

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI

Dipartimento Interateneo di Fisica "M. Merlin"

Scuola di dottorato di ricerca in Fisica XXIX Ciclo

SENSORI OPTOACUSTICI INNOVATIVI OPERANTI NEL MID-IR E NEL THz PER LA RIVELAZIONE DI TRACCE GASSOSE

Relazione finale del secondo anno:

Introduzione

L'attività di ricerca del secondo anno di dottorato si è sviluppata in continuità con gli obiettivi e le premesse poste durante l'anno precedente. I margini di evoluzione del campo della spettroscopia di tracce gassose in termini di arricchimento delle tecniche e di ambienti di utilizzo si rivelano potenzialmente illimitati. Affianco al tema del monitoraggio ambientale, che rappresenta sempre un'emergenza all'ordine del giorno negli ambienti in cui lo sforzo della comunità scientifica è al servizio degli organi governativi, riemergono in questi ultimi tempi diverse questioni:

1. Un intransigente sferzata al controllo delle emissioni di gas di scarico dagli autoveicoli, innescata dall'esplosione dello scandalo del Volkswagen;
2. Prevenzione e diagnosi tempestiva di malattie esaminando tracce gassose esalate dal corpo umano, tra cui ovviamente e prioritariamente il respiro;
3. Un sensibile accrescimento delle misure di prevenzione e gestione in sicurezza di eventi di stampo terroristico e in generale di pericolo per la società civile.

In questo scenario, la ricerca scientifica nell'ambito della spettroscopia di tracce gassose è chiamata a compiere un salto di qualità in termini di sviluppo ad hoc di tecnologia di impiego immediato, ed efficiente per rivelazioni in-situ ed in tempo reale di specie gassose di interesse.

In tal senso gli studi effettuati nel mio secondo anno di dottorato all'interno della collaborazione tra Università e Politecnico di Bari e Rice University di Houston, sono stati orientati al raggiungimento di un

nuovo stato dell'arte della tecnica Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy (QEPAS), che consentisse la transizione da prototipi di laboratorio a sensori ad impiego effettivo e permanente.

Attività del secondo anno

L'attività del secondo anno di dottorato è stata quindi incentrata sulla progettazione e realizzazione di risonatori di quarzo con caratteristiche peculiari per l'impiego in ambito spettroscopico. E' stata quindi effettuata una modellazione fisica delle dinamiche vibrazionali ed elettriche di questa nuova generazione di diapason di quarzo (QTF) custom. Si è proceduto quindi alla caratterizzazione elettrica dei trasduttori fino alla caratterizzazione mediante eccitazione fotoacustica nella regione spettrale del vicino-IR.

Sono infine stati realizzati due sensori entrambi per la rivelazione dell'acido solfidrico (H₂S) rispettivamente utilizzando due sorgenti laser nel vicino-IR e nel THz e che impiegano due diapason custom.

Studio delle proprietà elettro-elastiche di una nuova generazione di QTFs

I risonatori acustici di quarzo sono costituiti da due rebbi fissati ad una base. Le loro frequenze di risonanza sono determinate dalle proprietà elastiche del loro materiale costituente, dalla loro forma e dimensioni. Essendo il quarzo un materiale piezoelettrico, uno stress meccanico può essere convertito in un segnale elettrico e viceversa. In termini di modellazione elastica, ogni rebbio può essere descritto come un singolo oscillatore armonico, trascurando l'accoppiamento con l'altro. Per piccole oscillazioni di ampiezza, il moto di ciascun rebbio può essere descritto utilizzando un modello unidimensionale e le frequenze di risonanza nel vuoto sono date da:

$$f_{n,vac} = \frac{\pi T}{8\sqrt{12}L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} v_n^2$$

dove $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ è la densità del quarzo, $E = 72 \text{ GPa}$ è la componente del modulo di Young del quarzo nel piano di vibrazione della QTF. Le dimensioni L e T sono mostrate in Fig.1(a), $v_{n=0} = 1.194$ per il modo di oscillazione flessurale fondamentale e $v_{n=1} = 2.988$ per il primo overtone. Nel modo fondamentale, ciascun rebbio vibra con un ventre in punta e un nodo alla base della QTF. La potenza media assorbita è massima alla frequenza fondamentale f_0 ed è data da:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m_e}}$$

dove $m_e = 0.24267\rho LTw$ è la massa effettiva di un rebbio e w è lo spessore della QTF. La costante elastica k_0 del modo fondamentale è determinata da parametri geometrici e dal modulo di Young:

$$k_0 = 0.2575 \frac{T^3 w E}{L^3}$$

È conveniente introdurre il fattore di qualità Q , definito come il rapporto tra f_0 e la larghezza a mezza altezza (FWHM) della curva di risonanza Δf . Sfruttando l'effetto piezoelettrico del quarzo, le oscillazioni dei rebbi creano una corrente proporzionale alla velocità dell'estremo superiore $I(t) = a \cdot dx/dt$, in cui la costante di proporzionalità, detta anche *fork constant*, è data da:

$$a = 3d_{11}E \frac{TW}{L}$$

dove $d_{11} = 2.31 \cdot 10^{-12}$ m/V o C/N è il modulo piezoelettrico longitudinale del quarzo. La QTF può essere modellata sia come oscillatore meccanico che come circuito RLC e le relazioni tra caratteristiche meccaniche ed elettriche sono date da: $R = 2m_e \Delta f / a^2$, $L = 2m_e / a^2$ and $C = a^2 / 2k_0$. Di conseguenza, la *fork constant* può essere riscritta come:

$$a = \sqrt{\frac{2m_e \Delta f}{R}}$$

La corrente piezoelettrica può essere riscritta come $I(t) = I_a \sin(2\pi ft) + I_b \cos(2\pi ft)$, dove I_a e I_b sono le componenti in-fase e fuori-fase della corrente, entrambe funzioni della frequenza di eccitazione f :

$$I_a = \frac{I_M (\Delta f)^2 f^2}{(\Delta f)^2 f^2 + (f^2 - f_{0,vac}^2)^2},$$

$$I_b = \frac{f I_M \Delta f (f^2 - f_{0,vac}^2)}{(\Delta f)^2 f^2 + (f^2 - f_{0,vac}^2)^2}$$

dove I_M è il valore massimo della corrente alla frequenza di risonanza $f_{0,vac}$.

