

DANNEGGIAMENTO DELLE CELLE SOLARI IN AMBIENTE SPAZIALE

M. Palmisano Romano

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale, DIMeG - Politecnico di Bari
Viale Japigia 182, 70126 Bari – e-mail: palmisano@dimeg.poliba.it*

ABSTRACT

It is known that damaging effects, caused by space environment (neutral gas, plasma, radiation and debris), influence mechanical, optical and thermal performances of exposed space structures or critical spacecraft system (solar array, optical instrument and thermal control system) and can cause the structural failure of the spacecraft. For this reason in the parameter of mission plan it is important to hold account the progressive degradation due to the action of several environment factors.

In this work, the behaviour of solar cells in a radiation environment has been described. The wide range of electron and proton energies present in the space environment necessitates some method of describing the effects of various types of radiation in terms of a radiation environment which can be produced under laboratory conditions. In summary, the omnidirectional space radiation is converted to a damage equivalent unidirectional fluence at a normalised energy and in terms of a specific radiation particle. This equivalent fluence will produce the same damage as that produced by omnidirectional space radiation considered if the relative damage coefficient is properly defined to allow the conversion. When the equivalent fluence is determined for a given space environment, the parameter degradation can be evaluated in the laboratory by irradiating the solar cell with the calculated fluence level of unidirectional normally incident flux. The equivalent fluence is normally expressed in terms of 1 MeV electrons or 10 MeV protons.

SOMMARIO

È stato dimostrato che l'ambiente spaziale, naturale ed indotto, produce danneggiamenti di tipo meccanico, termico ed ottico alle superfici esposte e alle strumentazioni che ne degradando le performance, tanto da compromettere la riuscita della missione.

In questo lavoro si è focalizzato in particolare il comportamento delle celle solari sottoposte all'ambiente radiativo, uno dei fattori più critici dello space environment, descrivendo gli effetti sulle celle stesse delle diverse particelle presenti (elettroni e protoni) a vari livelli energetici, utilizzando delle fluenze equivalenti, che generano un danneggiamento equivalente a quello realmente prodotto durante l'esposizione in situ. L'uso di queste grandezze equivalenti (espresse in termini di elettroni ad 1MeV e di protoni ad 10 MeV) aiuta a riprodurre più facilmente in laboratorio, durante i test a terra, le condizioni operative di missione.

INTRODUZIONE

Il problema primario, in fase di progettazione di strutture spaziali destinate a lunga vita operativa (come *l'International Space Station*), consiste nella previsione dei meccanismi e delle modalità d'interazione tra la struttura e l'ambiente operativo nel quale queste sono destinate a vivere e ad operare: il conseguente danneggiamento prodotto influenza le proprietà meccaniche, termiche ed ottiche. Perciò è indispensabile nei parametri di progetto della missione considerare questa degradazione progressiva causata dai vari fattori ambientali, in quanto la stabilità dei materiali, intesa come compatibilità all'ambiente operativo, rappresenta un limite tecnologico per il raggiungimento degli scopi di missione. L'esigenza poi per i satelliti di nuova generazione di una vita operativa più lunga nasce dalla necessità di una effettiva riduzione dei costi in quanto sia la manutenzione, sia le riparazioni, sia la sostituzione di parti della struttura costituiscono oggi il maggior impegno di spesa per garantire che la missione vada a buon fine.

L'*Hubble Space Telescope* ne è un esempio, costretto a ricevere la visita di "missione di servizio" per essere ancora operativo (in media una ogni tre anni, da quando è stato lanciato -'90). Nell'ultima missione (marzo 2002) sono stati sostituiti i quattro pannelli solari, ai quali è demandata la produzione della potenza necessaria per il satellite. I pannelli, sottoposti al continuo bombardamento della radiazioni e del debris, avevano perso la loro efficienza e risentivano di gravosi cicli termici causati dalle variazioni delle temperature orbitali (con deformazioni e stress termici non trascurabili). I nuovi pannelli sono più piccoli, più rigidi, meno suscettibili al danneggiamento dall'ambiente; di contro producono il 30 % di potenza in più rispetto ai predecessori (già sostituiti a loro volta 8 anni fa).

La finalità di questo studio rientra tra quelli condotti in collaborazione tra il Politecnico di Bari e l'Università "La Sapienza" di Roma [1] per la progettazione e la realizzazione di un simulatore dell'ambiente spaziale, mediante il quale si possano riprodurre e caratterizzare a terra gli effetti all'ambiente operativo sia su campioni di materiale, sia su prototipi in scala di strutture orbitanti. La più probabile riproducibilità dei singoli fattori dello *space environment* consentirà all'apparato sperimentale di simulare non solo gli effetti delle singole componenti, ma anche il complesso delle interazioni sinergiche presenti (cicli termici, raggi UV, radiazioni, ossigeno atomico e plasma).

