

6. ОБРАБОТКА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ДАННИ ОТ ИЗПИТВАНИЯТА НА НАДЕЖДНОСТ НА МЕИ

6.1. Влияние на точността на измервателните средства върху експерименталните данни от изпитването

Извадковият метод при контрол и оценка на надеждността е основен, но не и единствен. Дори и всички МЕИ да се подложат на изпитване и контрол съществува известен риск на производителя и на потребителя, който произтича от грешката при измерване на контролираните параметри [27].

При изпитването на МЕИ се контролират параметрите на критерия за отказ. Разпределението на стойностите на тези параметри при измерване с пренебрежимо малка грешка е нормално. При отсъствие на грешки от измерването на контролираните параметри изходното разпределение се разделя на три равни области: X_1 , X_2 и X_3 . В област X_2 влизат изделия, параметрите на които се намират в границите на зададения допуск $\pm\varepsilon$, а в другите две области X_1 и X_3 — изделията с параметри излизащи извън полето на допуса.

Аналитичният израз на закона на разпределение на параметрите на годните изделия след изпитването в този случай е следния:

$$\varphi_{2(X_2)} = \frac{\Phi' \left(\frac{x_2 - M[X]}{\sigma_0} \right) 1/\sigma_0}{\Phi \left(\frac{\varepsilon - M[X]}{\sigma_0} \right) + \Phi \left(\frac{\varepsilon + M[X]}{\sigma_0} \right)}, \quad (6.1)$$

$$-\varepsilon \leq X \leq +\varepsilon$$

където $\Phi' \left(\frac{x_2 - M[X]}{\sigma_0} \right)$ — функция на Гаус; $\Phi \left(\frac{\varepsilon - M[X]}{\sigma_0} \right)$ и $\Phi \left(\frac{\varepsilon + M[X]}{\sigma_0} \right)$

— функции на Лаплас; x_2 — текуща стойност на параметъра X_2 ; ε — половината поле на допуса на параметрите на критерия за отказ на МЕИ; $M[X]$ и σ_0 — числени характеристики на изходното нормално разпределение. По таблиците на Лаплас може да се определи броят на бракуваните изделия:

$$\text{за } X_1 \text{ — } 0,5 - \Phi \left(\frac{\varepsilon + M[X]}{\sigma_0} \right) \text{ и за } X_3 \text{ — } 0,5 - \Phi \left(\frac{\varepsilon - M[X]}{\sigma_0} \right).$$

При наличие обаче на забележима случайна грешка Y контролът се

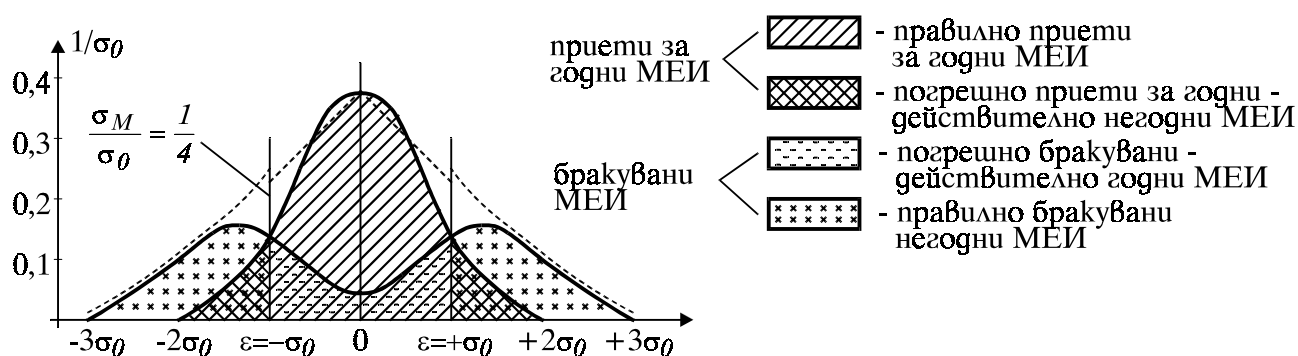
провежда по друг начин. МЕИ отново се групират на три части X_1 , X_2 и X_3 , но разпределението на действителните стойности на параметрите във всяка от тях няма да съвпаде с разпределението, установено по резултатите от измерването.

Процесът на разграничаване на отказалите МЕИ при изпитването е изпълнен правилно, ако отклонението на параметъра от границите на полето на допуски ($\pm\varepsilon$) е по-голямо от грешката на измерването. В обратния случай изделието в действителност е годно.

При значителни грешки от измерването, определена част от годните МЕИ попадат в групата на бракуваните (риск на производителя), а част от негодните се приемат (риск на възложителя). На фиг. 6.1 е показано разпределението на параметрите след бракуване на МЕИ при наличие на съществени грешки от измерването при:

$$\sigma_M / \sigma_0 = 1/4; -\varepsilon = -\sigma_0; +\varepsilon = +\sigma_0,$$

където σ_M — средно квадратично отклонение на грешката от измерване при нормалното разпределение $\varphi_M(Y)$;



Фиг. 6.1. Разпределение на стойностите на параметрите на критерия за отказ на МЕИ в случай на значителни грешки от измерването.

Чрез табулираните функции на Гаус и Лаплас може да се определи съответно:

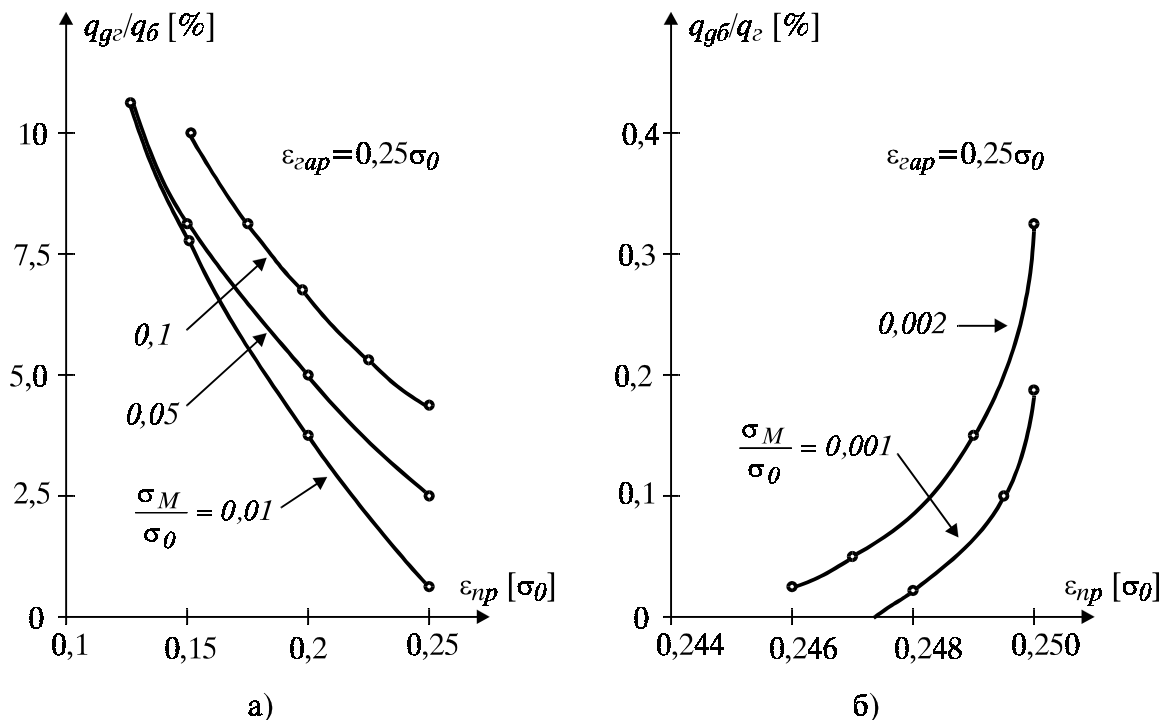
- относителният брой бракувани изделия (q_6);
- оставените за годни (q_2);
- съответно погрешно бракуваните (действително годните q_{g2});
- погрешно оставените за годни (действително негодни q_{g6}).

На фиг. 6.2. а, б са изобразени съответно зависимостите на риска на производителя (q_{g2}/q_6) — (а) и на риска на възложителя (q_{g6}/q_2) — (б) от точността на измерването на параметрите при различни допуски.

Допускът, превишаването на който не гарантира работоспособността на изделията в периода на експлоатация се нарича *гарантирана*

област на допуск $\pm \varepsilon_{гар}$. Този допуск се прилага не само за изходните параметри на готовото МЕИ, но и за параметрите на полуфабрикатите и материалите използвани при изготвянето му.

Допускът, от който се ръководят в процеса на производство се нарича *производствен допуск* $\pm \varepsilon_{пр}$. Очевидно $\varepsilon_{пр} < \varepsilon_{гар}$.



Фиг. 6.2. Зависимости на риска на заявителя (а) и на риска на производителя (б) от допуските и от точността на измерване на параметрите на критерия за отказ на МЕИ.

