



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA**

**Impatto delle ispezioni a raggi-X sulle prestazioni e  
sull'affidabilità di memorie a semiconduttore**

**Relatore: Prof. Gerardin Simone**

**Laureando: Manni Andrea**

**Correlatrice: Prof. Bagatin Marta**

**ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024**

**Data di laurea 18/04/2024**



## **Abstract**

Le memorie a semiconduttore presentano un grande vantaggio in termini di compattezza, consumi e prestazioni, ma richiedono costante attenzione nel mantenimento dell'integrità del dispositivo e del suo contenuto. Con la crescente miniaturizzazione dei componenti, questo aspetto risulta sempre più importante. Alcuni tra possibili meccanismi di guasto o fonte di errori derivano dagli effetti delle radiazioni ionizzanti che impattano sui dispositivi. Lo scopo di questa tesi risiede nella valutazione degli effetti delle ispezioni a raggi-x su dispositivi di memoria di tipo NAND Flash, una delle architetture di memoria più utilizzate sul mercato. Nei sistemi di produzione industriale, in particolare per le fasi di assemblaggio di schede elettroniche, le ispezioni a raggi-x risultano uno strumento fondamentale e molto utilizzato per la rilevazione di anomalie di montaggio dei componenti. In questo studio sono stati testati gli effetti di ispezioni a diverse intensità su memorie con differenti tecnologie costruttive, monitorandone le prestazioni, l'assorbimento di corrente e la capacità di ritenzione del dato.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>I. Memorie Flash</b>	<b>9</b>
1.1 Floating-gate	9
1.2 Architettura delle memorie	14
1.3 Logica di archiviazione	18
1.4 Comandi Principali	21
<b>II. Raggi-X</b>	<b>23</b>
2.1 Tubo radiogeno	24
2.2 Immagini a raggi-X	28
2.3 Interazione radiazione-materia	31
2.4 Utilizzo in ambito industriale	34
<b>III. Caratterizzazione dei campioni</b>	<b>37</b>
3.1 Identificazione dei bad blocks	38
3.2 Programmazione	39
3.3 Ritenzione del dato	41
3.4 Analisi delle prestazioni	45
3.5 Acquisizione di forme d'onda in corrente	47
<b>IV. Ispezioni a raggi-X di bassa intensità</b>	<b>51</b>
4.1 Descrizione del primo test	52
4.2 Comparazione dei risultati	54
4.3 Considerazioni sui risultati	56
<b>V. Ispezioni a raggi-X di media intensità</b>	<b>61</b>
5.1 Descrizione del secondo test	62

5.2 Comparazione dei risultati	65
5.3 Considerazioni sui risultati	68
<b>VI. Conclusioni</b>	<b>73</b>
6.1 Dipendenza dall'intensità di radiazione	73
6.2 Dipendenza dalla tecnologia costruttiva	75
6.3 Bit-errors su celle condivise	76
<b>Riferimenti</b>	<b>79</b>

## Introduzione

Tra le tecniche di memorizzazione di dati in formato digitale, negli ultimi anni si è fatta sentire sempre di più l'importanza dell'utilizzo di memorie di tipo Flash, già utilizzate ampiamente in vari dispositivi, dagli smartphone alle più semplici pen-drive, queste memorie stanno gradualmente sostituendo persino il sistema a disco rigido o HDD (*Hard Drive Disk*) nei più moderni computer, e soprattutto nei laptop, con gli SSD (*Solid-State Drive*), basati anch'essi su tecnologia Flash. Il motivo di tale transizione risiede principalmente nelle elevate performance, nella compattezza e nel minor peso di queste memorie a semiconduttore che forniscono inoltre densità sempre maggiori grazie alla costante miniaturizzazione delle tecnologie mos. Questo tipo di memorie, sebbene molto vantaggiose, non sono però esenti da problematiche affidabilistiche, tra cui il fenomeno definito "*bit-flipping*", ovvero una variazione del valore di alcuni bit memorizzati, tale fenomeno si può verificare per diverse cause, ad esempio, per via del rumore di fondo durante la fase di programmazione, per deterioramento del componente dovuto all'usura o a causa di fenomeni esterni. Tra quest'ultimi si inseriscono gli effetti delle radiazioni ionizzanti, fotoni ad alta energia che, colpendo la struttura di una cella di memoria, possono influenzarne il contenuto. In questo lavoro di tesi si andranno ad analizzare in particolare gli effetti della radiazione X su memorie NAND Flash appartenenti a diversi nodi tecnologici. Conoscere quale sarà il loro effetto può aiutare nella scelta della tipologia di memoria da utilizzare in determinati contesti e capire quale algoritmo di ECC (*Error Correction Code*) implementare per neutralizzare le conseguenze del *bit-flipping*. Spesso, lo studio dell'effetto della radiazione X, è associato all'ambito aerospaziale, in quanto si tratta di un contesto in cui l'esposizione a radiazioni ionizzanti è superiore a quello terrestre, tuttavia i raggi-x sono ampiamente utilizzati anche a livello terrestre, per applicazioni di tipo industriale o biomedicale. Nell'industria specializzata nella produzione di schede e dispositivi elettronici, essi vengono impiegati per eseguire operazioni di screening, sia manuali che automatiche, tra le varie fasi di produzione. L'ispezione 2D e la tomografia a raggi-X risultano essere infatti uno strumento indispensabile nei processi industriali, queste vengono impiegate, ad esempio, per controllare lo stato

di saldatura di un componente in formato BGA (*Ball Grid Array*) sulle piazzole di un PCB (*Printed Circuit Board*) oppure per misurare il volume di stagno presente in una saldatura a discapito di vuoti interni (detti anche *voids*) dovuti a piccole bolle di gas intrappolate all'interno del materiale durante il processo di fusione.

Nelle prossime pagine verrà illustrato il lavoro che è stato svolto presso *EAS Elettronica S.p.A.* per la descrizione di memorie NAND Flash con diverse tecnologie costruttive, sia in condizioni standard sia per l'identificazione di effetti cumulativi di ispezioni ai raggi-X a diverse intensità. La tesi è organizzata come segue: I capitoli *I* e *II* descrivono i dispositivi utilizzati per lo studio, il capitolo *III* espone la caratterizzazione dei componenti, mentre i capitoli *IV* e *V* definiscono i test effettuati e i risultati ottenuti, il tutto si conclude al capitolo *VI* dove questi vengono comparati.



# I. Memorie Flash

In questo capitolo verranno introdotti i principi fondamentali che consentono il funzionamento delle memorie di tipo Flash, illustrando la struttura della cella di memoria ed il principio fisico che ne permette la programmazione, si proseguirà nei seguenti paragrafi a specificare le differenti architetture che caratterizzano il sistema di memoria e se ne illustrerà il suo utilizzo per le istruzioni di programmazione, cancellazione e lettura di dati.

## 1.1 Floating-gate

La struttura fondamentale che permette la conservazione di un dato è il *transistor floating-gate*, esso presenta una configurazione simile a quella di un MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), con la differenza che all'interno del materiale dielettrico di gate si trova una sezione isolata, solitamente composta da silicio policristallino (*Poly-Si*), denominata “*floating-gate*” (FG). Questa regione del componente si comporta come una buca di potenziale in cui viene immagazzinata della carica elettrica per simulare un valore binario.

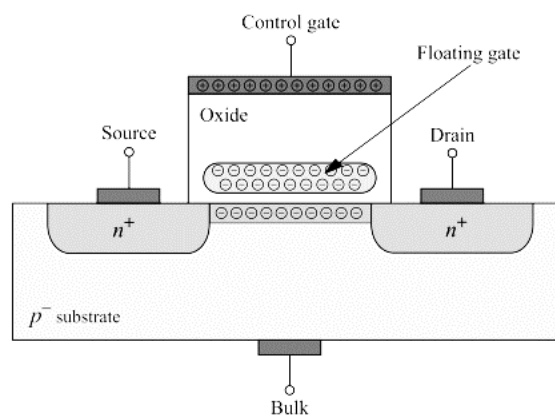


FIGURA 1.1.1 – ILLUSTRAZIONE SEMPLIFICATA DELLA STRUTTURA DI UNA CELLA FLOATING-GATE. [1]

L'isolante di gate, anche definito IPD (*Inter-Polysilicon Dielectric*) è generalmente realizzato con biossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ) o con ONO (*Oxide-Nitride-Oxide*) ed è più sottile nella parte in cui separa il floating-gate dal canale.

È stato dimostrato che i principali meccanismi praticabili per la modifica del contenuto di carica del floating-gate sono il tunneling di Fowler-Nordheim (FN) e la “hot carrier injection” (HCI) di elettroni attraverso lo strato dielettrico. [2, p. 224]

**Fowler-Nordheim tunneling:**

È uno dei più importanti meccanismi di iniezione di carica utilizzati nelle memorie non volatili o NVM (Non Volatile Memories). Durante la fase di programmazione viene applicata al control-gate una tensione ( $V_{app}$ ) sufficientemente alta da far modificare la struttura del band-diagram come mostrato nella Figura 1.1.2.

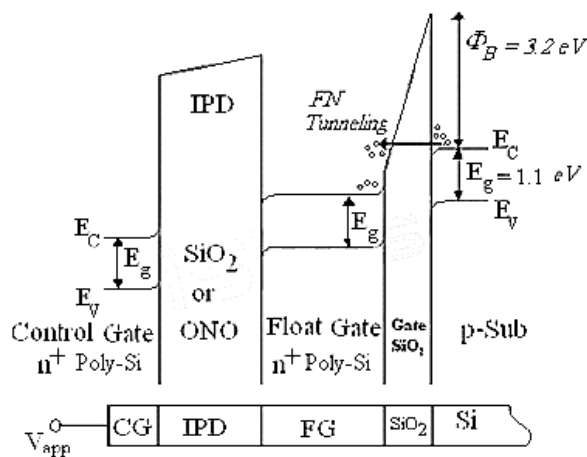


FIGURA 1.1.2 – BAND-DIAGRAM DI UNA CELLA A FG IN SCRITTURA PER FN TUNNELING. [2, p. 225]

La tensione applicata al control-gate genera un campo elettrico che definisce la pendenza delle barriere di potenziale. Come si può notare, la pendenza della barriera che divide il *floating-gate* dal substrato presenta una pendenza elevata se comparata a quella che lo separa dal *control-gate*, ciò è dovuto al minore spessore del dielettrico nella prima barriera rispetto alla seconda. La probabilità di tunneling attraverso una barriera di potenziale è dipendente dal suo spessore ed è definita dalla Formula 1.1.1.

$$[3, p. 14] \quad T = \exp \left( - \int_{x=0}^{x_T} 2\hbar^{-1} \sqrt{2m_e^* [q\phi_B - qEx - E]} dx \right) \quad (1.1.1)$$

Dove  $m_e^*$  rappresenta la massa dell’elettrone,  $E$  la componente energetica dell’elettrone incidente in direzione  $x$ ,  $\phi_B$  l’altezza della barriera di potenziale tra

il silicio e il dielettrico,  $\hbar$  la costante di Planck ridotta ( $\hbar = h/(2\pi)$ ), mentre  $\epsilon$  è il campo elettrico nella barriera.

All'aumentare della tensione applicata (e quindi al campo elettrico) lo spessore della barriera per gli elettroni presenti nel substrato diminuisce e di conseguenza ne aumenta la loro probabilità di tunneling attraverso di essa. Ciò può essere dimostrato anche tramite la formula di Fowler-Nordheim (Formula 1.1.2) per il calcolo della densità di corrente che la attraversa, la quale aumenta all'aumentare del campo elettrico  $\epsilon$ .

$$[4, p. 55] \quad J_{FN} = \frac{q^2 \epsilon^2}{16\pi^2 \hbar \phi_B} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m_e^*} \phi_B^{\frac{3}{2}}}{3\hbar q \epsilon}\right) \quad (1.1.2)$$

I cui parametri sono definiti allo stesso modo dell'equazione precedente.

Si può quindi affermare che la tensione applicata fornisce agli elettroni nel substrato un percorso per il *floating-gate* attraverso il materiale dielettrico.

L'esecuzione di un'operazione di cancellazione avviene applicando un'elevata tensione negativa al *control-gate*, il *band-diagram* assume dunque la struttura mostrata in Figura 1.1.3.

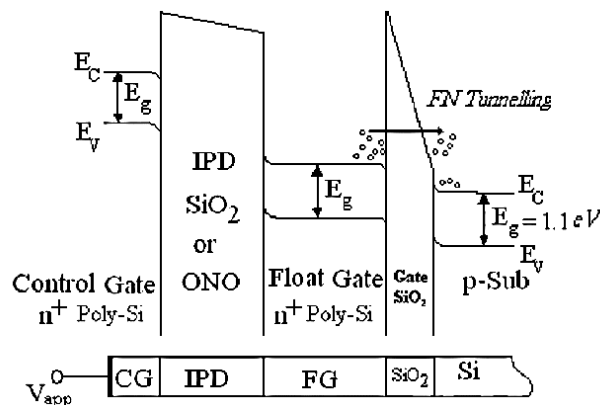


FIGURA 1.1.3 – BAND-DIAGRAM DI UNA CELLA A FG IN FASE DI ERASE PER FN TUNNELING. [2, p. 229]

In questo caso si verifica un fenomeno di tunneling analogo a quello appena illustrato, con la differenza che ora gli elettroni liberano il *floating-gate* tornando al substrato, privandolo pertanto dalla carica precedentemente immagazzinata.

### **Hot carrier injection:**

Secondo questo meccanismo di iniezione, gli elettroni vengono immessi dalla regione di *pinch-off* del drain. Viene applicata una tensione al terminale di drain, così da aumentare l'energia degli "hot electrons", i quali vengono accelerati dal campo elettrico nel canale fino ad arrivare ad un più alto campo nella regione di svuotamento del drain. Quando essi acquisiscono sufficiente energia, superano la barriera di potenziale tra il silicio ed il dielettrico accedendo così al *floating-gate*.

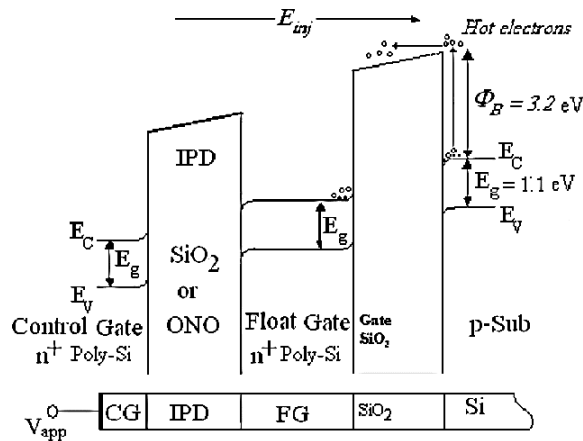


FIGURA 1.1.4 – BAND-DIAGRAM DI UNA CELLA A FG DURANTE LA SCRITTURA PER HCI. [2, P. 227]

Fornendo una tensione positiva al drain, gli elettroni iniettati in una memoria a canale-n, ritornano al substrato (ameno che non venga applicata un'elevata tensione positiva al control-gate che attiri gli elettroni verso di esso). In questo modo viene eseguita un'operazione di cancellazione.

Mentre il dispositivo si trova in uno stato di equilibrio, la carica precedentemente inserita rimane intrappolata tra due barriere di potenziale, risulta quindi confinata in una struttura simile ad un "quantum well". Questo tipo di cella, come suggerito dalla sua struttura, si composta come un dispositivo MOS, ma la presenza di carica nel *floating-gate* ne altera la tensione di soglia. All'aumentare del quantitativo di carica negativa al suo interno, aumenta la tensione di soglia ( $V_{th}$ ) del dispositivo, sfruttando questo fenomeno si effettuano le letture delle celle. Per fare questo viene applicato un determinato bias di tensione al control-gate, si misura la corrente di

drain e la si compara con un valore di riferimento. La corrente di drain varia a seconda del valore della tensione di soglia, si può pertanto determinare il contenuto di una cella dalla sua misura.

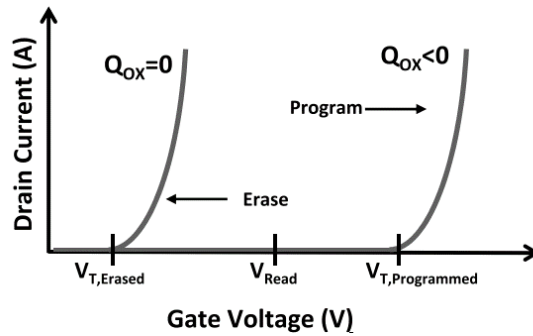


FIGURA 1.1.5 – CARATTERISTICA  $I_{DS}$ - $V_{CG}$  DI UNA CELLA DI MEMORIA FLASH SLC. [5]

Il sistema a *floating-gate* consente di costruire dispositivi in grado di immagazzinare sufficiente carica per cui essa possa essere modulata ed utilizzata per rappresentare un numero maggiore di stati. Al variare della quantità di carica accumulata, varierà di conseguenza il valore di tensione di soglia  $V_{th}$ . Nei sistemi “*multi level cell*” (MLC), diversamente dai “*single level cell*” (SLC), viene eseguita questa modulazione di carica per poter rappresentare i quattro stati di un numero a due bit. Ciò significa che in ogni cella di memoria di questo tipo vengono memorizzati due valori binari anziché uno, come invece avviene nelle SLC.

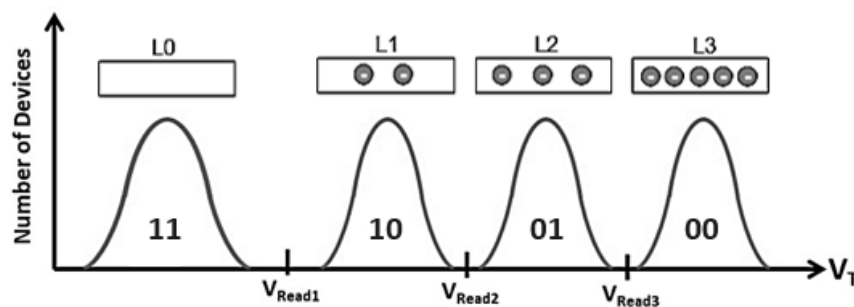


FIGURA 1.1.6 – DISTRIBUZIONE DELLA SOGLIA NELLE MEMORE NAND FLASH MLC. [5] [6]

Sfruttando questo sistema si costruiscono anche celle di memoria di tipo TLC (*Triple Level Cell*) che riescono a rappresentare tre bit, e QLC (*Quad Level Cell*) che arrivano fino a quattro bit per ciascuna cella. In questo lavoro di tesi si utilizzeranno solamente memorie di tipo SLC e MLC (2 bit).

## 1.2 Architettura delle memorie

Ogni cella di memoria può potenzialmente essere utilizzata singolarmente come dispositivo a tre terminali, per ovvie ragioni questo risulta sconveniente in un sistema con un numero di celle molto elevato, per questo motivo esse vengono organizzate in architetture più efficienti. Tra queste, le due più utilizzate sono la tipologia NOR e la NAND.

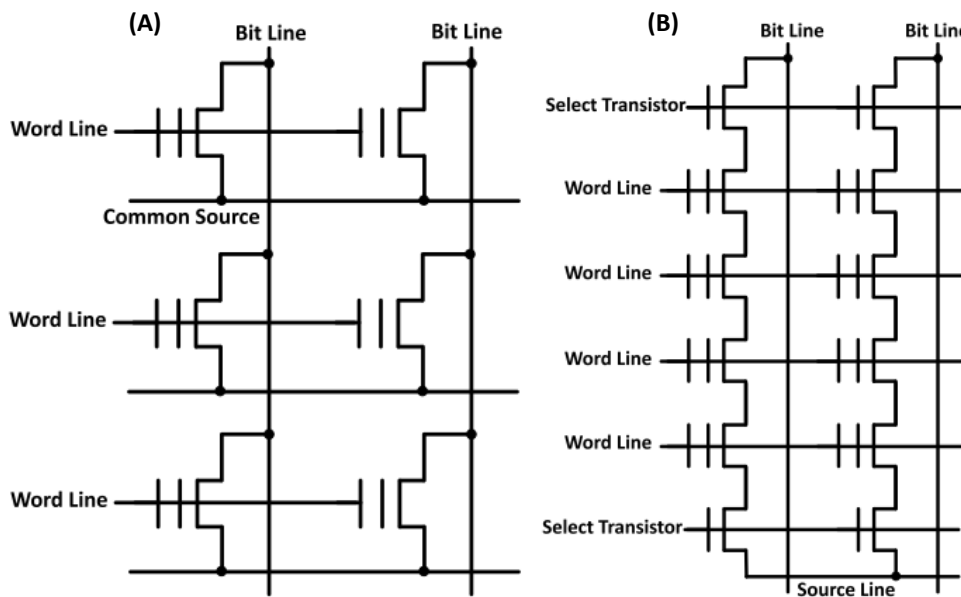


FIGURA 1.2.1 – (A) NOR FLASH ARRAY; (B) NAND FLASH ARRAY. [5]

### *NOR flash array:*

Rappresentata nella Figura 1.2.1 (A), la linea “*Bit Line*” (BL) risulta connessa al terminale di drain di ciascuna cella appartenente alla medesima colonna, la linea “*Word Line*” (WL) connette i gate dei dispositivi appartenenti alla stessa riga, mentre i terminali di source di ciascuna cella sono connessi tra di loro. La lettura viene eseguita individualmente applicando un bias positivo a WL e BL. La scrittura avviene singolarmente tramite HCI, mentre la cancellazione sfrutta il meccanismo del FN tunneling.

### ***NAND flash array:***

Secondo questa architettura (Figura 1.2.1 (B)) le celle vengono suddivise in stringhe connesse alla corrispettiva “*Bit Line*” (BL) tramite il transistor di selezione collegato al drain della prima cella. Ciascuna di esse condivide il terminale di source con quello di drain della successiva, ciò garantisce un’occupazione di area più efficiente rispetto al sistema NOR. Questa struttura necessita però di un’architettura di indirizzamento più complessa che conduce ad una lettura seriale più lenta. Nel sistema NAND, sia la scrittura che la cancellazione utilizzano il fenomeno del FN tunneling. Per compiere un’operazione di cancellazione (o *Erase*) viene applicata un’elevata tensione positiva al substrato delle celle appartenenti al blocco selezionato, così da sfruttare il meccanismo di tunneling, una volta eseguita l’operazione, tutte le celle di quel blocco si troveranno allo stato binario 11 corrispondente al livello L0 della Figura 1.1.6. L’esecuzione di un comando di programmazione avviene imponendo un’elevata tensione positiva alla “*Word Line*” (WL) corrispondente alla pagina che si vuole programmare, le altre pagine che condividono la stessa WL vengono inibite fornendo tensione alle corrispondenti BL per portare in interdizione il transistor di selezione del drain. La scrittura dei bit è tipicamente eseguita con l’algoritmo “*Incremental Step Pulse Program*” (ISPP) <sup>1</sup>. La lettura, come la programmazione, avviene per pagine, ma questa è eseguita alimentando entrambe le linee di selezione insieme a tutte le WL da ignorare, viene poi applicata una serie di precisi bias di tensione alla WL corrispondente alla cella che si vuole leggere, in questo modo è possibile stabilirne la tensione di soglia definendo che questa si trovi tra gli ultimi due valori di bias utilizzati dal momento in cui nel transistor inizia a scorrere corrente. [6, p. 2]

L’architettura NOR è significativamente più veloce nella lettura ed ha mediamente una più lunga durata, d’altro canto la NAND presenta una più elevata velocità di scrittura ed una densità maggiore (~60% più piccola [7, p. 3]) che la rendono più economica a parità di bit.

