

УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ФОРСОВАНИХ ВИПРОБУВАНЬ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ

Найбільш достовірні дані про «потенціал» радіоелектронних компонентів (цифрових блоків) можуть бути отримані при проведенні натурних випробувань. Одним з ефективних способів скорочень тривалості випробувань є прискорені випробування, при яких застосовуються форсовані режими.

У статті проведено узагальнення результатів форсованих випробувань радіоелектронних компонентів метою яких було визначення динаміки зміни діагностичного параметру (струму радіоелектронного компоненту (РЕК)) протягом усього періоду функціонування РЕК. Отримана за результатами випробувань та статистичної обробки залежність має надзвичайне практичне значення для діагностування цифрових блоків високонадійного радіоелектронного устаткування та вимагає пояснень фізико-хімічних процесів, які викликають те або інше відхилення діагностичного параметру від «норми».

Ключові слова: форсовані випробування, діагностичний параметр, фізико-хімічні процеси.

Вступ. Використання високонадійних зразків радіоелектронного устаткування передбачає неможливість проведення регламентних робіт (робіт з підтримки працездатного стану) окремих видів радіоелектронного устаткування після введення їх в експлуатацію (космічні системи, атомна енергетика). Тому, при підготовці до застосування подібних систем потрібне визначитись (мати відповідь) чи спроможна система (обладнання) виконувати свої функції протягом встановленого часу.

Найбільш достовірні дані про «потенціал» радіоелектронних компонентів (цифрових блоків) можуть бути отримані при проведенні натурних випробувань. Існуючі РЕК мають час наробітку на відмову $(10^7 - 10^8)_Г$. Тому час випробування існуючих РЕК може досягати тисяч годин [1]. Одним з ефективних способів скорочень тривалості випробувань є прискорені випробування, при яких застосовуються форсовані режими. В основу прискорених випробувань покладено сукупність теоретично та експериментально обґрунтованих закономірностей та допущень, на використанні яких засноване проведення випробувань зі скороченням їхньої тривалості [2].

Постановка завдання. Метою проведення випробувань є знаходження функціональної залежності діагностичного параметру від часу напрацювання, при максимально можливому (з погляду збереження адекватності фізики процесів старіння) коефіцієнті прискорення. Основна вимога до прискорених випробувань, це ідентичність процесів старіння та зношування по відношенню, до звичайних умов експлуатації.

Коефіцієнт прискорення в існуючих моделях прискорених випробувань напівпровідникових РЕК [3, 4], не дозволяє, за час випробувань $t_e = 10^3_Г$, охопити увесь час життя (безвідмовної роботи) $(10^7 - 10^8)_Г$ РЕК:

$$K_y^{T,U} \times t_e = (10^2 \div 10^3) \times 10^3 = (10^5 \div 10^6) < T(t) .$$

Відсутній час отримано додавши в комплексні форсовані випробування додаткові фактори, які активують процес старіння напівпровідникового РЕК.

Аналіз режимів роботи цифрового блоку РЕО та експлуатаційних параметрів РЕК показав технічну можливість введення в модель випробувань коефіцієнта прискорення при підвищеному омичному навантаженні K_n^R та коефіцієнт прискорення при підвищеній частоті вхідного сигналу K_n^f . Це дозволило:

- охопити весь період безвідмовної роботи $T(t) = (10^7 - 10^8)_r$ РЕК за час випробувань $t_e = 10^3 r$;

- знизити значення приватних коефіцієнтів прискорень та підвищити вірогідність процесу форсованих випробувань, наблизивши ідентичність процесів що відбуваються в РЕК (фізико-хімічних процесів) до звичайних умов експлуатації.

Результатом форсованих випробувань є статистично оброблена вибірка n – значень (обсяг вибірки) діагностичного параметру (математичне очікування) яка отримана в моменти часу t (час виміру ДП). Графічна екстраполяція отриманих та оброблених значень має вид представлений на рис. 1. Можливі відхилення значення ДП в реальних умовах експлуатації вимагають пояснень з точки зору фізико-хімічних процесів, які відбуваються в напівпровідниках під час їх експлуатації.

