
Sensori di radiazione ottica

Dr. Guido Toci
Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" - CNR
Sesto F.no
G.Toci@ifac.cnr.it

Consiglio Nazionale delle Ricerche



Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"

Corso "Sicurezza nell'uso delle
sorgenti Laser in ambito medico"
Firenze, 13-14 Marzo 2008



Misure di caratterizzazione di sorgenti laser

Caratteristiche fondamentali dell' emissione di una sorgente laser:

Laser continui (CW)

- **Potenza media**
- **Distribuzione spaziale** del fascio
(intensità=potenza per unità di superficie)

Laser impulsati

- **Energia** del singolo impulso
- **Frequenza di ripetizione** dell'impulso
- **Potenza media** del treno di impulsi
- **Potenza istantanea** (durata temporale) dell'impulso
- **Distribuzione spaziale** del fascio
(fluenza=energia per unità di superficie)

Per poter determinare queste caratteristiche, occorrono normalmente vari misuratori, basati su diversi principi di funzionamento e con differenti architetture costruttive



Rivelatori per sorgenti laser

Tipo di rivelatore

Tipo di misura

• Termici:

- Termopile → Potenza media
- Rivelatori piroelettrici → Energia di singolo impulso
- array di piroelettrici (ad immagine) → Distribuzione spaziale di intensità o di fluena

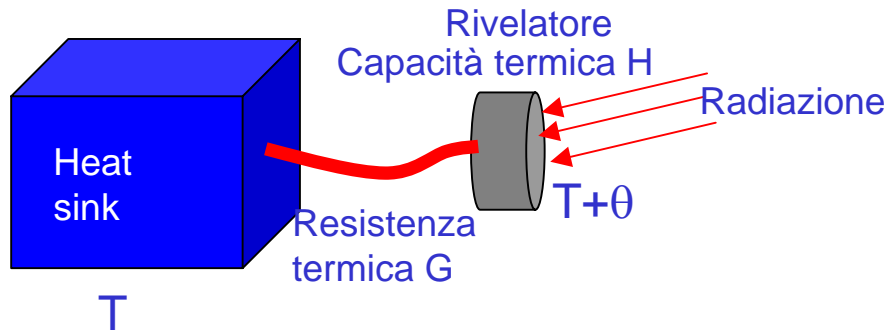
• A effetto fotoelettrico :

- Fotodiodi → Potenza media, potenza istantanea
- CCD (sensori a immagine) → Distribuzione spaziale di intensità o di fluena



Rivelatori ad effetto termico

Si misura la **variazione di temperatura** rispetto a un termostato di un elemento che assorbe la radiazione incidente



Temperatura del rivelatore

$$H \left(\frac{d\theta}{dt} \right) = \eta P - G\theta$$

θ : variazione di temperatura

P : potenza incidente

E : energia incidente

η : frazione di potenza assorbita

In condizioni stazionarie :

$$\theta = \frac{\eta}{G} P$$

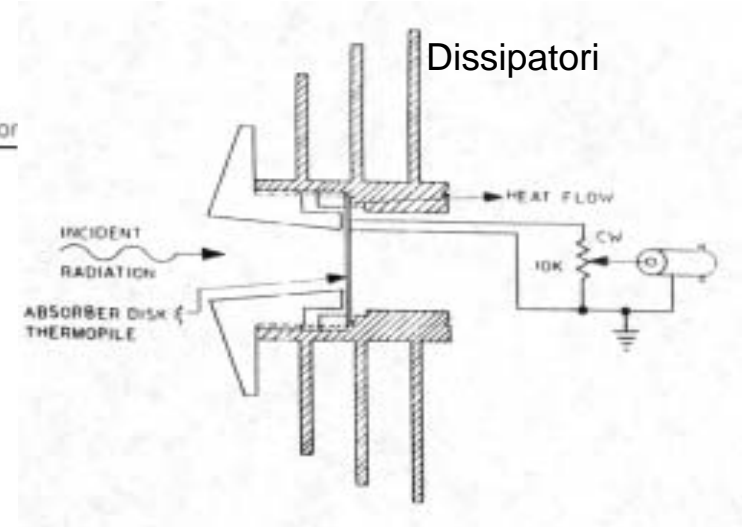
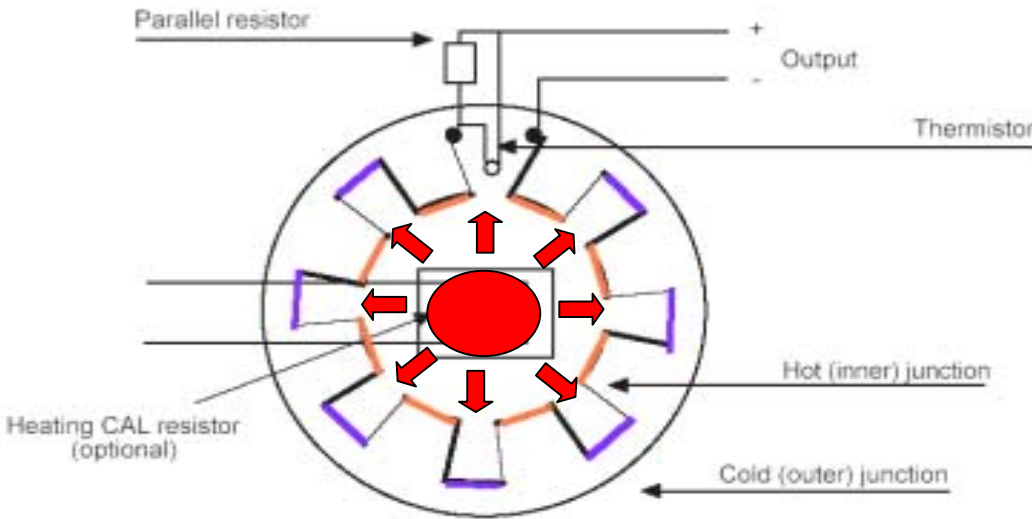
Con eccitazione impulsiva:

