

УДК 004.032.26

О.О. ЛАЗАРЄВ, Т.В. БАСЮК, М.А. ФЛІНІЮК

ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ НЕЙРОННИЙ ЕЛЕМЕНТ НА С-НЕГАТРОНІ

*Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна,
тел.:+380 (432) 59-80-75, E-mail: LaAlex@mail.ru*

Анотація. В роботі запропонований нейронний логічний елемент - оптоелектронний нейронний елемент на С-негатроні. Даний нейрон може виконувати логічні функції «І», «АБО», «НІ» булевої логіки, працювати як RS-тригер, елемент пам'яті, широтно-імпульсний та фазо-імпульсний модулятори, виконувати функції нейронної логіки над часовими імпульсно-кодованими вхідними сигналами. Було проведено комп'ютерне моделювання данного елемента.

Ключові слова: нейронний елемент, С-негатрон.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж дозволяють ефективно вирішувати задачі розпізнавання образів, прогнозування, оптимізації, діагностики, кластеризації, асоціативної пам'яті та керування [1, 2]. Штучний нейрон є елементарним функціональним модулем, з множини яких будуються штучні нейронні мережі. Він являє собою модель біологічного нейрона, але не в сенсі способу функціонування, а лише здійснення відповідних перетворень над вхідними сигналами. Нейрон виконує дві основні функції: зважене сумування (інтегрування) вхідних сигналів; та має нелінійну функцію активації, в найпростішому випадку - порогову функцію активації, тобто коли сумарний вхідний сигнал перевищить певний заданий поріг, на виході нейрона з'являється сигнал високого рівня.

На даний час існує велика кількість різних варіантів нейронних елементів [1]: механічних, магнітоелектричних, термоелектричних, квантових, на основі надпровідних матеріалів, на транзисторних схемах [3], на приладах з від'ємним опором – R-негатронах [4], на біспін-приладах [5], на операційних підсилювачах, на цифрових мікросхемах та мікро контролерах [1]. Складні фізичні моделі нейронних елементів дозволяють найбільш точно відобразити всі процеси та функціонування біологічних нейронів, проте містять велику кількість приладів і створення великих масивів таких нейронів є занадто складною технічною задачею. Альтернативний підхід полягає у створенні якомога простіших апаратних реалізацій нейронних елементів зі збереженням головних функцій нейрону. Найперспективнішою елементною базою для створення нейронних елементів є функціональні електронні прилади, використання яких забезпечить схемотехнічну простоту, високу надійність, економічність, технологічність, малі габарити та вагу. Перспективними функціональними електронними приладами є R-, L-, С-негатрони – прилади, що в певному режимі роботи мають від'ємне значення основного диференційного параметру (від'ємний активний опір, індуктивність, ємність). Теорія та практика створення та використання R-негатронів вже досить розвинута [6, 7]. Тільки напівпровідникових R-негатронів створено більше двох десятків різновидів. Серед них найпотужніші надвисокочастотні прилади – лавинно-пролітні діоди, найшвидкодійні ключі на лавинних транзисторах, найпотужніші напівпровідникові струмові перемикачі на динисторах та тиристорах. Відомі апаратні реалізації нейронних елементів на базі R-негатронів [4]: нейростори на S-діодах; модуляційних, лавинних, одноперехідних транзисторах; динисторах та тиристорах; тунельних діодах.

Відкриття нових фізичних ефектів від'ємної ємності призвело до появи фізичних С-негатронів [8-12], використання яких дозволяє вирішити ряд проблем класичної електроніки [13 - 15]. В зв'язку з цим викликає інтерес також створення нейронних елементів на базі фізичних С-негатронів, що будуть мати ряд переваг над існуючими. Наявність оптичних входів дозволяє забезпечити загальновідомі переваги оптичних зв'язків.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПОБУДОВИ НЕЙРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА С-НЕГАТРОНАХ

С-негатроном називається електронний прилад та його схемотехнічний аналог, що в певному режимі роботи має від’ємне значення диференційної ємності. Як і R-негатрони, їх можна поділити на статичні та динамічні [6]. Статичні С-негатрони мають кулон-вольтні характеристики N- та S-типів (рис. 1, а, б), на яких існує падаюча ділянка (а, б), де значення диференційної ємності буде негативним $C^{(-)} = dq/du < 0$.