Основна частина. За результатами випробувань визначено динаміку зміни діагностичного параметру (математичне очікування) – вихідного струму напівпровідникової інтегральної схеми та підтверджено запропоновані діагностичні моделі РЕК які враховують фізико-хімічні процеси в напівпровіднику (рис. 1). На рисунку позначено: $I_{ДП}$ - діагностичний параметр; $I_{ДП доп}$ - допустиме значення діагностичного параметру; $I_{ном}$ - номінальне значення діагностичного параметру; $t_{кр}$ - критичний час напрацювання РЕК; $t_{доп}$ - допустимий час напрацювання РЕК, B_1, B_2 - виміряні значення ДП на місці експлуатації; B'_1, B'_2 - екстрапольоване значення ДП, при визначенні часу відмови РЕК.

Розглянемо декілька імовірних випадків при порівнянні виміряного діагностичного параметру з «еталонними» значеннями (розрахованими, або отриманими в умовах прискорених випробувань).

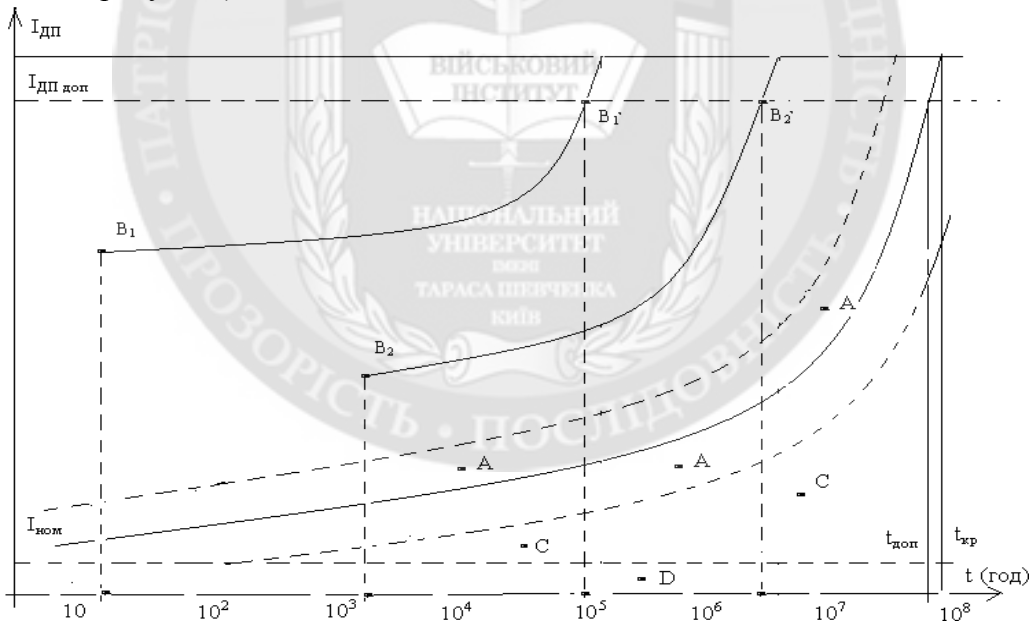


Рис. 1. Закономірність зміни діагностичного параметру (наближена)

Випадок перший (крапка А) значення діагностичного параметру лежить в межах довірчого інтервалу (відносно математичного очікування). Результат виміру і порівняння свідчить про справний технічний стан та (з великою долею ймовірності) можливість подальшого використання цифрового блоку за призначенням.

Випадок другий (крапки В). Значення ДП перевищує еталонне значення (перевищило довірчий інтервал в бік збільшення вихідного струму).

Проведені дослідження, в основі яких лежить аналіз причин пов'язаних зі зміною фізичних та хімічних властивостей напівпровідника і оксидних шарів, показали [5, 6], що

основними причинами прихованих несправностей РЕК є недоліки виробництва. До явищ, які можуть призвести до збільшення діагностичного параметру слід віднести: процеси у внутрішньому об'ємі напівпровідника та процеси на поверхні кристалічної структури.