С помощта на графиките от фиг. 6.1 и фиг. 6.2 се решават много практически задачи:

- при планиран риск на производителя и заявителя, зададени гарантиран и производствен допуск се определя необходимата точност на измервателните уреди;

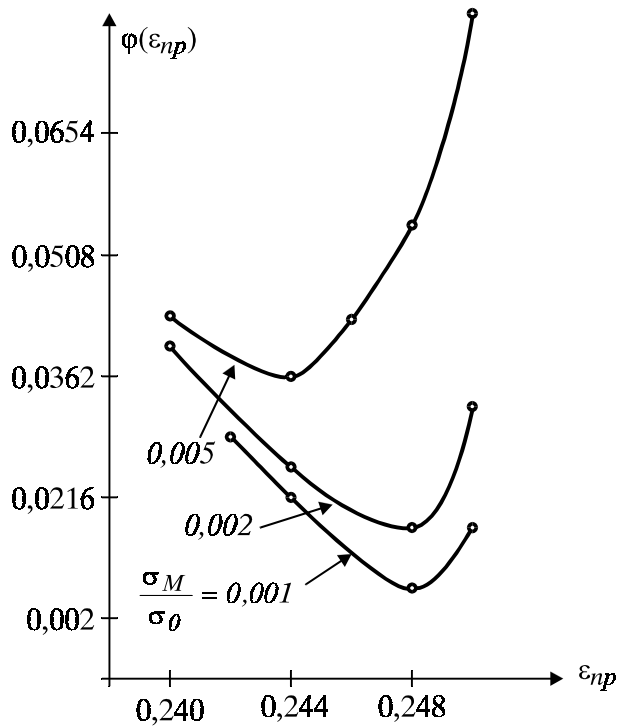
- при зададен гарантиран допуск на параметрите на критерия за отказ на МЕИ се определя съответно риска на производителя и риска на потребителя при отчитане на конкретната точност на измервателните средства;

- при планирани рискове на производител и потребител, зададен гарантиран допуск и известна точност на измервателните средства се определя стойността на производствения допуск.

За практиката е важно да се определи оптималния производствен допуск при минимална стойност на загубите на производителя. Тези за-

зуби включват:

— загубите, свързани с относителния брой неправилно бракувани изделия $q_{дз}$;



Фиг. 6.3. Зависимост на относителните загуби на заявителя от производствения допуск.

— загубите, свързани с увеличаване на производството поради наличие на известен брой погрешно приети за годни $q_{дб}$

Задачата за минимизиране на загубите при контрола се свежда до минимизиране на функцията на относителните загуби на производителя $\varphi(\varepsilon_{пр})$ при изменение на производствения допуск $\varepsilon_{пр}$ от 0 до $\varepsilon_{гар}$. Тя се решава чрез моделиране на ЕИМ. На фиг. 6.3 са дадени зависимостите на относителните стойности на загубите на производителя $\varphi(\varepsilon_{пр})$ от производствения допуск $\varepsilon_{пр}$ при зададен гарантиран допуск $\varepsilon_{гар}$ и различна точност на измерване σ_M/σ_0 на параметрите на критерия за отказ [9].

6.2. Статистическа обработка на експерименталните данни от изпитванията на надеждност

Големият брой на изпитванията налага да се избират методи за обработка на резултатите, които допускат малки извадки. Трябва да се предвиди и провеждане на изчисления с ЕИМ. Обикновено се изчисляват средна стойност (или математическо очакване), дисперсия и доверителни интервали, които напълно характеризират случайната величина.

При извършване на статистическа обработка на резултатите от изпитването първо се оценява грешката от измерването и след това тя се изключва от по-нататъшно разглеждане. Понякога се появяват резултати с рязко отличаващи се стойности, което може да се дължи на:

— грешки в измервателните прибори;

— изменение на климатичните условия в момента на контрол;

— неумело използване на апаратурата при измерването и др.

Тези резултати се квалифицират като грешки на експеримента и не се отчитат при обработката на данните.

Отклонението на контролирания параметър на едно или няколко изделия в извадката може да свидетелства за зараждащи се процеси на деградация, които по-нататък могат да доведат до откази. В случая тези отклонения са закономерни и не се изключват при обработката на данните.

Съществуват няколко критерия, които установяват границите за изключване на рязко различаващите се резултати от изпитването на МЕИ. Ако изменението на стойностите на контролираните параметри се подчинява на нормалния закон се използва критерият на Диксън. При прилагането му се изчислява коефициента на Диксън (табл. 6.1) в зависимост от броя на изпитваните изделия и от това дали отклоняващата се стойност е най-голямата или най-малката. Получената стойност на коефициента се сравнява с друга негова таблична стойност, която отчита екстремалните стойности на СВ при зададена достоверност (P^*). По този начин ако коефициентът на Диксън от табл. 6.1 е по-малък по стойност се приема, че екстремалното отклонение на стойността на измервания параметър на критерия за отказ не е случайно.

Табл. 6.1. Стойности на коефициента на Диксън.

Брой МЕИ в извадка	Означение	Стойност на коефициента за минимума на параметъра - критерий за отказ X	Стойност на коефициента за максимумата на параметъра - критерий за отказ X
3 — 7	r_{10}	$(x_2 - x_1)/(x_n - x_1)$	$(x_n - x_{n-1})/(x_n - x_1)$
8 — 10	r_{11}	$(x_2 - x_1)/(x_{n-1} - x_1)$	$(x_n - x_{n-1})/(x_n - x_2)$
11 — 13	r_{21}	$(x_3 - x_1)/(x_{n-1} - x_1)$	$(x_n - x_{n-2})/(x_n - x_2)$
14 — 30	r_{22}	$(x_3 - x_1)/(x_{n-2} - x_1)$	$(x_n - x_{n-2})/(x_n - x_3)$
При наличие на единствен едностранен екстремум			
3 — 10	r_{20}	$(x_3 - x_1)/(x_n - x_1)$	$(x_n - x_{n-2})/(x_n - x_1)$
При наличие на два и повече едностранни екстремума			

Такова приложение на критерия на Диксън е в сила само при наличие на една едностранна екстремална стойност на параметъра. При едновременно наличие на най-голяма и най-малка екстремална стойност на контролирания параметър на критерия за отказ се приема, че едност-

ранната екстремална стойност е една. При наличие на две или повече едностранни екстремални стойности, коефициентът на Диксън се определя в съответствие с табл. 6.1. Следователно използването на съответния коефициент зависи не само от обема на извадката, но и от броя „подозрителни“ едностранни отклонения на стойностите на параметрите на критерия за отказ (табл. 6.2).

Когато данните от изпитването не се подчиняват на нормално разпределение или пък закона на разпределение е неизвестен се използва критерия на Ирвин.

Табл. 6.2. Избор на коефициент на Диксън.

Обем на извадката	Брой едностранни екстремални стойности	
	Една	Две или повече
3 — 7	r_{10}	r_{20}
8 — 10	r_{11}	r_{20}
11 — 13	r_{21}	r_{21}
14 — 30	r_{22}	r_{22}

В случая, резултатите от измерването се подреждат по нарастващи стойности на параметрите на критерия за отказ и се извършва проверка за наличие на рязко отклоняващи се стойности от единия или от двата края на реда. За проверка се изчислява стойността на критерия на Ир-

вин:

$$\eta_c = \frac{x_{Kc} - x_{(K-1)c}}{s}; 1 \leq K \leq n, \quad (6.2)$$

където x_{Kc} — рязко отклоняващата се стойност на параметъра; $x_{(K-1)c}$ — съседна стойност на този параметър; s — неизместено средноквадратично отклонение на параметъра X ; \bar{X} — извадкова средна стойност на параметъра X .

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (6.3)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Табл. 6.3. Стойности на критерия на Ирвин, в зависимост от обема на извадката и доверителната вероятност.

n	η при		n	η при	
	$P^* = 0,95$	$P^* = 0,99$		$P^* = 0,95$	$P^* = 0,99$
2	2,8	3,7	50	1,1	1,6
3	2,2	2,9	100	1,0	1,5
10	1,5	2,0	400	0,9	1,3
20	1,3	1,8	1000	0,8	1,2
30	1,2	1,7			

Задава се доверителната вероятност P^* и според обема на извадката n с помощта на табл. 6.3 се определя $\eta_{табл}$. След това се сравнява получената стойност η_c с табличната стойност $\eta_{табл}$, и ако се окаже, че :

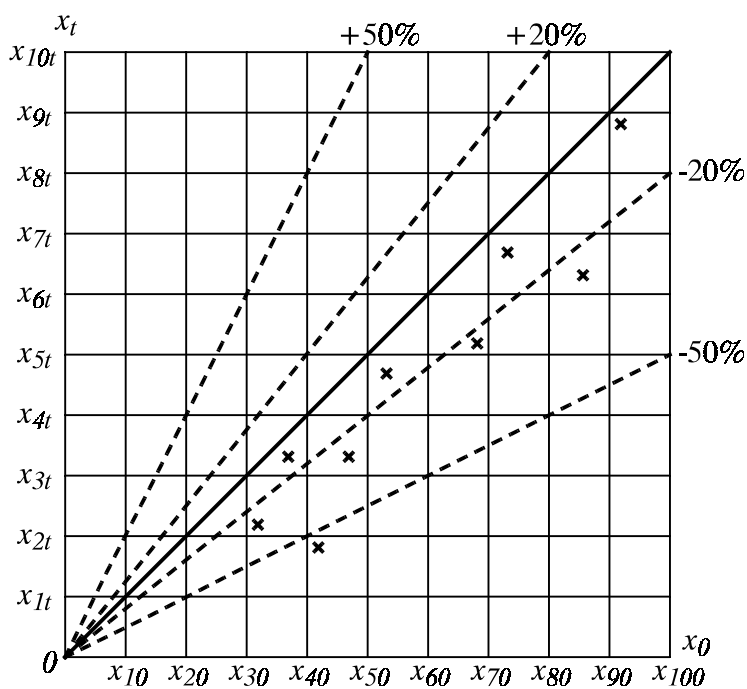
- 1) $\eta_c < \eta_{табл}$ — стойността на параметъра се приема;
- 2) $\eta_c > \eta_{табл}$ — стойността на параметъра се отхвърля и започва да се проверява друга екстремална стойност.