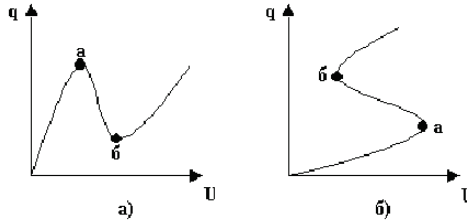


Рис. 1. Кулон-вольтні характеристики N- (а) та S-типів (б) С-негатронів

Наявність від’ємної ємності робить С-негатрон потенційно-нестійким та багатофункціональним приладом. При правильному виборі параметрів навантаження схема на С-негатроні буде працювати в режимі перемикання [6], а С-негатрон буде виконувати функції порогового елемента. Так при $C_H < |C^{(-)}|$ пряма навантаження перетинає кулон-вольтну характеристику С-негатрона N-типу як показано на рис. 2. При подачі вхідного струму $i(t)$, заряд $q(t)$ на С-негатроні буде збільшуватися, а положення робочої точки зсуватися з положення 1 в 2. При цьому буде забезпечуватися функція інтегрування вхідного сигналу струму, так як $q(t) = \int_0^t i(t)dt$. При досягненні порогового значення заряду $Q_{i\delta}$ відбудеться перемикання С-негатрона, і робоча точка миттєво перейде з положення 3 в положення 4, а напруга на С-негатроні стрибкоподібно зміниться від U_{nop} до U_{high} .

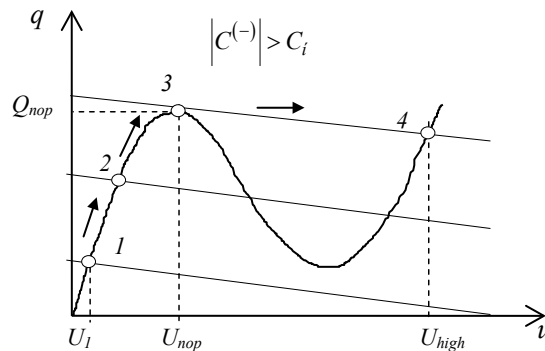


Рис. 2. Прямі навантаження та положення рівноваги С-негатрона N-типу

Аналогічним чином, але при $\tilde{N}_i > |C^{(-)}|$, буде працювати С-негатрон S-типу в режимі перемикання [6] та виконувати функції інтегрування вхідного струму та функцію порогового елемента.

Виходячи з вищеведеного принципу роботи порогового елемента синтезована схема оптоелектронного нейронного елемента на базі С-негатрона N-типу, що наведена на рис. 3.

На схемі: C_H – ємність навантаження – визначає нахил прямої навантаження; $C_N^{(-)}$ – С-негатрон N-типу – виконує інтегрування вхідних струмових сигналів та порогову функцію активації; фотодіоди збудження VD1-VД3 та гальмування VD4 – забезпечують перетворення вхідних оптичних сигналів в фотоструми.

Дана схема має оптичні входи (причому кількість оптичних входів досить легко збільшити додавши в схему паралельно нові фотодіоди, або подаючи декілька оптичних потоків на один фотодіод) та потенціальний вихід.

Напруга на виході буде визначатися виразами:

$$U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} \leq U_{i\hat{i}\hat{o}}, \text{ якщо } Q = \int_0^t i_{\Sigma}(t) dt \leq Q_{i\hat{i}\hat{o}}, \text{ де } i_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n i_j - \sum_{j=1}^m i_j;$$

$$U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} \geq U_{high}, \text{ якщо } Q = \int_0^t i_{\Sigma}(t) dt > Q_{i\hat{i}\hat{o}}.$$

