

СИГНАЛЬНА МАКРОМОДЕЛЬ ОПТОПАРИ НА СТРУКТУРАХ ОРГАНІЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Г. Барило [ORCID: 0000-0001-5749-9242], Р. Голяка [ORCID: 0000-0002-7720-0372], М. Брич [ORCID: 0009-0004-9767-5991],
О. Адам'як [ORCID: 0000-0002-6290-6516], Д. Марків [ORCID: 0009-0006-7744-8825]

Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Г. Барило (e-mail: hryhorii.i.barylo@lpnu.ua)

(Подано 4 лютого 2024 р.)

У статті запропоновано основні підходи реалізації макромоделі оптопари на органічних структурах для пристроїв сенсорної техніки. Використання таких структур значною мірою обмежено через часовий дрейф параметрів та температурну нестабільність. Використання розробленої моделі дає можливість отримати значення параметрів компенсації для оперативного коригування, відповідно до умов експлуатації та властивостей органічних структур. Під час дослідження встановлено можливість компенсації цих параметрів безпосередньо під час роботи органічних оптопар шляхом вимірювання та аналізу дрейфу параметрів. Для цього використовуються спеціалізовані вбудовані системи внутрішньої об'єктної діагностики та керовані сигнальні перетворювачі. З метою перевірки функціонування та оптимізації параметрів сигнальних перетворювачів вбудованих систем *in-situ* діагностики в роботі описано основні підходи та результат реалізації макромоделі оптопари. Макромодель надає можливість специфікувати компоненти оптронів сенсорної електроніки відповідно до підходів та синтаксису SPICE моделювання та відображає параметричну модуляцію при зміні температури навколишнього середовища, часову нестабільність та фліккерні шуми. Макромодель складається з п'яти модулів, які описують процеси та визначають характеристики оптопари: випромінювач світла (світлодіод), саморозігрів структури оптопари струмом живлення, оптичне середовище або активний шар оптосенсора, часовий дрейф та фліккер шум, приймач світла (фотодіод або фоторезистор). Модулі представлено схемами заміщення електричних компонентів відповідно до принципу функціональної аналогії. Наведено основні підходи до визначення параметрів компонентів макромоделі та приклади параметричних досліджень на її основі. Використання розробленої моделі дозволяє отримати значення параметрів компенсації для оперативного регулювання, відповідно до умов експлуатації та властивостей органічних структур.

Keywords: *оптопара, структури на органічних напівпровідниках, сигнальне перетворення, SPICE модель.*

1. Вступ

Сучасний етап розвитку сенсорики характеризується значним прогресом у галузі органічної електроніки, зокрема реалізацією широкої гами світловипромінювальних та фоточутливих структур на органічних напівпровідниках [1]. Новітні досягнення в цій галузі представлені, зокрема, роботами по органічних світлодіодах OLED (Organic Light Emitted Diode) [2], органічних

транзисторних структурах для фотоніки [3], використання органічних структур в оптичних сенсорах [4]. Значне зацікавлення знаходять питання розроблення математичних моделей OLED, зокрема для опису їхніх вольт-амперних [5] та температурних характеристик [6]. Важливим завданням є моделювання електро-теплових процесів в OLED структурах [7].

Характеризуючись суттєвими перевагами, що забезпечують сучасні технології органічної електроніки, зокрема в галузі високоефективних OLED моніторів, структури на органічних напівпровідниках усе ж не забезпечують відповідних рівнів довготривалості та стабільності функціонування [8]. Значною мірою нестабільність функціонування пристроїв органічної оптоелектроніки можна компенсувати, проводячи вимірювання та аналіз дрейфу їхніх параметрів безпосередньо в процесі їхньої експлуатації. Такий підхід базується на методах *in-situ* діагностики [9], яка здебільшого реалізується спеціалізованими вбудованими системами [10].

У цій роботі представлено основні підходи та результат реалізації макромоделі OCS на органічних структурах. Макромодель OCS розробляється з метою верифікації функціонування та оптимізації параметрів сигнальних перетворювачів для *in-situ* діагностики параметрів органічних оптопар сенсорної електроніки. Оскільки параметричний аналіз сигнальних кіл здебільшого проводиться на основі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) моделювання [11], розроблювана макромодель повинна відповідати SPICE синтаксису та будуватися на компонентах відповідного інтегрованого середовища розробки SPICE IDE (Integrated Development Environment). SPICE моделювання в сенсорній тематиці використовує метод формальної аналогії, який передбачає формальну заміну коефіцієнтів перетворення неелектричних фізичних характеристик (світлового потоку, механічного напруження, магнітного поля тощо) певними коефіцієнтами електричних процесів [12].

