М. А. ФІЛИНЮК, О. О. ЛАЗАРЄВ, О. В. ВОЙЦЕХОВСЬКА

LC-НЕГАТРОНИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

М. А. Філинюк, О. О. Лазарєв,
О. В. Войцеховська

LC–НЕГАТРОНИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2012

УДК 621.396.6:621.382
ББК 32.844
Ф53

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України (протокол № 8 від 05.04.2012 р.)

Рецензенти:
Й. Й. Білинський, доктор технічних наук, професор
О. П. Яненко, доктор технічних наук, професор

Філинюк, М. А.

Ф53 LC-негатрони та їх застосування : монографія / М. А. Філинюк, О. О. Лазарєв, О. В. Войцеховська. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с.

ISBN 978-966-641-452-9

В монографії розглядаються питання властивостей LC-негатронів та побудови інформаційних електронних пристроїв на їх основі. Показано можливості застосування LC-негатронів в комутуючих, керуючих, частотно-вибіркових, коригуючих пристроях. Розглянуто використання LC-негатронів в сенсорах, логічних та нейронних елементах, а також як помножувачів реактивностей, з метою покращення технічних характеристик пристроїв. Розглянуто варіанти технічної реалізації LC-негатронів. Книга розрахована на студентів, аспірантів, наукових співробітників та спеціалістів, що займаються проектуванням і розробкою інформаційних систем, систем керування та пристроїв на базі негатронів.

УДК 621.396.6:621.382
ББК 32.844

ISBN 978-966-641-452-9

© М. Філинюк, О. Лазарєв, О. Войцеховська, 2012

ЗМІСТ

ВСТУП 5
1 ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ LC-НЕГАТРОНІВ 7
1.1 Короткий історичний огляд розвитку наукового напрямку «Негатроніка» 7
1.2 Класифікація негатронів 21
1.3 Визначення С-негатрона 25
1.4 Визначення L-негатрона 28

2 ТЕОРІЯ КІЛ З С-НЕГАТРОНАМИ 32
2.1 Енергетичні властивості С-негатронів 32
2.2 Види годографів і допоміжні елементи Баркгаузена для С-негатронів 36
2.3 Стійкість електричних кіл із С-негатронами 37
2.3.1 Стійкість електричного кола з С-негатронами N-типу 38
2.3.2 Стійкість електричного кола з С-негатронами S-типу 48

3 ТЕОРІЯ КІЛ З L-НЕГАТРОНАМИ 56
3.1 Енергетичні властивості L-негатронів 56
3.2 Види годографів і допоміжні елементи Баркгаузена для L-негатронів 61
3.3 Стійкість електричної схеми з L-негатронами 62
3.3.1 Стійкість електричного кола з L-негатроном N-типу .. 62
3.3.2 Стійкість електричного кола з L-негатроном S-типу ... 68
3.4 Дуальність кіл з LC-негатронами 73

4 КОМУТУЮЧІ ТА КЕРУЮЧІ ПРИСТРОЇ 79
4.1 Ключі з послідовним включенням керуючого елемента на С-негатроні N-типу 80
4.2 Ключі з паралельним включенням керуючого елемента на С-негатроні N-типу 96
4.3 Використання С-негатронів для збільшення коефіцієнта перекриття ємності варикапів 103
4.4 Використання С-негатронів в активних фільтрах 104

5 СЕНСОРИ НА LC-НЕГАТРОНАХ 107
5.1 Ємнісні сенсори на С-негатронах 107
5.2 Індуктивні сенсори на L-негатронах 118
5.3. Індуктивні мостові сенсори на L-негатронах 125
5.4 Автогенераторні сенсори на LC-негатронах 136
5.4.1 Вимоги до автогенераторних сенсорів 136
5.4.2 Ємнісні автогенераторні сенсори на С-негатронах 138
5.4.3 Індуктивні автогенераторні сенсори на L-негатронах 143

6 ЧАСТОТНО-ВИБІРКОВІ ПРИСТРОЇ 157
6.1. Послідовний коливальний контур з LC-негатронами..... 157
6.2. Паралельний коливальний контур з LC-негатронами 165

7 КОРИГУЮЧІ ПРИСТРОЇ 171
7.1 Оптрони на негатронах..... 171
7.2 Компенсатор реактивного опору на L-негатроні..... 172
7.3 Компенсація паразитних ємностей та індуктивностей..... 174
7.4 Мікроенергосбереження та С-негатрони..... 176
7.5 Застосування С-негатронів в інформаційних пристроях.... 177
7.6. Застосування від'ємної індуктивності в інформаційних пристроях 194

8 ПОМНОЖУВАЧІ ІМІТАНСУ..... 213
8.1 Визначення та основні параметри помножувача індуктивності..... 213
8.2 Аналіз умов реалізації помножувача індуктивності 214
8.3 Визначення оптимального значення перетворюваного імітансу..... 218
8.4 Розрахунок максимально-досяжного коефіцієнта помноження індуктивності 220
8.5 Експериментальне дослідження однокристальних помножувачів індуктивності..... 221
8.6 Аналіз основних параметрів помножувача індуктивності на L-негатроні..... 226
8.7 Дослідження коефіцієнта добротності помножувача індуктивності 232
8.8 Помножувач реактивності на С-негатроні 236

