

**Scuola Nazionale
"Rivelatori ed Elettronica per
Fisica delle Alte Energie, Astrofisica
ed Applicazioni Spaziali"**

*(Course: "Detectors and Electronics for High Energy Physics,
Astrophysics and Space Applications")*

**INFN-Laboratori Nazionali di Legnaro
4-8 Aprile 2005**

Descrizione delle Lezioni

Rivelatori ed Effetti delle Radiazioni

1.1. "Le grandezze fisiche e gli ambienti di radiazione"

Jeffery Wyss

Dipartimento di Scienze Motorie e Salute, Università di Cassino

I fenomeni fisici dell'interazione radiazione-materia sono strettamente legati allo scopo, al funzionamento ed, in certi casi, ai possibili malfunzionamenti di rivelatori e sistemi elettronici destinati ad applicazioni scientifiche e tecnologiche. L'importanza dei concetti riguardanti la radiazione è trasversale ed abbraccia molti campi di attività: nello spazio (ricerche di astrofisica e applicazioni satellitari commerciali); presso gli acceleratori (fisica delle particelle, applicazioni mediche ed industriali); presso gli impianti nucleari. Lo scopo di questa lezione è di presentare le definizioni e le quantità fisiche essenziali alla comprensione delle tematiche riguardanti i danni indotti dalle radiazioni (NIEL, LET, dose, etc.) ed una descrizione degli ambienti di radiazione presenti negli esperimenti di fisica delle alte energie e nello spazio.

1.2. "Rivelatori a semiconduttore"

Dario Bisello

Dipartimento di Fisica, Università di Padova

Vengono illustrati i principi di funzionamento e le misure di caratterizzazione dei rivelatori di posizione e di energia a semiconduttore, in particolare: rivelatori a pixel, a microstrip, a deriva e per misure di E e di dE/dx. Inoltre verranno descritti come esempi le loro applicazioni in esperimenti di fisica nucleare, di fisica delle alte energie e di astrofisica.

1.3. "Danno da radiazione nei rivelatori al silicio"

Mara Bruzzi

Dipartimento di Energetica, Università di Firenze

I sistemi di rivelazione per la regione più vicina al vertice negli esperimenti di fisica delle alte energie al "Large Hadron Collider" (LHC) del CERN sono stati progettati per sostenere livelli di radiazione dell'ordine di 10^{15} cm^{-2} alla minima distanza dal punto di collisione. Un'opzione recentemente discussa riguarda l'aumento della luminosità fino a $10^{35} \text{ cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$ corrispondente, per 5 anni di funzionamento, a fluenze di adroni veloci fino a 10^{16} cm^{-2} . L'attuale tecnologia dei rivelatori al silicio non è in grado di sostenere tali livelli di radiazione a causa del consistente degrado dei parametri macroscopici principali: corrente di fuga, tensione di completo svuotamento ed efficienza di raccolta di carica. Tale degrado è dovuto alla creazione, indotta da irraggiamento, di difetti che agiscono da trappole e da centri di ricombinazione nel materiale. In questa lezione verranno discussi i principali effetti della radiazione nei rivelatori al silicio e le possibili strategie per aumentare la resistenza al danno da radiazione di tali dispositivi.

1.4. "Realizzazione di rivelatori resistenti alle radiazioni"

Maurizio Boscardin

ITC-irst, Povo (Trento)

La lezione si articolerà in due ambiti.

- 1) Le fasi del processo: si illustreranno i passi tecnologici fondamentali del flusso di processo che portano alla realizzazione di un rivelatore a microstrip a doppia faccia.
- 2) L'ottimizzazione della tecnologia: si tratterà di come una tecnologia di fabbricazione può essere ottimizzata per migliorare la resistenza del sensore al danno da radiazione.

1.5. "Rivelatori X e γ per spettroscopia e imaging: introduzione e applicazioni"

Antonio Longoni

Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano

I rivelatori a deriva a semiconduttore (SDD) sono caratterizzati da elevata risoluzione energetica in spettroscopia X (dell'ordine dei 130 eV FWHM sulla riga K_{α} del Mn), possono operare a temperature prossime a quella ambiente (circa -10 C, raggiungibile facilmente con raffreddatori termoelettrici Peltier) e possono raggiungere elevatissimi tassi di conteggio con buone prestazioni spettroscopiche (diverse centinaia di kcps). Tali caratteristiche li rendono di fatto superiori ai classici rivelatori raffreddati all'azoto liquido.

