

# GRAFIQO (Preventivi 2024)

## GRAvitational Force In Quantum Optomechanics

CSN2- GRAFIQO-CDR approved (September 2022)

**Objectives: explore the territory between quantum physics and gravity.**

**More specifically**

- 1. Measurement of gravitational force produced by the **smallest source mass** (masses  $\sim 10$  mg)**
- 2. Measurement of this small force when the test mass oscillator **is in a quantum state** (limited only by quantum fluctuations)**

*Responsabile nazionale:* **Francesco Marin**

*Unità INFN partecipanti:* **Trento, Firenze, Perugia**

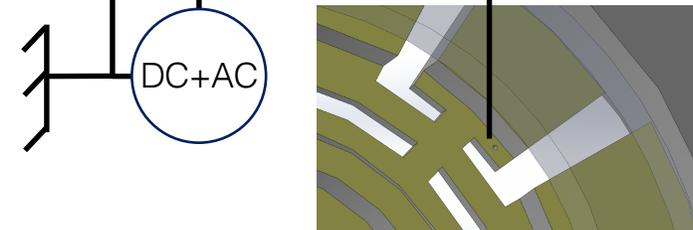
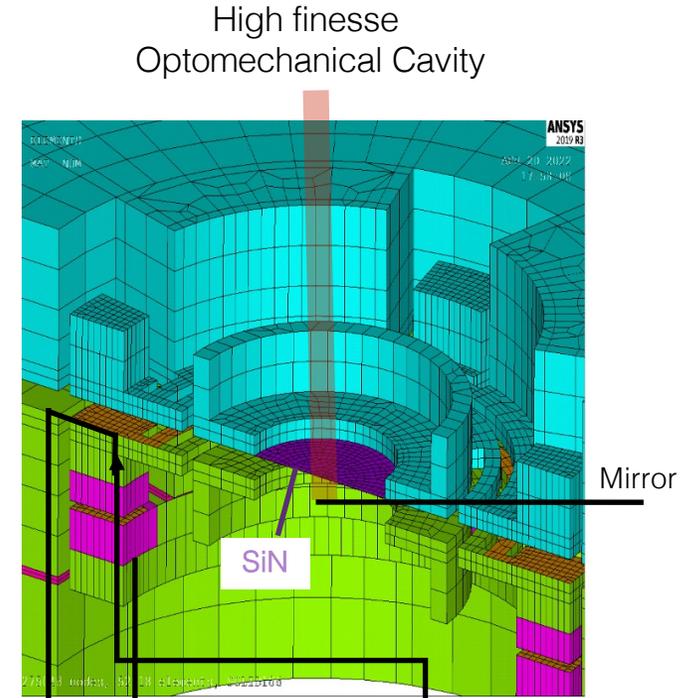
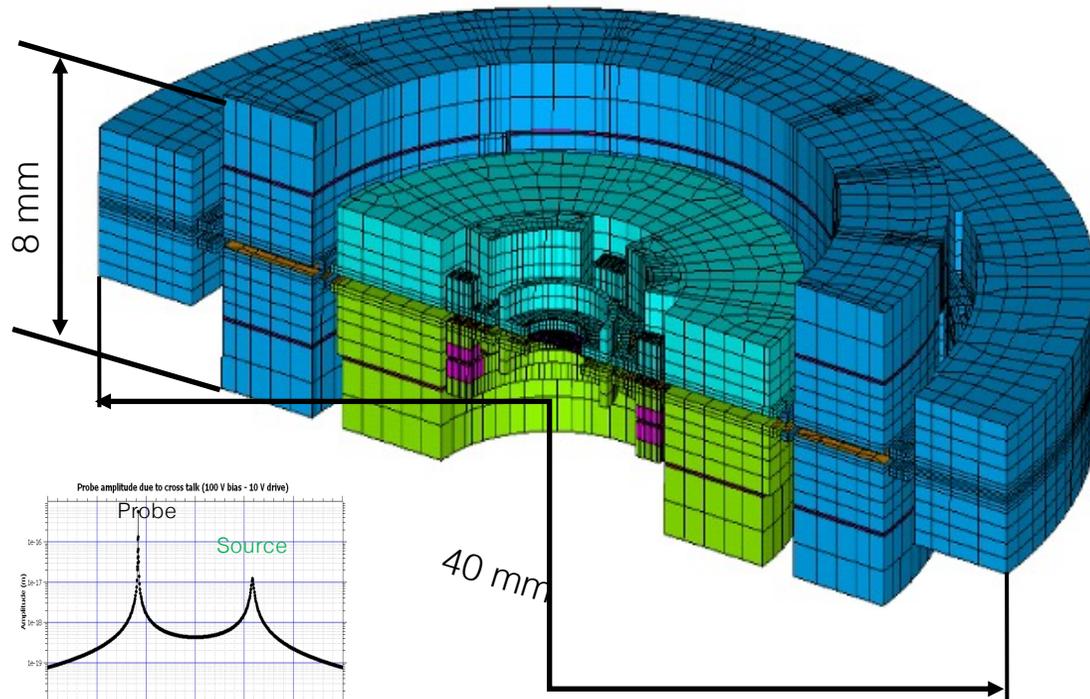
*Responsabili locali:* **Enrico Serra (TN) , David Vitali (PG)**

# Source-Probe design (CDR)

## Caratteristiche richieste per gli oscillatori

- *Probe*: alto fattore di qualità meccanico ( $Q$ ).
- *Source*: elevata ampiezza di oscillazione (1-10  $\mu\text{m}$ ).
- Assenza di cross-talk diretto: schermo elettrostatico + filtri meccanici.

		<i>Source</i>	<i>Probe</i>
massa sensibile (mg)	$m_g$		14.9 <sup>a</sup>
massa efficace (mg)	$m_{\text{eff}}$		37 <sup>b</sup>
fattore di qualità	$Q$	$1 \times 10^6$ <sup>c</sup>	$50 \times 10^6$ <sup>d</sup>
frequenza di risonanza (kHz)	$\Omega/2\pi$	20	20
temperatura (K)	$T$		0.02

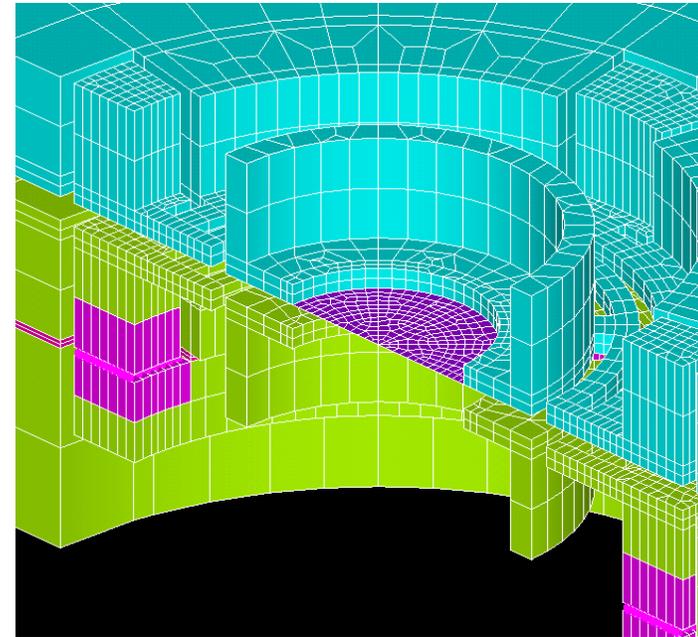
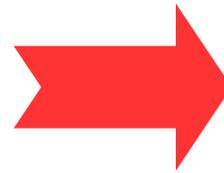
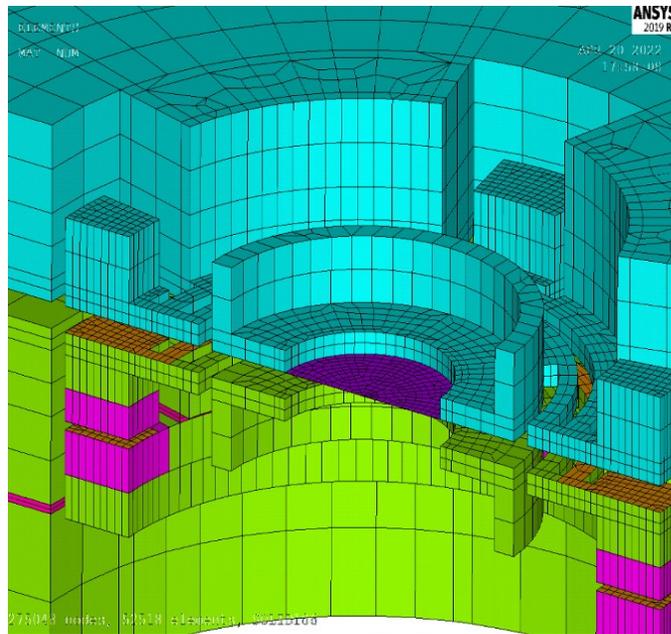


