

12. Liang C., Yu-Ru Li, Li-Hung Lin, Po-Tsun Lin, Chun-Kai Yang, Yen Shung Tseng, Kuang Yao Chen, Cooper N., Simmons M., Ritchie D. Electron heating and huge positive magnetoresistance in an AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor structure at high temperatures // APPL. PHYS. LETT. – 2008. – №92. – P.152117.

13. Hashim, Abdul Manaf, Ahir, Zon Fazlila Mohd, Kasai, Seiya, Hasegawa, Hideki. Odd Harmonic Responses in Two-Dimensional AlGaAs/GaAs HEMT Devices Due to Plasma Wave Interaction // AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol. 1150. – P.328-335.

14. Белов Л. Твердотельные усилители малой и средней мощности // Электроника: НТБ. – 2006. – №5. – с.50.

15. Аболдуев И.М., Гладышева Н.Б., Дорофеев А.А. Разработка HEMT на основе гетероструктур AlGaIn/GaN/сапфир // Материалы VI-ой НТК «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА». – 2007. – с. 39.

Дяченко С.М., Павлюченкова А.М. Розвиток HEMT. В статті наводиться огляд останніх робіт і перспективні напрямки розвитку транзисторів з високою рухливістю електронів

Ключові слова: нітрид галію, HEMT

Дяченко С.М., Павлюченкова А.М. Развитие HEMT. В статье приводится обзор последних работ и перспективные направления развития транзисторов с высокой подвижностью электронов

Ключевые слова: нитрид галлия, HEMT

Dyachenko S.M., Pavlyuchenkova A.M. Development HEMT. This paper provides an overview of recent work and future directions High Electron Mobility Transistor development

Key words: Gallium Nitride, HEMT

УДК 533.9.082.74

МЕТОДИ НВЧ-ДІАГНОСТИКИ ПЛАЗМИ

Воропаєв П.В., Митрофанов А.Б., Біденко В.А., Зоренко О.В.

Цей огляд присвячений методам НВЧ-діагностики, заснованим на зондуванні плазми електромагнітними хвилями і на реєстрації власного випромінювання плазми. Ці методи найбільш широко використовуються на великих термоядерних установках типу ТОКАМАК і Стеларатор. В огляді розглядаються проблеми багатоканальної інтерферометрії [1], особливості поляриметрії [2] та велика увага приділяється циклотронній НВЧ-діагностиці [3]. Як відомо, за допомогою перерахованих методів можна отримати дані по просторово-часовим залежностям основних параметрів плазми: щільності плазми, температури електронів та іонів, модуля та напрямку магнітної індукції пологоїдалного поля.

Тенденція до збільшення розрядного струму, а отже, і поздовжнього магнітного поля, щільності, температури і розмірів плазми в установках сучасного і майбутнього покоління викликає необхідність залучення для ді-

агностики широкого діапазону довжин хвиль – від сантиметрових до видимих. Застосування НВЧ-діагностики на сучасних установках пов'язане з подоланням труднощів, що не зустрічалися раніше. Зазвичай у приміщенні, де знаходиться установка, розміщують мінімум діагностичної апаратури, яка надійно працює в умовах іонізуючого випромінювання та електромагнітних завад. Доступ до неї протягом експерименту обмежений. Основна частина апаратури зосереджена в приміщенні за радіаційним захистом. Тому сигнали НВЧ необхідно передавати на десятки метрів з мінімальними втратами та спотвореннями.

Через складну конфігурацію установок непросто на практиці є введення зондуючого випромінювання та його виведення з розрядної камери. Доводиться також боротися з впливом вібрацій елементів установки (протягом розряду) на результати вимірювань. Висока вартість робочого часу установок вимагає комплексного використання діагностичних засобів, які повинні забезпечити максимум інформації про плазму за один розряд. При цьому важливо, щоб апаратура для цієї мети мала достатній ресурс безвідомної роботи.

Інтерферометрія

Для дослідження розподілу концентрації електронів в плазмі (рельєфу концентрації) на великих ТОКАМАКАх застосовують багатоканальні інтерферометри, кожен канал яких представляє собою окремий інтерферометр, побудований по одній з трьох основних схем. Схема Маха - Цендера, що заснована на проходженні хвилі через систему дзеркал, застосовується для зондування плазми тільки у вертикальних каналах. Схема Майкельсона і схема Маха-Цендера, що працює на відбиття, можуть використовуватися як у вертикальних, так і в горизонтальних каналах.

