

# UNIVERSITY OF SALERNO



***DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING***

*Ph.D. Course in Industrial Engineering  
Curriculum in Electronic Engineering – XXXV Cycle*

**ABSTRACT**

## ANALYSIS AND DESIGN OF DIELECTRIC MULTILAYERS FOR HIGH-EFFICIENCY OPTICAL COATINGS

**Supervisor**

*Prof. Francesco Chiadini*

**Ph.D. Student**

*Roberta De Simone*

**Scientific Referees**

*Prof. Vincenzo Fiumara*

*Prof. Vincenzo Pierro*

**Ph.D. Course Coordinator**

*Prof. Francesco Donsì*

The past decade has seen the ramp-up of the second-generation ('Advanced') earth-based gravitational-wave (GW) detectors. Design improvements and technological upgrades have paved the way to the first direct detection of GWs by the global network made up of the two aLIGO instruments (LIGO Scientific Collaboration 2015) (located in the USA: Hanford, WA and Livingston, LA) and of the Advanced Virgo detector (Acernese, F. *et al.* 2015) (located in Cascina, Italy). The main results achieved by the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration – recently joined by the KAGRA Collaboration (located in Kamioka, Japan, under the Ikenoue mountain) – include the first detection of a binary black hole merger (GW150914 (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2016)); the first detection of a binary neutron star (BNS) merger (GW170817 (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2017)) that lead to the birth of multi-messenger astronomy with GW (Hartley 2017); and now dozens of detections of compact binary mergers that add up in a GW Transient Catalogue regularly updated (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2019)-(Abbott, R., ... and De Simone, R., *et al.* (LVK Collaboration) 2021). These detections contribute to opening a new window onto the Universe by providing insights to the populations of compact objects and the binary merger rates (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2021*a*); they also allow scientists to perform stringent tests of general relativity (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2021*b*) in a new regime of gravitation never probed before. Advanced Virgo is a power-recycled Michelson interferometer with Fabry-Perot cavities in its 3 km-long arms. By measuring interferometric figure due to the length differences between mirrors in the arms interferometer, gravitational waves are identified. Therefore, very sensitive interferometers that accurately measure the separation between suspended test masses coated to function as highly reflecting mirrors have been designed in order to detect gravitational waves. A core challenge is the optimization of the mirrors for GW detectors. It is important to discover a mirror configuration that produces the least amount of additional (thermal) noise on the detection channel in addition to the typical mirror optimization design request of achieving high reflectance in a given frequency and angular range. It is well known that high

reflectance mirrors typically consist of multilayers of alternating low and high refractive index materials, where each layer is quarter wave thick at the operating frequency. As a result, a simple formulation of the coating optimization problem for the design of low noise dielectric mirrors can involve looking for the sequence of thicknesses of the selected materials that make up the mirrors that minimizes the thermal noise while maintaining the transmittance below a specified threshold value. To improve the multilayers structures performance, it has been formulated and solved another design that consist in discovering (synthesizing and optimizing) improved materials that have increased optical contrast, fewer optical and mechanical losses and enabling the achievement of a specified transmittance with fewer layers, resulting into thinner coatings and lower noise and giving up the constraint of having only two constituent materials and, then, introducing new ternary multimaterial design. A check of the robustness against the inaccuracy of the deposition process has been also carried out. Furthermore, none of the materials present in nature and studied at this time qualifies as a straight substitute for the materials currently in use with the highest optical losses ( $TiO_2$ -doped  $Ta_2O_5$  in current setups), but a few of them are better in terms of some properties (e.g., optical density, and/or mechanical losses), while unfortunately worse regarding others. The optimal material can be synthesized by using *Nanolayered structure* (NL) with thickness and equivalent refractive index that must be chosen ad hoc to fulfill the imposed conditions: at this scope it has been introduced a novelty homogenization procedure based on an established technique, the *Abelès method*. The technique proposed albeit presents some theoretical glitches has been verified that works well under certain assumptions. In addition, this technique has the advantage of being easy to implement in a laboratory, with the drawback of being able to apply it to a single wavelength. We are now exploring an innovative approach in order to build a very sensitive detection scheme using differential interferometry able to carry out high precision measurements: Quadrature Differential Phase Interferometer.



