

NANO-SWIR

NANOscale materials for next-generation SWIR hyperspectral sensors

Franco Spinella

Nuova proposta 2026

NANO-SWIR

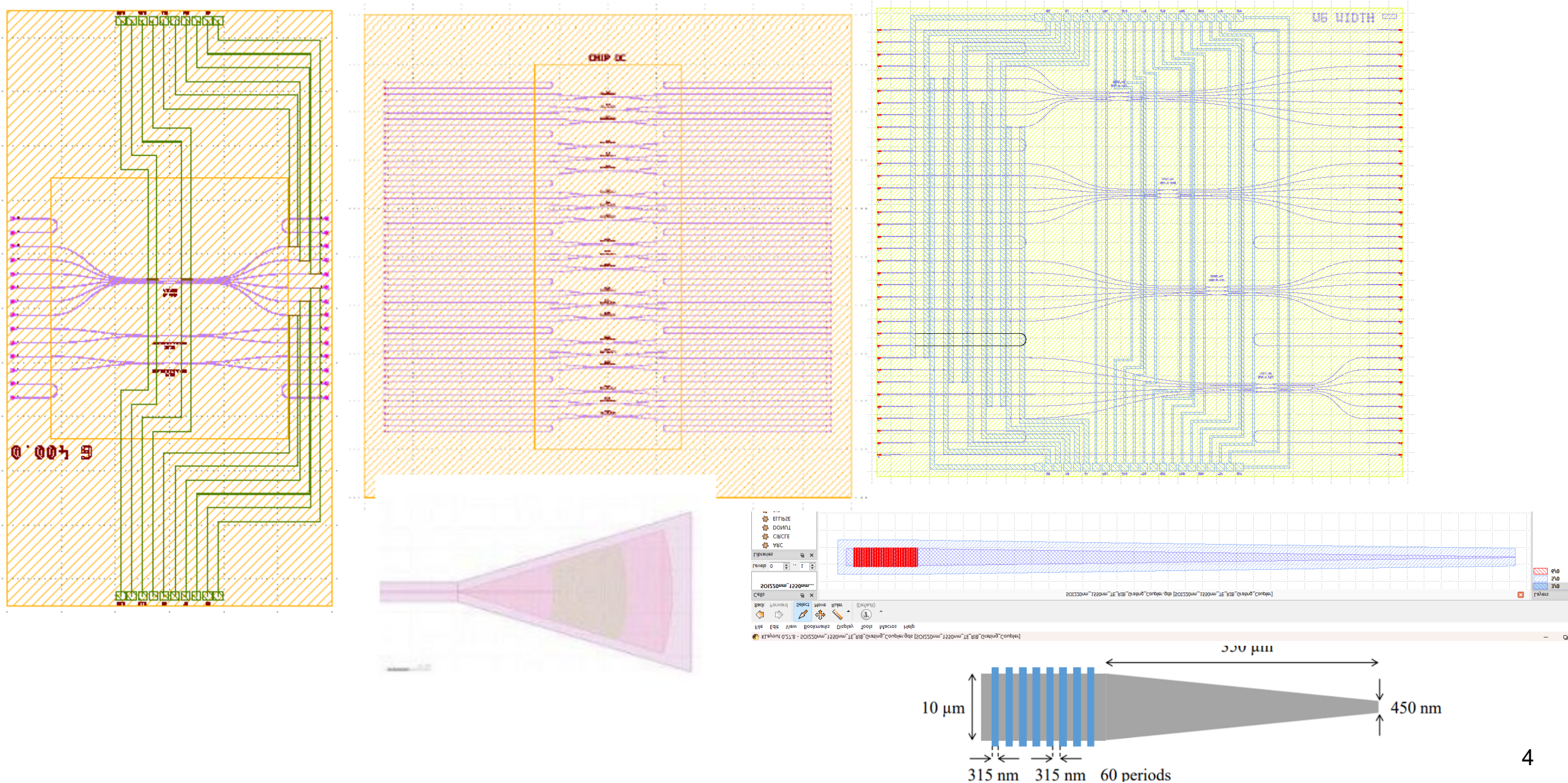
- Sviluppo di matrici di sensori in banda SWIR-MWIR (1 – 8 μm) ad altissima sensibilità tramite materiali innovativi.
- 3 Sezioni coinvolte: PI, RM2, PV
- Know-how da QUANTEP, PNRR-NQSTI
- Possibili utilizzi:
 - Medicale
 - Astronomia IR
 - Agricoltura di precisione (satelliti, droni)
 - Homeland security
 - ...

Sigla in corso: QUANTEP

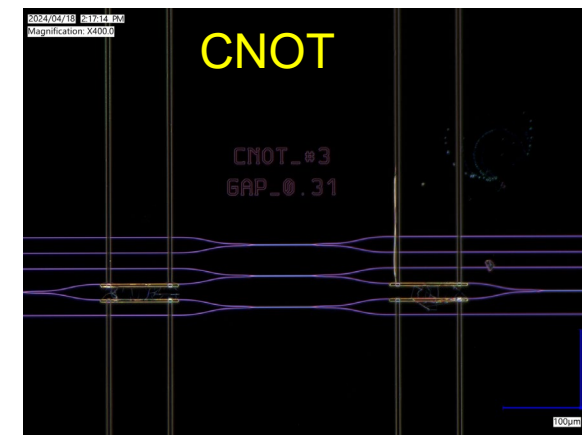
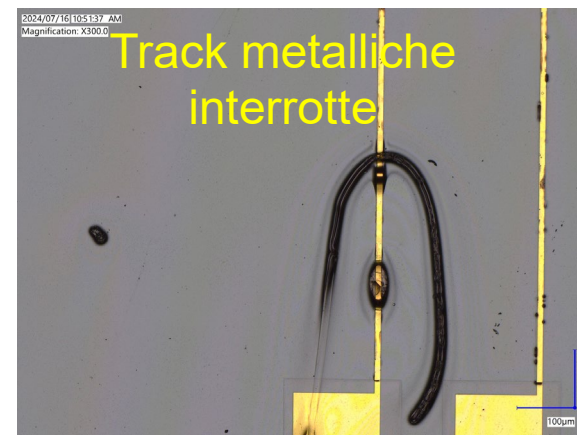
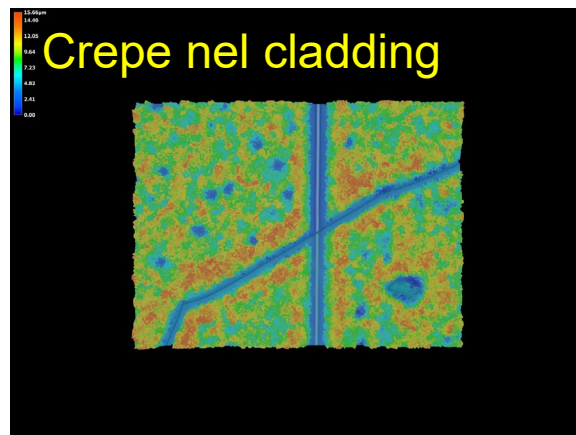
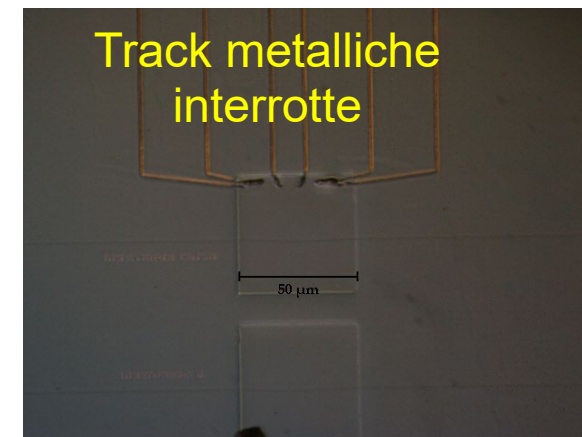
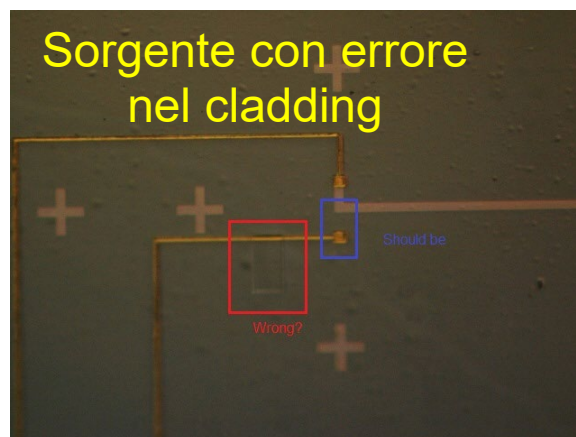
- Chiude a fine 2025
- 2 linee di ricerca:
 - Sviluppo di circuiti in silicon-photonics per Quantum Computing
 - Rivelatori/generatori di singolo fotone, eventualmente integrati

QUANTEP: silicon photonics

- Progetto & simulazione di vari circuiti fotonici tramite Ansys Lumerical & Luceda Photonics

