Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи з дисципліни

“МАТЕРІАЛИ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ”

для студентів спеціальності
153 – “Мікро- та наносистемна техніка”
денної і заочної форм навчання

2020

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни “Матеріали мікро- та наноелектроніки” для студентів спеціальності 153 – “Мікро- та наносистемна техніка” денної і заочної форм навчання / Укл.: Г.В. Сніжной. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 29 с.

Укладач: Г.В. Сніжной, проф., д-р техн. наук

Рецензент: В.В. Погосов, проф., д-р фіз.-матем. наук

Відповід. за випуск: А.В. Коротун, доц., канд. фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
"Мікро - і наноелектроніка"

Протокол №7
від “22” 01 2020 р.

Рекомендовано до видання
НМК ФРЕТ
Протокол № 6
від “23” 01 2020 р.

ЗМІСТ

1 Загальні положення та зміст курсової роботи…… 4
2 Основні теоретичні відомості…….. 5
2.1 Технологія отримання напівпровідникових і діелектричних матеріалів …… 5
2.2 Розподіл електричного поля і контактні явища в широкозонних напівпровідниках і вузькозонних діелектриках …..…… 6
2.3 Дослідження структури забороненої зони методами термоактиваційної спектроскопії……... 7
2.3.1 Основні механізми поляризації та деполяризації…… 7
2.3.2 Розрахунок параметрів активних енергетичних рівнів……... 9
2.3.3 Визначення частотного фактору електрично активних дефектів…… 14
2.3.4 Погрішності різних способів визначення енергії активації 14
3 Вимірювальний комплекс для проведення експериментів……... 15
3.1 Вимірювання ВАХ та розподілу потенціалу …… 15
3.2 Автоматизована експериментальна установка для вимірювання термостимульованих струмів…….. 17
3.3 Програмне забезпечення……... 19
3.4 Порядок проведення експерименту за допомогою автоматизованої установки “TERMO”…….. 22
4 Завдання……. 23
4.1 Розрахунок маси легуючої навіски домішки в розплав при вирощуванні кристалів із заданими властивостями…… 22
4.2 Розподіл електричного поля і контактні явища в матеріалах ... 25
4.3 Дослідження структури забороненої зони методами термоактиваційної спектроскопії……... 27
Перелік рекомендованої літератури…….. 28

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Мета виконання курсової роботи (КР) з курсу “Матеріали мікро- та наноелектроніки” – розвинути у студентів навички самостійного аналітичного дослідження матеріалів мікро- та наноелектроніки, знаходження фізичного й інженерного підходу при проектуванні радіоелектронних пристроїв і виборі матеріалів для них. Ця дисципліна є базовою для багатьох спеціальних дисциплін конструкторсько-технологічного й фізичного профілю. Знання властивостей матеріалів і вміння застосовувати їх на практиці необхідно також фахівцям з обчислювальної техніки, мікро- та наноелектроніки. Щоб зрозуміти закономірності поводження матеріалів у різних умовах, інженер електронної техніки повинен мати знання в області фізики, хімії, електротехніки та електроніки.

Тематика типових розрахунків:

1. технологія одержання матеріалів мікро- та наноелектроніки;
2. розподіл електричного поля і контактні явища в широкозонних напівпровідниках і вузькозонних діелектриках;
3. дослідження структури забороненої зони матеріалів методами термоактиваційної спектроскопії.

Виконуючи курсову роботу (КР) студент повинен провести теоретичні дослідження та практичні розрахунки для рішення поставленої проблеми. Загальні вимоги до структури та правила оформлення курсової роботі наведені в СТП 15-1 «Пояснювальна записка до курсових та дипломних проектів (робіт)». Структура КР: вступна частина, основна частина і додатки. Вступна частина містить такі структурні елементи: титульний лист; завдання на КР; реферат; зміст; перелік умовних позначень (символів, одиниць, скорочень і термінів). Основна частина містить такі структурні елементи: вступ, теоретична та практична частини, висновки і перелік посилань. Додатки розміщують після основної частини КР. Перелік посилань і джерел, на які є посилання в основній частині КР наводять у юнці тексу КР, починаючи з нової сторінки. Бібліографічні описи посилань у переліку наводять відповідно до стандартів з бібліографічної справи.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Існує велика кількість матеріалів, що застосовуються в електронній техніці для різних цілей, однак сучасна мікроелектроніка потребує матеріалів з "специфічними" властивостями, що робить актуальним процес одержання нових або модифікованих матеріалів з наступним детальним вивченням їх електрофізичних властивостей.

2.1 Технологія отримання напівпровідникових і діелектричних матеріалів

Способи одержання матеріалів тісно пов'язані із способами очищення і вирощування кристалів. Їх важко поділити, наприклад, транспортні хімічні реакції - не тільки спосіб одержання напівпровідникових речовин, але і спосіб їх глибокого очищення, а зонна плавка - широко відомий спосіб очищення - одночасно і спосіб вирощування монокристалів.

Напівпровідникові матеріали можна одержувати за допомогою всіх відомих хімічних реакцій: з'єднання, розкладення, обмінного розкладення і окислення - відновлення.

Розглянемо два основних способи - спосіб Чохральського і спосіб зонної плавки. Обидва способи основані на різній розчинності домішок в розплаві і в рівноважній з ним твердій фазі. Ця різниця кількісно характеризується рівноважним коефіцієнтом розподілу (який інколи називають коефіцієнтом сегрегації):

$$K=C_{тв}/C_{р} \ , \qquad (2.1)$$

де $C_{тв}$ - концентрація домішок в твердій фазі, $C_{р}$ - в рідкій фазі.

Якщо $K>1$, це означає, що домішки більше розчинюються в твердій фазі, і, отже, менше в розплаві. При цьому температура плавлення підвищується. Якщо $K<1$, то навпаки, домішки менше в кристалі і температура плавлення знижується. Це можна бачити на діаграмах *T-C*-типу, де *C* - концентрація домішки.

Якщо видалити із розплаву тверду фазу, що кристалізується, зменшивши дифузію домішок в ній, то вона буде чистішою, ніж розплав при $K<1$, і навпаки, тверда фаза буде містити більше домішок

при K>1. Отже, буде спостерігатись нерівномірний розподіл домішок по довжині злитка твердої фази. Знаючи розподіл домішок по довжині злитка можна кожний раз видаляти ту частину, що містить більше домішок, а іншу частину розплавляти для повторення процесу вирощування кристала. Повторюючи цю операцію необхідне число раз, можна одержати речовину високої міри чистоти. Якщо ж K~1, очищення відбуватись не буде.

Щоб вирішити питання про доцільність використання способу кристалізації із розплаву, необхідно знати коефіцієнт розподілу домішок в основній речовині. На перший погляд може здаватися, що простіше всього визначити рівноважний коефіцієнт розподілу із відповідних діаграм стану. Але для малих концентрацій домішок вони, як правило, невідомі, або відомі приблизно. Тому на підставі діаграм можна зробити лише наближену оцінку коефіцієнта розподілу.

