



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Batterie innovative per lo spazio,
l’ambiente e la medicina

Relatore

Prof. Daniele Mengoni

Correlatore

Dr.ssa Carmen Altana

Laureando

Federico Simioni

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Considerazioni iniziali	2
1.2	Struttura della batteria	3
1.3	Principi operazionali	4
1.4	Interazione elettrone-semiconduttore	5
1.5	Energia incidente e deposizione nel materiale	6
1.6	Sorgenti di radioisotopi beta	8
1.7	Semiconduttori per le celle betavoltaiche	11
1.8	Batterie betavoltaiche al Silicio	11
1.9	Obiettivi	13
2	Setup sperimentale	14
2.1	Apparato di misura per le caratteristiche I-V	14
2.2	Rivelatori	14
2.3	Setup di misura	16
3	Analisi dati	18
3.1	Efficienza di conversione	18
3.2	Potenza emessa dalla sorgente	19
3.2.1	Stima dell'angolo solido	19
3.3	Potenza del rivelatore	21
4	Conclusioni e prospettive	26
5	Appendice	28

1 Introduzione

1.1 Considerazioni iniziali

Nonostante il largo utilizzo delle convenzionali batterie elettrochimiche, la limitata durata nel tempo e la tendenza a degradare se poste in condizioni ambientali estreme ne limita l'utilizzo. Le batterie betavoltaiche, composte da una sorgente radioattiva e da materiale semiconduttore, volto a convertire l'energia delle particelle beta in elettricità, hanno acquisito via via maggior seguito per via della loro lunga durata ed alta densità di energia, come si può notare nel seguente grafico comparativo in Figura 1¹.

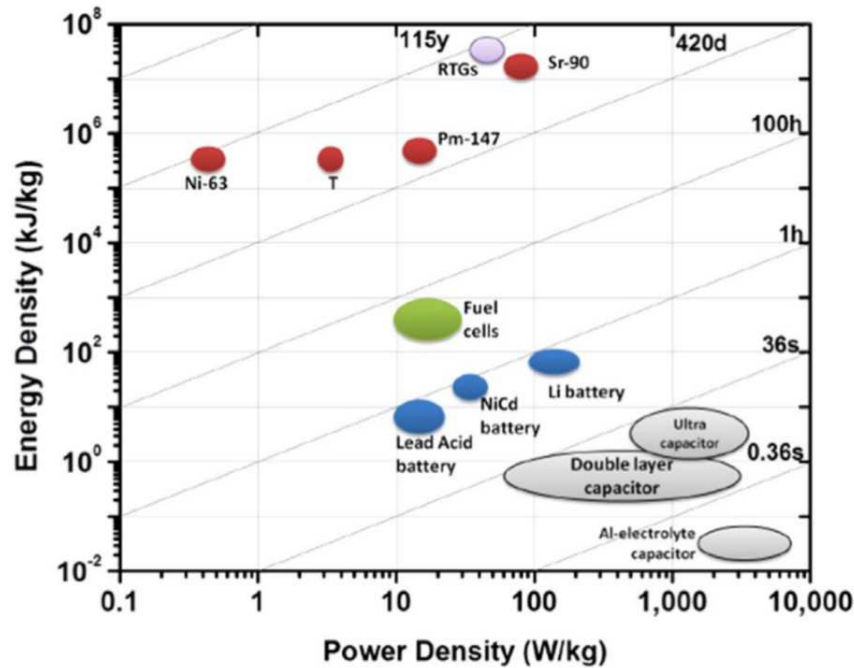


Figura 1: Plot di Ragone [1] in cui sono messi a confronto diverse tipologie di batterie in funzione della densità di energia e di potenza.

Questi motivi le hanno rese un'alternativa sicura e pulita per quelle situazioni in cui la sostituzione della batteria risulterebbe impossibile, o in quei casi in cui è necessario utilizzare generatori di energia a bassa potenza. Il principio di funzionamento è analogo a quello delle celle fotovoltaiche, con alcune differenze dettate dalla natura diversa della radiazione che incide nei convertitori in energia. Nel caso delle batterie qui analizzate, infatti, si sfrutteranno elettroni (spesso nominati mediante il sinonimo di radiazioni β^2 , in analogia con la tipologia di decadimenti da cui sono generati nella sorgente radioattiva presa in esame) mentre nelle celle solari l'energia è ricavata da fotoni provenienti dal sole. Le diverse caratteristiche tra le due particelle appena riportate comporta differenze nell'interazione con la materia: primo fra tutti il fatto che gli elettroni possono dar luogo alla creazione di molteplici coppie elettrone-lacuna³ (colpendo un semiconduttore consistente in una giunzione di tipo p-n, p-i-n o Schottky), a differenza dei fotoni che per interazione fotoelettrica ne possono generare solamente una. In principio questo sembrerebbe favorire le batterie betavoltaiche rispetto a quelle fotovoltaiche, tuttavia i diversi flussi di radiazione incidente (fotoni sono molto più numerosi rispetto agli elettroni

¹Il seguente grafico, e buona parte dell'introduzione, sono stati tratti e ispirati da vari articoli (citati in bibliografia). In particolare il maggior contributo, anche per quanto riguarda l'impostazione, riguarda l'articolo di Chunlin Zhou et al. "Review-Betavoltaic Cell: The Past, Present, and Future"

²Le particelle beta cui si farà riferimento consistono in elettroni, senza considerare i decadimenti β^+ . Il motivo è da riferirsi al fatto che per le antiparticelle l'interazione nella materia ordinaria è diverso, e da' origine al fenomeno di annichilazione (il quale non ha alcuna utilità ai fini prefissati per questo genere di device)

³La produzione avviene mediante ionizzazione del materiale attraversato. Le cariche poi verranno separate (per evitare ricombinazioni) e raccolte per produrre una corrente rilevabile

emessi dalle sorgenti β prese in considerazione) e la dissipazione di energia nelle interazioni tra elettroni e materiali semiconduttori (buona parte dell'energia viene dissipata in fononi ottici e acustici, come si vedrà) mettono in evidenza il maggior limite di questo genere di batterie, ovvero la bassa potenza in uscita, vincolandole a poter alimentare solamente dispositivi che necessitano potenze in ingresso dell'ordine del nanowatt [2]. In aggiunta a quanto detto fino ad ora, bisogna tenere in considerazione che il decadimento β non è un decadimento a due corpi in cui ciascun prodotto ha un'energia ben definita, bensì si tratta di un decadimento a tre corpi. La diretta conseguenza di questa osservazione è che la distribuzione di energia delle particelle β coprirà un range generalmente molto esteso, e quindi elettroni emessi a energie diverse penetreranno a profondità diverse nella giunzione del semiconduttore. Se ne deriva quindi che la distribuzione spaziale delle coppie elettrone-lacuna sarà diversa sarà diversa a seconda dell'energia della radiazione incidente. Come si può facilmente intuire già da queste prime constatazioni, dunque, le efficienze di conversione in energia delle batterie betavoltaiche sono ancora lungi dall'essere comparabili con quelle fotovoltaiche, e gli ostacoli tecnologici da superare non mancano. I primi studi sul processo betavoltaico risalgono al secolo scorso, e negli anni è proceduto in maniera più o meno sostenuta fino al 2006, quando diversi sviluppi tecnologici hanno permesso la realizzazione di strutture di batteria particolarmente efficienti, portando diverse aziende a riuscire nella costruzione dei primi prototipi, uno dei quali (per la City Labs' Nano-Tritium nel 2010) in grado di ottenere pure la "General License" in quanto soddisfacente tutti i requisiti di sicurezza [1]. Negli ultimi anni, le ricerche nel campo delle batterie betavoltaiche si sono concentrate nel miglioramento della loro efficienza e densità di potenza in uscita. Questo, come vedremo in seguito, è stato reso possibile grazie all'ottimizzazione della scelta di un adeguato semiconduttore e della struttura di conversione (p-n, piuttosto che p-i-n, piuttosto che Schottky). In parallelo si sono portati avanti anche studi sul materiale da utilizzare come sorgente di radiazione (^3H , ^{63}Ni , ^{147}Pm , ecc.) e sull'ottimizzazione della potenza trasferita al materiale convertitore. I risultati incoraggianti prospettano un ruolo di primo piano nell'utilizzo di questo tipo di batterie in diversi ambiti, dalla sensoristica remota a quello medico o spaziale[1].

1.2 Struttura della batteria

Una batteria betavoltaica è costituita da più strati di materiale radioattivo (si tratta nella fattispecie di una sorgente di radiazioni di tipo β), insieme a giunzioni di semiconduttori ed elettrodi metallici. Il tipo di giunzioni prese in considerazione può essere di due tipi, in base al tipo di campo elettrico intrinseco presente: la giunzione p-n (p-i-n) o la Schottky[1]. Generalmente, una regione debolmente di tipo i (regione intrinseca) viene presa in considerazione per aumentare la durata di vita media dei portatori di carica generati dalla radiazione, in modo tale da massimizzare la raccolta ai margini della regione di svuotamento, mentre le strutture basate sulla giunzione di tipo Schottky sono state largamente studiate per via della facilità di costruzione, sebbene le efficienze riscontrate sono risultate essere più basse[1]. Ciò suggerisce già uno dei diversi parametri presi in considerazione nella costruzione di una batteria betavoltaica, da pesare a seconda delle esigenze: i costi di produzione e la facilità nella realizzazione su larga scala. Non bisogna dimenticare infatti uno dei presupposti che stanno portando a investire diverse risorse nello sviluppo di questi device: fornire un'alternativa commercialmente valida alle batterie elettrochimiche. Tornando agli aspetti prettamente tecnici, in accordo con la forma di superficie, le batterie betavoltaiche possono essere suddivise in diverse tipologie di strutture (di seguito riportate anche in Figura 2): piatta, porosa, a piramide invertita, porosa 3D. La configurazio-

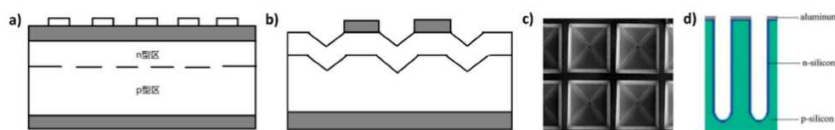


Figura 2: Diverse tipologie di strutture: nella a) quella piatta, nella b) quella a canali, c) per la piramide invertita e d) invece è la porosa [1].

ne più comune è quella piatta (soprattutto per il tipo di batterie che andremo a considerare, basate sul Silicio) sebbene le altre siano funzionali all'incremento della superficie effettiva della cella, aspetto

importante per aumentare l'efficienza della sorgente (ottenendo una maggiore densità di potenza). Considerando la formula di Bethe-Bloch, si può vedere come lo stopping power per le particelle β cala all'aumentare della profondità di penetrazione. Quindi, assunto che le coppie elettrone-lacuna generate possono essere separate e raccolte totalmente, bisogna considerare che la regione di svuotamento non potrà essere indefinitamente grande, ma dovrà rispettare determinati range dettati dagli strumenti che andranno ad essere alimentati dalla nostra batteria, e nello specifico dalla locazione in cui andrà ad essere posta. Questa regione, di conseguenza, dovrà essere progettata in maniera tale da coincidere il più possibile con la regione di massima ionizzazione della radiazione beta incidente all'interno della cella, in maniera tale da poter raccogliere la maggior energia possibile nel minor spazio. Come è facilmente intuibile, questo aspetto andrà a costituire uno dei parametri da ottimizzare nella costruzione della nostra batteria. Allo stato attuale, la regione di svuotamento delle batterie finora prodotte è più piccola della regione principale di massima ionizzazione, e questo per poter ridurre i fononi generati dalla ricombinazione di portatori di carica fotoeccitati[1]. Ultimo aspetto, ma non per importanza, da tenere in considerazione è che la lunghezza di diffusione degli elettroni è molto più grande rispetto a quella delle lacune a parità di concentrazione; dunque, la regione di tipo p e quella di tipo n andranno scelte in considerazione di ciò.

