

DETECTOR SIMULATION FOR PARTICLE PHYSICS

FROM MICROELECTRONICS DEVICE
SIMULATION TO SEMICONDUCTOR
DETECTOR TCAD DESIGN

Nicolas T. Fourches, CEA,IRFU

Journées Simulation Detecteurs

SIMULATION TCAD DE DETECTEUR

- Les logiciels de simulation sont utilisés depuis longtemps pour le développement de procédés microélectroniques, en 2D et en 3D.
- Dans la plupart des cas un détecteur semi-conducteur peut se résumer à : (géométrie du détecteur exclue), c'est plus simple qu'un dispositif électronique .



- La simulation peut se faire avec des outils TCAD (procédé technologique) par exemple ATHENA et ATLAS pour la simulation électrique, en temps que détecteur de charges photogénérées

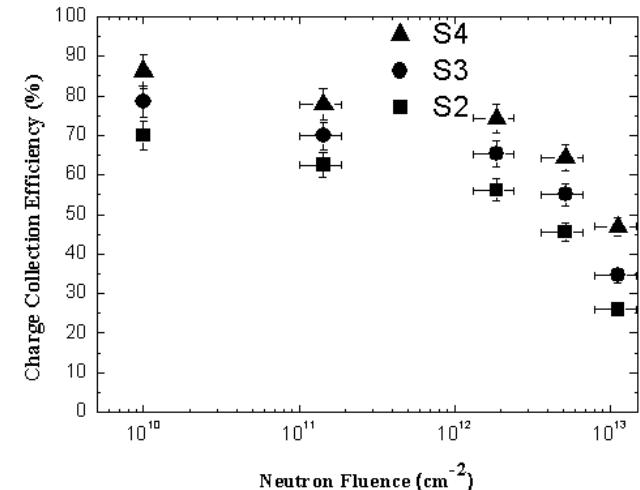
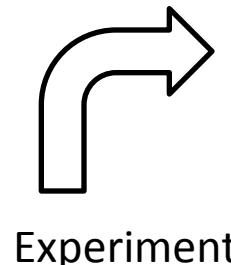
SIMULATION versus EXPERIMENT (Silicon)

- 2D simulations are faster and give good results
- CMOS MAPS can be simulated using atlas (S pisces).
- Charge carrier transport : anisotropy of the mobility tensor was not yet included. This is a prerequisite for germanium at very low temperatures (see A. Broniatowski et al.)
- Trapping and recombination can be well modeled and give adequate results.

Traps considered	Capture cross sections	Introduction rate
$E_e = 0.46 \text{ eV}$	for electrons $\sigma_0 = 10^{-13} \text{ cm}^2$	1 cm^{-1}
$E_e = 0.18 \text{ eV}$	for electrons $\sigma_0 = 10^{-13} \text{ cm}^2$	1 cm^{-1}
$E_e = 0.25 \text{ eV}$	for electrons $\sigma_0 = 10^{-13} \text{ cm}^2$	0.5 cm^{-1}
$E_g + 0.36 \text{ eV}$	for holes $\sigma_0 = 10^{-13} \text{ cm}^2$	1 cm^{-1}

Device Simulation of Monolithic Active Pixel Sensors: Radiation Damage Effects ,Nicolas T. Fourches , Dresden, 2008

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 56, NO. 6,
DECEMBER 2009



Plot of the Charge Collection Efficiency for three different pixel-diode sizes versus neutron fluence at moderate clocking frequencies. S4 has the largest collection diode and S2 the smallest. The pitch is identical for the three pixels (25 μm).

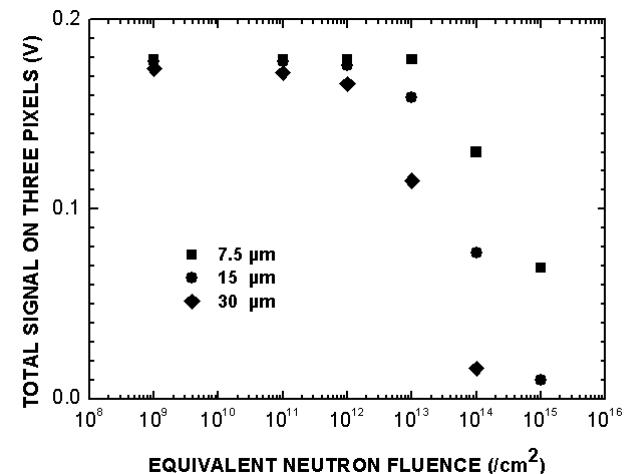
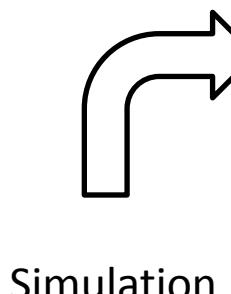
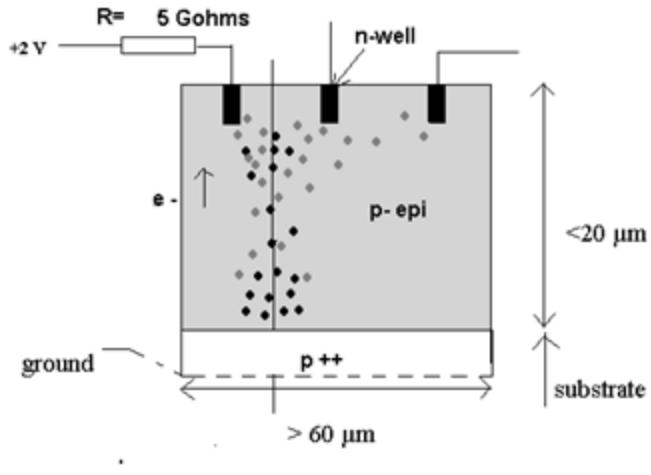


