

Г.І. Барило¹, Р.Л. Голяка¹, І.І. Гельжинський¹, З.Ю. Готра¹,
М.С. Івах¹, Р.Л. Політанський²

Моделювання органічних світловипромінювальних структур

¹Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, hyhorii.i.barylo@lpnu.ua

²Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

В роботі приведені результати дослідження параметрів органічних світловипромінюючих структур на основі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) модельних досліджень. Розроблено SPICE модель діодної структури, яка реалізована у вигляді схеми заміщення на основі базових компонентів симулятора. Дана модель може бути розширена шляхом введення додаткових компонентів схему заміщення, що забезпечує вищу точність представлення специфіки структури. Представлено графічні результати досліджень моделі OLED структури при зміні внутрішніх параметрів. Отримані дані добре представляють параметри реальних структур та характеризуються достатньо ефективною адаптацією до експериментальних даних конкретних взірців.

Ключові слова: світловипромінювальні структури, модель, SPICE моделювання.

Подано до редакції 21.07.2020; прийнято до друку 15.09.2020.

Вступ та постановка задачі

Синтез нових органічних напівпровідникових матеріалів створює передумови розвитку органічної електроніки. Значна увага в даному напрямку приділяється створенню ефективних світловипромінюючих структур. Розроблення таких пристроїв в значній мірі визначається ефективністю використання програмних засобів, які використовуються під дослідження електрооптичних параметрів органічних напівпровідників. На даний час використовуються різноманітні програмні засоби комп'ютерного моделювання OLED структур [1, 2]. Однак, серед значної кількості програмних продуктів слід відмітити симулятор електронних схем з відкритим програмним кодом SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Даний програмний продукт використовується в прикладних програмах схемотехнічного моделювання, зокрема SPICE (Personal SPICE), Proteus, LTSPICE (Linear Technology SPICE), MicroCap. Значна частина елементної бази неорганічної електроніки представлена готовими математичними моделями, створеними виробниками

цих елементів. Проте в напрямку органічних електронних компонентів такі моделі використовуються дуже рідко. Це пов'язано з певними труднощами технології виготовлення, яка знаходиться в постійному пошуку оптимальних рішень.

В даній роботі представлено варіант побудови SPICE моделі світловипромінюючої органічної структури. Розроблена математична модель враховує внутрішню структуру напівпровідника яка відображається еквівалентною схемою. Відкритий програмний код дозволяє змінювати параметри елементів еквівалентної схеми відповідно до внутрішньої структури OLED. Використання такого підходу побудови дозволяє проводити модельні дослідження параметрів розроблюваних структур так і визначати їх зміну в процесі експлуатації. Модельні дослідження дають можливість отримувати вольт-амперні характеристики досліджуваних структур та визначати вплив на них зовнішніх факторів.

Отримані результати моделювання можуть бути використані для побудови систем керування які контролюють дрейф характеристик та колірну температуру випромінювання OLED структур безпосередньо в процесі їх експлуатації (в таких

рішеннях використовується термін – «in-situ», що буквально означає «всередині» організму чи системи.

I. SPICE модель OLED структури

Розроблена модель базується на одній з традиційних SPICE схем заміщень (еквівалентних схем) діодних структур, зокрема, Level 1 - Standard SPICE чи Level 2 - PSpice. При необхідності забезпечити вищу точність представлення специфіки структури OLED, модель доповнюється іншими компонентами, які, зокрема, забезпечують вищу гнучкість при формуванні BAX структури OLED та її температурної характеристики. Наведена на рис. 1 схема заміщення SPICE моделі крім діода D містить послідовний RS та паралельний RL опори, а також дві залежні від режиму зміщення та струму ємності – CJ та CD (тут та далі у відповідності до синтаксису SPICE параметри моделей записуються без індексів). Послідовний опір RS описує опір електродів та шарів пасивної структури OLED, а паралельний RL – паразитне просочування струму через структуру омичного (лінійного) характеру. Компонент CJ описує бар'єрну, а CD – дифузійну ємності діодної структури. Перша з них CJ визначає динамічну характеристику при зворотному зміщенні діода та залежить від напруги на діоді, а друга CD – перехідний процес при прямому зміщенні та визначається обумовленим струмом діода ефектом накопичення в структурі неосновних носіїв заряду.

