



Quantum Emitters and Nano Light-Matter Interfaces

MSc Degree in Artificial Intelligence and Data Engineering

LORENZO VITTORI

A.A 2024/2025

Contents

1	Analisi dei paper	4
2	Query e risultati sui brevetti	6
2.1	Sintesi	7
3	Aziende rilevanti per il settore	8
4	Domande di ricerca	11
4.1	Esistono applicazioni tecnologiche che derivano direttamente dalla scienza?	11
4.2	Dopo quanto tempo si manifestano rispetto alla ricerca scientifica?	12
4.3	Chi realizza le applicazioni tecnologiche?	12
4.4	Come si distribuiscono le attività innovative per paese e per isti- tuzione?	13
4.5	Descrizione dell'applicazione tecnologica e di mercato della scienza	13
4.6	Ostacoli e tecnologie mancanti	14
4.7	Da TRL basso ad alto	15
5	Conclusioni	17

Introduzione alla fotonica quantistica

Le tecnologie quantistiche sfruttano le proprietà della luce e della materia a livello atomico e subatomico per applicazioni avanzate. I fotoni (particelle di luce) sono fondamentali nelle comunicazioni e nel calcolo quantistico, poiché possono trasportare informazione con velocità elevatissima e con interferenze minime [1]. Un emettitore quantistico è un sistema in grado di produrre un singolo fotone puro «on demand», condizione cruciale per questi applicativi avanzati [1]. Ad esempio, i punti quantici (quantum dots) nanostrutture semiconduttrici simili ad atomi artificiali possono emettere fotoni singoli quando opportunamente eccitati [2]. Analogamente, i centri NV del diamante (NV)¹ contengono elettroni con tempi di coerenza molto lunghi a temperatura ambiente, consentendo loro di funzionare come qubit o sensori quantistici stabili [3] [23]. Questi emettitori consentono la riduzione del rumore ambientale, nell'ambiente e producono fotoni indistinguibili per esperimenti di interferenza quantistica [5].

Le architetture basate sulla fotonica integrata consentono di manipolare la luce su chip compatibili con l'elettronica. Nella fotonica integrata, guide d'onda e dispositivi ottici (laser, modulatori, detector) sono fabbricati insieme su un unico substrato piatto [9]. In tal modo interi circuiti ottici complessi possono lavorare come i circuiti elettronici tradizionali, ma con vantaggi significativi: i fotoni viaggiano infatti alla velocità della luce senza riscaldare il sistema e possono trasportare simultaneamente grandi quantità di informazioni [6]. L'integrazione di più componenti fotonici su scala micrometrica permette comunicazioni tra chip più veloci e con consumi energetici molto ridotti, contrastando i limiti delle connessioni elettriche tradizionali.

Un materiale chiave nella fotonica avanzata è il grafene, uno strato monoatomico di carbonio con eccezionali proprietà ottiche e elettroniche. Integrato nei dispositivi fotonici, il grafene può potenziare modulazione e trasmissione ottica, consentendo transceiver ottici ad alte prestazioni e minore consumo energetico [8]. Recenti startup come CamGraPhIC utilizzano grafene in modulatori e rivelatori ottici per creare circuiti fotonici integrati (PIC) con larghezze di banda molto elevate, migliorando la comunicazione ottica tra chip [36][22].

¹Nitrogen-vacancy center

Infine, i sensori quantistici basati su sistemi come atomi ultrafreddi² o centri NV consentono misure estremamente sensibili di grandezze fisiche. Ad esempio, un sensore basato su centri NV nel diamante permette di rilevare debolissimi campi magnetici a scala nanometrica [40]. Startup come Qnami sviluppano microscopi quantistici (Scanning NV Magnetometry) che trasformano questi emettitori in strumenti di imaging avanzato di materiali e processi a livello atomico [31]. Analogamente, aziende come Nomad Atomics puntano a miniaturizzare sensori quantistici (magnetometri, gravitometri, orologi atomici) per applicazioni sul campo come esplorazioni geofisiche o navigazione ultra-precisa [32]. In sintesi, i settori emergenti della fotonica quantistica e dei materiali avanzati (grafene, diamanti sintetici, etc.) stanno creando un ecosistema tecnologico ricco di startup e spin-off che sviluppano emettitori di singoli fotoni, sensori quantistici e circuiti fotonici integrati. Questi componenti saranno alla base di futuri computer e reti quantistici, oltre che di nuovi sensori e dispositivi ottici ad alta precisione.