Fig. 12: Total charge on three pixels plotted versus neutron fluence for decreasing pitch values. The structures are large (150 μm for the 7.5 μm pitch and more than 150 μm for the 30 μm pitch). The doping level is set to: $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. This is raw simulation data. Error is estimated below 1%.

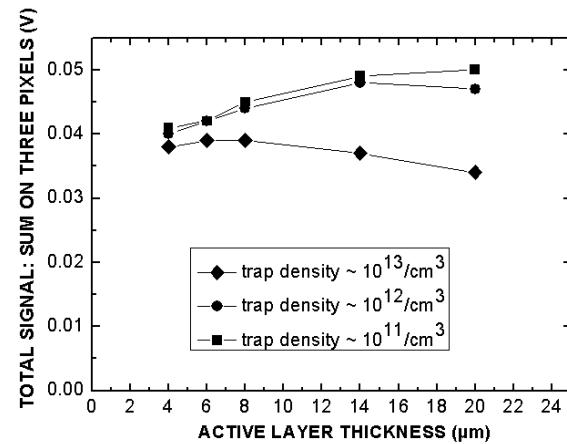
Questions et Restrictions



Pour les simulations 2D , les résultats dépendent de la largeur de la structure , donc des conditions aux limites. Les résultats les plus réalistes sont obtenus avec des structures larges par rapport à la distance interpixel.

Les pixels simulés sont constitués d'un contact $n+$ (n -well) et d'une couche peu dopée p avec un contact enterré $p+$. L'épaisseur de la zone fiduciale est inférieure à $20 \mu\text{m}$ (active layer thickness).

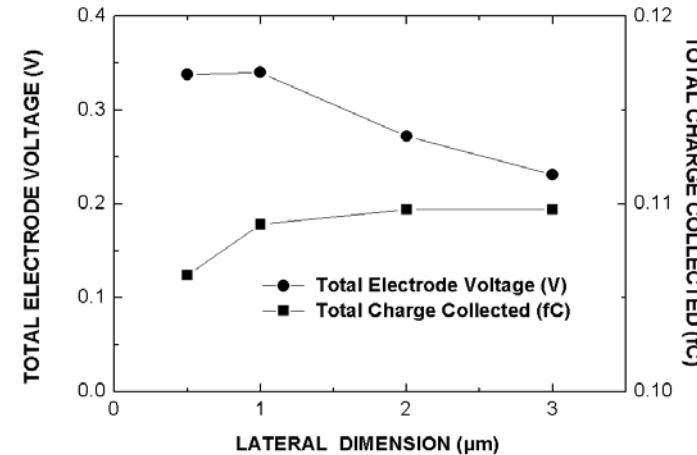
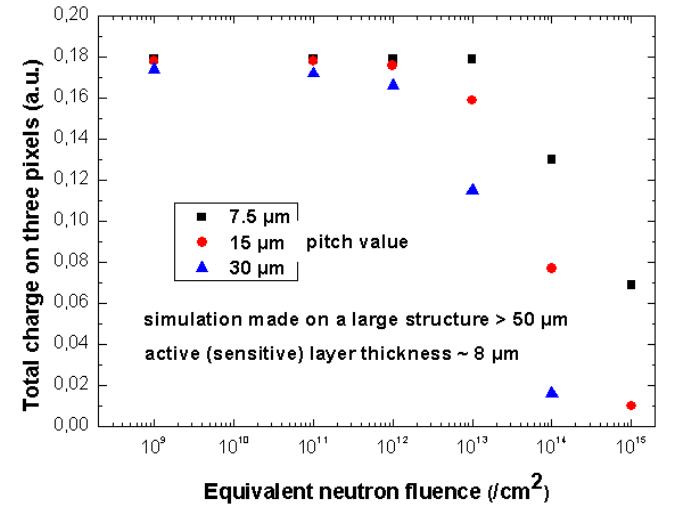
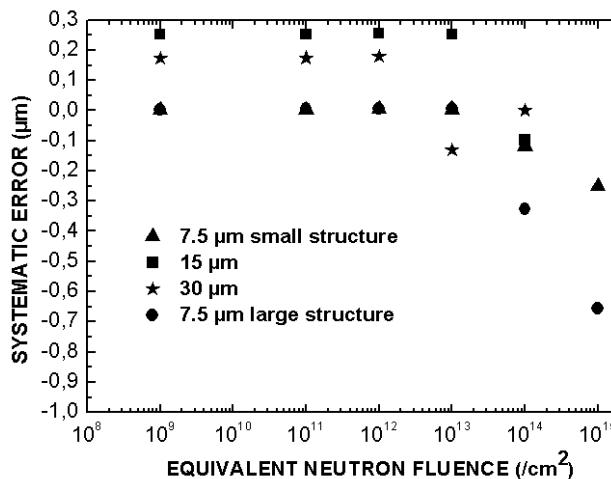
Le passage d'une particule chargée est modélisée par la génération de paires électron-trous le long de la trace. Au minimum d'ionisation.