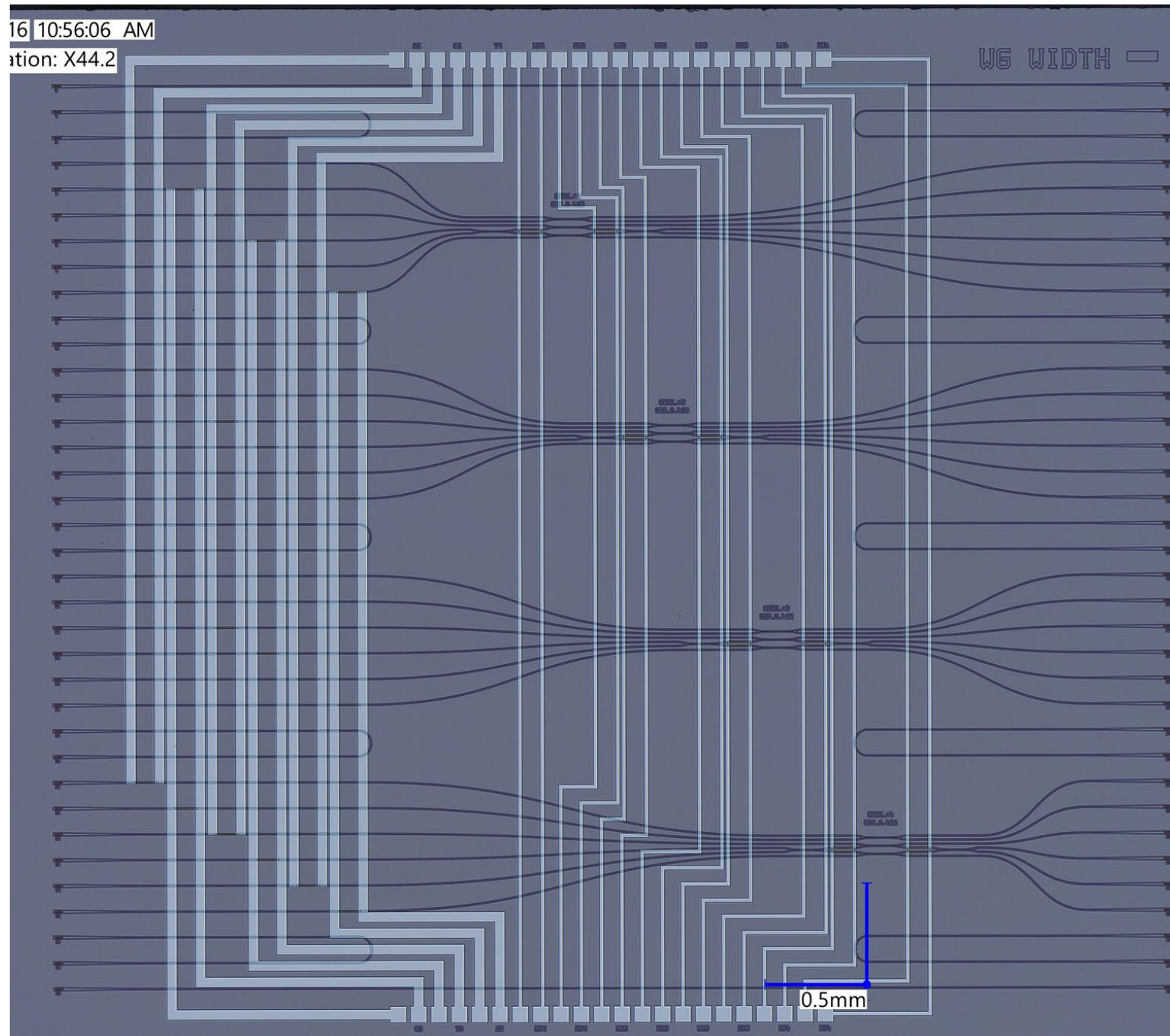


QUANTEP: fonderie ...



- Problemi di produzione & lunghissimi tempi di consegna: poco compatibile con progetti INFN di durata limitata ...
- Costi molto elevati ...

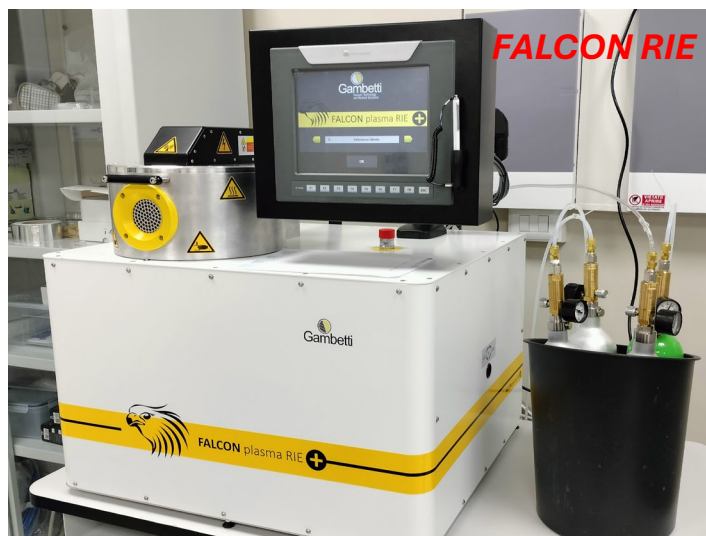
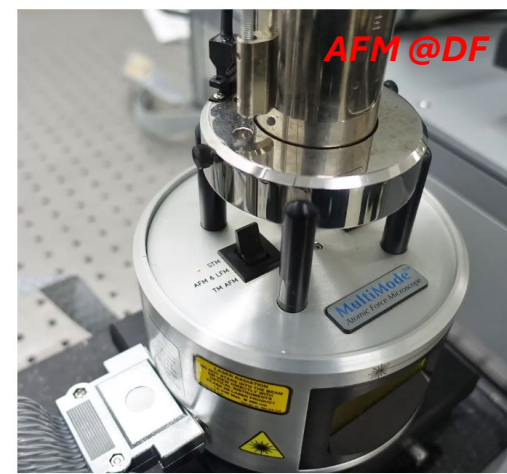
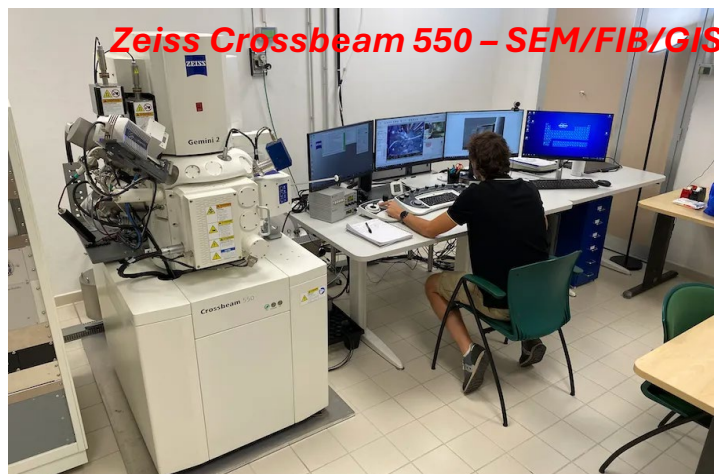
QUANTEP: Cornerstone



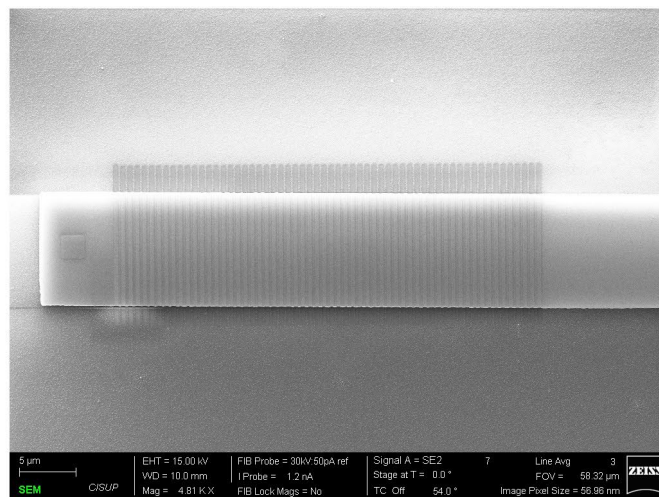
- Prototipo OK (4/2025 ...)
- Molto costoso
- Testato in regime classico OK
- Test single photon in corso a RM2

Fabbricazione in-house @PISA

- Dip. Ingegneria (Prof. Pennelli)
- Clean room wet @ INFN-Pisa
 - Acquistate RIE & PE-CVD @ INFN-Pisa & consumabili (QUANTEP, PNRR NQSTI 4-6, aiuto dalla Sezione ...)
- Dipartimento, CISUP

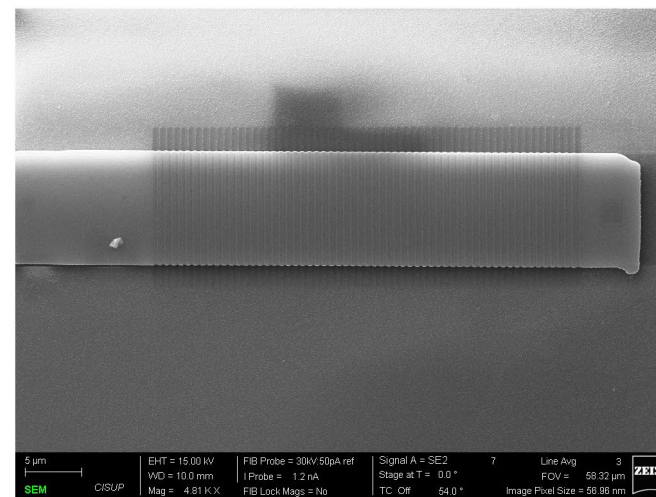


Strutture prodotte @PI

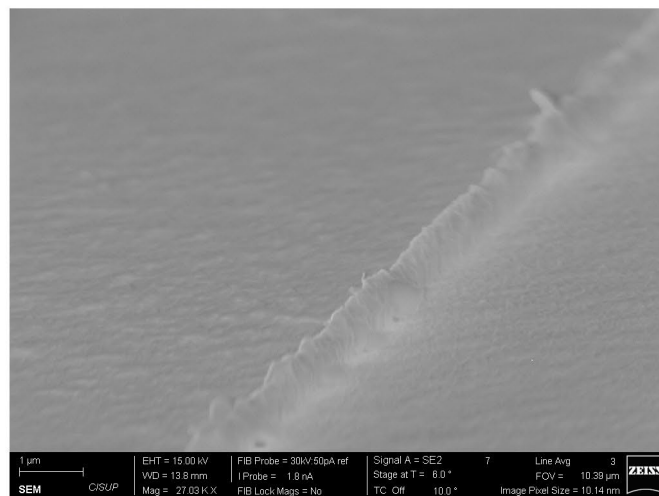


Grating coupler: Receiver

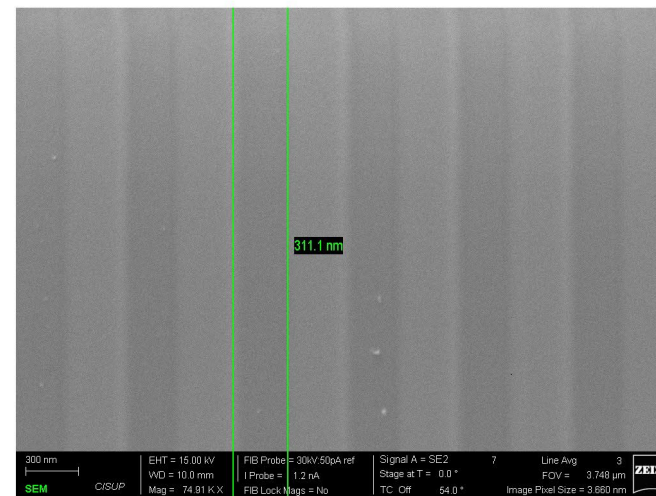
The small square on the left was used to calibrate FIB etching using an atomic force microscope



