

Rivestimenti in film sottile per rivelatori di onde gravitazionali di nuova generazione

F. Fabrizi - Università di Urbino, INFN Firenze
per conto della
Collaborazione Virgo Coating R&D



1506
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI URBINO
CARLO BO



interferometro



Rivelatore di onde gravitazionali Virgo,
European Gravitational Observatory (EGO),
Cascina (IT)

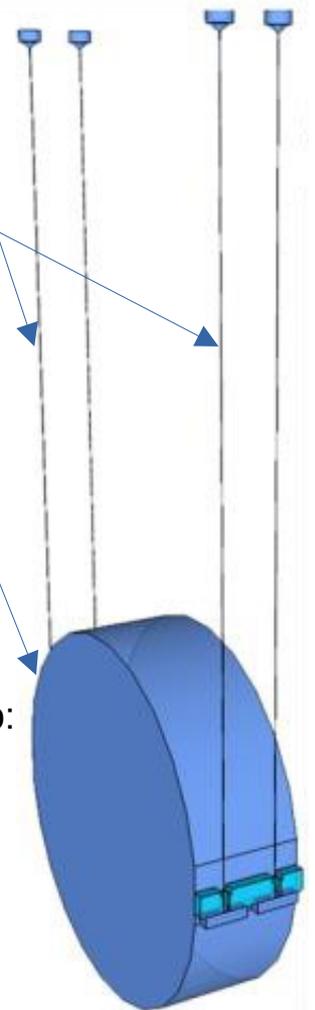
interferometro di Michelson, $L = 3$ km,
laser $\lambda = 1064$ nm (1.32 eV)



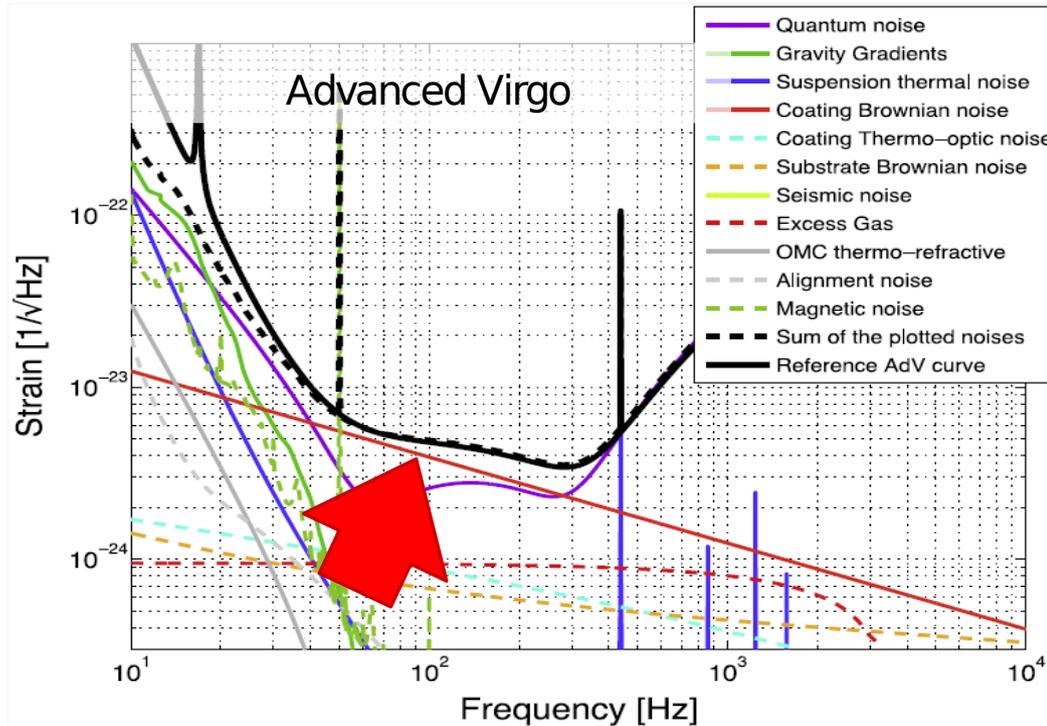
Sospensioni
silica

Specchio
silica
42 kg

Rivestimento:
riflettori di
Bragg =
stack di film
sottili ad
alto/basso
indice di
rifrazione