- La simulation des effets des défauts profonds permet de faire apparaître des résultats antiintuitifs
- L'épaisseur de la zone active n'est pas un paramètre déterminant pour le signal total obtenu

Simulation de pixels CMOS

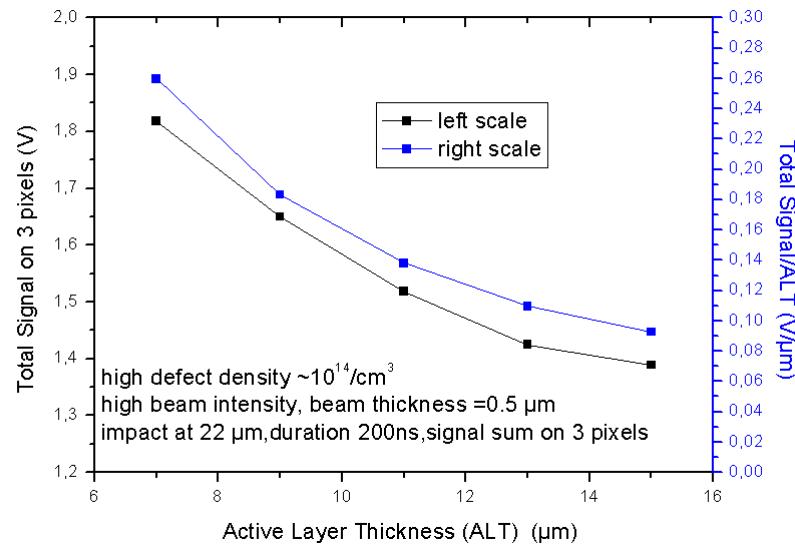
- La diminution de la surface d'un pixel améliore , entre autres l'efficacité de collection de charge, pour la même densité de défauts profonds
- La réduction de taille est donc favorable au fonctionnement des matrices CMOS (loi d'échelle valable)



Simulation de pixels CMOS

- Autres effets du piégeage de charge

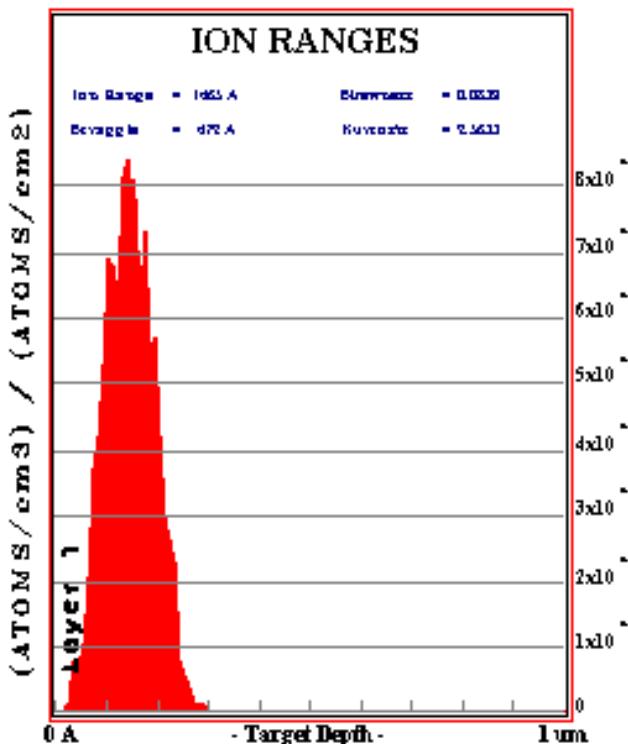
LATERAL DIMENSION (μm)	30 30 150 150 150 150
EQUIVALENT NEUTRON FLUENCE (cm^{-2})	10^9 10^{15} 10^{15} 10^{15} 10^9 10^9
ACTIVE LAYER THICKNESS (μm)	8 8 8 16 16 8
SIGNAL (V) (CHARGE COLLECTED)	0.265 0.106 0.067 0.065 0.317 0.176
PEAKING TIME (ns)	< 25 < 25 26 26 150 36



