

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica

TESI DI LAUREA

Sistema per la misura di temperatura con sensori in fibra ottica per l'acceleratore di ioni negativi dell'esperimento MITICA

Relatore: Ch.mo Prof. CHITARIN GIUSEPPE

Laureando: PASQUATO LEONE

Anno accademico 2014-2015

Ai miei genitori

Indice

SOMMARIO	iii
CAPITOLO 1	1
Fusione nucleare controllata	1
1.1. Plasma	1
1.2. Energia da fusione	1
1.3. ITER	4
1.3.1. Sistemi di raffreddamento	6
1.3.2. Sistema magnetico	6
1.3.4. Mantello (blanket)	8
1.3.5. Divertore	8
1.3.6. Criostato	9
1.3.7. Riscaldamento aggiuntivo del plasma	9
CAPITOLO 2	11
Iniettore di neutroni MITICA	11
2.1. Esperimento PRIMA	11
2.2. Struttura MITICA	12
2.2.1. Isolatore	12
2.2.2. Sorgente di ioni negativi	12
2.2.3. Estrattore e acceleratore	13
2.2.4. Sistema di deflessione di ioni residui (RID)	15
2.2.6. Calorimetro	16
2.2.7. Pompe criogeniche	16
2.3. Analisi e ottimizzazione griglie	16
2.3.1. Analisi ottica con SLACCAD	18
2.3.2. Analisi magnetica con NBIImag	20
2.3.3. Ottimizzazione dell'allineamento con ALIGN	22
2.3.4. Analisi termomeccanica con ANSYS	23
2.4. Risultati finali delle analisi	24
CAPITOLO 3	33
Sensori di temperatura in fibra ottica	33
3.1. Le fibre ottiche	33
3.1.1. Teoria delle fibre ottiche	34
3.2. Sensori fotonici	37

3.2.1.Classificazione	38
3.2.2.Principio di funzionamento	39
3.2.3.Applicazioni.....	39
3.3.Tipologie di sensori in fibra ottica	40
3.3.1.Interferometro Fabry-Pèrot.....	40
3.3.2.Interferometro Mach-Zehnder e Michelson	42
3.3.3.Scattering di Brillouin	42
3.3.4.Sensori con cristallo in GaAs.....	43
3.3.5.Reticolo di Bragg.....	44
3.4.FBG come sensori di temperatura	46
CAPITOLO 4.....	51
Sistema di misurazione.....	51
4.1.Scelta sensore di temperatura	51
4.2.Metodi di lettura	54
4.2.1.Wavelength-Division Multiplexing (WDM).....	55
CAPITOLO 5.....	57
Implementazione dei sensori nella griglia	57
CONCLUSIONI.....	61
BIBLIOGRAFIA	63

«Conosci innanzitutto la quadruplici radice
di tutte le cose: Zeus è il fuoco luminoso,
Era madre della vita, e poi Idoneo,
Nesti infine, alle cui sorgenti i mortali bevono»

(v.460), Empedocle, frammento B 6: *I presocratici*, Gallimard

C'è una forte corrispondenza tra la struttura della natura descritta nei miti di alcune civiltà antiche con quella studiata dalla scienza moderna.

Restando nella cultura occidentale e riesumando i primi filosofi greci che avevano come obiettivo la scoperta dell'archè, il principio su cui evolve la natura, troviamo già con Anassimene ma più nel dettaglio in Empedocle la riduzione della natura a degli elementi primi definiti 'radici' che corrispondono a quello che la fisica chiama 'stati della materia'.

Empedocle individua in quattro sostanze primordiali l'origine di ogni cosa: terra (γᾶ), acqua (ῥῶν), aria (αἰθήρ) e fuoco (πῦρ); mentre lui impersona questi elementi dalle rispettive divinità: Era, Nesti, Adoneo e Zeus, noi possiamo identificarli con i quattro stati della materia: solido, liquido, gassoso, plasma.

Con lo svilupparsi della meccanica quantistica e della possibilità tecnologica di avvicinarsi a condizioni limite quali lo zero assoluto si è arrivati a definire degli ulteriori stati della materia, queste categorie vanno però al di fuori di quello che è la nostra percezione sensibile della natura, quindi possiamo perdonare gli antichi filosofi se non le hanno inserite nelle loro teogonie.

I primi esperimenti riguardanti i plasmi coincidono con le prime scoperte sull'elettromagnetismo, fatte risalire allo storico esperimento di Benjamin Franklin con il quale scoprì la natura elettrica del fulmine. Studi più precisi coincidono con la creazione dei primi tubi da vuoto, i tubi di Crookes, su cui Sir William Crookes cominciò a lavorare negli anni successivi al 1870. Il plasma rimase però più che altro una curiosità: fanno eccezione gli studi approfonditi di Irving Langmuir, intorno agli anni 20 del novecento, sull'interazione dei gas ionizzati con le pareti del contenitore nel quale venivano formati.

L'interesse sistematico per i plasmi inizia invece alla fine degli anni cinquanta, quando la Conferenza di Ginevra Atoms for Peace sancisce l'inizio degli studi su uno sfruttamento pacifico della fusione nucleare. Più o meno nello stesso periodo

cominciano i primi lavori sugli effetti di un campo magnetico sui gas ionizzati (per es. della ionosfera) compiuti dal fisico Hannes Alfvén, che lo porteranno a vincere il premio Nobel nel 1970. Il suo contributo porterà alla spiegazione del meccanismo delle fasce di Van Allen in termini di moti di ioni ed elettroni.

Oggi la fisica del plasma è un settore in piena espansione, non solo per quanto riguarda la fusione nucleare, ma anche le applicazioni industriali (trattamento di superfici, il taglio al plasma, gli schermi al plasma) e la propulsione spaziale.

SOMMARIO

La tesi si propone di progettare un sistema di misura della temperatura con sensori in fibra ottica delle griglie dell'iniettore di particelle neutre del progetto MITICA al Consorzio RFX di Padova. Questo lavoro è inserito nei moderni studi sulla fusione nucleare controllata, in particolare nel progetto ITER, che prevede la progettazione e realizzazione di una macchina in grado di confinare il plasma da fusione.

Per poter progettare un sistema di misura della temperatura è necessario uno studio preliminare delle griglie in modo da definire le loro dimensioni, geometrie e zone più soggette a sovraccarico termico.

La tesi è organizzata in modo da dare una panoramica dello studio del plasma per la fusione nucleare e del progetto ITER, si concentrerà poi progressivamente sulle griglie dell'iniettore di neutri MITICA per avere un quadro completo delle problematiche e dei parametri principali da rispettare per la scelta dei sensori in fibra ottica e in che modo questi possano essere sistemati.

CAPITOLO 1: introduzione alla fusione nucleare controllata e al progetto ITER;

CAPITOLO 2: progetto MITICA e analisi delle griglie dell'iniettore di neutri;

CAPITOLO 3: principio di funzionamento delle varie tipologie di sensori a fibra ottica;

CAPITOLO 4: scelta del sensore e dello strumento di lettura;

CAPITOLO 5: proposta del sistema di misura

CAPITOLO 1

Fusione nucleare controllata

1.1. Plasma

Il plasma è un gas ionizzato, costituito da ioni (atomi o molecole ionizzati) e da elettroni liberi. Cariche positive 'nuotano' libere in un mare di elettroni, questo mare di elettroni permette al plasma di condurre elettricità. L'elevata mobilità delle cariche assicura che all'interno del plasma non ci siano campi elettrici e che il plasma sia globalmente neutro. Come un gas, il plasma non ha forma o volume definito; a differenza dei gas, essendo costituito da particelle cariche, è elettricamente conduttivo, produce campi magnetici e correnti elettriche e risponde alle forze elettromagnetiche.

Un gas può essere ionizzato applicando una differenza di potenziale tra due elettrodi (superiore al potenziale di ionizzazione degli atomi) o portandolo a temperature elevate.

Lo stato di plasma è abbastanza comune sulla Terra e la maggior parte delle persone può osservarlo senza neanche rendersene conto. Fulmini, scintille elettriche, luci fluorescenti, luci al neon, televisori al plasma, alcuni tipi di fiamma e le stelle sono tutti esempi di materia allo stato di plasma. Il plasma è normalmente luminoso per effetto della radiazione emessa dagli atomi quando gli elettroni legati agli atomi passano da un livello energetico ad un altro. Mentre sulla Terra la sua presenza è relativamente bassa, nell'Universo costituisce più del 99% della materia conosciuta: si trovano infatti sotto forma di plasma il Sole, le stelle e le nebulose.

1.2. Energia da fusione

Il processo che alimenta il sole e le stelle si chiama fusione, perché l'energia viene prodotta grazie alla fusione di atomi leggeri, come l'idrogeno, a pressioni e temperature estremamente elevate. (La temperatura esistente al centro del sole è di circa 15 milioni di °C). Alle temperature estreme gli elettroni sono separati dai nuclei e il gas diventa un plasma caldo ed elettricamente conduttivo. In una stella, come in un dispositivo di fusione, il plasma costituisce l'ambiente in cui gli elementi leggeri possono fondersi e produrre energia. Al fine di replicare questo processo sulla Terra, non potendo

raggiungere pressioni molto alte, i gas devono essere riscaldati a temperature estremamente elevate, circa 150 milioni di gradi ° C in modo tale che gli atomi diventino completamente ionizzati.

La reazione di fusione più facile da realizzare è la reazione tra due isotopi dell'idrogeno: deuterio, estratto dall'acqua e il trizio. Il trizio è disponibile in natura in quantità molto limitata, ma può essere prodotto in alcuni reattori a fissione oppure durante la reazione di fusione attraverso l'interazione con il litio.

(Si ricorda che gli isotopi di un elemento sono gli atomi che hanno lo stesso numero atomico Z, e quindi uguale numero di protoni e di elettroni, ma un numero di neutroni differente gli uni dagli altri, e quindi un diverso numero di massa atomica A).

reazione D-T



reazione D-D



La reazione di fusione nucleare permette di ricavare energia grazie al fenomeno naturale chiamato "difetto di massa".

La fusione D-T produce un atomo di elio e un neutrone. La massa risultante non è la somma esatta dei due atomi iniziali, la parte di massa che è stata persa produce una grande quantità di energia secondo la nota relazione di Einstein $E = mc^2$. Questa energia si manifesta come energia cinetica delle nuove particelle prodotte. Ogni secondo, il nostro Sole trasforma 600 milioni di tonnellate di idrogeno in elio, liberando una quantità enorme di energia. Ma senza una sufficiente forza gravitazionale (che è quella che assicura l'elevata pressione all'interno delle stelle), per ottenere la fusione sulla Terra è necessario un approccio diverso.

Per raggiungere queste temperature ci deve essere un riscaldamento potente e le perdite termiche devono essere ridotte al minimo, mantenendo le particelle di combustibile calde lontano dalle pareti del contenitore. Questo risultato è ottenuto attraverso la creazione di una "gabbia" magnetica fatta da forti campi magnetici. Per la produzione di energia questo plasma deve essere confinato per un periodo sufficientemente lungo perché la fusione si verifichi.

La configurazione più sviluppata finora è il tokamak, una parola russa per indicare una camera magnetica a forma toroidale.

Il primo dispositivo al mondo è stato il russo T1 Tokamak presso l'Istituto Kurchatov di Mosca e utilizzava un rivestimento in acciaio inox all'interno di una camera a vuoto di rame.

Dopo i primi esperimenti di fusione all'inizio degli anni '50, sono stati istituiti in quasi ogni nazione industrializzata dei laboratori di fisica per la fusione. A metà degli anni '50 macchine da fusione operavano in Unione Sovietica, Regno Unito, Stati Uniti, Francia, Germania e Giappone. Attraverso questi esperimenti è stato gradualmente perfezionato la comprensione del processo di fusione. Un importante passo avanti si è verificato nel 1968 in Unione Sovietica quando i ricercatori sono stati in grado di raggiungere una temperatura degli elettroni di oltre 1000 eV in un tokamak (1 elettronvolt equivale a 11605 kelvin).

La ricerca sulla fusione ha aumentato i parametri di performance di un fattore di 10.000 in oltre 50 anni, la ricerca è ora meno di un fattore di 10 dal produrre il nucleo di una centrale elettrica a fusione.

Per riuscire in questo intento sono nate collaborazioni internazionali al fine di radunare competenze tecnologiche e risorse finanziarie. La Joint European Torus (JET) nel Regno Unito, in funzione dal 1983, è stato un primo passo in questa direzione. Non è il prototipo di centrale di produzione di energia elettrica, ma solo una macchina sperimentale destinata a dimostrare di poter ottenere le condizioni di guadagno energetico necessarie. Nel 1997 JET ha raggiunto il record di potenza di 10 MW per una durata di circa 1.5 s.

ITER è un progetto internazionale cooperativo tra Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, Stati Uniti d'America, Corea del Sud e India proposto inizialmente nel 1985 ma entrato in vigore nel 2007. L'Europa sostiene il 45% del costo di costruzione e il 34% del costo di esercizio, decontaminazione e smantellamento della struttura così come la preparazione del sito. Il contributo dell'Europa a ITER è gestito da FusionForEnergy (F4E). I membri dell'Organizzazione ITER sosterranno il costo del progetto attraverso la sua fase di costruzione di 10 anni e la sua fase operativa di 20 anni prima di disattivazione. Situato in Cadarache, nel sud della Francia, sarà 30 volte più potente di JET e mira a produrre una notevole quantità di energia da fusione (500MW) per circa 7 minuti o 300 MW per 50 minuti. ITER non è il progetto di una vera e propria centrale, ma permetterà agli scienziati e ingegneri di sviluppare le

conoscenze e le tecnologie necessarie per procedere ad una successiva fase di produzione di energia elettrica.

DEMO è un reattore a fusione nucleare dotato di un circuito termodinamico a fluido per la conversione dell'energia termica in energia elettrica, gli studi sono iniziati prima del 1995 e proseguiranno fino alla progettazione costruttiva del reattore (prevista verso il 2030). Lo scopo principale del progetto è di dimostrare la fattibilità e l'affidabilità della produzione di energia elettrica da fusione su larga scala [1].

1.3.ITER

L'obiettivo scientifico del progetto ITER è di produrre una potenza termica pari ad almeno dieci volte la potenza che consuma. Dai 50 MW di potenza in ingresso, la macchina ITER è progettata per produrre 500 MW di potenza di fusione. ITER sarà quindi, il primo di tutti gli esperimenti di fusione per la produzione di energia netta. Nel corso della sua vita operativa, ITER sperimenterà tecnologie chiave necessarie per il passo successivo: la costruzione di una centrale elettrica che dimostrerà la possibilità di catturare energia di fusione per uso commerciale.

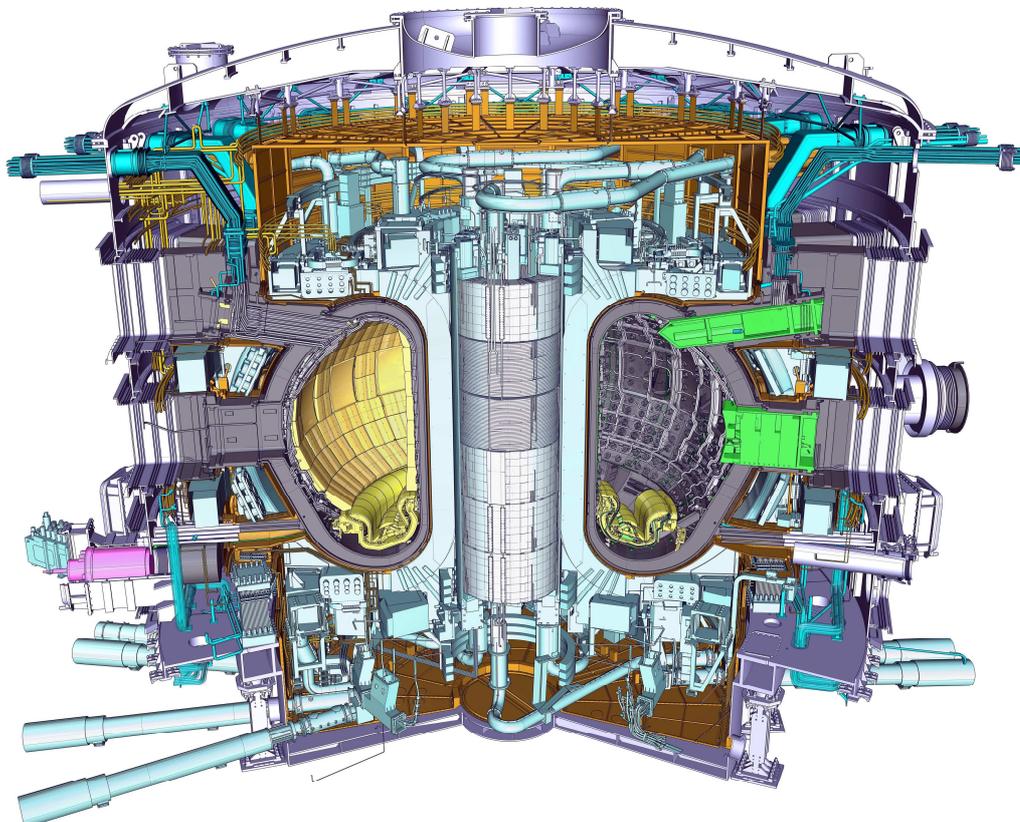


Figura 1.1 Rappresentazione 3D del tokamak di ITER

La camera toroidale di ITER sarà due volte più grande di qualsiasi tokamak precedente. Il complesso toroidale sarà alto quasi 30 metri dal peso di 23.000 tonnellate con un volume di plasma di 830 metri cubi.

In ITER, diversi tipi di campi magnetici funzionano combinati tra loro per modellare il plasma caldo a $150'000'000$ °C nella forma di un anello e isolarlo dalle pareti per mantenere la temperatura più a lungo possibile.

I nuclei di elio prodotti dalla reazione di fusione, essendo elettricamente carichi, saranno deflessi dai campi magnetici del tokamak e rimarranno confinati all'interno del plasma. Tuttavia, circa l'80% dell'energia prodotta viene portata via dal plasma dai neutroni che non hanno carica elettrica e quindi non sono deviati dai campi magnetici. I neutroni vengono assorbiti dalle pareti circostanti del tokamak, trasferendo la loro energia alle pareti come calore. In ITER, questo calore viene semplicemente disperso attraverso un sistema di raffreddamento. Nel successivo prototipo dimostrativo di impianto di fusione (DEMO) e nei futuri impianti di fusione industriale, il calore verrà utilizzato per produrre vapore e mandato ad un turboalternatore per la generazione di energia elettrica.

I combustibili utilizzati in ITER verranno trattati in un ciclo chiuso. La reazione di fusione nel tokamak ITER sarà alimentata con deuterio e trizio, due isotopi dell'idrogeno. ITER sarà la prima macchina di fusione completamente progettata per il funzionamento a deuterio-trizio. La messa in funzione avverrà in tre fasi: funzionamento a idrogeno, seguita da funzionamento a deuterio, e, infine, il funzionamento completo di deuterio-trizio. Come primo passo per iniziare la reazione di fusione, tutta l'aria e le impurità devono essere evacuate dalla camera a vuoto. I potenti magneti necessari a confinare e controllare il plasma sono poi accesi e il carburante gassoso a bassa densità viene introdotto nella camera a vuoto da un sistema di iniezione di gas. La quantità introdotta è solo quella necessaria per il funzionamento per qualche secondo. Una volta che il "combustibile" gassoso è stato introdotto, viene applicata una tensione elettrica al sistema necessaria per ionizzare il gas e trasformarlo in plasma. Sono state sviluppate delle pompe potenti per iniettare i combustibili gassosi con una portata di $200 \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ in media e $400 \text{ Pa m}^3/\text{sec}$ di picco, la potenza dei sistemi di iniezione sviluppati per ITER sarà quasi un ordine superiore a quella di qualsiasi tokamak esistente.

Il deuterio può essere estratto dall'acqua di mare in quantità virtualmente illimitata, mentre la disponibilità di trizio (sulla Terra) è limitata, stimata attualmente a venti chili. Fortunatamente esiste una seconda fonte di trizio: esso può essere prodotto all'interno

del tokamak quando i neutroni in fuga dal plasma interagiscono con uno specifico elemento di litio contenuto nel mantello. Quest'idea di produrre il trizio durante la reazione di fusione è importante per le future esigenze di una centrale elettrica a fusione su larga scala.

ITER fornirà un'opportunità unica per testare dei prototipi di mantelli per la produzione di trizio, chiamati test blanket modules (TBM), in un ambiente di fusione vero e proprio. All'interno di questi mantelli di prova, verranno esplorate le tecniche possibili per garantire un autosufficiente allevamento di trizio.

