

fizica defectelor, care utilizează mijloace de investigare sofisticate, mergând pînă la structura internă a materiei.

Pornind de la această analiză este posibil să se prognozeze comportarea componentelor — deci implicit a sistemului din care acestea fac parte — în diferite condiții de solicitare; totodată, plecînd de la analiza defectărilor se pot lua măsuri de îmbunătățire a fiabilității pentru generațiile următoare de componente.

În continuare, vor fi evidențiate principalele moduri și mecanisme de defectare a componentelor utilizate în sistemele electronice și vor fi trecute în revistă metode de investigare a fiabilității componentelor, utilizate de fizica defectelor.

10.5.1. MODURI ȘI MECANISME DE DEFECTARE A COMPONENTELOR ELECTRONICE

Prin *mod de defectare* al unei componente se înțelege condiția sau parametrul de stare observabil sau măsurabil al acesteia, care explică nefuncționarea componentei în sistem (de exemplu: scurtcircuit sau întrerupere; deriva unor parametri în afara limitelor admisibile etc.).

Prin *mecanism de defectare* se înțelege modificarea fizică, chimică și mecanică sau condiția care produce modul de defectare observat (de exemplu, mecanismul unui scurtcircuit al unui condensator poate fi străpungerea dielectricului cauzată de o tensiune excesivă).

Metodele moderne de analiză a fiabilității sistemelor implică determinarea tuturor modurilor de defectare ale elementelor componente, cu evidențierea modului lor de defectare dominant.

Proiectarea sistemelor fiabile impune o analiză fiabilistică mai aprofundată, fiind necesară luarea în considerare nu doar a două stări de bună funcționare și de defectare, ci a mai multor stări; o stare de bună funcționare și mai multe stări de defectare — corespunzătoare modurilor de defectare [9].

În tabelul 10.9 sînt prezentate unele moduri și mecanisme de defectare ale principalelor tipuri de rezistoare.

După cum rezultă din tabelul 10.9, modurile principale de defectare ale rezistoarelor constau în întreruperea sau modificarea (deriva) rezistenței. Posibilitatea de defectare prin scurtcircuit depinde de tipul rezistorului și tehnologia utilizată.

Pentru asigurarea unei înalte fiabilități, ținînd cont că toate tipurile de rezistoare sînt sensibile la solicitări electrice, este recomandabil ca încărcarea în putere a rezistoarelor să nu depășească 50 % din puterea nominală, iar tensiunea instantanee să nu depășească valoarea maxim admisă la temperatura ambiantă maximă de lucru.

De remarcă contribuția temperaturii înalte și a șocurilor termice la modificarea și întreruperea rezistenței, ceea ce impune ca plasarea rezistoarelor să se facă cît mai departe de sursele de căldură, asigurînd eventual o răcire forțată, ca și prin tăierea terminalelor — prin care se evacuează 60 ... 90 % din căldura disipată de rezistor — de o lungime corespunzătoare (minim 1,5 cm).

Solicitările mecanice conduc — de obicei — la întreruperea rezistenței, în timp ce umiditatea ridicată conduce la modificarea rezistenței datorită scurgerilor la suprafață.

În tabelul 10.10 sînt indicate unele moduri și mecanisme de defectare ale principalelor tipuri de condensatoare.

10.5.3. METODE DE INVESTIGARE A FIABILITĂȚII COMPONENTELOR ELECTRONICE

Metodele de investigare utilizate în analizele legate de fizica defectelor vor fi clasificate în cele ce urmează în funcție de fenomenul fizic pe care se bazează.

Radiații electromagnetice. *Lumina.* Examenul sub lupă sau cu microscopul optic este util pentru o primă investigare a componentelor defecte.

Baleiajul de lumină. Permite detectarea imperfecțiunilor componentelor, utilizând baleierea cu un fascicul îngust (diametrul spotului de $35 \mu\text{m}$) de lumină vizibilă.

Radiații infraroșii. Utilizând fenomenele de transfer, de căldură sau de emisie a căldurii, se pot obține *hărți termice* de suprafață care evidențiază „punctele calde” și alte imperfecțiuni. Spectrul infraroșu utilizat se întinde între 1 și $10 \mu\text{m}$. După caz se pot utiliza sisteme de televiziune în infraroșu sau microscopie în infraroșu (cu sau fără baleiaj automat).