---

<sup>1</sup> «ISPP first injects electrons into floating gates to boost the  $V_{th}$  of programmed cells through FN mechanisms and then performs a verification to check whether the  $V_{th}$  has reached the desired level. If  $V_{th}$  is still lower than the desired voltage, the program-and-verify iteration will continue until the cell’s  $V_{th}$  has reached the target level» [6, p. 2]

I dispositivi utilizzati per questo lavoro di tesi sono tutti di tipo NAND Flash.

Il sistema che gestisce la memoria, consentendo l'utilizzo della struttura NAND Flash, è illustrato tramite diagramma a blocchi in Figura 1.2.2. Prima di essere inviati alla memoria, i comandi, gli indirizzi e i dati del bus subiscono un processo di *multiplexing* che riduce fino a quasi 45% [7, p. 5] il numero di pin necessari rispetto a quelli di un'architettura NOR. Questi vengono ricevuti dal circuito di controllo di ingresso/uscita (I/O) tramite i medesimi pin, i comandi ricevuti in ingresso dal sistema vengono acquisiti dal "command register" e trasferiti al circuito "control logic" per la generazione dei segnali di controllo destinati alla gestione delle operazioni interne del dispositivo. Gli indirizzi vengono acquisiti dal registro "address register" e inviati ad un decodificatore di riga (*row decoder*) per la selezione dell'indirizzo di riga, o ad un decodificatore di colonna (*column decoder*) per l'indirizzo di colonna. I dati vengono trasferiti al o dal *NAND Flash array* un byte alla volta attraverso un "data register" ed un "cache register".

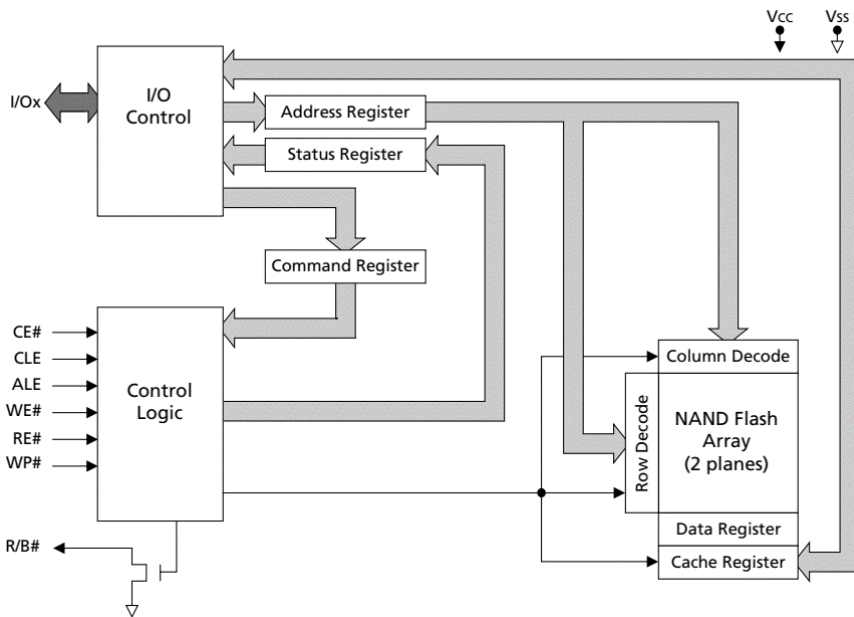


FIGURA 1.2.2 – DIAGRAMMA FUNZIONALE A BLOCCHI DI UNA MEMORIA NAND FLASH. [8]

Durante le normali operazioni sulle pagine di memoria, il "data register" ed il "cache register" agiscono come un unico registro. Al contrario, durante le operazioni di tipo "cache", i due registri operano in modo indipendente per aumentare la velocità di trasmissione dei dati.



### Ready Busy:

Il segnale di “Ready/Busy” (R/B) fornisce un metodo hardware per determinare se un target è nello stato “ready” (pronto) o “busy” (occupato). Il funzionamento di questo sistema prevede la presenza di un resistore di pull-up ( $R_P$ ), in quanto il segnale R/B è alto quando il dispositivo si trova nello stato “ready” ed è basso se si trova nello stato “busy”. Tipicamente, la linea R/B viene connessa da un pin di interrupt del sistema di controllo (vedi la Figura 1.2.3). La combinazione tra la resistenza  $R_P$  e la capacità del carico della linea di R/B determinano il *rise-time* del segnale, il quale è approssimabile al doppio della costante di tempo  $T_C = R_P \cdot C$ .

[9, pp. 28, 29]

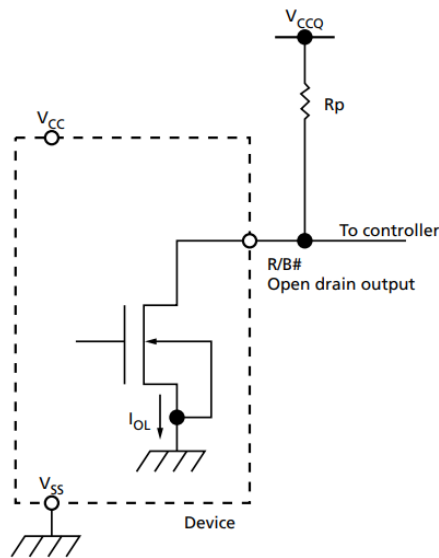


FIGURA 1.2.3 – READY/BUSY OPEN DRAIN. [9, P. 29]

Il *fall-time* del segnale è determinato principalmente dalla resistenza di uscita e dalla capacità totale del carico. Il valore minimo di  $R_P$  può essere determinato tramite la Formula 1.2.1, in cui sono stati sostituiti i valori numerici che caratterizzano i dispositivi utilizzati in questo studio.

$$[10, p. 17] \quad R_P^{min} = \frac{V_{CC}^{Max} - V_{OL}^{Max}}{I_{OL} + \sum I_L} = \frac{3.2V}{8mA + \sum I_L} \quad (1.2.1)$$

Dove il termine  $\sum I_L$  rappresenta la somma delle correnti d’ingrasso di tutti i dispositivi connessi al pin di R/B.

### 1.3 Logica di archiviazione

I dati seguenti sono riferiti ai dispositivi NAND Flash utilizzati per questa tesi. L'organizzazione degli indirizzi di memoria prevede che i dati all'interno di essa vengano suddivisi in byte, pagine e blocchi, come indicato nella Figura 1.3.1. In tale configurazione, ogni bit appartiene ad un byte, il quale appartiene ad una pagina che a sua volta fa parte di un blocco. Come specificato nel paragrafo precedente, le operazioni di lettura e scrittura hanno granularità di pagina, mentre quelle di cancellazione hanno granularità di un blocco.

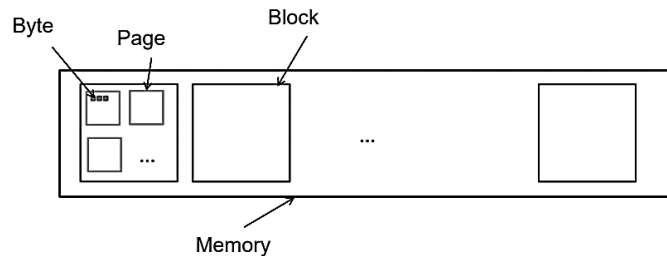


FIGURA 1.3.1 – ORGANIZZAZIONE DELLA MEMORIA IN BYTE, PAGINE E BLOCCHI. [11]

La Figura 1.3.2 mostra invece come queste strutture possano essere considerate complessivamente all'interno dell'unità logica o “*Logical Unit*” (LUN). Ogni blocco di memoria è composto da due sezioni separate, quella più grande è denominata “*Data area*” ed è l'effettiva area in cui verranno immagazzinati i dati, mentre quella più piccola (224 byte nell'esempio di Figura 1.3.2) è definita “*spare*”.

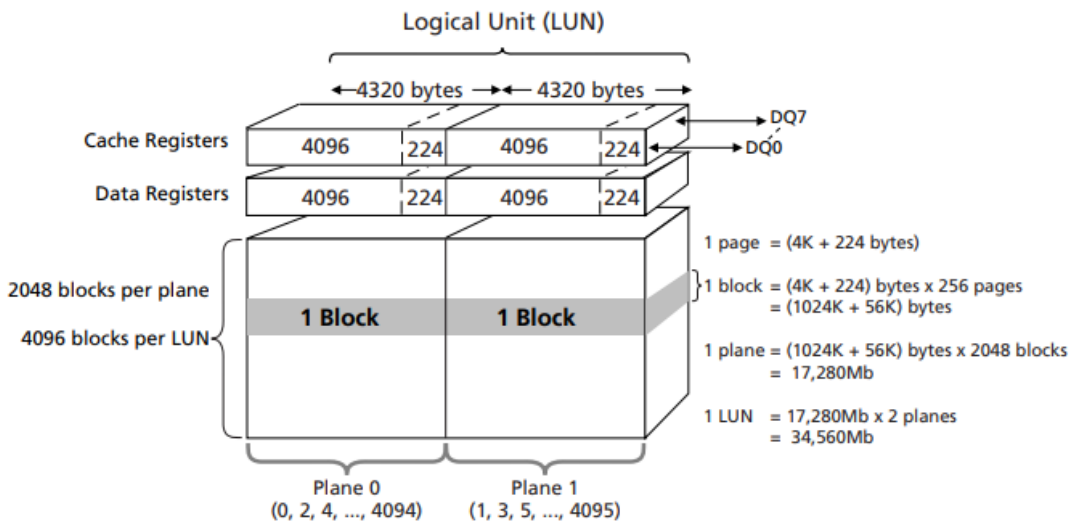


FIGURA 1.3.2 – ORGANIZZAZIONE DELL'ARRAY PER UNITÀ LOGICA (LUN). [9]

Lo *spare* è un'area di memoria destinata ad allocare algoritmi di “*wear-leveling*” (livellamento dell'usura) oppure di “*Error Correction Code*” (ECC). Quest'ultimo può essere utilizzato anche per la gestione dei “*bad blocks*”<sup>2</sup> in modo da mantenere inalterata l'integrità della memoria.

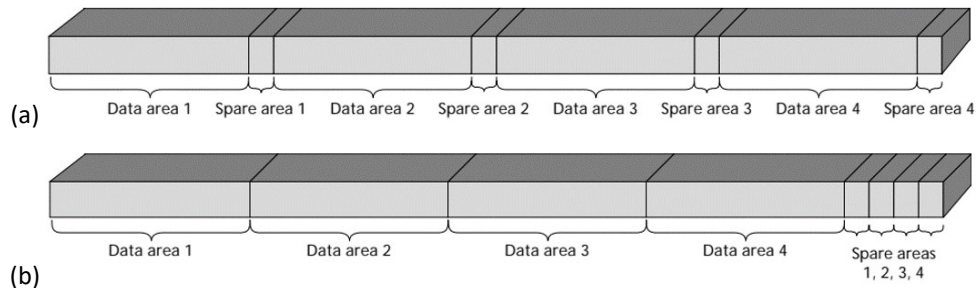


FIGURA 1.3.2 – METODI TIPICI DI ALLOCAZIONE DELL'AREA DI SPARE IN UNA PAGINA. [7]

Esistono due principali metodi per la distribuzione dell'area di *spare* nelle pagine di memoria: Nell'esempio della Figura 1.3.2 (a) vediamo una pagina in cui *data area* e *spare* vengono allocati in modo adiacente, con questo sistema la memoria può essere suddivisa in diverse sezioni, ognuna completa di *data area* e *spare*. Un altro metodo è illustrato in Figura 1.3.2 (b), dove le due aree di memoria vengono separate immagazzinando prima tutte le *data area* e alla fine della pagina le corrispettive aree di *spare*, raggruppandole così in due aree distinte.

### **Error Ccorrection Ccode:**

Gli algoritmi di ECC implementati nelle aree di *spare* della memoria sono indispensabili per il suo funzionamento. Le memorie flash, in modo particolare quelle a più livelli, sono soggette a errori e per mantenerne l'integrità è necessario che essi vengano costantemente rilevati e corretti. Ogni memoria ha un numero massimo di errori che è in grado di correggere, questo dato dipende dalla dimensione dell'area di *spare* ma anche dall'algoritmo di ECC che verrà scelto. Tra questi, i più utilizzati sono il codice di Hamming, il Reed-Solomon ed il BCH. Il codice di Hamming risulta di semplice implementazione, tuttavia, può correggere solo errori a singolo bit, mentre il sistema Reed-Solomon fornisce una

<sup>2</sup> Blocchi di memoria non utilizzabili, non necessariamente dovuti al deterioramento del sistema, possono essere presenti anche quando il dispositivo è nuovo. Solitamente il produttore garantisce che il numero di bad blocks sia sotto ad una predeterminata soglia al momento della vendita.

capacità di correzione degli errori più efficace, per questo è uno dei più utilizzati sul mercato. Anche il codice BCH (*Bose–Chaudhuri–Hocquenghem*) sta diventando popolare grazie alla sua efficienza, che risulta più elevata rispetto al Reed-Solomon [7, p. 24]. Nella Tabella 1.3.1 è rappresentato il numero di bit richiesto per ognuno di questi algoritmi, ciascuno comparato con il corrispettivo livello di correzione degli errori.

Livello di correzione degli errori	Numero di bit necessari nell'area di spare		
	Hamming	Reed-Solomon	BCH
1	13	18	13
2	-	36	26
3	-	54	39
4	-	72	52
5	-	90	65
6	-	108	78
7	-	126	91
8	-	144	104
9	-	162	117
10	-	180	130

TABELLA 1.3.1 – BIT DI SPARE NECESSARI E LIVELLO DI ECC PER UNA NAND FLASH. [7, P. 25]

### ***Pagine condivise:***

Nelle memorie MLC, i due bit di dati appartenenti ad ogni cella vengono allocati in due pagine logiche differenti, che d'ora in avanti divideremo in due gruppi denominandoli pagine A e pagine B. La loro collocazione, per quanto riguarda i dispositivi utilizzati in questa tesi, è illustrata nella Tabella 1.3.2, in cui le pagine appartenenti alla stessa riga sono quelle che condividono le stesse celle di memoria.

	Pagine A	Pagine B
Pagine con celle condivise	0	4
	1	5
	2	8
	3	9
	6	12
	7	13
	10	16
	...	...

TABELLA 1.3.2 – ORGANIZZAZIONE DELLE PAGINE CONDIVISE PER LE MEMORIE MLC UTILIZZATE [9, PP. 101, 102]. (LE FRECCHE NE RAPPRESENTANO L'ORDINE DI NUMERAZIONE)

## 1.4 Comandi Principali

In questo paragrafo saranno elencati e descritti i più importanti comandi per quanto riguarda l'utilizzo delle memorie NAND Flash adoperate in questo studio.

### ***Erase:***

Si tratta di un'operazione utilizzata per svuotare il contenuto di un blocco di memoria e prepararlo quindi per una successiva fase di programmazione. Questa operazione porta le celle d'interesse allo stato 1 o 11, rispettivamente per le memorie SLC e MLC.

### ***Program page:***

Questo comando ha lo scopo di trasferire ed immagazzinare pagine di dati nella memoria. Nella fase di scrittura del dato il dispositivo è unicamente in grado di convertire i bit dallo stato 1 allo stato 0 e non viceversa, per questo motivo prima di ogni programmazione è necessario un ciclo di *erase*. Di fatto, se si vuole programmare solo una specifica area di una pagina, sarà sufficiente impostare ad 1 tutti gli altri bit in scrittura, così facendo, il ciclo di programmazione ne lascerà inalterato il contenuto originale.

### ***Program page cache:***

È un comando simile al precedente, con la differenza che in questo caso i due registri operano in modo indipendente. Il contenuto del *cache-register* viene copiato nel *data-register*, così facendo, mentre il contenuto di quest'ultimo viene trasferito al *NAND Flash array*, il primo è nuovamente libero per un'altra operazione.

### ***Read page:***

È un comando la cui funzione risiede nel leggere il contenuto di pagine di memoria. Quando questa istruzione viene inviata è sempre seguita dall'indirizzo di memoria d'interesse. Dopo un tempo definito come "*read transfer time*" il dato è trasferito al registro ed è pronto per l'output.

**Read page cache:**

Il dato è inizialmente trasferito dal *NAND Flash array* al *data-register*, se il *cache-register* si trova nello stato *ready*, il dato viene rapidamente trasferito dal *data-register* al *cache-register*. A questo punto il *data-register* sarà libero e potrà iniziare il caricamento del dato successivo. Sfruttando questo sistema è possibile mettere in *pipeline* gli accessi successivi e mascherare il *read transfer time*. Nel caso si operi con un dispositivo con 8 bit di I/O, questo comando migliora le performance del 33% [7, p. 17] rispetto al comando *read page* tradizionale.

**Reset:**

Si tratta di un comando che può essere lanciato anche quando il dispositivo si trova nello stato *busy*. Questo ha lo scopo di interrompere l'istruzione precedente e portare il dispositivo in una condizione nota.

**Read ID:**

Viene utilizzato per leggere il codice identificativo programmato nella memoria.

**Read status:**

Utilizzato sia per monitorare lo stato di *ready* del dispositivo, sia per riportare lo stato del "*Write-protect signal*"<sup>3</sup> ma anche per verificare lo stato "*pass/failure*" delle precedenti operazioni di *program* o *erase*.

**Random data input:**

Permette l'accesso ad un qualunque dato all'interno di una pagina, ad esempio può essere utilizzato per collocarsi alla fine di una pagina e scriverne l'ECC.

---

<sup>3</sup> Segnale utilizzato per abilitare o disabilitare le operazioni *program* o *erase* in un target.

## II. Raggi-X

In qualunque campo elettromagnetico, l'energia che lo costituisce è composta da unità discrete, definite "fotoni". L'energia utilizzata per la generazione di uno di questi fotoni ne stabilisce la corrispettiva lunghezza d'onda, che risulta essere inversamente proporzionale rispetto ad essa, questo significa che fotoni più energetici saranno caratterizzati da una lunghezza d'onda minore e quindi da una maggiore frequenza. Un fotone con energia superiore a circa 13.5eV viene definito "ionizzante", questo termine indica che esso possiede sufficiente energia da rimuovere un elettrone da un atomo e generare quindi uno ione (l'energia di soglia per poter ionizzare un atomo è in realtà molto variabile e dipende dal tipo di materiale che si considera). Se l'energia di un fotone è sufficientemente alta, questo può avere effetti distruttivi in certi materiali, come la rottura di legami. Le radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa tra  $\sim 10^{-8}\text{m}$  e  $\sim 10^{-12}\text{m}$  (o con energia tra i  $\sim 10^2\text{eV}$  e  $\sim 10^6\text{eV}$ ) vengono definite "raggi-X".

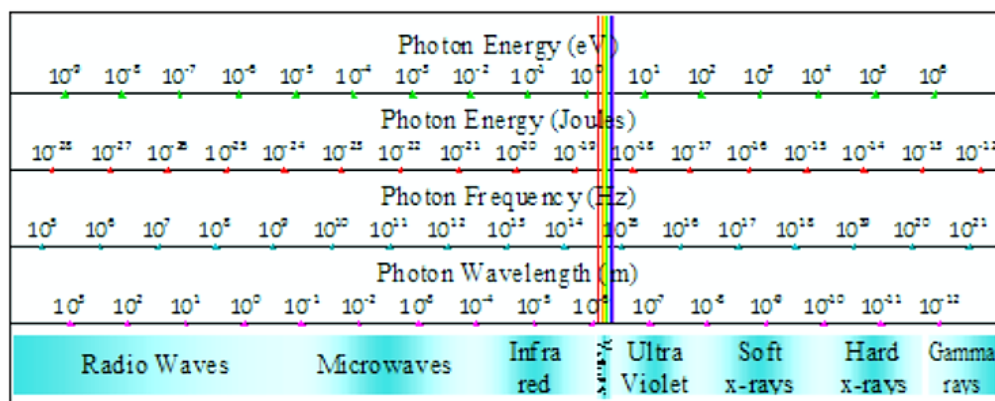


FIGURE 2.0.1 – NOMENCLATURA DI ONDE ELETTROMAGNETICHE. [12, P. 391]

I test eseguiti in questo studio, che verranno illustrati nei successivi capitoli, sono stati svolti mediante l'utilizzo di una macchina per l'ispezione a raggi-X della serie *XD* prodotta dalla *Nordson Dage*. I macchinari di questa serie sono in grado di generare fotoni con energia massima di 160keV [12, p. 391].

## 2.1 Tubo radiogeno

La generazione artificiale di raggi-X avviene solitamente tramite l'impiego di un tubo radiogeno, un dispositivo in grado di convertire energia elettrica in queste onde elettromagnetiche. La struttura di base che consente il funzionamento di tale dispositivo prevede la presenza di un'ampolla di vetro sottovuoto, contenente un anodo composto di un metallo pesante (generalmente leghe di tungsteno e molibdeno) ed un filamento catodico (oppure da un filamento riscaldante adiacente al materiale che costituisce il catodo).

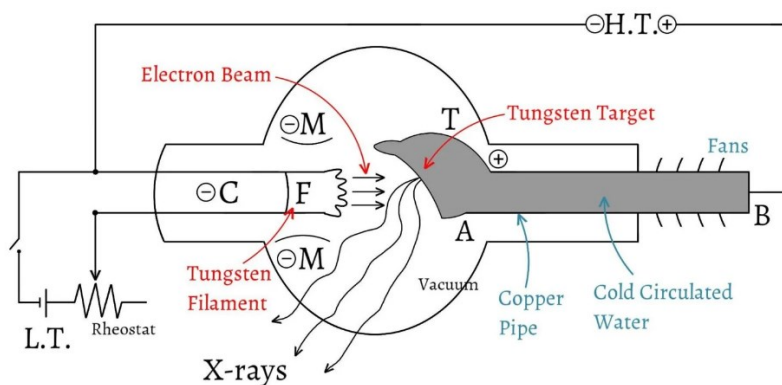


FIGURE 2.1.1 – SCHEMA BASE DI UN TUBO DI COOLIDGE. [13]

Viene fatta scorrere della corrente nel filamento del catodo allo scopo di innalzarne la temperatura, in questo modo i suoi elettroni acquisiscono sufficiente energia da lasciare il materiale per emissione termoionica e crearvi una nube di elettroni sulla superficie. Un'elevata tensione applicata tra anodo a catodo genera un gradiente di tensione che accelera gli elettroni liberi attirandoli verso l'anodo. Solo una piccola parte degli elettroni che colpiscono l'anodo genera raggi-X (<1% [12, p. 392]), questo implica una grande produzione di calore che dovrà essere dissipato tramite appositi sistemi. La generazione di raggi-X dall'impatto di elettroni è dovuta alla combinazione di due principi fisici: L'emissione di radiazione caratteristica e l'emissione di Bremsstrahlung. L'energia massima che può assumere un fotone generato in questo modo è equivalente al potenziale di accelerazione dato dalla tensione applicata tra anodo e catodo (e.g. 1kV di potenziale genera fotoni con energia massima di 1keV).