1.3.1. Sistemi di raffreddamento

ITER sarà dotato di un sistema di raffreddamento ad acqua per la gestione del calore generato durante il funzionamento del tokamak. Le superfici interne della camera da vuoto devono essere raffreddate a circa 240 °C a pochi metri dal plasma a 150 milioni di gradi.

L'acqua viene usata per rimuovere il calore dalla camera da vuoto e dei suoi componenti e per raffreddare i sistemi ausiliari quali il riscaldamento a radiofrequenza e il sistema criogenico.

La tecnologia delle bassissime temperature (criogenia) verrà ampiamente utilizzata in ITER per creare e mantenere condizioni di basse temperature per i magneti superconduttivi, per i sistemi di pompaggio del vuoto e di diagnostica.

I magneti saranno raffreddati con elio supercritico a 4 K (-269 °C) per ottenere la superconduttività e funzionare con elevati campi magnetici necessari per il confinamento e la stabilizzazione del plasma. Essi saranno circondati da un grande criostato e uno scudo termico attivamente raffreddato con un flusso forzato di elio a 80 K. Il sistema criogenico sarà in grado di fornire potenza di raffreddamento a tre diversi livelli di temperatura: 4 K, 50K e 80K.

Il sistema criogenico di ITER con una potenza installata di raffreddamento di 65 kW a 4.5K (elio) e 1300 kW a 80K (azoto) sarà, dopo il Large Hadron Collider del CERN, il più grande sistema criogenico mai costruito.

1.3.2. Sistema magnetico

Il sistema magnetico di ITER comprende 18 bobine superconduttrici per il campo toroidale e 6 bobine di campo poloidale, un solenoide centrale e una serie di bobine di

correzione. Queste bobine sono necessarie per confinare magneticamente, dare forma e controllare il plasma all'interno della camera da vuoto. Delle bobine supplementari saranno attivate per mitigare i 'modi localizzati ai bordi' (ELM), che sono instabilità altamente energetiche vicino al bordo del plasma che, se lasciate incontrollate, riducono l'energia complessiva del plasma.

Il sistema per il campo toroidale e per il campo poloidale utilizza magneti superconduttori che portati a temperature prossime allo zero assoluto riducono quasi a zero la loro resistenza elettrica. Le bobine di campo toroidale e poloidale si trovano tra la camera a vuoto e il criostato, dove sono raffreddate e schermate dai neutroni prodotti dalla reazione di fusione.

Il superconduttore del solenoide centrale e le bobine del campo magnetico toroidale sono progettati per funzionare con un alto campo magnetico (fino a 13 Tesla) e sono una lega speciale fatta di niobio e stagno (Nb3Sn). Le bobine di campo poloidale e le bobine di correzione utilizzano una lega diversa in niobio-titanio (NbTi).

Il campo toroidale produce un campo magnetico intorno al toro, la cui funzione primaria è quella di confinare le particelle di plasma. Queste bobine sono progettate per avere un'energia magnetica totale di 41 gigaJoule e di un campo magnetico massimo di 11,8 Tesla. Le bobine peseranno in totale 6.540 tonnellate.

Il sistema di bobine del campo poloidale consiste in sei bobine indipendenti poste all'esterno della struttura del magnete toroidale. Il campo poloidale contribuisce a mantenere la forma e la stabilità del plasma, è indotto sia dai magneti sia dalla corrente indotta dal plasma stesso.

Il solenoide centrale del magnete è essenzialmente il circuito primario di un grande trasformatore in cui il gas nella camera toroidale è il circuito secondario. La corrente di plasma principale è indotta dalla variazione di corrente nel solenoide centrale. Contribuisce alla formazione del flusso indotto che guida il plasma e alla stabilità verticale. Il solenoide centrale è formato da 6 pacchi di bobine indipendenti ciascuna contenente cavi superconduttori tenuti insieme in una struttura verticale tramite compressione. Ogni bobina è basata su una pila di unità multiple, un isolamento elettrico in fibra di vetro e poli-imide, impregnato con resina epossidica, garantisce la tenuta in alta tensione, fino alla tensione di 29 kV. Il materiale del rivestimento conduttore deve resistere alle grandi forze elettromagnetiche ed essere in grado di garantire un buon comportamento a fatica.

1.3.3.Camera da vuoto

La camera da vuoto è un contenitore di acciaio a tenuta di vuoto, che verrà collocato all'interno del criostato, che ospita la reazione di fusione e funge da prima barriera di contenimento di sicurezza. Nella sua camera a forma di ciambella, o toro, le particelle di plasma girano intorno continuamente senza toccare le pareti. La dimensione della camera da vuoto determina il volume del plasma di fusione; la camera da vuoto di ITER sarà due volte più grande e sedici volte più pesante di qualsiasi tokamak precedente, con un diametro interno di 6 metri. La camera da vuoto avrà pareti in acciaio doppie, con passaggi per far circolare l'acqua di raffreddamento.

Quarantaquattro porte forniranno l'accesso alla camera da vuoto per la manipolazione a distanza, operazioni di diagnostica, sistemi di riscaldamento e sistemi da vuoto: 18 porte superiori, 17 porte equatoriali e 9 porti minori.

1.3.4.Mantello (blanket)

I neutroni vengono rallentati nel mantello dove la loro energia cinetica viene trasformata in energia termica raccolta dai refrigeratori. In una centrale a fusione, questa energia verrà utilizzata per la produzione di energia elettrica. Il mantello è uno dei componenti più critici e tecnicamente impegnativi di ITER perché insieme al divertore si affaccia direttamente al plasma caldo. I materiali utilizzati per ricoprire il primo strato della parete saranno berillio e tungsteno, mentre il resto dello scudo sarà fatto di rame ad alta resistenza e acciaio inossidabile.

1.3.5.Divertore

Situato nella parte inferiore del recipiente da vuoto, è la parte su cui è deviato il plasma che sfugge ai campi magnetici di contenimento ed è composto da 54 moduli rimovibili a distanza, contenenti ciascuna tre componenti affacciate direttamente al plasma, (target). I target sono situati in corrispondenza delle linee di campo magnetico in cui le particelle di plasma ad alta energia colpiscono i componenti. L'energia cinetica delle particelle viene trasformata in calore, il flusso di calore ricevuto da questi componenti è estremamente intenso e richiede un raffreddamento attivo ad acqua. In ITER verranno provati materiali in grado di resistere a temperature fino a 3000 °C per la durata prevista di 20 anni della macchina. Si prevede di iniziare con un target in carbonio composito rinforzato con fibra di carbonio (CFC), un materiale che presenta il vantaggio di elevata conducibilità termica, che sarà seguito da un secondo divertore

con i target in tungsteno che offre il vantaggio di avere un tasso inferiore di erosione e di maggiore durata.

1.3.6.Criostato

Il criostato è una grande struttura in acciaio inox che circonda la camera da vuoto e i magneti superconduttori. Esso è costituito da una singola parete cilindrica, rinforzata da nervature orizzontali e verticali. Il criostato è alto 29,3 metri e largo 28,6 metri, ha molte aperture che forniscono l'accesso alla camera da vuoto per il raffreddamento dei sistemi, alimentazione dei magneti, riscaldamento ausiliario, diagnostica e per la rimozione del blanket e delle parti del divertore.

1.3.7.Riscaldamento aggiuntivo del plasma

Il Tokamak di ITER si baserà su tre fonti di riscaldamento esterne che lavorano per fornire la potenza di riscaldamento in ingresso di 50 MW per portare il plasma alla temperatura necessaria per la fusione. Questi sistemi sono basati sull'iniezione di neutri e due sorgenti di onde elettromagnetiche ad alta frequenza.

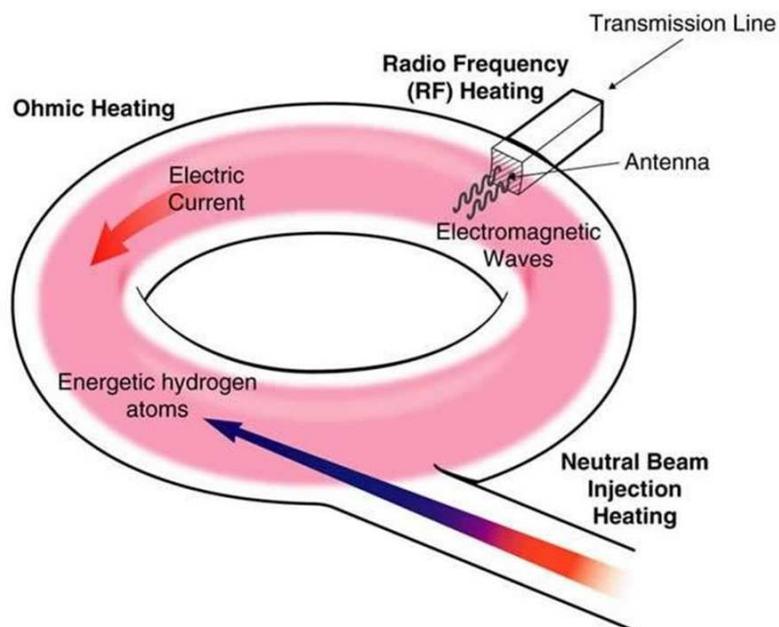


Figura 1.2 tecnologie di riscaldamento aggiuntivo del plasma

- RISCALDAMENTO A RISONANZA CICLOTRONICA DI IONI

Questo metodo di riscaldamento utilizza onde radio a diverse frequenze per portare calore aggiuntivo al plasma, nello stesso modo in cui un forno a microonde trasferisce calore al cibo attraverso le microonde. Nel riscaldamento a risonanza ciclotronica di ioni (ICRH) l'energia viene trasferita agli ioni nel plasma da un fascio ad alta intensità di radiazione elettromagnetica con una frequenza da 40 a 55MHz. Un generatore produce onde a radiofrequenza ad alta potenza che vengono mandate lungo una linea di trasmissione ad un'antenna situata nella camera da vuoto, inviando le onde nel plasma.

- RISCALDAMENTO A RISONANZA CICLOTRONICA DI ELETTRONI

Si riscaldano gli elettroni del plasma con un fascio ad alta intensità di radiazione elettromagnetica ad una frequenza di 170 GHz, la frequenza di risonanza degli elettroni. Gli elettroni a loro volta trasferiscono l'energia assorbita agli ioni per collisione. In confronto al sistema ICRH, il ECRH ha il vantaggio che il fascio può essere trasmesso attraverso guide d'onda, il che semplifica la progettazione e consente di avere la sorgente lontano dal plasma. La potenza sarà fornita da potenti girotroni ad alta frequenza come fonti di energia. Il progetto ITER prevede lo sviluppo di un girotrone da 1 MW funzionante a 170 GHz con una durata dell'impulso di più di 500 s.

- INIEZIONE DI UN FASCIO DI PARTICELLE NEUTRE

L'iniezione di neutri è basata sull'idea di iniettare particelle neutre ad alta energia nel plasma, cosicché le particelle trasferiscano per collisione la loro energia. Prima dell'iniezione, atomi di deuterio devono essere accelerati all'esterno del tokamak ad un'energia cinetica di 1 Mega elettronvolt (MeV). Dato che solamente particelle con una carica positiva o negativa possono essere accelerate con un campo elettrico, si creano ioni carichi positivamente o negativamente rimuovendo o aggiungendo un elettrone ad atomi neutri di idrogeno o di deuterio. Dopo l'accelerazione e prima dell'iniezione, gli ioni vengono neutralizzati, altrimenti verrebbero deviati dai forti campi magnetici; gli ioni passano attraverso un gas dove cedono l'elettrone in più o recuperano l'elettrone mancante e possono essere iniettati elettricamente neutri ma accelerati nel plasma [2].

CAPITOLO 2

Iniettore di neutri MITICA

2.1. Esperimento PRIMA

In ITER sono previsti due iniettori di neutri, ciascuno in grado di fornire al plasma fino a 16.5 MW di potenza mediante atomi di Idrogeno e Deuterio a 1 MeV di energia, per un tempo di 3600s. Il fascio di neutri è ottenuto accelerando a -1 MV un fascio di ioni negativi di 40A e poi viene neutralizzato dall'interazione con un gas neutro dello stesso tipo. La tensione di accelerazione, la corrente e la durata del fascio richiesti sono più alti di quelli utilizzati nei macchinari già esistenti. La simultanea realizzazione di questi parametri rappresenta una sfida tecnologica molto impegnativa.

Per questo motivo ITER collabora anche con il consorzio RFX di Padova per provare e ottimizzare l'iniettore di fasci di particelle neutri. Il progetto PRIMA (Padova Research on Iter Megavolt Accelerator) consiste in due esperimenti: SPIDER, sorgente, estrattore ed acceleratore elettrostatico di ioni negativi a 100kV e MITICA, iniettore completo di neutri a 1000kV [3].

SPIDER (Source for Production of Ions of Deuterium Extracted from RF Plasma) consiste in una camera da vuoto contenente una sorgente di ioni alimentata a radiofrequenza, un acceleratore e un calorimetro raffreddato ad acqua per la rilevazione del fascio. La sorgente di ioni è a sua volta refrigerata ad acqua e polarizzata a -100kV rispetto massa. È costituita da una camera principale che funge da zona di espansione per il plasma generato dagli otto driver, dove un gas di idrogeno o deuterio viene ionizzato da correnti a radiofrequenza. Gli ioni negativi sono prodotti da ioni positivi tramite un meccanismo di scambio di carica vicino alla griglia di plasma, la produzione è incrementata dalla presenza di superfici metalliche su cui si deposita cesio (Cs) evaporato all'interno della sorgente di ioni. La produzione, estrazione e accelerazione fino a 100 keV degli ioni negativi sono ottenute mediante un sistema di tre griglie polarizzate a differenti tensioni: la griglia di plasma (PG), la griglia di estrazione (EG) e la griglia a massa (GG). Il plasma all'interno della sorgente, il fascio generato e tutti i componenti alloggiati all'interno della camera si possono osservare mediante diagnostiche dedicate [4].

MITICA (Megavolt ITER Injector Concept Advancement) è un prototipo per HNB (Heating Neutral Beam injector) di ITER, comprende una sorgente di ioni, un acceleratore, un neutralizzatore, un deflettore di ioni residui e un calorimetro. L'acceleratore opera con una corrente di 40A di ioni negativi di deuterio (D^-) e un'energia di accelerazione di 1MeV per una durata di 1 ora. Il fascio di ioni negativi deve soddisfare molti requisiti ottici per essere idoneo al funzionamento in ITER [5]. L'esperimento si propone di:

- ottimizzare l'ottica del fascio di ioni negativi in termini di divergenza e direzione;
- minimizzare i carichi termici nelle griglie di accelerazione e ottimizzarne la configurazione magnetica ed elettrostatica per conferire un'efficiente deflessione degli elettroni co-estratti;
- ottimizzare il sistema di raffreddamento in grado di mantenere l'allineamento tra le griglie e garantire che i valori di stress termomeccanico rimangano entro valori accettabili (in base ai criteri per le verifiche strutturali di ITER), anche durante il funzionamento di 1 ora;
- garantire la tenuta alla tensione elettrica tra le griglie e tra la sorgente e la camera da vuoto con una probabilità di scarica sufficientemente piccola [6].

2.2.Struttura MITICA

2.2.1.Isolatore

L'isolatore ad alta tensione è l'interfaccia tra il vuoto nella sorgente e la linea ad alta tensione proveniente dall'alimentatore che trasporta sia la potenza elettrica continua (a vari potenziali fino a -1MV) sia la potenza per la sorgente di ioni a radiofrequenza. L'isolatore è formato da cinque anelli cilindrici di allumina di 1.46m di diametro interno separati con delle flange in acciaio inox. La cima della sorgente forma un tronco di cono, questo permette ai connettori a diverso potenziale elettrico negativo di essere sistemati in modo tale che il campo elettrico tra i conduttori sia minimizzato e lasci dello spazio per la connessione e la disconnessione della sorgente.

2.2.2.Sorgente di ioni negativi

Per ITER è stata scelta una sorgente di ioni di tipo a radiofrequenza perché non servono filamenti per il suo funzionamento e quindi non c'è bisogno di una regolare manutenzione di quest'ultimi. La sorgente è costituita da driver di allumina cilindrici lunghi circa 250mm e con diametro interno di circa 220mm, attorno ai quali sono avvolti

5-6 spire conduttrici alimentate alla frequenza di 1MHz. Nel driver viene iniettato del gas, H_2 o D_2 , per creare il plasma indotto che è libero di espandersi nella camera di espansione ad esso collegata. Una gabbia di Faraday protegge il cilindro di allumina dal bombardamento del plasma, mentre la prima griglia dell'acceleratore (Plasma Grid) è la parete che separa la camera di espansione dal driver. Gli ioni negativi vengono creati tramite reazioni all'interno del plasma, è stato verificato che il flusso di ioni negativi aumenta significativamente se una piccola quantità di cesio viene iniettata nella sorgente. La produzione principale di ioni H^- o D^- è dovuta sostanzialmente alle particelle H , H^+ , H_2 o D , D^+ , D_2 , D_3 che rimbalzano sulla superficie metallica della sorgente e dalla plasma grid. Il cesio iniettato nella sorgente forma un sottile strato sulla plasma grid che aumenta la produzione di particelle D^- facendo passare la densità di corrente da $40 A/m^2$ a $200 A/m^2$. Nell'acceleratore si generano anche elettroni tramite ionizzazione del gas residuo dovuta agli ioni D^- accelerati e alle particelle che impattano sulla superficie delle griglie. Avendo massa più piccola, gli elettroni generati nell'acceleratore non seguono la stessa traiettoria degli ioni D^- , molti sono intercettati dalle griglie disperdendo potenza su di esse. L'estrapolazione prevista è modulata con otto driver sistemati in 4x2 file collegati ad una camera di espansione. Questa disposizione permette, variando la potenza ai singoli driver, di ottimizzare il flusso degli ioni negativi diretti alla plasma grid [7].

2.2.3. Estrattore e acceleratore

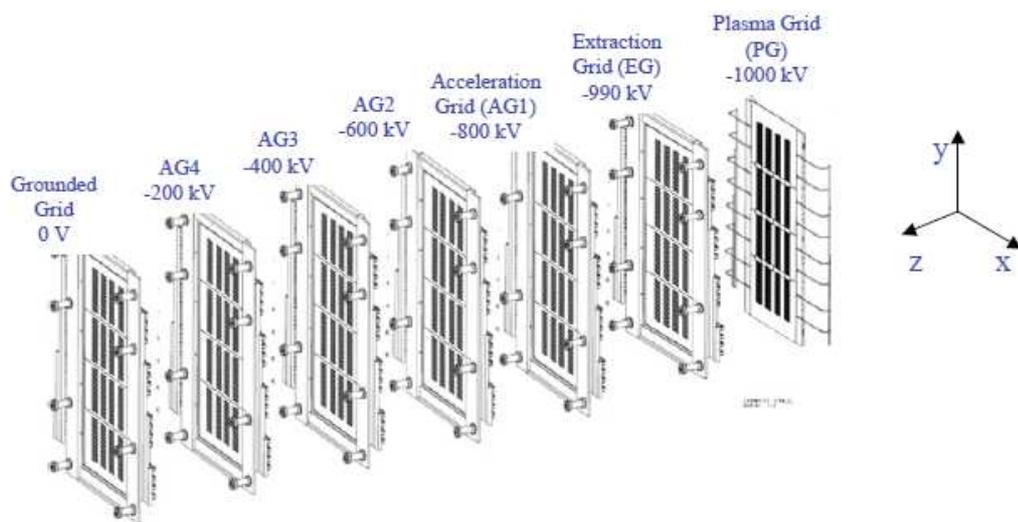


Figura 2.1 Disposizione griglie MITICA

Il sistema di estrazione e accelerazione è composto da sette griglie: Plasma Grid (PG), la griglia di estrazione (EG), quattro griglie di accelerazione (AG1-AG4) e la griglia di terra (GG). Le prime due rappresentano il sistema di estrazione, mentre le cinque successive formano il sistema di accelerazione. Tutte le griglie sono approssimativamente alte 1600 millimetri e larghe 800 mm (divise in quattro segmenti di circa 400 mm x 800 mm per ragioni di allineamento e fabbricazione). Ogni griglia dispone di 1.280 aperture (320 per segmento), raggruppate in 16 gruppi da 16x5, dove gli ioni vengono estratti dalla sorgente e accelerati fino a 1 MeV, formando un fascio di 40 A all'uscita. Gli ioni negativi di deuterio (D^-) o idrogeno (H^-) vengono estratti dalla sorgente di plasma a radiofrequenza (mantenuta a circa -1 MV), tramite una tensione di circa 10 kV applicata tra la plasma grid e la extraction grid. In questo modo, viene estratto un fascio di ioni negativi che viene accelerato in cinque stadi dalle griglie di accelerazione che si trovano (a partire dalla AG1 e finire con GG) ai potenziali elettrici di -800, -600, -400, -200 e 0 kV. La distanza tra queste griglie è di 88 millimetri, per mantenere la tensione con un ragionevole margine di sicurezza. Per ottenere dei piccoli fasci ben collimati, i potenziali delle griglie possono essere variati entro un certo intervallo.