В процесі специфікації SPICE моделей діодних структур використовують набір параметрів, які описують їх BAX, динамічні характеристики та температурні залежності цих характеристик. Основними серед параметрів моделі діодних структур [4] є: I_s (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

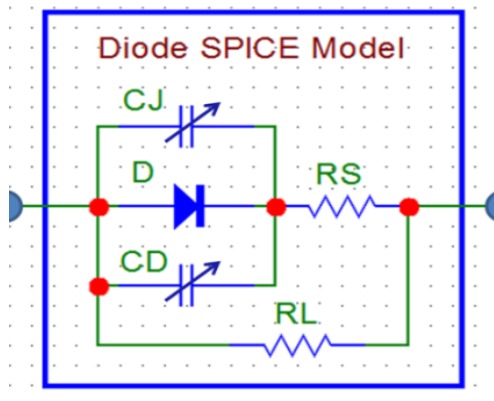


Рис. 1. Схема заміщення SPICE моделі структури OLED.

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; XTI (Temperature exponent for IS) – експоненціальний коефіцієнт струму насичення; KF (Flicker noise coefficient) – лінійний коефіцієнт флікер-шуму; AF (Flicker noise exponent) – експоненціальний коефіцієнт флікер-шуму; $TIKF$ (IKF linear temperature coefficient) – лінійний температурний коефіцієнт IKF ; $TBV1$ (BV linear temperature coefficient) – лінійний температурний коефіцієнт BV ; $TBV2$ (BV quadratic temperature coefficient) – квадратичний температурний коефіцієнт BV ; $TRS1$ (RS linear temperature coefficient) – лінійний температурний коефіцієнт RS ; $TRS2$ (RS 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.

BAX діодної структури, що описує залежність струму I_D від напруги V_D , в SPICE моделі визначається як [%1]:

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V_D}{N \cdot \varphi_T}\right) \right],$$

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q},$$

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

Вищезгадані бар'єрна та дифузійна електричні ємності діода визначаються рівняннями:

$$C_J = \frac{C_{0J}}{\left(1 - \frac{V_D}{V_J}\right)^M};$$

$$C_D = \frac{I_D \cdot TT}{\varphi_T}.$$

Як це вже відзначалося, при необхідності модель доповнюють резистивними компонентами. Це робить можливим більш точно представити температурні залежності опору шарів пасивної структури OLED. Для цього використовується розширена модель резистора, що включає в себе наступні параметри: R (Resistance multiplier) – множник опору; CP (Parallel capacitance) – паралельна ємність; LS (Series inductance) – послідовна індуктивність; $TC1$ (Linear temperature coefficient) – лінійний температурний коефіцієнт; $TC2$ (Quadratic temperature coefficient) – квадратичний коефіцієнт; TCE (Exponential temperature coefficient) – експоненціальний коефіцієнт; NM (Noise multiplier) – множник шуму; $T_MEASURED$ (Measured temperature, Celsius) – вимірювальна температура в °C; T_ABS (Absolute temperature, Celsius) – абсолютна температура в °C.

У відповідності до SPICE синтаксису температура позначається TEMP. Крім того важливо відзначити, що всі значення температур, в тому числі T_ABS (абсолютна температура), це не абсолютна термодинамічна температура, а температура за шкалою Цельсія для всієї схеми в цілому. Функція

опору резистора від температури визначається квадратичними та експоненціальними залежностями:

$$R(TEMP) = R(T_{NOM}) \cdot K_{TQ} \cdot K_{TE};$$

$$K_{TQ} = 1 + TC1 \cdot (T - T_{NOM}) + TC2 \cdot (T - T_{NOM})^2;$$

$$K_{TE} = 1.01^{TCE(T - T_{NOM})}.$$

Величина T_{NOM} – це номінальне значення температури, яке в SPICE моделях відповідає 27°C, тобто, приблизно 300 К абсолютної термодинамічної температури. При специфікації моделі певного компонента передбачена можливість змінювати температуру цього компонента відносно температури його базової моделі. Використовують поняття клону моделі АКО (an acronym for A Kind Of) з відповідними значеннями температур: T_REL_GLOBAL (Relative to current temperature, Celsius) – відносна температура в °C та T_REL_LOCAL (Relative to ACO model temperature, Celsius) – відносна температура клонованої моделі

в °C. В такому варіанті специфікації фактична температура компоненту (Device operating temperature) визначається одним з трьох значень: T_ABS , $T_REL_LOCAL + T_ABS$ (of ACO parent), $T_REL_GLOBAL + TEMP$ (global temperature, °C).

