Résumé en français

Alors que la photonique intégrée continue de démontrer qu'elle est une alternative énergétiquement efficace à l'électronique pour les télécommunications, elle est de plus en plus envisagée pour les applications de stockage et de traitement de l'information. L'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) optiques sur les plateformes photoniques a retenu l'attention de la communauté au cours de la dernière décennie, car ces matériaux ouvrent la voie vers de nouvelles fonctionnalités dans les circuits photoniques intégrés (PIC). Cependant, le comportement de ces dispositifs est mal compris, notamment à cause de la superposition de des physiques complexes en jeu. Cela limite l'efficacité des dispositifs conçus "à l'aveugle" ou en se basant de mauvaises hypothèses, conduisant à une sous-évaluation générale des performances des dispositifs à base de PCM.

Dans ce travail, nous utilisons des simulations multiphysiques pour mieux comprendre le fonctionnement des dispositifs optiques PCM et l'interaction entre les phénomènes optiques, thermiques et de changement de phase. Premièrement, des empilements de couches uniformes (c'est-à-dire des dispositifs 1D) comprenant des couches PCM sont étudiés, fournissant des informations précieuses sur les stratégies de simulation et permettant d'évaluer l'impact de plusieurs paramètres de conception, tels que l'épaisseur de la couche, la durée et la puissance du signal d'écriture, ainsi que le choix du PCM, sur les performances globales. Par la suite, le flot de simulation multiphysique est adapté et simplifié pour traiter les dispositifs photoniques intégrés. Un dispositif couramment présenté --un guide d'onde en silicium recouvert d'une fine couche the PCM-- est étudié en détail, et plusieurs approches sont proposées afin d'améliorer ses performances dans deux cas d'utilisation : l'écriture via une impulsion unique et l'accumulation. De manière cruciale, nous découvrons un aspect inconnu de ces dispositifs, car des simulations optiques précises permettent de révéler leurs comportements complexes et dépendant de leur géométrie.

La seconde et dernière partie de ce travail se concentre sur la simulation des PIC. Après avoir examiné les outils de simulation existants, nous expliquons pourquoi ils ne sont pas adaptés aux circuits PCM qui contiennent plus de quelques éléments. Pour surmonter cet obstacle et permettre de futures études au niveau système sur des PIC basés sur PCM contenant un grand nombre de composants, nous avons développé un nouvel outil de simulation appelé SPECS (acronyme anglais de "Simulateur évenementiel de circuits photoniques évolutif") basé sur le paradigme événementiel. Nous expliquons les processus techniques qui rendent notre approche viable, et comparons ses performances aux simulateurs PIC de pointe, montrant les énormes améliorations de vitesse apportées par SPECS, même dans des scénarios défavorables.

English summary

As integrated photonics technology continues to prove itself a worthy, energy-efficient alternative to electronics for telecommunication applications, it comes under increased scrutiny for information storage and processing applications. Optical integration of Phase-Change Materials (PCM) has garnered the community's attention over the past decade, as devices based on such materials are a door towards novel functionalities in Photonic Integrated Circuits (PICs). However, these devices' behaviors are only superficially understood, due to the complex physics at play, and poor design choices are unfortunately common, leading to an under-evaluation of PCM devices performances.

In this work, we use multiphysics simulations to gain insight on the operation of optical PCM devices, and on the interplay of optical, thermal and phase-change phenomena. First, uniform layer stacks (i.e., 1D devices) comprising PCM layers are studied, yielding valuable insight on simulation strategies, and enabling the evaluation of the impact of several design parameters, such as layer thickness, pulse duration and power, as well as the choice of PCM, on composite performance figures. Subsequently, the multiphysics simulation flow is adapted and simplified to handle integrated photonic devices. A prevalent device design, a PCM-loaded waveguide, is studied in detail, and several approaches are studied in order to probe for the optimal performances of the devices in two use-cases: single-pulse programming and accumulation. Crucially, we discover an unknown facet of these devices, as precise optical simulations help unveil their complex, geometry-dependent behaviors.

The second and final part of this work focuses on PIC simulation. After surveying existing simulation tools, we explain why they are not adapted for PCM circuits which contain more than a few elements. To overcome this barrier and enable future system-level studies on PCM-based PICs containing a large number of components, we developed a new simulation tool called SPECS (Scalable Photonic Event-driven Circuit Simulator) based on the event-driven paradigm. We explain the technical processes that make our approach viable and compare its performance to state-of-the art PIC simulators, showing the tremendous speed improvements yielded by SPECS, even in unfavorable scenarii.