rumore termico del coating

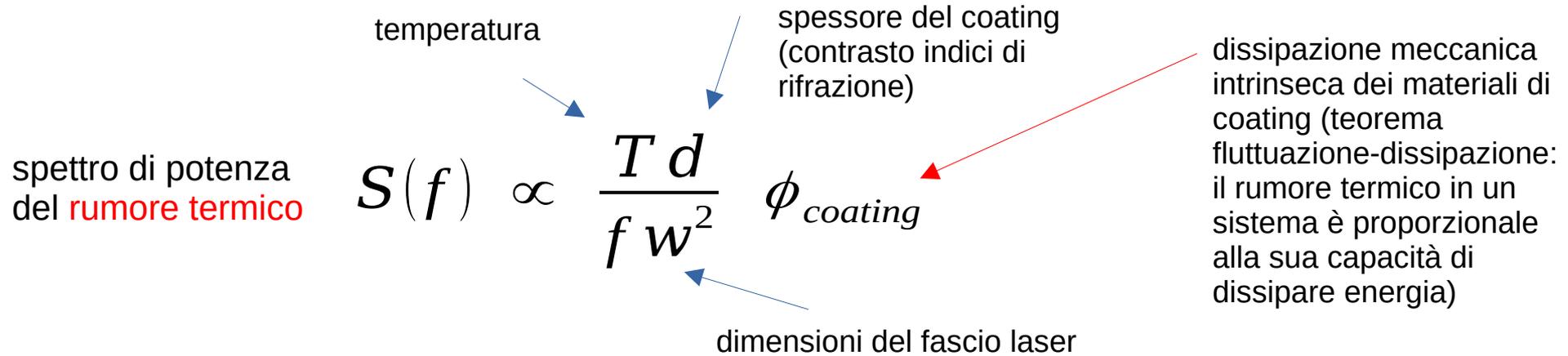


Contributo dominante nella banda centrale di frequenza (50 – 300 Hz),
In cui l'interferometro è più sensibile

agitazione termica browniana + rumore termo-ottico induce shift nella posizione della superficie dello specchio

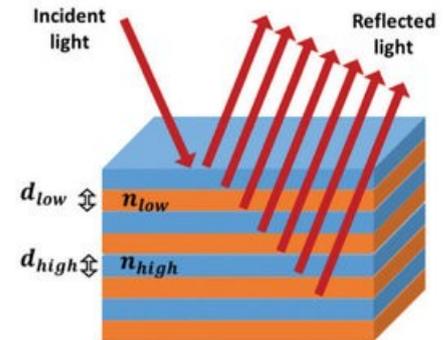
La rilevazione di eventi di coalescenza di binary neutron stars (BNS) è fortemente dipendente dal rumore totale nella banda centrale → necessario ridurre rumore termico per aumentare la detection rate e la SNR dei segnali GW di BNS

