



Università degli Studi di Bergamo

SCUOLA DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica
Classe n. L-8 Ingegneria dell'informazione (D.M. 270/04)

Studio della tolleranza alle radiazioni ionizzanti di MOSFET in tecnologia 28nm

Candidati

Nicola Cattaneo

Matricola 1081073

Emilio Meroni

Matricola 1080976

Relatore

Prof. Gianluca Traversi

Anno Accademico 2023–2024

Indice

1	Il transistor MOSFET	3
1.1	Transistore MOSFET	3
1.2	Effetti delle radiazioni sui transistori MOSFET	3
1.2.1	Ionizzazione	4
1.2.2	Misurazione della dose	4
2	Studio sperimentale	5
2.1	Variazione della tensione di soglia	5
2.1.1	TCM	6
2.1.2	SDLM	12
2.1.3	ELR	16
2.1.4	RM	20
2.2	Variazione della transconduttanza	24
2.2.1	Calcolo della transconduttanza	25
2.3	Variazione della corrente di leakage	26
2.4	Variazione della corrente I_{on}	26
2.5	Guadagno Intrinseco	26

Elenco delle figure

2.1	Applicazione TCM senza fit polinomiale	6
2.2	Applicazione TCM con fit polinomiale di sesto grado	7
2.3	Dati ΔV_{th} estratti con TCM	11
2.4	Applicazione SDLM senza fit polinomiale	12
2.5	Confronto SDLM tra diversi fit polinomiali a diversi gradi	14
2.6	Dati ΔV_{th} estratti con SDLM	16
2.7	Applicazione ELR	17
2.8	Dati ΔV_{th} estratti con ELR	20
2.9	Applicazione RM	21
2.10	Dati ΔV_{th} estratti con RM	24
2.11	Confronto g_m senza utilizzo di smooth e con utilizzo di smooth	25
2.12	Dati g_m estratti pre-irraggiamento	28
2.13	Dati $\Delta g_m\%$ al variare della dose	29
2.14	Variazione del guadagno intrinseco pre e pos irraggiamento	30

Introduzione

Capitolo 1

Il transistor MOSFET

Fare una introduzione al capitolo

titolo temporaneo(?)

In questo capitolo si daranno le principali informazioni necessarie per i capitoli successivi.

1.1 Transistore MOSFET

Scrivere sui mosfet

1.2 Effetti delle radiazioni sui transistori MOSFET

Gli effetti principali delle radiazioni su dispositivi elettronici possono essere di due categorie[3]:

- Ionizzazione, generazione di coppie elettroni-lacune($e - h$)
- Danni da spostamento, dislocazione degli atomi dai loro siti reticolari.

Mentre il danno da spostamento (DD) non è molto rilevante sui MOSFET, la ionizzazione può comportare variazioni dei parametri elettrici, come: guadagno e tensione di soglia, per questo motivo ci concentreremo solo su gli effetti della ionizzazione.

Il passaggio di una particella ionizzante, all'interno della materia, comporta una perdita di energia. Questa dissipazione può essere formalizzata come:

$$\Delta E = \Delta E_{\text{elettronica}} + \Delta E_{\text{nucleare}}$$

Perdita di energia elettronica e di energia nucleare, la prima è dovuta dalle interazioni con gli elettroni negli atomi, mentre la seconda è causata dalle interazioni con i nuclei degli atomi. Gran parte dell'energia persa è elettronica, occasionalmente avvengono *collisioni forti* tali da creare frammenti nucleari, pertanto la perdita di energia totale è una buona approssimazione della perdita dell'energia elettronica[2].

1.2.1 Ionizzazione

La perdita di energia elettronica nei semiconduttori provoca la ionizzazione, creazione di coppie elettrone-lacuna ($e-h$). Esiste una proporzionalità diretta tra il numero di coppie $e-h$ e l'energia elettronica persa da parte della particella, per esempio, nel silicio si ha una costante di $\frac{1}{3.6eV}$ mentre per SiO_2 è di $\frac{1}{18eV}$ [2].

L'effetto di ionizzazione è diverso nei semiconduttori e nei isolanti, una differenza è che l'effetto si accumuli o si dissipi rapidamente. Negli isolanti, come l'ossido di gate dei transistori MOSFET, è presente l'effetto cumulativo. Gli elettroni, liberati da una particella ionizzante, si possono muovere più facilmente soprattutto grazie a effetti di campo dovuti, ad esempio, a polarizzazioni. Al contrario le lacune sono molto meno mobili, dai 5 ai 12 ordini di grandezza inferiori rispetto agli elettroni. La maggior parte delle lacune riesce a sopravvivere alla ricombinazione con gli elettroni, creando perciò una carica positiva vicino alla giunzione Si/SiO_2 , con uno degli effetti di diminuire la tensione di soglia del MOSFET a canale P. Mentre negli NMOS dopo aver subito bassi dosaggi, inferiori a $10Mrad$, si può notare un abbassamento della tensione di soglia e un innalzamento per dosi superiori.

Spiegare perché fa così

Un'altro effetto presente solo negli NMOS è quello della formazione di un transistor parassita[1], questo effetto è dovuto all'aumento delle cariche positive nella *shallow trench isolation* (STI) comportando un aumento degli elettroni nel substrato, che a loro volta, creano un canale conduttivo tra source e drain, aggirando quello principale; questo collegamento fa sì che possa esserci un flusso di corrente, anche quando il dispositivo è polarizzato con una $V_{GS} \approx 0$.

La ricottura dell'ossido (*oxide anneals*) è una procedura volta a ripristinare, almeno in parte, le caratteristiche del MOSFET a seguito di dose assorbita. Consiste nel neutralizzare le lacune scaldando il dispositivo facendo sì che gli elettroni presenti acquisiscano abbastanza energia per potersi ricombinare con le lacune. La procedura di annealing che abbiamo eseguito sui nostri dispositivi è stata di portarli ad una temperatura di $100^\circ C$ e mantenerla per ventiquattro ore. La ricottura può avvenire anche a temperatura ambiente, ma probabilmente i tempi sarebbero molto lunghi, anche anni[2].

1.2.2 Misurazione della dose

La quantità di radiazioni ionizzanti assorbite da un materiale viene chiamata TID (*total ionizing dose*) ed è espressa in energia su unità di massa. La TDI normalmente è misurata in rad^1 , definito come $100 erg^2$ per grammo di materiale, oppure, accolto dal sistema internazionale, in gray(Gy) dove $1Gy = 100rad = 1 \frac{J}{Kg}$. Essendoci una dipendenza tra quantità di energia persa e il materiale su cui essa si sta depositando, spesso insieme all'unità di misura, si indica anche il materiale, ad esempio, nel caso del diossido di silicio si indicherà come $rad(SiO_2)$.

¹Radiation absorbed dose

²Unità di lavoro corrispondente a $10^{-7} J$

Capitolo 2

Studio sperimentale

In questo capitolo si tratteranno i parametri statici di transistori *MOS* in tecnologia *28nm* per comprendere come variano le prestazioni statiche all'aumentare dell'irraggiamento subito. Si tratteranno:

- Tensione di soglia
- Transconduttanza
- Corrente di leakage
- Corrente I_{on}
- Guadagno Intrinseco

Aggiungere i
parametri statici
che studieremo

2.1 Variazione della tensione di soglia

La tensione di soglia V_{th} di un transistor MOS è definita come quella tensione tra gate e bulk per la quale la popolazione di minoritari all'interfaccia è uguale alla popolazione di maggioritari nel bulk. Questa definizione non può essere usata direttamente per il calcolo della tensione di soglia dei dispositivi, ma si deve passare attraverso l'analisi delle caratteristiche corrente-tensione dei dispositivi.

Per l'estrazione del parametro V_{th} esistono numerosi metodi[4], la scelta è solitamente dettata da un compromesso che si deve trovare fra complessità della procedura di estrazione della soglia e risultato ottenuto per la specifica applicazione. Per questo studio sono stati presi in considerazione:

- *Transconductance Change Method (TCM)*;
- *Second Difference of the Logarithm of the drain current Minimum method (SDLM)*;
- *Extrapolation in the Linear Region method (ELR)*;
- *Ratio Method (RM)*.

Per il nostro studio, però, non si è solo interessati al valore in sé della tensione di soglia dei dispositivi, ma anche a come questa varia all'aumentare dell'irraggiamento. Dunque, per ogni metodo non ci si ferma all'estrazione della V_{th} dei dispositivi non irraggiati, ma

la si estrae anche dopo ogni step d'irraggiamento e, per ciascuno di questi, si calcola la $\Delta V_{th} = V_{th,Irraggiato} - V_{th,nonIrraggiato}$. La scelta di quale metodo usare per le analisi successive viene presa sulla qualità del parametro ΔV_{th} .

2.1.1 Transconductance Change Method

Il *Transconductance Change Method*, *TCM*, definisce la tensione di soglia come la tensione di gate-source V_{GS} corrispondente al picco massimo della derivata della transconduttanza g_m rispetto alla tensione di gate ($\frac{dg_m}{dV_{GS}}$) ed è valido per bassi valori della tensione V_{DS} . Questa definizione si basa sul fatto che, quando il dispositivo passa dalla regione di debole inversione alla regione di forte inversione, la dipendenza della corrente di drain rispetto a V_{GS} passa dall'essere esponenziale all'essere lineare. La transconduttanza è definita come la derivata prima della corrente I_D rispetto alla tensione V_{GS} , dunque la derivata della g_m corrisponde alla derivata seconda di I_D . Per questo motivo, il massimo di $\frac{dg_m}{dV_{GS}}$ coincide con la tensione alla quale il grafico della corrente passa dalla forma esponenziale a quella lineare. Se V_{DS} è piccola, la tensione per la quale la g_m è massima è molto simile a V_{th} .

