

# M-centar u 4H-SiC ozračenom niskoenergetskim elektronima

Eva Jelavić

Mentorica: dr. sc. Ivana Capan, Institut Ruđer Bošković

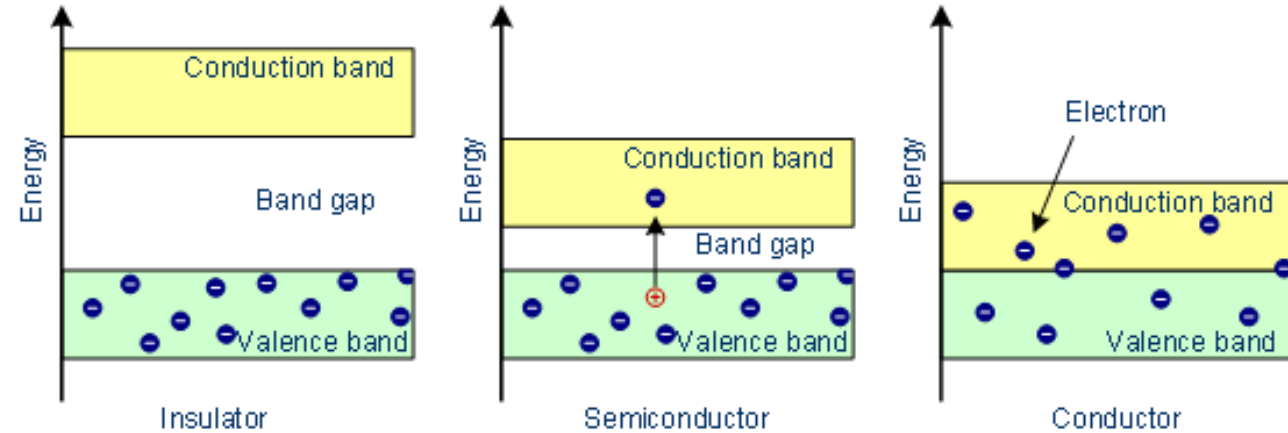
Kolegij: Samostalni seminar iz istraživanja u fizici

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Zagreb, siječanj 2023.

# Silicijev karbid

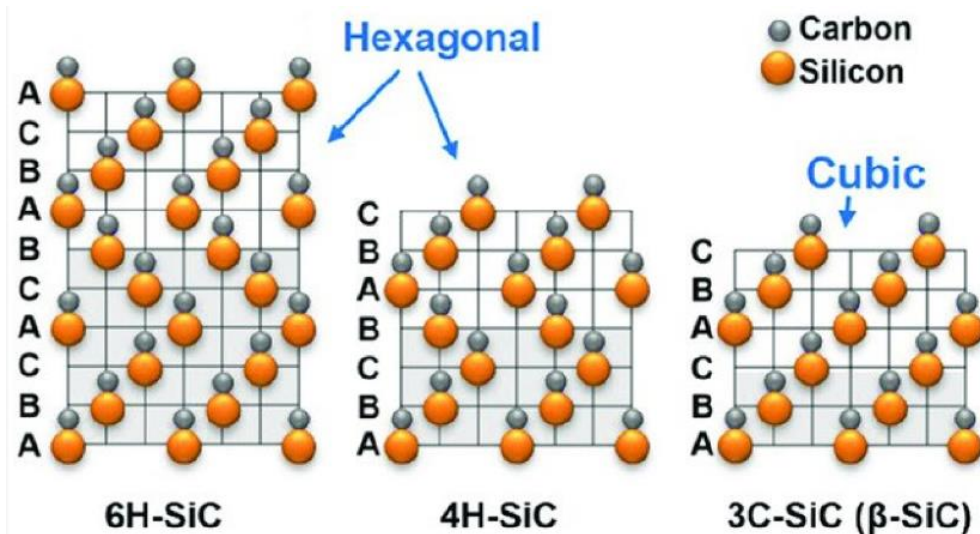
- Poluvodički materijal
- Široki energetska procjep
- Visoka termička vodljivost
- Otpornost na koroziju
- Jednak broj atoma Si i C
- Vezanje hibridnim  $sp^3$  orbitalama



Prikaz energetskih procjeka kod izolatora, poluvodiča i vodiča.  
Preuzeto iz [1]

# Silicijev karbid

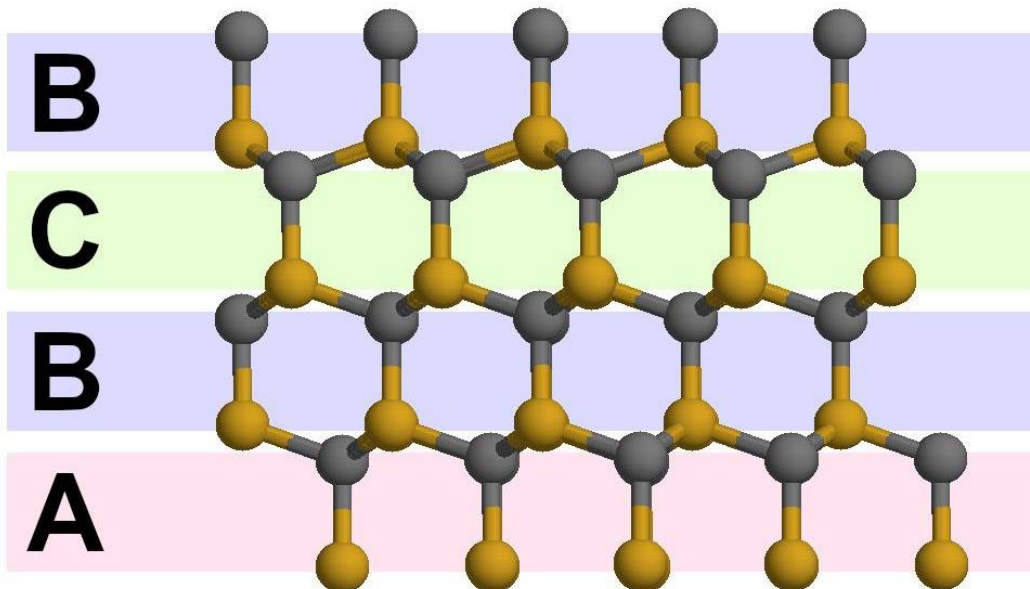
- Polimorfan materijal – preko 250 polimorfnih supstancija
- Neki politipovi:  $2H$ -SiC,  $3C$ -SiC,  $4H$ -SiC,  $6H$ -SiC
- Korišteni u izradi elektroničkih komponenti u sustavima za napajanje električnih vozila i detektorima koji imaju visok omjer šuma i signala



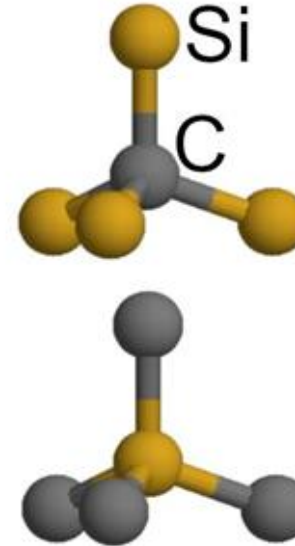
Prikaz struktura politipova silicijevog karbida. Preuzeto iz [2]

