

## АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ МОДЕЛЕЙ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

В статті наведено аналіз теплових моделей для дослідження процесів деградації напівпровідникових структур (НС), які дозволяють кількісно оцінити реакцію об'єкту контролю (ОК) на вплив перевіркової тестової послідовності (ТП) при наявності ділянок деградації якості напівпровідникової структури. Спираючись на високий ступінь інтеграції напівпровідників в сучасних виробках та пов'язану з цим низьку ремонтпридатність розглядається два завдання технічної діагностики, а саме: визначення технічного стану (ТС) та прогнозування ТС. Показані основні способи опису теплової нестационарності в напівпровіднику при імпульсному нагріванні в залежності від параметрів зовнішнього впливу. Крім того, наведено огляд необхідності врахування залежності теплофізичних властивостей напівпровідника при моделюванні теплових полів та обґрунтовано необхідність використання експериментального методу при вирішенні визначених завдань технічної діагностики. Через вплив експлуатаційних факторів у структурі напівпровідникових компонентів відбуваються фізико-хімічні процеси, які змінюють їхні властивості. Концентрація проникаючих у матеріали речовин і рівень енергетичних впливів в свою чергу залежать від якості захисту елемента від впливу зовнішніх і внутрішніх експлуатаційних факторів. Більшість процесів є термічно активованими. Тому теплова енергія відіграє визначальну роль у розвитку деградаційних процесів у радіоелектронних компонентах [1].

Серед існуючих методів перевага надається методам натурних досліджень. При проведенні експерименту напівпровідникові пристрої працюють в умовах більш високих навантажень. Результати, отримані при підвищених навантаженнях, екстраполюють на звичайні умови експлуатації. Експерименти вказують на можливість деградацію характеристик складної напівпровідникової структури приладу до досягнення нею температур плавлення матеріалів. Істотні розбіжності між розрахунковими і експериментальними даними, особливо при досягненні напівпровідниковими структурами високих температур, пов'язані з труднощами обліку всіх факторів, що впливають на поширення теплоти в напівпровідниковому кристалі. Необхідність розрахунку (врахування) значень цих факторів є вагомим аргументом для обґрунтування необхідності використання саме експериментального методу при вирішенні завдань технічної діагностики.

**Ключові слова:** напівпровідникова структура, теплові моделі.

**Кузавков В., Романенко М. Анализ тепловых моделей для исследования деградации полупроводниковых структур.** В статье приведен анализ тепловых моделей для исследования процессов деградации полупроводниковых структур (ПС), которые позволяют количественно оценить реакцию объекта контроля (ОК) на воздействие проверочной тестовой последовательности (ТП) при наличии участков деградации качества полупроводниковой структуры. Опираясь на высокую степень интеграции полупроводников в современных изделиях и связанную с этим низкую ремонтпригодность, рассматривается две задачи технической диагностики, а именно: определение технического состояния (ТС) и прогнозирования ТС. Показаны основные способы описания тепловой нестационарности в полупроводнике при импульсном нагреве в зависимости от параметров внешнего воздействия. Кроме того, приведен обзор необходимости учета зависимости теплофизических свойств полупроводника при моделировании тепловых полей и обоснована необходимость использования экспериментального метода при решении определенных задач технической диагностики. Из-за влияния эксплуатационных факторов в структуре полупроводниковых компонентов происходят физико-химические процессы, которые изменяют свойства. Концентрация проникающих в материалы веществ и уровень энергетических воздействий в свою очередь зависят от качества защиты элемента от воздействия внешних и внутренних эксплуатационных факторов. Большинство процессов является термически активированными. Поэтому тепловая энергия играет определяющую роль в развитии деградационных процессов в радиоэлектронных компонентах [1].