Вікно специфікації SPICE моделі резистора та приклад температурних залежностей опору $R(RDT)$ для певного набору температурних коефіцієнтів представлено на рис. 2, а приклади температурних залежностей абсолютних значень струму $ABS(I(DOLE))$ діода від температури – на рис. 2, б.

II. Дослідження моделі OLED структури

Проведено дослідження ВАХ напівпровідникової структури OLED при зміні певних параметрів наведено на рис. 3 ($RL = 1E3, 3E3, 1E4, 3E4, 1E5$;

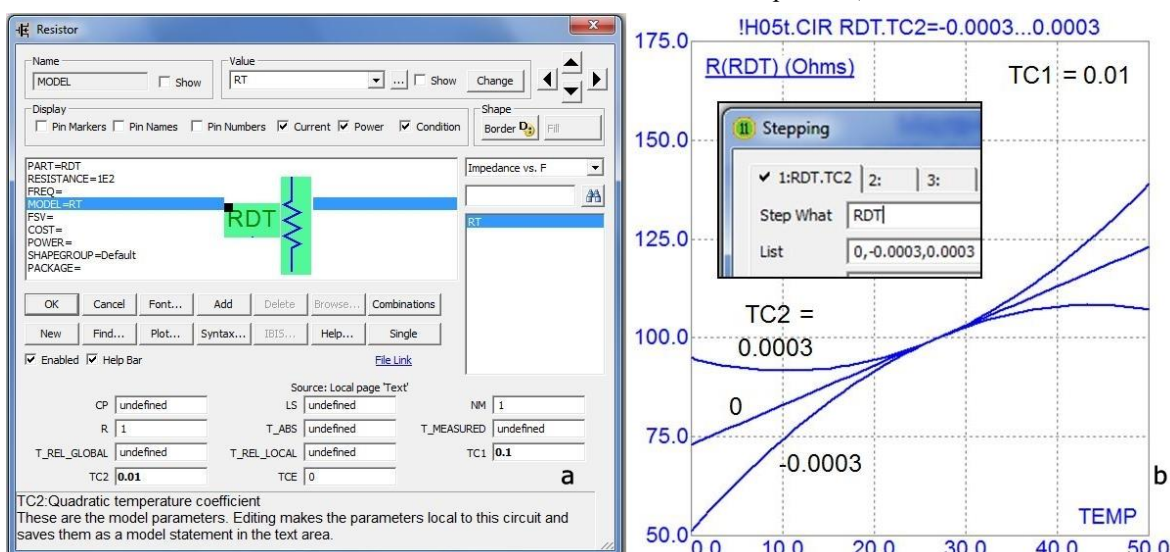


Рис. 2. Вікно специфікації SPICE моделі резистора (а) та приклад температурних залежностей опору $R(RDT)$ при: $TC1 = 0,001$; $TC2 = -0,0003, 0, 0,0003$ (б).

