

## STRUKTURA ČVRSTIH TELA

M.Lj. Napijalo

Odsek za fizičke i meteorološke nauke,

PMF, Beograd

i

Institut za fiziku, Beograd

Čvrsta tela predstavljaju široku klasu vrlo različitih i u isti mah složenih objekata. I sam pojam "struktura čvrstog tela" vrlo je složen i obuhvata, govoreći dosta pojednostavljeno, strukture pri različita podsistema koje je moguće razlikovati u jednom sistemu, kakvo je čvrsto telo. Prvo je kristalohemijska struktura, koja se odnosi na prostorni raspored čestica koje izgradjuju čvrsto telo: atoma, jona molekula ili makromolekula. Drugo je elektronska struktura čvrstih tela, koja se odnosi na elektronski podsistem: na prostorni raspored i energijske nivoe elektrona u atomima i jonima, odnosno na energijski spektar kolektivizovanih elektrona. Treće je struktura nuklearnog podsistema u čvrstom telu, koja se, sa stanovišta fizike čvrstog stanja u užem smislu reči, ograničava na magnetno uredjenje sistema nuklearnih magnetnih spinskih momenata. Pitanje strukture ovog trećeg podsistema dosta je specifično i mada je vrlo zanimljivo, ostaje van obima ovog pregleda posvećenog strukturama čvrstih tela. Šta više, široki spektar kristalohemijskih a posebno elektronskih struktura tražio je da se koncepcija prikaza struktura pojednostavi i da se neka vrlo značajna pitanja strukture elektronskog podsistema uopšte ne razmatraju. Nadamo se da će jedan prikaz, ovako kako je zamišljen, ipak dati dosta zaokružen izbog informacija o strukturama čvrstih tela i omogućiti onima, koji se ne bave ovom oblašću fizike, da steknu bar približnu sliku o značenju pojma "struktura čvrstih tela"

## 2. Kristalohemijska struktura čvrstih tela

Neka opšta pitanja vezana za kristalohemijsku strukturu čvrstih tela razmotrićemo na primeru jednodimenzionih sistema. Osnovu za objašnjenja pruža sl. 1. Na slici su prikazana potencijalna moguća stanja jednodimenzionih sistema, sa kojima se susrećemo u fizici kondenzovanog stanja; jedna data proizvoljna supstancija može se u opštem slučaju naći samo u nekim od naznačenih stanja.

A. Kondenzovani sistemi mogu u opštem slučaju da se nalaze u jednom od dva osnovna oblika odnosno faze: u obliku tečnosti odnosno čvrstog tela. U nekim slučajevima moguć je i treći oblik odnosno mezofaza: stanje tečnih kristala (termotropni tečni kristali).

B. Čvrsta tela obično imaju oblik kristala, mada u izvesnim slučajevima mogu da postoje i u obliku nekristalnih tela (amorfna i staklasta tela). Nekristalna tela predstavljaju po svojoj strukturi objekte koji leže između tečnosti i čvrstih tela: kao da su u pitanju zamrznute tečnosti (amorfna tela) odnosno čvrsta tela sa nezavršenom kristalizacijom (staklasta tela). Na izvesan način kristali predstavljaju jedini stabilni oblik postojanja čvrstih tela, mada nestabilnost nekristalnih tela obično treba shvatiti uslovno (u poredjenju sa nestabilnim sistemima u drugim oblastima fizike).

C. Prema tipu gradje kristali se mogu razvrstati u tri uže grupe. To su savršeni ("idealni") kristali, kristali sa defektima ("realni" kristali) i kristali polimera. U osnovi ove podele leži stepen savršenosti gradje kristalne rešetke. (sledeći paragraf).

Grupu savršenih kristala obrazuju kristali, čija kristalna rešetka ne sadrži defekte svojstvene realnim kristalima (paragraf 3.). Pojam savršeni kristal može da ima različito značenje u fizici

čvrstog stanja. Prvo, savršeni kristali sa različitim kristalnim rešetkama predstavljaju prototipove (modele) za realne kristale. Drugo, vrlo često moguće u laboratorijskim uslovima sintetizovati uzorke nekih supstancija, koji su vrlo bliski savršenim kristalima. Najzad, treće, u izvesnim slučajevima, pri proučavanju nekih osobina kristala moguće je zanemariti prisutnost defekata jer (u prvoj ili dovoljno visokoj aproksimaciji) ne utiče na razmatrane osobine. Suprotno ovim kristalima realni kristali predstavljaju onaj tip čvrstih tela, u kojima upravo prisutni defekti određuju osnovno ponašanje. Poslednju grupu u ovoj podeli obrazuju kristali polimera, koji po savršenosti kristalne gradje, lokalnoj ili stvarnoj (kristaličnost malog ili velikog dometa), leže u jednoj prelaznoj oblasti izmedju kristala sa defektima i nekristalnih tela [ 2 ] .

D. U savremenoj fizici čvrstog stanja sve se više uobličava podela kristala naznačena pri dnu sl. 1. Razlikuju se voluminozni "masivni") uzorci, kod kojih su zanemarljivi efekti granica, tanki slojevi - uzorci čija jedna dimenzija leži ispod određene granice (zavisno od oblasti pojava), površine, kao dvodimenzionalne oblasti u kojima se odigravaju specifični procesi i polikristalni uzorci. Polikristalni uzorci obrazovani su od kristalita relativno savršene kristalne gradje, koji su razdvojeni "velikougaoanim granicama", kao oblastima visokog stepena defektnosti.

E. Jednu određenu čvrstu supstanciju sa zadatom hemijskom bruto formulom ne karakteriše uvek jedna kristalna struktura. Pod određenim, različitim uslovima jedna supstancija može imati različite kristalne strukture - razne polimorfne oblike.

### 1.1. Napomene uz prikaz kristalohemijskih struktura

U ovom pregledu kristalohemijskih struktura mi smo naznačili pojedine oblike kondenzovanih faza ali ne i same tipove struktura. Tipovi struktura savršenih Kristala ( $AB$ ,  $AB_2$ ,  $A_x B_y \dots$ ) koji su karakteristični za pojedine tipove poluprovodnika, magnetika, jonskih kristala i sl. [3] ostaju van okvira ovog pregleda. Slično vredi i za tipove struktura tečnih kristala [1], tipove struktura kristala polimera [2] odnosno za tipove defekata u realnim kristalima [4].

Drugo, dati pregled odnosi se kratkoće radi, samo na jednokomponentne sisteme. Odgovarajuća šema za dvokomponentne sisteme bila bi znatno složenija: postojali bi tečni rastvori, čvrsti rastvori, jedinjenja, eutektici i sl. I kod dvokomponentnih sistema moguće je postojanje mezofaze: to su liotropni tečni kristali [1]. Treba naglasiti da u ove, dvokomponentne sisteme spadaju objekti od velikog značaja za fiziku čvrstog stanja (kristali dopirani primesama, intermetalna jedinjenja i sl. a od posebnog značaja su različite heterogene strukture kod poluprovodnika i dr., strukture tipa kermeta i dr.). Mi se na ovim pitanjima ne možemo zadržavati. Šta više mi ćemo u daljem razmatranju struktura pažnju posvetiti uglavnom savršenim kristalima i nekim uslovima pod kojima se ova savršenost naružava.