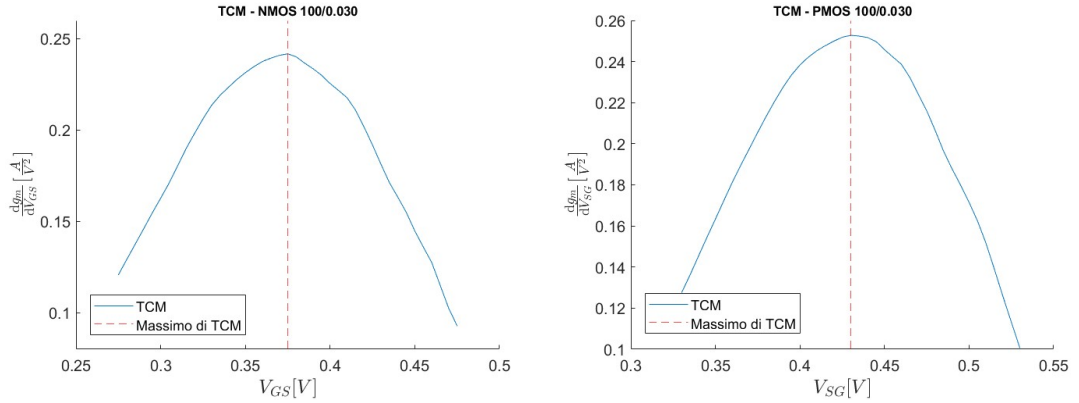


Figura 2.1: Esempio di *TCM* usato su un dispositivo NMOS e un dispositivo PMOS di dimensioni 100-0.030 a $V_{DS} = 150mV$

Per calcolare il *TCM* si deve trovare il massimo di una funzione, ovvero calcolarne la derivata prima. In questo caso si tratta in realtà di una derivata seconda, essendo già g_m calcolato con una derivata. Il calcolo della derivata non è effettuato su una funzione continua ma su dati misurati con uno step di $5mV$ di V_{GS} . Questo fa sì che la derivata prima e in modo maggiore la derivata seconda, siano affette da vere e proprie variazioni repentine dovute alla natura granulare dei dati e non da fenomeni fisici. È quindi necessario rendere la funzione studiata meno dipendente da questo effetto. Inoltre, come detto in precedenza, la risoluzione con la quale sono state fatte le misure della corrente di drain è $5mV$ (di V_{GS}). Pertanto, con questo metodo si estrarrebbe una soglia che avrebbe una risoluzione di $5mV$, del tutto inaccettabile in quanto sarebbe maggiore delle variazioni di soglia che potrebbero essere indotte dall'irraggiamento. Per far fronte

a questi due problemi, si è scelto di non tenere conto del massimo direttamente ottenuto dallo studio di $\frac{dg_m}{dV_{GS}}$ ottenuto dai valori delle misure, ma d'interpolare prima i punti del grafico con una funzione polinomiale e, di ricavare il valore di soglia da questa funzione.

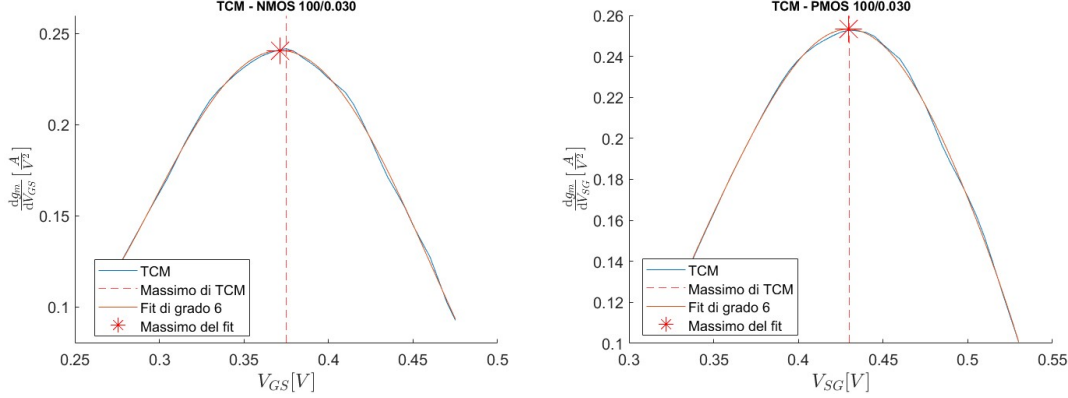


Figura 2.2: Esempio di *TCM* con fit polinomiale usato su un dispositivo NMOS e un dispositivo PMOS di dimensioni 100-0.030 a $V_{DS} = 150mV$

Lo studio del fit polinomiale risolve il problema della bassa risoluzione di misura, ma presenta una potenziale nuovo problema: il valore della V_{th} calcolata potrebbe variare significativamente al variare del grado della funzione polinomiale interpolante. Per capire l'effetto del grado della funzione interpolante sul valore di tensione di soglia estratto, si sono effettuate le estrazioni considerando i gradi 2, 4, 6 e 8 e si sono studiati i risultati ottenuti. Lo studio si è effettuato su dispositivi PMOS. Una volta scelto il valore del grado della funzione, lo stesso grado sarà utilizzato anche per l'estrazione della tensione di soglia degli NMOS.

Osservando i valori nella tabella 2.1, si può notare che la tensione di soglia ottenuta non varia molto nel caso dei fit fatti con polinomiali di grado 4, 6 e 8: è raro che la differenza tra questi valori superi $1mV$. Non si può dire la stessa cosa per le V_{th} calcolate con fit di grado 2: in questo caso la funzione interpolante ha un grado troppo basso per seguire in modo coerente la curva $\frac{dg_m}{dV_{GS}}$ e quindi il massimo risulta essere molto diverso da quelli calcolati con fit di grado maggiore. Dunque, al fine di fittare al meglio la curva, si è scelto un fit polinomiale di grado 6. In Tabella 2.2 e 2.3 sono riportati i risultati ottenuti con il metodo *TCM* e fit polinomiale di grado 6 su dispositivi PMOS¹ e NMOS pre e post irraggiamento. Mentre nelle tabelle 2.4, 2.5 e nei grafici a figura 2.3 vengono riportati i valori della ΔV_{th} in funzione della dose assorbita².

¹Per i PMOS viene indicata la $|V_{th}|$

²La ΔV_{th} riportata per i PMOS è da intendersi come: $\Delta V_{th} = |V_{th_{post}}| - |V_{th_{pre}}|$

Dispositivo	$V_{th}[mV]$ con interpolante di grado:			
	2	4	6	8
100 - 0.030	426.9	429.4	429.4	430.8
100 - 0.060	467.6	469.5	469.3	468.9
200 - 0.030	397.8	399.7	399.3	399.8
200 - 0.060	452.2	454.1	453.5	453.5
200 - 0.180	495.6	495.6	495.3	495.5
600 - 0.030	383.0	387.4	385.9	386.2
600 - 0.060	431.1	434.3	434.7	435.6
600 - 0.180	478.5	480.8	480.6	480.0

Tabella 2.1: Confronto dei valori di V_{th} dei dispositivi PMOS ottenuti con *TCM* con fit polinomiale di diversi gradi

Dispositivo	$V_{th}[mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	371.3	370.6	361.0	380.6	378.7	375.1	371.1	367.1	372.4
100 - 0.060	405.0	399.9	390.0	419.8	418.8	414.0	412.8	416.6	421.6
100 - 0.180	476.0	472.4	459.5	491.9	491.2	492.0	491.1	501.9	508.6
200 - 0.030	359.5	357.9	348.1	369.2	367.0	363.8	361.7	363.6	368.5
200 - 0.060	402.2	398.3	385.0	415.5	413.7	412.3	411.0	416.7	423.0
200 - 0.180	466.4	463.5	451.8	484.6	483.8	486.5	487.0	500.3	510.1
600 - 0.060	370.2	364.4	359.3	379.5	381.0	378.1	377.2	380.1	386.7
600 - 0.180	449.6	447.9	430.7	458.8	458.4	458.9	458.4	469.2	478.5

Tabella 2.2: V_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *TCM*

2.1 Variazione della tensione di soglia

Dispositivo	$ V_{th} [mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	429.4	430.7	432.2	434.4	439.0	452.6	459.4	485.6	465.2
100 - 0.060	469.3	469.6	471.4	472.7	479.7	491.8	500.8	533.0	513.4
200 - 0.030	399.3	401.0	403.1	404.8	410.2	422.3	429.8	450.1	431.1
200 - 0.060	453.5	455.2	456.2	458.6	463.8	476.9	485.8	514.9	493.6
200 - 0.180	495.3	497.1	503.9	506.5	511.3	524.1	535.3	576.2	557.6
600 - 0.030	385.9	386.6	388.8	391.0	394.5	405.5	412.3	436.5	416.2
600 - 0.060	434.7	435.4	438.5	438.9	445.6	458.4	467.8	500.4	478.9
600 - 0.180	480.6	481.5	483.7	486.0	492.0	507.2	519.6	564.1	537.1

Tabella 2.3: $|V_{th}|$ dei dispositivi PMOS estratte con *TCM*

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	-0.7	-10.3	9.3	7.4	3.8	-0.2	-4.2	1.1
100 - 0.060	-5.1	-15.0	14.8	13.8	9.0	7.8	11.6	16.6
100 - 0.180	-3.6	-16.5	15.9	15.2	16.0	15.1	25.9	32.6
200 - 0.030	-1.6	-11.4	9.7	7.5	4.3	2.2	4.1	9.0
200 - 0.060	-3.9	-17.2	13.3	11.5	10.1	8.8	14.5	20.8
200 - 0.180	-2.9	-14.6	18.2	17.4	20.1	20.6	33.9	43.7
600 - 0.060	-5.8	-10.9	9.3	10.8	7.9	7.0	9.9	16.5
600 - 0.180	-1.7	-18.9	9.2	8.8	9.3	8.8	19.6	28.9

Tabella 2.4: ΔV_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *TCM*

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	<i>5Mrad</i>	<i>50Mrad</i>	<i>100Mrad</i>	<i>200Mrad</i>	<i>600Mrad</i>	<i>1Grad</i>	<i>3Grad</i>	annealing
100 - 0.030	1.3	2.8	5.0	9.6	23.2	30.0	56.2	35.8
100 - 0.060	0.3	2.1	3.4	10.4	22.5	31.5	63.7	44.1
200 - 0.030	1.7	3.8	5.5	10.9	23.0	30.5	50.8	31.8
200 - 0.060	1.7	2.7	5.1	10.3	23.4	32.3	61.4	40.1
200 - 0.180	1.8	8.6	11.2	16.0	28.8	40.0	80.9	62.3
600 - 0.030	0.7	2.9	5.1	8.6	19.6	26.4	50.6	30.3
600 - 0.060	0.7	3.8	4.2	10.9	23.7	33.1	65.7	44.2
600 - 0.180	0.9	3.1	5.4	11.4	26.6	39.0	83.5	56.5

