

С.П. Новосядлий, С.І. Бойко

Конструкторсько-технологічний аналіз біполярних транзисторів високої швидкодії на основі структур AlGaAs/GaAs для субмікронних структур великих інтегральних схем

Прикарпатський Національний університет ім. В. Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76025, E-mail: nsp@mail.ru.if.ua

В даній статті проведено аналіз швидкодії біполярних транзисторів на основі гетероструктур AlGaAs/GaAs. Використання гетеропереходу в якості емітерного переходу дозволяє радикально підвищити його швидкість. Чисельне моделювання швидкодії ГБТ в режимі кільцевого генератора (КГ) як тестової структури, показало, що час затримки БТ з емітером 1x2 мкм може бути знижений до рівня 8 пс при максимальному струму 10^5 А/см². Час затримки 24 пс при потужності 9,1 мВт і 17 пс при потужності 40 мВт отримано для ГБТ як з одним, і з двома (емітерним і колекторним) гетеропереходами.

Ключові слова: біполярний транзистор, гетероперехід, арсенід галію.

Стаття постуила до редакції; прийнята до друку 15.03.2016.

Вступ

Прилад з гетеропереходом вперше запропонував В. Шотткі. Теорію гетеропереходів в тому ж році розглянув А.І. Рубанов і виклав їх концепцію [1].

Гетеропереходи утворюються між різними за складом напівпровідниками. Різкий стрибок потенціалів країв зон в напівпровіднику запобігає термоелектричній емісії і який утворює свого виду кишеньку-пастку для електронів у вузькозонній частині гетеропереходу. Згідно моделі Андерсена стрибок в зміні енергій для зони провідності визначається $\Delta E_c = H_1 - H_2$, де H_1 і H_2 – електронні спорідненості контактуючих напівпровідників (подібність роботи виходу) і аналогічно:

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c, \Delta E_c = H_1 - H_2 \quad (1)$$

де $\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2}$ – різниця ширини заборонених зон. Тому стрибки ΔE_c і ΔE_v розглядаються як порушення неперервності в зміні енергій країв зон, тобто похідні E_c і E_v за координатою в області стрибків досягають нескінченності.

Модель Андерсена відповідає ідеальному гетеропереходу. Такий гетероперехід може утворюватися між напівпровідниками з абсолютною однаковими постійними ґратки, що утворюють монокристалний однорідний в контакт кристал. Проте, реально постійні ґратки різних напівпровідників

відрізняються, хоча деякі з них мають досить близькі значення (Ge, GaAs, AlAs). Технологічно вдалося отримати монокристалічні гетеропереходи саме на використанні цих пар. Найбільш поширеною на сьогодні є пара AlGaAs/GaAs, на основі якої формуються гетероструктурні та варізонні транзистори. Проте навіть для такої ідеальної гетероструктури вираз (1) для стрибка потенціалу ΔE_c строго не виконується [2].

I. Гетероструктурні біполярні транзистори субмікронних структур ВІС/НВІС

Використання гетеропереходів дозволяє якісно покращити параметри швидкодії БТ і на їх основі субмікронних структур ВІС/НВІС.

Радикально підвищити швидкість БТ можна якщо збільшити ступінь легування бази без зміни ефективності емітера. Це відповідно можна зробити, якщо в якості емітерного переходу використати гетероперехід. На рис. 1 показано р-п-гетероперехід із широкозонною п-областю. Вмонтоване поле на переході є за дією різним для електронів і дірок запобігаючи струму дірок із р-області в п-область.

