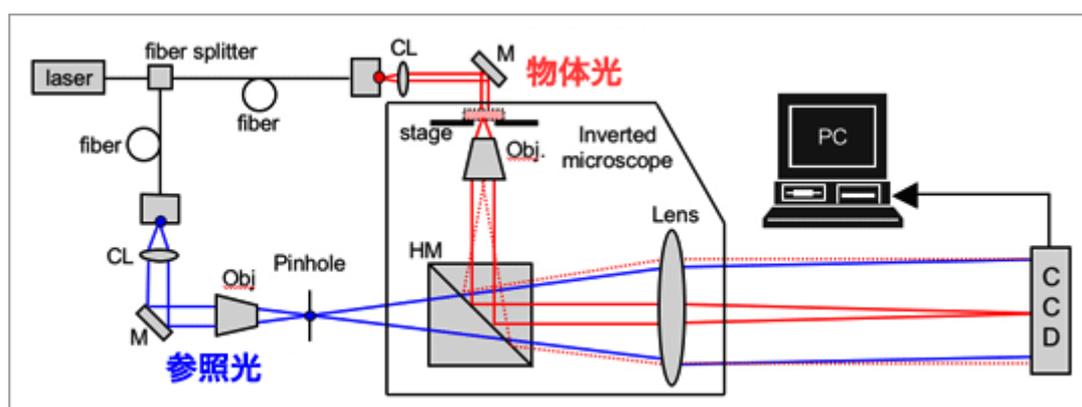
このような状況を鑑み、加工用部材としては水晶やCCD前面のカバーガラス



図Ⅱ-3 ガラス内部に作製した異質相

と同等な光学特性（屈折率 $n_d=1.45\sim 1.55$ 程度）である部材、あるいはそれに限らず、各種レンズ等に用いられるより屈折率の高い( $n_d>1.55$ )光学ガラスに対して、異質相形成の閾値、異質相形状の加工性、異質相の波長分散特性、着色、偏光特性、残留歪、ステージ走査速度（照射回数）やサイズ（加工体積）のガラス材料依存性を系統的に調べ、データの体系化を行う。

また、ガラス組成と異質相の関係が明らかになっていない部分が多く、上記の体系化の段階でどの種類に属するかも見極めていく必要がある。一方で、光学デバイスとしての利用を想定すると、着色による透過率の損失は好ましいとは言えず、また加工設計のし易さの観点から異質相領域の屈折率変化は連続的であることが好ましい。従って、これらの観点から本研究では密度変化による異質相利用を基本とし、必要に応じて異質相の種類を選択、組み合わせることにより屈折率差が0.015以上取れる透明な光学ガラス材料を開発する。さらには、形成した異質相の屈折率差の評価方法についても検討を行う。図Ⅱ-3にガラス内部に作製した異質相、図Ⅱ-4に屈折率変化量の測定の方法を示した。



図Ⅱ-4 ガラス内部に作製した異質相の屈折率変化量の測定

### ①-(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術

本研究では、三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料および一括描画に適した誘起構造を開発する。

光導波路デバイス形成で材料に求められる重要な要素は、フェムト秒レーザーにより誘起される構造変化領域の屈折率、散乱強度、吸収強度（使用波長域での）、構造変化閾値及び変化領域の形状・サイズの制御性である。しかしながら、構造変化機構と変化領域の物性については明らかにされていない部分が多く、系統的に研究された例も殆ど無いのが現状である。

三次元光導波路デバイス用として適したガラス材料を開発するにあたってはフェムト秒レーザーによる構造変化の系統的なデータの取得とその体系化を実施する必要がある。これらの研究において、ガラス内部にフェムト秒レーザーを集光照射した際に起こる現象をピコ秒オーダーの時間スケールで観測（図Ⅱ-5参照）し、その現象をシミュレーションすることで、代表的な異質相であるガラスの密度変化に起因する屈折率変化のメ

カニズムの解明や、レーザー照射により発生する圧力波の屈折率変化に及ぼす影響を調べる。

更に、レーザー集光点をガラス材料に対して相対移動させる従来法での光導波路描画と波面制御技術（研究項目②）による光導波路描画とでは形成される導波路の微細構造が異なることが想定され、例えば光の干渉による導波路の構造不整等が生じる可能性がある。そこで、ガラス材料開発の段階で光導波路形成における波面制御技術の問題点を抽出し、先の体系化したデータベースと照らし合わせることで、最終的に波面制御技術により高精度で高速加工が可能なガラス材料を開発する。

