

УДК 621.315.592

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16470

Д. О. ВОЛЬЧЕНКО¹, М. В. КИДРАЧУК², С. В. НІКІПЧУК³, Я. М. САВЧИН⁴,
В. Т. БОЛОННИЙ⁴

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАДГРАТОК У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУРАХ В ПАРАХ ТЕРТЯ ГАЛЬМ

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

²Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

³Національний університет «Львівська Політехніка», Україна

⁴Дрогобицький спеціалізований коледж нафти і газу, Україна

Наведено фізику багатошарових напівпровідникових мікроструктур так званих надграток, що знайшли важливе застосування в металевих фрикційних елементах гальмівних пристроїв. У стрічково-колодкових гальмах бурових лебідок надгратки обода шківів фрикційно взаємодіють з полімерною накладкою ФК-24А. Товщина надграткового напівпровідникового матеріалу $AlSiNi$ знаходиться в тілі обода шківів з постійною величиною ширини забороненої зони і перемінної його товщини через дію на них механічного, електричного і теплового полів. Кремній (Si), що знаходиться між матеріалами алюмінієм (Al) і нікелем (Ni) виступає в ролі теплоізолятора, і тим самим сприяє квазірівнюванню енергонавантажності поверхневих шарів обода шківів. При цьому знижується блукаючий електротепловий потенціал. При об'ємній температурі $350^{\circ}C$ кремній починає пропускати теплоту нікелю. Останній маючи високий коефіцієнт теплопровідності, у свою чергу віддає теплоту шарам обода (сталі 35ХНЛ) шківів. Такий стан верхніх шарів обода шківів гальм дозволяє покращити експлуатаційні параметри його пар тертя. Ефект теплопровідності надграток у напівпровідникових структурах у парах тертя гальм базується на інтенсифікації рухливості в них зарядів. Незвичайні електронні властивості легованих надграток впливають із специфічного характеру надграткового потенціалу, який у цьому випадку є потенціалом іонізованих домішок у легованих шарах. Потенціал об'ємного заряду в легованих надгратках модулює край зон вихідного матеріалу таким чином, що електрони та дірки виявляються просторово розділеними. Відповідним вибором параметрів структури (рівнів легування та товщини шарів) цей поділ можна зробити практично повним.

Ключові слова: гальмівний пристрій, пара тертя, металевий фрикційний елемент; надгратки в напівпровідникових структурах, електротеплопровідний потенціал.

Вступ. Ідея створення в кристалі напівпровідникової надграткової структури шляхом зміни легування або складу твердого розчину одномірного періодичного потенціалу з періодом, меншим за довжину одного пробігу електрона. З того часу багато дослідників стали приділяти велику увагу пошукам нових періодичних структур, що призвело до нинішньої різноманітності напівпровідникових надграток. Очевидно, що рушійною силою на цьому шляху були неординарні фізичні властивості зазначених матеріалів, а результатом стало виникнення нової галузі досліджень на стику матеріалознавства, фізичної кінетики та динаміки.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. При дослідженні електропровідності надграток найбільший інтерес викликає питання про провідність у напрямку, паралельному границі. Це пов'язано з різким підвищенням рухливості носіїв, досягнутим у надгратках з модульованим легуванням [1 - 5]. З часом першого повідомлення про такі структури наприкінці минулого століття [6]

поодинокі початкові роботи розвинулися у напрямі, присвяченому різноманітним дослідженням подібних структур. Модульоване легування було використане при вирощуванні методом молекулярно-променевої епітаксії одиночних гетеропереходів, що призвело до створення надшвидких польових транзисторів [7]. Цей метод довів свою застосовність і до структур p -типу, де вдалося різко підвищити рухливість дірок [5]. Тому, незважаючи на те, що Есакі і Цу у своїй піонерській роботі [8] привернули увагу дослідників до процесів перенесення вздовж осі надгратки, пов'язаних з так званими блохівськими осциляціями та тунелюванням через широкозонні шари, у роботах з електроперенесення домінують дослідження провідності двовимірних електронних та діркових систем.

Головним параметром напівпровідника є ширина забороненої зони E_g , та її знання дозволяє прогнозувати основні експлуатаційні параметри створюваних напівпровідникових структур [9]. Тому визначення E_g , якщо вона не відома, є головним завданням фізичної кінетики.

Завдання визначення E_g напівпровідника може виникнути у випадках втрати таких даних і, що особливо важливо, під час роботи з напівпровідниковими твердими розчинами, в яких E_g залежить від складу [10]. Склад же твердих розчинів у кристалах, як правило, змінюється за товщиною у зв'язку зі виснаженням розчину-розплаву в процесі росту кристала, а також у зв'язку з температурною залежністю коефіцієнтів сегрегації компонентів.

Техніка та методика визначення E_g однорідних кристалів, хоч і не завжди проста, проте досить добре розроблена. Це може бути результатом вимірювання спектра оптичного поглинання в краї фундаментальної смуги. Але для цього потрібна наявність відповідної оптичної апаратури, чутливого приймального пристрою та дуже тонких зразків досліджуваної речовини [12]. На такій же апаратурі можна виміряти спектр фотопровідності та визначити E_g за положенням її максимуму [13]. Можна також визначити E_g за температурною залежністю провідності напівпровідника [14]. Труднощі цього методу пов'язані з апріорною невизначеністю температурного інтервалу вимірювань, труднощами встановлення ділянки власної провідності і, головне, необхідністю сильного нагрівання зразка у разі широкозонного напівпровідника і складністю приведення результатів до робочих температур.