$$\theta_{pk} = \frac{\eta}{H} E$$

Costante di tempo di risposta: $\tau_T = \frac{H}{G}$

Impiegati per la misura di potenze medie o di energie di impulsi laser

Rivelatori a termopila



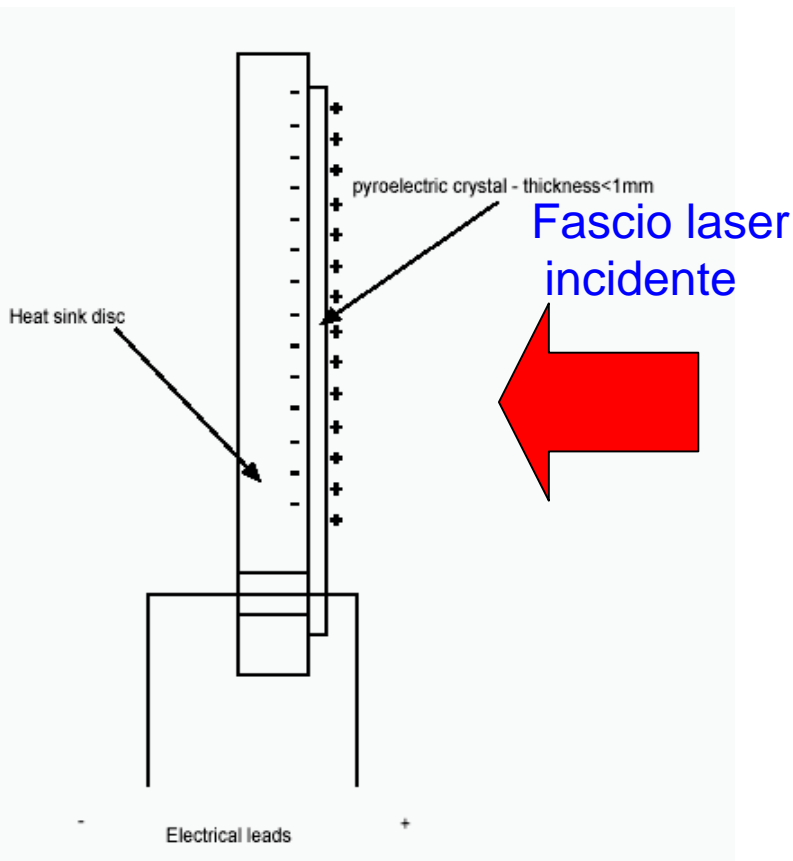
La radiazione incide sulla parte centrale riscaldandola; il flusso di calore induce una differenza di temperatura tra la parte centrale e quella periferica, misurata da una serie di termocoppie. Il calore viene poi dissipato nell' ambiente

La resistenza centrale permette di ricalibrare il sensore

Impieghi: misuratori di **potenza media**, potenze da <1 mW a > 1 kW

Tempi di risposta $\approx 1-10$ sec.

Rivelatori a effetto piroelettrico

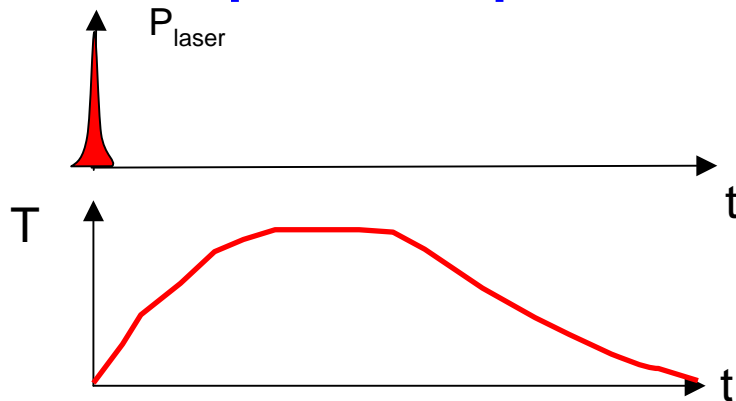


Sono costituiti di un materiale (ferroelettrico) che ha un **momento di dipolo elettrico permanente**, dipendente dalla **temperatura**.