²Atomi ultrafreddi

Chapter 1

Analisi dei paper

I paper elencati riguardano vari aspetti della fotonica quantistica & delle interfacce nanooptiche:

- Ferrari et al. (2003) - Precision Frequency Measurement of Visible Intercombination Lines of Strontium. Misurata direttamente la frequenza di una transizione intercombinazione di stronzio, candidata per un futuro standard ottico di frequenza. Parole chiave: standard ottico, transizione intercombinazione, combinazione di frequenza. Applicazioni: orologi atomici¹ e stabilizzazione della lunghezza d'onda dei laser [6].
- Ghulinyan et al. (2005) - Zener Tunneling of Light Waves in an Optical Superlattice. In questa ricerca sperimentale si osserva l'effetto Zener² in un superreticolo ottico realizzato in silicio poroso con bande mini-fotoniche. Parole chiave: tunnel di Zener, superreticolo ottico, minibande fotoniche. Risultati: evidenza di picco di trasmissione rafforzato e dipendenza tempo-dipendente, segni di trasferimento di fotoni tra bande. Implicazioni: controllo dei flussi luminosi in strutture periodiche, possibile uso in dispositivi ottici avanzati [4].
- Toninelli et al. (2008) - Exceptional Reduction of the Diffusion Constant in Partially Disordered Photonic Crystals . Si studia la propagazione della luce diffusa in cristalli fotonici di opali inversi in silicio parzialmente disordinati. Parole chiave: cristalli fotonici, disordine, costante di diffusione della luce. Risultato: il disordine controllato riduce eccezionalmente la diffusione luminosa (forte intrappolamento) rispetto a materiali casuali. Applicazioni potenziali: realizzazione di guide d'onda e cavità ottiche con bassa perdita, sensoristica basata su fotonica disordinata.[7]

¹Orologi atomici basati su stronzio

²Effetto Zener

- Mazzamuto et al. (2014) - Single-molecule study for a graphene-based nano-position sensor. Si sviluppa la base teorica e sperimentale per un "regolo nanoscala" basato sul trasferimento di energia da un emettitore quantistico singolo (molecola Dibenzothiophene DBT³) a un monostrato di grafene. Parole chiave: grafene, sensore di posizione nanoscalare, energia di trasferimento tra molecola ed e- in grafene, dipolo 2D, DBT. Risultati: misurata dipendenza del decadimento fluorescente $\sim d^{-4}$ ⁴ caratteristica dell'interazione dipolo-2D. Implicazioni: sensori nanometrici di posizione con accuratezza di pochi nm, sfruttando la sensibilità del grafene all'ambiente[8].
- Lombardi et al. (2018) - Photostable Molecules on Chip: Integrated Sources of Nonclassical Light. Viene dimostrato il potenziale di un ibrido che combina tecnologia integrata tra molecole organiche (DBT in cristalli di antracene) con emettitori di fotoni singoli integrati su chip dielettrico (guide Si₃ N₄). Parole chiave: molecole organiche quantistiche, sorgenti monofotoniche, waveguide dielettriche, alto rendimento di emissione, robustezza a lungo termine. Risultati: efficienza di accoppiamento fino al 42% in un riga guida, emissione a vita-limite (zero-phonon line a 3 K). Applicazioni: piattaforme integrate di fotonica quantistica per calcolo/telecomunicazioni senza bisogno di quantum dots epitassiali ⁵[9].
- Pazzagli et al. (2018, ACS Nano) - Self-Assembled Nanocrystals of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Show Photostable Single-Photon Emission. Si documentano le prestazioni di nanocristalli organici (antracene drogati con DBT) che emettono fotoni singoli stabili anche a temperatura ambiente. Parole chiave: nanocristalli organici, dibenzoterrylene (DBT), emissione monofotonica, stabilità spettrale, linea zero-phonon. Risultati: nanocristalli di centinaia di nm con stabilità di emissione su ore e linee spettrali strette (~ 50 MHz a 3 K). Applicazioni: sorgenti fotoniche scalabili per dispositivi quantistici integrati, bio-imaging e quantum computing.[10]
- Duquennoy et al. (2022) - Real-time two-photon interference from distinct molecules on the same chip. Si descrivono esperimenti di interferenza tipo Hong-Ou-Mandel tra coppie di molecole solide isolate su chip a poche decine di microns. Parole chiave: interferenza a due fotoni (HOM), sorgenti molecolari, fotonica integrata, ottica quantistica, rumore ambientale. Risultati: osservata interferenza quantistica in tempo reale tra molecole distinte a distanza di poche decine di μ m. Implicazioni: studio delle interferenze e criticità nel realizzare circuiti fotonici quantistici su chip con sorgenti indistinguibili.[11] [5]

³DBT

⁴il tasso di decadimento non-radiativo (ovvero la velocità con cui l'energia viene trasferita dalla molecola DBT al foglio di grafene) decresce con la quarta potenza della distanza (d) tra l'emettitore e il grafene

⁵Epitassia

Chapter 2

Query e risultati sui brevetti

Per individuare brevetti pubblicati dopo i paper, abbiamo formulato query basate sulle parole chiave e temi rilevanti:

- Query 1: AB=((planar optical antenna) AND (single molecule)). Scelta: riflette l'idea di proiettare l'emissione di un singolo emettitore in un'antenna planare. Risultati: Ad esempio, il brevetto US20180128742A1 (Priority 2015, pubblicato 2018) intitolato "Device for the beaming of light emitted by light sources, in particular fluorescence of molecules "[13] descrive un dispositivo planare (riflettore+direttore) che dirige l'emissione di una molecola singola. Gli autori sono Mario Agio e Costanza Toninelli ed è stato approvato nel 2020. Nessun NPR specifico trovato per lo specifico brevetto.
- Query 2: AB=((integrated photonic waveguide) AND (single photon source)) source Scelta: ricerca focalizzata su guide d'onda integrate per l'emissione di fotoni singoli su chip. Risultati: Il brevetto US11520105B2 (pubblicato 2022) descrive un dispositivo compatto che sfrutta un emettitore quantistico inserito in guide d'onda integrate, con ottimizzazione del percorso ottico tramite strutture evanescenti e guide multimodali [14]. Il documento brevettuale include due fonti non brevettuali (NPC), tra cui uno studio su color centres in diamante. [15], mostrando un'integrazione tra nano-diamond e strutture plasmoniche per aumentare efficienza e direzionalità.
- Query 3: AB=((graphene) AND (nano position sensor)). Scelta: Identificare brevetti che menzionano nei loro abstract parole come "graphene" e "sensor", preferibilmente in contesti di posizionamento o sensibilità spaziale, per trovare solide corrispondenze con il paper di Mazzamuto (graphene-based nano-position sensor). Risultati: il brevetto US9297831B2, 'Touch sensor using graphene for simultaneously detecting a pressure and a position'. [16] Questo utilizza una struttura a griglia di elettrodi di grafene incrociati per misurare contemporaneamente la pressione applicata e le coordinate (X,

Y) del tocco, mediante variazioni resistive. L'architettura è altamente coerente con un sensore di posizione basato su grafene, includendo possibili funzionalità multi-touch e un'integrazione trasparente, flessibile e compatibile con display touch avanzati

- Query 4: «AB=((Nanocrystals) AND (Single-Photon Emission))». Scelta: ricerca di emettitori basati su nanocristalli organici come quelli nel paper di Pazzagli. Risultati: Il brevetto US12266735B2[17] (pubblicato nel 2025) descrive un sistema ibrido a base di nanoparticelle con centri di colore (color centers) – inclusi centri NV nel diamante – integrato su substrato planare con componenti micro-elettronici e micro-ottici, che rispecchia chiaramente l'uso di emettitori quantistici. Presenta 4 NPR all'interno del brevetto riguardanti i centri NV in elettronica quantistica

2.1 Sintesi

Le query svolte hanno permesso di esplorare l'esistenza di brevetti tecnologici che impiegano, nei rispettivi abstract, parole chiave coerenti con la letteratura scientifica analizzata. In diversi casi, i risultati hanno evidenziato una connessione diretta tra le ricerche accademiche su emettitori quantistici, sensori a base di grafene o nanocristalli organici, e la successiva protezione intellettuale delle relative innovazioni. Tuttavia, la presenza di riferimenti bibliografici non brevettuali (NPR) all'interno dei brevetti non è sistematica: alcuni documenti, pur descrivendo dispositivi chiaramente ispirati a lavori accademici, non riportano esplicitamente citazioni a pubblicazioni scientifiche, mentre altri, soprattutto quelli più recenti o avanzati, includono riferimenti diretti alla letteratura tecnica, indicando un legame più consapevole tra scienza e trasferimento tecnologico. In generale, emerge un quadro in cui l'innovazione industriale attinge, con modalità e profondità diverse, ai risultati della ricerca fondamentale, dando vita a un ecosistema di sviluppo tecnologico che si nutre di contributi sia brevettuali sia scientifici.

Chapter 3

Aziende rilevanti per il settore

Per identificare aziende, startup e spin-off operanti in questi ambiti, sono state effettuate ricerche web con query mirate. Di seguito, per ciascuna query si riportano: la formulazione utilizzata, il motivo della scelta e i risultati principali con i link ufficiali.

- Query: «single-photon source startup». Scelta: individuare aziende che offrono sorgenti di fotoni singoli basate su tecnologie all'avanguardia (quantum dot, color centers). Luogo ricerca: Google. Risultati:
 - Quandela (Francia) - produce dispositivi standalone per la generazione e rilevazione di singoli fotoni da punti quantici. Ad esempio il sistema Prometheus è descritto come la «sorgente quantistica monofotonica standalone più efficiente»[24].
 - Nu Quantum (UK) - spin-off dell'Università di Cambridge specializzata in sorgenti e rivelatori di singoli fotoni. Il Cambridge Enterprise riporta che Nu Quantum sviluppa sorgenti e rivelatori monofotoni ad alte prestazioni funzionanti a temperatura ambiente [26][25].
- Query: «entangled photon source startup telecom». Scelta: ricercare fornitori di sorgenti entangled in banda telecom (utile per QKD¹ e networking). Luogo ricerca: Google. Risultati:
 - Ki3 Photonics (Canada) - sviluppa generatori di fotoni entangled integrati, compatibili con le bande S, C, L² delle telecomunicazioni. Il sito aziendale afferma: «forniamo sorgenti di entangled photons su un comb di frequenze ottiche ... per applicazioni in crittografia quantistica, metrologia quantistica e processamento di informazioni quantistiche»[27].
 - NuCrypt Photonics (USA) - produce sorgenti di fotoni entangled e componenti per reti quantistiche basate su fibra ottica [41].

