

# **ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI**

Doc. dr Milena Đukanović  
milenadj@ac.me

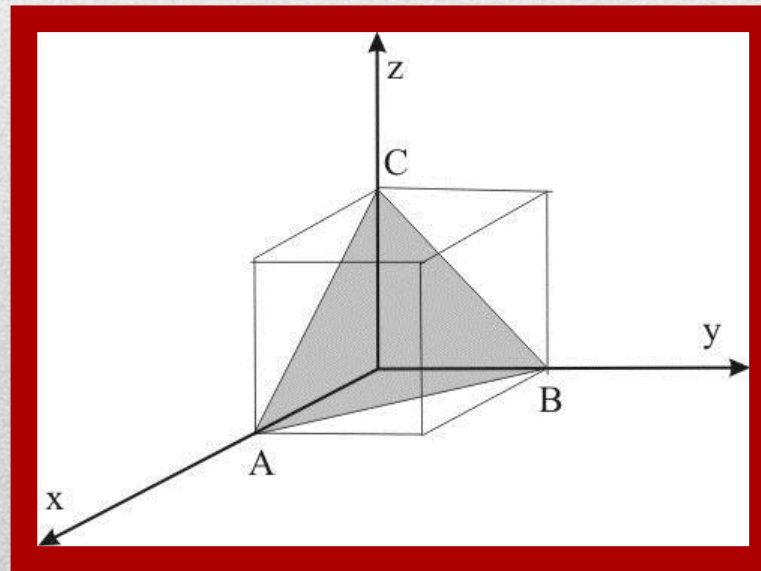
---

**PREDAVANJE IV  
MILEROVI INDEKSI,  
DEFEKTI KRISTALNE  
STRUKTURE**

---

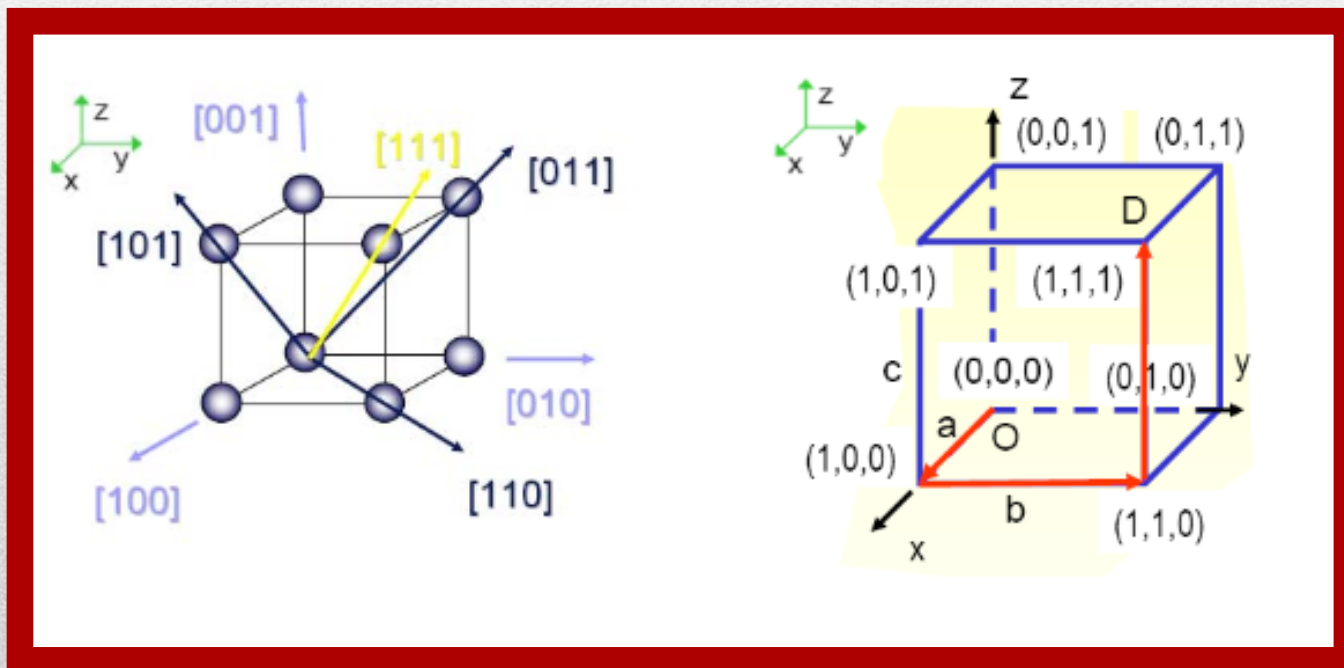
# TAČKE, PRAVCI I RAVNI JEDINIČNE KRISTALNE ČELIJE:

- **Anizotropnost** – osobina materijala kristalne strukture zavisi od položaja atoma u kristalnoj rešetki, pravaca u kristalu i položaja ravni u kojima leže atomi kristala.
- Položaj atoma jedinične ćelije određuje se preko koordinata tačaka u kojima se oni nalaze.
- Koordinate tačke definišu mjesta atoma jedinične ćelije u desnom pravouglom koordinatnom sistemu.



# TAČKE, PRAVCI I RAVNI JEDINIČNE KRISTALNE ČELIJE:

- Kristalografski pravci i i kristalografski čvorovi (tačke):

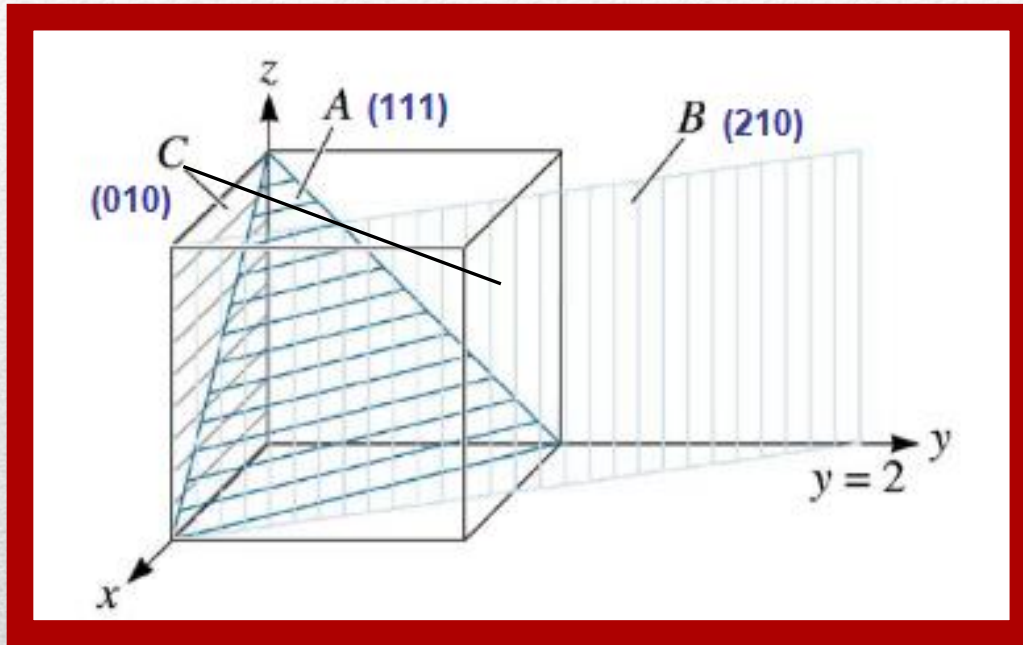


## MILEROVI INDEKSI:

- Kristalni pravci u jediničnoj ćeliji se određuju *Milerovim indeksima kristalografskih pravaca*.
- **Milerovi indeksi** se obilježavaju sa  $(h k l)$ .
- Za ravan koja na koordinatnim osama odsijeca odsječke  $x, y, z$  Milerovi indeksi se određuju sljedećim postupkom:
- Odsječci se izraze preko ivica elementarne ćelije  $\frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{z}{c}$ , a zatim se nađu recipročne vrijednosti ovih izraza:  $\frac{a}{x}, \frac{b}{y}, \frac{c}{z}$ .
- Ukoliko se ne dobiju cijeli brojevi u prethodnom koraku, tada se tri dobijena broja množe odgovarajućim faktorom kako bi se dobili cijeli brojevi, pri čemu se zadržava proporcija odsječaka:  $h = n \cdot \frac{a}{x}, k = n \cdot \frac{b}{y}, l = n \cdot \frac{c}{z}$
- Ravan koja **ne siječe** neku od koordinatnih osa ima odgovarajući **indeks 0**.
- Ako ravan siječe osu u negativnom delu, indeks je **negativan** i označava se **crticom iznad** indeksa, npr.  $(\bar{h} k l)$ .