Tabella 2.5: ΔV_{th} dei dispositivi PMOS estratte con *TCM*

2.1 Variazione della tensione di soglia

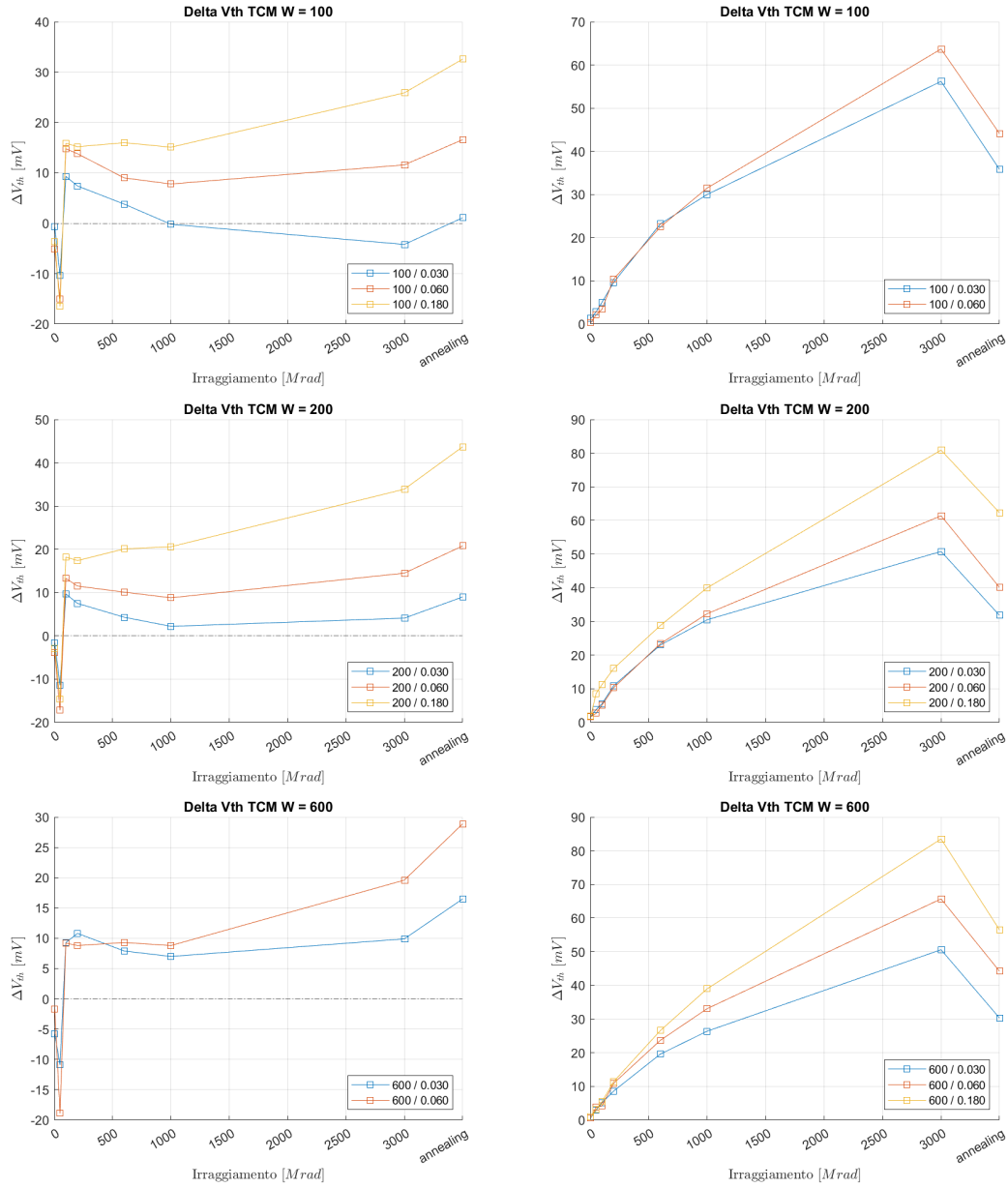


Figura 2.3: Variazioni di V_{th} dei dispositivi NMOS (a sinistra) e PMOS (a destra) estratte con TCM in funzione della dose assorbita. Ogni figura si riferisce a una larghezza di canale W differente. Raggruppate per dimensione dello spessore dei dispositivi

2.1.2 Second Difference of the Logarithm of the drain current Minimum method

Il secondo metodo analizzato è il *Second Difference of the Logarithm of the drain current Minimum method*, *SDLM*. Questo metodo definisce la V_{th} come la tensione V_{GS} per la quale si ha il picco minimo della derivata seconda del logaritmo naturale di I_D rispetto alla tensione di gate ($\frac{d^2 \ln I_D}{dV_{GS}^2}$) e vale solo per alti valori di V_{DS} [5].

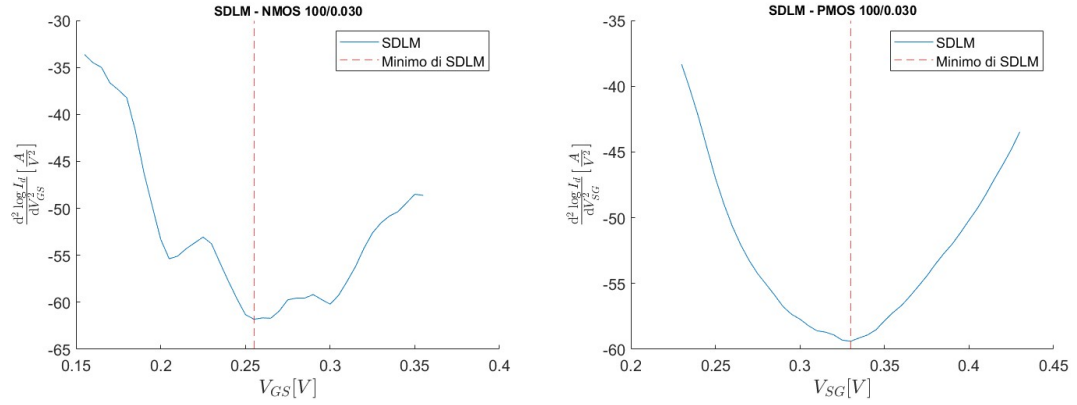


Figura 2.4: Esempio di *SDLM* usato su un dispositivo NMOS e un dispositivo PMOS di dimensioni 100-0.030 a $V_{DS} = 900mV$

Anche per questo metodo si ritrovano le problematiche presenti per il *TCM*: si deve fare il fit di una curva ottenuta come derivata seconda e inoltre la risoluzione della V_{GS} è $5mV$. Quindi, anche per questo metodo, abbiamo deciso d'interpolare la funzione ottenuta con una polinomiale e considerare il minimo di quest'ultima.

Prendendo in considerazione i dati presenti nella tabella 2.6, si nota come V_{th} assume valori molto diversi a seconda del grado della polinomiale interpolante. Nella maggior parte dei casi, le tensioni di soglia ottenute con polinomiali di grado basso (2 e 4) cambiano molto tra loro e rispetto a quelle ottenute con polinomiali di grado alto (6 e 8), mentre le misure ottenute con queste ultime sono, in genere, molto simili tra loro. Ad esempio, osservando i grafici relativi alla *SDLM* del PMOS 200-0.030 (figura 2.5), si può notare che il plot della funzione $\frac{d^2 \ln I_D}{dV_{GS}^2}$ ha un andamento che non viene interpolato in modo preciso da polinomiali di basso grado: per questo i valori minimi si discostano parecchio dai minimi ottenuti con polinomiali di grado maggiore. Risulta pertanto necessario estrarre le tensioni di soglia utilizzando una funzione polinomiale di grado 6.

Di seguito si riportano i valori delle V_{th} e delle ΔV_{th} , per i dispositivi NMOS: tabelle 2.7 e 2.9, e per i PMOS³: tabelle 2.8 e 2.10. Mentre in figura 2.6 si riportano i grafici che mostrano l'andamento della variazione della tensione di soglia (ΔV_{th}), in funzione della dose assorbita.

³Per i PMOS viene indicato il modulo della V_{th} e per il calcolo della variazione si utilizza: $\Delta V_{th} = |V_{th_{post}}| - |V_{th_{pre}}|$.

2.1 Variazione della tensione di soglia

Dispositivo	$ V_{th} [mV]$ con interpolante di grado:			
	2	4	6	8
100 - 0.030	332.0	322.3	323.5	327.2
100 - 0.060	423.1	416.1	411.6	411.7
200 - 0.030	303.2	298.8	296.5	296.7
200 - 0.060	413.1	404.4	404.9	405.0
200 - 0.180	460.4	453.5	449.3	448.7
600 - 0.030	296.0	291.4	289.7	298.1
600 - 0.060	398.3	393.3	391.8	389.6
600 - 0.180	454.7	446.7	441.4	441.3

Tabella 2.6: Confronto dei valori di $|V_{th}|$ dei dispositivi PMOS ottenuti con *SDLM* con fit polinomiale di diversi gradi

Dispositivo	$V_{th}[mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	287.7	259.5	271.2	289.8	287.7	278.5	276.4	269.7	275.0
100 - 0.060	356.8	327.2	322.7	360.9	356.8	356.6	352.6	354.6	352.4
100 - 0.180	404.8	381.5	369.1	422.1	404.8	422.1	418.2	433.1	442.5
200 - 0.030	279.7	262.2	269.6	277.9	279.7	267.3	268.5	267.8	268.2
200 - 0.060	355.3	325.4	313.3	357.4	355.3	351.1	348.7	355.7	358.2
200 - 0.180	417.9	378.9	372.5	418.8	417.9	420.1	416.7	436.6	441.5
600 - 0.060	334.4	276.0	304.0	336.1	334.4	332.7	331.6	333.8	336.7
600 - 0.180	417.1	381.5	379.6	418.4	417.1	416.2	414.3	426.7	431.1

