

характеристики, которые ограничивают область параметров «классических» систем. Построены диаграммы стационарности режимов, которые определяют границы стационарности режимов нуклеации.

Ключевые слова: фазовый переход, начальные стадии нуклеации, функция распределения, теория Зельдовича, квазистационарное зародышеобразование.

Summary. *D.V. Butenko, A.O. Kovalchuk. Building of parametric diagrams of non-stationary nucleation modes at the first order phase transition of decay type in two-component systems. Critical analysis of classic nucleation theory's results was done. Verity of quasi-stationary approximation of size distribution function's evolution was checked. Non-stationary modes of nucleation were found and criteria of non-stationarity was suggested. Boundary thermodynamic conditions restricting area of "classic" system parameters were found using model of alloy's decay in binary system and suggested criteria. Diagrams of stationary modes which restrict stationary nucleation boundaries were built.*

Keywords: phase transition, initial stage of nucleation, distribution function, Zeldovich's theory, quasi-stationary nucleation.

Одержано редакцією 28/09/2011

Прийнято до друку 02/11/2011

УДК 539.219.3

PACS 05.10.Ln, 61.72.-y

О.Ю. Ляшенко

РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ У РОЗПОДІЛІ ЧАСІВ ДО ВІДМОВИ ПРИПОЙНИХ З'ЄДНАНЬ

Надійність мікросхем є однією з ключових проблем мікроелектронної індустрії. Мікроелектронні пристрої повинні відповідати двом важливим критеріям: в середньому працювати протягом достатньо довгого часу і мати вузький розподіл часів до відмови. В цій роботі досліджується статистика відмов ансамблю припойних з'єднань. На основі простої математичної моделі показано, що середній час до відмови, при фіксованій густині струму, не залежить від розміру припойного з'єднання, але при цьому ширина розподілу часів до відмови зростає зі зменшенням розміру припойного з'єднання. Це означає, що зі зменшенням розмірів припойного з'єднання імовірність ранньої відмови буде зростати.

Ключові слова: Надійність мікросхем, статистика відмов, розподіл Вейбулла, Монте-Карло моделювання.

Вступ

На сьогодні однією з основних задач мікроелектроніки є мініатюризація зі збереженням надійності мікросхем. Інженери прагнуть досягнути великих значень *середнього часу до відмови* мікросхеми (Mean Time To Failure – MTTF), але при цьому забезпечити вузьку ширину розподілу *часів до відмови* (Time To Failure – TTF) [1]. В іншому випадку, навіть при широкому розподілі часів до відмови мікросхеми можна зустрітися з проблемою ранніх відмов.

Дуже часто TTF розподіл наближують розподілом Вейбулла, який характеризується двома параметрами – η і β . Перший з них (η) – пропорційний величині MTTF, а другий (β) – характеризує ширину TTF розподілу. Задача збільшення величини MTTF є сама по собі актуальною, так як має очевидну практичну цінність для мікроелектронної індустрії, але при цьому важливо також правильно розуміти природу явища відмови і вміти вчасно її передбачати. На сьогодні відомо, як зменшення ширини контакту і/чи розміру припойного з'єднання може вплинути на MTTF, в першу чергу за рахунок виникнення стиснення струму в окремих областях припойного з'єднання при екстремальних значеннях величин густин струму [2,3]. З іншого боку, на даний момент проведено недостатній аналіз фізичних причин розкиду значень TTF, за виключенням кореляції з розподілом розмірів складових елементів чи зерен [1].

В цій статті ми хочемо проаналізувати розкид значень TTF в залежності від розміру припойного з'єднання, на відміну від розкиду розмірів елементів, які відмовили. Такий розкид буде зберігатися, якщо всі припойні з'єднання будуть геометрично абсолютно ідентичними.

Приведемо практичний приклад суті проблеми наноконтактів. В процесі мініатюризації інтегральних схем і переходу до тривимірних схем планується заміна припійних (лютевих) кульок розмірами 50 мкм (як зараз) до припійних кульок розмірами 1 мкм. В процесі виготовлення схеми кульки багатократно плавляться і знову кристалізуються. При кристалізації кульки (на основі олова) розміром 50×50×50 мкм утворюються порядку ста тисяч кристалічних зерен, всі з різною орієнтацією, так що в цілому властивості кульки не змінюються. Якщо ж кулька має розмір 1×1×1 мкм, то після плавлення і кристалізації може складатися взагалі лише з одного зерна. Олово анізотропне, і від орієнтації залежить опір, а значить, тепловиділення, а значить, час до відмови. Отже, вузький розподіл перетворюється на широкий і призводить до небезпеки ранньої відмови навіть при незмінних середніх характеристиках.

