

5. ОТКАЗИ И МЕХАНИЗМИ НА ОТКАЗИТЕ В МЕИ

5.1. Видове откази в съвременните МЕИ

Структурата на МЕИ не е идеална. В нея протичат сложни електронни процеси. Внасянето на различни несъвършенства и дефекти в нея започва с използваните изходни материали и продължава през целия технологичен процес на създаване на изделието. МЕИ представлява неравновесна система. Всеки от дефектите в различна степен участва в деградационните процеси и води до изменение на изходните му електрофизични параметри. В МЕИ възникват нови дефекти и несъвършенства в периода на експлоатация в резултат на стареенето на материалите. Външните въздействия и особено топлинните и електрическите натоварвания ускоряват взаимодействието и генерацията на нови дефекти, които в крайна сметка водят до отказ на микроелектронните изделия [23].

При описване състоянието на дадено изделие се използват понятията годно и работоспособно състояние. *Годност* е състоянието на изделието, което съответства на всички изисквания на конструктурската и нормативната документация. *Работоспособност* е състоянието, при което всички параметри, характеризиращи способността му да изпълнява зададените функции съответстват на ТД, но съществуват нарушения, които не влияят на електрическите параметри, напр. лоша маркировка, пукнатини на корпуса и др.

Признакът, позволяващ да се установи факта на нарушение на работоспособността или състоянието на годност се нарича критерий за отказ (или критерий за годност). *Критерият за годност* е параметър(и), по чиято стойност или изменение МЕИ се счита за годно или отказало.

За невъзстановимите изделия (каквито са повечето МЕИ) отказът съвпада с граничното състояние, при което по-нататъшното му приложение по предназначение е недопустимо.

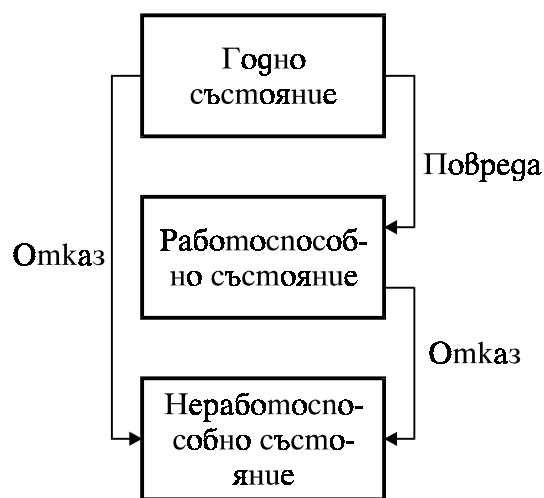
През времето на живот МЕИ могат да се намират в едно от трите състояния: годно, работоспособно и неработоспособно (фиг. 5.1). Преходът от едно в друго състояние се осъществява посредством такива събития като повреда и отказ.

Отказът се характеризира с редица показатели [15]. Те могат да бъдат:

— място, характер и външна проява на отказа;

- механизъм и причина на отказа;
- физико-статистическо разпределение; време и условия на възникване;
- причинно-следствени фактори свързани с разработката, производството и експлоатацията на изделието.

В зависимост от нивото на което се провежда анализът на отказите (електронна апаратура, блок, схема, МЕИ, елемент на МЕИ), понятието *причина за отказа* е различно. Физико-химическите процеси, водещи до откази на МЕИ се наричат *механизми на отказите*.



Фиг. 5.1. Схема на взаимодействие на състоянията и събитията на отказ и повреда при МЕИ.

Признаците по които се класифицират отказите са:

- място на възникване в елемента: на токопроводеща пътечка, на контактното прозорче, на контактната площадка и др.;
- характер на проява: късо съединение, прекъсване, плаващ отказ;
- характер на развитие на отказа: внезапен, постепенен;
- причина за възникване: качеството на елементите.

Класификацията на отказите например в полупроводникови МЕИ показва (фиг. 5.2), че най-голяма е частта на отказите от дефекти в метализацията и контактите.

Метализацията и контактите.

Внезапният отказ представлява скокообразно изменение на един или няколко параметри. Внезапните откази са свързани с недостатъци в конструкцията или с нарушения на технологичния процес. Често се проявяват в изменение на електрическата и механичната якост на изделието и се наричат катастрофални. Обикновено този вид откази не се подда-



Фиг. 5.2. Разпределение на отказите в МЕИ по причини за възникване.

ват на прогнозиране. Причина за внезапни откази могат да бъдат както естествените постепенни изменения във физическата структура на МЕИ, които при определени условия придобиват лавинообразен характер, така и условията на приложението им в ЕА. Характерни примери за внезапни откази са: късите съединения и прекъсвания в структурата на МЕИ.

Постепенният отказ (често наричан параметричен) се характеризира с плавно и закономерно изменение на един или няколко параметъра на изделието. Често се нарича условен, тъй като при една и съща стойност на критерия за отказ в един случай може да доведе до загуба на работоспособност, а в друг — не. Например постепенни откази в МЕИ възникват в резултат от нарастването на обратните токове на *p-n* преходите, намаляването на коефициента на усилване на транзисторите, изменение на праговото напрежение на *MOS* транзисторите.

Когато се нарушава електрическата, механичната или топлинна якост (к.с., пробив в диелектрика, прекъсване на изводи) или когато параметрите на критериите за годност са преминали граничните стойности, при които МЕИ става практически неработоспособно при допустими условия на експлоатация настъпва *пълен отказ*.

Независими са отказите, които възникват в резултат на процеси дължащи се на вътрешната структура на МЕИ и не са свързани с други предшестващи ги откази.

Отказите, в резултат на повреди в схемите за защита от претоварване или на пасивните ограничителни елементи в ИС се наричат *зависими откази*. Те се дължат на откази в елементите на МЕИ, между които съществува връзка.

Особено сложни за разпознаване са *временните (плаващите) откази* или многократно възникващите самоотстраняващи се откази от един и същ характер. Тези откази възникват в изделията при прилагане на външни натоварвания и изчезват след снемането им. Такива откази са пробивите в МЕИ поради наличие в обема на херметизирания корпус на проводящи частици, които могат да създават кратковременни к.с. между вътрешни изводи или между отделни токопровеждащи шини. Временни откази се появяват в процеса на механични и климатични изпитвания при електрическо натоварване.

При *частичните* откази се наблюдава влошаване на показателите на надеждност, но изделието продължава да работи.

Пълните откази се съпровождат с цялостно (пълно) нарушаване на работоспособността на МЕИ.

Конструктивният отказ възниква в резултат на нарушаване на ус-

тановени правила и (или) норми на конструиране на изделието. При откриване на такъв отказ се вземат съответни мерки за доработка на конструкцията, така че да се изключи появата на подобни откази в следващите партии.

Производствените откази възникват в резултат на нарушаване на установени правила и (или) условия на експлоатация на изделието. В резултат изделията могат да бъдат подложени на претоварване в апаратурата и преждевременно да откажат. При производството на ЕА, МЕИ могат да бъдат повредени в процеса на входящ контрол, при монтажа в апаратурата, вследствие на претоварвания от технологичните режими. Най-много откази възникват в периода на експлоатация на МЕИ поради нарушаване на установените правила на експлоатация и поради неблагоприятни въздействия на околната среда.

Производствените откази възникват в резултат на несъвършенство на технологичния процес или нарушена технология.

Систематичният отказ се обуславя от дефекти на конструкцията, нарушение на технологичния процес, ниското качество на изходните материали или грешки в експлоатацията. Този отказ се повтаря многократно. Проявява се обикновено в първата или в третата област на λ -характеристиката. Систематични откази се появяват във втората област при повтарящи се нарушения в условията на експлоатация и погрешно действие на обслужващия персонал.

5.2. Механизми на отказите в МЕИ

В практиката на надеждността се използват два традиционни подхода. Първият е свързан с измерване на фактичестката надеждност на МЕИ. Вторият — с усъвършенстване на МЕИ. Така се появяват направления като физическа надеждност на МЕИ и физика на механизмите на отказите, които са свързани с изучаване на причините за възникващите откази.

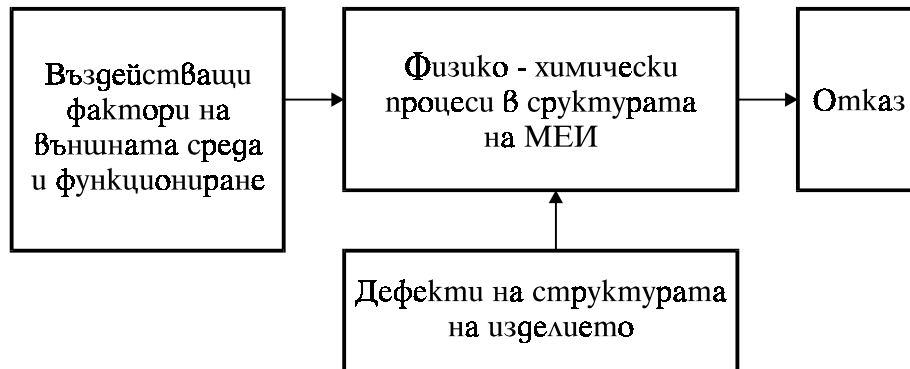
Изменението във времето на физическото състояние, обусловено от необратимите физико-химични процеси е най-общата причина за възникване на отказите. Схемата за формиране на откази е дадена на фиг. 5.3.

