
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Ysàs García, Anna. *Posta en marxa d'un sistema d'instrumentació per a la caracterització automatitzada de múltiples dispositius microelectrònics..* Treball de Final de Grau (Universitat Autònoma de Barcelona), 2026 (Grau en Enginyeria Electrònica de Telecomunicació)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/336118>

under the terms of the  license.



Treball Fi de Grau

Grau d'Enginyeria Electrònica de Telecomunicació

Posta en marxa d'un sistema d'instrumentació per
a la caracterització automatitzada de múltiples
dispositius microelectrònics

Anna Ysas García

Director: Montserrat Nafria Maqueda

Escola d'Enginyeria
Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)

Juny 2026

Resum

Aquest treball descriu el disseny i la posada en marxa d'un sistema d'instrumentació automatitzat per a la caracterització elèctrica i l'estudi de la fiabilitat de dispositius microelèctronics. L'objectiu fonamental és substituir els mètodes de mesura manuals per un control d'instruments per *software* que optimitzi els temps d'assaig.

El sistema d'instrumentació es compon d'un analitzador de paràmetres de semiconductors (SPA Agilent 4156C) i una matriu de commutació (Agilent E5250A) connectats a una estació de puntes o directament al DUT (*Device Under Test*). Mitjançant el desenvolupament d'*scripts* en MATLAB, s'ha aconseguit automatitzar completament l'encaminament dels senyals i l'execució de les mesures de forma seqüencial.

Pel que fa a l'encaminament dels senyals, s'ha comprovat mitjançant assajos de rampa de tensió (RVS) en resistències i estructures *crossbar*. Per verificar la flexibilitat en els test elèctrics s'ha realitzat una caracterització completa de transistors MOSFET comercials i de recerca de tecnologies nanomètriques. Finalment, mitjançant assajos d'estrès a tensió constant (CVS) i cicles de mesura-estrès-mesura (MSM) s'ha mostrat la seva aplicació per a la realització de test de fiabilitat. Aquestes darreres mesures han permès monitoritzar fenòmens crítics de degradació fins a la ruptura del dielèctric.

Paraules clau: Automatització, Instrumentació, SPA, Matriu de commutació, MATLAB, MOSFET, Fiabilitat, Degradació, Crossbar.

Llista d'abreviacions

- **ASCII:** American Standard Code for Information Interchange
- **BOX:** Buried Oxide
- **BTI:** Bias Temperature Instability
- **CCS:** Constant Current Stress
- **CVS:** Constant Voltage Stress
- **DUT:** Device Under Test
- **FLEX:** Flex Commands
- **FDSOI:** Fully Depleted Silicon-On-Insulator
- **GPIB:** General Purpose Interface Bus
- **HCI:** Hot-Carrier Injection
- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers
- **MOSFET:** Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
- **MSM:** Measure-Stress-Measure
- **PC:** Personal Computer
- **REDEC:** Reability of Electron Device and Circuits
- **RVS:** Ramped Voltage Stress
- **SCPI:** Standard Commands for Programmable Instruments
- **SMA:** SubMiniature version A
- **SMU:** Source Measure Unit
- **SOI:** Silicon-On-Insulator
- **SPA:** Semiconductor Parameter Analyzer
- **USB:** Universal Serial Bus

Index

1. Introducció.....	1
1.1 Context.....	1
1.2 Problema i necessitat existent.....	1
1.3 Objectius del treball.....	3
1.4 Estructura del document.....	3
2. Marc teòric.....	4
2.1 Fonaments d'instrumentació de mesura elèctrica.....	4
2.1.1 SPA: Unitats de Font i Mesura (SMU).....	4
2.1.2 Soroll instrumental.....	4
2.2 Protocols de test elèctric i fiabilitat.....	5
2.2.1 Escombrats en rampa de voltatge (RVS).....	5
2.2.2 Assajos d'estrès accelerat (MSM (Measurement Stress Measurement)).....	6
2.3 Comunicació mitjançant bus GPIB.....	7
2.4 Llenguatge de comandes FLEX.....	7
3. Sistema experimental (Hardware).....	9
3.1 Descripció general del sistema.....	9
3.2 SPA (Semiconductor Parameter Analyzer).....	9
3.3 Matriu de commutació.....	10
3.4 DUTs (Devices under test).....	12
3.4.1 Resistències discretes.....	12
3.4.2 Transistors MOSFET 2N7000.....	13
3.4.3 Estructura Crossbar.....	14
3.5 Taula de puntes.....	15
3.5.1. Transistors de l'oblea SNOW.....	16
4. Desenvolupament del codi i resultats.....	18
4.1. Connexió ordinador - SPA: Test RVS d'una resistència.....	18
4.2. Connexió ordinador - SPA: Test d'un transistor.....	22
4.2.1. Id - Vg.....	23
4.2.2. Id - Vd en funció de Vg.....	23
4.3. Connexió SPA - Matriu: Test d'un transistor.....	24
4.4. Connexió SPA - Matriu: Crossbar de resistències.....	27
4.5. Automatització de les mesures d'una matriu de resistències de mida NxM.....	29
4.6 CVS: Id en funció del temps.....	31
4.7 MSM: Measurement Stress Measurement.....	33
4.8 Transistors de la Oblea SNOW.....	35
4.8.1 Transistor N1 (W=10µm i L=10nm).....	36
4.8.2 Transistor N2 (W=10µm i L=120nm).....	39
5. Conclusions i treball futur.....	45
6. Referències.....	46
7. Annexos.....	48
Annex A: Codi generació Id -Vg MOSFET.....	48
Annex B: Codi generació Id -Vd en funció de Vg MOSFET.....	49

Annex C: Codi generació Id -Vg MOSFET amb matriu.....	50
Annex D: Codi generació Id -Vd en funció de Vg MOSFET.....	51
Annex E: Codi generació I-V resistències crossbar.....	52
R1.....	52
R2.....	53
R3.....	54
R4.....	55
Annex F: Codi generació I-V resistències crossbar selecció usuari.....	56
Annex G: Codi generació I-V resistències crossbar automatitzat fins a 36 elements.....	57
Annex H: Codi generació I-V resistències crossbar automatitzat de 4 elements amb 2 mesures simultànies.....	58
Annex I: Id en funció del temps.....	59
Funció CVS HCI.....	60
Annex J: MSM per al transistor 2N7000.....	61
Main.....	61
Funció CVS BTI.....	62
Funció RVS.....	63
Funció Vth-t.....	63
Annex K: Estrés en transistor de oblea.....	64
Main.....	64
Funció Ig-Vg.....	65
Funció Id-Vd.....	66
Annex L: Caracterització transistor oblea.....	67

1. Introducció

1.1 Context

En el camp de la microelectrònica actual, el progrés tecnològic està profundament condicionat pel '*device scaling*' i l'enginyeria de nous dispositius [1]. Això ha comportat que, al llarg de les darreres dècades, la tendència de la indústria hagi estat reduir constantment les dimensions dels components amb l'objectiu de millorar la densitat d'integració dels xips, minimitzar els costos de fabricació, reduir el consum energètic i augmentar la velocitat de processament dels circuits integrats [2].

Tot i que aquesta evolució ha permès l'aparició d'una nova generació de dispositius semiconductors que operen a la nanoescala, també ha conduït als límits físics dels materials tradicionals [3], [2]. Amb geometries tan extremadament denses i reduïdes, apareixen de manera accentuada mecanismes de degradació complexos, corrents de fuga (*leakage current*) per efecte túnel i comportaments estocàstics que desafien la fiabilitat i les prestacions d'aquests dispositius [1], i com a conseqüència neix la necessitat de testejar aquests dispositius per comprovar-ne el funcionament.

Davant d'aquesta situació, els laboratoris de recerca necessiten avaluar una gran varietat nous dispositius electrònics per tal d'analitzar-ne el comportament real i estadístic d'aquest. Així doncs, la investigació microelectrònica actual té la necessitat de conèixer els mecanismes de conducció d'aquests nous dispositius, verificar la integritat dels circuits fabricats i analitzar com es degraden o fallen sota estrès elèctric [3], [1].

Atès que molts d'aquests assajos requereixen mesurar senyals elèctrics febles i corrents de fuga extremadament febles, es fa imprescindible disposar d'una instrumentació de mesura d'elevades prestacions. Actualment, per als elements integrats, la metodologia d'assaig al laboratori és força tediosa en tractar-se d'un sistema manual, cal anar canviant de dispositiu en dispositiu i iniciar el procés de mesura desitjat. Només connectar els dispositius pot requerir diversos minuts en tractar-se d'escala tan petites i, a més, per obtenir un estudi fiable, és necessari repetir el procés sobre una gran quantitat d'elements.

1.2 Problema i necessitat existent

Actualment, al laboratori del grup de recerca REDEC (*Reability of Electron Device and Circuits*) de la UAB es disposa d'una taula de puntes per caracteritzar DUTs (*Device Under Test*) en una oblia. La taula està equipada amb capacitat de quatre puntes, és a dir connectades a quatre electrodes. A través de cables, aquestes puntes estan connectades a un SPA (*Semiconductor Parameter Analyzer*). Aquest SPA, disposa de quatre SMUs (*Source Measure Units*), un connectat a cada punta (figura 1.1). El fet de tenir únicament quatre terminals, fa que per a cada mesura l'operador hagi de manipular la taula de puntes per connectar un nou dispositiu. Cal tenir en compte que els tests de fiabilitat, són estadístics, i per tant requerirà sotmetre a molts dispositius a tests complexos. Això converteix la recollida d'informació en un procés altament lent, rutinari.

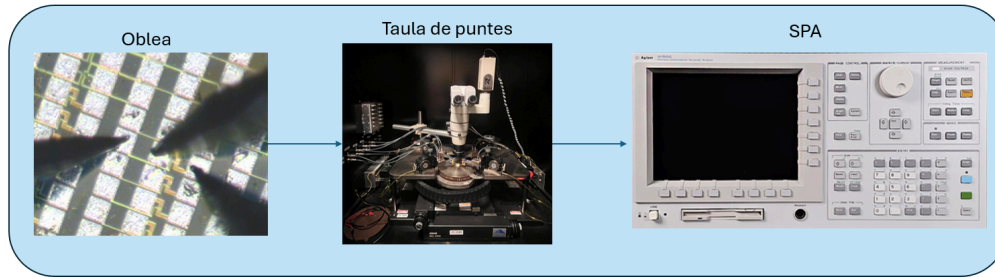


Figura 1.1: Esquema de la instrumentació actual.

Per millorar de manera significativa el procés de mesura de molts dispositius, es fa necessari integrar en el sistema d'instrumentació un sistema de commutació automatitzat, com són les *'switching matrices'* o matrius de commutació, que permeten desviar seqüencialment les connexions dels SMUs cap a múltiples nodes [4]. Aquesta integració és fonamental, ja que les estructures de prova actuals inclouen xarxes amb un gran nombre de dispositius idèntics fabricats en un mateix espai, i gràcies a la integració de matriu de commutació es podria connectar diversos punts de test simultàniament sense necessitat de moure les puntes.

Una disposició dels DUTs interessant és la *crossbar*, a través de la matriu ens permetria connectar tots els terminals i definir els test automàticament mitjançant el *software* adequat. Ara bé, en una mateixa oblea hi ha molts dispositius, i com només hi ha quatre puntes, es requerirà d'un element intermedi que ens permeti accedir a cada dispositiu de l'oblea. Aquest element s'anomena *'probe card'* o carta de puntes, que ha de ser específica per a la cada oblea. Cada una de les connexions facilitades a través de la carta de puntes aniran a un terminal de la matriu de connexions. A la figura 1.2, es veu la instrumentació a la que es vol arribar.

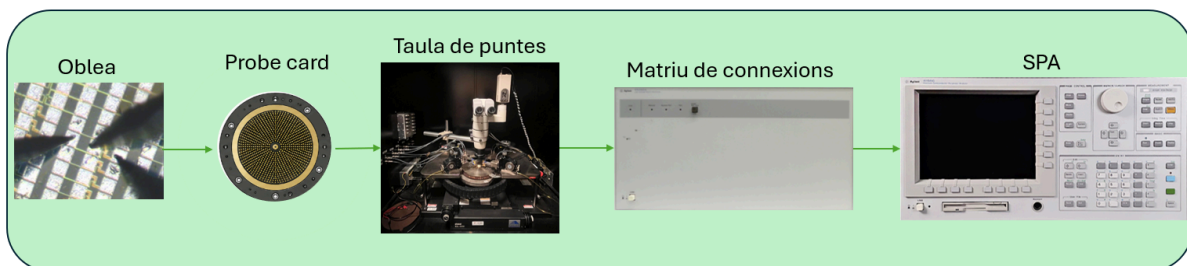


Figura 1.2: Esquema de la possible instrumentació a la qual es vol arribar.

Un cop tenim implementat el *hardware*, un programari pren el control del sistema per enllaçar cada node amb l'SPA, canviant de dispositiu de manera automàtica. Això no només accelera el procés de manera exponencial, sinó que garanteix que tots els components rebin exactament el mateix estímul elèctric sota les mateixes condicions temporals, eliminant la variabilitat associada a la manipulació manual entre assajos.

D'aquesta manera, el problema actual resideix en la manca d'una eina que controli aquest maquinari de commutació sense comprometre, la precisió de les mesures elèctriques. Per tant, es fa totalment indispensable el disseny d'un programari, en aquest cas desenvolupat en l'entorn MATLAB, que no només controli la matriu, sinó que coordini temporalment els estímuls aplicats als DUTs per tal garantir un flux de treball automatitzat.

1.3 Objectius del treball

Així doncs, l'objectiu principal d'aquest Treball de Final de Grau és el disseny, el desenvolupament de codi i la validació experimental del programari en l'entorn MATLAB, orientada a l'automatització de la caracterització elèctrica i la prova de concepte d'un test de fiabilitat per a la seva posterior exportabilitat a altres dispositius. Per assolir aquest propòsit general, es desglossen els següents objectius:

- **Configuració de la instrumentació:** Muntar i configurar les diferents connexions dels diferents instruments del sistema mitjançant el bus estàndard IEEE-488 (GPIB) entre l'ordinador de control [5], l'analitzador de paràmetres semiconductors (SPA) i la matriu de commutació [6], [7].
- **Desenvolupament del codi per al mòdul de commutació:** Desenvolupar un programa en MATLAB capaç de governar de forma dinàmica les rutes de senyal de la matriu de commutació d'acord amb la disposició dels terminals del DUT [4], [7].
- **Implementació de rutines de caracterització i fiabilitat:** Programar rutines automatitzades i iteratives per a l'execució d'assajos de caracterització elèctrica, i testos de fiabilitat [8].
- **Gestió de dades:** Amb les dades captades generar una sèrie de gràfics per tal de representar la resposta del dispositiu, per poder fer el seu posterior anàlisi.

1.4 Estructura del document

Aquesta memòria es divideix en els següents apartats ordenats segons el flux de treball del projecte:

- **Marc teòric:** S'ofereix una explicació dels diversos elements clau en el desenvolupament del projecte, centrant-se en l'explicació de la utilitat de cada element d'instrumentació emprat per a realitzar les mesures i alguna de les tècniques de caracterització elèctrica instrumental que s'implementaran.
- **Sistema experimental:** Descriu les especificacions tècniques i la configuració del banc de proves elèctric del laboratori, detallant els diversos DUTs que hem testejat, l'analitzador de paràmetres semiconductors (SPA) i sobretot, la matriu amb la seva disposició per tal de programar-la [2], [5].
- **Desenvolupament del codi i resultats:** S'explica detalladament les connexions a fer en cada prova, el codi implementat pel seu correcte funcionament, així com els resultats gràfics amb el seu anàlisi elèctric i l'objectiu de cada mesura per a progressar.
- **Conclusions i línies futures:** Recull les conclusions generals del projecte, valora el grau de compliment dels objectius fixats i proposa futures millores o ampliacions.

2. Marc teòric

2.1 Fonaments d'instrumentació de mesura elèctrica

Per poder dur a terme les diverses automatitzacions de processos de caracterització elèctrica de dispositius microelectrònics, primerament cal entendre quins són els elements d'instrumentació necessaris i els tests que es realitzaran. En aquest entorn de mesura, l'element central és l'analitzador de paràmetres semiconductors (SPA), el qual substitueix les fonts d'alimentació i els multímetres convencionals per unitats integrades d'alt rendiment [7]. D'altra banda, la integració de la matriu de connexions elèctriques en el banc de proves, que actua purament com un element encaminador de senyals entre l'SPA i el DUT, es detallaran en la descripció del sistema experimental, ja que el seu funcionament no altera els principis fonamentals de la mesura instrumental aquí exposats, però sí que és un element essencial en l'automatització.

2.1.1 SPA: Unitats de Font i Mesura (SMU)

Tot i que es parlarà més en detall de les característiques del SPA i SMUs utilitzats en la descripció del *hardware*, cal tenir clar que els SMUs el cor operatiu de qualsevol SPA, són les unitats de font i mesura. A diferència dels instruments de laboratori clàssics, on la generació de senyal i l'adquisició es realitzen mitjançant equips independents, un SMU és un instrument modular bidireccional capaç d'aplicar voltatge o corrent i, simultàniament, mesurar corrent o voltatge, respectivament, sobre el dispositiu sota assaig (DUT) [9].

El principal avantatge d'un SMU resideix en el seu bucle de realimentació intern i el disseny del seu amplificador de potència operacional, el qual commuta dinàmicament entre dos modes principals d'operació [10]:

- **Mode V-force / I-sense:** L'instrument actua com una font de tensió de baixa impedància i mesura el corrent que circula pel canal.
- **Mode I-force / V-sense:** L'instrument opera com una font de corrent de molt alta impedància i registra la caiguda de potencial resultant als terminals de la mostra.

A més, els SMU incorporen circuits limitadors de corrent o de compliança (*compliance*). Aquest paràmetre, configurable per programari, estableix un nivell màxim de corrent o voltatge permès durant l'assaig. Si el dispositiu sota estudi experimenta un corrent major a l'establert, l'SMU commuta el seu mode de funcionament en una fracció de mil·lisegon per limitar el corrent [10].

2.1.2 Soroll instrumental

La mesures d'aquest tipus d'elements és ultra-baixa, per tant, serà molt rellevant que el nivell de soroll en la instrumentació sigui extremadament baix en tot el sistema experimental. Quan es mesuren valors en l'escala dels picoampers [10^{-12}] o femtoampers [10^{-15}], els cables coaxials estàndard esdevenen un dels principals factors de degradació a causa dels corrents de fuga originats pel material dielèctric [11].

Per mitigar aquesta interferència, la connexió física amb l'SPA es realitza mitjançant cables i connectors triaxials (figura 2) [11].

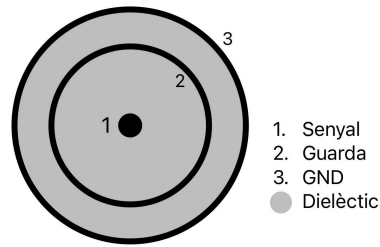


Figura 2: Estructura cable triaxial.

A diferència d'un cable coaxial ordinari, el cable triaxial (figura 2) afegeix una segona malla de blindatge interna denominada malla de guarda (*guard*). Aquest conductor intern es manté al mateix potencial elèctric que el nucli central, per on circula el senyal de mesura, gràcies a un seguidor de tensió de la SMU. Com que pràcticament no hi ha diferència de potencial entre el nucli i la guarda, no es genera corrent de fuga a través de l'aïllament intern. Això permet que les interferències externes es desviïn cap a la malla de massa exterior, protegint i mantenint net el senyal feble procedent de la mostra [3], [11].

2.2 Protocols de test elèctric i fiabilitat

L'avaluació de la fiabilitat del comportament elèctric dels dispositius es realitza mitjançant protocols d'assaig dissenyats per sotmetre el DUT a condicions controlades d'estrès elèctric. L'automatització d'aquests protocols mitjançant programari requereix parametritzar tant les variables temporals com les de magnitud que la unitat SMU aplicarà a la mostra. Això és indispensable per controlar la seva degradació progressiva en temps real [1].

2.2.1 Escombrats en rampa de voltatge (RVS)

Un dels primers tests que es fan als dispositius és un escombrat en rampa de voltatge, o també anomenat RVS (*Ramp Voltage Stress*) [1]. Es tracta d'un assaig de caracterització utilitzat per determinar alguns paràmetres del DUT i identificar les seves regions de conducció [12].

Per a la correcta programació d'un assaig RVS s'han de tenir en compte tres paràmetres essencials [9]:

- **Voltatge inicial i final:** Determinen la finestra de tensions de l'assaig, establint-les acord a què s'estigui estudiant i al DUT.
- **Pas de voltatge (*step*):** És l'increment de tensió entre cada esglaó de la rampa. Cal seleccionar un pas adequat a l'aplicació, ja que un pas massa gran redueix la resolució de la corba, però un pas massa estret incrementa dràsticament el temps de test i sotmet la mostra a un estrès acumulat no desitjat.
- **Temps de retard per esglaó (*delay time*):** És la pausa que fa la SMU a cada pas de la rampa abans d'efectuar la lectura. Quan el voltatge puja bruscament d'un esglaó al següent, es genera un corrent transitori de desplaçament. Aquest corrent és un artefacte de la mesura i no reflecteix el comportament real del DUT. El *delay time* garanteix que aquest pic transitori s'hagi extingit majoritàriament, assegurant que l'SPA mesura exclusivament el corrent del dispositiu sota assaig (DUT) [3], [9], [11]. Aquest paràmetre, és l'únic que no es configura des del codi, ho fa el SPA de manera autònoma.

Un exemple d'aquest tipus d'assaig, seria una corba I-V, com la que podem trobar a la figura 3, en aquest cas es tracta d'una resistència de $1k\Omega$.

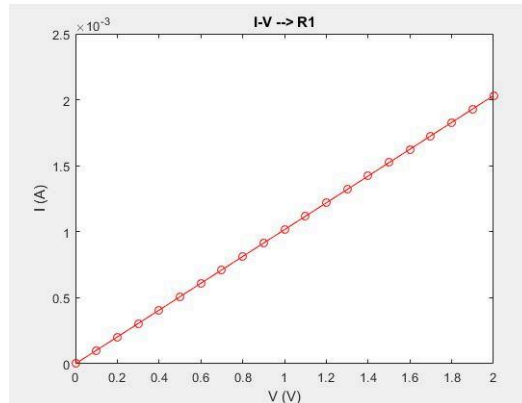


Figura 3: Exemple d'un test RVS

2.2.2 Assajos d'estrès accelerat (MSM (Measurement Stress Measurement))

Per estudiar els mecanismes de degradació a llarg termini de manera eficient, s'utilitzen els assajos d'estrès accelerat per temps. En condicions d'operació nominals, un dispositiu pot trigar anys a fallar, en canvi, injectant un estrès elèctric constant i sever, es forcen els mecanismes físics de fallada en una finestra de temps mesurable al laboratori. Un cop finalitzat l'estrès, es mesuren les seves característiques principals per veure com han variat respecte les inicials per poder fer el posterior estudi estadístic.

