

通信技術中的壓電石英

蘇聯 A. Ф. 普隆斯基 著

電信科學技術研究所譯

人民郵電出版社

А. Ф. ПЛОНСКИЙ

ПЬЕЗОКВАРЦ
В ТЕХНИКЕ СВЯЗИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

內 容 提 要

本書供壓電石英技術部門和有關通信技術部門中的工程技術人員作為實際工作的指南。

書中討論了石英諧振器、石英振盪器和石英濾波器的計算、設計、構造、實驗研究和製造等問題；敘述了作者所擬定的石英濾波器的調整和調諧的方法；並列有了許多濾波器、濾波諧振器和振盪諧振器的特性曲線。

通信技術中的壓電石英

著 者：蘇聯 А. Ф. 普隆斯基
譯 者：電信科學技術研究所
審校者：翁 龍 年
出版者：人民郵電出版社
北京東四區6條胡同十三號
印刷者：郵電部供應局南京印刷廠
南京太平路戶部街15號
發行者：新 華 書 店

書號：無79 1950年7月南京第一版第一次印刷 1—4,300 冊
850×1168 1/32 117頁 印張7 $\frac{10}{8}$ 字數166,000字 定價(10)1.20元

★北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號★

目 錄

序 言

概 說

第一章 石英諧振器

第一節 石英概說	(1)
第二節 石英的結晶軸	(2)
第三節 石英內的孿生	(2)
第四節 石英原料	(3)
第五節 石英結晶結構的光學研究	(4)
第六節 電軸方向與極性的確定	(10)
第七節 石英的X射綫檢查法	(11)
第八節 石英諧振器	(17)
第九節 壓電石英片的切割	(25)
第十節 石英諧振器的分類	(28)
第十一節 頻率溫度係數	(30)
第十二節 石英片的單頻性	(34)
第十三節 石英諧振器的計算	(36)
第十四節 石英諧振器的選擇	(39)
第十五節 石英諧振器裏機械振動的諧波及其應用	(40)
第十六節 石英諧振器的特種型式	(42)

第二章 壓電石英的製造

第一節 壓電石英的處理工藝	(45)
第二節 石英諧振器的固定方法及支架的結構	(48)

第三節	石英片的鍍金屬法	(57)
第四節	諧振器修整法	(61)
第五節	石英諧振器頻率的最後修整	(65)
第六節	細絲固定的零件對諧振器各參數的影響	(70)
第七節	石英的陳老現象	(72)
第八節	石英諧振器等值參數的測量	(74)
第九節	石英頻率溫度係數的測量	(79)
第十節	石英片中單頻性的檢查及寄生諧振的消除	(80)

第三章 石英穩定式振盪器

第一節	石英穩定式振盪器的工作情況	(82)
第二節	石英振盪器的工作機構	(83)
第三節	石英穩定式振盪器的頻率穩定度	(85)
第四節	並聯和串聯諧振的振盪器綫路	(89)
第五節	石英諧振器在振盪器綫路中工作時的活動性	(91)
第六節	石英振盪器的實用綫路	(92)
第七節	連續可調石英振盪器綫路	(110)
第八節	超高頻石英振盪器	(116)
第九節	低頻石英振盪器	(119)
第十節	石英振盪器的計算	(120)
第十一節	石英振盪器的綫路選擇、設計和結構	(127)
第十二節	石英振盪器的實驗研究和調整	(143)

第四章 石英濾波器

第一節	濾波器概說	(153)
第二節	石英濾波器的應用範圍	(157)
第三節	帶通濾波器綫路中的石英諧振器	(159)
第四節	帶通石英濾波器的分類	(160)

第五節	濾波器的特性阻抗.....	(168)
第六節	濾波器的工作衰減.....	(174)
第七節	石英濾波器的實用綫路.....	(178)
第八節	濾波器綫路的穩定度.....	(184)
第九節	設計石英濾波器的一般考慮.....	(186)
第十節	石英濾波器的計算.....	(189)
第十一節	研究和調整石英濾波器用的儀器.....	(199)
第十二節	石英濾波器的調整和調諧方法.....	(201)
第十三節	石英濾波器的試驗研究.....	(214)
附錄 I.	化學鍍金屬的配方.....	(217)
附錄 II.	電鍍金屬的配方	(219)
附錄 III.	電流比、電壓比與分貝的換算表	(220)
參攷書籍		

