

ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

PACS 2010: 72.20.JV УДК: 538.915, 538.911, 004.932
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2019.4.179612>

ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ РЕЛАКСАЦІЙНИХ СПЕКТРІВ – ЯК ЗАСІБ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ DLTS

В. В. Ільченко¹, І. В. Ліщук², В. Я. Опилат³, С. В. Тищенко⁴

Інститут високих технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
03022, проспект Глушкова 4-г, Київ, Україна, тел. +380 (44) 521-35-66,
факс +380 (44) 521-33-43

e-mail: 1) ilch2007@ukr.net; 2) lishchuk.ihor@gmail.com; 3) opylat@gmail.com; 4)
sergtyshch@gmail.com

ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ РЕЛАКСАЦІЙНИХ СПЕКТРІВ – ЯК ЗАСІБ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ DLTS

В. В. Ільченко, І. В. Ліщук, В. Я. Опилат, С. В. Тищенко

Анотація. Створено апаратну платформу для підтримки кількох методик, яка дозволяє окрім дослідження параметрів глибокорівневих дефектів (DLTS), одержати температурні залежності форми С-V та I-V-характеристик. Розроблено алгоритми застосування статистичних методів для обробітки експериментальних даних для методики DLTS. Результати тестування програмного продукту засвідчили високу точність декомпозиції складного релаксаційного спектру і високу стійкість до амплітуди шумів.

Ключові слова: DLTS, переріз захоплення, енергія активації, релаксація, шуми, статистичні методи, штучні нейронні мережі

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS FOR COMPLEX RELAXATION SPECTRA ANALYSIS AS A MEAN OF ADVANCE OF DLTS METHOD

V. V. Ilchenko, I. V. Lishchuk, V. J. Opylat, S. V. Tyshchenko

Abstract. Hardware platform with support of several techniques that allows, along with studying of a deep level defects' parameters (DLTS), to obtain temperature dependencies of C-V and I-V characteristics has been developed and manufactured. Algorithm of a statistical methods' application for processing of experimental DLTS data has been developed. Testing results shows high precision of a complex relaxation spectrum decomposition and high stability to noise level.

Keywords: DLTS, capture cross section, activation energy, relaxation, noises, statistical methods, artificial neural networks

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ РЕЛАКСАЦИОННЫХ СПЕКТРОВ – КАК СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ МЕТОДИКИ DLTS

В. В. Ильченко, И. В. Лищук, В. Я. Опилат, С. В. Тищенко

Аннотация. Разработано и создано аппаратную платформу для поддержки нескольких методик, которая позволяет кроме исследования параметров глубоководных дефектов (DLTS), получать температурные зависимости вида C-V и I-V-характеристик. Разработан алгоритм применения статистических методов для обработки экспериментальных данных для методики DLTS. Результаты тестирования программного продукта засвидетельствовали высокую точность декомпозиции сложного релаксационного спектра и высокую стойкость к амплитуде шумов.

Ключевые слова: DLTS, сечение захвата, энергия активации, релаксация, шумы, статистические методы, искусственные нейронные сети.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Процеси релаксації – досить поширені природні явища у фізичних системах з характерними розмірами – від галактичних до атомних і часами – від мільярдів років до пікосекунд. У кращому випадку релаксаційний сигнал генерується одним джерелом, у гіршому – маємо справу із суперпозицією сигналів від кількох джерел. Якщо методика дослідження джерел генерації таких сигналів базується на аналізі перехідних процесів, то основною проблемою стає обробіток складних релаксаційних спектрів. Задача од-

нозначного розділення таких спектрів багаторазово ускладнюється при наявності в сигналі значної шумової складової.

Дослідження, приведені у даній роботі, стимулюються прикладною задачею – розробленням надійних алгоритмів аналізу складних релаксаційних спектрів з експоненціальними складовими і рівнем шумів, сумірним з амплітудою сигналу. Результати досліджень увійдуть до математичного пакету підтримки функціонування релаксаційного спектрометра глибоких рівнів, над створенням якого працюють автори. Даний вимірювальний комплекс реалізуватиме

