

Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки.

Хрестоматія.

Назва дисципліни: Суб- і нанометрові технології ВІС.

Викладач: д.т.н., професор Новосядлий Степан Петрович

Список використаних джерел:

1. Новосядлий С.П., Терлецький А.І. Діагностика субмікронних структур ВІС. Монографія - Івано-Франківськ: Сімик - 2016 - 480 с.
2. Новосядлий С.П. Високоєфективні структури ФБП. Монографія - Івано-Франківськ: Плай - 2013 - 320с.
3. Аваев Н.А., Наумов Ю.Е., Фролкин В.Т. Основы микроэлектроники. М: Радио и связь - 1991 - 288 с.
4. Л.З. Бобровников. Електроника. СПб - Питер - 2004 - 560 с.
5. Новосядлий С. П Кіндрат Т. П. Варізонні напівпровідники та їхнє застосування // Технологический аудит и резервы производства — № 6/5(14), 2013, с 24-26.

Розділ 1. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Розвиток сучасної техніки та зміна ситуації зі світовими запасами сировини ставить перед дослідниками матеріалів дедалі складніші завдання. Сучасна електронна промисловість, авіаційна та космічна техніка, з одного боку, вимагають розроблення значної кількості різноманітних матеріалів з новими властивостями, а з іншого – отримання матеріалів з недефіцитної та недорогої сировини замість уже розробленої продукції з дорогих матеріалів. Тому проблема заміни матеріалів – це, насамперед, економія благородних металів, зокрема золота, срібла, палладію, платини, а також міді, кобальту, нікелю, марганцю, молібдену, олова та деяких інших.

В існуючій на теперішній час номенклатурі матеріалів розроблення і виробництво нових видів продукції можливі тільки за умови високих матеріальних затрат та пов'язані зі значними технічними труднощами. Це, в свою чергу, відображається на складності методів дослідження матеріалів, стимулює вдосконалення та прискорене розроблення нових способів аналізу, без яких не можуть обходитися сучасні дослідження матеріалів. Крім того, сучасні високоякісні матеріали можна отримувати тільки за допомогою достатньо складних технологічних процесів, а точне дотримання технологічних параметрів передбачає високу чистоту цих матеріалів. Для виявлення причин виникнення дефектів у матеріалах часто необхідно використовувати надзвичайно чутливі методи дослідження, знання можливостей та вміння застосування яких є принциповою умовою виготовлення високоякісної та надійної продукції. Тому на підприємствах електронної промисловості обов'язково здійснюється вхідний контроль матеріалів і комплектуючих виробів за допомогою високоефективних сучасних методів електрофізичної метрології та з широким застосуванням комп'ютерної техніки.

1.1. Проблема систематизації властивостей матеріалів

Методи дослідження, які використовують для отримання характеристик матеріалів, базуються на взаємодії вимірювального зонда та об'єкта. Якщо розглядати дію досліджуваного взірця як єдиного цілого на вимірювальний зонд, то можна зробити висновки щодо макроскопічних властивостей речовини. Тим більше, ці властивості визначаються внутрішніми особливостями матеріалу, тобто його структурою та будовою. Власне поняття структури та будови матеріалів на теперішній час не має чіткого визначення, а в ряді літературних джерел їм надано різного тлумачення. В зв'язку з цим ми не наводимо конкретні визначення цих двох дуже подібних термінів. Однак з практичною метою слід вказати, що під структурою слід розуміти атомарну будову речовини, в тому числі тип, кількість і розподіл дефектів кристалічної ґратки, таких як вакансії, домішкові атоми, дислокації та межі зерен, а під будовою – кількість фаз у матеріалі, взаємне розміщення зерен в об'ємі та їхню орієнтацію.

Крім того, слід відрізняти структуру та будову матеріалу від структури

напівпровідникового приладу чи інтегральної схеми, яка означає спосіб поєднання значної кількості різноманітних функціональних шарів, виготовлених з використанням літографії та плазмохімічного (хімічного) травлення. Однак ми розуміємо, що не завжди можна чітко розмежувати всі ці терміни, наприклад, епітаксійну структуру надгратки, виготовлену за кремнієвою чи арсенідгалієвою технологіями, можна розглядати в якості як напівпровідникового приладу, так і зовсім нового матеріалу, що характеризується розподілом фаз, які його утворюють, та власними електрофізичними параметрами.

Досліджуючи структуру та будову матеріалу насамперед слід розглядати утворення, які починаються в місцях локальної зміни структури і закінчуються виникненням нової фази. Відповідно до цього розрізняють мікро- та макроскопічну структури. Розглянемо особливості кожної з них, виходячи з їхніх термодинамічних властивостей.

Макроскопічні властивості речовини характеризують поведінку матеріалів під дією зовнішніх впливів. Якщо розглядати конкретний матеріал як термодинамічну систему в рамках зворотної термодинаміки, можна описати стан цього матеріалу та визначити його властивості в єдиній системі макроскопічних параметрів. Оскільки термодинамічні закони універсальні, то така система є незамінним засобом, який використовують для дослідження та розроблення нових матеріалів електронної техніки. Після визначення вільної ентальпії (або потенціалу Гібса) можна перейти до параметрів внутрішнього стану системи і використовувати похідні ентальпії за зовнішніми впливовими чинниками. До них належать температура T , тиск P , анізотропні зовнішні механічні навантаження σ , концентрація C , а також електричне E та магнітне H поля. Такі впливові чинники позначаються в термодинаміці як варіативні (змінні) параметри стану. Параметри внутрішнього стану – об'єм V , ентропія S , електрична P і магнітна M поляризації визначаються через ентальпію згідно з

$$\frac{\partial G}{\partial T} = -S; \quad \frac{\partial G}{\partial P} = V; \quad \frac{\partial G}{\partial E} = -VP; \quad \frac{\partial G}{\partial H} = -VM. \quad (1.1)$$

Похідні від параметрів внутрішнього стану дають низку рівноцінних характеристик матеріалу, до яких належать:

– теплоємність	$S = \frac{T}{m} \frac{dS}{dT};$
– температурний коефіцієнт лінійного розширення	$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT};$
– стискуваність	$\aleph = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP};$
– магнітна проникність	$\mu_0 \aleph_H = \frac{dM}{dH};$
– діелектрична проникність	$\epsilon_0 \aleph_I = \frac{dP}{dE};$

– магнітострикція

$$\omega_H = \frac{1}{V} \frac{dV}{dH};$$

– електрострикція

$$\omega_E = \frac{1}{V} \frac{dV}{dE};$$

– температурна залежність магнітної поляризації

$$M_T' = \frac{dM}{dT};$$

– температурна залежність електричної поляризації

$$P_T' = \frac{dP}{dT}.$$

Така система характеристик у вигляді другої похідної потенціалу Гібса більш вагома порівняно з набором параметрів, які визначаються першою похідною. Її можна застосовувати до опису таких властивостей матеріалу, як теплоємність, термічне розширення, пружність, діелектрична та магнітна проникність, п'єзоефект, магнітострикція, температурна залежність електричної та магнітної поляризації, в тому числі залежність магнітної поляризації від сили електричного поля. Крім того, послідовність отримання других

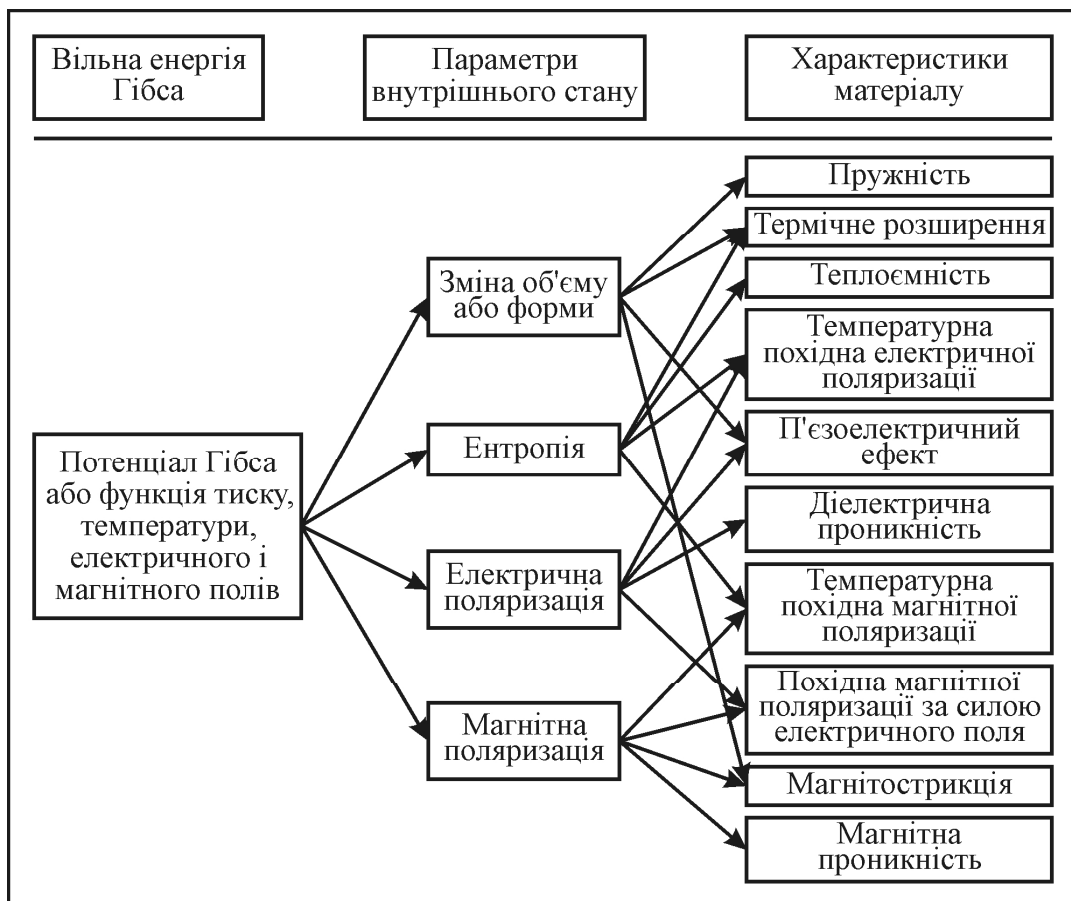


Рис. 1.1. Взаємозв'язок між вільною енергією Гібса, параметрами та характеристиками матеріалу

змішаних похідних від параметрів стану може бути довільна, завдяки чому зменшується кількість цих параметрів, а їхня інформативність стає значно вищою. Схему, яка відображає такий взаємозв'язок характеристик, демонструє рис. 1.1. Інші аналогічні характеристики матеріалу можна отримати подібним чином з використанням вказаних вище параметрів, наприклад, швидкість поширення звуку визначається за параметрами пружності та щільності.

За допомогою незворотної термодинаміки можна визначити додаткові властивості матеріалів, які об'єднуються в комплекс так званого транспортного феномену і подаються у формально єдиній термодинамічній системі. До них належать внутрішнє тертя чи опір, електрична теплопровідність, а також термоелектрорушійна сила, ефект Холла (в т.ч. квантовий) та інші ефекти взаємодії.

Електрофізичний параметр вказаного типу описує певні властивості матеріалу тільки в загальному вигляді та далеко не повністю, до того ж сам параметр може залежати від ряду інших впливів:

- параметр залежить від місця локалізації, якщо матеріал має помітну неоднорідність (наявність зв'язуючих речовин);

- параметр залежить від напряму вимірювання в анізотропному матеріалі (наявність монокристалу чи текстури плівки);

- параметр залежить від деякого зовнішнього впливу, якщо існує нелінійний зв'язок між ним і параметром внутрішнього стану. У цьому разі слід використовувати третю або вищу похідну потенціалу Гібса (так звані параметри вищих порядків);

- параметр залежить від виду вимірювань, що проявляється в отриманні різних його значень за умови перебігу незворотних процесів; такі явища називаються гістерезисом. Їх можна описати за допомогою додаткових параметрів, таких як енергія втрат, що припадає на цикл гістерезису, коерцитивна сила, залишкова магнітна чи електрична індукції;

- параметр залежить від швидкості вимірювання за наявності внутрішньої механічної релаксації чи резонансу (за відсутності пружності). У разі синусоїдної зміни зовнішнього впливу такий параметр можна описувати за допомогою комплексної амплітуди;

- параметр залежить від умов витримування взірця (часу, температури) після деякого оброблення внаслідок старіння чи активації домішки, оскільки таке оброблення призвело до нерівноважного стану (наприклад, старіння металу після холодної деформації штампуванням чи зварюванням);

- параметр залежить від інших чинників впливу, сталих для зазначених вище похідних (наприклад, від температурної залежності магнітної проникності). Залежність може бути нерівномірною (неперервною) у вигляді зламу чи стрибка за типових для матеріалу значень цих зовнішніх побічних умов, наприклад, за температур фазових переходів. Величина стрибка параметру внутрішнього стану є додатковою характеристикою матеріалу (наприклад, ентропія перетворення).

Наведені вище зовнішні впливи або їхні комбінації, наприклад, хвильові впливи всіх типів (світлові, лазерні, електромагнітні, НВЧ) можуть

викликати на поверхні матеріалу такі явища, як відбивання, заломлення та поляризацію. Ці явища не зумовлені жодними особливими властивостями матеріалів, а є лишень наслідком особливих умов, які виникають на стику (межі розділу) двох середовищ.

Однак більшість макроскопічних властивостей, віднесених до поверхні матеріалу, не можна пояснити описаними вище явищами. Це стосується змочування поверхні, електролітичного перенесення матеріалу, зварювання матеріалів, нанесення гальванічних шарів, корозії чи електрокорозії провідників у структурах ВІС, пасивації тощо. Для формального визначення відповідних параметрів необхідно знати інші чинники впливу, а саме: сили адгезії (зчеплення), розчинність (сегрегацію), хімічні концентрації, активність чи активацію тощо. Їх описують за допомогою так званих хімічних потенціалів, які формально розглядають в якості зовнішніх чинників впливу. Шляхом відповідного розширення потенціалу Гібса можна визначити параметри матеріалу через параметри поверхні.

Таким чином, термодинамічний аналіз дає можливість встановлювати залежності між макроскопічними властивостями матеріалу і чинниками, що впливають на ці властивості, та оцінювати їх кількісно. Тому він є важливим засобом розробки нових матеріалів для суб- чи наномікронної технології формування структур ВІС.

1.2. Структурні чинники, які впливають на макроскопічні властивості матеріалів електронної техніки

Макроскопічні властивості матеріалу залежать від внутрішніх особливостей речовини, тобто від його структури та будови, окремий розгляд яких є недоцільним. Структуру і будову необхідно вивчати взаємозв'язаними, оскільки тільки в цьому випадку можна визначати відповідні макроскопічні параметри матеріалу з урахуванням зовнішніх впливів, які зумовлені дією різноманітних технологічних чинників у процесі виготовлення самого матеріалу чи формування на його основі функціонального шару структури ВІС. У металургії електронних матеріалів такими чинниками є, наприклад, масові частки компонентів та їхня чистота, тобто хімічний склад речовини, температура плавлення, температура гарячого прокатування, зусилля деформації, швидкість витяжки, температура та швидкість охолодження на фінішному циклі оброблення, тривалість і атмосфера термічного оброблення чи відпалу.

Загалом структура матеріалу визначається його дефектністю. Оскільки не існує ідеальних кристалів, то реальні (Si, GaAs) завжди містять дефекти структури. Вони поділяються на дефекти нульового розміру (вакансії, домішкові атоми), одновимірні (дислокації), двовимірні (дефекти пакування, границі зерен і фаз) та тривимірні дефекти (ділянки точкових дефектів, пори, кластери, преципітати). В багатофазних матеріалах, якими є, наприклад, сплави, велику роль відіграє розподіл різних типів домішкових атомів у ґратці (хімічний порядок), їхня розчинність, температурна стабільність розподілу. Якщо структурні елементи мають електричний чи магнітний моменти, то часто вирішального значення набуває їхня взаємна орієнтація,

яка визначає анізотропність матеріалу.

У поняття макроструктури кристалу ВІС чи твердого тіла в якості геометричного аспекту входить взаємне розміщення функціональних шарів, захищених контактів, епітаксійних шарів (Si чи GaAs), а також зображення поверхні окремих функціональних шарів; мікрошліфів, які визначають зернистість сплавів (наприклад алюмінієвих на кшталт АКГо-1-1); поверхні контактних площадок під розварювання внутрішніх перемичок; структури термокомпресійних з'єднань тощо.

Названі види макроструктур подані на рис. 1.2 – 1.6. Рис. 1.2 ілюструє процес формування захищеного контакту, сформованого через міжшарову ізоляцію борофосфоросилікатного скла з використанням бар'єрного шару TiN до поверхні кремнію при багаторівневому полікремнієвому (поліцидному) розведенню з'єднань структури ВІС.

Рис. 1.3 подає поверхню епітаксійних арсенідгалієвих структур, зображення яких отримане оптичним методом із контрастом за Номарським: а) матовість 4 відн. од., б) матовість 7 відн. од., в) матовість 30 відн. од.; та в режимі вторинних електронів на растровому електронному мікроскопі JSM-840 (г) – матовість 9 відн. од.

Рис. 1.4 демонструє структуру алюмінієвого сплаву (алюміній-кремній-гальмій АКГо-1-1), який використовують для виготовлення мішеней магнетронного розпилення промислових устаткувань "Ораторія" та "Магна".

Рис. 1.5 ілюструє структуру осади паладію на контактні алюмінієві площадки під розварювання безкорпусного електронного чіпа (павучка).

Рис. 1.6 демонструє корозійне руйнування контакту золото-алюміній в термокомпресійних з'єднаннях внутрішніх виводів до структур ВІС.

