Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria meccanica

www.dii.unipd.it

Termocoppie erodibili a risposta rapida: prove sperimentali per l'integrazione in componenti esposti a plasmi fusionistici

Tutor universitario: Prof. Piergiorgio Sonato

Co-tutors: Dr. Ing. Mauro Dalla Palma, Ing. Stefano Ciufo

Padova, 14/9/2022

Laureando: *Riccardo Camuffo*

INDICE

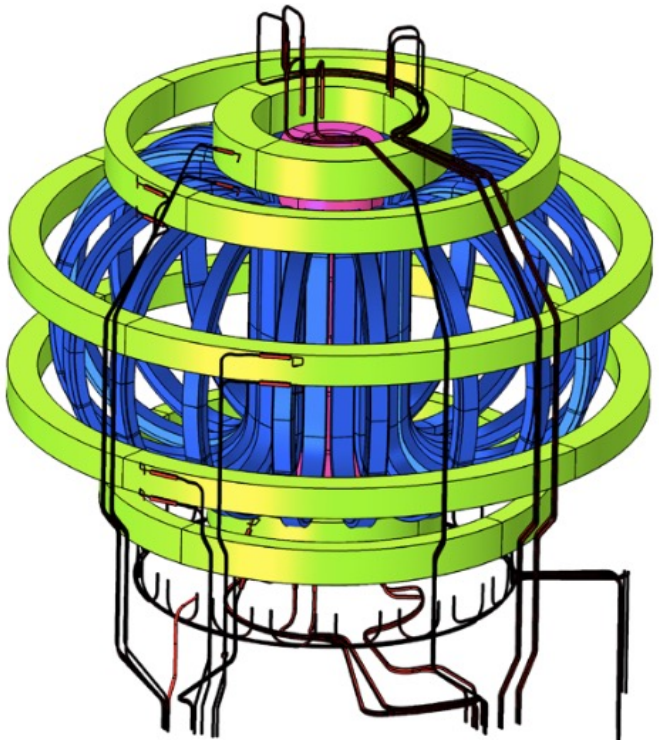
www.dii.unipd.it

- Confinamento in configurazione tokamak
- Il divertore
- Le termocoppie sul divertore Alcator C-Mod, ITER, DTT
- Set up sperimentale
- Esperienza sperimentale
- Conclusioni

CONFINAMENTO IN CONFIGURAZIONE TOKAMAK

La configurazione magnetica è data da:

- $\mathbf{B_{tor}}$ prodotto da bobine toroidali
- $\mathbf{B}_{pol}$ generato dalla corrente di plasma stessa
- $\boldsymbol{B}_{vert}$ prodotto dalle bobine controllo
- un solenoide centrale con avvolti sei gruppi di bobine (shaping)
- altre bobine per il controllo locale della configurazione magnetica (es. divertor coils).



DTT Plant Integration Document

In questo modo si riesce a confinare il plasma, determinando traiettorie elicoidali delle particelle attorno alle linee di **B**. Queste traiettorie sono la combinazione di:

- moto circolare sul piano perpendicolare alle linee di campo (r_L, ω..)
- moto lungo **B**, dipendente solo da $\boldsymbol{E}_{\parallel}$

CONFINAMENTO IN CONFIGURAZIONE TOKAMAK

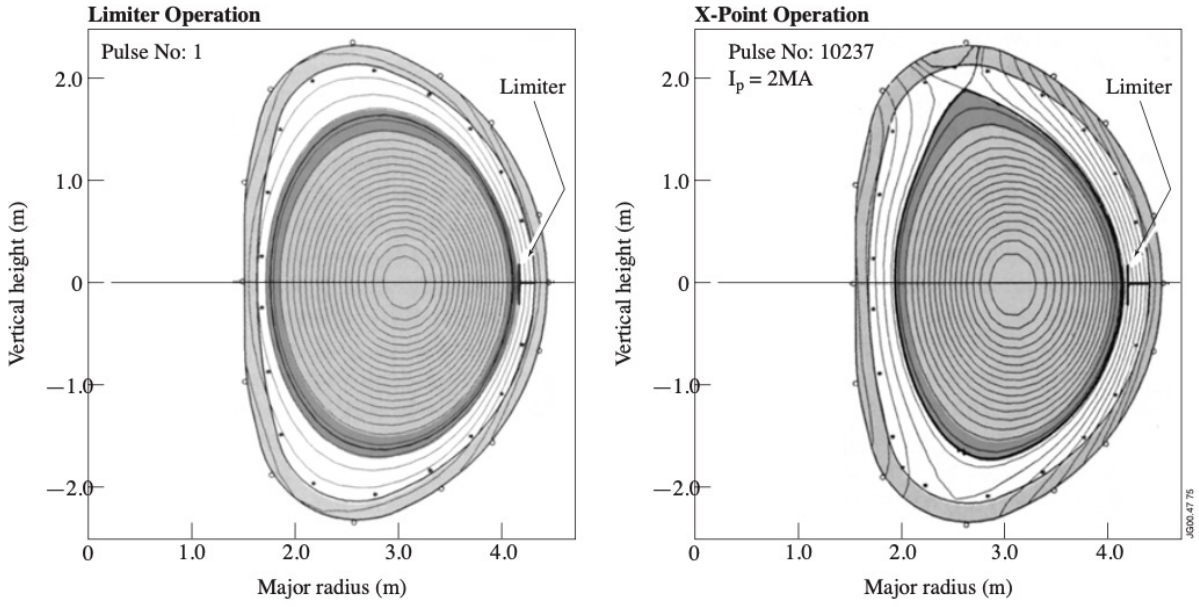
Regolando opportunamente la corrente circolante nelle bobine di controllo, viene evidenziata una configurazione magnetica in cui si distinguono:

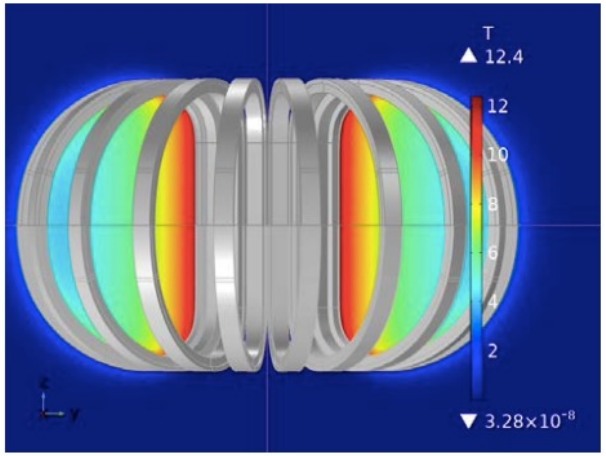
- separatrice
- una regione a linee chiuse di **B**
- una regione a linee aperte di **B**

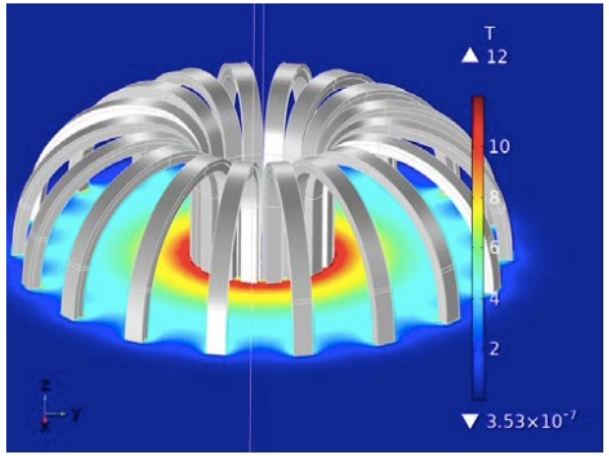
Sebbene questa configurazione procuri un carico termico alle pareti, bisogna notare che consente di incrementare il tempo di confinamento:

$$\tau_E = \frac{W}{P}$$

$$nT\tau_E > 5 \cdot 10^{21} \ m^{-3} KeVs$$







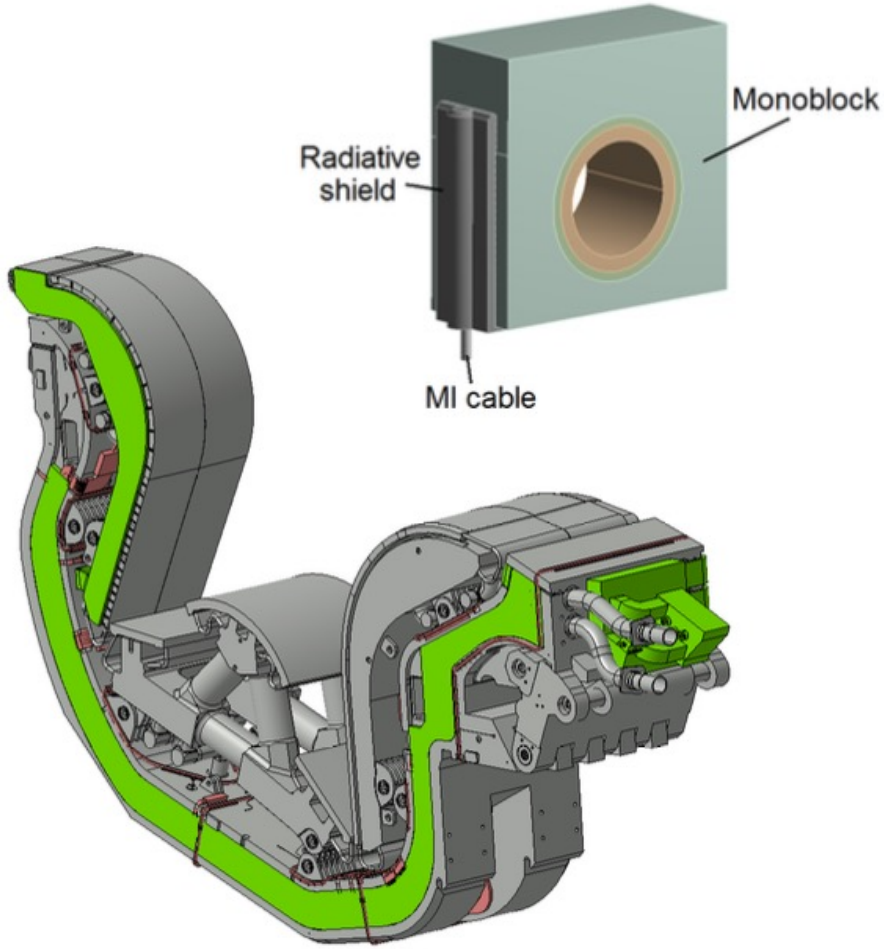
DTT Plant Integration Document

IL DIVERTORE

Per far fronte ai flussi di potenza, la cui componente ⊥ può arrivare fino a 20 MWm^{-2} durante eventi transitori come instabilità di plasma, i target sono formati da monoblocchi di tungsteno raffreddati attivamente da una portata d'acqua.