Принцип дії інтерферометра полягає в наступному: зондуєча хвиля просторово розділяється на дві (або більше) когерентні хвилі, що розповсюджуються різними шляхами. При порівнянні хвиль, що пройшли крізь досліджуваний об'єкт, із опорною когерентною хвилею, можливо визначити фазовий зсув, що вносить об'єкт дослідження, а, отже, і щільність плазми.

Якщо частота звичайної хвилі набагато більше плазмової ($\omega \gg \omega_{pe}$), то при появі плазми між рупорами фазовий зсув змінюється на величину:

$$\delta\varphi = \int \delta k dl = \int \frac{\omega}{c} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}} \right) \approx \int \frac{\omega}{2c} \cdot \frac{n_e}{n_{cr}} dl, \quad (1)$$

де k – хвильове число, n_e – щільність плазми, n_{cr} – критична щільність плазми, при якій відбувається відсічка хвилі з частотою ω . Для її обчислення використовують наступну практичну формулу: $n_{cr} = \frac{m_e \omega^2}{4\pi e^2} = 1,1 \cdot 10^{13} \cdot \frac{1}{\lambda^2}$,

де m_e – маса електрону ($9,1094 \times 10^{-31}$ кг); e – заряд електрону ($1,6022 \times 10^{-19}$ Кл); λ – довжина зондууючої хвилі. Співвідношення (1) справедливо також і для випадку незвичайної хвилі, якщо додатково забезпечити виконання умови того, щоб частота цієї хвилі була набагато більше циклотронної ($\omega \gg \omega_{ce}$).

У сучасних інтерферометрах вибір робочої довжини хвилі зумовлюється з одного боку прагненням позбутися впливу рефракції, а також підвищити просторову роздільну здатність (необхідно зменшувати довжину хвилі). З іншого боку, при зменшенні довжини хвилі зростають похибки вимірювання фази, викликані вібраціями і зменшенням фазової чутливості.

Для компенсації вібрацій використовується різна залежність зсуву фаз, викликаного плазмою і пов'язаного з вібраціями, від робочої довжини хвилі. Для знаходження зсуву фази, що створюється плазмою (рад) при роботі на відбиття, зручно користуватись формулою: $\delta\varphi_{\text{пл}} = 5,64 \cdot 10^{-14} \langle nL \rangle \lambda$, де $\langle nL \rangle$ – лінійна концентрація плазми, см^{-2} [2]. Зсув фази, пов'язаний з вібраціями величиною Δl , обернено пропорційний λ : $\delta\varphi_{\text{віб}} = 4\pi\Delta l / \lambda$. Якщо фаза вимірюється одночасно і незалежно на двох хвилях ($\lambda_1 > \lambda_2$), виміряні фази будуть відповідно рівні: $\delta\varphi_1 = \delta\varphi_{\text{пл}1} + 4\pi\Delta l / \lambda_1$ та $\delta\varphi_2 = \delta\varphi_{\text{пл}2} + 4\pi\Delta l / \lambda_2$,

$$\text{звідки } \delta\varphi_{\text{пл}} = \frac{\lambda_1(\delta\varphi_1\lambda_1 - \delta\varphi_2\lambda_2)}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}.$$

Якщо вибрати $\lambda_2 \ll \lambda_1$, то фаза $\delta\varphi_2$ практично буде пов'язана тільки з вібраціями і обробка вихідних сигналів значно спрощується. Наприклад, на ТОКАМАКу Doublet-III [4] (рис. 1) в якості основного і компенсаційного використовуються лазери на CO_2 і HeNe відповідно. Кутовий відбивач 7 за час пострілу, що триває 0,5 с, переміщується на відстань 1,5 см зі швидкістю 3 см/с, створюючи доплерівські зсуви частот, які використовуються в якості проміжних частот для сигналів обох лазерів. В електронній схемі з сигналів проміжних частот знаходиться фаза, пропорційна концентрації плазми.

