

## Напівпровідникові резистори

Напівпровідниковим резистором називається напівпровідниковий прилад з двома виводами, в якому використана залежність електричного опору напівпровідника від напруги, температури, освітлення, механічних деформацій.

У напівпровідникових резисторах застосовується напівпровідник, який рівномірно легований відповідним типом домішок.

Напівпровідникові резистори поділяються на:

1. лінійні резистори (рис. 2.1, а);
2. терморезистори (рис. 2.1, б):
  - а) термістори;
  - б) позистори;
3. варистори (рис. 2.1, в);
4. тензорезистори (рис. 2.1, г);
5. фоторезистори (рис. 2.1, д).

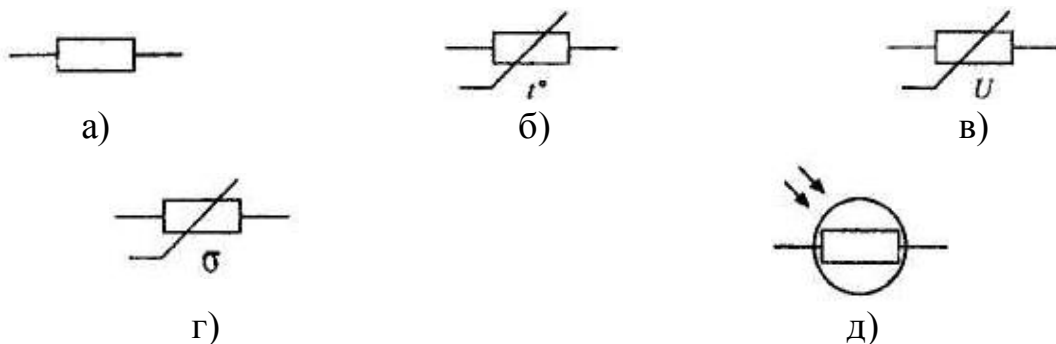


Рис. 2.1. Умовні позначення напівпровідникових резисторів.

**Лінійний резистор** – це напівпровідниковий резистор, в якому застосовується слаболегований матеріал типу кремнію або арсеніду галію. Опір лінійного напівпровідникового резистора залишається практично постійним в широкому діапазоні зміни напруг і струмів. Використовуються в інтегральних мікросхемах.

**Терморезистор** – напівпровідниковий резистор, в якому використовується, залежність електричного опору напівпровідника від температури. Розрізняють два типи терморезисторів:

а) термістор – напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури зменшується; він володіє від’ємний температурним коефіцієнтом опору;

б) позистор – напівпровідниковий резистор, опір якого із зростанням температури збільшується; він володіє додатним температурним коефіцієнтом опору.

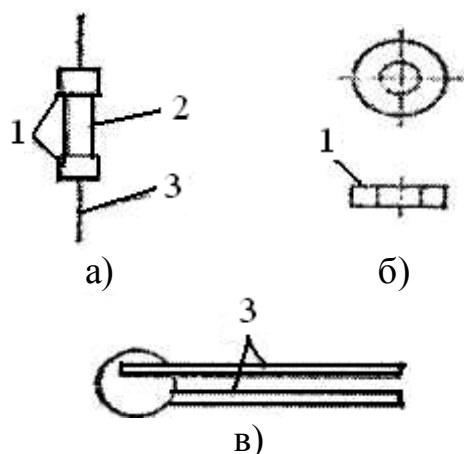


Рис. 2.2. Конструкція термісторів:  
а – циліндрична; б – дискова; в – кільцева  
(1 – напівпровідник, 2 – контакти, 3 – виводи).

У термісторах (прямого підігріву) опір змінюється або під впливом тепла, що виділяється в них при проходженні електричного струму, або в результаті зміни температури термістора при зміні теплового опромінення термістора (наприклад, при зміні температури навколишнього середовища).

Зменшення опору напівпровідника зі збільшенням температури може бути обумовлено наступними причинами – збільшенням концентрації носіїв заряду і збільшенням їх рухливості.