In un dispositivo di questo tipo è possibile esercitare una regolazione del flusso di elettroni inserendo un elettrodo di controllo nel percorso che essi compiono tra anodo e catodo, come illustrato nella Figura 2.1.2.

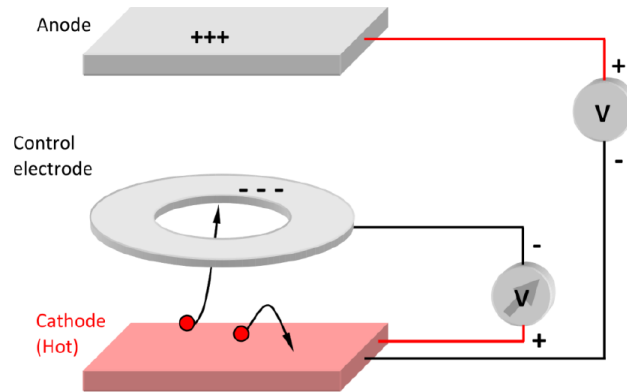


FIGURE 2.1.2 – RIPRODUZIONE SEMPLIFICATA DEL CONTROLLO DELLA CORRENTE DI FLUSSO. [12, P. 393]

L'aggiunta di un elettrodo con potenziale negativo modifica il gradiente, creando un ostacolo per gli elettroni che solo quelli con sufficiente energia riescono ad oltrepassare, una volta superata questa barriera, essi vengono nuovamente accelerati verso l'anodo. Gli elettroni con energia inferiore non superano questo ostacolo e finiscono per ricombinarsi nel catodo. Variando il potenziale dell'elettrodo di controllo è possibile regolare il flusso di corrente che scorre verso l'anodo, il dispositivo si comporterà pertanto come un triodo termoionico.

Nei seguenti punti verrà utilizzato il modello approssimato dell'atomo di Bohr per illustrare, a titolo di esempio, i meccanismi di generazione di radiazione precedentemente citati.

- **Radiazione caratteristica:**

Un elettrone accelerato dal gradiente impatta nell'anodo colpendo un elettrone di un atomo di tungsteno e cedendogli energia, questo ne acquisisce a sufficienza per passare ad un'orbita superiore. Il salto di orbita appena compiuto lascia uno spazio libero nell'orbitale precedente, il che rende instabile la configurazione elettronica generatasi, l'elettrone ritornerà rapidamente ad occupare l'orbita inferiore rilasciando l'energia in eccesso sotto forma di un fotone.

L'energia del fotone generato, e quindi la sua lunghezza d'onda, è definita dal livello energetico dell'orbitale il cui avviene il fenomeno, pertanto, lo spettro di emissione di questo sistema è strettamente legato al materiale utilizzato per la realizzazione dell'anodo del dispositivo.

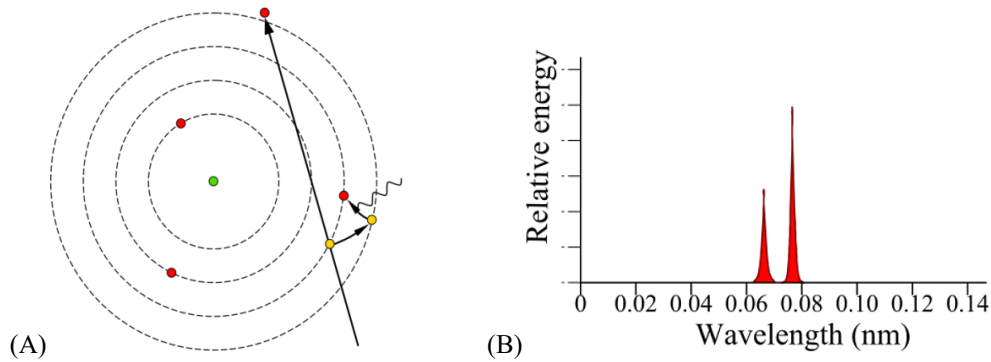


FIGURA 2.1.3 – (A) RAPPRESENTAZIONE DELL'EMISSIONE DI RADIAZIONE CARATTERISTICA NEL MODELLO DI BOHR; (B) ESEMPIO DI SPETTRO DI EMISSIONE DI RADIAZIONE CARATTERISTICA. [12, P. 394]

• **Emissione di Bremsstrahlung:**

L'elettrone accelerato attraversa un atomo presente nell'anodo senza impattare sui suoi elettroni, esso transita in prossimità del nucleo e viene deviato dalla sua carica positiva, l'elettrone in questo modo perde energia cinetica per decelerazione, che viene emessa tramite la generazione di un fotone. La lunghezza d'onda di quest'ultimo dipende dalla quantità di energia persa dall'elettrone, ma essendo essa dovuta ad un'interazione casuale, sono possibili valori appartenenti ad una banda più ampia rispetto al caso precedente.

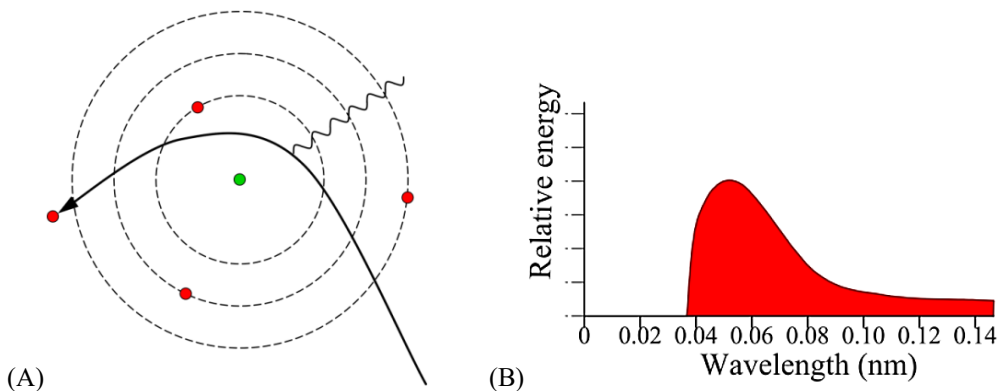


FIGURA 2.1.4 – (A) RAPPRESENTAZIONE DELL'EMISSIONE DI BREMSSTRAHLUNG NEL MODELLO ATOMICO DI BOHR; (B) ESEMPIO DI SPETTRO DI EMISSIONE DI BREMSSTRAHLUNG. [12, P. 395]

Nella pratica sono presenti entrambi i metodi di emissione, lo spettro elettromagnetico derivante all'utilizzo di un tubo radiogeno per la generazione di radiazione X proverrà dunque dal risultato della combinazione di entrambi, come illustrato nella Figura 2.1.5.

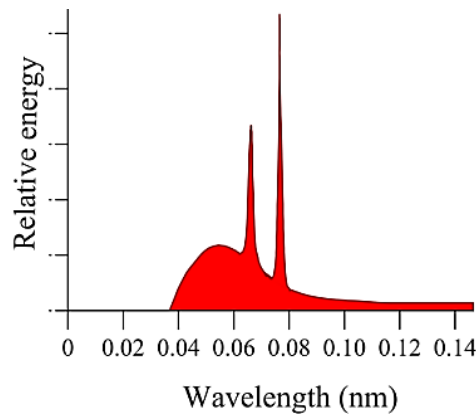


FIGURA 2.1.5 – ESEMPIO DI SPETTRO DI EMISSIONE DI UN TUBO RADIOGENO. [12, P. 396]

***Tubo radiogeno con anodo rotativo:***

L'area d'impatto degli elettroni sull'anodo, definita anche "punto focale", è soggetta ad una considerevole quantità di calore e ad un fenomeno di deterioramento del materiale, questi effetti possono ridurre l'efficienza e la durata della vita utile del dispositivo. Esiste però una particolare tipologia di tubo radiogeno che fa fronte a questi problemi sostituendo l'anodo statico del modello classico con uno rotativo, montato su un disco fissato al rotore di un motore elettrico che ne consente il movimento.

Ruotando il disco dell'anodo viene costantemente cambiato il punto d'impatto degli elettroni sulla superficie. In questo modo viene mitigato il deterioramento del materiale nel punto focale, allungando la vita del dispositivo e aumentandone l'efficienza nella dissipazione del calore.

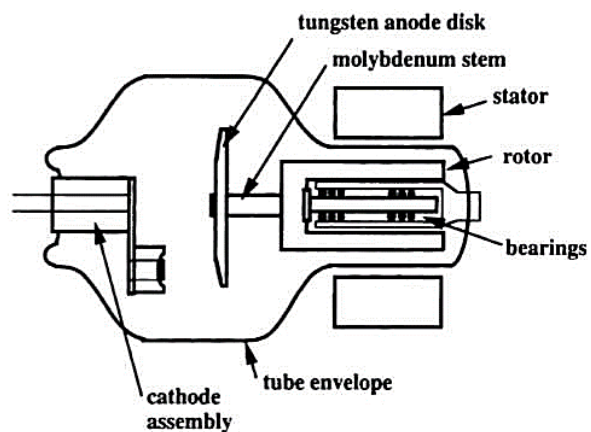


FIGURA 2.1.6 – TUBO RADIOGENO CON ANODO ROTATIVO. [14]

### **Effetto anodico:**

Nei tubi radiogeni è presente un fenomeno che produce una variazione dell'intensità dei fotoni generati, in funzione del loro angolo di uscita. Questo è definito "effetto anodico" o "effetto tacco" (*heel effect*) ed è causato dal percorso che compiono i fotoni all'interno del materiale dell'anodo prima di uscirvi. Maggiore sarà l'angolo compreso tra la direzione normale alla superficie dell'anodo e la direzione di uscita del fotone, maggiore risulterà il percorso che dovrà compiere quest'ultimo all'interno del materiale, aumentando così le probabilità di essere assorbito dallo stesso. Una maggiore inclinazione della superficie dell'anodo contribuisce a ridurre l'intensità di questo effetto; tuttavia, aumentando l'inclinazione aumenta anche la dimensione del punto focale, finendo per compromettere la risoluzione dell'immagine.

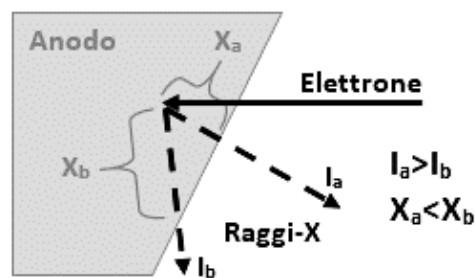


FIGURA 2.1.7 – RAPPRESENTAZIONE DELL'EFFETTO ANODICO.

Esistono delle soluzioni che consentono di alleviare questo effetto, una di queste consiste nell'applicazione di filtri che riducano l'intensità del fascio di fotoni dove questa risulta maggiore, un altro sistema utilizzato ne prevede la compensazione via software applicata direttamente all'immagine ottenuta.

## **2.2 Immagini a raggi-X**

Quando il fascio di fotoni X attraversa l'oggetto che si desidera ispezionare, essi sono soggetti a molteplici e differenti tipi di interazioni con il materiale. Considerando solo i casi che contribuiscono maggiormente al contesto sotto analisi, si può dire che i fotoni possono: essere assorbiti dal materiale per via di una o più interazioni, subire *scattering*, oppure attraversare il materiale senza interagirvi.

La quantità di fotoni del fascio che subiscono interazioni, dipende sia dalla loro energia, sia dallo spessore e dal coefficiente di assorbimento del materiale di cui è composto l'oggetto nell'area in cui ciascuno di essi vi transita. L'intensità  $I$  del fascio di fotoni trasmessi attraverso un materiale può essere calcolata tramite la Formula 2.2.1, in cui  $I_0$  rappresenta l'intensità iniziale del fascio,  $\mu$  indica il coefficiente di attenuazione lineare ed  $x$  la distanza nel materiale alla quale si desidera calcolare l'intensità.

$$[15] \quad I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.2.1)$$

Come si può notare dalla formula, all'interno di un materiale uniforme, l'intensità del fascio di fotoni cala esponenzialmente rispetto alla distanza percorsa.

I raggi-X non possono essere focalizzati tramite sistemi tradizionali, vengono quindi convogliati direttamente verso l'oggetto sotto ispezione, il quale genererà una sorta di ombra sul detector, maggiore sarà la densità del materiale dell'oggetto, maggiore risulterà il numero di fotoni assorbiti e più marcata apparirà la sua ombra.

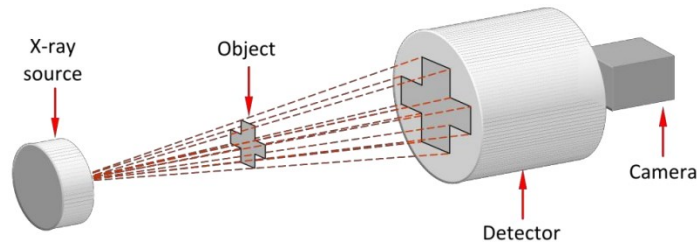


FIGURA 2.2.1 – POSIZIONAMENTO DI FONTE E DETECTOR DURANTE UN ISPEZIONE. [12, P. 397]

Per eseguire una magnificazione dell'immagine, viene sfruttato il fenomeno dell'ingrandimento geometrico, in cui più si avvicina l'oggetto alla fonte delle radiazioni, più grande diverrà l'ombra che esso proietta, e perciò la sua immagine. La magnificazione così ottenuta può essere espressa mediante l'Equazione 2.2.2.

$$M_{image} = \frac{d_{source\ to\ detector}}{d_{source\ to\ object}} \quad (2.2.2)$$

In cui il termine al numeratore rappresenta la distanza tra la fonte di radiazione ed il detector, mentre quello al denominatore indica la distanza tra la fonte e l'oggetto.

Un altro importante parametro da tenere in considerazione per la generazione di immagini, è la dimensione della sorgente di radiazione, ovvero del punto focale menzionato in precedenza. La sua dimensione influenza notevolmente la nitidezza dell'immagine, come rappresentato dalla Figura 2.2.2 (A). All'aumentare della dimensione della sorgente, diminuisce l'accuratezza con cui viene immaginato un dettaglio dell'oggetto sul detector, restituendo all'utente un'immagine sfocata. Dall'Equazione 2.2.3 si evince come questi margini di sfocatura dipendano sia dalla dimensione del punto focale, sia dalla distanza dell'oggetto rispetto ad esso e dal detector dello strumento.

$$[16] \quad U_g = f_s \cdot \frac{b}{a} \quad (2.2.3)$$

Dove  $f_s$  indica la dimensione del punto focale, i restanti parametri fanno riferimento alle indicazioni di Figura 2.2.2 (B).

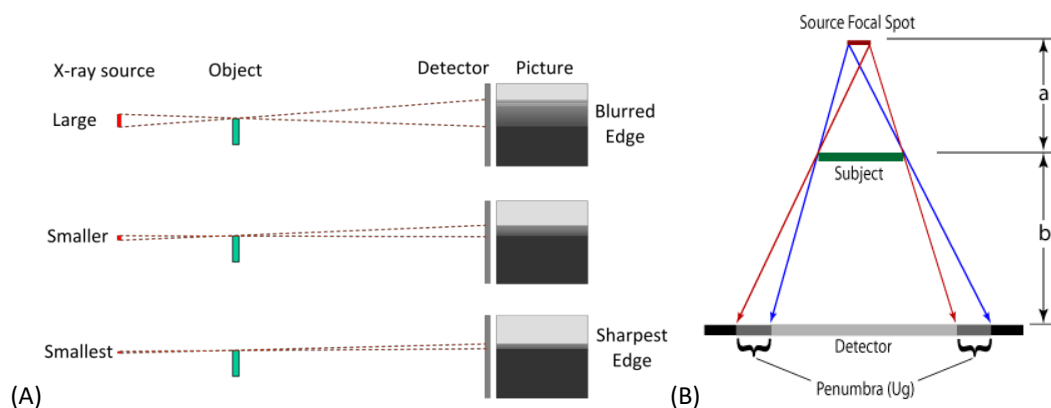


FIGURA 2.2.2 – (A) VARIAZIONE DI NITIDEZZA CON LA DIMENSIONE DEL PUNTO FOCALE [12, P. 397]; (B) MARGINI DI SFOCATURA IN FUNZIONE DELLE DISTANZE E DALLA DIMENSIONE DEL PUNTO FOCALE [16].

## 2.3 Interazione radiazione-materia

Le fonti di attenuazione che influiscono in un fascio di fotoni che attraversa un materiale non si limitano alla semplice acquisizione di energia da parte degli atomi per il rilascio di essa sotto differente forma, l'assorbimento dei fotoni avviene tramite combinazioni di molteplici tipologie d'interazione tra radiazione e materia. Di seguito saranno elencati i possibili fattori d'interazione di un fascio di raggi-X che ne causano l'attenuazione:

### *Assorbimento fotoelettrico:*

Il fotone incidente viene assorbito da un atomo che rilascerà elettroni dall'orbitale più esterno, diventando così uno ione. Successivamente l'atomo ritornerà al suo stato naturale emettendo radiazione caratteristica. I fotoni così rilasciati sono caratterizzati da un'energia inferiore e vengono solitamente riassorbiti, il loro contributo alla generazione d'immagini è pertanto trascurabile. Per atomi ad elevato numero atomico e per fotoni X con energia fino a 500keV, l'assorbimento fotoelettrico risulta essere il processo dominante nel fenomeno dell'attenuazione.

[17]

### *Scattering di Compton:*

Accade quando un fotone di raggi-X viene deviato dall'interazione con un elettrone in un atomo, cedendogli abbastanza energia da essere espulso dal suo orbitale. Il fotone avrà ora un'energia inferiore e quindi una lunghezza d'onda maggiore, per di più la sua traiettoria risulta alterata. La variazione di energia del fotone dipende dall'angolo di scattering e non dal mezzo in cui avviene.

[17]

### *Creazione di coppia elettrone-positrone:*

Si tratta di un'interazione che avviene solamente per fotoni con energia maggiore di 1.02MeV, ha una particolare importanza quando si tratta con materiali ad elevato numero atomico. Questo fenomeno avviene quando un elettrone ed un positrone vengono creati dall'annichilimento del fotone. I positroni annichiliscono molto velocemente generando due fotoni con 0.51MeV di energia.

[17]

### ***Scattering di Thomson:***

Il fotone in questo caso interagisce con l'intero atomo e subisce scattering senza cedere energia. Questo fenomeno contribuisce però solo in piccola parte al coefficiente di assorbimento, generalmente può essere considerato trascurabile.

[17]

### ***Fotodisintegrazione:***

Interagendo con un atomo, l'energia del fotone viene interamente assimilata dal nucleo, il quale emetterà una particella. A causa dell'enorme quantità di energia necessaria per questo fenomeno, esso può essere ignorato nel contesto della radiografia.

[17]

L'assorbimento di radiazioni ionizzanti può avere molteplici effetti negativi sull'affidabilità di circuiti integrati e vari tipi di dispositivi elettronici. Saranno considerati ora alcuni dei possibili effetti della TID (*Total Ionizing Dose*) su memorie a semiconduttore. Una tra le conseguenze derivanti dall'esposizione ai raggi-X di memorie Flash, è data dalla generazione di coppie elettrone-lacuna all'interno dell'ossido di tunneling delle celle a *floating gate*, dovute ai fenomeni di assorbimento fotoelettrico e scattering di Compton. Ciò può comportare la generazione di "trapped charges" che influenzano il valore della tensione di soglia. Intuitivamente, i tipi di memorie più datati potrebbero risultare più suscettibili a questo effetto, per via del maggiore spessore dell'ossido tra il floating gate ed il substrato che ne aumenta la probabilità. Una porzione delle lacune così generate non ricombina nell'ossido, queste possono spostarsi nel *floating gate* e ricombinare invece con gli elettroni immagazzinati durante la fase di programmazione, riducendone il numero e provocando una modifica della tensione di soglia, quindi del dato memorizzato nella cella. Si può inoltre verificare perdita di carica direttamente dal floating gate per effetto fotoelettrico, alcuni fotoni infatti sono in grado di cedere sufficiente energia da permettere agli elettroni di superare la barriera di potenziale dell'ossido. Le celle di memoria programmate in modo da avere una tensione di soglia maggiore subiranno una diminuzione della soglia, mentre quelle con la soglia più bassa ne subiranno un incremento derivante dalla perdita di carica positiva dal *floating gate* (quest'ultimo effetto vale per le tipologie di celle che prevedono un accumulo di carica positiva al livello L0).

