

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ Й НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи
з дисципліни "Забезпечення надійності виробів електроніки"

для студентів спеціальності
8.050801 “Мікро- та нанoeлектроніка” ”
всіх форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
“Мікро- і нанoeлектроніка”
Протокол № 4
від 26 червня 2013 р..

2013

ББК 30.14
УДК 621.396.6

Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни "Забезпечення надійності виробів електроніки" для студентів спеціальності для студентів спеціальності 8.050801 "Мікро- та наноелектроніка" всіх форм навчання денної й заочної форм навчання. Укл.: О.В.Томашевський, Запоріжжя: ЗНТУ.-2013.- 28 с.

Укладач: О.В.Томашевський, доцент, канд.техн.наук

Рецензент: Г.В.Сніжной, доц., канд.фіз.-матем.наук

Відповідальний за випуск: Г.В.Сніжной, доц., канд.фіз.-матем.наук

Вступ

Мета курсової роботи - поглиблене вивчення видів і механізмів відмов інтегральних схем і освоєння метода розрахунку основних показників надійності.

Метод дослідження - аналітичний підхід до розрахунку та подальшого аналізу основних показників надійності.

В теоретичній частині розглядаються основні положення теорії надійності, терміни, визначення та кількісні показники надійності, а також поняття випробувань надійності ІС та деякі механізми відмов.

Практичну частину курсової роботи складають розрахунки основних показників надійності: інтенсивності відмов ІС, ймовірності безвідмовної роботи при постійній інтенсивності відмов, середнього та гамма-відсоткового часу наробки до відмови та залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу наробки.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МДН - метал-діелектрик-напівпровідник;

K_n - коефіцієнт жорсткості випробувань;

λ_k - інтенсивність відмов корпуса;

λ_{kk} - інтенсивність відмов з'єднання кристал-корпус;

$\lambda_{ткз}$ - інтенсивність відмов термокомпресорного з'єднання;

n - кількість термокомпресорних з'єднань;

N_a, N_p - кількість активних та пасивних елементів відповідно;

B - коефіцієнт впливу товщини оксиду;

Q - коефіцієнт електричного навантаження ділянок;

P - ймовірність безвідмовної роботи;

t_γ - гамма-відсотковий час наробки до відмови;

L - кількість різно навантажених ділянок металізації.

1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 ПОНЯТТЯ МЕХАНІЗМУ ВІДМОВЛЕНЬ

У практиці надійності використовуються два традиційних шляхи, у напрямку яких зосереджуються зусилля виробників і споживачів напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем. Один з них спрямований на вимір фактичної надійності приладів з метою одержання достовірних даних, необхідних для розрахунку надійних характеристик апаратури. Однак цей шлях вимагає істотних економічних витрат, що значно зростають зі збільшенням надійності приладів, не даючи можливості цілком задовольнити розроблювачів апаратури вичерпними зведеннями про надійність приладів через нескінченну розмаїтість умов застосування і необхідності збору й обробки величезного обсягу інформації з результатів експлуатації апаратури і тривалих іспитів приладів. Істотно важливим аспектом є визначення можливості поширення результатів обробки отриманої інформації про кількісні показники надійності на прилади, що за період експлуатації їхніх попередників неминуче перетерпіли значні конструкційні зміни. В даний час у силу винятково високого динамізму в області напівпровідникової електроніки усе більша перевага віддається другому шляху, зв'язаному з удосконалюванням приладів, підвищенням їхньої надійності. Знання, чому той чи інший прилад надійний чи ненадійний, своєчасна розробка і вживання необхідних заходів по збільшенню його надійності куди важливіше, ніж знання дійсного рівня його надійних характеристик. Ця обставина викликала до життя такі напрямки в надійності, як фізична надійність, фізика механізмів відмовлень, що спрямовані на вивчення механізмів відмовлень, на розробку методів внесення корекції в прилади і методів контролю дієвості внесених змін і досконалостей.

В умовах росту складності напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем вивчення фізичних процесів механізмів відмовлень має, принаймні, дві мети. Перша з них за допомогою аналізу приладів, що відмовили, пізнавати зухвалі їх причини, поліпшувати на цій основі технологію виготовлення приладів і здійснювати заходу щодо удосконалюванню правильності їхнього застосування. Друга мета - через розкриття і пізнання фізичних явищ, що приводять до відмовлень, удосконалювати існуючі і створювати нові моделі надійності приладів, використовувані для контролю надійності розроблювальних приладів і для прогнозування надійності приладів, що знаходяться в серійному виробництві.

Важливо підкреслити розходження між видами і механізмами відмовлень. Вид відмовлення - це очевидна подія, через яке виявляється несправна робота приладу. Цією

подією може бути, наприклад, утрата підсилювальних властивостей, коротке чи замикання обривши. У ряді випадків вид відмовлення без дослідження внутрішньої структури приладу неможливо установити. У даному випадку ми маємо справу з так названим функціональним відмовленням. Механізм відмовлення - це фізико-хімічний процес, що веде до відмовлення. З погляду надійності недостатньо чи знати установити, з яким видом відмовлення ми маємо справу. Куди істотніше пізнати причини, приведших до відмовлення. Це головна мета аналізу відмовлень.

У напівпровідникових приладах і інтегральних мікросхемах з ідеальною структурою фізико-хімічні процеси при нормальній експлуатації повинні протікати з дуже малими швидкостями, унаслідок того, що активні області знаходяться в нейтральному середовищі, ізольованої герметичним корпусом від зовнішніх агресивних впливів, а режими застосування забезпечують незначний перегрів структури.

Викладені вище обставини у свій час послужили основою для припущення винятково високої довговічності напівпровідникових приладів, обчислювальної сотнями років. Висловлене припущення деякою мірою знаходить своє підтвердження в тім, що усталосні явища і зносові відмовлення в напівпровідникових приладах до тепер не спостерігалися. Однак наявність у структурі приладів різних дефектів і недосконалостей, що істотно прискорює фізико-хімічні процеси в них при впливі електромагнітних і теплових полів і механічних навантажень, дають підставу, як це було показано вище, розглядати реальні напівпровідникові прилади й інтегральні мікросхеми як термодинамічески хитливі системи, що містять дефекти і недосконалості.

Численні дослідження відмовлень напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем у результаті деградації їх, електрофізичних параметрів під дією температури показали справедливність застосування так названого активаційного комплексу для опису деградаційних процесів. Це поняття вперше було уведено шведським ученим С. А. Аррениусом у теорії швидкостей хімічних реакцій у розчинах, відповідно до якої залежність константи швидкості хімічної реакції від абсолютної температури описується наступним вираженням:

$$k_p = A \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (1.1)$$

де k - постійна Больцмана; A - коефіцієнт, що характеризує загальну кількість зіткнень взаємодіючих реагентів; E_a - енергія активації процесу.

Крім хімічних реакцій широке коло фізико-хімічних процесів, зв'язаних зі зміною концентрації речовини в результаті переміщення часток і їхньої взаємодії (наприклад, дифузія домішок в обсязі і на поверхні напівпровідника, переміщення крапкових, лінійних і об'ємних дефектів) задовольняє основним законам цієї теорії. Аналогія деградаційних

процесів хімічним реакціям дозволяє моделювати температурну залежність надійносних характеристик приладів в експонентній функції:

$$X(T) = K_x \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (1.2)$$

де $X(T)$ - один з показників надійності, наприклад інтенсивність відмовлень, наробіток до відмовлення, гаммавідсотковий ресурс; K_x - коефіцієнт, що характеризує конструкцію приладу, технологічний процес виготовлення приладу.

