

Kristali i njihova primjena

Runje, Lara

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:731704>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
Kemijски odsjek

Lara Runje

Studentica 3. godine Preddiplomskog sveučilišnog studija KEMIJA

KRISTALI I NJIHOVA PRIMJENA

Završni rad

Rad je izrađen u Zavodu za opću i anorgansku kemiju

Mentor rada: Izv. prof. dr. sc. Marijana Đaković

Neposredni voditelj rada: dr. sc. Mateja Pisačić

Zagreb, 2023.

Datum predaje prve verzije Završnog rada:

16. lipnja 2023.

Datum ocjenjivanja Završnog rada i polaganja Završnog ispita:

8. rujna 2023.

Mentor rada: Izv. prof. dr. sc. Marijana Đaković

Potpis:

Sadržaj

§ SAŽETAK.....	VII
§ 1. UVOD.....	1
§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME	2
2.1. Proces kristalizacije	2
2.1.1. Topljivost i prezasićenje.....	2
2.1.2. Nukleacija	3
2.1.3. Rast kristala	5
2.1.3.1. Rast kristala iz taline	6
2.1.3.2. Rast kristala iz plinske faze	7
2.1.3.3. Rast kristala iz otopine	8
2.1.3.4. Epitaksija.....	9
2.2. Kristali – strukture te fizikalna i kemijska svojstva	10
2.2.1. Simetrija i kristalne rešetke.....	10
2.2.2. Fizikalna svojstva kristala	12
2.3. Primjena kristala.....	13
2.3.1. Primjena kristala u elektronici.....	13
2.3.2. Primjena kristala u optici	14
2.3.3. Primjena kristala u znanosti i obrazovanju	18
2.3.4. Primjena kristala u farmaceutici	21
2.3.5. Primjena kristala u naprednim tehnologijama	22
2.3.6. Kristali i njihova buduća primjena	23
§ 3. LITERATURNI IZVORI.....	XXV

§ Sažetak

Kristali su materijali koji se ističu svojom pravilnom unutarnjom strukturom ali i često zadivljujućim izgledom. Njihova posebnost leži u tome što atomi, molekule ili ioni od kojih su sačinjeni tvore pravilne ponavljajuće obrasce, poznate kao kristalne rešetke. Ti uzorci se protežu u svim smjerovima, tvoreći raznolike oblike i strukture. Periodična struktura ima duboke posljedice na svojstva kristala. Fizikalna i kemijska svojstva kristala, kao što su tvrdoća, toplinska vodljivost i lomljivost, te kako kristal reagira s drugim tvarima ovise o načinu na koji su atomi postavljeni unutar rešetke. Neki kristali su izuzetno tvrdi, poput dijamanta, dok su drugi fleksibilni i lomljivi poput stakla. Kristali imaju nebrojene primjene u svakodnevnom životu i tehnologiji. Poluvodički kristali se koriste u elektronici za izradu tranzistora i mikročipova. Kristali se koriste i u laserskim uređajima za medicinske, istraživačke i komunikacijske svrhe. U energetici, kristali se primjenjuju u solarnim stanicama kako bi apsorbirali i pretvorili sunčevu svjetlost u električnu energiju. Kristali nisu samo prekrasni za promatrati, već imaju duboko ukorijenjenu važnost u mnogim industrijama i tehnologijama koje oblikuju suvremeni svijet.

§ 1. UVOD

Kristalizacija je proces nastanka kristala iz otopine, taline ili izravnim taloženjem iz plinovite faze. Tijekom kristalizacije manje se čestice postupno grupiraju u pravilne trodimenzijske strukture koje su opisane kristalnim rešetkama.¹

Nastajanje kristala, produkata kristalizacije, odvija se u dva koraka. Prvi korak obuhvaća nukleaciju što podrazumijeva grupiranje čestica otopljene tvari čime se stvaraju klasteri otopljene tvari koji se nazivaju klice nukleacije (preteče kristala). Drugi korak kristalizacije obuhvaća rast kristala. Koncentracija otopljene tvari u otopini mora biti veća od ravnotežne koncentracije otopljene tvari kako bi došlo do nukleacije i rasta kristala, stoga je vrlo važno detaljno poznavanje topljivosti tvari u određenom otapalu pri određenim uvjetima.²

Pravilna struktura kristala ključna je za određivanje njihovih svojstava. Kristali se sastoje od periodične, ponavljajuće mreže atoma, iona ili molekula koji tvore kristalnu rešetku. Takva pravilna struktura kristala definira karakteristična fizikalna i kemijska svojstva koja omogućuju njihovu primjenu u različitim granama industrije i znanosti. Rendgenska difrakcija u jediničnom kristalu jedna je od najčešćih metoda za određivanje molekulskih i kristalnih struktura novih kristalnih materijala, kao i proučavanje njihovih svojstava na atomskoj razini.

Optička svojstva kristala omogućuju njihovu upotrebu u optičkoj industriji, primjerice prilikom izrade leća, prizmi i optičkih vlakana. Električna svojstva kristala ključna su za razvoj elektroničkih komponenata poput tranzistora, dioda i integriranih krugova. Kristali imaju i ključnu ulogu u farmaceutskoj industriji jer razumijevanjem kristalnih struktura aktivnih tvari u farmaceutskim pripravcima pospješuje se formulacija i proizvodnja lijekova. Kontrolom uvjeta kristalizacije (kao što su na primjer tlak, temperatura ili odabir otapala) aktivnih farmaceutskih tvari dolazi do nastanka kristala željenih svojstava što posljedično omogućuje precizno doziranje, kontrolirano otpuštanje aktivne tvari, poboljšava topljivost i stabilnost lijeka te se povećava bioraspoloživost. Sve to zajedno doprinosi razvoju sigurnijih, učinkovitijih i stabilnijih farmaceutskih proizvoda.

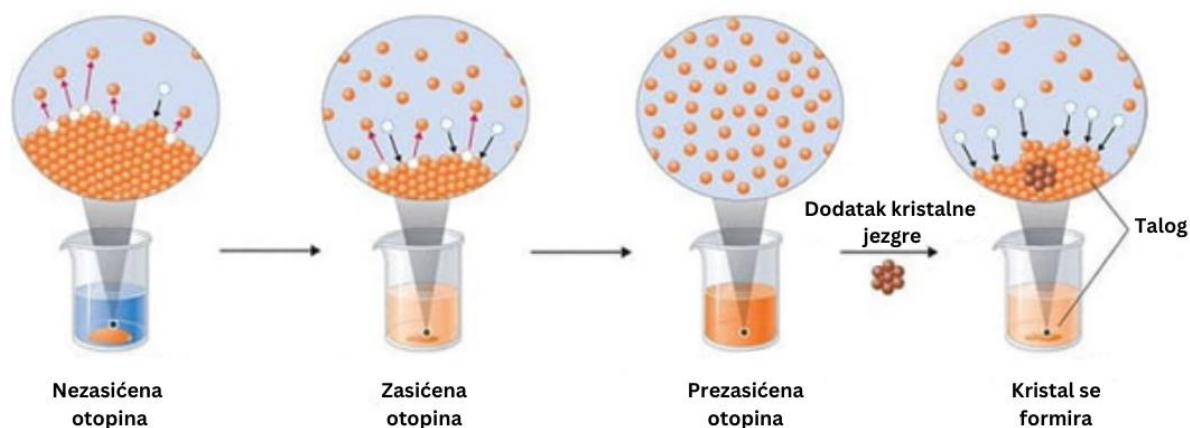
Razumijevanje suodnosa strukture i fizikalnih i kemijskih svojstava kristalnih tvari temelj je za potencijalnu primjenu kristala u različitim tehničkim, industrijskim i znanstvenim područjima, te omogućuje daljnji razvoj (kristalnih) materijala i tehnologija s poboljšanim svojstvima i širim spektrom primjene.

§ 2. PRIKAZ ODABRANE TEME

2.1. Proces kristalizacije

2.1.1. Topljivost i prezasićenje

Topljivost se može definirati preko mase, kao najveća masa tvari koju je moguće otopiti u 100 g otapala, ali i preko koncentracije, kao najveća koncentracija otopine nastale otapanjem tvari u otapalu pri određenim uvjetima tlaka i temperature.³



Slika 1. Proces otapanja i stvaranja kristala iz prezasićene otopine, slika preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru^{4 i 5}

Kada se kruta tvar doda u otapalo u kojem se otapa, čestice otopljene tvari napuštaju površinu krutine pri čemu ih otapalo solvatira, stvarajući u početku nezasićenu otopinu (slika 1). Kada se otopi najveća moguća količina tvari, otopina postaje zasićena. Ako je prisutan višak otopljene tvari, brzina kojom čestice otopljene tvari napuštaju površinu krutine jednaka je brzini kojom se vraćaju na površinu krutine. Prijelaz iz zasićene u prezasićenu otopinu, te samim time i kristalizacija tvari iz otopine može se potaknuti snižavanjem temperature otopine, isparavanjem otapala iz otopine, dodatkom protuotapala i slično.

