

Processi CMOS submicrometrici, resistenza alle radiazioni

M. Manghisoni



Università di Bergamo
Dipartimento di Ingegneria Industriale



INFN
Sezione di Pavia

**Corso nazionale di Formazione
Elettronica di Front-end per i rivelatori di particelle**

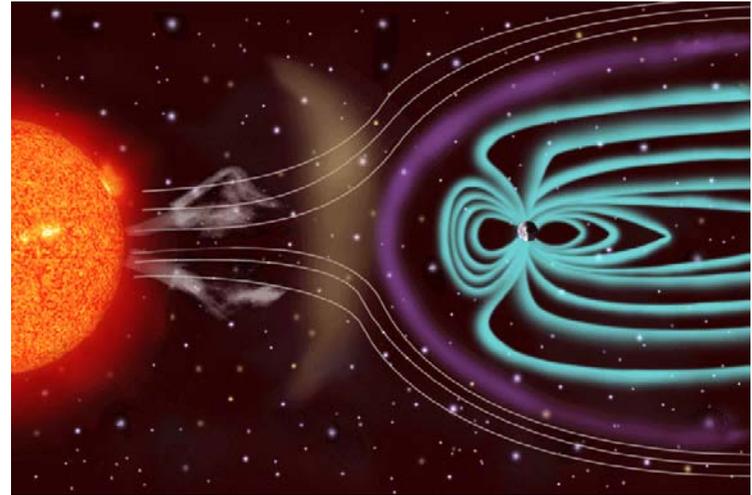
INFN-Pavia, 25-29 Ottobre 2004

Sommario

- Tecnologie CMOS e radiazioni
- Interazione tra radiazione e materia
- Meccanismi del danno da radiazione
- Effetti delle radiazioni su strutture MOS
- Effetti su parametri statici e di rumore
- Approccio *Radiation Tolerant*
- Effetti dello *scaling* tecnologico
- Bibliografia

Effetti delle radiazioni su dispositivi semiconduttori

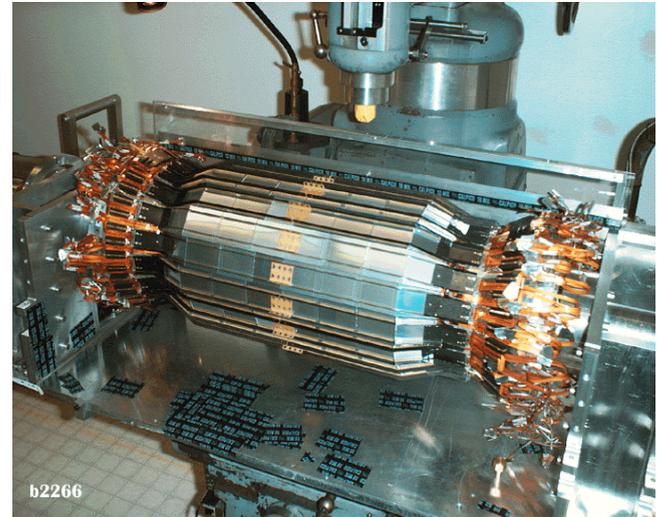
- Studio cominciato in seguito a danni riportati da circuiti dei primi satelliti a causa delle particelle energetiche presenti nelle fasce di Van Allen
- In seguito, interesse crescente sullo studio di circuiti che lavorano in ambiente radioattivo: missioni spaziali, satelliti, strumentazione per impianti di produzione di energia nucleare, esperimenti di fisica delle alte energie (*HEP experiments*)



HEP *experiments*

- Elevate dosi di radiazioni soprattutto per rivelatori vicini al punto di interazione

⇒ circuiti integrati utilizzati per elettronica di lettura dei rivelatori resistenti alle radiazioni (*rad-hard*)



⇒ sviluppo di speciali tecnologie *rad-hard* nelle quali la tolleranza alle radiazioni è migliorata grazie a:

- particolari processi produttivi
- speciali tecniche di layout
- speciali architetture circuitali

Tecnologie *rad-hard*

Presentano una serie di svantaggi

- molto costose a causa delle variazioni richieste sul processo
- tecnologicamente poco avanzate (un paio di tecnologie in ritardo rispetto a quelle commerciali)
- bassa resa e variazioni dei parametri dei dispositivi tra processi produttivi ma anche tra singoli *wafer*
- a causa della scarsa domanda la produzione di alcune tecnologie potrebbe non essere assicurata per il futuro

Tecnologie CMOS sub- μm

- in un MOS la parte più sensibile alle radiazioni è l'ossido di gate (spessore t_{ox})
- $\downarrow t_{\text{ox}} \Rightarrow \uparrow$ tolleranza alle radiazioni
- $\downarrow t_{\text{ox}}$ naturale tendenza delle moderne tecnologie
- attuali tecnologie CMOS *deep submicron* hanno spessori dell'ossido di gate di qualche *nm*
- intrinseca resistenza alle radiazioni di queste tecnologie suggerisce l'impiego in ambienti radioattivi senza variazioni di processo
- comunque necessario impiego di particolari tecniche di layout e di architetture circuitali

Radiazioni ionizzanti

- particelle e onde elettromagnetiche dotate di potere altamente penetrante nella materia
- ciò permette alle radiazioni di far saltare da un atomo all'altro gli elettroni che incontrano nel loro percorso \Rightarrow ioni
- gli atomi, urtati dalle radiazioni, perdono la loro neutralità (uguale numero di protoni e di elettroni) e si caricano elettricamente, ionizzandosi

Interazione radiazione-materia

Modalità di interazione dipendono da:

Particella incidente

- energia cinetica
- massa
- carica
- tipo di particella

Materiale bersaglio

- massa
- densità
- numero atomico

Utile suddividere le particelle incidenti in
particelle cariche e particelle neutre

Particelle cariche

- **protoni**
 - **interazione coulombiana**: ionizzazione o repulsione atomica (energie < 100 keV)
 - **collisione con nuclei**: eccitazione o spostamento di nuclei nel reticolo cristallino
 - **reazione nucleare** (energie > 10 MeV)
- **ioni pesanti**
 - **stessi fenomeni di protoni**
- **elettroni**
 - **interazione coulombiana**: ionizzazione o eccitazione atomica
 - **scattering con i nuclei**: spostamento all'interno del reticolo se energia di e^- abbastanza alta e trasferita al nucleo stesso

Particelle neutre

- **neutroni**

- **reazione nucleare**: neutrone assorbito da nucleo che emette altre particelle (protoni, particelle α , fotoni γ)
- **collisioni elastiche**: neutroni incidenti si scontrano con nuclei e continuano loro percorso \Rightarrow nuclei possono spostarsi nel reticolo \Rightarrow ionizzazione e spostamenti nucleari
- **collisioni anelastiche**: fenomeni simili a collisioni elastiche ma con eccitazione di nuclei che in seguito decadono ed emettono raggi γ

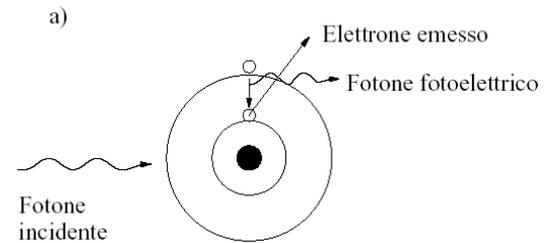
probabilità che avvengano questi fenomeni dipende da energia dei neutroni:

- **lenti (energie <1 eV)** \rightarrow reazioni nucleari o collisioni elastiche
- **intermedi (energie tra <1 eV e 100 eV)**
- **veloci (energie >100 eV)** \rightarrow collisioni elastiche

