

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh laboratorní úlohy s varikapem

**vedoucí práce: Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.
autor: Michal Ptáček**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal PTÁČEK**
Osobní číslo: **E10B0490P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh laboratorní úlohy s varikapem**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úkolem práce je navrhnout zapojení pro měření kapacity varikapu a vytvořit zadání laboratorní úlohy pro předmět Fyzikální elektronika:

1. Popište princip funkce a použití varikapu
2. Navrhněte různá zapojení pro měření kapacity varikapu
3. Navrhněte zadání laboratorní úlohy s varikapem

Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Vaníček, F.: Elektronické součástky - principy, vlastnosti, modely
2. Tůmová, O.: Elektrická měření - měřící metody
3. Jerhot, J.: Elektronické součástky a zesilovače
4. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**

Katedra technologií a měření

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**

Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vysvětlení principu a použití varikapu. Zabývá se návrhem různých zapojení pro měření kapacity varikapu a návrhem laboratorní úlohy s varikapem.

Klíčová slova

PN přechod, polovodič, dioda, varikap, kapacitní dioda

Abstract

The present thesis is focused on explanation of the principle and use the varikap. It deals with various circuits for measuring the capacity of varikap and the design of laboratory task with varikap.

Key words

PN junction, semiconductor, diode, varikap, capacitance diode

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 27.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Blechovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD.....	11
1 ZÁKLADY FYZIKY POLOVODIČŮ.....	12
1.1 POJEM POLOVODIČ	12
1.2 VLASTNÍ POLOVODIČE	13
1.3 NEVLASTNÍ POLOVODIČE	13
1.3.1 Polovodiče typu N.....	14
1.3.2 Polovodiče typu P.....	14
2 POLOVODIČOVÉ PŘECHODY.....	15
2.1 KLASIFIKACE PŘECHODŮ	15
2.2 PRINCIP PŘECHODU PN	16
2.3 KAPACITA PN PŘECHODU	19
2.3.1 Bariérová kapacita.....	19
2.3.2 Difúzní kapacita	21
3 POLOVODIČOVÉ SOUČÁSTKY S JEDNÍM PN PŘECHODEM	22
3.1 DIODA.....	22
3.2 USMĚRŇOVACÍ DIODY	23
3.3 STABILIZAČNÍ (ZENEROVY) DIODY	24
3.4 TUNELOVÉ A INVERZNÍ (OBRÁCENÉ) DIODY	24
3.5 KAPACITNÍ DIODY	25
4 MĚŘÍCÍ METODY PRO STANOVENÍ KAPACITY VARIKAPU.....	27
4.1 MĚŘENÍ KAPACITY SUBSTITUČNÍ METODOU	27
4.2 MĚŘENÍ KAPACITY Q-METREM	28
4.3 MĚŘENÍ KAPACITY SROVNÁVACÍ METODOU.....	28
4.4 MĚŘENÍ KAPACITY AMPÉRMETREM A VOLTMETREM.....	29
4.5 MĚŘENÍ KAPACITY REZONANČNÍ METODOU	30
4.6 MĚŘENÍ KAPACITY RLC MŮSTKEM.....	30
5 OVĚŘENÍ MĚŘÍCÍCH METOD.....	31
5.1 MĚŘENÍ KAPACITY AMPÉRMETREM A VOLTMETREM.....	31
5.2 MĚŘENÍ KAPACITY REZONANČNÍ METODOU	33
5.3 MĚŘENÍ KAPACITY RLC MŮSTKEM.....	34
6 NÁVRH MĚŘÍCÍ METODY	36
ZÁVĚR.....	37
POUŽITÁ LITERATURA	I

Seznam symbolů

E_C [eV]	Dolní okraj vodivostního pásu
E_V [eV]	Horní okraj valenčního pásu
E_G [eV]	Velikost zakázaného pásu
E_I [eV]	Intrinzitní hladina
E_D [V m^{-1}]	Difuzní elektrické pole
I_d [A]	Difuzní proud
I_p [A]	Polní proud
E [V m^{-1}]	Vnější intenzita elektrického pole
x_p, x_n [m]	Vzdálenost
Q_n [C]	Náboj akceptorových iontů
Q_p [C]	Náboj donorových iontů
S [m 2]	Plocha přechodu
N_A [-]	Koncentrace akceptorů
N_D [-]	Koncentrace donorů
N_o [-]	Koncentrace příměsových atomů
q [C]	Elektrický náboj
ε [F m^{-1}]	Permitovita
ε_0 [F m^{-1}]	Permitivita vakua
U_C [V]	Napětí na PN přechodu
C_T [F]	Bariérová kapacita
C_{T0} [F]	Bariérová kapacita při vnějším nulovém napětí
C_D [F]	Difuzní kapacita
V_O [V]	Difuzní napětí přechodu
a_p [-]	Gradient atomů v oblasti P
a_n [-]	Gradient atomů v oblasti N

τ_p [s]	Průletová doba diody
L_p [m]	Střední difúzní délka minoritních nosičů
C_j [F]	Kapacita přechodu varikapu
C_p [F]	Kapacita pouzdra varikapu
R_s [Ω]	Sériový odpor varikapu
R_j [Ω]	Odpor varikapu pro malý střídavý signál
L_s [H]	Sériová indukčnost přívodu varikapu
$\text{tg}\delta$ [-]	Ztrátový činitel
Q [-]	Činitel jakosti
f_∞ [Hz]	Mezní kmitočet varikapu
f [Hz]	Frekvence
f_r [Hz]	Rezonanční frekvence
U [V]	Napětí
I [A]	Proud
C_{VD} [F]	Kapacita varikapu
C_N [F]	Známá kapacita
L_N [H]	Známá indukčnost

Úvod

Většina součástek v elektrotechnice využívá nevlastní vodivosti. Nevlastní vodivost je pojem, který se používá při záměrně upravené vodivosti (dotování). Může se jí dosáhnout při výrobě nebo při vytváření struktur. Jednou z těchto součástek je varikap využívající kapacitu přechodu PN. [2]

Kapacita lze rozdělit na bariérovou a difuzní a je potřeba při měření některých úloh jí znát. S bariérovou kapacitou se lze setkat, jak v propustném, tak i v závěrném směru. Souvisí s nábojem, tedy i jeho rozložením a změně napětí. Při změně napětí je způsobena vlivem akumulovaného náboje minoritních nosičů na ochuzenou vrstvu. [1]

Dioda se skládá ze dvou elektrod (anoda, katoda). U diod se lze setkat se dvěma pracovními stavy. Je otevřená, když je na katodě kladné napětí a na katodě záporné. Zavřená je, pokud napětí je v opačné polaritě. [11]

Označení pro varikap a varistor lze použít souhrnné označení kapacitní dioda. Varistor od varaktoru se liší odlišným použitím. Varikap je řízený přiloženým napětím. Varistor pracuje s velkým střídavým signálem. [1]

Jako zapojení pro měření kapacity byly navrženy následující metody: měření kapacity multimetrem, měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem, měření kapacity substituční metodou, měření kapacity srovnávací metodou, měření kapacity rezonanční metodou, měření kapacity můstkovou metodou a měření Q-metrem.

Hlavním cílem této bakalářské práce je navrhnout zapojení pro měření kapacity varikapu a vytvořit zadání laboratorní úlohy pro předmět Fyzikální elektrotechnika.

1 Základy fyziky polovodičů

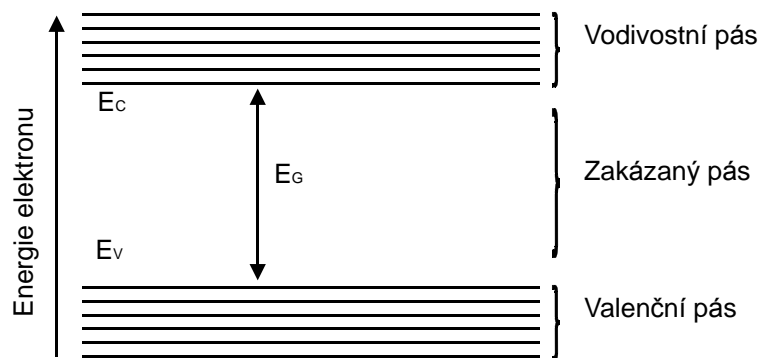
1.1 Pojem polovodič

Odvození pásového modelu pevných látek patří k nejvýznamnějším výsledkům aplikace kvantové mechaniky na popis chování elektronů v pevných látkách. Energetické pásy dělíme na tyto skupiny: [1]

Valenční pás - Jedná se o poslední elektronový pás obsazený valenčními elektrony

Vodivostní pás - Nejnižší neobsazený elektronový pás

Zakázané pásy - Oblasti energií, které elektron nemůže v pevné látce získat. Oddělují valenční a vodivostní pás. [2,3]



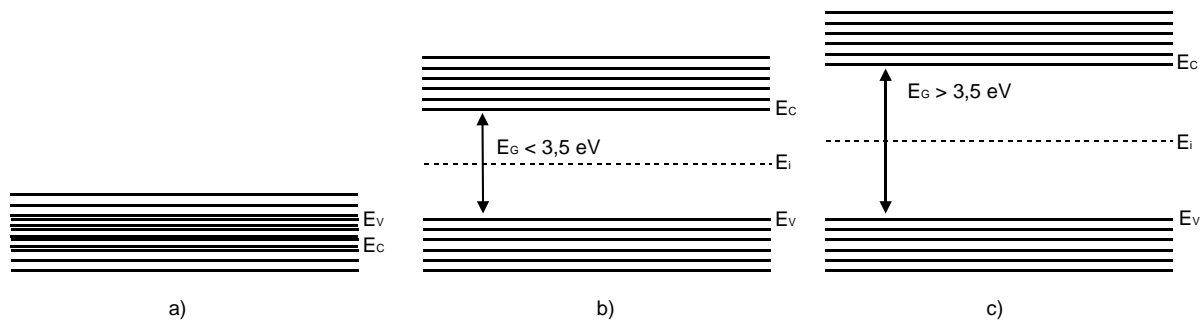
Obr. 1.1 Pásový model pevné látky [1]

Elektrické, optické a další vlastnosti pevných látek jsou ovlivněny vzájemnou polohou a energetickou šířkou těchto tří pásů. Okraj vodivostního pásu se označuje E_C (C je zkratkou slova conductivity) a okraj valenčního pásu se značí E_V (V je zkratkou valence). Velikost zakázaného pásu se značí E_G a je dána vztahem: [2]

$$E_G = E_C - E_V \quad (1.1)$$

U kovů se valenční a vodivostní pás překrývají (např. měď) nebo mají velmi úzký zakázaný pás ($E_G < 0,1$ eV). Pro polovodiče platí hranice $E_G < 3,5$ eV a pro izolanty je tato rovnost opačná ($E_G > 3,5$ eV). Intrinzní hladina E_i se nachází ve středu zakázaného pásma. Lze jí tedy vyjádřit vztahem: [2,4]