При изучаване на физическите процеси в МЕИ важно значение добиват понятията причина, вид и механизъм на отказа.

Под *причина за отказа* се подразбират обстоятелствата възникващи през времето на разработка, производство или експлоатация на из-

делието, които предизвикват отказ.

Видът на отказа е очевидно събитие, чрез което се проявява неизправната работа на МЕИ. Такова събитие може да бъде например к.с., загуба на усилвателни свойства. В редица случаи видът на отказа не може да се установи без изследване на вътрешната структура на МЕИ.



Фиг. 5.3. Схема за формиране на отказ в МЕИ.

Механизъм на отказа се нарича физическият, химическият или друг процес, предизвикващ отказа. От надеждностни позиции не е достатъчно да се знае или установи какъв е вида на отказа. По-съществено е да се открие причината, довела до отказа.

Табл. 5.1. Процеси на деградация в микроелектронните изделия.

| Вид на дефекта | Вид на отказа | Причини за възникване на отказ |
|--|---|--|
| Дефекти на кристала | Нарастване на обратните токове на PN-преходите; к.с.; дрейф на коефициента на усилване. | Дифузия на примеси, водещи до изтъняване на базата; локални прегрявания и пробив в PN-преходите |
| Замърсяване на Si в ПП микроелектронни изделия | К.с.; дрейф на пробивното напрежение. | Ниско качество на изходния Si; лавинен пробив поради усилване на ел. поле. |
| Пукнатини в активната област | Нарастване на утечките; увеличаване на базовото и колекторното съпротивление. | Разширяване на пукнатините по линията на скрайбиране; механични напрежения. |
| Наличие на метални частици в корпуса | К.с. | Миграция и отлагане на метални частици |
| Изтънена метализация | Прекъсване | Изтъняване при преминаване от окиса към Si; неравномерност на метализацията. Електродифузия и прегаряне на слоя метал. |
| Отлепяне на бонд от контактна площадка | Прекъсване | Груби технологични дефекти в контактите; нарушения в контактите. |

Типовите процеси на деградация на МЕИ и вероятните причини за възникване на отказите са дадени в табл. 5.1.

В МЕИ с идеална структура и при нормална експлоатация, физико-химичните процеси протичат с много ниска скорост, поради факта че активните области се намират в неутрална среда, изолирана с херметичен корпус от външни агресивни въздействия, а режима на експлоатация води до незначителни прегрявания на структурата. Тези обстоятелства предполагат изключително висока дълготрайност на полупроводниковите МЕИ. Реалните МЕИ обаче, както беше посочено по-горе, се разглеждат като термически неустойчиви системи, съдържащи дефекти и несъвършенства.

Разглеждането на най-характерните откази в МЕИ може да се извърши от една страна по причините за възникването им и от друга — по елементите на МЕИ. В табл. 5.2 са представени предпоставките за типичните откази на МЕИ в зависимост от външните въздействия и деградационни процеси.

Табл. 5.2. Предпоставки за типични откази в МЕИ, в зависимост от външните въздействия и деградационни процеси: А — пробив на преход; В — влошаване на електрически параметри; С — загуба на херметичност; D — прекъсване и к.с.; Е — поява на нестабилност; F — корозия на изводи и корпус; G — повреда на защитни покрития; H — пробив между изводи и корпус.

| Вид на външното въздействие | Деградационен процес | A | B | C | D | E | F | G | H |
|-------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Повишена температура | Деформация на защитните покрития Отделяне на газове Разтопяване Миграция на примеси, влага и газове Йонизация на примеси Промяна на размери Изменение на електрически характеристики | + | + | + | + | - | - | - | - |
| Понижена температура | Кондензация на влага Промяна на размерите Изменение на електрически характеристики | + | + | + | + | - | - | - | - |
| Термоудар | Механични напрежения в спойките Деформация на покритията Промяна на размерите | - | + | + | + | - | - | - | - |
| Повишена относителна влажност | Адсорбция и абсорбция на влага Корозия Електролиза | - | + | - | - | + | + | + | + |
| Понижено налягане | Влошено топлоотдаване Намалено пробивно напрежение | + | - | + | + | - | - | + | |
| Механични въздействия | Механични напрежения Умора | | + | + | | | | | |

5.2.1. Механизми на отказите в метализацията

Металният слой, нанесен на повърхността на готовата ИС, се намира при нееднакви условия. В контактните прозорчета той взаимодейства с легирания в различна степен монокристален *n*- или *p*-тип силиций. На други места контактува със силициевия двуокис. Неизбежна е деформацията на металния слой върху неравната повърхност на схемата и в местата на спойка на бонговете. Отказите в метализацията възникват в резултат на продължително въздействие на термични и електрически натоварвания. Основните откази на метализацията могат да бъдат:

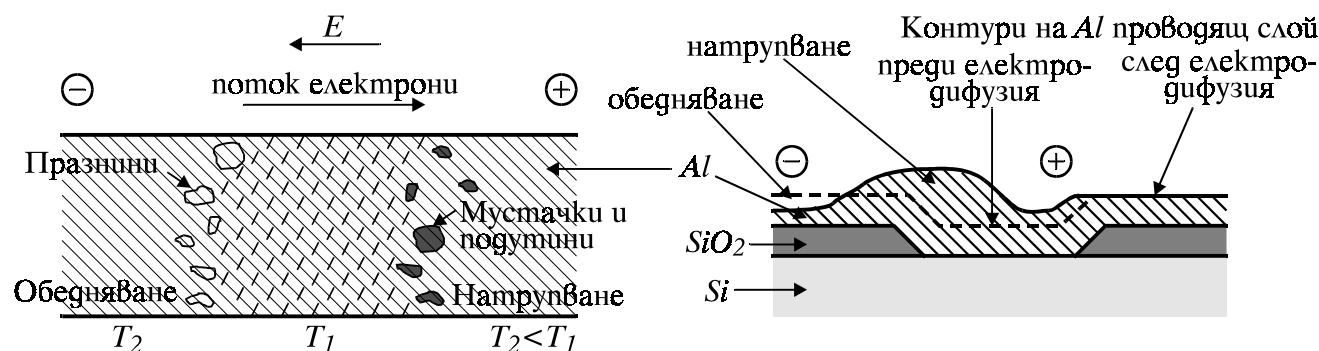
1 — прекъсване на метализацията в резултат на електродифузия (електромиграция) на материала и прегаряне на местата с повишена плътност на тока;

2 — прекъсване и к.с., предизвиквани от електролитна и химическа корозия на *Al* и *Au* при некачествено защитно покритие и замърсяване

на повърхността на кристала;

3 — к.с. на метализацията през отвори в окиса или в резултат на образуване на „мостчета“ между токопроводещите шини в процеса на електролитна корозия.

Механизъм на откази поради електромиграция. Явлението *електродифузия* или *електромиграция* се изразява в пренасяне на материала на проводника от отрицателния контакт към положителния при протичане на постоянен ток с висока плътност (около 10^6 A.cm^{-2}). Нееднородното нагряване на проводника ускорява процеса на пренос. При това в областта имаща отрицателен потенциал (фиг. 5.4) се образуват кухини, водещи до прекъсване на метализацията, а в положителния край — натрупване на материал. В отделни места се образуват кристални погупини, мустачки и хълмчета.



а) образуване на дефекти при електродифузия в Al проводящ слой - поглед отгоре

б) Изменения в контакта Al - Si поради електродифузия - напречен разрез

Фиг. 5.4. Модел на електродифузия на Al-йони в проводящ слой.

Средната отработка до отказ вследствие прекъсване на метализацията поради електродифузия се определя с израза [30].

$$\bar{t} = K \cdot J^{-n} \exp(E_a/kT), \quad (5.1)$$

където K е константа, зависеща от материала, структурата и геометрията на слоя; J — плътност на тока в A.cm^{-2} ; n — степенен показател, равен на 1, когато отказите се определят преимуществено от структурата на слоя, а когато за формирането на отказите доминира значение има температурният градиент $n = 3$; $E_a = 0,5 \div 0,7 \text{ eV}$ — енергия на активация на електродифузията. При повишени плътности на тока се приема $E_a = 1,4 \text{ eV}$.

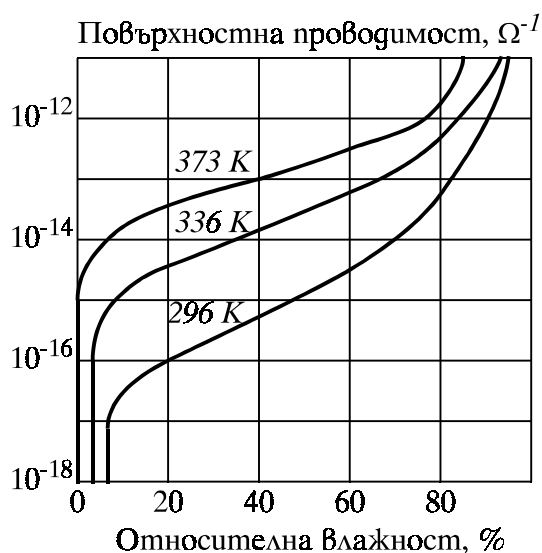
Механизми на отказите от електрохимическа корозия. При достигане на относителна влажност около 60 % в корпуса на МЕИ се създават благоприятни условия за адсорбиране върху повърхността на чипа на достатъчно влага за получаване на висока електролитна проводи-

мост. Най-важният механизъм на отказите на ИС, свързан с електролитната корозия е натрупване на материал вследствие електромиграция във форма на гендрити и влакна.