У поняття мікроструктури також входять енергетичні взаємозв'язки (тип зв'язку, сили взаємодії), які утворюють електронну структуру. Саме електронна структура матеріалу визначає його електричні та магнітні властивості. Для їх вивчення, аналізу та вимірювання параметрів використовують тестові структури.

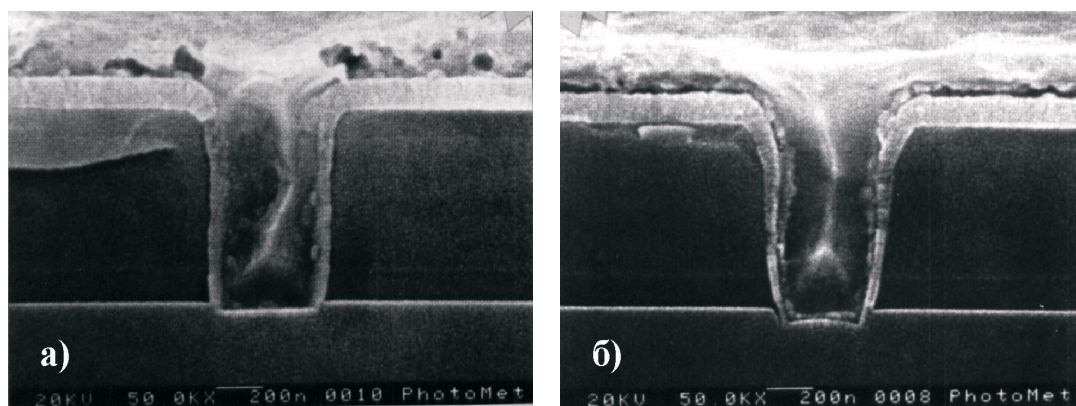


Рис. 1.2. Формування захищеного контакту до кремнію: а) TiN + АКГо-1-1; б) TiN + TiSi₂ (поліцид)

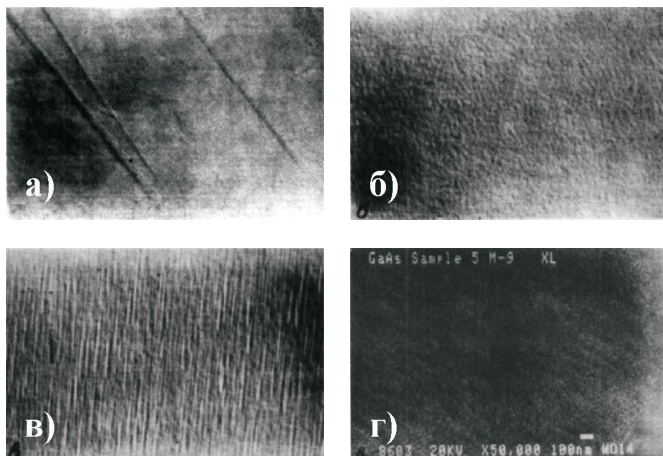


Рис. 1.3. Зображення поверхні епітаксійного GaAs, отримані оптичним методом (а, б, в), та на растровому електронному мікроскопі (г). Матовість (відн. од.): а) 4; б) 7; в) 30; г) 9

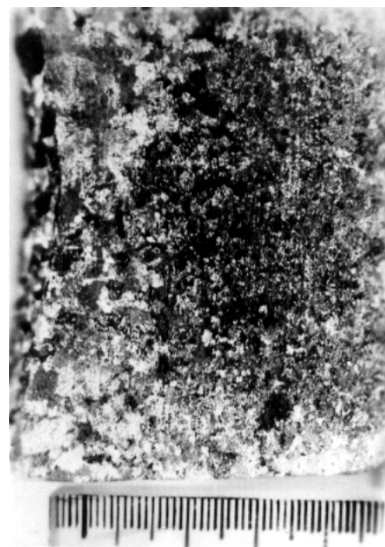


Рис. 1.4. Структура алюмінієвого сплаву АКГо-1-1

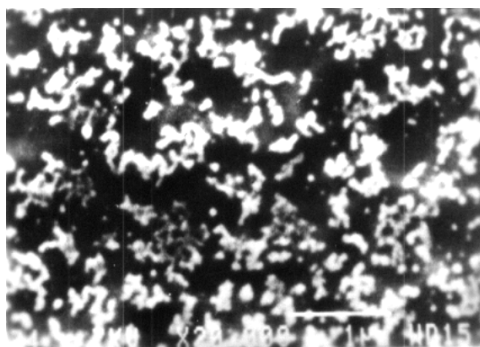


Рис. 1.5. Плівка паладію на алюмінієвому контакті (збільшення 10^3)

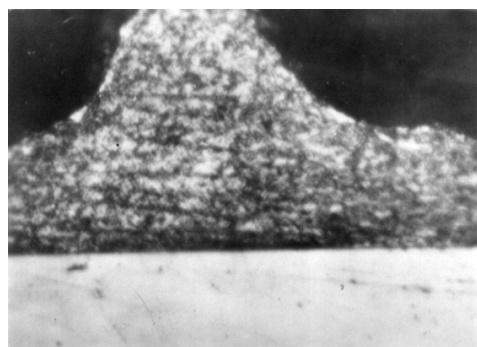


Рис. 1.6. Утворення інтерметалічного з'єднання Au-Al після термовідпалу (збільшення 10^3)

1.3. Структурні чинники, які впливають на макроскопічні властивості матеріалів

На рис. 1.7 схематично подана залежність макроскопічних властивостей матеріалів від умов їх виготовлення. Методи дослідження параметрів, що належать до обох гілок на рис. 1.7, можна розглядати сумісно, тобто вони являють собою комплекс методів, який можна охарактеризувати як аналітичний комплекс. Крім того, сучасний аналіз обов'язково передбачає аналіз чистих елементів. Він не обмежується тільки визначенням вмісту цих елементів, але й враховує їхній мікророзподіл та процеси взаємодії.

Щодо мікрровластивостей, то обидва підходи вже нероздільні, — їх називають структурним аналізом. В табл. 1.1 вказано типові для основних структурних варіантів методи дослідження. Виявляється, що вже відносно

невеликий набір методів і приладів аналітичного дослідження є достатнім для дослідження структур більшості матеріалів.

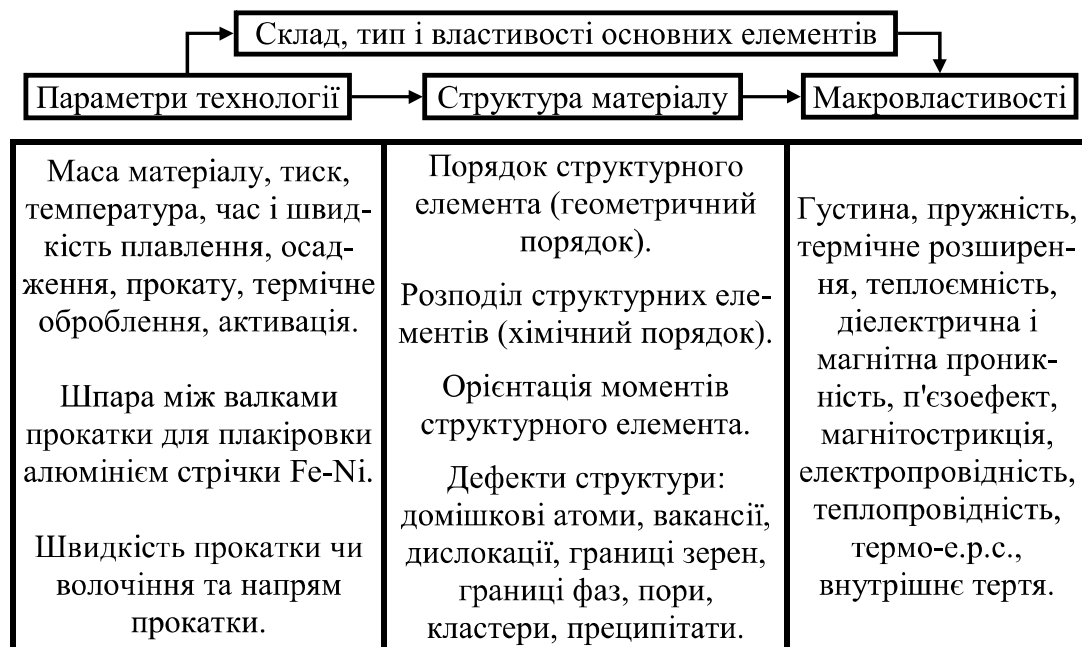


Рис. 1.7. Залежність макроскопічних властивостей матеріалу від технологічних чинників їх виготовлення

Розглянемо тепер основні положення сучасної теорії електронної структури, яку використовують для опису мікроструктури матеріалів.

Електрон в атомі однозначно характеризується за допомогою квантових чисел n , l , m_l та m_s . Згідно з принципом Паулі в одному атомі не може бути двох електронів, які мали би всі чотири однакові квантові числа. Головне квантове число n може набувати довільних натуральних значень 1, 2, 3, 4, Воно описує електронні орбіти K, L, M, N, O, ... оболонок атома відповідно. Кожна орбіта може вміщувати $2n^2$ електронів, тобто кожному головному квантовому числу відповідає $2n^2$ енергетичних станів електрона (n^2 підрівнів). Відповідно $2n^2$ електронів розміщуються на n рівнях, які позначаються індексами s , p , d , f , і т. д. Рівням відповідають орбітальні квантові числа $l = 0, 1, 2, 3, \dots (n-1)$. Кожний рівень може містити таку кількість електронів, яка вдвічі більша орбітального квантового числа. Таким чином, максимально можлива кількість електронів на рівнях s , p , d і f становить 1·2, 3·2, 5·2 та 7·2 відповідно. Електрони на рівнях s , p , d і f відрізняються магнітними квантовими числами m_l і спіновими квантовими числами m_s ; при цьому $m_l = -l, \dots, 0, \dots, +l$, а $m_s = \pm 1/2$. Це призводить до того, що кожний рівень розщеплюється на $2 \cdot (l + 1)$ підрівнів. Іншими словами, наприклад, рівню $l = 1$ (рівень p) відповідає три підрівні $m_l = -1, 0, +1$. На кожному з них може перебувати до двох електронів зі спінами $m_s = -1/2$ і $m_s = +1/2$. Тобто рівень p вміщує максимум шість електронів.

Таблиця. 1.1. Основні структурні особливості твердих тіл і типові методи їх дослідження

Розмірна характеристика	Структурна особливість	Аналітична проблема	Метод дослідження
1	2	3	4
Три-вимірна (3D)	Макро-дефекти	Дефекти осідання, тріщини, макровключення, дефекти нашарування	Магнітний, магнітно-індуктивний та ультразвуковий контроль; рентгено-та γ -дефектоскопія
		Пори, газові пухирі.	Ультразвуковий контроль, еліпсометрія
	Фази включення	Склад (фазовий аналіз)	Електронно-променевий мікроаналіз; мас-спектрометрія вторинних іонів; Оже-електронна спектроскопія; дифракція рентгенівських променів; рентгенолюмінесцентний аналіз, мессбауерівська спектроскопія; еліпсометрія
		Структура та параметри ґратки	Дифракція рентгенівських променів; трансмісійна електронна мікроскопія; дифракція нейтронів
		Об'ємні долі фаз	Кількісна металографія; кількісний структурний аналіз за допомогою мікрозонда; дифракція рентгенівських променів з вимірюванням інтенсивності; мессбауерівська спектроскопія; дифракція нейтронів
		Розмір зерна та включень, об'ємний розподіл	Кількісна металографія; кількісний структурний аналіз за допомогою електронно-променевого зонда
		Текстури	Дифракція рентгенівських променів з текстур-гоніометром; мессбауерівська спектроскопія; дифракція нейтронів
	Розподіл елементів	Ліквіація	Електронно-променевий мікроаналіз; Оже-електронна спектроскопія; мас-спектрометрія вторинних іонів; зворотне резерфордівське розсіювання
		Збагачення вздовж границь зерен	Мас-спектрометрія вторинних іонів; Оже-електронна спектроскопія

Продовження таблиці 1.1.

1	2	3	4
		Дифузійні зони	Електронно-променевий мікроаналіз; мас-спектроскопія вторинних іонів; Оже-електронна спектроскопія
		Розшарування надструктури	Дифракція рентгенівських променів; мессбауерівська спектроскопія; іонне відбивання; трансмісійна електронна мікроскопія
	Виділення	Ідентифікація складу	Електронно-променевий мікроаналіз; мас-спектроскопія вторинних іонів; трансмісійна електронна мікроскопія; дифракція рентгенівських променів; мессбауерівська спектроскопія
		Структура ґратки	Трансмісійна електронна мікроскопія; дифракція рентгенівських променів
		Об'ємна доля, величина, розподіл	Відбивна електронна мікроскопія; дифракція рентгенівських променів; рентгенівське малокутове розсіювання; кількісна металографія; мессбауерівська спектроскопія
	Магнітні структури	Магнітні структури та явища	Дифракція нейтронів; мессбауерівська спектроскопія
Дво-вимірні (2D)	Границі зерен і фаз	Питома поверхня зерен і границь фаз	Кількісна металографія
		Склад	Мас-спектроскопія вторинних іонів; Оже-електронна спектроскопія; фотоелектронна спектроскопія
		Структура	Трансмісійна електронна мікроскопія
	Зовнішня поверхня, оксидні шари.	Глибина нерівностей (клас чистоти)	Інтерференційна спектроскопія, еліпсометрія
		Топографія	Скануюча електронна мікроскопія
		Склад в адсорбованих шарах	Мас-спектроскопія вторинних іонів; Оже-електронна спектроскопія; фотоелектронна спектроскопія
		Структура	Дифракція електронів
	Дефекти пакування	Зображення	Трансмісійна електронна мікроскопія
	Феромагнітні зони	Зображення та границі Блоха	Поляризаційна мікроскопія; скануюча електронна мікроскопія

Продовження таблиці 1.1.

1	2	3	4
Одно- вимірна (1D)	Дислокації	Зображення	Травлення, трансмісійна електронна мікроскопія; рентгенівська топографія
		Густина дислокації	Дифракція рентгенівських променів; трансмісійна електронна мікроскопія
Нульова (0D)	Вакансії	Концентрація та розподіл вакансій	Дифракція іонів; позитронна анігіляція
	Домішкові атоми	Концентрація, розподіл домішкових атомів впровадження та заміщення, кластерні зони	Дифракція іонів і нейтронів; автоелектронна та автоіонна мікроскопія; позитронна анігіляція; зондовий мікроаналіз; атомно-силова мікроскопія

Електронна будова елемента описується головним квантовим числом n , допоміжним квантовим числом $l(s, p, d, f)$, а також кількістю електронів, які перебувають на цих рівнях. Для кисню, наприклад, це виглядає так: $1s^2 2s^2 2p^4$, тобто орбіта К з $n = 1$ і $l = 0$ (рівень s) заповнюється двома електронами. Орбіта L ($n = 2$) має вже два підрівні з $l = 0$ (рівень s) і $l = 1$ (рівень p). На рівні s є два електрони. Рівень p містить 4 електрони і може приймати ще два електрони. Якщо рівень p доповнити одним електроном, то отримуємо наступний елемент періодичної системи – фтор, а якщо двома електронами – неон. Неон має повністю заповнену орбіту L з електронною будовою (структурою) $1s^2 2s^2 2p^6$. В наступному (після неону) елементі періодичної системи (натрій) починається заповнення нової орбіти M: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$.

Орбітальний l і спіновий s моменти – вектори, які описуються власними компонентами l та s відносно осі квантування (наприклад, напрямку зовнішнього магнітного поля). В результаті взаємодії орбітального та спінового моментів отримуємо векторну суму, яка дає сумарний момент J . Тут можливі такі два типи зв'язку:

– **Зв'язки L - S (зв'язки Рассела-Саундерса)**. Такий зв'язок між електронами встановлюється у більшості атомів. Взаємодія моментів l_i і s_i між собою є значною, однак не перевищує енергію електростатичного відштовхування електронів в електронній оболонці. Тому компонент l_i додають до сумарного спінового моменту L , а компонент s_i – до сумарного спінового моменту S . Векторна сума моментів L і S в результаті дає момент J . Тобто,

$$L = \sum_i l_i; \quad S = \sum_i s_i; \quad J = L + S. \quad (1.1)$$

– **Зв'язок j - j** . Взаємодія моментів l_i і s_i є настільки великою, що енергія спін-орбітальної взаємодії перевищує енергію електростатичного відштовхування електронів в електронній оболонці, тому ці компоненти додають до результуючого моменту j_i . Отримані моменти j_i , в свою чергу, також

векторно додають, в результаті чого отримуємо результуючий момент J :

$$J = \sum_i j_i = \sum_i l_i + s_i. \quad (1.2)$$

Оскільки для зв'язку $j-j$ вже не можна визначити моменти L і S , то відпадає необхідність проводити розділення за енергетичними рівнями S, P, D і F, яке описано нижче.

У спектроскопії прийнято описувати стан атома спеціальною символікою енергетичних рівнів. Вона базується на головному квантовому числі n , сумарному орбітальному моменті L , сумарному спіновому моменті S та сумарному моменті J . Енергетичний стан з квантовим числом сумарного орбітального моменту $L = 0, 1, 2$ і 3 позначають як окремі стани S, P, D і F. При визначенні символіки енергетичних рівнів необхідно звернути увагу на те, що для заповнених рівнів відповідні їм сумарні орбітальний L та спіновий S моменти вже враховані в сумарному моменті J атома, тому для цих рівнів $L = S = 0$. Узагальнене позначення енергетичного стану має вигляд ^{2s+1}L . При цьому замість L використовується відповідний символ S, P, D, F. Величину $2s + 1$ називають мультиплетністю, яка показує кратність виродження рівнів атома. Для системи енергетичних рівнів атома важлива комбінація всіх можливих значень L і S . Тоді схема енергетичних рівнів складається з різних систем, кожна з яких належить до стану однієї і тієї ж мультиплетності.