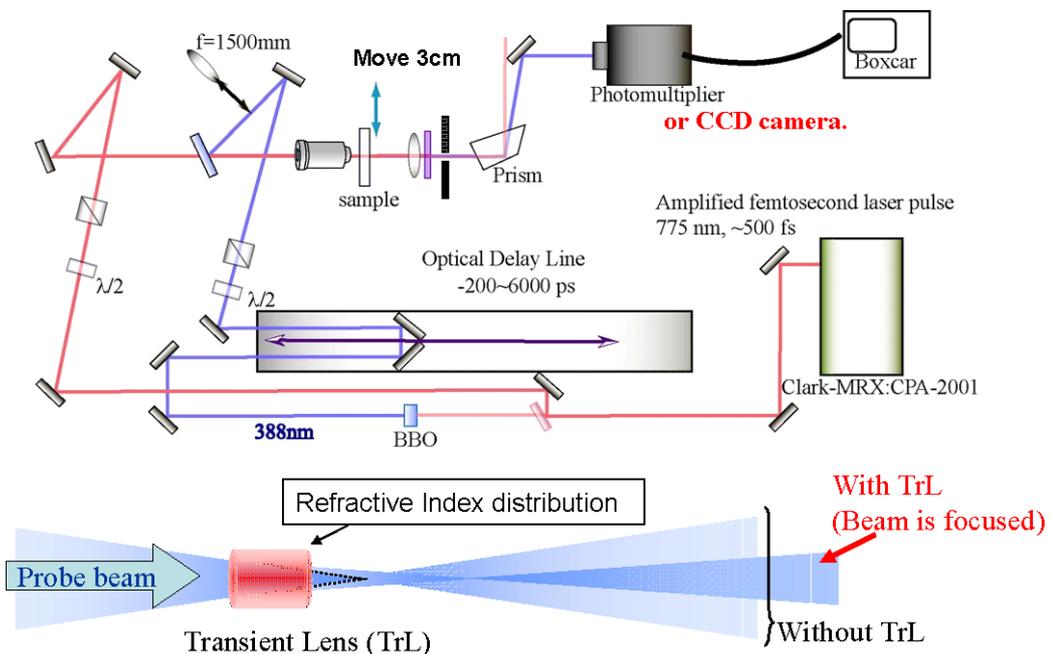


図 II-5 ダイナミクス観測用光学系

## 研究項目 ② 三次元加工システム技術

[加工システム]：ホログラムによる三次元加工システムとガラス加工

### ②-(1) 三次元加工システム技術目標

#### a) 加工メカニズムの解明と機構及び光学システムの構築

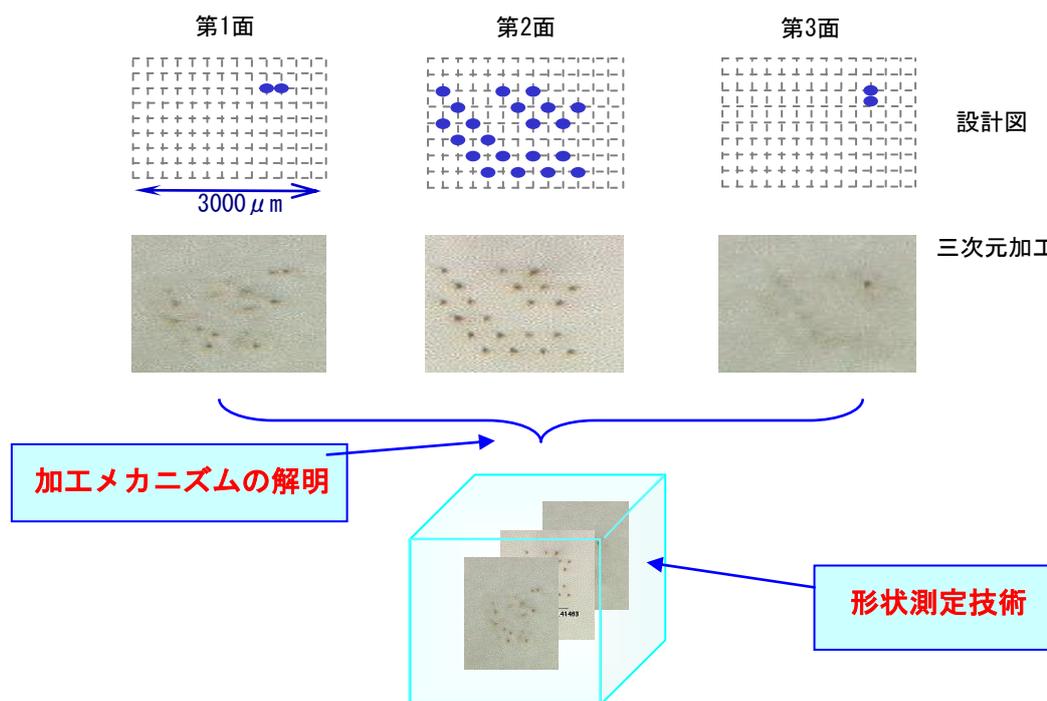
ガラス・ホログラムや空間光変調器を用いた三次元加工を行うためには、フェムト秒パルスレーザーを中心とした光学系・加工系のシステムを検討し、これを用いてレーザー光の強度、パルス幅などと加工形状などとの関係の加工基礎データを収集し、これらのデータから加工のメカニズムを検討し、より高性能に加工できる三次元加工システムを構築する。

## b) 形状計測技術

ガラスの中に作製した三次元導波路などのデバイスの形状やデバイス部の屈折率の評価が必要となってくる。この際に問題となるのは透明体であるガラスに微小な屈折率の変化に基づいてその形状を評価する必要がある。電子顕微鏡を用いる方法もあるが破壊検査となり、また電子顕微鏡でガラス内部の形状を測定することが困難であり、非破壊で形状測定を行える技術を開発する。これには屈折率差を逆に利用する波面位相差検出方式若しくは微分検出方式のいずれかの方法を用い検出能力を上げる。さらにハードのみでなく画像処理のソフトも含んで開発する。

## c) デバイス加工

別途開発するホログラム設計技術を用いてホログラムを設計し、この設計に基づいて別途開発のホログラム作製プロセスにてホログラムを作製し、これにフェムト秒レーザー光を照射し、ガラス中に三次元デバイスを作製する。作製したデバイスは形状計測技術にてその構造を計測し、またその特性を光学的他に関しても評価する。図Ⅱ-6に加工例を示した。



図Ⅱ-6 CGHを用いた三次元デバイスの作製

〔波面制御〕：ホログラム設計技術、ホログラムの作製技術

## ② - (2) 波面制御三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを、高精度で高速に作製するにはホ

ログラムを使用して一括元的に異質相を形成することが可能となる。このための高精度三次で異質相を形成する方法が有効である。これにより、従来の逐次形成法に比べて高精度で高速に三次元加工システムに必要な高精度ホログラムの製作、ホログラム設計用高速シミュレータ、形状計測技術、等を開発する。

#### a) ホログラムの設計技術 —ホログラム設計の高精度・高速化—

ホログラムを用いて一括照射で三次元導波路を作製するが、ホログラムを効率よく早く作製するためにはホログラム原版の設計も早く行わなければトータルスループットが上がらない。従来の方法では計算機を多数配置し並列処理をしている。それでも100時間程度が見積もられており原版作製からホログラム像を作成するまでに時間がかかった。またフィードバックをかけるにも演算処理が遅いためフィードバックがかけられない状態であった。PCの計算時間が早くなったとはいえ、演算アルゴリズムそのものを変革しなければ設計時間の短縮は望めない。このため高速演算アルゴリズムを開発しトータルスループットを上げる。さらに計算機を並列配置しさらに高速化を図る。図Ⅱ-7にホログラム設計の概念図を示した。



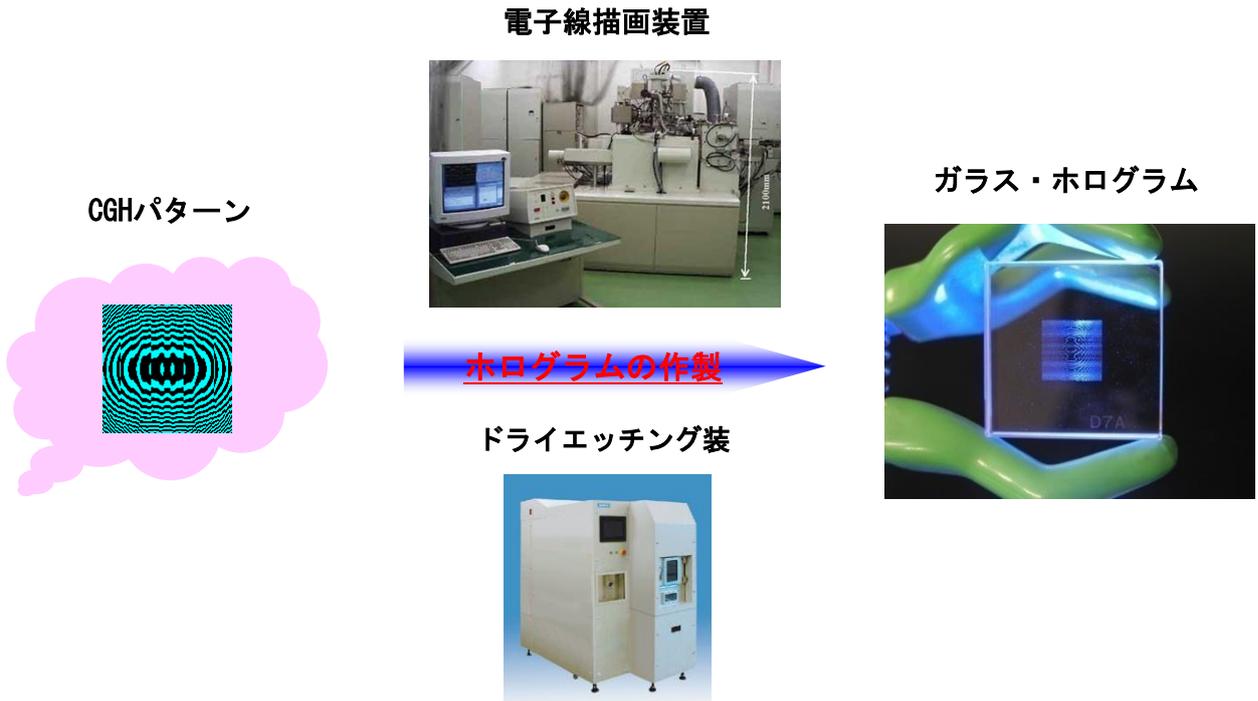
図Ⅱ-7 ホログラムの設計

#### b) ガラス・ホログラムの作製技術 —ホログラム設計の高精度・高速化—

三次元導波路などの繊細なパターンを再生するためのホログラムの性能はかなり高いものが要求される。高精度なホログラムを安定して作製するためには、EB描画によるリソグラフィ技術やドライエッチング技術等の半導体微細加工技術が有効な手段である（図Ⅱ-8）。また、位相情報は階調化して（多段構造として）深さ方向に記録する必要がある。計算によって求めた位相情報から各段のデータを生成し、数回に分けてEB描画とエッチングを繰返し、構造を形成する技術である。これにより高い回折効率を得ることができる。波長に対してホログラムの干渉縞が微細なほど、回折される3次元像の強度分布の均一性が向上し、特に導波路のような境界面の

滑らかさが要求される素子において、その重要性は高まる。

作製したホログラムの形状観察と、ビームプロファイラーによるホログラムによる実像（デバイス形状）観察、および実際にフェムト秒レーザーによるガラスの加工実験を通してその性能を評価し、更なる高性能・高効率化のための方策を検討しながら高性能ホログラムの実現を行なう。