1.3 Principi operazionali

Lo schema di una batteria viene riportato nelle Figure 3 e 4

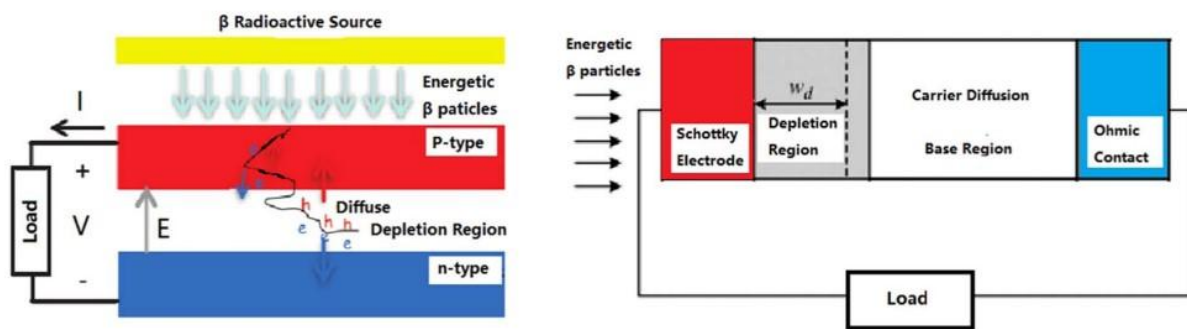


Figura 3: Rappresentazione schematica di ciò che avviene all'interno della batteria, a sinistra per il caso di una giunzione p-n, a destra per il caso di una giunzione di tipo Schottky [1]

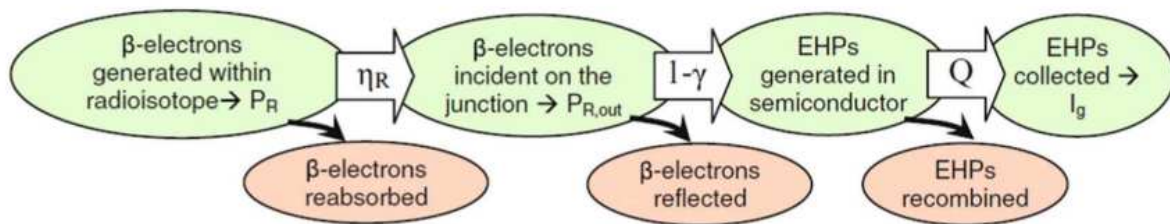


Figura 4: Schema del processo alla base del funzionamento di una batteria betavoltaica [1].

Il meccanismo di conversione dell'energia è molto simile a quello delle celle solari e si può suddividere nei seguenti macro-punti[1]:

- Le particelle beta energetiche emesse dal decadimento degli isotopi radioattivi colpiscono il semiconduttore, generando delle coppie elettrone-lacuna. Per le energie in gioco, a differenza della radiazione che interviene nel meccanismo alla base del funzionamento delle celle solari, la radiazione beta può generare molteplici punti di interazione;
- Le coppie elettrone-lacuna si diffondono nella regione di svuotamento, dove vengono separate dal campo elettrico intrinseco presente;

- Le cariche viaggiano nello strato di semiconduttore generando una corrente finchè lacune ed elettroni non vengono raccolte nell'anodo e nel catodo, rispettivamente;

Come già accennato all'inizio del presente capitolo, nel processo di ionizzazione tramite il quale la particella incidente genera le coppie, la maggior parte dell'energia viene dissipata. Quello che se ne deriva è che la quantità di energia ceduta non corrisponderà esattamente al bandgap del reticolo attraversato, ma necessariamente dovrà essere maggiore. A partire da diversi studi condotti al riguardo, è stato mostrato empiricamente che l'energia che deve essere fornita per generare una coppia elettrone-lacuna sia pari⁴ a $2.8E_g + 0.5 \text{ eV}$ [1]. La diretta conseguenza che si può trarre è che maggiore sarà il bandgap, minore sarà la frazione di energia dissipata, poichè l'offset di 0.5eV diventerà via via meno pesante. Questo principio vale fino ad un certo punto, poichè oltre un certo valore l'efficienza⁵ di questa conversione tende ad appiattirsi per i materiali di cui possiamo disporre, come si può osservare nel grafico riportato in Figura 5[3].

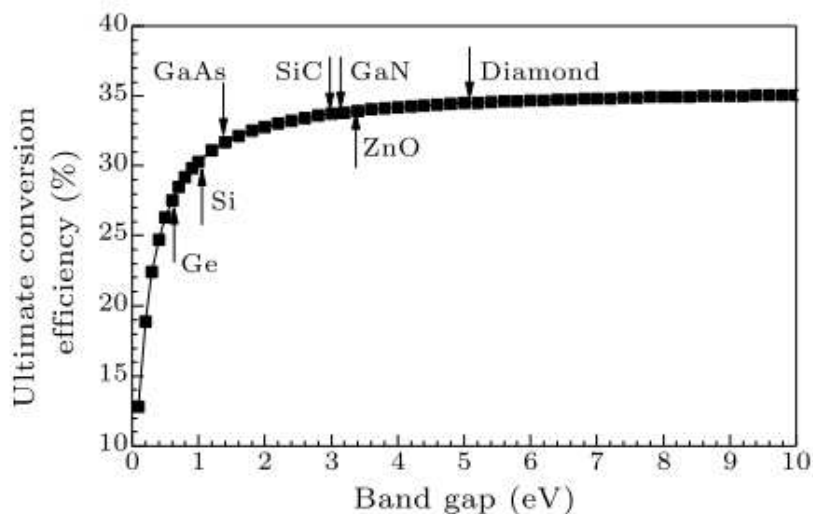


Figura 5: Efficienza di conversione in funzione del bandgap, si può notare come oltre certi valori non convenga più cercare di aumentare tale valore. Il valore riportato nelle ordinate è rappresentato dal rapporto (in percentuale) tra l'energia di bandgap e l'energia media di ionizzazione.

Durante il processo di conversione, la parte di energia cinetica della particella β che non viene utilizzata per generare la coppia elettrone-lacuna viene convertita in fononi (ottici o acustici) i quali successivamente si trasformano in energia termica del reticolo[1].

1.4 Interazione elettrone-semiconduttore

L'intervallo energetico delle particelle β può variare tipicamente in un intervallo compreso tra pochi keV fino a all'ordine del MeV. In questo intervallo, la perdita di energia dovuta alle interazioni con il materiale attraversato può essere di diversa natura: elettronica, nucleare o di radiazione[1], e quella predominante è l'elettronica. Partendo proprio da quest'ultimo caso, bisogna considerare che ci si sta riferendo al metodo principale con cui gli elettroni interagiscono con la materia in generale, ovvero urtando in maniera anelastica gli elettroni più esterni appartenenti agli atomi che compongono il reticolo. Questo fatto non dovrebbe sorprendere se si tiene in considerazione che il volume atomico (comprendente il guscio di elettroni che circonda il nucleo) è di gran lunga maggiore rispetto al volume del nucleo, e di conseguenza le sezioni d'urto rispecchiano tale andamento. Queste interazioni, oltretutto, dal momento che le particelle in gioco possiedono una carica elettrica, sono mediate dalla forza di Coulomb (il quale ha raggio d'azione teoricamente infinito), e da questo processo risulta la

⁴Si intende mediamente

⁵Necessario puntualizzare che tale efficienza fa riferimento solamente alla relazione tra l'energia di produzione di una coppia e il bandgap. Non è quindi da confondersi con l'energia effettiva della batteria, la quale tiene in considerazione molteplici aspetti ora trascurati

ionizzazione dell'atomo coinvolto. Il tasso di perdita di energia può essere espresso dalla seguente relazione (valida per basse energie)[1]:

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_e = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 e^4 N_A \times 2\pi \frac{Z\rho}{AE} \left(\ln \frac{4E}{I} - 0.1535\right) \quad (1)$$

Dove E si riferisce all'energia della particella incidente, e è la carica elementare, ϵ_0 è la costante dielettrica nel vuoto, N_A è il numero di Avogadro, ρ è la densità della sostanza attraversata, A è la massa molare, Z è il numero atomico della materiale colpito e I è l'energia di ionizzazione. Passiamo ora alla seconda tipologia di perdita di energia, ovvero quella di radiazione, che si riferisce all'interazione tra la particella β e i nuclei presenti nel reticolo sempre mediante la forza di Coulomb. Grazie a questa interazione la particella subisce un'accelerazione che causa variazione del modulo della velocità e della sua direzione, e questo genera emissione di onde elettromagnetiche dando luogo al fenomeno della bremsstrahlung⁶. Per avere una stima della rapporto che intercorre tra perdita di energia tramite radiazione $(-dE/dx)_r$ ed elettronica $(-dE/dx)_e$, e quindi quale delle due influisce di più (e in che range), si consideri la seguente relazione[1]:

$$\frac{(-dE/dx)_r}{(-dE/dx)_e} = \frac{ZE}{800} \quad (2)$$

Dove E è l'energia della particella incidente. Quando l'energia della particella β incidente aumenta, lo stesso vale per la frazione di energia persa per emissione di radiazione. Per l'ultimo tipo di perdita di energia, quello nucleare, il fenomeno che dà luogo a questo effetto prende il nome di backscattering e chiama in causa le collisioni elastiche tra le particelle β e i nuclei costituenti il reticolo. A partire da studi teorici e considerando le simulazioni ad oggi effettuate, è stato mostrato come più bassa è l'energia dell'elettrone incidente e alto il numero atomico del materiale target, maggiore sarà la frazione di particelle beta perse per via del backscattering sulla superficie del semiconduttore[1]. Per riassumere, le particelle β depositano energia nei materiali principalmente mediante interazione elettronica, grazie al quale sono in grado di creare un gran numero di coppie elettrone-lacuna nel il semiconduttore. A questo fenomeno, che ci consente di generare una corrente da cui poi si ricava l'energia dalla batteria, se ne aggiungono altri che assumono un ruolo dissipativo e che è nei nostri intenti ridurre: il fenomeno di bremsstrahlung (che per le particelle β è trascurabile) e di backscattering (ha un ruolo già più significativo, in alcuni casi può raggiungere valori considerevoli).

1.5 Energia incidente e deposizione nel materiale

Le prestazioni della batteria betavoltaica sono determinate dal grado di sovrapposizione tra la regione di deposizione dell'energia e l'effettiva regione di assorbimento energetico della batteria. Come è facilmente intuibile, maggiore sarà la sovrapposizione tra le due, maggiore sarà la frazione di energia convertita[1]. Per massimizzare questa sovrapposizione, i punti da tenere in considerazione sono molteplici, e tra questi vi sono quelli inerenti la distribuzione energetica con cui vengono emesse le radiazioni da parte della sorgente. Un primo aspetto riscontrato in diversi studi riguarda come l'energia media delle particelle β aumenti all'aumentare dello spessore della sorgente radioattiva, per un effetto definito di "autoassorbimento". La conseguenza che se ne deriva è che la regione di deposizione dell'energia diventerà più profonda, ma le particelle β emesse dai decadimenti della sorgente radioattiva perderanno energia nell'attraversare il corpo della sorgente, e ciò porterà ad una riduzione della potenza emessa. Pertanto, finchè la sorgente è relativamente sottile l'aumento dell'attività di superficie e della potenza emessa all'aumentare dello spessore derivano principalmente dal fatto che le particelle β ad elevata energia riescono ad uscire dalla sorgente. Tuttavia, se la sorgente diventa sufficientemente spessa, le curve dei valori in output tenderanno a saturare perchè anche le β più energetiche, se prodotte nella parte più interna, rimarranno intrappolate. Questo fenomeno influenzerà l'efficienza della batteria nello sfruttare pienamente l'energia della sorgente poichè vi sarà un incremento del

⁶Questo fenomeno può portare ad un danneggiamento del materiale semiconduttore

rapporto tra l'energia depositata nella sorgente stessa e quella emessa. Già a partire da simulazioni svolte [3] è possibile stimare che la perdita per auto-assorbimento può raggiungere valori pari anche al 90% a spessori particolarmente elevati. Per avere un riscontro grafico si vedano i risultati delle simulazioni sopracitate, a spessore di sorgente variabile (ci si riferisce al ^{63}Ni), riportati di seguito in Figura 6.