## 2. Kristalohemijska struktura savršenih kristala

Kristalohemijska struktura kristala zadaje se njegovom kristalnom rešetkom. Sa svoje strane kristalna rešetka u potpunosti je zadata jediničnom (elementarnom) ćelijom, za koju možemo uzeti da predstavlja onaj izgradjivački element kristalne rešetke, čijim slaganjem u tri dimenzije može biti izgradjen ceo kristal. Prvi problem pri definisanju strukture jednog kristala jeste određivanje simetrije jedinične ćelije. Ovaj podatak omogućava da se dati kristal razvrsta u odgovarajući Kristalografski sistem,

Kristalografsku klasu i prostornu grupu (3,5,6).

Kristalnu rešetku raznih kristala izgradjuju različite sastavne čestice: atomi, joni (jednoatomski ili višeatomski) i molekuli. Sastav jedne kristalne supstancije zadaje se hemijskom bruto formulom, koja definiše stehiometrijsku jedinicu Kristala. Pojam stehiometrijske jedinice može da odgovara molekulu klasične hemije, ali je u opštem slučaju širi (slučaj hidrata i sl.).

Jedinična ćelija sadrži jednu, dve ili više stehiometrijskih jedinica, koje su unutar ćelije raspoređene, geometrijski posmatrano, uz određene pravilnosti koje odgovaraju operacijama simetrije date strukture. Struktura kristala postpuno je određena kad su poznati međusobni prostorni odnosi svih čestica u jediničnoj ćeliji - koordinaciona okruženja svih izgradjivačkih čestica. Koordinaciono okruženje ("lokalna simetrija) zadaje se: prirodom atoma (jona) - suseda, brojem suseda (koordinacionim brojem), oblikom okruženja (koordinacionim poliedrom) i dimenzijama okruženja (ivice, dijagonale i uglovi poliedra).

Primera radi na sl. 2. prikazana je, inače često navodjena, kristalohemijska struktura NaCl: jedinična ćelija i oktaedarsko koordinaciono okruženje (sl. 2.a. i sl. 2.b.)

Slike ovog tipa (sl. 2.a) daju dobru, preglednu informaciju o relativnom prostornom raspoređu sastavnih čestica; ali, da bi se dobilo u preglednosti ovakvim slikama zanemaruje se nužno jedna bitna odlika realnih kristala. Tačniju sliku o strukturi kristala pruža slika tipa sl. 2.c, koja prikazuje strukturu NaCl kao sistem "gusto pakovanih" kuglica. Celokupno iskustvo u oblasti kristalohemije pokazuje da kristali (metalni, jonski i molekulski) predstavljaju sisteme čije se strukture obrazuju po "principu najgušćeg pakovanja". Izvesan izuzetak od ovog principa predstavljaju kristali sa čisto kovalentnim ili slabo polarnim vezama, čija upravljenost i ograničen broj po jednom atomu sprečavaju obrazovanje najgušćih pakovanja.

Gusto pakovanje jona i približna aditivnost razmaka medju

centrima čestica ( $r_{AB} = R_A + R_B$ ) ponavljana u strukturama različitih jonskih kristala omogućavaju da se definišu jonski radijusi ( $R_i$ ), kao veličine koje karakterišu srednje (efektivne) linijske dimenzije jona u kristalima. Slično vredi za tzv. "metalne radijuse" atoma metala u kristalima metala, "kovalentne radijuse" atoma u kovalentnim kristalima i unutar molekula u molekulskim kristalima i, najzad, za "vandervalsovske" radijuse atoma koji se nalaze u različitim molekulima molekulskih kristala 3,6. Tabele sa prosečnim vrednostima ovih radijusa, koje se navode u različitim priručnicima, predstavljaju dobro pomoćno sredstvo za predviđanje mogućih koordinacionih okruženja odnosno struktura.

Primetimo još da za slikovito predstavljanje kristala hemijskih struktura postoji još jedan pristup: strukture se mogu predstaviti i kao rezultat slaganja koordinacionih poliedara, što je pokazano za slučaj NaCl (sl. 2.d).

## 2. Napomene uz paragraf 2

Odredjivanje pravih efektivnih dimenzija čestica na osnovu podataka od kristalohemijskoj strukturi date supstancije omogućava da se ove dimenzije uporede sa dimenzijama slobodnih atoma i jona, odnosno sa dimenzijama istih čestica u drugim kristalima. Ovo poredjenje daje na izvesan način informacije o interakcijama čestica, koje ulaze u sastav kristala. Jednu predstavu o tome daje sl. 3 na kojoj su šematski prikazani fragmenti kristalnih struktura za četiri supstancije: germanijum Ge (kovalentni kristal  $A^{IV}$ ), galijum arsenid GaAs (slabi polarni kristal  $A^{III}B^V$ ), kalijum selenid CaSe (jako polarni kristal  $A^{II}B^{VI}$ ) i za kalijum hlorid KCl (jonski kristal  $A^I B^{VII}$ ). Na slikama ovih struktura prikazani su "jonski ostaci" atoma A i B (beli krugovi) i "elektronski oblaci" koji odgovaraju ovim sastavnim česticama u kristalima (osene prstenaste oblasti) a odnose se na oblasti zaposednute elektronskim orbitalama sa valentnim elektronima.

Ovde nije pomenuta metalna veza: Ovaj tip homopolarne veze može se na izvesan način povezati sa slikom za Ge- samo što osenčene prstenaste površine, koje odgovaraju delokalizovanim elektronima, treba da budu uvećane toliko da se međusobno dodiruju.

### 3. Savršeni kristal kao aproksimacija realnog kristala

Savršen, geometrijski pravilan raspored atoma ili jona u kristalima predstavlja strogo govoreći idealizaciju, koja se može pripisati samo kristalima na apsolutnoj nuli ( $T=0$ ).

Tačnije i pri  $T=0$  postoje nulte oscilacije kristalne rešetke. Medjutim, srednje pomeranje atoma iz ravnotežnih položaja, koje narušava savršenost rešetke obično je vrlo malo u poredjenju sa medjuatomske razmacima ( $r_{AB}$ ), ne samo pri  $T=0$  nego i u oblasti niskih temperatura. Izuzetak čine kvantni kristali (u osnovnom  $He^3$  i  $He^4$ ) [7]. Mi se ne možemo duže zadržavati na odlikama ovih inače vrlo interesantnih sistema.

Tri  $T=0$  toplotno kretanje (toplotne oscilacije) narušava idealnu pravilnost kristalne rešetke - uspostavlja se prva vrsta ravnotežnih, svojstvenih defekata. Oblik medjučestičnih potencijala odgovoran je za pojavu toplotnog širenja pri zagrevanju [4]. Toplotno širenje je u opštem slučaju anizotropno i uzrok je postepenog deformisanja "idealnog" prototipa strukture (za  $T=0$ ). Toplotno kretanje i neravnomerna raspodela energije toplotnog kretanja po sastavnim česticama uslovljavaju pojavu novih termički indukovanih defekata: jedan broj atoma (jona) napušta svoje "čvorne položaje" u rešetki obrazujući vakancije (praznine) i prelazi u medjučvorne (intersticijske) položaje [4]. Na svakoj temperaturi u datom kristalu postoji ravnotežna koncentracija defekata: stvaranje defekata praćeno je njihovim rekombinovanjem (iščezavanjem) i difuzijom kroz kristal.

Ovo narušavanje uredjenosti kristalne rešetke uvećava

se sa porastom temperature: kristal se približava temperaturi kad kristalohemijska struktura, koja karakteriše čvrsti kristal, iščezava potpuno i dolazi do faznog prelaza čvrsto-tečno stanje (topljenje) ili čvrsto telo - gas (sublimovanje). Kako je pomenuto, u redjim slučajevima može doći i do obrazovanja tečnih kristala.