図Ⅱ-8 ガラス・ホログラムの作製

### ②-(3) 空間光変調器三次元加工システム技術

フェムト秒レーザー照射によりガラス内部に各種デバイスを作成する場合、三次元的に成形された加工用ビームを順次形状を変化させながら作成する必要が生じる。この場合に有効なレーザーパターンを順次変更できる可変型の三次元加工システムのため、フェムト秒レーザーの高エネルギーパルスに適合しかつ高精細・高変調速度を有する位相変調型液晶空間光変調器（LCOS-SLM）、LCOS-SLMと最適な光学系を融合した光波面制御モジュール、および空間光変調器を用いた波面制御技術を開発する。

フェムト秒レーザー光波面制御モジュールは、フェムト秒レーザー光の位相空間分布を動的に制御するための光学モジュールであり、図Ⅱ-9のように、LCOS-SLM、レンズ、ミラーを組み合わせ構成される。この動的位相制御技術によって、加工面におけるビームパターン生成・ビームの品質向上・焦点位置制御などを行い、加工の速度・精度・機能を向上させようとするもので

ある。LCOS-SLMは波面を制御するデバイスであり、本モジュールの中核部品である。その他のレンズやミラーは、本モジュールを加工システム本体と円滑に光学接続する為のものである。本モジュールの開発に当たっては、これらの構成要素全てがフェムト秒レーザー加工に適した性能（耐光性、応答速度、解像度）を持つ必要がある。特に、本研究では耐光性と応答速度の向上を図る。

現在の基本 LCOS-SLM では、フェムト秒レーザー加工において、反射面が光吸収のあるアルミ電極をミラーとして用いるため、レーザー耐光性が低いという問題がある。アルミ電極上に誘電体多層膜ミラーを用いることでこの問題を解決できると考えられる。加工に用いるフェムト秒レーザーは波長帯域が通常のレーザーよりも広いため、誘電体多層膜ミラーはその全域をカバーする広帯域性と高反射率が必要である。同時に、基本 LCOS-SLM の有する光学的・電気的特性を劣化させない必要がある。このような条件を満足する誘電体多層膜ミラーを製造する技術を開発し、LCOS-SLM のレーザー光耐力を高める改良を行う。また、レンズやミラー等モジュールの他の光学部品のレーザー耐力の向上も行う。

上述のように多層膜ミラーをはじめとした薄膜の研究開発がポイントとなる。LCOS-SLM 用の機能薄膜は LCOS-SLM の電気特性を損なうことなくその光学特性を向上させる必要があるが、このような目的の薄膜研究は文献では見あたらず、開発に成功すれば国際競争力の高いユニークな技術に育つ可能性があると考えられる。この実現には、低温プロセスで、緻密な高屈折率を有する薄膜を作成することが必要である。また、応答速度の向上や位相変調度の向上のために、液晶層や CMOS 回路部の設計や試作、さらに LCOS-SLM の駆動回路についても検討を行っていく。

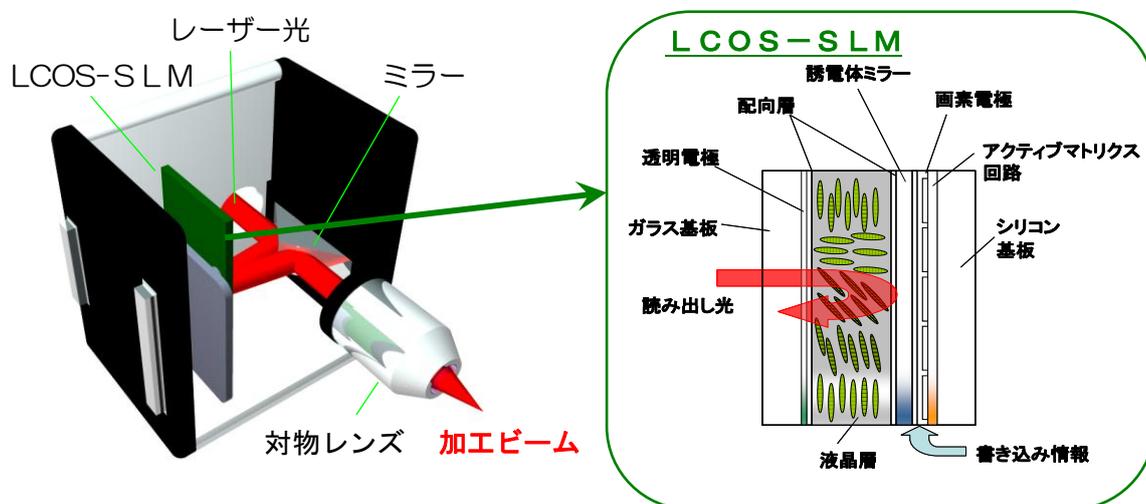


図 II-9 光波面制御モジュールの概念図

### 研究項目 ③ 三次元加工システム応用デバイス技術

三次元光学デバイスと三次元光回路導波路デバイスを、デバイス化加工用ガラス材料と本加工システムにより作製することによりその有効性を確認する。

#### ③-1) 三次元光学デバイス技術

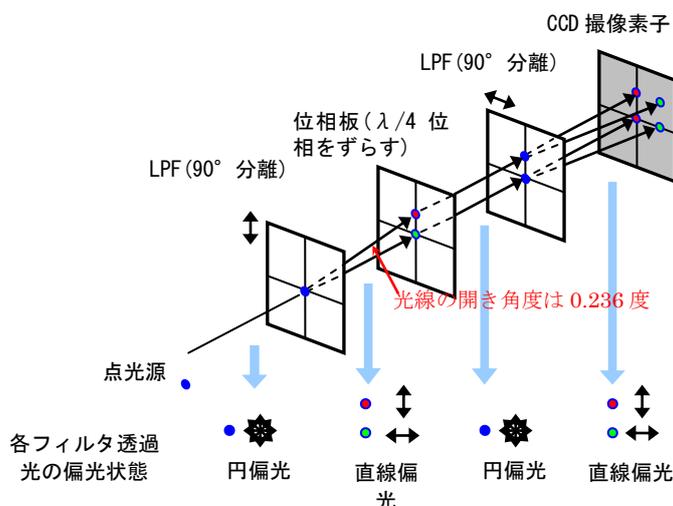
屈折率が母材と異なる異質相を、フェムト秒レーザー照射等によって母材の内部に、二次元あ

るいは三次元状に周期的に、微細、高精度で高速に形成する技術を開発する。これにより超薄型で、低コストで製作可能な光学ローパスフィルタを試作し、本三次元加工システムの有効性を確認する。

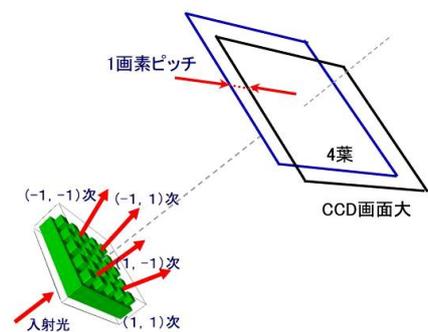
近年、デジタルビデオカメラやデジタルスチルカメラの普及に伴い、光学系のコンパクト化と画素の高密度化が進んでいる。このような固体撮像素子を備えた光学機器では、被写体像を光学的に空間サンプリングすることにより、被写体像の各画素に対応する撮像出力を得ており、取り扱うことのできる絵柄の細かさは撮像素子のサンプリング周波数で決まり、この周波数の半分のナイキスト周波数よりも高い空間周波数成分が上記被写体像に含まれると、折り返しによる偽信号が発生し、被写体の色と無関係な色や、本来見えるはずのない周期模様などが現れる。そこで、被写体の高空間周波数成分を制限するために、水晶の複屈折を利用して被写体像を僅かに分離することにより、低い空間周波数成分に対して極力高いコントラストを維持し高い空間周波数成分のコントラストを下げるようにした光学的ローパスフィルタが使用される。

従来の光学的ローパスフィルタでは、水晶の複屈折が利用されており、一枚の水晶板では一方の光線のみが分離される。一方、デジタルカメラ等では平面に画素が上下左右方向に配列されているため、撮映像を上下方向と左右方向の2方向に分離する必要がある。即ち、図II-10のように直行する2枚の水晶を使用し、且つ偏光特性を修正するために1枚の位相板が必要となりフィルタの厚みは数mmとなる。撮像素子の更なるコンパクト化には、これを薄くするためのブレークスルー技術を開発する必要がある。

