



CHALMERS



Marknära neutroners påverkan på elektronik – en förstudie

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik

Åsa Ehn Nygren
Hanna Chen

Marknära neutroners påverkan på elektronik – en förstudie.
A study on the terrestrial neutrons effects on electronics.

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i elektroteknik
ÅSA EHN NYGREN
HANNA CHEN

© ÅSA EHN NYGREN & HANNA CHEN, 2017

Institutionen för rymd- och geovetenskap

Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31-772 10 00

Omslagsbild: Åsa Ehn Nygren, 2016

Samtliga bilder och figurer används med tillstånd från upphovsrättsinnehavaren eller är skapade av Åsa Ehn Nygren.

Göteborg, Sverige 2017

Förord

Examensarbetet är utfört för elektroingenjörsprogrammet, på Chalmers tekniska högskola, som omfattar 3 års studier. Arbetet omfattar totalt 15 högskolepoäng och medverkande företag är Broccoli Engineering AB i Göteborg.

Användning av elektronik ökar konstant, det blir mer avancerade system i våra hem lika så i våra fordon. Mycket av vad som sliter på dessa komponenter som vatten och temperatur är känt men att det vid marknivå finns strålning som kan påverka livslängden för ex. transistorer är fortfarande något som många inte tänker på. Den här rapporten beskriver en övergripande bild av neutroner samt hur de kan påverka system och komponenter. Framförallt hur det kan påverka systemen i våra bilar och hur det bör vara något som bör beaktas när det kommer till självgående bilar.

Tack till Björn Bergholm på Broccoli för att ha initierat denna idé och för all hjälp under arbetets gång. Tack till Elke Passoth och Elin Hellbeck för möjligheten att få besöka The Svedbergs Laboratoriet (TSL) i Uppsala och för att vi fick ta del av deras erfarenhet. Tack till Johan Karlsson, som visade oss i rätt riktning. Tack till vår handledare Arto Heikkilä.

Sammanfattning

Denna rapport innehåller en undersökning av de befintliga metoder som används för testning av elektronik samt de störningar som kan uppkomma som följd av neutronstrålning. Den innehåller även en sammanställning om de naturliga neutronerna, deras energi därmed också hur flödet uppför sig beroende på faktorer som altitud och longitud.

Den övergripande idén med projektet har varit att se om det går att utföra neutrontestning i en mindre skala. Det som den här rapporten kommer visa är att den typen av testning redan utförs. Den innehåller också en undersökning för att se över möjligheterna för simulering av den typen av strålning som fordonen utsätts för på högre höjder.

Abstract

This report contains an examination of the existing methods used for testing electronics as well as the disturbances that may arise because of neutron radiation. It also contains a compilation about the natural neutrons, their energy levels thus also how the flow behaves depending on factors such as altitude and longitude.

The overall idea of the project has been to see if it is possible to perform neutron testing on a smaller scale. What this report will show is that this type of testing is already being performed. It also contains a survey to review the possibilities for simulation of the type of radiation to which the vehicles are subjected when to higher altitudes.

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	1
1.1 INLEDNING	1
1.2 SYFTE	1
1.3 AVGRÄNSNING	2
1.4 PRECISERING AV FRÅGESTÄLLNING	2
2. METOD	3
2.1 LITTERATURSTUDIER	3
2.2 STUDIEBESÖK	3
3. TEORI OCH TEKNISK BAKGRUND	4
3.1 NEUTRONER	4
3.1.1 Historia om naturlig förekomst av neutroner	4
3.1.2 Uppkomsten av naturliga neutroner	5
3.1.3 Artificiella neutronkällor	6
3.1.4 Bakgrund/historia kring SEE som följd av neutronstrålning	7
3.1.5 Halvledare	8
3.2 SOFT ERROR	9
3.2.1 Direkt- och indirekt jonisering	9
3.2.2 Detaljerad bild av SE i en SRAM-cell	10
4. DATORSIMULERINGAR	12
4.1 CAD-BASERADE SIMULERINGAR	12
4.2 LTSPICE ELLER ANNAN KRETSSIMULERING	13
5. TESTNING AV SOFT ERROR	13
5.1 LET (LINEAR ENERGY TRANSFER)	13
5.2 SER (SOFT ERROR RATE)	15
5.3 FIT (FAILURES IN TIME)	16
5.4 TESTNING FÖR SOFT ERROR	16
5.4.1 Realtidstest	17
5.4.2 Accelererad testning vid marknära kosmisk strålning.	18
5.4.3 Accelererad testning med termiska neutroner.	18
5.4.4 Accelererad testning med alfapartiklar	19
5.5 TESTNING	19
5.6 NEUTRONKÄLLOR FÖR ACCELERERAD SER-TESTNING	22
6.1 SKADOR	26
6.2 SÄKERHET OCH SKYDD	28
REFERENSLISTA	31
BILAGOR	38
A. LTSPICE	38
B. STUDIEBESÖK PÅ TSL	54

Beteckningar/förkortningar

Elektronvolt (eV) är den enhet som används för att beskriva partiklars energier. 1 eV är den energi som en elektron har vid 1 Volt (V) och 1 eV motsvarar $1,602 \cdot 10^{-19}$ joule. [77]

Firm Error: Ett fel eller störning som uppstår i ett system eller komponent, vilket kräver att en återställning/korrigerings sker för att deras ursprungliga funktion ska kunna återupptas. När en Soft Error (SE) uppstår i minnesceller är det ett temporärt fel men om det uppstår i en FPGA så är det ett firm error, detta för att felet påverkar dess funktion, deras konfigurerings. Det är inte ett övergående fel utan kräver en reset för att kunna återgå till sin ursprungsfunktion. [1]

Flux = Antal neutroner som träffar en yta under en given tid, dividerat med träffytans area, det mäts oftast i neutroner $\text{cm}^{-2} \text{sekund}^{-1}$. Flux används oftast vid test för att beskriva strålen.

Flödet = Antalet neutroner vilket passerar en areaenhet och är inte beroende av tidsenheter, mäts neutroner cm^{-2}

MBU = Multiple-Bit Upset: Det är när minst två bitar påverkas i samma ord från en cell.

MCU = Multi-Cell Upset: När en single event leder till flera simultana fel/störningar i mer än en minnescell.

SE = Soft Error: Soft error är en störning eller temporärt fel som uppstår i en halvledare efter en partikelträff.
SE i en komponent eller ett system visas som en felaktig utsignal

SEB = Single Event induced Burnout: När en energisk partikelträff inducerar en lokalt högt ström vilket smälter kiselt i transistorn och leder till att transistorn förstörs vid träffytan.[2,25]

SEE = Single Event Effect: En mätbar eller observerad ändring i tillstånd eller prestation av elektroniska komponenter, delsystem eller system (digital eller analog) som resultat efter en träff av en partikels energi. Det är ett samlingsnamn på SE och där ingår SEU (Single Event Upset), MBU (Multiple-Bit Upset), MCU (Multi-Cell Upset), SEFI (Single Event Functional Interrupts), SEL (Single Event Latchup), SHE (Single-event Hard Error), SET (Single Event Transient), SEB (Single Event induced Burnout) och SERG (Single Event Gate Rupture).

SEFI = Single Event Functional Interrupts: Ett temporärt fel som gör att enheten låser sig, reset:ar (återställning) eller störning på annat sätt som är detekterbart. Detta fel kräver dock inte en omstart för att bli funktionsduglig igen.

SEL = Single Event Latchup: När en hög strömpik leder till ett tillstånd i en anordning som orsakats av en partikels energi som passerar känsligare delar av dess konstruktion och resulterar i förlust av anordningens funktionalitet.

SEGR = Single Event Gate Rupture: En händelse där en enda energisk partikelträff resulterar i en uppdelning och ger en efterföljande ledande väg genom gate oxid i en MOSFET. SEGR manifesteras genom en ökning av läckströmmen i gate och kan resultera i en försämring eller fullständigt misslyckande av enhetens funktion.

SER = Soft Error Rate: Den takt i vilken SE, temporära fel uppstår.

SET = Single Event Transient: En momentan spänningstopp vid en nod i en integrerad krets, orsakat av en ensam partikelträff.

SEU = Single Event Upset: Ett temporärt fel som uppstår av en flyktig signal som induceras pga av träff med en partikels energi.

SHE = Single-event Hard Error (permanent fel): En förändring eller fel hos en funktion vilket uppstår som följd av en partikelträff som är bestående. Detta är ett fel som vanligtvis förknippas med permanenta skador i en eller flera element hos en enhet t ex gate oxid skada.

1. Inledning

1.1 Inledning

Under de senaste decennierna så har kännedomen om högenergetiska neutroners förmåga att påverka elektronikkomponenter ökat. Idag är det känt att högenergetiska neutroner kan påverka en minnescell eller FPGAs tillstånd. Samtidigt som komponenter såsom exempelvis transistorers fysiska storlek minskar ökar deras känslighet för neutroner med lägre energier det är inte längre enbart neutroner med högt energiinnehåll utan räcker att de innehar energier kring MeV-klassen.[9] Parallellt med denna utveckling så tilltar användningen av elektronik i våra bilar, och fler biltillverkare ser sin framtid inom autonomous drive (självkörande bilar), detta leder också till svårigheten med att ansvaret flyttas från föraren, som inte längre existerar i bilen, till företaget. Det ställer högre krav på bilföretag om det tänker satsa på självkörande bilar.

Neutroner kan orsaka störningar/fel i hårdvaran som leder till efterföljande avvikelser i mjukvaran i bilen. Halvledare är komponenter som är extra känsliga mot de kritiska laddningar som neutronreaktioner kan orsaka då neutroner tillsammans med kisel kan leda till alfapartiklar.

En neutron är instabil i sin fria form och har en massa på $1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, det är en oladdad partikel som finns i luften och i sin fria form har de en livslängd på ca 881,5 sekunder. Neutroner och andra partiklar mäts ofta med energienheten elektronvolt (eV), 1 eV är den energi som en elektron har vid 1 Volt och är ca $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. De fria neutronerna i luften har ett energispann från 1 keV upptill flera 10-tal GeV. De produceras bl.a. från reaktioner i jordens atmosfär. [3]

Det finns i dagsläget inga artificiella källor som kan komma upp i GeV-energiklassen men det existerar några få laboratorier i världen där de kan komma upp i ett par 100 MeV med olika typer av neutronkällor.[76] I vissa av dessa kan hela bilen testas men vanligtvis utförs testerna genom att så utsätta enskilda kretsar för neutronstrålning.

1.2 Syfte

Den här rapporten är en undersökning om de befintliga testmetoderna för elektroniktestning för soft errors (SE). Soft error är en störning eller fel som uppstår av elektromagnetiska störningar, brus som uppkommer i kretsen eller som följd av strålning.[39] Denna rapport kommer bara ta upp soft errors som uppkommer som följd av neutroner. Störningen eller felet förvanskar de data som finns på en komponent, förändrar dess funktion utan att komponenten blivit skadad. [6]

Den redovisar kort om de befintliga testmetoder som används och möjligheterna att utföra testning i en mindre skala. Det har också varit ett sätt att sammanställa störningar/fel som uppkommer som följd av neutronreaktioner och även hur/vad som kan göras för att motverka dem. Den innehåller också en undersökning hur vidare simuleringar och teoretiska beräkningar kan/räcker till för att garantera säkerheten hos kretsar. Rapporten innehåller även en undersökning kring om det går att simulera den naturliga neutronstrålningen som finns på högre markhöjder.

1.3 Avgränsning

Då denna rapport valt att fokusera på elektronik som används inom fordonsindustrin och då främst på självkörande fordon så finns inte ett behov att försöka efterskapa den naturliga neutronstrålningen som finns över en höjd på 4000 meter över havsnivå. För att veta hur strålningen ser ut måste en sammanställning av fakta och källor på hur neutronstrålningen beter sig beroende på höjd och plats. Det som nämns angående alfapartiklar är de som uppstår som följd av en neutron men också den testning som utförs efter rekommendationer av JEDECs standard 89A. Joint Electron Device Engineering Council (JEDEC) är en organisation inom mikroelektronik industrin vars mål är att tillsammans med tillverkare och leverantörer skapa standarder som behövs för utveckling inom området. Deras standard för elektroniktestning med kosmisk strålning heter JESD89A[6] och de har även en teststandard som heter Jep151. [15]

1.4 Precisering av frågeställning

Denna rapport handlar om att synliggöra den problem som uppstår hos vissa elektronikkomponenter vid påfrestning genom neutronstrålning samt att se över möjligheterna till en potentiell testmiljö i liten skala. Det är en del frågor som måste besvaras innan en eventuell testmiljö kan konstrueras. Data över det energispann som de fria neutronerna i luften måste sammanställas, därmed också hur det naturliga neutronflödet varierar beroende på miljö och olika platser, såsom latitud och altitud samt hur det uppkommer naturligt. Sammanställa de olika typer av störningar som uppkommer i mjukvaran som följd av neutron i hårdvaran samt se över möjligheterna att simulera och teoretiskt beräkna dem. Rapporten ska också inge en förståelse för hur testningen bedrivs i dagsläget samt se över tänkbarheten att rekonstruera den i en mindre skala. Den innehåller en närmare undersökning kring de vätedriva neutrongeneratorerna som finns på marknaden, för att eventuellt kunna använda den typen av neutronkälla vid test. En sammanställning om de åtgärder som behövs för att kunna säkerställa att den önskade neutronstrålningens intensitet uppnås.

Det finns ett par skilda standarder för hur den här typen av testning bör utföras samt dess arbetsgång vid test, denna rapport tittar mest till JEDECs två standarder[6,15] men värt att nämna är även International Electrotechnical Commissions (IEC) standard,[23] då det är de två organisationernas standarder som andra källor tittat på men också de två som haft mest inflytande över de amerikanska och europeiska laboratorierna. Rapporten innehåller också en sammanställning av de lagar och regelverk som finns kring hantering av neutronkällor i Sverige. Den innehåller också en undersökning om hur neutroner påverkar kroppen vid exponering av neutronstrålning vid olika energinivåer samt hur skyddsutrustningen ser ut och hur den säkerställs.

2. Metod

2.1 Litteraturstudier

Den stora delen utav detta projekt har bestått av litteraturstudier. I början av projektet så utgick arbetet av att skapa en förståelse för neutronernas fysikaliska egenskaper och deras uppkomst. Projektet har utvecklats under arbetets gång då det uppkommit nya frågor och begränsningar. Litteraturen har hämtats från forskning inom området och etablerade organisationer.

2.2 Studiebesök

Den 20 december 2016 utfördes ett studiebesök på The Svedbergs Laboratoriet (TSL) på Uppsalas universitet. Där intervjuades Elke Passoth och Elin Hellbeck under en rundvandring på anläggningen. Då det inte pågår någon forskning där längre, innebar det en möjlighet att se hela området då det inte pågick någon aktivitet. Med aktivitet så menas de reaktioner som protonerna och neutronerna har med materia, när det kommer till anläggningen på Svedbergs inbegriper det allt material som finns på området. Bilder och information från besöket finns i bilaga B.

3. Teori och teknisk bakgrund

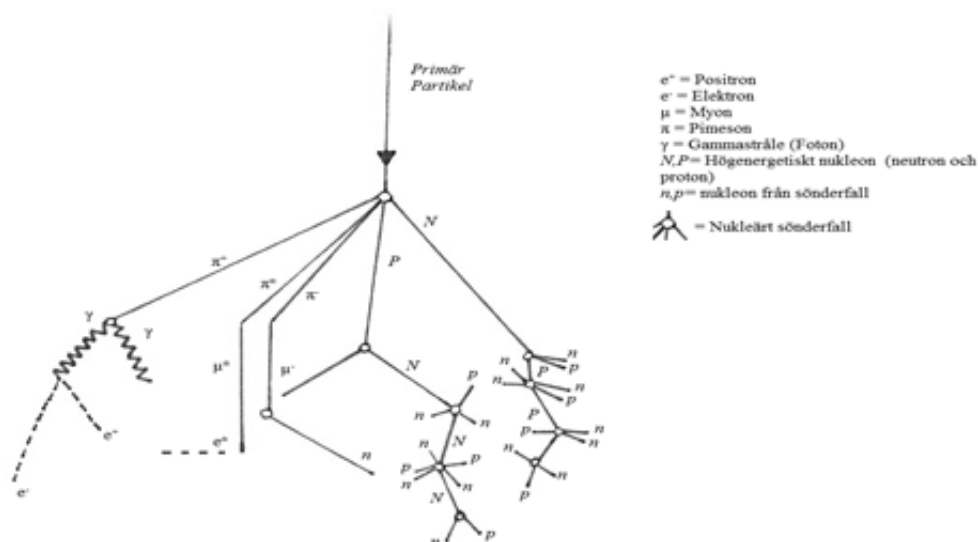
3.1 Neutroner

Neutroner finns naturligt i atmosfären och i flera olika intensiteter. De varierar kraftigt från långsamma neutroner med energier på ca 1 keV och upptill högenergetiska neutroner på flera GeV. De uppkommer genom reaktioner med andra partiklar och finns både i atmosfären samt vid havsnivå. De är oladdade med en livslängd på $881,5 \pm 1,5$ sekunder. I Stockholm så är det i snitt 14 neutroner $\text{cm}^{-2}\text{timme}^{-1}$, på 10 km höjd så är det ca 300 neutroner $\text{cm}^{-2}\text{timme}^{-1}$. [74] När det kommer till marknära strålning så är New York City utgångspunkten av skäl som beskrivs i nedanstående text. [3]

3.1.1 Historia om naturlig förekomst av neutroner

Under perioden 1898–1912 så fanns det ett ökat intresse för studier kring radioaktivt material, detta för att detta område gav en direkt insyn till atomens egenskaper, vars struktur fortfarande var helt okänd. För att mäta det lilla flödet av partiklar som kommer från radioaktiva material så användes en elektrometer. En elektrometer består av en glaskupa med vakuum som innehåller två tunna metalband, dessa band reagerar på laddningar. De fann ett "läckage" vars storlek var beroende av elektrometers storlek och var proportionell med tiden, till en början trodde de att läckaget var ett upptäckt radioaktiv förorening eller en ny typ av eterpartiklar. Victor Hess började placera elektrometern på olika platser, bl.a. ut på en sjö där läckaget borde försvunnit men istället var helt oförändrad och även in i grottor där läckaget försvann. Genom att använda två jonisationskammare fästa i ballonger och sedan placera dem på 6 km höjd så kunde han bevisa att det fanns ett flöde med partiklar som kom från himlen, 1936 fick Victor Hess Nobelpriset för sin forskning. Hans arbete följdes av flera arbeten inom området och Kolhörster visade att partikelflödet ökar kraftigt vid ökande altitud, med en faktor 10 vid 10 km höjd. [3]

3.1.2 Uppkomsten av naturliga neutroner



Figur 1: Figuren ovan visar hur det ser ut när neutroner bildas, från den primära partikeln tills de når marknivå.

När det kommer till kosmisk strålning så finns det tre olika huvudkategorier, primär kosmisk strålning, kaskadstrålning och marknära strålning. Den primära kosmiska strålningen, vilket är det initiala flödet av partiklar som finns utanför atmosfären. Det finns två källor till den primära kosmiska strålningen, solaktivitet och ett flux av högenergetiska partiklar från Vintergatan och andra galaxer, det råder fortfarande oklarheter kring exakt hur de uppkommer men enligt en del så uppkommer de från supernovor och stjärnbildning. Partikelflödet från solaktiviteter, framförallt solvindarna, beror på om solen är inne i en lugn eller aktiv period. När solen är aktiv så ökar antalet högenergetiska partiklar men det marknära partikelflödet minskar, detta för att solvinden samtidigt förvränger magnetosfären vilket gör att den släpper igenom färre partiklar. När solen är i ett lugnt tillstånd så finns det nästan inga energetiska partiklar i solvinden som kan penetrera atmosfären, alltså partiklar $> 1 \text{ GeV}$.

Den andra huvudkategorin är kaskadstrålning, ibland även kallad för sekundär strålning, vilket är en annan typ av kosmisk strålning. Från den primära kosmiska strålningen så är det inga partiklar som överlever länge nog för att nå jordens yta på grund av densiteten i atmosfären. Det som händer är att de högenergetiska partiklar, från den primära strålningen interagerar med partiklar som finns i atmosfären och skapar på så sätt flera andra sekundära partiklar. En partikel skapar en kaskad av sekundära partiklar som i sin tur skapar fler kaskadreaktioner. Dessa kaskadskurar med partiklar är de som är svårast att approximera, mest för att många av dessa högenergetiska partiklar har en spontan halveringstid och i vissa fall kan det ske under en nanosekund. De andra faktorerna som måste beaktas när det kommer till att uppskatta den sekundära strålningen, är altitud och jordens magnetfält. Magnetosfären som stöter bort laddade partiklar. Altitud är relevant vid uppskattning av den sekundära strålningen då kaskadskurarnas utseende varierar beroende av höjd.

Den sista huvudkategorin av kosmisk strålning är den marknära strålningen, den består av de partiklar som överlever länge nog för att ta sig igenom atmosfären. Det är mindre än 1 % av partiklarna från den primära strålningen som når marknivå. [26,94] Det är dessa som är orsaken till störningar på elektronik och ungefär 50 % av dessa störningar orsakas av neutroner [4] Det är svårt och tidskrävande att mäta upp den marknära strålningen, det har redan gjorts mätningar över New York City och därför så används den som utgångspunkt när det kommer till att beräkna denna strålning. [3]

Densiteten hos neutronstrålning, alltså flux och flöde, beror av solaktiviteten, longitud och latitud men främst av altitud exempelvis så ökar den med en faktor 10 vid 10 km höjd. Detta är något som flygindustrin har varit tvungen att ta hänsyn till vid utformning och design av sina flygplan. I tabellen nedan [tabell 1] visas hur neutroner delas in efter dess energi. [26,94]

Neutroner:	Neutronernas energi:
Termiska	0,026 eV
Epitermiska	0,1 - 1 eV
Resonans	1 - 100 eV
Intermediära	1 keV - 1 MeV
Snabba	1 MeV - 10 MeV
Högenergetiska	10 MeV →

Tabell 1: De tre första tillhör långsamma neutroner, långsamma neutroner är de vars energinivå ≤ 1 keV.

3.1.3 Artificiella neutronkällor

JEDEC står för Joint Electron Device Engineering Council och standarden JEDEC89A har tagits fram tillsammans med EIA (Electronic Industries Alliance). JEDEC89A är en specifikation som definierar standardkraven och processen för marknära soft error rate (SER) testning av integrerade kretsar och behandling av resultaten.[78]

Det finns enligt JEDEC JESP89A [6] fyra typer av neutronkällor som används vid SE-testning:

1. Termiska och epitermiska neutroner, det handlar vanligtvis om neutroner som kommer från reaktioner med bor. Det är testning med neutroner vars energi är under 20 eV. En beskrivning av dessa reaktioner och testning finns i avsnitt 5.4.3.
2. Neutronkällor som använder sig av reaktioner mellan tritium och deuterium, vilket är två olika typer av väteisotoper. Dessa reaktioner ger ifrån sig monoenergetiska neutroner med energier från 2,5 MeV upptill 14 MeV. Dessa kan användas för accelererad testning som beskrivs i avsnitt 5.4.2 och i 5.6.
3. Spallationsprotonkällor, de producerar neutroner i ett energispektrum upp till den energin som protonkällan innehåller. Dessa kan användas för accelererad testning som beskrivs i 5.4.2 och även i 5.6.