Le QTF che sono state progettate e realizzate sono rappresentate in Fig.1 e poste a confronto con la QTF standard originariamente ideata per scandire la frequenza di clock degli orologi ma finora ampiamente usata anche per scopi spettroscopici.

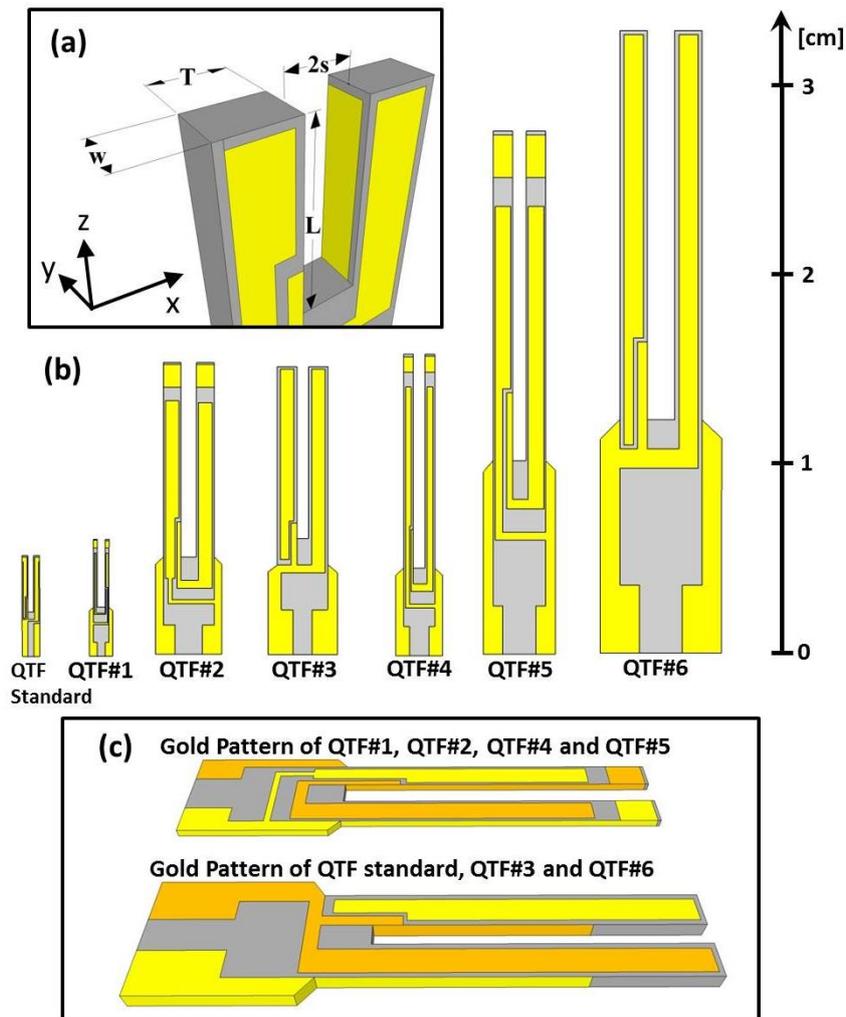


Fig. 1. (a) Schema delle dimensioni delle QTF. (b) piano x-z delle QTF rappresentate in proporzione. (c) differenza della configurazione dei contatti fra due gruppi di QTF.

Le QTF custom sono state realizzate a partire da uno strato di quarzo *z-cut* con rotazione di 2° lungo l'asse x, procedura che garantisce una frequenza stabile a temperatura ambiente. Tecniche fotolitografiche standard sono state usate per incidere le QTF e la deposizione dei contatti elettrici.

La nuova generazione di diapason permette rispetto alla QTF standard di essere eccitate a frequenze di risonanza più basse e quindi più adatte ai tempi di rilassamento dei gas investigati. Un'altra possibilità è quella di impiegare sorgenti laser con lunghezze d'onda maggiori (e quindi *beam waiste* maggiori) fino alla regione dei THz, o sorgenti che presentano profili del modo laser di scarsa qualità, grazie allo spazio maggiore fra i rebbi. Le 6 QTF custom sono state quindi eccitate con un segnale di tensione sinusoidale e variandone la frequenza sono stati ottenuti i profili delle curve di risonanza, mettendo in evidenza i contributi in-fase e fuori-fase della corrente piezoelettrica precedentemente introdotti (Fig.2).