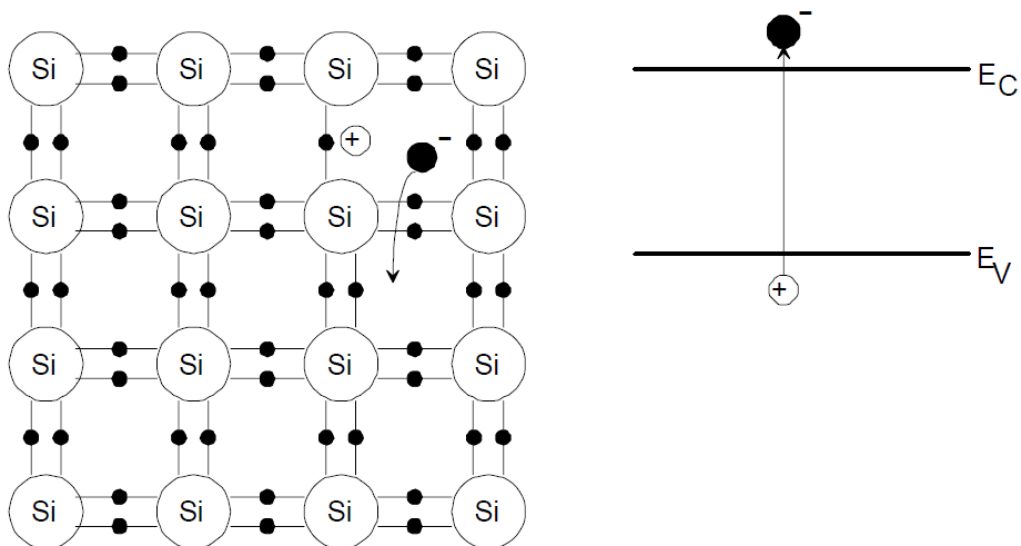
$$E_i = \frac{E_C + E_V}{2} \quad (1.2)$$



Obr. 1.2 Pásový model a) kovu; b) polovodiče; c) izolantu [4]

1.2 Vlastní polovodiče

Dokonalý vlastní polovodič nebo též intrinsický polovodič se v přírodě nevyskytuje, ale výrobou se mu dokážeme přiblížit. Za teploty $0 \text{ }^\circ\text{K}$ nejsou ve vodivostním pásu žádné elektrony, které by mohly vést proud. Při vyšších teplotách může dojít k „přeskočení“ do vodivostního pásu. K tomuto přeskoku potřebuje energii větší, než je hodnota E_G . Ve vodivostním pásu se objeví volné elektrony a ve valenčním pásu volné díry. Současně dochází v polovodiči k rekombinaci volných nosičů, která je ve vzájemné rovnováze s procesem generace. [1,2,6]



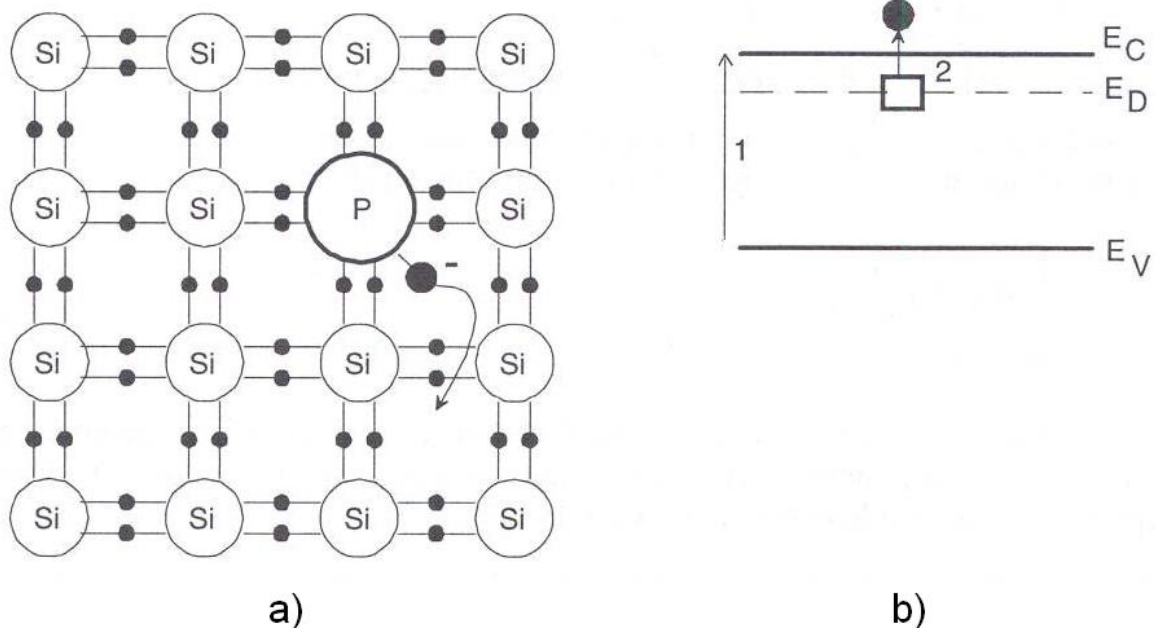
Obr. 1.3 - Vznik páru elektron - díra u vlastního polovodiče (převzato: [2])

1.3 Nevlastní polovodiče

Tvoří základ většiny polovodičových součástek. Pomocí dotování jsou do materiálu zaváděny příměsové atomy. V technické praxi mají význam polovodiče s velkou šířkou zakázaného pásma. [1,2]

1.3.1 Polovodiče typu N

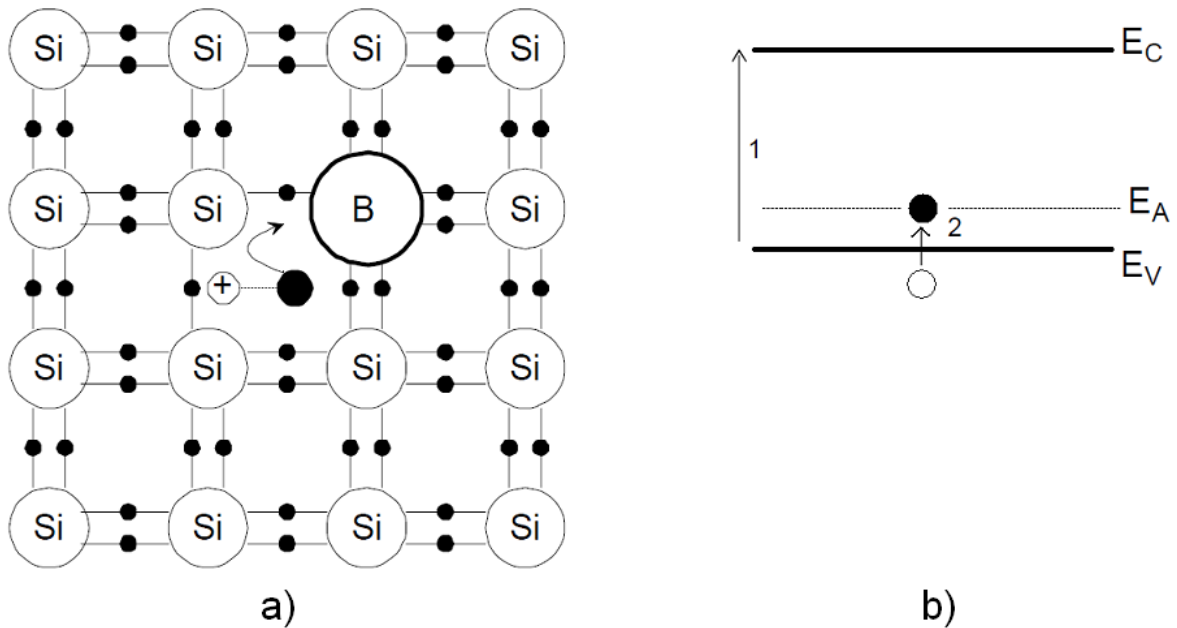
Vzniká nahrazením čtyřmocného prvku (prvku IV. skupiny - např. Si, Ge) atomem prvku pětímocného. Čtyři valenční elektrony se účastní vytvoření vazby a pátý nadbytečný elektron je vázán velmi slabě. Na uvolnění tohoto elektronu stačí velmi malá energie a elektron se posléze může účastnit vedení proudu. Tomu odpovídá i poloha donorové hladiny v zakázaném pásmu (obr. 1.4b). Dále jsou zde zakresleny dvě různé možnosti přeskočení do vodivostního pásu. [1,2,4,6]



Obr. 1.4 - a) Krystalová mřížka Si s jedním donorovým atomem; b) pásový model polovodiče typu N [2,4]

1.3.2 Polovodiče typu P

Vzniká nahrazením čtyřmocného prvku (prvku IV. skupiny - např. Si, Ge) atomem prvku trojmocného. Všechny tři elektrony se účastní vytvoření vazby a čtvrtá zůstane prázdná, kam může přeskočit elektron z jiné volné vazby. Na tento proces je zapotřebí mnohem méně energie, než na přeskok elektronu z valenčního pásu do pásu vodivostního. [2,4,6]



Obr. 1.5 - a) Krystalová mřížka Si s jedním akceptorovým atomem; b) pásový model polovodiče typu P [2,4]

2 Polovodičové přechody

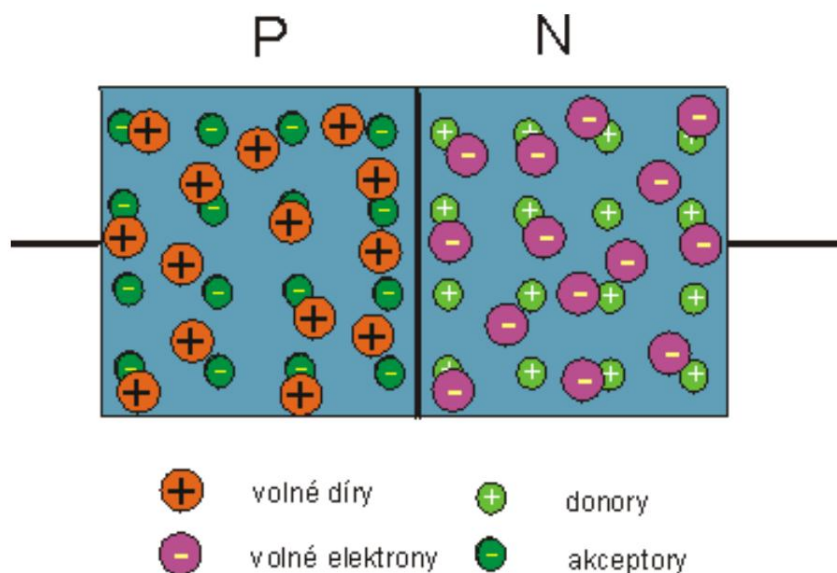
2.1 Klasifikace přechodů

Z hlediska činnosti se homogenní polovodiče a polovodičové vrstvy v technické praxi používají jen omezeně. Rozhraní mezi různě dotovanými polovodiči, mezi různými typy polovodičů nebo mezi materiálem a polovodičem se využívají mnohem častěji. [1,2]

