



UNIVERSITÀ DI PISA

Master's degree in Artificial Intelligence and Data Engineering
Documentazione del progetto di Gestione dell'Innovazione

Dal medio e lontano infrarosso alla sensoristica quantistica: un'analisi del percorso scienza-tecnologia

Leonardo Bargiotti

Anno accademico 2024/2025

Indice

Introduzione	3
Metodo seguito	3
Contesto generale: mid- e far-infrared light per quantum sensing	3
Analisi Scientifica degli Articoli	4
Primo gruppo di articoli (spettroscopia del CO ₂ , DFG)	4
Tecnologie o fenomeni fisici studiati	4
Parole chiave individuate	4
Secondo gruppo (QCL e frequency combs)	5
Tecnologie o fenomeni fisici studiati	5
Parole chiave individuate	5
Terzo gruppo (QCL stabilizzati, interband cascade lasers)	6
Tecnologie o fenomeni fisici studiati	6
Parole chiave individuate	6
Costruzione delle Query e Ricerca nei Brevetti	7
Spiegazione della strategia di ricerca.....	7
Risultati principali	8
Analisi delle Non Patent References (NPR)	9
Ricerca sulle Aziende e Applicazioni Industriali	10
Query e strumenti utilizzati	10
Aziende identificate e settori applicativi	10
Menzioni delle parole chiave sui siti web	11
Analisi delle Domande di Ricerca.....	12
Applicazioni tecnologiche e prodotti	12
Distanza temporale ricerca-applicazione	12
Chi realizza le applicazioni.....	12
Distribuzione geografica	12
Descrizione applicazioni tecnologiche e mercato	14
Ostacoli tecnologici e lacune complementari.....	14
Passaggio dai TRL bassi ai TRL elevati.....	14
Conclusioni	15
Sintesi dei punti chiave	15
Connessione tra scienza e industria	15
Riflessione personale sul percorso analizzato	15

Introduzione

Questo report analizza il legame tra alcune ricerche scientifiche avanzate nell'ambito dell'infrarosso medio e lontano (mid- e far-infrared light) applicate alla sensoristica quantistica (quantum sensing), e il loro possibile impatto tecnologico e industriale. Attraverso l'analisi di pubblicazioni selezionate, l'obiettivo è capire se e come la scienza di base si trasformi in innovazione, brevetti e applicazioni di mercato.

Metodo seguito

Il percorso seguito si articola in quattro fasi principali:

1. Lettura preliminare su Wikipedia per avere una prima comprensione dei concetti trattati negli articoli scientifici.
2. Analisi degli abstract e dei contenuti degli articoli, con l'individuazione delle tecnologie principali e delle parole chiave più rilevanti.
3. Costruzione di query basate su queste parole chiave:
 - per esplorare i database brevettuali (es. Espacenet, Google Patents);
 - per cercare aziende e attori industriali rilevanti nel settore.
4. Analisi dei risultati, con attenzione alle non-patent references (NPR), ai legami con le pubblicazioni scientifiche originali, alla geografia e agli attori dell'innovazione.

Contesto generale: mid- e far-infrared light per quantum sensing

L'infrarosso, essenzialmente nelle medie (3-8 μm) e lontane (oltre 8 μm) porzioni, è frequenza fondamentale in tante discipline scientifiche e tecnologiche. Questi intervalli di rendono possibili alcune transizioni molecolari essenziali, per esempio nella spettroscopia con gas catturati e nella rilevazione di gas come la CO_2 .

In questo contesto, strumenti come il quantum cascade laser (QCL), i frequency combs e le tecniche ottiche di stabilizzazione stanno dando spinta all'evoluzione di quantum sensing, un campo che utilizza fenomeni quantistici della luce e della materia per la quantificazione di grandezze fisiche con un'accuratezza senza precedenti.

L'attenzione sempre crescente estesa nel campo tecnologico è giustificata dagli effetti potenzialmente sull'ambiente, sicurezza, medicina, metrologia, spazio e altri settori strategici.

Analisi Scientifica degli Articoli

Primo gruppo di articoli (spettroscopia del CO₂, DFG)

Gli articoli di questo gruppo mirano a sviluppare tecniche di spettroscopia ad alta sensibilità e risoluzione nella regione dell'infrarosso medio, focalizzandosi sull'analisi precisa delle transizioni del biossido di carbonio (CO₂). L'obiettivo è migliorare la capacità di rilevare anche le transizioni più deboli della molecola, con potenziali applicazioni in ambito ambientale, atmosferico e metrologico.

Gli articoli sono:

- [10.1364/ASLA.1999.122](#)
 - Difference-frequency radiation around 4.3 μm for high sensitivity and sub-Doppler spectroscopy of CO₂
- [10.1364/OL.27.001256](#)
 - Low-power Lamb-dip spectroscopy of very weak CO, transitions near 4.25 μm

Tecnologie o fenomeni fisici studiati

Negli articoli di questo gruppo le tecnologie e i fenomeni fisici studiati si concentrano sulla Difference-Frequency Generation (DFG) e sulla spettroscopia Lamb-dip, applicate alla rilevazione ad alta precisione del biossido di carbonio (CO₂) nel medio infrarosso (MIR).

La DFG è un processo ottico non lineare in cui due fasci laser a frequenze diverse interagiscono in un materiale non lineare, come il niobato di litio periodicamente polarizzato (PPLN), dando origine ad una nuova radiazione di frequenza pari alla differenza delle frequenze delle due radiazioni che si combinano [1]. Mediante questa tecnica è possibile produrre luce coerente nel MIR, essenziale per la spettroscopia molecolare, in quanto molte molecole come il CO₂ possiedono forti bande di assorbimento in questo intervallo spettrale. Offrendo vantaggi significativi, come la possibilità di generare luce in regioni spettrali difficilmente accessibili con laser convenzionali, rendendola particolarmente utile per la spettroscopia ad alta risoluzione e la rilevazione di tracce di gas [2].