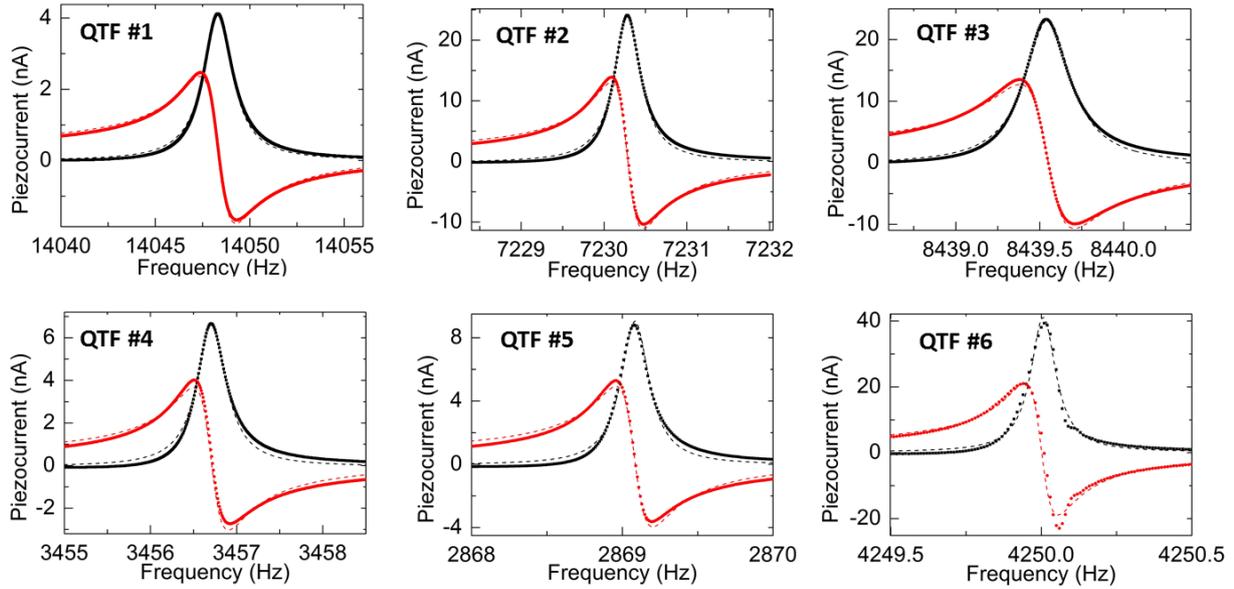


Fig. 2. (Color online) Curve di risonanza in-fase (punti neri) e fuori-fase (punti rossi) Le line tratteggiate indicano le curve di interpolazione ottenute tramite le equazioni per $I_a I_b$ sopracitate.

I parametri fondamentali delle QTF ad una pressione di 50 Torr ricavati dalle interpolazioni sono riportati nella seguente tabella

	$f_0^{(exp)}$ (Hz)	$f_{0,vac}$ (Hz)	Δf (Hz)	Q	$k_0^{(exp)}$ (N/m)	k_0 (N/m)
QTF standard	32762.84	32743.61	2.02	16206.63	9720.01	9718.33
QTF #1	14049.20	13746.59	1.89	7323.49	838.81	839.65
QTF #2	7230.27	7577.81	0.39	18654.18	3277.21	3280.50
QTF #3	8439.51	8419.79	0.54	25484.95	9033.05	9000.00
QTF #4	3456.69	3479.25	0.41	8388.12	422.19	422.61
QTF #5	2869.07	2913.42	0.24	11901.88	914.76	915.94
QTF #6	4250.01	4176.48	0.11	37712.74	8620.62	8333.33

Come è possibile notare dai fattori di qualità Q , la nuova generazione di QTF offre prestazioni comparabili alla QTF standard, tuttavia i segnali di picco della corrente piezoelettrica registrata risulta minore. Si è quindi cercato di individuare i parametri fisici significativi per orientare la progettazione delle QTF in direzione ulteriormente migliorativa. Il fattore di qualità Q e' estremamente importante perché è indice di quanto il diapason riesca a concentrare e massimizzare l'ampiezza vibrazionale (e quindi la corrente) in uno strettissimo intervallo di frequenze. Infatti risulta il segnale QEPAS $S \sim Q$. Tali considerazioni hanno quindi portato ad analizzare la dipendenza fenomenologica tra Q e la fork constant a , di cui è nota la dipendenza analitica sopracitata dai fattori geometrici.

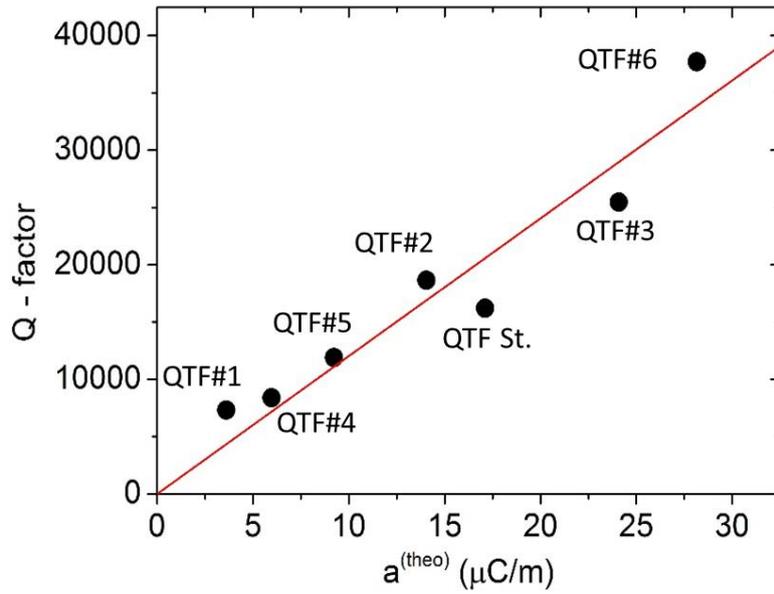


Fig. 3. Dipendenza del fattore di qualità Q rispetto all'espressione teorica della *fork constant* a : interpolazione lineare $Q=m\cdot a$, con $m=1203$ m/ μC .

Dal grafico in Fig.3 si desume come i Q sperimentali delle QTF mostrino un andamento lineare con a , cio' significa che anche $Q \sim wT/L$.

Altro parametro fondamentale ai fini della massimizzazione della corrente prodotta è la resistenza R del dispositivo, ed è stato dimostrato che $R \sim L^2/W\sqrt{T}$.