Нещодавно було показано [4], що відмова припойного з'єднання, яка спричинена електроміграцією, може відбутися не лише завдяки поступовому розповсюдженню єдиної пори, але і завдяки стохастичному зародкоутворенню і латеральному розростанню ансамблю пор. Ми покажемо, що цей процес, а разом з ним і залежність статистики відмов від скінченного розміру контакту, можуть бути описані моделлю типу Колмогорова–Аврамі [5,6]. Математичну задачу можна сформулювати наступним чином: ми хочемо знайти вид залежності дисперсії часів до відмови (TTF) від двох фізичних параметрів (частоти зародкоутворення і швидкості росту пор) і одного геометричного параметру (розміру контакту).

Опис моделі**Модельні припущення**

Для побудови нашої моделі ми користувались наступними припущеннями:

1. Будемо вважати, що в модельній схемі існує лише один припойний контакт і тільки один режим відмови цього контакту – режим Колмогорова-Аврамі: зародкоутворення і наступне латеральне розростання утворених пор до повного перетворення контактного з'єднання в одну суцільну пору.
2. Зародки круглої форми ростуть з постійною швидкістю V , як у класичній моделі Колмогорова-Аврамі.
3. Частота зародкоутворення на одиницю не перетвореної площі ν є однаковою в будь-якій точці припойного з'єднання і постійною в часі (насправді, це означає постійне в часі пересичення катодного кінця вакансіями).
4. Контактне з'єднання має форму квадрату $L \times L$ (де L – довжина сторони квадрату) (див. Рис. 1).
5. Ми шукаємо момент часу *повного перекриття* поперечного перерізу контактного з'єднання, який ми будемо називати *часом математичної відмови*.

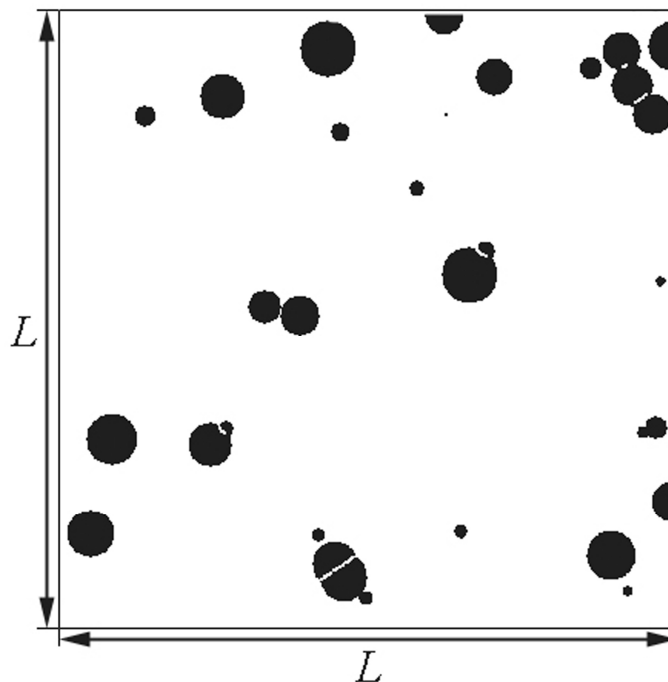


Рис. 1. Модельна схема

6. Час повного перекриття порою контактного з'єднання кінцевих розмірів набуває *випадкових значень*. Ми хочемо оцінити середній час до відмови (MTTF) і побудувати розподіл значень TMF.