In particolare, variando il potenziale di EG si riesce a regolare l'ottica del fascio e minimizzarne la divergenza all'uscita. Le griglie contengono anche magneti permanenti incorporati e dei canali di raffreddamento. I primi sono utilizzati per deviare sulle griglie gli elettroni che sono accelerati insieme agli ioni negativi, i secondi per smaltire i carichi termici sulle griglie, che sono causati proprio dalle particelle del fascio con una grande divergenza. Per la loro struttura complessa (con canali di raffreddamento molto piccoli che corrono all'interno della griglia e scanalature per magneti incorporati), le griglie possono essere realizzate soltanto mediante elettrodeposizione di rame su una piastra di base fresata in rame puro. Il processo di produzione è stato ottimizzato attraverso la costruzione di alcuni prototipi [8]. Tutte le griglie sono sottoposte a carichi termici stimabili con codici o tramite estrapolazione dei dati esistenti da esperimenti precedenti. La PG è riscaldata dal plasma all'interno della sorgente di ioni a radiofrequenza, con una densità di potenza alla superficie che è stimata essere tra 3 e 20 $kW m^{-2}$ [9]. Sia la sorgente di ioni e sia la PG sono mantenute ad un potenziale di -1 MeV (rispetto a massa) da un'apposita alimentazione elettrica. La PG è rivestita in molibdeno nel lato a contatto con il plasma e deve operare ad una temperatura di circa 150 °C al fine di migliorare l'effetto del cesio per la generazione di ioni negativi sulla superficie. Le aperture sono progettate con degli smussi conici sui lati a monte e a valle della griglia per fornire una superficie più ampia per la produzione di ioni e una

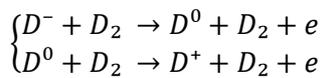
probabilità più grande per la loro estrazione. Una corrente di circa 4 kA scorre nella PG in direzione verticale, per fornire un campo magnetico orizzontale chiamato "campo di filtro", che riduce la densità elettronica locale (e quindi il numero di elettroni co-estratti) e la temperatura locale degli elettroni. La stessa corrente fornisce anche un campo magnetico all'interno dell'acceleratore, chiamato campo magnetico di lungo raggio per distinguerlo dal campo magnetico a corto raggio prodotto dai magneti incorporati nelle griglie (tutti tranne PG e GG). L'EG deve sopportare il calore scambiato dagli ioni negativi insieme agli elettroni estratti dalla sorgente di plasma, chiamati elettroni co-estratti. Infatti, una certa quantità di elettroni viene estratta insieme agli ioni negativi (D^- o H^-) per il fatto che essi hanno la stessa carica. Il rapporto tra gli elettroni e ioni estratti può variare tra 0,5 e oltre 10 a seconda della deposizione di cesio dentro la sorgente del plasma, la temperatura della PG e il campo magnetico di filtro [10]. Al fine di raggiungere una buona efficienza complessiva dell'acceleratore e ridurre i carichi termici sulle griglie, questa grande quantità di elettroni (alcune decine di Ampere in tutta l'area di estrazione) devono essere deviati all'inizio dell'acceleratore, dove non hanno ancora molta energia. Per questo motivo viene prodotto un forte campo magnetico localizzato utilizzando una serie di magneti all'interno di EG che fanno urtare quasi tutti gli elettroni co-estratti sulla stessa EG. Altri elettroni sono generati all'interno dell'acceleratore mediante delle reazioni di stripping, cioè quando gli ioni negativi perdono uno dei loro elettroni reagendo con il gas di fondo all'interno acceleratore (D_2). Anche altre particelle possono scontrarsi sulle griglie: si tratta di ioni negativi, neutri e ioni positivi. I carichi di potenza sono particolarmente alti sulle ultime tre griglie dell'acceleratore (AG3, AG4 e GG), dove rappresentano circa metà del carico totale di calore, l'altra metà è dovuta agli elettroni. Al fine di ridurre questo carico, una strategia efficiente è quello di diminuire i diametri di apertura nelle prime griglie di accelerazione (AG1 e AG2) da 16 mm a 14 mm. I segmenti delle griglie non sono piani, ma con una piccola curvatura che orienta il fascio in un condotto virtuale che collega l'iniettore alla camera Tokamak. In MITICA è stata adottata la stessa curvatura sebbene il fascio venga completamente assorbito dal calorimetro [11].

2.2.4. Sistema di deflessione di ioni residui (RID)

È stato calcolato che circa 0,8 MW di potenza vengono comunque dispersi dagli elettroni uscenti insieme al fascio di D^- . Gli ioni residui dopo la neutralizzazione del fascio vengono deflessi mediante un campo elettrico trasversale applicato facendo passare il fascio attraverso un sistema di piastre conduttrici parallele.

2.2.5. Neutralizzatore

Nel neutralizzatore le particelle cambiano carica per urto con un gas ivi introdotto, ad esempio deuterio D_2 . Le reazioni principali che avvengono nel neutralizzatore sono



Per ridurre il flusso di gas richiesto il neutralizzatore è diviso in quattro canali a sezione trasversale lungo i quali passano i fasci provenienti dall'acceleratore. Questa suddivisione riduce la conduttanza totale del gas nel neutralizzatore e quindi anche la richiesta di gas. Ogni canale è lungo 3m, alto 1,5m e spesso 105mm all'entrata e 95mm all'uscita. Ciascun canale è fatto di due pareti di rame ciascuno diviso in tre sezioni raffreddate con delle serpentine.

2.2.6. Calorimetro

Consiste in due pannelli inclinati che formano una V che possono essere ruotati in modo tale che, se aperti al massimo, non interferiscano con il fascio di neutri. I pannelli sono costituiti da un array orizzontale di tubi a spirale a sezione circolare. La misura della temperatura interna ed esterna di ciascun tubo permette di determinare il profilo verticale del fascio.

2.2.7. Pompe criogeniche

Hanno il compito di pompare H_2 alla pressione di $2 \times 10^{-4} Pa$, questo richiede di raggiungere la temperatura di circa 3,8K per ridurre la pressione del vapore di H_2 condensato ad un valore abbastanza basso per consentire il pompaggio [7].

2.3. Analisi e ottimizzazione griglie

Un'accurata progettazione delle griglie dell'acceleratore è fondamentale per poter rispettare i requisiti funzionali di MITICA, con la prerogativa di ridurre al minimo le perdite di potenza. La geometria delle griglie viene studiata per ottimizzare l'efficienza dei canali di raffreddamento e dei magneti presenti al suo interno. Per verificare la configurazione vengono fatte delle specifiche simulazioni tramite software, in modo da capire quali modifiche è necessario fare sulla geometria. A valle di numerose iterazioni si è giunti alla configurazione EQ_GAPS_41.

- Copper
- Co-extracted Electron Suppression Magnet (CESM), alternated from row to row
- Alternate Deflection Compensation Magnet (ADCM), alternated from row to row
- Stripped Electron Suppression Magnet (SESM), alternated from row to row
- Cooling channel

Magnet properties

Material: SmCo₂
 Remanence: 1.1 T
 Coercivity: -875351 A/m
 Relative permeability: 1

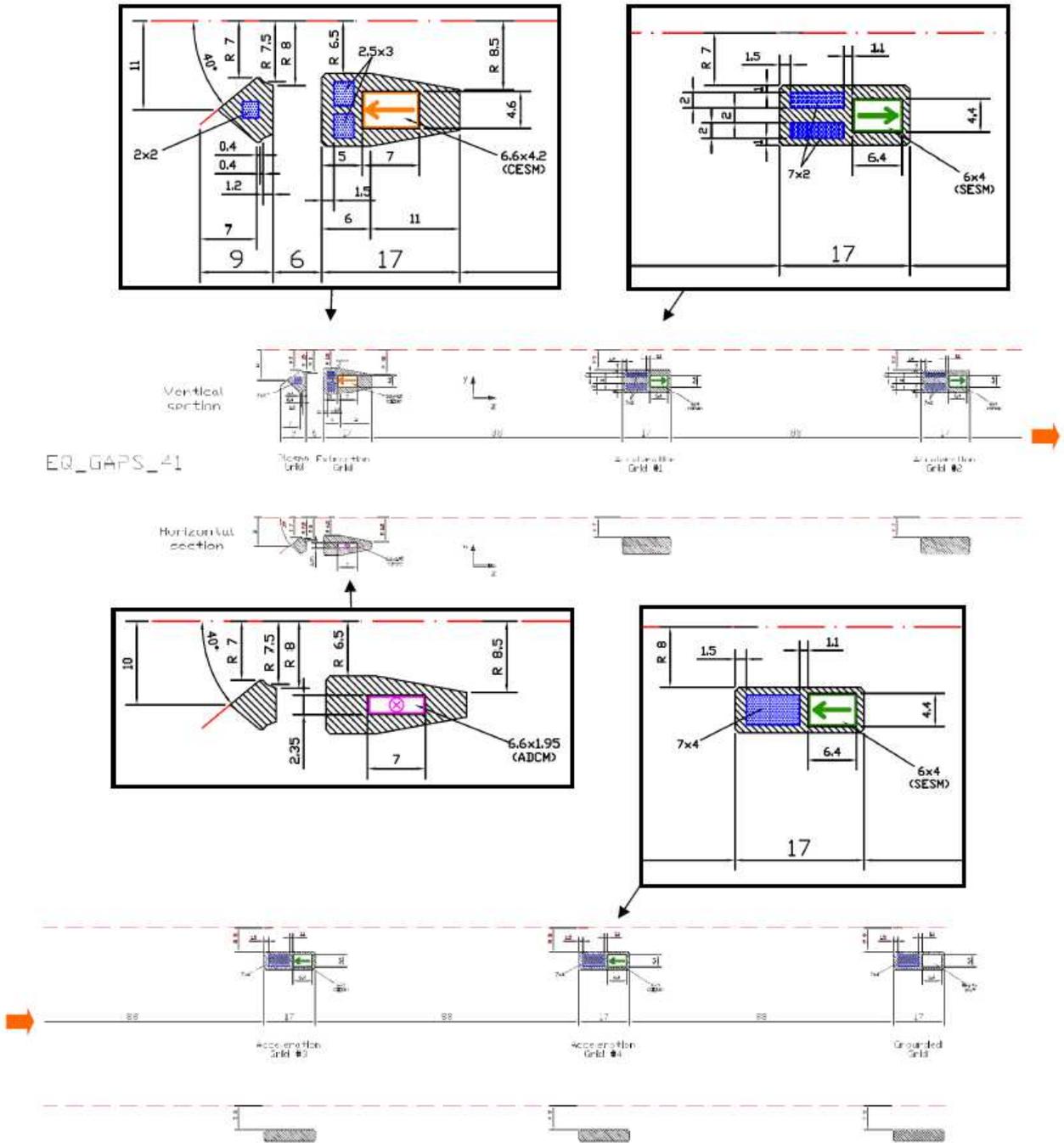


Figura 2.2 Configurazione EQ_GAPS_41

	Unit	H	D
Beam energy	keV	870	1000
Acceleration current	A	49	40
Maximum Beam Source pressure	Pa	0.3	0.3
Beamlet divergence	mrاد	≤ 7	≤ 7
Beam on time	s	3600	3600
Co-extracted electron fraction (e^-/H^-) and (e^-/D^-)		<0.5	<1

Figura 2.3 requisiti principali di MITICA [30]

In seguito vengono riportate alcune analisi effettuate dal Consorzio RFX su questa geometria che hanno permesso di tracciare dei profili di temperatura, di tensione e di deformazione delle varie griglie. In particolare ci si sofferma sull'analisi ottica, magnetica e termomeccanica.

2.3.1. Analisi ottica con SLACCAD

Utilizzando SLACCAD è stata fatta un'analisi ottica per verificare il comportamento dell'acceleratore dal punto di vista ottico e la sua robustezza (in termini di qualità ottica) se la condizioni d'esercizio sono diverse da quelle di riferimento. Per questo motivo, la divergenza media dei fascetti è stata studiata in un ampio range intorno al punto di funzionamento nominale. Gli ingressi per l'analisi sono:

- Perdite profilo per stripping: da STRIPRES
- Tipo particelle: D^-
- Densità nominale di corrente estratta (j_{nom}) pari a 293 A / m². Questo valore per la densità di corrente estratta permette di ottenere una corrente di D^- accelerati prossima al valore richiesto di 40 A (assumendo le perdite per stripping circa 30%). Per fare un'analisi questa corrente viene fatta variare tra 0,7 e 1,2 volte il suo valore nominale.
- Numero delle traiettorie considerate: 400
- Parametro CAVR: 20 (questo è un parametro SLACCAD che influenza la convergenza dell'analisi)
- Potenziali griglie:
 - $V_{PG} = 0$ V
 - $V_{EG} = 8.000-12.000$ V. Il potenziale di EG viene fatto variare tra 8000 V e 12000 V per fare un'analisi di sensibilità su questo aspetto. Una scansione

del potenziale di EG durante l'esperimento consente di trovare un miglior comportamento dell'ottica.

- $V_{AG1} = 209000 \text{ V}$
- $V_{AG2} = 409000 \text{ V}$
- $V_{AG3} = 609000 \text{ V}$
- $V_{AG4} = 809000 \text{ V}$
- $V_{GG} = 1009000 \text{ V}$

Nella simulazione numerica si sono definiti i potenziali elettrici prendendo come riferimento un potenziale nullo sulla sorgente di ioni negativi. Nell'esperimento reale la sorgente di ioni negativi sarà invece ad un potenziale di -100900 V rispetto a terra.

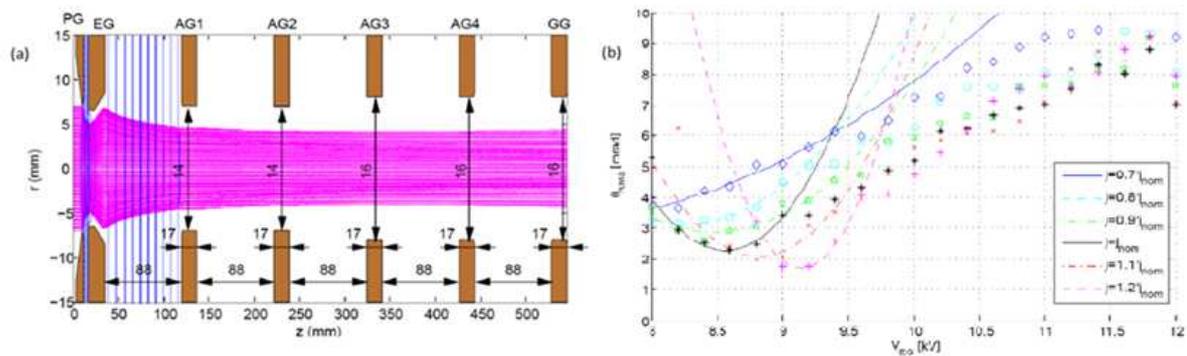


Figura 2.4 Traiettorie e le linee equipotenziali calcolati con SLACCAD con geometria EQ_GAPS_41; (a) acceleratore complessivo; (b) angolo di divergenza media del beamlet all'uscita dell'acceleratore in funzione della tensione di estrazione Grid e della densità di corrente estratta. La densità di corrente estratta è di 70%, 80%, 90%, 100%, 110% e 120% rispetto al suo valore nominale. Le tensioni PG, AG1, AG2, AG3, AG4 e GG sono fissate rispettivamente a 0, 209, 409, 609, 809 e 1009 kV, mentre la tensione EG viene fatta variare tra 8 e 12 kV.

2.3.2. Analisi magnetica con NBIImag

Il campo magnetico all'interno dell'acceleratore viene valutato con il codice NBIImag. Le principali fonti di campo magnetico sono i magneti incorporati all'interno delle griglie e la corrente che fluisce attraverso la PG e nei relativi conduttori. I magneti permanenti si trovano in tre diverse configurazioni:

- CESM (Magnet di Soppressione per Elettroni Co-Estratti), integrati nella griglia di estrazione, per sopprimere gli elettroni co-estratti. Questi magneti sono polarizzati alternativamente lungo la direzione del fascio e sono localizzati orizzontalmente tra le righe di apertura. In questo modo sono efficaci nella soppressione degli elettroni co-estratti deflettendoli sulla griglia stessa, ma deflettono anche gli ioni negativi (Criss-Cross Deflection Effect - CCDE).
- ADCM (Magnet Asimmetrici per la Compensazione della Deflessione), integrata nell' EG e disposti in verticale per compensare il CCDE.
- SESM (Magnet per la Soppressione degli Elettroni prodotti da Stripping) incorporata nell' AG1, AG2, AG3 e AG4, per sopprimere gli elettroni prodotti da ioni negativi a seguito di reazioni di stripping, prima che acquistino troppa energia.

La Figura 2.5 mostra tutti i magneti considerati nell'analisi (indicando anche la polarizzazione di ciascun magnete), mentre la figura 2.6 è una vista focalizzata sui magneti incorporati nella EG (CESM e ADCM). I magneti considerati in questa analisi corrispondono ad un singolo gruppo di beamlet (con 5x16 aperture). Il campo magnetico lungo la direzione y (A), fornendo una deflessione degli elettroni e ioni lungo il piano xz , è il più importante per valutare l'efficacia della configurazione magnetica; viene studiato in quattro diversi percorsi (corrispondenti a quattro fascetti) ed è tracciato in figura 2.7. I quattro percorsi corrispondono a:

1. beamlet centrale-centrale (giallo)
2. beamlet destro centrale (blu)
3. beamlet centrale-superiore (rosso)
4. beamlet destro superiore (verde)

