

Efekty radiacyjne typu *single-event*

Michał Bochenek

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

14 kwietnia 2008



Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym LET (Linear Energy Transfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym LET (Linear Energy Transfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym LET (Linear Energy Transfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym LET (Linear Energy Transfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym LET (Linear Energy Transfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym **LET (Linear Energy Transfer)**
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym **LET (Linear Energy Transfer)**
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym **LET** (**L**inear **E**nergy **T**ransfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym **LET** (**L**inear **E**nergy **T**ransfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Wpływ promieniowania na elektronikę

- **Total Ionizing Dose - proporcjonalne do dawki**
 - neutrony, protony, ciężkie jony, fotony γ
 - przesunięcie napięcia progowego, degradacja transkonduktancji i szybkości układu, wzrost poziomu szumów białych
- **Single Event Effects**
 - cząstki o dużym **LET** (**L**inear **E**nergy **T**ransfer)
 - błędy lub zniszczenie układu elektronicznego
- **Defekty strukturalne (Displacement Damage)**
 - zniszczenia w sieci krystalicznej
 - defekt widziany jako domieszka - zmienia się poziom domieszkowania

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - **SET** - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - **SEL**

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - **SEGR**

Single Event Burnout - **SEB**

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Rodzaje efektów radiacyjnych typu *single-event*

Efekty typu „non-destructive”

Single Event Upset - SEU

Single Event Functional Interrupt - SEFI - SEU w logice

Single Event Transient - SET - zmiany w propagacji sygnału

Single Event Latchup - SEL

Efekty typu „destructive”

Single Event Gate Rupture - SEGR

Single Event Burnout - SEB

Single Event Upset

Bardzo, ale to bardzo krótki rys historyczny

W roku 1962 obliczono, że w przypadku tranzystorów o długości kanału poniżej $1\mu\text{m}$ wpływ na ich pracę mogą mieć pojedyncze cząstki naładowane (S. Thompson)

- 1975 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice pochodzącej z satelitów (D. Binder & E.C. Smith),
- 1978 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice konwencjonalnej (T.C. May & M.H. Woods),
- 1979 r. - neutrony i protony, jako źródło powstawania błędów w układach cyfrowych (J.L. Ziegler & W.A. Lanford),
- 1983 r. - cząstki α , jako źródło powstawania błędów w komórkach pamięci (O’Gorman)
- 1995 r. - ^{10}B i reakcje typu (n, α) produkujące jony ^7Li (R. Bauman, T. Hossain & H. Kitagawa)

Bardzo, ale to bardzo krótki rys historyczny

W roku 1962 obliczono, że w przypadku tranzystorów o długości kanału poniżej $1\mu\text{m}$ wpływ na ich pracę mogą mieć pojedyncze cząstki naładowane (S. Thompson)

- 1975 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice pochodzącej z satelitów (D. Binder & E.C. Smith),
- 1978 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice konwencjonalnej (T.C. May & M.H. Woods),
- 1979 r. - neutrony i protony, jako źródło powstawania błędów w układach cyfrowych (J.L. Ziegler & W.A. Lanford),
- 1983 r. - cząstki α , jako źródło powstawania błędów w komórkach pamięci (O’Gorman)
- 1995 r. - ^{10}B i reakcje typu (n, α) produkujące jony ^7Li (R. Bauman, T. Hossain & H. Kitagawa)

Bardzo, ale to bardzo krótki rys historyczny

W roku 1962 obliczono, że w przypadku tranzystorów o długości kanału poniżej $1\mu\text{m}$ wpływ na ich pracę mogą mieć pojedyncze cząstki naładowane (S. Thompson)

- 1975 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice pochodzącej z satelitów (D. Binder & E.C. Smith),
- 1978 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice konwencjonalnej (T.C. May & M.H. Woods),
- 1979 r. - neutrony i protony, jako źródło powstawania błędów w układach cyfrowych (J.L. Ziegler & W.A. Lanford),
- 1983 r. - cząstki α , jako źródło powstawania błędów w komórkach pamięci (O’Gorman)
- 1995 r. - ^{10}B i reakcje typu (n, α) produkujące jony ^7Li (R. Bauman, T. Hossain & H. Kitagawa)

Bardzo, ale to bardzo krótki rys historyczny

W roku 1962 obliczono, że w przypadku tranzystorów o długości kanału poniżej $1\mu\text{m}$ wpływ na ich pracę mogą mieć pojedyncze cząstki naładowane (S. Thompson)

- 1975 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice pochodzącej z satelitów (D. Binder & E.C. Smith),
- 1978 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice konwencjonalnej (T.C. May & M.H. Woods),
- 1979 r. - neutrony i protony, jako źródło powstawania błędów w układach cyfrowych (J.L. Ziegler & W.A. Lanford),
- 1983 r. - cząstki α , jako źródło powstawania błędów w komórkach pamięci (O’Gorman)
- 1995 r. - ^{10}B i reakcje typu (n, α) produkujące jony ^7Li (R. Bauman, T. Hossain & H. Kitagawa)

Bardzo, ale to bardzo krótki rys historyczny

W roku 1962 obliczono, że w przypadku tranzystorów o długości kanału poniżej $1\mu\text{m}$ wpływ na ich pracę mogą mieć pojedyncze cząstki naładowane (S. Thompson)

- 1975 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice pochodzącej z satelitów (D. Binder & E.C. Smith),
- 1978 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice konwencjonalnej (T.C. May & M.H. Woods),
- 1979 r. - neutrony i protony, jako źródło powstawania błędów w układach cyfrowych (J.L. Ziegler & W.A. Lanford),
- 1983 r. - cząstki α , jako źródło powstawania błędów w komórkach pamięci (O’Gorman)
- 1995 r. - ^{10}B i reakcje typu (n, α) produkujące jony ^7Li (R. Bauman, T. Hossain & H. Kitagawa)

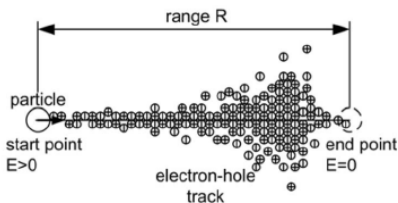
Bardzo, ale to bardzo krótki rys historyczny

W roku 1962 obliczono, że w przypadku tranzystorów o długości kanału poniżej $1\mu\text{m}$ wpływ na ich pracę mogą mieć pojedyncze cząstki naładowane (S. Thompson)

- 1975 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice pochodzącej z satelitów (D. Binder & E.C. Smith),
- 1978 r. - pierwsze obserwacje efektów typu SEU w elektronice konwencjonalnej (T.C. May & M.H. Woods),
- 1979 r. - neutrony i protony, jako źródło powstawania błędów w układach cyfrowych (J.L. Ziegler & W.A. Lanford),
- 1983 r. - cząstki α , jako źródło powstawania błędów w komórkach pamięci (O’Gorman)
- 1995 r. - ^{10}B i reakcje typu (n, α) produkujące jony ^7Li (R. Bauman, T. Hossain & H. Kitagawa)

Single Event Upset

SEU/soft errors są powodowane przez skoncentrowane nośniki ładunku (dziury i elektrony) wygenerowane w wyniku jonizacji przez cząstkę w różnych miejscach półprzewodnika.

