# એકમ

# 1

# ઘન અવસ્થા

## 1. પ્રસ્તાવના (Introduction)

આગળનાં ધોરણોમાં તમે પાંચ અવસ્થાઓ : ઘન, પ્રવાહી, વાયુ, પ્લાઝ્મા અને બીઈસી (બોઝ-આઈનસ્ટાઈન કન્ડેન્સેટ)નો અભ્યાસ કરી ચૂક્યા છો. આ પૈકી ઘન, પ્રવાહી, વાયુ અવસ્થા વિશે તમે માહિતગાર છો. પ્રવાહી અને વાયુનો અભ્યાસ ધોરણ 11માં વાયુ અવસ્થા અને પ્રવાહી અવસ્થાના એકમોમાં કર્યો છે. વાયુના નિયમો, પ્રવાહીના લાક્ષણિક ગુણધર્મો વગેરેનો પણ અભ્યાસ કર્યો છે. આ એકમમાં ઘન વિશે વધુ ઊંડાણમાં અભ્યાસ કરીશું. ઘન પદાર્થની રચના, ગુણધર્મો વગેરેના અભ્યાસને **ઘન અવસ્થા રસાયણવિજ્ઞાન (Solid State Chemistry)** કહે છે.

ઘન પદાર્થને ચોક્કસ આકાર અને કદ હોય છે એ વાત આપણે જાણીએ છીએ. આ વાક્ય સાથે સંલગ્ન રસાયણવિજ્ઞાનની ઘણી બધી ઘટનાઓનો અભ્યાસ કરીશું. આપણે ઘન પદાર્થથી પરિચિત છીએ. કારણ કે રોજબરોજનાં જીવનમાં આ પદાર્થો સાથે આપણે સંકળાયેલાં છીએ. જુદા જુદા ઉપયોગો માટે જુદા જુદા ઘન પદાર્થો વપરાય છે. ઘનમાં તેમનાં જુદાં જુદાં બંધારણ અને બંધનબળો સંકળાયેલાં હોય છે. ઘનનો અભ્યાસ કરીને તેના ગુણધર્મોની જાણકારી મેળવી તથા તેમાં ફેરફાર દ્વારા તેના ઘણા બધા ઉપયોગો કરી શકાય. જેમ કે અતિવાહકો તથા પ્લાસ્ટિકના પૅકિંગ માટે વપરાતાં પદાર્થો બનાવી શકાય. ઘન પદાર્થ પ્રવાહી અને વાયુ કરતાં એક જ બાબતમાં અલગ પડે છે અને તે પ્રવાહિતા છે. તેથી પ્રવાહી અને વાયુઓને **દ્રવ (fluid)** પણ કહેવાય છે, પરંતુ ઘનમાં આયનો, અણુઓ કોઈ નિશ્ચિત રૂપે વ્યવસ્થિત ગોઠવણીમાં હોય છે તેથી તેમના ચોક્કસ આકાર બને છે, માટે તે દ્રવ નથી. ઘનમાં પણ બે પ્રકાર હોઈ શકે : સ્ફટિકમય અને અસ્ફટિકમય. સ્ફટિકમય ઘન પદાર્થમાં પરમાણુઓ કે આયનોની ગોઠવણી વ્યવસ્થિત હોય છે.

આ એકમમાં આપણે ઘન પદાર્થમાં પરમાણુઓ કે આયનોની ગોઠવણી અને તેનો તેમના ગુણધર્મો સાથેના સંબંધનો અભ્યાસ કરીશું. આ ગુણધર્મોમાં કેવા ફેરફાર કરીએ તો ઈચ્છિત અને ઉપયોગી અસંખ્ય ઘન પદાર્થો મેળવી શકાય એનો પણ અભ્યાસ કરીશું.

### 1.1 બંધન બળોના આધારે ઘન પદાર્થોનું વર્ગીકરણ (આણ્વિય, આયનીય, સહસંયોજક, ધાત્વિક) (Classification of Compounds on the Basis of Bonding Forces (Molecular, Ionic, Covalent, Metallic))

મોટા ભાગના ઘન પદાર્થો સ્ફટિકમય હોય છે. જેમ કે કૉપર, લોખંડ, સિલ્વર જેવી ધાતુઓ. ફૉસ્ફરસ, સલ્ફર જેવી અધાતુઓ, આયનીય સ્વરૂપમાં સોડિયમ ક્લોરાઇડ, પોટૅશિયમ ક્લોરાઇડના સ્ફટિક અને નેપ્થેલીન જેવા આણ્વિય ઘન.

સ્ફટિકમય ઘન પદાર્થોનું વર્ગીકરણ તેમાં રહેલા આંતરઆણ્વિય આકર્ષણ બળોના આધારે ચાર વિભાગમાં કરવામાં આવેલ છે : (1) આણ્વિય ઘન (2) આયનીય ઘન (3) ધાત્વિક ઘન અને (4) સહસંયોજક અથવા જાળીદાર ઘન.

**(1) આણ્વિય ઘન :** આણ્વિય ઘનમાં રહેલા અણુ, ઘનના ઘટક કણો હોય છે. તેમને નીચેના ત્રણ વિભાગોમાં વહેંચી શકાય :

**(અ) બિનધ્રુવીય આણ્વિય ઘન :** આ પ્રકારના ઘનમાં તત્ત્વો જેવા કે, આર્ગોન, હિલિયમ અથવા બિનધ્રુવીય સહસંયોજક બંધથી બનેલા અણુઓ જેવા કે ડાયહાઈડ્રોજન, ડાયક્લોરિન, ડાયઆયોડિન વગેરેનો સમાવેશ થઈ શકે. આ પ્રકારના ઘનમાં પરમાણુઓ અથવા અણુઓ નિર્બળ વિક્ષેપન (dispersion) બળો અથવા લંડન બળો ધરાવે છે. આવાં બળોનો અભ્યાસ ધોરણ 11માં તમે કરી ચૂક્યા છો. આવા પ્રકારના ઘન નીચાં ગલનબિંદુ ધરાવે છે અને તેઓ પોચાં (મૃદુ) તથા વિદ્યુતના અવાહક હોય છે. સામાન્ય તાપમાને અને દબાણે તેઓ પ્રવાહી અવસ્થા અથવા વાયુમય અવસ્થામાં હોય છે.

**(બ) ધ્રુવીય આણ્વિય ઘન :** $SO_2$, $NH_3$ જેવા ઘન સામાન્ય રીતે ધ્રુવીય સહસંયોજક બંધ ધરાવે છે. આવા ઘનના અણુઓ એકબીજાની સાપેક્ષમાં પ્રબળ એવી ધ્રુવીય-ધ્રુવીય આંતરક્રિયાઓથી જકડાયેલા હોય છે. તેઓ પણ પોચા (મૃદુ) અને વિદ્યુતના અવાહક હોય છે. તેમનાં ગલનબિંદુ, બિનધ્રુવીય આણ્વિય ઘન કરતાં ઊંચા હોવા છતાં પણ સામાન્ય તાપમાને તેઓ વાયુ અથવા પ્રવાહી અવસ્થામાં હોય છે. ઘન $SO_2$ અને ઘન $NH_3$ આ પ્રકારના ઘન છે.

**(ક) હાઈડ્રોજનબંધ ધરાવતાં આણ્વિય ઘન :** આ પ્રકારના ઘનમાં H જેવા પરમાણુ અને F, O અથવા N જેવા વધુ વિદ્યુતઋણમય સાથે ધ્રુવીય સહસંયોજક બંધ બનાવે છે. તેમાં રહેલું પ્રબળ હાઈડ્રોજન બંધન તેને જકડી રાખી શકે છે. બરફ જેવો પદાર્થ આનું ઉદાહરણ છે. બરફ વિદ્યુતનો અવાહક છે. ઓરડાનાં તાપમાન અને દબાણે તેઓ બાષ્પશીલ પ્રવાહી અથવા પોચો (મૃદુ) ઘન હોય છે. બરફના અણુમાં પાણીના ચાર અણુ હાઈડ્રોજનબંધ દ્વારા આકર્ષાયેલા હોય છે. હાઈડ્રોજનબંધને પરિણામે તે જ સમૂહનાં અન્ય તત્ત્વોના હાઈડ્રાઈડથી અલગ પડે છે.

**(2) આયનીય ઘન :** આયનીય ઘનના ઘટક કણો આયનો હોય છે. આવા પદાર્થનાં ધનાયનો અને ઋણાયનો પ્રબળ કુલંબિક બળથી આકર્ષાયેલા હોય છે અને તેથી ત્રિપરમાણીય દિશામાં બળ સ્થિત અણુઓની ગોઠવણી ધરાવે છે. તેઓ સખત અને બરડ હોય છે. તેમના ગલનબિંદુ અને ઉત્કલનબિંદુ ધન અને ઋણ આયનોના પ્રબળ આકર્ષણને કારણે ઊંચા હોય છે. આવા પદાર્થોમાં આયનો હોવા છતાં તે વિદ્યુત કે ઉષ્માનું વહન કરી શકતા નથી. કારણ કે ધનાયન અને ઋણાયન વચ્ચે પ્રબળ આકર્ષણબળ હોવાથી જકડાયેલો રહે છે. પરંતુ તેમને પાણીમાં ઓગાળતાં અથવા તેમને ઘન સ્વરૂપમાંથી પીગળાવી નાખતાં આયનો અલગ પડે છે અને તેથી વિદ્યુતનું વહન કરે છે.

**(3) ધાત્વિક ઘન :** મોટાભાગની ધાતુઓ ઘન સ્વરૂપે હોય છે અને તેથી જેની આસપાસ મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન ગોઠવાયેલાં હોય છે. તે ધાતુના ધનાયન કેન્દ્રમાં હોય છે જે ચોક્કસ રીતે ગોઠવાયેલાં હોય છે. ઇલેક્ટ્રૉન કોઈ પણ ધાતુકેન્દ્રના પરમાણુ કેન્દ્રના ફરતા ઇલેક્ટ્રૉન સમુદ્ર સ્વરૂપે પથરાયેલાં હોય છે. આ ઇલેક્ટ્રૉન કોઈ પણ કેન્દ્ર પૂરતા સીમિત ન રહેતાં સમુદ્રમાં ફરતાં પાણીના વહેણની જેવાં કેન્દ્રોની આજુબાજુ ઘૂમતા હોય છે અને આ મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન ધાતુમાંથી વિદ્યુત તથા ઉષ્માનું વહન થવા દે છે. જ્યારે વિદ્યુતબળ લગાડવામાં આવે ત્યારે તેઓ ખસે છે, પણ નવીન અવસ્થામાં ઇલેક્ટ્રૉન તેની આજુબાજુ ગોઠવણ કરી લે છે. જ્યારે ઉષ્મા ધાતુમાં દાખલ કરવામાં આવે છે, ત્યારે ઉષ્મીય ઊર્જા મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન વડે બધે પ્રસરી જાય છે. આ ઉપરાંત ધાતુઓને ચળકાટ હોય છે અને કેટલાક કિસ્સાઓમાં રંગ પણ હોય છે. આ પણ મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉનની હાજરીને લીધે હોય છે. તેમને ટીપી શકાય છે તથા તેમના તાર ખેંચી શકાય છે.

**(4) સહસંયોજક અથવા જાળીદાર ઘન :** સમગ્ર સ્ફટિકમાં અરસપરસના પરમાણુઓ સહસંયોજક બંધની રચનાથી ખૂબ જ પ્રમાણમાં જુદા જુદા સ્ફટિકમય ઘન તરીકે રચના પામે છે. તેમને વિરાટ અણુઓ (Giant Molecules) કહે છે. સહસંયોજક બંધ દિશાકીય ગુણધર્મ ધરાવતા હોવાથી આ સંયોજનોમાં ખૂબ જ વિવિધતા જોવા મળે છે. તેમના અણુઓ સખતાઈથી જકડાયેલાં રહે છે અને તેથી ઘણા ઊંચા ઉત્કલનબિંદુ ધરાવે છે. કેટલાંક ગલન પામતાં પહેલાં વિઘટન પામે છે અને વિદ્યુતના વાહક પણ નથી. હીરો અને ગ્રેફાઇટ બંને આવા પ્રકારનાં ખાસ ઉદાહરણો છે. ગ્રેફાઇટનું બંધારણ વિશિષ્ટ હોવાથી તે પોચું અને વિદ્યુતનું સુવાહક છે. ગ્રેફાઇટમાં કાર્બનના ત્રણ પરમાણુ $sp^2$ સંકરણથી ત્રણ સહસંયોજક બંધ રચે છે અને ચોથો ઇલેક્ટ્રૉન મુક્ત રહે છે, જે ગ્રેફાઇટના એક સ્તર અને બીજા સ્તર વચ્ચે જોડાણ રાખે છે. આમ ગ્રેફાઇટમાં $sp^2$

સંકરણ ધરાવતી ષટ્‌ફલકીય રચના ધરાવતાં પડ બને છે અને ચોથો ઇલેક્ટ્રૉન તેમની વચ્ચે 340 pm જેટલું અંતર રાખે છે તથા તે મુક્ત હોવાથી વિદ્યુતનું વહન કરે છે. ગ્રેફાઇટના જુદા જુદા સ્તરો એકબીજા સાથે ઘર્ષણ કરી ખસી શકે છે માટે ગ્રેફાઇટ સારું ઘન લુબ્રિકન્ટ છે. જ્યારે હીરામાં $sp^3$ સંકરણથી ચતુષ્ફલક રચના થાય છે અને તેના ચારેય ખૂણાઓ અન્ય હીરાના કાર્બન પરમાણુ દ્વારા જોડાઈ ત્રિપરિમાણીય દિશામાં વિસ્તરે છે. તેથી તે ખૂબ જ કઠણ છે. વળી તેમાં મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન ન હોવાથી વિદ્યુતનું વહન કરી શકતો નથી. આમ જોઈ શકાય છે કે, એક જ તત્ત્વનાં બે અપરરૂપોમાં આંતરઆણ્વિય બળો અને સંકરણ અલગ રચાય તો તે અપરરૂપોના ગુણધર્મોમાં ઘણો મોટો ફેરફાર જણાય છે.

નીચેના કોષ્ટક 1.1માં ચારેય પ્રકારના ઘન અને તેમના ગુણધર્મો દર્શાવ્યા છે :

**કોષ્ટક 1.1 ઘનના જુદા જુદા પ્રકારો અને ગુણધર્મો**

| ઘનનો પ્રકાર | ઘટક કણ | આકર્ષણ બળો | ઉદાહરણ | ભૌતિક સ્વભાવ | ગલનબિંદુ | વિદ્યુતીય વાહકતા |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (1) આણ્વિય ઘન<br>(i) બિનધ્રુવીય | અણુઓ | વિક્ષેપન અથવા લંડન બળો | Ar, $CCl_4$, $H_2$, $I_2$, $CO_2$ | મૃદુ | ઘણાં નીચાં | અવાહક |
| (ii) ધ્રુવીય | અણુઓ | દ્વિધ્રુવ-દ્વિધ્રુવ આંતર આકર્ષણ | HCl, $SO_2$, $NH_3$ | મૃદુ | નીચાં | અવાહક |
| (iii) હાઇડ્રોજનબંધ ધરાવતાં | અણુઓ | હાઇડ્રોજનબંધ | $H_2O$ (બરફ) | સખત | નીચાં | અવાહક |
| (2) આયનીય ઘન | આયન | કુલંબિક અથવા સ્થિરવૈદ્યુતીય | NaCl, MgO, ZnS, $CaF_2$ | સખત પણ બરડ | ઊંચાં | ઘન અવસ્થામાં અવાહક પરંતુ પિગલિત અને જલીય દ્રાવણમાં વાહક |
| (3) ધાત્ત્વિક ઘન | બિનસ્થાનીકૃત ઇલેક્ટ્રૉનના સમુદ્રમાં ધન આયન | ધાત્ત્વિક બંધ | Fe, Ca, Mg, Ag | સખત પણ ટીપાઉ અને તન્ય | પ્રમાણમાં વધુ ઊંચાં | ઘન અને પિગલિત અવસ્થામાં વાહક |
| (4) સહસંયોજક અથવા જાળીદાર ઘન | પરમાણુઓ | સહસંયોજકબંધ | $SiO_2$ (ક્વાર્ટ્ઝ),<br>SiC (કાર્બોરેન્ડમ),<br>C (હીરો),<br>C (ગ્રેફાઇટ) | કઠણ<br><br><br>મૃદુ | ઘણાં ઊંચાં | અવાહક<br><br><br>વાહક (અપવાદ) |

## 1.2 સ્ફટિકમય અને અસ્ફટિકમય ઘન પદાર્થો (Crystalline and Amorphous Solid Substances)

ઘન પદાર્થો સ્ફટિકમય તથા અસ્ફટિકમય રૂપે મળે છે. તેમની રચના અને બંધારણમાં તફાવત હોય છે.

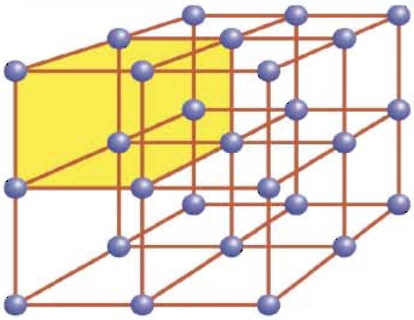
સ્ફટિકમય ઘન પદાર્થો દૃઢ અને અદબનીય હોય છે. તેમને ચોક્કસ આકાર હોય છે. તેમની ભૌમિતિક રચના નિયમિત અને ચોક્કસ હોય છે. આનું કારણ તેમના પરમાણુ, અણુ કે આયનોની ત્રિપરિમાણીય અવકાશ(space)માં નિયમિત અને ચોક્કસ ગોઠવણી હોય છે. તેમને ચોક્કસ અને સ્પષ્ટ (sharp) ગલનબિંદુ હોય છે. આવા સ્ફટિકમય ઘનનાં ઉદાહરણોમાં NaCl, KClનો સમાવેશ થાય છે.