Depenent de la magnitud elèctrica que es mantingui constant durant l'assaig, es distingeixen dos mètodes fonamentals:

- **CVS (Constant Voltage Stress):** En aquest mode, la SMU fixa un voltatge constant mentre monitoritza l'evolució del corrent al llarg del temps. Durant l'assaig, la degradació progressiva del dispositiu provoca un increment del corrent de fuga, que evoluciona gradualment fins a la fallada definitiva [1].
- **CCS (Constant Current Stress):** En aquest protocol, la SMU imposa un corrent constant i mesura simultàniament el voltatge necessari per mantenir-lo. A mesura que avança la degradació del dispositiu, les seves propietats elèctriques varien, fet que obliga el sistema a modificar el voltatge aplicat per conservar el corrent fixat. El registre temporal d'aquest voltatge permet seguir l'evolució del procés de degradació [1].

Durant l'execució del projecte es parlaran de dos tipus d'estrès per als transistors (DUTs que es faran servir), que són el BTI (*Bias Temperature Instability*) i el HCI (*Hot-Carrier Injection*). El BTI d'una banda, estressarà únicament la porta, i per tant s'haurà de mesurar la degradació al corrent de porta (I_g). D'altra banda, el HCI, aplicarà una tensió d'estrès tant en la porta com en el drenador i, per tant, la corrent d'estudi per visualitzar la degradació serà la del drenador (I_d).

2.3 Comunicació mitjançant bus GPIB

L'automatització d'un banc de proves elèctriques requereix un canal de comunicació robust, i d'alta velocitat que interconnecti l'ordinador de control amb l'analitzador de paràmetres semiconductors (SPA). En la instrumentació de laboratori, l'estàndard és el bus GPIB (*General Purpose Interface Bus*) [5].

El bus GPIB, normalitzat com a estàndard IEEE-488, és una interfície de comunicació digital en paral·lel dissenyada per al control d'instruments de mesura. Utilitza un bus de 24 línies físiques dividides en línies de dades (pins del 1 al 4 i del 13 al 16), sincronització o *handshaking* (pins del 6 al 8), gestió de la interfície (pins 5, del 9 al 11 i el 17), terra i retorns (pins del 18 al 24) i de blindatge (pin 12) (figura 4) [5].

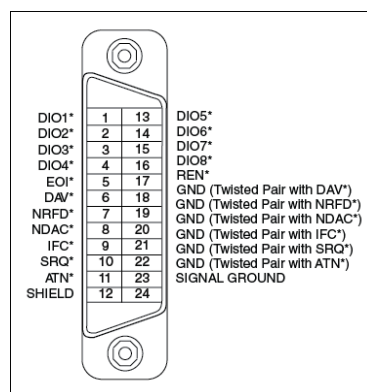


Figura 4: Ports del bus GPIB [13].

Una de les principals característiques del GPIB és la seva capacitat per connectar diversos instruments en un mateix bus, cadascun identificat mitjançant una adreça única. Aquest esquema permet que un ordinador actuï com a controlador central, enviant ordres als equips i adquirint-ne les dades de manera coordinada [9].

La transferència d'informació es realitza mitjançant un mecanisme de sincronització (*handshaking*) que coordina l'enviament i la recepció de dades entre els diferents dispositius del bus [5]. Gràcies a aquest esquema, el controlador pot enviar ordres de configuració, iniciar mesures i recuperar-ne els resultats de manera seqüencial i fiable. Aquesta capacitat és especialment útil en entorns d'automatització experimental, on programes desenvolupats en MATLAB poden controlar completament la instrumentació sense intervenció de l'usuari.

2.4 Llenguatge de comandes FLEX

Mentre que la majoria d'instruments moderns utilitzen el protocol SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*), basat en cadenes de text llargues, els analitzadors de paràmetres clàssics (com el que es farà servir) poden utilitzar el llenguatge de comandes FLEX [7], tot i que tindrem algunes comandes en SCPI [9].

El llenguatge FLEX és una sintaxi de comandes compactes de baix nivell i alt rendiment, dissenyada específicament per a entorns on el temps de transmissió pel bus de comunicació és crític. Les ordres es componen de codis curts de dues o tres lletres seguits de paràmetres separats per comes, reduint dràsticament el nombre de bytes transmesos.

Dins la lògica de control implementada, les comandes FLEX utilitzades es poden agrupar en tres blocs funcionals:

1. **Comandes de configuració del sistema:** inclouen la inicialització del mode FLEX amb `US`, la definició del format de transmissió de dades en ASCII mitjançant `FMT`, i l'activació dels canals de mesura o SMUs amb `CN`, així com la selecció de canals emprats amb la matriu. Aquestes instruccions estableixen l'estat operatiu inicial de l'instrument abans de qualsevol adquisició.
2. **Comandes d'excitació del dispositiu:** la instrucció `DV` (*Define Voltage*) permet imposar el punt de polarització del dispositiu sota prova, especificant al canal actiu, el valor de tensió aplicada i el límit de corrent (*compliance*), figura 5.1. O `DI` (*Define Current*) que fa el mateix però aquest cas amb corrent. Aquesta comanda constitueix el mecanisme principal de control de l'estímul elèctric aplicat durant l'assaig.

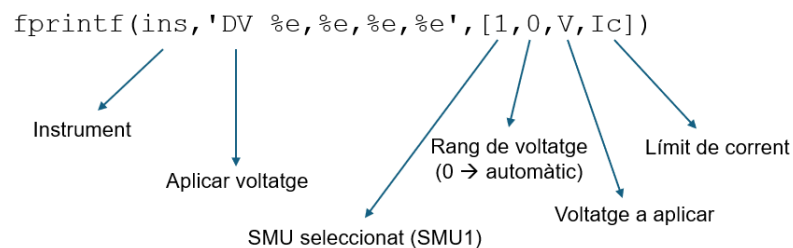


Figura 5.1: Exemple d'instrucció d'excitació del dispositiu.

3. **Comandes d'adquisició de dades:** la instrucció `TI?` (*Take Current*) sol·licita la lectura instantània del corrent mesurat per cada SMU actiu, figura 5.2. Aquestes consultes permeten construir la resposta elèctrica del dispositiu en funció de les condicions de polarització aplicades. O en cas contrari `TV?` (*Take Voltage*) que és per sol·licitar la lectura del voltatge.

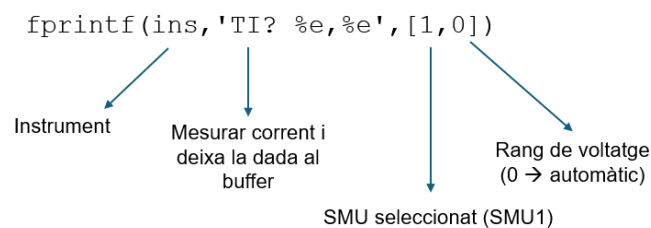


Figura 5.2: Exemple d'instrucció d'adquisició de dades.

L'ús d'aquesta sintaxi compacta permet executar seqüències de mesura de manera eficient, mantenint una comunicació ràpida i estable amb l'instrument.

3. Sistema experimental (Hardware)

3.1 Descripció general del sistema

Per tal de dur a terme les diferents mesures, el sistema està format per quatre elements interconnectats entre si, com es pot veure en l'esquema de la figura 6. En primer lloc, es troba l'ordinador (PC), des d'on es controlen els diferents instruments i on s'emmagatzemen les dades adquirides. En segon lloc, connectat a l'ordinador, hi ha l'SPA, que, com ja s'ha esmentat anteriorment, és el dispositiu encarregat de generar i adquirir els senyals. A continuació, es disposa la matriu de connexions, que permet la caracterització de diversos dispositius mitjançant un únic programa de control. Finalment, es troba el dispositiu sota prova (DUT), el qual és objecte de caracterització.

Aquest sistema permet centralitzar el control de tots els equips, automatitzar la seqüència de mesures i caracteritzar múltiples dispositius de manera eficient i repetible, reduint tant el temps d'assaig com la intervenció de l'usuari.

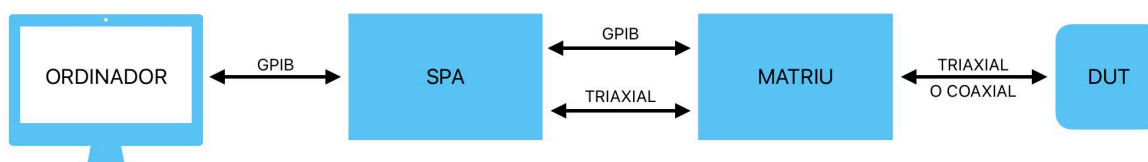


Figura 6: Esquema muntatge del hardware.

En aquesta mateixa figura 6, també podem observar el connexionat principal entre els diferents dispositius, aquí veiem l'esquema bàsic però entrarem més en detall en els següents punts.

3.2 SPA (Semiconductor Parameter Analyzer)

L'instrument analògic principal utilitzat en aquest banc experimental és l'analitzador de paràmetres, com s'ha esmentat anteriorment, en concret es treballarà amb el model Agilent 4156C (figura 7.1) [7].



Figura 7.1: Agilent 4156C precision semiconductor parameter analyzer [14].

Aquest conté quatre unitats de font i mesura (SMU) que actuen com a generadors i com a mesuradors de manera simultània. Si parlem de les seves característiques també cal esmentar la seva resolució i rangs d'operació, en quant a la resolució pot arribar a 1 fA pel que fa al corrent, per al voltatge estem parlant de $2\mu\text{V}$. D'altra banda, els rangs d'operació màxims són $\pm 100\text{ mA}$ per al corrent i $\pm 100\text{ V}$ per a la tensió. També cal esmentar que aquest dispositiu permet fixar un límit de corrent per *hardware* per protegir el DUT [7].

Si ens fixem en els seus terminals i connexions (figura 7.2), veiem que per connectar els quatre SMUs fem servir els connectors situats al centre de la part a l'esquerra, un per cada SMU. Per cada SMU tenim dos terminals el *force* (el que està connectat) i el *sence*, tenir ambdós connectats serveix per a

realitzar mesures, eliminant l'error causat per la resistència dels cables per tal d'assegurar una precisió més elevada de mesura. Per a l'aplicació del treball no serà rellevant aplicar també el *sence*, ja que el soroll serà menyspreable per a les mesures realitzades.

D'altra banda, també cal tenir en compte com connectem el bus GPIB (direcció 2 per al SPA), el seu connector està situat a la part inferior central, com es veu a la figura 7.2, hi ha dos elements connectats, un anirà l'ordinador (connectat per USB) i l'altre a la matriu de commutació (mitjançant el connector GPIB). D'aquesta manera ja tindrem interconnectats per aquest bus els tres elements (ordinador, SPA i matriu), sense necessitat de connectar directament l'ordinador a la matriu. Per tal de connectar a l'ordinador el SPA, fem servir una targeta d'adquisició de dades de National Instruments, serà important conèixer de l'element que es tracta per tal de que el programari identifiqui els dispositius.

Per acabar, a la dreta del tot trobem l'alimentació de l'instrument, d'aquesta manera estaria llest el connexionat de l'SPA.

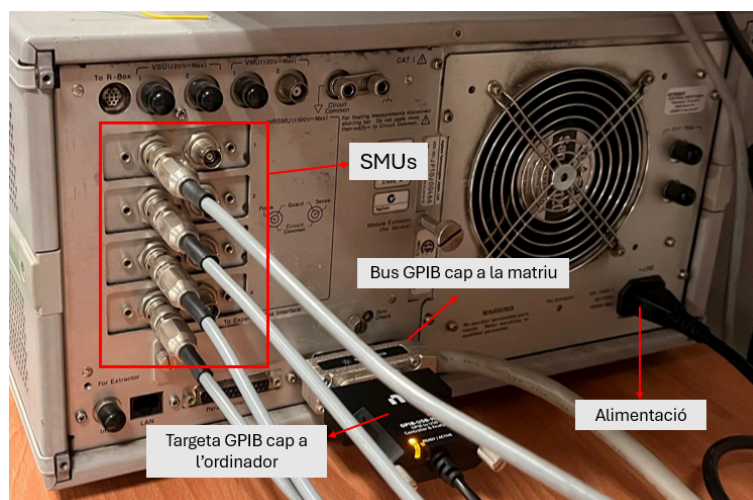


Figura 7.2: Agilent 4156C precision semiconductor parameter analyzer, amb connexions.

3.3 Matriu de commutació

La matriu de commutació E5250A (figura 8.1), és el mòdul encarregat d'encaminar de forma automàtica els senyals de l'SPA cap als terminals dels DUTs sense haver de canviar les connexions manualment [6].

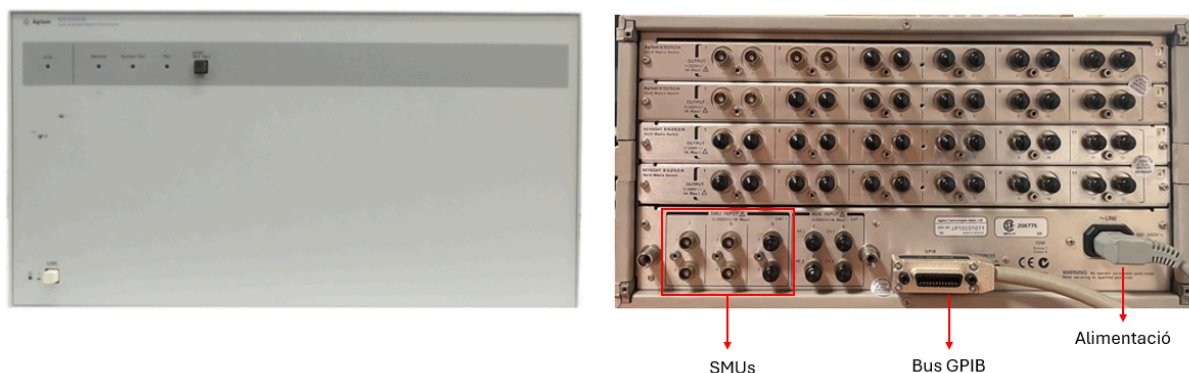


Figura 8.1: E5250A Low Leakage Switch Mainframe [15].

Concretament, el model del que es disposa al laboratori, figura 8.1, a la part superior té quatre mòduls o targetes *d'output* (figura 8.2), és a dir podem connectar fins a 48 terminals dirigits a DUTs. La part inferior que és on es troben les entrades, a l'esquerra es connecten els SMUs, al centre connectem el connector GPIB (direcció 22 per a la matriu) provinent del SPA i finalment a la dreta trobem l'alimentació.



Figura 8.2: E5252A Output Ports [6].

Per a comprendre el funcionament elèctric del sistema de commutació, la figura 8.3 representa el diagrama de nodes de les targetes de tipus matriu E5252A [6]. L'instrument disposa d'un disseny de malla on les línies horitzontals (corresponents a les entrades de senyal de les unitats SMU) travessen perpendicularment les línies verticals de sortida que es dirigeixen cap als diferents terminals dels mòduls *d'output* (DUTs), cada encreuament es tracta d'un interruptor que pot estar obert o tancat.

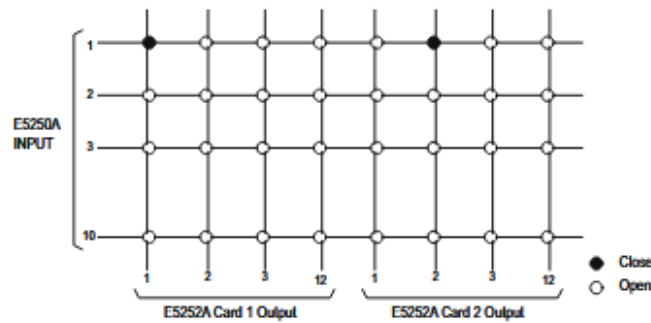


Figura 8.3: Diagrama de nodes de la matriu per a les targetes de sortida [6].

Com s'observa a la figura 8.3, el programari haurà de tenir la capacitat d'actuar selectivament sobre cada relé electromecànic de manera aïllada. Un node en estat actiu (*Close*, representat en negre) estableix la continuïtat òptima per a la transferència de corrent, mentre que un node en estat obert (*Open*, representat en blanc) garanteix un aïllament del node.

Per tal de programar l'estat de cada interruptor, en el manual facilita l'esquema de la figura 8.4, en aquest es veu el direccionament per a 48 sortides i 10 entrades, com és el nostre cas, cada interruptor té assignat un codi.

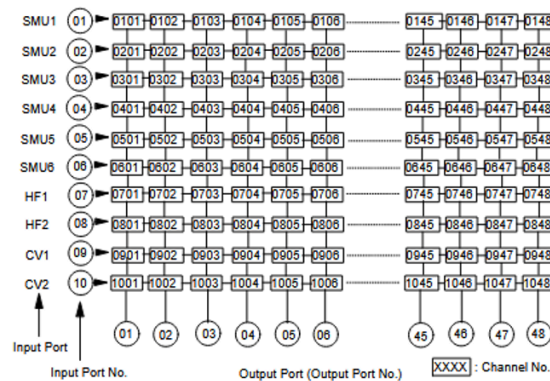


Figura 8.4: Esquema de direccionament de la matriu 10x48 [6].

En aquest cas són 4 dígit. Els dos primers indiquen l'entrada i els dos últims les sortides, les sortides són correlatives, la primera targeta corresponen a les direccions de la 1 a la 12 de dreta a esquerra, les direccions de la 13 a la 24 de la segona i així successivament amb les quatre targes que inclou el nostre equip.

Per fer-ho de manera més senzilla i no haver d'arribar fins a 48, també es pot implementar un codi de cinc dígit on el primer indica la targeta, els 2 següents l'entrada i els 2 últims la sortida, però en indicar la targeta, només caldrà posar un número de l'1 al 12. Per exemple si volem seleccionar la primera sortida de la segona targeta amb l'SMU 1 aleshores tindrem el codi 20101, el mateix, però amb el direccionament de la figura 8.4 seria 0113. Aquestes nomenclatures seran essencials per tal de realitzar correctament el direccionament amb el *software*.

3.4 DUTs (Devices under test)

Per tal de realitzar les diverses etapes del projecte, s'han fet servir diferents dispositius, inicialment senzills per comprovar les connexions més simples i per posteriorment afegir uns més complexes per anar comprovant commutacions i test de fiabilitat. Els dispositius que hem sotmès a proves han estat els següents:

3.4.1 Resistències discretes

Són els components passius més fonamentals en l'electrònica. El seu propòsit principal és oposar-se al pas del corrent elèctric, limitant la seva intensitat i provocant una caiguda de tensió segons la Llei d'Ohm (equació 1). Cada resistència té un valor nominal acord a un codi de colors amb certa tolerància.

$$\text{Equació 1: } V = R \cdot I$$

Per connectar la nostra resistència al sistema ho farem a través del component Keithley 8101-PIV (figura 9). Es tracta d'un dispositiu d'assaig, que consisteix en una caixa metàl·lica amb quatre connectors triaxials, dos connectors SMA i un tancament de pestanya. A l'interior del dispositiu d'assaig hi ha dos suports per a dispositius de 4 pins i dos pistons per a components de dos terminals. Amb això es podrà connectar mitjançant cables triaxials alguns dels dispositius que s'han usat amb l'SPA, evitant l'ús de cables coaxials que són més susceptibles al soroll [16].



Figura 9: Keithley 8101-PIV [17].

3.4.2 Transistors MOSFET 2N7000

Dispositiu de tres terminals accessibles (Porta, Drenador i Font) (figura 10.1) es tracta d'un transistor MOSFET de canal N en mode d'enriquiment dissenyat per a aplicacions de commutació ràpida i amplifacació de baix consum, la principal característica del qual és que es controla per la tensió aplicada a la Porta (*gate*) i al drenador (*drain*).

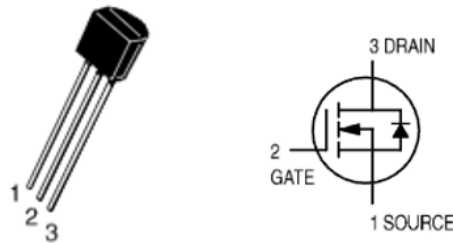


Figura 10.1: Connexions MOSFET.

Aquest presenta una tensió llindar d'entre 0,8V i 3V per començar a conduir (V_{GS}), també cal destacar que pot suportar fins a 60V en borns de drenador-font (V_{DS}) amb un corrent continu (I_D) màxim 200mA, i una baixa resistència en conducció d'entre 1,2 Ω i 5 Ω quan està totalment saturat [18], en la figura 10.2 podem veure a que correspon físicament cada paràmetre, important per poder realitzar posteriorment les diferents proves.

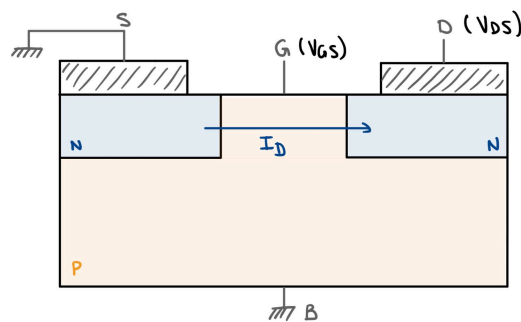


Figura 10.2: Representació física d'un MOSFET

A la figura 10.3, podem veure quin és el comportament elèctric esperat del transistor. Experimentalment, es realitzaran aquestes mateixes gràfiques, $I_D - V_D$ en funció de V_G i $I_D - V_G$, i mitjançant una comparació entre les de la figura 10.3 i les experimentals, verificarem que el programari desenvolupat és correcte.

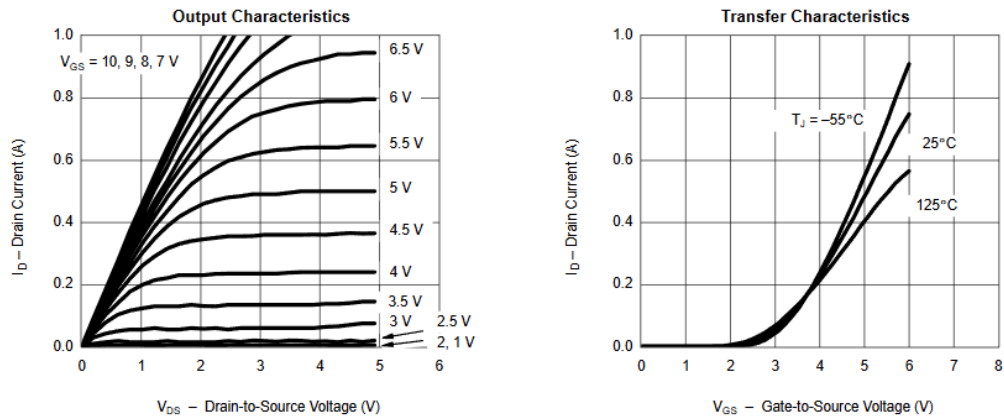


Figura 10.3: Comportament elèctric del transistor 2N7000 [18].

Igual que la resistència aquest dispositiu també es connectarà al SPA per fer les diferents proves mitjançant el dispositiu Keithley 8101-PIV.

