

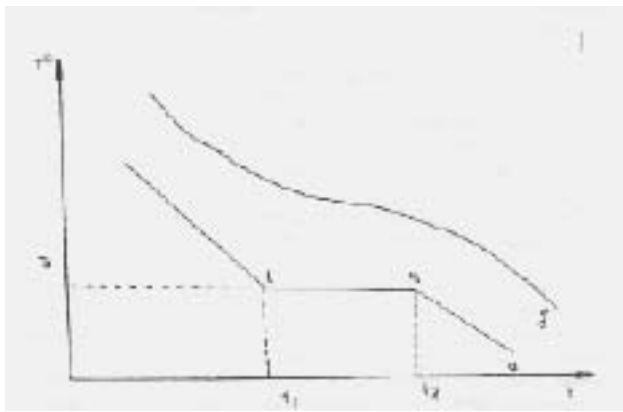
I. КРИСТАЛОГРАФИЯ

Основни особености на кристалите

Кристалографията изучава формата, вътрешния строеж, произхода и свойствата на кристалите. Думата “кристал” е гръцка и означава “лед”. Древните гръци са наричали бистрия и прозрачен кварц “планински кристал”, тъй като са смятали, че той се образува както и ледът при ниска температура. Дълго време понятието “кристал” се е свързвало с представата за чисто и прозрачно тяло. В природата обаче се срещат и аморфни вещества с такива свойства. В последствие изследователите наричат кристали твърдите вещества с правилна външна форма и изучават тяхната геометрия. В средата на миналия век кристалографията се развива като наука за външните форми на кристалите. В природата обаче сравнително рядко се срещат добре остенени кристали. Развитието на физиката и химията спомага за изучаване на вътрешното устройство на кристалите. Установява се, че те са изградени от правилно и закономерно подредени градивни частици.

За веществата са характерни три агрегатни състояния (фази) - твърдо, течно и газообразно. Разликата между тях се състои в различната подвижност на градивните частици (молекули, атоми и йони). При газовете и течностите те извършват постъпателни (браунови) и колебливи движения и притежават по - голяма енергия. Затова те нямат постоянен обем и форма. Твърдите тела се получават при преминаването от течно или газообразно състояние в твърдо. Градивните частици при това могат да се разположат по два начина. Когато молекулите, йоните и атомите се установяват в безредно състояние се образуват аморфни вещества. Най-често този случай се среща при бързо охлаждане на течност. „Аморфен” от гръцки значи безформен. Такива твърди тела са например стъклото, смолите и други. Такъв е минералът опал. От физико - химична гледна точка аморфните тела се разглеждат като “преохладени течности”. Те нямат определена форма и химичен състав. Техните свойства са еднакви в различните посоки, т. е. те са изотропни. Отсъствието на закономерност в разположението на атомите, молекулите и йоните е характерно за аморфните вещества.

Вторият случай е когато градивните частици се подреждат правилно, закономерно, на строго определено разстояние. Той се проявява при постепенно и бавно понижаване на температурата (фиг. 1) на огнетечни стопилки, наситени разтвори или при бавно изпаряване на разтворители. Скоростта на частиците бавно и постепенно намалява.



Фиг. 1. Криви на охлаждане на тешности, при което се получават кристали (а) и аморфни (б) вещества

На фигура 1(а) в точка L се създават условия за образуване на кристали. В участъка L- M температурата на разтвора остава постоянна, въпреки охлаждането на системата. Това се дължи на трансформирането на кинетичната енергия на градивните частици в топлинна, до момента на преустановяване на движението им. В този участък съществуват едновременно и течна и твърда фаза. Образуването на кристалите се придружава от отделяне на енергия - енергия на кристализация. Ето защо те притежават минимална вътрешна енергия. Градивните частици в тях извършват само един вид движения - колебателни. Затова и кристалите имат постоянен обем и постоянна форма. Те са устойчиви (статични). За да се стопи кристала е необходимо възвръщане на загубената енергия и преходът от твърдо кристално състояние в течно е съпроводен с поглъщане на топлина - топлина на топене. Когато охлаждането на течността е много бързо твърдата фаза възниква постепенно и кривата на охлаждането плавно имитира кривата на кристализация (фиг. 1 - б). В тези случаи се получават аморфни вещества. Градивните частици в тях са разпределени хаотично както това в газовете и течностите. Те извършват колебателни и силно забавени движения. С течение на времето молекулите, атомите и йоните в тях могат да се подредят закономерно. Ето защо аморфните твърди тела са неустойчиви (метастабилни) и могат да преминат в кристално състояние.

Характерни особености на кристалите са тяхната еднородност, анизотропност, статичност и способност за самоограждане с плоски стени.

Еднородни са такива тела, всички части на които притежават еднакъв състав и строеж. Еднородността на кристалите се дължи на закономерното подреждане на градивните частици в тях. Природните кристали често съдържат включения или имат дефекти в своя строеж . В лабораторни условия могат да се получат еднородни кристали, които се използват за получаване на чисти вещества и в техниката.

Кристалите проявяват физичните си свойства като твърдост, цепителност и прозрачност по различен начин в различни посоки и направления. Това явление се нарича анизотропност .

Например кристалите на минерала кианит по посока на удължението им имат твърдост 4.5, а в напречна посока - 7. От тук и неговото друго име дистен, което означава двойко твърд. Някои кристали по отношение на разпространението на топлината и светлината в тях са изотропни.

Характерно свойство само за кристалите е способността им да се самоограничават с кристални стени. Тя се дължи на различната скорост, с която кристалите нарастват в различни посоки. Ако късче от кристал поставим в преситен разтвор от съответното вещество, след време то ще се ограда с плоски стени и ще се получи многостенна геометрична форма, която е характерна само за това вещество. Следователно кристалите са предимно твърди тела, които се самоограждат с плоски стени в резултат на закономерното триразмерно подреждане на молекулите, атомите и йоните.

Съществува клас органични вещества, които образуват течни кристали. Подредеността на молекулите в тях не е тримерна, както в твърдите кристали, но тя не е и хаотична, както в течностите и има промеждутъчен характер. Течните кристали възникват в определен температурен интервал в прехода от твърд в течен и течен кристал в изотропна течност. Молекулите на течните кристали имат силно удължена форма и са нискосиметрични или асиметрични. Те могат да се ориентират под въздействието на електрично или магнитно поле, като образуват осева текстура. Течните кристали притежават характерни оптични свойства и намират широко приложение.

I. 1. ГЕОМЕТРИЧНА КРИСТАЛОГРАФИЯ

Идеални и реални кристали. Закон за постоянството на ръбните ъгли

Стените на кристалите се пресичат в ребра (ръбове), ребрата - във върхове (рогове). Всички те се наричат ограничителни елементи. Кристалните многостенници се подчиняват на равенството на Ойлер - Декарт: стени + върхове = ребра + 2($C+V = P+2$). Например при куба (фиг. 2), който е ограден от 6 стени, 8 върхове и 12 ребра ($6+8=12+2$). Когато едноименните стени на кристала са идеално развити, равни по форма и големина и са равноотдалечени по перпендикулярните разстояния от един геометричен център, тогава кристалът е идеален (фиг. 2). Ако едноименните стени са с различна форма и големина и ако тези разстояния не са равни, кристалът е реален (фиг. 3), развлечен. В природата идеални кристали не съществуват. Едно и също вещество при различни условия на кристализация образува различни по форма кристали. Кристали, които са оградени от еднакви по форма и големина стени се наричат прости кристални форми. Известни са 47 прости форми, които имат свои названия, например октаедър, ромбододекаедър, тетрагонална бипирамида I и II вид, тетрагонална призма I и II вид и т. н.

Комбинациите са съставени от две, три или повече прости форми. Всяка една от простите форми на фиг. 4 (а) и (б) може поотделно да остени един кристал. Такава форма се означава

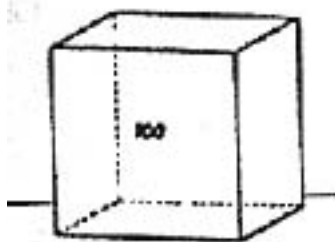
като затворена. Когато простата форма не може да ограда изцяло кристала (например пинакоид) тя е отворена .

Кристалите на едно и също вещество могат да имат различни по брой, големина и форма стени. В зависимост от условията на растеж на кристалите едни стени могат да се развиват по добре, други остават малки. Но както и да растат кристалите, тяхната форма се предопределя от закономерния им вътрешен строеж. В резултат на това каквато и външна форма да приеме кристалът на едно или друго вещество, ъглите между съответстващите му стени и ръбове при неп-

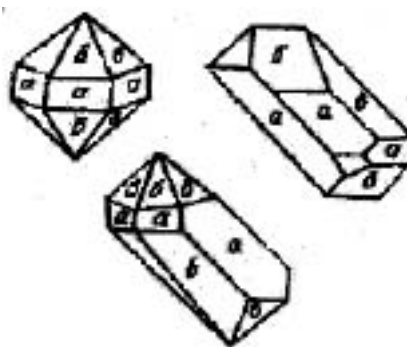
роменящи се външни условия на кристализация се запазват постоянни. Това е първият закон на геометричната кристалография, който е открит през 1669 г. от датския природоизпитател Нилс Стенсен

(Н. Стено) на основата на направени от него измервания на развлечени кварцови кристали.

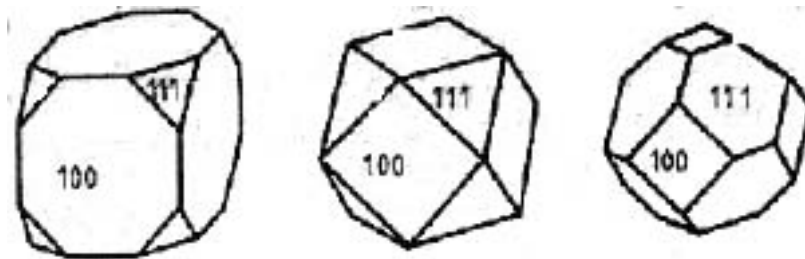
Изключение от този закон правят единствено т. нар. вицинални стени, които се отличават с незначителен наклон по отношение на нормалните стени при кристалите. Те се явяват в резултат на по-особени условия на растеж на кристалите. Законът на Стенсен е потвърден по-късно от Роме дьо л'Ил и Ломоносов.



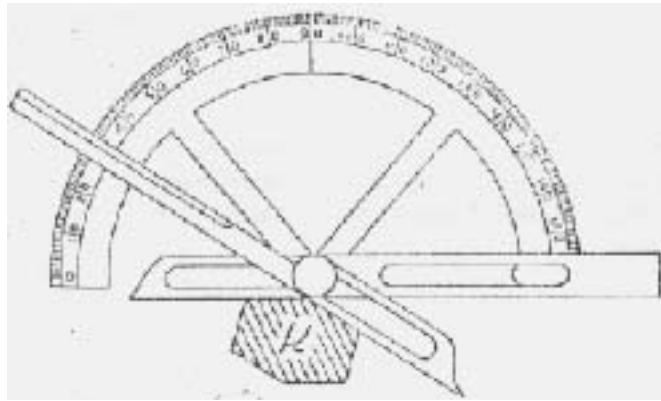
Фиг. 2 Куб



Фиг. 3. Идеален и развлечени (реални) кристали на кварц

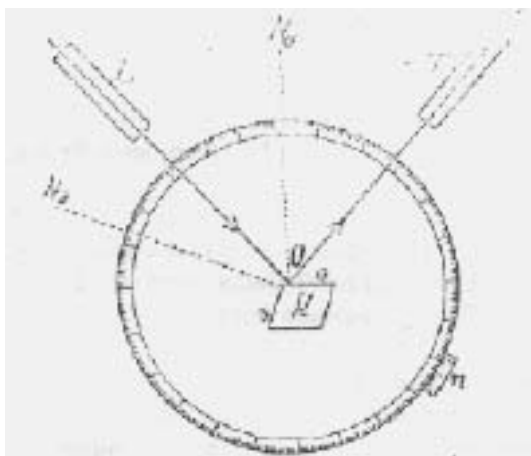


Фиг. 4. Комбинации от куб {100} и октаедър {111}



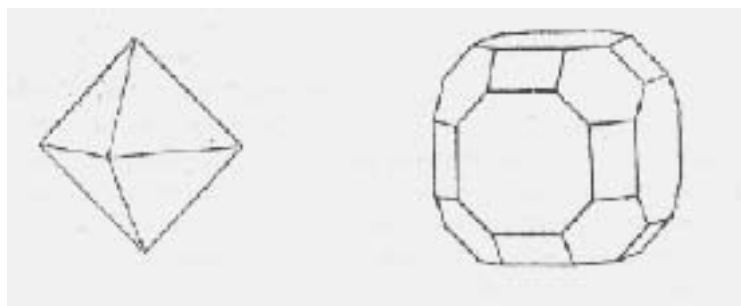
Фиг. 5. Допирателен гониометър

Измерването на ръбните ъгли се извършва с помощта на гониометри. Те биват допирателни и отражателни. Рамото на допирателния гониометър е фиксирано върху транспортир . Това дава възможност за пряко отчитане на ъглите между съседните стени на кристала. Раменете на гониометъра трябва да прилягат плътно и да са перпендикулярни към стените. Така се измерват ръбните ъгли на кристали с размери по-големи от 0.5 sm, като точността на измерването е 30". Отражателните гониометри се използват за мерене на дребни кристалчета. Към кристалната стена се подава светлинен сноп, който се отразява и в наблюдателната тръба се явява като "сигнал". При завъртане на кристала около оста му получаваме нов "сигнал" от съседната кристална стена. Положението на нормалата на дадена стена се определя от две ъглови величини - полярни координати (γ и j), които се отчитат съответно на хоризонталния и вертикалния кръг на гониометъра. Така се определя ръбния ъгъл между съседните стени. Точността на измерванията е една или половин минута, а при съвременни гониометри и до няколко секунди. Сравняването на данните за стойностите на ръбните ъгли в един кристал с определители се използва за диагностика на кристалното вещество.

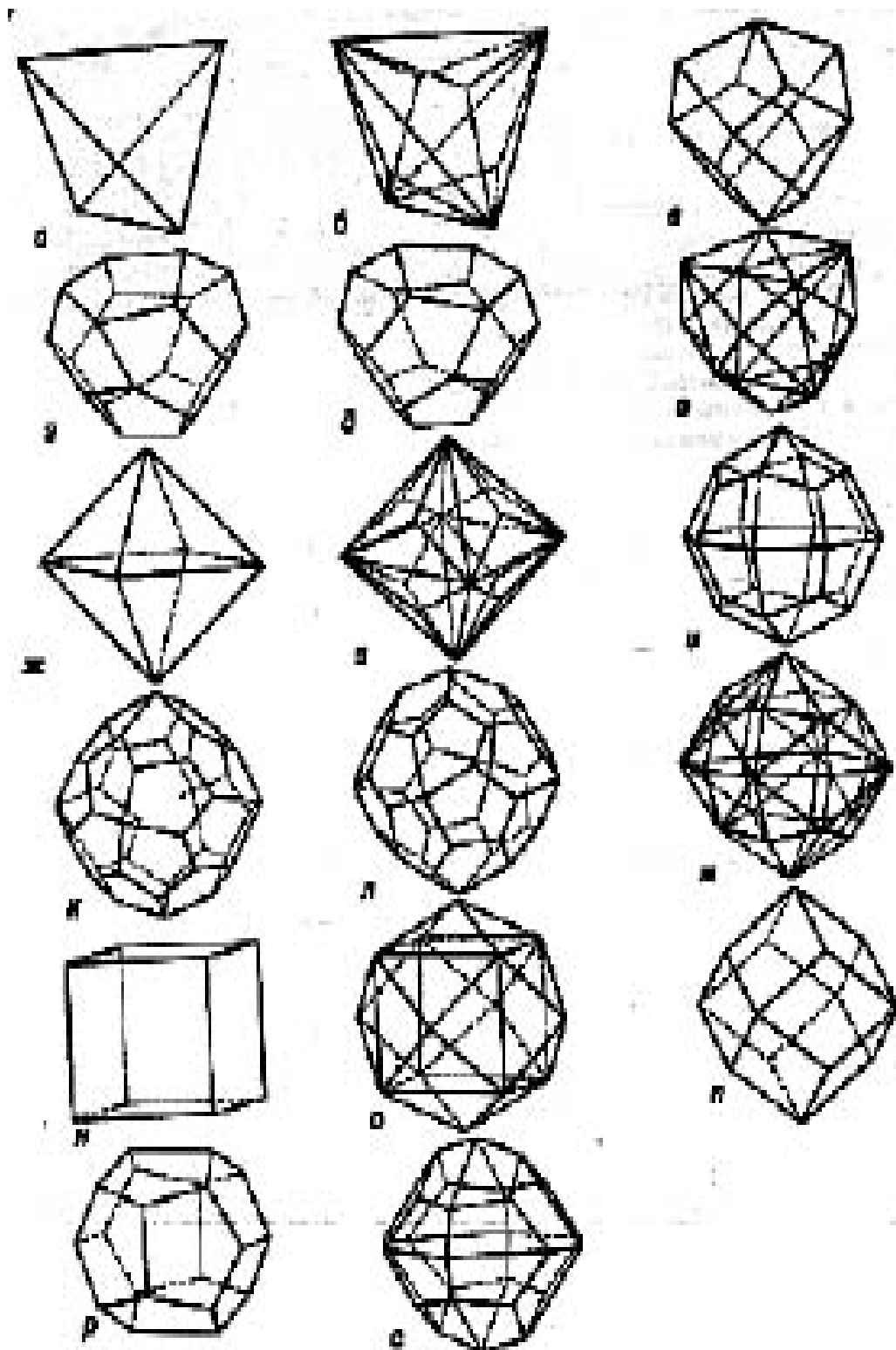


Фиг. 6. Схема на принципа на отражателния гониометър за кристали с размери по-големи от 0.5 см, като точността на измерването е $30''$.