Основні стани атома Na характеризують символом $3^2s_{1/2}$. Загальний електронний стан атома Na визначають як $1s^22s^22p^63s^1$. Орбіти K і L заповнені, тому не дають жодного внеску до моментів L і S . Орбіта M в основному стані містить 1 електрон на рівні s . Рівню s відповідає $l = 0$, а спін одного електрона становить $s = 1/2$. В результаті отримуємо $J = L + S = 1/2$, а відповідна мультиплетність становить $2s + 1 = 2 \cdot (1/2) + 1 = 2$. Якщо прийняти електронний стан для атома F як $1s^22s^22p^5$, то йому відповідають 3 можливі енергетичні стани. Рівень $1s^2$ вміщує 2 електрони з орбітальним моментом $l = 0$ і спіном $s = \pm 1/2$, а рівень $2s^2$ вміщує також 2 електрони, однак з орбітальним моментом $l = 1$ і спіном $s = \pm 1/2$. Рівень p має 5 електронів із шести максимальних. Це означає, що 4 електрони компенсують свої спінові моменти, тому тут слід враховувати тільки п'ятий електрон з $l = 1$ і $s = 1/2$. Тепер врахуємо всі можливі величини L , S і J , які дозволяють описати імовірні енергетичні стани:

$$\begin{aligned} l &= 0, & s &= \pm 1/2; & l &= 1, & s &= \pm 1/2, \\ L &= \sum_i l_i; & L &= 1; \\ S &= \sum_i s_i; & S &= 0, & S &= 1 \\ J &= L + S; & J &= 0, & J &= 1, & J &= 2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Векторну діаграму зазначених моментів атома фтору ілюструє рис. 1.8. Із такої векторної суми легко визначають дві мультиплетності $2s+1$: $2 \cdot 0 + 1 = 1$ та $2 \cdot 1 + 1 = 3$. Для $L = 1$ отримуємо стан P з мультиплетністю 1 або 3. Для першого випадку $J = 1$, стан позначають символом 2^1P_1 , а для другого

(мультиплетність 3) $J = 0, 1, 2$ – відповідні стани 2^3P_0 , 2^3P_1 та 2^3P_2 . Такі стани електронної структури використовують для пояснення фізичних процесів рентгеноелектронної та фотоелектронної емісій. Таким чином, мікро-структура значною мірою визначає параметри та характеристики макро-структури матеріалів.

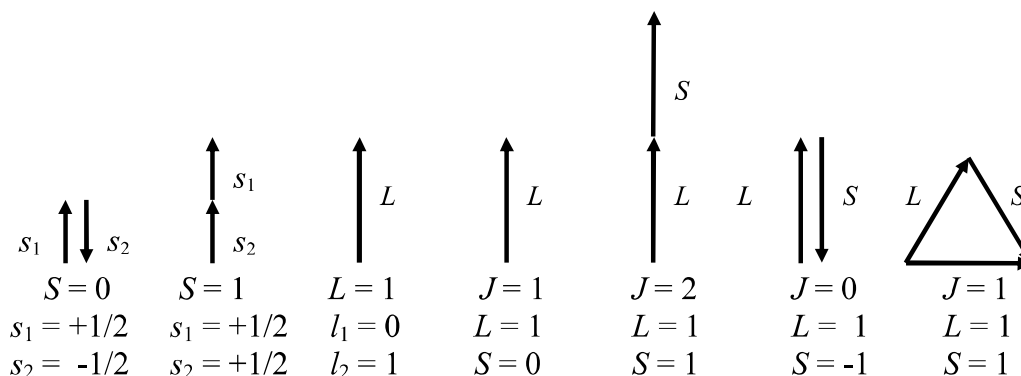


Рис. 1.8. Векторна діаграма моментів для атома фтору

На закінчення цього розділу розглянемо перехід від електронних станів в ізолюваному атомі до електронних станів у твердому тілі – до зонної моделі (рис. 1.9). Електрони в ізолюваному ($r = \infty$) атомі відрізняються точними енергетичними станами, які подають у вигляді схеми енергетичних рівнів або схеми термів. У міру зближення атомів хвильові функції їхніх зовнішніх

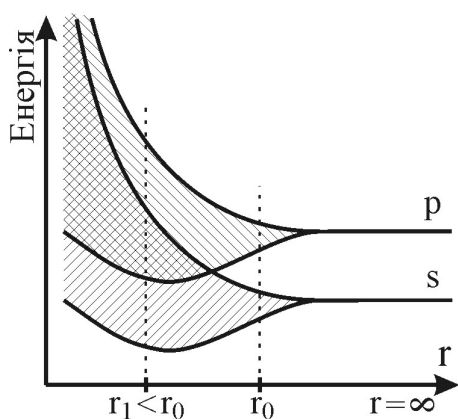


Рис. 1.9. Схема розщеплення енергетичних рівнів ізолюваних атомів в процесі їхнього зближення та утворення твердого тіла. Тут $r = \infty$ відповідає ізолюваним атомам, r_0 – існують дві енергетичні зони, розділені забороненою зоною, r_1 – ці зони перекриваються, утворюючи одну енергетичну зону

електронних оболонок починають перекриватися, тобто атоми взаємодіють. Тепер кожен з атомів вже не можна розглядати як окремий – вони утворюють систему, до якої також застосовний принцип Паулі. Це означає, що електрони, які перебували на однакових енергетичних станах ізолюваних атомів, вже не можуть мати однакову енергію в системі взаємодіючих атомів. Якщо система містить N атомів, то в результаті їхньої взаємодії енергетичні рівні атома N -кратно розщеплюються. В результаті цього утворюються так звані енергетичні зони, кожна з яких складається з квазінеперервного ряду N енергетичних станів.

Чим вищій оболонці належить електрон, тим сильніше розщеплюється відповідний йому енергетичний рівень. Внутрішні рівні менше піддаються розщепленню або ж таке явище прак-

тично відсутнє, оскільки відповідні їм електрони атома екрануються від дії інших атомів електронними оболонками, розташованими вище. Ширина зон пропорційна силі зв'язку та зростає зі зменшенням відстані між атомами.

Розщеплення енергетичних рівнів може бути настільки сильним, що сусідні енергетичні зони накладатимуться одна на одну. У зв'язку з цим у твердому тілі існує ряд дозволених енергетичних зон. Вони відділені одна від одної енергетичними інтервалами, в яких не можуть перебувати електрони. Такі інтервали називають забороненими зонами. Кількість енергетичних станів, яка припадає на одиничний енергетичний інтервал у визначеній зоні називається густиною (щільністю) енергетичних станів твердого тіла $g(E)$ (рис. 1.10).

Густина енергетичних станів можна визначити за допомогою спектрографічних методів дослідження, зокрема фотоелектронної спектроскопії, рентгеноспектроскопії та Оже-електронної спектроскопії, які будуть детально розглянуті в наступних розділах.

Заповнення енергетичних зон електронами починається з найнижчого енергетичного рівня. Тому в твердому тілі існують енергетичні зони, цілком заповнені електронами, та зони, які заповнені частково. Енергію рівня, до якого частково заповнена енергетична зона (за температури $T = 0$ К), називають енергією Фермі (рис. 1.10) або рівнем Фермі. За будь-яких інших температур заповнення рівнів поблизу рівня Фермі внаслідок термічних коливань енергії електронів має імовірнісний характер та описується розподілом Фермі-Дірака.

Якщо вільний атом речовини має парну кількість електронів, тобто на всіх його заповнених енергетичних рівнях міститься по два спарених електрони, то під час утворення твердого тіла з N таких атомів кожен із рівнів N -кратно розщеплюється в зону з N -підрівнями, яка містить $2N$ електронів. Це означає, що всі підрівні в зоні заняті електронами, тобто зона

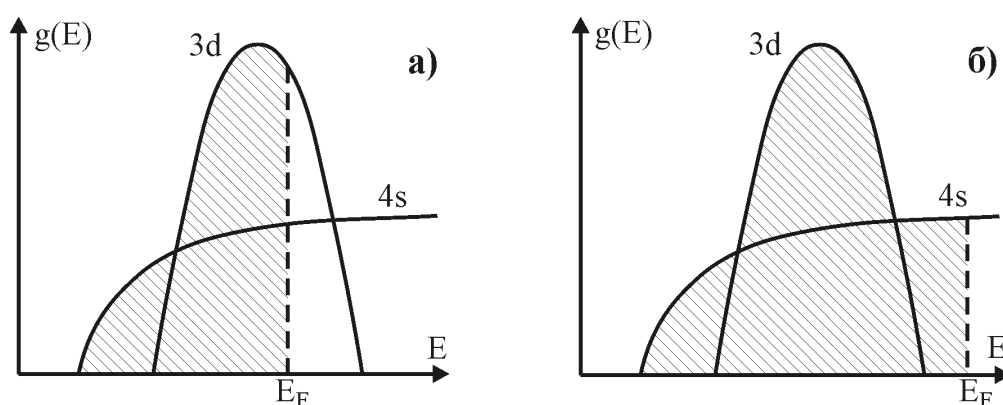


Рис. 1.10. Схема розподілу густини електронних станів $g(E)$ для нікелю (а) та міді (б). Для Ni зони $3d$ і $4s$, які перекриваються, не цілком заповнені електронами і мають загальний рівень Фермі E_F . Для Cu зона $3d$ є цілком заповнена електронами, а рівень Фермі E_F розташовується в $4s$ -зоні

повністю заповнена. Електрони такої зони, яку називають валентною, не можуть приймати участі у провідності, оскільки відсутні підрівні, на які вони могли би переходити внаслідок прискорюючої дії електричного поля зовнішнього джерела напруги. Вище валентної зони розташована так звана зона провідності – повністю вільна від електронів енергетична зона, утворена внаслідок розщеплення енергетичного рівня, що відповідає стану збудженого вільного атома. Якщо в зону провідності генерувати електрони з однієї із заповнених зон за допомогою квантів випромінювання, високоенергетичних частинок або фононів (нагрівання), то такі електрони вже можуть під впливом зовнішнього електричного поля створювати електричний струм.

Зона провідності та валентна зона можуть бути розділені зоною заборонених енергій – такі речовини належать до діелектриків або напівпровідників. Межа між останніми доволі умовна і залежить тільки від величини забороненої зони. Зазвичай напівпровідники проявляють помітну власну, тобто термічно активовану (не домішкову), провідність ще за температур, нижчих від температури їхнього плавлення. Для діелектриків помітна власна провідність недосяжна.

Якщо валентна зона та зона провідності перекриваються, то в такому випадку тверде тіло є металом, оскільки утворена сукупна зона заповнена не повністю і в ній є достатньо вільних енергетичних підрівнів, на які можуть легко переходити електрони (відстань між підрівнями становить приблизно $10^{-22} \div 10^{-23}$ еВ).

Окремим випадком слід вважати речовини, заборонена зона яких настільки вузька, що валентна зона та зона провідності практично дотикаються одна до одної. Такі речовини прийнято називати напівметалами. На відміну від напівпровідників напівметали володіють електричною провідністю за температури абсолютного нуля, однак, на противагу металам, ця провідність зростає з підвищенням температури.

Нарешті ті речовини, які мають непарну кількість електронів, теж належать до класу металів, оскільки верхній енергетичний рівень вільного атома, що містить неспарений електрон, також розщеплюється в зону з N підрівнями, одна половина з яких буде заповнена електронами, а друга – вільна. Таку зону також прийнято називати валентною.

Детальний опис зонної структури твердих тіл не є предметом цієї монографії. У цьому та наступних розділах теоретичні відомості подані в обсязі, необхідному для розуміння фізичних властивостей, явищ і процесів, які використовують для вимірювання та контролю параметрів і характеристик структур ВІС під час електрофізичного діагностування. Для повнішого розгляду теоретичних основ методів дослідження слід звернутися до підручників, навчальних посібників і наукових праць, ряд з яких поданий в списку використаної та рекомендованої літератури.

Закінчуючи цей розділ, слід ще раз відмітити, що саме мікро- і макроструктури в своїй сукупності визначають параметри та характеристики матеріалів, які, зі свого боку, відповідають за електрофізичні параметри субмікронних структур ВІС.

Розділ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ МЕТОДАМИ КІЛЬКІСНОЇ МЕТАЛОГРАФІЇ

Металографія є важливим методом якісного та кількісного дослідження структури металів і сплавів. Незважаючи на свою простоту, цей метод є досить потужним засобом дослідження матеріалів, який дозволяє отримати важливу емпіричну інформацію щодо їхніх властивостей, яку неможливо отримати іншими методами. Для проведення металографічних досліджень необхідні підготовлені за спеціальною технологією взірці – металографічні шліфи. Дослідження взірців здійснюється за допомогою мікроскопа, який працює у режимі відбивання світла.

Всі методи дослідження металографічних структур поділяються на якісні та кількісні. Якісні методи дають можливість описати насамперед тип, форму, розмір та взаємне розміщення виявлених фаз і структурних складових. Кількісні методи можна розділити на дві групи:

- дослідження певних механічних або фізичних властивостей, а також кількісне визначення хімічного складу окремих фаз або структурних складових. Для цього застосовують, наприклад, такі методи, як вимірювання мікротвердості або електронно-променевий мікроаналіз;

- вивчення кількісних характеристик просторової будови структури шляхом вимірювання числових параметрів мікроскопічних зображень.

Власне цю групу методів і називають кількісною металографією, саме вона є предметом цього розділу. Основними операціями кількісної металографії є підрахунок, вимірювання та класифікація елементів, які знаходяться в полі зору мікроскопа. Результатом вимірювання можуть бути кількісні параметри зерен або об'ємні долі різних фаз металу чи сплаву. Це означає, що кількісна металографія описує просторову будову структури без врахування її фізичних чи хімічних властивостей.

3.1. Систематизація структури з геометричної точки зору

Структура металів і сплавів проявляється в різноманітності її форм. Для кількісного металографічного дослідження доцільно звести цей широкий спектр форм до невеликої кількості основних геометричних типів, оскільки для кожного типу, незалежно від специфічних ознак структури та виду її структурних складових, завжди можна визначити характерні параметри цієї структури, а для їхнього (структур) аналізу завжди використовують одні і ті ж принципи вимірювання та опрацювання даних. Виділяють (за Салтиковим) такі геометричні типи структури (рис. 3.1):

Однофазно-поліедрична структура (рис. 3.1, а). За винятком неметалевих включень, пор тощо, ця структура складається з майже рівновісних кристалів однієї і тієї ж фази. (Рівновісними називаються такі кристали, що мають приблизно однакові геометричні розміри вздовж основних кристалографічних осей). Це означає, що спостерігаються тільки поверхні розділу рівнозначних структурних складових. До таких структур належать чисті метали та однофазні сплави (рис. 3.2, а).

Багатофазно-поліедрична структура (рис. 3.1, б) здебільшого складається з приблизно рівновісних кристалів двох або більше фаз чи структурних складових. При цьому поверхні розділу проходять між кристалами однієї чи різних типів фаз. До таких структур належать, наприклад, латунь зі структурою α - і β -твердого розчину чи ферито-перлітна структура сталі (рис. 3.2, б).

У **мережевих структурах** (рис. 3.1, в) одна фаза утворює деяку структурну мережу довкола кристалів іншої фази або іншої структурної складової.

Прикладом такої структури є мережа вторинного цементиту в сталі довкола кристалів перліту, який у свою чергу є структурою, що складається з двох фаз – пластинчатого фериту та цементиту (рис. 3.2, в).

У **матричних структурах** (рис. 3.1, г) одна фаза утворює основу (матрицю) структури, в якій частини однієї або декількох інших фаз, що називаються дисперсними, розподілені в більшій чи меншій мірі рівномірно. Прикладом таких структур є алюмінієві сплави, леговані кремнієм (Al-Si) або кремнієм і гольмієм (Al-Si-Ho), сплави алюміній-мідь (Al-Cu), золото-германій (Au-Ge) чи мідь-хром (Cu-Cr) (рис. 3.2, г), які використовують в якості матеріалу контактів до кремнієвих або арсенідгалієвих напівпровідникових структур.

