

ЕЛЕМЕНТИ ФИЗИКЕ ЧВРСТОГ СТАЊА

Милош Адамовић

11.06.2022.

Садржај

- 1 Увод
- 2 Кристалне структуре
 - Кристали
 - Кристалографски системи
 - Особине кристала
- 3 Квантна теорија електронског гаса
 - Слободни електрони у металу
 - Појам о зонској теорији кристала
- 4 Полупроводници
 - Полупроводници
 - Сопствена проводљивост
 - Примесна проводљивост
 - p - n спој
- 5 Суперпроводници
 - Суперпроводљивост
 - Мајснеров ефекат
 - Подела суперпроводника
- 6 Питања и задаци
 - Питања и задаци
- 7 Одабрана литература

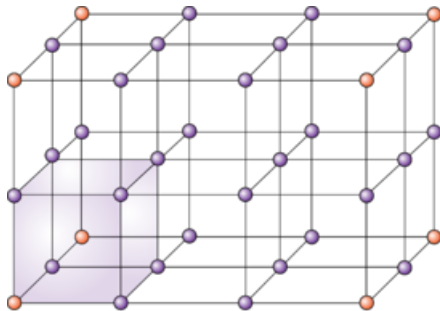
Увод

- Овом презентацијом биће дат кратак преглед градива средње школе из области **Физике чврстог стања**
- Питања и кратки рачунски задаци из наведене области

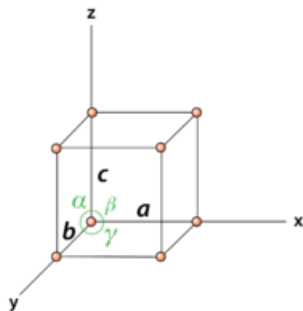
Кристали

- Већина чврстих тела је у кристалној форми
- У зависности од структуре и основних особина чврста тела могу бити **кристална** и **аморфна**
- Правилан геометријски облик је једна од основних особина кристала
- Кристална решетка
- Основни градивни елемент кристала представља елементарна ћелија
- Параметри (константе) кристалне решетке a , b , c , α , β , γ

Кристали

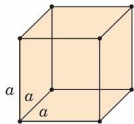


Crystal Lattice



Unit Cell

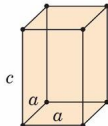
Кристалнографски системи



Cubic

$$a = b = c$$

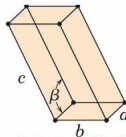
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Tetragonal

$$a = b \neq c$$

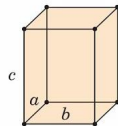
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Monoclinic

$$a \neq b \neq c$$

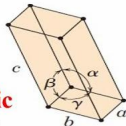
$$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$$



Orthorhombic

$$a \neq b \neq c$$

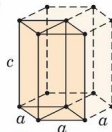
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



Triclinic

$$a \neq b \neq c$$

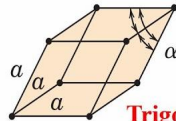
$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



Hexagonal

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$



Trigonal

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

Особине кристала

- Вредности параметара a , b , c су реда величине 10^{-10} m
- Анизотропија - особина кристала која представља појаву да физичке особине нису исте у свим правцима структуре
- Полиморфизам - постојање два или више кристалних облика неке супстанце
- Идеална кристална структура
- Примесе и дефекти кристалне структуре

Слободни електрони у металу

- Системе са великим бројем честица описујемо методама статистичке физике
- Фермиони и Бозони
- Фермиони су честице чији спин има полуцелу вредност и за њих важи Паулијев принцип
- Бозони су честице чији спин има целобројну вредност и за њих не важи Паулијев принцип
- Најједноставнији модел који објашњава особине метала кретањем слободних електрона је модел Фермијевог гаса