Тези натрупвания водят до възникване на к.с. между съседни метални шини. Йоните на метала се пренасят по повърхността на изолатора вследствие наличието на замърсявания. Най-активна роля имат йоните на халогенидите (*Na*, *K*, *Cl*). Поради своята амфотерност алуминият може да кородира и в киселинна и в основна среда. Най-силно се подлагат на корозия металните електроди, които са под отрицателен потенциал (катодна корозия). Тези електроди се разрушават от въздействието на положително заредените йони. Скоростта на корозия в положително заредените участъци е по-ниска, тъй като едновременно с корозията се образува алуминиев окис, който възпрепятства по-нататъшното разрушаване.

Йоните на хлора имат висока проникваща способност през дебелия слой алуминиев окис и поради това значително ускоряват корозията. Потенциална разлика от 5 V е достатъчна за да възникне интензивна корозия. Скоростта на корозията зависи също от разстоянието между електродите, температурата и концентрацията на йоните на примесите на повърхността на чипа. При повишена концентрация на фосфор във фосфорсиликатното стъкло, контактуващо с алуминиевата метализация се усилва корозията, поради образуването на фосфорна киселина.

Механизмите на отказите при корозия на златото се състоят в нарастване на отлагането на злато във вид на нишки на повърхността на изолатора между съседни проводящи ивици. Възникващите токове на к.с. достигат до 10^3 A .



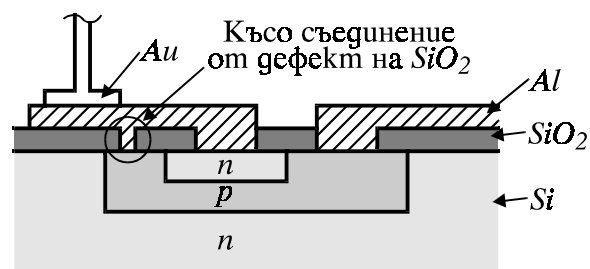
Фиг. 5.5. Резултати от измерване на проводимостта в система, съдържаща златни проводници и SiO_2

температурата и влагата е дадена на фиг. 5.5.

Намаляване на отказите от к.с. на метализацията се постига чрез:

- намаляване на влагата в корпуса на МЕИ;
- намаляване на замърсяванията на повърхността;
- използване на химически добавки, намаляващи скоростта на реакция в електролита;
- обработка на повърхността на корпуса със силиконови съединения, които я правят хидрофобна.

В МЕИ са разпространени и отказите от к.с. на метализационната система поради дефекти в окисния слой. Такива дефекти на окиса (пукнатини, каналчета) намаляват диелектричната му якост и се проявяват при експлоатация (фиг. 5.6).



Фиг. 5.6. Схема за възникване на отказ в МЕИ поради дефекти в окисния слой.

За да се възпрепятства проникването на злато в дълбочина към подложката и между проводниците се нанася титаново (или волфрамово) покритие под и над златния слой. Титанът е ефективен гетер за органичните материали и възпрепятства развитието на гендрити. Над слоя от титан (волфрам) проводниците се покриват със защитен кварцов слой. Наличието на пори и микропукнатини в кварцовия слой дава възможност за проникване на замърсители и нарастване на гендрити. Повърхностната проводимост на системата, съдържаща термичен окис и златни проводници в зависимост от темпе-

Разликата между температурните коефициенти на линейно разширение на Al и Si води до възникване на напрежение в метализацията от порядъка на $(1 \div 2)10^8 N/m^2$. Затова при провеждане на термоцикли при температури от $213^\circ K$ до $378^\circ K$ се появяват прекъсвания на металните области върху чипа.

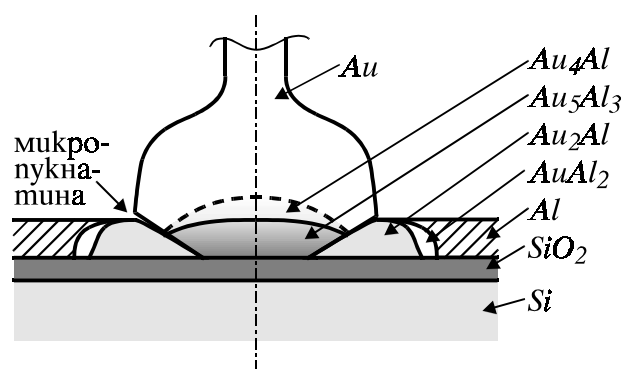
Механизъм на откази свързани с окисляване. Механизмът се състои във взаимодействие на кислорода с

повърхността на зърната на Al слой. В резултат се намалява обема и ефективното напречно сечение на проводника. Това нарушава температурния режим на МЕИ и води до локално прегряване, усилване на електродифузията и нарастване на вероятността за отказ от прекъсване на слоя. Локалното прегряване в токопровеждащите пътечки окрупнява зърната на поликристалната структура на материала. Поради възникването на големи напрежения, метализацията може да се разруши и отслои. Действието на този механизъм може да бъде значително намалено чрез: намаляване плътността на протичащия ток или добавяне на примеси (например итрий до 1%), които повишават температурата на рекристализация.

5.2.2. Механизми на отказите в контактните съединения

Повече от 50 % от всички откази в МЕИ се дължат на некачествените съединения.

В процеса на термокомпресия протича взаимна дифузия на спойваните метали, в резултат на което се създава здраво съединение в мястото на контакта. В зависимост от температурата, налягането, концентрацията на злато и алуминий в мястото на контакта се образуват интерметалните съединения $AuAl_2$, Au_2Al , Au_5Al_3 , Au_4Al . Те се различават значително по твърдост, специфично съпротивление и температурен коефициент на линейно разширение (ТКАР). В периферните участъци на термокомпресионния участък при температури над $300^\circ C$ се образува пористото съединение $AuAl_2$, наречено „пурпурна чума“, което намалява механичната якост (фиг. 5.7). Енергията на активация на процеса на образуване на интерметални съединения е $0,69 \div 1,0 \text{ eV}$.



Фиг. 5.7. Структура на термокомпресионния контакт в МЕИ $Al - Au$.

Образуването на интерметални съединения и изменението на състава в процеса на експлоатация води до възникване на механични напрежения на разделителната повърхност $Au-Al$, вследствие изменение на обема и несъвпадане на кристалните решетки на тези съединения. Неправилното центриране на термокомпресионния контакт спрямо контактната площадка може да

говеде до високо електрическо съпротивление на интерметалното съединение и до прекъсване на електрическата верига. Процесът на понижаване на якостта на металния контакт се усилва и от ефекта на Киркендал. Той се изразява в протичане на взаимна дифузия по между-възлията и ваканциите в областта на контакта на различните метали. Поради различните коефициенти на дифузия в случая със златото и алуминия се образуват празнини от страната на златото.

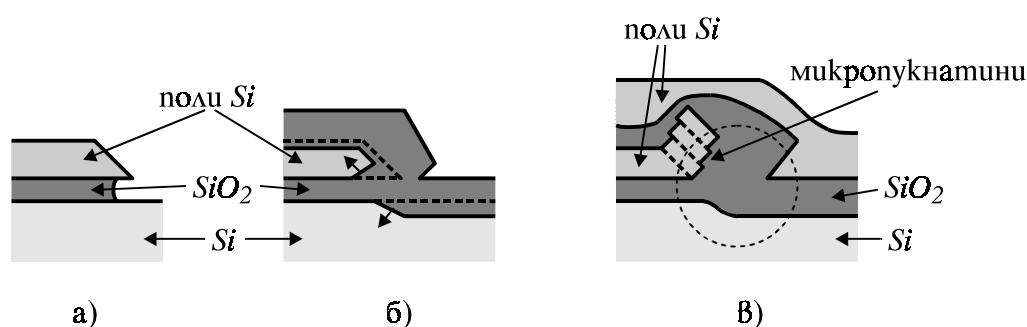
На практика се среща още един вид откази, свързан с образуване на интерметални съединения. При наличие на различни дефекти в окиса (отвори, канали, недостатъчна дебелина на слоя) може да се осъществи взаимодействие на Si с Al и Au и да се образува в областта на контакта интерметално съединение от типа $Al_xAu_ySi_z$, което има тъмно червен или черен цвят.

Внезапните откази поради прекъсване на изводите най-често се дължат на: механични напрежения поради различните ТКЛР или силно нагряване и прегаряне на контакта в местата на струпване на празнини и пукнатини.

Постепенните откази, свързани с разглеждания механизъм се изразяват в: намаляване на бързодействието; нарастване на напрежението на насищане на транзисторите в импулсен режим; нарастване на пълното съпротивление на ИС.

5.2.3. Механизми на откази в междуелементни съединения от полисилиций

Механизми на откази в междуелементни съединения от полисилиций са показани на фиг. 5.8.



Фиг. 5.8. Механизъм на откази при два слоя полисилиций: а) — изходна структура; б) — етап на израстване на изолационния слой; в) — възникване на отказ поради образуване на микрорукнатина.