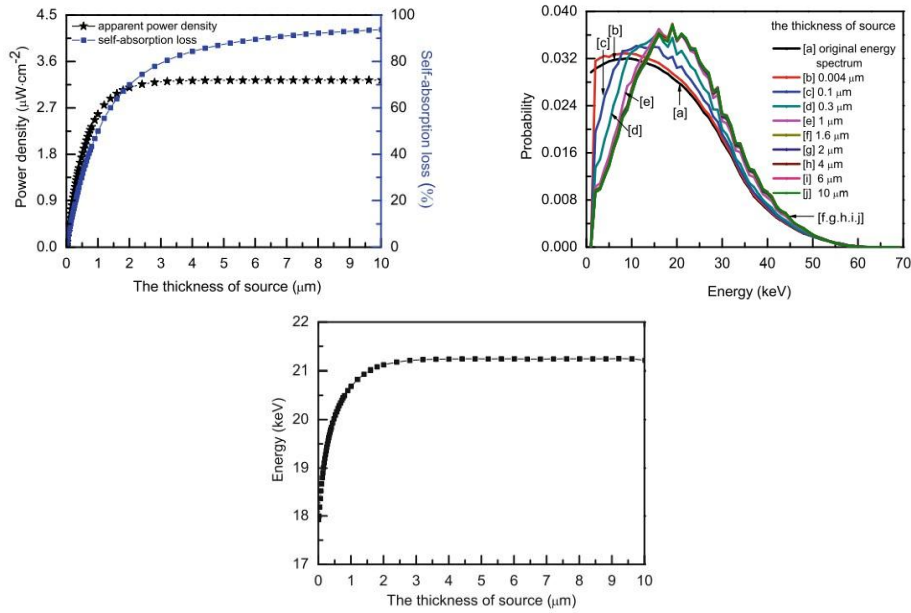


Figura 6: Nel primo grafico si può notare un confronto tra la potenza emessa e la percentuale di energia persa per autoassorbimento in funzione dello spessore della sorgente. Nel secondo grafico si osserva la trasformazione dello spettro di emissione della sorgente al variare dello spessore della stessa. Nel terzo grafico è possibile vedere come si stabilizza l'energia media emessa dalla sorgente al variare dello spessore della sorgente [3].

Come se ne può dedurre, dunque, aumentare indefinitamente lo spessore della sorgente non ha alcun effetto benefico nell'incremento nella potenza emessa dalla sorgente se si superano certi valori, ma anzi sarà causa di spreco di sorgente radioattiva e aumento dei costi (di produzione). Per avere dei valori di riferimento, e poter farsi un'idea degli ordini di grandezza in gioco, basti considerare che per quanto riguarda lo spessore in cui l'effetto di autoassorbimento e l'attività sono ottimizzate risulta essere, per il ^{63}Ni , approssimativamente $3 \mu\text{m}$ [2] (come si può anche evincere anche dai grafici riportati nelle Figure 7, 8 e 9).

Oltre a questo fenomeno, un altro aspetto fondamentale riguarda l'andamento con cui l'energia viene depositata nel semiconduttore. Grazie all'utilizzo di simulazioni basate su metodi Monte Carlo⁷, è stato mostrato come l'energia risulta essere liberata maggiormente nelle immediate vicinanze della superficie, e anche come la densità di potenza depositata decresce esponenzialmente con l'aumentare della profondità di penetrazione⁸. In conseguenza a tutto ciò, nel progettare lo spessore della sorgente bisognerà tenere in conto tutti questi effetti, e una soluzione da perseguire sarà la ricerca di massimizzazione dell'area di superficie sia della sorgente del radioisotopo sia del convertitore a semiconduttore, in maniera tale ottimizzare l'efficienza del device [2].

⁷La maggior parte dei design disponibili per le batterie betavoltaiche è stato pensato considerando solamente l'energia media della particella β . Se si intende studiare la distribuzione di energia, bisogna tenere a mente che particelle monoenergetiche con energia media di uno spettro, particelle monoenergetiche con energia massima di uno spettro e particelle con energie determinate considerando lo spettro intero devono essere considerate come sorgenti diverse per comportamento di penetrazione. Come si può evincere dal grafico qui riportato, infatti, il comportamento varia significativamente [5]

⁸Risulta importante sottolineare i diversi andamenti che si ottengono quando si considerano particelle monoenergetiche e particelle a spettro completo. Questo va tenuto conto nell'effettuare sia simulazioni che misure basate su queste ultime. Per avere un riscontro concreto dei diversi comportamenti, è possibile usare come sorgente β monoenergetica un microscopio SEM [5]

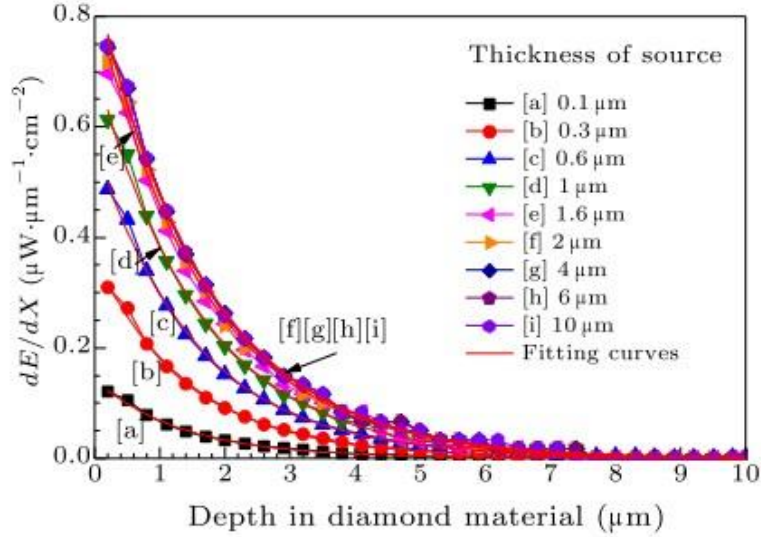


Figura 7: Simulazione dell'energia depositata in funzione della penetrazione. Come si può evincere dai diversi fit, oltre un certo spessore non vi è più alcun aumento dell'energia depositata, ma si arriva ad una sorta di stabilizzazione [4].

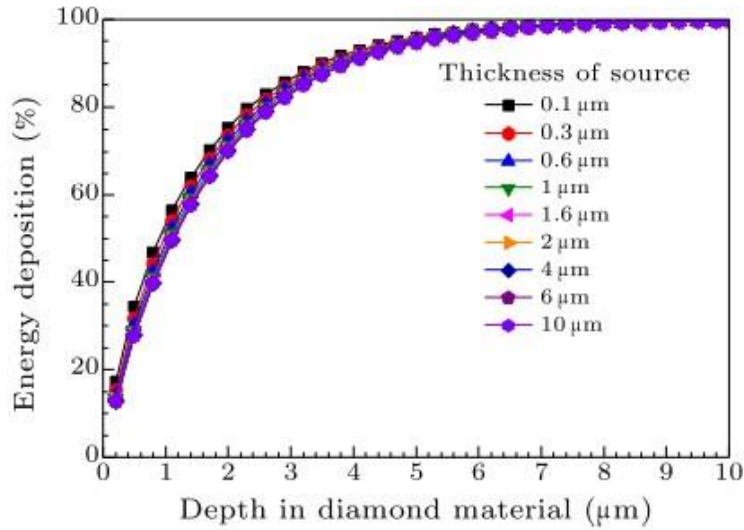


Figura 8: Percentuale di energia depositata in funzione della penetrazione, pure in questo caso non si scorgono particolari deviazioni al variare dello spessore della sorgente [4].

1.6 Sorgenti di radioisotopi beta

La scelta della sorgente di radiazioni beta non è di minor rilevanza, e può influenzare in maniera significativa l'efficienza finale della batteria. Nel sceglierla, bisogna tenere in considerazione:

- Il tempo di dimezzamento della sorgente radioattiva[1], ovvero il periodo necessario affinché metà delle particelle siano decadute. Il numero di atomi non ancora decaduti può essere espresso in funzione del tempo trascorso mediante la seguente relazione

$$N = N_0 e^{-t\lambda} \quad (3)$$

dove N è il numero di atomi radioattivi rimasti, N_0 è il numero iniziale di atomi radioattivi, λ è la costante di disintegrazione radioattiva legata a $t_{\frac{1}{2}}$ (tempo di dimezzamento) mediante la relazione $t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}$. Considerato il principio di funzionamento delle batterie betavoltaiche, è facile dedurre che più è lungo il tempo di dimezzamento, maggiore sarà la durata della batteria.

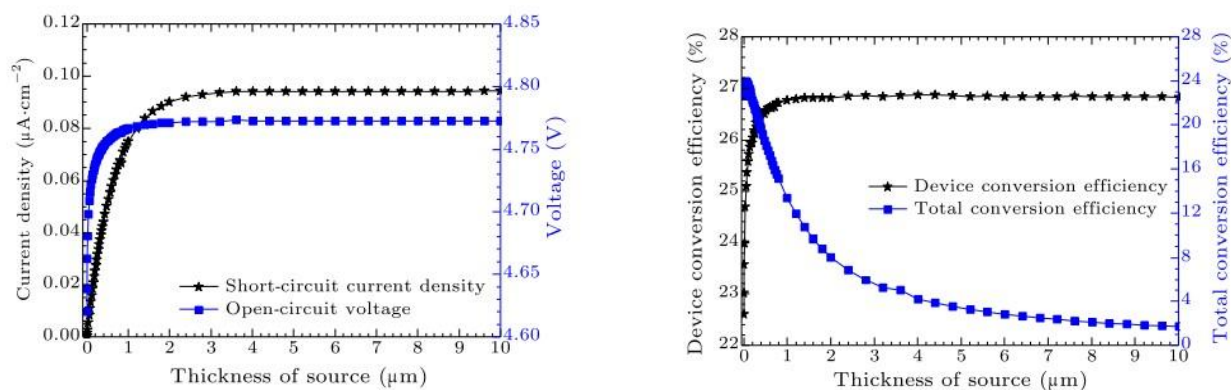


Figura 9: A sinistra l'andamento della densità di corrente di cortocircuito e del potenziale di circuito aperto, a destra l'andamento dell'efficienza di conversione del device (per vedere la distinzione tra le due efficienze riportate, vedere la sezione introduttiva del capitolo di Analisi dati.) [4].

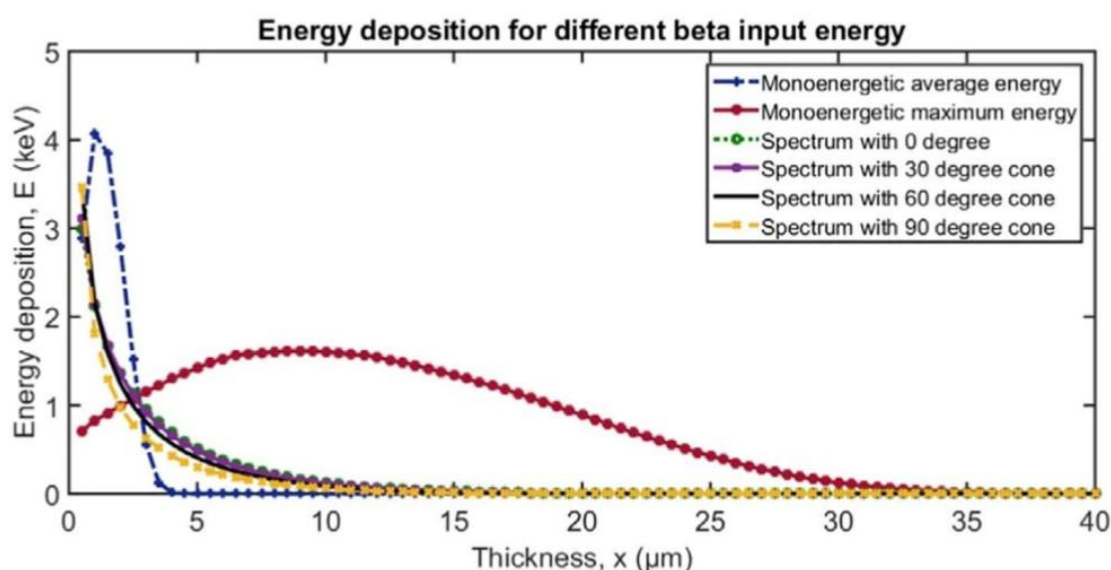


Figura 10: Simulazione della distribuzione dell'energia depositata in funzione della profondità di penetrazione. Come si può evincere dai diversi casi riportati in agenda, l'andamento e la profondità variano in base all'energia della particella incidente (e all'angolazione con cui incide) [5].