удосконалену методику DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy), запропоновану Ленгом [1; 2] – одну з фундаментальних методик дослідження глибокорівневих дефектів у напівпровідникових матеріалах. Метод базується на аналізі апаратно відфільтрованих сигналів, породжених нерівноважними процесами термоемісії носіїв з глибоких локальних енергетичних рівнів і дозволяє визначити термічний поперечний переріз захоплення носіїв дефектом $\sigma_n(\sigma_h)$, енергію активації термоемісії носіїв E_T зі структурного порушення та концентрацію самих дефектів N_T . Проте, класичний ленгівський алгоритм дослідження релаксаційних процесів, що базувався на швидкісному температурному скануванні зразка, володів низькою роздільною здатністю по енергії активації і мав незадовільну точність визначення термічного поперечного захоплення носіїв. Частково ці проблеми обумовлювались тогочасним рівнем розвитку електроніки, комп'ютерних систем, математичних методів обробітки даних, частково – методикою проведення вимірювань.

Удосконалення методики проводилось у кількох напрямках. У 1970х-80х роках домінували спроби покращити апаратну складову, зокрема шляхом модернізації блоку фільтрації релаксаційного сигналу [3]. Поява у 1990х роках доступних за ціною персональних комп'ютерів стимулювала розвиток алгоритмів математичного обробітки релаксаційних спектрів [4]. Автори [5], приводячи детальний огляд досягнень у розвитку математичних методів аналізу експоненціальних сигналів, аргументують факт неспроможності жодного з них забезпечити однозначність декомпозиції складних релаксаційних спектрів при наявності в сигналі навіть незначної шумової компоненти. Висновок – лише подальший розвиток апаратної складової, що дозволить розробку прогресивних алгоритмів вимірювань і способів одержання даних, здатен забезпечити прогрес математичної складової. Поява на початку 2000х років швидкодіючих багаторозрядних аналого-цифрових перетворювачів, потужних мікроконтролерів і програмованих логічних інтегральних схем з надвисоким вмістом

структурних елементів (технологія FPGA) була саме тим фактором, який обумовив новий етап у розвитку всіх складових методики DLTS.

Враховуючи, що методика DLTS:

- є унікальною за інформативністю,
- швидкою (результати обраховуються у процесі вимірювань),
- прецизійною (порівняно з іншими електрофізичними методами),
- має значний потенціал удосконалення,

з огляду на виключну складність практичної реалізації даної методики (ні в СРСР ні в Україні не створено жодного промислового варіанту подібного комплексу) і високу вартість закордонних зразків (біля 100000\$), актуальність теми видається очевидною.

РОЗВИТОК АЛГОРИТМІВ ВИМІРЮВАНЬ

Реалізовані у нашому комплексі режими вимірювань та модернізовані алгоритми обрахунку результатів, обґрунтовані у [6], мають ряд особливостей:

- використання «прямих» методів вимірювання і супутніх їм алгоритмів обчислення термічного поперечного перерізу захоплення носіїв дефектом $\sigma_n(\sigma_h)$;
- основним температурним режимом для вимірювань є режим термостабілізації; класичне неперервне термічне сканування виконується (за потребою) як опційне;
- основним параметром, що змінюється від виміру до виміру у межах одного режиму є довжина імпульсу збудження ($5ns \div 7s$) вимірюваного зразка для забезпечення наступного релаксаційного процесу;
- після проведення багатократних (десятки-сотні) вимірювань при фіксованій температурі, остання змінюється, фіксується і цикл вимірювань повторюється.

Проте, успішна реалізація зазначених вимог потребує високої чутливості вимірювального комплексу, бо використання наносекундних імпульсів збудження обумовлює мізерну амплітуду релаксації і сигнал буде глибоко захований у шумах.

РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ СКЛАДОВОЇ

Щодо апаратної складової комплексу, то вона формувалась із врахуванням вимог кожної з вимірювальних методик, відповідних їм режимів вимірювань та алгоритмів обробки аналогових сигналів і масивів оцифрованих даних. Використання – як базового – режиму термостабілізації зробило привабливим реалізацію на одній апаратній платформі кількох методик: DLTS, C-V та I-V-характеристик. Остання, до того ж, може вимірюватись із застосуванням джерела напруги або джерела струму [7]. Механізм електронної комутації дозволяє швидко перемикатись між методиками, що дозволяє окрім дослідження параметрів глибокорівневих дефектів, одержати температурні залежності форми C-V та I-V-характеристик. Оскільки детальну структуру і принципи функціонування комплексу буде подано у наступних публікаціях, то зазначимо лише, що використання в апаратній платформі швидкодіючих мікроконтролера і програмованих логічних інтегральних схем надає системі гнучкості стосовно реалізації нових режимів вимірювань, способів транспортування і обробки даних. Як підтвердження сказаному наведемо лише розгорнуту блок-схему універсального вимірювального комплексу (Рис. 1). На даний час комплекс знаходиться у стані відлагодження програмного забезпечення, тому перевірка дієздатності розроблених математичних алгоритмів проводиться шляхом комп'ютерного моделювання.