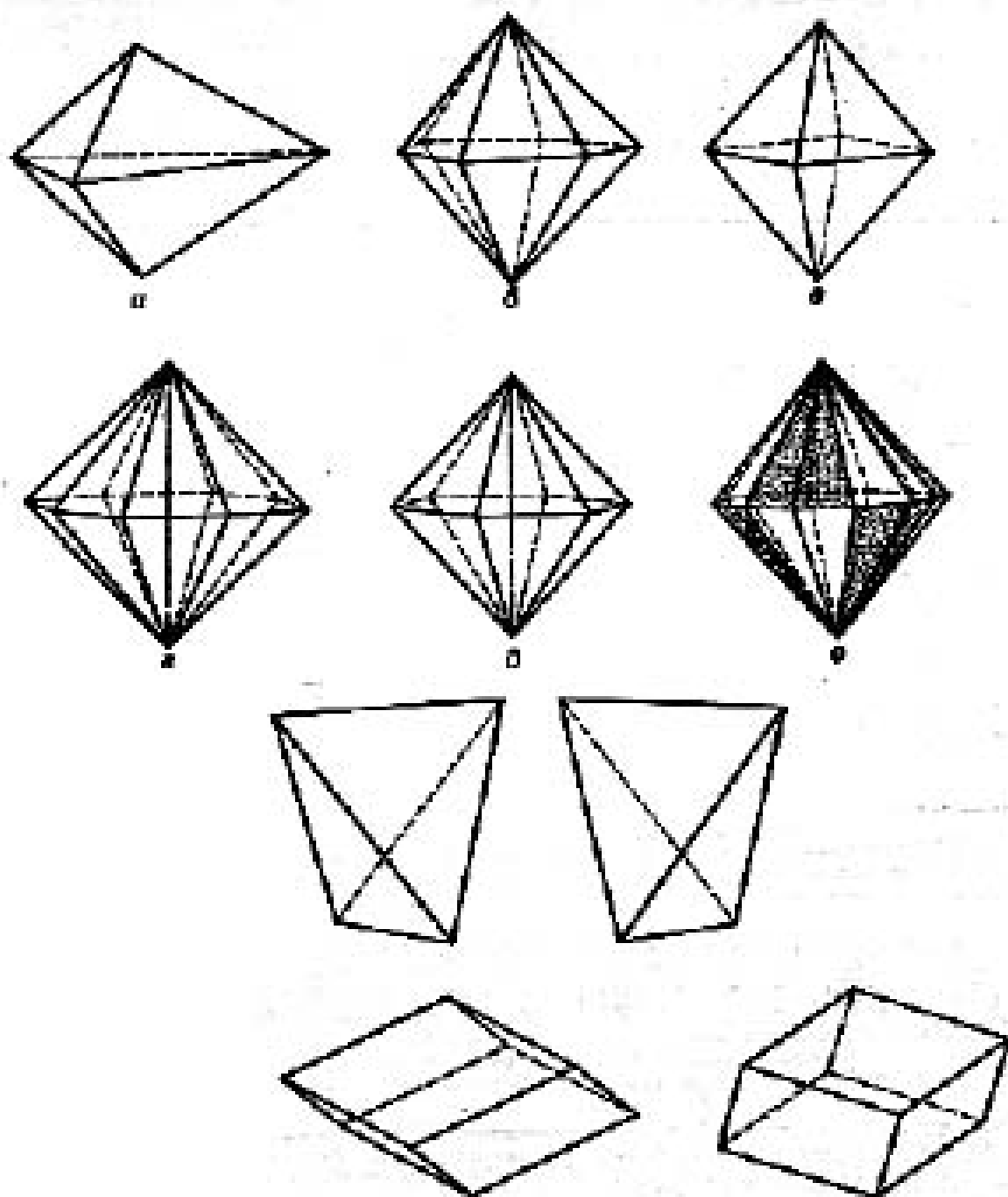
За изобразяване на кристалите се използват паралелно - перспективна, лицева, стереографска и гномостереографска проекции. В учебника се използва паралелно - перспективни проекции (фиг. 7).



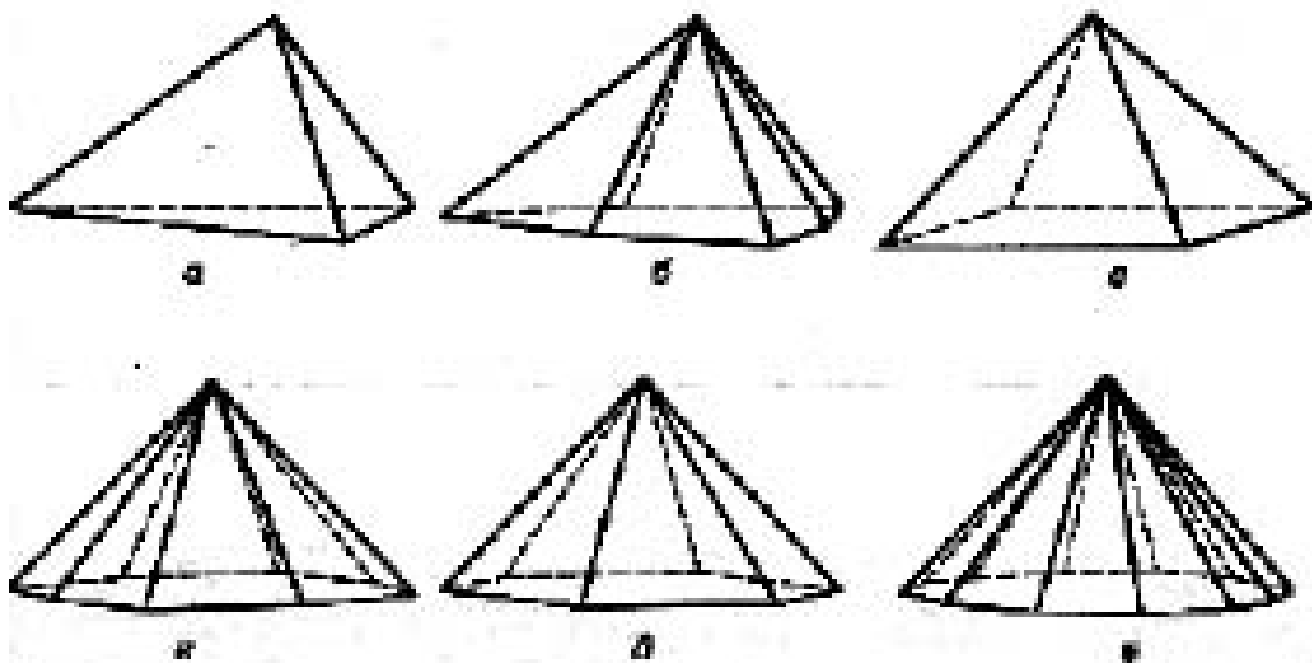
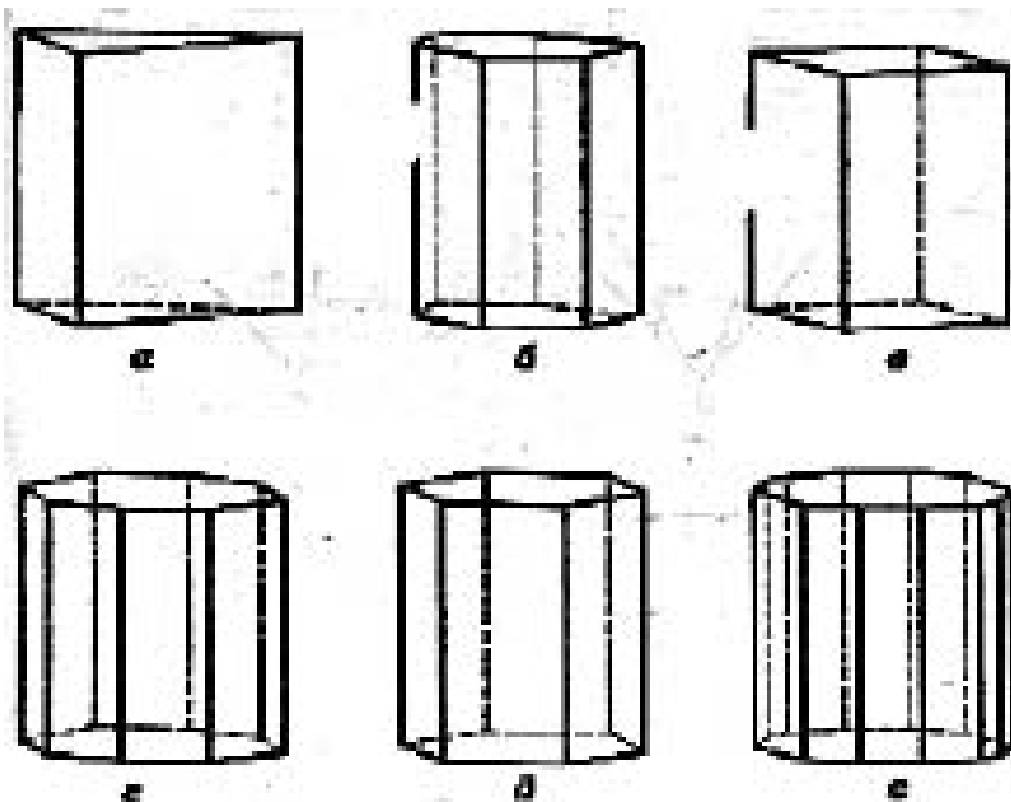
Фиг.7.Паралелно-перспективна проекция на флуоритов кристал



Прости форми от кубична сингония: а-тетраедър; б-тригонритетраедър; в-тетрагонритетраедър; г-положителен и отрицателен пентагондодекаедър; д-хексатетраедър; е-октаедър; з-тригонтриоктаедър; и-тетрагонтриоктаедър; к и л-ляв и десен пентагонтриоктаедър; м-хексаоктаедър; н-хексаедър(куб); о-тетраhexаедър; п-ромбододекаедър; р-пентагондодекаедър; е-дидодекаедър.

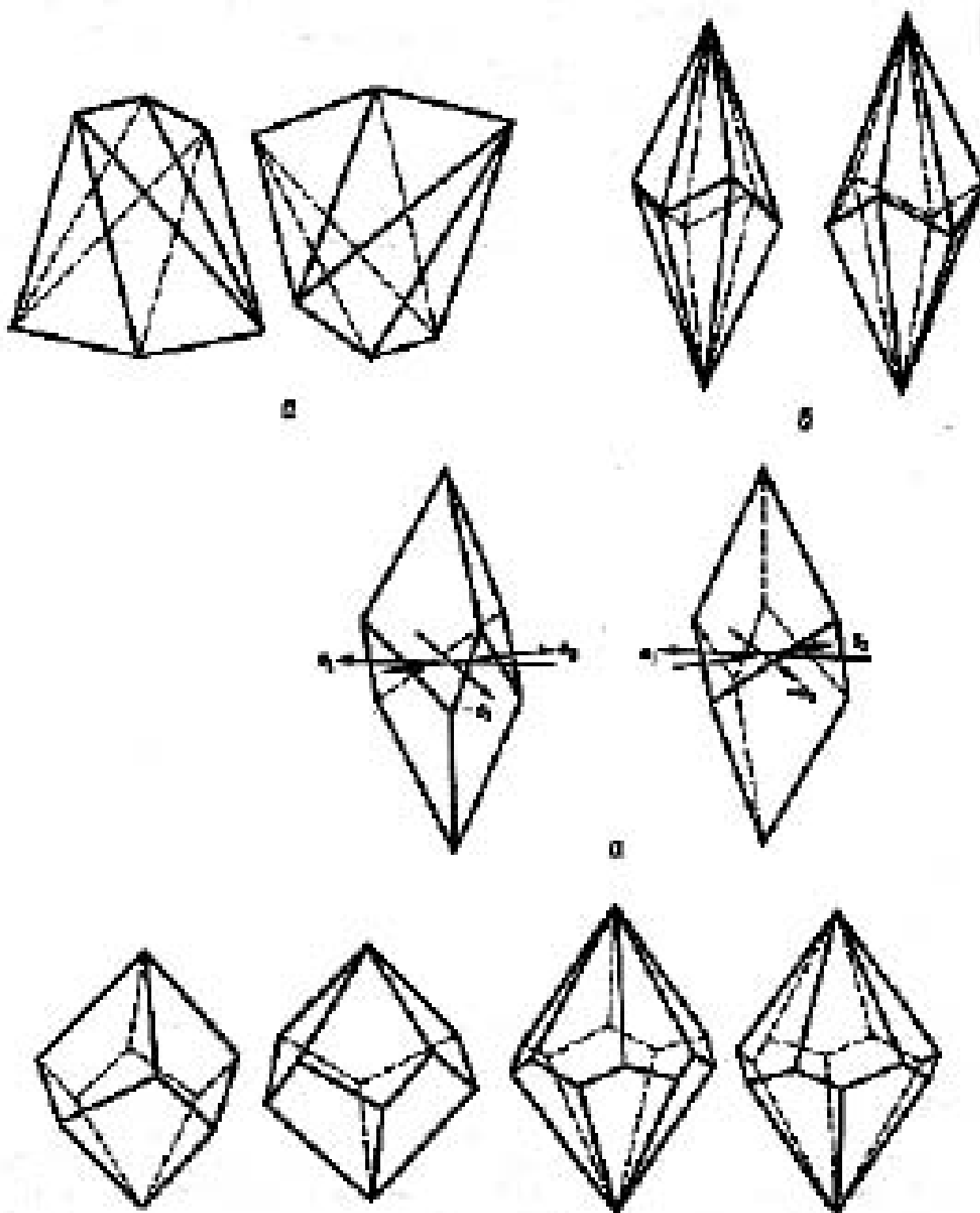


1. Бипирамиди на средните сингонии : а-тригонална; б-дитригонална; в-тетрагонална; г-дитетрагонална; д-хексагонална; е- дихексагонална.
2. Положителен и отрицателен тетрагонален тетраедър.
3. Положителен и отрицателен ромбоедър

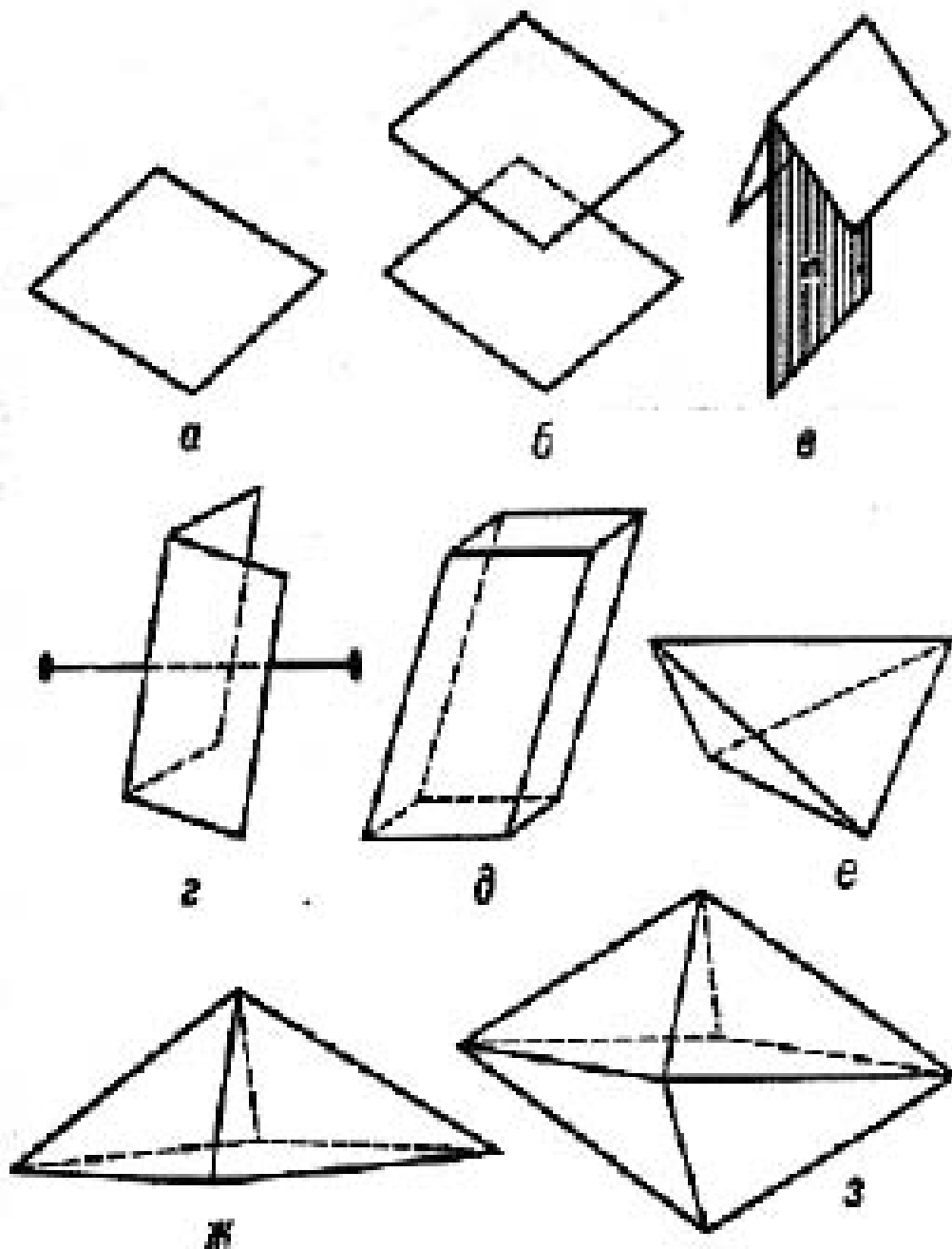


1. Призми на средните сингонии: а-тригонална; б-дитригонална; в-тетрагонална; г-дитетрагонална; д-hexагонална; е-дихexагонална;

2. Пирамиди на средните сингонии: а-тригонална; б- дитригонална; в- тетрагонална; г- дитетрагонална; д- hexагонална; е - дихexагонална



1. Положителен и отрицателен скаленоедър: а-тетрагонален;б- дитригонале;
2. десен и ляв трапезоедър: а-тригонален; б- тетрагонален; г- хексагонален.



Прости форми на нисшите сингонии: а-моноедър; б- пинакоид; в- диедър; г- диедър с ос; д- ромбична призма; е – ромбичен тетраедър; ж- ромбична пирамида; з- ромбична дипирамида

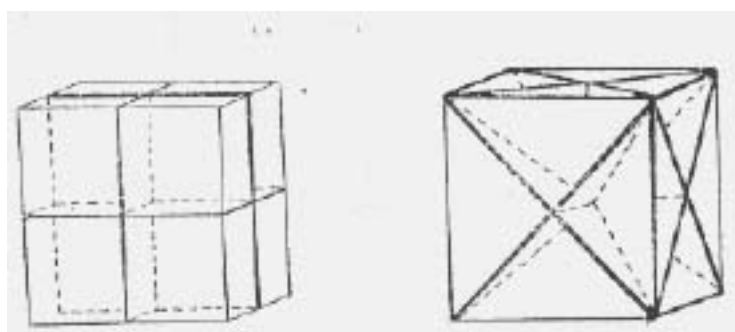
Симетрия на кристалите

Симетрия (от гръцката дума “съразмерие”) най-общо е закономерно повтаряне на равните части на тялото. Симетрията е едно от най-важните свойства на материята.

Кристалите имат правилна геометрична форма. За тях е характерна повтаряемост на еднаквите ограничителни елементи - стени, ръбове и върхове, установяваща се при извършване на симетрични операции. Тя се означава като симетрия на кристалите.

Различават се три вида елементарни пространствени движения с помощта на които точките на правилната система могат да бъдат съвместени една с друга: 1. Паралелен пренос и инверсия; 2. Завъртане около мислена права; 3. Отражение в мислена равнина. Тези движения се наричат симетрични операции. Чрез тях се установява повтаряемост на ограничителните елементи на кристалите в съответствие с тези три симетрични операции. За кристалите са характерни три типа елементи на кристалната симетрия: равнини на симетрия, оси и център на симетрия.