4. Kvasi-monoenergetiska neutroner med varierande energier, vanligtvis producerade genom att protoner träffar ett mål bestående av Be (beryllium) eller Li (litium). Denna källa används vid testning som beskrivs i avsnitt 5.4.2 och i 5.6.

3.1.4 Bakgrund/historia kring SEE som följd av neutronstrålning

I den marknära strålningen så finns det fyra orsaker som kan leda till störningar eller fel på komponenter och system, det är termiska och högenergetiska neutroner, alfapartiklar och myoner [4,6,7,8]. Dessa störningar eller fel kallas för Soft Errors (SE). Fokus här kommer ligga på de som kan orsakas av neutroner.

Det är halvledare och integrerade kretsar som är känsliga för SE eller soft fails som det också kan kallas. Single-Event Effect (SEE) är samlingsnamnet för dessa fel och innebär en mätbar eller observerad ändring i tillstånd eller prestationen hos en komponent, delsystem, system (analog som digital) eller enhet som resultat från en träff av en partikel.[24,34]

De vanligaste två felen som undersöks är följande:

Single-Event Upset (SEU) är ett temporärt fel uppstår som följd av en flyktig signal som induceras av energin från en partikelträff. SEU kan i sin tur leda till ett flertal andra fel och störningar. [14,35,36,84,85] Single-Event induced Burnout (SEB) är när en enhet utsätts för en SEU men att följderna från den är så pass allvarlig att komponenten förlorar sin funktion permanent. SEB behöver dock fler faktorer än bara en SEU för att ske. [25,39]

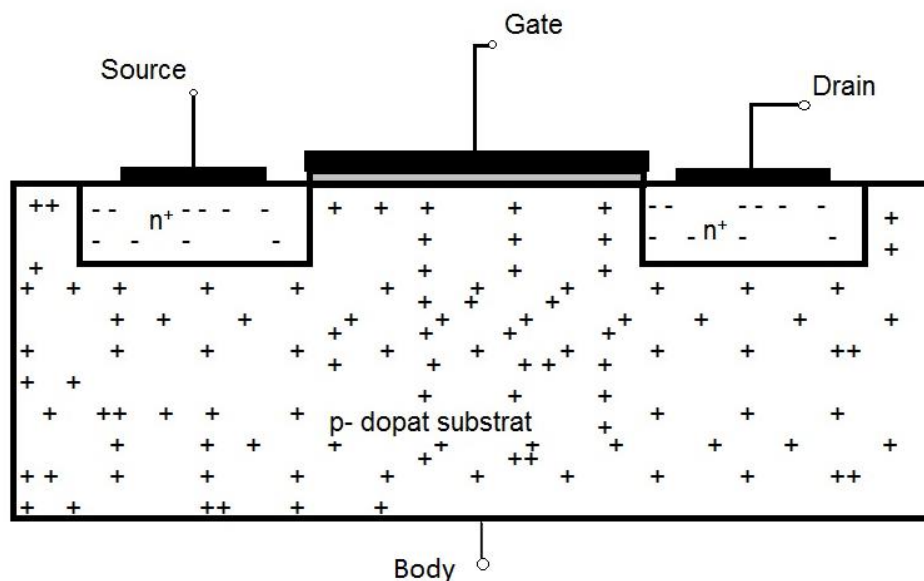
Soft Error Rate (SER) är den takt som SE uppstår och som används för att bedöma komponenternas motståndskraft mot partiklar i strålningen. [6,71]

Redan 1962 publicerades en artikel där de förutser ett problem med SE.[13] Där de förutser att känsligheten kommer att öka då den fysiska storleken på halvledare minskar. De pratar inte om SE utan snarare om att komponenternas känslighet för externa element, som temperatur och partiklar, kommer öka i takt med att komponenterna krymper till storlek. I artikeln så diskuteras densiteten i packningen av halvledare och hur den kan vara begränsad av kosmisk strålning. Med densitet i detta fall så handlar det om antalet komponenter per volymenhet, vid denna tidpunkt så var det 10^4 komponenter cm^{-3} . Att skydda från kosmisk strålning är svårt och om en skyddsfaktor på 5-20 gånger skulle upprättas så skulle ett blyskydd på 10 cm behövas omkring komponenten och det känns orimligt. [13]

Det är också det som är ett av de områdena som är mest intressant just nu, att i samma takt som bl.a. kretsar minskar till storlek så ökar sårbarheten för SEE vid marknära neutronstrålning, energierna måste inte längre vara så höga för att påverka en funktion eller tillstånd hos en enhet utan kan vara mycket lägre. Densiteten på den marknära neutronstrålningen innehåller fler neutroner med lägre energier, vilket i sin tur leder till att SER (Soft Error Rate), den takt som temporära fel uppstår, ökar. [9]

3.1.5 Halvledare

Halvledare är en komponentgrupp som ingår i många olika typer av konstruktioner och den gruppen inbegriper bl.a. transistorer och dioder. Det vanligaste materialet som används i halvledarkomponenter är kisel, detta för att det är ett relativt billigt och temperaturlåligt ämne. Halvledarmaterial kallas de som är placerade i grupp IV i det periodiska systemet, grupp III är P-dopare och grupp V är N-dopare. Genom användning av dessa grupper så kan halvledaren dopas med N- eller P-dopat vilket leder till negativa elektroner och positiva hål. P-dopade halvledare har en brist på en elektron i sin kristallstruktur detta leder till att ett hål skapas, hålen betraktas som en positiv laddning. N-dopade halvledare har istället ett överskott av elektroner i sin bindning. PN-övergången uppstår när dessa två halvledare kommer i kontakt med varandra. Den uppkommer då laddningsbärarna i de olika halvledarna attraherar varandra. [98] De rörliga elektroner diffunderas över från N-substratet och möts av hål vid gränsskiktet mellan N-och P-sidan, dit de hål som finns i P-substratet har rört sig. När det är jämvikt i en PN-halvledare så innebär det att diffusionen är balanserad av det elektriska fältet över gränsskiktet, det är en potentialskillnad mellan N- och P-substratet.



Figur 2: En förenklad modell av en MOS-transistor i off-läge.

I en MOS-transistor finns både N- och P-dopade halvledare, när ingen spänning är ansluten till den så ser den ut som i figur 2. När spänning ansluts till gate bildas en kanal mellan drain och source, p.g.a det elektriska fält som skapas mellan substratet och gate. Då är transistorn i on-läge och strömmen från drain kan styras med spänningen. [98]

3.2 Soft Error

Trots att neutroner är oladdade så räknas de fortfarande som joniserande strålning, d.v.s. strålning som kan leda till att elektroner frigörs från atomer. Då skapas en laddningsdeposition som kan orsaka SE i halvledare. Det går att dela in denna laddningsdeposition i två primära sätt, direkt och indirekt jonisering. [14,43]

3.2.1 Direkt- och indirekt jonisering

Direkt jonisering är när en partikel inducerar elektronhålpår längs med dess väg i halvledare och själv förlorar sin energi. När partikeln till sist stannar så har den färdats ett visst avstånd och beskrivs med dess energiförlust per sträcka Linear Energy Transfer (LET), vilket finns beskrivet i avsnitt 5.1 i denna rapport och mäts oftast i $\text{MeV mg}^{-1} \text{cm}^2$. Partikeln stannar när dess kinetiska energi är noll och förlorar sin energi till atomerna den passerar, 3,6 eV per elektronhålpår i kisel. Direkt jonisering involverar tunga joner och partiklar som är antingen positivt eller negativt laddade. [21,30,31]

Reaktionsprodukter	Neutronernas energi [MeV]
$^{25}\text{Mg} + \alpha$	2,75
$^{28}\text{Al} + p$	4,00
$^{27}\text{Al} + n + p$	12.00
$^{21}\text{Ne} + 2\alpha$	12.99

Tabell 2: Tabellen ovan listar de reaktioner som kan ske i halvledare som har kisel i sitt substrat, neutron + Si. [39]

Indirekt jonisering är de reaktioner som spallationspartiklarna kan åstadkomma i halvledaren efter att en nukleon (neutron eller proton) passerat. Spallationspartiklar eller spallationsfragment som det ibland kallas, är resultatet efter en reaktion mellan materialets atomer och neutroner.[32,33] Ett exempel på reaktion är att kisel avger en alfapartikel och en magnesium (Mg) kärna. Några av de reaktioner som kan ske finns nämnda i tabell 2 och alla dessa kan leda till direkt jonisering. De laddade fragmentens kinetiska energi överförs till elektrongasen, på så sätt skapas en begränsad och kompakt plasma (då gas värms till en nivå då elektronerna separeras från atomkärnorna) bestående av elektronhålpår inom halvledarens substrat. Den reaktion som sker beror energin hos den primära neutronen [17,18].

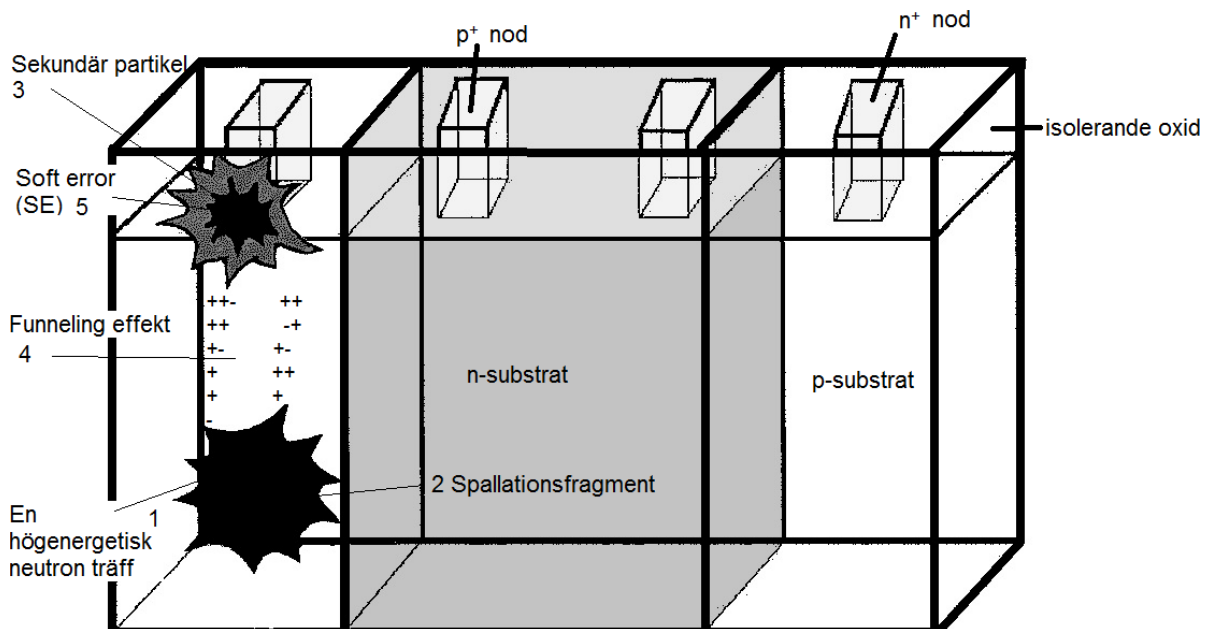
Det finns modeller (SRIM och NUSPA) [20,21,22] som beskriver produkten av LET för varje möjligt fragment, den produkten kan sedan användas för att beräkna antalet elektronhålpår per längdenhet. Den beräkningen sker genom en empirisk relation för kisel tillsammans med energiförlusten på 3,6 eV per elektronhålpår.

När en SEB (Single Event Burnout) sker i halvledarkomponenter som t.ex. effektdioder, skapas en nukleär kollision mellan en neutron (eller proton) och kiselatomkärnor. Detta leder i sin tur till att det genereras en tät plasma (joniserad gas) av elektronhålpar i halvledaren, om plasmans densitet är tillräckligt hög kan den fungera som en bärare av urladdningar. Gasen av urladdningar kommer ledas genom komponenten, vilket kommer orsaka kortslutning som konsekvens och förstörelse av halvledarkomponenten.

Den reaktion som är mest trolig att leda till störningar eller fel på komponenter är den reaktion vars fragment har högst LET, det innebär reaktionen som leder till att densiteten är högst på plasman med elektronhålpar.[16]

När tunga joner träffar en n-dopad MOSFET så kan en SEB (Single Event induced Burnout) ske. Det finns nu möjlighet att mäta det troliga utfallen av SEB i genomsnitt. Single Event Gate Rupture (SEGR) kan nu också mätas. De mesta av testning för SEB på MOSFET sker med partiklar vars LET är större än $25 \text{ MeV mg}^{-1} \text{ cm}^2$. I vissa studier är energinivåerna under $10 \text{ MeV mg}^{-1} \text{ cm}^2$ och även då var SEB mätbar. [28]

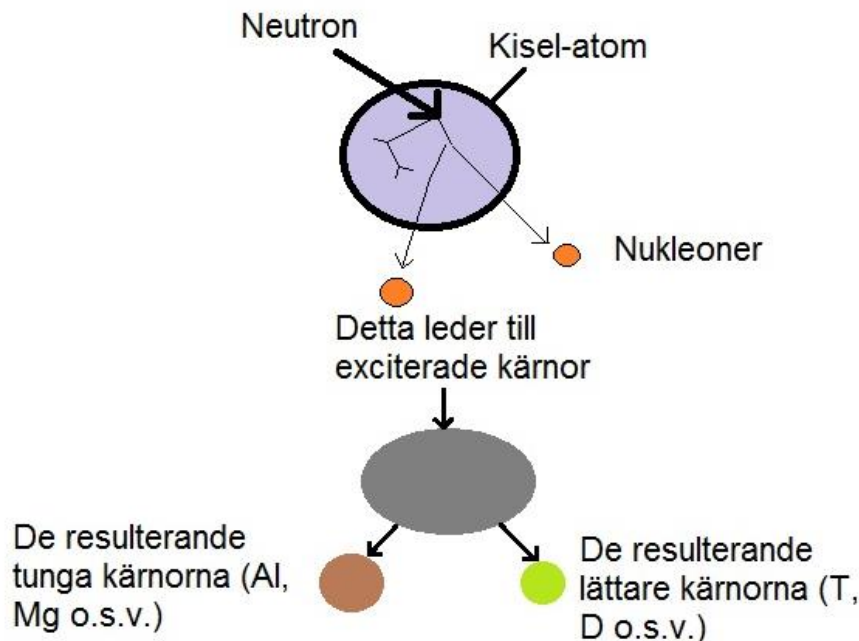
3.2.2 Detaljerad bild av SE i en SRAM-cell



Figur 3: En 3D bild på en SRAM-cell vid en partikelträff.

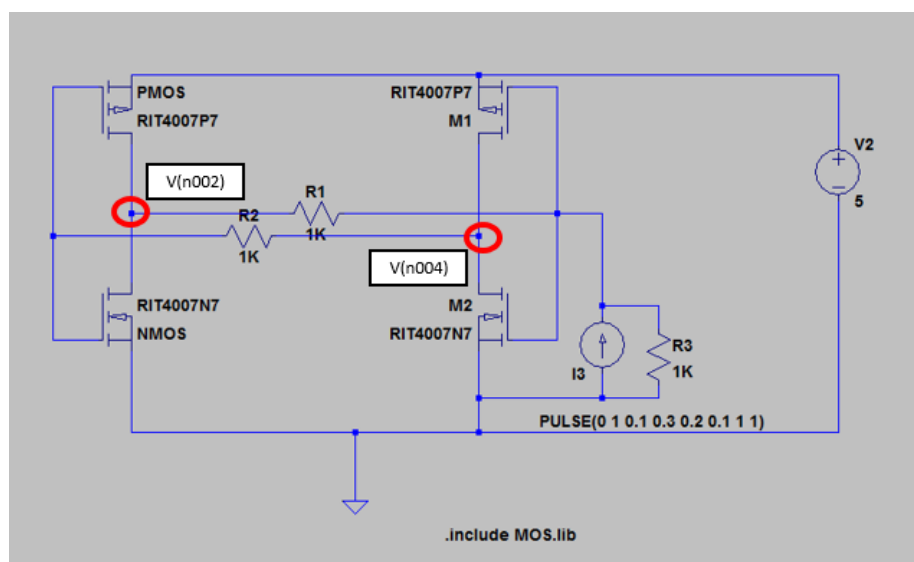
Static Random-Access Memory (SRAM) är ett flyktigt statiskt minne, det innebär att den behåller sin information i minnet så länge den har en strömkälla. En SRAM-cell består av 6 Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)-transistorer. I figur 3 visas en schematisk modell för hur det ser ut i en SRAM-cell när ett SE inträffar. Denna modell har två n+-noder i p-kanalen och två p+-noder i n-kanalen. De två uppsättningarna av angränsande n+ och p+ noderna motsvarar de två potentiella tillstånden, "hög" eller "låg".

Minnets data “1” eller “0” är tilldelade vid sidan (höger eller vänster) som har hög potential. När en högenergetisk neutron kommer in i SRAM-cellen (se 1 i figur 3) så kan en nukleär spallationsreaktion ske mellan neutronen och cellkärnorna som finns i halvledaren som oftast består av kisel (Si), vilket går att se i figur 4.



Figur 4: Här visas hur det ser ut när spallationspartiklar bildas i en cell som innehåller kisel.

Spallationsreaktioner sker inuti cellen och det är en snabb reaktion som sker i kärnan, när nukleonerna (neutroner och protoner) kolliderar med varandra. En del av dessa nukleoner kan smita från kärnan när de intar tillräckligt med kinetisk energi. [9]



Figur 5: Bilden är på en SRAM-krets från LTSpice demonstreringen som finns i bilagor. Denna process kallas för Intra-Nuclear Cascade (INC) [10]. Efter denna process så kan lättare kärnor “ävdunsta” från den resterande och exciterade kärnan.[11] Konsekvensen av detta är

att nukleonerna, de lättare kärnorna och resterande nukleoner skenar runt inom SRAM-cellen och dessa orsakar elektronhålpår längs med partikelns bana. Energin som behövs för att inducera ett elektronhålpår i kisel (Si) är enbart 3,6 eV. När någon av de sekundära jonerna träffar en nod som lagrar information i SRAM:en, en lagringsnod, så samlas en del av laddningen vid lagringsnoden främst genom en effekt som kallas "the funneling effect" [12] och diffusion spridning (se 4 i figur 3). Ifall laddningen överskrider den kritiska laddningen som krävs för att ändra tillstånd i SRAM:en så har ett SE inträffat.

4. Datorsimuleringar

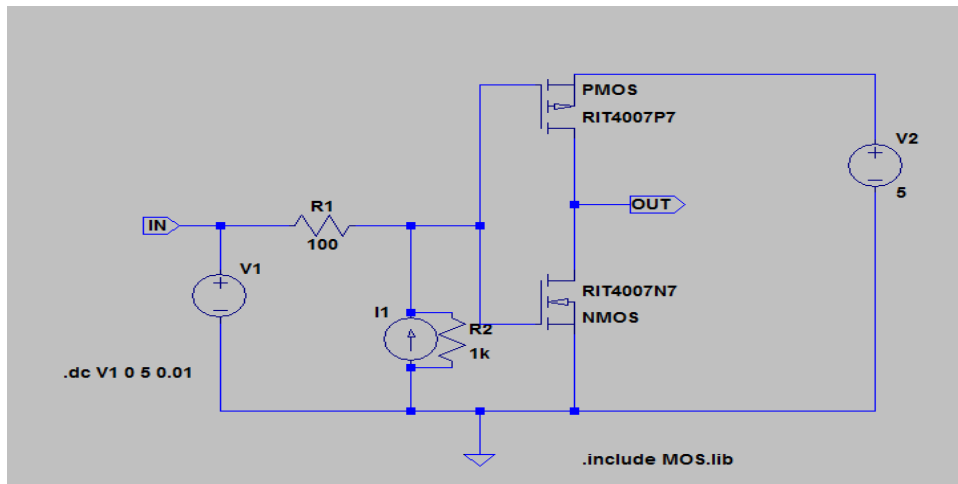
När det kommer till utvärdering av en komponents motståndskraft mot den marknära strålningen kan det delas in i ett antal steg, där de består av en kombination av datorsimuleringar, beräkningar och stråltester.

4.1 CAD-baserade simuleringar

Technology Computer-Aided Design (TCAD) används för simuleringar på substratnivå där en 3D modell appliceras för att analysera transienta pulsar som produceras av en partikel i en krets. Denna typ av simulering blir allt vanligare då komponenter minskar och risken för att fler än två celler påverkas av sekundära partiklar ökar. De enklare kretssimuleringarna kan bara användas för utvärdering av en direkt träff av en partikel, med en 3D modell går det att utvärdera de sekundära partiklarnas påverkan på cellerna. [43,71,81]

Det finns två program CORIMS (Cosmic Radiation IMPact Simulator) och SEALER (Single Event Adverse and Local Effects Reliever) som ofta används vid simuleringar.[9,43] De används för simuleringar på substratnivå eller för enskilda komponenter. De är båda Monte-Carlo baserade SE-simulatorer, det som skiljer dem åt är att i SEALER kan andra substratmaterial än kisel användas. [43,82,86,87,88]

4.2 LTSpice eller annan kretssimulering



Figur 6: Ett kretsschema från LTSpice på en CMOS-krets

Det går att utföra enklare simuleringar för SEE genom att använda sig av kretssimuleringsprogram som t ex. LTSpice. Det är ett billigare sätt att försöka förutsäga SER. De 3D CAD simuleringarna kräver en hel del datorkraft och beräkningarna som krävs är omfattande, LTSpice är lättare och ger en relativt sann bild, om beräkningarna genomförs för nivå och form på strömpulsarna som genereras av neutroner. Det är transport differentialekvationer som är grunden för dessa beräkningar till simuleringarna, oavsett om det är 3D, 2D eller 1D simuleringar och genom att använda ekvationerna går det att erhålla den inducerade strömmen från en partikelträff. [71] Det finns flera artiklar [53,71,80,82,9] där de utfört dessa simuleringar och de visar att det går att simulera en tillräckligt hög LET för att kunna störa kretsar. När resultaten från simuleringarna jämförs med tester som utförts med likadana komponenter fast med partikelstrålning så stämmer resultaten bra med varandra. [71] I bilaga A, finns en demonstration över hur det kan se ut vid denna typ av simulering, en strömkälla läggs till för att simulera en neutronträff. Strömkällans form och nivå har inte beräknats fram, utan simuleringen är till för att demonstrera hur det ser ut när en SRAM eller CMOS beter sig när en störning läggs till. SRAM-cellen i demonstrationen har bara fyra transistorer i kretsen, detta då två av de sex transistorerna är passiva och behövs därför inte under simuleringen. [38]

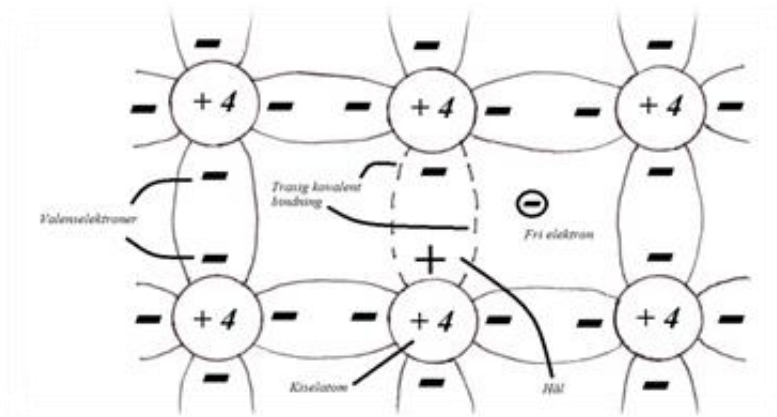
5. Testning av soft error

5.1 LET (Linear Energy Transfer)

Linear Energy Transfer (LET) är ett sätt att mäta energimängden per längdenhet som förloras genom att en partikel eller foton förflyttas genom ett material.[39] En förenklad ekvation för att approximeras LET är:

$$LET = \frac{dE}{dl} \quad (1)$$

Där E är partikelns energiförlust vid transport p.g.a reaktioner med material och l är distansen den färdas. LET beror på materialets densitet och på partikelns massa och energi.[16,94]. LET kan anges i enheten MeVcm^{-1} , men ofta divideras värdet med materialets densitet och anger då LET i enheten $\text{MeVmg}^{-1}\text{cm}^2$. Partikelns energiförlust går åt till att frigöra laddningar i materialet. [103]



Figur 7: Här visas en schematisk bild på hur det ser ut när ett elektronhålpar bildas i kisel.