2. Об'єкт та завдання дослідження

Розроблення сигнальних перетворювачів органічних оптопар для використання в сенсорній електроніці передбачає вирішення проблеми нестабільності параметрів цих оптопар. Часовий дрейф та температурну нестабільність можна компенсувати, проводячи вимірювання та аналіз дрейфу параметрів безпосередньо в процесі експлуатації органічних оптопар. Реалізація вимірювання здійснюється вбудованими системами *in-situ* діагностики з використанням двох методів. Перший з них базується на періодичному перемиканні компонентів оптопар між колами, що реалізують функцію сигнального перетворення сенсорного пристрою та функцію вищезгаданої *in-situ* діагностики. Другий метод базується на вимірюванні дрейфу безпосередньо в колах сигнального перетворення сенсорного пристрою і реалізується відповідними алгоритмами формування інформативних сигналів дійсної та уявної складових імпедансу.

На основі цих сигналів встановлюють характерні закономірності дрейфу параметрів оптопар, а відтак проводять корекцію коефіцієнтів з використанням математичних моделей сигнального перетворення. Тож необхідно вирішити проблему розроблення спеціалізованої макромоделі сенсорної оптопари.

Відповідно до вищезгаданої проблематики в роботі поставлено завдання розроблення макромоделі OCS MODEL, що повинна відповідати таким вимогам:

- відображати та специфікувати компоненти оптопар сенсорної електроніки;
- забезпечувати сумісність з системами SPICE моделювання;
- відображати параметричну модуляцію при зміні температури оточуючого середовища та теплової енергії, що виділяється в структурі;
- відображати та специфікувати часову нестабільність та фліккер-шум.

3. Структура SPICE макромоделі OCS MODEL

Відповідно до вищезгаданих вимог до розроблюваної макромоделі OCS MODEL, і зокрема описувати параметричну модуляцію при зміні температури оточуючого середовища та теплової енергії OLED, часову нестабільність та флікер-шум, розглянемо її основні компоненти та взаємозв'язки (рис. 1).

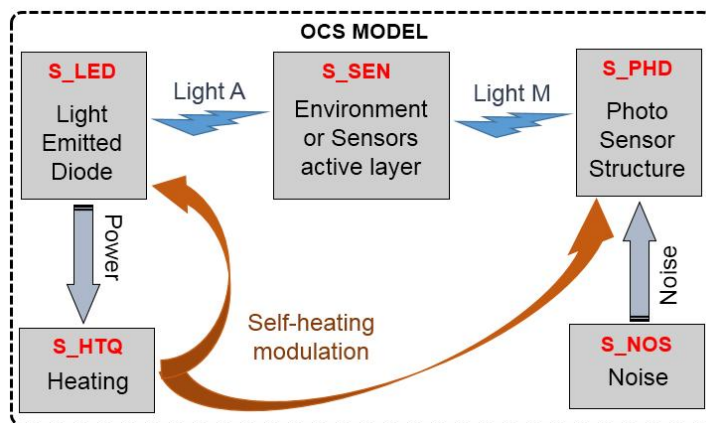


Рис. 1. Модулі та взаємозв'язки макромоделі OCS

Макромодель OCS MODEL складається з п'яти модулів, що описують процеси та специфікують характеристики оптопар:

- S_LED (Light Emitted Diode) – випромінювача світлового потоку (світлодіода);
- S_HTQ (Heating) – самонагріву структури оптопарі струмом живлення;
- S_SEN (Environment or Sensor active layer) – оптичного середовища чи активного шару оптосенсора;
- S_NOS (Noise) – часового дрейфу та флікер-шуму;
- S_PHD (Photo Sensor Structure) – приймача світлового потоку (фотодіода чи фоторезистора);

Взаємозв'язки модулів представлені величинами:

- Light A – світлового потоку на виході випромінювача;
- Light M – світлового потоку на вході приймача;
- Power – електричної (теплової) потужності випромінювача;
- Self-heating modulation – модуляції параметрів оптопарі тепловою потужністю, що розсіюється її структурі;
- Noise – миттєвих значень стохастичного дрейфу та флікер-шуму.

Кожен з вказаних модулів представлено схемами заміщення з електричних компонентів відповідно до принципу функціональної аналогії. Уніфікований варіант схем заміщення цих модулів разом із вбудованою системою контролера Embedded System Controller (OCS in-situ monitoring) з розширеними функціями формування інформативних сигналів дрейфу параметрів оптопарі (OCS in-situ monitoring) представлено на рис. 2.

4. Компоненти SPICE макромоделі OCS MODEL

Модуль S_LED базується на одній з традиційних SPICE схем заміщень діодних структур, зокрема Level 1 Standard SPICE чи Level 2 PSpice. Цю діодну структуру позначено DLD. Модель доповнено іншими компонентами, які забезпечують вищу гнучкість при специфікації ВАХ структури OLED та її температурної характеристики. Такими компонентами є:

- послідовний опір RLS, що специфікує опір електродів та шарів пасивної структури OLED;

- паралельний опір RLP, що специфікує паразитне просочування струму через структуру;
- еквівалентна ємність CLD, яка представляє бар'єрну та дифузійну складові ємності р-п переходу діодної структури;
- кероване джерело напруги ELQ, що забезпечує можливість враховувати модуляцію ВАХ структури в результаті її самонагріву.