9 ТЕХНІЧНА РЕАЛИЗАЦІЯ LC-НЕГАТРОНІВ..... 240
9.1 Аналіз методів та засобів схемотехнічної реалізації LC-негатронів..... 240
9.2. Реалізація С-негатронів на інверторах від'ємного опору .. 247
9.3 Реалізація С-негатронів на конверторах від'ємного опору 252
9.4 Реалізація L-негатронів на операційних підсилювачах…...263

10 ЛОГІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ НА LC-НЕГАТРОНАХ….....267
10.1 Визначення та класифікація імітансної логіки….....267
10.2 Схемотехнічна реалізація логічних елементів на LC-негатронах 272
10.3 Багатофункціональний логічний елемент на С-негатроні 275
10.4 Компоненти нейронних мереж..... 278

ЛІТЕРАТУРА……...284

ВСТУП

Технічні параметри інформаційних систем та систем керування значною мірою визначаються пристроями, що входять до їхнього складу. Ефективність цих пристроїв залежить від використаної елементної бази. Для подальшого вдосконалення електронних пристроїв необхідна розробка теорії побудови та пошук якісно нових принципів реалізації елементів, що відрізняються малим споживанням енергії, високою чутливістю, точністю, підвищеною швидкодією та надійністю, відносно малим об'ємом елементів, широким робочим діапазоном. В багатьох випадках цим вимогам відповідають негатрони – електронні прилади, що в деякому режимі роботи мають від'ємне значення основного диференційного параметра (від'ємні активний опір, індуктивність, ємність). Розвиток негатронів та теорії проектування інформаційних пристроїв на їх основі протягом десятків років здійснювався у самостійних напрямках, незважаючи на те, що загальні закони та принципи їх побудови були спільними.

Враховуючи це, на початку 80-х років минулого сторіччя відбулося об'єднання вчених, які займаються створенням негатронів та інформаційних пристроїв на їх основі в єдиному науковому напрямку, який отримав назву «Негатроніка».

Науковий напрямок «Негатроніка» був вперше визначений д. т. н., професором М. А. Філинюком в 1985 році [1]. Цьому передували публікації низки робіт радянських та закордонних авторів, таких як О. В. Лосєв, У. Шоклі (W. Shockle), Ганн (J. B. Gunn), Л. Есакі (L. Esaki), С. О. Гаряінов, І. Д. Абезгауз, Ф. Бенінг, В. П. Дьяконов, О. С. Тагер, Л. М. Степанова, О. М. Негоденко, Ф. Д. Касимов, В. С. Осадчук, В. М. Кичак, П. А. Молчанов та ін., в яких узагальнені результати як теоретичних, так і практичних досліджень. Кожна з цих публікацій внесла значний вклад в розвиток негатроніки. Однак слід зауважити, що більшість робіт стосуються R-негатронів, і значно менша частина – теорії та практики створення та використання елементів на базі L-, C-негатронів.

В цій монографії розглядається теорія L-, C-негатронів та їх можливі застосування. Вона є результатом досліджень, що проводились

протягом останніх років в цьому напрямку в Україні та за кордоном.

В першому розділі викладено історію розвитку негатроніки та основні визначення.

В другому та третьому розділах викладено основи теорії L- та C-негатронів, зокрема висвітлено питання енергетичних властивостей вказаних негатронів, види годографів, розглянуто питання стійкості та дуальності електричних кіл з L-, C-негатронами.

В четвертому розділі розглянуто комутуючі та керуючі пристрої, зокрема ключі з паралельним та послідовним включенням негатронів, а також використання C-негатронів в активних фільтрах та для збільшення коефіцієнта перекриття ємності варикапів.

В п'ятому розділі досліджено сенсори на L-, C-негатронах. Розглянуто ємнісні та індуктивні параметричні і автогенераторні сенсори.

В шостому розділі викладено результати досліджень коливальних контурів з L- та C-негатронами.

Різні види коригуючих пристроїв розглянуто в сьомому розділі. Висвітлено питання застосування L-, C-негатронів для компенсації паразитних параметрів пристроїв та використання C-негатронів для енергозбереження. Багато уваги в цьому розділі приділено аналізу закордонних публікацій щодо застосування L-, C-негатронів.

У восьмій главі висвітлено використання L-, C-негатронів як помножувачів імітансу.

В дев'ятій главі розглянуто варіанти схемотехнічної реалізації LC-негатронів на конверторах й інверторах від'ємного опору та на операційних підсилювачах.

Логічні елементи та компоненти нейронних мереж на LC-негатронах розглянуто в десятому розділі.

Автори висловлюють подяку рецензентам доктору технічних наук, професору кафедри конструювання і виробництва радіоапаратури Національного технічного університету України «КПІ» О. П. Яненку та завідувачу кафедри електроніки Вінницького національного технічного університету доктору технічних наук, професору Й. Й. Білинському за корисні поради, що дозволили покращити зміст монографії, а також редактору С. А. Малішевській та провідному інженеру О. М. Власюк за професіоналізм при підготовці цієї монографії до видання.