Равнина на симетрия (P) е мислена огледална плоскост, разделяща кристала на две еднакви половини, които се отнасят помежду си, както предмет със своя огледален образ. Плоскостите на симетрия могат да минават през противоположни ребра, перпендикулярни на тях. Броят на равнините на симетрия в различни обекти може да е различен. Например в куба те са девет.



Фиг. 8. Девет равнини на симетрия на куба

Равнината на симетрия се отбелязва с P (от латински “планус” - равнина). Броят на равнините се записва отпред - 9P (фиг. 8). Има кристали без равнини на симетрия.

Ос на симетрия (G) е мислена права, минаваща през средата на кристала при завъртането около която на 360° през равни ъглови интервали еднаквите ограничителни

елементи идват няколко пъти

(n) в едно и също положение. Осите на симетрия могат да минават през върховете на кристала, средите на ребрата и центровете на стените или да са перпендикулярни на последните. Ритъмът на симетричната операция се определя от равенството: $n = 360^\circ/\alpha$, където n е броя на припокривания на фигурата при въртене на кристала на 360° , а α е ъгъл на завъртане, при който се наблюдава повтаряне на един и същи ограничителен елемент.

Осите на симетрия се означават с G (от гръцки “ гирос” - въртя) . Порядъкът се записва като индекс горе. Тези оси, които минават през два еднакви по форма и големина ограничителни елемента в кристала се определят като биполярни.

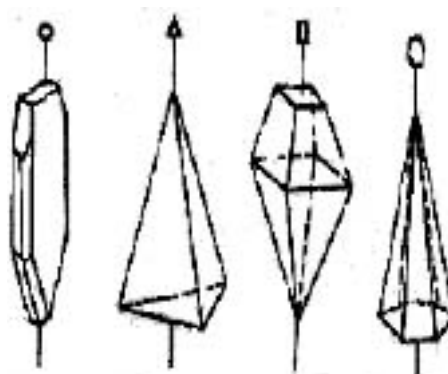
таблица 1

ъгъл на завъртане	порядък	ос	обозначение
$\alpha = 60^\circ$	$n=360^\circ/60^\circ$	шесторна (хексагира)	G_6
$\alpha = 90^\circ$	$n=360^\circ/90^\circ$	четворна (тетрагира)	G_4
$\alpha = 120^\circ$	$n=360^\circ/120^\circ$	тройна (тригира)	G_3
$\alpha = 180^\circ$	$n=360^\circ/180^\circ$	двойна (дигира)	G_2
$\alpha = 360^\circ$	$n=360^\circ/360^\circ$	единично (моногира)	G_1

-

Броят на установените в един кристал оси на симетрия се записва с цифра пред G , например $6G_2$

Полярни са осите на симетрия, които минават през два различни ограничителни елемента или два еднакви, но различни по форма и (или) големина ограничителни елемента (фиг. 9-а). Обозначават се така: G_{2p} , G_{3p} , G_{4p} , G_{6p} . Инверсионна ос на симетрия (гирида) е права линия при завъртане около която на определен ъгъл (α) и оглеждане през инверсионен център или равнина на симетрия ограничителни елементи от кристала се припокриват сами със себе си. В същото време всяка от тях се явява проста ос на симетрия (фигура 9-б). Гиридите се обозначават: G_i^2 , G_i^3 , G_i^4 , G_i^6 .

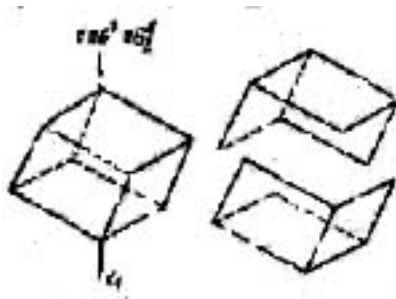


Фиг. 9-а. Кристали с полярни оси на симетрия

Център на симетрия (Z) е мислена точка в средата на кристала или по отношение на срещу полож ни елементи, в която всяка права, съединяваща противоположни ограничителни елементи се дели наполовина. Центърът на симетрия може да бъде само един. При наличие на център на симетрия на всяка стена отговаря друга паралелна и равна стена.

На фигура 8 кристалът е с център на симетрия, а на фигура 9-а центърът на симетрия отсъствува. При наличие на център на симетрия срещуположните страни в кристала са еднакви и паралелни (обратно-паралелни).

Центърът на симетрия е инверсионен, защото той е мислена точка съвпадаща с геометричния център на кристала, в която еднаквите по форма и големина ограничителни елемента се припокриват чрез инверсия (оглеждане чрез обръщане на образа на 180°). Отбелязва се с Z .



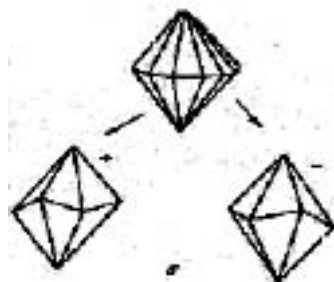
Фиг. 9-б Хексагириода

Съвкупността от елементите на симетрия в даден кристал определя неговата симетричност и се нарича формула на симетрия (вид симетрия).

На фигура 8 формулата на симетрия е $3G_4, 4G_3, 6G_2, 9PZ$. Извеждането на съвкупността на елементите на симетрия се контролира от шест правила на **32 кристалографски класа**. Към даден клас принадлежат винаги по седем прости форми. Всеки клас носи името на тази проста форма, която има най-голям брой стени.

Тридесет и двата вида симетрии се групират в седем сингонии (сингония- от гръцки: син - еднакъв и гониус - ъгъл). Различаваме три категории сингонии: **висша** (кубична) сингония с голям брой от елементи на симетрия, **средни** - тетрагонална, тригонална и хексагонална с една ос от порядък по - голям от 2 и **нисши** - триклинна, моноклинна и ромбична, в които могат да присъстват оси на симетрия само от втори порядък. Разпределението на 32-та кристалографски класа в съответните сингонии е следното: в триклинна сингония - 2 класа; в моноклинна сингония - 3 класа; в ромбична - 3 класа; в тетрагонална - 7 класа; в тригонална - 5 класа; в хексагонална - 7 класа и в кубична сингония - 5 класа.

Най-високосиметричните класове от различните сингонии се означават като холоедрични. Простите кристални форми от тези класове се характеризират с максимален брой стени, които са възможни за класа и неговата форма на симетрия. Тези кристални форми се наричат холоедри (пълностенници). Останалите класове от дадена симетрия имат по-ниска симетричност. Те имат редуциран брой кристални стени на простите форми. Тези класове се означават като мероедрични, а простите форми - като мероедри. Когато мероедричните форми съдържат половината от броя на съответните холоедрични форми те се наричат хемиедрични (от гръцки “хеми”-половина).

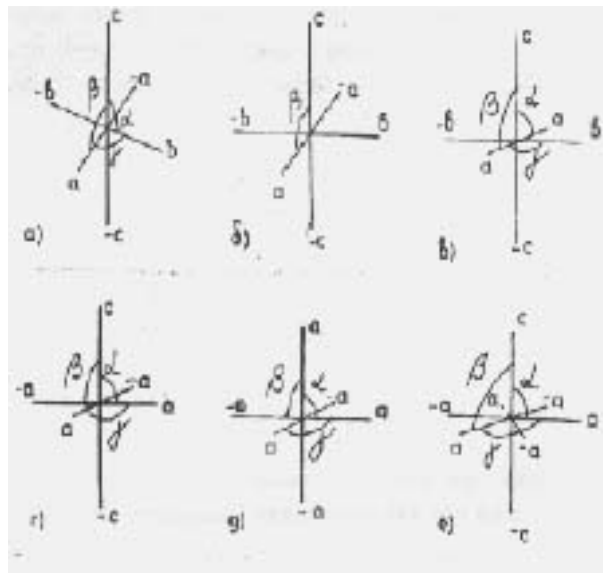


Фиг. 10. Извеждане на позитивен (+) и негативен (-) скаленоедър от дихексагонална бипирамида.

На фиг. 10 дитригоналният скаленоедър се извежда чрез удължаване стените на дихексагонална бипирамида през една т. е. чрез редуциране стените на холоедричната форма на половина. Новите хемиедрични форми се припокриват при завъртане около една от осите на симетрия на определен ъгал и се означават като конгруентни (съвместили при завъртане). Те се бележат съответно като позитивна(+) и негативна (-). При случаите, когато хемиедричните форми се припокриват чрез оглеждане се наричат енантиоморфни и се означават съответно като леви и десни.

Видове осни кръстове

В кристалографията за определяне на положението на стените на кристала в пространството се използват координатни системи, които се означават като осни кръстове или кристалографски оси. Осните кръстове се състоят от три или четири оси с определена дължина и ъгли, които се заключват между тях. Първата ос се бележи с “а”. Тя е насочена към наблюдателя. Втората ос е паралелна на раменете му и се бележи с “ в”.Третата ос е вертикална и се бележи с “с”.



Фиг. 11 . Видове осни кръстове за триклинна (а) , моноклинна (б) , ромбична (в) , тетрагонална (г) , кубична (г) , хексагонална и тригонална (е) сингонии

Осите, които са насочени към наблюдателя, надясно и нагоре са положителни, а посоките им надолу, наляво и обратно на наблюдателя са отрицателни. В кристалографията се използват шест вида осни кръстове.

Кристалните форми от една и съща сингония се ориентират върху един и същи осен кръст. Осният кръст за триклинна сингония се състои от три различни по дължина оси a , b , c , сключващи помежду си ъгли, които са различни от 90° . За моноклинните кристали кристалографските оси също не са равни. Ъгълът между ос “ c ” и ос “ a ” е или по - голям или по - малък от 90° , а останалите два ъгъла са прави. Ромбичните кристали се ориентират върху осен кръст изграден от три оси с различна дължина, които сключват помежду си прави ъгли. За тетрагоналните кристали се запазва перпендикулярността на осите, като първата и втората ос са равни ($a = b$), а третата ос “ c ” е или по-дълга или по-къса. Оста “ c ” се означава като главна кристалографска ос.

В кубична сингония трите оси са равни помежду си и са взаимно перпендикулярни. За тези пет сингонии се използват трираменни осни кръстове. За ориентиране на формите от тригонална и хексагонална сингония се използва осен кръст, който е изграден от три еднакви по дължина хоризонтални оси и перпендикулярно на тях четвърта ос “ c ”. Ъгълът между ос “ a ” и “ b ” е 120° , а другите ъгли са прави.

Центърът на осния кръст съвпада с геометричния център на кристала, а раменете на осните кръстове най - често с посоките на важни кристалографски направление. Отношението на дължините на кристалографските оси, измерени в средата на кристала се нарича осово отношение. За всяко кристално вещество осовото отношение и ъглите са точно определени, затова те се наричат кристалографски константи. Като се използват координатните оси за

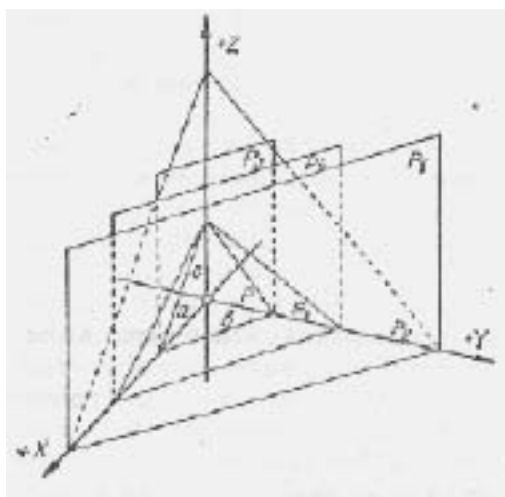
различните сингонии, може да се определи положението на всяка кристална стена в пространството. Така се спазва условието, че еднаквите по форма и големина стени от един идеално развит кристал лежат по един и същи начин върху раменете на осния кръст. Само ако е спазено това условие осният кръст е правилно избран .

Един осен кръст обединява кристалите от няколко кристалографски класове в сингония (система). За всяка сингония се избира един осен кръст. Те се подбират така, че еднаквите по форма стени да имат еднакво положение върху координатните оси. Единствено тригонална и хексагонална сингония се решават върху един осен кръст .

Закон за рационалните параметрични отношения .

Кристалните стени лежат така върху осния кръст, че отсичат отсечки, които се наричат параметри. Дължината на тези параметри се измерва от средата на осния кръст до мястото, където стената пресича кристалографските оси. Отношението между параметрите се нарича параметрично отношение. Положението на кристалната стена се определя от нейните параметри. Кристална стена, чиито параметри съответстват на осно отношение се нарича основна стена (обща проста форма). Параметрите на основната стена се бележат с общи знаци.

Например на фиг. 13 за основните стени: P те са $a : v : c$ и $P_3 - a : v : c$. За кристалите от кубична сингония те са $a : a : a$, за тези от тетрагонална сингония - $a : a : c$, за хексагонална и тригонална $a : a : -a : c$ и за ромбична моноклинна и триклинна сингония - $a : v : c$.



Фиг. 12. Параметри на кристалните стени

Спрямо основните стени (P и P_3) параметрите на другите производни стени (P_1, P_2, P_4 и P_5) от фиг. 12 могат да се отбележат така:

за стена $P_1 - 2a : 2v : c$

за стена $P_2 - m a : n v : p c$

за стена $P_4 - 2a : 2v : \sim c$

и за стена $P_5 - m a : n v : \sim c$

Числата m , n и p са общи и означават колко пъти параметрите на дадена кристална стена са по - големи или по - малки от параметрите на основната стена. Те се наричат коефициенти и са винаги рационални числа. Техните стойности са близки до единица и рядко достигат до 10. Законът за рационалните параметрични отношения е формулиран от Р. Ж. Ои. Вторият закон в кристалографията гласи: **“Отношенията на параметрите на стените на един кристал върху съответните координатни оси са представени от рационални и то предимно прости числа”**.

Символи на кристалните стени. Закон за зоните

Тъй като параметричното отношение определя точно положението на кристалната стена върху осния кръст то може да служи за означаване на съответната стена. Простите форми са оградени с еднакви по форма и големина стени. Най - често това е стената, която няма негативни знаци и се разполага горе в дясно на осния кръст. През 1809 г. Кр. Вайс въвежда параметричните отношения като символи на кристалните стени. Те са прости, нагледни и точни. Например на фиг. 12 параметричното отношение на кристалната стена P е $a : v : c$. Символите за простата форма бипирамида от ромбична сингония, която има същото параметрично отношение се записват в малки скоби ($a : v : c$). Вайсовите символи са доста разтегнати и неудобни за писане върху стените при чертане на кристалите. Поради това през 1825 г. У. Х. Милер предлага по - кратки индекси . Те се получават така. От фиг. 13 параметричните отношения на стена P_2 са $2a : 2v : c$. Разделяме параметрите на основната стена (P) с тези на разглежданата стена P_2 и получаваме $1/2:1/2 : 1/1$. Те съответствуват на реципрочните стойности на коефициентите $(2, 2, 1)$ и показват колко пъти параметрите на основната стена са по - малки или по - големи от параметрите на дадена стена. Ако приведем тези стойности към

еднакъв знаменател ще получим съответно $1 : 1 : 2$. Така получените Милерови индекси се записват без знак за отношение и се поставят в малки скоби при означаване на стена - например (112) и в големи скоби ако се означава цялата проста форма - например $\{112\}$. Когато параметрите не са точно определени Милеровите индекси се означават с букви hkl . Общите символи на която и да е стена са (hkl) .

и за проста форма - $\{hkl\}$. Ако кристалната стена е успоредна на дадена кристалографска ос и има коефициент \sim (фиг. 13 стена P_3), то реципрочната стойност е 0, например $\{110\}$.

Отрицателният знак за параметрите се поставя над индекса - например {111}. Когато Милеровите индекси се отнасят за кристална стена се ограждат с малки скоби, а за прости форми-с големи скоби..

За тригонална и хексагонална сингония Милеровите индекси са преработени от О. Браве при четирираменен осен кръст . Простата форма (стена) се означава с четири индекса . Когато те са общи числа се записват с {hk i l}, а ако са точно определени се записват с числа, например {0111} . Тези индекси се наричат Бравесови .

В кристала стените, които се пресичат във взаимно паралелни ръбове образуват кристалографска зона. Стените принадлежащи на една и съща зона се наричат тавтозонални . Общата посока на ръбовете се означава като зонална ос . Зоналната ос е мислена права, която минава през центъра на осния кръст и е успоредна както на ръбовете на дадена зона , така и на прилежащите и стени . Тя може да се представи като диагонал на паралелепипед със страни Ua , Vb и Wc . Координатите U , V и W съставляват така наречения зонен символ и се поставят в правоъгълни скоби [uvw] . На практика числените стойности на U , V и W се получават от съответните индекси на стени от дадена зона чрез кръстосано умножение , подобно на изобразяването в математиката на детерминанти . Всеки индекс се написва два пъти , първите и последните цифри се елиминират и след това се умножава и изважда на кръст . Например:

$$\begin{array}{ccccccc} h_1 & k_1 & & l_1 & & h_1 & k_1 & l_1 \\ & & x & & x & & x & \\ h_2 & k_2 & & l_2 & & h_2 & k_2 & l_2 \end{array}$$

$$U = k_1.l_2 - l_1.k_2 , V = l_1.h_2 - l_2.h_1 , W = h_1.k_2 - k_1.h_2$$

Например за две стени от пинакоиден тип с индекси (100) и (010), пресечката помежду ще представлява посоката на съответната зонална ос със символ [u v w] = [001]. Третият закон в кристалографията на зоните (известен като закон на Вайс) гласи: **“Всяка плоскост, която едновременно принадлежи към две зони е налична или възможна кристална стена”**.