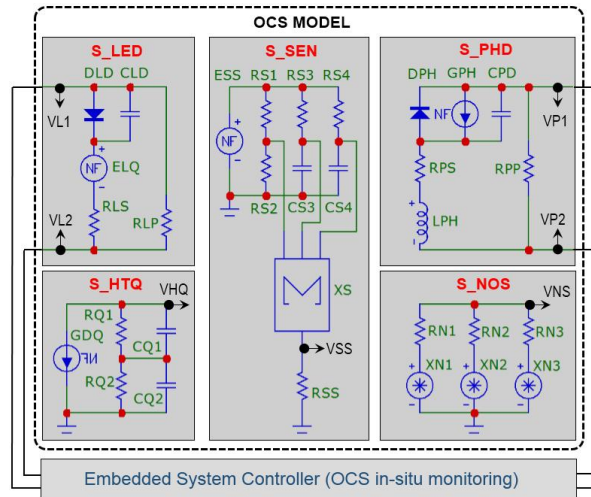


Рис. 2. Уніфікований варіант схеми заміщення модулів макромоделі OCS

Основними параметрами моделі діодних структур, що описують їх ВАХ та динамічні характеристики, є: IS (Saturation current) – струм насичення; N (Emission coefficient) – коефіцієнт емісії; ISR (Recombination current) – струм рекомбінації; IKF (High-injection “knee” current) – струм переходу до високого рівня інжекції; BV (Reverse breakdown “knee” voltage) – зворотна напруга пробою; RS (Series resistance) – послідовний омичний опір структури; RL (Junction Leakage Resistance) – паралельний омичний опір просочування; TT (Transit time) – час прольоту носіїв; CJ0 (Zero-bias junction capacitance) – ємність при нульовому зміщенні; VJ (Junction potential) – бар'єрний потенціал; M (Junction grading) – градієнт бар'єрного потенціалу; EG (Energy gap eV) – ширина забороненої зони.

Температурні залежності цих характеристик специфікують параметрами: XTI (Temperature exponent for IS) – експоненціальний коефіцієнт струму насичення; TIKF (IKF linear temperature coefficient) – лінійний температурний коефіцієнт IKF; TBV1 (linear temperature coefficient) – лінійний температурний коефіцієнт BV; TBV2 (quadratic temperature coefficient) – квадратичний температурний коефіцієнт BV; TRS1 (linear temperature coefficient) лінійний температурний коефіцієнт RS; TRS2 (quadratic temperature coefficient) квадратичний температурний коефіцієнт RS; T_MEASURED (Measured temperature Celsius), T_ABS (Absolute temperature), T_REL_GLOBAL (Relative to current temperature), T_REL_LOCAL (Relative to AKO model temperature) – температури в градусах Цельсія.

Шумові характеристики описуються параметрами: KF (Flicker noise coefficient) – лінійний коефіцієнт флікер-шуму; AF (Flicker noise exponent) – експоненціальний коефіцієнт флікер-шуму.

ВАХ діодної структури, що описує залежність струму ID від напруги VD, в SPICE моделі визначається як:

$$I_D = I_S \left[\exp \left(\frac{V_D}{N \cdot \phi_T} \right) \right], \quad \phi_T = \frac{k \cdot T}{q}, \quad (1)$$

де k – постійна Больцмана, q – заряд електрона, T – термодинамічна температура.

Вищезгадані бар'єрна та дифузійну електричні ємності діода визначають рівняннями:

$$C_J = \frac{C_{0J} \cdot}{\left(1 - \frac{V_D}{V_J}\right)^M}, \quad C_D = \frac{I_D \cdot TT}{\Phi_T}, \quad (2)$$

де C_J , C_D – бар'єрна та дифузійна ємності, TT (Transit time) часу прольоту носіїв заряду через бар'єр.

Для прикладу на рис. 3 представлено результат модельних досліджень BAX OLED (DC analysis) для трьох значень опору $R_{LP} = 100$ Ом (1), 300 Ом (2), 1000 Ом (3), а на рис. 4 результат модельних досліджень процесу перемикання (Transient analysis) струму в структурі OLED. Загалом такі приклади модельних досліджень ефективно представляють специфіку реальних OLED структур та характеризуються можливістю адаптації параметрів моделі за даними експериментальних досліджень.