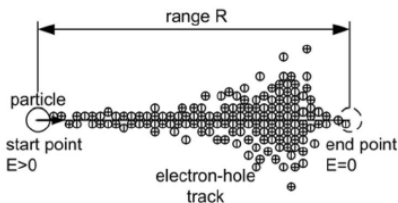


Przykład

- W technologii CMOS 90nm operuje się ładunkami rzędu **10fC**.
- Światło widzialne o energii kilka eV jest w stanie wygenerować jedną parę elektron - dziura, odpowiada to ładunkowi **0,00016fC**.
- Pojedyncza cząstka α o typowej energii (3-10 MeV) generuje ładunek rzędu **100fC!**

Single Event Upset

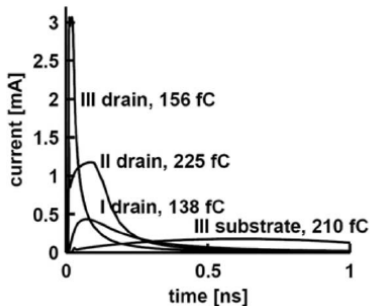
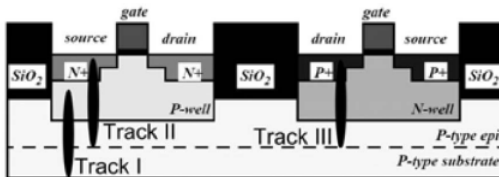
SEU/soft errors są powodowane przez skoncentrowane nośniki ładunku (dziury i elektrony) wygenerowane w wyniku jonizacji przez cząstkę w różnych miejscach półprzewodnika.



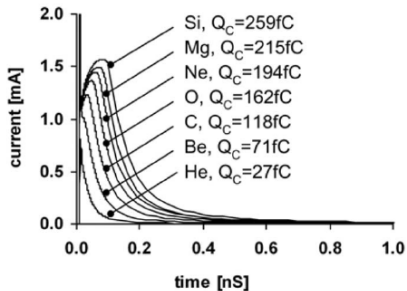
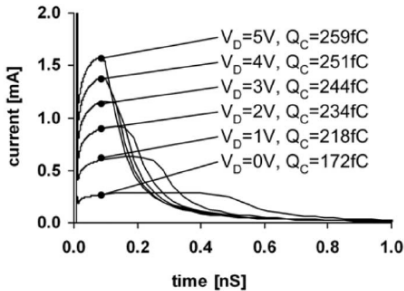
Przykład

- W technologii CMOS 90nm operuje się ładunkami rzędu **10fC**.
- Światło widzialne o energii kilka eV jest w stanie wygenerować jedną parę elektron - dziura, odpowiada to ładunkowi **0,00016fC**.
- Pojedyncza cząstka α o typowej energii (3-10 MeV) generuje ładunek rzędu **100fC!**

Single Event Upset - prądy wygenerowane w tranzystorze MOS



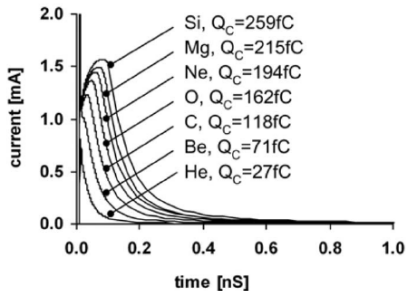
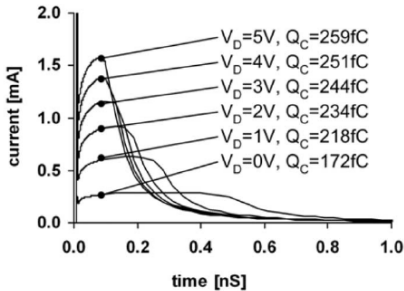
Zależność wygenerowanego prądu od V_D oraz rodzaju cząstki



Wnioski:

- 1 wraz ze wzrostem napięcia na drenie rośnie pole elektryczne, co w efekcie daje większy zebrany ładunek
- 2 cięższe cząstki posiadają większy LET, przechodząc przez materiał półprzewodnika generują więcej par elektron - dziura, a to w efekcie również daje większy prąd

Zależność wygenerowanego prądu od V_D oraz rodzaju cząstki

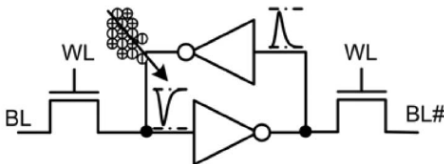


Wnioski:

- 1 wraz ze wzrostem napięcia na drenie rośnie pole elektryczne, co w efekcie daje większy zebrany ładunek
- 2 cięższe cząstki posiadają większy LET, przechodząc przez materiał półprzewodnika generują więcej par elektron - dziura, a to w efekcie również daje większy prąd

Wpływ SEU na elektronikę cyfrową

Efekty oddziaływania SEU na układy elektroniki cyfrowej są różne dla układów statycznych i dynamicznych, z i *bez* sprzężenia zwrotnego.



Jeśli zaburzenie jest większe od marginesu szumów dla danego urządzenia, to SEU może być zinterpretowane jako odwrotny stan logiczny.

Sensitive Volume Model - założenia

Sensitive Volume Model

Teoretyczny model pozwalający wyznaczyć podatność danego układu na wystąpienie efektów single-event upset (ale również single-event latchup).

Podstawowe założenia modelu:

- 1 Porcja ładunku (wytworzonego przez cząstkę jonizującą), który bierze udział w SEU jest generowana w pewnej zdefiniowanej objętości.
- 2 Ładunek wygenerowany poza tą zdefiniowaną objętością jest równy zero (nic nie wnosi do układu).

Sensitive Volume Model - założenia

Sensitive Volume Model

Teoretyczny model pozwalający wyznaczyć podatność danego układu na wystąpienie efektów single-event upset (ale również single-event latchup).