Списък на 32-та кристалографски класове таблица 2

Сингонии	Наименование на класа	Формула на симетрия	Обозначения	
			по Шьонфлис	по Херман-Моген
Кубична				
1.	Хексаоктаедричен	$3G_4G_36G_29PZ$	hO	m3m
2.	Хексатетраедричен	$3G_24Gp_36P$	dT	-43m

3. Дидодекаедричен	$3G_24G_3Z$	hT	$m\bar{3}$
4. Пентагон триоктаедричен	$3G_44G_36G_2$	O	432
5. Пентагон тритетраедричен	$3G_24G_3$	T	23
Тетрагонална			
6. Дитетрагонално -бипирамидален	G_44G_25PZ	hD_4	4/mmm
7. Тетрагонално -скаленоедричен	G_42G_22P	$dD_2=dV$	-42m
8. Тетрагонално -бипирамидален	G_4PZ	hG_4	4/m
9. Дитетрагонално -пирамидален	$G_{4p}4P$	VG_4	4mm
10. Дитетрагонално -трапецоедричен	G_44G_2	D_4	422
11. Тетрагонално -пирамидален	G_{4p}	C_4	4
12. Тетрагонално -тетраедричен	G_2	S_4	-4
Хексагонална			
13. Дихексагонално -бипирамидален	G_66G_27PZ	D_6h	6/mmm
14. Дихексагонално -пирамидален	G_p^66P	C_6v	6 mm
15. Дитригонално - бипирамидален	G_33G_2p4P	D_3^h	-6m2
16. Хексагонално - бипирамидален	G_6PZ	C_6h	6/m
17. Хексагонално - трапецоедричен	G_66G_2	D_6	622
18. Хексагонално - пирамидален	G_{6p}	C_6	6
19. Тригонално - бипирамидален	G_33P	G_3^h	-6

Тригонална

20. Дитригонално - скаленоедричен	G_33G_23PZ	$D-3d$	$3m$
21. Дитригонално - пирамидален	$G_{3p}3P$	$C-3V$	$-3m$
22. Тригонално - трапецоедричен	G_33G_{2p}	$D3$	32
23. Ромбоедричен	G_2Z	$C_{3i}=S_6$	$- 3$
24. Тригонално - пирамидален	G_{3p}	C_3	3

Ромбична

25. Ромбично-бипирамидален	$3G_23PZ$	$D2h=hV$	mmm
26. Ромбично -пирамидален	$G_{2p}2P$	$C2v$	$mm2$
27. Ромбично-тетраедричен	$3G_2$	$D2=V$	222

Моноклинна

28. Призматичен	G_2PZ	C_{2h}	$2/m$
29. Домален	P	C_5	m
30. Диедричен (осен)	G_{2p}	C_2	2

Триклинна

31. Пинакоидален	Z	$C_1=S_2$	-1
32. Моноедричен	$-$	C_1	1

Кубична (изометрична) сингония

Кристалните форми от петте класа на кубична сингония се ориентират в пространството еднозначно върху осен кръст изграден от три равни рамене , които са перпендикулярни помежду си.

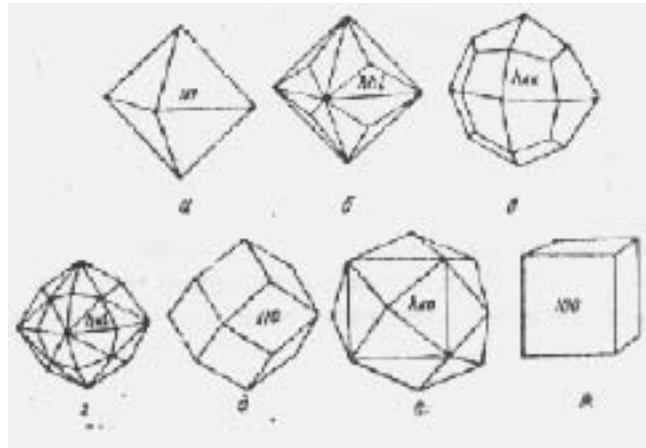
Хексаоктаедричният клас има обща формула на симетрия

$3G_4 4G_3 6G_2 9PZ$. Осите на координатната система се ориентират по посока на трите тетрагири.

Седемте прости форми са:

прости форми :	Вайсови	Милерови
	символи	индекси
1 октаедър	(a : a : a)	{ 111 }
2 тригонтриоктаедър	(a : a : na)	{ hhl }
3 тетрагонтриоктаедър	(a : na : na)	{ hkk }
4 хексаоктаедър	(a : na : ma)	{ hkl }
5 ромбододекаедър	(a : a : Γa)	{ 110 }
6 тетраhexаедър	(a : na : Γa)	{ hk0 }
7 хексаедър	(a : Γa : Γa)	{ 100 }

В този клас кристализират минералите : самородна мед (Cu), сребро (Ag) , злато (Au), диамант (C), флуорит (CaF₂), халит (NaCl) , магнетит (Fe₃O₄) , галенит (PbS) и други минерали.



Фиг. 13. Прости форми от хексаоктаедричния клас :

а-октаедър {111}; б - тригонтриоктаедър {hhl}; в - тетрагон триоктаедър {hkk}; г - хексаоктаедър {hkl} ; д - ромбододекаедър {110}; е-тетраhexаедър {hk0}; ж - хексаедър (куб) {100}

Хексатетраедричен клас - $3G_2 (3G_{4i})4G_{3P} 6P$.

Кристалографските оси съвпадат с трите дигири(тетрагероиди).

Простите форми са : тетраедар - (+) { 111 } и (-) { 111 }; тетрагонтитетраедър-(+){hhl} и (-){hhl}; тригонтитетраедър-(+){hkk} и (-){hkk}; (хексатетраедър - (+) {hkl} и (-){hkl}. Ромбододекаедърът, тетраhexаедърът и хексаедърът се повтарят от холоедричния клас.

В този клас кристализира сфалеритът (ZnS), тетраедритът

(Cu₁₂Sb₄ S₁₃) и други минерали.

Дидодекаедричен клас - $3G_24G_3PZ$. Кристалографските оси се ориентират по трите

двойни оси. Пет от формите на холоедричния клас се повтарят : октаедър, тригонтриоктаедър, тетрагонтриоктаедър , ромбододекаедър и хексаедър. Новите прости форми са : дидодекаедър - (+) {hkl} и (-) {hkl} и пентагондодекаедър - (+) {hko} (-) {kh0}. В този клас кристализира пиритът (FeS₂).

Тетрагонална сингония

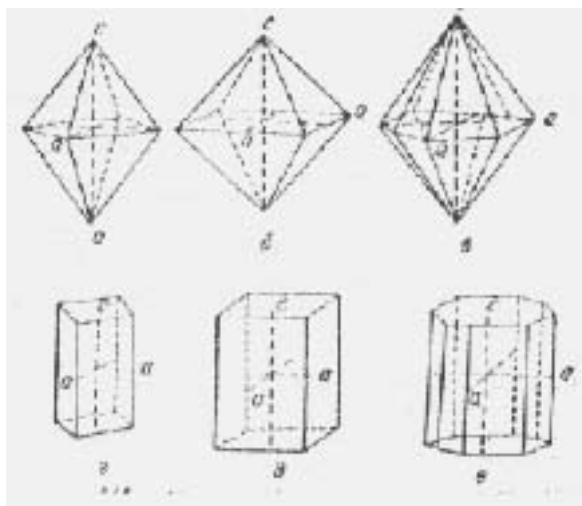
Има седем класа . Осният кръст на тетрагоналната сингония е трираменен . Две от неговите рамена “а” и “в” са равни, а вертикалната ос “с” е различна по дължина. Трите оси сключват помежду си прави ъгли . Оста “с” е главна кристалографска ос .

Дитетрагонално - бипирамидалният клас има обща формула на симетрия G₄ 4G₂ 5PZ . За ориентиране на осния кръст се използват направлението на 2 дигири (за a₁ и a₂) и тетрагирата (“с”) . Поради наличието на 2 дигири по-дълги и 2 дигири по-къси, кристалните многостенници могат да се ориентират в две положения, поради което простите форми са от I или II вид .

Простите форми в този клас са представени от три вида прости кристални форми. Основните бипирамиди имат и производни: I и II вид - само по оста “с”, а за дитетрагоналната бипирамида - по трите кристалографски оси . За дитетрагоналната призма производната форма е по двете оси a₁ и a₂.

Седемте прости форми са: таблица 4

- | Тетрагонални бипирамиди | Тетрагонални призми |
|---|-----------------------------------|
| 1. от I вид - основна {111} | 4. от I вид - { 1 1 0 } |
| - производна { h h l } | 5. от II вид - { 1 0 0 } |
| 2. от II вид - основна {1 0 1} | 6. дитетрагонална призма {h k o } |
| - производни { h 0 l } | |
| 3. дитетрагонална бипирамида | |
| - основни { h k l } | |
| - производни { h ₁ k ₁ l ₁ } | |
| 7. базичен пинакоид {001} | |



Фиг.14. Прости форми от дитетрагонално-бипирамидалния клас: а - тетрагонална бипирамида от I вид $\{111\}$; б - тетрагонална бипирамида от II вид $\{101\}$; в - дитетрагонална бипирамида $\{hkl\}$; тетрагонална призма: г-I вид - $\{100\}$; д - II вид $\{100\}$; е - дитетрагонална призма $\{hko\}$

В този клас кристализират минералите: рутил - TiO_2 , каситерит - SnO_2 , пиролузит - MnO_2 , циркон - $ZrSiO_4$ и други минерали.

Хексагонална сингония

Кристалните форми на седемте класа на хексагонална сингония се решават върху четирираменен осен кръст. Три от осите (a_1, a_2, a_3) лежат в хоризонтална равнина и са равни помежду си. Четвъртата ос "с" е перпендикулярна на тази равнина и е различна по дължина от останалите оси. Тя е главната кристалографска ос. Ъглите между третата и втората ос и между третата и първата ос са прави, а ъгълът между първата и втората ос е 120° .

Дихексагонално - бипирамиден клас - общата формула на симетрия е $G_6 6G_2 7PZ$. Възможни са две положения за ориентиране на равните оси - по три по-дълги или по посоката на три по-къси дигири, простите форми се явяват в два вида, четвъртата ос "с" съвпада с хексагирата. Простите форми са:

таблица 5

Хексагонални бипирамиди Хексагонални призми

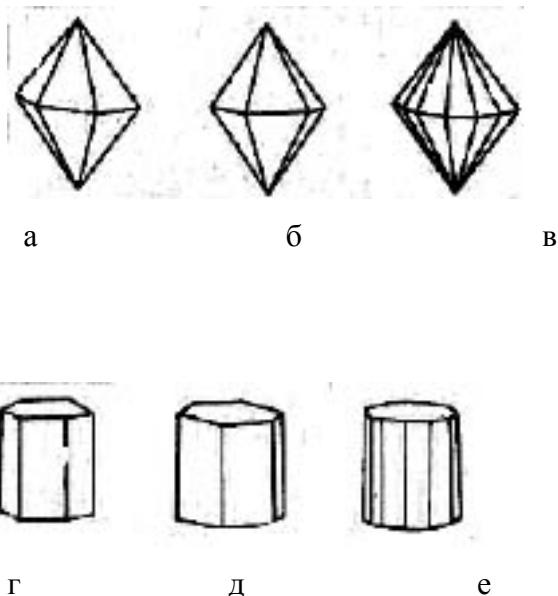
- | | |
|--|----------------------------------|
| 1. от I вид - основна $\{1\ 0\ -1\ 1\}$ | 4. от I вид - $\{1\ 0\ -1\ 0\}$ |
| - производна $\{h\ 0\ -h\ 1\}$ | 5. от II вид - $\{1\ 1\ -2\ 0\}$ |
| 2. от II вид - основна $\{1\ 1\ -2\ 1\}$ | 6. дихексагонална |
| - производна $\{h\ h\ -2h\ 1\}$ | призма $\{hk\ -l\ 0\}$ |
| 3. дитхексагонална бипирамида | |

- основна $\{ h k -i l \}$

- производна $\{ h_1 k -i_1 l_1 \}$

7. базичен пинакоид $\{ 001 \}$

И тук както в тетрагонална сингония основните форми имат и производни .В този клас кристализират минералите: графит-(C), пиротин - ($Fe_{1-x}S$), молибденит (MoS_2), берил ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$ и други минерали



Фиг. 15. Прости форми от дихексагонално - бипирамидалния клас : а и б - хексагонална бипирамида от I $\{10-11\}$ и II вид $\{1102\}$; в - дихексагонална бипирамида $\{hk-il\}$; г и д - хексагонална призма I $\{10-10\}$ и II $\{1100\}$ вид ; е - дихексагонална призма $\{hk-l0\}$; базичен пинакоид $\{0001\}$

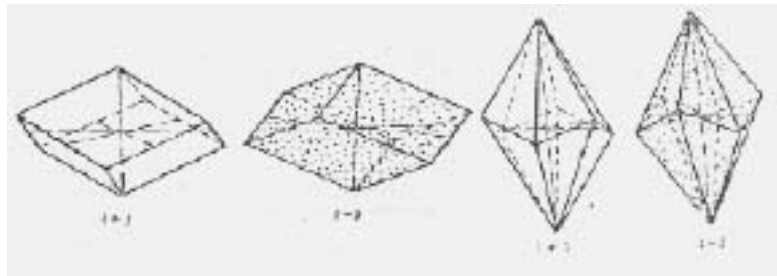
Тригонална сингония

Петте класа от тази сингония се ориентират върху същия осен кръст, върху който се решават формите от хексагонална сингония: $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$. По тази причина в тригонална сингония много често се повтарят прости форми от хексагонална сингония .

Дитригонално - скаленоедричен клас. Симетрия $G_3 3G_2 3PZ$. Осите a_1 , a_2 и a_3 съвпадат с посоката на $3G_2$, а “ c”(главната кристалографска ос) - с G_3 . Простите форми имат същите наименования и символи, както в дихексагонално - бипирамиден клас . Изключение правят две прости форми :

1. ромбоедър I вид	(+) { 1 0-1 1 }	{ h 0-h 1 }
	(-) { 0 1-1 1 }	{ 0 h-h 1 }
	основни	производни
2. Дитригонален скаленоедър	(+) { h k- i 1 }	{ h ₁ k ₁ -i ₁ l ₁ }
	(-) { k h- i 1 }	{ k ₁ h ₁ -i ₁ l ₁ }

Те могат да се извеждат чрез редуциране от хексагонална бипирамида I вид и от дихексагоналната бипирамида.



1 а

1 б

1 в

1 г

Фиг. 16. 1 а) позитивен (+) и 1 б) негативен (-) ромбоедър;

1 в) позитивен (+) и 1 г) негативен (-) скаленоедър

В този клас кристализират минералите : калцит (CaCO_3), родохрозит (MnCO_3), сидерит (FeCO_3), корунд (Al_2O_3), хематит (Fe_2O_3) и магнезит (MgCO_3).

Ромбична сингония

Ромбичният осен кръст има три различни по дължина оси, които сключват помежду си прави ъгли ($a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$). Върху този осен кръст се решават формите от трите класа .

Ромбичнобипирамиден клас. Симетрия $3G_2 3PZ$. Трите оси съвпадат с посоката на трите дигири, като се избира $a < c < b$. Простите форми са: таблица 7

1. Ромбична бипирамида - основна { 111 }, производна { hkl }

Призми

Пинакоиди

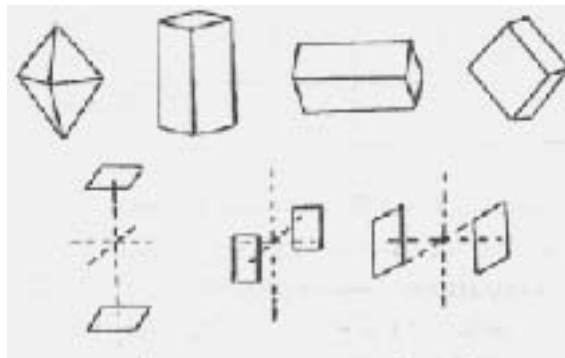
2. отвесна - основна { 1 1 0 } 5. преден { 1 0 0 }

- производна { h k 0 } 6. страничен { 0 1 0 }

3. надлъжна - основна { 0 1 1 } 7. базичен { 0 0 1 }

- производна { 0 k 1 }

4. напречна - основна $\{101\}$
 - производна $\{h01\}$



Фиг. 17. Прости форми от ромбично - бипирамидалния клас: ромбична бипирамида $\{111\}$; отвесна $\{110\}$, напречна $\{101\}$ и надлъжна $\{011\}$ призма; базичен $\{001\}$, преден $\{100\}$ и страничен $\{010\}$ пинакоид

В този клас кристализират минералите: самородна сяра (S), стибнит (Sb_2S_3), арагонит ($CaCO_3$), барит ($BaSO_4$), марказит (FeS_2).

Моноклинна сингония

Кристалните многостенници от трите класа на моноклинна сингония се решават върху трираменен кръст: $a \neq b \neq c$. Ъглите α и γ са прави, ъгълът β е по-голям или по-малък от 90° . Оста "а" е наклонена спрямо наблюдателя и другите две оси, поради което сингонията се нарича моноклинна.

Моноклинно-призматичен клас. Симетрия $G_2 PZ$. Оста "в" съвпада с дигирата, а осите "а" и "с" се ориентират по направленията на две от най-добре изразени системи от ръбове.

Седемте прости форми са:

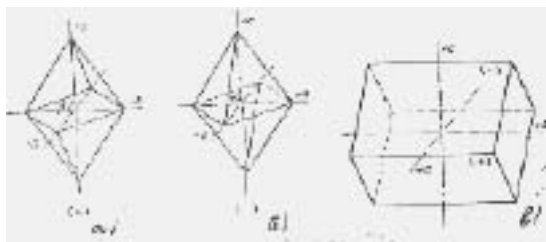
таблица 8

прости форми	основни	производни
1. моноклинна призма (+)	$\{111\}$	$\{hk1\}$
	$\{-111\}$	$\{hk1\}$
2. напречен пинакоид (+)	$\{101\}$	$\{h01\}$
	$\{-101\}$	$\{h01\}$
3. отвесна призма	$\{110\}$	$\{hk0\}$
4. надлъжна призма	$\{011\}$	$\{0k1\}$
5. преден пинакоид $\{100\}$		6. страничен пинакоид $\{010\}$

7. базичен пинакоид { 001 }

Позитивните форми лежат в полето на острия ъгъл $\beta < 90^\circ$, а негативните - в полето на тъпия ъгъл $\beta > 90^\circ$.

В този клас кристализират минералите: гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ортоклаз (KAlSi_3O_8), авгит ($\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$), арсенопирит (FeAsS), амфибол и други минерали.



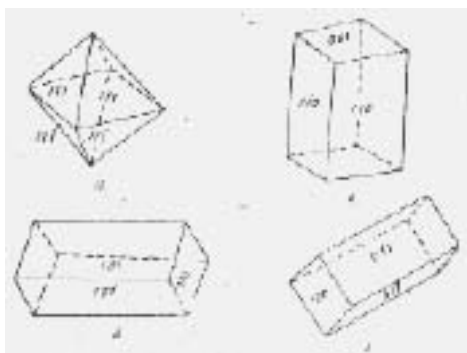
Фиг. 18. Позитивна (а) {111} и негативна (б) {111} моноклинна призма , (в) - позитивен {101} и негативен {101} напречен пинакоид

Триклинна сингония

Тази сингония има два класа, формите от които се решават върху раменен осен кръст : $a \neq b \neq c ; \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$.