Среди существующих методов предпочтение представляется методам натурных исследований. При проведении эксперимента полупроводниковые устройства работают в условиях более высоких нагрузок. Результаты, полученные при повышенных нагрузках, экстраполируют на обычные условия эксплуатации. Эксперименты указывают на возможную деградацию характеристик сложной полупроводниковой структуры прибора до достижения им температур плавления. Существенные расхождения между расчетными и экспериментальными данными, особенно при достижении полупроводниковой структурой высоких температур, связанные с трудностями учета всех факторов, влияющих на распространение теплоты в полупроводниковом кристалле. Необходимость расчета (учета) значений этих факторов является весомым аргументом для обоснования необходимости использования именно экспериментального метода при решении задач технической диагностики.

**Ключевые слова:** полупроводниковая структура, тепловые модели.

*Kuzavkov V., Romanenko M. Analysis of thermal models for the degradation study of semiconductor structures. The article analyzes thermal models for the study of the degradation of semiconductor structures (SS), which allow us to estimate approximately the degree of reaction of an object of control (OC) on the influence of the test sequence (TS) in the presence of sections of degradation of semiconductor structures. Based on the high degree of integration of semiconductors in modern products and the associated low maintainability, two tasks of technical diagnostics are considered, namely: determination of technical condition (TS) and forecasting of TS. The basic methods of describing thermal nonstationarity are shown in a semiconductor with pulse heating, depending on the parameters of external influence. In addition, there is an overview of the necessity of taking into account the temperature dependence of the thermophysical properties of a semiconductor in the modeling of thermal fields; as well as the necessity of using the experimental method in solving these mentioned problems of technical diagnostics. Through influence of operational factors, different physical and chemical processes occur in the structures of the radio components, which change their properties. The concentration of substances penetrating into the materials and the level of energy influences depend on the quality of protection of the element from the influence of external and internal operational factors. Most processes are thermally activated. Therefore, thermal energy plays a decisive role in the development of degradation processes in the radio-electronic components [1].*

*Within existed methods, the method of full-scale research is preferred. When conducting experiments, semiconductor devices operate under higher loads (than during normal operation). The results obtained at high loads are extrapolated to normal operating conditions. The experiments indicate a possible degradation of the characteristics of the complex semiconductor structure of the device until it reaches the melting point of the materials. There are significant differences between the calculated and the experimental data, especially when the semiconductor structures reach a high temperature, which is associated with the difficulties of accounting for all factors affecting the propagation of heat in a semiconductor crystal. The need to calculate (take into account) the values of these factors is a strong argument to justify the need to use the experimental method in solving problems of technical diagnostics.*

**Keywords:** semiconductor structure, thermal models.

#### **Постановка завдання.**

Технічна діагностика складних напівпровідникових структур (напівпровідникових радіоелектронних компонентів (РЕК)) вирішує завдання визначення технічного стану, локалізації несправності та прогнозування ТС. З огляду на високий ступінь інтеграції напівпровідників в сучасних виробках та пов'язану з цим низьку ремонтпридатність завдання локалізації несправності відходить на другий план (ремонт виробу або неможливий в конкретних умовах, або недоцільний). Таким чином, для обслуговуючого персоналу варті уваги два з перерахованих завдань технічної діагностики (визначення ТС та прогнозування ТС на певний термін). Загальний підхід до прогнозування – визначення остаточного ресурсу виробу, не втрачає своєї актуальності але потребує перегляду для зразків, які залучаються для виконання завдань на чергуваннях. Слід зазначити, що повноцінну інформацію про ТС ОК можливо отримати лише під час проведення планового контролю, коли об'єкт не використовується за призначенням, а всі ресурси (в тому числі і обчислювальні) задіяні для отримання та обробки діагностичної інформації. Для таких зразків радіоелектронного устаткування актуальною є відповідь на запитання: з якою вірогідністю збережеться працездатний стан ОК протягом періоду чергування (протягом періоду до наступної перевірки).

