

Напівпровідники n- і р-типу

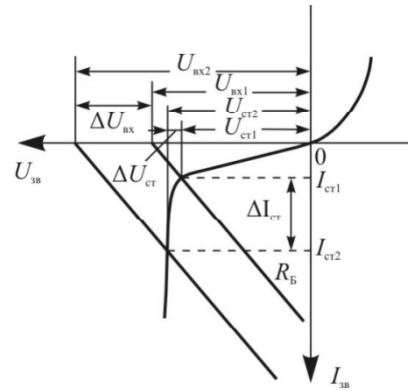
Напівпровідникові стабілітрони та стабістори

Принцип дії стабілітрона

Стабілітрони — це напівпровідникові діоди, принцип дії яких ґрунтується на використанні ефектів сильного поля в $p-n$ переході та які призначені для стабілізації напруги.

У разі великих напруженостей електричного поля в області $p-n$ переходу настає пробій, який супроводжується різким збільшенням зворотного струму за незначного збільшення зворотної напруги. Відрізок пробою на ВАХ, де напруга слабо залежить від струму, використовується для стабілізації напруги (рис. 3.14).

Рис. 3.14. Вольт-амперна характеристика діода в ділянці



Принцип стабілізації напруги пояснюється схемою, показаною на рис.3.15. Нехай напругу $U_{вх1}$ і опір баластного резистора R_B обрано таким чином, що робоча точка на ВАХ відповідає струму стабілітрона $I_{ст1}$. Зі зростанням входної напруги на $\Delta U_{вх}$ робоча точка зміщується в положення $I_{ст2}$, тобто струм стабілітрона збільшується на $\Delta I_{ст}$. Водночас напруга на стабілітроні зростає тільки на $\Delta U_{ст}$ (рис. 3.14), а різниця $(\Delta U_{вх} - \Delta U_{ст})$ буде виділятися на баластному резисторі R_B . Таким чином, напруга на виході схеми залишатиметься майже постійною.

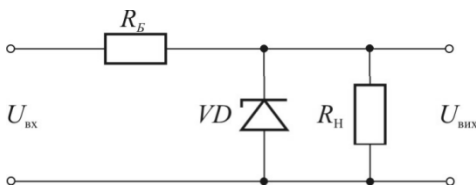


Рис. 3.15. Найпростіша схема стабілізації напруги

У стабілітронах використовують два види пробію: тунельний та лавинний. Оскільки ширина переходу мала (порядку 10^{-6} м), вже за напруги $U = 10$ В виникають поля $E = 10^7$ В/м, у яких може з'являтися ударна та електростатична іонізація.

У сучасних розробках стабілітронів використовують кремній. Вибір цього матеріалу обумовлено передусім малим зворотним струмом діодів і стійкістю до підвищених температур. У германієвих діодах зі зростанням зворотного струму настає тепловий пробій, що зумовлює появу падаючого відрізка на ВАХ і виведення з ладу діода.

Стабістори

Стабістори — це напівпровідникові діоди, призначені для стабілізації малих напруг і які працюють за прямого зміщення. На відміну від стабілітронів у стабісторах використовується слабка залежність напруги від струму за прямого зміщення $p-n$ переходу (рис. 3.17). Напруга стабілізації $U_{ст}$ відповідає прямому падінню напруги на діоді та становить 0,5...1,5 В.

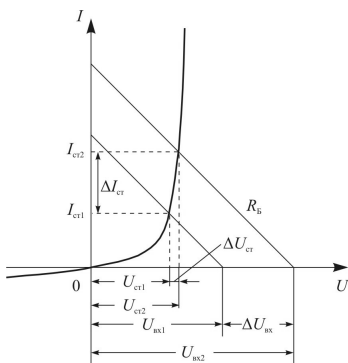


Рис. 3.17. Вольт-амперна характеристика стабістора

Стабістори характеризуються такими ж параметрами, що й стабілітрони.

Щоб зменшити вплив опору бази на диференціальний опір стабісторів, їх створюють на основі низькоомного n -кремнію. Товщина бази при цьому має бути якомога меншою. Внаслідок великої концентрації домішок в областях p та n ширина $p-n$ переходу виявляється дуже малою, тому напруга

пробою стабісторів не перевищує 10В. Але це не принципово для роботи в схемах стабілізації, оскільки стабістори працюють за прямого зміщення.

У разі потреби стабілізувати більше напруги послідовно з'єднують декілька стабісторів.

У діапазоні робочих струмів стабістори мають від'ємний ТКН. Це дозволяє використовувати стабістори для температурної компенсації стабілітронів з додатним ТКН.

Крім кремнію, стабістори створюють також на основі полікристалічного селену.