I en halvledare med kisel så är atomerna ordnade i ett regelbundet, kristallmönster, vilket kan ses i figur 7. Det är kovalent bindning, valenselektroner som delas mellan atomerna, som gör att de upprätthåller sitt mönster. Det krävs 3.6 eV i kisel för att skapa ett elektronhålpar. Elektronhålpar innebär att energi tillförs så att en elektron frigörs från bindningarna vilket leder det till att en brist på en elektron uppstår, det är bristen på en elektron som kallas hål och uppför sig som en positiv laddning. Ett sätt att öka de fria elektronerna är att tillföra ett störmne, som fosfor med fem valenselektroner (många fria elektroner kan leda ström) n-dopat. Det spallationsfragment eller spallationspartikel som uppkommit av en reaktion mellan en atom och en neutron och det fragment som har högst LET, är det fragment som troligast leder till SE, detta för att det är det fragmentet som orsakar tätast elektronhålsplasma. [16]

Den laddningen som behövs för att orsaka en störning eller ett fel i en enhet i en krets exempelvis en bit i ett SRAM-minne, det kallas för kritisk laddning. Om en partikel träffar denna enhet, med storleken T leder det till att partikeln avger energin $LET * T$ i enheten. Atomerna joniseras av denna energi, om joniseringsenergin är E_i så produceras ett antal elektronhålpar. För att få laddningen (Q_{coll}) som partikel frigör i enheten, multipliceras resultatet med elementarladdningen, e :

$$Q_{coll} = \frac{LET * T * e}{E_i} \quad (2)$$

T är materialets tjockhet, t.ex. en mikrometer.

e är elementarladdningen $1,602 \cdot 10^{-19}$ pC

E_i är den joniseringsenergi som krävs för att orsaka ett elektronhålpar, 3,6 eV i kisel

I ekvation 2 har LET dimensionen MeVcm^{-1} . Ett annat uttryck för Q_{coll} är:

$$Q_{\text{coll}} = \frac{LET * T * \rho * e}{E_i} \quad (3)$$

ρ är materialets densitet, vilket är $2,32 \text{ g cm}^{-3}$ för kisel. I detta uttryck tas materialets densitet med i beräkningen, LET har dimensionen $\text{MeVmg}^{-1}\text{cm}^2$. Om laddningen (Q_{coll}) är större än den kritiska laddningen (Q_c) för enheten så inträffar en störning eller ett fel sker men skulle laddningen (Q_{coll}) vara mindre än den kritiska laddningen så sker ingen störning eller fel på kretsen. [88,96]

5.2 SER (Soft Error Rate)

Single Event Effects (SEE) är samlingsnamnet på SE, i denna samling finns Single Event Upset (SEU) och det används för att mäta Soft Error Rate (SER). Det finns en annan störning som ökat under senare år och det är Single Event Transient (SET) [96] och innan har detta fel varit så underlägsen SEU men då transistorer minskar så till storlek så ökar intresset för SET och dess bidrag till SER.

SER är definierade av antalet SEU, inte antalet fel. SEU definieras av följande ekvationer:

$$\sigma_{\text{seu}} = \frac{N_{\text{seu}}}{\Phi_p} \quad (4)$$

Φ_p = Flödet av partiklar, neutroner cm^{-2}

N_{seu} = Antalet SEUs

Med flödet av partiklar så syftas det på antalet partiklar som passerar genom en area enhet.

$$SEU = \sigma_{\text{seu}} * \varphi_n \quad (5)$$

φ_n = fluxet av partiklarna, neutroner $\text{cm}^{-2} \text{ timme}^{-1}$

Detta flux av partiklar så syftas det på antalet partiklar som passerar genom en area enhet per tidsenhet. En störning leder inte alltid till ett fel, detta beror oftast på platsen och systemets funktion. Det är bara när dessa störningar leder till en felsignal som visas på systemets utsignal och stör systemets funktion som det kallas för "fel". När en störning som leder till en felaktig utsignal men inte leder till att systemets funktion störs, så kallas det för en "risk". En störning leder inte alltid fram till att ett system råkar ut för en "risk" eller "fel", detta för att störningen kan försvinna eller så kan det maskeras under propageringstiden genom maskeringseffekter. Det finns tre olika typer av maskeringseffekter: logisk maskering, elektrisk maskering och spärrfönster (latch window) maskering. Dessa maskeringseffekter ser lite olika ut beroende på vilken störning som undersöks. [83,96,97]

Det finns tekniker som kan används för att minska SER, ett exempel är Error Checking and Correction (ECC). ECC är en teori som möjliggör att skicka digital data över opålitliga kommunikationskanaler. [43,83]

5.3 FIT (Failures in time)

FIT (Failures in time) är en enhet som används för att ange antal störningar per tidsenhet som SE men också andra fel som oxiderande, hårdvarufel mm. 1 FIT beräknas som 1 fel på 10^9 komponenttimmar, vilket då motsvarar ett fel på drygt 100 000 år. För mätning av felfrekvens (SER) så används ofta enheten FIT. Normalt har en integrerad krets en felfrekvens på ca 5-150 FIT per enhet men utan kontroll så kan SER passera 50 000 FIT per krets, om inte SE finns med i beräkningarna redan från designstadiet.[26,40,94] När det kommer till kraftelektronik och halvledande komponenter som dioder, transistoren och tyristorer så är kraven högre och då har normalt komponenterna som använts värden mellan 1 FIT och 0,01 FIT. [15]

Det finns två standarder för marknära neutronstrålnings testning, JEDEC och IEC, TS 62396-1 "Process Management for Avionics-Atmospheric Radiation Effects". IBM har gjort en undersökning av SER och vid 10000 ft (ca 3000 m) så är SER 14 ggr högre än vid havsnivå. När komponenter som t.ex. MOSFET minskar i storlek så ökar deras känslighet. [40] Idag är den kritiska laddningen (Q_c) lägre och det räcker med att en partikel skapar en laddning (Q_{coll}) på några pC för att kunna störa en SRAM cell, jämfört det med ca 50 pC som det tog för 10 år sedan.[16]

För att fastställa FIT så måste neutronernas lägsta energi vara 10 MeV [6,41] vid testning med en accelererad källa. [41] Det är tröskelspänningen som är avgörande för skillnaderna mellan [42] den förväntade SER och mätbara SEUs tvärsnitt för SRAMs med noder under $0,13\ \mu\text{m}$, vid användning av monoenergetisk strålning (då stålen består av neutroner vars energier är inom ett snävt energispann). Det finns även andra artiklar där de undersökt tröskeln för olika reaktion kanaler, effekter i olika material och använt sig av Monte Carlos simulationer för att kontrollera inverkan av marknära SEUs FIT-rate.

Då medelvärdet på neutronflöden vid havsnivå [New York, 27,28] är 13 neutroner $\text{cm}^{-2}\text{timme}^{-1}$ och antar att stopplängden (den sträcka som partikeln rört sig i substratet innan den stannat) för kisel är ungefär 40 cm [29], så blir det maximala antalet reaktioner $3,2 \cdot 10^3 \text{cm}^2\text{timme}^{-1}$ inom kiselsubstratet med en tjocklek på $100\ \mu\text{m}$. Ifall varje neutronreaktion leder till en störning eller ett fel så begränsas det till $3,2 \cdot 10^6 \text{FIT cm}^{-2}$. Detta sammanfaller väldigt bra med den felmarginal som många komponenter har då de är nära sina respektive genombrottspänningar. [16]

5.4 Testning för soft error

Det finns fyra laboratorier som har det naturliga neutronspektrumet, spektrumet innebär att neutronerna finns i inom ett energintervall som förekommer naturligt i luften. Det kallas även för "white-spectrum neutrons", vilket innebär att neutronerna har ett brett

energispektrum.[79] När testning av elektronik som används inom autonomous drive alltså självkörande bilar, så behöver hela bilen utsättas för strålning.[34]

Facilitet och Laboratoriet	Land	Högsta energi (MeV)	Status
LANCSE ICE, LANL	USA	800	I drift
TNF, TRIUMF	Kanada	500	I drift
ANITA, TSL	Sverige	180	Ej i drift (2017)
ISIS Vesuvio, RAL	UK	800	I drift
ISIS Chip-IR, RAL	UK	800	Under konstruktion
SNS RID, ORNL	USA	1000	Föreslagen
ESS (European Spallation Source), Lund	Sverige	2500	Under konstruktion

Tabell 3: En lista av de existerande och planerade faciliteterna i Europa, USA och Kanada med ”white-spectrumneutrons”-bestrålning.

Det finns en allmän metods beskrivning, JEDEC Jep151[15] som går att köpa på JEDEC’s hemsida. Den beskriver lite mer utförligt hur en bör testa en halvledarkomponent och även om den är generell så är den applicerbar på många komponenter. Det finns ett mindre antal standarder som beskriver hur testning för soft-errors bör gå till. Det finns bl.a. JEDEC89A[6] och IEC 62396–1:2016[23]. JEDEC89A är den som kommer att tas upp mest, detta för att det är med den organisationen som Svedbergs laboratorium haft en del samarbete tillsammans med, och tagit fram en publikation som beskriver test-processen och den heter JEP151. Det är även den standard som används som referens till andra laboratorier i Europa och USA. En komplett testning av SER är enbart genomförd när antingen testningen skett i realtid under de aktuella förhållanden eller accelererad testning för alfa-partikel, högenergetiska kosmiskstrålning och om nödvändigt termiska neutroner.

Det finns några olika typer av elektroniktestning, för all typ av fel/störningar som uppkommer som följd av neutroner (enligt JEDEC Standard). För att ha en helhetsbild av en komponents soft error-känslighet så måste DUT (Device Under Test) utsättas för dessa typer av tester. De måste utsättas för neutronstrålning med både låg- och högenergi samt för alfastrålning.

5.4.1 Realtidstest

Det ultimata sättet att mäta SER vore att observera komponenten när den används under standard drift/arbets-villkor samtidigt som komponenten exponeras för normalt omgivande naturlig strålning. Problemet med denna typ av testning är att den effektiva felfrekvensen (SER) blir så låg att testning av en komponent skulle ta flera årtionden för att kunna generera statistiskt, signifikant antal SE för att kunna få fram SER. Det går att arbeta sig förbi denna begränsning genom, Real-Time SER (RTSER), testen går ut på att använda ett väldigt stort antal komponenter parallellt med varandra för att reducera den nödvändiga testtiden. Testen

kan också utföras på högre höjder där det högre neutronflödet kommer generera en högre felfrekvens. Den här typen av testning har dock fortfarande relativt lång testtid, flera veckor till månader. Det är bra att ha SER-data från annan typ av testning, som ex.vis alfa-partiklar eller från liknade komponenter som testats, för att kunna uppskatta den förväntade felfrekvensen. Denna uppskattning kan sedan användas för statistiska beräkningar som ex.vis χ^2 fördelning.

5.4.2 Accelererad testning vid marknära kosmisk strålning.

När det kommer till accelererad testning så menas att testet försnabbar åldringen hos komponenten. Detta görs genom att utsätta DUTn för en stråle med ett stort flöde av partiklar. När kosmisk strålning inträder i atmosfären, kolliderar de med atomkärnor i luften och skapar kaskader av partiklar av olika slag, där vissa av dem når marknivå. Inom den marknära kosmiska strålningen så finns det partiklar som interagerar starkt med nukleoner, främst neutroner, till viss del protoner och en del pioner. Dessa partiklar interagerar med kisel (Si) och andra atomkärnor via starka kärnreaktioner. Dessa reaktioner producerar en rad olika sekundära partiklar- protoner, neutroner, alfa-partiklar och tunga rekylkärnor, en del av dessa sekundära partiklar är starkt joniserade, om några av dem tränger sig in i substratet hos komponenter så kan det skapa en laddning av fria elektron-hålpar i kisel. Laddningen kan samlas vid pn-övergången och producera en strömspik i kretsen. Denna metod av testning är till för att bestämma komponenters känslighet för högenergetiska neutron händelser från accelererade experiment.

5.4.3 Accelererad testning med termiska neutroner.

Bor har två isotoper, ^{10}B och ^{11}B , ^{10}B har en hög intagningsförmåga av neutroner eller neutron tvärsnitt, och då en neutron intas av ^{10}B 's cellkärna så är det högst troligt att fission sker och klyvs då till två joniserade partiklar. Dessa fragment kan båda leda till SE.[48,49] Den dominanta reaktionen är:



Där γ är gammapartikel, ${}^7\text{Li}$ är en litium isotop, ${}^4\text{He}$ en helium isotop och n är en neutronpartikel. ^{10}B finns oftast i komponenter i form av polykristallin kisel doping, substrat doping eller i BPSG (Boro-Phospho-Silicate Glass). Användning av höga koncentrationer av bor i dess naturliga isotopform i substratet ökar riskerna för den ovannämnda reaktionen (6).[50] Det finns numera nyare tekniker som använder sig av mycket kraftigt dopade substrat, poly-kristallin kisels lager och implantat som används som kan placera ^{10}B i närheten av aktiva komponenter. Även ifall komponenten inte innehåller BPSG så räcker inte det för att utesluta SE som uppkommer som följd av termiska neutroner. Den ovannämnda reaktionen med ^{10}B ökar snarare då neutronernas energi minskar, denna reaktion domineras av neutroner $< 0.04 \text{ eV}$. De resulterande alfa-partiklarna och litiumkärnorna är båda starkt joniserade, så om någon av dem skulle komma i kontakt med den aktiva komponenten så orsakar det elektronhålpar i kisel. Laddningen kan samlas vid pn-övergången och producera en strömspik i kretsen. Dessa strömspikar kan vara stora nog för att ändra datatillstånd av några kretsar.

5.4.4 Accelererad testning med alfapartiklar.

Vi kommer inte att fokusera på denna typ av test men det bör ändå nämnas i rapporten. Alfapartiklar är starkt joniserade, och uran samt torium är två föroreningar som finns i spårmängder i många olika typer av produktion och packningsmaterial som avger alfapartiklar. Om någon av dem skulle komma i kontakt med den aktiva enheten så orsakar det en skur av fria elektronhålpår i kisel. Laddningen kan samlas vid pn-övergången och producera en strömspik i kretsen. Dessa strömspikar kan vara stora nog för att ändra data tillstånd i några kretsar. [6]

5.5 Testning

Detta är ett försök att sammanställa en generell testmetod för elektroniktestning med neutronstrålning. De mest drabbade komponenterna är MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) [15,71], JFET (Junction gate Field-Effect Transistor), effektdioder och IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), detta för att de oftast används för kraftelektronik.[15,16] I denna samling så ingår också komponenter som GTOs (Gate Turn-off Thyristor) och vanliga thyristorer. I eldistributionssystem så kan logiska funktioner ingå men också vara en del av integrerade kretsar eller system. Objektet som testas kallas för Device Under Test (DUT). Det följande kraven bör vara uppfyllda för att kunna genomföra en testning:

Det måste gå att detektera störningar som uppkommer på DUTn under själva testningen och att störningarna går att mäta. Det måste även gå att applicera spänning till DUTn under testet.

För att tillräckligt säker statistik skall kunna fås måste testet ske med ett visst antal komponenter, mellan 30-50 stycken DUT:s av samma slag räcker. [15] DUTn bör placeras på ett sätt så att strålen är konsekvent över alla DUT. Under testning så sker en aktivering i det omkringliggande materialen, den aktiviteten går att begränsa genom att försöka minimera materialet som används och att materialen inte innehåller livslånga radioaktiva isotoper. För elektroniken som används i testutrustningen kan SE vara ett problem, det går att minimera genom att begränsa strålen till DUTs area. Det måste säkerställas att spänningen till DUTn förblir vid den önskade nivån utan toppar och dalar. Strömförsörjningen och detektionselektroniken måste skyddas från strålen.

De störningar som uppkommer hos DUTn måste registreras under testet och vara identifierade innan testet utförs. De måste också vara finnas en redogörelse för antalet störningar som uppkommer men också sammanställning av de komponenter vars funktion inte påverkats. Fel som uppkommer som följd av andra orsaker än radioaktivitet måste uteslutas, såsom fel som uppkommit på grund av spänning eller strömsteg (dU/dt - och dI/dt -fel). En definition av komponentens fel bör anskaffas med referenser till dess specifika parametrar, t ex läckströmmens tröskel.

5.5.1 Testplan

En bra, utarbetad testplan är viktigt att ha vid testning av SE, speciellt när SEB (Single Event Burnout) ska testas. Då SEB leder till att DUTn [28] förstörs så involverar den testningen ett stort antal komponenter vilket gör att en bra testplan kan vara avgörande. Felfrekvensen mäts oftast i FIT (Failure In Time) och för att lättare kunna förutse den förväntade felfrekvensen (SER) så är det bra om det finns någon data från tidigare tester. I de fall där ingen tidigare testning gjorts eller att ingen testdata finns tillgänglig så går det att uppskatta en förväntad felfrekvens, genom att jämföra de förändringar i DUTs konstruktion med existerande data från komponenter som redan testats. Den lägsta förspänningen till DUTn då den förväntas få störningar är vid ungefär 60 % av märkspänningen. I de fall där DUTs känslighet mot marknära strålning kan jämföras med tidigare tester så är det rekommenderat att höja förspänningen så snart antalet fel uppkommer så att konfidensnivå för felfrekvensen är uppnådd. Höjning av temperaturen hos komponenten leder till att felfrekvensen minskar, oavsett förspänning.

5.5.1.1 Innan testning

Varje facilitet har en egen utarbetad checklista som bl.a. bestämmer hur placeringen av utrustning och annat ska ske. Det finns oftast markeringar och laserinriktningshjälpmedel för att underlätta positioneringen av DUTn längs med strålen (Se bild 56 i bilaga B). Det bör också ske någon typ av funktionalitets kontroll av utrustningen som ska användas som spänningskällor, konstruktionens förspänning och dess strömdetektorsignal med Analog-to-Digital omvandlare (ADC). Innan testet kan ske så bör villkoren för strålen fastställas som t.ex. strålens energi och intensitet.

Innan testningen kan påbörjas så bör en lista på komponenttyper samt testobjekten sammanställas och hur komponenterna är placerade under testen måste dokumenteras. Listan bör bl.a. innehålla komponenttyp, partinummer och en variant beskrivning. Dokumentationen måste även innehålla en definiering av kriterierna för komponentfel t.ex. tröskelvärde för läckströmssteg, vilket är ungefär 100 μA per DUT. Det bör också antecknas antalet komponenter som testas och deras positioner dels på test kortet och dels deras position längs med strålen.

Innan spänningen appliceras så bör Gate-Source/ Emitter kortslutas och hur det görs beror på vilket typ av DUT som testas. För MOSFETs och IGBTs görs det genom antingen att använda en ledande färg eller bindning direkt på de bara formarna och efter det kan DUT monteras på testkorten. För att kunna applicera spänning direkt på de bara formarna, så bör kanterna på formarna skyddas och detta görs t.ex. genom applicering av silikongummi.

Definieringen av startspänning och spänningssteg görs genom att se till tidigare tester. I de fall då startspänningen är okänd, så bör den vara ungefär 50 % av komponentens märkspänning. Spänningssteg är normalt en funktion av komponentens märkspänning. Det är

dock smart att välja spänningsstegen så att stegen inte leder till en massiv ökning av felhändelser, vilket kan vara svårhanterbart av signalelektroniken. Däremot bör stegen inte vara för små heller, utan att den önskade testspänningen kan täckas med 3-5 steg. Vid varje steg så bör ett antal t.ex. 10-15 fel bli samplade.

Positionerna för varje komponent vid testning bör registreras, det är viktigt för felanalysen som görs efter utfört test. Monteringen av komponenterna bör ske försiktig, detta för att undvika elektrostatiska urladdningar och mekaniska skador. Bestrålning med högenergetiska neutroner kommer oundvikligen leda till aktivitet i både DUTn och i testutrustningen som används. Aktiviteten som skapas beror på dels flödet hos strålen men också på de material som komponenterna består av. Material som metall bör minimeras och gjutmassan bör innehålla låga halter av ämnen som har lång radioaktivitet såsom klorin. Då den mesta av aktiviteten är kortlivad så är det bra att vänta 15 min innan kontrollering av utrustning sker med t ex Geigermätare, innan hantering av komponenterna förekommer. Geigermätare är ett instrument som kan mäta radioaktivitet. [102]

5.5.1.2 Generell testmetod

Applicering av startspänning bör ske samtidigt till alla DUTs, ifall fel inträffar så behåll en del av påverkan från spänningen tills 12-14 komponenter felar, detta för att uppnå en 50 % konfidensnivå. Ifall inga fel inträffar vid det uppskattade minsta tiden och fluxet av strålen så bör en ökning av spänningen ske med de förutbestämda stegen som är satta i planeringen av testet. En ökning av spänningen har fördelen att antalet DUTs minskar på grund av fel, alltså felfrekvensen kommer att öka simultant med ökning av spänning. Därför kommer antalet fel (FIT) hanteras lättare av signalelektroniken och därigenom också, de fel som inte är relaterade till bestrålningen t ex som dU/dt -effekterna kan lättare hanteras och identifieras. En bra datainsamling av den felade komponenten, antalet av komponenter som fortfarande fungerar, flödet-vid-fel, och förspänningen måste antecknas för varje DUT. Flödet-vid-fel är vilka egenskaper strålen har vid inträffade fel. Datainsamlingen utförs genom kontrollmjukvara och utrustningen för denna insamling måste kunna köras fjärrstyrt, genom en fjärrkontroll via exempelvis ett nätverk. Detta då det inte finns möjlighet att vara i närheten under testkörning. Kontrollmonitorn bör visa viktig information såsom statusen för strålens tillstånd, detta kan göras genom t.ex. en detektorräknare och en signalsenor som är på strålen. Monitorn bör även visa förspänningen, temperaturen, funktionalitet och felstatusen för alla DUTs. Det är också bra om monitorn kan visa komponenternas läckström och de felkriterier som upprättats innan test såsom tröskelströmsnivåer. Testet är slutfört antingen när alla komponenter har felat eller på grund av val av operatören, vanligtvis när tillräckligt många fel har uppnåtts oavsett inställningar på spänning eller temperatur.