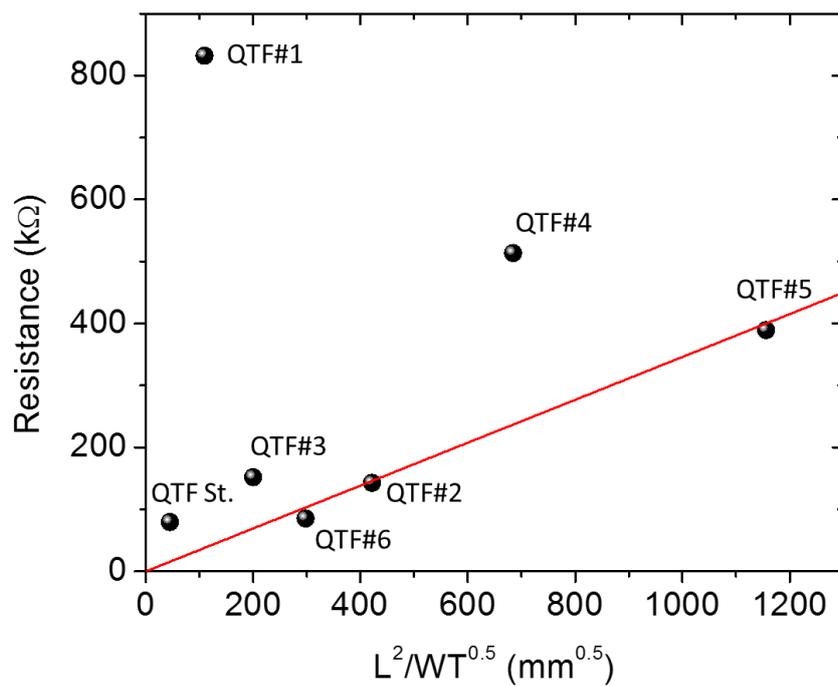


Fig. 4. Dipendenza della resistenza R sperimentale rispetto all'espressione teorica.

Valutando l'andamento esposto in Fig.4 dei valori misurati delle resistenze rispetto a $L^2/W\sqrt{T}$, si è concluso che le QTF#1 e QTF#4 si discostano dalla dipendenza lineare a causa dell'esiguo rapporto tra area del rebbio ricoperta da contatto elettrico ed area complessiva.

In sintesi, in questo vasto lavoro di modellazione e caratterizzazione è stata valutata la dipendenza del fattore Q , della frequenza di risonanza, della *fork constant* e della resistenza elettrica rispetto alle dimensioni delle QTF. Sono stati individuati nel fattore Q e nella resistenza R i fattori di merito optoacustici. Per le applicazioni QEPAS, tali risultati dimostrano che il valore di R deve essere mantenuto basso e Q il più alto possibile. Entrambe le condizioni possono essere ottenute aumentando w e il rapporto T/L . Tuttavia, la frequenza di risonanza f_0 aumenta con T/L^2 e non deve superare 40 KHz, limite imposto dai tempi di rilassamento dei gas.

Studio delle dinamiche vibrazionali dei modi superiori

Dopo lo studio e caratterizzazione delle proprietà vibrazionali del primo modo flessurale della nuova generazione di QTF, si è focalizzata l'attenzione sulla descrizione delle dinamiche vibrazionali dei modi superiori, ed in particolare del primo overtone. Il primo passo è stato valutare come cambia la parametrizzazione dei fattori di merito, in particolare del Q , con il cambio di dinamica.

Due sono i meccanismi principali di perdita, estrinseca ed intrinseca, a contribuire alla determinazione del fattore di qualità. Le perdite estrinseche sono causate da interazioni con il gas. Quelle intrinseche comprendono le perdite causate dall'interazione con il supporto (*support losses*), di superficie, di volume e le perdite termoelastiche. L'influenza di questi contributi dipende dalla dinamica vibrazionale della modalità di risonanza selezionata, dal momento che ogni modo di vibrazione è caratterizzato da diverse distribuzioni della sua massa effettiva. Il modo fondamentale nel piano di flessione può essere rappresentato da un singolo punto materiale massivo all'estremità del rebbio. Le *support losses* in tal caso possono essere trascurate e il fattore Q può essere correlato come già visto ai parametri geometrici da $Q \sim wT/L$. Il modo n -esimo può essere considerato come un sistema di n punti massivi accoppiati (Fig. 5), ciascuno dei quali posizionato in un ventre dell'onda stazionaria e il fattore Q è determinato prevalentemente dalle *support losses*. In tal caso quindi $Q \sim Q_{supp}$, che si è dimostrato essere $\sim (1/n^2) (L/T)^3$. Infatti, la conformazione del modo vibrazionale dell'overtone presenta una distribuzione uniforme dei punti massivi lungo il rebbio, con un conseguente elevato stress sul supporto della QTF. Pertanto, anche se le perdite al supporto aumentano con l'ordine dell'overtone, è possibile ottenere un Q maggiore rispetto al modo fondamentale ottimizzando le dimensioni della QTF. Tuttavia, la riduzione dello spessore T non può essere indefinita altrimenti lo smorzamento dovuto al gas diventa dominante.