Вираз (1.2) не може бути безпосередньо використане для обчислень показників надійності, тому що коефіцієнти K_x , як правило, не відоме. Однак побудувавши в напівлогарифмічному масштабі залежність

$$\ln X(t) = f(T^{-1}) \quad (1.3)$$

по її характері можна судити про механізми, що викликають виникнення відмовлень приладів, а по її нахилі визначити енергію активації деградаційного процесу і його ідентифікацію. Деякі значення енергій активації, еВ, процесів, що спостерігаються в інтегральних мікросхемах, приведена нижче:

Самодифузія:

<i>B</i>	<i>Al</i>	_____	1,4
<i>B</i>	<i>Si</i>	_____	4,8

Дифузія:

<i>Al в Si</i>	_____	3,5
<i>Na в SiO₂</i>	_____	1,39
<i>Електродифузія в Al</i>	_____	0,5...0,7
<i>Формовка інреметалевих з'єднань</i>	_____	0,87...1,1

Труднощі застосування моделі Аррениуса полягає в тім, що діапазон енергій активації більшості деградационных процесів, властивим напівпровідниковим приладам і інтегральним мікросхемам, лежить у вузькій області (менш 4 еВ), тому точність експериментальних методів, застосовуваних при визначенні параметрів рівняння Аррениуса, повинна бути досить високої.

Розглянемо деякі механізми відмовлень, характерні для найбільш розповсюджених напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем, і, у першу чергу, оборотна увага на механізми відмовлень металізації і контактів.

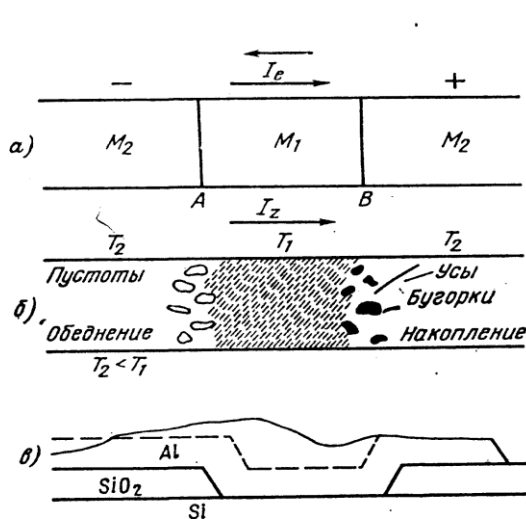
1.2 МЕХАНІЗМИ ВІДМОВЛЕНЬ МЕТАЛІЗАЦІЇ В РЕЗУЛЬТАТІ ЕЛЕКТРОМІГРАЦІЇ

Внутрішні межелементні з'єднання активних структур з тимчасових напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем виконуються шляхом нанесення алюмінієвої плівки товщиною близько 1 мкм на поверхню кристала з наступної фотолітографією відповідно до топології розведення. З ростом складності напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем зростає як довжина розведення, так і площа поверхні кристала, займана нею. В даний час у середньому вона досягає 50% і в міру зростання ступеня інтеграції збільшується, приводячи до того, що розроблювачі великих і надвеликих інтегральних мікросхем змушені переходити на багаторівневе розведення, для того щоб реалізувати прийняту топологію активних областей кристала.

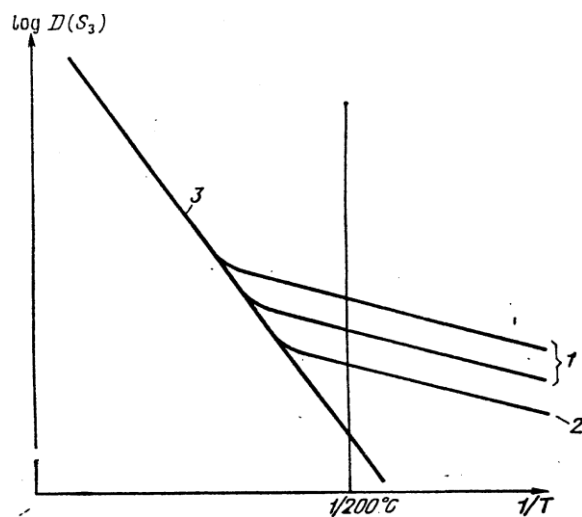
Металева плівка, нанесена на поверхню готової мікросхеми, знаходиться в неоднакових умовах. У контактних вікнах вона взаємодіє з монокристалічним кремнієм р- чи n-типів з різним ступенем легування, на іншій поверхні вона контактує з двоокисом кремнію як у площині поверхні схеми, так і на сходинках окисла. Неминуча деформація металевої плівки на нерівностях поверхні схеми й у місцях приварки дрових контактів. У процесі експлуатації напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем металеве розведення в неменшому ступені, чим активні області напівпровідникової структури, піддається токовим і тепловим навантаженням. Усе це створює сприятливі умови для протікання різних процесів деградації металевого розведення, що приводять до зміни її первісних властивостей, і в ряді випадків до раптових відмовлень.

Явище електродифузії чи електроміграції полягає в тому, що в металевих провідниках у визначених умовах при проходженні постійного струму великої щільності (близько $10^6 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$) спостерігається перенос матеріалу провідника з району негативного контакту до позитивного. Модель цього явища представлена на мал. 1.1. Суть нею полягає в наступному. При додатку електричного полюси E к провіднику в ньому виникає потік електронів e , спрямований назустріч електричному полю. Позитивно заряджені іони металу в цих умовах випробують вплив двох сил. Одна з них F_z виникає під дією електричного полюси, прагнучи перемістити іони по напрямку полюси. Походження другої сили F_e зв'язано з взаємодією потоку електронів з іонами металу, вона спрямована назустріч електричному полю. При досить великій щільності струму виникають умови, коли $F_e > F_z$ і іони металу починають переміщатися з області контакту M_2^- , що знаходиться під негативним потенціалом, в область позитивного контакту M_2^+ (мал. 1.1,а). В результаті цього в області негативного контакту (мал. 1.1,б) створюються збіднені ділянки і

порожнечі, а в районі позитивного контакту відбувається нагромадження металу, в окремих місцях утворюються горбки, виростають металеві "вуси" і "мітелки". Неоднорідне нагрівання провідника ($T_1 > T_2$) прискорює процес переносу.



Мал.1.1



Мал.1.2

Мал. 1.1. Модель електродифузії іонів алюмінію в плівковому провіднику: а - металеве розведення на поверхні напівпровідникової пластини; б - утворення дефектів у результаті електродифузії; в - зміну контакту $Al-Si$ через електродифузії.

Мал. 1.2. Температурна залежність коефіцієнта дифузії іонів в металу в провіднику: D - коефіцієнт дифузії; S_3 - площа зерен; 1 - дрібнозерниста структура; 2 - грубозерниста структура; 3 - монокристалл.

Кінцевим результатом процесу може бути значне зменшення перетину провідника в області негативного контакту (мал. 1.1,в) аж до настання розриву плівки.

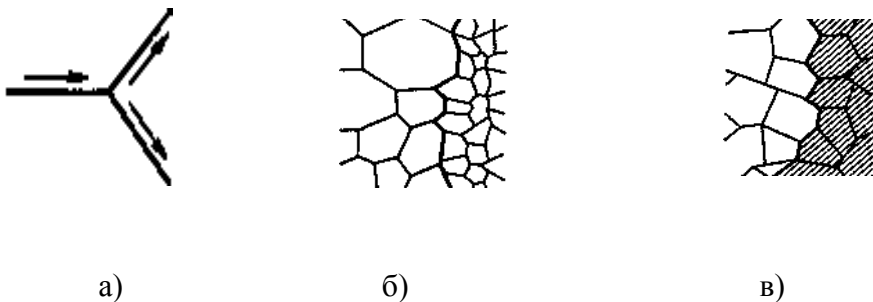
Дослідження температурної залежності електродифузії в металевих тонких плівках показали наявність двох механізмів переносу речовини в плівкових провідниках (мал. 1.2). Багністі провідні плівки, у тому числі алюмінієві, являють собою полікристалічну структуру. При відносно низьких температурах (до $+200^\circ C$) у плівках перенос речовини відбувається уздовж границь зерен (криві 1,2).