Відомо, що сучасна технологія виготовлення НПП не дозволяє досягнути ідеальної чистоти виробництва та досконалості кристалічної структури НПП [133 - 7]. Тому, при виготовленні НПП з'являються різні дефекти структури напівпровідника, які істотно впливають на електричні властивості кристалу і проявляється в зменшенні рухливості носіїв струму та у створенні акцепторних або донорських рівнів, які можуть бути також центром рекомбінацій.

Залежно від зміни концентрації носіїв змінюється той або інший параметр напівпровідника, причому ця зміна відбувається за певним законом. Зміна концентрації обумовлена або перерозподілом легуючих домішок в об'ємі кристалу, або структурною недосконалістю напівпровідникового кристалу, що виникає та розвивається в матеріалі дефектної схеми в процесі експлуатації [133 - 7].

При виникненні неоднорідності в об'ємі напівпровідника на них утворюється падіння напруги, аномальне підвищення температури, різке збільшення коефіцієнту дифузії. Тому дефекти в кристалі, розвиваючись у процесі експлуатації під впливом термічних і механічних навантажень впливають на зміну електричних параметрів призводять до виникнення як поступових, так і раптових порушень в роботі РЕК.

Для врахування впливу фізико-хімічних процесів у внутрішньому об'ємі напівпровідника на зміну параметрів $p-n$ переходів використана аналітична залежність параметра зміни концентрації носіїв ΔL з урахуванням часу напрацювання напівпровідникової структури t [160 - 8]:

$$\Delta L_1 = M_1 \left(\sqrt{NN'} \exp \left\{ -\frac{\Delta U}{2ht} \right\} - m_0 \right),$$

де M_1 – коефіцієнт пропорційності, що враховує тип і кількість $p-n$ переходів; ΔU – робота по переведенню атома з вузла в між вузловий простір; N' – кількість атомів у вузлах; N – кількість між вузлових просторів; h – постійна Планка; m_0 – початкова концентрація носіїв.

Найбільший вплив на параметри напівпровідника чинять фізико-хімічні зміни в поверхневому шарі. Плівка окису та двоокису кремнію і інших забруднень взаємодіють з мікрочастинками вологи та утворюють мікрооб'єми електролітів. На границі "електроліт-кристал" з'являються різні концентрації речовин і завдяки цьому можливий процес дифузії. Всі ці процеси є локальними, однак вони можуть досягти такої величини, коли зміщується бартерний рівень Фермі. У цьому випадку напівпровідник можна вважати виродженим, а РЕК таким, що втратив свої основні властивості. Такім чином, зміна концентрації носіїв є основним чинником, що визначає зміни параметру НПП від часу напрацювання. Виявлення закономірностей фізико-хімічних змін у поверхневому шарі кристалу дозволяє визначити інформативні параметри, які можуть бути використані при обґрунтуванні нових ефективних методів діагностування НПП.

Визначимо зміну концентрації носіїв залежно від глибини проникнення в кристал x і від часу напрацювання t .

Нехай задані:

N_0 – початкова концентрація домішок у напівпровіднику;

N_m – концентрація, що створюється в поверхневому шарі за рахунок мікрооб'ємів електролітів.

Початкові умови для цих концентрацій мають вигляд [8]:

$$\begin{aligned} N(0, t) &= N_m + N_0, \text{ при } t \neq 0; \\ N(x, 0) &= N_0, \text{ при } t = 0. \end{aligned}$$

Потрібно визначити залежність концентрації носіїв $N(x,t)$ від глибини проникнення носіїв у кристал x і від часу напрацювання t .

