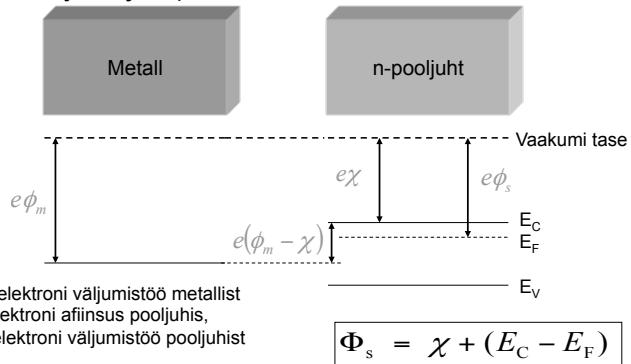


Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



Mis juhtub, kui me termilise tasakaalu tingimustes kontakteerime metalli ja pooljuhi?

1

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)

Work functions of some metals	
Element	Work function, ϕ_m (volt)
Ag, silver	4.26
Al, aluminum	4.28
Au, gold	5.1
Cr, chromium	4.5
Mo, molybdenum	4.6
Ni, nickel	5.15
Pd, palladium	5.12
Pt, platinum	5.65
Ti, titanium	4.33
W, tungsten	4.55

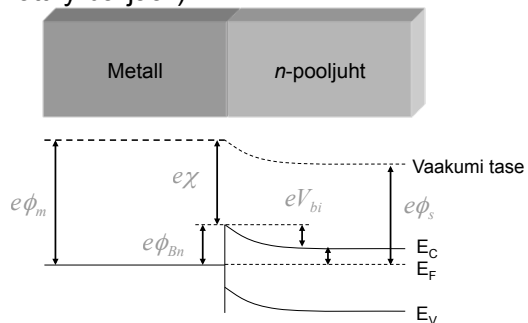
Electron affinity of some semiconductors	
Element	Electron affinity, χ (volt)
Ge, germanium	4.13
Si, silicon	4.01
GaAs, gallium arsenide	4.07
AlAs, aluminum arsenide	3.5

Mõnede metallide väljumistööd

Mõnede pooljuhtide elektronafiinsused

2

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



Fermi tase peab olema konstantne termilises tasakaalus ja vaakumi tase peab olema pidev....

3

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)

Vaakumi taseme pidevuse tagamiseks peab siis pooljuhi Fermi tase langema kontakti piirkonnas sügavamale keelutsooni.

See tähendab, et osa elektrone liigub pooljuhist metalli. Metalli Fermi taset need juurdetulevad elektronid ei häiri, kuna metallis on niigi elektrone väga palju.

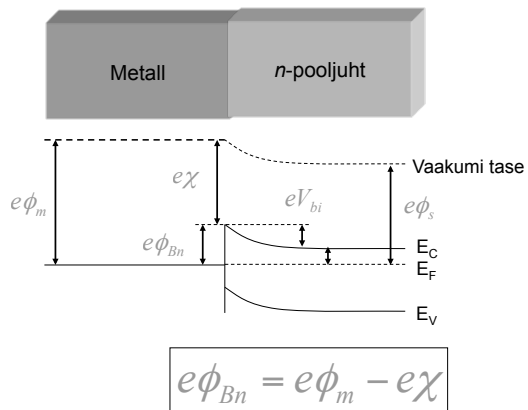
Kui siirde alalt elektronid liiguvad metalli, siis pooljuhi siirdealasse jäävad alles kompenseerimata ioniseeritud doonori aatomid ning tekib nn. tühjendatud (depletion) ala.