Слободни електрони у металу

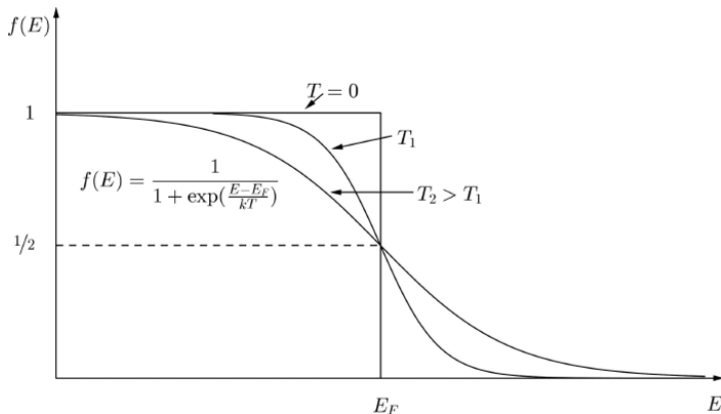
- Слободни електрони у металу су у правоугаоној потенцијалној јами унутар које се крећу слободно без међусобних интеракција
- Дубина потенцијалне баријере је приближно једнака излазном раду електрона
- Могуће енергије електрона су дискретне уз мали размак суседних нивоа
- Енергијски нивои нису еквидистантни, што је енергија виша то су нивои гушћи

Расподела електрона по енергијским нивоима

- На истом енергијском нивоу се могу наћи два електрона који имају различите оријентације спина
- Расподела електрона по енергијским нивоима зависи од температуре
- Највиши енергијски ниво на којем има слободних електрона на апсолутној нули назива се Фермијев ниво
- Бројна вредност енергије Фермијевог нивоа зависи од концентрације слободних електрона
- Ферми-Диракова расподела:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}$$

Расподела електрона по енергијским нивоима



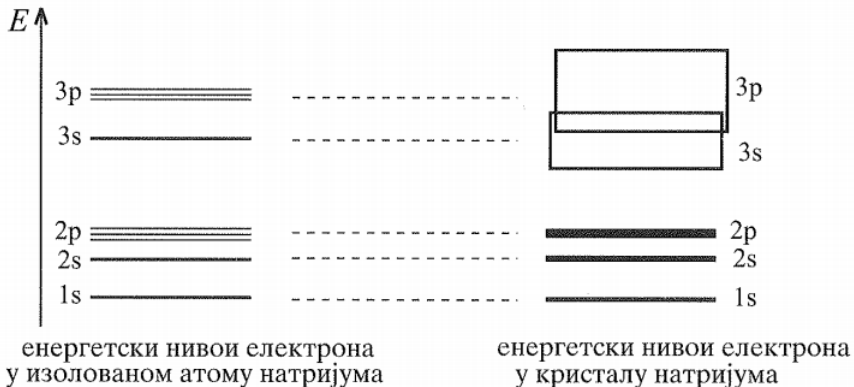
Појам о зонској теорији кристала

- Периодично електрично поље као последица периодичног распореда атома, јона или молекула
- Битне промене енергијских стања електрона, због постојања поља, у кристалу у односу на одговарајућа стања у изолованим атомима
- У кристалу су атоми близу других атома, па електрони не интерагују само са језгром свог атома већ и са језгрима и електронима других атома
- Енергијски нивои се цепају на много блиских поднивоа који чине енергијску зону

Појам о зонској теорији кристала

- Енергијски нивои електрона који су ближи језгру су скоро исти као код изолованих атома
- Енергијске зоне валентних електрона су знатно шире
- Размаци између енергијских зона се називају енергијским процепима
- Апсорбовањем енергије електрон прелази из њиже у вишу енергијску зону
- Прелаз електрона из више зоне у нижу зону праћен је ослобађањем енергије
- Најнижа енергијска зона у којој има електрона на апсолутној нули је валентна зона
- Изнад валентне зоне налази се проводна зона