La spettroscopia Lamb-dip è una tecnica che permette di osservare le transizioni molecolari senza l'effetto dell'allargamento Doppler, migliorando la risoluzione spettrale. Utilizzando radiazione generata tramite DFG, è possibile sondare transizioni molto deboli del CO₂, come quelle vicino a 4.25 μm , con una precisione elevata. Questa tecnica è fondamentale per estendere la metrologia basata su frequency combs nel MIR, consentendo misure più accurate delle frequenze di transizione molecolare [3].

Queste tecnologie, combinate, permettono la realizzazione di sistemi di spettroscopia ad alta sensibilità e precisione, cruciali per applicazioni in ambito ambientale, come il monitoraggio delle emissioni di gas serra, e in metrologia, per la calibrazione di standard di frequenza nel MIR.

Parole chiave individuate

- CO₂ spectroscopy
- Difference-Frequency Generation (DFG)
- Mid-infrared (MIR)
- Lamb-dip
- Sub-Doppler

Secondo gruppo (QCL e frequency combs)

Gli articoli di questo gruppo mirano a sviluppare sorgenti laser altamente stabili e referenziate nella regione dell'infrarosso medio (MIR), integrando Quantum Cascade Lasers (QCL) con frequency combs.

L'obiettivo è realizzare strumenti laser a larghezza di riga ultraristretta e controllo preciso della frequenza, in grado di abilitare misure spettrali estremamente accurate e riproducibili. Questi sistemi sono fondamentali per applicazioni in metrologia ottica, sensing molecolare di precisione, e tecnologie quantistiche emergenti.

Gli articoli sono:

- [10.1364/OL.32.000988](#)
 - Frequency-comb-referenced quantum-cascade laser at 4.4 μm
- [10.1103/PhysRevLett.104.083904](#)
 - Observing the Intrinsic Linewidth of a Quantum-Cascade Laser: Beyond the Schawlow-Townes Limit
- [10.1364/OL.37.001011](#)
 - Direct link of a mid-infrared QCL to a frequency comb by optical injection

Tecnologie o fenomeni fisici studiati

Questo gruppo di articoli si concentra sull'impiego dei Quantum Cascade Lasers (QCL) in combinazione con i frequency combs, per ottenere sorgenti coerenti, stabili e referenziate nel medio infrarosso (MIR), con applicazioni avanzate nella spettroscopia di precisione e nella metrologia ottica.

I laser a cascata quantica (Quantum Cascade Lasers, QCL) sono un tipo di laser a semiconduttore che emettono radiazioni nella gamma del medio e lontano infrarosso. A differenza dei laser convenzionali, che generano un fotone per ogni coppia elettrone-lacuna, i QCL sfruttano una struttura a più strati di semiconduttori che permette agli elettroni di compiere una serie di salti quantici a energia decrescente, emettendo un fotone a ogni salto. Questo processo a cascata consente di ottenere una maggiore efficienza e potenza di emissione, con lunghezze d'onda tipicamente nell'infrarosso medio, utili per applicazioni come la spettroscopia molecolare e il rilevamento di gas [4]. I frequency combs sono sorgenti di luce che emettono uno spettro costituito da centinaia di linee equispaziate in frequenza, simili ai denti di un pettine. Nati per la metrologia di precisione, permettono di collegare con precisione estrema le frequenze ottiche alle frequenze radio, rendendo possibile la calibrazione di laser e lo studio di transizioni atomiche e molecolari con incertezza minima.

Nei lavori analizzati, i QCL vengono referenziati a frequency combs tramite tecniche come l'optical injection locking, che consente il controllo coerente del QCL da parte del comb, oppure tramite heterodyne detection, che permette di misurare e stabilizzare la frequenza assoluta del QCL rispetto a un comb ottico. Questa combinazione apre la strada a sistemi laser stabili nel MIR, fondamentali per la spettroscopia ad altissima risoluzione e per applicazioni in sensing quantistico.

Parole chiave individuate

- Quantum Cascade Laser (QCL)
- Mid-infrared (MIR)
- Frequency comb
- Optical injection locking
- Schawlow-Townes

Terzo gruppo (QCL stabilizzati, interband cascade lasers)

Gli articoli di questo gruppo si concentrano sul miglioramento della stabilità, coerenza e controllo delle sorgenti laser nel medio infrarosso (MIR), attraverso approcci innovativi alla progettazione e caratterizzazione dei dispositivi.

In particolare, vengono studiati Quantum Cascade Lasers (QCL) stabilizzati mediante cavità ottiche ad alta qualità e Interband Cascade Lasers (ICL) operanti in regime quantisticamente limitato.

L'obiettivo di questi studi è rendere i QCL e gli ICL idonei a misure spettroscopiche ultraprecise, sensori quantistici e applicazioni metrologiche, dove la purezza spettrale e la stabilità del segnale sono requisiti fondamentali. Particolare attenzione è rivolta al recupero delle fasi nei QCL frequency combs, alla riduzione del rumore di fase, e alla caratterizzazione dei limiti quantistici degli ICL.