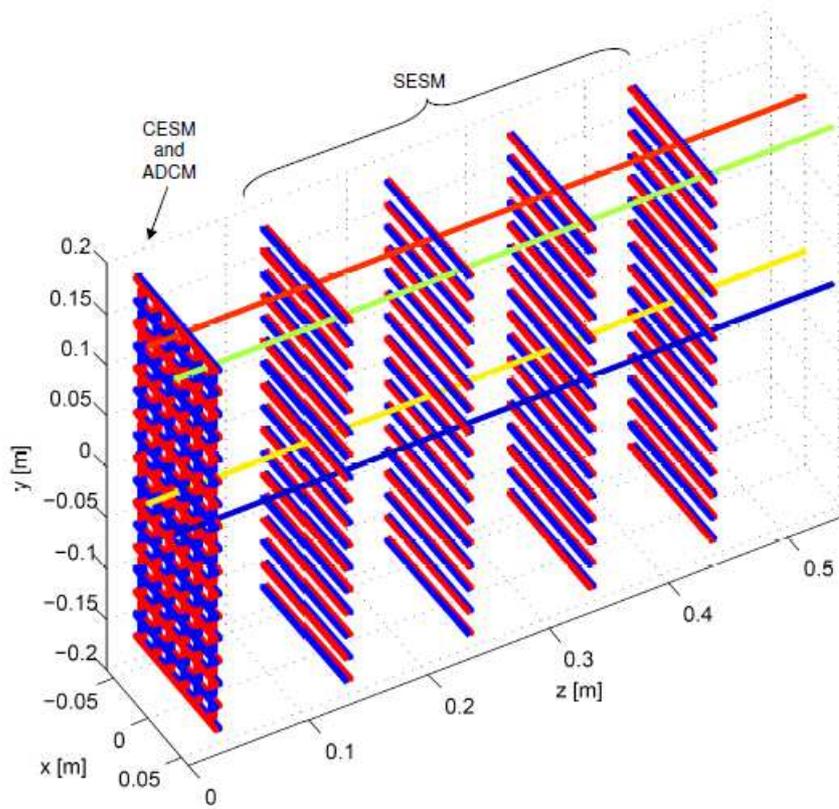


Figura 2.5 Geometria e polarizzazione di CESH, ADCM, SESM

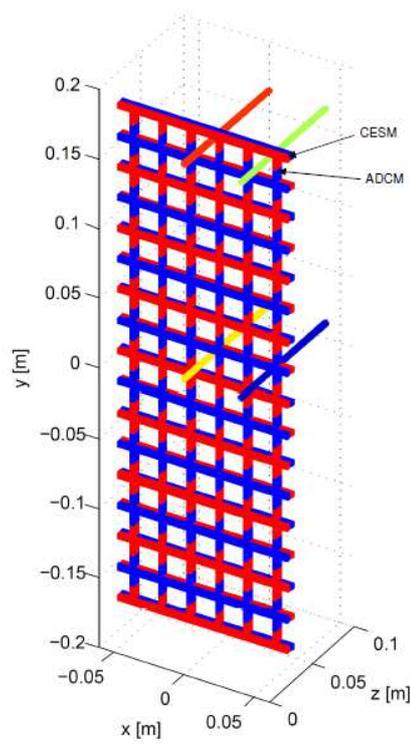


Figura 2.6 Geometria e polarizzazione di CESH e ADCM

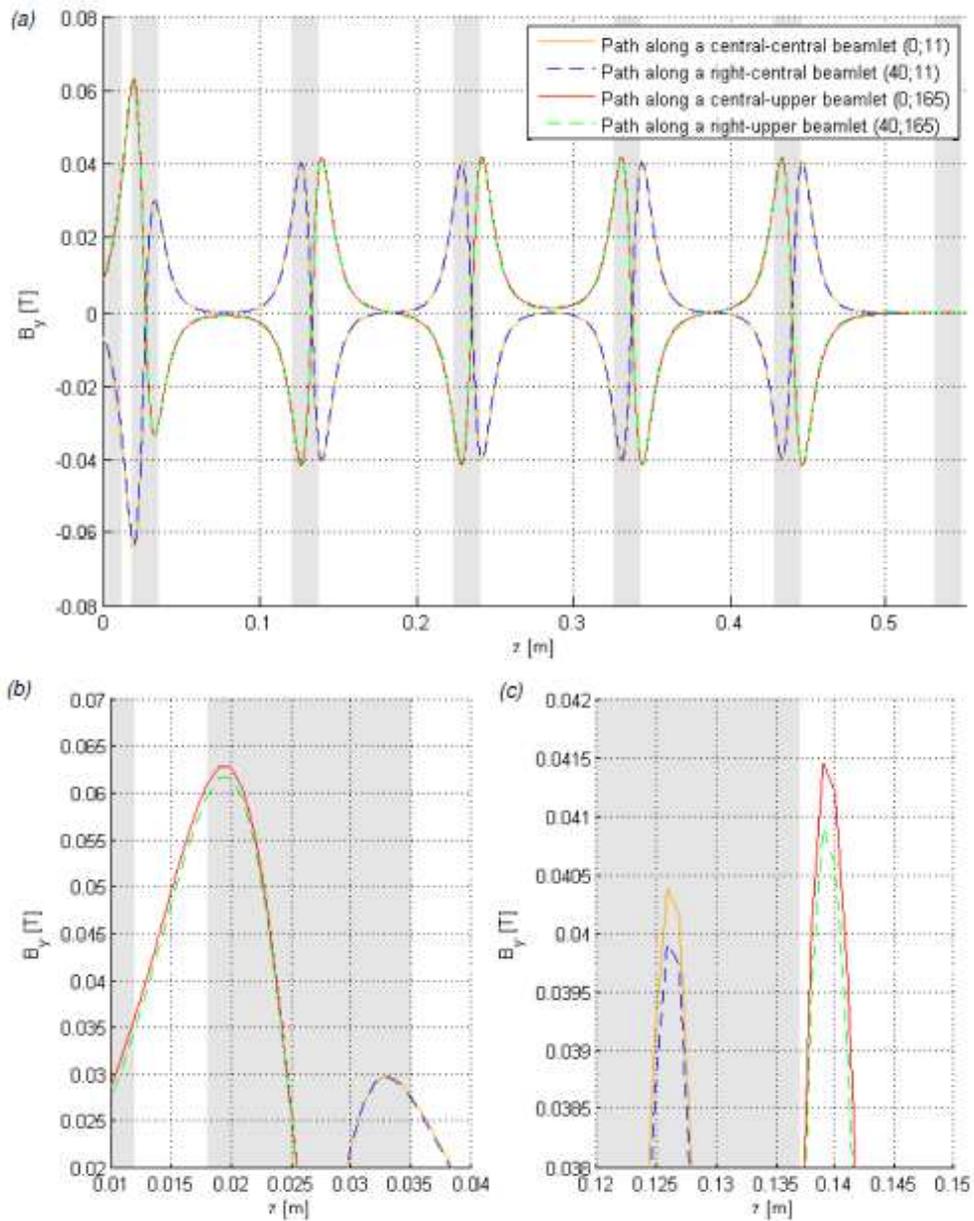


Figura 2.7 Il campo magnetico generato da CESH, ADCM e SESM calcolato con NBIImag lungo i quattro percorsi considerati nella geometria EQ_GAPS_40: (a) trama generale; (B) focalizzazione sui picchi di EG; (C) focalizzazione sui picchi di AG1.

2.3.3. Ottimizzazione dell'allineamento con ALIGN

L'allineamento tra le corrispondenti aperture delle griglie (PG, EG, AG1, AG2, AG3, AG4 e GG) è un parametro importante per la qualità del fascio di ioni in uscita dall'acceleratore. Per questo motivo, la deformazione nel piano (lungo gli assi x e y) di tali griglie deve essere valutata con buona precisione e in differenti scenari operativi. Il codice ALIGN, sviluppato al Consorzio RFX, ha lo scopo di calcolare lo spostamento orizzontale delle aperture, che è quello più critico (infatti lo spostamento verticale è

sempre più piccolo). È un codice iterativo analitico, che tiene conto della variazione delle proprietà dell'acqua di raffreddamento e del rame al variare della temperatura.

2.3.4. Analisi termomeccanica con ANSYS

I requisiti di allineamento sono considerati i più critici, altri requisiti sono temperatura, stress, tensione e resistenza a fatica fuori dal piano di deformazione. La geometria e la forma dei canali di raffreddamento devono essere ottimizzati per soddisfare diversi requisiti differenti:

- Temperatura di picco sulle griglie più bassa possibile, oltre i 300 °C le proprietà termo-meccaniche del rame sono sensibilmente peggiorate e oltre i 220 °C i magneti SmCo perdono irreversibilmente la loro magnetizzazione;
- Picchi di stress più bassi possibile in modo da soddisfare l'ITER DSC-IC (progettazione strutturale Criteri per Componenti In-Vessel) [48];
- Vita a fatica (valutata sulla base dei picchi di deformazione) più lunga possibile, e comunque da soddisfare i criteri di ITER [13].

Per fare questo, le griglie sono state studiate per mezzo di modelli tridimensionali col codice ad elementi finiti ANSYS. I modelli rappresentano una regione di griglie con larghezza intera e altezza ridotta (due canali di raffreddamento e due righe di apertura). Le proprietà meccaniche del rame elettrodepositato (da utilizzare per la fabbricazione di queste griglie) sono state valutate in funzione della temperatura durante una campagna di prova specifica. In particolare, la proprietà elastica del rame elettrodepositato è stata misurata in funzione della temperatura e implementata nel codice. Questo è particolarmente importante perché i carichi sono quelli prevalentemente termici e il rame è un materiale duttile.

In primo luogo, l'analisi termica viene effettuata per valutare la temperatura in ogni punto. La velocità dell'acqua di raffreddamento nel canale viene considerata uguale a valori di riferimento provenienti dall'ottimizzazione dell'allineamento (4 m/s per il PG, 5 m/s per l'EG, 10 m/s per le altre reti). I carichi termici sono calcolati con EAMCC [12].

2.4. Risultati finali delle analisi

Plasma Grid

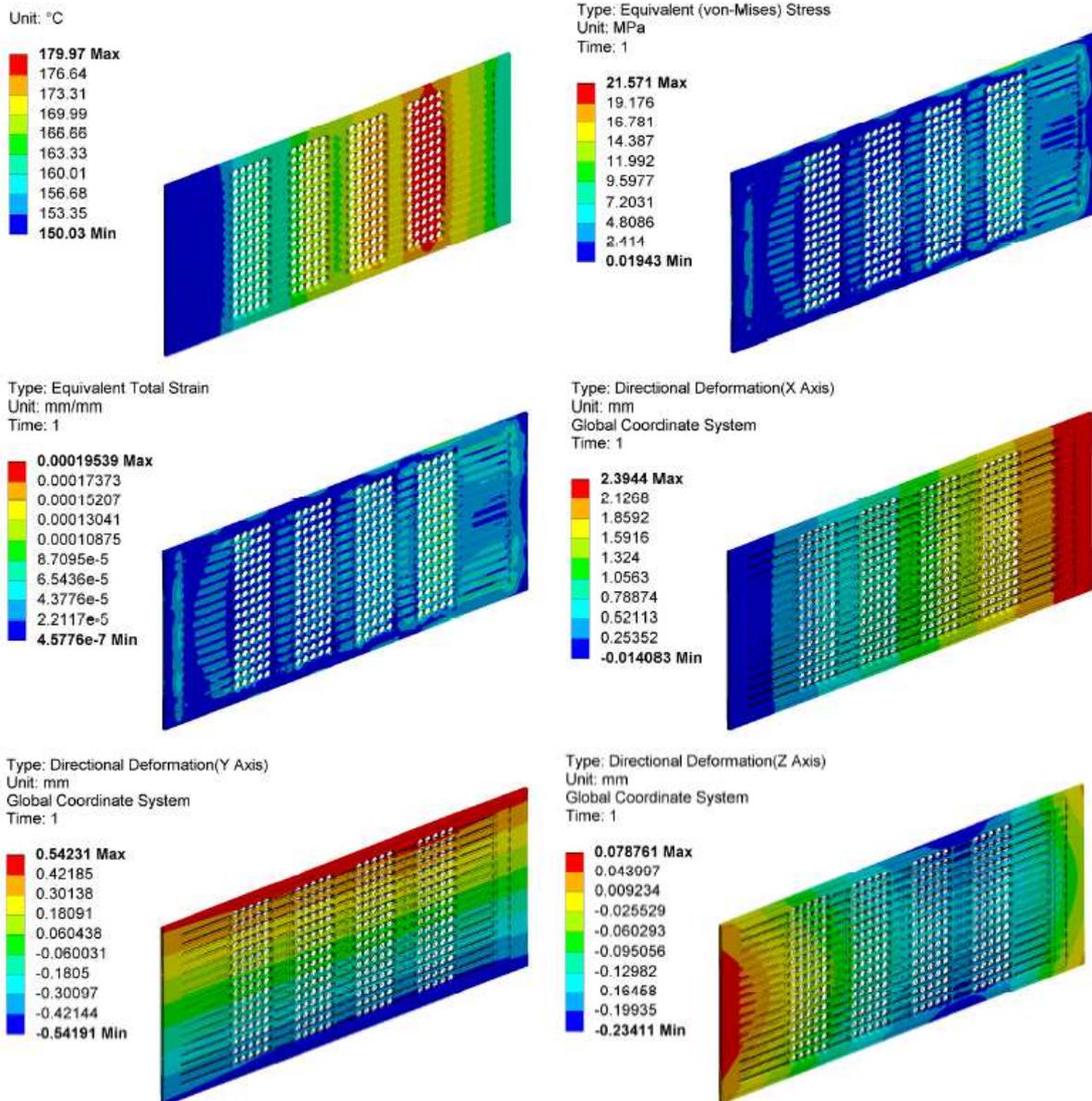


Figura 2.8 Descrizione della Plasma Grid, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Extraction Grid

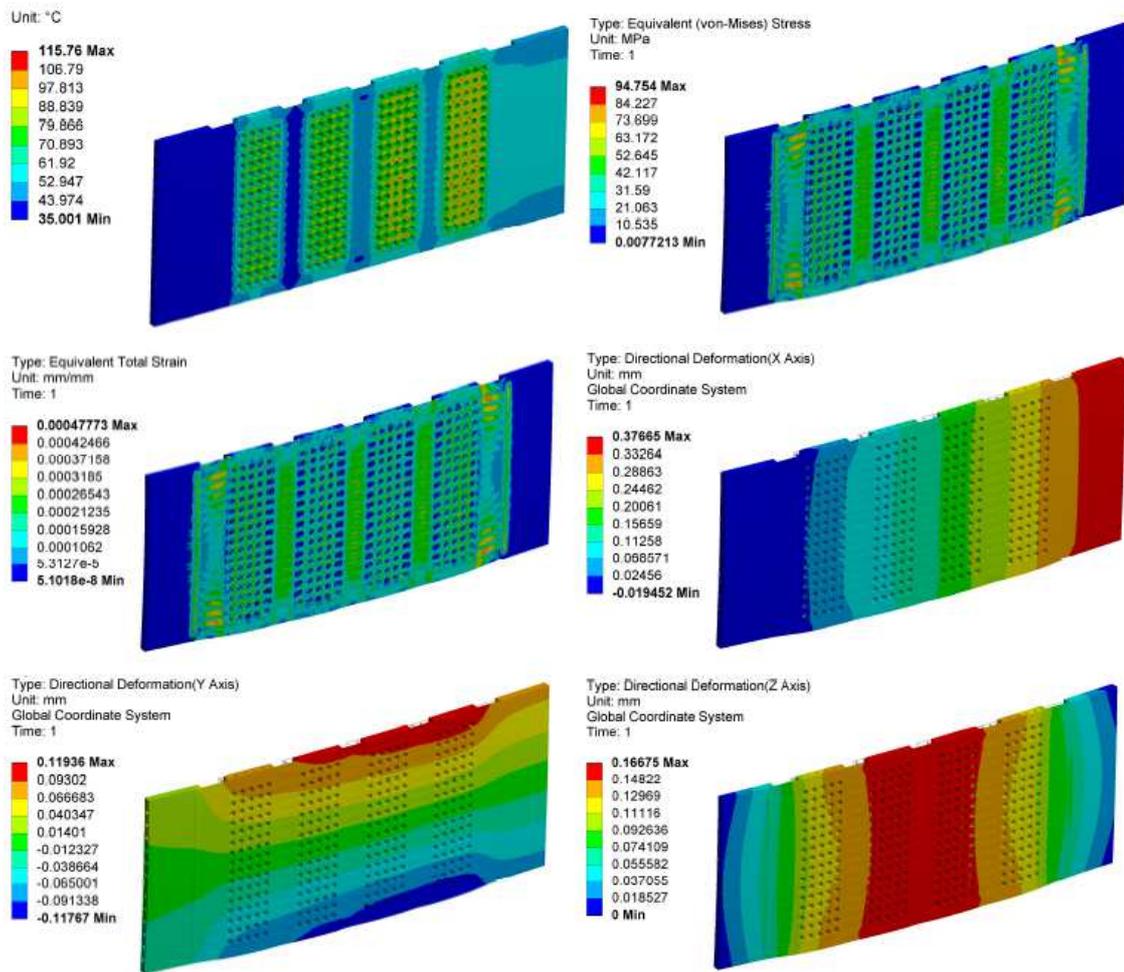


Figura 2.9 Descrizione della Extraction Grid, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Accelerator Grid 1

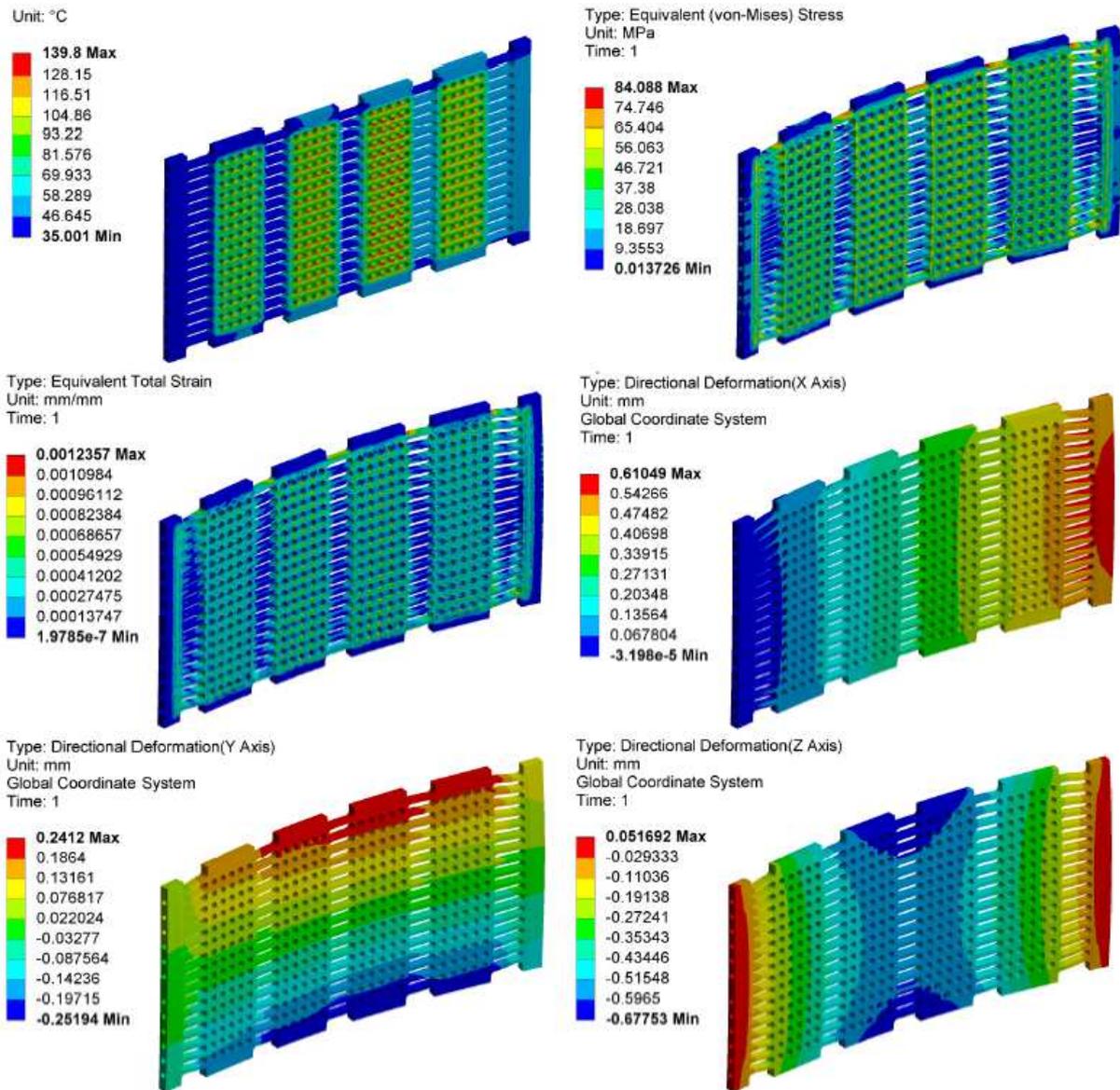


Figura 2.10 Descrizione della Accelerator Grid #1, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Accelerator Grid 2