Аналіз розмірностей

Використовуючи три вище згадані фізичні параметра V [m/s], ν [1/m²s] і L (m), ми можемо ввести безрозмірний параметр:

$$G = \frac{V}{vL^3} \quad (1)$$

Ми вважаємо, що виключно параметр G визначає статистику відмов (розподіл ймовірностей для приведеного часу, який рівний відношенню реального часу до МТТФ). Завдяки існуванню безрозмірної комбінації трьох параметрів, ми можемо ввести вирази для характеристичного часу, довжини та швидкості різними шляхами. Наприклад:

$$t_0 = \frac{1}{vL^2}, l_0 = L, V_0 = vL^3, \quad (2)$$

де $t_0 = \frac{1}{vL^2}$ – середній час між успішними подіями нуклеації в усій області контактного з'єднання. Тоді безрозмірні час, довжину і швидкість можна представити як:

$$tt = \frac{t}{t_0} = vL^2 t, ll = \frac{l}{l_0}, VV = \frac{V}{V_0} = \frac{V}{vL^3} \equiv G \quad (3)$$

Вирази для розмірних величин мають наступний вигляд :

$$t_1 = \left(\frac{1}{vV^2} \right)^{1/3}, l_1 = Vt_1 = \left(\frac{V}{v} \right)^{1/3}, V_1 = V$$

Тут $t_1 = \left(\frac{1}{vV^2} \right)^{1/3}$ – приблизний час покриття порою всієї площі поперечного перерізу.

Ми можемо передбачити, що МТТФ повинен бути пропорційний до величини *характеристичного часу*:

$$MTTF = zt_1 = z \left(\frac{1}{vV^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Ми використовуємо набір безрозмірних характеристичних параметрів (р-ня (3)), так як в комп'ютерному експерименті більш зручно використовувати один і той самий безрозмірний розмір зразка (в нашому випадку – квадрат 1×1) і змінювати значення безрозмірної швидкості.

Основний алгоритм

1. Ми розглядаємо квадратний зразок, з ребром $ll = 1$.
2. Ми ділимо горизонтальну і вертикальну вісі на N інтервалів.
3. Кожна одинична комірка площею може знаходитися в «старому» і «новому» стані.
4. На кожному кроці по часу ми повинні розглядати всі елементи, які досі знаходяться в «старому» стані і «намагатися» перетворювати їх в «новий» стан. Імовірність перетворення однієї комірки за один крок по часу рівна $dp = vdx dy dt \equiv \frac{dx}{L} \frac{dy}{L} d(vL^2 t) = dx \cdot dy \cdot dt = \frac{dt}{N^2}$. Тому, в кожному момент часу, для кожної ще не перетвореної комірки ми генеруємо випадкове число $rand$ з інтервалу $(0,1)$. Якщо $rand < dp$, то дана комірка змінить свій стан і момент часу перетворення

записується в пам'ять як $tt(i,j)$, в іншому випадку комірка залишиться в «старому» стані.

5. У випадку успішного зародкоутворення, комірка (i,j) в певний момент часу $tt(i,j)$ стає центром круга перетворень, який розширюється зі швидкістю G , тож в будь-який наступний момент часу, будь-яка комірка в крузі радіуса $G \times (tt - tt(i,j))$ з центром в комірці (i,j) неодмінно переходить в «новий» стан.

6. Момент часу, в який всі комірки поля перейшли в «новий» стан, записується в пам'ять як $TTF(k;G)$, де k є номером запуску програми. Після запуску тієї ж програми з тою самою безрозмірною швидкістю M разів ($1 < k < M$), ми отримуємо масив значень TTF , який повинен бути статистично оброблений за допомогою стандартних процедур для отримання розподілу ймовірностей, кумулятивного розподілу ймовірностей і $MTTF$ при заданому G .

7. Ми змінюємо G у межах ($0.1 < G < 5$) і знаходимо залежності безрозмірних параметрів кумулятивного розподілу Вейбулла a , b від G .

