

Polymer Optical Waveguide Link Design for High-Speed and High-Density On-Board Interconnects

March 2012

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy in Engineering



Keio University

Graduate School of Science and Technology
School of Integrated Design Engineering

Hsu, Hsiang-Han

論文要旨

コンピュータの演算処理速度の更なる向上ならびに消費電力の低減を目指し、極めて短距離のデータ伝送にまで光通信技術を導入する、光インターコネクタ技術への関心が高まっている。特にチップ間インターコネクタには、多モードポリマー並列光導波路をプリント基板に埋め込んだ光配線板の実現が期待されている。これまで研究されてきたポリマー並列光導波路の多くは、コア部の屈折率が均一な段階屈折率 (Step-Index: SI) 型構造であったために、今後のオンボード光インターコネクタの要求仕様を満たすためには、導波路の特性面で様々な問題が懸念されている。そのため、光導波路リンク全体としての特性解析を行うことで、各素子を最適設計することが必要となってきた。本研究では、光線追跡法、ならびにビーム伝搬法 (Beam Propagation Method: BPM) を用いて多モード光導波路リンクの特性を理論的に解析し、より高速・高密度インターコネクタを実現する光導波路構造 (コア径, 開口数, 屈折率分布) を、定量的に明らかにしている。第 1 章は序論であり、光インターコネクタ技術に関するこれまでの研究と課題を概説し、本研究の目的と意義を示している。

第 2 章では、光線追跡法を用いた導波路内の光波伝搬の解析方法について概説し、SI 型及び屈折率分布 (Graded-Index: GI) 型の多モード光導波路中を伝搬する光線の軌跡の計算結果を示している。また、多モード光導波路の特性解析において極めて重要となる、信号光の励振条件の考え方、並びに導波路構造のゆらぎがもたらす特性劣化の見積もりに関して、モンテカルロ法を用いた解析手法を導入することで対応できることを示している。

第 3 章では、波動光学に基づく差分 (Finite Difference: FD) ビーム伝搬法 (FD-BPM) を用いた導波路特性解析手法について述べている。具体的には、光源 - 導波路、導波路 - 検出器間に空隙が存在する場合の結合損失、異なる励振条件や導波路内の光散乱により生じる挿入損失を算出する手法を示している。第 4 章では、プリファーム法を用いて GI 型ポリマー並列光導波路を実際に試作し、その伝搬損失、結合損失、チャンネル間クロストークなどの特性評価を行なっている。さらに、得られた実験結果と、第 3 章で示した光線追跡法による計算結果とを比較し、本研究で用いた理論解析手法の妥当性について考察を行なっている。一方、導波路及び他の光学素子を接続して得られる、光導波路リンク全体の特性に関するシミュレーションには、より高精度に計算を行うことのできる FD-BPM 法を導入している。その結果、光導波路リンクのパワーバジェットを低減できる光導波路構造 (コア径, 開口数, 屈折率分布) を定量的に導き出している。

第 5 章は本論文の結論である。本研究を通して、本論文の著者は、様々な構造の多モード光導波路中の光波伝搬挙動、及び光導波路リンク全体としての特性を数値解析する手法を確立しており、実際に光配線板をオンボードインターコネクタへ応用する上で、本解析手法が極めて有効なツールとなると結論づけている。

ABSTRACT

The increasing requirement of calculation power provided by high performance computers (HPCs) leads a trend in board level data communication from electrical to optical interconnections. Currently, much attention is focused on chip-to-chip data exchange realized with polymer parallel optical waveguides (PPOWs) integrated on printed circuit boards. The purpose of this research is to model the behavior of lightwave in PPOWs for the application of on-board optical interconnection. Particularly, the advantage of graded-index (GI) core PPOWs over the step-index (SI) core counterpart for high-speed and high-density wiring is quantitatively discussed by simulating the optical properties of PPOWs.

Chapter 1 is the introduction for short range optical interconnection and motivation of this research.

In Chapter 2, the author addresses the optical characteristics of waveguides with ray optics. Compared to various theoretical approaches based on wave optics to analyze optical waveguides, ray optics is less general and approximated. However, for this research, ray optics not only gives us more clear physical picture but is comprehensive, since PPOWs support large number of propagating modes (multimode waveguide). In this chapter, the ray trajectories in SI and GI media are described first. Next, the launching condition generated by Monte-Carlo method and imperfections in core area are discussed in order to make the model more practical.

In Chapter 3, the author starts from the scalar wave equation to describe the plane wave propagation inside optical waveguides. Then, the finite difference beam propagation method (FD-BPM) is applied to waveguide analysis, in order to simulate the optical loss caused by air gap at waveguides connections. In addition, the optical loss and inter-channel crosstalk caused by biased launching conditions and light scattering are simulated using the FD-BPM. All of the features can be realized by the equations mentioned in this chapter, so that the self-developed computer programs based on wave optics contribute to involve the desired considerations with higher degree of freedom.

In the first two sections of Chapter 4, two types of GI waveguides are experimentally fabricated using the preform method. Then, the fabricated waveguides are characterized, and the measured optical properties are compared with those simulated using the ray tracing method. Furthermore, the theoretical model is extended from each optical device to the total optical link. The behavior of lightwave inside a typical link model is simulated totally using the FD-BPM. All of the calculation results in this chapter show more or less coincidence with the observed

phenomena.

In Chapter 5, the author summarizes the prospects and concerns of proposed methods, and discuss about the future plans for successors. Through this research, the author develops numerical ways which are started from fundamental equations, and then the author shows the flexibility of the simulation models for the application of short range optical interconnection utilizing PPOWs. The development of these numerical ways can not only apply to the high speed optical interconnection, but for the next generation silicon photonics applications.