Za neke supstancije karakteristično je da zagrevanje (neki put uz sadejstvo promene drugih parametara kao što je pritisak ili jačina električnog polja) može da izazove promenu u kristalohemijskoj strukturi. Dolazi do strukturnog faznog prelaza pri kome jedna polimorfna modifikacija supstancije prelazi u drugu.

Pitanje dinamike kristalne rešetke koja svaki savršeni kristal prevodi u realni, defektni kristal (ne vodeći računa o drugim neravnotežnim strukturnim defektima [ 4 ] ) kao i pitanje varijeteta strukturnih faznih prelaza [ 8 ] i samih procesa faznih prelaza [ 9 ] ostaje van okvira ovog prikaza - struktura kondenzovanih sistema. Odnosi o kojima je bilo reči u ovom paragrafu prikazani su šematski na sl. 4.

#### 4. Neka pitanja vezana za kristalohemijsku strukturu

Jedna specifičnost jonskih kristala i kristala sa polarnim vezama (dielektrika) jeste mogućnost uspostavljanja kristalohemijskih struktura bez centra simetrije: antipolarnih i polarnih kristala. Primetimo odmah da termini i klasifikacija u ovoj oblasti nisu ujednačeni [ 10, 11, 12 ] i da smo u ovom, opštem pregledu usvojili najjednostavniji pristup. Takva, osnovna klasifikacija dielektrika prikazana je na sl. 5.

Najširu grupu polarnih kristala sačinjavaju piezoelektrici. To su kristali čiji je spontani električni moment nerazdvojno povezan sa kristalohemijskom strukturom; veličina ovog momenta može se promeniti pod dejstvom mehaničkih napona i električnog polja, ali se piezoelektrični kristal ne može prepolarizovati. Užu klasu polarnih kristala čine piroelektrici, koji su u isti mah i



piezoelektrici, a odlikuju se time da im se spontana polarizacija primetno menja sa promenom temperature. Još užu grupu polarnih kristala čine feroelektrici. Oni su u isti mah piro- i piezoelektrici, ali se za razliku od ovih odlikuju time da ih električno polje može prepolarizovati.

Feroelektrici i antiferoelektrici (antipolarni dielektrici) odlikuju se postojanjem jednog ili više ravnopravnih pravaca u kristalnoj strukturi, duž kojih se može javiti odstupanje od centrosimetričnosti u dva različita smeru. Prirodna posledica ovakve ekvivalentnosti različitih smerova jeste spontana pojava električnih domena na koje se deli odgovarajući kristal. Uočimo da je domenska struktura nastala na ovaj način (ne upuštajući se u detalje [10,11]) uzrok nesavršenosti realnog dielektrika, čiji prototip strukture može da bude savršen. Dalje, ekvivalentnost različitih smerova (i pravaca) orijentacije spontanog momenta kod feroelektričnog kristala i lokalnih električnih momenata kod antiferoelektričnih kristala dozvoljava prepolarizovane odnosno polarizovanje ovih kristala u električnom polju.

Primetimo na kraju da je termin feroelektrik oznaka za električno uredjene faze kristalnih dielektrika. Ova uredjenja postoje samo u ograničenoj oblasti temperatura, koja odgovara oblasti postojanja date polimorfne modifikacije ili čak užoj temperaturskoj oblasti promena temperature (a neki put i sadejstvo drugih spoljašnjih faktora) dovodi (obično pri zagrevanju) do iščezavanja pomenute električne uredjenosti i do faznog prelaza u paralelektrično stanje [10,11].

Na sl. 6. prikazan je, primera radi, kristalohemijska struktura barijum titanata  $BaTiO_3$ , sl. 6a. i 6b. slikovito prikazuju razliku feroelektrične i paraelektrične faze.

## 5. Elektronska struktura kristala

Jedan partikularni tip kristalohemijske strukture (polimorfni oblik) date supstancije rezultat je određene ravnoteže unutrašnjih faktora (interakcije koje dovode do različitih međučestičnih veza) i spoljašnjih faktora (temperatura, pritisak i spoljašnja polja). U formiranom, stabilnom kristalnom obliku sve sastavne čestice (atomi, joni) podvrgnuti su određenim promenama elektronske strukture u poredjenju sa onom, koja se može pripisati slobodnim česticama. Uprošćeno govoreći elektroni svih atoma i jona mogu se svrstati u tri osnovne grupe (slično kao u atomskoj spektroskopiji i fizici molekula, ali sa drugim značenjem). To su

1. valentni ("periferni", s- i p-) elektroni, preko kojih se ostvaruju međučestične veze u kristalu a koji mogu biti manje ili više delokalizovani u odnosu na čestice, koje povezuju odnosno kolektivizovani u jedinstveni elektronski "kolektiv" u kristalu (razlika uslovljena prirodom kristala ali i usvojenim stanovištem - poznata "band-bond" dilema);

2. elektroni sa unutrašnjih nepopunjenih (d- i f-) orbitala, koji su većim delom ili potpuno lokalizovani na odgovarajućim atomima ili jonima a daju primetan doprinos interakcijama u kristalu i

3. elektroni sa unutrašnjih (i zaklonjenih) popunjenih orbitala, koji vrlo malo učestvuju u intrakristalnim interakcijama, ali savremena fizika čvrstog stanja može da dokaže ovo učešće i da na osnovu promena u ovoj "unutrašnjoj" oblasti elektronskog omotača izvuku zaključak sumarnim interakcijama u kristalu.

Na priloženim sl. 7. i 8. gornje izlaganje reprodukovano je odgovarajućim šemama. Prva šema odnosi se na periferne elektrone. Uprošćeno govoreći, energijski spektar ovih elektrona određuje jednu od osnovnih podela čvrstih tela podelu na provodnike, poluprovodnike i izolatore (dielektrike). Mi se nećemo zadržavati na odlikama energijskih spektara ovog dela elektronskog podsistema, koji leži u osnovi pomenute podele, Ceo skup problema vezan za ovo

pitanje nužno ostaje van okvira ovog pregleda.

Druga šema (sl. 8) odnosi se na unutrašnje elektrone. Kao što smo periferne elektrone povezali sa električnim transportnim osobinama kristala, tako unutrašnje elektrone možemo povezati sa magnetnim osobinama (u drugi plan dolaze pitanje boje, luminescencije i dr.). Očevidno, ovakvim pristupom izvršili smo dalje uporošćavanje prave slike koja odgovara realnim kristalima.

Zadržaćemo se još na levoj strani sl. 8. Primetimo prvo da su dijamagnetizam i polarizacioni paramagnetizam (Dorfmanov paramagnetizam, koji je uvek maskiran dijamagnetizmom) vezani ne samo za unutrašnje nego i za valentne ("sparene") elektrone u kristalima. Drugo, upravo pomenuti paramagnetizam kao i paramagnetizam (i boja) atoma (i jona) sa nepopunjenim orbitalima (prelazni metali i razne zemlje) vezani su oznakom "efekti kristalnog polja". U pitanju je jedno široko područje fizike čvrstog stanja u kome se na poseban način kroz odgovarajuće magnetne osobine ispoljava uticaj koordinacionog okruženja na orbitale elektrona u atomima: na "deformisanje" elektronskog omotača (Dorfmanov i Van Vleck-ov paramagnetizam), na "zamrzavanje" orbitalnih momenata i na veličinu spinskog momenta [ 14 ] .