Recentemente sono stati realizzati "arrays" monolitici di SDD tra loro indipendenti. La forma dell'array può essere facilmente adattata alla struttura dell'apparato di misura, in modo da ottimizzare, ad esempio, la geometria di collezione della radiazione di fluorescenza X e di minimizzare la distanza tra sorgente e rivelatore. La parcellizzazione dell'area attiva in elementi indipendenti di piccole dimensioni consente inoltre di massimizzare senza perdita di risoluzione il tasso globale di conteggio e di fornire informazioni sulla posizione di interazione dei fotoni. L'accoppiamento di array monolitici di SDD a cristalli scintillatori consente di realizzare rivelatori di immagine per raggi γ con elevate risoluzioni spaziali. Numerosissime sono le applicazioni. Tra di esse si segnalano l' "elemental mapping" di materiali e manufatti con tecniche XRF (X-ray fluorescence) e l' "imaging" di emissioni γ nel campo della biologia molecolare e della medicina.

1.6. "Effetti delle radiazioni su celle solari per applicazioni spaziali"

Emanuele Ferrando

Galileo Avionica, Milano

Le celle solari rappresentano il modo più economico ed ecocompatibile per fornire energia ai satelliti orbitanti intorno alla Terra. Le tipiche traiettorie di questi oggetti sono: l'orbita bassa equatoriale o polare, la geostazionaria o orbite intermedie che presentano lo svantaggio di attraversare più volte le fasce di Van Allen. Ognuna di queste orbite è contraddistinta da notevoli interazioni con particelle cariche intrappolate dal campo magnetico terrestre ed eventi causati da picchi dell'attività solare, solo parzialmente schermati dal campo geomagnetico. L'attività di test a terra, tramite irraggiamento protonico ed elettronico, è l'unico strumento per valutare le conseguenze di questi danni e per poter prevedere le condizioni di "fine vita" di tali dispositivi con margini realistici.

1.7. "CCD per applicazioni spaziali"

Marco Albi

Dipartimento di Astronomia, Università di Trieste

Nella lezione saranno affrontati i seguenti argomenti:

- 1) cenni sui principi di funzionamento dei CCD;
- 2) varie tipologie di CCD per uso spaziale;
- 3) parametri indicatori di performance;
- 4) danno da radiazioni su CCD;
- 5) test di qualifica.

Al termine della lezione, saranno esposti i risultati dei test di irraggiamento svolti sul CCD87 prodotto da "e2v Technology", candidato ad essere utilizzato sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS).

Elettronica ed Effetti delle Radiazioni

2.1. "Effetti delle radiazioni in dispositivi elettronici in tecnologie CMOS, BJT e JFET"

Valerio Re

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Bergamo

L'utilizzo di sistemi elettronici resistenti alle radiazioni è richiesto in un vasto campo di applicazioni (spazio, reattori nucleari, esperimenti di fisica delle alte energie). In questa lezione vengono esaminati: 1) gli effetti delle radiazioni e i meccanismi di danneggiamento nei principali dispositivi elettronici; 2) i fenomeni di degradazione dei parametri statici, di segnale e di rumore dei dispositivi. Viene infine analizzato l'impatto dell'evoluzione delle tecnologie microelettroniche sulle proprietà di tolleranza alle radiazioni.

2.2. "Effetti da evento singolo (SEE): introduzione e SEE in SRAM"

Alessandro Paccagnella

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Padova

Gli effetti da evento singolo ("Single Event Effects", SEE) rappresentano una classe di fenomeni fra quelli che più influenzano il funzionamento di un componente o di un sistema elettronico in modo transitorio o permanente. La lezione mira a fornire le nozioni principali per identificare e comprendere le cause fisiche che originano tali fenomeni, inquadrati in una panoramica generale degli effetti osservati sperimentalmente sui dispositivi elettronici. Nella seconda parte saranno trattate in modo più specifico le memorie RAM statiche, fra i componenti di riferimento per gli studi di SEE, illustrando le tipologie dei problemi osservati anche in funzione dello "scaling" tecnologico.