Цю задачу можна звести до відомої задачі про випаровування з напів обмеженого тіла [160]. Для цього варто знайти таку функцію $\tilde{N}(x,t)$, що задовольняла б рівнянню:

$$\frac{\partial \tilde{N}(x,t)}{\partial t'} = D \frac{\partial^2 \tilde{N}(x,t)}{\partial x^2}$$

та знаходилася би на границі "внутрішній обсяг кристала – поверхневий шар".

Такою функцією є:

$$\tilde{N}(0,t) = N_m + N_0 - N(x,t). \quad (1)$$

У зв'язку з тим, що шукана концентрація задовольняє рівнянню дифузії, то і функція $\tilde{N}(x,t)$ буде задовольняти цьому рівнянню. Рівняння для напів обмеженого тіла, можна записати [8]:

$$N(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^\infty \tilde{N}(\xi,0) \left[\exp\left\{-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}\right\} - \exp\left\{-\frac{(x+\xi)^2}{4Dt}\right\} \right] d\xi,$$

де D – коефіцієнт дифузії в приграничному шарі;

ξ – постійна проникнення поверхневого слою.

Початкову умову для $\tilde{N}(x,t)$ визначимо аналогічно тому, як і для $N(x,t)$, тобто:

$$N(\xi,0) = N_m + N_0.$$

Отже,

$$\tilde{N}(x,t) = \frac{N_m + N_0}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^\infty \left[\exp\left\{-\frac{(x-\xi)^2}{4Dt}\right\} - \exp\left\{-\frac{(x+\xi)^2}{4Dt}\right\} \right] d\xi,$$

звідки відповідно до (1) маємо:

$$N(x,t) = N_m + N_0 - (N_m + N_0) 2\Phi_0 \left(\frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{Dt}} \right) = (N_0 + N_m) \left(1 - 2\Phi_0 \frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{Dt}} \right),$$

$$\text{де } \Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

При фіксованому часі напрацювання t – концентрація носіїв $N(x,t)$ в залежності від глибини проникнення в кристал x змінюється від рівня $N_0 + N_m$ до N_0 . Тобто, швидкість зміни концентрації носіїв зменшується зі збільшенням часу напрацювання t .

При фіксованій глибині проникнення x в кристал концентрація носіїв $N(x,t)$ змінюється від рівня N_0 до $N_0 + N_m$ в залежності від часу напрацювання t . От же, чим менше x , тим швидше концентрація $N(x,t)$ досягає граничної величини $N_0 + N_m$.

Збільшення концентрації носіїв $\Delta N(x,t)$ у поверхневому шарі буде визначатися виразом:

$$\Delta N(x,t) = N(x,t) - N_0 = N_m - (N_0 + N_m) 2\Phi_0 \left(\frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{Dt}} \right).$$

Таким чином, зміна параметра ΔL_2 за рахунок дифузії може бути описана формулою:

$$\Delta L_2 = M_2 \cdot \Delta N(x,t),$$

де M_2 – коефіцієнт пропорційності.

Тоді зміна параметра ΔL за рахунок несправностей у внутрішньому об'ємі напівпровідника та на його поверхні буде мати вигляд:

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = M_1[\sqrt{NN'} \exp\left\{-\frac{\Delta U}{2ht}\right\} - m_0] + M_2[N_m - (N_0 + N_m)2\Phi_0\left(\frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{Dt}}\right)]. \quad (2)$$

Вираз (2) показує залежність параметра ΔL від часу напрацювання t при зміні концентрації носіїв.

Визначимо зміну концентрації конкретних носіїв, наприклад, електронів $n(D, t)$. Для не виродженого напівпровідника маємо [7, 8]:

$$n(D, t) = 2 \frac{(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{h^3} \exp\left\{-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}\right\}, \quad (3)$$

де E_{Fn} – енергія рівня Фермі; m_n^* – ефективна маса електрона; E_c – рівень енергії, що відповідає нижній границі зони провідності; T – температура (К); k – постійна Больцмана

Величини m_n^* і E_c мають відносно слабку залежність від напрацювання t при зміні концентрації носіїв [7, 8]. Тому (приблизно) можна вважати, що залежність концентрації електронів від напрацювання t в основному визначається енергією рівня Фермі, тобто $n(D, t) \approx f(E_{Fn})$.