Неправилното изключване на рязко различаващи се резултати от експеримента може да доведе до неправилни изводи.

Препоръчва се резултатите от измерването на електрически параметри на МЕИ да се представят в таблици, съдържащи оценката на средната стойност, на дисперсията или средноквадратичното отклонение на измервания параметър на критерия за годност при първоначалното и при всяко следващо негово измерване.

Изборът на форма за запис на резултатите от изпитванията на надеждност зависи от целите и методите за техния анализ.

Графичното представяне на експерименталните резултати дава най-нагледна представа за тенденциите на изменението им. Най-разпространените графики са: полигони; хистограми; поле на корелация; интегрална крива на разпределението.



Фиг. 6.4. Поле на корелация на измерен ред стойности на контролирания параметър на критерия за отказ на партида МЕИ.

За нагледност получените стойности на контролирания параметър на критерия за отказ се нанасят непосредствено в полето на корелация. За построяването му по оста на абцисата се нанасят началните стойности на изследвания параметър преди изпитване. По ординатната ос се нанасят стойностите на същия параметър, които са измерени след приключване на изпитването в продължение на t часа. Тогава стойностите на параметъра за всяко МЕИ преди и след изпитването за

дълготрайност се означават с точки в координатната мрежа. Пример за изобразяване на измерен ред стойности на определен параметър на критерия за отказ с помощта на полето на корелация е даден на фиг. 6.4. Така цялата партида МЕИ, която са преминали изпитване за надеждност ще бъде изобразена с точки по координатната мрежа. Тази съвкупност от точки образува полето на корелация.

6.3. Определяне на закона на разпределение на параметрите на критерия за отказ на МЕИ

На практика често възниква задачата за определяне на закона на разпределение на стойностите на параметрите на критерия за отказ.

Експоненциален закон на разпределение на отработката до отказ. Вероятността за безотказна работа при това разпределение има вида:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \tag{6.4}$$

или $\lg P(t) = -\lambda t \lg e = -0,434\lambda t$. (6.5)

При опитно определяне на вероятността за безотказна работа в даден момент от време, експерименталните данни се групират около една права линия (фиг. 6.5.а). По ъгъла на нейния наклон $\alpha = \arctg 0,434\lambda$ се определя интензивността на отказите и средното време на отработката до отказ.

Нормален закон на разпределение на вероятността за безотказна работа. В този случай вероятността за безотказна работа има вида:

$$P(t) = F_0\left(\frac{M[t] - t}{\sigma}\right) = F_0\left(-\frac{t - M[t]}{\sigma}\right). \quad (6.6)$$

Ако се въведе ново означение

$$\frac{t - M[t]}{\sigma} = Z \quad (6.7)$$

тогава

$$P(t) = F_0(-Z) = 1 - F_0(Z),$$

$$F_0(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ. \quad (6.8)$$

За функцията $F_0(Z)$ има таблици с един изход [27]. Затова знаейки стойността на Z , може да се определи таблично $F_0(Z)$ и обратно. Уравнение (6.7) може графично да се изобрази като права линия (фиг. 6.5. в). Тангенсът на ъгъла на наклона на тази права към абцисата е равен на $1/\sigma$, а отсечания от нея участък върху ординатата — на $M[t]/\sigma$.

От експерименталните данни се определя вероятността за безотказна работа P_i в момента на отказа на изделието t_i . За всяка стойност на P_i по формула (6.8) се определя съответната стойност $F_0(Z)$. За намерените стойности на $F_0(Z)$ по таблица се намират стойностите Z_i . Точките $[t_i, Z_i]$ при нанасяне в координатна система се групират около права линия от вида (6.7). Количествените показатели на надеждността на МЕИ при нормално разпределение на отработката до отказ се определят по графичен път.

Вейбулово разпределение на отработката до отказ. Вероятността за безотказна работа при вейбуловото разпределение се дава със зависимостта:

$$P(t) = e^{-\frac{t^\beta}{t_0}} \quad (6.9)$$

или

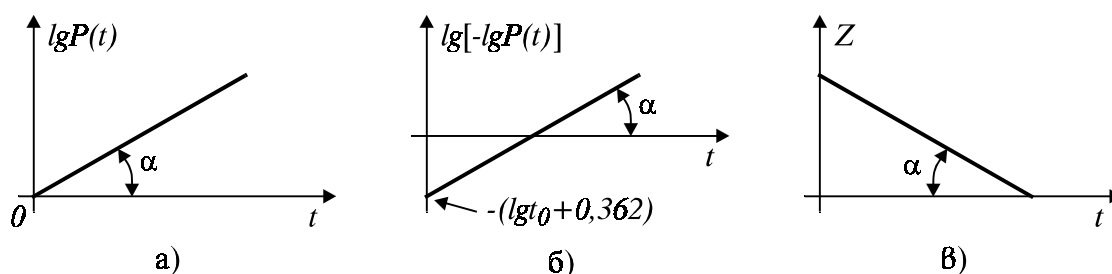
$$\lg P(t) = -\frac{t^\beta}{t_0} 0,4343, \quad (6.10)$$

където $\lg P(t)$ е отрицателна стойност, тъй като винаги $P(t) < 1$. От експерименталните данни може да се построи графиката за $P(t)$ по точки съответстващи на $(n - d_i)/n$ ($d_i \ll n$) за момента на настъпване на отказа t_i в едно изделие. За целта (6.6) се логаритмува:

$$\lg \left[\lg \left(1 - \frac{d_i}{n} \right) \right] = -\beta \lg t + \lg t_0 - \lg 0,4343, \text{ или}$$

$$\lg \left[-\lg \left(1 - \frac{d_i}{n} \right) \right] = \beta \lg t - \lg t_0 - 0,362. \quad (6.11)$$

Уравнение (6.11) представлява права линия (фиг. 6.5.б). Правата пресича ординатата в точка със стойност $(\lg t_0 + 0,362)$. Тангенсът на ъгъла, който тази права склучва с абцисната ос е равен на стойността на параметъра на формата β . За този графичен метод се използва специална вероятностна мрежа на Вейбул. След като се разполага с експериментални данни за моментите на настъпване на отказите (или отработката до отказ) t_i в d_i от изпитваните МЕИ, точките $[t_i, d_i]$ се нанасят на вейбулова мрежа и се групират около права от вида (6.11).



Фиг. 6.5. Графично изображение на: а) — експоненциално; б) — вейбулово и в) — нормално разпределение.

Ако експерименталните точки лежат на вдлъбната или изпъкнала крива, то за нейното изправяне се използва понякога параметъра на разположението γ [13], който е реално число. В този случай вероятността за безотказна работа се дава със зависимостта:

$$P(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{t_0}} \quad (6.12)$$

или

$$\lg \left[-\lg \left(1 - \frac{d_i}{n} \right) \right] = \delta \lg(t - \gamma) - \lg t_0 - 0,362. \quad (6.13)$$

Стойността на параметъра на разположението γ се избира експериментално, а неговия знак зависи от вида на кривата. Ако точките лежат на вдлъбната крива (спрямо абцисата), то се подбира стойност за γ ($\gamma < 0$), такава че експерименталните точки да се разположат на права линия. Аналогично се постъпва и за другия случай. При това се променя мащаба по абцисната ос, но не се променя характера на самото разпределение.

В случая, когато броят на отказалите изделия е съизмерим с броя на изделията в извадката ($d > 0,1n$), кривата се построява по точки $\left[t_i, \left(1 - \frac{d_i}{n+1} \right) \right]$. Тогава уравнение (6.11) може да се запише във вида:

$$\lg \left[-\lg \left(1 - \frac{d_i}{n+1} \right) \right] = \beta \lg t - \lg t_0 - 0,362. \quad (6.14)$$

За по-точна оценка на получените експериментални данни може се използва критерия на Пирсън.

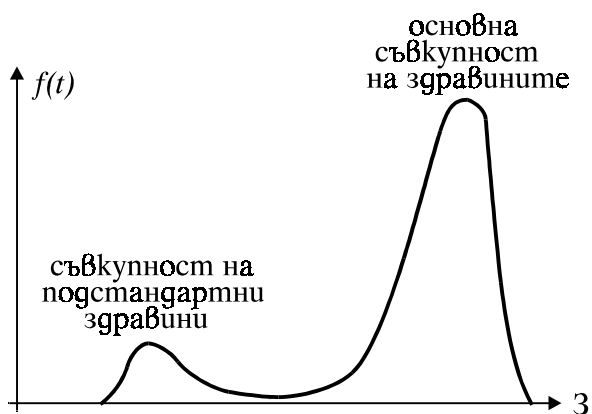
6.4. Избор на натоварването и на допустимите граници на изменение на параметрите на МЕИ при изпитване

Всяко изделие се характеризира с определена здравина (\mathcal{Z}) [13], т.е. способност да се противопоставя на въздействието на външни сили (G), да не се разрушава и да не получава остатъчни деформации. Докато $\mathcal{Z} > G$ изделието е работоспособно. При $\mathcal{Z} < G$ настъпва отказ. За всички случаи, когато се изпълнява $\mathcal{Z} - G = \xi > 0$, (където ξ е много малка величина) няма да настъпи отказ. Следователно вероятността за безотказна работа във всеки момент се изчислява с изрази:

$$P = \int_0^{\infty} \varphi(\xi) d\xi,$$

където $\varphi(\xi)$ — функция на разпределение на ξ .

Основната част от стойностите на здравините е центрирана около една очаквана стойност, докато друга, по-малка част е групирана около по-малка стойност. Това е съвкупността на подстандартните елементи, дължаща се на случайните изменения на производствения процес и дефектите на материалите



Фиг. 6.6. Зависимост на плътността на вероятностите на отказите от здравината на МЕИ.