# 4H-SiC

- Slojevi se slažu periodički
- Ponavlja se uzorak od četiri sloja
- Kristalizacija u heksagonskoj ćeliji



Shematski prikaz kristalne strukture 4H politipa SiC s označenim položajima Si-C ravnina. Preuzeto iz [3]



Shematski prikaz veze ugljikovog atoma sa susjednim atomima silicija. Preuzeto iz [3]

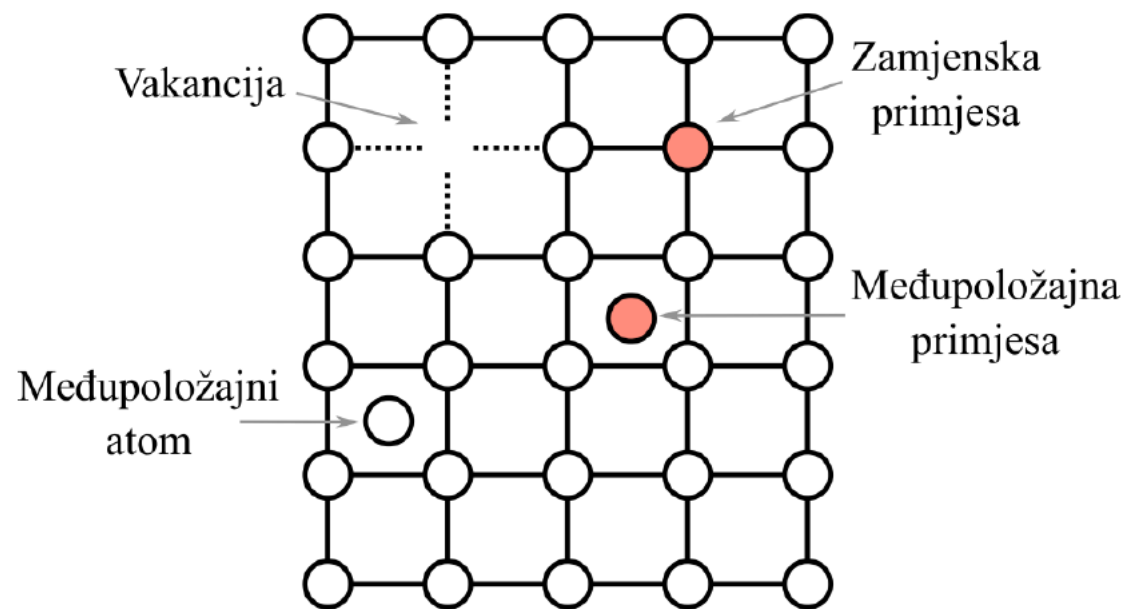
# Električki aktivni defekti u 4H-SiC

- Točkasti defekti:

- a) vakancije
- b) međupoložajni atom
- c) zamjenska primjesa
- d) međupoložajna primjesa

- Dvodimenzionalni defekti:

- a) dislokacija
- b) pogreška u redoslijedu ravnina



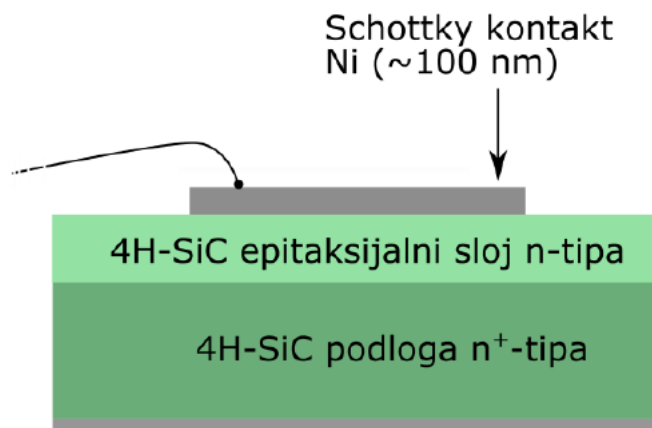
Shematski prikaz točkastih defekata u kristalnoj strukturi.  
Preuzeto iz [3]

# Električki aktivni defekti u 4H-SiC

- Defekti se dijele na donore i akceptore
- Donori predaju elektrone vodljivoj vrpci ili uhvate šupljinu
- Akceptori predaju šupljine ili uhvate elektron
- Vjerojatnost uhvata:
  - a) elektrona:  $C_n = \sigma_n v_{th,n} n$
  - b) šupljine:  $C_p = \sigma_p v_{th,p} p$

# Karakterizacija diode

- Shottky dioda
- Spoj metala i poluvodiča
- Uz površinu metala nalaze se elektroni
- Uz površinu poluvodiča nalaze se pozitivni naboji
- Stvara se područje osiromašenja unutar poluvodiča



Shematski prikaz 4H-SiC Schottky diode.  
Preuzeto iz [3]

# Karakterizacija diode

- Strujno naponska karakteristika

$$I(U) = I_s \left[ e^{\frac{q(U-IR_s)}{nk_B T}} - 1 \right]$$

→  $I_s$  je struja saturacije

→  $n$  je faktor idealnosti

→  $R_s$  je serijski otpor spoja



# Karakterizacija diode

- Kapacitivno naponska karakteristika

$$C(U) = A \sqrt{\frac{q\varepsilon\varepsilon_0}{2} \frac{N_D^+ - N_A^-}{U_{Bi} - U - \frac{k_B T}{q}}}$$

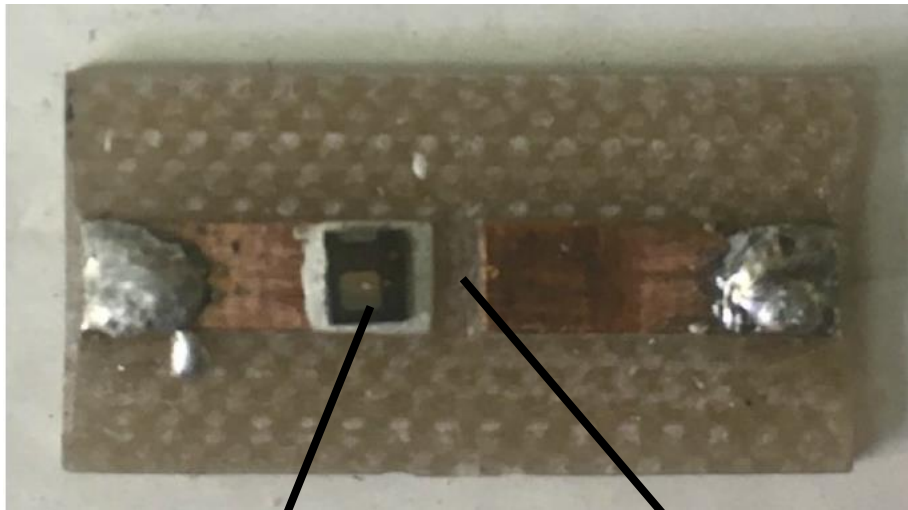
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{q\varepsilon\varepsilon_0 A^2} \frac{U_{Bi} - U - \frac{k_B T}{q}}{N_D^+ - N_A^-}$$