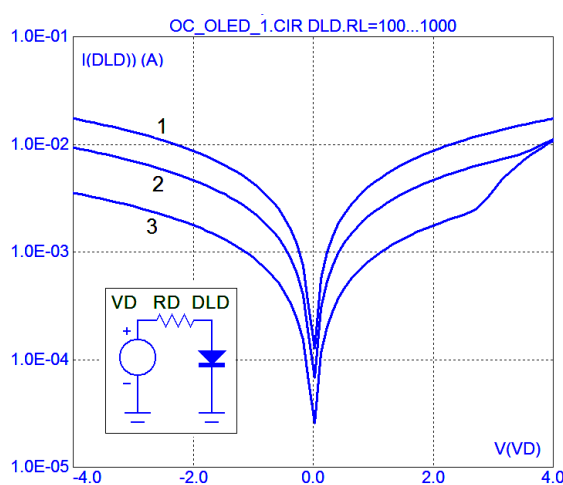


Рис. 3. BAX структури OLED при $R_{LP} = 100$ Ом (1), 300 Ом (2), 1000 Ом (3)

Відмінністю представленої макромоделі OCS MODEL від відомих рішень є можливість враховувати модуляцію BAX структури в результаті її самонагріву. Цю можливість реалізовано керованим функціональним джерелом (Function Source) напруги ELQ типу NF (Formula type voltage). Суттєве підвищення ефективності синтезу моделі та її використання можна забезпечити заміною числових значень коефіцієнтів пропорційності на параметри допоміжних компонентів схеми заміщення. Особливо це актуально в разі використання методу Stepping, в якому під час розрахунку в модель підставляється не одне значення певного параметру, а їх набір – лінійна зміна (Step it -> Method: Liner) чи наперед заданий в специфікації набір значень (Step it -> Method: List).

Приклад реалізації такого підходу та результату моделювання BAX діода демонструється на рис. 5 – рис. 7. Зокрема, коефіцієнт модуляції BAX діода внаслідок нагріву його структури струмом живлення формально (безрозмірно або з умовною розмірністю) представлено струмом допоміжного джерела $IK1$: $IK1 = 0$ (1), $1E-2$ (2), $3E-2$ (3), $1E-1$ (4).

У схемі заміщення розроблюваної макромоделі OCS MODEL кількість таких допоміжних джерел може бути довільною і визначатися кількістю параметрів, які задають кількісні значення модуляції BAX.

Модуль S_HTQ (Heating) макромоделі OCS специфікує динаміку процесу самонагріву структури оптопар струмом живлення. Використовується вищезрозглянутий принцип електро-теплової аналогії, в якому, зокрема, різниця температур відповідає різниці потенціалів, тепловий потік – електричному струму, тепловий опір – електричному опору, а теплоємність – електричній ємності.

В уніфікованому та дещо спрощеному варіанті реалізації схема заміщення S-HTQ містить функціональне джерело (Function Source) струму GDQ типу NF (Formula type voltage), що специфікує тепловий потік, та набір RC – ланок, зокрема RQ1, RQ2, CQ1, CQ2, які специфікують теплові опори та теплоємність структури оптопар.

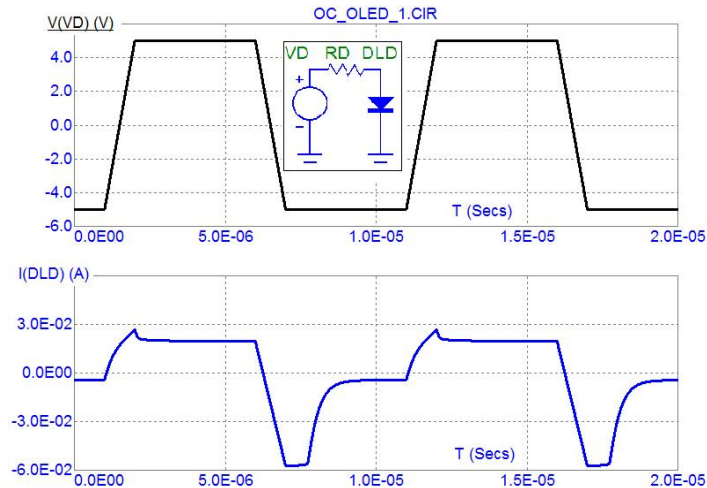


Рис. 4. Процес перемикання струму в структурі OLED

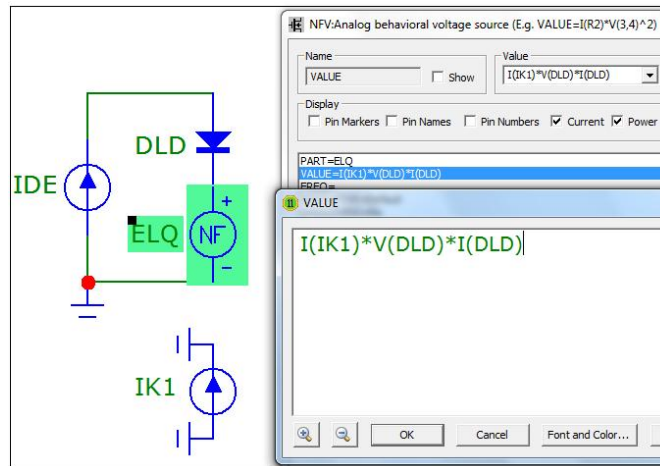


Рис. 5. Приклад специфікації функціонального джерела ELQ значенням струму допоміжного джерела IK1