Як відомо [7, 8]:

$$E_{Fn} = -\frac{Ed}{2} + kT \ln \left[\frac{h^3 N_d}{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}} \right]^{1/2},$$

де E_d – потенціал донорського шару; N_d – концентрація донорських рівнів.

Концентрацію N_d визначимо аналогічно $N(x, t)$:

$$N_d = (N_{d0} + N_{dm}) \left(1 - 2\Phi_0 \frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{D_d t}} \right),$$

де N_{d0} – концентрація донорських рівнів при виготовленні напівпровідника; N_{dm} – концентрація донорських рівнів за рахунок дифузії в поверхневому шарі мікрооб'ємів електродів.

Тоді вираз для енергії рівня Фермі з урахуванням (7) має вид:

$$E_{Fn} = -\frac{\Delta Ed}{2} + kT \ln \left[\frac{h^3 (N_{d0} + N_{dm}) \left(1 - 2\Phi_0 \left(\frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right)^{1/2}}{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Підставляючи формулу (4) в (3), отримаємо наступний вираз зміни концентрації електронів $n(D, t)$:

$$n(D, t) = \frac{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}}{h^3} \exp \left\{ -\frac{E_c}{kT} - \frac{\Delta Ed}{2kT} - \ln \left[\frac{h^3 (N_{d0} + N_{dm}) \left(1 - 2\Phi_0 \left(\frac{\sqrt{2x}}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right)^{1/2}}{2(2\pi m_n^* kT)^{3/2}} \right] \right\}. \quad (5)$$

Таким чином отримано математичну залежність (5), яка характеризує зміну концентрації основних носіїв (електронів) в напівпровідниковому переході РЕК в залежності від часу напрацювання та враховує фізико-хімічні процеси які відбуваються в напівпровіднику за цей час. Залежність має вигляд зростаючої експоненти зростаючий

характер що обумовлює зростання значень діагностичного параметру – струму напівпровідника.

Випадок третій (крапка С, D). Отримане значення ДП менш еталонного значення (перевищило довірчій інтервал в бік зменшення вихідного струму). До явищ, які можуть призвести до зменшення діагностичного параметру (збільшення опору - зменшення струму напівпровідникового РЕК) слід віднести: електродифузію (електроміграцію), корозію та окислювання металізації, механізм деградації металевих плівок та якості внутрішніх контактних з'єднань.

У процесі експлуатації напівпровідникових приладів металеве розведення в не меншому ступені, чим активні області напівпровідникової структури, піддається навантаженням (струмовим і тепловим). Все це створює сприятливі умови для протікання різних процесів деградації металевого розведення, які приводять до зміни первісних властивостей радіоелектронного компоненту і до його відмов. При чому відмови РЕК з вини процесів деградації металевого розведення здебільшого мають раптовий характер.

Явище електродифузії (електроміграції) полягає в тім, що в металевих провідниках (за певних умов) при проходженні постійного струму великої щільності (близько 10^6 A/cm^2) спостерігається перенос матеріалу провідника з району негативного контакту до позитивного.

Модель цього явища представлена на рис. 2 [9-11]. Сутність цього явища полягає в тім що, при прикладенні електричного поля E к провіднику в ньому виникає потік електронів I_e , спрямований назустріч електричному полю. На позитивно заряджені іони металу в цих умовах діють дві сили. Одна з них F_z , виникає під дією електричного поля, прагнучи перемістити іони по напрямку поля. Походження другої сили F_e пов'язане з взаємодією потоку електронів з іонами металу, вона спрямована назустріч електричному полю. При досить великій щільності струму виникають умови, коли $F_e > F_z$ а іони металу починають пересуватися з області «негативного» контакту, в область «позитивного» контакту. У наслідок цього, в галузі «негативного» контакту створюються збіднені ділянки і порожнечі, а в районі «позитивного» контакту відбувається нагромадження металу, в окремих місцях утворюються «горбки», виростають металеві "вуси". Неоднорідне нагрівання провідника ($T_1 > T_2$) прискорює процес переносу іонів металу.