Всі згадані методи можуть бути реалізовані лише на спеціально підготовлених однорідних зразках. Для визначення E_g матеріалу готових гомогенних p - n структур ці методи непридатні. У готовій p - n структурі можна визначити E_g по спектру фотovoltaїчного ефекту, що потребує складної оптичної апаратури [15]. Можна метод дослідження p - n структур застосувати і однорідним напівпровідникам, попередньо створивши у яких, наприклад, сплавний p - n перехід.

В роботі [16] розглянуто три схеми розташування послідовності шарів і координатна залежність зонної діаграми для: a – легуваних надграток GaAs (*nipi*-кристалах GaAs); b – надграток i -GaAs – n^+ -Al_xGa_{1-x}As з модульованим легуванням; згини зон поблизу гетерограниць створюються просторовими зарядами, які виникають при переході вільних електронів з іонізованих донорів в бар'єрах n^+ -Al_xGa_{1-x}As в потенційні ями i -GaAs'; c – легуваної надгратки GaAs – Al_xGa_{1-x}As'. Період надгратки складається з десяти окремих шарів. У першій схемі донори та акцептори діють за законом синуса, у другій схемі відбувається взаємодія чергуючих виступів і западин, третя схема є комбінованою.

Проте розглянуті роботи мали такі недоліки:

- враховувалося лише окремо фізика електронної провідності паралельно та перпендикулярно границям класичної та квантової взаємодії;
- відсутнє насичення електронами та іонами всіх поверхонь надгратчастого напівпровідникового матеріалу при різному його стані;
- не можна досягти постійної величини ширини забороненої зони напівпровідникових структур з p - n переходами у зв'язку з їх нерухомістю;
- товщина надграткового напівпровідникового матеріалу знаходиться під впливом електричного, теплового та механічного поля.

Постановка задачі. Основні питання статті: матеріали для надграток у металевих фрикційних елементах гальм; леговані надгратки; рухливість носіїв зарядів у гетероструктурах з модульованим легуванням.

Мета роботи – розкрити особливості роботи надграток у напівпровідникових структурах у парах тертя гальм для зниження їх енергонавантажності за рахунок блукаючого електротеплового потенціала.

Леговані надгратки у напівпровідникових структурах. Терміном «легована надгратка» прийнято називати періодичну послідовність шарів одного і того ж напівпровідника, легованих двома різними способами. Донорні атоми у шарах n -типу постачають електрони, що зв'язуються акцепторними атомами у шарах p -типу. Результати розподілу заряду створює сукупність параболічних потенційних ям.

Незвичайні електронні властивості легованих надграток впливають із специфічного характеру надграткового потенціалу, який у цьому випадку є потенціалом іонізованих домішок у легованих шарах [16]. Потенціал об'ємного заряду в легованих надгратках модулює краї зон вихідного матеріалу таким чином, що електрони та дірки виявляються просторово розділеними. Відповідним вибором параметрів структури (рівнів легування та товщини шарів) цей поділ можна зробити практично повним.

Однією з привабливих рис легованих надграток є можливість використання їх створення будь-якого напівпровідника, що допускає легування домішками n - і p -типу. Найчастіше використовується AlSiNi, що отримується методом молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ).

Інша характерна перевага легованих надграток пов'язана зі структурною досконалістю цих багатошарових систем. Відносно мала концентрація домішок у легованих надгратках, як правило 10^{17} - 10^{19} см^{-3} [16], вносить несуттєві спотворення у гратку вихідного матеріалу. Отже, леговані надгратки не містять типових для композиційних надграток гетерограниць, з якими пов'язані можливості безпорядкування складу або появи напружень невідповідності.

Маємо справу з однорідним напівпровідником, який лише модульований чергуючим типом легування. Крім того, ефективній ширині забороненої зони в легованій надгратці можна надавати будь-яке значення від нуля до ширини зони вихідного матеріалу шляхом належного підбору рівнів легування і товщин шарів.

Розглянемо напівпровідник із шириною забороненої зони E_g та статичною діелектричною проникністю ϵ , модульований періодичним n - та p -легуванням у напрямку осі z . Хоча профілі легування $N_D(z)$ $N_A(z)$ можуть мати довільну форму, для простоти розглянемо найпростіший випадок постійних і рівних рівнів легування $N_A = N_D$ за рівних товщин n - і p -шарів $d_n = d_p = d/2$. Будемо також нехтувати можливістю утворення домішкової зони та випадковими неоднорідностями розподілу домішкових атомів.

Для описаної ситуації макроскопічної компенсації в основному стані системи всі домішки будуть іонізовані за рахунок рекомбінації електронів із донорів із дірками на акцепторах. При цьому в кристалі виникає вбудований періодичний потенціал об'ємного заряду $V_D(z)$, створюваний позитивно зарядженими донорами та негативно зарядженими акцепторами. Це потенціал, що має амплітуду [16].

$$V_{D0} = \frac{\pi e^2 N_D d^2}{2\epsilon}, \quad (1)$$

Накладається на потенціал кристалічних ґраток і модулює краї зони провідності та валентної зони, як це схематично показано на рис. 1.