# Karakterizacija diode

- Tranzijentna spektroskopija dubokih nivoa
  - duboki nivoi su od vodljive ili valentne vrpce udaljeni za nekoliko vrijednosti  $k_B T$
  - određuju se parametri dubokih nivoa vezani uz generaciju, rekombinaciju i zatočenje nosioca naboja
  - proučavaju se električki aktivni defekti
  - Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) služi za karakterizaciju zamki za većinske naboje

# Eksperimentalna metoda

- U eksperimentu je korišten uzorak veličine 1 mm x 1 mm

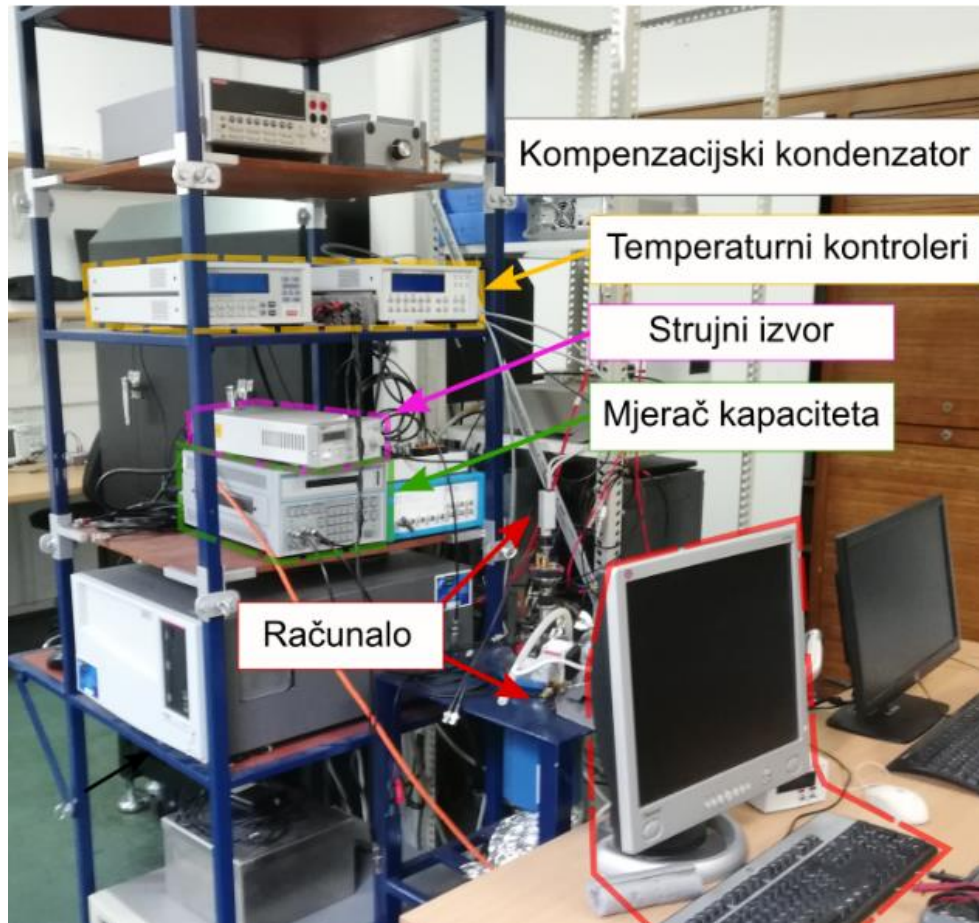


uzorak SiC

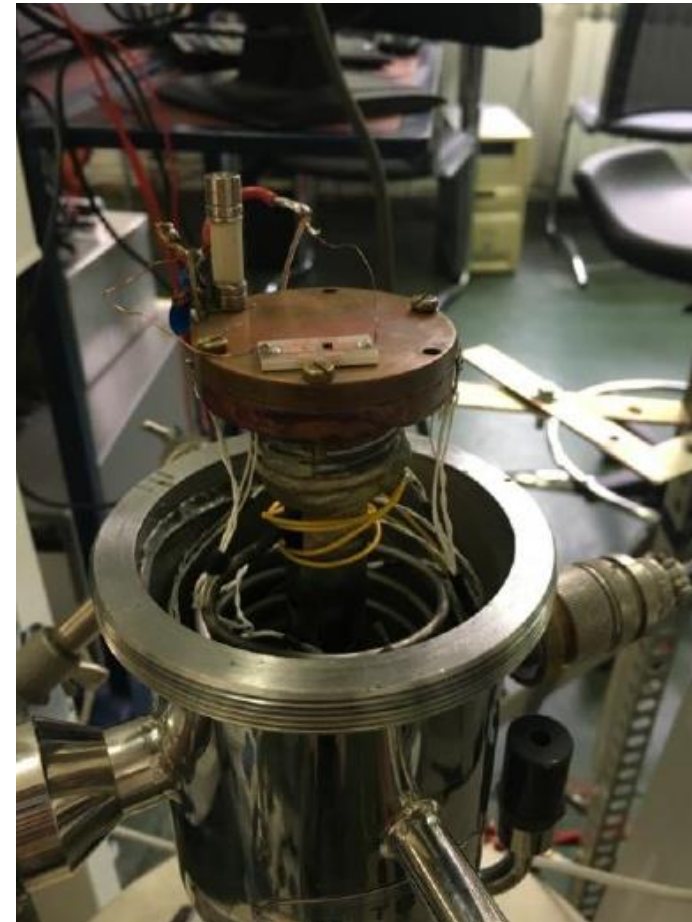
bond žica

Fotografija uzorka korištenog u eksperimentu.  
Preuzeto iz [4]