Homogenní přechody jsou přechody mezi materiály se stejnou krystalickou strukturou, ale různou dotací příměsí. Patří sem přechody typu PN (NP), přechody N+N (P+P) a přechody PI (NI) a jejich kombinace PIN. Heterogenní přechody (nesourodé přechody) jsou přechody mezi dvěma nestejnorodými materiály s různou krystalickou strukturou. Patří sem přechody mezi dvěma nestejnorodými polovodiči, přechod kov-polovodič (MS, MN, MP) a přechody kov-izolant-polovodič (MIS). [1,2]

2.2 Princip přechodu PN

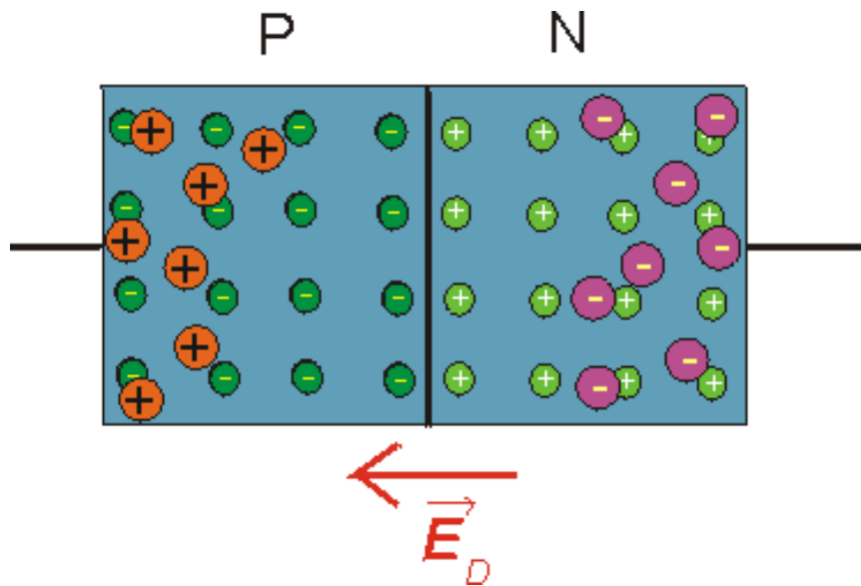
PN přechod se chová jako hradlo, takže propouští proud pouze v jednom směru. Může být zapojen v propustném, nebo v závěrném směru. V okamžiku vytvoření PN přechodu vypadá situace takto. [7,8]



Obr. 2.1 - Situace na PN přechodu v okamžiku jeho vytvoření (převzato: [7])

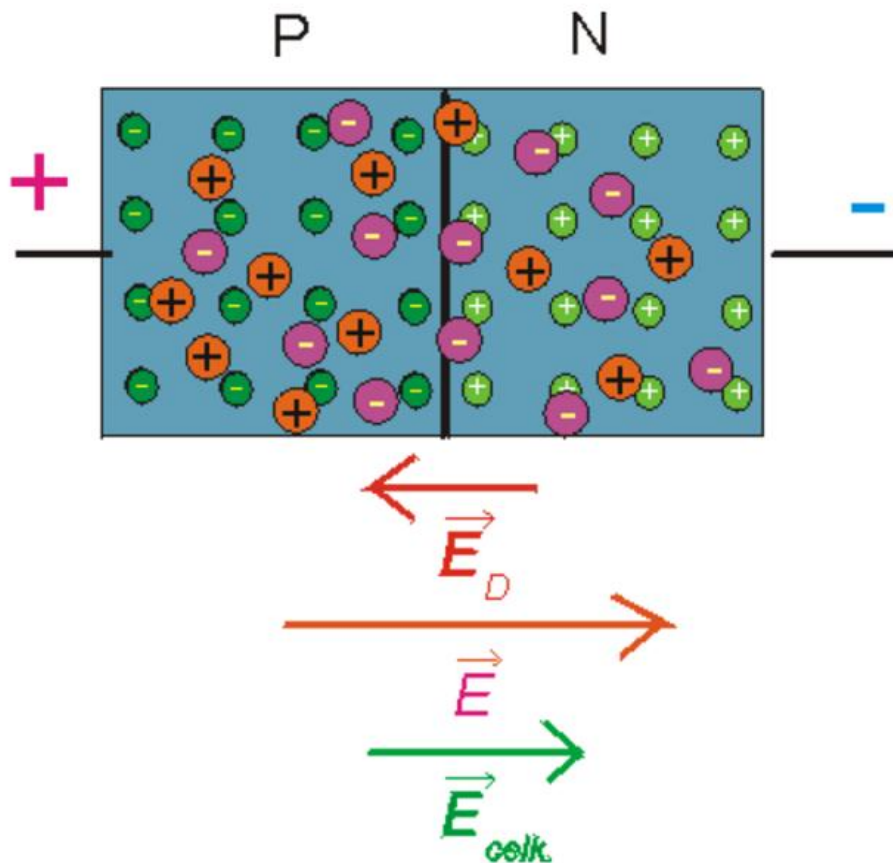
V příměsovém polovodiči typu P je přebytek volných děr a v polovodiči typu N je přebytek volných elektronů. Při spojení těchto polovodičů dojde v místě spojení k pronikání děr do typu N a elektronů do typu P. Vzájemnou rekombinací elektronů a děr vznikne oblast určité šířky nazývána vyprázdňená. Zbylé nepohyblivé ionty zapříčiní vznik difuzního elektrického pole E_D . Toto pole brání průchodu zbylým volným nosičům nábojů. [7,8,9]

Některé elektrony z oblasti typu N a některé díry z oblasti typu P se přece jen přes přechod dostanou a vytvoří malý elektrický proud proti směru elektrického pole nazývaný difuzní proud I_d a proud tekoucí ve směru elektrického pole nazývaný polní proud I_p . K rovnovážnému stavu na přechodu PN dojde, pokud je I_d rovno I_p . [9]



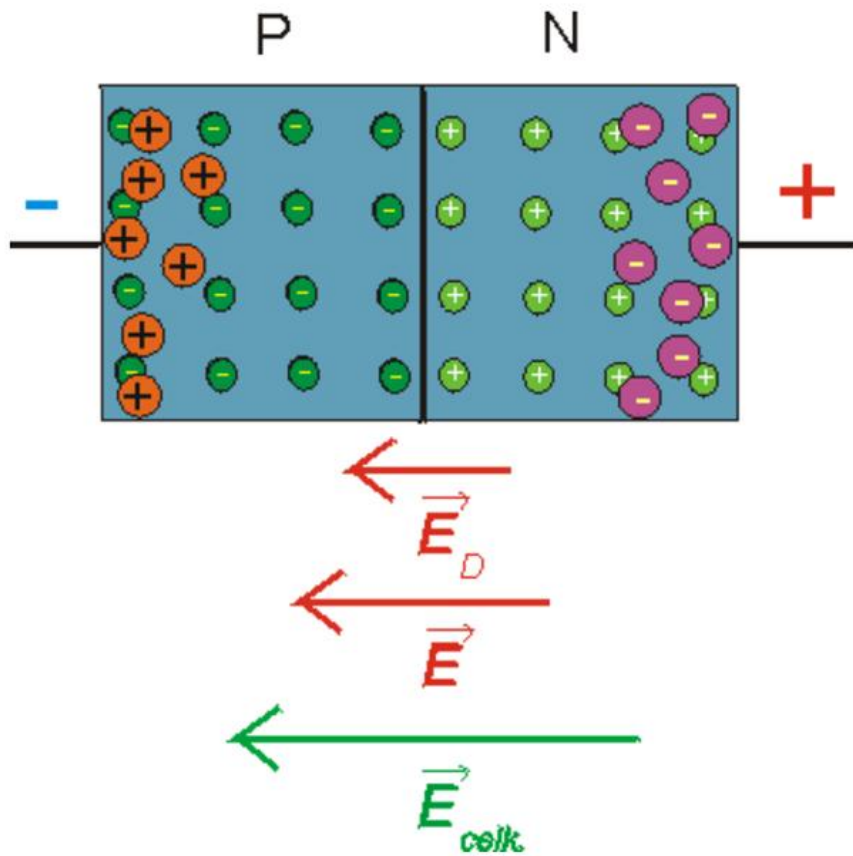
Obr. 2.2 - PN přechod v rovnovážném stavu (převzato: [7])

Po přivedení napětí tak, že kladný pól je připojen na oblast typu P a záporný na oblast typu N. Dojde k vytvoření vnější intenzity elektrického pole E , která má směr proti intenzitě E_D . Celková intenzita elektrického pole je dána vektorovým součtem intenzit E a E_D . Pokud je intenzita vnějšího elektrického pole větší, má celková intenzita směr od oblasti typu P k oblasti typu N. To znamená, že volné nosiče náboje můžou přes hradlovou oblast volně procházet PN přechod propouští proud. [7,8]



Obr. 2.3 - PN přechod zapojený v propustném směru (převzato: [7])

Jestliže se kladný pól zdroje připojí k oblasti typu N a záporný pól k oblasti typu P, tak mají intenzita vnějšího pole E a intenzita E_D stejný směr. Dojde k rozšíření vyprázdněné oblasti a zesílení elektrického pole na přechodu PN. To znamená, že přechod nosičů nábojů přes rozhraní se ztíží. Přes přechod může téct jen malý proud způsobený minoritními nosiči. Napětí zde nemůže být libovolně veliké, protože by mohlo dojít ke zničení přechodu. V určitém okamžiku by začal protékat velký proud, protože by došlo k překonání vazebných sil, které působí na valenční elektrony, protože by silové účinky elektrického pole byly větší. U těchto typů přechodů se využívá ještě jiné vlastnosti a to kapacity hradlové vrstvy. [7,8]



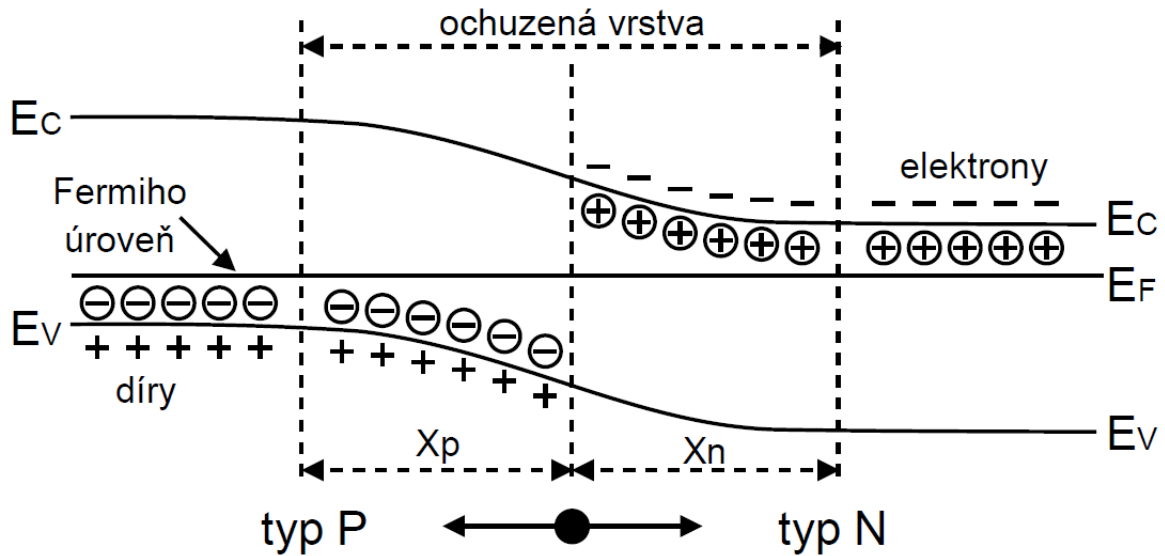
Obr. 2.4 - PN přechod zapojený v závěrném směru (převzato: [7])