## 6. Magnetna struktura kristala

Desna strana sl. 8. sadrži oznaku "uredjeni podsistemi" i odnosi se na kristale koji sadrže atome prelaznih 3d-metala i redkih zemalja. Interakcija razmene medju magnetnim momentima, koji odgovaraju ovim elektronima (u prvoj aproksimaciji zanemarujemo ostale, slabije interakcije [ 14 ] ) dovodi do spontanog uspostavljanja magnetne uredjenosti u kristalu. Postoje različiti tipovi ovog uredjenja - različite magnetne strukture kristala. Ne upuštajući se, kao ni u prethodnim delovima teksta, u potpune opise magnetnih struktura pomenućemo samo:

- Feromagnetizam i feromagnetnu strukturu koja sadrži

jednu magnetnu rešetku obrazovanu od paralelno orijentisanih magnetnih momenata,

- antiferomagnetizam i antiferomagnetnu strukturu, koja sadrži dve kolinearne, antiparalelne feromagnetne rešetke, zbog čega je rezultujući spontani magnetni moment kristala jednak nuli i

- feromagnetizam i feromagnetnu strukturu, obrazovane od dve nejednake kolinearne, antiparalelne rešetke, koje se uzajamno samo delimično kompenzuju, tako da je rezultujući spontani magnetni moment različit od nule.

U vezi sa ovim primetimo da (kao kod feroelektričnih kristala) simetrija kristalohemijske strukture dozvoljava orijentisanje magnetnih podrešetki u jednom ili više pravaca u odnosu na datu strukturu a u oba smera u svakom pravcu. Ne upuštajući se u pojedinosti primetimo da ova mogućnost dovodi do pojavljivanja magnetnih domena i domenske gradje kristala, koja sa stanovišta savršenosti strukture znači pojavu odredjenog tipa nesavršenosti. Primetimo da kod feromagnetika postoji mogućnost da se takav polidomenski uzorak premagnetiše, da se obrazuje jedan monodomenski objekt. Kod antiferomagnetika i feromagnetika stanje je složenije i mi se na tom pitanju ne možemo zadržavati [ 14 ].

Pomenućemo još da su pomenute magnetne strukture vezane za odredjenu temperatursku oblast, koja se podudara sa temperaturskom oblašću u kojoj postoji odgovarajuća polimorfna modifikacija date supstancije - magnetika ili je u pitanju uže temperatursko područje. U opštem slučaju zagrevanje magnetika, koji se odlikuje magnetnom uredjenošću, povlači smanjenje ove uredjenosti i na jednoj odredjenoj temperaturi bilo da dolazi do strukturnog faznog prelaza, bilo da se održava postojeća polimorfna modifikacija, nastaje odgovarajući magnetni fazni prelaz - iščezava magnetno uredjena faza i obrazuje se neuredjena, paramagnetna faza [ 14 ].

Na sl. 9. dati su primeri za magnetne strukture na sl. 9.a. prikazana je magnetna struktura gvoždja i na sl. 9.b. magnetna

struktura ferooksida  $\text{FeO}$  a na sl. 9.c. magnetna struktura mangan oksida  $\text{MnO}$ . Ova dva poslednja magnetika imaju istu kristalohemijsku strukturu (tipa  $\text{NaCl}$ ). Medjutim, oni imaju različite antiferomagnetske podrešetke: kod  $\text{MnO}$  magnetne podrešetke paralelne su ivici kocke, kod  $\text{FeO}$  magnetne podrešetke su paralelne prostornoj dijagonali kocke. Pored toga, za oba kristala magnetna jednačina ćelija veća je od kristalohemijske jednačine ćelije osam puta. Ovakav odnos magnetne i kristalohemijske strukture kod pomenutih supstanci predstavlja samo jedan primer za opšti slučaj odnosa ovih struktura (problem komenzurabilnosti).

## 7. Feroični kristali

Feroelektrični i feromagnetni kristali pomenuti u prethodnom tekstu mogu se zbog specifičnosti svoje strukture razvrstati u jednu posebnu grupu kristala - u feroične kristale [12]. Zajedno sa feroelastičnim kristalima oni obrazuju primarne feroične kristale (sl. 10). Feroelastici su, sasvim kratko, svojevrsan analogon feroelektrika i feromagnetika. Oni su spontano deformisani, pri čemu se spontana deformacija definiše u odnosu na prototip savršene nedeformisane strukture [12]. Smer deformacije može se menjati dejstvom spolja priključenih mehaničkih napona. Slično magnetnom i električnim domenima kod ovih kristala postoje domeni sa deformacijama različitog znaka, itd.

Drugu grupu sačinjavaju sekundarni feroični kristali. Oni se mogu dalje podeliti na dve uže grupe. Jednu sačinjavaju ferobimagnetici, ferobielektrici i ferobielastici. Zajednička odlika ove tri vrste kristala jeste velika anizotropija (magnetna, dielektrična) odnosno elastična). Ferobimagnetici su kristali sa antiferomagnetnom strukturom u obliku polidomenskih uzoraka koje bilo magnetno polje, bilo mehanički naponi mogu prevesti u monodomensko stanje. Ferobielektrici su kristali sa antiferoelektričnom strukturom, koje bilo električno polje, bilo mehanički naponi mogu prevesti u

monodomensko stanje. Najzad, ferobielastici su kristali kod kojih je svojstvena pojava blizanaca. Dejstvo mehaničkih napona stimuliše porast jednog blizanca na račun drugog i obrazovanje monolitnog uzorka.

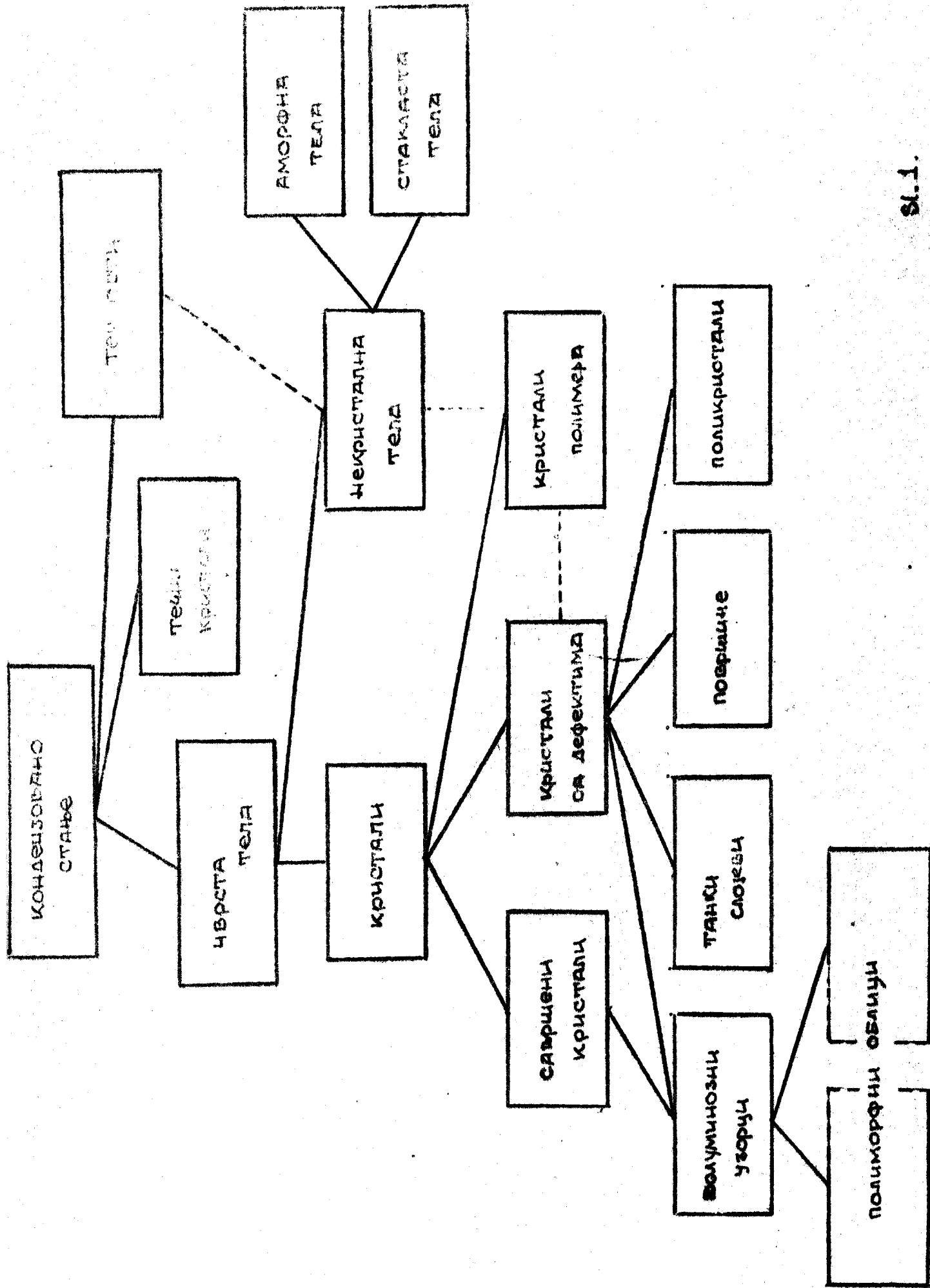
U grupu sekundarnih feroičnih kristala spadaju još tri vrste kristala. Prvo su feroelastoelektrici. Ukratko, to bi bili piezoelektrični kristali, koji se ne mogu prepolarizovati samo dejstvom električnog polja, ali se mogu prepolarizovati simultanim dejstvom mehaničkih napona i električnog polja. Slično vredi za feromagnetoelastike, Najzad, feromagnetoelektrici su takvi kristali u kojima električno polje indukuje magnetizaciju a magnetno polje indukuje električnu polarizaciju.