2.3. "Sistemi tolleranti ai guasti: generalità ed esempi applicativi. Le memorie di massa"

Adelio Salsano

Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università di Roma "Tor Vergata"

Il progetto e la realizzazione di sistemi elettronici in grado di operare in ambienti critici per i motivi più diversi devono rispettare vincoli spesso contrastanti tra loro, quali l'elevato livello delle prestazioni richieste, i vincoli di spazio e di costo, l'impossibilità di manutenzione. Caso tipico sono le applicazioni spaziali a bordo dei satelliti, tra le quali di primario interesse sono le memorie di massa. Dopo un'introduzione di tipo generale sui sistemi tolleranti ai guasti, sui meccanismi di guasto e sui relativi modelli, la lezione affronterà il tema dell'impiego di componentistica commerciale ("Commercial-Off-The-Shelf", COTS) in ambito spaziale, presenterà le metodologie progettuali normalmente usate, basate sui codici a correzione di errore e sullo "scrubbing" periodico, e mostrerà esempi tipici.

2.4. "Effetti della radiazione ionizzante su celle di memoria non volatile di tipo Flash"

Angelo Visconti

STMicronics, Agrate Brianza (Milano)

La lezione affronterà i seguenti argomenti:

- introduzione alle memorie a semiconduttore;
- struttura e principio di funzionamento della cella di memoria a floating gate;
- meccanismi fisici di scrittura;
- architettura della matrice di tipo NOR;
- cenni di affidabilità;
- misura degli effetti della radiazione ionizzante su processi CMOS per memorie Flash;
- effetti di dose totale (irraggiamento con X, gamma, protoni);
- effetti di evento singolo (irraggiamento con ioni pesanti);
- "Radiation Induced Leakage Current" (RILC);
- analisi e previsioni per le prossime generazioni tecnologiche.

2.5. "Effetti da evento singolo in FPGA: tipologie e possibili soluzioni"

Massimo Violante

Dipartimento di Automatica e Informatica, Politecnico di Torino

Nei dispositivi di tipo "Field Programmable Gate Array" (FPGA) il circuito implementato è definito per mezzo di informazioni immagazzinate in una memoria di configurazione a bordo della FPGA. I moduli di memoria utilizzati per immagazzinare la configurazione di una FPGA sono particolarmente sensibili agli effetti da evento singolo ("Single Event Effects", SEE), la cui sezione d'urto può raggiungere i 10^{-7} cm²/bit, e quindi adeguate contromisure devono essere adottate al fine di evitare che sistemi basati su FPGA possano avere dei comportamenti errati in presenza di radiazioni. In questa lezione verranno discussi con una visione d'insieme gli effetti da evento singolo nelle FPGA basate su SRAM, mostrando come i SEE possano modificare le risorse delle FPGA. Verranno quindi illustrate le tecniche attualmente utilizzate per migliorare la resistenza alle radiazioni di tali componenti.

2.6. "Effetti da evento singolo in MOSFET di potenza"

Giovanni Busatto

DAEIMI, Università di Cassino

La lezione è destinata a presentare il comportamento dei MOSFET di potenza quando vengono colpiti da una particella di alta energia. I fenomeni che si manifestano in conseguenza dell'impatto vengono analizzati sulla base dei principali risultati riportati nella letteratura scientifica, e con il supporto di misure sperimentali e di simulazioni ad elementi finiti 3-D effettuate su dispositivi commerciali. Vengono descritti: 1) i processi di attivazione del transistor bipolare parassita presente nella struttura del MOSFET; 2) i processi di formazione di elevati campi elettrici nelle regioni attive del dispositivo durante l'impatto con la particella energetica. Viene infine illustrato il ruolo di tali effetti nei fenomeni di "Single Event Burn-out" (SEB) e "Single Event Gate Rupture" (SEGR).

2.7. "Metodologie di disegno di ASIC resistenti alle radiazioni"

Federico Faccio

CERN, Ginevra, Svizzera

La lezione illustra una metodologia di disegno utilizzabile per progettare ASIC con tecnologie CMOS commerciali, in modo da aumentare la resistenza ad alte dosi di radiazioni e/o all'impatto di particelle di alta energia. Dopo avere richiamato sinteticamente i principali meccanismi di degradazione indotti dalle radiazioni nelle moderne tecnologie CMOS, verranno descritte le tecniche di layout per limitarne e/o eliminarne gli effetti. La discussione comprende inoltre gli approcci destinati a limitare l'impatto degli effetti da evento singolo distruttivi ("Single Event Latch-up", SEL) e non-distruttivi ("Single Event Upset", SEU). A supporto sono presentati una serie di esempi di circuiti elettronici sviluppati per i rivelatori del "Large Hadron Collider" (LHC) al CERN.