rumore termico del coating



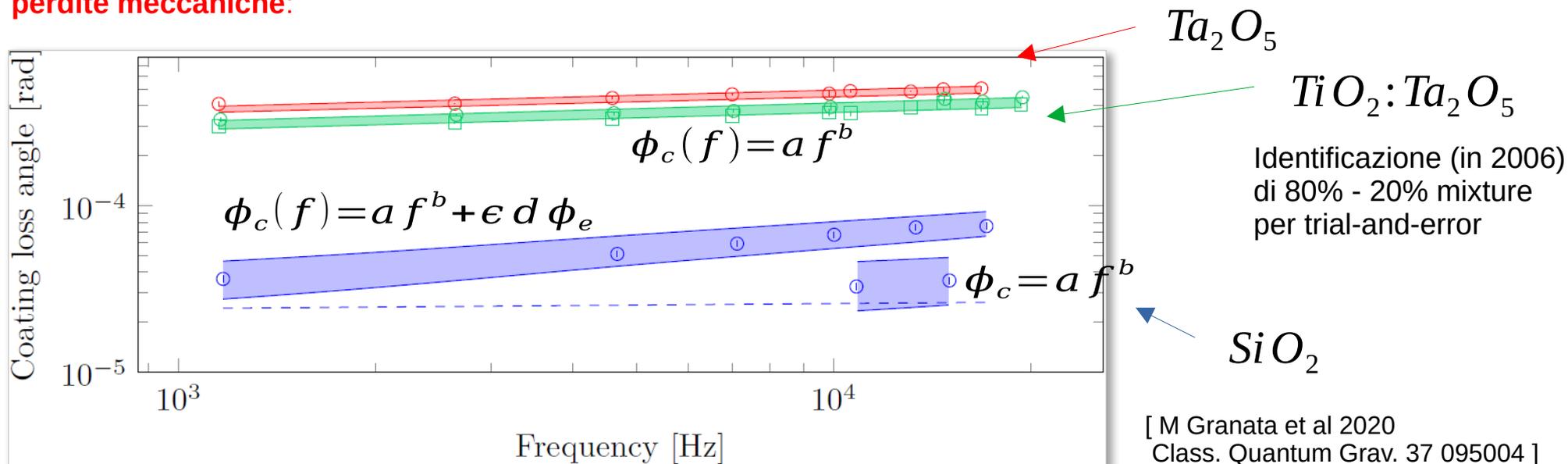
Requisiti dei 2 materiali di coating:

- Alto contrasto fra i 2 **indici di rifrazione**
- **Basse perdite meccaniche**
- **Basso assorbimento ottico** & scattering:
si richiede assorbimento ottico nel coating < 1 ppm
il band gap deve essere $\gg 1.32$ eV per prevenire transizione fra
banda di valenza e conduzione (difficile per materiale ad alto n)



materiali impiegati e performance

perdite meccaniche:



assorbimento ottico: extinction coefficient nello stack $k \approx 10^{-7}$

indici di rifrazione: materiale ad alto indice (TiO₂:Ta₂O₅) $n_H = 2.09$
materiale a basso indice (SiO₂) $n_L = 1.45$

coating per il futuro

- Perdite meccaniche del materiale ad alto indice di rifrazione sono elemento più critico
obiettivo: riduzione di un fattore 3
- Ricerca di nuovi materiali sia “knowledge-driven”
comprensione dei meccanismi fisici alla base della dissipazione meccanica piuttosto che approccio trial-and-error
- Einstein Telescope
interferometro criogenico per rilevazioni in basse frequenze (LF)
entrambi i materiali devono essere sostituiti (silica ha picco di dissipazione a 30 - 40 K)