そこで、従来の光学的ローパスフィルタに用いられている水晶の代わりに、屈折率が母材と異なる異質相を、フェムト秒レーザー一括照射によって固体撮像素子のカバーガラスの内部に、ドット状あるいは円柱状の異質相を二次元あるいは三次元状に周期的に形成し、これにより超薄型の光学ローパスフィルタを試作する。光学的ローパスフィルタの構造は、光学シミュレーションにより異質相形状と光線分離能の相関をとりながら開発する。提案するローパスフィルタの1例を図II-11に示す。



図II-10 2枚の水晶ローパスフィルタと位相板による光線分離の模式図



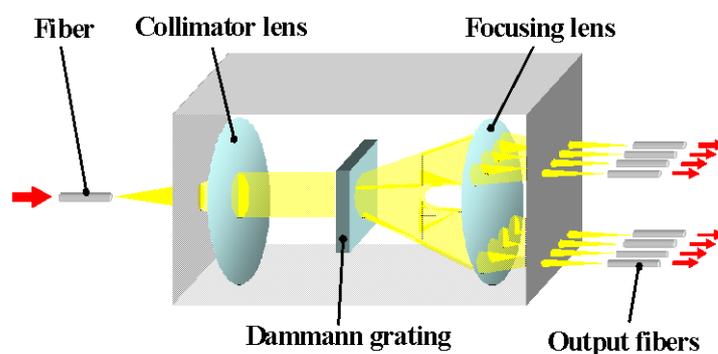
図II-11 提案ローパスフィルタの1例

### ③-(2) 三次元光回路導波路デバイス技術

ガラスの中に導波路やそれらの結合した三次元光回路導波路デバイスの一例として光カプラ（スプリッタ）導波路をフェムト秒レーザー照射で作製し、本三次元加工システムが光回路デバイスの作製に有効であることを確認する。

通信や情報処理等、様々なシステムの光ネットワーク化が急速に進展し、本格的な立ち上がりが始まっている光加入者系への各種サービスの早急な対応が求められている今日、低コスト、高性能で光集積化が容易な導波路型の合分岐や合分波器は必須の光デバイスである。

カプラには指向性カプラ、T-カプラ、スターカプラ、対称反射カプラや波長分割多重カプラ等、用途に合わせて様々なものが開発されている。これらのカプラには導波路型平面回路（PLC）を利用したものと融着延伸光ファイバーを利用したものとがある。PLCは光の発振・増幅・分岐・スイッチ等の光部品のコストダウンを可能にできる有力手段として注目されているが、フォトリソグラフィとドライエッチングによる従来の技術では立体的な三次元構造を高精度で作製することは困難である。一方、融着延伸光ファイバーでは、3×3の立体的な方向性結合器を用いた干渉計が知られており、干渉計アームの位相変化方向を計測できる等、三次元的な配置をとることで二次元にはない機能を付与させることができる。しかし、光回路構成の柔軟性や量産性を考えた場合、形態としては光導波路で集積されたものが望ましい。フェムト秒レーザーの集光照射によりガラス内部に三次元的な光導波路回路が形成できることが知られているが、従来の逐次描画法では量産性や加工精度に問題が残る。本研究では、これらの問題を解決するために、従来法である逐次描画法により作製されていた導波路、Y分岐導波路、Dammann型回折格子、フォトニック結晶構造やバイナリーレンズ等を同一ガラス内部に一括描画（図Ⅱ-12参照）することで、量産性に優れた三次元光カプラの作製し、本三次元加工システムが光回路デバイスの作製に有効であることを確認する。



図Ⅱ-12 三次元光回路イメージ

## II. 研究開発マネジメントについて

### II. 2 事業の計画内容

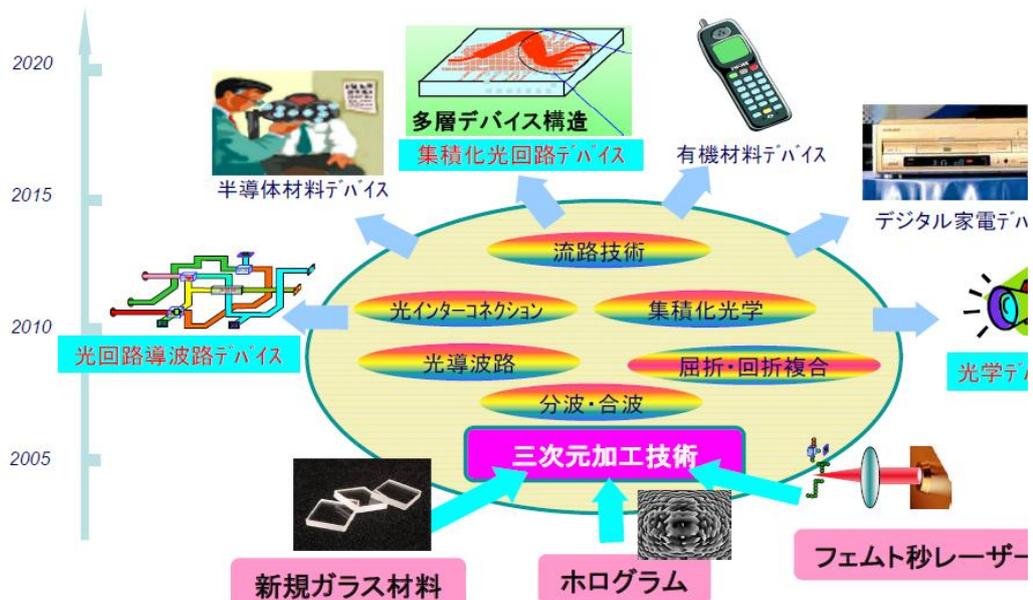
#### II. 2.1 研究開発の内容

##### II. 2.1.1 事業全体の計画内容

ガラスは社会の広範な分野で欠かせない基幹材料となっており、情報通信の超高速大容量化や各種機器の小型・軽量化、省エネ化等のニーズに対応するためには、今後ますます高機能化が求められる。ガラスは結晶材料に比べ、組成の選択範囲が連続的で広く、かつ構造の自由度が大きい。このため組成と構造の多くの組み合わせが可能で、それに伴い種々の潜在的特性・機能があると考えられる。しかし従来技術は、組成の制御と熱処理等、マクロな構造制御に終始しており、ごく一部の特性や機能しか実現できていない。ガラスが本来有している潜在的な特性や機能を有効に引き出すためには、ガラス母材とはその物性の異なった異質相をガラス内部に作製し積極的に新たな機能をガラスに誘起する必要がある。このような基盤技術の開発は「ナノガラス技術」プロジェクトで実施されてきた。

本プロジェクトでは、「ナノガラス技術」プロジェクトで得られた基盤技術を実用的な加工技術へと発展させるものであり、フェムト秒レーザー等と波面制御技術等を組み合わせ、加工の高精度化によるデバイス特性の向上と加工の高速化による製造コストの大幅な低減を目指すものである。また本プロジェクトで開発しようとする技術は、ナノテクノロジー技術戦略マップの光デバイス分野における「光導波路／光伝送／合分波」の「簡易作成法・実装法による光導波路作製技術」に適用され得るものであり、さらに「三次元造形／光加工」の「フェムト秒レーザーによる三次元加工」としても位置付けられている。本技術の確立により、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギー等の広範な分野において、従来技術では実現できなかった新しい機能を持

