

Integrated Microwave Photonic Processors using Waveguide Mesh Cores

Integrated microwave photonics changes the scaling laws of information and communication systems offering architectural choices that combine photonics with electronics to optimize performance, power, footprint and cost. Application Specific Photonic Integrated Circuits, where particular circuits/chips are designed to optimally perform particular functionalities, require a considerable number of design and fabrication iterations leading to long-development times and costly implementations.

A different approach inspired by electronic Field Programmable Gate Arrays is the programmable Microwave Photonic processor, where a common hardware implemented by the combination of microwave, photonic and electronic subsystems, realizes different functionalities through programming. Here, we propose the first-ever generic-purpose Microwave Photonic processor concept and architecture. This versatile processor requires a powerful end-to-end field-based analytical model to optimally configure all their subsystems as well as to evaluate their performance in terms of the radiofrequency gain, noise and dynamic range. Therefore, we develop a generic model for integrated Microwave Photonics systems. The key element of the processor is the reconfigurable optical core. It requires high flexibility and versatility to enable reconfigurable interconnections between subsystems as well as the synthesis of photonic integrated circuits. For this element, we focus on a 2-dimensional photonic waveguide mesh based on the interconnection of tunable couplers. Within the framework of this Thesis, we have proposed two novel interconnection schemes, aiming for a mesh design with a high level of versatility. Focusing on the hexagonal waveguide mesh, we explore the synthesis of a high variety of photonic integrated circuits and particular Microwave Photonics applications that can potentially be performed on a single hardware. In addition, we report the first-ever demonstration of such reconfigurable waveguide mesh in silicon. We demonstrate a world-record number of functionalities on a single photonic integrated circuit enabling over 30 different functionalities from the 100 that could be potentially obtained with a simple seven hexagonal cell structure. The resulting device can be applied to different fields including communications, chemical and biomedical sensing, signal processing, multiprocessor networks as well as quantum information systems. Our work is an important step towards this paradigm and sets the base for a new era of generic-purpose photonic integrated systems.

Los dispositivos integrados de fotónica de microondas ofrecen soluciones optimizadas para los sistemas de información y comunicación. Generalmente, están compuestos por diferentes arquitecturas en las que subsistemas ópticos y electrónicos se integran para optimizar las prestaciones, el consumo, el tamaño y el coste del dispositivo final. Hasta ahora, los circuitos/chips de propósito específico se han diseñado para proporcionar una funcionalidad concreta, requiriendo así un número considerable de iteraciones entre las etapas de diseño, fabricación y medida, que origina tiempos de desarrollo largos y costes demasiado elevados.

Una alternativa, inspirada por las FPGA (del inglés Field Programmable Gate Array), es el procesador fotónico programable. Este dispositivo combina la integración de subsistemas de microondas, ópticos y electrónicos para realizar, mediante la programación de los mismos y sus interconexiones, diferentes funcionalidades. En este trabajo, proponemos por primera vez el concepto del procesador de propósito general, así como su arquitectura. Además, con el fin de diseñar, optimizar y evaluar las prestaciones básicas del dispositivo, hemos desarrollado un modelo analítico extremo a extremo basado en las componentes del campo electromagnético. El modelo desarrollado proporciona como resultado la ganancia, el ruido y el rango dinámico global para distintas configuraciones de modulación y detección, en función de los subsistemas y su configuración. El elemento principal del procesador es su núcleo óptico reconfigurable. Éste requiere un alto grado de flexibilidad y versatilidad para reconfigurar las interconexiones entre los distintos subsistemas y para sintetizar los circuitos para el procesado óptico. Para este subsistema, proponemos el diseño de guías de onda reconfigurables para la creación de mallados bidimensionales. En el marco de esta tesis, hemos propuesto dos nuevos nodos de interconexión óptica para mallas reconfigurables, con el objetivo de obtener un mayor grado de versatilidad. Una vez escogida la malla hexagonal para el núcleo del procesador, hemos analizado la configuración de un gran número de circuitos fotónicos integrados y de funcionalidades de fotónica de microondas. El trabajo se ha completado con la demostración de la primera malla reconfigurable integrada en un chip de silicio, demostrando además la síntesis de 30 de las 100 funcionalidades que potencialmente se pueden obtener con la malla diseñada compuesta de 7 celdas hexagonales. Este hecho supone un record frente a los sistemas de propósito específico. El sistema puede aplicarse en diferentes campos como las comunicaciones, los sensores químicos y biomédicos, el procesado de señales, la gestión y procesamiento de redes y los sistemas de información cuánticos. El conjunto del trabajo realizado representa un paso importante en la evolución de este paradigma, y sienta las bases para una nueva era de dispositivos fotónicos de propósito general.

Els dispositius integrats de Fotònica de Microones ofereixen solucions optimitzades per als sistemes d'informació i comunicació. Generalment, estan compostos per diferents arquitectures en què subsistemes òptics i electrònics s'integren per a optimitzar les prestacions, el consum, la grandària i el cost del dispositiu final. Fins ara, els circuits/xips de propòsit específic s'han dissenyat per a proporcionar una funcionalitat concreta, requerint així un nombre considerable d'iteracions entre les etapes de disseny, fabricació i mesura, que origina temps de desenrotllament llargs i costos massa elevats. Una alternativa, inspirada per les FPGA (de l'anglès Field Programmable Gate Array), és el processador fotònic programable. Este dispositiu combina la integració de subsistemes de microones, òptics i electrònics per a realitzar, per mitjà de la programació dels mateixos i les seues interconnexions, diferents funcionalitats. En este treball proposem per primera vegada el concepte del processador de propòsit general, així com la seua arquitectura. A més, a fi de dissenyar, optimitzar i avaluar les prestacions bàsiques del dispositiu, hem desenrotllat un model analític extrem a extrem basat en els components del camp electromagnètic. El model desenrotllat proporciona com resultat el guany, el soroll i el rang dinàmic global per a distintes configuracions de modulació i detecció, en funció dels subsistemes i la seua configuració. L'element principal del processador és el seu nucli òptic reconfigurable. Este requereix un alt grau de flexibilitat i versatilitat per a reconfigurar les interconnexions entre els distintos subsistemes i per a sintetitzar els circuits per al processat òptic. Per a este subsistema, proposem el disseny de guies d'onda reconfigurables per a la creació de mallats bidimensionals. En el marc d'esta tesi, hem proposat dos nous nodes d'interconnexió òptica per a malles reconfigurables, amb l'objectiu d'obtindre un major grau de versatilitat. Una vegada triada la malla hexagonal per al nucli del processador, hem analitzat la configuració d'un gran nombre de circuits fotònics integrats i de funcionalitats de fotònica de microones. El treball s'ha completat amb la demostració de la primera malla reconfigurable integrada en un xip de silici, demostrant a més la síntesi de 30 de les 100 funcionalitats que potencialment es poden obtindre amb la malla dissenyada composta de 7 cèl·lules hexagonals. Este fet suposa un rècord enfront dels sistemes de propòsit específic. El sistema pot aplicar-se en diferents camps com les comunicacions, els sensors químics i biomèdics, el processat de senyals, la gestió i processament de xarxes i els sistemes d'informació quàntics. El conjunt del treball realitzat representa un pas important en l'evolució d'este paradigma, i assenta les bases per a una nova era de dispositius fotònics de propòsit general.