Триклинно - пинакоидален клас . Симетрия Z . За осен кръст се избират три добре развити в кристала направления (зони). Всички прости форми в класа са пинакоиди, които според положението им на осния кръст се разделят на три типа :
таблица 9

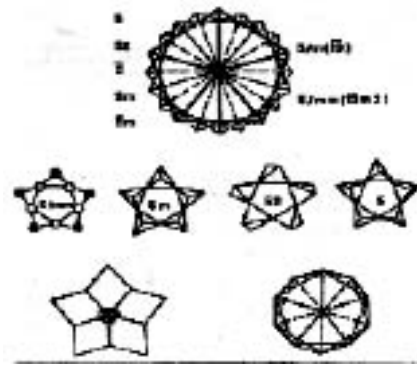
прости форми		основна	производна
триклинен пинакоид	горен десен	{ 1 1 1 }	{ hk l }
I тип	горен ляв	{ 1 1 1 }	{ hk l }
	долен десен	{ 1 1 1 }	{ hk l }
	долен ляв	{ 1 1 1 }	{ hk l }
II тип			
отвесен пинакоид	десен	{ 1 1 0 }	{ h k 0 }
	ляв	{ 1 1 0 }	{ h k 0 }
надлъжен пинакоид	десен	{ 0 1 1 }	{ 0 k l }
	ляв	{ 0 1 1 }	{ 0 k l }
напречен пинакоид	горен	{ 1 0 1 }	{ h 0 l }
	долен	{ 1 0 1 }	{ h 0 l }
III тип			
преден пинакоид		{ 1 0 0 }	
страничен пинакоид		{ 0 1 0 }	
базичен пинакоид		{ 0 0 1 }	



Фиг. 19. Комбинационни форми от : а) триклинен пинакоид $\{111\}$, б) отвесен пинакоид $\{110\}$, в) напречен $\{101\}$ и страничен $\{010\}$ пинакоид, г- надлъжен $\{011\}$ и преден $\{100\}$ пинакоид
 В този клас кристализират минералите : халканти ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), кианит (Al_2SiO_4), албит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) и други минерали.

Квазикристали и пентагонална кластърна симетрия

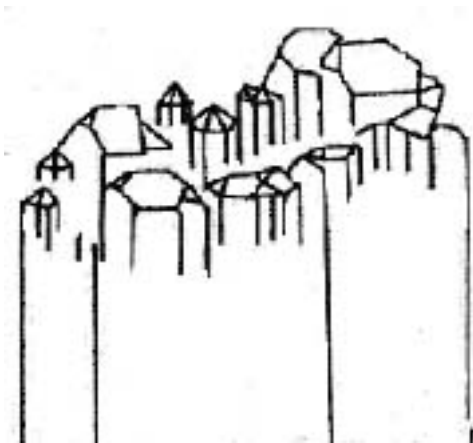
В природата се срещат форми на срастъци и на отделни кристали на диаманта, пирита и на други минерали с почти идеална петорна симетрия. Основните форми са правилния пентагондодекаедър и икосаедър. Петорната симетрия се изключва от класическата трансляционна кристалография. Тя е широко разпространена при биообектите. Икосаедричната симетрия е доказана като апериодична структура при редица сплави. Към кластичните кристалографски класове (точкови групи) и съответните системи (сингонии) е прибавена и една икосаедрична система с две точкови групи 2-35 и $m-35$. Специфичните форми са примерни и поради това се включват в кубичната система. Пентагоналната кластерна система е разработена от академик Иван Костов в монографичната Минералогия (1993) и в редица публикации през последните 15 години. Модел за тълкуване на квазикристалите се дава от т.нар. мозайка на Пенроуз. Кластери (групи от атоми) могат да притежават различна симетрия (фиг. 20). Тяхната симетрия играе важна роля при оформянето на кристали на някои минерали при различни условия на кристализация



Фиг. 20 . Схема на пространствени групи при неklasическата пентагонална система (сингония) и пентагонални кластерни групи с различна симетрия. Долу ляво петорен срастък при диа манти в дясно-икосаедър. (Този подраздел е разработен на основата на монографичната “Минералогия” от Ив. Костов

Кристални агрегати и срастъци

В природата рядко се срещат единични кристали (монокристали). При натрупване на отделните кристали се образуват кристални агрегати. Незакономерни са тези кристални агрегати, в които кристалите са срастнали един с друг в случайно неориентирано положение, като например кристалните друзи и кристалните групи. При закономерните агрегати, положението на един индивид е подчинено на положението на другия или другите. Те се наричат кристални срастъци. Различават се паралелни и същински срастъци. Паралелни са тези срастъци, при които индивидите са разположени така, че техните стени и елементи на симетрия са паралелни помежду си. При паралелното подреждане могат да се образуват : кристален шок, т. н. скептрово развитие, с различен край, кристален шок. Дендрити се образуват при бърза кристализация на разтвори и стопилки. Например зимно време на прозорците се образуват дендрити, които представляват перести образувания - субпаралелни срастъци от кристални скелети. Същински срастъци са тези, при които индивидите могат да се оглеждат в мислена огледална равнина, наречена срастъчна равнина. Има срастъци, при които завъртане на отделните индивиди на 180° около мислената права те се припокриват. Мислената права се нарича срастъчна ос. Срастъчната равнина е винаги паралелна на налична или възможна стена в кристала. От последната се опре-

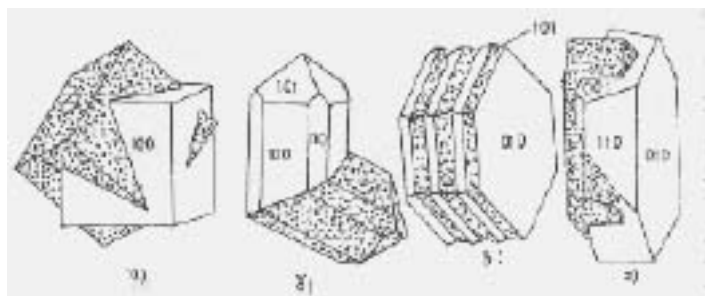


Фиг. 21. Паралелен срастък от кварц

деля законът на срастване.

По - важни закони на срастване и техните названия са следните :

В кубична сингония - $\{111\}$ - шпинелов (шпинел, флуорит); $\{100\}$ - диамантов (диамант) ; $\{110\}$ - пиритов (пирит) ; В тетрагонална сингония - $\{101\}$ - каситеритов (коленчест) (каситерит, рутил); В хексагонална сингония - $[1011]$ (цинкенил); В тригонална сингония - $\{1011\}$ и $\{0001\}$ (калцит) ; $\{0001\}$ -(кварц) ; $\{1120\}$ - бразилски (кварц) ; $\{1122\}$ - японски (кварц) ; В ромбична сингония - $\{110\}$ - арагонитов (арагонит , церусит); $\{032\}$ и $\{232\}$ - ставролитов (ставролит) ; В моноклинна сингония - $\{001\}$ - карлсбадски ; $\{021\}$ - бавенов (ортоклаз) ; $\{001\}$ - манебахов (ортоклаз) ; $\{100\}$ - ластовича опашка (гипс). В триклинна сингония - $\{010\}$ - албитов (плагиоклаз) . На фиг. 22 - а) , б) , в) , г) са посочени различни закони на срастване. Често пъти законът има специално име: шпинелов закон (фиг. 22-а); каситеритов закон - (фиг. 22 - б); албитов закон (фиг. 22 - в) ; карлсбадски закон (фиг. 22 - г). Срастъците биват двойни (фиг. 22 - а , б), тройни, четворни и полисрастъци (фиг. 22 - в) . Те се означават като допирателни (фиг. 22 - б и в) и прорастъци (връстъци) (фиг. 22 - а). Най-често срастват помежду си едни и същи минерали . Рядко се срещат закономерни сраствания и между кристали от различни минерали, които имат сходни кристални решетки. Това явление се нарича епитаксия.



Фиг. 22 . Същински срастъци : а) прорастък при диамант и флуорит по стена на октаедър $\{ 111 \}$; б) допирателен срастък при каситерита по стена на тетрагонална бипирамида $\{ 101 \}$; в) полисинтетен срастък при албит по страничен пинакоид $\{010\}$; г) карлсбадски срастък при ортоклаз по зонална ос $\{ 001 \}$.

Вътрешно устройство на кристалите

Външната симетрия на кристалите е дала на учените основание да изкажат редица хипотези за техния вътрешен строеж. Кристиян Хюйгенс счита, че кристалите на калцита са изградени при правилно подреждане на частици с формата на ротационен елипсоид, като така обяснява и цепителността на кристалите. В 1688 г. италианецът Доменико Гулиелмани изказва предположението, че крайните частици, от които е построен кристала представляват малки кристалчета с формата на макрокристала. През 1749 г. М. Ломоносов създава т. н. корпускулярна теория, според която най-малките частици на материята - корпускулите имат сферична форма. Цепителността на кристалите дава основание на френския кристалограф Рене Жуст Ои да предположи, че кристалите са изградени от интегрални молекули и създава т. н. дескресцентна теория. Използувайки тази теория той извежда закона за рационалните параметрични отношения.

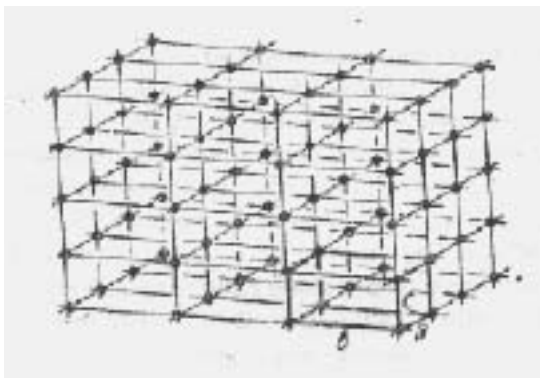
През 1812 г. У. Х. Уоластон предлага отделните интегрални молекули да бъдат заменени от вписани в тях сфери. Сферите се заменят с точките на геометричните им центрове. Съвремените теории за строежа на кристалите използват именно тази идея на Уоластон. Всяка точка представлява геометричен център на атом, молекула или групировки, които се

повтарят до безкрайност в пространството. Тези точки се означават като възли.

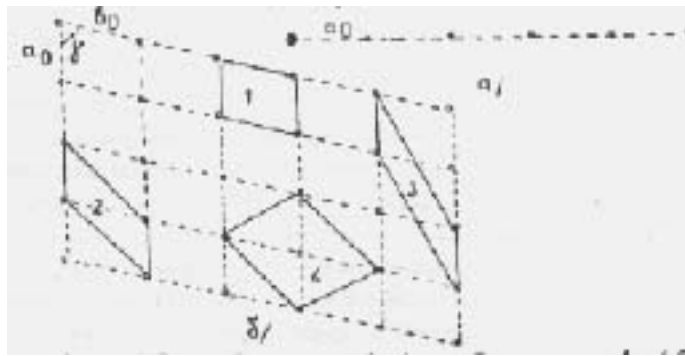
Възлите са безброй. Те са разположени равномерно в прави линии като образуват възлови редици (фиг. 24 - а). Разстоянието между отделните възли се нарича период на идентичност. Възловите редици отговарят на ръбовете на кристала или на важни кристалографски направления в него. Възловите редици образуват равнинна мрежа (фиг. 24 - б). Това са равнини с равномерно разположени върху тях възли. В равнинната мрежа могат да бъдат прокарвани елементарни (фиг. 24 - б 1, 2, 3) паралелограми с възли само по върховете на неелементарни паралелограми (фиг. 24 - б - 4), които имат възли и във вътрешността си. Основен примитивен паралелограм (фиг. 24 - б - 1) е този, който при една и съща площ има най - малък периметър.

Две пресичащи се равнинни мрежи очертават една пространствена решетка (фиг. 23). Пространствената решетка е безкрайна постройка, която се получава чрез паралелно пренасяне (транслиране) на един и същи паралелепипед по посока на кристалографските оси. Този паралелепипед се означава като елементарен (основна или елементарна клетка на решетката). Неговите ребра (а, в, с) имат най - малък период на идентичност по посока на кристалографските оси (a_0 , b_0 , c_0). Те сключват помежду си три основни ъгъла (фиг. 25). Елементарната клетка има минимален обем. Дължината на ребрата и ъглите сключени между тях се наричат геометрични параметри на пространствената решетка. Можем да си представим шест типа елементарни образувачи паралелепипеди (таблица 10).

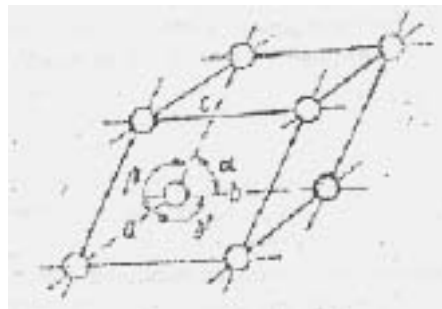
Геометричните параметри на елементарните образувачи паралелепипеда, определящи типа на пространствената решетка са :



Фиг. 23. Пространствена решетка



Фиг. 24. Възлова редица (а) и равнинна мрежа (б)



Фиг. 25. Елементарен паралелопипед (елементарна клетка на кристалната решетка) таблица 10

Тип на решетката	Геометричен параметър	
	линеен	ЪГЛОВ
кубична	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
тригонална	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma = 120^\circ$
хексагонална	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma = 120^\circ$
тетрагонална	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
ромбична	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
моноклинна	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ ; \beta \neq 90^\circ$
триклинна	$a \neq b \neq c$	$\alpha + \beta + \gamma \neq 90^\circ$

В повечето типове пространствени решетки възлите могат да се разпределят във върховете на основните образуващи паралелопипеди като симетрията на решетките при това не се изменя (примитивен тип клетка). В клетките на моноклинната, ромбичната и хексагоналната сингонии възлите могат да се намират също в центъра на тяхната основа (такива решетки се наричат базоцентрирани). В ромбичната, тетрагоналната и кубична решетки възлите могат да се

намираят също в центъра на клетката (обемно центриран тип клетка), а в ромбичната и кубичната решетка - в центъра на стените (стеноцентриран тип).

В 1856 г. френският учен О. Браве доказва, че съществуват 14 основни типа кристални решетки, от които 6 са примитивни (фигура 26). През 1890 г. руският кристалограф Е. С. Фьодоров намира, че при различно подреждане на клетките са възможни само 230 различни вида симетрии. В кристалографията те се означават като пространствени групи на Фьодоров.

Рентгенометрия на кристалите

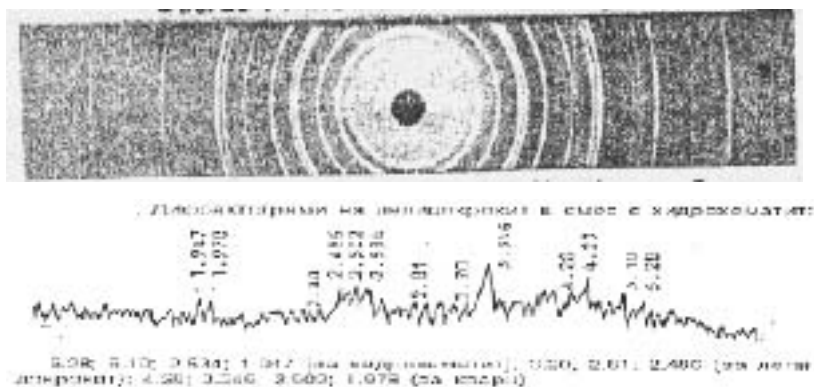
През 1912 г. немският физик Макс фон Лауе потвърди пространствено решетъчния строеж на кристалите и 230-те пространствено решетъчни групи на Фьодоров. Това става възможно благодарение на използването на рентгеновите лъчи.

Рентгеновите лъчи са открити през 1895г. от В. К. Ренген при опити с катодни лъчи, които възникват във вакуумна тръба при пускане на ток с високо напрежение. Отрицателно заредените частици (електрони) се насочват към метална плочка (антикатод). Възникват бели и характеристични рентгенови лъчи. Характеристичните рентгенови лъчи имат определена дължина на вълните, които зависят от веществото на антикатада. При меден антикатод тя е $\lambda = 1.542 \text{ \AA}$, при железен антикатод - $\lambda = 1.934 \text{ \AA}$. Знаем, че в кристална решетка на минерала атомите са разположени регулярно във вид на подредени плоскости с определено разстояние между тях. При падане на рентгеновия лъч той се отразява от слоевете на кристалната решетка, като дължината на изминатия от него път между два слоя е $2d \cdot \sin \theta$. За да се получи интензивно отражение е необходимо фазите на отразените лъчи да съвпадат т. е. да удовлетворяват закона на Вулф - Браг - $n\lambda = 2d \sin \theta$, където: θ е ъгълът при който падат рентгеновите лъчи върху равнинна мрежа, в която те дифрактират (отразяват) рентгеновите лъчи, λ е дължината на вълната, n е коефициент и d е междуплоскостното разстояние. Междуплоскостните разстояния в пространствената решетка на минерала се определят по тази формула. Между рентгенографските методи най-широко се използва методът на Дебай - Шерер - Хъл. Използува се нищожно количество вещество прах ($< 1 \text{ mg}$) от кристалното вещество, който се закрепва с помощта на гумено топче на кристалоносител в камера с диаметър 57.3 mm. По стените на камерата се прикрепва чувствителна фотографска лента, на която се фиксират отразените лъчи.

По-нататък задачата е да се разчетат разстоянията между симетричните линии ($2l$), като $1/2$ от това разстояние е равно на θ .

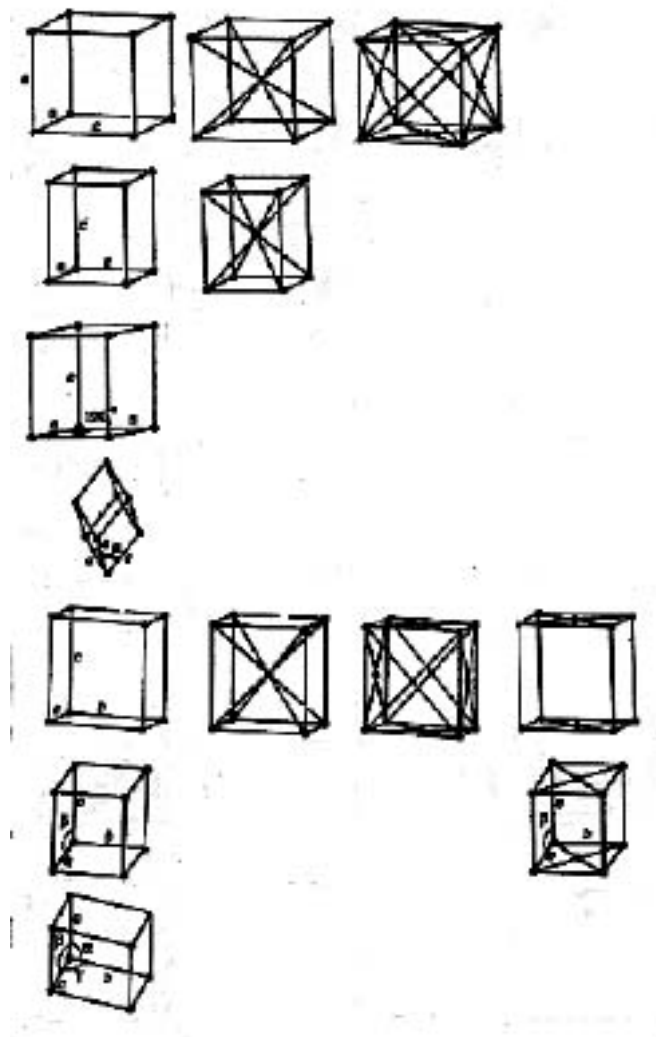
По посочената по - горе формула се изчислява d - стойностите подчинени на синусната функция . Определените стойности се сравняват с определители . Днес най - широко се използва определителят (Joint committee on Powder Diffraction data standards (JCPDS) in cooperation ASTM на USA , 1974 г. , който непрекъснато се попълва . По същество той представлява картотека, която съдържа прахови рентенограми на кристални органични и неорганични вещества.