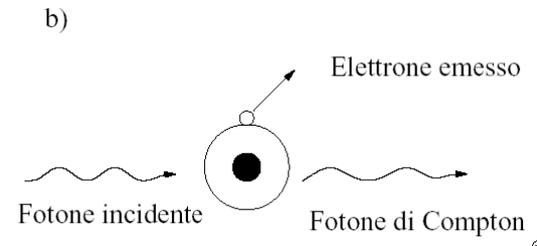
Particelle neutre

- **fotoni**

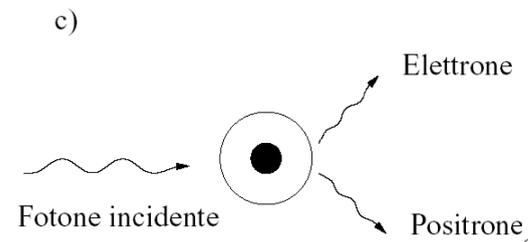
- **effetto fotoelettrico:**



- **effetto Compton:**

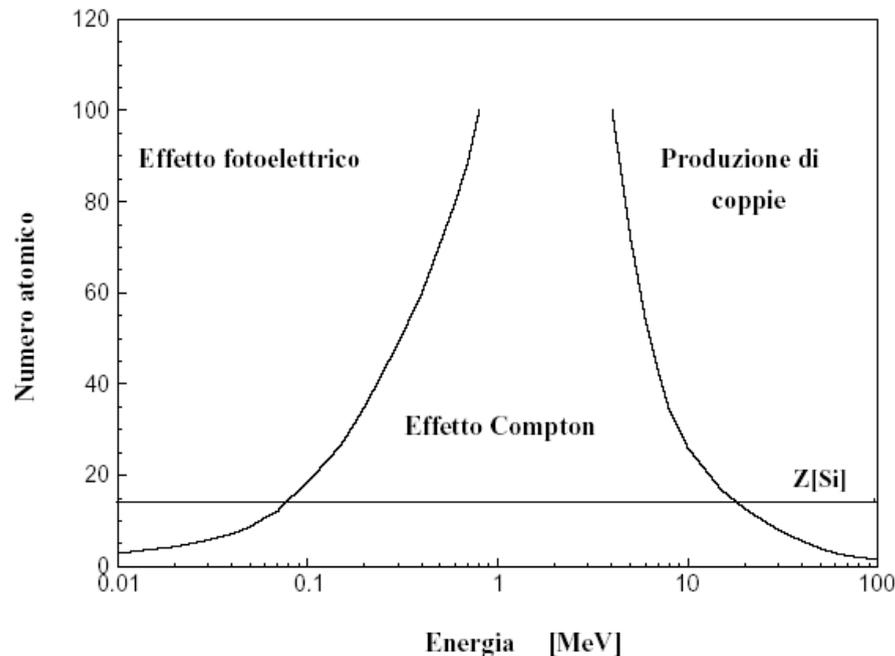


- **creazione di coppie elettrone-lacuna:**



Particelle neutre

Il peso relativo dei tre tipi di interazione tra fotoni e materia dipende dall'**energia del fotone** incidente e dal **numero atomico del materiale** considerato



Riassumendo

- interazione di radiazione, sia essa costituita da particelle cariche o neutre, con materia, può dare origine a due classi di eventi:
 - effetti ionizzanti
 - spostamento reticolare
- fenomeni possono essere direttamente causati da particella incidente o da prodotti secondari (maggioranza)
- dipendono da tipo di particella incidente e da sua energia
 - neutroni → dislocazione di atomi nel reticolo
 - fotoni ed elettroni → ionizzazione

Danno da ionizzazione

- **semiconduttore o isolante: formazione di coppie $e-h$ in numero proporzionale alla quantità di energia depositata nel materiale espressa dalla dose totale di radiazioni assorbita**
 - **dose assorbita espressa in *rad* o in *Gray* ($1 Gy=100 rad$)**
- ⇒ **a patto di scegliere particelle il cui principale effetto di interazione è la ionizzazione, in fase di test possiamo trascurare il tipo di particella e fare riferimento solo alla quantità di energia depositata nel materiale per studiare gli effetti della ionizzazione**

Danno da dislocazione reticolare

- particelle incidente sposta atomi di silicio all'interno del reticolo cristallino creando difetti che alterano le caratteristiche del cristallo
- principale meccanismo di degradazione di dispositivi irraggiati con neutroni ad alta energia
- si manifesta con tre importanti effetti:
 - formazione di stati intermedi: facilitano transizione di elettroni da banda di valenza a banda di conduzione
 - intrappolamento di portatori da parte di stati vicini a limiti di banda
 - cambiamento caratteristiche di drogaggio

Dosimetria

- *Dose assorbita* energia media dE per unità di massa dm

$$D = \frac{dE}{dm} \quad [\text{rad}]$$

rad energia di 100 *erg* in 1 *g* di materiale
nel SI si utilizza il *Gray (Gy)*: 1 *Gy* = 100 *rad*

- *Dose rate* dose ricevuta dal materiale nell'unità di tempo

$$D' = \frac{dD}{dt} \quad [\text{rad/s}] \quad [\text{Gy/s}]$$

Effetti delle radiazioni su strutture MOS

Parte più sensibile a radiazioni ionizzanti è SiO_2

Particella ionizzante attraversa struttura MOS

- generazione di coppie $e-h$
 - Gate, substrato coppie si ricombinano velocemente \Rightarrow nessun effetto
 - SiO_2 parte si ricombina, parte restante separata da campo elettrico applicato. Per $V > 0$:
 - e^- verso elettrodo di gate
 - lacune verso interfaccia SiO_2-Si dove possono essere catturate dando origine a potenziale fisso in SiO_2
- Creazione trappole all'interfaccia SiO_2-Si

Generazione e ricombinazione di coppie $e-h$ in SiO_2

- mobilità e^- in SiO_2 $20 \text{ cm}^2/Vs$
 - mobilità lacune in SiO_2 compresa tra 10^{-4} e $10^{-11} \text{ cm}^2/Vs$
- ⇒ e^- che non si ricombinano con lacune escono da SiO_2 in tempi brevi
- ⇒ rapporto tra lacune ed e^- intrappolati nell'ordine di $10^3 - 10^6$

Generazione di coppie $e-h$

numero di coppie generate dipende da

- quantità totale di energia depositata da particelle nel materiale \Rightarrow LET (Linear Energy Transfer)

$$\text{LET} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

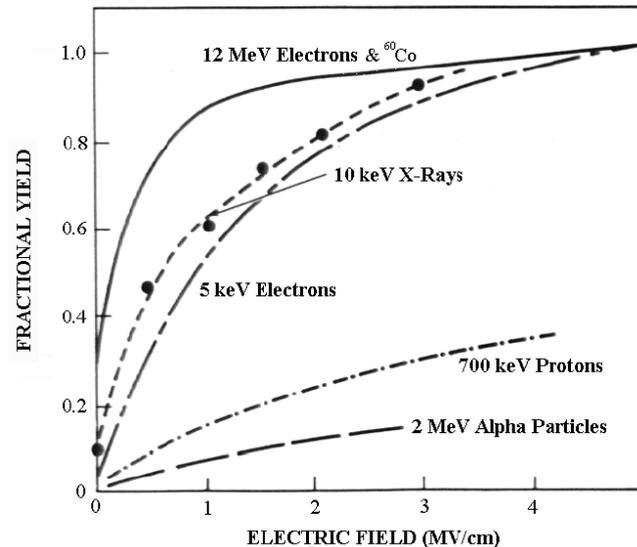
- ρ massa per unità di volume [kg/m^3]
- dE/dx quantità media di energia trasferita per unità di lunghezza

\Rightarrow LET dipende da energia e natura particella, tipo di materiale

- energia necessaria per creare una coppia in SiO_2 17 ± 1 eV

Ricombinazione

- legata qualitativamente alla LET: elevata LET
 ⇒ elevato # di coppie
 ⇒ elevata probabilità di ricombinazione
- proporzionale a densità di coppie (\neq modelli)
- funzione del campo elettrico applicato

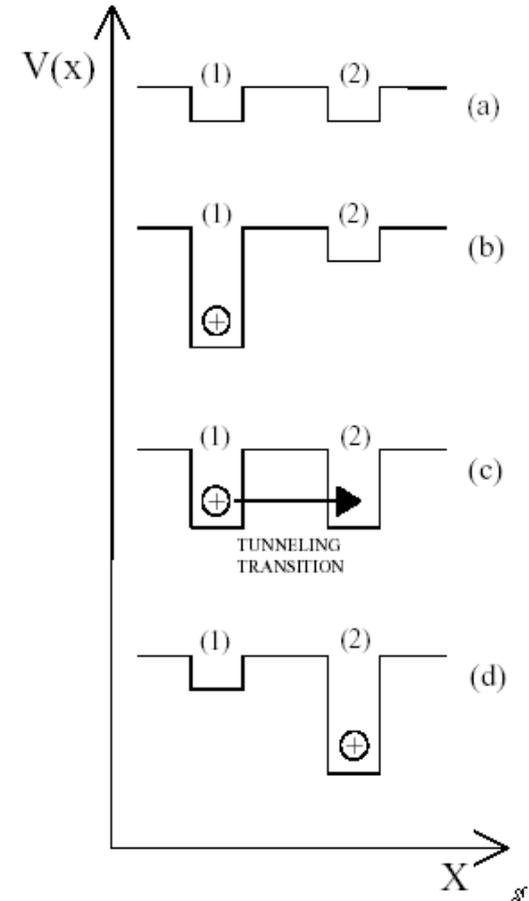


Trasporto di h in SiO_2

- dopo la generazione le lacune non ricombinate cominciano a muoversi per effetto del campo elettrico
- per $V_{GB} > 0$ le lacune tendono a spostarsi verso l'interfaccia SiO_2-Si
- trasporto lacune caratterizzato da tempi di transito molto variabili e dipendenti da T (*sec* a T ambiente fino a 10^4 *sec* a 80 K)
- meccanismo che spiega spostamento lacune in SiO_2 : *small polaron hopping*