На фиг. 6.6 е показано двумодалното разпределение на здравините, което е типично за микроелектронните елементи. Граничните стойности на въздействащото натоварване се избират да бъдат равни на граничното натоварване на изделията с най-малка здравина. Но здравината на изделията се мени с времето, в зависимост от големината на приложеното натоварване и в резултат на стареенето и износването.

Натоварване, което е избрано със съответен запас и препоръка на потребителя за използването на МЕИ в ЕА, се нарича *максимално допустимо*. Това натоварване се установява по експериментален път. Необходимият запас се избира от производителя от съображение за гарантиране на загаден показател на надеждността на МЕИ в продължение на определено време.

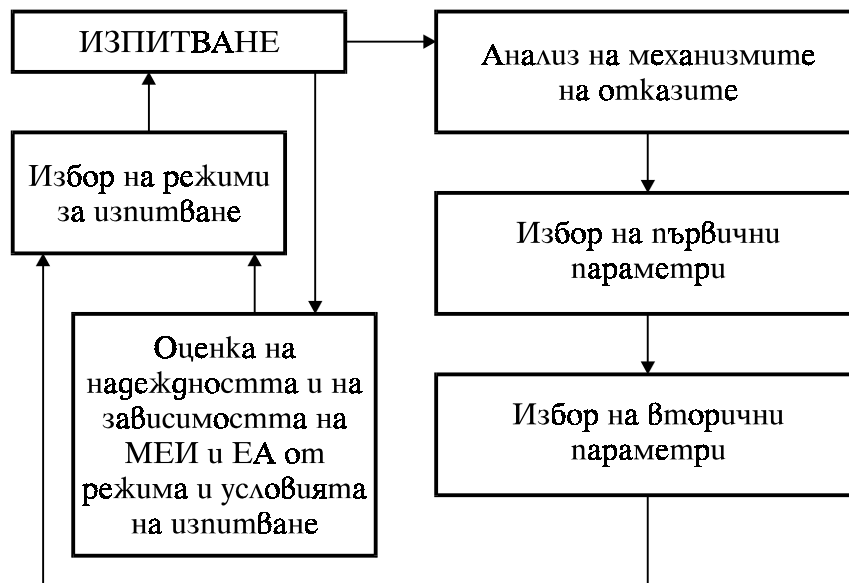
Най-важен етап при установяване на максимално допустимите натоварвания и условията на работа на МЕИ е анализа на механизма на отказите, възникващи при тяхното изпитване и експлоатация.

Параметрите, определящи стойността на максимално допустимите натоварвания, могат да се разделят на:

1. Първични — параметри, чиито стойности напълно предопределят механизма на отказа на изделието и скоростта на процеса на деградация на свойствата му. Например за ПП важни първични параметри са: температурата на различни области на изделието, пробивното напрежение на прехода, големината и посоката на механичните напрежения в кристала или в другите елементи на конструкцията.

2. Вторични — физико-технологични, конструктивни и електрически параметри на МЕИ, а също условията на експлоатация, които пряко или косвено влияят на първичните параметри. Сами по себе си те не определят механизма на отказа и вероятността за възникването му. Те се разделят на:

- вътрешни (електрически, конструктивни);
- външни (параметри на режимите и условията на експлоатация, като температура на околната среда, продължителност на импулса и др.).



Фиг. 6.7. Схема на установяване на максимално допустими натоварвания при експлоатация на МЕИ и ЕА.

В процеса на експлоатация на МЕИ, едновременно с осигуряването на необходимата надеждност трябва да се отчита ефективността им на функциониране, а също и характеристиките на електронната апаратура, в която МЕИ се използват. Съвкупността от всички тези условия позволява да се изберат най-оптималните максимално допустими натоварвания.

Дейностите по установяване на максимално допустимите натоварвания са представени в схемата на фиг. 6.7.

Контролът на параметрите на МЕИ до провеждането на изпитванията се извършва по така наречените производствени норми. Те се установяват за производството, в зависимост от точността на измервателното оборудване. Тези норми са по-тежки от установените в техническата документация. Стойността на *производствения запас* се избира така, че към потребителя да постъпват МЕИ винаги с по-добри параметри от посочените в ТД.

Производителят, за да осигури зададен показател на надеждност трябва да установява норми (условни критерии) на параметрите на МЕИ, отличаващи се от реалните им стойности в момента на предаване на продукцията в посока на разширяване на границите. Големината на запаса зависи от скоростта на изменение на параметрите във времето при въздействие на външните фактори върху МЕИ. При много голямо увеличаване на границите на изменение на параметрите, показателят на надеждността практически не се изменя, а техническите характеристики на изделието и ЕА, в която се използва се влошават.

Запасът по параметри, избран в зависимост от технологичното отклонение и конструктивните особености на МЕИ се нарича *конструктивно-технологичен запас*. На практика той се дава като безразмерна величина и се определя съответно за долната и горната граници:

$$K_1 = \frac{x_{min} - x_{minTD}}{M[X] - x_{min}},$$

$$K_2 = \frac{x_{maxTD} - x_{max}}{x_{max} - M[X]},$$
(6.15)

където: x_{min} и x_{max} са съответно най-малката и най-голямата стойности на контролирания параметър в реалното му разпределение; $M[X]$ — средна стойност на параметъра в генералната съвкупност; x_{minTD} и x_{maxTD} — стойности на нормата уговорена в техническата документация. При симетрично разпределение, знаменателите в изразите, характеризиращи нестабилността на технологичния процес стават равни и стойността на този коефициент в двата случая се определя от избраните конструктивно-технологични запаси по x_{min} и x_{max} .

При оценка на резултатите от изпитването с помощта на условни критерии се избират за наблюдение най-информативните параметри [2]. Избраният параметър, по който се оценява изделието за годно или условно отказало се нарича *критерий за годност (отказ)*.

Допустимите граници на изменение на критериите за годност могат да се установяват с *едностранни* или *двустранни* ограничения. Например, обратният ток на $p-n$ прехода за транзистори обикновено се ограничава от една страна (по максимално допустима стойност), но коефициентът на усилване по ток може да бъде ограничен както от една така и от две страни (минимална и максимална стойност). Минималните и максималните стойности за изменение на критерия за годност се установяват по два начина: по *абсолютни* допустими стойности и по *относителни* допустими стойности на изменение във времето по отношение на началните стойности. При оценка на надеждността на МЕИ изборът на абсолютни стойности на критериите е неудачен.

6.5. Методи за неразрушаващ контрол на параметрите на МЕИ при изпитване

Основните характеристики на неразрушаващия контрол са:

— запазване качеството, параметрите и характеристиките на ми-

кроелектронните изделия;

— откриване на скрити дефекти по косвени, вторични или преки признаци;

Възможността за изследване на МЕИ в процеса на разработка, производство и експлоатация е главното преимущество на неразрушаващия контрол при изпитване в сравнение с другите видове контрол.

Целите при прилагането на неразрушаващ контрол са:

— индивидуално и групово прогнозиране на надеждността на изделията;

— бракуване на партида изделия, която не удовлетворява изискванията по надеждност;

— оценка на качеството на технологичния процес с оглед на неговото управление за получаване на високонадеждни изделия.

В зависимост от физическите явления, заложен в основата на неразрушаващите методи за контрол те се класифицират на [9]: оптични, електрически, радиационни, методи на електронна микроскопия, топлинни и електро-физични. Всеки метод в зависимост от начина на получаване, преобразуване и регистриране на информацията включва множество разновидности.

6.5.1. Оптични методи.

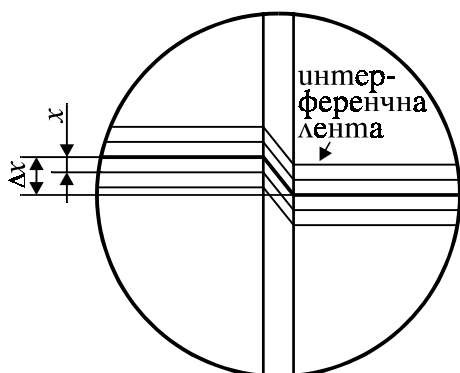
При тези методи се използва взаимодействието на видимото, ултравиолетовото и инфрачервеното излъчване с контролираното изделие. С тях се контролира състава и свойствата на материалите и на технологичните процеси. Те използват явления като оптично излъчване, отражение, интерференция и дифракция. Тези методи се разделят на визуално-оптични (микроскопски), интерференчни, спектрални, поляризационни, фотометрични и др.

Визуално-оптичен метод. Той се изразява във визуален оглед под микроскоп на изследваното изделие и сравнение с еталонен образец или с негово изображение. С този метод се контролират: външен вид, качества на повърхността, чистота на повърхността и наличие на дефекти по нея, точността на изпълнение на монтажни операции и наличие на деформации. Този метод широко се използва за анализ на откази в МЕИ. Повишаването на ефективността на визуалния контрол се постига с използване на проекционни устройства, за да се наблюдава на екран увеличеното изображение на обекта. Използват се лазерни и телевизионни проектори.

За визуален контрол са разработени автоматизирани системи, с които могат да се откриват дефектите, да се измерва площта и линей-

ните им размери, да се определя сумарната площ на дефектите върху работното поле, да се регистрира местоположението им.

Интерференчен метод. Същността му се изразява в получаване на информация от разпределението на интензивността и фазата на оптичното излъчване преминаващо през обекта или отразено от него.



