



Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași

Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

CIRCUITE INTEGRATE MONOLITICE DE MICROUND

Curs 5

Ș.L. dr. ing. Iov J. Cătălin

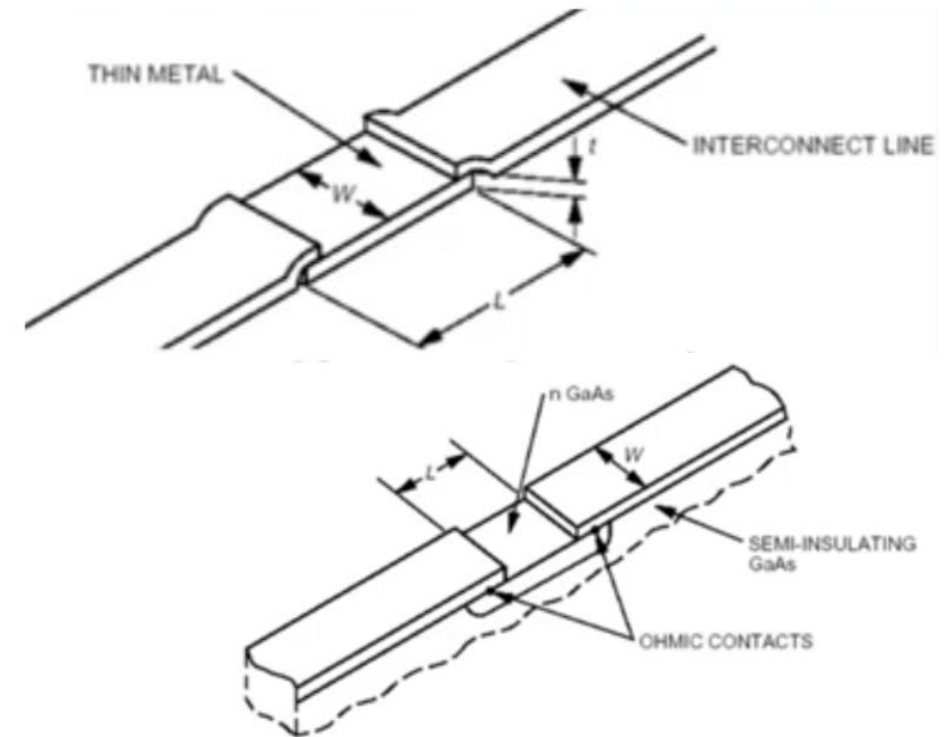
Componente în CIMM

- rezistoare
- condensatoare
- inductori
- treceri

- tranzistori
- diode

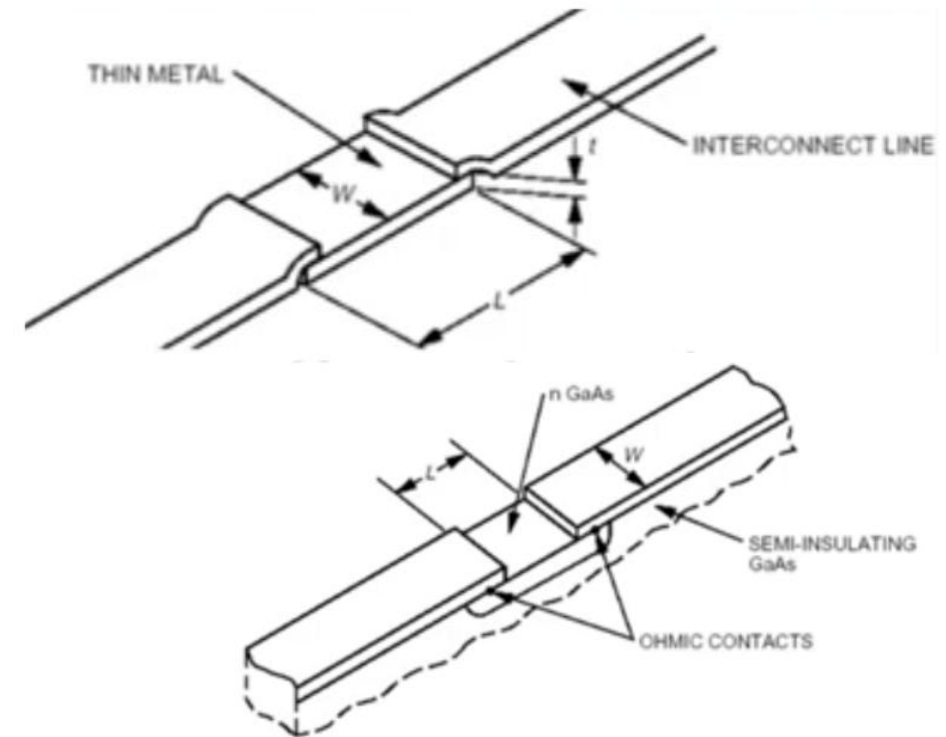
Rezistoare

- 2 tipuri uzuale de rezistori în CIMM, pentru fiecare caz existând contacte ohmice. În CIMM, ele sunt mai degrabă elemente funcționale decât de precizie.
- rezistoare pe film subțire



Rezistoare

- rezistori de strat active
 - rezistorul dreptunghiular simplu
 - rezistorul de tip "mesa" sau "island"
 - rezistorul simetric (split resistor)



Rezistoare

Condiții de proiectare și constrângeri

- densitatea de curent: fiecare material are o limită maximă de curent (ex. $0.5 \text{ mA}/\mu\text{m}$ de lățime). Dacă rezistorul este prea îngust pentru curentul de polarizare (DC), acesta se va deteriora.

Rezistoare

Condiții de proiectare și constrângeri

- disiparea termică: rezistoarele transformă energia în căldură. Trebuie calculată puterea disipată pe unitatea de suprafață (W/mm^2) pentru a evita distrugerea substratului sau modificarea valorii rezistenței prin efect termic.

Rezistoare

Condiții de proiectare și constrângeri