5.5.1.3 Testutvärdering

Då New York City fungerar som referenspunkt för den marknära strålningen och där den är uppmätt till 13 neutroner $\text{cm}^{-2} \text{timme}^{-1}$. [3] För att uppnå 100 FIT så förväntas ett fel att inträffa enligt konstruktionens flöde (antal komponenter*flödet) vara $1,3 \cdot 10^8$ neutroner $\text{cm}^{-2} \text{timme}^{-1}$. För en konfidentnivå på 95 % måste antalet fel (r) vara mellan 10-12 för att kunna bestämma felfrekvensen med en faktor 2. Detta kräver att flödet över DUTn är över 10 MeV och $1,5 \cdot 10^9$ neutroner cm^{-2} , vilket skulle kunna uppnås inom en test tid på 20 min. Det leder till att neutronkällans intensitet bör vara runt $5 \cdot 10^6$ neutroner $\text{cm}^{-2} \text{sekund}^{-1}$. [17]

För att beräkna fram FIT (λ_{CR}) för komponenterna så behövs följande ekvationer och data från testet: Felfrekvensen (F) vid en accelererad källa (λ_{ACC}), för flödet-vid-fel (f). När flödet (Φ_b) är känd så kan en $F(f)$ beräknas genom:

$$F(f) = 1 - \exp(-\lambda_{ACC} * f) \quad (7)$$

För beräkning av λ_{ACC} behövs antalet störningar/fel (r) hos DUT och komponentflödets produkt T_{SUM} vilket är:

$$T_{SUM} = \sum n(t_i) \Delta f_i \quad (8)$$

Där $n(t_i)$ är antalet komponenter vid tid för fel t , och Δf_i , är flödet -vid-fel (sedan det senaste felet). Felfrekvensen (λ_{ACC}) fås genom:

$$\lambda_{ACC} = \frac{r}{T_{SUM}} \quad (9)$$

Ifall en konstant riskfrekvens är antagen så kan konfidentintervall för λ_{ACC} fås genom:

$$(2T_{SUM})^{-1} X_{\alpha/2}^2(2r) < \lambda_{ACC} < (2T_{SUM})^{-1} X_{1-\alpha/2}^2(2r) \quad (10)$$

Där χ^2 är chi-kvadrats funktionen med 2 graders frihet och $\alpha = 5\%$ för ett 95 % konfidentintervall. Detta kan sedan användas för att beräkna DUT:ens felfrekvens (λ_{CR}), vilket vanligtvis är angivet som FIT (Failure In Time). Felfrekvensen vid en accelererad källa (λ_{ACC}) kan sedan multipliceras med medelvärdet av neutronflödet vid havsnivå (Φ_n) för att kunna uppskatta felfrekvensen hos DUT:en (λ_{CR}):

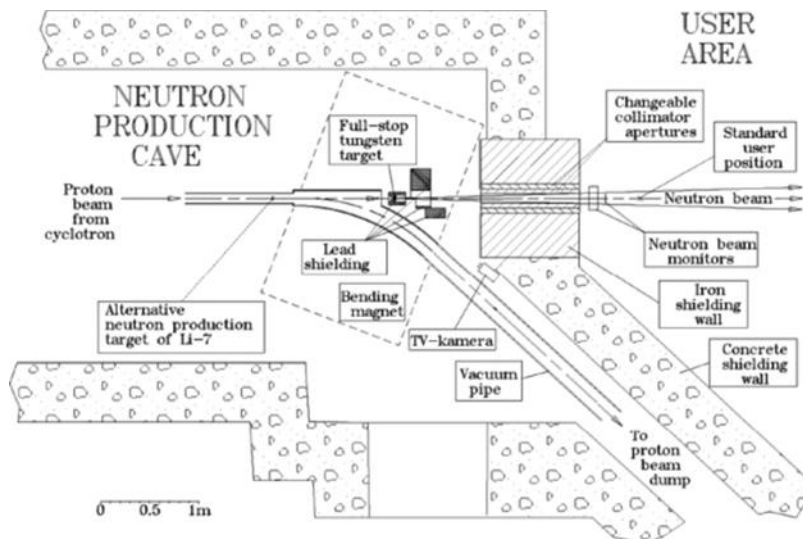
$$\lambda_{CR} = \lambda_{ACC} * \Phi_n \quad (11)$$

5.6 Neutronkällor för accelererad SER-testning

5.6.1 Laboratorier med neutronkällor för accelererad SE-testning.

Den mest effektiva testning för SE är den accelererade testningen. Accelererad testning innebär att testobjektet utsätts för en stråle med en väldigt hög densitet av neutroner, detta för att snabba på åldringsprocessen hos objektet. Därför så följer här en liten sammanställning av de laboratorier där den accelererade testningen kan ske, de är också dessa faciliteter som kan erbjuda ett spektrum av energier som liknar den naturliga strålningen som kommer från atmosfären. De följande fem laboratorierna följer både JEDEC och IEC-standarderna.

5.6.1.1 ANITA (Atmospheric-like-Neutrons from Thick Target)



Figur 8: Schematiskt layout för facilitet ANITA. © [2009] IEEE. Återgiven med tillstånd, från [95].

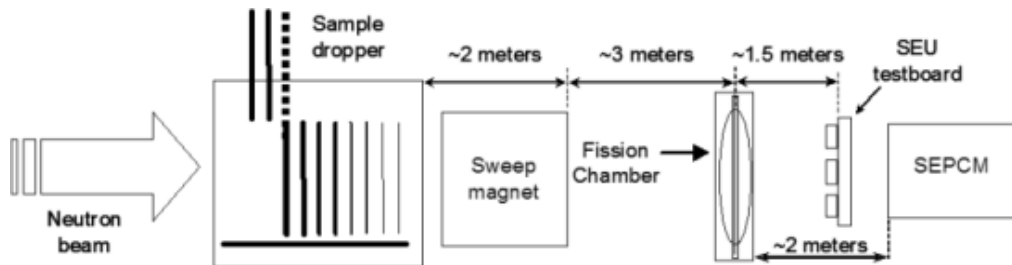
I The Svedbergs Laboratorium (TSL) i Uppsala finns ANITA-faciliteten vars neutronstråle har ett energispektrum som påminner om det naturliga neutronflödet, det gör att ANITA är lämplig för accelererad testning för SE. I Sverige finns ungefär $13 \text{ neutroner cm}^{-2}\text{timme}^{-1}$ på marknivå och med ANITA så kan de leverera en stråle med $1 \text{ miljon neutroner cm}^{-2}\text{sekund}^{-1}$ om det är en mindre komponent som ska testas så kan den placeras på ett ställe närmare strålen, där ANITA kan leverera $1.5 \text{ miljon neutroner cm}^{-2}\text{sekund}^{-1}$. [46]

ANITA-faciliteten har en kvasi-monoenergetisk neutronkälla som är gjort för energinivåer som är över 20 MeV, detta är på grund av 'Multi-body breakup reaction' [44].

ANITA har en cyklotron (Gustav Werner cyklotronen) som används för att accelerera protoner tills de innehar en energi på 180 MeV (se figur 53 och 54 i bilaga B), protonstrålen transporteras sedan till experimentsalen med hjälp av böj- och styrmagneter. I experimentsalen finns det ett Li^7 -mål som är inbäddad i ett betonghus för att undvika att andra partiklar reagerar med Li^7 -målet. I detta betonghus så finns det flera blyhinder som är placerade runt Li^7 -målet, detta för att förhindra att protonerna att läcka ut till kollimatoren (se figur 55 i bilaga B). Litium-7 (Li^7) är en av de stabila isotoperna som finns naturligt med 4 neutroner. Protonstrålen leds fram till Li^7 -målet med hjälp av magneter där mer än 99 % av protonerna bara passerar genom målet, för att sedan ledas vidare till en protondepå som är placerad ca 11 m från målet. De resterande procenten, ca 1 %, reagerar med Li^7 och producerar då kvasi-monoenergetiska neutroner, där ca hälften är lågenergetiska och resten innehar en energi på 175 MeV. Det strålen med neutroner passerar sedan en kollimator, som riktar neutronerna så att de blir parallella (se figur 55 i bilaga B). Kollimatoren som finns på ANITA är ca 1 m lång och efter den förs strålen ut till testsalen och på DUTn, storleken på strålen går att justera mellan 0-30 cm med kollimatorns öppning. [45] En

neutronstältningsmonitor används för att mäta neutronernas flöde från kollimatorn innan det skickas vidare ut till DUTn, även i hallen finns det olika neutrontektorer som mäter neutronflödet kontinuerligt.[46]

5.6.1.2 LANSCE (Los Alamos Neutron Science Center)



Figur 9: Testprocessen hos facilitet LANSCE. © [2004] IEEE. Återgiven med tillstånd, från [69].

Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) har en facilitet som heter ICE house, där de kan producera en neutronstråle som efterliknar den naturliga strålningen som finns i atmosfären. Den är lämplig för testning av SE för både den marknära strålningen men också för flyg- och rymdindustrin [48]. De är också en spallationskälla som ANITA på TSL och neutronerna är kvasi-monoenergetiska. Tungmetallernas atomkärnor blir instabila om de träffas av en högenergetisk proton och avger som följd spallationpartiklar, däribland neutroner. I ICE house så använder de sig av en 800 MeV protonstråle som riktas mot ett volframsmål. Detta leder till att neutronerna som uppkommer av spallationsreaktionen innehåller energier mellan 1 MeV till strax under 800 MeV. [47,49]

Neutronstrålen mäts med hjälp av en fissionskammare och ett "Time Of Flight"(TOF)-system [50]. För att förändra strålen så använder de sig av olika lager av polyeten, detta filter placeras uppströms längs med flygbanan och vid svepmagneterna. Det är svepmagneten som tar bort alla sekundära partiklar som uppkommer vid absorbatoren. [75]

5.6.1.3 TRIUMF (Tri-University Meson Facility)

Tri-University Meson Facility (TRIUMF) är en facilitet som är belägen på University of British Columbia, Vancouver. De bestrålar ett bly eller stål mål med protoner med energi upp till 500 MeV. TRIUMF utför SE tester för integrerade kretsar och har en högre protonintensitet på upp till 10^{10} protoner $\text{cm}^{-2}\text{sekund}^{-1}$ med ett energiområde mellan 20-500 MeV [52].

I en tidigare studie har dessa jämförts [90] med JEDEC-standarden. [51]. De har en Proton Irradiation Facility (PIF) och i detta område så kan de leverera en neutronstråle. Den fås genom att stoppa protonerna, som innehåller energier mellan 70 - 500 MeV, med ett mål som består av antingen bly eller stål.[53]

TRIUMF-faciliteten är inhägnad i en betong-och stålskyddad cistern, där en cylinderformad vattenkanal är placerad i mitten av anläggningen. I kanalen är målet inlagd, och under den är en aluminiumplatta placerad för att stoppa protonerna som skjuts genom ett vakuumrör. När protonerna har kolliderat med plattan genereras neutroner som strålas ut genom en vertikal öppning som är ansluten till i fyra horisontella neutronkanaler för att ta emot och balansera ut neutronstrålningen. Både energinivå och neutronflödet kan justeras med hjälp av ett ”rotationssystem” där olika aktiveringsfolier som guld, nickel, aluminium och kol kan alterneras i kanalen. Flödet kan mätas och simuleras med koden FLUKA (beräkning av partikel utgåva i Monte Carlo simulation). TRIUMF genererar två neutronstrålar för SER-test. Den ena neutronkanalen är ansluten till en högenergistrålning i BL1A (Beamline) där protoner med högre energi kan genereras. För att generera neutronstrålning används en absorbatör av bly eller stål, som placeras framför protonflödet och stoppar mellan 70-500 MeV. Mätningen av neutronflödet sker med hjälp av ‘Bonner sfärer’ och ‘aktivt kol’ [53]. Den andra kanalen är ansluten till en lågenergistrålning i BL2C. En stor joniseringskammare kallat T1 behövs för att kalibrera exakt dos och flöde för inkommande protonstrålning. Genom att justera en spridningsfoliers tjocklek framför kollimator kan man välja strålningens storlek [53].

5.6.1.4 ISIS

Rutherford Appleton Laboratory i Oxfordshire har en facilitet som använder sig av en spallationskälla där protoner accelereras på ett volfram eller tantalmål. Dock så är deras stråle designad för epitermisk neutron spridning-mätning i förtätad materia och strålen är modifierad av vatten. [73] Neutronproduktionen på ISIS utförs genom spallationsreaktioner som induceras av en strålen med 800 MeV protoner som accelererar genom en synkrotron (en typ av accelerator). Protonstrålen utför 10^4 varv inuti synkrotronen för att få upp accelerationen, för att sedan kastas ut i en protonstrållinje, som levererar $4 \mu\text{C}$ av protoner i “två 100-ns-långa pulsar” på ett spallationsmålet som består av antingen volfram (W) eller tantal (Ta). Hela processen med accelerationen upprepas 50 ggr/sekund, vilket leder till att en medelström på $200 \mu\text{A}$ levereras till målet. Denna process ger ca 30 neutroner per proton.

5.6.1.5 RNCP (Research Center for Nuclear Physics)

Research Center för Nuclear Physics (RCNP) på Osaka University har en avdelning, Cyclotron facility, avdelningen innehåller en facilitet som heter WN Course (White Neutron Irradiation facility). Där utförs testning av SE på halvledare med neutroner i energispannet 1-300 MeV. Neutronerna produceras genom att en 392 MeV protonstråle infaller på ett 6.5 cm tjockt volframmål. [54] Neutronspektrumet som erhålls genom att TOF-mätningar återger den marknära neutronstrålningens fördelning medan dess intensitet är högre med en faktor $1.5 \cdot 10^8$. Det genomsnittliga neutronspektrumet har en intensitet som ligger mellan 10 och 100 MeV, vilket liknar den på LANSCE. Neutron densiteten per puls är nästan 500 ggr lägre

på RCPN än på LANSCE, detta för att minska risken för SE-transienta strömmar och falska Multi-Bit Upset (MBU). RCPN är också mer lämplig för accelererad testning inom en mer realistisk tidsram. De använder sig av betongblock för att skydda från neutronerna, att använda sig av betong är bra då det är ett poröst material och det förhindrar neutronernas spridning.[68]

5.6.2 Neutrongeneratorer.

För accelererad testning kan även monoenergetiska neutronkällor användas och det finns tre typer av neutrongeneratorer som levererar den typen av strålning. Det är reaktioner mellan tritium (T eller ^3H) och deuterium (D eller ^2H) som är vanligast och ger en stabil ”puls”. Deuterium är en stabil väteisotop, också kallad för tungt väte med en neutron och en proton som kärnpartiklar. Tritium är också en väteisotop fast radioaktiv med en proton och två neutroner. Det finns flera andra typer av monoenergetiska neutronkällor men för just neutrongeneratorer så är reaktioner med dessa isotoper vanligast. [55]

Den vanligaste neutrongeneratoren är D-T-reaktionen som producerar neutroner med energier på 14 MeV, D-D-generatorer levererar neutroner mellan 3-5 MeV beroende på energin som den accelererade deuteriumet innehåller innan den träffar deuteriummålet. Den sista är p-T, där accelererade protoner träffar ett tritiummål och neutroner intar ungefärligt den energin som den accelererade protonen har. [6,27,56,57,58]

6. Skador, säkerhet och skydd.

Neutroners påverkan på atomer gäller inte uteslutande för material som kisel utan alla material, så även atomer i kroppen. Detta kan leda till en direkt död eller mer långsiktiga sjukdomar som cancer.

6.1 Skador.

Det sker en slumpmässig överföring av energi från strålning till molekyler i celler. Då den mänskliga cellen består av 60-70% vatten så är det troligast att det är en vattenmolekyl som reagerar med strålningen. Vattenmolekylen bildar joniserat H_2O^+ och en fri elektron, den joniserade molekylen omvandlas senare till radikaler som i sin tur reagerar starkt med andra molekyler och bildar då vätgas, väteperoxid och vatten. I slutändan så har en modifierad biomolekyl bildats och en biologisk skada har uppkommit. [77]

Det är därför insekterna kommer överleva oss om en atombomb exploderar, deras kroppar består inte till en så stor del av vatten, för att de ska påverkas så behövs fler kGy [60] Det går att dela in skadligheten på de mänskliga cellerna i två kategorier, akut och stokastisk effekt. Indelningen beror på strålningens dos som de utsätts för och mäts oftast i enheten Gray (Gy) där den beror på den energimängden som absorberas av en viss mängd materia, 1 Gy

motsvarar 1 joule energiabsorption per kg. Ibland används en äldre enhet, rad vilket är 0.01 joule per kg. Ett mått som används för att mäta den dödliga dosen strålning är LD (Lethal Dose), ex är LD_{50/30} att den absorberade dosen kommer döda 50 % av den exponerade populationen inom 30 dagar.

6.1.1. Akut effekt (Icke stokastisk)

Cellers känslighet mot strålning kan delas in i tre kategorier, den första är celler som inte delar sig såsom nervceller i det centrala nervsystemet (CNS). Den andra är celler som normalt inte delar sig men som ändå har potentialen till delning t ex leverceller. Den sista indelningen är de celler som fortlöpande delar sig t ex benmärgsceller och celler i tarmen. Celler som har snabb celledelning är känsligast mot radioaktivt strålning som benmärg och embryo.[77]

När hela kroppen utsätts för en stor dos av strålning, så är det flera saker som händer. Akut strålningssjuka (ARS – Acute Radiation Syndrome) är det samlande begreppet på flera effekter som strålning kan ha på kroppen men det går att dela in i tre huvud kategorier beroende på strålningsdos och exponeringstid: Benmärgsskador, tunntarmsskador och centrala nervsystemet.[68]

Oavsett strålningsdos så kommer personen uppleva illamående, kräkningar och diarré. Vid hematopoetisk symtom så är det skador i de stamceller som finns i benmärgen, symtomen manifesteras redan vid doser på 100 – 500 mGy (10-50 rad) men bara upptill 7 Gy. Gastrointestinala symtom (GI) visar sig symtomen på de celler som finns i tarmarna, framför allt kryptcellerna är känsliga för radioaktiv strålning. De ingår i den celledelning som sker och bildar villi i tarmarna. Detta sker om strålningsdosen är över 10 Gy eller mer, och på grund av dosen så inträffar även den hematopoetiska fasen. En person kan överleva dessa faser, genom övergripande och snabba medicinska behandlingar, som höga doser av antibiotika för de infektioner som manifesterar sig, ingivande av vätskor och elektrolyter och eventuellt också blod- eller/och benmärgstransplantation.

Den sista fasen, CNS (Centrala Nervsystemet) inträffar bara om personen exponeras för strålningsdoser över 20 Gy. Doser på denna nivå så finns det inget medicinskt ingripande som kan hjälpa, personen kommer inte att överleva. Nervsystem, tillsammans med andra kroppssystem upphör att fungera vilket leder till att utöver de tidigare nämnda symtomen så kommer personen hamna i koma. Döden inträffar alltifrån några timmar till veckor. [68,77]

6.1.2 Stokastisk effekt (Sena effekter)

Stokastisk effekt är symtom som uppkommer senare och inkluderar cancer och genetiska defekter på foster, från exponerade personen. Det är fortfarande svårt att säga vilka nivåer eller exponeringstid som leder till dessa effekter. Det enda som är klart är att det finns ett samband mellan exponering av strålning och cancer.

Cancer som uppkommer efter exponering av radioaktiv strålning går inte att skilja från den ”vanliga” cancer, vilket gör att det är svårare att avgöra om det verkligen är ett fall från exponering eller inte. De vanligaste varianterna av cancer från strålning är leukemi[63], ben- [64,65] och lungcancer[66] samt sköldkörtelcancer[67]. En skada på en DNA-sträng går att reparera detta för att information från den andra komplementära DNA-strängen, kan användas för att identifiera basparet som behövs för att fixa den skadade arean. Vid strålning med hög LET som exempelvis neutroner leder ofta till skador på båda DNA-strängarna, detta leder då i många fall till celledöd.

”Bystander effekt” [61] är att celler som inte utsatts för strålning fortfarande kan uppvisa symtom som skadade celler gör, detta för att de kommunicerar med exponerade celler. Genomisk instabilitet [62] är en annan effekt som strålning kan ha på cellerna, där celler känner av effekter från celler som blivit bestrålade. En ärftlig effekt är också en del av de kroniska effekterna av strålning. Exponering påverkar gonaderna, de organ/körtlar som producerar köns-hormoner/celler, alltså testiklarna och äggstockarna.

6.2 Säkerhet och skydd.

När det kommer till skydd från neutroner så kan den delas in i tre delar, detta för att högenergetiska neutroner är svåra att stoppa då de är oladdade. De material som används vid test aktiveras av neutroner, icke radioaktiva material blir radioaktiva. [68] Neutroner reagerar med atomerna i materialet och kan på så sätt förlora en del av sin energi. Det är bra att använda vätehaltiga material, i det första steget när neutronerna innehar höga energier, detta för att inducera spridningsreaktioner. Spridningsreaktionerna saktar ner neutronerna tills de kommer i termiskt tillstånd. De termiska neutronerna absorberas bättre i material som bor eller kadmium. Det bildas ofta gammastrålning när termiska neutroner reagerar med bor, därför kan det vara bra att även skydda även för den typen av strålning. [6,68]

6.2.2 Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM)

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) är en myndighet som arbetar förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter från strål- och kärnverksamheter. De är regeringsstyrda och tillhör miljö- och energidepartementet.

De övervakar följande områden: kärnkraft, avfallshantering, hälso- och sjukvård, forskning och industri samt kommersiella produkter och tjänster, samt naturlig strålning för att se att verksamheterna bedrivs på ett säkert sätt. För att få bedriva en verksamhet som hanterar strålning behövs tillstånd, det är SSM som utfärdar dessa tillstånd. [91]

6.2.2.1 Strålskyddslagen (1988:220)

Strålskyddslagen omfattar både joniserande strålning men också icke-joniserande, fria neutroner tillhör den första kategorin. Den gäller för de verksamheter som hanterar strålning

eller radioaktiva substanser, för hantering av radioaktivt avfall behövs tillstånd som går att ansöka hos SSM. Det är även SSM som är tillsynsmyndighet utsedda av regeringen. Lagens syfte är att skydda miljö, människor och djur från skadlig inverkan från strålning: Lag om finansiella åtgärder för hanteringen av restprodukter från kärnteknisk verksamhet (2006:647)

7. Diskussion

I takt med att komponenterna minskar till storlek så ökar deras känslighet för strålning och även för andra utomstående element. Det leder till att de lösningar som funnits inte längre räcker till för att undvika störningar och fel, som Error Corrections Techniques (ECC) och Triple Modular Redundancy (TMR). ECC kan bara korrigera ett visst antal fel i ett ord och då riskerna hela tiden ökar för MBE måste fler sätt att skydda hela systemet tillkomma. [72]

Det stora problemet är då en vill testa större, mer utvecklade system. Det finns ingen standardmetod för dessa och det leder ofta till att testutförarna inte vet hur de ska tolka resultatet efter utfört test. Dessa större system är också mycket mer komplicerade att datorsimulera, de 3D-CAD-programmen så utförs de endast på komponentnivå eller enklare kretsar och kretsimuleringar av LTSpice-typ på allt för stora system skulle ta evigheter att konstruera. Information kring hur felsökningen i det egna system måste finnas annars finns risken att testtiden blir bortkastat, detta då ett system som utsätts för accelererade strålningstester med en strålningsdensitet på ca $1 \text{ miljon neutroner cm}^{-2}\text{sekund}^{-1}$ och är otestad sedan innan kommer bara att sluta fungera. Ett flertal fel kommer att ha skapats och då gäller det att kunna särskilja på de störningar som neutronerna orsakat och vilka som är följdfel från neutronstrålningen. Det kräver en del förberedelser inför ett test, simuleringar på delsystem och på komponenterna i systemet måste göras. Det bör även finnas en del beräkningar för att kunna förutse hur systemet kommer betera sig. Det är svårt att hitta publicerade rapporter på accelererad testning då de utförs av tillverkare och de vill helst inte publicera.[74] En bra sida att besöka för att se publicerade tester, är NASAs hemsida "Radiation Effects & Analysis" [92]

I Sverige kan i praktiken vem som helst få tillstånd att bedriva en egen testanläggning för accelererad testning, så länge de krav som SSM har för sina tillstånd uppfylls. Det är dock inte enkelt att få tillstånd, i Sverige är det bara universitet som Uppsala och även Chalmers, som uppfyllt kraven. Det är också ett väldigt dyrt projekt att bygga upp förutom valet av accelerator som kostar flera miljoner kronor så behövs även en säker miljö för testen. Avfallshantering är inte heller helt enkelt eller billigt när det kommer till kärnavfall, även det är starkt reglerat av SSM.