Варикапи

Структура та принцип дії варикапа

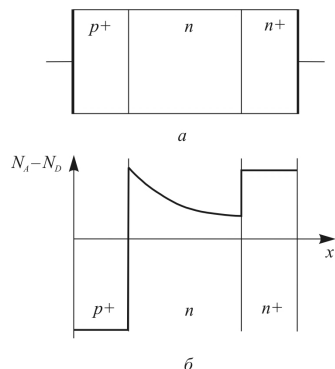


Рис. 3.18. Структура варикапа (а) і розподіл домішок у p - n переході зі зворотним градієнтом концентрації (б)

Варикап — це напівпровідниковий діод, принцип дії якого ґрунтується на залежності бар'єрної ємності p - n переходу від зовнішньої напруги.

В основу варикапа покладено структуру p +- n - n (рис. 3.18, а).

Залежність бар'єрної ємності від напруги для східчастого та плавного p - n переходів описується формулами (2.93) та (2.94) і показано на рис. 2.22. Для створення варикапів принципово важливим є більша не лінійність вольтфарадної характеристики. Тому перевагу потрібно віддавати східчастим p - n переходам.

Для ще різкішої залежності $C_B(U)$ у базовій області створюють розподіл домішок зі зворотним градієнтом концентрації (рис. 3.18, б). У такій структурі питомий опір бази зростає по координаті x і залежність бар'єрної ємності від напруги наближається до гіперболічної. Переходи з оберненим градієнтом концентрації називають надрізкими і виготовляють їх методом дифузії домішок у високоомну базу з наступним вплавленням емітерної ділянки.

Варикапи працюють тільки за зворотного зміщення, оскільки при цьому забезпечується високе значення добротності.

Варикапи можна створювати також на основі переходів метал напівпровідник і метал-діелектрик-напівпровідник.

Основні параметри варикапів

Номинальна ємність варикапа $C_{в.н}$ — ємність, яку вимірюють між виводами варикапа за заданої зворотної напруги за температури навколишнього середовища 20 $^{\circ}$ С. Залежно від призначення варикапи виготовляють з ємністю від одиниць до сотень пікофарад. Здебільшого номінальну ємність вимірюють за зворотної напруги 4 В.

Мінімальна ємність варикапа $C_{в.мін}$ — ємність діода за максимально допустимої зворотної напруги.

Коефіцієнт перекривання за ємністю K_C це $K_C = \frac{C_{в.н}}{C_{в.мін}}$, відношення номінальної ємності варикапа до мінімальної ємності

Значення K_C дорівнює декільком одиницям, або десяткам.

Добротність варикапа Q — це відношення реактивного опору варикапа до активного (опір втрат).

Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) — відношення відносної зміни ємності варикапа до абсолютної зміни температури навколишнього середовища за заданої зворотної напруги:

Тунельні діоди

Тунельний діод — це напівпровідниковий прилад, принцип дії якого ґрунтується на тунельному ефекті в тонких p - n переходах і призначений для генерування та підсилення електричних сигналів.

$$TKC = \frac{1}{C_{в.н}} \frac{\Delta C}{\Delta T}$$

Структура та принцип дії тунельного діода

В основу тунельних діодів покладено структуру $p+n$, тобто тунельні діоди створюються на підставі сильно легованих (вироджених) напівпровідників. Концентрація домішок в областях p та n досягає $10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$, у результаті чого ширина p - n переходів тунельних діодів на два порядки менша, ніж звичайних, і не перевищує 10^{-2} мкм. За таких умов утворюється можливість тунелювання носіїв заряду через потенціальний бар'єр p - n переходу. Для виготовлення тунельних діодів використовують такі напівпровідникові матеріали, як Ge, Si, GaAs, InSb.

Основна особливість тунельних діодів — наявність від'ємного диференціального опору на деякій ділянці прямої гілки ВАХ (рис.3.21). Пояснимо утворення такого опору за допомогою енергетичних діаграм тунельного переходу.

Зі збільшенням концентрації донорних і акцепторних домішок внаслідок взаємодії атомів домішкові рівні розщеплюються, утворюючи зони, які можуть зливатися із зоною провідності або валентною зоною напівпровідника. Рівень Фермі наближається до дна зони провідності в напівпровіднику n -типу та до верху валентної зони в напівпровіднику p -типу. За деякої достатньо великої концентрації рівень Фермі може опинитися всередині власних зон, тобто відбудеться «виродження» напівпровідника. Відповідно до статистики Фермі–Дірака енергетичні рівні в областях p і n , нижчі від рівня Фермі E_F , майже повністю зайняті, а вищі від рівня Фермі — майже вільні. У p - n переходах на основі вироджених напівпровідників викривлення енергетичних рівнів настільки велике, що відбувається перекривання зон, тобто в деякому інтервалі енергій дозволені рівні валентної зони області p мають таку саму енергію, що й дозволені рівні зони провідності в області n . Оскільки ці рівні розділені вузьким потенціальним бар'єром, то виявляється можливим тунельний перехід електронів на вільні рівні з однієї області в другу. Без зміщувальної напруги на діоді встановлюється такий стан, коли ймовірність тунельного переходу електронів з p -області в n -область і з n -області в p -область виявляється однаковою та сумарний струм через діод дорівнює нулю (енергетичній діаграмі, показаній на рис.3.22, а, відповідає точка 0 на ВАХ (див. рис. 3.21)).