Metalized  
Through Silicon Vias - TSVs  
(VERTICAL INTER-CONNECTIONS)

# Source-Probe design (2023)

Dopo le verifiche con il possibile produttore degli oscillatori in silicio, abbiamo fatto un primo giro di modifiche delle strutture per soddisfare i vincoli posti dai macchinari utilizzati.

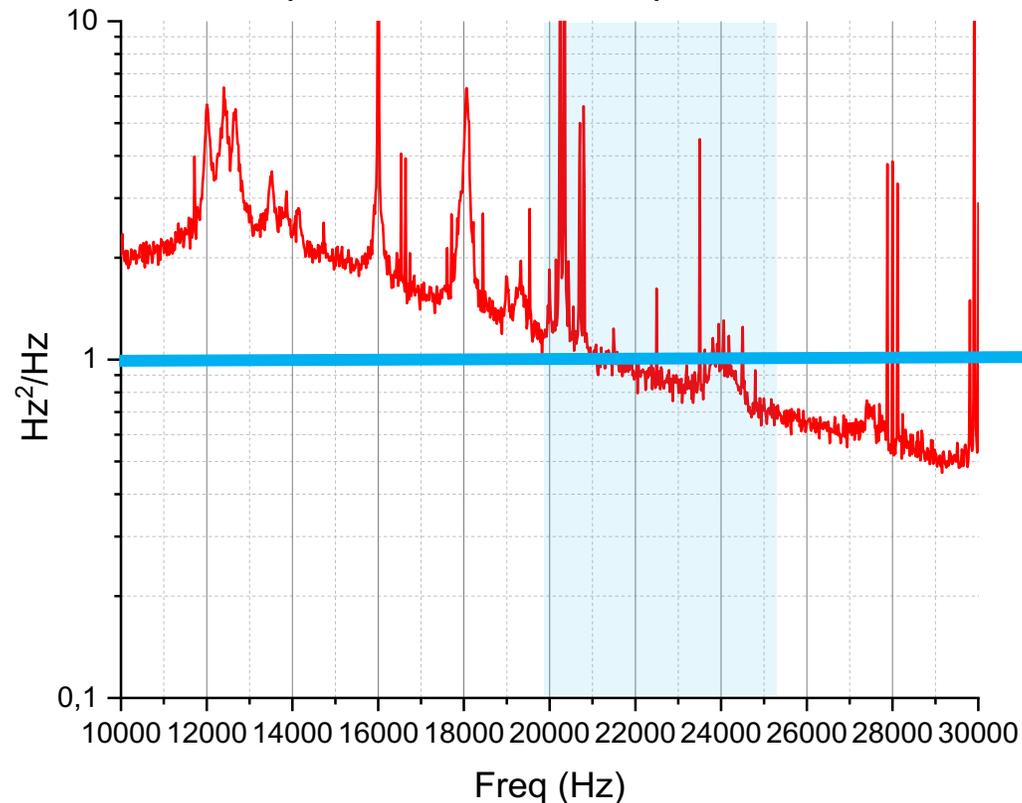
- Ridotto lo spessore complessivo da 2000 a 1500 micron e evitati scavi RIE con doppia profondità.
- Ripetute tutte le simulazioni FEM e verificato che il disegno attuale conserva le **prestazioni** e gli **aspetti critici** della proposta originale



a) Lunghezza di cavità 11 mm, cavità priva di PZT. E' la configurazione attualmente in uso a Camerino. La lunghezza di cavità consente di raggiungere la condizione di risonanza tra laser e cavità agendo unicamente sulla frequenza del laser (accordabile su ca 30 GHz). Non è possibile ottimizzare l'accoppiamento tra membrana e campo in cavità, che rimane quindi casuale. L'accoppiamento ha circa 2/3 di probabilità di risultare entro un fattore 2 dal massimo (livello che consideriamo accettabile). Nel caso risultasse troppo basso, è necessario smontare la cavità e riprovare, variando leggermente le distanze.

b) Lunghezza di cavità 3 mm, con specchio di ingresso e schermo (comprendente lo specchio posteriore) montati su PZT. Il primo PZT permette di accordare la cavità al laser, il secondo di ottimizzare l'accoppiamento tra membrana e campo in cavità.

Rumore di frequenza misurato rispetto ad una cavità lunga 50mm, Finesse 57000



Target: **1 Hz<sup>2</sup>/Hz** ( $10^{-34}$  m<sup>2</sup>/Hz) I fase  
**0.01 Hz<sup>2</sup>/Hz** ( $10^{-36}$  m<sup>2</sup>/Hz) II fase