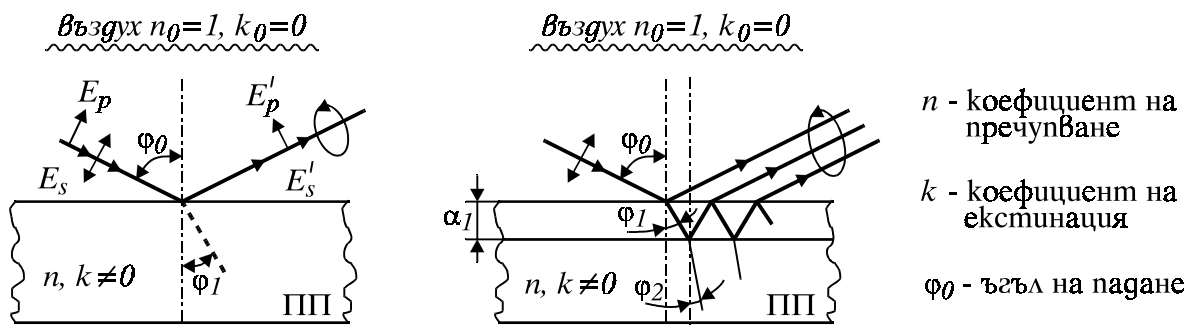
Фиг. 6.8. Измерване на дебелина на окисен слой по изкривяването на интерференчните линии от образуваното стъпало.

Този метод се прилага за контрол на: класа на чистота на повърхността, дебелини на слоеве, геометрични размери на елементи на структурата на МЕИ и др. На фиг. 6.8 е показана схемата на измерване на дебелина на слой, който измества интерференчната лента. Чрез определяне на това изместване Δx се измерват дебелини до $3 \cdot 10^4 \text{ nm}$.

Поляризационен метод. При него се получава информация за изменението на параметрите на поляризацията на оптичното излъчване в резултат от взаимодействието му с обекта в процеса на

пречупване, отражение или поглъщане.

Елипсометрични методи (отражателна поляризация). Това са едни от най-точните и чувствителни методи за контрол. На фиг. 6.9 е показан хода на лъч при отразяване на линейно-поляризирана светлина от повърхността на пластина. Елипсометричните измервания във видимия обхват на дължините на вълните се използват при измерване на дебелини и коефициенти на пречупване на тънки ($10^{-7} \div 10^{-5} \text{ m}$) и свръхтънки (десетки нанометри) диелектрични слоеве и за измерване на оптични константи на повърхности на различни материали. За измерване на дебелини на III слоеве се използва инфрачервено (ИЧ) излъчване в късия и дълговълновия диапазон.



Фиг. 6.9. Отразяване на линейно-поляризирана светлина от повърхността на полупроводник (ПП): (а) — без слой и (б) — със слой върху него.

Спецификата на инфрачервената елипсометрия е, че измерваните елипсометрични параметри са функционално свързани с електрофизичните свойства на ПП (концентрация и подвижност на свободни носители, време на релаксация и др.). Високата чувствителност на елипсометричният метод позволява той да намира приложение при анализ на явления, възникващи на повърхностите на МЕИ.

Нефелометричен метод. Той се прилага при изследване на причините за отказите в оптоелектронни прибори и елементи на квантовата електроника. При него, информация за изследвания обект се получава от изменението на интензивността и поляризацията на оптичното излъчване, преминаващо през обекта.

Спектрални методи. При тези методи се получава информация за изследвания обект по спектралния състав на възбуденото в него оптично излъчване чрез външно въздействие и по спектралния състав на преминаващо, отразено или разсейвано излъчване. Оптичната спектроскопия е сред най-важните използвани физически методи за анализ на химическия състав на материалите. С този метод се определя наличието на органични замърсявания по повърхността на ПП. При него информацията за изследвания обект се получава от спектралния състав на възбуденото от външно въздействие оптично излъчване.

За изследване на елементите в състава на неорганични материали широко се използва емисионен и абсорбционен атомен спектрален анализ. За получаване на информация за органични материали най-перспективен е методът на инфрачервена спектроскопия. С този метод се определя наличието на органични замърсявания по повърхността на ПП.

Метод на лазерно сканиране. Ако се сканира повърхността на ПП с оптична сонда, то картината на разпределение на възникващия фототок отразява разположението на p - n преходи и други потенциални бариери. Този метод се използва широко при анализ на причините за брак и за проверка на функционирането на МЕИ.

Електрооптични методи. За експресен контрол на качеството на

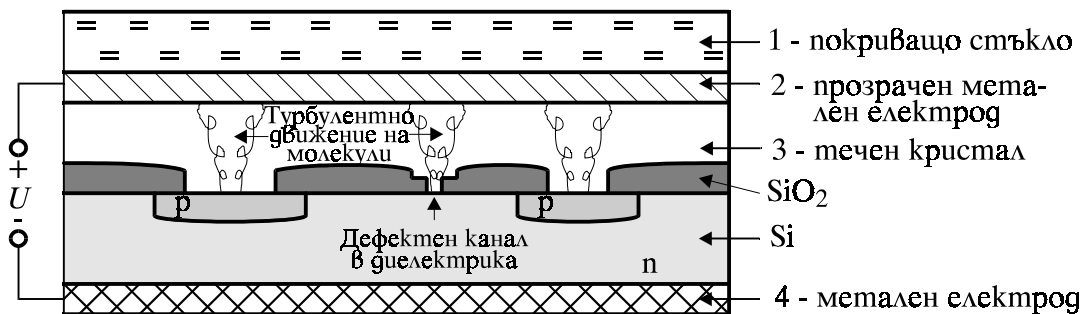
различните слоеве в МЕИ и за анализ на откази в ПП структури твърде перспективно е използването на течни кристали, които се нанасят на повърхността на микроелектронната структура [9].

В течнокристалната фаза молекулите на тези вещества са ориентирани по едно направление с много флукуации. Това води до голяма микронееднородност на средата и до голямо (10^6 пъти повече от обикновените изотропни кристали) разсейване на светлината. Във външно електрическо поле молекулите на течните кристали се подреждат строго и рязко нараства пропускането на светлината. Холестериците се използват за визуално наблюдаване на горещи точки в МЕИ. Много чувствителни към топлинни и механични въздействия са течните кристали в смектична фаза.

При диагностика въздействията на електрическите и топлинните полета се разглеждат като смуцаващи фактори. Електрическото поле води до възникване на ефект на динамично разсейване на светлината, свързано с турбулентното движение на молекулите на кристала. Топлинното натоварване води до термооптичен ефект, който се съпровожда с изменение на цвета и на светопропускането на кристала.

Методът на нематичните кристали е прост и евтин метод, който позволява да се регистрират пори в изследваните МЕИ с размери до $0,5 \cdot 10^6$ m. Схемата на устройството за контрол на ПП структури е показана на фиг. 6.10. Изследваната ИС се установява върху метална основа (4). Върху нея се нанася слой (3) течен кристал (с дебелина до $6 \cdot 10^5$ m). Над течния кристал се поставя стъклена пластина (1), от долната страна на която е нанесен прозрачен слой (2) от SnO_2 , служещ за електрод. При подаване на напрежение в местата с дефекти на окиса и в областта на *p-n* преходите възниква турбулентно движение на молекулите, което се наблюдава с оптичен микроскоп.

С нанасяне на течни кристали на повърхността на ИС може да се регистрира картината на разпределението на потенциалите и на логическите нива, визуално да се наблюдава квазистатичния режим на работа на ИС.

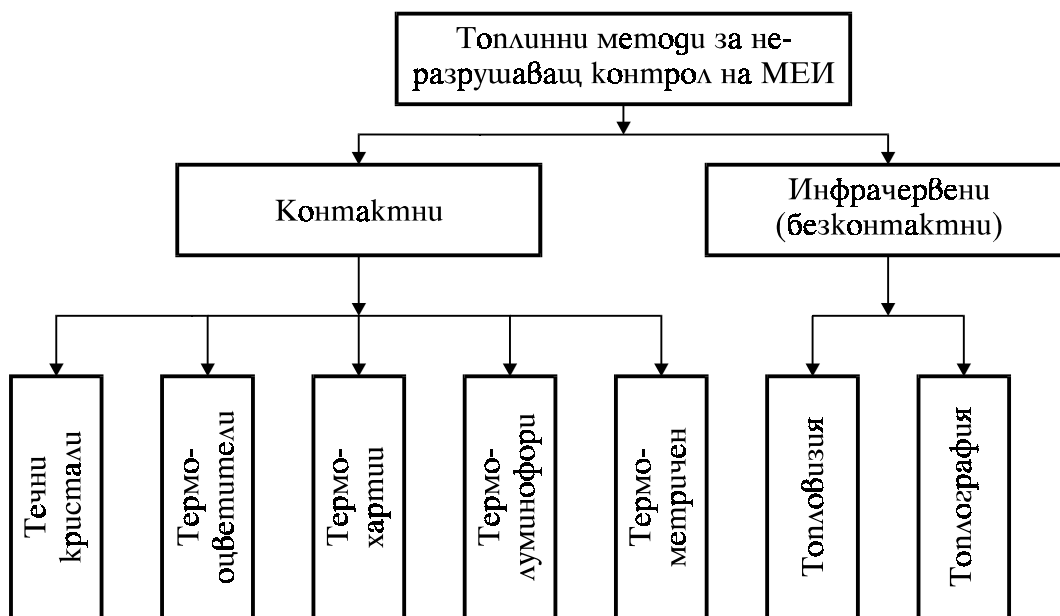


Фиг. 6.10. Неразрушаващ контрол на диелектрични, метални слоеве и PN-преходи на МЕИ с използване на течен кристал.

При подаване на входни сигнали към ИС може да се визуализира разпределението на потенциалите, да се проследи преминаването на сигналите и да се намерят участъците, в които нивата на сигналите се отличават от необходимата стойност. Този метод е статичен. При използването на течни кристали за визуализация на логическите състояния, във вътрешните възли на ГИС по време на работа в импулсен режим, може да се определят логическите нива, съответстващи на тези състояния.

