



Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” din Iași

Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

CIRCUITE INTEGRATE MONOLITICE DE MICROUND

Curs 4

Ș.L. dr. ing. Iov J. Cătălin

Caracteristici specifice

- Analiză distribuită
- Pierderi și efecte parazite importante

Analiză distribuită

- lungimea fizică a conductorilor devine comparabilă cu lungimea de undă electromagnetică
- tensiunea și curentul nu mai sunt constante de-a lungul unui fir, traseu, conductor

Analiză distribuită

- analiza distribuită:
 - tensiunea și curentul depind de poziție x și de timp t ,
 - liniile de transmisie sunt tratate ca medii distribuite,
 - parametrii R , L , G , C sunt raportați pe unitatea de lungime (Ω/m , H/m , S/m , F/m).

Analiză distribuită

- pentru o linie de transmisie (sau o interconexiune CIMM), scriem:

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = -(R + j\omega L)I(x, t)$$

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = -(G + j\omega C)V(x, t)$$

- acestea sunt ecuațiile telegrafistilor - baza teoriei liniei distribuite.

- prin derivare, obținem ecuația de undă:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \gamma^2 V, \quad \text{unde } \gamma = \alpha + j\beta$$

- unde:

- α = atenuare [Np/m]
- β = constantă de fază [rad/m]

Analiză distribuită

- fiecare segment de conductor are lungime efectivă comparabilă cu $\lambda/4$ sau $\lambda/2$;
 - pot apărea reflexii, pierderi, deplasări de fază;
 - impedanța nu mai este un număr fix, ci variază cu poziția și frecvența;
 - pentru adaptare (matching), se folosesc rețele distribuite, nu doar LC.

Analiză distribuită

Caracteristică	Analiză concentrată	Analiză distribuită
Domeniu	joasă frecvență (kHz – MHz)	microunde (GHz)
Modelare	Componente R, L, C separate	parametri R', L', G', C' per unitate de lungime
Variabile	Tensiune și curent uniforme în noduri	V(x), I(x) variază de-a lungul liniei
Efecte fizice	neglijabile (reflexii, întârzieri)	dominante (reflexii, faze, unde staționare)
Reprezentare	circuite concentrate	linii de transmisie, ghiduri de undă, microstripuri
Analiză	legi Kirchhoff	ecuațiile telegrafiștilor / undelor

Analiză distribuită

- în proiectare, fiecare traseu metalic sau microstrip este:
 - modelat prin parametri distribuiți (R' , L' , G' , C');
 - analizat prin parametrii s în funcție de frecvență;
 - optimizat pentru adaptare de impedanță și fază.

Analiză distribuită

- la frecvențe de GHz:
 - chiar și o rezistență sau o capacitate integrată prezintă comportament de linie;
 - componentele discrete devin elemente distribuite parțial (au inductanță de legătură, capacități parazite, întârziere);

Structură	Descriere	Rol
Microstrip	linie metalică pe un substrat dielectric	interconectare între blocuri
Coplanar waveguide (CPW)	linie între două planuri de masă paralele	bună izolare și integrare
Stub $\lambda/4$	linie de transmisie lungime $\lambda/4$	echivalent cu o reactanță LC
Cavitate rezonantă	segment de linie rezonant la o frecvență	filtrare / acord
Linii de întârziere (delay lines)	linii distribuite lungi	ajustare de fază