Small polaron hopping

- quando una trappola cattura una h il potenziale totale del sistema \downarrow per effetto della distorsione del reticolo attorno alla trappola
- \Rightarrow la h crea una buca di potenziale nella quale è auto intrappolata
- il passaggio tra due centri di cattura vicini tra loro avviene per effetto tunnel grazie alle fluttuazioni termiche del sistema che alterano il potenziale dei centri di cattura



Tempo di transito

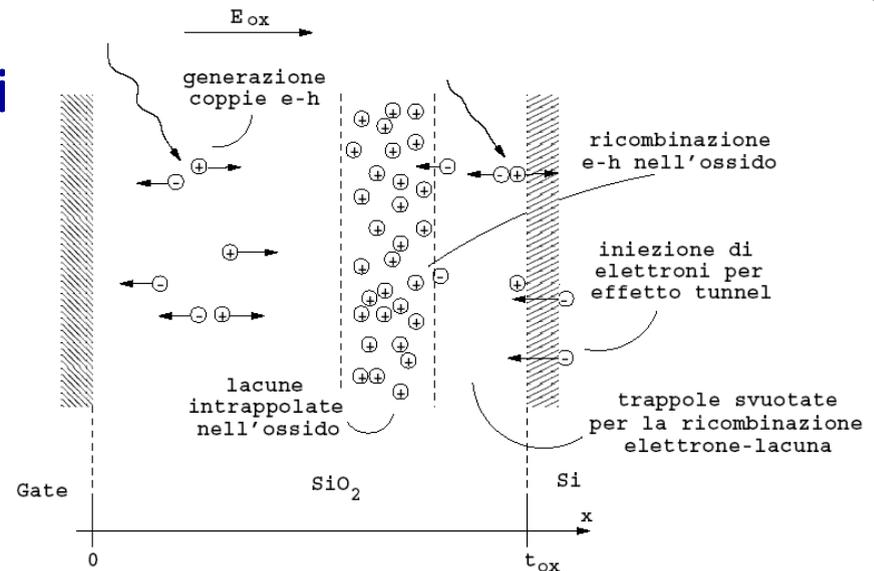
Tempo caratteristico con cui le lacune si muovono all'interno dell'ossido

$$t_s = t_s^0 \left(\frac{t_{ox}}{a} \right)^{1/\alpha} \exp \left(\frac{\Delta_0 - qaE_{ox}/2}{kT} \right)$$

- q , k carica elettrica e costante di Boltzmann
- a distanza media di salto in direzione del campo el.
- t_{ox} ed E_{ox} spessore e campo elettrico nell'ossido
- T temperatura assoluta in gradi K
- Δ_0 energia di attivazione a campo nullo
- t_s^0 costante di tempo critica del processo
- α parametro che per lacune in SiO_2 viene preso = 0.25

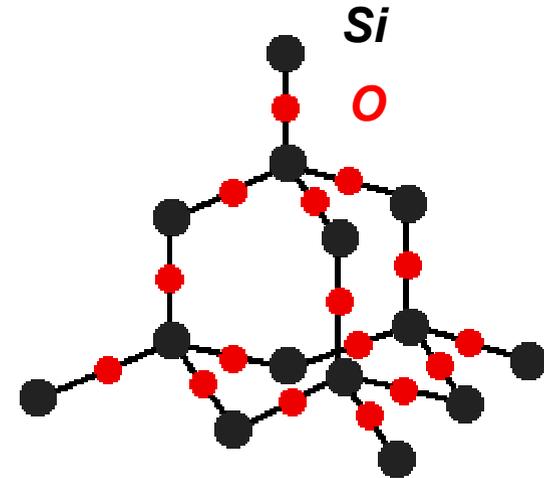
Carica intrappolata in SiO_2

- h che hanno terminato percorso in $SiO_2 \Rightarrow$ intrappolate all'interfaccia SiO_2-Si o SiO_2 -gate
- per $V_{GB} > 0$ h intrappolate a interfaccia SiO_2-Si a causa di difetti in SiO_2 che funzionano come centri di trappola
- trappole localizzate nei pressi dell'interfaccia (SiO_2-Si o SiO_2 -gate) entro pochi nm
- origine dei difetti da attribuire a tecniche di produzione di SiO_2



Difetti in SiO_2

- **Struttura ideale:** 1 atomo di Si (tetravalente) legato a 4 atomi di O (bivalente)
- se viene a mancare un atomo di $O \Rightarrow$ struttura trivalente in cui 1 atomo di Si è legato a tre di O con un e^- spaiato
- queste strutture possono mettere in comune l' e^- spaiato creando un legame tra debole tra due atomi di Si che introduce uno stato localizzato nella banda proibita di SiO_2 che può agire da trappola per le lacuna
- la lacuna può portare alla rottura del legame $Si-Si$ e all'intrappolamento attraverso la perdita di 1 degli e^-



Variazione di soglia

lacune intrappolate danno origine a variazione negativa della tensione di soglia ΔV_{ox}

$$\Delta V_{ox} = -\frac{1}{C_{ox}} \int_0^{t_{ox}} \frac{x}{t_{ox}} \rho(x) dx = -\frac{q}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \Delta N_{ot}$$

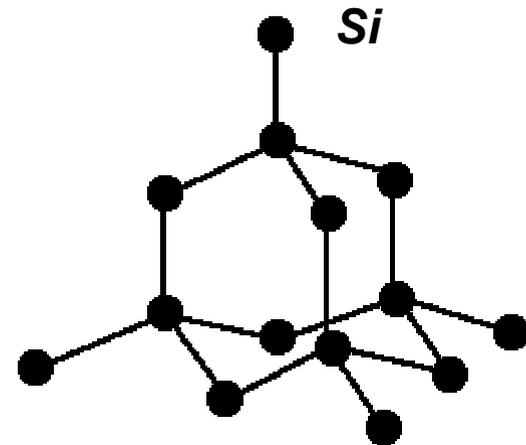
- q carica elettrone
- $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$ capacità dell'ossido per unità di area
- t_{ox} spessore dell'ossido
- ϵ_{ox} costante dielettrica dell'ossido
- ΔN_{ot} densità superficiale di trappole all'interfaccia
- $\rho(x)$ distribuzione spaziale della densità di carica in SiO_2

Trappole all'interfaccia SiO_2-Si

- densità di trappole \uparrow di diversi ordini di grandezza per effetto delle radiazioni ionizzanti
- proprietà delle trappole
 - localizzate entro 0.5 nm da interfaccia \Rightarrow possono scambiare cariche con il Si
 - carica residente positiva, negativa o neutra
 - distinzione fra trappole lente e veloci

Centri di trappola: un atomo di Si legato a tre soli atomi di Si

\Rightarrow formazione di trappole nella banda proibita della struttura cristallina



Carica all'interfaccia SiO_2-Si

- può essere positiva, negativa o neutra
- si distingue secondo il contributo di carica in
 - **donatori** rilasciano un e- passando da un livello energetico $<$ ad uno $>$ al livello di Fermi. Risultano neutre se occupate da un e-, cariche + se vuote
 - **accettori** la trappola cattura un e- quando passa da un livello energetico $>$ ad uno $<$ al livello di Fermi. Risultano neutre se vuote, cariche – se occupate da un e-
- **NMOS** livello di Fermi in parte superiore del gap
⇒ trappole all'interfaccia si caricano –
- **PMOS** livello di Fermi in parte inferiore del gap
⇒ trappole all'interfaccia si caricano +

Border traps

- trappole nell'ossido che possono modificare la propria polarità
- possono scambiare carica con Si con una probabilità che decresce esponenzialmente con l'aumento della distanza dall'interfaccia
- la loro densità dipende da
 - distribuzione spaziale ed energia dei difetti
 - condizioni di polarizzazione \Rightarrow possono emettere o intrappolare cariche in base a V_{GS}
- si distinguono in veloci e lente