Il carico termico sulle superfici esposte è il risultato di diversi contributi:

- flussi di particelle altamente energetiche che seguono le linee aperte di **B**
- convezione, irraggiamento
- correnti di plasma



Perché sensorizzare il divertore con termocoppie superficiali?

- misurare i campi di temperatura e flusso di potenza sulle superfici esposte
- consentire il *cross-check* con le misure acquisite tramite le termocamere IR

Design Description Document 55.G2 (Inner and Outer divertor Target Thermocouples)

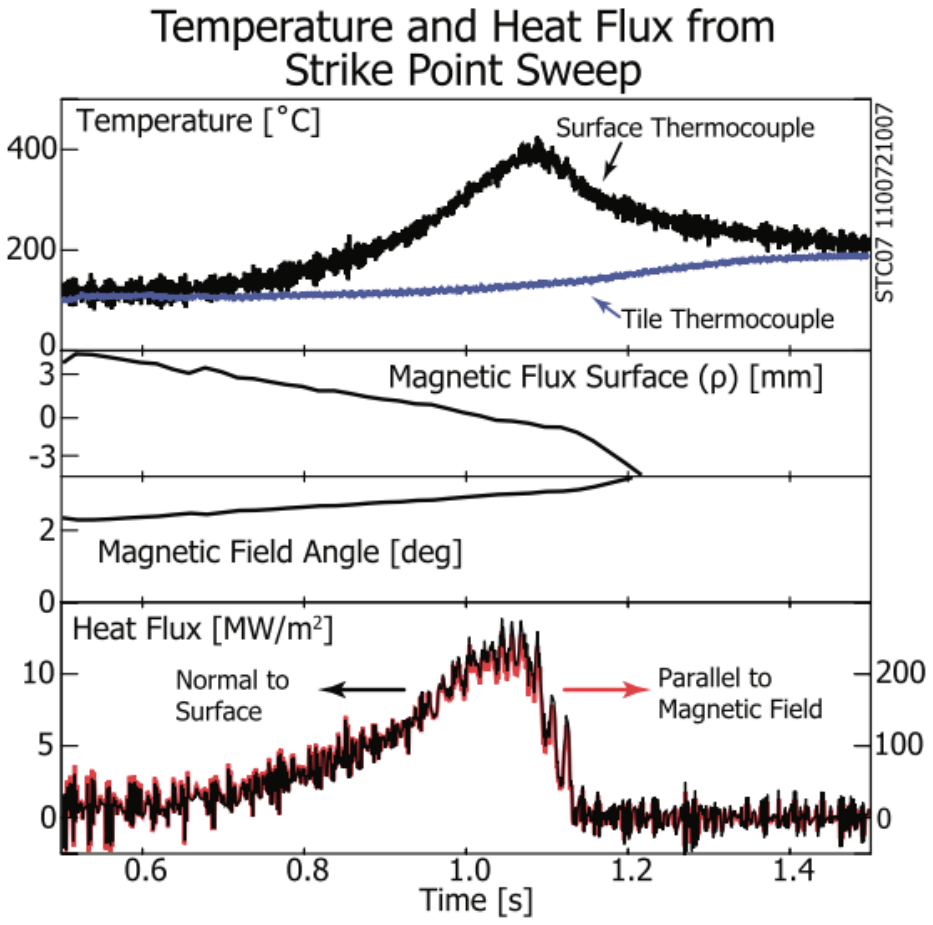
LE TERMOCOPPIE SUL DIVERTORE ALCATOR C-MOD

Lo scopo dell'esperimento è valutare i profili di temperatura e flusso di potenza al variare del punto di incidenza delle linee aperte di **B**.

L'andamento di T è comparato con le rilevazioni di semplici termocoppie di tipo K, a giunto coperto, accomodate qualche mm sotto la superficie per misurare la *bulk temperature.*

Nei due grafici si nota un picco all'istante in cui le linee di campo incontrano il sensore.

A conferma del fatto che **B** incida sul target secondo un piccolo angolo, si può osservare un andamento crescente tra 2° e 4°