2.3 Kapacita PN přechodu

Pro odhad dynamických a frekvenčních vlastností PN přechodu a také pro některé měřicí metody je třeba znát kapacitu PN přechodu. Tuto kapacitu je možno rozdělit na bariérovou (přechodovou) kapacitu a difúzní kapacitu. [2,10]

2.3.1 Bariérová kapacita

Bariérová kapacita PN přechodu souvisí s nábojem ochuzené vrstvy, jeho rozložením a změnách při změně napětí. Sice existuje v propustném i závěrném režimu přechodu. Znatelně se projevuje pouze při závěrném režimu přechodu, kdy je proud přechodem velmi malý. [1]



Obr. 2.5 - Schéma pásového diagramu PN přechodu [1]

Mějme negativní náboj Q_n záporných akceptorových iontů v oblasti P, rovnoměrně rozprostřený od přechodu do vzdálenosti $-x_p$ a stejně velký náboj Q_p kladných donorových iontů, rozprostřených do vzdálenosti x_n . Pro tyto náboje platí vztah: [1]

$$|Q| = |Q_n| = S \cdot q \cdot N_A \cdot x_p = |Q_p| = S \cdot q \cdot N_D \cdot x_n \quad (2.1)$$

kde S je plocha přechodu, N_A je koncentrace akceptorů a N_D je koncentrace donorů. Vzdálenosti x_p a x_n jsou funkcí vnějšího svorkového napětí, takže na něm závisí i Q_p a Q_n . Pro jejich velikost platí $Q_p = Q_n = Q$. Pak platí vztah: [1]

$$Q = \left[2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot \frac{N_D \cdot N_A^2}{N_A \cdot N_D + N_A^2} \cdot U_C \right]^{\frac{1}{2}} = \left[2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot \frac{N_A \cdot N_D^2}{N_A \cdot N_D + N_D^2} \cdot U_C \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

nebo po úpravě:

$$Q = \left[2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D} \cdot U_C \right]^{\frac{1}{2}} = K \cdot \sqrt{U_C} \quad (2.3)$$

kde:

$$K = \left[2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot q \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

V rovnicích značí U_C celkové napětí na přechodu. To je součet difuzního a svorkového napětí při průchodu ve zpětném směru a rozdíl při průchodu v přímém směru. Kapacita PN přechodu je kapacitou diferenciální. Definicí této kapacity je poměr změny náboje ochuzené vrstvy ke změně napětí na svorkách struktury, která změnu náboje způsobila. [1]

$$C_T = \frac{dQ}{dU} \quad (2.5)$$

Na základě definice můžeme pro bariérovou kapacitu C_T odvodit vztah:

$$C_T = \frac{dQ_p}{dx_n} \cdot \frac{dx_n}{dU} = \frac{dQ_n}{dx_p} \cdot \frac{dx_p}{dU} = \left[\frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2} \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (V_0 - U)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

nebo také po úpravě:

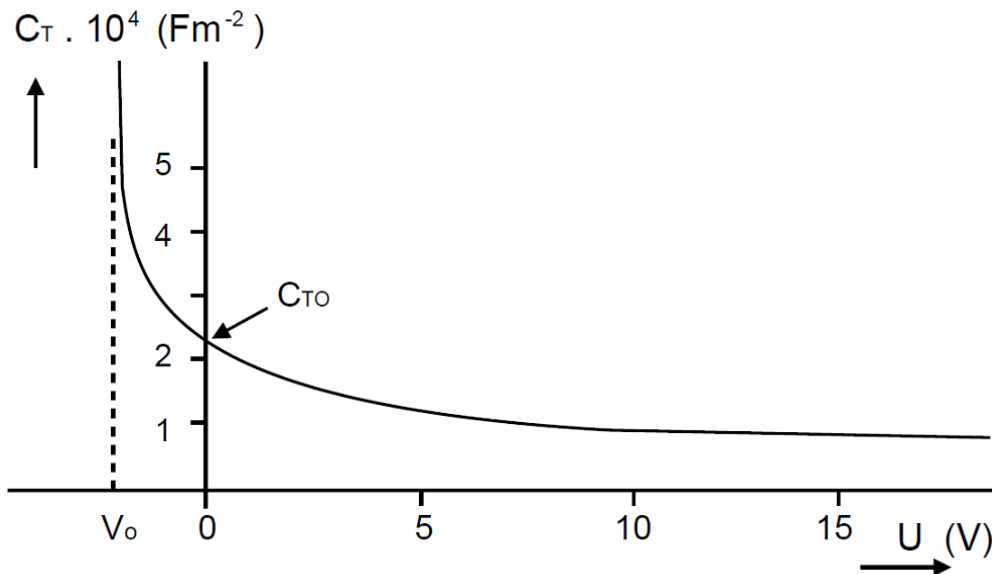
$$C_T = \left[\frac{q \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot N_A \cdot N_D}{2 \cdot V_0 \cdot (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - \frac{U}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}} = C_{T0} \cdot \left(1 - \frac{U}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

kde C_{T0} je bariérová kapacita při vnějším nulovém napětí, V_0 je difúzní napětí přechodu.

Odvození vztahu pro kapacitu nesymetrického pozvolného přechodu PN je složité, a proto je zde uveden pouze obecný výraz: [1]

$$C_T(U) = C_{T0} \cdot \left(1 - \frac{U}{V_0} \right)^{-m} \quad (2.8)$$

kde m je exponent napěťové závislosti bariérové kapacity.



Obr. 2.6 - Závislost bariérové kapacity na napětí strmého přechodu PN [1]

2.3.2 Difúzní kapacita

Difúzní kapacita se uplatňuje v propustném směru. Způsobuje jí změna akumulovaného náboje minoritních nosičů injikovaných na obě strany ochuzené vrstvy (děr do oblasti N a

elektronů do oblasti P) při změně napětí.

Při odvození její velikosti uvažujeme nesouměrný PN přechod (např. P⁺N, kterým protéká proud I. Nyní je možno počítat pouze s nábojem akumulovaným v oblasti N. [2]

$$Q_{ap} = I \cdot \tau_p = q \cdot S \cdot L_p \cdot p_n \cdot \exp\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T}\right) \quad (2.9)$$

Difúzní kapacitu potom spočítáme z obecné definice kapacity:

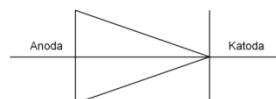
$$C_D = \frac{dQ_{ap}}{dU} = \frac{q^2}{k \cdot T} \cdot S \cdot L_p \cdot p_n \cdot \exp\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T}\right) = \frac{q}{k \cdot T} \cdot I_p = \frac{I}{U_T} \cdot \tau_p \quad (2.10)$$

kde τ_p se nazývá průletová doba diody a L_p je střední difúzní délka minoritních nosičů.

3 Polovodičové součástky s jedním PN přechodem

3.1 Dioda

Dioda je elektronická polovodičová součástka se dvěma elektrodami. Ty se nazývají katoda a anoda. Dioda má dva pracovní stavy. Pokud je na anodě kladné napětí a na katodě záporné, je dioda otevřena a proud může protékat. Pokud je napětí připojeno v opačné polaritě, chová se dioda jako zavřená. [11]



Obr. 3.1 - Schematická značka diody [11]

Označování diod:

1. písmeno - udává materiál polovodiče

A - germanium

B - křemík

2. písmeno - udává typ diody

A - dioda pro všeobecné použití nebo detekční dioda

B - kapacitní dioda

Y - usměrňovací dioda

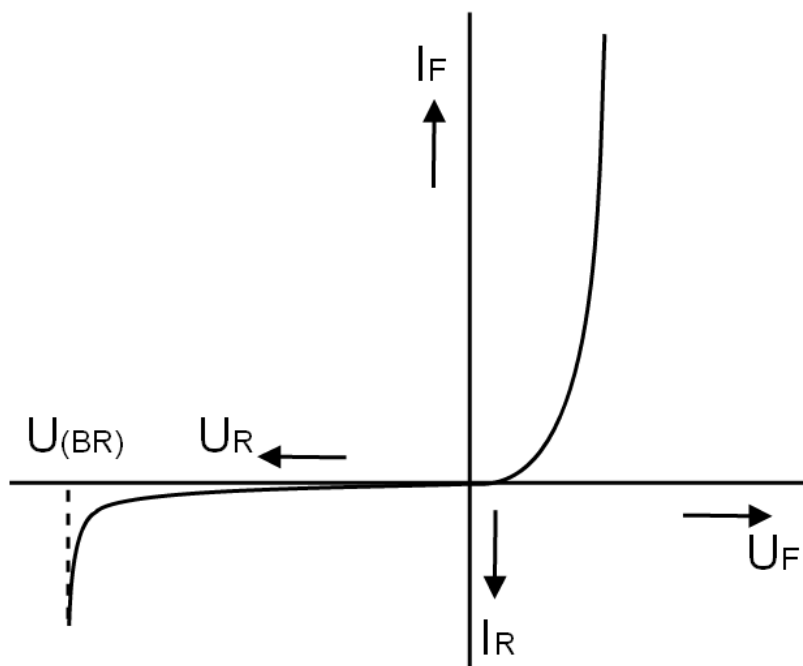
Z - Zenerova dioda

3.písmeno - označuje průmyslové typy [12,13]

Proud protékající diodou a napětí na ní je v souladu se statickou charakteristikou pouze při dostatečně pomalých změnách napětí a proudu. Při rychlých změnách platí až po odeznění přechodného děje, který je ovlivněn kapacitou PN přechodu. U varikapu je kapacita PN přechodu vyžadovaná, ale u ostatních diod je nežádoucí. [2]