[18] [19]



Le operazioni di cancellazione nelle memorie a semiconduttore richiedono una tensione maggiore rispetto a quella di alimentazione, per questo motivo in molte memorie viene integrato un sistema di innalzamento di tensione a pompa di carica. Uno dei più conosciuti è la pompa di carica di Dickson, si tratta di un circuito a stadi in cui ciascuno di essi è composto da un MOS connesso in configurazione a diodo e collegato ad un condensatore. La tensione di uscita di una pompa di carica di questo tipo è strettamente dipendente dalla tensione di soglia dei MOS che lo compongono, come si può constatare dall'Equazione 2.3.1.

$$[18] \quad V_{out} \approx (m + 1) \cdot (V_{DD} - V_r) \quad (2.3.1)$$

In cui  $m$  indica il numero degli stadi,  $V_{DD}$  la tensione di alimentazione,  $V_r$  la tensione di soglia dei MOS e  $V_{out}$  la tensione d'uscita. Le radiazioni ionizzanti possono influenzare la tensione di soglia dei dispositivi e causare variazioni al potenziale d'uscita, questo provoca comportamenti inaspettati della memoria. [18]

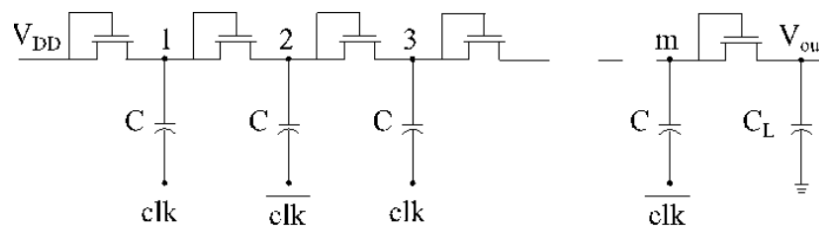


FIGURA 2.3.1 – POMPA DI CARICA DI DICKSON. [18]

La variazione della tensione di soglia nei MOS della pompa di carica deriva anch'essa dai processi di ionizzazione degli atomi dell'ossido di gate a causa dell'interazione con fotoni ad alta energia. Una volta createsi delle coppie elettrone-lacuna, la cui densità è dipendente dall'energia dei fotoni del fascio, a causa della loro elevata mobilità una frazione degli elettroni generati usciranno velocemente dall'ossido, mentre un'altra parte ricombinerà con le lacune. Le rimanenti lacune si spostano verso l'interfaccia tra l'ossido ed il silicio, alcune di queste finiscono intrappolate nell'ossido creando delle "oxide trapped charges", altre invece raggiungono l'interfaccia e generano delle "interface traps". Quest'ultime possono scambiare carica con il *bulk* per effetto tunnel. [18]

La carica intrappolata nell'ossido può avere un impatto significativo sui parametri elettrici dei circuiti integrati, come lo spostamento della tensione di soglia e il cambiamento della velocità di commutazione dei dispositivi. [18]

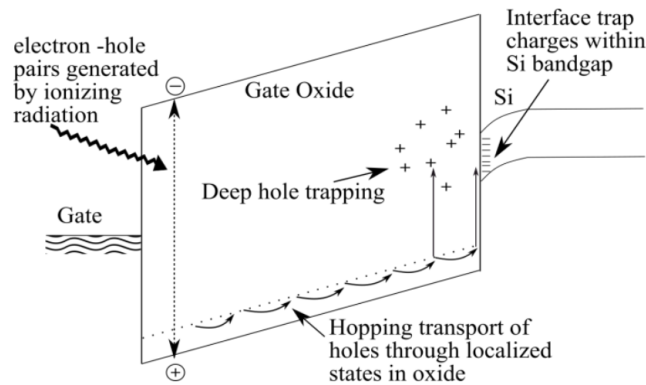


FIGURA 2.3.2 – EFFETTI DELLA TID IN UN DISPOSITIVO MOS. [18]

## 2.4 Utilizzo in ambito industriale

Le ispezioni a raggi-X vengono utilizzate per l'esecuzione di operazioni di screening su schede elettroniche dopo le fasi di saldatura dei componenti. Il principale scopo di questi test risiede nella ricerca e nella valutazione di eventuali bolle di gas (anche dette *voids*) all'interno del metallo di giunzione. Questi costituiscono delle cavità non conduttive all'interno del giunto, la loro presenza in quantità eccessiva può rappresentare un serio problema di affidabilità nei prodotti, specialmente nell'ambito dell'elettronica di potenza in cui è necessaria la gestione di correnti elevate. I *voids* vengono generati durante i processi di saldatura, la loro presenza causa un dislocamento nei percorsi delle correnti e ne influenza la generazione di calore, la resistività delle connessioni risulta maggiore e lo stress termico non è uniforme, questo può causare delle crepe e generare problemi alla resistenza meccanica dell'intera scheda. Con l'introduzione delle saldature senza piombo è stata registrata una maggiore presenza di *voids*, il che diminuisce l'affidabilità dei giunti di saldatura. Di *voids* ne esistono vari tipi che possono essere raggruppati in diverse categorie. [20, p. 9]

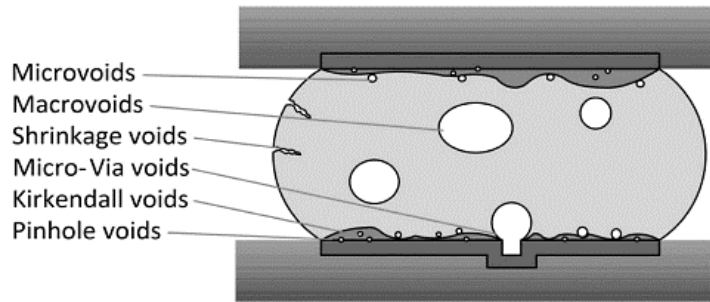


FIGURA 2.4.1 – GIUNTO DI SALDATURA E CLASSIFICAZIONE DELLE VARIE CATEGORIE DI VOIDS. [20, p. 9]

***Microvoids:***

Sono caratterizzati da un diametro ridotto, generalmente inferiore a 25µm. Esistono *microvoids* planari che si sviluppano sull’interfaccia tra la saldatura e la piazzola, questo riduce significativamente la resistenza meccanica della saldatura. Le loro cause di formazione non hanno ancora una spiegazione chiara. [20, p. 10]

***Macrovoids:***

È la tipologia di *voids* più frequente, sono formati dall’evaporazione di gas rilasciato dal flussante e dalle paste di saldatura durante la fase di rifusione. I *macrovoids* possono manifestarsi in qualunque punto all’interno della saldatura e sono caratterizzati da un diametro di circa 100-300µm. [20, p. 9]

***Shrinkage voids:***

Si tratta di vuoti con forma ramificata che partono dalla superficie della saldatura e ne sono diretti verso il centro. Essi si formano durante la fase di solidificazione del materiale, quando questo si restringe per via dell’abbassamento di temperatura. Non è ancora stato dimostrato che questo tipo di *voids* abbiano effetti negativi sull’affidabilità delle saldature. [20, p. 10]

***Micro-via voids:***

Si generano da fuoriuscite di gas attraverso una microvia<sup>4</sup> durante la fase di saldatura. Possono influenzare notevolmente l’affidabilità di un dispositivo. [20, p. 11]

<sup>4</sup> Foro placcato con un metallo conduttore utilizzato per collegare percorsi conduttivi attraverso strati indipendenti di un PCB.

***Kirkendall voids:***

Insorgono nello strato intermetallico tra la saldatura e la piazzola, vengono generati quando si uniscono due metalli con coefficienti di diffusione molto differenti, spesso si trovano nell'interfaccia tra saldature di stagno e piazzole di rame. [20, p. 11]

***Pinhole voids:***

Generati da un rilascio di gas da parte del metallo della piazzola durante la saldatura. Essi presentano dimensioni molto ridotte, mediamente attorno a 1-3 $\mu\text{m}$ . La loro presenza è causata dall'assorbimento da parte del substrato di sostanze derivanti da processi precedenti. [20, p. 12]

Un altro impiego delle ispezioni a raggi-X in ambito industriale è quello della verifica della precisione delle saldature su componenti in formato BGA (*Ball Grid Array*). La conformazione del packaging e la disposizione dei pin dei componenti in questo formato rendono di fatto impossibile vedere ad occhio nudo le saldature, le quali si trovano sulla parte inferiore del componente che verrà poggiato sulla basetta in fase di saldatura.

Trattando invece di componenti in formato PTH (*Planted Through Holes*), l'ispezione a raggi-X consente di constatare la risalita di stagno all'interno dei fori di saldatura assieme ai reofori del componente. Il corretto volume di materiale saldante presente all'interno garantisce una migliore conducibilità elettrica per il componente, per questo è un parametro molto importante che solo con questo tipo di ispezioni si è in grado di misurare con accuratezza.

### III. Caratterizzazione dei campioni

La prima serie di operazioni svolte sulle memorie è stata eseguita su dispositivi che non hanno subito irraggiamenti derivanti da ispezioni ai raggi-X. Questi test hanno lo scopo di decretare ed esporre i comportamenti delle memorie in condizioni standard, in modo da poterli successivamente comparare con quelli rilevati dopo le ispezioni. Tale serie di test è stata svolta lungo un periodo di tempo di tempo di 31 giorni, in modo da poter valutare eventuali variazioni nel tempo.

Tutte le misure svolte in questo studio sono state effettuate su memorie NAND Flash commerciali prodotte da *Micron technology® Inc.*, nello specifico sono stati testati i seguenti dispositivi:

- |   |                 |      |      |     |      |
|---|-----------------|------|------|-----|------|
| - | MT29F4G08AAA    | 4Gb  | 90nm | SLC | (MA) |
| - | MT29F8G08MAA    | 8Gb  | 65nm | MLC | (MB) |
| - | MT29F32G08CBACA | 32Gb | 25nm | MLC | (MG) |

Essi, per semplicità, verranno d'ora in avanti denominati rispettivamente con le sigle: MA, MB e MG.

Tutte le memorie elencate suddividono la propria area in 4096 blocchi totali, ciascun blocco delle memorie MA è costituito da 64 pagine da 2112 bytes (2048 di *data area* e 64 di *spare*), le MB hanno blocchi da 128 pagine la cui capacità è analoga a quella delle memorie MA. Mentre i blocchi delle memorie MG sono costituiti da 256 pagine di 4320 bytes (4096 di *data area* e 224 di *spare*). [8] [10] [9] Per l'esecuzione delle operazioni sulle memorie è stata impiegata una scheda FPGA (*Field Programmable Gate Array*) *Digilent® Nexys2*, connessa ad una scheda adattatrice (*RREACT FA*) a sua volta collegata ad una scheda (*RREACT FD*) dotata di un apposito socket per la connessione delle memorie in formato TSOP (*Thin Small Outline Package*). La *Nexus2* è programmata in modo da poter eseguire diverse operazioni sui dispositivi e comunicare tramite una porta seriale ad un computer in cui è installato l'apposito programma *RREACT Forgetful* per l'invio di comandi e ricezione di dati da parte del sistema di controllo delle memorie. La scheda *RReact FD* è provvista inoltre di uno switch che consente di selezionare la fonte di alimentazione delle memorie, in questo modo è possibile scegliere se

alimentarle tramite la scheda di comando o da una fonte esterna, così da poter misurare l'assorbimento di corrente dei dispositivi di memoria escludendo quello causato dal funzionamento del sistema. Il software utilizzato permette di eseguire operazioni di vario tipo, oltre ai comandi base per la lettura, scrittura e cancellazione di dati, questo prevede la possibilità di inviare comandi di reset, abilitare il segnale di *ready-busy* restituendo all'utente il tempo impiegato per un'operazione, leggere il codice identificativo del dispositivo e generare stringe di dati pseudo-casuali per le operazioni di programmazione.

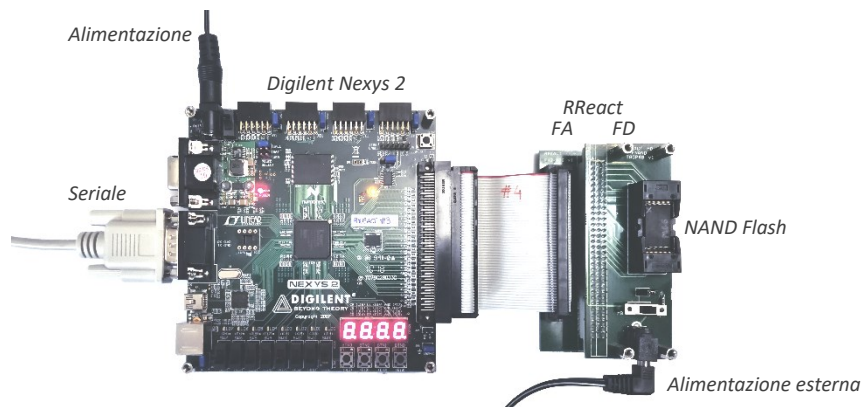


FIGURA 3.0 – SCHEMA DI COLLEGAMENTO DEI DISPOSITIVI.

### 3.1 Identificazione dei bad blocks

I bad blocks, come già specificato nei capitoli precedenti, sono blocchi di memoria non utilizzabili, la loro identificazione è dunque essenziale per la scelta delle aree di memoria su cui saranno eseguiti i successivi test. Per la loro identificazione è stato elaborato uno script di istruzioni da eseguire tramite *Forgetful*, esso prevede un'operazione di *erase* sull'intera area della memoria sotto test, questa operazione restituisce all'utente un segnale di errore nella schermata *log* del programma qualora esso tenti di eseguire l'operazione su un *bad block*. Questo viene segnalato con un "1" alla fine della riga riportante il risultato dell'operazione appena svolta. Il programma, una volta avviato, chiederà all'utente di selezionare una cartella in cui sarà salvato un documento di testo contenente il resoconto delle suddette operazioni di *erase*. Per agevolarne l'identificazione, è stato inoltre redatto un programma in *Matlab* che legge e identifica autonomamente le righe dei file che presentano l'errore, riportandole all'utente in modo più chiaro e ordinato.

Nello script di *Forgetful*, la prima sezione di codice consente all'utente di modificare alcuni parametri per la sua esecuzione cambiando semplici valori numerici, come la tipologia di memoria utilizzata. Per questo processo sono stati utilizzate due o più memorie per ogni tipologia, queste verranno d'ora in poi identificate dalla sigla MA, MB o MG seguita da un numero identificativo, in modo da distinguere dispositivi differenti appartenenti alla stessa tipologia.

I risultati dei test sull'identificazione dei *bad blocks* sono i seguenti:

```

MA3:    [0x]  2E7 A4A EE3
MA8:    [0x]  838 F6C
MB4:    [0x]  0 1
MB15:   [0x]  801 80D 825 82D 835 83B 845 849 84B FED FEF
MG6:    [0x]  38 5A 5B 120 121 6C8 788 9B0 D78 E8E FE8
MG20:   [0x]  5A 5B
MG123:  [0x]  5A 5B
    
```

In cui i numeri esadecimali rappresentati indicano l'indirizzo dei *bad blocks*.

### 3.2 Programmazione

Una volta localizzate le posizioni dei *bad blocks* all'interno delle memorie, è stato possibile assegnare le aree destinate ai test da eseguire. Per ogni memoria è stata quindi scelta un'area di **~2Gb** per i test sulla ritenzione del dato, ed un'area di **~1Gb** per i test sulle prestazioni. Queste aree sono state selezionate in modo da comprendere solo blocchi funzionanti. D'ora in avanti si farà riferimento alla partizione di memoria relativa ai test di ritenzione come “**sezione R**” e a quella utilizzata per testare le prestazioni come “**sezione P**”.

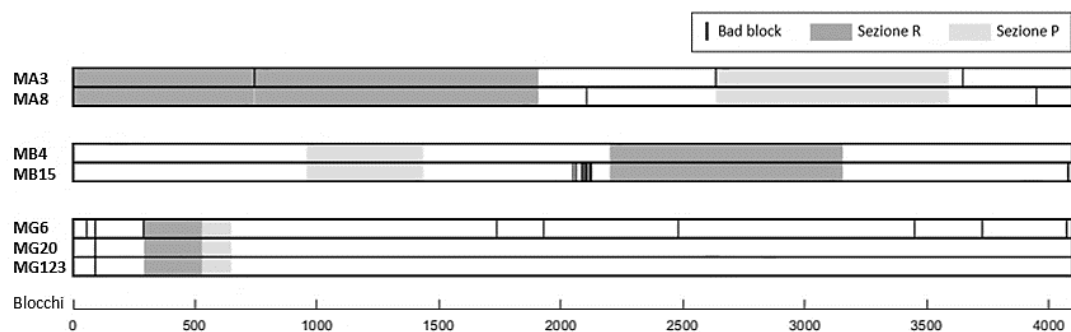


FIGURA 3.2.1 – RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DELLE AREE DI MEMORIA UTILIZZATE.

	Blocchi sezione R	Blocchi sezione P
MA	0 - 742 , 744 - 1907	2635 - 3588
MB	2200 - 3154	957 - 1434
MG	290 - 527	529 - 648

TABELLA 3.2.1 – BLOCCHI DI MEMORIA ASSOCIATI ALLE CORRISPETTIVE AREE DESTINATE AI TEST.

Il dato che verrà scritto nella sezione R delle memorie non è scelto in modo casuale, per le memorie MLC (in questo caso MB e MG) è stato scelto il valore esadecimale 0xAA per le pagine A ed il valore 0x66 per le pagine B, così facendo si ottengono tutte le possibili combinazioni di distribuzione di carica nelle celle e saranno rappresentati in ugual numero tutti e quattro i possibili stati:

0x AA	→	1	0	1	0	1	0	1	0
0x 66	→	0	1	1	0	0	1	1	0
		<hr/>							
		10	01	11	00	10	01	11	00

TABELLA 3.2.1 – VALORI ASSUNTI DALLE CELLE MLC CON IL DATO 0xAA 0x66.

Mentre per le memorie SLC (MA) è stato scelto semplicemente il dato 0xAA, in quanto è sufficiente rappresentare soltanto i due stati possibili, che anche qui risulteranno programmati nelle celle in egual numero.

Come è stato fatto per le istruzioni del paragrafo precedente, anche in questo caso è stato redatto uno script in *Forgetful*, questa volta destinato alla programmazione della sezione R. L'istruzione viene eseguita tramite l'impostazione del comando *solid pattern*, in modo da poter selezionare i valori scelti per la programmazione. È inoltre stato disabilitato il controllo del segnale di *Ready/Busy*, così da velocizzare il processo.

Sono infine state definite delle istruzioni per delle specifiche operazioni eseguite nella sezione P delle memorie, questi saranno però discussi al paragrafo 3.4.



### 3.3 Ritenzione del dato

Le memorie Flash sono costantemente soggette a fenomeni che contribuiscono alla degradazione della quantità di carica presente nelle celle, anche quando esse non sono direttamente esposte a fonti di radiazioni ionizzanti. La capacità di una memoria di mantenere inalterati i contenuti delle celle, e quindi dei bit memorizzati, è definita capacità di ritenzione. In questa tesi è stata testata tale proprietà misurando periodicamente la quantità di errori registrati in fase di lettura della sezione R delle memorie in assenza di algoritmi di ECC. Per rendere possibile questo test è stato innanzitutto redatto un ulteriore script in *Forgetful* che consente di eseguire delle operazioni di lettura su tutte le celle di interesse e che riporti un resoconto dei risultati. I processi di lettura possono essere però soggetti a disturbi che spesso comportano letture errate di alcune celle (soprattutto per dispositivi MLC), questi errori aleatori sono dovuti a vari fattori, come il RTN (*Random Telegraph Noise*), oppure possono dipendere dallo spostamento del valore di soglia di alcune celle che si frappongono esattamente al limite di un bias di lettura. Per fare fronte a questo problema è stato scelto di eseguire più volte consecutive il ciclo di lettura e considerare il valore medio del numero errori rilevati come l'effettiva quantità di errori presenti nella memoria. Il numero di volte in cui questo ciclo verrà iterato, e quindi il numero di misure su cui verrà fatta la media, è stato deciso in base alla variabilità della quantità di errori contati tra letture consecutive per ciascuna tipologia di memoria. È stato dunque deciso di effettuare consecutivamente 10 letture per le memorie di tipo MA e MB mentre ne sono state scelte 100 per le MG. Risulta interessante notare che la variabilità dei dati in lettura risulta maggiore per le memorie con nodo tecnologico più avanzato.

Per ciascun ciclo di lettura della sezione R eseguito dal programma, viene salvato un file di testo contenente gli indirizzi ed il contenuto dei byte di memoria che differiscono dal dato programmato, contrassegnati dal software come errori. Il set di dati restituito dall'esecuzione di questo script è stato analizzato tramite un codice Matlab per la lettura del contenuto dei byte riportati, esso conta il numero di bit errati presenti all'interno di ciascuno ed esegue un conteggio del numero totale.

Tale programma esegue questa operazione per tutti i documenti contenenti i risultati delle letture, dopo di che, esso restituisce la media, il valore massimo e il minimo del conteggio effettuato.

I dispositivi di memoria testati durante questa procedura sono i seguenti:

MA3 MA8 MB15 MB4 MG6 MG20

Un primo ciclo di letture è stato eseguito su ciascuna memoria subito dopo la sua programmazione. È stato notato quindi che per alcuni tipi di memoria si sviluppa un certo quantitativo di errori già pochi secondi dopo la fine della fase di programmazione, come si può notare dal grafico di Figura 3.3.1.

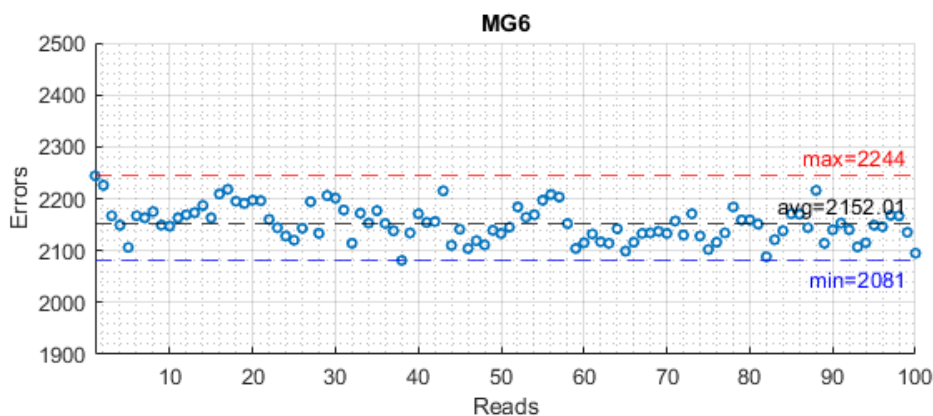


FIGURA 3.3.1 – VARIABILITÀ DEL NUMERO DI ERRORI IN UNA MEMORIA MG (SEZIONE R).

Il numero iniziale di errori risulta piuttosto limitato sulle memorie MB, che si aggira attorno ad una decina di errori (sulla sezione R), mentre non sono stati rilevati errori nelle MA. È stato quindi ripetuto questo processo di lettura e conteggio degli errori durante un periodo di circa un mese, in cui non sono stati rilevati cambiamenti nelle memorie MA3, MA8 e MB4 mentre è stato rilevato solo un leggero cambiamento nella memoria MB15 da una media di 10 errori iniziali ad una di 15.7 dopo 31 giorni dalla data di programmazione. Nelle memorie di tipo MG si è riscontrata una variazione piuttosto evidente nel numero di errori, la cui tendenza non presenta una crescita lineare, si è proceduto quindi ad organizzare i valori misurati in modo da poterne valutare l'andamento. È stata pertanto determinata una funzione che riesce

ad approssimare con una certa precisione la tendenza crescente del numero di errori in funzione del tempo, almeno per la quantità di giorni in cui queste memorie sono state sottoposte al test di ritenzione. L'equazione è rappresentata dalla Formula 3.3.1, essa comprende dei parametri che sono stati determinati per ciascuna delle due memorie grazie ad un programma per il fitting dei dati. Le funzioni derivanti dalle due analisi riscontrano pendenze differenti nella parte iniziale della curva per i due dispositivi; tuttavia, questa differenza tende a ridursi all'aumentare del tempo.

$$y = (y_0 + d) + a \cdot \tanh(b \cdot x^c) \quad (3.3.1)$$

In cui  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  sono i parametri di fitting,  $y$  rappresenta il numero di errori,  $y_0$  il numero di errori iniziale ed  $x$  indica il numero di giorni trascorsi. Sono riportati in seguito i valori dei parametri ricavati tramite fitting citato:

	$a$	$b$	$c$	$d$	
<b>MG6</b>	$4.074 \cdot 10^3$	$3.243 \cdot 10^{-2}$	$8.767 \cdot 10^{-1}$	$-1.821 \cdot 10^{-2}$	→ $R^2 = 0.99955$
<b>MG20</b>	$5.164 \cdot 10^3$	$2.327 \cdot 10^{-2}$	$7.79 \cdot 10^{-1}$	3.237	→ $R^2 = 0.99971$

TABELLA 3.3.1 – PARAMETRI DI FITTING E COEFFICIENTE DI DETERMINAZIONE.