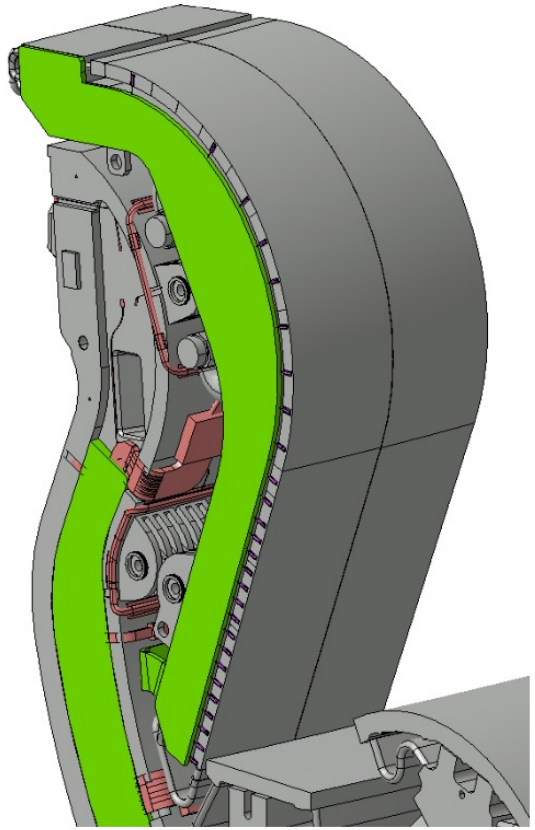


Rev. Sci. Instrum. ***83****, 033501 (2012)*

LE TERMOCOPPIE SUL DIVERTORE ITER

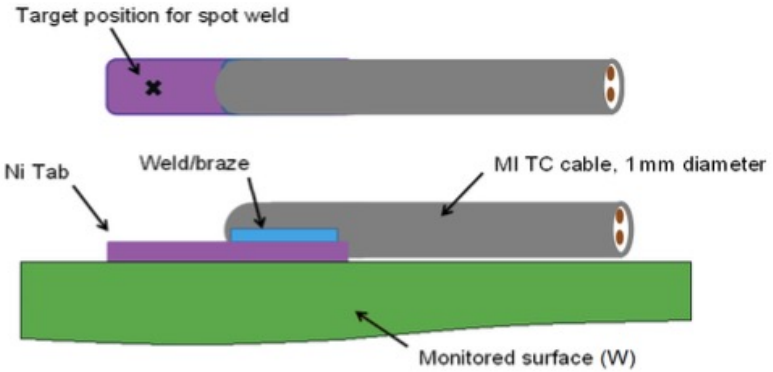
www.dii.unipd.it

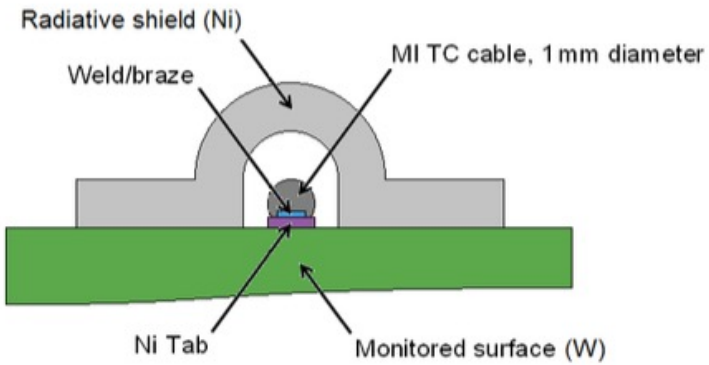
- Non sono concessi fori o intagli di nessun genere
- la saldatura sulla superficie laterale deve avvenire in modo puntuale
- per prevenire il surriscaldamento causato dall'irraggiamento del plasma, si utilizzerà un rivestimento in Ni saldato al W tramite *spot weld*



La scelta dei materiali è vincolata al problema dell'attivazione neutronica. Si hanno quindi:

- termocoppie di tipo N (Nisil-Nicrosil)
- isolamenti in Al_2O_3
- rivestimento del sensore in AISI 316 LN





Design Description Document 55.G2 (Inner and Outer divertor Target Thermocouples)

LE TERMOCOPPIE SUL DIVERTORE DTT

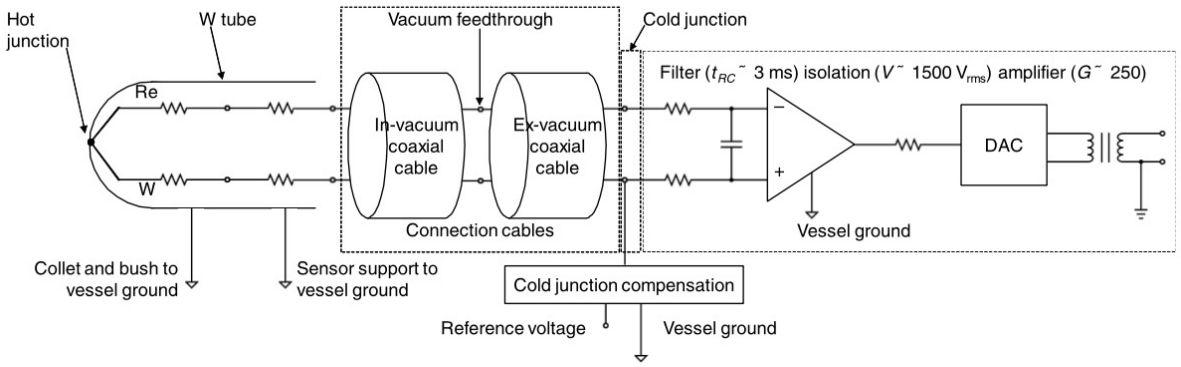
Il divertore di DTT verrà sensorizzato con termocoppie erodibili

I due termoelementi affiorano dalla superficie del sensore realizzando il giunto caldo; sono isolati nella corazza da sottili strati di allumina o mica.

