

О. М. Лебедь, к. т. н., доц.

ФІЗИЧНІ МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ЕПІТАКСІЙНИХ ШАРІВ МОНОКРИСТАЛІВ GaAs ПІД ЧАС ВИРОЩУВАННЯ З РІДКОЇ ФАЗИ

Розроблено технологічні режими зниження щільності дислокацій в епітаксійних шарах (ЕШ) арсеніду галію під час використання ізовалентного металу-розчинника вісмуту, які дозволяють стабілізувати фронт кристалізації. Розглянуто та проаналізовано механізми, що відповідають за зміну структури ЕШ.

***Ключові слова:** арсенід галію, епітаксійний шар, вісмут, дислокації, фронт кристалізації.*

Вступ

Підвищення надійності, економічності й масовості виробництва, дискретних і інтегральних напівпровідникових приладів, особливо щільності інтеграції твердотілих мікросхем, не може бути здійснено лише вдосконаленням технології виробництва приладів і пристроїв, оскільки у всіх випадках відсоток виходу і граничні параметри обмежуються мікронеоднорідністю фізичних і фізико-хімічних властивостей використовуваних напівпровідникових матеріалів. Однією з причин мікронеоднорідності монокристалічних матеріалів, що зумовлюють не лише локальні зміни фізичних властивостей вихідних матеріалів, але й відтворюваність результатів багатьох технологічних процесів, є одновимірні і двовимірні порушення кристалічної решітки, а саме: дислокації, дислокаційні ряди, міжзернові границі.

Дислокації часто є причинами підвищених струмів витоку, погіршення електричних характеристик і розвитку процесів деградації в різних напівпровідникових приладах [1, 2].

Одним із шляхів зниження щільності дислокацій в арсеніді галію є використання ряду ізотермічних витримок під час охолодження розчину-розплаву, що проводиться з постійною швидкістю. Уведення в об'єм ЕШ пружної напруги також дозволяє знижувати щільність дислокацій. Вони можуть згинати лінію успадкованої дислокації паралельно металургійній границі й виводити її на бічну поверхню ЕШ [3, 4].

Використання ізовалентних металів-розчинників дозволяє деякою мірою керувати структурними параметрами вирощуваного шару. Вони можуть виступати в якості легувальної домішки, а також змінювати стехіометрію основних компонентів сполуки в рідкій фазі. Одним із таких розчинників є вісмут, який, окрім вказаних вище властивостей, суттєво не змінює енергетичний спектр монокристалів арсеніду галію під час рідкофазної епітаксії (РФЕ) [5].

Низка авторів зазначає, що під час переходу від галієвих до вісмутівих розчинників покращується структура та зменшується щільність дислокацій в епітаксійних шарах арсеніду галію. [5]. Так, ефект зниження щільності дислокацій у процесі рідкофазної епітаксії під час переходу від галієвих до вісмутівих розчинів-розплавів автори [6] пояснюють підвищенням критичної напруги гетерогенного зародження дислокацій. Зниження щільності дислокацій під час цього також пояснюють підвищенням енергії утворення дислокацій в GaAs:Bi [7, 8].

Метою цієї роботи є розробка технологічних режимів зниження щільності дислокацій в арсеніді галію на основі ізотермічних витримок під час використання ізовалентного металу-розчинника вісмуту.

Методика експерименту й результати

Ми пропонуємо вирощувати епітаксійні шари арсеніду галію під час використання періодичної стабілізації фронту кристалізації за рахунок ізотермічних витримок.

Епітаксійні шари вирощували шляхом примусового охолодження розчину-розплаву у вертикальному реакторі в атмосфері очищеного дифузією через паладієвий фільтр водню. Температура початку епітаксії – $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, швидкість охолодження порядку $10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, відстань між підкладками – $1,2 \cdot 10^{-3}\text{ м}$. Як підкладки використовували монокристалічні пластини АГЧО (100) з концентрацією носіїв заряду $1 \cdot 10^{23}\text{ м}^{-3}$. Насичення розплаву Ві проводилося розчиненням полікристалічного GaAs ($n = 6 \cdot 10^{21}\text{ м}^{-3}$).

Процес вирощування здійснювався за допомогою температурно-часової схеми, яка складалася з 38 циклів [9]. Цикл представляє собою: інтервал гомогенізації розчину-розплаву при $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, інтервал кристалізації (охолодження) до $830\text{ }^{\circ}\text{C}$, інтервал гомогенізації розчину-розплаву при $830\text{ }^{\circ}\text{C}$, інтервал розчинення (рис. 1).