Поликристалният силиций се използва като междуелементно съеди-

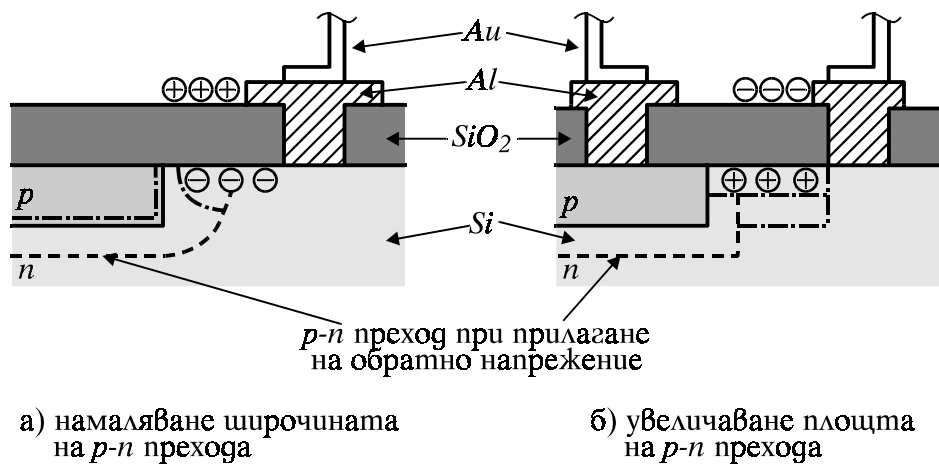
нение в МЕИ. В резултат на ецване, се получава профила показан на фиг. 5.8.а. При формиране на окиса, изолиращ двете нива на междоелементните съединения той се вклинява в обема на полусилициевия слой, както е показано на фиг. 5.8.б. Това създава напрежения, повдигащи края на този слой. Следващият слой полусилиций се вклинява под надвисналия долен слой полусилиций (фиг. 5.8. в). В означеното с пунктир слабо място се образуват пукнатини и е възможен пробив между двата полусилициеви слоя, поради отгъняването на окиса на слабото място. Този механизъм се определя изключително от конструктивните и технологичните характеристики на МЕИ.

5.2.4. Механизми на откази в планарни МЕИ

Активните и пасивните компоненти на планарните МЕИ са многослойни структури с различни електрофизични свойства. Най-същественото свойство при тях е локализацията на неконтролируем заряд в обема на слоевете на структурите и на разделителната им повърхност. При експлоатацията на МЕИ се извършват значителни изменения в местоположението на зарядите и в тяхната концентрация.

Механизмите на отказите, дължащи се на взаимодействието на зарядите на повърхността на окиса със зарядите в активните области, когато:

а) положителните заряди са в близост до единия извод (фиг. 5.9. а), водят до локално увеличаване на концентрацията на електрони под окисния слой. Вследствие на това се намалява широчината на p - n прехода в мястото с повишена концентрация. При прилагане на обратно напрежение на това място се увеличава напрегнатостта на електрическото поле, увеличава се обратният ток и е възможен повърхностен пробив;

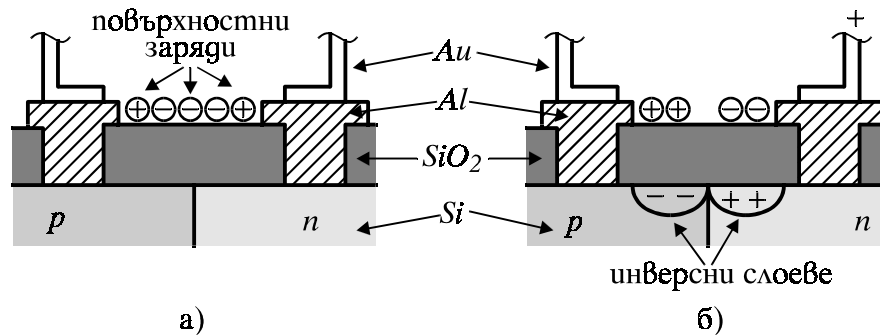


Фиг. 5.9. Взаимодействие на зарядите на повърхността на окиса със зарядите в активната област на полупроводникова структура.

б) отрицателните заряди са в близост до единия извод (фиг. 5.9.б), водят до обогатяване с дупки на приповърхностната област на полупроводника. В резултат е възможно площта на $p-n$ прехода да се увеличи значително. При обратно свързване на прехода се увеличава обратният ток и се намалява пробивното напрежение. При разпространяване на инверсия в полупроводника до мястото на омичния контакт се получава окъсяване на $p-n$ прехода. Скоростта на образуване на инверсия нараства с повишаване на температурата и влагата. Енергията на активация на процеса е в граници $0,5 \div 1,0 \text{ eV}$.

В отсъствие на електрическо поле зарядите в окиса са произволно разположени (фиг. 5.10. а). При прилагане на напрежение положителните заряди се съсредоточават над p -областта, а отрицателните над n -областта. В резултат се образуват инверсни участъци и диодната структура се шунтира (фиг. 5.10. б) от обратно включения $p-n$ преход. Този механизъм е причина за нестабилност на обратните токове на прехода. При значителна инверсия е възможно прехода да загуби изправящите си свойства.

Подвижните заряди в обема на окиса също влияят върху стабилността на характеристиките на МЕИ. Предполага се, че в неутрално състояние на структурата йоните на замърсяванията са равномерно разпределени и индуцират в приповърхностния слой на силиция заряд, противоположен по знак на заряда в окиса. При подаване на отрицателно напрежение в p -каналните структури и на положително напрежение на n -каналните се намалява праговото напрежение на структурите. Праговото напрежение в n -каналната структура се изменя значително в сравнение с това в p -каналната структура.



Фиг. 5.10. Преразпределение на зарядите в окиса под действие на инверсни слоеве: а) — преди прилагане и б) — след прилагане на ел. поле.

5.2.5. Механизми на отказ поради пробив в тънкия окис или вследствие ефекта на горещите носители

Съвременните МЕИ изискват дебелини на подгейтовия диелектрик под 5 nm , а това води до рязко нарастване на електрическото поле в диелектрика и настъпване на вътрешен пробив. Например за тънки окисни слоеве около 10 nm , пробивното напрежение е от порядъка на $\delta \div 10\text{ mV}$ [32]. Най-разпространеният модел за механизъм на такъв пробив е моделът на ударна йонизация-рекомбинация. Вероятността за възникване на такъв пробив е най-голяма в системата на многослойната метализация. Причина за това е влошеното качество на окиса, главно поради неизправностите на повърхностите на металните и полусилициевите пътечки. Затова в местата на стесняване на диелектричните слоеве и на остриетата на ръбовете може да възникне пробив.

Другият механизъм, водещ до нарастване на електрическото поле в тънките диелектрични слоеве на МЕИ е механизмът на инжекция на горещи електрони от Si в окисния слой. Инжекцията и захващането на горещи носители предизвиква деградация на коефициента на усилване на биполарните транзистори. За MOS -транзисторите при мащабиране на геометричните им размери под $1\text{ }\mu\text{m}$ този механизъм има основна роля при осигуряване на стабилна работа на МЕИ. Най-чувствителен към този механизъм е обратният клон на волт-амперната характеристика на транзисторите.

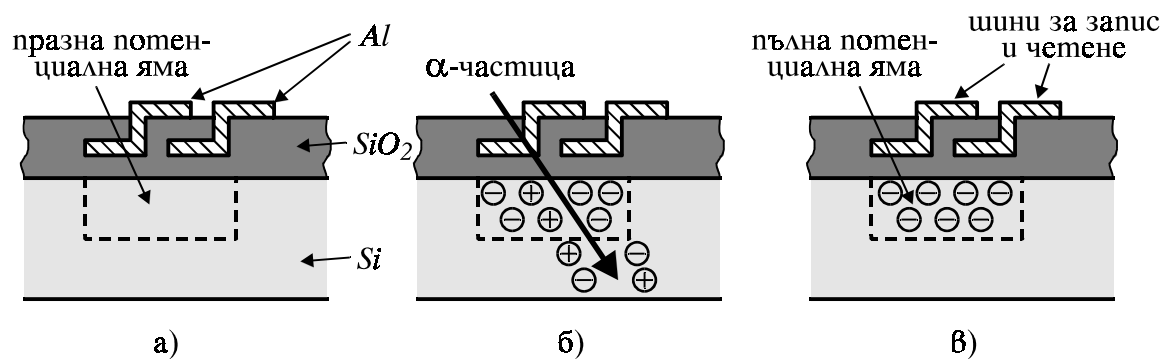
5.2.6. Някои механизми на отказ при радиационни въздействия

Радиационните дефекти взаимодействат със съществуващите несъвършенства на МЕИ и водят до възникване на откази [35].

Установено е, че повече от 90% от отказите тип „мека грешка“ в

паметите с капацитет над 4 Kbit се предизвикват от α -частици (ядра на хелия). В керамичните детайли на корпусите, пластмасата, стъклото, златото може да се съдържа определено количество радиоактивни елементи (U_{238} , U_{235} , Th_{232} , Zr_{91}), които излъчват α -частици с интензивност от $0,004$ до $45\text{ cm}^{-2}\cdot\text{h}$ с енергия около $8 \div 9\text{ MeV}$. Тези частици проникват на разстояние $2 \div 3\ \mu\text{m}$ в структурата и генерират около $2,5 \cdot 10^6$ двойки електрон-дупка.