Аналого-цифровий перетворювач нашої системи в оптимальному (точність-частота вибірки) режимі робить одне перетворення за мікросекунду, що дозволяє відстежувати досить короткі релаксаційні процеси, а отже досліджувати глибокорівневі дефекти з малими енергіями активації. Здатність вимірювати (з такою ж частотою вибірки) релаксаційні процеси протяжністю у 7 секунд окрім прямого призначення – дослідження глибоких рівнів з $E_T > 1$ eV – забезпечують кількомільйонний масив експериментальних точок. Останнє робить актуальним використання методів математичної статистики.

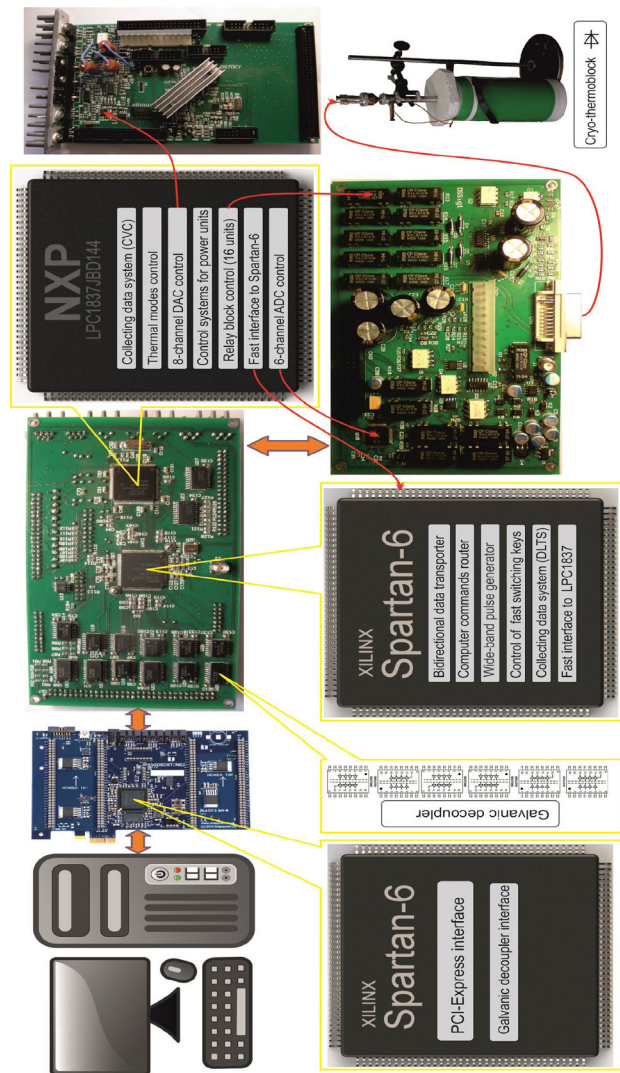


Рис. 1. Блок-схема універсального вимірювального комплексу для дослідження глибокорівневих дефектів у напівпровідниках. Перелік функцій, виконуваних двома програмованими логічними інтегральними схемами і мікроконтролером з архітектурою ARM Cortex M3, приведений на їх зображеннях.

РОЗВИТОК МАТЕМАТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Досить нечисленні спроби застосування статистичних методів для аналізу DLTS спектрів різняться способами одержання масивів даних, об'єктом обробки (релаксаційні чи спектральні криві) і власне статистичними алгоритмами обробки. Наприклад, автори [8] одержували статистичний набір ізотермічних релаксаційних кривих, на осно-

ві яких будували спектральні криві і до останніх застосовували статистичні методи. Проте за визнанням самих авторів запропонований метод має низьку роздільну здатність і може застосовуватись лише до поодиноких спектральних піків, навіть достатньо зашумлених.

Нами був розроблений алгоритм послідовного застосування чисельних та статистичних методів і – як демонстрація можливостей – програма експоненціальної апроксимації багатокомпонентних релаксаційних кривих, що містять значну шумову складову. Термін «статистичний» тут використовується у різних тлумаченнях залежно від контексту використання.