В **орієнтованих структурах** (рис. 3.1, д) спостерігається орієнтоване просторове видовження кристалів однієї чи декількох фаз. Це можуть бути витягнуті зерна металів (сплавів) після прокату чи волочіння (рис. 3.2, д, е),

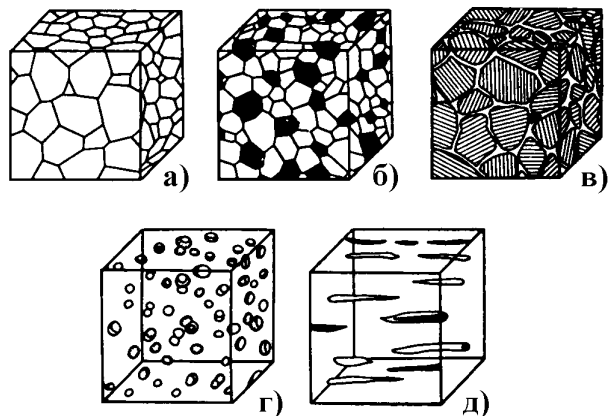


Рис. 3.1. Геометричні типи структур: а) однофазно-поліедрична; б) багатофазно-поліедрична; в) мережева; г) матрична; д) орієнтована

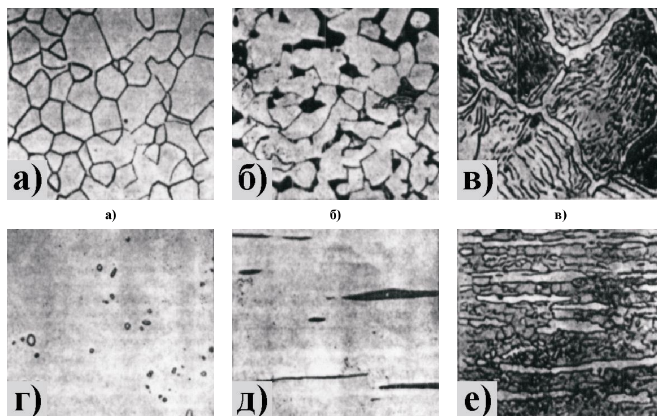


Рис. 3.2. Приклади основних типів структур (збільш. 400×): а) титан; б) ферито-перлітна структура сталі з 0,2% С; в) перліто-цементитна структура з 1,2% С; г) виділення хрому в сплаві Cu-Cr з 0,76% С; д) неметалеві включення в сталі; е) ферито-перлітна структура сталі після волочіння

наприклад, стрічки сплаву Fe-Ni, які використовують для виготовлення вивідних рамок, плакованих платиною, золотом чи алюмінієм.

Рис. 3.2 демонструє приклади реальних структур, які належать до різних геометричних типів. Ці основні типи являють собою граничні випадки; – в реальних структурах типи часто поєднуються один з одним. Шляхом вибору відповідної приготування взірця (дослідження протравленого або непротравленого шліфа) за умови належного збільшення під мікроскопом можна отримати зображення структурних складових, які належать до одного з основних структурних типів.

3.2. Основні методи металографічних досліджень

Основними методами дослідження параметрів структур є кількісні та напівкількісні методи. Серед кількісних методів в свою чергу виділяють аналіз за площею, точковий метод та метод лінійного аналізу. Розглянемо особливості цих методів та основні формули, які використовують для отримання параметрів досліджуваних структур.

3.2.1. Напівкількісні методи

Напівкількісні методи металографічного дослідження характеризуються роботою зі стандартними шкалами. В цьому випадку вибрані довільним чином без жодної закономірності поля зору досліджуваних взірців порівнюються із зображенням шкали. Сама шкала здебільшого складається із серії схематичних зображень структури; при цьому від зображення до зображення ступнево змінюється певна характеристика структури, наприклад, розмір зерен чи кількість карбідів, а також їхній розподіл у сталі. Оцінювання структури проводиться в балах.

До суттєвих недоліків порівняльної оцінки слід віднести:

- високий ступінь суб'єктивності отриманих результатів;
- низьку точність і недостатню відтворюваність результатів;
- ступінчастий характер оцінювання структури, тоді як реальна структура змінюється монотонно.

Допоміжними засобами для полегшення порівнювання за шкалами є використання у світлових мікроскопах насадки зі шкалою, яка фіксує геометричні розміри елементів структури.

3.2.2. Аналіз за площею

Цей аналіз дозволяє визначити:

- об'ємну долю фаз V_α , V_β , ... з розподілом окремих фаз α , β , ... в структурі;
- середню площу перерізу \overline{A}_α , \overline{A}_β , ... частинок різних фаз;
- розподіл мікрочастинок різних фаз α , β , ... за розмірами.

Процедура аналізу полягає у вимірюванні та підрахунку площ перерізу мікрочастинок досліджуваних фаз у межах заданої площі A . Для цього

вимірюють величини перерізів $(A_\alpha)_i, (A_\beta)_i, \dots$ мікрочастинок різних фаз, видимих у межах заданої площі та їхні кількості m_α, m_β, \dots . Об'ємна доля фази, наприклад, фази β (у %) обчислюється за формулою:

$$V_\beta = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{m_\beta} (A_\beta)_i \times 100, \quad (3.1)$$

де $\sum_{i=1}^{m_\beta} (A_\beta)_i$ – сума перерізів (мкм²) β -фази в межах заданої площі, A – переріз (мкм²) заданої площі. Для двофазної структури:

$$V_\alpha = 100 - V_\beta. \quad (3.2)$$

Середня площа перерізу, (мкм²):

$$\overline{V}_\beta = \frac{1}{m_\beta} \sum_{i=1}^{m_\beta} (A_\beta)_i, \quad (3.3)$$

де m_β – кількість частинок у межах заданої площі.

Розмір зерна однофазно-полієдричної структури (середня площа) визначається за формулою:

$$\overline{A} = \frac{A}{k + 0,5v + 0,25w}, \quad (3.4)$$

де k – кількість зерен, які повністю попадають у межі заданої площі, v – кількість зерен, по яких проходить межава лінія площі; w – кількість зерен, розташованих у кутах заданої площі.

За такою методикою розраховують зернистість плівок алюмінієвого сплаву АК-1 чи легованого полікремнію, які використовують для багаторівневого розведення з'єднань між структурами ВІС.

3.2.3. Точковий метод

Цей метод використовують для визначення об'ємних долей структурних складових або фаз. Він полягає в тому, що на досліджувану структуру накладають сітку, яка складається з точок, та підраховують кількість точок, які лежать у перерізі мікрочастинок досліджуваної фази. Об'ємна доля (у %) фази буде визначатися, як

$$V_\beta = \frac{P_\beta}{P} \times 100, \quad (3.5)$$

де P_β – кількість точок, які лежать у межах перерізу β -фази, P – загальна кількість точок.

Таким чином, відношення кількості точок, які попали на переріз фази, до загальної кількості точок ідентичне стехіометричному параметру об'ємної долі досліджуваної фази (за Глаголевим). Хоча цей метод набагато простіший, аніж аналіз за площею, однак за точністю визначення об'ємної долі він зовсім не поступається попередньому способу. Точність методу залежить тільки від загальної кількості точок P , тобто повністю визначається

параметрами чарунок сітки. Для досягнення необхідної точності загальна кількість точок P повинна бути не менше

$$P = \frac{t^2 V_{\beta}' (100 - V_{\beta}')}{\varepsilon^2}, \quad (3.6)$$

де t – стандартне відхилення, ε – абсолютна похибка. Величина V_{β}' являє собою попереднє, наближене значення об'ємної долі V_{β} і обчислюється за допомогою розрахункової формули (3.5) для декількох довільних полів зору та заданих початкових значень параметрів P і P_{β} .

З (3.6) отримуємо абсолютну похибку вимірювання:

$$\varepsilon = t \cdot \sqrt{\frac{V_{\beta}' (100 - V_{\beta}')}{P}}. \quad (3.7)$$

Величина стандартного відхилення t визначається за необхідною для результатів цього дослідження довірливою імовірністю η , наприклад:

$$\begin{array}{ll} \eta = 0,50 : & t = 0,6745; \\ \eta = 0,90 : & t = 1,6449; \end{array} \quad \begin{array}{ll} \eta = 0,60 : & t = 0,8416; \\ \eta = 0,99 : & t = 2,5758. \end{array}$$

3.2.4. Лінійний аналіз

Цей метод полягає в тому, що на зображення досліджуваної структури накладають сімейство прямих ліній, після чого хорди, які відтинаються перерізами зерен на лініях, вимірюють та групують відповідно до заданої системи розрядів. Далі підраховують кількість точок у перерізах вимірюваних ліній та границь зерен, а також загальну довжину вимірюваних ліній.

За допомогою цього методу для **однофазно-поліедричної** структури визначають такі її параметри:

– середній лінійний розмір зерна, мкм:

$$\overline{D_{\alpha}} = \frac{L}{N_{\alpha\alpha} M}, \quad (3.8)$$

де L – загальна довжина вимірюваної лінії, мкм; $N_{\alpha\alpha}$ – кількість точок перерізу границь зерна з вимірюваними лініями; M – збільшення мікроскопа;

– питома поверхня границь зерен, $\text{мкм}^2/\text{мкм}^3$:

$$S_{\alpha\alpha} = 4 \frac{N_{\alpha\alpha} M}{L}, \quad (3.9)$$

яка являє собою площу поверхні зерен, віднесену до 1 мкм^3 об'єму взірця. Між цими двома параметрами існує зв'язок: $S_{\alpha\alpha} = 4/\overline{D_{\alpha}}$.

У випадку лінійного аналізу **матричної або багатофазної поліедричної** структури вимірюють такі величини:

– довжини хорд l_{α} , l_{β} , ..., які відтинають на вимірюваних лініях перерізи частинок різних фаз;

– кількість $N_{\alpha\beta}$, $N_{\alpha\gamma}$, ..., точок перерізу вимірюваних ліній з межами фаз α/β , α/γ , ...;

– загальна довжина L всіх вимірюваних ліній.

З отриманих величин розраховують параметри структури:

– об'ємна доля розподіленої в матриці β -фази, (у %)

$$V_{\beta} = \frac{L_{\beta}}{L} \times 100, \quad L_{\beta} = \sum_{i=1}^{m_{\beta}} l_{\beta i}, \quad (3.10)$$

де L_{β} – середня всіх довжин хорд в β -фазі, мкм; m_{β} – кількість хорд в β -фазі;

– середній лінійний розмір частинок β -фази, мкм

$$\overline{D}_{\beta} = \frac{2L_{\beta}}{N_{\alpha\beta}M}. \quad (3.11)$$

Якщо замість L_{β} у формулі (3.11) підставити вираз (3.10), то отримаємо

$$\overline{D}_{\beta} = \frac{2(V_{\beta}/100) \cdot L}{N_{\alpha\beta}M}; \quad (3.11,a)$$

– середня відстань між частинками, яка відповідає середній довжині вільної відстані в матриці, мкм:

$$L_{\psi\alpha} = \frac{2L_{\alpha}}{N_{\alpha\beta}M} \quad (3.12)$$

або

$$L_{\psi\alpha} = \frac{2(V_{\alpha}/100) \cdot L}{N_{\alpha\beta}M}. \quad (3.12,a)$$

Для двофазної структури $V_{\alpha} = 100 - V_{\beta}$, тоді

$$L_{\psi\alpha} = \frac{2[(1 - V_{\beta})/100] \cdot L}{N_{\alpha\beta}M}; \quad (3.12,b)$$

– питома поверхня межі фаз, мкм²/мкм³ становитиме

$$S_{\alpha\beta} = \frac{2N_{\alpha\beta}M}{L}; \quad (3.13)$$

– відносна питома поверхня межі фаз:

$$S_{\alpha\beta}^{rel} = \frac{S_{\alpha\beta}}{(V_{\beta}/100)} = \frac{2N_{\alpha\beta}M \cdot 100}{V_{\beta}L} \quad (3.14)$$

або

$$S_{\alpha\beta}^{rel} = \frac{2N_{\alpha\beta}M \cdot 100}{L_{\beta}}. \quad (3.15)$$

Відносна питома поверхня міжфазної межі відноситься не до одиниці об'єму взірця, а до об'ємної долі дисперсної фази і тим самим стає мірою дисперсності, тобто визначає ступінь дрібнодисперсної фази в самій матриці: чим вона більша, тим вища дисперсність структури.

Метод лінійного аналізу можна використати також і для **багатофазної поліедричної** структури. В цьому випадку, як і для однофазно-поліедричної чи матричної структур, необхідно провести вимірювання вже згаданих вище величин (l_{α} , l_{β} , ..., $N_{\alpha\beta}$, $N_{\alpha\gamma}$, ..., L), за допомогою яких можуть бути

розраховані такі структурні параметри:

- об'ємна доля β -фази за матрицею (3.10);
- середній лінійний розмір зерна α -фази, мкм:

$$\overline{D}_{\alpha} = \frac{(V_{\alpha}/100) \cdot L}{(N_{\alpha\alpha} + \frac{1}{2} N_{\alpha\beta}) \cdot M}; \quad (3.16)$$

- середній розмір частинок β -фази згідно з (3.12.а);
- питома поверхня межі α -фази:

$$S_{\alpha} = \frac{(4N_{\alpha\alpha} + 2N_{\alpha\beta}) \cdot M}{L}; \quad (3.17)$$

- питома поверхня між α - і β -фазами згідно з (3.13);
- відносна питома міжфазна поверхня згідно з (3.14).

Для проведення металографічних вимірювань на досліджувану структуру, зазвичай, накладають паралельні лінії однакової довжини. Величину збільшення слід вибирати таким чином, щоби для однофазно-поліедричної структури вздовж однієї лінії розміщувалось близько 20 зерен, а в матричній структурі можна було визначати просвіти між вимірювальною лінією і частинкою для точного вимірювання хорд.

Абсолютну похибку ε визначення об'ємної долі розраховують згідно з:

$$\varepsilon = k \cdot t \cdot \sqrt{\frac{V_{\beta}(100 - V_{\beta})}{m_{\beta}}}. \quad (3.18)$$

Зі звичних допоміжних пристроїв мікроскопів для вимірювання довжин хорд використовують так звані окуляр-мікрометри та окулярні сітки для точкового аналізу, а за певних умов – також і для вимірювання площ.

Таким чином, лінійний аналіз є раціональним методом дослідження структури металів і сплавів мікроелектроніки, за допомогою якого можна оцінювати та порівнювати багато параметрів структур, зокрема алюмінієвих сплавів АК-1 і АКГо-1-1.

3.3. Типове устаткування для металографічного аналізу

Точковий та лінійний аналізи значно спрощуються з використанням електронних, вмонтованих в мікроскопи, допоміжних пристроїв. Це дозволяє створювати такі аналізатори, сфера використання яких не обмежується тільки кількісною металографією і які можуть застосовуватись також у біофізиці, електроніці, кристалографії, геології. Розроблено ряд систем приладів, які відрізняються типом вимірюваних параметрів чи рівнем використання електронної обчислювальної техніки та автоматизації.

Одним з перших приладів такого типу був лічильник Ельтинора, принцип дії якого з невеликими змінами використовують в автоматичному лінійному аналізаторі "Епівквант", виробництва "Carl Zeiss Jena" (Німеччина). Принцип дії аналізатора "Епівквант" полягає в реєструванні сумарних довжин хорд, які відтинаються зернами відповідних фаз уздовж вимірювальної лінії. Завдяки дискримінатору, що містить таку ж кількість каналів, як і кількість

фаз структури, реєстрування здійснюється одночасно для всіх типів фаз, як показано на рис. 3.3.

Реєструюча діафрагма приладу (рис. 3.3) переміщується вздовж досліджуваної структури (лінія 1-2), яка, для прикладу, складається з зерен трьох типів (фаз). Зерна різних фаз відрізняються між собою коефіцієнтом відбиття, завдяки чому одні з них виглядають світлішими, а інші – темнішими. На початку експерименту реєструюча діафрагма перебуває на світлому зерні, яке дає аналоговий електронний сигнал з високою амплітудою. Наступне зерно має дуже темну складову, і йому відповідає сигнал з низькою амплітудою. Сигнал з середньою амплітудою

відповідає фазі, яка має проміжну відбивну здатність. Після визначення висот імпульсів (амплітуд) сигналів від різних фаз за допомогою потенціометрів задаються порогові величини, згідно з якими дискримінатор здійснює роздільне запам'ятовування імпульсів, що відповідають різними фазами.

Для випадку, продемонстрованого на рис. 3.3, насамперед відкривається канал С, що відповідає світлій фазі, та підраховуються імпульси тактового генератора, який забезпечує крокове переміщення стола з взірцем. Сумарна накопичена кількість імпульсів каналу С відповідає довжинам хорд світлих зерен, які перетинає вимірювальна лінія 1-2.

Якщо в діафрагму попадає темне зерно, то вимірювальна логіка відкриває канал А, якому відповідає порогове значення сигналу А, і підраховує кількість імпульсів переміщення стола. Аналогічний процес здійснюється і для фази з проміжним значенням коефіцієнту відбиття (канал С), в результаті чого отримуємо накопичені цифрові сигнали, які пропорційні сумарним довжинам хорд усіх зерен кожної з фаз уздовж лінії 1-2.

Принципову схему блоків автоматичного телевізійного аналізатора "Епівквант" та автоматичної системи керування переміщенням і обчисленням "Квантімет" демонструє рис. 3.4.