"Case Studies"

3.1. "I programmi spaziali e la problematica delle radiazioni. Rassegna delle problematiche e delle iniziative europee"

Barbara Negri, Francesco Svelto

Agenzia Spaziale Italiana, Roma

Gli effetti delle radiazioni sui componenti e sui sistemi elettronici richiedono un'attenzione crescente da parte delle agenzie e delle industrie spaziali. Ciò è dovuto all'uso crescente di componenti commerciali ("Commercial-Off-The-Shelf", COTS), ma anche alla crescente complessità delle piattaforme, dei payload e delle missioni. In questa presentazione si intende passare in rassegna le competenze e le attività in corso in Europa nel campo dei modelli e degli strumenti software per gli esperimenti in volo effettuati ed in programma per il futuro. Saranno forniti anche alcuni accenni sulle analoghe iniziative in corso nel resto del mondo.

3.2. "Effetti delle radiazioni nella logica di configurazione di dispositivi Xilinx Virtex: risultati sperimentali"

Marcello Mancini

INAF-Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica, Milano

Viene presentato un metodo di indagine degli effetti delle radiazioni in dispositivi SRAM-FPGA, in particolare nella logica di configurazione. L'osservazione del comportamento da essi indotto riveste una notevole importanza per la realizzazione di sistemi riconfigurabili ad alta affidabilità per applicazioni critiche, in quanto guasti in tale logica potrebbero impedire ulteriori riconfigurazioni del dispositivo. Vengono illustrati l'apparato sperimentale e le procedure di test messe a punto per delle prove di irraggiamento con ioni pesanti condotte presso i Laboratori Nazionali di Legnaro su dispositivi Xilinx Virtex. Vengono presentati i risultati di tale campagna di test, nonché di alcune prove di iniezione di guasto effettuate in laboratorio.

3.3. "Impiego di ADC "Commercial-Off-The-Shelf" per applicazioni spaziali"

Nicoletta Ratti

Laben, Milano

In ogni programma spaziale è necessario implementare un'attività dedicata al controllo della resistenza alle radiazioni dell'elettronica. Essa consiste in una procedura costituita da differenti passi aventi lo scopo finale di assicurare che nessuna parte elettronica montata sul veicolo spaziale possa essere danneggiata dalle radiazioni presenti nello spazio, in modo tale da degradare le caratteristiche di funzionamento degli apparati oltre le specifiche richieste per la missione.

Nella presentazione verranno descritti, dopo una breve introduzione sulle tipiche attività di controllo di resistenza alle radiazioni, i principali strumenti usati per realizzare l'analisi e i principali risultati da tenere in considerazione. L'esempio dell'impiego di ADC commerciali ("Commercial-Off-The-Shelf", COTS) e delle relative attività di controllo per la resistenza alle radiazioni completeranno la presentazione.

3.4. "Componenti elettronici per apparecchiature spaziali"

Maria Sarno

Alenia Spazio S.p.A., Roma

La presentazione riguarderà le principali problematiche che devono essere affrontate per l'utilizzo di componenti elettronici nell'ambito dello sviluppo di apparecchiature per applicazioni su satellite e veicoli spaziali, soffermandosi sulle metodologie/modelli che devono essere adottate per assicurarne l'affidabilità.

3.5. "Radiation hardening assurance for Ariane 5 launchers"

Thierry Carriere

EADS SPACE, France

After a quick description of the Ariane 5 program, the natural radiation environment on various trajectories will be introduced. Then the methodology to quantify the risk of failure related to radiation will be exposed from components to system level. Finally the most used hardening techniques will be described.

3.6. "Metodologia per la scelta di componentistica non rad-hard in missioni spaziali e verifica sperimentale"

Sergio Legramandi

Carlo Gavazzi Space, Milano

Nella scelta dei componenti per applicazioni spaziali in missioni con bassi livelli di radiazioni, bisogna comunque garantire, con un certo grado di confidenza, che i componenti utilizzati non siano particolarmente sensibili alle radiazioni presenti nello spazio. In particolare si richiede la resistenza a bassi livelli di danno da ionizzazione (2-15 krad(Si)), ed una immunità al "Single Event Latch-up" (SEL) per particelle con $LET > 36 \text{ MeV} \times \text{cm}^2/\text{mg}$. La verifica viene fatta attraverso il confronto con i dati presenti in alcuni database e con dati eventualmente in possesso al fornitore. Per i "Single Event Upset" (SEU) si cerca di calcolare una stima della frequenza degli errori unita ad una valutazione degli effetti sul sistema. Viene infine presentato un test specifico su di un transistor MOSFET 2N6796 dove dei campioni presi da uno stesso lotto sono stati testati per verificare la resistenza a livelli di danno da ionizzazione superiore ai 10 krad(Si).