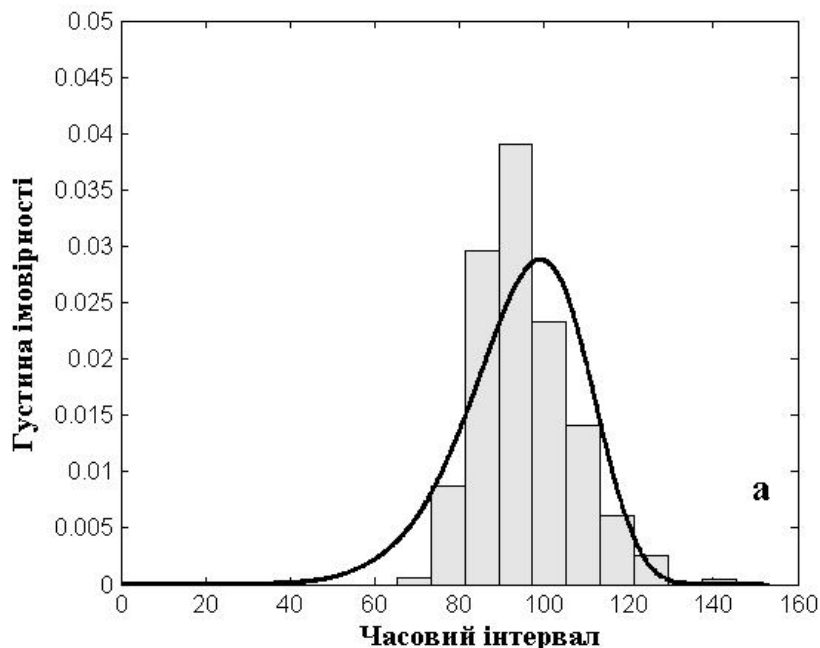
$$F(tt) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{tt}{a}\right)^b\right), \quad \begin{aligned} a &= a(G = VV), \\ b &= b(G = VV). \end{aligned} \quad (5a)$$

8. Наприкінці, ми повертаємось до розподілу Вейбулла у реальній (в секундах) розмірності TMF:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right), \quad \beta = b, \quad \eta = a \cdot t_0 = \frac{a}{vL^2}. \quad (5б)$$

Результати і обговорення

Типові розподіл безрозмірних значень TMF і кумулятивний розподіл для одного набору параметрів зображені на Рис. 2(а,б).



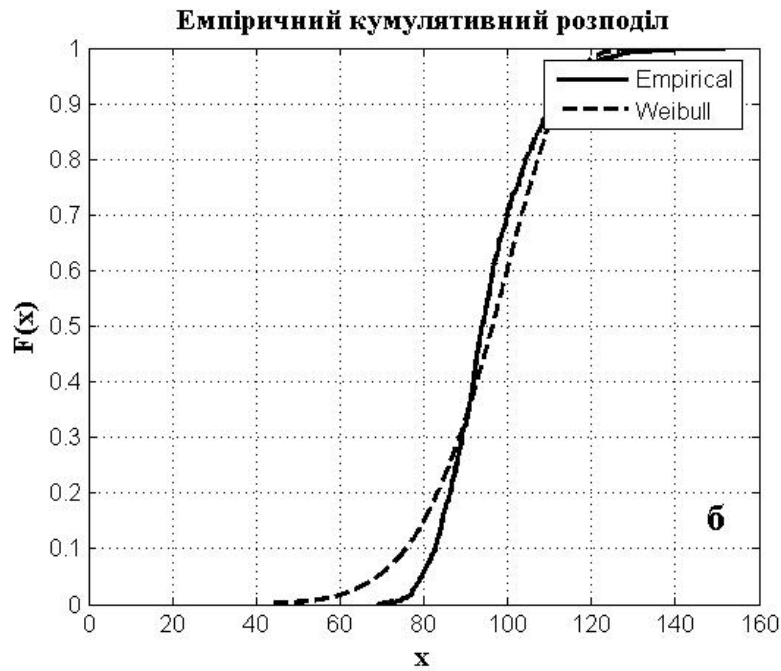


Рис. 2. Наближення розкиду значень ТМФ (часу до математичної відмови):
 а) нормальним розподілом Вейбула; б) кумулятивним розподілом Вейбулла.
 Параметри: $VV = G = 1, dt = 1, dx = dy = 1/300$

Залежності параметрів a, b як функції від безрозмірного параметру G зображені на Рис. 3.