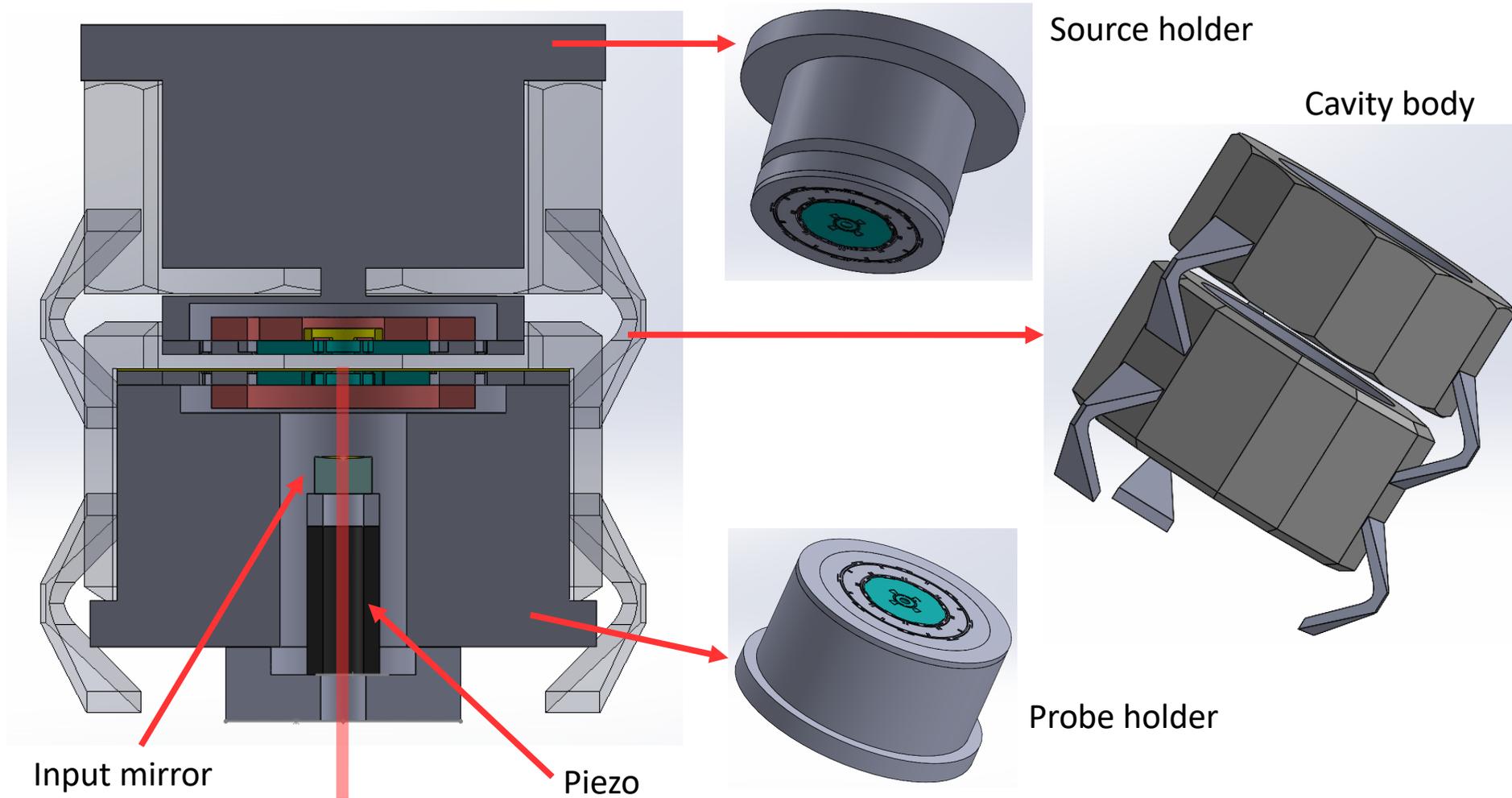
**~ 3 mm lunghezza cavità**

# Cavity design I (2023)

WP6 - CDR

Lavoro preliminare necessario per definire le misure dei device e iniziare la produzione

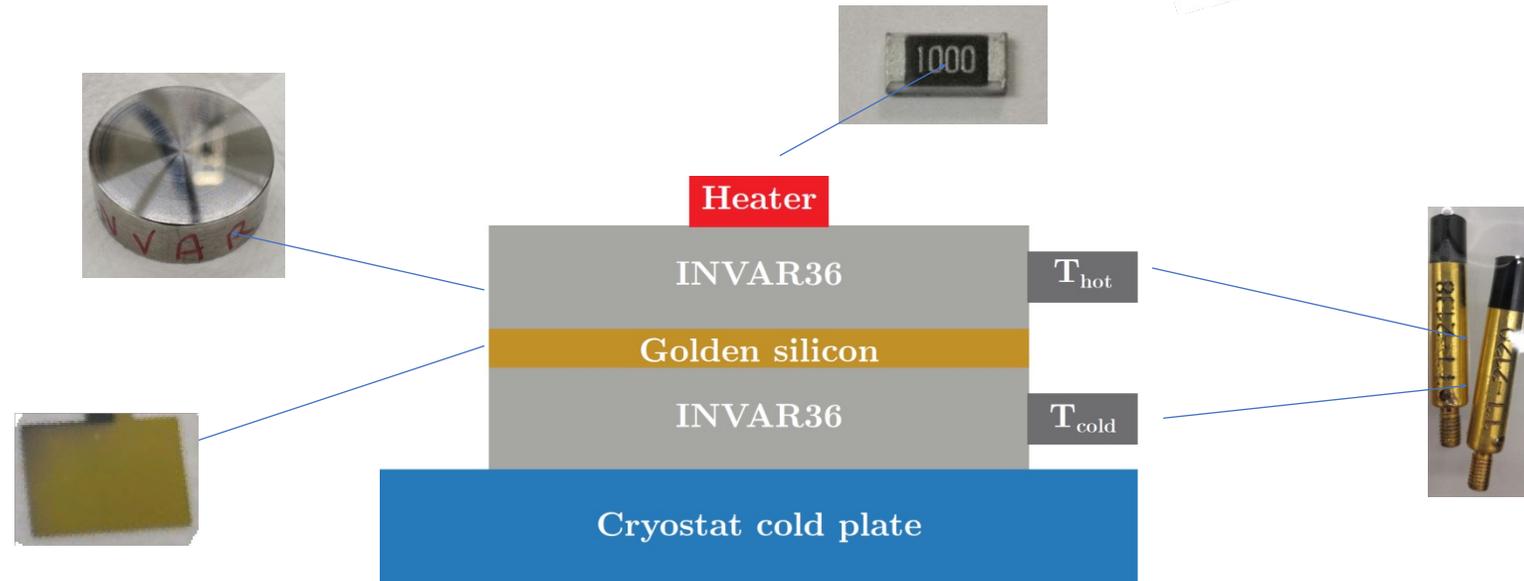
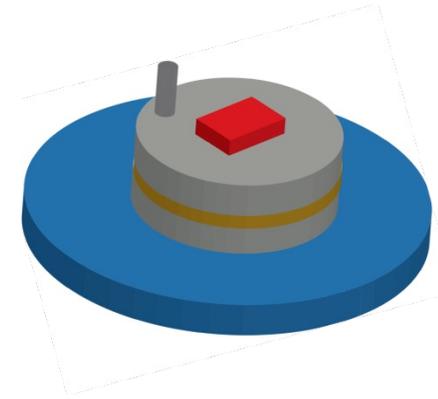
- Disegnata una prima versione di cavità da validare a livello di configurazione ottica e termica.
- **Misure di conducibilità su contatti metallo/silicio in preparazione a Camerino.**



