

Projeto de Processos e Dispositivos

Jacobus W. Swart, Hugo R. Jimenez Grados e Paula C. S. Dutra

Ajustar os processos de fabricação de dispositivos e de circuitos integrados de forma empírica por tentativa e erro custa muito dinheiro e demora muito tempo. Para evitar este custo e desperdício de tempo de experiências, foram desenvolvidos programas de simulação de processos e de dispositivos. Um programa de simulação de processo permite obter a estrutura física do dispositivos em função dos parâmetros das etapas de processo, tais como temperaturas, tempos e ambientes dos tratamentos térmicos, deposição de filmes finos e fotografações, etc. Uma vez obtido a estrutura do dispositivo devemos analisar o desempenho do mesmo. Isto pode ser obtido por meio de um simulador de dispositivos. Caso o desempenho não for o desejado, altera-se o processo de fabricação e conseqüentemente a estrutura do dispositivo até se obter o desempenho adequado do mesmo.

Existem vários produtos de programas de simuladores disponíveis no mercado. No CCS usamos os programas, desenvolvidos na Universidade de Stanford, USA. O programa de simulação de processo é o SUPREM (versão IV.GS) e o programa de simulação de dispositivo chama-se PISCES (versão 2ET). A Fig. 1 ilustra uma seqüência de simulações, indo até o nível de circuito, onde um programa de pós-processamento extrai os parâmetros SPICE das curvas de desempenho do dispositivos obtido pelo PISCES para em seguida realizar a simulação SPICE do circuito. Isto tudo sem fabricar os dispositivos e o circuito.

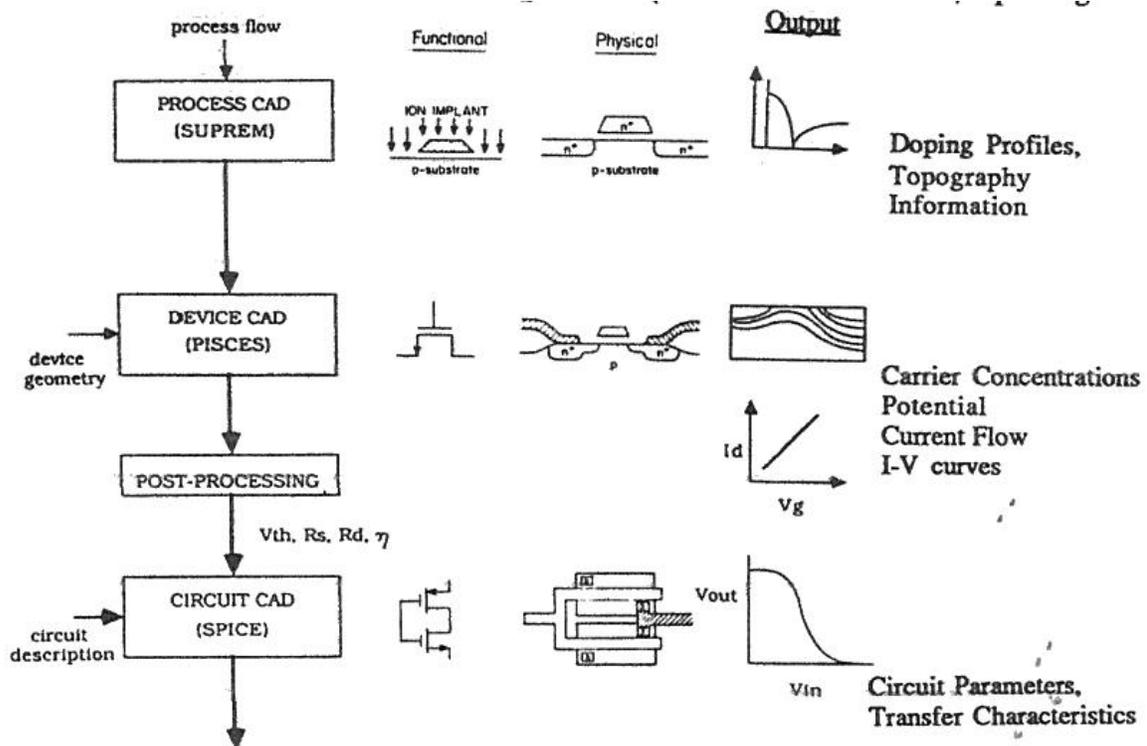


Fig. 1 Seqüência de simulações de processo, dispositivo e circuito.

A rede

Simuladores de processos e dispositivos tratam a seção da estrutura de um dispositivo como uma rede de pontos. Em cada ponto, as equações são resolvidas para a grandeza em interesse (concentração de dopantes, potencial elétrico ou densidade de corrente). Em simuladores unidimensionais, o espaçamento da rede é especificado apenas na direção vertical (perpendicular à superfície do silício). Em simuladores bidimensionais, o espaçamento é especificado tanto na direção vertical como lateral.

Regiões em que o parâmetro que está sendo simulado varia rapidamente com a distância requer um espaçamento menor (um grande número de cálculos devem ser feitos numa pequena distância). Em regiões em que o parâmetro muda mais lentamente o espaçamento pode ser maior sem comprometer a precisão e com um menor tempo de computação.

Geralmente a região imediatamente abaixo da superfície do silício é onde a concentração de dopante muda rapidamente, portanto uma rede mais apertada é necessária para alta resolução.

SUPREM:

Este programa baseia-se nas equações dos modelos das etapas de processos, tais como de oxidação, difusão, implantação de íons, deposição de filmes finos, litografia e corrosão. Estas equações são resolvidas tendo como base os parâmetros de cada etapa de processo, tais como temperatura, tempo, ambiente, tipo de dopante, etc. A versão SUPREM IV.GS é do tipo bidimensional, obtendo-se uma descrição física do dispositivo por uma seção de corte do mesmo. A Fig. 2 mostra um diagrama em blocos esquemático das operações do programa. As Figuras 3 e 4 mostram exemplos de perfis de dopagem em regiões de fonte/dreno de transistor MOS.