Podstawowe założenia modelu:

- 1 Porcja ładunku (wytworzonego przez cząstkę jonizującą), który bierze udział w SEU jest generowana w pewnej zdefiniowanej objętości.
- 2 Ładunek wygenerowany poza tą zdefiniowaną objętością jest równy zero (nic nie wnosi do układu).

Sensitive Volume Model - założenia

Sensitive Volume Model

Teoretyczny model pozwalający wyznaczyć podatność danego układu na wystąpienie efektów single-event upset (ale również single-event latchup).

Podstawowe założenia modelu:

- 1 Porcja ładunku (wytworzonego przez cząstkę jonizującą), który bierze udział w SEU jest generowana w pewnej zdefiniowanej objętości.
- 2 Ładunek wygenerowany poza tą zdefiniowaną objętością jest równy zero (nic nie wnosi do układu).

Sensitive Volume Model - założenia

Sensitive Volume Model

Teoretyczny model pozwalający wyznaczyć podatność danego układu na wystąpienie efektów single-event upset (ale również single-event latchup).

Podstawowe założenia modelu:

- 1 Porcja ładunku (wytworzonego przez cząstkę jonizującą), który bierze udział w SEU jest generowana w pewnej zdefiniowanej objętości.
- 2 Ładunek wygenerowany poza tą zdefiniowaną objętością jest równy zero (nic nie wnosi do układu).

Sensitive Volume Model - postulaty

Postulat I

Dla każdego punktu \mathbf{r} istnieje pewna funkcja wagowa $\Omega(\mathbf{r})$, która określa wkład ładunku wygenerowanego w punkcie \mathbf{r} na całkowity zdeponowany ładunek (w porównaniu z innymi punktami).

Definiowany jest ładunek krytyczny potrzebny do wygenerowania SEU:

$$\int \rho(\mathbf{r}) \Omega(\mathbf{r}) d^3r > Q_c$$

Postulat II

Produkty reakcji wytworzone przez protony mają tak mały zasięg, że $\Omega(\mathbf{r})$ jest w przybliżeniu stała na całej drodze reakcji tych produktów.

Ostateczna formuła na przekrój czynny na SEU (dla protonu):

$$\sigma_{pr}(E) = n \int \alpha \left(E, \frac{Q_c}{\Omega(\mathbf{r})} \right) d^3r$$

Sensitive Volume Model - postulaty

Postulat I

Dla każdego punktu \mathbf{r} istnieje pewna funkcja wagowa $\Omega(\mathbf{r})$, która określa wkład ładunku wygenerowanego w punkcie \mathbf{r} na całkowity zdeponowany ładunek (w porównaniu z innymi punktami).

Definiowany jest ładunek krytyczny potrzebny do wygenerowania SEU:

$$\int \rho(\mathbf{r}) \Omega(\mathbf{r}) d^3r > Q_c$$

Postulat II

Produkty reakcji wytworzone przez protony mają tak mały zasięg, że $\Omega(\mathbf{r})$ jest w przybliżeniu stała na całej drodze reakcji tych produktów.

Ostateczna formuła na przekrój czynny na SEU (dla protonu):

$$\sigma_{pr}(E) = n \int \alpha \left(E, \frac{Q_c}{\Omega(\mathbf{r})} \right) d^3r$$

Sensitive Volume Model - postulaty

Postulat I

Dla każdego punktu \mathbf{r} istnieje pewna funkcja wagowa $\Omega(\mathbf{r})$, która określa wkład ładunku wygenerowanego w punkcie \mathbf{r} na całkowity zdeponowany ładunek (w porównaniu z innymi punktami).

Definiowany jest ładunek krytyczny potrzebny do wygenerowania SEU:

$$\int \rho(\mathbf{r}) \Omega(\mathbf{r}) d^3r > Q_c$$

Postulat II

Produkty reakcji wytworzone przez protony mają tak mały zasięg, że $\Omega(\mathbf{r})$ jest w przybliżeniu stała na całej drodze reakcji tych produktów.

Ostateczna formuła na przekrój czynny na SEU (dla protonu):

$$\sigma_{pr}(E) = n \int \alpha \left(E, \frac{Q_c}{\Omega(\mathbf{r})} \right) d^3r$$

Sensitive Volume Model - postulaty

Postulat I

Dla każdego punktu \mathbf{r} istnieje pewna funkcja wagowa $\Omega(\mathbf{r})$, która określa wkład ładunku wygenerowanego w punkcie \mathbf{r} na całkowity zdeponowany ładunek (w porównaniu z innymi punktami).

Definiowany jest ładunek krytyczny potrzebny do wygenerowania SEU:

$$\int \rho(\mathbf{r}) \Omega(\mathbf{r}) d^3r > Q_c$$

Postulat II

Produkty reakcji wytworzone przez protony mają tak mały zasięg, że $\Omega(\mathbf{r})$ jest w przybliżeniu stała na całej drodze reakcji tych produktów.

Ostateczna formuła na przekrój czynny na SEU (dla protonu):

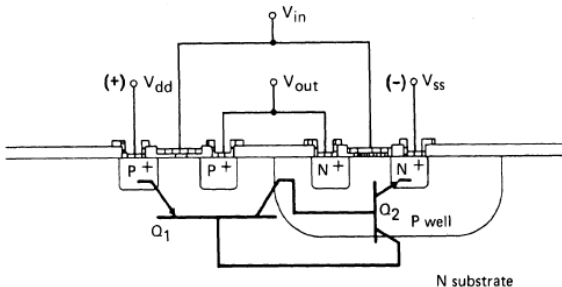
$$\sigma_{pr}(E) = n \int \alpha \left(E, \frac{Q_c}{\Omega(\mathbf{r})} \right) d^3r$$

Single Event Latchup

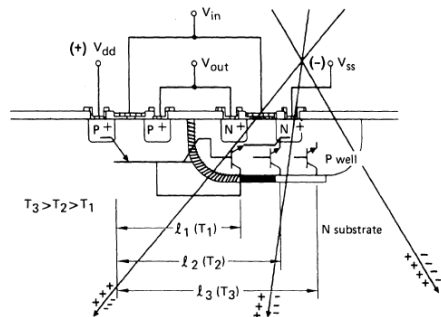
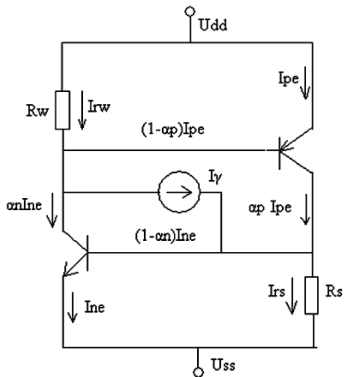
Single Event Latchup