# Eksperimentalna metoda



Fotografija eksperimentalnog postava



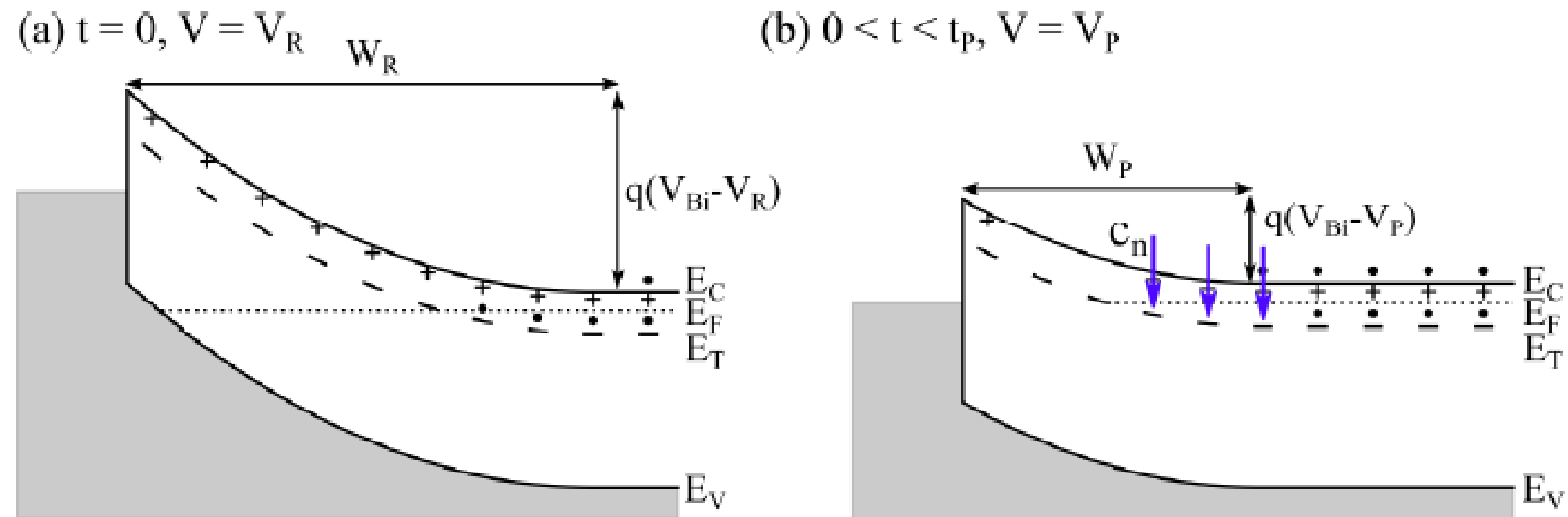
Fotografija uzorka u kriostatu

# Eksperimentalna metoda

- Mjerenje ovisnosti struje o naponu i kapaciteta o naponu
  - za mjerenje ovisnosti struje o naponu primjenjuje se reverzni napon što znači da postoji samo protok elektrona s metala na poluvodič
  - iz ovisnosti struje o naponu dobivamo informaciju o struji saturacije i faktoru idealnosti
  - kapacitet se mjeri kao povećanje naboja unutar područja osiromašenja pri povećanju vanjskog napona
  - iz ovisnosti kapaciteta o naponu dobije se koncentracija nosioca naboja

# Eksperimentalna metoda

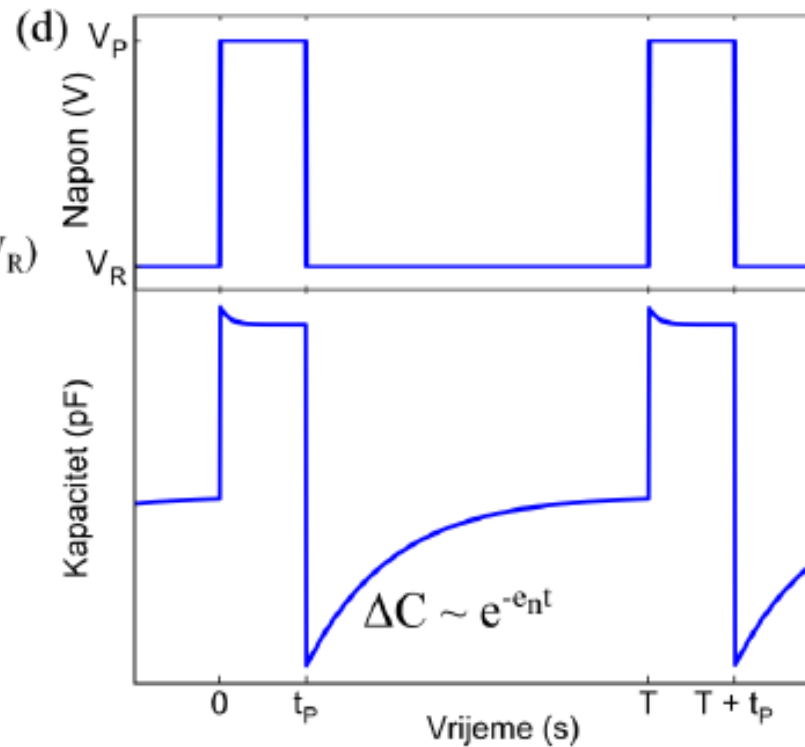
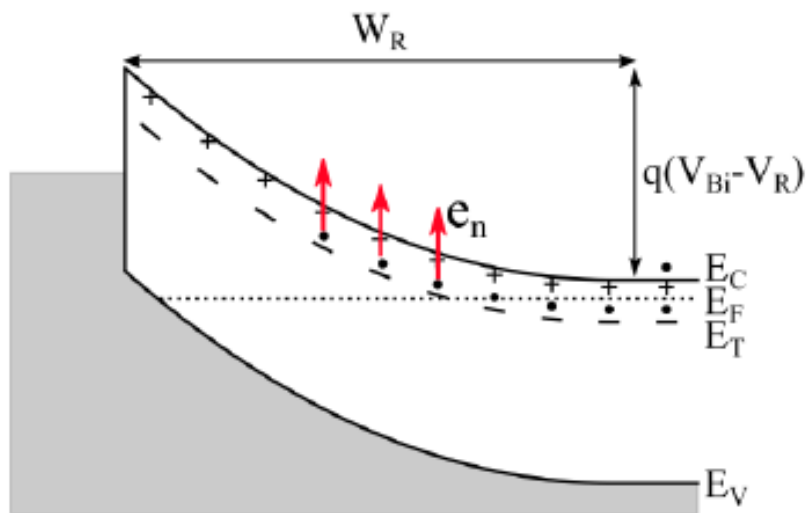
- Tranzijentna spektroskopija dubokih nivoa