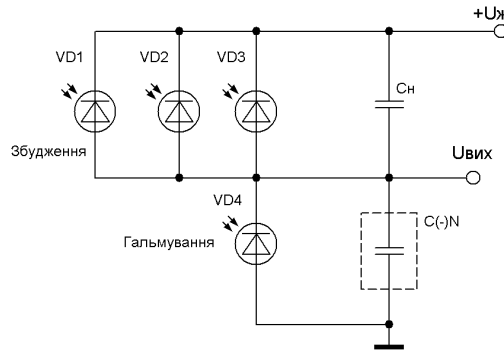


Рис. 3. Оптиелектронний нейрон на С-негатроні N-типу

Таким чином дана схема виконує просторове алгебраїчне сумування вхідних сигналів від фотодіодів: сумарний вхідний струм $i_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n i_j - \sum_{j=1}^m i_j$, де n - кількість фотодіодів збудження,

m - кількість фотодіодів гальмування; та часове інтегрування вхідних сигналів: заряд С-негатрона

$$Q = \int_0^t i_{\Sigma}(t) dt.$$

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В програмі Мікро-Сар 9 проведемо комп'ютерне моделювання запропонованого нейрону. Дана програма зручна для даного використання, так як в ній є можливість задання нелінійної кулон-вольтової характеристики ємності.

Проведений аналіз літератури показав, що на даний час ефект від'ємної ємності спостерігається в різних напівпровідникових структурах в різних умовах (однорідних напівпровідниках [8], гомоструктурах [9], гереструктурах [11], структурах типу метал-напівпровідник [10], аморфних напівпровідникових плівках [12]) та в інших зарядових електрифікованих структурах [13]. Нелінійну кулон-вольтну характеристику, що має ділянку від'ємної диференційної ємності, можна отримати в плівкових конденсаторах з фероелектричним діелектриком [16]. Такі фізичні С-негатрони сумісні з CMOS-технологією виготовлення інтегральних мікросхем. Проте фізичні С-негатрони ще знаходяться на стадії досліджень і відсутні детальні експериментальні дані, які дозволи б розробити математичну модель для саме цих С-негатронів. Тому для комп'ютерного моделювання задамося певними параметрами С-негатрона, що дозволить перевірити працездатність схеми та дослідити її роботу в різних режимах.

Для моделювання будемо використовувати С-негатрона N-типу, кулон-вольтну характеристику (рис. 4,а) якого опишемо поліномом 3-го степеня

$$q(u) = 8,8 \cdot 10^{-9} \cdot u - 4,35 \cdot 10^{-9} \cdot u^2 + 0,55 \cdot 10^{-9} \cdot u^3.$$

Для даної характеристики значення порогового заряду $Q_{i\hat{i}\hat{o}} = 530 \text{ пКл}$, порогової напруги $U_{i\hat{i}\hat{o}} = 1,4 \text{ В}$, від'ємна диференційна ємність спостерігається в діапазоні напруг $U = 1,4 \dots 3,9 \text{ В}$, максимальне значення від'ємної ємності спостерігається при напрузі $U_C = 2,65 \text{ В}$ і дорівнює $\tilde{N}_{i\hat{a}\hat{o}}^{(-)} = -267 \text{ пФ}$ (рис. 4,б). За умовою роботи С-негатрона N-типу в режимі перемикання необхідно, щоб

$C_H < |C^{(-)}|$, тому виберемо значення ємності навантаження $C_i = 10\text{пФ}$, при цьому значення напруги високого стану $U_{high} \approx 5\text{В}$ (рис. 4, а).