Istnieją dwa rodzaje tego efektu:

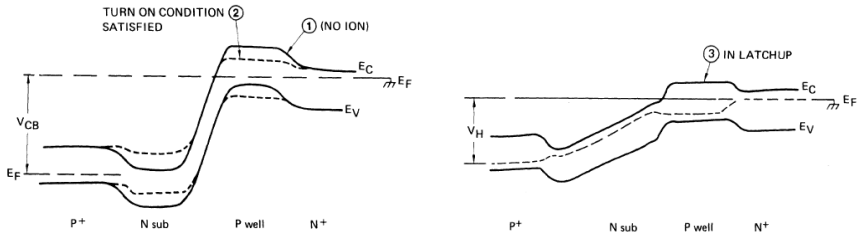
- Dose-Rate Latchup - występuje w technologii BJT i CMOS
- Single-Event Latchup - występuje tylko w technologii CMOS



Single Event Latchup

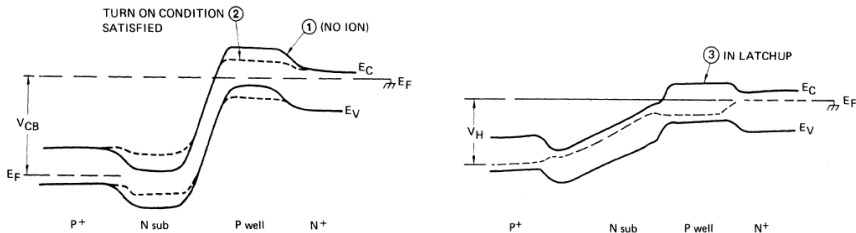


Single Event Latchup - mechanizm fizyczny



- przelatująca cząstka jonizująca generuje na swojej drodze pary e-h,
- wygenerowane nośniki są zmiatane w polu elektrycznym złącza p-well / n-substrate, następuje modyfikacja kształtu pasma przewodzenia i pasma walencyjnego,

Single Event Latchup - mechanizm fizyczny



- przelatująca cząstka jonizująca generuje na swojej drodze pary e-h,
- wygenerowane nośniki są zmiatane w polu elektrycznym złącza p-well / n-substrate, następuje modyfikacja kształtu pasma przewodzenia i pasma walencyjnego,

Single Event Latchup - mechanizm fizyczny

- nośniki większościowe z silnie zjonizowanego obszaru dyfundują do obszarów o niższej gęstości ładunków (dalsza deformacja kształtu pasm)

$$t_{tr} = \frac{W_b^2}{2D_{PB}}$$

- t_{tr} - czas przejścia przez bazę,
- W_b - szerokość bazy,
- D_{PB} - stała dyfuzji nośników w bazie.

Jeżeli czas życia nośników ładunku jest mniejszy niż czas ich przejścia przez bazę, to zrekombinują one po drodze zanim tranzystor będzie miał szansę się włączyć.

- nośniki docierają do złącza baza - emiter i polaryzują je w kierunku przewodzenia, następuje przepływ dużego prądu przez złącze.

Single Event Latchup - mechanizm fizyczny

- nośniki większościowe z silnie zjonizowanego obszaru dyfundują do obszarów o niższej gęstości ładunków (dalsza deformacja kształtu pasm)

$$t_{tr} = \frac{W_b^2}{2D_{PB}}$$

- t_{tr} - czas przejścia przez bazę,
- W_b - szerokość bazy,
- D_{PB} - stała dyfuzji nośników w bazie.

Jeżeli czas życia nośników ładunku jest mniejszy niż czas ich przejścia przez bazę, to zrekombinują one po drodze zanim tranzystor będzie miał szansę się włączyć.

- nośniki docierają do złącza baza - emiter i polaryzują je w kierunku przewodzenia, następuje przepływ dużego prądu przez złącze.

Single Event Latchup - mechanizm fizyczny

- nośniki większościowe z silnie zjonizowanego obszaru dyfundują do obszarów o niższej gęstości ładunków (dalsza deformacja kształtu pasm)

$$t_{tr} = \frac{W_b^2}{2D_{PB}}$$

- t_{tr} - czas przejścia przez bazę,
- W_b - szerokość bazy,
- D_{PB} - stała dyfuzji nośników w bazie.

Jeżeli czas życia nośników ładunku jest mniejszy niż czas ich przejścia przez bazę, to zrekombinują one po drodze zanim tranzystor będzie miał szansę się włączyć.

- nośniki docierają do złącza baza - emiter i polaryzują je w kierunku przewodzenia, następuje przepływ dużego prądu przez złącze.

Warunki wystąpienia latchup-u

Warunek wystąpienia efektu latchup-u

$$L_c = \frac{Q_c}{W_d + W_l}$$

- L_c - parametr krytyczny (critical threshold for turnon),
- Q_c - ładunek krytyczny potrzebny do wywołania SEL,
- W_d - szerokość warstwy zubożonej złącza p-well / n-substrate,
- W_l - parametr zderzenia.

Problemem jest W_d , które zależy od potencjału wbudowanego złącza ϕ_b

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad \frac{\Delta \phi_b}{\Delta T} = 2mV/^{\circ}C$$

- k - stała Boltzmanna,
- T - temperatura,
- q - ładunek elementarny,
- N_A, N_D - koncentracje domieszek,
- n_i - koncentracja ładunków samoistnych.

Warunki wystąpienia latchup-u

Warunek wystąpienia efektu latchup-u

$$L_c = \frac{Q_c}{W_d + W_I}$$

- L_c - parametr krytyczny (critical threshold for turnon),
- Q_c - ładunek krytyczny potrzebny do wywołania SEL,
- W_d - szerokość warstwy zubożonej złącza p-well / n-substrate,
- W_I - parametr zderzenia.

Problemem jest W_d , które zależy od potencjału wbudowanego złącza ϕ_b

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad \frac{\Delta \phi_b}{\Delta T} = 2mV/^{\circ}C$$

- k - stała Boltzmanna,
- T - temperatura,
- q - ładunek elementarny,
- N_A, N_D - koncentracje domieszek,
- n_i - koncentracja ładunków samoistnych.

Warunki wystąpienia latchup-u

Warunek wystąpienia efektu latchup-u

$$L_c = \frac{Q_c}{W_d + W_I}$$

- L_c - parametr krytyczny (critical threshold for turnon),
- Q_c - ładunek krytyczny potrzebny do wywołania SEL,
- W_d - szerokość warstwy zubożonej złącza p-well / n-substrate,
- W_I - parametr zderzenia.