Gli articoli sono:

- [10.1002/lpor.201500214](#)
 - Microcavity-Stabilized Quantum Cascade Laser
- [10.1038/s41566-019-0451-1](#)
 - Retrieval of phase relation and emission profile of quantum cascade laser frequency combs
- [10.1063/1.5139483](#)
 - Unveiling quantum-limited operation of interband cascade lasers

Tecnologie o fenomeni fisici studiati

Il terzo gruppo di articoli esplora tecniche avanzate di stabilizzazione e caratterizzazione dei laser operanti nel medio infrarosso, con particolare attenzione a due tipologie: i Quantum Cascade Lasers (QCL) e gli Interband Cascade Lasers (ICL). L'obiettivo è aumentarne la coerenza, la stabilità in frequenza e la comprensione del loro comportamento quantistico, per renderli adatti ad applicazioni in spettroscopia ultraprecisa e sensing quantistico.

Uno dei lavori analizzati propone la stabilizzazione di un QCL mediante una microcavità ottica, tecnica che consente di ridurre le fluttuazioni di fase e frequenza del laser. L'accoppiamento del QCL con una cavità ad alta qualità ottica (high-Q) permette di ottenere un'emissione più stabile, adatta a misure di precisione e a esperimenti quantistici.

Un altro articolo indaga il comportamento di un QCL che opera come frequency comb, analizzando le relazioni di fase tra le sue modalità e il suo profilo di emissione.

L'ultimo articolo si concentra sugli Interband Cascade Lasers, una tecnologia alternativa ai QCL per l'emissione MIR. A differenza dei QCL, che usano transizioni intersubband, gli ICL si basano su transizioni interbanda, simili a quelle dei laser a diodo, ma progettati per ottimizzare l'efficienza nella generazione MIR. Il lavoro mostra che questi dispositivi possono operare in condizioni vicine ai limiti quantistici, cioè con rumore minimo teorico, rendendoli promettenti per applicazioni ad alta sensibilità.

Parole chiave individuate

- Quantum Cascade Laser (QCL)
- Microcavity stabilization
- Interband Cascade Laser (ICL)
- Mid-infrared (MIR)

Costruzione delle Query e Ricerca nei Brevetti

Spiegazione della strategia di ricerca

Per identificare i brevetti correlati agli articoli scientifici analizzati, ho seguito una strategia articolata in più fasi:

1. **Selezione delle parole chiave:** ho individuato e selezionato le parole chiave più rilevanti all'interno di ciascun gruppo di articoli scientifici
2. **Costruzione delle query:** a partire dalle parole chiave selezionate, ho formulato query mirate per l'interrogazione dei database brevettuali. Ho utilizzato una query per ogni gruppo di brevetti cercando sia nel titolo che nell'abstract, e filtrando i risultati per includere solo i brevetti pubblicati dopo la data di pubblicazione dell'ultimo brevetto appartenente a ciascun gruppo, al fine di identificare sviluppi tecnologici successivi agli articoli. Le query utilizzate sono:
 - (*"difference-frequency generation" OR "DFG" OR "Lamb-dip" OR "sub-Doppler"*) AND (*"CO2" OR "carbon dioxide" OR "spectroscopy"*)
 - (*"quantum cascade laser" OR "QCL"*) OR *"frequency comb"*) AND (*"mid-infrared" OR "optical Injection locking" OR "Schawlow-Townes"*)
 - (*"frequency comb" OR "microcavity" OR "mid-IR" OR "mid-infrared"*) AND (*"quantum cascade laser" OR "QCL"*) OR *"interband cascade laser"*
3. **Consultazione dei database brevettuali:** le ricerche sono state condotte nei seguenti database cercando solo nell'abstract dei brevetti:
 - Espacenet [5]
 - Google Patents [6]
 - WIPO [7]
4. **Applicazione di filtri temporali:** per ogni ricerca, ho applicato filtri temporali mirati a includere esclusivamente i brevetti pubblicati successivamente alla data di pubblicazione degli articoli scientifici di riferimento, con l'obiettivo di individuare sviluppi tecnologici successivi alla ricerca accademica.

Risultati principali

Le ricerche hanno prodotto i seguenti risultati:

- **Brevetti su Generazione di Frequenza Differenziale (DFG) e Spettroscopia Sub-Doppler per l'analisi del biossido di carbonio (CO₂):**
 - Espacenet: 6 brevetti dal 2002 (data di pubblicazione del secondo articolo) ad oggi.¹
 - Google Patents: 68 brevetti su Google Patents (sempre nello stesso periodo).²
 - WIPO: 7 brevetti.³
 - Principali Paesi: Stati Uniti, Gran Bretagna, Giappone e Germania
 - Aziende attive: Boeing Co, TAE Technologies Inc, Imra America Inc., Nippon Telegraph and Telephone e Hamamatsu Photonics K.K.
 - Università coinvolte: California Institute of Technology (Caltech), Zhejiang University City College, Shanxi University e Ludwig-Maximilians-Universität München.
 - Brevetti Principali:
 - [GB2456652A](#)
 - [US2016153835A1](#)
 - Precision⁴: 4/6 = 66%
- **Brevetti su Quantum Cascade Laser (QCL) e frequency combs:**
 - Espacenet: circa 72 brevetti rilevanti dal 2012 a oggi.⁵
 - Google Patents: circa 492 brevetti individuati nello stesso periodo.⁶
 - WIPO: 14 brevetti.⁷
 - Principali paesi: Cina, Stati Uniti, Giappone ed Europa.
 - Aziende attive: Alpes Lasers, Hamamatsu Photonics K.K., IMEC, Sumitomo Electric Ind Ltd, Agilent Technologies e Nippon Telegraph and Telephone
 - Università coinvolte: Institute of Semiconductors, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology Chinese Academy of Sciences e University of Texas
 - Brevetti Principali:
 - [CN104596987A](#)
 - [CN118117445A](#)
 - Precision⁸: 45/69 = 65%