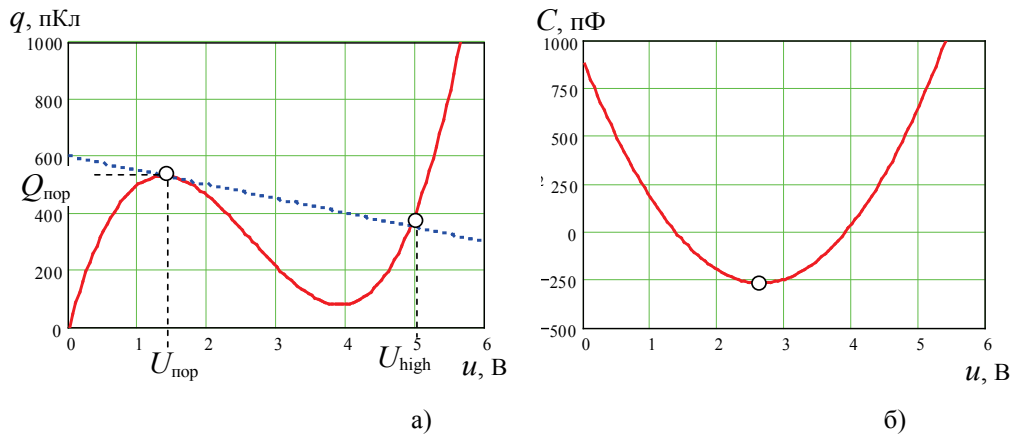
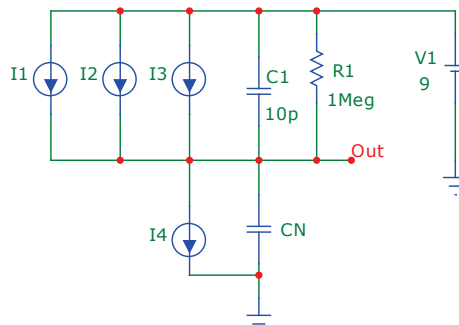


Рис. 4. Кулон-вольтна (а) та вольт-фарадна (б) характеристики С-негатрона N-типу

На рис. 5 наведена схема для моделювання в програмі Мікро-Сар 9. Фотодіоди замінені на генератори струму I1 – I4, R1 відображає опір діелектрика конденсатора навантаження C1, заряд С-негатрона CN заданий виразом $Q(CN)$.



$$Q(CN) = 0.88n \cdot V(CN) - 0.435n \cdot V(CN) \cdot V(CN) + 0.055n \cdot V(CN) \cdot V(CN) \cdot V(CN)$$

Рис. 5. Схема нейрона на С-негатроні для моделювання в програмі Мікро-Сар 9

На рис. 6 наведена часова діаграма роботи нейрона. Вхідний струм I1=5мА, заряд С-негатрона $Q(CN)$ збільшується по мірі заряду ємності, і в момент часу $t = 90,6\text{нс}$ досягає порогового значення $Q_{i\dot{i}\delta} = 530\text{пКл}$, і напруга на виході стрибком змінюється від $U_{i\dot{i}\delta} = 1,4\text{В}$ до $U_{high} = 5\text{В}$. Час перемикання, за результатами моделювання, становить значно менше 1пс. Проте в схемі не враховані паразитні елементи, що на практиці погіршать швидкодію схеми. Для скиду схеми в початковий стан необхідно подати імпульс струму на вхід гальмування, це розрядить ємність С-негатрона і напруга на виході стане $\approx 0\text{В}$.

На рис. 7 наведені часові діаграми роботи нейрона на С-негатроні при подачі імпульсних вхідних сигналів на входи збудження I1, I2, I3. Кожен з цих сигналів заряджає ємність С-негатрона, але заряду окремих сигналів не досить, щоб перевести схему у високий стан.

Схема виконує інтегрування вхідних сигналів, і коли сумарний заряд всіх трьох сигналів перевищує пороговий заряд С-негатрона відбувається перемикання схеми.

Таким чином нейрон може виконувати логічну функцію «І» бінарної логіки. Для переведення схеми в низький стан на вхід гальмування I4 подається імпульс струму скиду.