Конструкції термісторів показані на рис. 2.2, а-в. Матеріалом для виготовлення термісторів служать звичайно напівпровідники з електронною електропровідністю, як правило, оксиди металів та суміші оксидів. Конструктивно термістори оформляють у вигляді циліндрів, стрижнів, дисків, пластин або намистин та отримують методами керамічної технології, тобто шляхом відпалу заготовок при високій температурі. У ряді випадків термістори розміщують у скляні балони і підігрівають струмом за допомогою спеціальної обмотки. Такий термістор називають *термістором непрямого підігріву*.

Матеріалом для виготовлення позисторів служить титан-барієва кераміка з домішкою рідкоземельних елементів. Такий матеріал володіє аномальною температурною залежністю: у вузькому діапазоні температур (діапазоні температур вище точки Кюрі) його питомий опір збільшується на кілька

порядків зі збільшенням температури. Конструктивно позистор оформляють аналогічно термістору.

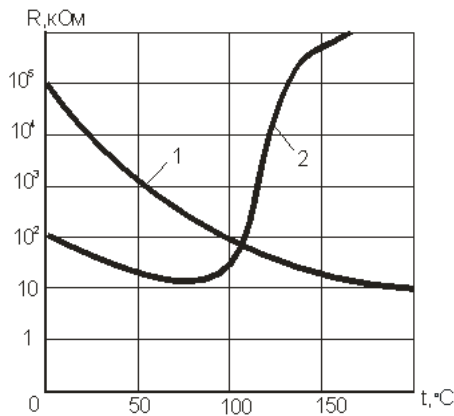


Рис. 2.3. Температурні характеристики терморезисторів: 1 – термістора, 2 – позистора.

Основною характеристикою терморезистора є температурна характеристика, яка виражає залежність опору терморезистора від температури (рис. 2.3). Для різних напівпровідників характер цієї залежності різний, проте для більшості напівпровідників у широкому інтервалі температур електричний опір термістора може бути виражено експоненціальним законом

$$R_T = K e^{\frac{\beta}{T}},$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від конструктивних розмірів термістора;  $\beta$  – коефіцієнт, що залежить від концентрації домішок у напівпровіднику;  $T$  – абсолютна температура.

Основним параметром, що характеризує роботу терморезистора, є *температурний коефіцієнт опору*, який виражає відсоткову зміну опору терморезистора при зміні температури.

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} \cdot 100.$$

Для промислових термісторів  $\alpha = -0,3 \div -0,66$ . Термістор не має вентильних властивостей і має порівняно велику теплову інерцію. Тому в електричних колах термістори поведуться як звичайні резистори, опір яких залежить від температури навколишнього середовища та діючого струму, причому для високих частот (100 - 500 МГц) не виявляється паразитна ємність та власна індуктивність термісторів. Ця властивість використовується при вимірюванні діючого струму високої частоти.

Температурний коефіцієнт опору терморезистора  $\alpha = 10 \dots 50$  поблизу точки Кюрі.

Іншими важливими параметрами терморезисторів є:

- номінальний опір – це його опір при певній температурі (зазвичай  $20^{\circ}\text{C}$ ) (від декількох Ом до декількох кОм з допустимим відхиленням від номінального опору  $\pm 5$ ,  $\pm 10$  і  $\pm 20\%$ );

- максимально допустима температура – це температура, при якій ще не відбувається необоротних змін параметрів і характеристик терморезистора;

- допустима потужність розсіювання – це потужність, при якій терморезистор, що знаходиться в спокійному повітрі при температурі  $20^{\circ}\text{C}$ , розігрівається при проходженні струму до максимально допустимої температури;

- постійна часу терморезистора – це час, впродовж якого температура терморезистора зменшується в  $e$  раз по відношенню до різниці температур терморезистора і навколишнього середовища (наприклад, при перенесенні терморезистора з повітряного середовища з  $t = 120^{\circ}\text{C}$  в повітряне середовище з  $t = 20^{\circ}\text{C}$ ). Теплова інерційність терморезистора, що характеризується його постійною часу, визначається конструкцією і розмірами та залежить від теплопровідності середовища, в якій знаходиться терморезистор. Для різних типів термісторів постійна часу лежить в межах від 0,5 до 140 с.