Annealing

- Dopo irraggiamento lacune non sono intrappolate in SiO_2 in modo permanente
- la carica può neutralizzarsi in un tempo che va dai msec agli anni
- effetto di neutralizzazione della carica intrappolata avviene a temperatura ambiente e prende il nome di *annealing*
- *annealing* di lacune intrappolate si manifesta essenzialmente in due modi
 - *annealing* per effetto tunnel
 - *annealing* termico

Annealing per effetto tunnel

- iniezione di e^- dal Si del substrato verso SiO_2 che porta ad una parziale ricombinazione delle lacune intrappolate e ad una riduzione della carica positiva in SiO_2
- probabilità del verificarsi dell'effetto tunnel diminuisce in modo *exp* all'aumentare della distanza dall'interfaccia
- *annealing* per effetto *tunnel* più efficiente all'aumentare del campo elettrico applicato perché si verifica un abbassamento della barriera di potenziale che deve essere scavalcata dagli e^-

Annealing termico

- gli e^- presenti nella banda di valenza di SiO_2 hanno energia sufficiente per attraversare il *gap* e ricombinarsi con le lacune intrappolate
- probabilità di emissione di un e^- da banda di valenza di SiO_2 verso le trappole in cui sono localizzate le lacune

$$p_{em} = AT^2 \cdot \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right)$$

⇒ p_{em} fortemente dipendente da temperatura

Effetti delle radiazioni sui parametri elettrici dei MOS

- variazione della tensione di soglia V_T
- variazione della corrente di leakage e della corrente di sottosoglia
- degradazione della mobilità dei portatori e della transconduttanza
- aumento del rumore elettronico

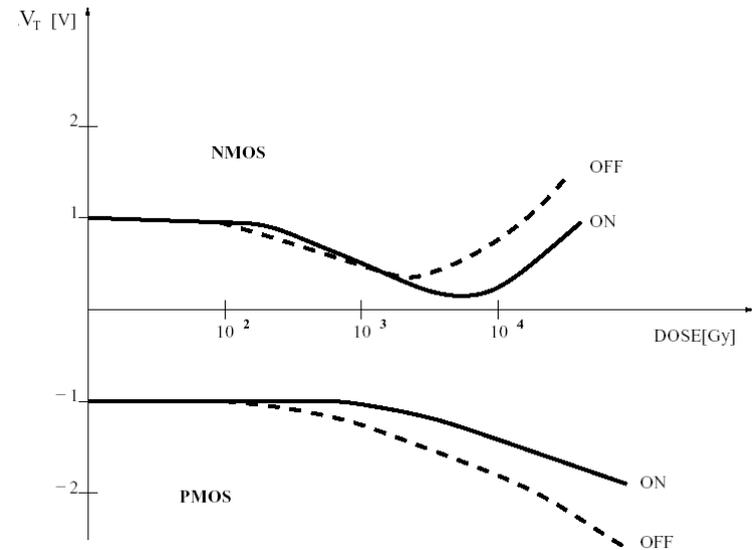
Tensione di soglia

- Carica intrappolata nell'ossido e aumento degli stati interfacciali

- **NMOS**

- **Bassa dose** ↓ di V_T (carica positiva intrappolata)
- **Dose elevata** ↑ di V_T (cariche negative accumulate da trappole a interfaccia)

- **PMOS** tendenza costante a ↓

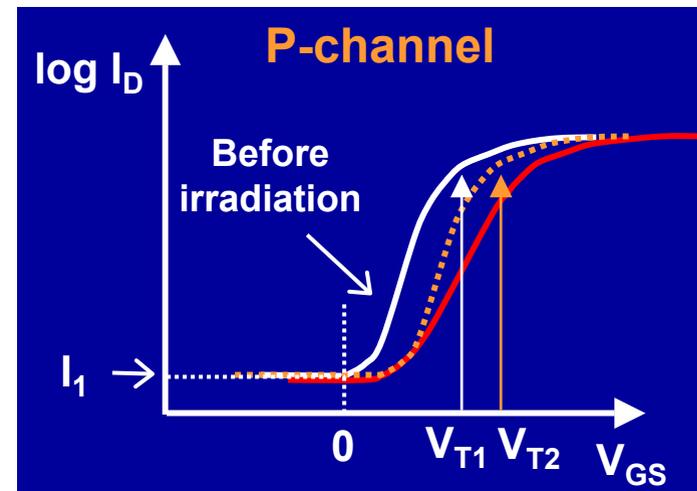
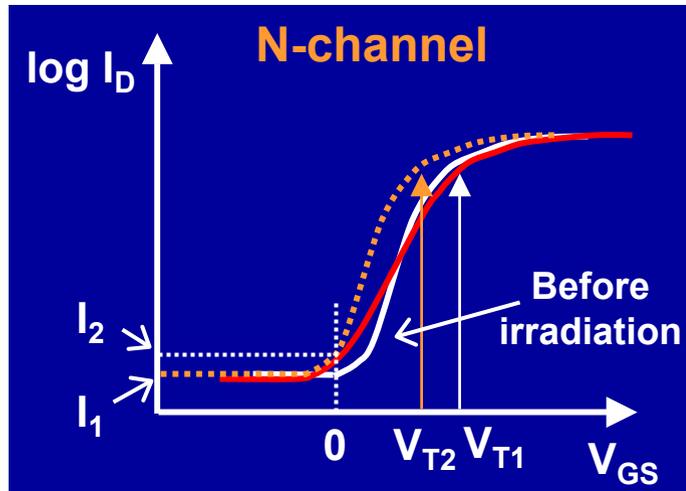


$$\Delta V_T = \Delta V_{OX} + \Delta V_{it} = -\frac{Q_{it}}{C_{OX}} - \frac{Q_{OX}}{C_{OX}}$$

- Q_{it} carica all'interfaccia per unità di area
- Q_{OX} carica nell'ossido per unità di area

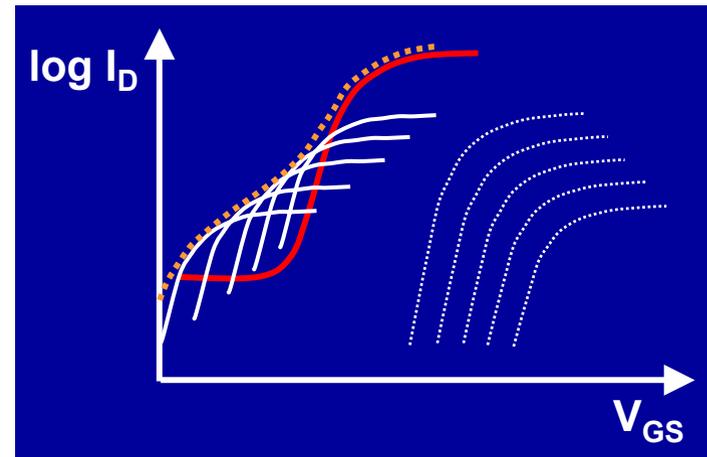
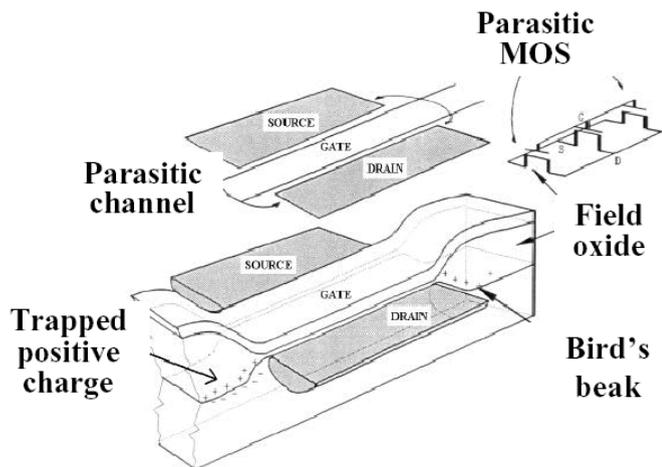
Corrente di sottosoglia

- Corrente che fluisce tra D e S per $V_{GS} < V_T$
- Variazione legata a due fattori
 - tensione di soglia
 - pendenza caratteristica I_D - V_{GS} sottosoglia
- **NMOS** $V_T \downarrow$, pendenza $\downarrow \Rightarrow \uparrow I_D$ sottosoglia
- **PMOS** $V_T \uparrow$, pendenza $\downarrow \Rightarrow \downarrow I_D$ sottosoglia



