

*К.С. ЯЦУН***МОДИФІКАЦІЯ АКТИВНОЇ ОБЛАСТІ РЕЗОНАНСНО-ТУНЕЛЬНОГО ДІОДУ****Вступ**

У загальному випадку резонансно-тунельний діод являє собою періодичну структуру, яка складається з послідовно розташованих квантових колодязів, розділених потенційними бар'єрами, з електричними контактами до двох крайніх протилежних областей.

Явище резонансного тунелювання було вперше описано в 1958 р. японським дослідником Л. Есакі [1]. Однак експериментальні резонансно-тунельні діоди і транзистори з'явилися лише на початку 90-х років ХХ століття. Резонансно-тунельний діод являє собою складну періодичну структуру, розміри деяких областей якої складають кілька нанометрів.

Принцип дії резонансно тунельного діоду полягає у тому, що струм досягає максимального значення, коли при поданій напрузі енергія електронів дорівнює енергії дискретного рівня у квантово-обмеженій області. При більш високих або менших напругах енергія електронів стає більшою чи меншою ніж енергія дискретного рівня, і прозорість бар'єру для електронів зменшиться. При цьому струм також зменшиться.

Додавання керуючого електрода до резонансно-тунельного діода перетворює його в резонансно-тунельний транзистор (РТТ) і розширює можливості його застосування. Такі транзистори мають частоти перемикання порядку 10^{12} Гц, що в 100 – 1000 разів вище, ніж у найкращих кремнієвих транзисторів з сучасних інтегральних мікросхем. З точки зору практичного використання найбільш привабливими характеристиками резонансно-тунельних діодів є їх надзвичайно високі швидкості перемикання.

Резонансно-тунельні діоди і транзистори застосовуються як в аналогових, так і в цифрових інтегральних мікросхемах як елементи, що мають вольт-амперну характеристику з ділянкою негативного диференціального опору.

При цьому, найбільш важливими особливостями розглянутих наноелектронних приладів на тунельному ефекті є їх розширені, в порівнянні з традиційними приладами, функціональні можливості. Надзвичайні особливості резонансно-тунельних структур пов'язані з унікальністю їх вольт-амперних характеристик і високою швидкодією. Завдяки їм РТД та РТТ відіграють все більш важливу роль в розробці надшвидкодіючих інтегральних мікросхем з надвисоким ступенем інтеграції.

Резонансно-тунельні структури у сучасній електроніці та мікроелектроніці

Функціонування РТД базується на ефекті резонансного тунелювання носіїв заряду через послідовно розташовані напівпрозорі потенційні бар'єри, розділені квантовими ямами. РТД спочатку були випробувані як детектори випромінювань терагерцового діапазону, а потім як високочастотні генератори [2]. В роботі повідомляється про досягнення частоти генерації 712 ГГц. Був розроблений і створений РТД, максимальна частота генерації якого оцінюється в 2 ТГц. Експериментально спостерігалось перемикання РТД з пікового стану в долині за 1,5 пс.

У даний час ведуться активні роботи по створенню схем, що містять РТД, для таких функціональних пристроїв дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів, як генератори фіксованої частоти, частотні модулятори і змішувачі. Необхідно відзначити, що не тільки висока гранична частота, а й інші характеристики РТД, такі як симетрія його N-подібної ВАХ відносно початку координат і знижений рівень шумів, можуть бути практично важливими для його застосування в уже освоєних діапазонах частот.

Великі переваги обіцяє використання РТД в цифрових інтегральних схемах в якості нелінійного навантаження для польових транзисторів. РТД перемикаються швидше ніж транзистори з високою рухливістю електронів (ТВРЕ), тобто не обмежують швидкодії активного

приладу), і вертикально інтегруються в стік активного транзистора, не займаючи при цьому додаткового місця [2, 3].