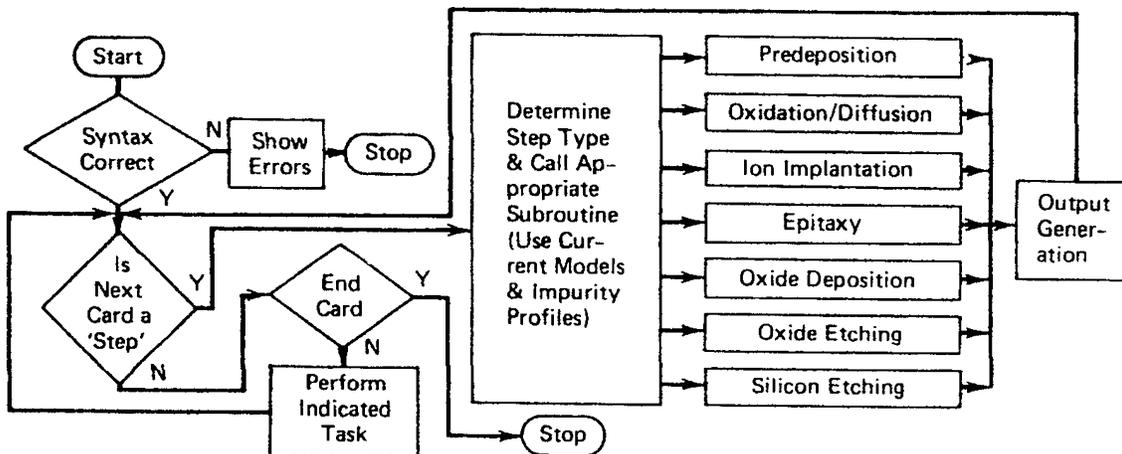


Fig. 2 Diagrama em blocos das operações do programa SUPREM

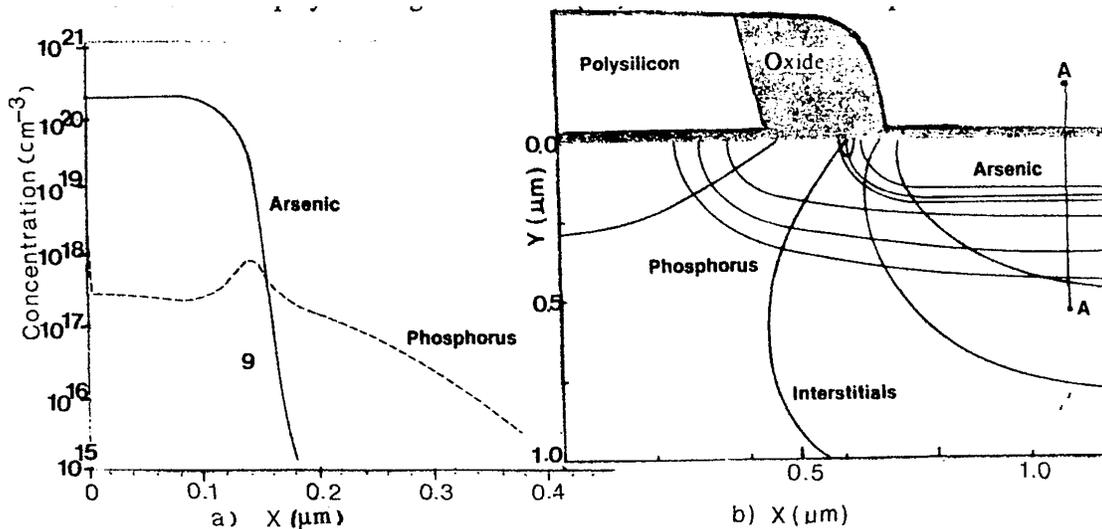


Fig. 3 Perfis de dopagem unidimensional e bidimensional de região de fonte/dreno com dopagem de As e P (estrutura LDD).

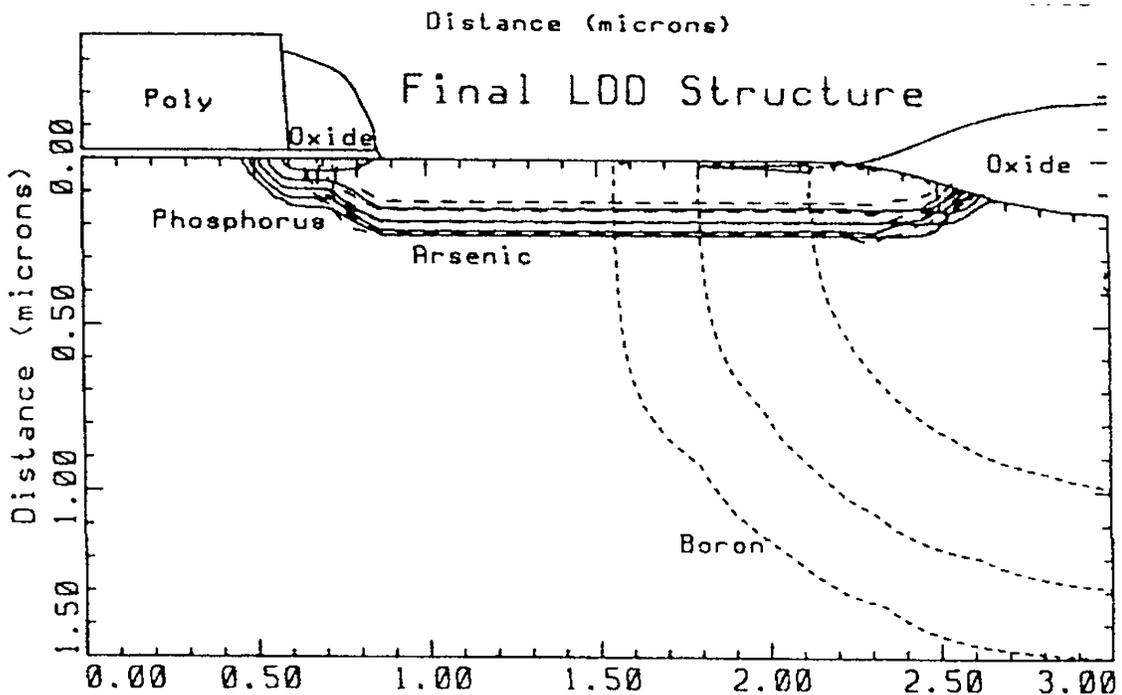


Fig. 4 Perfil de dopagem bidimensional de região de fonte/dreno, com inclusão da dopagem sob região de campo.