અસ્ફટિકમય ઘન પદાર્થો પણ દૃઢ અને અદબનીય હોય છે. પણ તેમના ચોક્કસ ભૌમિતિક આકાર હોતા નથી. અસ્ફટિકમય ઘનમાં અણુ, પરમાણુ કે આયનો સખત રીતે બંધનથી જોડાયેલાં હોવા છતાં પણ તેમની ચોક્કસ ભૂમિતિ

કે રચનાની આવર્તિતા જોવા મળતી નથી. તેમનાં ગલનબિંદુ સ્પષ્ટ રહેતાં નથી. કેટલાંક તાપમાન–ગાળો (range) ધરાવતાં હોય છે. આવા અસ્ફટિકમય ઘન પદાર્થોનાં ઉદાહરણોમાં કાચ, રબર વગેરેનો સમાવેશ થાય છે. નીચેના કોષ્ટક 1.2માં સ્ફટિકમય અને અસ્ફટિકમય ઘન પદાર્થોના તફાવતો દર્શાવ્યા છે :

કોષ્ટક 1.2 સ્ફટિકમય અને અસ્ફટિકમય ઘન પદાર્થો વચ્ચેનો તફાવત

| ગુણધર્મ | સ્ફટિકમય ઘન | અસ્ફટિકમય ઘન |
|---|---|---|
| (1) આકાર | ચોક્કસ અને ખાસિયત ધરાવતો ભૌમિતિક આકાર | અનિયમિત આકાર |
| (2) ગલનબિંદુ | ચોક્કસ અને સ્પષ્ટ ગલનબિંદુ હોય છે, જે ઘનના સ્ફટિકની ખાસિયત છે. | તાપમાનના ગાળા દરમિયાન ધીમે ધીમે પોચું પડે છે એટલે કે ચોક્કસ અને સ્પષ્ટ ગલનબિંદુ હોતું નથી. |
| (3) ગલન ઍન્થાલ્પી | ચોક્કસ અને લાક્ષણિક ગલન ઍન્થાલ્પી હોય છે. | ચોક્કસ અને લાક્ષણિક ગલન ઍન્થાલ્પી હોતી નથી. |
| (4) ચિરાડ (cleavage) ગુણધર્મ | ચપ્પાં જેવા ધારદાર સાધન વડે સ્ફટિકને કાપતાં બે ભાગમાં વહેંચાય છે. નવા મળેલા ભાગોની સપાટી પણ સાદી અને પોચી હોય છે એટલે કે મૂળ જેવી જ જણાય છે. | ચપ્પાં જેવા ધારદાર સાધન વડે કાપતાં બે ભાગમાં વહેંચાય છે, પણ નવા મળેલા ભાગોની સપાટી મૂળ જેવી ન હોતાં અનિયમિત હોય છે. |
| (5) સ્વભાવ | સાચાં ઘન હોય છે. | આભાસી ઘન અથવા અતિશય ઠંડા કરેલા પ્રવાહી હોય છે. |
| (6) ઘટક કણોની ગોઠવણીનો ક્રમ | લાંબા ગાળા સુધી ક્રમ જળવાય છે. | ટૂંકા ગાળા સુધી જ ક્રમ જળવાય છે. |
| (7) તાપમાનની અસર | ગરમ કર્યા પછી ઠંડું પાડતાં મળતો આલેખ (તાપમાન $\rightarrow$ સમય) વક્ર મળતો નથી. સ્ફટિકીકરણ કરતાં તાપમાન નિશ્ચિત રહે છે. | ગરમ કર્યા પછી ઠંડું પાડતાં મળતો આલેખ (તાપમાન $\rightarrow$ સમય) વક્ર મળે છે. સ્ફટિકીકરણ કરતાં તાપમાનનો ગાળો મળે છે. |
| (8) ગુણધર્મો | તેમની વિદ્યુતવાહકતા, ઉષ્મીય વાહકતા, યાંત્રિક સામર્થ્ય અને વક્રીભવનાંક જેવા ગુણધર્મો જુદી જુદી દિશામાં જુદા જુદા હોય છે. | તેમની વિદ્યુતવાહકતા, ઉષ્મીય વાહકતા, યાંત્રિક સામર્થ્ય અને વક્રીભવનાંક જેવા ગુણધર્મો બધી જ દિશામાં સરખા હોય છે. |



આકૃતિ 1.1 ત્રિપરિમાણીય ઘન લૅટિસનો ભાગ અને તેનો એકમ કોષ

## 1.3 એકમ કોષ–દ્વિપરિમાણીય અને ત્રિપરિમાણીય લૅટિસ (Unit Cell-Two Dimensional and Three Dimensional Lattice)

પદાર્થના નાનામાં નાના કણને પરમાણુ અથવા અણુ તરીકે ઓળખીએ છીએ તેમ ઘનના સ્ફટિકને ઓળખવા માટેના નાનામાં નાના કણને એકમ કોષ કહેવામાં આવે છે. આમ સ્ફટિકમય ઘનની મુખ્ય લાક્ષણિકતાઓ ધરાવતા નાનામાં નાના કણને **એકમ કોષ** કહે છે. આવા એકમ કોષ ત્રિપરિમાણીય દિશામાં એકબીજા સાથે ગોઠવાય છે અને સ્ફટિકની રચના બને છે. આ પ્રકારની ગોઠવણીને સ્ફટિક લૅટિસ કહે છે. (લૅટિસ માટે ગુજરાતીમાં જાલક શબ્દ છે.)

આકૃતિ 1.1માં દરેક કણને બિંદુ તરીકે દર્શાવેલ છે. આમ, અવકાશમાં બિંદુઓની ત્રિપરિમાણીય નિયમિત ગોઠવણીને સ્ફટિક લૅટિસ કહેવામાં આવે છે. આકૃતિ 1.1માં સ્ફટિક લેટિસનો ભાગ દર્શાવેલ છે. આવી ત્રિપરિમાણીય લૅટિસની 14 શક્યતાઓ છે. તેમને બ્રેવિસ (Bravias) લૅટિસ કહે છે. સ્ફટિક લૅટિસની કેટલીક ખાસિયતો નીચે પ્રમાણે છે :

(1) લૅટિસમાંના દરેક બિંદુને લૅટિસ બિંદુ અથવા લૅટિસ સ્થાન કહે છે.

(2) સ્ફટિક લેટિસમાં દરેક બિંદુ એક ઘટક કણનું પ્રતિનિધિત્વ કરે છે, જે પરમાણુ અણુ કે આયન હોઈ શકે છે.

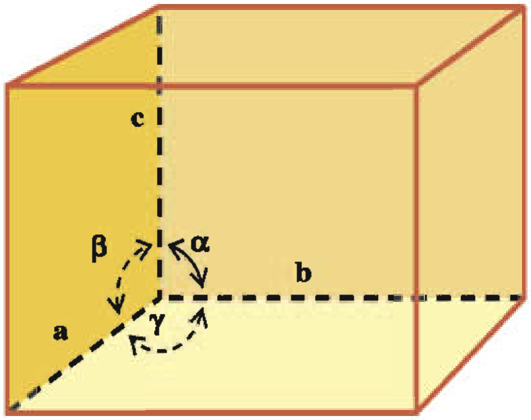
(3) લૅટિસ બિંદુઓને સીધી રેખા વડે જોડવામાં આવે છે જેથી લૅટિસની ભૂમિતિનો નિર્દેશ કરી શકાય છે.

એકમ કોષ સ્ફટિક લૅટિસનો નાનામાં નાનો ભાગ છે, જે જુદી જુદી દિશાઓમાં ત્રિપરિમાણીય રીતે પુનરાવર્તિત થાય છે અને સંપૂર્ણ લૅટિસ રચાય છે.

એકમ કોષની ખાસિયતો નીચે પ્રમાણે છે :

(1) તેનાં પરિમાણો તેની ત્રણેય (a, b અને c ધારો) (Edges) પર હોય છે. આ ધારો એકબીજાને લંબ હોય અથવા ન પણ હોય.

(2) ધારોની વચ્ચેના ખૂણાઓ $\alpha$ (ધારો b અને c વચ્ચે), $\beta$ (ધારો a અને c વચ્ચે) અને $\gamma$ (ધારો a અને b વચ્ચે) હોય છે. આમ એકમ કોષ છ પેરામીટર a, b, c, $\alpha$, $\beta$, $\gamma$થી લાક્ષણિક બને છે. આ પેરામીટર આકૃતિ 1.2માં દર્શાવેલ છે.




આકૃતિ 1.2 એકમ કોષનાં પરિમાણો

અત્રે નોંધવું જરૂરી છે કે, પુસ્તકોમાં આપણે દ્વિ-પરિમાણીય આકૃતિને દર્શાવી શકીએ. ત્રણેય પરિમાણ દર્શાવવા અઘરાં પડે છે. આથી મૉડેલનો ઉપયોગ કરી આ રચના સારી રીતે સમજી શકાય.

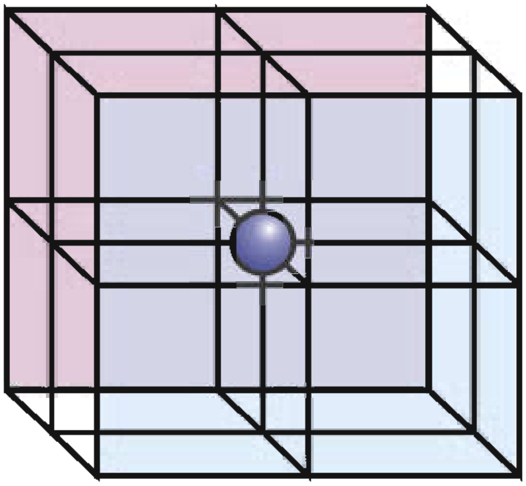
એકમ કોષને બે વિભાગમાં વહેંચી શકાય : (a) આદિમ (Primitive) એકમ કોષ (b) કેન્દ્રિત એકમ કોષ.

**(a) આદિમ એકમ કોષ :** જ્યારે ઘટક કણો એકમ કોષના ખૂણાના સ્થાન પર જ ગોઠવાયેલા હોય, તો તેને આદિમ કોષ કહે છે.

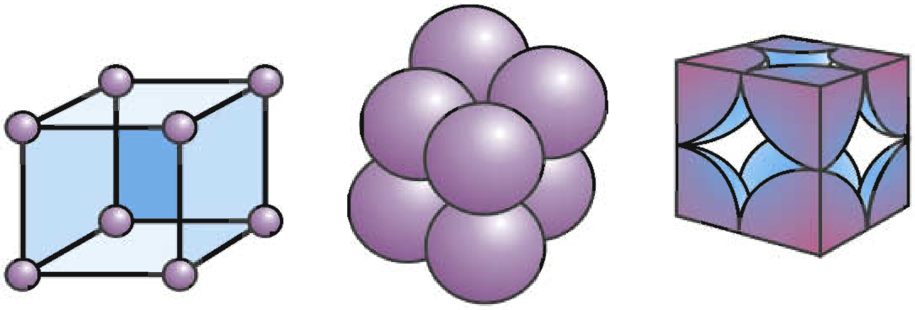
**(b) કેન્દ્રિત એકમ કોષ :** જ્યારે એકમ કોષમાં એક અથવા વધારે ઘટક કણો ખૂણાઓ ઉપરાંત ખૂણાઓ સિવાયની અન્ય જગ્યાએ ગોઠવાયેલા હોય ત્યારે તેને કેન્દ્રિત એકમ કોષ કહે છે. કેન્દ્રિત એકમ કોષ ત્રણ પ્રકારના હોય છે : (1) ફલક કેન્દ્રિત એકમ કોષ (2) અંતઃકેન્દ્રિત એકમ કોષ (3) અંત (છેડો) કેન્દ્રિત એકમ કોષ.

**(1) ફલક કેન્દ્રિત એકમ કોષ :** આ પ્રકારના એકમ કોષમાં દરેક ખૂણા પર ગોઠવાયેલા કણો ઉપરાંત દરેક ફલક(બાજુ)ના કેન્દ્રમાં એક-એક કણ ગોઠવાયેલા હોય છે.

**(2) અંતઃકેન્દ્રિત એકમ કોષ :** આ પ્રકારના એકમ કોષમાં દરેક ખૂણા પર ગોઠવાયેલા ઘટક કણો ઉપરાંત એક ઘટક કણ તેના અંતઃકેન્દ્ર (body centre) પર ગોઠવાયેલ હોય છે.



આકૃતિ 1.3 સાદા ઘન એકમ કોષમાં દરેક ખૂણા પરનો પરમાણુ 8 પરમાણુ સાથે સહિયારો છે

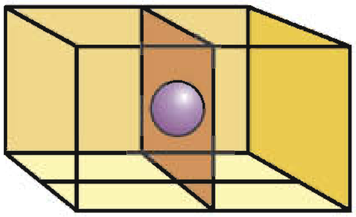


(a) (b) (c)

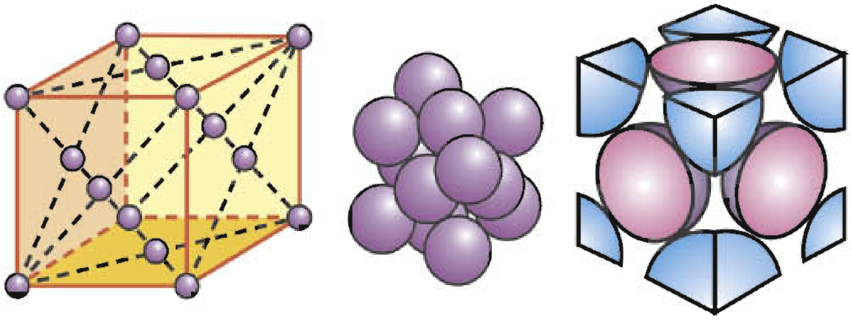
આદિમ એકમ કોષ

(a) ખુલ્લી રચના (b) અવકાશ ભરતી રચના

(c) દરેક એકમ કોષમાં સમાવિષ્ટ વાસ્તવિક ભાગ

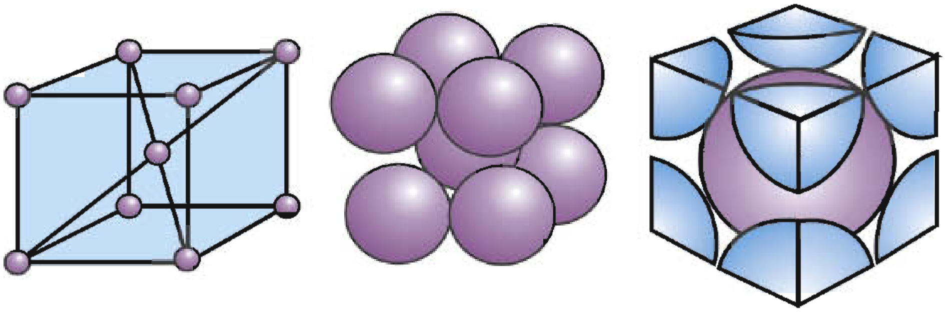


એકમ કોષના ફલક કેન્દ્રનો પરમાણુ બે એકમ કોષ વચ્ચે વહેંચાયેલો છે



(a) (b) (c)

ફલક કેન્દ્રિત એકમ કોષ (a) ખુલ્લી રચના (b) અવકાશ ભરતી રચના
(c) દરેક એકમ કોષમાં સમાવિષ્ટ વાસ્તવિક ભાગ

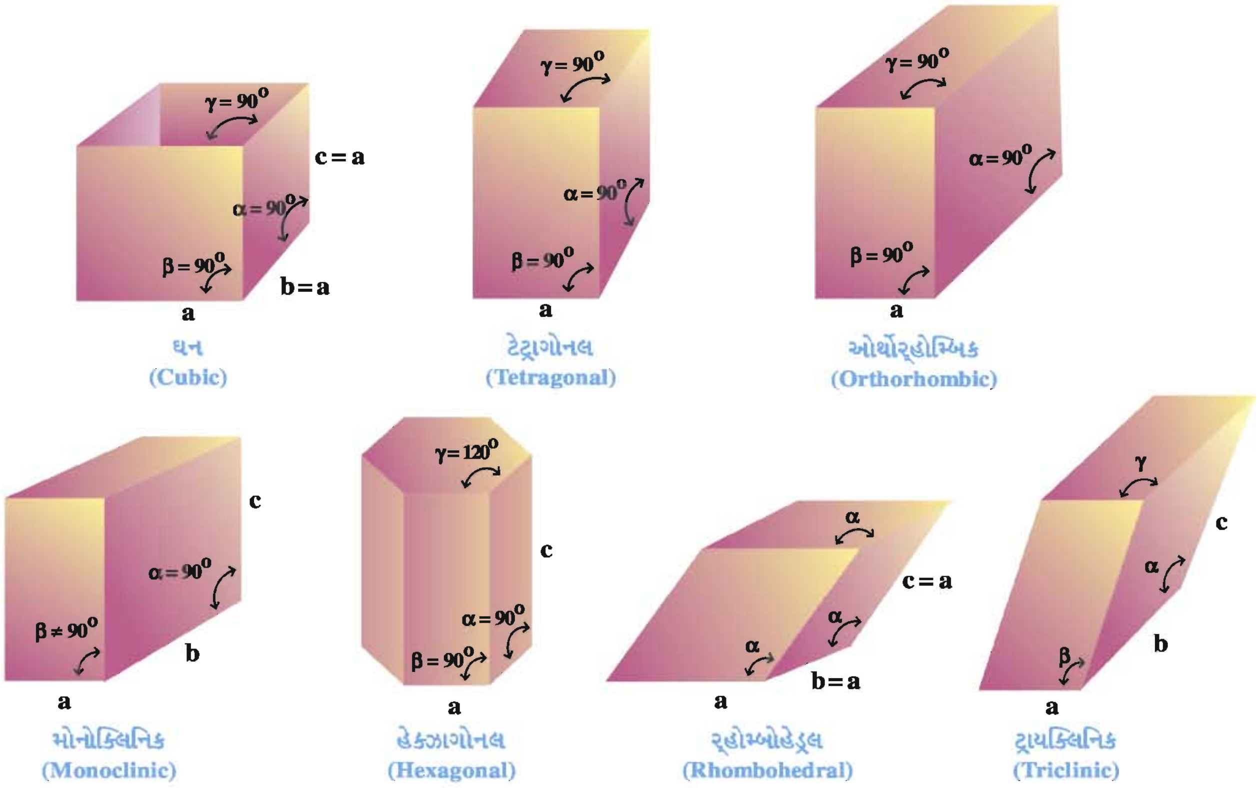


(a) (b) (c)

અંતઃકેન્દ્રિત એકમ કોષ (a) ખુલ્લી રચના (b) અવકાશ ભરતી રચના

(c) દરેક એકમ કોષમાં સમાવિષ્ટ વાસ્તવિક ભાગ

**(3) અંત (છેડો) કેન્દ્રિત એકમ કોષ :** આ પ્રકારના એકમ કોષમાં દરેક ખૂણા પર ગોઠવાયેલા ઘટક કણો ઉપરાંત એક-એક ઘટક કણ એકબીજાની વિરુદ્ધ ફલકોના કેન્દ્ર પર ગોઠવાયેલા હોય છે.