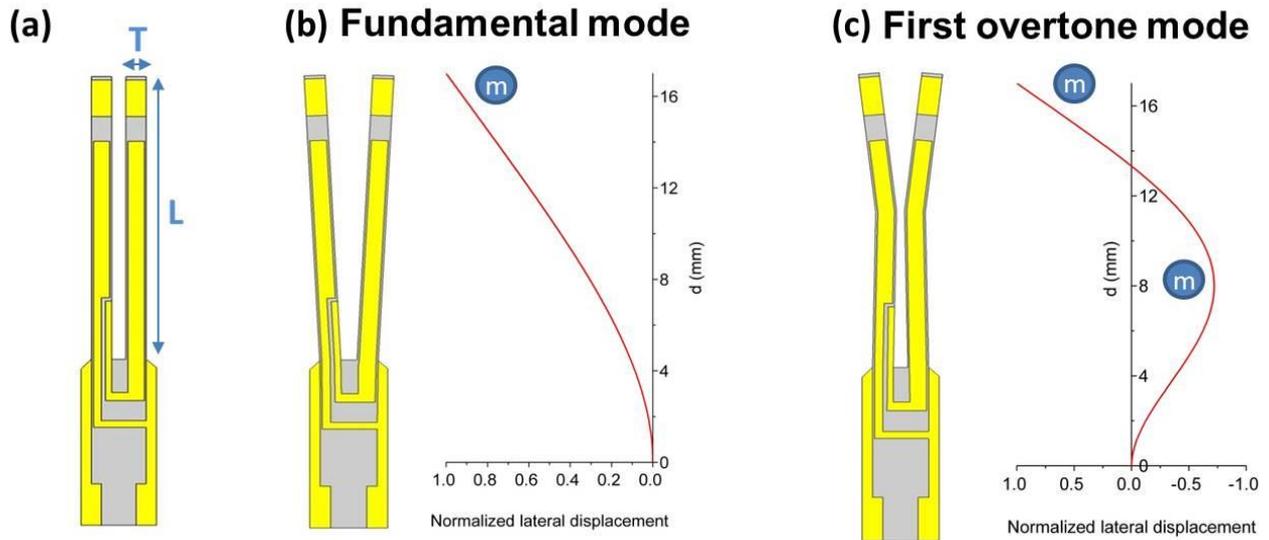


FIG. 5. (a) Schema della QTF utilizzata per l'eccitazione dell'overtono. $L = 17$ mm, $T = 1$ mm. (b) Spostamento laterale normalizzato del rebbio per il modo fondamentale (c) Spostamento laterale normalizzato del rebbio per il primo overtone.

E' stata selezionata la QTF#5 per eseguire un test elettrico e fotoacustico per confrontare la risposta in termini di piezocorrente generata dal modo fondamentale e dal primo overtone.

Nella tabella di seguito riportata sono mostrati i parametri ottenuti per i due modi vibrazionali:

	modo fondamentale, $n=0$	1 st overtone, $n=1$
f_n (Hz)	2879.55	17788.95
Δf_n (Hz)	0.238	0.567
Q_n	12098.97	31373.81
$I_{M,n}$ (nA)	9.28	49.22
R_n (k Ω)	373.50	70.40

E' possibile notare come la corrente generata sia più di 5 volte maggiore per il primo overtone.

Questo risultato è avvalorato dal fatto che anche il Q è maggiore per il primo overtone (~2.6 volte). A questo punto è opportuno verificare quale sia la risposta del risonatore ad una eccitazione di tipo fotoacustico. A tal fine è stata selezionata una riga d'assorbimento dell'acqua a $1.37 \mu\text{m}$ con una intensità di riga di 1.01×10^{-20} cm/mol e concentrazione a 1.7%, utilizzando un diodo laser come sorgente di radiazione. Dapprima è stata effettuata una scansione del segnale QEPAS in funzione della posizione lungo l'asse z dello spot laser, rappresentata in Fig. 6.

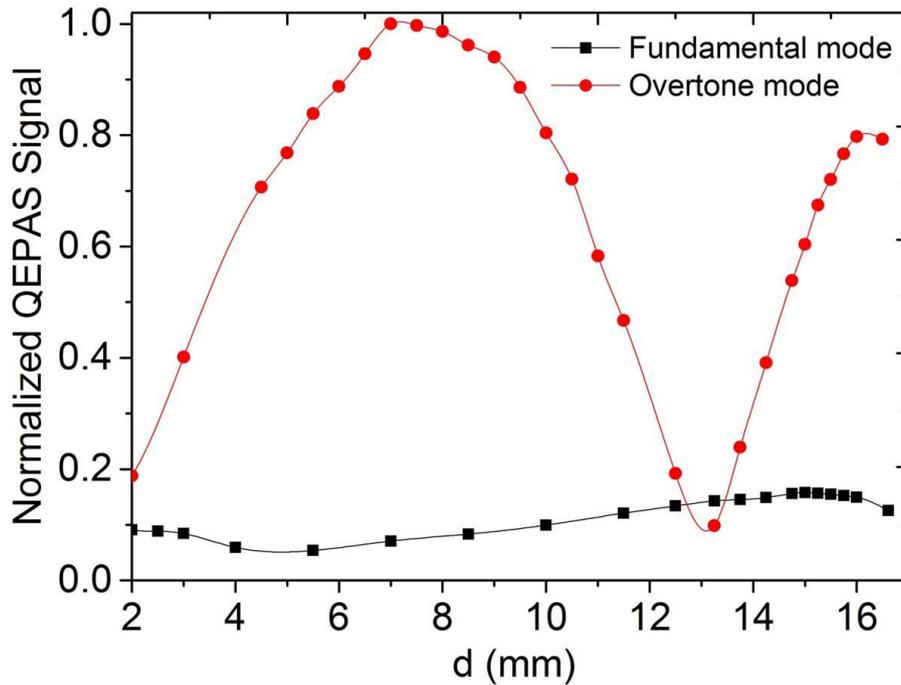


Fig. 6. Il segnale QEPAS normalizzato in funzione della distanza del fascio laser dal supporto della QTF per modo fondamentale (serie nera) e primo overtone (serie rossa).