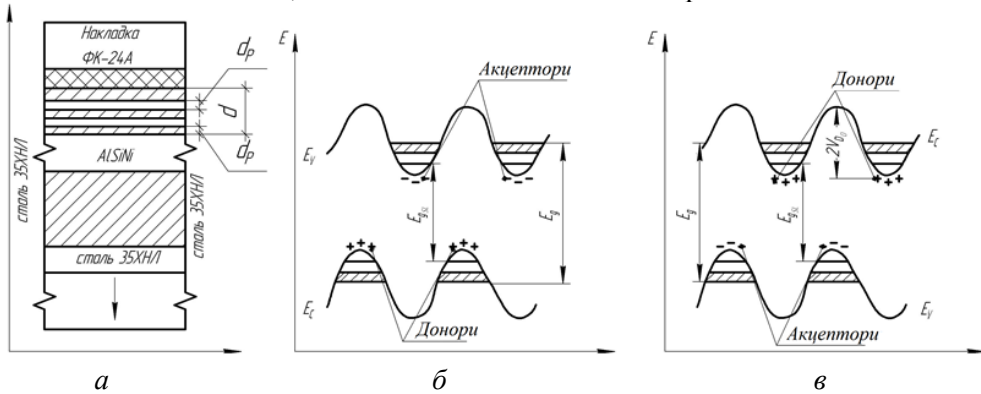


Рис. 1. Схема розташування послідовності шарів при фрикційній взаємодії пар тертя стрічково-колодкового гальма (а) та координатна залежність зонної акцепторно-донорної (б) та донорно-акцепторної (в) діаграм для легованих надґраток AISiNi з підкладкою сталі 35XHM. Стрілка на лівому рисунку показує напрямок зростання шарів

При цьому русі носіїв заряду в z -напрямку квантовано потенціалом надґратки $V_D(z)$. Ефективна ширина забороненої зони надґратки E_{gSL} , тобто енергетична відстань між нижчою підзоною провідності, що має енергію $E_{C.O}$. Про відносно мінімуму зони провідності, та вищою валентною підзоною з енергією $E_{V.O}$.

$$E_{gSL} = E_g - 2V_{D0} + E_{C.O} + |E_{V.O}|. \quad (2)$$

Вочевидь, що ефективна ширина забороненої зони E_{gSL} сильно зменшена порівняно із значенням E_g в не модульованому вихідному матеріалі і від V_{D0} , тобто від рівня легування товщини шарів.

Аналіз наведеної графічної залежності на рис. 2 показав наступне, що на ділянках:

- на кривій *аб* рівень Фермі слабо змінюється за низької температури;
- на кривій *бв* величина a_p збільшується зі зростанням температури;
- уявним *вг* величина a_p знову зменшується зі зростанням температури;
- *вд* концентрація електронів та дірок вирівнюється і тому термоЕРС стає негативною;
- *де* абсолютна величина термоЕРС зменшується.

У нижній частині рис. 2 наведено криву зміни термоЕРС донорного напівпровідника від температури. В області своєї провідності вона зливається з кривою для p -напівпровідника.

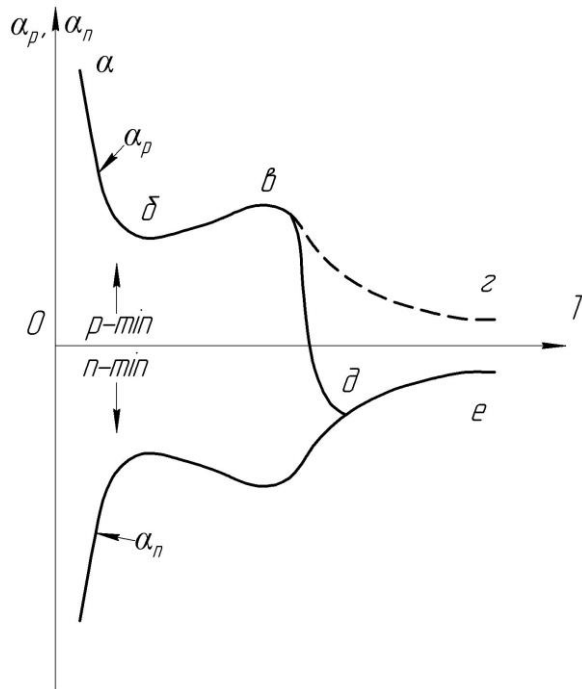


Рис. 2. Залежність термоЕРС акцепторного та донорного напівпровідників від температури

Проілюстровано фізику багатошарових напівпровідникових мікроструктур, так званих надграток знайшли важливе застосування в металевих фрикційних елементах гальмівних пристроїв. У стрічково-колодкових гальмах бурових лебідок надгратки обода шківа фрикційно взаємодіють із полімерною накладкою ФК-24А.

Товщина надграткового напівпровідникового матеріалу AlSiNi знаходиться в тілі обода шківа з постійною величиною ширини забороненої зони та змінної його товщини через вплив на них механічного, електричного та теплового полів. Кремій (Si) між матеріалами алюмінієм (Al) і нікелем (Ni) виступає в ролі утеплювача і тим самим сприяє квазівирівнюванню енергонавантаженості поверхневих шарів обода шківа і при цьому знижується блукаючий електротепловий потенціал. При об'ємній температурі 350°C кремій починає пропускати теплоту нікелю.

Останній маючи високий коефіцієнт теплопровідності, своєю чергою віддає теплоту шарам обода (сталі 35ХНЛ) шківа. Такий стан верхніх шарів обода шківа гальм дозволяє покращити експлуатаційні параметри його пар тертя.

Крім того, кожен із напівпровідникових матеріалів AlSiNi, оточений двома вертикальними та однією горизонтальною підкладкою з матеріалу сталь 35ХНЛ обода шківа утворює наступні поздовжні типи власної провідності: *p-n-p*; *n-p-n*; *n-n-p*; *p-p-n*; *n-p-p*. Поперечні типи власної провідності мають вигляд: *p-n-p*; *n-p-n*; *n-p-p*; *n-n-p*; *p-n-n*.

Відповідно до механізму утворення ковалентного зв'язку, згідно якого загальна електронна пара виникає при взаємодії двох електронів, існує також особливий донорно-акцепторний механізм. Він полягає в тому, що ковалентний зв'язок утворюється в результаті переходу існуючої вже електронної пари донора (постачальника електронів) в загальне користування донора і акцептора.

Ефект електротеплопровідності надграток у напівпровідникових структурах у парах тертя гальм базується на інтенсифікації рухливості в них зарядів.

