

博士學位論文要旨等の公表

学位規則（昭和28年4月1日文部省令第9号）第8条に基づき、当該博士の学位の授与に係る論文の内容の要旨及び論文審査の結果の要旨を公表する。

氏名 諭 弘歴

学位の種類 博士（理工学）

報告番号 甲第28号

学位授与の要件 学位規程第4条第2項該当

学位授与年月日 令和5年3月25日

学位論文題目

光集積回路へのインターコネクションの超高密度化ならびに
その実装自動化に関する研究

論文審査委員 主査 教授 吉本 直人

委員 教授 福田 浩

委員 教授 江口 真史

学 位 論 文 要 旨

理工学研究科 理工学専攻

学籍番号：D2200010

氏 名： 喻 弘 歴

光集積回路へのインターコネクションの超高密度化ならびに その実装自動化に関する研究

要旨：急速に増加するインターネット通信量需要に対し、光集積回路(PIC)技術によるデータセンター内通信機器の大容量化、高密度化や省エネルギー化が期待されている。それに伴い、通信機器の入出力光インターフェースとその内部に配置されているPICとを結ぶ光インターコネクションの高密度化も重要となってきた。従来の光インターコネクションの設計手法では、既存のシングルモードファイバ(SMF)の外径サイズをベースにして行われてきた。このため、図1(a)に示すようにSMFに比べて狭小なPIC側の入出力光ポート間隔をSMFに合わせて拡大しなければならない。その結果、PIC内に曲線導波路などを用いたなコンバージョンエリアが必要となるため、PICの高密度化のポテンシャルを十分に活かすことができない。今後、PICの入出力ポートの増大が進展することが予想され、この課題の解決が求められている。また、一方でPICを普及されるためには、PICの入出力ポートと光ファイバとを光結合する実装工程の自動化や短時間化などによる低コスト化が課題となっている。

これら課題を解決するために、本論文では、PICの入出力ポートとそれに接続する光ファイバとを含めた光インターコネクションシステム全体の「高密度化」と、その実装工程の「低コスト化」を実現する手法を提案・実証することを目的とする(図2)。

まず、高密度化を解決する方策として、従来のSMFをベースとした設計手法から、図1(b)に示すPICをベースとした全く新しい光インターコネクションの設計手法に転換した。これにより、図1(a)と比べ、PICの高密度化のポテンシャルを引き出すことが可能となる。これを実現するためには、光ファイバのサイズをPICのサイズに変換する機能を具備することが必要である。そこで、既存の光ファイバ線引き工程を活用することによって、図1(b)に示すとおり光ファイバの外径、コア間ピッチ、ならびにスポットサイズを同時に変換できることに着目した。この特徴を用いて、大きなサイズ変換が可能なダブルコア構造を有するマルチコアファイバ(M-DCF)を提案した。図3に設計したM-DCFを示す。中心のファーストコア外部にセカンドコア層があるダブルコア構造とすることで、シングルコアでは不可能な変換倍率が可能となった。また、マルチコア化することにより、より高密度なファイバコア配置と外径の細径化が両立できることを示した。さらに、設計した8チャンネルM-DCFを試作し、外径はSMFとはほぼ同等ながら、コア数は8個になり、PICの集積度を8倍向上させることが可能であることを示した。試作したM-DCFの挿入損失は平均0.2dB以下、各チャンネル間クロストーク-50dB以下と良好な光学性能が得られた。これにより、提案した高密度M-DCFが十分な実用性があることを示した。