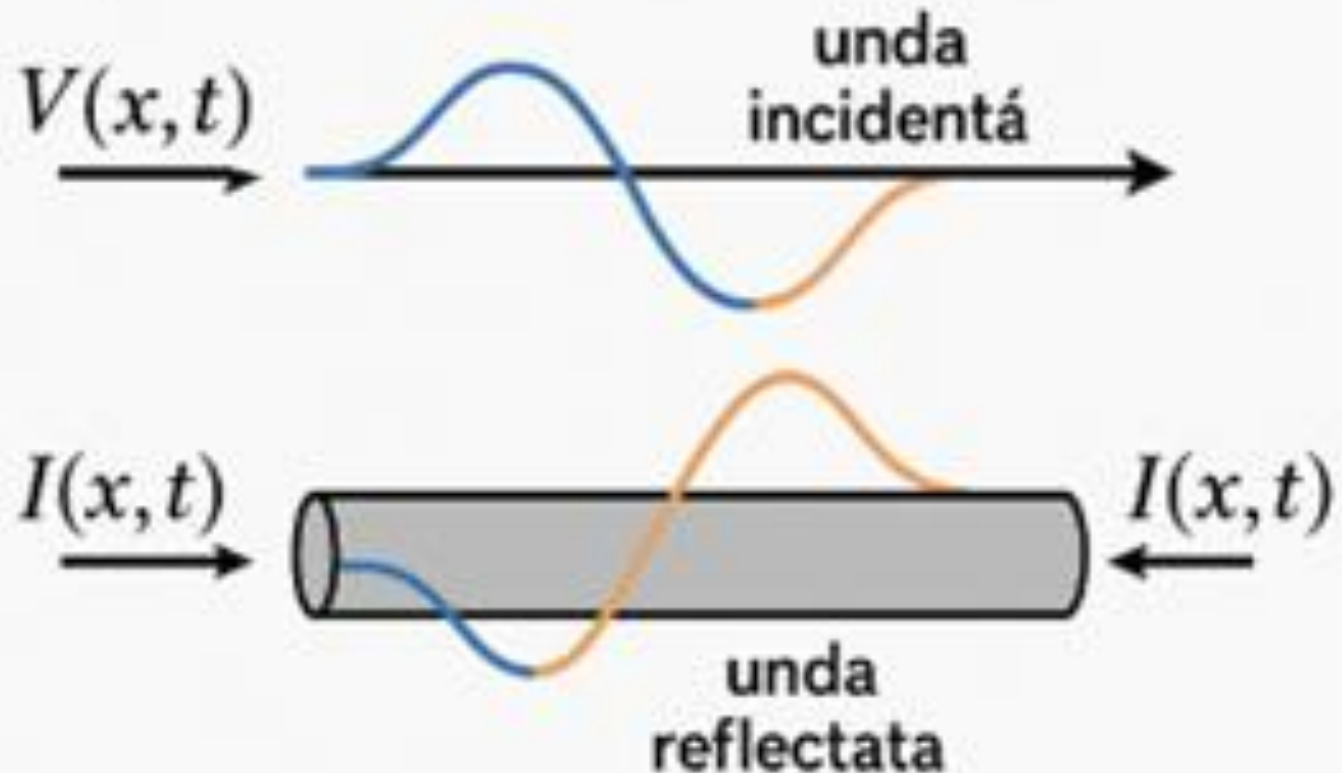
Analiză distribuită

analiza concentrată și cea distribuită, cu o linie de transmisie și variația tensiunii/curentului de-a lungul ei

Regim concentrat



Regim distribuit



Pierderi și efecte parazite importante

- componentele și interconexiunile nu mai pot fi considerate ideale;
- există pierderi electromagnetice, conductoare, dielectrice;

Pierderi și efecte parazite importante

- se manifestă efecte parazite (inductanțe, capacități, cuplaje, rezonanțe);
- toate acestea influențează câștigul, zgomotul, stabilitatea, adaptarea circuitului.

Tipuri principale de pierderi în CIMM

a) Pierderi în conducție (conduction losses)

- apar în metalizările MMIC (aur, aluminiu, cupru).
- datorate efectului pelicular (skin effect) - curentul se concentrează la suprafața conductorului.
- rezultatul: crește rezistența efectivă cu frecvența

$$R_{ac} = R_{dc} \cdot \frac{\delta_0}{\delta(f)} = R_{dc} \cdot \sqrt{\frac{f}{f_0}}$$

Tipuri principale de pierderi în CIMM

b) Pierderi dielectrice (dielectric losses)

- Se produc în substratul semiconductor (GaAs, GaN, SiGe) sau în stratul izolator.
- Se datorează conductivității finite și polarizării imperfecte a dielectricului.
- Caracterizate prin tangenta de pierdere: $\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$

Tipuri principale de pierderi în CIMM

c) Pierderi de radiație (radiation losses)

- traseele microstrip (sau coplanare) se comportă ca antene parțiale.
- la frecvențe înalte și dimensiuni comparabile cu $\lambda/4$ → radiază în aer.
- provoacă pierderi de putere și cuplaje electromagnetice între linii