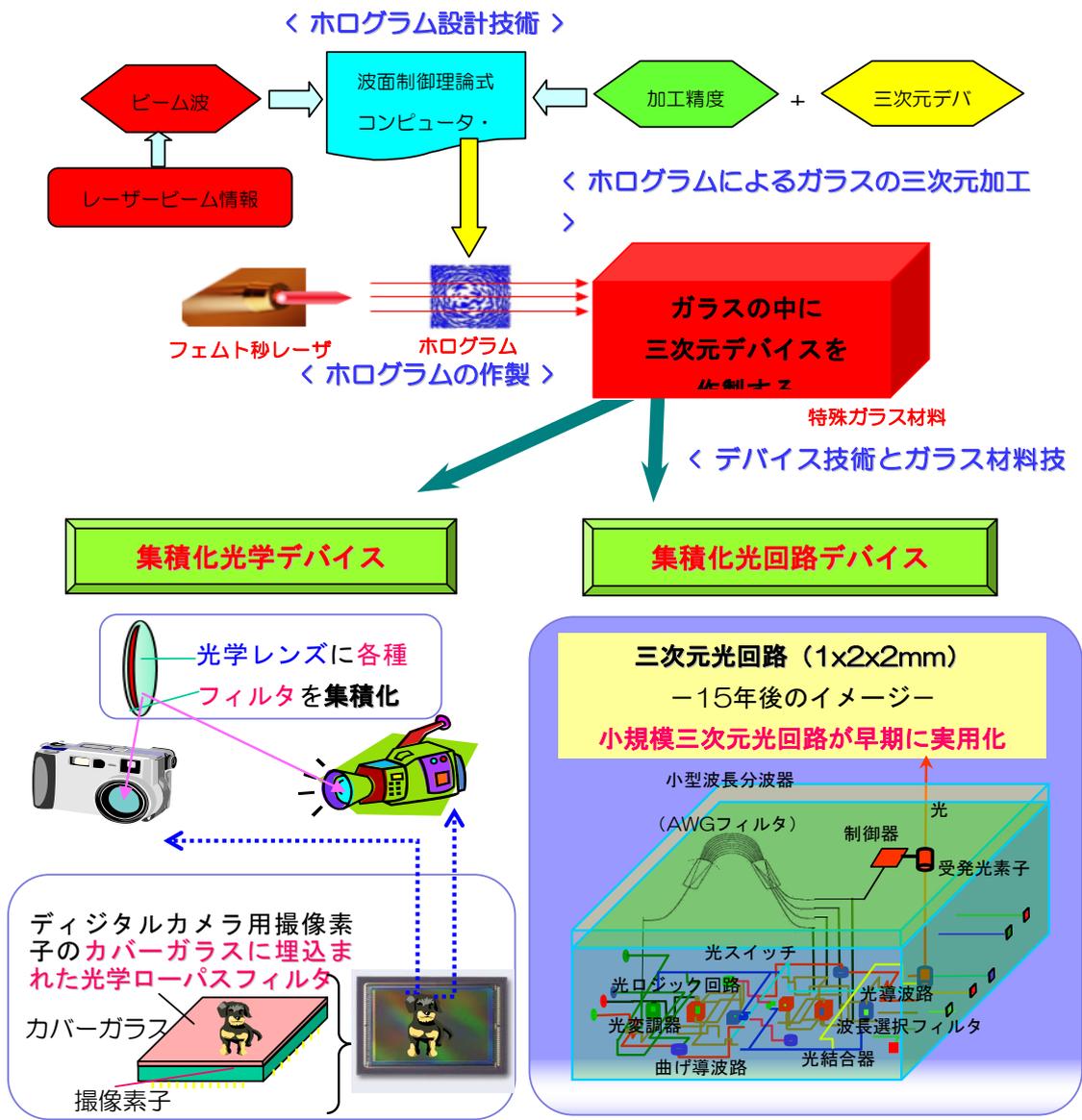
### フェムト秒レーザー・一括加工による製品イメージ



図II-2.1 プロジェクトの全体イメージ

つ光学デバイス等の創造が期待される。また本技術はガラスのみならず有機材料や半導体材料へも適用可能であり、将来、幅広い産業分野で利用される製造技術となることが見込まれる。プロジェクトの全体イメージを図Ⅱ-1.1に示す。事業全体の計画としては、平成22年度までに、フェムト秒レーザー照射等により、①デバイス化加工用ガラス材料技術、②三次元加工システム技術として、波面制御三次元加工システム技術と空間光変調器三次元加工システム技術等を確立する。また具体的なデバイスへの適用を前提に、③三次元加工システム応用デバイス技術として、三次元光学デバイス技術と三次元光回路導波路デバイス技術に取り組み、「三次元光デバイス高効率製造技術」の有効性を実証する。

本研究開発の三次元加工システム技術の内容を図Ⅱ-1.2に示した。図において、超短パルスレーザーであるフェムト秒レーザーを波面制御素子であるホログラムに照射し、これによってできた三次元形状の実像をガラスの中に作成する。結像した部分のガラスの屈折率が変化し、ガラスの内部に三次元形状を作ることができる。フェムト秒レーザーを用いると原子・分子が振動する一瞬の時間で加工できるために熱の影響を受けにくく高精度な加工ができる。またホログラムを用いることにより一度に大きなエリアを加工することができ、三次元光デバイスを高精度に低コストで効率よく造ることができる。