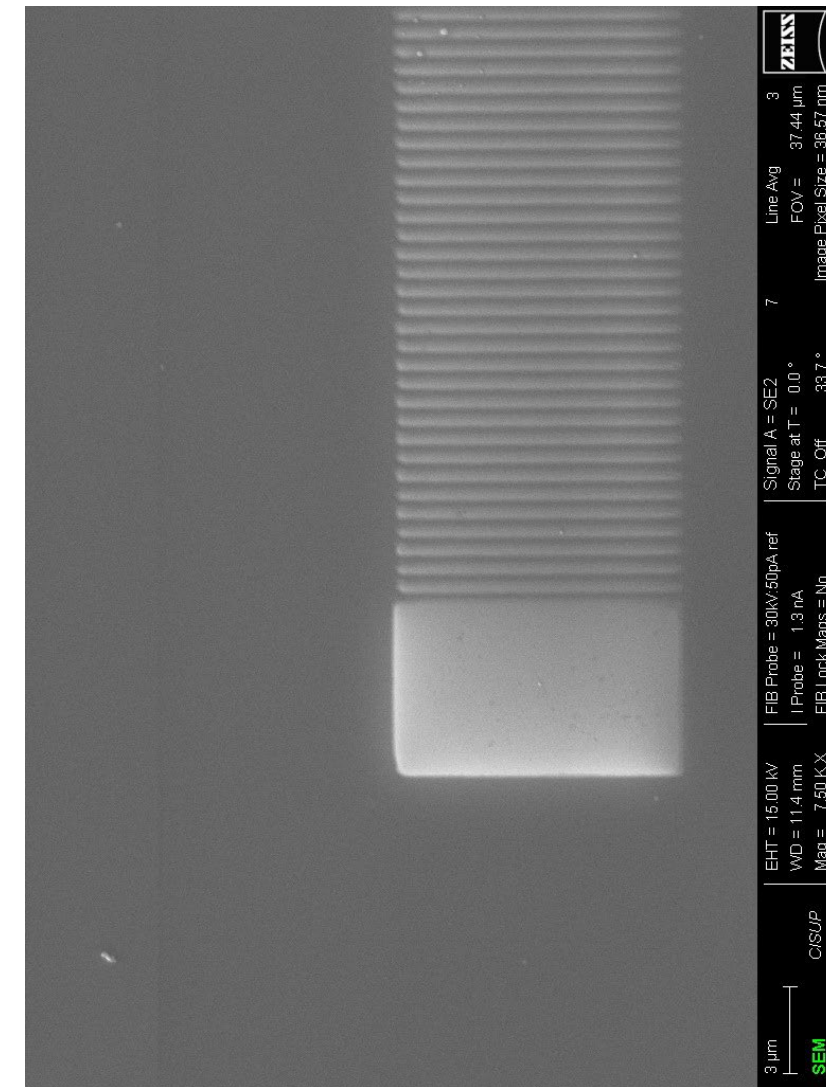
Grating coupler: Emitter



Vertical R.I.E etching with CF4



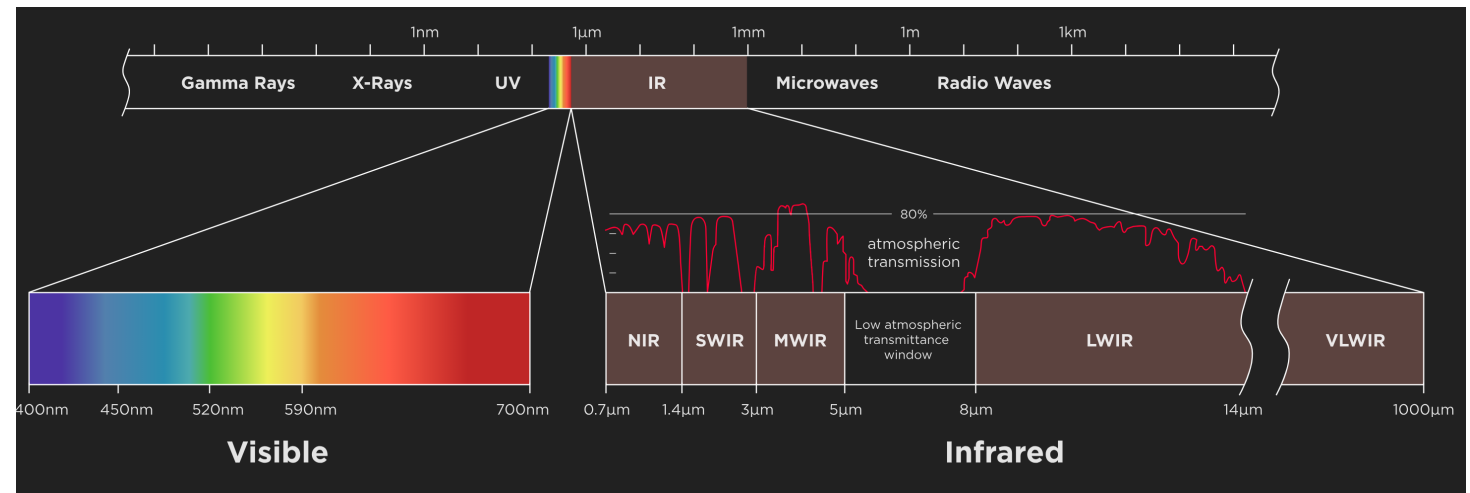
Grating coupler: Expected dimension 315 nm



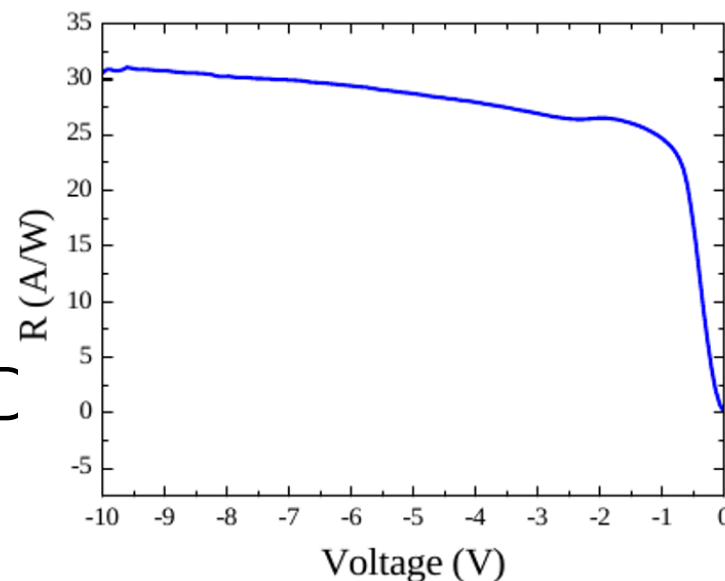
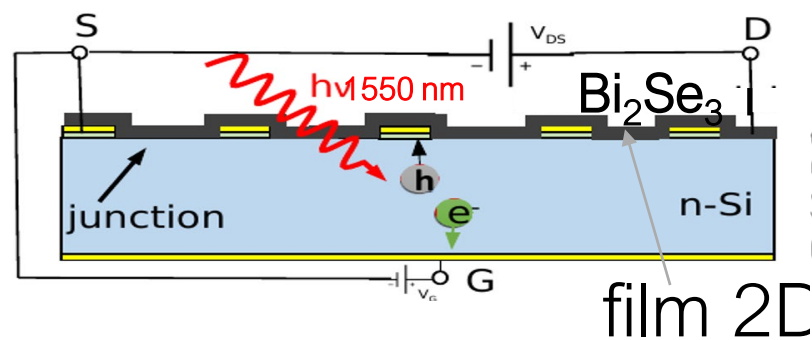
- Prodotte principalmente @DII ma in parte @ INFN-PI
- Abbiamo acquisito il know-how per produrre in house strutture Sol in Si + metallizzazioni
- PE-CVD per deposito di SiO₂ ...

