પ્રકરણ ચૌદ

સેમિકન્ડક્ટર ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ : દ્રવ્યો, રચનાઓ અને સાદા પરિપથો (SEMICONDUCTOR ELECTRONICS : MATERIALS, DEVICES AND SIMPLE CIRCUITS)

14.1 પ્રસ્તાવના (INTRODUCTION)

જે રચનાઓ (સાધનો)માં ઈલેક્ટ્રૉનનો નિયંત્રિત પ્રવાહ મેળવી શકાય છે તે બધા ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ પરિપથોના મૂળભૂત *બંધારણીય એકમો* છે. 1948માં ટ્રાન્ઝિસ્ટરની શોધ થઈ તે પહેલાં આ રચનાઓ મોટે ભાગે શૂન્યાવકાશિત (નિર્વાત) નળીઓ (જેમને વાલ્વ પણ કહેવામાં આવતા હતા), જેમકે નિર્વાત ડાયોડ જેને બે ઈલેક્ટ્રોડ હોય છે, એટલે કે ઍનોડ (જેને પ્લેટ પણ કહેવાય છે) અને કૅથોડ; ટ્રાયોડ જેમાં ત્રણ ઈલેક્ટ્રોડ હોય છે, કૅથોડ, પ્લેટ અને ગ્રીડ; ટેટ્રોડ અને પેન્ટોડ (જેમને અનુક્રમે 4 અને 5 ઈલેક્ટ્રૉડસ હોય છે) હતી. *નિર્વાત નળીમાં,* ગરમ થયેલા કૅથોડમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન મળે છે અને જુદા જુદા ઈલેક્ટ્રૉડસ વચ્ચે વોલ્ટેજ બદલીને શૂન્યાવકાશમાંથી પસાર થતા ઈલેક્ટ્રૉનના પ્રવાહને નિયંત્રિત કરાય છે. ઈલેક્ટ્રૉડસ વચ્ચેના અવકાશમાં શૂન્યાવકાશ હોવો જરૂરી છે; નહીંતર ગતિ કરતા ઈલેક્ટ્રૉનો તેમનાં માર્ગમાં આવતા હવાના અણુઓ સાથેની અથડામણ દરમિયાન તેમની ઊર્જા ગુમાવી દે. આ રચનાઓમાં ઈલેક્ટ્રૉન ફક્ત કૅથોડથી ઍનોડ તરફ ગતિ કરી શકે છે (એટલે કે એક જ દિશામાં). આથી, આ રચનાઓને વાલ્વ કહેવાય છે. આ નિર્વાત નળીવાળા સાધનો મોટે ભાગે મોટા કદના હોય છે, વધુ પાવર વાપરે છે, સામાન્ય રીતે ઊંચા વોલ્ટેજ (~ 100 V) પર કાર્ય કરે છે અને તેમનું આયુષ્ય ટૂંકુ તથા તેમની વિશ્વસનીયતા ઓછી હોય છે. આધુનિક *ઘન અવસ્થા અર્ધવાહક ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ* (સોલિડ સ્ટેટ સેમીકન્ડક્ટર ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ)ના બીજ આપણને 1930 ના સમયગાળા સુધી દોરી જાય છે જ્યારે એવું જાણવામાં આવ્યું હતું કે કેટલાક ઘન અવસ્થા અર્ધવાહકો અને તેમના જોડાણ સ્થાનો (જંકશન) વડે તેમનામાંથી વિદ્યુતભારવાહકોની સંખ્યા

અને તેમની દિશા નિયંત્રિત કરી શકાય છે. સામાન્ય ઉદ્દીપકો જેમકે પ્રકાશ, ઉષ્મા કે આપેલ નાના વોલ્ટેજ વડે અર્ધવાહકમાં ગતિમાન વિદ્યુતભારોની સંખ્યા બદલી શકાય છે. નોંધો કે આ અર્ધવાહક રચનાઓમાં વિદ્યુતભારવાહકોનો પુરવઠો અને તેમના પ્રવાહ ફક્ત આ *ઘનપદાર્થની અંદર* જ હોય છે, જ્યારે પહેલાની *નિર્વાત* નળીઓ/વાલ્વમાં, ગરમ થયેલા કૅથોડમાંથી ગતિમાન ઇલેક્ટ્રૉન મળતા હતા અને નિર્વાત અવકાશ કે શૂન્યાવકાશમાં તેમની ગતિ કરાવાતી હતી. અર્ધવાહક રચનાઓમાં બાહ્ય ઉષ્મા કે મોટા નિર્વાત અવકાશની જરૂર પડતી નથી. તેઓનું કદ નાનું હોય છે, તે ઓછો પાવર વાપરે છે, ઓછા વોલ્ટેજ પર કાર્ય કરે છે તથા લાંબું આયુષ્ય અને વધુ વિશ્વસનિયતા ધરાવે છે. ટેલિવિઝન અને કોમ્પ્યુટરના મોનિટરમાં વપરાતી કૅથોડ રે ટ્યુબ્સ (CRT) જે નિર્વાત નળીઓના સિદ્ધાંત પર કાર્ય કરે છે, તેમની જગ્યાએ હવે ઘન અવસ્થા (સૉલિડસ્ટેટ) ઇલેક્ટ્રૉનિક્સ પર આધારિત લિક્વિડ ક્રીસ્ટલડીસ્પ્લે (LCD)ના મોનિટરો આવવા લાગ્યા છે. સેમીકન્ડક્ટર રચનાઓની પુરેપુરી સમજૂતી મળી તેના કરતાં ઘણા પહેલાંના વખતમાં કુદરતમાં મળી આવતા ગેલિના સ્ફટીકો (લેડ સલ્ફાઈડ, PbS) સાથે ધાતુનો પોઈન્ટ કોન્ટેક્ટ જોડીને તેનો ઉપયોગ રેડિયો તરંગો *પરખવા* (ઝીલવા) માટે થતો હતો.

હવેના પરિચ્છેદમાં, આપણે સેમિકન્ડક્ટર ભૌતિકવિજ્ઞાનના પાયાના સિદ્ધાંતોનો પરિચય મેળવીશું અને કેટલીક સેમીકન્ડક્ટર રચનાઓ જેમ કે જંકશન ડાયોડ્સ (2-ઈલેક્ટ્રૉડવાળી રચના) અને બાઈપોલર જંકશન ટ્રાન્ઝિસ્ટર (3-ઈલેક્ટ્રૉડવાળી રચના)ની ચર્ચા કરીશું. તેમના ઉપયોગો દર્શાવતા કેટલાક પરિપથો પણ દર્શાવીશું.

14.2 ધાતુઓ, સુવાહકો અને અર્ધવાહકોનું વર્ગીકરણ (Classification of Matels, Conductors and Semiconductors)

વાહકતાના આધારે :

વિદ્યુત વાહકતા (σ) અથવા અવરોધકતા ($\rho = 1/\sigma$)ના સાપેક્ષ મૂલ્યોના આધારે ઘન પદાર્થોને આ રીતે વર્ગીકૃત કરી શકાય છે :

(i) ***ધાતુઓ* :** તેઓની અવરોધકતા બહુ ઓછી (અથવા વાહકતા, ઘણી વધુ) હોય છે.

$\rho \sim 10^{-2} - 10^{-8}\ \Omega\,\text{m}$

$\sigma \sim 10^{2} - 10^{8}\ \text{S m}^{-1}$

(ii) ***અર્ધવાહકો (સેમિકન્ડક્ટર્સ)* :** તેમની અવરોધકતા કે વાહકતા ધાતુઓ અને અવાહકોની વચ્ચેની હોય છે.

$\rho \sim 10^{-5} - 10^{6}\ \Omega\,\text{m}$

$\sigma \sim 10^{5} - 10^{-6}\ \text{S m}^{-1}$

(iii) ***અવાહકો* :** તેમની અવરોધકતા ઘણી વધુ (ઘણી ઓછી વાહકતા) હોય છે.

$\rho \sim 10^{11} - 10^{19}\ \Omega\,\text{m}$

$\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-19}\ \text{S m}^{-1}$

ρ અને σના આપેલ મૂલ્યો ફક્ત પરિમાણ દર્શાવે છે, જે આ સીમાઓ (અવધિ)ની બહાર પણ જઈ શકે. અવરોધકતાના આ સાપેક્ષ મૂલ્યો જ ધાતુઓ, અવાહકો અને અર્ધવાહકોને એકબીજાથી જુદા પાડવા માટેના માપદંડો નથી. બીજા કેટલાક તફાવતો પણ છે, જે આ પ્રકરણમાં આગળ વધતાં જઈશું તેમ સ્પષ્ટ થતા જશે. આપણે અર્ધવાહકોનો અભ્યાસ કરીશું.

આ પ્રકરણમાં આપણો હેતુ એવા અર્ધવાહકોનો અભ્યાસ કરવાનો છે, જેઓ :

(i) *પ્રાથમિક (તાત્વિક) અર્ધવાહકો* **:** *Si* અને Ge

(ii) *મિશ્ર (સંયોજન) અર્ધવાહકો* **:** ઉદાહરણ તરીકે :

અકાર્બનિક (Inorganic) : CdS, GaAs, CdSe, InP વગેરે.