1 ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ LC-НЕГАТРОНІВ

1.1 Короткий історичний огляд розвитку наукового напрямку «Негатроніка»

Нині в сфері електроніки розвиваються такі наукові напрямки: квантова електроніка, оптоелектроніка, акустоелектроніка, хемотроніка, магнітоелектроніка, кріоелектроніка та ін. В кінці XX століття сформувався ще один напрямок – «Негатроніка» [1–3]. Цей напрямок електроніки пов'язаний з теорією та практикою створення і застосування негатронів – електронних приладів, що мають у визначеному режимі від'ємне значення основного диференціального параметра: від'ємних активного опору (R-негатрони), ємності (C-негатрони) та індуктивності (L-негатрони) [4]. Зараз розроблені різні види негатронів. Тільки напівпровідникових негатронів створено більше двох десятків різновидів. Серед них найпотужніші надвисокочастотні (НВЧ) прилади – лавинно-пролітні діоди, найшвидкодійніші ключі на лавинних транзисторах, наймогутніші струмові напівпровідникові перемикачі на динисторах і тиристорах. Однак розвиток цього напрямку проходив нерівномірно і, на відміну від класичної транзисторної електроніки, довгий час не мав систематизованої методологічної і теоретичної бази. І тільки в 1985 році було дане формулювання цього наукового напрямку [1].

Збудження електричних коливань за допомогою від'ємних імпедансів відоме ще з початку XX століття і пов'язане з відкриттям Дуделем [5] «електричної дуги, що лунає». Внаслідок незручності практичного використання електричної дуги в схемах генераторів, вона була витіснена ламповими генераторами, що з'явилися. Перші електронні лампи, внаслідок недосконалості техніки одержання глибокого вакууму, були газонаповнені, а на їхніх вольт-амперних характеристиках спостерігалися спадні ділянки. На цих ділянках дійсний імпеданс між анодом і катодом газонаповненої лампи від'ємний [6], що в принципі дозволяє використовувати цю їхню властивість для побудови генераторів і підсилювачів електричних коливань. Однак їхні великі шуми і нестабільність виявилися причиною незначного інтересу до них, як до приладів, що мають від'ємний опір.

Винайдення у 1924 році електровакуумного тетрода поставло перед фахівцями проблему «динатронного ефекту», в результаті якого на вихідній вольт-амперній характеристиці (ВАХ) тетрода спостерігається спадна ділянка, що приводить до зростання нелінійних спотворень і самозбудження підсилювача. Цей ефект не знайшов практичного застосування і був подоланий у 1931 р. введенням в електронній лампі третьої антидинатронної сітки.

Відкриття 13 січня 1922 року інженером Нижегородської лабораторії О. В. Лосєвим (рис. 1.1) спадної ділянки на ВАХ напівпровідникового точкового діода, варто вважати початком розвитку напівпровідникової негатроніки [7]. Молодий вчений не тільки вперше одержав на ВАХ діода спадну ділянку, але й реалізував з використанням такого діода регенеративний приймач – кристадин. Ці результати привернули увагу багатьох фахівців світу. В США журнал «Radio News» помістив у вересневому номері 1922 р. редакційну статтю під заголовком «Сенсаційний винахід». В ній говорилося: «Немає потреби доводити, що це – революційний радіовинахід. Незабаром ми будемо говорити про схему з трьома або шістьма кристалами, як ми говоримо тепер про схему з трьома чи шістьма підсилювальними лампами. Потрібно буде кілька років для того, щоб кристал, що генерує, удосконалився настільки, щоб стати кращим вакуумної лампи, але ми пророкуємо, що такий час настане». У цьому пророкуванні не виправдалися тільки терміни. Саме ці перші роботи О. В. Лосєва треба вважати початком «ери напівпровідникової електроніки».

Електронні прилади зі спадною ділянкою на ВАХ надалі одержали найменування «негатрони» [9].

Успішний розвиток електронно-вакуумних приладів відвернув увагу спеціалістів від цього напрямку. Хоча, в результаті розвитку електронних ламп і підвищення робочих частот, у них виявлялися ефекти, пов'язані з від’ємним опором. Це спричиняло неконтрольоване збудження електронної апаратури й зростання нелінійних спотворень, і тому розглядалося як паразитне явище. І тільки знаходження у 1932 р. Д. А. Рожанським і А. Н. Арсеньєвою пролітного клістрона, а в 1936–37 р. Н. Ф. Алексєєвим і Д. Е. Маляровим багаторезонаторного магнетрона стало подальшим поштовхом розвитку вакуумної негат-

роніки. У цих приладах, і пізніше у винайдених лампах біжучої (ЛБХ) і зворотної (ЛЗХ) хвилі, в результаті взаємодії електронів з електромагнітними полями відбувається перетворення кінетичної енергії електронів в енергію електромагнітного поля і, як наслідок, до появи від'ємного опору [10]. Значний внесок у створення таких приладів належить Н. Д. Девяткову, М. С. Нейману, С. Д. Гвоздоверу, В. Ф. Коваленко, М. Т. Греховій, Ю. А. Кацману, С. А. Зусманову, І. В. Лєбєдєву та ін.