Дірковий струм зменшується в $e^{\frac{\Delta E}{kT}}$ раз, де ΔE –

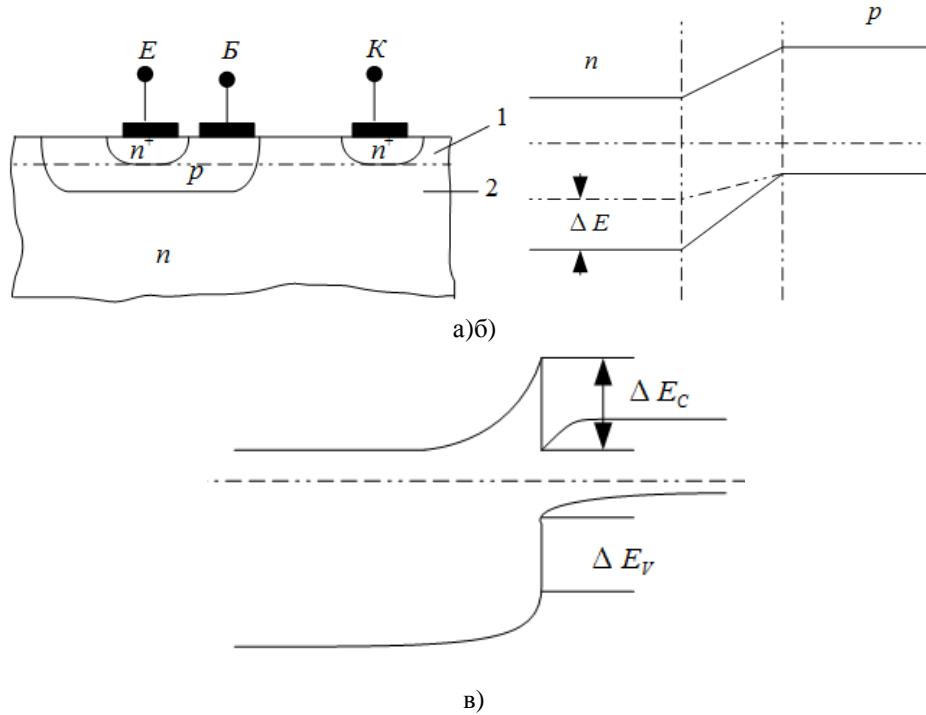


Fig. 1. a) HBT structure: 1 – wide-bandgap segment (AlGaAs), 2 – narrow-bandgap segment (GaAs); b) bandstructure of smooth heterojunction; c) steep heterojunction.

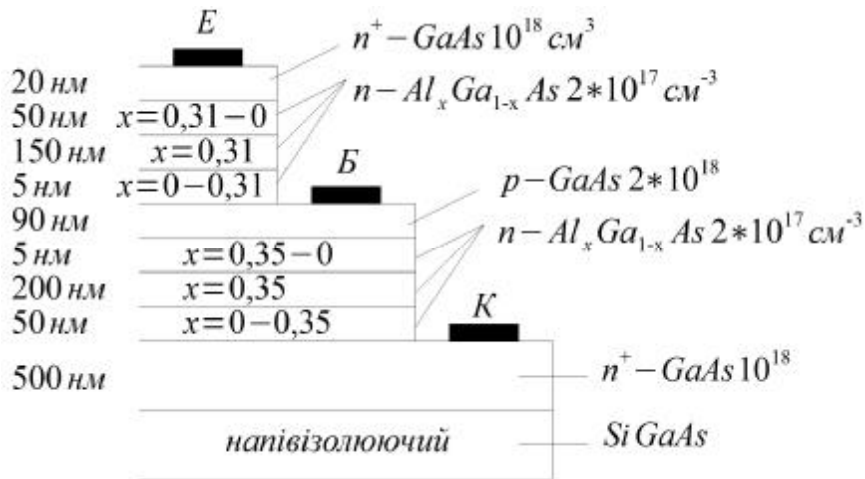


Fig. 2. HBT structure based on AlGaAs/GaAs.

додатковий гетеробар'єр для дірок. Тому ефективність емітера для p-n-гетеропереходу визначається як

$$g_e = \left(1 + \frac{v_p p_n}{v_n n_p} \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \right)^{-1} \quad (2)$$

при $\Delta E \gg kT$ ефективність емітера буде наближатись до одиниці, навіть якщо рівень легування області бази буде вищим, ніж n-область емітера. Величина ΔE_v плавного гетеропереході (варізонному кристалі) є рівна різниці ширини заборонених зон ΔE_g . В різкому гетеропереході (AlGaAs/GaAs) ΔE_g може бути легко реалізована великою ($> 10kT$), що є достатнім для того, щоб знизити більше ніж на порядок другий доданок в формулі (2).

Гетероперехід між широкозонним колектором та вузькозонною базою також дозволяє виключити

інжекцію дірок бази в колектор завдяки утворенню бар'єра для дірок, тому допустимо при сильному легуванні бази (більше 10^{19} см^{-3}) відносно слабке легування колектора (10^{17} см^{-3}). На рис. 2 подана одна із можливих конструкцій гетероструктурних БТ (ГБТ), яка представляє собою двошарову структуру: широкозонну частину AlGaAs вздовж поверхні і під нею – вузькозонну частину GaAs. Емітерний гомоперехід в широкозонному приповерхневому шарі пропускає дуже малий струм в порівнянні з струмом через гетероперехід у вузькозонну частину, де висота бар'єра ΔE_g є меншою. Практично транзистор працює у вертикальному напрямі при відключеній горизонтальній частині [3].