Schottky barjääri kõrguseks on pooljuhi juhtivustsooni ja metalli Fermi taseme vahe:

$$e\phi_{Bn} = e\phi_m - e\chi$$

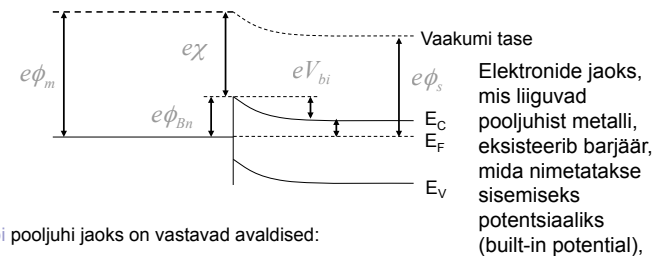
4

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



5

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)



p-tüüpi pooljuhi jaoks on vastavad avaldised:

$$e\phi_{Bp} = E_g - (e\phi_m - e\chi)$$

$$eV_{bi} = e\phi_s - e\phi_m$$

$$eV_{bi} = e\phi_m - e\phi_s$$

6

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)

Mõnede metallide ja pooljuhtide Schottky barjääri kõrgused, ϕ_{Bn} (V)

SCHOTTKY METAL	n Si	p Si	n GaAs
Aluminum, Al	0.7	0.8	
Titanium, Ti	0.5	0.61	
Tungsten, W	0.67		
Gold, Au	0.79	0.25	0.9
Silver, Ag			0.88
Platinum, Pt			0.86
PtSi	0.85	0.2	
NiSi ₂	0.7	0.45	

7

Metalli-pooljuhi kontakt (Schottky barjäär)

EELISED:

- Lihtne valmistada.
- Kiiremad kui p-n diodid!
- Oomilised kontaktid.

8

Siirdeala paksus

Kui Schottky barjääri kõrgus on teada, võime me arvutada elektrivälja profiili, siirdeala paksuse ja muud barjääri omadused.

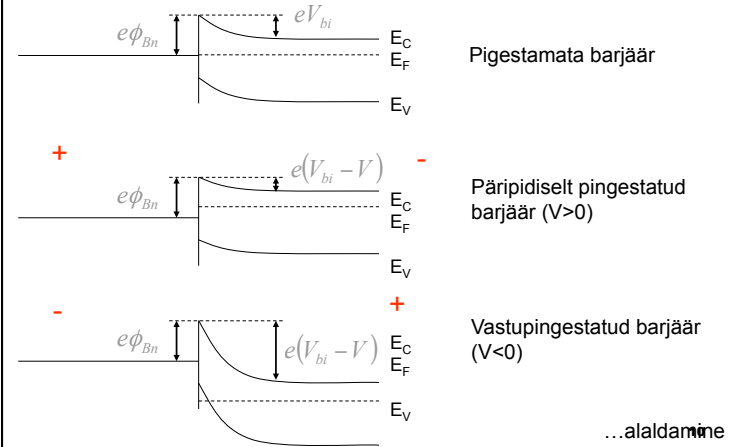
Schottky barjäär n-tüübilise pooljuhiga on analoogiline järsu p⁺-n siirdega (s.t. siirdeala ei ulatu metalli), mida vaatlesime p-n üleminekute juures. Sealt nägime, et

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V)}{eN_D}}$$

N_D – doonorite kontsentratsioon
 V – rakendatud väline pinge (positiivne päripinge korral)

9

Pingestatud Schottky barjäär



Vool Schottky barjääris

Peamine voolumehanism Schottky barjääris on termiline elektronide suundumine metalli, kusjuures osalevad vaid need elektronid, mis suudavad ületada potentsiaalibarjääri $e(V_{bi}-V)$

Välise pingega on võimalik selle barjääri kõrgust muuta.

Eeldame, et elektronide jaotus pooljuhis allub Boltzmanni jaotusele, siis barjääri $e(V_{bi}-V)$ kõrgusest suurema energiaga elektronide arv on

$$n_{th} = n_o e^{-e(V_{bi}-V)/kT}$$

Siin n_o on elektronide tihedus neutraalses alas (pooljuhi sees) ja see avaldub

$$n_o = N_C e^{-(E_C - E_{Fs})/kT}$$

N_C on juhtivustsooni olekute efektiivne tihedus

11

Vool Schottky barjääris

Tulles tagasi meie tsoonipildi juurde võib näha, et barjääri kõrgus metalli poolel on

$$e\phi_{Bn} = eV_{bi} + (E_C - E_{Fs})$$

Kombineerides nüüd kõik kolm võrrandit, saame

$$n_{th} = N_C e^{-e(\phi_{Bn}-V)/kT}$$

Siis vool, mis kulgeb pooljuhist metalli on võrdne

$$J_{s \rightarrow m} = CN_C e^{-e(\phi_{Bn}-V)/kT}$$

kus C on lihtsalt konstant

12

Vool Schottky barjääris

Termilises tasakaalus on elektronide voog pooljuhist metalli võrdne elektronide vooga metallist pooljuhti, seega

