

1.2.7 研究開発項目③「光コアスイッチの研究開発」

【成果の概要】

光電ハイブリッドスイッチシステムプロジェクトにおいて、本研究開発項目では 1000 ポート以上の入出力を備え、100 μ s 級の過渡応答時間で動作し、その内部に構成要素として「光波長多重回路(合波器)」「光スプリッタ」「光増幅器」「空間光スイッチ」を備え、各構成要素間がメッシュ状に接続される光コアスイッチの設計および原理検証に必要な実装を行い、他機能部との連携動作を実現することを目標として設定した。特に設計段階において、①光信号伝送の観点の設計、②装置の外形など実装観点の設計、③他の機能部との連携観点の設計の3点を重視して実施した。すなわち、①の光信号伝送観点の設計において、光 ToR スwitch内の光波長送受信器の送受信電力の許容範囲と整合させることをマイルストーンとして設定した。②の実装観点の設計において、フル実装時の装置サイズを実用上適切なサイズとなるよう設計することをマイルストーンとして設定した。③の他機能部との連携設計において、コントローラとの間で制御情報等を送受するインタフェースや通信プロトコルを規定すること、特にシステム全体を適切に動作させる観点から、特に遅延時間の低減に配慮した設計であることをマイルストーンとして設定した。本項では光コアスイッチを構成する空間光スイッチに関する研究開発成果、光コアスイッチ（他機能部との連携機能を含む）の設計および実装に関する結果について報告するとともに、発展的な課題として実施した、試作した光コアスイッチと **1.2.5 項研究開発項目②「光 ToR スwitchの研究開発」**にて試作した高速波長可変光源を用いた、光物理層の高速スイッチング動作の検証についても報告する。具体的には、下記の項目について報告する。

- ・空間光スイッチの技術アセスメント
- ・空間光スイッチモジュールの試作
- ・光コアスイッチにおける光信号の品質設計
- ・検証機用光デバイスの仕様策定
- ・光物理層の高速スイッチング動作
- ・光コアスイッチの静的な伝送特性

【最終目標】

光コアスイッチを構成する各機能モジュールの作製・評価を実施して、光コアスイッチの技術確立する。作製した機能モジュールは、システムの動作実証に向け、1.2.9 項研究開発項目⑤「光電ハイブリッドスイッチシステム実証」に活用される。

【成果】

＜空間光スイッチの技術アセスメント＞

空間光スイッチの満たすべき「挿入損失」と「スイッチング時間」と「入出力ポート数」を満足するためのスイッチングデバイスに適用するプラットフォームとして、Si フォトニクスと石英系平面光波回路（Planar Lightwave Circuit: PLC）を候補とし、いずれのプラットフォームを採用するかを判断するための技術アセスメントを、2018 年度から 2019 年度にかけて実施した。Si フォトニクスの導波路材料である Si と、石英系 PLC の導波路材料である石英ガラスの物理定数について、比較表を表 1.2.7-1 に示す。

表 1.2.7-1 石英ガラスと Si の物理定数

	Si	石英ガラス	
熱伝導度 (W/(m・K))	157	1.5	大きい方が、短時間で 目的温度に達する
屈折率	3.4	1.45	大きい方が回路を 小型化できる
屈折率の温度 依存性(1/°C)	18x10 ⁻⁶	1x10 ⁻⁶	大きい方が小さい温度差で スイッチできる

表 1.2.7-1 から明らかなように、スイッチング時間のみに着目すると、Si フォトニクスで作製する空間光スイッチの方が、石英系 PLC で作製する光スイッチと比較して良好な特性を得られると期待できる。しかしながら、平成 27 年度採択「エネルギー・環境新技術先導プログラム」：データセンタ向け低消費電力・超多ポート高速光スイッチシステムの研究開発において実施された、本研究開発着手前の検討において、16 ポート規模の光スイッチを Si フォトニクスで作製した場合には、生じる過剰損失が 15dB を超えるとの見積もりが得られており、実用的な光スイッチを作製できる見通しは得られていなかった。

一方、石英系 PLC で作製する光スイッチは、通信事業者のネットワークに数多くの導入実績があり、16 ポート規模の光スイッチであれば、過剰損失を数 dB 程度に抑えることができるものの、一般的なスイッチング時間として認知されている値は ms 以上の値であり、本研究開発における目標であるスイッチング時間である 100μs を達成できる根拠は得られていなかった。これらの状況を整理した、技術アセスメント着手前の比較表を表 1.2.7-2 に示す。

表 1.2.7-2 技術アセスメント着手前の比較表

	判断目安	Si	石英ガラス
挿入損失	5dB	△(15dB～) 実用的ではないが、使用 できないとまでは言えない	◎(数 dB) 数多くの採用実績あり
スイッチング時間	100μs	◎(Typ. 60μs)	? (一般的には ms 以上)
入出力ポート数	16	○ 設計することは可能	◎ 16 ポート級の光スイッチ 製品あり

以上の比較整理を踏まえて、技術アセスメントの実施方針として

- (1) 石英系 PLC で作製する光スイッチにおいて、スイッチング時間の短縮に取り組み、短縮することができた場合には、石英系 PLC をプラットフォームとして採用する。
- (2) 石英系 PLC で作製する光スイッチのスイッチング時間が短縮できなかった場合には、Si フォトニクスで空間光スイッチを作製することにする。

という方針を立て、研究開発を進めることとした。以降では、(1)として実施した、石英系 PLC で作製する光スイッチにおける、スイッチング時間の短縮に関する研究開発成果を示す。

図 1.2.7-1(a)に石英系 PLC デバイスの断面構造を示す。Si 基板の上に、石英ガラスのアンダークラッド層、導波路コア層、オーバークラッド層の順に堆積された構造を有している。光スイッチを構成

するための基本エレメントは、図 1.2.7-1 (b)に示されるような薄膜ヒータを導波路上に装荷したマッハツェンダ干渉計(Mach-Zehnder Interferometer: MZI)であり、一方のアームの光路長を $\lambda/2$ 変化させることで出力ポートを切り替える。光路長の制御は、薄膜ヒータに通電して直下の導波路を加熱し、熱光学効果によって導波路の屈折率を変化させることによって行う。スイッチング時間は、 $\lambda/2$ の光路長変化が生じる温度に導波路が加熱されるまでの時間と、加熱された導波路を放熱して初期の温度に戻るまでの時間が相当する。従って、導波路を短時間で加熱できるようにすること、また導波路の熱を短時間で放熱できるようにすることによって、スイッチング時間を短縮することができる。

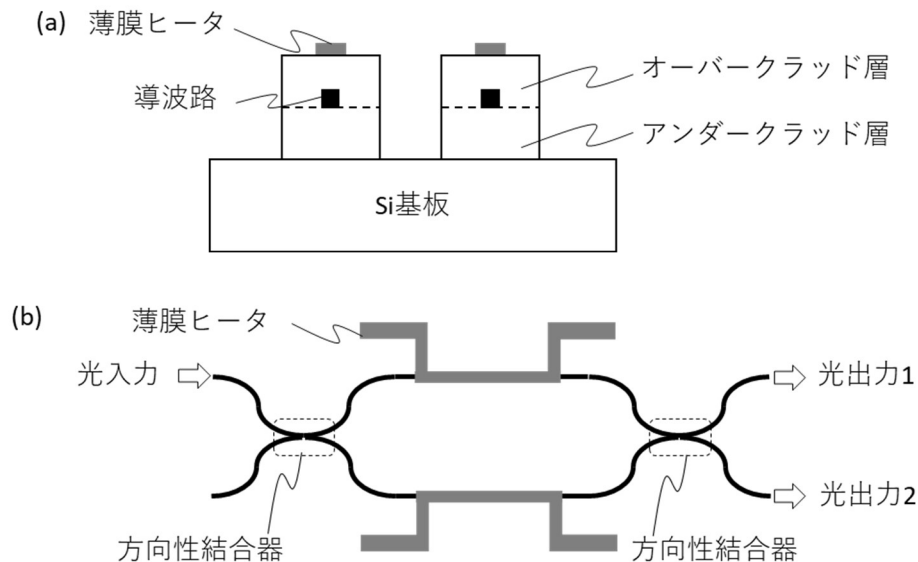


図 1.2.7-1 (a) 石英系 PLC デバイスの断面構造 (b) 光スイッチエレメントの基本構造

スイッチング時間を短縮するためには、まずデバイスの構造を工夫することが考えられる。具体的には、熱伝導率の低いクラッド層を薄膜化し、薄膜ヒータと Si 基板との距離を短縮する構造である。この構造では、熱源となる薄膜ヒータと熱浴とみなせる Si 基板の距離を短くすることで熱勾配が大きくでき、熱流を大きくすることで、加熱及び放熱に要する時間を短縮できると考えられる。但し、導波路と薄膜ヒータ/Si 基板を近接させすぎると、導波路を伝搬する電磁波が吸収されて損失増が生じてしまうため、クラッド層を無限に薄膜化することはできない。従って、クラッド層の厚さをどの程度まで薄くすることができるのかを明らかにすることが、スイッチング時間の短縮ポテンシャルを見極める上で重要な観点と言える。なお、本アプローチで実施された、従来の石英系 PLC スイッチのスイッチング時間短縮例として、クラッド層厚を $11\mu\text{m}$ で作成した場合の $180\mu\text{s}$ があった。

(Q. Lai et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 5, pp. 681–683 (1998).)

次に、駆動方法の改善によるスイッチング時間の短縮方法を示す。最もシンプルな駆動方法は、出力ポートを変える際に熱平衡状態で導波路に $\lambda/2$ の光路長変化を生じるように薄膜ヒータに電圧を印加し、出力ポートを戻す際に薄膜ヒータへの電圧印加を止める方法である。この時、駆動電圧波形は矩形となる。これを起点として、出力ポートを変える際のスイッチング時間を更に短縮するためには、導波路に $\lambda/2$ の光路長変化が生じるまでの間に限って大きな熱量を供給すればよく、出力ポートを戻す際のスイッチング時間を短縮するためには、導波路に与えた光路長変化が解消するまでの時間に限って急速に冷却できればよい。このうち出力ポートを変える時の導波路加熱は、薄膜ヒータへの印加電圧を一時的に増すことで実現可能である。しかし、出力ポートを戻すために加熱された導波路

を狙って局所的に急速冷却することは、現実的な実現手段が存在しないので、出力ポートを戻す際のスイッチング時間を短縮するためには別の手段を用いなければならない。そこで発想を転換し、「出力ポートを戻す」のではなく、「出力ポートを更に切り替える」と考えると、これは室温状態にある未加熱の導波路を薄膜ヒータで加熱し、 $\lambda/2$ の光路長変化を生じさせれば、急速冷却することなく実現可能である。これは、薄膜ヒータから供給する熱量を大きな熱量にすることで、一回目の切り替えと同じようにスイッチング時間を短縮できる。また、出力ポートを戻し始めるタイミングで元々加熱していた導波路に対する熱量の供給を断ち、光路長の変化量を減少させるのと並行して、未加熱の導波路を元々加熱していた導波路と同じ光路長変化量になるまで加熱すれば、光路長変化量が一致したタイミングで出力ポートが入れ替わるので、より効率的である。その状態で熱量の供給を断ち、2本の導波路の光路長変化量が等しい状態を保ったまま冷却すれば、出力ポートを維持したまま初期状態に戻せる。以上をまとめたスイッチング時間を短縮するための駆動電圧波形例を図 1.2.7-2 に示す。出力ポートを切り替える時は、薄膜ヒータ A に対して相対的に高い電圧 V_1 を短時間 T_1 の間印加し、その後 $\lambda/2$ の光路長変化を維持するための電圧 V_2 を印加する。出力ポートを戻すときは、薄膜ヒータ A に対して印加していた電圧 V_2 を停止すると同時に、薄膜ヒータ B に対して電圧 V_1 を短時間 T_2 の間印加すればよい。

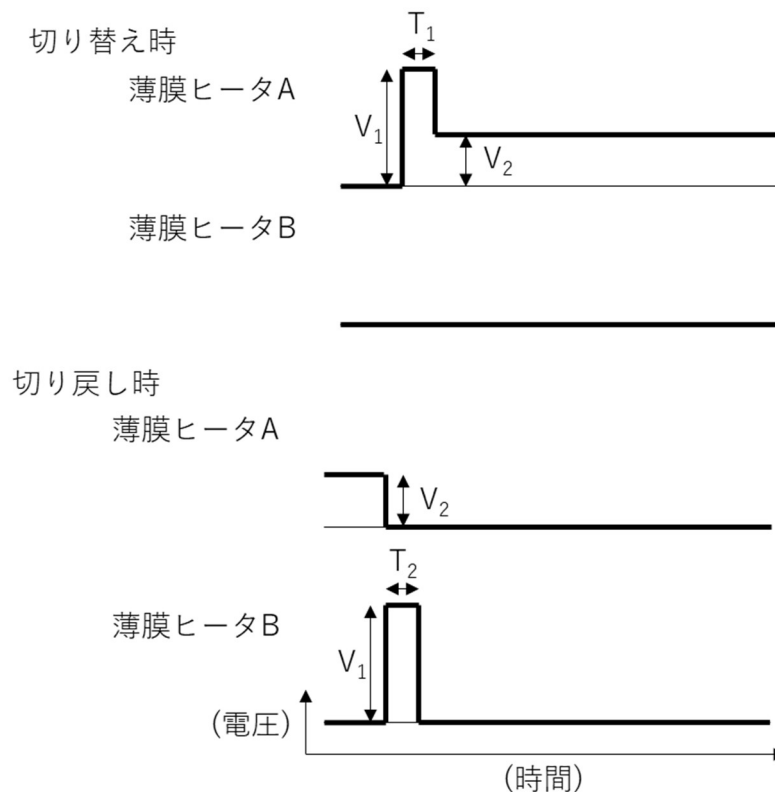


図 1.2.7-2 スイッチング時間を短縮する駆動電圧波形例

次に、石英系 PLC スイッチの低消費電力化に寄与する断熱溝構造の影響を示す。断熱溝構造は、薄膜ヒータに沿って、両側のクラッド層を Si 基板に到達するまでエッチングして形成したもので、導波路の側面方向に空気層が設けられ、薄膜ヒータから供給した熱が面内方向に伝搬することを妨げられて下方に位置する導波路の方向に誘導され、効率的に導波路を加熱する効果を有する。一方、断熱溝構造は、出力ポートを戻す際に、導波路の放熱経路を制限して冷却を妨げる構造でもあるため、特に出力ポートを戻す方向のスイッチング時間を長くする効果を有する。しかしながら、先に示した