In particolare, in questo lavoro, dopo aver caratterizzato un particolare profilo di missione (tipico della ISS) nel quale opera la struttura, se ne è descritto l'ambiente con particolare riguardo a quello radiativo (elettroni e protoni "intrappolati" dal campo magnetico terrestre e protoni solari), determinando la fluensa di queste particelle a vari livelli energetici. Di seguito si è valutato (grazie allo *SPENVIS* - Space ENVironment Information System) il comportamento delle celle solari sottoposte a queste radiazioni, introducendo alcune grandezze equivalenti, utili a rappresentare e a riprodurre le varie condizioni operative nelle simulazioni a terra, in funzione dei parametri caratteristici dei dispositivi, quali la potenza massima, la tensione a circuito aperto e la corrente di corto circuito. Infatti, è ragionevole assumere che il danneggiamento prodotto da questi elettroni e protoni è riferibile ad una fluensa equivalente (ad 1 MeV per flussi elettronici e a 10 MeV per flussi protonici): le varie componenti della radiazione presente saranno rappresentabili da questa grandezza, senza una determinazione laboriosa della degradazione delle costanti per ogni valore dello spettro energetico e delle particella. Questi valori energetici scelti rappresentano sia una componente significativa sia

comune della radiazione spaziale; risultano anche essere riproducibili adeguatamente in test di prova. Questa fluenza equivalente produrrà lo stesso danneggiamento di quello prodotto da una considerata radiazione dello spazio se il coefficiente del danneggiamento relativo D è definito correttamente. Quando la fluenza equivalente è determinata per un dato ambiente spaziale, la degradazione dei parametri d'uscita può essere valutata in laboratorio irradiando la cella solare con un livello di fluenza calcolato con un flusso unidirezionale incidente normalmente.

CARATTERIZZAZIONE DELL'AMBIENTE OPERATIVO DI MISSIONE

Per conoscere e studiare le peculiarità delle condizioni ambientali che dovranno essere riprodotte nel realizzando laboratorio, si è rappresentato numericamente un ambiente caratteristico di una tipica missione (come quella della ISS a 400 Km, 51.6°), con particolare riguardo a quello radiativo (elettroni e protoni “intrappolati” dal campo magnetico terrestre e protoni solari). Questa radiazione, oltre a danneggiare la struttura cristallina dei materiali (celle fotovoltaiche comprese), è letale all'esposizione dei tessuti umani e, aumentando il livello di carica dei moderni circuiti integrati, causa un bug nei dati o nel software di sistema, generando malfunzionamenti o danneggiamenti alle apparecchiature elettroniche on-board. Per determinare la fluenza di queste particelle a vari livelli energetici, si sono utilizzati i modelli implementati nello *Spennis*, quali l'AE-8 e AP-8 [2] per le particelle intrappolate, e il JPL-91[3] per i protoni solari. Nella fig. 1 si riporta la fluenza (per missione di 1 anno) in funzione dello spettro energetico del flusso delle particelle.

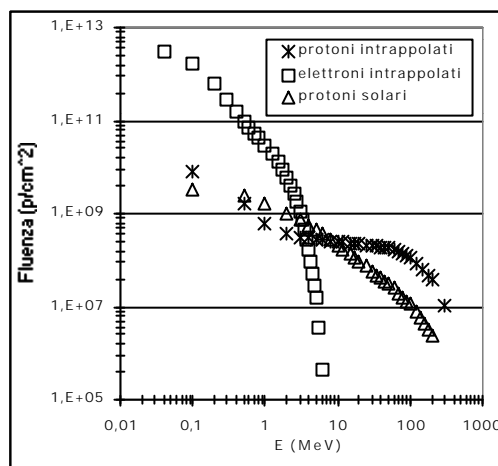


Figura 1. Fluenza di missione calcolata in funzione dello spettro energetico.