¹Quantum Key Distribution

²Frequenze 5G

- Query: «superconducting nanowire single photon detector company». Scelta: trovare produttori di SNSPD³, cruciale per rilevare fotoni singoli. Luogo ricerca: Google. Risultati:
 - Quantum Opus (USA) - offre sistemi SNSPD compatte (3U-rack sized) con alta efficienza di conteggio per applicazioni in ottica quantistica e computazione quantistica [28].
 - Single Quantum (Paesi Bassi) - azienda leader nella commercializzazione di SNSPD e di light sensor. «Single Quantum makes the world's fastest and most sensitive light sensors limited only by the laws of physics».[29].
 - S-Fifteen Instruments (Singapore) - spin-off accademico che produce rivelatori a fotone singolo per QKD e ricerca. Specializzati in sicurezza informatica quantistica e QKD devices[30].
- Query: «quantum sensor diamond NV company». Scelta: trovare aziende che sfruttano centri NV in diamante per sensori o imaging. Luogo ricerca: Google. Risultati:
 - Qnami (Svizzera) - leader globale nei sensori quantistici a nanoscale basati su NV in diamante. L'azienda offre microscopi NV scanning e chip di diamantini con NV. Sul sito si autodefinisce «pioniera nello sviluppo e commercializzazione di tecnologie quantistiche per applicazioni di sensing e imaging»[31].
 - Nomad Atomics (Australia/Germania) - sviluppa sensori quantistici miniaturizzati per applicazioni di campo (magnetometri, gravitometri, orologi atomici). Il sito aziendale afferma di realizzare «sensor e leader di tecnologia quantistica per mineraria e risorse» e indica che i loro sensori spaziano da magnetometri a gravitometri a orologi atomici [32].
 - Quantum Diamond Tech (QDTI) (USA) - sfrutta NV in diamante per rilevazione biomolecolare ultrasensibile. Dal sito: «QDTI sfrutta sistemi quantistici ingegnerizzati in cristalli di diamante - centri NV - per rilevare biomolecole in modo ultrasensibile»[33].
- Query: «integrated photonics silicon quantum». Scelta: individuare aziende di circuiti fotonici integrati, utili per computazione quantistica e telecomunicazioni. Luogo ricerca: Google. Risultati:
 - QuiX Quantum (Paesi Bassi/Germania) - sviluppa chip fotonici per quantum computing. Sul proprio sito dichiara di essere «la società europea leader nel calcolo quantistico basato su fotoni», con un computer quantistico fotonico universale in fase di sviluppo [34].

³Superconducting nanowire single-photon detector

- Black Semiconductor (Germania/Olanda) - azienda che integra grafene nella fotonica su wafer a 300 mm. Il sito ufficiale spiega come usa il grafene per «integrare fotonica ad alta velocità direttamente sui chip elettronici», offrendo chip che comunicano via fotoni ad altissima efficienza [35].
- Query: «graphene photonics transceiver startup». Scelta: trovare startup focalizzate su dispositivi fotonici con grafene per le telecomunicazioni. Luogo ricerca: Google. Risultati:
 - CamGraPhIC (Italia/UK) - spin-off focalizzato su transceiver ottici a grafene, in grado di fornire una soluzione scalabile, energicamente efficiente e performante alla continua e crescente domanda di traffico, soprattutto nell’ambito dei modelli generativi[36].
 - 2D Photonics (UK/Italia) - azienda madre di CamGraPhIC. 2D Photonics ha raccolto investimenti per sviluppare transceiver fotonici al grafene ed è direttamente collegata a CamGraPhIC [37].

Chapter 4

Domande di ricerca

4.1 Esistono applicazioni tecnologiche che derivano direttamente dalla scienza?

L'analisi dei brevetti e delle aziende individuate conferma con chiarezza che esistono applicazioni tecnologiche che derivano in modo diretto dalla ricerca scientifica analizzata nei paper. Le scoperte nel campo degli emettitori di fotoni singoli, delle cavità ottiche e dei sensori quantistici non sono rimaste confinate all'ambito accademico, ma sono state concretamente tradotte in dispositivi e tecnologie brevettate e, in alcuni casi, già disponibili sul mercato. Un esempio da noi analizzato è rappresentato dal brevetto US20180128742A1 [13], che descrive una struttura planare per l'ottimizzazione dell'emissione direzionale da sorgenti quantistiche, come molecole singole. Questo brevetto, in cui figurano come inventori Costanza Toninelli e Mario Agio, già autori di lavori scientifici fondamentali nella stessa area, mostra un chiaro legame tra la produzione scientifica e l'innovazione protetta tramite brevetto. Allo stesso modo, la sorgente quantistica integrata descritta nel brevetto US11520105B2[14] sfrutta concetti avanzati come quello di "waveguide", già approfondito nel paper pubblicato da Lombardi et al., dimostrando la continuità tra ricerca fondamentale e realizzazione prototipale. In parallelo, numerose aziende operanti nel settore quantistico, come Quandela, Nu Quantum, Qnami, Ki3 Photonics e CamGraPhIC, sviluppano prodotti (emettitori quantistici, rivelatori, guide d'onda, sensori) che riflettono in modo evidente le traiettorie scientifiche delineate nella letteratura. Alcune di queste aziende sono spin-off accademici, altre sono startup indipendenti che sfruttano risultati consolidati della fisica della materia e dell'ottica quantistica. L'evidenza della continuità tra scienza e tecnologia non solo è ampia, ma suggerisce una filiera innovativa attiva e in espansione, in un campo in continuo e florido sviluppo come quello del quantum computing.