パルス状の電圧を印加する駆動方法では、スイッチング時間の短縮に導波路の冷却工程は関与しないため、断熱溝構造を適用してもスイッチング時間は伸びないと考えられる。逆に断熱溝構造を設けることで、効率的な加熱が可能となり、省電力化すると同時にスイッチング時間の短縮も期待できる。

ここまでで示したスイッチング時間の短縮原理を踏まえて、薄膜ヒータを装荷した MZI 回路を作製し、スイッチング時間の短縮原理の実証実験を行った。得られた結果について、①薄膜化、②駆動波形、③断熱溝構造の 3 つの観点から示す。

まず薄膜化の効果を検討するに当たり、MZI 回路を用いる実験に先立って、薄膜化すること自体に起因する影響を明確化した。コアとクラッドの屈折率差を 1.5%程度とする条件で、オーバークラッド層厚を 20 μm に固定し、アンダークラッド層の厚さを変えて作製したウエハ内に、長尺の導波路を作製して偏波依存損失(PDL)を評価した。得られた結果を図 1.2.7-3 に示す。アンダークラッド層厚が 7.5 μm 以上の条件では、PDL は 0.01dB/cm より小さい値であったが、5 μm まで削減すると、0.04dB/cm 以上に増加した。この結果から、実用的なアンダークラッドの薄膜化は 7.5 μm が下限値であると判断した。

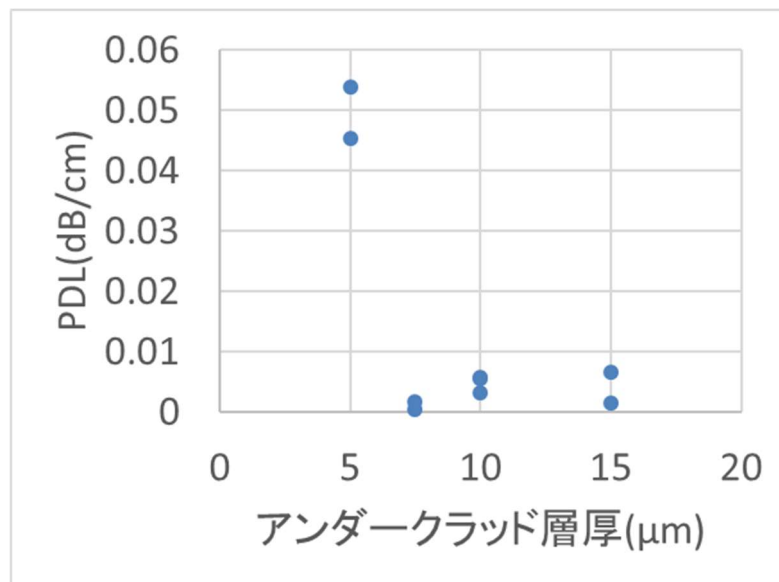


図 1.2.7-3 クラッド層厚と PDL の関係

次に①薄膜化の効果を検証するため、(アンダークラッド層厚, オーバークラッド層厚)の組み合わせについて、アンダークラッド層厚を中心に变化させ、(5 μm , 20 μm)、(7.5 μm , 20 μm)、(10 μm , 20 μm)、(15 μm , 20 μm)、(10 μm , 10 μm)の 5 通りで、薄膜ヒータを装荷した MZI 回路を作製した。作製した MZI 回路の薄膜ヒータに対し、矩形の電圧波形を印加して 10%-90%の変化に要する遷移時間と印加した電力を評価した。得られた結果を図 1.2.7-4 に示す。横軸は総クラッド層厚、すなわちオーバークラッド層厚+アンダークラッド層厚とし、縦軸は遷移時間あるいは印加電力としている。遷移時間のグラフにおいて黒塗りは OFF から ON、白抜きは ON から OFF への遷移時間を示している。図 1.2.7-4(a)の遷移時間グラフにおいてほとんどのプロットが概ね同一直線状に位置することから、矩形波駆動時の遷移時間は、総クラッド層厚のシンプルな関数で概ね表現できると考えられる。総クラッド層厚は、薄膜ヒータと Si 基板との距離でもあるから、矩形波駆動時の遷移時間は温度勾配や熱流束の関数と考えることもできる。一方、消費電力については、アンダークラッド層厚を薄くするほどスイッチングに要する電力が大きくなる傾向がみられる。また同じアンダークラッド層厚でオー

バークラッド層厚を薄くすると、消費電力が小さくなる傾向を示している。この2つの傾向から明らかなように、消費電力は遷移時間と違って総クラッド層厚のシンプルな関数と見做すことは困難である。光スイッチとしては、省電力で遷移時間が短い方が望ましいので、オーバークラッドはできるだけ薄くすることで消費電力を下げつつ遷移時間も短縮し、アンダークラッドは消費電力減と遷移時間減が両立しないので、両者のバランスを考慮して厚さを決定すればよい。以降では、(アンダークラッド層厚, オーバークラッド層厚)の組み合わせが($10\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$)のウエハに作製した MZI をより詳細に評価することとした。

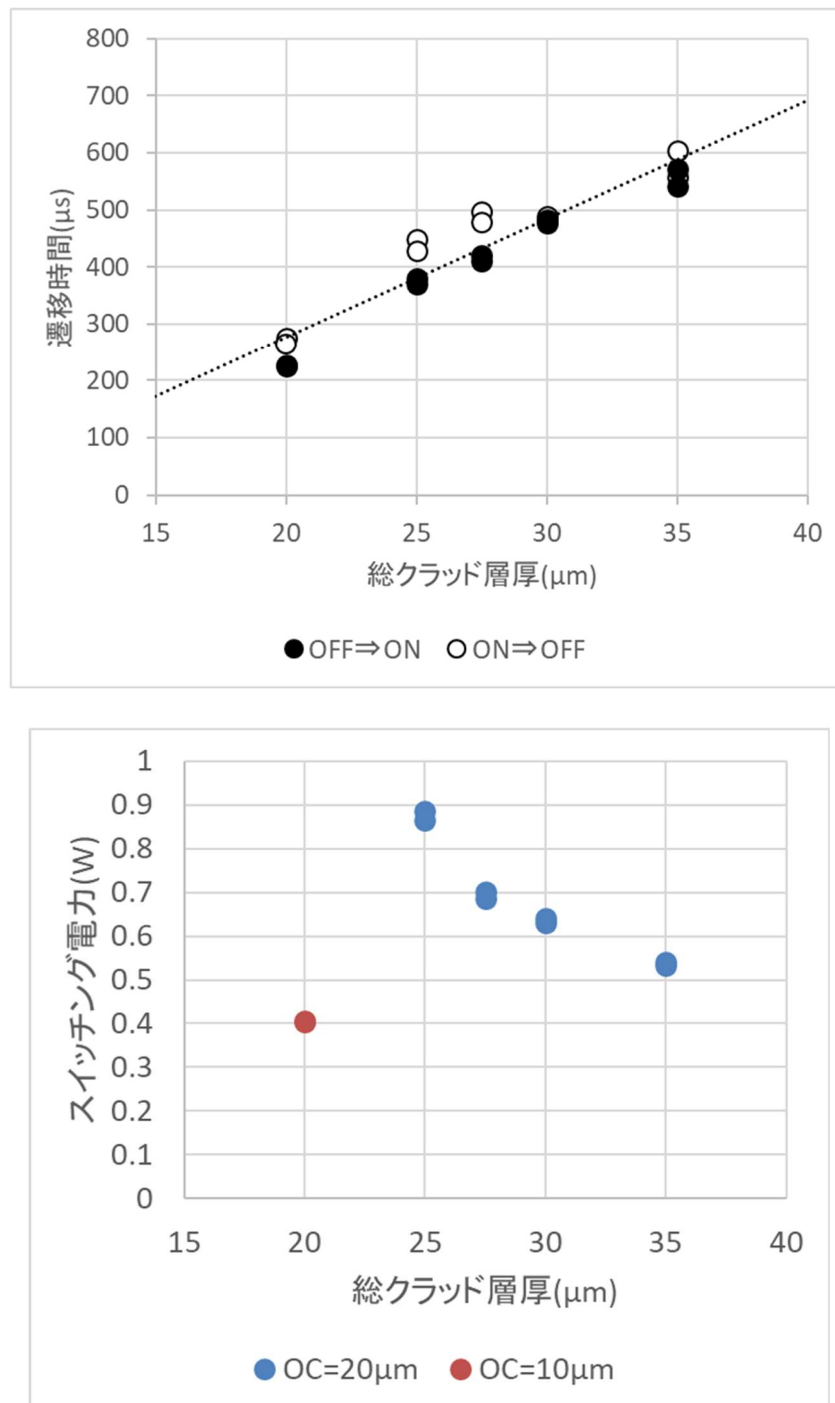


図 1.2.7-4 (a) クラッド層厚と遷移時間の関係 (b) クラッド層厚と印加電力の関係

次に、②駆動波形と③断熱溝構造の効果を検証するため、評価対象のウエハに形成したスイッチングエレメント（断熱溝構造あり／なしの２種類）に対し、スイッチングを行うタイミングで大きな熱量を供給する駆動方法を適用し、まず出力ポートを変える方向について遷移時間を評価した。評価にあたっては、スイッチングのタイミングで薄膜ヒータに供給した電力を横軸に、各条件での遷移時間を縦軸にプロットしたグラフを図 1.2.7-5 に示す。図 1.2.7-5 から、同一のスイッチングエレメントに対して印加する電力を増すことで、遷移時間を短縮できることが分かる。また、スイッチングエレメントに対して断熱溝構造を適用している場合には、同じ遷移時間でスイッチングするための電力は少ない電力で良く、同じ電力を供給した場合には、短い遷移時間でスイッチングできている。但し、遷移時間が短縮されるように薄膜ヒータに供給する電力を増すと、断熱溝の有無による遷移時間の差は縮小する傾向にある。観測されたスイッチング波形を図 1.2.7-6 に示す。図 1.2.7-6 には断熱溝構造の適用有無が異なる 2 つの回路に対し、図 1.2.7-5 中の点線で囲われている遷移時間の短い 2 条件の波形をプロットしている。横軸は時間経過を示しており、原点はスイッチングを開始したタイミングとしている。スイッチングを開始したタイミングから透過率が 90%に到達するまでの時間は、断熱溝がある場合で 78.2 μ s、断熱溝がない場合で 79.4 μ s であった。薄膜ヒータの加熱を開始してから導波路が温まり始めるまでの不感時間が存在するが、これを加味しても、断熱溝構造を形成した方が形成しない場合よりスイッチング時間が短いという比較結果となった。従って、スイッチング状態を維持するための電力が少なく、同じピーク電力で駆動した時にスイッチング時間を短くできる段熱溝を有する構造の方が、出力ポートを変える方向の操作上で有利と言える。

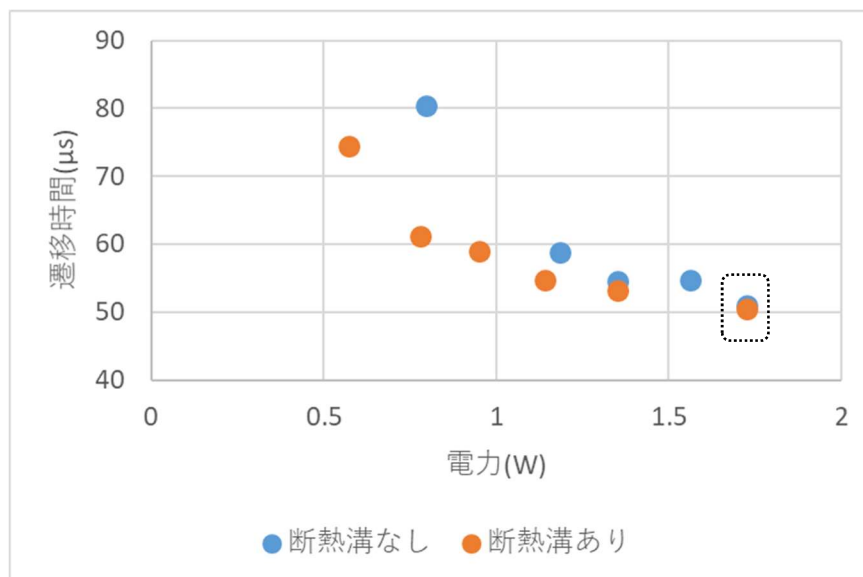


図 1.2.7-5 薄膜ヒータへの供給電力と遷移時間の関係

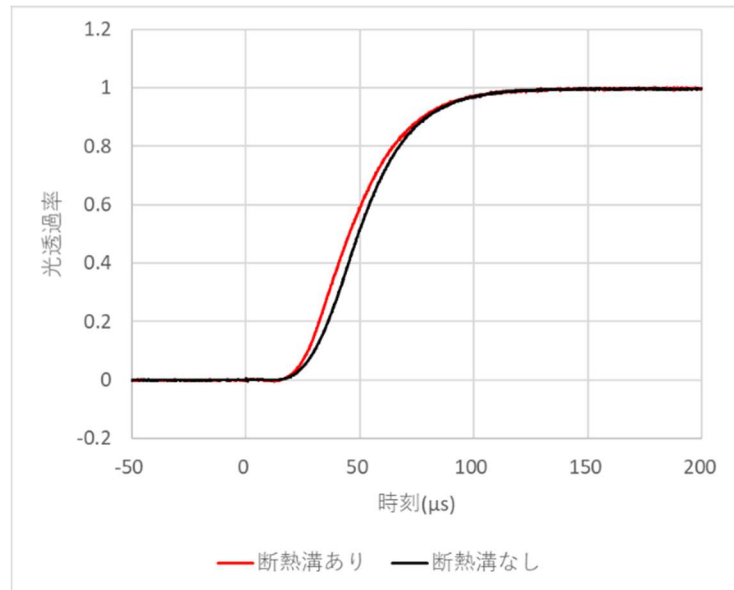


図 1.2.7-6 出力ポートを変える時のスイッチング波形

次に、出力ポートを戻す方向のスイッチングを評価した。スイッチングのタイミングで印加した電力は図 1.2.7-6 の条件と同一で、出力ポートを変える時と戻す時で同じ値とし、印加する時間を調整してスイッチング波形を最適化した。観測されたスイッチング波形を図 1.2.7-7 に示す。出力ポートを戻す方向の遷移時間は断熱溝がある場合で 73.4 μ s、断熱溝がない場合で 74.3 μ s であり、出力ポートを変える際の遷移時間よりも短い値であった。また、微差ではあるものの、断熱溝構造を形成した方がスイッチング時間を短くできている。出力ポートを戻す際のスイッチング時間が、変える時のスイッチング時間よりも短くなっているのは、加熱されていた導波路への熱供給を停止して、自然冷却する効果により、もう一方の導波路への加熱量は小さくて済むことから、自然な結果と言える。