Сучасні автоматичні структурні аналізатори забезпечують:

- визначення об'ємних долей структурних складових сплавів;
- визначення всіх розмірів, які можуть бути виміряні за допомогою класичного лінійного аналізу, в тому числі також при фазових переходах;
- визначення об'єму окремих структурних елементів у сплаві;

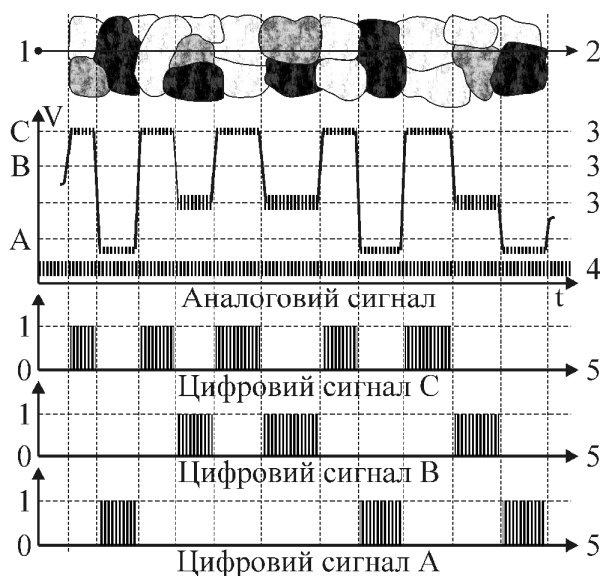


Рис. 3.3. Принцип дії приладу "Епівквант": 1-2) лінія вимірювання; 3) рівні дискримінатора; 4) кроки переміщення стола; 5) накопичувані імпульси

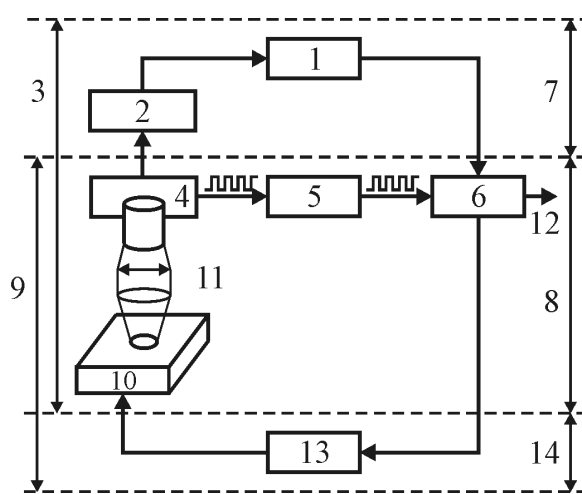


Рис. 3.4. Принципова схема автоматичного аналізатора структури. 1) контрольний монітор; 2) система обчислень; 3) система "Квантімет"; 4) перетворювач сигналів; 5) дискримінатор; 6) арифметико-логічний пристрій; 7) електронне зчитування; 8) формування та опрацювання сигналів; 9) "Епіквант"; 10) взірєць; 11) скануючий електронний мікроскоп; 12) виведення інформації на екран (дисплей); 13) маніпулятор переміщень; 14) механічний блок

- визначення максимальних і мінімальних розмірів вимірюваних величин паралельно та перпендикулярно напрямку зчитування;
- визначення кількості мікрочастинок одного типу на одиниці поверхні;
- відображення розподілів розмірів за площею, довжиною хорд, об'ємом;
- роздільний підрахунок мікрочастинок одного типу на основі такого чинника форми, як відношення площі до квадрату об'єму;
- визначення радіуса заокруглення контуру мікрочастинок.

Методи кількісної металографії в технології ВІС використовуються для дослідження технологічних процесів формування металізації з алюмінієвих сплавів АК-1, АК-Го-1-1, силіцидів, легованого полікремнію, контактних сплавів залежно від умов формування та легуючих компонентів, гетеро-переходів гетерних шарів, капсулюючих покриттів тощо.

Субмікронна та нанотехнології ВІС на сучасному етапі вимагають удосконалення методик металографічного аналізу прецизійних сплавів, які використовують для металізації контактів структур ВІС на арсеніді галію. Такі сплави надзвичайно важливі, оскільки від величини їхнього коефіцієнта термічного лінійного розширення залежить рівень механічних напруг, прикладених до монокристалу зі структурою ВІС (див. п. 10.5), а, отже, надійність виготовлених мікросхем.

Детальний металографічний аналіз також необхідний для оптимізації технології виготовлення рамок вивідних із сплаву Fe-Ni, які плакують алюмінієм або золотом та використовують для пластмасового корпусного виконання ВІС/HBIC.

Глава 1

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

В широком смысле электронными приборами принято называть усилительные устройства, основанные на электронных эффектах, происходящих в вакууме, разреженных газах, твердых телах, жидкостях или на границах их разделов при воздействии на них электрических, магнитных, световых, тепловых, акустических и других полей.

По своей сути электронные приборы являются достаточно эффективно управляемыми (с помощью некоторого управляющего сигнала) преобразователями энергии, отбираемой от источника питания и передаваемой потребителю энергии.

Источник (рис. 1.1) вырабатывает энергию W , а устройство управления, регулирующее передачу этой энергии потребителю, имеет функцию передачи

$$f(t) = kC(t),$$

где k — конструктивная постоянная; $C(t)$ — сигнал управления (в общем случае — некоторая физическая переменная величина, изменения которой во времени несут некоторую полезную информацию). При этом получаемая потребителем энергия $W(t) = W kC(t)$ в идеальном случае строго пропорциональна изменениям параметров управляющего сигнала во времени.

В правильно сконструированном и работающем в соответствующем режиме устройстве на управление тратится энергия существенно



Рис. 1.1. Структурная схема усилительного устройства

меньшая, чем энергия, поступающая потребителю от источника, вследствие чего в конечном итоге происходит усиление мощности управляющего сигнала.

Приведенная структурная схема применима почти ко всем устройствам, используемым в повседневной жизни, которые нужны для увеличения относительно слабых усилий, например тормозная система поезда (источник энергии — сжатый газ или жидкость, устройство управления — тормозной кран, потребитель энергии — тормозные колодки, прижимаемые к колесам с многократным усилением, пропорциональным степени открывания тормозного крана, управляемого человеком).

Равным образом, прикладывая весьма слабые усилия к выключателю в электрической цепи, можно, включая/выключая его, легко управлять большими потоками электрической энергии. По такому принципу работают и многие электронные приборы в импульсных режимах, подключая/отключая некоторое устройство (например, электродвигатель) от источника питания.

При создании большинства электронных приборов обычно приходится решать множество разных задач и проблем, одной из которых, весьма непростой, является проблема создания потока относительно свободных электронов проводимости и управление его интенсивностью, положением в пространстве или скоростью движения отдельных электронов в этом потоке.

В других видах электронных приборов используются практически неподвижные электроны, входящие в состав внешних валентных оболочек атомов и достаточно прочно связанные с атомными ядрами и поэтому не имеющие возможности в обычных условиях перемещаться. Однако под действием внешних электрических, магнитных, световых, тепловых или радиационных полей валентные электроны могут переходить на более высокие энергетические уровни (при этом происходит поглощение энергии внешнего поля) с последующим возвращением на начальные уровни и излучением поглощенной ранее энергии в виде электромагнитных квантов. Это явление используется в разнообразных квантовых приборах, например *лазерах, мазерах, иррадиаторах*.

Электроны являются заряженными частицами, поэтому их движением в принципе можно управлять с помощью электрических и магнитных полей.

На движущийся в электрическом и магнитном полях свободный электрон действует сила:

$$F = -qE + q[v \times B],$$

где q — заряд электрона; E — вектор напряженности электрического поля; B — вектор магнитной индукция поля; v — вектор скорости движения.

Магнитное поле действует только на движущиеся электроны и изменяет траекторию их движения, если они в своем движении пересекают магнитные силовые линии. Поперечные магнитные поля в электронных приборах используются для отклонения электронных потоков в заданном направлении, а продольные магнитные поля — для формирования из электронных потоков «электронных лучей» и «фокусирования» их — направления в заданную область пространства.

Электрическое поле действует как на покоящиеся, так и на движущиеся свободные электроны, изменяя скорость и направление их движения. Продольные электрические поля изменяют скорость движения электронов и применяются для формирования электронных потоков и управления ими. Поперечные электрические поля обычно используются для изменения направления движения («отклонения») электронных потоков.

Принцип действия большинства электронных приборов достаточно прост и сводится к управлению плотностью, скоростью или направлением движения электронного (или электронно-ионного в случае плазменных приборов, или ионного в хемотронных приборах) потока, движущегося в вакууме, разреженном газе, полупроводнике, диэлектрике или электролите. При этом устройство управления сконструировано так, что на управление потоком тратится энергия значительно меньшая, чем поток переносит от источника к потребителю.

Таким образом, при создании любого усилительного электронного прибора возникают, по меньшей мере, две задачи: получение направленного электронного потока и создание устройства, эффективно и энергетически экономно управляющего этим потоком.

Технических решений этих задач к настоящему времени имеется множество, и поэтому существует несколько сотен видов электронных усилительных приборов, основанных на различных эффектах, происходящих в вакууме, разреженных газах, твердых телах, жидкостях или на границах их разделов.

Особенностью современной радиоэлектроники является то, что она на 95 % основывается на полупроводниковых приборах. Но это не означает, что все другие виды электронных приборов, в том числе и электровакуумные приборы, разработанные почти столетие тому назад, в настоящее время не применяются. Существует много областей на-

уки и техники, где применение полупроводниковых усилительных приборов очень затруднено или же вообще невозможно. Например, работа аппаратуры в интенсивных радиационных полях (аппаратура контроля работы ядерных реакторов или аппаратура для применения в хранилищах отработанного ядерного топлива, аппаратура для устранения последствий аварий ядерных реакторов), работа в условиях высоких температур (аппаратура систем контроля работы сопел ракетных двигателей), мощные усилители и генераторы сверхвысоких частот (радио- и телевизионные передатчики, радиолокаторы, промышленные и бытовые СВЧ-печи). В этих случаях очень часто применяются электровакуумные усилительные и генераторные приборы.

Помимо этих областей весьма большое применение электровакуумные приборы («электронные лампы») находят и в бытовой электронике, например для создания мощных сверхвысококачественных аудиоусилителей.

1.1. Электронные лампы

В электронных лампах для получения потока свободных электронов используется явление электронной эмиссии — излучение электронов с поверхности твердых или жидких тел. Однако уход хотя бы небольшого числа электронов с поверхности тела нарушает его электрическую нейтральность, вследствие чего тело заряжается положительно и возникают тормозящие силы, стремящиеся вернуть электроны и, таким образом, препятствующие продолжению эмиссии. Для преодоления тормозящих сил электроны должны иметь достаточно большую энергию, называемую работой выхода, — до нескольких электрон-вольт. Работа выхода зависит от многих факторов, решающий из которых — расстояние между атомами в кристаллической решетке (чем расстояние больше, тем работа выхода меньше).

Для придания электронам дополнительной энергии, позволяющей им эмитировать с поверхности тел, в электронной технике используют следующие способы: нагревание до высоких температур, воздействие сильным электрическим полем, бомбардировка поверхности частицами высоких энергий, облучение светом.

При нагревании тела, используемого как излучатель электронов и называемого в электронной технике *катодом*, или *эмиттером*, увеличивается скорость движения электронов проводимости, возрастает их кинетическая энергия, и все большее их число покидает катод. Вблизи поверхности катода возникает своеобразное электронное об-

лако вылетающих из катода (и возвращающихся в него) электронов, плотность которого прямо пропорциональна температуре катода и почти обратно пропорциональна работе выхода:

$$I_{\tau} = A_{\tau} T^2 \exp \left(-\frac{W}{kT} \right),$$

где I_{τ} — плотность тока термоэлектронной эмиссии, А/см²; A_{τ} — постоянная, зависящая от материала катода и состояния его поверхности; T — абсолютная температура; W — работа выхода; k — постоянная Больцмана.

Для увеличения плотности тока термоэлектронной эмиссии необходимо увеличивать температуру катода и использовать материалы с малой работой выхода. Однако это сделать не всегда возможно, поскольку при увеличении температуры катода резко возрастает скорость испарения его материала в окружающий вакуум или разреженный газ. Поэтому для изготовления термоэлектронных катодов используют стойкие к испарению металлы: вольфрам, тантал, молибден и ниобий.

Эмиссионные свойства термоэлектронного катода могут быть существенно повышены, если на его поверхность нанесен тонкий слой активирующего металла, имеющего меньшую работу выхода.

При этом атомы активатора отдают свои валентные электроны атомам основного металла катода, становятся положительно заряженными ионами и создают ускоряющее поле, способствующее выходу термоэлектронов. Еще большего повышения эмиссионной способности термоэлектронного катода можно достигнуть, если поверхность катода покрыть тонким слоем окислов щелочных металлов. У обработанного таким образом оксидного катода работа выхода может быть ниже 1 эВ, что позволяет уменьшить рабочую температуру катода до 500–600 °С и тем самым резко сократить расход энергии и увеличить срок службы до нескольких тысяч — десятков тысяч часов. Особенностью оксидного термоэлектронного катода является его способность кратковременно отдавать в импульсных режимах токи огромной плотности (до 10³ А/см²). Конструктивно термоэлектронные катоды выполняют в виде катодов прямого и косвенного подогрева. Катоды прямого подогрева очень экономичны, поскольку ток накала, нагревающий катод до заданной рабочей температуры, проходит непосредственно через катод. Катоды прямого подогрева выполняют в виде тонких проволочек, лент, стержней и т. д. и обычно имеют весьма малый момент тепловой инерции. Это часто вынуждает питать катоды прямого подогрева от источников постоянного тока.

Катоды косвенного подогрева обычно выполняют в виде круговых или эллиптических тонкостенных цилиндров, внешняя поверхность которых покрыта оксидным слоем, а внутрь помещена нить накала, электрически изолированная от катода. Тепловая инерция катодов косвенного подогрева сравнительно велика (единицы-десятки секунд), поэтому нить накала может питаться током промышленной частоты.

Во многих видах современных электронных приборов применяются холодные катоды, электронная эмиссия с поверхности которых достигается за счет воздействия сильных электрических полей. Плотность тока получаемой таким способом эмиссии:

$$I_0 = \frac{A_0}{W} E_a^2 \exp \left(-B_a \frac{W^{3/2}}{E_a} \right),$$

где W — работа выхода; E_a — напряженность электрического поля у поверхности катода; A_0 и B_a — конструктивные постоянные.

Разновидностью холодного катода является *туннельный катод*. Конструктивно туннельные катоды выполняют в виде основания — металлической пластинки (обычно из тантала), покрытой тонким слоем в несколько десятков ангстрем (30–40 Э) изолятора (обычно это слой оксида металла катода, в данном случае — тантала). Поверх слоя изолятора наносится эмиттер — тончайший слой металла (10–20 Э), на который подается положительное относительно нижней металлической пластинки напряжение 10–20 В. Из-за малости межэлектродных расстояний между эмиттером и основанием действует электрическое поле напряженностью до 10^8 В/см, которое захватывает электроны проводимости, находящиеся в нижней металлической пластинке, ускоряет их и придает энергию, необходимую для преодоления слоя изолятора и «прострела» тонкого слоя эмиттера. Вследствие этого над поверхностью эмиттера образуется плотное электронное облако, из которого может быть сформирован электронный поток.

Электронная эмиссия может быть получена также воздействием на поверхность катода потоком частиц, обладающих достаточно высокой энергией. В качестве таких частиц обычно используются электроны и ионы, ускоряемые сильным электрическим полем. При соударении с катодом частицы отдают свою энергию электронам и вызывают их эмиссию. В зависимости от энергии первичных частиц материала катода и состояния его поверхности количество эмитированных (вторичных) электронов может во много раз превышать число первичных частиц.

Электронные вакуумные лампы продолжительное время были практически единственными электронными приборами, позволяющими усиливать электрические сигналы, преобразовывать их из одного вида в другой.

Затем положение изменилось: в 50-е годы прошлого века появились и в 60-е годы быстро заняли ведущую роль в электронике разнообразные полупроводниковые приборы, приведшие в 70-е годы к созданию полупроводниковой интегральной микроэлектроники.

Микроэлектронные функциональные элементы и узлы, выпускаемые в широком ассортименте, сделали нецелесообразным изготовление аппаратуры из отдельных электронных приборов и практически вытеснили их из всех сфер применения, за небольшим исключением аппаратуры, работающую при больших мощностях (сотни киловатт), на высоких и сверхвысоких напряжениях, и сверхвысоких частотах, больших температурах (выше 300°C), в условиях повышенной радиации, — ее пока можно выполнять только на электронных лампах.

Принцип действия электронной лампы сводится к управлению плотностью, скоростью или направлением движения потока электронов, движущихся в колбе, из которой откачан воздух.

В электронной усилительной лампе с управлением плотностью электронного потока (рис. 1.2, а) электроны, эмитированные с поверхности *катода*, под действием ускоряющего поля, создаваемого внешним источником питания, устремляются к *аноду*. На пути электронного потока устанавливается устройство управления, которое под действием напряжения источника сигнала создает электрические или магнитные (или те и другие) поля, которые способствуют или препятствуют прохождению электронов от катода к аноду.

Электронные лампы принято классифицировать по числу основных электродов. Если в лампе два электрода — анод и катод, то она называется *диодом*. Трехэлектродная лампа имеет анод, катод, управляющий электрод и называется *триодом*. Четырехэлектродная лампа называется *тетродом*, пятиэлектродная — *пентодом* и т. д.

Диоды. В диоде отсутствует устройство управления и его основное свойство — односторонняя электрическая проводимость, т. е. электрический ток может протекать в одном направлении — от катода к аноду. Это происходит тогда, когда диод включен в электрическую цепь с источником тока так, что на аноде оказывается плюс, а на катоде — минус. Только в этом случае электроны, эмитированные катодом, могут достигнуть анода.

Аналитически вольт-амперная характеристика диода — зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a — аппроксимируется параболой вида: $I_a = AU_a^{3/2}$, где A — конструктивная постоянная.

В современной радиоэлектронике вакуумные диоды находят ограниченное применение. При этом используется свойство односторонней проводимости (в высоковольтных выпрямителях, при рабочих напряжениях в десятки–сотни тысяч вольт) и возможность создавать очень равномерный «белый шум», с независимым от частоты спектром, генерируемым при работе в режиме насыщения анодного тока.

Триоды. В триоде управление плотностью электронного потока осуществляется с помощью управляющего электрода, изменяющего напряженность электрического поля в околочатодном пространстве.

В триодах с термоэлектронным катодом управляющим электродом служит тонкая металлическая *управляющая сетка* (рис. 1.2, б).

Обычно сетка расположена вблизи от поверхности катода, на расстоянии в несколько десятков микрометров, в то время как расстояние катод–анод может быть весьма большим (от единиц миллиметров до нескольких десятков сантиметров и более в мощных генераторных и модуляторных лампах).

Поэтому изменения потенциала управляющей сетки сказываются на напряженности поля в околочатодном пространстве сильнее, чем изменение потенциала анода. Если потенциал управляющей сетки отрицателен, то поле вблизи катода является тормозящим и плотность электронного потока по мере увеличения этого потенциала уменьшается — вплоть до полного прекращения прохождения электронов к аноду. При этом происходит запираание лампы.