4.2 Dopo quanto tempo si manifestano rispetto alla ricerca scientifica?

Il tempo che intercorre tra la pubblicazione scientifica e la manifestazione tecnologica della relativa innovazione varia in funzione della complessità della tecnologia, delle condizioni di maturazione industriale e dell'interesse del mercato. Tuttavia, l'analisi dei casi emersi nel nostro studio permette di stimare un intervallo medio compreso tra cinque e dieci anni.

Nel caso della misura di precisione su stronzio pubblicata da Ferrari et al. nel 2003, che si proponeva come base per futuri standard di tempo, si è dovuto attendere circa quindici anni prima di vedere applicazioni sperimentali mature nei laboratori nazionali di metrologia, con orologi ottici in fase di prototipazione avanzata. Più rapida è stata la traduzione tecnologica per le antenne ottiche planari e per le sorgenti monofotoniche integrate: la prima pubblicazione risale al 2015, il deposito del brevetto è avvenuto nel 2018, e l'approvazione ufficiale nel 2020.

Ancora più evidente è il caso delle sorgenti basate su molecole DBT in nanocristalli: a fronte di studi accademici pubblicati tra il 2014 e il 2018, sono oggi già in fase di test in diverse startup che sviluppano sistemi di comunicazione quantistica o imaging ad alta risoluzione. Questi esempi dimostrano che, in presenza di un interesse applicativo immediato e di una struttura di ricerca-industria efficiente, la latenza tra scienza e tecnologia può essere anche inferiore a un decennio.

4.3 Chi realizza le applicazioni tecnologiche?

L'analisi dei brevetti, delle aziende e degli autori coinvolti rivela un panorama articolato in cui la transizione dalla scienza alla tecnologia è realizzata attraverso una varietà di attori. In alcuni casi, sono direttamente gli stessi ricercatori che firmano le pubblicazioni scientifiche a figurare anche tra gli inventori dei brevetti. È questo il caso di Costanza Toninelli e Mario Agio, i cui nomi compaiono sia nei paper, che tra gli inventori del brevetto sull'antenna planare.

In altri casi, il trasferimento tecnologico avviene attraverso spin-off universitari fondati da ex-ricercatori o da team interdisciplinari che includono membri del mondo accademico. Aziende come Nu Quantum, CamGraPhIC, Ki3 Photonics o Qnami sono esempi rappresentativi di questa dinamica. Si tratta di imprese nate spesso con il supporto di programmi europei per la valorizzazione della ricerca, che sviluppano prodotti allineati con le scoperte di base sui centri NV, il grafene, la fotonica integrata o la spettroscopia molecolare.

Infine, un numero non trascurabile di applicazioni viene realizzato da soggetti terzi, cioè aziende che non hanno legami diretti con gli autori dei paper ma che operano in settori attigui. Queste imprese, talvolta molto strutturate, intercettano risultati scientifici maturi e li inglobano nel proprio portafoglio tecnologico. È il caso di Quantum Opus o QDTI, che operano nel mercato della rilevazione fotonica o del sensing biologico, attingendo a risultati scientifici consolidati nel panorama internazionale.

4.4 Come si distribuiscono le attività innovative per paese e per istituzione?

La geografia dell'innovazione legata ai temi affrontati nei paper mostra una predominanza europea, con una forte presenza in paesi come Germania, Italia, Francia e Regno Unito. L'Italia, grazie al ruolo attivo del CNR-INO e del LENS di Firenze, figura tra i protagonisti nella produzione scientifica e nel deposito di brevetti. In Germania emergono realtà come Black Semiconductor, che operano nella fotonica quantistica integrata e nella connessione chip-to-chip ad alta velocità. Il Regno Unito si distingue per la presenza di Nu Quantum e CamGraPhIC, spin-off accademici specializzati nella manipolazione della luce a livello quantistico. La Francia, con aziende come Quandela, si afferma come polo di sviluppo per emettitori quantistici scalabili.

Oltre l'Europa, il Nord America svolge un ruolo altrettanto significativo. Gli Stati Uniti ospitano sia startup tecnologiche (es. Quantum Opus, QDTI) sia grandi laboratori nazionali (NIST) che operano nel campo della metrologia ottica e della sensoristica avanzata. Il Canada si distingue con aziende come Ki3 Photonics, focalizzate sull'entanglement fotonico per la comunicazione quantistica.