На першому (нижньому) рівні обрахунку використовується статистичний характер розподілу амплітуди шумової компоненти та випадкової похибки вимірювальної системи. Для обох складових при дотриманні ряду вимог при виконанні апаратної частини (гальванічна розв'язка від комп'ютера, екранування, глибока аналогова фільтрація, застосування прецизійних аналого-цифрових перетворювачів) характерним є нормальний розподіл (2). На цьому очевидному припущенні, що має теоретичне [9; 10] і експериментальне обґрунтування (аналіз знятих осцилограм), побудовано алгоритм декомпозиції складних експоненціальних релаксаційних кривих зі значною шумовою компонентою. Структурно даний алгоритм реалізує ітераційний процес з рядом кроків:

довільно задаються параметри однієї експоненти;

вздовж цієї експоненти рахується сума середньоквадратичних відхилень;

за допомогою методу градієнтного спуску коректуються параметри експоненти;

етапи 2 і 3 повторюються допоки швидкість пошуку глобального мінімуму стане нижчою за наперед задану;

ітераційний процес зупиняється і визначається кінцева сума середньоквадратичних відхилень (похибка першого етапу);

пункти 1 – 5 повторюються для двох, трьох, ... експонент, допоки похибка етапу не сягне мінімуму (наступні етапи її не зменшують);

номер етапу з п. 6 дає нам дійсне число експонент у спектрі, а кінцеві їх параметри будуть близькими до дійсних.

Однак, і застосування статистичних методів при наявності у сигналі значної шумової складової, породжує ряд проблем:

– сумування квадратів елементів масиву потребує застосування типів даних підвищеної точності, що багатократно знижує швидкість обчислень і не гарантує абсолютну точність;

– акумуляція похибки з ростом числа експериментальних точок нівелює вплив «активної» частини експоненти ($\sim 3\tau$) на точність статистичної обробки.

Обидві проблеми потребують зменшення масиву даних, але при цьому падає точність власне законів математичної статистики. Розірвати це «замкнуте коло» вдалося завдяки застосуванню цифрової Wavelet-фільтрації вхідного сигналу, головна перевага якої полягає у тому, що процес ефективного «знешумлення» сигналу не порушує нормального розподілу суттєво подавленої шумової компоненти (Рис. 2).

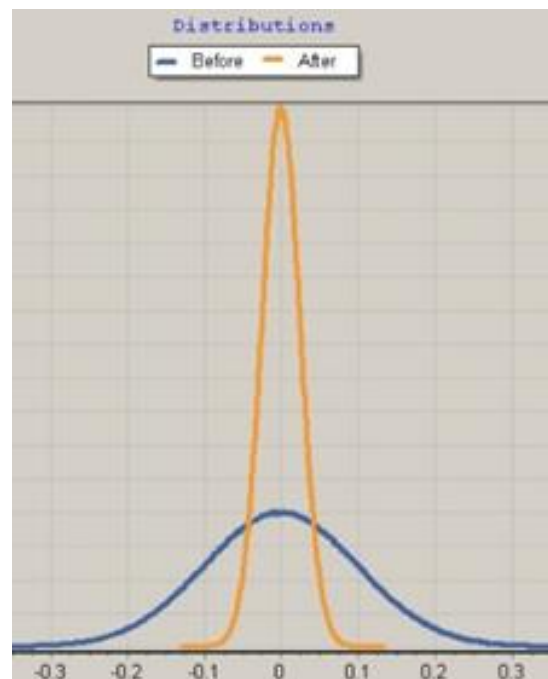


Рис. 2. Розподіл масиву даних до Wavelet-фільтрації (синя крива) і – після (помаранчева крива).

Більше того, Wavelet-обробіток «сирого сигналу» з суттєвими відхиленнями від гаусівського розподілу внаслідок нерегулярних «викидів» різноманітної природи, суттєво «нормалізує» такий сигнал і робить придатним для застосування методів математичної статистики. Як батьківський використовувався ортогональний вейвлет Добеші. Підбором порядку вейвлету та глибини розкладу встановлювалась оптимальна якість прямого і зворотного дискретного вейвлет-перетворень.