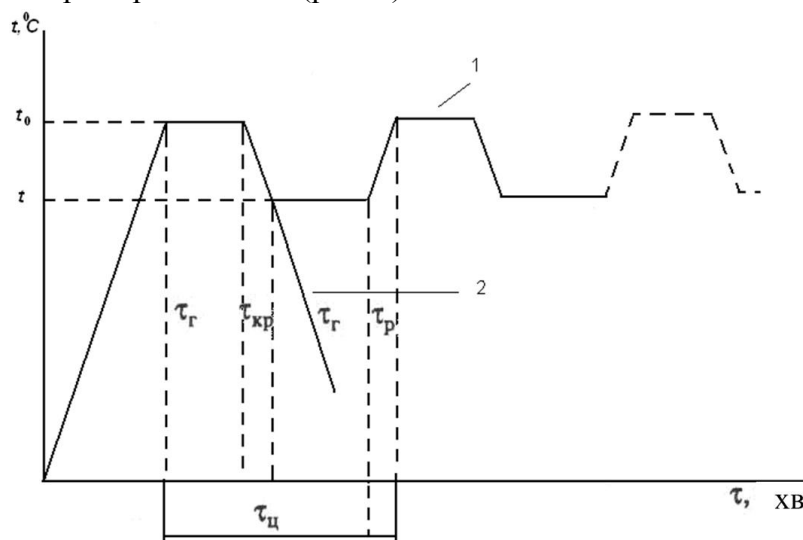


Рис. 1. Температурно-часова діаграма вирощування ЕШ методом примусового охолодження розчину-розплаву (2) за схемою ізотермічних витримок (1): $\tau_{\text{ц}}$ – тривалість циклу; $\tau_{\text{г}}$ – інтервал гомогенізації розчину-розплаву; $\tau_{\text{кр}}$ – інтервал кристалізації; $\tau_{\text{р}}$ – інтервал розчинення

Окрім ступінчастого процесу вирощування ЕШ, застосовувався стандартний режим охолодження (рис. 1, крива 2).

Необхідно зазначити, що під час стандартного режиму охолодження (примусове охолодження) реальне зниження щільності дислокацій починало спостерігатися при товщині шару близько $15 \cdot 10^{-6}\text{ м}$ і при подальшому збільшенні товщини ЕШ розподіл дислокацій ставав більш рівномірним. Розподіл щільності дислокацій (N_d) по радіусу (R) ЕШ, усереднений за декількома зразками, а також типовий розподіл щільності дислокації по радіусу підкладки приведені на рис. 2.

Первинний розподіл дислокацій у підкладці на рис. 2 представляє крива 1. Радіальний розподіл щільності дислокації має V-подібну форму, змінюючись від $0,5 \cdot 10^8\text{ м}^{-2}$ у центральній частині підкладки до $6 \cdot 10^8\text{ м}^{-2}$ у периферійній частині. У ЕС відбувається різке зменшення щільності дислокації на периферії і деяке зменшення N_d в центральній частині, яке досягає значення 10^7 м^{-2} .

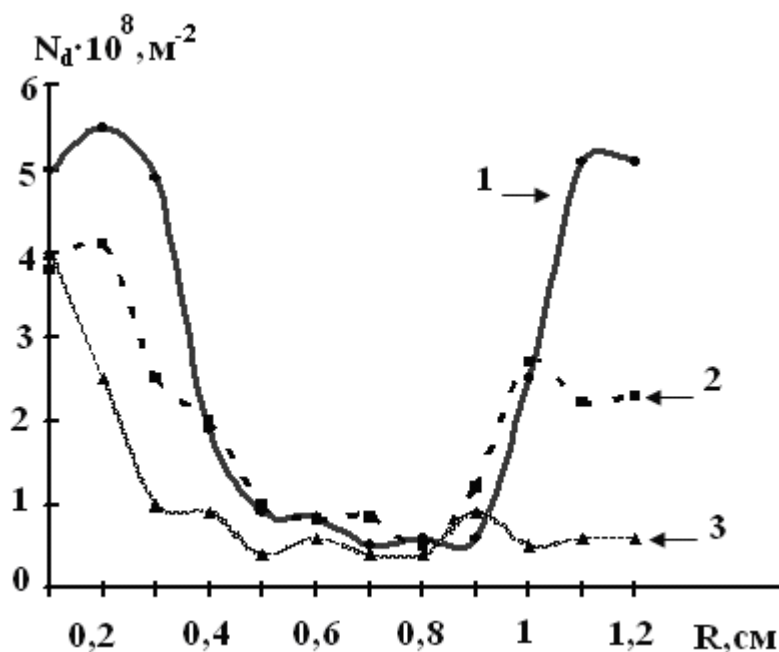


Рис. 2. Зміна радіального розподілу щільності дислокацій у зразках за товщиною зразка: крива 1 – підкладки, крива 2 – ЕШ товщиною $15 \cdot 10^{-6}$ м, крива 3 – ЕШ товщиною $20 \cdot 10^{-6}$ м

Під час використання методу ступінчастого режиму охолодження, заснованого на ізотермічних витримках, реальне зниження дислокацій починало відбуватися при товщині ЕШ близько 10^{-5} м, а при товщині $2 \cdot 10^{-5}$ м щільність дислокацій досягала значення $5 \cdot 10^6$ м⁻².

Аналіз отриманих результатів

Зниження щільності дислокацій під час ступінчастого режиму охолодження ми пов'язуємо з характером зміни швидкості системи. Швидкість охолодження, поряд із температурою епітаксії, визначає ступінь пересичення розчину-розплаву і її зміну в процесі росту.

