Les métasurfaces optiques sont des composants qui permettent l'ingénierie de la lumière par des nanostructures. Elles ont révélé un potentiel considérable pour diverses applications de contrôle de la lumière spectrale et spatiale, permettant ainsi le filtrage, la focalisation de la lumière, la génération d'hologrammes, et les lidars.

Le défi actuel de ces plateformes réside dans le fait que leurs propriétés sont figées une fois fabriquées. Cela limite leur potentiel et leur intégration dans des applications nécessitant un contrôle actif des propriétés de la lumière.

Les métasurfaces actives sont une solution potentielle à ce problème. Elles permettent le contrôle des fonctionnalités optiques après la fabrication en ajoutant un contrôle externe électrique, optique ou thermique. Plusieurs mécanismes peuvent être utilisés pour le contrôle actif, tels que les cristaux liquides, les actionneurs MEMS, des matériaux électro-optiques, ou encore des matériaux à changement de phase (PCM).

En particulier, le trisulfure d'antimoine Sb2S3 est un PCM à faible perte, qui possède des propriétés optiques remarquables pouvant être modulées en changeant de manière réversible la cristallinité du matériau. Il a attiré beaucoup d'attention pour offrir des métasurfaces actives pour le régime visible à proche infrarouge. L'objectif de cette thèse est de répondre à la question de la maturité de ce matériau en termes de nanofabrication et de conception de métasurfaces actives basées sur Sb2S3 et de fournir une démonstration expérimentale de métasurfaces actives basées sur le Sb2S3.

Après avoir introduit le concept de métasurfaces et l'état de l'art des PCMs dans le premier chapitre, le deuxième chapitre aborde les défis associés à l'utilisation de Sb2S3 dans les processus de nanofabrication et comment les propriétés d'adhésion améliorées renforcent la stabilité mécanique et chimique et ont permis une nanostructuration réussie en utilisant de nouvelles recettes de lithographie par faisceau d'électrons. La compréhension des propriétés du matériau a permis une nouvelle approche de nanopatterning utilisant la nanoimpression directe, permettant potentiellement une nanostructuration sans produits chimiques, et à faible coût.

Le troisième chapitre met en évidence différentes approches de conception pour le contrôle spatial de la lumière, y compris l'accumulation de phase, les métasurfaces de Huygens et la phase de Pancharatnam-Berry. Chaque approche a ses avantages et ses limitations pour son utilisation potentielle dans la conception de métasurfaces actives basées sur les PCMs. Le dernière design est sélectionné pour démontrer des fonctionnalités optiques avancées comme montré pour la cryptographie holographique optique.

Dans le quatrième chapitre, des métasurfaces actives basées sur Sb2S3 sont conçues et démontrées expérimentalement, abordant les défis matériaux et les performances optiques. Le chapitre explore deux applications: (i) le filtrage actif développé en utilisant Fabry-Pérot basé sur une cavité active Sb2S3 et des métasurfaces supportant l'état lié dans le continuum (BiC). (ii) La coloration structurelle réalisée par des nanostructures de Sb2S3. Le chapitre discute également des défis des métasurfaces basées sur Sb2S3 à l'état cristallin en termes de (i) difficulté à cristalliser des nanostructures isolées, (ii) et la difficulté à contrôler la croissance de la cristallisation qui conduit à une réponse anisotrope. Une approche de conception est développée pour surmonter ces défis, permettant la cristallisation des nanostructures et le filtrage des cristaux, conduisant à une croissance latérale isotrope des cristaux à l'intérieur de la métasurface. Cette approche permet la démonstration expérimentale de métasurfaces actives supportant des BiC sensibles à la symétrie pour les phases amorphes et cristallines.

Metasurfaces are promising optical components that enable light engineering functions such as optical filtering, focusing, holographic projection, spatial light modulation, lidar, and neuromorphic computing. The challenges ahead are to provide the means that can reversibly switch functionalities such as spectral and spatial light active control, making an optical device easily integrable into smart devices. Active metasurfaces are a potential solution to overcome the inherent passive functionalities of passive metasurfaces enabling a wide range of applications. Several tuning mechanisms are used to enable external control of metasurfaces, such as liquid crystals, mechanical actuators or stretchable substrates, chemical tuning, nonlinear materials, 2D materials, ferroelectric materials, semiconductors, transparent conducting oxides, or Phase Change Materials (PCMs).

Antimony trisulfide Sb2S3 is a low-loss PCM, which possess remarkable optical properties that can be modulated by reversibly changing the crystallinity of the material. It has attracted a lot of attention to provide active metasurfaces for the visible to the near-infrared regime. The objective of this thesis is to answer the question about the maturity of this material in term of nanofabrication and design of active metasurfaces based on Sb2S3 and provide experimental demonstration of active metasurface based on Sb2S3.

After introducing the concept of metasurfaces and the PCMs state of the art in the first chapter.

The second chapter discusses the challenges associated with using Sb2S3 in nanofabrication processes and how improved adhesion properties enhance the mechanical and chemical stability and have enabled successful nanopatterning using novel Electron Beam Lithography (EBL) recipes. The understanding of the material properties has allowed for a novel nanopatterning approach using direct nanoimprinting, potentially enabling chemical-free, scalable nanopatterning at low cost.

The third chapter highlights different design approaches for spatial light control, including the phase accumulation, Huygens metasurfaces, and the Pancharatnam Berry phase. Each approach has its advantages and limitations for its potential use in active metasurfaces design based on PCMs. The later design is selected to demonstrate advanced optical functionalities as shown for optical hologram cryptography.

In the fourth chapter, active metasurfaces based on Sb2S3 are designed and experimentally demonstrated, addressing material challenges and device performance. The chapter explores two applications: (i) active filtering developed using Fabry-Pérot based on Sb2S3 active cavity and metasurfaces supporting Bound State in the Continiuum (BiC). (ii) Structural coloring made by subwavelength and diffractive nanostructures of Sb2S3. The chapter also discusses the challenges of metasurfaces based on Sb2S3 at the crystalline state in term of (i) difficulty to crystallize isolated nanostructures, (ii) and the difficulty to control the crystallization growth which leads to an anisotropic optical response. A design approach is developed to overcome these challenges enabling the crystallization of nanostructures and crystals filtering, leading to isotropic crystal lateral growth inside the metasurface. This approach allows the experimental demonstration of active metasurfaces supporting symmetry-sensitive BiC for both amorphous and crystalline phases.