# TAČKE, PRAVCI I RAVNI JEDINIČNE KRISTALNE ČELIJE:

- Kristalografske ravni:



- Ravan C:

1.  $x = \alpha, y = 1, z = \alpha$
2.  $1/x = 0, 1/y = 1, 1/z = 0$
3.  $\{0\ 1\ 0\}$

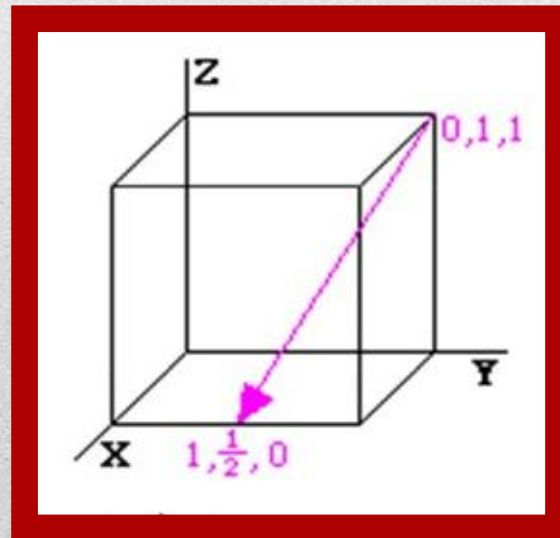
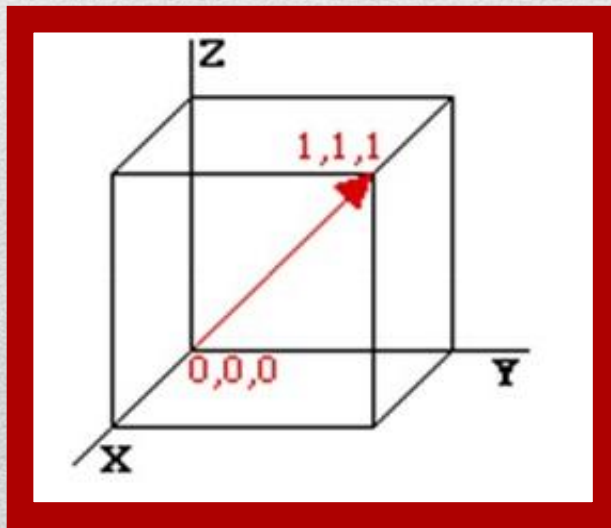
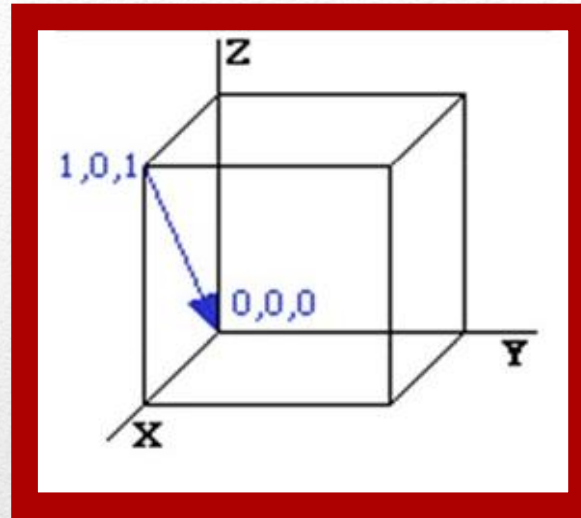
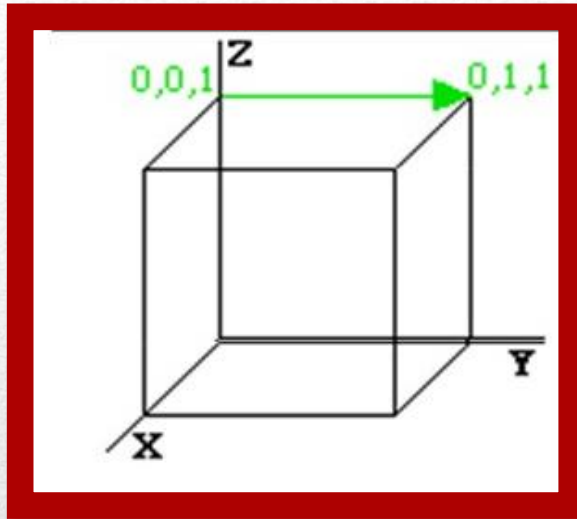
- Ravan A:

1.  $x = 1, y = 1, z = 1$
2.  $1/x = 1, 1/y = 1, 1/z = 1$
3.  $\{1\ 1\ 1\}$

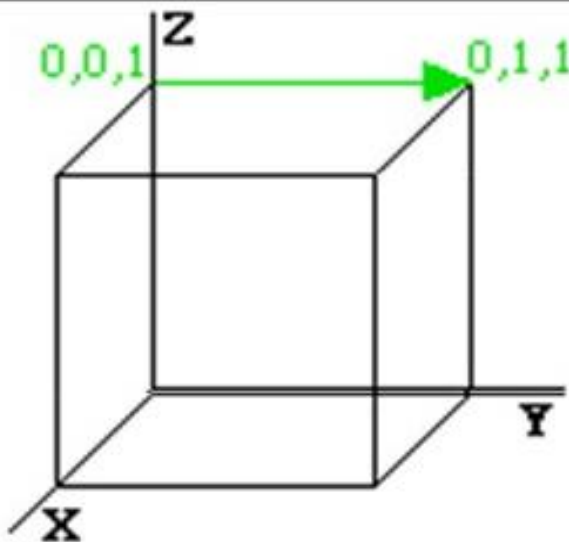
- Ravan B:

1. Ravan nikad ne siječe osu z:
2.  $x = 1, y = 2, z = \alpha$
3.  $1/x = 1, 1/y = 1/2, 1/z = 0$
4. Pretvaranje razlomaka u cijele brojeve (množenje sa 2):  
 $1/x = 2, 1/y = 1, 1/z = 0$
5.  $\{2\ 1\ 0\}$

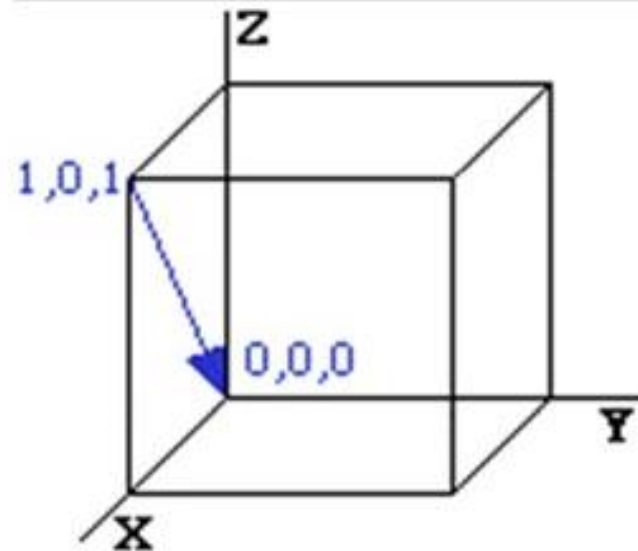
# MILEROVI INDEKSI:



## Kristalografski pravci u kubnom sistemu:



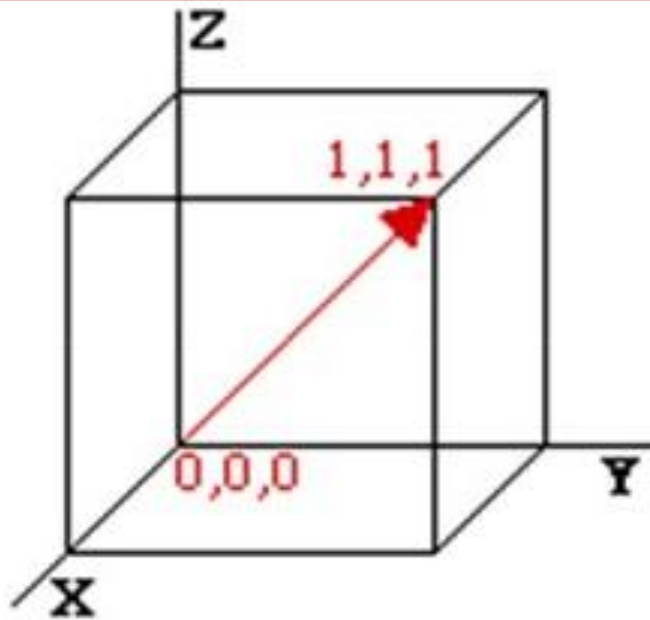
$$\begin{array}{r} 0, 1, 1 \quad \text{tip} \\ - 0, 0, 1 \quad \text{base} \\ \hline 0, 1, 0 \rightarrow [010] \end{array}$$



$$\begin{array}{r} 0, 0, 0 \quad \text{tip} \\ - 1, 0, 1 \quad \text{base} \\ \hline -1, 0, -1 \rightarrow [\bar{1}0\bar{1}] \end{array}$$

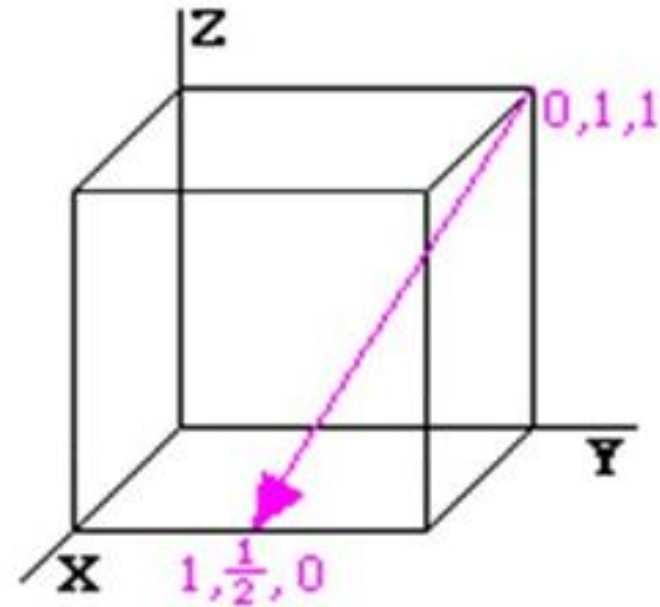


## Kristalografski pravci u kubnom sistemu:



$$\begin{array}{r} 1, 1, 1 \quad \text{tip} \\ - 0, 0, 0 \quad \text{base} \\ \hline \end{array}$$

$$1, 1, 1 \rightarrow [111]$$



$$\begin{array}{r} 1, \frac{1}{2}, 0 \quad \text{tip} \\ - 0, 1, 1 \quad \text{base} \\ \hline \end{array}$$