Конструкція та робота фрикційних вузлів гальм та матеріали пар тертя стрічково-колодкового гальма. Фрикційні вузли гальм мають різний коефіцієнт взаємного перекриття пар тертя, що змінюється від 0,2 до 0,75 і тому мають неоднакову енергонавантаженість.

На рис. 3 показані пари тертя дисково-колодкового гальма. Вони складаються з фрикційних накладок 2, що знаходяться на нерухомих гальмівних колодках. При фрикційній взаємодії робочих поверхонь накладок 2 з суцільним і самовентильованим диском 1, що обертається, під дією нормального притискового зусилля N утворюється бігова доріжка тертя 3.

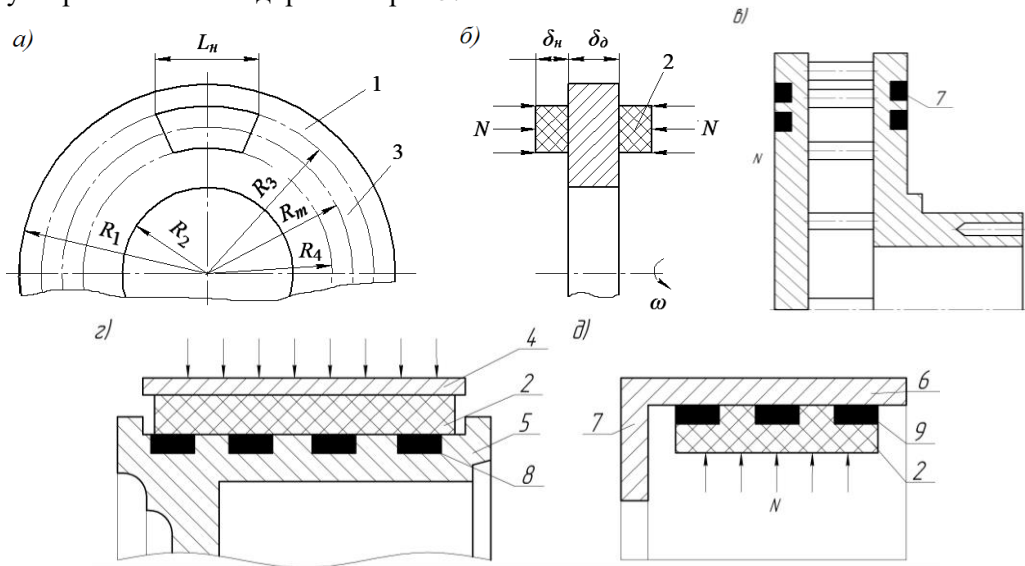


Рис. 3. Схеми різних типів фрикційних вузлів гальмівних пристроїв: а, б, в – дисково-колодкового з суцільним та самовентильованим диском (подовжній та поперечний розріз); г – стрічково-колодкового (поперечний розріз); д – барабанно-колодкового (поперечний розріз)

На рис. 3. г зображено фрикційний вузол стрічково-колодкового гальма бурової лебідки. При затягуванні гальмівної стрічки 4 під дією нормального притискового зусилля N робоча поверхня фрикційної накладки 2 взаємодіє з біговою доріжкою тертя обода шківів 5. Останній за допомогою виступу кріплення 8 з'єднується з фланцем барабана [17].

Фрикційний вузол барабанно-колодкового гальма автомобіля наведений на рис. 3, д. Він містить обід гальмівного барабана б з фланцем 7, а також фрикційні накладки 2, що знаходяться на гальмівних колодках. При розтисканні останніх робочі поверхні накладок 2 фрикційно взаємодіють із внутрішньою (робочою) поверхнею обода гальмівного барабана б.

Теплопровідні кільця 7, 8 та 9, виготовлені з матеріалу AlSiNi у вигляді вертикальних кілець різних зовнішніх та внутрішніх діаметрів та ширини.

Зупинимося на матеріалах пар тертя стрічково-колодкового гальма.

Внаслідок того, що при підвищенні температури верхній шар накладки «пригорає» і утворює дуже міцну поверхню, стійку до механічних пошкоджень. Саме вказаний шар і визначає високий динамічний коефіцієнт тертя – 0,43 за чавуном

та 0,50 по сталі та тривалий термін експлуатації. Навіть при екстримальних режимах гальмування при нагріванні більше 700°C (поверхнева температура) «Ретинакс» не розтріскується, не задирається і не згорає. Цим він відрізняється від більшості видів фрикційних матеріалів. Переваги полягають у відсутності у матеріалі синтетичних компонентів.

До складу фрикційного матеріалу ФК-24А входять такі компоненти: фенолформальдегід (смола), азбест, барит (сульфат барію), латунь, пластифікатори, модифікатори.

Хімічний склад матеріалів обода шків сталі 35ХНЛ наступний: залізо (*Fe*), кремній (*Si*), мідь (*Cu*), марганець (*Mn*), нікель (*Ni*), хром (*Cr*), фосфор (*P*), сірка (*S*).

Усі перелічені матеріали мають тип власної провідності *n* і лише *Cr* і *Si* – *p*. Фосфор та сірка мають слабку провідність.

Енергонавантаженість обода шків стрічково-колодкового гальма бурової лебідки при фрикційній взаємодії з робочими поверхнями фрикційних накладок за схемою: температура спалаху (електротермодинамічний ефект), поверхнево-об'ємна та об'ємна температури.

Рухливість носіїв зарядів у гетероструктурах із модульованим легуванням. Причиною зростання рухливості в гетероструктурах з модульованим легуванням є поділ рухомих носіїв з іонізованими домішками, що їх породили.