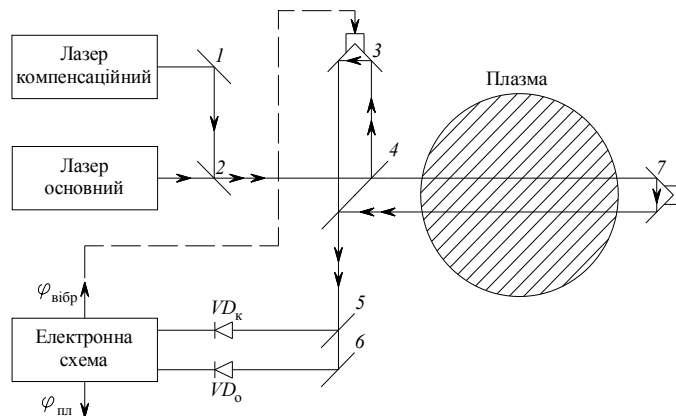


Рис. 1. Схема компенсації вібрацій

Більш перспективним виглядає використання лазерів, що працюють на близьких довжинах хвиль. Вважаючи похибки вимірювання фази кожним з інтерферометрів рівними $\delta\varphi_{\text{вим}} = \delta\varphi_1 = \delta\varphi_2$, знаходимо, що відносно збільшення похибки розрахунку $\delta\varphi_{\text{пл}}$ в залежності від λ_2/λ_1 визначається виразом:

$$\delta\varphi_{\text{пл}}/\delta\varphi_{\text{вим}} = \left(1 - \lambda_2/\lambda_1\right)^{-1}.$$

Таким чином, при роботі на близьких довжинах хвиль для вимірювального та компенсаційного інтерферометрів можуть бути використані одні й ті ж елементи тракту та однакові конструкції лазерів, що спрощує проблему побудови схеми інтерферометра з компенсацією вібрацій.

Поляриметрія

Цей метод оснований на вимірюванні параметрів плазми по поляризаційним характеристикам зондуєчого НВЧ-сигналу. Досвід використання поляриметрії на сучасних ТОКАМАКАх показав прийнятні результати вимірювань, що свідчить про доцільність використання цього методу для дослідження плазми і в подальшому.

Як відомо, електромагнітна хвиля \mathbf{E} , що розповсюджується в напрямку \mathbf{k} через плазму з концентрацією n , що знаходиться в магнітному полі \mathbf{B} , змінює свої поляризаційні характеристики: ступінь еліптичності χ і напрямки поляризації ψ . Характер зв'язку χ та ψ з векторами \mathbf{E} , \mathbf{k} і \mathbf{B} залежить від взаємного розташування останніх.

При розповсюдженні вздовж магнітного поля лінійно поляризовану хвилю можна представити як суперпозицію двох хвиль з круговою поляризацією протилежних напрямків. Оскільки постійні розповсюдження цих хвиль різні, вектор сумарного поля, залишаючись лінійно поляризованим, повертається в площині, перпендикулярній напрямку розповсюдження. В результаті спостерігається так зване Фарадееве обертання. При цьому кут повороту $\theta \propto \lambda^2 \int_{-z}^z n(z)B(z)dz$.

Сучасні методи вимірювання кута повороту площини поляризації, як правило, засновані на модуляції параметрів поляризації. Практичне застосування знайшли наступні методи: метод модуляції напрямку поляризації за синусоїдальним законом та метод з безперервною зміною напрямку поляризації. Останній метод відрізняється від першого високою швидкістю і тим, що на результат вимірювань не впливають можливі коливання інтенсивності сигналу, однак його практична реалізація більш складна.

Якщо при поширенні сигналу впоперек тороїдального магнітного поля \mathbf{B}_T кут між векторами \mathbf{E} і \mathbf{B}_T дорівнює 45° , то сигнал, що виходить з плазми, виявляється еліптично поляризованим. При цьому енергія, що передається складовою з поляризацією, що перпендикулярна вихідній, пропор-

ційна $\lambda^3 a \int_{-a}^a n(z) B_T^2 dz$ і, так як значення B_T відомо, можна знайти $n(z)$.

Циклотронна НВЧ-діагностика

Метод циклотронної НВЧ-діагностики дозволяє визначати електронну температуру плазми по її тепловому магнітно-гальмівному випромінюванню на електронній циклотронній частоті і її гармоніках. Сам принцип вимірювання температури таким методом повністю аналогічний добре відомому в спектроскопії низькотемпературної плазми способу, що полягає у використанні оптично-щільних ліній. При достатній оптичній товщині τ (яка визначається як, $\int_L \zeta dl$, де ζ – коефіцієнт поглинання, L – розмір області, зайнятої плазмою уздовж лінії спостереження) інтенсивність окремих ліній може досягати рівня випромінювання чорного тіла. Вимірювання випромінювальної здатності на відповідній частоті дозволяють визначити температуру T_e .