Tabella 2.7: V_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *SDLM*

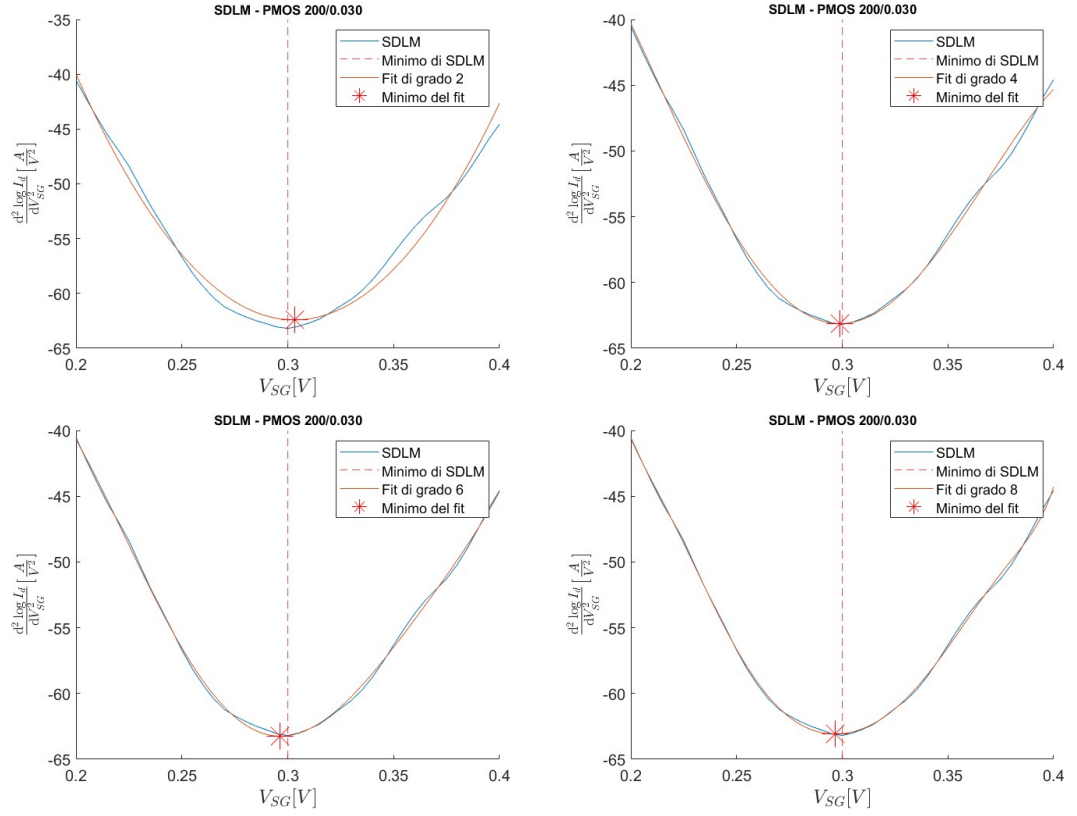


Figura 2.5: Confronto fra differenti fit (al variare del grado della funzione) della curva $\frac{d^2 \ln(I_D)}{dV_{GS}^2}$ per un dispositivo PMOS 200-0.030.

Dispositivo	$ V_{th} [mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	323.5	329.9	327.3	330.7	329.7	343.2	355.8	373.1	354.5
100 - 0.060	411.6	409.9	412.3	415.5	416.8	428.3	435.8	466.9	453.9
200 - 0.030	296.5	292.4	301.7	299.8	304.4	320.0	323.0	345.6	327.0
200 - 0.060	404.9	403.9	405.3	407.3	413.0	422.5	430.9	460.0	442.1
200 - 0.180	449.3	452.1	457.6	456.9	461.9	473.7	482.7	520.4	506.6
600 - 0.030	289.7	293.0	297.3	297.0	299.9	313.1	325.7	345.2	324.0
600 - 0.060	391.8	393.4	397.4	396.8	402.0	415.1	421.2	451.1	432.6
600 - 0.180	441.4	443.4	445.1	444.6	450.9	464.5	474.2	514.2	492.4

Tabella 2.8: $|V_{th}|$ dei dispositivi PMOS estratte con *SDLM*

2.1 Variazione della tensione di soglia

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	-20.2	-8.5	10.1	8.0	-1.2	-3.3	-10.0	-4.7
100 - 0.060	12.1	7.6	45.8	41.7	41.5	37.5	39.5	37.3
100 - 0.180	12.1	-0.3	52.7	35.4	52.7	48.8	63.7	73.1
200 - 0.030	-2.5	4.9	13.2	15.0	2.6	3.8	3.1	3.5
200 - 0.060	-0.6	-12.7	31.4	29.3	25.1	22.7	29.7	32.2
200 - 0.180	7.1	0.7	47.0	46.1	48.3	44.9	64.8	69.7
600 - 0.060	-29.1	-1.1	31.0	29.3	27.6	26.5	28.7	31.6
600 - 0.180	-3.3	-5.2	33.6	32.3	31.4	29.5	41.9	46.3

Tabella 2.9: ΔV_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *SDLM*

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	6.4	3.8	7.2	6.2	19.7	32.3	49.6	31.0
100 - 0.060	-1.7	0.7	3.9	5.2	16.7	24.2	55.3	42.3
200 - 0.030	-4.1	5.2	3.3	7.9	23.5	26.5	49.1	30.5
200 - 0.060	-1.0	0.4	2.4	8.1	17.6	26.0	55.1	37.2
200 - 0.180	2.8	8.3	7.6	12.6	24.4	33.4	71.1	57.3
600 - 0.030	3.3	7.6	7.3	10.2	23.4	36.0	55.5	34.3
600 - 0.060	1.6	5.6	5.0	10.2	23.3	29.4	59.3	40.8
600 - 0.180	2.0	3.7	3.2	9.5	23.1	32.8	72.8	51.0

Tabella 2.10: ΔV_{th} dei dispositivi PMOS estratte con *SDLM*

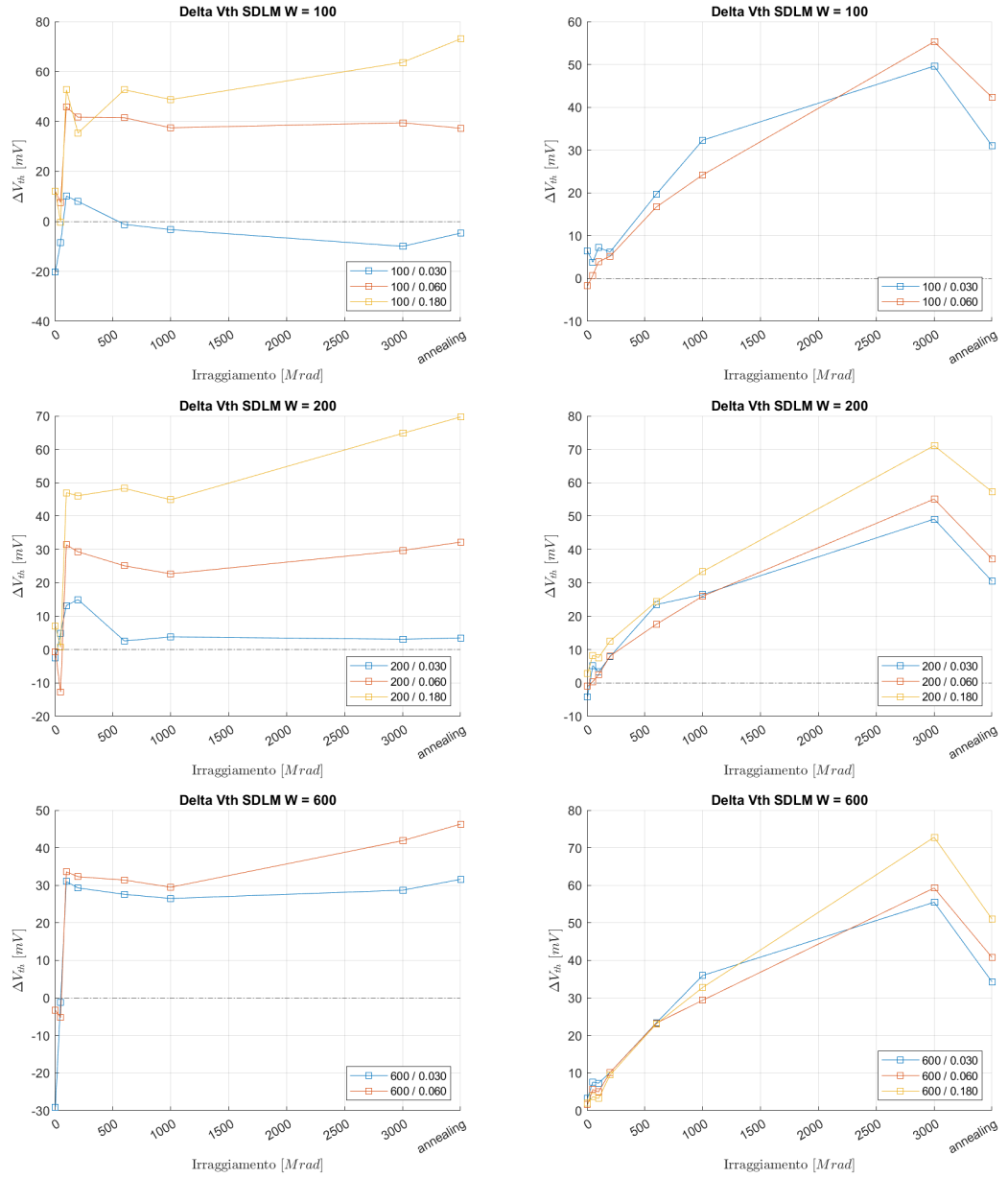


Figura 2.6: Variazioni di V_{th} dei dispositivi NMOS (a sinistra) PMOS (a destra) estratte con *SDLM* in funzione della dose assorbita. Ogni figura si riferisce a una larghezza di canale W differente. Raggruppate per dimensione dello spessore dei dispositivi

2.1.3 Extrapolation in the Linear Region method

Il terzo metodo analizzato è l'*Extrapolation in the Linear Region method*, *ELR*[4]. La tensione di soglia estratta con questo metodo è data dall'intercetta della estrapolazione

lineare della caratteristica $I_D - V_{GS}$ nel suo punto di massima pendenza (cioè il punto di massima transconduttanza, g_m) con l'asse delle ascisse (V_{GS}). Alla tensione così ottenuta, per ottenere la tensione di soglia, si dovrà aggiungere $V_{DS}/2$, dove V_{DS} è la tensione alla quale è stata misurata la caratteristica $I_D - V_{GS}$ interpolata linearmente. Operativamente, il tratto sul quale fare il fit lineare è ottenuto prendendo un determinato intervallo nell'intorno del punto di flesso della $I_D - V_{GS}$.

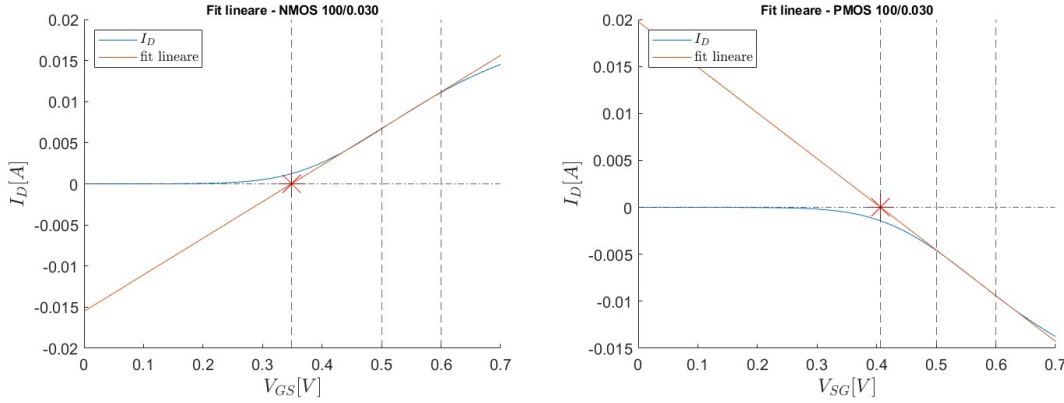


Figura 2.7: Fit lineare della caratteristica $I_D - V_{GS}$ a $V_{DS} = 150mV$ di un NMOS e di un PMOS di dimensioni 100-0.030

Lo svantaggio principale di questo metodo è dato dal fatto che il punto di pendenza massima può essere incerto a causa di possibili effetti quali il degrado della mobilità dei portatori di carica e la possibile presenza di resistenze parassite serie al terminale di source e drain. Nonostante ciò, per il nostro studio questo metodo potrebbe risultare efficace, in quanto non siamo principalmente interessati al valore della tensione di soglia dei dispositivi, ma alla variazione della tensione di soglia a causa delle radiazioni ionizzanti alle quali i dispositivi vengono sottoposti. Dunque gli errori prodotti dalle resistenze parassite e dalla degradazione di mobilità possono essere considerate come un offset che viene eliminato nel momento in cui si calcola la differenza tra la V_{th} pre e post irraggiamento.