Det är fler fordonstillverkare idag som ser sin framtid inom autonom drive (självkörande bilar), vilket kommer leda till mer elektronik och avancerade system i bilarna. Komponent- och kretskortstillverkare har ansvaret för att upprätta de korrekta tester som behövs för att

kunna säkerställa tillförlitligheten hos deras produkter. Det pågår just nu en diskussion om ansvarsfrågan för de självkörande bilarna, [93] om bilen är med i en olycka, vem bär då ansvaret när det är tekniken som fallerar? Detta är en frågeställning som försäkringsbolag tillsammans med fordonstillverkare ställer sig just nu.[99] Många försäkringsbolag måste också börja tänka om när det kommer till försäkringar, i USA har de börjat planera om sin verksamhet för framtiden då de tror på en minskning utav olyckor. [100] Volvo är en av fordonstillverkarna som gått ut med att de tar på sig fullt ansvar vid olycka. [59]

8. Slutsats

Under de senaste åren så har SE som orsakas marknära neutronstrålning blivit mer och mer relevant, speciellt då processtekniken börjar skala av ner till under 90 nm. [9,37,52]

Idag finns det CMOSs som är 14 nm och 2017 så kommer en 10 nm. När transistorerna och andra komponenter blir mindre så ökar risken att SE uppstår som följd av en träff av en lågenergi neutron, neutroner med energi under < 10 MeV.[9]

Då ett företag vill bygga ett eget testlabb, måste även de gå igenom SSM. Det är inte lika svårt att få tillstånd att inneha en neutrongenerator i jämförelse med en större accelerator. Det är svårt att få fram några exakta summor men startpriset på en liten generator börjar på ca 100 000 dollar.[101] Det finns även en hel del andra tillstånd att ansöka om, hantering av strålning, avfall och säkerhet. [91] Det gäller också att se vilka parametrar som är aktuella men då SE redan räknas in i FIT för en krets eller komponent så genomförs redan dessa tester av tillverkarna av kretsen eller komponenten. Det är inte lönsamt för ett mindre företag att försöka ”bygga upp” en mindre testfacilitet och inte heller nödvändigt då de redan utförts.

När ett system med fler komponenter och kretsar byggs upp så bör hela systemet testas för att säkerställa det, det räcker inte längre med de tester som utfört tidigare. Johan Karlsson [8] beskriver det hela som en swiss-cheese, det är en massa hål i alla lager och därför bör varje lager försöka täcka upp för SE på sitt sätt. Bara för att tester och utvärderingar gjorts på enskilda komponenter så betyder inte det att de är helt tillförlitliga i ett delsystem eller ett system. Det går att programmera bort en del fel men då behöver hela systemet utsättas för testning. Det går att till viss del bestämma den förväntade FIT:n på ett system men att utsätta den för accelererad strålning är en viktig del av säkerställningen av systemet.

Referenslista

1. Soft errors: http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/130765-understanding-soft-and-firm-errors-in-semiconductor-devices-questions-and-answers. Hämtad: 2016-12-23
2. SEB:
http://www.silvaco.com/tech_lib_TCAD/simulationstandard/2014/jul_aug_sep/jul_aug_sep2014.pdf. Hämtad: 2016-12-06
3. Ziegler, J.F. 1998, "Terrestrial cosmic ray intensities", IBM Journal of Research and Development, vol. 42, no. 1, pp. 117-140.
4. Ziegler, J.F. Curtis, J.F. Muhlfeld, H.P. Montrose, C.J. Chin, B. Nicewicz, M. Russell, C.A. Wang, W.Y. Freeman, L.B. Hosier, P. LaFave, L.E. Walsh, J.L. Orro, J.M. Unger, G.J. Ross, J.M. O’Gorman, T.J. Messina, B. Sullivan, T.D. Sykes, A.J. Yourke, H. Enger, T.A. Tolat, V. Scott, T.S. Taber, A.H. Sussman, R.J. Klein, W.A. & Wahaus, C.W. 1996, "IBM Experiments in Soft Fails in Computer Electronics (1978-1994)," IBM J. Res. Develop, 40, 3
5. Laboratorier: www.seutest.com. Hämtad: 2016-12-19
6. JEDEC Standard JESD89A, "Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductors":
<http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/jesd89a.pdf>. August 2001.
7. Seifert, N. Jahinuzzaman, S. Velamala, J. Patel, N. (2015) "Susceptibility of Planar and 3D Tri-Gate Technologies to Muon-induced Single Event Upsets", SELSE, March 2015, Austin, TX, USA.
8. Johan Karlsson, (Professor, Head of Department, Computer Science and Engineering. Chalmers) intervjuvad av författarna den 20 December 2016.
9. Ibe, E., Taniguchi, H., Yahagi, Y., Shimbo, K. & Toba, T. 2010, "Impact of Scaling on Neutron-Induced Soft Error in SRAMs From a 250 nm to a 22 nm Design Rule", IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 57, no. 7, pp. 1527-1538.
10. Tang, H. H. K. Srinivasan, G. R. and Azziz, N. (1990) "Cascade statistical model for nucleon-induced reactions on light nuclei in the energy range 50-MeV-1 GeV," Phys. Rev. C, Nucl. Phys., vol. 42, no. 4, pp. 1598–1622, Oct. 1990
11. Dostrovsky, I., Fraenkel, Z. & Friedlander, G. 1959, "Monte Carlo Calculations of Nuclear Evaporation Processes. III. Applications to Low-Energy Reactions", Physical Review, vol. 116, no. 3, pp. 683-702.
12. Hu, C. 1982, "Alpha-particle-induced field and enhanced collection of carriers", IEEE Electron Device Letters, vol. 3, no. 2, pp. 31-34.
13. Wallmark, J.T. & Marcus, S.M. 1962, "Minimum Size and Maximum Packing Density of Nonredundant Semiconductor Devices", Proceedings of the IRE, vol. 50, no. 3, pp. 286-298.
14. Dodd, P.E. & Massengill, L.W. 2003, "Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 50, no. 3, pp. 583-602.
15. JEDEC Jep151 "Test Procedure for the Measurement of Terrestrial Cosmic Ray Induced Destructive Effects in Power Semiconductor Devices", December 2015.
16. Soelkner, G. 2016, "Ensuring the reliability of power electronic devices with regard to terrestrial cosmic radiation", Microelectronics Reliability, vol. 58, pp. 39-50.

17. Tang, H.H.K. 1996, "Nuclear physics of cosmic ray interaction with semiconductor materials: Particle-induced soft errors from a physicist's perspective", IBM Journal of Research and Development, vol. 40, no. 1, pp. 91-108
18. Koning, A.J. & Rochman, D. 2012 "Modern nuclear data evaluation with the TALYS code system", Nuclear Research and Consultancy Group NRG.
19. Diskussion: <https://www.svd.se/oklart-ansvar-for-sjalvkorande-bilar>
Hämtad: 2017-04-22.
20. J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark, "The stopping and range of ions in solids ", 1985, Pergamon, New York.
21. Ziegler, M.D., Ziegler, J.F. & Biersack, J.P. 2010, "SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010)", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B, vol. 268, no. 11, pp. 1818-1823.
22. Srinivasan, G.R., Tang, H.K. & Murley, P.C. 1994, "Parameter-free, predictive modeling of single event upsets due to protons, neutrons, and pions in terrestrial cosmic rays", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 41, no. 6, pp. 2063-2070.
23. IEC 62396-1:2016 "Process management for avionics - Atmospheric radiation effects - Part 1: Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment", IEC Standard.
24. Johnson, G.H., Palau, J.M., Dachs, C., Galloway, K.F. & Schrimpf, R.D. 1996, "A review of the techniques used for modeling single-event effects in power MOSFETs", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 2, pp. 546-560.
25. Shoji, T., Nishida, S., Hamada, K. & Tadano, H. 2015, "Cosmic ray neutron-induced single-event burnout in power devices", IET Power Electronics, vol. 8, no. 12, pp. 2315-2321
26. R.C. Baumann, 2001, "Soft Errors in Advanced Semiconductor Devices-Part 1: The Three Radiation Sources", IEEE transactions on Device and Materials Reliability, Vol.1, No.1, pp.17-22.
27. Kabza, H., Schulze, H.-J., Gerstenmaier, Y., Voss, P., Schmid, J.W.W., Pfirsch, F. & Platzoder, K. 1994, "Cosmic radiation as a cause for power device failure and possible countermeasures", Proceedings of the 6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's , pp. 9.
28. Oberg, D.L., Wert, J.L., Normand, E., Majewski, P.P. & Wender, S.A. 1996, "First observations of power MOSFET burnout with high energy neutrons", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 6, pp. 2913-2920.
29. Petersen, E. 2012, "Foundations of Single Event Analysis and Prediction" in , 1st edn, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, pp. 13-76.
30. Barak, J., Levinson, J., Victoria, M. & Hajdas, W. 1996, "Direct processes in the energy deposition of protons in silicon", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 6, pp. 2820-2826.
31. Duzellier, S., Ecoffet, R., Falguere, D., Nuns, T., Guibert, L., Hajdas, W. & Calvert, M.C. 1997, "Low energy proton induced SEE in memories", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 44, no. 6, pp. 2306-2310.
32. Petersen, E. 1981, "Soft Errors Due to Protons in the Radiation Belt", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 28, no. 6, pp. 3981-3986.

33. Wrobel, F., Palau, J.-., Calvet, M.C., Bersillon, O. & Duarte, H. 2000, "Incidence of multi-particle events on soft error rates caused by n-Si nuclear reactions", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 47, no. 6, pp. 2580-2585.
34. Bisello, D., Candelori, A., Dzysiuk, N., Esposito, J., Mastinu, P., Mattiazzo, S., Prete, G., Silvestrin, L. & Wyss, J. 2012, "Neutron production targets for a new Single Event Effects facility at the 70 MeV Cyclotron of LNL-INFN", Physics Procedia, vol. 26, pp. 284-293.
35. E. Ibe, S. Chung, S. Wen, Y. Yahagi, H. Kameyama, S. Yamamoto, T. Akioka, H. Yamaguchi, "Valid and prompt track-down algorithms for multiple error mechanisms in neutron-induced single event effects of memory devices", Proc., Workshop on Radiation Effects on Component and Systems (RADECS), Greece, September 27-29, 2006, No.D-2 (2006)
36. D. Radaelli, H. Puchner, P. Chia, S. Wong, S. Daniel, "Investigation of multi-bit upsets in a 150 nm technology SRAM device", Proc. NSREC, 2005-Jul.-1115.
37. N. Seifert, V. Zia, "Assessing the impact of scaling on the efficacy of spatial redundancy based mitigation schemes for terrestrial applications", Proc. IEEE SELSE3, 2007-Apr.-34.
38. Li, X., Qin, J., Huang, B., Zhang, X. & Bernstein, J.B. 2006, "SRAM circuit-failure modeling and reliability simulation with SPICE", IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol. 6, no. 2, pp. 235-246.
39. Baumann, R. "A Tutorial on Single Event Effects in Advanced Commercial Silicon Technology", https://www.researchgate.net/profile/R_Baumann/publication/293173920_A_Tutorial_on_Single_Event_Effects_in_Advanced_Commercial_Silicon_Technology/links/56b614bf08ae3c1b79ad21aa.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication_detail. Hämtad: 2017-04-22
40. Baumann, R. 2005, "Ghosts in machine: soft errors in advanced computer systems," Texas Instrument Inc. IEEE Design and Test of Computers 22(3):258 – 266.
41. Sierawski, B.D., Warren, K.M., Reed, R.A., Weller, R.A., Mendenhall, M.M., Schrimpf, R.D., Baumann, R.C. & Zhu, V. 2010, "Contribution of low-energy ($\ll 10$ MeV) neutrons to upset rate in a 65 nm SRAM", 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium, pp. 395.
42. Yahagi, Y., Ibe, E., Takahashi, Y., Saito, Y., Eto, A., Sato, M., Kameyama, H., Hidaka, M., Terunuma, K., Nunomiya, T. & Nakamura, T. 2004, "Threshold energy of neutron-induced single event upset as a critical factor", 2004 IEEE International Reliability Physics Symposium. Proceedings, pp. 669.
43. Ibe, E.H. & Ebook Central (e-book collection) 2015;2014;, Terrestrial radiation effects in ULSI devices and electronic systems, 1st edn, John Wiley & Sons Inc, Singapore.
44. Nakamura, T. & Ebook Central (e-book collection) 2008, Terrestrial neutron-induced soft errors in advanced memory devices, World Scientific, Hackensack, NJ.
45. Prokofiev, A.V., Blomgren, J., Majerle, M., Nolte, R., Rottger, S., Platt, S.P., Cai, X.X. & Smirnov, A.N. 2009, "Characterization of the ANITA Neutron Source for Accelerated SEE Testing at the Svedberg Laboratory", 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop , pp. 166.
46. Prokofiev, A.V., Passoth, E., Hjalmarsson, A., Majerle, M., Uppsala universitet, Institutionen för fysik och astronomi, The Svedberg-laboratoriet, Fysiska sektionen, Tillämpad kärnfysik & Teknisk-naturvetenskapliga vetenskapsområdet 2014, "CUP-A New

High-Flux Irradiation Position at the ANITA Neutron Facility at TSL", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, no. 4, pp. 1929-1936.

47. LANSCE ICE house: <http://lansce.lanl.gov/NS/instruments/ICEhouse/>

Hämtad: 2016-12-19.

48. Lisowski, P.A. Bowman, C.D. Russell, G.J. & Wender, S.A. 1990, "The Los Alamos National Laboratory spallation neutron sources," Nucl. Sci. Engrg., vol. 106, pp. 208–218.

49. Wender, S.A., Balestrini, S., Brown, A., Haight, R.C., Laymon, C.M., Lee, T.M., Lisowski, P.W., McCorkle, W., Nelson, R.O., Parker, W. & Hill, N.W. 1993, "A fission ionization detector for neutron flux measurements at a spallation source", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, vol. 336, no. 1, pp. 226-231.

50. Johns, H.E. & Cunningham, J.R. 1987; 1983; *Physics of Radiology*, 4; 4th; edn, Legacy, United States.

51. Blackmore, E.W., Dodd, P.E. & Shaneyfelt, M.R. 2003, "Improved capabilities for proton and neutron irradiations at TRIUMF", IEEE Radiation Effects Data Workshop, pp. 149.

52. Ibe, S. Chung, H. Yamaguchi, Y. Yahagi, H. Kameyama, S. Yamamoto, T. Akioka, "Spreading diversity in multi-cell neutron-induced upsets with device scaling", Proc. CICC, pp. 437-444, 2006-Sep.-1013.

53. Sheehy, R., Dekter, J. & Machin, N. 2002, "Sea level failures of power MOSFETs displaying characteristics of cosmic radiation effects", 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), pp. 1741

54. RNCP: <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-a/RCF/RCNPCF-WNt.html>

Hämtad: 2016-12-06

55. Drosig, M. 1995, "Sources of fast-monoenergetic neutrons: more recent developments", Proceedings of SPIE, pp. 145.

56. Reijonen, J., Gicquel, F., Hahto, S.K., King, M., Lou, T.-. & Leung, K.-. 2005, "D–D neutron generator development at LBNL", Applied Radiation and Isotopes, vol. 63, no. 5, pp. 757-763

57. Ludewigt, B.A., Wells, R.P. & Reijonen, J. 2007, "High-yield D–T neutron generator", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B, vol. 261, no. 1, pp. 830-834.

58. Autran, J., Munteanu, D., Iniewski, K. & CRCnetBASE (e-book collection) 2015, Soft errors: from particles to circuits, 1st edn, CRC Press, Boca Raton, Florida.

59. Diskussion: <http://teknikensvarld.se/volvo-lovar-ta-fullt-ansvar-om-sjalvkorande-bil-krockar-196859/> Hämtad: 2017-04-22

60. Greene, J. Strom, D. 1988 "Would the Insects Inherit the Earth? And Other Subjects of Concern to Those Who Worry About Nuclear War.", Pergamon Professional.

61. Hall, E.J. 2003, "THE BYSTANDER EFFECT", *Health Physics*, vol. 85, no. 1, pp. 31-35.
62. Morgan, W.F. 2003, "Non-targeted and Delayed Effects of Exposure to Ionizing Radiation: II. Radiation-Induced Genomic Instability and Bystander Effects In Vivo, Clastogenic Factors and Transgenerational Effects", *Radiation Research*, vol. 159, no. 5, pp. 581-596.
63. Stewart, A., Webb, J. & Hewitt, D. 1958, "A Survey Of Childhood Malignancies", *The British Medical Journal*, vol. 1, no. 5086, pp. 1495-1508.
64. Raabe, O.G., Book, S.A., Parks, N.J., Chrisp, C.E. & Goldman, M. 1981, "Lifetime studies of ²²⁶Ra and ⁹⁰Sr toxicity in beagles--a status report", *Radiation research*, vol. 86, no. 3, pp. 515.
65. Lloyd, R.D., Mays, C.W. & Atherton, D.R. 1976, "Distribution of injected ²²⁶Ra and ⁹⁰Sr in the beagle skeleton", *Health physics*, vol. 30, no. 2, pp. 183-189.
66. Hurwitz, H. 1983, "The Indoor Radiological Problem in Perspective", *Risk Analysis*, vol. 3, no. 1, pp. 63-77.
67. Schafer, D.W., Lubin, J.H., Ron, E., Stovall, M. & Carroll, R.J. 2001, "Thyroid Cancer Following Scalp Irradiation: A Reanalysis Accounting for Uncertainty in Dosimetry", *Biometrics*, vol. 57, no. 3, pp. 689-697.
68. Stabin, M.G. & SpringerLink (e-book collection) 2007, *Radiation protection and dosimetry: an introduction to health physics*, Springer, New York.
69. Gersey, B., Wilkins, R., Huff, H., Dwivedi, R.C., Takala, B., O'Donnell, J., Wender, S.A. & Singleterry, R.C. 2003, "Correlation of neutron dosimetry using a silicon equivalent proportional counter microdosimeter and SRAM SEU cross sections for eight neutron energy spectra", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 6, pp. 2363-2366
70. Dodd P.E, Sexton F.W. "Critical charge concepts for CMOS SRAMs", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, 42: 1764.
71. Fulkerson, D.E. 2011, "An Engineering Model for Single-Event Effects and Soft Error Rates in Bulk CMOS", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 58, no. 2, pp. 506-515.
72. Liu, X., Pan, L., Zhao, X., Qiao, F., Wu, D. & Xu, J. 2013, "A novel soft error immunity SRAM cell", *IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report*, pp. 173.
73. Andreani, C., Pietropaolo, A., Salsano, A., Gorini, G., Tardocchi, M., Paccagnella, A., Gerardin, S., Frost, C.D., Ansell, S. & Platt, S.P. 2008, "Facility for fast neutron irradiation tests of electronics at the ISIS spallation neutron source", *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 11, pp. 114101.
74. Elke Passoth, (Senior research engineer at Department of Physics and Astronomy, TSL) intervjuad av författarna den 22 december 2016.
75. LANSCE ICE house: http://wnr.lanl.gov/_assets/flight_paths/4FP30L-A.php, 2017-02-01
76. Slayman, C.W. 2010, "Theoretical Correlation of Broad Spectrum Neutron Sources for Accelerated Soft Error Testing", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 6, pp. 3163-3168.
77. Johanson, K.J., Institutionen för radioekologi & Sveriges lantbruksuniversitet 1996, *Strålning, människan och miljön*, Institutionen för radioekologi Sveriges lantbruksuniv Uppsala, Uppsala.

78. JEDECs historia: <https://www.jedec.org/about-jedec/jedec-history> Hämtad: 2017-04-27
79. R. C, H. 2011, "Neutron-Emission Measurements at a White Neutron Source", Journal of the Korean Physical Society, vol. 59, no. 23, pp. 1553.
80. Petersen, E. 1996, "Cross section measurements and upset rate calculations", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 6, pp. 2805-2813.
81. E. Ibe, S. Chung, S. Wen, Y. Yahagi, H. Kameyama, Yamamoto, "Multi-error propagation mechanisms clarified in CMOSFET SRAM devices under quasi-mono energetic neutron irradiation", 2007 NSREC, Florida, July 17-21, 2006, No.PC-6 (2006)
82. Adell, P., Schrimpf, R.D., Barnaby, H.J., Marec, R., Chatry, C., Calvel, P., Barillot, C. & Mion, O. 2000, "Analysis of single-event transients in analog circuits", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 47, no. 6, pp. 2616-2623.
83. Uezono, T., Yoneki, S., Toba, T., Shimbo, K. & Ibe, E. 2013, "Evaluation of neutron-induced soft error effects on CPUs in automotive microcontrollers", IEEE 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), pp. 1
84. 岳素格(Yue Suge) 张晓林(Zhang Xiaolin) 赵元富(Zhao Yuanfu) 刘琳(Liu Lin) 王汉宁(Wang Hanning) 2015, "Modeling and simulation of single-event effect in CMOS circuit", 半导体学报：英文版, Journal of Semiconductors, Vol. 36, No. 11, pp. 15-24.
85. 赵元富(Zhao Yuanfu) 岳素格(Yue Suge) 赵馨远(Zhao Xinyuan) 陆时进(Lu Shijin) 边强(Bian qiang) 王亮(Wang liang) 孙永姝(Sun Yongshu) 2015, "Single event soft error in advanced integrated circuit", 半导体学报：英文版, Journal of Semiconductors, Vol. 36, No. 11, 99. 1-14.
86. Katasuhiko, T. Hideyuki, N. Taiki, U. Kan, T. Toshikazu, F. & Shigetaka, K. 2009, "Study on influence of device structure dimensions and profiles on charge collection current causing SET pulse leading to soft errors in logic circuits", 2009 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices. IEEE Publication.
87. Changhwan, S. Yasumasa, T. Xin, S. & Tsu-Jae, K.L. 2009, "Full 3D simulation of 6T-SRAM cells for the 22nm node", 2009 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices. IEEE Publication.
88. Lixiang, L. Yuanqing, L. Haibin, W. Rui, L. Qiong, W. Newton, M. Yuan, M. Li, C. 2015, "Simulation and experimental evaluation of soft error tolerant layout for SRAM 6T bitcell in 65nm technology" Springer Science Publication.
89. D. Munteanu, 2008, "Modeling and Simulation of Single-Event Effects in Digital Devices and ICs", IEEE transactions on Nuclear Science, Vol. 55, No.4, pp.1854-1878.
90. Platt, S.P., Prokofiev, A.V. & Cai, X.X. 2010, "Fidelity of energy spectra at neutron facilities for single-event effects testing", 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium, pp. 411.
91. SSM: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/>
Hämtad: 2017-04-21
92. NASA: <https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/RadDataBase/RadDataBase.html>
Hämtad: 2017-04-21
93. Diskussion: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vast/mixade-kanslor-for-sjalvkorande-bil>
Hämtad: 2017-04-22

94. R.C. Baumann, 2005, "Radiation-Induced Soft Errors in Advanced Semiconductor Technologies", IEEE transactions on Device and Materials Reliability, Vol.5, No.3, pp.305-316
95. Prokofiev, A.V., Blomgren, J., Majerle, M., Nolte, R., Rottger, S., Platt, S.P., Cai, X.X. & Smirnov, A.N. 2009, "Characterization of the ANITA Neutron Source for Accelerated SEE Testing at the Svedberg Laboratory", 2009 IEEE Radiation Effects Data Workshop, pp. 166
96. Entrena, L., Valderas, M.G., Cardenal, R.F., Garcia, M.P. & Ongil, C.L. 2009, "SET Emulation Considering Electrical Masking Effects", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 56, no. 4, pp. 2021-2025.
97. Zhang, B., Wang, W. & Orshansky, M. 2006, "FASER: Fast Analysis of Soft Error Susceptibility for Cell-Based Designs", IEEE Computer Society, pp. 755.
98. Molin, B. 2009, Analog elektronik, 2. uppl. edn, Studentlitteratur, Lund.
99. Borkar, S. 2005, "Designing reliable systems from unreliable components: the challenges of transistor variability and degradation", IEEE Micro, vol. 25, no. 6, pp. 10-16.
100. Försäkringsbolag: http://articles.chicagotribune.com/2014-01-12/business/ct-biz-0112-car-insurance--20140112_1_state-farm-driverless-cars-insurers 2017-04-22
101. Neutrongenerator: <http://newatlas.com/sandia-neutristor-neutron-generator-chip/23856/> Hämtad: 2017-07-21
102. Geigermätare: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Yrkesverksam/Industri/Radiografering/Foreskrifter-i-korthet/>. Hämtad: 2017-07-21
103. Petersen, E. 1996, "Cross section measurements and upset rate calculations", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 43, no. 6, pp. 2805-2813.