Крім того, останнім часом з'явилася велика кількість теоретичних і експериментальних робіт, в яких пропонується використовувати резонансно-тунельні структури (РТС) в якості логічних елементів. Монолітний синтез РТС з транзисторними структурами відкриває великі можливості у створенні приладів зі складними логічними функціями. Подібна інтеграція в різних варіантах була здійснена з польовим транзистором і біполярним транзистором. Монолітна (площинна або вертикальна) інтеграція декількох РТС дозволяє формувати компактні осередки багатозначної логіки і багатозначної пам'яті. Такі компактні осередки вже зараз можуть конкурувати зі звичайними транзисторними осередками. У роботі [3] інтегровано шість РТД і транзистор з високою рухливістю електронів на основі InGaAs. В результаті створено аналого-цифровий перетворювач і чотирьохзначний інвертор.

Властива РТД (з навантаженням) бістабільність дозволяє створювати тригерні схеми без використання зворотного зв'язку. Наприклад, описана в [3] ТВРЕ/РТД схема має площу в шість разів, а енергоспоживання в три рази менше, ніж аналогічні ТВРЕ-схеми на частоті 25 ГГц. Завдяки меншому числу елементів скорочуються також затримки на міжз'єднання.

За ТВРЕ/РТД технологією створено: осередки статичної оперативної пам'яті з нановатним споживанням, десятирозрядний зсувний регістр, що працює на частоті 2,5 ГГц, тактовий генератор на 6,5 ГГц, чотирьохбітний АЦП на 2 ГГц та деякі інші пристрої. Ці приклади підтверджують високу перспективність використання РТД в електроніці.

При більш детальному розгляді ефекту проходження електронів через потенційні бар'єри, створювані всією сукупністю заряджених частинок при контакті двох, наприклад напівпровідникових матеріалів, було встановлено кілька фактів. Виявилось, що в структурі з надзвичайно малими розмірами властивості тунельного ефекту залежать від енергії електронів усередині самої структури. Внаслідок чого в наноструктурі з двома потенційними бар'єрами спостерігається різке зростання струму, який протікає через неї, тільки при однаковій (у межах теплового розширення енергетичного стану) енергії електронів в електроді, що поставляє електрони, і окремого вільного енергетичного рівня в наноструктурі. Це явище отримало назву «резонансне тунелювання».

Прилади з РТС (і спеціальним легуванням контактних шарів) мають властивість зберігання інформації (заряду) за кімнатної температури і нульовій доданій напрузі. Дане явище полягає в наявності двох стійких станів системи, які відрізняються профілем зони провідності через відмінності в розподілі заряду і, відповідно, тунельною прозорістю.

Кожному стану відповідає своя гілка ВАХ, перехід між якими відбувається при підвищенні напруги. Такі структури можуть бути використані для виготовлення швидкодіючих енергонезалежних запам'ятовуючих пристроїв. Довгий час серйозною перешкодою для застосування РТД залишалася низька відтворюваність характеристик РТД, яку відносили на рахунок недосконалості технології молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ). В останні роки необхідна висока відтворюваність була досягнута. Зараз основною причиною, за якою не відбувається масове впровадження РТД в електроніку, є складність і дорожнеча технології, а також відсутність досвіду розробки схем з РТД у схемотехніці. Для спрощення технології виробництва, перш за все, бажано створити площинні РТС, і недавно стався істотний прорив в даному напрямку [4].

Інша проблема полягає в недостатньо високих статичних характеристиках одержуваних РТД, внаслідок чого вони не у всіх застосуваннях можуть конкурувати з традиційною елементною базою ІС. Найважливішими характеристиками статичної (низькочастотної) ВАХ РТД, що має N-подібний вигляд, є густина пікового струму J_p і відношення густини струму в піку J_p до густини струму в долині (відношення пік-долина) – J_v . Для використання РТД як компонента НВЧ пристроїв визначальним параметром є J_p , який задає частоту і потужність генерації. В даному випадку необхідно збільшення густини пікового струму. З наявних літературних даних інтерес представляють РТД з $J_p > 10$ А/см.