У нерелятивістському випадку (T_e не перевищує 1–10 кеВ) циклотронні лінії випромінювання та поглинання є вузькими. Потужність випромінювання шару можна розрахувати, виходячи із закону Кірхгоффа, і отримати для потужності, що вимірюється приймачем, співвідношення виду

$$P(\omega) \sim T_e [1 - \exp(-\tau)] \Delta\omega, \quad (2)$$

де оптична товщина τ залежить не тільки від параметрів плазми, але й від номера циклотронної гармоніки n і від типу поляризації хвилі по відношенню до магнітного поля.

При $\tau \gg 1$ (на практиці в якості граничного значення при розрахунках приймають величину $\tau \gg 2$) випромінювальна здатність пропорційна електронній температурі плазми. Можливість локалізації вимірювань ґрунтується на наступних двох обставинах:

а) магнітне поле, що утримує плазму, для багатьох типів установок є неоднорідним;

б) оптична товщина виявляється досить великою на характерних розмірах, значно менших від розміру плазми, і тоді локальним чорним тілом виступає плазма в циклотронному шарі з точно визначеним значенням B . Найпростіше проілюструвати таку ситуацію можна на прикладі тороїдальних плазмових конфігурацій (рис. 2), де: R – великий радіус тора; R_0 – радіус осі камери, B – магнітне поле; ΔR – розмір циклотронного шару; ΔB – зміна поля в ньому; ω_{ce} – випромінювання на циклотронній частоті, що приймається антеною [3]. Вакуумне магнітне поле в тороїдальній геометрії зменшується від центральної осі тора за законом: $B \sim R^{-1}$ [$B(R) = const$].

Тобто на певній частоті випромінює плазма, що знаходиться в конкретній області плазмового шнура. Якщо антена направлена, наприклад, по великому радіусу, то, проводячи вимірювання на різних частотах, можна виділяти циклотронне випромінювання з конкретних об'ємів в екваторіальній площині тора. Таким чином, можливість локалізації вимірювань T_e (при відомому значенні тороїдального магнітного поля) забезпечується прямим зв'язком між значенням частоти, що реєструється, і положенням об'єму, з якого йде випромінювання на цій частоті.

Зрозуміло, що необхідне виконання звичайної для локальних методів умови – не повинно відбуватися спотворення спектру при проходженні випромінювання від досліджуваного об'єму до детектора, тобто плазма повинна бути достатньо прозорою для випромінювання зовні самого об'єму, що випромінює (зокрема, необхідно, щоб значення іонно-циклотронної частоти було більше відповідного значення плазмо-іонної частоти). Зазвичай для вимірювань використовується друга гармоніка електронно-циклотронної частоти (незвичайна хвиля), хоча можливі й вимірювання на першій гармоніці, у тому числі із застосуванням звичайної хвилі [5]; щоправда тут виникає деяке протиріччя з загальноприйнятими теоріями циклотронного випромінювання.

Досі мова йшла про чисто теплове випромінювання електронів. Фактором, здатним спотворити результати і перешкодити проведенню локальних вимірювань температури, є наявність в плазмі надтеплого випромінювання. Практика показала, що в замкнутих системах типу ТОКАМАК, при щільності плазми близько $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ і нижче, звичайно існують пучки прискорених електронів, а пов'язане з ними надтеплове випромінювання перешкоджає вимірюванням профілю температури.

Циклотронні вимірювання на більшості установок проводяться в міліметровому і субміліметровому діапазонах довжин хвиль. Для аналізу спектру випромінювання застосовують методи НВЧ-радіотехніки і проводять роботи в інфрачервоному діапазоні. Типовим мікрохвильовим методом є застосування гетеродинного приймача [6]. Цей метод дозволяє отримати

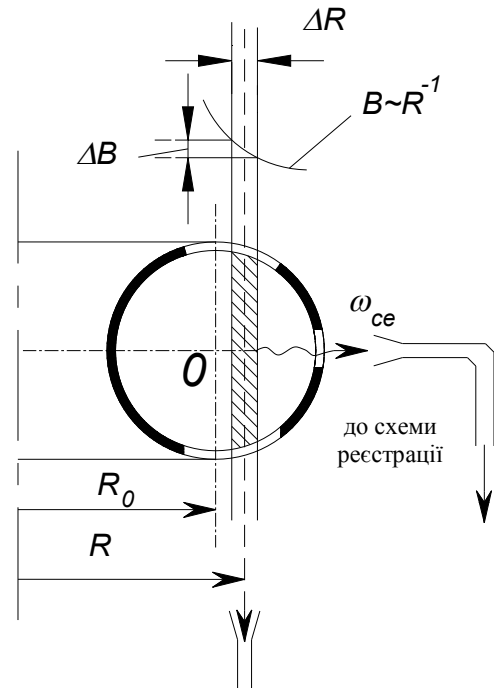


Рис. 2. Вимірювання локальної електронної температури методом реєстрації циклотронного випромінювання в тороїдальній геометрії