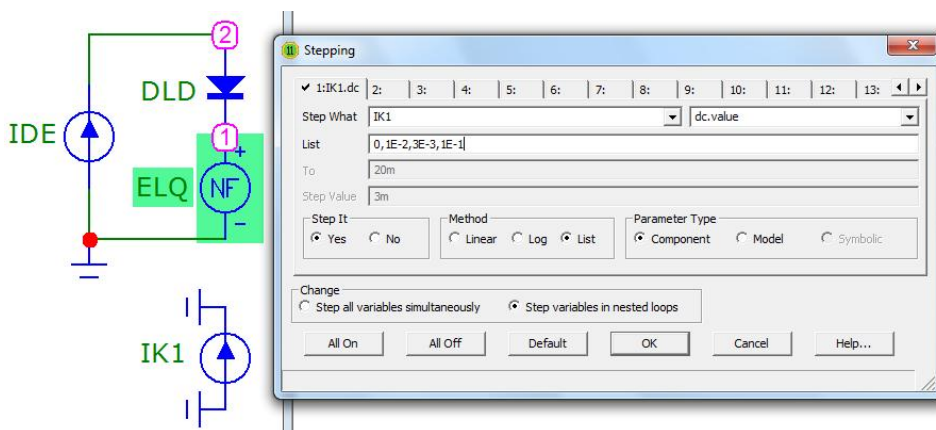


Рис. 6. Приклад специфікації для методу дослідження типу Stepping

Функціональне джерело GDQ компоненту S_HTQ специфікується часовою залежністю розсіяної в структурі оптопар теплової потужності, здебільшого значенням добутку миттєвих значень напруги та струму OLED. Вихідною інформативною величиною цього компоненту є напруга VHГ, яка формується під час релаксаційних процесів RC – ланок, та використовується в інших компонентах макромоделі OCS.

Це, зокрема, у вищезгаданому функціональному джерелі напруги ELQ схеми заміщення S_LED та у функціональному джерелі струму I(GPN) схеми заміщення S_PHD. Миттєві значення напруги VHГ служать формальними аналогами різниці температур у структурі оптопар при її самонагріві струмом живлення (Self-heating modulation).

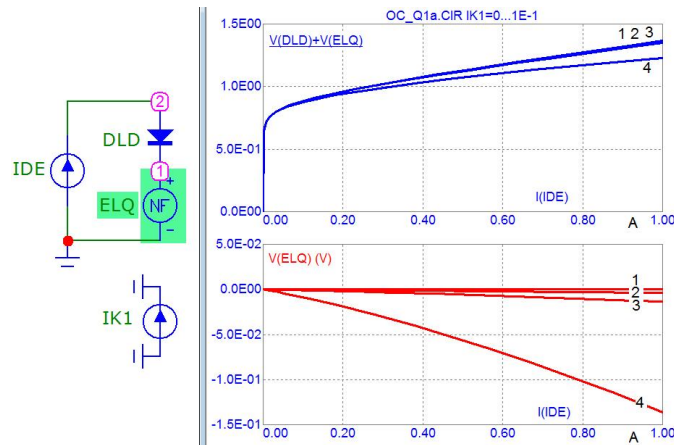


Рис. 7. ВАХ діода $V(DLD) = f(I(DE))$ (зверху) та функціональна залежність напруги джерела ELQ $V(ELQ) = f(I(IDE))$ (знизу) – метод Stepping

Формальним аналогом вхідного світлового потоку Light A модуля S_SEN (вихідного потоку на виході випромінювача OLED модуля S_LED) є напруга функціонального джерела ESS. Аналогічно формальним аналогом вихідного світлового потоку Light B цього компонента (потоку на вході фотоприймача модуля S_PHD) є напруга VSS, що формується суматором XS. Специфікація джерела ESS відбувається аналогічно до вищерозглянутих підходів специфікації функціональних джерел модуля S_HTQ. В якості формального параметру світлового потоку Light A здебільшого використовують струм світлодіода модуля S_LED.

Модуль S_SEN відображає кількісні параметри процесу формування сигналу оптичного середовища чи активного шару оптосенсора. Параметрами цього процесу є частотно-незалежний коефіцієнт селективного поглинання світлового потоку, який здебільшого є інформативним параметром сенсорного пристрою, та частотно-залежні коефіцієнти, які описують часову релаксацію поглинання чи активованого випромінювання внаслідок фотолюмінесценції.

Формальним аналогом вхідного світлового потоку Light A модуля S_SEN (вихідного потоку на виході випромінювача OLED модуля S_LED) є напруга функціонального джерела ESS. Аналогічно, формальним аналогом вихідного світлового потоку Light B цього компоненту (потоку на вході фотоприймача модуля S_PHD) є напруга VSS, що формується суматором XS. Специфікація джерела ESS відбувається аналогічно до вищерозглянутих підходів специфікації функціональних джерел модуля S_HTQ. В якості формального параметру світлового потоку Light A здебільшого використовують струм світлодіода модуля S_LED.