¹ Fonte: [Espacenet](#)

² Fonte: [Google Patents](#)

³ Query: EN_AB: (("difference-frequency generation" OR "DFG" OR "Lamb-dip" OR "sub-Doppler") AND ("CO2" OR "carbon dioxide" OR "spectroscopy")) AND PD:[20020716 TO *]) OR EN_TI: (("difference-frequency generation" OR "DFG" OR "Lamb-dip" OR "sub-Doppler") AND ("CO2" OR "carbon dioxide" OR "spectroscopy")) AND PD:[20020716 TO *])

⁴ Calcolata a partire dai 6 brevetti su Espacenet come rapporto tra il numero di brevetti rilevanti effettivamente trovati e quelli restituiti

⁵ Fonte: [Espacenet](#)

⁶ Fonte: [Google Patents](#)

⁷ Query: EN_TI: (((("quantum cascade laser" OR "QCL") OR "frequency comb") AND ("mid-infrared" OR "optical Injection locking" OR "Schawlow-Townes")) AND PD:[20120309 TO *]) OR EN_AB: (((("quantum cascade laser" OR "QCL") OR "frequency comb") AND ("mid-infrared" OR "optical Injection locking" OR "Schawlow-Townes")) AND PD:[20120309 TO *])

⁸ Calcolata a partire dai 69 brevetti su Espacenet come rapporto tra il numero di brevetti rilevanti effettivamente trovati e quelli restituiti

- **Brevetti su Interband Cascade Laser (ICL) e Microcavity-stabilized QCL:**
 - Espacenet: 36 brevetti identificati dal 2020 ad oggi.⁹
 - Google Patents: 57 risultati rilevanti nello stesso periodo.¹⁰
 - WIPO: 12 brevetti.¹¹
 - Principali paesi: Stati Uniti, Europa, UK, Canada e Cina.
 - Aziende con più brevetti: Heath Consultants Inc., HORIBA Ltd., Alpes Lasers S.A e Naniina Hones Technoloav Co. Ltd.
 - Università coinvolte: ETH Zürich, Institute of Semiconductors e Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology Chinese Academy of Sciences, Zhejiang University, Taiyuan University of Technology, Hainan Normal University ed East China Normal University
 - Brevetti Principali:
 - [EP4490822A1](#)
 - [CN114039268A](#)
 - Precision¹²: 20/33 = 60%

Analisi delle Non Patent References (NPR)

L'analisi delle NPR fornisce una panoramica della base scientifica e tecnologica su cui si fondano i brevetti che citano pubblicazioni accademiche e articoli scientifici.

Tra i brevetti del primo gruppo, spicca il brevetto [US11841271B2](#), che presenta il numero più elevato di NPR. La ricorrenza di articoli pubblicati su riviste di alto impatto come Nature Photonics, Science, Optica e Optics Express indica una solida validazione scientifica delle tecnologie brevettate.

Nel secondo gruppo, il brevetto [US10441201B2](#) si distingue per una robusta base di riferimenti tecnico-scientifici, con NPR tratte da riviste specialistiche come Applied Spectroscopy, Applied Optics e Biomedical Optics Express.

Per quanto riguarda il terzo gruppo, il brevetto [US12228501B2](#) risulta il più ricco in termini di NPR. Tra le fonti citate figurano riviste di rilievo come Optics Express, Next-Generation Spectroscopic Technologies VII e report tecnici di Physical Sciences Inc.

Nel complesso, l'analisi delle NPR evidenzia come alcuni brevetti siano fortemente supportati da una vasta e qualificata letteratura accademica. Questo rappresenta un chiaro segnale di maturità scientifica e potenziale trasferibilità tecnologica. La presenza di NPR tratte da riviste di altissimo livello rafforza ulteriormente la credibilità delle soluzioni brevettate, favorendone l'adozione in ambiti industriali, biomedici e ambientali.

⁹ Fonte: [Espacenet](#)

¹⁰ Fonte: [Google Patents](#)

¹¹ Query: EN_AB:(((("frequency comb" OR "microcavity" OR "mid-IR" OR "mid-infrared") AND ("quantum cascade laser" OR "QCL")) OR "interband cascade laser" AND PD:[20200401 TO *]) OR EN_TI:(((("frequency comb" OR "microcavity" OR "mid-IR" OR "mid-infrared") AND ("quantum cascade laser" OR "QCL")) OR "interband cascade laser" AND PD:[20200401 TO *])

¹² Calcolata a partire dai 33 brevetti su Espacenet come rapporto tra il numero di brevetti rilevanti effettivamente trovati e quelli restituiti

Ricerca sulle Aziende e Applicazioni Industriali

Query e strumenti utilizzati

Per identificare le aziende attive nei settori relativi alle tecnologie trattate negli articoli (Quantum Cascade Laser, frequency combs, interband cascade lasers, microcavity stabilization, DFG), sono stati utilizzati i seguenti strumenti di ricerca:

- *Google*: per individuare menzioni di parole chiave nei siti aziendali.
- *Crunchbase*: per identificare startup, spin-off e aziende
- *LinkedIn*: per verificare le tecnologie dichiarate da aziende nei profili aziendali.
- *Siti aziendali ufficiali*: per l'analisi delle tecnologie dichiarate e dei mercati serviti.