В безрозмірній шкалі, залежність параметру Вейбулла a від G добре наближується степеневою залежністю (крива 1 на рис. 2а):

$$a \cong \frac{105}{VV^{2/3}} = 105 \cdot \left(\frac{vL^3}{V} \right)^{2/3}. \quad (6)$$

Параметр форми b є більш чутливим до статистики. Для випадку наборів з 1000 значень ТМФ для кожного значення параметру G , найкращим наближенням є (крива 1 на рис. 2б):

$$b \approx 9.3 \cdot (1 + G)^{-1/6}. \quad (7)$$

При поверненні до значень часу в секундах, ми отримуємо звичайний розподіл Вейбулла $F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right)$ з наступними параметрами:

$$\eta = a \frac{1}{vL^2} \cong 105 \cdot \left(\frac{vL^3}{V} \right)^{2/3} \frac{1}{vL^2} = \frac{105}{(vV^2)}, \quad \beta = b \approx 9.3 \cdot (1 + G)^{-1/6}. \quad (8)$$

При $G \gg 1$ ми отримуємо досить просту параболічну залежність для параметру форми:

$$\beta \approx 9.3 \cdot G^{1/6} = 9.3 \sqrt[6]{L \left(\frac{v}{V} \right)^{1/3}}. \quad (9)$$

Якщо вважати, що математична відмова відбувається не при 100% перекриття порою площі поперечного перерізу, а при 90% і 80%, то можна отримати наступні результати для параметрів розподілу Вейбулла в звичайних розмірностях (див. Рис. 2, криві 2 і 3 відповідно):

$$\eta = \frac{z}{(vV^2)}, \quad z(90\%) \approx 63, \quad z(80\%) \approx 55,$$

$$\beta \approx Q\left(\frac{v}{V}\right)^{m/3} \cdot L^m, \quad Q(90\%) \approx Q(80\%) \approx 12, \quad m(90\%) \approx m(80\%) \approx 1.$$

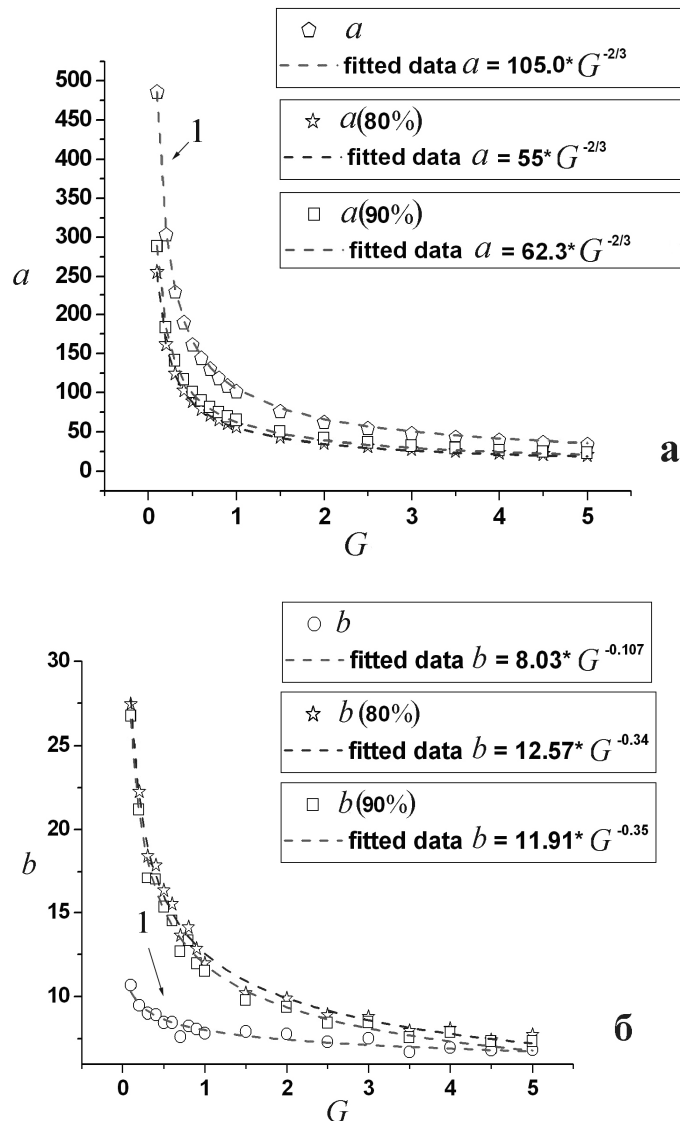


Рис. 3. Залежність параметру a та b (рисунки а і б відповідно) розподілу Вейбулла для безрозмірного ТМФ від безрозмірного параметру $G \equiv VV = \frac{V}{vL^3}$ при різних критеріях математичної відмови: крива 1 відповідає 100% перекриття порою поперечного перерізу припоного з'єднання, крива 2 – 90% і крива 3 – 80%.