Più limitata, ma in rapida crescita, è la presenza asiatica, dove realtà come S-Fifteen a Singapore stanno investendo in tecnologie fotoniche applicate a sistemi di comunicazione ottica e sensing quantistico. La distribuzione istituzionale riflette questa geografia, con una prevalenza di laboratori pubblici in Europa e Nord America, e una progressiva entrata in gioco di centri privati in Asia.

4.5 Descrizione dell'applicazione tecnologica e di mercato della scienza

Le tecnologie emerse dalla letteratura rispondono a una serie di esigenze concrete che vanno oltre l'ambito puramente accademico. L'applicazione tecnologica della scienza, in questo caso, si manifesta in modo netto in settori quali la crittografia quantistica sicura, la metrologia di precisione, le telecomunicazioni quantistiche basate su entanglement tra particelle e la sensoristica molecolare. I dispositivi e i sistemi che derivano da queste ricerche non si limitano a riprodurre fenomeni noti, ma puntano esplicitamente a risolvere problemi pratici e industriali legati alla scalabilità, all'affidabilità e all'accessibilità delle tecnologie quantistiche.

Un esempio concreto è quello delle antenne ottiche planari, che hanno l'obiettivo di migliorare la direzionalità dell'emissione di fotoni singoli. Questa caratteristica è essenziale nei protocolli di comunicazione quantistica basati sull'interferenza di indistinguibilità tra fotoni, come nel caso dell'effetto Hong-Ou-Mandel [5]. Migliorare la raccolta fotonica consente di rendere efficienti i processi di distribuzione entangled tra nodi quantistici, risolvendo un problema di perdita e di rumore che limita oggi le reti quantistiche su scala urbana o continentale.

Le sorgenti monofotoniche integrate, d'altra parte, rispondono a una necessità industriale molto concreta: integrare più dispositivi su chip fotonici compatibili con l'elettronica convenzionale, in modo da abilitare architetture computazionali quantistiche più dense e meno costose. Qui il problema non è tanto la prova di concetto, già ampiamente superata, ma la replicabilità su scala industriale. Le aziende come Nu Quantum e Quandela stanno costruendo la risposta commerciale a questa esigenza, e ciò rappresenta una chiara evoluzione del concetto scientifico in prodotto.

Nel caso dei sensori su grafene, la scienza viene indirizzata a risolvere problemi di imaging e misura su scala sub-nanometrica. Questi dispositivi non solo trovano applicazioni nella ricerca fondamentale, ma sono rilevanti per settori industriali come la diagnostica medica, la spettroscopia molecolare e persino il monitoraggio ambientale. In questo contesto, risulta quindi evidente come la ricerca in questo ambito non trova semplicemente applicazioni effettive, ma sarà il cardine del progresso tecnologico, una singolarità nel progresso come è stato internet ed è in questo momento l'IA.

Il mercato potenziale è ampio e comprende i settori dell'aerospazio, delle telecomunicazioni, della sicurezza informatica, della diagnostica biomedicale e dell'elettronica ad alte prestazioni. I problemi che queste tecnologie intendono risolvere sono ben identificabili: limiti di sensibilità, precisione temporale, efficienza energetica, e scalabilità dei dispositivi non basati su tecnologie quantistiche. Tutti questi aspetti si ritrovano come punti deboli nelle tecnologie attuali e rappresentano la domanda implicita del mercato.

4.6 Ostacoli e tecnologie mancanti

Nonostante il potenziale scientifico e industriale delle tecnologie analizzate, diversi ostacoli impediscono ancora oggi una diffusione su vasta scala. Il primo e più evidente è la necessità, per molte delle tecnologie, di operare a temperature criogeniche. Questa condizione, sebbene accettabile in contesti sperimentali o in ambienti industriali controllati, costituisce una barriera significativa per l'adozione diffusa, soprattutto nei settori biomedicali o in applicazioni portatili. Un altro ostacolo cruciale è rappresentato dalla variabilità spettrale degli emettitori. Anche quando si dispone di sorgenti in grado di emettere fotoni singoli, la mancanza di indistinguibilità tra di essi, dovuta a piccoli disallineamenti o a instabilità ambientale, rende difficile la loro integrazione in architetture scalabili. Per questo motivo, molte aziende stanno esplorando tecniche di stabilizzazione attiva, selezione spettroscopica o accoppiamento con cavità a fattore di qualità elevato.

Sul fronte industriale, un ulteriore limite è l'assenza di infrastrutture produttive comparabili a quelle dell'elettronica convenzionale. Mentre il mondo dei semiconduttori dispone di foundry mature per la produzione di chip CMOS, il panorama della fotonica quantistica è ancora frammentato e in larga parte sperimentale. Manca una catena di approvvigionamento standardizzata, dalla fabbricazione del materiale alla caratterizzazione fino all'assemblaggio finale.