Segue um exemplo de arquivos de entrada para simulação unidimensional de bidimensional de transistor nMOS com porta de Si-poli tipo n⁺, por SUPREM IV.GS. Os resultados destas simulações são apresentados nas figuras 5 e 6.

Arquivo de entrada para simulação unidimensional de canal:

```
option quiet
mode one.dim
#
```

```

phos poly /gas Trn.0=0.0
bor poly /gas Trn.0=0.0
phos oxide /gas Trn.0=0.0
bor oxide /gas Trn.0=0.0
#the vertical definition
line x loc=0.0 tag=top spacing=0.01
line x loc=0.1      spacing=0.01
line x loc=0.25    spacing=0.05
line x loc=0.5     spacing=0.05
line x loc=3.0 tag=bot
#the silicon wafer
region silicon xlo=top xhi=bot
#set up the exposed surfaces
bound exposed xlo=top xhi=top
bound backside xlo=bot xhi=bot
#calculate the mesh
init boron conc=2.50e14
#35 the pad oxide
deposit oxide thick=0.030
#36 the uniform boron implant
implant boron dose=1.2e12 energy=30 pearson
#37 oxide etching
etch oxide all
#38 anneal of implant (boron) gate oxidation
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=60 temp=950 dry
#39 deposit the poly
deposit poly thick=0.500 div=10 phos con=1.0e19
#40 anneal phos diffuse in poly
diffuse time=35 temp=925 nitrogen
#42 anneal Si poly
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=5 temp=950 dry
diffuse time=10 temp=950 nitrogen
#save: outfile
struct outf=poly.str
#49 the uniform phos implant (drain/source)
implant phos dose=2e15 energy=30 pearson
#49 the uniform arsenic implant (drain/source)
implant arsenic dose=7.5e15 energy=30 pearson
# 52 anneal of implant (phos+ars) drain/source
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=15 temp=950 dry
#54 phos-ars anneal (drain/source)
diffuse time=20 temp=950 nitrogen
struct outf=imp4.str
##plot the final profile of gate (unidim. program) -1Dim
select z=log10(phos)
plot.1d x.ma=2.0 y.mi=12.0 y.max=18.0

```

```

select z=log10(boron)
plot.1d x.max=2.0 cle=f axi=f
select z=log10(abs(doping))
plot.1d x.ma=2.0 y.mi=12.0 y.max=18.0
end

```

O perfil de dopagem de canal resultante desta simulação está mostrado na figura 5