Для визначення технічного стану ОК запропоновано використовувати метод власного випромінювання [2], а в якості діагностичного параметру – параметри фізичного прояву ДП – параметри інфрачервоного поля РЕК при впливі перевіркової тестової послідовності. Застосування запропонованого методу передбачає наявність діагностичної моделі ОК – моделі розрахунку параметрів ІЧ поля від напівпровідникової структури. Існує низка робіт присвячених математичному опису процесів, які відбуваються в напівпровідникових структурах цифрових РЕК. Аналіз існуючих способів (методів) опису процесів в напівпровідникових структурах при зовнішньому впливі (аналітичні вирази для чисельного визначення значень діагностичного параметру) є актуальною задачею для технічної діагностики складних напівпровідникових структур.

**Аналіз останніх публікацій.** У роботах [2, 3] показано, що застосування методу власного випромінювання (діагностичний параметр – інтенсивність власного випромінювання) та спеціально підготовленої перевіркової тестової послідовності на вході досліджуваної напівпровідникової структури можуть бути використані для вирішення

зазначених завдань технічної діагностики. Однак, ефективність методу залежить від адекватності застосованих моделей.

В якості основної причини відмов напівпровідникової структури в процесі функціонування складних напівпровідникових РЕК розглядаються фізико-хімічні процеси виникнення мікрооб'ємів електролітів і пов'язана з цим зміна концентрації основних носіїв. Ділянка (обсяг) деградуєючої структури змінює свої властивості (та відповідно технічні параметри всього пристрою) протягом деякого часу. Визначити наявність в структурі ділянок зі зміненими параметрами а також ступінь цих змін – деградацію напівпровідникової структури (до явного прояву відмови і виходу пристрою з ладу) можливо виключно за непрямими ознаками, зокрема за температурою кристала (поверхні радіоелектронного компонента) [4].

В результаті аномальних теплових процесів, які відбуваються в об'ємі кристала, можуть спостерігатися явні і приховані теплові пробої *p-n* переходів, вигорання окремих ділянок напівпровідника, обрив металізації, пробій тонких шарів діелектриків і т.д. У вихідних характеристиках ці процеси виражаються зазвичай або в повній непрацездатності приладу (безповоротна відмова), або в тимчасовому виході параметрів за встановлені межі (параметрична відмова). Величина нагріву кристала НС визначається параметрами зовнішнього впливу (енергії та тривалості роботи НП), і властивостями напівпровідникового кристала (тип матеріалу, його фізико-хімічні параметри і т.п.).

Прогнозування технічного стану складної НС засноване на інформації про тренд зміни фізичного прояву ДП – параметрів поля власного випромінювання в інфрачервоному діапазоні. Зазначений тренд отримується на підставі аналітичних розрахунків – математичних моделей, або за результатами натурних досліджень. За фізичною сутністю, концентрацію основних носіїв (пряму діагностичну ознаку деградації напівпровідника) виміряти доволі складно.

Залежно від вибору вихідних параметрів для прогнозування деградації НС на практиці використовується кілька видів моделей: теплові, електротермічні, електричні, іонізаційно-домішкові, статистичні та ін. [5]. Всі вони мають свої переваги, недоліки та сферу застосування. Особливу увагу приділяється параметрам зміни струму через напівпровідник та лінійно пов'язані з ним параметри ІЧ поля.

**Мета статті** проведення аналізу існуючих теплових моделей визначення ділянок деградації якості напівпровідникових структур та обґрунтування необхідності використання саме експериментального методу при вирішенні завдань технічного діагностування (враховуючи зовнішні і внутрішні теплофізичні властивості кристала).

**Виклад основного матеріалу.** Для моделювання реакції напівпровідникової структури на ТП найбільш часто використовують теплові, термоелектричні і електричні моделі. Не завжди можна однозначно віднести моделі до певного класу, оскільки при розрахунках можуть поєднуватися принципи і критерії, які використовуються для моделей різних класів. Для прогнозування теплових пробіїв найчастіше застосовують теплові і термоелектричні моделі.