કાર્બનિક (Organic) : એન્થ્રાસિન, અશુદ્ધિ ઉમેરેલા થેલોસાયનાઈન્સ વગેરે.

કાર્બનિક પોલિમરો : પોલિપાયરોલ, પોલિએનિલિન, પોલિથિઓફેન વગેરે હોઈ શકે.

હાલમાં મળતા મોટાભાગના સેમીકન્ડક્ટર સાધનો તાત્વિક (પ્રાથમિક) સેમીકન્ડક્ટરો Si કે Ge અને મિશ્ર *ઈનઓર્ગેનિક* સેમિકન્ડકટરોના બનેલા હોય છે. આમ છતાં, 1990 પછી ઓર્ગેનિક સેમિકન્ડક્ટરો અને સેમિકન્ડક્ટીંગ પોલિમરોનો ઉપયોગ કરીને અમુક સેમિકન્ક્ટર સાધનો વિકસાવવામાં આવ્યા જેમણે ભવિષ્યમાં આવનારી પોલીમર ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ અને આણ્વિક (મૉલેક્યુલર) ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ ટેક્નોલૉજીના ઉદ્‌ભવ તરફ ઈશારો કર્યો. આ પ્રકરણમાં આપણે ફક્ત ઈનઓર્ગેનિક સેમિકન્ડક્ટરો પૂરતું ધ્યાન કેન્દ્રિત કરીશું. ખાસ કરીને તાત્વિક (પ્રાથમિક) સેમીકન્ડક્ટરો Si કે Ge પર. અહીંયા, પ્રાથમિક સેમિકન્ડક્ટરોને સમજાવવા માટે અત્રે દર્શાવેલા સામાન્ય સિદ્ધાંતો મોટે ભાગે મિશ્ર સેમિકન્ડક્ટરોને પણ લાગુ પડે છે.

ઊર્જા પટ (બૅન્ડ) પર આધારિત :

બ્હોરના પરમાણ્વિક (એટમિક) મોડેલ મુજબ, *અલગ કરેલા પરમાણુમાં,* તેના કોઈ પણ ઇલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા તે જે કક્ષામાં ફરતો હોય તેના પર આધાર રાખે છે. પરંતુ જ્યારે પરમાણુઓ પાસપાસે આવીને ઘન પદાર્થ બનાવે ત્યારે તેઓ એકબીજાની ખૂબ નજીક હોય છે. આથી, આજુબાજુમાં આવેલા પરમાણુઓના ઈલેક્ટ્રૉનોની બાહ્ય કક્ષાઓ ખૂબ નજીક આવે છે અથવા એકબીજા સાથે વ્યાપ્ત (Overlap) પણ થઈ શકે છે. આના કારણે ઘન પદાર્થમાંની ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિ સ્વતંત્ર પરમાણુમાંની ગતિ કરતા ખૂબ ભિન્ન હોય છે.

સ્ફટીકમાં દરેક ઇલેક્ટ્રૉનને એક ચોક્કસ સ્થિતિ હોય છે તથા કોઈ પણ બે ઇલેક્ટ્રૉનની આસપાસ વિદ્યુતભારોની સમાન ગોઠવણી નથી હોતી. આથી દરેક ઈલેક્ટ્રૉનને એક અલગ *ઊર્જા સ્તર* હોય છે. આ સતત ઊર્જા-ફેરફાર ધરાવતા જુદા જુદા ઊર્જા સ્તરો *ઊર્જા પટ* (*Energy Band*) બનાવે છે. વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉનના ઊર્જા સ્તરો ધરાવતા ઊર્જાપટને *વેલેન્સ બૅન્ડ* કહે છે. વેલેન્સ બૅન્ડની ઉપરના ઊર્જાપટને *કન્ડકશન બૅન્ડ* કહે છે. બાહ્ય ઊર્જાની ગેરહાજરીમાં બધા જ વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉન વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહે છે. જ્યારે કન્ડકશન બૅન્ડનું લઘુત્તમ (Lowest) ઊર્જા સ્તર, વેલેન્સ બૅન્ડના મહત્તમ ઊર્જાસ્તર કરતાં નીચું હોય ત્યારે વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલા ઈલેક્ટ્રૉન સહેલાઈથી કન્ડકશન બૅન્ડમાં જઈ શકે છે. સામાન્ય રીતે કન્ડકશન બૅન્ડ ખાલી હોય છે. પરંતુ જ્યારે તે વેલેન્સ બૅન્ડ પર વ્યાપ્ત (Overlap) થાય ત્યારે ઈલેક્ટ્રૉન તેમાં મુક્ત રીતે ગતિ કરી શકે છે. આવું ધાત્વિક (મેટાલીક) વાહકોમાં હોય છે.

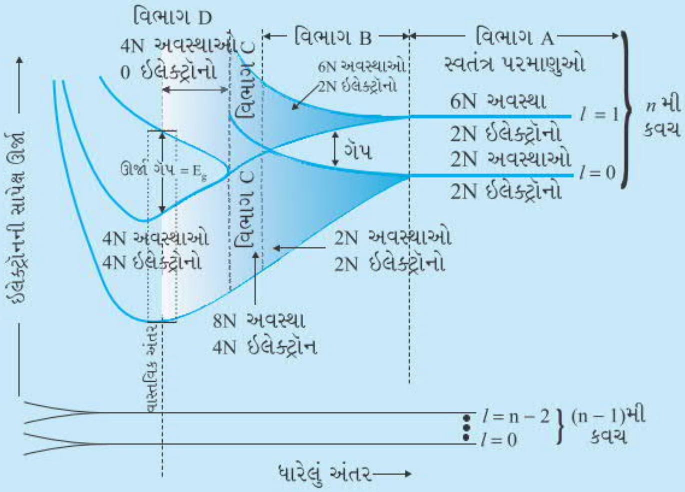
જો કન્ડકશન બૅન્ડ અને વેલેન્સ બૅન્ડ વચ્ચે અમુક જગ્યા હોય તો, વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલા બધા જ ઈલેક્ટ્રૉન બંધિત રહે છે અને કન્ડકશન બૅન્ડમાં એકપણ મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉન હોતો નથી. આથી, દ્રવ્ય અવાહક બને છે. પરંતુ વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલા કેટલાક ઈલેક્ટ્રૉન બાહ્ય ઊર્જા મેળવીને કન્ડકશન બૅન્ડ અને વેલેન્સ બૅન્ડ વચ્ચેની જગ્યા પાર કરી શકે છે. આમ થતાં, આ ઈલેક્ટ્રૉન કન્ડકશન બૅન્ડમાં જાય છે. આ જ સમયે તેઓ વેલેન્સ બૅન્ડમાં રીક્ત (ખાલી) ઊર્જા સ્તરો ઉત્પન્ન કરે છે જેમાં બીજા વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉન આવી શકે. આ ઘટનાથી કન્ડકશન બૅન્ડમાં ઈલેક્ટ્રૉનના કારણે અને વેલેન્સ બૅન્ડમાં રિક્ત સ્થાનોના કારણે વહન થવાની શક્યતા ઊભી થાય છે.

N પરમાણુઓ ધરાવતા Si કે Ge સ્ફટીકમાં શું થાય છે તે જોઈએ. Siમાં સૌથી બહારની કક્ષા ત્રીજી ($n = 3$) કક્ષા છે, જ્યારે Ge માટે તે ચોથી કક્ષા ($n = 4$) છે. સૌથી બહારની કક્ષામાં કુલ 4 ઇલેક્ટ્રૉન ($2s$ અને $2p$ ઇલેક્ટ્રૉન) હોય છે. આથી, સ્ફટીકમાં બહારની કક્ષાના કુલ ઈલેક્ટ્રૉન 4 N છે. બહારની કક્ષામાં મહત્તમ 8 ઈલેક્ટ્રૉન ($2s + 6p$ ઈલેક્ટ્રૉન) રહી શકે. આથી, 4 N વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉન માટે 8 N ઊર્જાસ્તરો (અવસ્થાઓ) મળે છે. આ 8 N અલગ ઊર્જા સ્તરો સતત પટ (બૅન્ડ) બનાવી શકે અથવા તેઓના સ્ફટીકમાં પરમાણુઓ વચ્ચેના અંતર (બોક્ષમાં ઘન પદાર્થો માટે બૅન્ડ થીયરીનો સિદ્ધાંત જુઓ)ને અનુલક્ષીને જુદા જુદા બૅન્ડના જૂથ બનાવી શકાય.

Si અને Geના સ્ફટીક લેટીસોમાં પરમાણુઓ વચ્ચેના અંતરે, 8 N સ્થિતિઓ ધરાવતું ઊર્જા પટ

(બૅન્ડ) બે ભાગમાં વિભાજિત થાય છે, જેમની વચ્ચે E_g જેટલો *ઊર્જા-અંતરાલ* ખાલી છે (આકૃતિ 14.1). નિરપેક્ષ શૂન્ય તાપમાને 4 N વેલેન્સ ઇલેક્ટ્રૉનો વડે સંપૂર્ણ ભરાયેલો નીચેનો બૅન્ડ *વેલેન્સ બૅન્ડ* છે. 4 N ઊર્જા સ્તરો ધરાવતો બીજો બૅન્ડ *કન્ડક્શન બૅન્ડ* છે, જે નિરપેક્ષ શૂન્ય તાપમાને સંપૂર્ણ ખાલી છે.