6.5.2. Методи за контрол на разпределението на температурните полета

С тези методи се регистрират топлинните полета в контролираното МЕИ (фиг. 6.11).



Фиг. 6.11. Класификация на топлинните методи за неразрушаващ контрол на МЕИ.

Те се прилагат за [9]:

- контрол на топлинните режими на МЕИ;
- анализ на разпределението на температурата по повърхността и регистриране на зони с локално прегряване;
- откриване на области с повишено и понижено съпротивление.

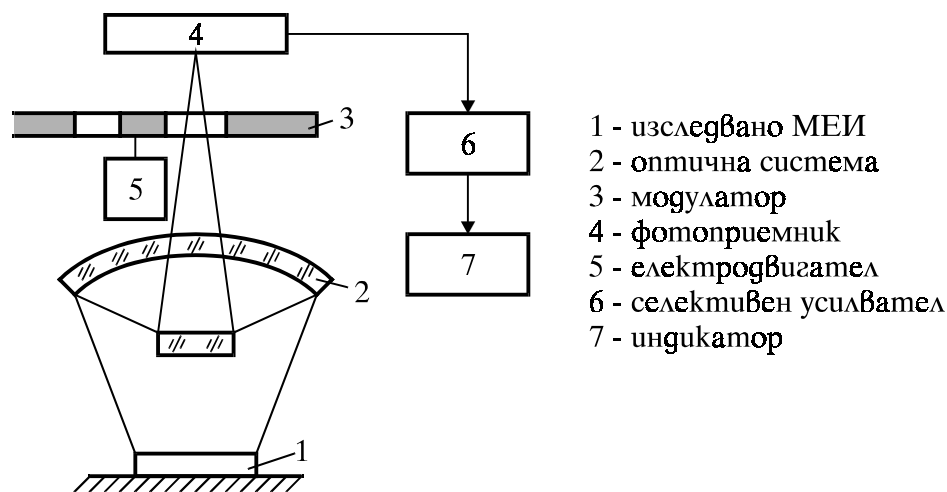
Във връзка с това методите широко се използват за регистриране на следните видове откази: к.с.; прекъсване на метализация; пробиви в окиса; големи утечни токове. Този вид контрол се използва през етапа на разработка, производство, за бракуване на потенциално ненадеждни изделия и при анализ на отказали МЕИ.

В зависимост от начина на получаване на информация топлинните методи за контрол се делят на: контактни и безконтактни.

Контактни методи. При тях се извършва контактна регистрация на абсолютната температура или на нейното разпределение по повърхността на изделието. Използват се контактни сензори на температура, термоиндикатори, индикатори на течни кристали и др.

За измерване на температурата и топлинното съпротивление се прилага регистрацията на електрическите параметри на изделието (напр. напрежение на *p-n* преход), които се изменят в зависимост от температурата.

Безконтактни методи. Към тях се отнася един от най-разпространените методи, при който се регистрира собственото ИЧ излъчване на изследваното МЕИ.



Фиг. 6.12. Схема на инфрачервен радиометър.

Схема на инфрачервен радиометър е показана на фиг. 6.12. Към изследваното МЕИ (1) се подава електрическо захранване. С оптичната система (2) ИЧ излъчване от изделието се фокусира на фотоприемника (4).

За отделяне на полезния сигнал от фона на шумовете трябва ИЧ излъчване да се модулира. Модулаторът (3) представлява диск с определен брой отвори, който се върти от електродвигател (5). Преобразувани-

ят сигнал се усилва със селективен усилвател (6) и се регистрира на индикатор (7).

Когато е необходимо да се наблюдава разпределението на топлинното поле във всички точки на изследваната повърхност се използват инфрачервени микроскопи или топовизори.

6.5.3. Радиационни методи за контрол

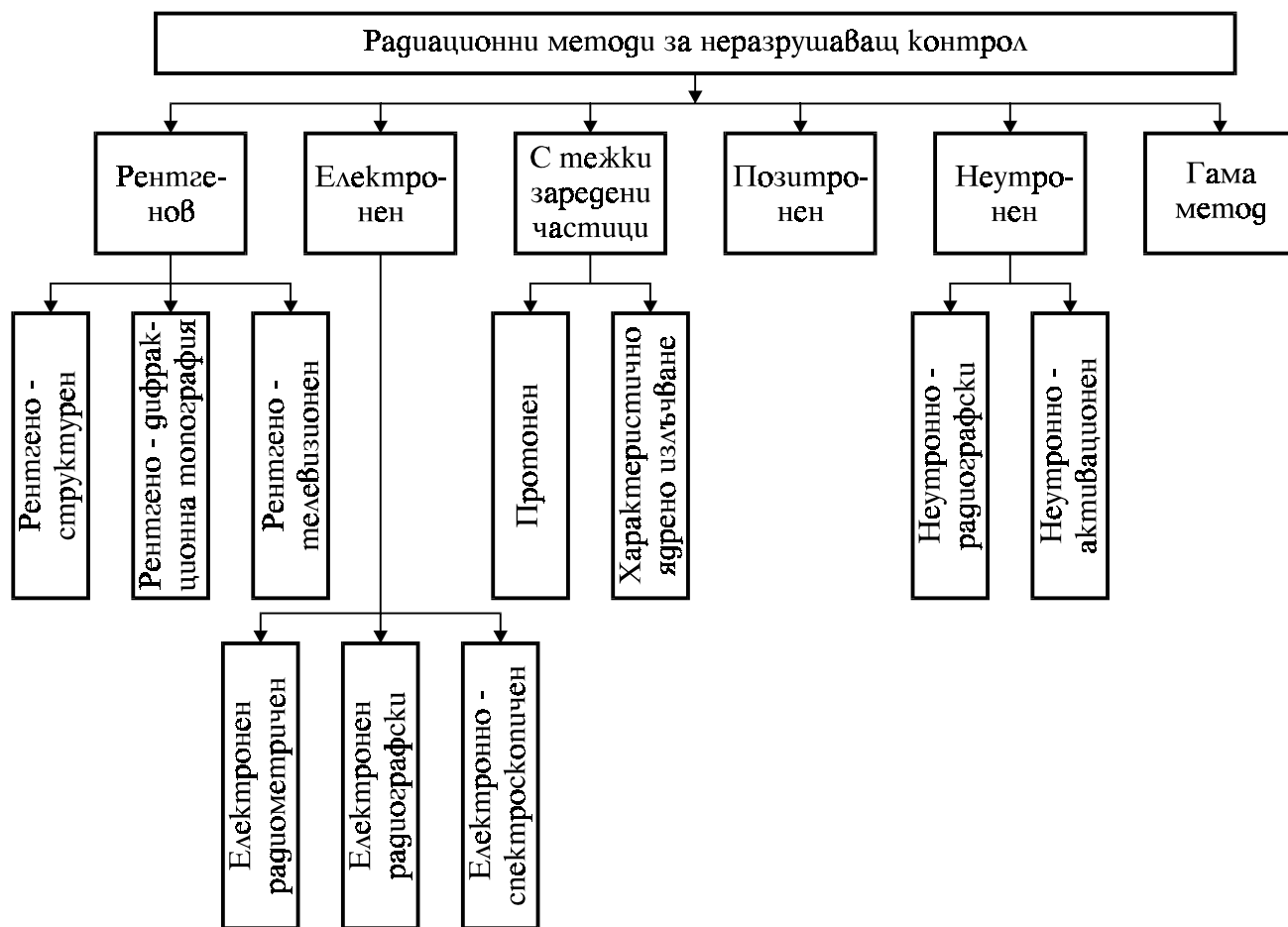
При тези методи (фиг. 6.13) се използва информацията получавана в резултат на взаимодействието на излъчването с контролируемото изделие.

Рентгенови методи. Те са получили най-широко разпространение и се подразделят на различни видове методи за контрол според начина на преобразуване на информацията. За анализ на отказите могат да се използват следните три свойства на рентгеновото излъчване: поглъщане, отклонение в кристалната решетка, собствено излъчване. В зависимост от използването на тези свойства и начина на преобразуване на информацията се различават:

- рентгенодифракционни;
- рентгеноструктурни;
- рентгеноспектрални;
- методи за контрол на интензивността на лъчението, когато то е преминало през контролираното изделие.

Когато при последния от изброените методи за регистрация на изображението се използва екран на видеоконтролно устройство се изграждат рентгенотелевизионните методи. С рентгенотелевизионен микроскоп могат да се откриват:

- нарушения в цялостта на материала, влияещи на херметичността, електрическата и механичната якост и на съхраняемостта на МЕИ;
- външни частици в корпусите, които влияят на електрическата, механичната якост и устойчивост на изделията;
- нарушение на геометричните размери и форма, поради грешки при изработката и монтажа, деформация или механични въздействия.



Фиг. 6.13. Класификация на радиационните методи за неразрушаващ контрол.

С помощта на микрорентгеноспектралният метод се определят точкови дефекти от радиационен характер, микронеравности в изходните монокристали, състава и химическото състояние на неорганични материали. При анализ на причините за откази се изследват корозионни явления и образуване на интерметални съединения.

С рентгеноструктурен анализ се определя кристалната структура.

Най-голямо разпространение за контрол на ориентацията на монокристалите и на съвършенството им е получил рентгенодифракционният метод.

Рентгеновите методи имат ниска разрешаваща способност и не са приложими за контрол на геометрията и структурните свойства на свръх големите ИС.