2.2 Розподіл електричного поля і контактні явища в широкозонних напівпровідниках і вузькозонних діелектриках

Накладення електричного поля на зразок супроводжується його складним просторовим розподілом. Крім того, за певних умов поляризації можуть бути сформовані термо- і фотоелектретний стан (ТЕС і ФЕС), що характеризуються високою стабільністю. Динаміка перерозподілу поля і характеристики електретного стану тісно пов'язані зі спектром локальних енергетичних рівнів забороненої зони, типом контактів (бар'єрний, інжектуючий та ін.) і природою релаксаторів. У той же час відомо, що особливості розподілу поля впливають на параметри спектрів струмів термостимульованої деполяризації (ТСД), що спостерігаються при релаксації ТЕС і ФЕС.

Початковими даними для розрахунків є координатні залежності потенціалу $\psi(x)$, отримані методом потенційного зонда під мікроскопом.

Координатні залежності напруженості поля $E(x)$ і густини заряду $\rho(x)$ можна розрахувати за допомогою рівняння Пуассона:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = \left(\varepsilon\varepsilon_0\right)^{-1}\rho(x), \qquad (2.2)$$

де ε_0=8,85·10^{-12} Фм$^{-1}$, ε - статична діелектрична проникність ма-

теріалу (обирається згідно варіанту).

Інтегрування залежності $\rho(x)$ дозволяє визначити величину загального накопиченого в процесі поляризації заряду:

$$Q = \int_a^b \rho(x)dx\,, \qquad (2.3)$$

де a=0, b=1 і заряду в прикатодній і прианодній областей у межах інтегрування a=0, b=0.3 і a=0.7, b=1, відповідно. Для характеристики розподілу потенціалу, поля та заряду використовуються безрозмірні змінні: x/x_{max}, ψ/ψ_{max}, E/E_{max}, ρ / ρ_{max}. Об'ємна величина накопиченого заряду: ρ /V, Q/V.

2.3 Дослідження структури забороненої зони напівпровідників і діелектриків методами термоактиваційної спектроскопії

В сучасній електроніці, радіотехніці і приладобудуванні діелектрики і напівпровідники займають важливе місце. Для забезпечення надійності і довговічності електронної апаратури застосовувані в ній діелектрики повинні мати дуже низьку електропровідність, високу термостійкість, низькі діелектричні втрати і максимальну електричну міцність.

2.3.1 Основні механізми поляризації та деполяризації

Звичайно електрична поляризація, індукована зовнішнім електричним полем, після вимикання поля зникає - діелектрик у рівноважному стані деполяризований. Однак у деяких випадках поляризований стан зберігається діелектриком тривалий час, тобто після зняття поля має місце залишкова поляризація. До неї може привести, наприклад, "заморожування" деяких механізмів теплової і міграційної поляризації, якщо час релаксації по тим чи іншим причинам різко зростає.

Залишкову поляризацію можуть створювати також електричні заряди, впроваджені в матеріал при попередній електризації і захоплені поверхневими чи об'ємними "пастками". Якщо матеріал із залишковою поляризацією не екранований металевими електродами, то він створює в навколишнім просторі електростатичне поле подібне тому, як постійний магніт створює магнітне поле.

Матеріали, що тривалий час зберігають в об’ємі чи на поверхні електричні заряди і створюють у навколишнім просторі постійне електричне поле, називаються *електретами.* Способи формування електретів різні: звичайно, крім сильного електричного поля, додатково застосовують який-небудь активуючий вплив, що прискорює процес поляризації (орієнтацію диполів, полярних комплексів, радикалів, доменів) чи процес електризації (міграції електронного, діркового чи іонного заряду і його закріплення на пастках).

В залежності від прикладеного до поля активуючого фактору (нагрівання, освітлення, радіація, магнітне поле), електрети класифікують на термо-, фото-, радіо-, магнітоелектрети й ін. Формування залишкової поляризації може відбуватися за двома основними механізмами: за рахунок утворення *гетерозарядів*, знак яких протилежний полярності формуючих електродів, чи шляхом захоплення діелектриком *гомозаряду*, що має той же знак, що і заряд на електроді.

Важливими умовами тривалого існування сформованого електрета є мала провідність вихідного діелектрика і великі енергетичні бар'єри для релаксаторів і захоплених носіїв заряду в ньому. Формування гомозаряду може відбуватися, наприклад, за рахунок інжекції електронів з катода (чи дірок з анода). Гетерозаряд з'являється завдяки різним “домішковим” механізмам поляризації.

Інжектований заряд, як правило, захоплюється пастками, тому його поводження надалі схоже на поводження носіїв заряду, захоплених при об'ємно-зарядовій поляризації, однак, інжекція може приводити до порушення електронейтральності об'єкта. Наполяризований об'єкт охолоджується до більш низької температури, в результаті чого поляризаційний стан “заморожується”, тобто різко зростає час релаксації цього стану.

Наступне зняття умов поляризації і закорочування електродів не приведе до помітної деполяризації, тому що нерівноважний стан виявляється метастабільним. Заморожений поляризований об'єкт у закороченому стані нагрівається за визначеним законом (лінійне нагрівання, фракційне очищення). Теплові кванти-фонони надають носіям заряду енергію, необхідну для подолання потенційного бар'єра. Оскільки носії заряду змінюють своє положення в просторі, то в ланцюзі в загальному випадку тече деполяризаційний струм.

Спорідненими методами є методи термостимульованої провідності (ТСПр) і термостимульованої поляризації (ТСП). ТСПр

з'являється при нагріванні з прикладеним електричним полем попередньо збудженого зразка (світло, опромінення), а термостимульована поляризація – незбудженого зразка. Зазначені розходження приводять до розходження у фізичних явищах, що протікають.

На відміну від струму термостимульованої деполяризації (ТСД), що обумовлена як струмом провідності, так і струмом зсуву, струм термостимульованої провідності обумовлений тільки струмом провідності і, отже, не несе інформації про процеси орієнтації диполів і нагромадження заряду на межі розділу. У випадку ТСД процес міграції заряду відбувається у внутрішньому полі, що самоузгоджено змінюється при нагріванні.

У випадку ТСПр – у постійному зовнішньому полі, у випадку ТСП – у сумарному полі, яке складним змінюється при нагріванні. Методам ТСПр і ТСП властиве високотемпературне наростання темнового струму, зумовленого рівноважною провідністю речовини через наявність зовнішнього електричного поля.

При проведенні експерименту часто використовуються шаруваті структури типу метал-діелектрик-метал і метал-слюда-діелектрик-слюда-метал. Найбільш інформативною є методика, коли виміряються: залежність струму від температури; залежність ємності, тангенс кута діелектричних втрат, опір від температури; вольт-фарадні і вольт-амперні характеристики; розподіл поля.

