DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : 22 novembre 2019

Prénom et nom de famille de l'auteur : **Alex AMATO**

Titre de la thèse : *« Couches minces à faible bruit thermique pour les détecteurs des ondes gravitationnelles de nouvelle génération »*

Résumé

En septembre 2015, la première observation directe des ondes gravitationnelles, provenant d'un système binaire de trous noirs, a été enregistrée. L'une des caractéristiques de la radiation gravitationnelle est son amplitude extrêmement faible ; ce n'est que grâce à la grande amélioration technologique qu'il a été possible de réaliser la première détection, en développant des interféromètres laser géants, fonctionnant à 1064 nm.

Ces interféromètres très sensibles se caractérisent par des bras kilométriques, des cavités résonantes Fabry-Pérot et de grands miroirs de Bragg hautement réfléchissants. Un réseau de détecteurs est actuellement opérationnel et d'autres détecteurs sont en construction. En particulier, les détecteurs jumeaux Advanced LIGO opèrent aux USA, Advanced Virgo opère en Europe tandis que KAGRA est en mis au point au Japon et participera aux prochaines missions d'observation vers la fin de cette année 2019.

Bien que de multiples détections aient déjà eu lieu, les détecteurs des ondes gravitationnelles (GWDs) doivent entrer maintenant dans une phase d'amélioration. L'un des principaux objectifs est de réduire le bruit thermique des couches réfléchissantes, qui limite la zone centrale et plus sensible de la bande de détection, autour de 200 Hz.
L'équilibre thermique est un équilibre dynamique, dans lequel il existe un échange continu entre deux niveaux, provoquant le bruit thermique. C'est l'idée du système à deux niveaux (Two-level System, TLS). Une sollicitation mécanique externe modifie l'asymétrie d'un TLS, modifiant sa population en conséquence, et donc les constantes élastiques du solide. La réponse mécanique est retardée par le processus de relaxation qui se produit afin de rétablir l'équilibre dans le système, ce qui provoque la dissipation. Selon le théorème de fluctuation-dissipation, les deux phénomènes de bruit thermique et de dissipation d'énergie mécanique sont intimement liés.

Les revêtements réfléchissants actuellement utilisés sont des multicouches de tantale dopé à l'oxyde de titane (Ti:Ta2O5, le matériau à haut indice) et de silice (SiO2, le matériau à bas indice) déposés par pulvérisation ionique (IBS) dans le Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) de Lyon, sur des substrats de silice fondue, massive et de grande surface. Les couches de Ti:Ta2O5 sont reconnues comme étant la principale source de bruit thermique dans les revêtements. Pour cette raison, il est important de trouver un nouveau matériau à haut indice avec un frottement interne (directement lié au bruit thermique) plus faible que le Ti:Ta2O5.

Dans ce contexte, la thèse consiste en l'étude des propriétés mécaniques et optiques de couches minces (principalement déposées par IBS au LMA), dans le but de trouver un nouveau matériau qui permette de réduire le bruit thermique des miroirs des GWDs actuels et futurs.
La caractérisation mécanique effectuée au LMA concerne les mesures de frottement interne et de constants élastiques par la méthode de « ring-down » utilisant un système de suspension nodale (Gentle Nodal Suspension, GeNS). La caractérisation optique a été réalisée à l'aide de l'ellipsométrie spectroscopique (SE),

une technique efficace pour étudier les propriétés optiques des matériaux et l'épaisseur des couches minces. Grâce à une collaboration avec l'OPTMATLAB de l'Université de Gênes, j'ai pu caractériser les échantillons par SE pour une large gamme d'énergie (des UV aux NIR).

Les premiers échantillons analysés sont les couches actuellement utilisées dans les GWDs : SiO_2, Ta_2O_5 et Ti:Ta_2O_5. Ensuite, Nb_2O_5, Nb:TiO_2, Zr:Ta_2O_5, SiC et SiNx ont été caractérisés en tant que matériaux à haute indice de réfraction, tandis que MgF_2 et AlF_3 ont été étudiés pour remplacer le matériau à bas indice afin d'augmenter le contraste d'indice, réduisant ainsi l'épaisseur totale du revêtement et donc le bruit thermique.