Для демонстрації ефективності алгоритму послідовного застосування чисельних та статистичних методів для першого (базового) рівня обрахунку була створена комп'ютерна програма експоненціальної апроксимації багатокомпонентних релаксаційних кривих, що містять значну шумову складову. Вхідний сигнал моделювався як сума константи (систематична похибка), експонент з різними постійними часу та передекспоненційними множниками (1) з додаванням шумової складової згідно (2).

$$S = Const1 + C1 * e^{-\frac{t}{\tau_1}} + C2 * e^{-\frac{t}{\tau_2}} + Const2 * f(x) \quad (1),$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{2\sigma^2}} \quad (2).$$

Для демонстрації прецизійності алгоритму приведено результат декомпозиції «незашумленого» двокомпонентного релаксаційного сигналу (Рис.3).

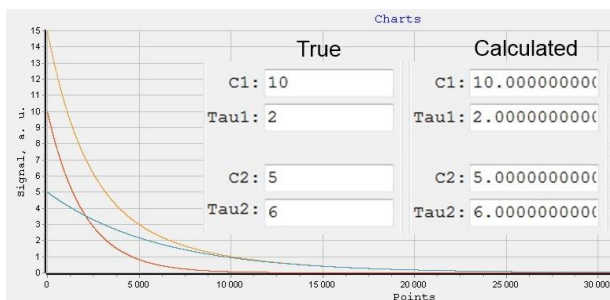


Рис. 3. Результат декомпозиції «незашумленого» двокомпонентного релаксаційного сигналу.

Вікно програми з результатами декомпозиції складного зашумленого сигналу показано на Рис. 4. Як бачимо, описаний алгоритм

демонструє високу стійкість до амплітуди шумів.

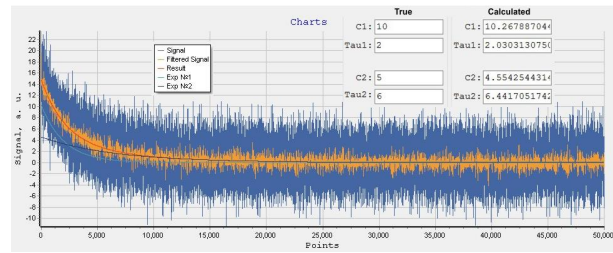


Рис. 4. «Зашумлений» (синій), відфільтрований (помаранчевий) сигнали та результати реставрації двох первинних експонент.

Результат реставрації первинної форми сигналів для випадку 3-х експонент приведено на рисунку 5.

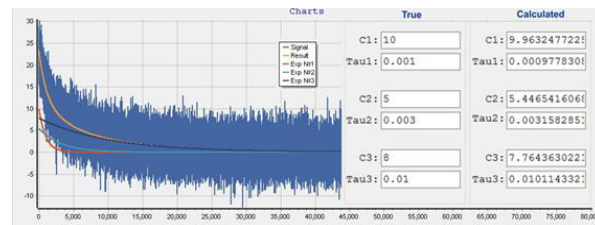


Рис. 5. «Зашумлений» (синій), сигнали та результати реставрації трьох первинних експонент (відфільтрований сигнал не приведений).

Рисунки 4 і 5 демонструють, що точність реставрації суттєво не залежить від числа експонент у сумарному сигналі. Як бачимо, навіть при досить близьких значеннях постійної релаксації алгоритм забезпечує пристойну точність декомпозиції і високу стійкість до амплітуди шумів. Протягом тестування програми було встановлено межі та оптимальні умови застосовності алгоритму. Знання числа експонент у релаксаційному сигналі робить непотрібними пункти 6 і 7 алгоритму, що для багатоекспонентних спектрів скорочує час обрахунку на порядки. Тому ми використовуємо штучну нейронну мережу [11], адаптовану за архітектурою і алгоритмом навчання до задачі визначення кількості експонент у спектрі [12].

На другому (середньому) рівні обрахунку термін «статистичний» стосується характеру алгоритму усереднення результатів багато-