QUANTEP: sviluppo di rivelatori IR di singolo fotone

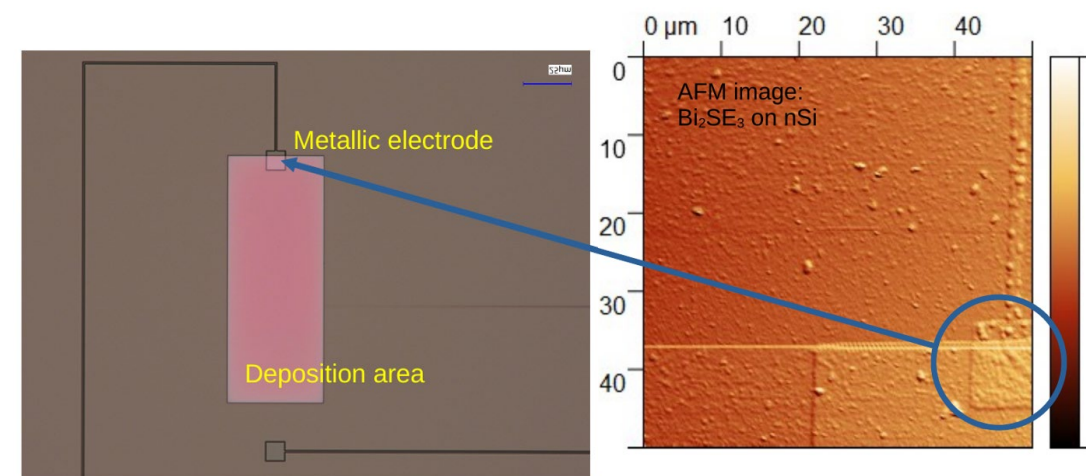
- Dispositivi commerciali in banda SWIR (1550 nm)
- Single photon: superconduttori, criogenici, poco efficienti
- Non single-photon: fotodiodi basati su InGaAs (0.9 – 1.7 μm), raffreddati
responsività tipica 1Amp/Watt



- Fondamentali per implementazione di algoritmi di QC fotonici
- QUANTEP: sviluppo di rivelatori basati su etero-giunzioni $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Si}$ (bandGap = 0.32 eV)



$R = 30 \text{ Amp/W @ -10V bias}$



-
- Terahertz & Microwave**
- Visible & Ultraviolet**
- Wavelength**
- Bandgap (eV)**
- Materials and Bandgaps:**
- Graphene
 - Gallene
 - 1T-TiS₂
 - Borophene
 - Bi₂Se₃
 - Fe₃GeTe₂
 - Cr₂S₃
 - Silicene
 - Fe₂O₃
 - Ti₂N
 - Ti₃C₂
 - C₇C
 - 1T-WTe₂
 - β-CuSe
 - 1T-VSe₂
 - Sb₂Te₃
 - β-Tellurene
 - α-Antimonene
 - TiS₃
 - 2H-WSe₂
 - 2H-MoS₂
 - 1T_r-ReS₂
 - β-Antimonene
 - α-SnS
 - In₂Se₃
 - MoO₂
 - P (blue)
 - β-SnTe
 - P (black)
 - 2D Mica Muscovite
 - h-BN
 - GaSe
 - Ga₂N₃
 - MnO₂
 - As₂S₃
 - SrTiO₃ Perovskite
 - MoO₃

Jinzhao Xu,^a Henan Li,^{*b} Shaofan Fang,^a Ke Jiang,^a Huizhen Yao,^a Feier Fang,^a Fuming Chen,^{id c} Ye Wang^d and Yumeng Shi^{id *ae}

Broadband photodetectors are critical to modern industrial systems and scientific applications and have attracted broad attention in recent years. In this paper, high quality single-crystal Bi_2S_3 nanobelts were prepared by using the chemical vapor deposition (CVD) method. The Bi_2S_3 nanobelts were further used as photosensitive materials for broadband photo-detection. The as-grown Bi_2S_3 nanobelts exhibit ultrahigh absorption coefficient in the ultraviolet (UV) to near infrared (NIR) range. The photodetectors based on a single Bi_2S_3 nanobelt showed excellent broadband photoresponse performance in the UV to NIR range (from 300 to 1000 nm), including high photoresponsivity up to 201 A W^{-1} , an ultrafast response speed of $\sim 50 \mu\text{s}$, a high external quantum efficiency of 31140% and a high detectivity of 2.7×10^{10} Jones. The superior performance can be attributed to the ultrahigh absorption coefficient of Bi_2S_3 nanobelts, as well as the Schottky contact between the Bi_2S_3 nanobelt and the Au electrode. The present work suggests that the single-crystal Bi_2S_3 nanobelts possess great potential for the fabrication of high performance broadband photodetectors.

Materiali 1D/2D

Comparative table of key performance parameters (Responsivity, Detectivity, Spectral Range, Response Time) for 2D heterostructure IR photodetectors.

Material	Device configuration	Responsivity (AW ⁻¹)	Detectivity (Jones)	Spectral Range	Response Time (s)	Ref.
2D/0D	Graphene/PbS QD	10 ⁷	7 × 10 ¹³	VIS-SWIR	10 ⁻²	[108]
	Graphene/PbS QD	10 ⁷	–	NIR	0.3	[109]
	MoS ₂ /PbS QD	10 ⁵ -10 ⁶	~10 ¹⁴	VIS-SWIR	0.35	[110]
	MoS ₂ /PbS QD	10 ⁷	5.5 × 10 ¹⁵	NIR	0.17	[111]
	PbS/MoS ₂	5 × 10 ⁴	3 × 10 ¹³	NIR	7.8 × 10 ⁻³	[112]
	PbS/MoS ₂	5.43 × 10 ⁻²	2.68 × 10 ¹²	SWIR	–	[113]
	MoS ₂ /HgTe QD	~10 ⁵	~10 ¹²	SWIR	Sub-millisecond	[114]
	Ti ₂ O ₃ /Gr	3.0 × 10 ²	7 × 10 ⁸	SIR	1.2 × 10 ⁻³	[39]
	MoS ₂ /PbS	1.376 × 10 ²	7.7 × 10 ¹⁰	NIR	–	[115]
	MoS ₂ /HgTe	1.05 × 10 ²	10 ¹²	NIR	–	[114]
2D/1D	Si/Gr	4.49 × 10 ¹	10 ⁵	VIS-NIR	–	[60]
	Te/MoS ₂	> 10 ³	10 ¹²	–	15 × 10 ⁻³	[116]
	PdSe ₂ /SiNWA	–	–	VIS-SIR	–	[69]
	PdSe ₂ /Ge NCs	5.3 × 10 ⁻¹	1.45 × 10 ¹¹	NIR	2.2 × 10 ⁻⁵	[117]
	Bi ₂ Te ₃ /Gr	9 × 10 ⁻⁵	–	VIS-NIR	–	[118]
2D/2D	CdS _x Se _{1-x} /Te	2.84 × 10 ²	1.07 × 10 ¹⁷	VIS-NIR	11 × 10 ⁻⁶	[119]
	Graphene/MoS ₂	10 ⁷	–	MWIR-LWIR	–	[120]
	Graphene/MoS ₂	3 × 10 ⁴	1.7 × 10 ⁻⁹	NIR	–	[121]
	Graphene/BP	3.3 × 10 ³	–	SWIR	4 × 10 ⁻³	[122]
	MoS ₂ /BP	1.534 × 10 ⁻¹	2.13 × 10 ⁹	SWIR	15 × 10 ⁻⁶	[77]
	MoS ₂ /BP	9.0 × 10 ⁻¹	1.1 × 10 ¹⁰	MWIR	4 × 10 ⁻⁶	[81]
	BP/WSe ₂	5.0 × 10 ⁻¹	~10 ¹⁰	SWIR	0.8 × 10 ⁻³	[93]
	BP/Graphene	5.0 × 10 ⁻²	6.69 × 10 ⁸	Vis-MWIR	–	[123]
	BP/MoS ₂	3.7 × 10 ⁻³	–	NIR-MWIR	–	[81]
	b-AsP/MoS ₂	–	10 ⁹	–	–	[80]
	WS ₂ /HfS ₂	>10 ³	>10 ¹⁰	Vis-LWIR	1.7	[124]
	Graphene/Bi ₂ Se ₃	1.97	1.6 × 10 ⁹	NIR-MWIR	4 × 10 ⁻³	[125]
	PdSe ₂ /MoS ₂	2.883 × 10 ¹	6.09 × 10 ¹⁰	UV-LWIR	–	[36]
	FG/Graphene	5.0 × 10 ¹	6 × 10 ⁹	UV-MWIR	100	[126]
	Te/MoS ₂	8.7 × 10 ⁻¹	7.8 × 10 ⁸	NIR-MWIR	–	[127]
	Te/Graphene	9.6 × 10 ⁻³	1.04 × 10 ⁹	NIR-MWIR	2.8 × 10 ⁻³	[128]
	MoTe ₂ /BP	–	3.4 × 10 ⁹	UV-MWIR	–	[129]
	Graphene/InSb	–	–	Vis-LWIR	–	[130]
	MoTe ₂ /Ge	1.246 × 10 ⁴	3.3 × 10 ¹²	NIR	–	
2D/3D	GeSn/Graphene	2.2 × 10 ²	2.96 × 10 ¹¹	NIR-SWIR	–	
	Bi ₂ Se ₃ /Si	2 × 10 ⁴	1.2 × 10 ¹⁰	Vis-NIR	–	
	b-As/Si	7.522 × 10 ¹	3 × 10 ⁹	UV-MWIR	–	
	PtTe ₂ /Si	>1.2 × 10 ⁶	–	Vis-LWIR	–	
	MoS ₂ /a-Si:H	5 × 10 ⁻²	2 × 10 ¹⁰	Vis-NIR	–	
	Graphene/Ta ₂ O ₅	7.2	8 × 10 ⁶	UV-LWIR	–	
	Graphene/Si	1.3 × 10 ⁻¹	–	NIR-MWIR	–	
	HgCdTe/BP	1.68 × 10 ⁻¹	1.81 × 10 ¹⁰	NIR-MWIR	–	
	WS ₂ /Si	–	–	UV-NIR	–	
	BP/Bi ₂ O ₃ Se	–	3 × 10 ⁹	–	–	
	PtTe ₂ /Si	5 × 10 ⁻³	6.92 × 10 ⁹	UV-LWIR	–	
	Te/Si	2.49 × 10 ²	1.15 × 10 ¹¹	UV-NIR	–	

- Molto recenti
- Sensibili dall' IR all'UV
- Alcuni con R molto alta se depositati 1D
- Picco di assorbimento non sempre indicato in letteratura !!!