次に、実装工程の低コスト化を解決する方策として、従来の信号光のパワーをモニターする手法では

なく、可視光を入力し、その導波状態に関する情報を CCD カメラで取得する手法を提案した。これにより、狭い領域に局在している光パワーを捕捉するため、長い調心時間が必要であったのに対し、広い領域で可視光の導波状態を捕捉できるため、調心時間の短縮化が期待できる。また、取得した可視光の画像と光ファイバの位置情報を関連付けることによって、自動化が可能となる。そこで、光入出力ポートであるグレーティングカップラ (GC) に対する光ファイバの位置毎に可視光の導波状態に関する画像を収集し、それを基に機械学習を行った。その結果、画像情報のみを用いるだけで、最適結合位置からのずれを高い精度で推測できることを確認した。その精度は87%であり、GCの有無だけの推測では、ほぼ100%の結果を得られた。これらの結果により、提案技術によって、GCとの調心時間の短縮化ならびに工程の自動化の可能性が高いことを示した。また、将来に向けて、光実装工程の遠隔からのオペレーションへの展開にも期待できることを示した。

最後に、超高密度PICインターコネクション向けのコンパクトGC (CGC) を有するPICの設計・試作を行い、提案技術の総合検証を行った。GCサイズは従来比の半分以下、GC間距離を125 μ mから35 μ mまで高密度化を行った。提案した調心方法を用いてCGCとM-DCFとの結合実験を行い、良好な結果が得られた。

これらの研究結果から、本研究の提案技術は、今後更なるPIC光インターコネクションの大容量化、高密度化、ならびにPICの低コスト化による普及に対して大きな貢献が期待できる。

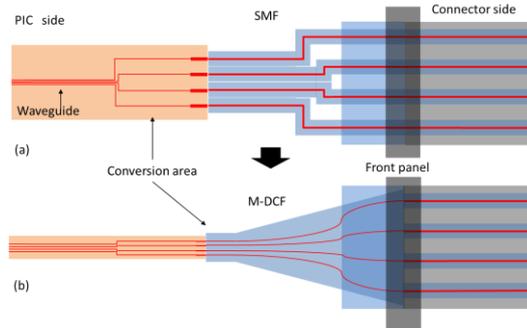


図1 超高密度光インターコネクションのイメージ図

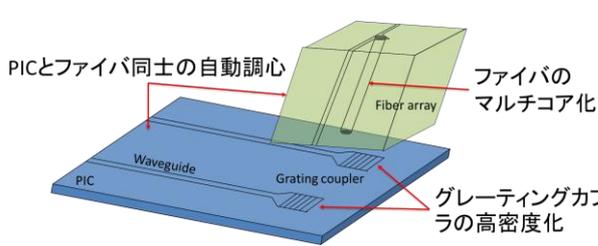


図2 高密度化・低コスト化の3要素

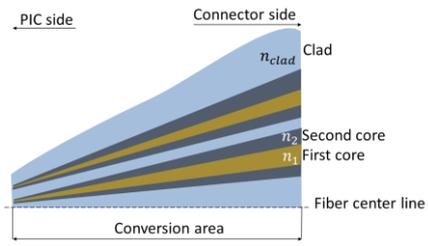


図3 M-DCFのコンセプト

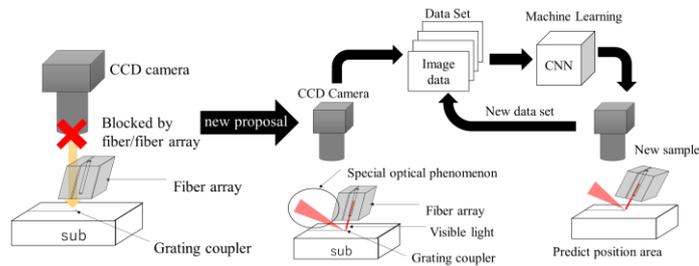


図4 可視光と機械学習を利用した自動調心

論文審査の結果の要旨

本論文の取り扱う分野は、近年注目を集めている「光集積回路」の周辺技術である光伝送路の接続技術、すなわちインターコネクション技術であるが、光集積回路の実用化・普及には不可欠の技術であり、その技術的・社会的意義は大きい。特に、本論文で着目した「超高密度化」は、増大するデータセンター内の省スペース化や省電力化などの要請から喫緊の課題となっている。また、高密度化によって難易度が増す光実装工程を「自動化」することは、光集積回路の普及に向けた低コストに重要な技術である。