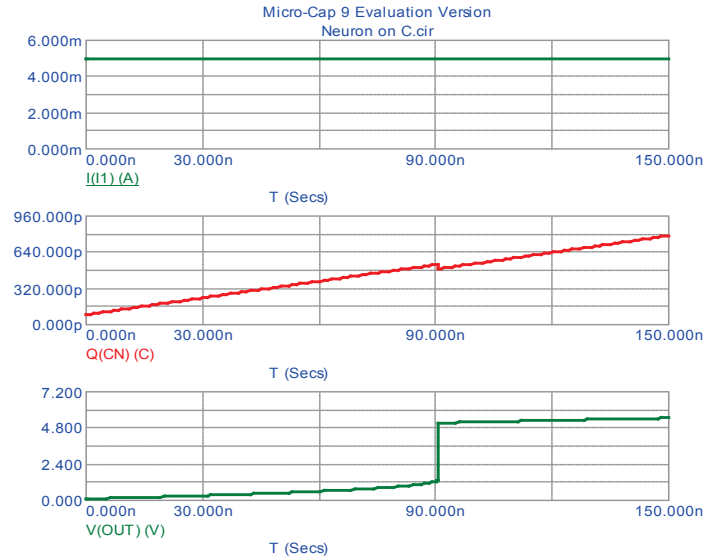


Рис. 6. Часові діаграми роботи нейрона на С-негатроні: I(I1) – вхідний фотострум сигналу збудження; Q(CN) – заряд С-негатрона; V(OUT) – напруга на виході нейрона

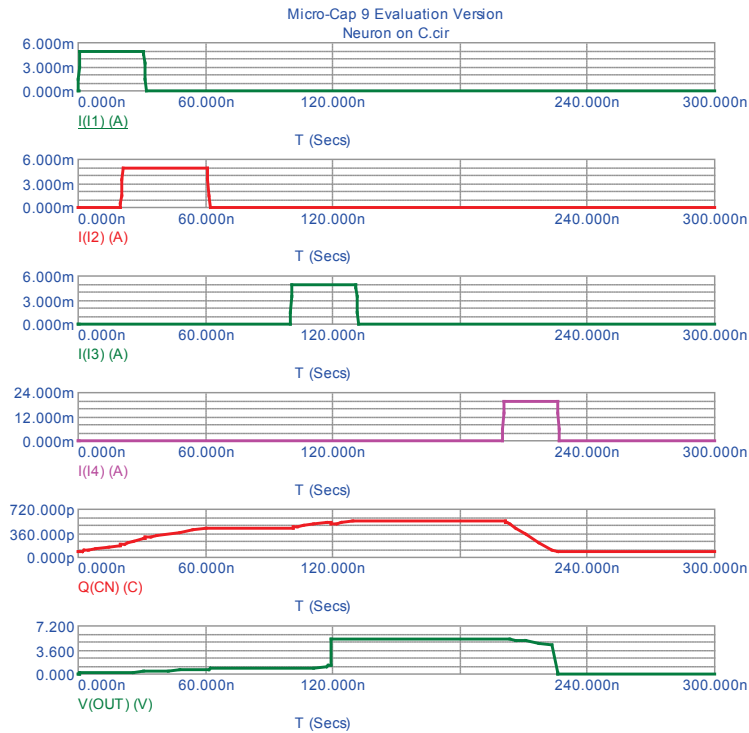


Рис. 7. Часові діаграми роботи нейрона на С-негатроні: I(I1), I(I2), I(I3) – вхідні фотоструми сигналів збудження; I(I4) – фотострум сигналу гальмування (сигналу скиду); Q(CN) – заряд С-негатрона; V(OUT) – напруга на виході нейрона

ВИСНОВКИ

1. Запропонований оптоелектронний нейронний елемент містить: фотодіод(и) збудження, фотодіод(и) гальмування, конденсатор навантаження, С-негатрон N-типу; і реалізує такі основні функції нейрона: просторове та часове інтегрування (алгебраїчне сумування) вхідних сигналів; порогову функцію активації. На виході нейрона з'являється напруга високого рівня, якщо сумарний вхідний заряд перевищить певний поріг, що визначається кулон-вольтовою характеристикою С-негатрона N-типу.

2. Даний нейрон може виконувати логічні функції «І», «АБО», «НІ» булевої логіки, працювати як RS-тригер, елемент пам'яті, широтно-імпульсний та фазо-імпульсний модулятори, виконувати функції нейронної логіки над часовими імпульсно-кодованими вхідними сигналами.

