

УДК 621.315.592

Д.М. Заячук, С.І. Круковський

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра напівпровідникової електроніки.**ВПЛИВ ДОМІШОК РІДКІНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ Gd I Yb
НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПІТАКСІЙНИХ ШАРІВ GaAs**

© Заячук Д.М., Круковський С.І., 2001

D.M. Zayachuk, S.I. Krukovsky

Lviv Polytechnic National University, Semiconductor Electronics Dept

**INFLUENCE OF Gd AND Yb RARE EARTH IMPURITIES ON
THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF GaAs EPITAXIAL LAYERS**

© Zayachuk D.M., Krukovsky S.I., 2001

Досліджено вплив домішок рідкісноземельних елементів Gd і Yb на електрофізичні параметри епітаксійних шарів GaAs, вирощених методом рідиннофазної епітаксії (РФЕ) з розчинів-розплавів галію. Показано, що легування вказаними домішками вихідних розплавів спричиняє зниження концентрації вільних електронів у вирощуваних шарах з подальшою інверсією типу їх провідності з електронної на діркову по досягненні концентрацією домішки критичного рівня N_{cr} , який залежить від сорту домішки. Встановлено, що для Yb N_{cr} становить значення порядку 0,04 ат. %, а для Gd – порядку 0,022 ат. %. Аналізуються можливі причини і механізми впливу досліджуваних домішок на електрофізичні параметри епітаксійних шарів GaAs.

Influence of Gd and Yb rare earth impurities on the electrophysical parameters of GaAs epitaxial layers grown from gallium solution-melts by LPE method is investigated. It is shown that doping of initial melts by indicated impurities causes to decreasing of free electron concentration into grown layers. The layer conductivity inverts from *n*- to *p*-type when the impurity concentration amounts to critical value N_{cr} depended from impurity kind. It is established that N_{cr} for Yb is equal to 0,04 at. % and for Gd 0,022 at. %. The possible reasons and mechanisms of investigated impurity influence on the electrophysical parameters of GaAs epitaxial layers are analysed.

Вступ. Інтерес дослідників і розробників приладів до арсеніду галію загальновідомий. Насамперед він зумовлений унікальними можливостями його практичного використання для виробництва широкого спектра приладів електронної техніки – від чутливих елементів різного роду сенсорів фізичних величин до різноманітних квантоворозмірних структур сучасної наноелектроніки [1 – 3].

Широке застосування арсеніду галію потребує вдосконалення ростових методик, які би, зокрема, забезпечували можливість вирощування некомпенсованих кристалів і епітаксійних шарів з високою рухливістю та низькою концентрацією вільних носіїв заряду. Одним із перспективних напрямків розв'язання цієї задачі є застосування впливу на параметри кристалів і плівок A^3B^5 домішок рідкісноземельних елементів. При належному підборі домішок і технологічних режимів росту вдається, зокрема, на 3 – 4 порядки знизити кон-

центрацію неконтрольованих фонових домішок в епітаксійних шарах і приблизно на порядок підвищити рухливість носіїв заряду в них [4], що надзвичайно важливо з погляду можливостей їх практичних застосувань.

Ця робота присвячена дослідженню особливостей керування параметрами епітаксійних шарів GaAs під час їх вирощування методами низькотемпературної РФЕ за допомогою домішок ітербію та гадолінію.

Вирощування епітаксійних шарів GaAs. Епітаксійні шари арсеніду галію нарощували на напівізолюючі підкладки GaAs, орієнтовані у площині (100) із застосуванням установки РФЕ на базі СДО-125/3. Епітаксію проводили у розміщеному горизонтально кварцовому реакторі з використанням графітових касет поршневого типу, які дозволяли вирощувати шари GaAs різної товщини.

Епітаксійний ріст відбувався з галієвого розчину-розплаву GaAs, попередньо очищеного від сторонніх неконтрольованих домішок за допомогою багатогодинного (~ 8 – 10 год.) високотемпературного (~ 820 °С) відпалу і реакцій відновлення у потоці водню (наведені потоки водню знаходилися на рівні (0,8 – 1,0) л/год·см²). Нелеговані шари GaAs, вирощені після такої попередньої очистки, володіли електронною провідністю і концентрацією вільних носіїв заряду ~ 5·10¹⁶ см⁻³. Для проведення експериментів з легуючими домішками останні вводили у вихідний розчин-розплав після його високотемпературного відпалу. Кристалізацію проводили у температурному інтервалі 500 – 700 °С. Швидкість кристалізації не перевищувала 10 нм/с. Типова товщина нарощуваних шарів становила 3 – 5 мкм.