При положительном потенциале сетки ее поле является ускоряющим, не препятствует прохождению электронов к аноду, и поэтому плотность электронного потока возрастает.

Таким образом, принцип действия усилителя на электронной лампе сводится к тому, что под действием напряжения входного сигнала $U_{вх}$ изменяется плотность электронного потока, идущего от катода к аноду. При этом изменяется кажущееся внутреннее сопротивление электронной лампы, что ведет к изменению анодного тока, обеспечиваемого за счет источника питания E_n . Это приводит к изменению падения напряжения $U_{вых}$ на сопротивлении нагрузки R_n . Так как управляющая сетка расположена во много раз ближе к катоду, чем анод, то напряжение $U_{вых} \gg U_{вх}$, т. е. входной управляющий сигнал усиливается.

На рис. 1.2, в приведена анодная характеристика триода — зависимость анодного тока от напряжения на аноде и управляющей сетке, аналитически выражаемая как

$$I_a = (U_c + U_a/\mu)^{3/2},$$

где A — конструктивная постоянная, учитывающая геометрию триода; U_c — напряжение на управляющей сетке; U_a — напряжение на аноде; μ — коэффициент усиления, отображающий усилительную возможность триода и показывающий, во сколько раз электрическое поле анода действует слабее, чем поле сетки в околокатодной области.

Под анодно-сеточной вольт-амперной характеристикой (рис. 1.2, з) понимается зависимость анодного тока от напряжения на управляющей сетке при постоянном напряжении на аноде.

Основные параметры триодов, используемые для их сравнения и выполнения различных расчетов, — это крутизна анодно-сеточной характеристики и внутреннее сопротивление по переменному току:

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c \text{ при } U_a = \text{const}; R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ при } U_c = \text{const},$$

где ΔI_a , ΔU_c , ΔU_a — приращения, соответственно, анодного тока, сеточного и анодного напряжений, показанные на рис. 1.2, в и 1.2, з.

Крутизна анодно-сеточной характеристики отображает эффективность управления анодным током при изменении напряжения на управляющей сетке. Крутизна характеристики возрастает с уменьшением расстояния сетка—катод и увеличением площади катода и его эмиссионной способности. Обычно крутизна характеристики триода с термоэлектронным катодом не превышает 10–30 мА/В. Внутреннее сопротивление тем меньше, чем меньше расстояние катод—анод и чем менее плотно прилегают друг к другу витки управляющей сетки.

Важнейший параметр триода — статический коэффициент усиления μ показывает, во сколько раз изменение напряжения на управляющей сетке эффективнее воздействует на анодный ток, чем изменение анодного напряжения. Величина μ определяется как $\Delta U_a / \Delta U_c$ при $I_a = \text{const}$. Статический коэффициент усиления показывает также, во сколько раз (в пределе!) может быть усилено напряжение сигнала, действующего на управляющей сетке триода, при работе в оптимальном режиме. Величина μ определяется конструкцией триода и режимом его работы и тем больше, чем больше расстояние анод—сетка по сравнению с расстоянием сетка—катод и чем гуще сетка (т. е. чем ближе друг к другу расположены витки сетки). Значение μ лежит в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков.

При работе в линейном режиме связь между параметрами триода выражается формулой: $\mu = SR_p$.

Таким образом:

- 1) изменение напряжения на управляющей сетке вызывает значительно большее изменение анодного тока, чем такое же изменение напряжения на аноде;
- 2) при изменении напряжения на управляющей сетке на 1 В анодный ток изменяется на S мА;
- 3) если напряжение на управляющей сетке отрицательно, то ток в цепи сетки не протекает.

Недостаток триода, ограничивающий его применение, — обратная связь (т. е. нежелательная передача энергии с выхода усилителя на его

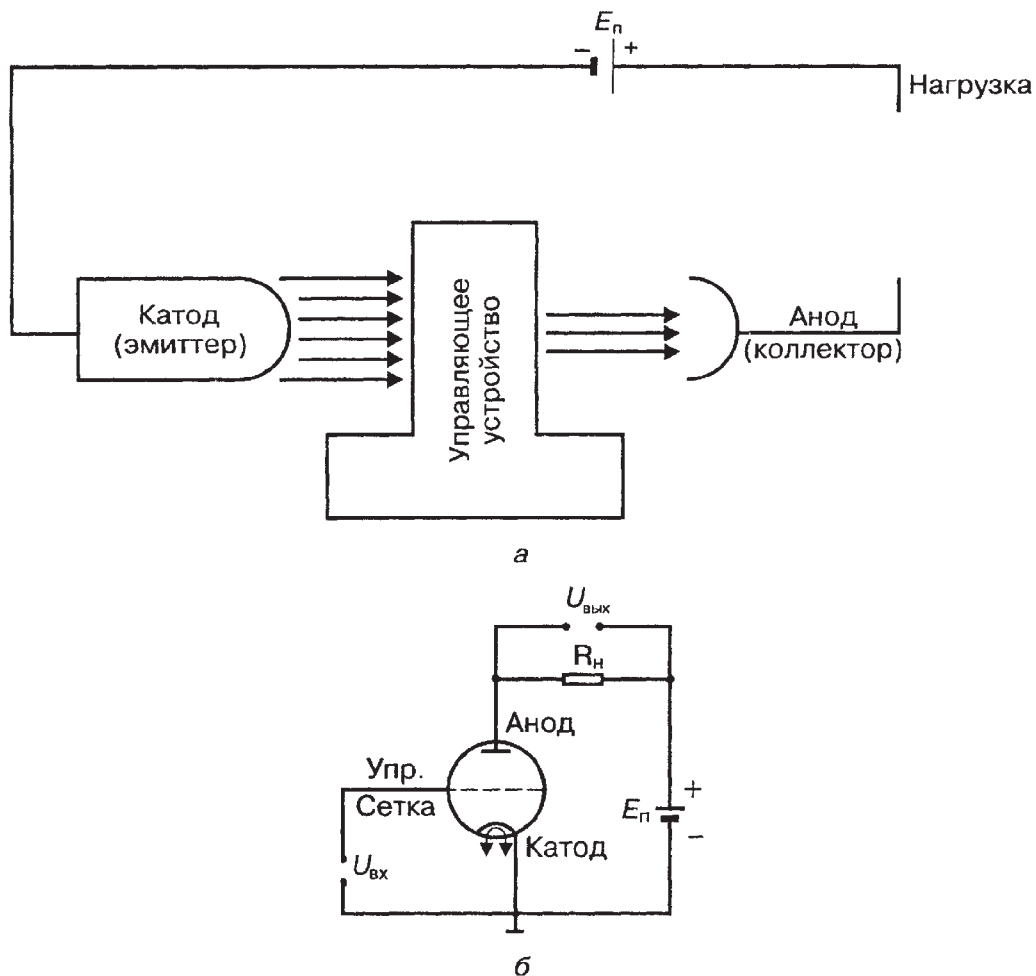


Рис. 1.2. Принцип действия электронной лампы (а), включение ее в качестве усилителя сигналов (б), анодная (в) и анодно-сеточная (г) характеристики

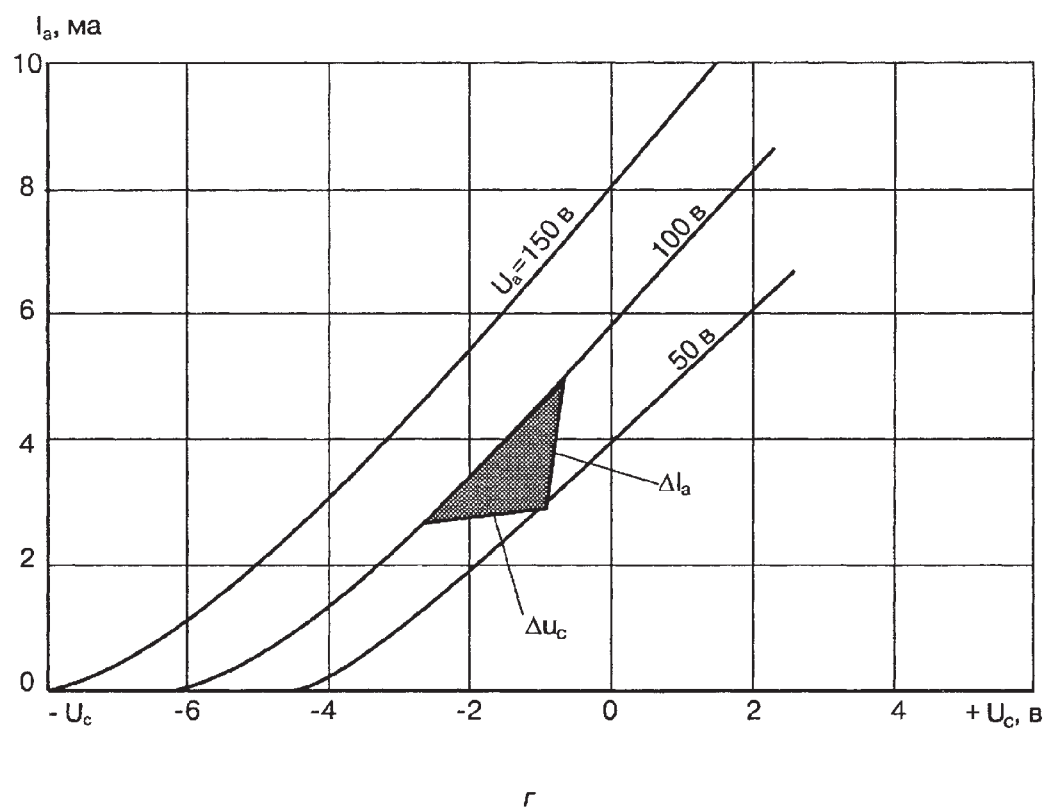
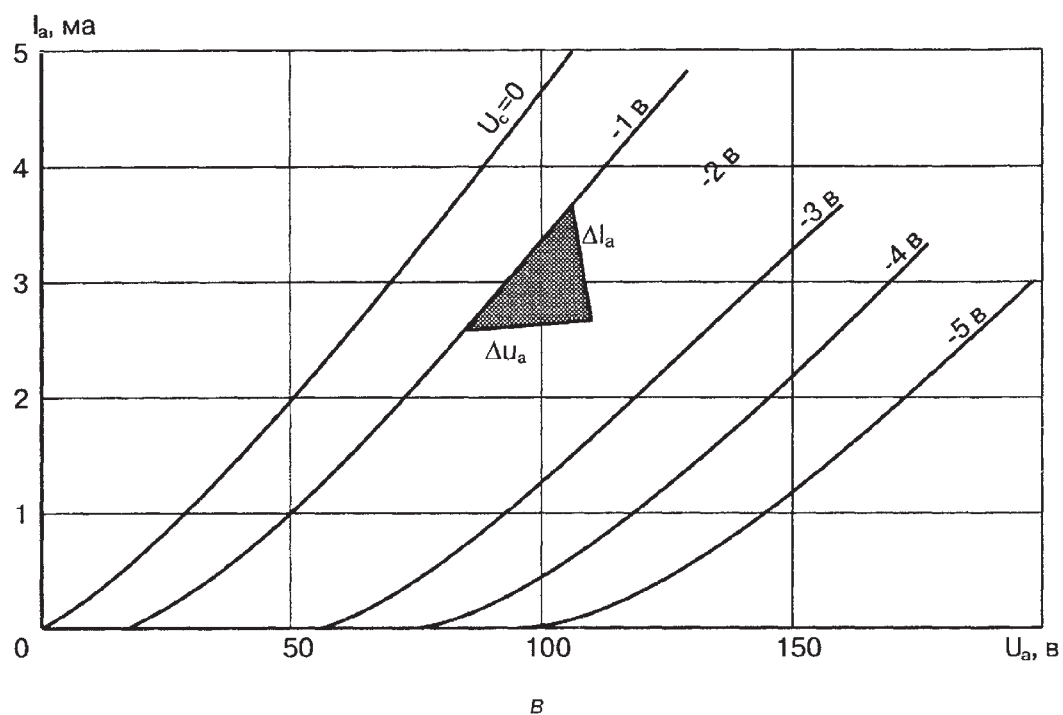


Рис. 1.2. Продолжение

вход) на высоких частотах между анодной и сеточной цепями, возникающая через емкость анод-управляющая сетка.

Тетроды. В тетроде анод и управляющая сетка разделены электростатическим экраном, выполненным в виде экранной сетки.

Экранная сетка не должна препятствовать прохождению электронов от катода к аноду. С этой целью сетка выполняется из тонкого провода, и на нее подается положительное напряжение.

Особенность тетрода — необходимость работы в таком режиме, когда напряжение на экранной сетке ниже напряжения на аноде. Если это требование нарушается, то наблюдается *динатронный эффект*: вторичные электроны, появляющиеся в результате попадания на анод электронного потока, движущегося с весьма большой скоростью, эмитируются с его поверхности и захватываются экранной сеткой. Это вызывает уменьшение анодного тока — вплоть до того, что он может стать равным нулю, а если коэффициент вторичной эмиссии больше единицы, то анодный ток может стать отрицательным. Динатронный эффект может быть устранен при формировании электронного потока в электронные лучи значительной плотности, вследствие чего в области пространства анод-экранная сетка создается отрицательный объемный заряд. Это приводит к появлению вблизи анода области с нулевым потенциалом, преодолеть которую могут лишь электроны, идущие от катода к аноду и имеющие большую скорость. Вторичные электроны, эмитированные анодом, имеют весьма малую скорость, преодолеть область нулевого потенциала они не могут и возвращаются на анод.

Пентоды. В маломощных электронных лампах динатронный эффект устраняется третьей, защитной, или антидинатронной, сеткой, помещаемой между анодом и экранной сеткой и имеющей потенциал, равный потенциалу катода. Трехсеточные (пятиэлектродные) электронные лампы называют пентодами.

Электрическое поле, создаваемое антидинатронной сеткой в пентоде, является тормозящим вне зависимости от значений анодного тока и анодного напряжения. Наличие в пентоде между анодом и управляющей сеткой еще двух сеток практически полностью устраняет между ними емкостную обратную связь даже на очень высоких частотах. Особенность пентодов — возможность подачи напряжения управляющего сигнала не только на управляющую, но и на защитную и экранную сетки, поскольку все три сетки (хотя и с неодинаковой эффективностью) обеспечивают управление плотностью электронного потока.

Многоэлектродные и комбинированные электронные лампы. Увеличение числа сеток в электронной лампе свыше трех-четырех прак-

тически не улучшает ее усилительные свойства настолько, чтобы это было оправдано существенным усложнением производства и снижением надежности эксплуатации.

Электронные лампы с управлением плотностью электронного потока могут работать только на частотах до 2–5 ГГц, поскольку наличие неустраняемых межэлектродных емкостей, индуктивностей вводных электродов и соизмеримость времени пролета электронов в пространстве катод-анод с периодом управляющего сигнала не позволяют использовать принципы управления плотностью электронного потока для усиления напряжений сигналов сверхвысоких частот (СВЧ).

Поэтому для усиления СВЧ-сигналов применяются приборы со скоростным управлением: *клистроны*, *лампы бегущей волны*, *магнетроны* и т. д. Принцип действия этих приборов основан на взаимодействии электромагнитного поля электронных потоков, идущих от катода к аноду, с электромагнитным полем управляющего сигнала, что в определенных условиях может приводить к передаче энергии электронного потока электромагнитному полю управляющего сигнала и, таким образом, к его усилению.

Клистроны. Для усиления и генерации напряжений сверхвысоких частот большой мощности применяются приборы со скоростным управлением, простейшим из которых является *клистрон*.

Схематическое устройство клистрона дается на рис. 1.3 а. Электронный поток, получаемый с поверхности катода, ускоряется полем анода-коллектора и с помощью фокусирующей системы формируется в электронный луч. На пути электронного луча установлено управляющее устройство, называемое группирователем, а на некотором расстоянии от него — приемное устройство, называемое улавливателем.

Управляющее и приемное устройства в простейшем случае представляют собой две сетки, разделенные небольшим зазором. Когда между сетками группирователя действует управляющее напряжение, то на движущиеся к аноду электроны в межсеточном пространстве будет действовать дополнительная сила, замедляющая или ускоряющая их движение. Если управляющее напряжение изменяется по синусоидальному закону, то в зависимости от его фазы электроны будут замедляться или ускоряться. Вследствие того, электроны, имевшие до входа в группирователь скорость v_0 , на выходе будут двигаться с различными скоростями — от $v_0 - \Delta v$ до $v_0 + \Delta v$. Это приведет к тому, что спустя некоторое время после прохождения электронов через группирователь плотность электронного луча начнет изменяться: электроны, имеющие скорость $v_0 - \Delta v$, начнут отставать, а электроны со

скоростью $v_0 + \Delta v$ начнут обгонять электроны, сохранившие неизменную скорость v_0 , в электронном луче, имевшем до входа в группирователь равномерную плотность, появятся периодические уплотнения — сгустки и разрежения, частота следования которых будет равна частоте управляющего сигнала. Степень концентрации электронов в сгустках пропорциональна амплитуде сигнала. Сгруппированный электронный луч затем попадает в улавливатель, взаимодействует с полем его сеток, отдает им свою энергию и уходит на коллектор. Управляющее воздействие может быть весьма слабым, но все равно через какое-то время произойдет группирование луча. При этом энергия сгруппированного луча определяется не энергией управляющего сигнала, а полной энергией электронного луча, т. е. энергией, отбираемой от источника анодного питания.