第一章

石英諧振器

第一節 石英概說

石英是矽石 (SiO_2) 的一種變態，約佔地殼的12%。它的比重為2.65，熔點為1710°C，硬度按莫氏硬標屬於第七級。

石英分成二類： β 石英（又名“低溫”石英）和 α 石英（又名“高溫”石英）^①， α 石英是 β 石英加熱到573°C 以上時所形成的一種變態。具有壓電效應的低溫石英可以用來製造諧振器。兩種變態在化學上都是穩定的，它們都不溶於除了氫氟酸以外的任何一種酸中。在室溫下，低溫石英晶體的介電常數約等於4.5。

β 石英（以後我們就簡稱它為“石英”）的產地在蘇聯有烏拉爾、中亞細亞、高加索、沃倫諾、外貝加爾地區。常見的石英為不同大小和不同顏色的結晶體，或者是不定形的礫石。

圖1—1上表示着石英晶體的兩種形狀，其中一塊彷彿

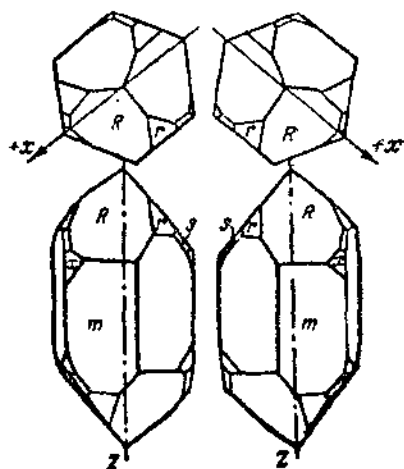


圖 1—1 石英晶體的兩種形狀

① 由於專門名詞沒有規定， β 石英有時稱為 α 石英；或者反之， α 石英叫 β 石英。

是另一塊在鏡子中的反映一樣。形狀不同的原因是由於氧和矽的原子在結晶格子中的排列情形不同。結晶如圖 1 左邊所示形狀的石英稱為“左”旋石英；結晶如圖右邊所示形狀的石英稱為“右”旋石英。石英結晶的兩種形狀之所以有這樣的稱呼，是由於沿 Z 軸而通過晶體的光的偏振平面在第一種情形下是向左旋轉；而在第二種情形下則是向右旋轉。

第二節 石英的結晶軸

根據座標軸系來研究石英內所發生的壓電現象是很方便的。座標軸的位置對晶體結晶格的相對位置是不變的。這些軸都畫在圖 1 上。

Z 軸，即光軸——就是在晶體裏對光綫沒有雙折射特點的方向。石英在光軸方向的電導率遠超過其他方向上的電導率。

X 軸，即電軸——就是能在稜面上引起最強電荷的那個機械力的方向。三電軸中任一軸的兩端上所激勵起的電荷是異性的，且右旋和左旋石英電軸的極性各不相同。

Y 軸，即機械軸（第三軸）——垂直於 XZ 平面的方向。 Y 軸如 X 軸一樣，也有三個。

請注意，這裏所講的軸的概念不是一條或幾條固定的綫，而是無限數量的平行綫。因為均勻石英結晶在各相同方向上的特性是完全一致的。

第三節 石英內的變生

結構均勻的晶體在自然界中很少見到。通常在晶體各部分內結晶軸的方向是各不相同的，也就是說，晶體是由幾個結合在一起的

晶胞所組成。這種現象稱為學生。強學生晶體照例不能用來製造諧振器。學生的性質與特點是各種各樣的。最常碰到的有電學生與光學生兩種。電學生又叫做定向學生，180度學生，或多非娜學生。由於電學生而產生雙右旋或雙左旋結晶晶胞相互間旋轉了 180° ，同時學生邊上的電軸極性也隨着旋轉而變化。這種學生可以看作極化面旋轉方向相同，而電軸極性相反的兩晶體的相互並生。把石英浸在氫氟酸中腐蝕可以確定石英裏有無電學生存在。

光學生或巴西學生是晶體左右旋晶胞的相互連生。用腐蝕方法或光學方法都很容易發現巴西學生。電學生一般是有不正規的形狀，然而光學生時腐蝕圖形的接界綫則為直綫（圖1—2）。