Висновки

Як видно, при зміні критерію відмови значення параметрів апроксимуючих функцій суттєво змінюються. Тому потрібно дослідити фізичні причини цього явища в майбутньому і визначити єдиний критерій математичної відмови. Незалежно від того, який критерій математичної відмови ми обираємо, можна зробити наступні загальні висновки:

1) Середній час математичної відмови (МТТФ) практично не залежить від розміру контактного з'єднання, за умови незмінної густини струму (а значить, частоти зародкоутворення і швидкості розростання пор) ;

2) На відміну від МТТФ, ширина розподілу часів до відмови (ТТФ) *росте* зі зменшенням розміру припойного з'єднання (зростаючий параметр $\frac{vL^3}{V}$) – (величина параметру форми зменшується) . Це без сумніву означає, що при малих розмірах контактного з'єднання, небезпека *ранньої* відмови стає більш реальною.

Подяки

Робота виконана під керівництвом та у співробітництві з проф. Гусаком А.М.

Робота підтримана Державним фондом фундаментальних досліджень України (проект № Ф40.7/040) та Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України.

Література

1. Orio R. L., Ceric H., Cervenka J., Selberherr S. The Effect of Copper Grain Size Statistics on the Electromigration Lifetime Distribution // International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices. – 2009 – P. 1-4.
2. Yeh E. C. C., Choi W.J., Tu K.N., Elenius P., Balkan H. Current-crowding-induced electromigration failure in flip chip solder joints // Appl. Phys. Lett. – 2011– V.99 – P. 082114.
3. Choi W.J., Yeh E.C.C., Tu K.N. Mean-time-to-failure study of flip chip solder joints on Cu/Ni(V)/Al thin-film under-bump-metallization // J. Appl. Phys. – 2003 – V.94, №9 – P. 5665-5671.
4. Tian Tian, Xu F., Han J. K., Choi D., Cheng Y., Helfen L., Michiel M., Baumbach T., Tu K. N. Rapid diagnosis of electromigration induced failure time of Pb-free flip chip solder joints by high resolution synchrotron radiation laminography // Appl. Phys. Lett. – 2011 – V.99 – P. 082114.
5. Kolmogorov A.N. On the statistical theory of the crystallization of metals // Izv. Akad. Nauk, Ser. Math. – 1937 – V.3 – P. 355.
6. Avrami M. Transformation-time relations for random distribution of nuclei // J. Chem. Phys. – 1940 – V.8 – P. 212.

Аннотация. *А.Ю. Ляшенко. Размерный эффект в распределении времен до отказа припойных соединений.* Надежность микросхем является одной из ключевых проблем микроэлектронной индустрии. Микроэлектронные устройства должны отвечать двум важным критериям: в среднем работать на протяжении достаточно долгого времени и иметь узкое распределение времен до отказа. В этой работе исследуется статистика отказов ансамбля припойных соединений. Благодаря использованию простой математической модели показано, что среднее время до отказа, при фиксированной плотности тока, не зависит от размера припойного соединения, но при этом ширина распределения времен до отказа растет с уменьшением размера припойного соединения. Это означает, что с уменьшением размеров припойного соединения вероятность раннего отказа будет увеличиваться.

Ключевые слова: надежность микросхем, статистика сбоев, распределение Вейбулла, Монте-Карло моделирование

Summary. *O.Yu. Liashenko. Size effect on time to failure distribution for solder joints.* Reliability is one of the key issues in microelectronic industry. At that assembly of microelectronic devices should meet two important criterions: operate for a reasonable long time in average and to have thin time to failure distribution. Failure of solder contacts ensemble is considered. On the basis of simple mathematical model it is shown that mean time to failure, at fixed current density, doesn't depend on the solder contact size. On contrary, the width of the time to failure distribution increases with decreasing size of the solder contact. It means that the smaller is the solder contact the earlier it should fail statistically.

Keywords: Microscheme reliability, failure statistics, Weibull distribution, Monte-Carlo modeling

Одержано редакцією 25/09/2012

Прийнято до друку 23/10/2012