IL DANNEGGIAMENTO PER LE CELLE SOLARI

Il comportamento delle celle solari sottoposte a questo flusso radiativo può essere descritto in termini di variazione dei parametri caratteristici dei dispositivi, quali la potenza massima (P_{max}), la tensione a circuito aperto (V_{oc}) e la corrente di corto circuito (I_{sc}). L'esperienza [4] ha mostrato che queste variazioni possono essere descritte dalla relazione empirica (1), sebbene vi sono ampie giustificazioni teoriche alla stessa.

$$X = X_0 - C * \log(1 + \mathbf{f} / \mathbf{f}_x) \quad (1)$$

Nella (1), X rappresenta i parametri di output delle celle (quali appunto I_{sc} , V_{oc} , P_{max}), X_0 gli stessi ad inizio vita operativa, \mathbf{f} la fluenza radiativa e \mathbf{f}_x il valore della fluenza radiativa nel quale i parametri X iniziano ad assumere un andamento lineare in una scala

logaritmica della fluenza stessa. La costante C^* , diversa per ogni parametro d'uscita, rappresenta la diminuzione di X per decade della scala logaritmica in funzione della fluenza radiativa. I tre parametri caratteristici sono poi legati tra loro dalle:

$$P_{\max} = f I_{sc} V_{oc} ; \quad V_{oc} = (kT/q) \ln(1 + I_{sc} / I_0) \quad (2)$$

Il vasto spettro di energia elettronica e protonica presente nell'ambiente spaziale necessita però di qualche metodo più diretto per descrivere gli effetti della degradazione delle celle solari causata da vari tipi di radiazione in funzione dello stesso ambiente radiativi, simulabile al meglio in laboratorio. Questi metodi sono basati sulle tecniche riportate in [5,6]. In sintesi, la radiazione spaziale omnidirezionale è convertita in una fluenza unidirezionale di danneggiamento equivalente con una ben determinata energia normalizzata ed in termini di specifiche particella radiative. Questa fluenza equivalente produrrà lo stesso danneggiamento di quello prodotto da una considerata radiazione omnidirezionale dello spazio se, introducendo una nuova grandezza, il coefficiente del danneggiamento relativo D , questa è definita in maniera corretta. Quando la fluenza equivalente è determinata per un dato ambiente spaziale, la degradazione dei parametri d'uscita può essere valutata in laboratorio irradiando la cella solare con un livello di fluenza calcolato con un flusso unidirezionale incidente normalmente.

Il valore energetico impiegato per la normalizzazione del relativo danneggiamento dovrebbe avere tre caratteristiche: *i*) essere simile a quello che ha prodotto il massimo danneggiamento nell'ambiente spaziale, *ii*) produrre un danneggiamento relativamente uniforme e *iii*) essere disponibile per le simulazioni in laboratorio. Però, il fenomeno è reso anche più complesso in quanto il comportamento all'impatto dei flussi elettronici è diverso da quello dei flussi protonici. Infatti i primi (con energia di qualche MeV) penetrano le celle solari al silicio abbastanza completamente tanto che i danni prodotti possono essere considerati uniformi lungo tutta la traiettoria di ogni singola particella impattante. Di contro, i flussi protonici (con energia minore di 10 MeV) a causa delle loro limitata penetrabilità nel materiale, generano un danneggiamento non uniforme, con una zona altamente danneggiata che si concentra alla fine della traiettoria della particella. L'utilizzo come valore di normalizzazione del danneggiamento prodotto da fasci elettronici a 1 MeV e da fasci protonici a 10 MeV è basato appunto su un compromesso di alcuni requisiti, che tengono conto anche del livello medio della fluenza di missione riscontrata (fig. 1). Nella pratica del calcolo del flusso equivalente, lo spettro verrà pesato su tutte le sue componenti, come descritto in seguito.

CALCOLO DEL COEFFICIENTE DEL DANNEGGIAMENTO RELATIVO D

Si può assumere che una configurazione base di una cella solare abbia una schermatura finita, trasparente otticamente (*coverglass*), che copre la superficie anteriore della cella e una protezione posteriore infinita. Assumere quest'ultima infinita non è sempre valido: le differenze nello spessore e nel materiale della protezione richiedono delle analisi separate tra la radiazione incidente anteriormente e posteriormente.

Si consideri un flusso radiativo omnidirezionale con energia E che incide sulla schermatura di spessore t della cella solare. Le particelle che non rimangono intrappolate nella schermatura penetrano nella sottostante cella al silicio con energia E_0 ($<E$). Questa diminuzione dell'energia è funzione (oltre dell'energia stessa) sia

dell'angolo di incidenza con cui impattano le particelle sia dalla traiettoria seguita nella protezione, cioè $\hat{A}(E_0) = \hat{A}(E, \mathbf{q}t) = \hat{A}(E) \cdot (t/\cos \mathbf{q})$.

Si ha che l'espressione per il coefficiente del danneggiamento relativo $D(E, t)$ di particelle radiative omnidirezionali con energia E , relative ad un flusso unidirezionale (per cella con coverglass di spessore t e schermatura posteriore infinita), è data dalla:

$$D(E, t) = \frac{1}{4\mathbf{p}} \int_0^{\mathbf{p}/2} D(E_0, \mathbf{q}) 2\mathbf{p} \sin \mathbf{q} \cos \mathbf{q} d\mathbf{q} \quad (3)$$

dove $D(E_0, \mathbf{q})$ è il coefficiente del danneggiamento di particelle radiative omnidirezionali incidenti con angolo \mathbf{q} ed energia E_0 , l'energia all'impatto del flusso sulla cella solare.