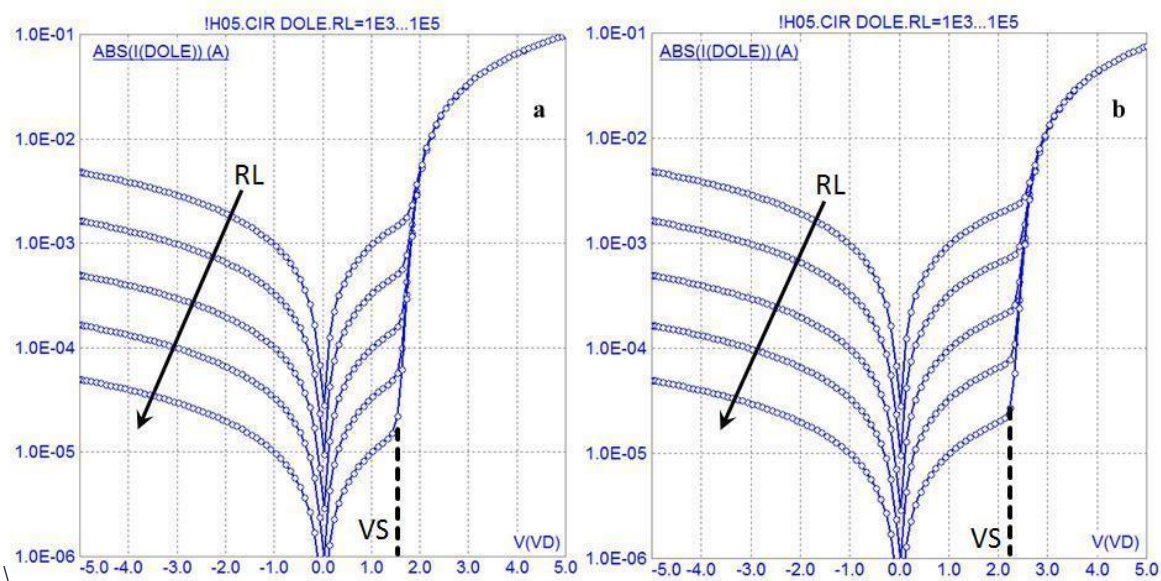


Рис. 3. ВАХ моделі OLED структури при $IS=1E-18$ (а) та $IS=1E-24$ (б) [$RL = 1E3, 3E3, 1E4, 3E4, 1E5$ @ $RS = 30$]

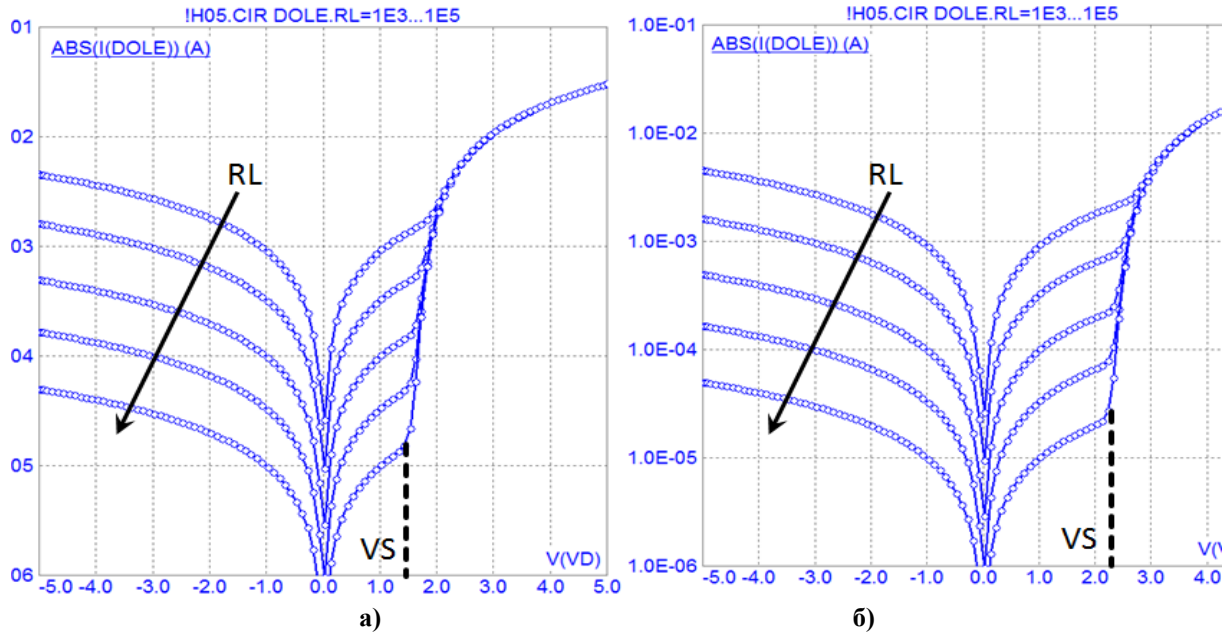


Рис. 4. ВАХ моделі OLED структури при $IS = 1E-18$ (а) та $IS = 1E-24$ (б)
 $[RL = 1E3, 3E3, 1E4, 3E4, 1E5 @ RS = 100]$