Об'ємна дифузія при низьких температурах значно менше, тому що довжина границь зерен істотно більше розмірів самих кристалів. При цьому енергія активації дифузії уздовж границь зерен істотно нижче (0,5...0,7 еВ) у порівнянні з енергією активації процесу об'ємної дифузії (близько 1,4 еВ). Інтенсивність дифузії в мелкокристаллических структурах (крива 1) істотно вище, ніж у крупнокристаллических (крива 2), унаслідок того, що сумарна довжина границь зерен у мелкокристаллической плівці багато більше,

ніж у грубозернистій. З ростом температури збільшується коефіцієнт об'ємної дифузії і перенос речовини відбувається переважно по обсязі полікристала (крива 3).

Вивчення процесу формування порожнеч унаслідок електродифузії в тонко плівкових алюмінієвих провідниках показує велику неоднорідність границь зерен. Найбільше ймовірно порожнечі утворюються поблизу точок дотику трьох зерен (див. мал. 1.3,а), тому що при напрямку потоку електронів ліворуч праворуч рух іонів металу більш ймовірно уздовж двох границь зерен праворуч, чим уздовж однієї границі ліворуч. Для провідних доріжок рівного поперечного переріза перенос речовини відбувається інтенсивніше в тих місцях, де більш густа мережа границь зерен, тобто в місцях з більш дрібною структурою (мал. 1.3,б). Тому в цих місцях мається підвищена імовірність виникнення порожнеч, об'єднання їх з утворенням наскрізних тріщин.

Зміна орієнтації зерен (заштрихована область на мал. 1.3,в) також сприяє зміні швидкості переносу речовини й утворенню порожнеч і тріщин. Це може мати місце при зміні чи структури складу підкладки, на яку нанесена металева плівка. В алюмінієвих плівках на монокристаллическом кремнії виявляється тенденція до утворення структури, близької до монокристаллической, у той час як на двоокисі кремнію утвориться більш разупорядоченная плівка, близька до аморфної.



Мал. 1.3. Схематичне представлення структур, що можуть приводити до появи відмовлень унаслідок електродифузії

а - стик границь трьох зерен; б- зміна розмірів зерен; в- зміна орієнтації плівки.

На границі таких областей з великою імовірністю утворюються тріщини. Подібна ж ситуація створюється на сходинці окисла. При цьому варто помітити, тут діють два процеси, що сприяють утворенню розриву струмоїдущей доріжки. Перший з них обумовлений зміною орієнтації зерен на плоскій поверхні провідної плівки і на вертикальній стінці сходинки, другий процес зв'язаний зі зменшенням поперечного переріза провідної плівки на сходинці окисла. Останнє викликає зростання щільності струму і швидкості переносу речовини.

Однак незважаючи на те, що дослідженню процесів електромиграції, присвячена велика кількість робіт, дотепер прийнятної теоретичної моделі процесу створити поки не

удалося. Справа, очевидно, у тім, що занадто багато факторів беруть участь у формуванні процесу переносу речовини в реальних плівкових структурах, і детальний облік їхнього впливу на сучасному рівні знань не представляється можливим.] Якісна ж картина, розглянута вище, може бути доповнена наступним. Явище електропереносу речовини в тонких металевих плівках спостерігається при проходженні постійного чи пульсуючого токи. Прискоренню електродифузії сприяють дефекти металевої плівки у виді подряпин, сторонніх включень, звужень металевих доріжок, нерівномірності по товщині плівки. Усі ці фактори створюють градієнти щільності струму і температури, унаслідок чого і прискорюється електродифузія, кінцевим результатом якої є відмовлення приладу через розрив металізації.

Середній наробіток до відмовлення через обрив металізації, викликаной електродифузій, визначають з наступного вираження :

$$t = K \cdot J^{-n} \exp(A_a/kT) \quad (1.4)$$

де K - константа, що залежить від матеріалу плівки, її структури і геометрії; J - щільність струму, $A \cdot \text{см}^{-2}$; n - показник ступеня, рівний 1, коли відмовлення переважно визначаються структурою плівки. У випадку, коли у формуванні відмовлення домінуюче значення набуває градієнт температури $n=3$; E_a - енергія активації процесу електродифузії, рівна 0,5...0,7 еВ. При підвищених щільностях струму верхнє значення для енергії активації переважніше.

На закінчення сформулюємо деякі рекомендації зі зниження електродифузії в металізації.

Насамперед необхідні заходи для зниження щільності струму, що проходить по металевих доріжках. Це може бути досягнуте як за рахунок вибору режиму, так і за рахунок збільшення поперечного перерізу провідника, що переважніше здійснювати, збільшуючи ширину доріжок. Позитивний ефект роблять захисні покриття на провідних доріжках у виді різних стекл. Перешкоджаючи утворенню горбків і вусів, діелектричні покриття сприяють зниженню імовірності відмовлення за рахунок електродифузії. Істотна увага повинна бути приділена якості самої металізації. Кращі грубозернисті плівки з орієнтацією зерен, що сприяє зниженню ефекту електродифузії.

Ідеальним рішенням проблеми виключення електродифузії було би створення монокристаллических чи аморфних провідних плівок. Можливість створення металізації з аморфною структурою більш реальна. Наприклад, сплави нікелю з ніобієм, молібденом, вольфрамом три визначених умови утворюють аморфні структури. Основною перешкодою до використання цих сплавів як вихідні матеріали для металізації є відносно високий питомий опір плівок. Однак дуже низькі коефіцієнти дифузії домішок у таких сплавах уже

зараз роблять перспективним їхнє застосування як бар'єрний шар, що перешкоджає проникненню кремнію в межелементні з'єднання при багат шаровій металізації.

1.3 МЕХАНІЗМИ КОРОЗІЇ Й ОКИСЛЮВАННЯ МЕТАЛІЗАЦІЇ.

Проникнення води в герметизований корпус, адсорбція її на поверхні металізації, через пори і тріщини в захисні покриттях, а також наявність іонних забруднень на поверхні кристала сприяють виникненню корозії металізації, що носить, як правило, електрохімічний характер. При досягненні відносної вологості усередині корпусу близько 60% створюються сприятливі умови для адсорбування на поверхні кристала достатньої кількості води, що забезпечує високу електролітичну провідність. Вище було показано, що при виробництві приладів має велику кількість джерел забруднення поверхні кристала іонами домішки. У першу чергу це забруднення, що потрапляє у результаті обробки пластин. Далі, це атмосфера, у якій проводиться герметизація, конструкційні деталі корпусу, клейові склади, застосовувані для посадки кристала і пластмаси, використовувані для герметизації приладів.

Найбільш небезпечними для алюмінію є іони натрію, калію і хлору. Через амфотерності алюмінію може корродувати як у кислої, так і в лужному середовищі. Як правило, у більшому ступені піддаються корозії металеві електроди, що знаходяться під негативним потенціалом (катодна корозія). Вони руйнуються під дією позитивно заряджених іонів. Такому ж впливу піддаються позитивно заряджені електроди, взаємодіючи з негативними іонами. Однак швидкість корозії позитивно заряджених ділянок нижче, тому що на них одночасно з корозією йде активний процес утворення шару окису алюмінію, що перешкоджає подальшому його руйнуванню. При наявності на поверхні кристала іонів хлору корозія позитивних ділянок металізації значно прискорюється унаслідок великої проникаючої здатності іонів хлору крізь товсту плівку окису алюмінію.

