

Д.М. Фреїк, В.М. Чобанюк, Л.І. Никируй

Напівпровідникові тонкі плівки – сучасний стан (огляд)

*Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна, E-mail: freik@pu.if.ua*

Розглянуто та проаналізовано основні аспекти перспективного напрямку мікроелектроніки – тонкоплівкового напівпровідникового матеріалознавства. Особлива увага приділена прикладним питанням: систематизовано основні методи вирощування та дослідження структурних властивостей, акцентовано увагу на фізико-хімічних властивостях, класифіковано найбільш важливі напрямки практичного застосування.

Ключові слова: напівпровідник, тонкі плівки, методи вирощування, мікроелектроніка.

Стаття постуила до редакції 10.04.2006; прийнята до друку 17.06.2006

ЗМІСТ

I.	Методи отримання	405
1.1.	Конденсація з парової фази	405
1.2.	Осадження плівок з газової фази	407
II.	Процеси росту, структура і властивості	408
2.1.	Процеси росту	408
2.2.	Структура плівок	409
2.3.	Фізико-хімічні властивості	410
III.	Деякі прикладні аспекти	411
3.1.	Тензорезисторні датчики	411
3.2.	Датчики температури	411
3.3.	Газові сенсори	412
3.4.	Сонячні елементи	412
3.5.	Фотоелектроперетворювачі	413
3.6.	Лазерні гетероструктури	414
	Література	415

Тонкі плівки напівпровідникових матеріалів, які зробили величезний вплив на розвиток сучасної мікро- і оптоелектроніки, привернули увагу вчених наприкінці першої половини минулого століття у зв'язку з виготовленням фоточутливих шарів сульфїду свинцю (галенїт) (Німеччина, Англія, США). Слід зазначити, що тонкоплівкове напівпровідникове матеріалознавство тісно пов'язане із розробкою способів його отримання, різновидів яких на сьогоднішній день налічується декілька десятків. Саме вони, разом з функціональними властивостями матеріалу (рис. 1), і визначають комплекс фізико-хімічних характеристик, необхідних для конкретних практичних застосувань.

I. Методи отримання

Відомі методи отримання тонких напівпровідникових плівок можна віднести до фізичних (парофазні) і хімічних (газофазні).

Конденсація з парової фази. Існує велике число різних методів отримання плівок з парової фази: метод випаровування, сублімація, катодне розпилювання, лазерна епітаксія та ін. При вирощуванні плівок випаровуванням у вакуумі, процес зводиться до створення потоку пари, яка створюється джерелом, нагрітим до вибраної

температури. Пара, пройшовши деякий шлях, конденсується на підкладці. Якщо при отриманні плівок елементарної речовини, склад зберігається, то при кристалізації з двох- або багатоконпонентної пари необхідно вживати спеціальні заходи щодо збереження його постійного складу. Чим більша відмінність у тиску насиченої пари компонентів сполуки, тим важче стає керувати складом парової фази і виникає необхідність використовувати роздільне випаровування компонентів речовини, яка кристалізується. При цьому тиск пари компонентів регулюється температурами джерел. Іншою, не менш важливою задачею при конденсації із парової фази є керування складом плівки, яка утворюється при конденсації пари декількох елементів. Коефіцієнт конденсації залежить від природи сконденсованих атомів матеріалу і стану підкладки, а значить і склад плівки, яка утворюється, може бути не ідентичний складу парової фази.

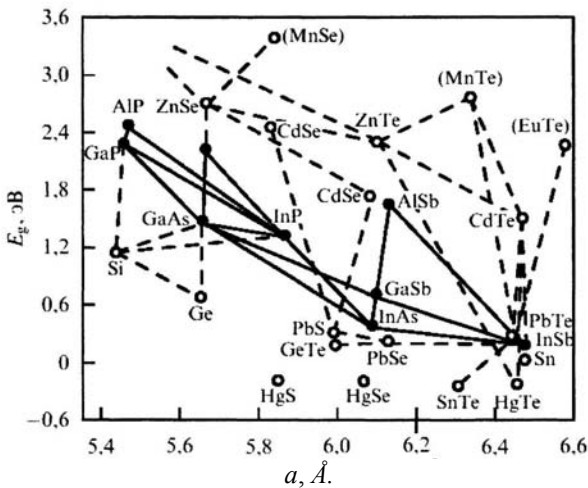


Рис. 1. Напівпровідники, які мають практичне використання в мікроелектроніці та їх основні характеристики: E_g – ширина забороненої зони, a – стала ґратки.

Приведені проблеми, багато в чому розв’язані у методах гарячої стінки та молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ), які володіють певними перевагами перед іншими методами.

Метод гарячої стінки є різновидом технології вакуумного осадження плівок. Він характеризується тим, що ріст відбувається в умовах, дуже близьких до термодинамічної рівноваги. Основною особливістю методу є наявність нагрітого екрану (гарячої стінки), який служить для зосередження і напрямлення на підкладку випаровуваної речовини (рис. 2). При цьому виключаються втрати випаровуваного матеріалу, створюється можливість підтримки високого тиску пари речовини або його різних компонент і зводиться до мінімуму різниця температур джерела і підкладки. До кінця 70-х років метод гарячої стінки був детально розроблений в застосуванні до цілого ряду сполук $A^{IV}B^{VI}$ та твердих розчинів на їх основі. Це дозволило плавно, без яких-небудь серйозних модифікацій технологічних

установок і режимів росту, перейти від епітаксії окремих шарів до виготовлення надґраток. Надґратки на основі напівпровідників $A^{IV}B^{VI}$ вперше були одержані на початку 80-х років в університетах Японії і Австрії. Типові установки для виготовлення надґраток цим методом показані на рис. 2.

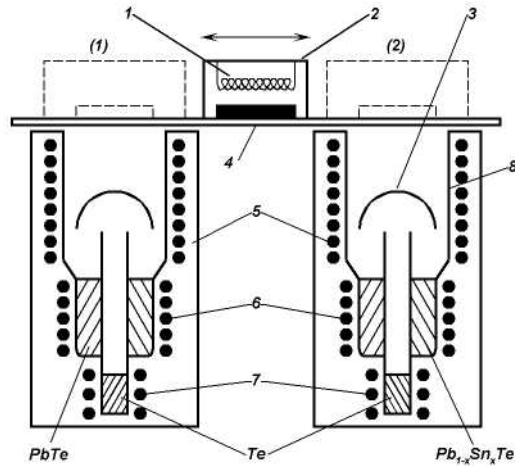


Рис. 2. Схема установки для епітаксійного вирощування надґраток PbTe-PbSnTe методом гарячої стінки: 1 – нагрівник підкладки; 2 – головка з підкладкою, що періодично пересувається двигуном; 3 – відбивач пари Te; 4 – підкладка; 5 – нагрівники стінок; 6 – нагрівники джерел; 7 – нагрівники резервуарів Te; 8 – стінка з кварцового скла.

До складу установки входять декілька (як правило, два) реакторів, які використовуються для отримання плівок різних матеріалів або різного типу провідності, а також рухомий тримач підкладок, переміщення якого між реакторами дозволяє сформувати надґратку. Для керування типом провідності окремих конденсатів $A^{IV}B^{VI}$ або $A^{II}B^{VI}$ використовують два способи: регульоване відхилення складу від стехіометрії, тобто легування електрично активними власними дефектами, та легування домішками. У першому випадку при вирощуванні плівок PbTe у додаткові резервуари реакторів завантажують чистий телур, тиском пари якого і визначається тип провідності матеріалу, оскільки надлишок халькогену в PbTe дає діркову провідність, а надлишок свинцю – електронну (рис. 2). Рівень легування при цьому визначається температурою резервуару з телуrom та істотно залежить від температури підкладки. Цей метод вирощування застосовується і для отримання надґраткових структур на основі напівпровідників $A^{II}B^{VI}$, наприклад, ZnS-ZnSe.

Метод молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ) призначений для вирощування кристалічних структур у надвисокому вакуумі за допомогою пучків атомів або молекул, які являються компонентами вирощуваної сполуки. Таким чином, МПЕ є вдосконаленням звичайного способу наплення плівок випаровуванням у вакуумі.