Терморезистори (термістори і позистори) застосовують для температурної стабілізації режиму транзисторних підсилювачів, а також у різних пристроях вимірювання, контролю та автоматики (вимірювання контролю та автоматичного регулювання температури, температурної та пожежної сигналізації та ін.). Термістори можна використовувати при вимірювання температури в широкому діапазоні, позистори – в обмежених температурних діапазонах.

**Варистор** – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги. Напівпровідниковим матеріалом для виготовлення варисторів є карбід кремнію. Порошкоподібний кристалічний карбід кремнію змішують із глиною і з цієї маси пресують заготовки варисторів у вигляді стержнів або дисків. Після обпалювання при високій температурі на заготовки

методом гарячого розпилення наносять електроди. Для захисту від зовнішніх впливів варистори покривають електроізоляційним лаком.

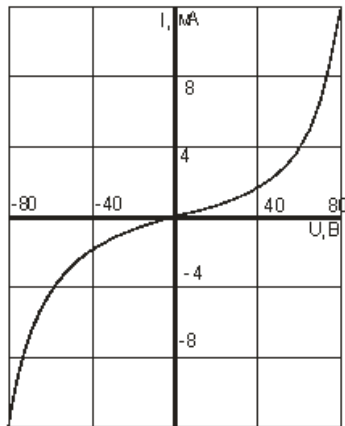


Рис. 2.4. ВАХ варистора.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) нелінійна (рис. 2.4). Нелінійність ВАХ варисторів обумовлена явищами на точкових контактах між кристалами карбіду кремнію: збільшення в сильних електричних полях провідності поверхневих потенціальних бар'єрів (при малих напругах) і збільшення провідності точкових контактів між кристалами через розігрів у зв'язку із викинутою на

контактах потужністю (при великій напрузі на варисторі). Оскільки товщина поверхневих потенціальних бар'єрів на кристалах карбіду кремнію мала, там можуть виникати сильні електричні поля навіть при малих напругах на варисторі, що призводить до тунелювання носіїв заряду крізь потенціальні бар'єри. Таким чином, при малих напругах на варисторі нелінійність ВАХ пов'язана із залежністю провідності поверхневих потенціальних бар'єрів від величини напруги. При великих напругах на варисторі і відповідно, при великих струмах, що проходять через варистор, густина струму в точкових контактах виявляється дуже великою. Уся напруга, прикладена до варистора, падає на точкових контактах. Тому питома потужність (потужність в одиниці об'єму), що виділяється в точкових контактах, призводить до зменшення загального опору варистора і нелінійності ВАХ.

Основний параметр варистора – коефіцієнт нелінійності

$$\lambda = \frac{R_{cm}}{R_0} = \frac{U/I}{dU/dI},$$

де  $R_{ст}$ ,  $R_d$  – відповідно статичний та диференціальний опори варистора. Для різних типів варисторів  $\lambda = 2 \div 6$ .

Інші параметри варистора:

– максимальна допустима напруга  $U_{\max \text{ доп}}$  (від десятків вольт до декількох кіловольт);

- номінальна потужність розсіювання  $P_{\text{ном}}$  ( $1 \div 3$  Вт);
- температурний коефіцієнт опору, який характеризує відносну зміну опору резистора при зміні температури на  $1^\circ\text{K}$  (в середньому  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ );
- гранична максимальна робоча температура ( $60^\circ \div 70^\circ\text{C}$ ).

Область застосування варисторів: варистори можна використовувати на постійному і змінному струмах з частотою до декількох кілогерц. Вони використовуються для захисту від перенапруг, в стабілізаторах і обмежувачах напруги, в різних схемах автоматики.