Questa è una caratteristica essenziale poichè permette di non dover ricambiare di frequente le batterie, e dunque di poter operare in zone estreme;

- Il tipo di decadimento della sorgente radioattiva e la radioattività del nucleo figlio[1]. Ciò è dovuto al fatto che raggi γ e X ad alta energia possono danneggiare le batterie e l'ambiente che le circonda. In genere, la sorgente radioattiva della batteria è selezionata in modo tale da essere una sorgente di sole radiazioni beta, senza ulteriori radiazioni γ o X (stesso discorso per il nucleo figlio);
- L'energia media e la massima energia della particella beta⁹[1]. In genere, più alta è l'energia media della sorgente, più alte saranno la densità di energia della batteria e il numero di coppie elettrone-lacuna. Tuttavia, bisogna tenere in considerazione che l'energia delle particelle β non può essere eccessivamente elevata, poichè ciò causerebbe danni al semiconduttore. Quello che si potrebbe generare, infatti, sono imperfezioni nel reticolo che poi formerebbe dei centri di

⁹Va ricordato che ogni particella β emessa in un decadimento ha uno spettro continuo di energia che da 0 fino ad un valore massimo. Quest'ultimo varia a seconda del radioisotopo che si sta considerando. Quello che ne risulta è che ciascun radioisotopo avrà una distribuzione di probabilità energetica diversa, ciascuno però con una tipica forma a campana come derivato a partire dalla regola d'oro di Fermi [5]

ricombinazione, con conseguente riduzione della vita media dei portatori di carica minoritari e, conseguentemente, dell'efficienza di raccolta delle coppie elettrone-lacuna. Semiconduttori diversi hanno diverse resistenze ai danni causati dalle radiazioni, e possono quindi essere scelti in base alle esigenze;

- La potenza specifica della sorgente radioattiva[1]. Più alta risulta essere quest'ultima, maggiore sarà la densità di energia fornita dalla sorgente radioattiva a parità di massa. In genere, la potenza specifica di una sorgente radioattiva è inversamente proporzionale al suo tempo di dimezzamento, che si traduce nel seguente: più lunga è la vita media di una sorgente, più piccola è la potenza specifica della stessa. Dunque, partendo da un certo tempo di dimezzamento, scegliere una sorgente con una potenza specifica maggiore è preferibile per ottimizzare la potenza in uscita a l'efficienza di conversione energetica.
- Metodo per ottenere il radioisotopo[2]. Tra i punti da considerare non bisogna dimenticare quelli inerenti la sfera economica. Se il radioisotopo può essere prodotto naturalmente durante un decadimento sarà relativamente economico da produrre. Al contrario, se per essere prodotto è necessario utilizzare un reattore nucleare per fare cattura neutronica, il prezzo aumenterà sensibilmente
- Maneggiabilità della sorgente[3]. Uno dei motivi per cui il ^{63}Ni risulta la prima scelta come sorgente, è per via della sua forma solida metallica, che lo rende facile da utilizzare. In contrapposizione a questo caso possiamo prendere come esempio il Trizio ^3H , il quale possiede valori energetici compatibili con gli obiettivi prefissati a inizio capitolo. Il difetto di questa scelta è dovuto al fatto che si presenta in uno stato gassoso che può causare perdite di radiazioni, aumentando quindi il rischio di esposizioni alle persone nelle vicinanze (per ovviare a questo problema di solito si procede utilizzando materiali drogati con il Trizio) [1]

In conclusione, per riassumere quanto riportato nei punti sopracitati, la sorgente ideale deve avere un'energia di radiazione non troppo elevata, una lunga vita media, una potenza specifica modesta e deve essere β pura, senza emissioni di raggi X o gamma. Al giorno d'oggi, le sorgenti più utilizzate risultano essere ^3H , ^{63}Ni e ^{147}Pm [1]. Nella seguente tabella di Figura 11 sono riportati vari tipi di sorgenti e i valori specifici[1]:

Isotop	Decay type	Half-life (year)	Maximum energy of the beta particles (MeV)	Average energy of the beta particles (MeV)	Specific power of the radioactive layer (W g^{-1})	Specific activity of the radioactive layer (Ci g^{-1})
^3H	β^-	12.32	0.01860	0.00568	9678.90	0.326
^{33}P	β^-	0.069	0.249	0.0766	156084.16	70.876
^{35}S	β^-	0.239	0.16747	0.04883	42699.26	12.360
^{63}Ni	β^-	101.2	0.06587	0.01713	56.11	0.006
^{85}Kr	β^-	10.752	0.687	0.25051	391.43	0.110
^{90}Sr	β^-	28.9	0.546	0.1958	137.54	0.160
^{90}Y	β^-	0.007	2.2839	0.93471	543753.50	601.164
^{106}Ru	β^-	1.019	0.03940	0.01003	3313.11	0.197
^{147}Pm	β^-, γ	2.6234	0.2247	0.06196	927.63	0.149
^{204}Tl	β^-, γ	3.783	0.7634	0.06196	927.63	0.149

Figura 11: Varie tipologie di sorgente con i relativi parametri: tipo di decadimento, tempo di dimezzamento, massima energia delle β emesse, energia media delle β emesse, potenza specifica e attività specifica.

1.7 Semiconduttori per le celle betavoltaiche

Alla luce dei principi descritti nei paragrafi precedenti, risulta chiaro come il contributo principale nel determinare l'efficienza della batteria spetti all'unità di conversione energetica. I parametri associabili a questa componente sono molteplici e vanno dalla scelta del materiale semiconduttore fino al tipo di giunzione adottata, e tutti influenzano in maniera più o meno sensibile sia la deposizione energetica delle particelle entranti che, per diretta conseguenza, il processo di distribuzione e separazione delle coppie elettrone-lacuna. Tutti questi aspetti determinano la potenza e l'efficienza in uscita dalla batteria, evidenziando quindi l'importanza della scelta del materiale semiconduttore. Questa scelta è determinata da diversi parametri, e riassumendo i punti principali risultano essere:

- La soglia di danneggiamento da radiazione del materiale semiconduttore dovrebbe essere più grande della massima energia rilasciata dai decadimenti della sorgente beta (generalmente questo limite si attesta in un range tra i 150 e i 400 keV [2]);
- Numeri atomici bassi sono preferibili poichè riducono la perdita di energia per backscattering delle particelle beta che incidono sulla superficie del materiale[1];
- L'energia della sorgente radioattiva tende a depositarsi in uno strato molto più vicino alla superficie nei casi con alta densità di elettroni, dunque permette di ottimizzare la miniaturizzazione della batteria[1];
- Il processo di preparazione del dispositivo di semiconduttore è un aspetto chiave nella realizzazione delle batterie betavoltaiche[1];
- La distribuzione dell'energia depositata dalla sorgente nel semiconduttore deve essere tenuta in considerazione per completare le stime teoriche e l'ottimizzazione del design della struttura del device[1];
- La concentrazione di sostanze dopanti, oltre determinare lo spessore della zona di svuotamento, influisce sia sulla lunghezza di diffusione dei portatori di carica minoritari, sia sulla corrente di dispersione[2];

Visti tutti questi parametri¹⁰, quindi, è bene sottolineare che la scelta non potrà essere assoluta, ma andrà fatta considerando la sorgente utilizzata. Dunque il peso di ciascun parametro potrà variare in considerazione di ciò. Ad oggi, oltre al Silicio già citato in precedenza, altre tipologie di materiali semiconduttore ad ampio bandgap utilizzate per questi scopi sono il Carburo di Silicio (SiC), Nitruro di Gallio (GaN) e il Diamante (C) [2]. Una volta effettuata tale scelta, un parametro che andrà ottimizzato sarà la profondità della zona di svuotamento. Questo infatti deriva dalle simulazioni effettuate al variare di questo fattore, mostrando come ciò possa influenzare l'efficienza del device [5] (vedi Figura 12).

1.8 Batterie betavoltaiche al Silicio

Tra tutte le tipologie di semiconduttore quello maggiormente studiato (e da più tempo), allo stato attuale, è senz'altro il Silicio [2], oggetto di studio nel presente lavoro di tesi. I motivi alla base di questa scelta sono diversi, e i vantaggi principali possono essere elencati come: costi contenuti, processo di produzione tecnologicamente maturo, numero basso di impurità e centri di ricombinazione nei cristalli[1]. Il suo largo utilizzo nei sistemi micro-elettro-meccanici (MEMS) ha dimostrato la sua maggior duttilità rispetto ad altri materiali, dunque risulta immediato eleggerlo a primo candidato per costituire l'unità di conversione delle nostre batterie betavoltaiche. I primi studi al riguardo risalgono al 1953, quando Rappaport et al. studiarono un device costituito da una giunzione p-n irradiata da una sorgente composta da ^{90}Sr - ^{90}Y , ottenendo un'efficienza di conversione dell'energia pari allo 0,2%[1]. I recenti studi su questa tipologia di batterie β si sono concentrati principalmente su strutture piatte per via della semplicità nella preparazione¹¹, tuttavia questa non rappresenta la

¹⁰Altro parametro importante da tenere in considerazione è la temperatura dell'ambiente in cui si trova la batteria. Si è riscontrato infatti come l'efficienza aumenti con l'abbassarsi delle temperature e decresca all'aumentare delle stesse [2]

¹¹Stessa tipologia adottata nelle misure esposte nelle pagine successive

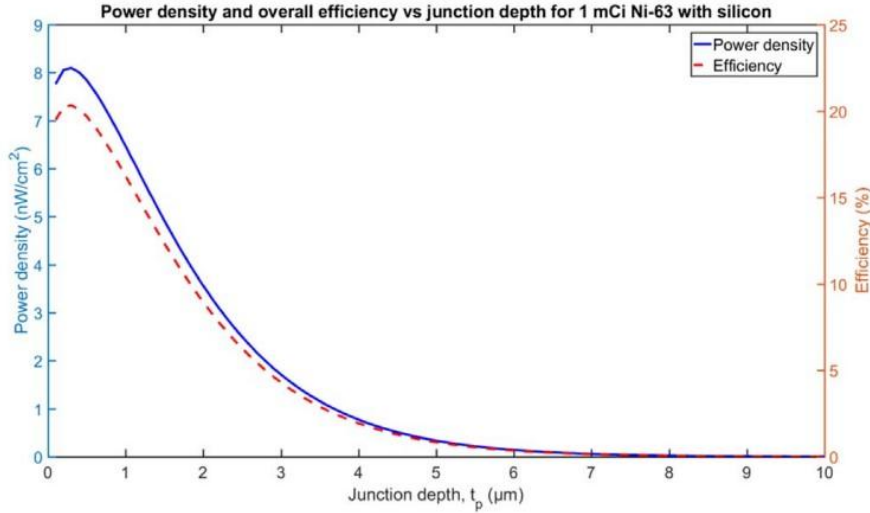


Figura 12: Efficienza totale e densità di potenza al variare della profondità della giunzione. Come si può evincere dalla figura, vi è un valore a cui vi è un picco per i motivi già discussi nelle righe precedenti [5].

configurazione più efficiente, dato che è quella che soffre la superficie minore a parità di angolo solido visto dalla sorgente (rispetto alle tipologie presentate in Figura 2), la quale emette isotropicamente. In tutti gli studi condotti fino ad ora le efficienze di conversione energetica sono ancora relativamente basse, lontane da quelli che sono i valori teorici aspettati [2], e allo stesso tempo è difficile compiere particolari sviluppi in questa tipologia di batterie per via delle peculiarità del Silicio stesso. Per questo tipo di materiale infatti bisogna tenere in conto che il bandgap è stretto (quindi pure l'energia media necessaria a produrre una coppia e-l, che è pari a 3.64 eV [2]), vi è una scarsa resistenza alle radiazioni e sono presenti grandi correnti dissipative. Di seguito si riporta in Figura 13 una tabella presa da uno degli articoli citati in bibliografia [2] per avere un confronto con altri lavori inerenti il medesimo convertitore basato al Silicio.