2.3.2 Розрахунок параметрів активних енергетичних рівнів

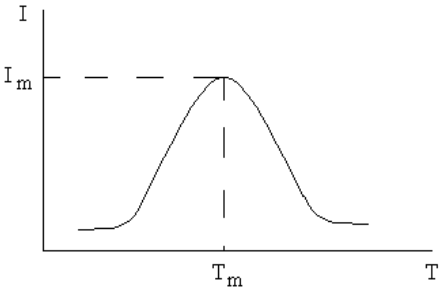


Рисунок 2.1 - Залежність струму від температури

Метод наближеної оцінки енергії активації оснований на співвідношенні:

$$W = AkT_m, \quad (2.4)$$

де T_m – температура максимуму (рис. 2.1); k – стала Больцмана; A – коефіцієнт пропорційності. Коефіцієнт пропорційності A лежить у межах від 10 до 30 в залежності від кінетики процесу і рекомбінації носіїв заряду.

Метод є чисто якісним і дає велику погрішність. У загальному випадку A=25. Даний коефіцієнт необхідно скорегувати, припускаючи що метод початкового підйому дає достовірний результат.

Метод Гарліка–Гібсона (метод початкового підйому) є найбільш прийнятним через незалежність розрахунку енергії активації від порядку кінетики і механізму релаксаційного процесу. Нахил прямої, що виходить при побудові початкової ділянки піка струму в координатах Арреніуса (ln$I$ від 1/(kT)), дає значення активації, а перетинання цієї прямої з віссю ординат – ефективний частотний фактор електричних активних центрів.

Перевагою описаного способу початкового підйому є його незалежність від порядку кінетики релаксаційного процесу.

Метод Парфіановича-Богуна-Буса (метод варіювання швидкості нагрівання) полягає у наступному. Умова максимуму піків ТСПр, поляризації, розрядки і деполяризації може бути представлена у вигляді:

$$ln\frac{T_m^2}{\beta} = \frac{W}{kT_m} + ln\frac{W}{kw_e} - ln\left[1 + (m-1)\frac{2kT_m}{W}\right]. \qquad (2.5)$$

Отже, якщо знехтувати температурною залежністю ефективного частотного фактора, а також слабким впливом третього члена формули, то випливає, що залежність ln($T_m{}^2 / \beta$) від $1/kT_m$, отримана при варіюванні швидкості нагрівання, повинна бути лінійною. Якщо обмежитися тільки двома швидкостями нагрівання, то з (2.5) можна одержати формулу:

$$W = \frac{kT_{m1}kT_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}} ln\frac{\beta_1}{\beta_2}\frac{T_{m2}^2}{T_{m1}^2} \qquad (2.6)$$

Модифікацією способу варіювання швидкості нагрівання є спосіб визначення енергії активації за нахилом залежності величини максимуму піка термостимульованого струму від температури цього максимуму при різних швидкостях нагрівання, що у координатах Арреніуса лінеаризується.

Метод Гроссвейнера (метод парціальної напівширини піка) полягає в тому, що енергія активації електрично активних дефектів впливає не тільки на температурне положення піка термостимульованого струму (ТСС), але і на температурну ширину цього піка.

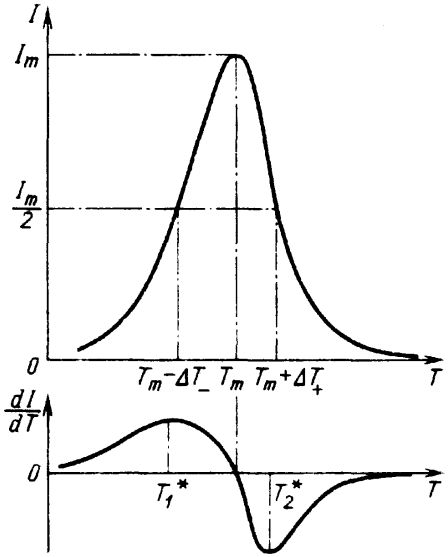


Рисунок 2.2 – Характерні точки кривої термостимульованого струму

Так, можна поставити зворотну задачу визначення енергії активації дефектів за температурною шириною відповідного піка термостимульованого зсуву.

Вперше цю задачу стосовно до термовисвічування вирішив Гроссвейнер. Суть цього методу полягає в наступному. По кривій ТСС поряд з температурою максимуму визначається низькотемпературна (ΔT_-) і високотемпературна (ΔT_+) напівширина піка, тобто інтервал температур, у межах яких ТСС більше чи дорівнює половині свого максимального значення (рис.2.2).

З умови (2.6) можна одержати вираз (2.7) для розрахунку енергії активації методом парціальної напівширини температурного піка.

$$I\left(T_m - \Delta T_-\right) = I\left(T_m - \Delta T_+\right) = \frac{1}{2} I \cdot T_m , \qquad (2.7)$$

$$W = G - \frac{kT_m (T_m - \Delta T_-)}{\Delta T_-} = G + \frac{kT_m (T_m + \Delta T_+)}{\Delta T_+} + \frac{kT_m (T_m + \Delta T_+)}{\Delta T_+} , \qquad (2.8)$$

де G_+, G_-- коефіцієнти, величини яких залежать від порядку кінетики релаксаційного процесу і значення ефективного частотного фактора. У випадку кінетики релаксації першого порядку коефіцієнт G_- у формулі (3.5) може приймати значення від 1.42 (при $w_e \approx 10^{12}$ с$^{-1}$) до 1.5 (при $w_e \approx 10^{8}$ с$^{-1}$, тобто слабке перезахоплення).

Формули, що враховують вплив порядку кінетики релаксаційного процесу на величину енергії активації, зумовлену за допомогою способу парціальної напівширини піка, запропонував Лущик:

$$W = \frac{kT_m^2}{\Delta T_+} \quad \text{– при кінетиці першого порядку і} \qquad (2.9)$$

$$W = \frac{2kT_m^2}{\Delta T_+} \quad \text{– при кінетиці другого порядку .} \qquad (2.10)$$

Формули (2.9), (2.10) свідчать про те, що високотемпературна напівширина може змінюватися в два рази при зміні кінетики релаксаційного процесу.

Свого роду модифікацією способу напівширини піка є спосіб точок перегину. Цей спосіб заснований на вимірюванні поряд з температурою максимуму піка також температур, при яких друга похідна ТСС по температурі дорівнює нулю (рис 2.2). Енергія активації дефектів може бути визначена за формулою

$$W = G_1^* \frac{kT_m T_1^*}{T_m - T_1^*} = G_2^* \frac{kT_m T_2^*}{T_2^* - T_m}, \qquad (2.11)$$

де G_1^*, G_2^* – коефіцієнти, величини яких залежать від значення ефективного частотного фактора і кінетики релаксаційного процесу Основною перевагою способу точок перегину в порівнянні зі способом напівширини піка є те, що на кінцеві результати, одержувані за допомогою способу точок перегину, практично не впливають фонові струми.