Механізм корозії та окислювання металізації пов'язаний з проникнення вологи в герметизований корпус, адсорбції її на поверхні металізації через пори та тріщини в захисних покриттях, а також наявністю іонних забруднень на поверхні кристалу. Все це сприяє виникненню корозії металізації, яка носить, як правило, електрохімічний характер та зростанню внутрішнього опору радіоелектронного компоненту.

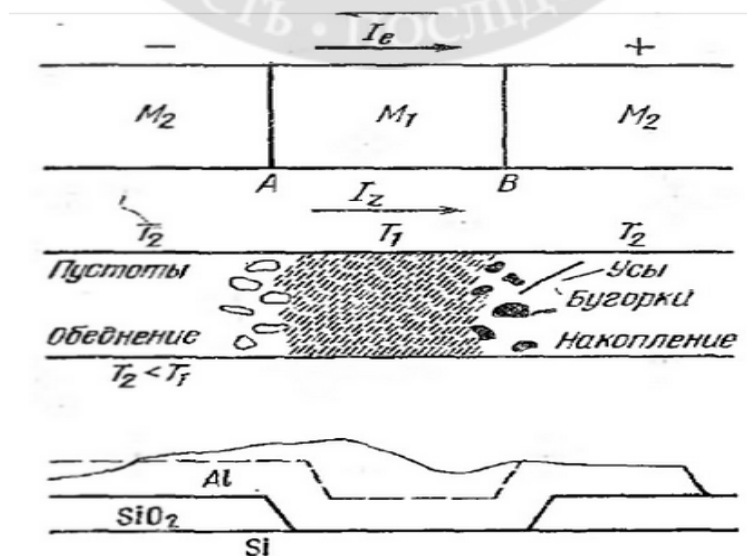


Рис. 2. Модель електродифузії іонів алюмінію в плівковому провіднику

На виробництві радіоелектронних компонентів є велика кількість джерел забруднення поверхні кристала іонами домішок (забруднення, що попадають у результаті обробки пластин, атмосфера, у якій проводиться герметизація, конструкційні деталі корпусу, клейові маси, застосовувані для посадки кристалу, пластмаса, для герметизації радіоелектронних компонентів). Найнебезпечнішими для алюмінію є іони натрію, калію та хлору. Алюміній може корозіювати як у кислотному, так і у лужному середовищі.

Більшою мірою піддаються корозії металеві електроди, які перебувають 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 діє активний процес утворення шару окису алюмінію, який перешкоджає подальшому руйнуванню. При наявності на поверхні кристала іонів хлору корозія позитивних ділянок металізації значно прискорюється внаслідок великої проникаючої здатності іонів хлору крізь плівку окису алюмінію.

Аналіз показав що корозія виникає і розвивається на границях зерен з утворенням суцільних мікротріщин та призводить до зростання внутрішнього опору та обриву металізації.

Механізм деградації металевих плівок діє паралельно з механізмами електродифузії і електрохімічної корозії та пов'язаний з окислюванням алюмінію і призводить до збільшення омичного опору струмоведучих елементів [12-15].

Механізм відмови в цьому випадку складається у взаємодії кисню з поверхнею зерен в обсязі кристалу напівпровідника. У результаті росту окисної плівки на поверхні провідних доріжок і утворення окисних між зернових прошарків зменшується обсяг і ефективний поперечний перетин провідника і, як наслідок, збільшується його опір.

Погіршення умов проходження електричного струму по струмоведучих доріжках порушує температурний режим приладу, приводячи до локальних перегрівів, посиленню електродифузії і росту ймовірності відмови за рахунок обриву металізації через більші розтяжні зусилля, які виникають у місцях розростання зерен.