Tipuri principale de pierderi în CIMM

d) Pierderi prin contact și interconexiune

- la interfața dintre straturi metalice, contacte ohmice imperfecte;
- fire bonding (în module hibride) → inductanță și rezistență parazită;
- în CIMM → reducerea câștigului și distorsiuni

Tipuri principale de pierderi în CIMM

Efect parazit	Descriere	Consecință practică
Capacități parazite	între linii, pad-uri, substrat	schimbă impedanța, apar rezonanțe
Inductanțe parazite	în legături și trasee metalice	defazaj, reflexii, instabilitate
Cuplaj electromagnetic (EM coupling)	între linii adiacente	diafonie, transfer de energie nedorit
Efect de substrat	curenți paraziți în stratul semiconductor	pierderi suplimentare, zgomot crescut
Rezonanțe interne	în cavități sau trasee $\lambda/2$	neuniformitate în banda de frecvență
Efecte termice	disipare locală în tranzistoare	modifică parametrii S, zgomotul și stabilitatea
Efect de piele (skin effect)	curent concentrat la suprafață	rezistență crescută, pierderi de putere

Surse de pierderi în CIMM

Tranzistor FET MMIC

- are capacități gate–source și gate–drain parazite (C_{gs} , C_{gd});
- acestea limitează banda de câștig;
- apare efectul feedback capacitiv → posibilă instabilitate.

Surse de pierderi în CIMM

Linie microstrip

- prezintă pierderi dielectrice + pierderi conductorice;
- variații ale impedanței datorită toleranțelor tehnologice (lățime, grosime).

Surse de pierderi în CIMM

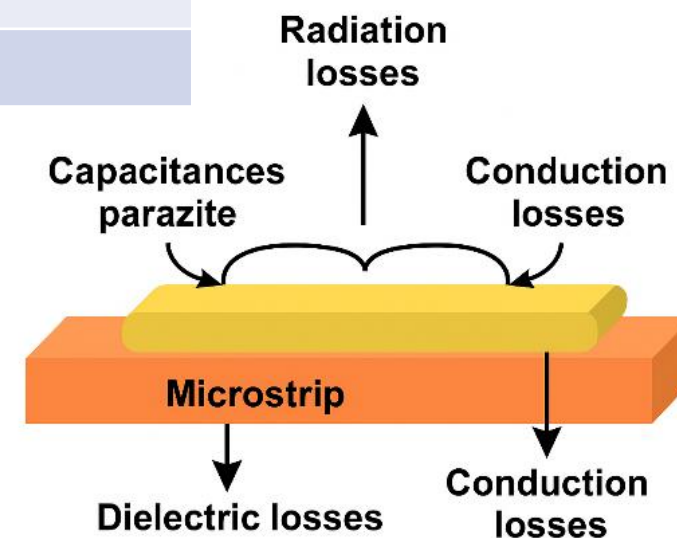
Rețea de adaptare $\lambda/4$

- poate deveni recombinantă sau rezonantă dacă lungimea reală $\neq \lambda/4$ exact;
- efectele parazite modifică faza și adaptarea.

Pierderi în CIMM – soluții

Metodă	Explicație
Alegerea substratului cu pierderi reduse (GaAs, AlN)	scade $\tan\delta$
Metale de bună conductivitate (Au, Cu)	reduc efectul pelicular
Linii cât mai scurte, cu lățime optimă	reduc atenuarea
Ecranare și planuri de masă	reduc cuplajul EM
Simulare electromagnetică 3D (EM co-simulation)	identifică rezonanțe și diafonie
Rețele de adaptare corect dimensionate ($\lambda/4$)	minimizează reflexiile
Polarizare termică controlată	menține stabil parametrii tranzistorului

pierderi și efecte parazite (linia microstrip, pierderi în conductor, în substrat, radiație și capacități parazite între trasee)