Problemem jest W_d , które zależy od potencjału wbudowanego złącza ϕ_b

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad \frac{\Delta \phi_b}{\Delta T} = 2mV/^{\circ}C$$

- k - stała Boltzmanna,
- T - temperatura,
- q - ładunek elementarny,
- N_A, N_D - koncentracje domieszek,
- n_i - koncentracja ładunków samoistnych.

Warunki wystąpienia latchup-u

Warunek wystąpienia efektu latchup-u

$$L_c = \frac{Q_c}{W_d + W_I}$$

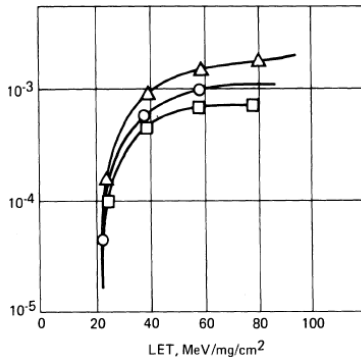
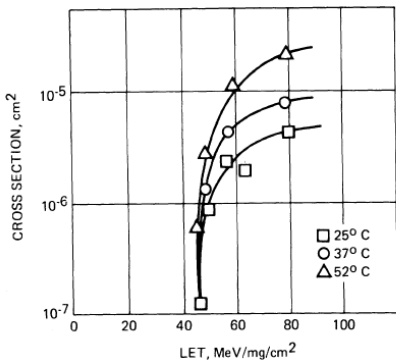
- L_c - parametr krytyczny (critical threshold for turnon),
- Q_c - ładunek krytyczny potrzebny do wywołania SEL,
- W_d - szerokość warstwy zubożonej złącza p-well / n-substrate,
- W_I - parametr zderzenia.

Problemem jest W_d , które zależy od potencjału wbudowanego złącza ϕ_b

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad \frac{\Delta\phi_b}{\Delta T} = 2mV/^{\circ}C$$

- k - stała Boltzmanna,
- T - temperatura,
- q - ładunek elementarny,
- N_A, N_D - koncentracje domieszek,
- n_i - koncentracja ładunków samoistnych.

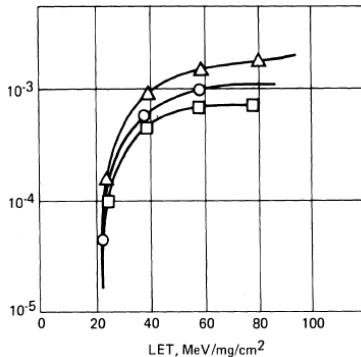
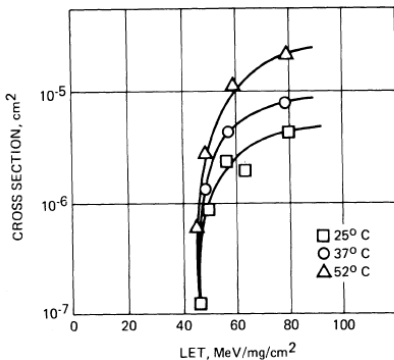
Przekrój czynny na SEL vs. LET



Wnioski:

- SEL ma wyraźny charakter progowy, występuje tylko powyżej określonej wartości LET dla cząstki jonizującej,
- SEL zależy od temperatury, przekrój czynny σ_{SEL} rośnie wyraźnie wraz z temperaturą.

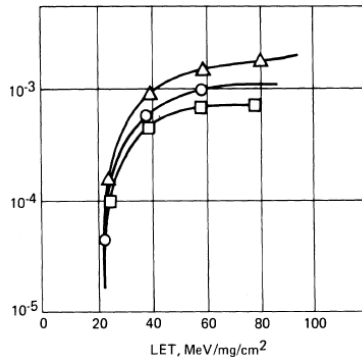
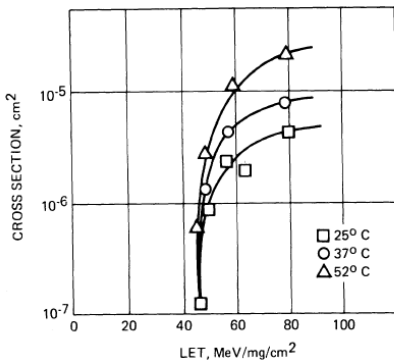
Przekrój czynny na SEL vs. LET



Wnioski:

- SEL ma wyraźny charakter progowy, występuje tylko powyżej określonej wartości LET dla cząstki jonizującej,
- SEL zależy od temperatury, przekrój czynny σ_{SEL} rośnie wyraźnie wraz z temperaturą.

Przekrój czynny na SEL vs. LET

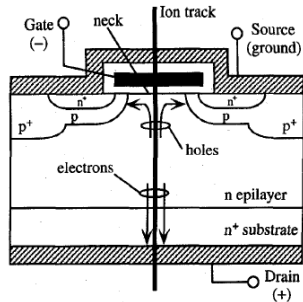
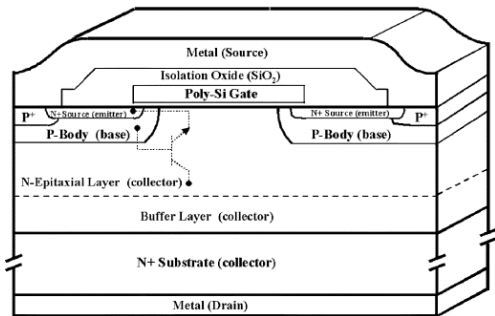


Wnioski:

- SEL ma wyraźny charakter progowy, występuje tylko powyżej określonej wartości LET dla cząstki jonizującej,
- SEL zależy od temperatury, przekrój czynny σ_{SEL} rośnie wyraźnie wraz z temperaturą.