3.4.3 Estructura *Crossbar*

Una estructura *crossbar* (o matriu d'interconnexió) és una configuració de xarxa on un conjunt de línies verticals (columnes) s'encreua amb un conjunt de línies horitzontals (files) (figura 11.1).

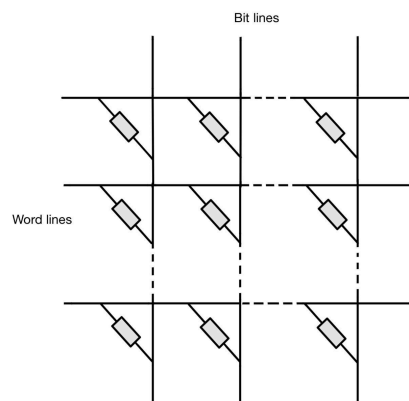


Figura 11.1: Exemple d'estructura *crossbar*.

En cada punt d'intersecció (node) es col·loca un dispositiu que pot actuar com a interruptor, memòria o element d'emmagatzematge (com un memristor, un díode o un transistor), en el nostre cas, com a estructura de test del sistema, tindrem una xarxa de resistències conegudes. (figures 11.2 i 11.3).

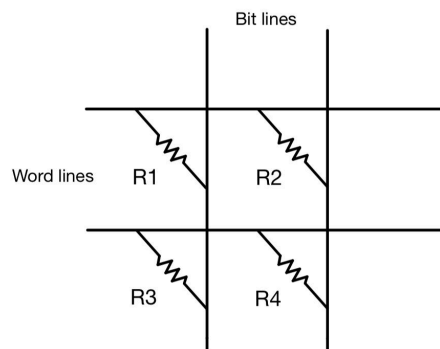


Figura 11.2: Esquema *crossbar* de resistències.

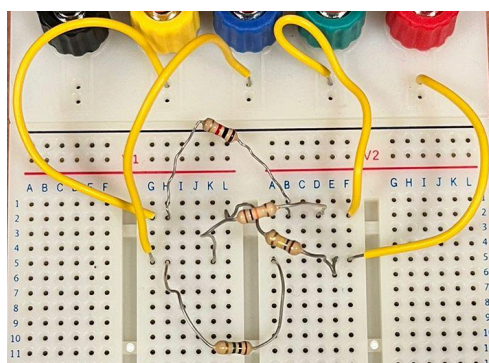


Figura 11.3: Crossbar de resistències.

Si ens fixem en la figura 11.3 i seguim el codi de colors de les resistències veiem que acord amb l'esquema de la figura 11.2, obtenim que $R1=1k\Omega$, $R2=100k\Omega$, $R3=10k\Omega$ i $R4=1M\Omega$, això serà important per analitzar posteriorment si hem fet bé la selecció de canals. Per tal de connectar la *protoboard* amb el circuit d'estudi a la matriu s'utilitzaran cables coaxials amb adaptadors triaxials, ja que no es disposen de cables triaxials capaços de connectar-se a la *protoboard*.

Cal destacar que, tot i que en aquest treball es fa servir una xarxa de resistències lineals i fixes, una de les possibles aplicacions d'aquest tipus d'arquitectures crossbar és la integració de memristors (*memory-resistors*).

Un memristor és un dispositiu passiu de dos terminals la resistència elèctrica del qual no és constant, sinó que depèn de la quantitat de càrrega elèctrica que ha passat prèviament a través d'ell, mantenint aquest valor de forma no volàtil. La similitud fonamental entre una crossbar de resistències convencionals i una de memristors rau en la seva topologia física i geomètrica, ambdues comparteixen la mateixa xarxa de línies creuades que permet adreçar cada node mitjançant la selecció de la fila i la columna corresponents.

La implementació de la xarxa de resistències conegudes és essencial, ja que permet comprovar de forma controlada, lineal i completament segura que tant l'algorisme de programari desenvolupat en MATLAB com el maquinari de la matriu de connexions realitzen la commutació i el camí de rutes correctament.

3.5 Taula de puntes

Per a les últimes mesures per treballar amb un transistor de característiques similars als que es poden estudiar al laboratori en investigació, hem hagut de modificar lleugerament el *hardware*.

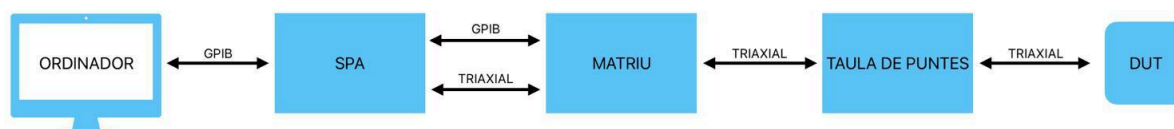


Figura 12: Estructura nou hardware.

En la figura 12, veiem que l'estructura és la mateixa, però s'introdueix la taula de puntes, ja que en tractar amb transistors tan petits és necessari fer-la servir, a més també s'apropa més a l'estructura que es tenia com a objectiu, tot i que no afecti en res al *software*.

La taula de puntes (també anomenada estació de sondes o *probe station*) és un sistema de suport mecànic de precisió utilitzat en els laboratoris de microelectrònica. El seu objectiu principal és actuar com a interfície física entre els dispositius electrònics que es troben gravats en una oblea (*wafer*) o en un xip sense encapsular, i els instruments de mesura elèctrica (com un SPA).

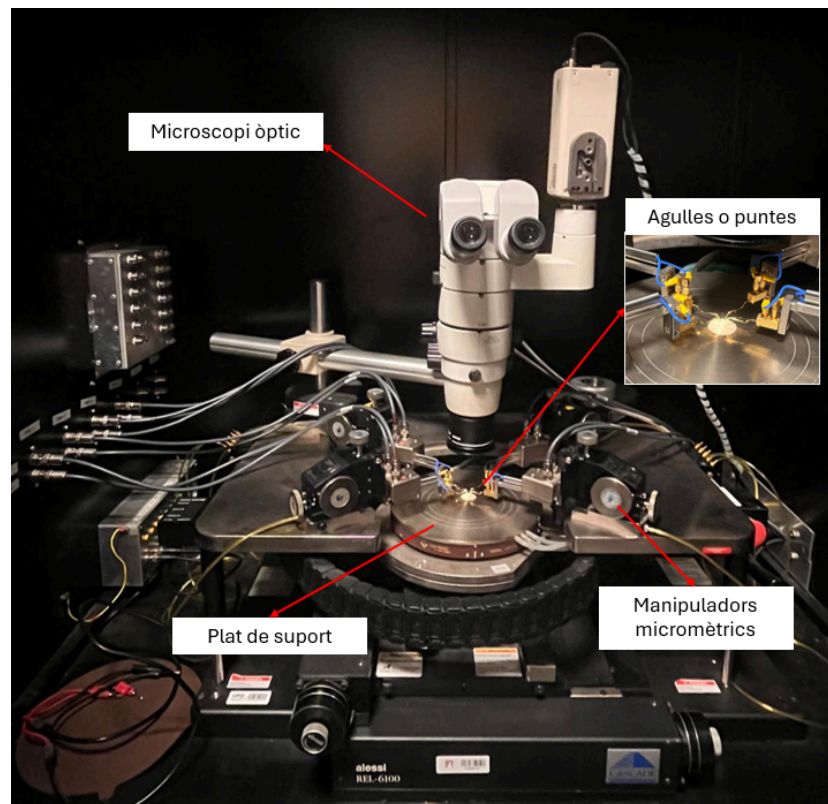


Figura 12.2: Taula de puntes.

Com es pot veure en la figura 12.2, aquesta està composta pel plat de suport (*Chuck*) que es tracta de la base plana on es col·loca la mostra o l'oblea de silici, els manipuladors micromètrics que són els braços mecànics d'alta precisió que es mouen en els eixos X,Y i Z. L'operador els utilitza per moure molt lentament les agulles de mesura fins a situar-les exactament a sobre dels terminals del dispositiu sota estudi. També tenim les agulles o puntes (*probes*), són agulles extremadament fines fetes de materials altament conductors. Aquestes puntes són les que fan el contacte directe sobre els *pads* del dispositiu i estableixen connexió amb els cables triaxials. Finalment tenim el microscopi òptic, com que les estructures sota estudi es troben en escala microscòpica, l'estació compta amb un microscopi de gran augment per poder guiar visualment les agulles fins al seu destí.

3.5.1. Transistors de l'oblea SNOW

SNOW és una oblea de prova (*test wafer*) que integra diferents estructures de test per avaluar la fiabilitat, la física de semiconductors i els mecanismes de degradació en tecnologies avançades d'òxid de porta. Entre els dispositius que incorpora, s'hi troben transistors MOSFET de canal N (nMOS) dissenyats amb diferents longituds de canal.

Per als nostres test farem servir els transistors N1 i N2. El transistor N1, té una amplada de $10\mu\text{m}$ i una longitud de 10nm , és a dir que es tracta d'un transistor de canal curt, factor que serà identificatiu del transistor i serà visible en els diferents tests realitzats. D'altra banda, el transistor N2, té una

amplada de $10\mu\text{m}$ i una longitud de 120nm , el qual tindrà un canal més llarg i comportament més semblant als que s'estudien de manera teòrica a les aules.

Aquests transistors estan fabricats amb tecnologia FDSOI (*Fully Depleted Silicon-On-Insulator*) i presenten una arquitectura *nanowire Ω -gate* (figura 12.3), en la qual la porta envolta el canal per tres costats, millorant el control electrostàtic respecte als MOSFETs plans convencionals. A més, utilitzen un dielèctric de porta high-k (HfSiON/TiN) amb un gruix equivalent d'òxid d'aproximadament $1,3\text{nm}$, fet que permet reduir les corrents de fuga mantenint una elevada capacitat de porta. El canal se situa sobre una capa de silici aïllada mitjançant un *Buried Oxide* (BOX) d'uns 145 nm de gruix, característica pròpia de la tecnologia SOI (*Silicon-On-Insulator*), que redueix les capacitats paràsites i millora el rendiment del dispositiu [19].

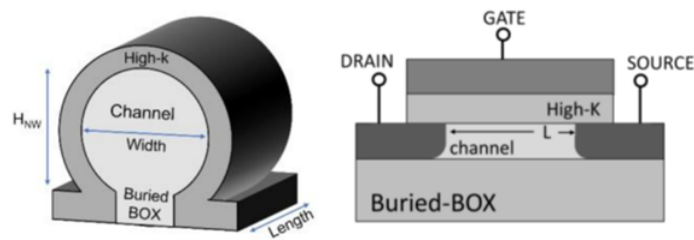


Figura 12.3: Estructura transistor de l'oblea SNOW [19].

4. Desenvolupament del codi i resultats

Com s'ha esmentat anteriorment, per tal de realitzar les diverses proves i controlar la instrumentació de mesura, farem servir el programari MATLAB. Es tracta d'un entorn de programació i càlcul numèric àmpliament utilitzat en l'àmbit científic i d'enginyeria. Ofereix eines per al processament i l'anàlisi de dades, la visualització de resultats i la comunicació amb equips d'instrumentació i mesura. En aquest treball, s'usa principalment com a eina de control d'instruments i el tractament de les dades obtingudes durant els assaigs.

Per a arribar a l'estructura d'instrumentació desitjada, serà essencial anar pas per pas i comprovar que tot funciona adequadament, per evitar possibles complicacions un cop tot el sistema estigui muntat. Així doncs, la primera tasca consisteix a connectar l'ordinador amb l'analitzador de paràmetres.

4.1. Connexió ordinador - SPA: Test RVS d'una resistència

Per tal de comprovar aquesta primera connexió i controlar correctament l'SPA abans d'introduir la matriu, al final, com a DUT hi hem posat únicament la resistència de $1k\Omega$ dins la caixa figura 13. En una banda connectarem l'SMU 1 i a l'altre l'SMU 2, en aquest cas és indiferent per on introduïm senyal en tractar-se d'una resistència.

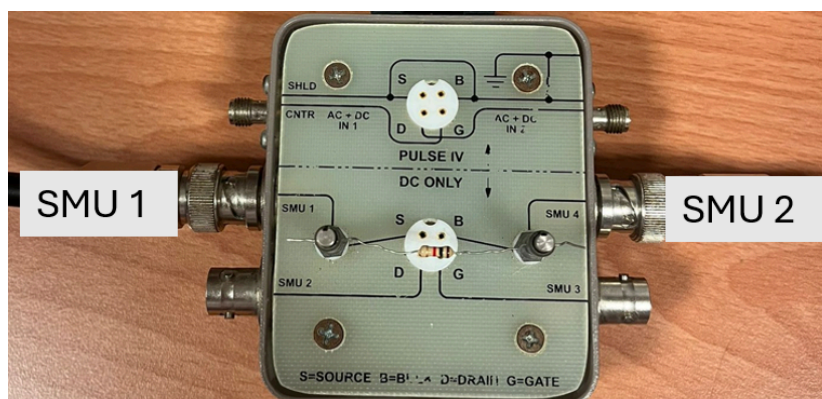


Figura 13: Connexionat de la resistència.

Així doncs, el primer que hem de fer és connectar els diferents instruments. Connectem l'ordinador i l'SPA a través del bus GPIB. Sabem que el SPA té com a adreça el número 2 i veiem a través de l'eina *tmtool* de MATLAB que s'identifica correctament (figura 14). El *tmtool* és una interfície gràfica d'usuari (GUI) integrada en MATLAB, dissenyada per a configurar, controlar i adquirir dades d'instruments de prova i mesura externs sense necessitat de controlar-ho a través de codi.

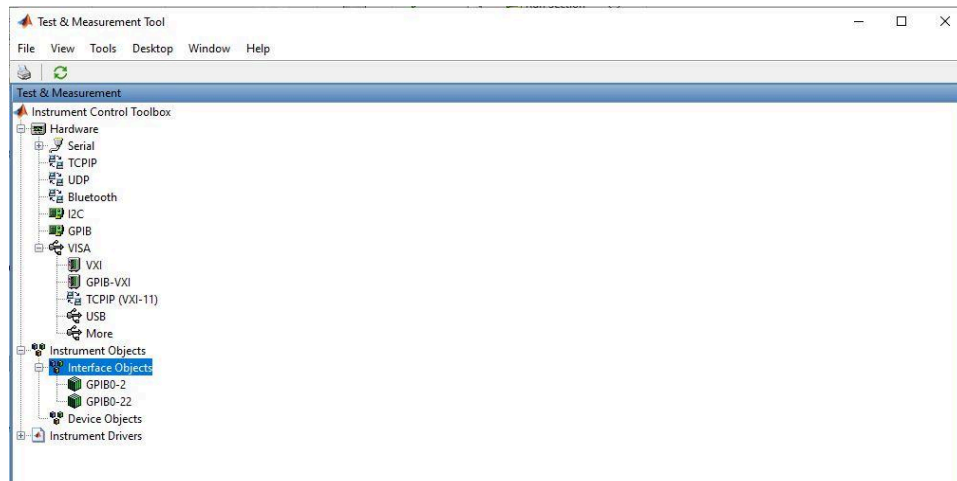


Figura 14: tmtool.

Un cop veiem que tenim connexió, procedim amb la programació. Primerament, cal establir els valors de tensió que introduïrem a la resistència. En voler comprovar únicament que es compleix la llei d'Ohm (equació 1) serà suficient en fer un escombrat de tensió (RVS) de 0 a 2 volts en passos de 0,1V. Així doncs, el primer que cal fer és generar uns vectors amb els voltatges a introduir en els dos terminals de la resistència (un amb la rampa i l'altre a 0V, ja que és necessari tenir tots els terminals connectats a l'SPA), ambdós vectors conformaran una matriu. Per generar aquests vectors, es pot realitzar de dues maneres. Primerament, a través de codi (figura 15.1) i seguidament a través de l'exportació d'un full d'excel amb els valors desitjats, on amb el MATLAB únicament s'han de guardar els valors de la manera adequada (figura 15.2). Ambdues opcions són vàlides, i es faran servir de manera indiferent.

```
Vini=0;
Vmax=2;
Vstep=0.1;

N=1+(Vmax-Vini)/(Vstep);

for i=1:N
    if i==1
        Vapp(i,1)=Vini;
        Vapp(i,2)=0;
    end
    if i>=2
        Vapp(i,1)=Vapp(i-1,1)+Vstep;
        Vapp(i,2)=0;
    end
end

save('VAPP','Vapp');
```

Figura 15.1: Generació vectors de tensió d'entrada RVS mitjançant codi.

```
Vapp2=xlsread('Vapp2.xlsx');

save('VAPP2','Vapp2');
```

Figura 15.2: Llegir i guardar un full d'excel amb els vectors de tensió RVS.

Un cop tenim la matriu guardada amb els vectors d'entrada, podem començar amb la programació del SPA per a l'assaig RVS per a la resistència (figura 16).

```

close all
clear all

ins=gpiib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

load('VAPP2')
n=length(Vapp2(:,1));
m=length(Vapp2(1,:));

Ic=1E-1;

for i=1:n
    i
    Vsamp(i,:)=Vapp2(i,:);
    V0=0;
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,2),Ic])

    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
    Isamp(i,1)=fscanf(ins, '%f');

    pause(0.1)
    figure(1)
    hold on
    plot(Vsamp(i,1),Isamp(i,1),'bo');
    hold off
end

fclose(ins) %cierra la conexi3n con el instrumento

```

Figura 16: Codi per implementar l'RVS per a la resistència.

A la figura 16, inicialment amb les comandes `close all` i `clear all` es neteja la memòria i tanca totes les gràfiques obertes per començar des de zero. Seguidament amb la comanda `gpiib('ni', 0, 2)`, es configura la connexió GPIB utilitzant la targeta de National Instruments indicat com 'ni', amb l'adreça de l'instrument que és coneguda, la 2. Després la comanda `fopen(ins)`, obre el canal de comunicació i la comanda `fprintf(ins, IDN?)`, demana el model i marca de l'instrument i la comanda `fscanf(ins)` llegeix la identificació i l'envia per pantalla, comprovant d'aquesta manera que es tracta de la connexió desitjada.

A continuació la comanda `US`, activa el conjunt de comandes en format FLEX. Després la `FMT %e , 2` configura l'instrument perquè retorni les dades numèriques en format ASCII. I per acabar la configuració comuna per al SPA, activem els canals del SMU de l'instrument mitjançant la comanda `CN ... [1, 2, 3, 4]`, que són els que estaran connectats físicament. En aquest cas els activem tots per si de cas, però realment no caldria. Únicament amb l'SMU 1 i el 2 ens serviria.

A partir d'aquí ja tenim la configuració comuna per l'SPA, i comencem amb la nostra aplicació concreta, la de la resistència.

Mitjançant la comanda `load ('VAPP2')`, descarreguem les dades que havíem generat anteriorment, en aquest cas són els valors de la figura 17, important conèixer com estan disposades les dades per després introduir els valors al SPA de manera adient i pel canal correcte.

	1	2
1	0	0
2	0.1000	0
3	0.2000	0
4	0.3000	0
5	0.4000	0
6	0.5000	0
7	0.6000	0
8	0.7000	0
9	0.8000	0
10	0.9000	0
11	1.0000	0
12	1.1000	0
13	1.2000	0
14	1.3000	0
15	1.4000	0
16	1.5000	0
17	1.6000	0
18	1.7000	0
19	1.8000	0
20	1.9000	0
21	2.0000	0

Figura 17: Dades fixer VAPP2.

Si continuem analitzant el codi de la figura 16, veiem que el següent que es fa és calcular la longitud i l'amplitud de la matriu, per tal de després recórrer-la fins al punt adequat. D'aquesta manera encara que canviem l'arxiu carregat, el codi s'adaptaria a la longitud del nou arxiu.

Seguidament, especifiquem el corrent màxim, fem servir una variable intermèdia per guardar els valors aplicats i iniciem el bucle per tal de mesurar. Amb la comanda `fprintf(ins, 'DV %e, %e, %e, %e', [1, 0, Vsamp(i, 1), Ic])`, el que es fa és introduir el voltatge del vector `Vsamp`, en concret la primera columna (la rampa) al SMU 1. Aquí veiem el terme `Ic`, que és el limitador de corrent, prèviament declarat. D'altra banda, en la següent comanda s'introdueix la segona columna del vector `Vsamp` (els zeros) al SMU 2.

A continuació, amb la comanda `fscanf(ins, 'TI? %e, %e', [1, 0])`, llegim el corrent al SMU 1, i amb la següent comanda `Isamp(i, 1) = fscanf(ins, '%f')`, guardem el valor al vector `Isamp`. Finalment, plotegem el punt que hem extret (`Vsamp(i, 1)` i `Isamp(i, 1)`), generant així el gràfic I-V.

Un cop el bucle ha recorregut tot el vector que se li ha facilitat, és a dir ha arribat al valor `n`, executa la comanda `fclose(ins)` per tancar la connexió amb l'instrument. A través d'aquest codi obtenim el gràfic de la figura 18.

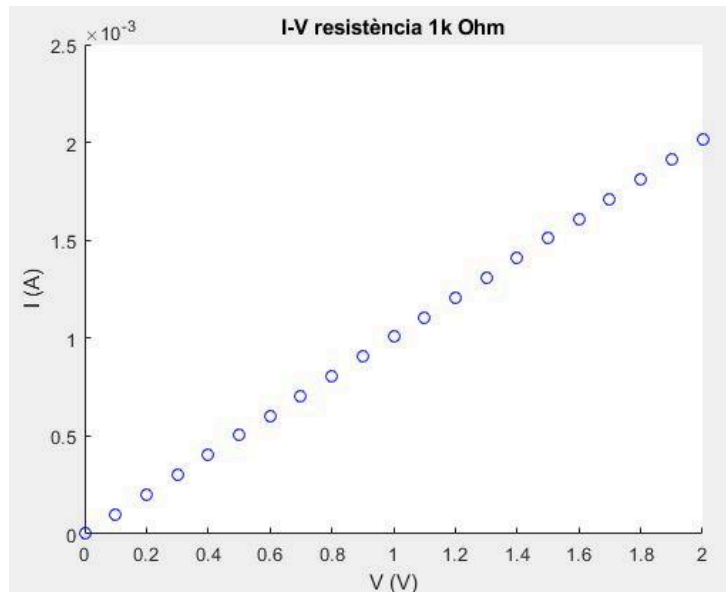


Figura 18: RVS d'una resistència de 1kΩ.