$$1, -\frac{1}{2}, -1 \rightarrow [2\bar{1}\bar{2}]$$

# MILEROVI INDEKSI:

1. Nacrtati ravan čiji su Milerovi indeksi (1 1 1).

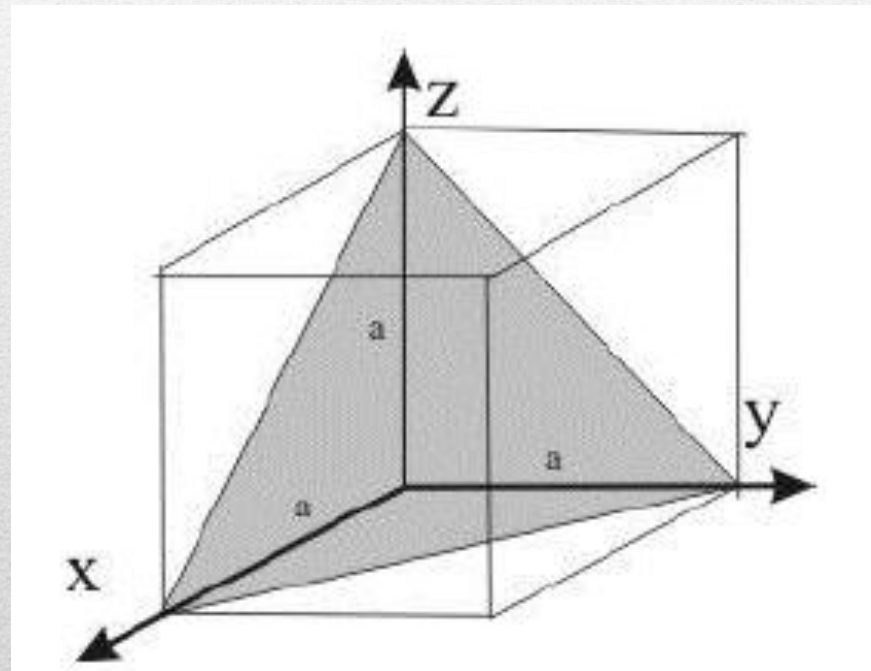
$$(111)$$

$$(hkl)$$

$$x = \frac{a}{1} = a$$

$$y = \frac{a}{1} = a$$

$$z = \frac{a}{1} = a$$



## MILEROVI INDEKSI:

2. Nacrtati ravan čiji su Milerovi indeksi (1 2 3).

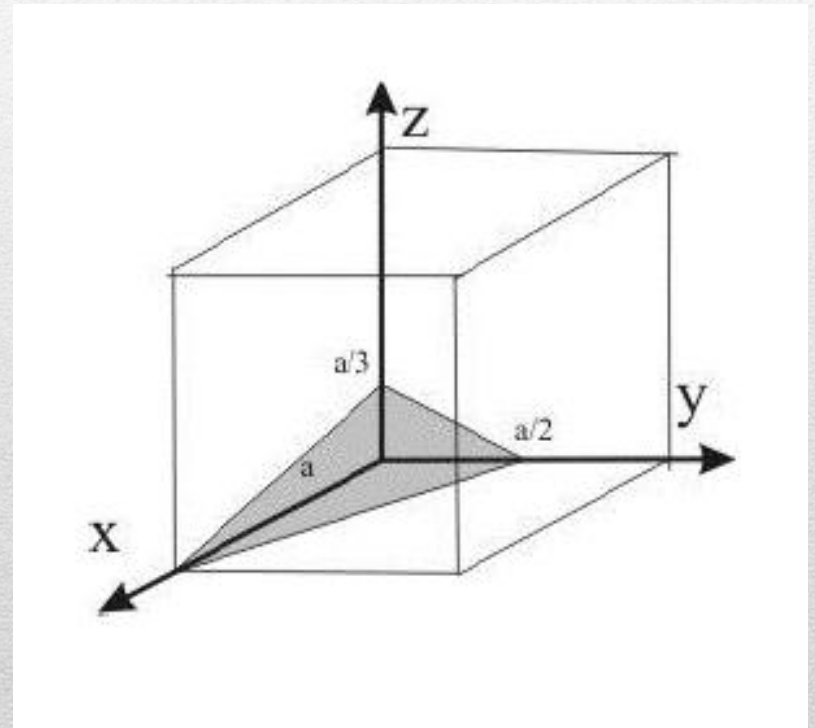
$$(123)$$

$$(hkl)$$

$$x = \frac{a}{1} = a$$

$$y = \frac{a}{2}$$

$$z = \frac{a}{3}$$



## MILEROVI INDEKSI:

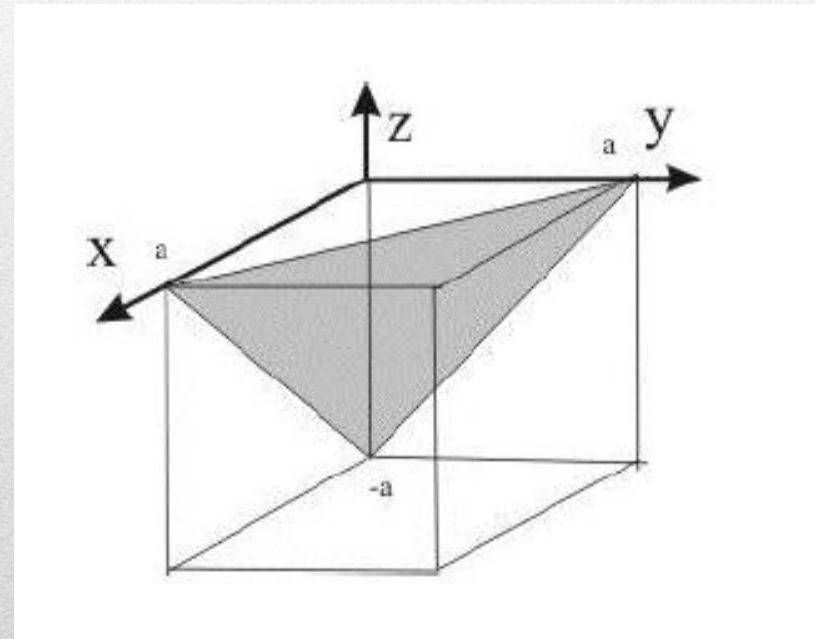
3. Nacrtati ravan čiji su Milerovi indeksi  $(\bar{1} 1 1)$ .

$$\begin{pmatrix} 11\bar{1} \\ hkl \end{pmatrix}$$

$$x = \frac{a}{1} = a$$

$$y = \frac{a}{1} = a$$

$$z = -\frac{a}{1} = -a$$



# MILEROVI INDEKSI:

4. Nacrtati ravan čiji su Milerovi indeksi (2 0 2).

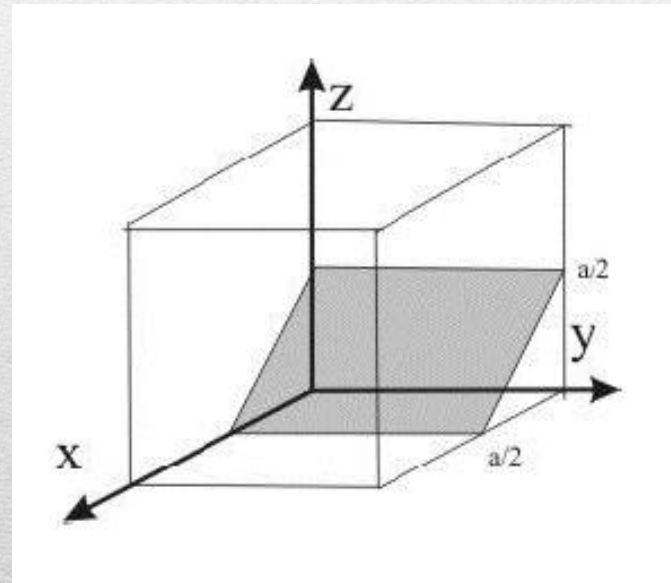
$$(202)$$

$$(hkl)$$

$$x = \frac{a}{2}$$

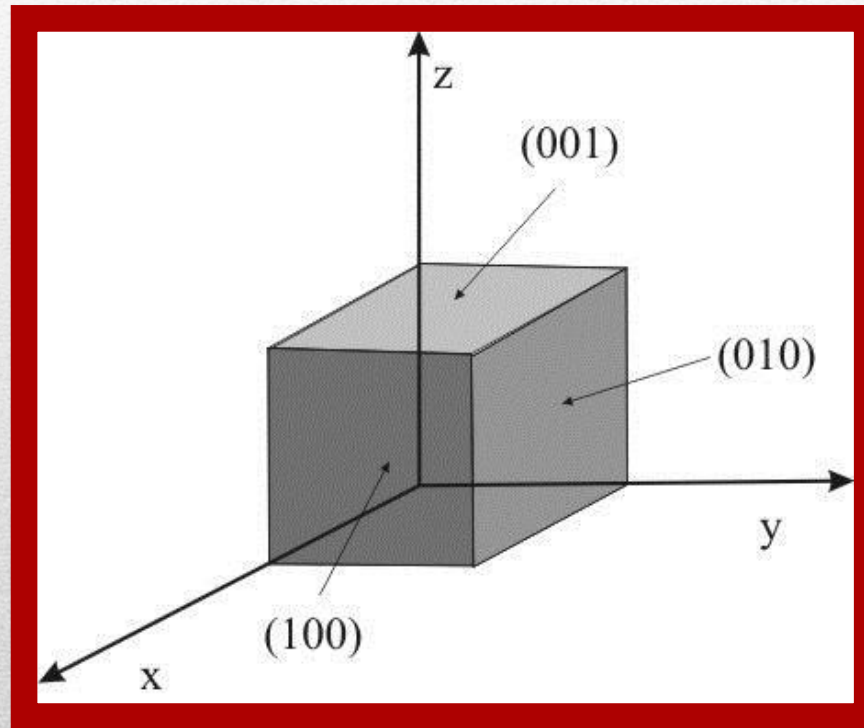
$$y = \frac{a}{0} \rightarrow \infty$$

$$z = \frac{a}{2}$$



## MILEROVI INDEKSI:

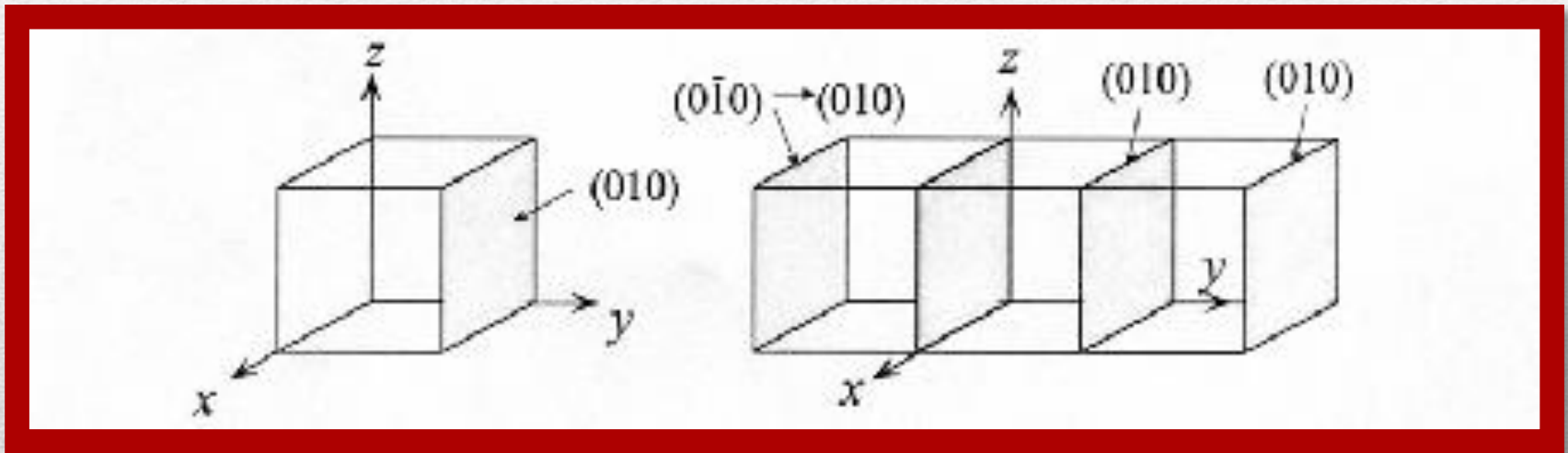
5. Odrediti Milerove indekse ravni kubne elementarne ćelije.