Термоелектричні моделі розглядають вплив струму, який протікає через НС, наведені напруги і температури на вихідні характеристики приладу (пов'язують параметри сигналів на вході і виході РЕК). Ці моделі рідко описують теплову нестаціонарність в кристалі, а більше розглядають вплив потужності, яка змінюється при зміні електрофізичних властивостей напівпровідникового кристалу [6].

Теплові моделі отримали більш широке застосування внаслідок гнучкості опису теплових процесів, що відбуваються для різних граничних умов [7]. Вони рідко враховують значення електричних характеристик або ці характеристики не грають в них ролі інформативних параметрів. Основне завдання теплової моделі – знайти розподіл температурного поля при наявності теплового джерела (імпульсного джерела нагріву). Виходячи зі значень одержуваних критичних температур визначається робоча область збереження працездатності НС при імпульсному нагріванні. З точки зору безповоротності

відмов у використовуваних теплових моделях будь-який термічний процес деградації (вигорання металізації, пробій  $p$ - $n$  переходу, відшарування контактів, пошкодження шарів напівпровідника) приймається за тепловий пробій.

Кожна група моделей має межі свого застосування: одні більше орієнтовані на відмови металізації, інші – на пробій  $p$ - $n$  переходів. Для прогнозування відмов металізації і контактів НС на практиці часто застосовують адаптовані моделі електроміграції. В якості основної причини відмов  $p$ - $n$  переходу в моделях, які використовуються розглядається його вторинний пробій.

Розподіл теплоти в напівпровідниковому кристалі при впливі НС носить неоднорідний характер, і його точний опис – надзвичайно важке завдання. На практиці для цих цілей часто використовують спрощені рівняння теплового потоку для різних типів джерел, а також рішення диференціальних рівнянь теплопровідності за допомогою імовірнісних функцій. Однак, при моделюванні термічних процесів слід враховувати ряд факторів, від впливу яких залежить максимальне значення температур.

Поширення теплоти від точкового джерела (ділянки деградації НП структури) для нескінченного тіла у загальному випадку можна описати за допомогою функцій Гріна [8]. Для миттєвої оцінки значення температури  $T$  в довільній точці однорідного кристала при точковому джерелі використовується вираз:

$$T = \frac{P_0}{8\chi t} \exp\left(\frac{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}}{4\chi t}\right), \quad (1)$$

де  $P_0$  – потужність джерела;  $t$  – поточний час дії джерела;  $x, y, z$  координати точки дії джерела;  $x', y', z'$  – координати точки в даній області;  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності.

З виразу (1) видно, що поширення теплоти описується еліпсом з джерелом в центрі. Оскільки не враховується нерівномірність розповсюдження теплоти в різних напрямках через аморфність теплофізичних властивостей напівпровідника, а також розміри джерела і його параметри такий розрахунок носить оцінний характер [9].

Прояв температурних ефектів при впливі ТП можливо описати якщо ввести умовне теплове джерело з імпульсною потужністю. В даному випадку теплове джерело являє собою зосереджену область основного переходу надлишкової потужності в теплову енергію кристала. При математичному описі процесу локалізації тепла в «збіднілій» області переходу використовуються перетворення Фур'є і Лапласа.

Одновимірний аналіз рівняння теплопровідності для плоского джерела (розміри джерела дорівнюють розмірам дефекту) має вираз (2) [10]:

$$P_f = \pi K \rho C_p \frac{1}{2} S_{pn} (C - T_0) t_f^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де  $t_f$  – час до відмови для імпульсу, змінюється в часі;  $K$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\rho$  – щільність матеріалу кристала;  $C_p$  – теплоємність напівпровідника;  $S_{pn}$  – площа  $p$ - $n$  переходу;  $T_0$  – температура навколишнього середовища.