гарний динамічний діапазон по частоті $\Delta\omega/\omega \leq 10^{-3}$ і високу роздільну здатність за часом (≤ 1 мкс) при фіксованій робочій частоті. Такий метод дуже зручний при отриманні часової залежності потужності, що випромінюється, для фіксованої точки у просторі, в тому числі і для спостереження різних коливань. Змінюючи частоту, можна періодично одержувати профілі потужності по перерізу плазмового шнура [3].

Поліхроматор з дифракційною ґраткою (інфрачервона техніка) застосовували для проведення циклотронних вимірювань на ТОКАМАКу типу PLT з трьома і п'ятьма каналами. Трьохканальний поліхроматор успішно застосовували для дослідження змін температури у часі при нагріванні плазми пучками атомів на установці PLT [7], де реєструвався часовий хід температури $T_e(t)$ в трьох фіксованих точках по малому радіусу шнура (0, 10, 20 см) за один розряд. Як і у випадку гетеродинного прийому сигналу, роздільна здатність за часом виявляється дуже високою – близько 1 мкс, а просторова роздільна здатність складає. $\Delta\omega/\omega \approx 0,05$.

Для реєстрації циклотронного випромінювання застосовуються також інтерферометри з великою світлосилою. Скануючий інтерферометр Фабрі-Перо має роздільну здатність за часом близько 10 мкс при $\Delta\omega/\omega < 0,1$.

Для перевірки теплового характеру циклотронного випромінювання необхідно проводити реєстрацію випромінювання в широкому діапазоні частот, щоб спостерігати наявність піка на плазмовій частоті, співвідношення інтенсивностей в окремих гармоніках і т. п. Для цієї мети добре підходить, наприклад, Фур'є-спектрометр, зібраний за схемою інтерферометра Майкельсона [8]. Сканування здійснюють повторюваним переміщенням одного з дзеркал протягом приблизно 14 мс. Проблема обробки та запису інформації вирішується застосуванням допоміжного He-Ne-лазера, що є джерелом випромінювання для інтерферометра у видимій області. Підрахунок порядків при переміщенні рухомого дзеркала дозволяє визначати положення дзеркала з великою точністю. Отримані дані записуються на ЕОМ разом з сигналами випромінювання плазми, що реєструються, і потім використовуються для виконання Фур'є-перетворення і, в кінцевому рахунку, для отримання профілів електронної температури.

Всі описані вище системи допускають проведення абсолютної калібровки і тим самим визначення значень електронної температури зі співвідношення (2). Але точність таких калібровок зазвичай невисока. Тому віддають перевагу проведенню нормування в певні моменти часу за даними вимірювань лазерного розсіювання, і використовують цю інформацію для калібрування системи реєстрації циклотронного випромінювання. Основне завдання, яке наразі вирішують за допомогою систем циклотронної діагностики на великих установках, – це отримання інформації про часовий роз-

поділ температури в плазмі. Незважаючи на перераховані вище негативні фактори (перш за все, надтеплове випромінювання), а також на необхідність проводити градування по лазерному розсіюванню, в деяких випадках вдалося ефективно використати цю методику саме для реєстрації зміни профілів електронної температури в часі.

Існує ще одна сфера застосування таких методик — спостереження флуктуацій температури, зокрема просторового розподілу амплітуди коливань певного типу, таких, як пилоподібні коливання, коливання моди $m=2$ і т.п.

Висновки

Кожен з розглянутих методів НВЧ-діагностики плазми має свої особливості застосування, переваги та недоліки. Інтерферометрія, зокрема багатоканальна, стала важливим інструментом дослідження рельєфу концентрації плазми та його зміни в часі. Надійність апаратури і висока достовірність результатів вимірювань дають можливість враховувати ці дані в системі контролю положення плазмового шнура та управління іншими параметрами плазми на ТОКАМАКах. До переваг методів поляриметрії слід відзначити відсутність впливу вібрацій установки на величину що вимірюється, а також можливість одночасного вимірювання розподілів поперічного магнітного поля B_p та n , що в деяких випадках дозволяє відмовитися від чутливої до вібрацій інтерферометрії. Незважаючи на деякі труднощі, циклотронна діагностика є незалежною від інших діагностик та широко використовується для пошуку робочих режимів розряду при дослідженні нагрівання й утримання плазми на установках термоядерного синтезу.