За незмінної швидкості примусового охолодження системи ступінь пересичення розчину-розплаву змінюється в процесі росту шару. Це несприятливо впливає на рівномірність його властивостей по товщині, що призводить, наприклад, до появи скупчення дислокацій. Подібний ефект можна пояснити так. На лінії ліквідусу фазової діаграми існує точка, по одну сторону від якої поверхня розділу двох фаз шершава, а по іншу – гладка. При малих пересиченнях зміна структури поверхні розділу призводить до зміни механізму росту від нормального до тангенціального. Це може призвести до створення дефектів структури кристалів, а також збільшити ймовірність виявлення ефекту замурування металу-розчинника та домішок. Подібні причини й пояснюють появу скупчення дислокацій.

Застосування ступінчастого режиму охолодження системи дозволяє за час відпалу привести фронт кристалізації в стан, близький до рівноважного. Це створює достатні умови для згладжування наслідків зміни механізму зростання шару, що виявляється в переорієнтації й анігіляції дислокацій. Результатом цього є поліпшення структури монокристалічного шару. Відповідно це призводить до більш рівномірного розподілу дислокацій в ЕШ і зниженні їхньої щільності.

Також треба зазначити сприятливіші умови для зростання арсеніду галію з рідкої фази при заміні галію на вісмут за рахунок збільшення стабільності фронту кристалізації (за однакових інших умов). Найважливішою умовою здобуття структурно і морфологічно досконалих ЕШ є забезпечення морфологічної стабільності фронту кристалізації, порушення якої зумовлене виникненням концентраційного переохолодження розчину-розплаву поблизу

підкладки. Оскільки питома теплопровідність рідкого вісмуту при температурі епітаксії в 6 разів нижча за питому теплопровідність розплавленого галію, то використання вісмуту в якості розчинника дозволяє збільшити температурний градієнт у розчині-розплаві поблизу підкладки в 6 разів [10] (порівняно з галієвим розчинником). Отже, під час вирощування з розчинів у розплаві вісмуту забезпечується вище значення стабільності фронту кристалізації, що значно збільшує морфологічну і структурну досконалість ЕШ арсеніду галію.

Висновки

Запропоновано технологічні режими покращення досконалості структури монокристалів арсеніду галію, побудовані на ізотермічних витримках. Вирощування епітаксійних шарів GaAs методом РФЕ під час використання спеціальних технологічних режимів зумовлює підвищення однорідності розподілу дислокацій та призводить до зменшення їхньої щільності в ЕШ. Під час використання вісмуту в якості розчинника щільність дислокацій в ЕШ досягає значення $(3 - 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев В. М. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. / Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н.; под ред. Ж. И. Алферова. – М.: Сов. радио, 1975. – 328 с.
2. Мильвидский М. Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике / Мильвидский М. Г. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
3. Braun A. Analytical solution to Matthews' and Blakeslee's critical dislocation formation thickness of epitaxially grown thin films / A. Braun, K. M. Briggs, P. Böni // Journal of Crystal Growth. – 2002. – V. 241 – P. 231 – 234.
4. Baganov Ye. A. Reducing the density of threading dislocations in GaAs epitaxial layers. Efficiency assessment of isovalent Bi doping and Pb doping. / Ye. A. Baganov, V. A. Krasnov, O. N. Lebed and S. V. Shutov. // Materials Science–Poland. – 2009. – Vol. 27. – No. 2. – P. 355 – 363.
5. Ганина Н. В. Физико–химические особенности изовалентного легирования полупроводников / Н. В. Ганина // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – т. 3. № 4. – С. 565 – 572.
6. Василенко Н. Д. Образование дислокаций в эпитаксиальных слоях, выращенных из различных растворов–расплавов. / Н. Д. Василенко, О. К. Городниченко, В. А. Краснов // Сб. Докл. 5 Междун конф. «Свойства и структура дислокаций в полупроводниках». – 1986. – С. 57 – 63.
7. Вальковская М. М. Пластичность и хрупкость полупроводниковых материалов при испытаниях на микротвердость. / Вальковская М. М., Пушкаш Б. М., Марончук И. Е. – Кишинев: Штиинца, 1984. – 107 с.
8. Петухов Б. В. О пороговых напряжениях при движении дислокаций в примесных полупроводниках. / Б. В. Петухов // Фізика і техніка полупроводників. – 2007. – т. 41. – в. 6. – С. 645 – 650.
9. Патент 28402 Україна, МПК⁶ Н 01 L 21/20 Спосіб отримання товстих гомоепітаксійних шарів арсеніду галію / Шутов С. В., Краснов В. О., Лебедь О. М. заявник та патентовласник Херсонський національний технічний університет. – №u200707996 ; заявл. 16.07.07 ; опубл. 10.12.07, Бюл. № 20.
10. Кристаллизация и свойства кристаллов / [Марончук И. Е., Кулюткина Т. Ф., Полещук В. С., Шутов С. В.] – Новочеркасск: НПИ. – 1989. – 64 с.

Лебедь Олег Миколайович – к. т. н., доцент кафедри науково-природничої підготовки.
Херсонська державна морська академія.