# Thermal Conductivity Measurement

WP4-CDR

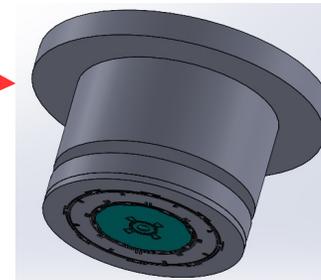
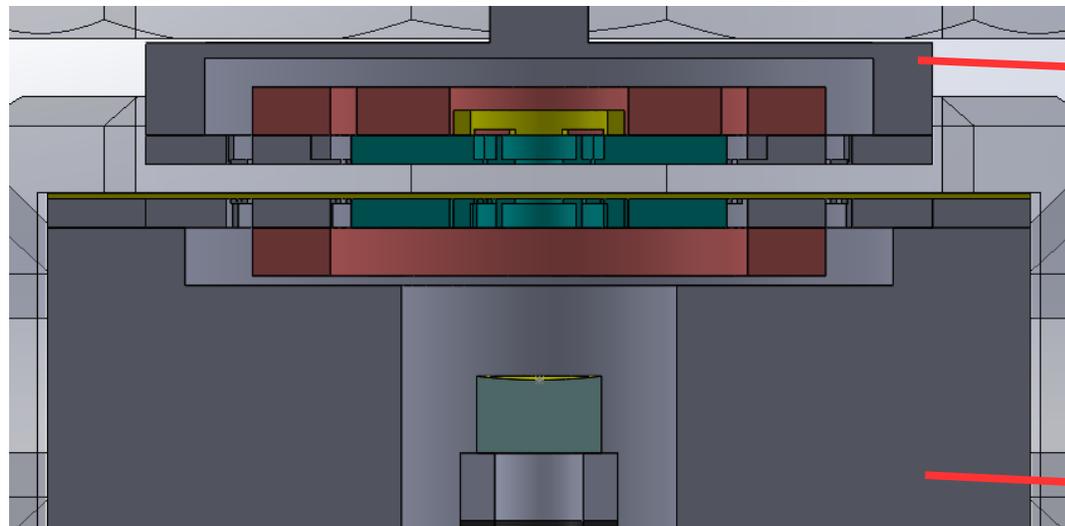
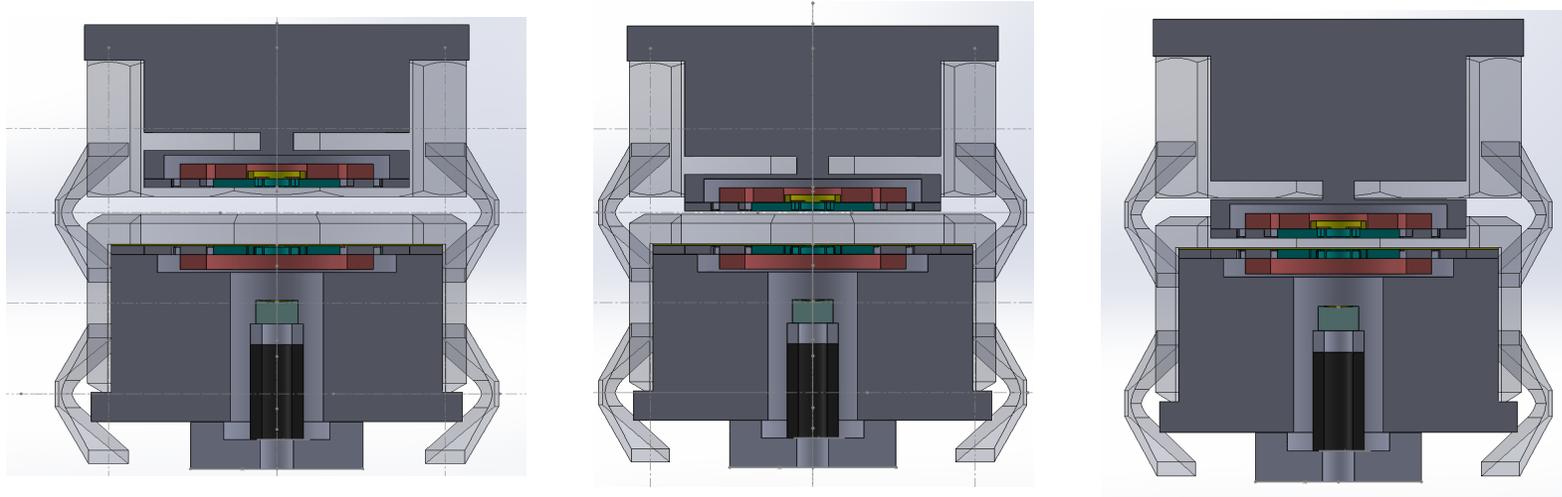
1. Design of the system for the measurement of the thermal conductivity of Si-elements with golden coating: measurement needed for estimating the thermal gradient and inferring the **effective oscillators temperature**.



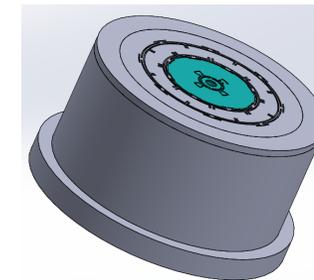
2. System assembled and ready for test.

# Cavity design II (2023)

La lunghezza del Source Holder definisce la distanza tra i due oscillatori (futura movimentazione?)



Source holder



Probe holder

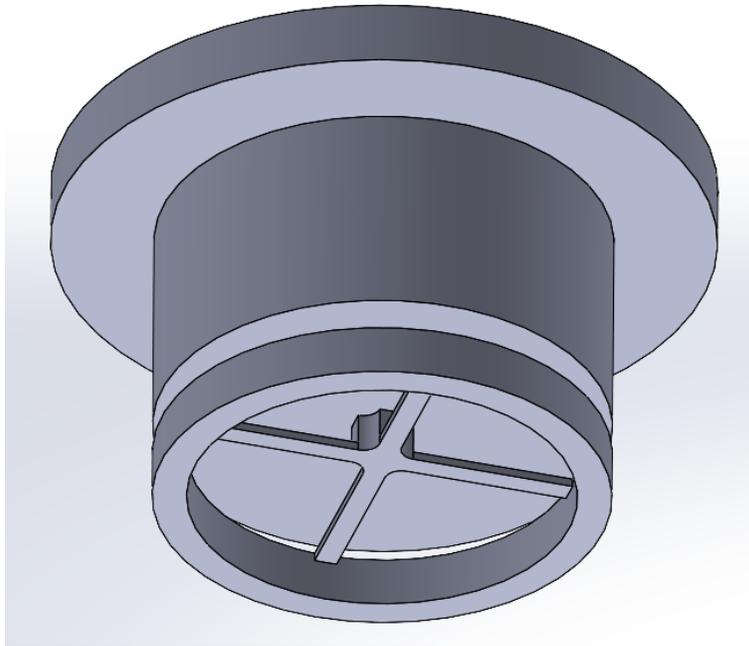
# Cavity design III (2023)

WP6 - CDR

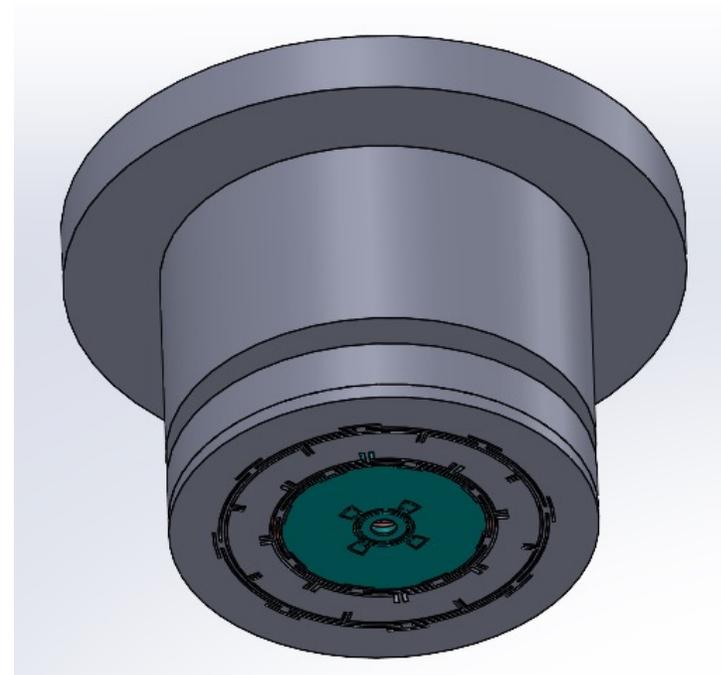
La struttura della cavità permette di ottenere la reiezione meccanica necessaria per l'esperimento grazie ad un filtro meccanico aggiunto nel supporto del source.

Questo disegno preliminare permette di migliorare la reiezione di un fattore 100 (obiettivo CDR).  
Stiamo lavorando per migliorare di un ulteriore fattore 10 di sicurezza.

NB: il supporto del source deve soddisfare requisiti meno stringenti per la termalizzazione, dato che l'oscillazione di drive è molto maggiore del suo termico. Questo permette maggiore flessibilità di design.