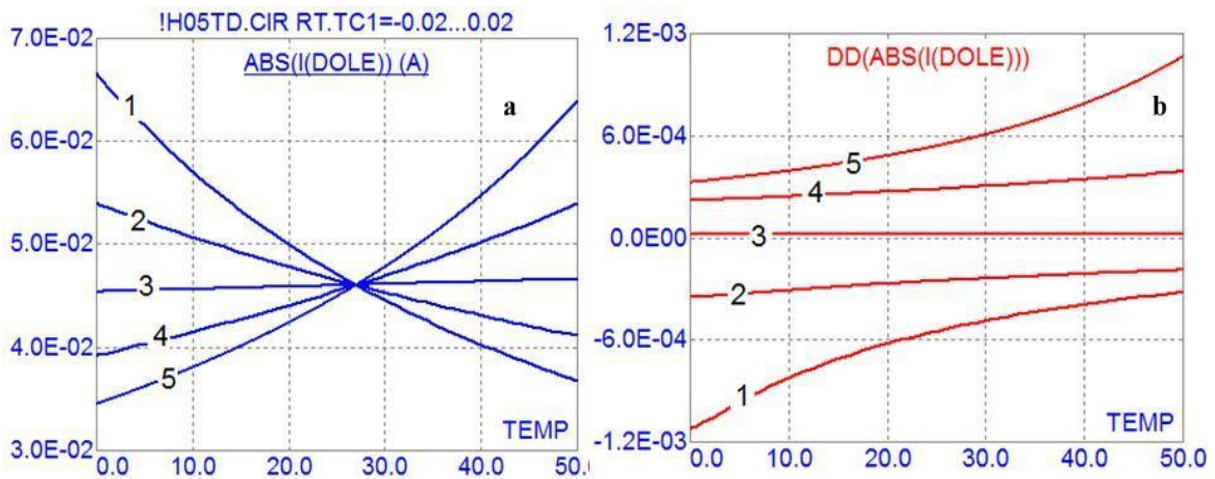


Рис. 5. Приклади температурних залежностей абсолютних значень струму $ABS(I(DOLE))$ (а) та їх крутизна $DD(ABS(I(DOLE)))$ (б) при: $TC1 = -0,02$ (1), $-0,01$ (2), 0 (3), $0,01$ (4), $0,02$ (5).

$RS = 30$) та рис. 4 ($RL = 1E3, 3E3, 1E4, 3E4, 1E5; RS = 100$). Позначення $V(D)$ відповідає значенням напруги на діоді, а $ABS(I(DOLE))$ – абсолютним значенням струму, де $DOLE$ – назва моделі OLED структури (у відповідності до синтаксису SPICE назва моделі діода повинна починатися з літери D, що обумовило зворотнє написання – $DOLE$). Позначення VS відповідає напругам переходу з бар'єрного до переважно омичного механізму проходження струму.

Можна бачити, що отримані ВАХ в цілому добре представляють специфіку реальних OLED структур та характеризуються можливістю достатньо ефективно адаптації під дані експериментальних даних конкретних взірців.

Температурна залежність досліджуваної структури відображається залежністю абсолютних значень струму $ABS(I(DOLE))$ та її крутизною

(рис. 5, а). Для більшої наочності температурну залежність можна представити у виді похідної (крутизни) за температурою, що позначається $DD(A)$, де A – досліджувана величина. Це демонструється на рис. 5, б, де $DD(ABS(I(DOLE)))$ – крутизна функції струму $ABS(I(DOLE))$.

Дослідження динамічних характеристик SPICE моделі OLED структури полягає у встановленні часу прольоту носіїв TT (Transit time) із врахуванням значень бар'єрної CJ та дифузійної CD ємності. Приклади модельних досліджень динамічних характеристик OLED структури для трьох значень $TT = 5E-7, 1E-6, 2E-6$ (sec) представлені на рис. 6 та рис. 7.