Метод варіювання швидкості нагрівання оснований на тому, що варіювання умов попереднього зсуву (поляризації) зразка може впливати не тільки на величину піка ТСС, але і на температурне положення цього піка. Остання обставина пояснюється тим, що у випадку сильного перезахоплення ефективний частотний фактор центрів захоплення пропорційний початковій концентрації носіїв заряду, локалізованих на цих пастках.

Отже, збільшення ступеня початкового заповнення центрів захоплення (про що можна судити по збільшенню відповідного піка

ТСС) повинно приводити до зменшення температури максимуму піка. Якщо ж реалізується слабке перезахоплення, то температура максимуму піка струму не повинна залежати від початкового заповнення пасток.

Температура максимально зміщається з підвищенням швидкості нагрівання, як правило, убік більш високих температур. Нехай β_1 і β_2 – швидкості нагрівання, тоді енергія активації W_a буде визначатися співвідношенням:

$$W_a = \frac{kT_{m1}T_{m2}}{T_{m1} - T_{m2}} \ln\left(\frac{\beta_1 T_{m2}^{\alpha}}{\beta_2 T_{m2}^{\alpha}}\right), \qquad (2.12)$$

де α приймає значення від 2 до 3 – показник ступеня.

Для методу ТСД у випадку дипольної поляризації температурна залежність часу релаксації (при кінетиці релаксації першого порядку) знаходиться шляхом інтегрування температурної залежності ТСС.

$$J(T) = \frac{dP}{dt} = -\frac{P(t)}{\tau(T)} \qquad (2.13)$$

З (2.13) одержуємо наступне співвідношення між ТСС і часом релаксації:

$$\tau(T) = \frac{1}{J(T)} \int_T^{\infty} \frac{J(T')}{\beta} dT' \quad , \qquad (2.14)$$

$$ln\,\tau(T) = ln\left[\frac{1}{j(T)} \int_T^{\infty} \frac{j(T')}{\beta} dT'\right] = \frac{W}{kT} - ln\,w \ . \qquad (2.15)$$

Формула лежить в основі методу температурної залежності часу релаксації. Цей метод може бути розповсюджений і на ТСС, зумовлені об'ємно-зарядовою поляризацією, а також на струми ТСПр, якщо реалізується кінетика релаксації першого порядку.

Перший порядок кінетики процесу рекомбінації також називається мономолекулярною рекомбінацією. У цьому випадку час рекомбінації є постійним. Другий порядок рекомбінації носить також назва бімолекулярна рекомбінація, і в цьому випадку час рекомбінації пропорційно зворотному значенню концентрації носіїв заряду, локалізованих на дрібних рівнях захоплення, за умови слабкого перезахоплен-

ня й електродів, що блокують, у електронейтрального зразка. Порядок симетрії визначається шляхом порівняння симетрії піка Δ_i з величиною μ_g

$$\Delta_i = \frac{2 + kT_{mi}}{W}, \qquad \mu_g = \frac{T_2 - T_{mi}}{T_2 - T_1} \tag{2.16}$$

При $\mu_g \leq \Delta_i$ – кінетика процесу мономолекулярна, а при $\mu_g \geq \Delta_i$ – кінетика бімолекулярна.

2.3.3 Визначення частотного фактору електрично активних дефектів

Важливим параметром, що поряд з енергією активації характеризує електрично активні чи дефекти процес неізотермічної релаксації заряду, є ефективний частотний фактор ω_e. По кривій термоструму в об'єкті з бімолекулярною рекомбінацією носіїв заряду ефективний частотний фактор може бути визначений за формулою

$$\omega_e = \frac{W^2 \beta}{2k^2 T_m^3} exp\left(\frac{W}{kT_m}\right) \tag{2.17}$$

при обов'язковій умові, що має місце сильне перезахоплення. У випадку ж слабкого перезахоплення ефективний частотний фактор в принципі не може бути знайдений подібним чином, тому що на кривій ТСТ максимум просто відсутній.

2.3.4 Погрішності різних способів визначення енергії активації

Результати аналізу погрішностей різних способів розрахунку енергії активації електричноактивних дефектів по кривих ТСС зведені в табл. 2.1. Зіставлення цих результатів свідчить, зокрема, про те, що інструментальні погрішності розглянутих способів визначення енергії активації, як правило, значно поступаються систематичним погрішностям, зумовленим невірним вибором модельних уявлень і наближеним характером аналітичних виразів для струму.

Таблиця 2.1 − Погрішності різних способів

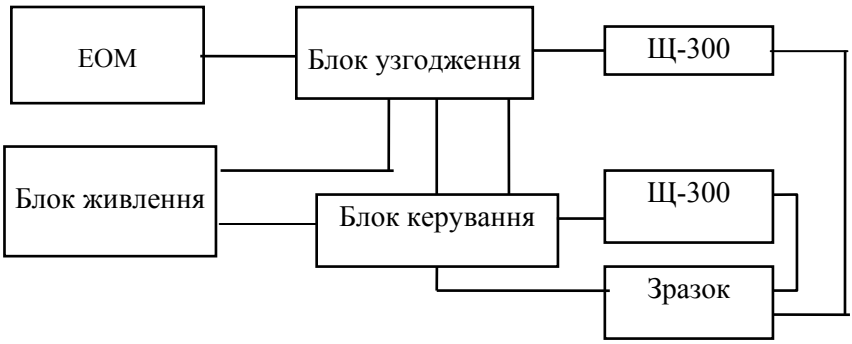
Спосіб визначення енергії активації	Погрішності визначення, %	
	Інструментальні	Методичні
Температурного положення піка	~1	~100
Початкового підйому	2-3	~1
Низькотемпературної напівширини піка	3-7	5-10
Високотемпературної напівширини піка	3-7	10-20
Варіювання швидкості нагрівання	5-10	~5

3 ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Вимірювання ВАХ та розподілу потенціалу

Установка для вимірювання ВАХ призначена для зняття залежності струму від напруги на досліджуваному зразку. Прилади живляться від мережі змінного струму 220V ±10% частотою 50 Гц ±10%. Максимальна потужність, споживана з мережі, 10W. Модуль являє собою пристрій зв'язку між вимірювальними приладами Щ-300 і персональним комп'ютером.

Функціонально модуль складається із трьох блоків (рис.3.1): керування, узгодження і живлення.



ЕОМ − персональний комп'ютер; Щ-300 − цифровий вольтметр

Рисунок 3.1 − Блок-схема підключення модуля інтерфейсу

Блок керування зібраний на мікросхемі К155ЛН1 (інвертор) і призначений для керування модулем узгодження. Під час роботи блок керування два рази в секунду перемикає блок узгодження або в режим прийому даних із Щ-300 або в режим передачі даних у комп'ютер.

Блок узгодження зібраний на чотирьох мікросхемах К155ИР9 (восьмирозрядні регістри зсуву з паралельним уведенням інформації) і здійснює узгодження між Щ-300 і комп'ютером під час експерименту. Кількість мікросхем обумовлена кількістю знаків, зчитуваних із Щ-300. За сигналом високого рівня із блоку керування дані із Щ-300 від паралельно завантажуються в блок узгодження. За сигналом низького рівня із блоку керування дані послідовно передаються у комп'ютер для подальшої обробки.