S'aprecia que el resultat que donat és correcte, ja es tracta d'una recta, aquest comportament lineal correspon a la perfecció amb la llei d'Ohm (equació 1). Seguint aquesta mateixa llei, agafant qualsevol punt en la gràfica, podem comprovar el valor de la resistència és l'esperat (equació 2), comprovant d'aquesta manera el correcte funcionament de la connexió SPA i ordinador, així com la configuració i comandes bàsiques per controlar SPA.

$$\text{Equació 2:} \quad R = \frac{V}{I} = \frac{2}{2 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^3 \Omega = 1k\Omega$$

4.2. Connexió ordinador - SPA: Test d'un transistor

A través d'aquest codi tan senzill, es pot extrapolar a test més complexes i a més SMUs de manera simultànea. Per tant, el següent objectiu és realitzar una sèrie de proves a un transistor de tres terminals, per continuar treballant amb l'SPA i familiaritzar-se amb la programació. Es volen realitzar dos gràfics per caracteritzar aquest transistor: un gràfic I_d - V_g i un I_d - V_d en funció de V_g

Igual que en l'apartat anterior, s'ha de tenir clar la disposició del hardware. Així doncs, farem servir també la caixa de la figura 19, i hi posarem el nostre dispositiu. Connectarem els terminals acord a la figura 15, el terminal *gate* (G) al SMU 1, el terminal *source* (S) al SMU 2 i el terminal *drain* (D) al SMU 4.

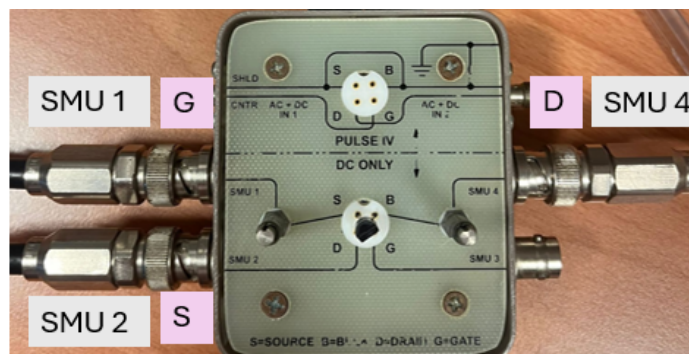


Figura 19: Esquema connexions SMU per al transistor.

Coneixent aquests paràmetres podem començar amb la programació. Igual que abans el primer que hem de fer és generar els voltatges introduïts al SMU i posteriorment començar amb la programació per a cada gràfic, que serà similar a la programació exposada canviant els paràmetres a introduir.

4.2.1. Id - Vg

Igual que abans extraurem les dades d'un *excel* a MATLAB de la mateixa manera que hem explicat anteriorment. En aquest cas a l'*excel* tindrem la primera columna a 0V, per al *source*, la segona columna constant a 0.5V per al *drain* i la tercera columna amb un voltatge de 0 a 2V amb *steps* de 0.05V per al *gate*.

Ara procedim amb la programació, que es pot trobar a l'annex A. Igual que abans obrim la comunicació amb l'SPA i configurem els paràmetres pertinents. Després carreguem la matriu amb els voltatges a introduir i es calcula la longitud d'aquesta per tal de realitzar correctament el bucle.

Dins el bucle procedim igual que abans, però aquest cas apliquem tensió als tres terminals, comprovant que introduïm a cada SMU el que correspon. A través d'això obtenim el resultat de la figura 20.

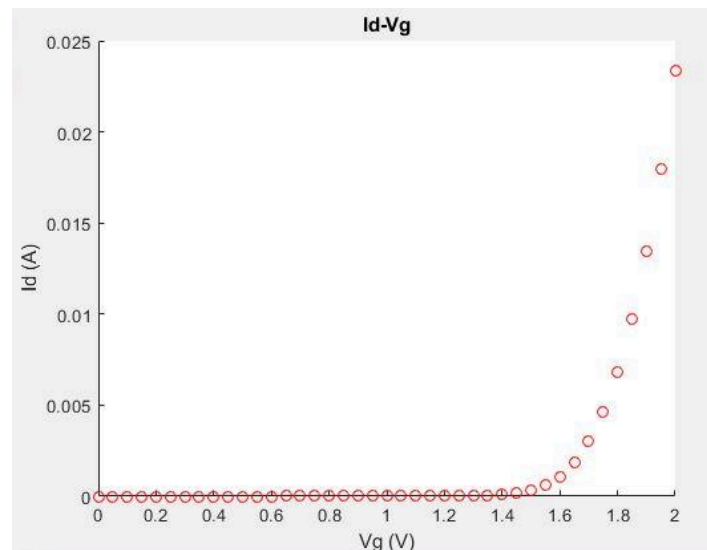


Figura 20: Gràfic Id-Vg.

D'aquesta figura 20, podem dir que la corba d'Id-Vg mostren una clara correspondència amb les especificacions teòriques del fabricant per al MOSFET 2N7000, apartat 3.4.2. S'observa clarament com el dispositiu es troba en estat de tall fins a assolir una tensió de llindar d'aproximadament 1.5V, moment en què el canal condueix i el corrent de drenatge Id comença a créixer de forma quadràtica, confirmant així el funcionament òptim i esperat del transistor.

4.2.2. Id - Vd en funció de Vg.

En aquest cas caldrà canviar els voltatges introduïts, igual que abans al *source* introduïrem 0V, al *drain* introduïrem un voltatge de 0 a 2V en passos de 0,05 i finalment al *gate* introduïm un voltatge de 1,5 a 2V en passos de 0,1V. Per tal de realitzar el codi caldrà afegir un altre bucle per anar variant Vg i dintre d'aquest per a cada Vg un bucle per recórrer Vd (codi de MATLAB al annex B).

Així doncs, s'obté el resultat de la figura 21. Aquest gràfic confirma que el transistor es comporta de forma esperada. Cada línia de color correspon a un valor de Vg diferent, veient-se clarament com un

augment en la tensió de porta desplaça la corba cap amunt, augmentant el corrent de sortida. També s'observa que la forma de les corbes, que primer pugen i després es queden planes, quadra perfectament amb el funcionament teòric esperat per a aquest component.

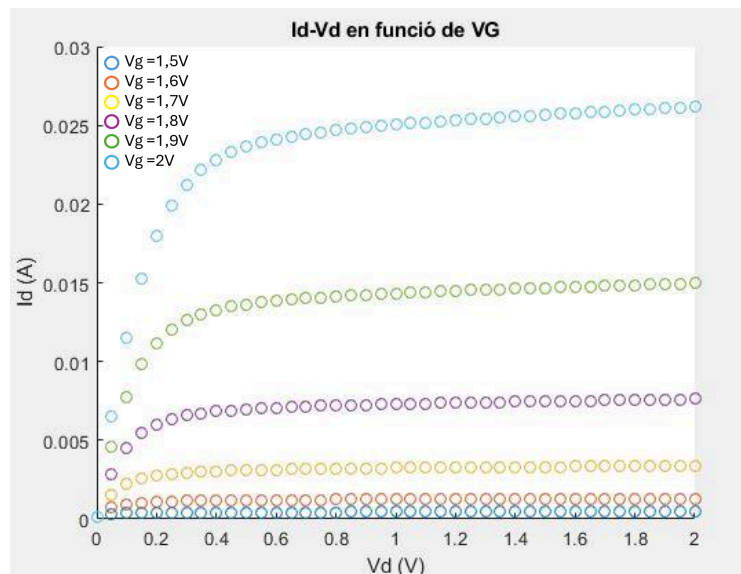


Figura 21: Gràfic I_d - V_d en funció de V_g .

Si comparem aquests dos gràfics amb els de la figura 10.3 on es mostra el comportament elèctric esperat del dispositiu estudiat, veiem que coincideix bastant si ens fixem en la regió d'estudi, ja que a causa de que l'SPA no pot mesurar corrents més elevats, no es pot fer l'escombrat que es fa al *datasheet* del transistor. Tot així, podem confirmar que el test aplicat és correcte i ens dona l'esperat en el rang d'estudi.

Amb aquests dos últims apartats, es demostra que a través de les instruccions bàsiques del codi de la resistència, es poden arribar a generar diversos tests per a més terminals i amb més complexitat, únicament modificant lleugerament el codi i les definicions de les tensions aplicades per a cada cas, demostrant d'aquesta manera control sobre el funcionament de l'SPA.

4.3. Connexió SPA - Matriu: Test d'un transistor

Un cop controlat correctament l'SPA, passem a introduir la matriu al nostre sistema d'instrumentació. Per comprovar que aquesta connexió sigui correcta el que farem serà tornar a realitzar els mateixos tests que hem realitzat anteriorment amb el transistor, però amb la diferència que ara també haurem de controlar la matriu de connexions. Igual que abans farem servir les connexions de la figura 19, però ara en comptes de connectar-ho directament a l'SPA, ho connectarem a la matriu, farem servir els ports 1, 2 i 4 de la primera targeta connectant els terminals *gate*, *source* i *drain* respectivament (figura 22), intentant seguir amb la mateixa estructura que en l'apartat anterior.

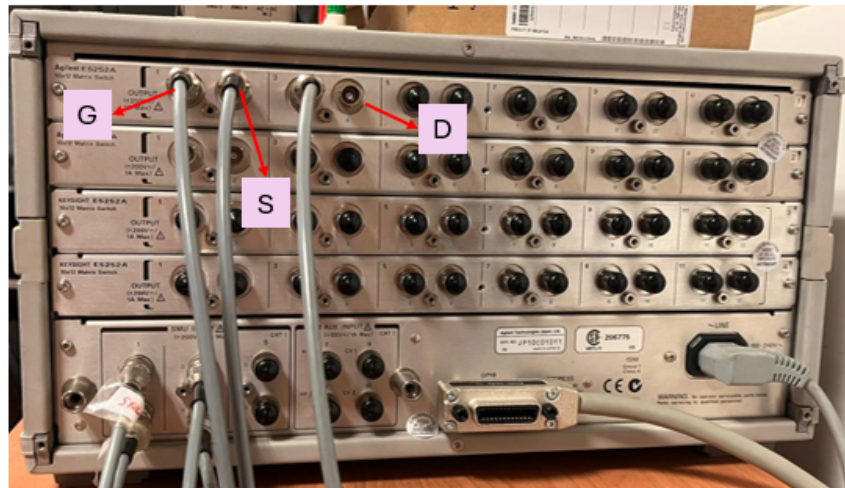


Figura 22: Connexions matriu.

A partir d'aquí la única diferencia respecte al codi realitzat en l'apartat 4.2, és que s'han de configurar els corresponents interruptors, acord al que s'explica a l'apartat 3.3. Per fer-ho apliquem les comandes de la figura 23.

```
%Comunicació Switching matrix
sw = gpib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuració switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los relés

fprintf(sw,':CLOS (@10101,10202,10404)');

% Esperar que l'operació acabi
fprintf(ins,'*OPC?');
Complete = fscanf(ins,'%d');
```

Figura 23: Configuració matriu.

Igual que amb l'SPA, s'estableix la comunicació, i sabem que l'adreça de la matriu és la 22, també identificada correctament com s'ha vist a la figura 14. Seguidament, el que fem és obrir tots els relés de la matriu i tanquem els que ens interessin (figura 23), en aquest cas, hem configurat per aprofitar el codi que ja teníem, el port 1 de la primera targeta amb l'SMU 1 (*gate*), el port 2 de la primera targeta amb l'SMU 2 (*source*) i al port quatre de la primera targeta amb l'SMU 4 (*drain*). Un cop la matriu està configurada correctament únicament hem d'afegir el codi de la figura 23 als codis anteriors (annex A i B) a més de la instrucció de tancar comunicació obtenint els codis de l'annex C i D.

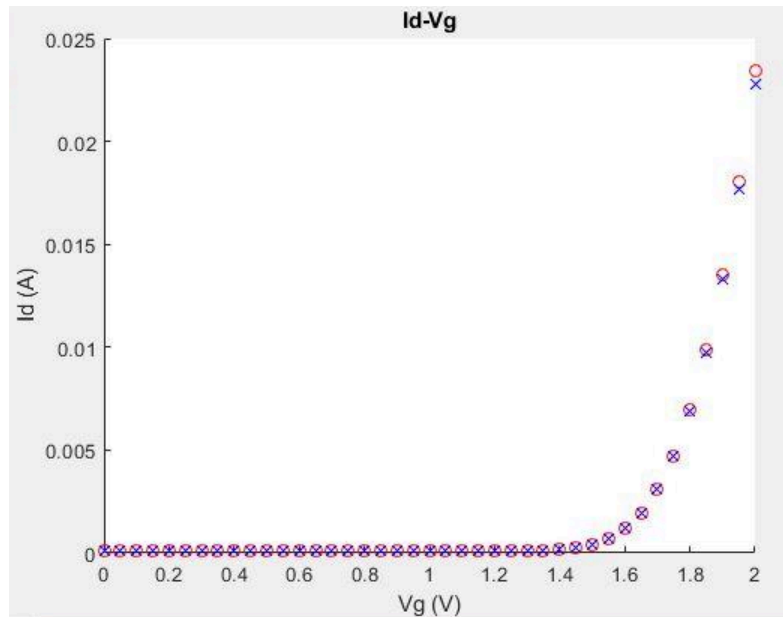


Figura 24: Gràfic I_d - V_g amb matriu (X) i sense matriu (O).

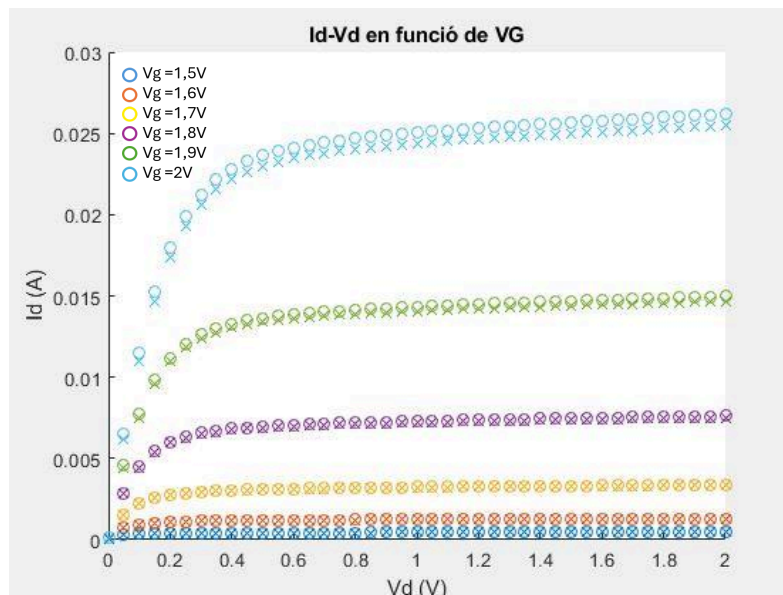


Figura 25: Gràfic I_d - V_d en funció de V_g amb matriu (X) i sense matriu (O).

En les figures 24 i 25 es pot veure una comparació entre les mesures directes (cercles) amb les obtingudes a través de la matriu de commutació (creus), s'observa una petita divergència a les zones de tensions i corrents més altes. En ambdós gràfics, les corbes amb matriu queden lleugerament per sota de les línies de referència directes. Això s'explica a través del concepte de caiguda de tensió IR (*IR drop*). Els relés interns i les connexions a través dels cables fins a la matriu de commutació afegeixen una resistència paràsita no negligible al camí del corrent. Segons la llei d'Ohm (equació 1), la pèrdua de tensió en aquests elements és directament proporcional al corrent que circula pel circuit.

Per aquest motiu, quan el transistor treballa en zones de conducció alta (corrents elevats), una part de la tensió que introdueix l'analitzador de paràmetres es perd en el connexionat amb la matriu abans d'arribar realment als terminals del MOSFET. Això fa que el dispositiu vegi una tensió efectiva lleugerament menor de la programada, traduint-se en una mesura de corrent una mica més baixa.

4.4. Connexió SPA - Matriu: Crossbar de resistències.

Un cop se sap controlar la matriu, continuem treballant amb ella, però ara es treballarà amb la *crossbar* de resistències conegudes, la descrita a l'apartat 3.4.3. El que s'ha fet inicialment és seleccionar cada resistència de manera aïllada, s'aplicarà el mateix del codi de l'apartat 4.1, amb les comandes addicionals per controlar la matriu, tindrem un codi per cada resistència (annex E). Si volguéssim seleccionar qualsevol element de la *crossbar* connectat a qualsevol terminal, sempre i quan fos conegut per l'usuari, es podria aplicar el codi de l'annex F, que és equivalent al que fan els codis de l'annex E, però l'usuari introdueix manualment quins canals es fan servir indicant la targeta i el port utilitzat. Pel que fa a les connexions físiques utilitzades per realitzar els codis de l'annex E connectarem els terminals acord a la figura 26.

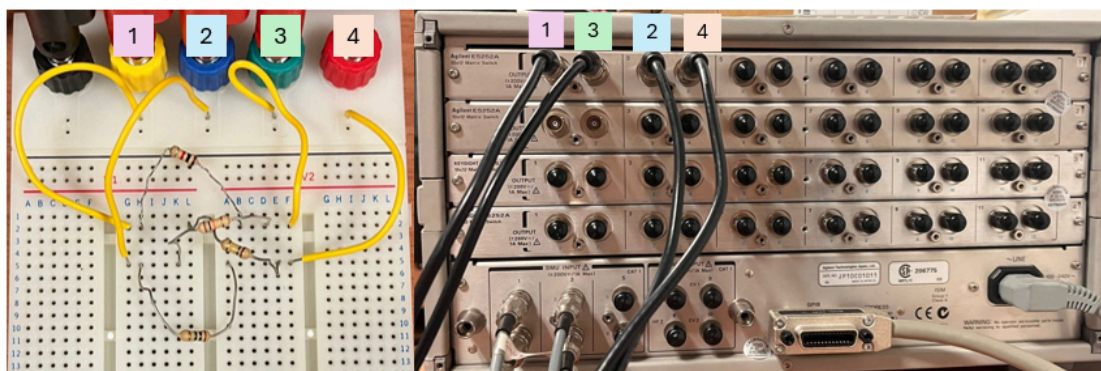


Figura 26: Esquema connexions matriu a crossbar.

Si fem les mesures del codi de l'annex E, obtenim la figura 28, corresponen a les corbes I-V de les resistències R1, R2, R3 i R4. Si ens fixem, veiem que les gràfiques difereixen del resultat esperat (lleï d'Ohm) per a les resistències escollides. Aquesta variació és degut al fet que quan mesurem una resistència en paral·lel tenim la resta de resistències que no s'han seleccionat (figura 27) i pot afectar variant el valor de la resistència, equació 3.1, aquest fenomen se'l denomina *sneak path*.

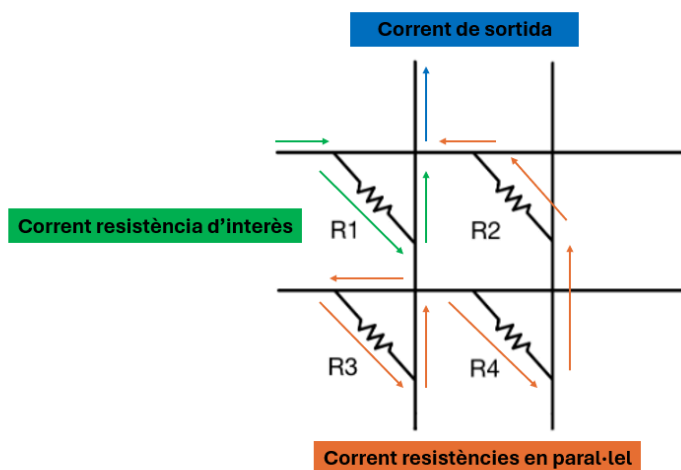


Figura 27: Resistències en paral·lel en la crossbar.

Equació 3.1: $R1_{real} = R1 / (R2 + R3 + R4)$

Fem la comprovació a través de la llei d'Ohm i el càlcul de les resistències en paral·lel per a cada un dels casos, i veiem si realment l'*sneak path* coincideix amb el que succeeix en els gràfics extrets (figura 28).

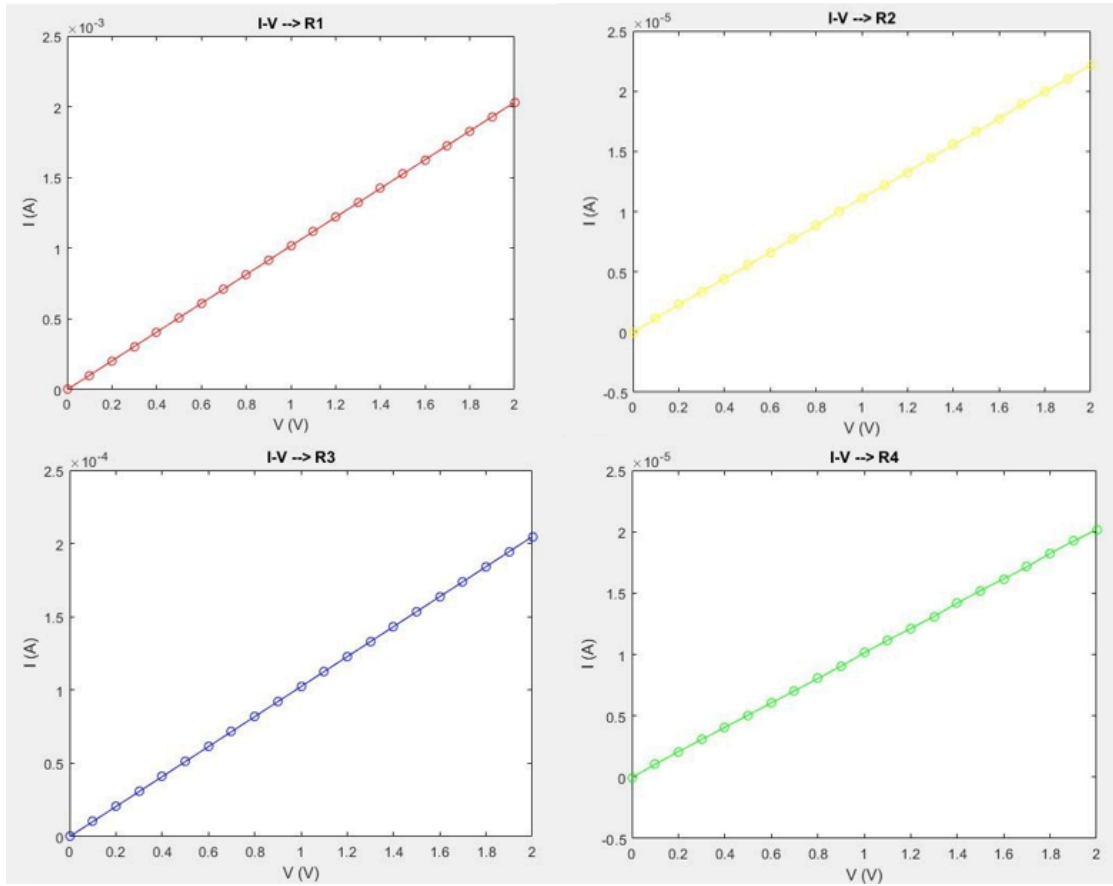


Figura 28: I-V de la crossbar.