Come si può constatare dalla Figura 3.3.2, per ciascuna memoria la funzione riesce effettivamente a seguirne in modo coerente l'andamento delle misure, dalla stessa figura è anche possibile vedere la differenza di pendenza tra le funzioni delle due memorie, in ciascun grafico è stata riportata con un tratteggio più chiaro la funzione di fitting relativa all'altro dispositivo, così da poterle comparare.

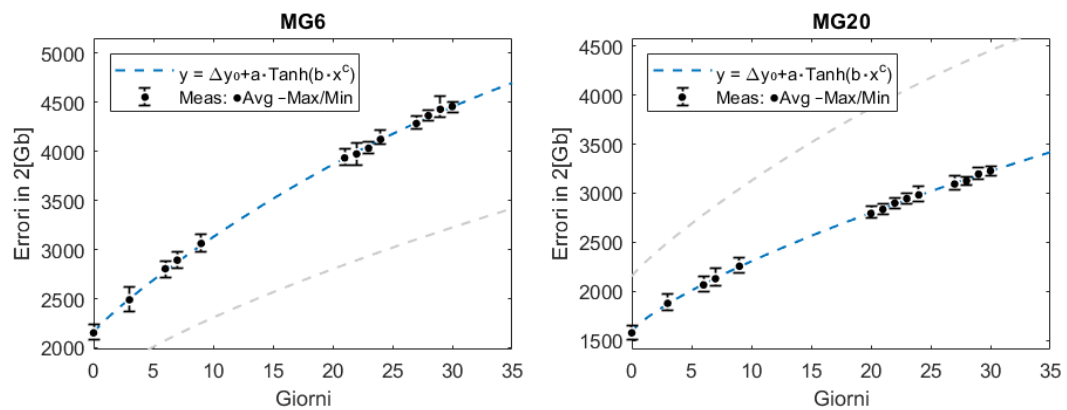


FIGURA 3.3.2 – MISURE DI RITENZIONE SU MEMORIE MG (SEZIONE R).

Grazie a questi risultati sarà ora possibile ricavare dei valori di riferimento con cui comparare le misure effettuate nei test successivi, in questo modo saremo in grado di discernere la perdita di dati per effetto delle radiazioni X da quella che avviene in condizioni standard dovuta a fenomeni intrinseci di degradazione della ritenzione dei dispositivi.

È comunque doveroso menzionare che il numero di errori riscontrato durante i test di ritenzione risulta ampiamente inferiore al limite posto dalla capacità di correzione degli errori riportata nei datasheet dei componenti. Lo stesso grafico della figura precedente è ora riportato come percentuale di errori nella sezione R (che ricordiamo essere di circa 2Gb) in scala logaritmica sulla Figura 3.3.3, indicando il limite minimo posto dall'ECC, che per le memorie MG è di 24 bit per 1080 bytes di dati [9, p. 103].

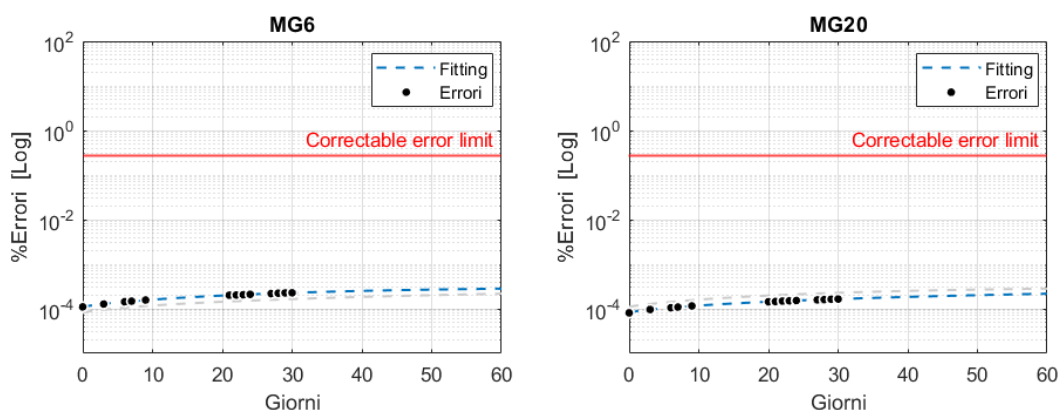


FIGURA 3.3.3 – PERCENTUALE DI ERRORI NELLA SEZIONE R DELLE MEMORIE MG.

Per le memorie MB il limite minimo di ECC indicato nel datasheet è di 4 bit per 528 bytes di dati [10, p. 64], mentre per le MA è di soltanto 1 bit per 528 bytes [8, p. 58].

	Media del numero iniziale di errori	Media del numero finale di errori	
<b>MA3</b>	0	0	28 giorni
<b>MA8</b>	0	0	28 giorni
<b>MB15</b>	10	15.7	31 giorni
<b>MB4</b>	7.25	6	31 giorni
<b>MG6</b>	2152	4456	30 giorni
<b>MG20</b>	1579	3228	30 giorni

TABELLA 3.3.2 – MEDIA DEL NUMERO DI ERRORI MISURATO IN RITENZIONE.

### 3.4 Analisi delle prestazioni

Lo scopo di questo test è quello di verificare il range di variazione a cui possono essere soggette le prestazioni dei dispositivi durante il loro utilizzo in condizioni standard. Con il termine “prestazioni” saranno indicati i tempi di cancellazione, scrittura e lettura di dati nella sezione P delle memorie (di circa 1Gb). Per calcolare questi tempi vengono eseguite, tramite uno script, le operazioni di *Erase*, *Program* e *Read* nell'apposita sezione delle memorie mantenendo abilitato il comando di *Ready/Busy*, in questo modo il programma registrerà il numero di cicli di clock della scheda di controllo (*Nexys2*) che intercorrono tra l'invio di ciascun comando e la fine della sua esecuzione. Conoscendo il periodo di clock della scheda di controllo, che è di **50ns**, è possibile ricavare la quantità di tempo richiesta per l'esecuzione di ciascuna operazione. È bene notare però che il comando di *Ready/Busy* introduce esso stesso un piccolo ritardo dovuto ai tempi di *pull-up* e *pull-down* del canale. Il calcolo dei tempi è stato eseguito tramite un programma in Matlab che, oltre a convertire in nanosecondi il numero espresso in cicli di clock, compie un calcolo della media dei tempi di esecuzione di ciascun comando, contando il numero di istruzioni eseguite dalla scheda per ogni ciclo di cancellazione, programmazione e lettura.

Ogni iterazione di questo test è stata eseguita in un differente giorno, in modo da testare le prestazioni in tempi prolungati. Differentemente da quanto svolto negli altri capitoli, in questo caso il dato programmato nelle celle viene generato dal generatore di numeri casuali del programma *Forgetful* partendo ogni volta da una chiave arbitraria fornita dall'utente. Per questo test sono state utilizzate chiavi diverse per ogni iterazione del processo, in modo da simularne un utilizzo standard ed evitare eventuali effetti di deterioramento disomogeneo delle celle.

I risultati ottenuti sono stati riportati schematicamente nel grafico di Figura 3.4.1, in cui sono sovrapposte le misure ricavate da ciascun dispositivo. I tre riquadri della figura rappresentano rispettivamente le operazioni di *Erase*, *Program* e *Read*,

eseguite nella sezione P dei dispositivi. Il primo grafico rappresenta il tempo medio impiegato dai dispositivi ad eseguire un'operazione di *Erase* in un blocco di memoria, il secondo ed il terzo indicano rispettivamente il tempo medio necessario per l'esecuzione di un'operazione *Program* e *Read* in un'intera pagina di memoria. È però necessario sottolineare che le memorie MA e MB hanno pagine con minore quantità di *bytes* rispetto alle MG.

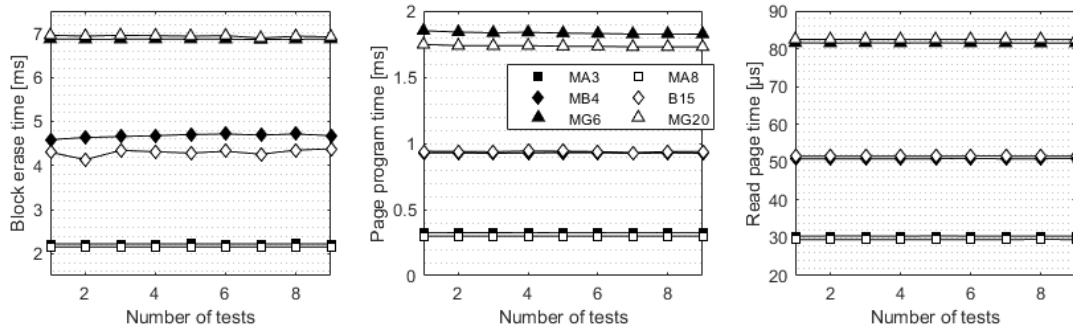


FIGURA 3.4.1 – RISULTATI DEI TEST PER LA VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI IN CONDIZIONI STANDARD.

È stato quindi redatto un ulteriore grafico, quello di Figura 3.4.2, che mostra i tempi medi di programmazione e di lettura di un byte di *data-area* delle memorie, per fare ciò sono stati semplicemente divisi i valori dei precedenti grafici per il numero di *bytes* di *data-area* che i rispettivi dispositivi contengono in ciascuna pagina.

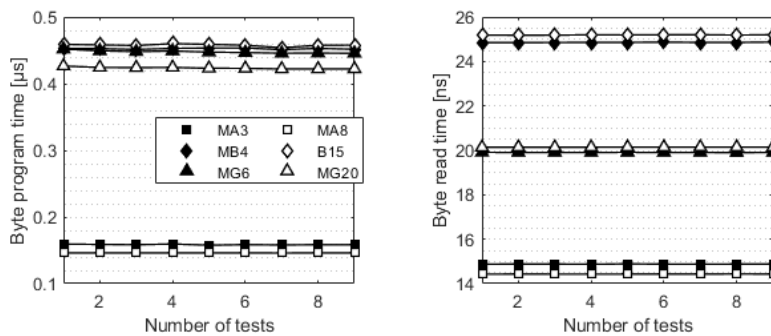


FIGURA 3.4.2 – RISULTATI DEI TEST DI SCRITTURA E LETTURA DI BYTES IN CONDIZIONI STANDARD.

Da questo grafico si possono confrontare più semplicemente le prestazioni dei dispositivi testati, si nota come i dispositivi SLC (MA) abbiano prestazioni nettamente superiori agli altri due. Confrontando invece le due tipologie MLC (MB e MG) notiamo che i tempi di programmazione sono pressoché uguali, mentre per

quanto riguarda le operazioni di lettura, i dispositivi MG, i quali sono costituiti da una tecnologia costruttiva più compatta, risultano più veloci dei dispositivi MB. Questi risultati tornano utili anche per constatare l'effettiva costanza delle prestazioni in questo tipo di test in relazione alle leggere variazioni riscontrate, così da poterle confrontare con quelle misurate dopo i cicli di ispezione a raggi-X e determinarne infine la presenza o meno di eventuali cambiamenti.

### 3.5 Acquisizione di forme d'onda in corrente

Questo tipo di procedura consente di acquisire, misurare ed analizzare le forme d'onda che caratterizzano l'assorbimento di corrente dei dispositivi nelle varie fasi di esecuzione dei comandi forniti dal software. Per misurare le variazioni di corrente dall'alimentazione è stato impostato lo *switch* della scheda *RReact FD* in posizione *EXT*, in modo da poter alimentare la memoria montata sul socket tramite una fonte esterna, è stato quindi utilizzato un alimentatore *Siglent SPD3303X-E* per fornire una tensione stabile a 3.3V (Tensione nominale di alimentazione delle memorie testate), è stato inoltre montato un resistore di shunt da  $10\Omega$  in serie all'alimentazione del dispositivo (come illustrato nello schema di Figura 3.5.1) in modo da poterne misurare la caduta di potenziale ai suoi capi e ricavare da essa l'assorbimento di corrente.

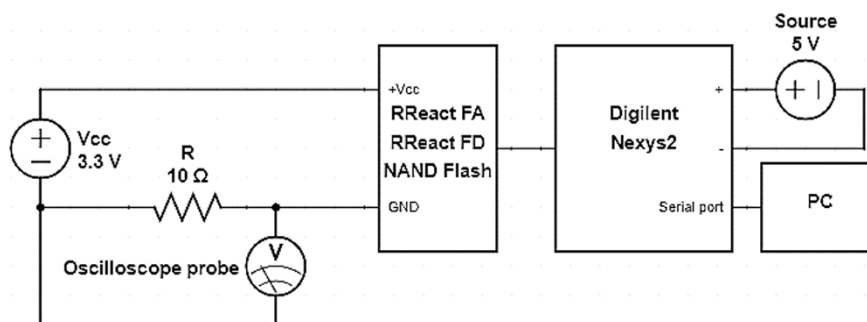


FIGURA 3.5.1 – SCHEMA DELLA CONFIGURAZIONE UTILIZZATA PER L'ACQUISIZIONE DI FORME D'ONDA.

Lo strumento utilizzato per questa misura è un oscilloscopio digitale *Siglent SDS 1202X-E* a cui è stata collegata una sonda di tensione 10:1 con connessione a massa.

Il range di tensione alimentazione consentito per il corretto funzionamento dei dispositivi testati va da 2.7V a 3.6V ( [8] [9] [10] ), i datasheet di questi riportano correnti dell'ordine dei 25mA con possibili massimi di 50mA [9, p. 112], dunque la massima caduta di tensione sulla resistenza di shunt che è possibile ottenere con l'utilizzo di questi dispositivi è di  $V_R^{Max} = 10\Omega \cdot 50mA = 0.5V$  che ne porterebbe la tensione di alimentazione ad un valore minimo di  $V_{min} = V_{cc} - V_R^{Max} = 2.8V$ , questo valore minimo rientra nel range di alimentazione definito dall'azienda produttrice, possiamo dunque aspettarci risultati attendibili da queste misure. Dalla caduta di tensione sulla resistenza è stata ricavata la corrente semplicemente dividendo i valori in tensione acquisiti per quello della resistenza di shunt utilizzata. Questo processo è stato ripetuto per due dispositivi di ciascuna serie, in basso sono riportati i risultati di un dispositivo per ciascuna tipologia (i due dispositivi per tipo, nominalmente uguali, hanno mostrato comportamento sovrapponibile).

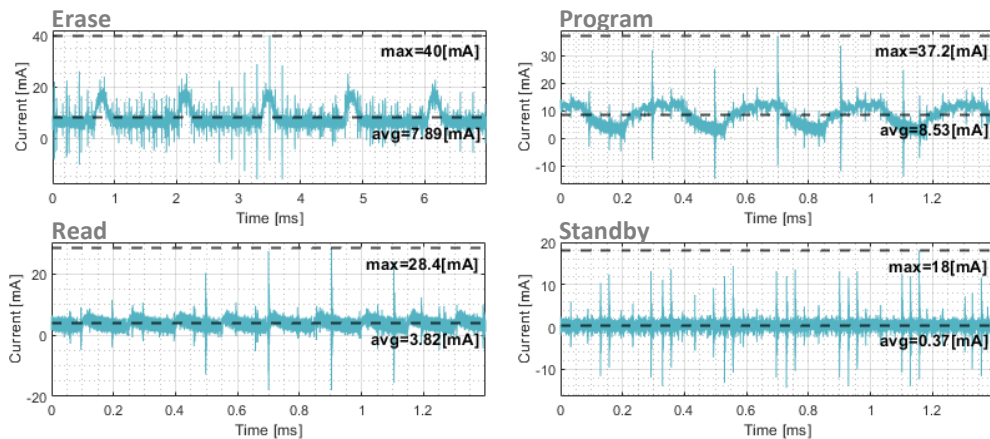


FIGURA 3.5.2 – ASSORBIMENTO DI CORRENTE PER LA MEMORIA MA3.

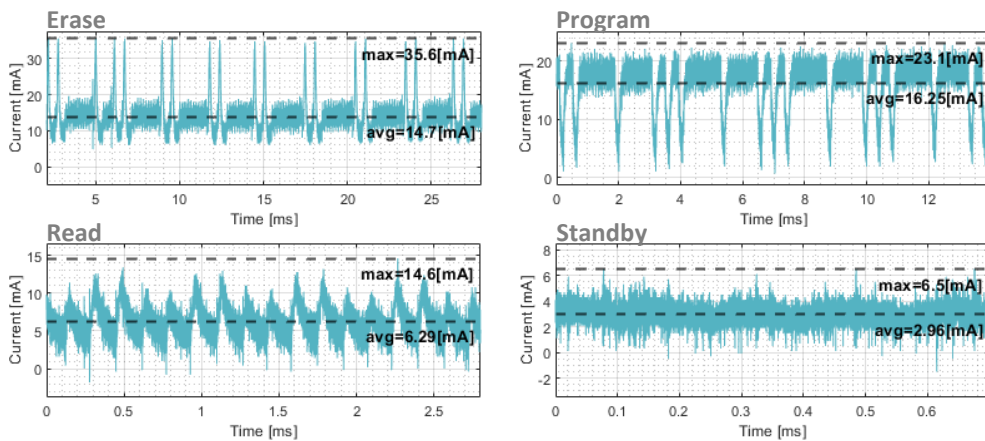


FIGURA 3.6.3 – ASSORBIMENTO DI CORRENTE PER LA MEMORIA MB4.



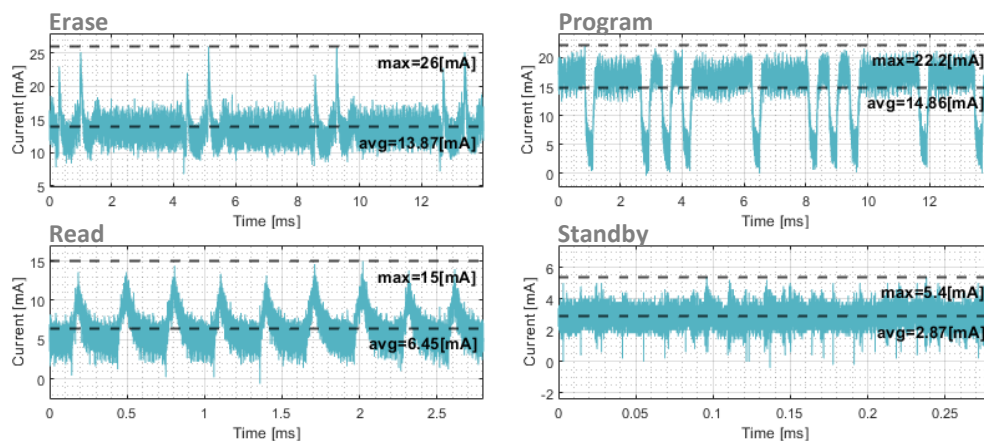


FIGURA 3.7.4 – ASSORBIMENTO DI CORRENTE PER LA MEMORIA MG6.

Le misure sono state effettuate seguendo quest'ordine:

*Erase* → *Program* → *Read* → *Standby*

Ciascuna di esse, eccetto quella per lo *Standby*, prevede l'utilizzo di uno script dedicato per l'esecuzione della corrispondente istruzione compiuta nell'area di memoria dedicata (sezione P).

Le operazioni *Program* sono state svolte tramite la scrittura dei valori 0xAA e 0x66 per le memorie MLC (MB e MG) rispettivamente per le pagine A e le pagine B, mentre è stato utilizzato il valore 0xAA per i dispositivi SLC (MA).

Il rilevamento della corrente assorbita dall'alimentazione in standby è stato misurato mantenendo selezionato il dispositivo (ovvero mantenendo attiva l'impostazione *Select Chip = 1* nel programma *Forgetful*).

Dai risultati di questa analisi si evince che i dispositivi MA siano quelli con minor consumo di corrente in ognuna delle fasi testate, i dispositivi MB richiedono più corrente per la cancellazione e la programmazione dei dati, mentre per le fasi di lettura e standby si avvicinano molto ai valori riscontrati nelle MG.



## IV. Ispezioni a raggi-X di bassa intensità

In questo capitolo verrà discusso ed analizzato il processo di test sulle memorie per la valutazione degli effetti di ispezioni a raggi-X di bassa intensità. Sarà innanzitutto rappresentato il processo di misura ed acquisizione dei dati giustificando ed illustrando le scelte compiute durante lo svolgimento e ne verranno analizzate le metodologie adoperate. Si procederà poi con l'interpretazione dei risultati e l'illustrazione dei sistemi utilizzati per l'elaborazione dei dati acquisiti nella fase di misura.

I criteri che hanno condotto alla scelta di iniziare con un determinato valore di intensità derivano da diverse considerazioni, la prima è quella di definire un range entro cui saranno effettuati questi irraggiamenti e quelli successivi, in modo da poter iniziare con il valore più basso tra questi, dato che ancora non sappiamo con esattezza quali effetti andremo a riscontrare. Il secondo criterio per la scelta dell'intensità è quello dei valori utilizzati dall'azienda ospitante per una normale ispezioni delle schede trattate da loro. Infine, questi sono stati condizionati dai risultati trovati su vari *paper* che trattano di studi analoghi su tipologie di dispositivi simili a quelli testati, in modo da potersi orientare qualitativamente sull'entità dell'impatto delle radiazioni che ci si dovrebbe aspettare in questo contesto. È stato dunque scelto di iniziare con degli irraggiamenti sulle memorie impostando il macchinario per le ispezioni ad una tensione di **90kV**.

I valori generalmente utilizzati in azienda variano dai 115kV ed i 120kV, mentre per la potenza si aggirano tra i 5.6W ed i 6W. L'impostazione a 120kV e 6W è comunemente utilizzata per ispezionare schede aventi dei componenti particolarmente spessi. Questa impostazione prevede pertanto una corrente di flusso di  $6W/120kV = 50\mu A$ , uno studio [21] dimostra come gli effetti delle radiazioni-X siano maggiormente dipendenti da variazioni della tensione del tubo radiogeno piuttosto che della corrente, è stato quindi scelto di mantenere costante il valore della corrente tra i due distinti test ("Bassa intensità" e "Media intensità") in modo da poterne valutare la dipendenza dalla tensione senza intersecare le conseguenze derivanti da cambiamenti nella corrente. Per questo motivo la potenza impostata

nel macchinario per le ispezioni è stata scelta in modo da mantenere invariato il valore della corrente. La potenza impostata risulta quindi di  $90kV \cdot 50\mu A = 4.5W$ .

#### 4.1 Descrizione del primo test

Per questo test sono stati utilizzati sei dispositivi, due per ciascuna tipologia di memoria utilizzata, questi saranno suddivisi in due gruppi, un campione di test che sarà sottoposto ad un'alternanza di irraggiamenti e prove di lettura, scrittura e cancellazione, mentre il secondo gruppo fungerà da campione di controllo, questo sarà soggetto alle stesse prove del primo campione ad eccezione degli irraggiamenti, che in questo caso saranno totalmente assenti. Per illustrare questo processo con maggiore chiarezza, è stato redatto il diagramma di flusso rappresentato in Figura 4.1.1.