Il giunto esposto consente di ottenere rapidissimi tempi di risposta (8-10 ms)

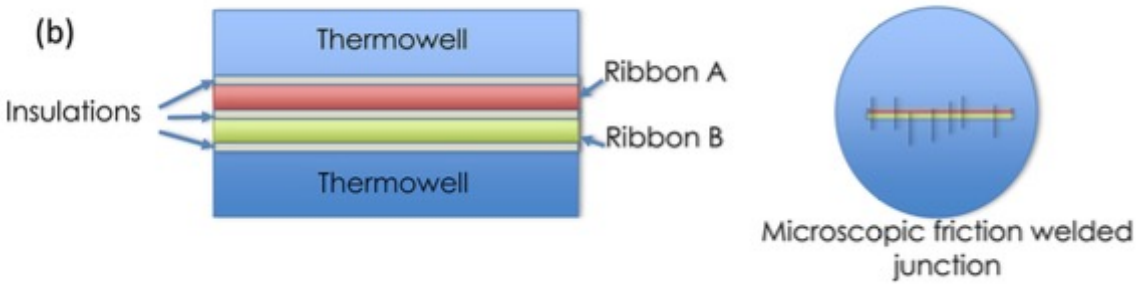
Il principio di funzionamento si basa sull'effetto Seebeck

la relazione che lega la d.d.p. alla T misurata non è lineare, ma polinomiale, il cui grado e coefficienti sono reperibili in letteratura tecnica (NIFS)



IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 21, NO. 16, AUGUST 15, 2021

Rev. Sci. Instrum. ***89****, 10J122 (2018)*

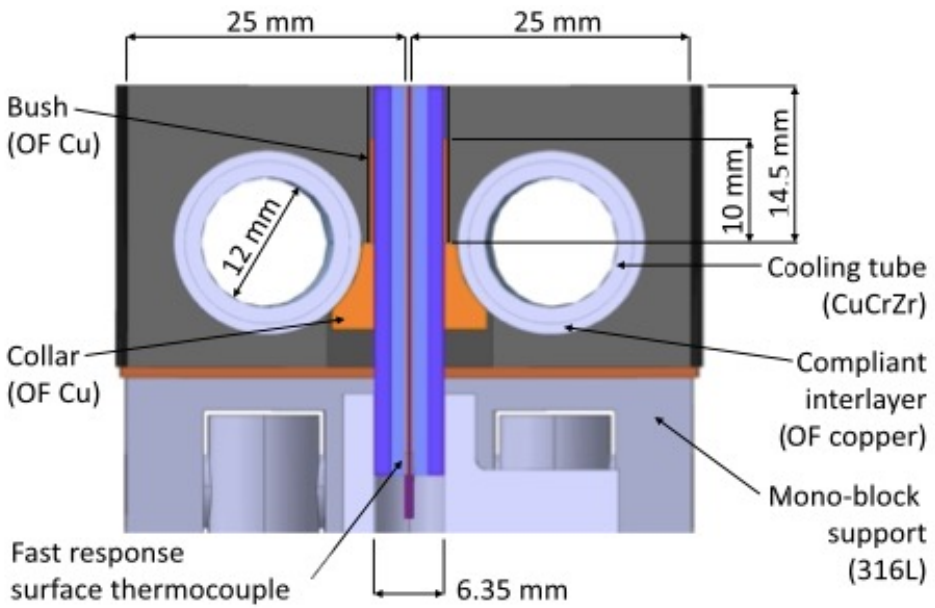


$$V = \sum_{i=0}^{n} c_i (T)^i$$

LE TERMOCOPPIE SUL DIVERTORE DTT

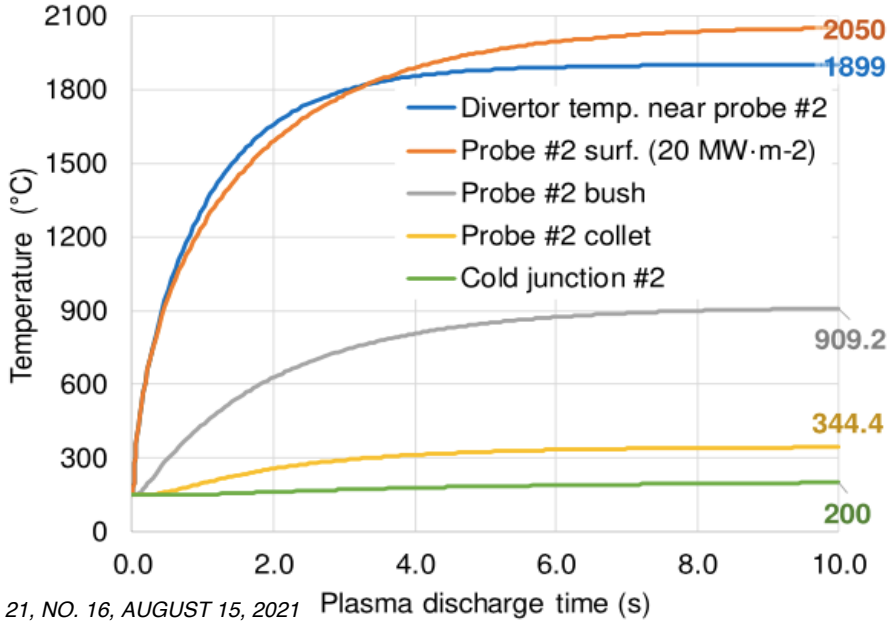
La scelta dei materiali avviene in analogia coi monoblocchi in tungsteno. Si hanno in particolare:

- termoelementi in W 26% Re vs W 5% Re
- due semicilindri in W
- un carrier body in W



Per valutare l'accuratezza di tale sistema di misura è stata studiata un'analisi agli elementi finiti che, tra gli altri vincoli, considera:

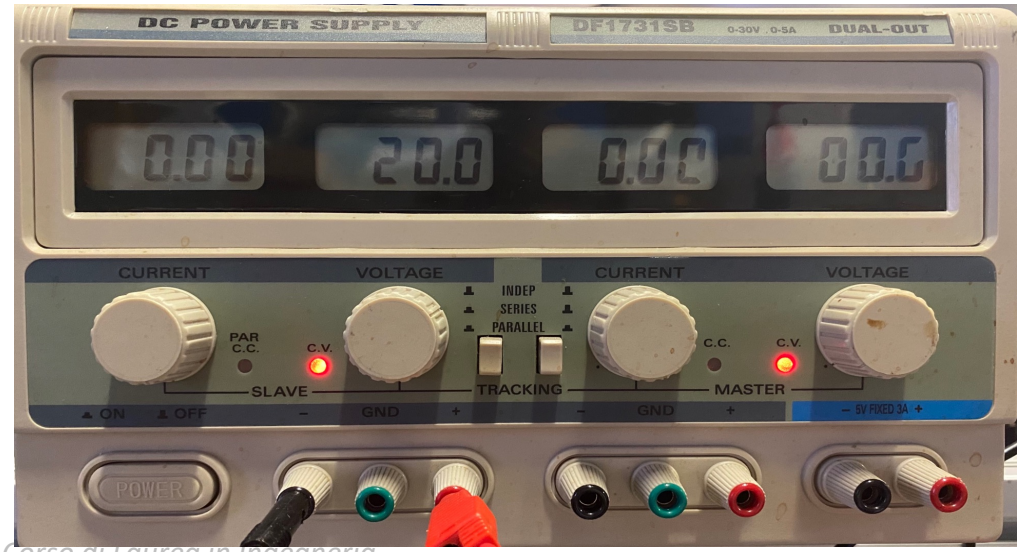
- $q_{\perp}$costante (20 $\mathrm{MWm^{-2}}$)
- impulso di t=10 s (durata minima per il raggiungimento di condizioni stazionarie)
- colletto in Cu per il collegamento a massa e per garantire accuratezza di misura

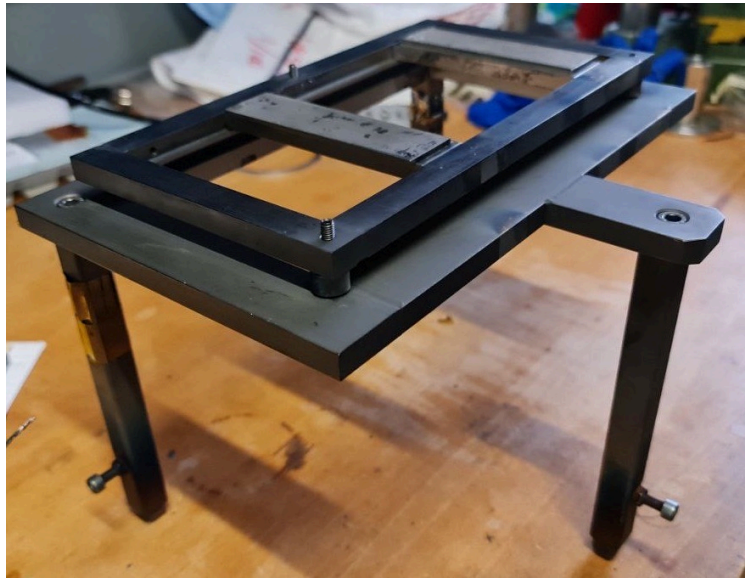


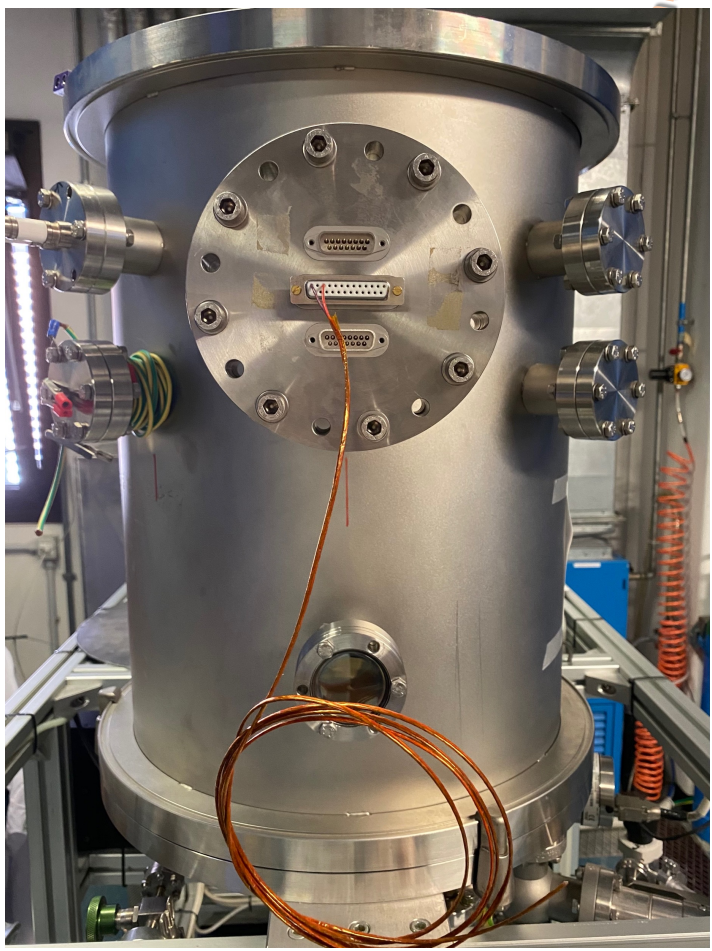
IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 21, NO. 16, AUGUST 15, 2021

SET UP SPERIMENTALE

- **Sensore di tipo E**, descritto e confrontato con la termocoppia erodibile Nanmac E-12 (in fornitura)
- **Supporto in AISI304**
- **Alimentatore per la polarizzazione in tensione**
- **Magnetron**
- **Vacuum feedthrough, connettori, pin..**
- **Termometro digitale Fluke**







SET UP SPERIMENTALE

www.dii.unipd.it

Le caratteristiche delle termocoppie erodibili sono già state discusse.