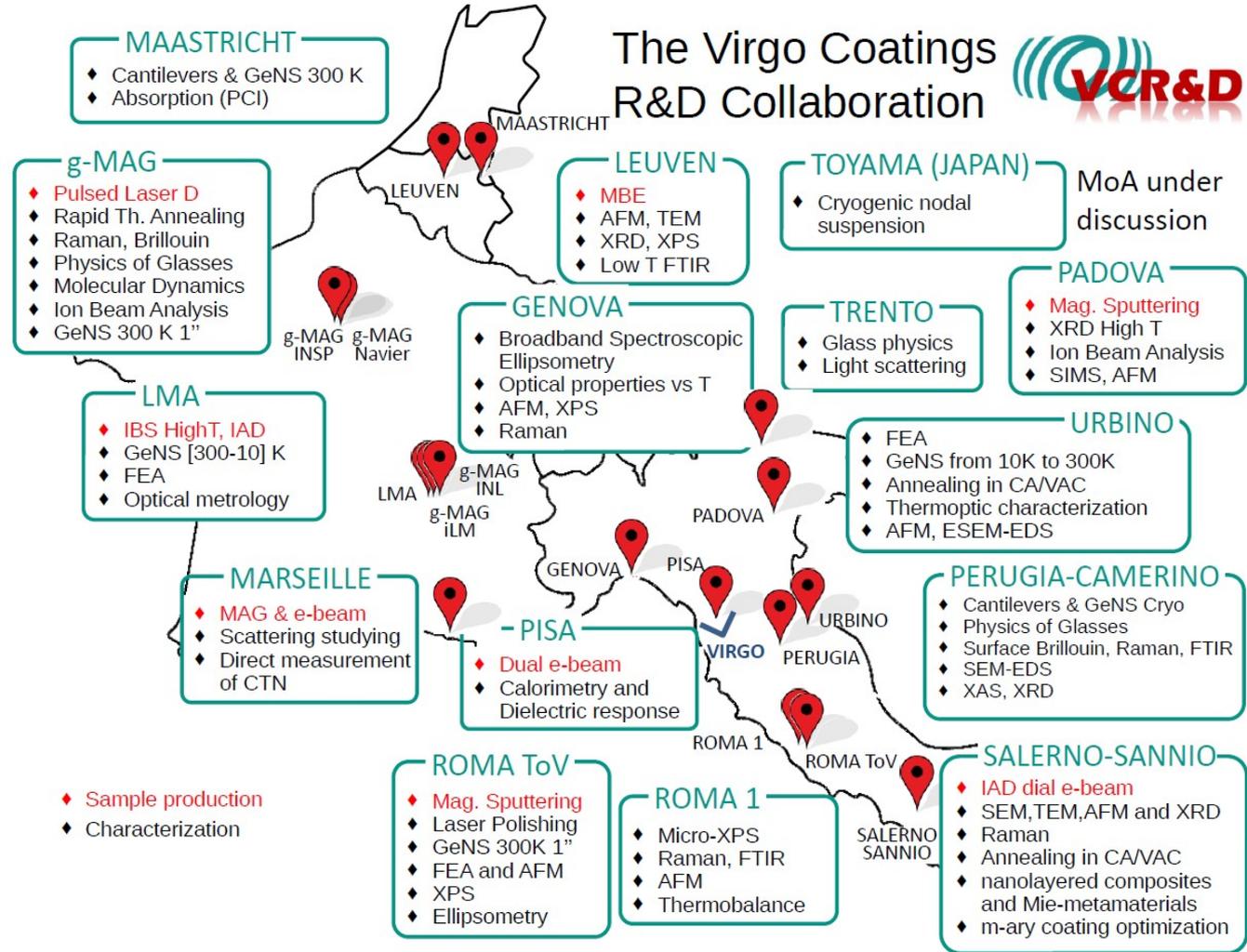
la collaborazione VCR&D

Fondato ad inizio 2017,
approvato & finanziato fine
2019

Progetto per lo sviluppo di
ciating per I futuri run di
Virgo
(O5, post-O5)

Risultati di interesse anche
per Einstein Telescope

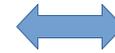
The Virgo Coatings
R&D Collaboration



tecniche di indagine

Urbach tail
[Amato et al.,
Sci Rep 10,
1670 (2020)]

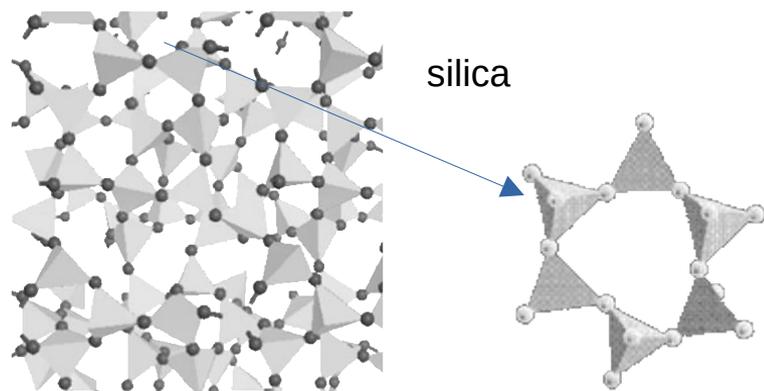
- *Sintesi di nuovi materiali*
tecniche e parametri di deposizione
trattamenti post-deposizione (annealing)
- *Proprietà ottiche*
assorbimento ottico / extinction coefficient (spectroscopic ellipsometry)
indice di rifrazione (spectroscopic ellipsometry)
- *Proprietà di dissipazione meccanica*
angolo di perdita Φ
densità & costanti elastiche (Brillouin spectroscopy)
- *Struttura microscopica*
composizione chimica & stechiometria (XPS)
cristallizzazione (XRD, Raman spectroscopy)
strutture molecolari locali in amorfi (Raman spectroscopy)
topologia e composizione di superficie (AFM, SEM)
- *Proprietà termiche e termo-ottiche*
cammino ottico vs temperatura (misure termorifrattive)
coefficiente di espansione termica α (misure di curvatura)