В уніфікованому варіанті схема заміщення компоненту S_SEN містить три ланки – частотно-незалежного затухання на резистивному подільнику RS1, RS2, частотно-залежного перехідного процесу релаксації затухання на інтегруючому колі RS3, CS3 та перехідного процесу люмінесценції на диференціюючому колі RS4, CS4. Часові параметри цих процесів задається відповідною специфікацією RC – ланок. Для поєднання сигналів використано суматор XS з резистором навантаження RSS.

Модуль S_NOS доповнює наявні в SPICE моделях можливості аналізу шумових параметрів електронних компонентів та електричних кіл на їх основі. Базовий варіант компоненту S_NOS (може модифікуватися з залежності від конкретних задач моделювання) містить три джерела XN1, XN2, XN3 із відповідними омичними навантаженнями RN1, RN2, RN3 (рис. 2.16). На їхньому виході формується сумарний стохастичний шум VNS, частотна характеристика якого в методі AC Analysis та миттєві значення в методі Transient Analysis, в подальшому використовується при специфікації функціонального NF джерела GPN схеми заміщення фотоприймача (модуль S_PHD).

Миттєві значення стохастичних шумів джерел XN1, XN2, XN3, які задаються параметри TS (Noise repetition rate; a new noise value will be generated every TS seconds) та VS (the maximum value of the noise source; all values will be in the range of 0 to VS Volts), відображають частотну залежність шуму. Здебільшого, при аналізі нестабільності оптопар органічної електроніки мова йде про фліккер-шум та часовий дрейф деградаційних процесів.

Модуль S_PHD специфікує параметри фоточутливої структури оптопари, здебільшого фотодіода, фоторезистора чи їхнього поєднання. Властиво, що деградація органічних оптопар сенсорних пристроїв призводить не лише до зміни параметрів фотодіода чи фоторезистора, але й до зміни домінуючих ефектів фоточутливості. Зокрема, деградація фотодіода обумовлює зростання фоторезистивної складової корисного сигналу. Аналогічні явища спостерігаються при зменшенні добротності фотодіодної структури, що також обумовлює зростання резистивного ефекту.

Аналогічно до вже розглянутого модуля S_LED схема заміщення фоточутливого модуля S_PHD базується на SPICE моделі діодної структури DPH. В уніфікованому виді її доповнено компонентами:

- послідовного опору RPS, що специфікує опір електродів та шарів пасивної структури S_PHD;
- паралельного опору RPP, що специфікує паразитне просочування струму через структуру S_PHD;
- еквівалентної ємності CPD, що специфікує бар'єрну та дифузійну складові ємності р-п переходу діодної структури чи паразитну ємність фоторезистивної структури;
- еквівалентну індуктивність LPH, що специфікує індуктивну складову реактивного опору фоторезистивної структури;
- функціонального джерела GPH, що специфікує діодні та резистивні фотоефекти, температурний дрейф внаслідок самонагріву струмом живлення світлодіода, фліккер-шуми та часову нестабільність структури S_PHD.

Враховуючи значну кількість вищезгаданих ефектів, актуальним завданням може бути розділення останніх на окремі субмоделі з декількома функціональними джерелами. Для прикладу розглянемо схему заміщення з двома керованими функціональними джерелами струму GPH, що специфікує фотоструміві ефекти, та GPN, що специфікує часову та температурну нестабільність (рис. 8). Для спрощення викладу суті проблеми в цьому прикладі значення струмів цих джерел визначаються функціями струму в допоміжних колах VGPH, RGPH та VGPN, RGPN: $I(GPH) = V(VGPH) / R(RGPH)$, $I(GPN) = V(VGPN) / R(RGPN)$. У реальних схемах заміщення макромоделі оптопари OCS ці допоміжні кола замінюються на вищерозглянуті модулі S_LED, S_HTQ, S_SEN, S_NOS та інформативні сигнали цих компонентів.

Результати моделювання BAX компоненту S_PHD з врахуванням зміни фотоструму, функція якого описується струмом керованого джерела GPH $I(GPH) = I(VGPH)$ представлено на рис. 9.

BAX компоненту S_PHD для масиву значень опору RPP у логарифмічному масштабі, що описує паразитне просочування струму фотодіода чи фоторезистивний ефект представлено на рис. 10. Схему заміщення в цьому разі доповнено джерелом напруги VE. Характеристика формується у виді залежності струму (зі знаком мінус), що протікає через це джерело від напруги на ньому. Можна бачити, що ефективним рішенням аналізу BAX є використання логарифмічної шкали модуля струму $\text{LOG}(\text{ABS}(VE))$.