3.2 Usměrňovací diody

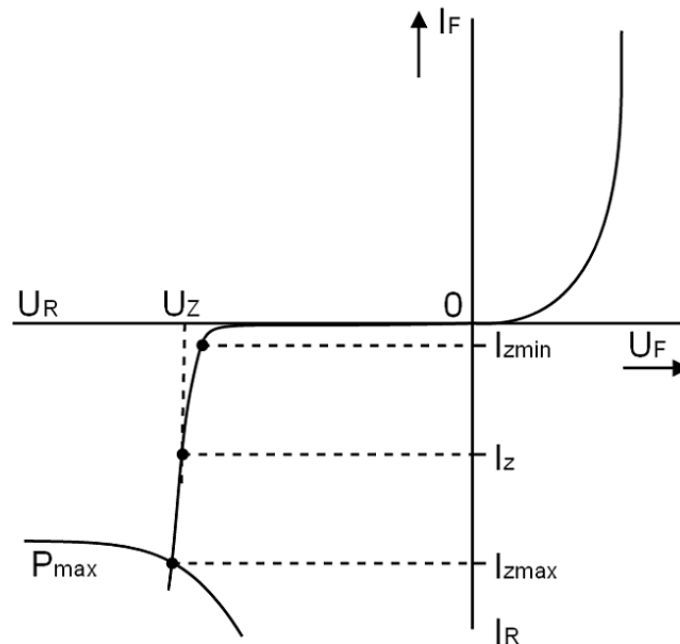
Mezi usměrňovací diody s přechodem PN řadíme součástky využívající nesouměrné vodivosti přechodu PN. Jsou určeny pro usměrňování proudů. Kmitočet usměrňovaných proudů se pohybuje od průmyslového kmitočtu 50 Hz a až po několik stovek kHz při usměrňování proudu tranzistorových měničů napětí. [1]



Obr. 3.2 - Průběh VA charakteristiky [2]

3.3 Stabilizační (Zenerovy) diody

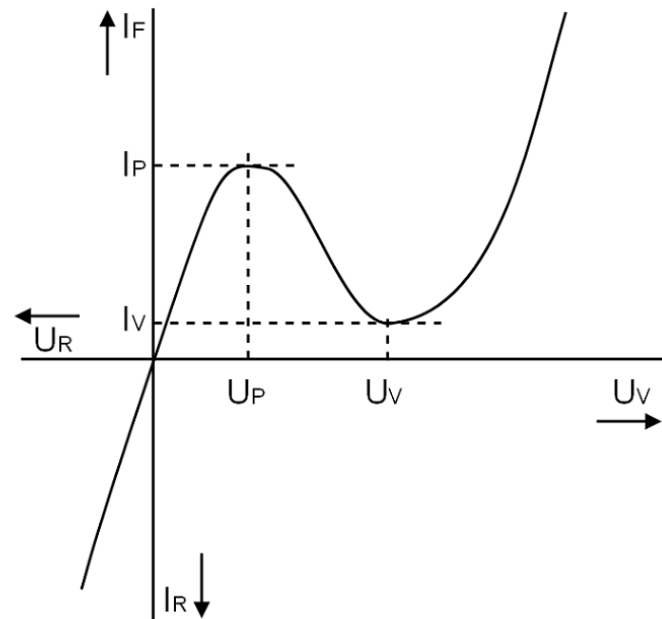
Stabilizační diody je společný název pro regulační a referenční diody. Pro stabilizační diody se často používá označení Zenerovy diody. Využívají se v závěrné části, kde se vyznačují velmi malým úbytkem napětí v závislosti na procházejícím proudu. Toto nastává po průrazu diody, který může být způsoben dvěma fyzikálně odlišnými mechanismy. Dovolený průrazný výkon P_Z a průrazné napětí udávají maximální dovolený proud diodou. [1,2]



Obr. 3.3 - VA charakteristika Zenerovy diody [1]

3.4 Tunelové a inverzní (obrácené) diody

Tunelová (Esakiho) dioda je založena na tunelovém jevu v propustném směru PN přechodu. V přímém směru má voltampérová charakteristika v určité části zápornou diferenciální vodivost. Tunelová dioda má velmi úzký přechod PN s velkou koncentrací příměsových atomů (10^{24} až 10^{26} m^{-3}). Aplikace tunelových diod má řadu nevýhod, a proto se tyto diody považují za neperspektivní. [1,2,14]



Obr. 3.4 - VA charakteristika tunelové diody [1]

3.5 Kapacitní diody

Varikap (variable capacitor) a varaktor (variable reactor) se označují souhrnným názvem kapacitní dioda. Rozdíl mezi těmito součástkami spočívá v jejich odlišné aplikaci. Varikap pracuje jako napětím řízený kapacitor, varaktor pracuje s tak velkým střídavým signálem, že se uplatní nelinearita jeho kapacity. Kapacitní diody využívají kapacitního charakteru PN přechodu, kde kapacita závěrně polarizovaného přechodu PN je napěťově závislá. [1,2,5]

Závislost bariérové kapacity C_T přechodu PN na přiloženém vnějším napětí U je dána vztahem:

$$C_T = C_{T0} \cdot \left(1 - \frac{U}{V_0}\right)^{-n} \quad (3.1)$$

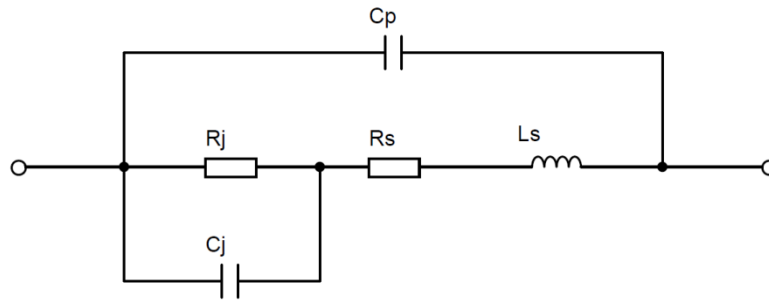
kde C_{T0} je kapacita přechodu při nulovém napětí, n je exponent, jehož hodnota závisí na tvaru strmého přechodu (pro strmý přechod je $n = 1/2$, pro pozvolný přechod je $n = 1/3$) a V_0 je difúzní napětí přechodu. [1,5]

Varikapy se vyrábějí nejen se strmým přechodem, ale i s přechody hyperstrmými, u kterých je průběh koncentrace příměsových atomů dán vztahem:

$$N_D(x) = N_0 \cdot x^m \quad (3.2)$$

kde N_0 je koncentrace příměsových atomů v oblasti metalurgického přechodu a m je koeficient charakterizující průběh koncentrace příměsí. (pro hyperstrmý přechod je $m < 0$, pro

strmý přechod je $m = 0$ a pro pozvolný přechod je $m = 1$). [1]



Obr. 3.5 - Náhradní schéma varikapu [1]

Odpor R_j je odpor přechodu pro malý střídavý signál, jehož hodnota se pohybuje v mezích od $10^2 \Omega$ do $10^8 \Omega$. Kapacita C_j je kapacita přechodu s hodnotou od desetin μF do desetin pF a kapacita C_p je kapacita pouzdra. Odpor R_s je sériový odpor varikapu a indukčnost L_s je sériová indukčnost přívodu. Veličiny L_s a C_p je obvykle možné zanedbat. [1]

Jedním z nejdůležitějších parametrů varikapu je činitel jakosti Q , který se rovná převrácené hodnotě ztrátového činitele $\text{tg}\delta$. Pro činitel jakosti tak platí vztah:

$$\frac{1}{Q} = \text{tg}\delta = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_s \cdot C_j + \frac{R_s + R_j}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_j^2 \cdot C_j} \quad (3.3)$$

Derivací předchozího vztahu podle kmitočtu můžeme určit kmitočet f_0 , kde je ztrátový činitel nejmenší a činitel jakosti největší, pro který platí vztah:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_j} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_s \cdot R_j} + \frac{1}{R_j^2}} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_j \cdot \sqrt{R_s \cdot R_j}} \quad (3.4)$$

Při kmitočtech menších než je f_0 lze zanedbat sériový odpor a pro kmitočty vyšší než je f_0 lze zanedbat odpor R_j . Pro činitel jakosti tak platí vztahy:

$$Q_{\text{nf}} = \omega \cdot C_j \cdot R_j = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_j \cdot R_j \quad (3.5)$$

$$Q_{\text{vf}} = \frac{1}{\omega \cdot C_j \cdot R_s} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_j \cdot R_s} \quad (3.6)$$

Mezní kmitočet varikapu f_∞ je kmitočet, při kterém se činitel jakosti zmenší na jedničku:

$$f_\infty = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_j \cdot R_s} \quad (3.7)$$

Jelikož kapacita C_j závisí na přiloženém napětí, je zapotřebí definovat mezní kmitočet při určitém napětí. Zpravidla se definuje pro napětí rovné nule. [1]

Praktická využití kapacitních diod můžeme rozdělit na následující dvě základní skupiny. Za prvé na obvody s malým střídavým signálem, kdy je kapacita varikapu dána

stejnosemným napětím na jeho svorkách. Jedná se o obvody pro ladění oscilátorů, kmitočtové modulátory, filtry, zpožďovací linky, generátory harmonických kmitočtů, měniče malých stejnosměrných napětí na napětí střídavá, stabilizátory malých stejnosměrných napětí, automatické doladování rozhlasových a televizních přijímačů. Varikapy umožňují zvýšení spolehlivosti elektronických obvodů a jejich miniaturizaci. [1,15]

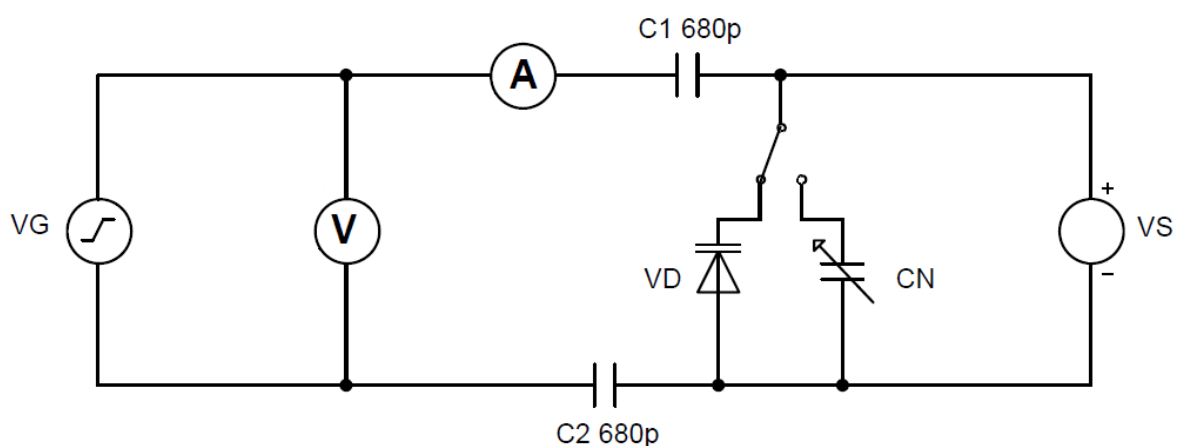
Za druhé na obvody s velkým střídavým signálem, kde je kapacita varaktoru určována jak stejnosměrným napětím, tak okamžitou hodnotou střídavého signálu. Patří sem parametrické zesilovače, generátory krátkých impulzů a další. [1]

4 Měřicí metody pro stanovení kapacity varikapu

4.1 Měření kapacity substituční metodou

Varikap, u něhož není známá kapacita, je zapojen do obvodu a určí se jeho účinek. Potom je do obvodu zapojen člen, jehož kapacita je známá a dá se měnit. Stejná výchylka na ampérmetru znamená rovnost. V obvodu je zapojen generátor označen VG a stejnosměrný zdroj označen VS. [18]

Tato metoda se řadí mezi ty přesnější, jelikož podmínky se během měření výchylky na varikapu a na členu se známou kapacitou nemění. Nevýhodou je potřeba proměnného členu.