Si fem els càlculs respectius veiem que el valor de la resistència, per a $R1=1k\Omega$, no varia gaire respecte el valor original (equació 3.2), i si apliquem la llei d'Ohm amb aquesta resistència $R1$ real als 2V (equació 4.1) i comparem amb el gràfic de $R1$ de la figura 28, veiem que el resultat coincideix amb el teòric estant una mica per sobre dels 2mA.

$$\text{Equació 3.2: } R1_{real} = R1 // (R2 + R3 + R4) = 1k\Omega // (100k\Omega + 10k\Omega + 1M\Omega) = 999,09\Omega$$

$$\text{Equació 4.1: } I = \frac{V}{R1_{real}} = \frac{2}{999,09} = 2,002 \cdot 10^{-3} A$$

Per a les resistències $R2=100k\Omega$ i $R3=10k\Omega$, veiem que els valors de resistència real són força semblants als que s'esperen si no tinguéssim l'*sneak path* (equacions 3.3, 3.4). Si comparem els gràfics, figura 28, amb el càlcul de la llei d'Ohm a 2V amb els valors del paral·lel, (equacions 4.2, 4.3), veiem que coincideixen, i difereixen lleugerament del cas ideal.

$$\text{Equació 3.3: } R2_{real} = R2 // (R1 + R3 + R4) = 100k\Omega // (1k\Omega + 10k\Omega + 1M\Omega) = 90,999 k\Omega$$

$$\text{Equació 4.2: } I = \frac{V}{R2_{real}} = \frac{2}{90,999 \cdot 10^3} = 2,2 \cdot 10^{-5} A$$

$$\text{Equació 3.4: } R3_{real} = R3 // (R1 + R2 + R4) = 10k\Omega // (1k\Omega + 100k\Omega + 1M\Omega) = 9,909k\Omega$$

$$\text{Equació 4.3: } I = \frac{V}{R3_{real}} = \frac{2}{9,909 \cdot 10^3} = 2,02 \cdot 10^{-4} A$$

D'altra banda, si ens fixem en l'R4, el valor del paral·lel (equació 3.5) disminueix bastant respecte al valor real de la resistència (R4=1MΩ), ja que en el paral·lel domina la resistència petita (suma de la resta de resistències), i per tant no mesura el que realment s'espera per a una resistència de 1MΩ, sinó que mesura el que s'espera pel paral·lel (equació 4.4)(figura 28).

$$\text{Equació 3.5: } R4_{real} = R3 / (R1 + R2 + R4) = 1M\Omega / (1k\Omega + 10k\Omega + 100k\Omega) = 99,09k\Omega$$

$$\text{Equació 4.4: } I = \frac{V}{R4_{real}} = \frac{2}{99,09 \cdot 10^3} = 2,02 \cdot 10^{-5} A$$

Per tant, es pot afirmar que el sistema de control de la matriu i les connexions físiques plantejades funcionen correctament, ja que les gràfiques I-V obtingudes coincideixen amb els models teòrics calculats. Tot i això, podem comprovar que el principal inconvenient de les estructures *crossbar* és *sneak path*. Mentre que en valors de resistència petits (R1, R2 i R3) la desviació és pràcticament imperceptible i els valors es mantenen com s'esperava, en components d'alta resistència respecte a la resta de resistències de la *crossbar*, com R4, el valor real mesurat disminueix dràsticament a causa de la disposició en paral·lel de les resistències no mesurades. Això demostra que, per garantir l'exactitud de la mesura en una *crossbar* de DUTs, convé considerar l'efecte d'aquests camins de corrent paràsits, tot i que s'estigui mesurant el que es desitja.

4.5. Automatització de les mesures d'una matriu de resistències de mida NxM

Un cop hem aconseguit mesurar i seleccionar cada una de les resistències, l'objectiu és automatitzar les mesures de les resistències en la *crossbar* fent ús de la matriu de commutació. Amb aquest objectiu, hem plantejat que en les *word lines*, tindrem les entrades que seran els pins imparells de la *crossbar* (10X01, 10X03,...) i en les *bit lines* tindrem les sortides que estaran connectades als pins parells de la *crossbar* (10X02, 10X04,...) (figura 29).

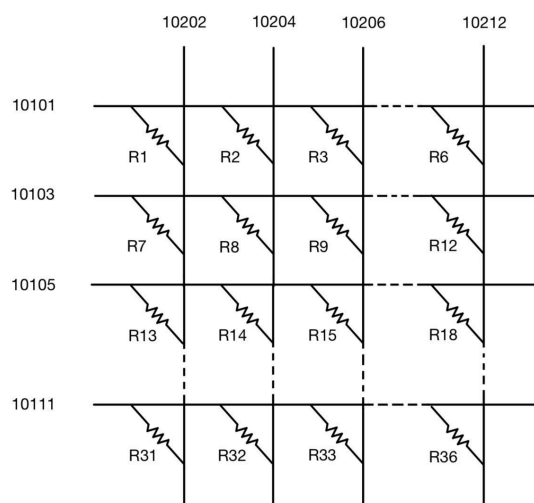


Figura 29: Plantejament entrades i sortides crossbar.

A partir d'aquesta estructura es pot generar un codi amb un bucle per recórrer les *word lines* amb un altre a dintre per recórrer les *bit lines*, augmentant en dos cada un dels bucles per mantenir parells i imparells (codi annex G). En aquest cas aplicarem un RVS a cada una de les resistències de la *crossbar*, igual que per a la resistència inicial. En cas de tenir un altre dispositiu com un memristor, que és l'habitual per aquest tipus d'estructures, es pot canviar el codi de dintre el bucle per aplicar un altre tipus de test, extrapolant a aplicacions reals aquest codi.

Per comprovar el correcte funcionament del codi s'ha tornat a realitzar les gràfiques I-V de la *crossbar* anterior, però ara automatitzat, figura 30. En aquest cas si seguim l'esquema de la figura 29 veiem que R1 correspondrà a la configuració de la matriu amb entrada 10101 i sortida 10202, R2 amb l'entrada 10101 i sortida 10204 i així successivament. Així doncs, si comparem amb els gràfics anteriors on es seleccionava cada resistència (figura 28), amb els realitzats de manera automatitzada (figura 30), indicant únicament la mida de la *crossbar*, es veu que els resultats coincideixen, verificant el correcte funcionament del codi automatitzat (annex G).

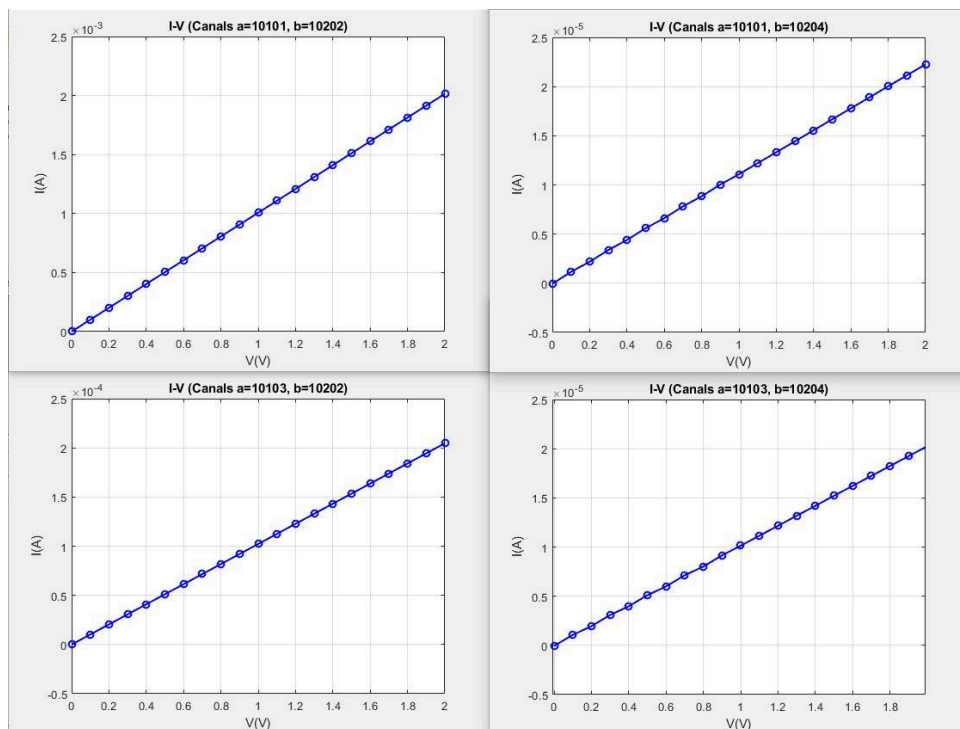


Figura 30: Resultat crossbar automatitzat.

La limitació principal d'aquest codi és que només l'hem configurat per a les 12 primeres entrades de la matriu, únicament per a la targeta 1, és a dir per una *crossbar* de 6x6 (36 elements), en cas de voler analitzar més elements caldria modificar com augmenten les variables o plantejar-ho d'una altra manera, com per exemple per una matriu de 12x12 (144 elements), es podria posar les *bit lines* a la targeta 1 i les *word lines* a la targeta 2, recorrent els bucles augmentant el valor d'un en un.

També en tenir 4 SMUs, es podrien automatitzar 2 mesures simultàniament en ser elements de dos terminals (annex H), fem l'exemple per la matriu de 2x2 ja analitzada anteriorment, obtenint el resultat de la figura 31.

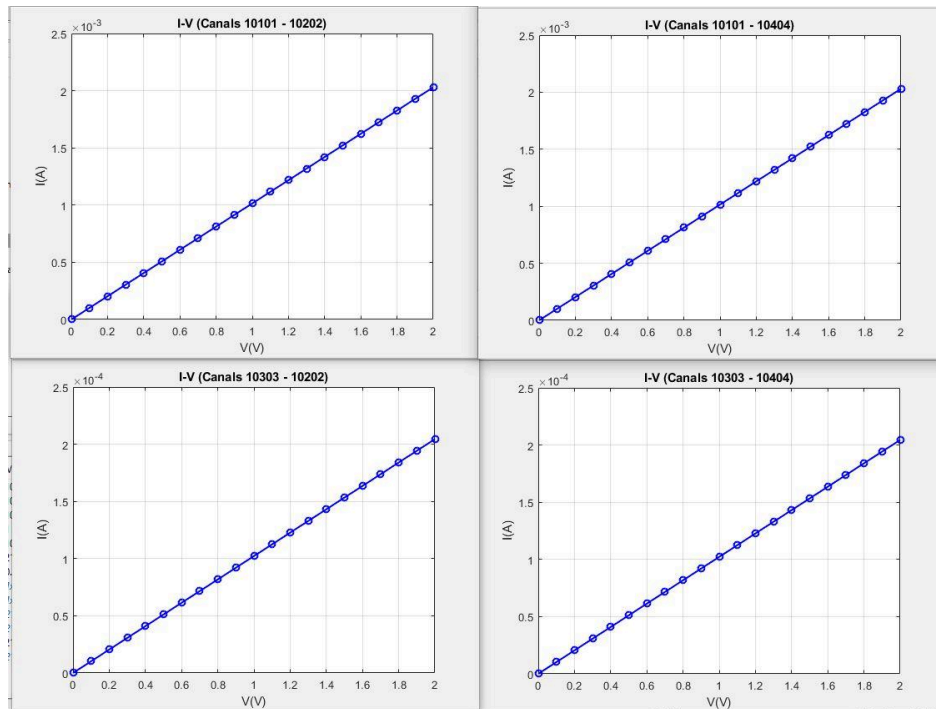


Figura 31: Dos mesures simultànies.

En la figura 31 veiem que quan intentem mesurar diverses resistències alhora utilitzant les 4 SMUs, el corrent tria sempre el camí més fàcil (el de menor resistència). Com que totes les files i columnes estan unides en la malla, el corrent es desvia i s'escapa pels camins paràsits (*sneak paths*). Això fa que les resistències petites (en aquest cas R1 i R3) dominin completament la mesura i "amaguin" els valors de les resistències més grans (R2 i R4, duplicant els gràfics tal com es veu a la imatge. Aquest tipus de mesura simultània només funcionaria correctament si els elements estiguessin totalment aïllats i no fessin contacte entre ells dins de la matriu. Així doncs, podem dir que just per aquesta aplicació la mesura simultània no ens resultaria útil, tot i que per una *crossbar* més gran en punts allunyats o per a dispositius independents (de dos terminals) sí que resultaria interessant de realitzar, estalviant temps de mesures.

Malgrat aquest últim resultat, podem dir que a partir de la base d'aquests codis es poden fer diferents modificacions per poder augmentar la mida de la *crossbar* o el tipus de test a realitzar, així com afegir mesures simultànies en un altre tipus d'estructures.

4.6 CVS: Id en funció del temps.

Un cop el funcionament de la matriu de commutació és completament conegut, demostrat mitjançant les mesures de les resistències de la *crossbar*, és important per a la possible aplicació d'aquest codis fer tests de fiabilitat *standard*. Un d'ells és el CVS, on com bé s'ha esmentat anteriorment (apartat 2.2.2) s'aplica una tensió constant al llarg del temps per estressar el nostre dispositiu i simultàniament es fa una mesura del corrent de drenador o de porta per veure com varia amb el temps acord amb aquest estrès.

L'objectiu principal d'aquest tipus d'assaig, en transistors, és avaluar els mecanismes de degradació del dielèctric de la porta o del canal. Per tal de provar el codi es farà servir el mateix transistor que en els apartats anteriors amb la mateixa configuració del *hardware*.

En el cas específic del transistor MOSFET 2N7000, es busca treballar en un règim on el dispositiu presenti una resposta estable. Atès que el sistema d'instrumentació utilitzat presenta limitacions físiques per mesurar corrents excessivament elevats (majors a 100mA), s'han acotat els paràmetres d'estrès. Aquest dispositiu perquè presenti una degradació evident, caldria aplicar tensions molt altes i, per tant, mesurar corrents elevades, pel fet que està dissenyat per suportar tensions de fins a 60V [18].

A diferència d'altres dispositius on en els tests de fiabilitat s'esperarien gràfics amb canvis rutinaris abruptes (com els salts verticals de corrent associats a la ruptura dielèctrica temporal o degradacions de caiguda exponencial per atrapament de càrrega), en la nostra caracterització del 2N7000 s'espera una gràfica pràcticament plana. Això verificarà que l'estrès aplicat és no-destructiu.

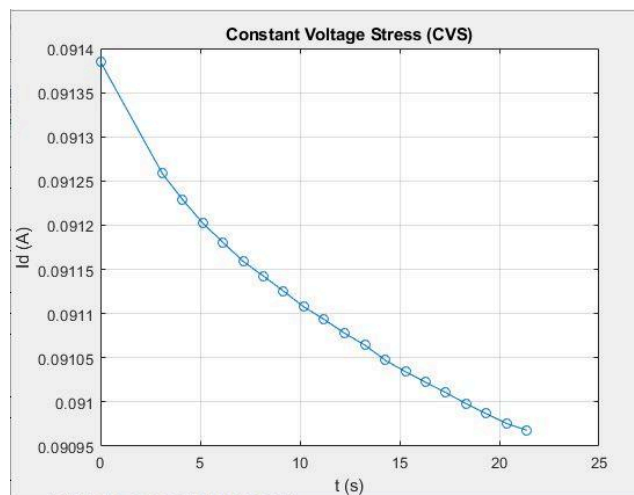


Figura 32: CVS del 2N7000

No obstant això, en analitzar els resultats experimentals obtinguts (figura 32), s'observa que el corrent de drenador (I_d) no es manté completament constant des de l'inici, sinó que descriu una lleugera tendència decreixent al llarg de la mesura.

Una de les teories era que aquesta variació podia ser causada pel soroll de la instrumentació, però fent aquest mateix test sense DUT, figura 33, es veu que ni la matriu ni el cablejat introdueixen un soroll tan significatiu, ja que estem en ordre de picoampers i a la figura 32 la variació és de miliampers.

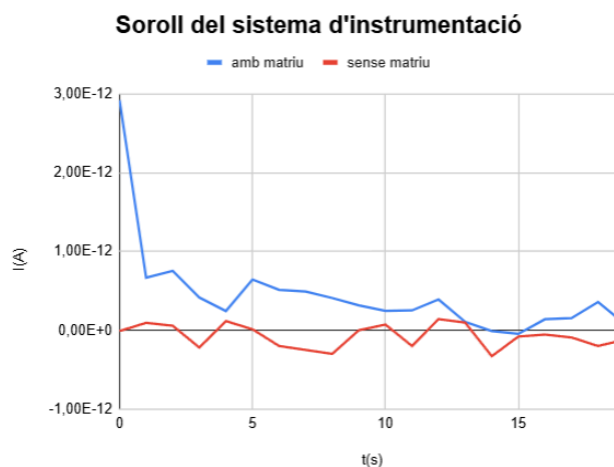


Figura 33: Soroll amb matriu i soroll sense matriu.

Així doncs, després de descartar el soroll, aquesta disminució progressiva del corrent, lluny de correspondre a una degradació permanent o a un fenomen de ruptura del component, es pot justificar principalment per la presència d'efectes transitoris i pel fet que el dispositiu i instrumentació encara no han assolit un estat plenament estabilitzat. Com que el temps total de l'assaig registrat és relativament curt, la gràfica mostra el tram inicial d'aquesta dinàmica transitòria. Per tant, si el test es prolongués durant un interval de temps superior, la corba tendiria a saturar-se i a estabilitzar-se, confirmant així el comportament pla i robust esperat per a aquestes condicions de treball no-destructives.

En aquest cas, s'ha de dir que el que s'ha realitzat no es tracta d'un BTI ni d'un HCI es un punt entre mig. Apliquem una tensió de porta elevada (2,5V), però una baixa en el drenador (0,5V) per no superar el límit de corrent, únicament per validar el correcte funcionament del codi de manera inicial. Això també pot provocar que la resposta no sigui plana. El codi aplicat el podem trobar a l'annex I.

4.7 MSM: Measurement Stress Measurement

Un cop tenim el codi d'estrès generat el que procedeix a continuació és un codi que generi un estrès i que mesuri com canvien les característiques elèctriques del dispositiu respecte la mesura inicial després de l'estrès. En aquest cas per al dispositiu 2N7000, com bé hem dit anteriorment, no esperarem cap canvi significatiu, únicament es vol veure si el codi realitza la seqüència de manera correcta, ja que l'SPA no és capaç de mesurar els corrents que es generarien a causa d'una excitació tan elevada. D'igual manera, farem servir la mateixa configuració del *hardware* que en l'apartat 4.3.

S'han realitzat dos tests un en BTI i l'altre en HCI, ambdós es realitzen amb el mateix codi (annex J) però s'apliquen tensions d'estrès diferents i el CVS mesuren un corrent diferent (I_d o I_g), però per la resta el codi és idèntic, mostrant d'aquesta manera la gran versatilitat del codi generat únicament amb petites variacions. En aquest s'aplica un bucle que es repeteix un número definit de vegades, i estressa el DUT durant un temps determinat establert i després de cada temps d'estres fa les mesures I_d - V_g per tal de calcular si la tensió llindar (tensió de porta a la qual el dispositiu comença a conduir), ha variat. També cal esmentar que el codi està estructurat en funcions per a cada tipus de test, cosa que ens permet tenir un codi més compacte, i afegir i modificar funcionalitats de manera independent l'una de l'altre, a més de poder reutilitzar aquestes funcions de manera més senzilla.

Si ens fixem en els resultats del test BTI, figura 34, s'observen tres gràfiques fonamentals que descriuen l'evolució temporal de les característiques elèctriques del transistor sota estrès.

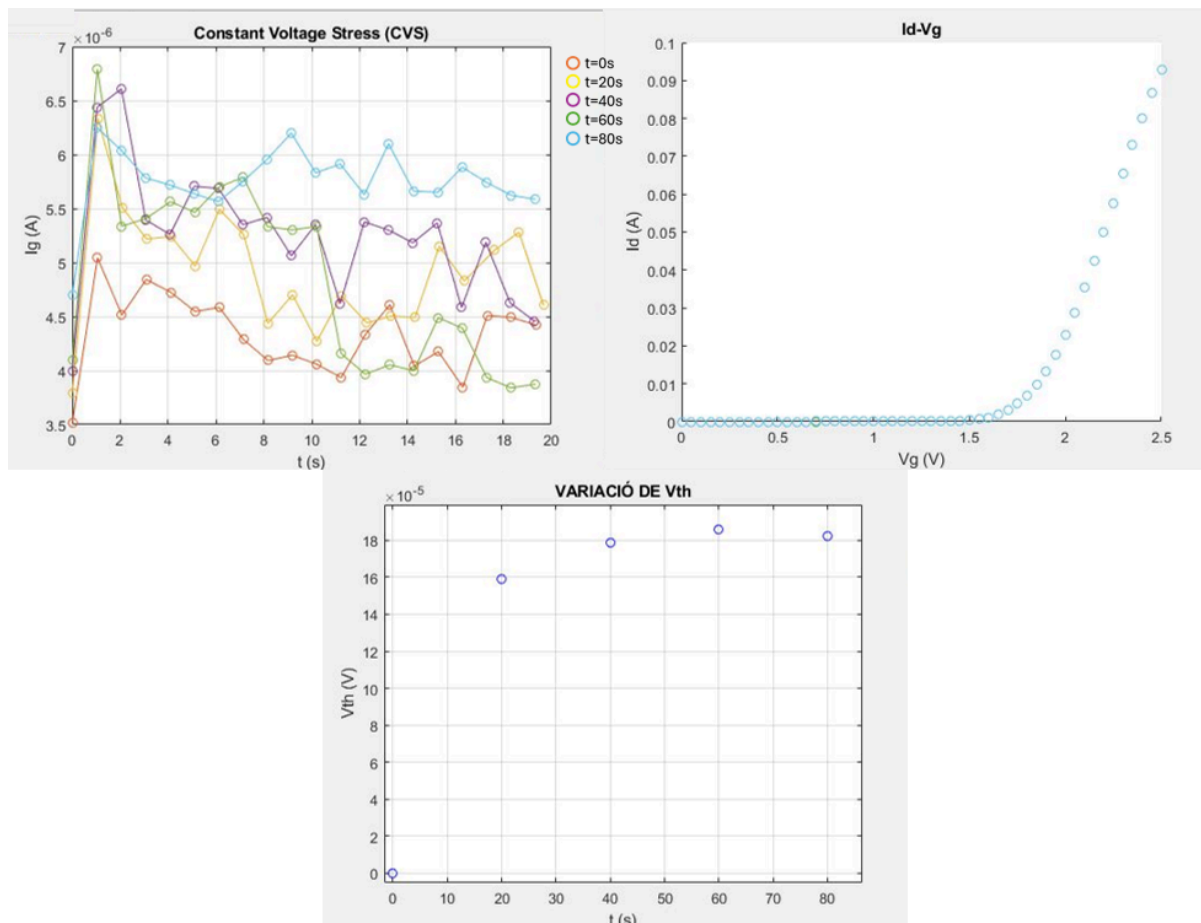


Figura 34: Resultat MSM, BTI.

En primer lloc, en la figura 34, en concret a la gràfica de Constant Voltage Stress (CVS) mostra l'evolució del corrent de porta (I_g) al llarg del temps per a diferents cicles d'estrès. Com es pot apreciar, els valors es mantenen en l'ordre dels microamperis, presentant certes fluctuacions i soroll experimental, però sense mostrar cap tendència a l'augment brusca ni un patró de degradació sever. Això corrobora que l'òxid de porta del dispositiu manté la seva integritat dielèctrica durant tot l'assaig, com esperàvem.