У конструкції напівпровідникових приладів широко застосовується алюмінієве розведення для створення між елементних з'єднань на кристалі, золотий і алюмінієвий дріт для створення внутрішніх з'єднань між контактними площадками на кристалі і корпусі приладу. Приєднання внутрішніх виводів із золотого дроту до контактних площадок на кристалі здійснюється термокомпресійним зварюванням при температурі підкладки порядку 30°C . У процесі термокомпресії відбувається взаємна дифузія металів, і створюється міцне з'єднання в місці контакту. Однак одночасно з дифузією в місці контакту алюміній і золото вступають у хімічну реакцію з утворенням інтерметалічних з'єднань або інтерметалідів. Залежно від температури, тиску, концентрації золота і алюмінію в місці їхнього контакту можуть утворитися наступні з'єднання: AuAl_2 , AuAl , Au_2Al , Au_5Al_3 , Au_4Al , які суттєво відрізняються по питомому опору, термічному розширенню, твердості.

При температурах вище 30°C утворюється надзвичайно пористе з'єднання AuAl_2 (пурпурна чума). Цей різновид інтерметаліда найнебезпечніший при формуванні термокомпресійного з'єднання.

На рис. 3 представлена структура контакту золотого дроту з алюмінієвою контактною площадкою. Вся контактна галузь складається з різних модифікацій інтерметалідів, які поширюються на всю глибину алюмінієвої плівки. По периметрі контакту через розходження в коефіцієнтах термічного розширення інтерметалічних фаз утворюються мікротріщини.

Таким чином, процеси утворення шарів інтерметалідів, порожнеч і тріщин по периметрі контакту знижують його міцність, підвищують контактний опір, що призводить до відмови контакту (поступовому або раптовому).

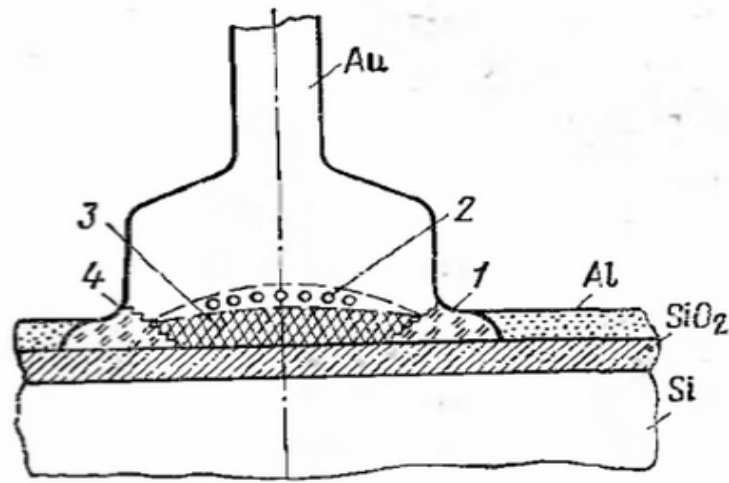


Рис. 3. Структура термокомпресійного контакту $AuAl$:
1- Au_2Al , 2- Au_4Al , 3- Au_5Al , 4-мікротріщини

Висновки. Таким чином, в статті проведено узагальнення результатів форсованих випробувань радіоелектронних компонентів метою яких було визначення динаміки зміни діагностичного параметру (струму РЕК) протягом усього періоду функціонування РЕК. Отримана за результатами випробувань та статистичної обробки залежність (рис. 1) має надзвичайне практичне значення для діагностування цифрових блоків високонадійного радіоелектронного устаткування та вимагає пояснень фізико-хімічних процесів які викликають те або інше відхилення діагностичного параметру від «норми».