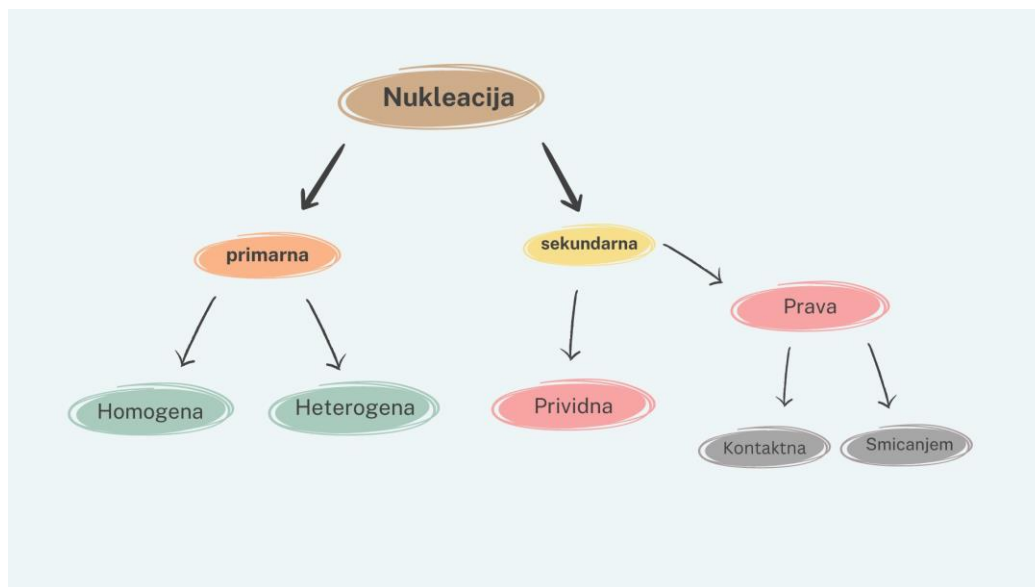
Topljivost većine krutih tvari povećava se porastom temperature. Kada se pripremi zasićena otopina na višoj temperaturi, ona sadrži veću količinu otopljene tvari nego što bi sadržavala na nižoj temperaturi. Međutim, kada se otopina ohladi, smanjuje se topljivost otopljene tvari te otopina postaje prezasićena s obzirom na otopljenu tvar. Prezasićena otopina je nestabilna i može doći do brze kristalizacije, odnosno taloženja viška otopljene tvari.

Drugi način kojim se može potaknuti kristalizacija tvari iz zasićene otopine je dodatak malih čestica otopljene tvari, koje se nazivaju klice ili jezgre kristalizacije, u zasićenu otopinu. Kada se klica otopljene tvari doda u prezasićenu otopinu, čestice otopljene tvari napuštaju otopinu, odnosno, vežu se za površinu kristalne jezgre te tvore kristalni talog (slika 1). Pritom se ponovno uspostavlja dinamička ravnoteža i sprječava se daljnja promjena neto količine otopljene tvari. U takvoj prezasićenoj otopini dolazi do kristalizacije, tj. formiranja i rasta kristala.⁵

2.1.2. Nukleacija

Nukleacija je prvi proces koji se događa u formiranju kristala, u kojem se mali broj čestica pravilno orijentira i tvori klicu (jezgru), na koju se vežu čestice otopljene tvari što uzrokuje rast kristala. Nukleacija može biti primarna ili sekundarna (slika 2).⁶

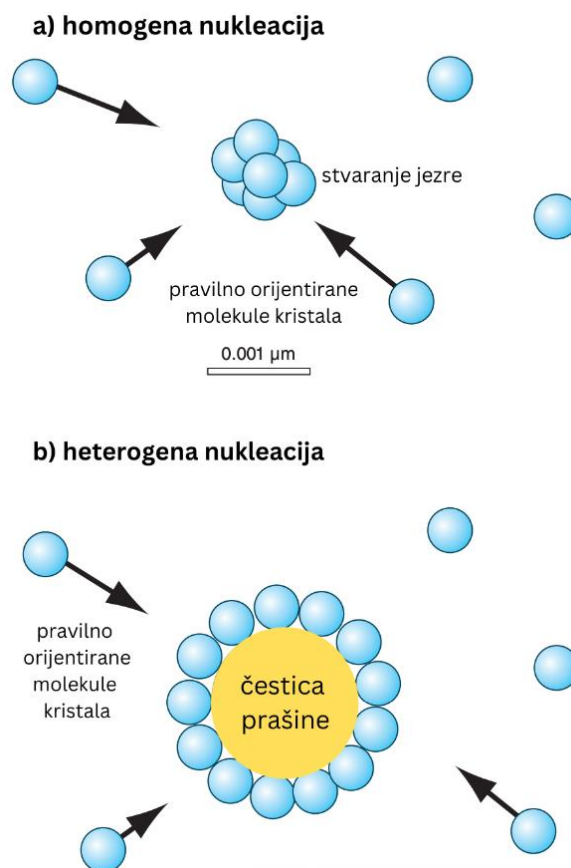
Primarna nukleacija je klasični oblik nukleacije. Javlja se pri velikoj prezasićenosti zbog čega jačaju nevezne interakcije među česticama otopljene tvari. Proces primarne nukleacije se dalje dijele na heterogene i homogene (slika 3.). U slučaju homogene nukleacije, nukleacija je spontana i neovisna o prisustvu drugih tvari u otopini. Čestice otopljene tvari pravilno se orijentiraju i dovode do stvaranja jezgre (klice) kristala. Heterogena nukleacija ne događa se spontano već je inducirana prisustvom stranih tvari u otopini kao što su čestice prašine ili stijenka posude. One djeluju kao ishodište prema kojem atomi, ioni ili molekule kristala postaju ispravno orijentirani.⁶



Slika 2. Shematski prikaz vrsta nukleacije i mehanizmi prave sekundarne nukleacije

Sekundarna nukleacija je proces nukleacije koji je rezultat prisutnosti klica kristala u otopini. Veličina klica kristala utječe na sekundarnu nukleaciju. Na primjer, veliki kristali klica stvaraju više sekundarnih jezgri u sustavu nego mali kristali klica zbog njihove veće vjerojatnosti kontakta i energije sudara. Postoji nekoliko vrsta sekundarne nukleacije s obzirom na način na koji se ona postiže:

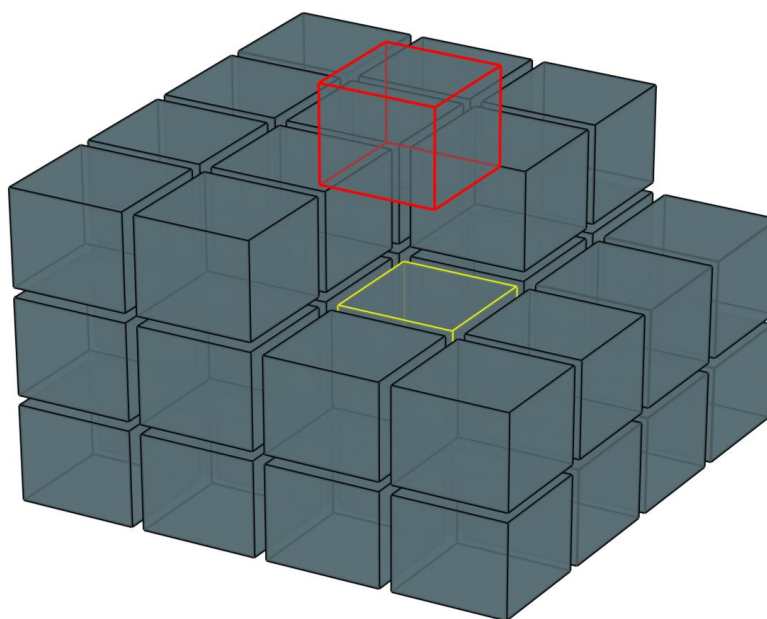
1. Pravidna sekundarna nukleacija postiže se kada se jezgre unose u sustav zajedno s onečišćenjima i ona uključuje sijanje kristalnom prašinom (engl. *dust breeding*).
2. Prava sekundarna nukleacija podrazumijeva nastanak novih jezgri kristalizacije interakcijom između kristalne klice i otopine. Najzastupljeniji mehanizmi prave sekundarne nukleacije su kontaktna nukleacija i nukleacija smicanjem. Kontaktna nukleacija je najdominantnija u kristalizatoru s miješanjem pri čemu je nukleacija uzrokovana sudarom kristal-kristal, sudarom kristal-mješalica ili sudarom stijenke kristala i kristalizatora.⁷ Nukleacija smicanjem uzrokovana je smicanjem tekućine i može podijeliti u tri skupine:
 - formiranje jezgri iz čvrste faze, tj. iz klice kristala,
 - stvaranje jezgri iz otopljene tvari u otopini,
 - stvaranje jezgri iz prijelazne faze na površini kristala.⁷



Slika 3. Prikaz homogene i heterogene nukleacije, slika preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru⁸

2.1.3. Rast kristala

Rast kristala je povećanje veličine kristala zbog vezanja otopljene tvari u slojevima na površini kristala. Otopljene čestice dolaze do rastućih površina kristala difuzijom kroz tekuću fazu. Nukleacija i rast se nastavljaju događati istovremeno dok postoji prezasićenje. Prezasićenje je preduvjet za kristalizaciju. To se može postići različitim metodama, kao što su hlađenje, dodavanje protuotapala, isparavanje otapala, podešavanje pH ili kemijskim reakcijama. Ovisno o uvjetima, ili nukleacija ili rast može biti dominantan proces, a kao rezultat dobivaju se kristali različitih veličina i oblika. Nakon što se prezasićenje iscrpi, sustav postiže ravnotežu, no promjenom uvjeta, kojima se postiže ponovno prezasićenje otopine, može doći do ponovne kristalizacije.¹

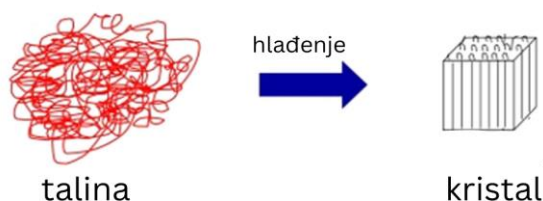


Slika 4. Shematski prikaz rasta kristala. Kristal se sastoji od (plavih) kubičnih čestica na jednostavnoj kubičnoj rešetki. Čestica u tekućini (prikazana crvenim rubovima) pridružuje se kristalu, povećavajući kristal za jednu česticu, spaja se s rešetkom na mjestu gdje će njegova energija biti minimalna, a to je u kutu nepotpunog gornjeg sloja (na vrhu čestice prikazane žutim rubovima). Slika je preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru⁹