Друг широко използван метод е рентгенографския фазов анализ, с помощта на който се определя минералния (фазов) състав на скали, руди, както и всякакви смеси с кристални фази. Той се базира на две основни явления: 1) всяка кристална фаза се характеризира със своя индивидуална дифрактограма , диагностична за нея и 2) механичната смес на кристални фази дава наложена дифракционна картина на индивидуалните, правопрпорционална на интензивността на отраженията на всяка фаза. Рентгенофазовият анализ се използва за изследвани на глини, като се извършва върху фини фракции под 0.0001 mm за проби въздушно сухи, накалиени при 550-570° C и наситени с глицерин. С помощта на този анализ могат да се определят основните минерални компоненти в изходната скала, да се диагностират слоестите силикати и други. С помощта на рентгеноструктурния анализ е възможно да се определи кристалната структура на минерала и параметрите на елементарната клетка.



Фиг. 27. Метод на Дебай - Шерер - Хъл (прахов метод). Дебаеграми, получени в рентгенова камера (горе) и в дифрактометър (долу).

Тип решет- ки	примитивна	обемно центрирана	стено центрирана	базо центрирана
------------------	------------	----------------------	---------------------	--------------------



Фиг. 26. 14-те типа кристални решетки на Браве

1. 2. КРИСТАЛОХИМИЯ

Атомни и йонни радиуси. Геохимична класификация на

ХИМИЧНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ

Кристалохимията изучава връзката между химичния състав на кристалите и техния вътрешен строеж. Нейното развитие е свързано със съвременната теория за строежа на атома. Както знаем атома е изграден от положително заредено ядро и обкръжаващи го отрицателно заредени електрони. Числото на електроните и тяхното разположение по сферични орбити около ядрото определя химичните свойства на елементите т. е. способността на атомите да влизат в химично съединение и да образуват едни или други минерали. При свързването си помежду си някои от елементите отдават електрони и се получават положително заредени катиони, а други ги приемат - съответно отрицателно заредени аниони. Действителен йонен (атомен) радиус е разстоянието от центъра до най-външната обвивка на йона (атома). Действителните радиуси на анионите са по - големи от тези на катионите.

Радиусът на сферата на действие на йоните (атомите) в кристалната решетка се нарича ефективен радиус на йона (атома). Той се определя от разстоянието между центровете на съседни йони (атоми) . Така например групите имат ефективен радиус $R = 1.33 \text{ \AA}$, а радикалът $(\text{SiO}_4)^{4-}$ има $R = 2.40 \text{ \AA}$.

За първи път това е установено от норвежкия геохимик и петролог В. М. Голдшмит, който е предложил да се разделят всички химични елементи на четири геохимични групи: атмофилни, литофилни, халкофилни и сидерофилни.

Атмофилните елементи са характерни за земната атмосфера. Всички инертни газове, а също водорода и азота. Типичният за атмосферата елемент кислород - не е бил включен в числото на атмофилните елементи, доколкото главно неговият обем е бил включен не в атмосферата, а в земната кора.

Литофилните елементи главно присъстват в земната кора. Към тяхното число се отнасят на първо място кислорода, съставляващ над 90 % от обема на литосферата, а също елементите, които преимуществено участват в състава на минерали с кислород: С, Na, Mg, Si, Al, P, K, Ca и други по - редки.

Към **халкофилните елементи** се отнасят сярата и тежките метали, които охотно образуват с нея съединения: Cu, Sb, As, Hg, Bi, Pb, Ag, Au, Zn и др. Това са елементи на сулфидните руди.

Сидерофилните елементи са особено характерни за железните метеорити. Това са елементи от групата на желязото, платината и други.

След В. М. Голдшмит са предложени още няколко геохимични класификации на елементите. При това винаги се подчертава, че всяка група елементи заема определено място в Периодичната система на Менделеев и е характерна за определен тип геохимични процеси.

Кристалохимични връзки

Ако значително се опрости картината, то всички възможни случаи на кристалохимични връзки в кристалите може да се сведат към комбинации на четири основни типа: метална, ковалентна, йонна и остатъчна.

Металната връзка се осъществява преимуществено при взаимодействие на химичните елементи с голямо масово число, в които външните електрони относително слабо са свързани с ядрата. Предполага се, че тези електрони свободно мигрират в кристалната решетка “обикаляйки“ положително заредените частици: които се състоят от атомни ядра, обкръжени от вътрешните слоеве на електроните. Енергетичното поле на “свободните“ електрони образуват в съвкупност отрицателно заредената мрежа, задържаща положително заредените частици на своите места (фиг. 28 - а).

В условията на различия на електричните потенциали движението на “свободните“ електрони е подредено, поради което най- характерните свойства на минералите с преобладаваща метална връзка се явява добрата електронна проводимост. Минералите с метална връзка имат значителна плътност, добра топлопроводност и невисока температура на топене. Те са непрозрачни, имат висока отражателна способност (“метален“ блясък), относително неголяма твърдост. Като еталон за минерали с доминираща метална връзка се явяват медта и златото.

Ковалентната връзка (атомна, хомеополярна) се осъществява посредством общи електрони. Възникващото “ сгъстяване“ на отрицателния заряд привлича към себе си ядрата на взаимодействащите атоми и ги задържа в строго определено положение по отношение един към друг. Числото на ковалентните връзки е ограничено (фиг 28 - б).

Минералите с преобладаваща ковалентна връзка имат малка плътност, слаба проводимост, висока температура на топене. Кристалите в които доминира ковалентната връзка са крехки и твърди. Те обикновено са прозрачни. Имат висок показател на лъчепречупване и силен “диамантов“ блясък . Ковалентната връзка е характерна за диаманта, кварца, корунда и каситерита.



Фиг. 28. Схематично изобразяване на метална връзка (а)
и ковалентна връзка (б)

Ковалентната връзка може да се образува между еднакви и между различни атоми. В молекулите, състоящи се от еднакви атоми, “сгъстяването” на отрицателния заряд се намира на равно разстояние от центровете на двете ядра. Положителните и отрицателните заряди се оказват при това разположени симетрично. Такава връзка се нарича неполярна. Електронната двойка на неполярната връзка в еднаква степен принадлежи и към двата свързани атома .

Когато връзката възниква между атоми на различни елементи, то един от тях като правило привлича общата електронна двойка по - силно, отколкото другата. Симетрията на разпределение на зарядите при това се нарушава. Връзката става полярна. Като частен случай се явява, когато общите електрони могат да бъдат напълно “ притеглени “ от един от атомите в състава на своята обвивка и ковалентната връзка се преобразува в йонна .

Йонната връзка възниква при електростатично взаимодействие на различно заредени йони. В йонните съединения атомите на неметалите допълват своя електронен слой до устойчива конфигурация за сметка на електроните на металите.

В този и в други случаи електронеутралността на атомите се нарушава: атомите на неметалите приемат отрицателен заряд, превръщат се в аниони, атомите на металите се превръщат в катиони. Противойоните се привличат един към друг, подчинявайки се на закона на Кулон, дотогава докато силата на тяхното притегляне не се изравни със силата на отблъскване на атомните ядра.

Кристалите с йонна връзка са диелектрични. Те са по - малко плътни, имат лоша топлопроводност и ниска температура на топене, прозрачност, нисък показател на лъчепречупване и “стъклен“ блясък . Много минерали, които имат йонна връзка се разтварят във вода. Йонната връзка е доминираща за такива минерали като халит и силвин.

Остатъчната връзка (молекулярна, вандервалсова) се осъществява между молекулите, в които действуват другите разгледани по - горе типове връзки. Остатъчната връзка е по - слаба, отколкото връзката на другите типове. Тя обикновено се обяснява с поляризация на молекулите. Минералите с остатъчна връзка не пропускат топлина, имат обикновено ниска температура на топене, ниска твърдост.

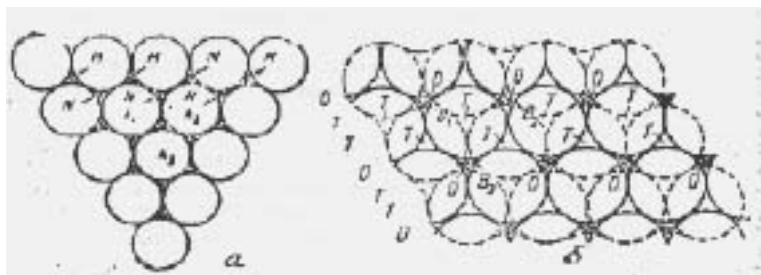
При всяка химична връзка центровете на взаимодействащите атоми се уравновесяват на разстояние на което силата на притегляне се изравнява със силите на отблъскване. В кристалния строеж между всяка двойка частици това разстояние е постоянно и се нарича дължина на връзката. Дължината на връзката, т.е. разстоянието между центровете на взаимодействащите атоми, както разстоянието между съответните възли на кристалната

решетка, може да бъде измерено с помощта на рентгеноструктурния анализ. В случая на йонна връзка, която и да е част на това разстояние се отнася към сферата на действие на аниона.

Принцип на най - плътна опаковка

Сферите на градивните частици на кристала се “допират“ и остават минимум свободно пространство. Това определя устойчивостта на кристалната структура.

Ако сферите с еднакъв радиус са подредени по плоскост, то най - плътната опаковка отговаря на такова тяхно положение, при което всяка от тях се допира до шест съседни.



Фиг.29. Най-плътна опаковка на сфери с равен обем :

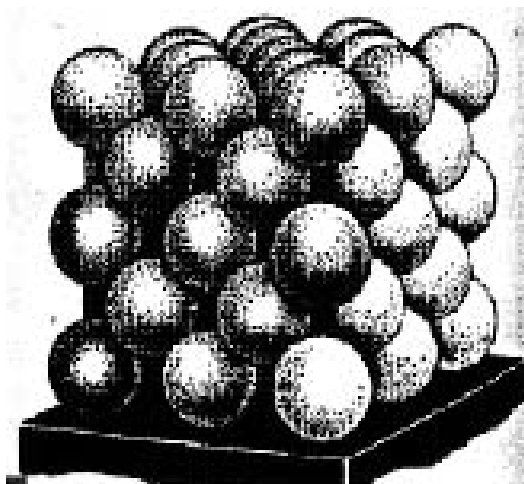
а) - в един слой ; б) в два слоя

В този случай между сферите остават триъгълни празнини, половината от които са обърнати в една посока (M), а другата половина - в противоположната (N). Общото число на празнините е три пъти по - голямо от числото на сферите. Ако отгоре в празнината се сложи още един слой сфери, то допирайки се горните сфери ще заемат само половината промеждутъци (M или N) в зависимост от това в кой от тях ще бъде положена първата сфера от новия слой . Втората система от промеждутъци ще остане открита (фиг. 29 - а).

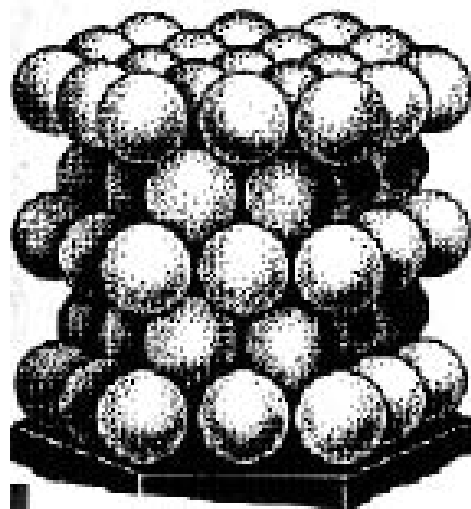
Част от промеждутъците са обкръжени от четири сфери и затова се наричат тетраедрични (T). Другият вид промеждутъци са обкръжени от шест сфери и се наричат октаедрични (O). Тетраедричните промеждутъци са винаги два пъти повече отколкото октаедричните (фиг. 29 - б).

Поставянето на сферите от третия слой може да стане по два начина: или празнини (O), или в другите (T). Ако сферите на третия слой са поставени на промеждутъци T, то третия слой повтаря първия . Такава най - плътна опаковка се нарича двуслойна или хескагонална. Последователността на слоевете в такъв случай се обозначават с формацията АВАВ Ако сферите от третия слой са поставени промеждутъци O, то само четвъртия слой повтаря първия, а такава най-плътна опаковка се нарича трислойна или кубична. Последователността на слоевете тук е АВСАВС..... В двата вида опаковки сферите заемат общо 74 % от цялото

пространство , а останалата част са празнини между тях. По - плътно сферите не могат да се поставят. Всяка сфера тук се допира до дванадесет съседни сфери.




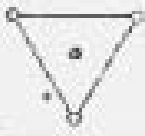



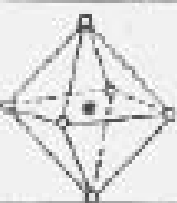
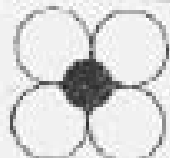
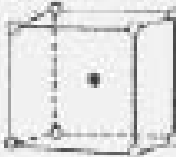
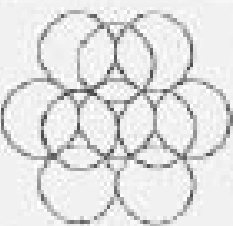
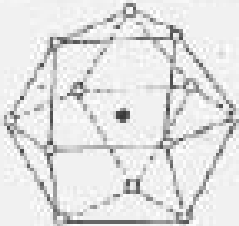


Фиг. 30 . Кубична най-плътна
опаковка



Фиг. 31. Хексагонална
най-плътна опаковка

Кубична най-плътна опаковка имат минералите мед, злато, сребро.

$R_k : R_a$	К. Ч.	Структурна Координац. Група	
0 - 0,15	2		
0,15 - 0,22	3		
0,22 - 0,41	4		
0,41 - 0,73	6		
0,73 - 1,00	8		
1,00	12		

Фиг. 32. Най-често срещаните координационни числа (к.ч.) и структурни координационни (координац.) групи

Числото атоми, образуващи най - близко обкръжение на даден атом се нарича координационно число (к. ч). Геометричната фигура която се получава при съединяване на центровете на атомите, обкръжаващи даден атом - носи названието координационен полиедър (многостенник).

При йонните структури най-често в строежа на кристалите участвуват атоми с по-малки радиуси (катиони - R_k) и атоми с по-големи радиуси (аниони - R_a) . ($R_k < R_a$).

Координационното число ще зависи от отношението $R_k : R_a$. Най - често срещаните зависимости между отношенията $R_k : R_a$ и координационните числа и структурите на координационните групи и полиедри в кристалите са посочени на фигура 32.

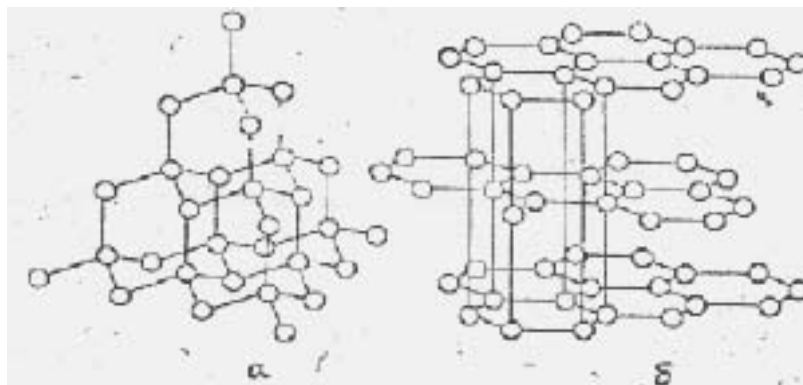
Типове кристални структури

Прието е, че основният структурен мотив в кристалната решетка на минералите се създава на най - плътната опаковка на големи сфери от аниони или катиони. В промеждутъците между анионите се разполагат малките по размери катиони, които заедно с незапълнените промеждутъци създават допълнителен субмотив на структурата. Ако за основен признак при класификацията на структурата се приеме разстоянието между центровете на взаимодействащите частици, то всички структури на кристалите се разделят на две големи групи:

Координационните структури (хомодезмични) се характеризират с това, че разстоянията между всяка частичка и нейните най - близки съседи се съхраняват еднакви в целия обем на решетката . Около всеки атом или йон може да бъде построен координационен полиедър с определен вид за дадената решетка.

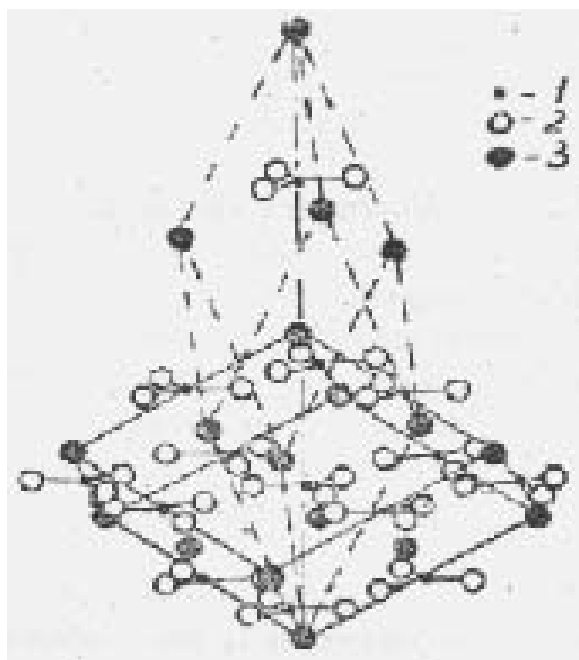
Не координационните структури (хетеродесмични) са тези, при които при закономерното повтаряне на структурния мотив в пространството се отделят островни, верижни, слоеви и скелетни структури.

Островни структури възникват тогава, когато в решетката присъствуват компактни устойчиви групи аниони и радикали, в които действуват обикновено ковалентни връзки. Последните се съединяват с катионите с йонни връзки от друга дължина . Например в калцита (CaCO_3) в качеството на такъв “остров“ участва комплексния радикал $[\text{CO}_3]^{2-}$, в който централният малък атом на въглерода е обкръжен от три големи атоми на кислорода. Отношението на ефективните радиуси на въглерода и кислорода е 0.15, което прави



Фиг. 33. Разположение на центровете на атомите на въглерода в структурата на диаманта (а) и

графита (б)



Фиг. 34. Разположение на центровете на атомите на въглерода (1) , на кислорода (2) , и на калция (3) в структурата на калцита - сплеснат робеодър ; - елементарна клетка ; -.-.- инверсионна ос -3 триъгълния “ остров “ много устойчив. Анионите “острови“ - радикали в калцита са съединени с катиона Ca^{2+} .

Верижни структури се образуват при обединяване на атоми или на “ острови “ - радикали във вериги, ленти или пояси, безкрайни в едно направление . Веригите могат да бъдат праволинейни, спираловидни, зигзагообразни с различни периоди на повторяемост, единични, двойни и т. н. Спирални вериги с безкрайно редуване -S - Hg - S лежат в основата на структурата на цинабарита - HgS. Вериги съединени помежду си с общ кислород на тетраедъра $[\text{SiO}_4]^{4-}$ образуват структурата на пироксените с повтарящи се мотиви $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$. Сдвоени вериги на силиций - кислородните тетраедри с повтарящ се мотив $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$. са характерни за амфиболите.