Результати моделювання відображають перехідні процеси в OLED структурі і можуть бути використані для визначення рухливості носіїв заряду

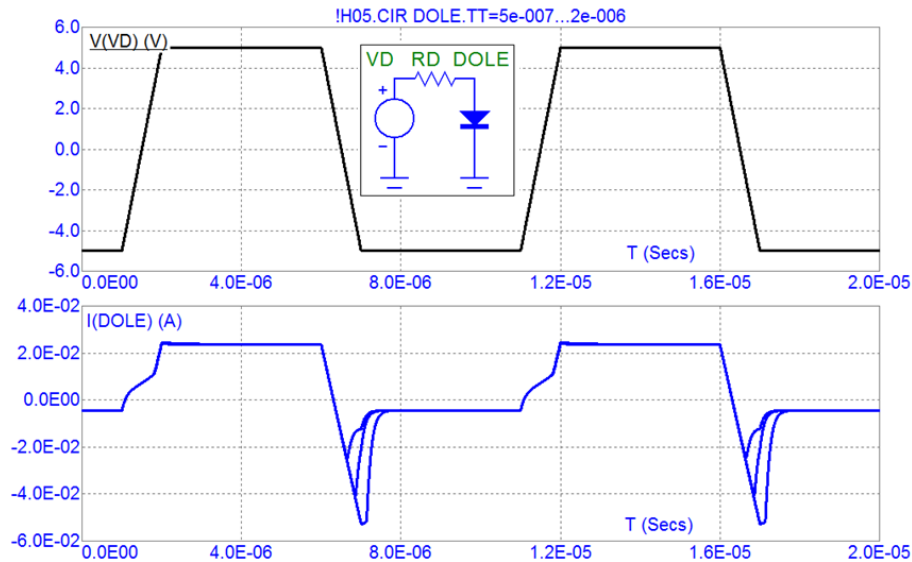


Рис. 6. Приклад дослідження перехідних процесів при $CJ0 = 1E-9F$.

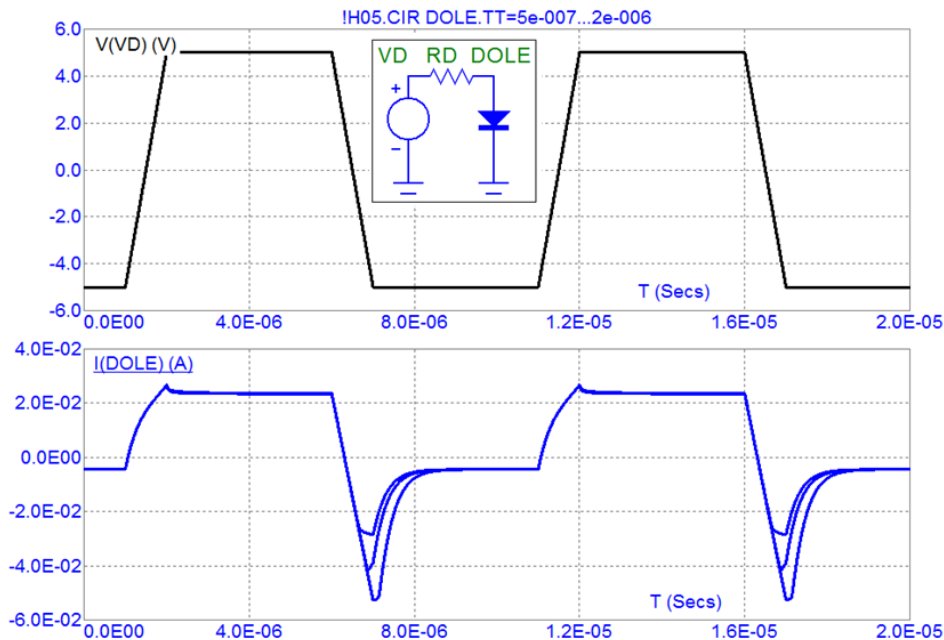


Рис. 7. Приклад дослідження перехідних процесів при $CJ0 = 3E-9F$.

методом екстракції у разі лінійного зростання напруги (CELIV) [4]. Використання даного методу дозволяє проводити розрахунок технологічних параметрів, зокрема, визначати товщину плівок напівпровідникових структур.