$$J_{m \rightarrow s} = J_{s \rightarrow m} = CN_C e^{-e\phi_{Bn}/kT}$$

Kuna barjääri kõrgus metalli pool ei sõltu välisest pingest, siis elektronide voog metallist pooljuhti on alati sama ning sõltumatu välisest pingest. Koguvool seega

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} = CN_C e^{-e\phi_{Bn}/kT} (e^{eV/kT} - 1)$$

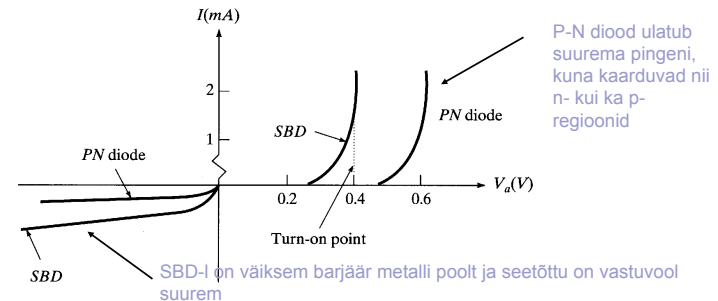
Piiirvoolu tihedus, J_s

$$J = J_s (e^{eV/kT} - 1)$$

...alaldamine
13

Vool Schottky barjääris

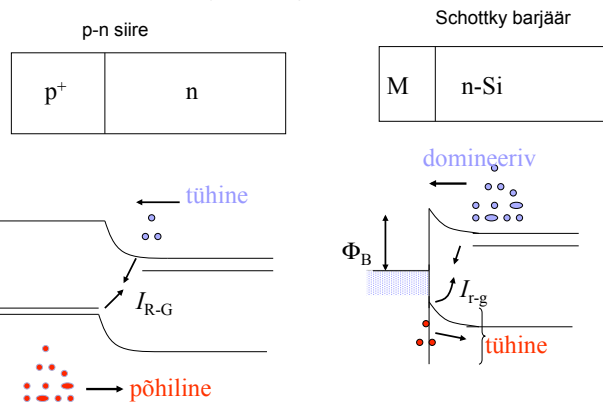
PN ja SBD diodide võrdlus



Schottky barjääri töötavas diodis liigutatakse **PÕHILISI** laengukandjaid, seetõttu puudub SBD-i difusioonmahtuvus. Järelikult on SBD **KIIREM** diod!!!

14

Vool Schottky barjääris



15

Vool Schottky barjääris

- Vastuvoolu võrdlus SBD ja p-n diodide puhul:

$$\text{SBD: } J_{sT} = A^* T^2 \exp\left[\frac{-e\phi_{Bn}}{k_B T}\right] \sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2$$

$$A^* \text{ - Richardsoni konstant } A^* = \frac{4 \pi q m^* k^2}{h^3}$$

$$\text{pn diod: } J_s = \left[\frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right] \sim 10^{-11} \text{ A/cm}^2$$

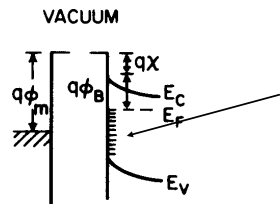
SBD voolu tuletuskäigu võib leida:
http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/pdf/ch3_4_4.pdf

16

Pinnaolekute mõju Schottky barjäärile

Reaalses Schottky barjääris pole kunagi puhast pinda. Metall ja pooljuhi vahel on kas õhuke oksiidikiht või eksisteerivad pooljuhi pinnal nn. pinnaolekud.

Pinnaolekud haaravad elektrone ning seetõttu võivad pooljuhi tsoonid kaarduda negatiivse laengu mõjul pinnal juba ilma metalliga kontakteerumata.