Слоести структури се образуват, когато атомите или радикалите се разместват във вид на безкраен слой в две направления. Най - прост пример от такъв род се явява структурата на графита на фиг. 33 - б . Редуващите се слоеве могат да имат еднакъв състав, както в графита , но често могат да бъдат изградени от различни атоми . Така например структурата на слюдите е изградена в основата си от многослойни пакети.

Най-сложни се явяват скелетните структури. Те, както и координационните структури, представляват тримерни изометрични постройки. Обаче, в този случай като “ строителни “ елементи се явяват радикали, обединени в сложен клетъчен скелет, празнините на който могат

да се запълнят с големи катиони или добавъчни аниони. Така например скелетът на кварца е образуван от силиций - кислородните тетраедри $[SiO_4]$ - във всеки, от които всички атоми на кислорода принадлежат едновременно на два тетраедъра. Повтарящите се структурни мотиви в този случай са $[SiO_2]^-$. Скелетна структура имат също фелдшпатите и други разпространени минерали. Закономерностите на разполагането на атомите в кристалната решетка и типовете структури много често определят облика и формата на срещане на минералите. Минерали с координационни структури и най - плътна кубична опаковка образуват главно изометрични кристали. Минералите с верижни структури кристализират под форма на удължени иглести кристали. Слоестите структури на кристалите преодолят образуването на листовидни и люспести агрегати. Със структурата е свързана плътността на минералите. От кристалната структура се определят много физични свойства на минералите, като твърдост, цепителност, лом, а също и оптични, електрофизични и други свойства .

Според приблизителния кристалохимичен закон на Ои (1801 г.) всяко химически еднородно вещество се характеризира с определени кристални форми като всяко изменение на химизма му води до изменение на неговите форми и структура. Но има редица примери, когато различни по химизъм вещества образуват близки, даже едни и същи кристални форми. И обратно, едни и същи по химизъм вещества образуват различни кристални форми (графит и диамант, калцит и арагонит). Приблизителният кристалохимичен закон (правило) на Грот гласи, че веществата с прост химичен състав принадлежат към по - висока симетричност и обратно - веществата със сложен химичен състав имат ниска симетричност. Но тук има много изключения . Например гранатите имат сложен химичен състав, а кристализират в кубична сингония.

Изоморфизъм

Изоморфизъм буквално означава “ еднаквоформие“. С това понятие се означава свойството на две или повече кристални вещества със сходен химичен състав да кристализират в един и същи кристалографски клас. Например злато и сребро. Това понятие е въведено от Митчерлих през 1819 г. Съществуват минерали, в които съдържанието на едни или други химични елементи закономерно се колебае в широки граници. Срещат се случаи на взаимно заместване на в кристалната решетка на йони, атоми и групи, които имат близки химични свойства. Така се образуват смесени кристали.

Под изоморфизъм се разбира способността на едни атоми или йони да се заместват с други в кристалните решетки. При изоморфното заместване не може да се нарушава електростатичния баланс на съединенията. Да се заместват един с друг могат само атомите или йоните имащи близки ефективни радиуси, сходни по строеж електронни обвивки и не

встъпващи в химично взаимодействие. Във формулите на минералите символите на изоморфните елементи се записват в реда на намаляване на тяхното съдържание, поставят се в малки скоби и се отделят един от друг със запетайки: волфрамит: (Fe,Mn) [WO₄].

Изоморфизмът е неограничен (съвършен), ако ефективните радиуси на замествания и заместващия йон не се отличават повече от 15 % (правило на Голдшмит). Така за оливина (Mg,Fe)₂SiO₄ отношението на радиуса на желязото към йонния радиус на магнезия е около 8 %. Между фостерита Mg₂SiO₄ и фаялита Fe₂SiO₄ съществува съвършена смесимост и в природата се срещат най-често смесени кристали. А за калиево-натриевият фелдшпат (K,Na)AlSi₃O₈ относителната разлика на йонните радиуси на калия и натрия е 36 % и изоморфизмът неограничено се проявява само при високи температури. При намаляване на температурата калиево-натриевият фелдшпат се разпада на калиева разновидност - микроклин KAlSi₃O₈ и натриева - албит NaAlSi₃O₈. При подчинено количество на албита той се отсмесва в микроклина (т. н. пертитово отсмесване). Такъв изоморфизъм се нарича ограничен.

Изоморфизмът може да се проявява между катионите и между анионите. Така например сред апатитите Ca[PO₄]₃(OH,Cl,F) се среща разновидност с по-голямо съдържание на F (флуорапатити), на хлор (хлорапатити) или хидроксилна група (хидроксил-apatити). Преобладаването на една или друга разновидност апатит е обусловено от конкретната обстановка на минералообразуване.

Различаваме изовалентното изоморфно заместване, когато се заместват един с друг йон от една валентност и хетеровалентни изоморфни замествания, когато замествания и заместващия йон имат различна валентност. При изовалентното изоморфно заместване, когато се заместват един с друг съседни елементи в границите на една подгрупа на Периодичната система, т. е. елементи атомите на които са сходни по строеж на електронна обвивка: Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Sr²⁺.

При хетеровалентните изоморфни замествания сумата на валентностите на заместваните и заместващите атоми или йони трябва да бъде равна, а ефективните радиуси да бъдат близки.

Много често, когато се замества в даден минерал елемент с по-ниска валентност от елемент с по-висока валентност, например Na⁺ се замества от Ca²⁺ обезателно, в състава му друг елемент се замества от елемент с по-ниска валентност, например Si⁴⁺ се замества от Al³⁺.

Характерен пример за хетеровалентен изоморфизъм са плагиоклазите (Na, Ca)[AlSi₄O₈]. Крайните членове при тях се явяват албит - NaAlSi₃O₈ и анортит CaAl₂Si₂O₈.

Полиморфизъм

Полиморфизъм (многоформие) е способността на веществото да образува кристални решетки с различни структури в зависимост от условията при които протича кристализацията.

Понятието за полиморфизъм е въведено в литературата от Е. Митчерлих (1821г.).

Такива широко известни минерали като диамант и графит имат еднакъв състав (съставени са от въглерод), обаче трудно могат да се посочат други минерали с толкова различни свойства. Кристалите на диаманта имат изометрична форма, изключително висока твърдост, относително голяма плътност, силен блясък. Те най - често са прозрачни и нецветени. Графитът се среща във вид на люспести непрозрачни агрегати, имащи черен цвят и метален блясък. Свойствата на тези минерали се определят от това, че диаманта има координационна структура с напълно реализирана ковалентна връзка и най - плътна кубична опаковка. Графитът има слоеста структура, нослоевите са съединени с относително слаби метални връзки и разстоянието между тях е значително по - голямо, отколкото между атомите на въглерода в слоя. Тази разлика в кристалната структура се определя от условията на образуване на минералите. Графитът и диамантът са пример на полиморфни модификации. Полиморфните модификации са вещества - твърди кристални вещества с един и същи състав , които имат различни кристални структури. Преходът от една полиморфна модификация в друга е фазов преход, който се осъществява при промяна на температурата и налягането и се съпровожда с изменение на енергията на кристалната решетка. Различните полиморфни модификации на природните вещества са различни минерални видове. Например:

573°C 870°C 1470°C 1713°C

α кварц \Leftrightarrow β кварц \Leftrightarrow α тридимит \Leftrightarrow кристобалит(кубичен) \Leftrightarrow стопилка;
(тригонален)(хексагонален)(хексагонален)

Обратимото превръщане, както при кварца, се означава енантиотропно, а необратимото превръщане като монотропно.

I. 3. РАСТЕЖ НА КРИСТАЛИТЕ

Псевдоморфози

С псевдоморфоза се означава лъжеформие, когато формата е на един минерал , а вътрешната устройство-на друг. Те свидетелствуват за промяна на физикохимичната обстановка. Например възможно е последователно да се образува най - напред халкопирит и след това ковелин по кристалните форми на халкопирита. Когато химизмът на двете фази е един и същи псевдоморфозата се нарича параморфоза (рядък случай на псевдоморфози). Налице е фазово превръщане в твърдо състояние, в резултат на изменение на условията.

Възможно е псевдоморфозата да възникне при частично или пълно изменение на химичния състав. Например, при окисление на магнетита се образува хематит. Последният заема формата на магнетитови кристали. Псевдоморфният хематит се нарича мартит, а явлението - мартитизация. Възможно е и обратното - псевдоморфоза на магнетит по хематит, който се нарича мушкетовит, а явлението - мушкетовизация. В природата се наблюдават процеси напълно разтваряне на кристалите на даден минерал и запълване на образувалите се негативни форми с други минерали. Така се получава например доломит с форма на кварцови кристали.

Образуване на кристалите в природата

Кристалите се образуват от преминаване от течна или газообразна в твърда фаза или при прекристализация в твърдо състояние.

Кристализацията т. е. образуването и растежът на кристалите е възможна само в преситен разтвор. Пресищането се получава в резултат на промяна на температурата и налягането, при изпарение на разтворителя и в резултат на някои химични реакции.

Най - разпространено в природата е образуването на кристали от течна фаза, например при охлаждане на огнетечна стопилка, във водни басейни и дуги. Кристализацията от газообразно състояние се среща най - често във вулканските области при бързо понижаване на температурата и налягането. Кристализацията от твърда фаза може да настъпи при кристализация на твърдо аморфно вещество или при прекристализация на една в друга кристална фаза.

Съществуват няколко вида зараждане на кристали: самопроизволно зараждане, зараждане на повърхността на течност и върху отломки. За да се образуват кристални зародиши е необходима повишена концентрация на разтвора т. е. необходим е преситен разтвор. В преситения разтвор при определена температура молекулите и йоните в него са доближени една до друга и се създава възможност за групиране между тях. Групирането отговаря на конфигурация , която съответства на кристален зародиш. Този процес се нарича самопроизволно зараждане на кристали.

Процесът е динамичен, т. е. едновременно става създаването на едни и разпадането на други зародиши, при което крайния резултат ще зависи от насочването на явлението в една или друга посока. Устойчивостта на кристала - зародиш зависи от неговата големина. Съществува известен размер, след преодоляването на който зародишът е устойчив и може да бъде център на кристализация. Самопроизволното зараждане е характерно при кристализация на магма или течности. Числото зародиши, които са възникнали в единица обем за единица

време наричаме число на центрoвете на кристализация, т. е. скорост на зародишообразуване. Кристализационната способност зависи от степента на покриване на кривите на скоростта на зародишообразуване и на линейната скорост на нарастване на кристалите. Зараждането на кристали е възможно да стане на повърхността на течност, например в солени водни басейни. Зародишите лесно се зараждат от силите на повърхностно напрежение на границата на граничната ципа на разтвора. При раздвижване или когато се образуват твърде тежки кристали те падат на дъното и нарастват във вид на слой соли (утайка).

Зараждането на нови кристали може да се осъществява и върху отломките на поранообразуван минерал. Отломките стават центрове на кристализация и могат да дадат началото на нови кристали. Те са много по-активни. Възможно е кристали да се зародят върху кристали от друг минерален вид. Когато новите минерали се появяват след прекъсване отлагането на минералното вещество, при изменение на физико - химичните условия, тогава се образуват кристали от нова генерация. образуването на кристали може да стане и с участието на организми.

Зараждането се осъществява в микроорганизма в резултат на неговата жизнена дейност. Минералното вещество се натрупва в неговата клетка, като я замества напълно. В последствие ако самата клетка се премести в обкръжаващата среда тя става зародиш на минерален индивид.

Зараждането на кристалите в една среда става неравномерно, поради действието на силата на тежестта, ролята на тектонските движения, състава на вместиращите скали и други фактори.

При растежа си кристалите се ограждат със стени, които съответствуват на равнинни мрежи с най - голяма ретикулярна плътност. Според принципа на Тибе - Кюри - Вулф скоростта на растежа на отделните кристални стени зависи от техните повърхностни енергии. При растежа включването на примеси се разглежда като адсорбционен процес, който намалява скоростта на растеж на стените.

По експериментален път е доказано, че физико - химичните условия и примесите в разтвора влияят на кристалния хабитус. Формата на кристала до голяма степен зависи от състава на подхранващата среда и от нейната симетрия.

Например, в солев разтвор на натриев хлорид да поставим свободно да нараства кристалче от халит, окачено на конец. Около кристалчето се образуват потоци с различна концентрация.

В резултат на това едноименните стени на кристалчето няма да бъдат еднакви по форма и големина и ще се получи реален кристал. Ако кристала расте на дъното на съда ще се получи вдлъбнат кристал и вместо кубични кристали ще се получат кристални плочки.

При бърза кристализация и повишен вискозитет на течната фаза най - често се образуват

не доизградени, израснали само по върховете (роговете) кристали. Те се наричат кристални скелети и имат малки размери.

Този процес се наблюдава при изливане на лавата на земната повърхност, при образуването на снежинките и при перестите образувания по стъклата на прозорците през зимата и т. н.

I. 4. КРИСТАЛОФИЗИКА

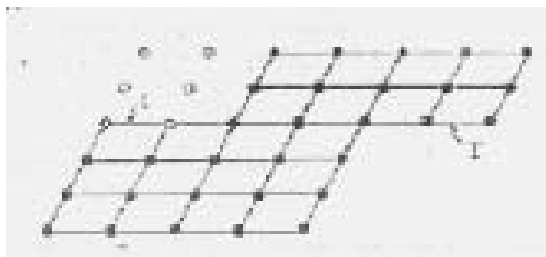
Кристалофизиката е този раздел от кристалографията, който разглежда взаимовръзката и зависимостта между вътрешния строеж на кристалите и техните физични свойства. Много кристали - природни и изкуствени, притежават такива физични свойства, заради които се използват като абразиви, за пиезоелектричеството, в оптиката и др. При обогатяването на полезните изкопаеми и тяхната технологична преработка от голямо значение са физичните свойства на кристалите. Те влияят върху параметрите на технологичните процеси. Тези физични свойства на кристалите, които не зависят от посоката се наричат скаларни. Това са плътността, топлемостта и други. Физични свойства, които зависят от посоката са векторни. Те са цепителността, твърдостта, оптичните свойства и други.

Относителното тегло (P) е отношението между плътността на минерала и плътността на водата при 4°C и е без измерна величина. То зависи от атомната маса на елементите, които изграждат кристала, от размерите на техните йонни радиуси, валентност и координационно число. Относителното тегло(P) се измерва с помощта на аналитичните везни и се изчислява по формулата: $P = G / (G - G_t)$, където G е масата на изследвания кристал, а G_t е масата на кристала потопен в течност. Вместо относително тегло се използва понятието плътност. Плътността представлява масата на един минерал за единица обем и винаги се означава с единиците на измерване, обикновено g/sm².

Механични деформации в кристалите

При изучаване на кристалите много често се срещат признаци на деформации, които биват еластични, пластични и остатъчни (крехки). Еластична е тази деформация, която след премахване на силата на въздействие кристалът възстановява първоначалната си форма. При пластична деформация се изменя формата на минерала под влияние на външни сили, без да настъпва неговото разрушаване. Тя се осъществява по определени равнинни мрежи, които се означават като равнини на трансляция или равнини на хлъзгане. При трансляциите настъпва пространствено-решетъчно разместване на части от един кристал паралелно на определени

кристалографски плоскости и в определена посока. Те са характерни при пластичните деформации в метали. Деформациите зависят от химичния състав, температурата, скоростта и влиянието на проникващите разтвори. Причините за деформация са тектонските сили, напрежението на химичните реакции, съпроводени с изменение на обема, топлинно разширяване или свиване, изменение на налягането, удари и други. Друг вид изменения в кристала са радиогенните и прекристализацията. При едностранно механично въздействие върху даден кристал се получават динамогенни срастъци, например при калцита.



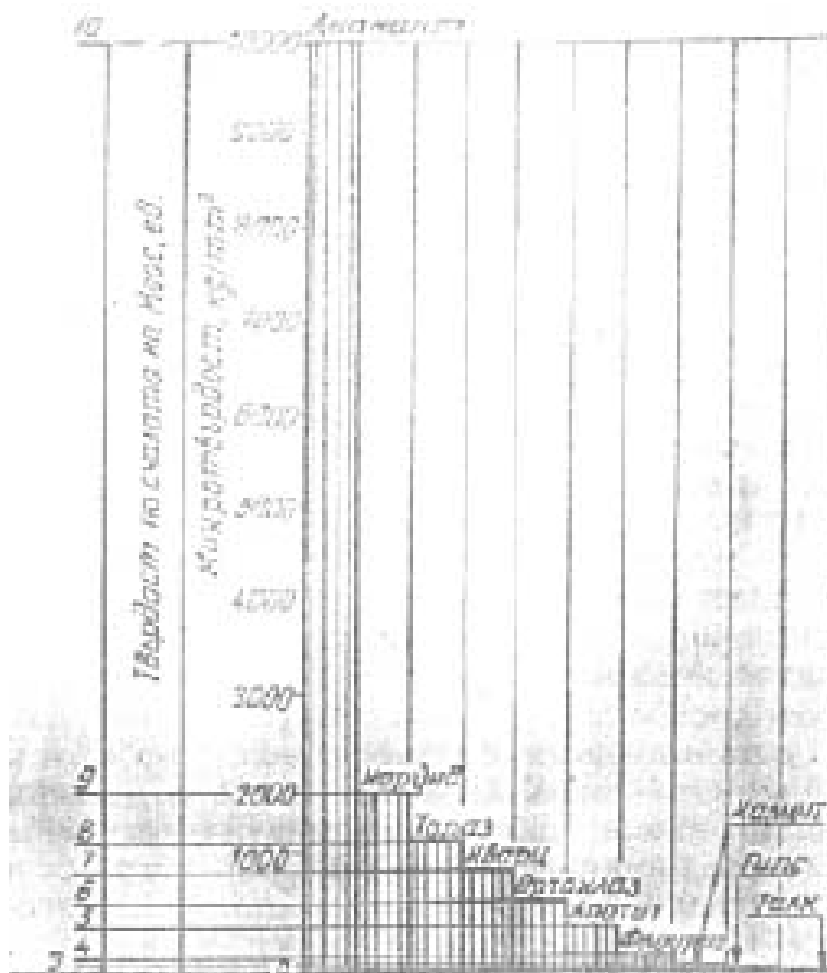
Фиг.35.Равнина на хлъзгане (на трансляция) в кристална решетка

Цепителност е способността на кристалите под въздействието на механични сили да се раздробяват по определени кристалографски посоки. Ако цепителните плоскости са гладки то цепителността е съвсем съвършена, например при слюдите. Съвършена е тази цепителност при която фрагментите нямат напълно гладки стени. Такава цепителност е характерна за калцита, халита и др. минерали. Ясна цепителност имат ортоклазът, амфиболът и неясна - кварцът. За последния е характерен неравния, зърнест и мидест лом.