3.7. "Procurement di componenti per applicazioni spaziali"

Salvatore Iacono

Top-Rel, Roma

In questo intervento vengono espone le attività associate all'acquisizione (procurement) di componenti ad alta affidabilità per l'industria aerospaziale. Vengono descritti gli obiettivi propri di un'agenzia di procurement (elevati standard di qualità, riduzione dei costi, rispetto dei tempi di consegna, etc.) e le azioni svolte per assicurare il successo della missione. A partire dai requisiti di programma, viene descritto il flusso di procurement e gli strumenti utilizzati. In particolare vengono delineati i due principali sistemi di specifiche utilizzati nella "quality assurance": il sistema Military Specification e Standard Microcircuit Drawings (SMD) del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti ed il sistema European Space Components Coordination (ESCC) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Vengono descritte a grandi linee le procedure dei test eseguiti sui componenti di volo sia dal costruttore sotto il controllo dell'agenzia di procurement sia quelli eseguiti dall'agenzia stessa. Particolare rilievo verrà dato ai test di resistenza alle radiazioni.

3.8. "ASIC per CAN BUS su satellite"

Stefania Chicca

Aurelia Microelettronica, Viareggio (Lucca)

L'adozione del protocollo di comunicazione CAN sta diventando di largo uso in applicazioni spaziali, poiché offre un protocollo di comunicazione multimaster, una velocità dati pari allo standard MIL-STD-1553, un protocollo robusto rispetto agli errori di trasmissione/ricezione, ed una tecnologia ormai matura. Si presenta quindi una rapida introduzione del protocollo di comunicazione CAN bus rispetto allo standard MIL-STD-1553 ed al bus RS485.

A causa della difficoltà di reperire sul mercato tecnologie ad alta tensione a basso costo e che offrano caratteristiche di resistenza alle radiazioni per applicazioni spaziali, è stata usata una tecnologia commerciale ad alta tensione per implementare un CAN transceiver, soddisfacente i requisiti dello standard ISO-11898, nell'ambito del progetto CASTA per l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Le caratteristiche di resistenza alle radiazioni del dispositivo sono state migliorate, rispetto alle caratteristiche intrinseche della tecnologia, attraverso tecniche di progetto; misure di caratterizzazione della resistenza alle radiazioni con ioni di alta energia sono state eseguite presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN.

3.9. "L'esperimento di Astrofisica GLAST"

Riccardo Rando

Dipartimento di Fisica, Università di Padova

GLAST è un osservatorio astrofisico su satellite progettato per osservazioni gamma di sorgenti celesti ad alte energie (~500 MeV). Lo strumento principale, il "Large Area Telescope" (LAT), è composto da un tracciatore al silicio a microstrisce, un calorimetro scintillatore ed uno schermo di anticoincidenza. L'elettronica del tracciatore e parte dell'elettronica di controllo sono state validate per gli effetti da evento singolo e di dose totale ai Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN, utilizzando ioni pesanti e raggi gamma.

La lezione tratterà la descrizione dell'apparato, in particolare del LAT, l'individuazione dei test rilevanti per le caratteristiche della missione riguardante i rivelatori e l'elettronica, la progettazione del sistema di misura ed i risultati sperimentali ottenuti.

Space Weather e ApparatI di Test

4.1. "Space Weather: caratterizzazione delle emissioni ad alta energia"

Mauro Messerotti

INAF-Osservatorio Astronomico di Trieste

L'evoluzione temporale delle condizioni fisiche dell'ecospatio, descritte come "Space Weather", sono interamente determinate dalle caratteristiche spaziali, temporali ed energetiche del flusso di radiazioni e particelle provenienti dalla stella Sole e da sorgenti astrofisiche esterne al Sistema Solare. In tale contesto, si illustrerà il quadro fenomenologico complessivo riguardante le radiazioni ad alta energia che interessano il sistema Terra alla luce delle più recenti osservazioni, evidenziando la particolare complessità che ne rende problematica la modellistica globale e, conseguentemente, la previsione dei geoeffetti più significativi.