Raze X. Este posibilă realizarea unor „radiografii” a componentelor, chiar încapsulate, reliefându-se eventualele imperfecțiuni de montaj. În scopul relevării imperfecțiunilor structurilor semiconductoare este utilizată difracția razelor X.

Radiații corpusculare. *Electronii.* Un fascicul de electroni, trimis în vid pe suprafața unui dispozitiv, conduce la apariția unor fenomene diverse, cum ar fi emisia unei radiații secundare de electroni mai lenți și emisia de radiații X secundare.

Bazat pe acest fenomen, *microscopul electronic cu baleiaj* este la ora actuală larg utilizat pentru studii de fizica defectelor (în special în cazul dispozitivelor semiconductoare), prin faptul că permite observații topografice cu un grad de mărire accentuat și o profunzime a câmpului deosebită, ca și observații electrice ale componentei polarizate; acestea din urmă permit vizualizarea hărților de potențial de suprafață, corelația între defectele electrice și cele topografice fiind realizată pe imagine.

Studiul radiațiilor X secundare permite o analiză chimică calitativă și chiar cantitativă a structurilor cu o precizie de până la 1%; se poate astfel evidenția prezența compușilor intermetalici nocivi, care determină unele mecanisme de defectare și care nu ar putea fi identificați prin alte procedee.

Neutronii. Neutronii lenți permit obținerea de imagini ale părților interne, constituite fie din elemente grele, opace razelor X, fie din elemente ușoare (cum ar fi masele plastice).

Alte metode. În afara metodelor anterioare de analiză a fiabilității componentelor electronice se pot utiliza și alte mijloace de investigare, cum ar fi:

- folosirea ultrasunetelor;
- diverse măsurări electrice, punând în evidență anumite particularități ale componentelor (de exemplu: distorsiunile armonice în cazul unor componente pasive);
- folosirea spectrografiei de masă ș.a.

Rezultă că, poate fi utilizată o mare varietate de metode — nedistructive sau distructive — de analiză a fiabilității componentelor electronice. De la caz la caz, inginerul fiabilist va alege metoda cea mai potrivită în funcție de echipamentul de care dispune, urgența și profunzimea cerută pentru analiză.

TABELUL 10.9

Moduri și mecanisme de defectare a rezistoarelor

Tipuri de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare care rezultă	Tipul de rezistor			
			De volum	Peliculă carbon	Peliculă metalică	Bobinat
1	2	3	4	5	6	7
<i>Solicitare electrică</i> Tensiune excesivă	Deteriorarea sau străpingerea elementului rezistiv sau a izolației	Rezistență modificată	x	x	x	x
		Rezistență întreruptă	+	x	x	
		Rezistență scurtcircuitată	++	++	++	x
Putere disipată excesivă	Deteriorarea elementului rezistiv	Rezistență modificată	x	x	x	x
		Rezistență întreruptă	+	x	x	x
		Rezistență scurtcircuitată	x			
<i>Ambianță</i> Șocuri, vibrații sau accelerație constantă	Deteriorarea elementului rezistiv sau a sistemului de fixare	Rezistență întreruptă		x	x	x
Temperatură înaltă	Deteriorarea elementului rezistiv sau a izolației	Rezistență modificată	x	x	x	x
Șoc termic	Deteriorarea elementului rezistiv	Rezistență modificată	x	x	x	x
		Rezistență întreruptă	x	x	x	x
Umiditate ridicată	Deteriorarea elementului rezistiv	Rezistență întreruptă	x	x	x	
	Coroziune	Rezistență întreruptă		x	x	x
	Scurgere la suprafață	Rezistență modificată	x	x	x	x
Atmosferă corozivă	Coroziune	Rezistență întreruptă		x	x	x
	Scurgere la suprafață	Rezistență modificată	x	x	x	x
Radiație	Deteriorarea elementului rezistiv	Rezistență modificată	x			