È infine doveroso fare una parentesi sulla regione di linearizzazione considerata per questo studio: infatti non è possibile stabilire con certezza una regione fissa in cui la funzione, ottenuta con misure sperimentali, può essere linearizzata. Il metodo da noi applicato è stato quello di analizzare tutti i possibili intervalli di linearizzazione ampi $100mV$ i cui estremi ricadono nell'intervallo $[300mV; 750mV]$ e scegliere quello il cui il fit approssimava meglio la funzione. All'atto pratico abbiamo considerato l'intervallo il cui fit ha il coefficiente di determinazione R^2 più alto, che è risultato essere sempre maggiore di 0.999.

Capitolo 2 Studio sperimentale

Dispositivo	$V_{th}[mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	351.0	348.5	338.8	360.4	358.4	353.1	348.6	346.2	350.1
100 - 0.060	388.8	385.3	373.1	403.8	402.0	398.8	396.0	399.6	404.4
100 - 0.180	465.9	461.6	449.4	482.5	481.7	482.3	481.9	492.9	500.8
200 - 0.030	336.9	334.6	324.6	346.0	344.7	341.3	338.7	340.1	344.5
200 - 0.060	382.9	379.4	366.4	396.6	395.1	393.4	391.6	397.6	403.1
200 - 0.180	454.6	449.8	438.1	471.1	471.0	473.6	474.4	489.5	497.8
600 - 0.060	349.3	347.2	336.7	361.2	361.4	358.1	356.7	359.9	366.0
600 - 0.180	431.8	427.5	412.4	440.6	440.1	440.8	440.4	451.3	460.8

Tabella 2.11: V_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *ELR*

Dispositivo	$ V_{th} [mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	405.8	406.6	408.6	410.1	416.1	429.3	436.6	458.9	440.7
100 - 0.060	452.0	452.9	454.6	456.5	462.9	475.4	484.9	515.9	497.1
200 - 0.030	376.2	377.6	379.3	380.3	386.9	397.5	404.7	426.3	406.6
200 - 0.060	434.6	435.9	437.5	439.3	445.1	458.1	467.2	495.9	474.2
200 - 0.180	482.3	483.5	490.3	492.4	498.5	511.5	522.6	562.3	543.2
600 - 0.030	359.4	360.9	362.5	364.6	370.1	379.8	387.1	410.6	389.2
600 - 0.060	412.8	414.2	417.1	417.5	424.5	437.3	446.1	477.9	455.5
600 - 0.180	463.2	464.4	466.4	468.9	475.2	490.8	502.9	546.2	519.3

Tabella 2.12: $|V_{th}|$ dei dispositivi PMOS estratte con *ELR*

2.1 Variazione della tensione di soglia

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	-2.5	-12.1	9.4	7.4	2.1	-2.4	-4.8	-0.9
100 - 0.060	-3.5	-15.8	15.0	13.1	10.0	7.2	10.8	15.6
100 - 0.180	-4.3	-16.5	16.6	15.8	16.3	16.0	27.0	34.9
200 - 0.030	-2.3	-12.3	9.1	7.9	4.5	1.8	3.2	7.6
200 - 0.060	-3.5	-16.5	13.6	12.2	10.5	8.7	14.7	20.2
200 - 0.180	-4.9	-16.5	16.5	16.4	19.1	19.8	34.9	43.2
600 - 0.060	-2.2	-12.7	11.8	12.0	8.8	7.4	10.6	16.7
600 - 0.180	-4.3	-19.4	8.8	8.2	9.0	8.6	19.5	29.0

Tabella 2.13: ΔV_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *ELR*

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	0.8	2.8	4.4	10.4	23.5	30.8	53.1	34.9
100 - 0.060	0.9	2.6	4.5	10.9	23.3	32.9	63.9	45.1
200 - 0.030	1.4	3.2	4.1	10.8	21.3	28.6	50.1	30.4
200 - 0.060	1.3	2.9	4.7	10.5	23.5	32.6	61.3	39.6
200 - 0.180	1.2	8.0	10.1	16.2	29.3	40.4	80.0	60.9
600 - 0.030	1.5	3.2	5.2	10.7	20.4	27.7	51.2	29.8
600 - 0.060	1.4	4.3	4.8	11.8	24.5	33.3	65.1	42.7
600 - 0.180	1.2	3.2	5.7	12.0	27.6	39.7	83.0	56.1

Tabella 2.14: ΔV_{th} dei dispositivi PMOS estratte con *ELR*

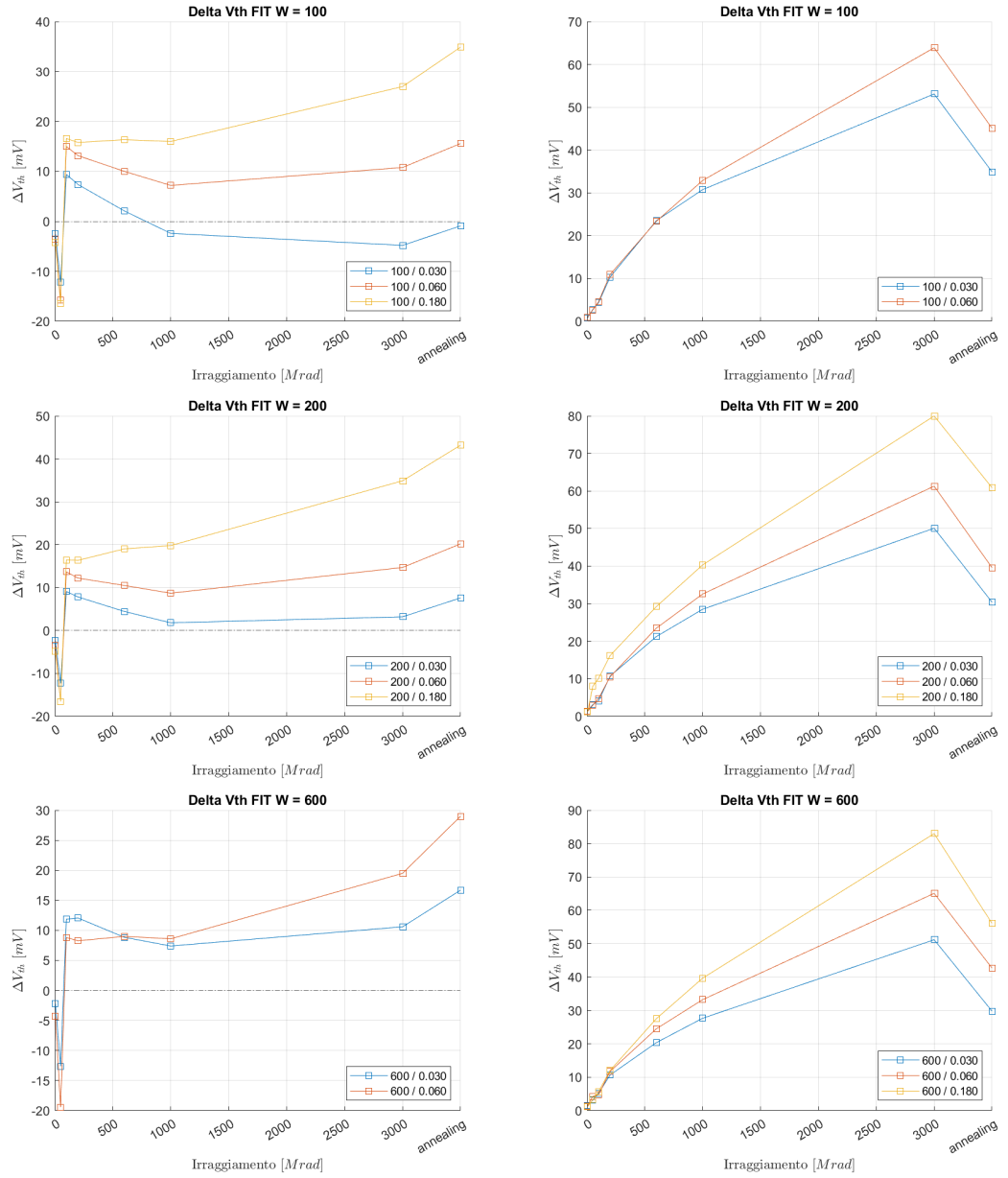


Figura 2.8: Variazioni di V_{th} dei dispositivi NMOS (a sinistra) PMOS (a destra) estratte con *ELR* in funzione della dose assorbita. Ogni figura si riferisce a una larghezza di canale W differente.

2.1.4 Ratio Method

Il *Ratio Method*, *RM* è stato sviluppato per far fronte alle problematiche dell'*ELR*: è stato infatti dimostrato che questo metodo non è influenzato dalla degradazione della mobilità dei portatori di carica né dalle resistenze parassite[4]. Questo metodo si basa

2.1 Variazione della tensione di soglia

sull'assunzione che, a bassi valori di tensione di drain V_{DS} , il rapporto tra la corrente di drain I_D e la radice quadrata della transconduttanza g_m ($\frac{I_D}{\sqrt{g_m}}$) in funzione della tensione di gate V_{GS} si comporti come una funzione lineare. La tensione di soglia V_{th} coincide con il valore della tensione V_{GS} a cui il fit lineare della funzione interseca l'asse delle ascisse. Come detto, questo metodo supera alcuni limiti dei metodi descritti in precedenza, però presenta una problematicità non indifferente: tracciando il grafico di $\frac{I_D}{\sqrt{g_m}}$ in funzione di V_{GS} , questo non verifica appieno l'assunzione di linearità. Dunque non esiste un intervallo in cui il grafico è chiaramente linearizzabile e quindi la misura di V_{th} non rispecchia del tutto il valore reale della tensione di soglia, ma è comunque una buona approssimazione, soprattutto se si considera il ΔV_{th} al crescere dell'irraggiamento. Anche in questo caso, per ottenere il fit lineare più accurato possibile è stato usato lo stesso metodo esposto per l'*ELR*.