- efectul de margine: la frecvențe mari, curentul nu este distribuit perfect uniform. De asemenea, contactele metalice de la capete adaugă o rezistență de contact mică, dar care trebuie luată în calcul în designul de înaltă precizie.

Rezistoare – ex calcul numeric

Exemplu de calcul numeric 1: rezistor de polarizare (bias resistor)

Să presupunem că avem nevoie de un rezistor de 500Ω pentru rețeaua de polarizare a porții unui tranzistor.

Date de proces:

- $R_{\square} = 50 \Omega/\square$.
- cerință de curenți: rezistorul trebuie să suporte un curenți maxim de 10 mA.
- limită densitate curenți: $0.4 \text{ mA}/\mu\text{m}$.

Rezistoare – ex calcul numeric

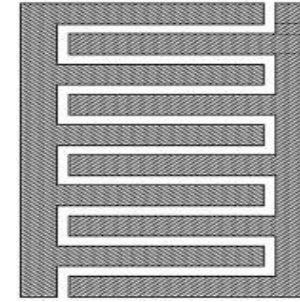
Pașii de calculare:

- calculul lățimii minime (W): pentru a suporta 10 mA, lățimea trebuie să fie $W_{min} = \frac{10 \text{ mA}}{0,4 \text{ mA}/\mu\text{m}} = 25 \mu\text{m}$

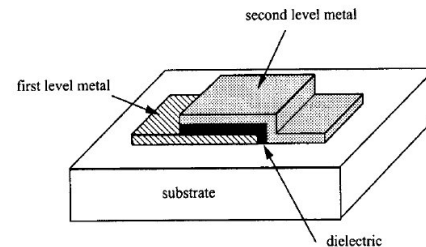
- calculul lungimii (L): folosind formula rezistenței: $500 = 50 \cdot \frac{L}{25}$
 $\frac{L}{25} = 10 \Rightarrow L = 250 \mu\text{m}$

Rezistorul va avea dimensiunile $250 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$. Este un rezistor lung, care va avea o inductanță parazită considerabilă, dar acest lucru este adesea acceptabil în rețelele de polarizare.