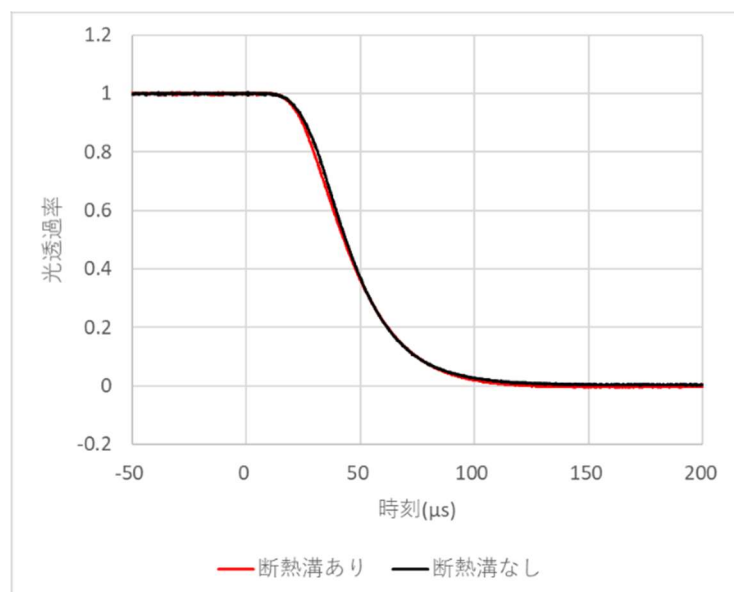


図 1.2.7-7 出力ポートを戻す時のスイッチング波形

以上で示したように、石英系 PLC で作製した熱光学効果を用いたスイッチにおいて、薄膜化、スイッチングのタイミングで大きな熱量を供給する駆動方法、断熱溝構造を適用することにより、

100 μ s を大きく下回る 78.2 μ s でスイッチングできることが示された。

ここまでに得られた結果をもとに、技術アセスメントの実施方針に沿って、石英系 PLC で作製する光スイッチにおいて、スイッチング時間の短縮に取り組み、短縮することができたことから、石英系 PLC をプラットフォームとして採用することとした。

更に発展的な検討として、高頻度スイッチングへの対応の可否についても実験的に検証を行った。ここまでに示したスイッチング時間の短縮は、石英系 PLC スwitch の駆動方法を工夫することで、10kHz 級の変調器として使用できることまでは意味していない点に注意を要する。これは、出力ポートの切り替えと切り戻しを 100 μ s おきに繰り返すと、導波路の熱が放熱されきらずに蓄積されるため、動作が破綻するためである。その一方で、出力ポートの切り替えタイミングと切り戻しタイミングの間に、一定のガードタイムを設けて定常状態に戻すことを必須としてしまうと、このスイッチを適用したスイッチシステムを構築する際に、運用上の制約が大きくなってしまう。図 1.2.7-8 は光スイッチエレメントの切り替えタイミング、切り戻しタイミング、光スイッチをデータが通過する時間の代表的な関係を模式的に表したもので、これを用いて運用ルールと運用上の制限、光スイッチに求められる要請の 3 点を整理する。なお光スイッチエレメントをデータが通るのは、光スイッチを切り替えてから、切り戻すまでの間であるものとする。

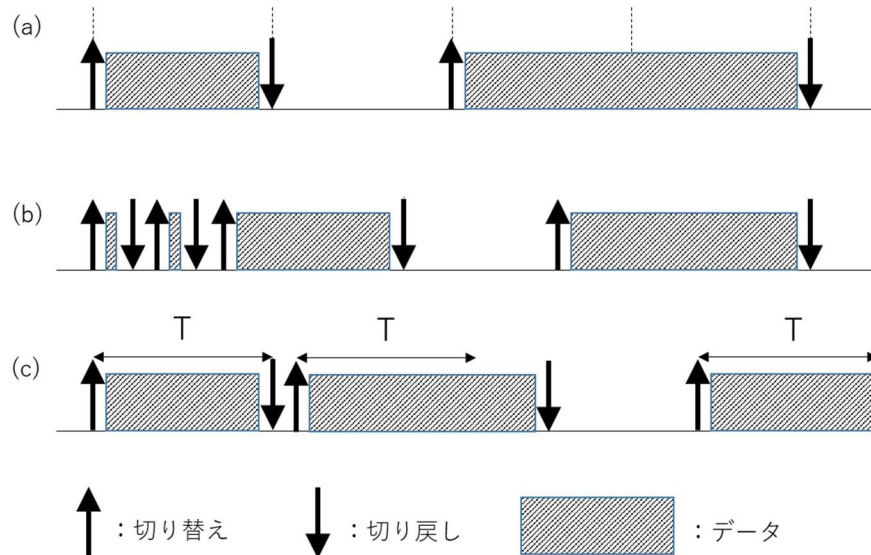


図 1.2.7-8 光スイッチの制御タイミング例

図 1.2.7-8(a)は、一定の周期で訪れるタイミングのみで切り替えおよび切り戻しを実施できるとルールづけられた場合である。このように規定をすれば、切り替えと切り戻し、切り戻しと切り替えの間に最低 1 周期分の待ち時間が設けられるため、スイッチング時間の短縮駆動方法を適用した石英系 PLC スwitch であっても、この待ち時間の間に導波路を放熱して定常状態にできる。しかし、このようなルールを適用するためには、ネットワーク全体で同期を取り、切り替え・切り戻しのタイミングを合わせる必要があるので、システムの制御の実現難易度は高く、現実的な方式とはいえない。図 1.2.7-8(b)は、切り替えおよび切り戻しのタイミングに一切制約を設けず、任意とする場合である。この場合、流れるトラフィックによっては切り替えと切り戻し、切り戻しと切り替えが極めて短い間隔で繰り返される場合が生じる。その場合、スイッチング時間の短縮駆動方法を適用した石英系 PLC スwitch は導波路の熱を放熱しきれず、動作が破綻する可能性が生じてしまう。但し、この導波路の熱を放熱しきれなくなるような状況とは、スイッチング時間と同程度以下の極めて短時間の

データ送受信と、 $100\mu\text{s}$ 程度を要するスイッチングが交互に行われるような状況であり、帯域利用効率が 50%を下回るような効率的でない状況であることも意味している。従って、切り替え・切り戻しのタイミングに一切制約を設けない運用方法も、効率の観点で実用的とは言えない。図 1.2.7-8(c) は、図 1.2.7-8(b)の制約を設けない場合の非効率性を改善するため、出力ポートを切り替えた後、切り戻すまでの間に最小開通時間 T を設けることをルール化した場合である。例えば $T=1\text{ms}$ と設定し、スイッチングに伴う不稼働時間が $100\mu\text{s}$ の場合には回線利用効率は最低でも 90.9%であり、何の制約も設けない場合よりも高効率を確保できる。このようなルールの下では、出力ポートを切り替えた状態は一定時間以上維持されるので、その間に熱平衡状態に至る。従って、出力ポートが切り戻された後、短時間で再度切り替えられる場合で不具合が生じなければよい。なお、このような運用ルールが適用されるスイッチシステムの一例として、本研究開発でターゲットとする電子回路ベースの packetswitch と光スイッチを並列に配置し、短いフローを packetswitch で処理し、長いフローのみを光スイッチに送るハイブリッドスイッチ構成が挙げられ、十分な現実性も備えたルールといえる。

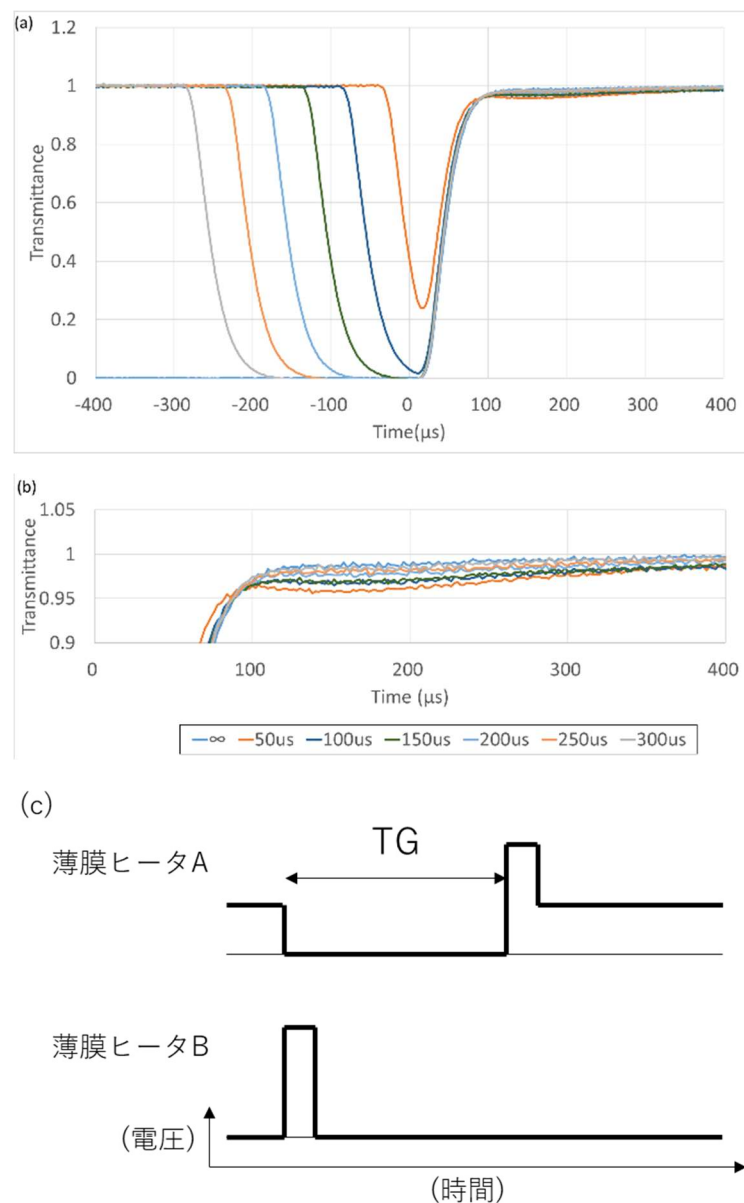


図 1.2.7-9 光スイッチの再切り替え動作

以上の運用ルールに関する考察を踏まえて、図 1.2.7-8(c)に示した運用ルールに対応できるよう、出力ポートが切り戻された後、短時間で再度切り替えられる場合における遷移波形の評価を行った。図 1.2.7-9(a)に観測された波形を示す。図 1.2.7-9(a)の横軸は経過時間に対応しており、原点が再切り替えのトリガを与えた時刻に相当する。図 1.2.7-9(b)は、再切り替え後の透過率 90%以上の領域を拡大したものである。図 1.2.7-9(c)には駆動信号波形の概念図を示す。駆動信号波形において、切り戻しのトリガを与えてから再切り替えのトリガを与えるまでの時間をパラメータ TG としており、これを 50 μ s から 300 μ s まで 50 μ s 間隔で変化させた。図 1.2.7-9(a), (b)には、これら 6 本の遷移波形と、熱平衡に至るまでの時間を十分に経過した通常の切り替え波形の 7 本が描かれている。観測された遷移波形から、出力ポートが切り戻された後、50 μ s 後に再度切り替えられた場合でも、破綻なく再切り替えができていることがわかる。但し、図 1.2.7-9(b)において間隔を最短の 50 μ s にした場合は、95%程度の透過率で推移する時間が長くなっている。消光比に敏感な用途で使用する場合には、切り戻しと再切り替えの間は 100 μ s 以上あけることが望ましいが、いずれにせよスイッチング時間の短縮駆動方法を適用した石英系 PLC スイッチに対して、出力ポートが切り戻された後、短時間で再度切り替えを行う制御は問題なく実施可能である。従って、図 1.2.7-8(c)に示されるような運用ルールで高速に切り替える石英系 PLC 光スイッチを利用可能であることが確認できた。

なお、空間光スイッチの技術アセスメントを通じて得られた研究開発成果については、光通信関連の研究において最も知名度の高い学術会議である OFC2020 において採択されている。(O. Moriwaki et al., “Fast Switching of 84 μ s for Silica-based PLC Switch,” in Proc. of OFC2020, paper Th3B.5, 2020.)