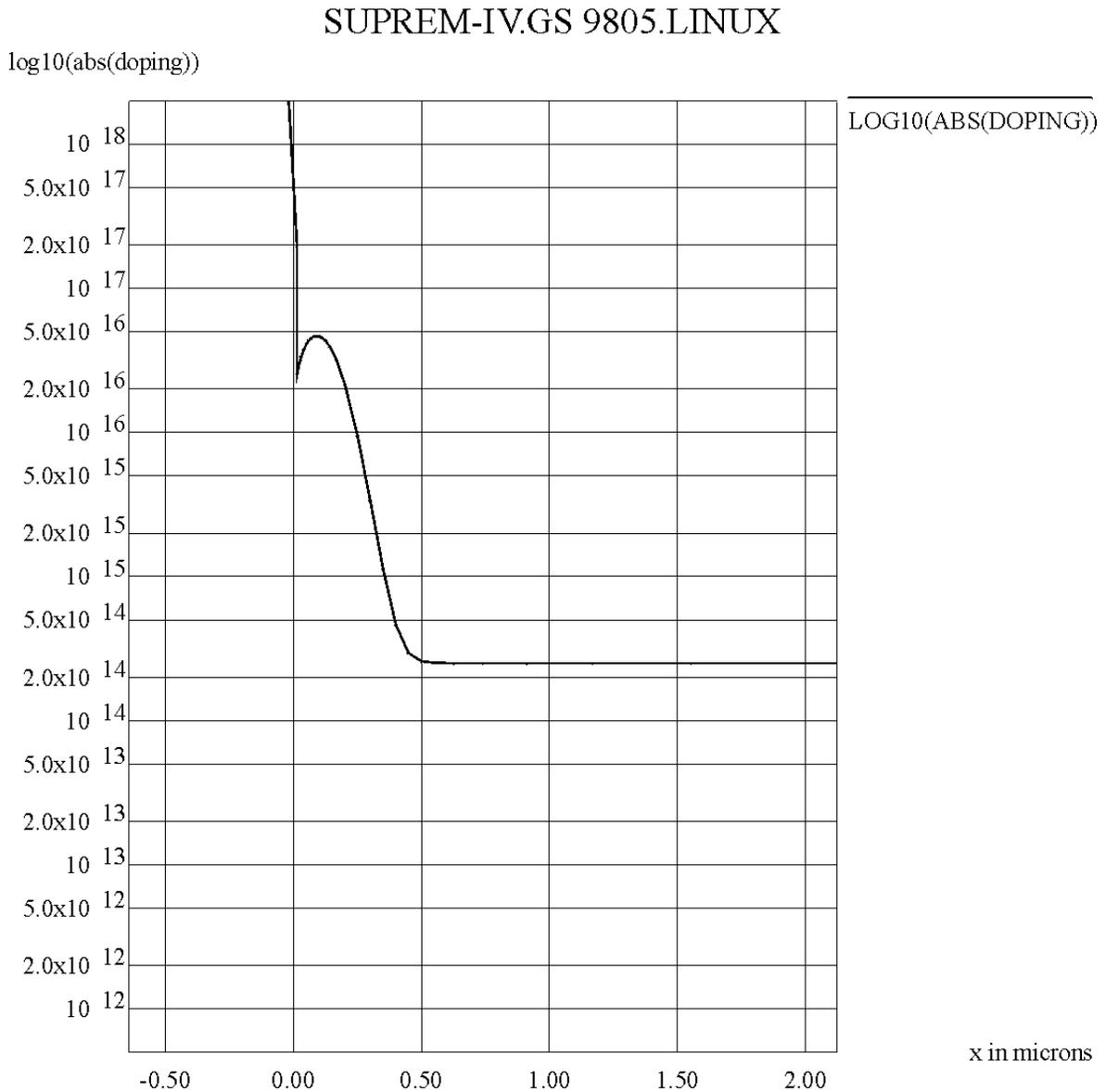


Fig. 5 Perfil de dopagem de canal obtido por simulação SUPREM.

Arquivo de entrada para simulação bidimensional de fonte/dreno e canal:

```

set echo
cpu log
phos poly /gas Trn.0=0.0

```

```

bor poly /gas Trn.0=0.0
phos oxide /gas Trn.0=0.0
bor oxide /gas Trn.0=0.0
#This line x was modified to get the full device/2
#the vertical definition
line x loc=0.0 tag=lft spacing=0.25
line x loc=0.95 spacing=0.03
line x loc=1.25 spacing=0.03
line x loc=1.9 spacing=0.25
line x loc=2.0 tag=rht spacing=0.25
#the horizontal definition
line y loc=0.0 tag=top spacing=0.01
line y loc=0.1 spacing=0.01
line y loc=0.25 spacing=0.05
line y loc=0.5 spacing=0.01
line y loc=1.0 tag=bot
#the silicon wafer
region silicon xlo=lft xhi=rht ylo=top yhi=bot
#set up the exposed surfaces
bound exposed xlo=lft xhi=rht ylo=top yhi=top
bound backside xlo=lft xhi=rht ylo=bot yhi=bot
#calculate the mesh
init boron conc=2.50e14
#35 the pad oxide
deposit oxide thick=0.030
#36 the uniform boron implant
implant boron dose=1.2e12 energy=30 pearson
#37 oxide etching
etch oxide all
#38 anneal of implant (boron) gate oxidation
deposit oxide thick=0.035
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=60 temp=950 nitrogen
#39 deposit the poly
deposit poly thick=0.500 div=10 phos con=1.0e19
#40 anneal phos diffuse in poly
diffuse time=35 temp=925 nitrogen
#42 anneal Si poly
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=10 temp=950 nitrogen
#43 etch the poly away
etch poly right p1.x=1.05 p1.y=-0.020 p2.x=0.95 p2.y=-0.55
#save: outfile
struct outf=poly.str
#49 the uniform phos implant (drain/source)
implant phos dose=2e15 energy=30 pearson
#49 the uniform arsenic implant (drain/source)
implant arsenic dose=7.5e15 energy=50 pearson

```

```

#52 anneal of implant (phos+ars) drain/source
diffuse time=5 temp=950 nitrogen
diffuse time=15 temp=950 nitrogen
#54 phos-ars anneal (drain/source)
diffuse time=20 temp=950 nitrogen
struct outf=imp4.str
# plot the total profile (drain) -2Dim.
select z=log10(abs(phos+ars))
plot.2d bound fill y.max=1.0
foreach v (15.0 to 21.0 step 0.5)
  contour val=v
end

```

O perfil bidimensional de dopagem resultante desta simulação está mostrado na figura 6.