Завдяки цій моделі було показано, що тепло слабо поширюється від точки перегріву протягом дії  $\tau_i$  менше  $10^{-3}$  с, в результаті чого виникає великий градієнт температури. У цій моделі при зворотному зміщенні  $p$ - $n$  переходу дефектна галузь повинна займати частину площі переходу (близько 10%). Тоді ширина «збіднілої» області стає рівною нулю, і ефективна площа  $p$ - $n$  переходу  $S_{pn} = axb$  прямує до нескінченності [11]. Д. Ванш та Р. Белл припустили, що тепло, що генерується джерелом, піднімає температуру до деякої критичної величини  $T_C$ , при якій і відбувається локальний тепловий пробій. Цією величиною може бути будь-яка критична температура, яка відноситься до своїх властивостей напівпровідникового матеріалу. З виразу (2) видно, що співвідношення між енергією, що розсіюється і часом до відмови НС залежить від геометрії дефекту.

У моделі [10] автори представили дефектний регіон перегріву в формі довгого циліндра висотою  $a$  і діаметром  $b$ . Тоді, для часу відмови порядку декількох мікросекунд отримуємо наступний вираз:

$$P_f = \frac{\pi K a (T_c - T_0)}{\left[ \log_e \left( \frac{t_f 4\pi D}{b^2} \right) + \log_e \left( \frac{4}{\pi} \right) \right]}, \quad (3)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії.

Зазначене співвідношення виконується за умови, що пробій відбувається тільки після досягнення певної критичної температури, близької до температури плавлення, що не завжди підтверджується експериментальними даними.

Основну складність в наведених моделях становить визначення розмірів дефекту.

Моделі, які поєднують перетворення Фур'є і Лапласа з використанням функції Гріна, дозволяють отримати висновок, що розподіл тепла в напівпровідниковому приладі доцільно розділити на кілька часових інтервалів, причому в кожному з них визначити свій закон розподілу температури – моделі нагріву для різних часових інтервалів. Облік довільної форми імпульсу в таких моделях вносить певну складність в процес моделювання, але дозволяє отримати формули та результати, найбільш наближені до реальних умов. Форма дефекту в цьому випадку представляється у вигляді прямокутного паралелепіпеда з довжиною сторін  $a, b, c$ . При  $r \rightarrow 0$  температура в центрі дефектної області має вид:

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \frac{P_0}{\rho C_p \Delta} \int_0^t \operatorname{erf} \left( \frac{a}{4\sqrt{D\tau}} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{b}{4\sqrt{D\tau}} \right) \operatorname{erf} \left( \frac{c}{4\sqrt{D\tau}} \right) dt, \quad (5)$$

Аналіз вищенаведених виразів дозволяє встановити зв'язок розмірів дефектної області в напівпровіднику з енергією впливу, теплофізичними параметрами напівпровідникового матеріалу і формою виробу в цілому.

Можливим способом оцінки локального перегріву НС є так звані локальні чисельні методи. Напівпровідниковий кристал розбивається на окремі області в залежності від топології НС та за допомогою функції Гріна розраховується максимально можливий нагрів в кожній області [13]. Підсумовуючи значення температури в областях, можна отримати розподіл нагріву всього кристала. Вочевидь, точність даного методу визначається складністю топології і, як наслідок, кількістю ділення НС на галузі. При цьому виникає ряд значних припущень, при яких всі джерела в галузях розглядаються як точкові. Метод поділу дозволяє отримати наочний розподіл температури по кристалу, особливо цікавий випадок, коли відома технологічна структура розташування функціональних елементів на підкладці напівпровідникової схеми.