Materials Today Nano 29 (2025) 100582



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Materials Today Nano

journal homepage: www.sciencedirect.com/journal/materials-today-nano



Van der Waals heterostructures for advanced infrared photodetection: Innovations in stability and spectral range

Aditya Kushwaha^a, Manasvi Raj^a, Anshul^a, Rahul Kumar^{b,*}, Neeraj Goel^{a,*}

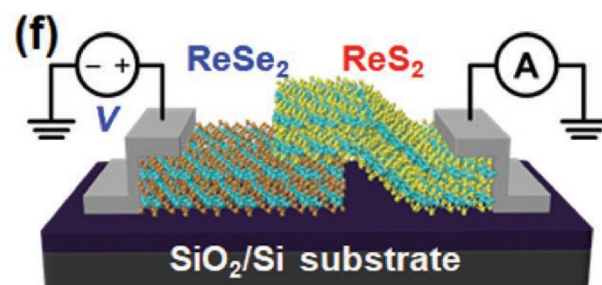
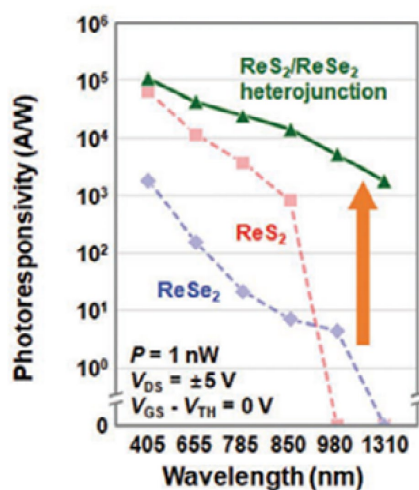
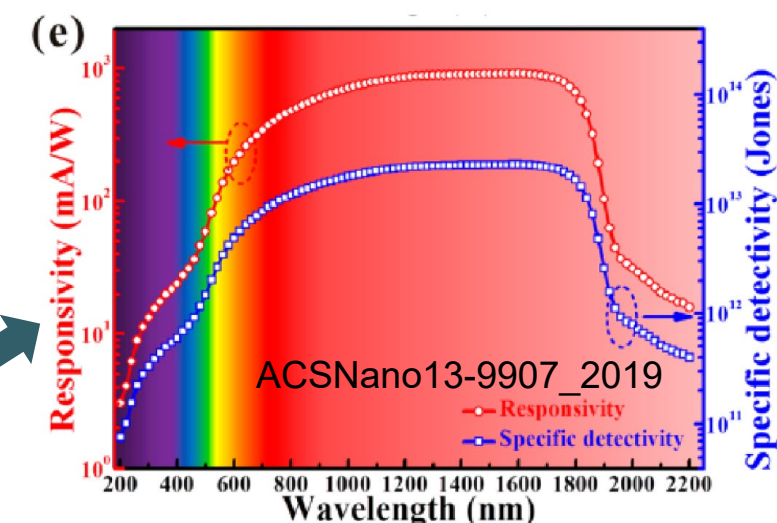
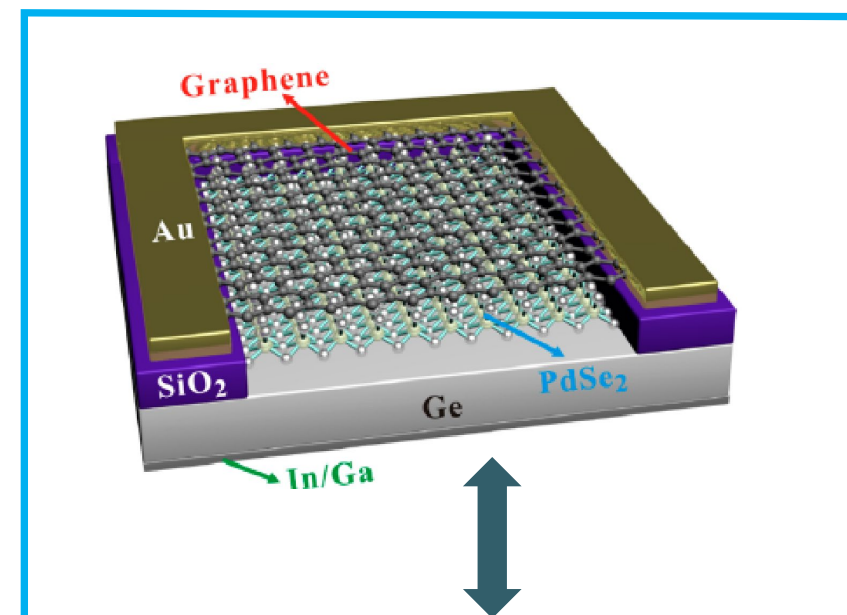
^a Department of Electronics and Communication Engineering, Netaji Subhas University of Technology, Dwarka, New Delhi, 110078, India
^b Institute of Infrastructure Technology Research and Management, Ahmedabad, 380026, India

Cosa si propone il progetto ?

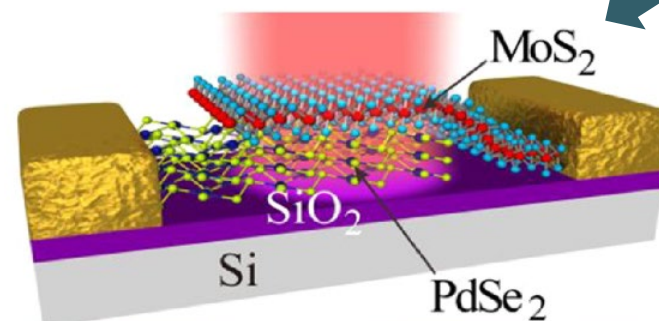
Fase 1: caratterizzazione dei materiali

- Caratterizzare la risposta spettrale di diversi materiali
- Sceglierne 4 che coprono la banda 1-8 μm con la massima responsività e separazione spettrale

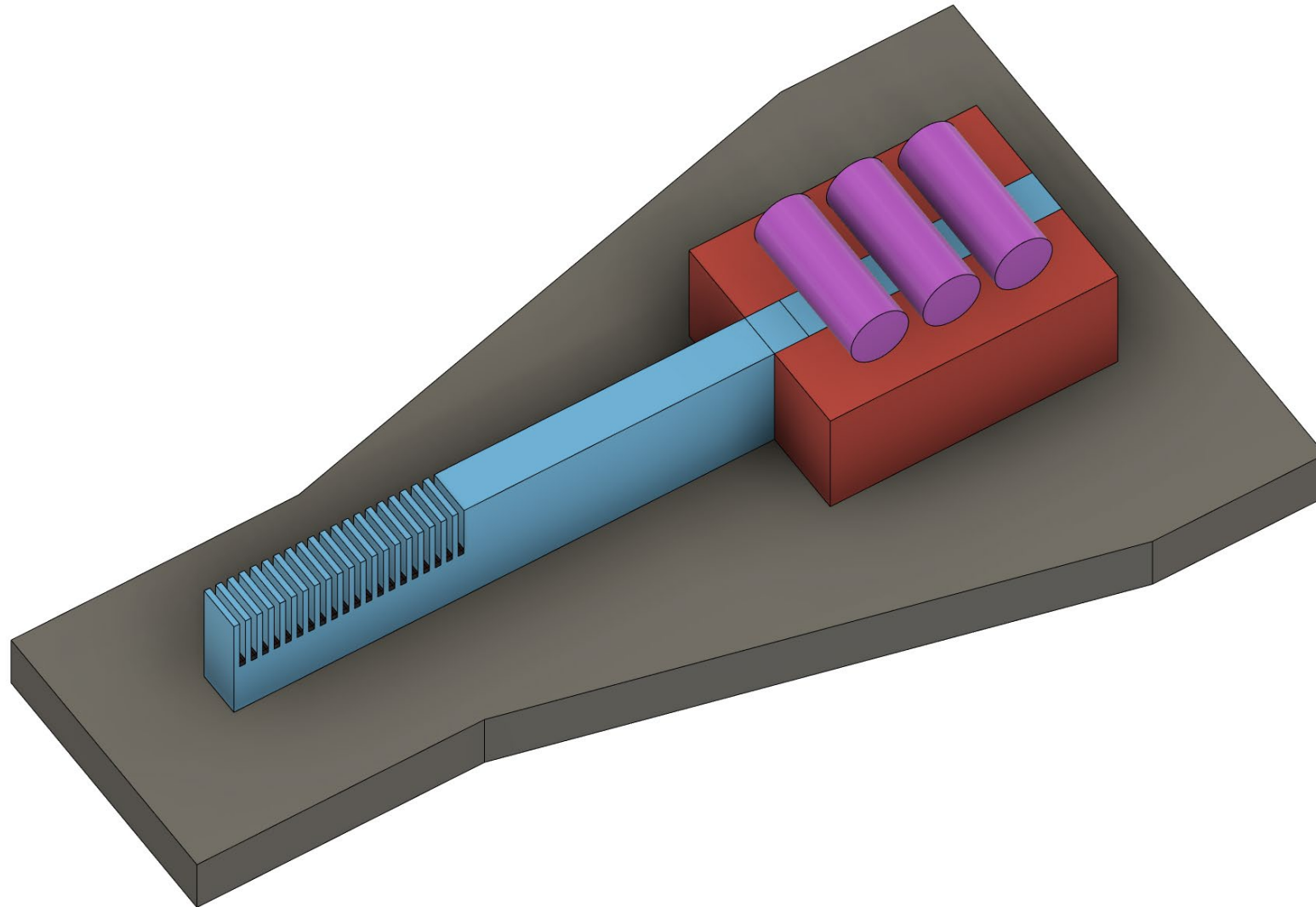
Material	structure	bandgap eV	Substrate	wavelength μm	responsivity A/W
PdSe ₂ /Si	thin film	~0.35	Si	5-10	0,3
Bi ₂ O ₂ Se/PbSe	Q-dots			2	3000
WS ₂ /PbS	Q-dots			1,8	1400
Bi ₂ Te ₃ /Gr	nanowire	0,35		0.94-1.72	10 ⁶
PdSe ₂ /MoS ₂	film/flake			10,6	42,1
WS ₂ /Bi ₂ Se ₃	flake/film			1.064	26,7
Bi ₂ Te ₃ /Gr	nanoplatelets			1,55	0,22
Te/Si	film	0,35			
PdSe ₂ /Ge	thin film			0.2-3.034	1000
PtSe ₂ /Ge				1,55	0,6
MoS ₂ /Si	thin film			0.45-1.050	
PbSe	thin film			4.5-10	125



AdvSci5-1700423_2018



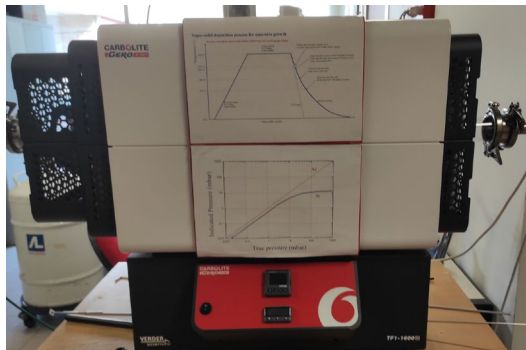
Prototipo 1 pixel – 1 materiale



- Prototipo rivelatore 1 pixel in silicon photonics
- Deposito nanowire/nanobelts/flakes a seconda del materiale
- Test