En segon lloc, la corba característica I_d - V_g obtinguda, és pràcticament idèntica durant tots els cicles d'estrès, ja que es troben superposades, corroborant que no ha variat el seu comportament elèctric.

Finalment, la gràfica de variació de la tensió llindar mostra el desplaçament d'aquest paràmetre en funció del temps d'estrès acumulat. S'observa que la variació calculada és pràcticament negligible, situant-se en l'ordre de les desenes de microvolts. Per calcular aquesta tensió llindar hem aplicat una funció que agafa els valors extrems del gràfic I_d - V_g i fa una aproximació lineal, annex J.

D'altra banda, per al test HCI ($V_d=5V$ i $V_g=5V$), obtenim els resultats de la figura 35.

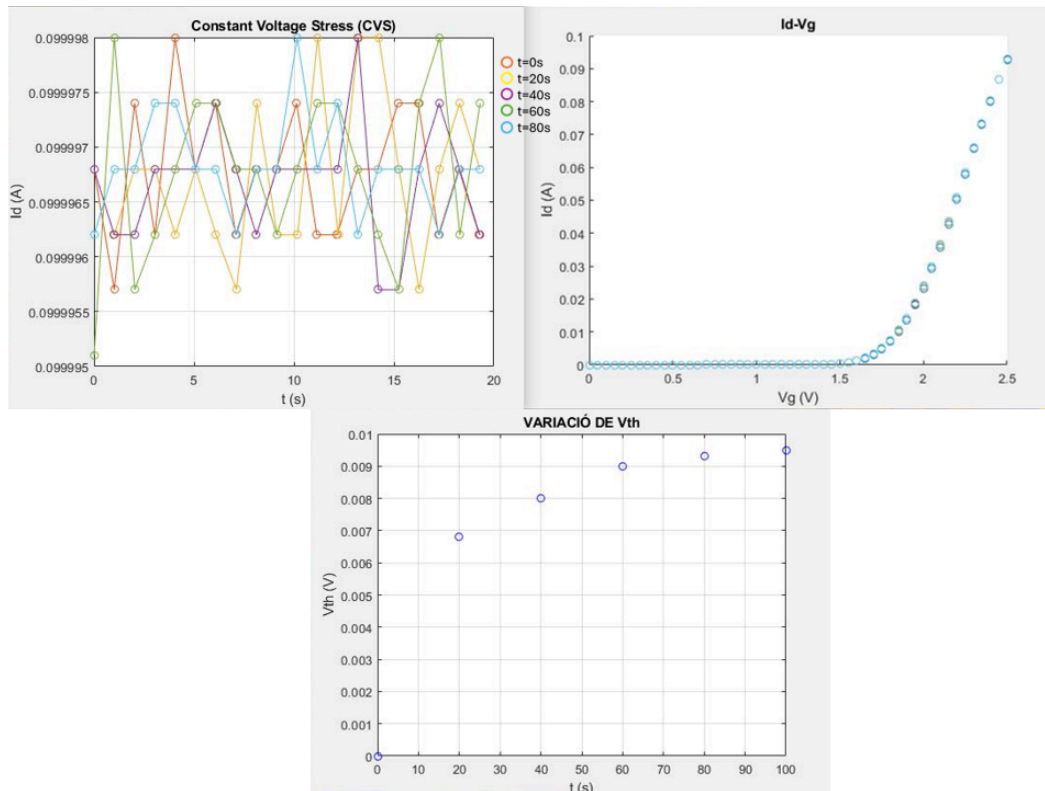


Figura 35: Resultat MSM, HCI.

Veiem que els resultats d'aquest últim test a la figura 35, aquests són similars als que trobem a la figura 34, amb la diferència que a la figura 35 al gràfic CVS, aquest es troba saturat, ja que amb aquests voltatges aplicats en aquest transistor, el corrent de drenador (I_d), supera el llindar que podem mesurar amb els SMUs del nostre SPA. Exceptuant aquest gràfic, que no podem valorar, els resultats són coherents amb el que esperàvem.

Aquests resultats confirmen de manera sòlida la hipòtesi inicial, sota les condicions elèctriques d'assaig acotades per les limitacions del sistema, el transistor 2N7000 no presenta degradació, per tant, podem validar que els tests i el codi aplicat són correctes.

4.8 Transistors de la Oblea SNOW

Un cop validat el correcte funcionament del codi generat per estressar i mesurar els dispositius, treballarem amb els transistors N1 i N2 de quatre terminals de l'oblea SNOW per veure una degradació real d'un transistor (dintre del rang de mesura del SPA) i validar amb una aplicació real el correcte funcionament del codi. S'haurà d'incorporar al *hardware* la taula de puntes per a poder accedir a mesurar els transistors desitjats, ja que aquest estan situats sobre una oblea i són nanomètrics.

Per aquest test, modificarem lleugerament el codi anterior i afegirem altres funcions per recollir més dades, generarem després de cada temps d'estrès I_d - V_g , I_g - V_g , I_d - V_d , i la variació de la tensió llindar, codi annex K. El codi principal no ha patit gaires modificacions respecte al codi de l'annex J en afegir aquestes noves funcionalitats, a causa de treballar amb funcions, únicament afegim un parell de línies.

4.8.1 Transistor N1 ($W=10\mu\text{m}$ i $L=10\text{nm}$)

Abans d'iniciar els tests sobre el dispositiu, comprovem que aquest està ben connectat. Per tal de connectar correctament el dispositiu, primer s'ha d'identificar on està cada terminal del transistor, acord a les especificacions del fabricant i situar les puntes fent contacte a través del microscopi òptic, figura 36.

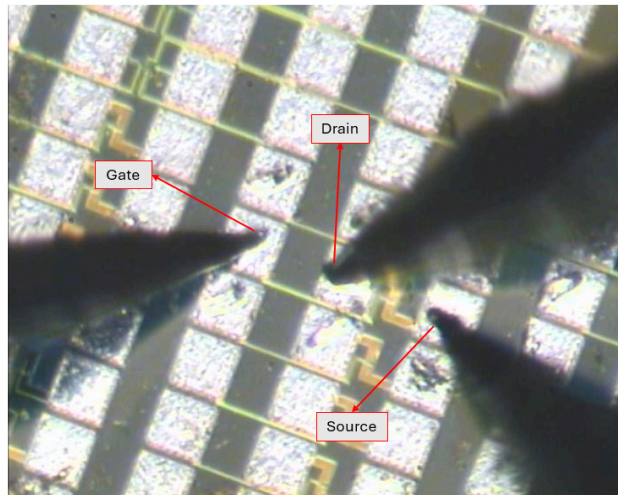


Figura 36: Connexió del transistor amb les puntes a través del microscopi òptic.

Tindrem connectat la primera punta al *gate*, la segona al *bulk* (aquesta no es veu a la imatge, ja que està fora de rang del microscopi òptic), a la tercera al *drain* i la quarta al *source*. Si ho mirem des de fora del microscopi tindrem la figura 37.

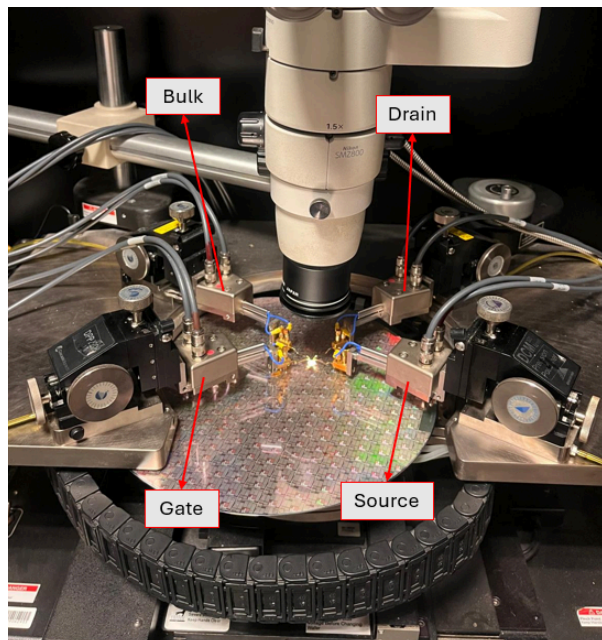


Figura 37: Taula de puntes amb l'obla.

Si mirem el connexionat exterior, tant de la caixa de la taula de puntes com de la matriu obtindríem l'esquema de la figura 38. A més configurarem la matriu de manera similar a l'apartat anterior per haver de modificar menys coses al codi, per tant, tindrem al SMU1 el *gate*, al SMU2 el *source*, al SMU3 el *bulk* i al SMU4 el *drain*.

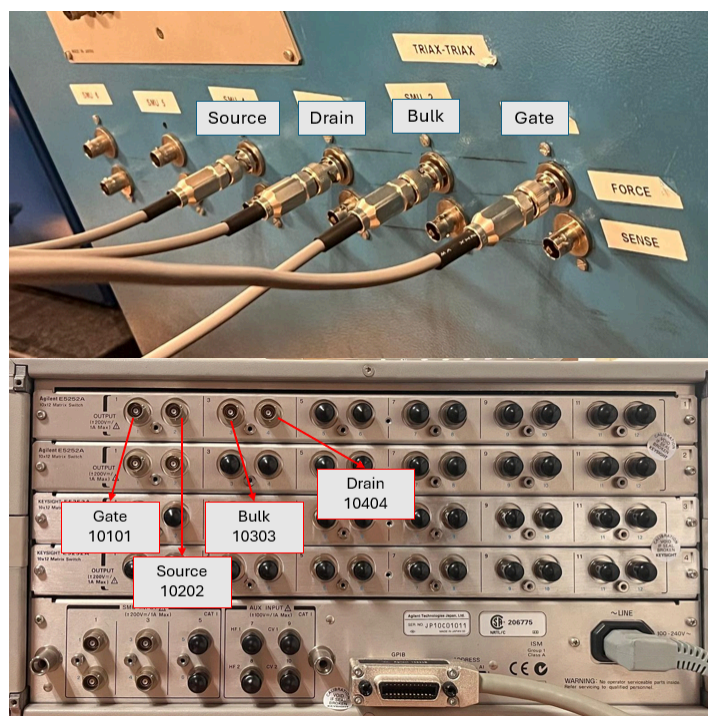


Figura 38: Connexions taula de puntes i matriu i configuració matriu.

Un cop el connexionat està llest, apliquem el codi (annex L) on únicament es fa la caracterització inicial del dispositiu sense aplicar cap mena d'estrès. Per tant, comprovarem que el connexionat és correcte i que es veu el que s'espera d'un dispositiu de canal curt, com és l'N1.

En primer lloc, a la figura 39 es mostra la corba de transferència I_d - V_g . El resultat més clar d'aquest gràfic és que, quan la tensió de porta és de zero volts, el transistor no s'apaga, sinó que manté un corrent de fuga elevat de gairebé 0,85 mA. Aquesta pèrdua del control elèctric es deu al fet que com la font i el drenador estan separats per només 10 nm (canal curt), i la tensió del drenador té prou força per generar un canal pel seu compte. Això fa que el transistor comenci a conduir, sense esperar l'ordre de la porta.

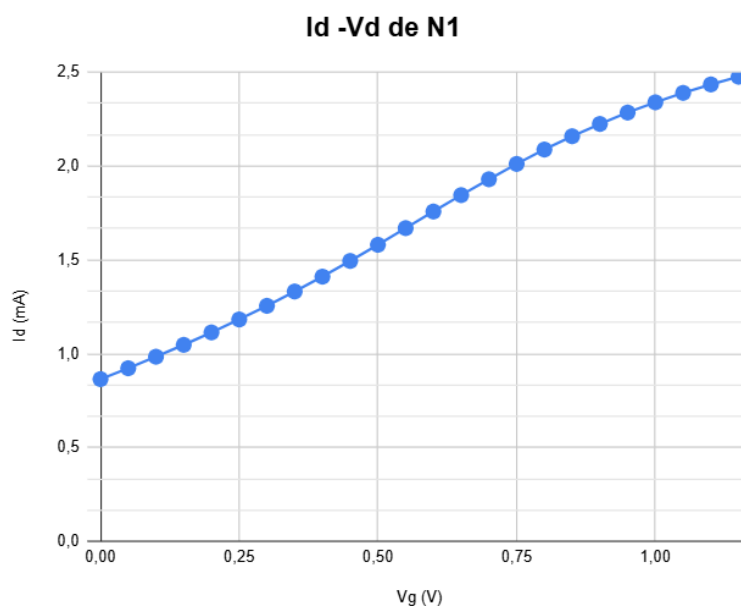


Figura 39: I_d - V_g de N1.

A la figura 40, on es mostra el corrent de fuga de la porta (I_g) en escala logarítmica. S'observa com aquest corrent augmenta de manera exponencial a mesura que pugem la tensió, passant de valors gairebé nuls fins a superar el nanoamper (1nA).

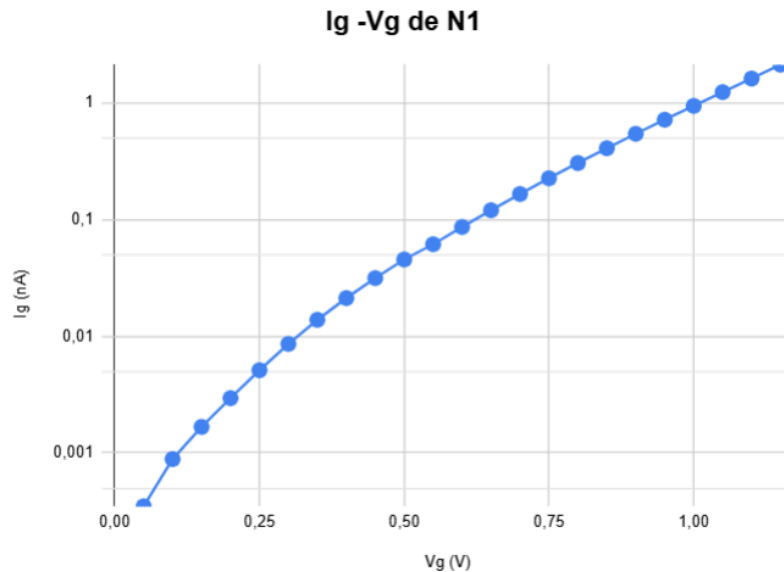


Figura 40: I_g - V_g de N1.

Finalment, la figura 41 mostra les característiques de sortida I_d - V_d per a diferents tensions de porta (V_g). En contrast amb els transistors de canal llarg, on el corrent se satura completament esdevenint pla, les corbes del dispositiu N1 mantenen un pendent positiu molt pronunciat. Aquesta manca de saturació és conseqüència directa del canal curt.

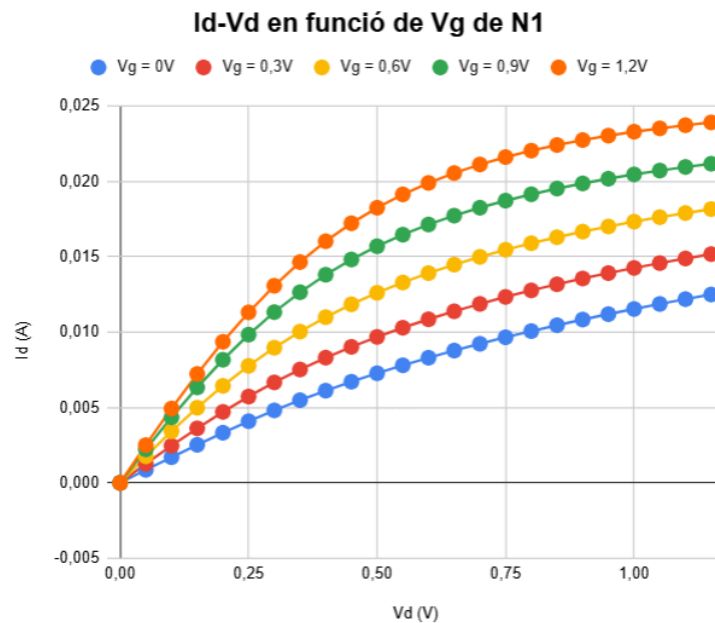


Figura 41: I_d - V_d en funció de V_g de N1.

Així doncs, es pot veure que el connexionat és correcte i que els codis aplicats per caracteritzar els transistors són correctes.

4.8.2 Transistor N2 ($W=10\mu\text{m}$ i $L=120\text{nm}$)

Per realitzar l'estrès, finalment s'ha decidit fer amb el dispositiu N2, ja que en tenir un canal més llarg, el gràfic I_d - V_g és l'esperat per un MOSFET de canal llarg, i per tant es pot fer l'aproximació lineal al gràfic I_d - V_g per extreure la tensió llindar, a diferència de l'N1 on la tensió llindar no es veu tan definida.

Per tal de canviar de transistor del N1 al N2, com la disposició dels dos transistors és contigua i amb la mateixa disposició, únicament s'han desplaçat les puntes al següent dispositiu. Comprovem novament les característiques inicials del transistor amb el codi de l'annex L, per assegurar-nos que estem treballant sobre el transistor N2.

A la figura 41 es mostra la corba de transferència I_d - V_g . A diferència de l'altre dispositiu, el resultat més clar d'aquest gràfic és que, quan la tensió de porta és de zero volts, el corrent de fuita és pràcticament nul i es troba enganxat a zero. Com que la font i el drenador estan molt més separats, la tensió del drenador ja no té prou força per generar el canal. Per tant, la porta manté el control de la generació del canal, presentant una tensió llindar molt al voltant dels 0,25V i un pendent inicial molt més vertical.

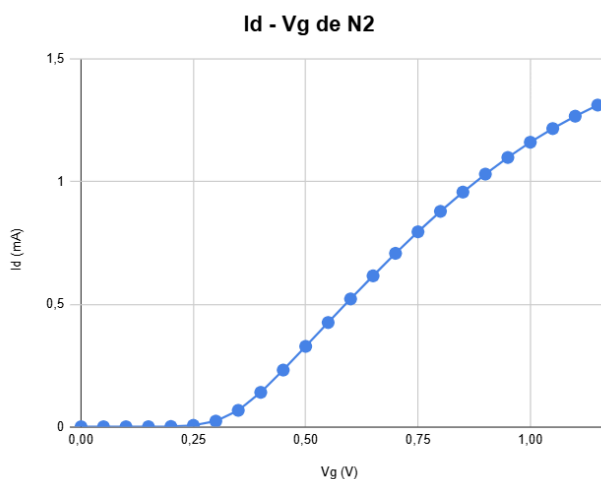


Figura 41: I_d - V_g de N2.

D'altra banda, el corrent de fuita de la porta (I_g) es representa en escala logarítmica a la figura 42. En aquesta gràfica s'observa la típica forma en "V" o de línies simètriques a banda i banda del zero. El punt clau aquí és comprovar que, fins i tot a les tensions de treball més altes, el corrent de fuita es manté en valors màxims d'uns pocs nanoampers.

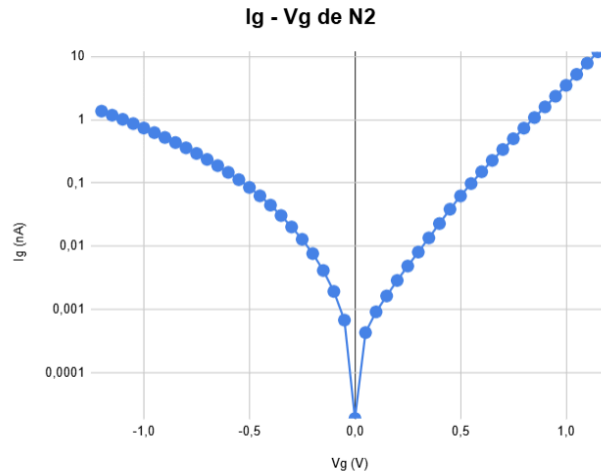


Figura 42: I_g - V_g de N2.

Finalment, la figura 43 mostra les corbes de sortida I_d - V_d per a diferents tensions de porta (V_g). Veiem que, a partir d'una $V_d=0,5V$, el corrent es satura i les línies es tornen pràcticament planes i horitzontals, aconseguint una regió de saturació gairebé perfecta. A més, es pot comprovar visualment que les corbes blava i vermella queden totalment planes sobre la línia de zero, confirmant que el transistor s'apaga per a aquestes tensions de porta.

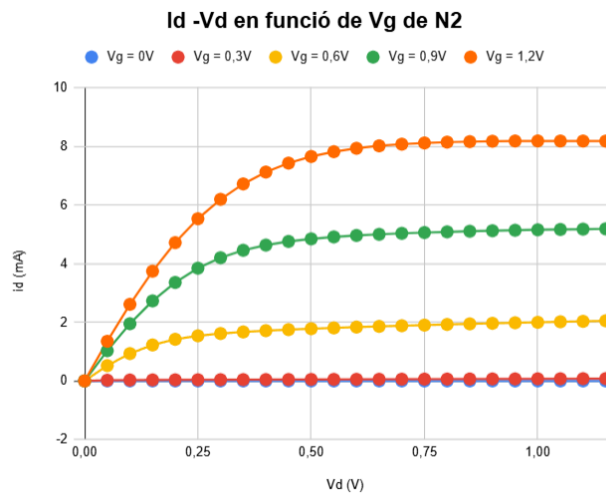


Figura 43: I_d - V_d en funció de V_g per a N2.

Un cop caracteritzat inicialment el dispositiu apliquem el codi de l'annex K, és a dir l'estrès. S'aplicaran 1,8V tant al drenador com a la porta (estrès HCI) durant 1 min en períodes de 10s. Repetirem les mesures anteriors després de cada iteració per veure com es degrada el transistor.

El primer resultat d'aquest assaig el trobem a la figura 44, on es mostra la gràfica de corrent de drenador respecte al temps I_d -t durant els 60 segons de durada de l'estrès total. En aquest gràfic s'aprecia clarament una caiguda progressiva del corrent. Aquesta disminució contínua del corrent és a causa que els electrons queden atrapats i generen defectes que frenen el pas del corrent.

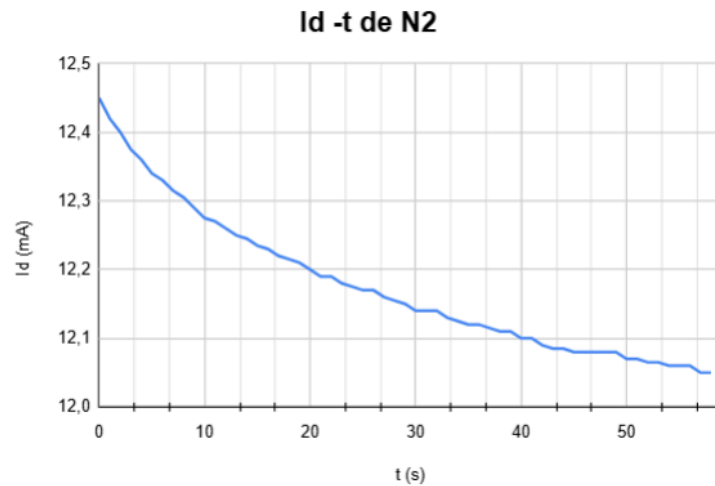


Figura 44: I_d -t durant 60s.