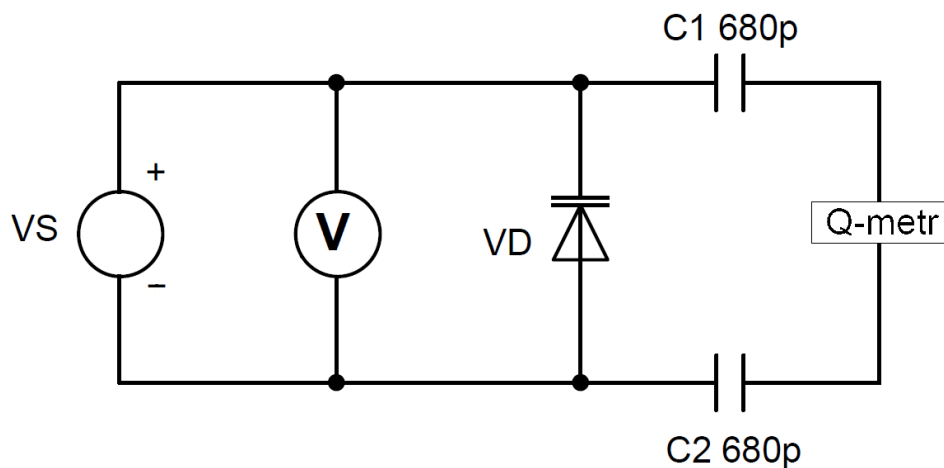
Obr. 4.1 - Měření kapacity substituční metodou [19]

4.2 Měření kapacity Q-metrem

Měření se provádí při určité rezonanční frekvenci. Rezonanční frekvence je docíleno za pomoci kalibrační cívky zapojené do Q-metru a proměnné kapacity C_N umístěné v Q-metru, která je v tomto stavu označena C_{N1} . Po připojení varikapu je nastavena rezonanční frekvence změnou kapacity C_N , jejíž hodnota je v tomto stavu označena C_{N2} . Výsledná kapacita varikapu je dána vztahem: [16]

$$C_{VD} = C_{N1} - C_{N2} \quad (4.1)$$

Jedná se o přesnou metodu. Mezi nevýhody této měřicí metody patří nutnost vlastnit sadu kalibračních cívek a Q-metr.



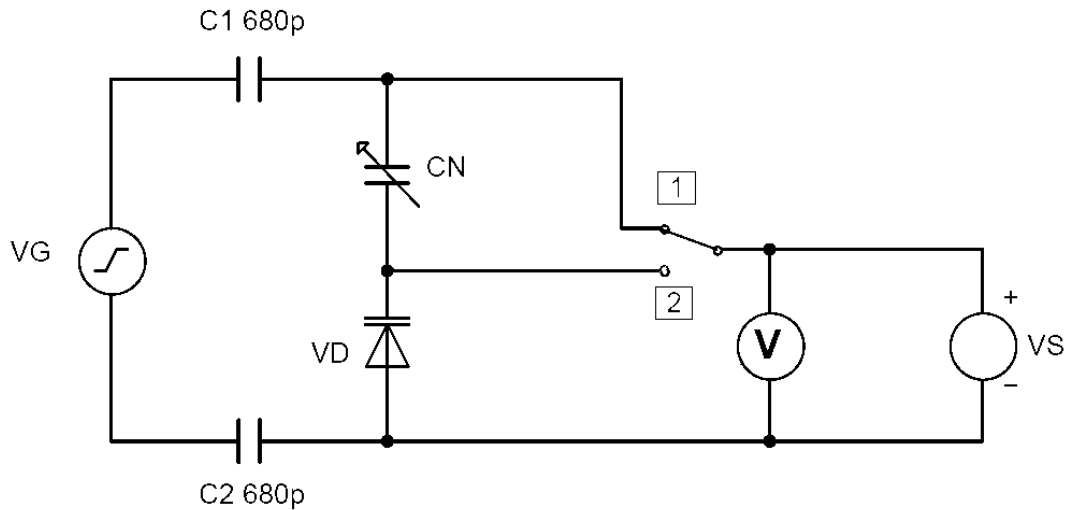
Obr. 4.2 - Měření kapacity Q-metrem

4.3 Měření kapacity srovnávací metodou

Člen s neznámou kapacitou je zapojen do obvodu v sérii s členem, jehož velikost kapacity je známá. Napětí v bodě 1 je označeno jako U_1 a napětí v bodě 2 jako U_2 . Velikost kapacity je pak dána vztahem: [18]

$$C_{VD} = C_N \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

Při zachování stejné délky kabelů je tato metoda přesná.



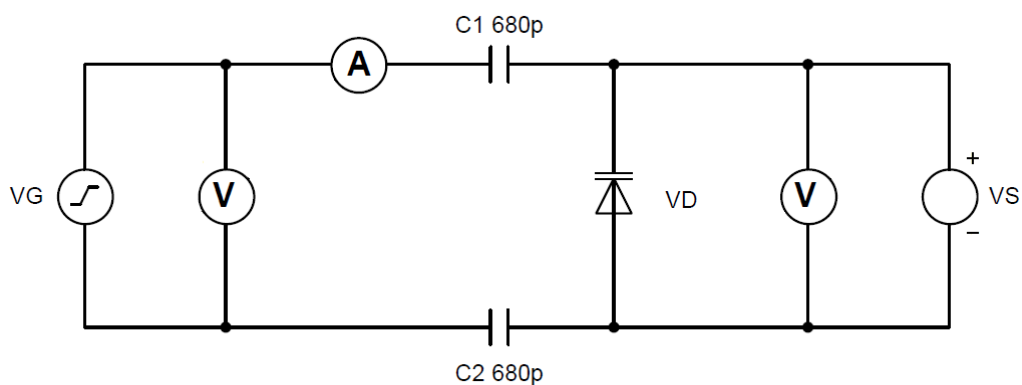
Obr. 4.3 - Měření kapacity srovnávací metodou [19]

4.4 Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem

Měří se velikost procházejícího proudu kondenzátorem a velikost napětí na něm. Ve výpočtu se vychází z upraveného Ohmova zákona: [18]

$$U = I \cdot Z = I \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_{VD}} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{VD}} \Rightarrow C_{VD} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U} \quad (4.3)$$

Výhodou tohoto zapojení je jednoduchost zapojení obsahující běžné měřicí přístroje a součástky. Nevýhodou je vliv kapacit měřícího obvodu.



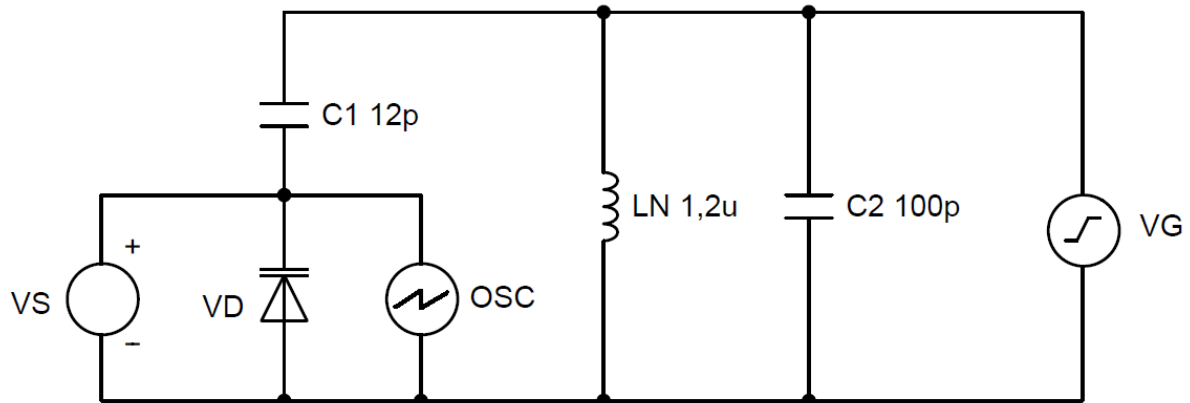
Obr. 4.4 - Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem [19]

4.5 Měření kapacity rezonanční metodou

Změření velikosti kapacity je podmíněno dosažením sériové nebo paralelní rezonance. V okamžiku rezonance platí vztah: [18]

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_N \cdot C_{VD}}} \Rightarrow C_{VD} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_r^2 \cdot L_N} \quad (4.4)$$

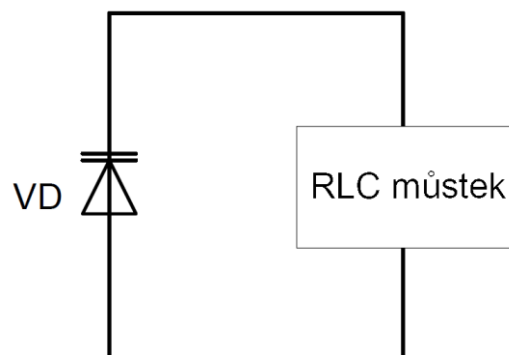
Tato měřicí metoda je citlivá na zvolené součástky. Další nevýhodou je potřeba většího počtu měřících přístrojů a součástek.



Obr. 4.5 - Měření kapacity rezonanční metodou [20]

4.6 Měření kapacity RLC můstkem

Můstky se využívají k přesnému měření elektrických veličin. Měření můstkovými metodami se zakládá na dosažení rovnovážného stavu mezi větvemi můstku. [17]



Obr. 4.6 - Měření kapacity RLC můstkem

5 Ověření měřících metod

Za účelem praktického ověření měřících metod byly vybrány čtyři varikapy s následujícími vlastnostmi.