# Eksperimentalna metoda

- Tranzijentna spektroskopija dubokih nivoa

(c)  $t_p < t < T$ ,  $V = V_R$



# Rezultati mjerenja

- Ovisnost struje o naponu

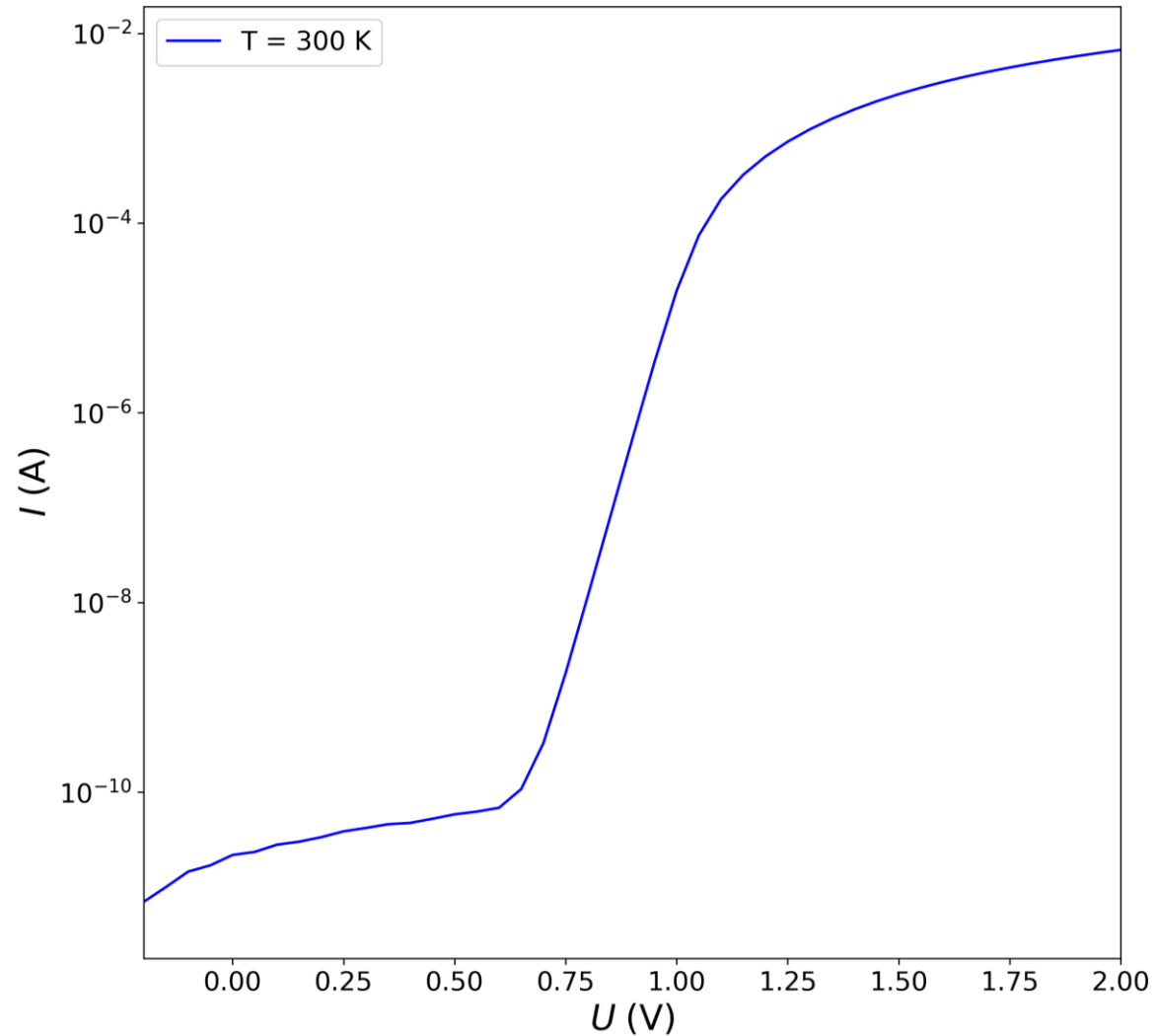
$$\ln(I) = \ln(I_s) + \frac{q}{nk_B T} U$$

The diagram illustrates the relationship between the equation and a linear plot. The term  $\ln(I)$  is identified as the y-axis variable. The term  $\ln(I_s)$  is identified as the y-axis intercept, labeled 'b'. The term  $\frac{q}{nk_B T}$  is identified as the slope, labeled 'a'. The term  $U$  is identified as the x-axis variable.

- Iz nagiba pravca dobije se faktor idealnosti, a iz odsječka na y – osi struja saturacije



# Rezultati mjerenja



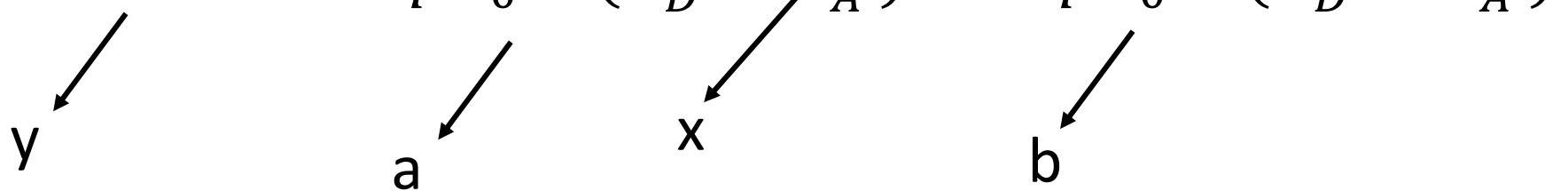
Graf ovisnosti struje o naponu  
pri temperaturi od  $T = 300$  K