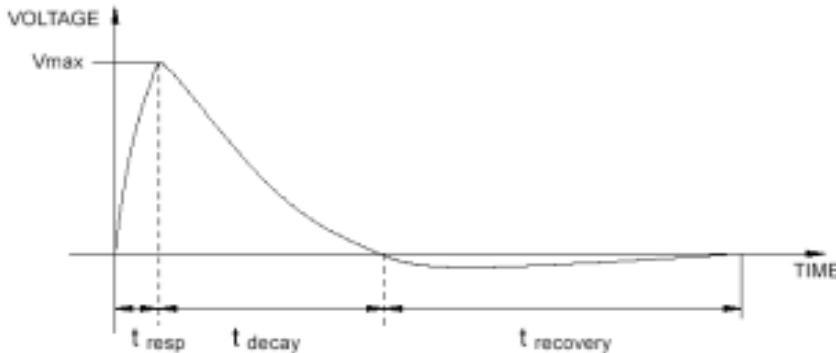
La **variazione di temperatura** determinata dall'assorbimento della radiazione ottica modifica la polarizzazione permanente del materiale e genera un **transiente di corrente** che può essere rivelato.

Il rivelatore è sensibile **solo** alle **variazioni di potenza** incidente (laser impulsati, o CW chopperati)

Risposta temporale di un rivelatore piroelettrico



Impulso laser incidente di durata \ll
 \ll tempo di risposta (eccitazione impulsiva)



Tensione di picco \propto energia assorbita
Tempo di risposta 0.1 - 1 msec

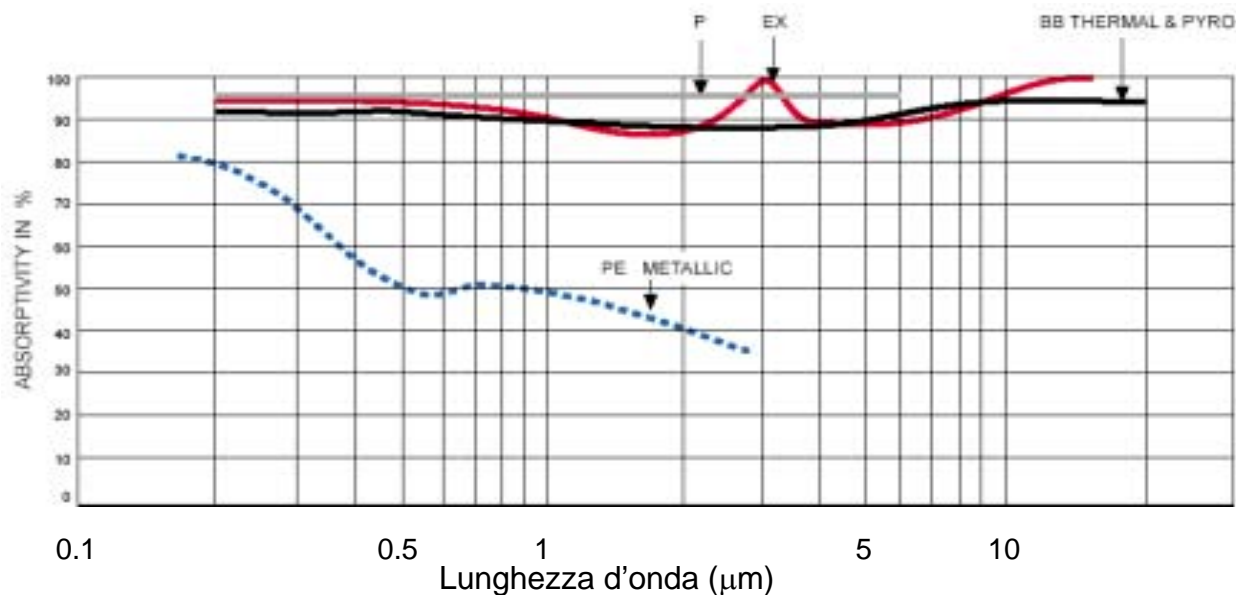
Il transiente deve essere terminato prima che il rivelatore possa misurare un altro impulso: limite alla frequenza di ripetizione degli impulsi massima accettata

Applicazioni:

misura di **energia di singolo impulso** da $1\mu\text{J}$ a $> 1\text{ J}$,
Freq. ripetizione 1-100 Hz (alcuni qualche kHz)

IMPORTANTE: è insensibile alla componente CW (laser in continua)

Risposta spettrale dei rivelatori termici

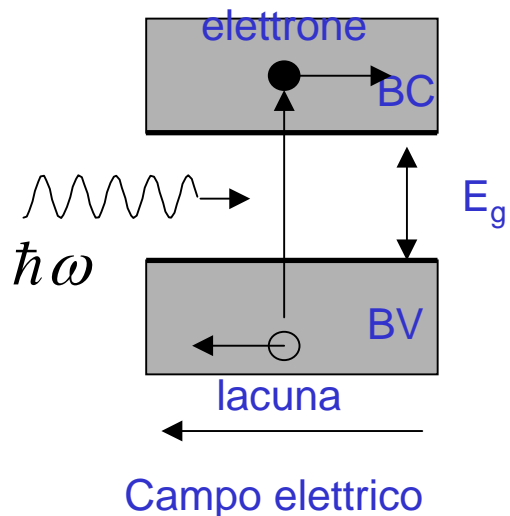


Determinata dall' **elemento assorbente** (coating polimerici, metallici, vetri assorbenti) sulla faccia dell' elemento termosensibile: **elevata e uniforme** su ampi intervalli di lunghezza d'onda

Adatti anche per la misura di

- sorgenti con emissione simultanea a varie lunghezze d'onda (es. laser ad Ar⁺ multilinea)
- sorgenti a banda larga (es. lampade)

Rivelatori a effetto fotoelettrico (fotodiodi)