Dal grafico è possibile notare come l'andamento del segnale QEPAS in funzione dell'altezza dello spot laser ricalchi fedelmente il profilo di vibrazione di entrambi i modi, mostrando il massimo del segnale quando lo spot laser è posizionato nel ventre dell'onda stazionaria.

Un confronto diretto fra piezocorrente generata nelle migliori condizioni di lavoro per modo fondamentale e primo overtone è riportato qui di seguito

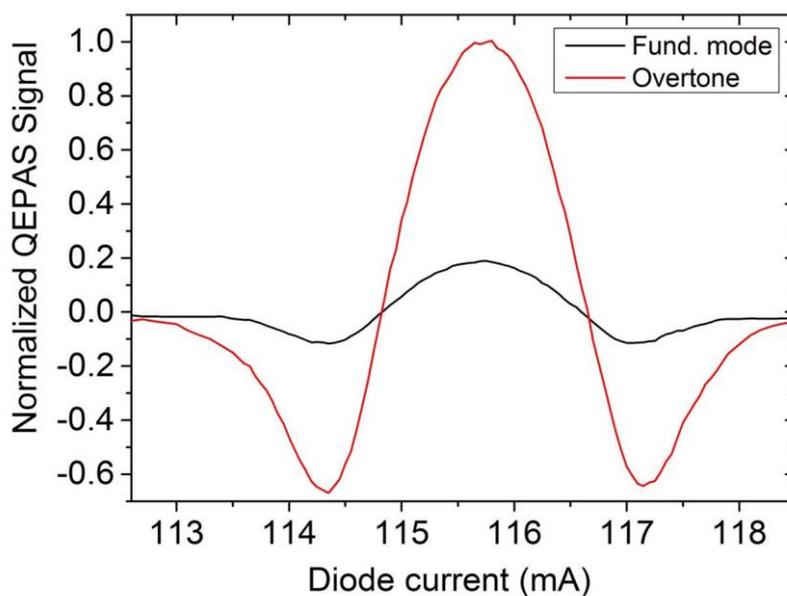


Fig. 7. Scansione del segnale QEPAS per una miscela di gas contenente aria con una concentrazione di acqua dell'1,7% ad una pressione di 75 Torr per il modo fondamentale (linea nera continua) e per il primo overtone (linea rossa continua).

I due spettri QEPAS mostrano lo stesso livello di rumore (30 mV), mentre il valore di picco misurato per il primo overtone è ~ 5.3 volte superiore a quello ottenuto con il modo fondamentale. Questi risultati dimostrano chiaramente che il funzionamento della QTF investigata al primo overtone è vantaggioso in termini di rapporto QEPAS segnale-rumore. Inoltre, operare ad una frequenza di QTF di 18 kHz consente l'utilizzo di un sistema di micro-tubi lunghi circa 1 cm come risonatore acustico per migliorare ulteriormente il rapporto segnale - rumore. Questo approccio non è attuabile per il modo fondamentale a 3 kHz poiché, essendo la lunghezza ottimale dei tubi inversamente proporzionale alla frequenza di risonanza, si richiederebbero tubi lunghi diversi centimetri, rendendo impraticabile l'allineamento ottico.

Sensore vicino-IR e THz per la rivelazione di H₂S

I gas CBRN (Chemical Biological Radiological Nuclear) ed esplosivi rappresentano obiettivi centrali dei programmi di sicurezza della NATO, e in genere presentano intense bande di assorbimento nel THz e medio infrarosso. L'acido solfidrico rappresenta uno dei gas di maggiore interesse a causa della sua alta tossicità. In concentrazioni superiori a 500 ppm provoca perdita di coscienza, inibizione e cessazione dei processi respiratori e morte. Può essere rinvenuto in basse concentrazioni come bioprodotto della decomposizione di sostanze organiche o in concentrazioni maggiori durante attività industriali come trivellazione e raffinazione del petrolio.

Questi due lavori sono stati intesi nell'ottica di integrare ed estendere gli intervalli spettrali di rivelazione dell'acido solfidrico già esplorati l'anno scorso con i sensori realizzati nel vicino-IR (2.6 μm , $S = 1,67 \cdot 10^{-21}$ cm/mol) e nel medio-IR (7.9 μm , $S = 1,51 \cdot 10^{-21}$ cm/mol). Sono stati pertanto realizzati due ulteriori sensori che impiegano per la prima volta una QTF custom, un altro nel vicino-IR, l'altro nei THz.

Nel sensore vicino-IR è stata eccitata una riga di assorbimento a 1.5 μm di intensità di $1,15 \cdot 10^{-23}$ cm/mol per mezzo di un diodo laser la cui potenza ottica è stata amplificata tramite un *erbium doped fiber amplifier* fino a 1.5W (Fig). L'approccio innovativo è stato l'uso della QTF#2 con spazio fra i rebbi di 0.8 mm. Nella prima versione di questo sensore infatti, si era reso necessario l'utilizzo della tecnica MOCAM per la cancellazione del rumore introdotto dalle code di potenza del modo laser non particolarmente buono, che impattavano sui rebbi della QTF standard. Nella nuova configurazione invece, il livello di rumore è stato mantenuto molto inferiore grazie alla spaziatura tra i rebbi quasi tre volte maggiore. I segnali QEPAS sono stati acquisiti eccitando il modo fondamentale a 7.2 KHz e sono stati applicati microtubi di 12 mm che hanno consentito di raggiungere un'amplificazione del segnale rispetto alla QTF nuda di circa 80 volte.