Експериментальні результати та їх обговорення. Для з'ясування характеру впливу домішок Gd та Yb на електрофізичні параметри тонких плівок GaAs і можливостей використання цього впливу для вирощування некомпенсованих матеріалів з низькою концентрацією і високою рухливістю носіїв заряду була проведена серія дослідів з вирощування епітаксійних шарів із галієвих розчинів-розплавів різного рівня легування. Номінальна концентрація рідкісноземельних елементів у розчинах-розплавах змінювалася в межах від 0 до 0,05 ат. %.

Характер впливу домішок Gd і Yb на концентрацію і рухливість носіїв заряду в епітаксійних шарах GaAs, вирощених методом низькотемпературної РФЕ, відображають дані, зображені на рис. 1 і 2.

Як видно з рис. 1, введення досліджуваних домішок у галієвий розчин-розплав для вирощування GaAs спричиняє зменшення концентрації вільних електронів у шарах, що ростуть з легуваних розплавів, яке тим суттєвіше, чим вища вихідна концентрація домішки в останніх. Спільною характерною особливістю епітаксійних шарів GaAs, вирощених під впливом зазначених домішок, є *n-p* інверсія типу провідності при досягненні концентрацією останніх критичного значення N_{cr} , яке залежить від сорту домішки. Необхідно особливо виділити дві обставини. Перше – розходження в значеннях N_{cr} для Gd і Yb є досить суттєвим, практично двократним. Друге – $N_{cr}(Gd) < N_{cr}(Yb)$. Для досліджуваних напівпровідникових шарів і технологічного методу їх вирощування, як видно з рис.1, $N_{cr}(Gd)$ приймає значення порядку 0,022, а $N_{cr}(Yb) = 0,04$ ат. %.

Зменшення концентрації електронів у шарах GaAs під впливом домішок як Gd, так Yb супроводжується ростом їх рухливості u_n (рис. 2). Ізоконцентраційні (по концентрації вільних електронів) перерізи залежностей $u_n(N_{Gd})$ і $u_n(N_{Yb})$ показують, що за однакової концентрації електронів у шарах, вирощених як під впливом домішки Gd, так під впливом домішки Yb, їх рухливості практично збігаються.

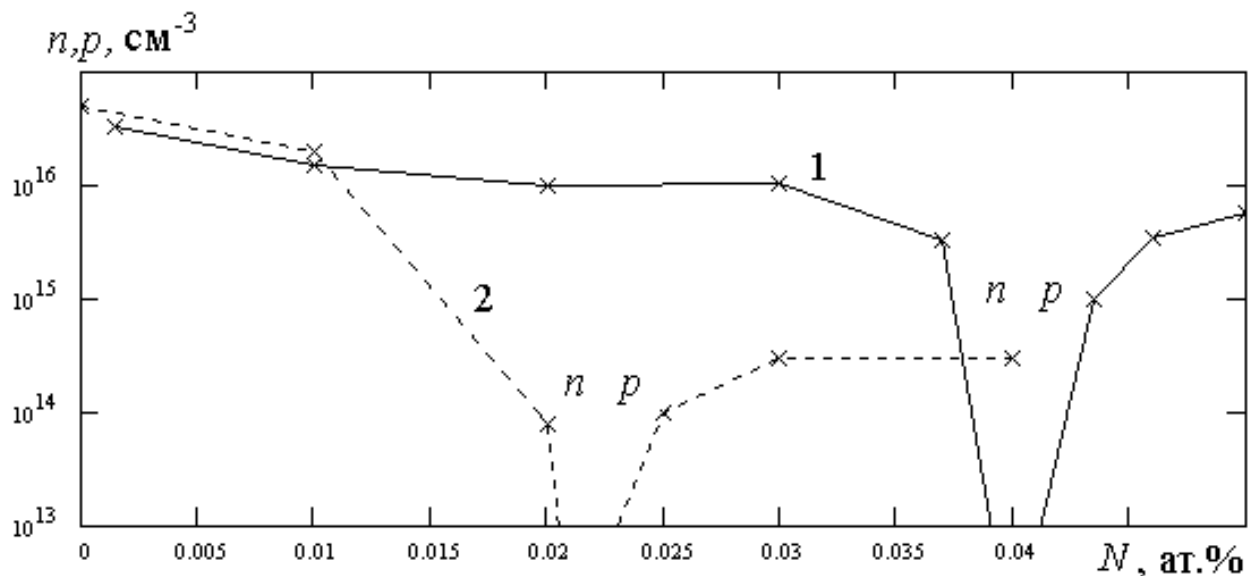


Рис. 1. Залежність концентрації вільних носіїв заряду у епітаксійних шарах GaAs при 77 K від концентрації Yb (1) та Gd (2) у галієвому розчині-розплаві