При використанні РТД в цифрових інтегральних схемах густина пікового струму визначається конкретним проєктованим пристроєм. Також густина пікового струму залежить від розмірів елементів, що виготовляються для необхідних потужних режимів. Принциповим в даному випадку є зменшення долинного струму, оскільки він визначає споживану потужність елемента в стані логічного нуля. Мінімізація Іv автоматично збільшує відношення пік / долина.

При цьому вирішується проблема надійності реєстрації логічних рівнів в елементах ІС. Зростання Іv також сприяє поліпшенню інших статичних і динамічних характеристик проєктованих пристроїв. Тому основне завдання в області створення приладів з резонансним тунелюванням полягає в отриманні відтвореним чином відносно великих пікових густин струму ($10^3 - 10^5$ А/см²) і відносин пік / долина більше 10 при 300 К. Поряд з експериментальними дослідженнями ефекту резонансного тунелювання виникає необхідність в моделях, які дозволили б адекватно описати фізичні процеси, що протікають в структурах і аналізувати залежність електрофізичних характеристик приладів від конструктивно-технологічних параметрів. Такі моделі дозволяють визначити необхідні розміри, підібрати відповідні матеріали на етапі розробки РТД приладів, спрогнозувати їх підсумкові показники. Фізичні моделі спираються на експериментальні дані і, звичайно, оформляються у вигляді комп'ютерних програм-симуляторів.

Повний опис поведінки РТД можливий тільки мовою квантового кінетичного рівняння (ККР), тому що необхідно враховувати процеси розсіювання. Однак надзвичайно високі вимоги симуляторів на основі ККР до обчислювальної потужності, роблять актуальним використання більш простих моделей. Значна їх кількість заснована на розв'язанні стаціонарного рівняння Шредінгера в наближенні однозонного методу ефективної маси.

Моделювання та оптимізація резонансно-тунельного діоду

Тунелювання грає важливу роль у багатьох напівпровідникових діодах. РТД. Важливою характеристикою резонансно-тунельного діоду на основі двохбар'єрної структури з квантовою ямою є наявність падаючої ділянки на ВАХ. Іншими словами поява негативного диференційного опору або негативної диференційної провідності. Якісне пояснення ВАХ базується на енергетичній структурі квантової ями. Вона являє собою дискретну систему енергетичних рівнів розмірного квантування. У загальному випадку, положення квантово-розмірних рівнів та відповідних їм хвильових функцій у ямі можливо розрахувати, розв'язавши стаціонарне рівняння Шредінгера. Хвильові функції частинок, локалізованих у ямі не дорівнюють нулю на границях ями, а плавно спадають у глиб бар'єрів. Таким чином, можливе тунелювання крізь бар'єр.

За відсутності напруги, струм через структуру дорівнює нулю. При додаванні електричного поля потенційний бар'єр для електронів зменшується, і вони можуть тунелювати з емітера до колектора. Таким чином, буде заповнюватися нижній рівень у ямі, струм буде повільно зростати. При подальшому збільшенні напруги, рівні у ямі рухаються униз по шкалі енергії відносно рівня Фермі. При певній нарузі рівень Фермі попаде у резонанс із підзоною розмірного квантування. Тоді електрони можуть резонансним чином тунелювати у яму, потім вийти з неї, протунелювавши крізь другий бар'єр. Тунельний струм стрімко зросте. При подальшому підвищенні напруги тунельний струм різко падає, утворюючи, таким чином, область з негативним диференційним опором. Далі, з підвищенням напруги, при співпадінні рівня Фермі з наступним рівнем розмірного квантування у ямі ефект повторюється. Таким чином, можна спостерігати осциляції тунельного струму. Відстань між максимумами буде пропорційна відстані між рівнями енергії частинок в КЯ.