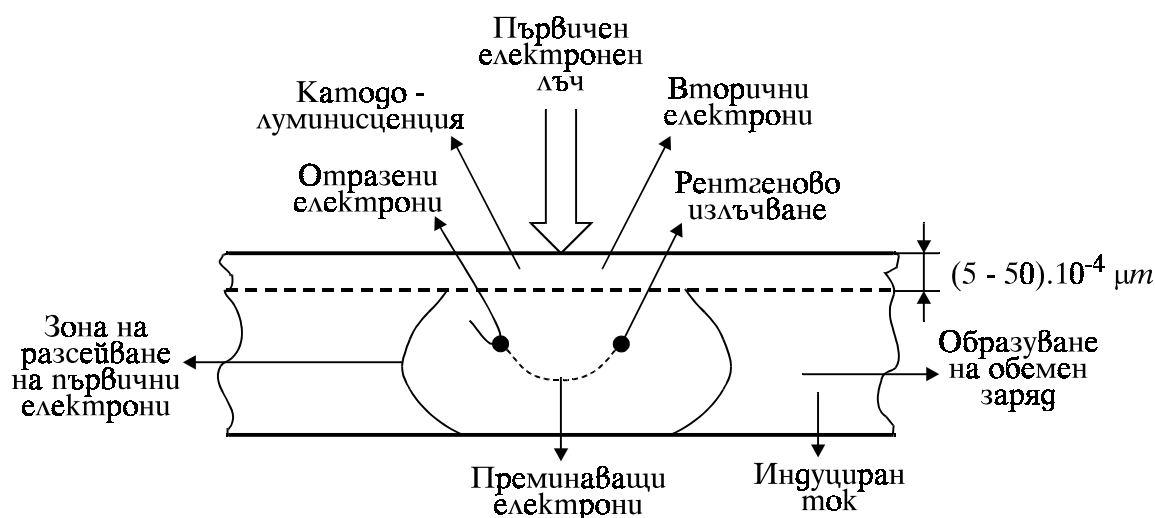
Фотоакустична спектроскопия. Методът използва фотоакустичния ефект, изразяващ се в генерация на акустични колебания в газа около твърдото тяло, при въздействие на повърхността му с импулсно електромагнитно излъчване (в ултравиолетов, видим или ИЧ обхват).

Информация за топлинните и оптичните свойства на веществата,

а също и визуализация на структурата на твърдите вещества, в частност дефекти от типа на пукнатини, чужди включения, може да се получи с фотоакустичен микроскоп. С него се визуализират топлинните нееднородности на МЕИ в дълбочина.

6.5.4. Методи на електронна микроскопия

Тези методи използват явленията на взаимодействие на електронен лъч с веществото (растерна микроскопия, електронография) или явленията на отделяне на електрони под въздействието на топлината, светлината, на йонен или електронен поток (емисионни, оже-спектроскопични методи).

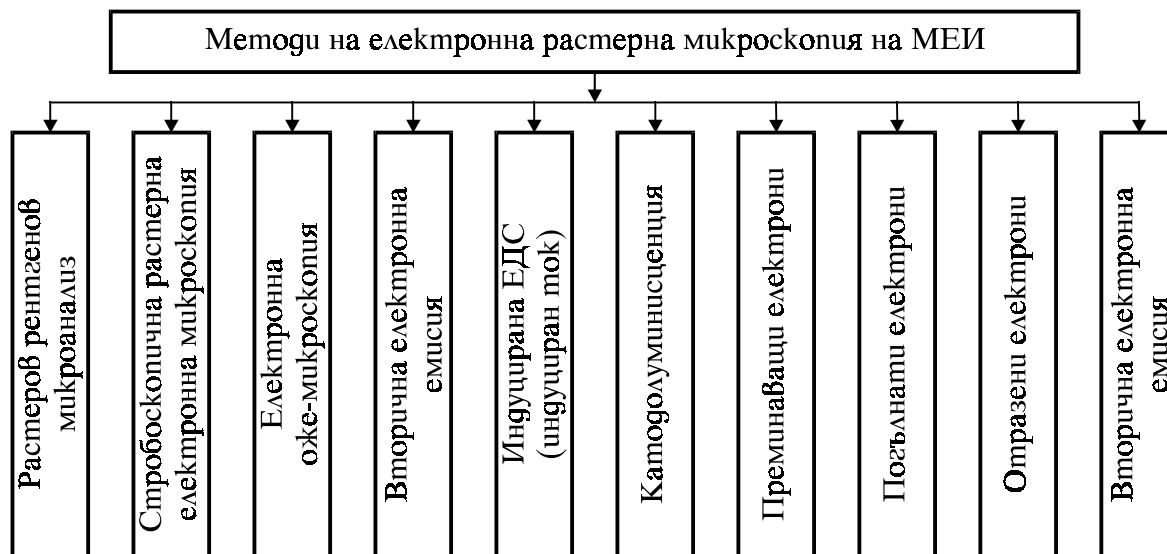


Фиг. 6.14. Схема на вторичните ефекти при взаимодействие на първичен електронен лъч със структурата на изследваното МЕИ.

Методите на електронната микроскопия са с висока чувствителност, точност и с висока разрешаваща способност, поради което се прилагат за контрол при създаването на ГИС и МЕИ с повишена надеждност.

В основата на растерната електронна микроскопия стоят методите, при които на екран се регистрират резултатите от взаимодействието на фокусиран електронен лъч (с енергия до няколко десетки keV) с веществото на изследваното изделие. Вторичните ефекти, които се наблюдават при взаимодействие на първичния електронен лъч с образеца са дадени на фиг. 6.14.

Класификация на методите на растерната електронна микроскопия по вида на получаваната информация е показана на фиг. 6.15.



Фиг. 6.15. Класификация на методите на растерна електронна микроскопия, прилагани при неразрушаващ контрол на МЕИ.

Растерните електронни микроскопи работят в различни режими. Сред най-разпространените са методите на:

- отразените електрони;
- вторичната електронна емисия и
- оже-спектроскопията.

Използването както на отразени, така и на вторични електрони, позволява по-точно отразяване на релефността на повърхността, отколкото само при методите използващи отражението на електроните. Така могат да се визуализират налични на повърхността електрически или магнитни микрополета. Могат да се регистрират места на утечки, прекъсване на токопроводящи шини или на к.с. в елементите на МЕИ.

Емисионна електронна микроскопия. В случаите, когато е необходимо да се определи реакцията на анализирания материал (елемент на МЕИ) на външно въздействие (топлинно, радиационно, механично), изменящо структурата или състава по време на въздействието се използва този метод. Такъв анализ например е необходим при установяване на причините за пробиви, „плаващи“ откази в процеса на експлоатация в условията на екстремални кратки топлинни или др. натоварвания.

Електронна оже-спектроскопия. Този метод се използва за химически анализ на повърхността на МЕИ, състоянието на която се определя от такива свойства на слоевете като адхезия, корозия, пасивация и т.н. Разрешаващата способност на метода по дълбочина е от части моноатомен слой до няколко атомни слоя. С този метод се изследват причините за отказите и брака на МЕИ. Същността на метода се зак-

лъчава във възможност за получаване на информация за елементния състав на повърхностните слоеве на твърдо тяло чрез анализ на енергетичното разпределение на вторичните електрони, възникващи при облъчване на твърдото тяло с електронен лъч, отделянето на оже-електрони, определяне на тяхната енергия и интензивност и идентификация по тези характеристики на съответните елементи от периодичната система.

6.5.5. Масови спектрометрични методи

Тези методи намират приложение при прецизни изследвания на химически състав и в управлението на технологическия процес. В производството най-широко приложение са намерили: искрова, лазерна и масова спектрометрия на вторични йони.

Масова спектрометрия на вторични йони. Метода се основава на масовата спектрометрия на вторични йони, поради което се използва за изучаване на състава и характера на разпределение на примесите в тънки многокомпонентни слоеве, за изследване на преходни зони в мястото на контакта (метал-керамика, метал-ПП), концентрационен профил на легиран или имплантиран полупроводник.

Лазерна масова спектрометрия. При този метод повърхността на обекта се сондира с фокусиран лазерен лъч. Методът се използва за определяне на елементния състав на ПП монокристали, епитаксиални и имплантирани слоеве за откриване на атомни примеси. С него могат да се анализират всякакви твърди вещества (метали, ПП, диелектрици).

Искрова масова спектрометрия. Методът използва явления на разпрашване и йонизация на веществото във вакуум в резултат на въздействие на електрически разряд. С този метод се получават уникални аналитични характеристики като абсолютната чувствителност при определяне състава на 70 елемента достига до 10^{12} g.

6.5.6. Електрохимични методи

Основното достоинство на електрохимичните методи е постигането на визуализация на дефектите или на контролируемите елементи без използване на сложно оборудване. Тези методи позволяват да се установи местоположението на дефектите за по-нататъшен анализ с растерна електронна микроскопия или други методи.

Метод на анодно декориране. При прилагането на този метод се извършва или отлагане на аморфен силиций или окисление на изследвана-

та повърхност на МЕИ.

Например за контрол на цялостта на металните шини на ИС се прилага метод на анодно окисление. Този метод се използва преди нанасяне на защитно покритие. Прекъснатите области на метализацията се откриват с оптичен микроскоп по рязкото изменение на цвета на слоя окис. Методът се счита за неразрушаващ, тъй като алуминиевите шини специално се подлагат на анодно окисление за предпазване от електромиграция.