Na kraju ovog prikaza feroičnih struktura zadržavamo se na još jednom pitanju - pitanju koegzistencije primarnih feroičnih stanja. Postoje primeri koji ukazuju na mogućnost takve simultane uredjenosti. Posebno su interesantni feroelektrici-feromagnetici (senjetomagnetici) [11], koji na poseban način ilustruju kako složenost struktura čvrstih tela, tako i složenost interakcija u čvrstim telima.

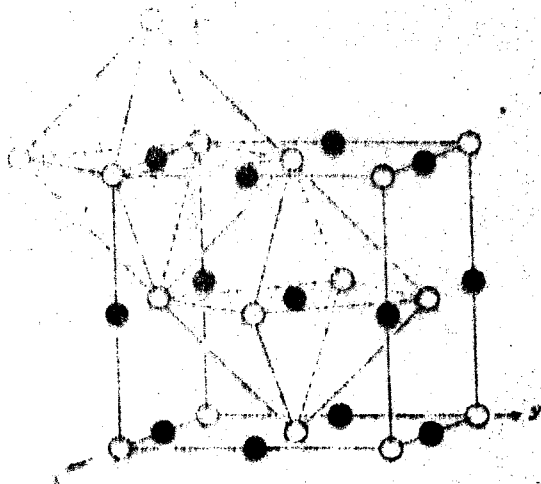
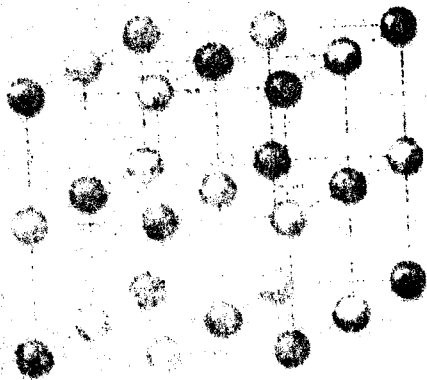
#### Literatura

1. Chandrasekhar S., Liquid Crystals, Cambridge Univ. Press, London, 1977.
2. Perepechko I.I., Vvedenie v fiziku polimerov, "Himiya", Moskva, 1978.
3. Megaw H.D., Crystal Structures: A Working Approach, W.B. Saunders Co., London, 1973.
4. Kittel C., Introduction to Solid State Physics, John Wiley, New York, 1976.
5. Soviemennaya Kristallografiya, T.1., B.K. Vainshtein, Simmetriya Kristallov. Metody strukturnoi kristallografii, "Nauka", Moskva 1979.

6. Sovremennaya Kristallografiya, T.2., B.K. Vainshtein, V.M. Fridkin i V.L. Indenbom, Struktura Kristallov, "Nauka", Moskva, 1979.
7. na primer: Kvantovye kristally, Sbornik statei, red. S.V. Vonsovskii, "Mir", Moskva, 1975 (predgovor i prvi članak).
8. Rustin Roy, A. Syncretist Classification of Phase Transition, in Phase Transition 1973, ed. H.K. Henisch and R. Roy, Pergamon Press, New York, 1973, pp. 11-27.
9. Rao C.N.R. and Rao K.J., Phase Transitions in Solids, McGraw-Hill, New York, 1978.
10. Lines M.E. and Glass A.M., Principles and Application of Ferroelectrics and Related Materials, Clarendon Press, London, 1977.
11. Poplavko, Yu.M., Fizika dielektrikov, "Vishcha shkola", Kiev, 1980.
12. Aizu K., Phys.Rev. B.2, 754 (1970); J.Phys.Soc. Japan 34, 121 (1973).
13. Sovremennaya kristallografiya, T.4., L.A. Shuvalov i dr., Fizičeskie svoistva kristallov, "Nauka", Moskva, 1981.
14. Solid State Physics, ed. R.Kubo and T.Nagamiya, McGraw-Hill, New York, 1969.

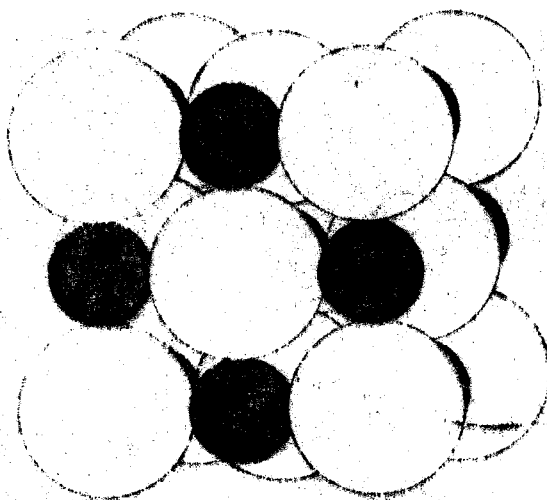




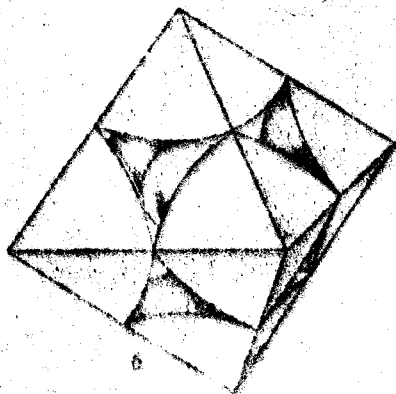


● Na, ○ Cl

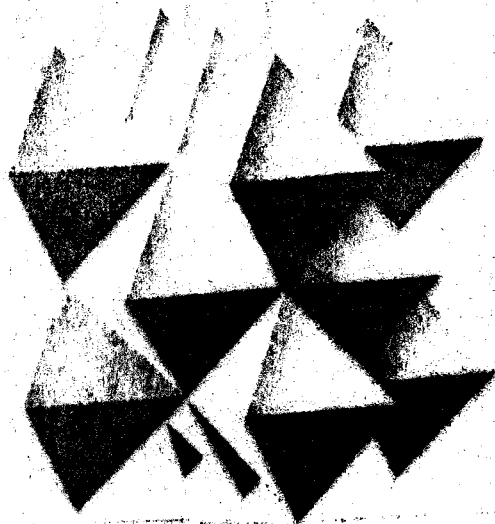
b.