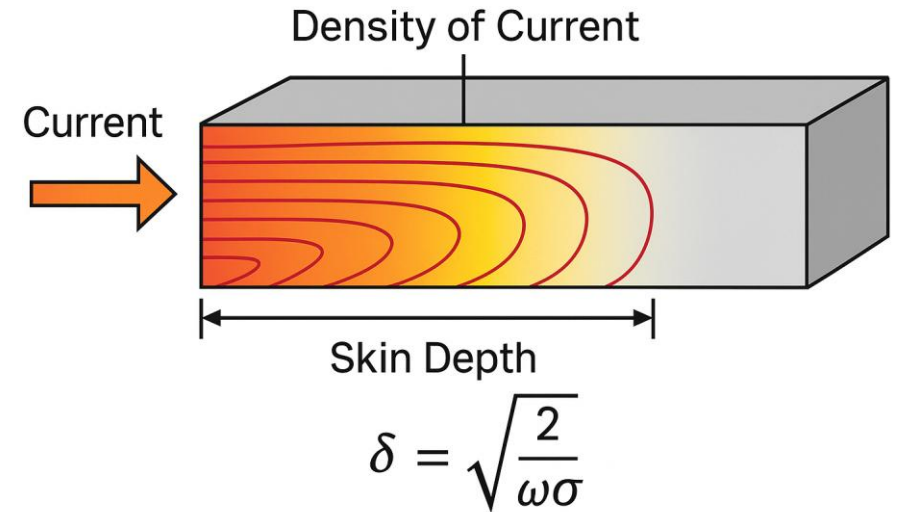


Fenomene fizice caracteristice

- Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă
- Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată
- Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

- reflectate,
- refractate,
- absorbite,
- conduse
- ghidate



Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

La frecvențe de microunde

- efectul de peliculă (skin effect)
- pătrunderea câmpului electromagnetic în metal
- reflexii incomplete
- pierderi ohmice distribuite
- apariția modurilor de propagare în ghiduri

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

Comportamentul ideal:

- $\vec{E}_{\text{tangential}} = 0$ la suprafața metalului
- unda reflectată are aceeași amplitudine cu unda incidentă
- faza undei se schimbă cu 180° (inversare de semn)
- $\Gamma = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

Comportamentul real

- $Z_s = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$, unde $\sigma =$ conductivitatea, $\omega = 2\pi f$, $\mu =$ permeabilitatea

Coeficientul de reflexie devine $\Gamma = (Z_s - Z_0) / (Z_s + Z_0)$

- Pentru că $|Z_s| \ll Z_0$, se obține:
- $\Gamma \approx -1 + \epsilon$
- o pierdere prin absorbție mică, dar nenulă

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

Adâncimea de pătrundere în metal este $\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$

La frecvențe mari, curenții electrici sunt împinși către suprafața conductorului

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

Caracteristici:

- cu creșterea frecvenței, δ scade proporțional cu $1/\sqrt{f}$
- curentul se concentrează într-un strat foarte subțire
- rezistența conductorului crește
- pierderile ohmice cresc
- reflexiile devin mai puțin ideale

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

efecte ale reflexiei pe metal

- scăderea amplitudinii unde reflectate
- apariția unde transmise (foarte mică)
- încălzirea metalului
- modificarea fazei unde reflectate
- apariția pierderilor prin curent de suprafață
- interferență între unda incidentă și cea reflectată (unde staționare)

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

- structură metalică (de obicei secțiune rectangulară sau circulară) care transportă energie electromagnetică prin reflexii interne successive
- unda electromagnetică lovește pereții interni metalici și este reflectată repetat, producând un mod de propagare stabil.

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

- câmpurile nu sunt uniforme
- există distribuții complexe ale modurilor
- apar moduri TE (Transversal Electric), TM (Transversal Magnetic), uneori TEM (rar în ghiduri metalice solide)

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

- câmpurile nu sunt uniforme
- există distribuții complexe ale modurilor
- apar moduri de propagare:
 - TE (Transversal Electric),
 - câmpul electric NU are componentă longitudinală
 - cel mai des întâlnit: TE_{10} în ghid rectangular
 - TM (Transversal Magnetic),
 - câmpul magnetic nu are componentă longitudinală
 - TEM (rar în ghiduri metalice solide)