ЛІТЕРАТУРА:

1. РД 11 0755-90. Микросхеми інтегральні. Методи ускорених испытаний на безотказность и долговечность. РНИИ «Электронстандарт». 1990.
2. Bowles J. V. A survey of reliability prediction procedures for microelectronics devices // IEEE Trans. Reliab. 1992. Vol. 41. N 1. P. 2-12.
3. Кокс Д.Р., Оукс Д. Анализ данных типа времени жизни / Пер. с англ. О.В. Селезнёва. - М.: Финансы и статистика, 1988. - 191 с.
4. Г.Д. Карташов, Л.Г. Ветров, В.И. Тимонин и др. Основные принципы и методы ускоренных испытаний на надежность радиоэлектронной аппаратуры военного назначения./ - М.: Минобороны СССР, 1987. - 261 с.
5. Бережной В.П. Выявление причин отказов РЭА / В.П. Бережной, Л.Г. Дубицкий. - М.: Радио и связь, 1983. - 232 с
6. Готра З.Ю., Николаев И.М. Контроль качества и надежности микросхем / З.Ю. Готра, И.М. Николаев. - М.: Радио и связь, 1989. - 168 с.
7. Спиридонов Н.С. Основы теории транзисторов / Н.С. Спиридонов. - 2-е изд. - К.: Техника, 1975. - 359 с.
8. Шкуліпа П.А. Побудова алгоритмів для розробки діагностичної моделі транзистора енергодинамічним методом діагностування // Наукові нотатки постійно діючого семінару науковців, здобувачів та ад'юнктів. - Випуск №19. - Київ: ВІКНУ, 2011. - С. 13-25.
9. Курносое А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Высшая школа, 1986.
10. Минайчев В.Е. Нанесение пленок в вакууме. - М.: Высшая школа, 1989.
11. Чернышёв А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. - М.: Радио и связь, 1988.
12. Фізичні основи надійності інтегральних схем . За редакцією Ю.Г.Міллера. М.: Радянське радіо, 1976. -320с., іл.
13. В.С.Пряників. Прогнозування відмовлень напівпровідникових приладів. М.: Енергія 1978. - 112с., іл.

14. А.А.Чернишов — Основы надёжности полупроводниковых приборов и интегральных схем. -М.: Радио и связь, 1988. -256 с., ил.

15. М.И.Горлов, С.Ю.Корольов — Физические основы надёжности интегральных микросхем. - Воронеж: Изд. -Воронежского университета, 1995. -200с., ил.

Без рецензії.

д.т.н., проф. Жердев Н.К., к.т.н., доц. Глухов С.И, к.т.н. доц. Кузавков В.В.
**ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФОРСИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ**

Наиболее достоверными данными о «потенциале» радиоэлектронных компонентов (цифровых блоков) могут быть получены при проведении натурных испытаний. Одним из эффективных способов сокращения длительности испытаний являются ускоренные испытания, при которых используется форсированный режим.

В статье проведено обобщение результатов форсированных испытаний радиоэлектронных компонентов целью, которых было определение динамики изменения диагностического параметра (ток радиоэлектронного компонента (РЭК)) на протяжении всего периода функционирования РЭК. Полученные по результатам испытаний и статистической обработки зависимость имеет большое практическое значение для диагностирования цифровых блоков высоконадежного радиоэлектронных устройств и требует пояснений физико-химических процессов, которые приводят к тем или другим отклонениям диагностического параметра от «нормы».

Ключевые слова: форсированные испытания, диагностический параметр, физико-химические процессы.

Prof. Zherdev N.K., Ph.D. Glukhov S.I., Ph.D. Kuzavkov V.V.
**SUMMARY OF THE RESULTS OF THE RADIO-ELECTRONIC COMPONENTS FORCED
TESTS**

The most reliable data on the “potential” of radio-electronic components (digital blocks) can be obtained during field tests. One of the effective ways of the tests duration reduction is accelerated tests with the use of forced mode.

The authors have summarized the results of the radio-electronic components forced tests aimed to determine the dynamics of the diagnostic parameter (radio-electronic component current (REC)) throughout the whole period of REC. The received by the results of tests and statistical processing dependence has enormous practical significance for diagnosing digital blocks of highly reliable radio-electronic equipment and requires an explanation of physical and chemical processes causing a particular diagnostic parameter deviations from the “norm”.

Keywords: forced testing, diagnostic parameter, physical and chemical processes.