Для досягнення високої швидкодії БТ необхідно зменшити розміри емітера і горизонтальну довжину базової області, а також підсилити ізоляцію

колектора. Останнє визначає як збільшення пробивної напруги, так і зменшення C_K . Тому у швидкодіючих ГБТ використовується, як правило, емітерний, базовий і колекторний переходи розміщують на різних рівнях.

II. Гетероструктурні біполярні транзистори на структурі AlGaAs/GaAs

Розглянемо конструкції ГБТ на напівпровідниках AlGaAs/GaAs, їх переваги в порівнянні гетероструктурними польовими транзисторами і гомоструктурними БТ, що дозволяють отримати високу швидкодію.

На рис. 3 подано розріз структури і зонна діаграма ГБТ на AlGaAs/GaAs з одним гетеропереходом у емітера. В порівнянні з кремнієвим БТ такий транзистор має наступні переваги. Слабке легування емітерної області знижує ємність емітер-база. Широкозонний емітер має високий рівень інжекції електронів в базу. Високе легування бази різко знижує її опір, з значить час зарядження колекторної ємності – важливого фактору, що визначає швидкодію транзистора.

Висока рухливість електронів в GaAs в порівнянні з Si сумісно з сильним емітерним полем, вмонтованим у варізонній базі знижує час прольоту через базу, а також через колекторний перехід. Висока початкова швидкість електронів, що інжектуються в базу через різкий гетероперехід, теж прискорює проліт бази. Порівняння швидкодії ГБТ на AlGaAs/GaAs з БТ на моно-Si показує, що швидкість перемикання ГБТ майже в 3 рази вища.

Переваги такого ГБТ перед моно-Si БТ є очевидними. Це, перш за все, наявність тонкоплівкової вертикальної структури ГБТ, яка робить субмікронну довжину пролітної області електронів без використання складної субмікронної літографії горизонтальних розмірів (їх визначає епітаксія). Велика ширина потоку електронів в біполярній структурі в порівнянні з каналом ПТ, а також експоненційна дія вхідного сигналу на вихідний забезпечує більш низький вихідний опір і більш високу крутизну БТ в порівнянні з ПТ та високу густину струму. Потік носіїв заряду в БТ краще екранований від поверхневих рівнів захоплення. І, накінець, управління пороговими напругами є більш надійним і відтворюваним в ГБТ ніж в ПТ.

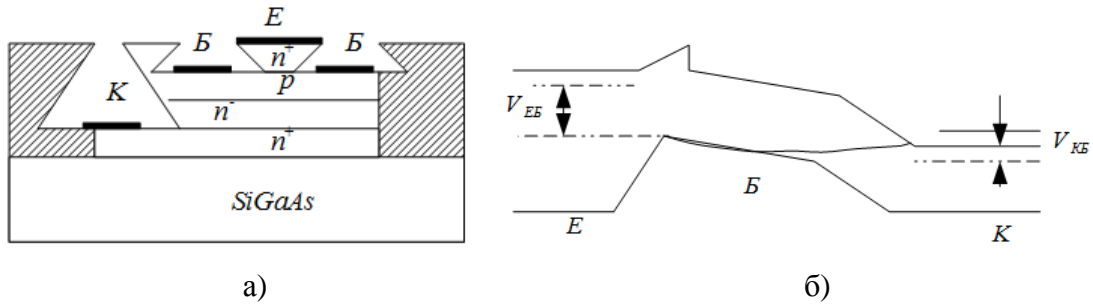


Fig. 3. Structure a) and band diagram б) of HBT with one emitter heterojunction, its parameters are presented on table 1.