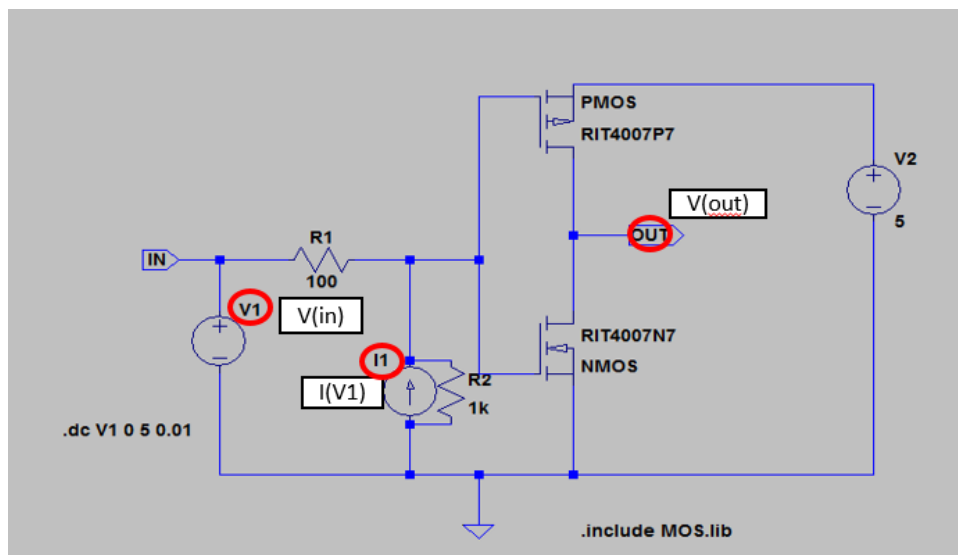
Bilagor.

A. LTSpice

En riktigt kretssimulering tar tid och kräver en hel del beräkningar innan simuleringen kan påbörjas. I den här bilagan kommer en CMOS inverterare och SRAM cell-krets demonstreras med hjälp av det analoga kretssimuleringsprogrammet LTSpice (SPICE). Avsikten är att exemplifiera och demonstrera principer och illustrera hur störning kan modelleras och hur den påverkar utsignalen. Valet på nivån hos strömstörningen inte är baserad på modellberäkningar så våra resultat är inte realistiska.

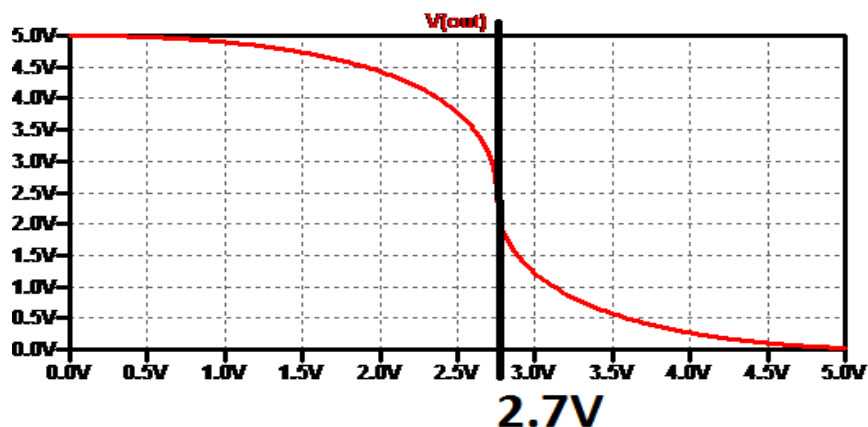
A.1. SPICE simulering av en CMOS inverterare.

I detta avsnitt simuleras en CMOS-krets i LTSpice. En CMOS-krets består av en PMOS-transistor och en NMOS transistor. Definition för värdena för transistor är definierad i filen *.MODEL lib*. I samma fil finns bland annat parametrarna för kanalbredden (W) som är 6,25 μm för PMOS och 2,5 μm för NMOS, medans kanallängden (L) för båda transistorerna är 0,25 μm .



Figur 10: kretsschema för en CMOS inverterare i SPICE simulator

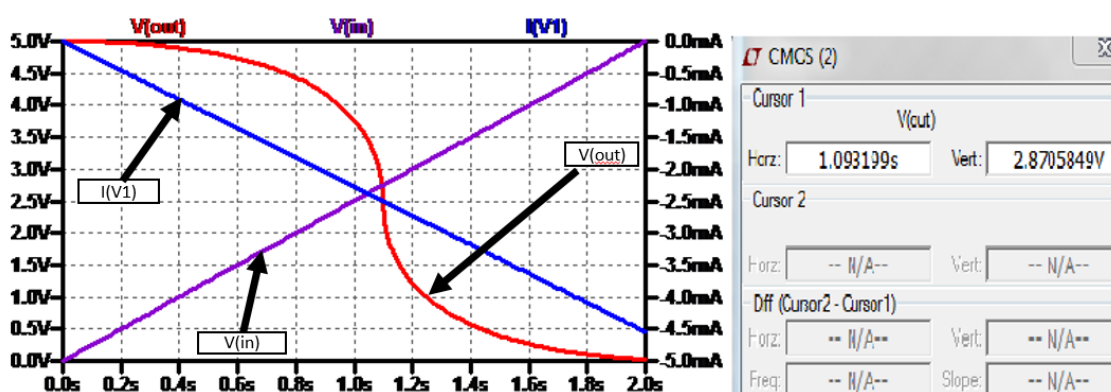
För att kunna demonstrera en strömstörning, introduceras störningskomponenter i form av en strömkälla (I(V1)) som parallellkopplas med en resistiv belastning (R2). Denna koppling är nödvändig där ett passivt belastningselement såsom en resistor, induktor eller kondensator behövs för att få en fungerande störningssignal [70].



Figur 11: Simulerings utsignal vid CMOS inverterare med 2,7 V omslag

I figur 11 visas ett utsignalsdiagram för en CMOS inverterare i normalt läge, där inspänningen sveps från 0V till 5V med en 0,01 stegning. Mittpunkten i detta diagram kallas för en instabil punkt för en inverterare, vilket är då både PMOS och NMOS leder.

CMOS-kretsen kommer att simuleras i olika tillstånd, för att jämföra hur utsignalen påverkas av strömstörningar. I figur 12 visas hur CMOS-transistor beter sig i ett normalt läge, utmarkerat finns strömstörningssignalen ($I(V1)$), NMOS-transistors utsignal ($V(out)$) och kretsens inspänning ($V(in)$).



Figur 12: Utsignalen ($V(out)$), strömstörningen ($I(V1)$) och insignalen ($V(in)$) i normalt läge.

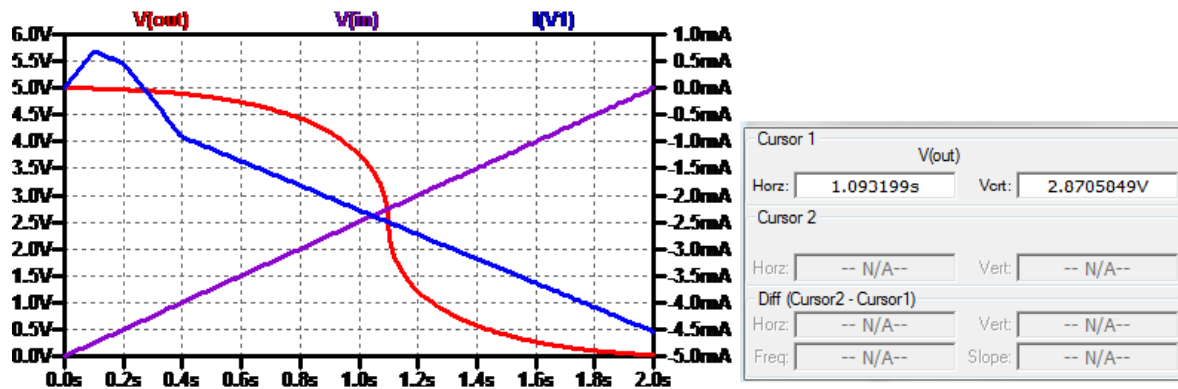
De tillstånd som kommer att simuleras är:

1. Hur CMOS-kretsen beter sig genom att studera utsignalen ($V(out)$) när strömstörningen ($I(V1)$) ökar och har en stigtid (T_{rise}) på 0,1 sekunder.
2. Hur CMOS-kretsen beter sig genom att studera utsignalen ($V(out)$) när strömstörningen ($I(V1)$) ökar och har en stigtid (T_{rise}) på 0,5 sekunder.
3. Hur CMOS-kretsen beter sig genom att studera utsignalen ($V(out)$) när den resistiva belastningen ($R2$) ökar från 1 Ω till 10 k Ω samt att strömstörningen ($I(V1)$) är 0 A och har stigtiden (T_{rise}) på 0,1 sekunder.

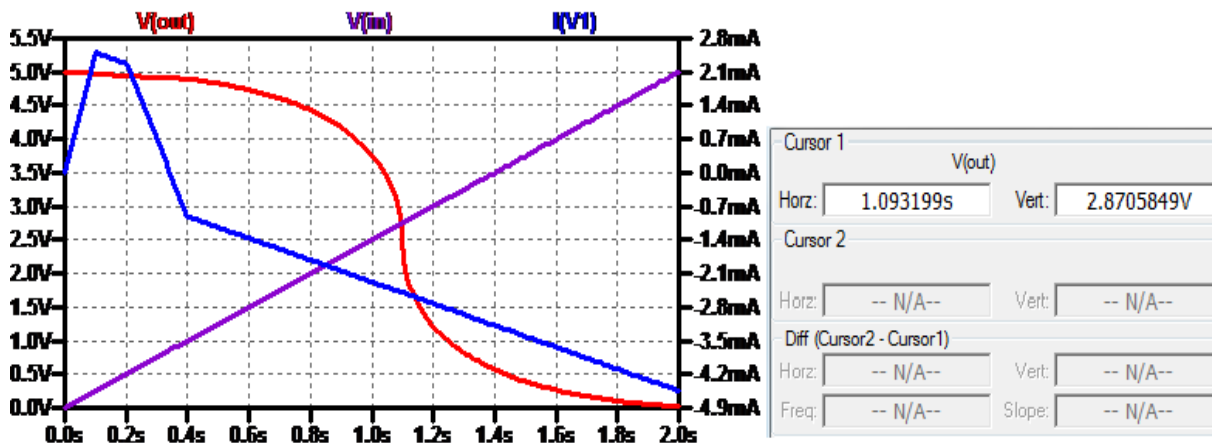
4. Hur CMOS-kretsen beter sig genom att studera utsignalen ($V(\text{out})$) när strömstyrningen ($I(V1)$) ökar från 0 A till 0,1 A och har en bestämd resistiv belastning ($R2$) på 10 k Ω .

A.1.1 Simulering när endast strömstyrningen ($I(V1)$) ändras.

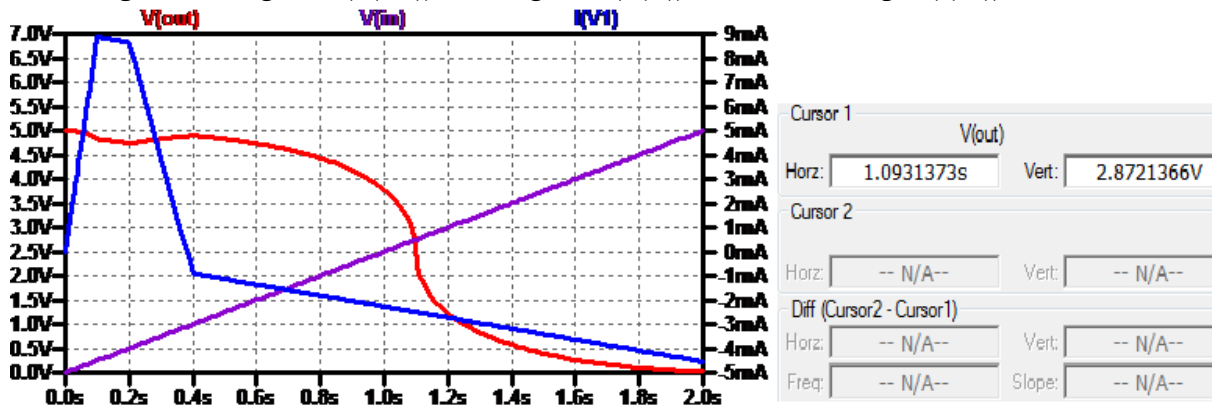
Här visas hur utspänning ($V(\text{out})$) förändras när strömmen ($I(V1)$) på störningen ökar från 0,001 A till 0,1 A och stigtiden (T_{rise}) för störningssignalen är 0,1 sekunder.



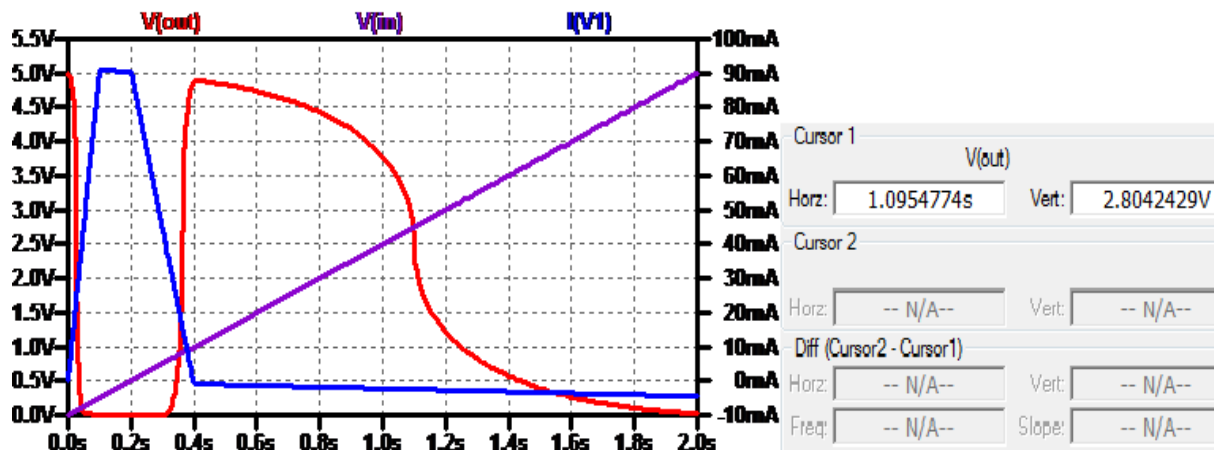
Figur 13: Utsignalen ($V(\text{out})$) och insignalen ($V(\text{in})$) när strömstyrningen ($I(V1)$) är 0,001 A..



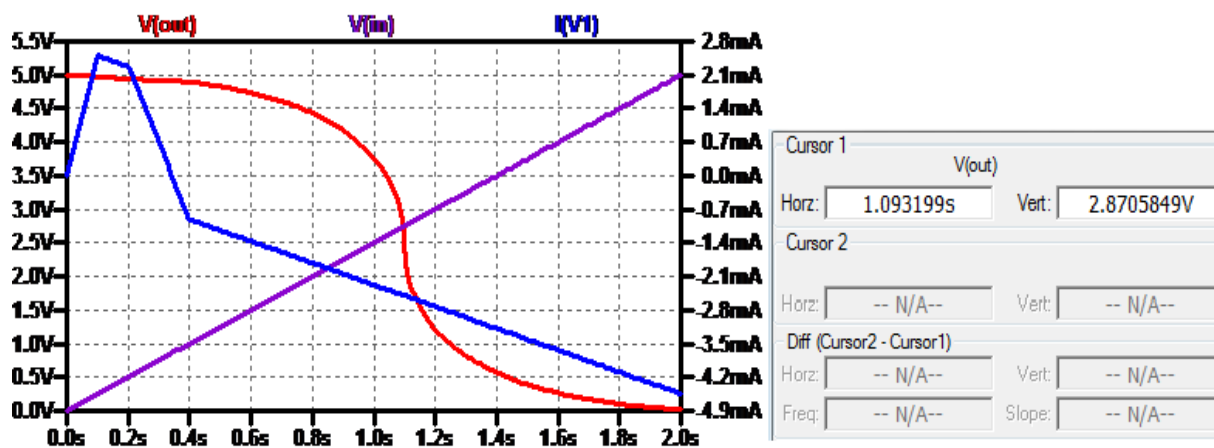
Figur 14: Utsignalen ($V(\text{out})$) och insignalen ($V(\text{in})$) när strömstyrningen ($I(V1)$) är 0,003 A.



Figur 15: Utsignalen ($V(\text{out})$) och insignalen ($V(\text{in})$) när strömstyrningen ($I(V1)$) är 0,01 A.



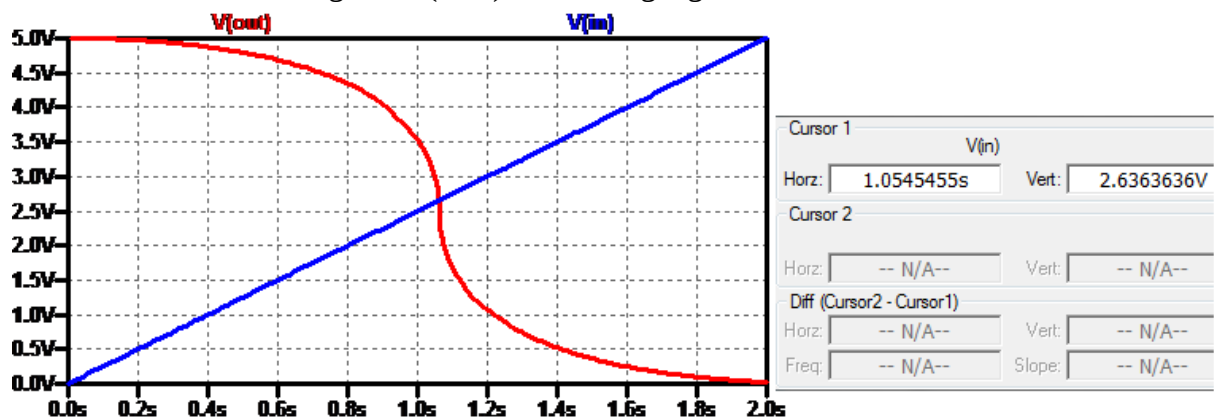
Figur 16: Utsignalen ($V(out)$) och insignalen ($V(in)$) när strömstörningen ($I(V1)$) är 0,1 A.



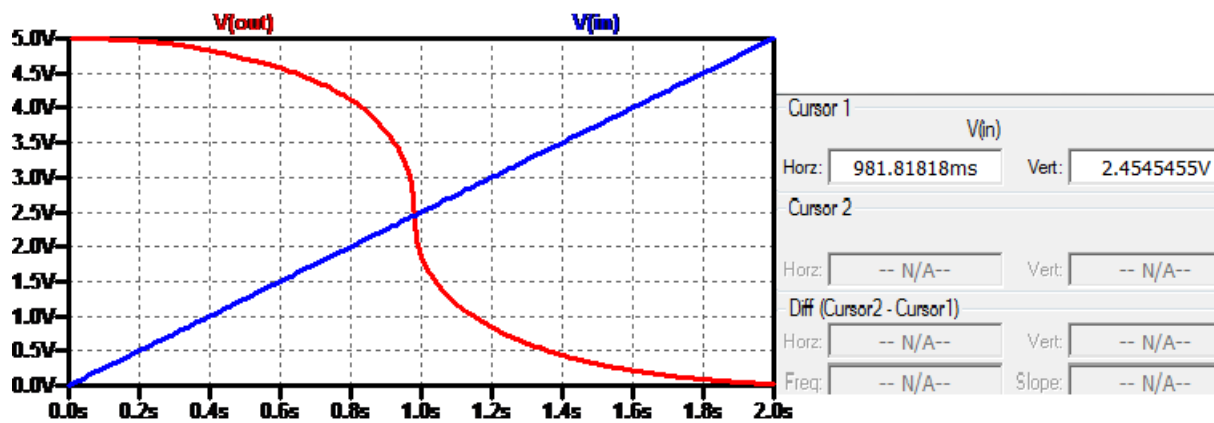
Figur 17: Graf med utsignal, störning och insignal när strömstörningen ($I(V1)$) är 0,003A.

A.1.2. Simulering när strömmen ($I(V1)$) varierar och ökad stigtid.

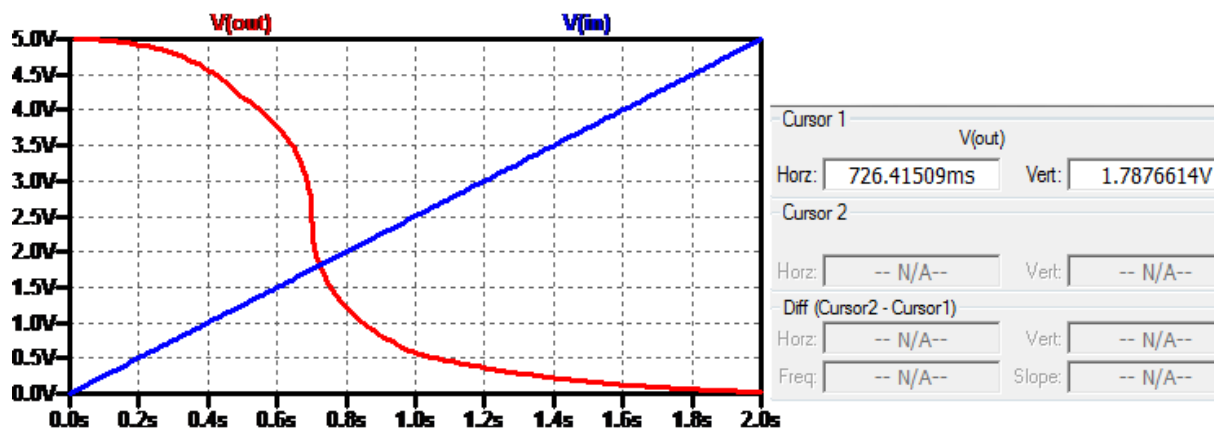
Här visas hur utspänning ($V(out)$) förändras när strömmen ($I(V1)$) på störningen ökar från 0,001 A till 0,1 A och stigtiden (T_{rise}) för störningssignalen är 0,5 sekunder.