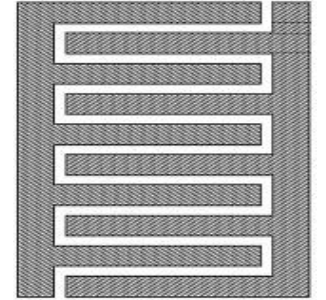
Condensatoare



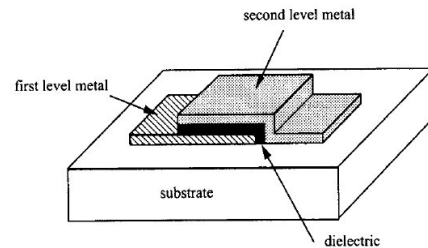
- condensatorul MIM (Metal-Insulator-Metal) - structura „sandviș”: un strat metalic inferior (de obicei Metal 1), un strat subțire de dielectric depus prin PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), frecvent Nitrură de Siliciu (Si_3N_4), și un strat metalic superior.



Condensatoare



- condensatorul interdigital - folosește un singur strat metalic



Condensatoare

Condiții de proiectare IDC:

- substratul: deoarece câmpul trece prin substrat, permitivitatea acestuia (ex. GaAs, $\epsilon_r \approx 12,9$) influențează direct valoarea.
- spațierea (gap - g): distanța dintre degete trebuie să fie minimă (limitată de rezoluția litografică a procesului, de obicei 1-5 μm) pentru a maximiza capacitatea.
- aplicație: se folosesc pentru valori foarte mici (sub 1 pF), în rețele de adaptare sau filtre, unde precizia este mai importantă decât densitatea.

Condensatoare

Condiții de proiectare IDC:

- substratul: deoarece câmpul trece prin substrat, permitivitatea acestuia (ex. GaAs, $\epsilon_r \approx 12,9$) influențează direct valoarea.
- spațierea (gap - g): distanța dintre degete trebuie să fie minimă (limitată de rezoluția litografică a procesului, de obicei 1-5 μm) pentru a maximiza capacitatea.
- aplicație: se folosesc pentru valori foarte mici (sub 1 pF), în rețele de adaptare sau filtre, unde precizia este mai importantă decât densitatea.

Condensatoare

Exemplu de calcul: Avem nevoie de un condensator de cuplaj de 150 fF (0.15 pF) pentru un amplificator la 30 GHz.

- configurație: alegem $N = 10$ degete, cu lățimea $W = 5\mu\text{m}$ și spațierea $g = 5\mu\text{m}$. Lungimea degetelor L va fi variabila noastră.

Condensatoare

Exemplu de calcul: Avem nevoie de un condensator de cuplaj de 150 fF (0.15 pF) pentru un amplificator la 30 GHz.

- regulă empirică: într-un proces standard pe GaAs, un condensator interdigital produce aproximativ 0.02 - 0.05 fF/ μm lungime totală de deget.

Condensatoare

Exemplu de calcul: Avem nevoie de un condensator de cuplaj de 150 fF (0.15 pF) pentru un amplificator la 30 GHz.

- calcul estimativ: dacă estimăm un randament de 0.3 fF/ μm de lungime a structurii (însumând toate degetele), pentru 150 fF avem nevoie de o lungime cumulată mare. Dacă folosim o aproximare mai directă: pentru $N=10$ și $L=100 \mu\text{m}$, obținem adesea valori în plaja 100-200 fF.

Condensatoare

Exemplu de calcul: Avem nevoie de un condensator de cuplaj de 150 fF (0.15 pF) pentru un amplificator la 30 GHz.