I due gruppi sono composti come segue, in cui la nomenclatura dei dispositivi fa riferimento a quella utilizzata nel precedente capitolo.

Campione di test:                    MA8                    MB4                    MG20

Campione di controllo:           MA3                    MB15                    MG6

Il test inizia con un'operazione di *Erase* nella sezione R delle memorie e con la successiva programmazione del dato 0xAA 0x66 per i dispositivi MLC e 0xAA per i dispositivi SLC. Ogni ciclo di misura prevede una serie di letture consecutive della sezione R delle memorie, come è stato fatto per le misure illustrate nel capitolo precedente, per valutare le variazioni nella capacità di ritenzione del dato. Dopo di queste si procede ad eseguire in serie le operazioni di Erase, Program (con l'ausilio di dieci pattern randomici utilizzati a rotazione) e Read nella sezione P, questo serve per la valutazione di eventuali cambiamenti nelle prestazioni dei dispositivi. Infine vengono ripetuti singolarmente queste ultime tre operazioni, questa volta utilizzando gli stessi pattern della sezione R, mentre si mantiene monitorato

l'assorbimento di corrente tramite l'impostazione di un'alimentazione esterna. Come si può notare osservando il diagramma di flusso, il primo ciclo di misura viene eseguito senza irraggiamenti, in modo da valutare per prima cosa lo stato iniziale delle memorie subito dopo la fase di programmazione.

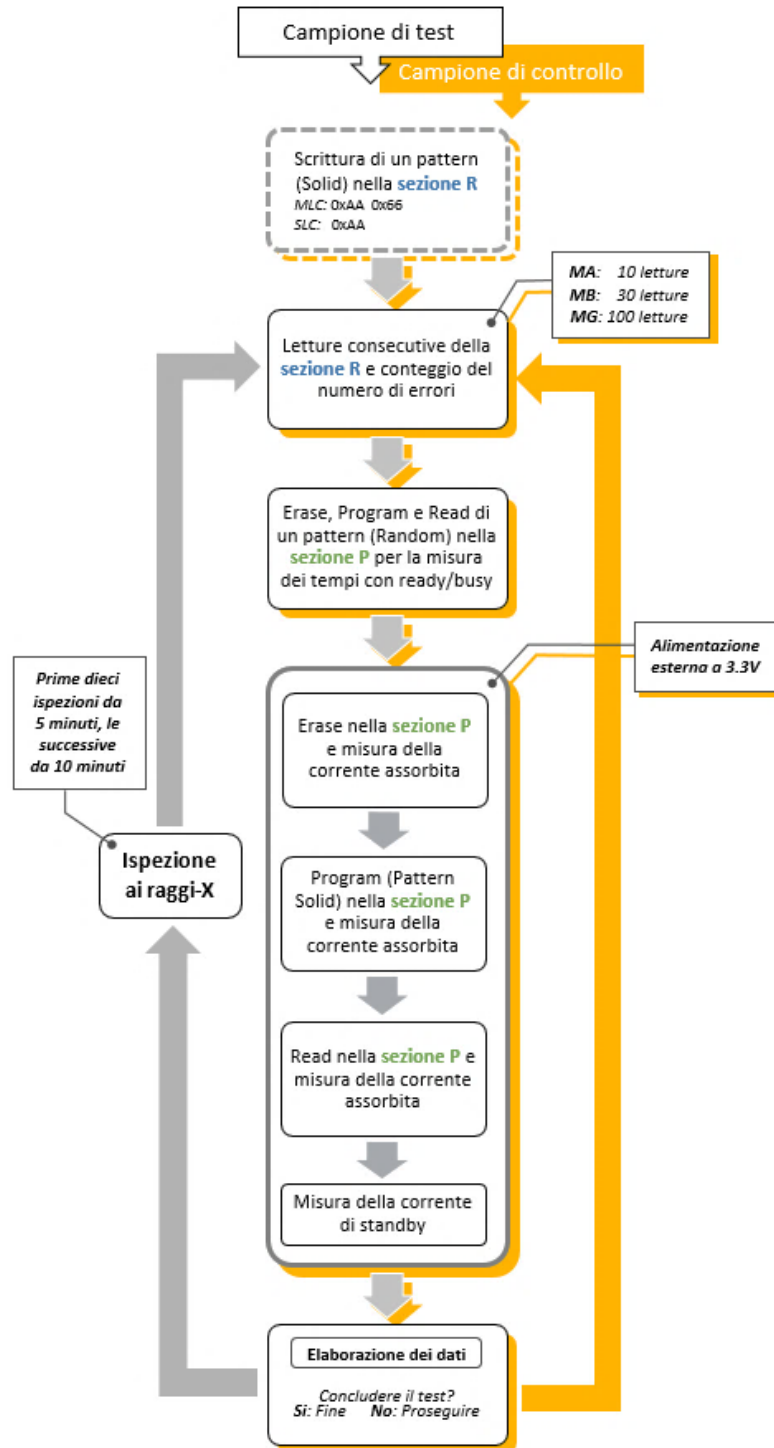


FIGURA 4.1.1 – DIAGRAMMA DI FLUSSO PER L'ESECUZIONE DEL PRIMO TEST CON IRRAGGIAMENTI.

Per quanto riguarda le ispezioni ai raggi-X con cui vengono irraggiati i dispositivi in questa fase di test (90kV 4.5W), le prime dieci ispezioni sono state eseguite con una durata di 5 minuti ciascuna, mentre le successive sono state effettuate con irraggiamenti da 10 minuti. La durata indicata per ciascun irraggiamento considera il tempo trascorso dal raggiungimento della potenza selezionata allo spegnimento del tubo radiogeno, lo spegnimento è pressoché immediato mentre l'accensione richiede qualche secondo, la dose di radiazione a cui sono soggette le memorie durante la fase di accensione prima del raggiungimento della potenza desiderata è stata considerata trascurabile per questa prima prova. In questo test non è stato possibile determinare con sufficiente precisione la distanza dei campioni dal tubo radiogeno, ma secondo delle stime fatte tramite una funzione aggiuntiva del software del macchinario per le ispezioni utilizzata successivamente, i campioni in questo test sono stati esposti ad una distanza di circa 16cm. Le misure di corrente relative a questa fase di test sono state eseguite con le stesse modalità descritte nel Paragrafo 3.5 con la differenza che il modello di oscilloscopio digitale utilizzato in queste misure è un *Siglent SDS 1104X-E*. Per queste acquisizioni sono stati considerati i valori di corrente relativi alla base della forma d'onda e a quelli assunti nei picchi, ogni misura di questo tipo è stata effettuata selezionando un sufficiente numero di periodi del segnale. La parte finale di ogni processo di misura, ovvero l'elaborazione dei dati, è stata eseguita tramite dei programmi scritti in *Matlab* per il conteggio del numero di *bit-errors* ed il calcolo delle prestazioni a partire dai file di dati restituiti dai processi di test. Inoltre, questi dati, compresi quelli di assorbimento di corrente, vengono uniti in dei grafici in modo da poter comparare anche visivamente l'andamento dei parametri che si stanno analizzando.

## **4.2 Comparazione dei risultati**

In questo test sono stati effettuati diciotto cicli di misura per ciascun dispositivo, per un totale di 120 minuti di irraggiamento cumulativi. I principali risultati che si possono notare riguardano la variazione del numero di eventi di *bit-flipping* che

avviene nelle memorie MG (25nm), in cui si distingue chiaramente l'andamento crescente che segue una forma piuttosto definita.

Questi test sono stati svolti però in un lasso di tempo che comprende diverse settimane, dato che i singoli cicli di lettura richiedono del tempo per essere eseguiti e ricontrrollati prima dell'irraggiamento successivo. Questo impone la necessità di disgiungere la quantità di errori causata dalle ispezioni da quella che avviene comunemente come perdita di dati in ritenzione al passare del tempo. Sono dunque stati utilizzate le funzioni di fitting ricavate in precedenza (illustrate nel Paragrafo 3.3), adattate con la somma di una costante, per sottrarre il numero di errori previsti in funzione del tempo da quelli misurati ad ogni ciclo. Per fare questo è stato annotato il giorno e l'orario relativi all'esecuzione di ciascun ciclo di misura, in modo da poter utilizzare queste informazioni per lo scopo citato e rendere questi risultati indipendenti dal tempo, cosicché il numero di errori rimanente (denominato " $\Delta Errori$ ") sia correlato unicamente al tempo di irraggiamento dei dispositivi, a discapito ovviamente del margine di errore introdotto con questo sistema, che però è stato constatato essere sufficientemente ridotto per lo scopo finale di questo test.

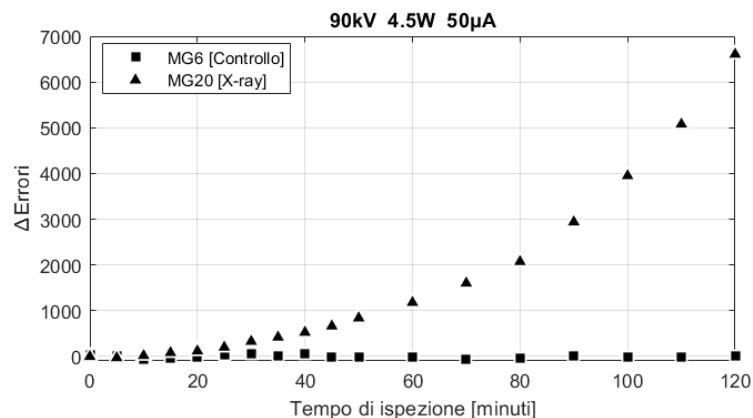


FIGURA 4.2.1 – NUMERO DI ERRORI NELLA SEZIONE R CAUSATI DAGLI IRRAGGIAMENTI DEL PRIMO TEST.

A riprova del funzionamento del sistema utilizzato per rimuovere il contributo degli errori in ritenzione dipendenti dal tempo da quelli dipendenti dagli irraggiamenti, si può vedere in Figura 4.2.1 come il numero di errori del campione di controllo rimanga prossimo allo zero (mentre nei dati grezzi questo variava da 2192 *bit-errors* per la prima misura a 3745 *bit-errors* per l'ultima).

Per quanto riguarda le indicazioni relative al campione di controllo nella Figura 4.2.1, ciascun punto nel grafico rappresenta una misura effettuata nello stesso ciclo di misura in cui il campione di test è stato sottoposto al tempo di irraggiamento indicato nel grafico. È bene rimarcare che il campione di controllo indicato non subisce irraggiamenti durante il test, il suo scopo è puramente comparativo.

Nei dispositivi MA ed MB non sono state registrate variazioni statisticamente significative per i test in ritenzione del dato, ne per quelli sulle performance e assorbimento di corrente causate dagli irraggiamenti. Durante i test sulle performance dei dispositivi è stata riscontrata una variazione (a tratti crescente e decrescente in altri, fatto riscontrato anche nei test successivi) nei dispositivi MB nell'ordine dei  $\sim 0.5\text{ms}$ , questa variazione non è però stata attribuita all'effetto delle ispezioni, in quanto si riscontrano variazioni simili anche nel campione di controllo dello stesso modello, come si può vedere dal grafico di Figura 4.2.2.

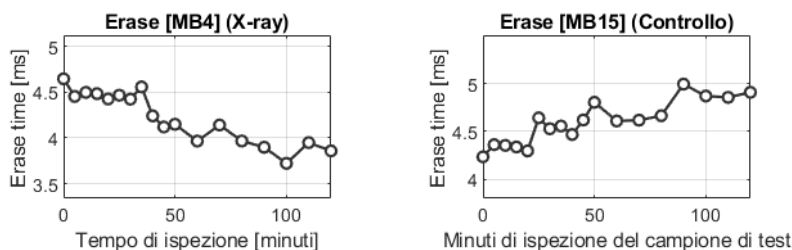


FIGURA 4.2.2 – COMPARAZIONE DEI RISULTATI DEL PRIMO TEST SULLE PRESTAZIONI DEI DISPOSITIVI MB.

### 4.3 Considerazioni sui risultati

Alla fine del primo test, le uniche variazioni riscontrate dai vari cicli di misura risiedono nelle perdite di dati relative ai test di ritenzione nel dispositivo MG20, come illustrato nel precedente paragrafo. Il *datasheet* del componente definisce che gli algoritmi di ECC da implementare in questi dispositivi devono essere in grado di correggere almeno 24 bit ogni 1080 bytes di dati [9], che corrisponde a circa lo 0.278% dei bit di dati che vengono memorizzati. Nella Figura 4.3.1, sono stati rappresentati in scala logaritmica il numero di errori determinati per ciascun ciclo



di misura, in questo grafico sono considerati sia il numero di eventi di *bit-flipping* dovuti agli irraggiamenti, sia quelli che avvengono in condizioni standard (descritti nel Paragrafo 3.3), come si può constatare dal valore non nullo al tempo zero e dalla variazione del numero di errori rilevati nel campione di test. Da questo grafico è possibile notare come l'aumento del numero di errori dovuti agli irraggiamenti rimanga comunque ampiamente inferiore al limite minimo per l'ECC, si può dunque dedurre che questo tipo di ispezioni a questa intensità non rappresenti un problema per i dispositivi anche per esposizioni della durata di svariate ore.

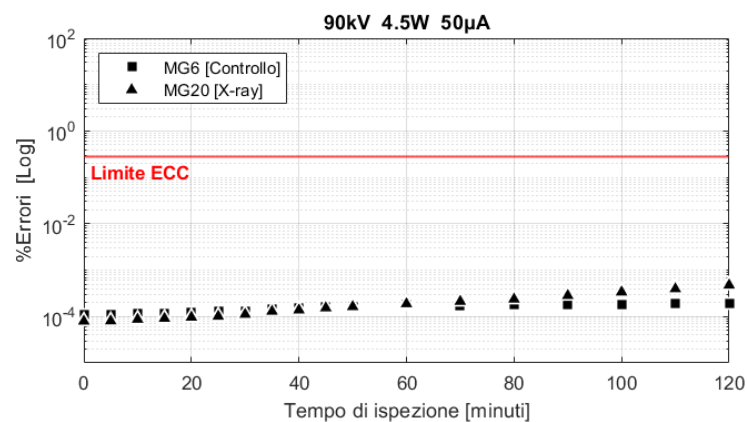


FIGURA 4.4.1 – PERCENTUALE DI ERRORE IN SCALA LOGARITMICA PER IL PRIMO TEST.

È stato possibile determinare la durata delle ispezioni entro la quale il numero di errori generati dal *bit-flipping* causato dall'irraggiamento rimane sotto la soglia di correzione. Per prima cosa, tramite fitting dei dati, è stata trovata una funzione che approssima adeguatamente l'andamento del numero di errori dipendenti dall'irraggiamento (il " $\Delta Errori$ " del paragrafo precedente), questo corrisponde alla seguente funzione:

$$Fit_{1MG20}^{\Delta Errori}(t) \cong 3.274 \cdot 10^{-5} \cdot t^4 - 3.583 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + 0.4182 \cdot t^2 \quad (4.3.1)$$

In cui  $t$  rappresenta il tempo di esposizione, espresso in minuti, a cui è sottoposto il campione. Questa funzione, rispetto alle misure, presenta un coefficiente di determinazione pari a  $R^2 = 0.99962$ . La funzione ed i valori delle misure sono rappresentati graficamente nella Figura 4.3.2.

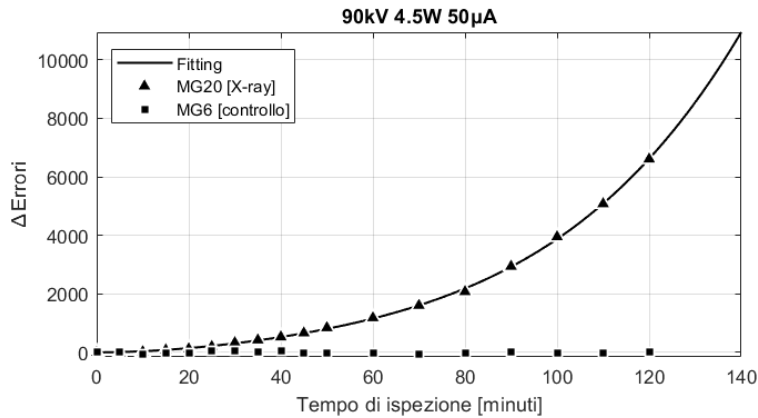


FIGURA 4.3.2 – FITTING DEI RISULTATI DEGLI IRRAGGIAMENTI DEL PRIMO TEST.

Estendendo il calcolo della funzione nell'asse dei tempi e trasformando le misure e la funzione in percentuale, è stato determinato il tempo di esposizione al quale la percentuale d'errore raggiunge quella del minimo dell'ECC, risultando in un irraggiamento di **661.53 minuti**. Come rappresentato dal grafico di Figura 4.3.3.

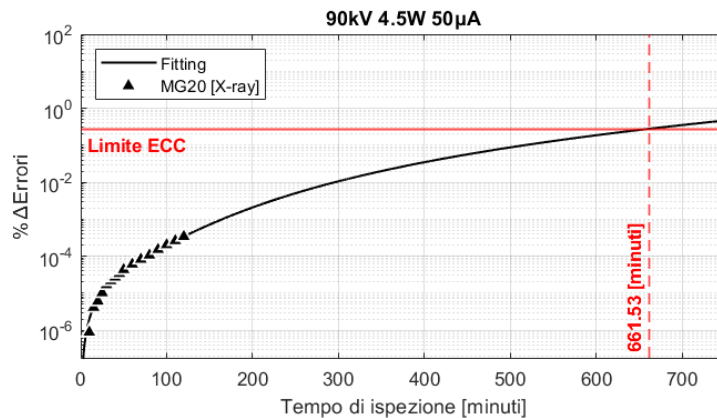


FIGURE 4.3.3 – PREVISIONE DEL TEMPO DI SUPERAMENTO DEL LIMITE DELL'ECC.

Durante questo processo, nonostante vi siano stati dei chiari effetti d'interazione con il funzionamento del dispositivo, non sono state registrate variazioni nelle prestazioni di quest'ultimo, le misure che hanno portato a tale conclusione sono state riportate nella Figura 4.3.4, in cui è possibile notare qualche leggera differenza tra i due campioni, ma che mantenendosi costante sin dall'inizio delle misure, non può essere attribuita agli effetti degli irraggiamenti.

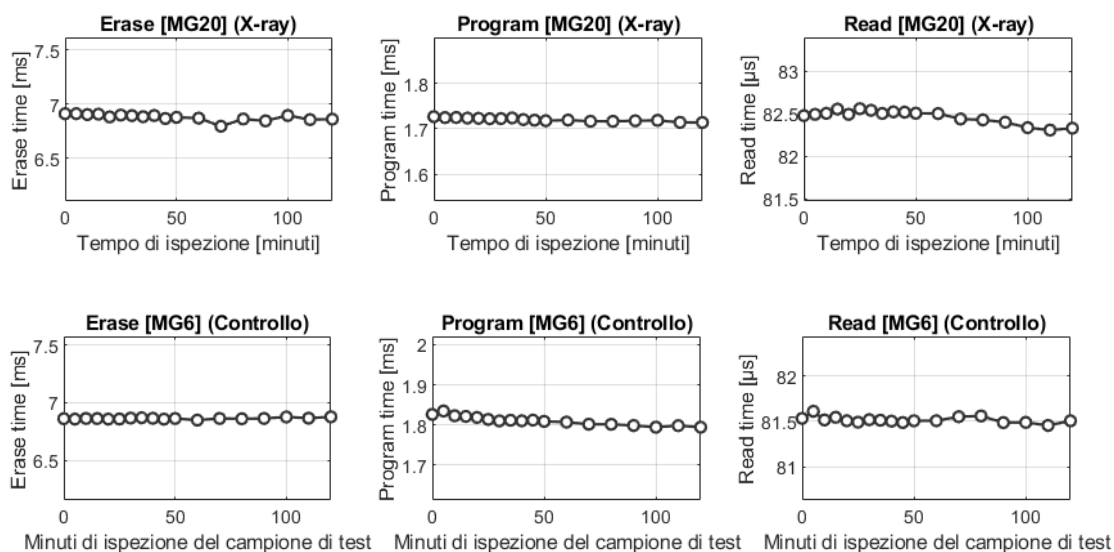


FIGURE 4.3.4 – MISURE DELLE PRESTAZIONI DEI DISPOSITIVI MG DURANTE IL PRIMO TEST.

In conclusione, è doveroso aggiungere che non sono state riscontrate nemmeno variazioni della corrente assorbita dai dispositivi tra le varie misure effettuate.

Per quanto riguarda i dispositivi MA ed MB non è stata registrata alcuna variazione riconducibile ad effetti delle ispezioni a raggi-X nei test sulla ritenzione del dato, in quelli sulle prestazioni e nelle misure di corrente.



## V. Ispezioni a raggi-X di media intensità

In questo capitolo verrà descritto il sistema di misura, la procedura ed i risultati dell'esposizione dei campioni di memoria ai fasci di radiazioni ionizzanti di media intensità che costituiscono il secondo test sui dispositivi. Per quanto riguarda la scelta dei campioni impiegati, i campioni di test dei dispositivi MA ed MB sono stati riutilizzati allo stesso modo del primo test (descritto nel precedente capitolo), in quanto non è stato individuato alcun effetto dovuto agli irraggiamenti nelle misure effettuate, inoltre rimane una scelta preferibile quella di mantenere come campione di controllo quei dispositivi che non hanno subito alcun irraggiamento durante i test, seppur in assenza di effetti evidenti nell'altro campione. Mentre per il campione MG è stato scelto di eseguire gli irraggiamenti sul campione utilizzato in precedenza come campione di controllo, dato che nel campione di test MG20 erano già state riscontrate delle variazioni. Come campione di controllo per i dispositivi MG è stato introdotto un ulteriore dispositivo che sarà utilizzato come campione di controllo.

L'intensità di radiazione a cui sono sottoposti i dispositivi è stata scelta secondo i criteri illustrati all'inizio del precedente capitolo, questo test è stato eseguito impostando una tensione di **120kV** ed una potenza di **6W**, ciò garantisce lo stesso flusso di corrente di elettroni nel tubo radiogeno, ovvero **50 $\mu$ A**. Tale impostazione risulta essere spesso utilizzata in ambito industriale, soprattutto quando c'è la necessità di ispezionare schede elettroniche con componenti spessi. In questo secondo test è stato possibile abilitare la funzione aggiuntiva "*Dose controls*" [12, p. 369] nel macchinario utilizzato per le ispezioni a raggi-X, grazie a questa funzione è stata impostata con precisione la distanza dal tubo radiogeno per ogni ciclo di ispezione del secondo test. La distanza dei campioni dalla sorgente di radiazione è definita dallo spazio tra la parte superiore del tubo radiogeno e la parte inferiore del vassoio porta campione [12, p. 370] che, sempre grazie alla citata funzione, è stata impostata in modo preciso a **159.6mm**.