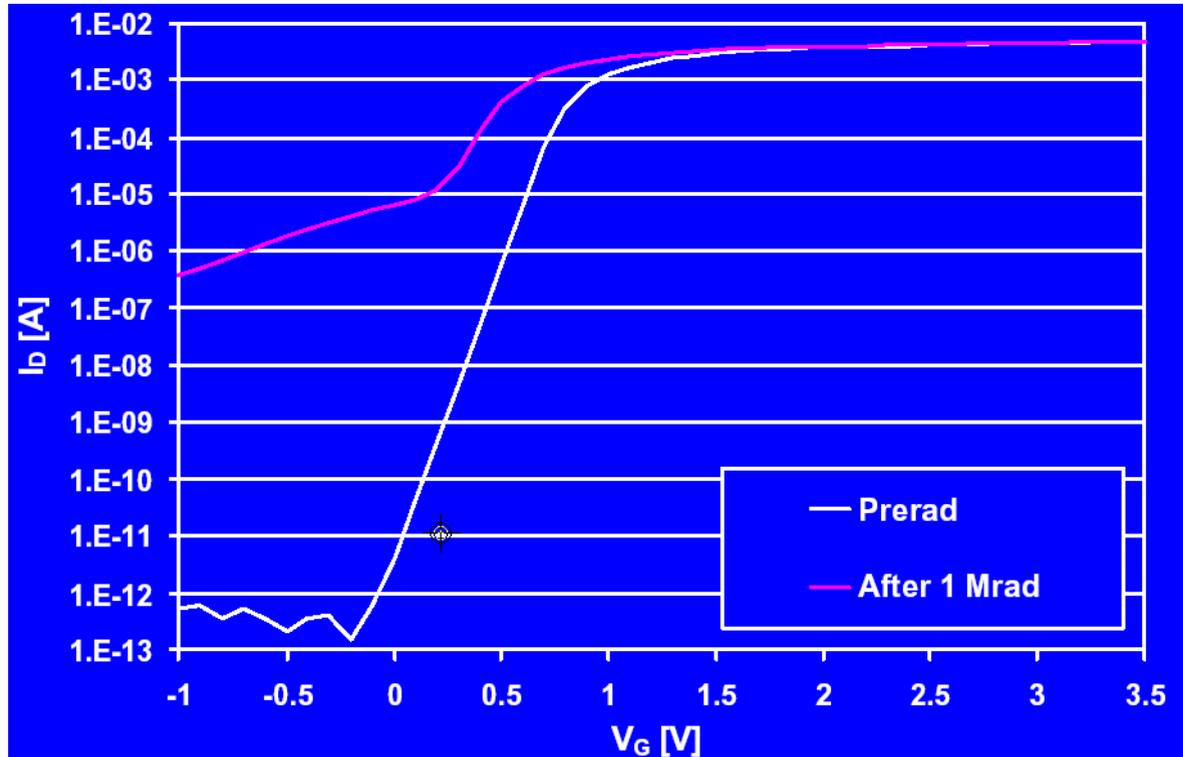
Correnti parassite

- percorsi conduttivi parassiti tra S e D in regione di *bird's beak* e sotto ossido di campo
- In questa regione spessore ossido $>$ rispetto a gate \Rightarrow carica intrappolata crea canale conduttivo parassita Transistor parassita rappresentato da diversi transistor in // con $\neq W$ e $L =$ a quella di dispositivo principale
- Effetto solo su nMOS, per pMOS accumulo di carica è positivo e conduzione tra D e S avviene per trasporto di h



Correnti parassite e di sottosoglia

NMOS – tecnologia $0.7 \mu\text{m}$ - $t_{\text{OX}} = 17 \text{ nm}$



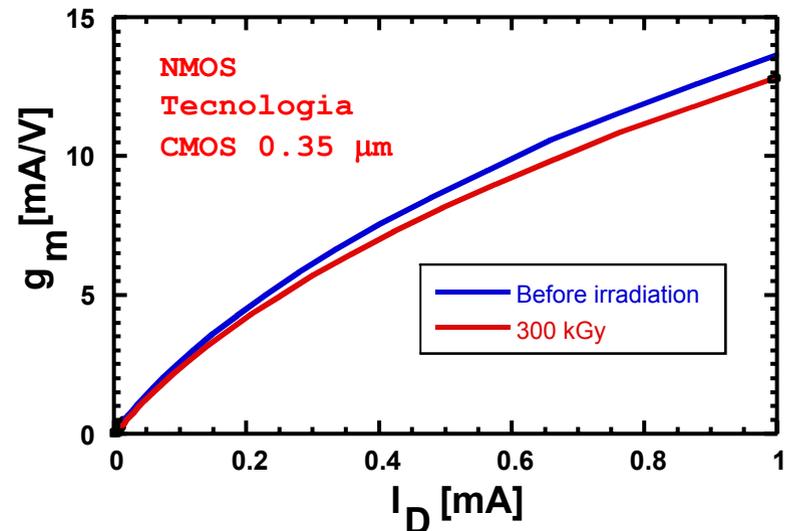
Degradazione della mobilità

- formazione di trappole all'interfaccia

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha \cdot (\Delta N_{it})}$$

μ_0 mobilità pre-irraggiamento
 ΔN_{it} aumento trappole interfaccia
 α Parametro della tecnologia
 (10^{-14} cm^2)

- Degradazione mobilità
- ⇒ diminuzione della transconduttanza



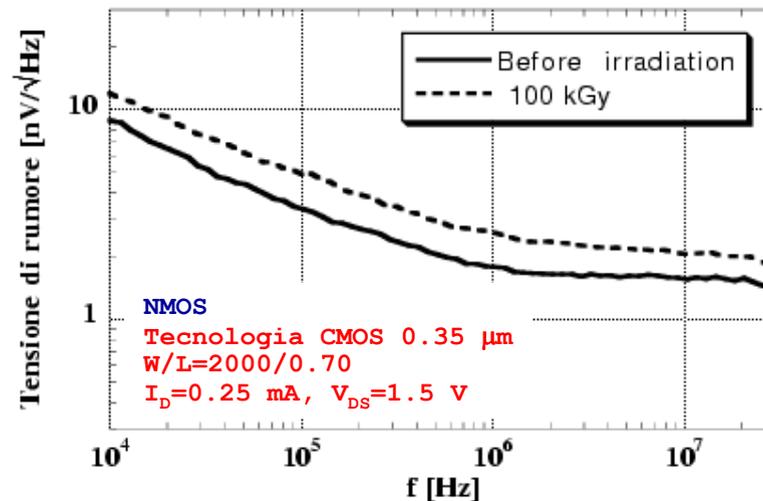
Aumento rumore elettronico

- Rumore bianco

- Contributo $R_{GG'}$ e $R_{BB'}$: non varia
- Rumore termico di canale riferito al gate: \uparrow a causa di \downarrow di g_m

- Rumore Flicker

- \uparrow in relazione con carica positiva intrappolata nell'ossido in prossimità dell'interfaccia e con le trappole di bordo



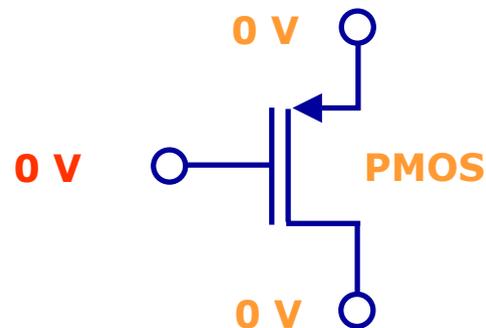
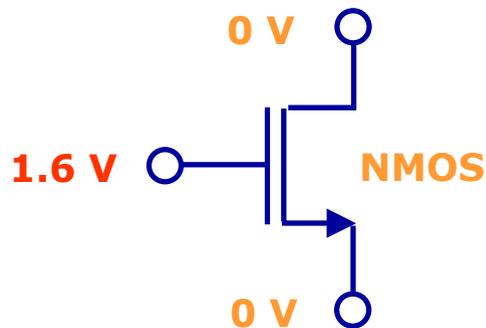
Effetti da evento singolo

(SEE, Single Event Effects)

- Effetti dovuti al passaggio di una singola particella che genera una variazione del funzionamento di uno o più dispositivi e dell'intero circuito a cui appartengono
 - **Single Event Upset (SEU)** modifica istantanea dello stato logico di una cella di memoria
 - **Single Event Latch-up (SEL)** la presenza di un transistor PNP parassita porta all'aumento della corrente e alla distruzione del dispositivo se il latch-up non viene interrotto prontamente