Molecular Dynamics Simulation
analisi a elementi finiti (FEA)

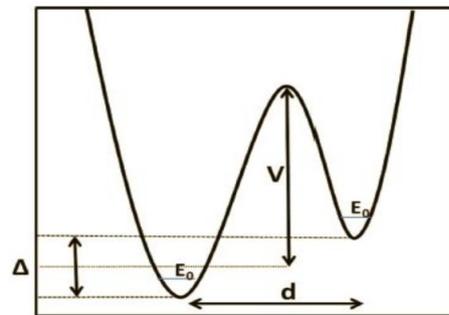
materiali amorfi

Rumore termico in materiali amorfi è dovuto a transizioni fra strutture atomiche locali (Two Level Systems, TLS), la cui esistenza è resa possibile dal disordine strutturale)



il disordine nasconde la presenza di unità strutturali locali

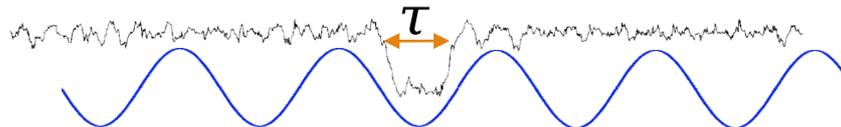
$$\tau \propto \tau_0(\Delta) \exp\left[\frac{V}{k_b T}\right]$$



V = barriera energetica alla transizione

relaxation time caratteristico delle transizioni fra due configurazioni meta-stabili

Solo transizioni con un relaxation time comparabile al periodo dell'onda di strain che si propaga nel materiale producono perdite meccaniche:



- T ambiente: la barriera energetica “problematica” è intorno a 0.5 eV
- T criogenica: V “problematica” si abbassa

materiali amorfi

Due modi per minimizzare il rumore termico

Materiali “floppy”: barriera V molto bassa

- Silica (SiO_2)
(microstruttura = tetraedri connessi solo ai vertici)
✓ per **materiale a basso indice di rifrazione** a room T
 - $\text{TiO}_2:\text{Ta}_2\text{O}_5$ (correntemente usato)
 - $\text{TiO}_2:\text{GeO}_2$
 - $\text{TiO}_2:\text{SiO}_2$
 - Ossidi ternari
- ✓ a T ambiente (V è sotto valore critico di 0.5 eV)
✗ a T criogenica (valore critico si abbassa)

Materiali rigidi:

V molto alta (> 0.5 eV)

- nitruri
- semiconduttori

Densità di stati TLS molto bassa

- Silicio amorfo (aSi)



a T ambiente



a T criogenica

La deposizione uniforme su superfici grandi è semplice; i fattori limitanti sono contaminazione e non-stechiometria / non ancora trovati materiali con proprietà fisiche ottimali.

materiali amorfi

Materiali “floppy”: barriera V molto bassa

- TiO₂:GeO₂
- TiO₂:SiO₂
- Ossidi ternari

Ossidi quasi certamente presentano un livello di **assorbimento ottico** compatibile con i requisiti

TiO₂:GeO₂ promette un livello di perdite meccaniche migliore dei materiali attuali ($\phi \sim 10^{-4}$ @ 1 kHz); ottimizzare la procedura di deposizione per evitare formazione di “bubbles” nell’annealing dei multilayers TiO₂:GeO₂ / SiO₂

[Colorado State University / LMA e VCR&D]

Ossidi ternari potrebbero permettere temperature di annealing + alte senza cristallizzare

Materiali rigidi:

V molto alta (> 0.5 eV)

- nitruri
- semiconduttori

Densità di stati TLS molto bassa

- Silicio amorfo (a-Si)

a-Si ha perdite meccaniche molto basse, ma bandgap piccolo ≈ 1.12 eV < 1.32 eV causa **assorbimento ottico** significativo = non trasparente a 1064 nm (laser a 1550 nm ?)