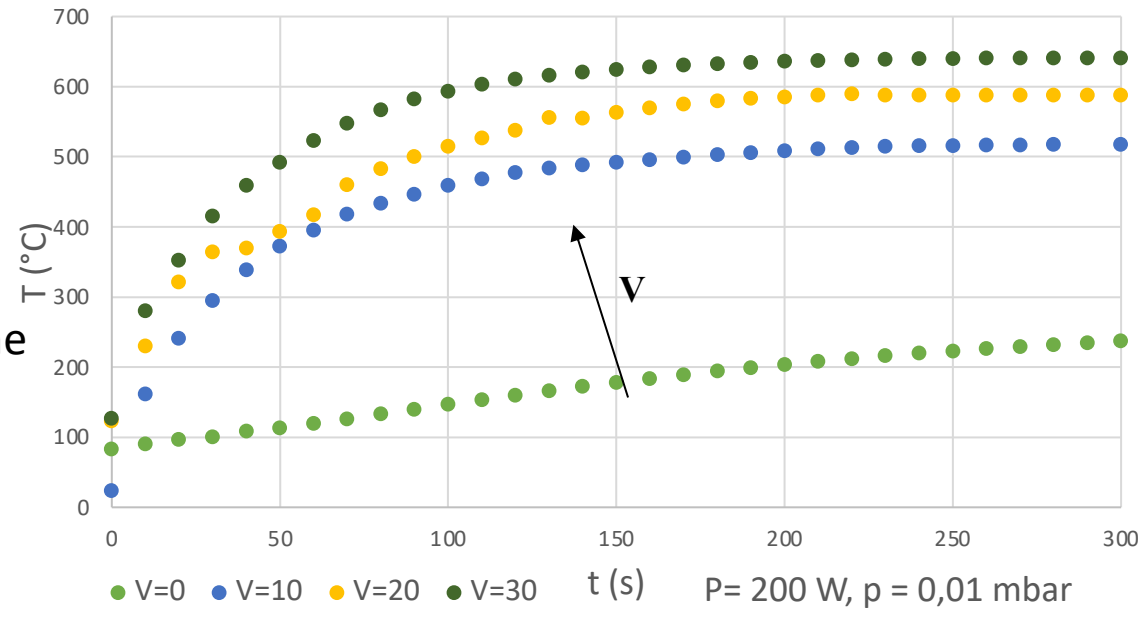
S'illustra in particolare come sia stata ricreata la configurazione a giunto esposto, che affiora dalla superficie, in analogia con la termocoppia erodibile:

- il giunto caldo è stato creato avvolgendo le estremità dei conduttori
- i termoelementi sono isolati al kapton rispetto al carrier body in AISI304
- il giunto caldo è stato posizionato in modo da essere radente alla base del rivestimento

ESPERIENZA SPERIMENTALE

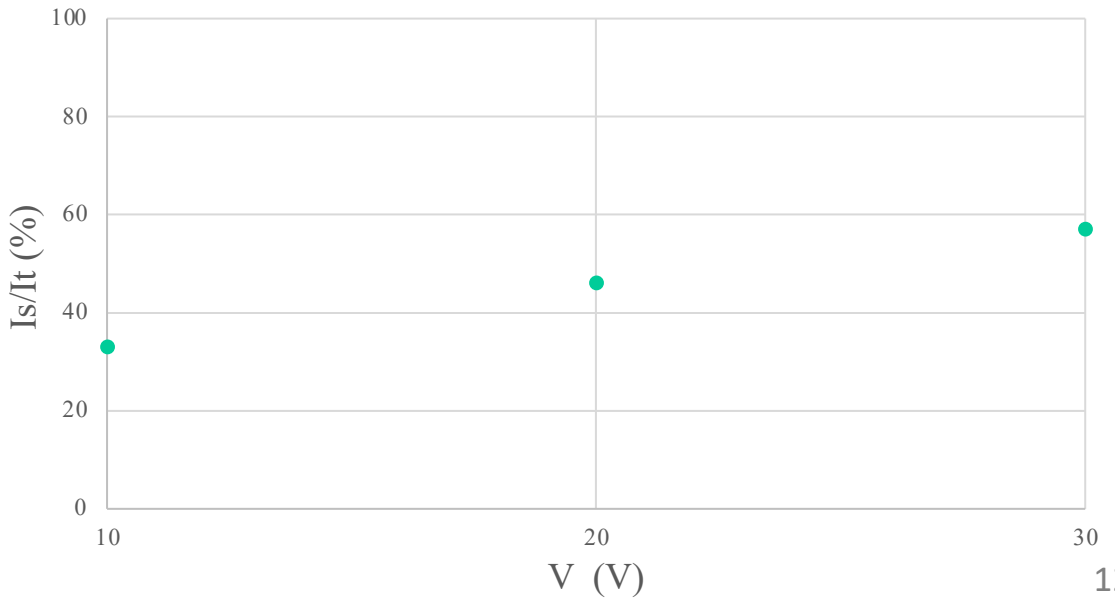
Considerazioni sugli andamenti:

- si nota un progressivo riscaldamento con tendenza all'equilibrio termico del sistema
- a parità di P emessa la T aumenta al crescere della polarizzazione
- all'aumentare della polarizzazione, si ha un incremento della corrente drenata attraverso il supporto della termocoppia



Considerazioni sulle misure:

- si può ottenere una misura di T da un sensore su cui scarica un arco di plasma
- la temperatura misurata non cambia allo spegnimento del plasma, se non per lenta decrescita attribuibile al raffreddamento del giunto caldo. Dunque l'esperienza, nelle condizioni in cui è stata condotta, non ha permesso di rilevare il rumore dato dalla corrente di plasma



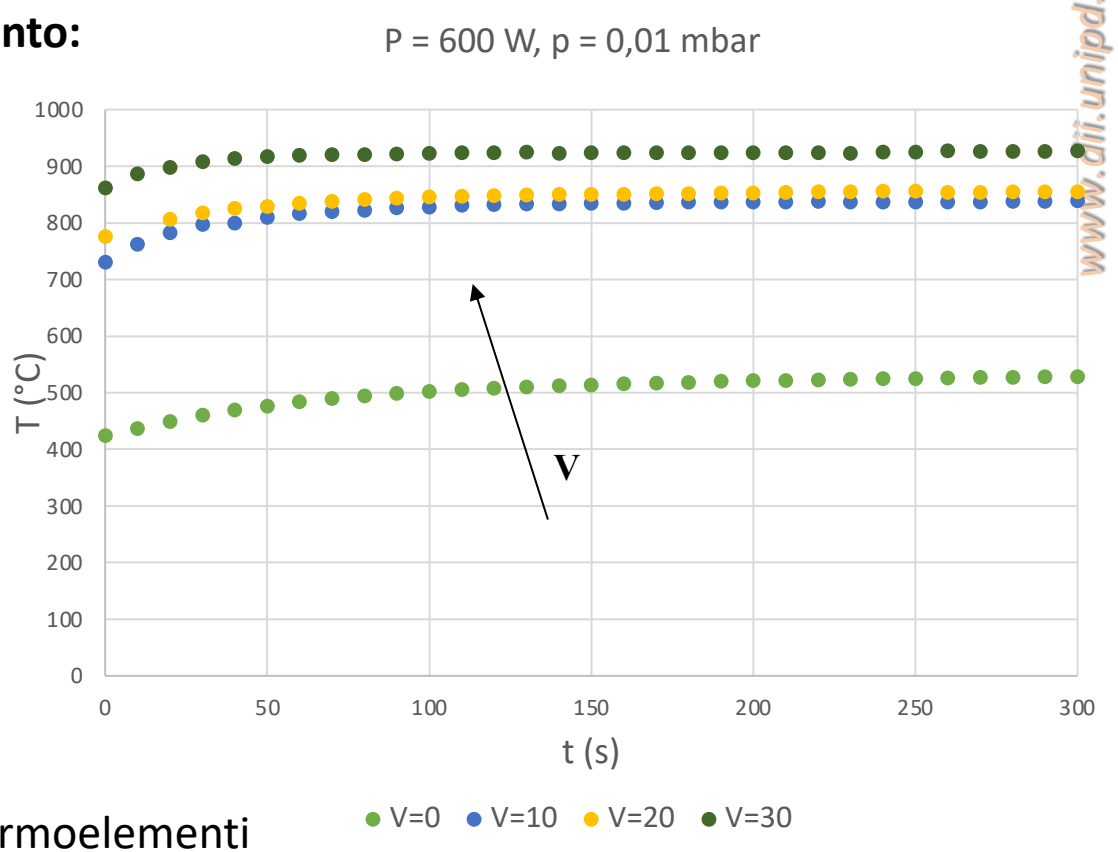
www.dii.unipd.it

ESPERIENZA SPERIMENTALE

Considerazioni sul sensore costruito e sull'elettronica di condizionamento:

- è stato raggiunto il fondo scala dello strumento (1000 °C per tipo E)
- si è verificata la perdita di isolamento del giunto caldo
- calcolo della costante di tempo

$$\tau_{sensor} = \frac{c\rho VR}{\lambda S} = 0{,}05\ s$$



- l'alta impedenza fa sì che non venga drenata corrente attraverso i termoelementi

- La f_{fluke} di campionamento (3.3 Hz) è tale da filtrare il rumore generato dalla scarica di plasma, dato che non è rispettato il teorema di Shannon. Per verifica:

$$f_{fluke} > 2\ f_{sensor}$$

www.dii.unipd.it

CONCLUSIONI

www.dii.unipd.it

L'obiettivo delle prossime prove è tentare di rilevare il disturbo causato dalla scarica di plasma con un'opportuna catena di misura:

- termocoppia erodibile Nanmac E12, dal rapido tempo di risposta (8ms), per poter seguire fenomeni tempovarianti veloci

- PCB con circuito integrato dalla frequenza di acquisizione compatibile con la costante di tempo molto bassa del sensore

- si può anche valutare il raffreddamento attivo del sensore, per poter ripetere frequentemente le scariche di plasma ad alta potenza senza dover attendere il raffreddamento inerziale.