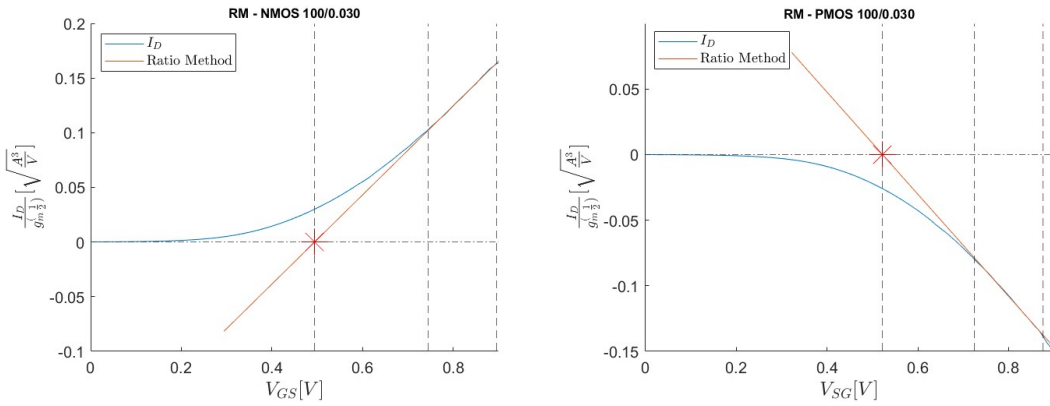


Figura 2.9: Fit lineare della caratteristica $\frac{I_D}{\sqrt{g_m}} - V_{GS}$ a $V_{DS} = 150mV$ di un NMOS e di un PMOS di dimensioni 100-0.030

Dispositivo	$V_{th}[mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	494.2	490.9	476.2	449.9	447.5	478.7	478.4	444.0	489.9
100 - 0.060	485.6	481.8	470.9	502.5	499.4	500.3	499.4	506.0	506.9
100 - 0.180	529.4	527.8	503.8	541.0	541.9	541.4	540.9	545.8	550.8
200 - 0.030	485.2	497.4	483.1	486.8	496.7	504.1	497.3	500.3	499.0
200 - 0.060	499.8	482.9	467.2	499.6	498.9	503.1	514.1	513.6	518.1
200 - 0.180	523.4	515.8	507.5	542.1	538.6	544.1	546.2	506.6	555.1
600 - 0.060	514.9	507.4	504.9	517.3	521.4	521.2	514.3	512.8	526.5
600 - 0.180	539.0	537.0	525.9	546.6	546.2	545.6	546.1	550.2	557.4

Tabella 2.15: V_{th} dei dispositivi NMOS estratte con *RM*

Dispositivo	$ V_{th} [mV]$								
	pre	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	522.3	529.8	530.7	532.2	533.3	544.4	547.3	520.9	553.1
100 - 0.060	543.6	543.3	541.8	545.4	548.9	528.1	541.6	581.5	560.3
200 - 0.030	525.2	520.5	527.4	542.2	544.8	551.1	554.7	554.0	553.5
200 - 0.060	547.9	540.5	549.1	550.6	555.7	563.1	568.3	579.3	571.1
200 - 0.180	551.1	553.1	538.3	538.0	545.0	568.8	576.8	599.7	587.5
600 - 0.030	527.8	539.9	537.3	540.2	539.9	550.8	555.2	567.0	556.5
600 - 0.060	557.2	552.2	558.5	559.7	558.7	567.6	576.7	589.6	575.2
600 - 0.180	555.2	559.3	556.9	559.4	559.7	574.3	581.3	603.4	582.1

Tabella 2.16: $|V_{th}|$ dei dispositivi PMOS estratte con RM

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100 - 0.030	-3.3	-18.0	-44.3	-46.7	-15.4	-15.8	-50.2	-4.3
100 - 0.060	-3.9	-14.7	16.8	13.8	14.7	13.8	20.4	21.3
100 - 0.180	-1.6	-25.6	11.6	12.6	12.0	11.5	16.4	21.4
200 - 0.030	12.2	-2.1	1.7	11.5	19.0	12.1	15.1	13.8
200 - 0.060	-16.9	-32.5	-0.2	-0.9	3.3	14.3	13.8	18.3
200 - 0.180	-7.6	-15.9	18.7	15.2	20.7	22.8	-16.8	31.7
600 - 0.060	-7.5	-9.9	2.4	6.5	6.3	-0.6	-2.1	11.6
600 - 0.180	-1.9	-13.0	7.6	7.2	6.7	7.1	11.2	18.4

Tabella 2.17: ΔV_{th} dei dispositivi NMOS estratte con RM

2.1 Variazione della tensione di soglia

Dispositivo	$\Delta V_{th}[mV]$							
	<i>5Mrad</i>	<i>50Mrad</i>	<i>100Mrad</i>	<i>200Mrad</i>	<i>600Mrad</i>	<i>1Grad</i>	<i>3Grad</i>	annealing
100 - 0.030	7.5	8.4	9.9	11.0	22.1	25.1	-1.4	30.8
100 - 0.060	-0.3	-1.8	1.8	11.0	-15.5	-2.0	37.9	16.7
200 - 0.030	-4.7	2.2	17.0	19.6	25.9	29.5	28.8	28.3
200 - 0.060	-7.5	1.1	2.6	7.7	15.2	20.3	31.4	23.2
200 - 0.180	2.0	-12.7	-13.1	-6.1	17.8	25.7	48.6	36.4
600 - 0.030	12.1	9.5	12.4	12.1	23.0	27.5	39.2	28.7
600 - 0.060	12.1	1.3	2.5	12.1	10.4	19.5	32.4	18.0
600 - 0.180	-4.6	1.8	4.3	4.5	19.2	26.1	48.2	26.9

Tabella 2.18: ΔV_{th} dei dispositivi PMOS estratte con *RM*

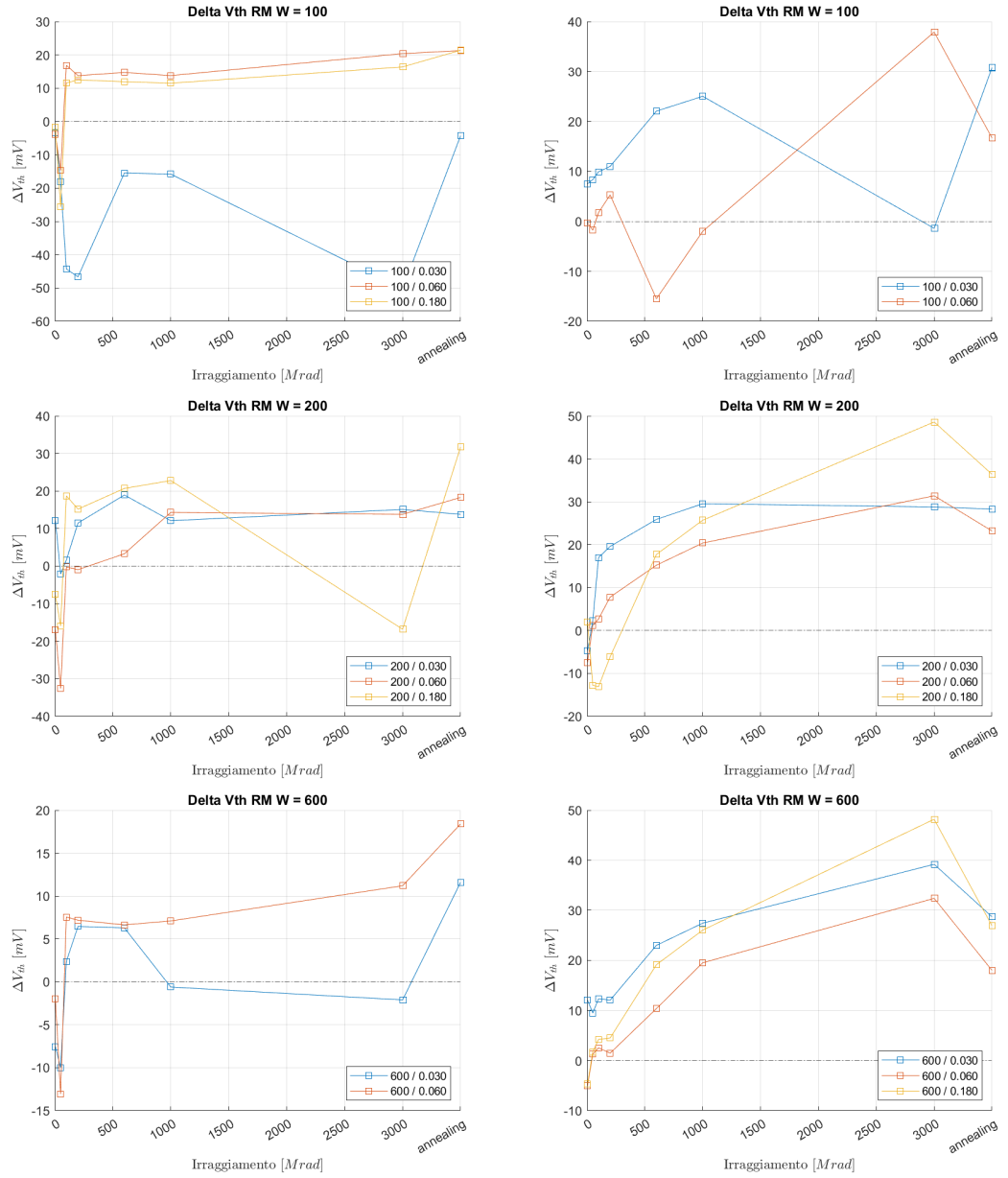


Figura 2.10: Variazioni di V_{th} dei dispositivi NMOS (a sinistra) PMOS (a destra) estratte con RM in funzione della dose assorbita. Ogni figura si riferisce a una larghezza di canale W differente.