2.1.3.1. Rast kristala iz taline

Rast kristala iz taline složen je proces koji uključuje niz koraka koji se odvijaju tijekom hlađenja taline i organiziranja čestica u uređene kristalne strukture. Početna faza rasta kristala iz taline je zagrijavanje tvari do točke taljenja, pri kojoj dolazi do prijelaza iz čvrstog stanja u tekuće stanje, odnosno talinu. U talini, atomi, molekule ili ioni se kreću slobodno i nemaju fiksiranu poziciju. Nakon formiranja taline, slijedi postupak hlađenja. Hlađenje taline uzrokuje smanjenje kinetičke energije molekula, što dovodi do smanjenja njihove pokretljivosti. Kako se talina hladi, molekule se orijentiraju i organiziraju u uređene trodimenzijske strukture. Kako temperatura taline pada, dolazi do pojave mikroskopskih jezgri kristala, odnosno nukleacije. Nukleacija se javlja kada molekule, ioni ili atomi u talini formiraju početne središnje točke kristala. Ove mikroskopske jezgre imaju pravilnu strukturu, ali su vrlo male i nevidljive golim okom. Nakon nukleacije, male kristalne jezgre počinju rasti. To se događa vezanjem molekula

ili atoma na površinu jezgri (klice) kristala. Otpuštanje topline tijekom procesa rasta pomaže u stabilizaciji kristalnih struktura. Rast se nastavlja dok talina nastavlja hlađenje. Oblik i veličina kristala koji nastaju iz taline ovise o mnogim čimbenicima, uključujući brzinu hlađenja, koncentraciju tvari u talini, prisutnost drugih tvari u talini i površinsku energiju kristala.^{10,11}



Slika 5. Formiranje kristala polimera iz taline. Slika je preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru¹²

2.1.3.2. Rast kristala iz plinske faze

Kristali se mogu uzgajati iz pare onda kada se molekule plina vežu na površinu i organiziraju u kristalnu strukturu. Za to je potrebno zadovoljiti nekoliko važnih uvjeta. Pri konstantnoj temperaturi i uvjetima ravnoteže, prosječni broj molekula u plinovitom i čvrstom stanju je konstantan; molekule napuštaju plin i vežu se na površinu istom brzinom kojom molekule s površine ponovno prelaze u plinovitu fazu. Da bi kristali rasli, sustav plin-čvrsto stanje mora biti u neravnotežnom stanju, tako da postoji veliki suvišak molekula u plinovitoj fazi u određenim uvjetima tlaka i temperature. To stanje se naziva prezasićenje. Molekule imaju veću sklonost da napuste plinovito stanje nego da prijeđu u plin, pa se talože na površini spremnika koji se koristi za uzgoj kristala iz pare i pruža površinu na koju će se vezati molekule iz pare i omogućiti rast kristala. Prezasićenje je moguće postići održavanjem kristala na nižoj temperaturi od plina. Kritični korak u rastu kristala je unošenje klice pravilne strukture i orijentacije. Molekule plina radije se talože na površini klice nego na stijenkama spremnika. Nakon što se molekula nađe na površini klice, gibajući se po površini klice ona traži optimalno mjesto za pričvršćivanje. Rast se odvija jedan po jedan sloj. Proces kristalizacije iz plinovite faze vrlo je spor. Kristali se uzgajaju na temperaturama znatno nižim od temperature taljenja

kako bi se smanjila gustoća kristalnih defekata. Prednost rasta iz pare je ta što se ovom metodom mogu uzgajati vrlo čisti kristali, dok je nedostatak dugotrajnost procesa.¹¹

Većina oblaka u atmosferi su kristali leda koji nastaju rastom kristala iz plinovite faze iz molekula vode. Većina kišnih kapljica su kristali kada počnu padati, ali se otapaju tijekom pada prema Zemlji. Sijanje oblaka je postupak u kojem avion raspršuje čestice srebrova jodida (AgI), a služi za poticanje oborina. Kristali srebrova jodida koriste se kao kondenzacijske jezgre jer imaju veliki afinitet prema vodenoj pari i olakšavaju stvaranje oborina. Srebrov jodid privlači vodenu paru, koja se kondenzira na njegovoj površini i formira kapljice ili kristale leda većih oblika. Veće kapljice ili kristali imaju veću vjerojatnost spajanja i rasta, što može rezultirati formiranjem oborina poput kiše, snijega ili tuče. Sijanje oblaka se obično provodi u oblaku koji pokazuje potencijal za oborine, ali koji još nije samostalno aktivirao proces kondenzacije i stvaranje oborina. Postupak sijanja oblaka koristi se u određenim situacijama kada je potrebno povećati količinu oborina ili kontrolirati raspodjelu oborina radi poboljšanja vodnih resursa, poljoprivrede ili ublažavanja suša.¹¹

2.1.3.3. Rast kristala iz otopine

Veliki jedinični kristali mogu se uzgojiti iz otopine. U ovoj tehnici klica kristala je uronjena u otapalo koje obično sadrži oko 10–30 % željene otopljene tvari. Izbor otapala obično ovisi o topljivosti otopljene tvari. Temperatura i pH otopine moraju biti strogo kontrolirani. Metoda je brža od rasta iz plinovite faze, jer postoji veća koncentracija molekula na površini u tekućini u usporedbi s plinom, ali je još uvijek relativno spora.¹¹

Općenito, proces rasta kristala iz otopine uključuje nukleacija i rast kristala. Oblik i veličina kristala mogu biti kontrolirani različitim faktorima. Na primjer, brzo hlađenje ili miješanje otopine može rezultirati manjim kristalima, dok sporije hlađenje ili kontrolirano isparavanje otapala može polučiti veće kristale. Dodavanje određenih supstrata također može utjecati na oblik i veličinu kristala. Tijekom rasta kristala, moguće je da se na površini kristala adsorbiraju drugi spojevi iz otopine, a oni mogu poticati ili inhibirati rast.

2.1.3.4. Epitaksija

Epitaksija je proces rasta kristalnog filma koji se pravilno orijentira na površini drugog materijala. Ovaj postupak se često koristi u industriji za proizvodnju tankih filmova, nanomaterijala i složenih struktura. Postupak rasta kristala na površini čvrste tvari započinje pripremom podloge ili supstrata. Supstrat je obično čvrsti, kristalni materijal s ravnom i glatkom površinom. Na tu površinu se zatim nanosi tanki sloj čestica koje će formirati kristalni rast. Jedan od važnih faktora u rastu kristala na površini čvrste tvari je postizanje epitaksijalne veze između supstrata i novog sloja. Epitaksija se odnosi na usklađivanje kristalne rešetke i orijentacije između supstrata i rastućeg sloja. Ako se supstrat i novi sloj uspješno usklade, kristalna rešetka se nastavlja preko površine supstrat–novi sloj, što rezultira kristalno uređenim slojem.¹³



Slika 6. Primjer epitaksije, rast rutila (TiO_2) na hematitu (Fe_3O_4), slika je preuzeta i prilagođena prema izvoru¹⁴

2.2. Kristali – strukture te fizikalna i kemijska svojstva

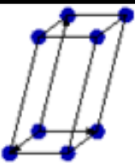
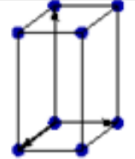
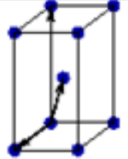
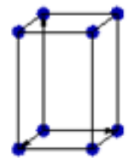
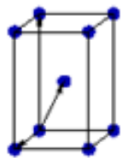
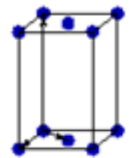
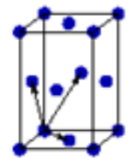
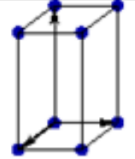
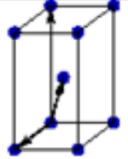
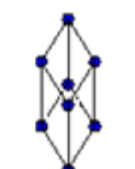
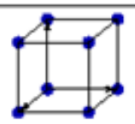
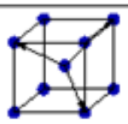
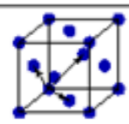
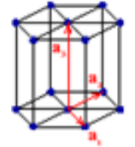
Kristali su tvari koje imaju periodičan raspored atoma, iona ili molekula u prostoru. Javljaju se u različitim veličinama, oblicima te imaju različita svojstva. Zahvaljujući uređenoj strukturi, imaju posebna fizikalna i kemijska svojstva, kao što su lom svjetlosti, električna vodljivost i magnetska svojstva. Zbog toga imaju široku primjenu u mnogim područjima znanosti, tehnologije te raznim granama industrije.