ઘન પદાર્થો માટે બૅન્ડ થિયરી (સિદ્ધાંત) (BAND THEORY OF SOLIDS)



ધારોકે Si કે Ge સ્ફટિક N પરમાણુઓ ધરાવે છે. દરેક પરમાણુના ઇલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા જુદી-જુદી કક્ષામાં જુદી-જુદી હશે. જો બધા પરમાણુઓ *અલગ અલગ* એટલે કે એકબીજાથી મોટા અંતરે હોય તો ઇલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા સમાન હશે, પરંતુ સ્ફટીકમાં પરમાણુઓ એકબીજાની નજીક (2 થી 3Å) હોય છે અને તેથી ઇલેક્ટ્રૉન એકબીજા સાથે તેમજ આજુબાજુમાં આવેલા પરમાણુઓના કેન્દ્ર (મધ્ય ભાગ) સાથે આંતરક્રિયા કરે છે. સૌથી બહારની કક્ષાઓમાં રહેલા ઇલેક્ટ્રૉન માટે આ વ્યાપ્ત (કે આંતરક્રિયા) વધુ જણાય છે, જ્યારે અંદરની કક્ષાઓ કે કેન્દ્રની નજીક આવેલા ઇલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા પર કોઈ અસર ન થતી હોય. આથી, Si કે Ge સ્ફટીકમાં ઇલેક્ટ્રૉન ઊર્જાઓ સમજવા માટે, આપણે સૌથી બહારની કક્ષામાં આવેલા ઇલેક્ટ્રૉનની ઊર્જાઓમાં થતાં ફેરફાર જ ધ્યાનમાં લેવા જોઈએ. Si માટે સૌથી બહારની કક્ષા ત્રીજી ($n = 3$) છે. જ્યારે Ge માટે તે ચોથી ($n = 4$) છે. સૌથી બહારની કક્ષામાં રહેલા ઇલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા 4 (2*s* અને 2*p* ઇલેક્ટ્રૉન) છે. આથી, સ્ફટીકમાં બહારની કક્ષામાં રહેલા ઇલેક્ટ્રૉનની કુલ સંખ્યા 4 N છે. બહારની કક્ષામાં મહત્તમ 8 ઇલેક્ટ્રૉન (2*s* + 6*s* ઇલેક્ટ્રૉન) રહી શકે. આથી, 4N ઇલેક્ટ્રૉનમાંથી 2N ઇલેક્ટ્રૉન, 2N *s-સ્ટેટસ* (*અવસ્થાઓ*) (કક્ષીય ક્વૉન્ટમ નંબર $l = 0$)માં હોય અને બાકીના 2N ઇલેક્ટ્રૉન ઉપલબ્ધ એવા 6N *p-સ્ટેટસ* (*અવસ્થાઓ*) માં હોય. દેખીતું છે કે કેટલીક *p*-ઇલેક્ટ્રૉન અવસ્થાઓ (સ્ટેટસ) ખાલી છે, જે આકૃતિમાં છેક જમણી બાજુ દર્શાવેલ છે. આ કિસ્સો એકબીજાથી દૂર રહેલા અલગ અલગ સ્વતંત્ર પરમાણુઓ માટેનો (આકૃતિ વિસ્તાર-A) છે.

ધારોકે આ પરમાણુઓ ઘન પદાર્થ બનાવવા માટે એકબીજાની પાસે આવતા જાય છે. સૌથી બહારની કક્ષાઓમાં રહેલા આ ઇલેક્ટ્રૉનની ઊર્જા જુદા-જુદા પરમાણુઓના ઇલેક્ટ્રૉન સાથેની આંતરક્રિયાના કારણે બદલાઈ શકે (વધે કે ઘટે બંને). $l = 1$ માટેના 6N સ્ટેટસ (અવસ્થાઓ)ની ઊર્જા અલગ-અલગ પરમાણુઓ માટે સમાન હતી, તે અવસ્થાઓ વિસ્તરતી જાય છે અને *ઊર્જા બૅન્ડ* (આકૃતિમાં વિસ્તાર -B) રચે છે. તે જ રીતે $l = 0$ માટે 2N સ્ટેટસ (અવસ્થાઓ)ની ઊર્જા અલગ-અલગ પરમાણુઓ માટે સમાન હતી તે વિભાજિત થઈને બીજો બૅન્ડ બનાવે છે. (આકૃતિમાં વિસ્તાર-Bને ધ્યાનથી જુઓ) જે પ્રથમ બૅન્ડથી ઊર્જા *અંતરાલ* વડે જુદો પડે છે.

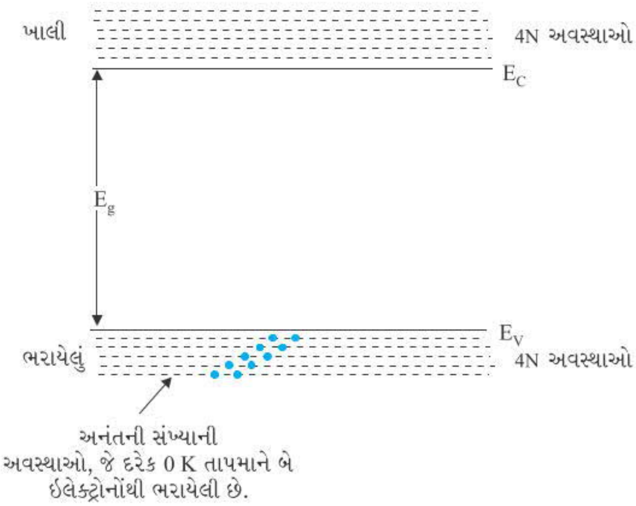
હજી નાના અંતર માટે ફરીથી એ સ્થિતિ આવે છે કે જેમાં બંને બૅન્ડ એકબીજામાં ભેગા થઈ જાય છે. ઉપરના પરમાણુ સ્તરનું વિભાજીત લઘુત્તમ ઊર્જા સ્તર નીચેના પરમાણુ સ્તરના વિભાજીત મહત્તમ (ઉપરના) ઊર્જા સ્તરથી નીચે ગયેલું દેખાય છે. આ વિસ્તારમાં *ઉપરના અને નીચેના ઊર્જા સ્તરો ભેગા થઈ જતા હોય છે. (આકૃતિ વિસ્તાર-C) ત્યાં કોઈ ઊર્જા અંતરાલ હોતો નથી.*

અંતમાં જો પરમાણુઓ વચ્ચેનું અંતર હજી ઘટે તો ઊર્જા બૅન્ડસ ફરી છુટા પડે છે અને *ઊર્જા અંતરાલ* E_g (આકૃતિમાં વિસ્તાર -D) વડે જુદા પડે છે. ઉપલબ્ધ (પ્રાપ્ય) એવા 8N ઊર્જા સ્ટેટસ (અવસ્થાઓ) બે સરખા ભાગ (દરેક નીચેના અને ઉપરના ઊર્જા સ્તરોમાં 4N અવસ્થાઓ)માં *વહેંચાય* છે. અહીંયા, અગત્યનો મુદ્દો એ છે કે નીચેના સ્તરમાં જેટલા સ્ટેટસ પ્રાપ્ય છે (4N), એટલા જ વેલેન્સ ઇલેક્ટ્રૉન (4N) પરમાણુઓમાંથી પ્રાપ્ય છે.

આથી, આ બૅન્ડ (જે *વેલેન્સ બૅન્ડ* કહેવાય છે) સંપૂર્ણ ભરાયેલો હોય છે, જ્યારે ઉપરનો બૅન્ડ સંપૂર્ણ ખાલી છે. ઉપરનો બૅન્ડ *કન્ડક્શન બૅન્ડ* કહેવાય છે.