Esempi di query utilizzate:

- *"quantum cascade laser" site:*.com*
- *"Quantum Cascade Laser" site:crunchbase.com*
- *"difference frequency generation" site:*.com*
- *"mid-infrared spectroscopy" site:*.com*
- *"interband cascade laser" site:*.com*
- *"QCL frequency comb" site:linkedin.com/company*

Aziende identificate e settori applicativi

Sulla base delle ricerche effettuate, sono state identificate diverse aziende attive nella produzione o integrazione di dispositivi basati su QCL, frequency combs e tecnologie affini. Di seguito un riepilogo:

Azienda	Paese	Tecnologie menzionate	Settore applicativo
Raicol Crystals	Israele	DFG	Medico [8]
IPS (Innovative Photonic Solutions)	USA	DFG	Gas sensing [9]
Alpes Lasers	Svizzera	QCL	Gas sensing, ambientale, medicale, difesa [10]
IRsweep	Svizzera	QCL Frequency Combs	Soluzioni di spettroscopia ottica nel medio infrarosso [11]
Block Engineering	USA	QCL, mid-IR	Sicurezza, difesa, rilevamento chimico [12]
Edmund Optics	USA	QCL	Gas detection [13]
Emerson Electric Company	USA	QCL	Gas detection [14]
Bruker	USA	QCL	Gas detection [15]
Wavelength Electronics, Inc.	USA	QCL	Controllo di corrente e temperatura per laser [16]
Thorlabs	USA	QCL, frequency combs, ICL	Spettroscopia, telecomunicazioni [17]

Daylight Solutions	USA	QCL, MIR	Imaging chimico, difesa [18]
Agilent Technologies	USA	QCL	Imaging chimico [19]
Hamamatsu Photonics	Giappone	QCL	Gas detection [20]
Sumitomo Electric Ind Ltd	Giappone	QCL	Gas sensing [21]
HORIBA Ltd.	Giappone	QCL	Gas analyzer [22]
Nokia	Finlandia	QCL	Diagnostica medica e il monitoraggio dell'inquinamento [23]
Pyroistech	Spagna	Mid-Infrared Spectroscopy	Rilevamento di gas, analisi alimentare, controllo ambientale [24]
Nlir	Danimarca	Mid-Infrared Spectroscopy	Monitoraggio industriale, identificazione di plastiche [25]
MirSense	Francia	QCL	Gas sensing [26]
Leonardo	Italia	QCL	Difesa
nanoplus	Germania	ICL	Gas detection [27]

Menzioni delle parole chiave sui siti web

Le parole chiavi presenti sui siti web delle principali aziende attive nel campo dei laser a cascata quantica (QCL) e della spettroscopia nel medio infrarosso (mid-IR) ricorrono frequentemente nelle descrizioni dei prodotti e delle tecnologie offerte.

Ad esempio, Emerson mette in evidenza l'utilizzo di "Quantum Cascade Laser Analyzers" per l'analisi dei gas in tempo reale, facilitando il controllo dei processi e il monitoraggio delle emissioni [28].

Hamamatsu Photonics descrive i QCL come sorgenti luminose eccellenti per applicazioni nel medio infrarosso, come l'analisi molecolare dei gas e la spettroscopia di assorbimento [29].

Block Engineering sottolinea l'utilizzo di QCL di nuova generazione e della spettroscopia di assorbimento infrarosso per identificare sostanze chimiche e proteggere le persone da minacce a distanza [30].

Pyroistech evidenzia l'importanza della spettroscopia nel medio infrarosso (2 - 20 μm) per fornire informazioni sulla composizione dei campioni in settori come l'analisi alimentare e il rilevamento di gas [31].

Analisi delle Domande di Ricerca

Applicazioni tecnologiche e prodotti

I laser mid-IR (QCL, ICL) e i comb ottici trovano numerose applicazioni industriali e scientifiche. Ad esempio, i sistemi di analisi gas industriali sfruttano QCL/ICL per rilevare tracce di gas. La società Emerson commercializza analizzatori a QCL per misure TDLAS ad alta risoluzione nel mid-IR [32]. Nanoplus (QD Lasers) offre laser a cascata interband (ICL) dedicati a sensori TDLAS per gas (applicazioni nel rilevamento di gas industriali) [33]. Sistemi ottici basati su frequency comb mid-IR sono stati commercializzati: ad es. Menlo Systems vende un Mid-IR Comb per spettroscopia ad alta accuratezza (nanoFTIR, chimica ambientale) [34]. Altre applicazioni chiave includono l'analisi biomedica (es. sensibilità ai biomarcatori nel respiro umano) e la sicurezza/ difesa.

Distanza temporale ricerca-applicazione

In generale si tratta di tecnologie con un notevole ritardo tra scoperta e impiego. Il QCL fu dimostrato nel 1994 da Capasso e Cho e solo circa 10 anni dopo iniziarono ad apparire prototipi commerciali (prima generazione di sensori e contromisure) [35]. Il libro Cambridge 2023 osserva che «dopo oltre 25 anni di continuo R&S, i QCL stanno ora rivoluzionando molte applicazioni» [36].

Analogamente i frequency-comb (premio Nobel 2005) si sono diffusi in near-IR prima (anni 2000) e solo nel decennio 2010 sono comparsi prodotti mid-IR: per esempio la start-up IRsweep (ETH Zurigo) ha lanciato il primo spettrometro dual-comb mid-IR commerciale già nel 2017 (fondata nel 2014), cioè pochi anni dopo lo sviluppo iniziale del prototipo [37]. In sintesi, per queste tecnologie avanzate il passaggio dalla dimostrazione in laboratorio al mercato richiede tipicamente decenni o anni di sviluppo.