кратних вимірювань, одержаних на першому етапі. Як було сказано, основним параметром, що змінюється від виміру до виміру при сталій температурі є довжина імпульсу збудження ($5\text{ns} \div 7\text{s}$) вимірювального зразка для забезпечення наступного релаксаційного процесу. У межах цього діапазону, що охоплює 9 порядків, згідно моделі різношвидкісних областей захоплення носіїв виділяються два відносно вузькі піддіапазони, у кожному з яких застосовується свій алгоритм «прямого» обчислення термічного поперечного перерізу захоплення носіїв дефектом [6]. Спільним є те, що довший збуджуючий імпульс породжує релаксаційний сигнал з більшою амплітудою (передекспоненційним множителем), проте аналітичні залежності для різних піддіапазонів різні. На постійну часу релаксаційного процесу довжина імпульсу не впливає. Отже, реалізуючи алгоритм «прямого» обчислення термічного поперечного перерізу захоплення носіїв дефектом (один чи обидва), ми матимемо десятки (можливо сотні) значень параметрів релаксаційних кривих. Статистичні залежності усереднення постійної часу релаксаційного процесу містять вагові коефіцієнти, пропорційні довжині імпульсу збудження – внаслідок збільшення співвідношення сигнал/шум. Вагові коефіцієнти статистичних залежностей усереднення величин передекспоненційних множників містять ще й функцію амплітуди релаксації від довжини імпульсу збудження.

На третьому (верхньому) рівні обрахунку термін «статистичний» стосується усереднення результатів, одержаних на першому і другому рівнях, але для різних (стабілізованих) температур. У цьому випадку вагові коефіцієнти для усереднення параметрів експонент будуть функціями температури.

Деталізацію алгоритмів другого і третього рівнів автори планують викласти в окремих статтях. Тут же різномірність статистики згадана лише для того, щоб показати яким чином можна суттєво покращити точність результатів, одержаних на першому рівні.

ВИСНОВКИ

Розроблено і створено апаратну платформу

для підтримки кількох методик, яка дозволяє окрім дослідження параметрів глибокорівневих дефектів (DLTS), одержати температурні залежності форми C-V та I-V-характеристик.

Використання в апаратній платформі швидкодіючих мікроконтролера і програмованих логічних інтегральних схем надає системі гнучкості стосовно реалізації нових режимів вимірювань, способів транспортування і обробітку даних.

Апаратна платформа комплексу здатна забезпечити кількомільйонний масив експериментальних точок, що робить актуальним використання методів математичної статистики.

Розроблено 3 алгоритми застосування статистичних методів для обробітку експериментальних даних для методики DLTS. Результати тестування програмного продукту, що реалізує лише один з алгоритмів, засвідчили високу точність декомпозиції складного релаксаційного спектру і високу стійкість до амплітуди шумів.

Список використаної літератури

- [1]. Lang D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / Lang. // *J. Appl. Phys.* – 1974. – P. 3023 – 3032.
- [2]. Lang D. V. Fast capacitance transient apparatus / Lang. // *J. Appl. Phys.* – 1974. – P. 3014 – 3022.
- [3]. Goguenheim D. Theoretical and experimental aspects of the thermal dependence of electron capture coefficients / D. Goguenheim, M. Lannoo. // *Journal of Applied Physics*. – 1990. – №68. – P. 1059–1069.
- [4]. Dobaczewski L. Laplace-transform deep-level spectroscopy: The technique and its applications to the study of point defects in semiconductors / L. Dobaczewski, A. R. Peaker, K. B. Nielsen. // *Journal of Applied Physics*. – 2004. – V. 96. – №9. – P. 4689–4728.
- [5]. Istratov A. A. Exponential analysis in physical phenomena / A. A. Istratov, O. F. Vyvenko. // *Review Of Scientific Instruments*. – 1999. – P. 1233 – 1257.
- [6]. Do pytanja pro vyznachennja poperechnoho pererizu zakhoplennja nosiiv zariadu meto-

- dom DLTS / [O. V. Tretiak, V. J. Opylat, Y. V. Boiko та ін.]. // *Sensorna elektronika i mikro-systemni tekhnolohii*. – 2010. – №1. – P. 42 – 50.
- [7]. Tyshchenko S. V. Design and manufacture of hardware and software platform of universal measurement complex for research of deep level defects in semiconductors / S. V. Tyshchenko, I. V. Lishchuk, V. J. Opylat. // *Applied Physics and Engineering (YSF), 2016 II International Young Scientists Forum*. – 2016. – P. 81–84.
- [8]. Statisticheskiy metod relaksatsionnoy spektroskopii glubokih urovney v poluprovodnikah / E. A. Tatchin, A. V. Kadantsev, A. E. Bormontov, V. G. Zadorozhniy. // *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. – 2010. – V. 44. – №8. – P. 1031–1037.
- [9]. Cowan G. *Statistical data analysis* / Glen Cowan. – USA: Oxford University Press, 1998. – 206 p.
- [10]. Scheaffer R. L. *Probability and Statistics for Engineers* / R. L. Scheaffer, M. S. Mulekar, J. T. McClave. – Boston: MA Brooks/Cole, 2011. – 818 p. – (Cengage Learning 2011).
- [11]. Adaptatsiia metodu shtuchnykh neuronnykh merezh do analizu syhnaliv relaksatsiinoi spektroskopii hlybokykh rivniv / D. B. Hriaznov, S. A. Korin, V. Y. Opylat, O. V. Tretiak. // *Sensor Electr. And Microsystem Technologies*. – 2012. – №4. – P. 81 – 88.
- [12]. Characteristics of neural networks' training process for decomposition of multiexponential relaxation spectra with high level of noises / I. V. Lishchuk, V. V. Ilchenko, V. Y. Opylat, S. V. Tyshchenko. // *XIX International Young Scientists' Conference on Applied Physics*. – 2019. – P. 44 – 45.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2019 р.