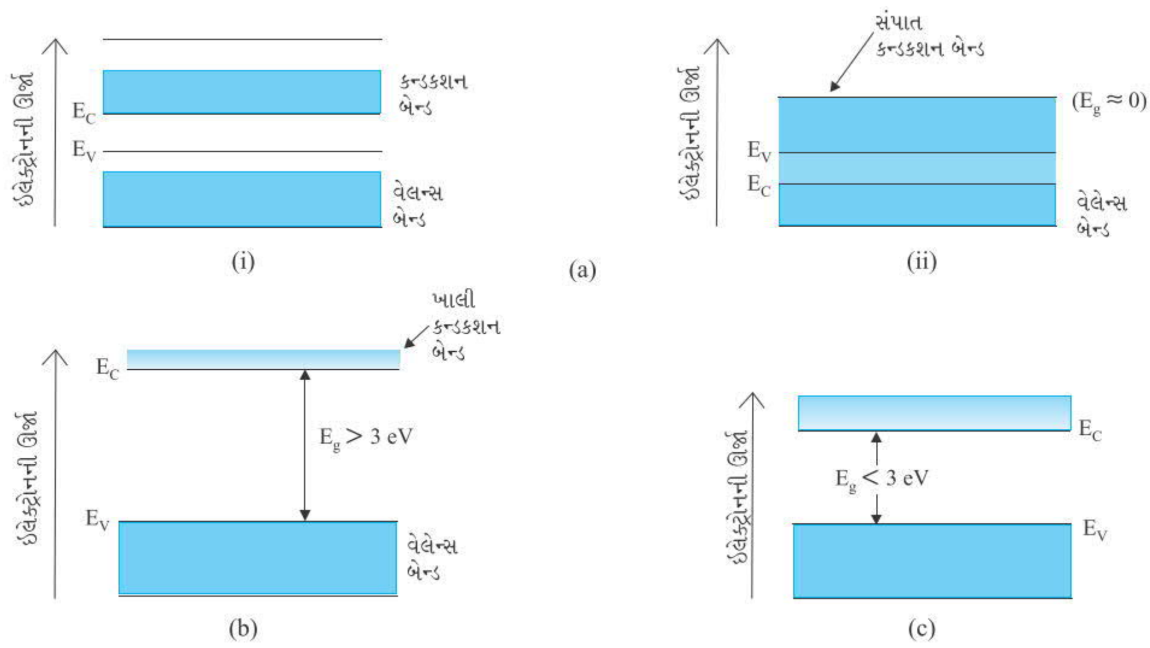
કન્ડકશન બૅન્ડનું લઘુત્તમ ઊર્જા સ્તર E_C વડે દર્શાવ્યું છે અને વેલેન્સ બૅન્ડનું મહત્તમ ઊર્જા સ્તર E_V વડે દર્શાવ્યું છે. E_Cની ઉપર અને E_Vની નીચે મોટી સંખ્યામાં પાસપાસે રહેલા ઊર્જા સ્તરો, આકૃતિ 14.1માં દર્શાવ્યા છે.

વેલેન્સ બૅન્ડની ઉપરની સપાટી અને કન્ડકશન બૅન્ડના તળીયાની સપાટી વચ્ચેની (ખાલી) જગ્યાને *ઊર્જા બૅન્ડ અંતરાલ* (*ઊર્જા ગેપ* E_g) કહે છે. દ્રવ્યના પ્રકારના આધારે તે મોટી, નાની કે શૂન્ય હોઈ શકે છે. આ બધી પરિસ્થિતિઓ આકૃતિ 14.2માં દર્શાવી છે, અને તે નીચે સમજાવેલ છે.



આકૃતિ 14.1 0 K એ અર્ધવાહકમાં ઊર્જા બૅન્ડનાં સ્થાન. ઉપરનો બૅન્ડ, જે કન્ડકશન બૅન્ડ કહેવાય છે, અનંત સંખ્યાના પાસપાસે રહેલા ઊર્જા સ્તરોનો બનેલો છે. નીચેનો બૅન્ડ જે વેલેન્સ બૅન્ડ કહેવાય છે, સંપૂર્ણ રીતે ભરાયેલા પાસપાસે રહેલા ઊર્જા સ્તરોનો બનેલો છે.

કિસ્સો I : તે આકૃતિ 14.2(a)માં દર્શાવેલ પરિસ્થિતિને અનુરૂપ છે. આપણી પાસે એવી ધાતુ હોઈ શકે જેમાં કન્ડકશન બૅન્ડ અંશતઃ (Partially) ભરાયેલો અને વેલેન્સ બૅન્ડ અંશતઃ ખાલી હોય, અથવા કન્ડકશન અને વેલેન્સ બૅન્ડ બંને એકબીજા પર વ્યાપ્ત (Overlap) હોય. જ્યારે એકબીજા પર વ્યાપ્ત હોય ત્યારે વેલેન્સ બૅન્ડના ઇલેક્ટ્રૉન સહેલાઈથી કન્ડકશન બૅન્ડમાં જઈ શકે. આ પરિસ્થિતિમાં વિદ્યુતવહન માટે મોટી સંખ્યામાં ઇલેક્ટ્રૉન પ્રાપ્ય હોય છે. જ્યારે વેલેન્સ બૅન્ડ અંશતઃ ખાલી હોય ત્યારે તેના નીચેના સ્તરમાંથી ઇલેક્ટ્રૉનો ઉપરના સ્તરમાં આવી શકે, જેથી વિદ્યુતવહન શક્ય બને. આથી, આવા દ્રવ્યોનો અવરોધ ઓછો હોય છે અને વાહકતા વધુ હોય છે.



આકૃતિ 14.2 (a) ધાતુઓ (b) અવાહકો અને (c) અર્ધવાહકોના ઊર્જા સ્તરો વચ્ચેનો તફાવત

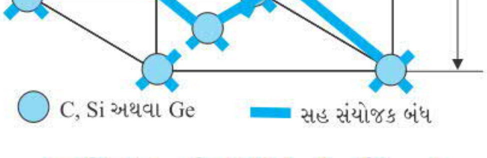
કિસ્સો II : આ કિસ્સામાં, આકૃતિ 14.2(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ, મોટો ઊર્જા ગેપ (અંતરાલ) E_g ($E_g > 3\ eV$) હોય છે. કન્ડકશન બૅન્ડમાં કોઈ ઇલેક્ટ્રૉન હોતા નથી અને તેથી વિદ્યુતવહન શક્ય નથી. નોંધો કે, આ ઊર્જા ગેપ (તફાવત) એટલો મોટો હોય છે કે તાપિય ઉદ્દીપનથી પણ કોઈ ઇલેક્ટ્રૉનને વેલેન્સ બૅન્ડથી કન્ડકશન બૅન્ડ સુધી મોકલી શકાતો નથી. આ કિસ્સો *અવાહકોનો* છે.

કિસ્સો III : આ પરિસ્થિતિ આકૃતિ 14.2(c)માં દર્શાવી છે. અત્રે ચોક્કસ પણ નાનો ઊર્જા ગેપ (અંતરાલ) ($E_g < 3\ eV$) હોય છે. ઊર્જાગેપ (તફાવત) નાનો હોવાથી ઓરડાના તાપમાને વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલા કેટલાક ઇલેક્ટ્રૉન પુરતી ઊર્જા મેળવીને ઊર્જા ગેપ પસાર કરી *કન્ડકશન બૅન્ડમાં* આવે છે. આ ઇલેક્ટ્રૉન (જેમની સંખ્યા નાની હોવા છતાં) કન્ડકશન બૅન્ડમાં ગતિ કરે છે. આથી, *અર્ધવાહકોનો* અવરોધ અવાહકો જેટલો ઊંચો નથી હોતો.

આ પરિચ્છેદમાં આપણે ધાતુઓ, અવાહકો અને અર્ધવાહકોનું વર્ગીકરણ કર્યુ. હવે પછીના પરિચ્છેદમાં તમે અર્ધવાહકોમાં વહનની પ્રક્રિયા શીખશો.

14.3 શુદ્ધ (આંતરિક) અર્ધવાહક (INTRINSIC SEMICONDUCTOR)

આપણે Ge અને Si નો સામાન્ય કિસ્સો લઈશું, જેનું સ્ફટીક બંધારણ આકૃતિ 14.3માં દર્શાવ્યું છે. આવા બંધારણો ડાયમન્ડ (હીરા) પ્રકારના બંધારણ કહેવાય છે. દરેક પરમાણુ ચાર નજીકત્તમ પરમાણુઓ વડે ઘેરાયેલો હોય છે. આપણે જાણીએ છીએ કે Si અને Geને ચાર વેલેન્સ ઇલેક્ટ્રૉન હોય છે. દરેક Si કે Ge પરમાણુ તેમના સ્ફટીક બંધારણમાં તેમના ચારમાંથી એક એક વેલેન્સ ઇલેક્ટ્રૉનની તેમના નજીકતમ પડોશી પરમાણુઓના એક એક ઇલેક્ટ્રૉન સાથે *ભાગીદારી કરે* છે અને આવા દરેક પડોશી પાસેથી એક ઇલેક્ટ્રૉનનો ફાળો મેળવે છે. આ ભાગીદારી પામેલા ઇલેક્ટ્રૉન જોડકાં *કોવેલેન્ટ બંધ* અથવા ફક્ત વેલેન્સ બૉન્ડ (બંધ) બનાવે છે એમ કહેવાય છે. ભાગીદારી પામેલા આ બે ઇલેક્ટ્રૉન તેમના સંકળાયેલા પરમાણુઓ વચ્ચે આગળ-પાછળ ગતિ કરતા રહે છે અને તેમને મજબુત રીતે બાંધી રાખે છે. આકૃતિ 14.3માં દર્શાવેલ Si કે Geના બંધારણને આકૃતિ 14.4માં દ્વિ-પરિમાણમાં રેખાકૃત કર્યું છે, જે કોવેલેન્ટ બંધને વધુ સ્પષ્ટ કરે છે. તે આદર્શ પરિસ્થિતિ દર્શાવે છે, જેમાં એક પણ બંધ તુટેલ નથી (બધા બંધ એમ જ છે). આવી પરિસ્થિતિ નીચા તાપમાનોએ હોય છે. જેમ તાપમાન વધે તેમ આ ઇલેક્ટ્રૉનને વધુ ઉષ્મા ઊર્જા પ્રાપ્ત થાય છે અને કેટલાક ઇલેક્ટ્રૉન (બંધમાંથી) છુટા પડી જાય છે (*મુક્ત* ઇલેક્ટ્રૉન બને છે જે વિદ્યુતવહનમાં ફાળો આપે છે). પરિણામ સ્વરૂપે ઉષ્મા ઊર્જા, સ્ફટીક બંધારણમાં પરમાણુઓનું આયનીકરણ કરે છે અને બંધમાં *ખાલી જગ્યા* ઉત્પન્ન કરે છે જે આકૃતિ 14.5(a)માં દર્શાવેલ છે. બાજુની જગ્યા જ્યાંથી મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન (વિદ્યુતભાર $-q$ સાથે) આવ્યો છે ત્યાં ખાલી જગ્યા છોડી જાય છે. જેના અસરકારક વિદ્યુતભાર ($+q$) હોય છે. અસરકારક ધન વિદ્યુતભાર ધરાવતી આ *ખાલી જગ્યાને હોલ* (*Hole*) કહે છે. હોલ જાણે કે પરિણામી ધન વિદ્યુતભાર ધરાવતો *આભાસી મુક્ત કણ* હોય તેમ વર્તે છે.