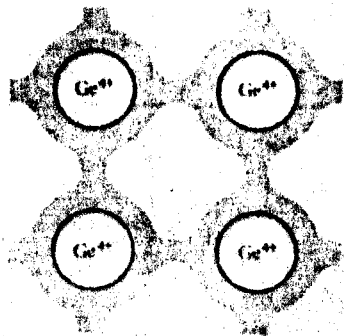
c.



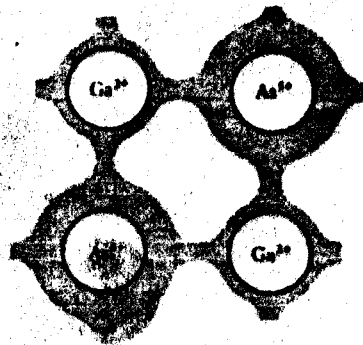
d.



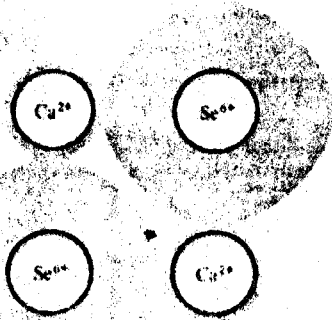
sl. 2.



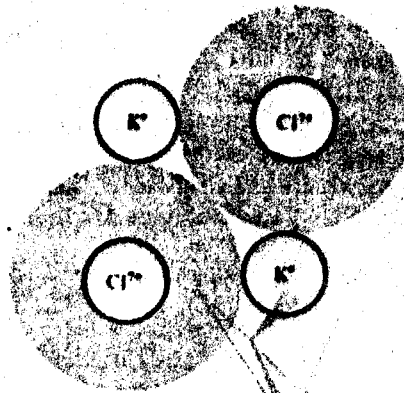
(a)



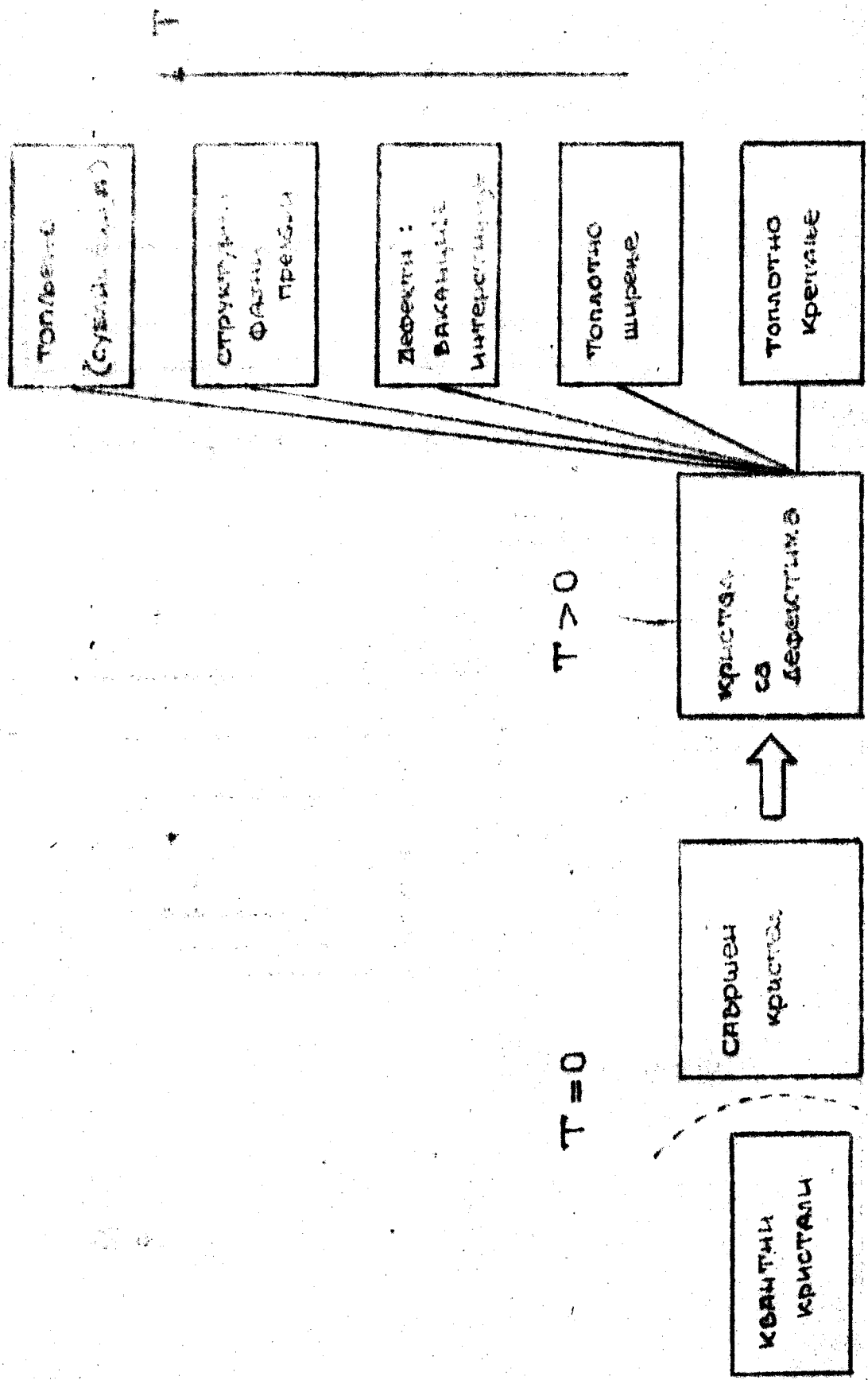
(b)