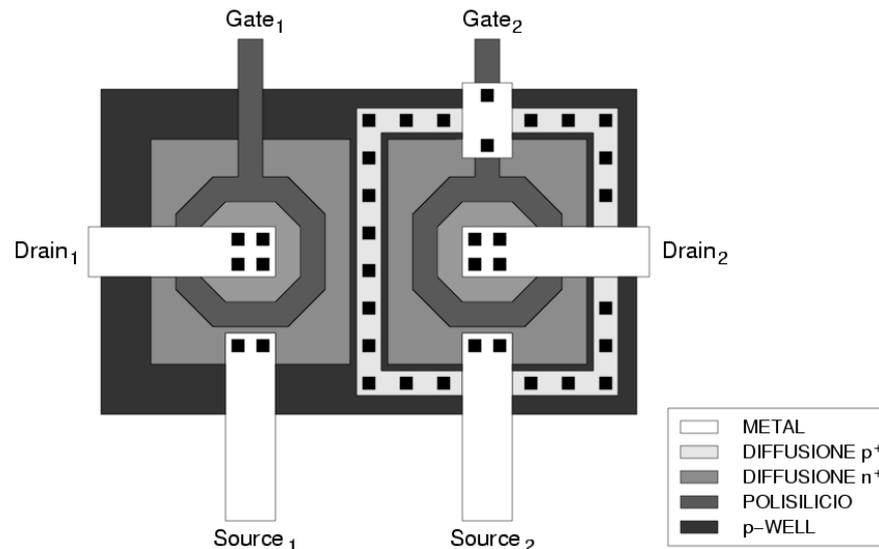
Condizioni di polarizzazione

- effetti dell'irraggiamento su parametri elettrici dei MOS dipendono da movimento delle lacune e intrappolamento di cariche all'interfaccia $Si-SiO_2$
 ⇒ dipendono da condizioni di polarizzazione durante l'irraggiamento
- condizioni "worst-case" (favoriscono spostamento di lacune in SiO_2 ⇒ accrescono effetti di radiazioni)



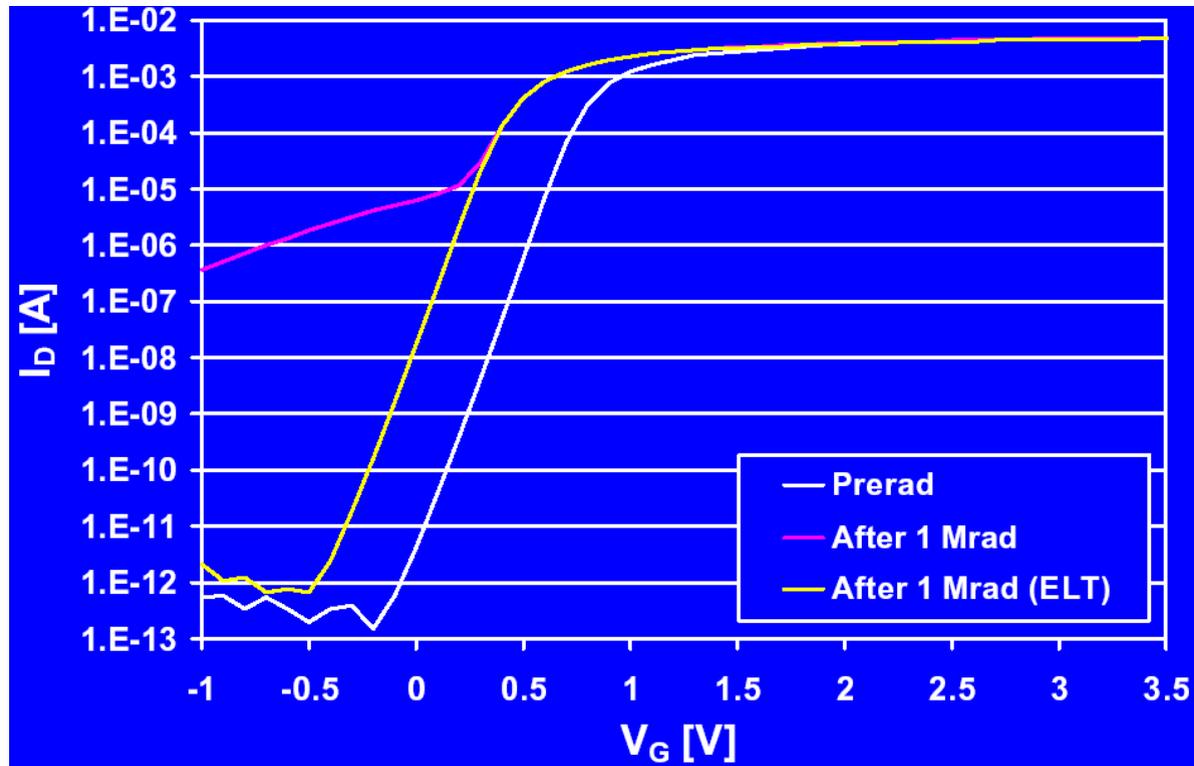
Approccio Radiation Tolerant

- tecnologie CMOS *deep submicron* con spessori dell'ossido di gate di qualche nm
- impiego di particolari tecniche di layout
 - Enclosed Layout Transistor (ELT)
 - guard rings