$$I_s = (3.9 \pm 1.9) \cdot 10^{-21} \text{ A}$$

$$n = (1.07 \pm 0.20)$$

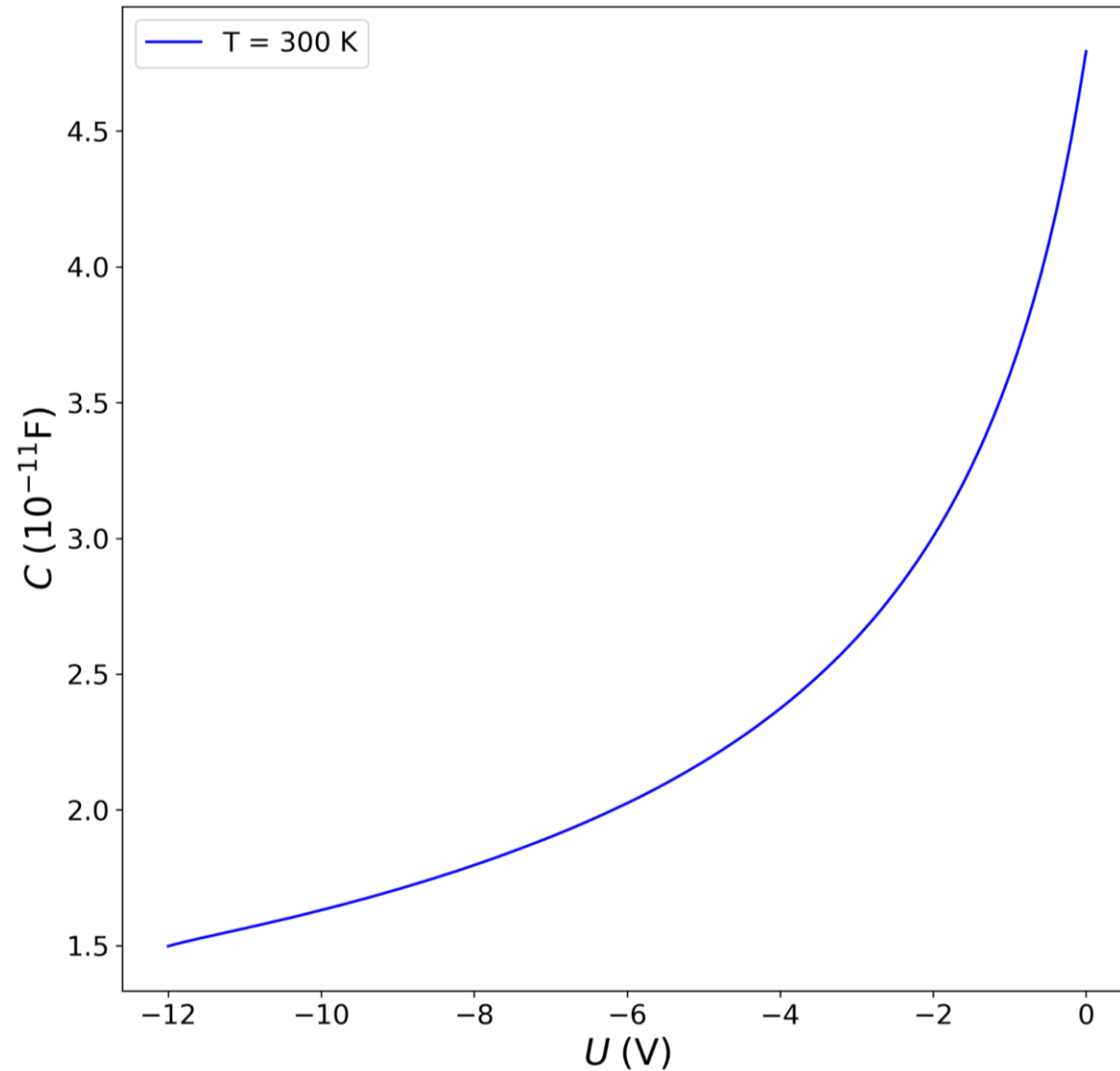
# Rezultati mjerenja

- Ovisnost kapaciteta o naponu

$$\frac{1}{C^2} = \frac{-2}{q\epsilon\epsilon_0 A^2 (N_D^+ - N_A^-)} U + \frac{2 \left( U_{Bi} - \frac{k_B T}{q} \right)}{q\epsilon\epsilon_0 A^2 (N_D^+ - N_A^-)}$$


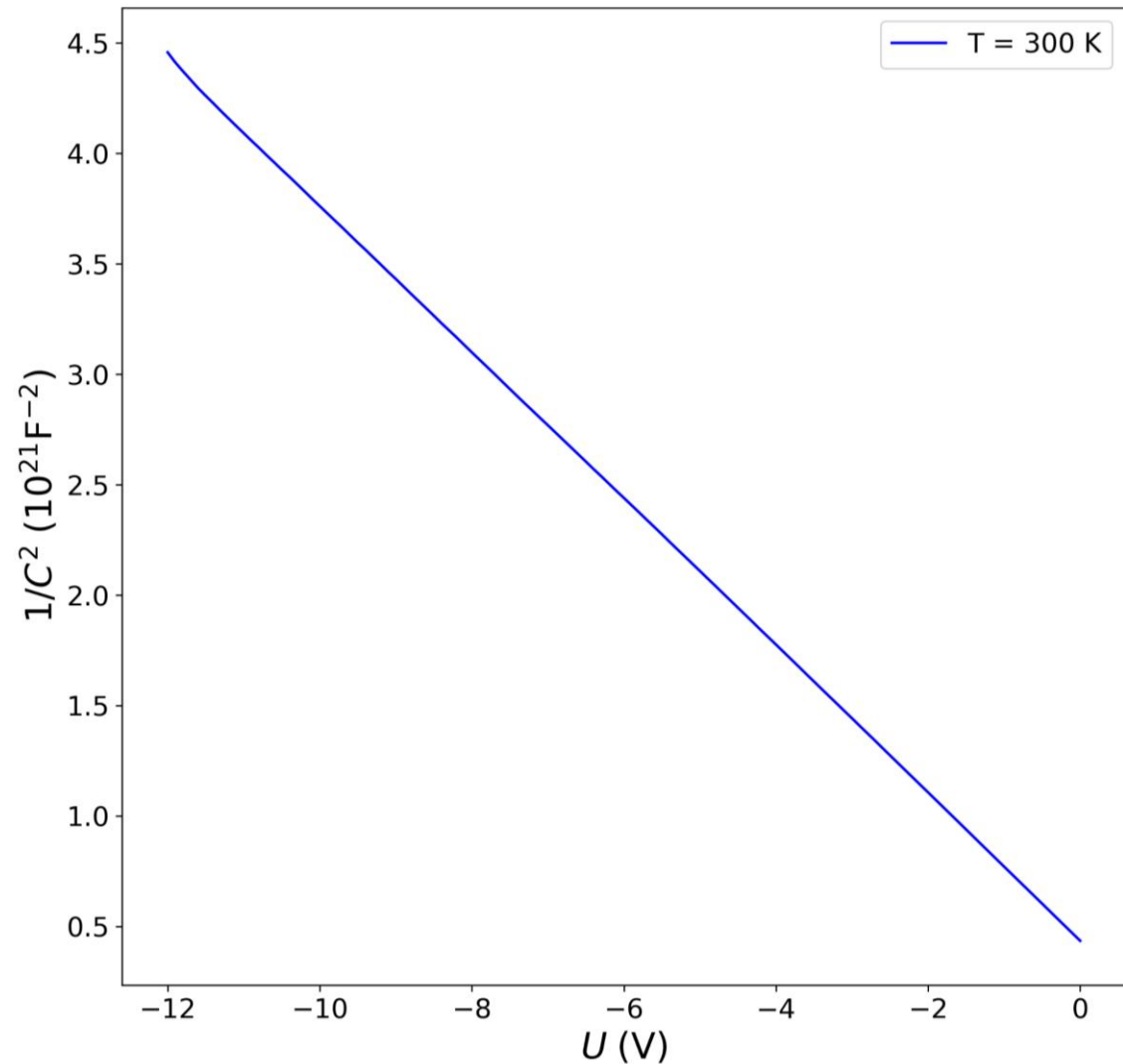
- Iz nagiba pravca odredi se koncentracija nosioca naboja