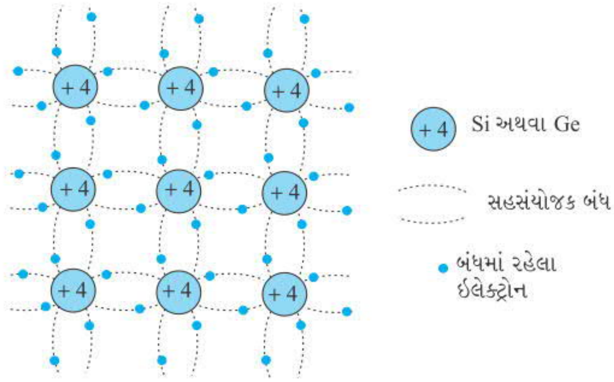


આકૃતિ 14.3 કાર્બન, સિલિકોન કે જર્મેનિયમનું ત્રિપારિમાણિક ડાયમન્ડ પ્રકારનું સ્ફટીક બંધારણ, જેમાં સ્તરો વચ્ચેનું અંતર a અનુક્રમે 3.56, 5.43 અને 5.66 Å છે.

શુદ્ધ (આંતરિક) અર્ધવાહકોમાં, મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા n_e, હોલની સંખ્યા n_h જેટલી હોય છે. એટલે કે,

$$n_e = n_h = n_i \qquad (14.1)$$

જ્યાં, n_i એ શુદ્ધ (Intrinsic) વાહક સંખ્યા છે.

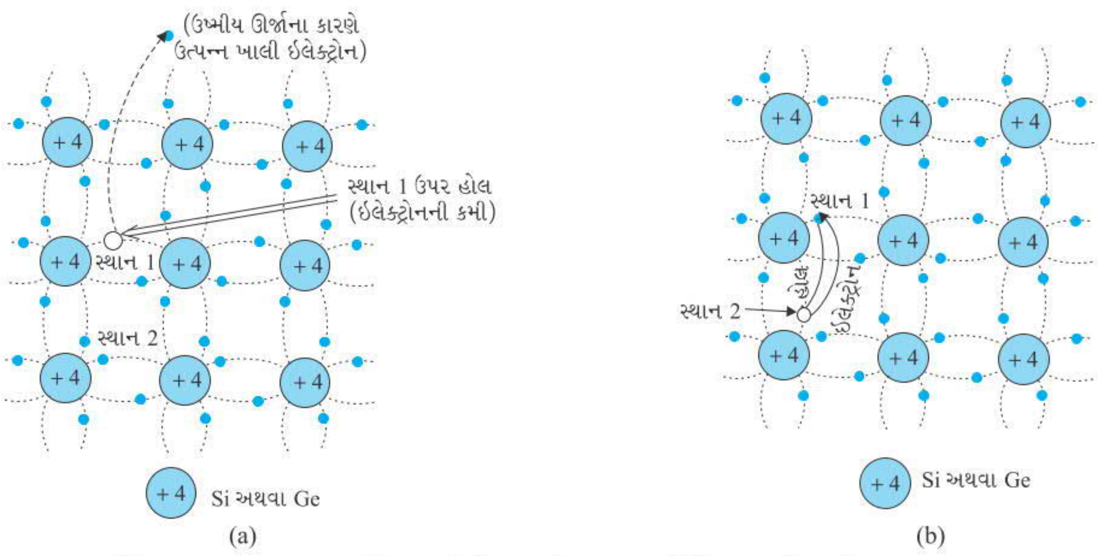


આકૃતિ 14.4 Si કે Geનું દ્વિપારિમાણીક રેખાચિત્ર જે નીચા તાપમાને કોવેલેન્ટ બંધ દર્શાવે છે. +4 સંજ્ઞા Si કે Geના આંતરિક ભાગ (કેન્દ્ર) દર્શાવે છે.

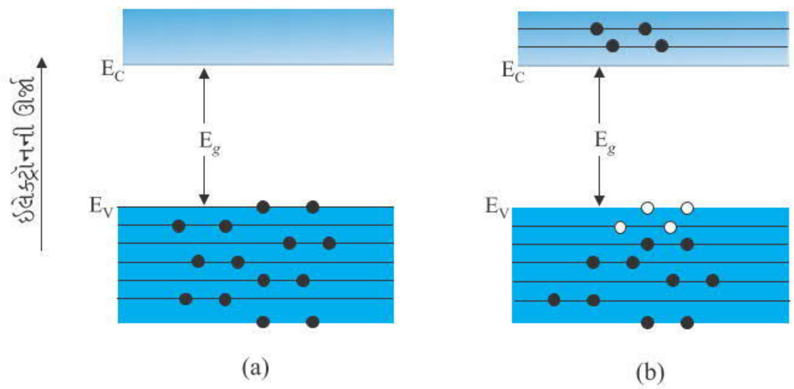
અર્ધવાહકો એવો અદ્વિતિય ગુણધર્મ ધરાવે છે કે જેમાં, ઇલેક્ટ્રૉન ઉપરાંત હોલ પણ ગતિ કરે છે. ધારોકે આકૃતિ 14.5(a)માં દર્શાવ્યા મુજબ સ્થાન 1 પાસે એક હોલ છે. હોલની ગતિ આકૃતિ 14.5(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ જોઈ શકાય છે. સ્થાન 2 પાસે કોવેલેન્ટ બંધમાં રહેલો ઇલેક્ટ્રૉન ખાલી સ્થાન 1 (હોલ)માં કૂદીને જાય. આમ, આ કૂદકા પછી, હોલ સ્થાન 2 પાસે જાય અને સ્થાન 1 પાસે ઇલેક્ટ્રૉન હોય. આમ, દેખીતી રીતે હોલ સ્થાન 1થી સ્થાન 2 સુધી ગતિ કરે છે. નોંધો કે મૂળ જે ઇલેક્ટ્રૉન મુક્ત થયો હતો [આકૃતિ 14.5(a)], તે હોલની ગતિ માટેની આ પ્રક્રિયામાં ભાગ લેતો નથી. મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન સ્વતંત્ર રીતે વાહક (કન્ડકશન) ઇલેક્ટ્રૉન તરીકે ગતિ કરે છે જેના પરિણામે આપેલ વિદ્યુતક્ષેત્રની અસર હેઠળ ઇલેક્ટ્રૉન પ્રવાહ I_e મળે છે. યાદ રહે કે હોલની ગતિ એ જ્યારે પણ સ્ફટિકમાં કોઈ બંધ ખાલી હોય ત્યારે *બંધિત ઇલેક્ટ્રૉન*ની વાસ્તવિક ગતિ દર્શાવવાની એક સગવડ ભરી પદ્ધતિ છે. વિદ્યુતક્ષેત્રની અસર હેઠળ આ હોલ ઋણ સ્થિતિમાન તરફ ગતિ કરે છે, જેના પરિણામે હોલ પ્રવાહ I_h મળે છે. આમ, કુલ વિદ્યુતપ્રવાહ I એ ઇલેક્ટ્રૉન પ્રવાહ I_e અને હોલ પ્રવાહ I_hના સરવાળા જેટલો હોય છે.

$$I = I_e + I_h \tag{14.2}$$

એ નોંધવું જોઈએ કે વાહક (કન્ડકશન) ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલના *ઉદ્ભવની પ્રક્રિયા* ઉપરાંત, ઇલેક્ટ્રૉનના હોલ સાથે *ભળવાની* (*પુનઃ સંયોજનની*) પ્રક્રિયા પણ ચાલુ હોય છે. સંતુલન સ્થિતિમાં વિદ્યુતભાર વાહકોના (જોડકાના) ઉદ્ભવ દર અને એકબીજામાં ભળવાનો દર સમાન હોય છે. ઇલેક્ટ્રૉન જ્યારે હોલ સાથે અથડાય ત્યારે આવું પુનઃ સંયોજન થતું હોય છે.