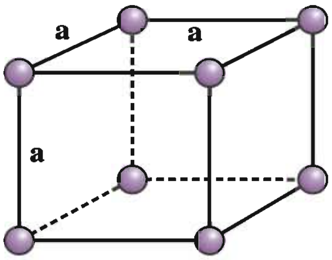



આદિમ એકમ કોષ

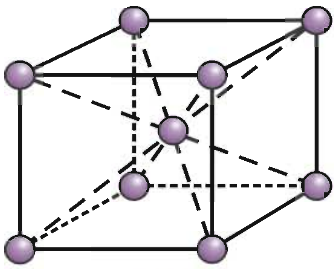
કુલ સાત પ્રકારના આદિમ એકમ કોષ છે, જેને નીચેના કોષ્ટક 1.3માં દર્શાવેલ છે :

**કોષ્ટક 1.3 સાત આદિમ એકમ કોષ અને તેમનામાં કેન્દ્રિત એકમ કોષના શક્ય વિચલન**

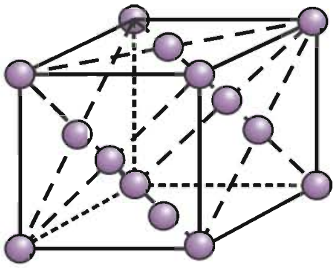
| ક્રમ | સ્ફટિક પ્રણાલી | શક્ય વિચલન | અક્ષીય અંતર અથવા ધારનું અંતર | અક્ષીય ખૂણા | ઉદાહરણ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | ઘન | આદિમ, અંતઃકેન્દ્રિત, ફલક કેન્દ્રિત | $a = b = c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ | NaCl, ZnS (ઝિંક બ્લેન્ડ), Cu |
| 2. | ટેટ્રાગોનલ | આદિમ, અંતઃકેન્દ્રિત | $a = b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ | સફેદ ટિન, $SnO_2$, $TiO_2$, $CaSO_4$ |
| 3. | ઓર્થોર્હોમ્બિક | આદિમ, અંતઃકેન્દ્રિત, ફલક કેન્દ્રિત, અંત (છેડો) કેન્દ્રિત | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$ | ર્હોમ્બિક સલ્ફર, $KNO_3$, $BaSO_4$ |
| 4. | હેક્ઝાગોનલ | આદિમ | $a = b \neq c$ | $\alpha = \beta = 90^0$ $\gamma = 120^0$ | ગ્રેફાઇટ, ZnO, CdS |
| 5. | ર્હોમ્બોહેડ્રલ અથવા ટ્રાયગોનલ | આદિમ | $a = b = c$ | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^0 < 120^0$ | કેલ્સાઇટ ($CaCO_3$) સિનાબાર (HgS) |
| 6. | મૉનોક્લિનિક | આદિમ, અંત (છેડો) કેન્દ્રિત | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \gamma = 90^0$ $\beta \neq 90^0$ | મૉનોક્લિનિક સલ્ફર, $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ |
| 7. | ટ્રાઇક્લિનિક | આદિમ | $a \neq b \neq c$ | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^0$ | $K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $H_3BO_3$ |




આદિમ કોષ (Primitive
(or simple))

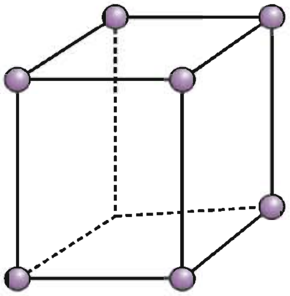


અંતઃકેન્દ્રિત
(Body-centred)

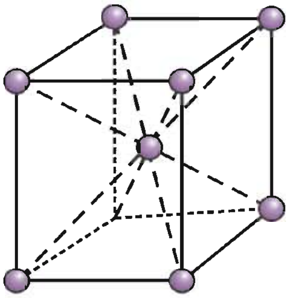


ફલક કેન્દ્રિત
(Face-centred)

**ત્રણ ઘન લૅટિસ :** બધી બાજુઓની લંબાઈ સમાન, બધા ફલક વચ્ચેના ખૂણા $90^{o}$

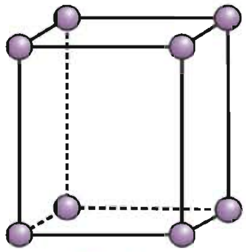


આદિમ કોષ
(Primitive)

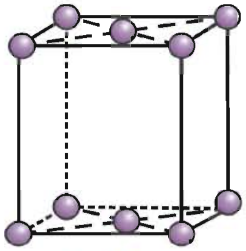


અંતઃકેન્દ્રિત
(Body-centred)

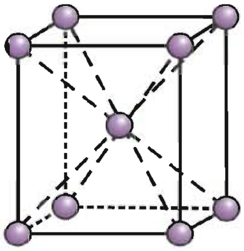
**બે ટેટ્રાગોનલ :** એક બાજુની લંબાઈ અન્ય બાજુ કરતાં જુદી, બધા ફલક વચ્ચેના ખૂણા $90^{o}$



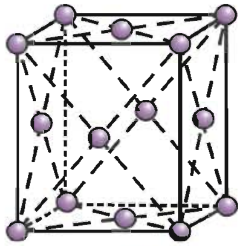
આદિમ કોષ
(Primitive)



અંત-કેન્દ્રિત
(End-centred)

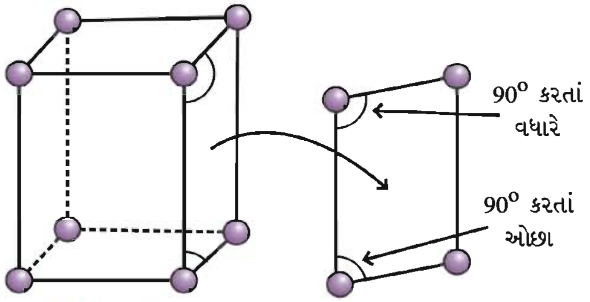


અંતઃકેન્દ્રિત
(Body-centred)

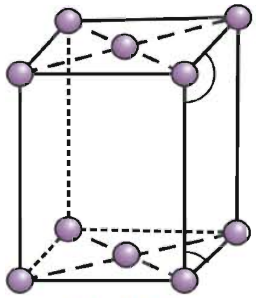


ફલક કેન્દ્રિત
(Face-centred)

**ચાર ઓર્થોર્હોમ્બિક લૅટિસ :** અસમાન બાજુઓ, બધા ફલક વચ્ચેના ખૂણા $90^{o}$




આદિમ કોષ
(Primitive)



અંત કેન્દ્રિત
(End-centred)

**બે મોનોક્લિનિક લૅટિસ :** અસમાન બાજુઓ, બે ફલક $90^{o}$થી જુદો ખૂણો ધરાવે છે

## 1.4 એકમ કોષમાં પરમાણુઓ દ્વારા વપરાયેલા કદની ગણતરી (Calculation of Volume Used by an Atom in Unit Cell)

જુદા જુદા સ્ફટિકોના એકમ કોષમાં અણુ, પરમાણુ કે આયનોની ગોઠવણી અલગ-અલગ હોય છે. આપણે જુદા જુદા એકમ કોષોમાં પરમાણુઓની ક્લોઝ્ડ-પૅકિંગ (એકબીજાની નજીક) ક્ષમતા વિશે અભ્યાસ કરીશું.

**પૅકિંગ-ક્ષમતા :** ઘટક કણો (પરમાણુ, અણુ કે આયન)નું પૅકિંગ કોઈ પણ પ્રકારે થતું હોય છતાં તેમાં કેટલીક મુક્ત જગ્યા (Space) રહી જાય છે, જેને **પોલાણ** અથવા **છિદ્ર (Void)** કહેવામાં આવે છે. કણો વડે રોકાયેલા કુલ અવકાશના કદના ટકાને **પૅકિંગ-ક્ષમતા** કહે છે. હવે, જુદી જુદી રચનાઓમાંની પૅકિંગ-ક્ષમતાની ગણતરી કરીશું.

**(1) સાદા ક્યુબિક લૅટિસમાં પૅકિંગ-ક્ષમતા :** સાદા ક્યુબિક લૅટિસમાં પરમાણુઓ માત્ર ઘનના ખૂણાઓ પર જ હોય છે. કણો ધાર પર એકબીજાને સ્પર્શે છે.

ઘનની બાજુ અથવા ધાર a અને દરેક કણની ત્રિજ્યા r વચ્ચે સંબંધ થશે. $a = 2r$

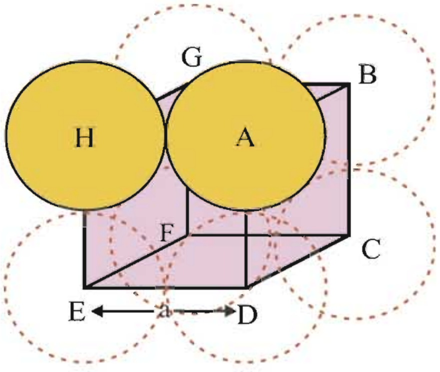
એકમ કોષમાં ઘનનું કદ $= a^3 = (2r)^3 = 8r^3$

દરેક ક્યુબિક એકમ કોષ માત્ર 1 પરમાણુ જ ધરાવે છે.

તેથી, અવકાશ દ્વારા રોકાયેલ કદ $= \frac{4}{3}\pi r^3$

$$\text{હવે પૅકિંગમાં ક્ષમતા} = \frac{\text{એકમ પરમાણુનું કદ}}{\text{ક્યુબિક એકમ કોષનું કદ}} \times 100\,\%$$

$$= \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{8\,r^3} \times 100 = \frac{\pi}{6} \times 100 = 52.36\ \%$$




આકૃતિ 1.4 ક્યુબિક લૅટિસમાં એકમ કોષમાં પૅકિંગ-ક્ષમતા

**(2) અંતઃકેન્દ્રિત એકમ કોષ રચનાની પૅકિંગ-ક્ષમતા :** આકૃતિ 1.5માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે કેન્દ્રમાં રહેલો પરમાણુ બીજા વિકર્ણીય રીતે ગોઠવાયેલા બે પરમાણુને સ્પર્શે છે. આથી $\Delta EFD$માં,

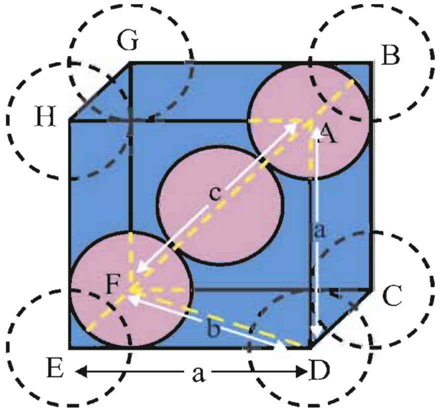
$$b^2 = a^2 + a^2 = 2a^2$$

$$\therefore\ b = \sqrt{2}a$$

હવે $\Delta AFD$માં,

$$c^2 = a^2 + b^2 = a^2 + 2a^2 = 3a^2$$

$$\therefore\ c = \sqrt{3}a$$




આકૃતિ 1.5 અંતઃકેન્દ્રિત એકમ કોષ રચનાની પૅકિંગ-ક્ષમતા

વિકર્ણીય અંતઃસ્થની લંબાઈ $c = 4r$; જ્યાં, r પરમાણુની ત્રિજ્યા છે કારણ કે, ત્રણેય ગોળા વિકર્ણીય રીતે સ્પર્શે છે.

$$\therefore\ \sqrt{3}a = 4r$$

$$\therefore\ a = \frac{4}{\sqrt{3}}r \text{ થશે.}$$

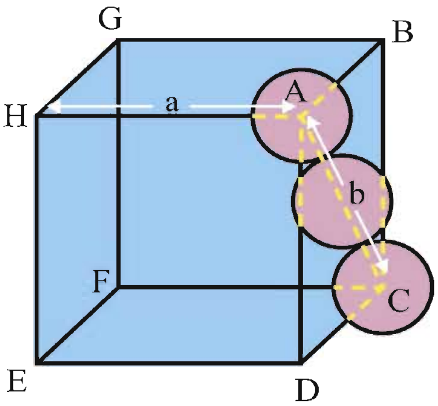
આ પ્રકારની રચનામાં કુલ પરમાણુની સંખ્યા 2 હોય છે અને તેથી તેમનું કદ $2\times\frac{4}{3}\pi r^3$ થશે.

ઘનના કદ $a^3 = \left(\frac{4}{\sqrt{3}} r\right)^3$

હવે પૅકિંગ-ક્ષમતા $= \frac{\text{એકમ કોષમાંના બે ગોળા વડે રોકાયેલું કદ}}{\text{એકમ કોષનું કુલ કદ}} \times 100\,\%$

$$= \frac{2 \times \left(4/3\right) \pi r^3}{\left[\left(\frac{4}{\sqrt{3}}\right) r\right]^3} \times 100\,\% = \frac{8/3\ \pi r^3 \times 100}{64/(3\sqrt{3}) r^3} = 68\,\%$$

**(3) હેક્ઝાગોનલ ક્લોઝ પૅકિંગ (hcp) અને ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ (ccp)માં પૅકિંગ-ક્ષમતા :** આ બંને પ્રકારમાં ક્લોઝ પૅકિંગ એકસરખું અસરકારક હોય છે. આપણે ccp રચનાની પૅકિંગ-ક્ષમતા ગણીએ. આકૃતિ 1.6માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે એકમ કોષની ધારની લંબાઈ a છે અને ફલકનો વિકર્ણ AC = b છે.




આકૃતિ 1.6 ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ-ક્ષમતા

$\Delta ABC$માં, $AC^2 = b^2 = BC^2 + AB^2$

$= a^2 + a^2 = 2a^2$ અથવા $b = \sqrt{2}\, a$

ધારો કે ગોળાની ત્રિજ્યા r છે, તો $b = 4r = \sqrt{2}a$ અથવા $a = \frac{4r}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}\, r$ અથવા $r = \frac{a}{2\sqrt{2}}$.

આપણે જાણીએ છીએ તે પ્રમાણે ccp રચનામાં 4 પરમાણુ અથવા ગોળા હોય છે. આથી ચાર ગોળાનું કુલ કદ $4 \times 4/3\ \pi r^3$ થશે અને ઘનનું કદ $a^3$ અથવા $(2\sqrt{2}r)^3$ થશે.

આથી, પૅકિંગ-ક્ષમતા $= \frac{\text{એકમ કોષમાંના ચાર ગોળાથી રોકાયેલું કદ}}{\text{એકમ કોષનું કુલ કદ}} \times 100\,\%$

$$= \frac{4 \times (4/3) \pi r^3 \times 100}{(2\sqrt{2}r)^3}\ \%$$

$$= \frac{\left(\frac{16}{3}\right) \times \pi r^3 \times 100}{16\sqrt{2}\, r^3} = 74\,\%$$

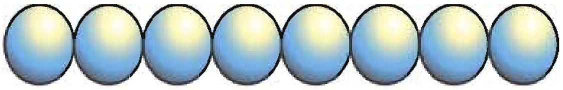
ત્રણેય રચનાઓની ગણતરી પરથી નક્કી કરી શકીએ કે, hcp અને ccp રચનામાં સૌથી વધુ પૅકિંગ-ક્ષમતા હોય છે.

## 1.5 ક્લોઝ પૅક રચના અને તેના પ્રકાર (એક પરિમાણીય, દ્વિપરિમાણીય અને ત્રિપરિમાણીય) (Close Pack Structure and Their Types (One Dimensional, Two Dimensional and Three Dimensional)

પરમાણુ, અણુ કે આયનને આપણે ગોળાકાર સ્વરૂપ તરીકે સ્વીકારીએ. તેમની ઘન અવસ્થામાંની ગોઠવણીની જેમ એકબીજાની નજીક બધી જ બાજુએ ગોઠવાય અને તેમની વચ્ચે કેટલોક અવકાશ અથવા જગ્યા રહી જાય. ધારો કે એક બંધ ડબામાં નાના ગોળા ભરી, ડબાને હલાવીને મૂકી રાખીએ તો નાના ગોળાઓ બધી દિશાઓમાં ગોઠવાશે પરંતુ ગોળાઓ વચ્ચે જગ્યા રહી જશે. ઘન અવસ્થામાંના કણો ક્લોઝ પૅકિંગ ધરાવે છે અને તેથી તેમની વચ્ચે ખૂબ જ ઓછી

ખાલી જગ્યા રહે છે. આથી આપણે ઘનમાંના ઘટક કણોને સખત ગોળા ગણીએ અને તેમની ગોઠવણીનો વિચાર કરીએ તો ત્રણ પરિસ્થિતિઓ સંભવી શકે : (1) એક પરિમાણીય ગોઠવણી (2) દ્વિપરિમાણીય ગોઠવણી (3) ત્રિપરિમાણીય ગોઠવણી. હવે, આ ગોઠવણીઓનો વિગતવાર અભ્યાસ કરીએ.

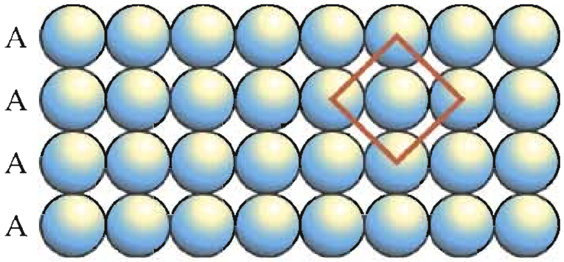
**(1) એક પરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ :** આ પ્રકારના પૅકિંગમાં આકૃતિ 1.7માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે એક કણની (ગોળો) પાસે પડોશી બીજા બે કણો ગોઠવાયેલા હોય છે. કણની સૌથી નજીકના પડોશી કણોની સંખ્યાને **સવર્ગાંક** કહે છે. આમ એક પરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગમાં સવર્ગાંક 2 હોય છે.



આકૃતિ 1.7 એક પરિમાણીય ગોળાનું ક્લોઝ પૅકિંગ

**(2) દ્વિપરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ :** આ પ્રકારના પૅકિંગમાં ક્લોઝ પૅકિંગ ધરાવતી હરોળ થપ્પીની જેમ ગોઠવાયેલ હોય છે. આ ગોઠવણી બે પ્રકારની હોઈ શકે છે :

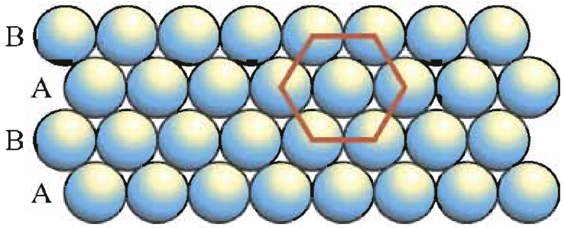
(a) આ ગોઠવણીમાં એક હરોળમાં ગોઠવાયેલા કણોની બરોબર ઉપર જ બીજો કણ ગોઠવાયેલો હોય તેમ થપ્પી બને છે. આમ,આ હરોળમાંના કણો આડી અને ઊભી રીતે એકબીજા સાથે ગોઠવાયેલા (alligned) હોય છે. આપણે પ્રથમ હરોળને A કહીએ તો બીજી હરોળ પણ તેના જેવી જ હોવાથી તેને પણ A કહીએ, આથી એક પછી એક એમ હરોળ ગોઠવતાં જોઈએ તો આપણને આકૃતિ 1.8 (a)માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે AAA.......... પ્રકારની ગોઠવણી મળે.