Source Holder



Con Source montato



# Accordo di Ricerca Collaborativa con Sintef Digital (Oslo, Norway) per la microfabbricazione (2023)

WP1 - CDR



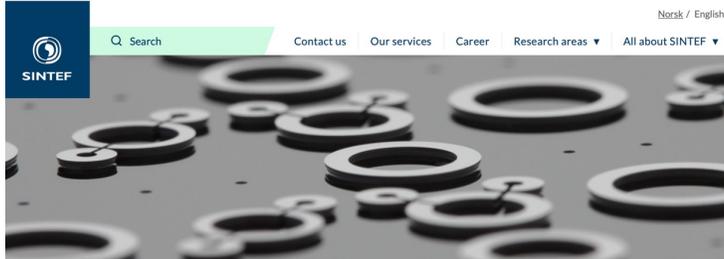
Firmata NDA tra Sintef – Digital e INFN propota da Tecnologico di INFN. Si definisce il flusso di informazioni scambiate tra le parti e la policy di protezione dell'IP che si svilupperà;



Si sta definendo l'accordo quadro di ricerca collaborativa e l'allegato tecnico in collaborazione con l'ufficio di Trasferimento Tecnologico di INFN che sarà di durata annuale e rinnovabile tacitamente per i successivi anni, salvo disdetta anticipata delle parti;



E' stato effettuato l'ordine di acquisto dei substrati in silicio cristallino 6 pollici con spessore 1.5 mm al fine di fornire il materiale di partenza al partner Sintef Digital e partire quanto prima con la realizzazione del primo prototipo: il device SOURCE; Arrivo dei wafers previsto Luglio/Agosto 2023.



## Department of Smart Sensors and Microsystems



1

### Non-Disclosure Agreement

This Mutual Non Disclosure Agreement is entered into as of the last signature date by and between SINTEF AS, by its institute SINTEF Digital, having a place of business at Gaustadalleen 23 C, 0373 Oslo, Norway, and TIPFA-INFN, having a place of business at c/o Dip. di Fisica, Università di Trento, Via Sommarive, 14, 38123 Povo, Trento, Italy. In the following the party disclosing information will be called the Disclosing Party and the party receiving information will be called the Receiving Party. Each Party will be called a Party, and together they will be called the Parties.

#### 1 Purpose

The Parties wish to explore the development of a novel monolithic resonant MEMS sensor for gravitational measurements, designed by TIPFA-INFN and fabricated by SINTEF Digital, with the purpose to produce a sensor for the use in fundamental research.

In connection with such Purpose, the Parties may disclose certain technical and business information which they agree to treat as confidential pursuant to the terms herein.

#### 2 Confidential Information

Confidential Information means any information disclosed under this agreement including without limitation, documents, prototypes, samples, equipment, business and technical information, licensing practices and fees, information about employee wages, research and development information, customer information and future business plans.

#### 3 Exceptions to Confidential Information

Notwithstanding Section 2 above, Confidential Information shall exclude information which:

- i) was generally known and publicly available prior to disclosure hereunder;
- ii) becomes generally known and publicly available after disclosure hereunder without breach of any confidentiality obligation;
- iii) is already in Receiving Party's possession prior to disclosure hereunder;
- iv) is obtained by Receiving Party from a third party without breach of any confidentiality obligations; and/or

## WP1 - CDR

Interesse reciproco per l'acquisizione di nuove competenze nel campo risonatori N/MEMS per la gravitazione.



## Microsystems and Nanotechnology

Dopo NDA si è proceduto con stesura Accordo di ricerca collaborativa e allegato tecnico con servizio di Trasferimento Tecnologico - INFN .



<b>DOC ID</b> STT_CTR_COLL_AT_MOD	<b>Ver.</b> 1	<b>Validità</b> Approvato
Modello Allegato Tecnico attività collaborativa TTX_aaSTR_000		Pag 1 di 6

### ALLEGATO TECNICO

### ALL'ACCORDO DI RICERCA COLLABORATIVA

E' previsto un rimborso spese a Sintef per costi sostenuti di CR.

# Validazione dei tasks intermedi (2023)

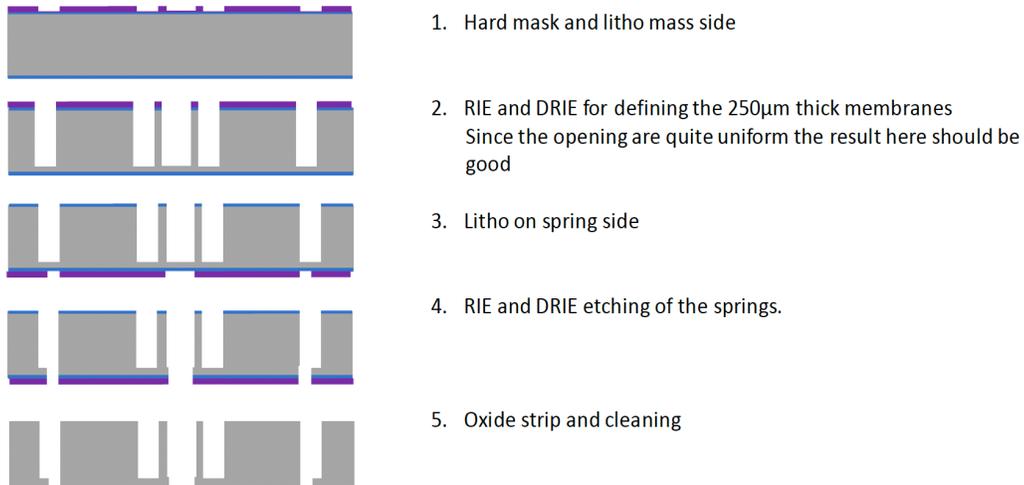
WP1 - CDR

Per lo sviluppo ex-novo di un sistema di risonatori in silicio monocristallino è necessaria la validazione dei task intermedi di processo che hanno come risultato un singolo device o parti di esso.

La validazione permetterà aggiustamenti del design iniziale o miglioramenti della meccanica del sistema risonante.

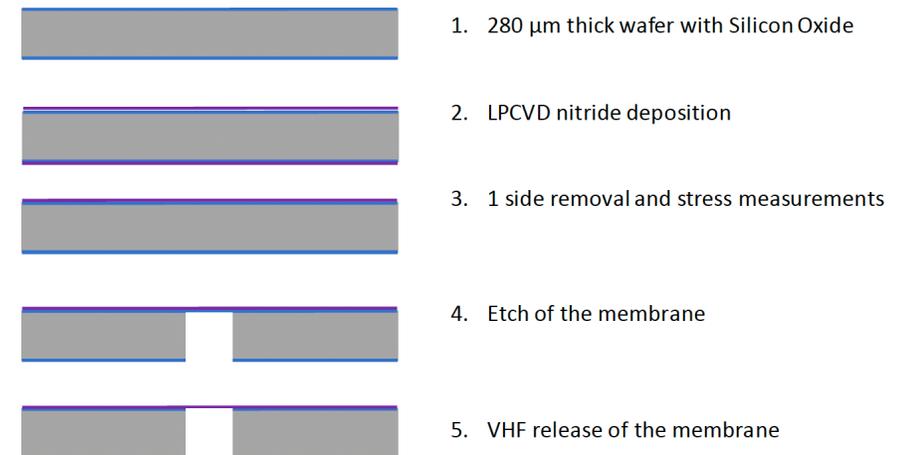
## Esempio di possibile realizzazione del SOURCE (process flow-chart)