# Rezultati mjerenja



Graf ovisnosti kapaciteta o naponu pri temperaturi od  $T = 300\text{ K}$

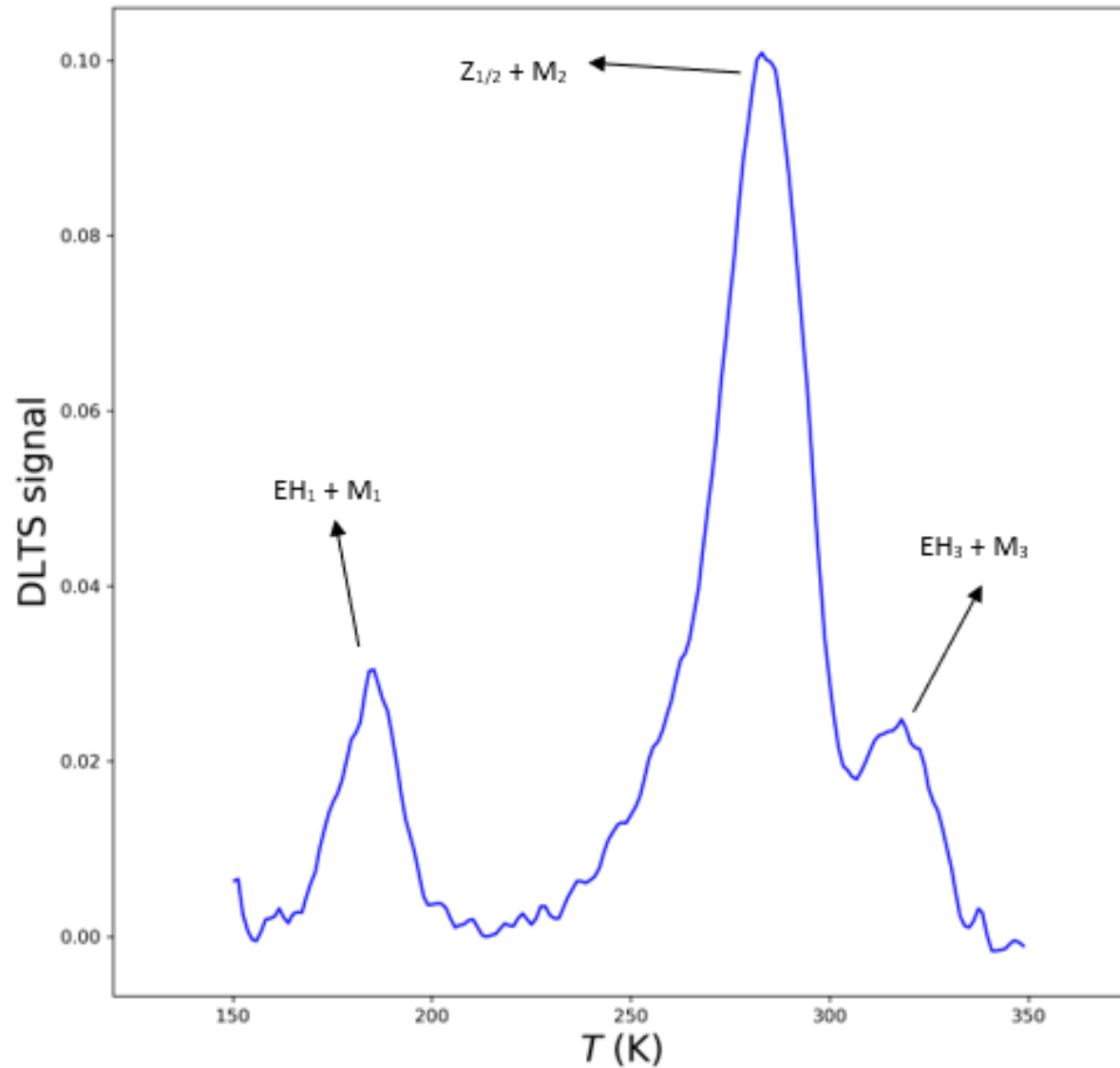
# Rezultati mjerenja



Graf ovisnosti recipročne vrijednosti kvadrata kapaciteta o naponu pri temperaturi od  $T = 300 \text{ K}$

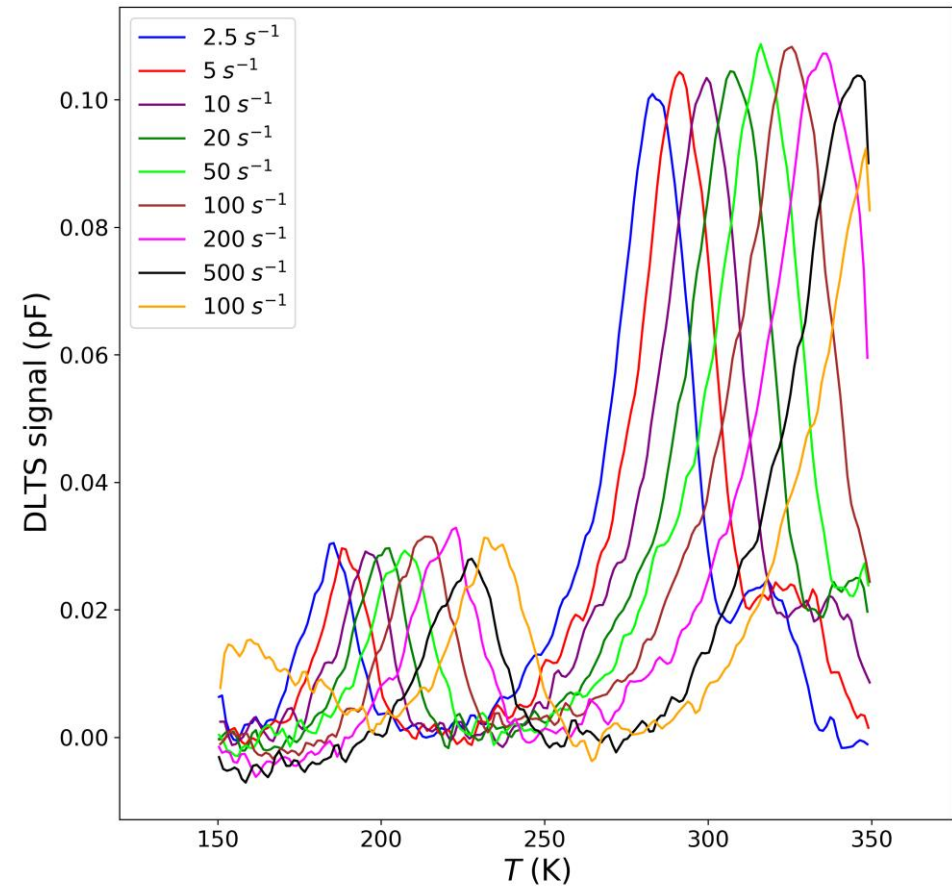
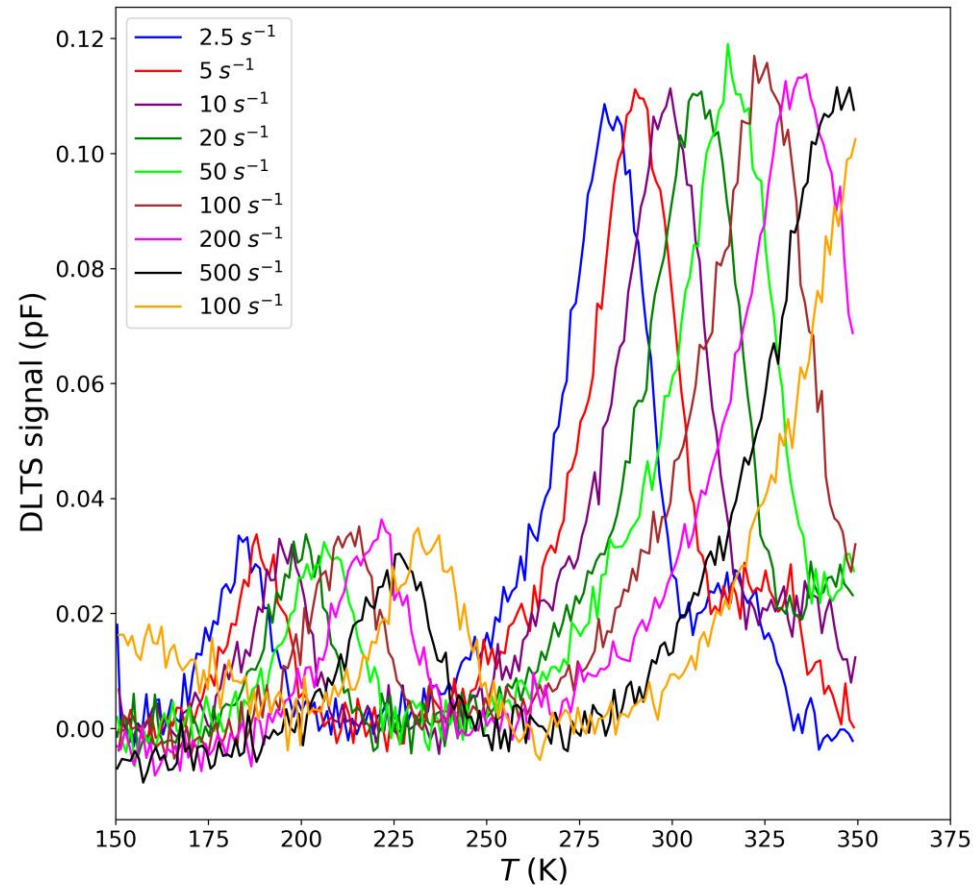
$$N = (4.2 \pm 0.1) \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$$