Принципи технології МПЕ формулювалися поступово. У 1964 р. (R.B. Schoolar, J.N. Zemel) за допомогою молекулярних пучків були одержані досконалі епітаксійні плівки PbS на монокристалічній підкладці NaCl. У 1968 р. (J.E. Davey, T. Pankey, J.R. Arthur) в умовах високого вакууму були вирощені епітаксійні плівки GaAs на монокристалічних підкладках арсеніду галію. Ці дослідження стали основою подальшого прогресу по вирощуванню досконалих плівок GaAs чи інших напівпровідникових сполук $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$ методом МПЕ. Новий етап в розвитку і вдосконаленні МПЕ розпочався у 70-і роки та пов'язаний із створенням і промисловим виробництвом відповідного вакуумного устаткування (рис. 3).

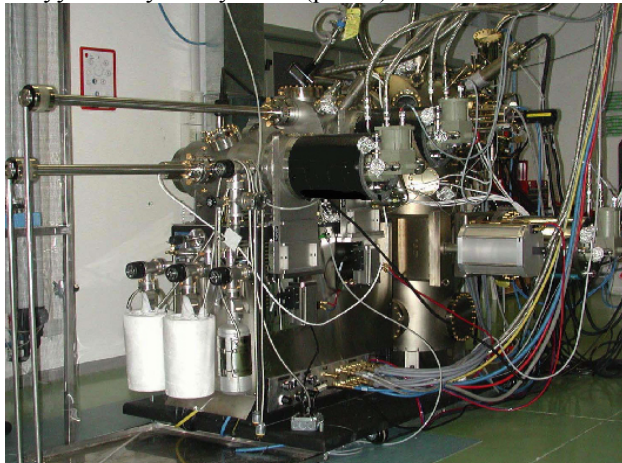


Рис. 3. Загальний вигляд установки для отримання плівок методом молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ).

Спрощена схема ростової камери МПЕ показана на рис. 4. Випаровування матеріалів, що осідають у надвисокому вакуумі на підкладку, закріплену на маніпуляторі з нагрівальним пристроєм, здійснюється за допомогою ефузійних комірок (ефузія – повільне виткання газів через малі отвори).

У порівнянні з іншими технологіями, які використовують для вирощування тонких плівок і багатшарових структур, МПЕ характеризується, перш за все малою швидкістю росту і відносно низькою температурою росту. До переваг цього методу слід віднести можливість різкого переривання і подальшого відновлення потрапляння на поверхню підкладки молекулярних пучків різних матеріалів, що найбільш важливо для формування багатшарових структур з різкими межами між шарами. Отриманню досконалих епітаксійних структур сприяє і можливість аналізу структури, складу і морфології шарів, що ростуть, у процесі їх формування.

Найважливіша для технологічного процесу область ростової камери знаходиться між ефузійними комірками і підкладкою (рис. 4). Цю область можна розділити на три зони, які позначені на малюнку цифрами I, II і III. Зона I – зона генерації молекулярних пучків, у цій зоні молекулярні пучки, сформовані кожною із ефузійних комірок, не

перетинаються і не впливають один на одного. У другій зоні (зона II – зона змішування випаровуваних елементів) молекулярні пучки перетинаються і відбувається перемішування різних компонент. Про фізичні процеси, які відбуваються у цій зоні на даний час відомо дуже мало. У безпосередній близькості від поверхні підкладки розташовується зона III – зона кристалізації. В цій зоні відбувається епітаксійний ріст у процесі молекулярно-променевої епітаксії.

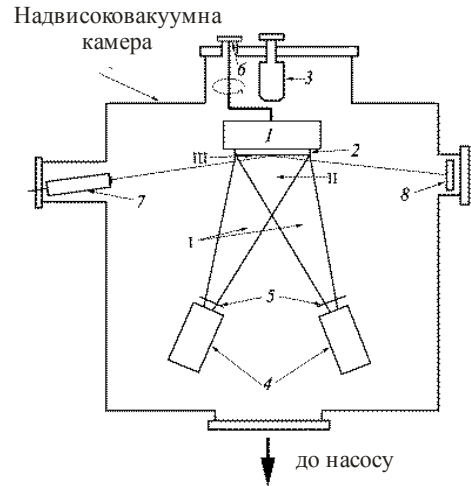


Рис. 4. Схема простої установки молекулярно-променевої епітаксії:

1 – тримач зразка з нагрівником; 2 – зразок; 3 – мас-спектрометр; 4 – ефузійні комірки; 5 – заслінки; 6 – маніпулятор; 7 – електронна гармата; 8 – люмінесцентний екран.

Різновидом методу МПЕ є лазерна МПЕ, у якій випаровування початкових компонентів здійснюється за допомогою імпульсного випромінювання потужного лазера. Цей метод був застосований для вирощування надграток HgTe-CdTe. Пучок атомів ртуті створюється випарником ефузійного типу. Полікристалічні зразки CdTe і Te поміщаються в танталові човники, встановлені на поворотному майданчику, і по черзі піддають дії сфокусованого лазерного променя. Особливості процесу лазерної МПЕ пов'язані, у першу чергу, з високою температурою джерел. У випадку лазерної МПЕ CdTe випаровувався у вигляді атомів кадмію і телуру на відміну від звичайної МПЕ, при якій випаровування відбувалося у вигляді атомів кадмію і молекул телуру. Таким чином, склад парової фази виявлявся різним, що позначається на характері процесу епітаксії, а саме, орієнтація підкладки у випадку лазерної МПЕ має істотно менший вплив на ріст епітаксійної плівки, ніж у випадку звичайної МПЕ.

1.2. Осадження плівок з газової фази. Методи газозфазної епітаксії, які відрізняються простотою і відтворюваністю хімічних процесів осадження тонких плівок достатньо інтенсивно використовуються для отримання плівок напівпровідникових матеріалів. В основі цих методів

лежать процеси переносу осаджуваних матеріалів у вигляді летючих сполук до поверхні підкладки, на якій відбувається розклад цих сполук з виділенням необхідного продукту. Із методів газофазної епітаксії у виробництві промислового кремнію широке застосування одержав метод відновлення кремнію в атмосфері водню з його тетрахлориду (SiCl₄):



У цьому ж реакторі проводять легування епітаксійних шарів кремнію, використовуючи джерела рідких або газоподібних речовин, які містять легуючі домішки. Наприклад, для отримання епітаксійного шару n-типу використовують речовини, які містять фосфор: PCl₃, PBr₃, PH₃ та ін. Шар р-типу одержують легуванням кремнію бором з його сполук, наприклад, BBr₃, B₂H₂ і ін.

В останньому десятилітті, коли виник інтерес до масового виробництва приладів з субмікронними шарами (польових транзисторів, лазерів, фотоприймачів, сонячних елементів та ін.) із методів газофазної епітаксії найінтенсивніше розвивається метод росту з газової фази із використанням металоорганічних сполук (ГФЕ МОС). Цей метод знаходить більш широке застосування в технології напівпровідникових структур, у тому числі і напівпровідникових надграток. У цьому методі зростання епітаксійного, полікристалічного або аморфного шару здійснюється при термічному розкладі (піролізі) газоподібних металоорганічних сполук і подальшої хімічної реакції між утвореними компонентами на нагрітій підкладці (рис. 5).

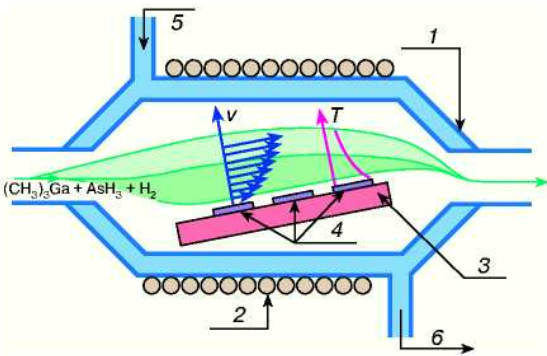
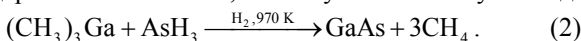


Рис. 5. Схема горизонтального реактора відкритого типу з охолоджуваними стінками для ГФЕ МОС: 1 – кварцовий корпус, 2 – котушка ВЧ-генератора для нагрівання підкладки, 3 – блок нагрівання, 4 – підкладки, 5 – водяне охолодження (впуск), 6 – водяне охолодження (випуск). Схематично показано розподіл швидкостей v і температури T у газовому потоці в дифузійному шарі поблизу підкладки (масштаб не дотриманий).