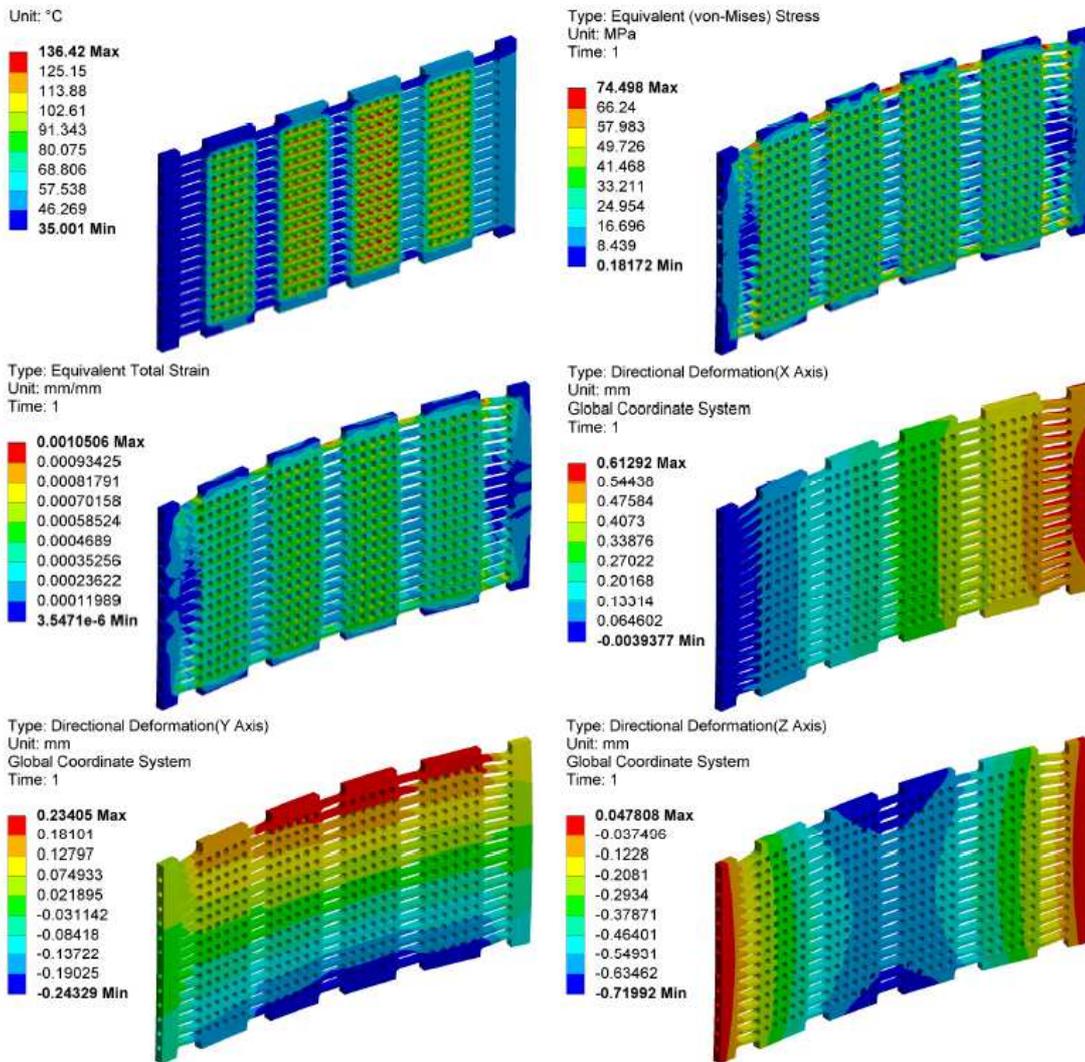


Figura 2.11 Descrizione della Accelerator Grid #2, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Accelerator Grid 3

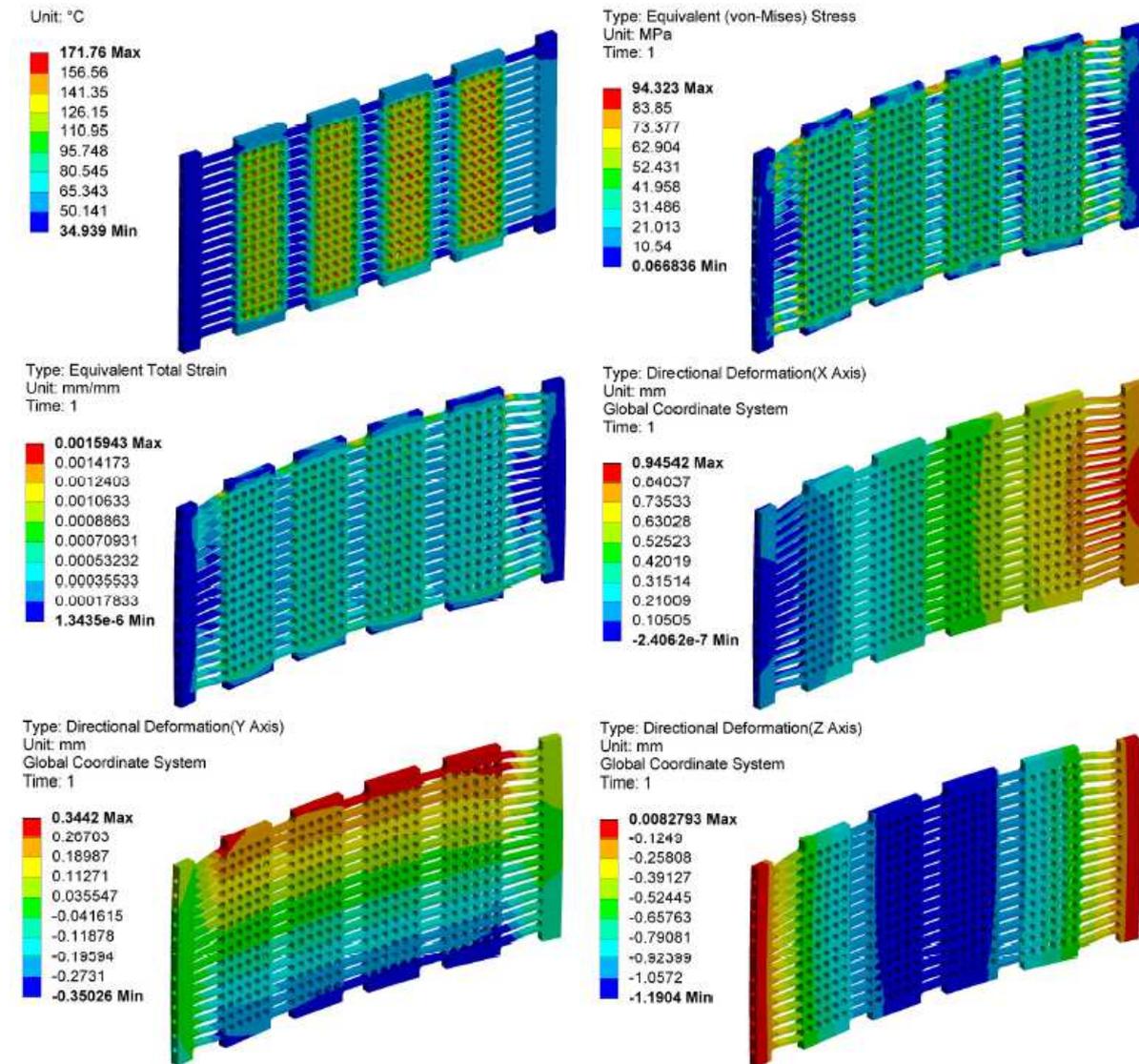


Figura 2.12 Descrizione della Accelerator Grid #3, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Accelerator Grid 4

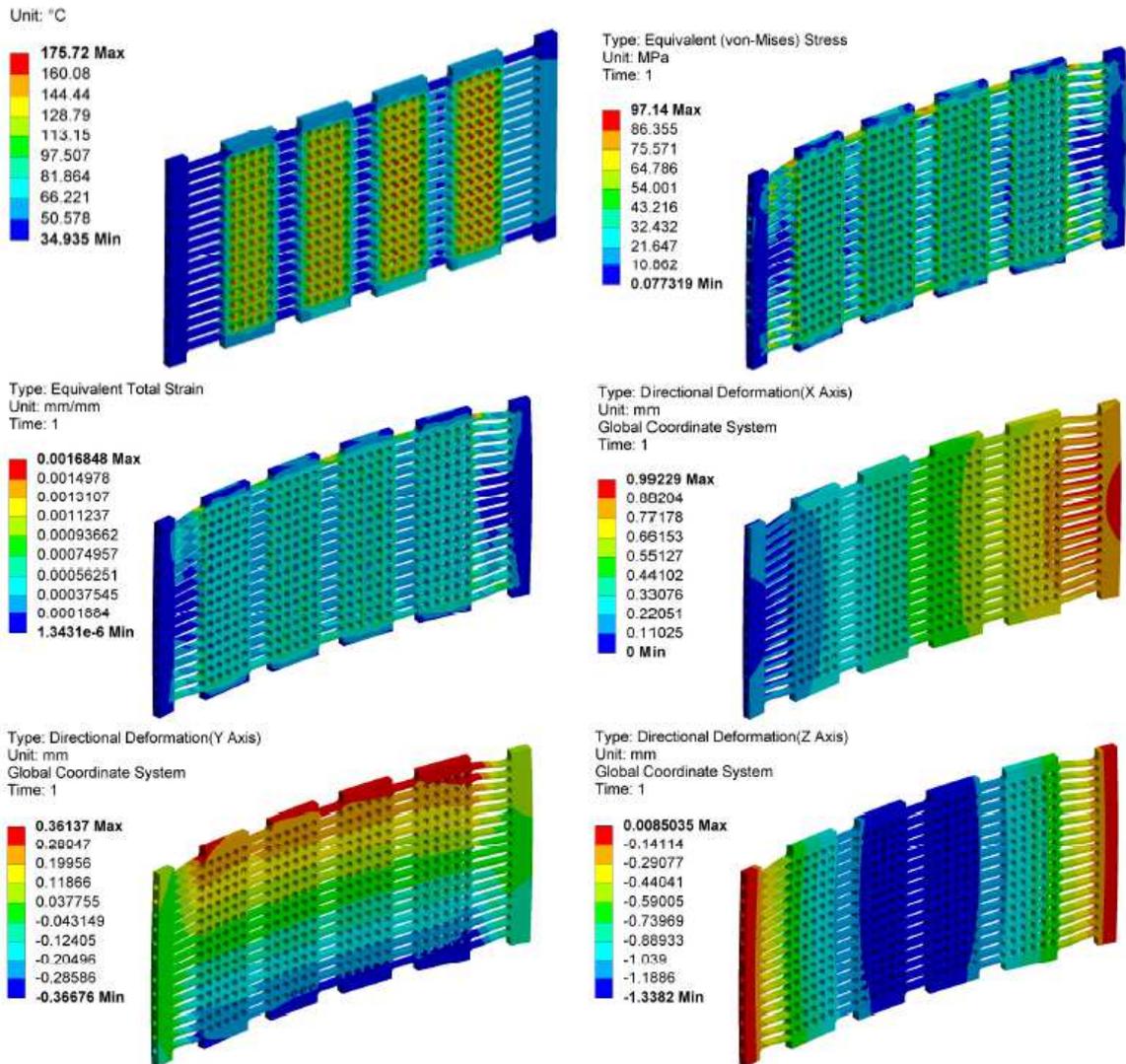


Figura 2.13 Descrizione della Accelerator Grid #4, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Ground Grid

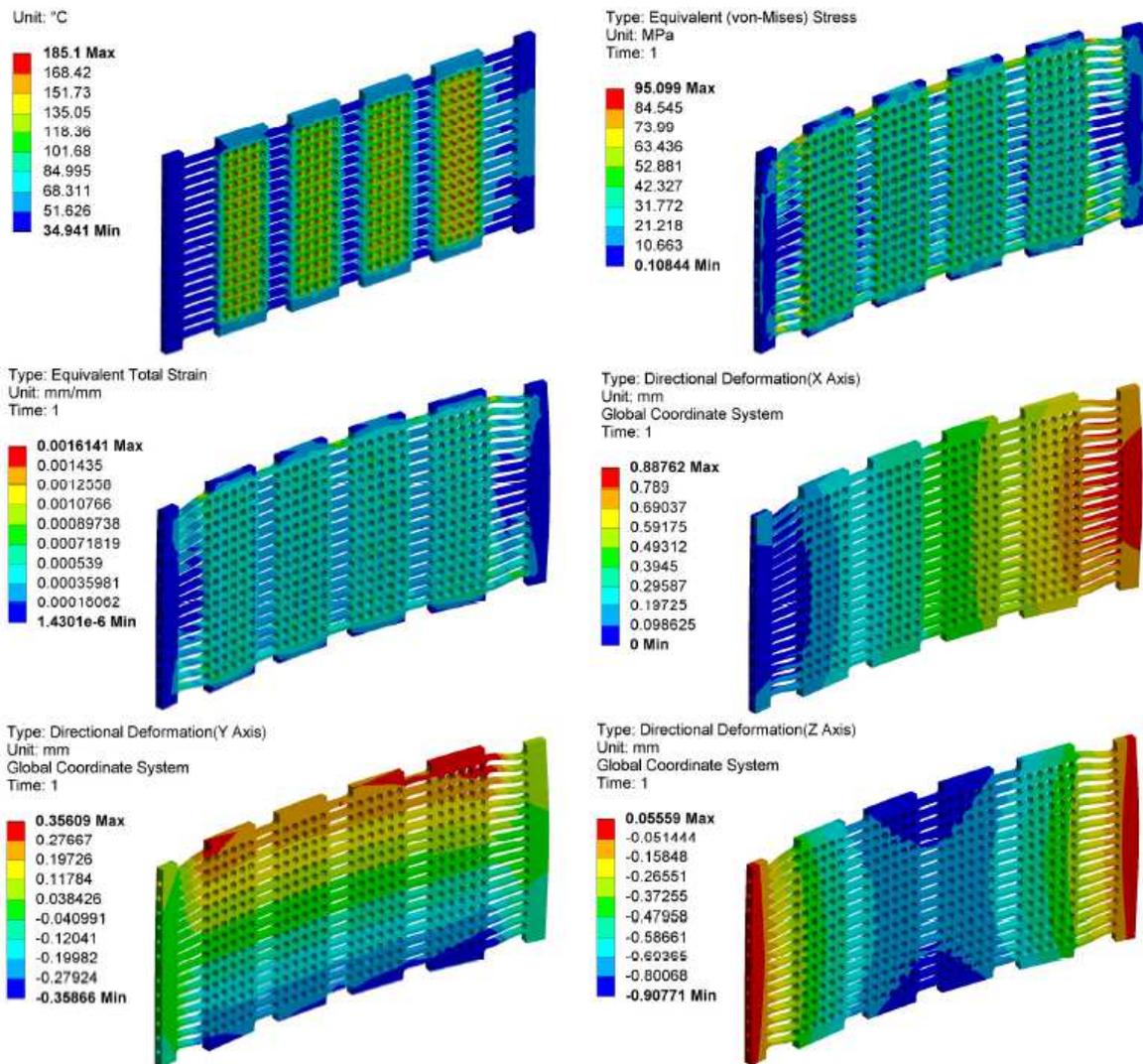


Figura 2.14 Descrizione della Ground Grid, sono considerati condizioni di funzionamento nominali e flusso di raffreddamento nominale

Sebbene queste simulazioni forniscano delle stime attendibili è necessario avere la possibilità di monitorare in tempo reale l'andamento della temperatura nelle griglie, perciò devono essere integrate con un sistema di misura, ma le condizioni d'esercizio complicano questo lavoro.

Considerando che le griglie si trovano ad un alto potenziale elettrico non si possono utilizzare delle termocoppie dato che sarebbe troppo complicato portare al potenziale di terra il segnale; inoltre nell'iniettore è stato creato il vuoto e quindi applicare un sensore sulla superficie della griglia tramite collanti non sarebbe una soluzione duratura. Una soluzione fattibile potrebbe essere quella di inserire il sensore direttamente all'interno della griglia, considerando però le esigue dimensioni a nostra disposizione il sensore deve essere molto piccolo.

Per riuscire a rispettare tutti questi requisiti si possono utilizzare dei sensori in fibra ottica, i quali hanno un diametro anche inferiore al millimetro, sono composti da materiale elettricamente isolante e non risentono di disturbi elettromagnetici.

CAPITOLO 3

Sensori di temperatura in fibra ottica

3.1. Le fibre ottiche

Le fibre ottiche sono filamenti di materiale dielettrico trasparente (come il vetro, il quarzo o i polimeri), che permettono di trasmettere al loro interno un campo elettromagnetico a frequenza ottica (tipicamente con lunghezza d'onda compresa tra 380 e 750 nm) con perdite di potenza estremamente limitate. La trasmissione del segnale è possibile andando a modificare l'indice di rifrazione della parte più esterna della fibra (chiamata cladding), ottenendo così una superficie di discontinuità rispetto al nucleo centrale (core), all'interno del quale resta confinato il segnale grazie al fenomeno della riflessione totale. Ogni singola fibra ottica è infatti composta da strati concentrici.

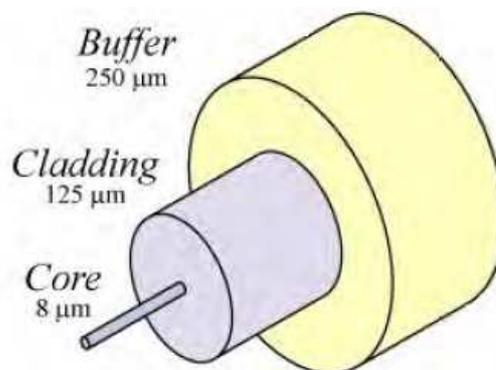


Figura 3.1 Struttura di una fibra ottica

Il core presenta dimensioni differenti a seconda che si tratti di fibre monomodali, ossia che permettono la trasmissione di un solo raggio luminoso o modo di propagazione al proprio interno, o fibre multimodali, nel caso sia possibile la trasmissione di più modi di propagazione. In particolare le fibre monomodali hanno un diametro del core compreso tra gli 8 e i 10 µm, mentre per le fibre multimodali il diametro del core risulta essere maggiore e compreso tra i 50 e i 62,5 µm. Il cladding invece presenta un diametro di circa 125 µm per le fibre standard.

Le fibre ottiche monomodali di ultima generazione, non ancora di largo impiego, possono presentare diametri del cladding minori, anche di 50, 60, 80 μm , a parità di diametro del core.

In figura 3.2 viene riportata una rappresentazione delle due differenti tipologie di fibre ottiche.

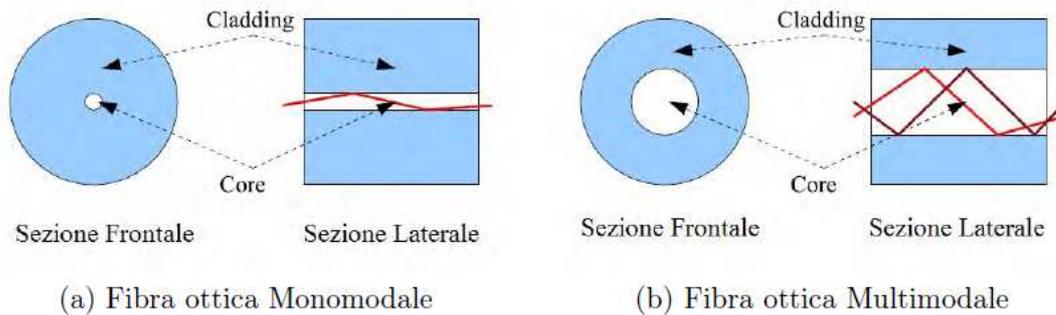


Figura 3.2 Confronto tra fibre ottiche monomodali e multimodali

Per offrire una migliore resistenza strutturale e protezione della fibra, in fase di produzione la si riveste con uno strato detto buffer o coating, di diametro variabile a seconda del materiale utilizzato.

3.1.1. Teoria delle fibre ottiche

Il fenomeno della propagazione della luce all'interno delle fibre ottiche, essendo i fenomeni di diffrazione trascurabili, può essere studiato nell'ipotesi di validità delle leggi che regolano l'ottica geometrica. Le fibre ottiche trasmettono il segnale sfruttando il fenomeno della riflessione totale interna (TIR) in cui i raggi di luce passando attraverso un'interfaccia tra due mezzi trasparenti, caratterizzati da un indice di rifrazione differente, subiscono il fenomeno della rifrazione e cambiano direzione secondo la legge di Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

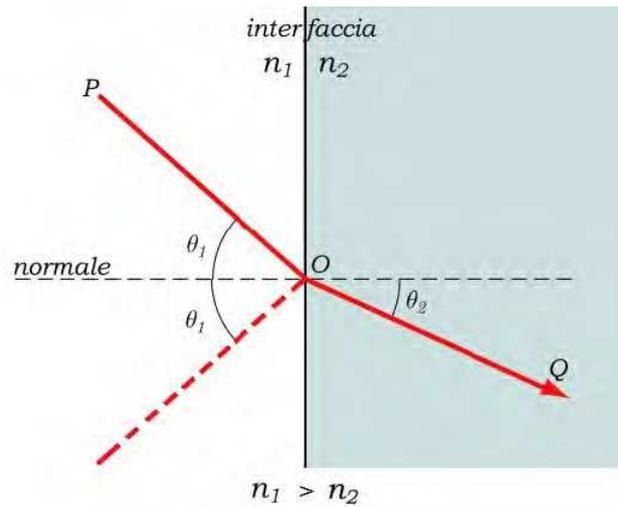


Figura 3.3 Legge di Snell

Quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione maggiore a uno minore, così come avviene nelle fibre ottiche, esiste un angolo limite $\theta_1 = \theta_{cr}$ in corrispondenza del quale $\theta_2 = 90^\circ$, ossia non vi è più la presenza del raggio rifratto. Per la determinazione dell'angolo limite vale la seguente relazione:

$$\sin \theta_{cr} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

In corrispondenza di un angolo di incidenza maggiore o uguale a θ_{cr} avviene la riflessione totale interna.