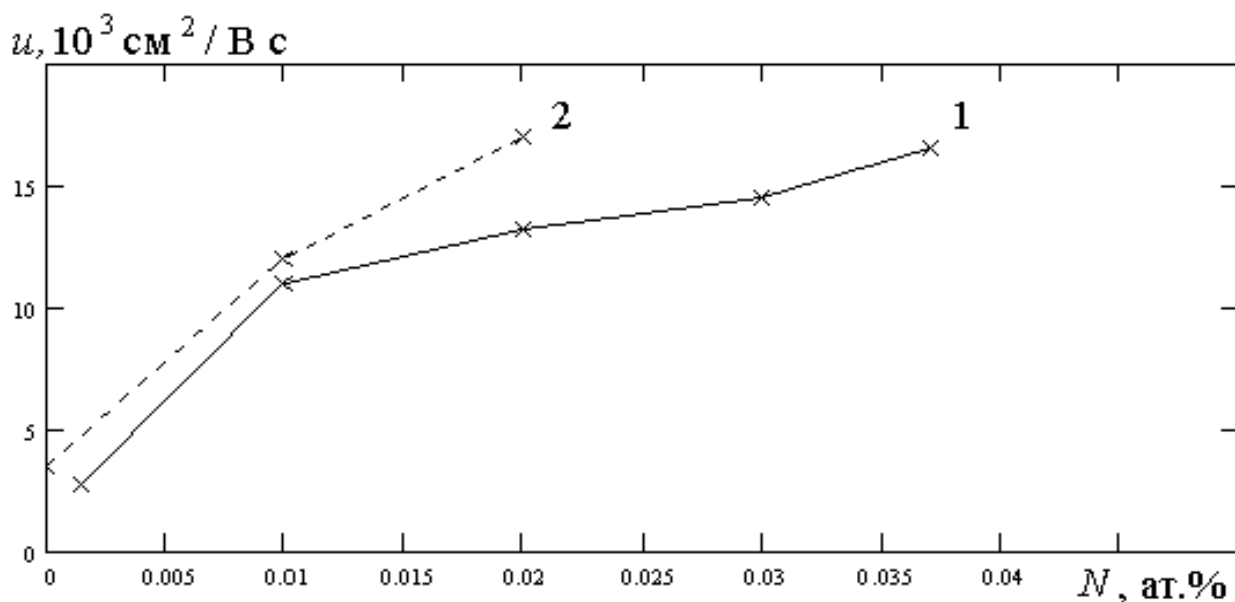


Рис. 2. Залежність рухливості вільних носіїв заряду у епітаксійних шарах GaAs при 77 K від концентрації Yb (1) та Gd (2) у галієвому розчині-розплаві

І гадоліній, і ітербій, як і галій, є елементами III групи. Тому вони не можуть виступати безпосередніми акцепторами по відношенню до GaAs, які би компенсували наявні в ньому донорні центри. Тим більше, що висока рухливість носіїв заряду в плівках, вирощених із розплавів з Gd і Yb, свідчить про відсутність компенсації домішкових центрів у них. Звідси випливає, що акцепторна дія досліджуваних домішок спричинена тим, що вони запобігають проникненню у вирощувані плівки неконтрольованих донорних домішок.

Можуть існувати дві принципово різні можливості для такого запобігання. Перша – Gd і Yb займають вакантні місця у вузлах металічної підґратки GaAs і таким чином зменшують вірогідність попадання у ці позиції неконтрольованих донорних домішок, а отже, зменшують результуючу концентрацію вільних електронів у плівках. Друга – Gd і Yb зв'язують зазначені неконтрольовані домішки в комплекси у галієвому розчині-розплаві,

запобігаючи їхньому проникненню в епітаксійні шари, що ростуть. Остаточний результат буде таким же, як у попередньому випадку.