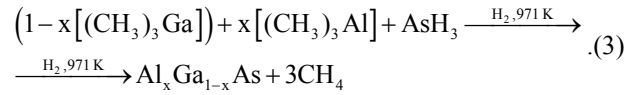
Хімічна реакція, за допомогою якої були одержані плівки GaAs, може бути записана у вигляді:



Розклад газової суміші триметилгалію (CH₃)₃Ga і гідриду миш'яку (арсину) AsH₃ відбувається при

температурі 970 К в атмосфері водню H₂.

За допомогою ГФЕ МОС вирощують більшість напівпровідникових сполук A^{III}B^V, A^{II}B^{VI} і A^{IV}B^{VI}, а також багато важливих потрійних і четверних сполук A^{III}B^V. Наприклад, сполуки Al_xGa_{1-x}As звичайно вирощують, використовуючи наступний процес:



Вирощування шаруватих напівпровідникових гетероструктур (ГС) методом ГФЕ МОС вимагає зміни складу газової суміші в реакторі. Швидкість, з якою може бути забезпечено необхідну зміну, залежить від геометрії реактору і повного потоку газу через реактор. При високих швидкостях потоку така зміна складу може бути здійснена достатньо швидко, тому можуть бути одержані гетеропереходи із практично різкою гетерограницею. Використання методики ГФЕ МОС для вирощування ГС Al_xGa_{1-x}As-GaAs дозволяє одержувати структури достатньо високої якості, у яких товщина окремих шарів складає всього 5-6 міжатомних відстаней.

II. Процеси росту, структура і властивості

2.1. Процеси росту. Питання, пов'язані з механізмами росту, стають надзвичайно важливими при створенні гетероструктур та багатошарових структур, для яких необхідний вищий ступінь однорідності складу при товщині менше 100 Å. Найважливіші індивідуальні атомні процеси, що супроводжують ріст плівок з парової фази наступні (рис. 6): адсорбція (прилипання) падаючих на підкладку атомів чи молекул, які належать вирощуваній сполуці; міграція (поверхнева дифузія) адсорбованих атомів по поверхні підкладки (може передувати дисоціацією молекул вирощуваної

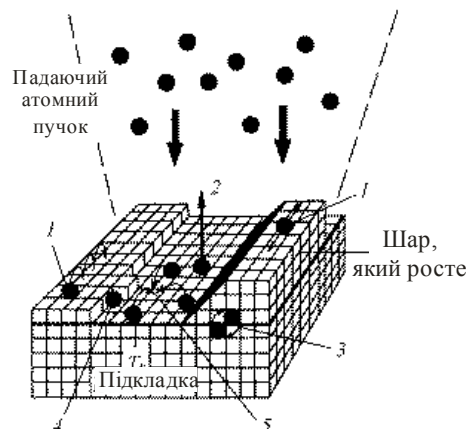


Рис. 6. Схематичне зображення поверхневих процесів, що відбуваються при вирощуванні тонкої плівки методом МПЕ:

1 – поверхнева дифузія; 2 – десорбція; 3 – взаємодифузія; 4 – вбудовування в ґратку; 5 – поверхнева агрегація (зародкове утворення).

сполуки); вбудовування атомів, що становлять ГС, в кристалічну ґратку підкладки або моноатомний шар, який вирощують; термічна десорбція атомів, які не вбудувалися в кристалічну ґратку; утворення і подальший ріст двовимірних зародків кристалу на підкладці або на поверхні шару, який вирощують; взаємна дифузія атомів, що вбудувалися в кристалічну ґратку.

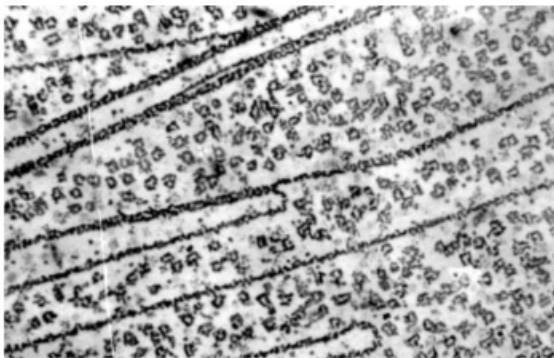
Іонно-ковалентний характер і значна величина енергії хімічних зв'язків у напівпровідникових сполуках $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$ призводять до того, що в результаті адсорбції і міграції по поверхні атоми катіонів А і аніонів В заміщають цілком певні положення в кристалічній ґратці, тобто за час росту одного моноатомного шару (звичайно за цей час (~ 1 с) атом виконує декілька тисяч дифузійних стрибків, поки не займе свого остаточного місця в ґратці) відбувається своєрідна самоорганізація вирощуваної структури.

2.2. Структура плівок. Дослідження структури плівок в процесі їх росту з парової фази дозволило визначити основні джерела дефектів у плівках (рис. 7). До них відносять наступні: *дефекти підкладки*; *дислокації невідповідності*; *малокутові межі*, які утворюються при зростанні стабільних великих зародків, що мають різну орієнтацію; *дефекти упаковки*, які виникають при коалесценції зародків. Причина їх виникнення – невідповідність

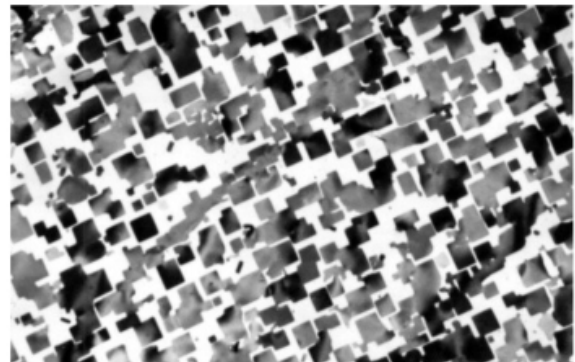
ґраток зародків, пов'язана із порушенням порядку чергування атомних площин при злитті стабільних зародків у порівнянні з непорушеним монокристалом. Дефекти упаковки можуть виникати і в місці контакту зародку і підкладки; дислокації, що виникають через ефекти пластичної деформації вирощуваної плівки.

Аналіз багатьох електронних мікрофотографій (рис. 7,в) свідчить про те, що структура дислокації плівок тісно пов'язана з існуванням пружних механічних напруг. Оскільки перехід пружної деформації в пластичну носить стрибкоподібний характер, то густина дислокацій зростає стрибкоподібно. Після виникнення дислокацій напружений стан знімається, і відбуваються процеси заліковування дефектів. При низькій температурі конденсації дислокації, очевидно, також виникають і в процесі переходу пружної деформації в пластичну, однак, критична товщина у даному випадку розташована завжди в області суцільних плівок. Це пов'язано із тим, що при низькій температурі конденсації на підкладці утворюються набагато більше зародків, і вони зростаються в суцільну плівку при меншій товщині, ніж при високій температурі. Іншими словами, чим вище температура, тим більша товщина при якій відбувається утворення суцільної плівки (при постійній швидкості конденсації).

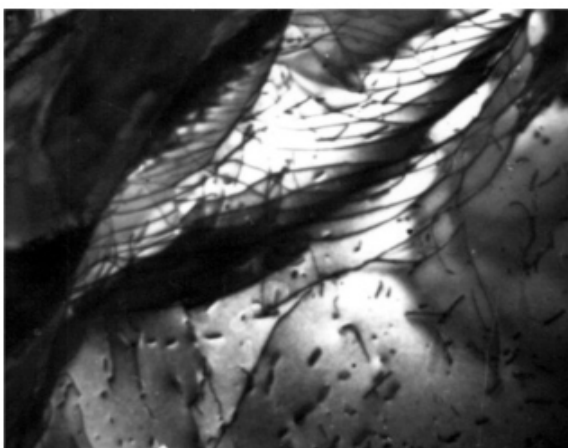
Перераховані дефекти спостерігаються для багатьох гетерогенних систем "підкладка-плівка".



а)



б)



в)

Рис. 7. Мікроструктура плівок PbS на (100) NaCl, одержаних із парової фази на різних етапах формування:
а – початкове утворення зародків; б – розростання кристалітів; в – утворення дислокацій.