Рисунок 1.1 – О. В. Лосєв (10.5.1903–22.01.1942)

Освоєння НВЧ діапазону дало поштовх до пошуку нових фізичних ефектів і напівпровідникових приладів, що мають від'ємний опір. Зусилля насамперед були спрямовані на створення напівпровідникових негатронів, що мають від'ємний опір якомога на більш високих частотах у надвисокочастотному діапазоні. Початком пошуку шляхів створення таких НВЧ-приладів стала стаття В. Шоклі, опублікована в 1954 році [11]. Автор викладає ідею двохелектродного приладу з від'ємним опором, що виникає завдяки ефекту часу прольоту. Як перший приклад він розглядає «діод із затримкою неосновних носіїв». У запропонованій ним p^+-n-p- чи (n^+-p-n)-структурі, неосновні носії, що інжектуються із p^+-n-переходу, дрейфують до іншого p-n-переходу, затримуючись при цьому на час, рівний часу прольоту. Інший прилад, запропонований В. Шоклі, – це p-n-p-структура, що використовується в режимі проколу, щоб забезпечити її уніполярність. Ці дві структури

надзвичайно схожі на інжекційно-пролітні діоди (ІПД), що з'явилися пізніше.

У тій же статті В. Шоклі обговорює можливість створення двохелектродного приладу, що являє собою просто однорідний напівпровідник, у якому під дією сильного електричного поля можуть спостерігатися відхилення від закону Ома, що приводять до виникнення від'ємного диференціального опору. Відхилення від закону Ома виражається в зниженні швидкості носіїв зі збільшенням напруженості поля, тобто в появі ділянки від'ємної диференціальної рухливості. Однак практичної реалізації ця ідея не одержала через низку теоретичних недоробок. І тільки в 1963 р. Ганном були отримані перші експериментальні дані про існування пролітних коливань, пов'язаних з цією властивістю у GaAs і InP [12]. А прилади, що використовують цей ефект, одержали найменування «Діоди Ганна» або «прилади на ефекті об'ємного від'ємного опору».

Цікавий двохелектродний прилад з від'ємним опором, що діє на новому принципі, – тунельний діод, який був відкритий у 1957 р. японським фізиком Л. Есакі [13]. На прямій ділянці ВАХ дуже вузького германієвого *p*-*n*-переходу (тобто переходу, створеного на сильнолегованому матеріалі) була виявлена ділянка від'ємного опору кінцевої величини. Така характеристика виходить в результаті польової емісії (тунелювання) електронів через вузький збіднений шар. Варто помітити, що тунельний діод не виправдав надій, оскільки від нього не вдалося одержати великої вихідної потужності.

У 1958 р. В. Рід [14] запропонував використовувати для генерації НВЧ потужності діод з багатоскладовою n^+-p-p^--структурою. У цьому приладі використовується поєднання ефектів лавинного множення, заснованого на ударній іонізації, і часу прольоту електронів. Тому прилад був названий IMPATT-діод (Impact Avalanche and Transit Time). Однак запропонована ним спеціальна конструкція діода виявилася занадто складною, її вдалося втілити в життя тільки в 1964 р.

В СРСР ці прилади одержали найменування «лавинно-пролітні діоди (ЛПД)» і були відкриті О. С. Тагером і його співробітниками в 1959 р. [15]. За кордоном перше повідомлення про практичну реалізацію ЛПД було опубліковано в 1965 році [16].

Подальшим розвитком ЛПД є TRAPATT-діод (Trapped Plasma Avalanche-and-Transit Time, що означає «лавинно-пролітний діод із захопленням плазми»). Для реалізації TRAPATT-режиму, відкритого в 1966 р. [17], необхідна дуже складна взаємодія між приладом і НВЧ схемою. Наприклад TRAPATT-підсилювач вимагає налаштування за гармоніками та субгармоніками, а також використання ЛПД-режиму для запуску. Незважаючи на складність самого приладу і відповідної схеми, TRAPATT-діоди відіграють провідну роль у фазованих антенних ґратках (ФАГ), оскільки забезпечують можливість одержання високої імпульсної потужності на НВЧ (> 100 Вт), більшого коефіцієнта заповнення (1–20%), високого ККД (> 25 %) та ширини смуги пропускання в підсилювачах не менш 15 %. Однак цим приладам властиві і деякі недоліки:

– процесу ударної іонізації властиві значні шуми, тому підсилювачі і генератори на їхній основі будуть також мати великі шуми;

– процес ударної іонізації вимагає більшої потужності для одержання значних електричних полів.

В 1971 р. вперше було отримано генерацію у НВЧ діапазоні за допомогою інжекційно-пролітного діода [18], теоретичні основи роботи якого були обґрунтовані ще в 1954 році В. Шоклі [11]. У низці публікацій ці діоди одержали найменування «БАРІТТ-діоди» (Barrier Injection Transit Time Diodes). Маючи, як і ЛПД, динамічний від'ємний опір у діапазоні НВЧ, в них не використовується режим лавинного множення носіїв і, отже, відсутні недоліки, властиві ЛПД.

Всі вищерозглянуті діоди з від'ємним опором призначені для роботи в діапазоні НВЧ і здатні працювати при відносно невеликих значеннях потужності сигналу і робочих струмах.