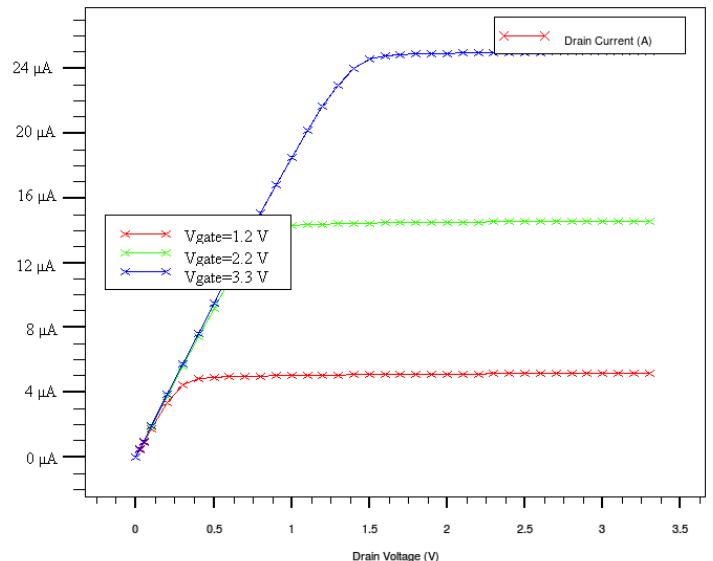
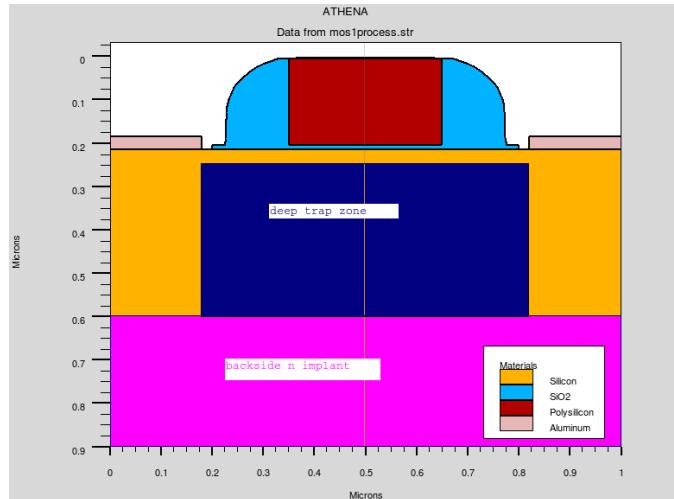
Effet très marqué aux densités de défauts élevées

Conception d'un nouveau pixel par simulation

- Le TRAMOS : dispositif permettant la détection de particules chargées
- Un simple MOS à canal n que l'on conçoit avec ATHENA par exemple
- Les caractéristiques statiques restent stables

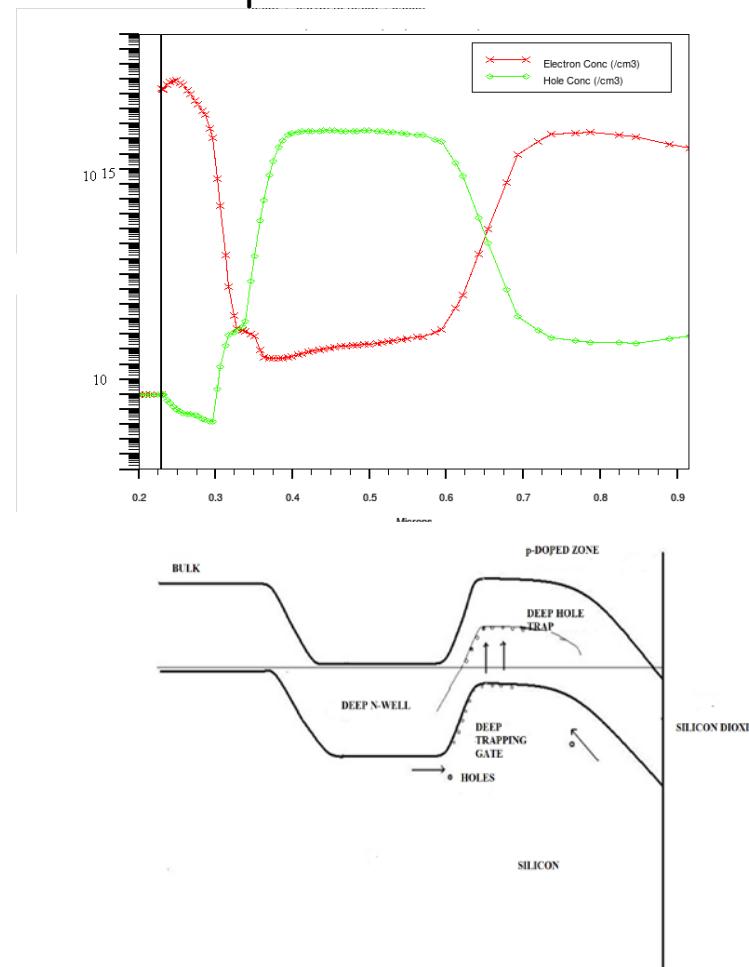
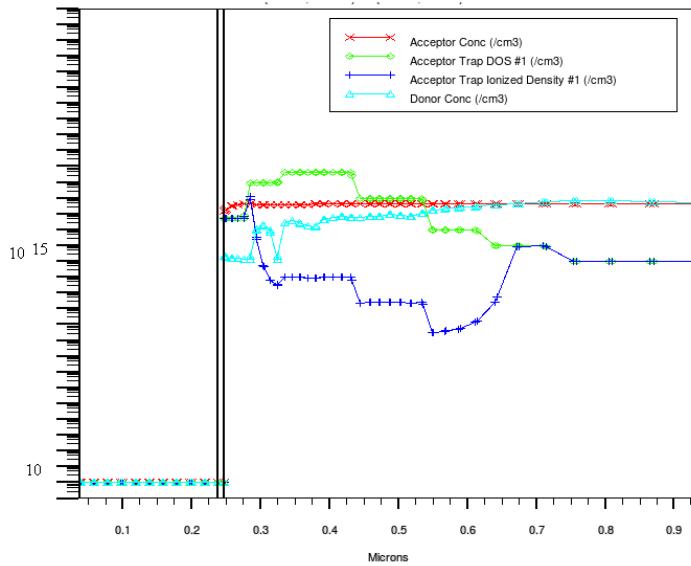