Досліджуваний зразок підключається до виводів на вимірювальному зонді. Зонд, у свою чергу, підключається до входу комплексу на передній панелі корпуса. Кабелями підключають до відповідних входів Щ-300. На задній панелі комплексу є рознім для підключення комп'ютера за допомогою спеціального кабелю через LPT - порт. Комплекс і Щ-300 включаються в мережу 220 В.

На початку експерименту програмно задається значення напруги, що подається на зразок; виставляються діапазони вимірювання струму через зразок і спадання напруги на зразку (такі ж значення виставляються вручну на Щ-300); вибирається вид ВАХ (повна, пряма „гілка”, зворотна „гілка”), потім два рази в секунду за допомогою відповідних Щ-300 знімаються значення струму через зразок і спадання напруги на досліджуваному зразку (дискретному приладі) і через комплекс дані вводяться в комп'ютер.

Для зручності роботи до комплексу додається програмне забезпечення, що складається із програми "ВАХ". Програма написана мовою DELPHI. Програма запускається файлом ВАХ.EXE.

Установка для вимірювання поверхневого потенціалу методом зонду передбачає:

1) блок живлення,
2) електростатичний вольтметр (на основі п'єзоелемента, має великий внутрішній опір),
3) систему підсвічування з набором світлофільтрів,
4) кристалоутримувач,
5) нагрівальний елемент з регулятором температури,
6) потенційний зонд.

Контакт зонда із зразком контролюється під мікроскопом, так як деформація поверхні зразка може внести значну похибку в вимірювання. Також з цією метою зонд орієнтований до зразків під кутом, а не перпендикулярно.

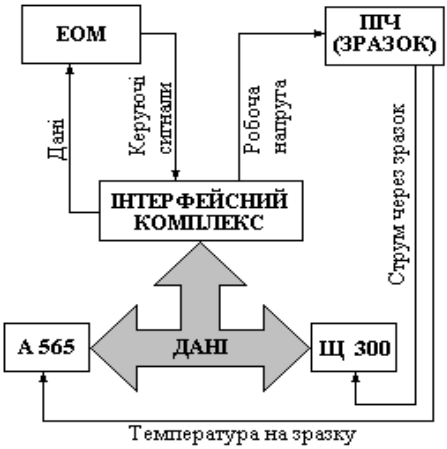
Методика вимірювання поверхневого потенціалу

1) Встановити зразок в кристалоутримувач.
2) Нагріти зразок до заданої температури.
3) Прикласти зовнішню електричну напруга (0 на анод, φ на катод) до зразка.
4) Висвітлити зразок світлом із заданою довжиною хвилі.
5) Опустити зонд на прианодну область зразка і виміряти потенціал на поверхні зразка за допомогою електростатичного вольтметра.
6) Переміщаючи зонд до катоду виконати наступні вимірювання потенціалу на поверхні зразка.

3.2 Автоматизована експериментальна установка для вимірювання термостимульованих струмів

Для вимірювання ТСС в матеріалах використовується автоматизований вимірювальний комплекс “TERMO”. Прилад живиться від мережі змінного струму 220 В (±10%) частоти 50 Гц (±10%). Максимальна потужність, споживана з мережі, 10 В.

У комплексі використовуються: ЕОМ, прилад комбінований цифровий Щ-300, цифровий термометр А-565. Вибір цього обладнання зумовлений наступними міркуваннями: комбіновані прилади мають цифрові виходи, що дозволяє дистанційно зчитувати дані; універсальні, що дозволяє їх використовувати як для вимірювання температури печі так і для вимірювання сили струму, що тече через зразок; комп'ютер має оптимальні параметри, необхідні для керування комплексом.



ЕОМ- персональний комп'ютер;
Щ-300 - вимірювальний прилад;
А 565 – цифровий термометр; зразок – досліджуваний зразок, що знаходиться в печі

Рисунок 3.2 - Блок - схема підключення комплексу

Комплекс є пристроєм сполучення між вимірювальним приладом Щ-300, цифровим термометром А565 і персональним комп'ютером. (див. блок-схему на рис.3.2). Керуючі сигнали – це сигнали, передані з комп'ютера в інтерфейсний модуль для керування нагрівальним елементом (печі). Дані – це сигнали, передані модулем у комп'ютер (температура зразка і струм). Робоча напруга – напруга, що подається на піч модуля. Струм через зразок – поточний струм через зразок у процесі експерименту.

Функціонально комплекс складається з трьох блоків: керування, узгодження і живлення. Блок керування зібраний на двох мікросхемах К155ИР22 (регістр – реле) і К555КП7 (мультиплексор) і призначений для керування блоком узгодження. Під час роботи мікросхема К155ИР22 два рази в секунду переключає блок узгодження або в режим прийому даних із Щ-300 і А-565 або в режим передачі даних у комп'ютер (виходи SHIFT і LOAD). Отже, знімаються значення струму зі зразка напівпровідникової пластини і температура зі зразка.

Блок узгодження зібраний на шести мікросхемах К155ИР10 (восьмирозрядні регістри зсуву з паралельним вводом інформації) і узгодження між Щ-300, А-565 і комп'ютером під час експерименту. Кількість мікросхем обумовлена кількістю знаків, що зчитуються з Щ-300 і А-565 (три на передачу значення струму, три на передачу значення температури). По сигналі високого рівня з блоку керування відбувається рівнобіжне завантаження даних із Щ-300 і А-565 у блок узгодження. За наступним сигналом з блоку керування відбувається послідовна передача даних у комп'ютер для подальшої обробки. Мікросхеми можна виділити в два однакових модулі по трьох мікросхеми. По

сигналі з блоку керування відбувається рівнобіжне завантаження даних із Щ-300 у блок узгодження. По наступному сигналі з блоку керування (мікросхема К155ИР22) відбувається послідовна передача даних у комп'ютер для подальшої обробки.

Для зняття термостимульованих струмів у полі, що тягне, застосовується зовнішнє регульоване джерело живлення (0 – 100 В). До джерела живлення так само підключений тиристор, що має власне живлення, для керування піччю. Цей вузол гальванічне розв'язаний для запобігання улучення виходу комп'ютера з ладу при улученні високої напруги на вхід.

Досліджуваний зразок напівпровідникової пластини вставляється у тримач і поміщається в піч. Піч, в свою чергу, підключається до комплексу із задньої сторони корпуса, а виводи з тримача і зовнішнє джерело живлення підключаються на передній панелі корпуса. Кабелями, що прикладаються до комплексу, відповідні виходи комплексу підключаються до входів Щ-300 і А-565. На задній панелі комплексу знаходяться розніми для підключення комп'ютера за допомогою спеціального кабелю через LPT-порт (кабель додається до комплексу).