申請者は、これらの課題に対して、3つの独創的なアイデアを提案し、実証した。1つ目は、光集積回路の高密度化された入出力ポートに接続可能な新たな光ファイバ構造の提案である。具体的には、2つのコア層を設けることにより光閉じ込めに関する設計自由度を確保することによって、従来の光ファイバに比べて外形寸法を1/10に低減化することが可能となった。これにより、大幅な高密度化が実現可能となる。2つ目は、光集積回路の高密度化された入出力ポートの配置構造に関する提案である。具体的には、光集積回路上の光入出力部の配置を高密度化された先述の光ファイバの導波構造と一致させるとともに、その入出力部の形状を極小化することによって、光集積回路上の収率を1/5に低減化することが可能となった。3つ目は、先述の高密度化された光ファイバと高密度化された光集積回路の入出力部を簡易に光結合する手法について提案を行った。具体的には、可視光を用いてその散乱や導波状態を画像認識することによって、光ファイバと入出力部の位置関係を推定することで、信号光の光パワーを検出して光軸調心を行っていた従来手法に比べ格段に調心時間の短縮が可能であることを示した。さらに、画像認識に機械学習をさせることにより調心工程の自動化の可能性を示した。以上のように、いずれも学術的、実用的に価値あるものである。

上記学位論文の内容をもとに、40分間のプレゼンテーションを行った後、質疑応答を行った。プレゼンテーションは、上記3つのアイデアを中心に簡潔に要点がまとめられていた。質疑応答では以下のような内容の議論を行った。

- ・ 高密度化の要求条件と目標
- ・ 本提案領域における機械学習の有効性
- ・ 画像認識された可視光の振る舞いに対する再現性
- ・ 機械学習に畳み込みニューラルネットワークの手法を用いた妥当性
- ・ 調心技術の拡張性（マルチチャンネルへの適用性やその場合の回転補正を方法など）

いずれの項目に対しても、しっかりとした技術的見識から一般的な回答に加え、自らの意見を述べていた。

以上、申請者は、技術的な見識や関連技術に対する視野の広さ、また社会課題に対する技術の位置付けの理解などいずれにおいても高いレベルに達しており、理工学の学位取得に相応しい人物であると考えます。

論文の査読とその内容についてのプレゼンテーションならびにその技術的内容に関する質疑応答を行った後、「理工学」学位に資する幅広い見識を見るため、主査・副査の委員にて口頭試問を行った。「その結果、合格」の結論を得た。以下に、その理由について示す。

口頭試問において、質疑応答にあった内容を以下に示す。

- ・ 従来光ファイバにおける高密度の制限要因について
- ・ ダブルコア構造の光導波路としての物理的な意義と製造性について
- ・ マルチチャネルを光軸合わせする場合の留意点と実用化に向けた課題について
- ・ 集積光回路としての光スイッチの現状と今後の展開について
- ・ 光集積回路上の収率改善に対する具体的なインパクトについて
- ・ 端面結合と表面結合それぞれの接合強度について
- ・ 光軸アライメントに機械学習を設けることによる技術的制約、技術的限界について
- ・ さらなる高密度において、波長多重技術など他技術の可能性について

いずれの項目に対しても、しっかりとした技術的見識と社会人での就業経験による検知から、いずれも的確に回答するとともに、関連技術と業界についての今後の動向について自らの考えを述べていた。

以上、申請者は自らの技術的成果のみならず、その技術の社会から要求されている条件、その技術の適用範囲・技術的限界、オルタナティブな技術への洞察・理解、技術の導入が社会に与える効果などを論理的かつ平易に説明できる能力を有しており、その人間性も併せて理工学の学位取得に相応しい人物であると考えます。