Table 1

Parameters of HBT based on AlGaAs/GaAs

Layer	Material	Thickness, μm	Doping cm^{-3}
Emitter top	n^+ -GaAs	50	10^{18} - 10^{19}
Wide-bandgap emitter	$n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x в межах $0 - 0,25 - 0$)	200	$5 \cdot 10^{17}$
Wide-bandgap base	p^+ -GaAs	70	10^{19} - 10^{20}
Collector buffer	n -GaAs	700	$(3-6) \cdot 10^{16}$
Collector contact	n^+ -GaAs	600	$5 \cdot 10^{18}$
GaAs-substrate	Si GaAs	Напівізольуючий, товщиною більше 0,25мм	–

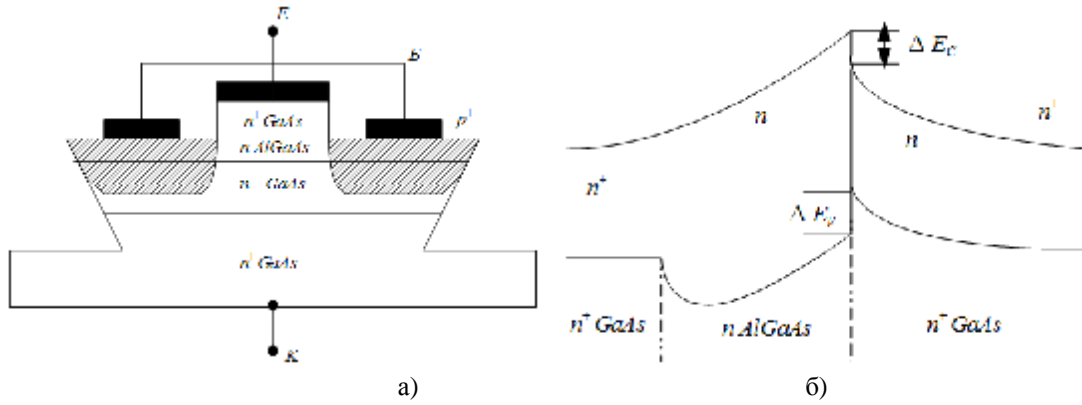


Fig. 4. a) BICFETstructure; b) BICFETband diagram

Всі ці переваги ГБТ перед ПТ і гомоструктурним БТ підтвержені численними експериментами [4]. А принциповим недоліком їх є накопичення заряду в режимі насичення струму, яке проявляється навіть у широкозонному колекторі, що веде до зниження коефіцієнту підсилення внаслідок рекомбінації носіїв заряду. Відносно високий рівень легування шарів дозволяє використовувати при отриманні БТ шари із залишковим легуванням біля 10^{16} см^{-3} (проти 10^{15} см^{-3} у випадку ПТ). Рівень легування бази обмежується тільки технологічними факторами: ростом дифузії домішки з ростом їх концентрації і використання багатозарядної імплантації.

Приведемо значення основних параметрів для ГБТ. Крутизна транзистора зростала з ростом струму колектора і досягала значень 50-100 мСм/мкм² площі емітера, що відповідає більше ніж 10^4 мСм/мм довжини емітера при його ширині в 1,2 мкм. Структура допускала густину струму до 10^5 А/см^2 . ГБТ з гребінковим емітером з трьома шарами площею 1,2x9 мкм мали рекордні параметри НВЧ. Значення f_T залежали від напруги $V_{ке}$ і лежали в області 30-70 ГГц. Максимум $f_T = 70$ ГГц отриманий при $V_{ке} = 1\text{В}$. Підсилення потужності на частоті 40 ГГц досягало 10 дБ при допустимій потужності на вході до 1 Вт/мм довжини емітера.

Для оцінки часу затримки прольоту $\tau_{ек}$ використовували вираз:

$$t_{ек} = r_e (C_{Бе} + C_{Бк} + C_{Бк} (R_e + R_k) / r_e) + t_B + t_k$$

Як бачимо для його зменшення необхідно понижувати опір емітера, колектора і їх ємностей.

Чисельне моделювання швидкодії ГБТ в режимі кільцевого генератора (КГ) як тестової структури, показало, що час затримки БТ з емітером 1x2 мкм може бути знижений до рівня 8 пс при максимальному струму 10^5 А/см^2 . Час затримки 24 пс при потужності 9,1 мВт і 17 пс при потужності 40 мВт отримано для ГБТ як з одним, і з двома (емітерним і колекторним) гетеропереходами.

Сьогодні розроблено декілька технологічних способів по зменшенню величини $R_B C_k$. З метою зменшення ємності $C_{Бк}$, область між базовим електродом і колектором робиться товстою і ізолюваною шляхом багатозарядної імплантації кисню (O_{16}^{++}).