Аналітичні методи з використанням перетворень Фур'є і Лапласа дозволяють визначити значення критичних температур НС з невеликими похибками і широко використовуються на практиці для моделювання роботи НС при термічних імпульсних перевантаженнях. Вони найбільш оптимально враховують реальні умови теплопереносу в напівпровідниковому кристалі. Використовуючи кратне перетворення Фур'є за координатами і перетворення Лапласа за часом, отримано значення температури в певній точці кристала з тепловідводом при імпульсному нагріванні [10]:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos \left( \frac{m\pi}{L_x} x \right) \cos \left( \frac{n\pi}{L_y} y \right) \left( \sum R_{mn}^{(i)} \exp(S_i \cdot t) \right), \quad (6)$$

де  $L_x, L_y$  – розміри кристала;  $R_{mn}$  – величина, залежна від потужності джерела і теплофізичних характеристик напівпровідника;  $S_i$  – полюса дії нестационарних температур  $m \neq n$  – цілі числа.

З моделювання розподілу теплоти за допомогою (6) можливо зробити висновок, що перепад температур в напівпровідниковому приладі в значній мірі визначається товщиною як

самого напівпровідника, так і тепловідведення. Обмеженнями для розглянутих моделей виступає тривалість імпульсу впливу (не менше  $10^{-3} - 10^{-4}$  с) і складність опису топології НС.

При використанні даної методики отримані результати, що вказують на виникнення більшого градієнта температури в обсязі напівпровідника (по осі  $OZ$ ) в порівнянні з градієнтом на його поверхні. Наприклад, результати двовимірного моделювання окремо для кожної пари координатних осей (для дифузійних вертикальних МОН-транзисторів) показали, що розподіл температури в кристалі і тепловідводі приблизно однакові за формою. Порівняння характеристик теплових градієнтів в підкладці і тепловідводі вказує, що тепловий перепад в підкладці набагато більший, ніж в тепловідводі, незважаючи на забезпечення тісного контакту між частинами системи.

Для визначення критичних температур в НС можливо використовувати адаптовані моделі, що застосовуються для теплового розрахунку приладів, які розсіюють велику потужність [10]. Однак застосування цих методик не дозволяє розрахувати розподіл градієнта температури, так як використовувані моделі отримані в основному для стаціонарних режимів. Однак вони дозволяють оцінити нагрів самого  $p-n$  переходу в початковий момент впливу тестових імпульсів, коли теплова нестационарність виражена більш явно і небезпечна для виникнення теплових пробойів.

До окремої групи можна віднести теплові моделі, в яких більшість параметрів необхідно знаходити експериментально. Як правило, такі моделі побудовані на знаходженні енергії активації процесу деградації і використанні рівняння Ареніуса [14]. Через вплив експлуатаційних факторів у матеріалах елементів відбуваються різні фізико-хімічні процеси, що змінюють їхні властивості: дифузійні процеси в об'ємі та на поверхні; переміщення та скупчення точкових дефектів і дислокацій у твердих тілах; флуктуаційні розриви міжатомних зв'язків у металах і сплавах; розрив хімічних зв'язків ланцюгів макромолекул полімерних матеріалів; електролітичні процеси; дія поверхнево-активних речовин; структурні перетворення в сплавах та ін. Швидкість і характер здійснення цих процесів для напівпровідників визначається концентрацією основних носіїв і домішок у матеріалах, а також рівнями енергетичних впливів на радіоелектронні компоненти.

Концентрація проникаючих у матеріали речовин і рівень енергетичних впливів залежать від якості захисту елемента від впливу зовнішніх і внутрішніх експлуатаційних факторів. Зростання інтенсивності їхнього впливу на елемент збільшує швидкість здійснення фізико-хімічних процесів, у результаті чого виникають оборотні й необоротні зміни в матеріалах. Виникнення різних фізико-хімічних процесів у напівпровідниках і швидкість їх протікання обумовлені типом енергії, яка на них впливає: тепловий, електричний, хімічний та типи пов'язані з перетворенням одного виду енергії в інший. Більшість процесів є термічно активованими процесами.

При проведенні експерименту напівпровідникові пристрої працюють в умовах більш високих навантажень, чим при звичайній експлуатації. Результати, отримані при підвищених навантаженнях, екстраполюють на звичайні умови експлуатації [15,16].