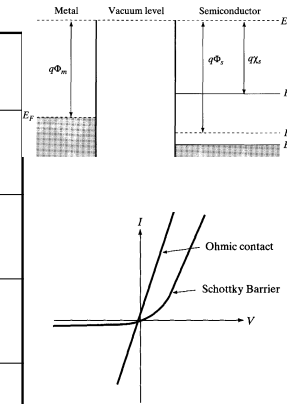
Juhul kui pinnaolekute tihedus on väga suur, siis kontakteerimine metalliga ei muudagi eriti tsoonide kõverust ning ka Fermi nivoo jääb endisele tasemele.

Fermi tase on siis hõivatud (pinned) pinnaolekute poolt!

17

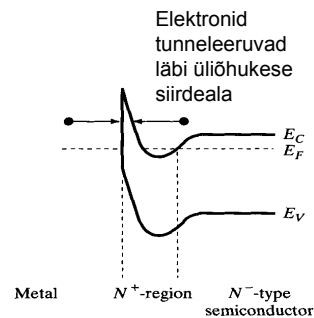
Kontaktid

Materjal / Tingimus	Kontakti tüüp
n-tüüpi – Metall $\Phi_m > \Phi_s$	Barjäär
p-tüüpi – Metall $\Phi_m < \Phi_s$	Barjäär
n-tüüpi – Metall $\Phi_m < \Phi_s$	Oomiline
p-tüüpi – Metall $\Phi_m > \Phi_s$	Oomiline



18

Kontaktid



Kõige lihtsam on oomilist kontakti saavutada kasutades **tunneleefekti**

Seega pinnakiht tuleb ülelegeerida!

19

Schottky barjääri mahtuvus

- Mäletatavasti iga pinge muutusega kaasneb ka uus siirdeala paksus W
- Suureneb (või väheneb) ruumlaeng Q

$$C = dQ/dV = A\sqrt{q\epsilon N_A/2(V_{bi}-V)}$$

$$C = A\epsilon/W$$

Sarnasus plaatkondensaatoriga!

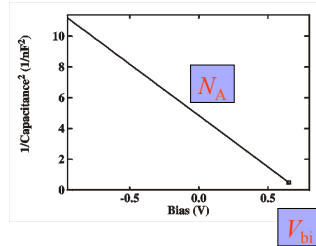
A- siirde pindala

20

C-V meetod

$$C = A \sqrt{q\epsilon N_A / 2(V_{bi} - V)}$$

$$C^{-2} = 2(V_{bi} - V) / A^2 q \epsilon N_A$$



- kaldest saame N_A
- lõikumine x-teljega annab V_{bi}

21

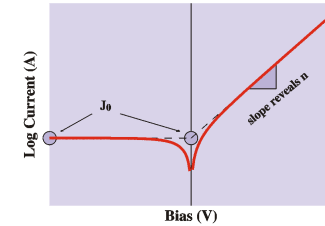
Schottky barjääri alalisvoolu juhtivus

$$J = A^* T^2 \exp(-q\phi_{Bp}/kT) [\exp(qV/nkT) - 1]$$

$$= J_0 [\exp(qV/nkT) - 1]$$

Ühest I-V skaneerimisest saame

- vastuvoolu (J_0)
- ideaalsusfaktori, n



Mõõtes erinevatel temperatuuridel T:

- barjääri kõrguse, ϕ_{Bp}

22

Schottky barjääri vahelduvvool

$$V(t) = V + v \sin(\omega t) \longrightarrow I(t) = I + i \sin(\omega t)$$

JUHTIVUS: Alalisvool: $1/R = I/V$, Vahelduvvool: $G = i/v$

Väike v : Juhtivus G on IV-kõvera tuletis

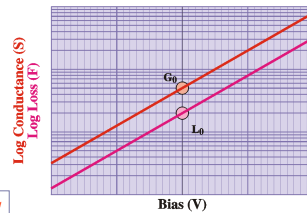
$$J = J_0 [\exp(qV/nkT) - 1]$$

$$G = G_0 \exp(qV/nkT)$$

Ei sõltu sagedusest

$$\text{Kaod: } L = G/\omega$$

$$\text{Kaonurga tangens: } \tan\delta = G/\omega C$$



23

Sügavad energiatasemed

_____ E_c

_____ E_T

_____ E_v

Igat energiataset keelutsoonis iseloomustab tema ajakonstant:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_T / kT)$$