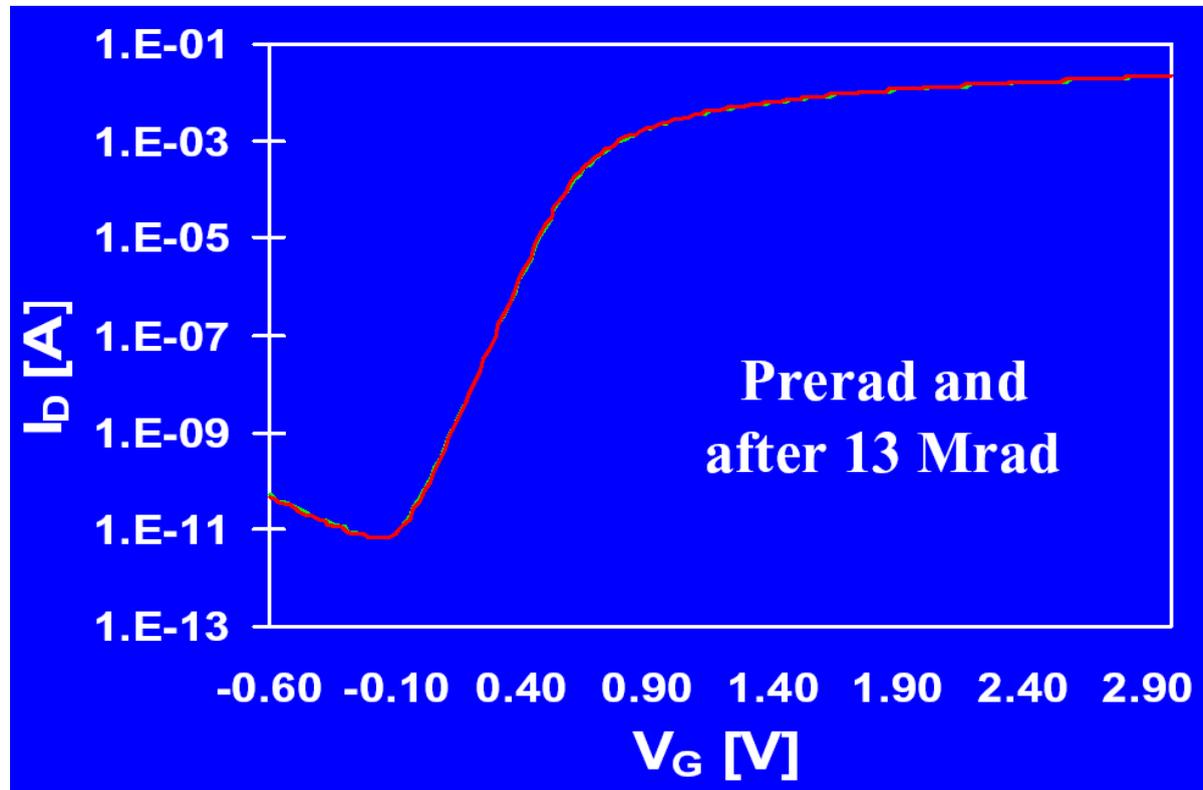
Effetto dell'ELT

NMOS – tecnologia $0.7 \mu\text{m}$ - $t_{\text{OX}} = 17 \text{ nm}$



Effetto di ELT e *scaling*

NMOS – tecnologia 0.25 μm - *ELT*



Effetto dello *scaling* tecnologico

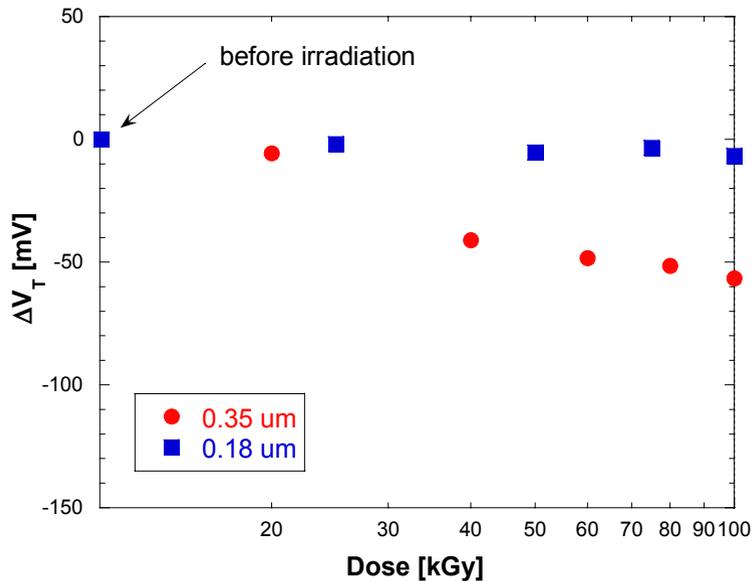
- effetti delle radiazioni sui due tecnologie CMOS a canale submicrometrico

Lunghezza minima di canale [μm]	0.35	0.18
Spessore ossido di gate [nm]	7.0	4.0
Tensione di alimentazione [V]	3.3	1.8

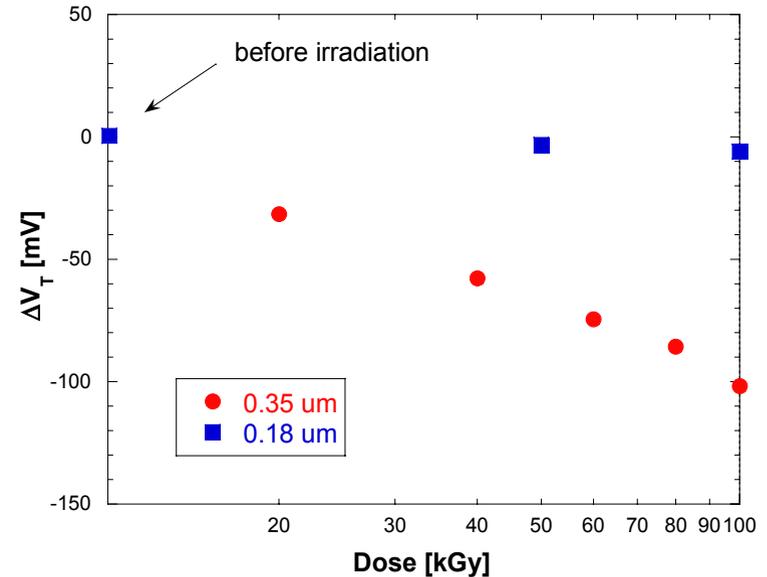
- Condizioni di irraggiamento
 - Sorgente ^{60}Co
 - Dose rate 0.3 Gy(Si)/s
 - Dose totale 300 kGy(Si)
 - Polarizzazione *worst-case*

Effetto dello *scaling* su V_T

nMOS

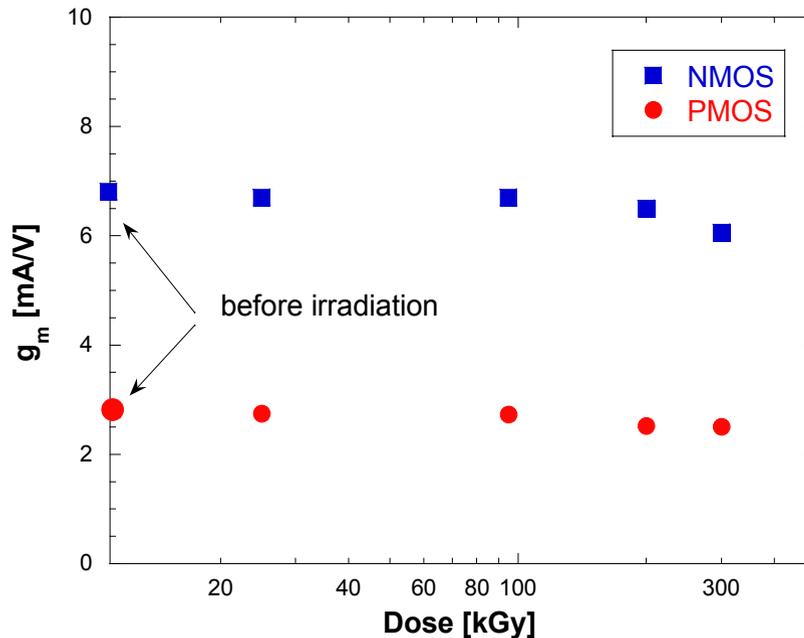


pMOS



⇒ ridotta variazione della tensione di soglia per effetto dello *scaling* delle dimensioni dell'ossido

Effetto dello *scaling* sulla transconduttanza



Tecnologia CMOS 0.18 μm

NMOS

$W/L=2000/0.70$

$I_D=0.25 \text{ mA}$

$V_{DS}=0.8 \text{ V}$

PMOS

$W/L=2000/0.5$

$I_D=0.25 \text{ mA}$

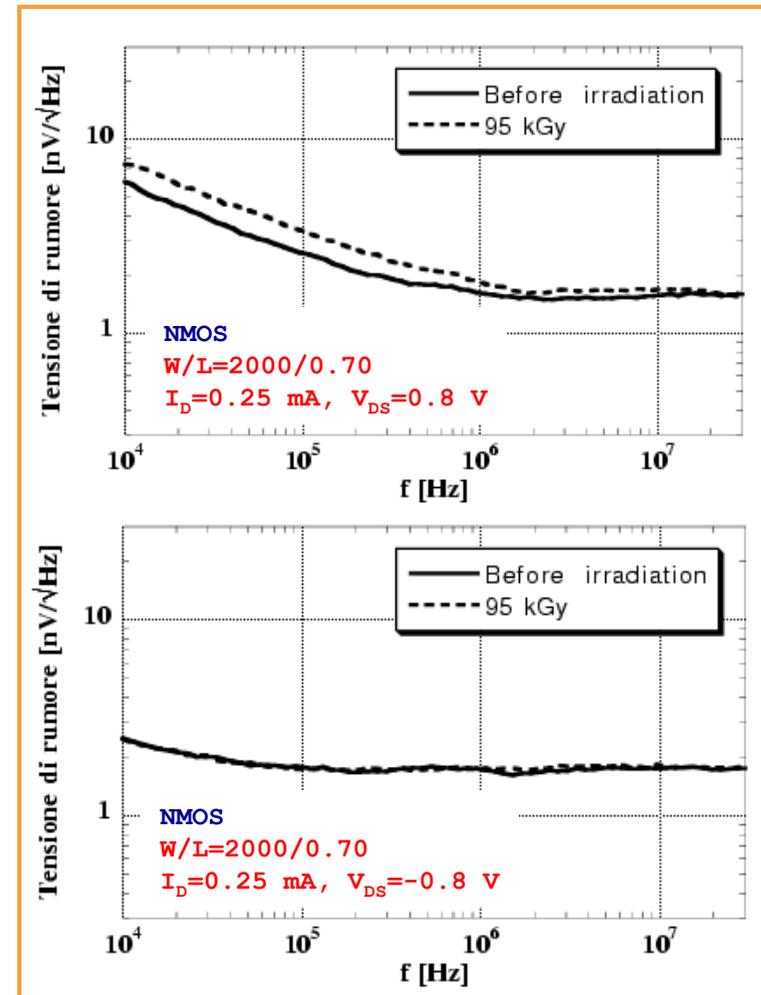
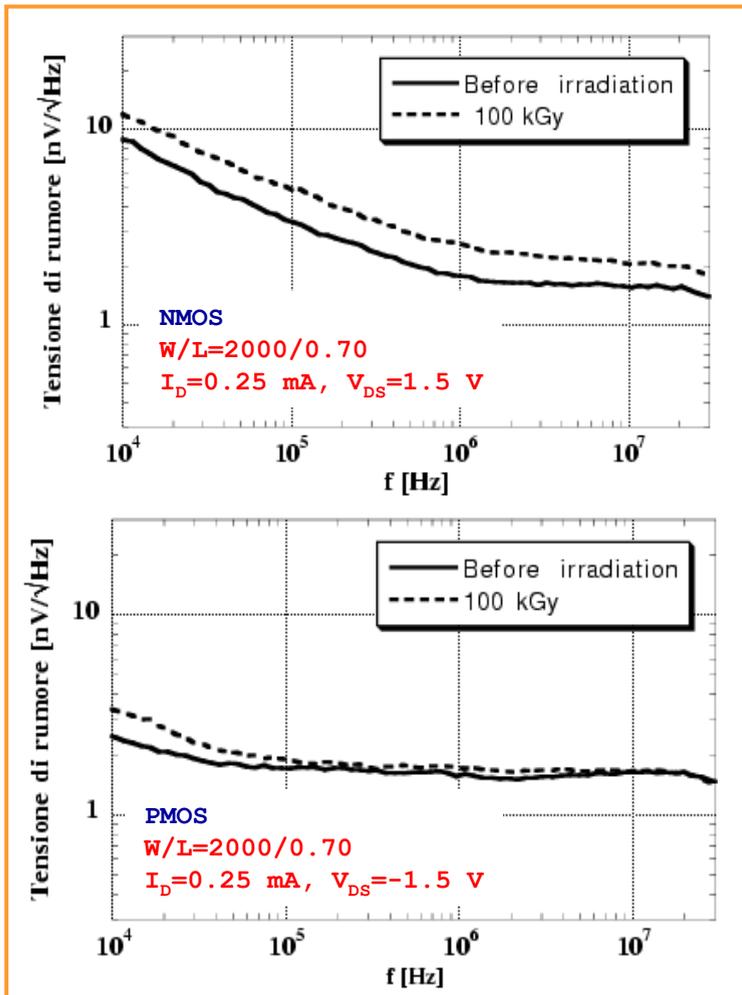
$V_{DS}=-0.8 \text{ V}$