Sequenza delle operazioni

1) sintesi delle strutture 2D & 1D su quarzo @RM2



Forno zona singola

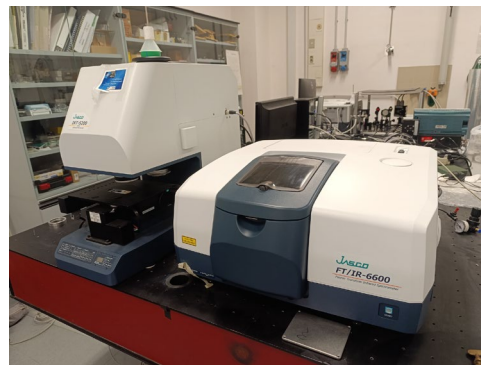


Forno 3 zone

2) misura spettro 2D @ PI (DF) , RM2

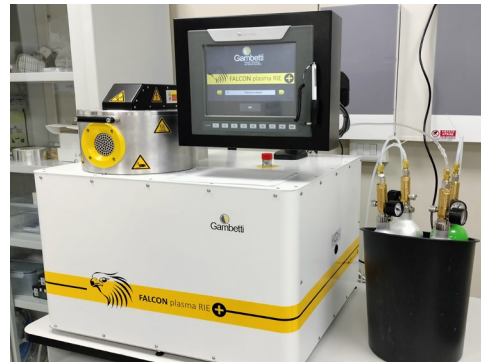


Spettrometro 3um



Lab ottica @ DF

3) produzione struttura in silicon photonics @ PI



4) posizionamento nanowire (1D) @ PV (UNIMORE)

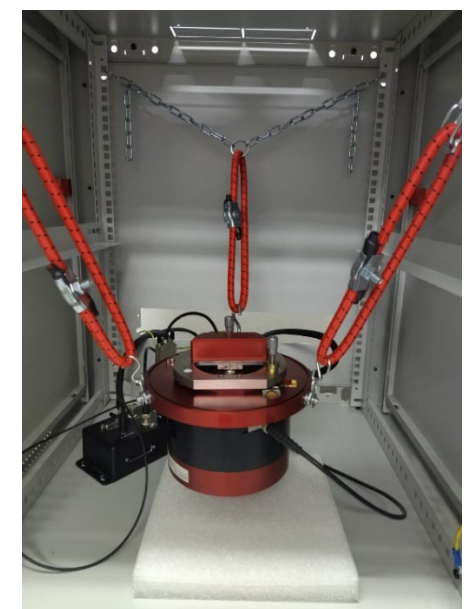


Nano manipolatore

5) test del sensore (curva I-V, $R(\lambda)$) @PI,RM2,PV



Micro manipolatore



AFM



Laser IR 1.4-1.7 um

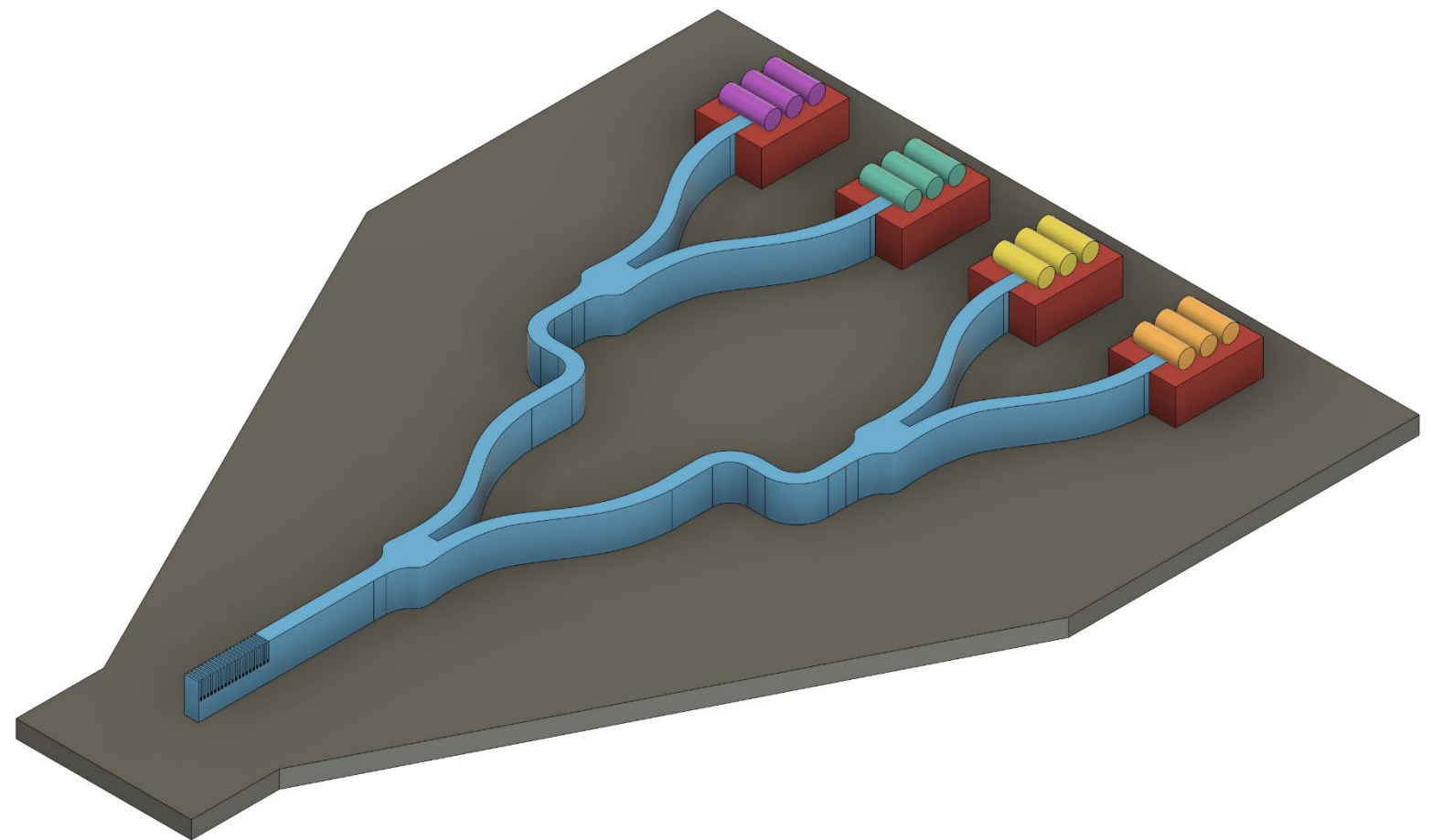


Source + pA

Cosa si propone il progetto ?

Fase 2: struttura 4 materiali + guida Si

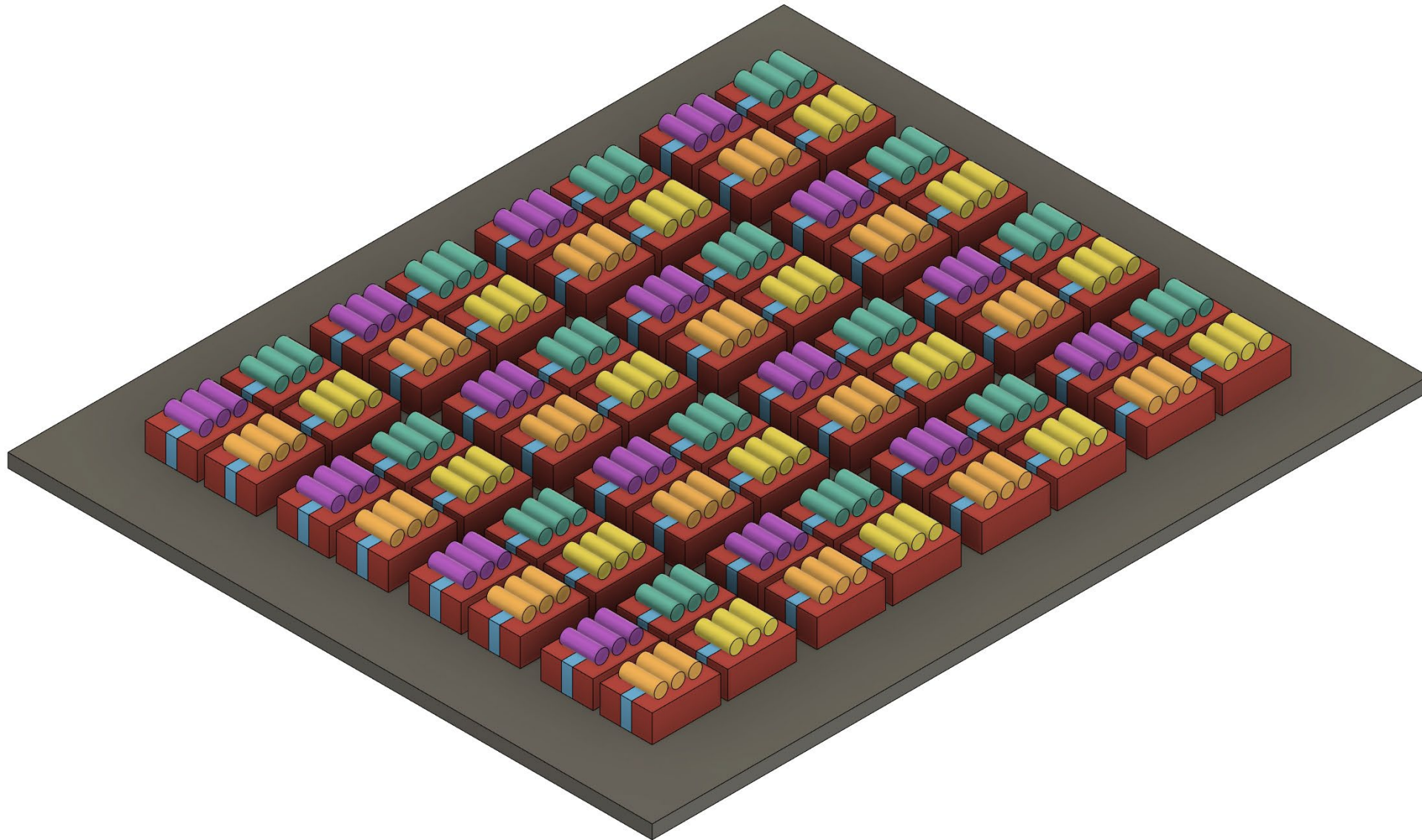
- Sviluppo di un sensore a larga banda 1-8 μm basato su nanostrutture 1D di 4 materiali diversi con diversa risposta spettrale, ingresso in fibra e struttura in silicon photonics



- Risposte indipendenti: analisi spettrale a bassa risoluzione
- Alta sensibilit  su tutta la banda (goal : 10x InGaAs)
- Il Si non trasmette nel visibile : intrinsecamente solar blind
- Dimensioni ridotte: semplice da raffreddare per diminuire il rumore termico (MWIR)

Cosa si propone il progetto ?