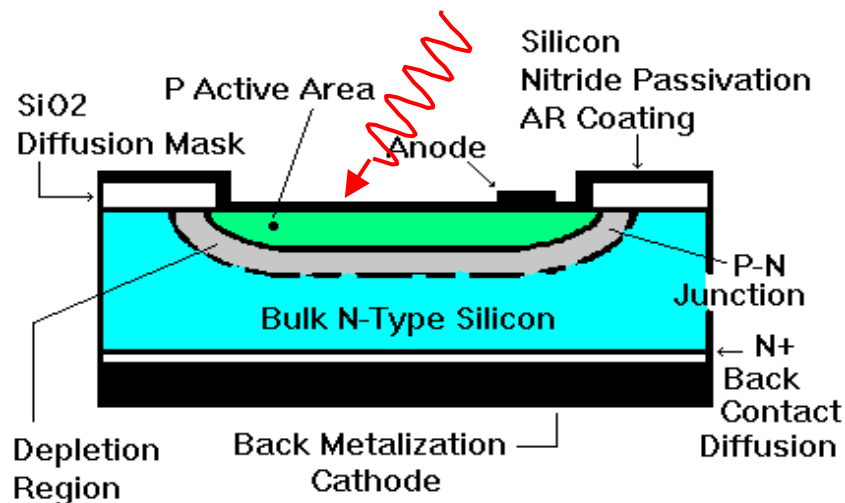


Basati su semiconduttori intrinseci o drogati
L'assorbimento del fotone genera una coppia lacuna-elettrone e aumenta la conducibilità del materiale
L'assorbimento può avvenire per fotoni di energia

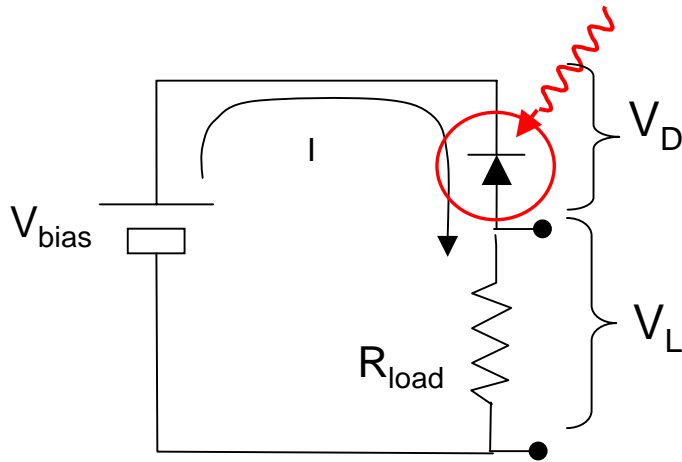
$$\hbar\omega > E_g$$

Fotodiodo: giunzione $p-n$
tra semiconduttori con diverso drogaggio

Struttura planare, anche di grande area
(da $\sim 20 \times 20 \mu\text{m}^2$ fino a $\sim 1 \text{ cm}^2$)
Strato a drogaggio p molto sottile



Fotodiodo: schema di rivelazione



Funzionamento in modo **fotoconduttivo**
fotodiodo in polarizzazione inversa

V_{bias} fornito da una batteria o da alimentatore DC
(2 - 50 V)

L'assorbimento della radiazione genera portatori
che danno luogo ad una corrente nel circuito
La corrente può essere misurata come caduta di
tensione V_L sulla resistenza di carico R_{load}