3. Перевагою нейронних елементів на С-негатронах є: висока швидкодія (час переключення менше 1пс); схемотехнічна простота (функції інтегрування та активації виконуються одним С-негатроном); технологічна простота (С-негатроном може бути плівковий конденсатор з фероелектричним діелектриком, що сумісний з добре розвинутою CMOS-технологією виготовлення інтегральних мікросхем); здатність підсилювати напругу; мале енергоспоживання (ємність не споживає активну потужність); С-негатрон керується зарядом, що дозволяє працювати не зі струмами та напругами, а безпосередньо з зарядом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры. М.: ИПРЖР, 2000. – 528с.
2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. — 2-е. — М.: «Вильямс», 2006. — С. 1104.
3. Пат. 6501294 В2 США, МКИ H03K 19/23. Neuron circuit / К. Bernstein, N. J. Rohrer (США). - № 09/842736; Заявл. 26.04.2001; Опубл. 31.12.2002. – 5с.
4. Стафеев В.И., Комаровских К.Ф., Фурсин Г.И. Нейристорные и другие функциональные схемы с объемной связью – М.: Радио и связь, 1981. – 112с.
5. В.Ф. Бардаченко, О.К. Колесницький, С.А. Василецький, Таймерні нейронні елементи та структури. – УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 126с.
6. Філінюк М.А. Основи негатроніки. Т.1. Теоретичні і фізичні основи негатроніки - УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 456 с.
7. Філінюк М.А. Основи негатроніки. Т.2. Прикладні аспекти негатроніки. - Вінниця:УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 306 с.
8. Пенин Н.А. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах // ФТП. - 1996. - Т.30, №4. - С. 626-634.
9. Ershov M., Liu H.C., Li L., Buchanan M., Wasilevski Z.R., Jonscher A.K. Negative capacitance effect in semiconductor devices // IEEE Trans. On Electron Devices. – 1998. – Vol. 45, №10. – P. 2196-2203.
10. Wu X., Yang E.S., Evans H.L. Negative capacitance at metal-semiconductor interfaces // J. Appl. Phys. - 1990. - Vol. 68, №6. - P. 2845-2848.
11. Болтаев А.П., Бурбаев Т.М., Курбатов В.А., Рзаев М.М., Пенин Н.А., Сибельдин Н.Н. Эффекты накопления заряда и отрицательная емкость в гетероструктурах на основе кремния // Известия академии наук. Серия физи-ческая. - 1999. - №2. - С. 312-318.
12. Абдулаев А.Г., Ветхов В.А., Касимов Ф.Д. и др. Отрицательная емкость в локально выращенных пленках поликристаллического кремния // Электронная техника, Сер. 3. Микроэлектроника. - 1985. - Т.116, Вып. 4. - С.21-25.
13. Partenskii M.B., Dorman V. L., Jordan P. C.. The question of negative capacitance and its relation to instabilities and phase transitions at electrified interfaces // Int. Rev. Phys. Chem. - 1996. – No. 11, 153. - P.153–181.
14. Anup P. Jose, Kenneth L. Shepard. Distributed Loss-Compensation Techniques for Energy-Efficient Low-Latency On-Chip Communication // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2007. - Vol. 42, No. 6. – P. 1415 – 1424.
15. Kolev Svilen, Delacressonniere Bruno, Gautier Jean-Luc. Using a negative capacitance to increase the tuning range of a varactor diode in MMIC technology // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. - 2007, Vol. 49, No12. - P. 2425-2430.
16. Victor V. Zhirnov and Ralph K. Cavin. Negative capacitance to the rescue? // Nature Nanotechnology. – 2008. - Vol. 3. – P. 77 – 78.

Надійшла до редакції 05.10.2008р.

ЛАЗАРЄВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ – к.т.н., старший викладач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної техніки ВНТУ, E-mail: LaAlex@mail.ru.

ФІЛІНЮК МИКОЛА АНТОНОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної техніки ВНТУ, (0432) 59-80-75, E-mail: Filinyuk@vstu.vinnica.ua.

БАСЮК ТАРАС ВОЛОДИМИРОВИЧ – студент 5-го курсу факультету МБЕП інституту РТЗП ВНТУ.