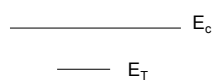
Seega mida sügavam on energiatase, seda suurem on tema ajakonstant

Mida suurem on tema ajakonstant, seda madalamat sagedust on vaja, et tase reageeriks

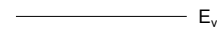
Kui tase "reageerib", siis toimub läbi tema pidev laengukandjate vahetus tsoonide vahel- tal on MAHTUVUS

24

Sügavad tasemed



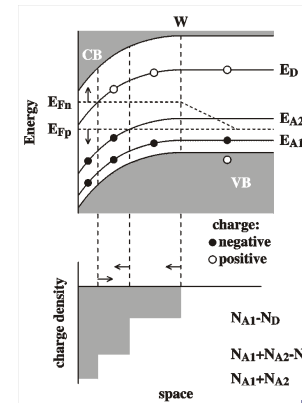
Seega mõõtes siirde mahtuvust madalatel sagedustel saame:
Siirde mahtuvus= madalate tasemete mahtuvus+ sügavate tasemete mahtuvus



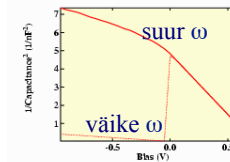
Mõõtes siirde mahtuvust kõrgetel sagedustel saame:
Siirde mahtuvus= madalate tasemete mahtuvus

25

Sügavad tasemed



- Suurendame päripinget
- tsoonide kõverus väheneb
- E_F liigub tsoonis allapoole
- Pingel $V > V_x$ on sügav tase täielikult ülalpool E_{FP} – mõju kaob!
- **Väheneb** mahtuvus ja **suureneb** C^{-2} - V kõvera kalle



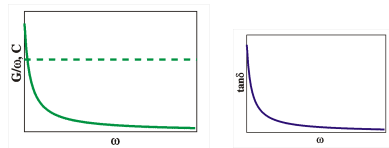
$$C^{-2} = 2(V_{bi} - V)/A^2 q \epsilon (N_{A1} + N_{A2})$$

Sageduse mõju

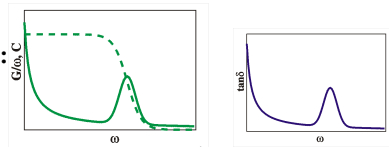
$C, G/\omega$

$$\tan \delta = G/\omega C$$

Ainult madalad tasemed:



Lisaks ka sügavad tasemed:

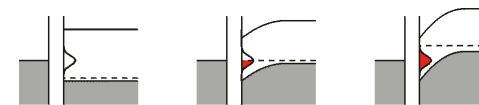


Maksimum sagedusel: $\omega_{max} = \frac{1}{\tau}$

27

Piirpinna olekud

Piirpinna olekud- interface states



a) forward

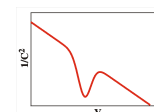
b) no bias

c) reverse

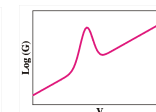
pole näha C, G sõltuvustes

pole näha C, G sõltuvustes

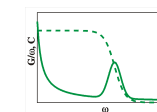
C ja G suurenevad



C^{-2} - V



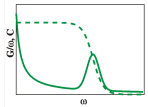
$\text{Log}(G)$ - V



$G/\omega, C - \omega$

28

Piirpinna olekud



$G/\omega, C - \omega$

Sõltuvused on samad nagu sügavate tsentrite korral!

KUIDAS TEHA VAHET SIIS?

Mõõdame sõltuvusi **erinevatel vastupingetel!**

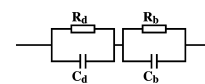
Kui sõltuvused **nihkuvad** sageduse teljel, siis on tegemist **piirpinna olekutega**

Sügavate energiatasemetel korral nihkumist ei toimu!