На початку експерименту встановлюється значення напруги, що подається на зразок; виставляються діапазони вимірювання струму через зразок, потім у залежності від обраного режиму нагрівання печі (квантування по температурі чи за часом) знімаються дані (через визначені проміжки температури чи часу). За допомогою Щ-300 і А-565 зчитуються значення струму через зразок і температура досліджуваного зразка, і через комплекс дані вводяться у комп'ютер.

По закінченні експерименту необхідно відключити живлення комплексу А 565 і Щ 300, потім від’єднати досліджуваний зразок.

3.3 Програмне забезпечення

Для роботи з установкою використовується програмне забезпечення "TERMO". Програма "TERMO", що дозволяє одержати значення термостимульованих струмів зразків напівпровідникових пластин, запускається файлом Termo.EXE. Зовнішній вигляд головного вікна програми представлений на рис.3.3.

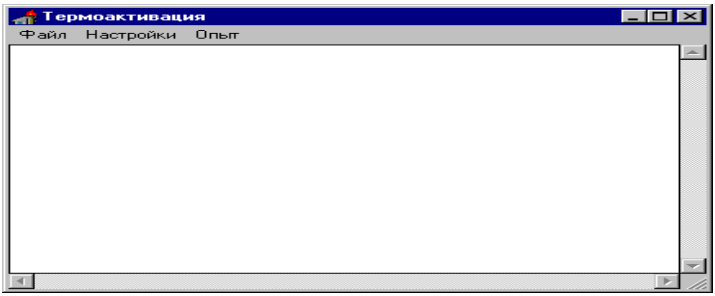


Рисунок 3.3 Зовнішній вигляд головного вікна програми "TERMO"

Програма дозволяє під час експерименту переглянути дані, отримані з комплексу (рис.3.2) і зберегти в окремий файл для подальшої обробки. Під заголовком вікна розташовується спадаюче меню, у якому розташовані всі органи керування.

Коротка характеристика елементів меню.

Меню **Файл** складається з наступних елементів: **Зберегти як** – дозволяє зберегти отримані дані в окремий файл для подальшої обробки інформації; **Очистити** – очищення попередніх даних; **Позначка** – перед початком експерименту рекомендується ставити позначку, де відображається дата і час одержання даних; **Вихід** – вихід із програми.

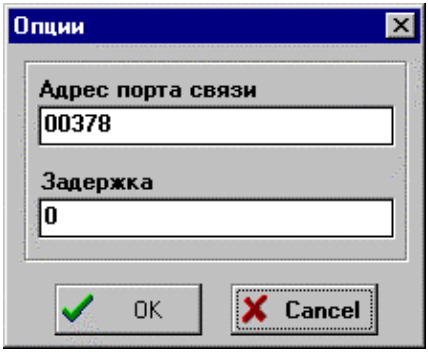


Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд меню “Опції”

Меню **Настроювання** містить наступні елементи: **Опції** – встановлюють адресу порту зв'язку і затримку, яка служить для узгодження апаратної частини з програмною; **Параметри** – установлюються початкова і кінцева температури, крок за часом і температурою, квантування за часом чи температурою, потужність, похибки й умови переходу, а також режим роботи Щ-300.

Меню **Дослід** складається з: **Запуск** – запуск експерименту; **Зупинка** – припинення експерименту.

Після підключення комплексу за допомогою файлу Termo.EXE

запускається програма. На початку вимірювальної послідовності необхідно виставити адресу порту зв'язку і затримку, а також діапазон вимірювання струму через зразок, початкову і кінцеву температури (^{o}C), установити режим вимірювання (квантування по температурі чи за часом), крок нагрівання (температуру ^{o}C і час, мілісек) і коефіцієнти поправок в % у розділах опції і параметри спадаючого меню настроювання. (рис.3.4.,3.5). Діапазон вимірювання струму необхідно так само виставити вручну на Щ-300.

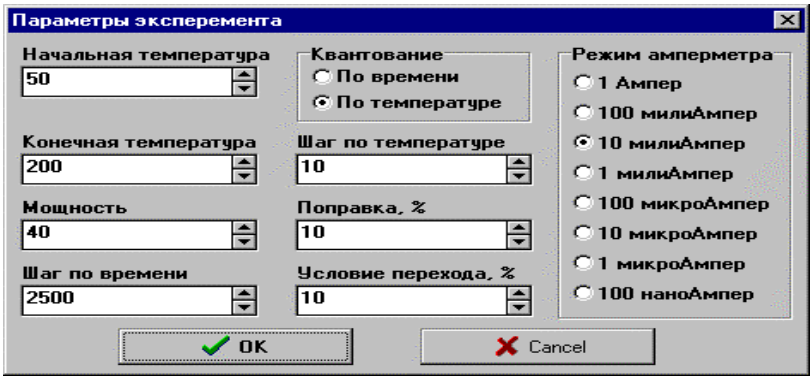


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд вікна «Параметри експерименту», де встановлюються необхідні значення

Початкова і кінцева температури змінюються в межах від 20°C до 300°C з кроком 1°C. Максимальна рекомендована температура 200 ^{o}C.

Крок по температурі змінюється в межах від 1 до 20 ^{o}C з кроком 1 ^{o}C, мінімальний крок, що рекомендується, 2 ^{o}C.

Після установлення всіх необхідних даних і переключення Щ-300 у необхідний режим вимірювання запускається програма (Дослід/Запуск). Знімаються залежності струму, що тече через зразок і температура зразка. Дані виводяться на екран у три стовпчики: температура, струм і час (рис. 3.6).

Для більш детальної обробки дані можна занести в буфер обміну чи зберегти в окремий файл, а потім перенести в необхідний редактор.

Для виходу з програми необхідно викликати розділ “Файл/Вихід”. Попередньо дані можна зберегти у файлі з розширенням TXT у розділі “Файл/Зберегти як...”.

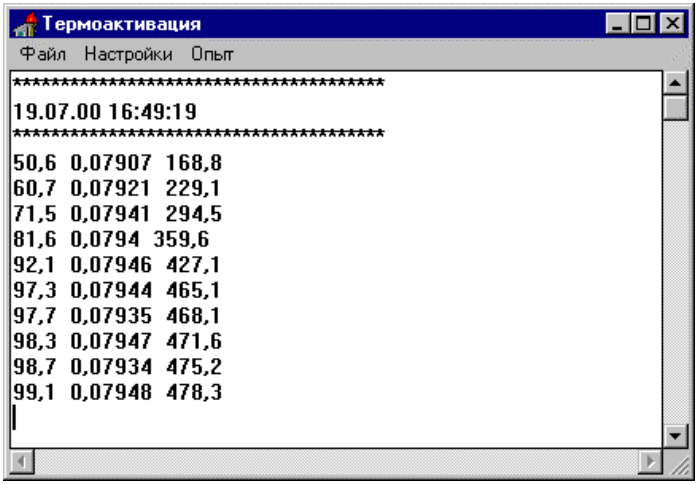


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд вікна з даними

3.4 Порядок проведення експерименту за допомогою автоматизованої установки “TERMO”

1 Установіть зразок напівпровідникової пластини у тримачі. Опустіть піч так, щоб верхній зонд торкнувся зразка.