Tabulka 1 - Vlastnosti měřených varikapů [21]

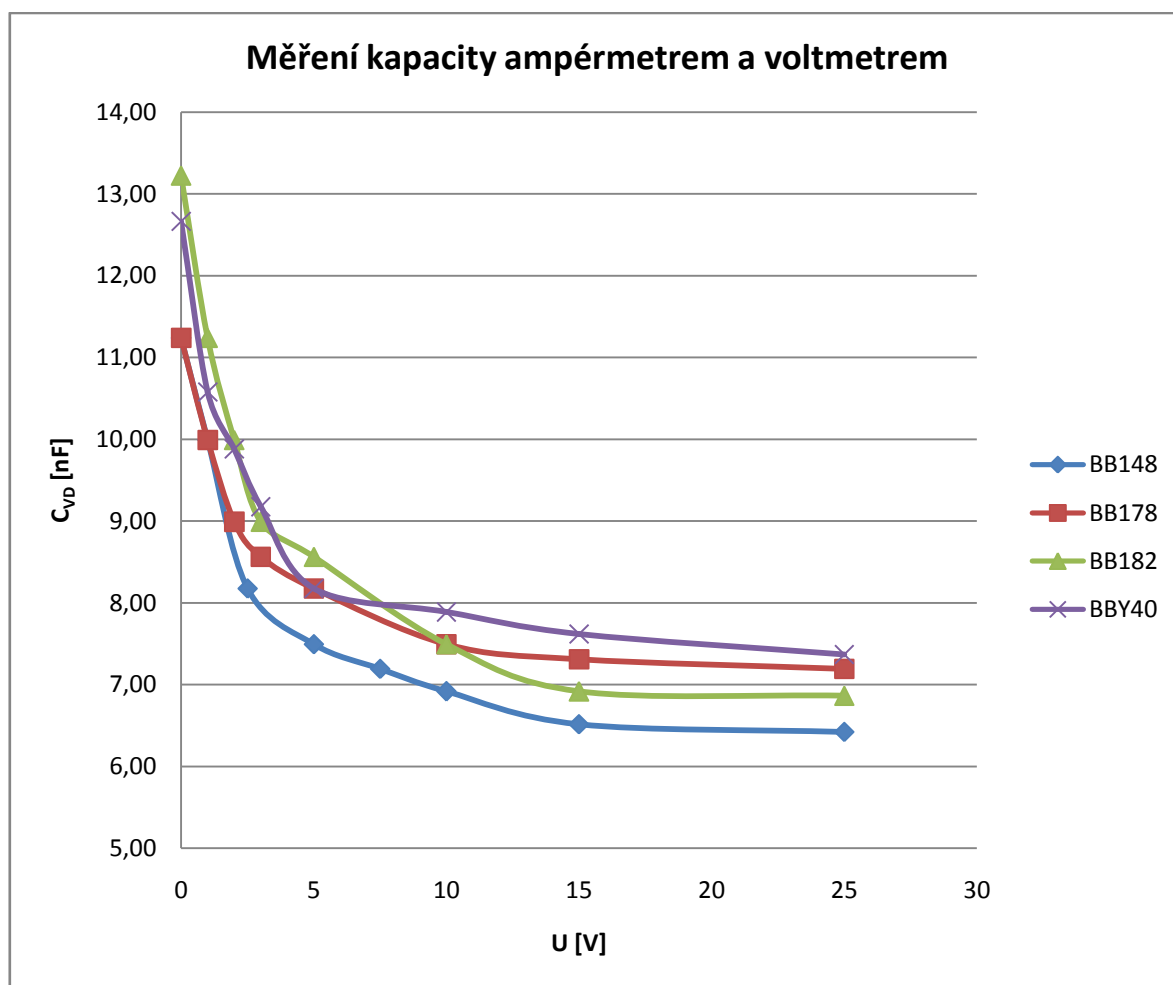
Typ varikapu			BB148	BB178	BB182	BBY40
Parametr	Symbol [jednotky]	podmínky				
Závěrné napětí	V_R [V]	-	30	32	32	30
Kapacita diody	C_{VD} [pF]	$V_R = 1V$	36,8 - 41,8	34,7 - 42,4	52 - 62	-
		$V_R = 3V$	-	-	-	26 - 32
		$V_R = 25V$	-	-	-	4,3 - 6
		$V_R = 28V$	2,6	2,6	2,7	-
Kapacitní poměr	$\frac{C_{d(1V)}}{C_{d(28V)}}$	$f = 1MHz$	15	15	22	-
	$\frac{C_{d(3V)}}{C_{d(25V)}}$	$f = 1MHz$	-	-	-	5 - 6,5

5.1 Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem

Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem je součástí zadání měření kapacity varikapu, a tak byla tato metoda prakticky ověřena. K měření je zapotřebí generátor střídavého napětí označen VG a zdroj stejnosměrného napětí označen VS. Dále jsou zapotřebí voltmetr a ampérmetr. V obvodu jsou zapojeny oddělovací kondenzátory. Schéma zapojení je na obrázku 4.4 Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem. Tato metoda je nepřesná, jelikož se zde projevuje vlivem kapacit vodičů v obvodu a kapacit měřících přístrojů. Během měření byla zjištěna následující data.

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty metodou měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem

Typ varikapu		0	1	2,5	5	7,5	10	15	25
BB148	U [V]	0	1	2,5	5	7,5	10	15	25
	U_{VD} [mV]	0,80	0,90	1,10	1,20	1,25	1,30	1,38	1,40
	C_{VD} [nF]	11,24	9,99	8,18	7,49	7,19	6,92	6,52	6,42
BB178	U [V]	0	1	2	3	5	10	15	25
	U_{VD} [mV]	0,80	0,90	1,00	1,05	1,10	1,20	1,23	1,25
	C_{VD} [nF]	11,24	9,99	8,99	8,56	8,18	7,49	7,31	7,19
BB182	U [V]	0	1	2	3	5	10	15	25
	U_{VD} [mV]	0,68	0,80	0,90	1,00	1,05	1,20	1,30	1,31
	C_{VD} [nF]	13,22	11,24	9,99	8,99	8,56	7,49	6,92	6,86
BBY40	U [V]	0	1	2	3	5	10	15	25
	U_{VD} [mV]	0,71	0,85	0,91	0,98	1,10	1,14	1,18	1,22
	C_{VD} [nF]	12,67	10,58	9,88	9,18	8,18	7,89	7,62	7,37



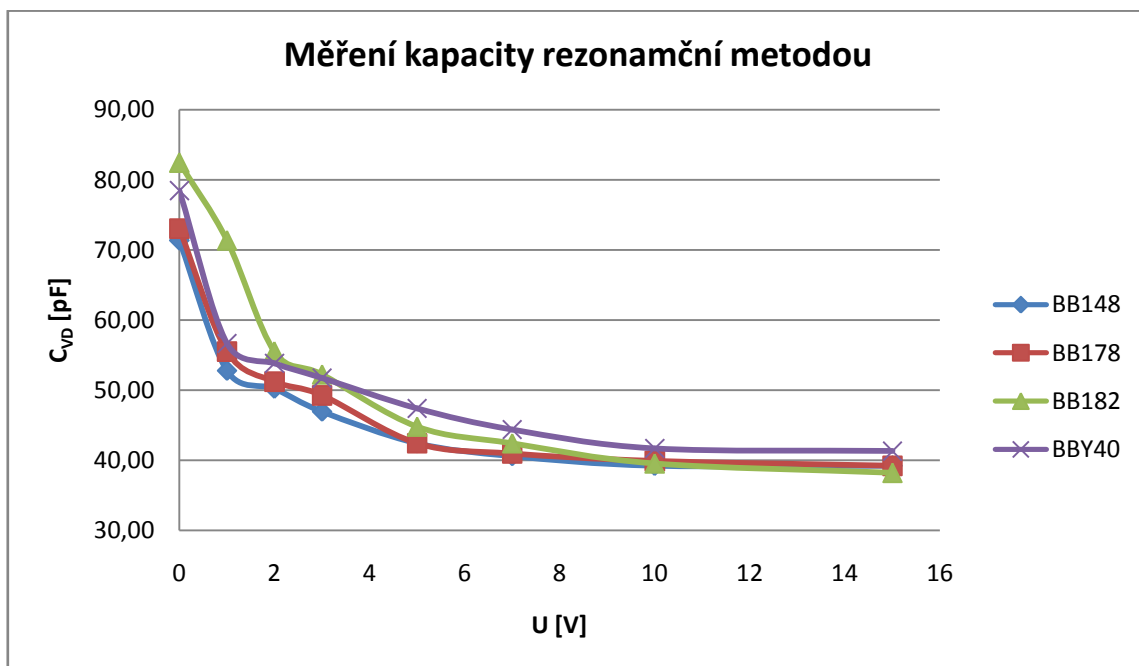
Obr. 5.1 - Závislost kapacity na napětí při měření ampérmetrem a voltmetrem

5.2 Měření kapacity rezonanční metodou

Měření kapacity rezonanční metodou je součástí zadání měření kapacity varikapu, a tak byla tato metoda prakticky ověřena. K měření je zapotřebí generátor střídavého napětí s minimálním frekvenčním rozsahem do 30 MHz a zdroj stejnosměrného napětí. Dále je zapotřebí osciloskop. Rezonanční kmitočet je dán cívkou LN, kondenzátorem C1 a varikapem VD. Schéma zapojení je na obrázku 4.5 Měření kapacity rezonanční metodou. Během měření byla zjištěna následující data.

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty rezonanční metodou

Typ varikapu	U [V]	0	1	2	3	5	7	10	15
BB148	U [V]	0	1	2	3	5	7	10	15
	f [MHz]	17,2	20,0	20,5	21,2	22,3	22,8	23,2	23,2
	C _{VD} [pF]	71,35	52,77	50,23	46,97	42,45	40,61	39,22	39,22
BB178	U [V]	0	1	2	3	5	7	10	15
	f [MHz]	17,0	19,5	20,3	20,7	22,3	22,7	23,0	23,2
	C _{VD} [pF]	73,04	55,51	51,22	49,26	42,45	40,96	39,90	39,22
BB182	U [V]	0	1	2	3	5	7	10	15
	f [MHz]	16,0	17,2	19,5	20,1	21,7	22,3	23,1	23,5
	C _{VD} [pF]	82,46	71,35	55,51	52,25	44,83	42,45	39,56	38,22
BBY40	U [V]	0	1	2	3	5	7	10	15
	f [MHz]	16,4	19,3	19,8	20,2	21,1	21,8	22,5	22,6
	C _{VD} [pF]	78,48	56,67	53,84	51,73	47,41	44,42	41,70	41,33



5.2 - Závislost kapacity na napětí při měření rezonanční metodou

5.3 Měření kapacity RLC můstkem

Měření kapacity za pomoci RLC můstku je součástí zadání měření kapacity varikapu, a tak byla tato metoda prakticky ověřena. K měření je zapotřebí pouze RLC můstek. Schéma zapojení je na obrázku 4.6 Měření kapacity RLC můstkem. Během měření byla zjištěna následující data.