図Ⅱ-2.2 フェムト秒レーザーによる三次元一括加工概要

## Ⅱ. 2.1.2 全体スケジュールと予算

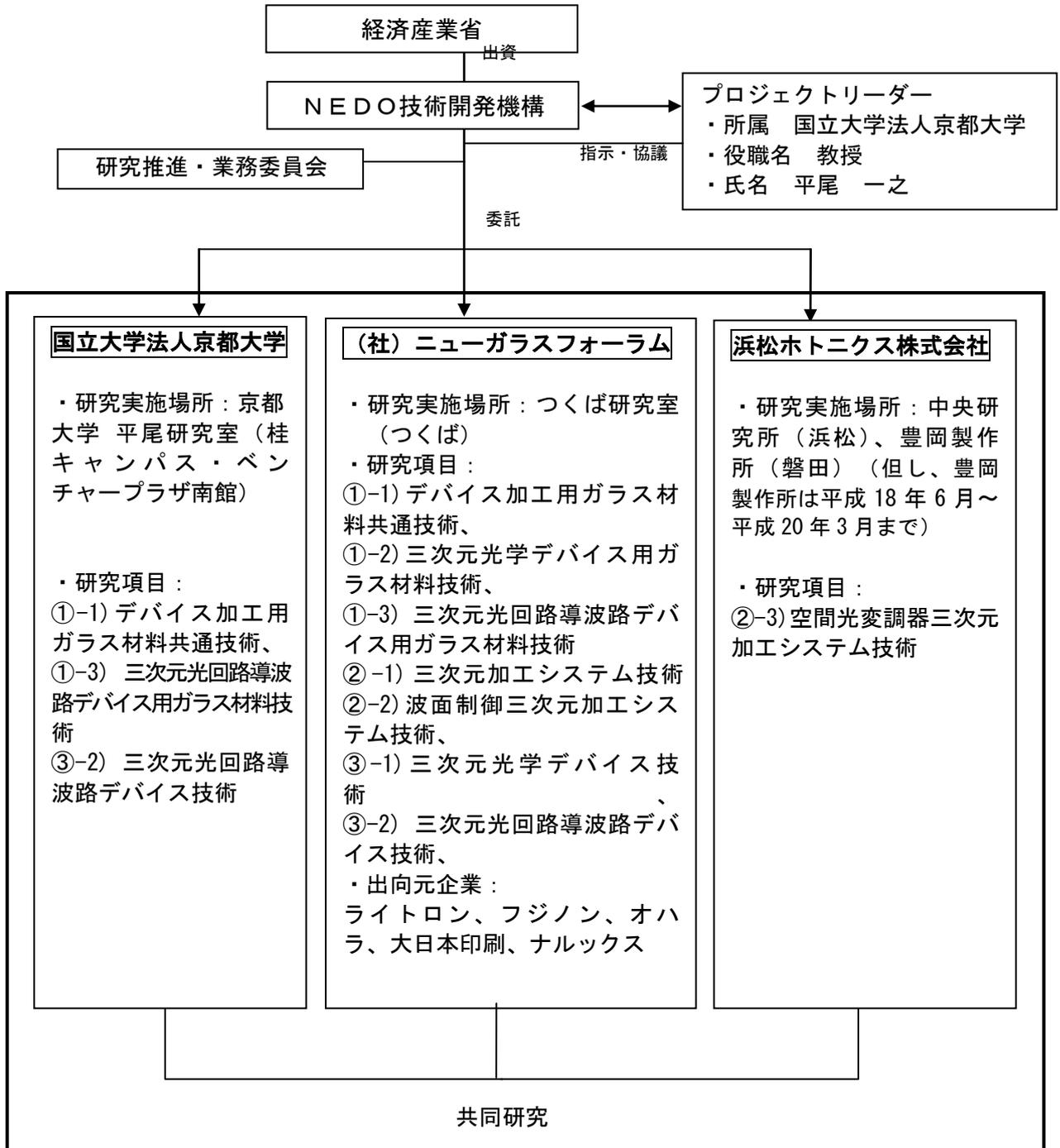
(内数)：追加予算

研究開発項目	18年度	19年度	20年度	21年度	22年度	計
①デバイス化加工用ガラス材料技術	89	90 (+18)	62	57	40	338
(1) デバイス加工用ガラス材料技術共通目標	各種ガラスのレーザー加工性の検討とそのデータベース化					
(2) 三次元光学デバイス用ガラス材料技術	→					
(3) 三次元光回路導波路デバイス用ガラス材料技術	デバイス別ガラス組成の最適化検討・試作		デバイス動作確認によるガラス組成の再検討・試作			
②三次元加工システム技術とデバイス	247	226	173	166	115	927
(1) 三次元加工システム技術	加工システムの構築 加工基本情報の取得			加工システムの改良		
(2) 波面制御 三次元加工システム技術	ホログラム設計技術の開発 ガラス・ホログラムの作製プロセスの開発			ホログラム設計技術の改良 ホログラム作製プロセスの高精度化		
(3) 空間光変調器 三次元加工システム技術	空間光変調器と波面制御モジュールの試作			空間光変調器と波面制御モジュールの改		
③三次元加工システム応用デバイス技術	56	59	105	90	80	390
(1) 三次元光学デバイス技術	光学ローパスフィルタの設計と試作による基本動作の確認			一括加工システムによるデバイスの作製及びその性能の確認と改良		
(2) 三次元光回路導波路デバイス技術	光導波路の基本性能の確認					
開発予算 (単位：百万円)	392	375	340	313	235	1655

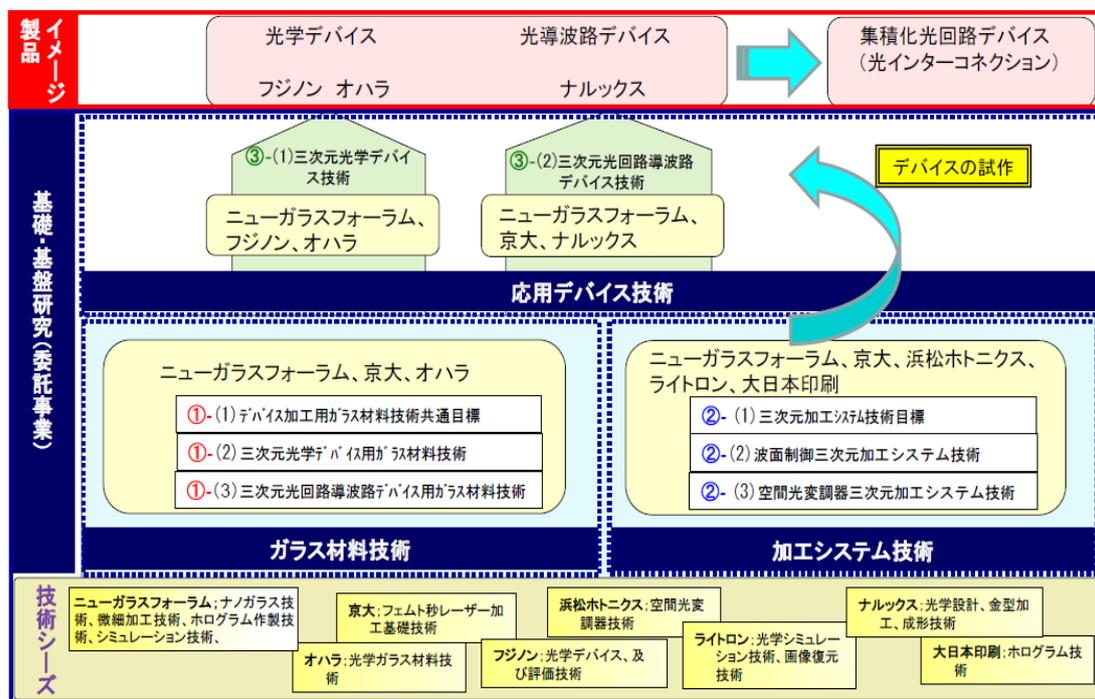
プロジェクト推進における重点化について：平成 18, 19 年度のプロジェクト前半は材料技術を、平成 21, 22 年度後半には加工システムの高性能化とデバイスの試作を重点化して研究開発を進めた。

## II. 2.2 研究開発の実施体制

### II. 2.2.1 実施体制



研究開発項目①～③の位置付けを図Ⅱ-13に示す。



図Ⅱ-13 研究開発項目①～③の位置付け

## Ⅱ. 2.2.2 共同研究先と出向元企業のプロフィール

### [大学]

#### 国立大学法人京都大学大学院工学研究科材料化学専攻

京都大学では早くよりフェムト秒レーザーの高いピークパワーに着目し、フェムト秒レーザーをガラスのような透明材料内部の加工ツールとして利用する研究をスタートさせた。その結果、フェムト秒レーザーとガラス材料との相互作用により生じる屈折率変化、イオンの価数変化、金属、半導体や非線形結晶の析出等、多くの構造変化をガラス内部に誘起させることに成功している。

更に、近年ではフェムト秒レーザー照射直後のガラス状態を調べることで、構造改質のオリジンを明らかにする研究も行っており、フェムト秒レーザーの集光照射により焦点近傍では光イオン化によって生じたプラズマの消失による急激な温度と圧力の上昇、およびそれに伴う圧力波の発生を世界に先駆けて確認している。これらの研究実績と経験・知識は本技術の遂行において非常に有効であると考えられる。

### [企業]

#### 浜松ホトニクス株式会社

本プロジェクトで使用する空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) の研究開発を1980年代初期から長年に亘り行ってきた。その間に、光電面をアドレス部とし、光変調

部として電気光学結晶板(LiNbO<sub>3</sub>)を用いた真空管方式の空間光変調管(MSLM: Microchannel Spatial Light Modulator)やアモルファスシリコン(a-Si)をアドレス部として用い、液晶分子を基板に平行に配向したネマチック液晶層を光変調部とした平行配向液晶空間光変調器(PAL-SLM: Parallel Aligned nematic Liquid Crystal Spatial Light Modulator)を開発した。引続き、液晶ディスプレイ(LCD)とPAL-SLMを最適設計された光学系で結合し、画素間の非連続性を光学的手法により除去した光利用効率の高い電気アドレス型空間光位相変調器モジュール(PPM: Programmable Phase Modulator)を開発した。

## 【社団法人ニューガラスフォーラム出向元企業】(アイウエオ順)

### 1) 株式会社オハラ

主に溶融急冷法によりガラスの試験溶解を行い、レンズ光学系用途の光学ガラスや、各種新規用途の結晶化ガラス材料の組成開発を行っている。

フェムト秒レーザーの集光照射によりシリカガラス内部に形成された微小空洞を利用した微小光デバイスの研究において、照射パルス光強度と微小空洞形成に関して、また空洞を利用した回折格子の光波伝播特性の挙動の解明に関する研究を行っていた。

### 2) 大日本印刷株式会社

最先端半導体製造技術フォトマスクを製造しており、超微細な合成石英加工技術を蓄積している。最近では、種々フォトマスク構造が用いられるため、多段構造の加工技術も備わっている。このような技術は、もともと社内で展開しているホログラムの原版の製造へも展開されている。

また、(社)ニューガラスフォーラム向け3次元加工ホログラムの試作を行い、2002年秋の応用物理学会にてその結果が公表されている。

### 3) ナルックス株式会社

光学設計、光学薄膜などの技術をシーズに高度化する市場要求に対応した商品開発量産実績や次世代の商品や要素技術課題について産官学連携の研究を多数行い、数々の新しい市場や技術を創出リードしている。本研究の出口テーマの1つである光通信分野においても当社の技術シーズである各種の光学、形状設計技術や金型加工/成形技術を用い例えばRa数nm精度の量産技術を確立し次世代の光結合分波素子やWDM光通信用波長分散補償システムなどの市場投入を実現している。

### 4) フジノン株式会社

ホログラムの応用については以前から、非球面形状測定、光記録などへの応用を考慮した研究を行っており、光学デバイスの評価に関しては長年の蓄積技術がある。本研究で必要となるモアレ測定など的高額評価技術を所有している。また、モアレ対策で使用されるカメラの光学部品などの製造も行なっている。