La valutazione di $D(E_0, \mathbf{q})$ è necessaria per completare l'integrazione dell'equazione (3). Bisogna, però, tenere in considerazione le difformità di comportamento tra flussi elettronici e protonici all'impatto con celle. Infatti, i flussi elettronici a bassi valori energetici generano un danneggiamento uniforme lungo tutta la traiettoria in quanto penetrano abbastanza completamente la struttura. Perciò, la quantità del danneggiamento da *displacement* prodotto da un elettrone è proporzionale alla lunghezza totale della traiettoria percorsa nella cella. Allora si ha che:

$$D(E_0, \mathbf{q}) = D(E_0, 0) / \cos \mathbf{q} \quad (4)$$

Sostituendo la (4) nella (3) il termine $\cos \mathbf{q}$ si annulla: il danneggiamento indotto nella cella risulta indipendente dell'angolo di incidenza \mathbf{q} . Quindi, nel caso di radiazione spaziali elettroniche la $D(E, t)$ diventa:

$$D(E, t) = \frac{1}{4\mathbf{p}} \int_0^{\mathbf{p}/2} D(E_0, 0) 2\mathbf{p} \sin \mathbf{q} d\mathbf{q} \quad (5)$$

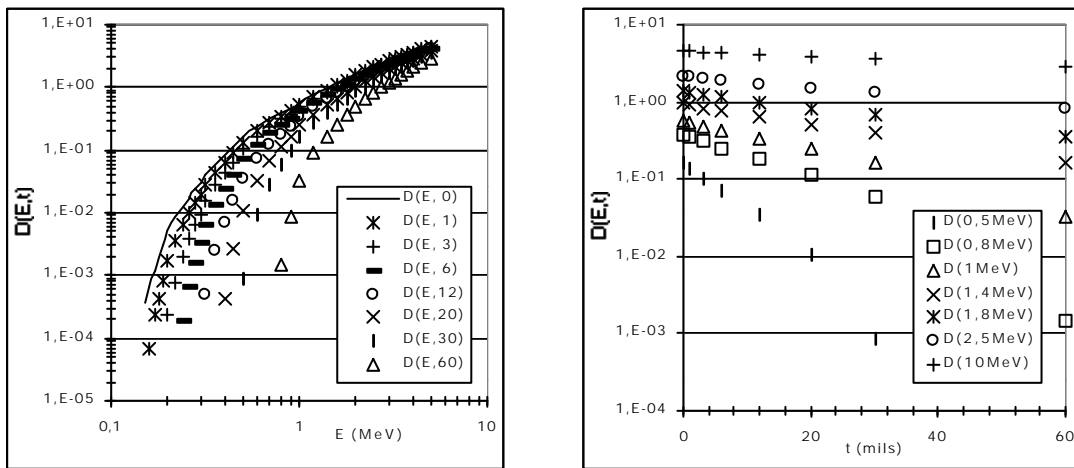


Figure 2 a-b. Coefficiente del danneggiamento relativo per radiazioni spaziali elettroniche su celle solari al silicio, in funzione dello spettro energetico e dello spessore della protezione.

I risultati della (5) sono riportati nelle figure 2 a-b. All'aumentare dell'energia del flusso elettronico D aumenta, tendendo asintoticamente alla curva $D(E, 0)$ della cella non

protetta. Per uno stesso valore dell'energia del flusso impattante, D diminuisce all'aumentare dello spessore t . Questa diminuzione è più pronunciata per bassi valori dello spettro energetico.

Invece, per la radiazione spaziale protonica (derivante sia da flussi protonici "intrappolati" sia da protoni solari), la valutazione della (3) è più complessa rispetto al caso elettronico a causa della limitata penetrabilità e dell'aumento del danneggiamento locale. Infatti, l'aspetto tipico di questo danneggiamento è che la maggior parte delle delocalizzazioni si hanno all'estremità della traiettoria del protone, permettendo l'utilizzo di un modello semplificato per la previsione dell'effetto dell'angolo dell'incidenza sul danneggiamento stesso. Si assume cioè che l'effetto di un protone a bassa energia (ad incidenza non nulla) è simile a quello di un protone che incide normalmente, ma che ha una profondità di penetrazione uguale a quella di un protone che non incide normalmente. Per correggere l'inaccuratezza di questo modello, si utilizza un fattore correttivo che lega il rapporto degli spostamenti totali prodotti da una incidenza non normale a quelli ad incidenza normale (che possono comunque penetrare con la stessa profondità nella cella). Il numero totale delle delocalizzazioni si calcolano usando il modello di Kinchin e Pease [7]: per protoni che impattano sulla cella con energia E_0 ed angolo di incidenza \mathbf{q} $D(E_0, \mathbf{q})$ può essere espresso nel modo seguente:

$$D(E_0, \mathbf{q}) = D(E_n, 0) \frac{N_{id}(E_0)}{N_{id}(E_n)} \quad (6)$$

dove $D(E_n, 0)$ è il coefficiente del danneggiamento relativo per un protone che impatta ad incidenza normale con energia E_n ; $N_{id}(E_0)$ il numero totale delle delocalizzazioni nel silicio generate da un protone che penetra con energia E_0 ; $\cos \mathbf{q}$ la proiezione sulla normale della superficie della cella; $\hat{A}(E_n) = \hat{A}(E_0) \cos \mathbf{q}$, E_0 l'energia del protone all'uscita dal coverglass e all'ingresso della cella solare stessa. È ovvio che quando la traiettoria di un protone con energia E_0 ed angolo di incidenza \mathbf{q} è maggiore della funzione $(t/\cos \mathbf{q})$, il protone penetrerà la cella. Questo caso è analogo al caso discusso in precedenza per gli elettroni e varrà la (4) ed insieme alla (6) si potrà valutare $D(E, t)$ per celle protette posteriormente con schermatura infinita nel seguente modo:

$$D(E, t) = \frac{1}{4\mathbf{p}} \int_0^{q_p} D(E_0, \mathbf{q}) 2\mathbf{p} \sin \mathbf{q} l \mathbf{q} + \frac{1}{4\mathbf{p}} \int_{q_p}^{p/2} D(E_n, 0) \frac{N_{id}(E_0)}{N_{id}(E_n)} 2\mathbf{p} \sin \mathbf{q} \cos \mathbf{q} l \mathbf{q} \quad (7)$$

dove \mathbf{q} è l'angolo di incidenza per un protone con energia E che penetrerà il coverglass e la cella solare. Il primo termine della (7) descrive il caso quando il protone penetra completamente il coverglass e la cella solare, mentre il secondo termine si utilizza quando il protone penetra il coverglass ma si arresta nella cella.

I risultati della (7) per protoni intrappolati sono riportati nelle figure 3 a-b. Andamenti simili si riscontrano per protoni solari. In generale nel caso di flussi protonici l'andamento della degradazione è più complesso rispetto al caso elettronico, a causa della natura non uniforme del danneggiamento, specie a bassi valori energetici del flusso impattante. Dalla fig. 3a si riscontra che per valori di E compresi tra 1.5 e 3 MeV il danneggiamento è massimo per celle non protette. All'aumentare di t , il picco di danneggiamento diminuisce di intensità, ma si posiziona ad E maggiori del flusso, cioè all'aumentare dell'energia, aumenta la penetrabilità del flusso, ma diminuisce il

danneggiamento. Da valori energetici di 10 MeV e superiori il danneggiamento diventa uniforme. Da questo intervallo energetico è direttamente applicabile il concetto generale dell'equivalenza, anche se con i dovuti accorgimenti viene usato per valori energetici più bassi.

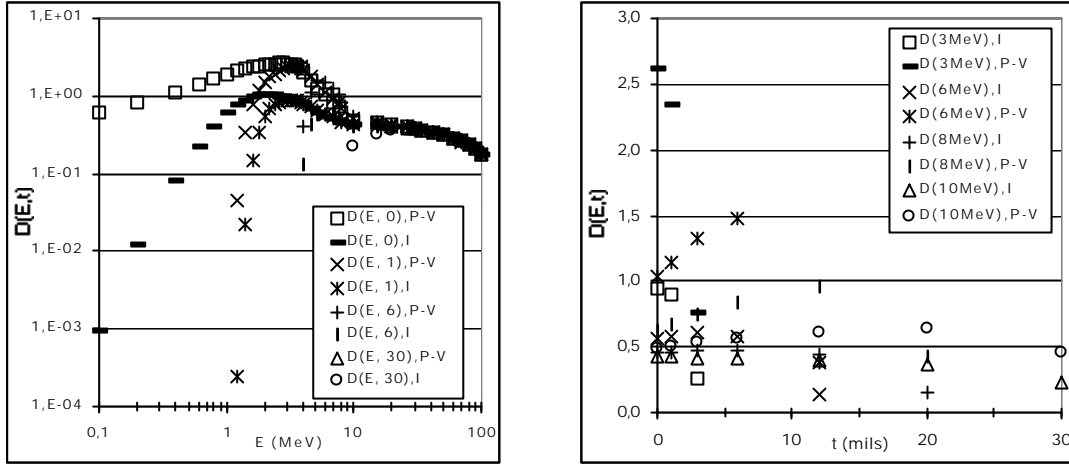


Figure 3 a-b. Coefficiente del danneggiamento relativo per radiazioni spaziali protoniche intrappolate su celle solari al silicio, in funzione dello spettro energetico e dello spessore della protezione.