На низьких частотах велике поширення одержали чотиришарові напівпровідникові структури типу *p*-*n*-*p*-*n* та їхні різні модифікації, що мають від'ємний опір [19]. В основі їх роботи лежить тиристорний ефект, обумовлений лавинним множенням носіїв у закритому середньому *p*-*n*-переході. Найширше застосування одержали двохелектродні *p*-*n*-*p*-*n* (динистори) і триелектродні (тиристори) структури. Крім того відомі тиристори з керуванням за двома вхідними колами (тетристори) і тиристори з чутливим і нечутливим електродом. Систематич-

ні дослідження таких тиристорних негатронів проведені С. О. Гаряїновим і І. Д. Абезгаузом. Ці прилади можуть працювати в підсилювальному, генераторному і ключовому режимах. Для них характерна велика економічність за живленням при роботі в ключовому режимі та здатність комутувати сигнали великої потужності. Таким чином, теоретично вони є багатофункціональними приладами, за допомогою яких можна здійснювати широку уніфікацію радіоелектронних пристроїв. Однак практична сфера їх застосування обмежується в основному пристроями імпульсної техніки, що пояснюється низкою характерних для них недоліків. До них відносяться: низька температурна стабільність, підвищена нестійкість коефіцієнта перетворення пристроїв до зміни від'ємного опору, низька економічність за живленням при роботі в лінійному режимі, високі напруги живлення й малий частотний діапазон.

Дослідження ефекту лавинного множення в колекторному переході біполярного транзистора привело до створення лавинного транзистора, на ВАХ якого є ділянка від'ємного опору [20]. Теоретичні дослідження таких негатронів і імпульсних пристроїв на їхній основі, проведені В. П. Дьяконовим [21], показали можливість формування імпульсів з часом наростання 0,1–1 нс і амплітудою до 15 В і більше на опорі навантаження в 750 Ом. Деякі транзистори дозволяють при меншій амплітуді генерувати імпульси з частотою повторення до 1 ГГц, інші, при значно менших частотах повторення, здатні формувати імпульси з амплітудою за напругою до 100 В на навантаженні 50 Ом або імпульси з амплітудою за струмом до 50 А на опорі навантаження в 0,5–1 Ом. Наявність між емітером і колектором лавинного транзистора індуктивного імпедансу з від'ємною дійсною складовою стала передумовою використання його як високодобротного напівпровідникового аналога індуктивності [22]. Однак великі шуми таких негатронів, обумовлені лавинним ефектом, і низька температурна стабільність зробили таке застосування лавинних транзисторів безперспективним.

Технологічні методи створення планарних напівпровідникових приладів досягли високої досконалості. Тому негатрони на *p-n*-переходах можуть мати відносно високу надійність і відтворюваність. Однак процес їх виготовлення трудомісткий, оскільки вимагає прове-

дення від двох до чотирьох високотемпературних процесів окислювання і дифузії, і відповідної кількості процесів фотолітографії. З цього погляду цікаві аморфні і полікристалічні напівпровідникові плівки, у яких поряд з ВО (від'ємним опором) існує і переключення з пам'яттю. При додаванні до плівки визначеної граничної напруги вона стрибком переходить у низькоомний стан і зберігає його, навіть, у випадку відключення живлення. Перше повідомлення в 1969 р. про спостереження ВО у склоподібних напівпровідниках дало поштовх до створення різних негатронів на основі халькогенідних матеріалів [23]. Однак дотепер фізичні механізми виникнення ВО у таких напівпровідниках остаточно не вивчені. Дослідження в цьому напрямку активно проводились в Азербайджанській науковій школі під керівництвом професора Ф. Д. Касімова [24], де в 1991 році була проведена перша Всесоюзна науково-технічна конференція з негатроніки [2].

Загальним істотним недоліком усіх вищерозглянутих напівпровідникових негатронів є залежність їх від'ємного опору від фізичних властивостей напівпровідникових кристалів і фізичних процесів в них. А прагнення реалізувати 100 % внутрішній позитивний зворотний зв'язок всередині кристала накладає тверді вимоги до технології виготовлення таких негатронів, створює труднощі у виробництві ідентичних приладів і подальшому їх застосуванні. Ці недоліки при створенні транзисторних негатронів були частково подолані шляхом реалізації комбінованого 100 % позитивного зворотного зв'язку: частково внутрішнього, за рахунок тимчасової затримки неосновних носіїв у базі транзистора; частково, за рахунок введення кола зовнішнього зворотного зв'язку. Початком цього напрямку, очевидно, слід вважати 1956 р., коли Ямагучі (J. Jamaguchi) досліджував негатрон на транзисторі зі спільним колектором та індуктивним колом зворотного зв'язку між базою і колектором [25]. В подальшому були досліджені різні модифікації такого негатрона, що одержав назву «індуктивний транзистор», тому що він виявився перспективним як напівпровідниковий аналог індуктивності. Слід зазначити успішне застосування цього негатрона в різних аналогових НВЧ пристроях: активних фільтрах, генераторах, перетворювачах частоти, мультиплексорах, активних антенах та ін. Основи проектування таких пристроїв були закладені в роботах

Ділла (H. Dill) [22], Адамса і Хо (D. K. Adams, R. Y. C. Ho) [26] та ін. Систематизацію і подальший розвиток цього наукового напрямку зроблено професором М. А. Філинюком в роботах [24, 27], де запропоновано розглядати транзистор як узагальнений перетворювач іммітансу і обґрунтовано фізичний механізм виникнення динамічного від'ємного опору на його клемах.