આકૃતિ 1.8 (a) દ્વિપરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ

આ ગોઠવણીમાં દરેક ગોળાની ફરતે ચાર બીજા ગોળા પડોશી તરીકે ગોઠવાયેલા છે. આથી દ્વિપરિમાણીય રચનામાં સવર્ગાંક 4 થશે. જો આપણે ચારેય ગોળાનાં કેન્દ્રોને જોડીએ તો આપણને એક ચતુષ્કોણ મળશે. આથી આ રચનાને દ્વિપરિમાણમાં **ચોરસ ક્લોઝ પૅકિંગ** કહે છે.

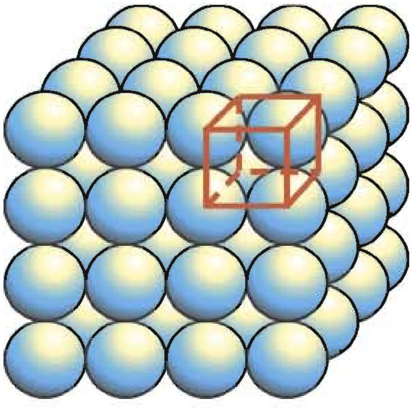
(b) બીજી રીતમાં આપણે ગોળાની થપ્પી પર ગોળાની બીજી થપ્પી થોડી વિચલિત રીતે ગોઠવીએ જેથી કરીને બીજી થપ્પીના ગોળા પહેલી થપ્પીના ગોળામાં રચાતી જગ્યા (અવકાશ) પર ગોઠવાય. હવે જો પ્રથમ થપ્પીના ગોળાઓની રચના A પ્રકારની કરીએ તો બીજી થપ્પીના ગોળાઓની રચના અલગ B પ્રકારની થાય. આમ, વારાફરતી A અને B હરોળ ગોઠવતાં જઈએ તો ABABAB.... પ્રકારની રચના થાય. આ રચનામાં પહેલી રચના કરતાં અવકાશ અથવા ખાલી જગ્યા ઓછી હોય છે. આ રચના ચોરસ ક્લોઝ પૅકિંગ કરતા વધુ દૃઢ અને વધુ પૅકિંગ ક્ષમતાવાળી હોય છે. આ પ્રકારની રચનામાં દરેક ગોળાની આજુબાજુ 6 ગોળા ગોઠવાયેલા હોય છે માટે તેને દ્વિપરિમાણીય **હેક્ઝાગોનલ ક્લોઝ પૅકિંગ** કહે છે, જે આકૃતિ 1.8 (b)માં દર્શાવેલ છે.




આકૃતિ 1.8 (b) દ્વિપરિમાણીય અષ્ટફલકીય ક્લોઝ પૅકિંગ

**(3) ત્રિપરિમાણીયમાં ક્લોઝ પૅકિંગ :** આપણે જે સાચી રચનાઓ અથવા બંધારણો જોઈએ છે તે બધી જ ત્રિપરિમાણીય રચનાઓ હોય છે. આવી રચના દ્વિપરિમાણીય રચનામાં જોયા પ્રમાણે ગોઠવાતી દરેક થપ્પી પ્રમાણે હોય છે. એટલે કે ચોરસ ક્લોઝ પૅકિંગ અને ષટ્કોણીય હોય છે. આપણે હવે ત્રીજા પરિમાણમાં ક્લોઝ પૅકિંગ કેવી રીતે થાય છે તે સમજીએ.

**(i) દ્વિપરિમાણીય ચોરસ ક્લોઝ પૅકિંગમાંથી ત્રિપરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ :** આપણે A પ્રમાણેની ગોઠવણી કર્યા પછી બીજી થપ્પી બરાબર Aની જેમજ એકબીજા પર ગોળા ગોઠવીને કરીએ. આમ પહેલી A થપ્પીના ગોળા બીજી A થપ્પીના ગોળા પર જ ગોઠવાશે. આકૃતિ 1.9માં દર્શાવ્યા પ્રમાણે ગોળા ઊભી અને આડી રીતે સંપૂર્ણપણે એકસરખી રીતે ગોઠવાયેલા રહેશે.

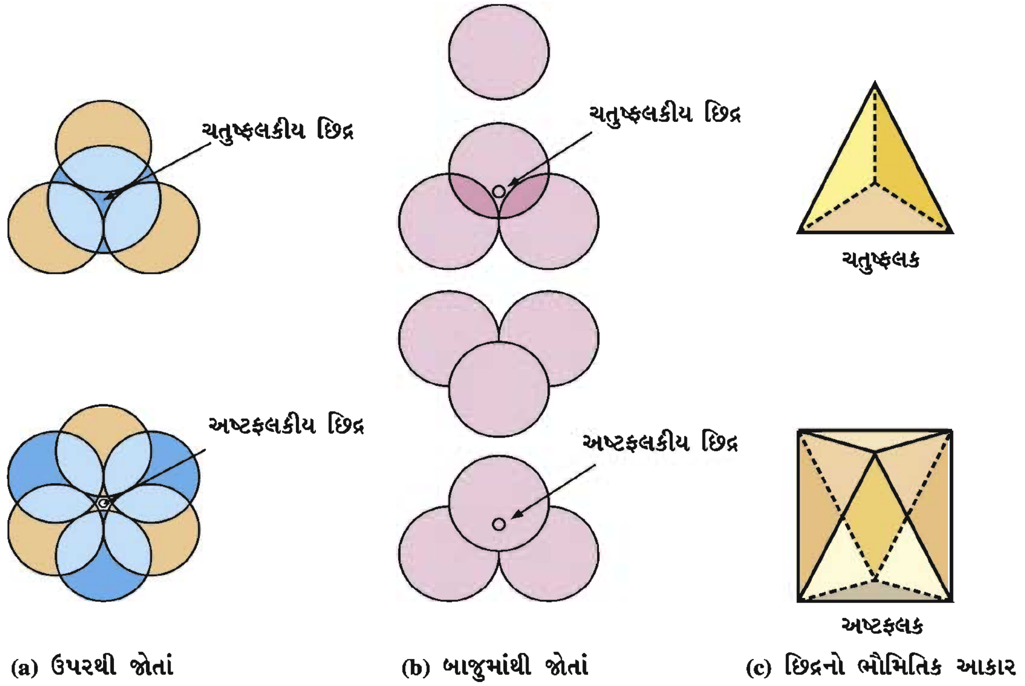


આકૃતિ 1.9 સાદી ઘન રચના AAAA... ગોઠવણી

જો પહેલી થપ્પીને A પ્રકારની કહીએ તો બધી જ થપ્પી એક જ પ્રકારની થશે. એટલે કે AAAA........ પ્રકારની થશે. આથી મળતી લૅટિસ રચનાને સાદી ક્યુબિક લૅટિસ રચના કહેવામાં આવે છે જેને એકમ કોષને આદિમ ક્યુબિક એકમ કોષ કહે છે.

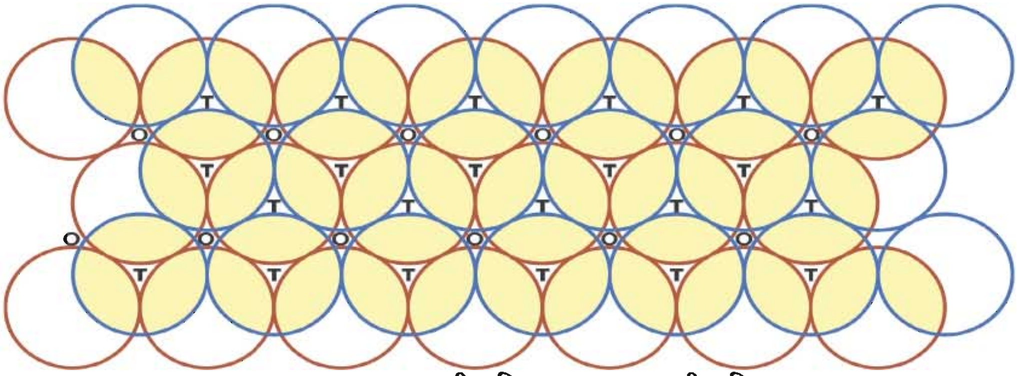
**(ii) દ્વિપરિમાણીય ષટ્કોણીય ક્લોઝ પૅકિંગ રચનામાંથી ત્રિપરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ રચના :** ત્રિપરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ રચના એક પર બીજા સ્તરને ગોઠવીને રચી શકાય.

**(a) પ્રથમ સ્તર પર બીજું સ્તર ગોઠવીને :** ધારો કે દ્વિપરિમાણીય ષટ્કોણીય ક્લોઝ પૅકિંગ ધરાવતી સ્તર A અને તેના ઉપરની પહેલા સ્તરની ગોઠવણીમાં ખાલી રહેલી જગ્યા પર બીજા સ્તરના ગોઠવાયેલા ગોળાને ગોઠવીએ. અહીંયાં બંને સ્તરના ગોળા ભિન્ન રીતે ગોઠવાયેલા (allign) હોવાથી બીજા સ્તરને B કહીશું, જે આકૃતિ 1.10માં દર્શાવેલ છે.




આકૃતિ 1.10 ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો

આકૃતિ પરથી સ્પષ્ટ થાય છે કે, પ્રથમ સ્તરમાંથી ત્રિકોણીય ખાલી જગ્યા (છિદ્રો) બીજા સ્તરના ગોળા વડે સંપૂર્ણપણે ઢંકાયેલા નથી. આથી જુદી જુદી ગોઠવણીઓ સંભવી શકે છે. બીજા સ્તરના ગોળા પહેલા સ્તરના છિદ્ર પર ગોઠવાયેલા હોય છે અથવા તેથી ઊલટું હોય તો તેમાં ચતુષ્ફલકીય છિદ્ર (void) રચાય છે. આ છિદ્રો **ચતુષ્ફલકીય છિદ્રો** કહેવાય છે. કારણ કે જ્યારે આ ચારેય ગોળાનાં કેન્દ્રોને જોડવામાં આવે છે ત્યારે ચતુષ્ફલકની રચના થાય છે.




T = ચતુષ્ફલકીય છિદ્ર, O = અષ્ટફલકીય છિદ્ર

આકૃતિ 1.11 ક્લોઝ પૅક ગોળાના બે સ્તરોની થપ્પી અને તેમાં ઉદ્ભવતાં છિદ્રો

આકૃતિ 1.11માં ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોને T તરીકે દર્શાવેલ છે. અન્ય સ્થાનોમાં બીજા સ્તરનાં ત્રિકોણીય છિદ્રો પ્રથમ સ્તરના ત્રિકોણીય છિદ્રોની ઉપર ગોઠવાયેલા હોય છે. તેમના ત્રિકોણીય આકાર વ્યાપ પામતા નથી. તેમાંના એક ત્રિકોણ ઉપરની બાજુએ નિર્દેશ કરે છે અને બીજા નીચેની તરફ નિર્દેશ કરે છે. આવાં છિદ્રોને અષ્ટફલકીય છિદ્રો કહે છે. આકૃતિ 1.11માં O સંજ્ઞા વડે દર્શાવેલ છે. આ બંને પ્રકારનાં છિદ્રોની સંખ્યા ક્લોઝ પૅકિંગ પામેલા ગોળાની સંખ્યા પર આધાર રાખે છે.

ધારો કે,

ક્લોઝ પૅકિંગ પામેલા ગોળાની સંખ્યા N છે.

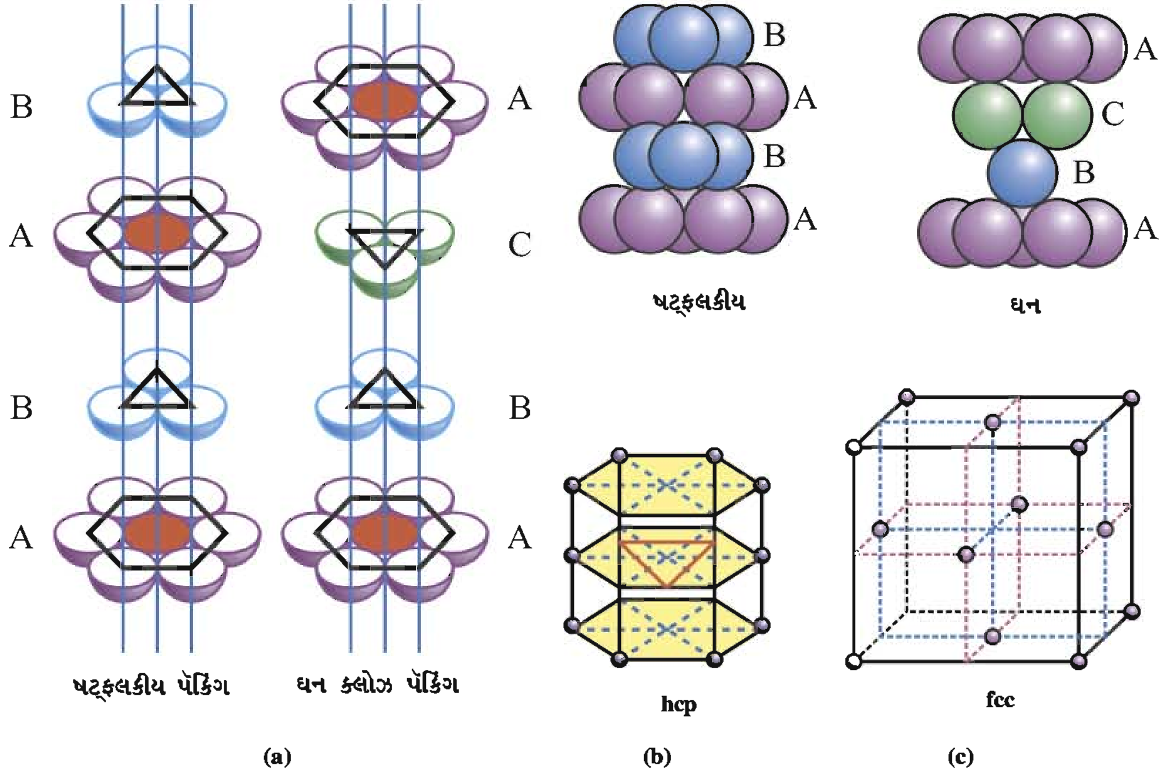
∴ રચાતાં અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા = N છે.

ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા = 2N

આમ, ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યાથી બમણી હોય છે.

**(b) બીજા સ્તર પર ત્રીજા સ્તરની ગોઠવણી :** હવે ધારો કે બીજા સ્તર પર ત્રીજા સ્તર ગોઠવીએ તો બે શક્યતાઓ રહેલી છે :

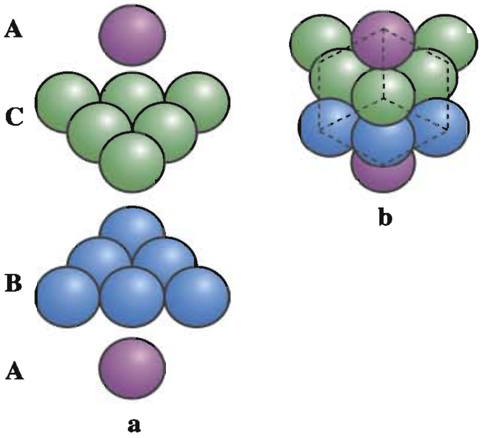
**(i) ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોને ઢાંકતી (Covering) શક્યતા :** ત્રીજા સ્તરના ગોળાઓથી બીજા સ્તરના ચતુષ્ફલકીય છિદ્રો ઢંકાઈ જાય. આ પરિસ્થિતિમાં પ્રથમ સ્તરના ગોળાઓ અને ત્રીજા સ્તરના ગોળાઓ બરાબર એકબીજા પર ગોઠવાઈ જાય છે. આથી એકાંતરે રચાતી ગોળાની થપ્પીનું પુનરાવર્તન થયા કરે તેને AB AB....... પ્રકારની થપ્પી કહી શકાય અને આ રચનાને હેક્ઝાગોનલ ષટ્ફલકીય ક્લોઝ પૅકિંગ (hcp) કહે છે, જે આકૃતિ 1.12માં દર્શાવેલ છે. આ પ્રકારની ગોઠવણી ઘણી બધી ધાતુઓ જેવી કે ઝિંક, મૅગ્નેશિયમ વગેરેમાં જોવા મળે છે.




આકૃતિ 1.12 (a) ષટ્ફલકીય ઘન ક્લોઝ પૅકિંગ (b) દરેકમાં ચાર થપ્પી (c) ક્લોઝ પૅકિંગની ભૂમિતિ

**(ii) અષ્ટફલકીય છિદ્રોને ઢાંકતી (Covering) શક્યતા :** આ રચનામાં ત્રીજા સ્તરને બીજા સ્તર પર એવી રીતે ગોઠવવામાં આવે છે, જેથી ત્રીજા સ્તરના ગોળા બીજા સ્તરનાં અષ્ટફલકીય છિદ્રોને ઢાંકે. આ પ્રમાણે ગોઠવણી કરતાં ત્રીજા સ્તરના ગોળા પહેલા સ્તરના ગોળા પર બરાબર ગોઠવાતાં (align) નથી. આ ગોઠવણીને C પ્રકારની કહી શકાય. હવે જ્યારે ચોથા સ્તર ગોઠવવામાં આવે ત્યારે તેના ગોળા પ્રથમ સ્તરના ગોળા પર બરાબર ગોઠવાય છે, જે આકૃતિ 1.13માં દર્શાવેલ છે. આથી આ થપ્પી ABC ABC ABC........ પ્રકારની હોય છે અને આ રચનાને **ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ (ccp)** અથવા **ફલક કેન્દ્રિત ક્યુબિક (fcc)** રચના કહે છે. કૉપર અને સિલ્વર જેવી ધાતુઓ આ પ્રકારની રચનામાં સ્ફટિકીકરણ પામે છે.

આ બંને પ્રકારની ક્લોઝ પૅકિંગ ગોઠવણી સૌથી વધુ ક્ષમતાવાળી હોય છે અને તેમના વડે સ્ફટિકની 74 % જેટલી જગ્યા (કદ) રોકાયેલા હોય છે તથા તે 12 ગોળાઓ સાથે સંપર્કમાં હોય છે. માટે આ બંને રચનામાં તેમનો સવર્ગાંક 12 હોય છે.




(a) સ્તરની ABC ABC ગોઠવણી જ્યારે અષ્ટફલકીય છિદ્ર ઢંકાયેલાં છે

(b) ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ(ccp)માં અથવા ફલક કેન્દ્રિત (fcc) ઘન રચના

આકૃતિ 1.13

## 1.6 સમચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો (Tetrahedral and Octahedral Voids)

અગાઉ ક્લોઝ પૅકિંગ રચના દરમ્યાન સમચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો વિશે શીખ્યા. આકૃતિ 1.11માં સમચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો દર્શાવ્યાં છે. ત્રિપરિમાણીય આકૃતિઓ પુસ્તકમાં દર્શાવવાની મર્યાદા છે. પણ જો મૉડેલ દ્વારા અભ્યાસ કરીએ તો આ બાબત વધુ સ્પષ્ટ બને.