Лучшие образцы современных клистронов обеспечивают коэффициент усиления по мощности до миллиона раз при выходной мощности до 1000 кВт и КПД до 50 %.

Лампы бегущей волны. Недостатком клистрона является то, что взаимодействие электронного луча с управляющим сигналом и отдача энергии сгруппированным лучом выходному устройству происходят ограниченное время в узком зазоре между сетками. Эффективность работы прибора может быть увеличена, если взаимодействие будет осуществляться более длительное время. Это реализуется в лампах бегущей волны (ЛБВ), в которых взаимодействие управляющего сигнала с лучом происходит практически на всем его протяжении.

Так же как и в клистроне, в ЛБВ электронный поток фокусируется в электронный луч, для улучшения его фокусировки применяется продольное магнитное поле.

Основным элементом лампы является спиральная линия передачи, по которой распространяется электромагнитная волна сигнала, а внутри ее движется электронный поток. Особенностью спиральных линий является то, что в них групповая скорость распространения электромагнитных волн вдоль оси значительно меньше, чем в свободном пространстве. Если скорость движения электронов луча меньше скорости распространения электромагнитной волны, то электроны начинают ее ускоряться, вследствие чего волна отдает энергию электронам. Если скорость движений электронов больше скорости распространения волны, то электроны тормозятся и отдают энергию волне. Торможение приводит к группированию луча в электронные сгустки, что сопровождается интенсивной передачей энергии волне. Чем длиннее спираль, тем большее усиление может быть достигнуто. В ЛБВ можно

обойтись и без замедляющей системы: имеются электронно-лучевые ЛБВ, в которых используется второй электронный луч, движущийся параллельно основному, но несколько медленнее его. Входной сигнал воздействует на оба луча вблизи их выхода из фокусирующей системы, и через некоторое время они оказываются сгруппированными. Поскольку скорости движения сгустков в лучах различны, между ними происходит обмен энергией, в результате чего в «медленном» луче имеет место усиление сигнала.

Лампы бегущей волны являются сравнительно маломощными усилительными приборами и имеют выходную мощность, обычно не превышающую несколько сотен ватт. Это объясняется тем, что величина тока электронного луча ограничивается несколькими сотнями миллиампер. При больших токах существенно усложняется фокусировка луча вследствие взаимного отталкивания электронов. Для получения больших мощностей в настоящее время используются магнетроны.

В *магнетроне* (рис. 1.3, б) имеется цилиндрический катод 2, помещенный точно в центре цилиндрического анода 1. Анод магнетрона выполняется достаточно толстостенным. Это позволяет сделать в его теле несколько *объемных резонаторов* 5. Объемные резонаторы представляют собой цилиндрические отверстия со щелями, открывающимися внутрь междуэлектродного пространства магнетрона. Они являются резонансными (колебательными) системами для сверхвысоких радиочастот и в какой-то мере аналогичны параллельным *LC*-контурам. Объемные резонаторы магнетрона образуют замедляющую систему, вдоль которой может распространяться электромагнитная волна сигнала. Особенностью конструкции магнетрона является наличие сильного поперечного магнитного поля, действующего вдоль оси катода во всем междуэлектродном пространстве. В результате этого на эмитированные катодом электроны действует как электрическое радиальное ускоряющее поле анода, так и поперечное магнитное поле. Вследствие этого траектории электронов искривляются и создается электронное облако, вращающееся вокруг катода. При этом скорость вращения определяется напряженностью электрического и магнитного полей. Если в магнетрон через *входной резонатор* 4 вводится электромагнитная волна сигнала, то вращающееся электронное облако вступает с ней во взаимодействие и передает ей значительную часть своей энергии. Усиленная электромагнитная волна выводится через *выходной резонатор* 3.

Если цепочка объемных резонаторов замкнута, то сигнал с выходного резонатора снова и снова подается на вход, и магнетрон начинает

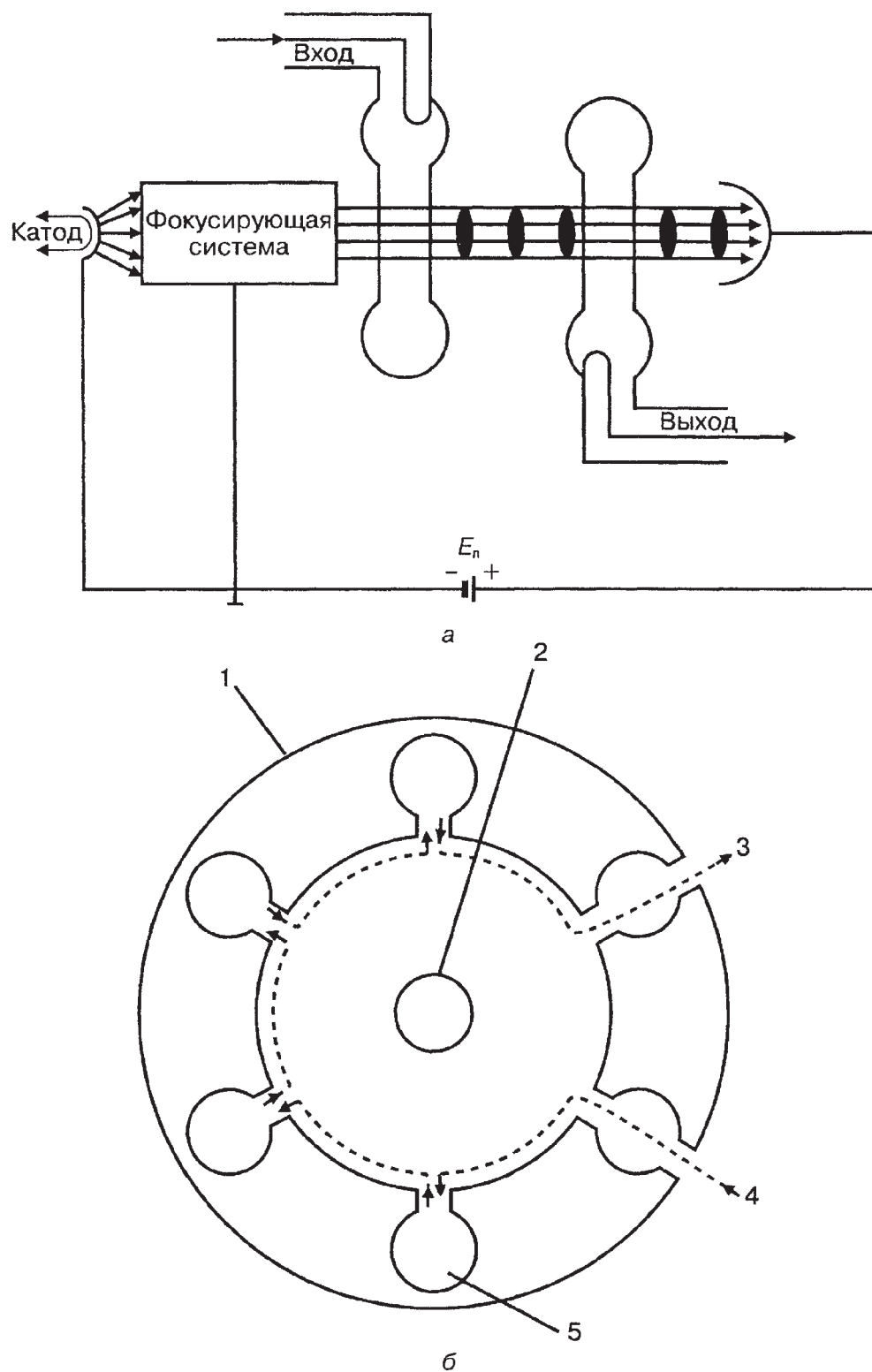


Рис. 1.3. Устройство клистрона (а), магнетрона (б) и электронно-лучевого коммутатора (в)

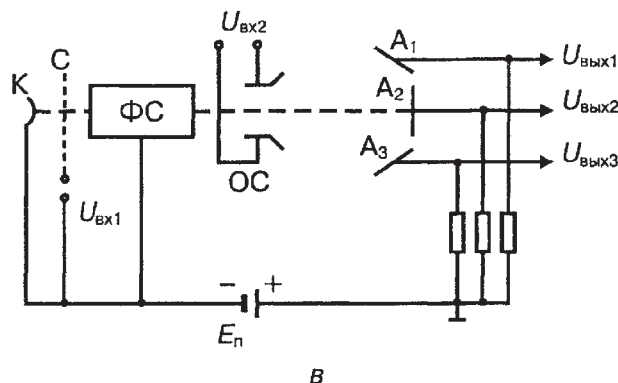


Рис. 1.3. Продолжение

работать как генератор незатухающих колебаний, преобразуя энергию источника анодного питания в энергию СВЧ-колебаний. Современная электроника использует огромное число различных видов магнетронов, имеющих номинальную мощность от сотен ватт до сотен мегаватт. Коэффициент полезного действия магнетронов велик и достигает 95 % при коэффициенте усиления по мощности в несколько десятков раз.

Электронно-лучевые коммутаторы. Относительная простота формирования электронного потока в электронный луч, малая инерционность электронного луча и возможность сравнительно простого управления его положением в пространстве с помощью электрических и магнитных полей привели к разработке различных видов электронных ламп с отклонением луча, из которых важнейшие — электронно-лучевые коммутаторы.

Принцип действия электронно-лучевого коммутатора на три положения (рис. 1.3, в) следующий. Электронный луч, полученный от катода K и сформированный с помощью фокусирующей системы ΦC , проходит между двумя пластинами отклоняющей системы $ОС$. При отсутствии между пластинами напряжения луч не отклоняется и попадает на центральный анод A_2 . Когда между пластинами действует управляющее напряжение $U_{вх2}$, луч отклоняется в вертикальной плоскости. Если на верхней пластине плюс, а на нижней минус, то луч отклоняется вверх и попадает на анод A_1 ; при обратной полярности управляющего напряжения луч отклоняется вниз, и замыкается цепь анода A_3 .

Кроме управления положением луча, возможно управление током луча, что достигается применением обычной управляющей сетки C , на которую подается управляющее напряжение $U_{вх1}$. Помещая в лампу дополнительные пластины горизонтального отклонения, можно перемещать электронный луч и в горизонтальном направлении.

Это позволяет создавать электронно-лучевые коммутаторы со многими тысячами анодов и переключать с огромной скоростью многие тысячи электронных цепей.

Контрольные вопросы

1. Можно ли (и как) выполнить электронную лампу с управлением плотности электронного потока магнитным полем?
2. Предложите конструкцию электронной лампы с холодным катодом и управлением плотностью электронного потока.
3. Как, по вашему мнению, может быть выполнена электронная лампа для работы на низких частотах с управлением скоростью электронов?

1.2. Газоразрядные (плазменные) приборы

В электронных вакуумных лампах перенос электрического тока осуществляется электронами. В плазменных лампах (внутри колб которых находится инертный газ) в процессе работы происходит ионизация молекул газа, и возникают положительно заряженные ионы, в результате чего промежуток пространства между катодом и анодом оказывается заполнен *плазмой*: примерно равным числом электронов и положительно заряженных ионов газа.

В общем случае прохождение электрического тока через любой газ практически всегда сопровождается процессом ионизации — образованием положительных и отрицательных ионов, возникающих при столкновении электронов, движущихся к аноду, с молекулами газа. Ионизация — пороговый процесс: для образования иона энергия движущегося электрона должна быть выше энергии связи валентных электронов с атомным ядром. Если электрон обладает меньшей энергией, то ионизации не происходит. Однако при этом атом возбуждается и полученная энергия переводит один из его валентных электронов на более высокий энергетический уровень, с которого он через некоторое время возвращается в нормальное состояние, излучая избыток энергии в виде электромагнитного кванта. Этот квант может быть затем поглощен ближайшим атомом, что приводит к его возбуждению, после этого квант повторно излучается и может быть захвачен новым атомом и т. д. Таким образом, избыток энергии задерживается в объеме газа на некоторое время, что увеличивает вероятность ионизации. Процесс ионизации неизбежно сопровождается деионизацией (рекомбинацией): положительные ионы захватывают «медленные» электро-

ны, в результате чего появляются возбужденные атомы, излучающие избыток энергии в виде фотонов инфракрасного, ультрафиолетового или видимого света. В процессе ионизации также принимают участие ионы: двигаясь к катоду, они соударяются с атомами газа и, если скорость достаточно велика, производят ионизацию. Достигая катода, ионы вызывают появление вторичных электронов, после этого рекомбинируют с частью эмитированных с поверхности катода электронов и становятся нейтральными.

Наличие в газе тяжелых и малоподвижных положительных ионов приводит к компенсации отрицательного объемного заряда, создаваемого электронным потоком, идущим от катода к аноду, — образуется в целом электрически нейтральная, но достаточно хорошо проводящая электрический ток плазма. В результате этого состояние объема газа между катодом и анодом в какой-то мере напоминает состояние в металлическом проводнике, в котором имеются способные перемещаться электроны проводимости и неподвижные ионизированные атомы металла. При этом падение напряжения на участке катод—анод лампы (а следовательно, и внутреннее сопротивление) становится очень малым.

В принципе плазменные лампы могут работать как с нагретым, так и с холодным катодом, надо только каким-либо образом первоначально пропустить импульс тока между катодом и анодом, после чего ток через прибор самостоятельно поддерживается за счет автоэлектронной эмиссии и вторичной эмиссии электронов, выбиваемых с поверхности отрицательно заряженного катода ударяющимися о него положительными ионами. В режиме холодного катода работает большая часть плазменных ламп. В тех случаях, когда внутреннее сопротивление должно быть минимальным, применяют термоэлектронный катод.

Плазменные лампы управляются электрическими, магнитными, тепловыми или радиационными полями, с помощью которых можно управлять моментом включения и выключения, можно изменять величину рабочего тока или пространственное положение электрического разряда.

При работе в плазменной лампе возникает свечение: рекомбинирующие с электронами ионы отдают излишек энергии в виде света. Поэтому плазменные лампы используются в качестве источников света.

В режиме несамостоятельного газового разряда, при анодных токах в единицы—десятки микроампер, работают ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и детекторы радиоактивных и космических излучений. При работе в этом режиме анодный ток прямо пропорционален интенсивности ионизирующего излучения.

В режиме самостоятельного (тлеющего) разряда, при анодных токах в единицы–десятки миллиампер, работает большинство плазменных ламп, применяемых в электронике. Это объясняется тем, что: 1) лампы тлеющего разряда легко управляются (моментом включения); 2) в них используется холодный катод; 3) потери электрической энергии на внутреннем сопротивлении малы; 4) при прохождении тока наблюдается яркое свечение, позволяющее находить неисправные лампы, а также применять их в качестве различных индикаторов; 5) лампы тлеющего разряда дешевы, имеют простое устройство и практически неограниченный срок службы.

Важнейшие приборы тлеющего разряда — стабилитроны и индикаторные лампы. Работа стабилитронов основана на свойстве тлеющего разряда поддерживать неизменным напряжение горения при больших изменениях анодного тока.

Яркое свечение тлеющего разряда привело к широкому использованию диодов в качестве цветных световых индикаторов и указателей. Если баллон светового индикатора заполнен неоном, то свечение будет оранжево-красным; аргон дает сиреневое свечение, криптон — голубое, гелий — синее.

Если к аноду плазменной лампы приложено достаточно высокое напряжение, то в лампе может возникнуть дуговой разряд: практически все молекулы газа оказываются ионизированными и внутреннее сопротивление становится очень малым. Высокая электропроводность плазмы в режиме дугового разряда позволяет создавать дуговые выпрямительные лампы большой мощности, используемые для выпрямления токов в десятки тысяч ампер промышленной частоты и преобразования постоянных напряжений в переменные. Кроме того, яркое свечение плазмы дугового разряда используется в мощных источниках света практически любого спектрального состава.

Выпрямительные диоды дугового разряда — *газотроны* — имеют термоэлектронные катоды, вследствие этого их включение (зажигание дуги) происходит при низком анодном напряжении.

Важнейшие управляемые приборы дугового разряда — *тиратроны*. Тиратроны выполняются в виде триодов (термоэлектронный катод, управляющая сетка, анод), тетродов и пентодов. Термоэлектронный катод тиратрона может быть прямого подогрева и косвенного.

Когда катод нагрет, а на анод подано положительное напряжение, в тиратроне может возникнуть дуга лишь в том случае, если на управляющей сетке нет запирающего отрицательного напряжения. Для включения тиратрона на управляющую сетку подается положитель-

ный импульс запуска, при этом отрицательное напряжение на управляющей сетке уменьшается, электроны устремляются к аноду, ионизируя по пути молекулы газа, после этого сетка практически теряет свое управляющее действие и с ее помощью невозможно ни погасить тиратрон, ни сколько-нибудь существенно изменить значение анодного тока. Отрицательно заряженную сетку «обволакивают» положительные ионы газа и полностью нейтрализуют ее поле. Для выключения тиратрона необходимо или разорвать цепь источника анодного питания, или значительно уменьшить анодный ток, или подать на анод отрицательный импульс напряжения. При этом плазма рекомбинирует, сетка восстанавливает свои управляющие свойства и запирает тиратрон. Тиратроны в настоящее время используют в энергетике больших мощностей, при токах в десятки тысяч ампер и очень высоких рабочих напряжениях в десятки—сотни тысяч вольт, импульсных модуляторах и разрядниках, в ускорителях заряженных частиц, мощных радиолокаторах, экспериментальных термоядерных реакторах и т. д.

Контрольные вопросы

1. Предложите конструкцию газоразрядного прибора, управляемого электромагнитным полем; потоком частиц высоких энергий.
2. Почему в режиме тлеющего разряда падение напряжения между катодом и анодом практически не зависит от величины тока?
3. Как может быть устроен тиратрон с холодным катодом?