Для здійснення цього поблизу гетерограниці легують виключно матеріал з більшою шириною забороненої зони (зазвичай $AlSiNi$), а вузькозонний матеріал (сталі 35ХНЛ), що межує з ним, залишають нелегованим. Переважною технологією вирощування таких структур МЛБ. Носії в гетеропереході переходять із домішок через границю у нижчі зонні стани сусіднього матеріалу, утворюючи двовимірну електронну або діркову систему, просторово розділену зі своїми іонізованими донорами або акцепторами. Провідність уздовж гетерограниці при цьому помітно збільшується порівняно з провідністю масивного матеріалу з еквівалентною концентрацією носіїв, головним чином за рахунок пригнічення домішкового розсіювання. Тому переваги модульованого легування помітні, переважно, при низьких температурах, як у звичайних легованих напівпровідниках домінує розсіювання на іонізованих домішках. При високих температурах, коли домінує фонне розсіювання, переваги модульованого легування менш помітні, проте відчувуються навіть за кімнатної температури. Основний принцип модульованого легування незмінний і зараз, так що просторовий поділ носіїв та іонізованих домішок залишається основним методом збільшення рухливості у цих структурах. Разом про те наступні роботи [7, 8] як теоретичні, і експериментальні [19] дозволили виділити процеси залишкового розсіювання й у деяких випадках знайти спосіб зменшити їх вплив.

Для оцінки методу модульованого легування перерахуємо коротко основні процеси залишкового розсіювання носіїв двовимірної електронної системи на гетерограниці. Свою увагу зосередимо на гетеропереході *n*-типу $AlSiNi$ – сталі 35ХНЛ (рис. 4).

Розсіювання на об'ємних фонах має власний характер і при кінцевих температурах не може бути виключено. Реальна швидкість фонного розсіювання в структурах з модульованим легуванням може трохи модифікуватися в порівнянні з об'ємним випадком, але ці зміни повинні бути невеликі. Теоретичні розрахунки показують, що швидкість розсіювання близька до свого об'ємного значення [19]. При температурах, що перевищують 750К, коли домінує фонне розсіювання,

значення рухливості у кращих структурах з модульованим легуванням збігаються з даними для чистого масивного AlSiNi. Таке погодження показує, що навіть при високих температурах рухливість у структурах з модульованим легуванням, що мають концентрацію, еквівалентну 10^{17} см^{-3} , може дорівнювати або навіть перевершувати рухливість носіїв у кращих масивних зразках сталі 35ХНЛ з концентрацією $\approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Крім того, це означає, що високотемпературне (тобто фононне) розсіювання в обох типах структур аналогічне.

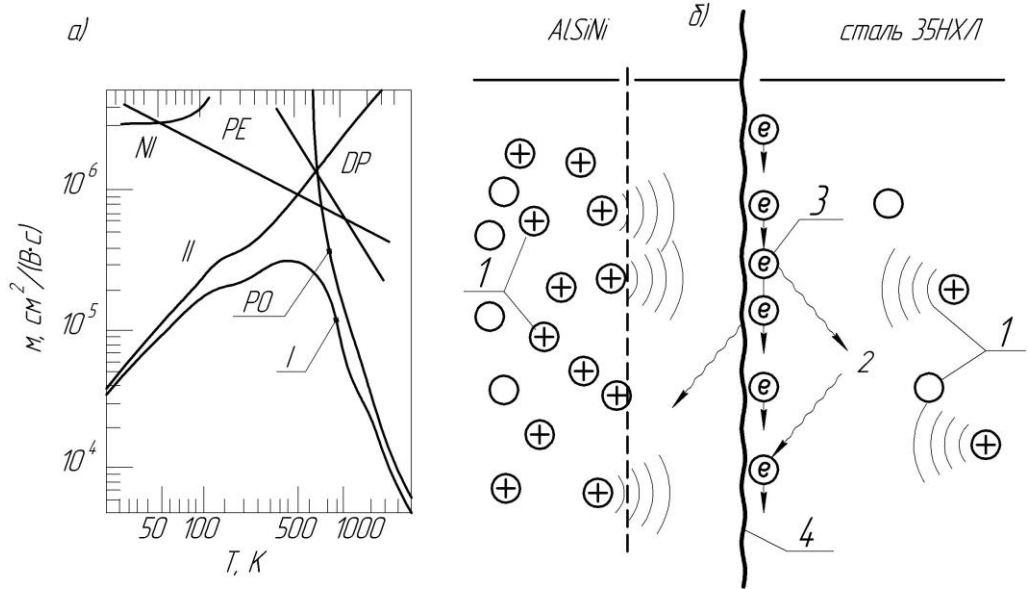


Рис. 4. Температурна залежність рухливості μ для різних способів розсіювання в однорідному чистому AlSiNi (a); PE – п'єзоелектричне розсіювання, PO – розсіювання на полярних фононах, DP – розсіювання на деформаційному потенціалі; NI – розсіювання на нейтральних домішках; II – розсіювання на іонізованих домішках з концентрацією $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; I – результуюча рухливість, б – схематичне зображення процесів залишкового розсіювання у двовимірному електронному полі на гетерограниці сталь 35ХНЛ – AlSiNi. Штриховою лінією показана границя легovanого та нелегovanого AlSiNi: 1 – домішки, 2 – фонони, 3 – двомірне електронне поле, 4 – шорсткість границі

Можливим способом релаксації є розсіювання на поверхневих фононах. Проте через близькість щільностей і діелектричних проникностей обох матеріалів (сталь 35ХНЛ і AlSiNi) роль поверхневих фононів мала і електронне розсіювання на них несуттєве.