### First fabrication process – Task 1



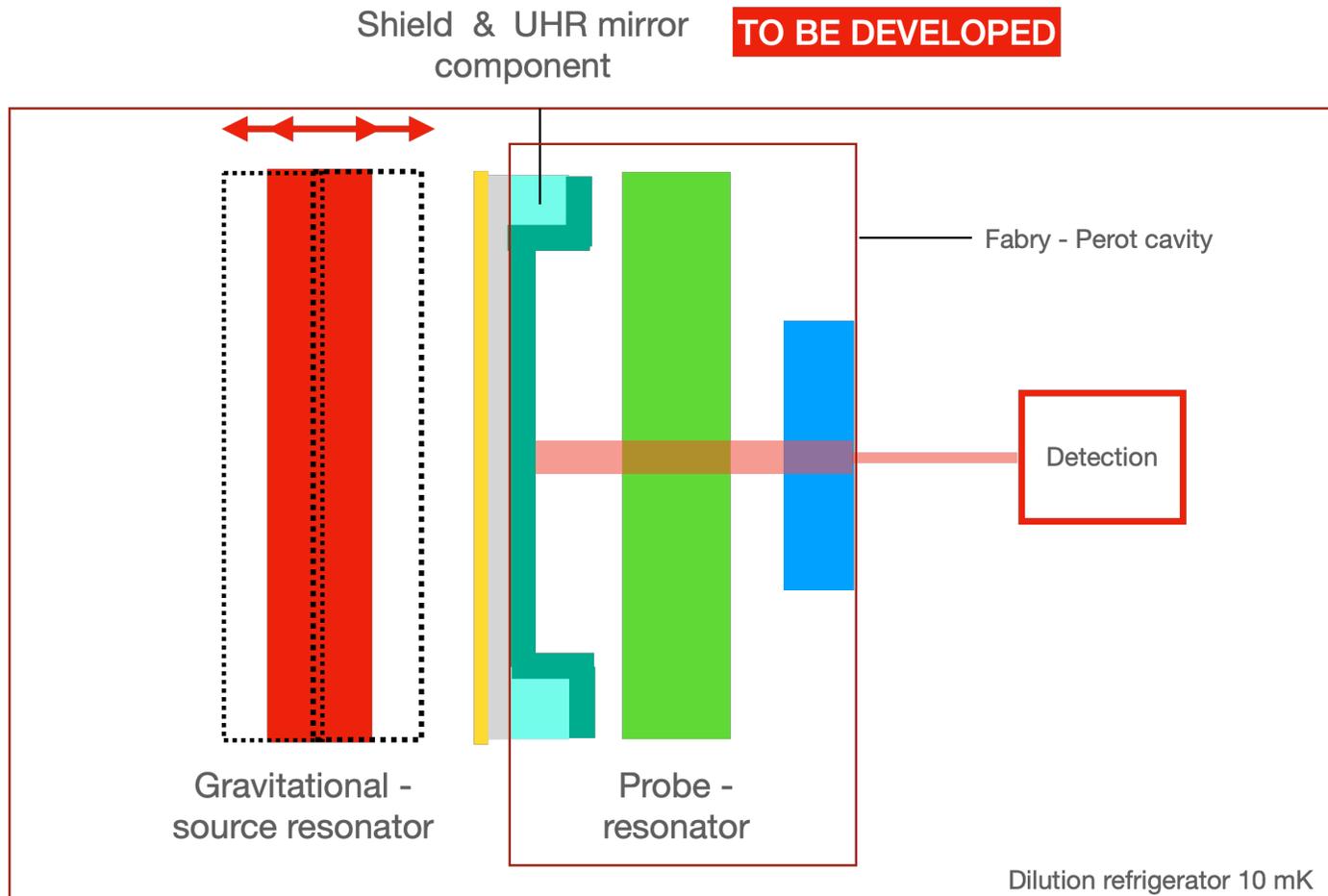
## Esempio di possibile realizzazione della membrana del PROBE (process flow-chart)

### First fabrication process – Task 2



# Sviluppo schermo elettrostatico e dello specchio di cavità (2023)

WP3 - CDR



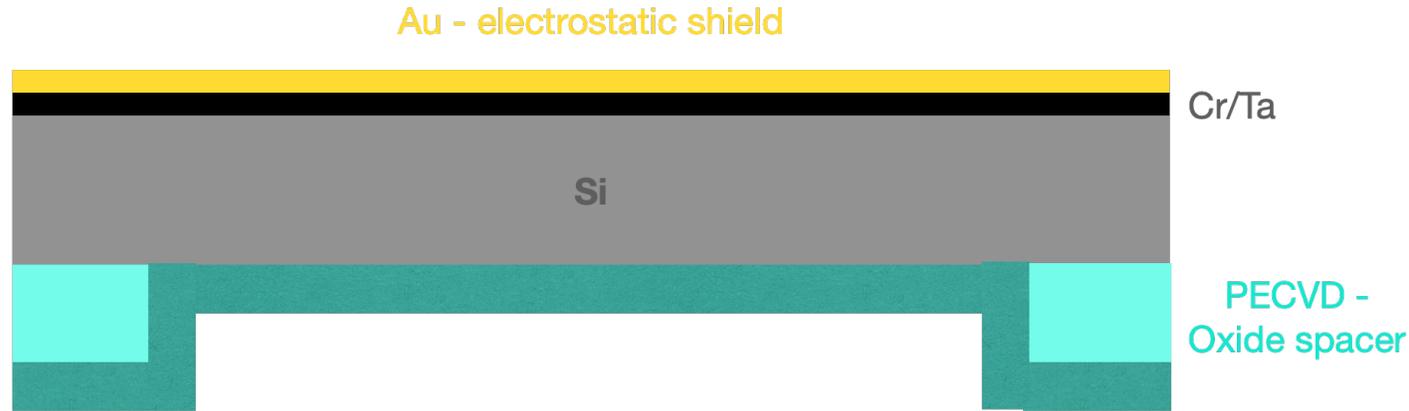
Task: Microfabrication of a bi-functional component with one side coated with gold while the other side with a UHR Double Bragg Reflector – target reflectivity: 99.999% (losses <10 ppm)

Deposition of the UHR-DB coating will be done FiveNine Optics (USA)

**TU Delft** - Else Kooi Lab will produce the component at the Microfabrication facility. Collaboration with the THz Sensing group.

# Dettagli del componente bifunzionale (2023) WP3 - CDR

## CONFIGURATION FOR THE SHIELD & LASER MIRROR COMPONENT

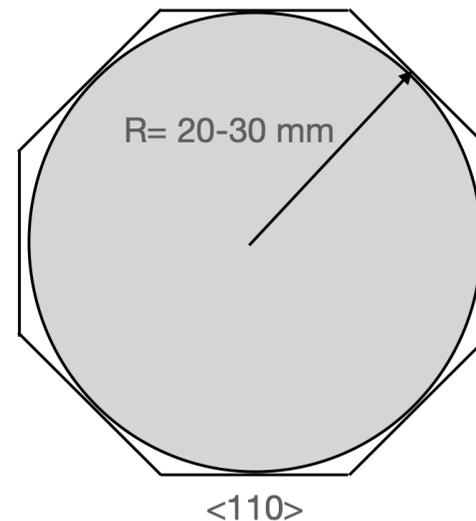


	Thickness [um]
Au (evaporated)	0.1-0.5
Cr/Ta (Adhesion layer)	0.005
Si	300
UHR – coating Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>	5.9
Spacer Epi-Si (smooth)	10 um

**UHR coating - 38 alternate Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> quarter-wave coating layers for a total thickness of 5.9 μm. Reflectivity 99,999% @ 1064 nm NdYAG Laser Fabrication by IBS sputtered - annealed at 430 °C for stabilisation of the coating.**

UHR mirror should be clean, deposited on a low roughness Substrate (ICEMOS) < 10 Angstrom ? (50 Angstrom TOPSIL)

A double-face surface micromachining process is under development !!