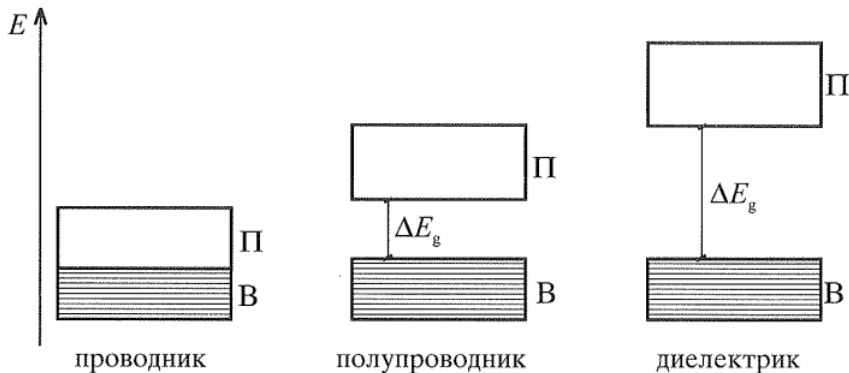
Појам о зонској теорији кристала



Појам о зонској теорији кристала

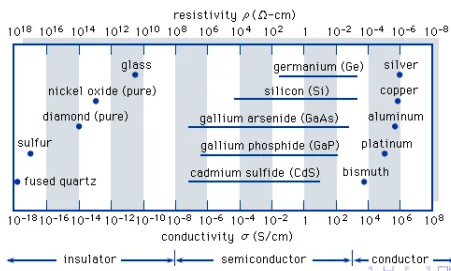
- На основу зонске теорије проводници, полупроводници и диелектрици (изолатори) разликују се по међусобним положајима валентне и проводне зоне
- У проводницима се валентна и проводна зона додирују без процепа или се делимично преклапају
- Код полупроводника, валентна зона је попуњена електронима на апсолутној нули, а између валентне зоне и проводне зоне постоји енергијски процеп реда величине $0.1 - 1 \text{ eV}$
- У изолаторима на апсолутној нули валентна зона је попуњена електронима а енергијски процеп између валентне и проводне зоне има ширину од неколико eV .

Појам о зонској теорији кристала



Полупроводници

- Материјали који могу проводити електричну струју али им је електрична проводност мања него код проводника
- Силицијум и германијум као типични представници полупроводних материјала
- Четворовалентни атоми

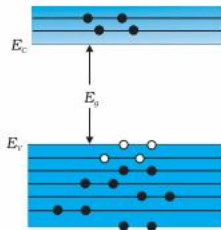


Сопствена проводљивост

- На вишим температурама електрони могу раскинути везу са атомом и постају слободни
- На месту које је напустио електрон ствара се вишак позитивног наелектрисања и та незасићена веза се назива **шупљина**
- У стању термодинамичке равнотеже, број електрона који у јединици времена раскине везу једнак је броју електрона који се рекомбинује са шупљинама
- У полупроводницима постоје негативни и позитивни носиоци наелектрисања, електрони и шупљине

Сопствена проводљивост

- Електрична струја ће тећи кроз полупроводник ако има електрона у проводној и шупљина у валентној зони
- Хемијски чисти полупроводници се називају сопствени полупроводници са сопственом проводљивошћу
- Једнаке концентрације негативних и позитивних носилаца



Сопствена проводљивост

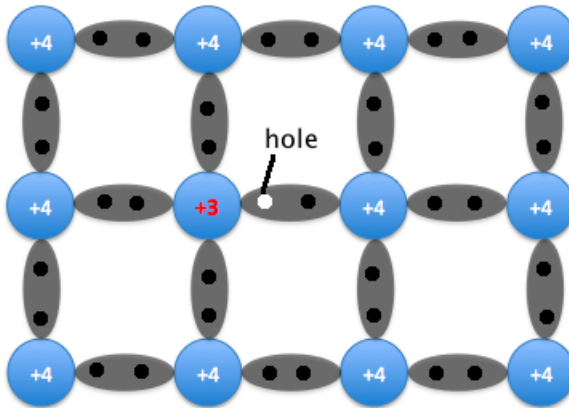
- Сопствена проводљивост у великој мери зависи од температуре
- Виша температура, већи број електрона раскида везу и прелази из валентне у проводну зону
- Специфична отпорност хемијски чистих полупроводника смањује се са порастом температуре
- Специфична проводљивост:

$$\sigma = e n \mu_n + e p \mu_p$$

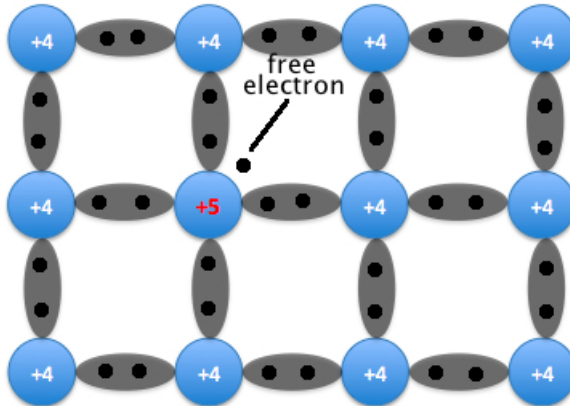
Примесна проводљивост

- Додавање примесних атома чистим полупроводницима може значајно повећати проводљивост
- Примесе у виду тровалентних и петовалентних атома
- Додавањем примеса **тровалентних** елемената (нпр. индијум) већински носиоци постају шупљине и тада имамо тзв. полупроводнике p -типа. Примесни атоми се називају **акцепторима**
- Додавањем примеса **петовалентних** елемената (нпр. фосфор) већински носиоци постају електрони и тада имамо тзв. полупроводнике n -типа. Примесни атоми се називају **донорима**

Примесна проводљивост



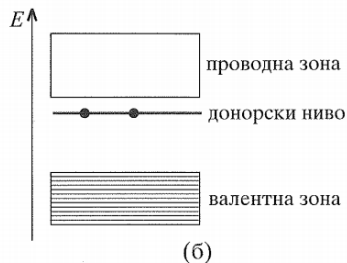
Примесна проводљивост



Примесна проводљивост

- Примесна проводљивост зависи од концентрације примеса
- Свакако и у овом случају температура утиче на проводљивост
- Додатни нивои између валентне и проводне зоне у примесним полупроводницима
- Донорски ниво (полупроводници *n*-типа)
- Акцепторски ниво (полупроводници *p*-типа)

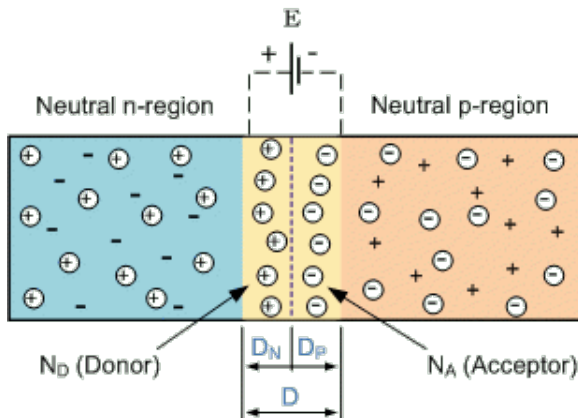
Примесна проводљивост



p-n спој

- Спајањем пролупроводника *p*-типа и полупроводника *n*-типа добија се тзв. *p-n* спој
- При образовању споја долази до дифузије носилаца
- Слободни електрони из *n*-области прелазе у *p*-област и рекомбинују са шупљинама
- У *n*-области остаје вишак позитивног наелектрисања док у *p*-области остаје вишак негативног наелектрисања
- Успоставља се електрично поље

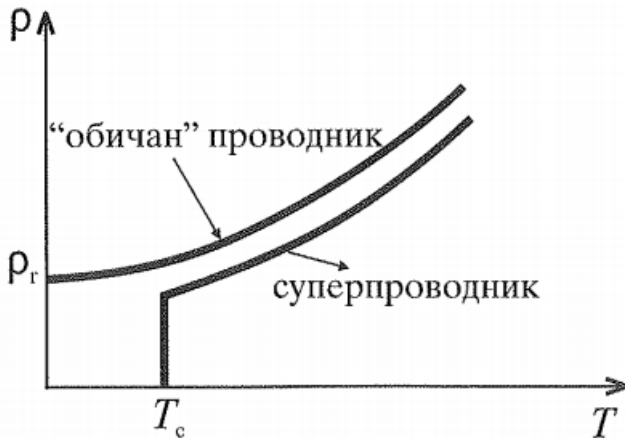
p-n спој



Суперпроводници

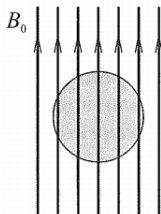
- Суперпроводљивост - одсуство електричне отпорности на ниским температурама код неких материјала
- Највиша температура на којој материјал има суперпроводна својства се назива критична температура T_c
- Појаву суперпроводности открио је холандски физичар Онес 1911. године
- Критичне температуре за чисте метале су врло ниске, испод $4K$ мада постоје и материјали са вишим критичним температурама