Chi realizza le applicazioni

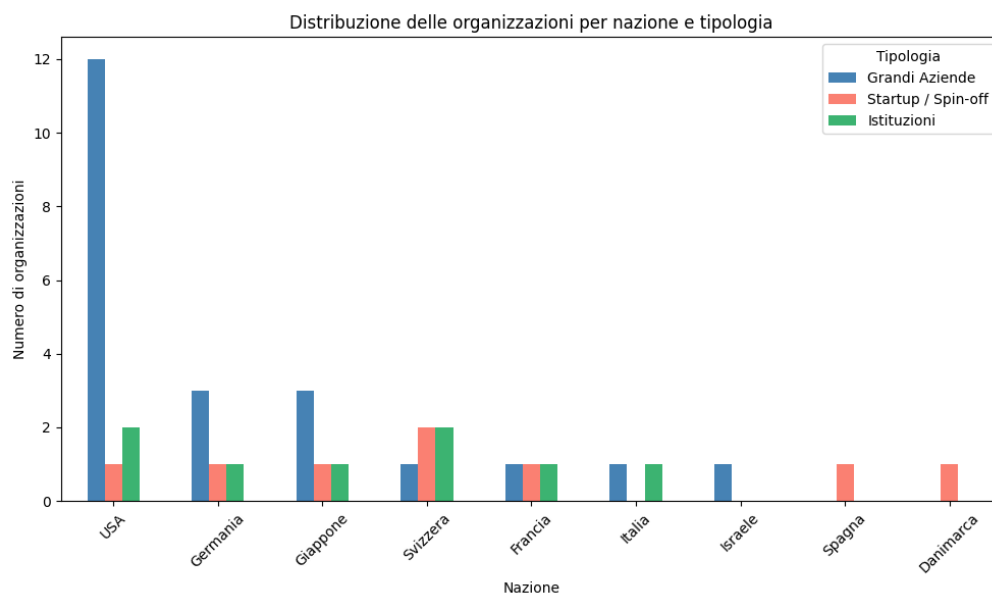
Le applicazioni finali sono realizzate principalmente da imprese specializzate (con spesso collaborazioni accademiche). Ad esempio, DRS Daylight Solutions e Nanoplus (Germania) producono laser mid-IR basati su QCL/ICL per uso scientifico e industriale. Aziende consolidate come Emerson integrano moduli QCL in analizzatori di processo. Startup nate da spin-off accademici entrano nel mercato come IRsweep ha sviluppato spettrometri mid-IR dual-comb. Di frequente i prototipi iniziali nascono in laboratori universitari (ad es. Bell Labs) e poi vengono trasferiti a industrie o spin-off. Raramente gli stessi ricercatori pubblicano anche il prodotto finito; piuttosto si avvalgono di licenze o collaborazioni per la produzione, a volte creando startup dedicate.

Distribuzione geografica

L'innovazione in QCL/ICL/comb mid-IR è globale, con concentrazione in poche regioni. Gli USA sono storicamente leader (aziende come DRS Daylight ed Emerson per spettroscopia). In Germania Nanoplus sviluppa ICL industriali. In Svizzera ETH Zürich e lo spin-off IRsweep hanno portato sul mercato comb QCL.

Di seguito è riportata la suddivisione delle aziende tra grandi aziende e startup:

Nazione	Grandi Aziende	Startup / Spin-off	Istituzioni
USA	Thorlabs Inc. [38], Emerson Electric Co. [38], Block Engineering [39], Daylight Solutions [38], AdTech Optics [40], Akela Laser Corporation [38], Menlo Systems [41], Picarro Inc. [38], Agilent Technologies, Innovative Photonic Solutions (IPS) [9], Bruker [15], Wavelength Electronics, Inc. [16]	LongWave Photonics LLC [38]	National Institute of Standards and Technology (NIST) [42], California Institute of Technology (Caltech) [43]
Germania	Nanoplus Nanosystems and Technologies GmbH [44], Sacher Lasertechnik GmbH [38], MG Optical Solutions GmbH [38]	IRUBIS GmbH [38]	Fraunhofer IPMS [45]
Francia	MirSense SAS [46]	Quantune Technologies [47]	C2N - Université Paris-Saclay [48]
Svizzera	Alpes Lasers S.A. [49]	IRsweep AG, MIRO Analytical [50]	ETH Zürich [51], EPFL [52]
Giappone	Hamamatsu Photonics K.K. [38], Sumitomo Electric Ind Ltd, HORIBA Ltd [22]	Xtia Co. Ltd. [53]	RIKEN [54]
Italia	Leonardo DRS Inc. [55]	—	Istituto Nazionale di Ottica (CNR-INO)
Israele	Raicol Crystals [8]	—	—
Spagna	—	Pyroistech S.L. [24]	—
Danimarca	—	NLIR [25]	—



Descrizione applicazioni tecnologiche e mercato

Le tecnologie mid-IR risolvono il problema della rivelazione selettiva e sensibile di gas molecolari per applicazioni industriali, ambientali e mediche. In particolare, le sorgenti QCL/ICL consentono di interrogare le forti bande di assorbimento molecolare nella regione 3–12 μm , offrendo velocità e accuratezza superiori rispetto alle tecniche convenzionali. Il mercato di riferimento include imprese energetiche, chimiche, farmaceutiche, nonché enti di monitoraggio ambientale e difesa. Rispetto a gascromatografi o FTIR, i sistemi QCL/ICL-TDLAS offrono analisi in tempo reale con alta selettività e manutenzione ridotta. Ad esempio, Emerson propone strumenti QCL/TDLAS per controllo fumi e sicurezza industriale [56].