Per $V_L < V_{bias}$

$$I = I_{buio} + \frac{\eta e}{\hbar \omega} P$$

$$V_L = IR_{load}$$

I : corrente

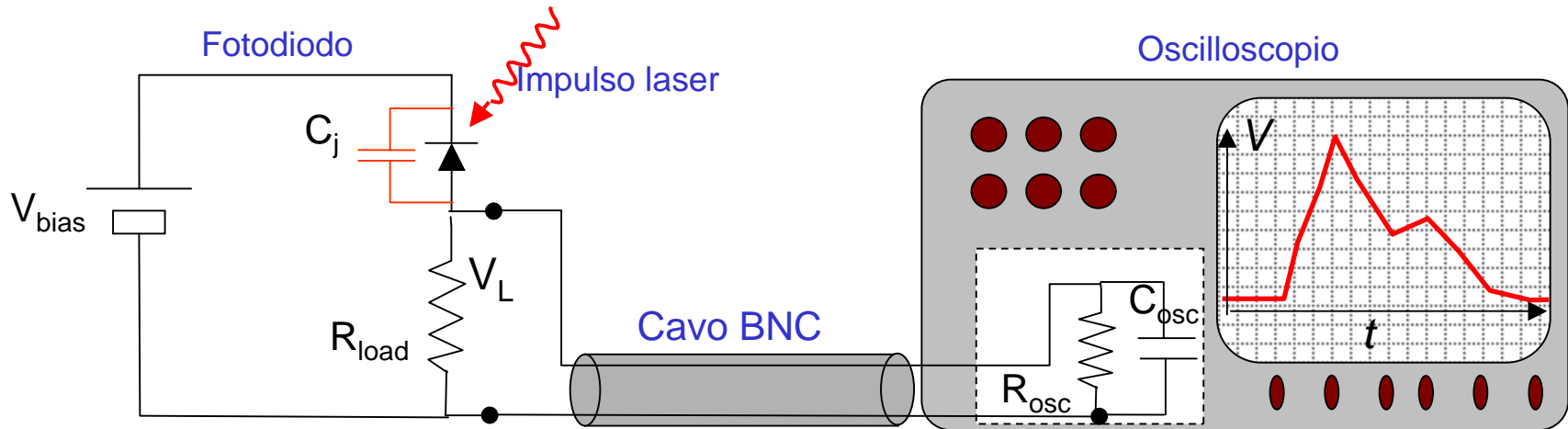
I_{buio} : corrente di buio

P : potenza assorbita

η : efficienza quantica

Impieghi: misura di potenza media (1 nW - 1 W) e energia

Fotodiodo per la misura della forma temporale di un impulso laser



Costante di tempo del circuito di lettura

$$T_{RC} = 2.2(R_{load} // R_{osc})(C_j + C_{osc})$$

T_{phd} : costante di tempo del fotodiodo

Tempo di salita complessivo

$$T_R = \sqrt{T_{phd}^2 + T_{RC}^2}$$

R_{osc} : resistenza di ingresso oscilloscopio (es. 50 Ω)

R_{load} : resistenza di carico (es. 50 Ω)

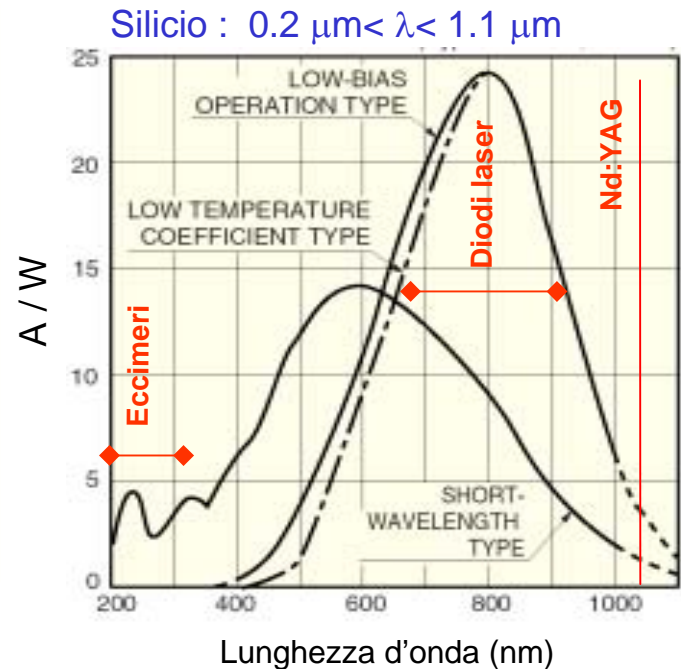
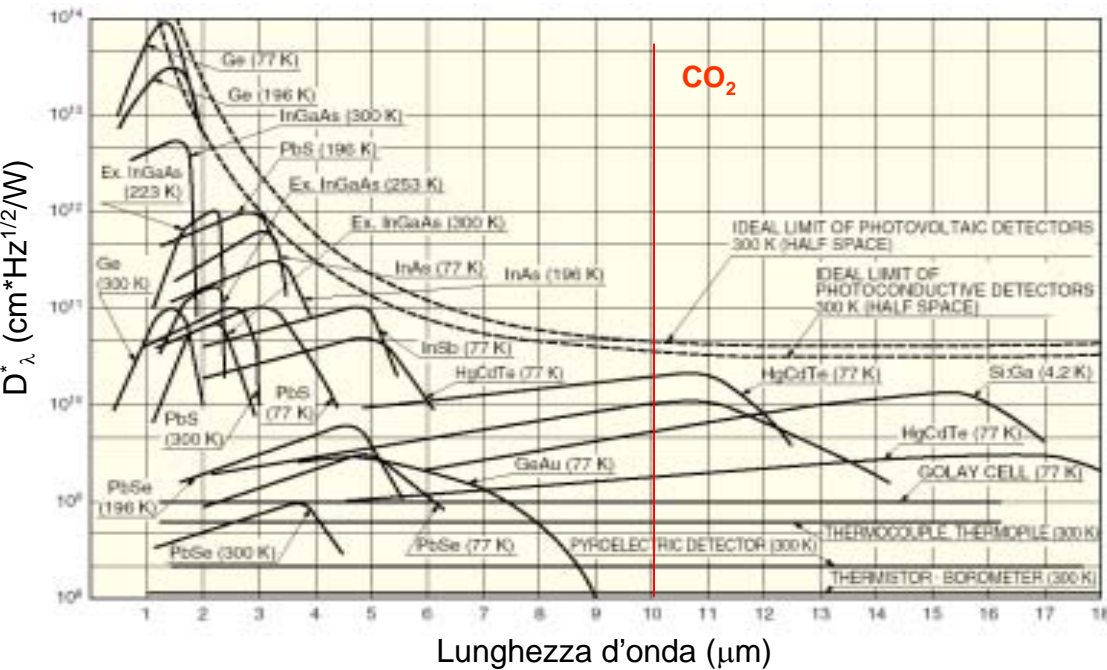
C_j : capacit  di giunzione del diodo (10-1000 pF)

C_{osc} : capacit  di ingresso dell'oscilloscopio (es. 12 pF)

Per una ricostruzione fedele del profilo temporale dell'impulso, occorre che T_R sia molto minore della durata dell'impulso da misurare