SUPREM-IV.GS 9805.LINUX

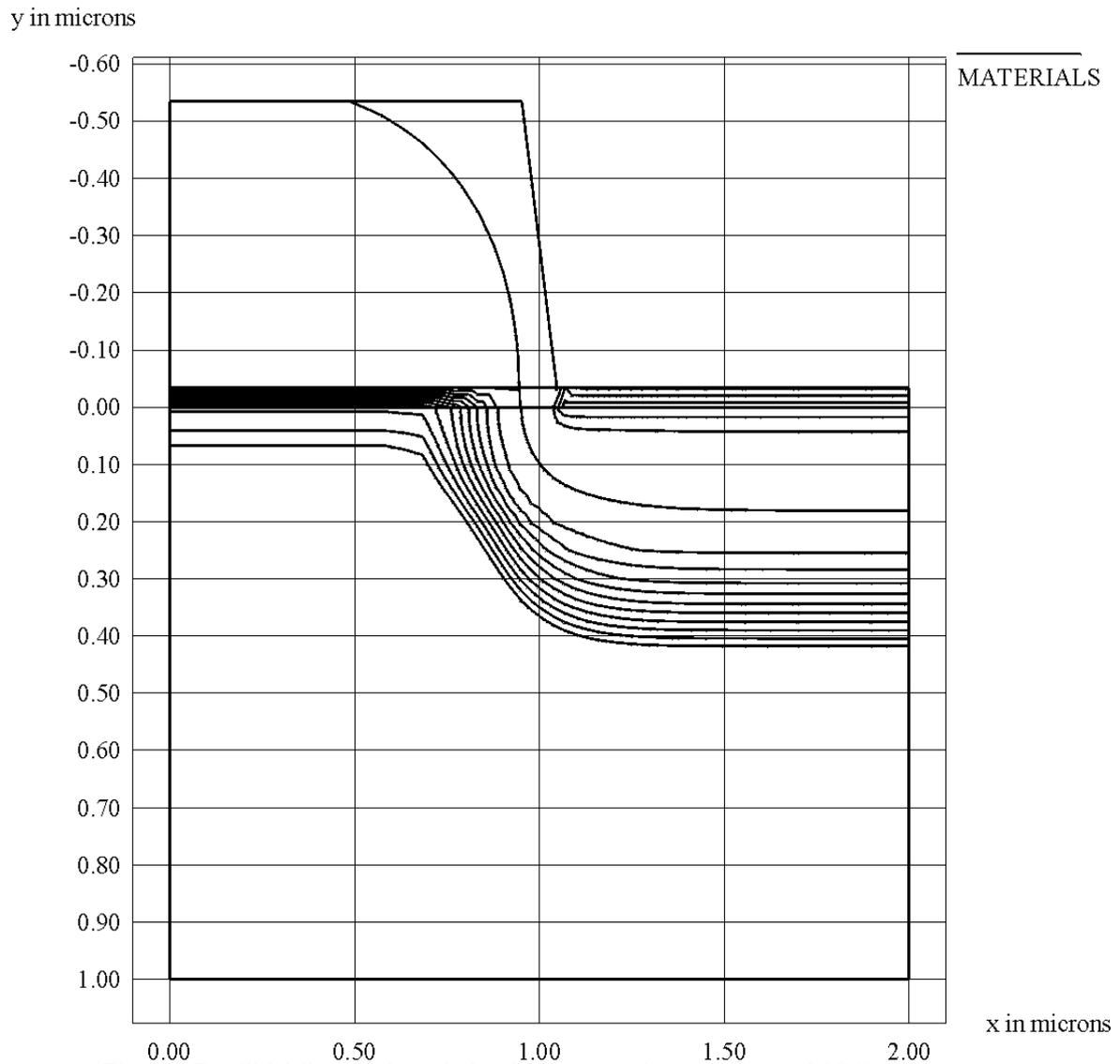


Fig. 6. Perfil bidimensional de dopagem do transistor MOS.

PISCES:

Programas como PISCES e outros tomam a descrição física do dispositivo e realizam uma simulação elétrica do mesmo, calculando as distribuições de potencial elétrico, campo elétrico, densidade de portadores, densidade de corrente elétrica e corrente total em cada terminal do dispositivo, tendo como condições de contorno as tensões aplicadas nos mesmos. Estes resultados oferecem as curvas de corrente versus tensões aplicadas (curvas características), anomalias e limitações de desempenho, detalhes de funcionamento interno do dispositivo (não visível por medidas elétricas). O programa baseia-se na solução bidimensional da equação de Poisson e da equação de continuidade de portadores, tendo em vista a estrutura física e as tensões aplicadas aos terminais, como ilustra o diagrama de blocos da figura 7. A figura 8 mostra a distribuição bidimensional de potencial elétrico de um dado transistor MOS.

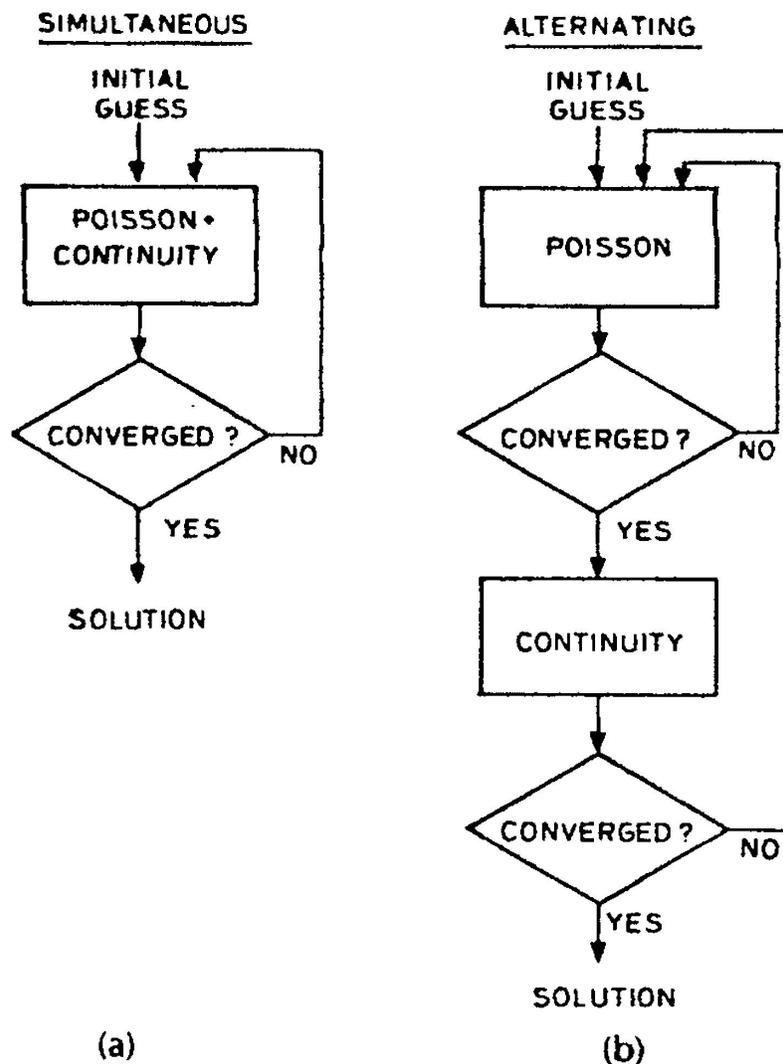


Fig. 7 Diagrama de blocos dos cálculos PISCES a) por método simultâneo e b) por método iterativo.