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

- frecvența de tăiere

- pentru un ghid rectangular

• a, b = dimensiunile ghidului

• m, n = indici de mod

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

ghidul de undă nu poate propaga frecvențe sub frecvența de tăiere

- pentru modul fundamental TE₁₀, $f_c = c/2a$

- ghid cu dimensiunea $a = 22.86$ mm, are $f_c \approx 6.56$ GHz

- sub 6.56 GHz → unda este atenuată rapid

- peste această valoare → unda se propagă

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

- pentru mod TE:
$$Z_{TE} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

- pentru mod TM:
$$Z_{TM} = Z_0 \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$$

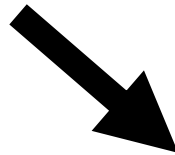
-

- la frecvența de tăiere → impedanța devine infinită (TE) sau zero (TM)

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

la interiorul ghidurilor de undă:

- reflexiile la pereții metalici sunt aproape totale
- undele staționare apar dacă sarcina nu este adaptată
- coeficientul de reflexie depinde de mod și de sarcină



- fenomenul de undă staționară
- pozițiile nodurilor și ventrelor
- pierderi suplimentare
- transfer ineficient de putere

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

Pierderi în ghidurile de undă (teoretic idexistente):

- pierderi ohmice → prin efect skin
- pierderi prin radiație → la discontinuități
- pierderi dielectrice → dacă ghidul conține un dielectric

Reflexie pe suprafețe metalice → ghiduri de undă

Pierderi în ghidurile de undă (teoretic idexistente):

- pierderi prin rugozitatea pereților
- pierderi la colțuri sau îndoiri
- pierderi prin excitație moduri nefundamentale

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

- Dielectricele
 - în general izolatoare
 - interacționează puternic cu câmpurile electromagnetice, în special la frecvențe ridicate (RF, microunde, millimeter-wave)
- interacțiunea produce absorbția energiei electromagnetice, care este transformată în căldură prin mecanisme moleculare și dipolare

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

- încălzirea prin microunde
- procese industriale (uscare, sinterizare, topire controlată)
- aplicații medicale (diatermie, ablație RF)
- senzori de umiditate și permittivitate
- tehnologia materialelor și tratamente termice localizate

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

Polarizarea dielectrică

- polarizare electronică (deplasarea norului electronic)
- polarizare ionică
- polarizare dipolară (orientațională) – dominantă în încălzirea RF/microunde
- polarizare interfacială (Maxwell-Wagner)
- relaxare dipolară (importantă la frecvențe ridicate)
 - întârzie
 - pierde energie prin frecare internă
 - generează căldură prin relaxare termică

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

absorbția și transformarea în căldură

- ciocniri intermoleculare
- frecare dipolară
- relaxare termică



Energia pierdută se transformă în:

$$P = \omega \epsilon'' |E|^2$$

- P = puterea disipată în volum (W/m^3)