Відомі моделі спираються не на один конкретний фізичний механізм виникнення відмов, а дозволяють врахувати ефект спільного впливу декількох різних механізмів.

Час випробувань значно скорочується (відносно реальних умов функціонування), значення коефіцієнта прискорення  $K_n$  буде перелічено в очікуваний час безвідмовної роботи компонента  $t$  за допомогою наступного виразу:

$$t = K_n \times t_{stres}, \quad (10)$$

де  $T$  – температура кристалу [K];  $K_n$  – коефіцієнт прискорення;  $T_{stres}$  – температура випробування [K];  $\Delta E$  – енергія активації – параметр, який використовують для визначення ступеня прискорення, пов'язаного з температурою; де  $K_n^T$  – коефіцієнт прискорення за

температурою;  $K_n^U$  – коефіцієнт прискорення за напругою;  $U$  – робоча напруга [В];  $U_{stres}$  – напруга при випробуваннях [В]; де:  $k$  – постійна Больцмана ( $8,62 \times 10^{-5}$  еВ/К).

Модель Ареніуса характеризується коефіцієнтом прискорення  $K_n^T$  при прискорених випробуваннях в умовах підвищеної зовнішньої температури  $T_{stres}$ . Дані, отримані з використанням цієї моделі, переводять на температуру звичайного режиму експлуатації  $T$ , використовуючи залежність:

$$t = K_n^T \times t_{stres}, \quad (11)$$

де  $K_n^T$  – коефіцієнт прискорення, знаходиться за виразом:

$$K_n^T = \exp \frac{\Delta E}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{stres}} \right), \quad (12)$$

Звичайно, фактор прискорення при температурі  $55^\circ\text{C}$  приймається рівним одиниці. Одержувані при  $125^\circ\text{C}$  фактори прискорення змінюються від 1 до  $10^4$  залежно від зміни енергії активації. Невелика зміна енергії активації викликає істотну зміну коефіцієнту прискорення  $K_n^T$ .

Термічна та електрична напруга (модель Ейрінга) – модель комбінованих випробувань, де додатковим фактором (додатковим до температури), що активує, є підвищена робоча напруга (для визначення ефекту «пробою» оксидного шару напівпровідникової МОН-структури). Введення емпіричного коефіцієнта  $B$  дозволяє врахувати товщину оксидного шару. У випадку комбінованих випробувань, загальний коефіцієнт прискорення  $K_n^{T,U}$  знаходиться з виразу [14]:

$$K_n^{T,U} = K_n^T K_n^U = \exp \frac{\Delta E}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{stres}} \right) \times \exp B \left( U_{stres} - U \right), \quad (13)$$

Аналіз режимів роботи цифрового об'єкту контролю та експлуатаційних параметрів РЕК показав можливість введення в модель випробувань коефіцієнта прискорення при підвищеному омичному навантаженні  $K_n^R$  та коефіцієнта прискорення при підвищеній частоті вхідного сигналу  $K_n^f$ . Введення в комплексні форсовані випробування додаткових факторів дозволило охопити період безвідмовної роботи  $(10^7 - 10^8)$  год. за час випробувань  $10^3$  год.

**Висновки.** Розглянуті моделі (моделі умовного теплового джерела, моделі нагріву для різних часових інтервалів, чисельні моделі, аналітичні моделі рішення рівняння теплопровідності) дозволяють приблизно оцінити ступінь реакції об'єкту контролю (зміна значень діагностичного параметра) на тестовий вплив при наявності ділянок (областей) деградації напівпровідникових структур. Незважаючи на різноманітність моделей, є істотні розбіжності між розрахунковими і експериментальними даними, особливо при досягненні НС високих температур. Це пов'язано з труднощами обліку всіх факторів, що впливають на поширення теплоти в напівпровідниковому кристалі, і необхідністю розрахунку їх значень в залежності від температури. У всіх моделях використовується істотне припущення, що такі характеристики матеріалу, як теплопровідність, щільність і теплоємність, що не залежать від температури – це є однією з можливих причин неузгодженості між експериментальними та теоретичними даними [18].