<空間光スイッチモジュールの試作>

2019 年度から 2021 年度にかけて、光コアスイッチに適用する空間光スイッチのモジュールの設計・試作・評価および、モジュール駆動用のドライバ試作を段階的に実施し、計画的かつ効率的に懸念材料の解消に取り組み、光コアスイッチ検証機の作製の準備を着実に実施した。当該 3 年間の取り組みは以下の通りであった。

◆ 2019 年度

光スプリッタと光セクタスイッチを集積した、検証機向け空間光スイッチと同じ機能の小規模版（8 入力 8 出力規模）の空間光スイッチ簡易モジュールを試作

光スイッチエレメントの単体個別駆動に対応した、高速駆動用のドライバ回路を試作

◆ 2020 年度

2019 年度試作の小規模版スイッチを、検証機向けの規模（16 入力 8 出力）に拡張して空間光スイッチ簡易モジュールを試作

設計の最適化を図りながら、検証機に搭載可能なモジュール形態で空間光スイッチモジュールを試作

16 入力 8 出力規模の空間光スイッチモジュール駆動に対応する、高速駆動用のドライバ回路を試作し、外部制御インタフェースに EtherCAT を適用

◆ 2021 年度

2020 年度試作の空間光スイッチモジュールに対し、低消費電力化を狙った構造を適用し、簡易モジュール形態で検証

低消費電力版の構造で、検証機向け空間光スイッチモジュールを試作

各取り組みで得られた成果について、以下に示す。

2019年度には、8入力8出力規模の空間光スイッチを簡易モジュールの形態で試作した。試作した簡易モジュールの外観を図 1.2.7-10 に示す。

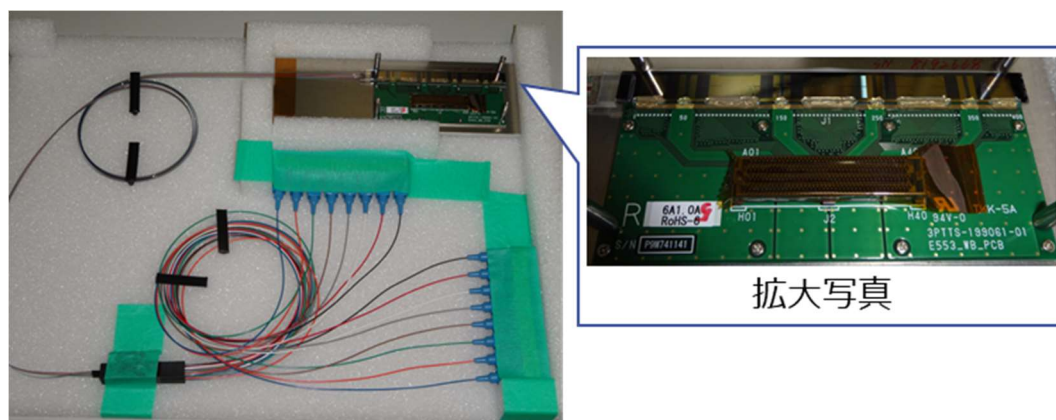


図 1.2.7-10 8入力8出力空間光スイッチ簡易モジュール外観

試作した光スイッチは、8個の1入力8出力光スプリッタと8個の8入力1出力光セクタスイッチが集積されたもので、検証機向けとして予定する16入力1出力の光セクタスイッチよりも小規模な構造で基礎的な検証を行ったものである。なお、消光比(ON状態とOFF状態の光レベル比)を向上するために、スイッチエレメント2個を縦続接続する回路構成を採用した。

作製した空間光スイッチ簡易モジュールについて、全経路の過渡応答特性を取得した。取得した過渡応答波形を図 1.2.7-11 に示す。

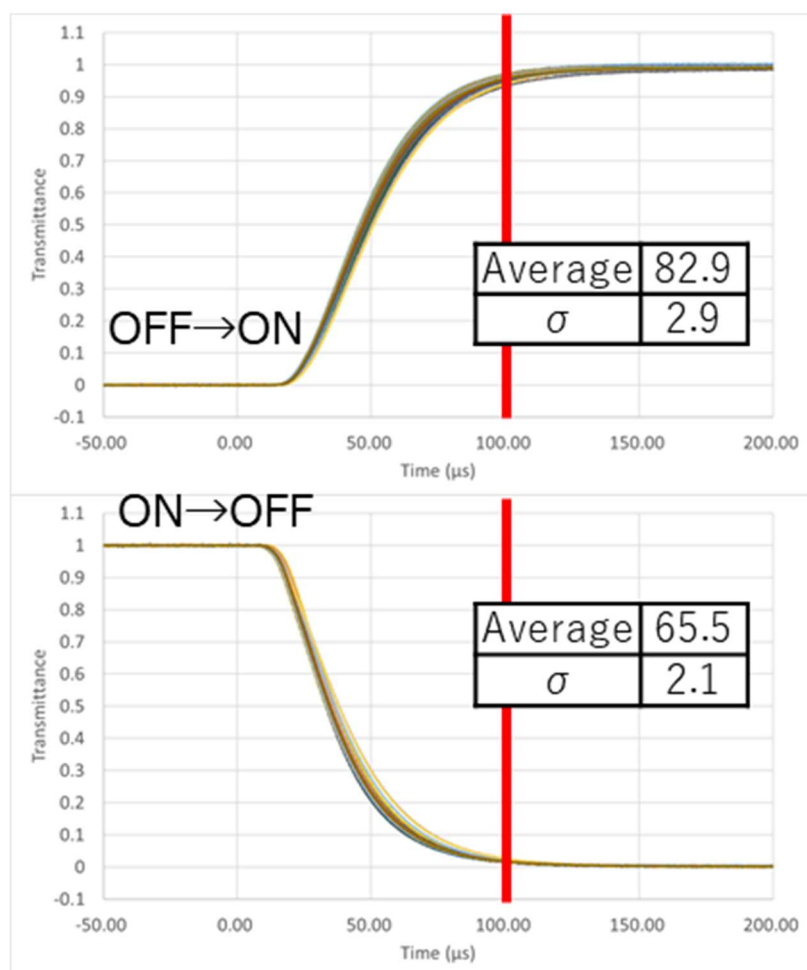


図 1.2.7-11 8入力8出力空間光スイッチ過渡応答特性

図 1.2.7-11 から明らかなように、取得した過渡応答特性から全ての経路で 100 μ s 以内でのスイッチングを達成できていることを確認することができた。なお、OFF $\rightarrow$ ON へのスイッチング時間が ON $\rightarrow$ OFF へのスイッチング時間よりも長い理由は、作製した回路構成から説明が可能である。すなわち、消光比を向上するために採用した、スイッチエレメント 2 個を縦続接続する回路構造により、ON 状態を実現するために全体で透過率 90%となるためには、スイッチエレメント 1 個の透過率の 2 乗が全体の透過率になることから、1 個の透過率は、 $\sqrt{0.9}=95\%$ であることが必要であるのに対し、全体で透過率 10%を得るためのスイッチエレメント 1 個の透過率は $\sqrt{0.1}=32\%$ に至ればよく、個々のスイッチエレメントに求められる ON 状態と OFF 状態の透過率の違いによって、スイッチ回路としてのスイッチング時間に時間差が生じていると説明できる。

作製した空間光スイッチ簡易モジュールについて、静的な光学特性データについても取得した。取得した特性を表 1.2.7-3 に示す。

表 1.2.7-3 8 入力 8 出力空間光スイッチの静的な光学特性

SW 電力/MZI(mW)	157 (mW)
挿入損失(dB)	14.8 (dB)
消光比(dB)	57.3 (dB)

SW 電力については、石英系 PLC で作製する光スイッチとしては、高速化の代償として若干高い値であるものの、許容可能な電力と言える。1024 ポート規模の光コアスイッチを想定すると、同時駆動する最大の MZI（マッハツェンダ干渉計）の数は 2048 個であるから、光スイッチを駆動するために必要な電力は、高々 320 W 程度に留まる。

挿入損失については、1 入力 8 出力の光スプリッタの原理損失が 9 dB であり、6 dB 程度の過剰損失が確認された。これは Si フォトニクスで空間光スイッチを作製する場合よりは格段に小さな値であるものの低減余地のある値であり、課題の残る数値であった。

消光比については、消光比を向上するために採用した、スイッチエレメント 2 個を縦続接続する回路構造の効果で十分に大きな値を得られており、良好な結果を初期の試作段階から得ることができた。

2019 年度には、光スイッチエレメントの単体個別駆動に対応した、高速駆動用のドライバ回路の試作も実施した。作製したドライバ回路の外観を、図 1.2.7-12 に示す。



図 1.2.7-12 高速駆動用のドライバ回路外観

作製したドライバ回路は、前述した 8 入力 8 出力空間光スイッチ過渡応答特性を取得する際に使用しており、図 1.2.7-11 の出力波形からも、ドライバ回路が備えるべき基本機能を備えた回路が実現できていることを確認することができた。

2020 年度には、2019 年度試作の結果を踏まえて、8 入力 8 出力の小規模版空間光スイッチ回路を、検証機向けの規模に相当する 16 入力 8 出力の規模に拡張し、簡易モジュール形態での試作を経て、検証機に搭載可能なモジュール形態での空間光スイッチモジュール試作を実施した。また、16 入力 8 出力規模の空間光スイッチモジュールを駆動するため、同モジュールのインタフェースに最適化した高速駆動用のドライバ回路を試作した。特に外部制御インタフェースには EtherCAT を適用しており、他の研究開発項目における成果物との連携動作を行うための基盤整備も、この段階で進捗させた。試作した空間光スイッチモジュールと、モジュール高速駆動用のドライバ回路の外観を図 1.2.7-13 に示す。

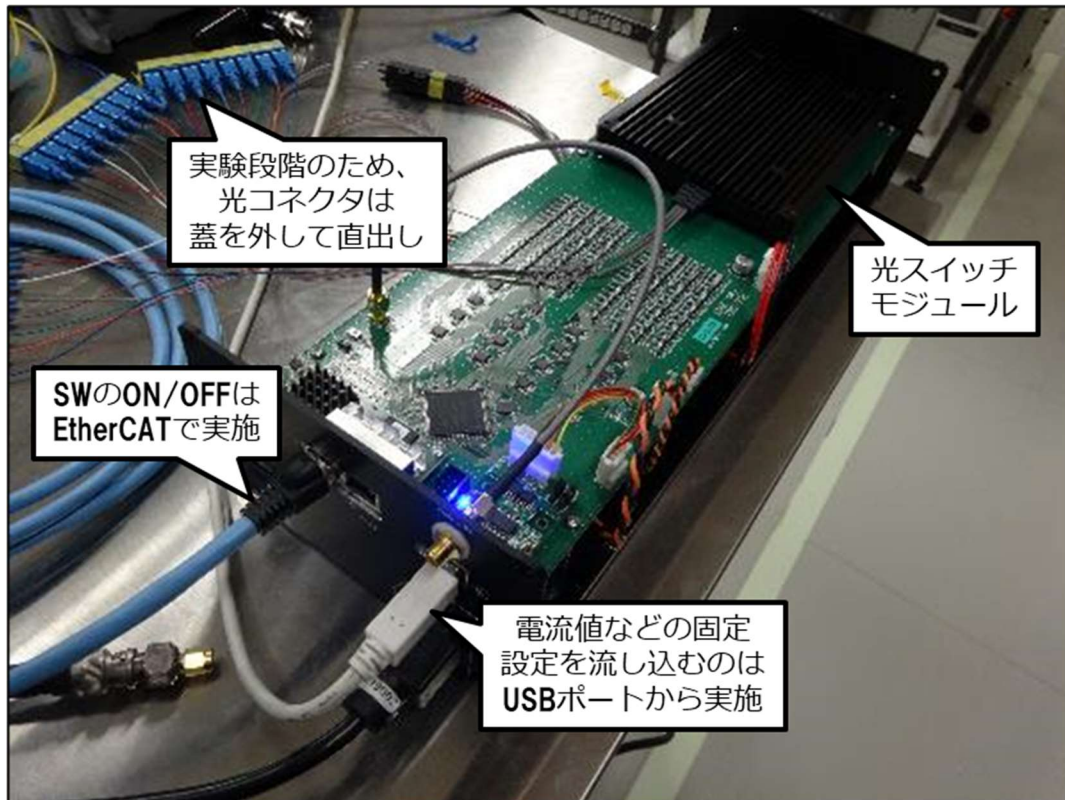


図 1.2.7-13 空間光スイッチモジュールとモジュール高速駆動用のドライバ回路外観

試作した 16 入力 8 出力の空間光スイッチモジュールの過渡応答特性は、モジュール高速駆動用のドライバ回路を使用して評価した。得られた過渡応答波形を図 1.2.7.14 に示す。OFF→ON へのスイッチング時間について、制御開始後 100 μ s 以内に透過率を 90%以上に変化させること、ON→OFF へのスイッチング時間について、制御開始後 100 μ s 以内に透過率を 10%以下に変化させることのいずれについても、目標を達成可能であることの確認ができた。

また、静特性についても 8 入力 8 出力の小規模版空間光スイッチの簡易モジュールにおいて、課題として残っていた過剰損失について、設計・構造の最適化を通じて 1 dB 程度改善し、過剰損失 5 dB 程度の値を得ることができた。一方で消費電力については、25%程度の増加が観測されてしまい、光スイッチエレメント（マッハツェンダ干渉計）1 個当たり 200 mW 程度の電力を消費するというデータが得られている。最後に消光比については良好な数値を維持できており、全体としては、光コアスイッチに適用する空間光スイッチモジュールとして、目標をクリアする光モジュールを実現できることの実証を前倒しで達成することができた。

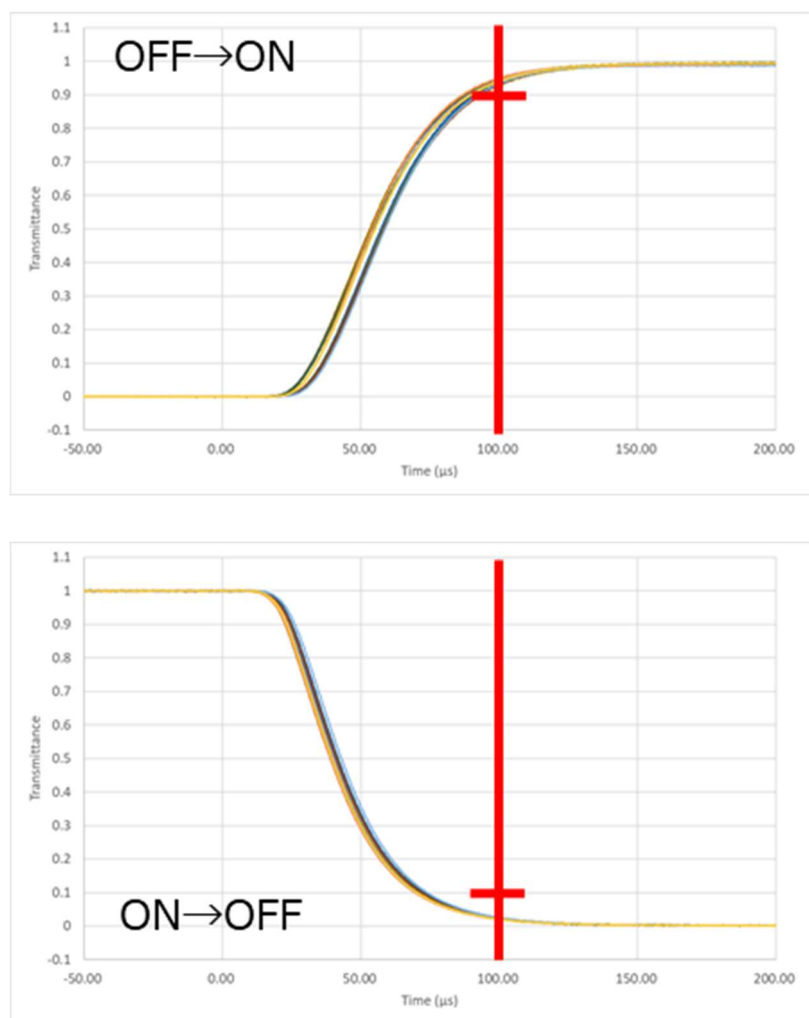


図 1.2.7-14 16 入力 8 出力の空間光スイッチモジュール過渡応答特性

2021 年度には、2020 年度の取り組みによって、光コアスイッチに適用する空間光スイッチモジュールを作成可能な状態に至ったことを踏まえて、更なる低消費電力化を狙った構造の検証を簡易モジュール形態で実施し、得られた設計情報に基づいて、検証機向け空間光スイッチモジュールの試作を実施した。作製した検証機向け空間光スイッチモジュールの外観を、図 1.2.7-15 に示す。