# Rezultati mjerenja



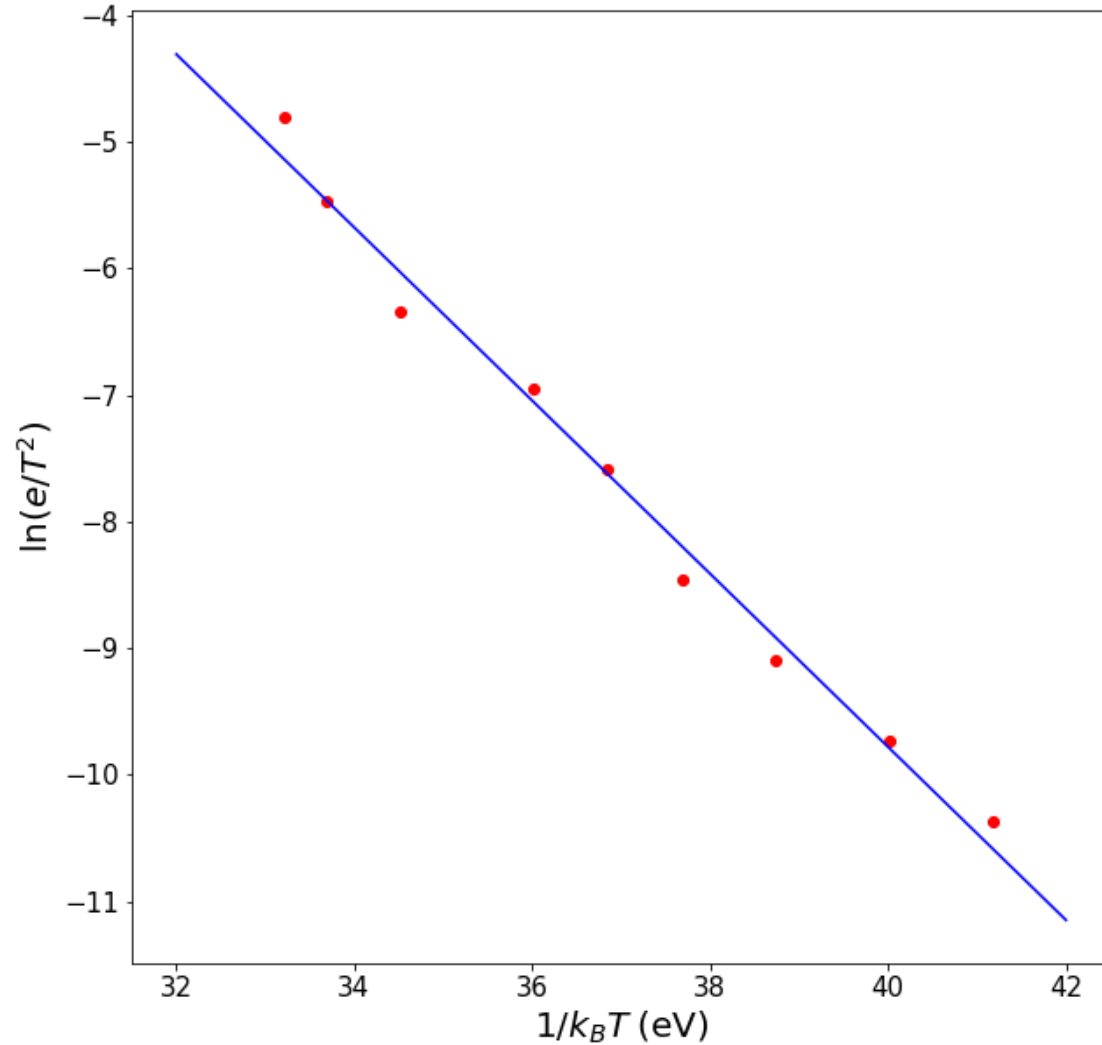
Graf DLTS signala za jedan emisijski prozor

# Rezultati mjerenja



Grafovi DLTS signala u ovisnosti u temperaturi

# Rezultati mjerenja



Arrhenius graf

$$E_a = (0.63 \pm 0.03) \text{ eV}$$

# Zaključak

- Dobivena je vrlo mala struja saturacije
- Faktor idealnosti je vrijednosti blizu 1 što pokazuje da u materijalu ne dolazi do tuneliranja i sličnih efekata
- Glavni uzrok transporta naboja je termička emisija
- DLTS mjerenja pokazuju tri vrha koja označavaju duboke nivoe nastale zbog defekata
- Za potpuniju sliku potrebno je napraviti  $I/V$  i  $CV$  analizu na većem rasponu temperatura



HVALA NA PAŽNJI!

# Literatura

- [1] Brainkart.com; [https://www.brainkart.com/article/Different-between-conductors,-semiconductors-and-insulators\\_265/](https://www.brainkart.com/article/Different-between-conductors,-semiconductors-and-insulators_265/)
- [2] MDPI; <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/2/245>
- [3] T. Brodar, *Karakterizacija električki aktivnih defekata u 4H-SiC metodama tranzijentne spektroskopije*, Doktorski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2020.
- [4] A. Hadžipašić, *Električni aktivni defekti u poluprovodnicima*, Završni rad rad, Prirodno-matematički fakultet, Tuzla, 2018.
- [5] T. Knežević, A. Hadžipašić, T. Ohshima, T. Makino, I. Capan, *M-center in low-energy electron irradiated 4H-SiC*, Applied Physics Letters (2022)
- [6] Md. Nuruzzaman, M. Ariful Islam, M. Ashrafal Alam, M. A. Hadi Shah, A. M. M. Tanveer Karim, *Structural, elastic and electronic properties of 2H and 4H-SiC*, Int. Journal of Engineering Research and Applications (2015)