## 5.1 Descrizione del secondo test

Il processo di misura, analisi e scansione temporale con cui vengono eseguiti gli irraggiamenti fanno sempre riferimento al diagramma di flusso rappresentato nella Figura 4.1.1, ma con una piccola modifica sulla quantità di letture eseguite, è stata infatti effettuata una variazione del numero di tali istruzioni sulla sezione R dei dispositivi MG, in quanto la grande quantità di *bit-errors* accumulati negli ultimi test allungava in modo eccessivo la durata delle letture; La tabella riportata in seguito specifica il numero effettivo di letture svolte per le memorie MG.

<i>Cicli di test</i>	<i>1-15</i>	<i>16-18</i>	<i>19</i>	<i>20-24</i>
<i>Numero di letture</i>	100	50	30	20

TABELLA 5.1.1 – NUMERO DI LETTURE DELLA SEZIONE R NELLE MEMORIE MG RELATIVE AI CICLI DI MISURA.

I campioni utilizzati in questo secondo test sono i seguenti:

Campione di test:                    MA8                    MB4                    MG6

Campione di controllo:            MA3                    MB15                    MG123

La prova, come la precedente, si struttura in una prima fase di cancellazione di dati nella sezione R, per poi eseguirvi una riprogrammazione con le stesse modalità del primo test, in modo da valutare gli effetti degli irraggiamenti alle stesse condizioni.

Si prosegue quindi con le misure delle performance eseguite in modo analogo a quelle descritte nel precedente capitolo, ovvero con operazioni di *Erase*, *Program* e *Read* di pattern randomici con abilitazione del segnale di *Ready-Busy*.

Per quanto riguarda la misura di assorbimento di corrente, in questo secondo test è stato adottato un metodo differente a cui però sono stati comparati i risultati ottenuti in precedenza per accertarne la correttezza. Dopo aver impostato l'alimentazione

esterna dei dispositivi sulla scheda di controllo, è stato posto un multimetro impostato per la misura di corrente in serie all'alimentazione, in questo sistema non si acquisisce l'intera forma d'onda ma viene restituito un valore medio di corrente corrispondente a quello calcolato in precedenza. Essendo le varie misure caratterizzate da una durata di tempo non trascurabile, viene riscontrata una leggera variabilità nei decimali della misura, è stato quindi scelto di mantenere il valore massimo tra le medie registrate dallo strumento durante la misura. La configurazione del banco di prova per la misura di corrente è rappresentata schematicamente nella Figura 5.1.1 in cui il simbolo con la lettera "A" indica il multimetro configurato come amperometro.

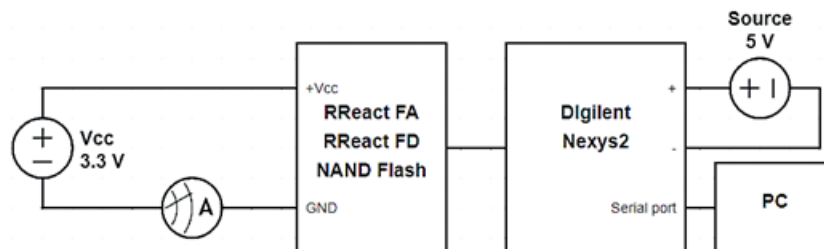


FIGURA 6.1.1 – SCHEMA DELLA CONFIGURAZIONE UTILIZZATA PER LA MISURA DELLA CORRENTE MEDIA.

Per praticità di misura è stato utilizzato per le misure di corrente un multimetro *Fluke 175 True RMS*. Prima di procedere con le misure, è stata verificata l'accuratezza dello strumento tramite delle misure comparative sulle memorie, con le stesse condizioni dei successivi test, utilizzando un multimetro da banco *HP Hewlett*, quest'ultimo presenta una precisione maggiore, che si traduce in più cifre decimali, ma approssimando a due cifre dopo la virgola (che sono quelle supportate dal *Fluke* per le misure in milliampere) si ottiene in ogni caso la stessa misura del primo. Essendo questa una precisione sufficiente per lo scopo è stato scelto di proseguire le misure con il *Fluke*.

La procedura di irraggiamento per i dispositivi è stata eseguita con le stesse sequenze temporali del test precedente, ovvero, è stato impostato un timer che viene avviato al raggiungimento della potenza desiderata per il tubo radiogeno (questo impiega qualche secondo) e viene fermato allo spegnimento, che ai fini di questo studio può considerarsi istantaneo. Prima di avviare il tubo radiogeno vengono

riposti i campioni in un preciso punto del vassoio e ne vengono impostate le coordinate nel macchinario, viene quindi selezionata l'altezza desiderata insieme ai parametri per il funzionamento del tubo, una volta impostati e ricontrollata la correttezza dei valori inseriti, viene iniziata l'accensione del tubo.

Prima dell'avvio del primo step della procedura di misura, è stato sfruttato il tempo trascorso dall'inizio del primo test (45 giorni) per eseguire un'ulteriore misura sulla ritenzione del dato in condizioni standard sul dispositivo MG6 utilizzato come campione di controllo del primo test, in modo da verificare l'accuratezza del modello di previsione del numero di errori in ritenzione in un tempo più ampio di quello utilizzato in precedenza. Comparando il numero di errori risultante si è riscontrata nuovamente l'accuratezza della funzione ricavata in precedenza (Funzione 3.3.1), a cui sono stati comparati altri modelli di fitting, come la funzione di densità cumulativa Log-normale, ma, come si evince dalla Figura 5.1.2, la predizione risulta più accurata se viene utilizzata la funzione ricavata (indicata nella figura come "Custom fit"). Per questo motivo in questa tesi è stata utilizzata questa funzione al posto di altri modelli.

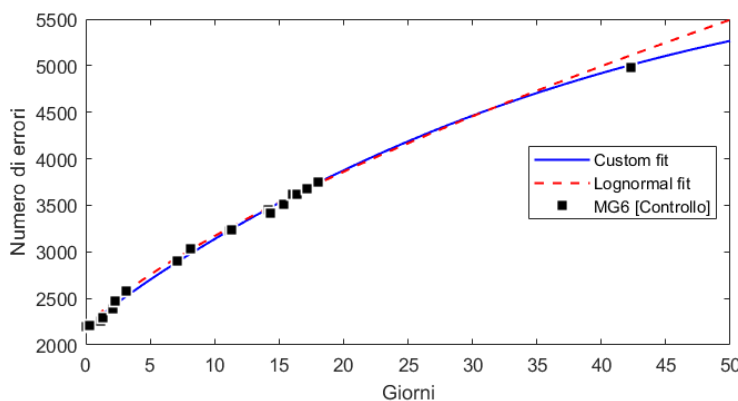


FIGURE 5.1.2 – COMPARAZIONE DEI MODELLI DI FITTING CON I DATI DEL TEST PRECEDENTE SU MG6.



## 5.2 Comparazione dei risultati

Durante queste prove sono state riscontrate delle interessanti differenze rispetto alle misurazioni eseguite durante il precedente test, saranno definiti in primo luogo gli effetti sulla ritenzione del dato; è stato riscontrato un notevole aumento del numero di errori dovuti alla *bit-flipping* nei dispositivi MG al punto che, come si evince dalla Figura 5.2.1, il numero di *bit-errors* iniziale risulta pressoché trascurabile rispetto all'incremento a cui sono soggetti (In cui la media del numero di errori per MG6 nel primo punto è di 2257 *bit-errors*).

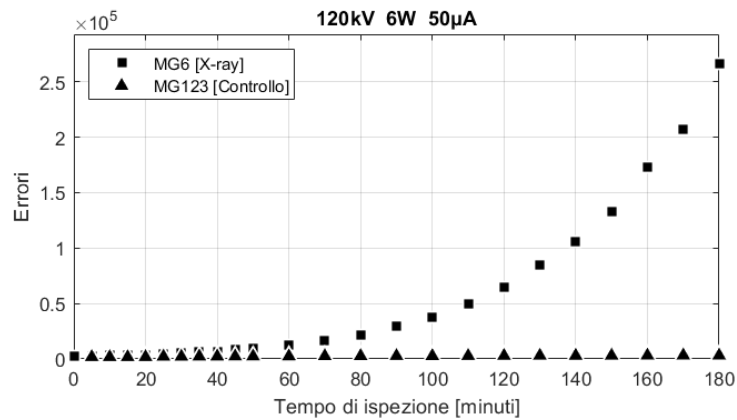


FIGURA 5.2.1 – NUMERO MEDIO DI BIT-ERRORS NEI DISPOSITIVI MG DURANTE IL SECONDO TEST.

Calcolandone la percentuale e plottando in scala logaritmica si nota maggiormente la differenza di incidenza del numero di errori rispetto al campione di controllo, come mostrato dal grafico di Figura 5.2.2.

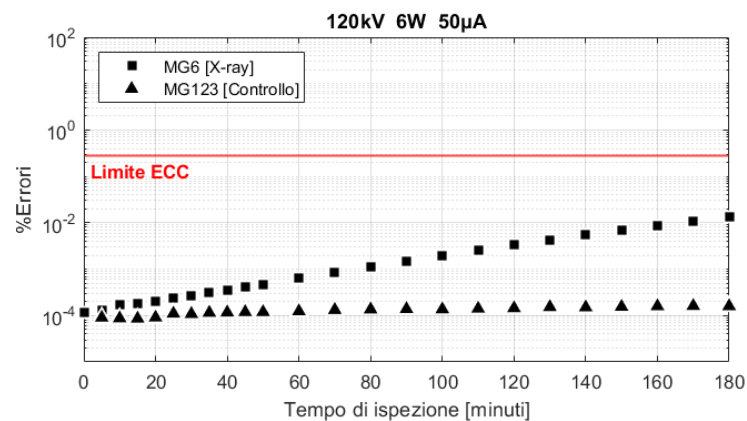


FIGURA 5.2.2 – PERCENTUALE DI BIT-ERRORS NEI DISPOSITIVI MG DURANTE IL SECONDO TEST.

In questo test, a differenza del precedente, si sono riscontrate delle variazioni sulla ritenzione del dato sulle memorie MB, causate dall'interazione con il fascio di fotoni. Queste si sono però verificate soltanto negli ultimi cicli di misura, sarà dunque arduo stabilire in seguito una funzione di fitting con sufficiente precisione.

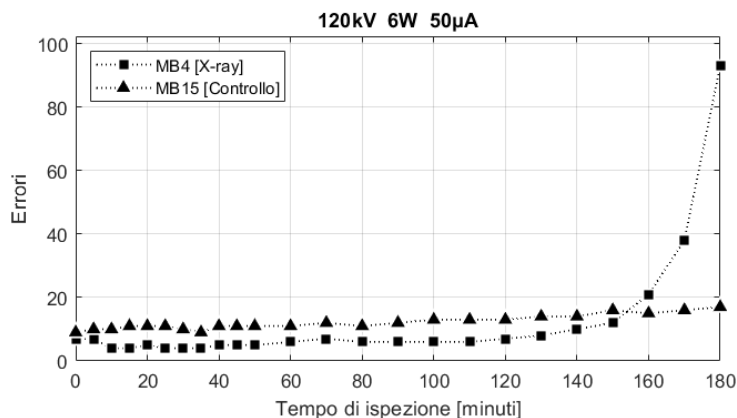


FIGURA 5.2.3 - NUMERO MEDIO DI BIT-ERRORS NEI DISPOSITIVI MB DURANTE IL SECONDO TEST.

Differentemente dalle altre due tipologie di dispositivo, le memorie di tipo MA non hanno subito variazioni di alcun tipo in questo secondo test.

Passando all'analisi delle prestazioni, sono state riscontrate delle variazioni nelle prestazioni in fase di cancellazione nel dispositivo MG6, una possibile spiegazione di questo effetto può essere data dall'interazione dei fotoni ionizzanti con l'ossido di gate dei mos che compongono la pompa di carica. Studiando paper relativi a simili test si è riscontrata una coerenza in questo risultato [18].

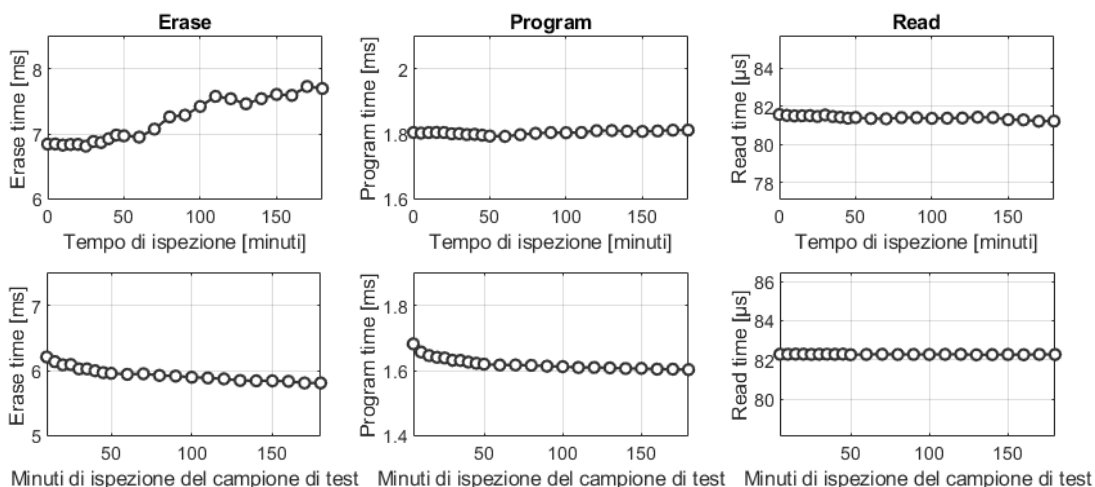


FIGURA 5.2.4 – PRESTAZIONI DEL DISPOSITIVO MG6 [X-RAY] (SOPRA) E MG123 [CONTROLLO] (SOTTO).

Nelle misure in corrente non sono state rilevate variazioni in nessuno dei dispositivi testati, questa misura è riportata nel grafico di Figura 5.2.5.

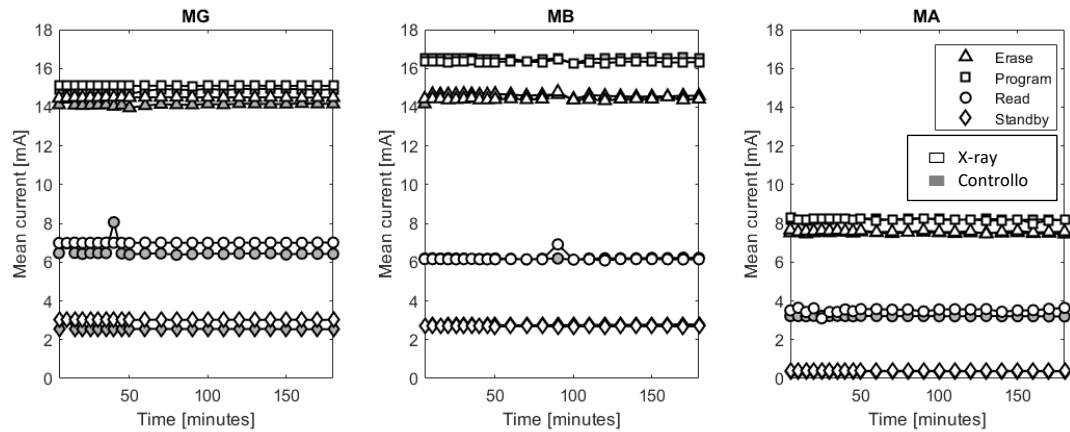


FIGURA 5.2.5 – MISURE DI CORRENTE ESEGUITE DURANTE IL SECONDO TEST.

Durante gli irraggiamenti sui dispositivi sono state acquisite delle immagini a cui sono stati applicati dei filtri digitali per la riduzione del rumore, previsti dal software del macchinario per le ispezioni. Dalla Figura 5.2.6 si può vedere come i dispositivi appaiono durante le ispezioni, si può notare che le parti in plastica risultano quasi trasparenti ai fasci di fotoni ad alta energia, mentre le aree più scure, caratterizzate da coefficienti di assorbimento maggiore, sono costituite da metallo e semiconduttore.

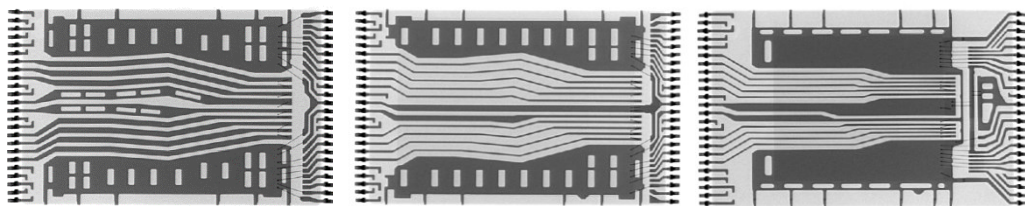


FIGURA 5.2.6 – IMMAGINE AI RAGGI-X RISPETTIVAMENTE DEI DISPOSITIVI: MA8, MB4 E MG6.

### 5.3 Considerazioni sui risultati

In questo paragrafo saranno analizzate e processate le misure ricavate dall'iterazione delle operazioni descritte in precedenza, allo scopo di estrapolare dati utili e generare modelli descrittivi dei fenomeni riscontrati. Per prima cosa si analizzeranno gli effetti sulla ritenzione del dato nella sezione R del dispositivo **MG6**, il quale ha riscontrato l'impatto maggiore dalle esposizioni. Com'è stato fatto nel capitolo precedente, è stata utilizzata la funzione ricavata per la previsione del numero di errori che avvengono in condizioni standard in modo da sottrarre alla quantità di errori totali, così da lasciare solamente il numero di *bit-errors* causati dall'interazione con i fasci di onde ionizzanti ( $\Delta\text{Errori}$ ). Tramite un sistema di fitting dei dati sono stati trovati i parametri di una funzione che ne descrive l'andamento con un coefficiente di determinazione di  $R^2 = 0.99957$ , essa è riportata nella Formula 5.3.1.

$$Fit_{2MG6}^{\Delta\text{Errori}}(t) = 3.017 \cdot 10^{-4} \cdot t^4 - 2.66 \cdot 10^{-2} \cdot t^3 + 3.006 \cdot t^2 \quad (5.3.1)$$

Questa funzione riesce a descrivere con una buona precisione l'effetto dei raggi-X, essa viene rappresentata dal grafico di Figura 5.3.1, in cui sono inoltre indicati i valori medi del numero di *bit-errors* dipendenti dall'interazione con le onde per ciascun ciclo di misura eseguito sul dispositivo durante il secondo test.

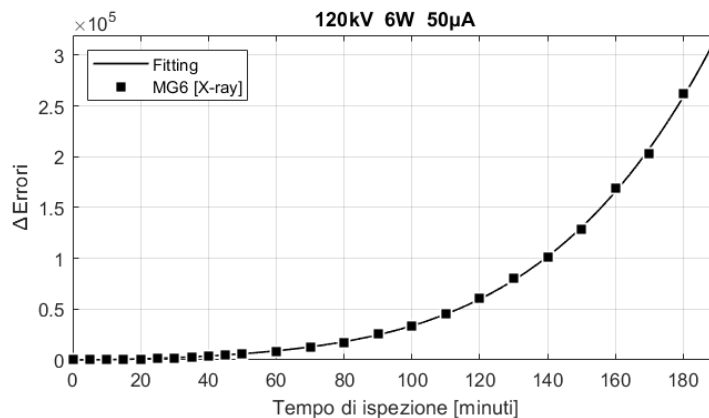


FIGURA 5.3.1 – FITTING DEL NUMERO MEDIO DI ERRORI PER IL DISPOSITIVO MG6.

Sebbene il numero di errori in condizioni standard risulti praticamente trascurabile per tempi di irraggiamento sopra i 100 minuti, questo non vale se consideriamo soltanto i primi cicli di irraggiamento, plottando i valori di  $\Delta Errori$  in scala logaritmica e convertendolo in percentuale si può infatti notare come essi variano rispetto al grafico di Figura 5.2.2, in cui sono rappresentate solamente le misure medie del totale. Estendendo il processo di fitting è possibile, anche in questo caso, effettuare una previsione del limite di tempo di irraggiamento dei campioni per il raggiungimento del termine minimo dell'*error correction code* (Figura 5.3.2).

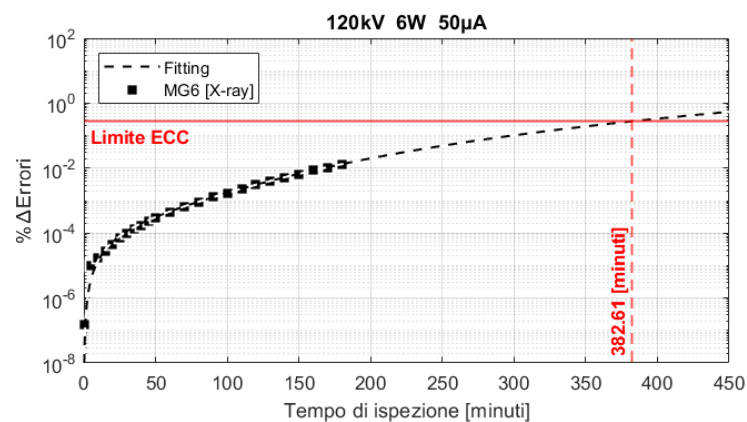


FIGURA 5.3.2 – FITTING DEL NUMERO MEDIO DI ERRORI IN SCALA LOGARITMICA PER IL DISPOSITIVO MG6.

Possiamo dunque constatare che il limite di tempo di ispezione a cui possono essere sottoposti i dispositivi di tipo MG prima di rischiare perdite di dati irreversibili sia di **382.61 minuti**, secondo le modalità utilizzate in questo test.

Analizzando ora le misurazioni effettuate sul dispositivo **MB4**, si evince che anche in questo caso è possibile effettuare un processo di fitting dei dati per stimare una funzione che ne segua l'andamento, tuttavia, data la limitatezza dell'effetto riscontrato, risulterà impossibile constatarne l'accuratezza in modo rigoroso. Il grafico contenente le misure ed il fitting dei dati è riportato in Figura 5.3.3, mentre la funzione di fitting che lo descrive è riportata in seguito (Formola 5.3.2).

$$Fit_{MB4}^{Errori}(t) \cong 6.022 \cdot 10^{-6} \cdot e^{9.15710^{-2} \cdot t} + 5.638 \quad (5.3.2)$$

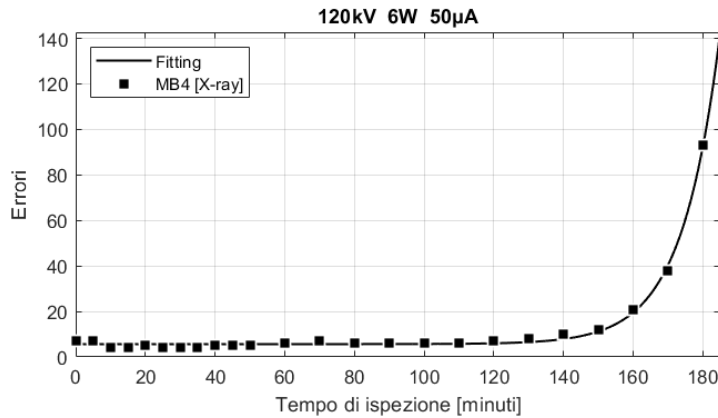


FIGURA 5.3.3 – FITTING DEL NUMERO MEDIO DI ERRORI PER IL DISPOSITIVO MB4.