Zn : 200 keV



Conception d'un nouveau pixel par simulation

- Implantation ionique afin de réaliser la grille piégeante, metaux de transition, défauts d'irradiation etc... (et boîtes quantiques)
- Profils de densité d'accepteurs ou de donneurs (profonds et superficiels)
- Profils de densité de porteurs correspondants

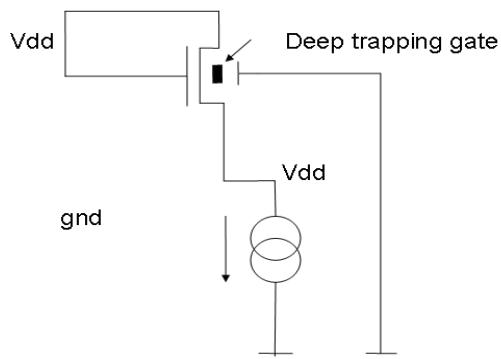


Conception d'un nouveau pixel par simulation

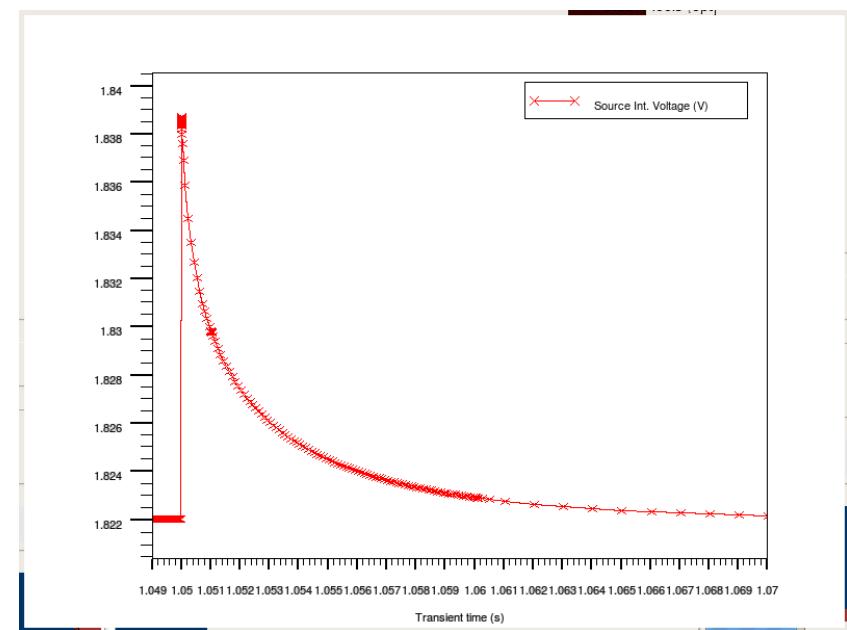
- Équivalent électrique du pixel
- Réponse en tension de la source pour une charge déposée linéairement le long d'une trace, génération de $80 \text{ e}/\mu\text{m}$
- Effet mémoire du aux trous relachés par la grille piégeante
- Dispositif pouvant devenir une mémoire volatile

pixel

- Pixel schematic



- * simplification
- * only one device
- * no diode
- * higher sensitivity
- * scaling law



Conception d'un nouveau pixel par simulation

- Brevetabilité acquise:
- US7936018 B2 octroyé
- Etude des méthodes de fabrication
- La simulation est donc un outil d'aide à la conception de nouvelles technologies, pour des détecteurs comme pour des dispositifs classiques comme des dispositifs actifs bipolaire/MOS/JFET.
- Mais ne permet pas de lever tous les verrous technologiques , la réalisation de vehicules de test restant nécessaires pour le développement
- PROCHAINE ETAPE :
FABRICATION D'UN VEHICULE DE TEST
- Projet ANR

EN GUISE DE CONCLUSION

Simulations électriques sur des structures simples : résultats assez réalistes (détecteurs silicium)