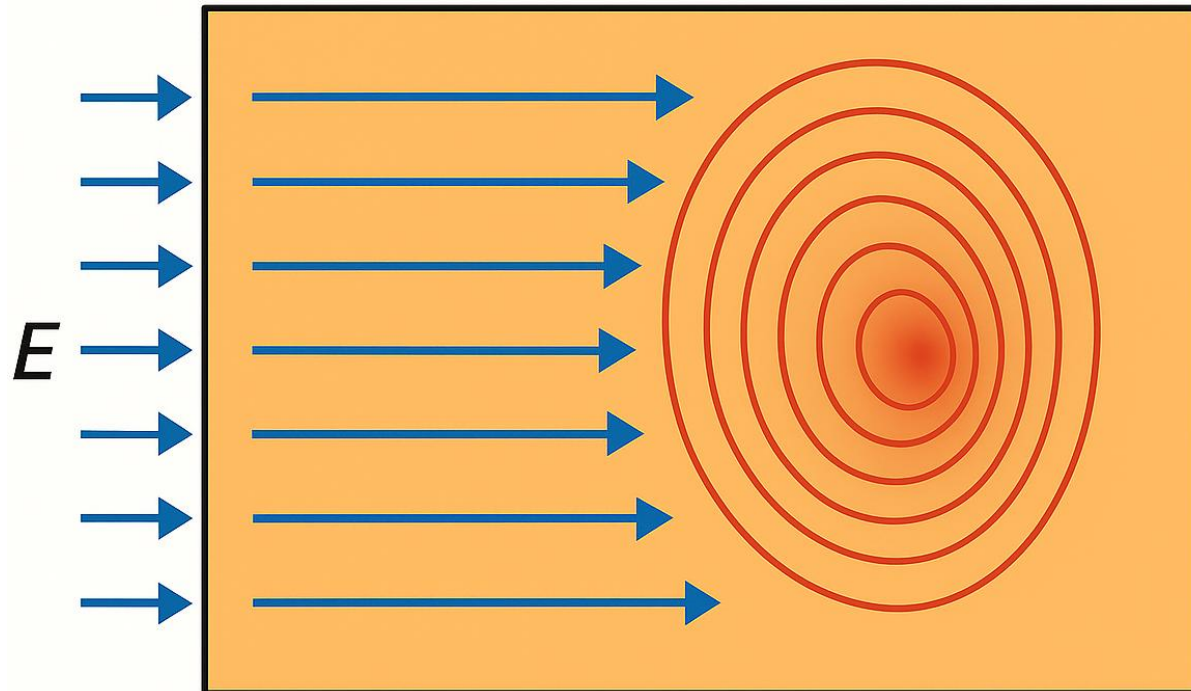
$$- \omega = 2\pi f$$

- $|E|$ = amplitudinea câmpului electric

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

- distribuție uniformă sau localizată a temperaturii
- evitarea carbonizării sau degradării
- viteza optimă a procesului
- controlul temperaturii în timp real
- efect termic predictibil și repetabil

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată



Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

factori

1. Frecvența câmpului electromagnetic
2. Permitivitatea materialului
3. Dimensiunea și forma obiectului
4. Geometria camerei de încălzire
5. Conducția termică a materialului

Absorbție în materiale dielectrice → **încălzire controlată**

factori

Exemple de materiale puternic absorbante

Material	ϵ'	ϵ''	$\tan \delta$	Observații
Apă	78–80	12–14	~0.15	Încălzire foarte eficientă
Lemn umed	5–10	0.5–1	0.1	Absorbant, depinde de umiditate
Ceramici	4–10	0.01–0.1	foarte variabil	Posibilă sinterizare cu microunde
Materiale plastice	2–3	<0.01	foarte slab	Nu se încălzesc direct

Absorbție în materiale dielectrice → încălzire controlată

aplicatii

industriale

1. Încălzire prin microunde
 - cuptoare industriale
 - topire materiale plastice
 - activarea adezivilor
 - încălzirea materialelor compozite
2. Sinterizare de ceramică și pulberi
 - Fără contact, încălzire rapidă și uniformă.
3. Uscare de materiale
 - Hârtie, textile, lemn, materiale alimentare.
4. Procese chimice asistate de microunde
 - Creșterea vitezei reacțiilor chimice.

Absorbție în materiale dielectrice → **încălzire controlată**

aplicatii

biomedicale

1. Diatermie RF
 - Încălzire terapeutică a țesuturilor.
2. Ablajie RF/microwave
 - distrugerea țesutului tumoral
 - generarea de căldură localizată în zone mici
3. Hypertermie controlată
 - încălzirea tumorilor la 41–45°C pentru radiosensibilizare

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

utilizarea și modelarea precisă a dielectricilor, utilă pentru:

- proiectarea liniilor de transmisie (microstrip, CPW, stripline);
- optimizarea rezonatorilor și filtrelor;
- dezvoltarea senzorilor dielectrice;
- caracterizarea substraturilor (GaAs, GaN, SiC, InP).

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

două fenomene esențiale ale dielectricelelor la microunde sunt:

- dispersia dielectrică;
- rezonanța dielectrică

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

dispersia dielectrică – dependența permitivității dielectrice de frecvență:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)$$

Componenta reală:

- determină viteza de propagare a undelor
- influențează lungimea de undă, impedanța liniei, parametrii S

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

dispersia dielectrică – dependența permitivității dielectrice de frecvență:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega)$$

Componenta imaginară:

- determină pierderile dielectrice, deci încălzirea materialului
- afectează Q-ul rezonatorilor și zgomotul circuitelor

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

Mecanisme principale:

- polarizare electronică
- polarizare ionică
- **polarizare dipolară (relaxare Debye) – dominantă în RF/microunde**
- rezonanțe interne moleculare (oscilații rotaționale/vibraționale)
- dispersie Maxwell–Wagner în materiale neomogene/compozite