Con fotodiodi veloci (es. PIN) , $T_R \approx 1\text{ns}$

Risposta spettrale di vari semiconduttori



In alcuni casi disponibili solo fotoconduttori es. MCT (HgCdTe), PbS, PbSe
 Sensori IR: raffreddamento termoelettrico (-70 °C) o criogenico (LN₂, -196 °C)

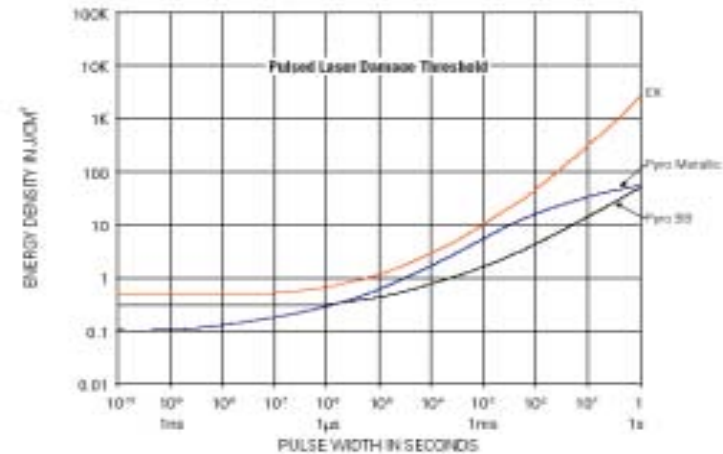
Risposta spettrale **fortemente dipendente** dalla lunghezza d'onda: la misura su sorgenti che emettono a più lunghezze d'onda o a banda larga può essere difficoltosa
 Nel UV-VIS-NIR è impiegato soprattutto il Si

Soglie di danneggiamento dei rivelatori

Fornite dal costruttore, espresse in:

- potenza media massima (W)
- fluenza (energia per unità di superficie, J/cm^2)
- intensità media (potenza per unità di superficie, W/cm^2)
- intensità di picco (potenza per unità di superficie, W/cm^2)

Pyroelectric Heads



Possono dipendere anche dalla **lunghezza d'onda** e dalla **durata dell'impulso**

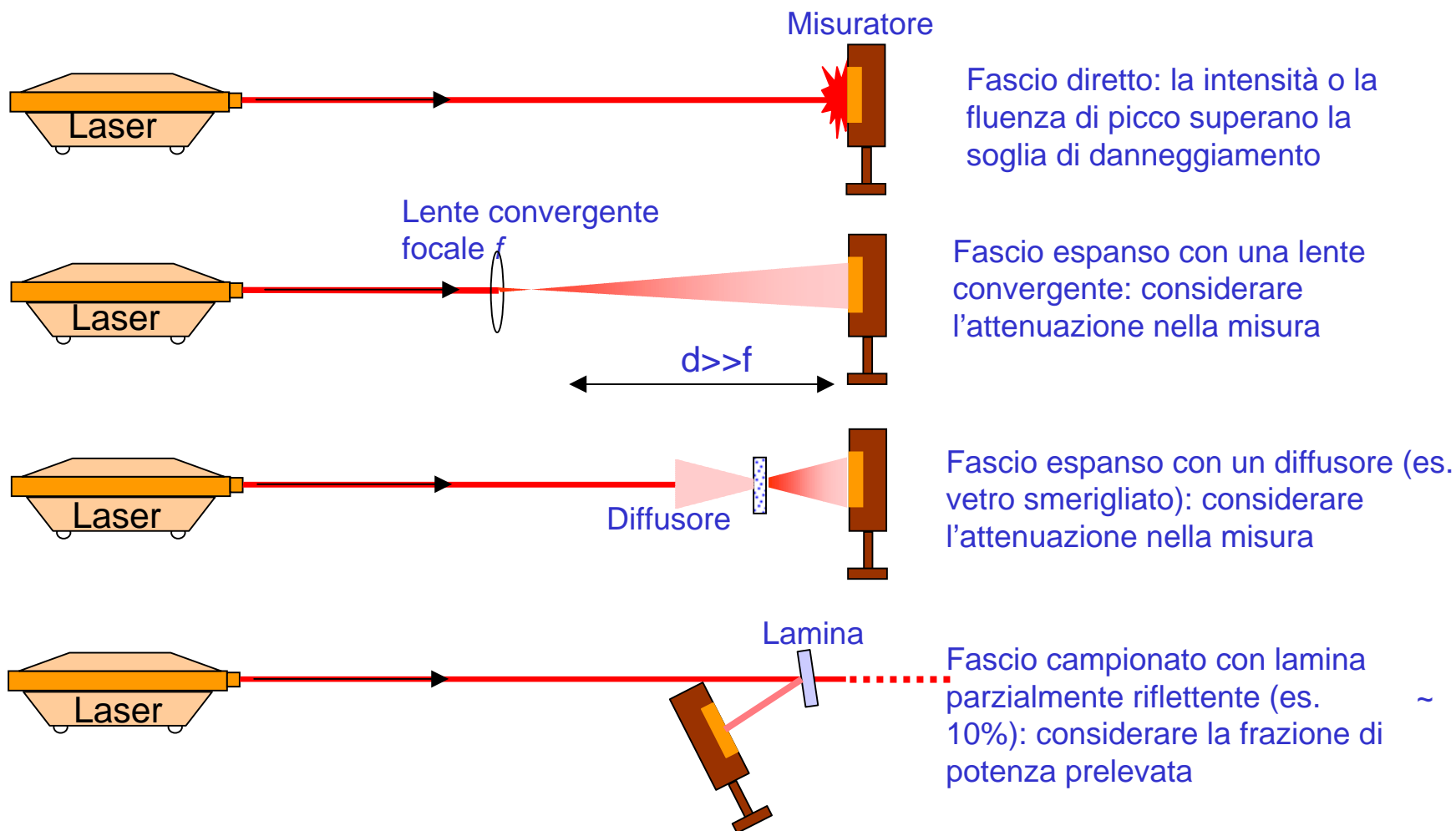
Con fasci laser di **piccolo diametro o focalizzati**, i valori di fluenza o di intensità possono **superare** la soglia di danneggiamento, anche se la potenza media è inferiore al limite