光學生



電學生

第四節 石英原料

石英是從淺的露出地面的礦脈開採出來的。採掘出來的石英中只有很小一部分可以用來製造壓電石英諧振器。這一種原料不應該有裂紋、學生或任何外部侵入物（呈針狀、纖維狀或小泡狀）。但是差不多在任何晶體裏都有上面所說的缺點，所以用“利用率”來表示原料的質量。利用率是指適於製造石英諧振器這部分晶體的體積與晶體總體積的百分比。石英原料的平均利用率接近於40%。利用率低於25%者就認為是不合格。石英的顏色並不是一種缺點。原料的預選是把原料在弧光燈照射下進行檢查來實現的。為了增加透明度在石英的表面塗上一層煤油。此種檢查法可以發現外部侵入物、

圖 1—2 電學生與光學生

小泡及裂紋等。

石英晶體遭受機械壓力時，就沿着平行於菱面體稜面的平面以完全一定的形狀裂開。這些面叫做劈開面。

第五節 石英結晶結構的光學研究

石英的光學研究方法是利用光的特性為基礎的。大家知道，光源通常是由無數不規則分佈着的基本放射體所組成。因此，光波可以在任何方向進行這種光稱為自然光或不偏振光。但在某種情況下，光波可以在一個與光綫方向一致的平面內進行，這樣的光稱為平面偏振光。

光的偏振是用偏振器來實現的。偏振器的工作原理是利用伴隨着光綫的反射過程與折射過程而產生的現象為基礎的。

偏振器讓在某一定平面上振盪的光通過，而阻止在所有沿其它平面發出的光。圖 1—3 為在兩個互相垂直的平面內所產生的平面偏振波的機械比擬。為得到平面偏振光，常常利用許多晶體所特有

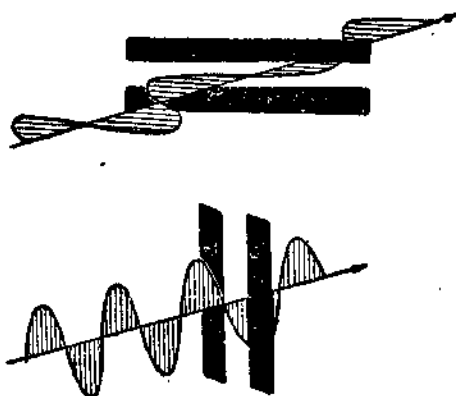


圖 1—3 平面偏振波的機械比擬

的光的雙折射現象，這種現象在方解石（冰洲石）中特別顯著。這種現象就是光綫在折射時分為二部分，因此每條入射光有兩條折射光（顯 1—4）。其中一條稱為尋常光綫，另外一條稱為非常光綫。尋常光綫服從於折射定律，而非常光綫則不服從折射定律，因為它的折射率不是一個常數，而是視晶體內光綫的方向而定。兩種光綫在二互相垂直的平面上偏振。

許多晶體（例如冰洲石，石英及電氣石）都有一個能使兩種光綫（尋常光綫和非常光綫）一起傳播而不分開的方向。這一方向就是晶體的光軸。實際上僅利用一條偏振光，而另一偏振光則用某種方法加以消除。電氣石僅有一種偏振光，而另一偏振光是被吸收了。人造碘化奎寧的結晶也有同樣的特性。這些小品體黏在賽璐珞的膠片上，而朝着同一個方向。這種膠片稱為偏振片。

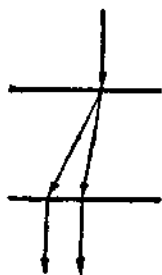


圖 1-4 光的雙折射

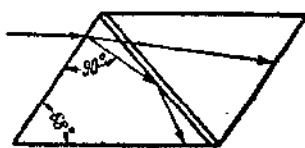


圖 1-5 尼科爾稜鏡

“尼科爾稜鏡”（尼科爾）是一種很好的偏振器，它是由冰洲石的單晶體所製成。用一定方式磨過的晶體沿對角綫切成兩部分，以後再把它們磨光，用加拿大香膏互相膠合起來（圖 1—5）。加拿大香膏的折射率小於冰洲石的折射率，因此，折射作用較非常光為強的尋常光綫受到反射，而射到塗有黑顏色的邊面上，被黑顏色所吸收。