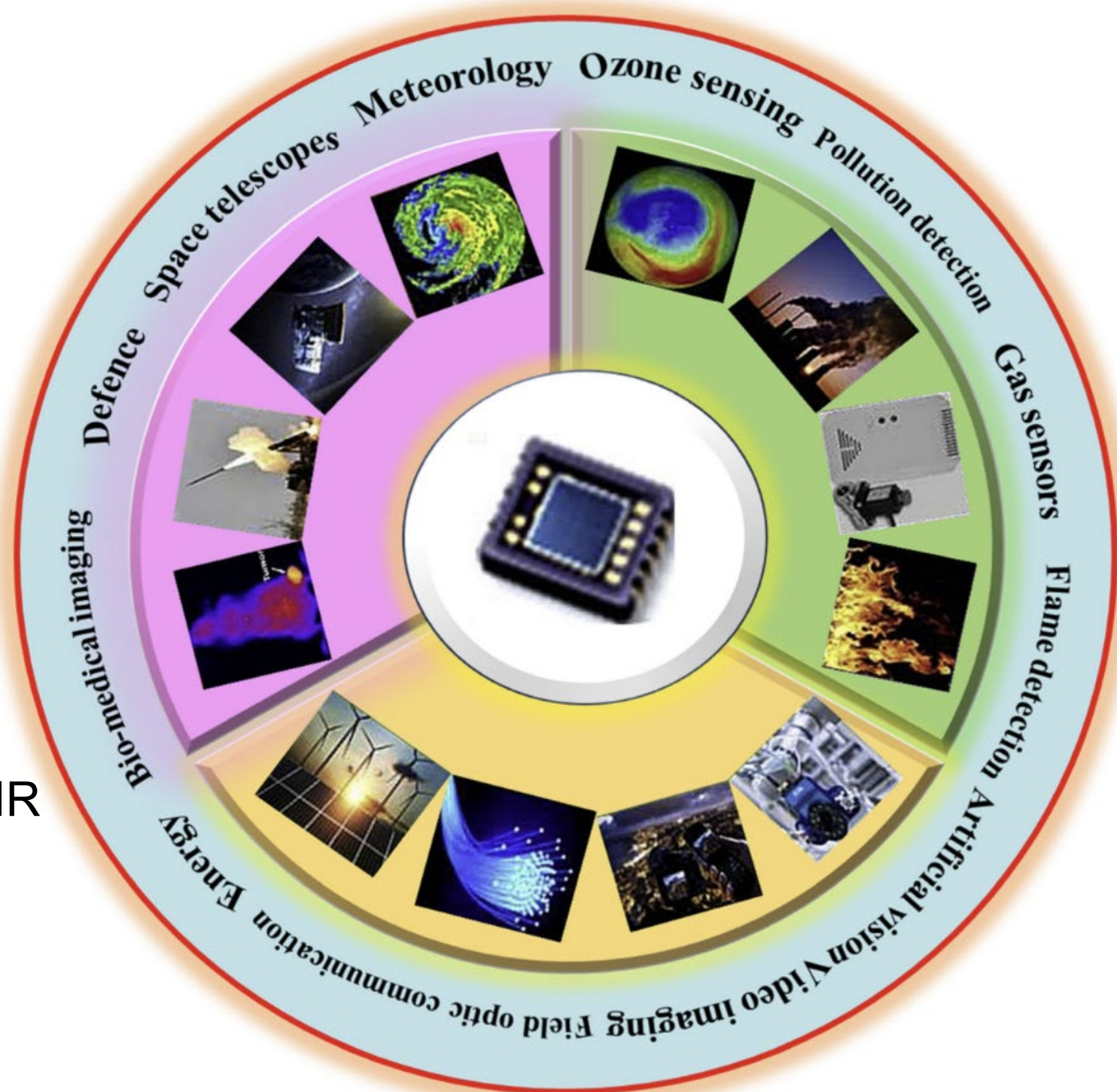
Fase 3: Struttura 64 pixel-16 gruppi-4 materiali



- Dimostratore: Array 8×8 (4×4 gruppi), lettura singolo pixel, polarizzazione a gruppi di 16
 - posizionamento molti nanowires complesso
- Accoppiamento luce dall'alto (filtro passa basso commerciale) o dal basso usando il Si come filtro per il visibile
- Altre combinazioni possibili es. sensore 8×8 singolo materiale su banda ristretta

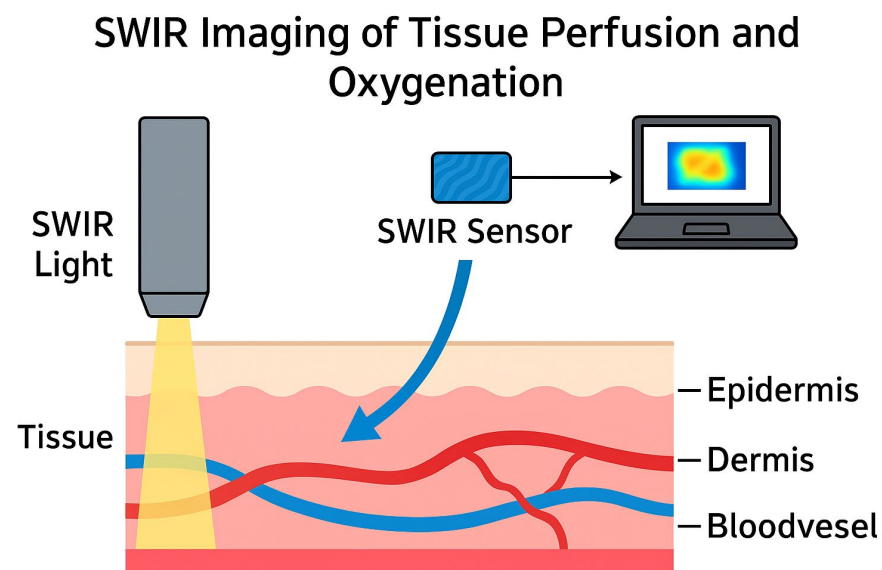
Applicazioni sensori SWIR ad altissima sensibilità

- Possibili utilizzi in molti campi, limitati attualmente dall' alto costo, moderata sensibilità e larghezza di banda (1-1.7 μm) dei dispositivi commerciali InGaAs
- Pochissimi array commerciali in banda SWIR – MWIR
- Campi di utilizzo:
 - Scienze della vita
 - Agricoltura di precisione
 - Fisica dell'atmosfera, astronomia IR
 - Analisi molecolare
 - Homeland security



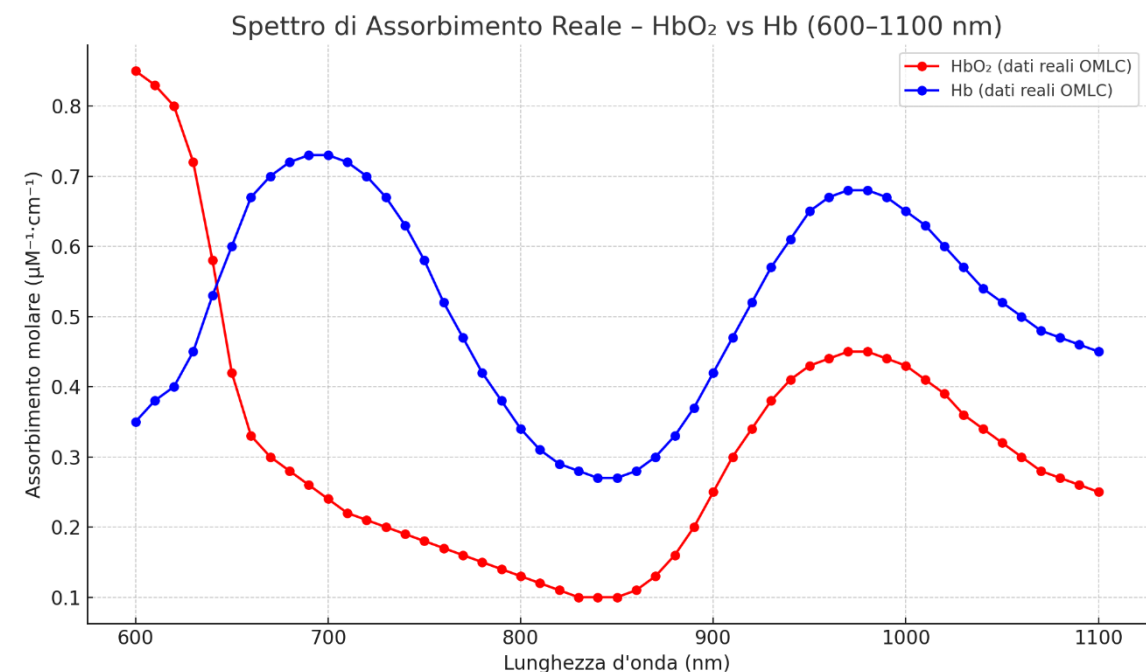
Monitoraggio non invasivo della perfusione

- Monitoraggio non invasivo della perfusione e dell'ossigenazione tissutale
 - Limiti delle tecniche attuali (pulsossimetria, doppler, imaging termico) in termini di profondità di analisi e accuratezza
 - SWIR (1 -3 μm) penetrano molto di più del visibile nei tessuti
 - Differenziazione spettrale delle forme di emoglobina nell'IR -> mappe spaziali delle condizioni circolatorie locali (array SWIR)