Цепителността е тясно свързана с кристалната структура. Тя се осъществява в резултат на разделяне на равнинни мрежи със слаби връзки. Ето защо съвършената цепителност е характерна за минерали със слоеста структура, каквито са слюдите. Когато отделните късове приличат на късове от почва, земя, минералите имат “землест” лом. Така наречената отделеност при кристалите се наблюдава в резултат на механични деформации на ламерални (полисинтетни индивиди или вследствие на ориентирани включения в кристалите, например в корунда.

Твърдостта се изразява със съпротивлението, което един кристал оказва на едно или друго механично въздействие. За определяне на твърдостта се използват различни методи. Моос е предложил използването на 10 стандартни минерала, които имат определена твърдост: 1- талк (мазен на пипане); 2- гипс (драска се с нокът); 3- калцит (драска се с медна монета); 4-флуорит(драска се със стъкло); 5-апатит (драска се с нож); 6-ортоклаз(драска се с накалена стомана); 7-кварц (драска стъкло и накалени метали);8-топаз(драска се от корунда); 9-корунд(драска се от диаманта); 10-диамант (драска всички минерали и метали).Всеки минерал от посочените в таблицата драци предхождащите го минерали. Определената твърдост е относителна. Могат да се използват и някои подръчни средства:

нокътят на човека - с тв.2,5; медна игла или монета-тв.3, стъкло-тв.5,5.



Фиг.36 . Микротвърдост на еталонните минерали по скалата на Моос

Абсолютната твърдост на минералите се определя с помощта на микротвърдомери (метод на Викерс). При него диамантена пирамида упражнява натиск върху плоскостта на кристала. Твърдостта се определя като отношение между упражнявания натиск и големината на отпечатъка, който остава на кристалната стена и се измерва в kg/m^2 (фиг. 36). Абсолютната твърдост H се определя по следната формула: $H = P/F \text{ kg}/\text{mm}^2$, където P е натоварването на диамантовата пирамида, а F е площта на отпечатъка и се определя по формулата: $F = d^2/2 \sin \alpha/2$ (d - диагоналът на отпечатъка и α е ъгъла между две съседни стени на диамантовата пирамида (136°)). Другата твърдост на Росивал е шлифовъчна. Тя се определя при шлифоването на минерала с пластинка с дебелина 1mm или 1cm. Времето, за което се изработва такава пластинка от кварц се приема за 100 и спрямо него се определя шлифовъчната твърдост на минералите .Твърдостта на кристалите зависи от типа кристална структура и плътността на кристалното вещество. Когато кристалът се дращи или натиска , неговата структура се

размества и раздробява обратно пропорционално на решетъчната му енергия. При полиморфните модификации по - голяма твърдост имат минералите с по - голяма плътност. Например калцита с плътност 2.72 има твърдост 3, а арагонита съответно 2.94 и 4.

Като пример за това, че твърдостта е класическо векториално свойство може да се посочи кианита (дистена) (Al_2SiO_5), който паралелно на оста С има твърдост 4.5, а напречно на тази посока съответно 6.5 -7.

Топлопроводност е разпространението на топлина в кристалите. Тя зависи от тяхната симетрия. В даден кубичен кристал, както и в аморфни тела, топлината се разпространява еднакво във всички посоки и може да се опише сфера около топлинния източник. При кристалите от средните кристали изотермната повърхност има форма на ротационен елипсоид, а при нискосиметричните - на триосен елипсоид с различна ориентация спрямо кристалографските посоки. Следователно топлопроводността е зависимост от анизотропността или изотропността на кристалите. Тя зависи и от наличието на дефекти в реалния кристал, които силно намаляват неговата топлопроводимост. Топлопроводността в аморфните вещества е по - малка в сравнение с кристалните със същия състав. Например стъклото има от 9 до 16 пъти по - малка топлопроводност от кварца.

Топлинното разширение се дължи на линейното и обемно разширяване на кристалите при нагряване. В съответствие със симетрията им кристалите се разширяват (деформират) равномерно - при кубичните и неравномерно с форма на удължен елипсоид - за тетрагонални, хексагонални и тригонални с форма на триосен елипсоид- за кристали от ниските сингонии. Топлинното разширение зависи от стойностите на междуплоскостните разстояния, валентността на йоните, координационното число и типа на кристалната структура.

Електричните свойства на кристалите са в пряка зависимост с типа кристалоструктурна връзка. Така например при метална връзка кристалът има добра електропроводимост, за разлика от йонните и ковалентните кристали, които са изолатори. От практическа гледна точка най - важни са пироелектричеството и пиезоелектричеството.

Пиезоелектричните кристали имат свойството при натиск или опън да се наелектризират разнородно на двата им края . Това е характерно за кварца, който притежава полярна тригира. Пиезоелектричните кристали се явяват електромеханични преобразуватели , тъй като превръщат механичната енергия в електрична и обратно. Самият термин “ пиезо “ - електричество означава електричество възбудено от натиск (от гръцки). Максималният пиезоелектричен ефект при кварца се покрива при прерези паралелни на позитивния и негативния ромбодър. Пиезоелектричните свойства са характерни за кристали без център на симетрия. Те се използват за произвеждане на подводни звукови вълни, за направа на точни часовници, на измервателни и контролни уреди за определяне на вибрации, за стабилизатори

на електромеханични вълни и други.

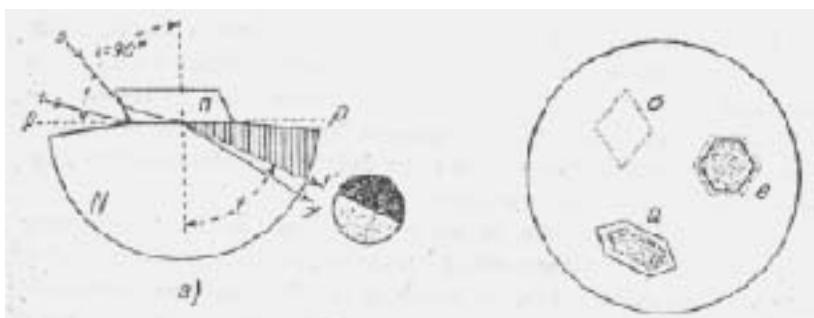
Пироелектричните свойства са характерни за кристали, които имат само една полярна ос. При нагряването възниква електрическа поляризация или това е преобразуване на топлинната енергия в електрическа.

Магнитните свойства на кристалите. Магнитната възприемчивост (χ) се определя от отношението на индуцирания магнитен момент създаден от магнитното поле на атомите на кристалните структури (M) и външното магнитно поле (H): $\chi = M / H$. Кристалите биват диамагнитни, когато векторът на магнитната възприемчивост е малък и обратен по знак спрямо този на външното поле. Парамагнитни са когато показателя χ е малък и еднакъв по знак. Парамагнитните минерали се привличат слабо от магнита (например пиротин). При феромагнитните кристали магнитната възприемчивост е еднаква по знак и по-голяма от тази за външното поле векторна магнитната възприемчивост. Това е магнетитът. Магнитните свойства на минералите се използват при геофизичните изследвания на земната кора и при търсенето на полезни изкопаеми.

Оптичните свойства се обуславят от начина, по който светлината се разпространява в кристалите и са в тясна зависимост от структурната им симетрия. Различаваме оптично изотропни и оптично анизотропни кристали. Оптично изотропни са кубичните кристали и аморфните вещества. В тях светлината се разпространява във всички посоки с една и съща скорост. Скоростта на разпространение зависи от плътността на кристала. За кристалите с по-голяма плътност скоростта на разпространение на светлината ще бъде по-малка.

Следователно две граничещи среди (A) и (B), които имат различна плътност, ще имат и различни скорости на разпространение на светлината - съответно V_1 и V_2 . Законът на Снелиус-Декарт гласи, че скоростите на V_1 и V_2 ще се отнасят помежду си както синусите на ъгъла на падане на лъча (a) към среда A и синуса на ъгъла на пречупване (b) през среда B : ($n = \sin r / \sin I$, където n е показателят на кристала, I - ъгълът на падане и r е ъгъл на пречупване). Реципрочните стойности на скоростите на разпространение V_1 и V_2 се означава като показател на лъчепречупване N_A и N_B . Обикновено за всяка среда този показател се определя с този на въздуха (1.0003) - N_A . Тогава N_B е показателя на лъчепречупване на изследвания кристал. Например за диаманта $N_B=2.4$. Показателят на лъчепречупване се определя с помощта на специални прибори кристалрефрактометри, като се използва формулата: $n = N \cdot \sin t$, където n е показател за лъчепречупване на изследвания кристал. N - показател на лъчепречупване на стъклената сфера на кристалрефрактометъра и t е измерен пределен ъгъл (t) на пълно вътрешно отражение в положение на зрителното поле. Друг метод за определяне на показателя на лъчепречупване е имерсионния, при който се ползува набор с 90 - 100 течности с определен показател на лъчепречупване (от 1.406 до 1.780). Стига се до точност: показател на

лъчепречупване еднакъв с този на изследвания минерал.



Фиг. 37. Схема на кристал - рефрактометър

Фиг.38. Кристал с показател на лъчепречупване по - голям (а), равен (б) и по - малък (в) от този на течността , в която е включен кристалът

Тези наблюдения се извършват в микроскопа при проходяща светлина. Фокусирането на образа се извършва чрез леко повдигане на тубуса, при което се явява светла ивица на границата на кристала с течността, означавана като Бекева ивица. При повдигане на тубуса Бекевата ивица се придвижва към средата с по - висок коефициент на лъчепречупване. Точността на измерване на показателя на лъчепречупване с имерсионния метод е 0.002 (N вода = 1.333).

От центъра на кристала сферично във всички посоки нанасяме отсечки, равни по дължина на показателя на лъчепречупване в съответното направление. Получава се овалонд, който според симетрията на кристала има различна форма. Например кристалите от низшите сингонии имат три взаимно перпендикулярни главни оптични направления със съответно три показателя на лъчепречупване. Едно от най - важните оптични свойства на кристалите е двойното лъчепречупване. На фиг. 39 пластинка от прозрачен калцит (исландски калцит) е поставена върху лист хартия с надпис . През кристалната пластинка се виждат двата надписа един над друг, като буквите на единия от тях са по - слаби. При по - дебела пластина явлението е по - ефектно. За първи път това свойство на калцита е открил датския учен Е. Бартолин през 1670 г. Това явление се наблюдава по – слабо при повечето прозрачни кристали (с изключение на тези от кубична сингония).

Блясък на кристалите

Една част от падналия върху кристала лъч прониква през него, като се пречупва или

поглъща. Друга част от светлинните лъчи се отразява без да променя скоростта си. Тази отразена светлина е причина за блясъка на кристала. Блясъкът на кристалите зависи от коефициента на лъчепречупване и характера на отразяващата повърхност. Той може да се определи с формулата на Френел: $R = \frac{(N-1)^2}{(N+1)^2 + n^2 k^2}$, където R е показател на отражение, а N е показател на лъчепречупване. Кристали, които имат силен метален блясък са: среброто, златото, медта, галенитът и др. минерали. За кристали с показател на лъчепречупване по-голям от този на въздуха ($n = 1$), блясъкът е стъклен ($R = 2-10\%$, $N = 1.3$ до 1.9), диамантен ($R = 10-29\%$, $N = 1.9$ до 2.6), полуметален ($R = 9-20\%$, $N = 2.6$ до 3). Кристалите с показател на лъчепречупване над 3 имат метален блясък ($R = 20-95\%$)



Фиг. 39. Двойно лъчепречупване в кристал от прозрачен калцит (исландски шпат)

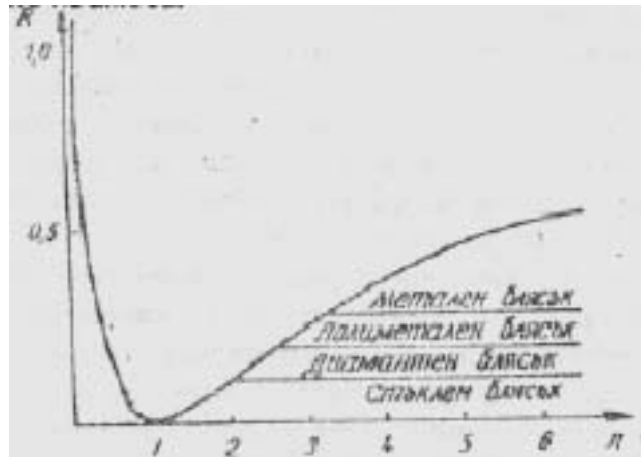
Блясъкът на кристала и отражателната сила (R) може да се определи като се сравнява с тези показатели за еталонни кристали. Посоченото степенуване на блясъка е валидно за гладки кристални повърхности. Според характера на цепителността той се променя. Кварцът има стъклен блясък, но на отломена неравно повърхност блясъкът е мастен. Слюдите имат съвършена цепителност и техния блясък е бисерен. Блясъкът зависи и от кристалния агрегат. Например влакнестите агрегати имат копринен блясък (азбест).

Прозрачност

Прозрачността на кристалите е важно тяхно свойство. Това е способността им да пропускат светлина. Коефициентът на пропускане (a) при дебелина на пластинка равна на 1 cm се определя по формулата: $a = I/I_0$, където I е интензитетът на падащата върху кристала светлина, а I_0 е интензитета на изходящата светлина ($I > I_0$). Прозрачните минерали имат по-високи стойности на a . Напълно прозрачни и напълно непрозрачни минерали няма, тъй като винаги част от преминаващата светлина се поглъща. Минералите са: прозрачни (кварц, калцит), полупрозрачни (сфалерит), непрозрачни (пирит, халкопирит).

Цвят

За различните кристали е различно количеството на погълнатата, отразената и пропуснатата светлина. Поради това всеки кристал има специфичен цвят. Оцветяването на кристалите се дължи на химизма, дефекти в кристалната структура и наличие на механични примеси.



Фиг. 40. Зависимост между показателя на отражение на светлината (R) и показателя на лъчепречупване (n).

Оцветените кристали, които са съединения на елементи - хроматори, са идиоохроматни. Например галенит PbS - оловносив, аурипигмент As_2S_3 - златистожълт. Оцветяването на някои кристали се дължи на присъствието в тях на примеси от елементи - хроматори. Например корундът (Al_2O_3) е безцветен. Когато в него присъства примес от Ti^{4+} , Fe^{2+} и Fe^{3+} той е син и се нарича сапфир, а когато примесите са от хром той става червен и се нарича рубин. Ролята на хроматори в минералите играят следните елементи (Ti^{3+} , Ti^{4+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Mn^{4+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Co^{3+}). За някои минерали (например лазурит) причината за идиоохроматизма е наличието на допълнителни аниони като: Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} .

Алохроматни ("алос" от гръцки "чужд") са минерали, оцветяването на които се дължи на примеси от други минерали. Например хематитът винаги оцветява в червено. Цветът на някои минерали се дължи на интерференционни или дифракционни явления (псевдохроматизъм). Тези цветове са лъжливи - псевдохроматни. Например при халкопирита и борнита те са сини, червени или лилави. Така наречената игра на цветовете се наблюдава и при опала (опалесценция), при лабратора (лабраторизация). Цветът на минерала се изразява с величина, като за целта се определят спектрите на поглъщане или на отражение. Оптичната плътност на минерала се определя по формулата $D = \lg 1/a$, където a е коефициентът на пропускане. По абцисата на координатна система се нанасят дължините на вълните, а по ординатата - оптичната плътност. Спектрите на поглъщане се измерват с двулъчеви спектрофотометри и се различават за обикновената и за необикновената светлинна вълна. Спектрите на отражение се регистрират с фотометри.

Цвят на чертата е дирята, която оставя кристалът върху бяла твърда неглазирана плочка. Повечето кристали имат еднакъв цвят с цвета на прахът върху плочката. За други минерали цветът на чертата е различен от цвета на минерала. Например хромитът $FeCr_2O_4$ е

черен, а чертата му е кафява. Цветът на хематита Fe_2O_3 варира от червен до черен, а чертата на минерала е винаги керемиденочервена, вишневочервена .

Радиоактивността е самопроизволно разпадане на атомите, при което се отделят α -, β - и γ - частици, представляващи съответно хелиеви ядра, електрони и електромагнитно лъчение, подобно на рентгеновите. Елементите от урановата, ториевата и актиновата редица се характеризират с голяма маса и неравновесно съотношение между протони и неутрони в атомното ядро поради, което те са неустойчиви и това води до саморазпадането им и отделянето на голямо количество енергия. Саморазпадането на елементите става с постоянна скорост без да зависи от промяна на температурата, налягането и други фактори за околната среда. В резултат на разпадането на U^{238} се образува междинен продукт Ra^{226} и краен продукт - Pb^{206} . При известна скорост на разпадане на радиоактивните изотопи е възможно по количеството на Pb^{206} да се определи абсолютната възраст (Т) на радиоактивния минерал (при условие, че не съдържа първично олово) по формулата: $T = \text{Pb}/\text{U} \cdot 0.38 \text{Th} \times 7400$ млн. год. С помощта на този метод е определена възрастта на земната кора на 4 милиарда и 600 милиона години (+_ 200 мил. год.)

Радиоактивните минерали се използват за добив на уран. Радиоактивните елементи могат да присъствуват в състава на други минерали под формата на изоморфни примеси. Това води до изменение на тяхната кристална структура, до механични и химични изменения. Така могат да се образуват метамиктови минерали или да се получат плеохроитни ореоли.

Луминисценцията е светенето на минералите, получено в резултат на освобождаването на погълнатата енергия от възбудени йони или молекули при преминаването им в друго състояние с по - малка енергия. Различава се флуоресценция, когато излъчването на светлината е само в момента на облъчване и фосфоресценция - при излъчване на светлината и след прекратяване на облъчването. Последната е характерна за някои арагонитови и гипсови кристали, флуоресценцията е характерна за флуорита. С помощта на това явление могат да се определят редица минерали като шеелит, отунит и други. В някои случаи цветът и силата на излъчената светлина може да се дължи на присъствието в кристалната структура на чужди йони, като например лантаноиди и редки земи във флуорита. Изучена е луминисценцията, която се дължи на наличието в минерала на елементи - луминифори (Cr^{2+} , Mn^{2+} , TR^{2+} , TR^{3+} , U^{4+} , U^{3+} , W^{6+} . Например флуоритът свети синьовиолетово при наличие на TR- елементи и в зелено - при наличие на Mn^{2+} .

Значителен брой минерали излъчват светлина при нагряване преди да се нажежат, което се означава като термолуминисценция. За нейното изследване се използват специални апарати, като данните се записват на интегрални криви. Термолуминисценцията се използва за определяне на относителната доза на радиоактивно облъчване, на което е бил подложен

минералът. Тя се използва за стратиграфско корелиране и за отделяне на генерации минерали.

Към **повърхностните свойства** на кристалите причисляваме тяхната омокряемост . това е лекотата, с която кристалните стени се покриват с вода или с друга течност. Това свойство на кристалите се използва при обогатяването на минерални суровини. При технологичната преработка се използва избирателното флотирание на отделните минерали.