Ostale tri ravni su paralelne obilježenima i imaju iste Milerove indekse.

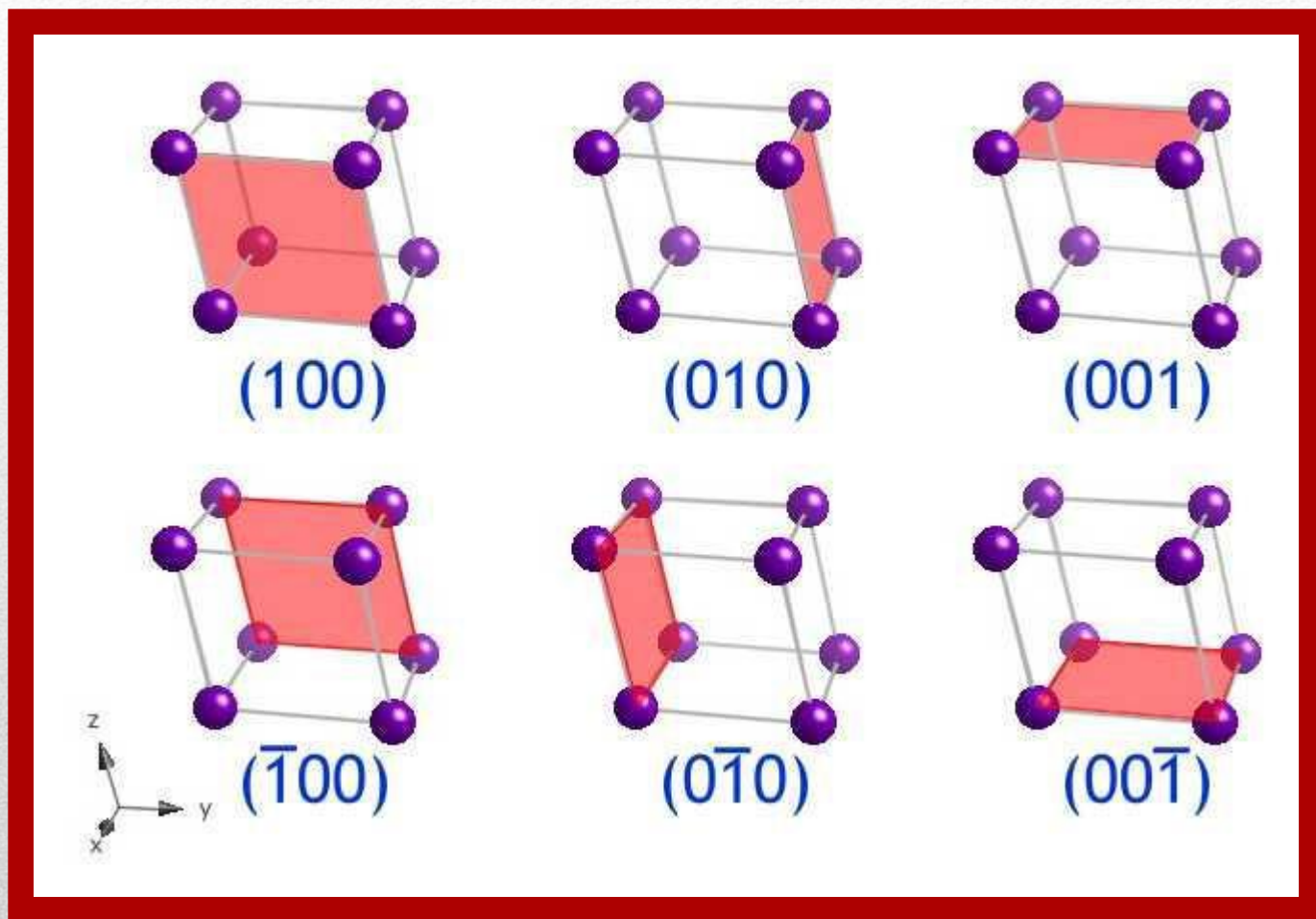
## MILEROVI INDEKSI:

- Sve ravni koje su paralelne i fizički ekvivalentne datoj ravni imaju iste Milerove indekse i takva familija ravni se označava sa  $\{h, k, l\}$ .



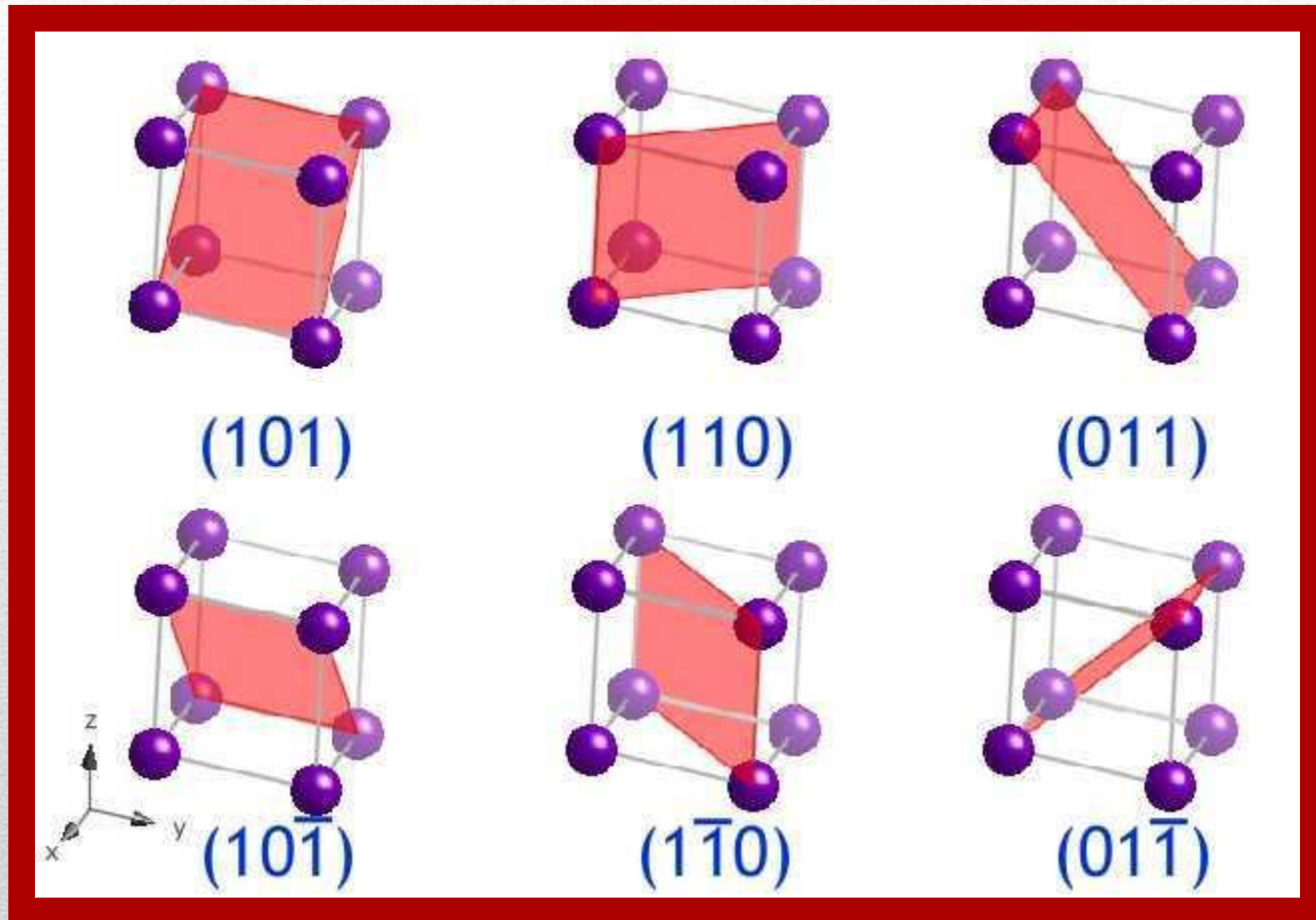
- Pravac dat Milerovim indeksima  $[h \ k \ l]$  normalan je na ravan sa istim Milerovim indeksima  $(h \ k \ l)$ !!!