Іншим напрямком негатроніки, спрямованим на подолання недоліків однокристальних напівпровідникових негатронів, є створення аналогів негатронів на базі різних схемотехнічних комбінацій активних приладів. Очевидно, однією з перших робіт у цьому напрямку слід вважати монографію С. О. Гаряїнова і І. Д. Абезгауза [19], опублікованої в 1970 р. Подальший розвиток цей напрямок одержав в широко відомих роботах Х. Стедлера [28], Л. М. Степанової зі співавторами [29], О. М. Негоденка [30], Нільсона й Уільсона та ін. Розвинута в роботах цих авторів теорія синтезу аналогів статичних негатронів N- і S-типу дозволила створити велику кількість різних схемотехнічних рішень для широкого класу як аналогових, так і ключових електронних пристроїв різного функціонального призначення. Їх можна розділити на три групи. У першій групі об'єднуються транзисторні аналоги, що складаються з транзисторів однієї структури. Другу групу складають аналоги, виконані на транзисторах різної структури, але не на складових еквівалентах *p*-*n*-*p*-*n*-структури. Третя група складається з транзисторних еквівалентів *p*-*n*-*p*-*n*-структури. Використання в таких схемах перехресних зв'язків обмежує їхнє застосування частотами до 1 ГГц.

Наведений вище історичний екскурс далеко не всеосяжно охоплює шляхи розвитку негатроніки і роль учених різних країн у її розвитку.

Не можна не звернути увагу читача на низку фундаментальних узагальнюючих робіт в сфері негатроніки.

Насамперед, це монографія С. О. Гаряїнова і І. Д. Абезгауза «Напівпровідникові прилади з від'ємним опором» (М. : Енергія, 1974) у якій сформульовано основні положення, що стосуються статичних R- негатронів.

Розглянуті негатрони відносяться до R-негатронів, тобто тих, що мають від'ємний активний диференціальний опір. Як видно з вище наведеного аналізу, вони зараз знаходять широке практичне застосування, особливо в техніці НВЧ і силовій електроніці.

Зокрема, з бурхливим розвитком твердотільної НВЧ електроніки особливо гостро постала задача мініатюризації частотно-вибіркових кіл. Розв'язання задачі шляхом використання об'ємних резонаторів, відрізків лінії передачі, сегнетоелектричних і феритових резонаторів неможливе, тому що їх добротність падає зі зменшенням розмірів. Коливальні контури на базі негатронів таких недоліків не мають, що дозволяє розв'язувати задачу з реалізації в одному кристалі декількох десятків високодобротних коливальних контурів (фільтрів, LC-генераторів і т. п.). Ці можливості були доведені ще в 80-і роки [27]. Однак, вочевидь через відсутність інформації, у низці країн у даний час проведені в цьому напрямку дослідження розглядаються як «нові» [4, 31].

Крім R-негатронів ведуться дослідження зі створення й застосування C- і L-негатронів. Це прилади, або їх схемотехнічні аналоги, що мають за певних умов від'ємну диференціальну ємність $C = \partial Q / \partial U < 0$ або індуктивність $L = \partial \psi / \partial i < 0$, відповідно [4, 32, 33, 34]. Практичне застосування таких негатронів у наш час одержало незначного поширення і потребує подальших досліджень і пошуку напрямків їхнього ефективного використання.

Нині в сфері негатроніки починає формуватися низка піднапрямів [35]: оптонегатроніка, акустонегатроніка, біонегатроніка, мікронегатроніка [36], нанонегатроніка [37]. Основи оптонегатроніки також були закладені О. В. Лосєвим, що у 1927 році зробив ще одне відкриття: експериментуючи з детектуючим контактом «карборунд–сталевий провідник», він знайшов на його стику слабке світіння.

Молодий талановитий дослідник не пройшов повз незвичайне явище, не відніс його до розряду випадкових, а навпаки, звернув пильну увагу, передбачив, що воно базується на ще невідомому експериментальній фізиці принципі. Він почав проводити систематичні дослідження цього ефекту на різних матеріалах, у різних температурних режимах. Так, більше 70 років тому, ним було зроблено ще одне перс-

пективне відкриття електроніки – електролюмінісценція напівпровідникового переходу.

9 березня 1927 року результати досліджень були повідомлені на науковому семінарі (на лабораторній бесіді, як називали ці заходи в ті роки), а в 1927 році були опубліковані в п'ятому номері журналу «Телефония и телеграфия без проводов» у статті «Карборундовий светящийся детектор и детектирование с кристаллами» [38]. Експериментуючи з різними сортами кристалів і контактних проводів, О. В. Лосєв робить два найважливіших висновки: світіння відбувається без виділення тепла, тобто є «холодним», інерція виникнення і згасання світіння неймовірно мала. Тепер відомо, що ці характеристики світіння, відзначені в 20-і роки, є найважливішими для сучасних світлодіодів, індикаторів, оптронів, випромінювачів інфрачервоного світла.