Dal punto di vista economico e normativo, infine, la lentezza dei processi di certificazione e la scarsità di fondi dedicati al passaggio da TRL intermedi a TRL alti rappresentano un ulteriore freno. Le startup spesso faticano a superare lo "scalino" tra la validazione scientifica e la realizzazione del primo prodotto commercializzabile. In questo scenario, il ruolo delle politiche pubbliche e dei programmi europei per la transizione deep tech diventa decisivo.

4.7 Da TRL basso ad alto

Il passaggio da TRL¹ bassi a TRL elevati non è mai lineare, ma nel caso delle tecnologie analizzate è possibile ricostruire una traiettoria tipica. Si parte dalla ricerca fondamentale (TRL 1-2), in cui vengono osservati fenomeni fisici come l'emissione coerente da una molecola o l'interferenza quantistica tra fotoni. A questa fase segue la dimostrazione sperimentale (TRL 3-4), spesso condotta in laboratorio con dispositivi su scala singola o a bassa stabilità.

Con l'ingresso nei TRL intermedi (5-6), il prototipo inizia a essere testato in ambienti più realistici, anche se ancora controllati. È qui che entra in gioco il ruolo dei primi brevetti, delle collaborazioni con l'industria e dei progetti dimostratori finanziati da enti pubblici. La transizione verso TRL 7-8 richiede una validazione tecnica su scala pre-commerciale, spesso accompagnata dalla nascita di uno spin-off o dalla partnership con un'azienda esistente.

Infine, l'ingresso nel mercato (TRL 9) coincide con la disponibilità del prodotto per l'uso su vasta scala, spesso in settori specializzati come il biomedicale, le telecomunicazioni o la difesa.

Questo modello non è soltanto teorico, ma riflette percorsi già in atto, come dimostrano i casi di Nu Quantum, Quandela, e dei dispositivi sviluppati attorno a sorgenti organiche o NV center. Se supportato da investimenti, infrastrutture e policy adeguate, questo passaggio può avvenire in tempi inferiori a un decennio.

¹Technology Readiness Level

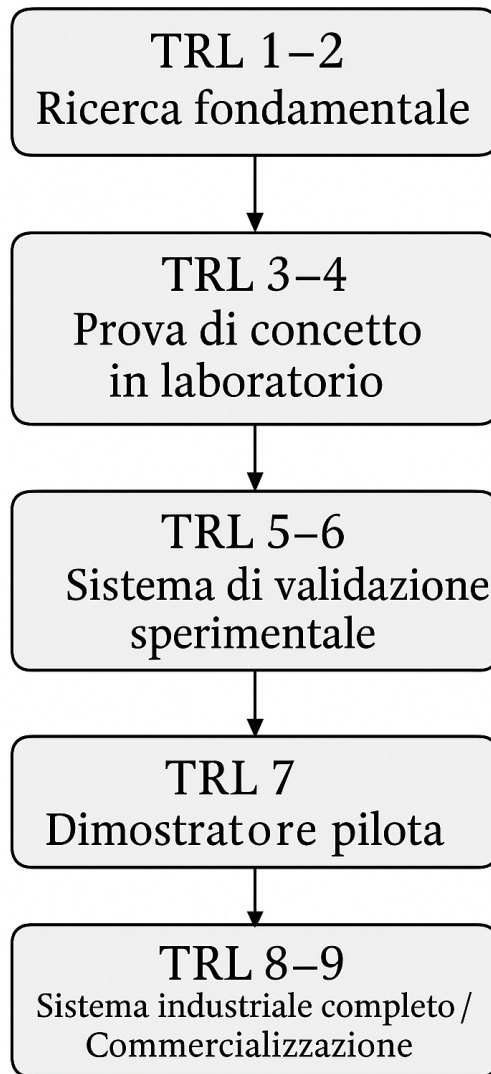


Figure 4.1: Transizione da TRL bassi a TRL alti

Chapter 5

Conclusioni

L'analisi svolta nel presente lavoro ha dimostrato come la ricerca scientifica avanzata nell'ambito dell'interazione luce-materia a livello nanometrico, finalizzata alle comunicazioni e la componentistica di circuiti, non rimanga confinata al solo piano teorico o sperimentale, ma si traduca in applicazioni tecnologiche reali, spesso brevettate e in sempre più casi già industrializzate. I risultati emersi dalle query su brevetti e aziende confermano una filiera dell'innovazione attiva, nella quale i concetti fondamentali sviluppati nei paper trovano diretta applicazione in dispositivi ad altissima sensibilità ed efficienza. Nonostante le difficoltà ingegneristiche e di ricerca dettate dalla precisione necessaria a lavorare a scale di dimensioni nanometriche, il quadro che emerge è quello di una scienza viva, capace di dialogare con il mondo produttivo e con le società nel suo complesso. La presenza di brevetti con Non-Patent References, l'attività di imprese deep tech e il coinvolgimento diretto dei ricercatori in percorsi di imprenditorialità scientifica indicano che l'ecosistema dell'innovazione è in trasformazione, spinto non solo da logiche di profitto, ma anche da un desiderio diffuso di concretizzare i risultati della conoscenza in soluzioni con impatto reale, che andranno a rivoluzionare le successive generazioni dando luogo ad una nuova rivoluzione tecnologica.