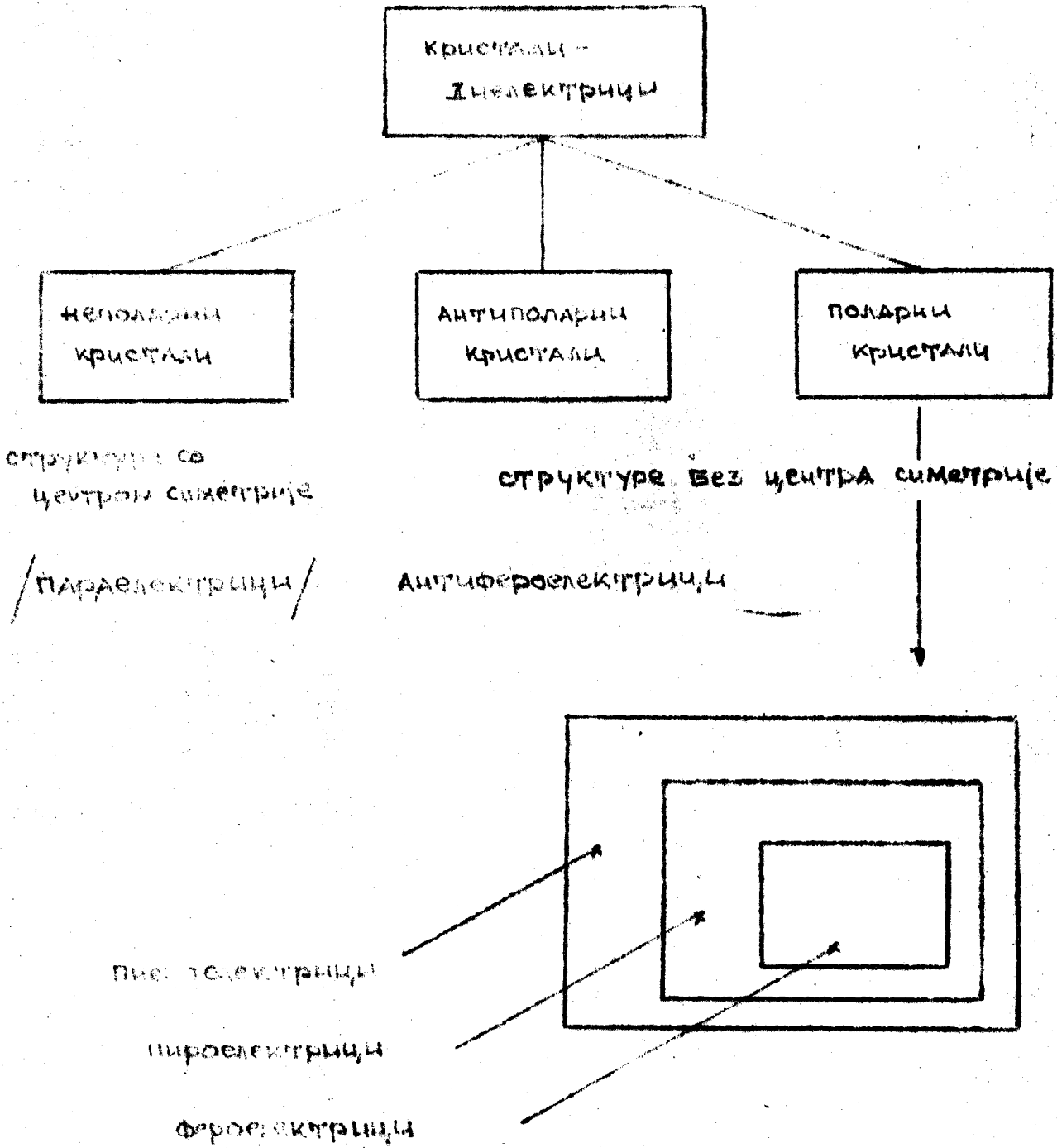


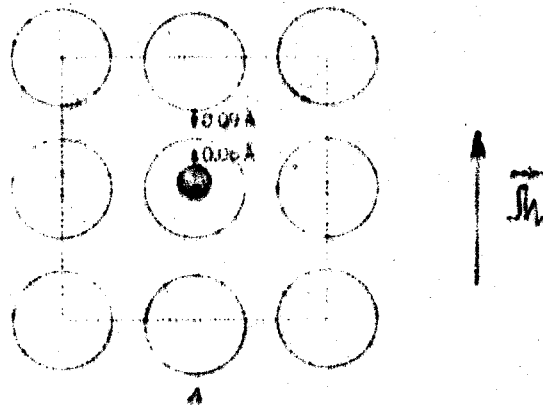
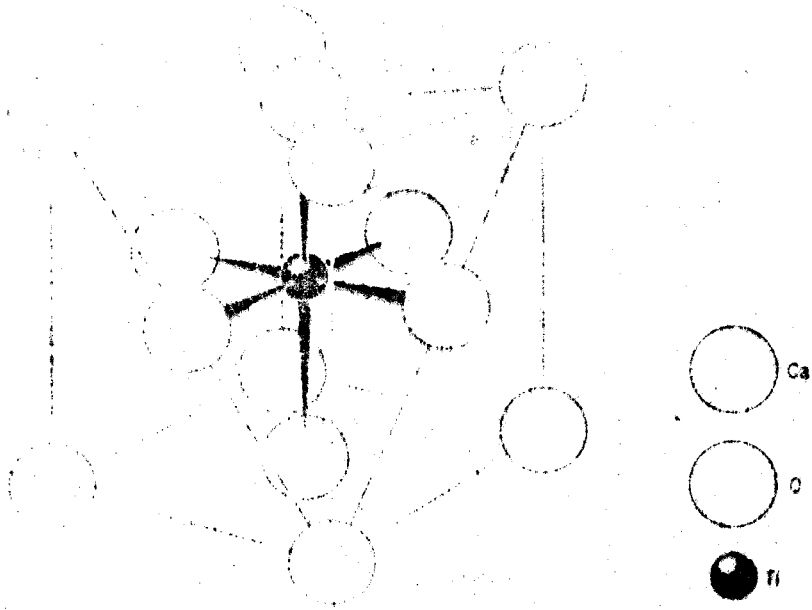
(c)