29

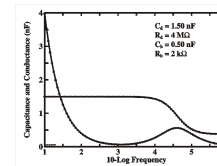
Admittance spectroscopy

Admittance spectroscopy: C, G , tanõ sageduse ω funktsioonina



$$C = \frac{R_d^2 C_d + R_b^2 C_b + \omega^2 R_d^2 R_b^2 C_d C_b (C_d + C_b)}{(R_d + R_b)^2 + \omega^2 R_d^2 R_b^2 (C_d + C_b)}$$

$$G = \frac{R_d + R_b + \omega^2 R_d R_b (R_d C_d^2 + R_b C_b^2)}{(R_d + R_b)^2 + \omega^2 R_d^2 R_b^2 (C_d + C_b)}$$



b- bulk, d- interface

Me võime tõepoolest simuleerida sügavaid tasemeid ekvivaatskeemide abil!

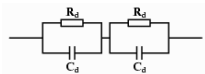
(sellel pole küll mingit füüsilist sisu!!)

Teatavasti võnkeringi kohta: $\tau = RC$

30

Admittance Spectroscopy

Kaonurga tangens:

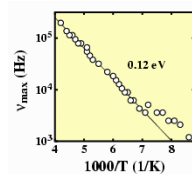
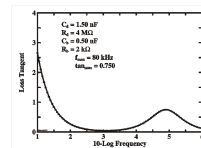


Maksimumi asukoht:
 $1/\omega_{\max} = R_b \sqrt{C_b(C_b + C_d)}$

$R_b \sim \exp(-E_a/kT)$

Pooljuhi takistus sõltub temperatuurist

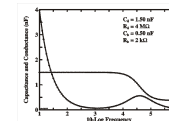
Siis saame me pooljuhi takistuse aktivatsiooni energia mõttes tanõ sõltuvust!



31

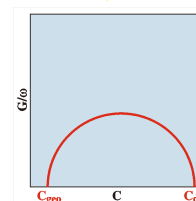
Admittance Spectroscopy

Cole-Cole Plots



	$\omega=0$	$\omega=\infty$
C	C_d	C_b
R	R_d	R_b

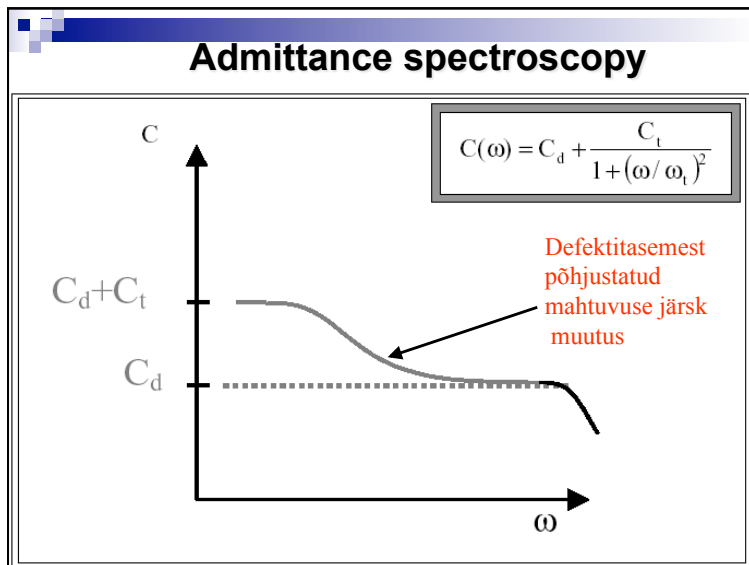
$C_b = C_{\text{geo}} = \epsilon A/d$ ("plaatkondensaator")



Cole-Cole plot on G/ω vs. C

Võib leida pooljuhi ϵ
 (kui me teame siirde pindala ja pakust)

32



Admittance spectroscopy

$$C_{\text{tot}} = C_d + \frac{C_t}{1 + (\tau\omega)^2},$$

$$G_{\text{tot}} = G_d + \frac{G_t (\tau\omega)^2}{1 + (\tau\omega)^2},$$

$$\frac{1}{\tau} = \omega_t = 2\nu_0 e^{-\left(\frac{E_t}{kT}\right)},$$

$$\nu_0 = \beta_p N_v = \sigma_p \langle v_{Th} \rangle N_v$$

Põhivalemid

Näivjuhtivus- admittance

$$Y = G + i\omega C$$

Elektrijuhtivus- conductance

Mahtuvus- capacitance

34