Швидкість корозії істотно залежить від напруги, подаваної на схему. Різниця потенціалів 5В і більш достатня для того, щоб виникла інтенсивна корозія. Швидкість корозії залежить також від відстані між електродами, температури навколишнього середовища і концентрації іонів домішки на поверхні кристала. Аналіз відмовлень, що виникли в результаті корозії, показує, що остання виникає і розвивається в першу чергу на границях зерен з утворенням суцільних мікротріщин, що приводять до обриву металізації. Застосування фосфорсилікатного скла з підвищеним змістом фосфору значно збільшує корозію, тому що надлишковий фосфор, взаємодіючи з водою, утворює фосфорну кислоту, що посилює корозію металізації. Зниження вагової концентрації

фосфору у фосфорсилікатном склі, що контактує з алюмінієвою металізацією до 5%, збільшує середній наробіток до відмовлення через корозію більш ніж на три порядки.

Паралельно з механізмами електродифузії й електрохімічної корозії діє механізм деградації металевих плівок, зв'язаний з окислюванням алюмінію, що веде до збільшення омичного опору струмоведучих доріжок. Механізм відмовлення в цьому випадку складається у взаємодії кисню з поверхнею зерен в обсязі матеріалу. У результаті росту окисної плівки на поверхні провідних доріжок і утворення окисних межзернових прошарків зменшується обсяг і ефективний поперечний переріз провідника і, як наслідок, збільшується питомий опір матеріалу. Погіршення умов проходження електричного струму по струмоведучих доріжках порушує температурний режим приладу, приводячи до локальних перегрівів, посиленню електродифузії і росту імовірності відмовлення за рахунок обриву металізації.

Крім того, локальний перегрів струмоведучих доріжок сприяє укрупненню зерен полікристалічної структури матеріалу за рахунок злиття сусідніх зерен і розростання їх до поперечного розміру доріжки. У цих умовах відбувається чи розрив відшаровування металізації через великі розтяжні зусилля, що виникають у місцях розростання зерен. Дія даного механізму відмовлень може бути істотно ослаблене за рахунок зниження щільності струму, що протікає по струмоведучих доріжках, а також додаванням у металізацію спеціальних домішок, наприклад ітрія до 1%, що підвищують температуру рекристалізації.

1.4 МЕХАНІЗМИ ВІДМОВЛЕНЬ КОНТАКТІВ

Вище вказувалося, що в конструкції напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем широко застосовується алюмінієве розведення для створення межелементних з'єднань на кристалі і золотий і алюмінієвий дріт для створення внутрішніх з'єднань між контактними площадками на кристалі і корпусі приладу.

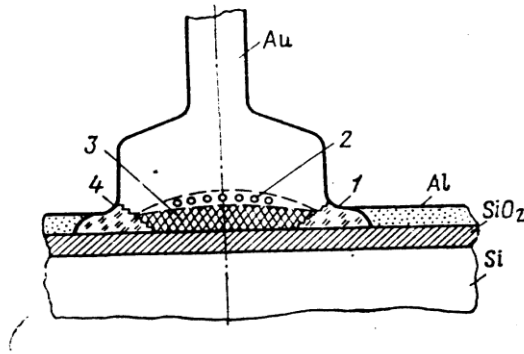


Рис. 8.8. Структура термокомпрессионного контакту Al—Au

1 — Au_2Al ; 2 — Au_4Al ; 3 — Au_5Al ;
4 — мікротріщини

Приєднання внутрішніх висновків із золотого дроту до контактних площадок на кристалі здійснюється термокомпрессионною зварюванням при температурі підкладки порядку 300°C . У процесі термокомпресії відбувається взаємна дифузія металів, що зварюються, у результаті чого і створюється міцне з'єднання в місці контакту. Однак одночасно з дифузією в місці контакту алюміній і золото вступають у хімічну реакцію з утворенням інтерметаличних чи з'єднань інтерметалідів. У залежності від температури, тиску, концентрації золота й алюмінію в місці їхнього контакту можуть утворитися наступні з'єднання: AuAl_2 , AuAl , Au_2Al , Au_5Al_3 , Au_4Al , що відрізняються істотно по питомому опорі, коефіцієнту термічного розширення і твердості. При температурах вище 300°C утвориться надзвичайно пористе з'єднання AuAl_2 називане *пурпурною чумою*. Цей різновид інтерметаліда найбільш небезпечний при формуванні термокомпрессионного з'єднання. На мал. 1.4 представлена структура контакту золотого дроту з алюмінієвою контактною площадкою. З малюнка випливає, що весь контакт і обсяг складається з різних модифікацій інтерметалідів, що поширюються на всю глибину алюмінієвої плівки. По периметрі контакту через розходження в коефіцієнтах термічного розширення інтерметаличних фаз утворюються мікротріщини.

Розглянемо кінетику росту інтерметаличних з'єднань у контактах. Оскільки основою цих процесів є взаємна об'ємна дифузія металів, можна припустити, що товщина шару інтерметалідів $d(t)$ росте згодом по параболическому закону:

$$d(t) = K t \quad (1.5)$$

де K - постійного швидкості росту фаз, що залежить від коефіцієнтів взаємної дифузії контактуючих металів і властивостей з'єднань, що утворюються. Енергія активації процесу утворення інтерметаличних фаз лежить у межах $0,69 \dots 1,0$ еВ. З ростом температури швидкість утворення інтерметалідів різко збільшується і при температурі 430°C досягає $2,5 \dots 5 \text{ мкм} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Процес зниження міцності металевого контакту за рахунок утворення інтерметаліческих з'єднань збільшується ефектом Киркендалла, суть якого полягає в тім, що при контакті різних металів у місці контакту відбувається взаємна дифузія металів по міждовузлиям чи вакансіях. При цьому в результаті розходження коефіцієнтів дифузії в металі з великим коефіцієнтом дифузії утворюються порожнечі. У випадку контакту золото - алюміній золото має більший коефіцієнт дифузії в алюміній, тому на стороні золота утворюються порожнечі.

У такий спосіб процеси утворення шаруючи інтерметалідів, порожнеч і тріщин по периметрі контакту знижують його міцність, підвищують контактний опір, що в кінцевому рахунку приводить до поступового чи раптового відмовлення .контакту, тобто до його обриву.

Поступові відмовлення, зв'язані з розглянутим вище механізмом, виражаються в наступному: через ріст контактного опору знижується швидкодія інтегральних мікросхем, росте напруга насичення транзисторів в імпульсному режимі, росте загальний повний опір інтегральних мікросхем.

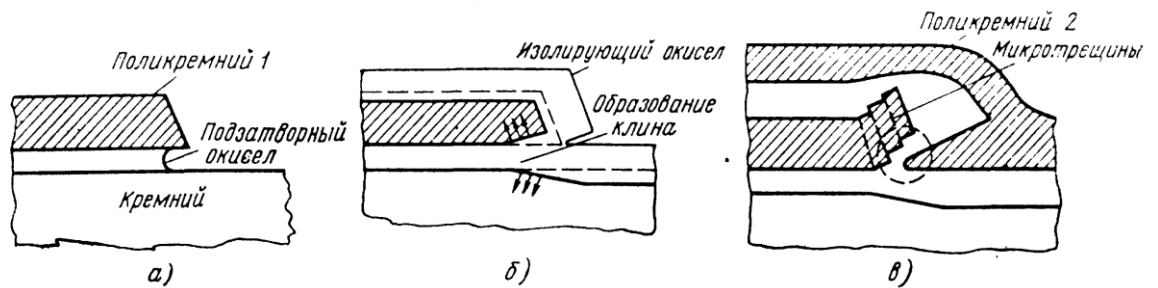
Раптові відмовлення відбуваються через обрив контакту при механічних навантаженнях унаслідок підвищеної крихкості контактного з'єднання. Крім того, через сильний розігрів контакту в місцях скупчення порожнеч і тріщин можливе перегорання контакту при підвищених щільностях струму.