Material (junction type)	U_{OC} , V	J_{SC} , nA cm ⁻²	P_{max} , nW cm ⁻²	η , %	FF , %	S , cm ²	A , mCi cm ⁻²
Si (<i>p-n</i>) [3, 62]	0.0008	11 (nA)	2.5 (pW)	—	28.4	—	4
Si (<i>p-n</i>) [37]	0.082	54	—	—	—	1	10
Si (<i>p-n</i>) [38]	0.068	25	0.66	0.094	39	1.13	7.07
Si (Schottky) [38]	0.041	21.85	0.3	0.043	33	1.13	—
Si (<i>p-n</i>) [40]	0.002	40	0.01	—	33.7	0.25	5
Si (<i>p-i-n</i>) [39]	0.028	27.36	0.766	0.042	—	1	8
Si (<i>p-n</i>) [33]	0.05	17	—	0.045	—	0.25	5
Si (<i>p-i-n</i>) [63]	0.074	19.74	0.586	—	39.8	0.25	4.9
	0.058	8.75	0.184	—	36.2	0.25	1.96
Si (<i>p-i-n</i>) [36]	0.151	72.9	6.14	0.6	55.4	1	10
Si (<i>p-n</i>) [14]	0.15	133	11.6	2.5	58	1	Electron beam
Si (<i>p-n</i>) [64]	0.16	133	12.3	2.65	58	0.64	Electron beam
Si (3D <i>p-n</i>) [43]	0.125	25	1.56	—	—	—	Electron beam

Figura 13: Parametri ottenuti da altri lavori su batterie beta al Silicio[2], in ordine: potenziale di circuito aperto (U_{OC}), densità di corrente di cortocircuito (J_{SC}), densità di potenza massima emessa dal rivelatore (P_{max}), efficienza (η), Fill Factor, superficie, attività

1.9 Obiettivi

Obiettivo di questo lavoro di tesi è la caratterizzazione di rivelatori al Silicio disponibili in laboratorio, che rappresentano uno dei possibili materiali dell'unità di conversione delle celle betavoltaiche, mediante l'analisi delle curve caratteristiche I-V ottenute utilizzando una sorgente di calibrazione costituita da ^{241}Am . A partire da queste misure è possibile ricavare i parametri caratteristici dei rivelatori adoperati, necessari alla stima di efficienza di conversione energetica.

Nel capitolo 2 è presentato il Setup sperimentale utilizzato per le misure con la descrizione di strumenti, rivelatori e configurazioni adottate.

Nel capitolo 3 sono presentati i risultati sperimentali, a partire dalla procedura di caratterizzazione dei dispositivi, i valori dei fit e l'analisi svolta per ricavare i parametri caratteristici che hanno permesso di stimare l'efficienza dei rivelatori.

Nel capitolo 4 sono riportate le conclusioni ottenute a partire dai risultati dell'analisi e gli obiettivi da considerare nell'immediato futuro come proseguo di questo lavoro.

2 Setup sperimentale

Dalle curve caratteristiche I-V del materiale semiconduttore, che costituisce l'unità di conversione delle batterie betavoltaiche, è possibile stimare l'efficienza delle batterie stesse. Nel seguente capitolo è quindi descritto il setup sperimentale per la realizzazione di tali misure, che sono state condotte presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN.

2.1 Apparato di misura per le caratteristiche I-V

Lo strumento utilizzato per la misura della caratteristica elettrica I-V è un Sub-Femtoamp Remote SourceMeter (Modello 6430 della Keithley) [6]. Tale strumento, rispetto ai classici elettrometri, presenta un'elevata sensibilità di misura a basse correnti e un bassissimo rumore di ingresso. Il suo funzionamento è possibile grazie all'accoppiamento con un Remote PreAmp, il quale è dotato di un amplificatore bidirezionale molto sensibile per misurare o generare correnti nel dispositivo da testare (nel nostro caso i rivelatori al Silicio). I segnali emessi da Remote PreAmp vengono inviati al main-frame di controllo tramite una connessione che consente di ridurre al minimo gli effetti del rumore del cavo. In Figura 14. è mostrato lo strumento di misura.

Lo strumento possiede diverse funzioni, riassunte nei seguenti punti:

- Fungere da sorgente di potenziale con un range da $5\mu\text{V}$ fino a 210 V
- Misura di potenziali da $1\mu\text{V}$ fino a 211 V
- Fungere da sorgente di corrente in un range da 0.5 fA fino a 105 mA
- Misura di corrente da 10 nA fino a 105.5 mA
- Misura di resistenze da $100\ \mu\Omega$ fino a $21.1\ \text{T}\Omega$
- Fungere da sorgente di potenza fino a 2.2W

Per la caratterizzazione delle curve I-V lo strumento è stato utilizzato come misuratore di corrente utilizzando la tensione come sorgente, che è stata variata in un determinato range. Prima di realizzare le misure di corrente sui dispositivi oggetto della tesi, abbiamo collegato, al posto dei rivelatori, una sorgente di corrente (DC Precision Current Source, modello 6220 della Keithley), mostrata in Figura 15 per verificare la corretta calibrazione della strumentazione. La lettura dei valori di corrente sul Source Meter corrispondeva alla corrente impostata sul Current Source.



Figura 14: Sub-Femtoamp Remote SourceMeter (Modello 6430 della Keithley).

2.2 Rivelatori

Dal momento che il Silicio è uno dei possibili materiali semiconduttori che costituiscono l'unità di conversione delle batterie betavoltaiche, le misure del seguente lavoro di tesi sono state realizzate su rivelatori al Silicio per studi nel campo della fisica nucleare di base.



Figura 15: DC Precision Current Source, modello 6220 della Keithley.

In particolare sono state investigate due tipologie di rivelatori, utilizzati nel detector EUCLIDES, prodotti dalla Micron Semiconductors Ltd. (UK) a partire da wafer in silicio di tipo n di una decina di cm. Il substrato di tipo n è dopato tramite l'impianto di ioni ad alta energia di modo tale da produrre una giunzione di tipo pn. Nell'assemblaggio dei due strati, gli anodi di entrambi sono posti nella parte interna, a contatto elettricamente e messi a terra, mentre i catodi sono messi nelle facce esterne [7]. I rivelatori utilizzati sono di forma pentagonale e di forma esagonale segmentata a 4 quadranti, come mostrato in Figura 16. Entrambe le tipologie di rivelatori sono costituiti da due stadi di rivelazione, uno stadio ΔE con spessore dell'ordine del centinaio di μm ed uno stadio E spesso circa 1 mm (vedi la Tabella 1).

	Codice identificativo	Spessore (μm)
Riv1	2044-23-2	996
	2105-4-2	138
Riv3	2558-3P	999
	2575-27	144
Riv4	3415-3-1	150

Tabella 1: Modelli di rivelatore utilizzati, con i relativi codici identificativi e spessori.

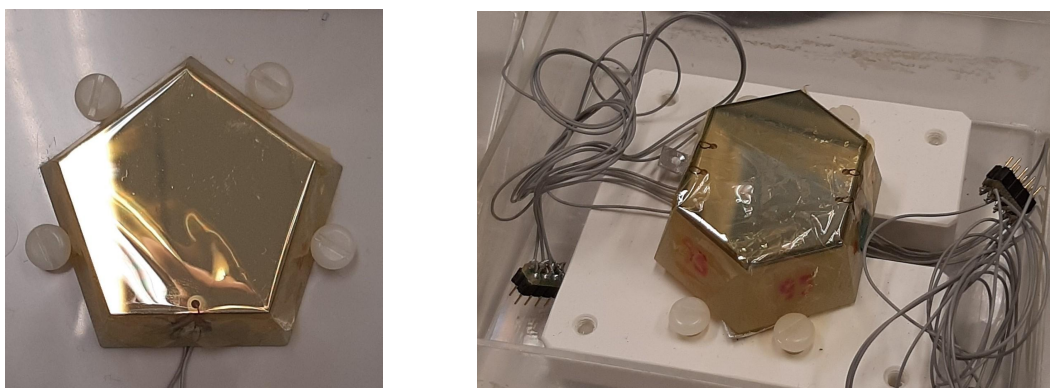


Figura 16: Le due tipologie di rivelatori adoperate. A sinistra abbiamo la tipologia di rivelatore rappresentato nella tabella da Riv 1 e 3, di forma pentagonale e con un'unico settore coprente l'intera area. A destra il rivelatore del tipo riportato come Riv4, di forma esagonale e con l'area divisa in 4 settori indipendenti tra di loro.

2.3 Setup di misura

Poichè il silicio è sensibile alla luce visibile, le misure delle caratteristiche I-V sono state realizzate ponendo i vari dispositivi in una camera da vuoto, mostrata in Figura 17. Ciascun rivelatore è stato collegato alla strumentazione di misura grazie ai passanti LEMO su una delle flange della camera.

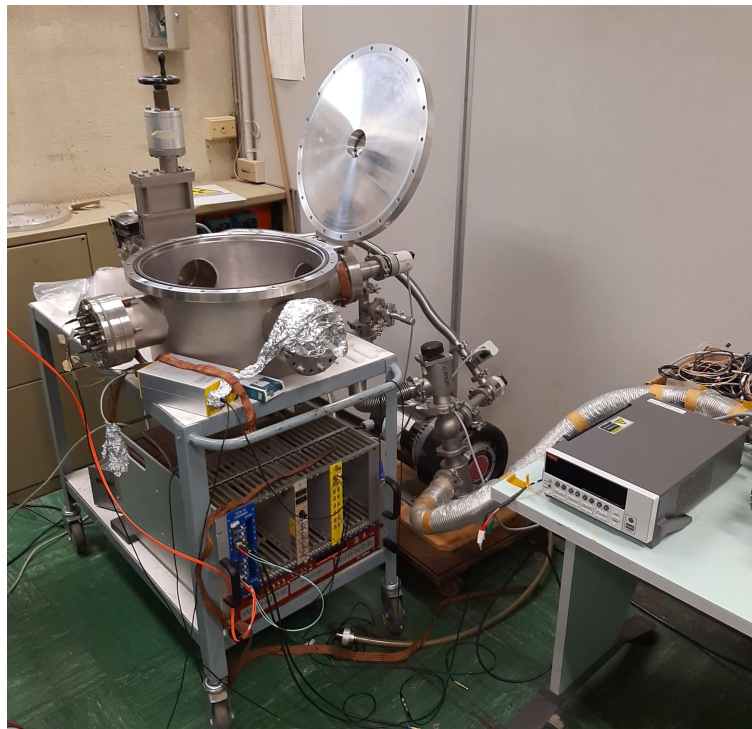


Figura 17: Setup sperimentale con camera a vuoto.

Le caratteristiche I-V sono state realizzate inizialmente senza l'utilizzo di alcuna sorgente, al fine di determinare la corrente di leakage di ogni rivelatore, che come descritto nel prossimo capitolo è differente per ciascun dispositivo. Infatti alcuni di essi sono già stati utilizzati con fasci di particelle e presentano una corrente di leakage maggiore in quanto deteriorati. In seguito è stata posizionata davanti al rivelatore una sorgente di ^{241}Am , che emette particelle alfa di energia 5.47 MeV e avente un'attività di 28.72 kBq. Lo schema di decadimento dell' ^{241}Am è riportato in Figura 18.

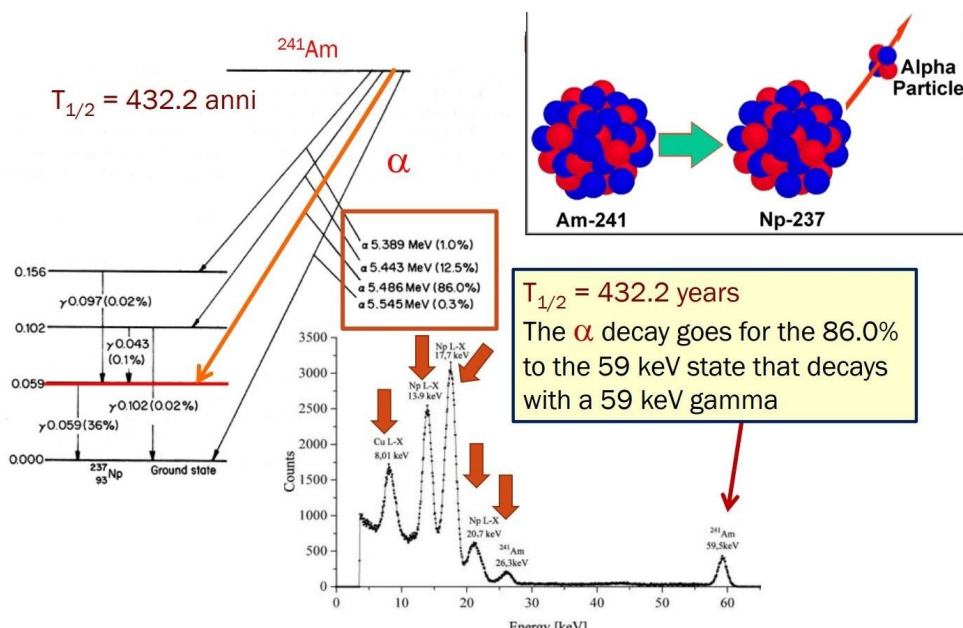


Figura 18: Schema dei possibili decadimenti dell' ^{241}Am [8].