Добре відомо, що основними фоновими домішками, від яких важко позбутися навіть при застосуванні всіх можливих запобіжних заходів при вирощуванні епітаксійних шарів GaAs методом РФЕ, є домішки кремнію і кисню [5]. У сенсі електричної активності перша із них є амфотерною. При високих ($T > 1120$ К) температурах вона займає переважно вакантні вузли кристалічної ґратки у підґратці миш'яку і тоді поводить себе як акцептор. При низьких температурах, зокрема таких, що відповідають температурним режимам низькотемпературної РФЕ GaAs, кремній, навпаки, займає переважно вакантні вузли у підґратці галію і тоді поводить себе як донор [6]. Як донор поводить себе в GaAs також і домішка кисню [6]. Тому логічно пов'язати зменшення концентрації електронів у шарах GaAs під впливом домішок Gd і Yb, яке спостерігається на експерименті, впливом останніх саме на поведінку якоїсь із цих двох (або і тієї і іншої) домішок.

Ковалентні радіуси Gd і Yb (1,62 і 1,57 Å відповідно [7]) значно переважають значення ковалентного радіусу галію – 1,25 Å [7]. Тому малоймовірно, що ці домішки можуть ефективно займати місця у вузлах металічної підґратки GaAs і, отже, зменшувати вірогідність попадання неконтрольованої домішки кремнію у ці позиції, а значить знижувати ефективність його донорної дії. На користь цього свідчать і відомі дані про розчинність рідкісноземельних елементів у епітаксійних шарах A^3B^5 . Так, згідно з даними роботи [8], одержаними за допомогою методу “мічених атомів” з використанням радіоактивного ізотопу ^{169}Yb , концентрація рідкісноземельних елементів у епітаксійних шарах GaAs, вирощених РФЕ, становить не більше 10^{13} см^{-3} , що є неспіввимірною величиною з концентрацією вільних носіїв заряду у досліджуваних тонких плівках. Зважаючи на це, можливість реалізації такого механізму впливу домішок Gd і Yb на їхні електрофізичні параметри здається маловірогідною.

Більш імовірно, на нашу думку, що зменшення концентрації електронів у шарах GaAs і подальша інверсія типу провідності з електронної на діркову під впливом досліджуваних домішок зумовлена тим, що як Gd, так і Yb зв'язують неконтрольовані кисень і кремній у вихідному галієвому розчині-розплаві і таким чином запобігають їхньому попаданню у результуючі плівки. На користь такого пояснення свідчить той факт, що $N_{cr}(\text{Gd}) < N_{cr}(\text{Yb})$, як і повинно бути при такому механізмі впливу, оскільки хімічна активність елементів у деяких лантаноїдів зменшується зі збільшенням їхнього порядкового номера.

Висновки. Проведені дослідження показали, що легування галієвих розчинів-розплавів під час вирощування епітаксійних шарів GaAs методом низькотемпературної РФЕ домішками Gd і Yb у відповідних пропорціях дозволяє ефективно керувати їх електричними параметрами і отримувати матеріали з низькою концентрацією і високою рухливістю носіїв заряду. Результати впливу зазначених домішок на концентрацію і рухливість вільних носіїв заряду в епітаксійних шарах можна пояснити гетеруючою дією домішок у розчині-розплаві, передусім гетеруванням і зв'язуванням у комплекси домішок кисню і кремнію, що запобігає їхньому неконтрольованому проникненню в нарощувані шари.

1. Schubert E.F., Fisher A., Ploog K. // *Electron. Lett.* 1985. 21. P. 411 – 414. 2. Horikoshi Y., Ploog K. // *Appl. Phys.* 1985. 37. P. 47 – 54. 3. Bolshakova I.A., Moskovets T.A., Krukovsky S.I. and Zayachuk D.M. // *Mater. Sci. & Engineering*, 2000, B69–70. P. 441 – 443. 4. Мастеров В.Ф., Захаренков Л.Ф. // *ФТП.* 1990. 24. С. 610 – 629. 5. Susumu K., Toshimaso A., Haruo N. // *J. Cryst. Growth.* 1983. 64. P. 433 – 440. 6. Шумилян Ф.С. *Диффузия и деградация в полупроводниковых материалах и приборах.* Кишинев, 1976. 7. Стрельченко С.С., Лебедев В.В. *Соединения A^3B^5 .* М., 1984. 8. Беспалов В.А., Елкин А.Г., Журкин Б.Г., Квит А.В., Октябрьский С.Р., Перешиагин Г.А. // *Краткие сообщения по физике.* 1987. 9. С. 32 – 34.