1.5 ДЕЯКІ МЕХАНІЗМИ ВІДМОВЛЕНЬ У МЕЖЕЛЕМЕНТНИХ З'ЄДНАННЯХ НА ОСНОВІ ПОЛІКРЕМНІЮ

В даний час широке застосування в конструюванні інтегральних мікросхем с багаторівневим розведенням одержали межелементные з'єднання на основі полікремнію. Найбільше поширення розводка з полікристалічного кремнію одержала в МДП-структурах, де заміна металевого затвора на полікремнієвий дозволила істотно підвищити якість і швидкодія мікросхем за рахунок так називаного ефекту самосполучення затвора з областями стоку і джерела. Суть самосполучення полягає в тім, що сформований на острівці подзатворного окис полікремнієвий затвор є маскою при виконанні процесу дифузії в області стоку і джерела через вікна в окислі. Внаслідок ефекту самосполучення забезпечується точне розташування затвора щодо країв областей стоку і джерела з незначним перекриттям за рахунок подовжньої дифузії легуючої домішки при створенні дифузійних областей стоку і джерела. Однак при створенні одноуровневої і, особливо , багаторівневого розведення з використанням полікремнію виникає ряд специфічних ефектів, що приводять до відмовлень напівпровідникових структур. Механізми

формування відмовлень у багатошарових структурах з полікремнію полягають у наступному.

Як уже було сказано, вихідною структурою, на основі якої створюється інтегральна мікросхема з багаторівневим розведенням, є кремнієва підкладка з нанесеними шарами подзатворного і польового окислу і сформованих затворів і межелементними з'єднаннями з полікремнію (мал. 1.5,а). У результаті неоднорідності процесів травлення бічні стінки полікремнієвого затвора мають визначений нахил, а подзатворний діелектрик через подтраву утоплений під шаром полікремнію. Наступною операцією при створенні багатошарового розведення є процес вирощування окисного шару, що розділяє провідні шари.



Мал. 1.5. Механізми відмовлення багаторівневого полікремнієвого розведення: а - вихідна структура; б - проміжний етап нарощування ізолюючого окислу; у - дворівневе полікремнієве розведення. (Пунктирною окружністю показане слабе місце)

При окислюванні відбувається поглиблення окисного шару в обсяг полікремнієвого затвора і розведення, а також нарощування зовнішнього шару окисла. Одночасне окислювання полікремнію відбувається і на оголеній ділянці подтраву з поглибленням окисла в обсяг кремнієвої підкладки (мал. 1.5,б, в) .

У результаті цього процесу на вертикальній стінці полікремнію створюється нависаючий шар двоокису-кремнію, а в районі подтраву подзатворного окисла утвориться впроваджений під полікремній окисний клин, у місці залягання якого виникають значні напруги, що розтягують, що приводять до підняття нижнього краю полікремнію з одночасним горизонтальним зрушенням за рахунок зрушення окремих мікроблоків. Наступний шар полікремнію розташується, на поверхні ізолюючої двоокису кремнію з заповненням порожнини під навислим "краєм" (мал. 1.5,в). В отриманій структурі утвориться слабе місце, позначене на малюнку пунктирною окружністю. У цьому місці можливе утворення тріщин, а сусідні провідні доріжки з полікремнію розділені дуже

тонким шаром окисла, що чревате виникненням пробую, що приведе до закорачиванню струмоведучих доріжок і до виходу з ладу всієї напівпровідникової структури.

Розглянутий механізм цілком визначається конструктивними параметрами і технологічними характеристиками приладу. За допомогою оптимального вибору товщини подзатворного окисла, ступеня легування полікремнію і режиму нанесення проміжного окісного шару можна домогтися результату, при якому до мінімуму зменшуються подтрав, утворення нависаючого окислу на краю полікремніної доріжки і зв'язані з цим деформація, утворення тріщин і слабких місць у районі зіткнення провідних шарів.

1.6 МЕХАНІЗМ ПРОБОЮ В ТОНКОМУ ОКИСЛІ ТА ЕФЕКТ ГАРЯЧИХ НОСІЇВ

У сучасних МДП-структурах товщина подзатворного окисла досягла 20 нм і менш. При подальшому масштабуванні приладів із довжиною каналу до 0,25 мкм товщина подзатворного окисла, очевидно, досягне 5 нм, що приведе до різкого зростання електричного поля в діелектрику до рівня, при якому наступить внутрішній пробій. Для окісних тонких плівок товщиною близько 10 нм гранична напруга пробую складає 8...10 мВ. Найбільш розповсюдженою моделлю внутрішнього пробую є модель ударної іонізації - рекомбінації. Суть її полягає в наступному.

Під дією електричного поля вільний електрон при русі в окислі достатньої товщини на довжині вільного пробігу встигає одержати енергію для ударної іонізації атомів матриці і створення електронно-діркових пар. У наслідок більшої рухливості електрони випереджають у русі дірки, залишаючи позаду хмара позитивна заряджених носіїв заряду, що створює додаткове поле, що прискорює, на шляху наступної порції електронів. Таким чином, у системі ударної іонізації з'являється позитивний зворотний зв'язок, що сприяє лавинному розмноженню носіїв і настанню стану пробую. Велика імовірність виникнення такої ж ситуації в системах багатошарової металізації. Товщина шарів ізоляції в цих системах істотно більше, ніж товщина подзатворного діелектрика. Однак якість цих шарів багато нижче головним чином через нерівності поверхні металевих і полікремнієвих доріжок. Тому в місцях звужень діелектричних шарів і на вістрях виступів можуть виникати підвищені напруженості електричного поля, що приводять до пробую.

Наступним фізичним механізмом, викликуваним ростом електричного поля в тонких діелектричних шарах і приладах при масштабуванні, є механізм інжекції гарячих електронів із кремнію в окісний шар. Гарячі електрони - це високоенергійні носії, що

утворюються при лавинному пробії р-п чи переходу в області підвищеного електричного поля поблизу стоку МДП-транзистора з коротким каналом.

Інжекція і захоплення гарячих носіїв відповідальні за деградацію коефіцієнта підсилення біполярних транзисторів. Для МДП-транзисторів при масштабуванні їхніх геометричних розмірів до 1 мкм і менш захоплення гарячих носіїв є визначальним чинником, що має фундаментальне значення в справі забезпечення стабільності роботи приладів.

Інжекція гарячих носіїв може йти декількома шляхами, у тому числі за рахунок виникнення гарячих електронів у каналі й в обсязі напівпровідника. Гарячі електрони в каналі - це електрони, що йдуть від джерела до стоку. У режимі насичення в п-канальному МДП-транзисторі створюється велике електричне поле поблизу стоку. Під його впливом електрони при проходженні від джерела до стоку здобувають значну енергію. У результаті розсіювання на атомах ґрат створюється потік електронів з випадковим розподілом швидкостей, що містить визначену частку електронів, здатних перебороти потенційний бар'єр на границі роз'єдну системи кремній - двоокис кремнію і проникнути в подзатворний окисел. Установлено, що струм гарячих носіїв має експонентну залежність від напруги на затворі.

Електричне поле в окислі протидіє інжекції гарячих електронів, тому гарячі електрони зосереджуються в безпосередній близькості до крапки перекриття каналу, розташованого в стоку. При низьких температурах ефект інжекції гарячих електронів значно вище, тому що розсіювання на коливаннях ґрат знижується.

Іншим джерелом гарячих електронів є термогенерація носіїв в обсязі напівпровідника. Електрони підкладки р-типа прискорюються позитивною напругою на затворі, переміщаючи в межах збідненої області, переборюють потенційний бар'єр на границі роз'єдну системи кремній двоокис кремнію.