Ostacoli tecnologici e lacune complementari

Nonostante il potenziale, vari limiti rallentano la diffusione commerciale. Innanzitutto, il costo e complessità dei dispositivi mid-IR sono superiori alle alternative [57]. Molte sorgenti QCL/ICL richiedono raffreddamento attivo o alimentazioni elevate, e l'ottica mid-IR è più costosa di quella visibile/near-IR. Questi fattori riducono la “TRL effettiva” delle soluzioni; spesso mancano standard industriali e componenti “plug-and-play” per mid-IR. In pratica, l'adozione diffusa è frenata da problemi di reali soglie di potenza, efficienza fotonica, stabilità ambientale e dalla necessità di sviluppare tecnologie di supporto.

Passaggio dai TRL bassi ai TRL elevati

Il trasferimento richiede stadi di sviluppo progressivi. Un possibile schema di maturazione (TRL) è: TRL1–3 (ricerca di base) → TRL4–5 (prototipo di laboratorio) → TRL6–7 (dimostrazione in ambiente operativo) → TRL8–9 (sistema finale certificato).

Ad esempio, nel QCL: TRL1–3 sono rappresentati dalla dimostrazione iniziale al Bell Labs nel 1994 [35]. Le attività successive (TRL4–5) includono prototipi didattici in laboratorio e prime pubblicazioni. Il livello TRL6 implica esperimenti pilota fuori dal laboratorio (es. campagne misure sul campo), mentre TRL7–8 corrispondono a dimostrazioni industriali e prime forniture a clienti. Infine TRL9 corrisponde alla produzione su larga scala di prodotti commerciali (vedi aziende del settore).

Un esempio concreto: la startup IRsweep ha portato un prototipo dual-comb da laboratorio a un prodotto commerciale in ~3 anni [58], grazie a un percorso di incubazione e supporto industriale. Solitamente la transizione avviene tramite spin-off universitari o collaborazioni pubblico-privato, investimenti VC, e programmi nazionali/UE. Nel passaggio da ricerca a prodotto, si svolgono iterazioni di ingegnerizzazione (ottimizzazione di potenza, affidabilità, interfacce utente).

In sintesi, il passaggio a TRL alti segue una traiettoria che va dall’“idea di fisica” a dimostratori di laboratorio, fino a versioni prototipali testate sul campo e alla produzione industriale. Ogni passaggio avviene attraverso fasi di ingegnerizzazione incrementale e validazione. Per esempio, lo spin-off IRsweep è passato da TRL low (ricerca ETH Zürich) a un prodotto entro pochi anni.

Conclusioni

Sintesi dei punti chiave

- **Tecnologie analizzate:** I laser a cascata quantica (QCL) e la spettroscopia nel medio infrarosso (mid-IR) sono tecnologie avanzate che operano nel range spettrale tra 3 e 12 μm [59]. Queste tecnologie consentono un'analisi chimica precisa grazie alla loro capacità di interagire con le "impronte digitali" molecolari.
- **Applicazioni principali:** Le applicazioni di QCL e spettroscopia mid-IR includono il monitoraggio ambientale, il controllo di processi industriali, la diagnostica medica non invasiva e la difesa. Ad esempio, i QCL sono utilizzati per il rilevamento remoto di gas e sostanze chimiche, mentre la spettroscopia mid-IR è impiegata in analisi ambientali e mediche [60].
- **Distribuzione geografica:** Le grandi aziende nel settore sono prevalentemente situate negli Stati Uniti e in Giappone, mentre startup e spin-off tecnologici sono concentrati in Europa, in particolare in Germania, Svizzera e Francia.
- **Stato di maturità:** Le tecnologie QCL e mid-IR hanno raggiunto un livello di maturità tecnologica (TRL) elevato, con applicazioni commerciali consolidate e una crescente adozione in vari settori industriali.

Connessione tra scienza e industria

Le tecnologie QCL e spettroscopia mid-IR rappresentano un esempio significativo di trasferimento tecnologico dalla ricerca scientifica all'industria. Inizialmente sviluppate in ambito accademico e di ricerca, queste tecnologie sono state adottate e perfezionate da aziende che le hanno integrate in soluzioni commerciali per applicazioni reali. La collaborazione tra istituti di ricerca e imprese ha facilitato l'ottimizzazione dei dispositivi e l'espansione delle loro applicazioni, dimostrando l'importanza di un ecosistema innovativo che unisce scienza e industria.

Riflessione personale sul percorso analizzato

L'analisi del percorso di sviluppo e commercializzazione delle tecnologie QCL e spettroscopia mid-IR evidenzia l'importanza della sinergia tra ricerca scientifica e applicazioni industriali. La capacità di tradurre scoperte scientifiche in soluzioni pratiche ha permesso di affrontare sfide globali in ambito ambientale, medico e di sicurezza. Questo percorso sottolinea l'importanza di investire in ricerca e sviluppo, nonché di promuovere collaborazioni tra accademia e industria per stimolare l'innovazione e il progresso tecnologico.