2 Підключіть піч, зовнішнє джерело живлення (якщо воно потрібне) і виводи зонда до автоматизованого комплексу: джерело до розніму «Джерело живлення», Щ-300 – розніми «Щ-300», зразок – розніми «Зразок», піч – розніми «Піч» (із зворотної сторони модуля).

3 Включіть в мережу змінної напруги 220 В комбіновані цифрові прилади Щ-300, А 565 і комплекс.

4 Натисканням мережних кнопок і перемикачів включіть Щ-300, А565 і комплекс.

5 Запустіть програму “Termo”. У розділі “Опції” встановіть адреса порту зв'язку і затримку (за вказівкою викладача).

6 У розділі “Параметри” встановлюються необхідні значення температур, кроку вимірювань, потужність, режим вимірювання (за часом чи температурою) і режим роботи Щ-300: початкова температура 50 ºС, кінцева температура 100 ºС, потужність 10% від повної, крок за часом 2500 мілісек, крок по температурі 5 ºС, попра-

вка 10 %, умова переходу 5 %, квантування по температурі і Щ – 300 в режим вимірювання 1 А.

7 Перед запуском процесу нагрівання очищається вікно даних (Файл/Очистити) і ставиться позначка (Файл/Позначка)

8 Після установок необхідних параметрів запустіть процес вимірювання (Дослід/Запуск).

9 В процесі нагрівання, якщо змінюються параметри вимірювання на Щ-300, необхідно установити позначку (Файл/Позначка).

10 По закінченні вимірювань отримані дані можна зберегти у файлі з розширенням TXT (розділ “Файл/Зберегти як...”) чи скопіювати в буфер для подальшої обробки.

11 Відключіть прилади і комплекс від мережі.

4 ЗАВДАННЯ

4.1 Розрахунок маси легуючої навіски домішки в розплав при вирощуванні кристалів із заданими властивостями

Запис оптичної інформації в просторово часові модулятори світла типу PROM і ПРИЗ (перетворювач зображення) на основі сіліко- і германоселенітів здійснюється синьо-зеленим світлом ($0.4<\lambda<0.54$ мкм) У ході експериментів було виявлено, що світло з такою довжиною хвилі збуджує носії зарядів (електрони) із центрів в забороненій зоні з в зону провідності. Електрони, дрейфуючи в зовнішньому електричному полі, захоплюються центрами з W=1.2÷0.6 еВ (при T=300 ºС). При цьому позитивні й негативні заряди просторово розділяються, тобто при запису оптичної інформації в зовнішнім електричному полі відбувається утворення об'ємної системи зарядів, у якій позитивний заряд обумовлений іонізацією центрів з енергією активації W=3.0÷2.3 еВ, а негативний - електронами, захопленими пастками з W=1.2÷0.6 еВ.

Матеріал із заданими властивостями можна виростити методом Чохральского. Необхідний енергетичний рівень у забороненій зоні формується додаванням домішки в шихту.

Розрахувати масу домішки m з атомною масою A_m, яка необхідна для вирощування кристала n-типу з питомим опором ρ з розплаву

масою m_1 у припущенні рівномірного розподілу легуючої домішки по об'єму кристала. Коефіцієнт розподілу домішки між твердою і рідкою фазами K, густина розплаву d, рухливість електронів μ.

Вихідні дані представлені у таблиці 4.1

Виконання цього завдання передбачає відображення в пояснювальної записки опису методу Чохральського, виконання розрахунку маси легуючої домішки.

Таблиця 4.1 − Вихідні дані для розрахунку маси легуючої навіски домішки в розплаві

Варіант	ρ,Ом·м	m_1, кг	$K\cdot10^3$	d,кг/м^3	μ,м^3/(В·с)	$A_m\cdot10^3$
1	2	3	4	5	6	7
1	0.01	4.0	3.0	5600	0.38	30.97
2	0.02	4.1	3.1	5700	0.40	50.94
3	0.03	4.2	3.2	5800	0.42	74.92
4	0.04	4.3	3.3	5900	0.44	92.90
5	0.05	4.4	3.4	6000	0.46	121.75
6	0.06	4.5	3.5	6100	0.48	180.95
7	0.07	4.6	3.6	6200	0.50	208.98
8	0.08	4.7	3.7	6300	0.52	26.98
9	0.09	4.8	3.8	6400	0.54	44.96
10	0.10	4.9	3.9	6500	0.56	69.72
11	0.11	5.0	4.0	6600	0.58	88.90
12	0.12	5.1	4.1	6700	0.60	114.82
13	0.13	5.2	4.2	6800	0.62	204.37
14	0.14	5.3	4.3	6900	0.64	28.08
15	0.15	5.4	4.4	7000	0.66	47.90
16	0.16	5.5	4.5	7100	0.68	72.59
17	0.17	5.6	4.6	7200	0.70	91.22
18	0.18	5.7	4.7	7300	0.72	118.69
19	0.19	5.8	4.8	7400	0.74	178.49
20	0.20	5.9	4.9	7500	0.76	207.2
21	0.21	6.0	5.0	7600	0.78	32.06
22	0.22	6.1	5.1	7700	0.80	51.99
23	0.23	6.2	5.2	7800	0.82	78.96
24	0.24	6.3	5.3	7900	0.84	95.94
25	0.25	6.4	5.4	8000	0.86	127.60

4.2 Розподіл електричного поля і контактні явища в матеріалах

Прикладення електричного поля до кристалу супроводжується зміною внутрішнього електричного поля, яке набуває складного просторового розподілу. Динаміка перерозподілу поля і характеристики електретного стану тісно пов'язані зі спектром локальних енергетичних рівнів забороненої зони, типом контактів і природою релаксаторів.

В процессе виконання курсової роботи потрібно отримати і побудувати графіки розподілу потенціалу, єлектричного полю і заряду при відповідних зовнішніх умовах (електрична напруга, температура, освітлення. Необхідно визначити наявність високоомних областей, величину накопиченого об'ємного заряду. З метою досконалішого аналізу побудуйті на одному графіки криві залежності потенціала, полю та заряда в відносніх одиницях. Вихідні дані: геометричні розміри зразка ($1\times5\times10$ мм^3) та статична діелектрична проникність матеріалу наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Статична діелектрична проникність кристалів

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε	40	42	44	46	48	50	52	54	56
№ варіанта	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ε	58	60	41	43	45	47	49	51	53
№ варіанта	19	20	21	22	23	24	25		
ε	55	57	59	37	35	33	30		

Виконання цього завдання передбачає відображення в пояснювальної записці наступне:

1) Принцип дії і схему просторово-часового модулятора світла (варіанти: 1 – рідкокристалічний, 2 – твердотільний, 3 – поперечна орієнтація вектора електричного поля і оптичного сигналу, 4 – повздовжня орієнтація електричного поля і оптичного сигналу).
2) Описати метод потенціального зонду.
3) Навести принцип дії електростатичного вольтметру.
4) Виконати вимірювання розподілу потенціалу по поверхні зра-

зка. Отримані експериментальні данні навести у вигляді таблиці. Побудувати координатні залежності потенціалу $\psi(x)$, які отримані засібом потенційного зонда під мікроскопом.