Облік залежності теплофізичних параметрів напівпровідника від температури дозволяє більш точно моделювати процеси теплової нестационарності при вирішенні завдань технічної діагностики.

Експерименти вказують на можливу деградацію характеристик складної напівпровідникової структури приладу до досягнення нею температур плавлення матеріалів. Отже, моделі енергії активації та методи засновані на їхньому використанні надають більш

повну інформацію про стан об'єкту дослідження оскільки враховують вплив більшості теплофізичних параметрів напівпровідника

**Напрямок подальшого дослідження** є аналіз фізичних засад функціонування та умов проведення вимірювання пристрою реєстрації діагностичного параметру (температури напівпровідникової структури).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кузавков В.В., Редзюк Є.В. Побудова перевірних тестів визначення технічного стану цифрових блоків безконтактним індукційним методом. Системи озброєння і військова техніка. 2015. №1. С. 116 – 119.

2. Кузавков В.В., Янковський О.Г. Застосування методу власного випромінювання для технічної діагностики радіоелектронних блоків. Збірник наукових праць ОДАТРЯ. 2014. №2 (5). С. 58 – 62.

3. Жердев М.К., Кузавков В.В. Побудова функціональних перевірних тестів для безконтактного індукційного методу діагностування. Системи озброєння і військова техніка. 2014. №4 (40). С. 73 – 76.

4. H. Zhang et al. Failure analysis of thermal degradation of TIM during power cycling. Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Orlando, FL. 2014. pp. 404-408. doi: 10.1109/ITHERM.2014.6892309.

5. Review of Quality and Reliability Handbook. NEC Electronic Corp. 2003

6. R. Bouhaddiche, S. Bouazabia and I. Fofana. Thermal modelling of power transformer. 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). Manchester. 2017. pp. 1-4, doi: 10.1109/ICDL.2017.8124676.

7. J.P. Kulkarni, Mesut Meterellioz, Kaushik Roy and Jayathi Murthy. Nano-scaled SRAM thermal stability analysis using hierarchical compact thermal models. 2008 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Orlando, FL. 2008. pp. 999-1005, doi: 10.1109/ITHERM.2008.4544375.

8. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М. Наука. 1964. – 488 с.

9. Breglio G., Spirio P. Microelectronics Journal. 2000. Vol. 31.(9-10) P. 735 – 739.

10. Алексеев В.Ф., Журавлев В.И. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов. Доклады №2. БГУИР. Минск. 2005. С 65–72.

11. Ho C., Lion J., Chen F. Solid-State Electronics. 2000. Vol. 44, № 1. P. 653-660.

12. Dwyer V., Franklin A., Campbell D.S. Solid-State Electronics. 1990. Vol. 33, № 5. P. 553–560.

13. Smy T., Walkeya D. Dewa S. Solid-State Electronics. 2001. Vol. 45, iss.7. P. 1137-1148.

14. Stojadinovic N. D., Ristic S. D. Failure physics of integrated circuits and relationship to reliability. Phys. Stat. Sol. (a). 1983. Vol. 75. P. 11-47.

15. Строгонов А.В. Долговечность интегральных схем и производственные методы ее прогнозирования. Электронный ресурс: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200206/8.html>.

16. M. Musallam and C. M. Johnson. Monitoring through-life thermal path degradation using real time thermal models. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes. 2008. pp. 738-743, doi: 10.1109/PESC.2008.4592017.

17. Горлов М.И., Емельянов В.А., Строганов А.В. Геронтология кремниевых интегральных схем. М. Наука. 2004.

18. Zhuravliov V., Alexeev V. The 2003 IEEE Int. Symposium on EMC. Symp. Records. TH-A-12.