2.2.1. Simetrija i kristalne rešetke

Ključno svojstvo uređenog rasporeda atoma u kristalima je simetrija. U kristalima građevne jedinice mogu biti povezane različitim elementima simetrije kao što su osi rotacije, zrcalne ravnine i centri inverzija. Elementi simetrije prisutni u kristalu utječu na njegov oblik te imaju značajan utjecaj na njegova fizikalna svojstva. S druge strane, operatori simetrije su matematičke operacije koje predstavljaju određene transformacije nad kristalnom strukturom. Oni uključuju rotacije, zrcaljenja, translacije i kombinacije tih elemenata. Translacije se odnose na pomicanje građevnih jedinica (atoma, iona ili molekula) u kristalnoj strukturi tako da atomi zauzimaju identične pozicije u susjednim jediničnim ćelijama. Rotacije se odnose na rotaciju građevnih jedinica kristala oko osi simetrije, pri čemu se kut rotacije određuje brojem 360° , podijeljenim s prirodnim brojem n (1, 2, 3, 4 ili 6). Zrcalne ravnine (ravnine simetrije) preslikavaju građevne jedinice na suprotnim stranama zrcalne ravnine simetrije. Inverzije pomiču svaki atom u drugu poziciju, pri čemu je središte inverzije linija koja spaja stari i novi položaj atoma. Neprave rotacije su kombinacija rotacija i zrcaljenje, odnosno refleksija (rotorefleksije) ili rotacija i inverzija (rotoinverzije).¹⁵

Kristal se može klasificirati prema elementima simetrije koje posjeduje. Svaka kristalna struktura može se svrstati u jednu od 230 prostornih grupa, 32 točkine grupe, 14 Bravaisovih rešetki i 7 kristalnih sustava. Jedinična ćelija je osnovna (strukturna) ponavljajuća jedinica u kristalnoj rešetki čiji oblik određuje kojem od sedam kristalnih sustava kristal pripada. Jedinične ćelije istog oblika mogu imati dodatne atome na stranicama, vrhovima i u središtu, a ti dodatni atomi dijele 7 kristalnih sustava u 14 Bravaisovih rešetki koje predstavljaju moguću trodimenzionalnu konfiguraciju točaka koje se koriste za opisivanje uređenog rasporeda atoma unutar kristala. Svaka točka u rešetki predstavlja jedan ili više atoma prisutnih u stvarnom kristalu.¹⁶ Nadalje, 32 točkine grupe odgovaraju jednoj od mogućih kombinacija elemenata

simetrije (os rotacije, ravnina simetrije (zrcalnih ravnina), točki inverzija i nepravih osi rotacija). Uz dodatak translacijskih elemenata, ukupno postoji 230 prostornih grupa u kojima kristali mogu kristalizirati.¹⁵

Bravaisove rešetke		P	I	C	F
Trikliniski kristalni sustav	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} \neq \alpha_{23} \neq \alpha_{31}$				
Monoklinski kristalni sustav	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$ $\alpha_{12} \neq 90^\circ$				
Rompski kristalni sustav	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Tetragonski kristalni sustav	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Romboedarski kristalni sustav	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} < 120^\circ$				
Kubični kristalni sustav	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Heksagonski kristalni sustav	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = 120^\circ$ $\alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				

Slika 7. Prikaz Bravaisovih kristalnih rešetki, pri čemu je P primitivna ćelija, I volumno-centrirana ćelija, F plošno-centrirana ćelija, C ćelija s česticama na središtima dvije nasuprotne ravnine. Slika je preuzeta i prilagođena prema izvoru¹⁷

2.2.2. Fizikalna svojstva kristala

Fizikalna svojstva kristala izravno su povezana s kristalnom strukturom, odnosno rasporedom atoma, iona i molekula u strukturi, te prisutnošću međumolekulskih interakcija čime je omogućena njihova raznolika primjena. Fizikalna svojstva kristala uključuju optička, mehanička, električna i termička svojstva.¹⁸

Optička svojstva kristala obuhvaćaju njihovu sposobnost da propuštaju, lome ili apsorbiraju svjetlost. Ova svojstva ovise o interakciji svjetlosti s kristalnom strukturom i rasporedom atoma u kristalu.

Proučavanje mehaničkih svojstava kristala uključuje ispitivanje otpornosti ili prilagodljivosti kristala na primjenu vanjski mehaničkih podražaja. Pritom se najčešće ispituje tvrdoća kristala te mogućnost plastične ili elastične deformacije kristala. Ova svojstva povezana su s vezama unutar i između građevnih jedinki (atoma, iona ili molekula) u kristalu te njihovom rasporedu. Tvrdoća kristala odražava otpornost kristala na lokaliziranu trajnu deformaciju, a krti kristali ne mogu apsorbirati puno energije zbog čega ne dolazi do značajne deformirati prije nego što kristal pukne.

S druge strane, deformacije kristala opisuju promjene oblika ili veličine koje se javljaju pod djelovanjem vanjskih sila. Kristali mogu pokazivati elastično ili plastično ponašanje pri deformacijama. Elastičnost se odnosi na sposobnost kristala da se deformira privremeno i povrati u prvobitno stanje kada se ukloni vanjska sila, a plastičnost na trajne deformacije koje se javljaju kada se vanjska sila primjenjuje izvan granica elastičnosti.¹⁹

Električna svojstva kristala odnose se na njihovu električnu provodljivost, dielektrična svojstva ili sposobnost generiranja električnog polja pod vanjskim utjecajem. Ova svojstva ovise o rasporedu naboja u kristalnoj rešetki i interakcijama elektrona unutar nje.²⁰

Termička svojstva kristala obuhvaćaju toplinsku provodljivost, toplinski kapacitet i koeficijent toplinskog širenja. Ova svojstva proizlaze iz vibracija atoma unutar kristala i prijenosa topline kroz njihovu rešetku. Razumijevanje fizikalnih svojstava kristala otvara mogućnost primjene kristala u različitim područjima, kao što su optika, elektronika, energetika i mnoga druga, ali i u znanosti o materijalima. Također nam omogućava dizajniranje materijala s posebnim svojstvima ili optimizaciju kristala za određene namjene.

2.3. Primjena kristala

Kristali su prisutni u raznim područjima ljudskog djelovanja i imaju mogućnost široke primjene zbog svojih jedinstvenih fizikalnih i kemijskih svojstava. Njihova kristalna struktura, koja se sastoji od pravilo raspoređenih atoma ili molekula, odgovorna je za široku funkcionalnost i karakteristike.

2.3.1. Primjena kristala u elektronici

Kristali imaju ključnu ulogu u poluvodičkoj industriji i proizvodnji elektroničkih komponenti. Njihova uređena kristalna struktura omogućuje ostvarivanje električnih svojstava te se stoga mogu iskoristiti za proizvodnju visokoučinkovitih i naprednih elektroničkih uređaja. Uloga kristala posebice je istaknuta u poluvodičkoj industriji i proizvodnji elektroničkih komponenti kao što su tranzistori, diode, integrirani krugovi i senzori.

Poluvodički kristali, poput silicija (Si) ili germanija (Ge), koriste se kao osnovni materijali u proizvodnji elektroničkih komponenta. Njihova atomska struktura omogućuje kontrolu protoka elektrona i stvaranje različitih tipova poluvodičkih spojeva.²¹ Nadalje, tranzistori su jedna od najvažnijih elektroničkih komponenti i temelj modernih digitalnih sustava. Oni omogućuju kontrolu i pojačavanje električnog signala. Tranzistori se izrađuju pomoću poluvodičkih kristala gdje se kontroliranim dodavanjem specifičnih atoma (dopiranje) mijenja električna vodljivost materijala.²² Također, kristalna struktura poluvodičkih materijala omogućuje stvaranje spojeva koji su ključni za rad dioda, komponenti koje omogućuju prolaz struje samo u jednom smjeru. One se sastoje od spoja dvaju različito dopiranih poluvodičkih materijala.²³

Integrirani krugovi (IC) su složeni sklopovi koji sadrže veliki broj elektroničkih komponenti na malenom čipu koji se izrađuje na kristalnom supstratu, obično od silicija, gdje se koriste različite tehnike litografije i dopiranja kako bi se stvorile željene strukture.²⁴

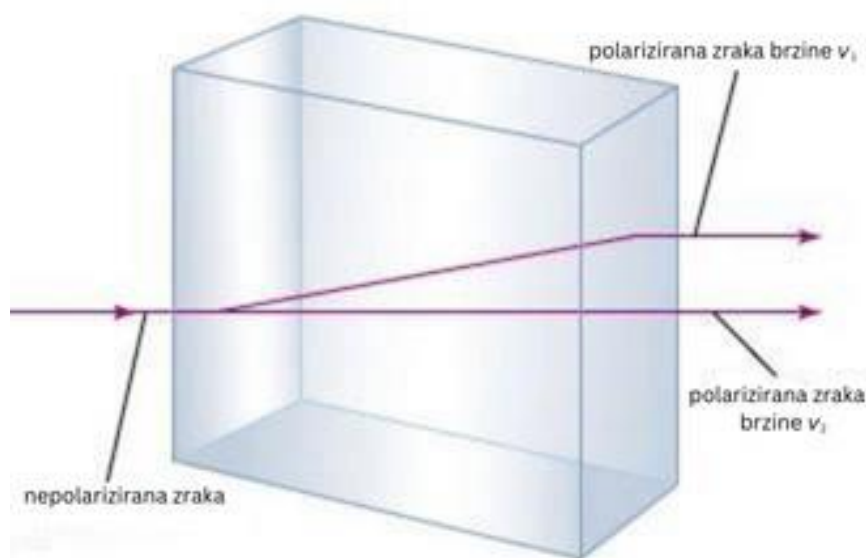
Kristali se također koriste kao osjetljivi materijali u sensorima kako bi reagirali na specifične promjene i omogućili precizno mjerenje i detekciju.²⁵ Senzori su elektronički uređaji koji pretvaraju fizikalne veličine, poput temperature, tlaka ili svjetlosti, u električne signale. Primjer kristala koji se koristi kao senzor je kristal kvarca. Kvarc je poluvodički kristal koji se često koristi kao senzor, posebice u mjeracima temperature, tlaka i frekvencije. Kristal kvarca

ima piezoelektrična svojstva, što znači da može generirati električni naboj kada je izložen mehaničkom stresu ili obrnuto, mehanički titra kada je podvrgnut električnom polju. Ovo svojstvo čini kristale kvarca iznimno osjetljivima na mehaničke promjene i vibracije. Na primjer, kvarc se može koristiti kao temperaturni senzor. Promjena temperature uzrokuje promjenu dimenzija kristala kvarca, što rezultira promjenom u frekvenciji titranja. Ova promjena frekvencije može se precizno izmjeriti i koristiti kao indikator temperature. Kvarc se također koristi kao osjetljivi materijal u sensorima tlaka. Kada se na kristal kvarca djeluje pritiskom, mijenja se njegova geometrija, što dovodi do promjene frekvencije titranja koja se može koristiti za precizno mjerenje tlaka.^{26,27}