Крайні шари резонансно-тунельного діоду є сильно легованими, і до них приєднуються омичні контакти. У результаті розвитку технології молекулярно-променевої епітаксії такі структури стало можливо створювати на основі гетеропереходів. Висота бар'єрів у таких

структурах змінюється при збільшенні змісту Al від 0,25 eВ при $x=0,3$ до 1,35 eВ при $x=1$. Типові ширини бар'єрів і ями мають значення 5 – 10 нм.

Оскільки бар'єри мають кінцеву висоту, то електрони, неповністю локалізовані у ямі, та квазірівні енергії у ямі мають кінцеву ширину $\Delta E \approx \hbar/\tau_n$ [5], де час релаксації

$$\tau_n = \frac{1}{v_n} \times \frac{4}{|D_1|^2 + |D_2|^2}. \quad (1)$$

Частота класичного руху у ямі $v_n = \hbar R q k_n / mL$

D_1, D_2 – амплітуди проходження крізь «перший» 1 та «другий» 2 бар'єри, $|D_1|^2, |D_2|^2$ – коефіцієнти проходження крізь 1 та 2 бар'єри, k_n – хвильовий вектор, який відповідає квазірівню енергії частинки $E_n = \hbar^2 (k_n)^2 / 2m$ у ямі.

Для прямокутних бар'єрів коефіцієнт проходження крізь всю структуру поряд з енергією квазірівня E_n приблизно можна представити у вигляді

$$|D|^2 = \frac{4 \cdot |D_1 D_2|^2}{(|D_1|^2 + |D_2|^2)} \times \frac{\hbar^2 / \tau_n^2}{|E - E_n|^2 + \hbar^2 / \tau_n^2}. \quad (2)$$

Максимальне значення $|D|^2=1$ буде при $E=E_n$ та $|D_1|=|D_2|$ згідно з формулою (2).

При накладанні зовнішнього електричного поля змінюється форма і висота бар'єрів так, що амплітуди проходження D_1, D_2 стають різними, тому загальний коефіцієнт проходження $|D|^2$ буде зменшуватися, згідно формули (2).

Змінюючи висоту або ширину одного або двох бар'єрів можливо отримати, що при заданому значенні напруги коефіцієнт проходження знову стане максимальним. Таким чином, збільшення висоти другого бар'єру фактично повертає рівність коефіцієнтів проходження D_1 та D_2 , що приводить до результуючого збільшення коефіцієнта проходження усєї структури згідно (2).

Величина і ширина піку залежності коефіцієнта проходження від енергії визначають вид ВАХ. При низьких температурах, коли $kT \ll \mu$, де μ – рівень Фермі, струм через діод можна записати [6]:

$$I = \frac{q \cdot S \cdot m}{2 \cdot \pi^2 \cdot \hbar^3} \cdot \int_0^\mu (\mu - E) \cdot |D(E)|^2 dE. \quad (3)$$

Приблизно, при $|D_1|=|D_2|$ з (1) та (2) впливає [5]:

$$I = \frac{q \cdot S \cdot m}{2 \cdot \pi^2 \cdot \hbar^3} \cdot \int_0^\mu (\mu - E) \cdot \frac{(\hbar^2 / \tau_n^2) dE}{(E - E_n - qV/2)^2 + \hbar^2 / \tau_n^2}. \quad (4)$$

Основними параметрами ВАХ, що визначають робочі характеристики резонансно-тунельного діоду, є відношення максимального та мінімального (після падаючої ділянки) струму і максимальне значення негативної диференційної провідності – g_{\max} .

Інтеграл (4) береться аналітично, звідки можна отримати наступні оцінки:

$$I_{\max} = \frac{emS\mu}{2\pi\hbar^2\tau_n}, \quad (5)$$

$$g_{\max} = \frac{q^2 m S \mu}{4\pi^2 \hbar^3}. \quad (6)$$

Максимальний струм, як слідує з виразу (5), пропорційний ширині квазірівня ($\sim 1/\tau_n$), а g_{\max} не залежить від τ_n . Ці висновки отримані при наближенні $|D_1|=|D_2|$, тому реальні значення можуть бути більш складнішим чином залежними від параметрів структури.