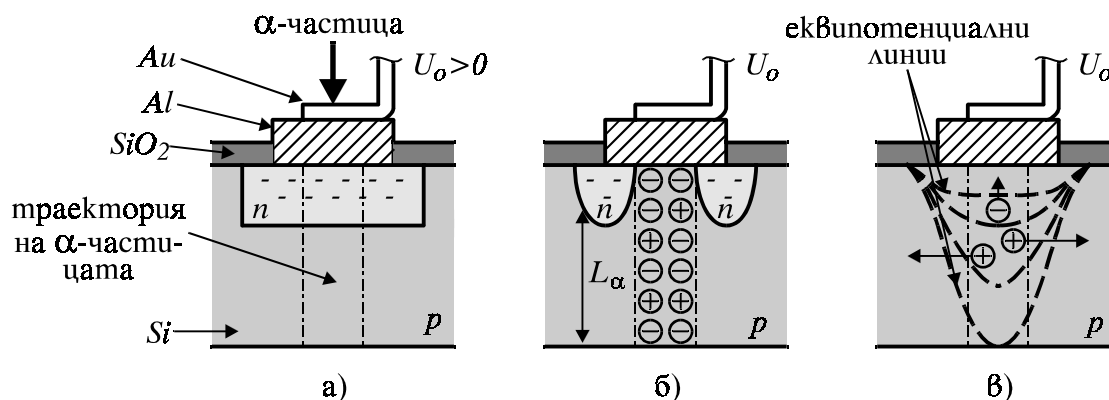
Физическият модел на механизма на възникване на откази в *MOS* паметите е илюстриран на фиг. 5.11. При попадане в елемент на паметта на α -частици започват да се генерират двойки електрон-дупка. Електроните се задържат в празната преди това потенциална яма, която е съответствала на състояние логическа „1“, а дупките дифундират в подложката и рекомбинират в обема и на тилния контакт. При определена енергия на α -частицата в елемента се генерира достатъчно количество електрони за превключването му в състояние на логическа „0“. Тази грешка може да бъде възприета при четене на информацията в интервалите между регенерациите на динамичната памет. При брой на електроните в запомняща клетка под $50\ 000$ вероятността за отказ при поток на частиците $0,01\text{ cm}^{-2}\cdot\text{h}$ е почти 100% . Такива откази могат да се появят и в разрядните шини на паметите.



Фиг. 5.11. Механизъм на възникване на „мека“ грешка в елементите на памет; а) — състояние „1“; б) — генериране на електрони при попадане на α -частица; в) — „мека“ грешка поради прехода в състояние „0“.

Попадането на α -частици в биполярните транзистори и ИС води до възникване в *p-n* преходите на високи йонизационни токове. Същността на механизма се изразява в следното. Когато α -частицата пресича *p-n* прехода, генерираният заряд по нейната траектория компенсира пространствения заряд на прехода (фиг. 5.12.а, б). Приложеното към

прехода напрежение U_o пада върху ефективната дължина на траекторията на частицата L_α , като еквипотенциалните линии се изкривяват във формата на фуния (фиг. 5.12. в).



Фиг. 5.12. Механизъм на отказ от попадане на α -частица в биполярни структури: а) — попадане на α -частица; б) — компенсация на пространствения заряд на p - n прехода; в) — движение на неравновесните носители под действие на нестационарното електрическо поле.

Под действие на полето започва пространствено разделяне на заряда във фунията. Основните носители се изтласкват в подложката в радиално направление, а неосновните се устремяват към повърхността на прехода. Тези йонизационни токове в определени условия водят до ефект, при който паразитният тиристор n - p - n - p (в биполярните и $CMOS$ ИС) се отпушва. В резултат схемата престава да функционира по предназначение.

5.2.7. Механизми на откази в резултат на ударни и вибрационни натоварвания

Повреждане на конструктивните елементи на МЕИ при механични въздействия може да се получи при натоварвания, предизвикващи напрежения по-големи от техническата якост на материалите. Най-често такъв отказ протича при въздействие на вибрации и удар, в условията на резонанс. Но повреда може да настъпи и при циклични натоварвания, когато напрежението в елементите не превишава техническата якост на материалите на конструкцията. Якостта във времето или дълготрайността на материала се дефинира като времето необходимо за развитие на процеса на разрушаване от момента на натоварването до настъпването на отказа. Физическият механизъм се изразява в следното:

Атомите на твърдото тяло се колебаят с период $\tau_0 \approx 10^{-12} \div 10^{-13} \text{ s}$.

Вероятността под действие на топлинните флуктуации да протече разкъсване на химическа връзка зависи от енергията на активация и от температурата. Прилагането на външно напрежение намалява височината на активационната бариера. Образуването на субмикроскопични области с разкъсани връзки и сливането им една с друга води до зараждане и развитие на пукнатини.

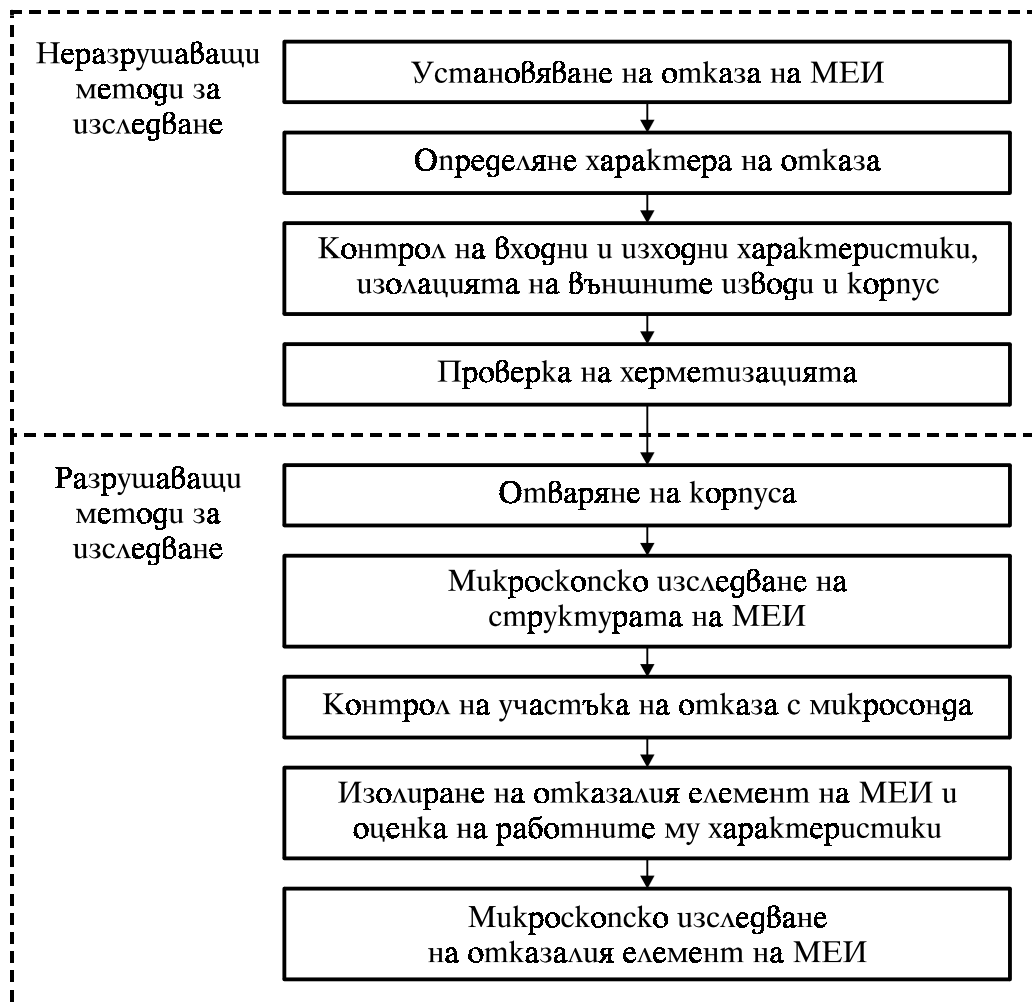
5.3. Анализ на отказите в микроелектронните изделия

Анализът на отказите има важна роля в системата за управление на надеждността и е основа на физическия подход към проблема за надеждността.

Анализът на възникналите при изпитването на МЕИ откази се извършва на два етапа:

Първи етап — Първичен анализ на отказите. Най-напред се определят признаците за отказа, откриват се отказалите елементи на МЕИ и причините за отказа.