---

L'ultimo decennio ha visto l'aumento dei rilevatori di onde gravitazionali (GW) terrestri di seconda generazione ("Advanced"). Miglioramenti progettuali e aggiornamenti tecnologici hanno aperto la strada alla prima rilevazione diretta di GW da parte della rete globale costituita dai due strumenti aLIGO (LIGO Scientific Collaboration 2015) (situati negli USA: Hanford, WA e Livingston, LA) e dal Advanced Virgo detector (Acernese, F. *et al.* 2015) (situato a Cascina, Italia). I principali risultati raggiunti dalla collaborazione scientifica LIGO e dalla collaborazione Virgo – recentemente affiancata dalla collaborazione KAGRA (situata a Kamioka, in Giappone, sotto il monte Ikenoue) – includono il primo rilevamento di una fusione binaria di buchi neri (GW150914 (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2016)); il primo rilevamento di una fusione di stelle di neutroni binarie (BNS) (GW170817 (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2017)) che ha portato alla nascita dell'astronomia multi-messaggero con GW (Hartley 2017); e ora numerosi rilevamenti di fusioni binarie compatte che si sommano in un GW Transient Catalog regolarmente aggiornato (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2019)- (Abbott, R., ... and De Simone, R., *et al.* (LVK Collaboration) 2021). Questi rilevamenti contribuiscono ad aprire una nuova finestra sull'Universo fornendo informazioni sulle popolazioni di oggetti compatti e sulla frequenza di eventi di fusione binaria (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2021*a*); consentono inoltre agli scienziati di eseguire importanti test di relatività generale (Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) 2021*b*) in presenza di campi gravitazionali di intensità mai misurati precedentemente. Advanced Virgo è un interferometro Michelson a riciclo di energia con cavità Fabry-Perot nei suoi bracci lunghi 3 km. Misurando la figura interferometrica dovuta alle differenze di lunghezza tra gli specchi nei bracci dell'interferometro, vengono identificate le onde gravitazionali. Pertanto, per rilevare le onde gravitazionali sono stati progettati interferometri molto sensibili che misurano con precisione la distanza tra le masse di prova sospese rivestite per funzionare come specchi altamente riflettenti. Una sfida fondamentale è l'ottimizzazione degli specchi per i rivelatori di onde gravitazionali. È importante individuare una configurazione dello specchio che produca la minima quantità di rumore aggiuntivo (termico) oltre alla tipica

richiesta di progettazione dell'ottimizzazione dello specchio per ottenere un'elevata riflettanza in una data gamma di frequenza e di spettro angolare. È ben noto che gli specchi ad alta riflettanza sono tipicamente costituiti da multistrati di materiali alternati a basso e alto indice di rifrazione, in cui ogni strato ha uno spessore di un quarto d'onda alla frequenza operativa. Di conseguenza, una semplice formulazione del problema di ottimizzazione del rivestimento per la progettazione di specchi dielettrici a basso rumore può comportare la ricerca della sequenza di spessori dei materiali selezionati che compongono gli specchi che minimizzano il rumore termico mantenendo la trasmittanza al di sotto di un valore di soglia specificato. Per migliorare le prestazioni delle strutture multistrato, è stato formulato e risolto un altro progetto che consiste nello scoprire (sintetizzare e ottimizzare) materiali ottimizzati che hanno un maggiore contrasto ottico, minori perdite ottiche e meccaniche e che consentono il raggiungimento di una specifica trasmittanza con un basso numero strati, risultando in rivestimenti più sottili e meno rumorosi e rinunciando al vincolo di avere solo due materiali costituenti e, quindi, introducendo un nuovo design multimateriale ternario. È stata inoltre effettuata una verifica della robustezza rispetto all'imprecisione del processo di deposizione. Inoltre, nessuno dei materiali presenti in natura e studiati in questo momento si qualifica come un diretto sostituto dei materiali attualmente in uso con le più alte perdite ottiche ( $TiO_2$ -dopata  $Ta_2O_5$  nelle attuali configurazioni), poichè alcuni di essi sono migliori in termini di alcune proprietà (ad es. densità ottica e/o perdite meccaniche), mentre purtroppo peggiori per altre. Il materiale ottimale può essere sintetizzato utilizzando *strutture Nanostratificate*, *Nanolayered structure* (NL), con spessore e indice di rifrazione equivalente che devono essere scelti ad hoc per soddisfare le condizioni imposte: a questo scopo è stata introdotta una procedura di omogeneizzazione innovativa basata su una consolidata tecnica, il *metodo di Abelès*. La tecnica proposta pur presentando alcuni difetti teorici è stato verificato che funziona bene sotto certi presupposti. Inoltre, questa tecnica ha il vantaggio di essere facilmente implementabile in laboratorio, con l'inconveniente di poterla applicare ad una singola lunghezza d'onda. Si sta ora esplorando un approccio innovativo

per costruire uno schema di rilevamento molto sensibile utilizzando l'interferometria differenziale in grado di effettuare misure di alta precisione: Quadrature Differential Phase Interferometer.





# Bibliography

- Abbott, R., ... and De Simone, R., *et al.* (LVK Collaboration) (2021), ‘GWTC-3: compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run’, *arXiv preprint arXiv:2111.03606* .
- Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) (2016), ‘Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger’, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102.
- Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) (2017), ‘GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral’, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101.
- Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) (2019), ‘GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs’, *Phys. Rev. X* **9**, 031040.
- Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) (2021*a*), ‘Population properties of compact objects from the second LIGO–Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog’, *The Astrophysical journal letters* **913**(1), L7.
- Abbott, R. *et al.* (LVK Collaboration) (2021*b*), ‘Tests of general relativity with binary black holes from the second LIGO–Virgo gravitational-wave transient catalog’, *Physical review D* **103**(12), 122002.
- Acernese, F. *et al.* (2015), ‘Advanced Virgo: A second-generation interferometric gravitational wave detector’, *Classical and Quantum Gravity* **32**(2).

Hartley, W. (2017), ‘Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger’, *The Astrophysical Journal Letters* **848**(2), L12.

LIGO Scientific Collaboration, t. (2015), ‘Advanced LIGO’, *Classical and Quantum Gravity* **32**(7), 074001.