# MILEROVI INDEKSI RAVNI KUBNE JEDINIČNE ČELIJE:



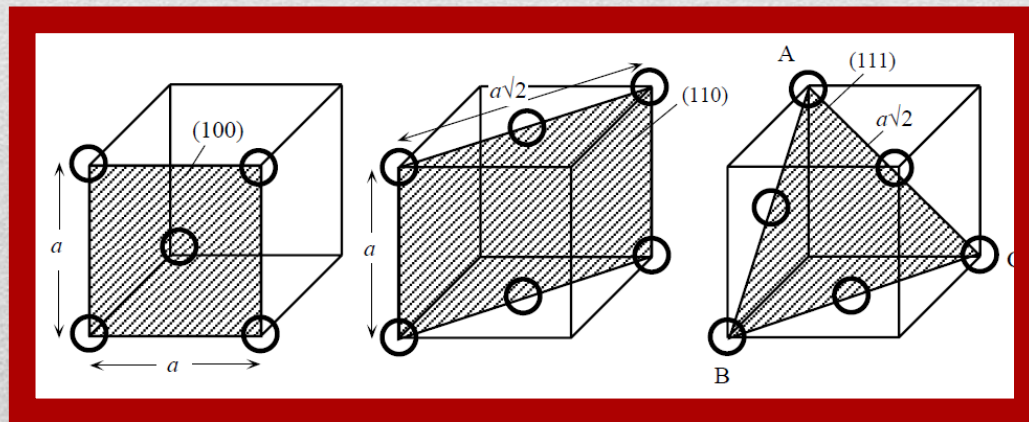


# MILEROVI INDEKSI RAVNI KUBNE JEDINIČNE ČELIJE:



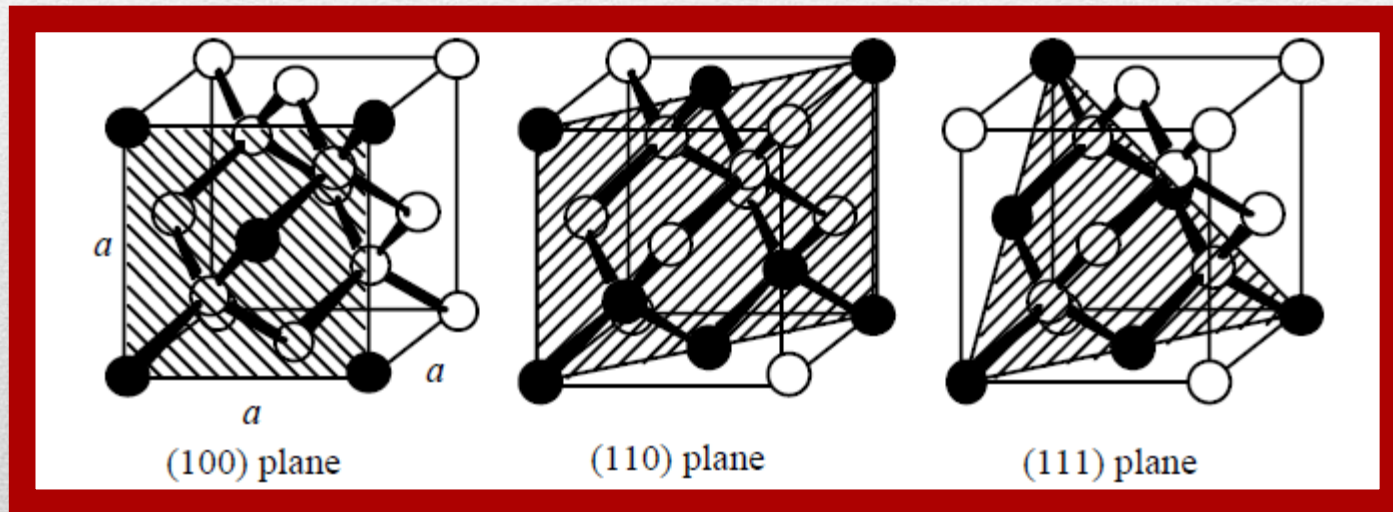
# MILEROVI INDEKSI RAVNI KUBNE JEDINIČNE ČELIJE:

- Planarna koncentracija (ili gustina) označava broj atoma po jedinici površine koji su zahvaćeni određenom ravni i definisani preko Milerovih indeksa. Kako bi se izračunala planarna koncentracija  $n_{(hkl)}$  na  $(hkl)$  ravan uzimamo u obzir površinu  $A$  i samo oni atomi čiji su centri zahvaćeni površinom  $A$  ulaze u račun  $n_{(hkl)}$ . Za svaki atom se izračunava koji dio površine je zahvaćen površinom  $A$ .
- **Zadatak 1:** Srebro Ag ima FCC kristalnu strukturu. Ukoliko je data vrijednost stranice jedinične ćelije  $a$ , naći planarne koncentracije ravni  $\{100\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{111\}$  koje su date na slici:



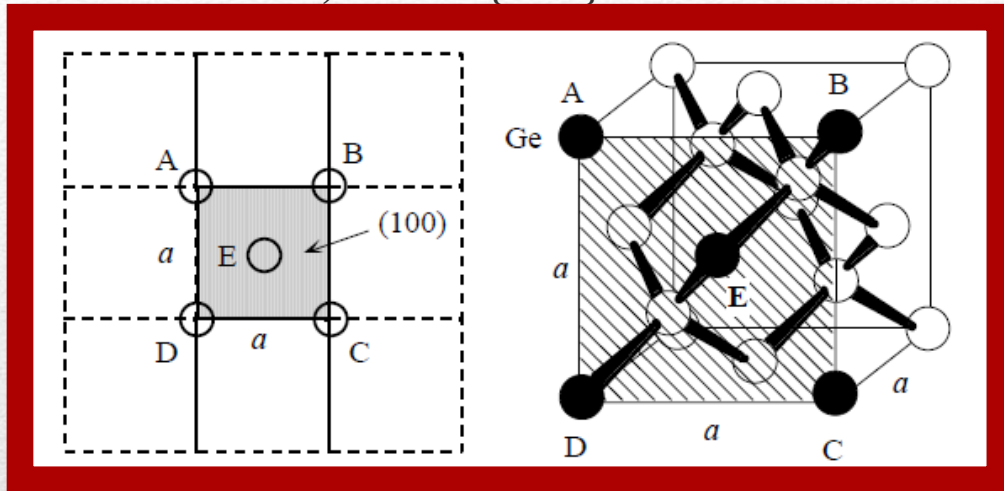
# MILEROVI INDEKSI RAVNI KUBNE JEDINIČNE ČELIJE:

- Zadatak 2:** Germanijum Ge ima dijamantsku kristalnu strukturu. Ukoliko je data vrijednost stranice  $a$  jedinične ćelije, izračunati planarne koncentracije (broj atoma po jedinici površine) za ravni  $\{100\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{111\}$ . Koja ravan ima najmanju gustinu?