Суперпроводници

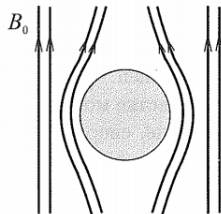


Мајснеров ефекат

- Немачки физичар Мајснер је открио да суперпроводници не дозвољавају магнетном пољу да продре у њихову унутрашњост
- Мајснеров ефекат



изнад критичне температуре



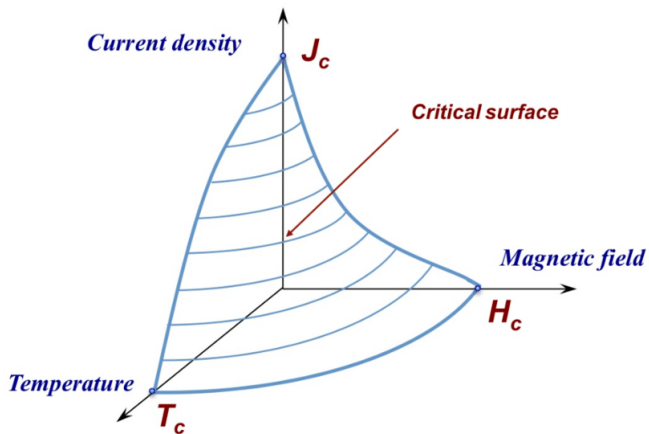
испод критичне температуре

Подела суперпроводника

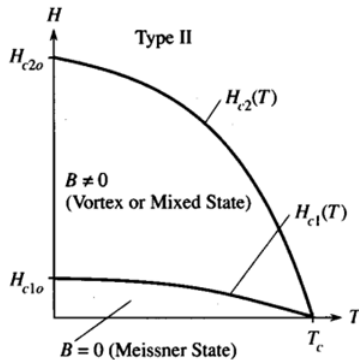
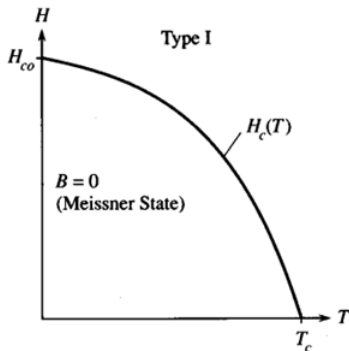
- Критична вредност магнетног поља уништава суперпроводно стање
- Критична вредност густине струје такође уништава суперпроводно стање
- Суперпроводници I врсте
- Суперпроводници II врсте
- Критична јачина магнетног поља код суперпроводника I врсте

$$H_C(T) = H_C(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^2 \right)$$

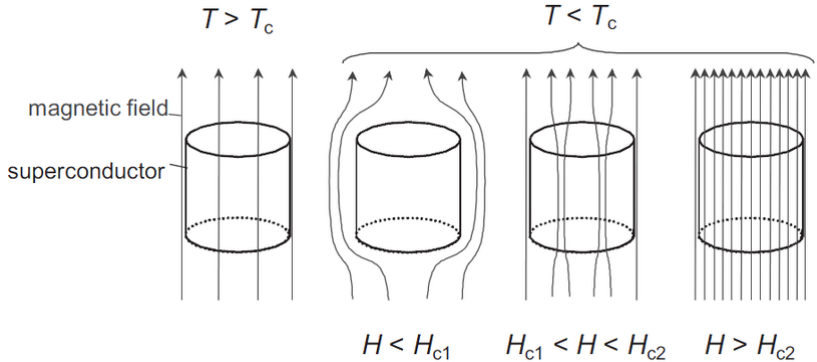
Подела суперпроводника



Подела суперпроводника



Суперпроводници // врсте



Питање 1.

Димензије елементарне ћелије кристалне решетке су реда величине:

(a) $10^{-12} m$

(б) $10^{-10} m$

(в) $10^{-8} m$

Питање 1.

Димензије елементарне ћелије кристалне решетке су реда величине:

(a) 10^{-12} m ✗

(б) 10^{-10} m ✓

(в) 10^{-8} m ✗

Питање 2.

На температурама блиским апсолутној нули електроне у проводној зони имају:

- (а) метали
- (б) полупроводници
- (в) диелектрици

Питање 2.

На температурама блиским апсолутној нули електроне у проводној зони имају:

- (а) метали ✓
- (б) полупроводници ✗
- (в) диелектрици ✗

Задатак 1.