ガラスについては、その使用に当たって材料分析、光学特性解析などを行っている。

#### 5) ライトロン株式会社

光学関係の製品及びソフトウェアの開発を行ってきた。ソフトウェアでは光のシュミレーションソフトであるPARTIALというソフトを開発し販売してきた。この中に回折演算を行う部分があり、多重積分を短時間で演算できる。今回のホログラムを用いた方法では、多重積分をいかに早く演算するかにかかっているため、この技術を十分に応用できる。また、画像復元のアルゴリズムを持っており、三次元デバイスの形状測定技術の開発に寄与できる。

#### 6) 社団法人ニューガラスフォーラム

ニューガラスに関する技術開発等に関する情報の収集・提供、調査研究、国際交流、並びにニューガラスに関する、特にナノガラスに関する研究を進めている。2000年度から始まったナノガラス技術プロジェクトにおいては、12サブテーマの多分野に及ぶ基盤技術の研究を進めてきた。これらの研究の一部を早期に実用化できるように本プロジェクトではその実用化に必要な基盤技術の研究開発を推進している。また、これ等の研究のために専任の研究員を雇用し成果を早期に世の中に普及できるように努力している。

この他にも「ガラス構造データベース」や「革新的省エネルギー溶解技術」などの国家プロジェクトを提案、受託しており、特にガラスデータベースは INTERGLAD と称し、ニューガラスの開発を支援するツールとして1991年からバージョンアップを重ね世界中に配布を続けている。

## II. 2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権を持つNEDOは、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに、本プロジェクトの目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。また、必要に応じて、外部有識者の意見を運営管理に反映させた。

NEDOが実施・管理を行う当該プロジェクトの、より効率的な研究開発の推進を図るため、研究開発の現場において指示・指導・調整の任にあたる研究者であり、実施者の一員として自ら研究開発に携わる他、研究開発計画原案の策定、研究成果のとりまとめ等の役割を担う研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として京都大学 平尾一之教授のもと、本プロジェクトを推進した。

本研究開発を効率的に実施するため、国立大学法人京都大学、浜松ホトニクス株式会社、及び社団法人ニューガラスフォーラムとの間でそれぞれ包括的な「共同実施契約」を締結し、有機的に結合し研究を実施した。なお社団法人ニューガラスフォーラムは、株式会社オハラ、大日本印刷株式会社、ナルックス株式会社、フジノン株式会社、ライトロン株式会社からの出向研究員による集中研究室を構成し、自らも研究員ならびに研究補助員を雇用して研究開発にあたった。

まず、プロジェクトリーダーの役割を以下に挙げる。

### 1. 組織関係

- (1) 研究体の研究室の設置、廃止等の組織構成の決定。
- (2) 研究体の室長、研究リーダーの選任と解任。

### 2. 研究体所属研究者関係

- (1) 京都大学、浜松ホトニクスおよびニューガラスフォーラムが提出する研究者候補リストの中からの研究体所属研究者の選任。
- (2) 研究体所属研究者の任期の設定および変更に関する調整。
- (3) 研究体所属研究者の担当研究項目の決定。
- (4) その他研究体所属研究者の総合的な統括。

### 3. 予算、研究場所、研究設備および装置等

- (1) 実施時における予算の配分の調整。
- (2) 研究体の活動に割り当てられた研究場所の配分、模様替え等の調整。
- (3) 研究設備および装置等の使用範囲等の調整。

### 4. 研究計画および報告

- (1) 年度毎概算要求案の策定。
  - ① 年間研究計画書案の策定。
  - ② 実施計画書案の策定。
- (2) 研究計画の変更
  - ① 実施計画書変更申請案の策定。

(3) 軽微な研究計画の変更

- ① 実施計画書変更届出書の策定。

(4) 研究経過の報告

- ① 成果報告書案の策定。  
② その他必要に応じた研究報告書案の策定。

(5) 研究終了報告

- ① 研究終了報告書案の策定。

5. 研究評価

- (1) 研究内容の研究体内での評価。  
(2) 研究者の研究体内での評価。

6. 研究成果

- (1) 別途定める研究体運営規則の施行およびその遵守に関する指導管理。  
(2) 論文発表等による公開を、知的所有権による保護に優先させるか否かの判断。

7. 第三者との共同研究、研究者等の招聘

- (1) 第三者との共同研究の実施と管理。  
① 共同研究および共同研究契約に対する要望事項の取り纏め。  
② 共同研究契約書案の策定。  
③ 各種報告書案の策定。  
(2) 外部研究者の調整および選任。

8. その他

- (1) 研究体の研究活動推進のための総合調整。  
(2) 経済産業省、NEDO、京都大学、浜松ホトニクスおよびニューガラスフォーラムに置かれた各種関係会議への対応、総括。  
(3) ワークショップ、シンポジウム等、関連事業計画の策定および実施。

また、上述したプロジェクトリーダーのミッションの一部は、以下のように京都大学、浜松ホトニクス、及びニューガラスフォーラムなどと連携し、実施されてた。

【研究計画の策定】

「研究推進・業務委員会」を設置し、本プロジェクトの年間計画を策定した。委員長をプロジェクトリーダーとし、委員は共同研究先である京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラム、およびニューガラスフォーラムで集中研を構成する株式会社オハラ、大日本印刷株式会社、ナルックス株式会社、フジノン株式会社、ライトロン株式会社の代表者から構成した。プロジェクトリーダー、及び京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラムを代表する3名のサブ・リーダーとが年間研究計画の原案を作成し、それについて研究推進・業務委員会で討議し、策定した。

#### 【研究の評価・管理】

- ① R&D 検討会を年3回定期的に開催し、京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラム集中研の各研究担当者が担当分野の報告を行った。これに対してプロジェクトリーダー、サブ・リーダー、研究リーダーが研究担当者と研究成果について議論し、進捗チェックと研究の方向付けを行った。
- ② 原則年2回の「研究推進・業務委員会」で研究体運営管理に係る情報交換、研究開発状況、外部成果発表実績等を報告し、計画に対する進捗を確認した。
- ③ プロジェクトリーダーは、必要に応じ適宜、電話、e-mailにてサブ・リーダー、研究リーダー、及び研究者から情報を受け、それに対して指示した。
- ④ 予算作成時、プロジェクトリーダーは、サブ・リーダーと相談し予算を作成した。

#### 【成果報告】

- ① プロジェクトリーダーが、京都大学、浜松ホトニクス、ニューガラスフォーラムの各サブ・リーダーから研究成果報告を受けその内容をチェックした。その後、各サブ・リーダーを中心に「研究成果報告書」として纏めた。
- ② 論文、新聞発表に際しては、プロジェクトリーダーが承諾の最終判断をした。

#### 【その他】

出向元には、研究成果を出来るだけ早く実用化する契機を造ることを目的に、研究リーダーをおいた。これにより、早期実用化を進めて行った。また、研究リーダーとサブ・リーダーとの定期的な会合をもった。

## II. 2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

### 1. 成果の実用化可能性

#### (1) 三次元光学デバイス（光学ローパスフィルタ）

モアレの低減が確認できた。更に改善した一括加工を進めると同時に、モアレ以外の光学特性をも含めて実用化の観点から問題点の抽出を継続研究で行い、問題が無ければ実用化の検討を行っていく。

#### (2) 光インターコネクション

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光インターコネクション用として発展させ、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

#### (3) 光結合器

研究項目「②三次元加工システム技術の②-1&2」で開発された直線異質相及び曲線異質相を光結合器などとして発展させて、オール光通信処理技術のデバイスとしての実用化への検討を進めていきたい。具体的な技術の問い合わせが来ている。

#### (4) LCOS-SLM

開発してきた LCOS-SLM で適応できる分野での実用化を検討する。

#### (5) プロジェクトで開発してきた下記についても早期に市場に出るよう検討したい。

- ・ホログラムシミュレータ・ホログラム加工プロセス
- ・三次元屈折率差測定機能付き形状測定器

#### (6) ホログラムを使用した特殊材料の高速、微細加工の問い合わせがきており、新規分野が開拓できる可能性が高い。

#### (7) ホログラムとフェムト秒レーザーを使用した加工に興味を持ち、その市場開拓に協力を申し出られている企業が複数でてきている。

### 2. 波及効果

プロジェクトで得られた成果は、

- ①三次元ホログラムの設計法、
- ②ガラス・ホログラムを使用した高耐光・高速一括加工法、
- ③光軸方向に伸展しないホログラム加工法、
- ④レーザー加工の容易なガラス材料、
- ⑤高速加工が可能な光学デバイス設計法、
- ⑥低光エネルギー加工が可能な加工法