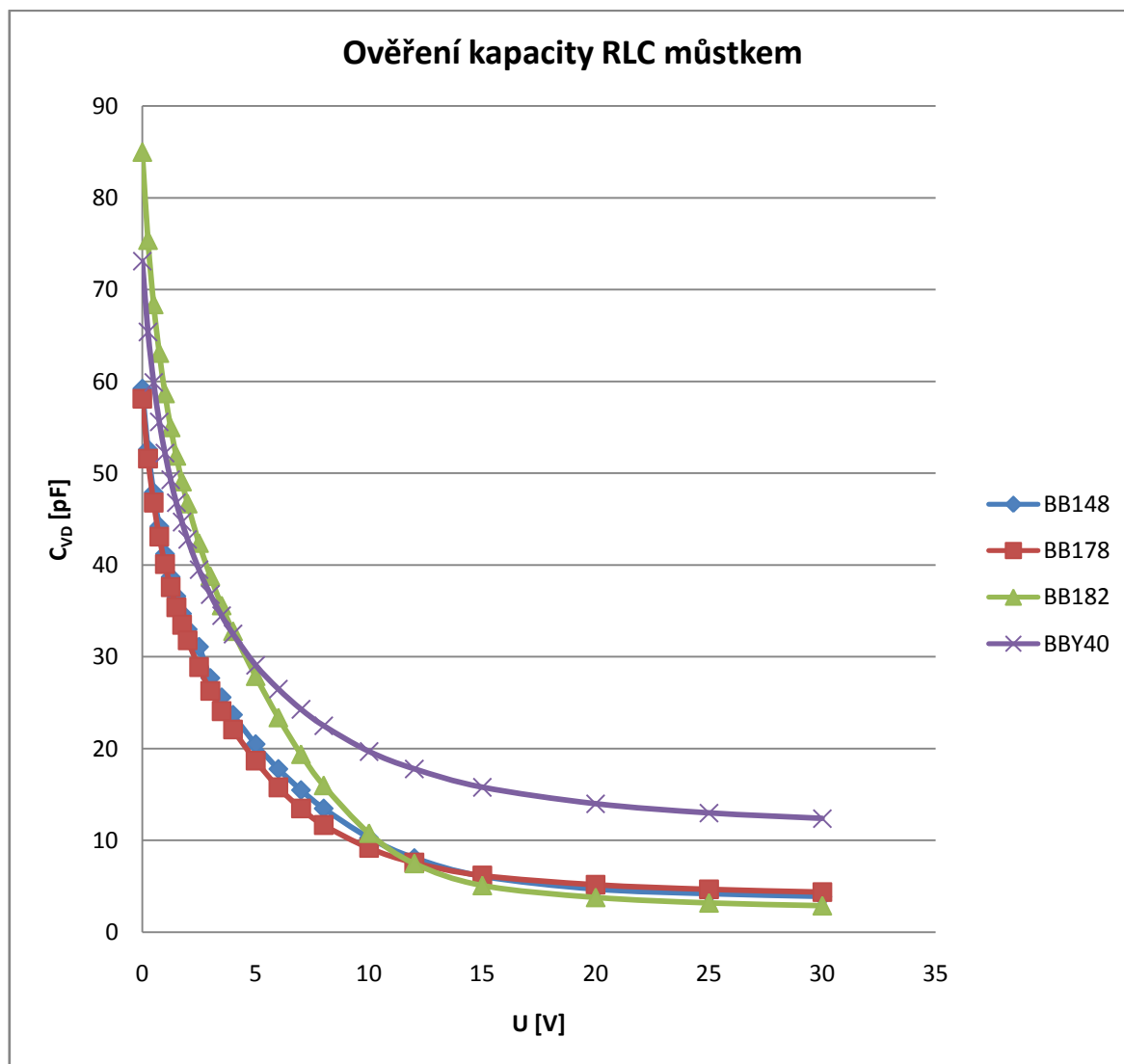
Tabulka 4 - Ověření hodnot pomocí RLC můstku

Typ varikapu							
BB148		BB178		BB182		BBY40	
U[V]	C _{VD} [pF]	U[V]	C _{VD} [pF]	U[V]	C _{VD} [pF]	U[V]	C _{VD} [pF]
0	59,2	0	58,1	0	85	0	73,1
0,25	52,6	0,25	51,6	0,25	75,4	0,25	65,4
0,5	47,9	0,5	46,8	0,5	68,4	0,5	59,9
0,75	44,2	0,75	43,1	0,75	63,1	0,75	55,6
1	41,2	1	40,1	1	58,7	1	52,2
1,25	38,7	1,25	37,6	1,25	55	1,25	49,3
1,5	36,6	1,5	35,4	1,5	51,9	1,5	46,8
1,75	34,7	1,75	33,5	1,75	49,1	1,75	44,7
2	33	2	31,8	2	46,7	2	42,8
2,5	31,1	2,5	28,9	2,5	42,4	2,5	39,5
3	27,7	3	26,3	3	38,8	3	36,8
3,5	25,6	3,5	24,1	3,5	35,6	3,5	34,5
4	23,7	4	22,1	4	32,8	4	32,5
5	20,5	5	18,7	5	27,9	5	29,1
6	17,8	6	15,8	6	23,4	6	26,5
7	15,5	7	13,5	7	19,4	7	24,3
8	13,5	8	11,7	8	16	8	22,5
10	10,3	10	9,2	10	10,8	10	19,7
12	8,1	12	7,6	12	7,5	12	17,8
15	6,1	15	6,2	15	5,1	15	15,8
20	4,7	20	5,2	20	3,8	20	14
25	4,2	25	4,7	25	3,2	25	13
30	3,9	30	4,4	30	2,9	30	12,4

Hodnoty kapacit pro výpočet kapacitního poměru byly zvoleny při napětí 1 V a 30 V, ačkoliv katalog uvádí u většiny varikapů hodnoty při napětí 1 V a 28 V, nebo 3 V a 25 V. Jelikož hodnoty kapacit při vyšším napětí jsou téměř konstantní, je tato odchylka zanedbatelná.

Tabulka 5 - Porovnání kapacitního poměru

Typ varikapu	BB148	BB178	BB182	BBY40
Katalogová hodnota $\left(\frac{C_{d(1V)}}{C_{d(28V)}}, \frac{C_{d(3V)}}{C_{d(25V)}} \right)$	15	15	22	5 - 6,5
Vypočtená hodnota $\left(\frac{C_{d(1V)}}{C_{d(30V)}} \right)$	10,5	9,1	20,4	4,2



Obr. 5.3 - Závislost kapacity na napětí při měření RLC můstkem

6 Návrh měřící metody

Návrh měřící metody vychází ze schémat uvedených v kapitole Měření kapacity varikapu, a tudíž zde už nebudou opět popisována.

- Z katalogů určete mezní a charakteristické parametry varikapů
- Změřte závislost kapacity C_{VD} na napětí v závěrném směru u předložených kapacitních diod metodou měření kapacity voltmetrem a ampérmetrem
- Změřte závislost kapacity C_{VD} na napětí v závěrném směru u totožných kapacitních diod pomocí měření kapacity rezonanční metodou
- Ověřte závislost kapacity C_{VD} na napětí v závěrném směru u totožných kapacitních diod za použití RLC můstku
- Změřené závislosti znázorněte graficky a porovnejte všechny měřící metody
- U měření kapacity můstkovou metodou určete poměr kapacit $C_{VD(1V)} / C_{VD(30V)}$ a porovnejte s hodnotou uvedenou v katalogu

Závěr

V první části bylo cílem práce vysvětlit princip funkce a použití varikapu. Za tímto účelem zde byly popsány principy polovodičů typu N a polovodičů typu P. Obsáhlejší kapitolou zde je kapitola s názvem polovodičové přechody, ve které se podrobněji popisuje kapacita PN přechodu. Důraz je kladen na bariérovou kapacitu, kterou varikap v závěrném směru využívá. V poslední kapitole této části je popsáno rozdělení diod, kde je soustředěná pozornost na kapacitní diodu.

V další části bylo cílem navrhnout různá zapojení pro měření závislosti kapacity na napětí. Byly zde i uvedeny výsledky provedených měření. Byly vybrány měřicí úlohy za pomoci můstku, měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem a měření kapacity rezonanční metodou. Důraz zde byl kladen i na to, aby se student orientoval v katalogovém listu.

Při měření kapacity za použití voltmetru a ampérmetru vycházeli kapacity velice nepřesně. Tato nepřesnost byla způsobena kapacitou vodičů v obvodu a vliv kapacity přístrojů.

Při měření kapacity rezonanční metodou byly dosaženy přesnější hodnoty. Nepřesnost zde způsobovalo malé rozpětí rezonančních frekvencí a nízká jakost rezonančního obvodu, která zapříčinila plochou rezonanční křivku.

Během měření kapacity RLC můstkem byly změřeny hodnoty, které se velice přiblížily předpokládaným hodnotám. To dokazuje i fakt, že u varikapu BB182 je poměr kapacit $C_{VD(1V)} / C_{VD(30V)}$ rozdílný pouze o 1,6 oproti katalogovému listu.

V poslední části bylo cílem navrhnout zadání laboratorní úlohy s varikapem. Při navrhování zadání měřicí úlohy byl brán ohled na vybavení laboratoře a potřeby předmětu Fyzikální elektrotechnika.

Použitá literatura

- [1] VANÍČEK, František. *Elektronické součástky: principy, vlastnosti, modely*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 357 s. ISBN 80-010-3112-8.
- [2] BRZOBOHATÝ, Jaromír, Vladislav MUSIL, Arnošt BAJER a Jaroslav BOUŠEK. *Elektronické součástky* [online]. Brno, 15.11.2002 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: http://studentkmt.hostuju.cz/Materialy/LS_2/IESOE/IESOE_Zkouska1.pdf
- [3] Pásová struktura. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7.2.2012 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1sov%C3%A1_struktura
- [4] JERHOT, Jaroslav. *Elektronické prvky*. 1. vyd. Plzeň: Edič. střed. Vys. školy stroj. a elektrotechn., 1982. 172 s.
- [5] JERHOT, Jaroslav. *Elektronické součástky a zesilovače*. 1. vyd. Plzeň: Edič. střed. Vys. školy stroj. a elektrotechn., 1980. 167 s.
- [6] Polovodiče: fyzikální základy. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2012-03-23]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>
- [7] TRUHLÁŘ, Michal. *Modelování vysokofrekvenční diody v programu Comsol Multiphysics: Modeling HF diode in Comsol Multiphysics*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009
- [8] Přejchod P-N. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 3.1.2012 [cit. 2012-03-24]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_P-N
- [9] PN přechod. In: *Univerzita Karlova v Praze: Matematicko-fyzikální fakulta* [online]. [cit. 2012-03-26]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap2/2_1_4.html
- [10] *Fyzika polovodičů (kap 6-7)*. Dostupné z: http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34epo/prednasky/pn_bezo.pdf
- [11] Dioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dioda>
- [12] HAVLÍČEK, Tomáš. *Polovodičové diody* [online]. [cit. 2012-03-27]. Dostupné z: <http://skriptum.wz.cz/elektro/Diody.htm>
- [13] ADÁMEK. *Diody a usměrňovače: Přednáška č. 2* [online]. Zlín [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: http://www.mikroelektro.utb.cz/e107_files/downloads/pr2.pdf. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [14] Tunelová dioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tunelov%C3%A1_dioda
- [15] VRÁNA, Václav a Václav KOLÁŘ. *Základy polovodičové techniky: Určeno pro posluchače bakalářských studijních programů FS* [online]. 2003 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_polovodicova%20technika_bc%20FS.pdf
- [16] *Měření Q-metrem* [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: webs.zcu.cz/fel/ket/+EM/blok_uloh_1/Q-metr.doc
- [17] Měřicí můstek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2012-05-07 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9B%C5%99ic%C3%AD_m%C5%AFstek
- [18] *Měřicí přístroje a měřicí metody* [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.kteiv.upol.cz/uploads/soubory/serafin/vseel/Merici_pristroje_a_merici

- metody.pps
- [19] *Měření kapacity* [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: e-c.wz.cz/cz/uploaded/EM3-04.DOC
- [20] *Kapacitní dioda - varikap* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://elnika.sweb.cz/radia/varikap.html>
- [21] PHILIPS SEMICONDUCTORS. *Katalogové listy* [online]. [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: http://www.nxp.com/products/diodes/varicap_diodes/tv_vcr_dvd_hdd_varicap_diodes_vhf_tuning/#products