Il **danno** che si produce sul rivelatore è visibile ad occhio: fusione della superficie, viraggio del colore, opacizzazione, distacco di strati superficiali: **perdita della calibrazione**

Rimedio: distribuire l'energia/potenza incidente sulla superficie di rivelatore più ampia possibile

Disponibili **piastrine di test** per verificare la resistenza del rivestimento senza mettere a rischio il rivelatore

Rimanere sotto la soglia di danneggiamento



Fascio diretto: la intensità o la fluenza di picco superano la soglia di danneggiamento

Fascio espanso con una lente convergente: considerare l'attenuazione nella misura

Fascio espanso con un diffusore (es. vetro smerigliato): considerare l'attenuazione nella misura

Fascio campionato con lamina parzialmente riflettente (es. 10%): considerare la frazione di potenza prelevata

Sistemi di misurazione



La tendenza corrente è di avere **sistemi modulari**: un solo **lettore** è in grado di gestire **numerosi sensori** (“**teste**”), diversi per prestazioni e elemento sensibile (fotodiodi, termopile, piroelettrici).

Funzionamento “**smart head**”: il lettore riconosce il tipo di testa impiegata, viene aggiornato sui dati di calibrazione, ed esegue il software di gestione appropriato

Analizzatori di fascio

Problema: avere informazioni quantitative sulla distribuzione di intensità / fluenza di un fascio laser, al fine di:

- determinazione di parametri di irraggiamento , es.

diametro del fascio,

intensità / fluenza di picco/media

valutazione del parametro di qualità del fascio (M^2)

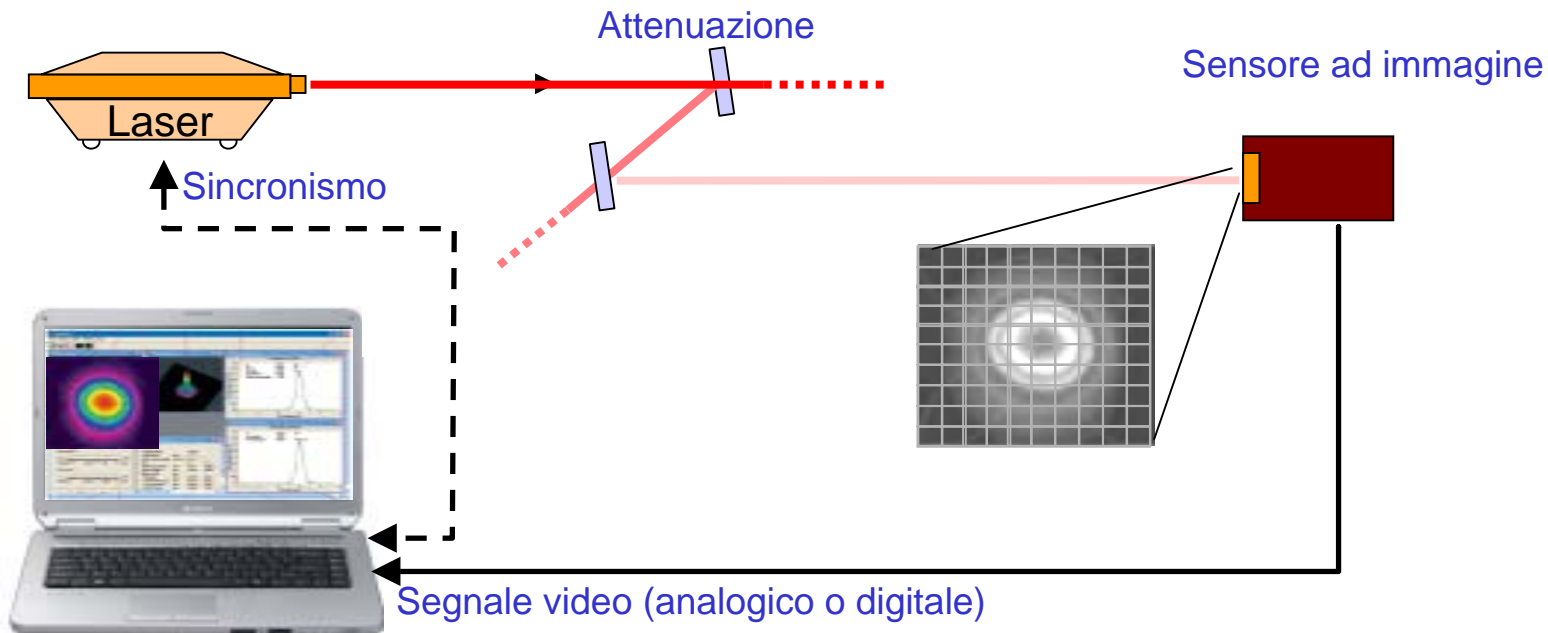
- diagnostica sul sistema, es.