図 1.2.7-15 検証機向け空間光スイッチモジュール外観

検証機向け空間光スイッチモジュールの特性について、評価結果を順に示す。まず、空間光スイッチの過渡応答特性について、図 1.2.7-16 に示す。

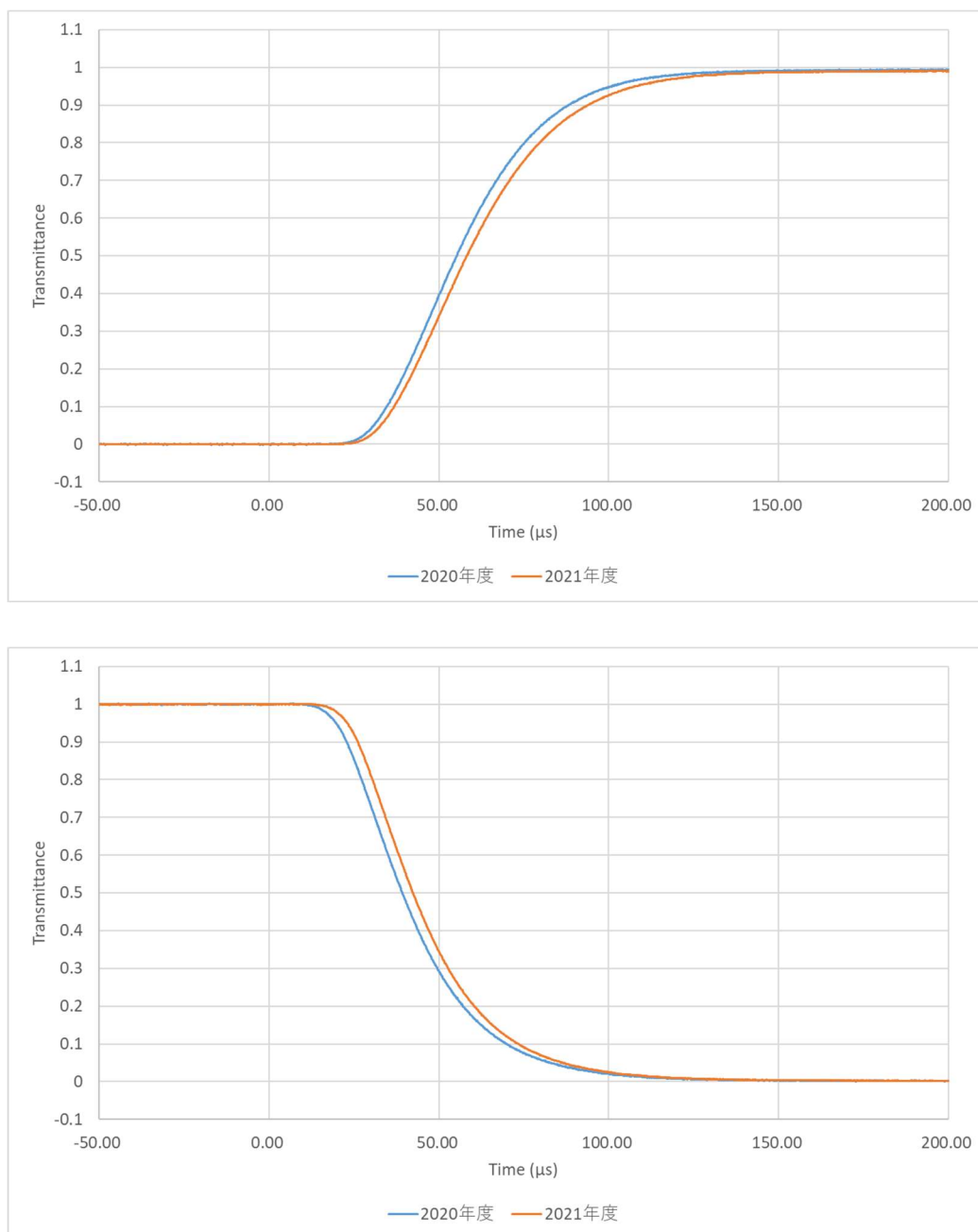


図 1.2.7-16 検証機向け空間光スイッチモジュール過渡応答特性

空間光スイッチの過渡応答特性については、2020 年度試作のモジュールより多少の応答の遅れがみられたものの、OFF→ON へのスイッチング時間について、制御開始後 100μs 以内に透過率を 90% 以上に変化させること、ON→OFF へのスイッチング時間について、制御開始後 100μs 以内に透過率を 10%以下に変化させることのいずれについても、目標の達成を確認できた。回路構成上スイッチング時間が長く観測される OFF→ON へのスイッチング時間について、ヒストグラムを図 1.2.7-17 に示す。

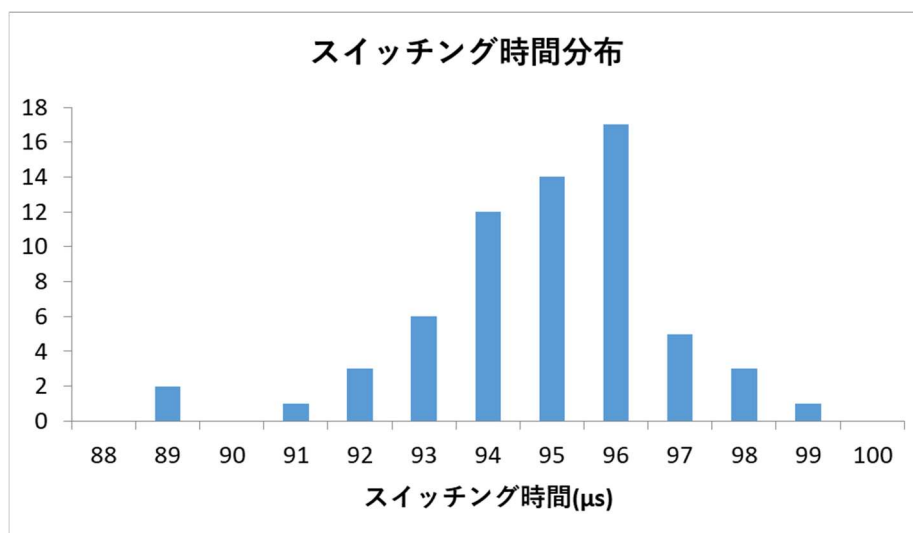


図 1.2.7-17 OFF→ON スwitchング時間のヒストグラム

次に、空間光スイッチの消費電力について各スイッチングポイントの消費電力を図 1.2.7-18 に示す。

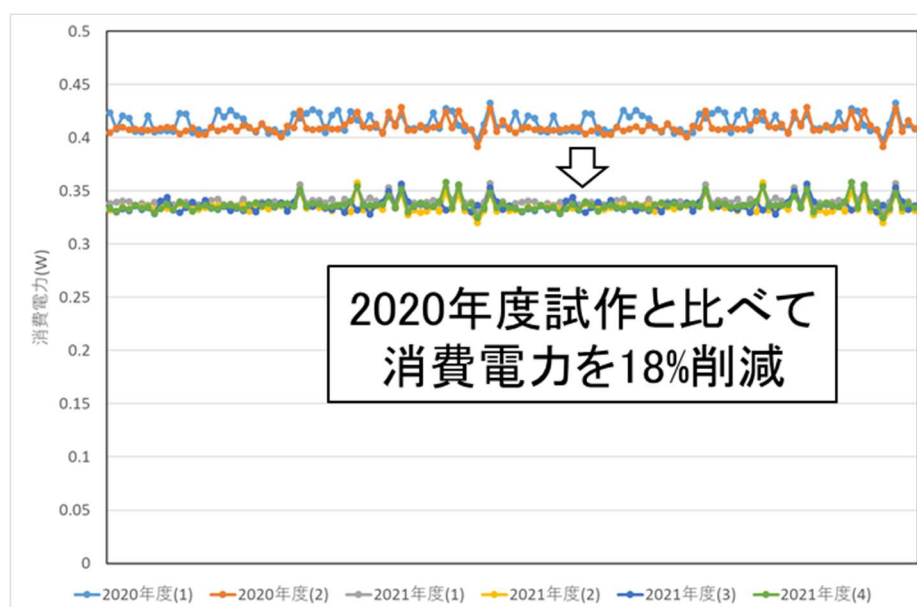


図 1.2.7-18 検証機向け空間光スイッチモジュールの各スイッチングポイントの消費電力

2020 年度試作のモジュールで増加がみられた消費電力について、設計の最適化を通じて 18%の改善を達成し、光スイッチエレメント（マッハツェンダ干渉計）1 個当たりの消費電力を 170 mW 程度にまで改善することができた。（図 1.2.7-18 の縦軸では、同時に駆動する光スイッチエレメント 2 個分の消費電力をプロットしている。）この値は、8 入力 8 出力の小規模版空間光スイッチ回路と同程度の値である。

最後に静的な光学特性の評価結果について、表 1.2.7-4 に示す。挿入損失と消光比のいずれも、2020 年度試作で得られた値から数値が悪化することはなく、光コアスイッチに適用する空間光スイッチモジュールとして、十分な値を得ることができた。

表 1.2.7-4 検証機向け空間光スイッチモジュールの静的な光学特性

	挿入損失 (Ave.)	消光比 (Ave.)
2020年度試作	13.7dB	55.3dB
2021年度試作	13.6dB	53.5dB

＜光コアスイッチにおける光信号の品質設計＞

2020年度から2021年度にかけて、光コアスイッチの設計指針を策定する目的で、1024分岐（原理損失30dB相当）を含む損失補償を行う光増幅器（EDFA）の配置、信号雑音比（OSNR）の検討を実施し、検討結果を踏まえて試作する機能ブロックのサイズについても概算を行った。なお、本検討におけるEDFAの配置とは、検証機の物理的な設計を意味するものではなく、光信号の品質設計を意味するものであり、送信器から光信号が出力された後、どのような部品を経由し、どのような光レベルの信号に対して、どのような利得の光増幅器を適用すると、どのような品質の信号が受信器に入力されるかを机上検討する営みである。

検討にあたっては、共通のパラメータとして以下の値を使用した。

- ◆ 送信器関連
 - 出力：-12 (dBm/ch)
 - OSNR：34 (dB/0.1nm)
- ◆ パッシブデバイス関連
 - スプリッタの挿入損失：原理損失+2 (dB)
 - 空間光スイッチ(光セクタスイッチ)の挿入損失：3 (dB)
 - 波長合波器の挿入損失：5 (dB)
- ◆ 光増幅器(EDFA)関連
 - NF：6 (dB)

これらに加えて、「EDFAの利得」、「EDFAの出力光レベル」、「光増幅の回数」等を可変のパラメータとして、試算を行った。

まず、標準的なWDM（波長分割多重）信号対応のEDFA製品で実現可能な設計として

- EDFAの利得：24 (dB)
- EDFAの出力光レベル：5 (dBm/ch)
- 光増幅の回数：2回あるいは3回

とした場合、受信器に入力される信号のOSNR（着信OSNR）は、

- ✓ 光増幅回数が2回の場合：27.8 (dB/0.1nm)
- ✓ 光増幅回数が3回の場合：26.6 (dB/0.1nm)

となった。なお本設計においては、固定値の利得(24 dB)、固定値の出力光レベル(5 dBm/ch)と整合させるため、EDFAの直前でVOAを用いて入力光レベルを-19 dBm/chに調整することを前提とする。この光レベル調整の前提があるため、着信OSNRとEDFAの配置には関連性は生じず、光増幅の回数のみで着信OSNRが定まる設計となる。

次に、利得の可変設定に対応する、若干高機能なEDFAを適用する場合の設計として

- EDFAの利得：14～24 (dB)

- EDFA の出力光レベル：5 (dBm/ch)
- 光増幅の回数：2回 あるいは 3回

の場合で試算を行った。この場合、VOA を用いた光入力レベルの調整が不要となり、これに伴って先の試算よりも着信 OSNR は向上する。なお、この試算条件では EDFA の配置が着信 OSNR に影響を与えるため、光増幅の回数ごとに一意の値に定まることはないが、良好な着信 OSNR が得られる代表的な EDFA の配置で、

- ✓ 光増幅回数が 2 回の場合：28.1 (dB/0.1nm) … 代表例
- ✓ 光増幅回数が 3 回の場合：29.4 (dB/0.1nm) … 代表例

という着信 OSNR の試算結果が得られた。得られた試算結果を下表 1.2.7-5 にて整理する。

表 1.2.7-5 光増幅器の利得、増幅回数と着信 OSNR の関係(試算)

光増幅器利得	光増幅回数	着信OSNR (dB/0.1nm)	補足
24dB固定	2回	27.8	EDFAの直前にVOAを適用し、光入力レベルを-19 (dBm/ch)に調整するモデル。 着信OSNRとEDFA配置に関連性は生じない。 (着信光レベルとEDFA配置は関連する。) 光増幅回数が増えると着信OSNRは低下する。
24dB固定	3回	26.6	
14～24dB可変	2回	28.1	EDFAへの入力を-19dBm/chに合わせる必要がなく、VOAが不要となる効果で着信OSNRが向上。 (着信OSNRは配置によって変わる代表例。) 光増幅回数が増えると着信OSNRは向上する。
14～24dB可変	3回	29.4	