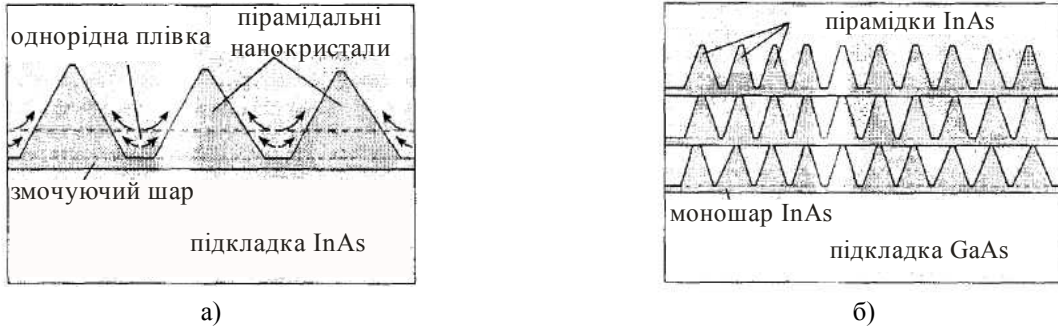


Рис. 8. а – утворення пірамідальних острівків InAs в результаті трансформації плоских шарів цього напівпровідника (пунктир), вирощуваних на підкладці CaAs с відмінними параметрами ґратки; б – система зв’язаних вертикально пірамідок InAs на підкладці GaAs.

Проте, індивідуальності кожної конкретної системи, які визначаються, перш за все, природою речовини і підкладки, повинні по-різному проявлятися, накладаючи свої особливості на структуру сконденсованої плівки.

В останні роки було показано, що при понижених температурах росту при багатшаровому рості напівпровідника з параметрами кристалічної ґратки, відмінними від параметрів ґратки підкладки (рис. 1), можна одержати на поверхні росту майже однакові за розміром острівки. Острівки осаджуваного напівпровідника пірамідальної форми практично не містять дефектів. Як приклад, можна привести осадження InAs ($a = 6,0584 \text{ \AA}$) на підкладці GaAs ($a = 5,6533 \text{ \AA}$). Такий процес одержав назву самоорганізації структури в процесі росту.

Рухливістю силою утворення острівків, а не плоского шару є прагнення системи до мінімуму енергії. При неспівпаданні параметрів ґратки виникають пружні деформації як утвореного острівця, так і підкладки. Якщо в процесі росту поверхня залишається плоскою (пунктир на рис. 8,а), то енергія пружної деформації росте, а енергія поверхні не змінюється. При певній товщині (як правило, декілька моношарів) така ситуація стає енергетично невигідною. Мінімуму енергії системи відповідатиме утворення тривимірних острівків-пірамід (стрілки на рис. 8,а), у яких підкладка буде сильно деформована (для InAs на поверхні GaAs), але деформація зменшуватиметься по мірі віддалення від підкладки до вершини піраміди. Один шар InAs, названий змочуючим шаром, відділяє піраміди від підкладки CaAs. При подальшому нарощуванні конденсату утворюється система зв’язаних вертикально пірамід (рис. 8,б).

2.3. Фізико-хімічні властивості. З різноманіття напівпровідникових матеріалів (рис. 1) детальніше зупинимося на сполуках $A^{IV}B^{VI}$. Халькогеніди свинцю і олова – вузькоцилиндрні напівпровідники. З однієї сторони – вони незмінні модельні об’єкти для наукових досліджень, а з іншою – базові матеріали для створення пристроїв інфрачервоної техніки. Це, зокрема, термоелектричні перетворювачі, які функціонують в інтервалі температур 300-950 К, а також фотоприймальні і випромінювальні структури

інфрачервоного діапазону оптичного спектру. Високі значення статичної діелектричної проникності (декілька сотень) дають можливість використовувати тонкі плівки для створення багатоелементних матриць.

Халькогеніди свинцю, як гомогенна фаза, існують як з надлишком металу щодо стехіометричного складу, так і з надлишком халькогену. Так, максимальна протяжність області гомогенності телуриду свинцю спостережувана при 1048 К від 49,994 до 50,013 % атомного вмісту телуру. Халькогеніди свинцю можуть бути як електронної так і діркової провідності. Високі значення рухливості носіїв в n-PbTe і значна термо-е.р.с., а також добре співвідношення рухливості носіїв до ґраткової теплопровідності визначають високу термоелектричну добротність матеріалу.

Властивості плівок значною мірою залежать як від типу підкладок, які використовуються при вирощуванні, так і технологічних чинників (рис. 9,10).

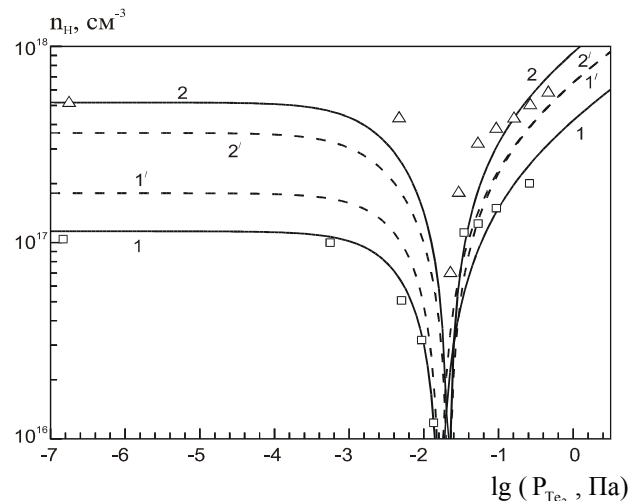


Рис. 9. Залежність концентрації носіїв струму n_n у плівках PbTe, вирощених методом гарячої стінки від номінального тиску пари телуру. Підкладки: \square , 1, 1' – NaCl (100); Δ , 2, 2' – BaF₂ (111); \square , Δ – експеримент; 1, 2 – розрахунок з врахування внутрішньої напруги плівок, 1', 2' – без неї.

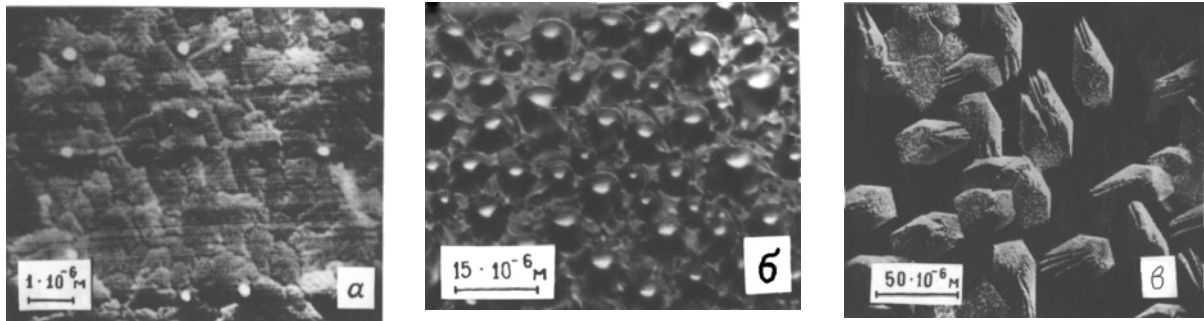


Рис. 10. Морфологія поверхні плівок PbTe, вирощених методом гарячої стінки при осадженні із: а – наважки стехіометричного складу; б – пересиченої пари свинцем; в – пересиченої пари телуром.

Встановлено, що якщо для плівок PbTe при температурах $T_p = 400-620$ К та парціальному тиску телуру $P_{Te} = 10^{-7}-1,3 \cdot 10^{-2}$ Па на сколах (111) BaF₂ і (100) NaCl осідає матеріал тільки n-типу провідності, то при вищому тиску – р-типу (рис. 9). При цьому показано, що плівки n-PbTe, одержані з наважок після п'ятигодинного випаровування, мають на поверхні вкраплення металу (рис. 10,а). Додаткове підживлення пари свинцем призводить до збільшення вільного металу на поверхні плівок (рис. 10,б). При температурах осадження $T_p > 600$ К і значних пересиченнях пари телуром на поверхні плівок з'являється вільна фаза чистого телуру при збереженні електронної провідності (рис. 10,в).

Першу особливість можна пояснити впливом внутрішніх механічних напруг, які виникають в процесі вирощування плівок на різних підкладках. Так, внутрішня напруга P_f і відповідні зміни ширини забороненої зони ΔE_g в плівках PbTe, вирощених на підкладках NaCl і BaF₂ при температурі осадження $T_p = 653$ К складають $P_f = -6,125 \cdot 10^8$ Па, $\Delta E_g \approx 0,05$ eV для підкладки NaCl і, $P_f \approx 4,900 \cdot 10^8$ Па, $\Delta E_g \approx -0,018$ eV для підкладки BaF₂, відповідно. Інші особливості у властивостях плівок (рис. 9,10) пов'язані як з фізико-хімічною природою речовини, так і технологічними чинниками процесу осадження.