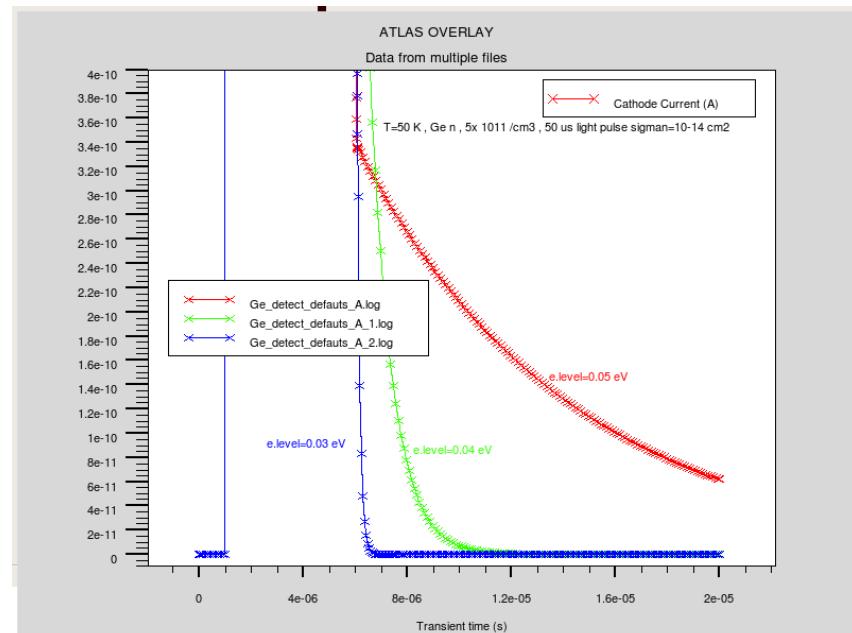
Conception de nouveaux dispositifs rendu possible

Autres applications mais limitées sur les détecteurs germaniums : piégeage de charge

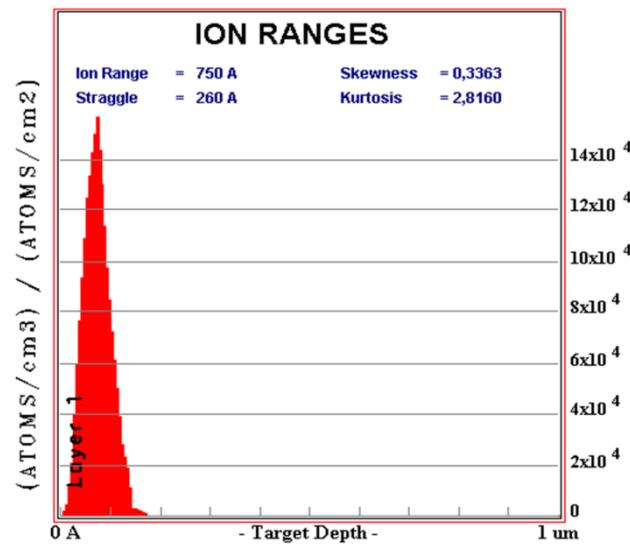
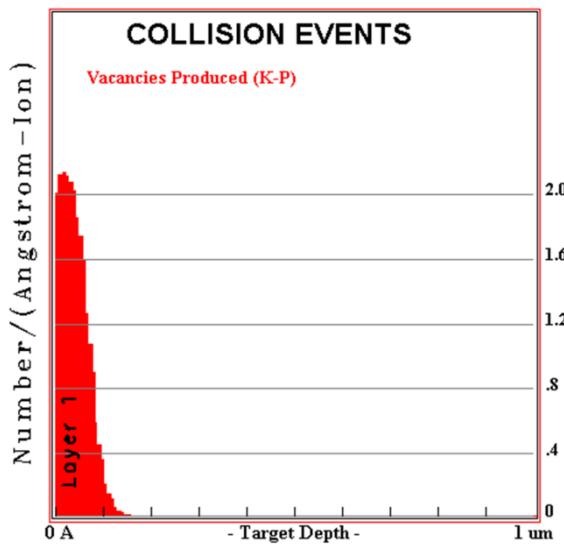
- Current transients are slower when the level is deeper
- Dimensions :
- 300 µm thickness
- 1µm width
- 2 mm length
- Not a real detector (Oxford EDELWEISS Collaboration Meeting , 2010)
- Voir présentation suivante

Courants transitoires dans un détecteur germanium , simulés en fonction de la température: structure planar.