При проведенні математичного моделювання були отримані графіки ВАХ резонансно-тунельного діоду, зображені на рис. 1.

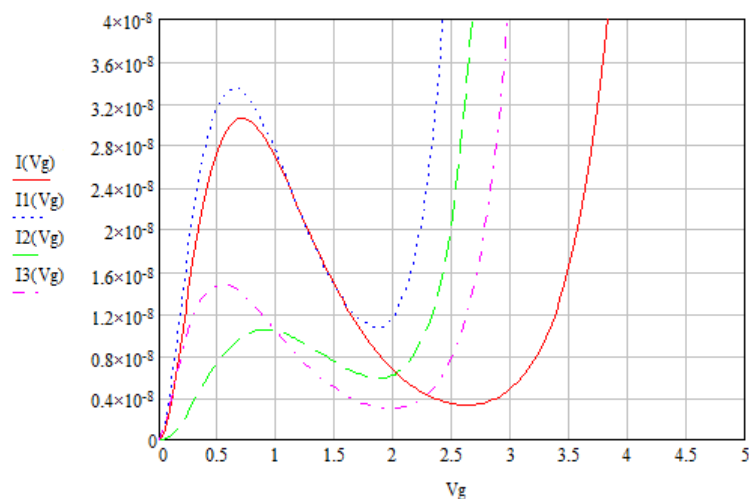


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики резонансно-тунельного діоду отримані за результатами математичного моделювання

Висновки

У статті розглянуто структуру та принцип дії резонансно-тунельного діоду. Розраховано коефіцієнти прозорості і відбиття РТС та ВАХ РТД. За допомогою цих розрахунків побудовано графіки ВАХ при різній товщини бар'єру та ширині квантової ями.

Можна зробити висновок, що модифікація активною областю резонансно-тунельного діоду можлива при збільшенні або зменшенні товщини шарів матеріалу а також при зміні складу шарів. У результаті цього змінюється товщина бар'єрів та квантової ями. При зменшенні товщини ями або бар'єру електронам потрібно менше енергії для тунелювання і на ВАХ можна спостерігати більше піків струму при меншій напрузі. Це дає перспективи для використання РТД у приладах з низькою напругою живлення.

Список літератури:

1. Chang L.L., Esaki L., Tsu R. Applied Physics Letters. Maryland, 1974. Vol 24. 593 p.
2. Поздняков Д.В. Расчет вольт-амперных характеристик симметричных двухбарьерных резонансно-туннельных структур на основе арсенида галлия с учетом процессов разрушения когерентности электронных волн в квантовой яме // Физика и техника полупроводников. Москва : Наука, 2004. Т.38. Вып. 9. С. 1097–1100.
3. Абрамов И.И. Исследование двухбарьерной резонансно-туннельной структур на основе GaAs/AlAs с использованием комбинированной двухзонной модели // Доклады Бгуир, 2004. Вып.4. С. 42–46.
4. Врубель М.М. О влиянии ширины спейсерных слоев на размеры области бистабильности в вольт-амперных характеристиках двухбарьерных туннельных резонансных диодов // Письма в ЖТФ, 1997. Т. 23. Вып. 21. С. 12–16.
5. Иогансен Л.В. Журнал экспериментальной и теоретической физики. Москва :Наука, 1963. Т.45. Вып. 2. 2207 с.
6. Агарев В.Н. Моделирование резонансного тунелирования в полупроводниковых наноструктурах. ННГУ Фонд образовательных электронных ресурсов, 2008.

Надійшла до редколегії 06.02.2020

Відомості про автора:

Яцун Кирило Сергійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв (МЕЕПП), факультет електронної та біомедичної інженерії; Україна; e-mail: deadwoldi@gmail.com