આપણે સંયોજનનું સૂત્ર અને તેમાં સંકળાયેલાં છિદ્રોની સંખ્યા વિશે વિચારીએ. અગાઉ જોયા પ્રમાણે ક્લોઝ પૅકિંગને કારણે ccp અથવા hcp રચના થાય છે ત્યારે બે પ્રકારનાં છિદ્રો મળે છે. લૅટિસ રચાતાં સમચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા અષ્ટફલકીય છિદ્રો કરતાં બમણી હોય છે. આયનીય સંયોજનોમાં ધનાયન કરતાં ઋણાયન કદમાં મોટા હોય છે. મોટા ઋણાયન ક્લોઝ પૅક રચનામાં ભાગ લે છે, જ્યારે ધનાયન છિદ્રોમાં ગોઠવાય છે. જો આયન છિદ્ર કરતાં નાના હોય તો સમચતુષ્ફલક છિદ્રમાં ગોઠવાય છે અને જો મોટા હોય તો અષ્ટફલકીય છિદ્રમાં ગોઠવાય છે. બધાં જ ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો ન રોકાતાં માત્ર કુલ છિદ્રોનો અમુક અંશ જ રોકાય છે. આ બાબત સંયોજનના સૂત્ર પર આધાર રાખે છે, જે નીચેનાં દાખલાઓ પરથી સ્પષ્ટ થશે

**દાખલો 1 :** એક સંયોજન બે તત્ત્વો A અને Bનું બનેલું છે. તત્ત્વ B(ઋણાયન)ના પરમાણુઓ ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ રચના બનાવે છે અને તત્ત્વ Aના પરમાણુઓ બધાં જ અષ્ટફલકીય છિદ્રોને રોકી લે છે. સંયોજનોનું સૂત્ર શું હશે ?

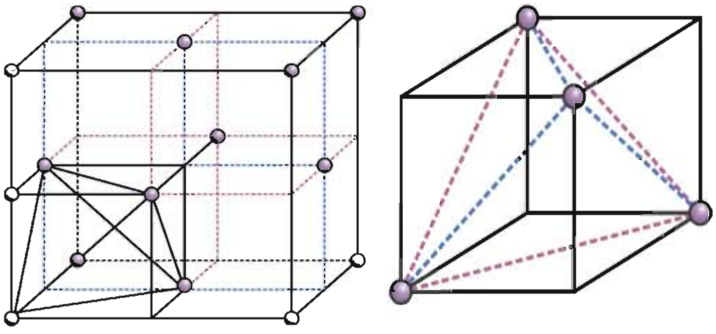
**ઉકેલ :** તત્ત્વ B ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ રચના બનાવે છે. આથી અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા Bમાં રહેલા પરમાણુની સંખ્યા જેટલી થશે. તત્ત્વ Aના બધા જ પરમાણુઓ દ્વારા બધાં જ અષ્ટફલકીય છિદ્રોને રોકાયેલા છે. તેથી તેમની સંખ્યા તત્ત્વ Bની સંખ્યા જેટલી થશે. આમ તત્ત્વ A અને B 1:1ના પ્રમાણમાં રહેલા છે માટે સંયોજનનું સૂત્ર AB હશે.

**દાખલો 2 :** તત્ત્વ Yના પરમાણુઓ ષટ્કોણીય ક્લોઝ પૅકિંગ રચે છે અને તત્ત્વ Xના પરમાણુઓ ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યાના $\frac{2}{3}$ ભાગને રોકે છે. X અને Yથી રચાતા સંયોજનનું સૂત્ર લખો.

**ઉકેલ :** રચાતાં ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા તત્ત્વ Yના પરમાણુથી બમણી છે અને તેનો માત્ર $\frac{2}{3}$ ભાગ જ Y તત્ત્વના પરમાણુઓથી રોકાયેલો છે. આથી X અને Yના પરમાણુઓનો ગુણોત્તર $2 \times \frac{2}{3} : 1$ અથવા $4 : 3$ થશે. આથી સંયોજનનું સૂત્ર $X_4Y_3$ બનશે.

**ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રોનાં સ્થાન નક્કી કરવાં (Locate) :** આપણે અભ્યાસ કરી ગયાં કે, ક્લોઝ પૅકિંગ રચનામાં બંને ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો હોય છે. આપણે ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ (ccp) અને ફલક કેન્દ્રિત ક્લોઝ પૅકિંગ (fcp) બંધારણ લઈએ અને તેમાં છિદ્રોના સ્થાન નક્કી કરીએ.

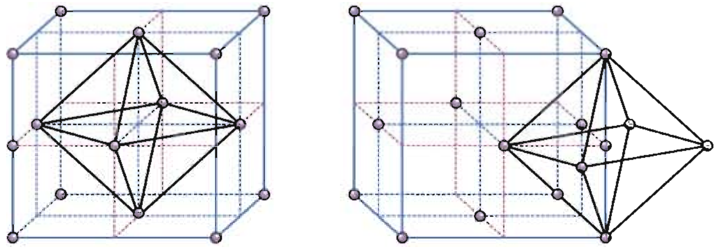
**(a) ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોનાં સ્થાન નક્કી કરવાં :** ccp અથવા fcpનો એકમ કોષ લઈએ. આકૃતિ 1.14માં આ એકમ કોષ આઠ નાના ઘનમાં વિભાજિત કરીએ. આ દરેક નાના ઘનના એકાંતર ખૂણા પર પરમાણુઓ છે. એક નાના ઘનમાં એકંદરે ચાર પરમાણુઓ છે. તેમને એકબીજા સાથે જોડી દઈએ તો નિયમિત સમચતુષ્ફલક બનાવે છે. આથી દરેક નાના ઘનમાં એક ચતુષ્ફલક છિદ્ર છે અને કુલ આઠ ચતુષ્ફલક છિદ્રો છે. આમ નાના ઘનમાંના દરેકમાં એક છિદ્ર એક એકમ કોષ (ccp) રચનામાં થશે. આપણે જાણીએ છીએ કે ccp રચનાના દરેક એકમ કોષમાં ચાર પરમાણુઓ છે. આથી ચતુષ્ફલક છિદ્રોની સંખ્યા પરમાણુની સંખ્યાથી બમણી છે.



(a) ccp રચનાના દરેક એકમ કોષમાં આઠ ચતુષ્ફલકીય છિદ્ર (b) ભૂમિતિ દર્શાવતો એક ચતુષ્ફલક

આકૃતિ 1.14

**(b) અષ્ટફલકીય છિદ્રોનાં સ્થાન નક્કી કરવાં :** આપણે ફરી વાર ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગ (ccp) અથવા ફલક કેન્દ્રિત ક્લોઝ પૅકિંગ(fcp)નો એકમ કોષ લઈએ. ઘનનું અંતઃકેન્દ્ર C રોકાયેલ નથી પણ તે છ ફલક પરના પરમાણુઓથી ઘેરાયેલ છે. જો આ ફલક-કેન્દ્રોને જોડવામાં આવે તો અષ્ટફલકીય રચના થશે. આ એકમ કોષમાં ઘનના અંતઃકેન્દ્રમાં એક અષ્ટફલકીય છિદ્ર છે. અંતઃકેન્દ્ર ઉપરાંત બારમાની દરેક ધારના કેન્દ્રમાં એક-એક અષ્ટફલકીય છિદ્ર છે, છ પરમાણુઓથી ઘેરાયેલો છે. જેમાંના ત્રણ (બે ખૂણાઓ પર અને એક ફલક કેન્દ્રમાં) દરેક એકમ કોષમાં અને ત્રણ નજીકના બે એકમ કોષ પર હોય છે. ઘનની દરેક ધાર ચાર નજીકના એકમ કોષ વચ્ચે ભાગીદાર થયેલી હોવાથી તે પ્રમાણે અષ્ટફલકીય છિદ્ર તેના પર સ્થાન પ્રાપ્ત કરશે. દરેક છિદ્રનો માત્ર $\frac{1}{4}$ ભાગ જ કોઈ એક કોષનો હોય છે.



(a) અંતઃકેન્દ્રિત (b) દરેક ધારના કેન્દ્ર પરનું છિદ્ર

આકૃતિ 1.15 ccp અથવા fcc એકમ કોષની લૅટિસમાં અષ્ટફલકીય છિદ્રનું સ્થાન

આમ, ક્યુબિક ક્લોઝ પૅકિંગમાં, ઘનના અંતઃકેન્દ્ર પર અષ્ટફલકીય છિદ્ર = 1

12 અષ્ટફલકીય છિદ્રો દરેક ધાર પર ગોઠવાયેલા અને ચાર એકમ કોષ વચ્ચે ભાગીદાર થયેલા $= 12 \times \frac{1}{4} = 3$

$\therefore$ કુલ અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા = 1 + 3 = 4

આપણે જાણીએ છીએ કે ક્યુબિક ક્લોઝ પૅક રચનામાં દરેક એકમ કોષ ચાર પરમાણુ ધરાવે છે. તેથી અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા તે સંખ્યા જેટલી થશે.

## 1.7 એકમ કોષમાં રહેલા પરમાણુઓની સંખ્યાની ગણતરી (Calculation of Number of Atoms in Unit Cell)

સ્ફટિકમાંના એકમ કોષનો પ્રત્યેક ખૂણો આઠ એકમ કોષો સાથે સંયુક્ત રીતે સંકળાયેલ છે. તેથી તેની પ્રત્યેક બાજુની ધાર ચાર એકમ કોષોને તથા તેના પ્રત્યેક ફલક બે એકમ કોષોથી સંકળાયેલાં હોય છે. આથી સ્ફટિકની રચના માટે પ્રત્યેક લૅટિસ બિંદુ સાથે અણુ; પરમાણુ કે આયન સંકળાયેલા હોય, તો તેમનો $\frac{1}{8}$ ભાગ ખૂણાઓ દ્વારા, $\frac{1}{4}$ ભાગ બાજુની ધારો વડે અને $\frac{1}{2}$ ભાગ ફલકો વડે સંમિલિત થયેલો હોય છે. એકમ કોષોની ખૂણે રહેતા તથા ફલકકેન્દ્રમાં રહેલા કણો અન્ય અનેક કોષો સાથે સંયુક્ત રીતે જોડાયેલા હોય છે. આથી પરમાણુની સંખ્યાની ગણતરી નીચે પ્રમાણે દર્શાવી શકાય છે :

સાદા ઘન એકમ કોષમાં 8 એકમ કોષ, 8 કોણીય પરમાણુઓ વચ્ચે ભાગીદારી હોય છે. તેથી, 8 ખૂણાઓ × $\frac{1}{8}$ પરમાણુ પ્રતિ એકમ = $\frac{8}{8} = 1$ પરમાણુ

આમ, સાદા ઘન સ્ફટિકના પ્રત્યેક એકમ કોષમાં એક જ પરમાણુ હોય છે.

અંતઃકેન્દ્રિત ઘન એકમ કોષમાં 8 ખૂણાઓ $\left(\frac{1}{8}\right)$ પરમાણુ પ્રતિ એકમ કોષ = $\frac{8}{8} = 1$ અને ઉપરાંત પ્રત્યેક એકમ કોષમાં 1 અંતઃકેન્દ્રિત પરમાણુ = 1

આથી 1 + 1 = 2 કુલ પરમાણુ થશે.

આમ, અંતઃકેન્દ્રિત ઘન સ્ફટિકમાં પ્રત્યેક એકમ કોષ દીઠ 2 પરમાણુઓ હોય છે.

ફલક કેન્દ્રિત ઘન એકમ કોષમાં 8 ખૂણાઓ × $\left(\frac{1}{8}\right)$ પરમાણુ પ્રતિ એકમ = $\frac{8}{8} = 1$ પરમાણુ અને તે ઉપરાંત 6 ફલક કેન્દ્રિત પરમાણુઓ × $\left(\frac{1}{2}\right)$ પરમાણુ પ્રતિ એકમ = 1 + 3 = 4 પરમાણુઓ હોય છે.

આમ, ફલક કેન્દ્રિત સ્ફટિકના એકમ કોષ દીઠ 4 પરમાણુઓ હોય છે. ઉપરની ગણતરી નીચેના કોષ્ટક 1.4માં રજૂ કરી શકાય :

કોષ્ટક 1.4 : એકમ કોષના પ્રકાર અને પરમાણુની સંખ્યા

| ક્રમ | એકમ કોષનો પ્રકાર | ખૂણા પર રહેલા પરમાણુઓની સંખ્યા | ફલકમાં રહેલા પરમાણુઓની સંખ્યા | અંતઃકેન્દ્રિત રહેલા પરમાણુઓની સંખ્યા | કુલ પરમાણુ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1. | સાદો ઘન | $8 \times \frac{1}{8} = 1$ | 0 | 0 | 1 |
| 2. | અંતઃકેન્દ્રિત (bcc) | $8 \times \frac{1}{8} = 1$ | 0 | 1 | 2 |
| 3. | ફલક કેન્દ્રિત (fcc) | $8 \times \frac{1}{8} = 1$ | $6 \times \frac{1}{2} = 3$ | 0 | 4 |

## 1.8 બિંદુ ક્ષતિ અને તેના પ્રકારો (Point Defects and Their Types)

બિંદુ ક્ષતિ વિશે અભ્યાસ કરતાં પહેલાં આપણે વિચારીએ કે સ્ફટિક સંપૂર્ણ હોય છે ? અથવા એમાં કોઈ અપૂર્ણતા હોય છે ? એક અંદાજ પ્રમાણે નક્કી કરવામાં આવેલ કે 1 મોલ ઘટક કણોમાં ($6.022 \times 10^{23}$ કણો) $10^6$ ક્ષતિ ઘટક

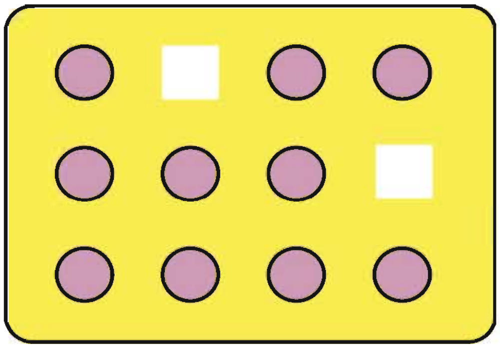
કણોની ગોઠવણીમાં જણાઈ છે. $6.022 \times 10^{23}$ની સરખામણીમાં આ મૂલ્ય નગણ્ય છે. પરંતુ તેની અસર સ્ફટિકના ગુણધર્મો, રચના વગેરે પર જરૂર જણાય છે. આ ક્ષતિ તાપમાનના વધારા સાથે વધે છે. આમ આદર્શ જણાતો સ્ફટિક પણ કણોની ગોઠવણી અને રચનામાં અપરિપૂર્ણ (Imperfect) જણાયો છે. આપણે જો સ્ફટિકને નાનામાં નાના સ્વરૂપમાં વિચારી એકાકી સ્ફટિક (Single Crystal) તરીકે ગણીએ તો તેમાં પણ ક્ષતિ રહેવાની સંભાવના રહેલ છે. કણોની ગોઠવણી દ્વારા ઘન બને ત્યારે ક્ષતિની સંખ્યામાં વધારો જણાય છે. આથી જ સ્ફટિકીકરણની પ્રક્રિયામાં ગરમ દ્રાવણને ધીમે ધીમે ઠંડું પાડવું કારણ કે ઝડપથી ઠંડું પાડવામાં અને એકાકી સ્ફટિક મેળવવામાં આવે તોપણ ક્ષતિ રહી જાય છે.

ઉષ્માગતિશાસ્ત્રના ત્રીજા નિયમની વ્યાખ્યામાં એમ સૂચવ્યું છે કે નિરપેક્ષ શૂન્ય તાપમાને સંપૂર્ણ શુદ્ધ સ્ફટિકમય પદાર્થની એન્ટ્રોપી શૂન્ય હોય છે. તમે ભૌતિકવિજ્ઞાન અથવા રસાયણવિજ્ઞાનમાં ક્યાંક વાંચ્યું હશે કે નિરપેક્ષ શૂન્ય તાપમાન મેળવવું અશક્ય છે. આથી કહી શકાય કે નિરપેક્ષ શૂન્ય તાપમાને પણ સંપૂર્ણ શુદ્ધ સ્ફટિકમય પદાર્થ કલ્પીએ તોપણ તેમાં ક્ષતિ હોવાની સંભાવના છે. તાપમાનના વધારા સાથે સ્ફટિક પર થતી અસરને કારણે ક્ષતિમાં સ્થાન ફેરફાર અથવા અવ્યવસ્થા ઉત્પન્ન થાય છે ત્યારે ક્ષતિની સંખ્યા વધે છે.

આમ, ક્ષતિની વ્યાખ્યા આપીએ તો સ્ફટિકની રચનામાં કણો દ્વારા થતી અનિયમિતતા. આવી ક્ષતિના બે પ્રકાર છે : (1) બિંદુ ક્ષતિ અને (2) રેખા ક્ષતિ. બિંદુ ક્ષતિ સ્ફટિકમય પદાર્થની આદર્શ રચનામાં કોઈ બિંદુ અથવા પરમાણુની આસપાસ અનિયમિતતા ઊભી થવાને કારણે ઉદ્ભવે છે. જ્યારે રેખા ક્ષતિ લૅટિસ બિંદુની સમગ્ર હરોળમાંની આદર્શ ગોઠવણીમાં અનિયમિતતા અથવા વિચલનને કારણે થાય છે. આ બંને પ્રકારની ક્ષતિને સ્ફટિક ક્ષતિ કહીએ છીએ.

ક્ષતિના બે પ્રકારો છે : (A) તત્ત્વયોગમિતિય ક્ષતિ અને (B) બિનતત્ત્વયોગમિતિય ક્ષતિ. બિંદુ ક્ષતિના આ બે પ્રકાર ઉપરાંત ત્રીજો પ્રકાર (C) અશુદ્ધિ ક્ષતિ છે. આપણે હવે વિગતે અભ્યાસ કરીએ.