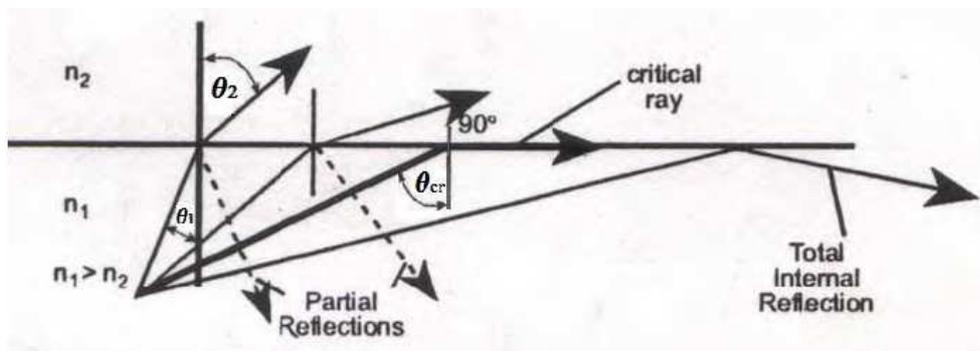


Figura 3.4 Riflessione totale interna

Risulta pertanto essenziale trasmettere la luce all'interno della fibra in modo che l'angolo di incidenza interno verifichi la suddetta condizione e il segnale, rimanendo confinato nel nucleo (core), possa propagarsi per successive riflessioni fino a raggiungere il rivelatore. I raggi parzialmente rifratti, infatti, perdono potenza ad ogni riflessione e quindi scompaiono rapidamente. Considerando un raggio proveniente dall'esterno della fibra, il massimo angolo di incidenza che garantisce che la luce rifratta subisca il fenomeno della riflessione totale interna viene definito angolo di accettazione θ_a . L'insieme di tutte le possibili traiettorie incidenti aventi angolo inferiore o uguale a quello di accettazione, costituisce il cono di accettazione.

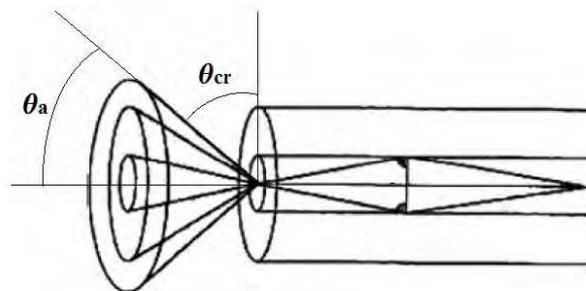


Figura 3.5 Cono di accettazione

Durante l'utilizzo di fibre ottiche bisogna prestare attenzione ai raggi di curvatura, poiché raggi di curvatura ridotti possono generare angoli incidenti inferiori a quello critico, provocando perdite di potenza. [14]

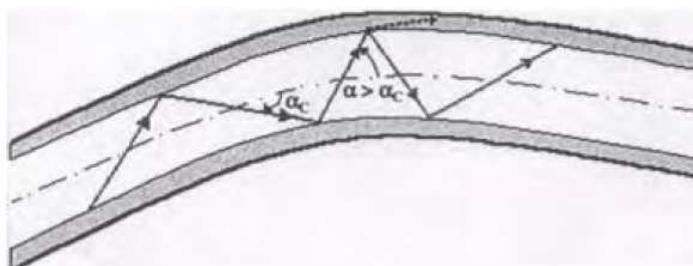


Figura 3.6 Raggio di curvatura eccessivo

3.2.Sensori fotonici

Nonostante il suo principale utilizzo nel campo delle telecomunicazioni, la fibra ottica si presta a molteplici impieghi. Una posizione di rilievo è occupata dalla sensoristica fotonica, campo in ampia espansione e con grandissime potenzialità. Altri settori in cui è presente sono: il controllo e l'automazione dei processi industriali, il settore aerospaziale e quello dei trasporti, le applicazioni di diagnostica medica e le biotecnologie, l'ingegneria civile e geotecnica ed il monitoraggio ambientale.

Ciò è dovuto al fatto che le tecnologie utilizzate nei sensori in fibra ottica hanno una serie di vantaggi che li rendono interessanti per un ampio range di applicazioni.

Infatti sono caratterizzati da [15,16]:

- dimensioni compatte e leggerezza;
- sono elettricamente isolanti;
- basso consumo di potenza;
- elevata banda di trasmissione, data la lunghezza d'onda della luce è possibile trasmettere un segnale che contiene molte informazioni;
- alta resistenza elettrica, quindi è possibile usare fibre vicino ad oggetti ad alto potenziale elettrico, o tra dispositivi a potenziale diverso;
- immunità all'interferenza elettromagnetica;
- immunità alle fluttuazioni di potenza lungo il percorso ottico;
- alta sensibilità e precisione;
- resistenza agli ambienti ostili;
- semplicità di *multiplexing* lungo la stessa fibra;
- facilità di integrazione nei sistemi ottici di telecomunicazione;
- basso costo;

Tuttavia, è necessario nominare anche gli aspetti negativi da cui non sono esenti i sensori fotonici [17]:

- necessità di isolare i sensori da parametri indesiderati;
- disponibilità di sorgenti ottiche;
- costo e disponibilità della strumentazione *ad hoc*;
- necessità di controllare la stabilità a lungo termine.

3.2.1. Classificazione

Una prima distinzione tra sensori fotonici si basa sul ruolo della fibra ottica all'interno del dispositivo e per questo si può parlare di sensori:

ESTRINSECI: la fibra ottica ha il compito di guidare l'informazione dal/al sensore;

INTRINSECI: la fibra ottica costituisce anche l'elemento sensibile del dispositivo.

I sensori possono essere distinti anche in:

CONCENTRATI: eseguono la misura su un'area ridotta;

MULTIPUNTO: eseguono la misura su un'area più ampia, ponendo in serie elementi concentrati;

DISTRIBUITI: eseguono la misura su aree molto ampie con continuità, sfruttando effetti a cui è soggetta naturalmente il materiale della fibra (la silice).

Grazie alla possibilità di integrarli all'interno dei sistemi di comunicazione, il meccanismo di interrogazione del sensore risulta particolarmente semplice.

Si illustrano i due possibili schemi di interrogazione:

1. in trasmissione:



Figura 3.7 Schema di interrogazione in trasmissione

2. in riflessione:

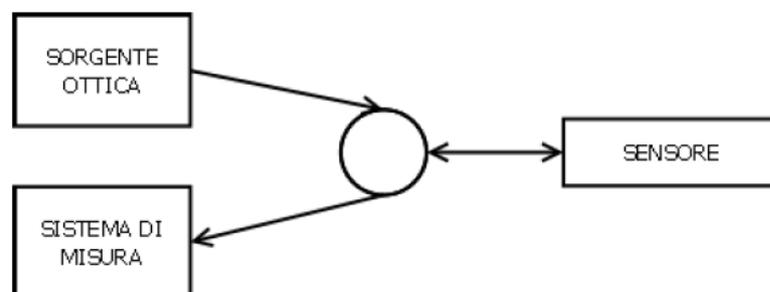


Figura 3.8 Schema di interrogazione in riflessione

3.2.2. Principio di funzionamento

Grazie ai sensori fotonici si possono facilmente misurare grandezze fondamentali, quali temperatura, tensione meccanica, pressione. Il principio di funzionamento è basato sulla modulazione, per mezzo della quantità da misurare, di uno o più parametri del segnale ottico inviato al sensore: intensità, fase, polarizzazione, lunghezza d'onda, distribuzione spettrale. Il segnale così alterato è trasmesso ad un detector che registra queste variazioni con continuità. Conoscendo le caratteristiche dei segnali in ingresso ed in uscita, si deduce la funzione di trasferimento del sistema. Da qui si risale alla grandezza incognita, in quanto appare esplicitamente nella funzione di trasferimento (Figura 3.9).



Figura 3.9 Schema a blocchi di un sensore fotonico

3.2.3. Applicazioni

Si possono individuare una serie di "categorie" di applicazioni:

- monitoraggio distribuito di strutture civili o di reti di trasporto, ad esempio per il monitoraggio statico delle strutture (ponti, viadotti, gallerie), grazie anche alla bassa attenuazione del segnale ed alla scarsa manutenzione necessaria;
- monitoraggio integrato di un numero elevato di grandezze in sistemi quali velivoli, imbarcazioni o auto da corsa, con necessità di ridurre i pesi e le interferenze tra i diversi sistemi installati a bordo;
- misurazioni di grandezze o in ambienti verso i quali il sistema di misura non deve introdurre alcuna alterazione: è il caso della diagnostica medica, in cui si utilizzano per gastroscopia, broncoscopia, chirurgia laser, angioplastica. Con i sensori di temperatura si misura l'ipotermia o si effettua il monitoraggio cardiaco; i sensori di pressione sono di ausilio nelle diagnosi cardiovascolari o intracraniche e, infine, i sensori chimici (di pH, pO₂, pCO₂) rendono possibili indagini su problemi respiratori e metabolici o sul contenuto di ossigeno del

sangue e dei tessuti. Inoltre in questa categoria rientrano i sensori per misurazioni di inquinamento elettromagnetico ambientale, per le quali sono commercializzati soprattutto sensori di tipo estrinseco;

- misurazioni da effettuare in ambienti particolarmente ostili, o nei quali misurazioni con sensori tradizionali sono impossibili. Rientrano in questa categoria le misurazioni da effettuare in prossimità di sorgenti di forti campi elettromagnetici, quali i grossi trasformatori che si utilizzano nelle reti di trasformazione dell'energia o antenne, che rendono inutilizzabili i sensori che richiedono connessioni con conduttori metallici, oppure le misurazioni in presenza o all'interno di pozzi petroliferi o materiali esplosivi o infiammabili, che è pericoloso esporre a differenze di potenziale.

3.3. Tipologie di sensori in fibra ottica

Il modo più naturale per misurare le variazioni di temperatura è quello di studiare il comportamento della fibra ottica sottoposta ad un gradiente termico.

3.3.1. Interferometro Fabry-Pèrot

L'interferometro di Fabry-Pérot è costituito da una cavità delimitata da due superfici piane sufficientemente riflettenti. La distanza tra queste due superfici, detta lunghezza della cavità, determina a quali lunghezze d'onda, a seguito delle riflessioni multiple, i segnali escono dalla cavità sommandosi in fase (interferenza costruttiva) e quali invece escono sommandosi in opposizione di fase (interferenza distruttiva). La lunghezza della cavità è un multiplo intero delle lunghezze d'onda che risuonano al proprio interno, dunque esiste una stretta correlazione tra la dimensione geometrica della cavità e la risposta spettrale della stessa.

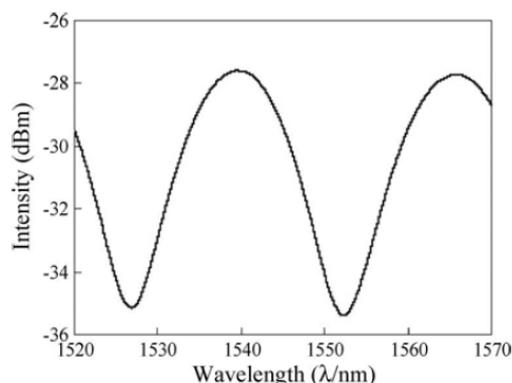


Figura 3.10 Spettro di interferenza di una cavità FP

Come tutti i materiali, anche la silice che costituisce la fibra ottica è soggetta a dilatazione termica, pertanto la distanza tra le due superfici riflettenti cambia con la temperatura provocando una variazione della risposta spettrale. Dimensionando opportunamente la lunghezza della cavità Fabry-Pérot e variando il materiale contenuto al proprio interno è dunque possibile realizzare un elemento sensibile alla temperatura. Affinché esso diventi un sensore necessita di un sistema di misurazione a monte o a valle. La configurazione più semplice prevede l'interrogazione del sensore attraverso una sorgente a banda larga; lo spettro della riflessione viene catturato da un analizzatore di spettro ottico (Optical Spectrum Analyzer - OSA) tramite un circolatore (od un accoppiatore) ed è quindi disponibile per essere elaborato numericamente allo scopo di fornire una misura di temperatura (assoluta o relativa), una volta note le caratteristiche dell'elemento sensibile (in particolare il coefficiente di dilatazione termica).

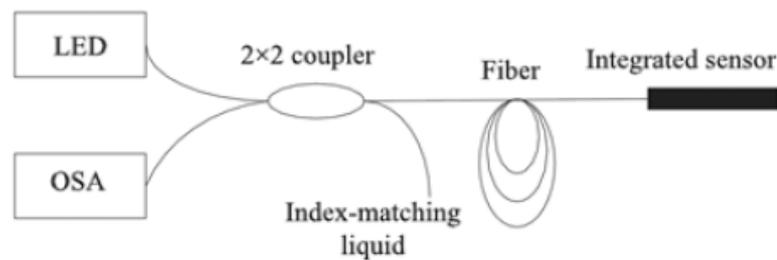


Figura 3.11 Setup del sistema di interrogazione di un sensore FP in riflessione

Ci sono diverse soluzioni per la realizzazione della cavità: la semplice giunzione di una fibra multimodale (oppure una fibra microstrutturata) tra due fibre a singolo modo, la giunzione di fibra microstrutturata alla testa di una fibra monomodale [22], la creazione di una cavità d'aria tra due fibre monomodali mediante avvicinamento delle stesse tramite un connettore di tipo meccanico, la creazione di una cavità tramite un femtolaser ecc.

E' sufficiente dunque modificare l'indice di rifrazione in una zona del mezzo trasmissivo, in modo tale da formare due discontinuità sul materiale, generando così due interfacce di riflessione (il coefficiente di riflessione può essere aumentato scegliendo opportunamente i materiali). Quella degli interferometri di Fabry-Pérot è la categoria di sensori maggiormente utilizzata, grazie alla semplicità di realizzazione.

Poiché anche la tensione meccanica a cui è sottoposta la fibra ottica si ripercuote sulla lunghezza della cavità, spesso questi sensori vengono utilizzati per misurare simultaneamente temperatura e forza/allungamento.

3.3.2. Interferometro Mach-Zehnder e Michelson

Tali interferometri si basano sulla differenza di cammino ottico (Optical Path Difference - OPD), solitamente dovuta alla propagazione dei modi nel nucleo e nel mantello che, avendo indici di rifrazione diversi, inducono una differenza nelle costanti di propagazione e quindi generano battimento [23].

I sensori ad interferometro Mach-Zehnder e Michelson sono realizzati tipicamente giuntando fibre diverse (per esempio una fibra a singolo modo ed una fibra bucata) con un disallineamento tra i nuclei, in modo da eccitare contemporaneamente i modi del nucleo e del mantello. In alternativa possono essere utilizzate fibre a doppio core, dove la differenza nella costante di propagazione nei due nuclei è dovuta alla naturale produzione della fibra stessa.

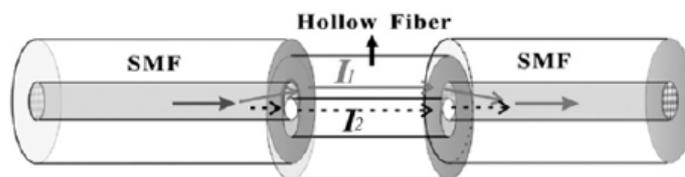


Figura 3.12 Interferometro MZ realizzato giuntando una fibra forata con disallineamento

Anche in questo caso il modo più comune per l'interrogazione dei sensori è la rilevazione della figura d'interferenza tramite analizzatore di spettro ottico e sorgente a banda larga.

3.3.3. Scattering di Brillouin

Lo scattering di Brillouin è costituito da un fascio che si propaga in una direzione diversa rispetto al segnale di ingresso e ad una frequenza differente da esso. Tale differenza di frequenza, nota come shift di Brillouin, è direttamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo trasmissivo, il quale è a sua volta dipendente dalla

temperatura. Di conseguenza è possibile realizzare un sensore di temperatura misurando lo shift di Brillouin dal fascio retroriflesso generato dall'invio di un impulso in fibra tramite un laser [24-25].

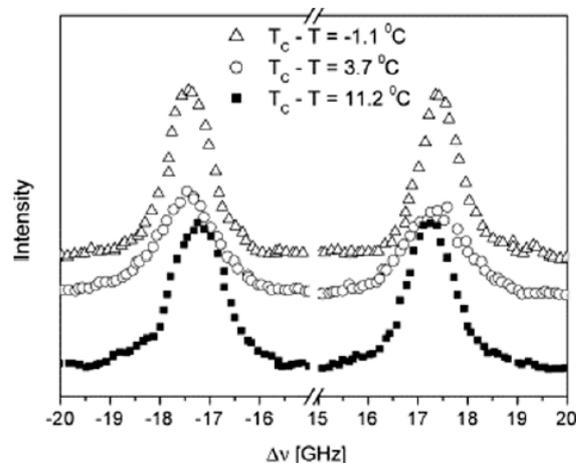


Figura 3.12 Shift di Brillouin al variare della temperatura

3.3.4. Sensori con cristallo in GaAs

Combinazioni di particolari cristalli (Arseniuro di Gallio) con fibre comuni (a singolo modo) generano delle situazioni di interferenza modale strettamente dipendenti dalla dilatazione termica e quindi dalla temperatura.

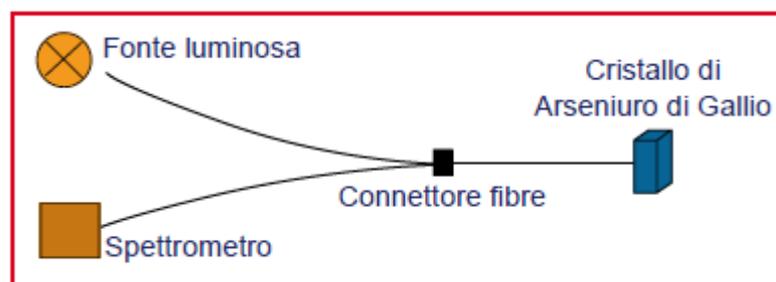


Figura 3.13 Interferometro realizzato giuntando una fibra microstrutturata tra due fibre monomodali

Una sorgente di luce, attraverso una fibra ottica, eccita un cristallo in GaAs posto sulla punta della stessa che si trova alla temperatura da rilevare. Il cristallo riflette indietro la luce attraverso la fibra ottica con uno sfasamento in frequenza proporzionale alla temperatura del cristallo. Il cristallo GaAs fissato sulla punta della sonda diventa

trasparente a una lunghezza d'onda superiore a 850 nm. Tale soglia di trasparenza cambia al variare della temperatura di 0,4 nm per grado Kelvin. [18]

3.3.5. Reticolo di Bragg

I reticoli di Bragg (Fiber Bragg Grating - FBG) vengono realizzati mediante un'opportuna modulazione locale dell'indice di rifrazione del core di una fibra ottica fotosensibile, effettuata per mezzo di una sorgente energetica, come i raggi UV.

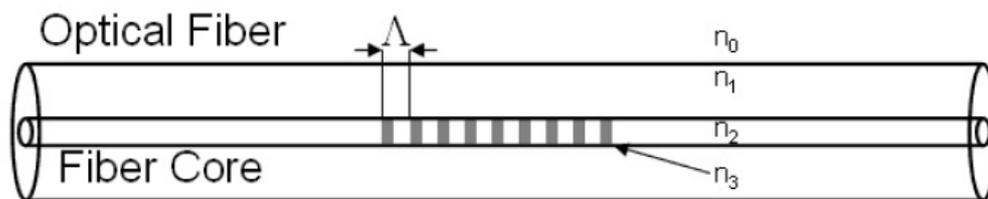


Figura 3.14 Reticolo di Bragg

Il tratto di fibra ottica modificato ha la funzione di filtro, permettendo quindi di selezionare delle particolari lunghezze d'onda. La luce viaggiando attraverso la fibra ottica viene in parte riflessa in corrispondenza di ogni piccola variazione dell'indice di rifrazione. Per un piccolo range di lunghezze d'onda, i raggi luminosi riflessi agiscono costruttivamente percorrendo a ritroso la fibra ottica. La riflessione massima avviene per la lunghezza d'onda chiamata lunghezza d'onda di Bragg λ_B , ricavabile attraverso l'equazione fondamentale di Bragg, che la relaciona al periodo delle frange (passo) del reticolo Λ e all'indice di rifrazione effettivo n_{eff} , ($n_{eff} = n_{co} \sin \theta$ dove n_{co} è l'indice di rifrazione del nucleo e θ è l'angolo di incidenza della luce).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.2)$$

Il contributo additivo dei raggi luminosi riflessi avviene quindi solo per quelle lunghezze d'onda legate al passo del reticolo e al particolare indice di rifrazione.