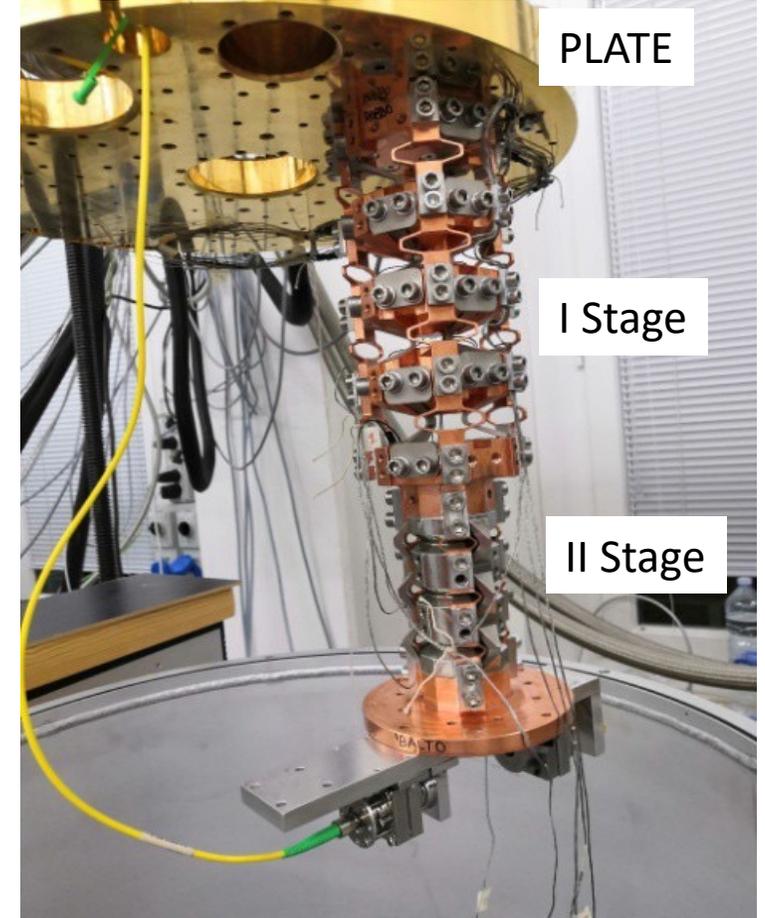
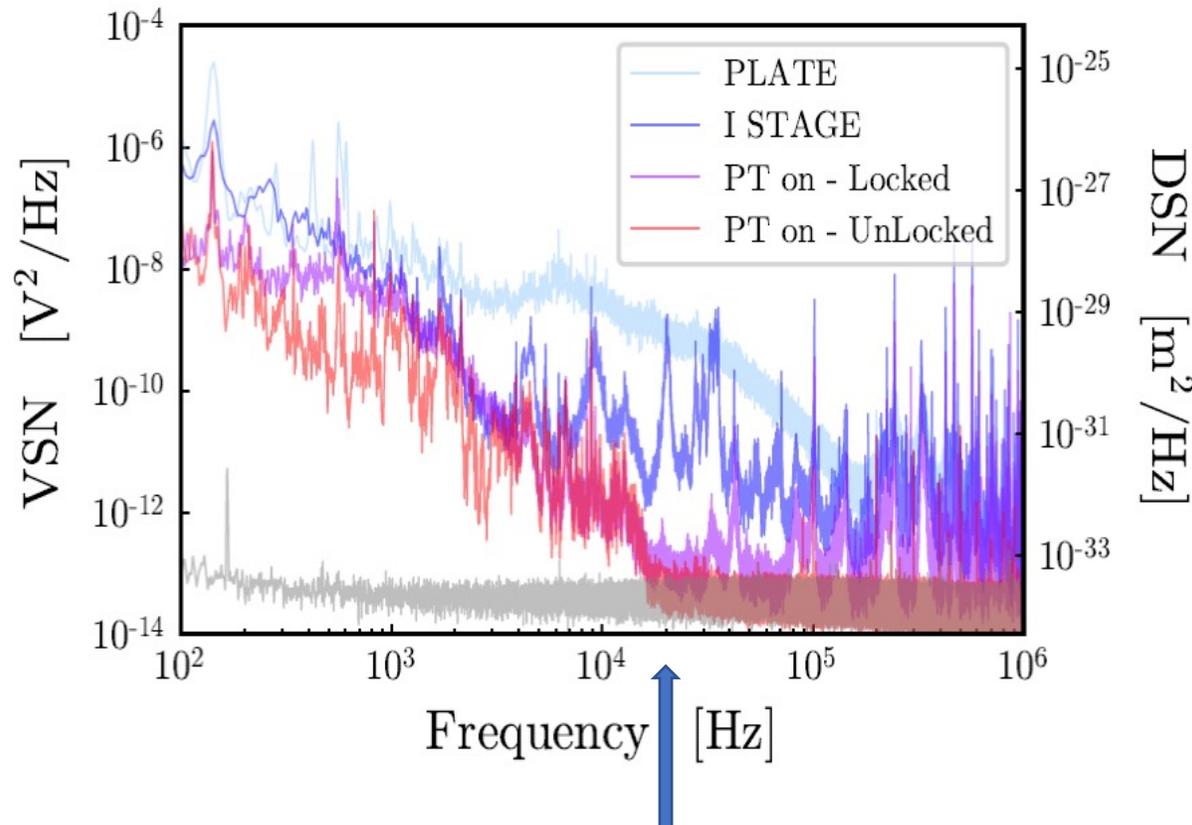


The size and shape of the chip is determined by the cavity design but could be critical from the Microfabrication point of view because of the fragility of the wafer.

The deep-RIE cut strategy should be defined.

# Background noise in the cryostat (2023)

Reduction of background noise floor I:  
reducing **mechanical vibration and acoustic noise** with suspension system  
(good preliminary results)



PT – Pulse Tube  
Optical Cavity Locked/ Unlocked

GRAFIQO Workpackages	Attività TIFPA	
WP1: Progettazione e realizzazione di dispositivi P-S WP3: Studio e riduzione dell'accoppiamento elettrostatico. WP5 Analisi ed eventuale riduzione del rumore acustico a 20 kHz. WP6 Progettazione e realizzazione del sistema opto-meccanico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Design e processo fabbricazione per P-S e specchio cavità</li> <li>- Sviluppo soluzione con schermo bifunzionale microfabbricato con doratura</li> <li>- Stadio LF-HF funzionate come da progetto</li>   <li>- Primo Design della cavità con sistema di riezione meccanica cross-talk tra PS migliorata di un fattore 100</li> </ul>	

Impegni di spesa/missioni GRAFIQO	al 30/06/2023	al 31/12/2023
Processo microfabbricazione (contributo rimborso spese di Clean Room sostenuto da Sintef Digital prevista dal contratto di Accordo di Ricerca Collaborativa)	-	50.0k € (settembre)
Acquisto substrati 1.5 mm in c-Si – arrivo Luglio/Agosto (su dot2)	3.241k €	-
Conferenza MNE2023 (su dot2)	-	2.0k € (settembre)
Missioni coordinamento Italia / missione estero TUD / Sintef	0.4k €	1.6k € (novembre)

- *Optical self-cooling of a membrane oscillator in a cavity optomechanical experiment at room temperature* Submitted to Physical Review A <https://arxiv.org/pdf/2305.14903.pdf>
- *Amplitude and phase noise in Two-membrane cavity optomechanics* - Submitted. <https://arxiv.org/pdf/2305.11594.pdf>
- *Lowering dissipation in Electro-Optic resonators for quantum transducing RF to optical signals* – Submitted to Berlin [49th international conference on Micro and Nano Engineering](#) 25-28 September, Berlin Germany