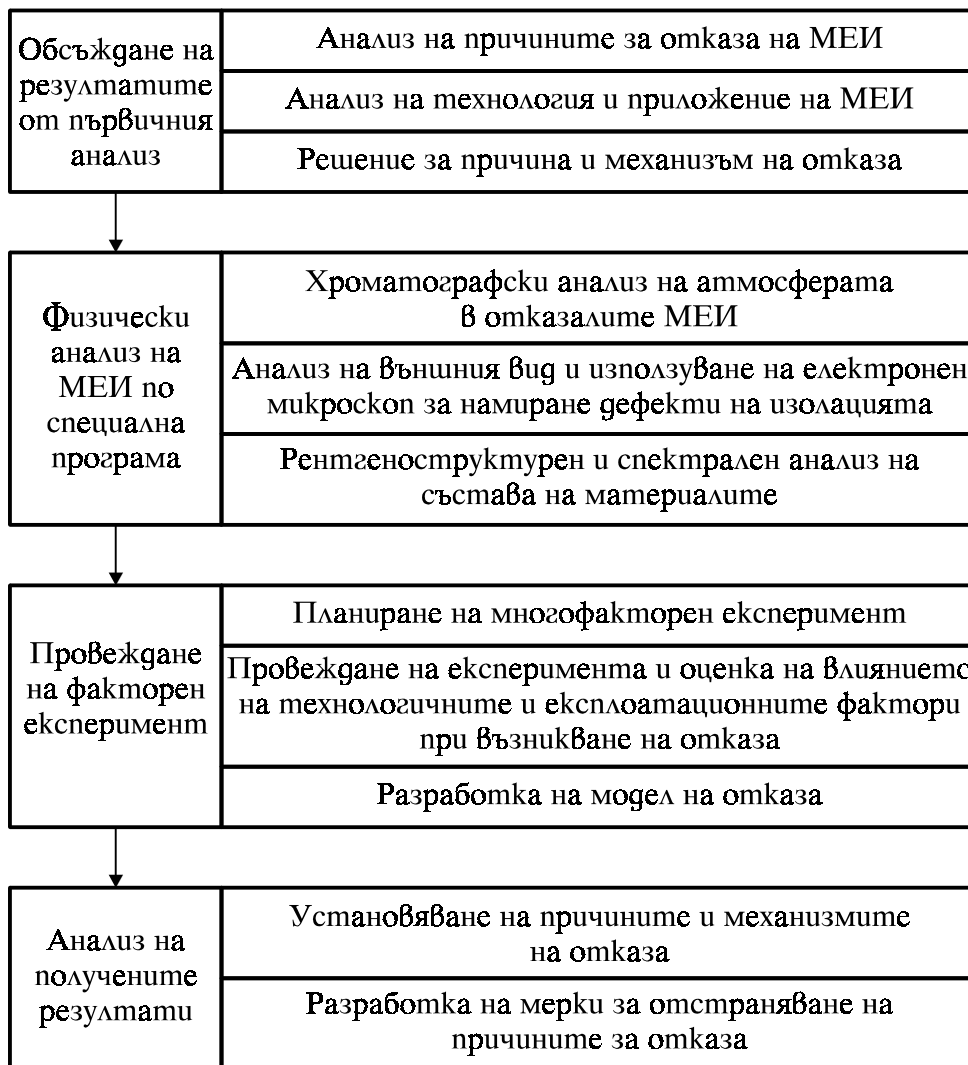
Схемата на провеждане на първичен анализ на отказите на МЕИ е дадена на фиг. 5.13. По тази схема се получават първоначални данни за отказите. Предложеният ред на процедурите може да бъде съкратен при по-прости МЕИ. Първичният анализ не винаги позволява да се установи причината за възникване на отказа, но дава необходимата информация по какъв начин и в кой технологичен процес по-нататък тя да се търси. Ако причинно-следствената връзка не е разкрита в първичния анализ се провежда вторичен.



Фиг. 5.13. Схема за провеждане на първичен анализ на отказите на МЕИ.

Втори етап — Вторичен анализ. Вторичният анализ на изследване на причините и механизмите на отказите в МЕИ се извършва с помощта на статистически, физически и физико-химически методи. В резултат на това се съставя физически модел на отказа и се уточнява причината за отказа. След това се изготвят препоръки за отстраняване на установените причини за отказите.

Обект на вторичния анализ са отказалите изделия, технологичния им процес, режимите и условията на изпитване. Вторичният анализ се провежда по специално разработена програма, в която се уговаря целта, срока и метода за анализ. На фиг. 5.14 е представена схема на вторичен анализ на отказите.

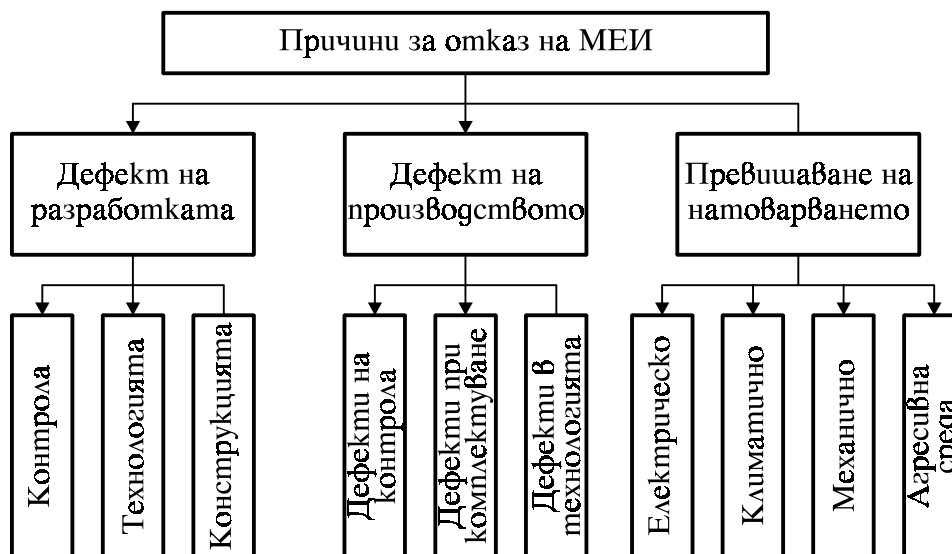


Фиг. 5.14. Схема за провеждане на вторичен анализ на отказите на МЕИ.

След приключване на анализа на отказите в МЕИ се съставя методика за откриване и предпазване от дефекти. Разработва се и пълна класификационна схема на отказите. Примерна такава класификация на отказите е дадена на фиг. 5.15

Факторите, имащи доминиращо значение при формиране на причините за отказите могат да бъдат конструктивни недостатъци, дефекти на материалите, нарушения на технологичния режим и на установените процедури за контрол и изпитване. В резултат на класификацията причините за отказите се разделят на организационни и технически. За отстраняване на техническите причини се изучава механизмът на отказите и се предлагат технически мерки за намаляване на въздействието му. За отстраняване на организационните причини се усъвършенства технологичния процес, уточняват се изискванията към персо-

нала и процедурата за контрол и изпитване.



Фиг. 5.15. Видове причини за отказ на МЕИ.

Най-сложен в техническо отношение е анализът на експлоатационните откази на МЕИ. Този анализ трябва да бъде обща задача на производителя на МЕИ, производителя на ЕА и потребителя.

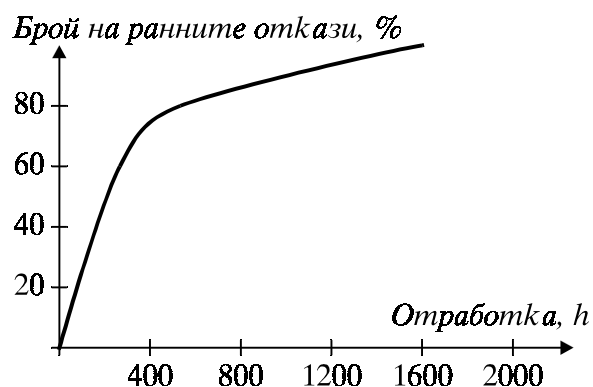
5.4. Технологично трениране на МЕИ

Един от пътищата за повишаване на количествените показатели на надеждността при МЕИ е технологичното трениране [13, 36]. *Технологичното трениране* представлява изпитване на 100 % от готовите изделия без разрушаване с цел бързо развитие на механизмите на възникване на откази и бракуване на тези от тях, които са потенциално ненадеждни. За потенциално ненадеждни МЕИ се приемат тези, при които дефектите могат да се открият само в процеса на експлоатация. Наличието на потенциално ненадеждни МЕИ се дължи на ограничената точност и достоверност на контролно-измервателното и изпитвателното оборудване, а също и на несъвършенството на методите и системите за контрол.

Потенциалните дефекти предизвикват откази на МЕИ в първите 1000 часа на експлоатация, като най-голям е процентът на отказите в първите 250 ÷ 300 часа. Тренировката се установява като допълнение към технологичния цикъл на производство. Тя създава условия за изкуствено предварително стареене, при което МЕИ преминават от периода на ранните откази (или през негова част) и интензивността на

отказите се доближава до установена стойност.

Съставянето на програма за технологичното трениране се изразява в обосноваване и избор на експлоатационни фактори (повишена температура, напрежение, ток, удари, вибрации и т.н.), на продължителност на въздействие и на критерии и норми за окачествяване. Технологичното трениране е ефективно само при установен технологичен процес със стационарни характеристики.



Фиг. 5.16. Разпределение на ранните откази в МЕИ.