**Тензорезистор** – напівпровідниковий резистор, в якому використовується залежність електричного опору від механічних деформацій. Призначення – вимірювання тисків і деформацій. Принцип дії напівпровідникового тензорезистора базується на тензорезистивному ефекті – зміні електричного опору напівпровідника під дією механічних деформацій.

Для виготовлення тензорезисторів частіше всього застосовують кремній з електропровідністю як  $p$ -типу, так і  $n$ -типу. Заготовки такого кремнію ріжуть на дрібні пластинки, шліфують для одержання гладкої поверхні з малою кількістю дефектів. До кінців пластинок приварюють контакти.

Основна характеристика тензорезистора – деформаційна (рис. 2.5), яка являє собою залежність відносної зміни опору  $\Delta R/R$  від відносної деформації  $\Delta l/l$ , де  $l$  – довжина робочої частини тензорезистора.

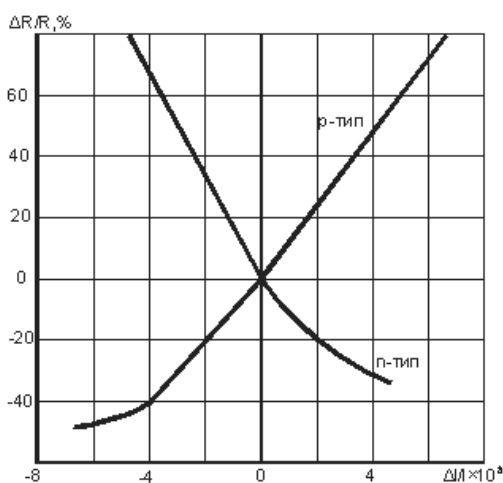


Рис. 2.5. Деформаційна характеристика тензорезистора.

Основними параметрами тензорезисторів є:

- номінальний опір  $R_{\text{ном}}$  – це опір без деформації при  $t = 20^\circ\text{C}$  (зазвичай він має величину від декількох десятків до декількох тисяч Ом);

- коефіцієнт тензочутливості  $K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$ ,

значення якого для різноманітних тензорезисторів лежить у межах від -150 до +150.

**Фоторезистор** – напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від освітленості. Існують різні види поглинання світла. При поглинанні напівпровідником квантів світла – фотонів їх енергія передається електронам в валентній зоні, які під дією цієї енергії можуть переходити в зону провідності. Отже, енергія квантів іде на іонізацію атомів. Чим більше квантів світла падає на напівпровідник, тим більша кількість електронів переходить з валентної зони в зону провідності, а значить провідність напівпровідника зростає.

Основним елементом фоторезистора є напівпровідниковий світлочутливий шар напівпровідника, який може бути виконаний у вигляді монокристалічної або полікристалічної пластини напівпровідника або у вигляді полікристалічної плівки, яка нанесена на діелектричну підкладку. В якості напівпровідникового матеріалу для фоторезисторів найчастіше використовують сульфід кадмію, селенід кадмію або сульфід свинцю. На поверхню світлочутливого шару наносять металічні електроди. Іноді електроди наносять безпосередньо на діелектричну підкладку перед осадженням напівпровідникового шару. Поверхню напівпровідникового світлочутливого шару, який розташований між електродами називають, називають **робочою площиною**. Фоторезистори виготовляють з робочими площадками у вигляді прямокутників, меандру та кільця. Площа робочих площадок різних фоторезисторів найчастіше складає від десятих частин до десятків квадратних міліметрів. Пластину з нанесеним на неї напівпровідниковим світлочутливим шаром або пластину напівпровідника розміщують в пластмасовий або металічний корпус. Навпроти робочої площадки роблять вікно з прозорого матеріалу.