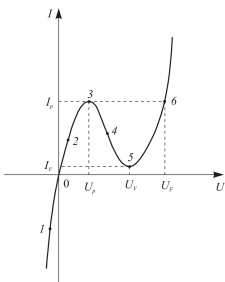


Рис.3.21.Вольтамперна характеристика тунельного діода

З подаванням на діод зміщувальної напруги у зворотному напрямі висота потенціального бар'єра p - n переходу збільшується і збільшується перекривання енергетичних зон у сусідніх областях. Вільні рівні зони провідності n -області розміщуються навпроти зайнятих рівнів валентної зони p -області, а зайняті рівні зони провідності n -області — навпроти повністю зайнятих рівнів валентної зони p -області (рис.3.22,б). При цьому ймовірність переходу електронів з валентної зони p -області збільшується, а ймовірність зворотного переходу зменшується.

Рівновага порушується і через діод буде проходити тунельний струм у зворотному напрямі (див. рис. 3.21, точка 1 на ВАХ). Значення цього струму різко збільшується у міру підвищення зворотної напруги, оскільки при цьому дедалі більша кількість електронів з валентної зони p -області може тунелювати в зону провідності n -області.

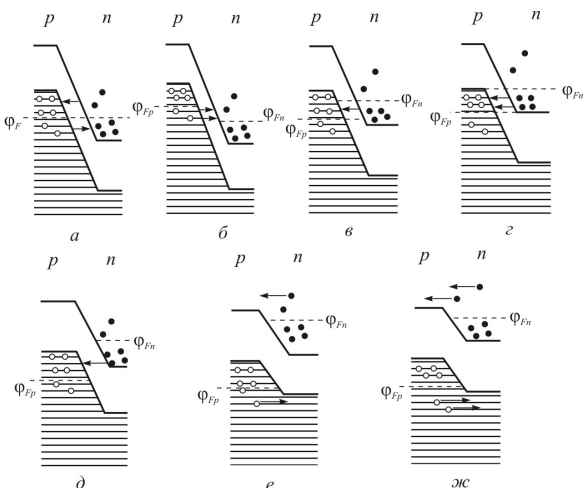


Рис. 3.22. Енергетичні діаграми тунельного діода за різних напруг зміщення

Із прикладанням до діода напруги в прямому напрямі внаслідок зменшення потенціального бар'єра перекривання зон зменшується. Частина заповнених рівнів зони провідності n -області розміщується навпроти вільних рівнів валентної зони p -області (рис. 3.22, в). Потік електронів із зони провідності у валентну зону збільшується, а зворотний потік зменшується. Через діод проходить прямий тунельний струм (рис.3.21, точка 2 на ВАХ). З підвищенням напруги збільшується кількість зайнятих рівнів зони провідності, що перекриваються з вільними рівнями валентної зони, і прямий струм зростає. За деякої прямої напруги U_p , коли рівень Фермі в зоні провідності буде навпроти верху валентної зони, повністю зайняті рівні зони провідності n -області максимально перекриваються з вільними рівнями валентної зони p -області (рис. 3.22, г), і тунельний струм діода в прямому напрямі досягає максимуму (див.рис.3.21, точка 3 на ВАХ). Надалі з підвищенням напруги тунельний струм починає зменшуватися (див. рис. 3.21, точка 4 на ВАХ), тобто з'являється відрізок з від'ємним диференціальним опором. Причина зменшення тунельного струму полягає в тому, що при $U > U_p$ частина зайнятих рівнів у зоні провідності перестає перекриватися з вільними рівнями валентної зони (рис.3.22, д) і розміщується навпроти забороненої зони p -області. Коли напруга на діоді буде дорівнювати UV , перекривання зон припиниться (рис.3.22, е) і тунельний струм дорівнюватиме нулю (точка 5 на ВАХ).

Подальше підвищення напруги понижує потенціальний бар'єр настільки, що виявляється можливим перехід носіїв над бар'єром, тобто з'являється дифузійний струм, який зростає зі збільшенням напруги так само, як у звичайному діоді.