Parmi les couches étudiées, Zr:Ta_2O_5 et SiNx ont fourni les résultats les plus prometteurs en terme de dissipation, en particulier à 100 Hz, où les GWDs sont limités par le bruit thermique des revêtements réfléchissants. Par ailleurs, ces deux matériaux ayant une température de cristallisation nettement plus élevée que le Ti:Ta_2O_5, ils peuvent subir un traitement thermique à plus haute température, ce qui est favorable pour leurs propriétés mécaniques et optiques. De plus, un recuit à plus haute température est bénéfique également pour les couches de silice, ce qui permet de réduire l'angle de perte total des revêtements.

Zr:Ta_2O_5 présente des constantes optiques et élastiques similaires à celles du Ti:Ta_2O_5; pour cette raison, il pourrait être un bon candidat pour les détecteurs à température ambiante. Toutefois, des tests supplémentaires sur un empilement optimisé Zr:Ta_2O_5/SiO_2 sont nécessaires.

SiNx présente des pertes ~ 3 fois plus faibles de celles du Ti:Ta_2O_5. Cependant, il réside le problème lié à l'absorption à 1064 nm, bien plus élevée que celle des couches actuellement utilisées dans les GWDs. Toutefois, d'autres améliorations de SiNx pourraient diminuer l'absorption optique ; un test sur un empilement optimisé SiNx/SiO_2 est nécessaire.
Le bruit thermique dépend également de la différence entre les modules d'élasticité du substrat et du revêtement, donc le module de Young de SiNx, supérieur à celui du substrat, pourrait limiter son utilisation dans les détecteurs à température ambiante. Toutefois, les futurs GWDs cryogéniques pourraient avoir un substrat en saphir, dont le module de Young est supérieur à celui de la silice. Pour ces raisons, le SiNx pourrait être une solution valable pour les détecteurs cryogéniques.

L'une des nouveautés de ce travail concerne le calcul analytique du frottement interne dans un TLS, en considérant une expression générale de la barrière de potentiel. L'angle de perte obtenu est en accord avec les résultats connus dans la littérature sur la silice, en utilisant un potentiel exponentiel. Pour confirmer la validité générale de ce calcul, d'autres comparaisons avec d'autres angles de perte mesurés seront nécessaires.

D'autres résultats importants ont été obtenus lors des caractérisations optique et mécanique des échantillons. En particulier, l'analyse des couches de silice a permis d'observer un angle de perte mécanique supplémentaire du bord des échantillons. **Un modèle qui tient compte de cet effet du bord a été développé au cours de cette thèse.** Cet effet est en concurrence avec le modèle "bulk and shear", et il pourrait masquer la dissipation intrinsèque de la couche s'il n'est pas pris en compte pendant l'analyse. Par ailleurs, afin d'atténuer l'effet du bord et de définir les meilleurs traitements pour tous les échantillons, un protocole de mesure et de conservation a été établi, concernant le recuit post-dépôt et le stockage sous vide des échantillons.

De plus, **une méthode non destructive, basée sur l'ajustement des simulations par éléments finis aux mesures effectuées à l'aide de GeNS, a été développée pour évaluer la constante élastique des couches.**

Enfin, au cours de cette thèse, les propriétés optiques, liées à la densité des états électroniques, et les propriétés mécaniques, relatives à la dissipation, ont été analysées en relation avec l'organisation structurale des couches à courte et moyenne distance. En particulier, **pour la première fois, une corrélation entre l'énergie d'Urbach, liée au comportement exponentiel du bord de l'absorption, et la dissipation, liée aux propriétés mécaniques, a été trouvée**. Cette corrélation est observée pour différents oxydes, ce qui suggère sa validité générale.