III. Деякі прикладні аспекти

Практичне використання тонких напівпровідникових плівок в мікро- і оптоелектроніці має широкий спектр. Відзначимо тільки, що якщо зростання світового ринку електроніки в рік становить 7%, то напівпровідникова кремнієва промисловість росте із швидкістю 15%. Всередині цієї промисловості велике місце належить приладам на гетероструктурах кремній – кремній-германій. Сьогодні один лише ринок гетеролазерів відповідає ринку всієї напівпровідникової промисловості за 80-й рік. Зупинимося стисло на характеристиці основних напрямів практичного застосування тонкоплівок напівпровідникових елементів.

3.1 Тензорезисторні датчики. Принципово нові можливості в розвитку тензорезисторних датчиків відкрилися з розробкою і дослідженням гетероепітаксійних напівпровідникових структур типу «кремній на діелектрику». З них найбільш вивчена і технологічно освоєна у виробництві структура «кремній на сапфірі» (КНС), яка є тонкою монокристалічною плівкою кремнію, вирощеною на монокристалічній сапфіровій підкладці з певною кристалографічною орієнтацією. При виготовленні датчиків на структурі КНС формують тензочутливу схему, в якій тензорезистори мають вид мезаструктур, відокремлених один від одної проміжками чистого сапфіру. Для подальшого створення ефективних тензоперетворювачів необхідна розробка технології отримання профільованих структур КНС різноманітної форми з точним дотриманням розмірів і створення жорсткої, температуростабільної сполуки сапфірових деталей при температурах 600-1200 К.

Тензоперетворювачі з напівпровідниковими чутливими елементами (НЧЕ) мають значний інтерес для атомної енергетики чи інших галузей народного господарства. Добре зарекомендували себе НЧЕ на основі КНС і при вимірюванні механічних параметрів в умовах криогенних температур.

3.2. Датчики температури. Поліпшення характеристик напівпровідникових датчиків температури і спрощення їх конструкції може бути досягнуте при використанні НЧЕ. Виготовлення таких датчиків здійснюється масовими методами планарної технології, які забезпечують отримання значень номінальних опорів з достатньо високою точністю і, крім того, дозволяють використовувати при виготовленні лазерні методи підгонки номінальних опорів.

Великі можливості із подальшого вдосконалення плівкових термодатчиків виникли з появою в серійному виробництві гетероепітаксійних КНС структур, що працюють в діапазоні температур від 70 до 720 К і що мають похибку 0,25% та вихідний сигнал (4...20) мА. В області середніх температур найчастіше використовується легований германій, як добре вивчений напівпровідниковий матеріал. При легуванні германію елементами III і IV груп, такими як галій і сурма, які є мілкими домішками з енергією

активації порядку 0,01 еВ, можна виготовляти високочутливі термометри для роботи в діапазоні від 1 до 40 К з похибкою 0,005 К.

3.3. Газові сенсори. Тонкоплівкові напівпровідникові металооксидні газові сенсори, принцип дії яких полягає у зміні провідності ряду широкозонних напівпровідників (ZnO, SnO₂, In₂O₃ та ін.) за наявності різних газів, знаходять широке застосування в газоаналітичних приладах. Конструкція пропонуваного напівпровідникового металооксидного сенсора показана на рис. 11. Сенсор

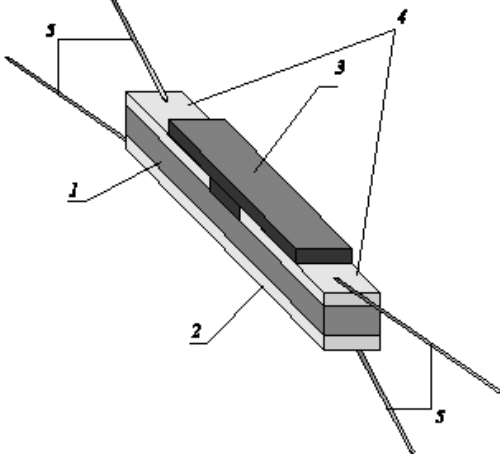


Рис. 11. Конструкція металооксидного напівпровідникового сенсора: 1 – сапфірова підкладка; 2 – тонкоплівковий платиновий нагрівач; 3 – газочутливий шар; 4 – електроди; 5 – дротяні виводи.

виконаний на підкладці 1 з сапфіра розміром 0,2×0,5×2 мм. На одній стороні підкладки розташовано тонкоплівковий платиновий нагрівник

2, а на іншій – газочутливий шар 3 та електроди 4. Виводи сенсора 5 зроблено із платинового дроту Ø30 мкм. Сенсор кріпиться за дротяні виводи таким чином, що підкладка знаходиться в підвішеному стані і розсіювання тепла здійснюється за рахунок теплообміну з повітрям та корпусом датчика через дротяні виводи.

На основі описаної конструкції були розроблені датчики вуглеводнів, гідридних газів (H₂S, PH₃, AsH₃), етанолу, водню та ін. У цих сенсорах газочутливим шаром є тонкі плівки на основі ZnO і SnO₂, сформовані методом магнетронного реактивного розпилення. Формування на поверхні тонкоплівкового газочутливого шару острівкових плівок різних каталізаторів дозволяє підвищити селективність сенсора до деяких компонентів і значно зменшити його робочу температуру. Так, формування на поверхні тонкоплівкового газочутливого шару на основі SnO₂ острівкової плівки золота дозволило понизити робочу температуру датчика етанолу з 650 К до 550 К і забезпечити високу селективність до етанолу у присутності ацетону.

3.4. Сонячні елементи. У тонкоплівкових сонячних елементах активними напівпровідниковими шарами є полікристалічні або неупорядковані плівки, які наносять або вирощують на електрично активних або пасивних підкладках (таких, як скло, пластмаса, кераміка, метал, графіт або металургійний кремній). Тонкі плівки CdS, Si, GaAs, InP, CdTe чи ін. наносять на підкладку за допомогою різних методів, таких, як газова епітаксія, плазмове розпилювання та осадження. Якщо товщина шару напівпровідника перевищує обернений коефіцієнт поглинання, велика частина носіїв, що генеруються світлом, може бути колективізована. Основна перевага тонкоплівкових сонячних елементів полягає в тому, що їх вартість може бути низкою, оскільки технологія їх

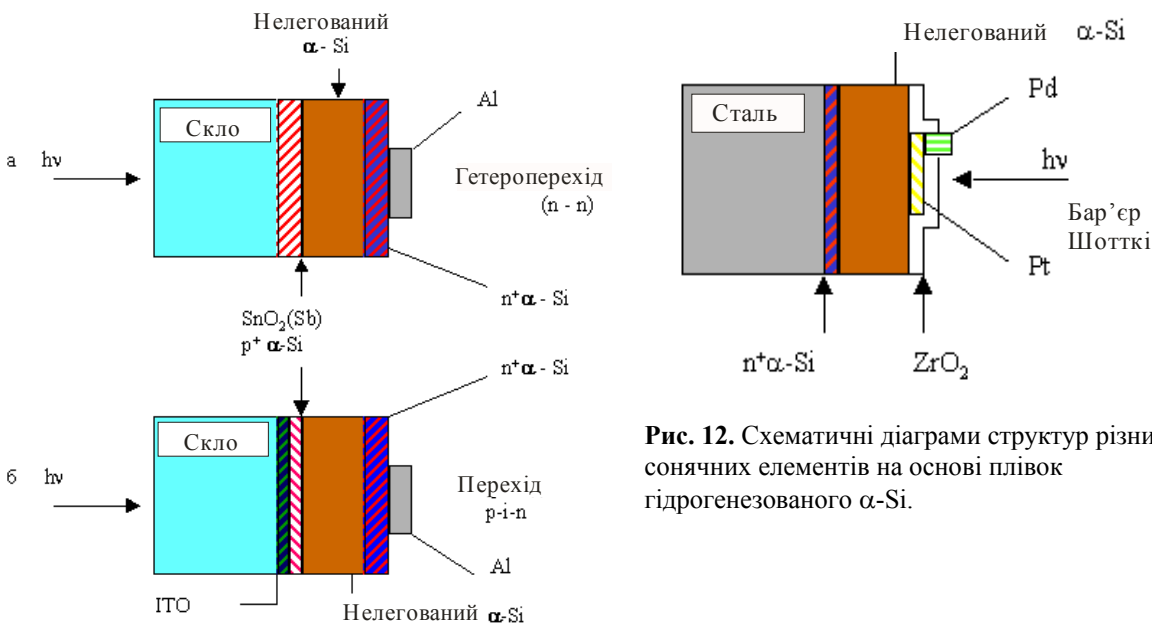


Рис. 12. Схематичні діаграми структур різних сонячних елементів на основі плівок гідрогенезованого α -Si.

