



Title	Ultra-broadband Silicon Waveguides for Terahertz Applications
Author(s)	Koala, Alex Sylvestere Desire Ratmalgre
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92206
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (KOALA RATMALGRE ALEX SYLVESTERE DESIRE)	
Title	Ultra-broadband Silicon Waveguides for Terahertz Applications (テラヘルツ応用のための超広帯域シリコン導波路)
<p>A lot of research effort has been dedicated to the terahertz (THz) range covering frequencies from 0.1 to 10 THz. This is because of the huge available spectral bandwidth that should enable high communication channel capacities. It can be conceivable to bring to daily use various applications for up to 1 Tbit/s in wireless communications links, hidden object detection, and space exploration. These applications are needed for the development of emerging applications and services including virtual immersive experiences, high computational data centers, and advanced connectivity for faster real-time streaming services and more coverage worldwide. For the nascent technologies to become commonplace in our daily lives, THz range wave guiding interconnects are indispensable. Low-loss and broadband silicon (Si) waveguides have reported loss < 0.1 dB/cm and bandwidth of ~ 120 GHz in 0.26 THz – 0.39 THz. The bandwidth can further be enhanced to unlock high-data rates applications. In addition, there is an ever-growing need for short-range low-loss interconnects for inter-/intra-chip/board communication applications.</p> <p>This dissertation focuses on the development of low-loss Si waveguide platforms that will serve as a canvas for the development of THz imaging and communications. This study explores in detail the development of extremely low-loss and broadband Si waveguides in the WR-1 band (0.75 – 1.1 THz) to target higher frequencies. Previous work has focused on frequencies up to 0.75 THz. Extremely broadband dielectric all-Si waveguides are designed, fabricated, and tested. We analyze the performance of two effective-medium (EM) waveguides, and unclad waveguides. These waveguides have a record-setting 3-dB bandwidth of 350 GHz. The propagation loss is as low as < 0.1 dB/cm and 0.15 dB/cm for EM waveguide and unclad waveguide, respectively.</p> <p>In addition, fundamental design practices and measurement techniques that can be extended to the design and analysis of dielectric waveguides at high frequencies > 1 THz are established. Compact and packaged waveguide modules are designed and tested, revealing a loss improvement of 8 dB (EM waveguide) and 6 dB (unclad waveguide) compared to the metallic hollow waveguide. The results advocate that all-Si waveguide modules can replace metallic waveguides for interconnecting with the test equipment. Subsequently, using the waveguide module, THz imaging with a high resolution of 0.28 mm is demonstrated.</p> <p>All-Si waveguides are employed to double the data rates by implementing orthogonal E_x and E_y dual polarizations. Such dual polarization operation is not supported by metallic hollow waveguides. Data rates of 24 Gbit/s (E_x) and 22 Gbit/s (E_y) are recorded. In addition to dielectric waveguides, THz hollow-core fiber is investigated for the realization of short-range applications that require some degree of flexibility. The fundamentals of THz hollow-core fibers including the multi-mode operation, the dispersion, and the loss are analyzed. Losses of 10 dB/m and 15 dB/m for 1 mm, and 0.7 mm core fibers, respectively, are confirmed in experiments. An all-Si linear taper interface for coupling with THz fiber is implemented with a coupling efficiency of >60 %. Other types of interfaces are systematically investigated: rod array and semi-hemispherical lens interfaces offer 80-% and 40-% coupling efficiencies, respectively. THz fiber link communication with dual polarization is demonstrated, achieving data rates of 22 Gbit/s, and 18 Gbit/s for the E_x and E_y polarizations, respectively.</p> <p>The achieved results show that ultra-broadband Si waveguides could lead to the realization of more advanced intra-/inter-chip or board communications using THz waves.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (KOALA RATMALGRE ALEX SYLVESTERE DESIRE)		
	(職)	氏名
論文審査担当者	主査 教授	永妻忠夫
	副査 教授	眞田篤志
	副査 教授	向山敬
	副査 准教授	富士田誠之

論文審査の結果の要旨

近年、0.1 THzから10 THzの周波数帯の電磁波、テラヘルツ (THz) 波に多くの関心が集まっている。これは、非常に広い周波数スペクトル帯域を利用した大容量の無線通信、有線通信、センシング、計測等の幅広い産業応用が期待されているからである。また、THz応用システムにおいては、デバイス、チップ、ボード間を接続するための低損失広帯域インターフェクション技術が重要である。例えば、低損失広帯域のシリコン (Si) 導波路として、これまでに0.26 THz～0.39 THzの周波数において、0.1 dB/cm以下の損失と120 GHzの帯域幅が報告されている。

本論文では、THz通信システムやイメージングシステムのためのプラットフォームとして用いる低損失広帯域Si導波路について、その高性能化や多機能化を目指して行った研究をまとめている。まず、WR-1バンド (0.75 THz～1.1 THz) で動作するSi導波路に関して、低損失化と広帯域化のための設計手法と評価手法を確立した。実際に試作を行い、350 GHzという記録的な3 dB帯域幅を実証し、設計の妥当性を明らかにした。有効媒体導波路とアンクラッド導波路の2種類の導波路について性能比較を行い、それぞれ、0.10 dB/cmと0.15 dB/cmの低損失性能を実現した。

また、上記のWR-1バンド導波路を導波管インターフェースのモジュールに実装し、従来の金属中空導波管と比較した結果、有効媒質導波路とアンクラッド導波路で、それぞれ、8 dBおよび6 dBの損失低減を実現した。さらに、Y分岐の機能を有するモジュールを開発し、空間分解能として、0.28 mmの超高解像度のイメージングに成功した。次に、直交する2つの偏波成分を伝送できるSi導波路と、それによる偏波合成・分離回路の設計技術についての検討を行った。300 GHz帯で動作する導波路ならびに回路を試作し、通信に適用した結果、直交する2偏波成分に対し、24 Gbit/sおよび、22 Gbit/sのデータレートを記録した。

最後に、フレキシブルなTHz中空コアファイバについて、モード、分散、損失特性ならびに2つの直交する偏波伝送特性について分析した。当該ファイバと金属導波管とのインターフェース回路をSi導波路で実現し、中空ファイバの伝送損失を実験的に評価し、通信応用へと展開した。その結果、コア径1 mmおよび、0.7 mmの300 GHz帯THzファイバについて、伝送損失として、それぞれ、10 dB/mおよび、15 dB/m、データレートとして、それぞれ、22 Gbit/sおよび、14 Gbit/sの性能を実証し、高解像度非圧縮映像の伝送実験に成功した。

以上、1 THz帯までにおけるSi導波路の超広帯域動作と偏波多重分離回路、分岐回路といった機能回路を実現し、さらに、中空コアファイバと融合することにより、将来のTHzシステムのプラットフォームとしての可能性を示したことは、工学的に極めて大きなインパクトを与えるものであることから、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。