2.2 Variazione della transconduttanza

Un parametro utile ad indicare quanto un dispositivo MOSFET possa regolare la corrente di drain I_D , attraverso la tensione V_{GS} , è la transconduttanza g_m . La quale è definita

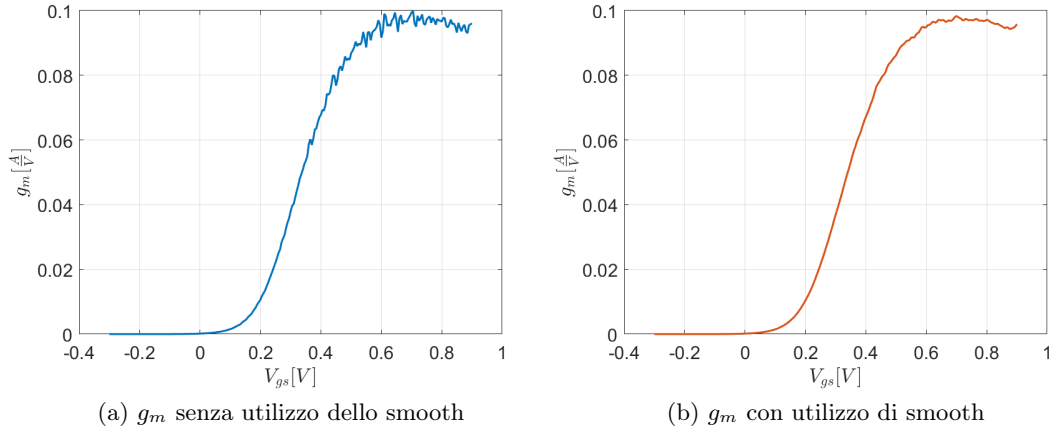


Figura 2.11: Confronto delle transconduttanze calcolate senza applicare smooth e con l'utilizzo di smooth.

dal rapporto incrementale:

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}$$

Nel caso di $I_D - V_{GS}$ in regione lineare, si ottiene l'espressione:

$$g_m = \frac{W}{L} \cdot \mu \cdot C_{ox} \cdot (V_{GS} - V_{th})$$

2.2.1 Calcolo della transconduttanza

Derivare dei dati discontinui porta sempre, o quasi sempre, ad avere delle curve spezzate, per le quali è difficile trarre informazioni utili. Questo è stato il caso per la transconduttanza; la figura 2.11a (curva di sinistra) rappresenta la g_m di un transistor MOSFET a canale N, con $W = 100\mu m$ e $L = 30nm$ senza eseguire nessun tipo di smooth; in particolare, per alte V_{GS} , questo difetto è molto marcato. Per ridurre questo effetto, oltre ad applicare alla fine uno smooth di ampiezza 5, due valori prima e due valori dopo; abbiamo calcolato due transconduttanze, la prima g_m' normalmente, mentre, la seconda g_m'' abbiamo eseguito il rapporto incrementale tra I_D e V_{GS}^* , tensione gate-source shiftata di una posizione, duplicando il primo valore ed eliminando l'ultimo. In seguito abbiamo trovato la transconduttanza come la media dei singoli valori:

$$g_{m_i} = \frac{g_{m_i}' + g_{m_i}''}{2} \quad i \in [1, 2, 3...]$$

Trovando, per il dispositivo in questione, la curva a figura 2.11b (curva a destra).

A figura 2.12 vengono mostrati i grafici relativi alla transconduttanza per i diversi transistori MOSFET, sia a canale N che P.

Dispositivo	$\Delta g_m \text{‰}[A/V]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100-0.030	-0.3866	-0.4273	-0.7731	-0.7528	-1.2004	-2.2787	-4.0081	-4.2930
100-0.060	-0.2759	-0.6667	-1.6092	-1.6092	-1.8851	-2.7126	-4.6207	-4.2989
100-0.180	1.1011	1.1567	-2.7027	-2.2356	-2.2356	-4.1263	-6.9069	-7.0181
200-0.030	-0.1333	0.3758	-0.9939	-1.2000	-1.8667	-2.7273	-5.0182	-5.0788
200-0.060	1.3702	0	-1.3823	-1.4915	-2.0007	-3.0799	-4.8139	-4.9473
200-0.180	0.5282	0.3815	-3.3744	-3.3451	-4.5775	-5.4577	-9.5364	-9.5070
600-0.060	-1.4440	-1.8532	-4.0193	-3.4817	-4.4765	-5.1023	-6.1773	-6.4902
600-0.180	0.8105	1.0132	-4.2553	-4.5086	-4.8632	-5.6738	-8.0041	-8.7133

Tabella 2.19: Variazioni della transconduttanza al variare della dose assorbita in un MOSFET a canale N.

Uno dei effetti delle radiazioni ionizzanti è quella di ridurre la mobilità dei portatori di carica μ all'interno del canale. Osservando l'espressione della g_m si nota la proporzionalità diretta con la mobilità dei portatori comportando una riduzione della transconduttanza, all'aumentare della dose assorbita. Effetto confermato dai dati sperimentali (vedi tabelle 2.19 e 2.20 e figura 2.13) ottenuti dai transistori sotto osservazione in questo lavoro di tesi.

2.3 Variazione della corrente di leakage

2.4 Variazione della corrente I_{on}

Corrente di Leakege documenti: "PhDThesis_GiulioBorghello_2" a pagina 32

2.5 Guadagno Intrinseco

Il guadagno intrinseco (A_{vi}) è definito come il massimo guadagno ottenibile da un MOSFET, polarizzato da un generatore di corrente ideale. Fornisce una misura di quanto un MOSFET può amplificare senza essere influenzato da elementi esterni. Esso viene calcolato come:

$$A_{vi} = g_m \cdot r_0 = \frac{g_m}{g_{ds}}$$

Con g_m la transconduttanza e r_0 la resistenza in uscita dal transistor ($1/g_{ds}$). Spesso, il grafico di A_{vi} , viene mostrato in funzione del coefficiente di inversione (I_{C0}), parametro utile per descrivere il grado di inversione del canale (debole: per valori inferiori a 0.1, moderata: tra 0.1 e 10, forte: superiori a 10) il quale si può ricavare dalla I_d ad alte V_{ds} :

Dispositivo	$\Delta g_m \% [A/V]$							
	5Mrad	50Mrad	100Mrad	200Mrad	600Mrad	1Grad	3Grad	annealing
100-0.030	-0.1216	-0.9325	-1.4393	-1.1555	-3.0205	-4.1557	-11.2508	-6.4058
100-0.060	-0.1578	-0.8343	-1.3078	-1.0372	-3.1342	-4.3292	-12.2435	-6.5614
200-0.030	0.0797	-0.4461	-0.7328	0.1593	-1.3223	-1.4338	-6.2291	-3.7757
200-0.060	0.1837	-0.4898	-0.8878	-0.2908	-1.8062	-2.4797	-8.8321	-4.4390
200-0.180	-0.6345	-1.7766	-1.2690	-1.5228	-3.2995	-5.0761	-18.6548	-11.1675
600-0.030	-0.0069	-0.2477	-0.3647	0.1651	-0.9770	-0.7362	-4.9539	-3.4884
600-0.060	0.0494	-0.0412	-0.6837	0.1565	-0.9885	-1.5568	-7.4876	-4.3822
600-0.180	0.1198	-0.4790	-1.1976	-1.0579	-3.2335	-4.3114	-17.9441	-8.8423

Tabella 2.20: Variazioni della transconduttanza al variare della dose assorbita in un MOSFET a canale P.

$$I_{C0} = \frac{I_d}{I_z^*} \cdot \frac{L}{W}$$

La corrente caratteristica (I_z^*) è stata misurata pre-irraggiamento. I valori sono riportati nella tabella 2.21.

Tipologia Canale	I_z^*
N	470nA
P	370nA

Tabella 2.21: Valori della corrente caratteristica misurati prima dell'irraggiamento

Alla figura 2.14 vengono mostrati i grafici $A_{vi} - I_{C0}$, raggruppati per larghezza di canale, prima e dopo l'irraggiamento a 3Grad, per transistori MOSFET a canale N e P.

Mentre nei NMOS si nota un innalzamento significativo della curva $A_{vi} - I_{C0}$, soprattutto per lunghezze di canale più grandi. Questo non sembra verificarsi per i PMOS, infatti, l'offset della curva è leggermente negativo rispetto ai rispettivi grafici pre-irraggiamento. Effetto più visibile per le lunghezze di canale più grandi.

Dare una spiegazione a questo effetto(?), e magari riscriverla meglio

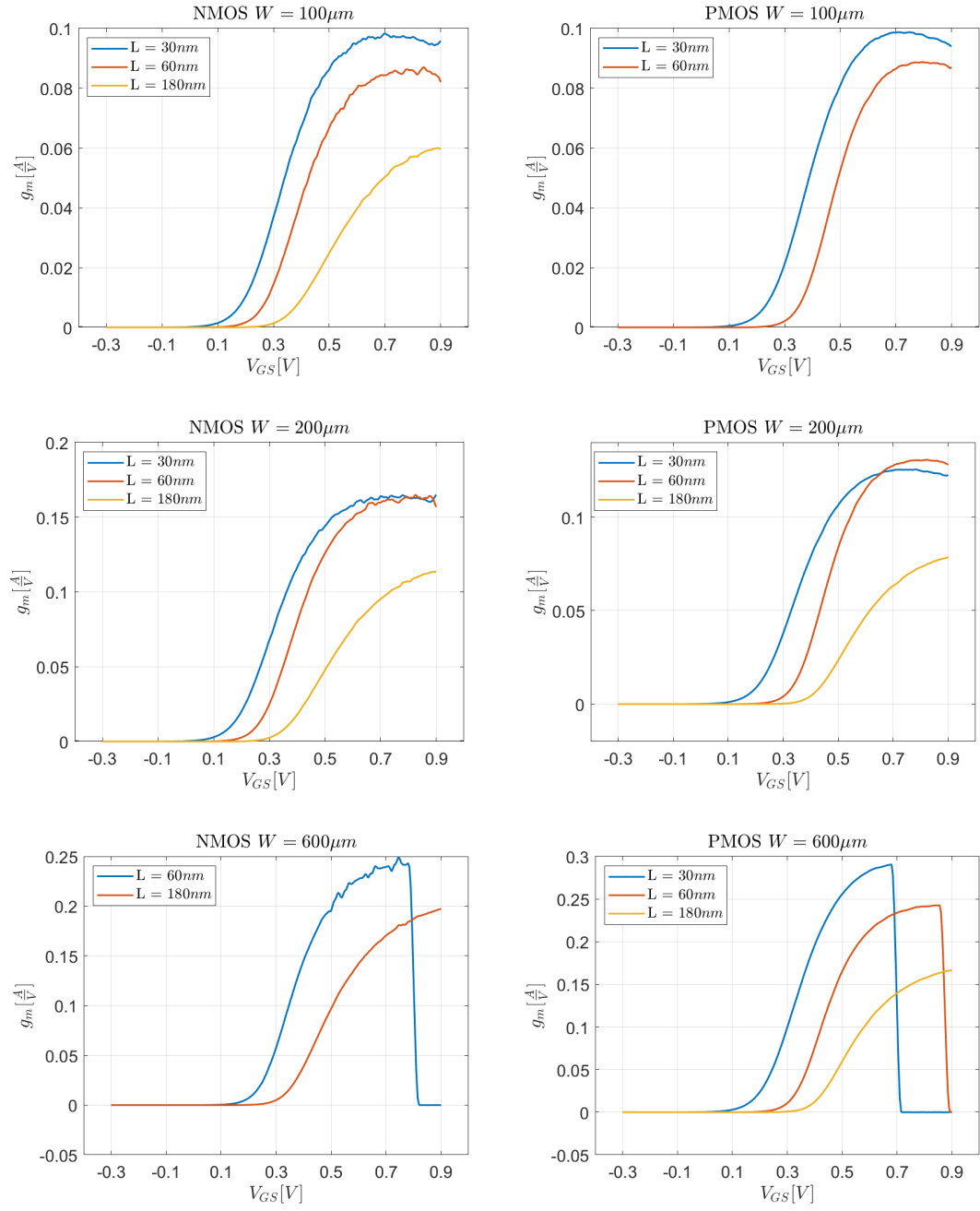


Figura 2.12: Transconduttanza calcolata nei dispositivi MOSFET prima di subire la dose di irraggiamento. canale N, a sinistra, e canale P, a destra, i grafici sono raggruppati per larghezza di canale.