È anche evidente rispetto al caso elettronico un'altra differenza sostanziale. Qui la degradazione colpisce maggiormente i parametri tipo la V_{oc} e la P_{max} rispetto alla I_{sc} , quanto più è basso il valore dell'energia del flusso impattante (come da fig. 3). Poiché questi valori più alti di D per la P_{max} e la V_{oc} sono dovuti agli effetti che producono vicino alla giunzione, in letteratura è precisato che questi valori dei coefficienti dovrebbero essere usati soltanto quando i protoni incidono anteriormente alla superficie della cella. Quando la struttura della cella non è montata a corpo, riceve anche flussi incidenti sulla superficie posteriore della cella: in questo caso per caratterizzare la degradazione è consigliabile usare i coefficienti di danneggiamento riferiti alla I_{sc} . Perciò vengono sempre condotte analisi separate per valutare D riferito all' I_{sc} e alle V_{oc} e P_{max} .

PROCEDURA PER IL CALCOLO DELLA FLUENZA EQUIVALENTE

I coefficienti D del danneggiamento relativo permettono la conversione di vari spettri di energia di flussi elettronici e protonici spaziali in fluenze equivalenti. Il processo di pesare uno spettro integrale di energia può essere descritto [8], per il caso elettronico, nel seguente modo:

$$\mathbf{f}_{1MeV,e} = \sum_1^n \mathbf{f}_{equiv,e}(E_i, t) = \sum_1^n [\mathbf{f}(E_i) - \mathbf{f}(E_i + \Delta E)] D(E_i, t) \quad (8)$$

dove $\mathbf{f}_{1MeV,e}$ è la fluenza elettronica ad 1 MeV del danneggiamento equivalente, $[\mathbf{f}(E_i) - \mathbf{f}(E_i + \Delta E)]$ è la fluenza nell'intervallo dello spettro $[E_i, E_i + \Delta E]$ e $D(E_i, t)$ il coefficiente del danneggiamento relativo per energia E_i incidente sulle celle solari protette da

coverglasses di spessore t . Nelle fig. 4 vengono riportati gli andamenti delle fluenze equivalenti $f_{equiv,e}(E_i,t)$ in funzione dell'energia del flusso e dello spessore della protezione. La curva continua in fig. 4a rappresenta la fluenza di missione, mentre quella in fig. 4b rappresenta la $f_{1MeV,e}$. In fig. 4b, il primo valore riportato (per $t < 0$) per ogni curva della fluenza è il dato della fluenza di missione calcolato per quel livello energetico.

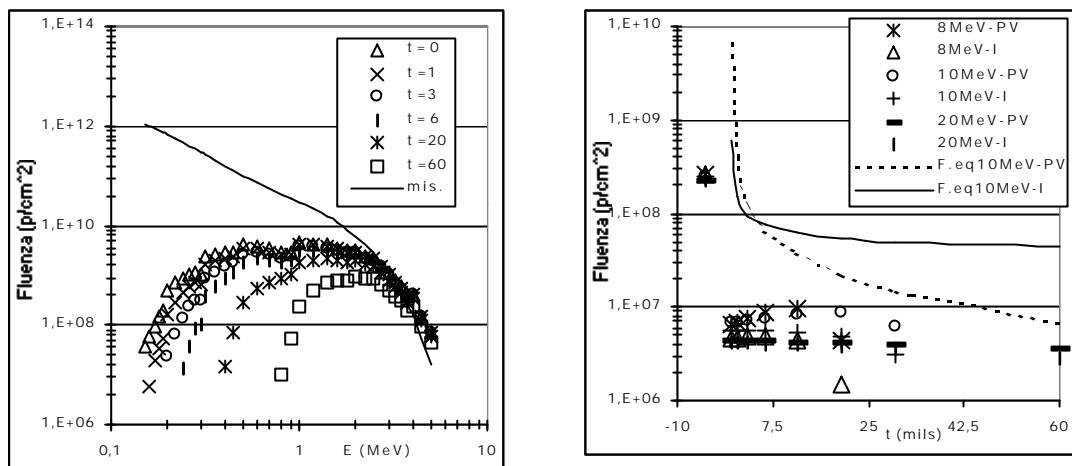


Figura 4 a-b. Andamenti delle fluenze equivalenti in funzione dell'energia del flusso elettronico e dello spessore della protezione.