1.3. Физические основы работы полупроводниковых электронных приборов

В полупроводниковых электронных приборах наиболее широко используются контактные явления, возникающие на границах разделов: металл-полупроводник, полупроводник с электронной проводимостью — полупроводник с дырочной проводимостью. Контакт двух разнородных полупроводников (электронного и дырочного) принято называть *электронно-дырочным n - p -переходом*.

Под электронными (n -полупроводниками) понимают полупроводники типа германия, кремния, селена, карбида кремния, арсенида галлия и т. д., в которые искусственно введены атомы примесей, имеющих валентность большую, чем валентность полупроводника. При этом каждый атом примеси-«донора» отдает один из валентных электронов, который становится электроном проводимости и способен переносить электрический ток. Для четырехвалентных кремния и герма-

4. Висновки

За результатами досліджень запропоновано використати в якості джерела поляризованого світла дисплейний екран персонального комп'ютера або смартфонів, планшетів. Це дало можливість наблизити контроль наявності механічних напружень у оптично прозорих матеріалах до умов виробництва. Також запропоновано і досліджено можливість покращення чутливості та точності контролю при використанні модуляційно-поляризаційного методу.

Література

1. Ключев, В. В. Неразрушающий контроль [Текст]: справочник / В. В. Ключев. — М.: Машиностроение, 2004. — В 7 т., Т. 3. — 864 с.
2. ГОСТ Р 53696-2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения [Текст]. — М.: Стандартинформ, 2010. — 12 с.
3. Ландсберг, Г. С. Оптика [Текст] / Г. С. Ландсберг. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 848 с.
4. Застосування плоского або телевізійного екрана в стані включення в електричну мережу живлення персонального комп'ютера або телевізора як джерела інфрачервоного випромінювання [Текст]: патент України на корисну модель № 78910 від 10.04.2013 / Венгер Є. Ф., Маслов В. П., Качур Н. В., Лабузов О. Є., Афонін А. В., Кушовий С. М. — 2013. — Бюл. № 7.
5. Сардега, Б. К. Модуляційна поляриметрия [Текст] / Б. К. Сардега. — К.: Наукова книга, 2011. — 260 с.
6. Пристрій для контролю якості оптичних матеріалів [Текст]: патент України на корисну модель № 39789 від 10.03.2009 / Венгер Є. Ф., Сардега Б. К., Маслов В. П., Качур Н. В. — 2009. — Бюл. № 5.
7. Сардега, Б. К. Комплексні дослідження якості сапфірових вікон сучасними неруйнівними методами [Текст] /

Б. К. Сардега, І. Є. Матяш, П. М. Литвин, В. П. Маслов, С. М. Кушовий // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. — 2012. — №43. — С. 54-60.

8. Кардона, М. Модуляционная спектроскопия [Текст] / М. Кардона. — М: Мир, 1972. — 416 с.
9. Спосіб контролю матеріалів, прозорих в оптичному діапазоні випромінювання [Текст]: патент України на корисну модель № 49479 від 26.04.2010 / Венгер Є. Ф., Качур Н. В., Кіндрась О. П., Локшин М. М., Ляпіна А. Б., Марічева І. Л., Маслов В. П., Родічев Ю. М. — 2010. — Бюл. № 8.
10. Спосіб лазерного контролю якості кристалічних матеріалів, прозорих в оптичному діапазоні випромінювання [Текст]: патент України на корисну модель № 57495 від 25.02.2011 / Венгер Є. Ф., Качур Н. В., Маслов В. П. — 2011. — Бюл. № 4

РАЗВИТИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СПОСОБОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены методы оптического неразрушающего контроля. Исследована возможность использования оптического поляризационного способа контроля для выявления механических напряжений в стекле. Исследованы возможности повышения точности оптического контроля. Результаты исследования могут быть применены в оптическом производстве для контроля качества материалов и готовых оптических деталей

Ключевые слова: техническая диагностика, оптический метод контроля, поляризация.

Качур Наталя Володимирівна, молодший науковий співробітник, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкар'єва НАН України, Україна, e-mail: natalykachur@gmail.com

Качур Наталя Владимировна, младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкар'єва НАН Украины, Украина, e-mail: natalykachur@gmail.com

Kachur Nataliya, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Ukraine, e-mail: natalykachur@gmail.com

УДК 537.5

Новосядлий С. П.,
Кіндрат Т. П.

ВАРІЗОННІ НАПІВПРОВІДНИКИ ТА ЇХНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Представлено аналіз варізонних напівпровідників, які використовуються для створення сонячних елементів. Встановлено можливості підвищення їхнього ККД. Варізонні напівпровідники - це кристали, в яких енергетичні параметри зонної структури - ширина забороненої зони, спин-орбітальне розчинення в v -зоні, а також ефективні маси носіїв заряду і діелектрична проникливість, плавно змінюються вздовж одного або декількох напрямів.

Ключові слова: варізонний, напівпровідник, кристал, сонячний елемент.

1. Вступ. Зонна діаграма кристалу

Интерес до варізонних напівпровідників викликано особливостями, проявлених в них багатьох фізичних явищ, а також виникненням нових ефектів, не властивих напівпровідникам з однорідною зонною структурою, які пазвемо гомозонними. Просторова залежність ширини забороненої зони приводить до появи вмонтованих квазіелектричних шарів, різних за величиною для дірок і електронів, що відповідно змінюють їх рухливість. Це зумовлює дифузійно-дрейфовий механізм переносу нерівноважних носіїв заряду, зміну координатного розподілу їх концентрацій, зміну умов

поверхневої рекомбінації в порівнянні з гомозонними напівпровідниками. А це відкриває нові можливості для формування нових видів напівпровідникових приладів для структур ВІС. Всі ці особливості приводять до суттєвих відмінностей в інжекційних, фотоелектричних і люмінісцентних явищах [1]. Вигляд зонної структури варізонного напівпровідника визначається просторовим розподілом вмонтованого мікрорісталу, а також наявністю внутрішніх та зовнішніх мікрополів: поля магнітних напружень, електричного, температурного. Неоднорідність таких полів в просторі приводить до відповідної неоднорідності зонної структури, що є наслідком дії двох механізмів. За одним із них зовнішні

мікрополя спотворюють мікропотенціали в кожній електричній коміці, відповідно змінюють обумовлену цим мікропотенціалом зонну структуру, за другим механізмом потенціальна енергія електронів в монокристалі додається до енергії електронів в дозволений зоні $\epsilon(\vec{R}, \vec{r})$, де \vec{r} - радіус вектор, \vec{R} - хвильовий вектор для даного стану в зоні. В результаті цього повна енергія електронів в зоні визначається виразом:

$$E = \epsilon(\vec{R}, \vec{r}) - q\phi(\vec{r}), \quad (1)$$

де $\phi(\vec{r})$ - потенціал електростатичного мікрополя.

Розглянемо більш детально зв'язок між енергією зони провідності E_c і ϕ для кристалу змінного складу, враховуючи градієнт електричної спорідненості. Позначимо через E_0 енергію електрона в стані спокою у вакуумі при відсутності зовнішнього макрополя (рис. 1). Координатна залежність макрополя описується рівністю

$$E^*(z) - E_0 = -q\phi(z). \quad (2)$$

Електронна спорідненість визначається як $\Theta = E^* - E_c$. При $E^* = E_0$ і величина електронної спорідненості на межі кристалу з вакуумом рівна Θ_0 , тоді

$$\begin{aligned} E_c(z) &= E_0 - \Theta(z) - q\phi(z) = \epsilon_c(z) - q\phi(z), \\ E_v(z) &= E_0 - \Theta(z) - E_0(z) = \epsilon_v(z) - q\phi(z). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким чином, повна потенціальна енергія електрона в с-зоні складається із зонної енергії, що визначається мікрополем кристалу та електростатичної потенціальної енергії $q\phi(z)$, що визначається вже макрополем. Ці дві величини є координатно залежними [2].

Отже прийнятий для гомозонних напівпровідників прийом опису потенціалу макрополя ϕ за допомогою енергетичного рівня, що проходить через середину забороненої зони є вже неможливим для варізонних напівпровідників. Це пов'язано із тим, що $\nabla\phi$ згідно (3) і рис. 1 є не пропорційний ∇E_c та ∇E_v .

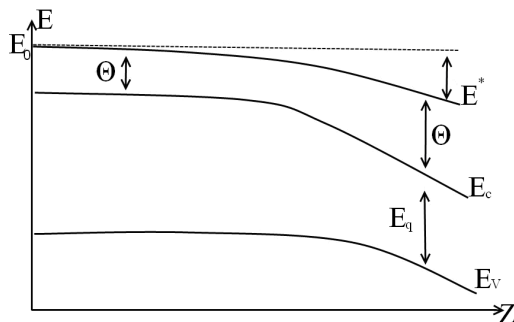


Рис. 1. Одномірна модель варізонного напівпровідника

2. Високоєфективні сонячні елементи на варізонних структурах

Варізонним напівпровідникам властиві принципові особливості в спектральних залежностях і величинах власної фотопровідності в порівнянні з гомозонними матеріалами, що освітлені з широкозонної сторони обумовлено наступним:

1. Випромінювання поглинається в діапазоні $\Delta E_q = E_q^{\max} - E_q^{\min}$, а це досить сильно розширює область спектральної чутливості.
2. Фотони з енергією $h\nu$ локально поглинаються в об'ємі в точці Z_0 де $E_q(Z_0) = h\nu$, тобто може підвищуватись фоточутливість за рахунок зниження рекомбінаційних втрат на освітлений поверхні, до якої ННЗ рахуються в гальмівному полі [3].
3. При швидкості дрейфу ННЗ, спів розмірною із швидкістю рекомбінації I_0 , вплив поверхневої рекомбінації значно послаблюється і в області $h\nu > E_q^{\max}$. Це відповідно підвищує фоточутливість і в короткохвильовій частині спектру, причому при достатньо великих ∇E_q короткохвильовий край може бути зміщений в область енергії фотонів, які суттєво підвищують E_q^{\max} .
4. Носії створені фотонами з енергією $h\nu \approx E_q^{\min}$, причеплюються вмонтованими полями до вузькозонної поверхні. При високих значеннях поверхневої рекомбінації I_d фоточутливість в довгохвильовій області спектру може і знижуватись [4].

Однією із перспективних застосувань приладів із фотовольтаїчними ефектами на основі варізонних напівпровідників є сонячна енергетика. Типова структура і спрощена еквівалентна схема варізонного сонячного ФЕП з р-n-переходом приведена на рис. 2.

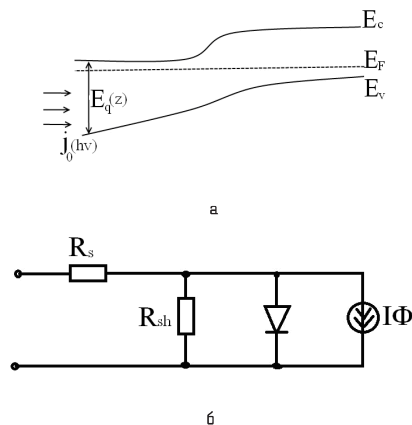


Рис. 2. Зонна діаграма варізонного ФЕП (а) та еквівалентна схема (б)

Основною величиною, що пред'являється до СЕ – це висока ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, що характеризується ККД $\eta = P/P_0 = N/P_0$, де I, V - вихідний струм і напруга СЕ, а P_0 - потужність падаючого випромінювання [5]. Для забезпечення максимального ККД необхідно забезпечити максимальну вихідну потужність $P_m = I_m \cdot V_m$, що визначається матеріалом, конструкцією приладу і відповідними вибором робочої точки на ВАХ. В даному режимі фактор заповнення $FF = \frac{V_m I_m}{I_{sc} V_{oc}}$, де I_{sc}, V_{oc} - струм короткого замикання та напруга холостого ходу ФЕП [6].

Величина R_x слабо впливає на вихідну потужність і нею можна в повній мірі знехтувати. В той час ще опір R_s величиною в декілька Ом приводить до зниження вихідної потужності на десятки процентів.

Для отримання максимальної вихідної потужності потрібно задовільнити ряд протирічних величин, які

необхідно пред'явити до матеріалу і конструкції ФЕП. Тут також необхідно забезпечити оптимальне узгодження його спектральної характеристики із спектром випромінювання сонця. Вузкозонні напівпровідники поглинають значну долю сонячних фотонів і, як наслідок, дають великі значення фотоструму. Про те при цьому генерується низька фото е.р.с [7]. Крім цього, вся надлишкова на E_g енергія фотонів губиться на розігрів ґратки. При величинах E_g досягаються високі значення е.р.с і малі значення струму насичення I_0 , але більша частина фотонів з $h\nu < E_g$ взагалі не поглинаються. Розрахунки показують, що для ідеальних гомозонних ФЕП в земних умовах оптимальне значення $E_g = 1,35\text{eV}$, що забезпечує К.К.Д $\eta = 31\%$. В космічному просторі максимальною ефективністю повинні мати СЕ з $E_g \geq 1,6\text{eV}$ [8].

Причинами втрат генерованих світлом носіїв заряду, які обмежують ККД є поверхнева і об'ємна рекомбінація. Для зниження об'ємних втрат необхідно розміщувати р-п-перехід ближче до поверхні. Проте при цьому зменшується вклад фото е.р.с довгохвильових фотонів і збільшується послідовний опір R_s , що є небажаним. Відповідно для зменшення R_s необхідно підвищувати провідність поверхневого шару, але при високих концентраціях легуючої домішки зменшується дифузійна довжина і скорочується область збирання фото носіїв [9].

На гомозонних ФЕП із GaAs з р-п-переходом при оптимальній конструкції з просвітлюючим покриттям досягнутий ККД 19,3 % в умовах освітлення AM1.

Значний крок вперед в покращенні параметрів СЕ зв'язаний із застосуванням гетеропереходів. Наявність широкозонних вікон дозволила значно розширити спектральні характеристики СЕ у високоенергетичну область, збільшити товщину фронтального шару і таким чином понизити R_s , враховуючи параметри контактної ґребінки. В результаті в гетероепітаксійній системі р-Al_{0.3}Ga_{0.7}As-n-GaAs досягнута ефективність $\geq 25\%$ при AM1 [10].

3. Висновки

1. У варизонних напівпровідниках просторова залежність ширини забороненої зони зумовлює дифузійно-дрейфовий механізм переносу нерівноважних носіїв заряду, зміну координатного розподілу їх концентрацій, зміну умов поверхневої рекомбінації в порівнянні з гомозонними напівпровідниками.
2. Наявність широкозонних вікон дозволила значно розширити спектральні характеристики СЕ у високоенергетичну область, збільшити товщину фронтального шару і таким чином понизити R_s , враховуючи параметри контактної ґребінки. В результаті в гетероепітаксійній системі р-Al_{0.3}Ga_{0.7}As-n-GaAs досягнута ефективність $\geq 25\%$ при AM1.

Література

1. Новосядлий, С. П. Технологія САПР на основі тестових структур [Текст] / С. П. Новосядлий // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т3, №3. – С. 179-189.
2. Новосядлий, С. П. Моделювання субмікронної та нанотехнологій на основі ТС [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук, С. М. Вертепний // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 1/7 (37). – С. 26-38.
3. Шур, М. Современные приборы на арсениде галлия [Текст]/

- М. Шур. – М.: Мир, 1991. – 628 с.
4. Афанасьев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки ПД нейтронная техника. Сер 1 [Текст] / В. А. Афанасьев, М. П. Духновский, Т. А. Крысев // Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 12. – С. 24-29.
5. Новосядлий, С. П. Технологічні особливості, формування шаруватих наноструктур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008. – № 44. – С. 32-38.
6. Ди Лоренцо, Д. В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления БИС [Текст]: пособ.; пер. с англ. / под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Кандедула. – М: Радио и связь, 1988. – 49 с.
7. Новосядлий, С. П. Багатозарядна радикальна імплантатія при формуванні SOI- структур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т. 9, № 3. – С. 659-667.
8. Новосядлий, С. П. Багатозарядна іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишень і металізації субмікронних структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський // Металлофізика і новітні технології. – 2007. – Т. 29, №7. – С. 857-866.
9. Аванс, Н. А. Основы микроэлектроники [Текст]: учеб. / Н. А. Аванс, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. – М: Радио и связь, 1999. – С. 64-67.
10. Новосядлий, С. П. Джерела іонів для формування шаруватих структур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський // Прикарпатський вісник НТШ. – 2008. – № 1. – С. 151-158.

ВАРИЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Представлен анализ варизонных полупроводников, которые используются для создания солнечных элементов. Установлено возможности повышения их КПД. Варизонных полупроводники - это кристаллы, в которых энергетические параметры зонной структуры - ширина запрещенной зоны, спин-орбитальное растворение в ν -зоне, а также эффективные массы носителей заряда и диэлектрическая проницаемость, плавно меняются вдоль одного или нескольких направлений.

Ключевые слова: варизонный, полупроводник, кристалл, солнечный элемент.

Новосядлий Степан Петрович, доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, Україна, e-mail: nsp@pu.if.ua

Кіндрат Тарас Петрович, аспірант, кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки, Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, Україна, e-mail: kindrat@i.ua

Новосядлий Степан Петрович, доктор технических наук, профессор, кафедра компьютерной инженерии и электроники, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаника, Украина, e-mail: nsp@pu.if.ua

Киндрат Тарас Петрович, аспирант, кафедра компьютерной инженерии и электроники, Прикарпатский национальный университет им. В. Стефаника, Украина, e-mail: kindrat@i.ua

Novosyadlyy Stepan, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine, e-mail: nsp@pu.if.ua

Kindrat Taras, Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ukraine, e-mail: kindrat@i.ua