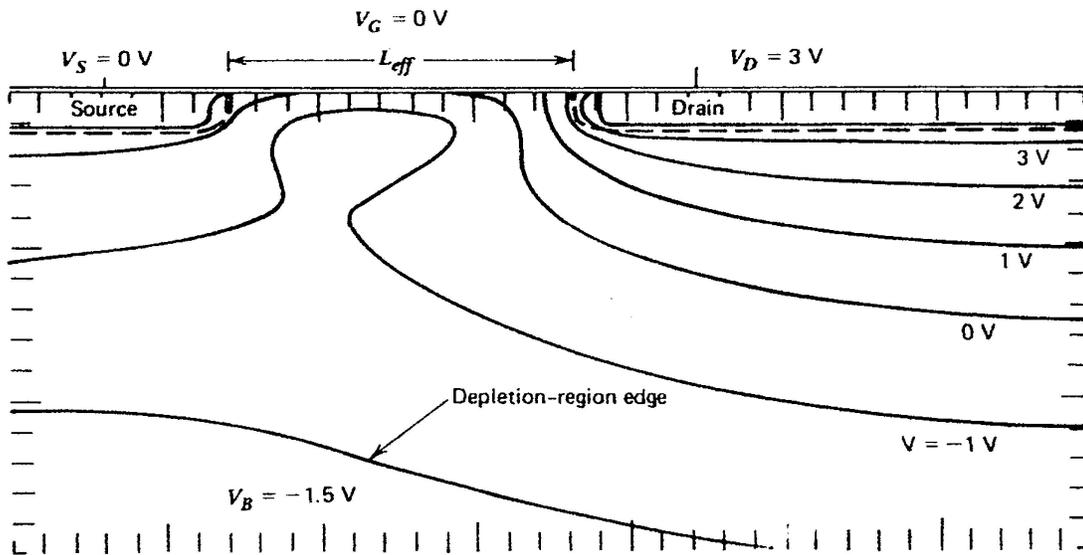


Fig. 8 Distribuição de potencial elétrico em um dado transistor MOS, obtido por simulação PISCES.

Exemplo de Simulação PISCES:

Segue um exemplo de simulação realizado, tendo um transistor nMOS com as seguintes características físicas: $L=2\mu\text{m}$, $X_J=0.5\mu\text{m}$, $T_{OX}=35\text{nm}$, um perfil de ajuste de V_T raso com N_A de superfície de $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, porta de Si-poli tipo n^+ .

O arquivo de entrada PISCES é como segue:

Title Short Channel ($L=2.0 \mu\text{m}$) MOSFET with doping for ajust of V_T

\$ Name: Hugo R. Jimenez Grados

\$ Especifications: $L=2.0 \mu\text{m}$ $X_j=0.5$ $T_{ox}=0.035 \mu\text{m}$

\$ O L efetivo 'e menor pelo efeito de difusão lateral.

\$ * * * A : define rectangular grid * * *

mesh rectangular $n_x=38$ $n_y=23$ outf=nmeshb.msh

x.m n=1 l=0 r=1

x.m n=4 l=0.50 r=.7

x.m n=8 l=0.70 r=.75

x.m n=15 l=1.0 r=1.0

x.m n=17 l=1.2 r=1.0

x.m n=24 l=1.8 r=1.0

x.m n=26 l=2.0 r=1.0

x.m n=31 l=2.30 r=.8

x.m n=35 l=2.50 r=1.33

x.m n=38 l=3.00 r=1.40

y.m n=1 l=-.035 r=1

y.m n=4 l=0 r=1

y.m n=9 l=0.10 r=1.25

y.m n=14 l=0.40 r=1.15

y.m n=16 l=0.50 r=1.15

y.m n=23 l=2.0 r=1.25

\$ * * * eliminate

elim ix.lo=13 ix.hi=26 iy.lo=20 iy.hi=23 y.dir

```

elim ix.lo=1 ix.hi=38 iy.lo=21 iy.hi=23 y.dir
elim ix.lo=5 ix.hi=13 iy.lo=21 iy.hi=23 y.dir
elim ix.lo=25 ix.hi=33 iy.lo=21 iy.hi=23 y.dir
$ *** distort ***
spread left w=0.70 up=4 lo=16 y.lo=0.5 en=1.2 gr1=1.3
+ gr2=.5 mid=13 y.mid=0.35
spr right w=0.70 up=4 lo=16 y.lo=0.5 en=1.2 gr1=1.3
+ gr2=.5 mid=10 y.mid=0.3
$ *** regions
region num=1 ix.l=1 ix.h=38 iy.l=1 iy.h=4 oxide
region num=2 ix.l=1 ix.h=38 iy.l=4 iy.h=23 silicon
$ *** electrodes
elec num=1 ix.l=4 ix.h=35 iy.l=1 iy.h=1
elec num=2 ix.l=1 ix.h=38 iy.l=23 iy.h=23
elec num=3 ix.l=1 ix.h=3 iy.l=4 iy.h=4
elec num=4 ix.l=36 ix.h=38 iy.l=4 iy.h=4
$ *** doping and fixed charge
dop reg=2 unif conc=2.5e14 p.type
DOP GAUSS CONC=8.0E16 P.TYPE
+ JUNC=0.75 y.top=0 y.bot=0 char=0.1
dop reg=2 n.type gaussian x.right=.90 ratio.lateral=.8
+ conc=1e20 junction=.5
dop reg=2 n.type gaussian x.left=2.1 ratio.lateral=.8
+ conc=1e20 junction=.5
$...Plot grid
options plotdev=xterm
$options plotdev=lw plotfile=grid.ps
$plot.2d grid no.top bound pause
$plot.2d no.top bound junction pause
$contour doping abs log min=15 max=20 del=0.5
$plot.2d junction no.top bound pause
$contour poten ncont=5
$$ Perfil do doping in y=0
$plot.1d dop log abs a.x=0 a.y=0 b.x=3 b.y=0 pause
$$Perfil vertical em x=0.2 (Source)
$plot.1d dop log abs a.x=0.2 b.x=0.2 a.y=0 b.y=2 pause
$$ Perfil vertical em x=1.5 (gate)
plot.1d dop log abs a.x=1.5 b.x=1.5 a.y=0 b.y=2 pause
$$Perfil vertical em x=2.8 (drain)
$plot.1d dop log abs a.x=2.8 b.x=2.8 a.y=0 b.y=2 pause
end