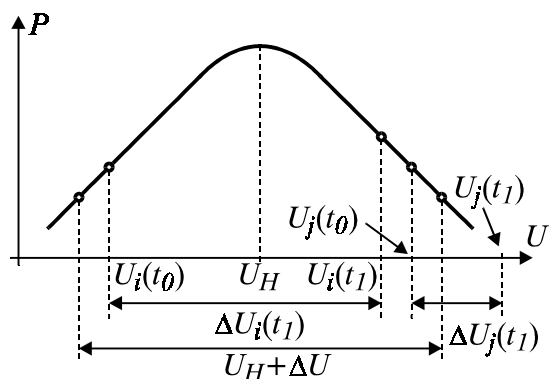
Стойността на въздействащия фактор не трябва да надвишава запаса на устойчивост на МЕИ. Продължителността на въздействащия фактор при тренирането (*i*-вид изпитване) се установява като се използват експериментални данни от анализа на физико-статистическото разпределение на отказите. Приема се, че продължителността е избрана правилно, ако за установеното време се наблюдават максимален брой откази от

стимулацията механизъм на отказите и при по-нататъшно трениране настъпва стационарен процес в потока на ранните отказите (фиг. 5.16).

Характерът и видът на въздействащия фактор се установява в зависимост от очакваните и възможните механизми на потенциалните дефекти при това без да се пораждат нови механизми на дефекти. Конкретният фактор се избира след отчитане на технико-икономическата му ефективност. Последователността на въздействие на дестабилизиращите фактори се установява като се изхожда от условието да се стимулират най-голям брой дефекти, изискващи най-силното въздействие.

Ефективността на технологичните тренировки зависи съществено от правилния избор на критерии за качеството и количествените норми за бракуване. Случайният характер на разпределение на контролируемите електрически параметри създава ситуации, при които изделие с интензивна и бърза деградация на физическата структура в края на изпитването има електрически параметри със стойности, съответстващи на нормите в техническата документация и обратно стойностите на електрическите параметри на изделие с малка и бавна деградация излизат извън нормите на ТД (фиг. 5.17).

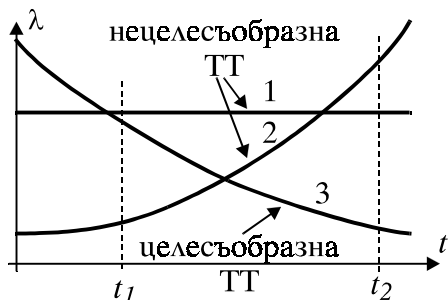
- По този начин критериите за бракуване могат да бъдат:
- пълна загуба на работоспособност (пълни откази);
 - излизане на електрическите параметри извън допустимите граници, установени в ТД;
 - скорост и степен на деградация на електрическите параметри спрямо номиналната им стойност $\Delta U_{номл}(t_1)$;
 - скорост и граници на изменение на информативните електрически или електрофизически параметри на изделието спрямо първоначалната стойност.



U_H - номинална стойност
 $U_H + \Delta U$ - област на допустимите стойности
 $U_i(t_0), U_j(t_0)$ - стойности на i, j -изделия в началния момент
 $U_i(t_1), U_j(t_1)$ - стойности в края на изпитването
 $\Delta U_i(t_1), \Delta U_j(t_1)$ - изменения на параметъра през време на изпитването

Фиг. 5.17. Статистическо разпределение на електрически параметър на МЕИ.

Преди да се реши въпроса за провеждане на тренировка за конкретното изделие се изяснява характерът на изменение на интензивността на отказите във времето.



Фиг. 5.18. Зависимост $\lambda = f(t)$ за различни видове МЕИ (технологична тренировка — ТТ).

На фиг. 5.18 са представени зависимостите на интензивностите на отказите λ от времето t за различни типове изделия. Ако изпитването е продължило от 0 до момент t_1 , то задачата е да се сведе до минимум средната интензивност на отказите за интервала (t_1, t_2) спрямо интервала $(0, t_1)$. Ако λ нараства (линия 2), то тренировката увеличава средната интензивност на отказите през интервала (t_1, t_2) до по-голяма стойност спрямо тази

през интервала $(0, t_1)$. Тренировка е целесъобразно да се провежда, когато МЕИ имат падаща характеристика на λ (линия 3) с явно изразен участък на улягане.

За да се облекчи анализа на резултатите от тренирането процеду-

рите се разделят на три групи:

1. *Стресови процедури*: термоцикли, термошок и постоянно ускорение.

Ефектите от стресовите процедури са:

а) разширяване на дефекта — при производствени дефекти като пукнатини в кристала, в окиса, в метализацията и изводите;

б) възникване на вторичен дефект — например поява на пукнатини вследствие разлика в температурните коефициенти на разширение, пукнатини в изводите в близост до термокомпресионния контакт, отслояване на метализацията и др.

Тези процедури са най-подходящи за стартиране на механизма на отказите. Те трябва да се изпълняват в началото.

2. *Процедури, ускоряващи развитието на физико-химичните и термичните процеси*: термообработка при високи температури и електротермично изпитване (*burn-in*).

Процедурите от тази група се прилагат при дефекти, които активират физико-химични процеси. Такива дефекти са: замърсяването на повърхността на чипа, което е благоприятна среда за електрохимична корозия; замърсяване на метализацията и изводите във връзка с ускоряване на химическата корозия; наличие на йони и атоми на *Au*, *Fe*, *Ni*, *Cu* в *Si*.

Термообработката се изпълнява след провеждане на процедурите от първата група и преди провеждане на електротермична тренировка.

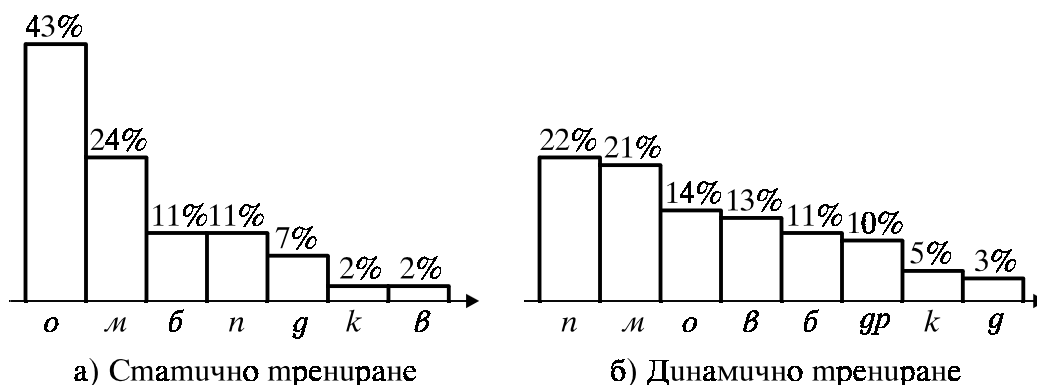
Електротермичната тренировка е крайна процедура за разкриване механизма на отказите. Но при някои видове замърсявания (където има значение електрическото натоварване) тя е стартираща и единствена процедура.

По време на електротермичната тренировка МЕИ се подлагат на електрическо натоварване и термично въздействие, което значително превишава експлоатационните температури. Различават се два вида електротермични тренировки:

а) статична, която се провежда при висока температура и електрозахранване.

б) динамична, която се провежда при висока температура, електрозахранване, управление на входовете с динамични сигнали и натоварване на изводите. Електрическото възбуждане може да бъде паралелно (всички схеми са паралелно свързани и получават еднакво динамично управление на входовете) и последователно (по схема на кръгов осцилатор).

При избор на електротермичното изпитване е необходимо да се извърши анализ на дефектите в партидата МЕИ и данните от опитното разпределение на отказите по време на статично и динамично трениране съгласно фиг. 5.19. При отсъствие на данни за характера на дефектите се препоръчва за МЕИ с ниска и средна степен на интеграция да се прилага статична, а за тези с висока степен на интеграция — динамична тренировка. За установяване на оптимален режим е целесъобразно да се извършва постоянен контрол на изходите на МЕИ.



Фиг. 5.19. Разпределение на отказите при електротермична тренировка (о — оксидиране; м — метализация; б — бондиране; п — повърхностни дефекти; д — дифузия; к — корпусиране; в — вътрешни връзки; дп — групи).

3. *Тестови процедури:* радиография, проверка на херметизацията, контрол на параметрите.

Целта на радиографията и проверката на херметизацията е да се открият дефекти, които са се развили при провеждане на процедурите от първа и втора група, но не са довели до отказ.

В табл. 5.3 е дадена програма за технологично трениране, използвана от фирмата Reliability Inc.

Табл. 5.3. Програма на фирмата Reliability Inc — USA за технологично трениране на ИС, в съответствие със стандарта MIL STD 883 B.

| Процедура | Метод |
|--|--------|
| 1. Термообработка при високи температури — MIL STD 883 B | 1008 C |
| 2. Термоцикли — MIL STD 883 B | 1010 C |
| 3. Постоянно ускорение — MIL STD 883 B | 2001 E |
| 4. Статична електротермична тренировка — MIL STD 883 B | 1015 A |
| 5. Динамична електротермична тренировка — MIL STD 883 B | 1015 |
| 6. Радиография — MIL STD 883 B | 2012 |
| 7. Външен визуален контрол — MIL STD 883 B | 2009 |

Технологичното трениране в условията на производство е свързано с надеждността на контролно-измервателното оборудване, хранящите източници и с тяхната точност и стабилност през времето на изпитване.