偏光鏡（即利用偏振光的光學研究設備）最簡單的是由兩個偏振板（起偏板和檢偏板）所組成。

如果將二偏振板的偏振面平行放置（“平行的”偏振板），則可使通過的光綫最多。平行的尼科爾稜鏡能使在這些稜鏡偏振平面內偏振的光綫中有80%以上能通過這些稜鏡。

當偏振面互相垂直時，偏振板或根本不讓光綫通過，或者只有很少的光綫通過。偏振面相互垂直的偏振板稱為“交叉式偏振板”。兩個垂直交叉的尼科爾稜鏡是完全不透光的。而交叉的偏振板則可通過少量光綫。交叉的或平行的偏振片的透光度與單色光波長的關係曲綫如圖 1—6 所示。

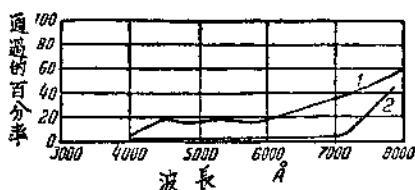


圖 1—6 平行偏振片及交叉偏振片的光綫通過情況

如果在兩交叉偏振板間放置石英晶體，那末在普通情況下，通過起偏板而射到石英晶體上的偏振光由於光綫雙折射而分成兩條光綫，這二光綫將以某種程度通過檢偏板。

如果在通過的光綫裏把晶塊旋轉一週，則在一週內，在檢偏板視場會產生四次黑暗和四次明亮的現象，這是由於光綫雙折射作用和尋常光綫與非常光綫的干涉作用所致。如果在交叉偏振板之間所放置的不是晶體，而是各向同性體，那末它會讓光綫通過而不變更光波的方向。因此檢偏板的視場變成黑暗。

光軸與平行光束方向一致的薄石英片，其作用與各向同性體相

類似，因為平行於晶體光軸的光綫在這種情況下不會遭到折射。如果片子厚一些事情就複雜了。通過旋光性體的片子的光綫，其偏振面發生旋轉，因此檢偏板的視場不是呈現出黑暗，而是光亮的，也就是說可以不產生吸收現象。石英在光軸方向上每一毫米厚度的旋轉角與單色光的波長有關。紅色光的旋轉角近於 0.33° ，黃色光的旋轉角近似於 0.56° ，藍色光近似於 0.84° 。

在聚光或散光裏，中心光綫的方向可以與光軸一致，但錐形光束的其他光綫則與光軸成某種角度。如果晶體沿光軸方向的厚度在所有各點上都是一樣的，則均勻傾斜光綫的投影成一圓形。因此當所研究的石英的光軸與光束方向一致時，在檢偏板裏所看見的干涉圖為許多同心環。

石英原料的光軸是用偏振光鏡來確定的，這種偏振光鏡是利用聚光，平行光，或是利用能分出一定波長的濾光器所濾過的漫散光，或是利用沒有經過濾光器的漫散光。石英光學研究儀器的結構是各種各樣的。

在圖 1—7 上畫着偏振光鏡的圖樣。其中黑色鏡當作起偏板，而尼科爾稜鏡當作檢偏板。把石英浸入透明的容器裏，器中所盛液體的折射率應與石英的折射率相近似。柏油、三甲酚磷酸鹽

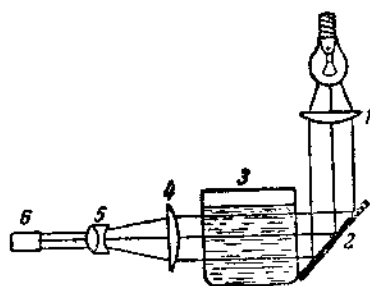


圖 1—7 偏光鏡

以及在某種程度上如煤油與苯都屬於這類液體。液體的功用是在

於減少因石英表面而產生的光綫反射。對尋常光綫來說石英折射率等於 1.544 ，而對於非常光綫則等於 1.553 。把石英放到電力綫平行於

晶體任一電軸的電場時，折射係數就變更。圖 1—7 的偏振光鏡是為大塊石英原料的光軸作預先測定用的，其精確度約為幾度。為此把石英或礫石放置在偏振光光綫裏，而選擇恰當的位置使通過尼科爾檢偏板可以看見干涉環。此時晶體光軸的方向與光綫的方向一致。最好能有一組濾光器以便藉選擇單色光的波長使干涉環的亮度最強。

體積較小而方向已預先確定過的石英塊 其更精確的光軸方向是用偏光顯微鏡來確定的。偏光顯微鏡與普通顯微鏡的不同之點在於它有兩塊尼科爾稜鏡和一組發散透鏡（圖 1—8）。