Майже через 20 років це явище було знову «відкрите» в Америці, але не в карборунді, а в деяких кристалофосфорах відомим ученим Дестріо, що запропонував для нього назву «електролюмінісценція». Дестріо, проте, із самого початку відзначав у своїй публікації пріоритет О. В. Лосєва й в Америці світіння карборунду одержало назву «Losev-light» – «Світіння Лосєва» [39]. І за кордоном, і в СРСР робилися спроби його практичного застосування. Сам Лосєв одержав патент на пристрій «Світлове реле» [40], але недостатній розвиток в той період теорії твердого тіла і майже повна відсутність напівпровідникової технології не дозволили при житті вченого знайти практичне застосування роботам з електролюмінісценцією. Власне кажучи, вони відносилися до проблем майбутнього, і до них дійшла черга лише через 20–30 років.

Практичне застосування ефекту світіння О. В. Лосєва почалося наприкінці п'ятидесятих років. Цьому сприяло освоєння напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, тиристорів. Ненапівпровідниковими залишалися тільки елементи відображення інформації – громіздкі і ненадійні. Тому у всіх розвинутих у науково-технічному відношенні країнах йшла інтенсивна розробка напівпровідникових світловипромінюючих приладів. У результаті була створена велика кількість різних світловипромінюючих діодів, цифросимвольних і матричних індикаторів, модулів твердотільних екранів і табло [41].

Учений випередив своїх сучасників. Його заслуга не тільки у відкритті детекторного світіння і генерації електромагнітних коливань з використанням напівпровідникового діода, а й, головним чином, у тому, що своїми дослідженнями він так гостро поставив проблему, що продовження робіт у цих сферах стало неминучим. Так, завдяки інтуїції і наполегливості О. В. Лосєва зародилися нові напрямки електроніки – напівпровідникова оптоелектроніка і негатроніка.

Науковий напрямок, що знаходиться на стику цих двох фундаментальних напрямків електроніки, одержав назву – «Оптонегатроніка» [35]. Це ще дуже молодий науковий напрямок і його досягнення значно скромніші, ніж таких напрямків, як оптоелектроніка і негатроніка. Основою розвитку цього напрямку є результати досліджень оптичних властивостей напівпровідникових негатронів – оптонегатронів [42].

Їх класифікація близька до класифікації негатронів, що наведена в [43], але враховує здатність негатронів працювати в оптичних режимах світловипромінювання – світловипромінюючі оптонегатрони; фотоприйому – фотоприймальні оптонегатрони; в режимі оптопари, коли світловипромінювач, фотоприймач або їхня комбінація мають від'ємний диференційний опір. Дослідження негатронів і розробка електронних пристроїв на їхній основі неможливі без відповідного метрологічного забезпечення. При цьому виникають деякі труднощі використання стандартної апаратури, пов'язані з потенційною нестійкістю негатронів і пристроїв на їхній основі. Це стало причиною розвитку напрямку вимірювань потенційно-нестійких електронних приладів і пристроїв на їхній основі [44]. Значний внесок у вирішення цих задач внесли вчені Вінницького національного технічного університету. При цьому були отримані пріоритетні результати при вимірюванні фізичних параметрів негатронів [45], інваріантного коефіцієнта стійкості [46], максимально-досяжного від'ємного опору [47], іммітансних параметрів [48], максимально-досяжного коефіцієнта стійкого посилення k_{ms} [49] та ін.

В наш час негатроніка сформувалася як самостійний науковий напрямок, результати досліджень в якому набули широкого застосування. Організаційно цей науковий напрямок об'єднав вчених країн СНД у міжнародному координаційному центрі з проблеми «Негатроніка»,

організованому у Вінницькому політехнічному інституті в 1986 році, до складу якого ввійшли відомі вчені: професори В. С. Андрєєв, Л. Н. Біберман, С. О. Гаряїнов, В. П. Дьяконов, Ф. Д. Касімов, О. М. Негоденко, Л. М. Степанова, О. С. Тагер, М. А. Філинюк, Ю. Л. Хотунцев та ін. Значний внесок у становлення цього напрямку зробили всесоюзні наукові школи-семінари «Прилади з негативним опором у радіоелектронних пристроях», проведені на ВДНГ СРСР під керівництвом проф. С. А. Гаряїнова і перша Всесоюзна НТК «Прилади з негативним опором і інтегральні перетворювачі на їхній основі», проведена в 1991 році в м. Баку під керівництвом проф. М. А. Філинюка і проф. Ф. Д. Касімова. Остаточним становленням «Негатроніки», як самостійного наукового напрямку, стала опублікована Російською академією наук монографія колективу авторів «Негатроніка» [50]. За останні роки ученими країн СНД проводилися інтенсивні дослідження в сфері негатроніки, за результатами яких була захищена велика кількість кандидатських і низка докторських дисертацій (Ф. Д. Касімов, Л. М. Степанова, П. А. Молчанов, В. М. Кичак, О. В. Осадчук та ін.) [51–55]. Ними підготовлено і видано низку монографій [24, 50, 56–70], що спільно з класичними монографіями [19, 21, 27, 29, 30, 71–73], стали базою для подальшого розвитку негатроніки.

Розвиток електронних інформаційних мереж дозволив активізувати роботу центра й обмін інформацією. З цією метою створено інформаційний сайт «Міжнародний координаційний центр Негатроніка» [74] і отримано електронну адресу центру: http//:kpi.kharkov.ua/albom/02/works/lis/.