Nitruri e semiconduttori amorfi (strutture covalenti a coordinazione 4) sono composti ad alto numero di coordinazione = rigidi

Si₃N₄ testato per deposizione @ LMA dal 2016, ma non ottenuti coating stechiometrici / contaminazione: Si₃N₄ → SiO_xN_y → **assorbimento ottico** non accettabile

La selezione di materiali nella classe dei semicond. amorfi è limitata dalle **proprietà ottiche**: gli unici a largo bandgap che rinangono sono AlP, GaP, e InP +

Problemi di tossicità / sicurezza

materiali cristallini

Al contrario dei materiali amorfi, candidati con proprietà fisiche ottimali sono individuati; la difficoltà è nello scalare la deposizione su larghe superfici + coating transfer.

Perdite meccaniche: struttura cristallina virtualmente priva di difetti → no transizioni → no rumore termico browniano. Rimane solo rumore termo-ottico (= fluttuazioni di temperatura indicano fluttuazioni in volume + indice di rifrazione)

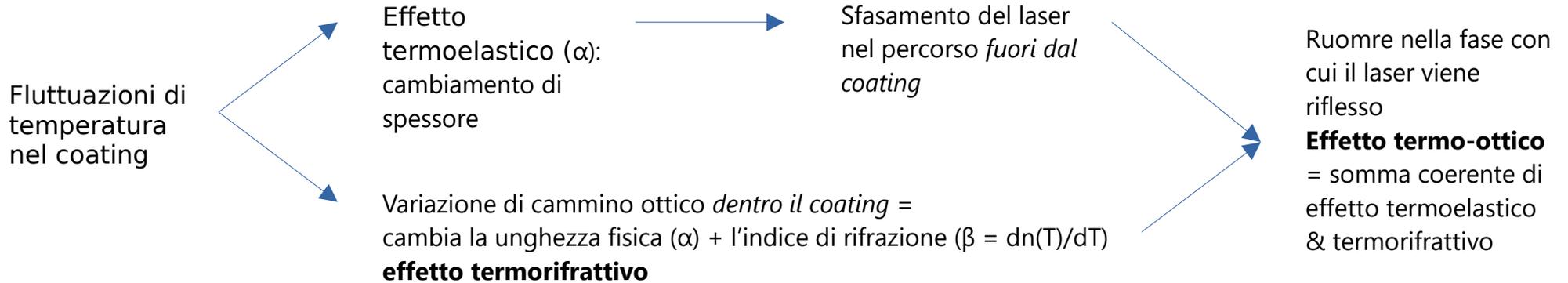
Assorbimento ottico: l'intero bandgap è libero (no stati intermedi) – basta che il gap sia sufficientemente largo.

Depositati su substrati cristallini via Molecular Beam Epitaxy (MBE) → coating transfer su specchio di silica amorfo
Non si è in grado al momento di depositare con diametro degli specchi di Virgo / ET.

- GaAs / Al_{0.92}Ga_{0.08}As [Garrett D. Cole, et al., Optica 3, 647-656 (2016)]
perdite meccaniche ~ $6 \cdot 10^{-6}$ dopo coating transfer (riduzione così grande da permettere fascio laser più piccolo – riduzione del diametro da depositare)
assorbimento ottico & scattering compatibili con I requisiti
- Ossidi cristallini (Cr₂O₃, Ga₂O₃, Fe₂O₃) [Università di Leuven]
corundum structure → alta simmetria → cresce monocristallo senza dislocazioni → basse perdite meccaniche
alcuni (Cr₂O₃) crescono su zafiro → substrato candidato per Einstein Telescope

rumore termo-ottico

Ulteriore contributo al rumore termico in aggiunta al rumore browniano:

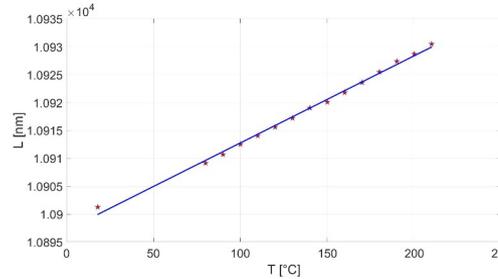
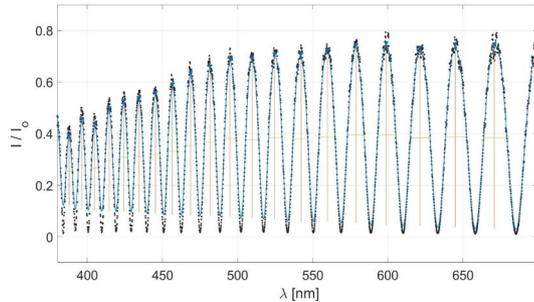


Misura di $\alpha + \beta / n$: misura di cammino ottico vs temperatura: interferenza da film sottile = luce a largo spettro riflessa [trasmessa] dalle 2 interfacce del coating fa interferenza

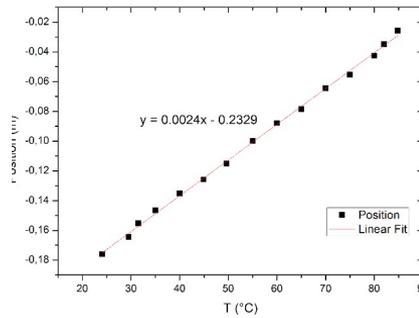
Misura di α : misura di curvatura vs temperatura: coating depositato su una lamella di substrato con un alto contrasto nel coefficiente di espansione termica α

rumore termo-ottico

Esempio di misura in Ta2O5



$$\alpha + \beta / n = (1.43 \pm 0.05) 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$



$$\alpha = (3.6 \pm 0.5) 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

da cui

$$\beta = (2.2 \pm 0.1) 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

[M. Bischì, Coating Thermal Noise Issue for Gravitational-Waves Detectors, PhD thesis, Università di Urbino (2022)]

In generale, nei materiali amorfi il rumore termico browniano domina sul termo-ottico.

Nei materiali cristallini, a causa della drastica riduzione del rumore browniano, il termo-ottico assume rilevanza.

metrologia

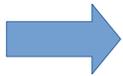
Nel caso di **perdite meccaniche**:

- ripetibilità e uniformità del protocollo di misura fra diversi laboratori
- protocollo di pulizia del campione
- laser polishing dei bordi del campione
- invecchiamento del substrato
- shift del termoelastico



Dissipazione termoelastica = principale rumore di background nelle misure di laboratorio su substrati cristallini
Vibrazioni meccaniche causano compressioni / dilatazioni locali → gradiente di temperatura
Cicli termici con stessa frequenza delle vibrazioni meccaniche inducono dissipazione

Shift del termoelastico = cambiamento del rumore di background *nel substrato* dovuto alla presenza *del coating*
Rende difficile comparare le misure prima / dopo la coatizzazione & estrarre la dissipazione del coating



Campagna di simulazioni numeriche (ANSYS) + sviluppo analitico del modello del termoelastico per

- quantificare lo shift e quali parametri fisici lo influenzano
- ottimizzare la geometria del substrato al fine di minimizzare lo shift

conclusioni

Collaborazione Virgo Coating R&D per rivestimenti in film sottile per gli specchi di Virgo / ET:

- Ricerca di nuovi materiali

soddisfacenti proprietà di **dissipazione meccanica** (+ rumore termo-ottico), **assorbimento ottico**, **indice di rifrazione**

in struttura amorfa / cristallina

- Comprensione dei meccanismi fisici sottesi alle proprietà fisiche può guidare la ricerca riducendo lo spazio dei parametri che definiscono i nuovi materiali
- Definizione e divulgazione degli standard metrologici