Per veure com afecta exactament aquest estrès a l'N2, analitzem, en primer lloc, la corba de transferència I_d - V_g a la figura 45. Aquí es pot observar visualment com, a mesura que avança el temps d'estrès, tota la corba es va desplaçant cap a la dreta i perd una mica de corrent màxim. Aquest desplaçament cap a la dreta ens indica directament que la tensió que necessita el transistor per començar a conduir està augmentant.

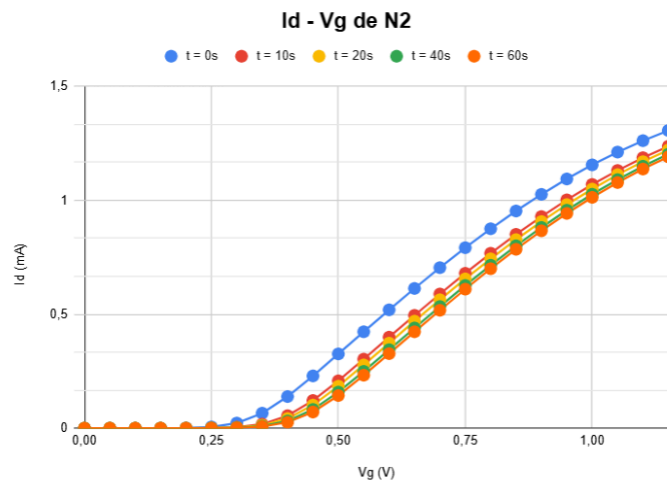


Figura 45: I_d - V_g durant l'estrès.

Aquest augment es quantifica de manera precisa a la figura 46, que representa la variació de la tensió llindar (ΔV_{th}) al llarg del temps. Com es pot comprovar, la tensió llindar augmenta ràpidament durant els primers 20 segons i després continua pujant de manera més suau fins al final del test. Aquesta variació, ara sí, és molt significativa, cosa que demostra que el mecanisme degrada el dispositiu de manera evident, forçant la porta a necessitar més tensió per obrir el canal.

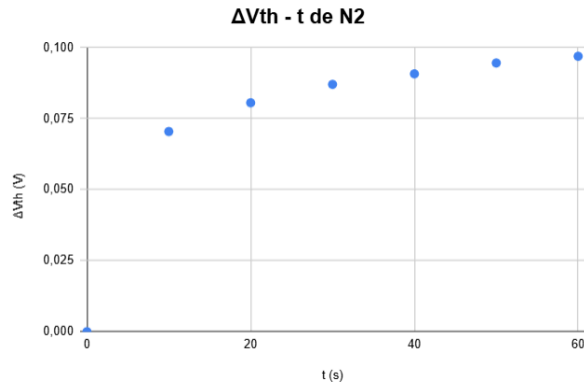


Figura 46: Variació de la tensió llindar.

Finalment, l'impacte d'aquesta degradació en el funcionament general del transistor es pot veure a les característiques de sortida I_d - V_d (figura 47) i de fuites de porta I_g - V_g (figura 48). A la figura 47, les corbes de saturació mostren un esglaonament clar cap avall a cada cicle d'estrès, confirmant la pèrdua de capacitat de corrent del dispositiu a causa de la degradació del canal. D'altra banda, si ens fixem en la figura 48, el corrent de fuga de la porta pràcticament no varia en la part negativa, però experimenta un lleuger increment en la banda positiva a mesura que sumem segons d'estrès, provocat precisament per la injecció i l'atrapament de portadors calents cap a l'interior de l'òxid.

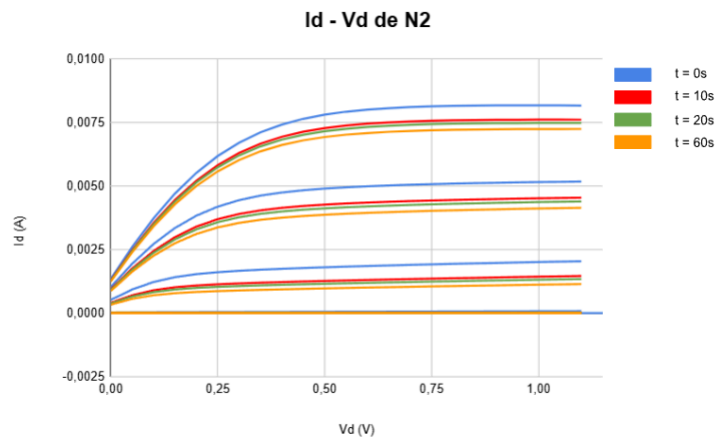


Figura 47: I_d - V_d en funció de l'estrès.

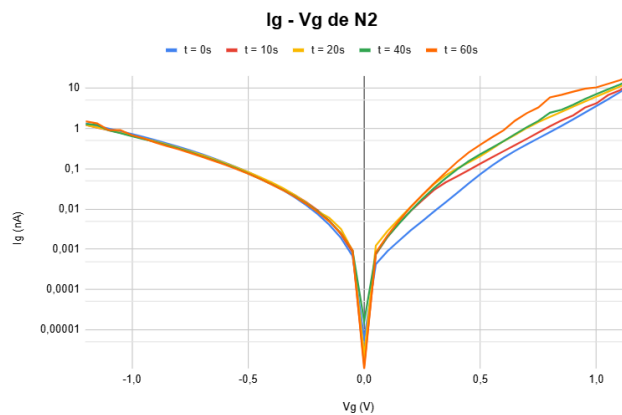


Figura 48: I_g - V_g en funció de l'estrès.

Per cloure l'estudi de fiabilitat, s'ha dut a terme un assaig destructiu amb l'objectiu de buscar el trencament elèctric de l'òxid de porta (*breakdown*) en el dispositiu N2. Per fer-ho, s'ha aplicat una rampa de tensió creixent a la porta fins a forçar un augment brusc i irreversible del corrent de fuita, indicant que ha deixat de funcionar. Per fer-ho s'ha aplicat el codi de l'annex L però amb la diferència que en l'escombrat en tensió V_g s'ha arribat fins als 7V, destruint d'aquesta manera el dispositiu.

A la figura 49 es mostra l'evolució del corrent de porta (I_g) en escala logarítmica durant aquest escombrat (RVS). Es pot veure clarament que el corrent augmenta de forma progressiva fins que, en arribar aproximadament als 2,5V, es pateix un salt brusc vertical, tot i que no s'aprecia en el gràfic, s'intueix per la seva posterior caiguda. Aquest comportament és el típic d'una ruptura dielèctrica (*breakdown*), confirmant així que la fallada del dispositiu.

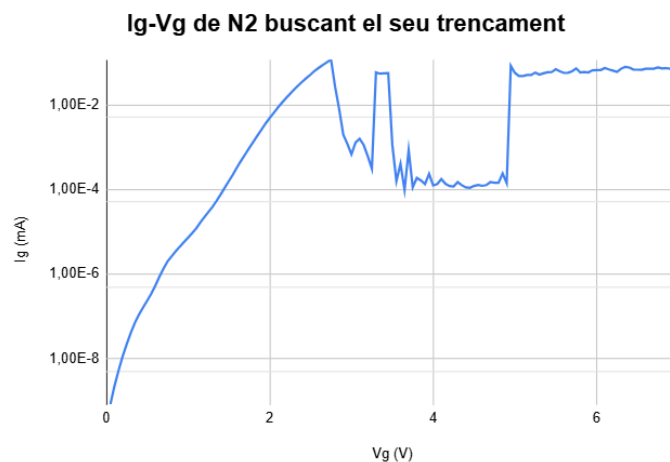


Figura 49: I_g - V_g del trencament dielèctric.

Un cop confirmat el trencament, s'han repetit les caracteritzacions elèctriques anteriors per comprovar l'estat en què havia quedat el transistor. El resultat de la corba de transferència I_d - V_g es mostra a la figura 50, i és completament caòtic. Com es pot apreciar, el corrent de drenador ja no depèn del control de la porta, sinó que es converteix en un senyal ple de soroll i fluctuacions aleatòries. La porta ha perdut totalment la capacitat de crear o modular el canal elèctric.

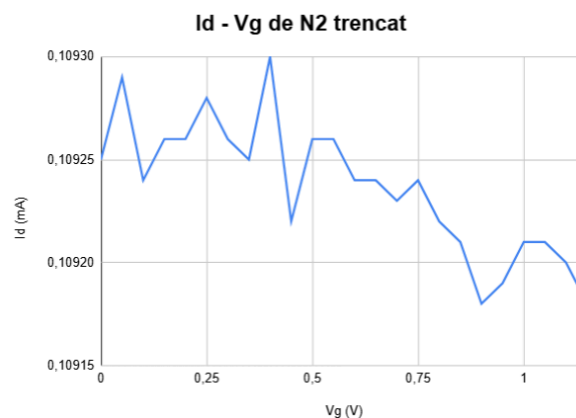


Figura 50: I_d - V_g del transistor trencat.

Aquesta pèrdua absoluta de control es confirma de manera rotunda a la figura 51, on es representen les corbes I_d - V_d per a diferents tensions de porta. La gràfica ens mostra que totes les corbes han

quedat totalment fusionades en una sola línia. Ja no hi ha saturació ni separació segons la tensió que apliquem a la porta. El transistor ha deixat d'actuar com un interruptor elèctric i ha passat a comportar-se com una mena de resistència.

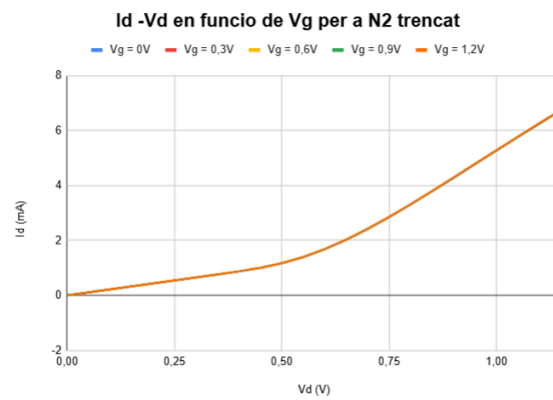


Figura 51: Id-Vd en funció de Vg per al transistor trencat.

5. Conclusions i treball futur

Per concloure, es pot afirmar que s'han assolit satisfactòriament els objectius plantejats inicialment en aquest treball. D'una banda, s'ha aconseguit controlar de manera remota la matriu de commutació, la qual cosa permet accedir a diferents DUTs dins d'una *crossbar*, canviar de dispositiu de manera àgil i seleccionar l'SMU desitjat per a cada canal, aplicant i mesurant els senyals elèctrics requerits en cada cas. A més, s'ha comprovat experimentalment que el soroll introduït per la matriu és negligible, ja que, tot i que presenta un efecte resistiu residual igual que passa amb els cables de connexió, aquest no distorsiona les caracteritzacions, perquè és molt baix (s'hauria de tenir en compte si es caracteritzen dispositius en l'ordre dels picoampers). D'altra banda, s'han generat les funcions bàsiques necessàries per dur a terme diferents tests de fiabilitat, fet que permet una adquisició de dades sistemàtica, ràpida i eficient.

En resum, aquest treball aporta un conjunt de codis sòlids, eficients i escalables que, combinats entre si, juntament amb la matriu de commutació optimitzen de manera dràstica les tasques de caracterització al laboratori i obren la porta a futurs estudis estadístics de fiabilitat aprofitant al màxim els recursos instrumentals disponibles.

Com a possible treball futur, la intenció seria aplicar aquests codis per tal de caracteritzar nous dispositius de manera molt més àgil, aconseguint que la presa de mesures, en requerir un volum estadístic alt, es realitzi en major part de manera automàtica. Per exemple, es podrien adaptar els algorismes actuals per a estructures de tipus *crossbar* de *memristors*, introduint petites modificacions a partir del codi que ja s'ha desenvolupat per a la matriu de resistències. Una altra línia d'interès seria la caracterització de dispositius directament sobre l'obla de silici. Connectant una carta de puntes a la matriu de commutació, es podria anar canviant de dispositiu completament per programari a través del control de la matriu de commutació, fet que evitaria haver de desplaçar les puntes de prova manualment sobre el xip i eliminaria una tasca de laboratori que sol ser molt tediosa i lenta. Finalment, en el cas de treballar amb estructures de transistors, es podrien aprofitar directament les funcions de caracterització i estrès ja generades en aquest treball, modificant únicament els valors aplicats i els encaminaments de la matriu de commutació.

6. Referències

- [1] M. Nafria, «Charapter 7, Electrical characteritzacion».
- [2] S. M. Sze y K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 3. ed. en Wiley-Interscience online books. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2007. doi: 10.1002/0470068329.
- [3] Tektronix, «LowLevelHandbook_7Ed». Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://download.tek.com/document/LowLevelHandbook_7Ed.pdf
- [4] KEITHLEY, «Switching Handbook». 27 de febrero de 2026. Accedido: 27 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://download.tek.com/document/SwitchingHandbook.pdf>
- [5] E. Amores, «CONTROL DE INSTRUMENTOS MEDIANTE EL BUS GPIB PROGRAMADO CON MATLAB ». Accedido: 4 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2010/hdl_2072_97366/PFC_EduardoAmoresRubio.pdf
- [6] Keysight, «E5250A Switching Matrix User's Guide». Accedido: 13 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-01854/user-manuals/9018-01854.pdf>
- [7] Agilent Technologies, «Agilent-4156C-Datasheet».
- [8] K. Instruments, «ACS - 2600 RTM User's Manual».
- [9] Hewlett-Packard Company, «4155A/4156A Semiconductor Parameter Analyzer Programmer's Guide». Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-07923/programming-guides/9018-07923.pdf>
- [10] Keysight, «How to Make IV Measurements With a Source Measure Unit (SMU)».
- [11] Keysight, «Low Current Measurement with E5250A Switch Mainframe».
- [12] X. Blasco, M. Nafria, y X. Aymerich, «Ultra thin films of atomic force microscopy grown SiO₂ as gate oxide on MOS structures: conduction and breakdown behavior», *Surf. Sci.*, vol. 532-535, pp. 732-736, jun. 2003, doi: 10.1016/S0039-6028(03)00152-3.
- [13] National Instruments, «GPIB Connector - NI», <https://www.ni.com>. Accedido: 6 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/docs>
- [14] 전문텍캠몰-정밀계측기, «Agilent 4156C / Precision Semiconductor Parameter Analyzer». Accedido: 6 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.tekkammall.com/goods/goods_view.php?goodsNo=1000013498
- [15] «Agilent E5252A, Keysight E5252A, HP E5252A», AXIOM. Accedido: 6 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.axiomtest.com/Component-Analyzers,-LCR,-Semiconductor/Accessories-and-Other/Keysight-.-Agilent/E5252A/10x12-Matrix-Switch/>
- [16] Tektronix, «Keithley Test Fixtures Selector Guide». Accedido: 7 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tek.com/en/documents/product-selector-guide/keithley-test-fixtures-selector-guide>
- [17] «8101-PIV», dataTec. Accedido: 7 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.datatec.eu/de/en/keithley-8101-piv>

- [18] Alldatasheet, «2N7000». Accedido: 4 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en:
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1365220/VISHAY/2N7000.html>
- [19] R. Goyal, A. Crespo-Yepes, M. Porti, R. Rodriguez, M. Nafria, «A statistical characterization of dielectric breakdown in FDSOI nanowire transistors»

7. Annexos

Annex A: Codi generació Id -Vg MOSFET

```
%% Id-Vg

%Establir comunicació

close all
clear all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicación con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificación al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificación del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notación en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4close

% Trobem n i m
load('VIN')
n=length(Vin(:,1));
m=length(Vin(1,:));

% Especifiquem el corrent màxim
Ic=1E-1;

% Bucle per aplicar tensions i extreure la intensitat
for i=1:n
    i % Per veure les iteracions

    % Aplicar tensions
    Vsamp(i,:)=Vin(i,:);
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,3),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vsamp(i,2),Ic])

    % Llegir corrent Id
    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[4,0]);
    Isamp(i,4)=fscanf(ins, '%f');

    % Pausa
    pause(0.1)

    % Fer el gràfic
    figure(1)
    hold on
    plot(Vsamp(i,3),Isamp(i,4),'ro');
    title('Id-Vg');
    xlabel('Vg (V)');
    ylabel('Id (A)');
    hold off
end

% Tancar la connexio amb l'instrument
fclose(ins)
```

Annex B: Codi generació Id -Vd en funció de Vg MOSFET

```
%% Id-Vd en funció de VG

%Establir comunicació

close all
clear all

ins=gpiplib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicación con el instrumento
fprintf(ins, '*IDN?' ) % Pide identificación al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificación del instrumento
fprintf(ins, 'US' ); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins, 'FMT %e', 2); %Activa notación en ASCII
fprintf(ins, 'CN %e,%e,%e,%e', [1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4close

% Trobem n i m
load('VD')
n=length(Vd(:,1));
load('VG')
m=length(Vg(:));

% Especifiquem el corrent màxim
Ic=1E-1;

% Bucle per aplicar tensions i extreure la intensitat

colors= lines(m); % genera diferents colors

for l=1:m
    1
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [1,0,Vg(l),Ic])
    for i=1:n
        1 % Per veure les iteracions

        % Aplicar tensions
        Vsamp(i,:)=Vd(i,:);
        fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [2,0,Vsamp(i,1),Ic])
        fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [4,0,Vsamp(i,2),Ic])

        % Llegir corrent Id
        fprintf(ins, 'TI? %e,%e', [4,0]);
        Isamp(i,4)=fscanf(ins, '%f');

        % Pausa
        pause(0.1)

        % Fer el gràfic
        figure(2)
        hold on
        plot(Vsamp(i,2),Isamp(i,4),'o','Color',colors(l,:));
        title('Id-Vd en funció de VG');
        xlabel('Vd (V)');
        ylabel('Id (A)');

    end
end
% Tancar la connexio amb l'instrument
fclose(ins);
```

Annex C: Codi generació Id -Vg MOSFET amb matriu

```
%% Id-Vg

%Establir comunicació am el SPA

%close all
clear all

ins=gplib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4 close

%Comunicació Switching matrix
sw = gplib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuració switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los relés

fprintf(sw,':CLOS (@10101,10202,10404)');

% Esperar que l'operació acabi
fprintf(ins,'*OPC?');
Complete = fscanf(ins,'%d');

% Trobem n i m
load('VIN')
n=length(Vin(:,1));
m=length(Vin(1,:));

% Bucle per aplicar tensions i extreure la intensitat
for i=1:n
    i % Per veure les iteracions

    % Aplicar tensions
    Vsamp(i,:)=Vin(i,:);
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,3),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vsamp(i,2),Ic])

    % Llegir corrent Id
    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[4,0]);
    Isamp(i,3)=fscanf(ins, '%f');

    % Pausa
    pause(0.1)

    % Fer el gràfic
    figure(1)
    hold on
    plot(Vsamp(i,3),Isamp(i,3),'bx');
    title('Id-Vg');
    xlabel('Vg (V)');
    ylabel('Id (A)');

end

% Tancar la connexió amb l'instrument
fclose(ins)
fclose(sw)
```

Annex D: Codi generació Id -Vd en funció de Vg MOSFET

```
%Establir comunicació
clear all
close all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4close

%Comunicaci3 Switching matrix
sw = gpi('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuraci3n inicial del switching matrix
fprintf(sw,'OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fprintf(sw,'CLOS (@10101)');
fprintf(sw,'CLOS (@10202)');
fprintf(sw,'CLOS (@10404)');

% Esperar que l'operaci3 acabi
fprintf(ins,'*OPC?');
Complete = fscanf(ins,'%d');

% Trobem n i m
load('VD')
n=length(Vd(:,1));
load('VG')
m=length(Vg(:));

% Especifiquem el corrent m3xim
Ic=100E-3;

% Bucle per aplicar tensions i extreure la intensitat

colors= lines(m); % genera diferents colors

for l=1:m
    1
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vg(l),Ic])
    for i=1:n
        2 % Per veure les iteracions

        % Aplicar tensions |
        Vsamp(i,:)=Vd(i,:);
        fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,1),Ic])
        fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vsamp(i,2),Ic])

        % Llegir corrent Id
        fprintf(ins,'TI? %e,%e',[4,0]);
        Isamp(i,4)=fscanf(ins, '%f');

        % Pausa
        pause(0.1)

        % Fer el gr3fic
        figure(2)
        hold on
        plot(Vsamp(i,2),Isamp(i,4),'o','Color',colors(1,:));
        title('Id-Vd en funci3 de VG');
        xlabel('Vd (V)');
        ylabel('Id (A)');

    end
end

% Tancar la connexi3 amb l'instrument
fclose(ins);
fclose(sw);
```

Annex E: Codi generació I-V resistències crossbar

R1

```
%% R1 array protoboard
close all
clear all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

%Comunicaci3 Switching matrix
sw = gpi('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuraci3n inicial del switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fprintf(sw,':CLOS (@10101,10202)');

% Esperar que l'operaci3 acabi
fprintf(sw,'*OPC?');
Complete = fscanf(sw,'%d');

load('VAPP2')
n=length(Vapp2(:,1));
m=length(Vapp2(1,:));

Ic=1E-1;

for i=1:n
    i
    Vsamp(i,:)=Vapp2(i,:);
    V0=0;
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,2),Ic])

    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
    Isamp4(i,1)=fscanf(ins, '%f');

end

figure(1)
plot(Vsamp(:,1),Isamp4(:,1),'r-o');
hold on
title('I-V --> R1');
xlabel('V (V)');
ylabel('I (A)');
hold off

% Apagar las salidas de los SMUs
fprintf(ins,'DZ');

fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fclose(ins) %cierra la conexi3n con el instrumento
fclose(sw)
```

R2

```
%% R2 array protoboard
close all
clear all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins, '*RST')
fprintf(ins, '*CLS')

%Comunicaci3 Switching matrix
sw = gpi('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

fprintf(sw, '*RST')
fprintf(sw, '*CLS')

fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

%Configuraci3n inicial del switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s
fprintf(sw,':CLOS (@10101,10404)');

% Esperar que l'operaci3 acabi
fprintf(sw,'*OPC?');
Complete = fscanf(sw,'%d');

load('VAPP2')
n=length(Vapp2(:,1));
m=length(Vapp2(1,:));

Ic=1E-1;

for i=1:n
    Vsamp(i,:)=Vapp2(i,:);
    V0=0;
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vsamp(i,2),Ic])

    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
    Isamp4(i,1)=fscanf(ins, '%f');
end

figure(1)
plot(Vsamp(:,1),Isamp4(:,1),'y-o');
hold on
title('I-V --> R2');
xlabel('V (V)');
ylabel('I (A)');
hold off

% Apagar las salidas de los SMUs
fprintf(ins,'DZ');

fclose(ins) %cierra la conexi3n con el instrumento
fclose(sw)
```