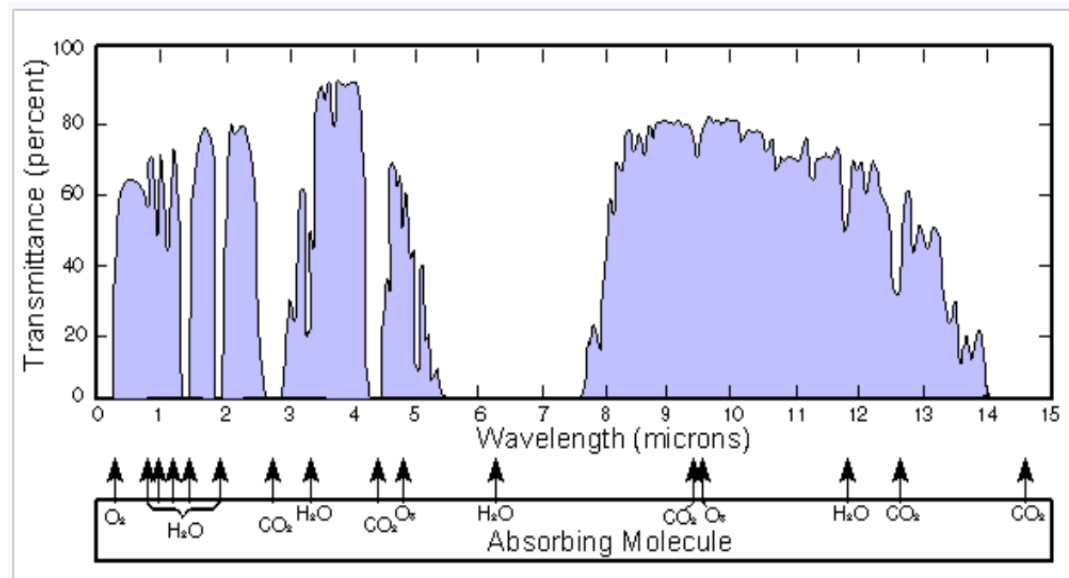
Profondità di penetrazione (valori indicativi)

Banda	Profondità di penetrazione tipica	Note
Visibile	0.1 – 1 mm	Forte scattering e assorbimento (soprattutto a $\lambda < 600 \text{ nm}$)
NIR (700–900 nm)	1 – 5 mm	Finestra terapeutica, buon compromesso
SWIR (1000–1700 nm)	2 – 10 mm (variabile)	Profonda penetrazione in tessuti molli

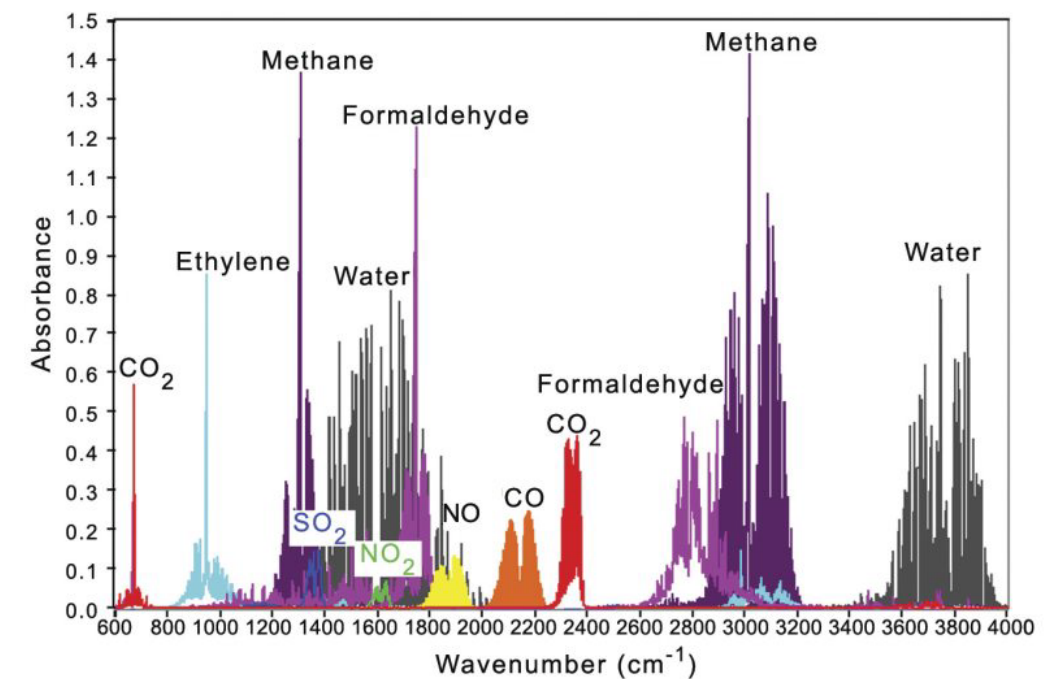


Pochi dati oltre 1.1 μm

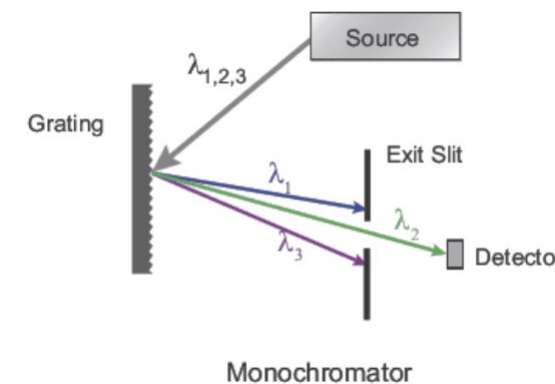
Sensori per astronomia IR – spettroscopia IR



- Astronomia IR: osservazioni da terra in banda J (1.1 – 1.4 μm)
- Finestra di trasmissione atmosferica centrata su 1.25 μm



- Molte molecole assorbono in banda 1-4 μm
- Homeland security



Necessità di sensori SWIR ad alta sensibilità

Agricoltura di precisione

Misure IR/SWIR sono molto comuni in agricoltura di precisione:

- **Rilevamento dello Stress Idrico Precoce:** L'acqua assorbe fortemente nel SWIR. Variazioni minime nel contenuto idrico delle piante possono essere rilevate prima che lo stress sia visibile.
- **Analisi della Composizione Chimica:** I segnali SWIR sono influenzati dalla presenza di zuccheri, proteine, lipidi e altri composti organici nelle piante e nel suolo.
- **Identificazione di Malattie e Parassiti:** Le alterazioni nella struttura cellulare o nella composizione chimica dovute a patogeni possono essere individuate in fase iniziale.
- **Mappatura del Suolo Dettagliata:** Valutazione del contenuto di umidità, materia organica e minerali nel suolo.
- **Monitoraggio della Maturazione dei Frutti:** Analisi non distruttiva del grado di maturazione e del contenuto zuccherino.

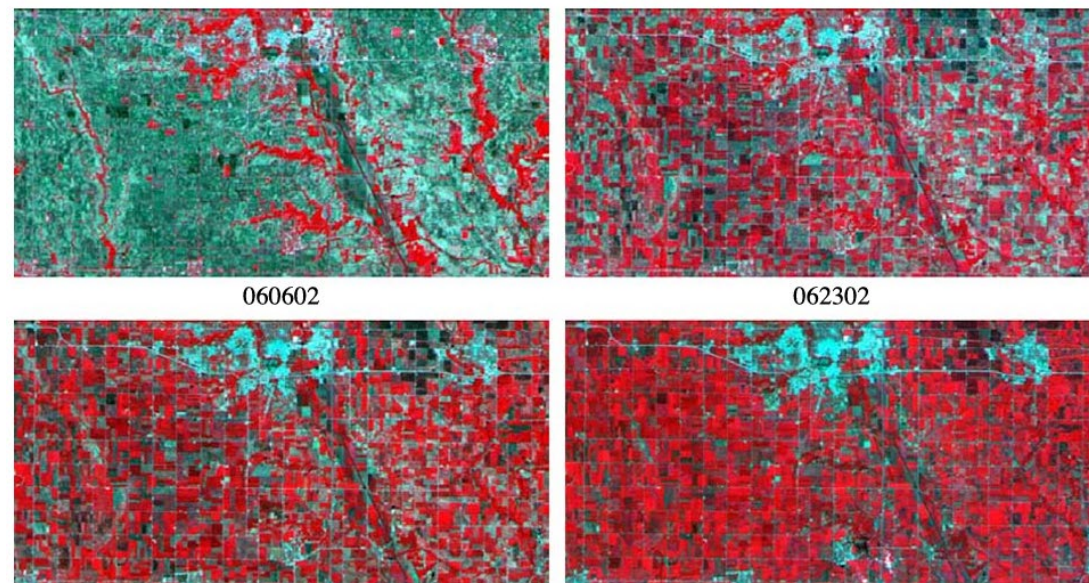
sensori SWIR ad alta sensibilità possono rilevare variazioni minime

Sensori SWIR spesso montati su droni o satelliti: necessità di array molto sensibili

$$VWC = f\left(\frac{R_{NIR} - RS_{WIR}}{R_{NIR} + RS_{WIR}}\right)$$

Vegetation Water Content

array 8*8 2 materiali ...



VWC Telsat VII image, Walnut AZ

- Anagrafica

- | | | |
|---------------------|------|-------------------------------------|
| - F. Spinella | 30% | INFN Resp. Naz. |
| - E. Pedreschi | 25% | INFN |
| - Franco Carillo | 5% | INFN |
| - A. Toncelli | 50% | UNIFI |
| - Giovanni Pennelli | 50% | UNIFI |
| - Fabrizio Barbato | 100% | INFN Ass. Ric., Docente Scuola Sup. |
| - Francesco Amanti | 50% | INFN, Docente Scuola Sup. |

Richieste alla Sezione e budget

Richieste alla Sezione:

- Utilizzo clean room wet
- Servizio alte tecnologie: bonding sensori (1 settimana/anno)
- Servizio elettronica: montaggio amplificatori (0.5 mesi/anno)