Найважливішим етапом діяльності центру і розвитку негатроніки було введення вперше у світі в навчальний процес Вінницького державного технічного університету в 2002 році навчального курсу «Основи негатроніки» з виданням для студентів низки навчальних посібників [75–77].

Простежити роль різних учених і наукових шкіл у становленні і розвитку негатроніки частково дозволяє наведена нижче коротка хронологія [78]:

10.05.1903 р. – у м. Твері народився засновник негатроніки О. В. Лосєв.

13 січня 1922 р. – О. В. Лосєвим виявлена спадна ділянка на ВАХ напівпровідникового кристала.

Лютий 1922 р. – О. В. Лосєв передав у журнал «ТиТбп» свою історичну статтю про генераторні властивості деяких кристалів [2].

9 березня 1922 р. – перше публічне повідомлення О. В. Лосєва на 36-й лабораторній бесіді НРЛ про спостереження і можливість застосування від'ємного активного диференціального опору напівпровідникового кристала.

Травень 1923 р. – О. В. Лосєв виготовив перший технічний зразок приймача – гетеродина з кристалічним детектором (початок ери напівпровідникової електроніки).

1932 р. – Д. А. Рожанським і А. Н. Арсеньєвою винайдено підсилювальний вакуумний негатрон – пролітний клістрон.

1936 р. – Н. Ф. Алексєєвим і Д. Е. Мадьяровим винайдено генераторний вакуумний негатрон – багаторезонаторний магнетрон.

1938 р. – учена рада Ленінградського політехнічного інституту з представлення академіка А. Ф. Іоффе присудила О. В. Лосєву учений ступінь кандидата фізико-математичних наук за сукупністю опублікованих робіт без захисту дисертації.

7 травня 1952 р. – наукова сесія Всесоюзного науково-технічного суспільства ім. О. С. Попова прийняла рішення про видання наукових праць О. В. Лосєва.

1954 р. – Шоклі опублікував статтю, де сформулював принципи створення ряду напівпровідникових негатронів [11].

1956 р. – Ямагучі запропонував і досліджував комбінований динамічний негатрон на біполярному транзисторі [25].

1957 р. – японський фізик Есакі винайшов тунельний діод [13].

1958 р. – Рід винайшов діод, згодом названий його ім'ям (діод Ріда, реалізований у 1964 р.) [14].

1959 р. – О. С. Тагер зі співробітниками одержав диплом на відкриття лавинно-пролітного діода [15].

1961 р. – Ділл досліджував «індуктивний транзистор» у лавинному режимі [22].

1963 р. – Ганн винайшов діод, згодом названий його ім'ям (діод Ганна) [12].

1969 р. – Адамс та Хо застосували комбінований транзисторний динамічний негатрон в активних НВЧ-пристроях [24].

1970 р. – С. О. Гаряїнов і І. Д. Абезгауз опублікували монографію, де сформулювали найважливіші теоретичні положення негатроніки [19].

1971 р. – видано збірник наукових праць О. В. Лосєва «У истоков полупроводниковой техники» [79].

1971 р. – створено інжекційно-пролітний діод.

1971 р. – Ф. Бенінг опублікував монографію з основами теорії кіл з R-, L-, C-негатронами [24].

1973 р. – В. П. Дьяконов опублікував монографію з теорії лавинних транзисторів [21].

1981 р. – В. І. Стафєєв, К. Ф. Комаровських, Г. І. Фурін опубліковали монографію з застосування статичних негатронів S-типу у функціональній схемотехніці [71].

1985 р. – сформовано науковий напрямок «Негатроніка» [1].

1986 р. – при Вінницькому політехнічному інституті організований міжнародний координаційний центр «Негатроніка», до складу якого ввійшли В. С. Андрєєв, Л. Н. Біберман, С. О. Гаряїнов, В. П. Дьяконов, Ф. Д. Касімов, О. М. Негоденко, Л. М. Степанова, О. С. Тагер, М. А. Філинюк, Ю. Л. Хотунцев та ін.

1987 р. – опубліковано монографію М. А. Філинюка, що узагальнила теорію і практику створення радіоелектронних схем на базі комбінованих транзисторних динамічних негатронів [27].

1991 р. – під керівництвом М. А. Філинюка і Ф. Д. Касімова у м. Баку проведена перша Всесоюзна науково-технічна конференція з негатроніки.

1995 р. – Російською академією наук опубліковано монографію О. М. Серьезнова, Л. М. Степанової, С. О. Гаряїнова, С. В. Гагіна, О. М. Негоденка, М. А. Філинюка, Ф. Д. Касімова «Негатроніка», що остаточно затвердила негатроніку як один з напрямків електроніки [50].

1999 р. – опубліковано коротку історію розвитку наукового напрямку «Негатроніка» [38].

2001 р. – сформульовано піднапрямок негатроніки — «Оптонегатроніка» [80].

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-452-9

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-452-9

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page
http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-452-9

Наукове видання

Філинюк Микола Антонович
Лазарєв Олександр Олександрович
Войцеховська Олена Валеріївна

LC–НЕГАТРОНИ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет підготовлено О. Войцеховською
Дизайн обкладинки – В. Чудак

Підписано до друку 05.10.2012 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різографічний. Ум. др. арк. 17,79
Тираж 100 прим. Зам № 2012-154

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.