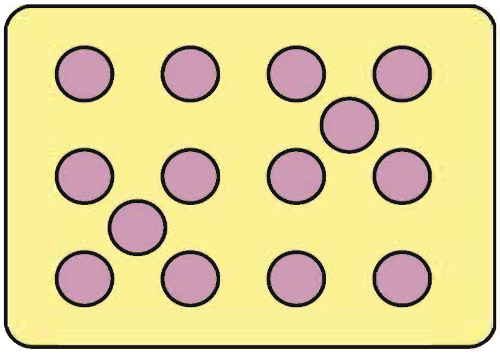
**(A) તત્ત્વયોગમિતિય ક્ષતિ :** આ એવી બિંદુ ક્ષતિ છે, જે ઘનની તત્ત્વયોગમિતિયને ખલેલ પહોંચાડતી નથી. તેમને **આંતરિક (intrinsic)** અથવા **ઉષ્માગતિય ક્ષતિ** કહે છે. તે તાપમાન સાથે બદલાય છે. આ પણ બે પ્રકારની હોય છે : (i) અવકાશ (vacancy) ક્ષતિ (ii) આંતરાલીય (interstitial) ક્ષતિ.



આકૃતિ 1.16 અવકાશ ક્ષતિ

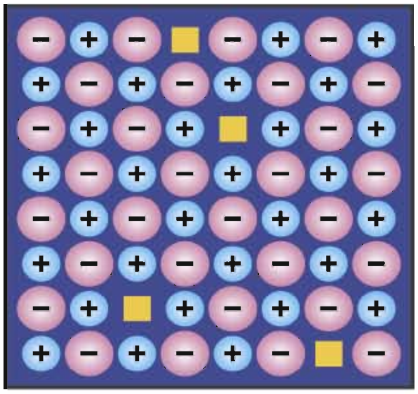
**(i) અવકાશ ક્ષતિ :** લૅટિસમાંના કેટલાંક સ્થાન ખાલી હોય એટલે કે કણના બદલે અવકાશ હોય. આવા સ્ફટિકને અવકાશ ક્ષતિ ધરાવતા સ્ફટિક કહે છે (આકૃતિ 1.16). આને લીધે પદાર્થની ઘનતામાં ઘટાડો થાય છે. કારણ કે એકમ કદમાં અણુની સંખ્યા ઘટે છે. આ ક્ષતિ ધરાવતા પદાર્થને ગરમ કરવામાં આવે તો ક્ષતિ વિકાસ પામે છે.

**(ii) આંતરાલીય ક્ષતિ :** કેટલાક સ્ફટિકમાં પરમાણુ કે અણુ જેવા ઘટક કણો સ્ફટિકમાંથી આંતરાલીય સ્થાન પર ગોઠવાય છે, ત્યારે સ્ફટિક આંતરાલીય ક્ષતિ ધરાવે છે તેમ કહી શકાય. આ ક્ષતિ પદાર્થની ઘનતા વધારે છે. કારણ કે અણુની સંખ્યા પ્રતિ એકમ કદ વધે છે. (આકૃતિ 1.17)



આકૃતિ 1.17 આંતરાલીય ક્ષતિ

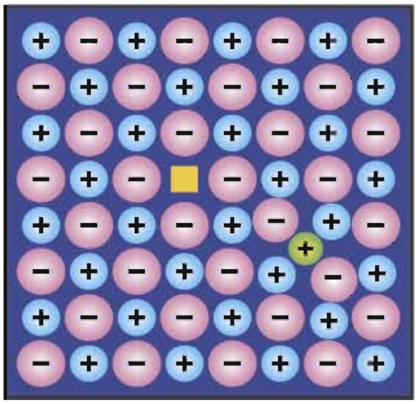
ઉપર દર્શાવેલી બંને પ્રકારની ક્ષતિ બિનઆયનીય ઘન પણ દર્શાવે છે. આયનીય ઘનને હંમેશાં વિદ્યુતીય તટસ્થતા જાળવી રાખવાની હોય છે. આ ક્ષતિ બે પ્રકારની ક્ષતિ દર્શાવે છે : (a) શોટ્કી (Schottky) ક્ષતિ (b) ફ્રેન્કલ (Frenkel) ક્ષતિ.



આકૃતિ 1.18 શોટ્કી ક્ષતિ

**(a) શોટ્કી ક્ષતિ :** આ ક્ષતિ મૂળમાં તો આયનીય ઘનમાંની અવકાશ ક્ષતિ જ છે. તેમાં ન મળતાં કે ન ગોઠવાયેલા ધનાયન અને ઋણાયનની સંખ્યા સરખી રહેશે. કારણ કે ક્ષતિ બાદ પણ સ્ફટિક વિદ્યુતીય રીતે તટસ્થ છે. આકૃતિ 1.18માં આ ક્ષતિ દર્શાવેલ છે.

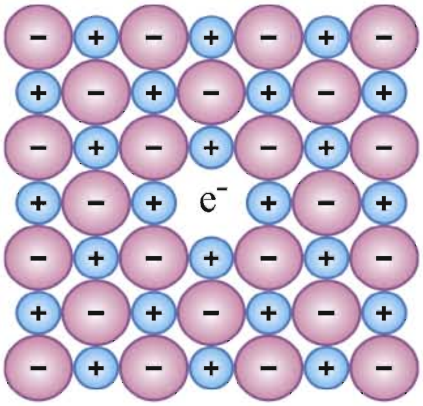
અવકાશ ક્ષતિની જેમ શોટ્કી ક્ષતિ પણ પદાર્થની ઘનતામાં ઘટાડો દર્શાવે છે. આ ક્ષતિની સંખ્યા ખાસ અર્થસૂચક હોય છે. અગાઉ જણાવ્યું તેમ NaClના સ્ફટિકમાં આશરે $10^6$ પ્રતિ સેમી$^3$ શોટ્કી ક્ષતિ ઓરડાના તાપમાને હોય છે. 1 સેમી$^3$ કદમાં આશરે $10^{22}$ આયન રહેલાં હોય છે. તેથી આશરે $10^{16}$ આયનોએ 1 શોટ્કી ક્ષતિ હોય છે. જે આયનીય ઘનમાં ધનાયન અને ઋણાયનનાં કદ (size) સરખા હોય છે અથવા જેમના સવર્ગાંક ઊંચા હોય છે તે શોટ્કી ક્ષતિ દર્શાવે છે. દા.ત., NaCl, KCl, AgBr. એ નોંધવું જરૂરી છે કે AgBr બંને પ્રકારની એટલે કે ફ્રેન્કલ અને શોટ્કી ક્ષતિઓ દર્શાવે છે.



આકૃતિ 1.19 ફ્રેન્કલ ક્ષતિ

**(b) ફ્રેન્કલ ક્ષતિ :** આ ક્ષતિ પણ આયનીય ઘન દર્શાવે છે. સામાન્ય રીતે નાનો આયન (ધનાયન) પોતાના સામાન્ય (મૂળ) સ્થાન પરથી ખસીને વચ્ચેના આંતરાલીય સ્થાન પર ગોઠવાય છે. તેથી તે અવકાશ ક્ષતિ ઉત્પન્ન કરે છે (આકૃતિ 1.19). આથી તે પોતાના મૂળ સ્થાને અવકાશ ક્ષતિ અને નવા સ્થાન પર આંતરાલીય ક્ષતિ ઉત્પન્ન કરે છે. ફ્રેન્કલ ક્ષતિને વિસ્થાનીય (dislocation) ક્ષતિ પણ કહી શકાય. તેમાં કણના સ્થાન બદલાય છે. તેમની વધઘટ થતી નથી માટે ઘનની ઘનતા બદલાતી નથી. ફ્રેન્કલ ક્ષતિ એવા આયનીય ઘન પદાર્થોમાં જોવા મળે છે જેમાં ધનાયન અને ઋણાયનના આયનીય કદમાં મોટો તફાવત હોય છે. દા.ત., ZnS, AgCl, AgBr, AgI. આનું કારણ $Zn^{2+}$ અને $Ag^{+}$ આયનો નાના નાના કદ(Size)ના છે. આ ક્ષતિ જેમના સવર્ગાંક નીચાં છે તેવા ઘન પદાર્થો દર્શાવે છે.

**(B) બિનતત્ત્વયોગમિતિય ક્ષતિ :** આપણે અભ્યાસ કર્યો તે તત્ત્વયોગમિતિય ક્ષતિમાં કોઈ ખલેલ પડતી નથી. પરંતુ બિનતત્ત્વયોગમિતિય ધરાવતા ઘણાં અકાર્બનિક ઘન જાણવા મળ્યાં છે તેમાં ઘટક તત્ત્વો બિનતત્ત્વયોગમિતિય ગુણોત્તરમાં હોય છે, જેનું કારણ સ્ફટિકની રચનામાંની ક્ષતિ છે. આ ક્ષતિના બે પ્રકાર છે : (i) ધાતુ વધારો (excess) ક્ષતિ અને (ii) ધાતુ ઊણપ (deficiency) ક્ષતિ.




આકૃતિ 1.20 સ્ફટિકમાંનું F-કેન્દ્ર

**(i) ધાતુ વધારો ક્ષતિ : એનાયન અવકાશને લીધે થતી ધાતુ વધારો ક્ષતિ :** NaCl અને KCl જેવા આલ્કલી હેલાઇડ આ પ્રકારની ક્ષતિ દર્શાવે છે. ધારો કે સોડિયમ ક્લોરાઇડના સ્ફટિકને સોડિયમની બાષ્પના વાતાવરણમાં ગરમ કરવામાં આવે તો સોડિયમ પરમાણુઓ સ્ફટિકની સપાટી પર જમા થાય છે. તેથી $Cl^{-}$ આયન સ્ફટિકની સપાટીમાં પ્રસરણ પામી Na પરમાણુ સાથે જોડાય છે અને NaCl બનાવે છે. Na પરમાણુમાંથી $Na^{+}$ આયન બનવામાં થતા ઈલેક્ટ્રૉનના ઘટાડાને લીધે હોય છે. મુક્ત થયેલા ઈલેક્ટ્રૉન સ્ફટિકમાં પ્રસરણ પામી એનાયનના સ્થાન પર પહોંચી જાય છે. આને કારણે સ્ફટિકમાં સોડિયમનો વધારો હોય છે. અયુગ્મિત ઈલેક્ટ્રૉન વડે રોકાયેલા એનાયનીય સ્થાનને F-કેન્દ્રો કહે છે. (જ્યાં F-જર્મન શબ્દ Farbenzenter એટલે કે રંગ-કેન્દ્ર (colour center) દર્શાવે છે.) આથી NaClના સ્ફટિક પીળો રંગ ધારણ કરે છે. જ્યારે NaClના સ્ફટિક પર દશ્યપ્રકાશ પડે છે ત્યારે તે ઊર્જાનું શોષણ

કરે છે અને ઈલેક્ટ્રૉનને ઉત્તેજિત કરે છે. જેના પરિણામે પીળો રંગ દેખાય છે. આ જ પ્રમાણે ઉત્તેજન દ્વારા LiClના સ્ફટિકમાં લિથિયમનો વધારો આછો ગુલાબી રંગ અને KClના સ્ફટિકમાં પોટૅશિયમનો વધારો જાંબલી રંગ દર્શાવે છે.

**આંતરાલીય સ્થાનો પર વધારાના ધનાયનની હાજરીને કારણે ધાતુ વધારો ક્ષતિ :** ઝિંક ઑક્સાઇડ ઓરડાના તાપમાને સફેદ રંગનો પદાર્થ છે. તેને ગરમ કરતાં તે પીળો પડે છે, કારણ કે તે ઑક્સિજન ગુમાવે છે.

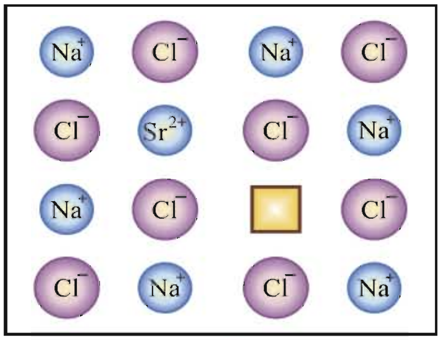
$$ZnO \xrightarrow{\text{ગરમી}} Zn^{2+} + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$$

હવે સ્ફટિકમાં $Zn^{2+}$ વધે છે અને તેથી તેનું સૂત્ર $Zn_{1+x}O$ બને છે. આ વધારાનો $Zn^{2+}$ આયન આંતરાલીય સ્થાન પર ગોઠવાય છે અને ઈલેક્ટ્રૉન પડોશી (બાજુના) આંતરાલીય સ્થાનમાં ગોઠવાય છે.

**(ii) ધાતુ ઊણપ ક્ષતિ :** ઘણા બધા ઘન પદાર્થોને તેમની તત્ત્વયોગમિતિય પ્રમાણે બતાવવા મુશ્કેલ છે અને તે તત્ત્વયોગમિતિય ગણતરી કરતાં પ્રમાણમાં ઓછા ધાતુ પરમાણુઓ ધરાવે છે. આમાં ખૂબ જ જાણીતું ઉદાહરણ FeOનું છે, જે મોટે ભાગે $Fe_{0.95}O$ ખરેખર તે $Fe_{0.93}O$ અને $Fe_{0.96}O$ની વચ્ચેના ગાળામાં હોય છે. FeOના સ્ફટિકમાં કેટલાક $Fe^{2+}$ આયન ખોવાયેલા (missing) જણાય છે અને તેથી ધનભારનો ઘટાડો જરૂરી $Fe^{3+}$ આયન વડે પૂરો પાડવામાં આવે છે.

**(iii) વિસ્થાપનની ક્ષતિ :** ઘણી વખતે સ્ફટિકમાંની જાળી રચનામાંના પરમાણુ તેમના સ્થાનેથી અન્ય સ્ફટિક જાળી રચનામાં પારસ્પરિક રીતે વિનિમય (exchange) કરીને વિસ્થાપન કરે છે ત્યારે વિસ્થાપનીય ક્ષતિ જણાય છે અને વિસ્થાપનીય અવ્યવસ્થા ઉત્પન્ન થાય છે. આ પ્રકારની ક્ષતિ કૉપર અને સિલ્વરની મિશ્ર ધાતુમાં જોવા મળે છે.

**(C) અશુદ્ધિ ક્ષતિ :** ધારો કે પિગલિત NaClમાં થોડા પ્રમાણમાં ઘન $SrCl_2$ ઉમેરીને સ્ફટિકીકરણ કરવામાં આવે તો મળતા સ્ફટિકમાં $Na^+$ના કેટલાક સ્થાન $Sr^{2+}$ વડે રોકાય છે (આકૃતિ 1.21). દરેક $Sr^{2+}$ આયન બે $Na^+$ને વિસ્થાપિત કરે છે. તે એક સ્થાન રોકી લે છે અને બીજું સ્થાન ખાલી રાખે છે. આમ ધનઆયનીય અવકાશની સંખ્યા $Sr^{2+}$ આયનની સંખ્યા જેટલી હોય છે. અન્ય ઉદાહરણમાં $CdCl_2$ અને AgClનું ઘન દ્રાવણ ગણી શકાય.




આકૃતિ 1.21 $Sr^{2+}$ વડે $Na^+$નું NaClમાંથી અવકાશ ક્ષતિમાં દાખલ થવું

**ધાતુઓમાં પટ સિદ્ધાંત (Band Theory in Metals) :** પટ સિદ્ધાંતમાં એમ સ્વીકારવામાં આવેલ છે કે ધાતુ અથવા પદાર્થમાં બે પટ હોય છે. એક સંયોજકતા પટ જેમાં ધાતુ અથવા પદાર્થના સંયોજકતા ઈલેક્ટ્રૉન સમાયેલાં હોય છે. તેની ઉપરના ભાગમાં બીજો પટ હોય છે. તેને વાહકતા પટ કહે છે. પદાર્થના વિદ્યુતવહન માટે વાહકતા પટમાં ઈલેક્ટ્રૉન હોવા જરૂરી છે. આ બંને પટ વચ્ચે જગ્યા રહેલી હોય છે જેને આપણે શક્તિગૅપ (energy gap) કહીએ છીએ. સંયોજકતા પટમાંના ઈલેક્ટ્રૉન સહેલાઈથી વાહકતા પટમાં જાય તે માટે આ શક્તિગૅપનું અંતર અગત્યનું છે. ધાતુઓમાં આ બંને પટ વચ્ચે શક્તિગૅપનું અંતર ઓછું હોવાથી ઈલેક્ટ્રૉન સંયોજકતા પટમાંથી સહેલાઈથી વાહકતા પટમાં જઈ શકે છે. માટે જ ધાતુઓમાં વિદ્યુતનું વહન સહેલાઈથી થાય છે અને તે સુવાહક કહેવાય છે. કેટલાક પદાર્થોમાં આ શક્તિગૅપનું અંતર વધારે હોવાથી સામાન્ય સંજોગોમાં ઈલેક્ટ્રૉન સંયોજકતા પટમાંથી વાહકતા પટમાં જઈ શકતા નથી. પરિણામે વિદ્યુતનું વહન થતું નથી. આથી તેઓ અવાહક કહેવાય છે. અધાતુ મોટે ભાગે વિદ્યુત માટે અવાહક હોય છે. આ બંને વચ્ચેની પરિસ્થિતિ અર્ધવાહકોની છે. સિલિકોન જેવી અર્ધધાતુના સંયોજકતા પટમાં ચાર ઈલેક્ટ્રૉન હોય છે તે મુક્ત હોતા નથી. તેથી સામાન્ય સંજોગોમાં સિલિકોન વિદ્યુતનું વહન કરતો નથી અને અવાહક બને છે. પરંતુ જો તેનું તાપમાન વધારવામાં આવે અથવા ખાસ પ્રકારનાં વિકિરણો તેના પર પાડવામાં આવે તો સંયોજકતા પટમાંના કેટલાક ઈલેક્ટ્રૉન વાહકતા પટમાં જાય છે અને તેથી વિદ્યુતનું વહન થાય છે. સંયોજકતા પટમાં પડેલ ખાલી જગ્યા પદાર્થમાંના અન્ય ઈલેક્ટ્રૉન લઈ લે છે.

આ ઇલેક્ટ્રૉન ઓછા પ્રમાણમાં જવાથી ચોક્કસ સંજોગોમાં તે વિદ્યુતવાહક બને છે માટે જ તેમને અર્ધવાહકો કહે છે. આમ પટ સિદ્ધાંતને આધારે વાહકતા પટ અને સંયોજકતા પટ વચ્ચેના અંતર-શક્તિગૅપને આધારે વાહક, અવાહક અને અર્ધવાહક સમજાવી શકાય.