При конструюванні логічних вентилів потрібно поряд з розглянутими вище ГБТ n-p-n-типу мати і ГБТ p-n-p-типу, тобто комплементарні пари. В p-n-p-структурі n-база може бути сформована більш провідною, що зменшує R_B , в порівнянні з p-базою в n-p-n-структурі, але швидкість прольоту n-бази неосновними носіями – дірками буде меншою, ніж швидкість прольоту діркової бази електронами. Тобто, тут слід провести якісне моделювання та оптимізацію параметрів і характеристик.

Вперше ГБТ p-n-p-типу на AlGaAs/GaAs, що працює в НВЧ-діапазоні був виготовлений тільки в 1987 році, що вказує на великі технологічні труднощі. Легування бази товщиною в 1 мкм складало $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Товщина емітера була рівною 2 мкм. ГБТ при цьому мав $f_T = 12$ ГГц і $f_{макс} = 20$ ГГц. Для їх зменшення в 2 рази базу формують товщиною 0,5 мкм.

Сьогодні запропонована нова концепція біполярного транзистора, який називають біполярним польовим транзистором з інверсією каналу (БІКПТ, BICFET). В БІКПТ на гетеропереході AlGaAs/GaAs створюється інверсний дірковий канал, що відіграє роль бази (рис. 4) [5].

Проте відсутня теорія такого транзистора і не дозволяє провести якісне комп'ютерне моделювання та оптимізацію параметрів і характеристик.

Це вимагає побудови сучасної САПР на проектування – це вже задача сьогодення.

Висновки

1. В даній статті проведено аналіз теоретичних основ проектування гетероструктурних біполярних транзисторів високої швидкодії для субмікронних структур ВІС/НВІС на основі структур AlGaAs/GaAs.

2. Для практичної реалізації таких структур необхідні наступні технологічні вдосконалення:

- субмікронна літографія (електронна, іонна, рентгенівська) з високою роздільною здатністю і контрастністю;
- багатозарядна імплантація з фотонним відпадом (активацією) для формування ретроградних концентраційних профілей;
- низькотемпературна епітаксія сполук $A^{III}B^V$ для

формування багатшарових структур з різким гетеропереходом;

– анізотропне плазмохімічне та іонно-променеве травлення (профілювання) діелектриків, металів, напівпровідників і його комп'ютерне моделювання;

– технологія багаторівневої комутаційна основі силіцидів/поліцидів;

– низькотемпературна епітаксія GaAs на AlGaAs кремнієвих підкладках великого діаметру (більше 150 мм).

Новосядлий С.П. - доктор технічних наук, професор;
Бойко С.І. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії і електроніки.

- [1] Ju.K. Pozhela, Fizika bystrodejstvujushhih tranzistorov (Mokslas, Vil'njus, 1989).
- [2] V.A. Moskaljuk, V.I. Timofeev, A.V. Fedjaj, Sverhbystrodejstvujushhie pribory jelektroniki (NTUU KPI, Kiev, 2012).
- [3] N.G. Einspruch, W.R. Frensley, VLSI Electronics: Microstructure Science. Heterostructures and Quantum Devices (Academic Press, San Diego, 1994).
- [4] O. Esame, Y. Gurbuz, I. Tekin, A. Bozkurt, Microelectronics Journal 35(11), 901 (2004).
- [5] B. Lia, S. Prasada, L.W. Yangb, S.C. Wangc, Solid-State Electronics 43(4), 839 (1999).

S.P. Novosyadlyj, S.I. Boyko

Design and Technology Analysis Bipolar Transistors Based on High Performance Structures AlGaAs / GaAs Structures for Submicron Large Integrated Circuits

Carpathian National University. Stefanik, st. Shevchenko, 57, m. Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76025, E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

This paper analyzes performance of bipolar transistors based on AlGaAs/GaAs heterostructures (HBT). Use of heterojunction as emitter junction allows radical improvement of its performance. Numerical simulation of HBT in ring oscillator mode showed that the delay of the BT with $1 \times 2 \mu\text{m}$ emitter can be reduced to 8 ps at a maximum current of 10^5 A/cm^2 . HBT with one and two (emitter and collector) heterojunctions showed 24 ps delay at 9.1 mW and 17 ps at 40 mW.

Keywords: bipolar transistor, heterojunction, gallium arsenide.