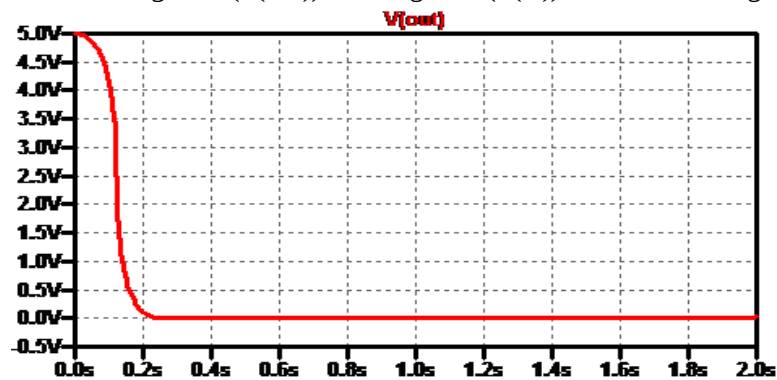
Figur 18: Graf med utsignalen ($V(out)$) och insignalen ($V(in)$) när strömstörningen är 0,001 A.



Figur 19: Graf med utsignalen ($V(\text{out})$) och insignalen ($V(\text{in})$) när strömstörningen ($I(V1)$) är 0,003 A.



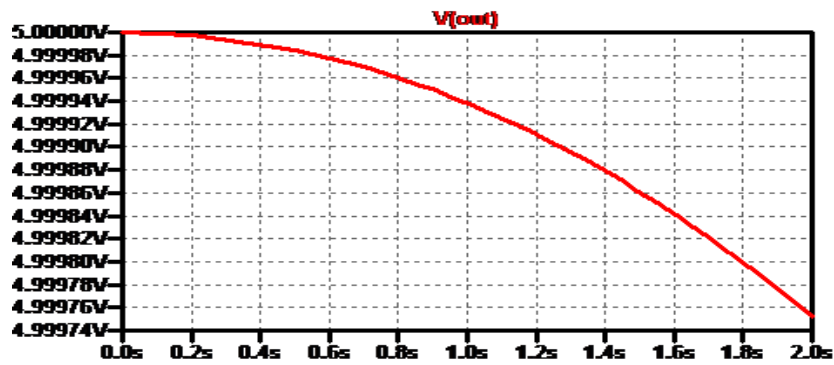
Figur 20: Graf med utsignalen ($V(\text{out})$) och insignalen ($V(\text{in})$) när strömstörningen ($I(V1)$) är 0,01 A.



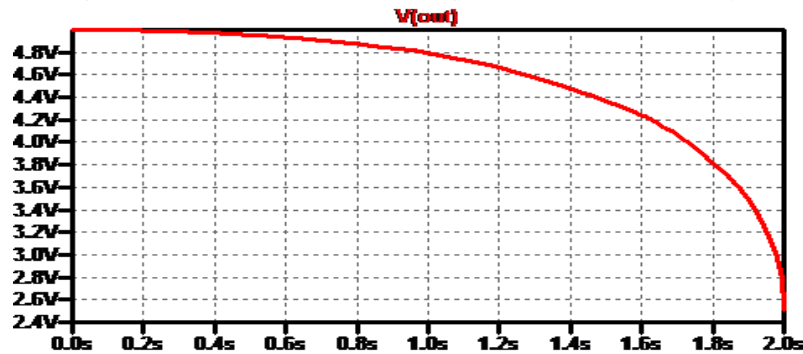
Figur 21: Graf med utsignalen ($V(\text{out})$) när strömstörningen ($I(V1)$) är 0,1 A.

A.1.3 Simulering när belastningen ($R2$) varierar.

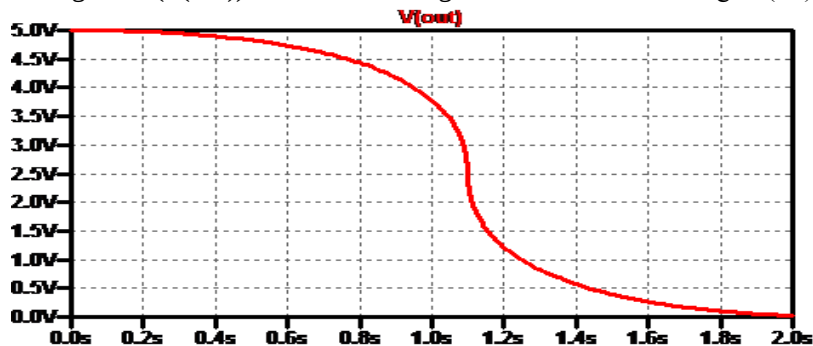
Här visas hur utspänning ($V(\text{out})$) förändras när den resistiva belastningen ($R2$) ökar från 1 Ω till 10 k Ω och strömstörningen är 0 A med stigtiden (T_{rise}) på störningssignal är 0,1s



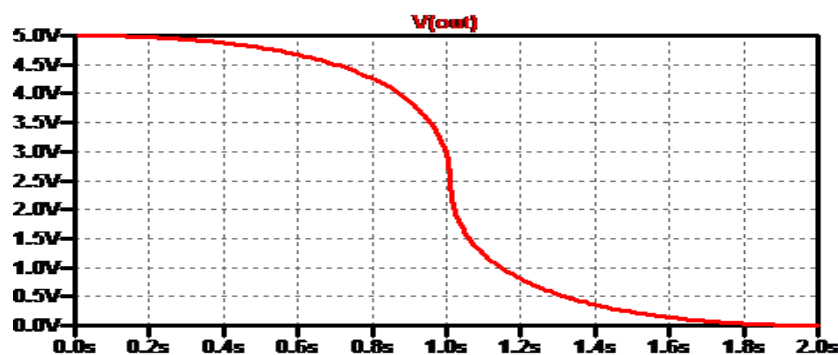
Figur 22: Utsignalen (V(out)) när strömstyrningen är 0 A och belastningen (R_2) är 1 Ω .



Figur 23: Utsignalen (V(out)) när strömstyrningen är 0 A och belastningen (R_2) är 100 Ω .



Figur 24: Utsignalen (V(out)) när strömstyrningen är 0 A och belastningen (R_2) är 1 k Ω .

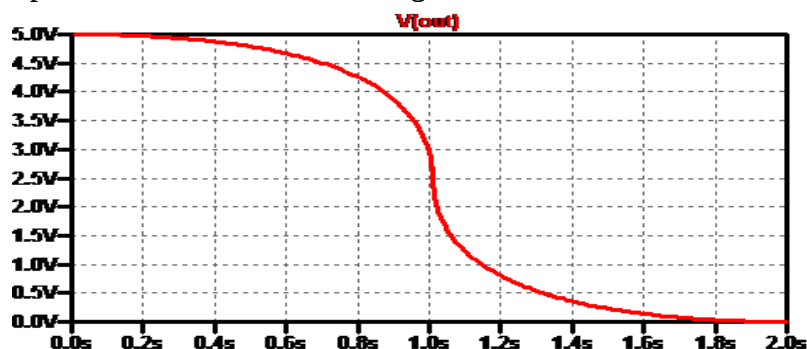


Figur 25: Utsignalen (V(out)) när strömstyrningen är 0 A och belastningen (R_2) är 10 k Ω .

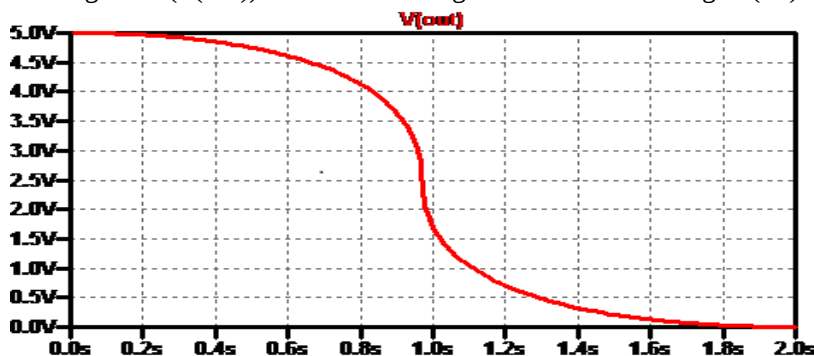
A.1.4 Simulering när belastningen (R_2) är bestämd och strömmen ($I(V_1)$) på störningen varierar.

Här visas hur utspänning (V(out)) förändras när strömmen ($I(V_1)$) varierar från 0 A till

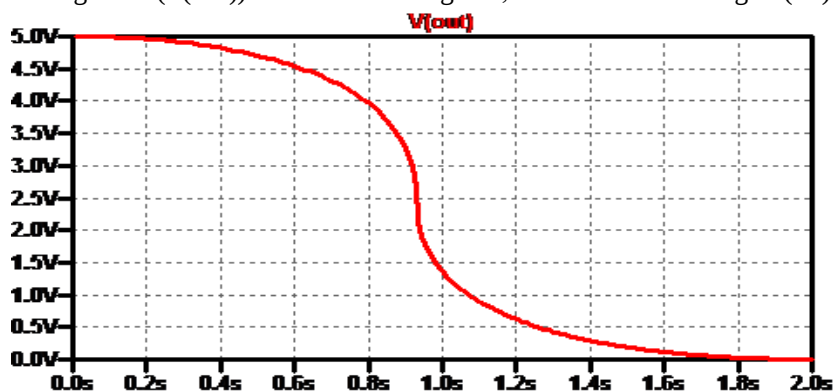
0,1 A och stigtiden (T_{rise}) på störningssignal är 0,5 sekunder. Den resistiva belastningen (R_2) har ett fast värde på 10 k Ω under hela simuleringen.



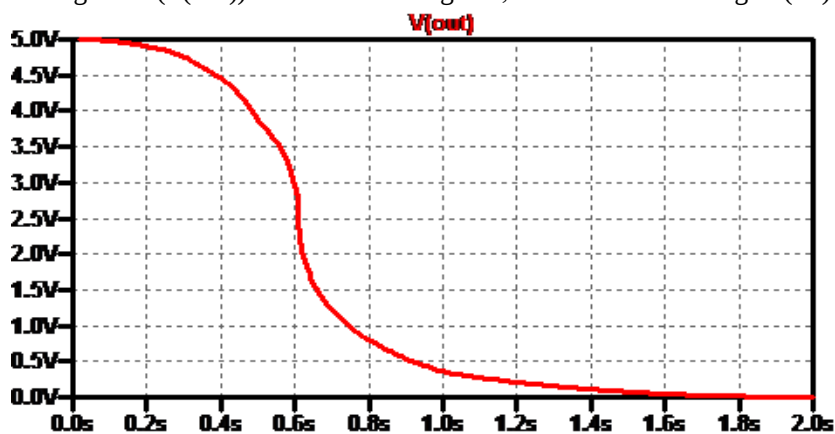
Figur 26: Utsignalen ($V(\text{out})$) när strömstörning är 0 A och belastningen (R_2) är 10 k Ω .



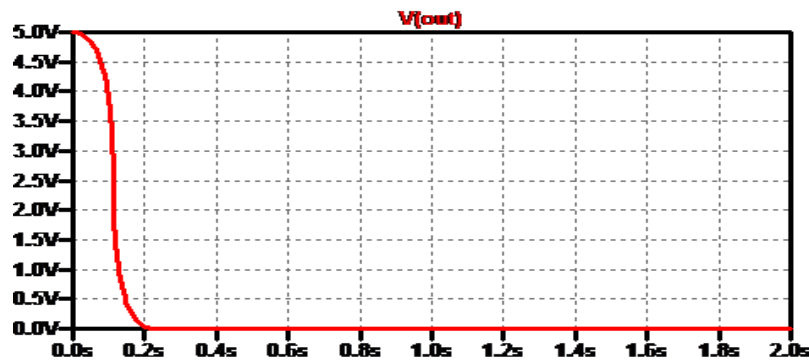
Figur 27: Utsignalen ($V(\text{out})$) när strömstörning är 0,001 A och belastningen (R_2) är 10 k Ω .



Figur 28: Utsignalen ($V(\text{out})$) när strömstörning är 0,002 A och belastningen (R_2) är 10 k Ω .



Figur 29: Utsignalen ($V(\text{out})$) när strömstörning är 0,01 A och belastningen (R_2) är 10 k Ω .



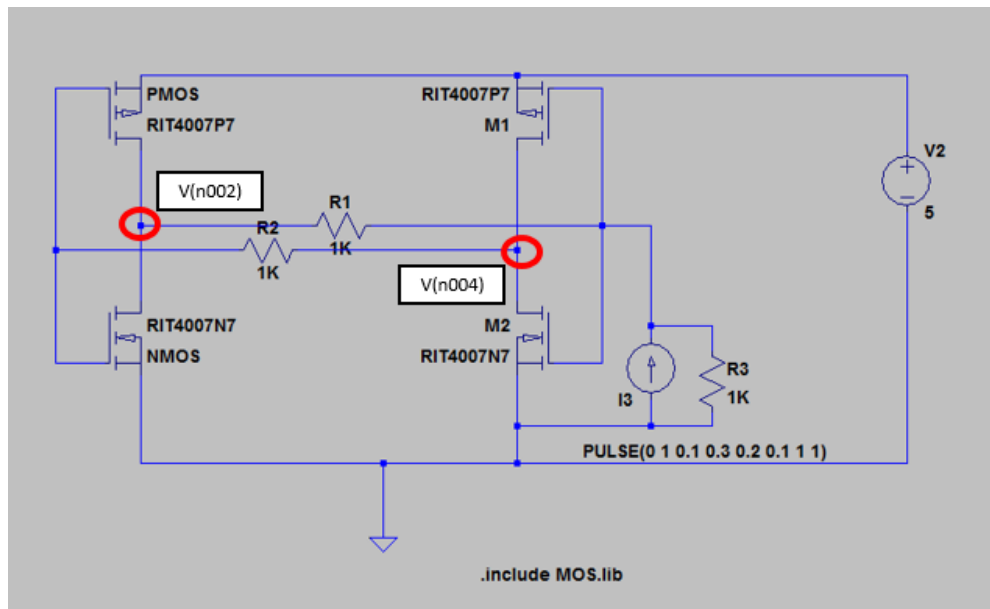
Figur 30: Utsignalen ($V(out)$) när strömstörning är 0,1 A och belastningen ($R2$) är 10 k Ω .

A.1.5 Analys

När enbart strömmen på störningen ökar blir inte felen kvarstående på kretsen utan CMOS-transistorn kan återgå till sin ursprungliga funktion efter störningen. När stigtiden för strömstörningen ($I(V1)$) ökas från 0,1 sekunder till 0,5 sekunder så uppstår störningar på CMOS-kretsens utsignal redan vid 0,01 A när strömmen på störningen ökas till 0,01 A så är transistorn strypt och felet kvarstår (se figur 16). Storleken på den resistiva belastningen ($R2$) påverkar också utsignalen på CMOS-kretsen, en hög belastning leder till ökad ström på störningen. Detta resulterar i en känsligare CMOS-transistor.

A.2. SPICE simulering av en SRAM cell.

I detta avsnitt simuleras en 1-bit SRAM cell för att se hur den reagerar om en strömstörning läggs till i kretsen. En 6T SRAM cells-krets består av ett par tvärkopplade CMOS inverterare och två stycken nMOSFET pass transistorer, de fyra transistorerna i CMOS inverterar-kretsen har huvudfunktionen att lagra bitarna 1 eller 0 i minnet. De två nMOSFET transistorerna fungerar som en brytare genom att växla mellan laddning och urladdning av två noder under minnets läs- och skrivcykel, det är också skälet till att de inte behövs under denna typ av simulering och därför inte är med i kretsschemat. Definition av värdena för transistorerna är definierade i filen *.MODEL lib*. I detta fall används samma värdena som på transistorerna i CMOS inverteraren. En strömstörning ($I3$) med en varierande resistans ($R3$) har parallellkopplats med transistorn ($M2$) vilket kan ses figur 36.



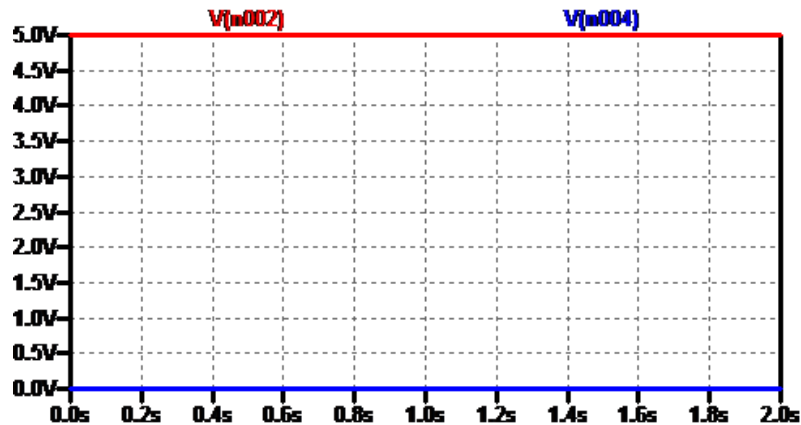
Figur 31: Kretsschema för en 6T SRAM cell i SPICE simulator.

De två utsignalerna V(n002) och V(n004) från de två CMOS inverterarna simuleras i olika tillstånd. Detta görs genom att reglera storleken på den resistiva belastningen (R3) och på strömstörning (I3) för att se hur utsignalerna V(n002) och V(n004) påverkas. Belastningen på resistorerna R1 och R2 kommer också att variera under simuleringen.

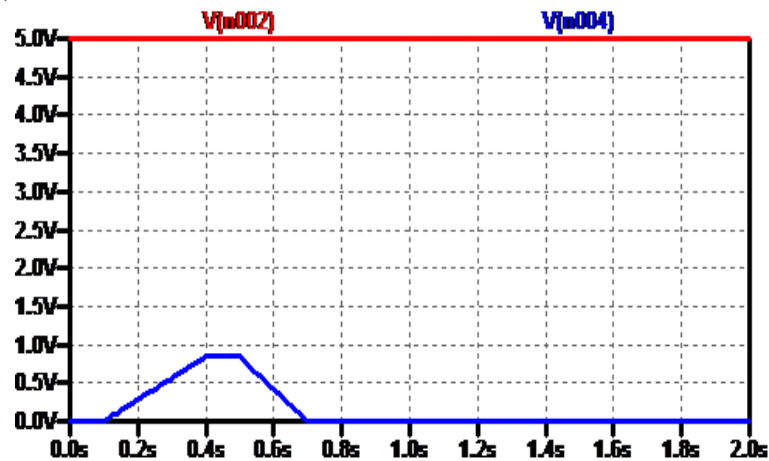
De olika tillstånden som undersöks är:

1. När SRAM cellen har belastningsresistorerna (R1 och R2) mellan PMOS och NMOS transistorerna 1 k Ω och störningssignalens belastningsresistor (R3) är också satt till 1k Ω .
2. Simulering med högre resistans på belastningsresistorerna (R1 och R2) mellan PMOS och NMOS transistorerna, de ökar till 1000 k Ω samt att störningssignalens belastningsresistor (R3) ökar till 1 k Ω .
3. Simulering när belastningsresistorerna (R1 och R2) behåller sitt värde på 1000 k Ω men störningssignalens belastningsresistor (R3) ökar till 10 k Ω .
4. Simulering med lägre resistans mellan PMOS och NMOS transistorerna, resistorerna (R1 och R2) sätts till 0 Ω . Belastningen (R3) på störningssignalens varierar mellan 1 k Ω och 100 k Ω .

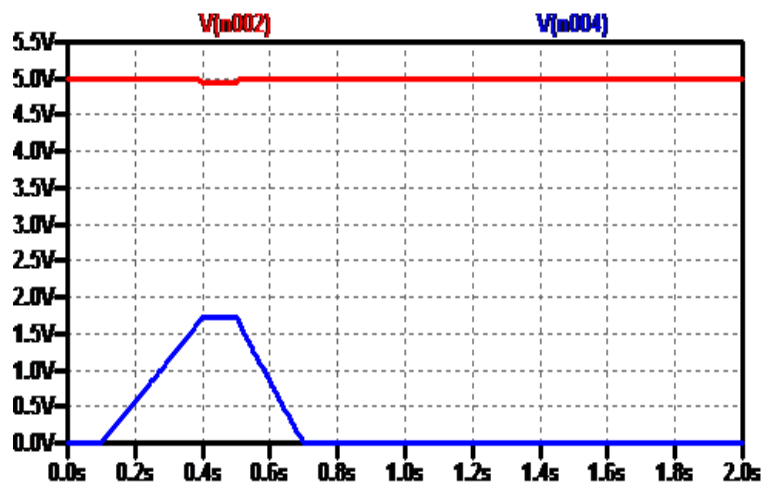
A.2.1. När SRAM kretsen belastas med lika stora motstånd.



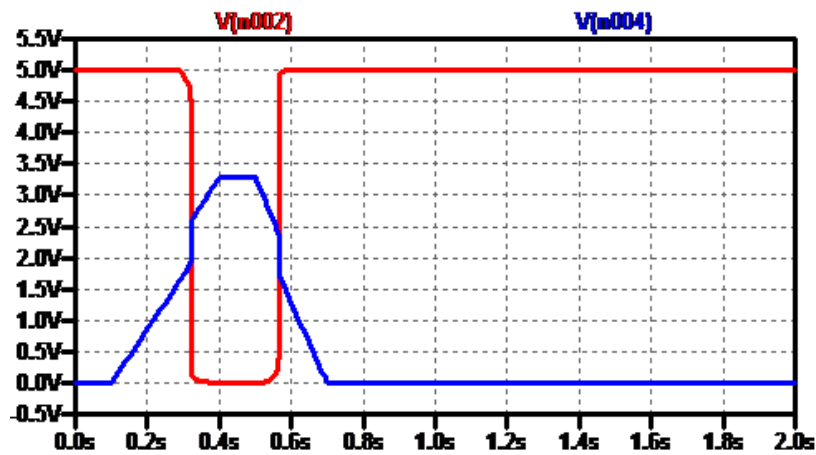
Figur 32: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0 A.



Figur 33: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,001 A.



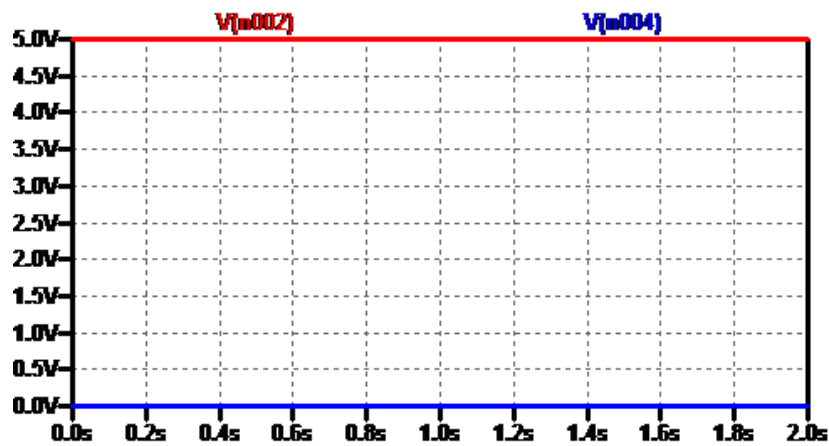
Figur 34: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,002 A.