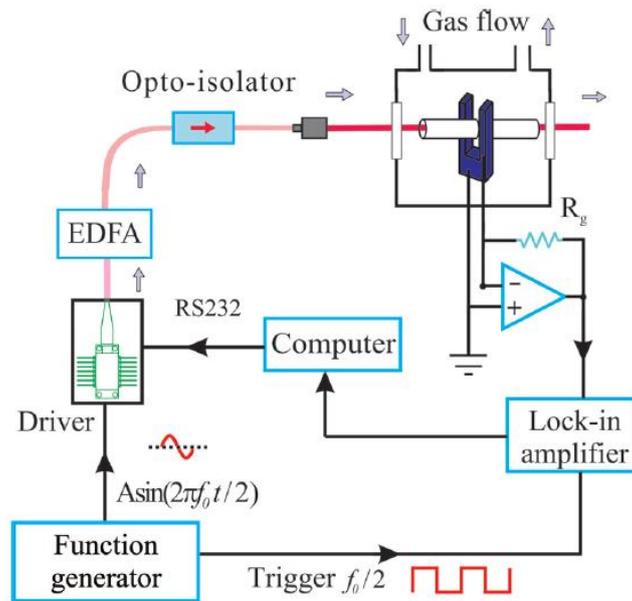


Fig. 7. Apparato sperimentale del sensore vicino-IR con diodo laser amplificato in fibra per la rivelazione di H₂S

Dalla analisi Allan Deviation è stato estrapolato un limite di sensibilità di rivelazione di 30 ppb a 30 secondi di integrazione, ed una *normalized noise equivalent absorption (NNEA)* di $1.3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Fig.8)

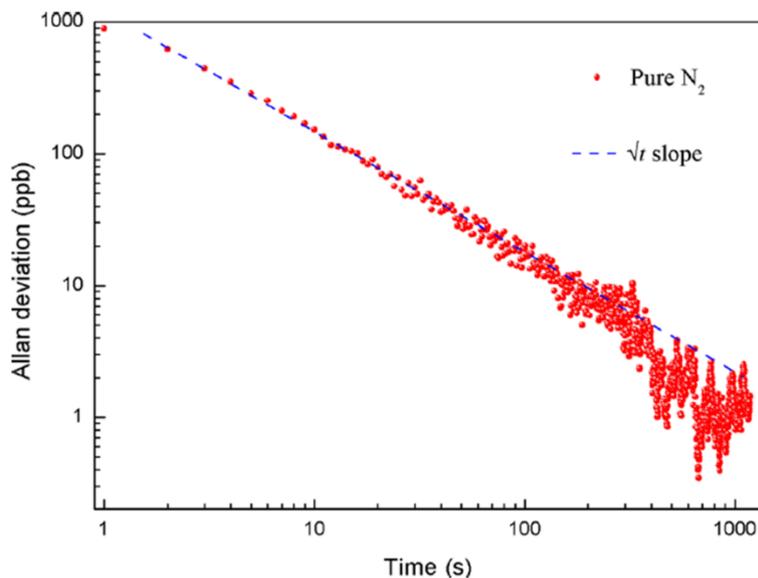


Fig. 8. Analisi Allan Deviation per il sensore vicino-IR con diodo laser amplificato in fibra per la rivelazione di H₂S

Per quanto riguarda il sensore THz, la riga d'assorbimento selezionata ha lunghezza d'onda 103 μm (2.91 THz) e intensità $1.13 \cdot 10^{-22} \text{ cm/mol}$. La sorgente laser impiegata è un laser a cascata quantica (QCL) Fabry-Perot con potenza 0.24 mW (Fig.9). Essendo il *beam waiste* di poco inferiore a 500 μm, si è reso necessario

usare la QTF#5 con spaziatura fra i rebbi di 0.7 mm. Anche in questo caso si è utilizzato come modo di eccitazione il fondamentale a 2.8 KHz, ma non sono stati impiegati micro-tubi.

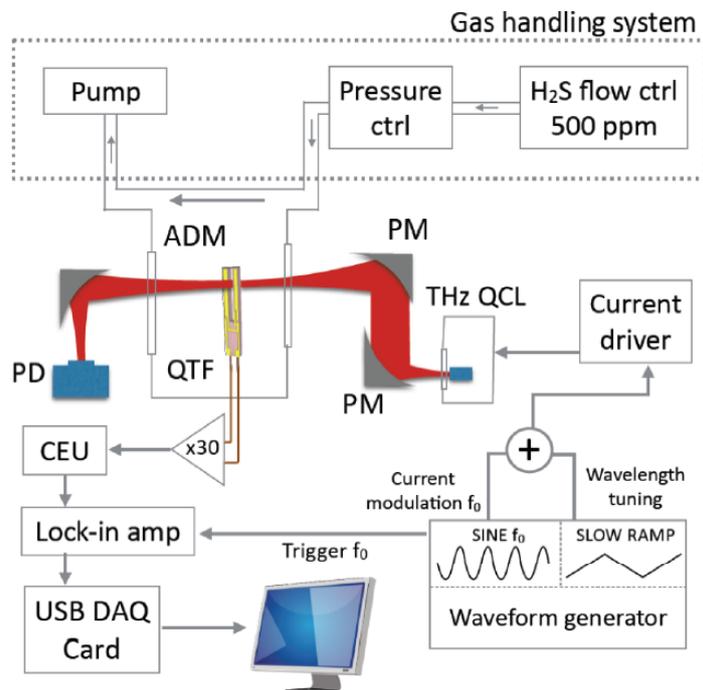


Fig. 9. Apparato sperimentale del sensore THz con laser a cascata quantica per la rivelazione di H₂S

Dalla analisi Allan Deviation è stato estrapolato un limite di sensibilità di rivelazione di 107 ppm a 30 secondi di integrazione, ed una $NNEA$ di $3.6 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ (Fig.10)