Poichè le particelle alfa di tale energia vengono stoppate in circa 5 cm di aria, abbiamo operato cambiando la distanza sorgente-rivelatore¹² per studiare i valori di efficienza in funzione dell'energia, come mostrato schematicamente in Figura 19.

Per un singolo rivelatore, Riv4, è stata infine eseguita una misura in vuoto per stimarne l'efficienza al valore di energia massima. In Tabella 2 sono rappresentati i valori di energia delle alfa in funzione della distanza sorgente-rivelatore [9]:

Distanza (cm)	Energia (MeV)
Vuoto 2.7cm	5.47
Aria 2.7cm	2.63
Aria 3.4cm	1.50

Tabella 2: Energie delle α in funzione della distanza percorsa.

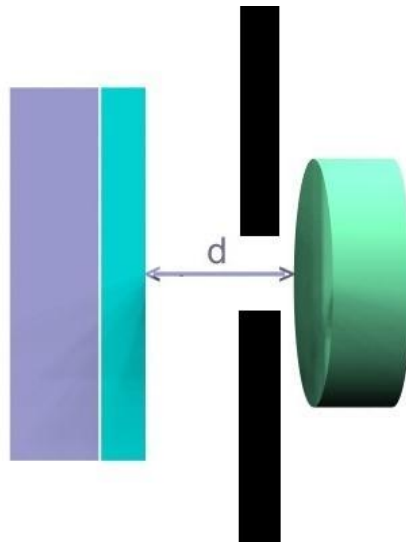


Figura 19: Rappresentazione schematica del posizionamento Sorgente-Rivelatore, gli spessori neri rappresentano il collimatore del campione di Americio utilizzato.

¹²Le diverse distanze considerate sono quelle riportate in Tabella 2, nella prima colonna

3 Analisi dati

A partire dai dati presi in laboratorio è possibile procedere con l'analisi mediante fit esponenziali. I parametri che se ne ricavano permettono di stimare le grandezze caratteristiche del rivelatore in esame tra cui la potenza emessa dallo stesso. Questo permetterà di determinare l'efficienza di conversione energetica del device, e nel capitolo che segue sarà presentato un confronto tra i vari risultati ottenuti per diversi rivelatori.

3.1 Efficienza di conversione

L'efficienza di conversione del dispositivo è definita come

$$\eta_{dev} = \frac{P_{max}}{P_{sor}} \quad (4)$$

Dove P_{max} e P_{sor} rappresentano rispettivamente la potenza ottenuta in output dal rivelatore e la massima potenza emessa complessivamente dalla sorgente che raggiunge la superficie del device e che è definita come:

$$P_{sor} = \phi \cdot E_{avg} \cdot q \quad (5)$$

Dove ϕ rappresenta l'attività della sorgente (espressa in Bq), E_{avg} è l'energia media con cui vengono emesse in media le particelle α e q è la carica dell'elettrone misurata in Coulomb (in maniera tale da ottenere un valore misurato in Joule).

Al fine di stimare l'efficienza di conversione ci serve dunque conoscere i valori I_{max} e V_{max} , i quali si ricavano a partire dalla curva caratteristica I-V nella seguente maniera:

- La corrente che scorre nel rivelatore in funzione del potenziale posto ai suoi capi segue la legge tipica del diodo a giunzione

$$I_D = I_S \cdot (e^{\frac{qV_D}{\eta kT}} - 1) \quad (6)$$

Dove I_D è la corrente che scorre nel rivelatore, V_D è la differenza di potenziale applicata ai capi del diodo, I_S è la corrente di saturazione, q è la carica di un elettrone, k è la costante di Boltzmann, T la temperatura assoluta ed η il fattore di idealità. Questa è l'equazione in caso di assenza di sorgente.

Nel caso in cui si ha una sorgente, a causa delle coppie generate dal passaggio di radiazione, questa diventa

$$I_D = I_{SC} - I_S \cdot (e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1) \quad (7)$$

Dove I_{SC} rappresenta la corrente di cortocircuito;

- Dal fit della curva I-V ottenuta sperimentalmente con l'equazione (7) è possibile ricavare i valori di I_{SC} e V_{OC} come intersezione rispettivamente con gli assi $V=0$ e $I=0$. In una batteria betavoltaica, la corrente di corto-circuito (I_{SC}) è data dall'espressione

$$I_{SC} = \frac{\eta_{CCE} \cdot q \cdot P_{avg}}{E_{ehp}} \quad (8)$$

dove η_{CCE} è l'efficienza di raccolta di carica, P_{avg} è la potenza depositata nella regione attiva ed E_{ehp} è l'energia media di ionizzazione. Il potenziale di circuito aperto (V_{OC}), invece, è definito come [4]

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} + 1\right) \quad (9)$$

- La potenza massima emessa dal rivelatore è la potenza corrispondente al massimo ottenuto dal plot dell'equazione $P = V_D \cdot I_D$ nel range tra $V=0$ e $V = V_{OC}$

Per quanto riguarda quest'ultimo punto, a partire da questi valori è possibile stimare un parametro caratteristico del rivelatore in esame, chiamato "Fill Factor" e definito come:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC}V_{OC}} \quad (10)$$

3.2 Potenza emessa dalla sorgente

Come primo passo, è necessario calcolare la potenza emessa dalla nostra sorgente in funzione delle diverse distanze Sorgente-Rivelatore. Nota l'attività della sorgente, dall'equazione (5) possiamo ricavare la potenza di emissione della sorgente per le diverse energie ricavate in funzione della distanza (si veda Tabella 3).

Energia (MeV)	Potenza media residua (nW)
1.50	6.9
2.63	12.1
5.47	25.2

Tabella 3: Energie delle particelle α emesse in aria a distanze diverse e relative potenze.

Mettendo in conto tutto questo con le frazioni di angolo solido calcolate nel prossimo paragrafo, è possibile calcolare le potenze emesse dalla sorgente che arrivano fino al rivelatore. Dal momento infatti che la sorgente non è posta a contatto con il rivelatore, nel calcolo della potenza emessa dalla sorgente occorre tener conto pure dell'angolo solido. In Tabella 6 sono riportati i valori di potenza normalizzati per l'angolo solido in funzione del rivelatore e della distanza

3.2.1 Stima dell'angolo solido

Per tenere conto dell'angolo solido, bisogna considerare la geometria del sistema, schematicamente riportata nelle rappresentazioni grafiche in Figura 19 e 20 (e con le lunghezze prese nella Tabella 4):

Segmento	Lunghezza (mm)
l_1	45
l	47
b	32
c	24
h	35
a	30

Tabella 4: Lunghezze caratteristiche dei rivelatori utilizzati. Ai fini del presente lavoro si riportano semplicemente i valori misurati per dare un'idea delle grandezze in gioco. Per l'analisi dei dati si è considerato l'errore a partire dalla tacca dello strumento adoperato e considerando per la σ una funzione densità di probabilità uniforme. Per ottenere queste lunghezze si è fatto uso di un calibro.

Le aree dei rivelatori esagonali e pentagonali riportate in Figura 20 sono state ricavate a partire dalle grandezze riportate in Tabella 4, e sono pari rispettivamente a $A_1 = 14.5 \pm 0.5 \text{ cm}^2$ e $A_2 = 15.5 \pm 0.6 \text{ cm}^2$. A partire da tali aree, per semplificare i calcoli che seguono, le forme dei rivelatori sono state approssimate con cerchi di area uguale.

Considerate le distanze tra la sorgente e il rivelatore (riportate precedentemente nella Tabella 2 e da qui in avanti denominate con d_1 per indicare 3.3cm e d_2 per 2.7cm) e raggi pari rispettivamente a

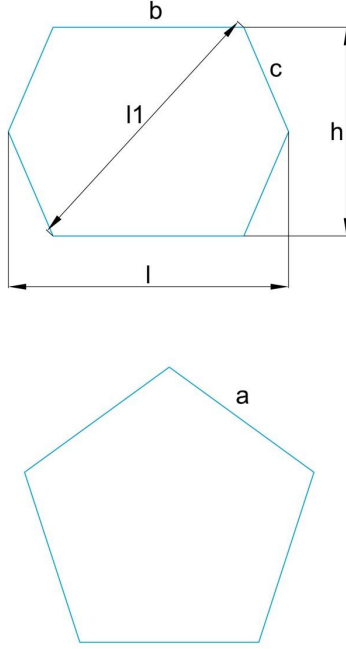


Figura 20: Rappresentazione grafica delle superfici dei rivelatori.

$r_{pentagono} = 22.2 \pm 0.4\text{mm}$ e $r_{esagono} = 21.5 \pm 0.4\text{mm}$, è dunque possibile calcolare la frazione di angolo solido sotteso dal rivelatore¹³.

La metà dell'angolo di apertura del cono di emissione della sorgente è dato dall'espressione $\theta = \arcsin \frac{r}{d}$, e da questo l'angolo solido che ne deriva è definito da $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta)$. In Tabella 5 sono riportati i valori di angolo solido per tutte le configurazioni di misura.

Distanza R-S	θ (rad)	Ω (sr)
d_{1E}	0.68 ± 0.02	1.41 ± 0.09
d_{2E}	0.92 ± 0.05	2.5 ± 0.2
d_{2P}	0.97 ± 0.05	2.7 ± 0.3

Tabella 5: Valori di apertura del cono con cui la sorgente "vede" il rivelatore (Riv4C-a per le distanze segnate con il pedice E, Riv1 e Riv3 per quelle segnate con pedice P) e l'angolo solido sotteso dallo stesso. I pedici numerici si riferiscono ai medesimi utilizzati poco fa per indicare le distanze diverse assunte tra rivelatore e sorgente.

A partire da tali valori, calcolandone il rapporto con 4π ¹⁴, si riesce a stimare la frazione di angolo solido del nostro rivelatore¹⁵. Considerando quanto appena stimato con le frazioni di energia perse nel cammino dalla sorgente al rivelatore, è possibile calcolare infine le potenze emesse dalla sorgente che arrivano fino al nostro device (Tabella 6):

¹³Per i conti si è approssimata la sorgente come puntiforme. La scelta è giustificata dalla presenza del collimatore, come raffigurato nella Figura 19

¹⁴Questo valore rappresenta l'angolo solido coperto da una sfera. Farne il rapporto significa quindi prendere la frazione di superficie sferica coperta dal rivelatore, dove la sfera in questione ha raggio pari alla distanza sorgente-rivelatore

¹⁵Senza dimenticare che per i rivelatori esagonali l'area è divisa in 4 sezioni, dunque l'angolo solido andrà diviso ulteriormente per un fattore 4

Distanza	P_{eff} (nW)
d_{1E}	0.19 ± 0.01
d_{2E}	0.59 ± 0.05
d_{2E}^*	1.2 ± 0.1
d_{2P}	2.6 ± 0.3

Tabella 6: Potenza emessa dalla sorgente normalizzata per la frazione di angolo solido coperta dal rivelatore. I valori d_i fanno riferimento alle distanze riportate precedentemente, in particolare il penultimo con l'asterisco si riferisce alla potenza residua in vuoto, trascurando quindi il rallentamento delle particelle dovuto all'aria, mentre l'ultima riga con d_{2P} fa riferimento al caso di Riv1 e Riv3 a forma pentagonale.

3.3 Potenza del rivelatore

Per la stima della potenza in output del rivelatore si è proceduto con il fit della curva I-V utilizzando una funzione del tipo $f(x) = p_0 + p_1 \cdot e^{p_2 \cdot x}$ [10]¹⁶ per ognuno dei rivelatori utilizzati. In Tabella 7 e 8 si sono riportati i valori dei parametri (con relativi errori) ottenuti per i rivelatori pentagonali¹⁷.