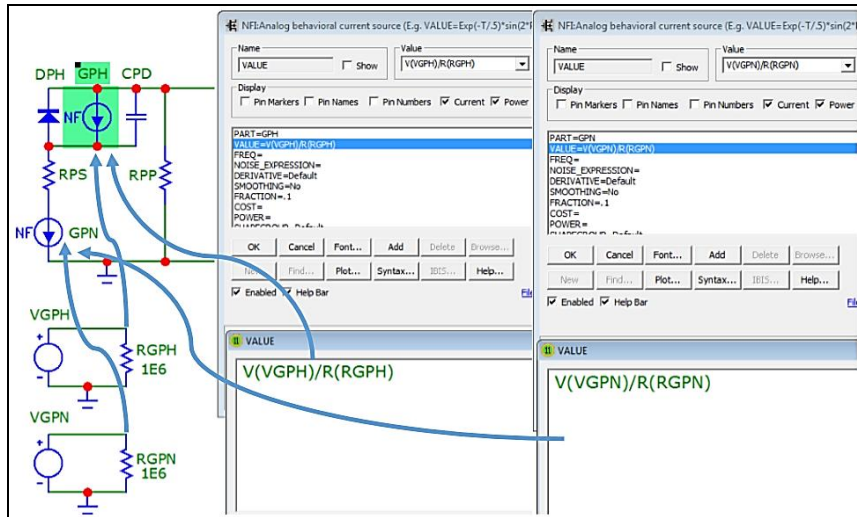


Рис. 8. Схема заміщення з двома керуваними джерелами струму

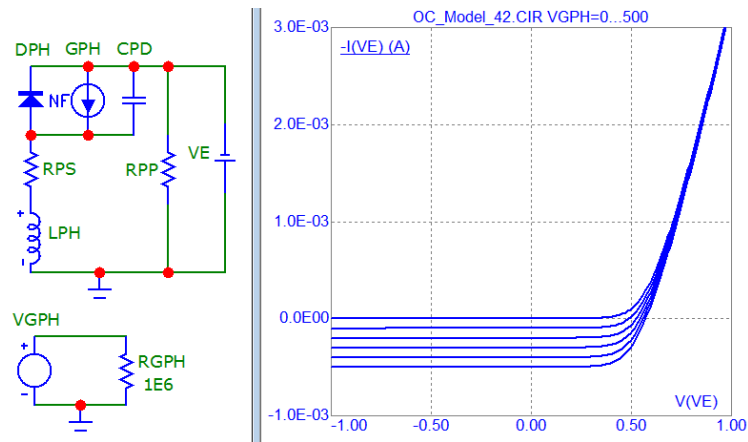


Рис. 9. Схема VAX фоточутливого модуля S_PHD для масиву значень фотоструму $I(GPH) = I(VGPH)$

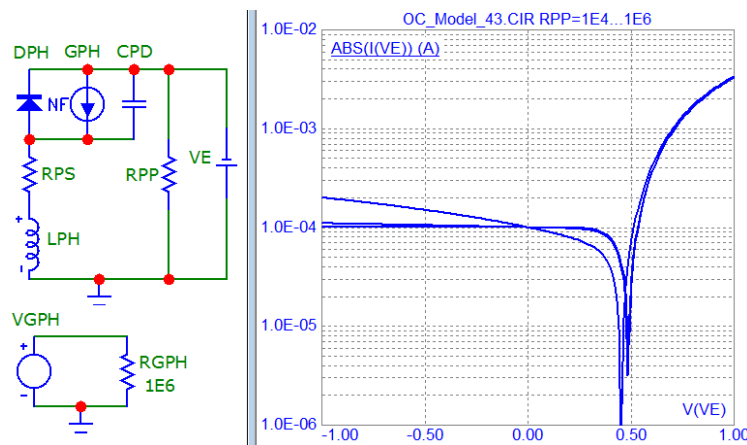


Рис. 10. VAX фоточутливого компоненту S_PHD для масиву значень опору RPP у логарифмічному масштабі

Висновки

Показано, що використання органічних структур в сенсорній техніці, зокрема на основі оптопар, значною мірою обмежено процесами їхньої нестабільності. Часовий дрейф та температурну нестабільність можна компенсувати, проводячи вимірювання та аналіз дрейфу параметрів

безпосередньо в процесі експлуатації органічних оптопар. Для цього використовуються спеціалізовані вбудовані системи in-situ діагностики.

З метою верифікації функціонування та оптимізації параметрів сигнальних перетворювачів вбудованих систем in-situ діагностики в роботі розкрито основні підходи та результат реалізації макромоделі оптопар OCS MODEL. Макромодель забезпечує можливість специфікувати компоненти оптопар сенсорної електроніки у відповідності до підходів та синтаксису SPICE моделювання та відображає параметричну модуляцію при зміні температури оточуючого середовища, часову нестабільність та флікер-шум.

Макромодель OCS MODEL складається з п'яти модулів, що описують процеси та специфікують характеристики оптопар: S_LED (Light Emitted Diode) – випромінювача світлового потоку (світлодіода); S_HTQ (Heating) – самонагріву структури оптопар струмом живлення; S_SEN (Environment or Sensor active layer) – оптичного середовища чи активного шару оптосенсора; S_NOS (Noise) – часового дрейфу та флікер-шуму; S_PHD (Photo Sensor Structure) – приймача світлового потоку (фотодіода чи фоторезистора). Модулі представлено схемами заміщення з електричних компонентів відповідно до принципу функціональної аналогії. Розглянуто основні підходи специфікації параметрів компонентів макромоделі OCS MODEL та приклади параметричних досліджень її основи.