TABELUL 10.10

Moduri și mecanisme de defectare a condensatoarelor

Tipuri de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare	Tipuri de condensatoare			
			Hârtie	Mică	Ceramică	Electrolitice
1	2	3	4	5	6	7
<i>Solicitare electrică</i>						
- Tensiune mai mare cu 125% față de normă (rar)	Avariere	Scurtcircuit			x	x
- Tensiune mai mare cu 150% față de normă (rar)	Avariere	Scurtcircuit	x	x	x	x
-Tensiune continuă excesivă	Deteriorare dielectric	Scurtcircuit	x	x	x	x
	Curent de scurgere mare					x
	Modificare dielectric	Modificarea capacității			+	
-Tensiune alternativ excesivă	Supraîncălzire	Scurtcircuit	x	x	x	x
	Efect Corona	Scurtcircuit		x	x	
-Curent alternativ excesiv	Supraîncălzire	Scurtcircuit	x	x	x	x
<i>Ambianță</i>						
-Șocuri, vibrații sau accelerație constantă	Deteriorarea fixării sau internă	Înterupt sau scurtcircuit	x	x	x	x
-Temperatură înaltă	Deteriorarea dielectricului	Scurtcircuit	x		x	x
	Curent curgere mare	Scurtcircuit	x		x	x
	Modificare dielectric	Modificarea capacității			x	
-Temperatură înaltă	Deteriorarea izolației	Scurtcircuit		x	x	
	Pierdere electrolit	Rezistența serie mare sau întrerupt				x
-Temperatură joasă	Deteriorarea izolației	Modificarea capacității	x	x		
	Micșorarea conductivității electrolitului	Rezistența serie mare				++
	Modificare dielectric	Modificarea capacității			+	

TABELUL 10.10 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7
-Încălzirea ciclică	Deteriorarea izolației	Modificarea capacității	x	x	x	x
	Modificare dielectric	Modificarea capacității			+	
-Șoc termic	Deteriorarea izolației	Scurtcircuit	x	x	x	
	Deteriorare dielectric	Modificare capacitate sau scurtcircuit				x
-Umiditate ridicată	Scurgere la suprafață	Rezistență paralel mică	++	++	++	++
-acoperire ermetică						
-acoperire neermetică	Scurgere internă	Scurtcircuit	x	x		
-Atmosferă corozivă:	Scurgere la suprafață	Scurtcircuit	x	x	x	
-acoperire ermetică						
-acoperire neermetică	Coroziune internă	Scurtcircuit	x	x	x	
-Vid înalt	Scurgere exterioară	Scurtcircuit	x	x	x	
	Pierdere electrolit	Rezistență serie mare				x
-Radiație	Deteriorare dielectric	Scurtcircuit	x			
	Ionizare internă	Curent de scurgere sau scurtcircuit	x	x		

+ Supratensiune sau putere disipată peste limita admisibilă.

++ Depinde de construcție sau de materialul de acoperire.

Solicitările electrice au ca rezultat – în principal – defectarea condensatoarelor prin scurtcircuit.

Pentru asigurarea unei fiabilități ridicate a condensatoarelor este recomandabil ca încărcarea în tensiune pentru condensatoarele ceramice, cu mică și cu hârtie să fie cu 80%; din contră, în cazul condensatoarelor electrolitice, este necesar ca, în montaj, condensatorul să nu fie încărcat în tensiune la o valoare sub 30...50% din cea nominală, astfel încât stratul de dielectric să-și păstreze calitățile inițiale.

Solicitările legate de ambianță conduc la variate mecanisme și moduri de defectare. Influența umidității ridicate și a atmosferei corozive depinde în mare măsură de tipul de acoperire de protecție. Radiația influențează îndeosebi condensatoarele de hârtie și într-o mai mică măsură pe cele cu mică. Legat de fiabilitatea condensatoarelor ceramice, trebuie remarcat faptul că unele materiale dielectrice ceramice sunt în particular sensibile la temperatură,