Третім джерелом гарячих електронів може бути ударна іонізація і генерація електронно-діркових пар. Якщо ударна іонізація відбувається в результаті дії електронів у каналі, то в цьому випадку найбільш ймовірна інжекція в окисел дірок, що рухаються по напрямку електричного поля. З іншого боку, електронно-діркові пари генеруються дірковим струмом підкладки і прискорені електрони можуть інжектуватися в окисел так само, як і електрони, що виникають при термогенерації.

При інжекції гарячих електронів у подзатворний окисел у середньому один з 10^5 інжектованих електронів захоплюється на пастках. Інший потік гарячих електронів досягає затвора і збирається на ньому. У зв'язку з тим, що в основному гарячі електрони виникають біля стоку, найбільш чутливою характеристикою до цього механізму

відмовлення є зворотна галузь вольт-амперної характеристики транзистора за рахунок збільшення граничної напруги. Зокрема, у n-канальних МДП-приборах це виявляється у виді значного позитивного зрушення зворотної галузі ВАХ.

Одночасно зі зміною граничної напруги під дією гарячих електронів відбувається деградація провідності каналу, що викликається неоднорідним розподілом пасток в окислі, що захопив електрони, чи утворенням нових заряджених станів на поверхні роздязнула системи кремній - двоокис кремнію.

1.7 ПРИСКОРЕНІ ІСПИТИ

Надійність сучасних напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем у залежності від умов експлуатації оцінюється по рівнях інтенсивності відмовлень у межах $10^{-7} \dots 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$. Перспективні вимоги по надійності приладів призначених для використання в апаратурі космічних об'єктів тривалого існування, у що необслуговуються радіорелейних лініях, трансатлантичних кабелях телефонного і телеграфного зв'язку досягають по інтенсивності відмовлень величини порядку 10^{-10} ч^{-1} . Підтвердження настільки високих значень надійності прямими іспитами практично неможливо. Розглянемо такий приклад.

Припустимо, нам необхідно провести іспиту для підтвердження того, що дані прилади мають інтенсивність відмовлень не більш 10^{-9} ч^{-1} . Це означає, що прилади мають середній наробіток до відмовлення 10^9 ч чи близько 1,3 мільйони років.

Для забезпечення прийнятної вірогідності результатів іспитів необхідно провести достатня кількість досвідів. У нашому випадку кількість досвідів визначається кількістю приборочасов чи добутком числа приладів, поставлених на іспит N на кількість годин іспитів t . У даному випадку необхідно мати, принаймні, 10^9 приборочасов з одержанням за час іспитів не більш одного відмовлення. Можливі співвідношення кількості приладів і тривалості зведені в табл.1.1.

Дані табл. 1.1 свідчать про те, що прямі іспити приладів для підтвердження необхідної надійності економічно не вигідні, тому що вимагають величезних витрат устаткування, приладів і енергоресурсів. Одним з виходів із цього положення є застосування прискорених іспитів і методів прогнозування надійності приладів. Прискорені іспити розглядаються як різновид фізичного моделювання, що дозволяє оцінити надійність приладів при стиснутому масштабі часу. Як ускоряючих фактори, що сприяють виявленню потенційно слабких, дефектних місць у приладах використовуються наступні підвищені навантаження: тепловий вплив, механічні впливи у виді лінійних

прискорень, ударів і вібраційних навантажень, вологість, тиск навколишнього середовища, електричний навантаження.

Вибір факторів, що прискорюють, і їхня інтенсивність у кожному конкретному випадку повинні базуватися на наступних принципах:

Число приборів	Тривалість іспиту ч(г)
1000	10^6 (130)
10000	10^5 (13)
100000	10^4 (1,3)

Табл.1.1

1. Визначення факторів, що прискорюють, повинне ґрунтуватися на знанні закономірності впливу різних видів навантаження на приховані дефекти в приладах. Бажано знати ступінь прискорення і мати тверду впевненість у тім, що інтенсивність впливу стабільна в заданих умовах і тим самим забезпечується відтворюваність результатів.

2. При впливі факторів, що прискорюють, фізичні процеси, порушувані ними, повинні бути тими ж, що і при звичайній експлуатації, тобто в прискорених і в звичайних умовах типи відмовлень повинні бути ті самі. З енергетичної точки зору це означає, що енергія активації механізмів відмовлень, стимулюємих факторами, що прискорюють, не змінюється.

3. Умови факторів, що прискорюють, повинні бути такими, щоб після їхнього закінчення була можливість проаналізувати прилади, що відмовили, для встановлення причин відмовлень.

Деякі види факторів, що прискорюють, і дефекти, що виявляються ними, приведені в табл. 1.2.

Найбільший ефект дають прискорені іспити в електричному режимі при підвищених температурах. При цьому в ряді випадків вибирають підвищені температури в сполученні зі зворотним зсувом. Звичайно при виборі режиму таких іспитів виходять із закону Аррениуса, записуючи його для інтенсивності відмовлень у наступній формі:

$$\lambda(T) = K_{\lambda} \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (1.6)$$

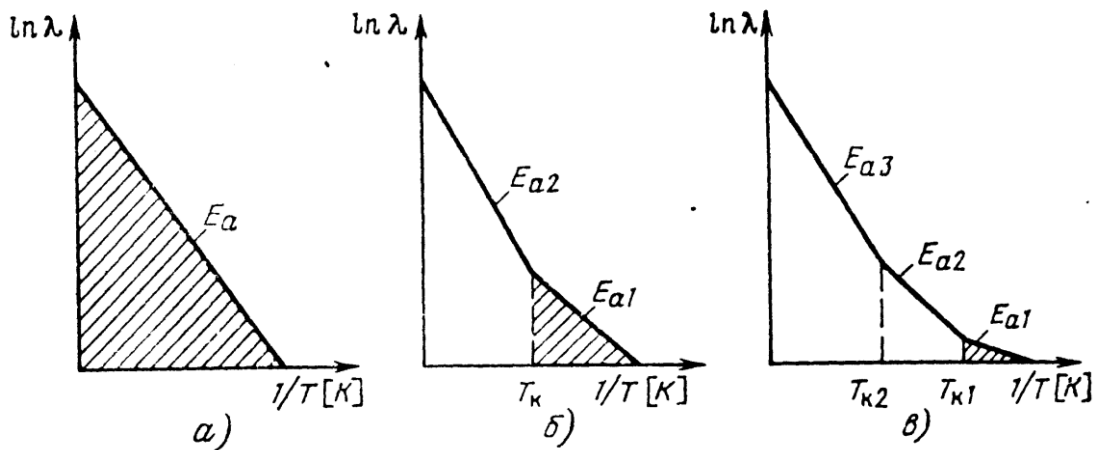
Побудувавши залежність (1.6) у напівлогарифмічному масштабі, можна визначити енергію активації дефектів E_a , що викликають відмовлення, а за формою кривої судити, про стабільність механізму, відповідального за даний вид відмовлень. Приклади можливих варіантів залежностей інтенсивності відмовлень приборів від рівня теплового й електричного навантаження приведені на мал. 9.8.

Для проведення прискорених іспитів вибирається діапазон навантаження з постійною енергією активації дефектів. У приведених прикладах прийнятні діапазони навантажень лежать у межах заштрихованої частини малюнків. Вибір даних рівнів навантаження зв'язаний з тим, що за відмовлення, що виникають у приладах, відповідальні дефекти, активуємі навантаженням, близької до навантаження, випробовуваної приладами в реальній експлуатації. При підвищенні навантаження активуються дефекти, що у звичайних умовах залишаються нейтральними і не впливають на надійність приладів.