L'espressione (8) si può usare anche per il caso protonico con l'eccezione che la fluenza equivalente sarà calcolata come una fluenza del danneggiamento equivalente a 10 MeV e non a 1 MeV. Analoghe osservazioni a quelle fatte per le fig. 4, si possono fare per le fig. 5. In più, dato che si sono trovati valori differenti di $D(E,t)$ per radiazione protoniche quando questo danneggiamento è valutato in termini di I_{sc} o di P_{max} e V_{oc} , sono state estrapolate due diverse fluenze equivalenti a 10 MeV: una descriverà la variazione della P_{max} e della V_{oc} della cella solare, l'altra la variazione dell' I_{sc} .

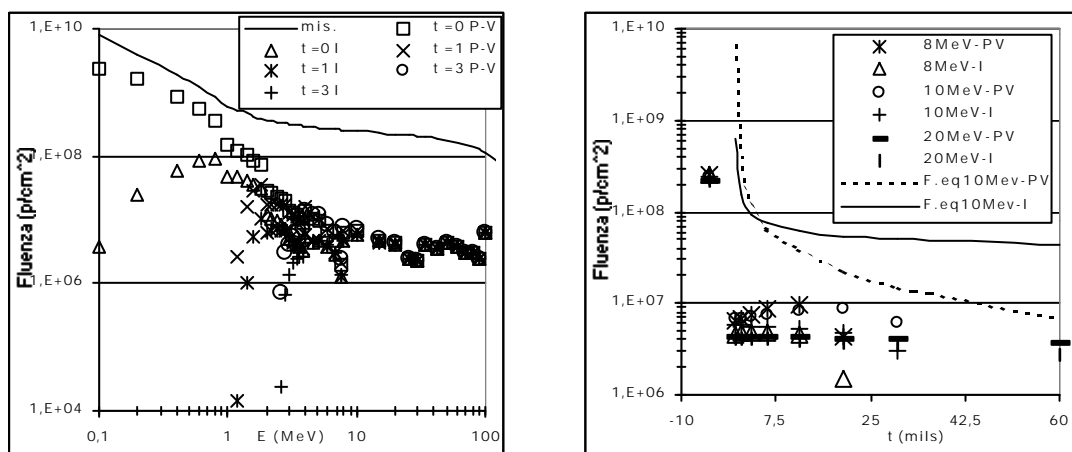


Figura 5 a-b. Andamenti delle fluenze equivalenti in funzione dell'energia del flusso protonico "intrappolato" e dello spessore della protezione.

In più, per combinare gli effetti del danneggiamento protonico con quello elettronico, in letteratura si è soliti riportare la calcolata fluena equivalente protonica a quella elettronica nel seguente modo:

$$f_{1\text{MeV},e} = 3 \cdot 10^3 f_{10\text{MeV},p} \quad (9)$$

Questa relazione è puramente un'approssimazione, stante la diversità tra i due tipi di danneggiamento. Comunque, il valore di conversione di $3 \cdot 10^3$ è indicativamente usato per parametri d'uscita della cella degradati al 25%. Nei casi in cui la degradazione della cella è interamente dominata da danneggiamento protonico, la degradazione della cella dovrà necessariamente essere valutata calcolando la fluena protonica equivalente a 10 MeV, usando i connessi dati di danneggiamento e non quelli derivanti da flussi elettronici. Per questo motivo risulterà fondamentale conoscere l'esatto ambiente operativo nel quale dovrà operare la missione.

Riportando tutto ad una fluena equivalente elettronica così come da (9), gli andamenti della stessa in funzione dello spessore sono riportati in figura 6. In tab.1 si riportano per lo spessore della protezione le scale di corrispondenza tra tre unità di misura.