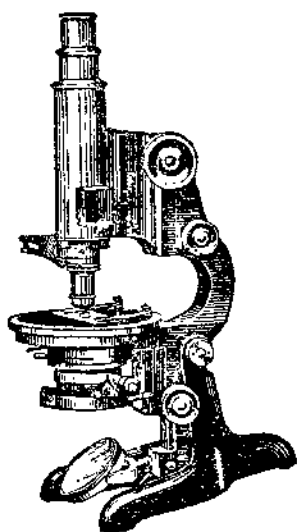


圖 1—8 偏光顯微鏡

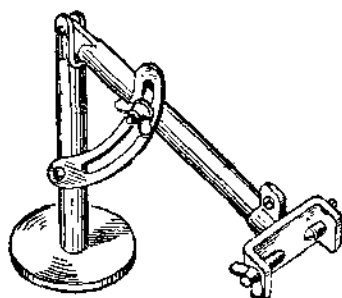


圖 1—9 偏光顯微鏡檢查石英時所用的夾具



圖 1—10 交叉尼科爾稜鏡的干涉圖

尼科爾第一稜鏡（起偏板）放在載物台之下，第二稜鏡（檢偏板）放在目鏡與物鏡之間的管筒內。需要檢查的石英塊浸在盛滿柏

油的薄壁透明容器裏，並用一種簡單的夾具在容器內把石英塊定向（簡1—9）。夾具的底座是在容器旁的顯微鏡載物台上。端上固定着石英的槓桿對基座可以居有各種不同位置。這樣就可以使石英塊與光綫方向成任一角度。

當精確測量時，載物台與夾具的底座應該嚴格平行。當光軸垂直於載物台的平面時，交叉尼科爾稜鏡的干涉圖如圖1—10所示，而且環的中心與目鏡綫的交叉點相重合。如果必須用偏光顯微鏡來確定大塊石英的光軸方向，則從這石英塊上切下一小片，先用上述方法來確定此片的方向。然後把該片與夾具一起附到石英塊上，且與它們一起固定在金剛石鋸的刀架上。固定時必須使得垂直於石英光軸的夾具底座與鋸面平行，或者在必要時與鋸面成一所需的夾角。

利用偏光顯微鏡可以確定石英旋轉的方向。當檢偏板對交叉位置發生轉動時，干涉環或者擴大或者縮小。如果按順時針方向旋轉檢偏板時干涉環擴大，則此種石英為右旋石英，但如果縮小，則是左旋石英。

另外還有一種方法，即當轉動檢偏板時按干涉顏色的替換來確定石英的旋轉方向，但此種方法可能會造成錯誤，因此不作介紹。

應該指出，也可以用偏光鏡而在最簡單的情況下可以用偏振片來確定石英的旋轉特性。為了避免發生錯誤，最好預先檢查一下其旋轉方向已經明明知道的石英。

利用偏光鏡可以發現石英層裏的光(巴西)孳生。使光綫偏振面旋轉方向改變的光孳生，或者呈現出有明顯干涉顏色侵入的形狀，或者呈現出輪廓很明顯的三角形。當石英裏存在孳生時，干涉環的封閉綫要破裂，在破裂處它們的顏色亦起變化。

不會使光綫偏振面旋轉方向發生改變的電學生是不能用光學方法來發現的。

第六節 電軸方向與極性的確定

石英晶體內電軸方向的確定法有好幾種；下面將引述幾種。

以裂紋法確定電軸的方向 垂直於光軸切下厚0.5—3毫米的截片。把截片在爐內加熱至攝氏200°左右，然後，慢慢的浸入室溫下的水中，此時在石英內有沿晶體電軸方向的裂紋形成。首先出現的是與水平面的夾角最接近於直角的電軸方向的裂紋。因此，當慢慢把石英片浸入水中時必須把它繞着光軸旋轉，使得切面與水面經常保持垂直。用此法可以得到朝向所有電軸方向的裂紋。如果迅速地將石英片浸入水中，就會產生許多方向極不相同的偶然性的裂紋。如果石英片過厚，或加熱過度，也會產生類似的結果。