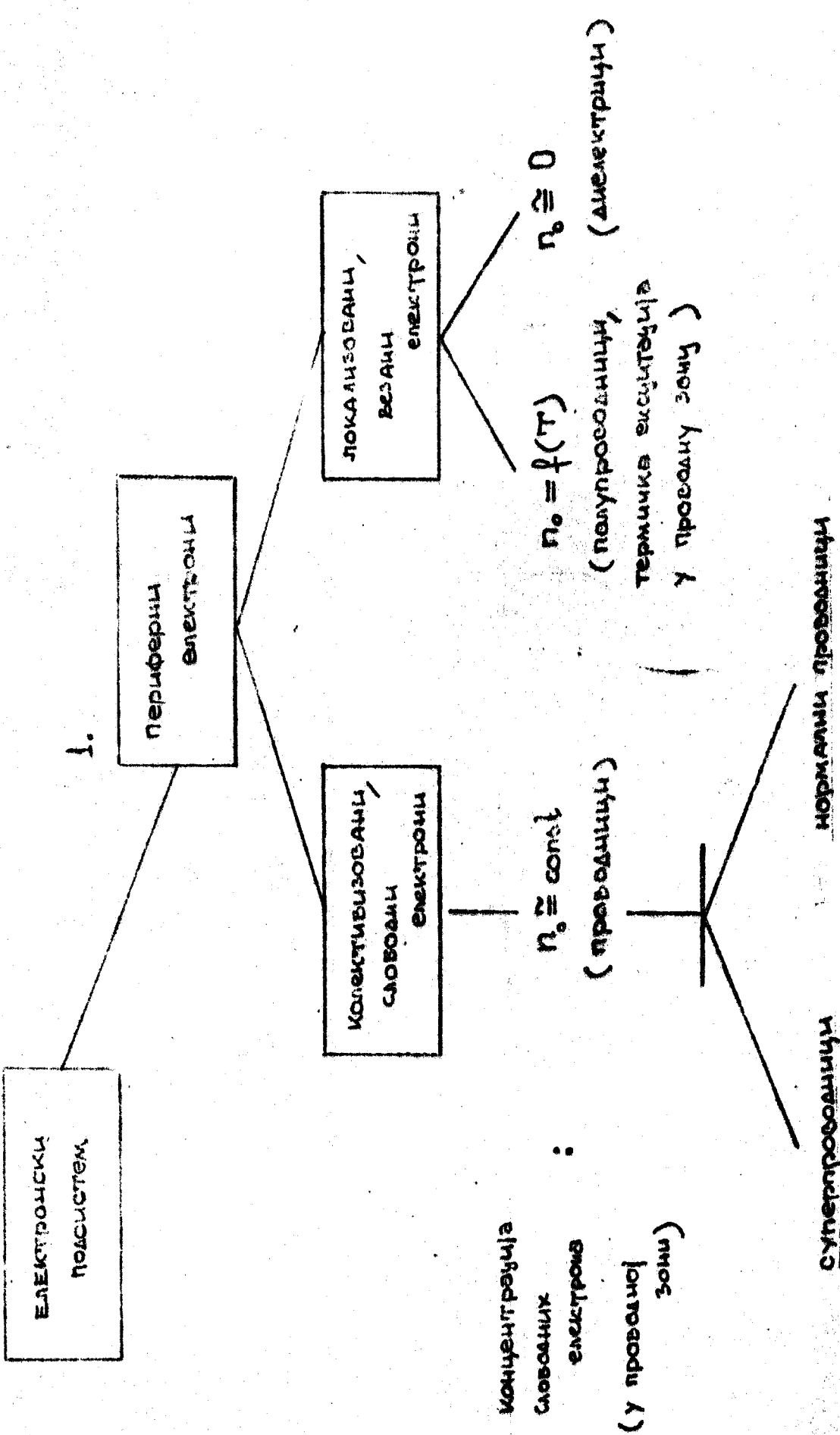


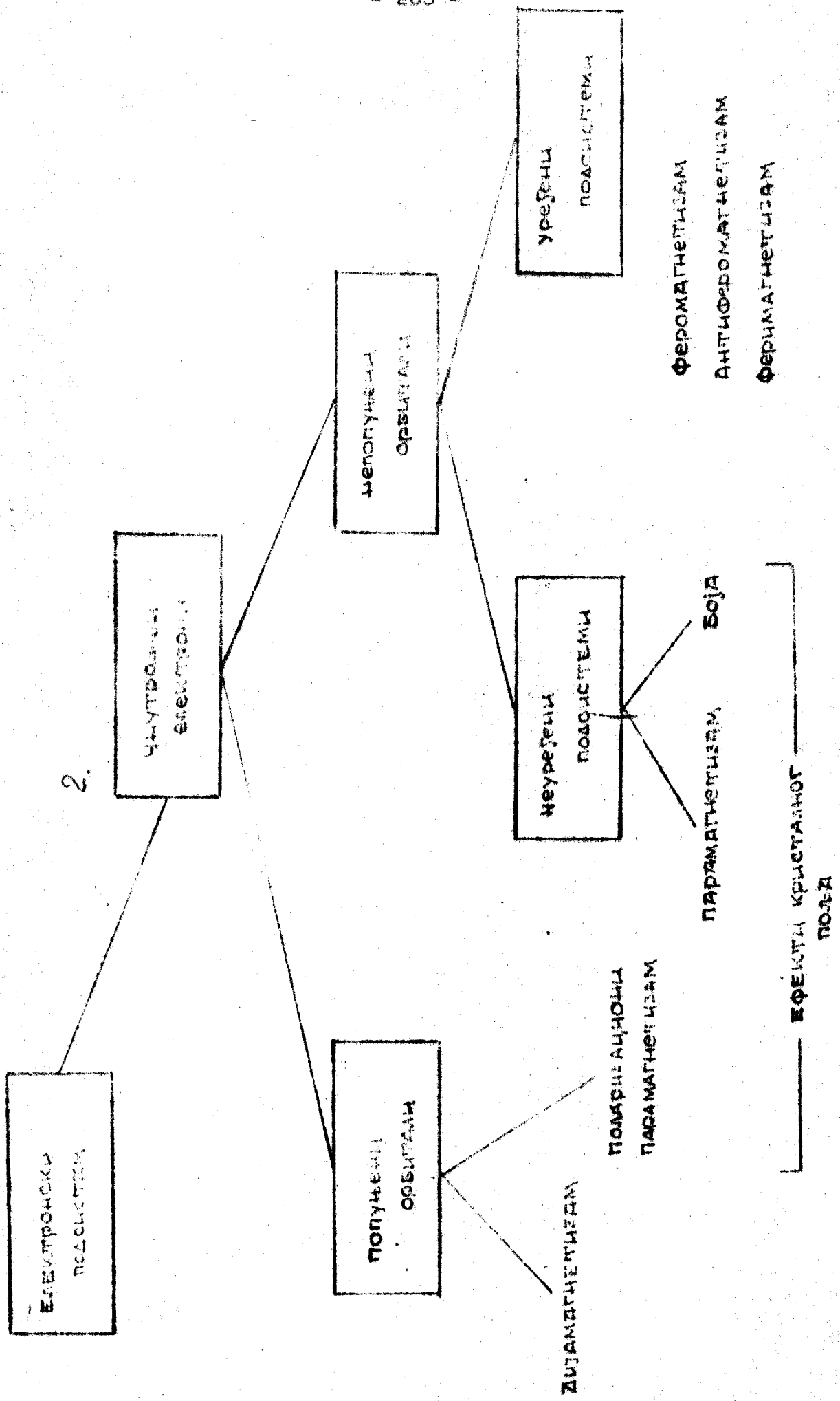
(d)

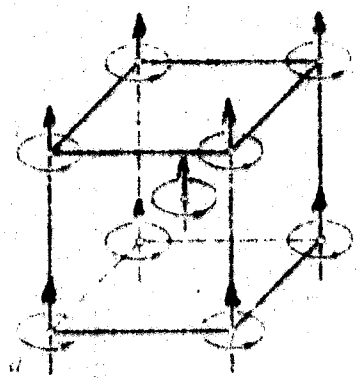




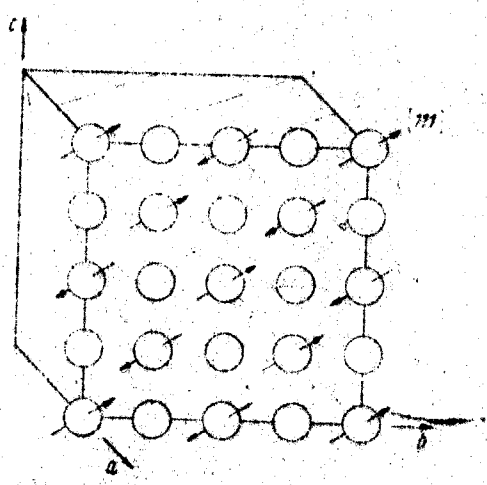




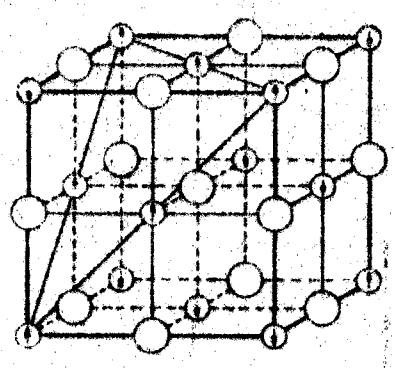




a



b



c



Фероични кристали

ПРИМАРНИ  
Фероични крист.

СЕКУНДАРНИ  
Фероични крист.

Феро-  
МАГНЕТИЦИ

Феро-  
МАГНЕТИЦИ

Феро-  
МАГНЕТО-  
ЕЛАСТИЦИ

Феро-  
ЕЛЕКТРИЦИ

Феро-  
ЕЛЕКТРИЦИ

Феро-  
ЕЛАСТО-  
ЕЛЕКТРИЦИ

Феро-  
ЕЛАСТИЦИ

Феро-  
ЕЛАСТИЦИ

Феро-  
МАГНЕТО-  
ЕЛЕКТРИЦИ