Енергију Фермијевог нивоа на апсолутној нули могуће је израчунати на следећи начин $E_F = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3}$, где је h Планкова константа, m_e маса електрона и n концентрација слободних електрона. Одредити Фермијеву енергију ако је концентрација $n = 5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$:

- (а) $7.94 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- (б) $11 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- (в) $5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Задатак 1.

Енергију Фермијевог нивоа на апсолутној нули могуће је израчунати на следећи начин $E_F = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3}$, где је h Планкова константа, m_e маса електрона и n концентрација слободних електрона. Одредити Фермијеву енергију ако је концентрација $n = 5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$:

(а) $7.94 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ✓

(б) $11 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ✗

(в) $5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ✗

На основу дате формуле имамо:

$$E_F = \frac{h^2}{2m_e} \left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{2/3} = \frac{(6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js})^2}{2 * 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} \left(\frac{3 \cdot 5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}}{8 \cdot 3.14}\right)^{2/3}$$

После рачуна добијена бројна вредност је:

$$E_F = 7.94 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Задатак 2.

Колико износи вероватноћа да на температури $T = 300 \text{ K}$, електрон заузме стање које се налази 0.1 eV испод Фермијевог нивоа:

- (a) 0.3
- (b) 0.98
- (v) 0.05

Задатак 2.

Колико износи вероватноћа да на температури $T = 300 \text{ K}$, електрон заузме стање које се налази 0.1 eV испод Фермијевог нивоа:

- (а) $0.3 \times$
 (б) $0.98 \checkmark$
 (в) $0.05 \times$

Пошто је ниво 0.1 eV испод Фермијевог нивоа важи:

$$E - E_F = -0.1 \text{ eV}$$

На основу Ферми-Диракове расподеле тражена вероватноћа је:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{-0.1 \text{ eV}}{1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} 300 \text{ K}} + 1}} = \frac{1}{e^{\frac{-0.1 \text{ eV}}{0.026 \text{ eV}} + 1}} = 0.98$$

Задатак 3.

Колико износи вероватноћа да на температури $T = 300 \text{ K}$, електрон заузме стање које се налази на Фермијевом нивоу:

- (a) 1
- (б) 0.5
- (в) 0.2

Задатак 3.

Колико износи вероватноћа да на температури $T = 300 \text{ K}$, електрон заузме стање које се налази на Фермијевом нивоу:

- (a) 1 \times
- (b) 0.5 \checkmark
- (v) 0.2 \times

На основу текста имамо:

$$E - E_F = 0$$

На основу Ферми-Диракове расподеле тражена вероватноћа је:

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{0}{1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} 300 \text{ K}} + 1}} = 0.5$$

Задатак 4.

Одредити критичну температуру суперпроводника I врсте уколико је вредност критичне јачине магнетног поља на 0 K два пута већа од вредности критичног поља на температури $T = 0.8\text{ K}$:

- (a) 1 K
- (б) 0.5 K
- (в) 1.13 K

Задатак 4.

Одредити критичну температуру суперпроводника I врсте уколико је вредност критичне јачине магнетног поља на 0 K два пута већа од вредности критичног поља на температури $T = 0.8\text{ K}$:

- (а) 1 K ✗
- (б) 0.5 K ✗
- (в) 1.13 K ✓

За температуру $T = 0.8\text{ K}$ важи:

$$H_C(T) = \frac{H_C(0)}{2}$$





одакле се добија:

$$\frac{H_C(0)}{2} = H_C(0) \left(1 - \frac{T^2}{T_C^2}\right)$$

односно критична температура је:

$$T_C = \sqrt{2}T = 1.13\text{ K}$$

Одабрана литература

-  *Наташа Чалуковић, Физика 4, приручник за 4. разред гимназије природно-математичког смера, Круг, Београд 2014. године*
-  *Милан О. Распоповић, Физика 4, уџбеник за 4. разред гимназије природно-математичког смера, Завод за уџбенике, Београд 2008. године*
-  *Јовица Милисављевић, Милан Прокић, Физика 4, уџбеник за четврти разред гимназије природно-математичког смера, Klett, Београд 2021. године*
-  *Иван Аничин, Физика 4, уџбеник за четврти разред гимназије природно-математичког смера, Klett, Београд 2016. године*