用腐蝕法確定電軸的方向 把大塊石英垂直於光軸切成許多小塊。把這些小塊浸入50%的氫氟酸中數小時。用圖1—11上所示的儀器來確定X軸。把腐蝕塊安裝在旋轉載物台上。經過腐蝕之後，小塊的表面上佈滿了極微小的凹紋網。凹紋的方向與結晶軸成一定關係，並且在嚴格一定的方向反射光綫。旋轉載物台使在目鏡裏出現光綫反射的現象。此後在塊面上拉好綫，同時沿綫切割。此綫不與電軸一致，而與電軸夾成某一銳角，再把石英塊轉至另一面，重複上述的操作。在垂直於光軸的其中一平面上所形成的銳角，它的分角綫（直綫）為此晶體的電軸。在X軸上，遠離光源的一端為正。

光圖法是另一種用腐蝕來確定電軸方向的方法。垂直於光軸切成的並經過腐蝕的石英塊移置在點光源上。在石英面上形成類似三

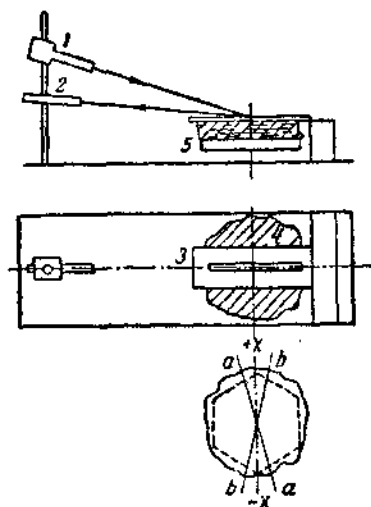


圖 1-11 石英內電軸方向的測定儀：
1—光源；2—目鏡；3—可掀開的切口板；
4—石英塊；5—載物台。

角形的光圖。光三角形的各邊與各電軸幾乎平行。軸的正端突出在圖形範圍之外，仿佛是三角形各邊的延長綫（圖 1—12）。用光圖法來求 X 軸，它的準確度很



圖 1-12 石英面上的光圖

低，與真正方向的偏差幾達 10° 之多。

用碎面法來確定電軸的方向 用碎面法也可大致確定電軸的方向。用尖銳的金屬塊或直徑很小的鋼球在垂直於光軸的塊面上打幾下，由此在石英面上形成裂紋，其方向在大多數情況下與 X 軸的方向一致。這種定向的方法也是極不完善的，而不能保證足夠的測量準確度。

第七節 石英的X射綫檢查法

上述檢查石英的方法存在許多缺點，其中包括：準確度低，定向的過程久，不能廣泛應用以及其他等等；因此在現代的石英製造中僅在檢查與選擇原料以及預先確定原料的方向時才用光學檢查

法。 X 射綫檢查法能使我們以高達 $1'$ 的準確度來測量石英片與石英塊的切角。測量時間不超過幾分鐘。 X 射綫設備的維護較簡單並不須要有高度熟練的技術人員。

用 X 光綫檢查結晶圖形結構的方法有兩種。其中第一種方法是以 X 射綫因結晶格所產生的繞射現象為基礎的。輻射現象是由於光綫在其通過大小與輻射波的波長差不多的小孔時所產生的偏移作用。如果空間結晶格原子間的距離與 X 射綫的波長差不多，則可把結晶格作為自然繞射格。如果在 X 光綫的通路上放置各向同性體，那末光綫的方向並不改變的；但如果用晶體來代替各向同性體，則一部分光綫將偏離其本來的位置。通過晶體的光綫定影在底片上，而在那裏形成“勞埃”特性圖。依照勞埃照片的形狀，可以判斷晶體的結構，以及晶體對 X 射綫方向所成的方位。

第二種檢查晶體的方法，現時在製造壓電石英諧振器中用得很廣泛。其方法如下：大家知道晶體是由許多晶胞所組成。晶胞的特性完全類似於晶體。這些晶胞聯合成一個整體，就組成晶體的空間格。空間格的原子面在圖形上類似於結晶面，並且有特別的標記。

X 射綫的繞射在不同程度與其反射同時發生。二次反射的各 X 射綫波在一定條件下相位是同相的；此時反射強度最強。最大反射強度的條件可以公式表示之：

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1-1)$$

式中 n ——反射次序係數；

λ —— X 射綫波長；

d ——由反射所產生的同類原子面之間的最短距離；

θ ——入射角（及反射角），即光束與反射面間所夾而相當於最強反射的角。