Moduri și mecanisme de defectare a bobinelor și transformatoarelor

Tipuri de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare care rezultă	Bobine	Transformatoare	Observații
1	2	3	4	5	6
<i>Solicitări electrice</i> -Supratensiune mare	Străpungerea instantanee a izolației	Scurtcircuitarea bobinajului	x	x	
	Efect Corona 1)	Scurtcircuitarea sau întreruperea (rar) izolației	x	x	1)Accelerează procesul de îmbătrânire a materialului izolator prin eliberare de ozon și încălzire
-Supratensiune moderată (aprox. 120% față de normă)	Grăbesc o străpungere prematură a izolației	Scurtcircuitarea bobinajului	x	x	
-Curent excesiv în secundar	Supraîncălzire și micșorarea rigidității electrice a izolației	Întreruperea sau scurtcircuitarea bobinajului		x	
	Deformarea carcasi 2)	Modificarea parametrilor electrici ai bobinajului 2)		x	2)prin dilatarea compoundului de putere
-Scăderea frecvenței de intrare sub limita prescrisă	Creșterea excesivă a temperaturii 3,4) și scăderea rigidității electrice a izolației	Scurtcircuitarea sau întreruperea bobinajului	x	x	3)prin scăderea reactanței și creșterea curentului peste limita prescrisă 4)prin creșterea pierderilor de miez
-Creșterea frecvenței de intrare peste limita prescrisă		Scurtcircuitarea sau întreruperea bobinajului			
-Șocuri, vibrații sau accelerație constantă	Deformarea carcasi sau a bobinajului	Modificarea parametrilor electrici	x	x	
	Deteriorarea fixării	Circuit întrerupt	x	x	
-Temperatură înaltă	Deteriorarea izolației	Modificarea parametrilor electrici	x	x	
		Scurtcircuitarea sau întreruperea bobinajului	x	x	
-Umiditate ridicată	Coroziune	Întreruperea bobinajului	x	x	
	Scurgere la suprafață	Micșorarea factorului de calitate	x		
-Atmosferă corozivă	Coroziune	Întreruperea bobinajului	x	x	
	Scurgere la suprafață	Micșorarea factorului de calitate	x		
-Radiație	Deteriorarea izolației	Scurtcircuitarea bobinajului	x	x	

temperaturi excesive și își modifică caracteristicile în timp, caracteristici de care trebuie să se țină seama în proiectare.

În tabelul 10.11 se prezintă unele moduri și mecanisme de defectare a bobinelor și transformatoarelor.

Din tabelul 10.11 rezultă că cele mai frecvente moduri de defectare a bobinelor și transformatoarelor constau în scurtcircuitarea bobinajului, datorită mecanismului de străpungere a materialului izolator. Defectările prin întreruperea bobinajului apar foarte rar. Solicitățile excesive electrice și de ambianță grăbesc străpungerea bobinajului. De aceea alegerea tipului și clasei de izolație corespunzătoare diferitelor tipuri de

aplicații, deci a diferitelor regimuri electrice și termice, prezintă o importanță deosebită pentru fiabilitatea elementelor inductive.

În tabelul 10.12 sunt indicate unele exemple de moduri și mecanisme de defectare pentru structuri tipice de dispozitive semiconductoare: tranzistoare de puteri mici și de putere, diode de semnal mic și redresoare de putere, circuite integrate. Gruparea circuitelor integrate împreună cu dispozitivele semiconductoare discrete este datorată unor similitudini în proiectare și fabricare, care conduc la moduri și mecanisme similare de defectare.

Din tabelul 10.12 rezultă că acumulările de sarcină la suprafață, care conduc la curent rezidual mare și la câștig mic, sunt provocate de solicitări electrice (tensiune înaltă, putere disipată mare), solicitări termice de ambianță (umiditate ridicată) și de radiații. De remarcat că mecanismul de defectare prin acumulări de sarcină la suprafață este caracteristic atât dispozitivelor semiconductoare discrete, cât și circuitelor integrate.

Tipuri de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare care rezultă	Tipul de dispozitiv									
			Tranzistor de semnal mic		Tranzistor de putere		Diodă semiconductoare de semnal mic		Diodă redresoare de putere	Circuit integrat monolitic*	Circuit integrat beam-lead*	
			a	b	c	d	e	f	g	h	k	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
-Umiditate ridicată	Scurgeri la suprafață	Curent rezidual mare										
	Acumulări de sarcină la suprafață	Cîștig mic										x
	Coroziune chimică (deteriorarea ermetizării)	Curent rezidual mare	x	x							x	
		Cîștig mic	x	x							x	
	Coroziune galvanică	Ruperea conexiunilor	x	x							x	x
Atmosferă sărată	Coroziune chimică (deteriorarea ermetizării)	Curent rezidual mare	x	x							x	
		Cîștig mic	x	x							x	
	Coroziune galvanică	Ruperea conexiunilor	x	x							x	x
-Murdărire	Scurgeri la suprafață	Curent rezidual mare	x	x			x	x			x	x
		Străpungere superficială				x				x		
-Vid înalt	Efect Corona (electric)	Arc electric				x				x		
		Coroziune				x				x		
	Evaporarea constituenților	Deteriorări mecanice										x
<i>Radiație</i> -Neutroni rapizi	Deteriorări de volum ale structurii	Cîștig mic	x	x	x	x					x	x
		Rezistență directă mare										
-Radiații Y și de electroni	Acumulare de sarcină la suprafață	Curent rezidual mare	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Câștig mic	x	x	x	x					x	x

*Valabil pentru ambele dispozitive: polare și bipolare