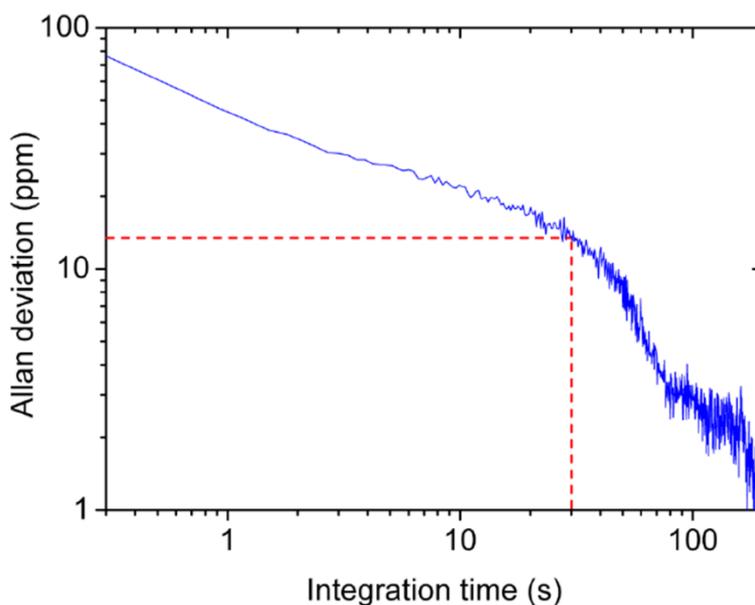


Fig. 10. Analisi Allan Deviation per il sensore THz con laser a cascata quantica per la rivelazione di H₂S

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva delle prestazioni dei quattro sensori realizzati per la rivelazione di acido solfidrico:

	Near-IR	Near-IR	Mid-IR	THz
Sorgente laser e Potenza	Diodo laser amplificato in fibra, 1500 mW	Diodo laser, 3 mW	QCL a cavita' esterna, 45 mW	QCL Fabry-Perot, 0.24 mW
QTF	QTF#2	Standard QTF	Standard QTF	QTF#5
Lunghezza d'onda (μm)	1.5	2.6	7.8	103 (2.91THz)
Intensita' di riga (cm/mol)	$1.15 \cdot 10^{-23}$	$1.67 \cdot 10^{-21}$	$1.51 \cdot 10^{-21}$	$1.13 \cdot 10^{-22}$
NNEA ($\text{cm}^{-1} \cdot \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$)	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$2.4 \cdot 10^{-9}$	$7.3 \cdot 10^{-9}$	$3.6 \cdot 10^{-9}$
Sensibilita' di rivelazione @ 30sec	30ppb	750 ppb	330 ppb	107 ppm

Il limite di rilevazione migliore è stato ottenuto nella regione spettrale del vicino-IR poiché è stato impiegato un diodo laser amplificato in fibra con potenza ottica di 1.5 W. Tuttavia, il valore di *NNEA* misurato per il THz risulta confrontabile se non inferiore a quelli osservati nel vicino-IR e nel medio-IR, confermando che la regione THz è la più adatta per la tecnica QEPAS. Inoltre, nella regione THz esistono le bande di assorbimento di H₂S più intense, fino a due ordini di grandezza rispetto al medio-IR. Ciò significa che è possibile raggiungere un aumento del rapporto segnale-rumore di oltre due ordini di grandezza e un limite di rilevazione di poche decine di ppb andando ad eccitare le righe più intense.

Programma di Ricerca: 3° anno

Gli obiettivi principali del terzo anno sono pertanto:

1. Potenziamento dell'attività di ricerca per la rivelazione di sostanze CBRN;
2. Realizzazione di un sensore NO/NO₂ per il monitoraggio dei gas di scarico degli autoveicoli;
3. Finalizzazione della progettazione e realizzazione di una elettronica di controllo e aggancio della cavità *bow-tie* per quanto riguarda l'esperimento I-QEPAS, già avviato durante il secondo anno;
4. Studio e realizzazione di sensori di tracce gassose basati sulla spettroscopia con sorgenti COMB;
5. Sensore QEPAS THz funzionante a temperatura ambiente mediante l'utilizzo di sorgenti innovative basate su effetti non lineari (*difference frequency generation* di due sorgenti QCL medio-IR).

Pubblicazioni

- “Hollow core waveguide as mid-infrared laser modal beam filter”, P. Patimisco et al., Journal of Applied Physics (2015);
- “Allan Deviation Plot as a Tool for Quartz Enhanced Photoacoustic Sensors Noise Analysis”, M. Giglio et al., IEEE (2015);
- “Quartz enhanced photoacoustic H₂S gas sensor based on a fiber-amplifier source and a custom tuning fork with large prong spacing”, H. Wu et al., Applied Physics Letters (2015);
- “THz Quartz-enhanced photoacoustic sensor for H₂S trace gas detection” V. Spagnolo et al., Optics Express (2015);
- “Single mode operation with mid-IR hollow fibers in the range 5.1-10.5 μm ”, A. Sampaolo et al., Optics Express (2015);
- “Analysis of the electro-elastic properties of custom quartz tuning forks for optoacoustic gas sensing”, P. Patimisco et al., submitted to Sensor and Actuators B: Chemical.
- “Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy exploiting tuning fork overtone modes”, A. Sampaolo et al., Applied Physics Letters (2015)
- “Single-tube On-beam Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy”, H. Zheng et al., submitted to Optics Letters

Partecipazioni a Scuole Internazionali e Conferenze

SPIE Photonic West.

San Francisco, CA, United States 13-18 Febbraio 2015.

New approaches in Quartz-Enhanced Photoacoustic Sensing

Nato Science for Peace and Security Programme.

Izmir, Turkey, 2-6 Novembre

H₂S detection from near-IR to THz spectral regions via QEPAS

Dottorando
Angelo Sampaolo