5) Виконати розрахунок розподілу внутрішнього електричного полю $E(x)$ и заряду $\rho(x)$ по формулі (2.2). Отримані величини навести у вигляді таблиць та графіків.

6) Виконати розрахунок накопиченого заряду Q (сумарний заряд, сумарний позитивний заряд, сумарний негативний заряд, прианодний сумарний заряд, прианодний сумарний позитивний заряд, прианодний сумарний негативний заряд, прикатодний сумарний заряд, прикатодний сумарний позитивний заряд, прикатодний сумарний негативний заряд) по формулі (2.3).

7) Зробити висновок про вид сформованого заряду в зразку (гомозаряд або гетеро заряд, система сендвіч); який контакт метал(Pt)-зразок (омічний контакт, бар'єрний тип контакту, інжекція або ексклюзія) має місце.

8) Виконати розрахунок накопиченого об'ємного заряду Q_v діленням отриманих величин Q на об'єм V зразка.

9) Виконати розрахунок концентрації носіїв заряду діленням отриманих величин Q_v на заряд електрону.

10) Для характеристики розподілу потенціалу, поля та заряду побудувати на одному графіку названі залежності у безрозмірних змінних.

11) Побудувати колірну зарядограмму (області з позитивним зарядом відображаються червоним кольором, а з негативним – синім).

4.3 Дослідження структури забороненої зони методами термоактиваційної спектроскопії

У ході виконання КР необхідно виміряти струми ТСД при різних температурі і умовах поляризації (табл. 4.3) залежно від варіанту. Необхідно визначити енергію активації, частотний фактор, накопичений у процесі поляризації заряд розглянутими вище методами (п.п. 2.3.2.1÷2.3.2.5) і проаналізувати отримані значення (взаємозв'язок, погрішність й ін.).

Отримані дані необхідно представити у вигляді таблиць. Побудувати графічні залежності температури T_m, заряду Q_m, амплітуди I_m, енергії активації W від умов поляризації $U_р$, $T_р$, $t_р$, $\lambda_р$.

Таблиця 4.3 – Умови поляризації

№	Умови поляризації	№ вар.
1	2	3
1	Температурні залежності струмів ТСД для різних швидкостей нагрівання. Умови поляризації: $U_р$=100 В; $T_р$=100 ^oC; d=0.5 мм, β = 0,05; 0.1; 0.15 градус/сек.	1 10 19
2	Температурні залежності струмів ТСД для різних значень поляризуючого поля. Умови поляризації: $T_р$=30 ^oC; d=0.5 мм; $U_р$ = 50 В, 100 В, 150 В.	2 11 20
3	Температурні залежності струмів ТСД для різних часів поляризації Умови поляризації: $U_р$=75 В; $T_р$=165 ^oC; d=0.3 мм; β=0.2 градус/сек; $T_р$ = 30, 50, 100 секунд.	3 12 21
4	Температурні залежності струмів ТСД для різних довжин хвиль поляризуючого світла. Умови поляризації: $U_р$=100 В; $T_р$=40 ^oC; d=0.25 мм; $t_р$=60 сек.; β = 0,25 градус/сек; $\lambda_р$ = 700 нм, 950 нм, 1060 нм.	4 13 22
5	Температурні залежності струмів ТСД для різних значень поляризуючого поля. Умови поляризації: $T_р$=130 ^oC; d=0.1 мм; $U_р$ = 50 В, 100 В, 150 В.	5 14 23

Продовження таблиці 4.3

1	2	3
6	Температурні залежності струмів ТСД для різних температур поляризації Умови поляризації: $U_р$ = 75В, $t_р$=100сек.; d=0,25мм; β=0,2 градус/сек; $T_р$=75°С, 100 °С, 125 °С.	6 15 24
7	Температурні залежності струмів ТСД для різних довжин хвиль поляризуючого світла. Умови поляризації: $U_р$=200 В; $T_р$=150 °С; d=0.25 мм; $t_р$=60 сек.; β = 0,25 градус/сек; $\lambda_р$ = 700 нм, 950 нм, 1060 нм.	7 16 25
8	Температурні залежності струмів ТСД для різних значень поляризуючого поля. Умови поляризації: $T_р$=200 °С; d=0,1 мм; $U_р$ = 150 В, 200 В, 350 В.	8 17 26
9	Температурні залежності струмів ТСД для різних температур поляризації Умови поляризації: $U_р$=300 В; $t_р$ = 100 сек.; d = 0,3 мм; β = 0,2 градус/сек. $T_р$ = 50 °С, 150 °С, 200 °С.	9 18 27

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники [Текст] / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 368 с.

2. **Прокопів, В. В.** Матеріали електронної техніки [Текст] / В. В. Прокопів. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с.

3. **Панченко, Т. В.** Функіональні та інтелектуальні матеріали [Текст] / Т. В. Панченко, М. П. Трубіцин, Т. М. Бочкова, Т. В. Крузіна. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2014. – 85 с.

4. **Кравченко, О. П.** Фізичні основи функціональної мікроелектроніки: навч.посібник [Текст] / О. П. Кравченко. –К.: Либідь, 1993. – 216 с.

5. **Яворський, Б. М.** Справочник по физике [Текст] / Б. М. Яворський, А. А. Детлаф. – М.: Наука. Гл.ред.ФМЛ, 1974. – 942 с.

6. **Крайзмер, Л. П.** Быстродействующие ферромагнитные запоминающие устройства [Текст] / Л. П. Крайзмер.- М.-Л.: Энергия, 1964. – 371 с.

7. **Гершунский, Б. С.** Основы электроники и микроэлектроники : Учебник [Текст] / Б. С. Гершунский. – К.: Вища шк., 1989. – 423 с.

8. **Горелик, С. С.** Материаловедение полупроводников и диэлектриков [Текст] / С. С. Горелик, М. Я. Дашевский. – М.: Металлургия, 1988. – 574 с.

9. **Богородицкий, Н.П.** Электротехнические материалы [Текст] / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, В. М. Тареев. – М.: Энергия, 1977. – 280 с.

10. **Шалимова, К. В.** Физика полупроводников [Текст] / К. В. Шалимова. – М: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.

11. **Снежной, Г. В.** Автоматизированная установка для исследования релаксационных процессов и ВАХ в диэлектриках и полупроводниках / Г. В. Снежной, А. В. Кондратьев // Радиоэлектроника, информатика, управление.-1999. – №2. – С.44-46.

12. **Сніжной, Г.В.** Автоматизована установка для визначення магнетної сприйнятливості криць та стопів / Г. В. Сніжной, Є. Л. Жавжаров // збірник наукових праць "Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування". – 2012. – № 49. – С. 136-141.