着信 OSNR は 25 (dB/0.1nm)以上の値であれば、将来の 1Tbps 級信号の伝送へも対応できることが見込めることから、1～2dB 程度の着信 OSNR の改善を図る目的で、利得の可変設定に対応する EDFA を適用する必要はないと判断した。特に、EDFA の利得を固定値とすることで、利得の波長依存性をフラットにするためのフィルタに可変性も必要なくなり、EDFA モジュールの小型化、さらには検証機の小型化にもつながる。利得固定の EDFA を適用する条件下では、光増幅の回数は少ない方が着信 OSNR を高くすることができることから、光増幅回数を 2 回とする設計について、さらに詳細に設計の比較を実施した。試算に用いたパラメータを以下に示す。

- EDFA の利得：24 (dB)
- EDFA の出力光レベル：
 - ✧ 条件 1：5 (dBm/ch)
 - ✧ 条件 2：3 (dBm/ch)
 - ✧ 条件 3：1 (dBm/ch)
- 光増幅の回数：2回
 - ✧ 条件 1：1 回目は波長合波器の後、2 回目は 128 分岐した後
 - ✧ 条件 2：1 回目は波長合波器の後、2 回目は 64 分岐した後
 - ✧ 条件 3：1 回目は波長合波器の後、2 回目は 32 分岐した後

以上の条件で EDFA の出力光レベルを 3 通り、EDFA の配置を 3 通り、それぞれ変化させた場合の着信 OSNR と着信光レベルの比較結果を下表 1.2.7-6 に示す。

表 1.2.7-6 EDFA の出力光レベルと EDFA 配置別の着信 OSNR と着信光レベル(試算)

		5dBm/ch	3dBm/ch	0dBm/ch	EDFA出力
		27.8dB	26.5dB	24.1dB	着信OSNR (dB/0.1nm)
① 波長合波器後 ② 128分岐後	2064台	-10dBm/ch	-12dBm/ch	-15dBm/ch	
① 波長合波器後 ② 64分岐後	1040台	-13dBm/ch	-15dBm/ch	-18dBm/ch	
① 波長合波器後 ② 32分岐後	528台	-16dBm/ch	-18dBm/ch	-21dBm/ch	
EDFA配置	EDFA数				

着信 OSNR は、固定値の EDFA 利得(24 dB)の場合、EDFA の出力光レベルを指定するとそれに合わせて、EDFA の直前で VOA を用いて入力光レベルを調整するため、着信 OSNR と EDFA の配置には関連性は生じない。EDFA の出力光レベルと着信 OSNR の関係は以下の通りであり、EDFA の出力光レベルを下げると着信 OSNR が低下する傾向がある。EDFA モジュールの対応可能な範囲で、EDFA の出力光レベルは上げることが望ましい。

- ✓ EDFA の出力光レベルが 5 (dBm/ch)の場合： 27.8 (dB/0.1nm)
- ✓ EDFA の出力光レベルが 3 (dBm/ch)の場合： 26.5 (dB/0.1nm)
- ✓ EDFA の出力光レベルが 0 (dBm/ch)の場合： 24.1 (dB/0.1nm)

本試算において EDFA の配置は着信 OSNR との関連性は生じないが、着信光レベルと関連性は生じている。一例として、EDFA の出力光レベルが 5 (dBm/ch)の条件下で、EDFA 配置を「1 回目は波長合波器の後、2 回目は 128 分岐した後」とすると、表 1.2.7-6 の赤枠内左上に記載の着信光レベル -10 (dBm/ch)となる。ここを基準に下方向、すなわち 2 回目の EDFA 配置を送信器側に近づけて 64 分岐した後とすると、着信光レベルが 3dB 低下して-13 dBm/ch となる。更に 2 回目の EDFA 配置を送信器側に近づけて 32 分岐した後とすると、着信光レベルが更に 3dB 低下して-16 dBm/ch となる。また、同じ EDFA 配置であっても、EDFA の出力光レベルを変化させことで着信光レベルの変化も生じる。表 1.2.7-6 の赤枠内において、左列(EDFA の出力光レベル 5 dBm/ch)から、中央列(EDFA の出力光レベル 3 dBm/ch)に変更すると、着信光レベルは 2 dB 低下する。右列(EDFA の出力光レベル 0 dBm/ch)に変更すると、着信光レベルは 5 dB 低下する。

また、光信号の品質設計から離れて、検証機の物理的な設計の観点において、EDFA の配置は 1024 ポート規模の検証機全体で必要とする EDFA の総数を決定するパラメータとなっている。すなわち、

- ✓ EDFA の配置が 1 回目は波長合波器の後、2 回目は 128 分岐した後の場合
： EDFA の総数 2064 台
- ✓ EDFA の配置が 1 回目は波長合波器の後、2 回目は 64 分岐した後の場合
： EDFA の総数 1040 台

- ✓ EDFA の配置が 1 回目は波長合波器の後、2 回目は 32 分岐した後の場合
： EDFA の総数 528 台

以上の試算結果を踏まえると、

- ✓ 着信 OSNR の観点からは、EDFA の出力光レベルは高いことが望ましい
- ✓ 着信光レベルの観点からは、2 回目の EDFA 配置を送信器側から遠ざける（多分岐してから光増幅すること）ことが望ましい
- ✓ EDFA の総数の観点からは、2 回目の EDFA 配置を送信器側に近づける（少分岐した段階で光増幅すること）ことが望ましい

という傾向が明らかとなった。以上の傾向を総合的に勘案し、検証機においては、

- EDFA の出力光レベル： 5 (dBm/ch)
- 光増幅の回数： EDFA の配置： 1 回目は波長合波器の後、2 回目は 32 分岐した後

とする設計を採用し、

- ✓ 着信 OSNR： 27.8 (dB/0.1nm)
- ✓ 着信光レベル： -16 (dBm/ch)
- ✓ EDFA の総数： 528 台

を目指すこととした。

<検証機用光デバイスの仕様策定>

2021 年度には、光コアスイッチにおける光信号の品質設計の結果を踏まえ、検証機に適用する汎用光デバイスのカスタム仕様を策定し、2022 年度にかけて調達を実施した。以下、策定した波長合波器と光増幅器の仕様を示す。波長合波器については、本命となる 75GHz 間隔 64ch の合波モジュールに加えて、低シンボルレートでの検証への対応用として 50GHz 間隔 64ch 合波モジュール、合波器のフィルタ特性により伝送特性が著しく劣化した場合に、スイッチ規模を 512 に低減して検証する用途の 100GHz 間隔 32ch 合波モジュールも調達することで、様々な状況変化に対応できるように準備を実施した。

【波長合波器仕様】

(1) 75GHz 間隔 64ch 合波モジュール

対応波長範囲(対応周波数範囲)： 1529.553～1567.337nm(191.275～196.0THz)

挿入損失： 5.5dB 以下

挿入損失の均一性： 1.5dB 以下

PDL： 0.5dB 以下

1dB 帯域幅： 37.5GHz 以上

3dB 帯域幅： 56GHz 以上

反射損失： 40dB 以上

光コネクタ： LC コネクタ

(2) 50GHz 間隔 64ch 合波モジュール

対応波長範囲(対応周波数範囲)： 1540.162～1565.496nm (191.5～194.65THz)

挿入損失： 6dB 以下

挿入損失の均一性：1.5dB 以下

PDL：0.5dB 以下

1dB 帯域幅：25GHz 以上

3dB 帯域幅：37.5GHz 以上

反射損失：40dB 以上

光コネクタ：LC コネクタ

(3) 100GHz 間隔 32ch 合波モジュール

対応波長範囲(対応周波数範囲)：1540.557～1565.496nm (191.5～194.6THz)

挿入損失：5.5dB 以下

挿入損失の均一性：1.5dB 以下

PDL：0.5dB 以下

1dB 帯域幅：50GHz 以上

3dB 帯域幅：75GHz 以上

反射損失：40dB 以上

光コネクタ：LC コネクタ

【光増幅器仕様】

動作波長：1528nm～1566nm

総光入力パワー：-10dBm～-1dBm

利得：24dB(Typical 値)

飽和出力光パワー：23dBm

利得平坦性：(入力-5dBm 利得 24dB 時)：±1dB

NF(利得 24dB 時)：5.5dB 以下(Typical 値 5dB)

反射損失(入力および出力)：45dB 以上

光ファイバ：SMF-28 900μm loose tube 1m

コネクタ：LC/UPC

動作電圧：5±0.25V

消費電力：10W(Typical 値)

動作モード：AGC

制御 IF：RS-232C

コネクタ：2mm ピッチ 2x15 ピン (メス)

サイズ：70x90x15mm

＜光コアスイッチの検証機筐体設計＞

2021 年度には、検証機向け空間光スイッチモジュールの試作、光信号の品質設計、検証機用光デバイスの仕様策定を通じて、光コアスイッチ検証機の筐体設計が可能となった。光信号の品質設計を踏まえて、2 種類の機能ブロックを作製することとした。各機能ブロックは、入力側から順に以下の光デバイスを搭載するものとした。

- ◆ 第1機能ブロック（最大 16 台）：64 入力 32 出力
 - 64 入力 1 出力 波長合波器：1 個
 - 光増幅器：1 個
 - 1 入力 32 出力 光スプリッタ：1 個
 - 光増幅器：1 個
- ◆ 第2機能ブロック（最大 32 台）：16 入力 32 出力
 - 1 入力 4 出力 光スプリッタ：16 個
 - 16 入力 8 出力 空間光スイッチモジュール：4 個

各機能ブロックへの搭載デバイス数と、各デバイスのサイズを踏まえて、試作した光コアスイッチ検証機の機能ブロック外形図を図 1.2.7-19、20 に示す。

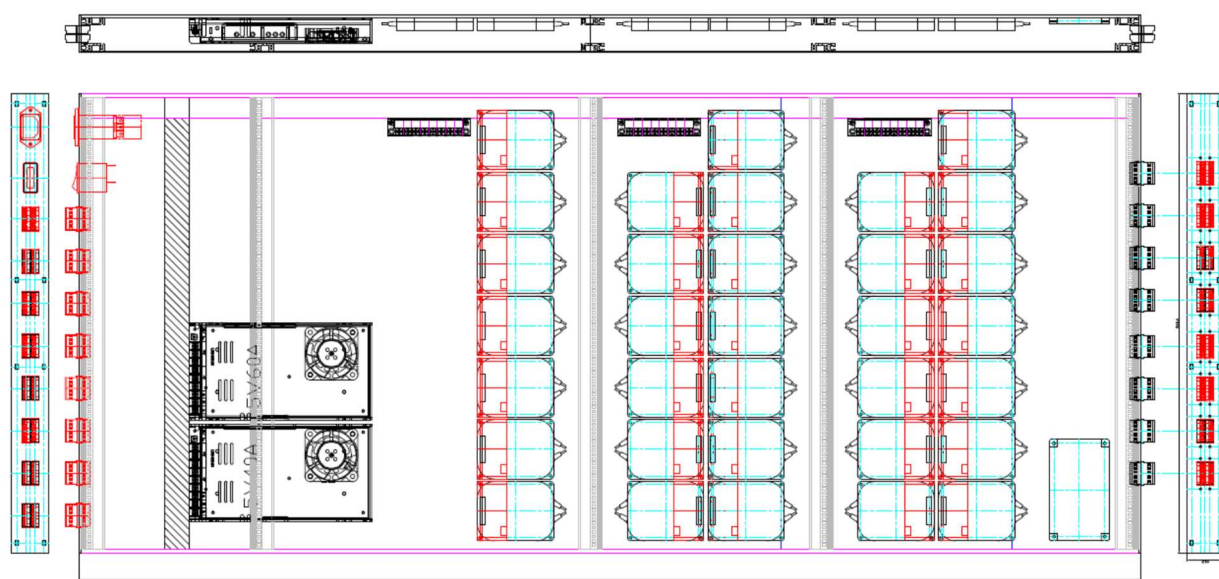


図 1.2.7-19 光コアスイッチ検証機：第1機能ブロック外形図



図 1.2.7-20 光コアスイッチ検証機：第2機能ブロック外形図

第1機能ブロックの外形寸法は、幅 543.4mm、高さ 44.5mm、奥行 1255mm、第2機能ブロックの外形寸法は、幅 543.4mm、高さ 88mm、奥行 705mm である。光コアスイッチを 1024 ポート規模のフ

ル実装する場合、機能モジュールの高さ合計は $44.5\text{mm} \times 16 + 88\text{mm} \times 32 = 3,528\text{mm}$ であり、2 架に分割して実装することを想定する。

＜光物理層の高速スイッチング動作＞

2021 年度には、試作済みの検証用機器群のうちで EtherCAT を介した制御が可能な状態にあった、空間光スイッチモジュールと、光波長送受信器に内蔵される高速波長可変光源モジュールを連携し、光物理層における 1000 ポート級かつ $100\mu\text{s}$ 級のスイッチングに関する原理検証実験を行った。本実験では、光電ハイブリッドスイッチシステムへの適用を目指す構成ではなく、信号を逆方向に辿る構成を採用した。すなわち、図 1.2.7-21 に示すように、送信側に可変波長光源を適用し、生成した信号を光セクタスイッチ（空間光スイッチ）で分岐する。全ての送信用波長可変光源に対して 1 つずつ設けられた全ての光セクタスイッチから、各々 1 つの出力ポートを集めて光カプラによって合流し、合流した信号を波長分波器で分波する。この構成での経路設定は、宛先とする受信器に対して波長分波器が出力する波長に波長可変光源の波長を設定し、光セクタスイッチを宛先とする受信器の接続された波長分波器と結線されるように設定することによって、任意の可変波長光源の出力を任意の受信器に到達させることができる。