disallineamenti degli specchi del laser o delle ottiche di foccheggiamento

danneggiamenti degli specchi o delle ottiche



Analizzatori di fascio



Il sensore viene letto da un PC (eventualmente con *frame grabber*) con software di gestione/analisi dati

Sincronismo: opportuno per laser impulsati

La misura viene effettuata con un sensore ad immagine (CCD, camera IR) costituito da una matrice bidimensionale di elementi sensibili alla radiazione laser, letti individualmente

Analizzatori di fascio: tipi di sensori disponibili

CCD a Silicio

- range spettrale 200-1100 nm
- dimensione del pixel da $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ a $20 \times 20 \mu\text{m}^2$
- dimensione array da 320×200 a 1600×1200 pixel²
- dinamica (rapporto segnale max/rumore) fino a 64 dB (~1:1600)

CCD a Silicio “phospor coated”

- range spettrale 1440-1600 nm
- risoluzione effettiva $> 20 \times 20 \mu\text{m}^2$
- dimensione array da 320×200 a 1600×1200 pixel²
- dinamica (rapporto segnale max/rumore) fino a 30 dB (~1:30)

Camere InGaAs

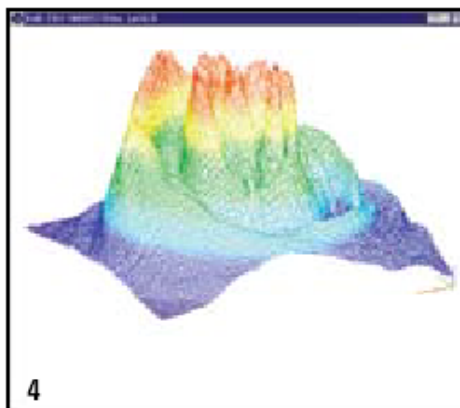
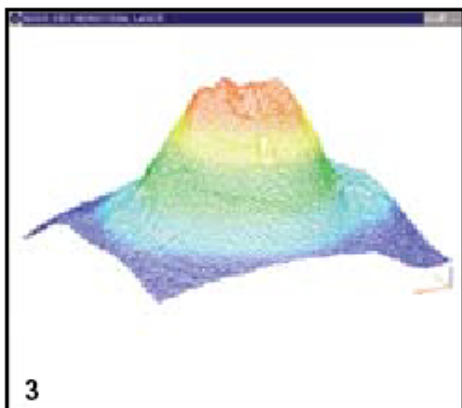
- range spettrale 900-1700 nm
- dimensione del pixel da $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ a $40 \times 40 \mu\text{m}^2$
- dimensione array da 320×200 a 640×400 pixel²
- dinamica (rapporto segnale max/rumore) fino a 60 dB (~1:1000)

Camere piroelettriche

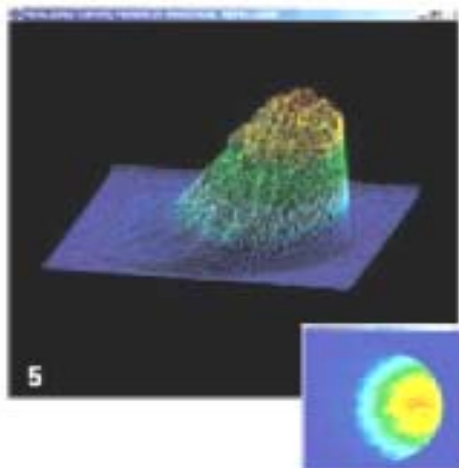
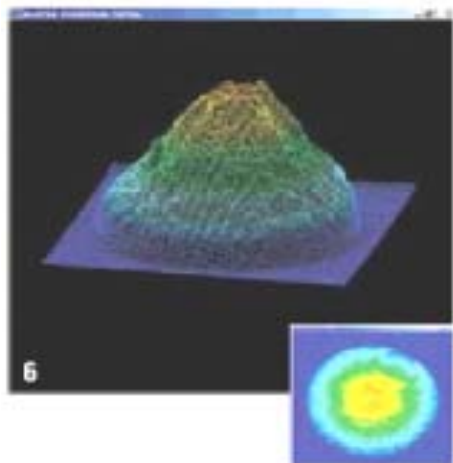
- range spettrale 20 nm - 350nm, $1.06 \mu\text{m}$ a $3000 \mu\text{m}$
- dimensione del pixel $\sim 100 \times 100 \mu\text{m}^2$
- dimensione array 100×100 pixel²
- dinamica (rapporto segnale max/rumore) fino a 43 dB (~1:140)



Analizzatori di fascio: informazioni ottenibili



Esempio: laser CO₂ correttamente allineato (sx) o con gli specchi disallineati (dx) - fascio multimodo con rapide modulazioni di intensità



Esempio: fascio di laser a Nd:YAG con ottiche di foccheggiamento correttamente allineate (dx) o fuori allineamento (sx) - fascio parzialmente oscurato ai bordi