## 1.9 ક્ષતિની વિદ્યુતીય અને ચુંબકીય અસરો : ધાતુઓમાં પટ સિદ્ધાંત (Electrical and Magnetic Effects of Defect : Band Theory in Metals)

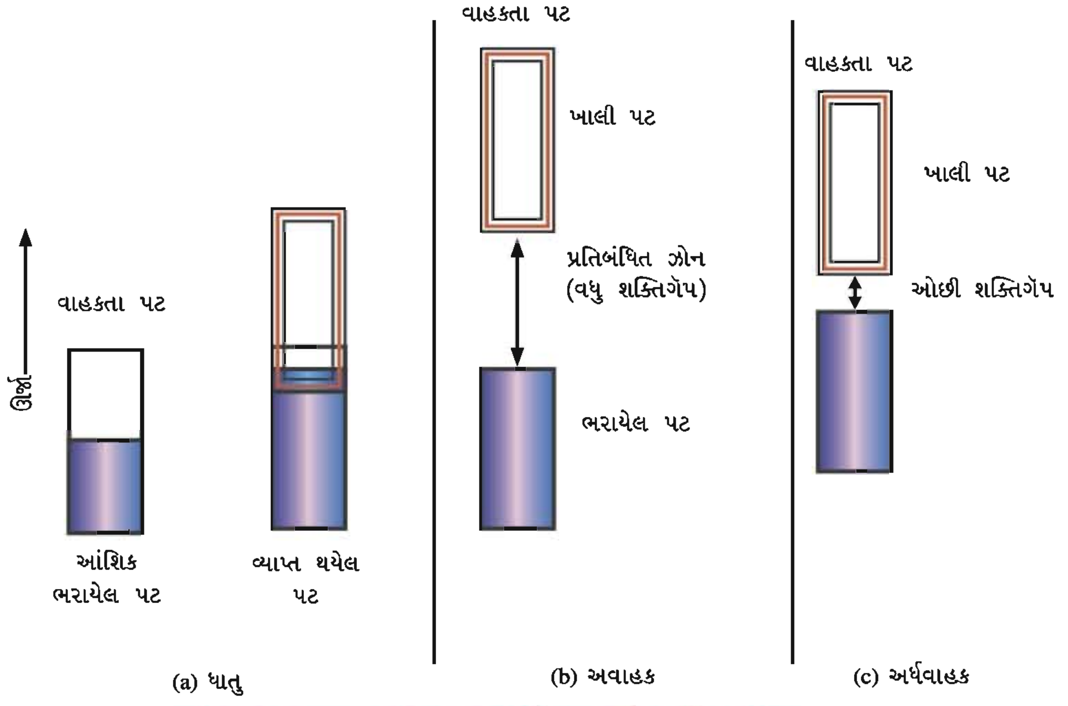
ઘન પદાર્થોની વિદ્યુતીય વાહકતામાં ઘણો મોટો ગાળો જોવા મળે છે. આશરે $10^{-20}$થી $10^{7}$ ઓહ્મ$^{-1}$ મી$^{-1}$ જેટલી વિદ્યુતવાહકતા દર્શાવતા ઘન પદાર્થો છે. આથી ઘન પદાર્થોને તેમની વિદ્યુતીય વાહકતાના આધારે ત્રણ વિભાગમાં વહેંચી શકાય : (1) વીજવાહકો (2) વીજ અવાહકો (3) વીજ અર્ધવાહકો.

**(1) વીજવાહકો :** જે ઘન પદાર્થોની વિદ્યુતીય વાહકતા $10^{4}$થી $10^{7}$ ઓહમ$^{-1}$ મી$^{-1}$ના ગાળામાં હોય તેમને વીજવાહકો અથવા સુવાહકો કહેવામાં આવે છે. સામાન્ય રીતે આવા ઘન પદાર્થોમાં ધાતુઓનો સમાવેશ થાય છે.

**(2) વીજ અવાહકો :** જે ઘન પદાર્થોની વિદ્યુતીય વાહકતા ઘણી ઓછી એટલે કે $10^{-20}$થી $10^{-10}$ ઓહ્મ$^{-1}$ મી$^{-1}$ના ગાળામાં હોય તેમને વીજ અવાહકો કહેવામાં આવે છે.

**(3) વીજ અર્ધવાહકો :** જે ઘન પદાર્થોની વિદ્યુતીય વાહકતા $10^{-6}$થી $10^{4}$ ઓહ્મ$^{-1}$ મી$^{-1}$ના ગાળામાં હોય તેમને વીજ અર્ધવાહકો કહેવામાં આવે છે.

**ધાતુઓમાં વિદ્યુતનું વહન :** વાહકમાં વિદ્યુતનું વહન ઇલેક્ટ્રૉન અથવા આયન દ્વારા થઈ શકે છે. ધાતુઓ ઇલેક્ટ્રૉન દ્વારા વિદ્યુતનું વહન કરે છે. જ્યારે વિદ્યુત વિભાજ્યો આયનો દ્વારા વિદ્યુતનું વહન કરે છે. ધાતુઓ ઘન તેમજ પિગલિત અવસ્થામાં વિદ્યુતનું વહન કરે છે અને તેમની વાહકતા તેમના પરમાણુમાં પ્રાપ્ત થતી સંયોજકતા કોષમાંના ઇલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા પર આધાર રાખે છે. ધાતુઓના પરમાણુઓની પરમાણ્વિય કક્ષકો જે આણ્વિય કક્ષકો રચે છે, તે એકબીજાથી એટલા નજીક હોય છે કે તેનાથી એક પટ (band) રચાય છે. આ પટ અર્ધપૂર્ણ ભરાયેલો અથવા આ પટની ઉપર આવેલા વાહકતા પટ સાથે વ્યાપ્ત થયેલ અથવા સંમિશ્રણ (overlap) હોય છે ત્યારે વિદ્યુતપ્રવાહ પસાર કરવાથી ઇલેક્ટ્રૉન સહેલાઈથી તેનું વહન કરે છે અને ધાતુ વિદ્યુતવાહકતા દર્શાવે છે (આકૃતિ 1.22).




આકૃતિ 1.22 (a) ધાતુઓ (b) અવાહકો (c) અર્ધવાહકોમાં તફાવત

જો ભરાઈ ગયેલ સંયોજકતા પટ અને ઉપરના બીજા ન ભરાયેલા પટ (વાહકતા પટ) વચ્ચે ખાલી જગ્યા-'ગૅપ' (gap) વધારે હોય, તો ઇલેક્ટ્રૉન વાહકતા પટમાં કૂદી શકતા નથી અને તેથી પદાર્થ વિદ્યુતનું ઘણું ઓછું પ્રમાણ વહન કરે છે અથવા નથી કરતો. તેથી તે અવાહક તરીકે વર્તે છે.

**અર્ધવાહકોમાં વિદ્યુતવહન :** અર્ધવાહકોની બાબતમાં સંયોજકતા પટ અને વાહકતા પટ વચ્ચેનું અંતર ઓછું હોય છે (આકૃતિ 1.22). આથી કેટલાક ઇલેક્ટ્રૉન સંયોજકતામાંથી વાહકતા પટમાં જઈ શકે છે માટે તે અલ્પ વિદ્યુતનું વહન કરશે. અર્ધવાહકોની વિદ્યુતીય વાહકતા તાપમાનના વધારા સાથે વધે છે. કારણ કે તાપમાનના વધારાથી મળતી ઊર્જા સંયોજકતા પટ ઇલેક્ટ્રૉનને વાહકતા પટમાં કૂદાવી શકે છે. આથી વિદ્યુતનું વહન સરળ અને વધુ બને છે. આમ અર્ધવાહક સામાન્ય તાપમાને અવાહક જેવું જણાય પરંતુ તાપમાનના વધારા સાથે સુવાહક જણાય. સિલિકોન અને જર્મેનિયમ જેવાં તત્ત્વો આ પ્રકારની વર્તણૂક બતાવે છે માટે તેમને આંતરિક (intrinsic) અર્ધવાહકો કહે છે. આવા આંતરિક અર્ધવાહકોની વાહકતા એટલી ઓછી હોય છે કે તેનો પ્રાયોગિક ઉપયોગ કરી શકાતો નથી; પરંતુ જો તેમાં કોઈ યોગ્ય પ્રકારની અશુદ્ધિ યોગ્ય પ્રમાણમાં ઉમેરવામાં આવે તો તેની વાહકતા વધારી શકાય છે. આ ક્રિયાને **ડૉપિંગ (doping)** કહે છે. આ 'ડૉપિંગ'માં ઇલેક્ટ્રૉન સમૃદ્ધ અને ઇલેક્ટ્રૉન ઊણપવાળાં તત્ત્વો (આંતરિક અર્ધવાહક સિલિકોન અને જર્મેનિયમની સરખામણી ) ઉમેરી શકાય છે. આવી અશુદ્ધિઓને તેમાંની ઇલેક્ટ્રૉન ક્ષતિ તરીકે ઓળખી શકાય.

આપણે બે સામાન્ય ઉદાહરણ લઈએ. ધારો કે સિલિકોન કે જર્મેનિયમ જેવા અર્ધવાહકમાં (જેમાં ચાર ઇલેક્ટ્રૉન સંયોજકતા કોષમાં હોય છે) ઇલેક્ટ્રૉન સમૃદ્ધ તત્ત્વ દા.ત., P અથવા As (જેમાં પાંચ ઇલેક્ટ્રૉન સંયોજકતા કોષમાં હોય છે) સાથે તેનું ડૉપિંગ કરીએ તો એક વધુ ઇલેક્ટ્રૉન ધરાવતો અર્ધવાહક મળે. ઇલેક્ટ્રૉન વધારે છે અને તે ઋણભાર ધરાવતો હોઈ આવા ડૉપિંગ કરેલા અર્ધવાહકને **ઋણભાર પ્રકારના (negative type)** અથવા **n-પ્રકારના અર્ધવાહકો** કહેવામાં આવે છે.

એ જ પ્રમાણે B, Al કે Ga જેવા તત્ત્વની (જેમાં સંયોજકતા કોષમાં ત્રણ ઇલેક્ટ્રૉન હોય છે.) સાથે ડૉપિંગ કરવામાં આવે તો તેમાં એક ઇલેક્ટ્રૉનની ઊણપ વર્તાશે. તેથી આવા ડૉપિંગ કરેલા અર્ધવાહકને **ધનભાર પ્રકારના (positive type)** અથવા **p-પ્રકારના અર્ધવાહકો** કહે છે. અર્ધવાહકો વિશે તમે ભૌતિકવિજ્ઞાનમાં વધુ વિગતે અભ્યાસ કર્યો જ હશે.

n અને p-પ્રકારના અર્ધવાહકો ઘણા ઇલેક્ટ્રૉનિક ભાગો અથવા ઘટકો બનાવવામાં વપરાય છે. ડાયોડ n-પ્રકાર અને p-પ્રકારના અર્ધવાહકોનું જોડાણ છે, જેનો રેક્ટિફાયર તરીકે ઉપયોગ થાય છે. ટ્રાન્ઝિસ્ટરમાં પણ તેનો ઉપયોગ થાય છે. npn અથવા pnp પ્રકારના સંયોગીકરણ કરી જુદા જુદા ગુણધર્મોવાળા અર્ધવાહકો બનાવી શકાય. ફોટોડાયોડની મદદથી પ્રકાશનું વીજળીમાં રૂપાંતર કરી શકાય છે. ગેલિયમ આર્સેનાઇડ (GaAs) જેવા અર્ધવાહકો તેમના ઝડપી પ્રતિભાવ(response)ને કારણે અર્ધવાહકો ધરાવતી વસ્તુઓએ ક્રાંતિ સર્જી છે.

એ જાણવું રસપ્રદ છે કે સંક્રાંતિ ધાતુ ઑક્સાઇડની વિદ્યુતીય વાહકતામાં નોંધપાત્ર તફાવત દર્શાવે છે. TiO, $CrO_2$ અને $ReO_3$ જેવા ઑક્સાઇડ ધાતુની જેમ વર્તે છે. $ReO_3$ ધાત્વિક કૉપર જેવી વાહકતા અને દેખાવ ધરાવે છે. બીજા ઑક્સાઇડ જેવાં કે VO, $VO_2$, $VO_3$ અને $TiO_2$ ધાત્વિક અથવા અવાહકના ગુણધર્મો દર્શાવે છે, જે તાપમાન પર આધારિત છે.

**ચુંબકીય ગુણધર્મો :** આપણે જાણીએ છીએ તે પ્રમાણે ઇલેક્ટ્રૉન વિદ્યુતભાર ધરાવે છે તથા ગતિ કરે છે તેથી તે ચુંબકીય ગુણધર્મ ધરાવે છે. દરેક પદાર્થમાં ઇલેક્ટ્રૉન રહેલાં છે, માટે કંઈક અંશે પણ ચુંબકીય ગુણધર્મો પદાર્થ સાથે સંકળાયેલાં હોય છે. દરેક પરમાણુમાં ઇલેક્ટ્રૉન એક અતિ નાના ચુંબક તરીકે વર્તે છે. તેથી ચુંબકીય ચાકમાત્રા તેની બે પ્રકારની ગતિમાંથી ઉદ્ભવે છે. (1) કેન્દ્રની ફરતે ગતિ તથા (2) પોતાની જ ધરી પરની ગતિ. આમ ઇલેક્ટ્રૉન વીજભાર ધરાવતું કણ હોવાથી અને આ પ્રકારની ગતિ ધરાવતાં હોઈ ચુંબકીય ચાકમાત્રા ધરાવે છે. આમ દરેક ઇલેક્ટ્રૉનની કાયમી (permanent) ભ્રમણ અને કક્ષકીય ચુંબકીય ચાકમાત્રા તેની સાથે સંકળાયેલ છે. ચુંબકીય ચાકમાત્રાની માત્રા (magnitude) ઘણી નાની છે અને તેનું માપન બૉહ્ર મૅગ્નેટોન એકમમાં થાય છે. તેનું મૂલ્ય $9.27 \times 10^{-24}$ $Am^2$ છે.

આમ ચુંબકીય ગુણધર્મોના આધારે પદાર્થોના પાંચ પ્રકાર પાડી શકાય : (1) અનુચુંબકીય (2) પ્રતિચુંબકીય (3) ફેરોમૅગ્નેટિક (4) ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિક અને (5) ફેરીમૅગ્નેટિક. આ પાંચેય પ્રકારનો અભ્યાસ કરીશું.

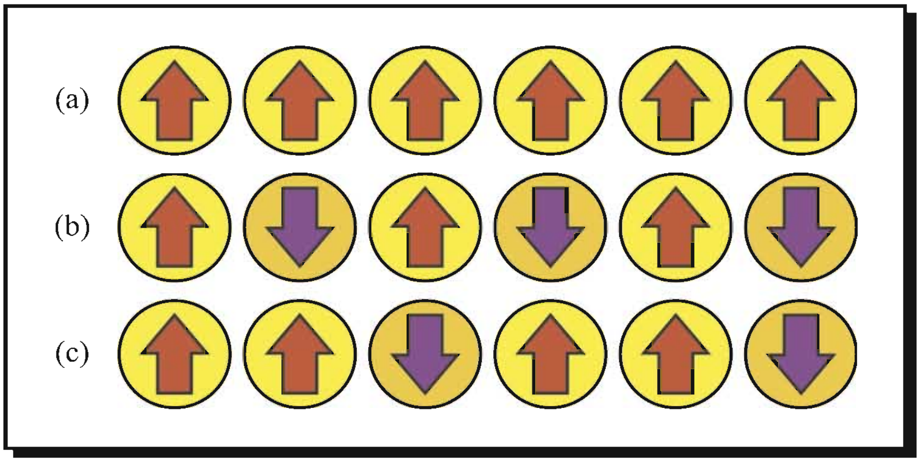
**(1) અનુચુંબકત્વ :** અનુચુંબકત્વ અયુગ્મિત ઇલેક્ટ્રૉનને લીધે હોય છે. અનુચુંબકીય પદાર્થો ચુંબકીય ક્ષેત્રમાં નિર્બળતાથી આકર્ષિત થાય છે. તેઓ ચુંબકીય ક્ષેત્રની દિશામાં જ ચુંબકત્વ પામે છે. ચુંબકીય ક્ષેત્રની ગેરહાજરીમાં તેમનું ચુંબકત્વ દૂર થાય છે. અનુચુંબકત્વ એક અથવા વધારે અયુગ્મ ઇલેક્ટ્રૉનને લીધે હોય છે. કારણ કે તેઓ ચુંબકીય ક્ષેત્ર વડે આકર્ષણ પામે છે. $Cu^{2+}$, $Fe^{3+}$, $Cr^{3+}$, $O_2$ વગેરે આવા અનુચુંબકીય પદાર્થોનાં ઉદાહરણ છે.

**(2) પ્રતિચુંબકત્વ :** પ્રતિચુંબકીય પદાર્થો ચુંબકીય ક્ષેત્રની નિર્બળતાથી અપાકર્ષણ પામે છે. NaCl, $H_2O$, $C_6H_6$, $N_2$ વગેરે આવા પદાર્થોનાં ઉદાહરણ છે. તેઓ ચુંબકીય ક્ષેત્રની હાજરીમાં નિર્બળતાથી અપાકર્ષાયેલ હોય છે જે વિરુદ્ધ દિશામાં હોય છે. જે પદાર્થોમાં અયુગ્મિત ઇલેક્ટ્રૉન ન હોય અથવા જેમાં બધાં જ ઇલેક્ટ્રૉનનાં જોડકાં બનાવી દીધાં હોય તેવા પદાર્થો પ્રતિચુંબકીય ગુણધર્મ દર્શાવે છે. ઇલેક્ટ્રૉનની પરસ્પર વિરુદ્ધ દિશામાંના ભ્રમણથી રચાતી જોડ ચુંબકીય ચાકમાત્રાને રદ (cancel) કરે છે અને તેથી તેઓ ચુંબકીય ગુણધર્મ ગુમાવે છે.

**(3) ફેરોમૅગ્નેટિક :** આયર્ન, કોબાલ્ટ, નિકલ, ગેડોલિનિયમ, $CrO_2$ જેવા પદાર્થો ચુંબકીય ક્ષેત્રની હાજરીમાં ખૂબ જ પ્રબળ આકર્ષણ ધરાવે છે. આવા પદાર્થો ફેરોમૅગ્નેટિક પદાર્થો કહે છે. પ્રબળ આકર્ષણ ઉપરાંત આવા પદાર્થો કાયમી રીતે ચુંબકીય બની જાય છે. ઘન અવસ્થામાં ફેરોમૅગ્નેટિક પદાર્થોના ધાતુ આયનો 'ડોમેઇન' (domain) તરીકે ઓળખાતા નાના વિસ્તારમાં એકસાથે સમૂહમાં ગોઠવાયેલ હોય છે. આવું દરેક ડોમેઇન એક નાના ચુંબક તરીકે વર્તે છે. ફેરોમૅગ્નેટિક પદાર્થના બિનચુંબકીય ટુકડામાં આ ડોમેઇન અવ્યવસ્થિત રીતે ગોઠવાયેલ હોય છે અને તેમની ચુંબકીય ચાકમાત્રા રદ (cancel) થઈ જાય છે. જ્યારે પદાર્થ ચુંબકીય ક્ષેત્રમાં મૂકવામાં આવે છે ત્યારે બધી ડોમેઇન ચુંબકીય ક્ષેત્રની દિશામાં જ અભિવિન્યાસિત (oriented) હોય છે (આકૃતિ 1.23 (a)) અને તેથી પ્રબળ ચુંબકીય અસર ઉત્પન્ન થાય છે. જો ચુંબકીય ક્ષેત્ર દૂર કરવામાં આવે તોપણ ડોમેઇનમાં ક્રમબદ્ધતા (ordering) જળવાઈ રહે છે અને તેથી ફેરોમૅગ્નેટિક પદાર્થો કાયમી ચુંબક બને છે.