# FTE & richieste finanziarie TIFPA 2024

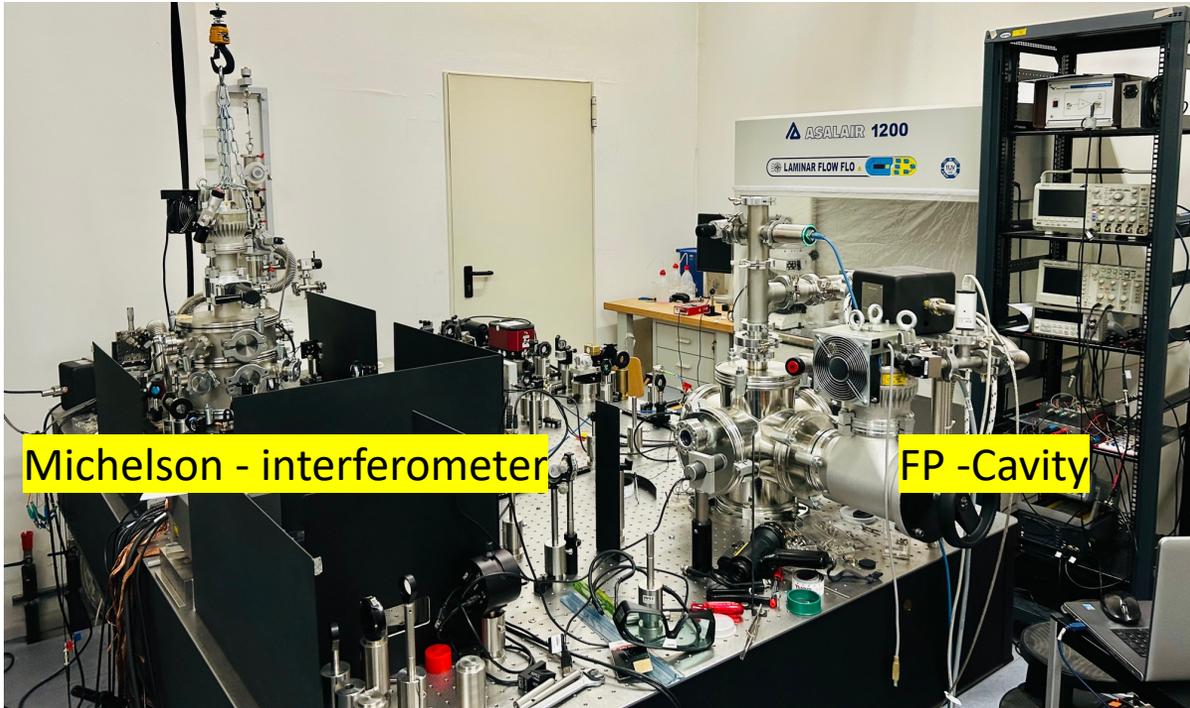
Dettaglio FTE - TIFPA	2024
Dr. Michele Bonaldi (Associato Dip. FBK-CNR)	1.0
Dr. Antonio Borrielli (Associato Dip. CNR-IMEM)	1.0
Dr. Serra Enrico (Dip. Tecnologo TIFPA)	1*(min FTE 0.7)
<b>TOT</b>	<b>3.0* - (2.7)</b>

- Indica che entro fine anno in quanto parte FTE sarà allocato sul progetto Prin2022 in fase di approvazione del finanziamento. Nota: Potrebbero esserci 0.2 FTE aggiuntivi del Prof. Giovanni Prodi quando sarà chiarito il modalità computo FTE di Virgo -ET

Richieste finanziarie TIFPA	2024
Processo microfabbricazione (quota annuale per rimborso spese CR - Accordo di Ricerca collaborativa) -consumabile	40k
Missioni italia (coordinamento 3 persone) e estere (TUD & Sintef Digital – min. 2 viaggi)	10k

# Related activities in Trento

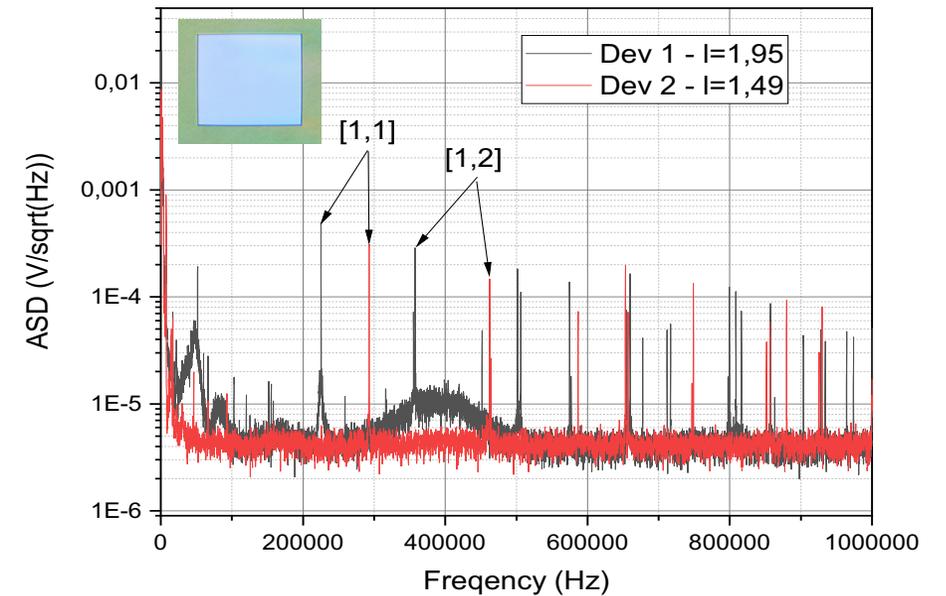
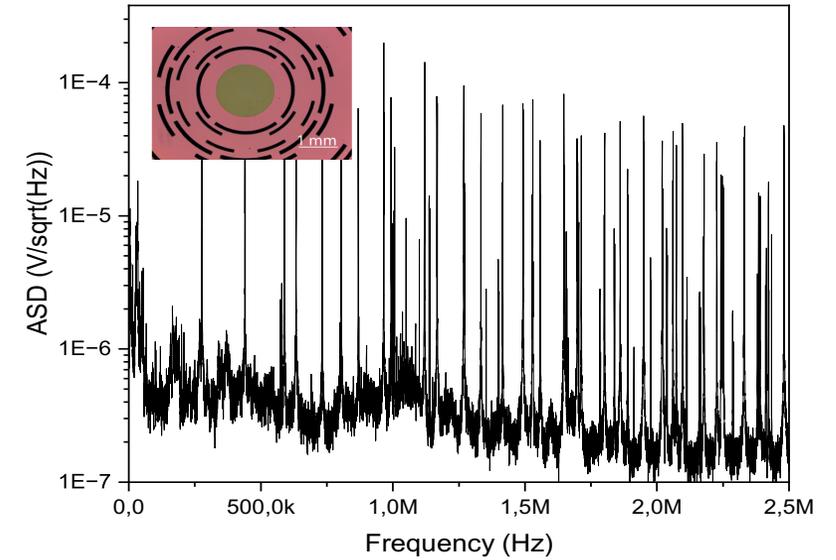
CNR-IMEM Lab



Michelson - interferometer

FP - Cavity

(Top) Cavity measurement with PHD scheme and MIM  
(Bottom) Interferometric measurement on FBK SiN membranes (collaboration with A. Franzoi)



# Realizzazione della coppia source-probe

La realizzazione dei dispositivi SOURCE-PROBE è molto complessa in quanto si richiedono lavorazioni di bulk-micromachining su due lati di un substrato in silicio monocristallino con scavi profondità variabile 0.250 mm e 1.5 mm e con necessità di controllo molto fine degli spessori.

Si prevedono le interconnessioni dei due lati del SOURCE con tecniche **Through-Silicon-Vias** di elevata difficoltà tecnologica su spessori > 1 mm. Il livello di pulizia dovrà essere elevato (CR100).

E' stato individuato **Sintef Digital** quale partner che offre maggiori garanzie di successo nella realizzazione dei dispositivi sia in base ad all'esperienza nella realizzazione di sensori ad alto aspetto di forma con verticalità delle pareti < 1°. Il partner si è dimostrato collaborativo e metterà a disposizione la propria camera pulita, il personale ricercatore e tecnico e le proprie competenze a fronte di una copertura dei costi di operatività delle macchine e del materiale impiegato. SI SEGUE QUINDI LA STRADA DELL'ACCORDO DI RICERCA COLLABORATIVA.