2.3.2. Primjena kristala u optici

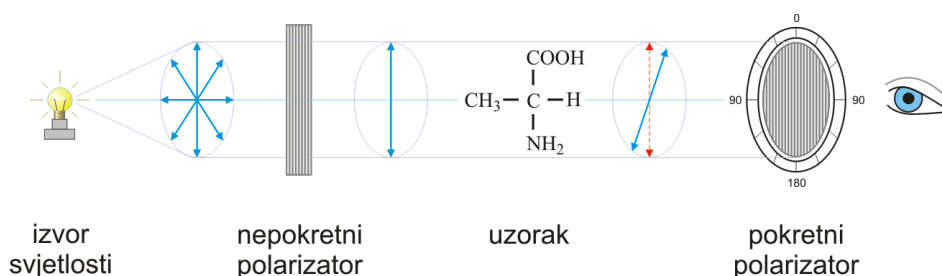
Kristali su neizostavni materijali u optici zahvaljujući svojim specifičnim optičkim svojstvima. Njihova unutarnja struktura, raspored atoma i interakcije omogućuju finu manipulaciju svjetlosti na različite načine. Ova svojstva ključna su za razvoj optičkih komponenti i tehnologija koje imaju široku primjenu u različitim područjima.

Kristali imaju anizotropna optička svojstva te stoga mogu polarizirati svjetlost. To znači da svjetlost prolazi kroz kristal ovisno o njegovoj kristalnoj strukturi u određenim smjerovima.²⁸ Polarizacija se postiže putem loma ili selektivne apsorpcije svjetlosti. Anizotropna struktura kristala omogućuje da svjetlost prolazi kroz njih s dvije različite brzine, ovisno o polarizaciji svjetlosti i smjeru propagacije što rezultira podijeljenim snopom svjetlosti na dva polarizacijski odvojena snopa. Ovaj fenomen naziva se dvojni lom. Manipulacijom smjera propagacije ili odabirom odgovarajućih kristala, moguće je polarizirati svjetlost ili analizirati polarizaciju svjetlosti.²⁹



Slika 8. Dvostruka refrakcija pokazuje dvije izlazne zrake kada jedna svjetlosna zraka pogodi kristal pod odgovarajućim kutem. Ovaj učinak nastaje zbog razlike u brzini svjetlosti koja putuje duž različitih osi u kristalu. Slika je preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru³⁰

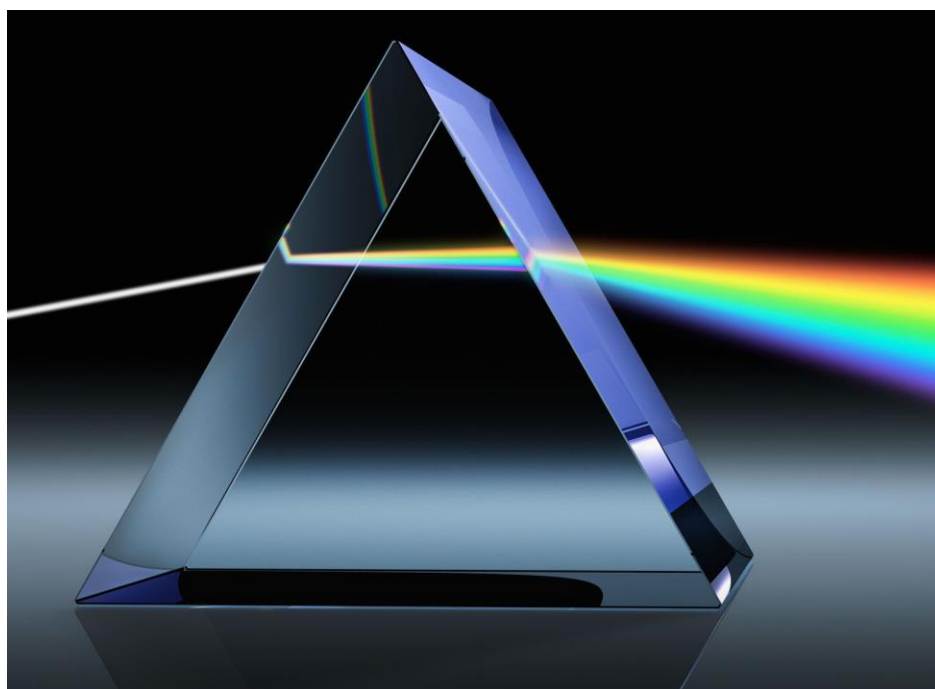
Materijali mogu selektivno apsorbirati svjetlost s određenom polarizacijom. Na primjer, polarizatori su optički uređaji koji se sastoje od materijala koji apsorbira svjetlost s određenom polarizacijom dok propušta svjetlost s okomitom polarizacijom. Ovaj mehanizam se koristi za stvaranje polarizirane svjetlosti ili analizu polarizacije svjetlosti.³¹ Polarizacija svjetlosti koristi se u analitičkoj kemiji za karakterizaciju i identifikaciju molekula. Kada polarizirana svjetlost prolazi kroz tvar, interakcija između molekula i svjetlosti može promijeniti njegovu polarizaciju. Ovo se koristi u tehnici nazvanoj polarimetrija koja omogućuje mjerenje optičke aktivnosti tvari, kao što su kiralni spojevi.³²



Slika 9. Shematski prikaz mjerenja kuta zakretanja ravnine polarizirane svjetlosti. Slika preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru³³

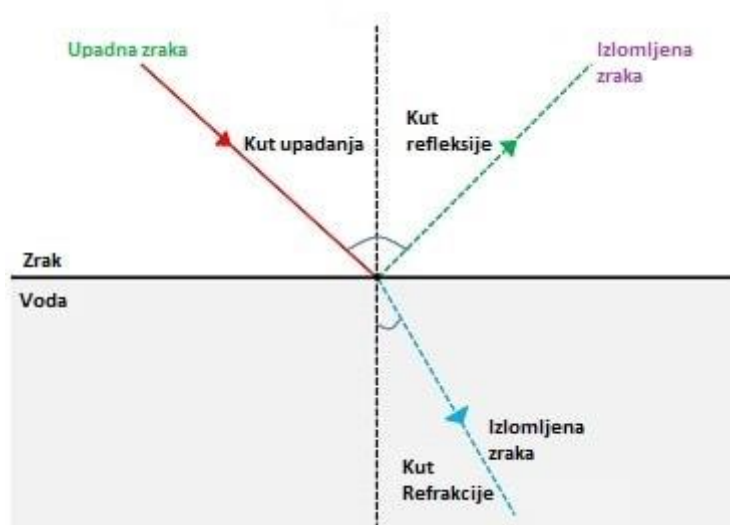
Polarizacija svjetlosti također se koristi i za proučavanje unutarnje strukture materijala, identifikaciju kristalnih faza i mjerenje mehaničkih naprezanja. Koristi se i u spektroskopiji i spektrofotometriji za analizu i karakterizaciju materijala.²⁹ kao i u raznim tehnikama fotografiranja, u fotografskim filterima i specijalnim optičkim uređajima za postizanje posebnih efekata, kao što su smanjenje odsjaja ili povećanje kontrasta u fotografiji i filmskoj industriji. Polarizacijska mikroskopija koristi polarizirano svjetlo za dobivanje kontrasta i analizu strukture materijala pod mikroskopom.³⁴

Još jedan od fenomena koji se javlja kod kristala je disperzija, odnosno raspršivanje svjetlosti na komponente boja (spektra) kada prolazi kroz materijal. Kristali imaju različite indekse loma za različite valne duljine svjetlosti, što rezultira različitim kutovima loma i raspršivanjem svjetlosti. Ovo svojstvo koristi se u optičkim elementima poput prizmi i leća za raspršivanje svjetlosti i razdvajanje boja, kao na primjer u spektroskopiji.³⁵



Slika 10. Disperzija svjetlosti na prizmi, slika preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru³⁶

Refrakcija, promjena smjera svjetlosti kada svjetlost prolazi iz jednog medija u drugi, također predstavlja svojevrsni fenomen koji omogućava primjenu kristala u optici, u izradi leća i objektivâ.³⁷ Leće su optički elementi koji koriste refrakciju kako bi usmjerile svjetlost i fokusirale je na određenu točku. Kada svjetlost prolazi kroz leću, mijenja smjer na temelju promjene indeksa loma, koji ovisi o materijalu leće i okolnom mediju. Promjenom zakrivljenosti ili oblika leće, može se postići različito lomljenje svjetlosti i time mijenjati fokusna udaljenost i karakteristike fokusiranja. Ovo omogućuje dobivanje jasne slike objekta na filmskoj ili digitalnoj ploči u kamerama ili na okularu u teleskopima. Refrakcija također ima važnu primjenu u optičkim vlaknima – tankim vlaknima od prozirnih materijala poput stakla ili organskih materijala, koja koriste refrakciju za prijenos svjetlosti na dugim udaljenostima. Svjetlost koja ulazi u vlakno pod odgovarajućim kutem lomi se pri prelasku iz jednog materijala u drugi, što omogućuje da se svjetlosni signal prenosi unutar vlakna bez značajnih gubitaka ili iskrivljenja.^{38,39}