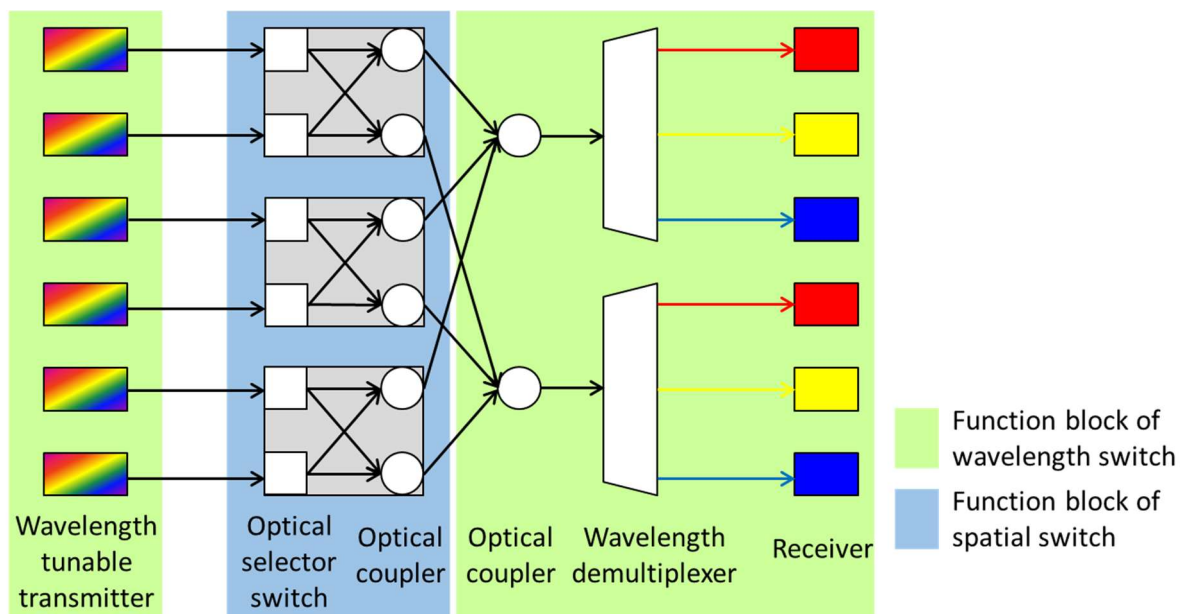


図 1.2.7-21 光物理層の高速スイッチング動作検証用の光スイッチ構成

図 1.2.7-22 に構築した実験系を示す。光源には、光波長送受信器に内蔵される高速波長可変光源モジュールを適用し、その出力光を過渡応答を短縮した石英系 PLC 光スイッチに入力した。光スイッチは 8 入力 16 出力のマルチキャストスイッチの機能を有しており、8 連の 1×16 セクタスイッチと 16 連の 8×1 光カプラを対向させて編み込んだ構成となっている。光スイッチからの出力は、 4×1 光カプラと 32×1 光カプラの順に經由して、光スイッチに内蔵された光カプラと合わせて、1024 経路の合流に相当する損失を与えたのちに、75GHz 間隔の 64ch AWG で波長分波し、O/E 変換してオシロスコープで過渡応答を観測した。構築した実験系は送信器から受信器に至る 1 経路に留まるが、フル実装時には 1024×1024 規模にまで拡張が可能である。

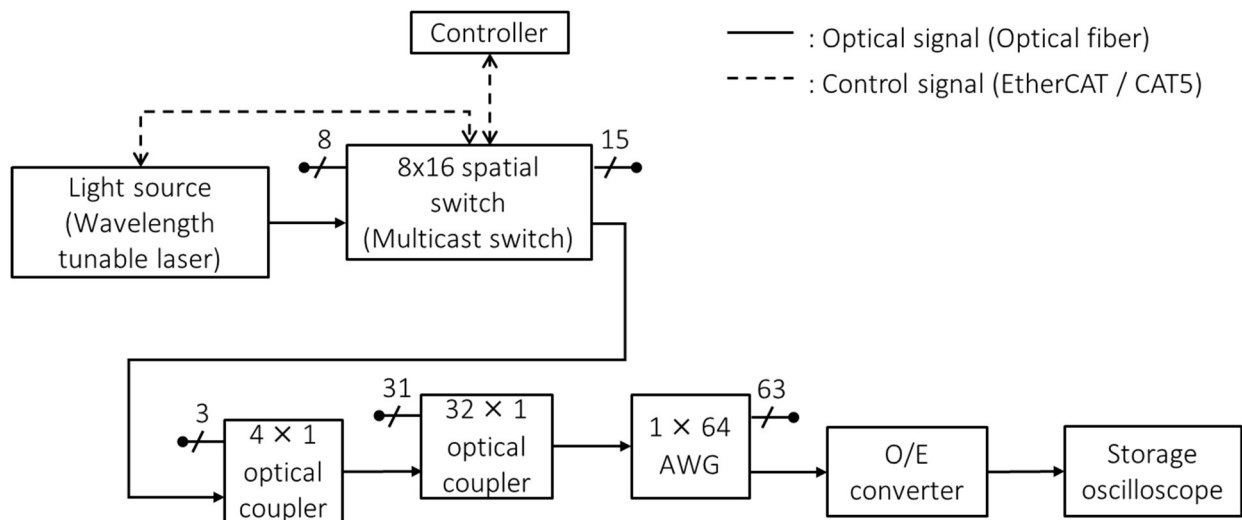


図 1.2.7-22 光物理層の高速スイッチング動作検証用の実験系

構築したスイッチシステムの模擬系を $100\mu\text{s}$ 級のスイッチング時間で動作させるには、制御対象となる波長可変光源と光セクタスイッチを同じタイミングで動作させることが必要不可欠である。これは制御ネットワークに EtherCAT を採用しているため、制御ネットワークの機能として実現可能である。EtherCAT は制御対象の機器を一筆書きで接続し、制御対象のとるべきステータスを変化の有無に関わらずマスタとなる機器から一定の間隔で送信する制御方式であり、多数の機器をタイミングをそろえて制御する際に、特に有効な方式といえる。

構築したスイッチシステム模擬系で、信号経路の変更パターンを全て数え上げると、(初期状態での入力ポート)×(初期状態での出力ポート)×(終状態での出力ポート)で算出できるので、フル実装の 1024 ポートシステムでは、1,000,000,000 通りのパターンが存在する。これは全ての場合を対象として動作検証を実施するには膨大な数であるため、経路変更のパターンを 3 種類に分類し、それぞれの典型例を対象に過渡応答を観測することとした。

1. 信号波長が変化し、光セクタスイッチの設定変更は行われない場合
2. 信号波長は変化させず、光セクタスイッチの設定変更を行う場合
3. 信号波長が変化し、光セクタスイッチの設定変更も行う場合

図 1.2.7-23 に取得した過渡応答波形を示す。グラフの X 軸は時間経過に対応し、時刻 0 に波長切り替えおよび光セクタスイッチの経路設定変更を開始している。図 1.2.7-23(a) は 1 つ目のパターン、すなわち波長可変波長光源の出力波長のみを変化させた場合である。波長可変光源の過渡応答は、始状態と終状態の組み合わせ毎に異なるため、過渡応答波形にはばらつきが生じる。ただし、観測した全ての場合において、波長チューニングが $100\mu\text{s}$ 以内に完了していることが確認できた。図 1.2.7-23(b) は 2 つ目のパターン、すなわち光セクタスイッチの設定変更を行った場合である。石英系 PLC スイッチエレメントの過渡応答はエレメント間のばらつきが小さく、多くの過渡応答波形が重なっている。OFF 状態から透過率が 90% になるまでの所要時間は $84.1 - 90.1\mu\text{s}$ 、ON 状態から透過率が 10% になるまでの所要時間は $67.6 - 71.5\mu\text{s}$ であった。信号の立ち上がり時間と立下り時間に違いが生じているのは、消光比を向上させるためにスイッチエレメントを 2 つ直列接続して使用しているためである。最後に図 1.2.7-23(c) に 3 つ目のパターン、すなわち波長可変波長光源の出力波長と光セクタスイッチの設定の両方を変更した場合を示す。観測された過渡応答波形は、図 1.2.7-23(a) と (b) を掛け合わ

せた波形と考えることができ、目標とする $100\mu\text{s}$ でのスイッチングが行われていることを示している。

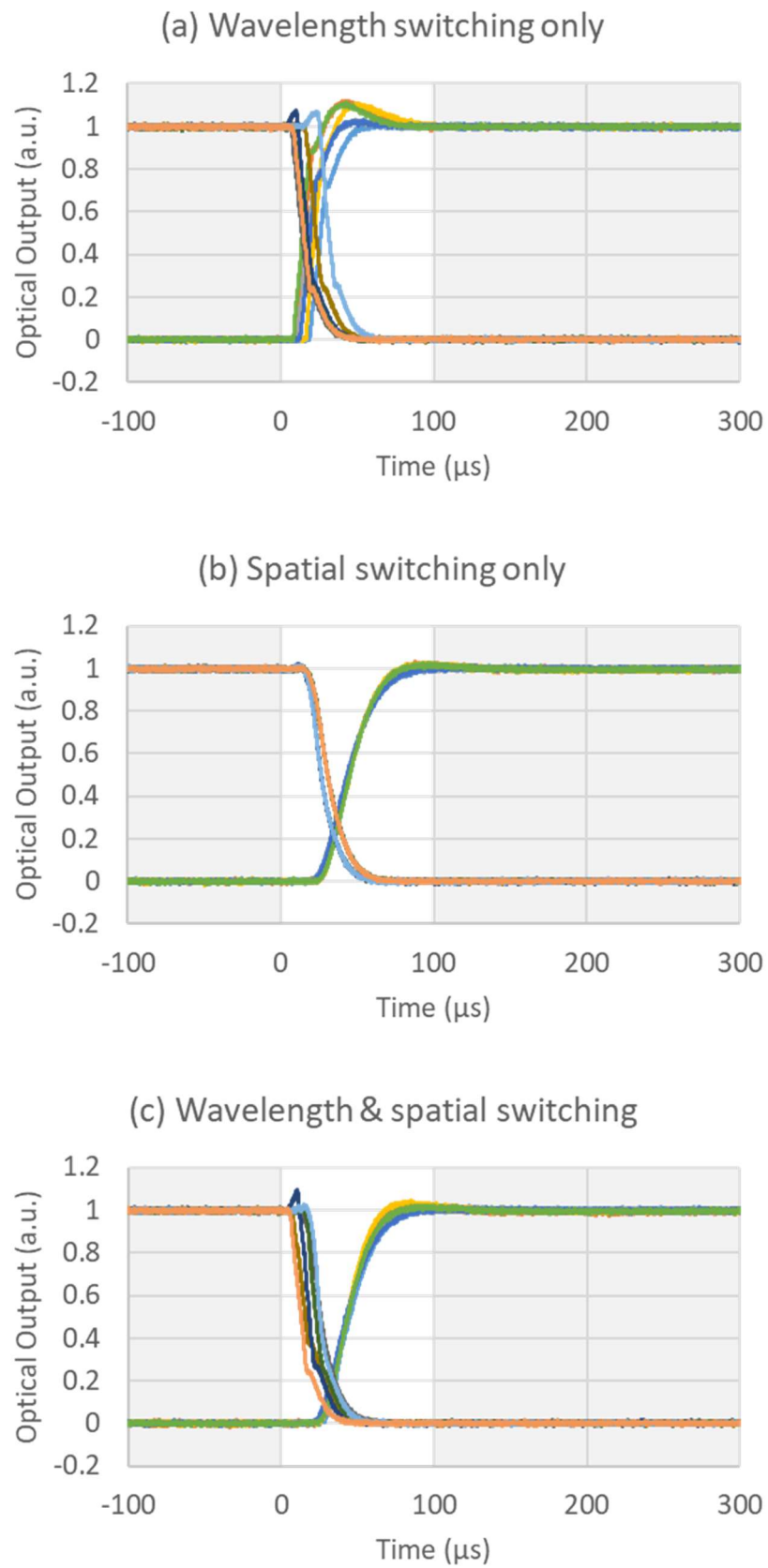


図 1.2.7-23 光物理層スイッチングの過渡応答波形

なお、本成果において実施した光物理層のスイッチングを実施した系では、スイッチング時間に寄与するデバイスが系の前半に位置することから、系の後半に位置するデバイス（特に光増幅器）も、100 μ s 級の光信号断と信号回復に対応する必要がある。また、全ての送信器から出力された信号を光カプラで合流させる際に、光増幅器で付加されるノイズも加算されるため S/N 比が劣化しやすい。但し、これらの課題はシステム化する際に光電ハイブリッドスイッチシステムへの適用を目指す光スイッチ構成を採用することにより、解消されるものと言える。

なお、光物理層の高速スイッチング動作に関して得られた研究開発成果については、光通信関連の著名な国際会議である OECC/PSC2022 において採択されている。(O. Moriwaki et al., “1,000-port Scale and 100- μ s Switching with Carrier-grade Devices,” in Proc. of OECC/PSC2022, paper WC2-3, 2022.)