Single Event Burnout

Single Event Burnout - schemat wertykalnego tranzystora mocy



Single Event Burnout - ogólny mechanizm zjawiska

- 1 Tranzystor jest spolaryzowany dodatnim napięciem V_D podawanym na dren,
- 2 Przechodzący przez półprzewodnik jon generuje na swojej drodze pary elektron - dziura,
- 3 Duże pole elektryczne wywołane przez wysoki potencjał na drenie skutkuje dużą gęstością prądu (nawet do $10^4 A \cdot cm^2$),
- 4 Jeśli w wyniku przepływu tego prądu na rezystancjach pasożytniczych odłoży się napięcie większe niż $0,7V$ następuje włączenie lateralnego tranzystora bipolarnego i wzmocnienie prądu,
- 5 Wzrost prądu powoduje wzrosty wydzielanej mocy (wzrost temperatury), co prowadzi do dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Single Event Burnout - ogólny mechanizm zjawiska

- 1 Tranzystor jest spolaryzowany dodatnim napięciem V_D podawanym na dren,
- 2 Przechodzący przez półprzewodnik jon generuje na swojej drodze pary elektron - dziura,
- 3 Duże pole elektryczne wywołane przez wysoki potencjał na drenie skutkuje dużą gęstością prądu (nawet do $10^4 A \cdot cm^2$),
- 4 Jeśli w wyniku przepływu tego prądu na rezystancjach pasożytniczych odłoży się napięcie większe niż $0,7V$ następuje włączenie lateralnego tranzystora bipolarnego i wzmocnienie prądu,
- 5 Wzrost prądu powoduje wzrosty wydzielanej mocy (wzrost temperatury), co prowadzi do dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Single Event Burnout - ogólny mechanizm zjawiska

- 1 Tranzystor jest spolaryzowany dodatnim napięciem V_D podawanym na dren,
- 2 Przechodzący przez półprzewodnik jon generuje na swojej drodze pary elektron - dziura,
- 3 Duże pole elektryczne wywołane przez wysoki potencjał na drenie skutkuje dużą gęstością prądu (nawet do $10^4 \text{ A} \cdot \text{cm}^2$),
- 4 Jeśli w wyniku przepływu tego prądu na rezystancjach pasożytniczych odłoży się napięcie większe niż $0,7 \text{ V}$ następuje włączenie lateralnego tranzystora bipolarnego i wzmocnienie prądu,
- 5 Wzrost prądu powoduje wzrosty wydzielanej mocy (wzrost temperatury), co prowadzi do dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Single Event Burnout - ogólny mechanizm zjawiska

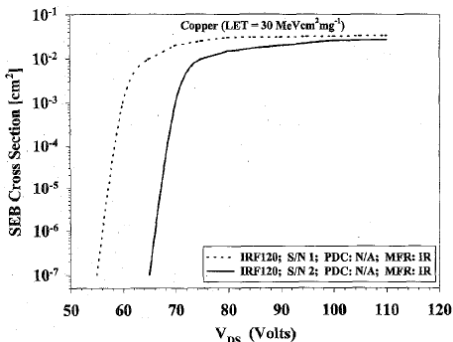
- 1 Tranzystor jest spolaryzowany dodatnim napięciem V_D podawanym na dren,
- 2 Przechodzący przez półprzewodnik jon generuje na swojej drodze pary elektron - dziura,
- 3 Duże pole elektryczne wywołane przez wysoki potencjał na drenie skutkuje dużą gęstością prądu (nawet do $10^4 A \cdot cm^2$),
- 4 Jeśli w wyniku przepływu tego prądu na rezystancjach pasożytniczych odłoży się napięcie większe niż $0,7V$ następuje włączenie lateralnego tranzystora bipolarnego i wzmocnienie prądu,
- 5 Wzrost prądu powoduje wzrosty wydzielanej mocy (wzrost temperatury), co prowadzi do dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Single Event Burnout - ogólny mechanizm zjawiska

- 1 Tranzystor jest spolaryzowany dodatnim napięciem V_D podawanym na dren,
- 2 Przechodzący przez półprzewodnik jon generuje na swojej drodze pary elektron - dziura,
- 3 Duże pole elektryczne wywołane przez wysoki potencjał na drenie skutkuje dużą gęstością prądu (nawet do $10^4 A \cdot cm^2$),
- 4 Jeśli w wyniku przepływu tego prądu na rezystancjach pasożytniczych odłoży się napięcie większe niż $0,7V$ następuje włączenie lateralnego tranzystora bipolarnego i wzmocnienie prądu,
- 5 Wzrost prądu powoduje wzrosty wydzielanej mocy (wzrost temperatury), co prowadzi do dodatniego sprzężenia zwrotnego.

Single Event Burnout - przekrój czynny na zjawisko

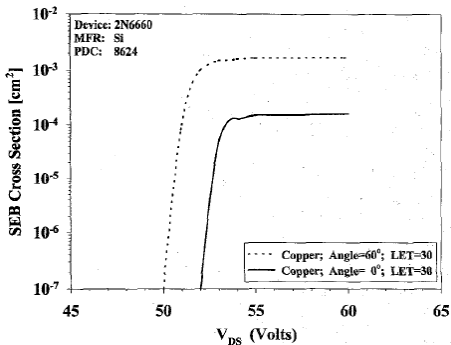
- σ_{SEB} mierzone dla różnych wartości napięcia V_{DS} oraz V_{GS} w zależności od ustalonych wartości LET jonów bombardujących próbkę,
- σ_{SEB} mierzone dla różnych wartości napięcia V_{GS} oraz LET dla ustalonych wartości napięcia V_{DS} .



- $E = 247\text{MeV}$
- $LET = 30\text{MeVcm}^2\text{mg}^{-1}$,

Single Event Burnout - wyniki doświadczalne (obserwacje kątowe)

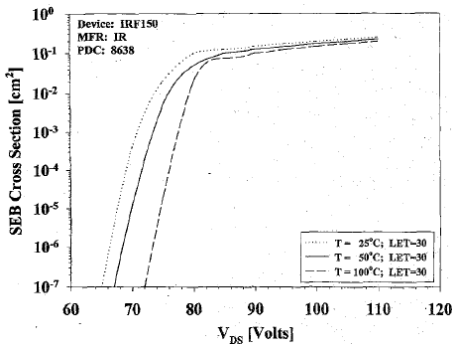
σ_{SEB} zmienia się wraz z kątem padania jonów na próbkę (zmienia się LET_{eff})



- $E = 247\text{MeV Cu}$,
- $LET = 30\text{MeVcm}^2\text{mg}^{-1}$,
- $\Theta = 0^\circ$ i 60° .

Single Event Burnout - wyniki doświadczalne (obserwacje temperaturowe)

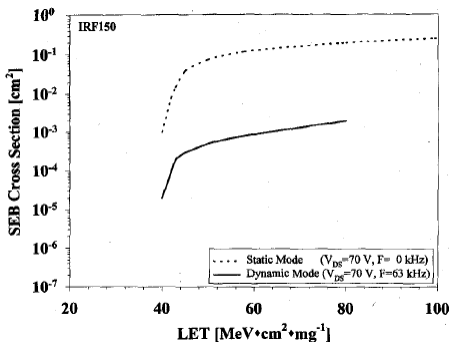
σ_{SEB} zmienia się wraz z temperaturą, w jakiej znajduje się badana próbka



- E = 247MeV Cu,
- LET = 30MeVcm²mg⁻¹,
- T = 25° C, 50° C oraz 100° C

Single Event Burnout - wyniki doświadczalne (obserwacje częstotliwościowe)

σ_{SEB} jest różny dla układów statycznych (DC) i układów dynamicznych (switching)



- $E = 247\text{ MeV Cu}$,
- $\text{LET} = 30\text{ MeVcm}^2\text{mg}^{-1}$,
- $f = 0\text{ kHz}$ oraz 60 kHz .