Bibliography

- [1] Quantum emitters: Beyond crystal clear to single-photon pure. <https://phys.org/news/2021-09-quantum-emitters-crystal-single-photon-pure.html>
- [2] Punti Quantici. https://it.wikipedia.org/wiki/Punto_quantico
- [3] Sorgenti e sensori quantistici basati su centri di colore-InRiM. <https://www.inrim.it/it/ricerca/settori-scientifici/ottica-quantistica-e-fotometria/attivita/sorgenti-e-sensori-quantistici>
- [4] Zener Tunneling of Light Waves in an Optical Superlattice | Phys. Rev. Lett. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.94.127401>
- [5] Hong-Ou-Mandel effect - Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Hong%2D%20Ou%2DMandel_effect
- [6] Precision Frequency Measurement of Visible Intercombination Lines of Strontium | Phys. Rev. Lett. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.91.243002>
- [7] Exceptional Reduction of the Diffusion Constant in Partially Disordered Photonic Crystals | Phys. Rev. Lett. <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.101.123901>
- [8] Single-molecule study for a graphene-based nano-position sensor. <https://arxiv.org/abs/1407.6951>
- [9] Photostable Molecules on Chip: Integrated Sources of Nonclassical Light - FAU CRIS. <https://dev.cris.fau-dev.tf.fau.de/publications/296956135/>
- [10] Self-Assembled Nanocrystals of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Show Photostable Single-Photon Emission - PubMed. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29630340/>
- [11] Real-time two-photon interference from distinct molecules on the same chip. <https://arxiv.org/abs/2201.07140>

- [12] Solutions | Ki3 Photonics. <https://www.ki3photonics.com/solutions>
- [13] US20180128742A1 - Device for the beaming of light emitted by light sources, in particular fluorescence of molecules - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US20180128742A1/en>
- [14] US11520105B2 - Single photon source - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/US11520105>
- [15] Diamond-based single-photon emitters <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011RPPh...74g6501A>
- [16] US9297831B2 - Touch sensor using graphene for simultaneously detecting a pressure and a position . <https://patents.google.com/patent/US9297831B2>
- [17] US12266735B2 - Device and method for using diamond nanocrystals having NV color centers in CMOS circuits. <https://patents.google.com/patent/US12266735B2>
- [18] QDTI - quantum powered biomarker detection. <https://qdti.com/>
- [19] QuiX Quantum | Photonic Quantum Computing. <https://www.quixquantum.com/>
- [20] Startseite - Black Semiconductor. <https://blacksemi.com/>
- [21] 2D Photonics / CamGraphIC raises €25 million to advance graphene-based photonics | Graphene-Info. <https://www.graphene-info.com/2d-photonics-raises-25-million-advance-graphene-based-photonics>
- [22] Black Semiconductor acquires Applied Nanolayers to accelerate technology development of its Integrated Graphene Photonics (IGP) technology <https://www.graphene-info.com/black-semiconductor-acquires-applied-nanolayers-accelerate-technology>
- [23] Companies Working With Diamond NV Quantum Computing. <https://thequantuminsider.com/2022/03/31/5-quantum-computing-companies-working-with-nv-centre-in-diamond-technology/>
- [24] Quandela Prometheus - Quantum-dot based single-photon source. <https://www.quandela.com/products-and-services/prometheus/>
- [25] Nu Quantum raises £650k pre-seed investment - Cambridge Enterprise. <https://www.enterprise.cam.ac.uk/news/cambridge-spin-out-nu-quantum-raises-pre-seed-investment/>
- [26] Nu Quantum site <https://www.nu-quantum.com/>
- [27] Solutions | Ki3 Photonics. <https://www.ki3photonics.com/solutions>

- [28] Quantum Opus - Excellence in photon detection. <https://www.quantumopus.com/>
- [29] Single Quantum - Excellence in photon detection.
<https://www.singlequantum.com/>
- [30] S-Fifteen Instruments Pte. Ltd. <https://www.s-fifteen.com/>
- [31] Quantum Sensing Leaders in Nanoscale Precision | Qnami. <https://www.qnami.ch/>
- [32] Nomad Atomics - Changing the world of sensing forever. <https://www.nomadatomics.com/>
- [33] QDTI - quantum powered biomarker detection. <https://www.qdti.com/>
- [34] QuiX Quantum | Photonic Quantum Computing.
<https://www.quixquantum.com/>
- [35] Startseite - Black Semiconductor. <https://www.blacksemi.com/>
- [36] CamGraPhIC. <https://www.camgraphic-technology.com/>
- [37] 2D Photonics. <https://www.2dphotonics.com/>
- [38] Quantum Brilliance. <https://www.quantumbrilliance.com/>
- [39] Diatope. <https://www.diatope.com/>
- [40] NVision Imaging. <https://www.nvision-imaging.com/>
- [41] NuCrypt. <http://nucrypt.net/>