- design final: se va opta pentru $L \approx 80 \mu\text{m}$ pentru a atinge cei 150 fF, urmat obligatoriu de o simulare electromagnetică pentru a valida cuplajul cu planul de masă de pe spatele cipului.

Condensatoare

Considerații layout IDC:

- nu plasați condensatoare lângă un tranzistor de putere mare fără o izolare termică

Condensatoare

Considerații layout IDC:

- planul de masă (ground plane) să nu fie prea aproape pe fața superioară

Condensatoare

Considerații layout IDC:

- dacă proiectul trebuie să funcționeze la frecvențe mai mari (de exemplu în banda W, peste 90 GHz), trebuie mărit SRF prin scurtarea degetelor

Condensatoare

Considerații layout MIM:

- efectul de „step coverage” - metalul superior trebuie să treacă peste marginea dielectricului pentru a se conecta la restul circuitului

Condensatoare

Considerații layout MIM:

- densitatea de curent (electromigrarea): deoarece condensatorul MIM este foarte mic, tot curentul RF trece printr-o secțiune îngustă de metal

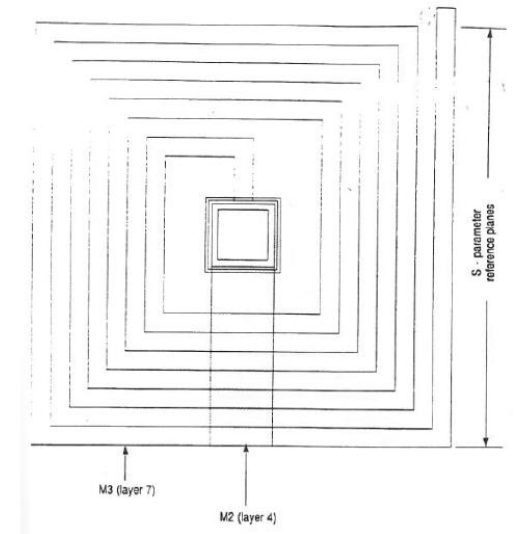
Condensatoare

Considerații layout MIM:

- capacitatea parazită la masă - placa inferioară a condensatorului MIM formează o capacitate parazită cu planul de masă de pe spatele cipului

Inductori

- sunt printre cele mai dificile componente passive
- utilizate pentru rețele de adaptare, filtre RF, circuite de polarizare RF (RF choke), rezonanță LC, izolarea RF-DC.
- **bobina planară spiralată**
- **bobina planară într-un singur strat**



trecerile (VIA)

- conectarea la masă (grounding): scurtcircuitarea elementelor de circuit la planul de masă de pe spatele cipului.
- disiparea termică: evacuarea căldurii de la tranzistoarele de putere către radiator.

treckerile (VIA)

Condiționalități de fabricare:

- aspect ratio: raportul dintre adâncime și diametru trebuie controlat pentru a asigura o metalizare uniformă a pereților.
- inductanță parazită: orice VIA introduce o inductanță care, la 30 GHz, poate acționa ca o impedanță semnificativă, "ridicând" potențialul de masă al circuitului.