આકૃતિ 14.5 (a) સામાન્ય તાપમાને ઉષ્મા ઊર્જાના કારણે સ્થાન 1 પાસે હોલના સર્જન અને કન્ડકશન ઇલેક્ટ્રૉનનું રેખાચિત્રણ મોડલ. (b) હોલની શક્ય ઉષ્મીય ગતિ દર્શાવતું સરળ નિદર્શન. ડાબી બાજુ નીચેના કોવેલેન્ટ બોન્ડ (સ્થાન-2) પાસેથી, ઇલેક્ટ્રૉન અગાઉના હોલના સ્થાન 1 પર જાય છે, જે પાછળ તેના સ્થાને હોલ છોડતો જાય છે. જે હોલની સ્થાન 1થી સ્થાન 2 સુધીની દેખીતી ગતિ દર્શાવે છે.



આકૃતિ 14.6 (a) T = 0K એ શુધ્ધ અર્ધવાહક, અવાહક તરીકે વર્તે છે. (b) T > 0K એ ઉષ્મીય રીતે ઉત્પન્ન થયેલા ચાર ઇલેક્ટ્રોન-હોલ જોડકાં. ઘાટા વર્તુળ (•) ઇલેક્ટ્રોનો દર્શાવે છે, જ્યારે ખાલી વર્તુળો (o) હોલ દર્શાવે છે.

T = 0 K એ શુદ્ધ અર્ધવાહક આકૃતિ 14.6(a)માં દર્શાવ્યા મુજબ અવાહક તરીકે વર્તે છે. ઊંચા તાપમાનો (T > 0 K) એ ઉષ્મા ઊર્જાના કારણે વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલા કેટલાક ઇલેક્ટ્રૉન ઉત્તેજિત થઈને કન્ડકશન બૅન્ડમાં આવે છે. T > 0 K એ ઉષ્મીય રીતે ઉત્તેજીત થયેલા ઇલેક્ટ્રૉન, કન્ડકશન બૅન્ડને આંશિક રીતે ભરે (રોકે) છે. આથી, શુદ્ધ અર્ધવાહકોના ઊર્જા બૅન્ડ આકૃતિ 14.6(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ હોય છે. અત્રે કેટલાક ઇલેક્ટ્રૉનને કન્ડકશન બૅન્ડમાં દર્શાવ્યા છે તેઓ વેલેન્સ બૅન્ડમાંથી આવ્યા છે તથા ત્યાં એટલા જ હોલ ઉત્પન્ન કરતાં આવ્યા છે.

ઉદાહરણ 14.1

ઉદાહરણ 14.1 C, Si અને Ge ને એક સમાન લેટીસ બંધારણ છે. શા માટે C અવાહક છે જ્યારે Si અને *Ge* અર્ધવાહક છે ?

ઉકેલ C, Si અને Ge ના બંધ બનાવતા ચાર ઇલેક્ટ્રૉન અનુક્રમે બીજી, ત્રીજી અને ચોથી કક્ષામાં છે. આથી, આ પરમાણુઓમાંથી એક ઇલેક્ટ્રૉનને બહાર કાઢવા માટે જરૂરી ઊર્જા (એટલે કે આયનીકરણ ઊર્જા Eg) Ge માટે સૌથી ઓછી, Si માટે તેનાથી વધુ અને C માટે સૌથી વધુ હોય છે. આથી, વહન માટે મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન સંખ્યા Ge અને Si માં નોંધપાત્ર છે પણ C માટે અવગણ્ય એવી નાની છે.

14.4 અશુદ્ધ (બાહ્ય) અર્ધવાહક (Extrinsic Semiconductor)

શુદ્ધ અર્ધવાહકની વાહકતા તેના તાપમાન પર આધાર રાખે છે, પરંતુ ઓરડાના તાપમાને તેની વાહકતા ઘણી ઓછી હોય છે. હકીકતમાં, આવા અર્ધવાહકોની મદદથી કોઈ અગત્યના ઇલેક્ટ્રૉનિક સાધનો બનાવી ન શકાય. આથી, તેમની વાહકતા વધારવી જરૂરી બને છે. આવું અશુદ્ધિઓનો ઉપયોગ કરવાથી થઈ શકે છે.

જ્યારે નાના પ્રમાણમાં, જેમકે દસ લાખે અમુક સંખ્યા (*ppm*-parts per million)ની યોગ્ય અશુદ્ધિ, શુદ્ધ અર્ધવાહકમાં ઉમેરવામાં આવે છે, ત્યારે અર્ધવાહકની વાહકતા અનેકગણી વધી જાય છે. આવા દ્રવ્યો *અશુદ્ધ અર્ધવાહકો અથવા એક્સ્ટ્રીન્ઝીક અર્ધવાહકો* કહેવાય છે. હેતુપૂર્વક ઇચ્છનીય અશુદ્ધિ ઉમેરવાની ઘટનાને ડોપીંગ (Dopping) કહે છે અને અશુદ્ધિ પરમાણુઓને *ડોપન્ટસ* (*Dopants*) કહે છે. આવા પદાર્થને *ડોપ્ડ સેમિકન્ડક્ટર* પણ કહે છે. ડોપન્ટ (અશુદ્ધિ પરમાણુ) એવો હોવો જોઈએ કે જે શુદ્ધ અર્ધવાહક સ્ફટીકની રચનાને વિકૃત ન કરે. તે સ્ફટીકમાં થોડાક મૂળભૂત અર્ધવાહક પરમાણુ સ્થાન રોકે છે. આમ, કરવા માટેની જરૂરી શરત એ છે કે ડોપન્ટ પરમાણુઓ અને અર્ધવાહક પરમાણુઓના કદ (પરિમાણ) લગભગ સમાન હોવા જોઈએ.

ચાર સંયોજકતા (વેલેન્સી) ધરાવતા (ટેટ્રાવેલન્ટ)Si કે Geમાં ડોપીંગ કરવા માટે બે પ્રકારના ડોપન્ટસનો ઉપયોગ થાય છે.

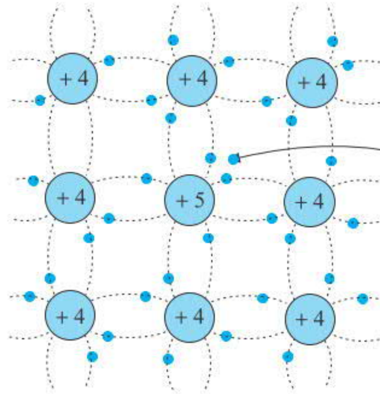
(i) પેન્ટાવેલેન્ટ સંયોજકતા (વેલેન્સી 5) : જેમકે, આર્સેનિક (As), એન્ટિમની (Sb), ફૉસ્ફરસ (P) વગેરે.

(ii) ટ્રાઈવેલેન્ટ સંયોજકતા (વેલેન્સી 3) : જેમકે, ઈન્ડીયમ (In), બોરોન (B), ઍલ્યુમિનિયમ (Al) વગેરે.

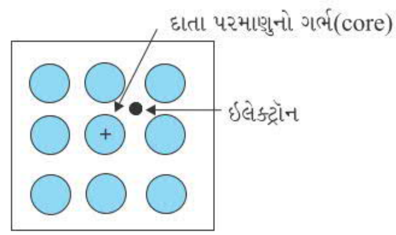
આપણે હવે એ સમજીશું કે કેવી રીતે ડોપીંગ, અર્ધવાહકમાં વાહક વિદ્યુતભારોની સંખ્યા (અને તેથી વાહકતા) બદલે છે. Si અને Ge આવર્ત કોષ્ટક (પિરિયોડીક ટેબલ)ના ચોથા સમુહ (ગ્રુપ)માં આવે છે. આથી, આપણે ડોપીંગ માટેનું તત્વ નજીકના પાંચમાં કે ત્રીજા સમુહ (ગ્રુપ)માંથી પસંદ કરીએ છીએ કે જેથી અપેક્ષા મુજબ ડોપીંગ કરવાના પરમાણુંનું કદ Si કે Geના કદ જેટલું હોય. Si કે Geમાં પેન્ટાવેલેન્ટ અને ટ્રાઈવેલેન્ટ ડોપન્ટ બે સંપૂર્ણ જુદા પ્રકારના અર્ધવાહકો આપે છે જે નીચે સમજાવ્યા છે.