Slika 11. Refrakcija svjetlosti, slika je preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru⁴⁰

Akusto-optički efekti javljaju se kada zvučni valovi interagiraju s kristalima i mijenjaju svojstva svjetlosti. Ovi efekti se koriste u uređajima kao što su akusto-optički modulatori, deflektori svjetlosti i filtri. Akusto-optička tehnologija koristi se u optičkim komunikacijskim sustavima. Oni omogućuju preciznu kontrolu intenziteta ili faze svjetlosti, što je ključno za prijenos podataka u optičkim mrežama, a koriste se i u laserskim sustavima. Akusto-optički

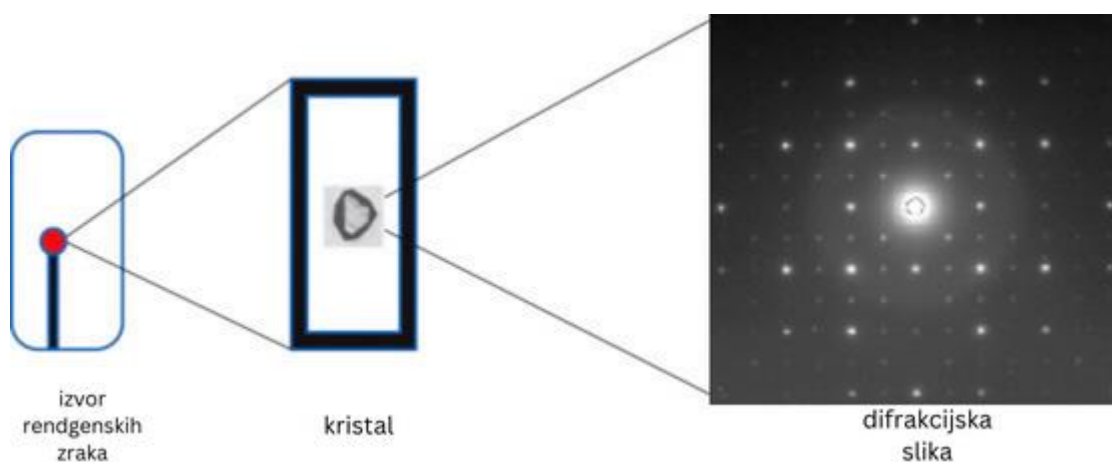
deflektori omogućuju precizno usmjeravanje laserskog snopa, što je korisno u raznim primjenama poput laserskog skeniranja, holografije i laserskog označavanja. U medicinskoj dijagnostici, akusto-optička tehnologija se koristi za analizu i karakterizaciju bioloških uzoraka. Navedeni uređaji se primjenjuju u instrumentima kao što su spektrometri, mikroskopi i snimači slike. Oni omogućuju visoku osjetljivost i preciznost u detekciji svjetlosti i detaljno proučavanje bioloških materijala.⁴¹

Kristali su također ključni elementi u laserskim sustavima. Nd:YAG kristal je jedan od najčešće korištenih laserskih kristala. On emitira svjetlost u bliskom infracrvenom području valnih duljina od 1064 nm i može se koristiti za različite namjene kao što su medicinski laseri, lasersko označavanje, lasersko rezanje i zavarivanje metala.⁴²

2.3.3. Primjena kristala u znanosti i obrazovanju

Primjena kristala u znanosti i obrazovanju je široka i raznolika. Kristali imaju jedinstvene optičke, električne i mehaničke karakteristike koje ih čine izuzetno korisnima u mnogim istraživačkim područjima, ali i obrazovnim aktivnostima.

Kristali se koriste u strukturnoj kemiji, ali i različitim srodnim znanstvenim disciplinama za proučavanje unutarnje građe kristalnih tvari, tj. za razumijevanje prostornog uređenja atoma, iona ili molekula koji sačinjavaju kristal te njihove međusobne povezanosti. Moderna kristalografija temelji se na analizi difrakcije rendgenskih zraka u kristalima. U ovoj tehnici, rendgenski snop prolazi kroz kristal, a difrakcija se događa kada rendgenske zrake interferiraju s elektronima atoma u kristalnoj rešetci. Ova interferencija stvara karakterističan difrakcijski uzorak iz kojeg se složenim matematičkim postupcima određuje unutarnja struktura kristala. Koristeći rendgensku kristalografiju, mogu se odrediti molekulska i kristalna struktura tvari, od malih organskih spojeva, do složenijih metalo-organskih, pa čak i velikih, složenih molekula, kao što su proteini i DNA.^{43,44}



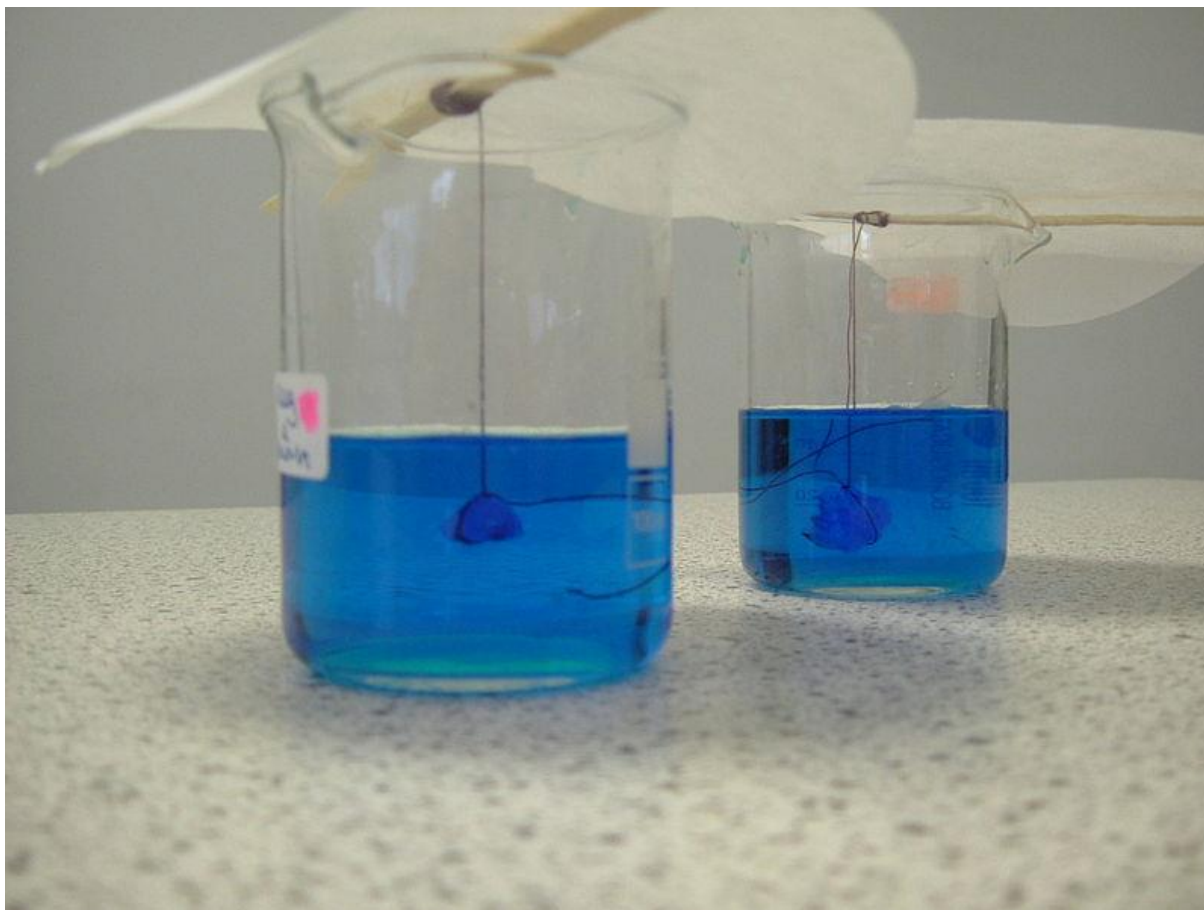
Slika 12: Difrakcija rendgenskih zraka na kristalu natrijeva klorida, NaCl, slika preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru ⁴⁴

Kristalografska istraživanja također doprinose otkrivanju novih materijala. Proučavanje kristalne strukture omogućuje identifikaciju novih spojeva i materijala s jedinstvenim svojstvima. Primjerice, kristalografskom analizom možemo odrediti strukture različitih materijala kao što su materijali s visokom termičkom stabilnošću, velikom električnom vodljivošću, specifičnom optičkom apsorpcijom ili posebnim magnetnim svojstvima. Ti novootkriveni materijali mogu imati širok spektar primjena u različitim industrijama i tehnološkim područjima. Kristalografija također doprinosi sintezi novih materijala. Poznavanje strukture materijala omogućuje kontrolirano oblikovanje i sintezu materijala željenih svojstava. Uvođenjem malih strukturnih promjena na molekularnoj razini moguće je kontrolirano ugađanje kristalne strukture te posljedično makroskopska svojstva s ciljem postizanja željenih svojstava materijala. Primjena kristalografskih podataka u optimizaciji postupaka sinteze i kontroli kvalitete novih materijala ključna je kako bi se osigurala ujednačenost kvalitete materijala.⁴⁵

Osim važnosti kristalografije i kristala u proizvodnji materijala, kristali imaju važnu ulogu i u fizici, posebno u područjima optike, optoelektronike, akustike i fizike čvrstog stanja te u područjima geologije i mineralogije. Kroz proučavanje kristala mogu se istraživati fenomeni kao što su polarizacija svjetlosti, fazne promjene i kvantna svojstva materijala. U geologiji i mineralogiji, kristali su ključni kod proučavanja minerala i stijena. Identifikacija kristala pomaže u određivanju mineralnih sastava stijena, geokemijskim analizama i proučavanju geoloških procesa.