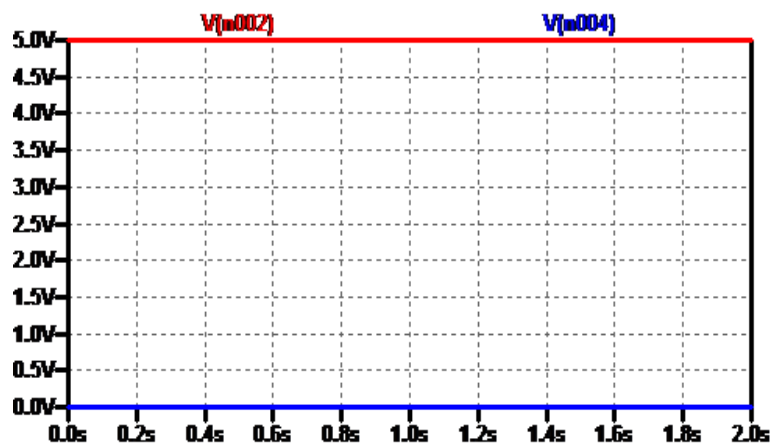
Figur 35: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,003 A.

A.2.2. Simulering med högre resistans.

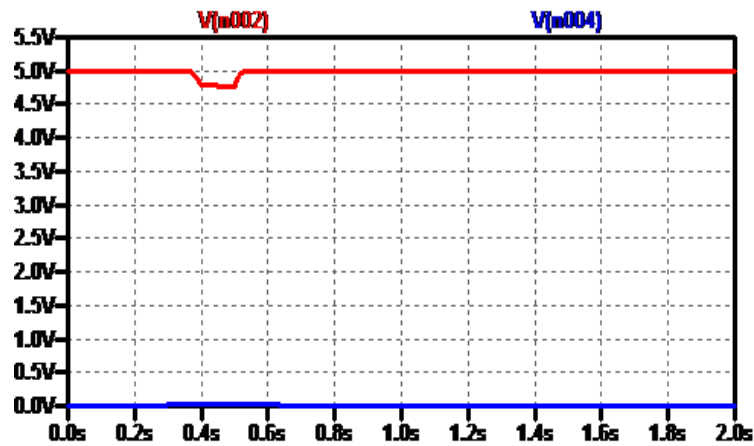
Belastning resistorerna (R1 och R2) sätts till 1000 k Ω och belastningen (R3) över strömstörningen sätts till 1 k Ω . Strömmen (I3) kommer att öka från 0 A till 0,01 A



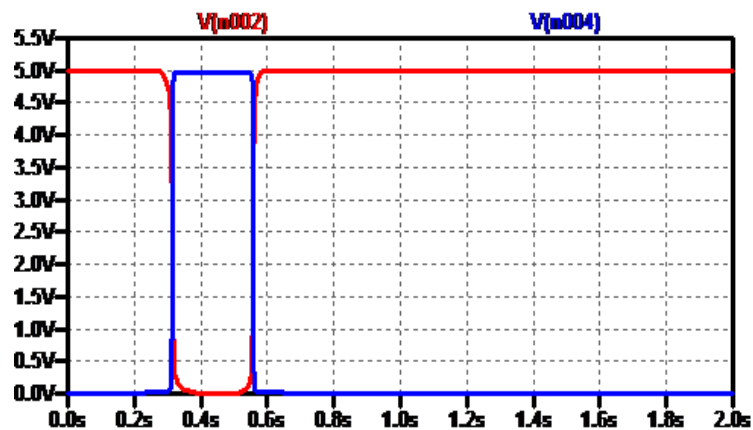
Figur 36: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0 A.



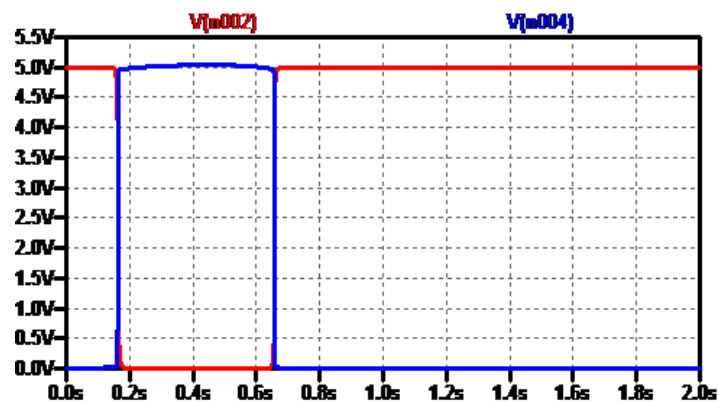
Figur 37: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,001 A.



Figur 38: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,002 A.



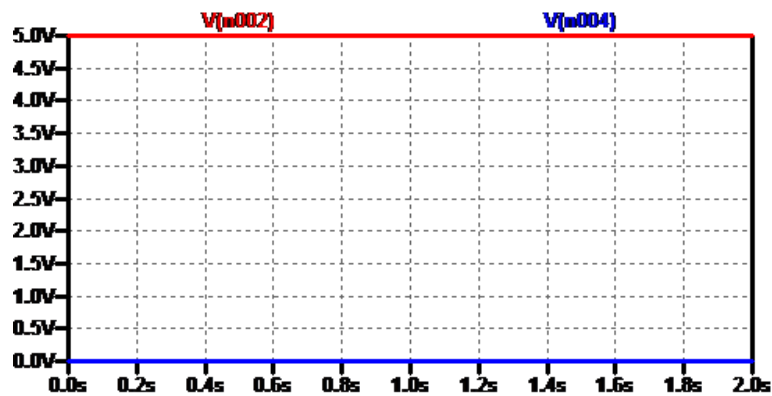
Figur 39: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,003 A.



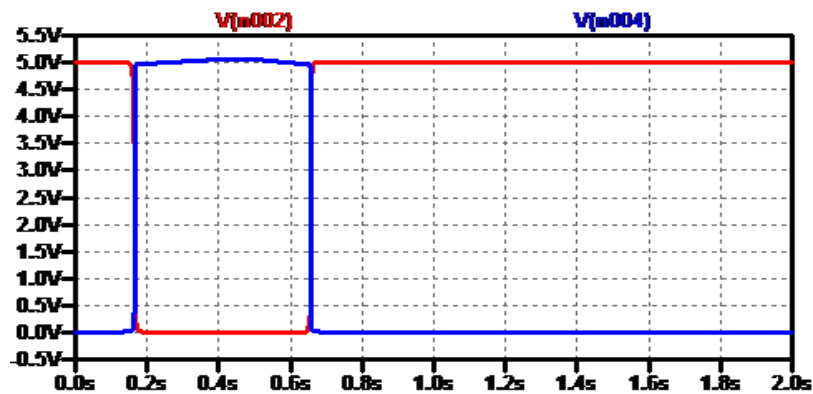
Figur 40: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,01 A.

A.2.3. Simulering med högre motstånd på R3.

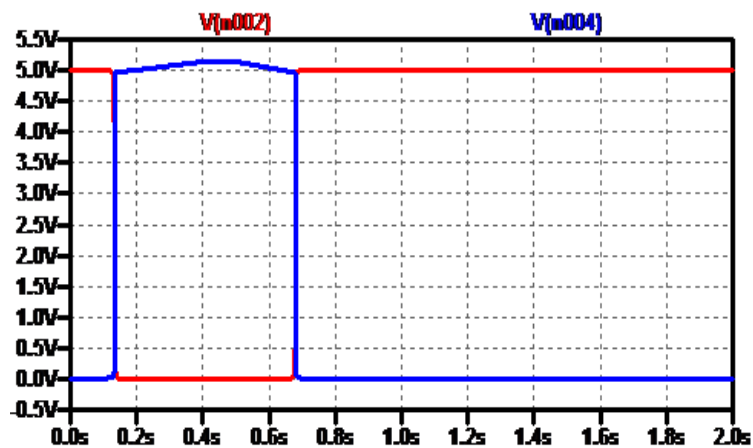
Simulering när belastningsresistorerna (R1 och R2) behåller sitt värde på 1000 k Ω men störningssignalens belastningsresistor (R3) ökar till 10 k Ω . Strömstörningen varierar från 0 A till 0,002 A



Figur 41: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0 A.



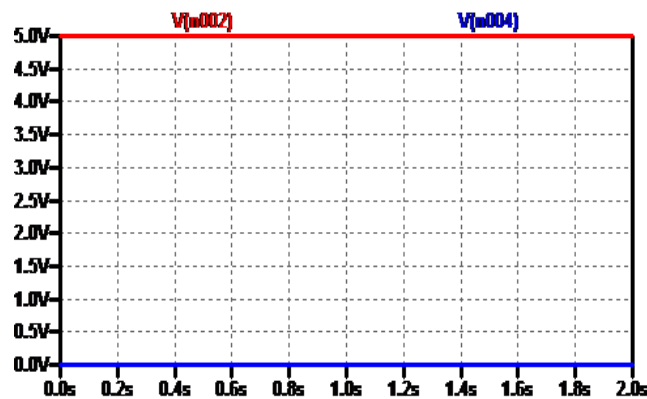
Figur 42: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,001 A.



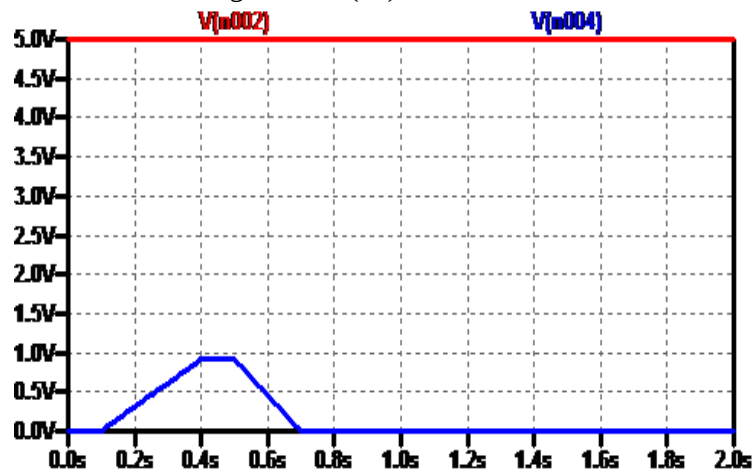
Figur 43: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,002 A.

A.2.4. Simulering med lägre resistans mellan transistorerna.

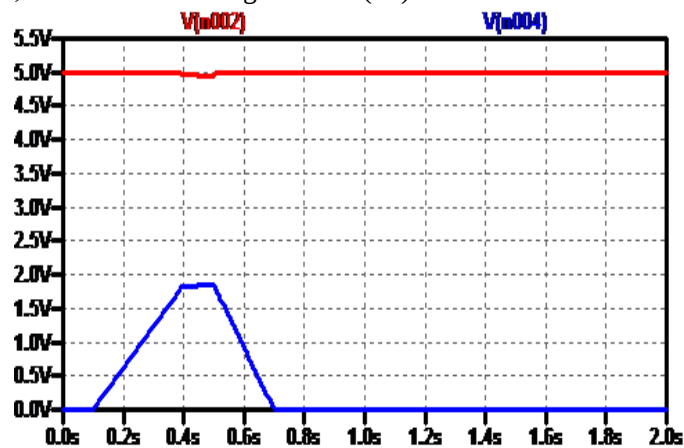
Simulering när belastningsresistorerna (R1 och R2) sätts till $0\ \Omega$ och strömstörningen (I3) varierar från $0\ \text{A}$ till $0,01\ \text{A}$. Resistorn (R3) över störningssignalen varierar från $1\ \text{k}\Omega$ till $100\ \text{k}\Omega$.



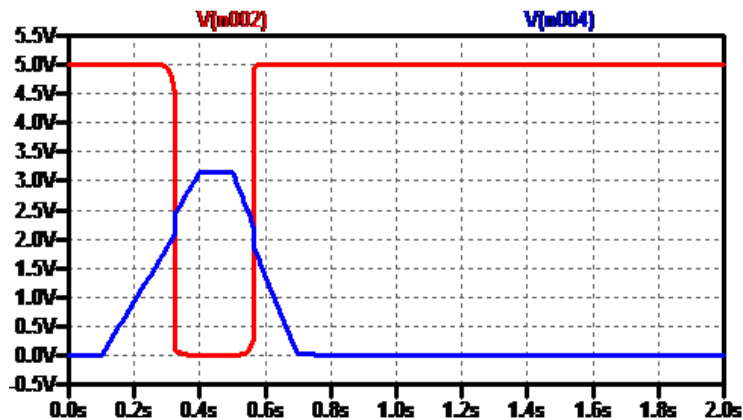
Figur 44: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är $0\ \text{A}$ och belastningsresistorn (R3) är $1\ \text{k}\Omega$.



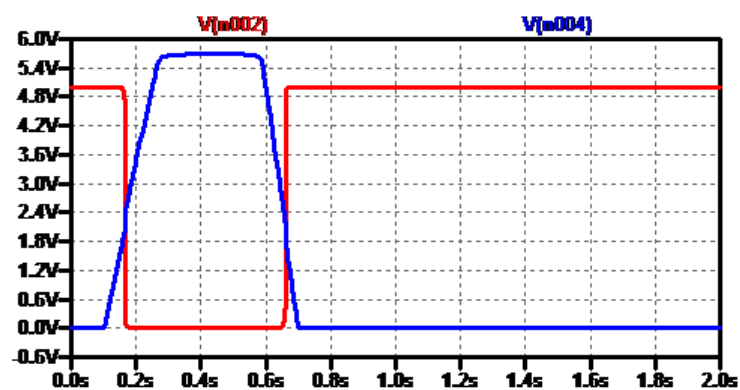
Figur 45: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är $0,001\ \text{A}$ och belastningsresistorn (R3) är $1\ \text{k}\Omega$.



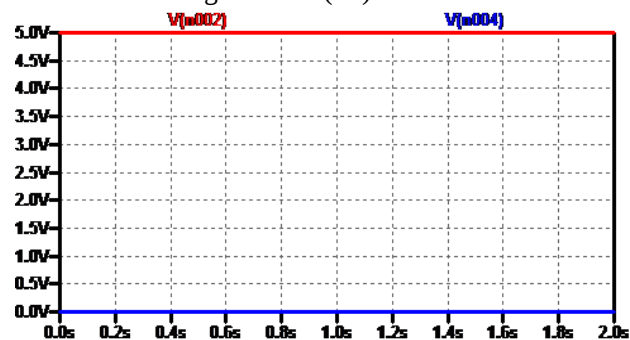
Figur 46: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är $0,002\ \text{A}$ och belastningsresistorn (R3) är $1\ \text{k}\Omega$.



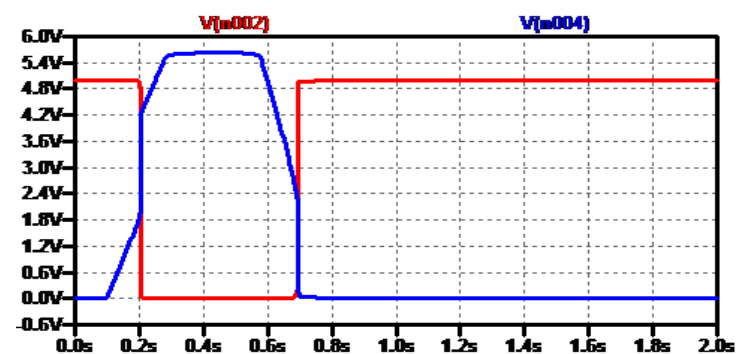
Figur 47: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I_3) är 0,003 A och belastningsresistorn (R_3) är 1 k Ω .



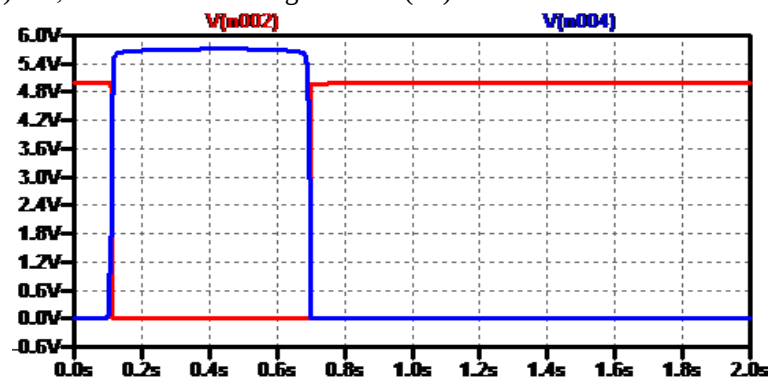
Figur 48: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I_3) är 0,01 A och belastningsresistorn (R_3) är 1 k Ω .



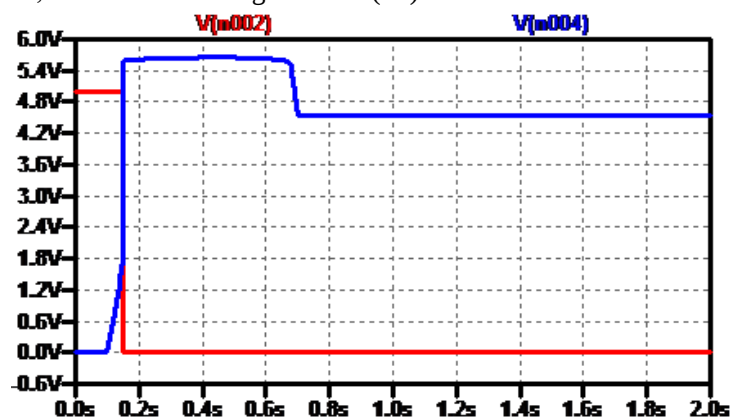
Figur 49: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I_3) är 0 A och belastningsresistorn (R_3) är 10 k Ω .



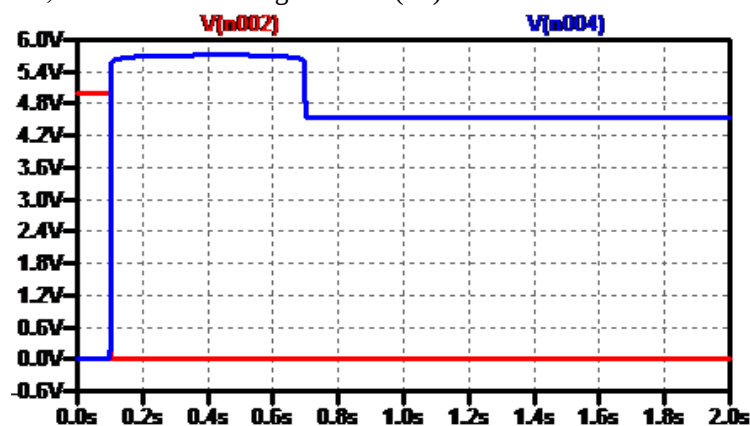
Figur 50: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,001 A och belastningsresistorn (R3) är 10 k Ω .



Figur 51: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,01 A och belastningsresistorn (R3) är 10 k Ω .



Figur 52: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,001 A och belastningsresistorn (R3) är 100 k Ω .



Figur 52: Här visas utsignalerna (V(n002) och V(n004)) från de två CMOS inverterare i SRAM kretsen när strömstörningen (I3) är 0,01 A och belastningsresistorn (R3) är 100 k Ω .

A.2.5 Analys

I en SRAM cell är NMOS transistorn den känsligaste delen av kretsen för SEU i dessa testsimuleringar som gjorts visar att transistorn klarar sig bättre vid låga resistanser än vid högre resistanser. Vid låga resistanser 0-10 k Ω på R3 klarar kretsen av störningar upp till 0,003 A medan vid höga värde på resistansen (R3) leder till en hög potential över kretsen och felen som uppstår är kvarstående redan vid 0,001 A på strömstörningen.

B. Studiebesök på TSL

Den 22 december 2016 besökte vi Svedbergs laboratorium (TSL) på Uppsalas universitet. Där träffade vi Elin Hellbeck som är projektledare vid institutionen för fysik och astronomi, på Svedbergs laboratorium och Elke Passoth, 1:e försteforskningsring på samma institution. I dagsläget så har TSL lagts ner och när vi var där så hade ingen testning utförts på några månader vilket gav oss en möjlighet att se och vara i närheten av delar av faciliteten som annars varit svåra att närma sig p.g.a. den aktiviteten som skapas i materialet när tester skett.



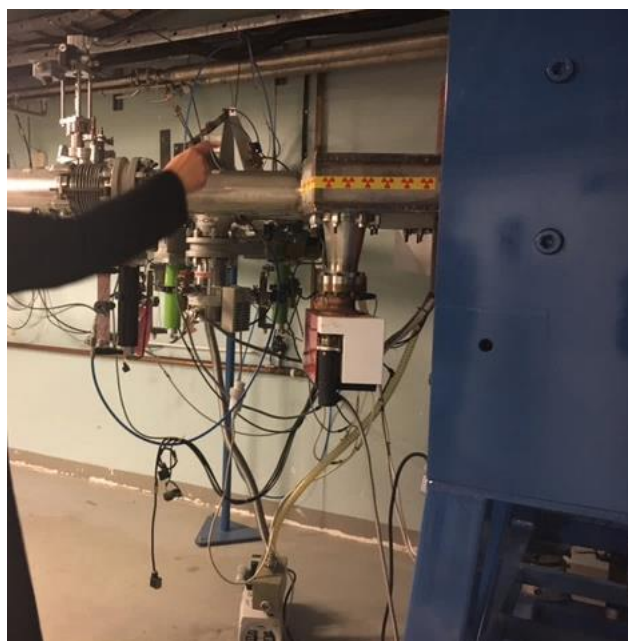
Figur 53: Bilden föreställer Gustav Werner Cyklotronen

I figur 53, som ses ovan, visas det rum där Gustav Werner Cyklotronen befinner sig. Den del som är märkt med nummer 1 på bilden är själva magneten. Delen märkt med en 3 är acceleratoren och den med nummer 4 är vakuumsystemet. Nummer 2 är den del som injekterar partiklar till magneten. Nummer 5 är den delen som transporterar den framställda protonstrålen vidare till själva testfaciliteterna.



Figur 54: Bilden ovan är på protontransporten från Gustav Werner Cyklotronen till testrummen

I bilden ovan skymtas den protontransport som finns. Själva transporten sker under jord med tjocka betongväggar som avskiljer resten av faciliteten från den strålning som uppstår i rummet. Det är även värt att tillägga att det finns strålningsdetektorer över alla dörrar och de går inte att öppna om aktivitet finns i rummet.



Figur 55: På denna bild kan vi se magneterna som styr protonstrålen och den mätutrustning som används för att säkerställa dess energinivå.

I bilden ovan visas de böj- och styrmagneter som styr protonstrålen i transporten, de riktar upp strålen så att den hamnar rätt.



Figur 56: Denna bild visar kollimatoren som används i ANITA. Den visar också de betongblock som är placerade runt om i rummet för att skydda mot strålen.

I själva testsalen, som är full av betongblock som är utplacerade för att skydda utrustning och även mot kontrollrummet. I figur 56, visas kollimatoren som bestämmer strålens storlek och riktar upp neutronstrålen. I golvet finns det markeringar som gör det lättare att bestämma/mäta intensiteten på strålen för de som testar. Bakom kollimatoren finns det volframmål som protonstrålen träffar och ovanför skymtas den ställning som används för deras "CUP"-testning. Där kan mindre föremål såsom kretskort utsättas för den mest extrema stråle. Idagsläget har tyvärr TSL lagts ner. När vi var där så var deras framtid fortfarande oklar, Uppsala universitet ville inte längre driva det då det inte längre utfördes någon forskning på laboratoriet.