виготовлення дешева і при цьому використовуються порівняно недорогі матеріали. До основних недоліків відносяться низький ККД та поступова деградація характеристик. Низький ККД обумовлений частково впливом межзеренних границь, а частково – низькою якістю напівпровідникового матеріалу, вирощуваного на різних підкладках. Проблема деградації пов'язана із хімічними реакціями, які протікають між напівпровідником і навколишньою атмосферою (киснем, парами води).

Як матеріал для тонкопліткових сонячних елементів використовують також аморфний кремній (*a*-Si) (рис. 12). Шари завтовшки 1-3 мкм вирощують на скляних підкладках, покритих шаром металу або ГТО, за допомогою розкладання силану у високочастотному розряді. Кристалічний і аморфний кремній сильно відрізняються: перший має непряму заборонену зону шириною 1,1 еВ, тоді як характеристики оптичного поглинання в гідрогенізованому *a*-Si нагадують характеристики із прямою забороненою зоною шириною 1,6 еВ. На тонких плівках гідрогенізованого *a*-Si були створені сонячні елементи як з р-п-переходами, так і з бар'єрами Шоттки (рис. 12). Оскільки у видимій частині оптичного спектру коефіцієнт поглинання в *a*-Si складає 10^4 - 10^5 см⁻¹, більшість носіїв генерується на відстані, яка не перевищує 1 мкм від освітленої поверхні. Дифузійна довжина не перевищує ~1 мкм, а темновий питомий опір виявляється порядку 100 МОм·см. Звідси одержуємо, що в р-і-п-приладі з товщиною і-шару 1 мкм послідовний опір складає 10^4 Ом·см. Тому навіть якнайкращі результати для елемента з бар'єром Шоттки (прозорий металевий шар) відносно невисокі (ККД ~ 6 %).

3.5. Фотоелектроперетворювачі. На даний час інтенсивно розвиваються напівпровідникові ультрафіолетові фотоелектроперетворювачі (УФ) для перешкодостійкої УФ-локації (наприклад, для реєстрації полум'я ракет в денний час); екології (наприклад, для контролю „озонної діри” над Землею); біотехнології (синтез вітамінів D₂ і D₃); медицини (фізіотерапія, аутотрансфузія крові, профілактика простудних захворювань, захист від канцерогенного випромінювання). Відомий широкий спектр напівпровідникових матеріалів, які використовують у тонкопліткової фотомікроелектроніці. Так, кремнієві р-п-фотоприймачі до тепер найпоширеніший тип УФ-фотоелектроперетворювачів. Si-фотодіоди мають спектральну область fotocутливості 0,2÷1,1 мкм, причому максимум спектру знаходиться в ІЧ-області (0,8÷1,0 мкм). Переваги фотоелектроперетворювачів на основі GaAsP в порівнянні з Si р-п-структурами: істотно менша чутливість до ІЧ-світла (спектральна область 0,2÷0,68 мкм), високий диференціальний опір в нулі напруг (~ 10^4 ГОм), що забезпечує низькі шуми, висока стабільність, добре узгодження з оптичними фільтрами. Спектральна область Au-GaP фотодіодів Шоттки була 0,2÷0,55 мкм з максимумом

при ~ 0,4 мкм.

Фотоприймачі на основі напівпровідникових нітридів перспективні для УФ-області спектру, оскільки це прямозонні матеріали, їх ширина забороненої зони близька до межі видимої і УФ-областей спектру, а система AlN-GaN утворює безперервний ряд прямозонних твердих розчинів, що дозволяють створювати фотоприймачі з різким довгохвильовим краєм fotocутливості, розташованим в будь-якому місці ближньої УФ-області.

Дуже високу струмову чутливість мають фоторезистори на основі GaN, у них також спостерігається і різкий довгохвильовий край. Для виготовлення сонячно-сліпих фотоприймачів використовуються тверді розчини GaN-AlN. Під цим терміном в літературі найчастіше мається на увазі повна відсутність чутливості до всього сонячного випромінювання, що доходить до Землі ($\lambda < 0,3$ мкм), а іноді – відсутність чутливості до видимого і ІЧ-світла ($X < 0,38$ мкм). Із зростанням вмісту AlN в твердому розчині Al_xGa_{1-x}N довгохвильовий край fotocутливості зсувається у бік коротших довжин хвиль. Він відповідає: $\lambda = 0,365$ мкм ($x = 0$), $\lambda = 0,32$ мкм ($x = 0,35$), $\lambda = 0,23$ мкм ($x = 0,75$), $\lambda = 0,2$ мкм ($x = 1$).

Фотоприймачі з бар'єрами Шоттки на основі ZnMgBeSe і твердих розчинів ZnSSe і ZnS_{1-x}Te_x використовуються для зсуву довгохвильового краю fotocутливості; він знаходиться при $\lambda = 0,37$ мкм для ZnS_{0,8}Se_{0,2}, при $\lambda = 0,34$ мкм для ZnS_{0,95}Te_{0,05}, при $\lambda = 0,338$ мкм для ZnS-структур.

Перспективним для УФ-області спектру є оксид цинку ZnO. Він радіаційно стійкий, перспективний для виготовлення низькопорогових синіх і УФ-лазерів, які, завдяки високій енергії зв'язку екситона (60 меВ), можуть бути зв'язані з ZnO-фотодетекторами. На основі ZnO були виготовлені m-s-m-фотодіоди, а на основі Mg_{0,34}Zn_{0,66}O – сонячно-сліпі фоторезистори.

Досягнуті на даний час максимальні значення струмової fotocутливості відповідають квантовій ефективності 0,7-0,9, що дуже близько до теоретичної межі. Величини постійних часу фотоприймачів, особливо з бар'єрами Шоттки, також виявилися близькими до теоретичної межі, визначуваної RC-колом. В той же час питома спостережувальна здатність кращих приладів знаходиться на рівні 10^{13} - 10^{15} Гц^{1/2}Вг⁻¹см – це істотно нижче за теоретичну межу (~ 10^{17} Гц^{1/2}Вг⁻¹см), і для її підвищення необхідно зменшувати темновий зворотний струм, що зрештою вимагає вдосконалення вихідних матеріалів.

Особливе місце серед фотоприймальних пристроїв займають напівпровідникові сполуки типу A^{II}V^{VI}, A^{IV}V^{VI} через їх високу чутливість у ближній ІЧ-області спектру. Так, за рахунок отримання досить високоомних шарів PbS і PbSe на кремнієвих підкладках виготовляють фоторезистивні матриці з

Таблиця

Значення струмової чутливості S і спостережувальної здатності D^* для деяких напівпровідникових тонкоплівкових структур.

Матеріал	Si	GaP	GaN	AlGaN	ZnMgBeSe	ZnSSe
Параметр						
$S, A/B_T$	0,5	0,2	2000	0,025-0,03	0,17	0,12
$D^*, \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} B_T^{-1} \text{см}$	10^{15}	$10^{14}-10^{15}$	–	–	$2 \cdot 10^{12}$	–
Матеріал	ZnSTe	MgZnO	PbSe	PbS	CdS	Тв. розчини, $A^{IV}B^{VI}$
Параметр						
$S, A/B_T$	0,15	1200	–	–	–	–
$D^*, \Gamma_{\text{ц}}^{1/2} B_T^{-1} \text{см}$	–	–	10^{11}	$10^{10}-10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	10^{12}

суцільним чутливим шаром і загальним числом елементів в десятки і сотні тисяч. Спостережувальна здатність D^* цих матеріалів при неглибокому охолодженні близька до теоретичної межі.