Розрив зони провідності на гетерокордон має, як правило, величину близько 300 меВ. Тому двовимірні носії, локалізовані в шарі AlSiNi поблизу кордону, можуть тунелювати в шар AlSiNi і розсіюватися там на випадковому потенціалі цього потрійного твердого розчину. Але в силу малості глибини проникнення внесок цього в повну швидкість розсіювання зазвичай малий. Експериментально вивчався вплив частки Al(x) у AlSiNi на рухливість у структурах з модульованим легуванням [18]. В області $x < 0,4$, де AlSiNi є прямозонним напівпровідником, спостерігався як монотонний ріст та спад рухливості [19]. Принаймні незрозуміло, чи залежність рухливості від частки Al вказувати на важливу роль сплавного розсіювання в структурах з модульованим легуванням, так як зростання концентрації Al зменшує глибину підбар'єрного проникнення електронів, але в той же час збільшує амплітуду флуктуацій потенціалу AlSiNi. Крім того, зміна частки Al

може помітно позначатися як гетерокордон і тим самим впливати на рухливість за рахунок розсіювання електронів на шорсткості кордону.

Розсіювання носіїв на шорсткості границі між сталлю 35ХНЛ та AlSiNi стає впливовим, коли рухливість перевищує $\sim 10^5$ см²/(В·с). Дослідження залежності рухливості від об'ємної температури росту кристала T_g в інтервалі між $\sim 600^\circ\text{C}$ та $\sim 700^\circ\text{C}$. За більш високих і низьких T_g рухливість різко падає. Вказаний температурний інтервал оптимальної рухливості збігається з областю температур, в якій шорсткості границь у нелегованих надгратках сталі 35ХНЛ виявляються мінімальними. Ця кореляція дозволяє припустити, що температура зростання впливає на рухливість у двовимірному каналі головним чином завдяки зміні амплітуди шорсткості границь.

Важливою характеристикою залишається розсіювання носіїв на хвостах кулоновського потенціалу віддалених іонізованих домішок AlSiNi. Введення нелегованого прошарку із сталі 35ХНЛ («спейсера») між шарами сильнолегованого AlSiNi суттєво пригнічує розсіювання [4]. Дослідження залежності рухливості від товщини спейсера в поодиноких гетероструктурах з модульованим легуванням виявили несподівано складну закономірність. Із зростанням товщини спейсера d_3 в інтервалі від $d_3 \approx 7$ нм до $d_3 \approx 10$ нм рухливість зростала, але потім знову почала падати. Причина спаду рухливості при великих d_3 , мабуть, пов'язана зі зменшенням концентрації носіїв, оскільки при великій товщині спейсера зменшується заряд, що переноситься з домішок каналу. Сильна залежність рухливості від концентрації носіїв була експериментально підтверджена. Як правило, більшим концентраціям відповідали збільшені рухливості, тому зменшення концентрації носіїв при великій товщині спейсера веде до зниження рухливості.

Джерелом розсіювання в структурах з модульованим легуванням можуть бути домішки в шарах сталі 35ХНЛ, залежно від природи домішок та ступеня їх компенсації можуть бути або зарядженими, або нейтральними. Зарядженими домішками є сильні розсіювачі, а нейтральні – слабкі. Шари сталі 35ХНЛ у структурах з модульованим легуванням зазвичай містять менше ніж 10^{15} см⁻³ домішок (порівняно з 10^{18} см⁻³ в AlSiNi), що не помітно позначається на загальній поведінці рухливості двовимірних електронних систем. Намірне легування шарів AlSiNi до рівня, більшого 10^{16} см⁻³, призводить до зниження рухливості.

Придушення основних джерел розсіювання електронів у двовимірних каналах структур із модульованим легуванням шляхом створення раціонального матеріалу дозволило значно підвищити рухливість електронів у цих структурах. Поряд із ослабленням перерахованих способів розсіювання для досягнення збільшеної рухливості необхідно брати до уваги ще один дуже важливий параметр. Це концентрація двовимірних електронів. Виразна кореляція між концентрацією та рухливістю електронів була виявлена експериментально. Хоча реальний взаємозв'язок рухливості та концентрації у різних дослідників різний, загальноновизнаним є різке зростання рухливості з концентрацією в інтервалі від $1 \cdot 10^{11}$ до $5 \cdot 10^{11}$ см⁻². Із збільшенням кута розсіювання зростає вага відповідних процесів у сумарній швидкості пружного розсіювання. Це означає, що важливою є не тільки частота зіткнень, а й величина зміни імпульсу кількості руху вздовж електричного поля в одному акті розсіювання. Таким чином, для деякого конкретного процесу розсіювання, має певну амплітуду для хвильового вектора q , розсіювання при великих k_F відносно менш ефективно, ніж при малих k_F . Звідси впливає зростання

рухливості зі зростанням k_F , тобто зі зростанням концентрації двовимірної електронної системи.