Ускоряване на механизма на ранните откази

За да се съхрани механизма на отказите е необходимо ускоряващите механични, температурни и електрически въздействия да се намират в определени граници. Параметрите на електрическите и термичните въздействия се определят от допустимата температура на прехода. Тя се дава с формулата:

$$T_j = T_b + R_{th}P_a, \quad (5.2)$$

където T_j — температура на прехода; T_b — температура на корпуса; R_{th} — топлинно съпротивление между корпуса и МЕИ; P_a — средна стойност на разсеяната мощност, зависеща от схемното използване на МЕИ.

От допустимите температури на прехода се определят граничните електрически натоварвания при зададена температура на околната среда. Допустимите температури на прехода за различните технологии са както следва:

- 125°C за *CMOS* технология;
- 150°C за *NMOS* и *PMOS* технология;
- 175°C за *TTL*, *DTL*, *ECL* технология.

Ранните откази биват два вида:

- свързани с развитието на дефекта и неговото прерастване в отказ;
- свързани с ускоряването на физико-химичните явления, предизвикани от дефекта.

Първата група откази се ускорява с механични и термични въздействия, по-често — стресови. Характера на ускорението е случаен и няма количествени измерения.

Табл. 5.4. Енергии на активация (E_a) за различни типове откази по данни на Intel Co.

| Причина за отказа | E_a , eV |
|---------------------|------------|
| Повърхностни заряди | 0,5 ÷ 1,0 |
| Замърсявания | 1,0 ÷ 1,4 |
| Поляризация | 1,0 |
| Електромиграция | 0,6 ÷ 1,0 |
| Дефекти в окиса | 0,3 ÷ 0,5 |
| Утечки | 0,3 |

Ускорението на втората група откази се определя чрез теорията на Арениус. Така коефициентът на ускорение се определя с формулата:

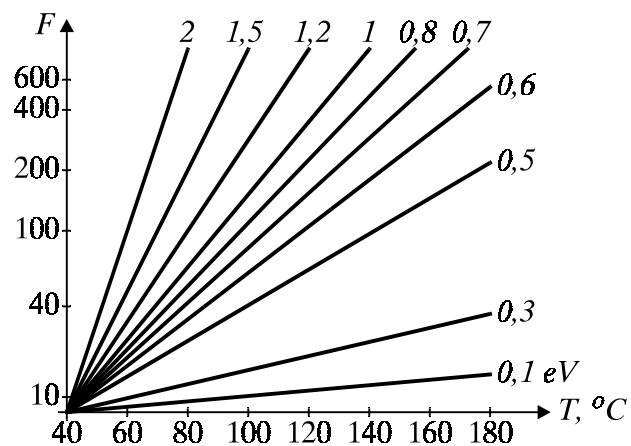
$$F = e^{-\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (5.3)$$

където $k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$; T_1 — температура по време на процедурата; T_2

— температура по време на експлоатация.

Данни за енергията на активация за различни видове откази са представени в табл. 5.4.

Фиг. 5.20 показва зависимостта на фактора на ускорение от температурата на изпитване, при температура на експлоатация 40°C и различни енергии на активация на отказите в МЕИ.



Фиг. 5.20. Графични зависимости на фактора на ускорение, отнесен към експлоатационна температура 40°C за различни температури на технологичното трениране и за различни енергии на активация на отказите в МЕИ.

— с поява на вторичен дефект — под въздействие на стресово натоварване или при физико-химично явление, причинено от първичен дефект.

2. *Модели с последствие* — характерно за тях е, че развитието на механизма на отказите вследствие определен дефект започва при една процедура на бракуване и завършва (стига до внезапен отказ) при следваща процедура на бракуване.

При тези модели също са възможни случаи на развитие на дефектите или получаване на вторични дефекти. Разгледаните модели на ранните откази се поясняват с пример на фиг. 5.21.

Данните за възникващите откази от провеждане на технологично трениране могат да служат за допълнителна информация при изследване на механизмите на отказите в МЕИ.

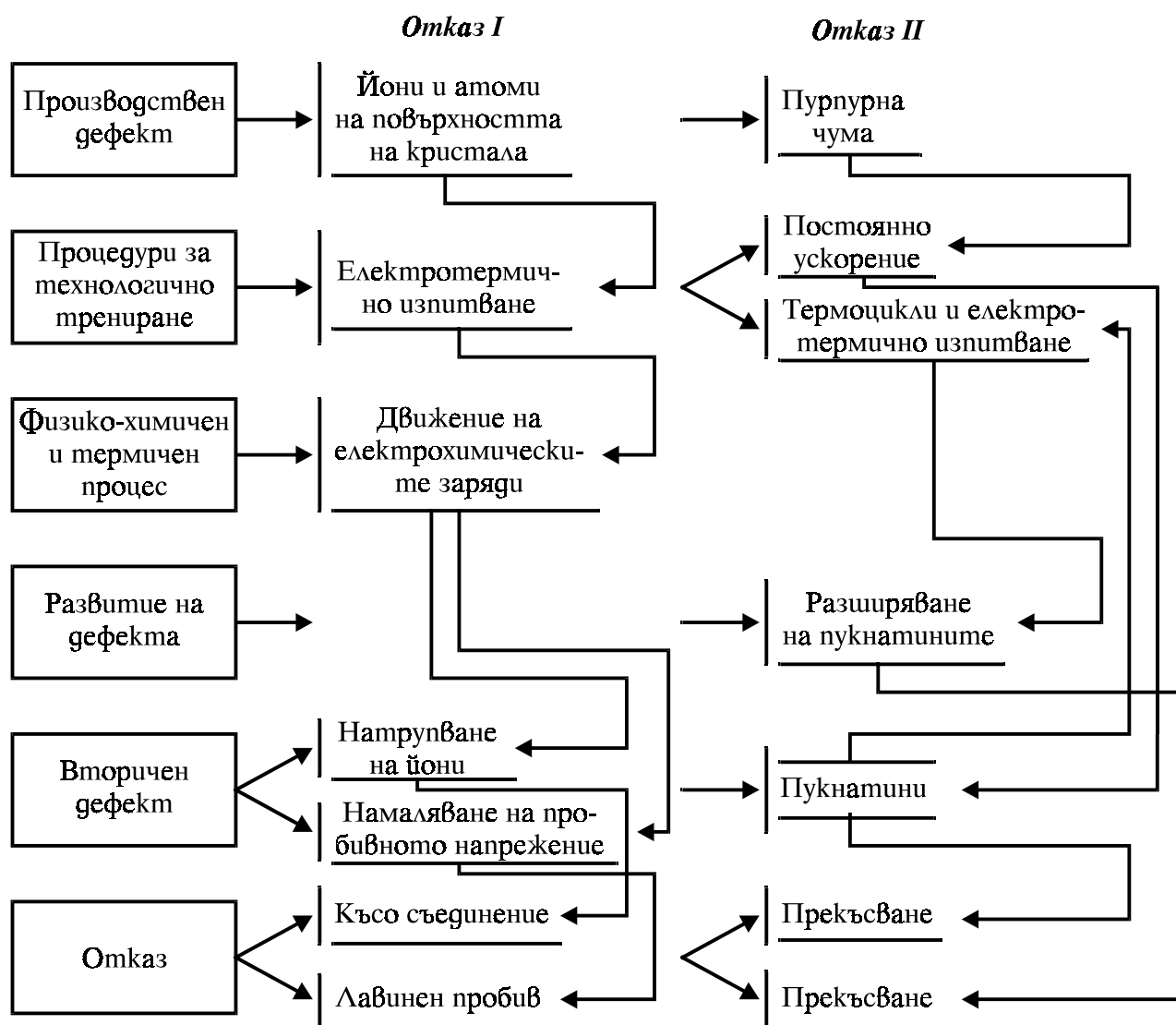
Тренировката може да предизвика нови проблеми. Един от тях за ГИС е електростатичният разряд. Отказите от електростатичния заряд са зависими събития. Рискът за възникване на откази от електростатичен заряд се увеличава с повишаване на температурата, което

Ускоряващите въздействия имат широк спектър на действие. Те активират откази, причинени от дефекти, които се различават по характеристиките си и по мястото на възникване в МЕИ. Тези особености определят следните типове модели на ранните откази:

1. *Прости модели* — механизмът на отказа започва и завършва при една и съща процедура. Простите модели биват два типа:

— с развитие на дефекта — дефекта се разширява до превръщането му във внезапен отказ;

е характерно за тренировката. Електростатичният разряд може да стимулира слабо място или дефект на МЕИ. Това води до деградация на изделието или предизвиква отказ при продължителна експлоатация. Така при избора на вариант за технологично трениране трябва да съществува ясна представа за отказите причинени от електростатичния разряд и тези откази да се изключат от данните за ранните откази. Работата по отстраняване на страничните ефекти от технологичното трениране понякога е по-голяма от изгодата, която то носи.



Фиг. 5.21. Модел на два различни механизма на откази в МЕИ.

При избора на програма за технологично трениране значително влияние оказват също характеристиките на процеса на отказите преди и след тренировката. Най-критична е ситуацията, когато отношението на интензивностите на ранните откази и установената интензивност

на отказите е достатъчно голямо. Оптимално решение за необходимостта от тренировка в този случай се взема след като се отчетат разходите, разпределението на отказите, показателите за надеждността и физическите ограничения.