Très utiles pour la Photo-Induced-Transient-Current-Spectroscopy et la Current-DLTS



EXTRA SLIDES



Example : silicon implanted with germanium ions , Kinchin and Pease displacement model

EXTRA SLIDES

- ```
go athena
CEA NMOS structure avec implantation
#
line x loc=0 spac=0.1
line x loc=0.2 spac=0.006
line x loc=0.4 spac=0.006
line x loc=0.5 spac=0.01
#
line y loc=0.00 spac=0.002
modified (0.2)(0.005)
line y loc=0.2 spac=0.005
modified (0.5)(0.05)
line y loc=0.5 spac=0.01
modified (0.8)(0.15)
line y loc=0.9 spac=0.05
thickness modified
init orientation=100 c.phos=1e14 space.mul=2
#
#pwell formation including masking off of the nwell
#
diffus time=30 temp=1000 dryo2 press=1.00 hcl=3
#
etch oxide thick=0.02
#
#P-well Implant (modified) (8e12) 4e13
#
implant boron dose=2e13 energy=100 pears
```
- ```
# diffus temp=950 time=100 weto2 hcl=3
#
#N-well implant not shown -
#
# welldrive starts here
diffus time=50 temp=1000 t.rate=4.000 dryo2 press=0.10 hcl=3
#
diffus time=220 temp=1200 nitro press=1
#
diffus time=90 temp=1200 t.rate=-4.444 nitro press=1
#
etch oxide all
#
#sacrificial "cleaning" oxide
diffus time=20 temp=1000 dryo2 press=1 hcl=3
#
etch oxide all
#
#gate oxide grown here:- 
diffus time=11 temp=925 dryo2 press=1.00 hcl=3
#
# extract gate oxide thickness
extract name="gateox" thickness oxide mat.occno=1 x.val=0.50
#
#vt adjust implant (vt >> 1011 is it useful ?)
implant boron dose=9.5e11 energy=10 pearson
#
```

- ```

implant deep trapping gate (no implant)
implant zinc dose=4e14 energy=200 monte damage iv.scale=1e-3
implant deep n deep junction
implant phosphor dose=2e13 energy=400 monte damage
iv.scale=1e-3
#
implant phosphor dose=5e12 energy=500 monte damage
iv.scale=1e-3
#
depo poly thick=0.2 divi=10
#
#from now on the situation is 2-D
#
etch poly left p1.x=0.35
#
method fermi compress
#diffuse time=3 temp=900 weto2 press=1.0 (modified)
diffuse time=3 temp=350 weto2 press=1.0
#
#
implant phosphor dose=2.0e13 energy=15 pearson
#implant phosphor dose=3.0e13 energy=20 pearson (backup)
#
depo oxide thick=0.120 divisions=8
#
etch oxide dry thick=0.120
#
#implant arsenic dose=5.0e15 energy=50 pearson (backup)
implant arsenic dose=2.0e15 energy=25 pearson
#

```
- ```

method fermi compress
diffuse time=1 temp=400 nitro press=1.0
#diffuse time=1 temp=900 nitro press=1.0 (modified)
#
etch oxide left p1.x=0.2
deposit alumin thick=0.03 divi=2
etch alumin right p1.x=0.18

## no specific annealing performed

# Extract a design parameter.....
# extract final S/D Xj...
extract name="nxj" xj silicon mat.occno=1 x.val=0.1 junc.occno=1
# extract the long chan Vt...
extract name="n1dvt" 1dvt ntype vb=0.0 qss=1e10 x.val=0.49
# extract a curve of conductance versus bias....
extract start material="Polysilicon" mat.occno=1 \
    bias=0.0 bias.step=0.2 bias.stop=2 x.val=0.45
extract done name="sheet cond v bias" curve(bias,1dn.conduct
material="Silicon" mat.occno=1 region.occno=1)
outfile="extract.dat"
# extract the N++ regions sheet resistance...
extract name="n++ sheet rho" sheet.res material="Silicon"
mat.occno=1 x.val=0.05 region.occno=1
# extract the sheet rho under the spacer, of the LDD region...
extract name="ldd sheet rho" sheet.res material="Silicon"
mat.occno=1 x.val=0.3 region.occno=1

```

- # extract the surface conc under the channel....

```
extract name="chan surf conc" surf.conc impurity="Net Doping"
material="Silicon" mat.occcno=1 x.val=0.45
```
- structure mirror right

```
electrode name=gate x=0.5 y=0.1
electrode name=source x=0.1 y=0.2
electrode name=drain x=0.9 y=0.2
electrode name=substrate backside
#electrode name=emitter x=0.9 y=0.55
```
- # defines the structure

```
save outfile=mos1process.str
```
- # plot the structure

```
#tonyplot -st mos1process.str -set mos1ex02_0.set
#tonyplot mos1process.str
```
- #go atlas simflags="-P 8"

```
go atlas
# define the Gate workfunction
#electrode name=gate x.min=0.5 x.max=0.5 y.min=0.1 y.max=0.1
#electrode name=source x.min=0.0 x.max=0.1 y.min=0.2 y.max=0.2
#electrode name=drain x.min=0.9 x.max=1.0 y.min=0.2 y.max=0.2
#electrode name=substrate x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.8
y.max=0.8
#electrode name=emitter x.min=0.1 x.max=0.15 y.min=0.54
y.max=0.56
```
- contact name=gate n.poly
contact name=source resistance=1
contact name=drain resistance=1
contact name=substrate resistance=0.1

```
#trap density (should be modified to take into account the zinc
concentration profile) with higher hole capture cross sections

trap acceptor density=5e16 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.2 y.max=0.25
trap acceptor density=1e19 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.25 y.max=0.3
trap acceptor density=4e19 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.3 y.max=0.4
trap acceptor density=1e18 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.4 y.max=0.5
trap acceptor density=1e16 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.5 y.max=0.6
trap acceptor density=1e15 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.6 y.max=0.7
trap acceptor density=1e14 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.7 y.max=0.8
trap acceptor density=1e14 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.8 y.max=0.9
trap acceptor density=1e14 e.level=0.60 degen.fac=1 sigp=1e-14
sign=1e-19 x.min=0.2 x.max=0.8 y.min=0.9 y.max=1.0
```