Основними характеристиками фоторезисторів є:

- вольт-амперна характеристика (рис. 2.6);
- світлова або люкс-амперна характеристика (рис. 2.7);
- спектральна характеристика – це залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого світла на робочу площадку фоторезистора. Тому при виготовленні фоторезисторів враховується довжина хвилі, при якій буде

працювати фоторезистор. Наприклад інфрачервоні фоторезистори мають найбільшу чутливість при інфрачервоному освітленні, ніж при звичайному.

**Вольт-амперні характеристики** фоторезистора представляють собою залежність струму через фоторезистор (фотострум) від прикладеної напруги, при постійній освітленості (рис. 2.6, крива 1). Розрізняють два струми: **світловий** (1 при освітленні фоторезистора) і **темновий** (2 в темряві). У робочому діапазоні напруг ВАХ фоторезисторів при різних значеннях світлового потоку практично лінійні. Але у більшості плівкових фоторезисторів лінійність вольт-амперної характеристики порушується при малих напругах. Ця нелінійність пов'язана з явищем на контактах між окремими зернами або кристалами напівпровідника.

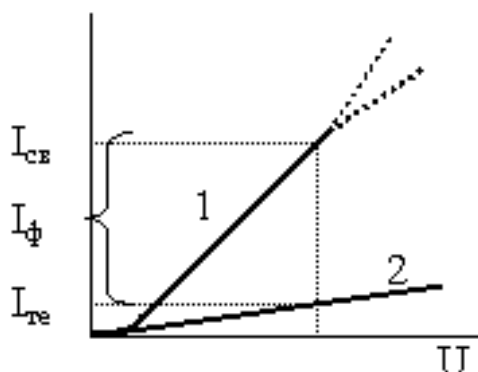


Рис. 2.6. ВАХ фоторезистора.

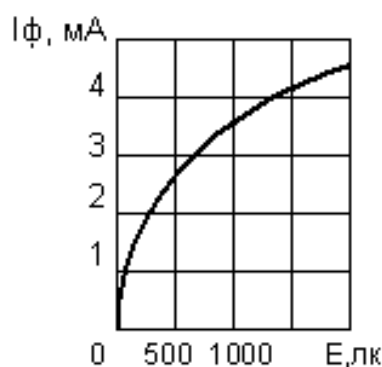


Рис. 2.7. Світлова характеристика фоторезистора.

**Світлова або люкс-амперна характеристика** фоторезистора представляє собою залежність фотоструму  $I_{\phi} = I_{св} - I_{т}$  від освітленості, де  $I_{св}$  та  $I_{т}$  – світловий і темновий струми відповідно. Фоторезистори звичайно мають сублінійну світлову характеристику (рис. 2.7).

Основні параметри фоторезистора:

– постійна часу – це швидкість зміни опору фоторезистора, при зміні освітленості (визначає інерційність фоторезистора). Для визначення швидкості спочатку фоторезистор на деякий час розміщують під джерелом світла (200 лк), потім повністю затемнюють фоторезистор і вимірюють час за який фоторезистор відновить свій опір на 63 % (в  $e$  раз). Звичайні фоторезистори



звичайно мають порівняно велику інерцію і тому можуть сприймати світлові імпульси з частотою декілька кілогерц.

– темновий опір – це опір фоторезистора при відсутності світла. Темновий опір прийнято вимірювати через 30 с після затемнення фоторезистора, який перед цим знаходився під освітленістю 200 лк.

– питома чутливість – це відношення фотоструму до світлового потоку і прикладеної напруги  $K_0 = \frac{I_\phi}{\Phi U}$ . Питомі інтегральні чутливості різних фоторезисторів лежать в діапазоні від 1 до 600 мА/(В·лм);

– інтегральна чутливість фоторезистора, яка визначається рівністю  $K_\phi = \frac{I_\phi}{\Phi}$ . Чутливість називають інтегральною, тому що її вимірюють при освітленні фоторезистора світлом складного спектрального складу: від джерела світла з кольором температури 2840 К при освітленості 200 лк.