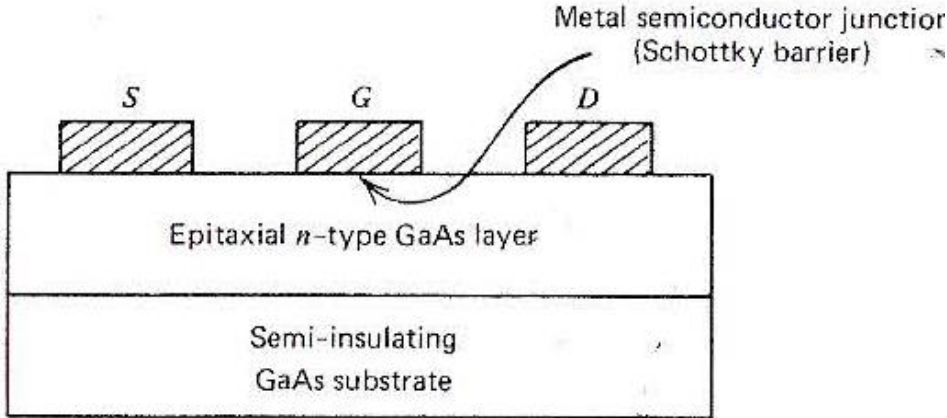
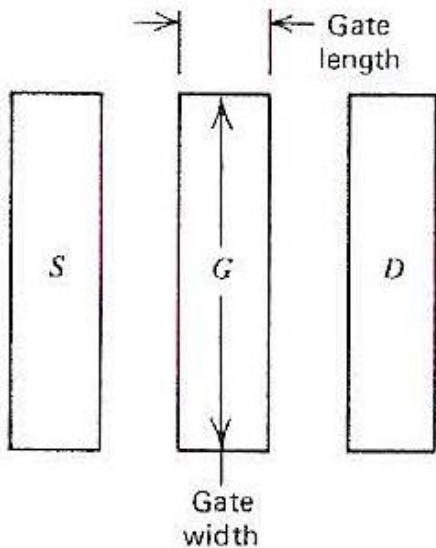
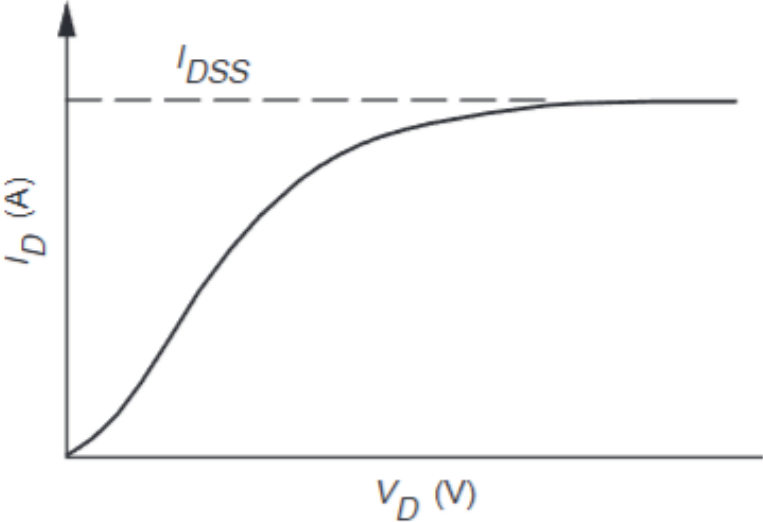
trecerile (VIA)

- VIA-uri în paralel: plasarea a două sau mai multe treceri una lângă alta reduce inductanța echivalentă
- pad-uri de captură: dimensiunea inelului de metal de deasupra trecerii trebuie să fie suficient de mare pentru toleranțele de aliniere, dar mică pentru a nu adăuga capacitate parazită față de alte linii.

trecerile (VIA)

- proximitatea față de tranzistor: în cazul tranzistoarelor de putere, trecerile VIA se plasează direct sub sursa tranzistorului pentru a minimiza inductanța de degenerare, care scade câștigul (G_{\max}).
- ecranarea (shielding): șiruri de VIA-uri sunt folosite pentru a crea "pereți" electromagnetici care previn cuplajul parazit între diferite secțiuni ale cipului (izolare între porturi).