quit

- ```

trap density due to neutron induced defects , fluence up to 1e17
/cm3
#trap donor density=1e17 e.level=0.18 degen.fac=1 sign=1e-13
sigp=1e-20 x.min=0.0 x.max=1.0 y.min=0.0 y.max=1.0
#trap donor density=0.5e17 e.level=0.25 degen.fac=1 sign=1e-13
sigp=1e-20 x.min=0.0 x.max=1.0 y.min=0.0 y.max=1.0
#trap donor density=1e17 e.level=0.46 degen.fac=1 sign=1e-13
sigp=1e-20 x.min=0.0 x.max=1.0 y.min=0.0 y.max=1.0
#trap acceptor density=1e17 e.level=0.36 degen.fac=1 sign=1e-20
sigp=1e-13 x.min=0.0 x.max=1.0 y.min=0.0 y.max=1.0
#introduction rate Ec-0.46 = 1.0 cm-1 (source Fretwurst et al.)
#introduction rate Ec-0.18 = 1.0 cm-1 (source Fretwurst et al.)
#introduction rate Ec-0.25 = 0.5 cm-1 (non mesuré)
#introduction rate Ev+0.36 = 1.0 cm-1 (source Fretwurst et al.)
#fluence = 1e17 cm-2

Define the Gate Qss
interface qf=3e10

save the structure
save outfile=mos1process.str

plot the structure
#tonyplot -st mos1process.str -set mos1ex02_0.set
#tonyplot mos1process.str

#tonyplot -overlay -st mos1ex02_1.log mos1ex02_2.log
mos1ex02_3.log -set mos1ex02_1.set

```
- ```

log outf=transfert.log
solve vdrain=3.3 vssubstrate=0.0 name=gate vgate=0.0 vfinal=3.3
vstep=0.05
tonyplot transfert.log

# plot the structure
tonyplot mos1process.str
$
go atlas
#go atlas simflags="-P 8"
.BEGIN
V1 0 6 3.3
R3 6 1 100
$V1 0 1 PULSE 0 3.3 10u 100u 100u 980m 1000m
V3 0 8 3.3
R4 8 5 100
$V3 0 5 PULSE 0 1.3 100u 100m 100u 880m 1000m
$V2 1 3 PULSE 0 -3.3 10u 10m 10u 10u 1.4 2
$O1 1 0 PULSE 0 1 800m 100n 100n 1u 1000m
$1u
$1.3 considere comme point milieu
R1 4 1 1
R2 7 0 1
$M1 2 3 7 0 MODN L=20u W=5u TEMP=27
$M3 2 3 4 1 MODP L=5u W=15u TEMP=27
M4 3 5 4 1 MODP L=10u W=10u TEMP=27
$ drain, gate, source, bulk bulk n'est pas la prise dans le caisson
A2 7=source 3=drain 5=gate 0=substrate INFILE=mos1process.str
width=1

```

- MODEL MODN NMOS LEVEL=1 VTO=1.0
 .MODEL MODP PMOS LEVEL=1 VTO=-1.0
 \$ il est necessaire d'avoir une carte device dans le spice
 .NUMERIC LTE=0.8 TOLTR=1.0E-6 VCHANGE=10.0 DTMIN=1e-9
 .OPTIONS PRINT RELPOT WRITE=10
 \$.NUMERIC LTE=0.5 TOLTR=1.E-9 VCHANGE=10.0 DTMIN=1e-10
 \$.OPTIONS RELPOT WRITE=10
 \$
 .LOG OUTFILE=pd2
 .SAVE MASTER=pd2
 \$
 .NODESET V(1)=3.3
 \$.DC V1 0.0 3.3 0.1
 \$.DC V3 0.0 3.3 0.1
 \$.TRAN 0.01uS 1000ms
 \$.NODESET V(1)=0.0 V(2)=0.0
 \$
 \$.IC V(1)=3.3
 .END
 MODELS DEVICE=A2 REG=1 CONMOB FLDMOB CONSRH AUGER BGN
 \$
 \$MATERIALS DEVICE=ADIODE REG=1 TAUN0=5E-6 TAUP0=2E-6
 \$IMPACT DEVICE=A2 REG=1 SELB<
 \$
 \$METHOD CLIM.DD=1.0E5 DVMAX=1.E6 DT.MAX=1e-3 TRAP
 method newton trap dvmax=100 dt.max=1e-3 climit=1e-2
 \$beam num=1 f.radiate=generate_2D_DET_6.lib
 \$beam num=1 f.radiate=fradiate2.lib
 go atlas simflags="-P 8"
 tonyplot pd2_dc_1.log

N. FOURCHES June 17th 2013