Single Event Burnout - wyniki doświadczalne, pozostałe zależności

- brak zależności σ_{SEB} od wcześniejszego naświetlenia,
- brak wyraźnych zależności σ_{SEB} od wartości napięcia V_{GS} ,
- duża zależność od geometrycznych parametrów zderzenia - najbardziej wrażliwy na efekty SEB jest rejon p-body / n-substrate.

Single Event Burnout - wyniki doświadczalne, pozostałe zależności

- brak zależności σ_{SEB} od wcześniejszego naświetlenia,
- brak wyraźnych zależności σ_{SEB} od wartości napięcia V_{GS} ,
- duża zależność od geometrycznych parametrów zderzenia - najbardziej wrażliwy na efekty SEB jest rejon p-body / n-substrate.

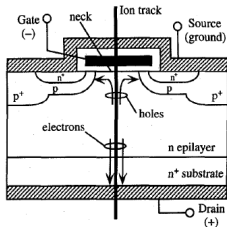
Single Event Burnout - wyniki doświadczalne, pozostałe zależności

- brak zależności σ_{SEB} od wcześniejszego naświetlenia,
- brak wyraźnych zależności σ_{SEB} od wartości napięcia V_{GS} ,
- duża zależność od geometrycznych parametrów zderzenia - najbardziej wrażliwy na efekty SEB jest rejon p-body / n-substrate.

Single Event Gate Rupture

Single Event Gate Rupture

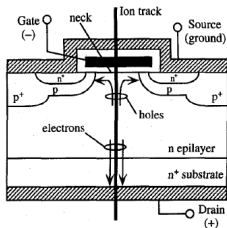
Single Event Gate Rupture to zjawisko polegające na przerwaniu bramki tranzystora w wyniku przejścia przez niego silnie jonizującej, wysokoenergetycznej cząstki.



- energia zdeponowana przez cząstkę prowadzi do wytworzenia się wzdłuż śladu dużej gęstości nośników ładunku (dziur i elektronów).
- napięcie przyłożone na bramce powoduje, że dziury zbiegają w kierunku tlenku,
- w wyniku akumulacji zwiększa się gradient pola elektrycznego,
- z chwilą przyłożenia dodatniego, wysokiego napięcia na dren, pole w tlenku może przekroczyć pewną wartość krytyczną i następuje przerwanie bramki.

Single Event Gate Rupture

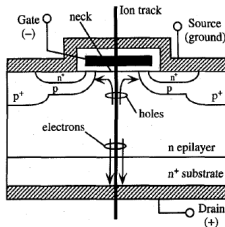
Single Event Gate Rupture to zjawisko polegające na przerwaniu bramki tranzystora w wyniku przejścia przez niego silnie jonizującej, wysokoenergetycznej cząstki.



- energia zdeponowana przez cząstkę prowadzi do wytworzenia się wzdłuż śladu dużej gęstości nośników ładunku (dziur i elektronów).
- napięcie przyłożone na bramce powoduje, że dziury zmiernają w kierunku tlenku,
- w wyniku akumulacji zwiększa się gradient pola elektrycznego,
- z chwilą przyłożenia dodatniego, wysokiego napięcia na dren, pole w tlenku może przekroczyć pewną wartość krytyczną i następuje przerwanie bramki.

Single Event Gate Rupture

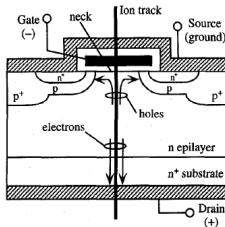
Single Event Gate Rupture to zjawisko polegające na przerwaniu bramki tranzystora w wyniku przejścia przez niego silnie jonizującej, wysokoenergetycznej cząstki.



- energia zdeponowana przez cząstkę prowadzi do wytworzenia się wzdłuż śladu dużej gęstości nośników ładunku (dziur i elektronów).
- napięcie przyłożone na bramce powoduje, że dziury zmiernają w kierunku tlenku,
- w wyniku akumulacji zwiększa się gradient pola elektrycznego,
- z chwilą przyłożenia dodatniego, wysokiego napięcia na dren, pole w tlenku może przekroczyć pewną wartość krytyczną i następuje przerwanie bramki.

Single Event Gate Rupture

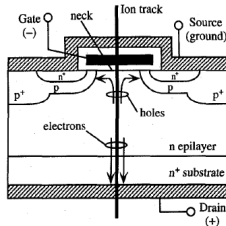
Single Event Gate Rupture to zjawisko polegające na przerwaniu bramki tranzystora w wyniku przejścia przez niego silnie jonizującej, wysokoenergetycznej cząstki.



- energia zdeponowana przez cząstkę prowadzi do wytworzenia się wzdłuż śladu dużej gęstości nośników ładunku (dziur i elektronów).
- napięcie przyłożone na bramce powoduje, że dziury zbiegają w kierunku tlenku,
- w wyniku akumulacji zwiększa się gradient pola elektrycznego,
- z chwilą przyłożenia dodatniego, wysokiego napięcia na dren, pole w tlenku może przekroczyć pewną wartość krytyczną i następuje przerwanie bramki.

Single Event Gate Rupture

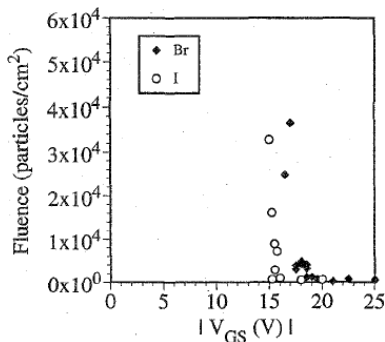
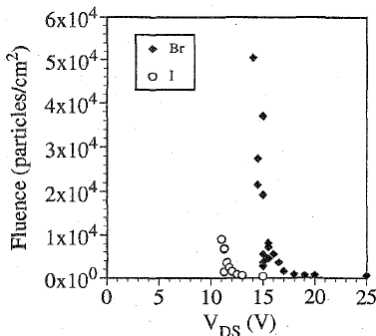
Single Event Gate Rupture to zjawisko polegające na przerwaniu bramki tranzystora w wyniku przejścia przez niego silnie jonizującej, wysokoenergetycznej cząstki.