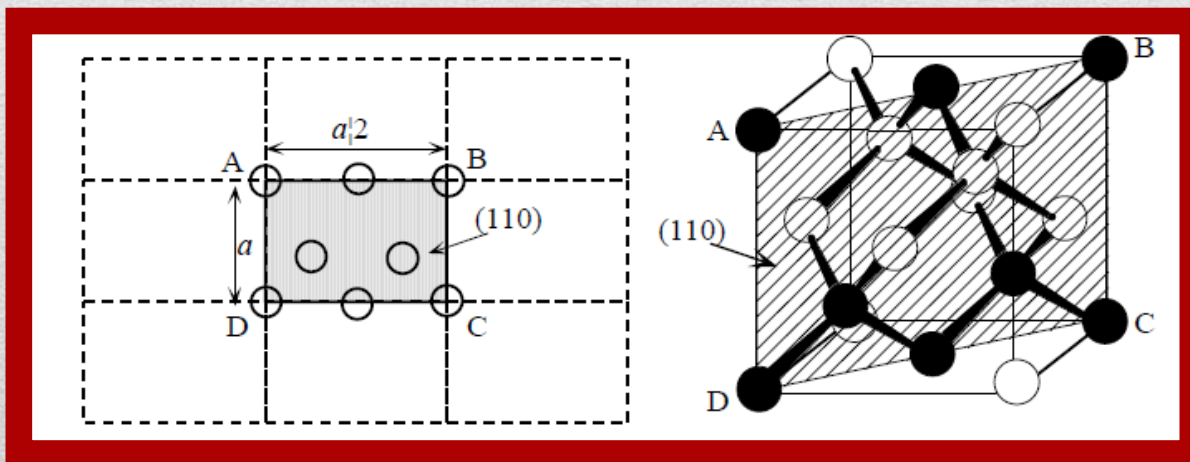


# MILEROVI INDEKSI RAVNI KUBNE JEDINIČNE ČELIJE:

- **Zadatak 2: a) Ravan {100}**

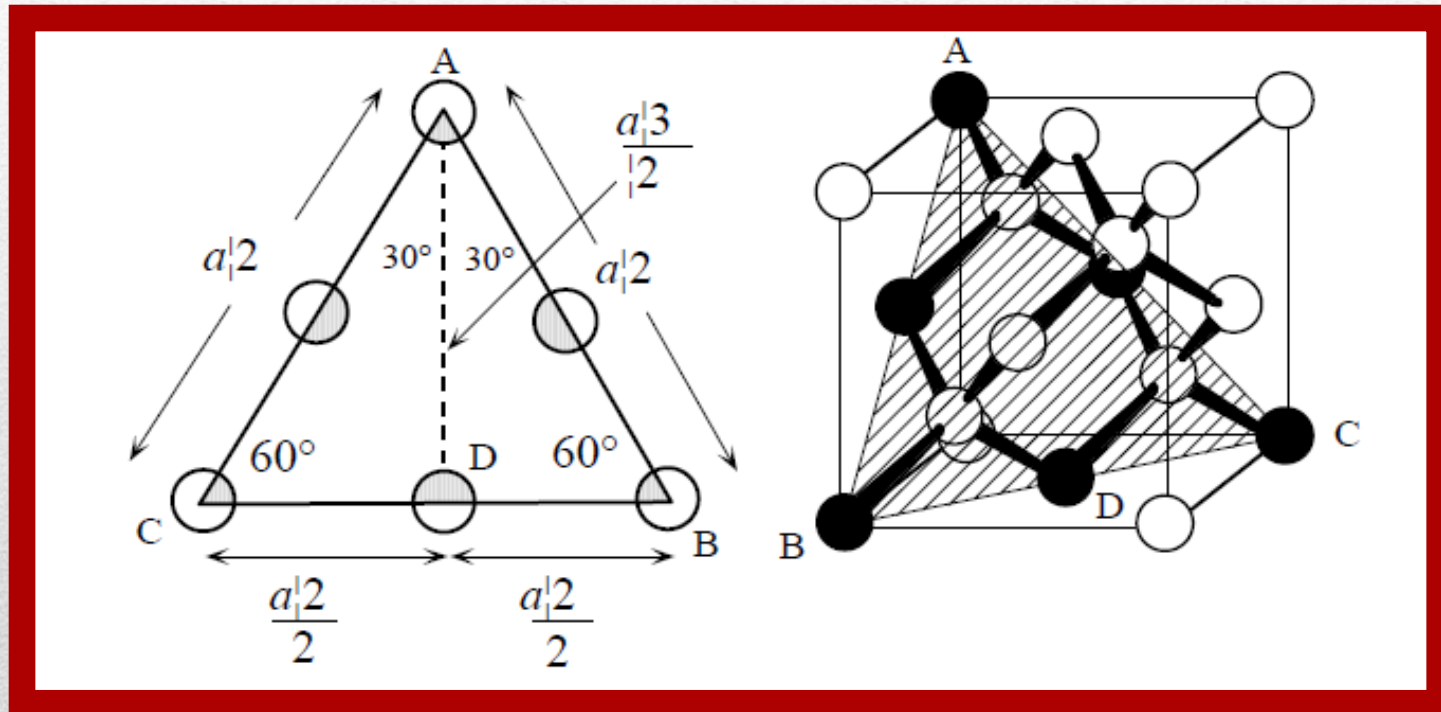


- **Zadatak 2: b) Ravan {110}**



# MILEROVI INDEKSI RAVNI KUBNE JEDINIČNE ČELIJE:

- **Zadatak 2: c) Ravan  $\{111\}$**



## ALOTROPSKA MODIKACIJA:

- Materijali koji imaju više od jedne kristalne strukture nazivaju se **alotropni** ili **polimorfni** i za njih se kaže da se javljaju u više alotropskih modifikacija i mogu da iskažu veoma različite fizičke osobine.
- Razlika između alotropskih formi bazira se na silama koje utiču i na druge strukture, na primjer svjetlo, pritisak i temperatura. Stabilnost nekih alotropa zavisi od uslova sredine.
- Npr. gvožđe ima više od jedne kristalne strukture: na nižim temperaturama ima BCC kubnu rešetku, a na višim temperaturama ima FCC kubnu rešetku; dijamant i grafit su polimorfne modifikacije ugljenika.
- Mnogi keramički materijali, a među njima i kvarc, prolaze kroz više alotropskih transformacija u toku procesa zagrijavanja ili hlađenja, što može da uzrokuje promjenu karakteristika materijala.
- Uobičajeno je da se alotropske modifikacije označavaju grčkim slovima, i to modifikacija koja je stabilna pri normalnoj i nižoj temperaturi obilježava se slovom  $\alpha$ , a ostale modifikacije, pri višim temperaturama, redom slovima  $\beta$ ,  $\gamma$  itd. (npr.  $\alpha$ -Fe,  $\beta$ -Fe,  $\gamma$ -Fe,  $\beta$ -Ti itd.).