Нині роль різних способів розсіювання, визначаючих рухливість двовимірних електронів, з'ясовано досить добре [5]. Істотно менше зусиль вживалося при вивченні двовимірних діркових систем, хоча ці системи видаються цікавими як з погляду фундаментальної фізики, але й у важливих практичних застосуваннях. У низці недавніх робіт вивчалися різні аспекти двовимірного діркового газу в гетеропереходах сталі 35ХНЛ – AlSiNi [20]. Було показано, що вдосконалення технології модульованого легування призводить до збільшення діркової рухливості [21]. Максимальна діркова рухливість становить $\approx 9,7 \cdot 10^4$ (см²/В·с) при 420°С. Хоча накопичення експериментальних результатів по дірковій рухливості триває, поки що не було спроб сформулювати теоретичну модель, здатну пояснити отримані результати та передбачити граничні значення діркової рухливості в *p*-гетероструктурах з модульованим легуванням. Проте сучасне розуміння електронної структури гетеропереходів сталі 35ХНЛ – AlSiNi *p*-типу з модульованим легуванням дозволяє сформулювати відносно просту модель діркової рухливості [22]. У ній передбачається, що дірки зосереджені у трикутній квантовій ямі гетерограниці з боку сталі 35ХНЛ. Відсутність інверсної симетрії і сильна спин-орбітальна взаємодія в системі, що розглядається, призводить до розщеплення чотириразово виродженої валентної зони на ряд підзон. Дві вищі спинові підзони важких дірок вироджені при $k = 0$ і помітно відокремлені від нікелящих підзон, так що при типових концентраціях дірок заповнені лише вищі підзони. Оскільки зазначені дві підзони мають різні спини, то для всіх основних процесів розсіювання помітне міжпідзонне розсіювання відсутнє і швидкості розсіювання можна обчислювати для кожної зони окремо. Аналіз, що враховує всі основні процеси розсіювання у двох виявлених спинових підзонах, показав, що при великих товщинах спейсера гранична очікувана дірочна рухливість перевищує $2 \cdot 10^5$ см² / (В·с) і повністю визначається розсіюванням на деформаційному потенціалі акустичних фононів [20].

Обговорення результатів. Результати теоретичних досліджень із застосування надграток модульованих легуванням матеріалу AlSiNi у парах тертя гальм показав наступне:

- є можливим розглянути одночасно фізику електронної провідності для обох випадків – класичного (паралельно границям), оскільки металевий фрикційний елемент обертається;
- насичення іонами та електронами верхніх шарів матеріалу AlSiNi, впровадженого у вигляді вставок у металеві фрикційні елементи гальм відбувається при замкнених та розімкнених їх пар тертя;
- взаємодія поперечних та поздовжніх типів електротеплопровідностей у робочих шарах обода шків дозволяє вирівняти в них енергонавантаженість за рахунок зниження величини блукаючого потенціалу;
- ширина забороненої зони напівпровідникових структур з *p-n*-переходами залишається постійною незважаючи на те, що акцептори та донори зарядів змінюють своє положення через кожні 180° при генеруванні синусоїдального електричного струму в парах тертя «метал-полімер»;
- гетероепітаксія матеріалу AlSiNi, для якого товщина його шарів не відіграє ролі, а підкладкою є матеріал сталі 35ХНЛ обода шків, що знаходяться під впливом динамічного, електричного та теплового полів зростання кристалів надграток у напівпровідникових структурах по їх товщині відбувається зверху вниз.

Висновки. Таким чином, за рахунок електротеплопровідності надграток у напівпровідникових структурах, впроваджених у вигляді кілець в обід шківів, забезпечується зниження енергонавантажності пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки.

Список літератури

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ редакцией А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
2. Dingle R., Störner H. L. Grossard A. C., Wiegman W. – Appl. Phys. Lett., 1978, v.33, p. 665.
3. Störner H. L. – J. Phys. Soc. Japan, 1980, v. 49, Suppl. A. p. 103.
4. Störner H. L., Pinczuk A., Grossard A. C., Wiegman W. – Appl. Phys. Lett., 1981, v.38, p. 691.
5. Störner H. L. – Surf. Sci., 1984, v. 142, Suppl. A. p. 130.
6. Störner H. L., Dingle R., Grossard A. C., Wiegman W., Logan R. A. – In Proc. of the 14th Intern. Conf. Phys. Semicond. 1978, Edinburgh./ Ed. B. L. H. Wilson. – London and Bristol: Institute of Physics, Conf. Ser. 43, 1979, p. 557.
7. Морсоч Н. – IEEE Spectrum, 1984, Febr., p. 28.
8. Esaki L., Tsu R. – IBM J. Res. Develop., 1970, v. 14, p. 61.
9. В. И. Фистуль. Введение в физику полупроводников (М., Высш. шк., 1975).
10. Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. Полупроводниковая оптоэлектроника (М., Мир, 1976).
11. В. М. Андреев, Х. М. Долгинов. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов (М., Сов. радио, 1975).
12. И. В. Бондарь. ФТП, 49 (3), 1180 (2015).
13. А. И. Лебедев. Физика полупроводниковых приборов (М., Физматлит, 2008).
14. К. В. Шалимова. Физика полупроводниковых приборов (М., Энергоатомиздат, 1985). В. Л. Бонч-Бруевич, И. П. Звягин, И. В. Карпенко, А. П. Миронов. Сборник задач по физике полупроводников (М., Мир, 1987).
15. А. Амброзьяк. Конструкция и технология полупроводниковых фотоэлектрических приборов (М., Сов. радио, 1970).
16. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман // Пер. с англ. – Мир, 1989. – 240 с.
17. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко [и др.]. Стандарт. Баку: «Апострофф», 2016. – 312 с.
18. Изделия фрикционные из ретинакса. Технические условия: ГОСТ 19851 – 73. М.: Высшая школа, 1991. – 351 с.
19. Störner H. L. – Surf. Sci., 1983. v. 132, p. 519.
20. Walukiewicz W. – Phys. Rev. B, 1985, v. 31, p. 5557.
21. Wang W, Mendez E. E., Stern F. – Appl. Phys., Lett., 1984, v. 45, p. 639.
22. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника: Пер. с испан. С. И. Баскакова / Под. ред. В. А. Терехова; Предисл. В. А. Терехова. М.: Высшая школа, 1991. – 351 с.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2022.