Висновки

Обґрунтована та вирішена задача побудови SPICE моделі для дослідження параметрів OLED структур. Модель побудовано на основі базових елементів симулятора відповідно до узагальненої еквівалентної схеми яка відображає внутрішню будову. Для отримання результатів моделювання які максимально відповідають реальним параметрам

досліджуваних структур створено специфікацію SPICE моделі діодної структури яка описує ВАХ, динамічні характеристики та температурні залежності цих характеристик.

Представлено математичне обґрунтування процесу вимірювання ВАХ структури та показано величини впливу бар'єрної C_j та дифузної C_d ємності переходу. Наведено розрахунки величини теплового впливу на параметри елементів, які представлено у програмній специфікації моделі.

Отримано ВАХ OLED структур та встановлено величину дрейфу спричиненого зміною значення R_L під впливом температури. Показана можливість та приклад дослідження температурної залежності абсолютних значень струму та його крутизни.

Показано можливості використання розробленої

моделі для дослідження динамічних характеристик органічної структури. Результати такого моделювання можуть бути використані для визначення рухливості носіїв заряду напівпровідникового переходу та товщини плівок досліджуваного зразка.

Запропонований підхід реалізації моделі передбачає можливість розширення її функціональних можливостей шляхом розширення деталізації структури з відповідним розширенням еквівалентної схеми, що забезпечить більш високу точність отримуваних результатів.

Розроблена модель з успіхом може бути використана для побудови систем керування живленням OLED в яких використовуються динамічний контроль ВАХ та можливістю її

корегування.

Барило Г.І. - д.т.н., доцент, доцент кафедри електронних приладів;

Голяка Р.Л. - д.т.н., професор, професор кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій;

Гельжинський І.І. - к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних приладів;

Готра З.Ю. - д.т.н., проф., завідувач кафедри електронних приладів;

Івах М.С. - к.т.н., старший викладач кафедри електронних приладів;

Політанський Р.Л. - д.т.н., професор, професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки.

- [1] R.L. Politanskyi, M.V. Vistak, G.I. Barylo, A.S. Andrushchak, *Optical Materials* Volume 102 (2020) (doi: 10.1016/j.optmat.2020.109782).
- [2] V. Cherpak, A. Gassmann, P. Stakhira, D. Volyniuk, J. Grazulevicius, A. Michaleviciute, A. Tomkeviciene, G. Barylo, H. Von Seggern, *Organic Electronics* 15, 7 (2014) (doi:10.1016/j.orgel.2014.04.002).
- [3] Г.В. Баришніков, Д.Ю. Волинюк, І.І. Гельжинський, З.Ю. Готра, Б.П. Мінаєв, П.Й. Стахіра, В.В. Черпак, *Органічна електроніка* (Львівська політехніка, Львів 2019).
- [4] G. Barylo, V. Cherpak, G. Pakhomov, Z. Hotra, I. Helzhynskyy, M. Hladun, G. Wiosna-Salyga, B. Luszczynska, P. Stakhira, *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 639, 1 (2016) (doi:10.1080/15421406.2016.1255075).
- [5] K. Ivaniuk, M. Chapran, V. Cherpak, G. Barylo, P. Stakhira, Z. Hotra, M. Hladun, T. Dudok, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 16 (2015) (doi:10.3116/16091833/16/2/95/2015).
- [6] T. Lawicki, G. Barylo, M. Vistak, R. Holyaka, V. Virt, F. Vezyr, Nursanat Askarova, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 108086E (doi:178. 10.1117/12.2501630).

G.I. Barylo¹, R.L. Holyaka¹, I.I. Helzhynskyy¹, Z.Yu. Hotra¹,
M.S. Ivakh¹, R.L. Politanskyi²

Modeling of Organic Light Emitting Structures

¹Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. hryhorii.i.barylo@lpnu.ua

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

The paper has been shown the results of the study of the parameters of organic light-emitting structures based on the SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) model studies. A SPICE model of diode structure has been developed, which is implemented in the form of a substitution scheme based on the basic components of the simulator. This model can be extended by introducing additional components of the substitution scheme, which provides higher accuracy in representing the structure specifics. Graphical results of researches of the model of OLED structure at the change of internal parameters have been presented. The obtained data well represent the parameters of real structures and are characterized by a fairly effective adaptation to the experimental data of specific samples.

Keywords: light emitting structures, model, SPICE modeling.