- energia zdeponowana przez cząstkę prowadzi do wytworzenia się wzdłuż śladu dużej gęstości nośników ładunku (dziur i elektronów).
- napięcie przyłożone na bramce powoduje, że dziury zbiegają w kierunku tlenku,
- w wyniku akumulacji zwiększa się gradient pola elektrycznego,
- z chwilą przyłożenia dodatniego, wysokiego napięcia na dren, pole w tlenku może przekroczyć pewną wartość krytyczną i następuje przerwanie bramki.

Single Event Gate Rupture

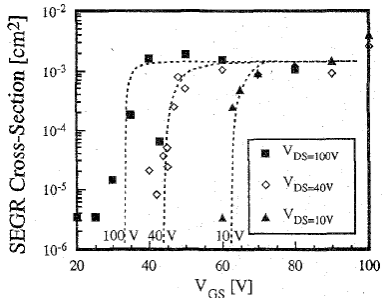
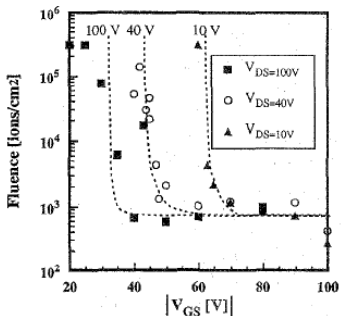
SEGR jest bardziej wrażliwy na zmiany napięcia bramka - dren, niż dren - źródło.



- $E = 312\text{MeV}$ jony jodu i 256MeV jony bromu,
- $V_{GS} = 14,5\text{V}$ (dla jonów jodu) i $17,5\text{V}$ (dla jonów bromu),
- $V_{DS} = 10\text{V}$ (dla jonów jodu) i 15V (dla jonów bromu).

Single Event Gate Rupture

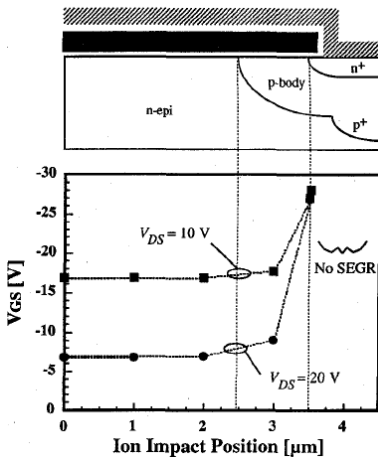
W przeciwieństwie do SEB, dla SEGR przekrój czynny jest częściej podawany w dziedzinie V_{GS} , co jest konsekwencją silnego charakteru progowego zjawiska.



- jony bromu o energii 286MeV.

Single Event Gate Rupture

SEGR silnie zależy od miejsca jonizacji.



- jony bromu o energii 286MeV.

Single Event Gate Rupture - zależności półempiryczne

Empiryczny opis uwzględniający zależność V_{GS} , V_{DS} oraz LET

$$V_{GS} = 0,85 \cdot [1 - \exp(-LET/17)] V_{DS} - \frac{50}{1 + \frac{LET}{53}}$$

Dodatkowa modyfikacja - grubość tlenku w bramce T_{OX}

$$V_{GS} = 0,87 \cdot [1 - \exp(-LET/18)] V_{DS} - \frac{10^7 T_{OX}}{1 + \frac{LET}{53}}$$

Dodatkowa modyfikacja - kąt Θ padania jonu

$$V_{GS} = 0,87 \cdot [1 - \exp(-LET/18)] V_{DS} - \frac{10^7 T_{OX}}{1 + \frac{LET}{53}} \cos^{0,7} \Theta$$

$$[LET] = [MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1}], [T_{OX}] = [cm].$$

Single Event Gate Rupture - zależności półempiryczne

Empiryczny opis uwzględniający zależność V_{GS} , V_{DS} oraz LET

$$V_{GS} = 0,85 \cdot [1 - \exp(-LET/17)] V_{DS} - \frac{50}{1 + \frac{LET}{53}}$$

Dodatkowa modyfikacja - grubość tlenku w bramce T_{OX}

$$V_{GS} = 0,87 \cdot [1 - \exp(-LET/18)] V_{DS} - \frac{10^7 T_{OX}}{1 + \frac{LET}{53}}$$

Dodatkowa modyfikacja - kąt Θ padania jonu

$$V_{GS} = 0,87 \cdot [1 - \exp(-LET/18)] V_{DS} - \frac{10^7 T_{OX}}{1 + \frac{LET}{53}} \cos^{0,7} \Theta$$

$$[LET] = [MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1}], [T_{OX}] = [cm].$$

Single Event Gate Rupture - zależności półempiryczne

Empiryczny opis uwzględniający zależność V_{GS} , V_{DS} oraz LET

$$V_{GS} = 0,85 \cdot [1 - \exp(-LET/17)] V_{DS} - \frac{50}{1 + \frac{LET}{53}}$$

Dodatkowa modyfikacja - grubość tlenku w bramce T_{OX}

$$V_{GS} = 0,87 \cdot [1 - \exp(-LET/18)] V_{DS} - \frac{10^7 T_{OX}}{1 + \frac{LET}{53}}$$

Dodatkowa modyfikacja - kąt Θ padania jonu

$$V_{GS} = 0,87 \cdot [1 - \exp(-LET/18)] V_{DS} - \frac{10^7 T_{OX}}{1 + \frac{LET}{53}} \cos^{0,7} \Theta$$

$$[LET] = [MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1}], [T_{OX}] = [cm].$$

Co dalej?

- ❶ Badania na ten temat prowadzone grubo ponad 10 lat temu. Jak wygląda problem dla nowych technologii?
- ❷ Zaprezentowane modele nie dają się zastosować do wszystkich technologii.
- ❸ Zjawiska SEB i SEGR są dobrze opisane dla wertykalnych tranzystorów mocy. Brak danych na temat scalonych tranzystorów mocy.

Co dalej?

- 1 Badania na ten temat prowadzone grubo ponad 10 lat temu. Jak wygląda problem dla nowych technologii?
- 2 Zaprezentowane modele nie dają się zastosować do wszystkich technologii.
- 3 Zjawiska SEB i SEGR są dobrze opisane dla wertykalnych tranzystorów mocy. Brak danych na temat scalonych tranzystorów mocy.

Co dalej?

- 1 Badania na ten temat prowadzone grubo ponad 10 lat temu. Jak wygląda problem dla nowych technologii?
- 2 Zaprezentowane modele nie dają się zastosować do wszystkich technologii.
- 3 Zjawiska SEB i SEGR są dobrze opisane dla wertykalnych tranzystorów mocy. Brak danych na temat scalonych tranzystorów mocy.

Dziękuję za uwagę!