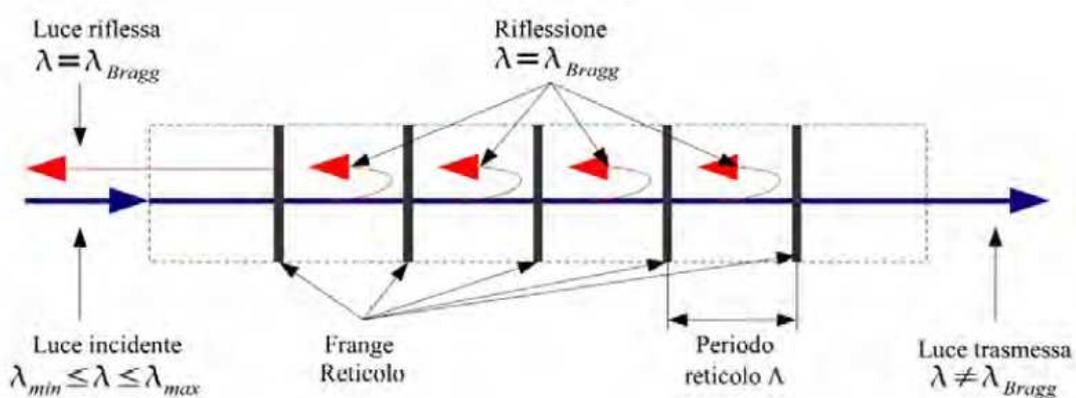


Figura 3.15 Riflessione della luce nel reticolo di Bragg

L'equazione (3.2) implica che la lunghezza d'onda di Bragg, subisca una variazione ad ogni alterazione delle proprietà fisiche o meccaniche del reticolo. L'applicazione di una deformazione provocherà ad esempio una variazione del passo del reticolo e dell'indice di rifrazione effettivo attraverso effetti ottici. In modo analogo il reticolo sarà soggetto a rispondere diversamente se soggetto a modifiche della temperatura. Per questo motivo i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come sensori per la misura di deformazione e temperatura attraverso la variazione della lunghezza d'onda di Bragg. L'intensità della risposta del sensore dipende dalla lunghezza del reticolo di Bragg e quindi dal numero di variazioni dell'indice di rifrazione all'interno del reticolo.

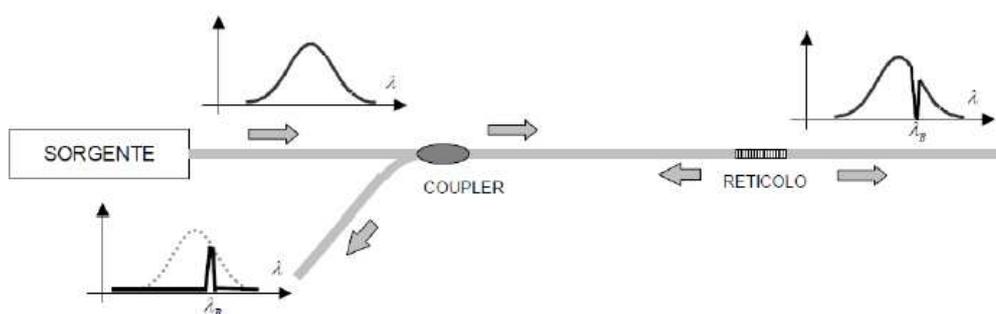


Figura 3.16 Principio di funzionamento FBG

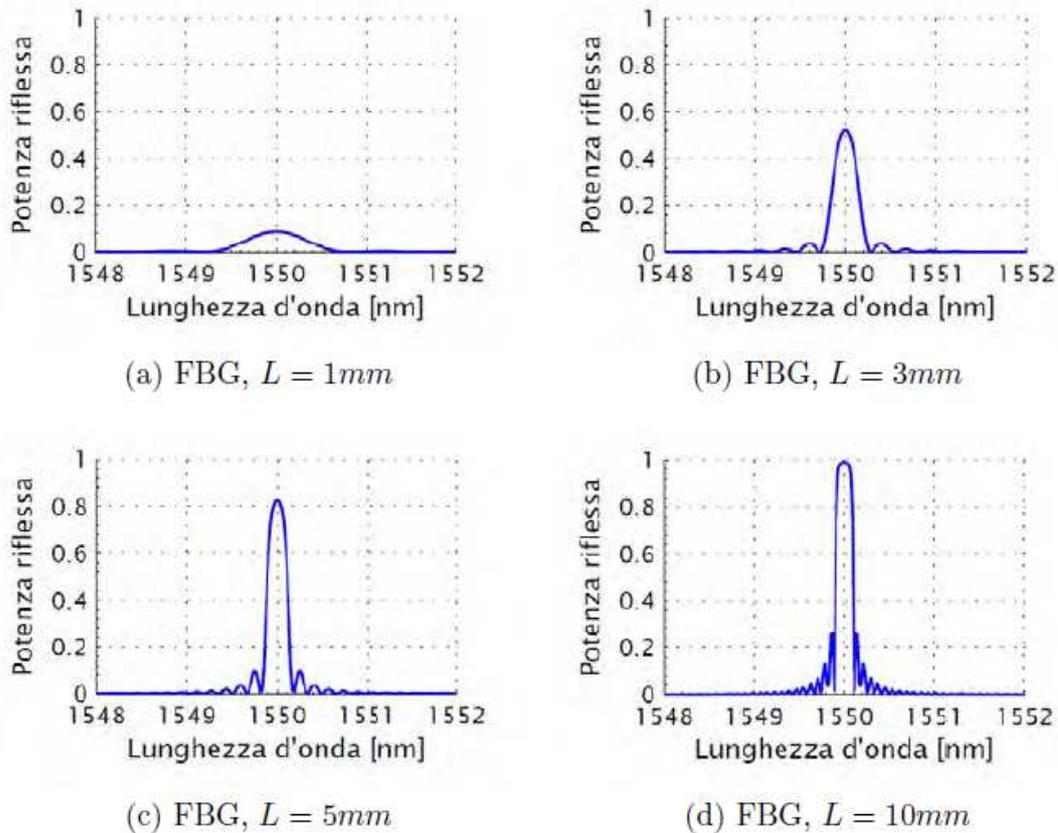


Figura 3.17 Confronto tra le intensità delle risposte per reticoli di Bragg uniformi al variare della lunghezza del reticolo (a parità di passo Λ)

3.4.FBG come sensori di temperatura

Esponendo il nucleo di una fibra fotosensibile ad intensa radiazione UV si può ottenere una perturbazione periodica dell'indice di rifrazione efficace del modo di interesse. Si ipotizza che tale perturbazione realizzata prima dell'uso della fibra sia descritta dall'espressione:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (3.3)$$

dove $\overline{\delta n_{eff}}$ è la variazione media dell'indice di rifrazione su un periodo del reticolo, v è la visibilità (o contrasto) delle frange, ossia la profondità di modulazione della variazione, Λ è il periodo nominale e $\phi(z)$ descrive la variazione di Λ [20]. Le proprietà ottiche di un FBG sono essenzialmente determinate dalla variazione di δn_{eff} lungo

l'asse longitudinale della fibra, pari a circa $10^{-5} - 10^{-3}$ [19]. Per una trattazione teorica dell'accoppiamento tra due modi in un FBG si prende in considerazione un reticolo uniforme. L'azione che un reticolo esercita su un'onda con lunghezza d'onda λ incidente su di esso con angolo θ_1 è descritta da

$$n_{co} \sin \theta_2 = n_{co} \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (3.4)$$

dove θ_2 è l'angolo dell'onda diffratta e m è l'intero che determina l'ordine di diffrazione.

Poiché la costante di propagazione del modo vale $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$, si ottiene dall'equazione 3.4

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (3.5)$$

Per il primo ordine di diffrazione, che solitamente domina in un reticolo, si ha $m = -1$. Per un reticolo short-period, in cui l'accoppiamento avviene fra modi che viaggiano in direzioni opposte, si ha che $\theta_2 = -\theta_1$ e quindi $\beta_2 = -\beta_1$. (Figura 3.18)

Inserendo queste informazioni nella Equazione 3.5 si ottiene la condizione di Bragg

$$\lambda_{FBG} = 2n_{eff}\Lambda$$

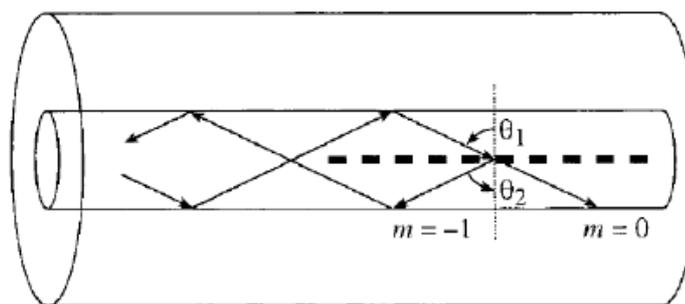


Figura 3.18 Illustrazione della riflessione di Bragg tramite un FBG

Ricorrendo alla teoria dei modi accoppiati, si possono ricavare informazioni quantitative sull'efficienza di diffrazione e sulla dipendenza spettrale dei reticoli. Si giunge ad una formula per la riflettività che è:

$$r = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \quad (3.6)$$

dove κ è il coefficiente di accoppiamento “puntuale” e tiene conto della variazione della modulazione dell’indice, σ è il coefficiente di accoppiamento medio su un periodo e L è la lunghezza totale del reticolo. La dipendenza della riflettività dall’indice di rifrazione è presente nelle espressioni di κ e σ . In figura 1.12 si illustra la riflettività del reticolo per due valori del parametro κL . Si noti che per valori alti la riflettività aumenta ma il filtro risulta poco selettivo in frequenza.

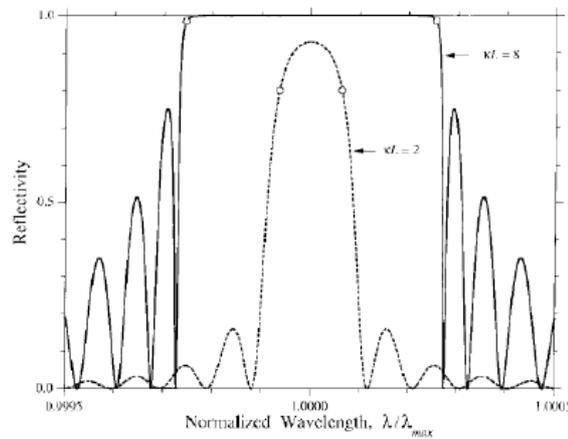


Figura 3.19 Riflettività vs lunghezza d’onda normalizzata per riflessione di Bragg in reticoli uniformi, con $\kappa L = 2$ e $\kappa L = 8$

La variazione della λ_B può essere imputata ad un cambiamento dell’indice di rifrazione efficace e/o ad un cambiamento del periodo del reticolo. Ciò può avvenire rispettivamente in due modi:

- cambiando la temperatura a cui è soggetto il reticolo;
- sottoponendo il reticolo a tensione meccanica (*strain*) lungo la direzione della fibra.

L’applicazione di un gradiente termico provoca sostanzialmente due conseguenze all’interferometro: l’espansione termica e l’effetto termico-ottico. Il primo fenomeno, l’espansione termica, non è altro che la naturale dilatazione del mezzo, la quale provoca una variazione della lunghezza L ; l’effetto termo-ottico invece è causa della variazione degli indici di rifrazione.

I vantaggi di utilizzare gli FBG rispetto agli altri sensori in fibra ottica convenzionali o elettronici sono [17]:

1. informazione sul parametro incognito “codificata” come variazione di lunghezza d’onda di picco, quindi non affetta da rumore o da perdita di potenza nella linea;
2. spostamento della lunghezza d’onda di Bragg lineare con le grandezze da misurare per range molto ampi;
3. estrema leggerezza e micro-diametri, per cui i sensori possono essere facilmente posizionati;
4. basso costo di produzione.

Facendo riferimento agli FBG come sensori di temperatura, la traslazione di λ_B si attesta attorno ai 6.8 pm/°C per una λ_B iniziale di 830 nm, 10 pm/°C a 1300 nm, 13 pm/°C a 1550 nm [17], anche se i valori dipendono dal tipo di FBG. Formalmente lo shift per un cambio di temperatura ΔT è esprimibile come

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \tag{3.7}$$

dove α è il coefficiente di espansione termica per la fibra ($\approx 0.55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per la silice) e ζ rappresenta il coefficiente termo-ottico, approssimativamente pari a $8.6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per fibra con nucleo di silice drogata al germanio [21].

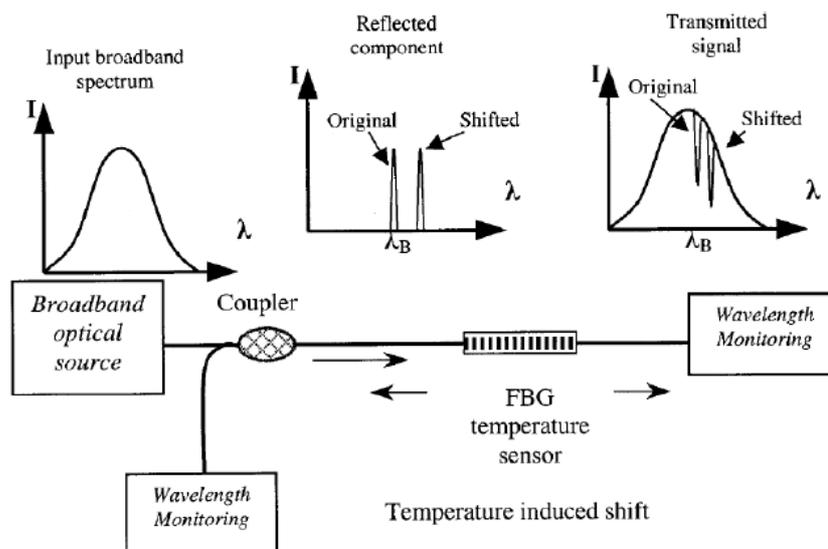


Figura 3.20 Principio di funzionamento di un sensore con tecnologia FBG. Il monitoraggio dei segnali può avvenire contemporaneamente sia in trasmissione che in ricezione

CAPITOLO 4

Sistema di misurazione

4.1. Scelta sensore di temperatura

I fattori determinanti nella scelta del sensore più adatto da inserire nelle griglie sono il range di temperatura e le dimensioni. La temperatura massima ricavata dalle simulazioni è di 180 °C nella plasma grid, cerchiamo quindi un sensore che riesca a sopportare una temperatura superiore di questa, dato che l'intento della misurazione è anche quello di riportare dati dovuti a qualche malfunzionamento e quindi ad eventuali sovraccarichi termici. Considerando le dimensioni della griglia e l'intento di inserire la fibra all'interno della stessa (come verrà spiegato nel capitolo successivo) si cercherà un sensore che riesca a soddisfare il range di temperatura richiesto avendo le dimensioni più piccole possibili.

Sono state prese in considerazione le ditte Optocon e Neoptix per quanto riguarda i sensori ottici a cristallo di GaAs, le ditte Smart Fibres e MicronOptics per quanto riguarda i sensori con tecnologia a reticolo di Bragg [28-29].

I prodotti di queste ditte hanno tutti diametro inferiore al millimetro, sarebbero quindi tutti utilizzabili per il nostro scopo tranne quelli della MicronOptics che hanno range di temperatura (-40, 120 °C) [27].

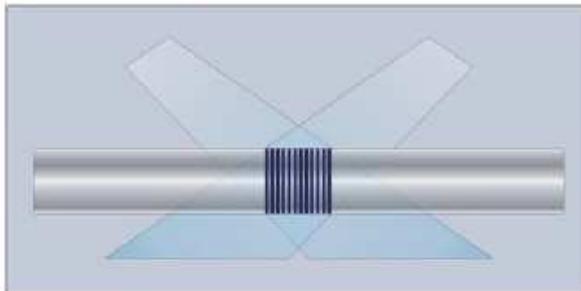
I sensori con cristallo di GaAs possono fornire solo una misura puntuale, quindi se vorremmo avere una panoramica dell'evoluzione della temperatura su tutta griglia bisognerebbe utilizzare un numero elevato di fibre e questo sarebbe di difficile realizzazione considerando la complessità costruttiva della griglia.

Si può risolvere questa difficoltà sfruttando la possibilità dei sensori FBG di Smart Fibres di implementare più reticoli di Bragg all'interno di una singola fibra, avendo così la possibilità di effettuare un numero maggiore di misurazioni puntuali con un'unica fibra [26].

A fronte di questo i sensori SmartFBG di Smart Fibres sembrano essere i più adatti per un sistema di misurazione della temperatura nelle griglie di MITICA.

Si allegano i dataSheet rispettivamente dei sensori SmartFBG e dello scanner SmartScan della ditta Smart Fibres.

- Optical strain and/or temperature sensor
- Zero power, EMI immune
- Intrinsically safe
- Highly stable
- Multiple km signal integrity
- Available singly or in multiple FBG arrays
- Suitable for composite embedment
- Can be used to manufacture smart sensors and transducers
- Suitable for long-term SHM



FBG recorded by interfering UV laser beams



FBG sensor in acrylate coated fibre

A Fibre Bragg Grating (FBG) is a novel optical sensor recorded within the core of a standard optical fibre. It reflects a narrow bandwidth of light, which responds faithfully to changes in temperature and strain. Many FBG sensors can be recorded onto a single optical fibre and interrogated simultaneously with a single instrument - the effect is a very low cost mechanism for distributed monitoring of strain and/or temperature within large structures, particularly suited to design validation and structural health monitoring

SmartFBG Specifications (typ):

	Unit	Standard				Options
Centre wavelength	nm	1528 – 1608				Alternative wavelength range
FBG length	mm	1	2	5	10	
Peak reflectivity	%	>=50	>=50	>=70	>=80	
3 dB bandwidth	nm	<1.5	<1.2	<0.7	<0.3	
SLSR single sensor	dB	15				> 15
Strain range	µstrain	+/- 9,000				> +/- 9,000
Strain sensitivity	pm/µstrain	1.20				
Strain resolution [†]	µstrain	0.4				
Temperature sensitivity [‡]	pm/°C	11				
Temperature resolution [†]	°C	0.05				
Fibre type		Single Mode SMF-28, 9/125 µm				
Fibre coating and FBG recoating options*		Acrylate		Polyimide		High temperature acrylate Other custom coatings
Temperature range [‡]	°C	-270 to +85		-270 to +300		
Cable and connections		To suit application				

[†] with 0.5 pm resolution interrogator
[‡] decreased temperature sensitivity below -170 °C, no temperature sensitivity below -220 °C

* Polyimide recoating recommended for strain applications

All specifications are correct at the time of writing and may change without notice.

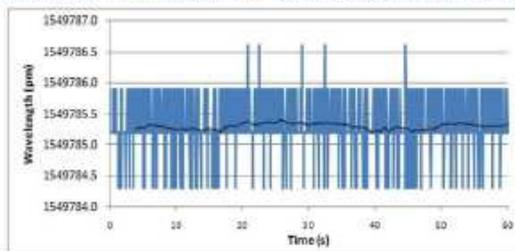
Certain specifications may be speculative or untested - please contact us to confirm the specification meets with your requirements.



Commercial Grade SmartScan 04

- Multi-kHz Scanning
- Ultra Compact
- All Solid State
- Highly Robust Optics (flight tested variants available)
- On-board Data Averaging
- Data logging to USB drive option

SmartScan is an ultra-compact and robust interrogator for dynamic measurement of FBG sensors. This WDM instrument is based on an agile, tuneable laser source that enables high resolution interrogation at multi kHz frequencies. The high frequency scan rates allow over-sampling and averaging to give extraordinary resolution.