(i) *n-પ્રકારનો અર્ધવાહક*(*n-type Semi-conductor*)

ધારોકે આપણે આકૃતિ 14.7માં દર્શાવ્યા મુજબ Si કે Geને પેન્ટાવેલેન્ટ તત્વ વડે ડોપીંગ કરીએ છીએ. જ્યારે +5 વેલેન્સીવાળા તત્વનો પરમાણુ Si સ્ફટીક બંધારણમાં કોઈ પરમાણુની જગ્યાએ ગોઠવાય છે ત્યારે તેના ચાર ઈલેક્ટ્રૉન આજુબાજુમાં આવેલા ચાર સિલિકોન પરમાણુઓ સાથે બંધ રચે છે. જ્યારે પાંચમો ઈલેક્ટ્રૉન આ જનક પરમાણુ સાથે અત્યંત નબળી રીતે બંધિત રહે છે. કારણ એ છે કે પાંચમો ઈલેક્ટ્રૉન બંધ (બોન્ડ) બનાવવામાં વપરાતા ચાર ઈલેક્ટ્રૉનને પરમાણુના અસરકારક ગર્ભ (Core) ના ભાગ તરીકે જુએ છે. પરિણામે આ ઈલેક્ટ્રૉનને મુક્ત કરવા માટે જરૂરી આયનાઈઝેશન ઊર્જા ઘણી ઓછી હોય છે, અને ઓરડાના તાપમાને પણ તે અર્ધવાહક સ્ફટીકમાં ગતિ કરવા માટે મુક્ત થાય છે. ઉદાહરણ તરીકે આ ઈલેક્ટ્રૉનને પરમાણુમાંથી મુક્ત કરવા જર્મેનિયમ માટે ~ 0.01 eV અને સિલિકોન માટે 0.05 eV ઊર્જા જોઈએ છીએ. આ ઊર્જા ઓરડાના તાપમાને શુદ્ધ અર્ધવાહક માટે પ્રતિબંધિત પટ (Forbidden Band)માંથી કુદકો મારવા માટે જરૂરી ઊર્જા (જર્મેનિયમ માટે લગભગ 0.72 eV અને સિલિકોન માટે લગભગ 1.1 eV) કરતાં ઘણી ઓછી છે. આમ, પેન્ટાવેલેન્ટ પરમાણુ એક વધારાનો ઈલેક્ટ્રૉન વહન (Conduction) માટે આપે છે અને તેથી તે *દાતા* (*Donar*) અશુદ્ધિ કહેવાય છે. વહન માટે પ્રાપ્ય એવા ઈલેક્ટ્રૉનોની સંખ્યાનો આધાર ડોપીંગ (ઉમેરેલ અશુદ્ધિ)ના પ્રમાણ પર છે, અને તે આસપાસના તાપમાનના વધારા પર આધાર રાખતી નથી. બીજી બાજુ Si પરમાણુઓ વડે તાપમાનના વધારા સાથે મુક્ત ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા (અને તેટલી જ હોલની સંખ્યા) ઓછા પ્રમાણમાં વધે છે. ડોપીંગ કરેલા અર્ધવાહકમાં વાહક (કન્ડકશન) ઈલેક્ટ્રૉનની કુલ સંખ્યા n_e, એ દાતા (Donor) પરમાણુઓએ આપેલા ઈલેક્ટ્રૉનના કારણે અને શુદ્ધ વાહકનાં (ઓરડાના તાપમાને ઉત્પન્ન થયેલા ઈલેક્ટ્રૉનનાં) કારણે છે, જ્યારે હોલની કુલ સંખ્યા n_h એ ફક્ત શુદ્ધ વાહકના કારણે છે, પરંતુ હોલના (ઈલેક્ટ્રૉન સાથે) જોડાણની સંખ્યા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા વધતાં વધે છે. પરિણામે, હોલની સંખ્યા હજી ઘટે છે.

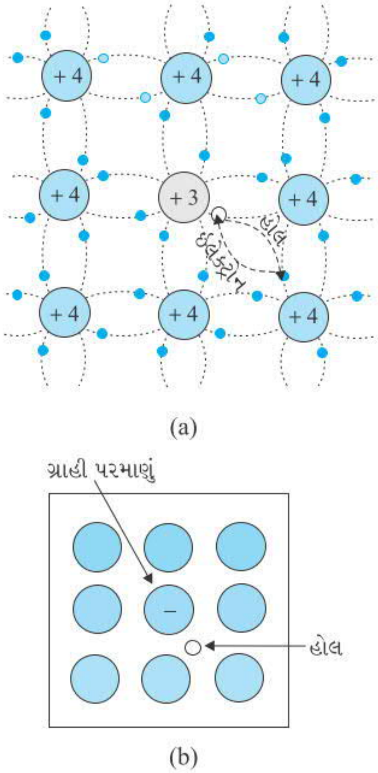


(a)



(b)

આકૃતિ 14.7 (a) પેન્ટાવેલેન્ટ દાતા (Donar) પરમાણુ As, Sb, P વગેરે. જે ટેટ્રાવેલેન્ટ Si કે Geમાં ડોપીંગ કરવાથી *n*-પ્રકારનો અર્ધવાહક આપે છે અને (b) *n*-પ્રકારના પદાર્થ માટે સામાન્ય રીતે ઉપયોગમાં લેવાતું રેખાચિત્ર, જે ફક્ત ડોનર પરમાણુના ચોક્કસ કેન્દ્રોને વધારાના ધન વિદ્યુતભાર અને તેની સાથે સંકળાયેલા વધારાના ઈલેક્ટ્રૉન વડે દર્શાવે છે.



આકૃતિ 14.8 (a) ટ્રાઈવેલેન્ટ ગ્રાહી (સ્વીકારનાર, Accepor) પરમાણુ In, Al, B વગેરે. જે ટેટ્રાવેલેન્ટ Si કે Geના સ્ફટીકમાં ડોપીંગ કરવાથી *p*-પ્રકારનો અર્ધવાહક મળે છે, અને (b) *p*-પ્રકારના પદાર્થ માટે સામાન્ય રીતે ઉપયોગમાં લેવાતું રેખાચિત્ર, જે ફક્ત સ્વીકારનાર પરમાણુના નિશ્ચિત કેન્દ્રોને વધારાના એક અસરકારક ઋણ વિદ્યુતભાર અને તેની સાથે સંકળાયેલા હોલ વડે દર્શાવે છે.

આમ, યોગ્ય પ્રમાણમાં ડોપીંગ કરવાથી કન્ડકશન ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા હોલની સંખ્યા કરતા ઘણી વધારી શકાય. આથી, પેન્ટાવેલેન્ટ અશુદ્ધિ ડોપ કરેલા અશુદ્ધ અર્ધવાહકમાં, ઈલેક્ટ્રૉન *મેજોરિટી* (*બહુસંખ્યક-Majority*) વાહકો બને છે જ્યારે હોલ *માઈનોરિટી* (*અલ્પસંખ્યક-Minority*) *વાહકો* બને છે. આથી, આ અર્ધવાહકોને *n-પ્રકારના અર્ધવાહકો* કહે છે. *n*-પ્રકારના અર્ધવાહકો માટે

$$n_e >> n_h \qquad (14.3)$$

(ii) *p-પ્રકારનો અર્ધવાહક* (*p-type Semiconductor*)

જ્યારે Si કે Geને ટ્રાઈવેલેન્ટ (ત્રણ વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉન ધરાવતી) અશુદ્ધિ, જેમ કે Al, B, In વગેરે વડે ડોપ કરવામાં આવે ત્યારે આવા પદાર્થ મળે છે. આ ડોપીંગ કરવા માટેના પરમાણુને Si કે Ge કરતાં એક ઓછો વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉન હોય છે. આથી આ પરમાણુ આજુબાજુના ત્રણ Si પરમાણુઓ સાથે કોવેલન્ટ (સહસંયોજક) બંધ (બોન્ડ) બનાવી શકે છે. પરંતુ ચોથા Si પરમાણુ સાથે બંધ બનાવવા તેની પાસે ઈલેક્ટ્રૉન હોતો નથી. આથી, ચોથા પડોશી પરમાણુ અને ટ્રાઈવેલેન્ટ પરમાણુ વચ્ચેના બંધમાં આકૃતિ 14.8માં દર્શાવ્યા મુજબ એક ખાલી જગ્યા (Vacancy) કે હોલ હોય છે. સ્ફટીકમાં પડોશી Si પરમાણુને હોલની જગ્યાએ એક ઈલેક્ટ્રૉનની જરૂરિયાત હોવાથી બાજુમાં આવેલા પરમાણુની બહારની કક્ષામાં આવેલો ઈલેક્ટ્રૉન કુદીને આ જગ્યા પૂરે છે, જેના પરિણામે તેના પોતાના મૂળ સ્થાને ખાલી જગ્યા કે હોલ ઉત્પન્ન થાય છે. આમ, કન્ડકશન માટે હોલ પ્રાપ્ત થાય છે. નોંધો કે ટ્રાઈવેલેન્ટ, બહારનો પરમાણુ જ્યારે ચોથા ઈલેક્ટ્રૉનની બાજુના Si પરમાણુ સાથે ભાગીદારી કરે ત્યારે પરિણામ સ્વરૂપે તે ઋણ વિદ્યુતભારીત બને છે. આથી, *p*-પ્રકારના પદાર્થના ડોપન્ટ પરમાણુને આકૃતિ 14.8 (b)માં દર્શાવ્યા મુજબ તેની સાથે સંકળાયેલ હોલ સાથે *એક ઋણ વિદ્યુતભારવાળા કેન્દ્ર* તરીકે ગણવામાં આવે છે. એ દેખીતું છે કે એક *ગ્રાહી* (*સ્વીકારનાર - Acceptor*) પરમાણુ એક હોલ આપે છે. આ હોલ શુદ્ધ અર્ધવાહકમાં (ઓરડાના તાપમાને બનતા) હોલ ઉપરાંત છે, જ્યારે વાહક ઈલેક્ટ્રૉનનું ઉદ્‌ગમ ફક્ત શુદ્ધ અર્ધવાહક જ છે. આમ, આવા પદાર્થ માટે હોલ મેજોરિટી વાહકો અને ઈલેક્ટ્રૉન માઈનોરિટી વાહકો છે. તેથી, ટ્રાઈવેલેન્ટ અશુદ્ધિઓ ડોપ કરેલા અશુદ્ધ અર્ધવાહકો *p-પ્રકારના અર્ધવાહકો* કહેવાય છે.

p-પ્રકારના અર્ધવાહકો માટે (ઈલેક્ટ્રૉન હોલના) પુનઃ સંયોજનની પ્રક્રિયાના કારણે શુદ્ધ (આંતરિક) રીતે ઉત્પન્ન થયેલા ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા (n_e) થાય છે. આથી, *p*-પ્રકારના અર્ધવાહકો માટે

$$n_h >> n_e \qquad (14.4)$$

નોંધો કે સ્ફટીક સમગ્રપણે વિદ્યુતભાર તટસ્થતા જાળવી રાખે છે. કારણકે, વધારાના વિદ્યુતભાર વાહકોનો વિદ્યુતભાર સ્ફટીકમાં રહેલા આયનાઈઝ્ડ કેન્દ્રો (ગર્ભ) જેટલો જ અને વિરુદ્ધ પ્રકારનો હોય છે.