Seppur sotto approssimazione, risulta interessante notare il modo in cui i dispositivi MG (tecnologia costruttiva a 25nm) ed MB (tecnologia costruttiva a 65nm) rispondano in modo differente all'interazione con le onde ionizzanti. Tramite un software online [22] è stato possibile ricavare, oltre ai parametri di fitting, l'incertezza che caratterizza questa funzione rispetto alle misure effettuate. Questi valori sono stati utilizzati per intercettare il range di tempi di irraggiamento del campione entro il quale si dovrebbe trovare l'intersezione della percentuale d'errore con il minimo stabilito per l'ECC di questo dispositivo (4bit ogni 528byte). Il risultato suggerisce che i tempi di ispezione che il campione può sopportare sotto le condizioni di questo test prima della perdita irreversibile di dati sia di **289.12 minuti** [-14.28 minuti, +19.56 minuti] (Figura 5.3.4).

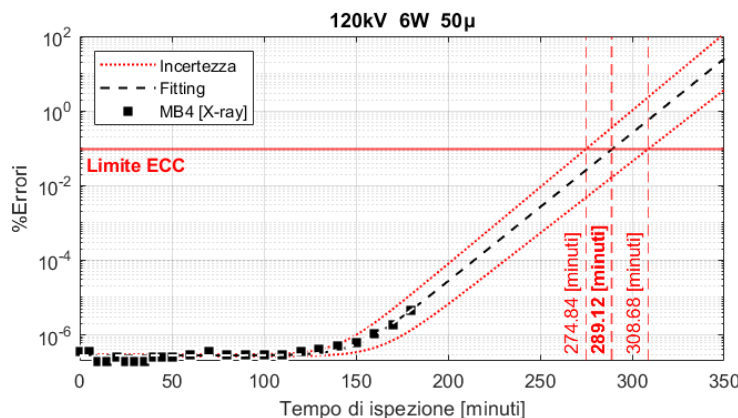


FIGURA 5.3.4 – FITTING DEL NUMERO MEDIO DI ERRORI IN SCALA LOGARITMICA PER IL DISPOSITIVO MB4.

Durante i test sui dispositivi MA (90nm) non sono state rilevate variazioni sulla ritenzione del dato paragonabili a quelle riscontrate negli altri dispositivi. Tuttavia, pur non essendoci evidenze della causa di questo tipo di comportamento associato all'esposizione ai raggi-X, si sono generati quattro nuovi bad blocks dall'ottavo ciclo di irraggiamenti nel dispositivo MA8 (campione di test), ed una ulteriore bad block al ventunesimo ciclo (in questo blocco però si erano già riscontrati dei momentanei problemi di lettura durante le precedenti misure).

Passando ora all'analisi dei test sulle prestazioni dei dispositivi, si vede come queste rimangano pressoché invariate, o senza discrepanze evidenti tra i campioni di test e quelli di controllo, tranne per i dispositivi MG. Di fatto, come annunciato nel precedente paragrafo, è stata misurata una graduale crescita del tempo di cancellazione del dato nel dispositivo MG6. L'aumento del tempo medio impiegato per la cancellazione di un blocco risulta direttamente proporzionale al tempo di esposizione del dispositivo, nella Figura 5.3.5 è possibile vedere la comparazione di questa misura con quella effettuata nel primo test, in cui MG6 era utilizzato come campione di controllo, quindi non soggetto ad irraggiamenti, ma solo agli stessi cicli di misurazione a cui era soggetto il campione di test.

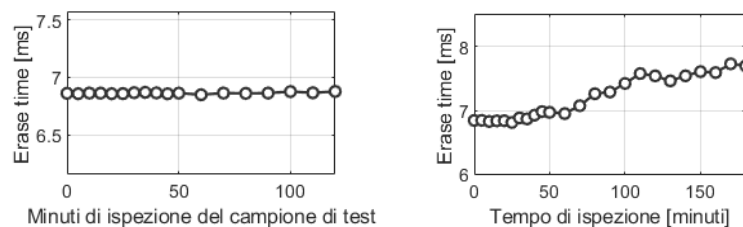


FIGURA 5.3.5 – TEST 1 (SINISTRA), TEST 2 (DESTRA), ENTRAMBI SUL DISPOSITIVO MG6.

Per quanto riguarda l'assorbimento di corrente, si può affermare che, per i tempi di ispezione considerati e nelle condizioni di questo test, gli irraggiamenti sui dispositivi non ne hanno modificato l'assorbimento medio di corrente per le operazioni di lettura, scrittura, cancellazione e standby (da dispositivo selezionato).





## VI. Conclusioni

In quest'ultimo capitolo saranno riportati e comparati i principali risultati ottenuti durante questo studio, lo scopo di questo confronto è quello di valutare la relazione che lega gli effetti delle varie intensità dei raggi-X alle differenti tipologie di dispositivi testati. Sarà dunque più chiara la relazione tra causa ed effetto, inoltre si potrà raggiungere una migliore distinzione tra i diversi comportamenti dei dispositivi in prova e della loro reazione alle ispezioni.

### 6.1 Dipendenza dall'intensità di radiazione

Verranno ora comparati gli effetti riscontrati tra i due test svolti sulle memorie di tipo **MG (25nm)**, essendo esse le uniche tra quelle testate ad aver riscontrato variazioni comparabili in entrambi i test con irraggiamento. Saranno analizzati gli effetti riscontrati sulla ritenzione del dato e sulla variazione delle performance, non verranno discussi gli effetti sull'assorbimento medio di corrente, in quanto non sono state registrate variazioni percettibili sui dispositivi.

#### *Effetti sulla ritenzione del dato:*

Separando la quantità di *bit-errors* generata dagli irraggiamenti da quella generatasi in condizioni standard, come illustrato nei precedenti capitoli, si ottengono delle curve molto simili tra i due test ma con tasso di crescita differente.

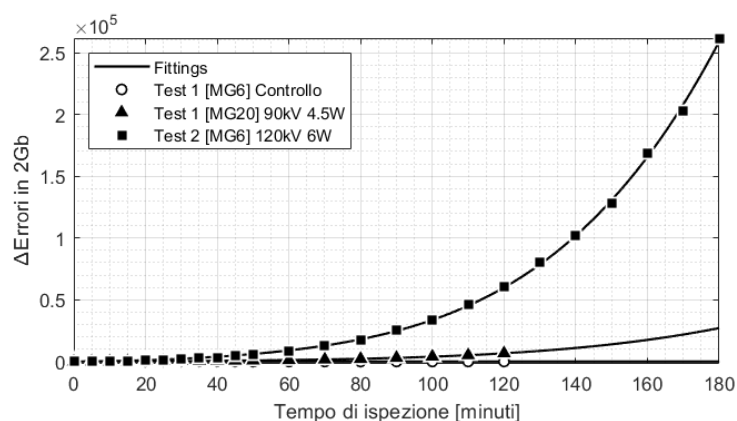


FIGURA 6.1.1 – NUMERO MEDIO DI BIT-ERRORS GENERATI DAGLI IRRAGGIAMENTI NEI TEST SVOLTI.

Dal Grafico di Figura 6.1.2 si evince che irradiando i dispositivi con fotoni ad energia maggiore, è sufficiente un tempo di esposizione minore per raggiungere il limite minimo stabilito per l'ECC.

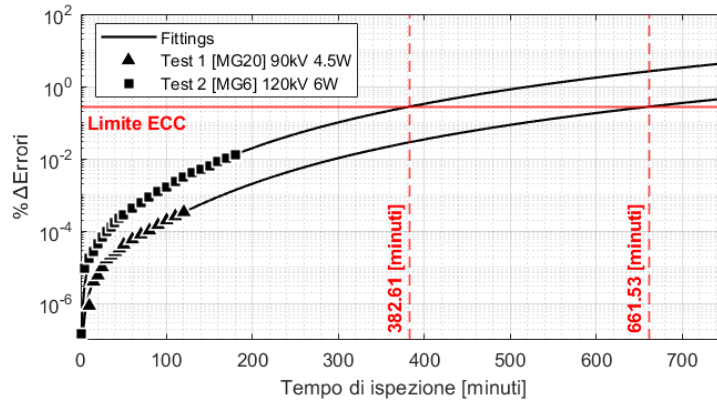


FIGURA 6.1.2 – PERCENTUALE D'ERRORE GENERATA DAGLI IRRAGGIAMENTI NEI DISPOSITIVI MG.

Si può dunque concludere che, anche a parità di tempo di irraggiamento del dispositivo, il numero di errori che si generano in un'area di memoria contenente dati, sia maggiore per fasci di fotoni ad energia maggiore.

**Effetti sulle prestazioni:**

Per le dosi e le intensità di radiazione testate in questo studio, si può confermare che le performance dei dispositivi con tecnologia costruttiva a 25nm risentano degli irraggiamenti nelle operazioni di cancellazione. Dai grafici di Figura 6.1.6 si può inoltre notare la dipendenza anche dall'energia del fascio, in particolar modo possiamo vedere che il tempo di cancellazione di un blocco di memoria rimanga pressoché invariato per il test a 90kV mentre aumenta per quello a 120kV.

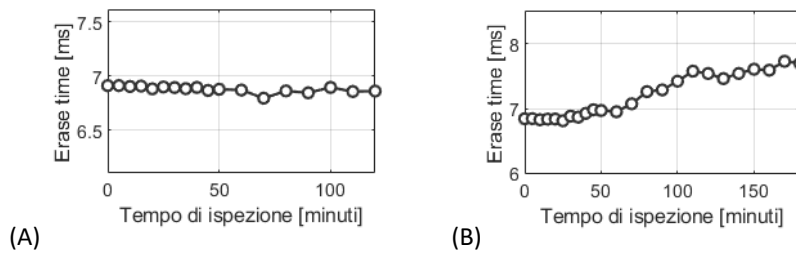


FIGURE 7 – TEMPIO MEDIO DI CANCELLAZIONE PER BLOCCO NEI DUE TEST: 90kV (A), 120kV (B).

## 6.2 Dipendenza dalla tecnologia costruttiva

Dai risultati ottenuti è possibile vedere come tecnologie costruttive differenti risentano in modo diverso dell'impatto dei fotoni ionizzanti. Osservando i grafici dei precedenti capitoli si può subito vedere come le tecnologie costruttive più datate siano quelle meno soggette agli effetti delle ispezioni. Le memorie di tipo MA (90nm) non hanno subito alcun tipo di effetto per quanto riguarda la ritenzione del dato, prestazioni e assorbimento di corrente; I dispositivi MB (65nm) hanno subito perdita di dati in ritenzione dopo un lungo periodo di esposizione, sono inoltre state misurate delle sezioni crescenti e decrescenti nei tempi di cancellazione ma esse rientrano nel range di variazione misurato durante il primo test sul campione di controllo, non sono quindi univocamente riconducibili agli effetti degli irraggiamenti; Le memorie di tipo MG (25nm) hanno subito variazioni nel numero di *bit-errors* già a basse dosi di radiazione per poi divenire molto elevate a dosi maggiori, è poi stata riscontrata anche una chiara modifica dei tempi di cancellazione del dato che presenta un andamento crescente al crescere del tempo di ispezione del campione.

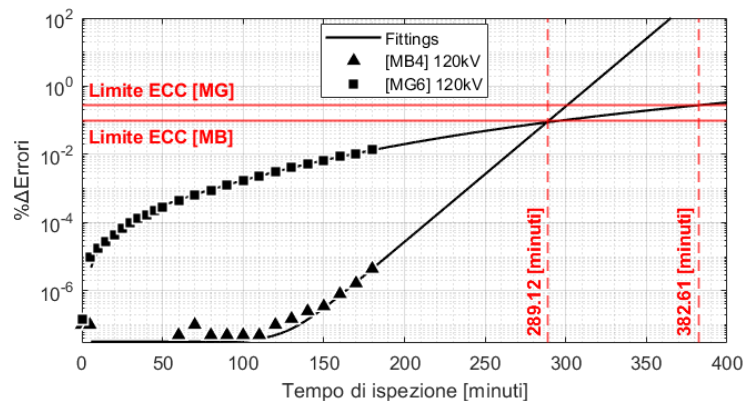


FIGURA 6.2.1 – COMPARAZIONE DEGLI EFFETTI DELLE ISPEZIONI SU DISPOSITIVI DIFFERENTI.

Nella Figura 6.2.1 vengono rappresentati il numero medio di errori generati dagli irraggiamenti sui dispositivi MG6 e MB4 durante il secondo test (120kV; 6W), Per separare il numero di errori di ritenzione in condizioni standard da quello generato dalle ispezioni nel dispositivo MB4, è stato sottratto dal numero di errori il valore

medio di quest'ultimi nelle prime fasi di test, ottenendo così le misure indicate ( $\Delta\text{Errori}$ ), esse sono ora comparabili a quelle ottenute per l'altro dispositivo, questo è ovviamente stato fatto in egual modo anche al sistema di fitting implementato, in quanto non è stata trovata in precedenza una crescita del numero di errori in condizioni standard analizzando il comportamento del dispositivo.

Come mostrato nel quinto capitolo, l'incremento di *bit-errors* nei dispositivi a 25nm segue un andamento del tipo  $\Delta\text{Errori}_{MG} \cong a \cdot t^4 + b \cdot t^3 + c \cdot t^2$ , mentre i dispositivi a 65nm seguono una funzione del tipo  $\Delta\text{Errori}_{MB} \cong a \cdot e^{b \cdot t} + c$ , dove sono stati indicati con “*a b c*” i parametri di fitting e con “*t*” il tempo di esposizione dei campioni.

### 6.3 Bit-errors su celle condivise

Il *datasheet* dei dispositivi MG indica la numerazione specifica delle pagine condivise, ovvero quelle pagine logiche di memoria i cui bit condividono la stessa cella. Supponendo che, tra due pagine condivise, la stessa numerazione di byte e bit faccia corrispondere univocamente i bit logici sulle stesse celle fisiche, è stato redatto un programma che analizzi l'output di una delle letture eseguite sulla *sezione R* dei dispositivi per ciascun ciclo di misura, e conti tra i *bit-errors* registrati quelli che condividono la stessa cella di memoria, questi vengono rappresentati graficamente nella Figura 6.0.1 e Figura 6.02. La variabilità che si presenta tra una misurazione e la successiva è data dal fatto che queste non rappresentano una media sul numero di letture eseguite ma sui dati di singole letture, esse, come visto nel terzo capitolo, presentano una certa variabilità dovuta a diversi fattori, da cui deriva il rumore di misura appena descritto. Si può però notare da questi grafici una tendenza alla diminuzione del numero di errori da due bit dopo l'esposizione ai raggi-X, nonostante il complessivo aumento del numero di errori che essa causa. Questa riduzione potrebbe intuitivamente essere data dalla modifica della tensione di soglia delle celle contenenti errori, queste infatti potrebbero non avere una tensione di soglia rientrante in modo molto definito in uno dei quattro ragne descrittivi per la rappresentazione del dato, una variazione data dall'interazione con

i fasci di fotoni ad alta energia potrebbe avere meno probabilità di generare due errori, visto che questo accade quando la tensione di soglia rientra solo in uno dei quattro possibili range di valori. Essendo il numero iniziale di errori generato in un modo differente da quelli indotti dalle radiazioni, si potrebbe semplicemente considerare inferiore la probabilità che i raggi-X generino errori a doppio bit rispetto a quella che li genera inizialmente, da cui l'interazione casuale appena descritta ne abbasserebbe il numero totale interagendo nel complesso anche con le celle che presentano già due errori; Questa però è solamente un'ipotesi che è stata avanzata osservando i risultati.

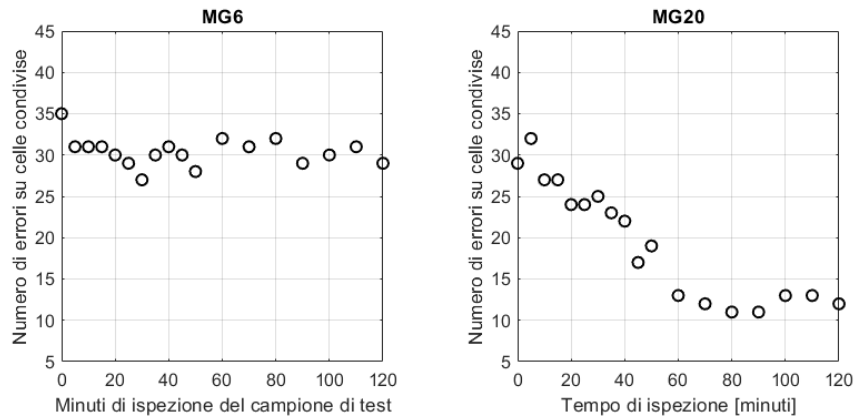


FIGURA 6.0.1 – NUMERO DI ERRORI CONDIVISI DURANTE IL PRIMO TEST (DESCRITTO NEL CAPITOLO 4).

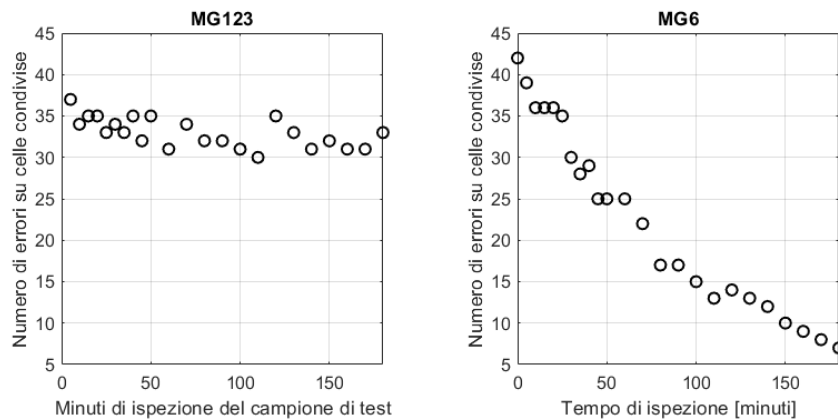


FIGURA 6.0.2 – NUMERO DI ERRORI CONDIVISI DURANTE IL SECONDO TEST (DESCRITTO NEL CAPITOLO 5).



## Riferimenti

- [1] Stefan Ilić, Aleksandar Jevtić, Srboľjub Stanković, Goran Ristić, «Floating-Gate MOS Transistor with Dynamic Biasing as a Radiation Sensor».
- [2] Muhammad Hamza El-Saba, «Introduction to Digital Design & Synthesis».
- [3] UNIPD. Matteo Meneghini. Slides del corso: "Optoelectronic and photovoltaic devices", «Quantum mechanics – Fundamentals», AA 2022-2023.
- [4] Mark White, Joseph B. Bernstein, «Microelectronics Reliability: Physics-of-Failure Based Modeling and Lifetime Evaluation».
- [5] Matthew J. Marinella, «Radiation Effects in Advanced and Emerging Nonvolatile Memories».
- [6] Yu Cai, Erich F. Haratsch, Onur Mutlu, Ken Mai, «Error Patterns in MLC NAND Flash Memory: Measurement, Characterization, and Analysis».
- [7] Micron Technology® Inc., «NAND Flash 101: An Introduction to NAND Flash and How to Design It In to Your Next Product», n. 09005aef8245f460.
- [8] Micron Technology® Inc., «NAND Flash Memory: 4Gb, 8Gb, and 16Gb x8 NAND Flash Memory», n. 09005aef81b80e13.
- [9] Micron Technology® Inc., «NAND Flash Memory: 32Gb, 64Gb, 128Gb Asynchronous/Synchronous NAND», n. 09005aef844335a5.
- [10] Micron Technology® Inc., «NAND Flash Memory MLC: 8Gb, 16Gb, and 32Gb: x8 NAND Flash Memory», n. 09005aef828313aa.
- [11] UNIPD. Simone Gerardin, Marta Bagatin. Slides del corso: "Quality and Reliability in Electronics", «Laboratory - Flash Memories (v1.3)», AA 2022-2023.
- [12] Nordson Dage, «XD Series X-ray Microscope: Users Guide. V21.3», Dicembre 2014.
- [13] «AnkPlanet», [Online]. Available: <https://ankplanet.com/physics/modern-physics/x-ray/coolidge-x-ray-tube/>. [Consultato il giorno 05 01 2024].
- [14] Sangeetha Prabhu, Divya Kumari Naveen, Sandhya Bangera, Subrahmanya Bhat B, «Production of X-RAYS using X-RAY Tube».
- [15] Iowa State University, «Center for Nondestructive Evaluation», [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/Physics/X-Ray/attenuationCoef.xhtml>. [Consultato il giorno 11 01 2024].
- [16] Iowa State University, «Center for Nondestructive Evaluation», [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/Physics/X-Ray/GeometricUnsharp.xhtml>. [Consultato il giorno 11 01 2024].

- [17] Iowa State University, «Center for Nondestructive Evaluation», [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/Physics/X-Ray/attenuation.xhtml>. [Consultato il giorno 12 01 2024].
- [18] Halit Dogan, Md Mahbub Alam, Navid Asadizanjani, Sina Shahbazmohamadi, Domenic Forte, Mark Tehranipoor, «Analyzing the Impact of X-ray Tomography on the Reliability of Integrated Circuits», Novembre 2015.
- [19] S. Gerardin, M. Bagatin, A. Paccagnella, K. Grürmann, F. Gliem, T. R. Oldham, F. Irom, D. N. Nguyen, «Radiation Effects in Flash Memories», 2013.
- [20] Karel Dušek, David Bušek, Petr Veselý, «Overview of Selected Issues Related to Soldering».
- [21] Anju Sharma, Preeth Sivakumar, Andrew Feigel, In Tae Bae, Lawrence P. Lehman, «Effects of x-ray exposure on NOR and NAND flash memories during high-resolution 2D and 3D x-ray inspection», 2016.
- [22] «Curve Fitting with X and Y Uncertainties», [Online]. Available: <https://curve.fit/>. [Consultato il giorno 02 03 2024].



## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare il mio relatore, Simone Gerardin e la correlatrice Marta Bagatin, per la loro preziosa guida e supporto durante la stesura di questa tesi.

Un sentito ringraziamento va al mio tutor, Andrea Bevilacqua, ed al personale di EAS Elettronica per l'opportunità di tirocinio e per il loro sostegno.

Grazie ai miei compagni di università per aver reso questa esperienza così significativa e per aver condiviso gioie, sfide e momenti di crescita durante questo percorso accademico.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori per aver reso possibile tutto questo, per il loro sostegno incondizionato e per il costante incoraggiamento lungo tutto il percorso universitario.

Infine, un ultimo importante ringraziamento va alla mia ragazza, Lisa, per il suo amore e il suo supporto.

Il vostro contributo è stato fondamentale per il completamento di questo lavoro.  
Grazie per tutto.