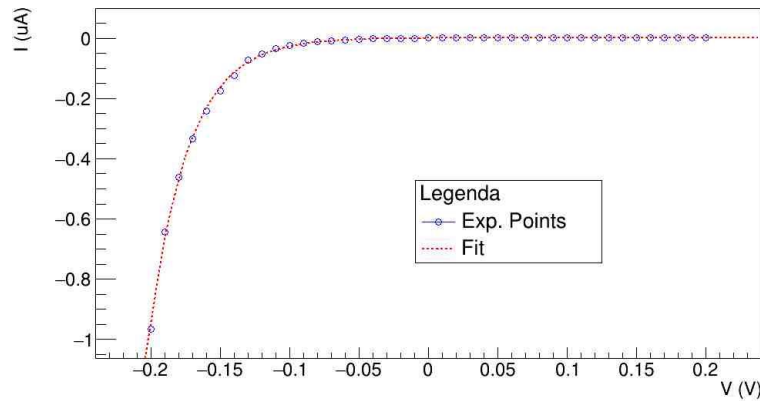


Figura 21: Caratteristica I-V e relativo fit ottenuto per un rivelatore esagonale.

Rivelatore	Sorgente	Stadio	p_0 (μA)	p_1 (μA)	p_2 (V^{-1})
Riv1	O	ΔE	0.1731 ± 0.0004	-0.1754 ± 0.0004	-34.43 ± 0.03
		E	0.458 ± 0.001	-0.400 ± 0.001	-31.38 ± 0.03
	S	ΔE	0.2105 ± 0.0005	-0.2100 ± 0.0005	-35.87 ± 0.03
		E	0.514 ± 0.001	-0.508 ± 0.001	-31.12 ± 0.03
Riv3	O	ΔE	0.1481 ± 0.0003	-0.1254 ± 0.0003	-32.75 ± 0.03
		E	0.1800 ± 0.0004	-0.1529 ± 0.0004	-32.95 ± 0.03
	S	ΔE	0.1997 ± 0.0004	-0.2042 ± 0.0004	-32.62 ± 0.03
		E	0.1681 ± 0.0004	-0.1691 ± 0.0004	-32.44 ± 0.03

Tabella 7: Parametri dei fit per i due rivelatori pentagonali a sezione unica.

La stima della potenza massima erogata dal rivelatore è stata ottenuta sottraendo il valore di potenza ricavato nel caso senza sorgente.

Il valore di potenza è stato ricavato dalla procedura descritta nel paragrafo 3.1¹⁸. In Figura 22 è

¹⁶Nell'articolo appena citato la funzione è definita come $I = I_p - I_0 \cdot (\exp \frac{eV}{kT} - 1)$. Il motivo per cui non si è considerata una funzione dello stesso tipo di quella teorica menzionata nelle pagine precedenti (ovvero con $p_0 = p_1$) è da riferirsi al fatto che con la presenza di una sorgente radioattiva tutta la curva risulterà traslata e quindi non sarà tenuta a passare per l'origine

¹⁷Nelle tabelle, sotto la colonna "Sorgente" con la lettera O ci si riferisce al caso senza sorgente, mentre con S si intende che la sorgente era presente

¹⁸Nel nostro caso corrisponde al minimo per il verso con cui abbiamo scelto di polarizzare il nostro rivelatore

Rivelatore	Sorg.	Stadio	V_{OC} (mV)	I_{SC} (nA)
Riv1	O	ΔE	0.4 ± 0.1	-2.3 ± 0.6
		E	-4.3 ± 0.1	58 ± 1
	S	ΔE	-0.06 ± 0.09	0.5 ± 0.6
		E	-0.4 ± 0.1	6 ± 2
Riv3	O	ΔE	-5.1 ± 0.1	22.7 ± 0.4
		E	-5.0 ± 0.1	27.1 ± 0.5
	S	ΔE	0.7 ± 0.1	-4.5 ± 0.6
		E	0.19 ± 0.09	-1.0 ± 0.5

Tabella 8: Valori di potenziale di circuito aperto e corrente di cortocircuito per i due rivelatori pentagonali a sezione unica.

riportato a titolo di esempio uno dei grafici di tale funzione, da cui si ricava la potenza fornita dal rivelatore¹⁹.

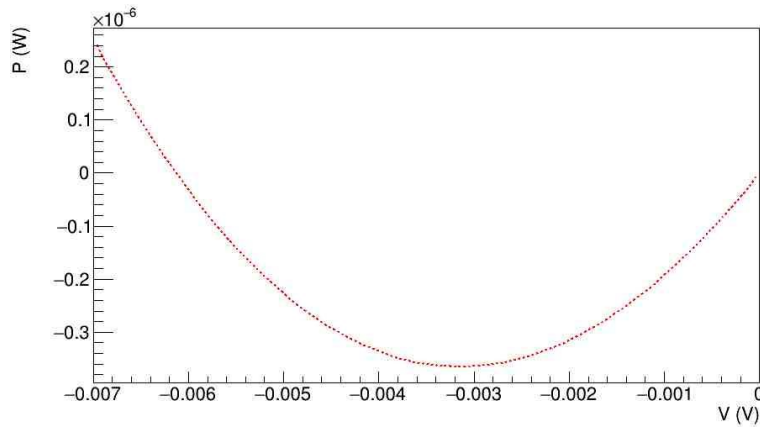


Figura 22: Tipico grafico ottenuto per la potenza a partire dai fit alle misure. Come si può notare risulta evidente la presenza di un minimo nell'intervallo tra V_{OC} e 0. Questo nello specifico è stato ottenuto a partire dalle misure sul Riv4 in vuoto con 2.7cm tra sorgente e rivelatore (si veda il seguito).

Rivelatore	Stadio	P_{max} (pW)	P_0 (pW)	P_{res} (pW)
Riv1	ΔE	0.01 ± 0.02	0.2 ± 0.1	0.22 ± 0.02
	E	0.5 ± 0.3	64 ± 3	63 ± 3
Riv3	ΔE	0.7 ± 0.2	30 ± 1	29 ± 1
	E	0.05 ± 0.05	35 ± 1	35 ± 1

Tabella 9: Valori di potenza massima erogata dal rivelatore (con e senza sorgente) e di potenza residua. Con il termine P_{max} si intende la potenza massima emessa in presenza della sorgente, con P_0 la medesima senza sorgente, mentre con P_{res} ci si riferisce alla valore assoluto della differenza tra le due.

Una volta ottenuta la potenza, si ricava l'efficienza semplicemente considerandone il rapporto con la potenza emessa dalla sorgente normalizzando per l'angolo solido visto dal rivelatore. I valori che si ottengono sono riportati di seguito in Figura 23.

Si può notare che l'efficienza dello strato sottile del Riv1 è molto bassa rispetto a quella dello strato spesso. Questo fatto può indicare la presenza di un danneggiamento consistente del rivelatore, il quale compromette in maniera evidente il segnale fornito. Tale supposizione risulta essere avvalorata già da analisi pregresse fatte nel medesimo dispositivo. Per Riv3 invece i valori risultano essere coerenti, e a

¹⁹Nel nostro caso corrisponde al minimo per il verso con cui abbiamo scelto di polarizzare il nostro rivelatore

Rivelatore	Stadio	η
Riv1	ΔE	$(8 \cdot 10^{-5}) \pm (1 \cdot 10^{-5})$
	E	0.024 ± 0.003
Riv3	ΔE	0.011 ± 0.001
	E	0.013 ± 0.001

Tabella 10: Valori di efficienza ricavati per i due rivelatori pentagonali.

conferma di ciò vi è l'indice di compatibilità pari a 1.18, dove l'indice di compatibilità è definito come

$$k = \frac{|\mu_a - \mu_b|}{\sqrt{\sigma_{\mu_a}^2 + \sigma_{\mu_b}^2}} \quad (11)$$

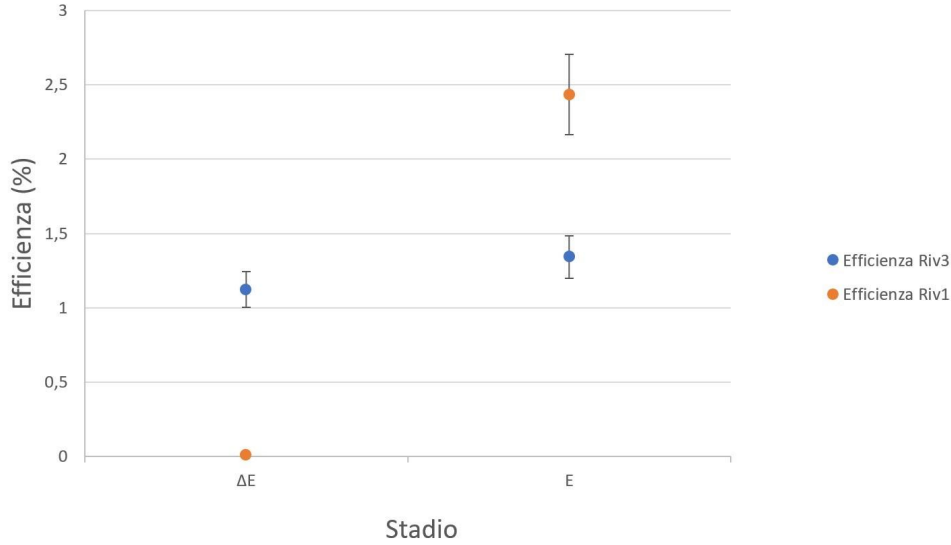


Figura 23: Efficienza di conversione in funzione dello spessore del rivelatore considerato.

Per quanto riguarda il rivelatore esagonale, le misure sono state condotte su un solo quadrante dello strato sottile, denominato con la lettera C (da qui la sigla Riv4C-a per indicare questo rivelatore). Su tale dispositivo, le misure si sono effettuate a diverse distanze Sorgente-Rivelatore in aria, ovvero 3.3cm e 2.7cm, e poi si è ripetuta quest'ultima in vuoto. I parametri ottenuti dai fit e i relativi potenziali di circuito aperto e corrente di cortocircuito²⁰ sono riportati rispettivamente in Tabella 11 e 12

	Energia α (MeV)	Sorg.	p_0 (nA)	p_1 (nA)	p_2 (V^{-1})
Riv4C-a	1.50	O	0.761 ± 0.002	-0.602 ± 0.001	-36.25 ± 0.02
		S	1.100 ± 0.002	-0.849 ± 0.004	-34.85 ± 0.04
	2.63	O	3 ± 1	-1.18 ± 0.07	-33.1 ± 0.3
		S	1.247 ± 0.002	-0.879 ± 0.003	-34.86 ± 0.03
	5.47	O	0.910 ± 0.001	-0.886 ± 0.001	-35.08 ± 0.02
		S	1.104 ± 0.003	-0.932 ± 0.003	-35.34 ± 0.03

Tabella 11: Valori dei parametri del fit per Riv4C-a.

In Tabella 13 sono invece riportati i valori di potenza ottenuti.

Infine, in Figura 25 sono riportati i valori di efficienza ottenuti per tale rivelatore nelle diverse configurazioni

²⁰Per quanto riguarda i valori ottenuti in aria a 2.7cm senza sorgente, si precisa che gli errori particolarmente elevati sono dovuti al fatto che per questa misura si è presa solamente una serie di dati

	Energia α (MeV)	Sorgente	V_{OC} (mV)	I_{SC} (nA)
Riv4C-a	1.50	O	-6.4 ± 0.1	0.159 ± 0.003
		S	-7.4 ± 0.1	0.250 ± 0.004
	2.63	O	-26 ± 10	2 ± 1
		S	-10.0 ± 0.1	0.368 ± 0.004
	5.47	O	-0.77 ± 0.07	0.024 ± 0.002
		S	-4.8 ± 0.1	0.172 ± 0.004

Tabella 12: Valori di potenziale a circuito aperto e di corrente di cortocircuito per il Riv4C-a.