Список використаних літературних джерел

- [1] M. Novota et al., "New phenanthrene-based organic semiconductor material for electronic devices," *The Tenth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*, Smolenice, Slovakia, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ASDAM.2014.6998655.
- [2] R. Ikeda, J. Mizuno and T. Kasahara, "Fabrication and Evaluation of Microfluidic Organic-Light Emitting Diode Having a Fluorine-Doped Tin Oxide Cathode," *2023 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, Kumamoto, Japan, 2023, pp. 117-118, doi: 10.23919/ICEP58572.2023.10129647.
- [3] S. Lan, Y. Ke and H. Chen, "Photonic Synaptic Transistor Based on P-Type Organic Semiconductor Blending With N-Type Organic Semiconductor," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 8, pp. 1180-1183, Aug. 2021, doi: 10.1109/LED.2021.3090906.
- [4] Furong Zhu, "Tandem organic semiconductor devices for optical sensor application," *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai, China, 2016, pp. 3349-3349, doi: 10.1109/PIERS.2016.7735310.
- [5] L. Zhang, L. Wang, W. -J. Wu and M. Chan, "Modeling Current-Voltage Characteristics of Bilayer Organic Light-Emitting Diodes," in *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 66, no. 1, pp. 139-145, Jan. 2019, doi: 10.1109/TED.2018.2843681.
- [6] R. Lin, J. Tsai, D. Buso and G. Zissis, "OLED equivalent circuit model with temperature coefficient and intrinsic capacitor," *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, 2014, pp. 1-8, doi: 10.1109/IAS.2014.6978436.
- [7] E. Kollar, I. Zolomy and A. Poppe, "Electro-thermal modeling of large-surface OLED," *2009 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS*, 2009, pp. 239-242.
- [8] M. Kreger et al., "Reliability and lifetime of flexible organic electronics," *2009 IEEE International Reliability Physics Symposium*, Montreal, QC, Canada, 2009, pp. 104-104, doi: 10.1109/IRPS.2009.5173232.
- [9] M. Duran, G. Teyssedre, F. Massines and C. Laurent, "In-situ diagnostic of polypropylene degradation by electrical discharge induced luminescence at room temperature," *ICSD'01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics (Cat. No.01CH37117)*, Eindhoven, Netherlands, 2001, pp. 31-34, doi: 10.1109/ICSD.2001.955504.
- [10] Gryhoriy Barylo, Oksana Boyko, Ihor Helzhynskyy, Roman Holyaka, Mykola Khilchuk, Tetyana Marusenkova. Embedded system for supply voltage converter of organic lightemitting diode with extended functionality // *Przegląd elektrotechniczny*. – 2021. No. 12. PP. 68-72. doi:10.15199/48.2021.12.11. http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=12792&lang=1
- [11] F. -J. Hsu et al., "High accuracy large-signal SPICE model for silicon carbide MOSFET," *2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 403-406, doi: 10.1109/ISPSD.2018.8393688.
- [12] Barylo G., Holyaka R., Marusenkova T., IvakhM. Structure and 3-D Model of a Solid State Thin-Film Magnetic Sensor // *Physics and Chemistry of Solid State – 2021. – Vol. 22. No. 3. PP. 444-452. DOI:https://doi.org/10.15330/pess.22.3.444-452.*

THE SIGNAL MACROMODEL OF OPTOCOUPLERS ON ORGANIC ELECTRONICS STRUCTURES

H. Barylo, R. Holiaka, M. Brych, O. Adamiak, D. Markiv

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

The paper is devoted to the basic approaches to the realization of the macromodel of optocouplers on organic structures for sensor devices. It is shown that the use of such structures is largely limited due to the time drift of parameters and temperature instability. In the course of the research, the possibility of compensating for these parameters directly during the operation of organic optocouples by measuring and analyzing the parameter drift was established. For this purpose, specialized built-in in-situ diagnostic systems and controlled signal transducers are used. In order to verify the functioning and optimize the parameters of signal transducers of built-in in-situ diagnostic systems, the paper describes the main approaches and the result of the implementation of the optocouple macromodel. The macromodel provides the ability to specify the components of sensor electronics optocouplers in accordance with the approaches and syntax of SPICE modeling and reflects parametric modulation with changes in ambient temperature, time instability, and flicker noise. The macromodel consists of five modules that describe the processes and specify the characteristics of the optocoupler: the light emitter (LED), self-heating of the optocoupler structure by the supply current, the optical medium or active layer of the optosensor, time drift and flicker noise, and the light receiver (photodiode or photoresistor). The modules are represented by substitution schemes of electrical components in accordance with the principle of functional analogy. The main approaches to specifying the parameters of macromodel components and examples of parametric studies based on it are considered. The use of the developed model makes it possible to obtain the values of compensation parameters for operational adjustment, in accordance with the operating conditions and properties of organic structures.

Keywords: *optocoupler, structures on organic semiconductors, signal conversion, SPICE model.*