などが挙げられる。これ等は汎用性があり、今後いろいろな分野での応用展開が期待できるものである。

その対象として、1. 実用化の見通しについてに記載した(1)から(5)は勿論のこと、(6)、(7)への適用が挙げられ、従来 デバイス加工が不可能と言われていたものも低コストでの作製が可能となる。

更に、上述の得られた成果①から⑥の内、半数以上はホログラム加工とは独立に利用できるものであり、より汎用性の高い技術であり、様々な分野に波及するであろう。

### II. 3 情勢変化への対応

日本経済の活性化を目指す、内閣府(総合科学技術会議)において検討中の革新的技術戦略(平成20年4月10日)における高速大容量通信網技術—オール光通信処理技術—の一部として「三次元光デバイス高効率製造技術」プロジェクトが登録された。この革新的技術により、スイッチ・経路処理を含め、ネットワークのオール光化技術により、爆発的に増大する情報を処理可能とする一方で、ネットワークにおける電力効率を数十倍程度向上した超高速基幹ネットワークの構築が可能となる。また、次世代イーサネット規格等の国際標準の獲得も目指した技術確立等により、我が国の国際競争力が強化される。

これに対応すべく、三次元光デバイス高効率製造技術の研究開発を従来以上に活発に進めていく。

・平成19年度(18,000千円)(加速財源)

三次元光デバイス高効率製造技術では、可能な限り広い領域において一括加工できるガラス材料(ガラス種や組成比)や加工システムの開発が重要な課題の一つである。京大では一括描画に適したガラス材料と描画方法を中心とした基礎検討を実施している。これらの検討課題においては、実際に数ミリ角以上の面積を加工しながらガラス材料とレーザーとの相互作用プロセス解明や異質相形成の閾値測定等を実施する必要がある。そのためには、可能な限り(パルスエネルギーが大きくなれば加工面積は広がるが、僅かに集光しただけで容易にブレイクダウンを起こし、大気中でのビームの取り扱いが困難となる。)大きなパルスエネルギーを有するフェムト秒レーザーが必要であり、平成19年度はF21からの移管物品であるフェムト秒レーザーシステムのバージョンアップ(エネルギー増幅装置追加)を実施した。その結果、繰り返し:10Hz、パルス幅:100fs、波長:800nmにおいて100mJ(従来の100倍、パワー換算にて1TW)のパルスエネルギーを確保することが可能となった。

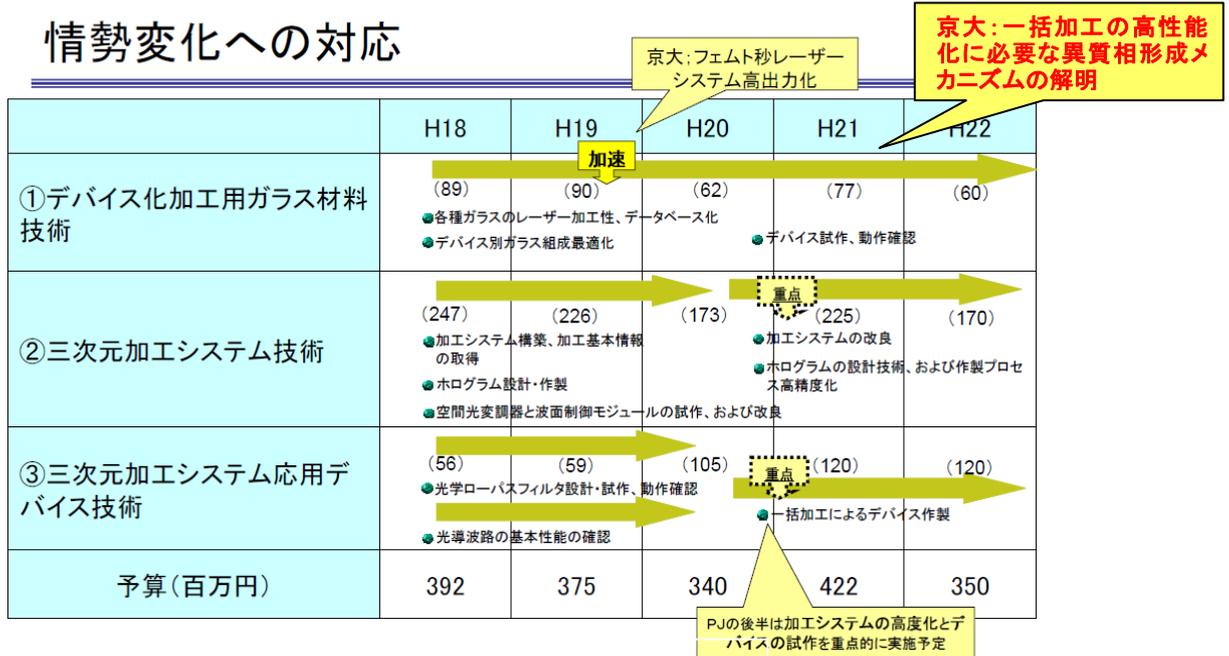


図 II-15 情勢変化への対応

#### 4. 中間評価結果への対応

中間評価時の指摘事項とそれに対する実績の概要を以下に示した。

##### 指摘事項 1. 基礎的な技術開発にも注力すること。

###### ●京都大学 対応

- ・“LCOS-SLM を利用し、曲線導波路、分岐導波路を一括描画するためのホログラム作成方法の基礎検討（アルゴリズム等）を行った。

###### ●ニューグラスフォーラム 対応

- ・レーザー光とガラス材料との反応の素過程を考察し、上述の入射方向への伸びの少ない加工技術を開発した。また、低エネルギーで加工できる技術を開発した。
- ・デバイス作製時の加工エネルギーが少ない新型光学素子の基礎的検討と素子の試作を行い、その機能を確認した。

##### 指摘事項 2. 光集積回路の実現においてアクティブ素子を如何にして実現するか。

###### ●ニューグラスフォーラム 対応

- ・アクティブ素子実現のための基礎実験を行った。
- ・フェムト秒レーザーの照射部のみが発光する条件を発見した。この現象を利用するとレーザー発振の可能性がある、これには数センチメートル以上の長さの光導波路が必要である。これはホログラムを使用した一括描画で作製できる。

##### 指摘事項 3. ホログラフィック加工に並行してその他の要素技術をどうするか。

###### ●ニューグラスフォーラム 対応

下記の種々の技術を開発した。

- ・高速長尺ホログラフィック加工による穴あけ技術の要素技術を開発した。技術の適用先としては電気インターコネクションや光インターコネクション等に使用される。
- ・ホログラフィック加工と光学系を組合せた微細三次元加工システム技術を開発した。
- ・レーザー光の入射方向への伸びを抑える技術を開発した。
- ・レーザー光を有効に使用できる材料作製技術を開発した。

## Ⅱ. 5 評価に関する事項

NEDO は、国の定める技術評価に係わる指針及び NEDO が定める技術評価実施要領に基づき、技術的及び実用化の観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 20 年度、事後評価を平成 23 年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

### 参考文献

#### Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

- 1) 技術戦略マップ 2008 (ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他)、平成 20 年 3 月、経済産業省
- 2) 技術戦略マップ 2008 (ネットワーク分野、ナノテクノロジー分野他)、平成 20 年 4 月 22 日、NEDO
- 3) 革新的技術戦略、平成 20 年 5 月 19 日、総合科学技術会議
- 4) 平尾一之他：機能性ナノガラスの最新技術と応用、シーエムシー出版、東京、4 (2003) .
- 5) 田中修平：「ナノガラス技術」から「三次元光デバイス高効率製造技術」へ、NEDO 特別講座第 1 回シンポジウム、平成 18 年 9 月 27 日
- 7) 田中修平：「ナノガラス技術」の光デバイスへの実用化展開— 三次元光デバイス高効率製造技術 —、日本光学会第 37 回研究会、予稿集、平成 19 年 4 月 20 日