```

Title Long Channel MOS (2.0 um channel) with doping for ajust of $V_T=0.8$ v

\$\$ Name: Hugo R. Jimenez Grados

\$ Especifications: L= 2.0 um $X_j=0.5$ $Tox=0.035$ um

\$ *** define rectangular grid

\$ date from program grid.p2 : file nmeshb.msh

mesh inf=nmeshb.msh

\$ *** Symbolic Factorization (Gummel) and Parameters

```

symb gummel carr=1 electrons
method iccg damped
$ * * * Materials/Contacts
mater num=2 g.surf=0.75
contact num=1 n.poly
$ * * * Models
models conmob temp=300 fldmob print
$ * * * Solve Initial Bias Point; Save in nbiasbinit
solve initial outfile=nbiasbinit.slv
$ * * * Switch to Newton Method
symb newton carriers=1 electrons
method autonr
$ * * solve for gate characteristics * *
$ * * Solve for Vds = 1.0 volts; Save in nbiasb15a
$ solve v4=2.0 outf=nbiasb15a.slv
$ * * Setup I-V Log File
$log outf=nIVb15.log
$ * * Step Vgs from 0 to 1.0 volts (vds=1.0 volts)
$ solve v1=0.0 vstep=0.1 nsteps=10 electrode
$ * * solve for drain characteristics * *
$ * * Solve for Vgs = 1.0 volts; Save in ivds
$solve v1=1.0
$log outf=ivds.log
$ * * Step Vds from 0 to 5.0 volts (vgs=0.0 volts)
$solve v4=0.0 vstep=0.1 nstep=50 elect=4
$ * * solve for n , for poten and for Efield
solve v4=5.0 v1=0.0 v3=0 v2=0 outf=nbias.slv
options plotdev=xterm
$options plotdev=lw plotfile=JELECT.ps
$ * * Plot Id vs Vgs (Log and Linear Scales)
$plot.1d x.axis=v1 y.axis=i4 pause
$plot.1d x.axis=v1 y.axis=i4 log points pause
$ * * Plot Id vs Vds (Log and Linear Scales)
$plot.1d x.axis=v4 y.axis=i4 log points pause
$plot.1d x.axis=v4 y.axis=i4 pause
$ * * *Perfil do potential in y=0
plot.1d poten abs a.x=0 a.y=0 b.x=3 b.y=0 pause
$ * * * Perfil do potential in y=1.0
$plot.1d poten abs a.x=0 a.y=1.0 b.x=3 b.y=1.0 pause
$ * * Perfil do potential bidimen
plot.2d no.top bound junction pause
contour poten min=0.0 max=7 del=0.5 pause
$ * * electron concentration in y=0
plot.1d electron log abs a.x=0 a.y=0 b.x=3 b.y=0
+ min=0 max=20 spline nspl=300 points pause
$ * * electron concentration in y=1.0
$plot.1d electron log abs a.x=0 a.y=1.0 b.x=3 b.y=1.0
$+ min=0 max=20 spline nspl=300 points pause
$ * * electron concentration - bidimen

```

```

plot.2d no.top bound junction pause
contour electron log min=10 max=20 del=1.0 pause
$ ** Electric field in y=0
$plot.1d E.field abs a.x=0 a.y=0 b.x=3 b.y=0 pause
$ ** Electric field in y=1
$plot.1d E.field abs a.x=0 a.y=1.0 b.x=3 b.y=1.0 pause
$ ** Electric field - bidimen
$plot.2d no.top bound junction pause
$contour E.field log min=0 max=20 del=2.0 pause
$ ** *current densities in y=0
$plot.1d J.Electr abs a.x=0 a.y=0 b.x=3 b.y=0 pause
$ ** current densities - bidimen
$plot.2d no.top bound junction pause
$contour J.Electr log min=2 max=10 del=0.5 pause
end

```

A figura 9 apresenta curvas de corrente de dreno versus tensão de porta, para $V_{DS}=2V$ e $V_{BS}=0$. Observa-se uma corrente muito grande na região sublimiar e de comportamento não exponencial, como seria esperado em transistor com boa operação. Este comportamento é atribuído ao efeito punchthrough, que representa uma corrente pelo substrato em região abaixo da superfície. Este fenômeno é detalhado pelas distribuições do potencial elétrico, da concentração de elétrons e de densidade de corrente, mostrando um caminho de corrente de elétrons abaixo da superfície, mostrados nas figuras 10 a 12 respectivamente.