Fonti

- [1] <https://your-physicist.com/difference-frequency-generation-dfg/>
- [2] <https://modern-physics.org/difference-frequency-generation>
- [3] <https://iris.cnr.it/handle/20.500.14243/294310>
- [4] https://it.wikipedia.org/wiki/Laser_a_cascata_quantica
- [5] <https://worldwide.espacenet.com/patent/search>
- [6] <https://patents.google.com>
- [7] <https://patentscope.wipo.int/search/en/search.jsf>
- [8] <https://raicol.com/optimizing-dfg-sfg-with-custom-nonlinear-crystals-for-advanced-laser-systems>
- [9] <https://ipslasers.com/difference-frequency-generation-and-gas-sensing/>
- [10] <https://www.alpeslasers.ch/applications/>
- [11] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=16468.
- [12] <https://www.blockeng.com/applications/>
- [13] <https://www.edmundoptics.com/f/quantum-cascade-laser-systems/39712/>
- [14] <https://www.emerson.com/en-us/catalog/quantum-cascade-laser-analyzers?fetchFacets=true#facet:&partsFacet:&modelsFacet:&facetLimit:&searchTerm:&partsSearchTerm:&modelsSearchTerm:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&modelsBeginIndex:0&orderBy:&partsOrderB>
- [15] <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-microscopes/what-is-QCL-microscopy.html>
- [16] <https://www.teamwavelength.com/shop/>
- [17] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1858
- [18] <https://www.daylightsolutions.com/applications/>

- [19] <https://www.agilent.com/en/product/molecular-spectroscopy/ldir-chemical-imaging-spectroscopy/ldir-chemical-imaging-system/ldir-chemical-imaging-system>
- [20] <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/lasers/semiconductor-lasers/qcls/application.html>
- [21] <https://global-sei.com/qcl/>
- [22] <https://www.horiba.com/int/products/by-technique/molecular-spectroscopy/quantum-cascade-laser-qcl-spectroscopy/>
- [23] <https://www.nokia.com/bell-labs/about/history/innovation-stories/quantum-cascade-laser/>
- [24] <https://www.pyroistech.com/products/>
- [25] <https://nlir.com/applications/>
- [26] <https://mirsense.com/qcl-technologies/>
- [27] <https://nanoplus.com/applications>
- [28] <https://www.emerson.com/it-it/catalog/quantum-cascade-laser-analyzers-it-it>
- [29] <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/lasers/semiconductor-lasers/qcls.html>
- [30] <https://www.blockeng.com/>
- [31] <https://www.pyroistech.com/mid-infrared-mir-spectroscopy/>
- [32] <https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation/gas-analysis/about-quantum-cascade-laser-analyzers#:~:text=Emerson%E2%80%99s%20Quantum%20Cascade%20Laser%20technology,infrared%20range%20of%20spectroscopic%20light>
- [33] <https://nanoplus.com/products/interband-cascade-laser#:~:text=nanoplus%20offers%20a%20DFB%20interband,wavelength%20gas%20sensors>

- [34] <https://www.menlosystems.com/products/optical-frequency-combs/mid-ir-comb/#:~:text=World,high%20accuracy%20spectroscopy%20or%20nanoFTIR>
- [35] <https://www.nokia.com/bell-labs/about/history/innovation-stories/quantum-cascade-laser/#:~:text=of%20different%20compositions%20of%20InAlGaAs,first%20realization%20was%20in%201994>
- [36] <https://www.cambridge.org/core/books/abs/midinfrared-and-terahertz-quantum-cascade-lasers/qcl-applications-in-scientific-research-commercial-and-defense-and-security-markets/D5C44F7FF536467A3A0CBC95F278010C>
- [37] <https://www.venturelab.swiss/Infrared-spectrometer-specialist-IRsweep-gets-fully-acquired-by-Sensirion#:~:text=IRsweep%20AG%20was%20founded%20in,Core%20applications%20of%20IRsweep's%20technology>
- [38] <https://www.marketsandmarkets.com/ResearchInsight/quantum-cascade-laser-market.asp>
- [39] <https://www.blockeng.com/products/ltune.html>
- [40] <https://www.atoptics.com/qcl.html>
- [41] <https://www.menlosystems.com/products/optical-frequency-combs/mid-ir-comb/>
- [42] <https://tf.nist.gov/general/pdf/3081.pdf>
- [43] <https://authors.library.caltech.edu/records/rszj5-tt860>
- [44] <https://nanoplus.com>
- [45] <https://www.ipms.fraunhofer.de/en/Components-and-Systems/Components-and-Systems-Sensors/Spectroscopy-Systems-and-Components/Quantum-cascade-lasers.html>
- [46] <https://midiralliance.eu/companies/>
- [47] <https://quantune.com/>
- [48] <https://odin.c2n.universite-paris-saclay.fr/en/activities/mir-thz-devices/quantum-cascade-laser/>
- [49] https://en.wikipedia.org/wiki/Alpes_Lasers

- [50] <https://miro-analytical.com/company/>
- [51] https://qoe.ethz.ch/Tutorials/quantum_cascade_laser.html
- [52] https://www.epfl.ch/labs/k-lab/latest_scientific_results_2/page-65028-en-html/page-102896-en-html
- [53] <https://www.crunchbase.com/organization/optocomb>
- [54] https://www.riken.jp/en/research/labs/rap/thz_qtm_device/index.html
- [55] <https://www.daylightsolutions.com/>
- [56] <https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation/gas-analysis/about-quantum-cascade-laser-analyzers#:~:text=Emerson%E2%80%99s%20Quantum%20Cascade%20Laser%20technology,infrared%20range%20of%20spectroscopic%20light>
- [57] <https://www.prnewswire.com/news-releases/interband--quantum-cascade-lasers-market-challenges-and-bottlenecks-for-the-broader-adoption-of-icls-and-qcls-in-large-volume-applications-301406577.html>
- [58] <https://www.venturelab.swiss/Infrared-spectrometer-specialist-IRsweep-gets-fully-acquired-by-Sensirion#:~:text=IRsweep%20AG%20was%20founded%20in,Core%20applications%20of%20IRsweep's%20technology>
- [59] <https://www.spiedigitallibrary.org/topic/optoelectronics/quantum-cascade-lasers>
- [60] <https://www.blockeng.com/applications/industrial.html>