Osim toga, kristali su izvrsni alati za obrazovne svrhe jer pružaju vizualni i konkretan prikaz apstraktnih koncepata iz fizike, kemije i drugih znanstvenih disciplina. Njihova periodična

struktura i specifična svojstva omogućuju učenicima i studentima da bolje razumiju i vizualiziraju različite fenomene. Korištenjem kristala, učenici mogu jasnije vidjeti kako svjetlost interagira s materijalom i kako se refraktira ili prolazi kroz kristal. Također, učenici mogu sudjelovati u eksperimentima rasta kristala. Eksperiment rasta kristala modre galice može biti izvrstan način za učenike da iskuse proces kristalizacije. Ovaj eksperiment omogućuje učenicima da vide kako se kristali formiraju iz zasićene otopine modre galice. Mogu promatrati oblik, veličinu i brzinu rast kristala na žici ili koncu. Također mogu istraživati kako promjene uvjeta kristalizacije (npr. koncentracija otopine, temperatura, dodatak drugih tvari ili vrijeme kristalizacije) mogu utjecati na rast i izgled kristala. Ovo iskustvo omogućuje im da steknu osnovno razumijevanje procesa kristalizacije i faktora koji utječu na rast kristala.

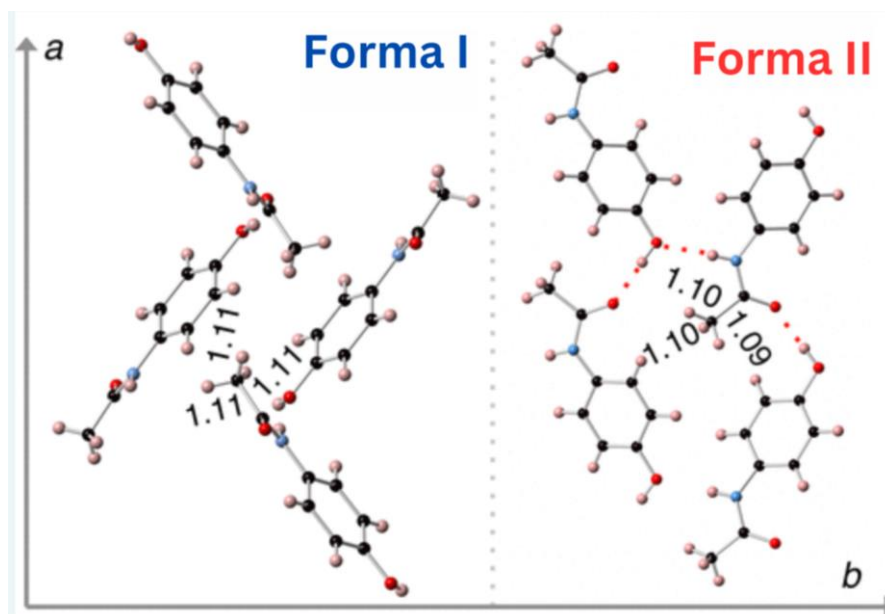


Slika 13. Primjer pokusa s modrom galicom, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, slika je preuzeta iz literaturnog izvora⁴⁶

Ukratko, kristali su izuzetno korisni resursi u obrazovanju jer omogućuju vizualizaciju, eksperimentiranje i razumijevanje mnogih temeljnih znanstvenih procesa te povezanih pojmova. Njihova primjena u znanosti i obrazovanju neprestano se razvija i pruža neiscrpan izvor istraživanja i učenja.

2.3.4. *Primjena kristala u farmaceutici*

Kristali imaju važnu primjenu u farmaceutici, posebno u istraživanju, razvoju, proizvodnji i formulaciji lijekova. Analiza kristalne strukture aktivnih tvari omogućuje farmaceutima i istraživačima da bolje razumiju molekulsku strukturu te interakcije koje molekule lijeka (tj. aktivne tvari) ostvaruju. Ova informacija je ključna za razvoj novih lijekova, optimizaciju postojećih formulacija kako bi se postigla željena topljivost, bioraspoloživost i stabilnosti lijekova tijekom skladištenja i transporta, te osigurala odgovarajuća doza i oslobađanje lijeka.⁴⁷ Nadalje, tvari u čvrstom stanju mogu postojati u različitim polimorfnim oblicima, što znači da ista molekula lijeka može formirati različite kristalne strukture⁴⁷, a jedan od primjera polimorfizma kod lijekova je paracetamol, poznat kao acetaminofen, koji je široko korišten analgetik i antipiretik. Najpoznatije forme paracetamola su forma I i II (Slika 14). Kristalno pakiranje forme I paracetamola osigurava željena fizikalna svojstva, kao što je dobra topljivost, što za posljedicu ima jako dobru apsorpciju lijeka, a samim time i bolje djelovanje lijeka. Forma I paracetamola je najstabilniji i najčešće korišten oblik u farmaceutskim formulacijama. Forma II paracetamola je manje stabilna i može se javiti kao rezultat promjena u uvjetima skladištenja ili procesu proizvodnje jer ima drugačiju kristalnu strukturu od forme I što utječe na topljivost, stabilnost i biodostupnost lijeka. Polimorfizam paracetamola može imati značajan utjecaj na kvalitetu i djelotvornost lijeka. Kontrola polimorfizma paracetamola je važna kako bi se osigurala konzistentnost i stabilnost lijeka tijekom proizvodnje, skladištenja i uporabe. Farmaceuti i proizvođači lijekova primjenjuju različite tehnike, kao što su kontrolirani procesi hlađenja i kristalizacije, kako bi dobili željeni polimorfni oblik paracetamola i minimizirali pojavu neželjenih polimorfija.⁴⁵



Slika 14. Polimorfne forme paracetamola, slika je preuzeta i prilagođena prema literaturnom izvoru⁴⁸

2.3.5. Primjena kristala u naprednim tehnologijama

Napredne primjene kristala obuhvaćaju širok spektar područja i tehnologija koje koriste specifična svojstva kristala za inovativne svrhe. Ova područja i primjene kristala i dalje se aktivno istražuju i razvijaju kako bi se postigle napredne funkcionalnosti u različitim industrijama. Kristali se koriste u optoelektrničkim uređajima poput LED dioda (dioda s emitiranjem svjetlosti), laserskih dioda, optičkih vlakana i solarnih stanica. Kristalni materijali imaju posebne optičke karakteristike koje omogućuju pretvaranje električne energije u svjetlosnu energiju i obrnuto.⁴⁹

U području fotonike, kristali igraju ključnu ulogu u manipulaciji svjetlosnim signalima i kontroliranju svjetlosnih signala. Optičke komponente koje se temelje na kristalima omogućuju preciznu kontrolu polarizacije svjetlosti, faznih promjena i drugih važnih optičkih efekata, što je od suštinskog značaja za razvoj moderne optike, optoelektronike i telekomunikacija.⁵⁰ U akustici, kristali se koriste za generiranje, prijam i manipulaciju zvučnim valovima. Kristalni mikrofoni, piezoelektrični zvučnici i akustični filtri su primjeri naprednih aplikacija kristala u tom području.⁵¹ Također, kristali imaju značajnu ulogu usenzorima. Na primjer, termistori

koriste promjene električne otpornosti kristala za mjerenje temperature, dok senzori tlaka koriste piezoelektrične kristale za pretvaranje mehaničkog tlaka u električni signal.⁵²

2.3.6. Kristali i njihova buduća primjena

U budućnosti se očekuje daljnji napredak i razvoj primjene kristala u različitim područjima. Kristali su već sada ključni elementi u mnogim tehnološkim i znanstvenim područjima, a očekuje se da će njihova primjena i utjecaj rasti kako se tehnologija i istraživanje nastavljaju razvijati.

Istraživanja se danas provode kako bi se stvorili kristali s posebnim električnim, optičkim, mehaničkim i termalnim svojstvima, koji će naširoko naći primjenu u raznim industrijama, uključujući elektroniku, energetiku, automobilsku industriju i medicinu. Kristali će imati značajnu ulogu u razvoju kvantne tehnologije, kao što su kvantna računala, kvantna komunikacija i kvantni senzori. Kvantni kristali će biti ključni za kontrolu i manipulaciju kvantnih stanja materije, omogućavajući izuzetno brze i moćne računalne sustave te sigurne metode prijenosa informacija. Oni se razlikuju od uobičajenih kristala po tome što elektroni unutar njih su ograničeni u prostoru, što dovodi do pojave kvantnih efekata kao što su kvantno tuneliranje i kvantna konfinacija.^{53,54} S rastućom potrebom za brzim prijenosom podataka, očekuje se da će kristali igrati važnu ulogu u razvoju optičkih komunikacijskih sustava. Napredni kristali će se koristiti za generiranje, modulaciju i detekciju svjetlosnih signala, omogućavajući veću propusnost i veću pouzdanost optičkih mreža.⁵¹ Također, očekuje se da će kristali biti ključni u daljnjem razvoju solarnih stanica i drugih obnovljivih izvora energije. Napredni kristalni materijali će omogućiti veću efikasnost pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju, što će biti od vitalnog značaja za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i borbu protiv klimatskih promjena.⁵⁵