D. O. VOLCHENKO, M. V. KINDRACHUK, S. V. NIKIPCHUK, Ya. M. SAVCHYN, V. T. BOLONNY
**ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SUPERSTRUCTURES IN SEMICONDUCTOR
STRUCTURES IN BRAKE FRICTION PAIRS**

The physics of multilayer semiconductor microstructures of so-called superlattices, which have found important application in metal friction elements of brake devices, is presented. In the belt-pad brakes of drilling winches, the lattice rim superstructures frictionally interact with the polymer overlay FC-24A. The thickness of the AlSiNi superlattice semiconductor material is in the body of the pulley rim with a constant value of the band gap and its variable thickness due to the action of mechanical, electric and thermal fields. Silicon (Si), located between the materials aluminum (Al) and Nickel (Ni) acts as a thermal insulator, and thus contributes to the quasi-equalization of the energy load of the surface layers of the rim of the pulley. At the same time the wandering electrothermal potential decreases. At a volumetric temperature of 350 °C, silicon begins to transmit heat to Nickel. The latter, having a high coefficient of thermal conductivity, in turn gives off heat to the layers of the rim (steel 35HNL) pulley. This condition of the upper layers of the rim of the brake pulley allows to improve the performance of its friction pairs. The thermal conductivity effect of superlattices in semiconductor structures in brake friction pairs is based on the intensification of charge mobility in them. The bulk charge potential in doped lattices modulates the edges of the source material zones in such a way that electrons and holes are spatially separated. With the appropriate choice of structure parameters (alloying levels and layer thickness), this division can be made almost complete.

Key words: brake device, friction pair, metal friction element; superlattices in semiconductor structures, electrically conductive potential.

Reference

1. Treniye, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) / Pod obshch redaktsiyey A. V. Chichinadze. – M.: Mashinostroyeniye, 2003. – 575 s.
2. Dingle R., Störner H. L. Grossard A. C., Wiegman W. – Appl. Phys. Lett., 1978, v.33, p. 665.
3. Störner H. L. – J. Phys. Soc. Japan, 1980, v. 49, Suppl. A. p. 103.
4. Störner H. L., Pinczuk A., Grossard A. C., Wiegman W. – Appl. Phys. Lett., 1981, v.38, p. 691.
5. Störner H. L. – Surf. Sci., 1984, v. 142, Suppl. A. p. 130.
6. Störner H. L., Dingle R., Grossard A. C., Wiegman W., Logan R. A. – In Proc. of the 14th Intern. Conf. Phys. Semicond. 1978, Edinburgh./ Ed. B. L. H. Wilson. – London and Bristol: Institute of Physics, Conf. Ser. 43, 1979, p. 557.
7. Morcoc H. – IEEE Spectrum, 1984, Febr., p. 28.
8. Esaki L., Tsu R. – IBM J. Res. Develop., 1970, v. 14, p. 61.
9. V. I. Fistul'. Vvedeniye v fiziku poluprovodnikov (M., Vyssh. shk., 1975).
10. T. Moss, G. Barrel, B. Ellis. Poluprovodnikovaya optoelektronika (M., Mir, 1976).
11. V. M. Andreyev, Kh. M. Dolginov. Zhidkostnaya epitaksiya v tekhnologii poluprovodnikovoykh priborov (M., Sov. radio, 1975).
12. I. V. Bondar'. FTP, 49 (3), 1180 (2015).
13. A. I. Lebedev. Fizika poluprovodnikovoykh priborov (M., Fizmatlit, 2008).
14. K. V. Shalimova. Fizika poluprovodnikovoykh priborov (M., Energoatomizdat, 1985).
15. V. L. Bonch-Bruyevich, I. P. Zvyagin, I. V. Karpenko, A. P. Mironov. Sbornik zadach po fizike poluprovodnikov (M., Mir, 1987).
16. A. Ambrozyak. Konstruktsiya i tekhnologiya poluprovodnikovoykh fotoelektricheskikh priborov (M., Sov. radio, 1970).
17. Kherman M. Poluprovodnikovyye sverkhreshetki / M. Kherman // Per. s ang. – Mir, 1989. – 240 s.
18. Proyektyny i proverochnyy raschet friktsionnykh uzlov lentochno-kolodochnykh tormozov burovykh lebedok / A. Kh. Dzhanakhmedov, D. A. Vol'chenko, N. A. Vol'chenko [i dr.]. Standart. Baku: «Apostroff», 2016. – 312 s.

18. Izdeliya friktsionnyye iz retinaksa. Tekhnicheskiye usloviya: GOST 19851 – 73. M.: Vysshaya shkola, 1991. – 351 s.

19. Störner H. L. – Surf. Sci., 1983. v. 132, p. 519.

20. Walukiewicz W. – Phys. Rev. B, 1985, v. 31, p. 5557.

21. Wang W, Mendez E. E., Stern F. – Appl. Phys., Lett., 1984, v. 45, p. 639.

22. Rosado L. Fizicheskaya elektronika i mikroelektronika: Per. s ispan. S. I. Baskakova / Pod. red. V. A. Terekhova; Predisl. V. A. Terekhova. M.: Vysshaya shkola, 1991. – 351 s.

Вольченко Дмитро Олександрович – докт. техн. наук, професор кафедри видобування нафти і газу Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-373-82-42, E-mail: divo99@ukr.net.

Кіндрачук Мирослав Васильович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net.

Нікіпчук Сергій Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедри автомобільного транспорту [Національного університету «Львівська політехніка»](#), 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери 12, тел.: +38 099 318 89 12, E-mail: nikipch@gmail.com

Савчин Ярослав Михайлович – викладач, Дрогобицького фахового нафтового і газового коледжу, вул. Грушевського, 57, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100, Україна, +38 0324438969, E-mail: savchyn_j@ukr.net

Болонний Василь Тарасович - канд. техн. наук, доцент, заступник директора з навчальної роботи Дрогобицького фахового нафтового і газового коледжу, вул. Грушевського, 57, м. Дрогобич, Львівська обл., 82100, Україна, +38 0324438969, E-mail: vtb281972@ukr.net