3.6. Лазерні гетероструктури. В даний час напівпровідникові лазери на тонкоплівкових гетероструктурах знайшли використання в двох основних сегментах ринку: телекомунікації – 70 % всього ринку – це лазери на підкладках InP на довжинах хвиль близько 1,3 та 1,5 мкм, яким відповідають діапазони прозорості оптоволокон; оптичний запис (зараз це червоні лазери) – тут потрібні короткі довжини хвиль. Крім того, зараз активно займаються ультрафіолетовими лазерами, які теж ефективні для використання в цій області, тому що чим менша довжина хвилі, тим більшу за обсягом інформацію можна записати на компакт-диск. Крім того, за допомогою ІЧ-лазерів, як елементів

напівпровідникових газоаналізаторів, здійснюють хімічний контроль викидів в атмосферу, оскільки в діапазоні довжин хвиль 2-5 мкм лежать смуги поглинання багатьох шкідливих (токсичних) промислових газів.

Для отримання напівпровідникових гетероструктур виділяють дві основні методики і два типи обладнання, які з однаково рівним успіхом використовуються: газофазова епітаксія з металоорганічних сполук (ГФЕ МОС) і молекулярно-променева епітаксія (МПЕ).

Шаруваті гетероструктури є квантово-каскадними лазерами (ККЛ), які складаються з активних областей, в яких відбувається випромінювання фотонів, та інжекційних областей, через які носії пролітають до наступної активної області. Інжекційна область (інжектор) володіє високою тунельною прозорістю для електронів низьких енергій і низькою прозорістю для високих

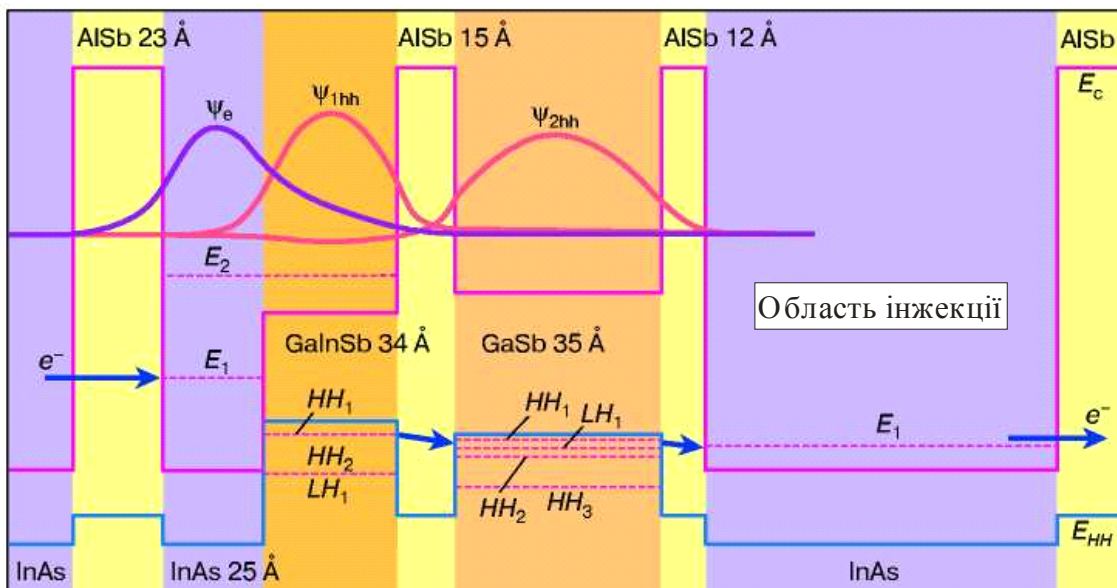


Рис. 13. Зонна діаграма одного періоду структури біполярного каскадного лазера. Відмічені рівні енергії електронів і дірок, а також приведені хвильові функції станів.

енергій. Для створення ІЧ-лазерів на міжзонних переходах використовуються гетероструктури з квантовими ямами і надгратки на основі сполук $(\text{In}, \text{Ga})(\text{As}, \text{Sb})/(\text{Al}, \text{Ga})(\text{As}, \text{Sb})$. Такі структури в даний час найбільш перспективні для створення напівпровідникових лазерів, які випромінюють в діапазоні 3-5 мкм. На рис. 13 показано зонну діаграму одного періоду біполярного каскадного лазера, а також показані рівні енергії електронів і дірок, зверху наведені хвильові функції ψ -станів, які беруть участь в процесі рекомбінації. Електрон з рівня E_1 в квантовій ямі з InAs переходить з виходом фотона на рівень важких дірок HH_1 в сусідній квантовій ямі з GaInSb . Далі з рівня HH_1 електрон тунелюванням переходить на аналогічний рівень HH_1 в третій квантовій ямі з GaSb , з якого потім йде в інжекційну область (інжектор), а далі все це повторюється спочатку.

За допомогою розглянутої структури для довжини хвилі лазерного випромінювання 4 мкм був досягнутий рекордний квантовий вихід вище 200 %. Відзначимо, що в ідеалі величина квантового виходу повинна бути рівною кількості періодів структури (їх було 23) і, отже, вона повинна складати 2300 %. Для такої структури був також встановлений і рекорд по пороговому струму при кімнатній температурі – 130 А/см². Проте такий підхід до створення ІЧ-лазерів не дозволяє одержувати при кімнатній

температурі довші хвилі через переважання процесів оже-рекомбінації над процесами випромінювальної рекомбінації. Із зростанням довжини хвилі посилюються внутрішньозонні поглинання (втрати) і розігрівання носіїв заряду та гратки, які згубно впливають на роботу ІЧ-лазерів.

При використанні шаруватих гетероструктур у напівпровідникових лазерах необхідно враховувати наступні обставини: у шаруватих подвійних гетероструктурах збіг параметрів гратки матеріалів є обов'язковою умовою для реалізації досконалих приладів; необхідний один клас споріднених матеріалів, що формують гетероструктуру, наприклад, GaAs-AlGaAs або кремній-германій; дефекти і дислокаційні кластери призводять до деградації лазерів; дислокації і сітки дислокації перешкоджають роботі приладових структур.

Фреїк Д.М. – директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла, заслужений діяч науки і техніки України, доктор хімічних наук, професор;

Чобанюк В.М. – проректор з навчальної роботи, кандидат фізико-математичних наук, доцент;

Никируй Л.І. – завідувач відділу з питань інтелектуальної власності та інновацій, кандидат фізико-математичних наук.

- [1] A. Lopez-Otero. Hot wall epitaxy // *Thin Solid Films*, **49**, pp. 3-57 (1978).
- [2] Fiche Technique 76008: Проспект фірми Schlumberger (Франція), 4 р. (1976).
- [3] H. Luth. Surface and Interfaces of Solids. *Springer Series in Surface Science 15*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 356 p. (1993).
- [4] J. Hynecsek. Elastoresistance in n- type silicon on sapphire // *J. Appl. Phys.*, **45**(6), p. 2631 (1974).
- [5] L. Sosnowsky, J. Starkiewicz, O. Simpson. Lead Sulfide Photoconductive Cells // *Nature. Lond.*, **159**, pp. 818 (1947).
- [6] *Lead Chalcogenides: Physics and Applications (Optoelectronic Properties of Semiconductors and Superlattices)*, ed. by D. Khokhlov. Taylor & Francis, – 720p. (2002).
- [7] Y.M. Martin, Y.L. Hernandez. Arrays of thermally evaporated PbSe infrared photodetectors deposited on Si substrates operating at room temperature // *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, pp. 1740-1744 (1996).
- [8] А.Д. Фреїк. Атомні дефекти і фізико-хімічні процеси у тонких плівках халькогенідів свинцю (огляд) // *Фізика і хімія твердого тіла*, **4**(2), сс. 191-212 (2002).
- [9] А.Я. Шик. Квантовые нити // *Соросовский Образовательный Журнал*, **5**, сс. 87-92 (1997).
- [10] Б.М. Рувинский, Д.М. Фреик, М.А. Рувинский. Влияние технологических факторов на дефектную подсистему пленок PbSe при парофазной эпитаксии с участием кислорода. *Сб. докладов Международного симпозиума «Тонкие пленки в оптике и электронике»*. ИПЦ «Контраст», Харьков, сс. 125-129 (2002).
- [11] Б.М. Рувинський, Д.М. Фреїк, М.А. Рувинський, М.О. Галушак Вплив випаровування у вакуумі на приповерхневий шар плівок халькогенідів свинцю // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(2), сс. 241-246 (2002).
- [12] Б.М. Рувинський, Д.М. Фреїк, М.А. Рувинський, М.О. Галушак Утворення металічної фази при синтезі плівок халькогенідів свинцю квазірівноважними методами // *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**(1), сс. 153-159 (2001).
- [13] В. Эрлер, Л. Вальтер. *Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами*. Мир, М. 285 с. (1974).
- [14] В.А. Гридчин Пьезосопротивление в структурах КНС n- типа. В кн.: *Электронное и полупроводниковое приборостроение*. Новосибирск, с. 136 (1977).
- [15] В.Б. Уфимцев, Р.Х. Акчурин. *Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии*. Металлургия, М. (1983).