S rastućom potrebom za brzim prijenosom podataka, očekuje se da će kristali igrati važnu ulogu u razvoju optičkih komunikacijskih sustava. Napredni kristali će se koristiti za generiranje, modulaciju i detekciju svjetlosnih signala, omogućavajući veću propusnost i veću pouzdanost optičkih mreža.⁵¹ Također, očekuje se da će kristali biti ključni u daljnjem razvoju solarnih stanica i drugih obnovljivih izvora energije. Napredni kristalni materijali će omogućiti veću efikasnost pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju, što će biti od vitalnog značaja

za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i borbu protiv klimatskih promjena.⁵⁵ U području biomedicine, kristali će potencijalno biti korišteni za razvoj novih dijagnostičkih alata, terapija i materijala za regenerativnu medicinu. Kristali mogu poslužiti kao nosači lijekova, biomaterijali za rekonstrukciju tkiva i senzori za detekciju bioloških molekula. Kristali imaju perspektivu za korištenje u razvoju naprednih optičkih tehnika, poput super-rezolucijske mikroskopije, kvantne mikroskopije i spektroskopije visoke razlučivosti. Ove tehnike omogućuju detaljnije proučavanje materijala, bioloških sustava i kemijskih reakcija, što će doprinijeti daljem istraživanju i razumijevanju svijeta oko nas.⁵⁶

Budućnost kristala je obećavajuća i otvara mnoge mogućnosti za napredak u različitim područjima. Nastavak istraživanja i razvoja naprednih materijala, kvantne tehnologije, optičke komunikacije, solarnih tehnologija, biomedicine i naprednih optičkih tehnika omogućit će da kristali ostanu ključni element u inovacijama i rješavanju složenih izazova pred nama. Njihova jedinstvena struktura i svojstva pružaju temelje za razvoj novih tehnologija i poboljšanje postojećih sustava. S pravom možemo očekivati da će primjena kristala i njihov značaj samo nastaviti rasti u godinama koje dolaze.

§ 3. LITERATURNI IZVORI

1. A. C. Dimian, C. S. Bildea, A. A. Kiss, *Integrated Design and Simulation of Chemical Processes*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 35, 2014, str. 484.
2. M. Giulietti, A. Bernardo, u M. Andreetta (ur.), *Crystallization - Science and Technology*, IntechOpen, 2012, str. 379.
3. A. G. Jones, *Crystallization Process Systems*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002, str. 58.
4. <https://www.stemlittleexplorers.com/hr/kako-napraviti-kristale-od-secera/> (datum pristupa 13. svibnja 2023.)
5. https://saylordotorg.github.io/text_general-chemistry-principles-patterns-and-applications-v1.0/s17-02-solubility-and-molecular-struct.html (datum pristupa 13. svibnja 2023.)
6. G. Salas, R. Costo, M. del Puerto Morales, u J. M. de la Fuente, V. Grazu (ur.), *Nanobiotechnology: Inorganic Nanoparticles vs Organic Nanoparticles*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 4, 2012, str. 39.
7. P. M. Doran, *Bioprocess Engineering Principles* (drugo izdanje), Elsevier, Amsterdam, 2013, str. 549
8. https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_%28Stull%29/07%3A_Precipitation_Processes/7.02%3A_Nucleation_of_Liquid_Droplets (datum pristupa 13. svibnja 2023.)
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal_growth (datum pristupa 13. svibnja 2023.)
10. N. Zhang, *Modeling and Control of Transport Processes during Melt Crystal Growth*, doktorski rad, Sveučilište u Minnesoti, 2012, str. 2-6.
11. <https://www.britannica.com/science/crystal/Molecular-binding> (datum pristupa 04. srpnja 2023.)
12. Y. Furushima, C. Schick, A. Toda, *Crystallization, recrystallization, and melting of polymer crystals*, *Polym. Crystallization* (2018), e10005.
13. K. H. Jürgen Buschow (ur.), R. W. Cahn, M. C. Flemings, B. Ilschner, E. J. Kramer, S. Mahajan, P. Veyssièrè, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, L. Amsterdam, 2001, str. 2791-2799.

14. <https://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxy> (datum pristupa 04. srpnja 2023.)
15. P. M. Wolff, Y. Billiet, J. D. H. Donnay, W. Fischer, R. B. Galiulin, A. M. Glazer, M. Senechal, D. P. Shoemaker, H. Wondratschek, T. Hahn, A. J. C. Wilson, S. C. Abrahams, *Acta Cryst.* **A45** (1989) 494–499.
16. <https://www.britannica.com/science/Bravais-lattice> (datum pristupa 13. svibnja 2023.)
17. S. S. Rath, Comparison of CPFEM and Spectral Solution Methods in Prediction of Strains near Grain Boundaries in a Uniaxially Loaded Oligocrystalline Tensile Specimen, magistarski rad, Materials Science and Engineering, Michigan State University, 2016, str. 6.
18. <https://www.britannica.com/science/crystal/Types-of-bonds> (datum pristupa 14. svibnja 2023.)
19. T. Rouxel, *J. Ceram. Soc. Jpn.* **130** (2022) 519–530.
20. <https://www.britannica.com/science/crystal/Electric-properties> (datum pristupa 14. svibnja 2023.)
21. <https://www.britannica.com/science/semiconductor> (datum pristupa 14. svibnja 2023.)
22. <https://www.nanowerk.com/transistors-explained.php> (datum pristupa 14. svibnja 2023.)
23. A. V. Medvedovici, V. David, u P. J. Worsfold, A. Townshend, C. F. Poole (ur.), *Encyclopedia of Analytical Science*, Elsevier, Amsterdam, 2005, str. 321–327.
24. <https://www.britannica.com/technology/integrated-circuit> (datum pristupa 14. svibnja 2023.)
25. J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, Springer, Berlin, 2014, str. 570.
26. B. Haraoubia, *Nonlinear Electronics 1*, ISTE Press – Elsevier, Amsterdam, 2018, str. 156–163.
27. Y. Saigusa, u K. Uchino (ur.), *Advanced Piezoelectric Materials*, Woodhead Publishing, Sawston, 2010, str. 171–174., 200–202.
28. <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/atomic-scale-structure/single3.php> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)
29. <https://www.britannica.com/science/double-refraction> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)
30. <https://www.britannica.com/science/anisotropy> (datum pristupa 04. srpnja 2023.)
31. <https://www.newport.com/n/polarization-control-with-optics> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)

32. <https://www.britannica.com/science/polarimetry> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)
33. <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=polarimetrija> (datum pristupa 04. srpnja 2023.)
34. <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1945> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)
35. <https://www.britannica.com/science/dispersion-biology> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)
36. <https://www.britannica.com/science/refraction> (datum pristupa 24. kolovoza 2023.)
37. <https://www.britannica.com/science/refraction> (datum pristupa 09. lipnja 2023.)
38. Y. Saigusa, u U. Uchino (ur.), *Advanced Piezoelectric Materials*, Woodhead Publishing, Sawston, 2010, str. 171–174., 200–202.
39. E. Spain, A. Venkatanarayanan, u M. S. J. Hashmi (ur.), *Comprehensive Materials Processing*, Vol. 13, Elsevier, Amsterdam, 2014, str. 6, 9–12.
40. <https://www.stemlittleexplorers.com/hr/demonstracija-refrakcije/> (datum pristupa 04. srpnja 2023.)
41. <https://shalomeo.com/Introduction-to-Acousto-Optic-Crystals-Shalomeo.html> (datum pristupa 24.08.2023.)
42. R. Ritch, C. C. Y. Tham, u G. L. Spaeth, H. Danesh-Meyer, I. Goldberg A. Kampik (ur.), *Ophthalmic Surgery: Principles and Practice*, Saunders, Philadelphia, 2011., str. 308–214.
43. <https://www.britannica.com/science/crystallography> (datum pristupa 11. lipnja 2023.)
44. W. S. Ryu, *Molecular Virology of Human Pathogenic Viruses*, Academic Press, Cambridge, 2017, str. 21–29.
45. M. DeGraef (ur.), M. E. McHenry, *Structure of Materials: An Introduction to Crystallography, Diffraction and Symmetry*, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, str. 654, 2–15.
46. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Making_Copper_Sulphate_Crystals.jpg (datum pristupa 24. kolovoza 2023.)
47. D. Braga, L. Casali, F. Grepioni, *Int. J. Mol. Sci.* **23** (2022) 9013.
48. N. Tsapatsaris, B. A. Kolesov, J. Fischer, E. V. Boldyreva, L. Daemen, J. Eckert, H. N. Bordallo, *Mol. Pharmaceutics* **11** (2014) 1032–1034.
49. N. K. Subramani, H. Siddaramaiah, J. Hee Lee, *Comprehensive Analytical Chemistry*, Vol. 69, Elsevier Science, Amsterdam, 2015, str. 145.

50. I. S. Amiri, S. R. B. Azzuhri, M. A. Jalil, H. M. Hairi, J. Ali, M. Bunruangses, P. Yupapin, *Micromachines* **9(9)** (2018) 452.
51. H. Elahi (ur.), M. Eugeni, P. Gaudenzi, Piezoelectric Aeroelastic Energy Harvesting (prvo izdanje), Elsevier, Amsterdam, 2021, str. 3–19.
52. D. R. Sahu, Multifunctional Ferroelectric Materials, IntechOpen, Rijeka, 2021, str. 96–130. <https://www.intechopen.com/chapters/77225> (datum pristupa 13. lipnja 2023.)
53. <https://research.princeton.edu/news/scientists-visualize-electron-crystals-quantum-superposition> (datum pristupa 16. srpanj 2023.)
54. W. A. Cahyadi, Y. H. Chung, Z. Ghassemlooy, N. B. Haassan, *Electronics* **9(9)** (2020) 1339.
55. N. Lago, *Crystals* **13** (2023) 925.
56. P. Rui, Z. Qiuqiang, P. Qiuqiang, L. Siying, G. Xin, L. Liangliang, Q. Xian, W. Ziqing, *Nature Commun.* **13** (2022) 6636.