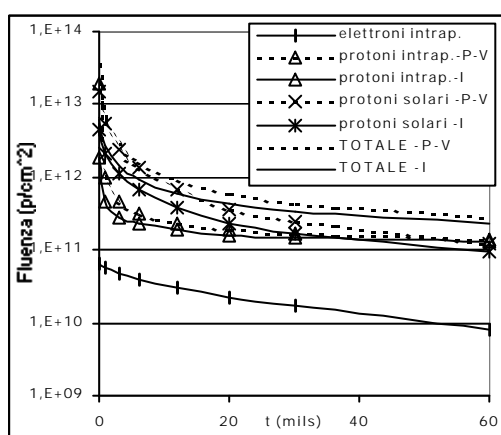


Figura 6. Andamenti della fluena equivalente in funzione dello spessore della protezione

mils	micron	g/cm ²
0	0	0.00000
1	25.41	0.00559
3	76.36	0.01680
6	152.27	0.03350
12	305.00	0.06710
20	509.09	0.11200
30	761.36	0.16750
60	1522.73	0.33500

Tabella 1. Scale di corrispondenza tra tre unità di misura per lo spessore t della protezione

CONSIDERAZIONI FINALI

Questi valori ottenuti delle fluene equivalenti, grazie all'utilizzo del coefficiente del danneggiamento relativo D, possono essere utilizzati in laboratorio per riprodurre e simulare a terra l'ambiente operativo di missione. Passo successivo sarà quello di valicare tali grandezze confrontando i dati di danneggiamento ottenuti in laboratorio irradiando i provini di materiali con queste fluene equivalenti con i dati su provini esposti in situ.

Sicuramente, per una maggiore validità dei dati di fluena equivalente ottenuti, le analisi numeriche dovranno essere compiute su missioni più lunghe, rispetto all'anno considerato in questo lavoro, per ottenere valori delle fluene di missione che tengono conto del reale andamento dei cicli geomagnetici spaziali.

Sarà anche interessante confrontare il comportamento di celle solari al silicio con celle di altri materiali in uso nelle applicazioni spaziali, per esempio il GaAs.

Appaiono importanti anche altre considerazioni. Questo approccio limita la comprensione dei mutamenti fisici che si presentano all'interno di queste strutture, mutamenti che verranno analizzati in fasi successive della ricerca. Comunque, capire sin dall'inizio un modello fisico più semplice fornisce sicuramente un know-how per le valutazioni del comportamento dei materiali in un ambiente complesso. In più, i pannelli solari di nuova generazione potranno essere costituiti da materiali che subiscono in maniera differente il danneggiamento causato dalla radiazione. Per questi motivi si dovrebbero conoscere i vari processi con i quali la radiazione interagisce con la materia e comprendere i modelli fisici che descrivono tali processi.

In più, i valori di $D(E,t)$ sono stati calcolati presupponendo che la protezione posteriore sia infinita. Anche se questa circostanza può considerarsi reale per i pannelli solari montati sul corpo del satellite spinnante, ciò non è sempre vero. In realtà si deve valutare anche il contributo della fluensa equivalente che risulta dalla radiazione incidente sul lato posteriore. Nel caso di flusso elettronico, è ragionevole usare gli stessi valori di $D(E,t)$ sia per radiazione impattante anteriormente sia posteriormente. Il caso protonico è più complesso per i motivi prima enunciati. Infatti, la radiazione protonica impattante nella posteriormente aumenta non soltanto la resistività intrinseca del materiale, ma anche modifica le curve caratteristiche di IV., fenomeni che devono essere inclusi nella valutazione del $D(E,t)$. L'altra raccomandazione è quella di analizzare il danneggiamento, valutando più l' I_{sc} e non la P_{max} e la V_{oc} .

BIBLIOGRAFIA

1. Allegri G., d'Avanzo P., Palmisano Romano M., Marchetti M., "SAS, un Simulatore dell'Ambiente Spaziale: studio della degradazione indotta sui materiali e le strutture", XVI Congresso Nazionale AIDAA, 24-28 Settembre 2001, Palermo.
2. Vette, J. I., "The NASA/National Space Science Data Center Trapped Radiation Environment Model Program (1964-1991)", NSSDC/WDC-A-R&S 91-29, 1991b.
3. Feyman, J., Spitale G., Wang J., Gabriel S., "Interplanetary Proton Fluence Model: JPL 1991", J. Geophys. Res., 98, **13**, 281, 1993.
4. Tada H. Y., Carter J. R. Jr., Anspaugh B. E., Downing R. G., "Solar Cell Radiation Handbook", Third Edition, JPL Publication 82-69, 1982.
5. Brown, W. L., J. D. Gabbe, and W. Rosenzweig, "Results of the Telstar Radiation Experiments", Bell System Technical J., **42**, 1505, 1963.
6. Tada, H. Y., "Equivalent Fluence and Relative Damage Coefficient - Tools For Space Solar Cell Degradation Estimate", IEEE Trans. Nuc. Sci., NS-20, **6**, 234, 1973a.
7. Kinchin, G. W., Pease R. S., "The Displacement of Atoms in Solids by Radiation", Report Prog. Phys., **18**, 1, 1955.
8. SPENVIS, Space environment information system, Manuale d'uso, 2001.