Дефекты	Линейные нагрузки	Удар	Вибрация	Повышенное давление	Влага	Термоциклы	Пониженные температуры	Повышенные температуры	Электрический режим
Дефекты корпуса	+	+	+	+	+	+	—	—	+
Наличие посторонних частиц	+	+	+	—	—	—	—	—	—
Несоответственность спаев	—	—	—	—	—	+	+	+	—
Нарушение герметизации	—	+	+	+	+	+	+	+	—
Наличие посторонних газов	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Несовершенство р-п перехода	—	—	—	—	—	+	+	+	+
Несовершенство защиты перехода	—	—	—	—	+	+	+	+	+
Микротрещины	+	+	+	—	+	+	+	+	+

Примечание: + означает возможность выявления указанного дефекта.

Табл.1.2



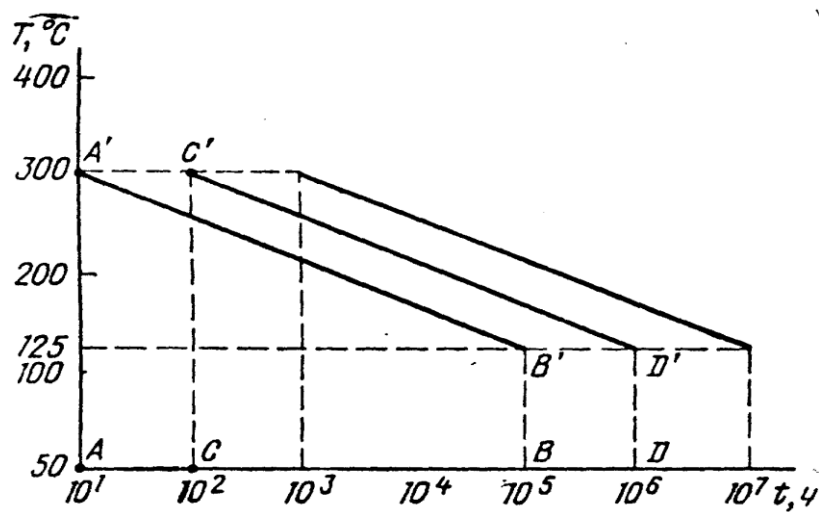
Мал. 1.6 Залежність інтенсивності відмовлень і енергії активації дефектів від рівня навантаження:

а - у діапазоні навантаження діє одні вид дефекту з енергією активації E_a ; б - діапазоні навантаження два види дефектів з різними енергіями активації; в - у діапазоні навантаження три види дефектів; T_k - критична температура активації дефекту

Умови прискорених іспитів для конкретного виду приладів формуються на великому статистичному матеріалі, одержуваному при тривалих іспитах у широкому діапазоні температур. За результатами іспитів будується в подвійному логарифмічному

масштабі сімейство характеристик залежності середнього наробітку до відмовлення (що ідентично часу іспиту) від температури при відповідному електричному зсуві. Приклад такого сімейства характеристик показаний на мал. 1.7.

Виходячи з припущення, що в межах діапазону температур $+300 \dots +125^\circ\text{C}$ діють ті самі механізми відмовлень, робиться висновок про те, що іспиту при $+300^\circ\text{C}$ в плин 10 ч (крапка А') ідентичні по своєму впливі іспитам протягом 10^5 ч при температурі $+125^\circ\text{C}$ (крапка В'). Беручи відношення середнього часу наробітку до відмовлення при $+125^\circ\text{C}$ к середньому часу наробітку при $+300^\circ\text{C}$, одержимо коефіцієнт прискорення для даного виду іспитів. У нашому випадку він дорівнює 10^4 . В стільки разів скорочується час іспитів при виборі даного конкретного режиму прискорення.



Мал. 1.7 Сімейство характеристик прискорених іспитів при підвищених температурах з додатком зворотного зсуву.

2 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 ВХІДНІ ДАННІ

№	Параметри	Позначення	Значення (згідно варіанта розрахунка)
1	Активний елемент		
2	Вид ізоляції		
3	Матеріал для металізації		
4	Коефіцієнт навантаження по струму	$K_{ні}$	
5	Коефіцієнт навантаження по напрузі	K_u	
6	Кількість різнонавантажених ділянок металізації	L	
7	Площа різнонавантажених ділянок $IS, \text{мм}^2$	S_i	
8	Коефіцієнт електричного навантаження ділянок	Q	
9	Коефіцієнт впливу товщини оксиду	β	
10	Ширина доріжки металізації, мкм	W	
11	Температура, С	T	
12	Коефіцієнт впливу площі кристала	$\alpha_{кр}$	
13	Ступінь інтеграції ІС		
14	Співвідношення активних та пасивних елементів	$Na/Nп$	
15	Інтенсивність відмов пасивних елементів, 1/год	$\lambda_{п}, 10^{-7}$	
16	Інтенсивність відмов корпусу, 1/год	$\lambda_{к}, 10^{-7}$	
17	Інтенсивність відмов з'єднання кристал-корпус, 1/год	$\lambda_{кк}, 10^{-7}$	
18	Інтенсивність відмов термокомпресійного з'єднання корпусу, 1/год	$\Lambda_{ткз}, 10^{-7}$	
19	Коефіцієнт жорсткості випробувань	$Kп$	
20	Ймовірність безвідмовної роботи	γ	
21	Інтенсивність різних механізмів відмов:		
	1.при руйнуванні металізації внаслідок електроміграції	q_i	
	2.при зарядовій нестабільності в шарі окисла і на межі окисла з н/п	q_i	
	3.при взаємодії металізації з напівпровідником на межі	q_i	
	4.при дефектах об'єма кристала	q_i	

2.2 РОЗРАХУНОК ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ІС.

Розрахунок інтенсивності відмов ІС передбачає використання інформації про надійність аналогічних елементів серійно виготовлених ІС, враховуючи залежність показників надійності від дії прискорюючих факторів (температура, електричний режим) і технології виготовлення.

При розрахунку припускається, що відмова будь-якого елемента призводить до відмови ІС, і для розрахунку інтенсивності відмов ІС (λ_{IC}) використовується загальна модель виду:

$$\lambda_{IC} = K_{\Pi} (\lambda_{KE} + \lambda_{ЕК} + \lambda_{МЗ}), \quad (2.1)$$

де K_{Π} - коефіцієнт вида при цьому, що характеризує систему відбраковочних випробувань, або коефіцієнт жорсткості випробувань;

λ_{KE} - інтенсивність відмов конструктивних елементів;

$\lambda_{ЕК}$ - інтенсивність відмов елементів кристала;

$\lambda_{МЗ}$ - інтенсивність відмов міжелементних з'єднань.

Розрахуємо окремо інтенсивність відмов конструктивних елементів, елементів кристала та міжелементних з'єднань.

2.3 РОЗРАХУНОК ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.

Інтенсивність відмов конструктивних елементів λ_{KE} визначається:

λ_K - інтенсивністю відмов корпусу;

λ_{KK} - інтенсивністю відмов з'єднання кристала з основою корпусу;

$\lambda_{TKЗ}$ - інтенсивністю відмов термокомпресорного з'єднання.

Однак інтенсивність відмов λ_{KE} залежить не тільки від λ_K , λ_{KK} , $\lambda_{TKЗ}$, але й від площі кристала та від кількості термокомпресорних з'єднань. Розрахунок λ_{KE} проводиться за формулою:

$$\lambda_{KE} = \lambda_K + \alpha_{кр} \lambda_{KK} + n \lambda_{TKЗ}, \quad (2.2)$$

де $\alpha_{кр}$ - коефіцієнт впливу площі кристала;

n - кількість термокомпресорних з'єднань.

2.4 РОЗРАХУНОК ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ МІЖЕЛЕМЕНТНИХ З'ЄДНАНЬ.

В ІС у загальному випадку можливо відокремити ділянки металізації, що знаходяться під різним електричним та температурним навантаженням. Позначимо кількість таких різнонавантажених ділянок - L та їх площі S_i , де $i=1, L$.