R3

```
%% R3 array protoboard
close all
clear all

ins=gpiplib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins, '*RST')
fprintf(ins, '*CLS')

%Comunicaci3 Switching matrix
sw = gpilib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

fprintf(sw, '*RST')
fprintf(sw, '*CLS')

fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

%Configuraci3n inicial del switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fprintf(sw,':CLOS (@10303,10202)');

% Esperar que l'operaci3 acabi
fprintf(ins,'*OPC?');
Complete = fscanf(ins,'%d');

load('VAPP2')
n=length(Vapp2(:,1));
m=length(Vapp2(1,:));

Ic=1E-1;

for i=1:n
    i
    Vsamp(i,:)=Vapp2(i,:);
    V0=0;
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[3,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,2),Ic])

    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[3,0]);
    Isamp4(i,1)=fscanf(ins, '%f');

end

figure(1)
plot(Vsamp(:,1),Isamp4(:,1),'b-o');
hold on
title('I-V --> R3');
xlabel('V (V)');
ylabel('I (A)');
hold off

% Apagar las salidas de los SMUs
fprintf(ins,'DZ');

fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fclose(ins) %cierra la conexi3n con el instrumento
fclose(sw)
```

R4

```
%% R4 array protoboard |
close all
clear all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicación con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificación al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificación del instrumento
fprintf(ins, '*RST')
fprintf(ins, '*CLS')

%Comunicació Switching matrix
sw = gpi('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

fprintf(sw, '*RST')
fprintf(sw, '*CLS')

fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notación en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

%Configuración inicial del switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los relés

fprintf(sw,':CLOS (@10303,10404)');

% Esperar que l'operació acabi
fprintf(ins,'*OPC?');
Complete = fscanf(ins,'%d');

load('VAPP2')
n=length(Vapp2(:,1));
m=length(Vapp2(1,:));

Ic=1E-1;

for i=1:n
    Vsamp(i,:)=Vapp2(i,:);
    V0=0;
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[3,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vsamp(i,2),Ic])

    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[3,0]);
    Isamp4(i,1)=fscanf(ins, '%f');
end

figure(1)
plot(Vsamp(:,1),Isamp4(:,1),'g-o');
hold on
title('I-V --> R4');
xlabel('V (V)');
ylabel('I (A)');
hold off

% Apagar las salidas de los SMUs
fprintf(ins,'DZ');

fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los relés

fclose(ins) %cierra la conexión con el instrumento
fclose(sw)
```

Annex F: Codi generació I-V resistències crossbar selecció usuari.

```

%% Simulacions crossbar usuari selecciona.
close all
clear all

ins=gpiplib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'%IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento

fprintf(ins, '*RST')
fprintf(ins, '*CLS')

%Comunicaci3 Switching matrix
sw = gpiplib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'%IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

fprintf(sw, '*RST')
fprintf(sw, '*CLS')

fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

%Configuraci3n inicial del switching matrix
fprintf(sw,'%OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

w= input('Introdueix la tarja on tens connectada la word line (1,2,3,4): ');
x= input('Introdueix la sortida de la matriu on tens la word line (1-12) : ');
y= input('Introdueix la tarja on tens connectada la bit line (1,2,3,4): ');
z= input('Introdueix la sortida de la matriu on tens la bit line (1-12) : ');

a= w*10000+100+x;
b= y*10000+200+z;

fprintf(sw,sprintf('%CLOS (%d,%d)',a,b));

% Esperar que l'operaci3 acabi
fprintf(sw,'%OPC?');
Complete = fscanf(sw,'%d');

load('VAPP2')
n=length(Vapp2(:,1));
m=length(Vapp2(1,:));

Ic=1E-1;

for i=1:n
    i
    Vsamp(i,:)=Vapp2(i,:);
    V0=0;
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,2),Ic])

    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
    Isamp4(i,1)=fscanf(ins, '%f');

end

figure(1)
plot(Vsamp(:,1),Isamp4(:,1),'r-o');
hold on
title(sprintf('I-V (Canals a=%d, b=%d)',a,b))
xlabel('V (V)');
ylabel('I (A)');
hold off

% Apagar las salidas de los SMUs
fprintf(ins,'DZ');

fprintf(sw,'%OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fclose(ins) %cierra la conexi3n con el instrumento
fclose(sw)

```

Annex G: Codi generació I-V resistències crossbar automatitzat fins a 36 elements.

```
%% Simulacions array protoboard

close all
clear all
clc

% Comunicació instrument principal

ins = gpib('ni',0,2);
fopen(ins);

fprintf(ins,'*IDN?');
ident = fscanf(ins)

fprintf(ins,'US');
fprintf(ins,'FMT %e',2);
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]);

% Comunicació Switching Matrix

sw = gpib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

% Dimensions matriu

filas = input('Introdueix el número de filas: ');
columnas = input('Introdueix el número de columnas: ');

% Carregar tensions

load('VAPP2')

n = size(Vapp2,1);

Ic = 1E-1;

x = 1;

s = 10101 + 2*(filas-1);
t = 10202 + 2*(columnas-1);

% Bucle principal
for a = 10101:2:s
    for b = 10202:2:t
        fprintf(ins,'*RST')
        fprintf(ins,'*CLS')
        fprintf(sw,'*RST')
        fprintf(sw,'*CLS')

        fprintf(ins,'US');
        fprintf(ins,'FMT %e',2);
        fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]);

        fprintf(sw,':OPEN ALL');

        fprintf(sw,sprintf(':CLOS (@%d,%d)',a,b));

        fprintf(sw,'*OPC?');
        Complete = fscanf(sw,'%d');

        % Isamp(:,x) = 0;

        for i = 1:n
            fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vapp2(i,1),Ic]);
            fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vapp2(i,2),Ic]);

            fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
            Isamp(i,x) = fscanf(ins,'%f');

            fprintf(ins,'DZ');

        end

        % Plot
        figure(x)
        plot(Vapp2(:,1),Isamp(:,x),'b-o','LineWidth',1.5)
        grid on
        title(sprintf('I-V (Canals a=%d, b=%d)',a,b))
        xlabel('V(V)')
        ylabel('I(A)')

        x = x + 1;

    end
end
```

Annex H: Codi generació I-V resistències crossbar automatitzat de 4 elements amb 2 mesures simultànies.

```

%% Dues mesures simultànies

close all
clear all
clc

% Comunicació instrument principal

ins = gpib('ni',0,2);
fopen(ins);

fprintf(ins, '*IDN?');
ident = fscanf(ins)

% Comunicació Switching Matrix

sw = gpib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw, '*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

% Carregar tensions

load('VAPP2')

n = size(Vapp2,1);

Ic = 1E-1;

fprintf(ins, 'US');
fprintf(ins, 'FMT %e', 2);
fprintf(ins, 'CN %e,%e,%e,%e', [1,2,3,4]);

fprintf(sw, ':OPEN ALL');

a=10101;
b=10202;
c=10303;
d=10404;

fprintf(sw, sprintf(':CLOS (@%d,%d,%d,%d)', a,b,c,d));

fprintf(sw, '*OPC?');
Complete = fscanf(sw, '%d');

for i = 1:n

    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [1,0,Vapp2(i,1),Ic]);
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [2,0,Vapp2(i,2),Ic]);
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [3,0,Vapp2(i,1),Ic]);
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [4,0,Vapp2(i,2),Ic]);

    fprintf(ins, 'TI? %e,%e', [1,0]);
    Isamp(i,1) = fscanf(ins, '%f');
    fprintf(ins, 'TI? %e,%e', [3,0]);
    Isamp2(i,1) = fscanf(ins, '%f');

end

figure(1)
plot(Vapp2(:,1),Isamp(:,1),'b-o','LineWidth',1.5)
grid on
title(sprintf('I-V (Canals %d - %d)',a,b))
xlabel('V(V)')
ylabel('I(A)')

figure(4)
plot(Vapp2(:,1),Isamp2(:,1),'b-o','LineWidth',1.5)
grid on
title(sprintf('I-V (Canals %d - %d)',c,d))
xlabel('V(V)')
ylabel('I(A)')

for i = 1:n

    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [1,0,Vapp2(i,1),Ic]);
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [4,0,Vapp2(i,2),Ic]);
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [3,0,Vapp2(i,1),Ic]);
    fprintf(ins, 'DV %e,%e,%e,%e', [2,0,Vapp2(i,2),Ic]);

    fprintf(ins, 'TI? %e,%e', [1,0]);
    Isamp(i,1) = fscanf(ins, '%f');
    fprintf(ins, 'TI? %e,%e', [3,0]);
    Isamp2(i,1) = fscanf(ins, '%f');

end

% Plot

figure(2)
plot(Vapp2(:,1),Isamp(:,1),'b-o','LineWidth',1.5)
grid on
title(sprintf('I-V (Canals %d - %d)',a,d))
xlabel('V(V)')
ylabel('I(A)')

figure(3)
plot(Vapp2(:,1),Isamp2(:,1),'b-o','LineWidth',1.5)
grid on
title(sprintf('I-V (Canals %d - %d)',c,b))
xlabel('V(V)')
ylabel('I(A)')

% Tancar comunicacions
fclose(ins);
fclose(sw);

```

Annex I: Id en funció del temps.

Main

```
%% Aplicació_CVS amb matriu
close all
clear all

ins=gpiplib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicación con el instrumento
fprintf(ins, '*IDN?') % Pide identificación al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificación del instrumento
fprintf(ins, '*RST')
fprintf(ins, '*CLS')

%Comunicació Switching matrix
sw = gpiplib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw, '*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

fprintf(sw, '*RST')
fprintf(sw, '*CLS')

fprintf(ins, 'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins, 'FMT %e', 2); %Activa notación en ASCII
fprintf(ins, 'CN %e,%e,%e,%e', [1,2,3,4]) %Habilita los SMUs 1,2,3 y 4

%Configuración inicial del switching matrix
fprintf(sw, ':OPEN ALL'); % abrir todos los relés
fprintf(sw, ':CLOS (@10101,10202,10404)');

% Esperar que l'operació acabi
fprintf(sw, '*OPC?');
Complete = fscanf(sw, '%d');

Vstress_g = 2.5;
Vstress_d = 0.5;
Tstress = 20;
Ic = 1E-1;
dt = 1;
colors= lines(10); % genera diferentes colores
l=1;

Id = funcio_CVS(Vstress_g,Vstress_d,Tstress,dt,Ic,ins,colors,2)

fclose(ins) %cierra la conexión con el instrumento
fclose(sw)
```

Funció CVS HCI

```
function [Ileak] = funcio_CVS(Vstress_g,Vstress_d,Tstress,dt,Ic,ins,colors,l)

% Inicialización
N = (Tstress/dt);

t = zeros(N,1);
Ileak = zeros(N,1);

% Aplicar tensión constante

fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vstress_g,Ic]);
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vstress_d,Ic]);
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,0,Ic]);
pause(1);

% Inicio del ensayo
tic
k = 1;

while k:N

    t(k) = toc;

    % medida
    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[4,0]);
    Ileak(k) = fscanff(ins,'%f');

    fprintf('t = %.1f s   I = %.3e A\n',t(k),Ileak(k));

    k = k + 1;
    pause(dt)
end

% Apagar tensión

fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,0,Ic]);
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,0,Ic]);

% Gráfica

figure(1)
plot(t,Ileak,'-o','Color',colors(1,:))
xlabel('t (s)')
ylabel('Id (A)')
title('Constant Voltage Stress (CVS)')
grid on
hold on

end
```

Annex J: MSM per al transistor 2N7000

Main

```
%Establir comunicació
clear all
close all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicaci3n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificaci3n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificaci3n del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notaci3n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUS 1,2,3 y 4close

%Comunicaci3 Switching matrix
sw = gpi('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuraci3n inicial del switching matrix
fprintf(sw,'OPEN ALL'); % abrir todos los rel3s

fprintf(sw,'CLOS (@10101,10202,10404)');

% Esperar que l'operaci3 acabi
fprintf(sw,'*OPC?');
Complete = fscanf(sw,'%d');

colors= lines(10); % genera diferents colors

Vth0 = 0;
t_total = 0;
Ic = 100E-3;

[Id,Vg] = funcio_RVS(ins,Ic,colors,1);
Vth0 = funcio_Vth_t(Id,Vg,t_total,Vth0);

for l=1:5
Vstress_g = 2.5;
Vstress_d =0;
Tstress = 20;
dt = 1;

Results = funcio_CVS_2(Vstress_g,Vstress_d,Tstress,dt,Ic,ins,colors,l+1);
t_total = t_total+Tstress;
[Id,Vg] = funcio_RVS(ins,Ic,colors,l+1);
Vth = funcio_Vth_t(Id,Vg,t_total,Vth0);
end

fclose(ins) %cierra la conexi3n con el instrumento
fclose(sw)
```

Funció CVS BTI

```
function [t,Ileak] = funcio_CVS_2(Vstress_g,Vstress_d,Tstress,dt,Ic,ins,colors,1)

% Inicializaci3n
N = (Tstress/dt);

t = zeros(N,1);
Ileak = zeros(N,1);

% Aplicar tensi3n constante

fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vstress_g,Ic]);
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vstress_d,Ic]);
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,0,Ic]);
pause(1);

% Inicio del ensayo
tic
k = 1;

while k:N

    t(k) = toc;

    % medida
    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
    Ileak(k) = fscanf(ins,'%f');

    fprintf('t = %.1f s    I = %.3e A\n',t(k),Ileak(k));

    k = k + 1;
    pause(dt)
end

% Apagar tensi3n

fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,0,Ic]);
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,0,Ic]);

% Gr3fica

figure(1)
plot(t,Ileak,'-o','Color',colors(1,:))
xlabel('t (s)')
ylabel('Ig (A)')
title('Constant Voltage Stress (CVS)')
grid on
hold on

end
```

Funció RVS

```
function [Isamp,Vg] = funcio_RVS(Ins,Ic,colors,l)
% Trobem n i m
load('VIN')
n=length(Vin(:,1));
m=length(Vin(1,:));
Vg=Vin(:,3);

% Bucle per aplicar tensions i extreure la intensitat
for i=1:n
    i % Per veure les iteracions

    % Aplicar tensions
    Vsamp(i,:)=Vin(i,:);
    fprintf(Ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,3),Ic])
    fprintf(Ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(Ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vsamp(i,2),Ic])

    % Llegir corrent Id
    fprintf(Ins,'TI? %e,%e',[4,0]);
    Isamp(i)=fscanf(Ins, '%f');

    % Pausa
    pause(0.1)

    % Fer el gràfic
    figure(2)
    hold on
    plot(Vsamp(i,3),Isamp(i),'o','Color',colors(1,:))
    title('Id-Vg');
    xlabel('Vg (V)');
    ylabel('Id (A)');

end
fprintf(Ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,0,Ic]);
fprintf(Ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,0,Ic]);
end
```

Funció Vth-t

```
function [Vth] = funcio_vth_t(Id,Vg,t,vth0)

%Calcul Vth
Id = Id(:);
Vg = Vg(:);

% gm
gm = gradient(Id,Vg);

% punto de gm màxim
[~,idx] = max(gm);

N = 4;

idx1 = max(1,idx-N);
idx2 = min(length(Vg),idx+N);

% ajust lineal
p = polyfit(Vg(idx1:idx2),Id(idx1:idx2),1);

m = p(1);
b = p(2);

% vth = talla amb Id=0
Vth = -b/m;

%Diferència
if vth0 == 0
    vth0=Vth;
end

dvth=abs(Vth-vth0);

%Gràfic
figure (3)
plot(t,dvth,'b-o')
xlabel('t (s)')
ylabel('Vth (V)')
title('VARIACIÓ DE vth')
grid on
hold on
end
```

Annex K: Estrés en transitor de oblea.

Main

```
%Establir comunicació
clear all
close all

ins=gpi('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicació³n con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificació³n al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificació³n del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notació³n en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUS 1,2,3 y 4close

%Comunicació Switching matrix
sw = gpi('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuración inicial del switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los relés

fprintf(sw,':CLOS (@10101,10202,10404)');

% Esperar que l'operació acabi
fprintf(sw,'*OPC?');
Complete = fscanf(sw,'%d');

colors= lines(10); % genera diferents colors

Vth0 = 0;
t_total = 0;
Ic = 100E-3;

%Vg
Vini=0;
Vmax=1.2;
Vstep=0.05;

N=1+(Vmax-Vini)/(Vstep);

for i=1:N
    if i==1
        Vg(i,1)=Vini;
    end
    if i>=2
        Vg(i,1)=Vg(i-1,1)+Vstep;
    end
end

Id1(:,1) = funcio_RVS(ins,Ic,colors,1)
Ig(:,1) = funcio_ig_vg_(ins,Ic,colors,1)
Id2(:,1) = funcio_id_vd(ins,Ic,colors)

vth(1,1) = funcio_vth_t(Id1(:,1),Vg,t_total,vth0);

for l=1:6
    Vstress_g = 1.8;
    Vstress_d = 1.8;
    Tstress = 10;
    dt = 1;

    Id3(:,1+1) = funcio_CVS(Vstress_g,Vstress_d,Tstress,dt,Ic,ins,colors,1+1);
    t_total = t_total+Tstress;
    Id1(:,1+1) = funcio_RVS(ins,Ic,colors,1+1);
    Ig(:,1+1) = funcio_ig_vg_(ins,Ic,colors,1)
    Id2(:,1+1) = funcio_id_vd(ins,Ic,colors)
    vth(:,1+1) = funcio_vth_t(Id1(:,1+1),Vg,t_total,vth(1,1));
end

fclose(ins) %cierra la conexión con el instrumento
fclose(sw)

save('N2_Dev2_M10u_L120n_MSM');
```

Funció Ig-Vg

```
function [Ig] = funcio_ig_vg_(ins,Ic,colors,1)
Vini=0;
Vmax=1.2;
Vstep=0.05;

N=1+(Vmax-Vini)/(Vstep);

for i=1:N
    if i==1
        Vin(i,1)=Vini;
    end
    if i>=2
        Vin(i,1)=Vin(i-1,1)+Vstep;
    end
end

n = length(Vin(:,1));

% Bucle per aplicar tensions i extreure la intensitat
for i=1:n
    i % Per veure les iteracions

    % Aplicar tensions

    Vsamp(i,:)=Vin(i,:);
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vsamp(i,1),Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,0,Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,0,Ic])
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[3,0,0,Ic])

    % Llegir corrent Id
    fprintf(ins,'TI? %e,%e',[1,0]);
    Ig(i,1)=fscanf(ins, '%f');

    % Pausa
    pause(0.1)

    % Fer el gràfic
    figure(4)
    hold on
    plot(Vsamp(i,1),log10(abs(Ig(i,1))), 'b-o', 'Color', colors(1,:))
    title('Ig-Vg');
    % set(gca,'YScale','log')
    xlabel('Vg (V)');
    ylabel('Id (A)');

end
fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,0,Ic]);
end
```

Funció Id-Vd

```
function [Id] = funcio_id_vd(ins,Ic,colors)

Vini=0;
Vmax=1.2;
Vstep=0.3;

N=1+(Vmax-Vini)/(Vstep);

for i=1:N
    if i==1
        Vg(i,1)=Vini;
    end
    if i>=2
        Vg(i,1)=Vg(i-1,1)+Vstep;
    end
end

Vini2=0;
Vmax2=1.2;
Vstep2=0.05;

N=1+(Vmax2-Vini2)/(Vstep2);

for i=1:N
    if i==1
        Vd(i,1)=Vini2;
    end
    if i>=2
        Vd(i,1)=Vd(i-1,1)+Vstep2;
    end
end

n = length(Vd(:,1));
m = length(Vg(:,1));

- -
for l=1:m
    1
    fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[1,0,Vg(1,1),Ic])
    for i=1:n
        i % Per veure les iteracions

        % Aplicar tensions
        Vsamp(i,:)=Vd(i,:);
        fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[2,0,0,Ic])
        fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[4,0,Vd(i,1),Ic])
        fprintf(ins,'DV %e,%e,%e,%e',[3,0,0,Ic])

        % Llegir corrent Id
        fprintf(ins,'TI? %e,%e',[4,0]);
        Id(i,1)=fscanf(ins, '%f');

        % Pausa
        pause(0.1)

        % Fer el gràfic
        figure(5)
        hold on
        plot(Vd(i,1),Id(i,1),'o','color',colors(1,:));
        title('Id-vd en funció de Vg');
        xlabel('Vd (V)');
        ylabel('Id (A)');

    end
end
end
```

Annex L: Caracterització transistor oblea.

```
%Establir comunicació
clear all
close all

ins=gpiplib('ni',0,2); %conecta el PC con el instrumento
fopen(ins); % abre la comunicació con el instrumento
fprintf(ins,'*IDN?') % Pide identificació al instrumento

ident=fscanf(ins) %lee la identificació del instrumento
fprintf(ins,'US'); %activa el modo de comandos FLEX
fprintf(ins,'FMT %e',2); %Activa notació en ASCII
fprintf(ins,'CN %e,%e,%e,%e',[1,2,3,4]) %Habilita los SMUS 1,2,3 y 4close

%Comunicació Switching matrix
sw = gpiplib('ni',0,22);
fopen(sw);

fprintf(sw,'*IDN?');
id_sw = fscanf(sw)

%Configuración inicial del switching matrix
fprintf(sw,':OPEN ALL'); % abrir todos los relés

fprintf(sw,':CLOS (@10101,10202,10404)');

% Esperar que l'operació acabi
fprintf(sw,'*OPC?');
Complete = fscanf(sw,'%d');

colors= lines(10); % genera diferents colors

vth0 = 0;
t_total = 0;
Ic = 100E-3;

%Vg
Vini=0;
Vmax=1.2;
Vstep=0.05;

N=1+(Vmax-Vini)/(Vstep);

for i=1:N
    if i==1
        Vg(i,1)=Vini;
    end
    if i>=2
        Vg(i,1)=Vg(i-1,1)+Vstep;
    end
end

Id1(:,1) = funcio_RVS(ins,Ic,colors,1)
Ig(:,1) = funcio_ig_vg(ins,Ic,colors,1)
Id2(:,1) = funcio_id_vd(ins,Ic,colors)

Vth(1,1) = funcio_vth_t(Id1(:,1),Vg,t_total,vth0);

for l=1:6
    Vstress_g = 1.8;
    Vstress_d = 1.8;
    Tstress = 10;
    dt = 1;

    Id3(:,l+1) = funcio_CVS(Vstress_g,Vstress_d,Tstress,dt,Ic,ins,colors,l+1);
    t_total = t_total+Tstress;
    Id1(:,l+1) = funcio_RVS(ins,Ic,colors,l+1);
    Ig(:,l+1) = funcio_ig_vg(ins,Ic,colors,l)
    Id2(:,l+1) = funcio_id_vd(ins,Ic,colors)
    Vth(:,l+1) = funcio_vth_t(Id1(:,l+1),Vg,t_total,Vth(1,1));
end

fclose(ins) %cierra la conexión con el instrumento
fclose(sw)
```