4.2. "European SEE Irradiation Facilities and ESA Standards for Radiation Testing"

Reno Harboe-Sorensen

European Space Agency/ESTEC, The Netherlands

Single Event Effects (SEEs) in spacecraft systems has resulted in years of research and development focusing on the space environment, on ground simulation testing, on event predictions and engineering tools and standards. Dedicated ground test facilities and test systems allowed component radiation evaluation and characterization to be carried out. However, advancement in device technology together with increased complexity, architecture and packaging assemblies, pose ever-increasing challenges, which need to be solved if accurate and correct, SEE testing still have to be carried out. One of these problems, the use and availability of suitable irradiation facilities will be addressed in this talk.

Following a short introduction covering the various space environments, some spacecraft radiation anomalies and component trends, earlier used test facilities will be introduced before focusing on today's SEE irradiation facilities. Main characteristics of some of the more popular heavy ion and proton accelerators will be highlighted together with their dedicated SEE test areas. Some advantages and limitations will also be addressed before a series of component SEE data, obtained at different facilities, will be presented.

4.3. "Sistema laser per test di SEE e per la mappatura della sensibilità alla radiazione dei circuiti integrati"

Behcet Alpat

INFN Sezione di Perugia

Viene descritto un sistema a diodo laser impulsato per lo studio, in laboratorio, degli effetti da evento singolo sui circuiti integrati. Vengono messi a confronto i risultati dei test effettuati con ioni pesanti, elencando vantaggi e limitazioni del sistema. Viene infine illustrata la possibilità di usare il sistema per ottenere la mappatura della sensibilità alla radiazione dei circuiti integrati.

4.4. "Qualifica di componenti elettronici resistenti alle radiazioni: cenni sulla normativa di riferimento ed impianti di irraggiamento presso il Centro di Ricerche dell'ENEA-Casaccia"

Stefania Baccaro

ENEA, Centro di Ricerche della Casaccia, S. Maria di Galeria (Roma)

La qualifica di componenti elettronici alla resistenza a radiazione si basa sulla possibilità di simulare presso impianti di irraggiamento, i principali effetti indotti dalla radiazione, quali ionizzazione e dislocazioni. Tali qualifiche devono essere eseguite secondo procedure internazionali che verranno brevemente descritte: operare nell'ambito di queste, quali ad esempio MIL-STD-883E e ESA/SCC Basic Specification 22900 per le applicazioni spaziali, garantisce e consente il confronto dei risultati su componenti qualificati presso impianti diversi. In conclusione saranno descritti gli impianti di irraggiamento operanti presso i laboratori dell'ENEA-Casaccia (Roma), quali l'impianto di irraggiamento gamma Calliope e le tecniche di dosimetria utilizzate, ed i reattori nucleari TRIGA e TAPIRO.

4.5. "Gli acceleratori di elettroni"

Piergiorgio Fuochi

Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività del CNR, Bologna

Gli acceleratori di elettroni, macchine che convertono energia elettrica in corrente elettronica, sono una valida alternativa alle sorgenti radioattive per ottenere radiazioni ionizzanti: sono, infatti, intrinsecamente sicuri, precisi, facilmente controllabili e, contrariamente alle sorgenti radioattive, possono essere accesi o spenti a piacere. Inoltre, le energie del fascio di elettroni e la potenza erogata possono essere modulate su un ampio intervallo. Gli acceleratori utilizzati oggi sono di diversi tipi, tuttavia alcune caratteristiche e principi costruttivi sono comuni a tutti. Gli elettroni vengono emessi da un filamento, di solito di tungsteno, che funge da catodo e vengono accelerati all'interno di un tubo sotto vuoto da un campo elettrostatico (acceleratori elettrostatici), oppure da un campo elettromagnetico (acceleratori a radiofrequenza). Una volta accelerati, gli elettroni escono dalla macchina acceleratrice attraverso una sottile finestra (poche decine di μm di spessore) di metallo, sotto forma di un fascio che viene fatto incidere sul materiale da irraggiare. Voltaggio e corrente del fascio sono i due parametri che caratterizzano un acceleratore di elettroni. Il primo determina l'energia e quindi il potere di penetrazione degli elettroni nel materiale mentre, a parità di voltaggio o energia, il secondo determina la quantità di materiale che può essere irradiato nell'unità di tempo. Verranno quindi descritti i principi costruttivi delle tre classi di acceleratori (di bassa, media e alta energia) che vengono comunemente usati per applicazioni industriali e per ricerca.