＜光コアスイッチの静的な伝送特性＞

2022 年度には、光コアスイッチの検証機試作を完了した。試作した検証機における光デバイスの配置は、光物理層の高速スイッチング動作検証用の光スイッチ構成とは異なり、信号を順方向にたどる構成であり、図 1.2.7-24 に示すように、あらかじめ指定された波長の信号を出力する固定波長の送信器、波長合波器、光スプリッタ、光セクタスイッチ（空間光スイッチ）、波長可変フィルタ機能を備えた受信器の順に配置される光スイッチ構成であり、波長合波器から光セクタスイッチまでの区間が光コアスイッチに対応する。光コアスイッチに入力される信号は、波長合波器で波長多重された後、光コアスイッチの入出力ポート数の同じ数に分岐される。光セクタスイッチは、光コアスイッチの出力ポートに各 1 個ずつ設けられていて、入力ポート数は光コアスイッチに実装できる波長合波器の最大数であり、各入力ポートはそれぞれ異なる波長合波器に接続され、いずれの波長合波器に入力された信号を光受信器に送出するかを選択を行う。光コアスイッチの入出力ポート数は、波長合波器のポート数（＝合波できる信号数）と、光セクタスイッチのポート数（＝光コアスイッチに実装可能な波長合波器の最大数）との積であり、75GHz 間隔の 64 ポートの波長合波器と 16 ポートの光セクタスイッチを適用したので、最大 1,024 ポートまでの拡張が可能である。なお、波長可変フィルタ機能（デジタルコヒーレント信号の送受信器における局発光源の波長チューニングが相当）を備えた受信器における透過波長と、光セクタスイッチのポート選択を組み合わせることで、いずれの受信器も、任意のポートから入力された信号を受信することができる。

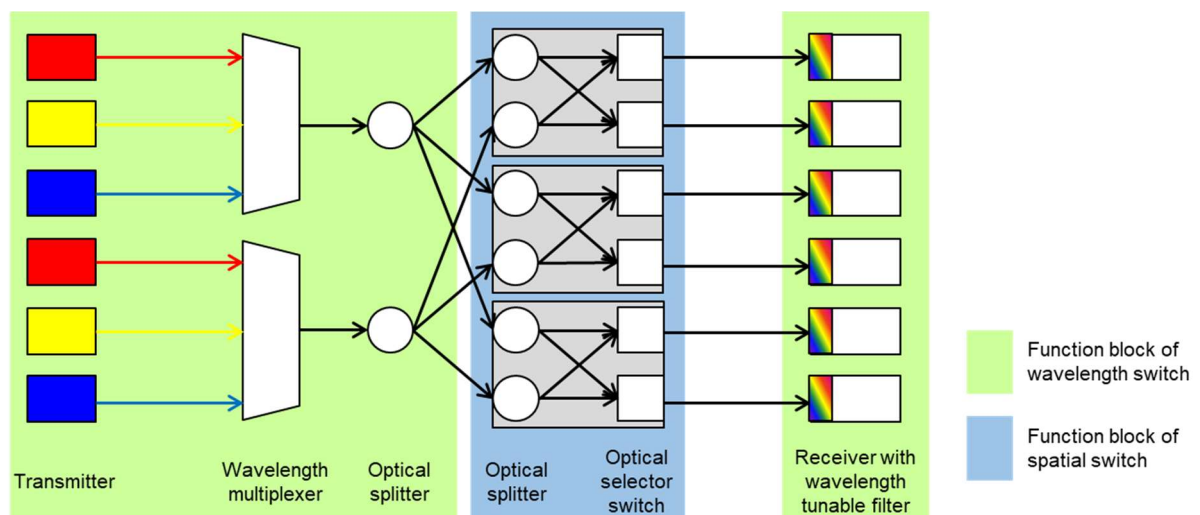


図 1.2.7-24 光コアスイッチの構成

図 1.2.7-25 は光コアスイッチの静的な伝送特性を評価するために構築した実験系の概要図である。信号源は、1 波長で 200Gbps (64Gbaud, DP-QPSK)の信号を送信可能なデジタルコヒーレント送信器である。適用した合波器は、検証機に使用した 75GHz 間隔の 64 波長対応のアレイ導波路回折格子である。光セレクトアスイッチのポート数は 16 であり、検証機に使用した空間光スイッチモジュールと同じく、16 個の 1 入力 8 出力光スプリッタと、8 個の 16 入力 1 出力光スイッチを集積してフルメッシュ接続した回路構成となっており、16 入力 1 出力のマルチキャストスイッチと同じ機能を有する光スイッチモジュールを適用した。損失補償用の光増幅器 (EDFA)は、検証機と同様に波長合波器での合波後と、32 分岐の光スプリッタでの分岐後の 2 か所に設置する構成とした。なお、光セレクトアスイッチで生じるコヒーレントクロストーク信号による (同一波長の信号が漏れることによって生じる) 信号劣化の評価を少数の機器で効率的に行うため、32 分岐の光スプリッタは 2 分岐のスプリッタと 16 分岐相当に設定した可変アッテネータ (VOA) による模擬構成とした。クロストーク信号の影響評価については、

1. 波長合波器において、評価対象の主信号波長に対し、隣接する波長の信号を入力した場合に生じる、隣接チャネルクロストークの影響
2. 光セレクトアスイッチにおいて、評価対象の主信号が入力されるポート以外のすべての入力ポートにも、主信号と同一波長の信号を入力した場合に生じる、コヒーレントクロストークの影響の 2 種類で実施した。

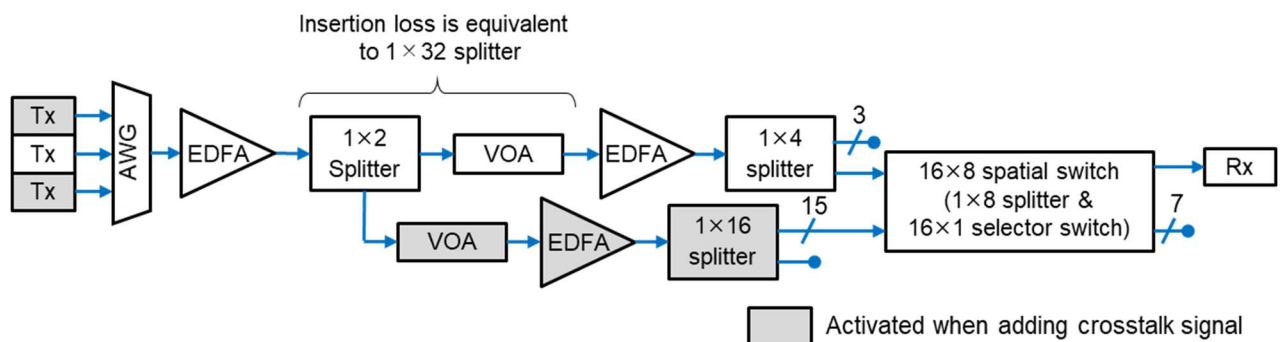


図 1.2.7-25 光コアスイッチの静的な伝送特性評価系

図 1.2.7-26 に実験結果として得られた静的な伝送特性を示す。横軸に受信器への入力光パワー、縦軸にエラー訂正前 (Pre-FEC) の符号誤り率 (Bit Error Rate: BER) をプロットしたグラフである。プロットされているデータは 4 種類あり、

- ① 送信器と受信器を、VOA を介して直結した場合 (Back to back)
- ② 主信号のみを光コアスイッチを経由させた場合
- ③ 評価対象の主信号波長に対し、隣接する波長の信号を入力した場合
- ④ 光セレクトアスイッチに、評価対象の主信号が入力されるポート以外のすべての入力ポートにも、主信号と同一波長の信号を入力した場合

である。

得られたグラフにおいて、①の Back to back を基準とすると、②～④の 3 本のプロットはほぼ重なっており、Back to back のプロットから約 1dB 右側にシフトしている。この得られた結果のうち、②～④の 3 本のプロットがほぼ重なっていることは、光コアスイッチの伝送において、隣接する波長の信号によって生じる混信も、同一波長の信号によって生じる混信も、その影響は無視できるレベルに

留まることが導かれる。また、光コアスイッチを経由することによって生じる信号劣化は存在しているが、その信号劣化は受信器への信号入力を 1dB 高くすることで補償できるものである。(光コアスイッチを経由することにより、約 1dB のパワーペナルティが生じている。) この 1dB のパワーペナルティが生じる要因としては、

- A) 光増幅器を適用したことによる雑音の重畳 (OSNR の劣化)
- B) 波長合波器を経由することによる、波長合波器のフィルタ効果

の 2 つの要因が挙げられる。これらの要因の切り分けを行うため、Back to back の信号に、ASE

(amplified spontaneous emission) 光を加算することで OSNR を変化させ、横軸に OSNR、縦軸に Pre-FEC BER をプロットしたグラフを作成した。これを図 1.2.7-27 に示す。OSNR が 30dB を下回ると OSNR の変化と Pre-FEC BER の変化が敏感に連動する領域となるが、静的な伝送特性評価系を通過させた時の OSNR の実力値(30dB 台の半ば)においては、OSNR の変化に対して Pre-FEC BER の変化は鈍感であり、1dB のパワーペナルティを生じる要因とはならない。従って、1dB のパワーペナルティが生じる要因は、B) の「波長合波器を経由することによる、波長合波器のフィルタ効果」であるものと推定される。なお、詳細にパワーペナルティの要因分析を実施したが、図 1.2.7-26 の静的な伝送特性のグラフは、得られた全てのプロットが十分なレベルの光信号 (例えば信号当たり -18dBm) を入力すれば、エラー訂正の限界である $\text{Pre-FEC BER} = 2.0 \times 10^{-2}$ よりも低い誤り率で信号を伝送できることを意味しており、光コアスイッチ検証機を介した通信が問題なく実施できることを確認することができた。

なお、光コアスイッチの静的な伝送特性は、光通信関連の最も知名度の高い学術会議である OFC2023 において採択された研究開発成果の一部を構成している。(O. Moriwaki et al., “Sub-ms Data Recovery at 1,000-port Scale Optical Switch Developed with Customized Practical Devices,” to be presented at OFC2023.)

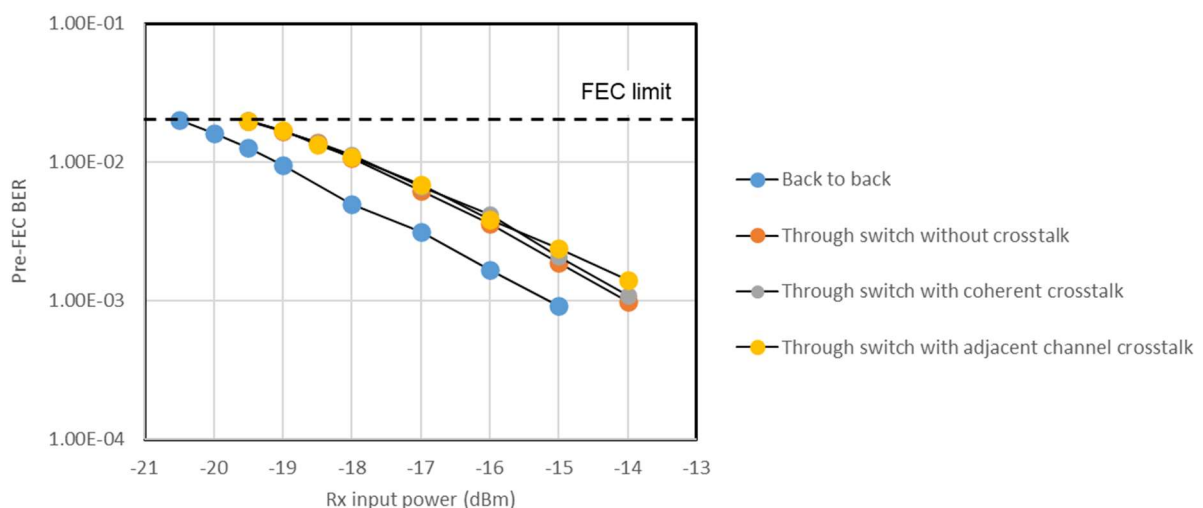


図 1.2.7-26 静的な伝送特性

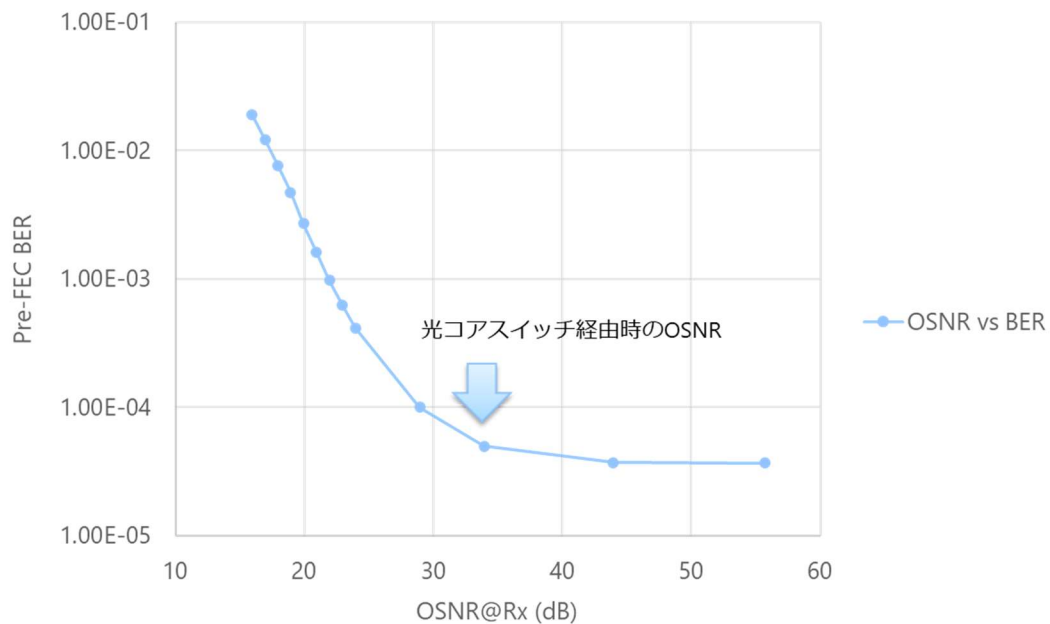


図 1.2.7-27 OSNR と Pre-FEC BER の関係

<まとめ>

以上の報告にて記載の通り、研究開発項目③「光コアスイッチの研究開発」において、1000 ポート以上の入出力を備える光コアスイッチの設計および原理検証に必要な実装を行い、他機能部との連携動作を実現するという目標を完遂することができた。

設計段階における重点とした、①光信号伝送の観点の設計、②装置の外形など実装観点の設計、③他の機能部との連携観点の設計の3点についても、設定したマイルストーンを着実にクリアすることによって、研究開発項目間を連携させる研究開発項目⑤「光電ハイブリッドスイッチシステム実証」への検証機提供を順調に進めることができた。①の光信号伝送観点の設計において、光 ToR スwitch 内の光波長送受信器の許容範囲と整合させること、②の実装観点の設計において、フル実装時の装置サイズを実用上適切なサイズとなるよう設計すること、③の他機能部との連携設計において、コントローラとの間で制御情報等を送受するインターフェースや通信プロトコルを規定すること、特にシステム全体を適切に動作させる観点から、特に遅延時間の低減に配慮した設計であることを達成することができている。

光コアスイッチを構成するキーデバイスとして、特に注力して研究開発を実施した空間光スイッチに関する研究開発成果、発展的な課題として実施した、試作した光コアスイッチと研究開発項目②にて試作した高速波長可変光源を用いた、光物理層の高速スイッチング動作に関する研究開発成果については、それぞれ光通信関連の著名な国際会議にて論文が採択されており、学術的にも高い評価が得られているものとする。

なお、本研究開発項目の遂行過程にて、関連する特許を5件出願した。

また、国内にて開催された研究会および学会総合大会にて4件の招待講演依頼を受け、成果の周知・普及にも取り組んだ。