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

Rezonanța datorată:

- un mod specific de vibrație moleculară
- geometriei rezonatorului

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

- Tipuri:
- Rezonanță moleculară – EM interacționează cu dipoli naturali
- Rezonanță geometrică – materialul funcționează ca un rezonator dielectric (un volum dielectric cu permitivitate mare)

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

măsurarea dispersiei/rezonanței:

1. Metoda cu ghid de undă / linie coaxială

- se măsoară parametrii S ai unei secțiuni de material introdus într-un ghid:
- extragere ϵ' și ϵ''
- aplicabilă - 1–100 GHz

2. Metoda cu cavitate rezonantă

- frecvența de rezonanță
- factorul de calitate Q

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

măsurarea dispersiei/rezonanței:

3. Metoda cu rezonator dielectric (DR) (Ideală pentru materiale cu pierderi foarte mici (low-loss))

4. Metode bazate pe linii CPW/Microstrip în MMIC

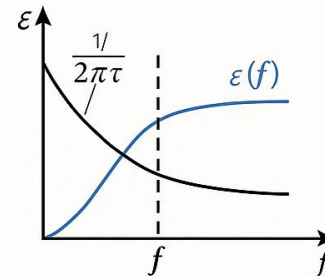
- Se fabrică linii test pe chip:
- linie scurtă
- linie lungă
- linii cu dielectrice diferite
- comparând parametrii S → extragem ϵ_{eff} și pierderile.

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

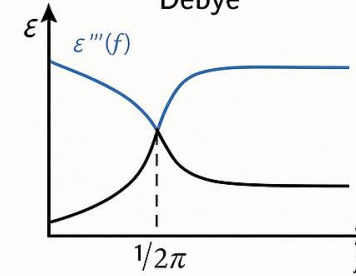
- senzori bazati pe microstrip
- senzori cu rezonator dielectric (DR Sensor)
- senzori cu patch rezonant
- senzori evanescenti

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

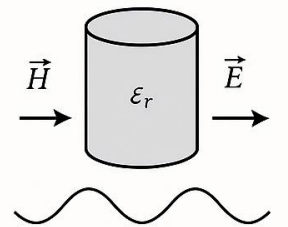
DISPERSIE DIELECTRICĂ



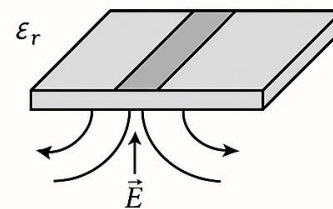
$\epsilon_i(f)$ și $\epsilon''(f)$ în Modelul Debye



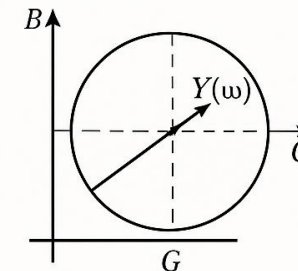
REZONANȚĂ DIELECTRICĂ



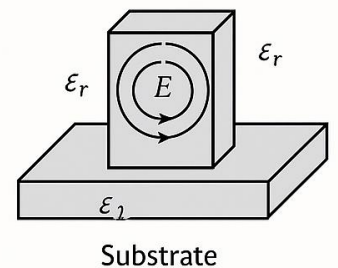
SENSOR DIELECTRIC CU MICROSTRIP



GRAFIC DE ADMISIBILITATE



SENSOR CU REZONATOR DIELECTRIC



Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

Aplicații:

- caracterizarea substraturilor CIMM, măsurarea exactă $\epsilon_r(\omega)$, critică pentru designul:
 - filtrelor
 - amplificatoarelor cu linii distribuite
 - antenelor integrate
 - oscilatoarelor
- senzori de proces industrial
 - umiditate în materiale
 - densitate
 - compoziție
 - temperatură (prin schimbarea ϵ')

Dispersie și rezonanță dielectrică → măsurători și senzori

Aplicații:

- măsurări medicale non-invazive
 - hidratarea pielii
 - compoziția țesuturilor
 - detectarea formațiunilor tumorale (diferite ϵ)
- internet of Things (IoT) – senzori integrați RF