Література

1. Малых Н. И., Горбунов Е. П., Ямпольский Е. С. Диагностика плазмы. — М.: Энергоиздат, 1981.— Вып. 4(1). — с. 125.
2. Малых Н.И., Рождественский В.В. Диагностика плазмы в субмиллиметровом диапазоне волн. Диагностика плазмы / Под ред. М.И. Пергамента. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — Вып. 5. — С. 89.
3. Кузнецов Э.И., Щеглов Д.А. Методы диагностики высокотемпературной плазмы, изд. 2-е, перераб и доп. — М.:Атомиздат, 1980. — с. 200.
4. Зайдель А.Н., Островская Г.В. Лазерные методы исследования плазмы. — Л.: Наука, 1977.
5. Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968.
6. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю. Н., Радиотелескопы и радиометры. — М., 1973
7. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. — М.: Наука, 1978.
8. Малышев В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979.

Воропаєв П.В., Митрофанов А.Б., Біденко В.А., Зоренко О.В. Методи НВЧ-діагностики плазми. Здійснено огляд основних методів НВЧ-діагностики плазми, а саме: інтерферометрії, поляриметрії та циклотронної НВЧ-діагностики плазми.

Ключові слова: плазма, ТОКАМАК, інтерферометрія, поляриметрія, циклотронна

НВЧ-діагностика

Воропаев П.В., Митрофанов А.Б., Биденко В.А., Зоренко А.В. **Методы СВЧ-диагностики плазмы.** Произведен обзор основных методов СВЧ-диагностики плазмы, а именно: интерферометрии, поляриметрии и циклотронной СВЧ-диагностики плазмы

Ключевые слова: плазма, ТОКАМАК, интерферометрия, поляриметрия, циклотронная СВЧ-диагностика

Voropaiev P.V., Mytrofanov A.B., Bidenko V.A., Zorenko A.V. **Methods of plasma UHF-diagnostics.** Reviewed the basic methods of plasma UHF-diagnostics. There are: interferometry, polarimetry and plasma cyclotron diagnostics.

Keywords: plasma, ТОКАМАК, interferometry, polarimetry, cyclotron UHF-diagnostics.

УДК 621.396.674.3

**БАГАТОПРОМЕНЕВІ АНТЕНІ РЕШІТКИ
НА ОСНОВІ ЛІНЗ РОТМАНА (ОГЛЯД)**

Булашенко А.В.

Багатопротенева антенна решітка (БАР) – це антенний пристрій, здатний формувати у просторі декілька діаграм спрямованості (ДС), кожній з яких відповідає визначений вхід променя. Такі антени використовуються як самостійні пристрої або як елементи складних систем. БАР забезпечує можливість паралельного огляду простору в широкому секторі кутів з високою роздільною здатністю, одночасного сканування декількох незалежними променями, управління формою ДС та інше.

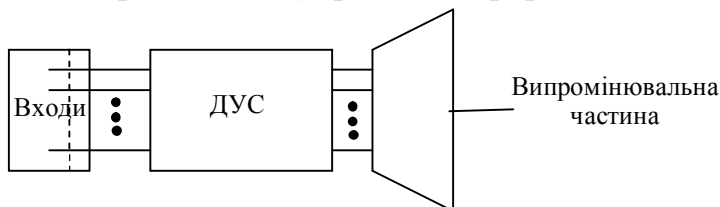


Рис. 1. Структурна схема БАР

Структурна схема БАР (рис. 1) включає випромінювальну частину, яка може бути виконана у вигляді решітки випромінювачів або розкриву апертурної антени,

діаграмоутворюючу схему (ДУС) та входи антени у вигляді поперечних перетинів ліній передачі з одним типом хвилі. ДУС – це основний елемент структурної схеми БАР, призначений для створення потрібних амплітудно-фазових розподілів поля у випромінюючій частині.

За способом реалізації випромінюючої частини можна виділити апертурні та решітчасті БАР [1]. Апертурні БАР зазвичай реалізують на основі лінзових чи дзеркальних антен. ДУС таких БАР – це сукупність опромінювачів з рефлектором або лінзою. Їх перевага у простоті конструкції та можливості формування ДС з малими бічними пелюстками. До недоліків належать: низький рівень перетину сусідніх пелюстків, громіздкість констру-