Розрахунок інтенсивності відмов міжелементних з'єднань виконується за формулою:

$$\lambda_{ME} = \lambda_M \sum_{i=1}^L \gamma_i S_i, \quad (2.3)$$

де λ_M - інтенсивність відмов металізації одиничної площі, що залежить від ширини металізованої доріжки.

2.5 РОЗРАХУНОК ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ КРИСТАЛА.

На інтенсивність відмов елементів кристала $\lambda_{ЕК}$ впливають наступні фактори:

- інтенсивність відмов активних елементів λ_a та кількість активних елементів N_a ;
- інтенсивність відмов інших (пасивних) елементів в кристалі λ_n та їх кількість N_n ;
- теплові та електричні режими, що враховуються за допомогою коефіцієнта режиму α ;
- якість підзатворного діелектрика при використанні МДН-транзисторів як активного елемента, що враховується коефіцієнтом β - коефіцієнт впливу товщини оксиду.

З урахуванням зазначених факторів, розрахунок інтенсивності відмов елементів кристала відбувається за формулою:

$$\lambda_{ЕК} = \alpha \beta (N_a \lambda_a + N_n \lambda_n). \quad (2.4)$$

Інтенсивність відмов визначається ступенем інтеграції ІС, активним елементом, що використовується, та особливостями технології виготовлення. Згідно початковим даним (ступінь інтеграції 4, активний елемент- МДП-структура) $\lambda_a = 0,3 \cdot 10^{-10} 1/\text{год}$.

Коефіцієнт режиму α розраховується за формулою:

$$\alpha = 0,1 \cdot K_y \quad (2.5)$$

де K_y —загальний коефіцієнт прискорення.

Розрахунок K_y проводиться за формулою (2.6) з урахуванням зазначених механізмів відмов і коефіцієнтів, що характеризують прискорюючі фактори.

$$K_y = \sum_{i=1}^L q_i \cdot K_i \quad (2.6)$$

де q_i - доля ймовірності відмови ІМС в загальному потоці відмов внаслідок розвитку i -го механізму відмови при нормальних умовах і режимі праці;

K_i - коефіцієнт прискорення i -го механізму відмови.

Якщо i -ий механізм відмови інтенсифікується кількома прискорюючими факторами, то коефіцієнт K_i являє собою добуток коефіцієнтів прискорення всіх діючих факторів.

Прискорюючими факторами для заданих механізмів відмов являються підвищена температура і підвищені електричні режими.

Для характеристики підвищених температурних і електричних режимів використовуються коефіцієнти, які характеризують навантаження за температурою, струмом і напругою:

$$K_{\text{нт}} = (1/T_0 - 1/T_{\text{п}}); \quad (2.7)$$

$$K_{\text{нж}} = j_{\text{п}}/j_0; \quad (2.8)$$

$$Q = j_0/j_{\text{мах}}; \quad (2.9)$$

$$K_{\text{ни}} = U_{\text{п}}/0,7U_{\text{проб}}; \quad (2.10)$$

$$\Delta U_{\text{н}} = U_{\text{п}} - U_0, \quad (2.11)$$

де $T_{\text{п}}$, $j_{\text{п}}$, $U_{\text{п}}$ - підвищені значення температури, щільності струму та напруги;

T_0 , j_0 , U_0 - температура, щільність струму та напруга при нормальному режимі;

$j_{\text{мах}}$ - максимально припустима щільність струму;

$U_{\text{проб}}$ - пробивна напруга діелектричного шару.

Для визначення коефіцієнта прискорення, виходячи зі значень прискорюючих факторів при різноманітних i -тих механізмах відмови, існує ряд моделей. В якості моделей коефіцієнта прискорення від температури ($K_{\text{т}}$) використовується рівняння Ареніуса:

$$K_{\text{т}} = \exp[E_a/k(1/T_0 - 1/T_{\text{п}})] = \exp(K_{\text{нт}} * E_a/k), \quad (2.12)$$

де E_a —енергія активації механізмів відмови, eВ;

k —постійна Больцмана, що дорівнює $8,6 \cdot 10^{-5}$ eВ/К.

В якості моделі коефіцієнта прискорення при інтенсифікації механізмів відмови підвищеним струмом пропонується ступенева залежність

$$K_{\text{т}} = K_{\text{нл}}^n \quad (2.13)$$

де n —константа моделі, яка розрізняється в залежності від механізму відмови.

В якості моделі коефіцієнта прискорення при інтенсифікації механізму відмови підвищеною напругою пропонується експоненціальна залежність:

$$K_{\text{т}} = \exp(\alpha * \Delta U_{\text{н}}), \quad (2.14)$$

де α —константа моделі.

Далі розрахуємо загальний коефіцієнт прискорення з урахуванням заданих механізмів відмов:

2.6 РОЗРАХУНОК ЙМОВІРНОСТІ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ ПРИ ПОСТІЙНІЙ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ.

Інтегруючи (1.4), отримуємо вираз, який пов'язує ймовірність безвідмовної роботи і інтенсивність відмов:

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (2.20)$$

Припускаючи інтенсивність відмов постійною величиною, що справедливо, якщо відмови відбуваються внаслідок прихованих дефектів і не пов'язані з процесами старіння, з рівняння (2.20) отримаємо:

$$P(t) = \exp(-\lambda_{IC} t). \quad (2.21)$$

Отриманий вираз для ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ називається експоненційним розподілом. Результати розрахунку та графік залежності ймовірності безвідмовної роботи від часу наробки (t змінюється від 0 до $5 \cdot 10^8$ с-значення, при якому $P(t)$ близьке до нуля), при значенні інтенсивності відмов $\lambda_{IC} = 2,492 \cdot 10^{-8} \text{ 1/год}$ (згідно проведених розрахунків), представлено в Додатку Б в таблиці 1 та на рисунку 1, відповідно.

2.7 РОЗРАХУНОК СЕРЕДНЬОГО ТА ГАММА – ВІДСОТКОВОГО ЧАСУ НАРОБКИ ДО ВІДМОВИ ПРИ ПОСТІЙНІЙ ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ

Середній час наробки до відмови являє собою математичне очікування часу наробки до відмови

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (2.15)$$

і може бути виражен через ймовірність безвідмовної роботи як

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.16)$$

При постійній інтенсивності відмов $P(t)$ середній час наробки до відмови підпорядковується експоненційному розподілу, і тоді

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda_{IC}}. \quad (2.17)$$

Підставляючи чисельне значення λ_{IC} , отримане в п.2.1, отримаємо

$$t = 1/\lambda_{IC} = 4,009 \cdot 10^8 \text{ год}$$

Гамма-відсотковий час наробки до відмови t_γ визначається як час, протягом якого відмова не виникає з імовірністю γ . Значення t_γ отримується досить просто з рішення рівняння:

$$\gamma = P(t_\gamma) = 1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t) dt. \quad (2.18)$$

Для експоненційного розподілу вираз для t_γ отримується

$$P(t_\gamma) = \exp(-\lambda_{IC} t_\gamma);$$

$$t_\gamma = -\frac{1}{\lambda_{IC}} \ln P(t_\gamma) = -\frac{1}{\lambda_{IC}} \ln \gamma. \quad (2.19)$$

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. “Фізичні основи надійності інтегральних схем”. За редакцією Ю.Г.Міллера. М.: Радянське радіо, 1976. - 320с., іл.
2. В.С.Пряників “Прогнозування відмовлень напівпровідникових приладів”. М.: Енергія 1978. - 112с., іл.
3. А.А.Чернишов “Основи надійності напівпровідникових приладів і інтегральних схем”. - М.: Радіо і зв'язок, 1988. - 256 с., іл.
4. М.И.Горлов, С.Ю.Корольов “Фізичні основи надійності інтегральних мікросхем”. - Воронеж: Изд. - Воронежського університету, 1995. - 200с., іл.