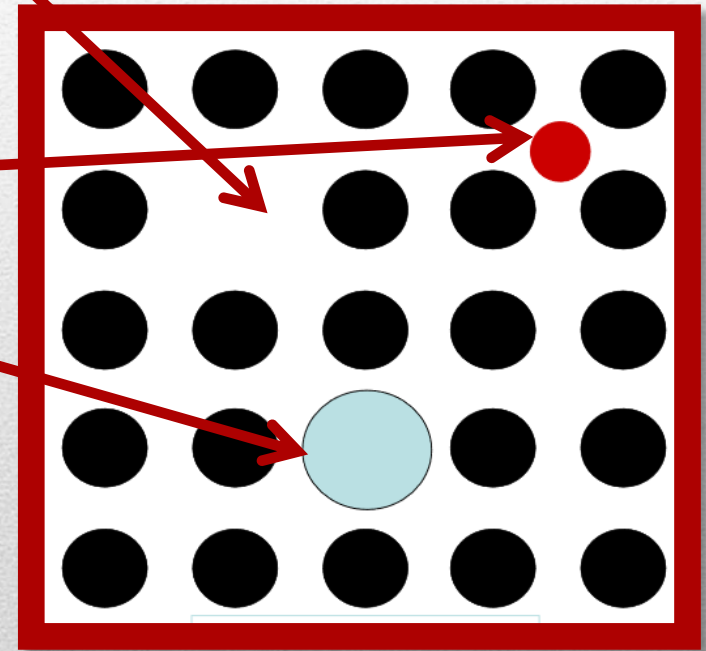
# NESAVRŠENOSTI U KRISTALNOJ STRUKTURI MATERIJALA:

- Kod realnih kristala javljaju se različita odstupanja od „idealne“ kristalne rešetke.
- Ova odstupanja od geometrijski pravilnog rasporeda atoma nazivaju se nesavršenostima ili defektima kristalne strukture.
- Ove nesavršenosti u kristalnoj strukturi kristalne rešetke imaju veliki uticaj na karakteristike i ponašanje materijala.
- Razlikujemo među statičkim tj. strukturnim defektima nepravilnosti koje su nastale pri formiranju kristalne rešetke ili kasnije različitim postupcima (mehaničkim deformacijama, grijanjem, ozračivanjem itd.):

- 1) Tačkaste nesavršenosti
- 2) Linijske nesavršenosti
- 3) Površinske nesavršenosti
- 4) Zapreminske nesavršenosti

# TAČKASTE NESAVRŠENOSTI U KRISTALNOJ STRUKTURI MATERIJALA:

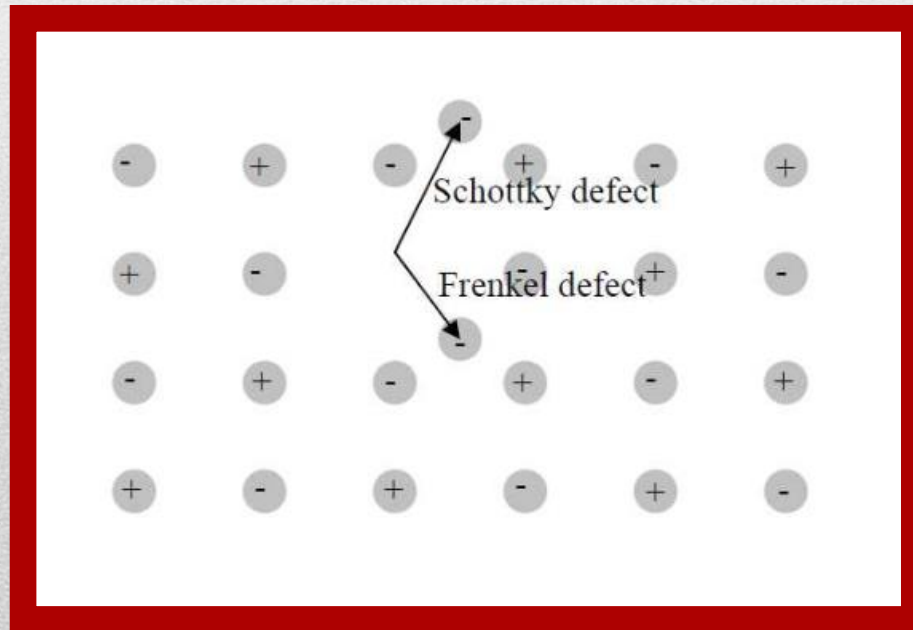
- **Vakancija** - praznina u regularnom rasporedu atoma
- **Intersticija** - atom koji svojim položajem narušava periodičnu kristalnu strukturu
- **Supstitucijska primjesa** – može da se formira samo ukoliko se poluprečnik primjesnog atoma ne razlikuje više od 15% u odnosu na atom strukturnog kristala. U intersticijske položaje se mogu smjestiti istorodni ili raznorodni atomi strukturnog atoma.





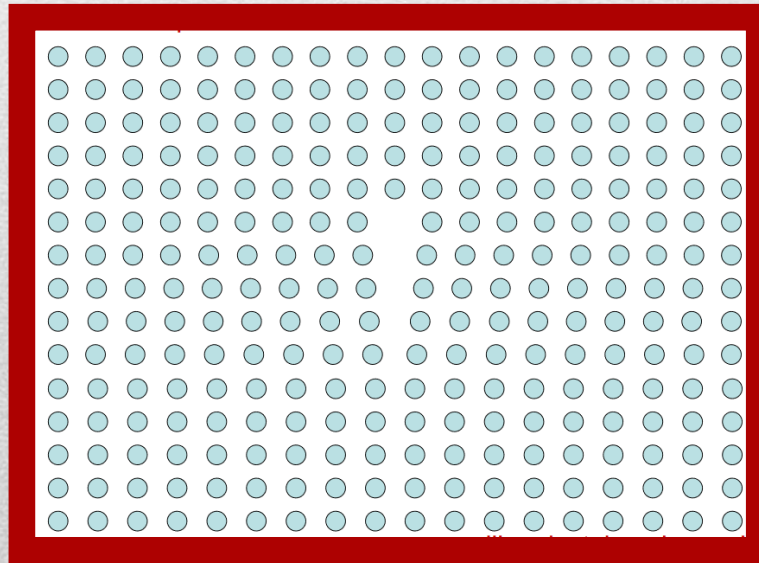
# TAČKASTE NESAVRŠENOSTI U KRISTALNOJ STRUKTURI MATERIJALA:

- **Schottkyev defekt** - vakancija nastala odlaskom atoma na površinu kristala.
- **Frenkelov defekat** - vakancija nastala kada atom iz regularnog položaja pređe u intersticijski položaj.



# LINIJSKE NESAVRŠENOSTI U KRISTALNOJ STRUKTURI MATERIJALA:

- Linijske nesavršenosti se nazivaju **dislokacije** i predstavljaju granicu između pomjerenog i nepomjerenog područja kristala.
- Prema načinu nastanka, postoje dva tipa linijskih nesavršenosti – **ivična** i **spiralna** dislokacija.
- Ivična dislokacija se pojavljuje kada je geometrijski pravilan kristal izložen dejstvu naprezanja smicanjem, koje izaziva pomjeranje lokalnih područja kristala.



# POVRŠINSKE NESAVRŠENOSTI U KRISTALNOJ STRUKTURI MATERIJALA:

- Površinske nesavršenosti predstavljaju granice između područja materijala koji imaju istu kristalnu strukturu, ali različitu orijentaciju.
- Primjer površinskih nesavršenosti – tip granice zrna (Mikrostruktura mnogih materijala se sastoji iz zrna. Zrna su područja materijala koji imaju identičan raspored atoma, pri čemu je orijentacija atomskog pakovanja različita, što prouzrokuje stvaranje prelaznog područja u kome je pakovanje atoma nesavršeno).