	Energia α (MeV)	P_{max} (pW)	P_0 (pW)	P_{res} (pW)
Riv4C-a	1.50	0.49 ± 0.02	0.271 ± 0.009	0.22 ± 0.02
	2.63	1.01 ± 0.02	0.271 ± 0.009	0.74 ± 0.02
	5.47	0.21 ± 0.01	0.0465 ± 0.0008	0.21 ± 0.01

Tabella 13: Valori di potenza massima erogata dal rivelatore (con e senza sorgente) e di potenza residua.

	Energia α (MeV)	η
Riv4C-a	1.50	0.0011 ± 0.0001
	2.63	0.0012 ± 0.0001
	5.47	0.00017 ± 0.00002

Tabella 14: Valori di efficienza ricavati.

Considerando il grafico delle efficienze o quello delle potenze dei rivelatori (questa volta poste in funzione dell'energia delle particelle invece che dello spessore del rivelatore) è possibile riscontrare come vi siano diversi comportamenti a seconda delle configurazioni in esame: alle energie maggiori corrispondenti con le misure a vuoto l'efficienza cala in maniera sensibile mentre rimane pressochè costante nelle prime misure effettuate in aria.

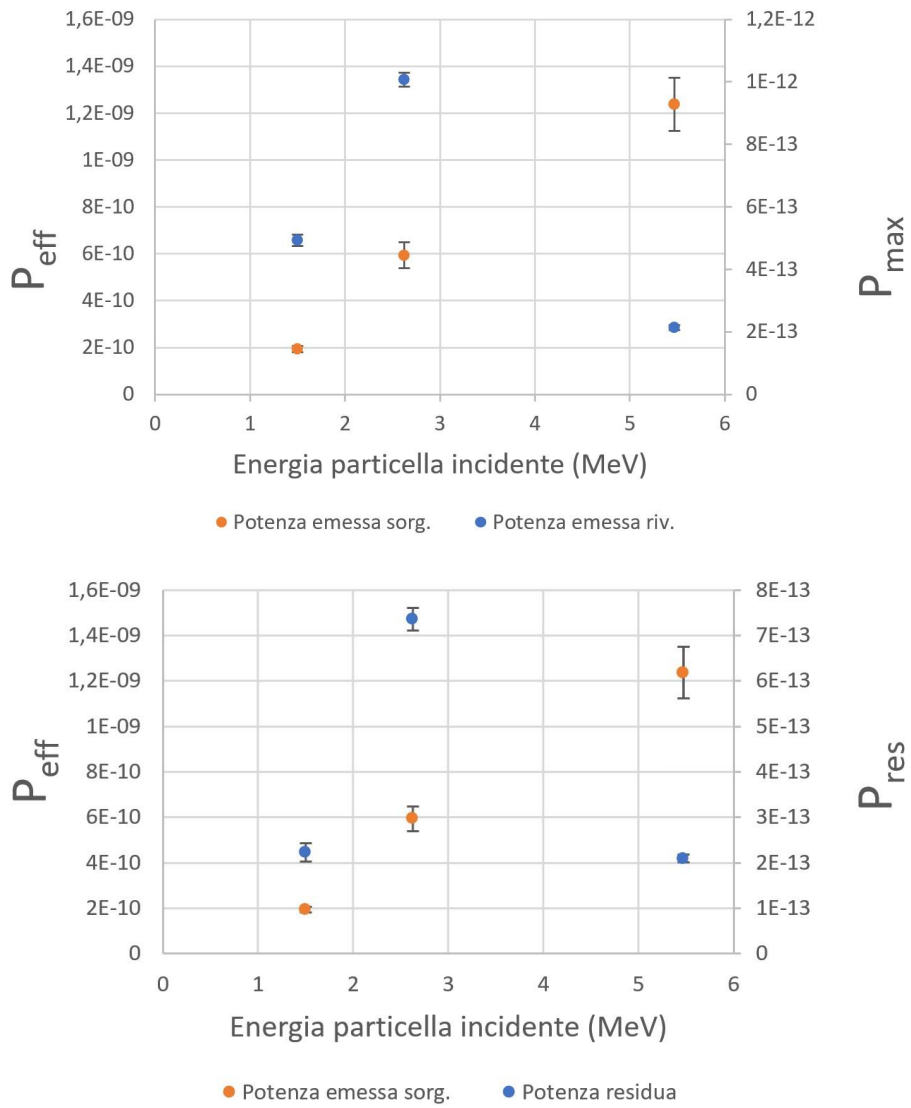


Figura 24: Potenza di output del rivelatore in funzione dell'energia incidente.

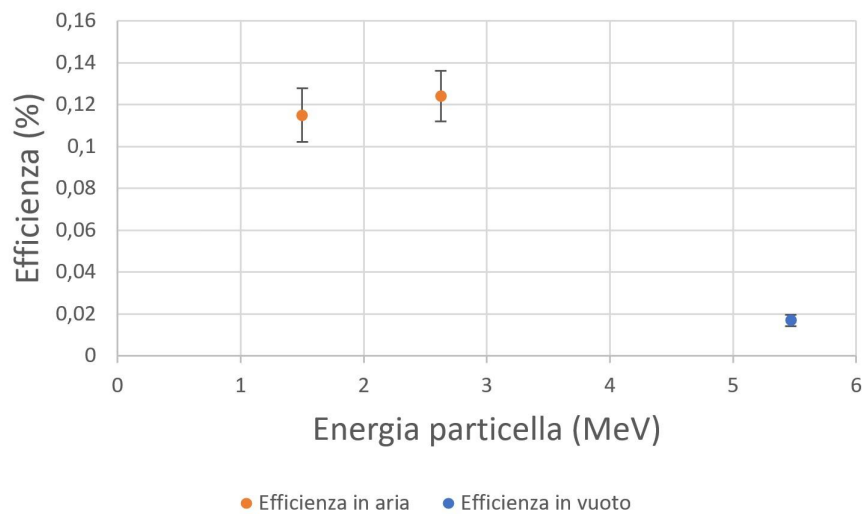


Figura 25: Efficienza di conversione in funzione dell'energia della particella che incide sul rivelatore.

4 Conclusioni e prospettive

In questa tesi è stata per la prima volta effettuata una misura di efficienza di batterie betavoltaiche. Ciò rappresenta un punto di partenza per la qualifica dell'efficienza di tali dispositivi e il loro miglioramento, tramite studi geometrici, di elettrodi e la possibile aggiunta di elementi passivi focalizzanti i portatori di carica. Per la caratterizzazione si sono scelti rivelatori al Silicio, disponibili per misure di fisica nucleare di base, che possono rappresentare l'unità di conversione delle batterie betavoltaiche.

Nel lavoro di tesi sono state effettuate stime di efficienza e confronti tra i risultati ottenuti per i rivelatori disponibili, diversi per forma e danneggiamento, e diverse energie della radiazione incidente.

Tale diversità è evidente sin dalle potenze osservate in assenza di sorgente, presumibilmente a causa del danneggiamento di alcuni dispositivi. Le stime finali di efficienza con sorgente risultano essere dell'ordine dell'unità percentuale per il Riv3, mentre per il Riv4C sono dell'ordine di 10^{-1} e 10^{-2} , in funzione della configurazione. Tali stime risultano compatibili con i valori presenti in letteratura, considerando substrati simili ma radiazioni incidenti di tipo β anziché α come nel presente lavoro.

Dalle misure effettuate per il rivelatore Riv4C, preso come riferimento in quanto un nuovo dispositivo, si evidenzia un andamento dell'efficienza in funzione dell'energia delle particelle interagenti che porta ad una diminuzione della stessa all'aumentare dell'energia. Sebbene misure sistematiche siano necessarie a confermare tale andamento, un'ipotesi di lavoro plausibile per giustificare questo comportamento è che all'aumentare dell'energia della radiazione incidente aumenta la profondità di penetrazione della stessa nel substrato, e ciò porterebbe ad aumentare la probabilità che i portatori di carica vengano riassorbiti. A parità di potenza generata dalla sorgente di radiazione, ciò comporterebbe una diminuzione di corrente e dunque un calo di efficienza.

A seguito delle prime stime di efficienza, si possono elencare alcuni punti per proseguire nella caratterizzazione dei dispositivi:

- Effettuare misure più precise ed accurate acquisendo più dati nel range corrispondente all'intervallo tra 0 e V_{OC} per il rivelatore in esame. Questo porterebbe a minimizzare incertezze legate alla procedura di fit, utilizzato per stimare i vari parametri.
- Effettuare misure su altri rivelatori di diversa capacità, dal pF al nF.
- Effettuare misure su altri rivelatori di diverso materiale, ad esempio SiC e diamante.
- Stimare corrente prodotta tramite misura del segnale preamplificato usando digitalizzatori e algoritmi numerici.

Riferimenti bibliografici

- [1] Chunlin Zhou et al. *Review-Betavoltaic Cell: The Past, Present, and Future*. ECS J. Solid State Sci. Technol. 10 027005, 2021.
- [2] A. A. Krasnov e S. A. Legotin. *Advances in the Development of Betavoltaic Power Sources (A Review)*. Instruments e Experimental Techniques, 2020.
- [3] Yu-Min Liu et al. *A $4H$ -SiC betavoltaic battery based on a ^{63}Ni source*. Nucl. Sci. Tech. (2018) 29:168, 2017.
- [4] Yu-Min Liu et al. *Theoretical Prediction of Diamond Betavoltaic Batteries Performance Using ^{63}Ni* . Chinese Phys. Lett. 35 072301, 2018.
- [5] Tariq R. Alam et al. *Beta particle transport and its impact on betavoltaic battery modeling*. Elsevier-Applied Radiation e Isotopes 130 (2017) 80-89, 2017.
- [6] Keithley. *Model 6430 Sub-Femtoamp Remote SourceMeter Instrument, Reference Manual*. https://download.tek.com/manual/6430-901-01G_Jan_2021_Ref-2.pdf. 2021.
- [7] D. Testov et al. *The 4π highly-efficient light-charged-particle detector EUCLIDES, installed at the GALILEO array for in-beam γ -ray spectroscopy*. Eur. Phys. J. A (2019) 55:47, 2019.
- [8] F. Recchia. *Radioactive sources, For the experiments of the laboratory course*. Università degli Studi di Padova, Corso magistrale di Physics Laboratory, 2022.
- [9] Michigan State University. *Exotic Beam Production with Fragments Separators*. <https://lise.nsl.msui.edu/lise.html>. 2022.
- [10] Hang Guo e Amit Lal. *Nanopower betavoltaic microbatteries*. The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators e Microsystems, Boston, June 8-12, 2003, 2003.

5 Appendice

Riportiamo i programmi utilizzati nell'elaborazione dei dati.

- Macro utilizzata per il fit dei dati ottenuti.

```
#include "TCanvas.h"
#include "TROOT.h"
#include "TGraphErrors.h"
#include "TF1.h"
#include "TLegend.h"
#include "TArrow.h"
#include "TLatex.h"
#include "math.h"

void macro1(){
    // Instance of the graph
    TGraphErrors graph("./riv4Ca_consorg-part2.txt","%lg %lg %lg");
    graph.SetTitle(" ;V (V);I (uA)");
    //graph.SetTitleSize(2)

    // Make the plot esthetically better
    graph.SetMarkerStyle(kOpenCircle);
    graph.SetMarkerColor(kBlue);
    graph.SetLineColor(kBlue);

    // The canvas on which we'll draw the graph
    auto mycanvas = new TCanvas();

    // Draw the graph
    graph.DrawClone("APE");

    // Define a linear function
    TF1 f(" Exponential law ", "[0]+[1]*TMath::Exp([2]*x)", -0.3,0.3);
    f.SetTitle(" ;V (V);P (W)");
    // Let's make the function line nicer
    f.SetLineColor(kRed); f.SetLineStyle(2);
    //Fit it to the graph and draw it
    f.SetParameter(0,0.001162);
    f.SetParameter(1,-0.0009363);
    f.SetParameter(2,-35.222);
    graph.Fit(&f);
    f.DrawClone("Same");

    // Build and Draw a legend
    TLegend leg(.1,.7,.3,.9,"Legenda");
    leg.SetFillColor(0);
    graph.SetFillColor(0);
    leg.AddEntry(&graph,"Exp. Points");
    leg.AddEntry(&f,"Fit");
    leg.DrawClone("Same");
```

```
    mycanvas->Print("graph_with_law.pdf");  
}  
  
int main(){  
    macro1();  
}
```