- [16] В.Г. Буткевич, В.Д. Бочков, Е.Р. Глобус. Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных слоев халькогенидов свинца // *Прикладная физика*, **6**, сс. 66-112 (2001).
- [17] В.Е. Борисенко. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века // *Соросовский Образовательный Журнал*, **5**, сс. 100-104 (1997).
- [18] В.И. Белявский. Экситоны в низкоразмерных системах // *Соросовский Образовательный Журнал*, **5**, сс. 93-99 (1997).
- [19] В.И. Фистуль. *Новые материалы. Состояние, проблемы, перспективы*. МИСИС, М. 141с. (1995).
- [20] В.М. Федосюк, М.У. Шелег, О.И. Касютич. Многослойные магнитные структуры // *Зарубежная радиоэлектроника*, **5**, сс. 88-97 (1990).
- [21] В.М. Шперун, Д.М. Фреїк, Р.І. Запыхляк. *Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів*. Івано-Франківськ: Плай, 250 с (2000).
- [22] В.С. Папков, М.В. Цыбульников. *Эпитаксиальные кремниевые слои на диэлектрических подложках и приборы на их основе*. Энергия, М. 88 с. (1979).
- [23] В.Т. Хряпов, В.П. Пономаренко, В.Г. Буткевич, И.И. Таубкин, В.И. Стафеев, С.А. Попов, В.В. Осипов. Пороговые характеристики и матрицы ИК-диапазона // *Оптический журнал*, **12**, сс. 33-34 (1992).
- [24] В.Я. Демиховский. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // *Соросовский Образовательный Журнал*, **5**, сс. 80-86 (1997).
- [25] Г.А. Агранов, А.М. Дакин, В.К. Нестеров, С.К. Новоселов. Особенности получения и обработки ИК-изображений в матричных фотоприемниках с координатной адресацией на основе халькогенидов свинца // *Оптический журнал*, **9**, сс. 53-57 (1996).
- [26] Г.Г. Зегря. Полупроводниковые лазеры среднего инфракрасного диапазона: достижения и проблемы // *Соросовский образовательный журнал*, **7(6)**, сс. 70-74 (2001).
- [27] Г.Г. Йордан. Полупроводниковые тензорезисторные преобразователи общепромышленного назначения. - В кн.: *Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники*. М., с. 3 (1980).
- [28] Г.И. Лурье, В.М. Стучебников, В.В. Хасиков. Использование структур КНС в низкотемпературных датчиках давления. // *Приборы и системы управления*, **9**, с. 20 (1981).
- [29] Д.М. Фреик, Б.М. Рувинский, М.А. Рувинский, М.А. Галушак, О.Я. Довгий. Влияние внутренних напряжений на дефектообразование в пленках теллурида свинца при парофазной эпитаксии // *Журн. физ. Химии*, **76(2)**, сс.362-368 (2002).
- [30] Д.М. Фреик, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. *Физика и технология полупроводниковых пленок*. Вища школа, Львов 152 с (1988).
- [31] Д.М. Фреик. Получение пленок соединений $A^{IV}B^{VI}$ // *Приборы и техника эксперимента*, **5**, сс. 7-17 (1976).
- [32] Д.М. Фреик. Получение пленок соединений с заданными параметрами методами квазизамкнутого объема // *Изв. АН СССР. Неорган. Материалы*, **8(8)**, сс. 1237-1248 (1982).
- [33] Д.М. Фреїк, В.В. Прокопів, М.О. Галушак, М.В. Пиц, Г.Д. Матеїк. *Кристалохімія і термодинаміка дефектів у сполуках $A^{IV}B^{VI}$* . Плай, Івано-Франківськ 164 с. (1999).
- [34] И.А. Случинская. *Основы материаловедения и технологии полупроводников*. М., 376 с. (2002).
- [35] Л. Фельдман, Д. Майер. *Основы анализа поверхности и тонких пленок*. Мир, М., 344 с. (1989).
- [36] Л.Н. Курбатов. Очерк истории приемников инфракрасного излучения на основе халькогенидов свинца // *Вопросы оборонной техники*, Сер.11, **3(146)-4(147)**, сс. 3; (1995); 1-2. сс. 3 (1996).
- [37] Л.С. Палатник, В.К. Сорокин. *Основы плёночного полупроводникового материаловедения*. Энергия, М. 295 с. (1973).
- [38] Л.С. Палатник, В.К. Сорокин. Тонкие пленки полупроводниковых соединений // *Изв. АН СССР. Неорган. материалы*, **5(5)**. сс. 822-852 (1969).
- [39] Л.С. Палатник, М.Я. Фукс, В.М. Косевич. *Механизм образования и структура конденсированных пленок*. Наука, М. 320 с. (1972).
- [40] М. Херман. *Полупроводниковые сверхрешетки*. Пер. с англ. Мир, М. 240 с. (1989).
- [41] М.А. Рувинский, Д.М. Фреик, Б.М. Рувинский, В.В. Прокопив. О механизме образования и зарядовых состояниях собственных атомных дефектов в пленках теллурида свинца // *Письма в ЖТФ*, **26(15)**, сс.6-11 (2000).
- [42] М.Е. Ксенофонтов, М.В. Суровиков. Миниатюрный гетероэпитаксиальный преобразователь давления. - В кн.: *Приборы точной механики и технология приборостроения*. М., **2**. с. 176 (1972).
- [43] М.Е. Ксенофонтов. Упругие элементы тензопреобразователей из сапфира // *Приборы и системы управления*, **3**, с. 61 (1970).
- [44] Микроминиатюрный биомедицинский тензопреобразователь / А.Г. Алекса, В.Н. Зимин В.Н. Корнеев и др. *Электронная техника*. Сер. 11. М.: ЦНИИ «Электроника», **2(6)**, с. 43 (1978).

- [45] *Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры*: Пер. с англ. / Под ред. Ж.И. Алферова, Ю.В. Шмарцева. Мир, М. (1989).
- [46] Н.Н. Берченко, К.И. Гейман, А.В. Матвеев. Методы получения р-п переходов и барьеров Шоттки в халькогенидах свинца и твердых растворов на их основе // *Зарубежная электронная техника*, **14**, сс. 3-70 (1977).
- [47] Н.Х. Абрикосов, Л.Е. Шелимова. *Полупроводниковые материалы на основе соединений AIV BVI*. Наука, М. 196 с. (1975).
- [48] Пат. 4127840 (США). Solid state force transducer / J.H. House. Опубл. 28.11.1978.
- [49] *Плёночные термоэлементы: Физика и применение* / Под ред. Лидоренка Н.С. Наука, М. 232 с. (1985).
- [50] *Полупроводниковые тензодатчики* / Под ред. М. Дина. Энергия, М. - Л. 213 с. (1985).
- [51] Р. Суху. *Магнитные тонкие пленки*. Мир, М. 422 с. (1967).
- [52] Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. *Полупроводниковая оптоэлектроника*. Мир, М. 432с. (1976).
- [53] *Физическая энциклопедия*. / Гл. Ред. А.М. Прохоров. Т.2. Советская энциклопедия, М. 704с. (1990).
- [54] Ю.А. Владимиров. Лазерная терапия: Настоящее и будущее // *Соросовский Образовательный Журнал*. **12**, сс. 2-8 (1999).

D.M. Freik, V.M. Chobanyuk, L.I. Nykyruy

Semiconductor Thin Films – Modern Problems (Review)

*Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail:freik@pu.if.ua*

It is considered and analysed the basic aspects of perspective direction of microelectronics – thin film semiconductor material science. The special attention is spared to the applied questions: the basic methods of growing and research of structural properties, accented attention on physical and chemical properties, the most essential directions of practical application of thin.