PACS 2010: 72.20.JV UDC: 538.915, 538.911, 004.932
DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2019.4.179612>

APPLICATION OF STATISTICAL METHODS FOR COMPLEX RELAXATION SPECTRA ANALYSIS AS A MEAN OF ADVANCE OF DLTS METHOD

V. V. Ilchenko, I. V. Lishchuk, V. J. Opylat, S. V. Tyshchenko

Institute of High Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03022, Hlushkov av. 4-g, Kyiv, Ukraine, phone +380 (44) 521-35-66, fax +380 (44) 521-33-43

Summary

In current work an availability of the statistical methods application to the problem of complex DLTS spectra analysis has been shown. The usage of methods that are non-traditional for this kind of problems and specifics of authors-developed algorithms required a radical upgrade of measurement equipment. Thus, a new hardware platform that supports several complementary methods and allows to obtain temperature dependencies of C-V and I-V-characteristics along with studying of deep level defects (DLTS) has been developed. Hardware complex are capable to provide arrays of experimental points with count up to several millions, which makes possible application of methods of mathematical statistics.

On the basis of real parameters of new equipment a mathematical modelling has been performed. As a model curve a sum of decaying exponents with additive Gaussian noise has been used.

Original algorithms of the statistical methods realization has been developed for each of three stages of experimental DLTS data processing. Current work shows the results of the software product testing, which implements only one algorithm. These results demonstrates high precision of a clear complex relaxation spectrum decomposition and high stability to noise levels.

Keywords: DLTS, capture cross section, activation energy, relaxation, noises, statistical methods, artificial neural networks

PACS 2010: 72.20.JV УДК: 538.915, 538.911, 004.932

DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2019.4.179612>

ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ РЕЛАКСАЦІЙНИХ СПЕКТРІВ – ЯК ЗАСІБ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ DLTS

В. В. Ільченко, І. В. Ліщук, В. Я. Опилат, С. В. Тищенко

Інститут високих технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03022, проспект Глушкова 4-г, Київ, Україна, тел. +380 (44) 521-35-66, факс +380 (44) 521-33-43

Реферат

В роботі показана перспективність використання статистичних методів для аналізу складних релаксаційних DLTS- спектрів. Застосування нетрадиційної для даного класу завдань методики і особливості розроблених авторами алгоритмів її реалізації потребувало радикального удосконалення апаратної складової. Тому було розроблено і створено апаратну платформу для підтримки кількох взаємодоповнюючих методик, яка дозволяє окрім дослідження параметрів глибокорівневих дефектів (DLTS), одержати температурні залежності форми CV та I-V-характеристик. Апаратна платформа комплексу здатна забезпечити кількомільйонний масив експериментальних точок, що робить можливим використання методів математичної статистики.

Базуючись на реальних параметрах нової апаратної платформи проведено математичного моделювання із використанням у якості модельних кривих суми затухаючих експонент із накладеною шумовою складовою із гаусівським розподілом випадкової величини.

Розроблено оригінальні алгоритми реалізації статистичних методів для кожної з 3-х стадій обробітку експериментальних даних для методики DLTS. У роботі приведено результати тестування програмного продукту, що реалізує лише один з алгоритмів. Вони засвідчили високу точність декомпозиції “незашумленого” складного релаксаційного спектру і високу стійкість алгоритму до амплітуди шумів.

Ключові слова: DLTS, переріз захоплення, енергія активації, релаксація, шуми, статистичні методи, штучні нейронні мережі