\Rightarrow ridotta variazione della transconduttanza per effetto dello *scaling* delle dimensioni dell'ossido

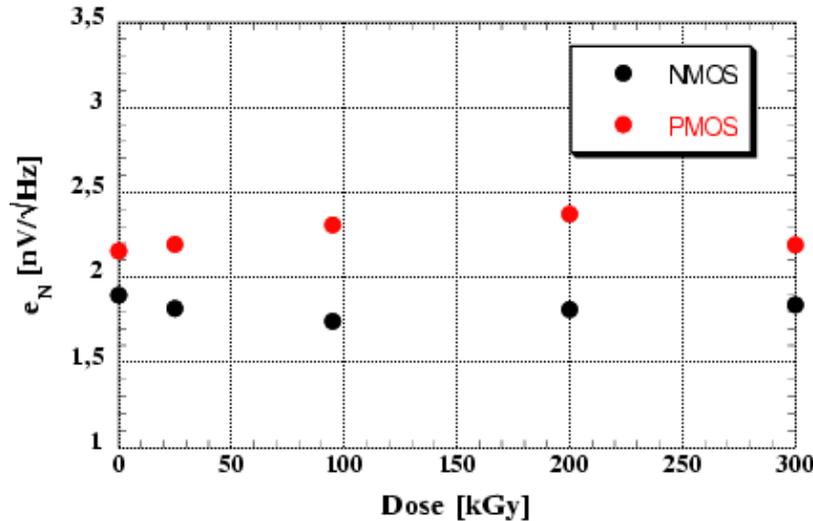
Effetto dello *scaling* sul rumore

tecnologia 0.35 μm

tecnologia 0.18 μm



Effetto dello *scaling* sul rumore termico di canale



Tecnologia CMOS 0.18 μm

$W/L=200/0.70$

$I_D=0.5 \text{ mA}$

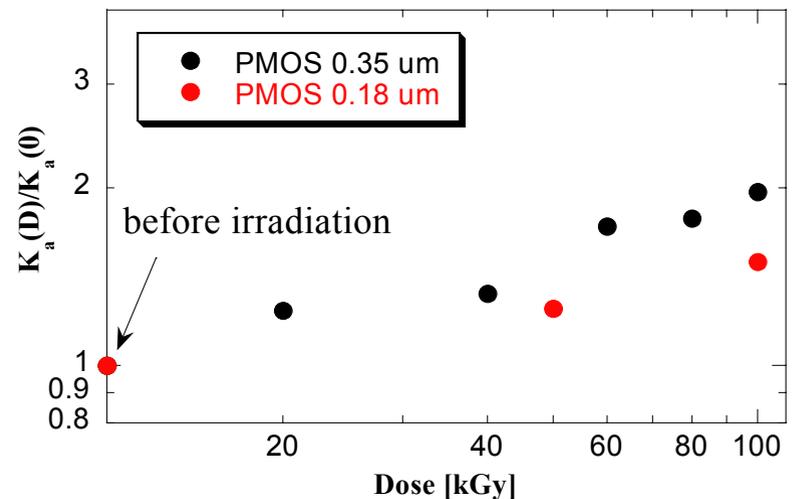
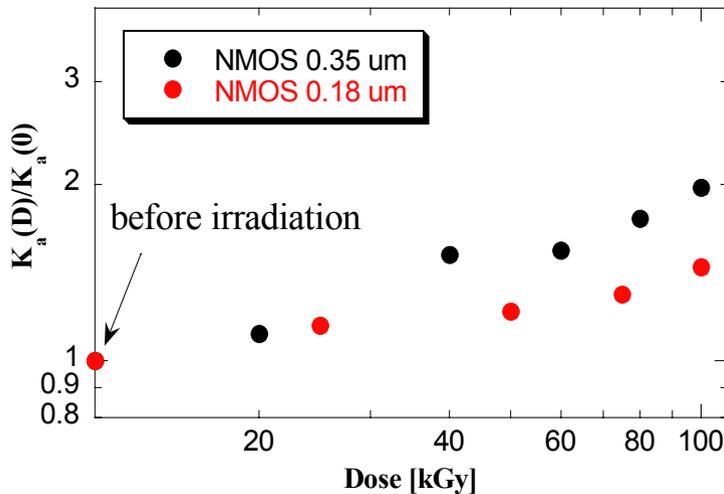
$|V_{DS}|=0.8 \text{ V}$

$$S_{in}(f) = 4kT\Gamma \frac{1}{g_m}$$

\Rightarrow ridotta variazione del rumore termico di canale per effetto della ridotta variazione della transconduttanza

Effetto dello *scaling* sul rumore 1/f

$$S_{in_1/f}(f) = \frac{K_a}{C_{OX}^2 WL f} \Rightarrow \frac{K_a(\text{post})}{K_a(\text{pre})}$$



⇒ ridotta variazione del rumore 1/f per la tecnologia da 0.18 μm

Effetti dello *scaling* sui SEE

- **Single Event Upset (SEU)** con lo *scaling* densità di integrazione $\uparrow \Rightarrow$ quantità di carica immagazzinata per singolo bit $\downarrow \Rightarrow$ circuiti più sensibili a fenomeno del SEU
- **Single Event Latch-up (SEL)** con lo *scaling* si ha Retrograde wells, Trench isolation e ridotte VDD \Rightarrow aiutano nella prevenzione dal SEL

Bibliografia

- T.P. Ma, P.V. Dressendorfer, "Ionizing radiation effects in MOS devices & circuits", John Wiley & Sons.
- G.M. Anelli, "Design and characterization of radiation tolerant integrated circuits in deep submicron CMOS technologies for the LHC experiments", Tesi di dottorato, Politecnico di Grenoble, 2000.
- M. Manghisoni, L. Ratti, V. Re, V. Speciali, "Radiation Hardness Perspectives for the design of Analog Detector Readout Circuits in the 0.18 μm CMOS Generation", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 49 , no. 6, pp. 2902 – 2909, 2002.
- W. Snoeys, F. Faccio, M. Burns, M. Campbell, E. Cantatore, N. Carrer, et al., "Layout techniques to enhance the radiation tolerance of standard CMOS technologies demonstrated on a pixel detector readout chip", *Nucl. Instr. Meth.*, vol. A 439, pp. 349-60, 2000.
- G. Anelli, F. Faccio, S. Florian, and P. Jarron: "Noise characterization of a 0.25 μm CMOS technology for the LHC experiments", *Nucl. Instr. Meth.*, vol. A457, pp. 361-368, 2001.