2.5 Guadagno Intrinseco

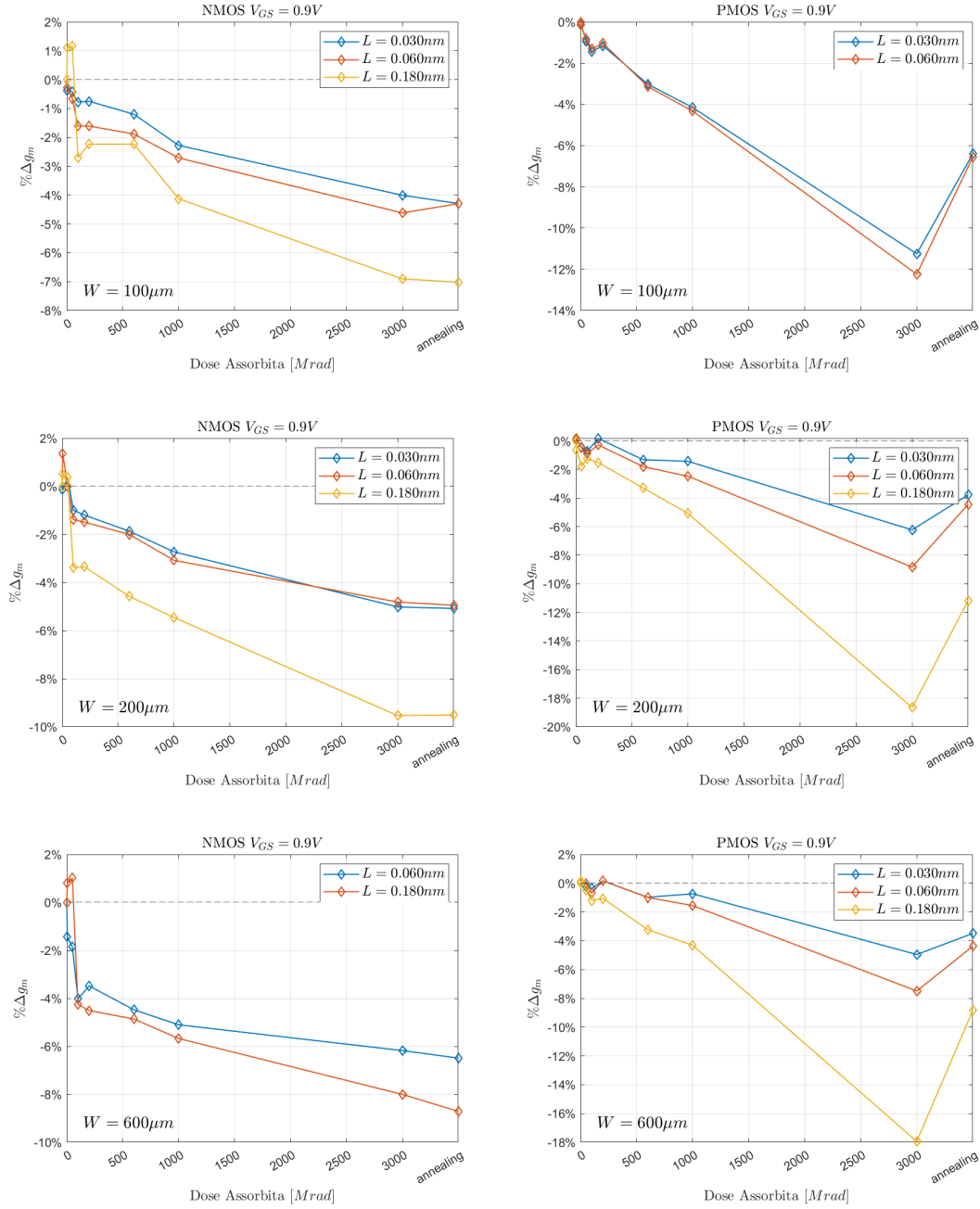


Figura 2.13: Curve Δg_m percentuale al variare della dose assorbita: a sinistra i transistori MOSFET a canale N e a destra a canale P. I grafici sono raggruppati per larghezza di canale.

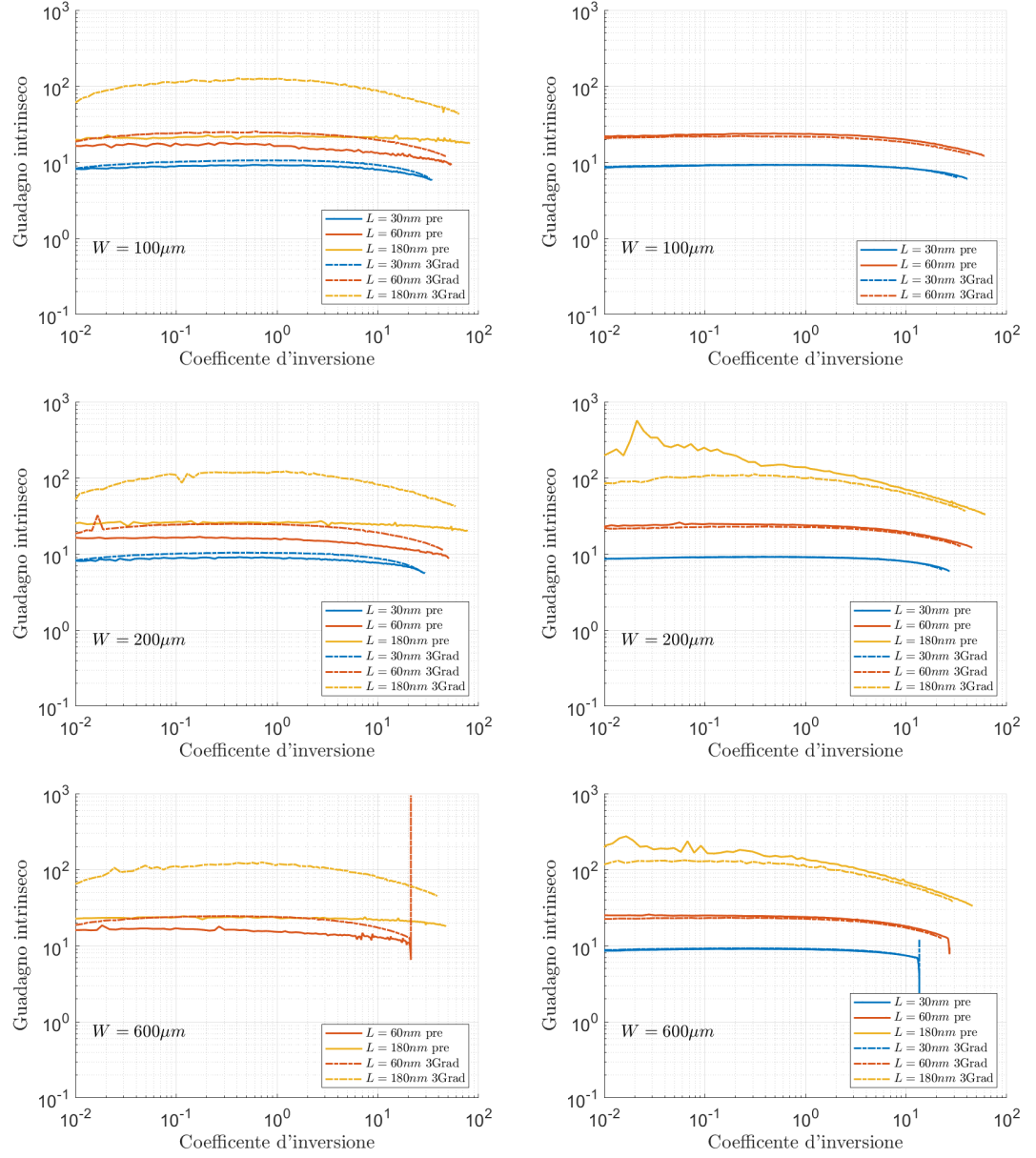


Figura 2.14: Variazioni del guadagno intrinseco per NMOS, a sinistra, e PMOS a destra prima e dopo una dose di 3Grad.

Conclusioni

Bibliografia

- [1] A. Camplani, S. Shojaii, H. Shrimali, A. Stabile, and V. Liberali, “Cmos ic radiation hardening by design,” *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics*, vol. 27, pp. 251–258, 01 2014.
- [2] L. Edmonds, C. Barnes, L. Scheick, U. S. N. Aeronautics, S. Administration, and J. P. L. (U.S.), *An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics*, ser. JPL publication. Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2000. [Online]. Available: <https://books.google.it/books?id=3azqHAAACAAJ>
- [3] F. B. McLean and T. R. Oldham, “Basic mechanisms of radiation effects in electronic materials and devices. final report, september 1986-september 1987,” 9 1987. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/5646360>
- [4] A. Ortiz-Conde, F. Garcia Sánchez, J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada, and Y. Yue, “A review of recent mosfet threshold voltage extraction methods,” *Microelectronics Reliability*, vol. 42, no. 4, pp. 583–596, 2002. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271402000276>
- [5] T. Rudenko, V. Kilchytska, M. K. M. Arshad, J.-P. Raskin, A. Nazarov, and D. Flandre, “Influence of drain voltage on mosfet threshold voltage determination by transconductance change and gm/id methods,” in *Ulis 2011 Ultimate Integration on Silicon*, 2011, pp. 1–4.