Анодното окисление се прилага и за откриване на електрически дефектни транзисторни структури на ИС при тяхното изготвяне, когато все още не е проведена метализацията. Скоростта на електрохимичното окисление на повърхността на полупроводниковите пластини е различна при наличие на диодни или транзисторни структури (базовите области се окисляват по-бавно от колекторните). При прилагането на постоянно напрежение колекторния *p-n* преход е свързан в обратна посока и внася допълнително съпротивление в електрическата верига. Ако колекторният преход е с повишен утечен ток, тогава неговото съпротивление ще се намали рязко и повърхността на базовата област започва интензивно да се окислява. В този случай започва електрохимично да се окислява и повърхността на емитерната област. Това е така, защото включеният в права посока емитерен преход не внася голямо съпротивление в електрическата верига на протичащия процес на електролиза. Наличието на окисни слоеве върху повърхностите на базовата и емитерната област се открива по оцветяването им вследствие интерференционния ефект. Така се откриват транзисторните структури, които се различават от тези с нормална волт-амперна характеристика.

Електролитно декориране чрез метализация. Този метод се използва за анализ и контрол на дефекти в слоевете от позитивен фоторезист и в непроводящи покрития на МЕИ.

Пластината с изследваното диелектрично покритие служи за катод. Извършва се електролитно отлагане на мед или никел. При подаване на напрежение медта се отлага в порите на диелектрика и излиза на повърхността във вид на локални области с размери $5 \cdot 10^{-6} \div 10^{-5} \text{ m}$.

Отлагането на метал се прилага и за откриване на дефектни обратни свързани *p-n* преходи. Индикацията на електрически дефектните елементи на ИС се извършва в резултат на отлагане на метал вследствие възстановителни реакции на катода.

Метод на електрохимична електрография. Този метод се използва за откриване на пори в диелектрични слоеве. При него се използва кон-

тактен печат, гължащ се на изменение на цвета на електролита, проникнал в пористия слой на материала. Контактният печат може да се получи и при засветяване на фотослой при локално преминаване на ток през дефектните области. Във връзка с това се различават методи на цветни реакции и електрографски методи с регистрация на дефектите на фотохартия.

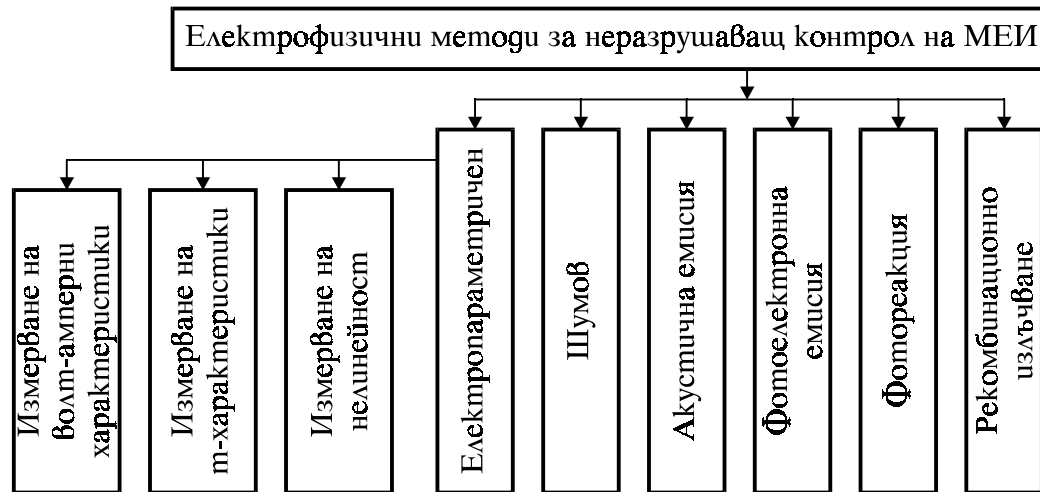
Например може върху ПП пластина с изследваното диелектрично покритие да се постави бял мембранен филтър, който е пропит с електролит. При прилагане на напрежение проникналият в порите на диелектрика електролит се оцветява. След провеждане на електрохимична автография на филтрова хартия се получава огледално изображение на дефектите във вид на тъмни петна, формата и размерите, на които точно съответстват на дефектите в диелектрика.

6.5.7. Електрофизични методи за контрол

На фиг. 6.16 са представени видовете електрофизични методи. Те се отнасят към специалните методи за измерване на параметрите на конкретни микроелементи.

Електропараметрични методи. Измерват се параметрите или характеристиките на елементите на МЕИ, което позволява да се получи информация за дефектите в структурата. Към тях се отнасят измерване на: волт-амперна и волт-фарадна характеристика, специфично и листово съпротивление, пробивни напрежения и т.н.

Контролът на надеждността на разделителната повърхност диелектрик-полупроводник се извършва с измерване на волт-фарадните характеристики (ВФХ). Наличието на потенциална контактна разлика между полупроводника и метала води до хоризонтално изместване на ВФХ без да се променя нейната форма. Ако тази разлика е положителна ВФХ се измества към страната на положителните напрежения, а ако е отрицателна — към отрицателните напрежения. Аналогично е и влиянието на заряда, който възниква в диелектрика при отлагането му. Повърхностните състояния, чието запълване зависи от приложеното напрежение, предизвикват изместване и изменение на наклона на ВФХ. Като се съпоставят реалната и идеалната ВФХ на *MOS*-структура могат да се контролират редица параметри, които характеризират разделителната повърхност диелектрик - полупроводник.



Фиг. 6.16. Класификация на електрофизичните методи за неразрушаващ контрол на МЕИ.

Методът за измерване на m -характеристиките се основава на откриване на потенциално ненадеждни елементи на ИС по вида на входната волт-амперна характеристика при ниски напрежения. Токът през p - n прехода може да се раздели на четири съставлящи: дифузионен; рекомбинационно-генерационен в обема на прехода; рекомбинационен на повърхността на прехода; повърхностен канален ток. Тези съставлящи са чувствителни към различни параметри на елементите и преобладават в различните участъци. При право включване на p - n прехода преобладава токът на рекомбинация. При малки напрежения рекомбинационният ток представлява значителна част от сумарния прав ток на прехода. С увеличаване на приложеното напрежение, обаче той неизбежно отстъпва ролята си на дифузионния ток. Така при реален p - n преход токът се определя от израза:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{gU}{mkT}} - 1 \right),$$

където I_0 е обратния ток на p - n прехода; g — заряд; k — константа на Болцман; T — температура в $^{\circ}K$; m — коефициент, с който се отчита влиянието на рекомбинационно-генерационните съставлящи на тока в прехода, в обема и на повърхността му при ниски нива на инжекция.

Коефициентът m характеризира качеството на повърхността на прехода, тъй като там има повече рекомбинационни центрове, отколкото в обема му.

6.5.8. Методи за контрол на надеждността с тестови структури

Елементите на МЕИ не могат да бъдат изпитвани индивидуално, а се изпитват като функционална схема. Така източниците на ненадежност или отказите остават скрити в конструкцията и обикновено се проявяват при експлоатация. Затова за управление на качеството и надеждността в производството се използват тестови структури, близки по конструктивни параметри до елементите на МЕИ. Така могат да се изследват дефектите на структурата на МЕИ и различните механизми на отказите и да се коригира технологичния процес. Методите използват:

— *тестова структура* — конструктивни елементи, разположени в един или няколко слоя, които не влизат в състава на ИС. Удобна е за измерване на електрически, физични и геометрични параметри;

— *спомогателни тестови структури*, представляващи елементи на микросхеми с допълнителни контактни площадки;

— *тестови пластини*, които съдържат само тестови чипове;

— *тестови чипове*, които съдържат само тестови структури;

— *контролни пластини* — пластини с нанесени на повърхността им слоеве (легирани, епитаксиални, диелектрични, полисилициеви, метални) без формирани на тях тестови структури.

В чипа на ИС се разполагат малък брой тестови структури (транзистор, резистор, контактено съединение и др.). В тестовия чип се разполагат повече елементи на схемата и тестови структури с по-големи размери за оценка на причините за отказите на елементите. Тестовите чипове се разполагат на пластина в ред или стълб.

Тестовите структури се използват при междуоперационния контрол и при проверка на производствения процес. Контролът на качеството на партидата МЕИ се осъществява също с контролни пластини, на които се измерват определени параметри. Основната роля на тестовата структура е да се намали спектъра на дефектите, да се намали действието на различни механизми на отказите и да се повиши якостта при различни натоварвания

Например тестова структура на *MOS*-транзистор позволява да се измерят следните параметри: стабилност на праговото напрежение; ток на насищане на дрейна; ток на утечка; контактено съпротивление; пробивно напрежение на окисния слой и на дифузионните преходи.

Без *технологичните тестови структури* в производството на надеждни МЕИ е невъзможно да се осъществят редица необходими измервания в процеса на технологичния контрол. Често тези структури се използват и за контрол на различни области на ИС в процеса на производство. Затова те възпроизвеждат обекта на контрол или изслед-

ване: *p-n* преход, проводящ или резистивен слой, кондензатор, контакт и др. Тестовите структури трябва да носят информация за параметрите и свойствата на работните структури на ИС и на техните елементи. Технологичните тестови структури са подобни на работните структури. Това позволява резултатите от техните изследвания да се използват като достоверни данни за аналогичните конструктивно-технологични параметри на изделието.

Тестовите структури се проектират така, че да се повиши възможността за измерване и контрол. Те могат по схемотехнично изпълнение значително да се различават от самата ИС.

Тестовите структури могат да се разделят на две групи: контролни и спомагателни. *Контролните тестови структури* се използват за контрол на качеството, на надеждността или на технологичните процеси. *Спомагателните тестови структури* се прилагат при избора на оптимални електрически и топлинни въздействия върху работните МЕИ или в качеството на допълнителни елементи за оптимизация на параметрите на изделията.

От резултатите при измерването на параметрите на тестовите структури се получава усреднена оценка за параметрите на работните структури на пластината.