**(4) ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિક :** MnO જેવા પદાર્થો ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિઝમ દર્શાવે છે. તેમના ડોમેઇનની રચના ફેરોમૅગ્નેટિક પદાર્થોની જેમ જ હોય છે. પરંતુ તેમની ડોમેઇન એકબીજાથી વિરુદ્ધ રીતે અભિવિન્યાસિત (oriented) હોય છે અને તેથી એકબીજાની ચુંબકીય ચાકમાત્રાને રદ (cancel) કરે છે (આકૃતિ 1.23 (b)).

**(5) ફેરીમૅગ્નેટિક :** જ્યારે પદાર્થમાંની ડોમેઇનની ચુંબકીય ચાકમાત્રા એકબીજાને સમાંતર અને બિનસમાંતર રીતે ગોઠવાયેલી હોય છે પણ અસમાન સંખ્યામાં હોય છે ત્યારે તેને ફેરીમૅગ્નેટિક પદાર્થ કહેવાય છે (આકૃતિ 1.23). ફેરોમૅગ્નેટિક પદાર્થની સરખામણીમાં તેઓ વધુ નિર્બળતાથી આકર્ષાયેલ હોય છે. મૅગ્નેટાઇટ ($Fe_3O_4$), ફેરાઇટ ($MgFe_2O_4$) અને $ZnFe_2O_4$ જેવા પદાર્થો ફેરીમૅગ્નેટિઝમ દર્શાવે છે. આવા પદાર્થોને ગરમ કરતાં ફેરીમૅગ્નેટિઝમ ગુમાવે છે અને અનુચુંબકીય બની જાય છે (આકૃતિ 1.23 (c)).




આકૃતિ 1.23 (a) ફેરોમૅગ્નેટિક (b) ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિક અને (c) ફેરીમૅગ્નેટિકમાં ચુંબકીય ચાકમાત્રાનું સંરેખણ (alignment)

## સારાંશ

દ્રવ્યની મુખ્યત્વે ત્રણ અવસ્થા છે : ઘન, પ્રવાહી અને વાયુ. આ ઉપરાંત બીજી બે - પ્લાઝ્મા અને બોઝ આઇન્સ્ટાઇન કન્ડેન્સેટ છે. આ એકમમાં આપણે દ્રવ્યની ઘન અવસ્થાનો અભ્યાસ કર્યો. ઘન પદાર્થને ચોક્કસ દળ, કદ અને આકાર હોય છે. કારણ કે તેમના ઘટક કણોના સ્થાન નિશ્ચિત હોય છે. તે એકબીજાની નજીક ગોઠવાયેલા હોય છે અને તેમની વચ્ચે પ્રબળ આંતર આકર્ષણ હોય છે. ઘન પદાર્થોના મુખ્યત્વે બે પ્રકાર છે : સ્ફટિકમય અને અસ્ફટિકમય. સ્ફટિકમય પદાર્થોમાં રચના, ગોઠવણી વગેરે વ્યવસ્થિત હોય છે અને તેથી આ એકમમાં તેના વિશે વધુ જાણકારી આપેલી છે. અસ્ફટિકમય પદાર્થોના ઘટક કણોની ગોઠવણી બહુ જ થોડા અંતર માટે વ્યવસ્થિત હોય છે. તેથી તેમના ચોક્કસ આકાર અને નિશ્ચિત ગલનબિંદુ હોતા નથી. તેમને અતિ શીત પ્રવાહી તરીકે ઓળખી શકીએ. જ્યારે સ્ફટિકમય પદાર્થોમાં ચોક્કસ ગલનબિંદુ, નિયમિત ગોઠવણી, લાક્ષણિક આકાર વગેરે હોય છે. તેમના ઘટક કણો વચ્ચે તીવ્ર આંતરક્રિયા હોવાથી તે વિશિષ્ટ ગુણધર્મો ધરાવે છે. ઘન પદાર્થોને તેમની રચના, આકર્ષણબળો વગેરેના આધારે કેટલાક વિભાગોમાં વહેંચી શકાય. જેમ કે આણ્વિય, આયનીય, ધાત્ત્વિક, સહસંયોજક વગેરે. આ બધા જ તેમના ગુણધર્મોમાં નોંધપાત્ર ફેરફાર દર્શાવે છે.

સ્ફટિકમય ઘન પદાર્થના ઘટક કણો નિયમિત રીતે ગોઠવાયેલા હોય છે અને તેને આધારે સ્ફટિકની રચના થાય છે. સ્ફટિકના નાનામાં નાના કણને આપણે એકમ કોષ કહીએ છીએ અને સ્ફટિકમાં આ એકમ કોષ ત્રિપરિમાણીય દિશામાં ગોઠવાયેલો હોય છે. આવી ગોઠવણીને લૅટિસ રચના કહે છે. જુદા જુદા પ્રકારની લૅટિસ રચનાને બ્રેવિસ (Bravais) લૅટિસ કહે છે. એકમ કોષ આદિમ પ્રકારનો હોય, જેમાં કણો ખૂણા પર અથવા કેન્દ્રમાં ગોઠવાયેલા હોય છે. આવા સ્ફટિકોના પ્રકારમાં ફલક કેન્દ્રિત,અંતઃકેન્દ્રિત અને અંત (end) કેન્દ્રિત છે. આદિમ કોષના સાત પ્રકાર છે. કણોના ક્લોઝ પૅકિંગને કારણે ઉચ્ચ ક્ષમતા ધરાવતી લૅટિસ રચાય છે. જેમાં ષટ્ફલકીય ક્લોઝ પૅકિંગ (hcp), ઘન ક્લોઝ પૅકિંગ (ccp), ફલક કેન્દ્રિત ક્લોઝ પૅકિંગ (fcp) અગત્યના છે. તેમની પૅકિંગ-ક્ષમતા જુદી જુદી હોય છે. ccpમાં આશરે 52.36 %, hcpમાં આશરે 68 %, fcpમાં આશરે 74 % છે. જુદા જુદા પ્રકારની ગોઠવણીને કારણે સ્ફટિકની રચનામાં છિદ્રો અથવા જગ્યાઓ (voids) રહે છે. તેના બે પ્રકાર છે : ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય. અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા કરતાં ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા બમણી હોય છે.

સ્ફટિક દેખાય છે તેટલા સંપૂર્ણ (perfect) હોતાં નથી. તેમાં અપૂર્ણતાઓ (imperfections) રહેલી હોય છે, જેને આપણે ક્ષતિ (defect) કહીએ છીએ. આવી ક્ષતિઓ જુદા જુદા પ્રકારની હોય છે. જેમ કે બિનતત્ત્વ-યોગમિતિય, તત્ત્વયોગમિતિય, અશુદ્ધિ બિંદુ ક્ષતિ વગેરે. તેમાંથી શોટ્કી ક્ષતિ અને ફ્રેન્કલ ક્ષતિ આયનીય સ્ફટિકોમાં જોવા મળે છે. શોટ્કી ક્ષતિમાં ઘટક કણોની સંખ્યાના ઘટાડાને લીધે ઘનતામાં ઘટાડો જણાય છે. જ્યારે ફ્રેન્કલ ક્ષતિમાં ઘનતામાં ઘટાડો થતો નથી. કારણ કે ઘટક કણો આંતરાલીય સ્થાનમાં ગોઠવાયેલા હોય છે. AgBr જેવો સ્ફટિક બંને પ્રકારની ક્ષતિ દર્શાવે છે. આવી ક્ષતિનો ઉપયોગ કરી તેમના સ્થાને કેટલાંક તત્ત્વો કે ઘટકો દાખલ કરી ઉપયોગમાં આવે તેવા સ્ફટિક મેળવાય છે જેને ડૉપિંગ કહે છે. ઍલ્યુમિનિયમ કે બોરોન જેવા તત્ત્વનો ઉપયોગ કરી pnp પ્રકારના અર્ધવાહક અને આર્સેનિક તથા ગેલિયમ જેવા તત્ત્વનો ઉપયોગ કરી npn પ્રકારના અર્ધવાહક બનાવી શકાય. ટ્રાન્ઝિસ્ટર વગેરેમાં પણ તેમનો ઉપયોગ થઈ શકે.

સ્ફટિકોમાં રહેલા ઇલેક્ટ્રૉન અને ગોઠવણીને આધારે તેઓ જુદા જુદા ચુંબકીય ગુણધર્મો દર્શાવે છે. જેવા કે અનુચુંબકીય – જેમાં ચુંબકીય ક્ષેત્રની અસર પડે છે અને તે અયુગ્મિત ઇલેક્ટ્રૉનને લીધે હોય છે. પ્રતિચુંબકીય પદાર્થોમાં ચુંબકીય ક્ષેત્રની અસર જણાતી નથી, જે યુગ્મિત ઇલેક્ટ્રૉનીય રચના દર્શાવે છે. આ ઉપરાંત આયર્ન, કોબાલ્ટ, નિકલ જેવી ધાતુઓ વિશિષ્ટ પ્રકારની ચુંબકીય અસર દર્શાવે છે જેને ફેરોમૅગ્નેટિઝમ કહે છે. ચુંબકીય ક્ષેત્રની અસરને કારણે કાયમી ગોઠવણી થાય તો ફેરીમૅગ્નેટિઝમ અને કોઈ અસર ન પડે તો ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિઝમનો ગુણધર્મ જણાય છે.

વાહકોના ત્રણ પ્રકાર કરી શકાય જે પોતાનામાં વિદ્યુતનું વહન થવા દે તેને સુવાહકો, પોતાનામાંથી વિદ્યુતનું વહન ન થવા દે તેને અવાહકો અને તાપમાન વધારવાથી અથવા અમુક પ્રકારનાં વિકિરણો પ્રઘાત કરવામાં આવે તો વિદ્યુતનું વહન કરે તેવા અર્ધવાહકો. પદાર્થમાં વિદ્યુતનું વહન પટ સિદ્ધાંતના આધારે સમજાવી શકાય :

એક સંયોજકતા પટ અને બીજો વાહકતા પટ. સંયોજકતા પટ કરતા વાહકતા પટ ઊંચા શક્તિ સ્તરે હોય છે. આથી તે બંને વચ્ચે જગ્યા, જેને શક્તિગૅપ (energy gap) કહે છે તેના પર આધાર રાખે છે. જો ઇલેક્ટ્રૉન સહેલાઈથી સંયોજકતા પટમાંથી વાહકતા પટમાં જાય તો તે સુવાહક બને છે. જો ઇલેક્ટ્રૉન થોડી ઊર્જા (તાપમાન વધારીને) આપી મોકલી શકાય તો તેને અર્ધવાહક અને ન જ મોકલી શકાય તો અવાહક. બીજા શબ્દોમાં કહીએ તો બંને પટ વચ્ચે જેટલું વધારે અંતર તેટલું ઇલેક્ટ્રૉન મોકલવાનું મુશ્કેલ અને તેટલો જ વધારે અવાહક. આમ ઘન અવસ્થામાં રહેલી ધાતુઓ, આયનીય ઘન, આણ્વિય ઘન, સહસંયોજક ઘન વગેરેના અભ્યાસ પરથી તેમના ઉપયોગો, રચના વગેરેના અભ્યાસને 'ઘન અવસ્થા રસાયણ' (Solid State Chemistry) કહે છે.

## સ્વાધ્યાય

**1. આપેલા વિકલ્પોમાંથી યોગ્ય વિકલ્પ પસંદ કરો :**

(1) સોડિયમ ક્લોરાઇડ કયા પ્રકારનો ઘન છે ?

(A) આયનીય (B) આણ્વિય (C) સહસંયોજક (D) ધાત્ત્વિક

(2) આયનીય ઘનના ગલનબિંદુ ........... હોય છે.

(A) ઘણા ઊંચા (B) સામાન્ય (C) ઘણા નીચા (D) અસામાન્ય

(3) ક્વાર્ટ્ઝ કેવા પ્રકારનો ઘન છે ?

(A) આયનીય (B) આણ્વિય (C) સહસંયોજક (D) ધાત્ત્વિક

(4) સિલ્વર ધાતુની સ્ફટિક રચના કેવી છે ?

(A) fcc (B) સાદો ઘન (C) bcc (D) અસ્ફટિકમય

(5) સાદા ઘનની પૅકિંગ-ક્ષમતા કેટલા ટકા છે ?

(A) 53.26 (B) 68.0 (C) 74.0 (D) 52.36

(6) ચતુષ્ફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા અષ્ટફલકીય છિદ્રોની સંખ્યા કરતા કેટલા ગણી હોય છે ?

(A) 4 (B) 8 (C) 2 (D) 0.5

(7) અંતઃકેન્દ્રિત ઘનના એકમ કોષના પરમાણુની સંખ્યા કેટલી છે ?

(A) 2 (B) 1 (C) 4 (D) 6

(8) ફલક કેન્દ્રિત ઘનના એકમ કોષમાં પરમાણુની સંખ્યા કેટલી છે ?

(A) 2 (B) 1 (C) 4 (D) 6

(9) નીચેનામાંથી કયા સંયોજનમાં શોટ્કી ક્ષતિ રહેલી છે ?

(A) NaCl (B) ZnS (C) $SiO_2$ (D) $SrCl_2$

(10) નીચેનામાંથી કયા સંયોજનમાં ફ્રેન્કલ ક્ષતિ રહેલી છે ?

(A) NaCl (B) ZnS (C) KBr (D) $SrCl_2$

(11) નીચેનામાંથી કયું સંયોજન ધાતુ ઊણપ ક્ષતિ દર્શાવે છે ?

(A) $Fe_{0.95}O$ (B) $Fe_2O_{3.6}$ (C) $Fe_3O_4$ (D) $FeS_{1.6}$

(12) નીચેનામાંથી કયું તત્ત્વ અર્ધવાહક છે ?

(A) Na (B) Al (C) Fe (D) Ge

(13) Si સાથે Bના ડૉપિંગથી મળતો અર્ધવાહક કેવા પ્રકારનો છે ?

(A) n-પ્રકાર (B) p-પ્રકાર (C) pnp-પ્રકાર (D) npn-પ્રકાર

(14) $ReO_3$ સંયોજનની વિદ્યુતવાહકતા કયા તત્ત્વને મળતી આવે છે ?

(A) કૉપર (B) ઝિંક (C) આયર્ન (D) ઍલ્યુમિનિયમ

(15) નીચેનામાંથી કયું આયન અનુચુંબકીય છે ?

(A) $O_2^{2-}$ (B) $Cr^{3+}$ (C) $Na^+$ (D) $Cu^+$

(16) વાહક અને અર્ધવાહકમાં વિદ્યુતનું વહન સમજાવવા કયો સિદ્ધાંત ઉપયોગી છે ?

(A) પૌલીનો સિદ્ધાંત (B) ઍવોગેડ્રોનો સિદ્ધાંત (C) પટનો સિદ્ધાંત (D) સંકરણનો સિદ્ધાંત

## 2. નીચેના પ્રશ્નોના ટૂંકમાં ઉત્તર લખો :

(1) બંધનબળોના આધારે ઘનના પ્રકાર લખો.

(2) સ્ફટિકમય અને અસ્ફટિકમય ઘનનાં ઉદાહરણો આપો.

(3) એકમ કોષની વ્યાખ્યા લખો.

(4) ઘનમાં થતાં પૅકિંગના પ્રકાર જણાવો.

(5) ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો એટલે શું ?

(6) જુદા જુદા પ્રકારના ઘનના એકમ કોષમાં રહેલા પરમાણુની સંખ્યા જણાવો.

(7) વાહક, અર્ધવાહક અને અવાહકના એક-એક ઉદાહરણ લખો.

(8) વાહકતા સમજાવતો પટ સિદ્ધાંત શું છે ?

(9) ચુંબકીય ગુણધર્મના ચાર પ્રકાર લખો.

(10) ક્ષતિ એટલે શું ? ઘનમાં રહેલી ક્ષતિના પ્રકાર જણાવો.

## 3. નીચેના પ્રશ્નોના ઉત્તર લખો :

(1) આયનીય અને આણ્વિય ઘન ઉદાહરણ સાથે સમજાવો.

(2) જાળીદાર ઘન સંયોજનો ઉદાહરણ સાથે સમજાવો.

(3) અસ્ફટિકમય અને સ્ફટિકમય ઘન પદાર્થોના ત્રણ તફાવત લખો.

(4) ઘનના જુદા જુદા પ્રકારો સમજાવી તેમની લાક્ષણિકતા લખો.

(5) અંતઃકેન્દ્રિત તથા ફલક કેન્દ્રિત ઘનમાં રહેલા પરમાણુની સંખ્યા ગણો.

(6) સાદા ઘનમાં પરમાણુઓથી રોકાયેલા કદની ગણતરી કરો.

(7) ચતુષ્ફલકીય અને અષ્ટફલકીય છિદ્રો આકૃતિ દોરી સમજાવો.

(8) અર્ધવાહકોમાં વાહકતા સમજાવતા પટના સિદ્ધાંતનું વર્ણન કરો.

(9) ફેરોમૅગ્નેટિઝમ અને ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિઝમ સમજાવો.

(10) ડૉપિંગ એટલે શું ? યોગ્ય ઉદાહરણ આપી સમજાવો.

### 4. નીચેના પ્રશ્નોના વિગતવાર ઉત્તર લખો :

(1) દ્વિપરિમાણીય અને ત્રિપરિમાણીય ક્લોઝ પૅકિંગ સમજાવો.

(2) ફલકકેન્દ્રિત અને અંતઃકેન્દ્રિત ઘનની વિશેષતાઓ જણાવો.

(3) અંતઃકેન્દ્રિત ઘનમાં પરમાણુઓથી રોકાયેલ કદની ગણતરી કરો.

(4) ક્ષતિના પ્રકારો લખો અને શોટ્કી તથા ફ્રેન્કલ ક્ષતિ વર્ણવો.

(5) ધાતુ ઊણપ તથા બિનતત્ત્વયોગમિતિય ક્ષતિ વિશે વિગતે લખો.

(6) ઘન પદાર્થોમાં વાહકતા વિશેનો પટ સિદ્ધાંત સમજાવો.

(7) ફેરોમૅગ્નેટિઝમ, ફેરીમૅગ્નેટિઝમ, ઍન્ટિફેરોમૅગ્નેટિઝમ વિગતવાર સમજાવો.

(8) શક્તિગૅપ, વાહકતા પટ અને સંયોજકતા પટ પર વિગતવાર નોંધ લખો.