У реальних тунельних переходах за напруги UV струм ніколи не дорівнює нулю, оскільки за цієї напруги вже можлива незначна дифузія і, крім того, ще наявна тунельна складова струму. Остання обумовлена наявністю в забороненій зоні системи дозволених рівнів (рівнів дефектів ґрат і домішок, що глибоко залягають), з яких можливе тунелювання. Цей тунельний струм називають надмірним.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. За яких ознак класифікують напівпровідникові діоди? Наведіть основні класи діодів.
2. Наведіть визначення випрямного діода.
3. Назвіть методи отримання $p-n$ переходів випрямних діодів.
4. Назвіть параметри випрямних діодів.
5. Наведіть переваги та недоліки германієвих і кремнієвих випрямних діодів.
6. Які види пробою характерні для германієвих і кремнієвих випрямних діодів?
7. Чому кремнієві діоди мають більші напруги пробою та спади напруги в прямому напрямі порівняно з германієвими?
8. Поясніть температурну залежність ВАХ діодів.
9. Наведіть особливості силових діодів.
10. Що таке імпульсний діод?
11. Чим зумовлена інерційність діодів до швидких змін струму та напруги?
12. Поясніть процес перемикання діода з прямого вмикання на зворотне.
13. Чим зумовлені тривалість фази постійного струму та тривалість фази спадання зворотного струму?
14. Наведіть параметри імпульсних діодів і їх визначення.
15. Які існують методи підвищення швидкодії діодів і їх сутність?
16. Охарактеризуйте діоди з нагромадженням заряду. Яке їх основне призначення?
17. Дайте визначення напівпровідникового стабілітрона. Які види пробою використовуються у стабілітронах?
18. Який зв'язок між напругою пробою, шириною $p-n$ переходу та питомим опором бази?
19. Поясніть температурну залежність напруги пробою для різних механізмів пробою.
20. Нарисуйте ВАХ стабілітрона, укажіть ділянку стабілізації.
21. Що таке ТКН і як його визначають? Нарисуйте залежність ТКН від напруги стабілізації та поясніть її.
22. Які заходи вживають для зменшення ТКН?
23. Що таке стабістор?
24. Наведіть визначення варикапа.
25. Як впливає характер розподілу домішок в переході на залежність бар'єрної ємності від напруги?
26. Наведіть еквівалентну схему варикапа.
27. Що таке добротність варикапа? Запишіть формули добротності для низьких і високих частот.
28. Поясніть залежність бар'єрної ємності та добротності варикапа від частоти.
29. Поясніть залежність добротності від напруги.
30. Що таке коефіцієнт нелінійності та коефіцієнт перекривання бар'єрної ємності?
31. Нарисуйте енергетичну діаграму $p-n$ переходу на основі вироджених напівпровідників.
32. Що таке тунельний ефект? Наведіть визначення тунельного діода.
33. Поясніть хід ВАХ тунельного діода за допомогою енергетичних діаграм.
34. Назвіть параметри тунельного діода.
35. Поясніть залежність ВАХ і параметрів тунельного діода від температури.
36. Чому за напруги U_V тунельний струм не дорівнює нулю?
37. Нарисуйте еквівалентну схему тунельного діода. Виведіть формули граничної та резонансної частот діода.
38. Що таке обернений тунельний діод?
39. Що являє собою діод Шотткі?
40. У яких випадках утворюються випрямні та невивипрямні переходи метал-напівпровідник?
41. Нарисуйте енергетичні діаграми випрямних і невивипрямних переходів метал-напівпровідник.
42. Коли в разі контакту металу та напівпровідника утворюється $p-n$ перехід?
43. Який механізм руху носіїв через контакт метал-напівпровідник?
44. Які особливості ВАХ діодів Шотткі?
45. Поясніть, чому швидкодія діодів Шотткі більша за швидкодію діодів з $p-n$ переходами.
46. Які переваги та недоліки діодів Шотткі?
47. Які діоди називають перемикальними?
48. Поясніть принцип дії перемикальних діодів.
49. Нарисуйте схеми заміщення резонансних перемикальних діодів.
50. Якими параметрами характеризуються перемикальні діоди?
51. Які переваги та недоліки $p-n$ і $p-i-n$ перемикальних діодів?
52. Наведіть визначення лавинно-пролітного діоду.
53. Поясніть виникнення від'ємного опору ЛПД на НВЧ.
54. Напишіть формулу пролітної частоти ЛПД.
55. Які переваги роботи ЛПД у режимі із захопленням плазми?
56. Наведіть параметри ЛПД.
57. Поясніть принцип роботи ІПД.
58. Наведіть визначення діода Ганна.

59. Нарисуйте залежність струму від напруженості електричного поля в арсеніді галію.
60. Що таке доменна нестійкість?
61. Поясніть механізм утворення домену в діоді Ганна.
62. Назвіть режими роботи діода Ганна. Поясніть режим роботи ОНОЗ.