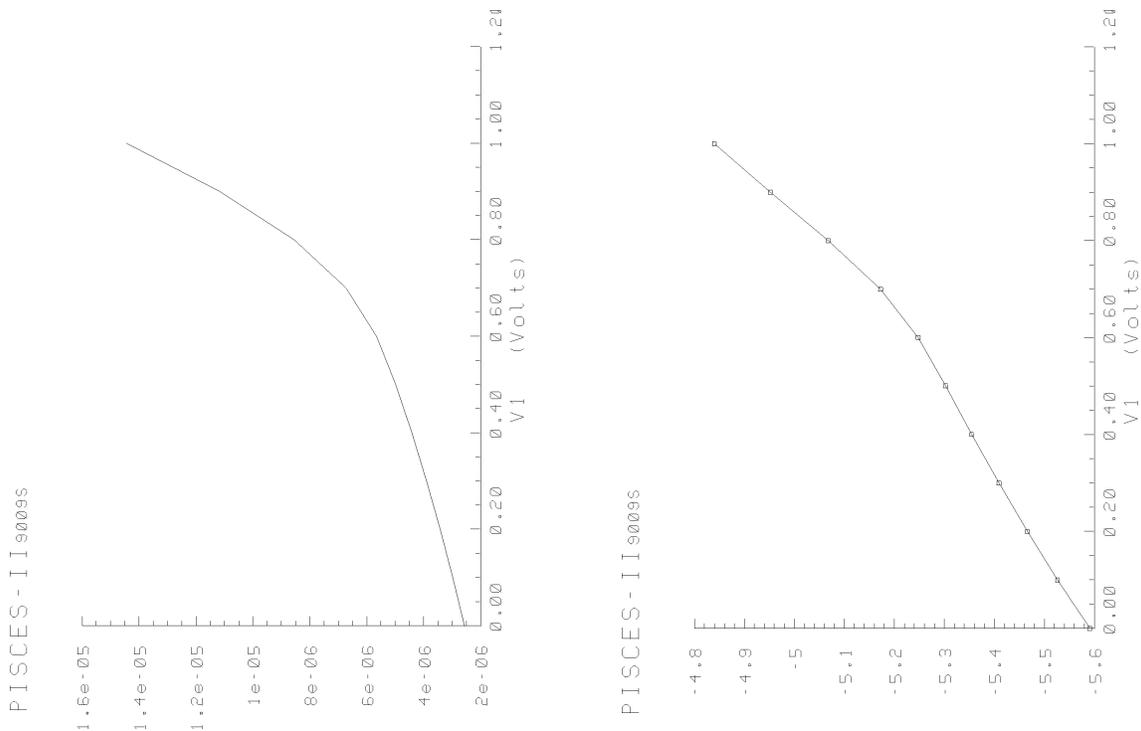


Fig. 9 Curva de I_{DS} x V_{GS} para $V_{DS}=2V$ em escala: a) linear e b) logarítmica

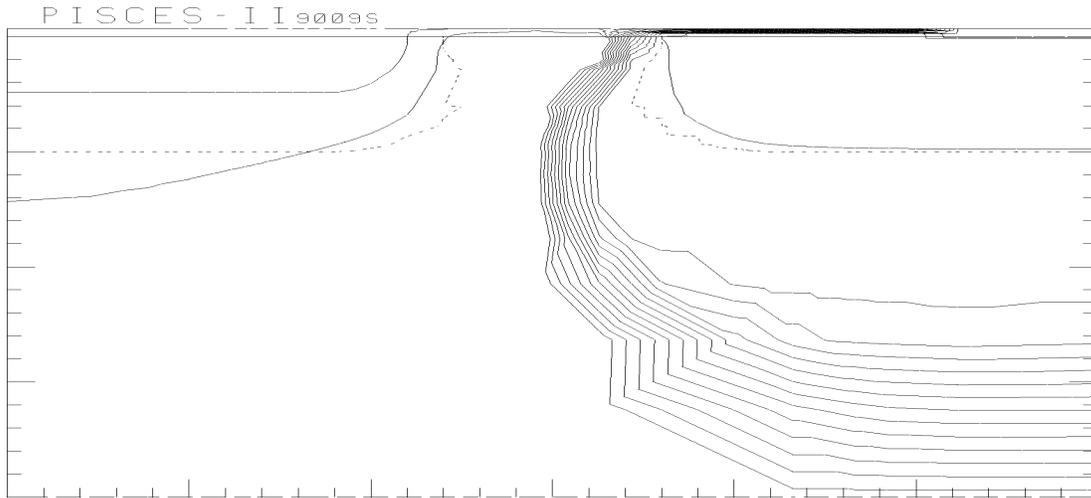


Fig. 10 Distribuição de potencial elétrico.



Fig. 11 Distribuição da densidade de elétrons (limite inferior = 10^{10} cm^{-3}).

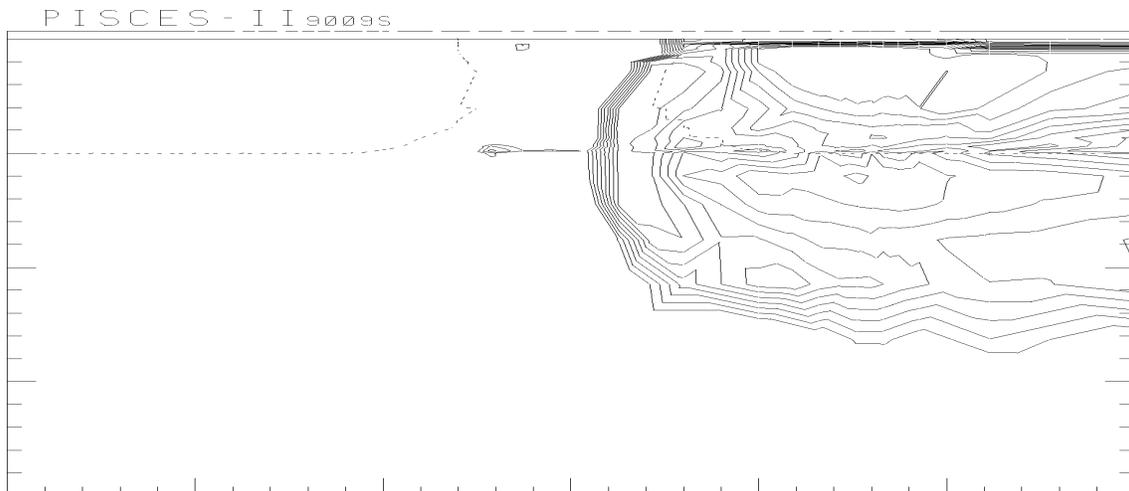


Fig. 12 Distribuição da densidade de corrente de elétrons

A anomalia apresentada pelo transistor deve ser corrigida pelo aumento da concentração da dopagem de substrato na região abaixo do canal. Este exemplo mostra o potencial desta ferramenta de CAD para projeto de processo/dispositivo.