Tranzistorul MESFET



Elemente de proiectare și producție CIMM

- constrângerile tehnologice ale companiei producătoare (foundry) trebuie cunoscute
- tipul de tehnologie

Elemente de proiectare și producție CIMM

Particularități specifice se află în:

- stackup-ul metalizărilor,
- opțiuni de via/grounding,
- PDK (process design kit = structura de layere + elemente microstrip/CPW parametrice)

Elemente de proiectare și producție CIMM

flux tipic de proiectare a CIMM:

1. Selectezi procesul (ex. GaAs pHEMT pentru LNA/driver, GaN HEMT pentru PA de putere mare).

2. Încarci PDK-ul în ADS/AWR:

- ai simboluri parametrice pentru tranzistoare (multi-finger, W total, număr de degete, etc.),

- ai bibliotecă de componente pasive (MIM cap, rezistențe, bobine spiralate, linii microstrip/CPW),

- ai verificări: DRC în layout, LVS/extracție (unde e disponibil).

Elemente de proiectare și producție CIMM

3. Simulezi:

- semnal mic (parametrii S, stabilitate, zgomot),
- semnal mare (HB: P1dB, PAE, intermodulație),
- eventual electro-termic (mai comun în GaN; unele foundry-uri pun accent pe integrarea termică în PDK).

4. Layout cu celule/layere specifice procesului.

5. DRC/LVS (treci de verificări) → apoi tape-out (GDS).

6. MPW sau producție + măsurători on-wafer; apoi recalibrare de model dacă e cazul (în limitele permise).

Elemente de proiectare și producție CIMM

pentru a proiecta un CIMM ai nevoie de la foundry:

- tehnologia exactă
- PDK complet (active + pasive)
- modele de semnal mare/mic + zgomot
- stackup + substrat
- DRC + LVS
- reguli de fiabilitate
- suport EM

Foundries (fabricatori)

- **Fabricatorul WIN Semiconductors**
- **Fabricatorul Plessey**

Foundries (fabricatori)

- în funcție de compania ce deține un foundry, și de anvergura și tipul/vârsta tehnologiilor, informațiile despre limitările producătorilor de CIMM sunt partajate parțial sau complet cu publicul
- în general, informațiile publice sau semi-publice pot fi regăsite pe pagina web a producătorului (foundry), în broșuri de proces (capabilități generale, domenii de frecvență, clase de tehnologii), în exemple de PDK suportate în anumite unelte EDA (ADS/AWR) la nivel de listă/capabilități sau în articole, lucrări și aplicații care menționează procesul folosit

Foundries (fabricatori)

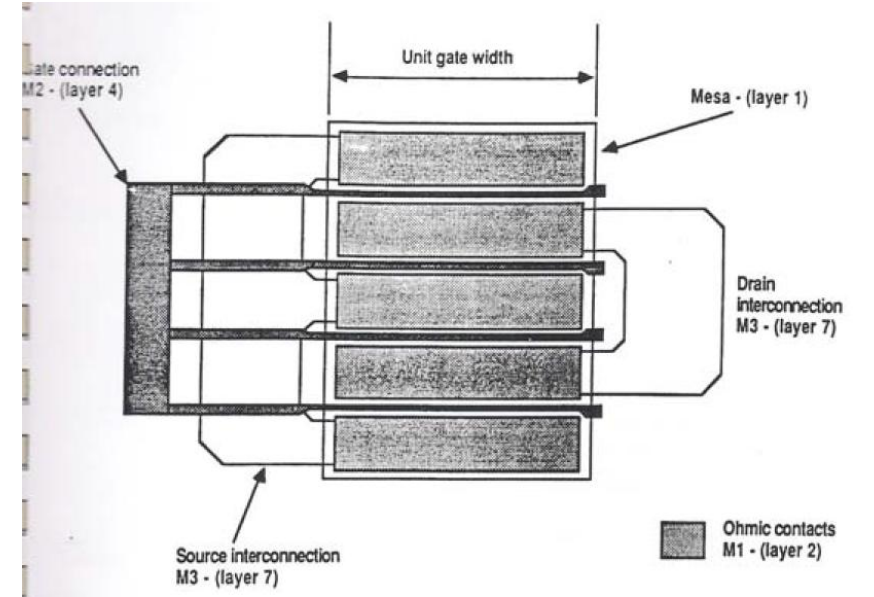
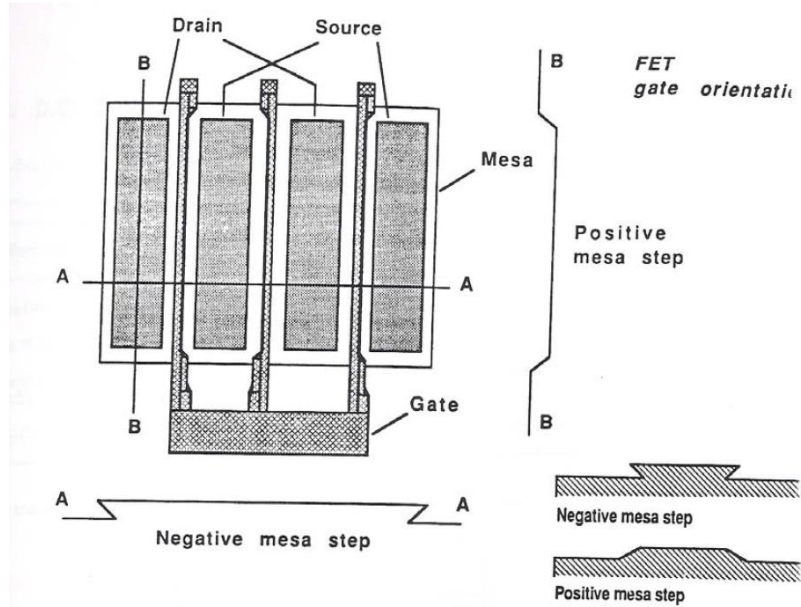
De regulă sub NDA, oferit clienților, se pun la dispoziție informații despre:

- setul complet de DRC/LVS (reguli exacte de layout)
- modelele detaliate (de semnal mic, de semnal mare, de zgomot) pe toată plaja de polarizare (toate combinațiile relevante de V_{GS} și V_{DS} în care dispozitivul poate funcționa realist, sigur și util)

Foundries (fabricatori)

De regulă sub NDA, oferit clienților, se pun la dispoziție informații despre:

- fișierele de stackup/EM calibrate, substrat exact, biblioteci complete de celule (setul de componente cu care ai voie să construiești circuitul)
- ghiduri de fiabilitate/derating, detalii de proces cu sensibilitate competitivă (derating = folosirea intenționată a tehnologiei sub stresul maxim posibil)



Layer 1 (Mesa)	izolarea electrică a ariilor active (FETuri și rezistoare)
Layer 2 (M1)	metalizarea pentru contacte ohmice. NU SE FOLOSEȘTE pentru interconexiuni
Layer 3 (Mesa)	rezistoare Mesa
Layer 4 (M2)	metalizarea Schottky pentru grila FET, electrodul inferior pentru condensatoare MIM, primul nivel de interconexiuni, condensatoare interdigitale
Layer 5 (nitride 1)	pasivizarea ariilor active a FET, dielectricul condensatoarelor MIM
Layer 6 (polymide)	dielectricul interstraturi pentru trecerile metalizate, dielectricul din condensatoarele MIM
Layer 7 (M3)	al doilea nivel de interconexiuni, bobinele, electrodul superior al condensatoarelor MIM, liniile de transmisiune, padurile de margine
Layer 8 (nitride 2)	încapsularea întregului circuit cu ariile de paduri exterioare lăsate libere
Layer 9	definirea geometriei de poartă pentru FET de 0,5/0,7 μm
Layer 10	definește extinderea ariei active a circuitului
Layer 11 (VIA)	definește trecerile VIA prin GaAs
Layer 12 (aliniere)	doar implantare selectivă pentru a defini amplasarea corectă a implantărilor ulterioare
Layer 13 (implant 1)	definește aria pentru prima implantare selectivă
Layer 14 (implant 2)	definește aria pentru a doua implantare selectivă