Example Data Set: SmartScan reading 2 mm FBG, 1550 nm, 70% R, 0.7 nm FWHM		
Data Averaging	STDEV Resolution (pm)	STDEV Resolution (microstrain)
60s, raw data - 2.5 kHz	0.39	0.33
60s, 10 averages - 250 Hz	0.13	0.11
60s, 100 averages - 25 Hz	0.06	0.05
60s, 1000 averages - 2.5 Hz	0.04	0.03

Specifications

Measurement and Processing	SmartScan	SmartScan Lite
Wavelength Range	40 nm (1528 – 1568 nm)	
Number of Optical Channels ¹	1, 2, 3, 4	
Maximum Number of Sensors/Channel	16	
Scan Frequency (all sensors simultaneously)	2.5 kHz	250 Hz
Maximum Scan Frequency (with reduced wavelength range)	25 kHz	-
Repeatability ^{2,3A}	< 1 pm	
Wavelength Stability	< 5 pm over operating temperature range, +/- 20 pm over 25 years	
Dynamic Range (total tolerable optical attenuation, without loss of performance)	27 dB	
Dynamic Range (laser launch power minus detection noise floor)	37 dB	
Gain Control	9 levels, per channel or per sensor, automatic or user controlled	
Onboard Processing	For conversion of measuring units and interfacing to client systems	
Bragg Grating Full Width Half Maximum (FWHM)	Minimum > 0.2 nm, > 0.5 nm recommended	
Mechanical, Environmental and Electrical		
Dimensions	140 x 115 x 85 mm / 5.5 x 4.5 x 3.3"	
Weight	0.9 kg / 2 lb	
Operating Temperature	-15 to +55°C / +5 to 131°F	
Optional Increased Temperature Range	-20 to +60°C / -4 to 140°F	
Comms Interface	Ethernet (UDP-IP), CanBus and others on request	
Data Connector	RJ45 standard	
Data Logging (optional)	To USB memory device (no need for connected PC)	
Power Connector	via mains adapters supplied	
Optical Connector ⁵	FC/APC	
Input Voltage	+9 to +36 VDC	
Power Consumption	typ 7.5 W, max 8.5 W	
EMC Certification	Per BS EN 61326-1 edition 2006	
Hazardous Area Certification (optional)	Per ATEX for hazardous zones 0, 1 or 2 with gas groups IIA, IIB or IIC Link to certification	

4.2. Metodi di lettura

Un FBG viene utilizzato come sensore illuminandolo con una sorgente di luce ad ampio spettro e misurandone la lunghezza d'onda riflessa. Le variazioni della lunghezza d'onda di Bragg possono essere monitorate da una delle seguenti tecniche:

- Può essere utilizzato un interferometro per convertire gli spostamenti della lunghezza d'onda in sfasamenti, i quali possono essere rilevati misurando le variazioni dell'intensità della luce come differenza di percorso nell'interferometro.
- Può essere utilizzato un filtro ottico inclinato, che può essere un altro reticolo di Bragg, per convertire spostamenti della lunghezza d'onda direttamente in variazioni di intensità. Se il filtro è progettato per avere un rapporto passaggio/riflessione che varia con la temperatura, allora la lunghezza d'onda di una riflessione a banda stretta di un unico reticolo può essere determinata semplicemente misurando e confrontando le intensità di luce passate e riflesse. Questo è il modo più semplice ed economico di demodulare un FBG, ma ha lo svantaggio che può analizzare solo un reticolo alla volta.

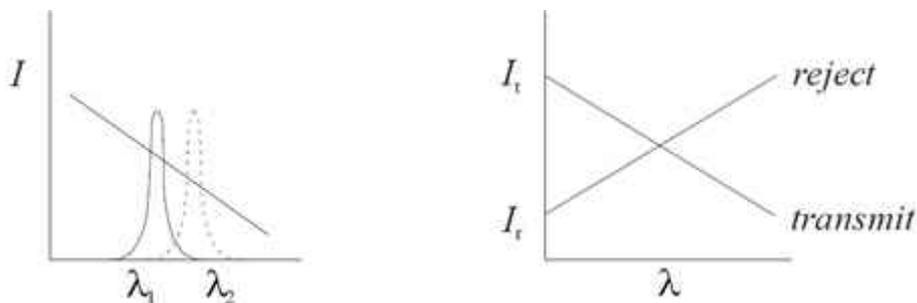


Figura 4.1 Demodulazione di un FBG con filtro passivo. Turni lunghezza d'onda (a sinistra) sono convertiti in variazioni di intensità (a destra)

- Un approccio ampiamente impiegato è illuminare l'FBG con una sorgente luminosa sintonizzabile a banda stretta (WDM). Questo è il principio su cui si basano i prodotti di Smart Fibres.

4.2.1. Wavelength-Division Multiplexing (WDM)

Molti reticoli di Bragg possono essere combinati su una singola fibra e analizzati simultaneamente fornendo ognuno una diversa lunghezza d'onda. Questo si ottiene sia utilizzando una sorgente di luce a banda larga e uno spettrometro per il rilevamento, sia una sorgente luminosa sintonizzabile con semplici fotodiodi rilevatori.

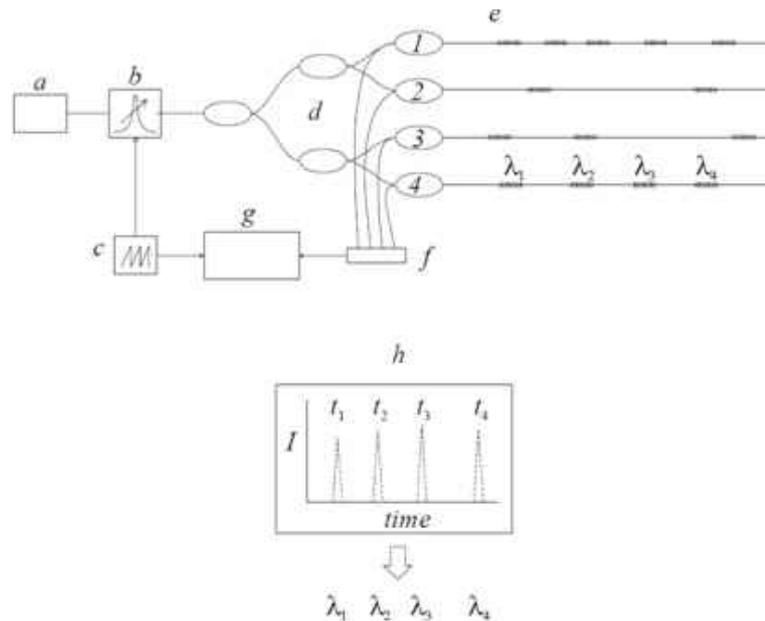


Figura 4.2 Principio di funzionamento e schema di attrezzature WDM

Legenda: a) fonte di luce; b) filtro di scansione; c) generatore di scansione; d) accoppiatore di rete per i canali 1-4; e) FBG arrays; f) fotorivelatori; g) processore; h) uscita in funzione del tempo del rivelatore sul canale 4, che mostra i tempi t_i convertiti in lunghezze d'onda di Bragg λ_i

Lo scanner sintonizza la sorgente luminosa, traslandola avanti e indietro all'interno del suo range in modo che in ogni istante si conosca la lunghezza d'onda della luce che viene trasmessa alle fibre. Quando questa lunghezza d'onda coincide con la lunghezza d'onda di Bragg dell'FBG, la luce è riflessa indietro lungo la fibra ad un fotorivelatore. Lo scanner fornisce anche un segnale di temporizzazione al processore, permettendo di rappresentare l'intensità luminosa in uno spettro. Viene eseguita un'ulteriore elaborazione per identificare i picchi in questo spettro, trovare le loro posizioni di picco e convertirli in temperatura [26].

CAPITOLO 5

Implementazione dei sensori nella griglia

L'intento attuale è di monitorare l'andamento della temperatura sulla extraction grid, ma il procedimento proposto è estendibile anche alle altre griglie.

Per ottenere delle misure puntuali una prima proposta era quella di applicare sulla griglia tramite vite autofilettante un ulteriore elemento, sempre in rame, con una piccola cavità per l'inserimento del sensore. Questa idea è stata scartata principalmente perché per ottenere un numero sufficientemente utile di misure sarebbero serviti molti sensori, quindi molti supporti e quindi una complicata attività sia di realizzazione che di lettura. Inoltre sia i supporti che i relativi fori necessari per il fissaggio avrebbero variato la distribuzione di temperatura nelle griglie rispetto alle simulazioni. Si è cercato dunque una soluzione che riduca il numero di elementi necessari e che modifichi meno possibile la geometria della griglia.

Come è stato accennato in precedenza, le griglie vengono realizzate mediante successive elettrodeposizioni di rame su una piastra. Su ogni strato (a partire dalla piastra stessa) si fanno degli intagli, che saranno poi destinati a ospitare i magneti per il confinamento oppure l'acqua per il raffreddamento.

Una volta realizzati, questi intagli vengono riempiti con una sostanza (ad esempio cera) per tornare ad avere una superficie completamente piana, pronta al bagno elettrolitico. Una volta completate le elettrodeposizioni, la cera sarà sciolta per liberare i canali.

La proposta è quella di realizzare un ulteriore canale destinato ad ospitare il sensore in fibra ottica. In questo modo possiamo realizzare un sistema di misura semplice, efficace, minimamente invasivo e con la possibilità di essere tolto/inserito senza particolari difficoltà.

Considerando le zone più critiche risultanti dalle simulazioni, le fibre verranno sistemate in verticale e si potrà sfruttare la capacità delle fibre SmartFBG di inserire più sensori in un'unica fibra. In una griglia ci saranno quindi 4 fibre, ciascuna con 16 sensori distanziati di 35mm; le fibre saranno inserite sfasate verticalmente di 17,5mm in modo da ottenere una panoramica più completa su tutti i punti di interesse.

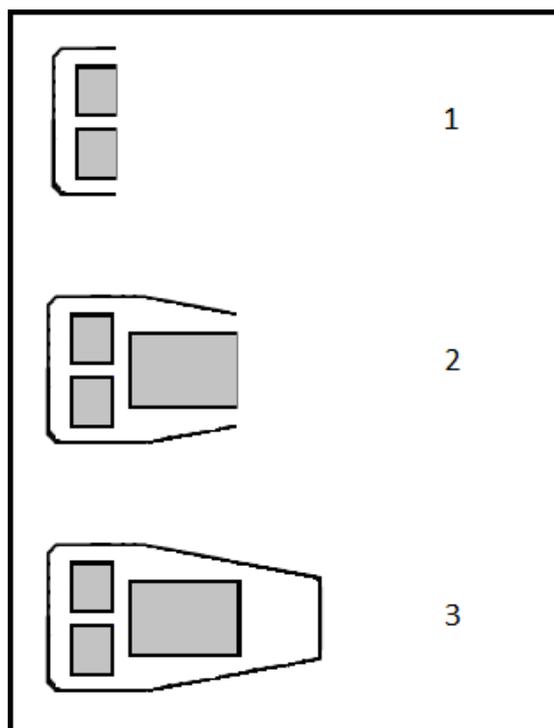


Figura 5.1 Stadi di realizzazione griglia

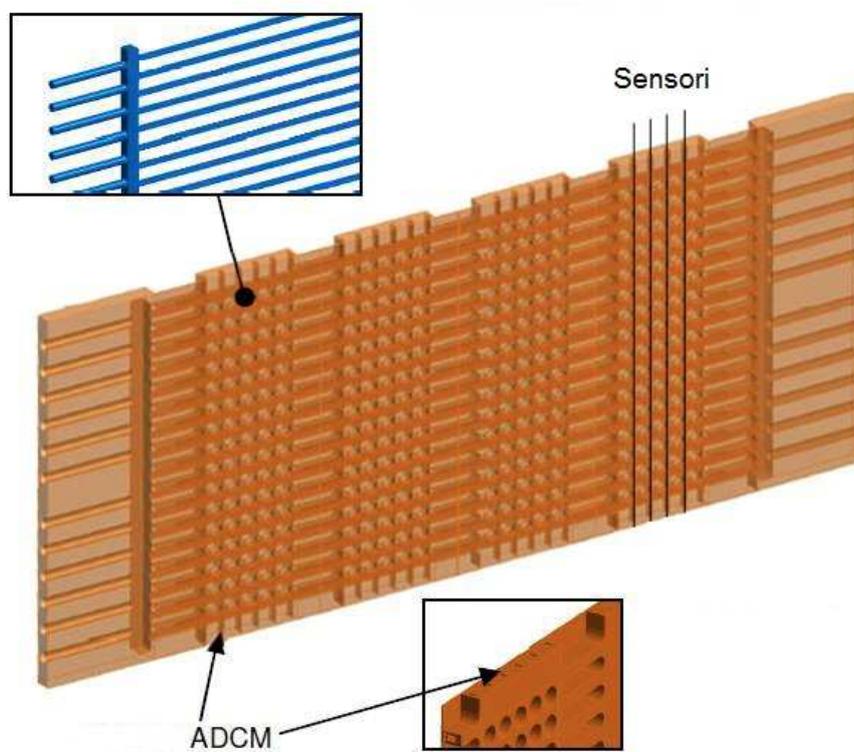


Figura 5.2 Vista complessiva della griglia con particolare sui canali di raffreddamento, canali per i magneti ADCM e uno schema intuitivo sulla posizione delle fibre

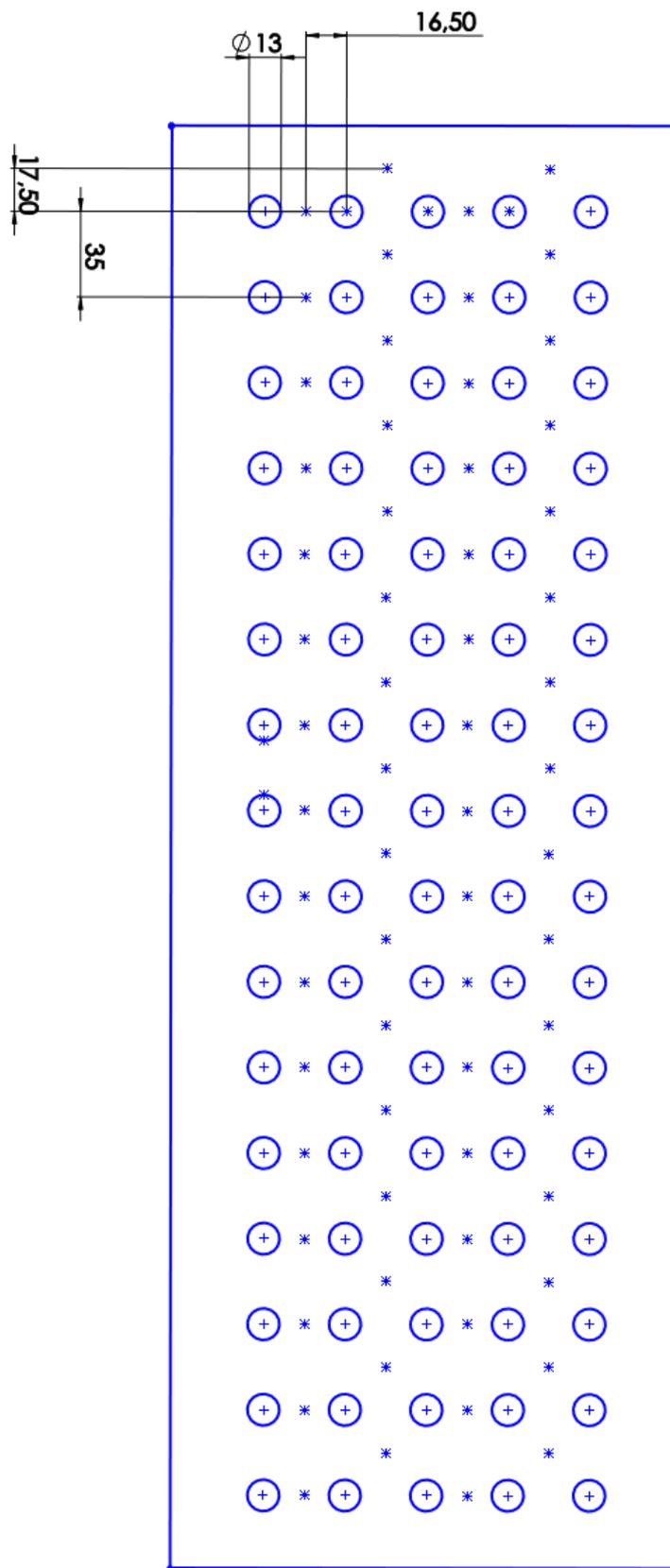


Foto 5.3 Disposizione dei sensori all'interno della fibra sulla griglia

CONCLUSIONI

All'interno dell'esperimento MITICA sulla progettazione e realizzazione di un iniettore di particelle neutre destinato al riscaldamento addizionale del plasma per la fusione nucleare è utile avere un sistema per la misurazione della temperatura nelle griglie di accelerazione dell'iniettore soggette a un forte riscaldamento dovuto al passaggio di particelle accelerate.

Queste griglie trovandosi ad un potenziale elettrico nell'ordine dei kiloVolt rendono impossibile l'utilizzo di sensori di natura elettrica come ad esempio le termocopie. Per questo motivo è stato deciso di utilizzare dei sensori in fibra ottica, i quali sono elettricamente isolanti, immuni a disturbi elettromagnetici e di dimensioni molto ridotte.

Nell'implementazione dei sensori si è cercato di utilizzare un numero di elementi necessari alla misurazione ragionevolmente ridotto e di manipolare meno possibile le griglie in modo da non andare a variarne il profilo di distribuzione della temperatura (evitando ad esempio ulteriori fori).

La soluzione proposta consiste nel realizzare degli ulteriori canali all'interno della griglia per poter inserire i sensori in fibra ottica SmartFBG collegati al ricevitore SmartScan.

BIBLIOGRAFIA

[1] <http://fusionforenergy.europa.eu/>

[2] <http://www.iter.org/>

[3] Grisham L. et al., 2012, "Recent improvements to the ITER Neutral Beam System Design", *Fusion engineering and design*, vol 87, pp. 1805-1815.

[4] Pomaro N. et al., 2013, "Design of the interlock and protection system for the SPIDER experiment", *Fusion engineering and design*, vol 88, pp. 980.

[5] Zaccaria P. et al., 2012, "Progress in the MITICA beam source design", *Review of scientific instruments*, vol 83, 02B108.

[6] H.P.L. de Esch et al., 2013, "Status of physics design of the HNB accelerator for ITER", *AIP conference proceedings*, pp. 512-521.

[7] Hemsworth R. et al., 2009, "Status of the ITER heating neutral beam system", *IOP publishing, Nuclear fusion* 49.

[8] Agostinetti P. et al., 2014, "Manufacturing and testing of grid prototypes for the ITER neutral beam injectors", *IEEE transaction on plasma science*, vol 42, pp. 628-632.

[9] Franzen P. et al., 2009, "Physical and experimental background of the design of the ELISE test facility", *AIP conference proceedings*, pp. 41.

[10] Kraus W. et al., 2009, "Long pulse H extraction with a rf driven ion source with low fraction of co-extracted electrons", *AIP conference proceedings 1097*, pp. 257.

[11] Veltri P. et al., 2014, "Compensation of beamlet deflections and focusing methods in the electrostatic accelerator of neutral beam injector", *IEEE transaction on plasma science*, vol 42, pp. 1047-1052.

[12] Agostinetti P. et al., 2013, "Single beamlet optics studies and functional optimization of the MITICA accelerator", Consorzio RFX technical note RFX-MITICA-TN-221.

[13] ITER SDC-IC, 2004, "Structural design criteria for ITER in-Vessel components", ITER Document No. G 74 MA 8.

[14] http://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_ottica

- [15] Mihailov S.J., 2012, "Fiber bragg grating sensors for harsh environments", *Sensors*.
- [16] Reddy P.S. et al., 2011, "Encapsulated fiber bragg grating sensor for high temperature measurements", *Optical Engineering*.
- [17] Zhang B., 2004, "High temperature sensors based on hydrogen loaded fiber bragg gratings", Ph.D. dissertation, Concordia University.
- [18] <http://www.deltastrumenti.it/>
- [19] Singh N. et al., 2005, "Fiber bragg grating writing using phase mask technology", *Journal of scientific and industrial research*, vol 64, pp. 108-115.
- [20] Erdogan T., 1997, "Fiber grating spectra", *Journal of lightwave technology*, vol 15.
- [21] Thair B. A. et al., 2006, "Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application," *Journal of optoelectronics and advanced material*, vol 8, pp. 1604-1609.
- [22] Huang Z. et al., 2005, Intrinsic Fabry-Perot fiber sensor for temperature and strain measurements", *IEE Photonics technology letters*, n.11 vol 17.
- [23] Li Y. et al., 2010, "Double-pass in-line fiber taper Mach-Zehnder interferometer sensor", *IEE photonics technology letters*, n.23 vol 22.
- [24] Galindez C. et al., 2009, "Temperature sensing in multiple zones based on Brillouin fiber ring laser", *Journal of physics: conference series*, n. 178.
- [25] Rodriguez-Barrios F. et al., 2010, "Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification", *Journal of lightwave technology*, n. 15 vol 28.
- [26] <http://www.smartfibres.com/FBG-sensors>
- [27] <http://www.micronoptics.com/>
- [28] <http://www.optocon.de/>
- [29] <http://www.neoptix.com/>
- [30] Svensson L., SRD-53-PR, -MI, -MP, -SI, -SP (NEUTRAL BEAM TEST FACILITY), Version 1.2, IDM UID 2WCCSG, 2009.
- [31] N.Umeda et al., 2014, "Long pulse acceleration of MeV class high power density negative H⁻ ion beam for ITER"