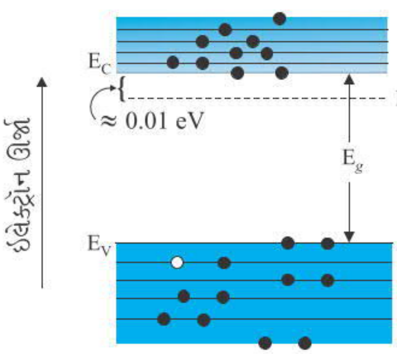
અશુદ્ધ (બાહ્ય) અર્ધવાહકોમાં મેજોરિટી વિદ્યુતભાર વાહકોની સંખ્યા પુષ્કળ હોવાથી ઉષ્મીય રીતે ઉત્પન્ન થયેલા માઈનોરિટી વિદ્યુતભાર વાહકોને મેજોરિટી વિદ્યુતભાર વાહકો સાથે અથડાવાની શક્યતા વધુ હોય છે અને આમ, તે નાશ પામતા હોય છે. આથી, અશુદ્ધ પરમાણુઓ જે એક પ્રકારના મોટી સંખ્યાના વિદ્યુતભાર વાહકો પ્રદાન કરે છે, તે મેજોરિટી વિદ્યુતભાર વાહકો બને છે અને પરોક્ષ રીતે (ઉષ્મીય રીતે) ઉત્પન્ન થયેલા માઈનોરિટી વાહકોની સંખ્યા ઘટાડવામાં મદદ કરે છે.

અર્ધવાહકના ઊર્જા બૅન્ડ (પટ)ની રચના ડોપીંગને કારણે બદલાય છે. અશુદ્ધ અર્ધવાહકોમાં દાતા અશુદ્ધિઓ અને સ્વીકારનાર (એસેપ્ટર) અશુદ્ધિઓના કારણે વધારાના ઊર્જા સ્તરો (E_D અને E_A)પણ હાજર હોય છે. *n*-પ્રકારના, Si અર્ધવાહકમાં, દાતા ઊર્જા સ્તર E_D એ કન્ડકશન બૅન્ડના તળિયાના સ્તરથી થોડુંક નીચે હોય છે અને આ સ્તરમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન બહુ ઓછી ઊર્જા આપવાથી પણ કન્ડકશન બૅન્ડમાં જાય

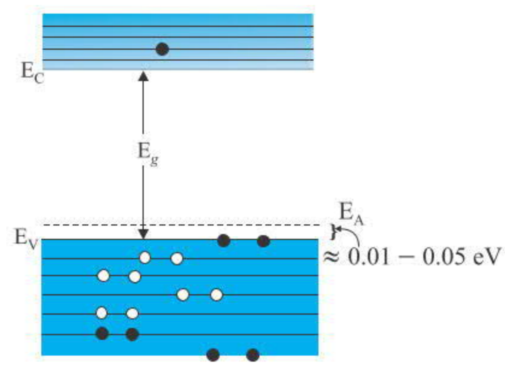
છે. ઓરડાના તાપમાને, મોટાભાગના દાતા (ડોનર) પરમાણુઓ આયનીકૃત થાય છે, પરંતુ Siનાં ઘણાં ઓછા ($\sim 10^{12}$) પરમાણુઓ આયનીકૃત થાય છે. આથી, કન્ડકશન બૅન્ડમાં મોટાભાગના ઇલેક્ટ્રૉનો દાતા અશુદ્ધિઓમાંથી મળે છે. જે આકૃતિ 14.9 (a)માં દર્શાવેલ છે. તે જ રીતે p-પ્રકારના અર્ધવાહક માટે એક્સેપ્ટર (સ્વીકારનાર) ઊર્જા સ્તર E_A, વેલેન્સ બૅન્ડ E_Vના ટોચના સ્તરથી થોડુંક ઉપર હોય છે, જે આકૃતિ 14.9 (b)માં દર્શાવેલ છે. થોડીક ઊર્જા આપવાથી પણ વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલો ઇલેક્ટ્રૉન E_Aમાં પહોંચે છે અને એક્સેપ્ટરને ઋણવિદ્યુત ભાર સાથે આયનીકૃત કરે છે (બીજી રીતે આપણે એમ પણ કહી શકીએ કે થોડીક ઊર્જા આપવાથી સ્તર E_Aમાંથી હોલ વેલેન્સ બૅન્ડમાં નીચે જાય છે, જ્યારે બાહ્ય ઊર્જા પ્રાપ્ત થાય છે ત્યારે ઇલેક્ટ્રૉનો ઉપર આવે છે અને હોલ નીચે જાય છે). ઓરડાના તાપમાને મોટાભાગના ગ્રાહી (એક્સેપ્ટર) પરમાણુઓ આયનીકૃત થાય છે, જે વેલેન્સ બૅન્ડમાં હોલ ઉત્પન્ન કરે છે. આમ, ઓરડાના તાપમાને વેલેન્સ બૅન્ડમાં હોલની સંખ્યા ઘનતા મોટે ભાગે અશુદ્ધ અર્ધવાહકમાં રહેલી અશુદ્ધિના કારણે હોય છે. *ઉષ્મીય સંતુલન*માં ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલની સંખ્યા

$$n_e n_h = n_i^2 \qquad (14.5)$$

વડે અપાય છે. ઉપરની સમજુતી આશરે અને કાલ્પનિક (Hypothetical) હોવા છતાં તે ધાતુઓ, અવાહકો અને અર્ધવાહકો (શુદ્ધ અને અશુદ્ધ) વચ્ચેનો તફાવત સરળ રીતે સમજાવવામાં મદદરૂપ છે. C, Si અને Geની અવરોધકતાનો તફાવત તેમના કન્ડકશન અને વેલેન્સ બૅન્ડ વચ્ચેના ઊર્જા તફાવત પર આધાર રાખે છે. C (હીરા), Si અને Ge માટે આ ઊર્જા તફાવતો અનુક્રમે 5.4 eV, 1.1 eV અને 0.7 eV છે. Sn પણ સમૂહ-IVમાં આવતું તત્વ છે પરંતુ તે ધાતુ છે કારણકે તેના માટે ઊર્જા તફાવત 0 eV છે.



(a) T > 0 K
એક ઉષ્માજનિત ઇલેક્ટ્રૉન-હોલ જોડકું, તથા દાતા પરમાણુઓના 9 ઇલેક્ટ્રૉન



(b) T > 0 K

આકૃતિ 14.9 (a) n-પ્રકારના અર્ધવાહક અને (b) p-પ્રકારના અર્ધવાહક માટે T > 0 K તાપમાને ઊર્જા બૅન્ડ

ઉદાહરણ 14.2 ધારોકે શુદ્ધ Si સ્ફટીકમાં 5×10^{28} પરમાણુ/m^3 છે. તેને 1 *ppm* ઘનતા (સાંદ્રતા) સાથે As વડે ડોપ કરવામાં આવે છે. ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલની સંખ્યા ગણો. $n_i = 1.5 \times 10^{16} m^{-3}$ આપેલ છે.

ઉકેલ નોંધો કે ઉષ્મીય રીતે ઉત્પન્ન થયેલા ઇલેક્ટ્રૉન ($n_i \sim 10^{16} m^{-3}$) છે, જે ડોપીંગ વડે મળતા ઇલેક્ટ્રૉનની સરખામણીમાં અવગણી શકાય તેટલા છે. આથી, $n_e \approx n_D$. પરંતુ $n_e n_h = n_i^2$ હોવાથી હોલની સંખ્યા

$$n_h = (2.25 \times 10^{32}) / (5 \times 10^{22})$$
$$\sim 4.5 \times 10^9 m^{-3}$$

ઉદાહરણ 14.2

14.5 *p-n* જંક્શન (*p-n* JUNCTION)

ડાયોડ, ટ્રાન્ઝિસ્ટર જેવી ઘણી રચનાઓ માટે *p-n* જંક્શન એ પ્રાથમિક બંધારણ એકમ છે. અન્ય અર્ધવાહક રચનાઓનું કાર્ય સમજવા માટે જંક્શનનું કાર્ય સમજવું ખૂબ ઉપયોગી છે. આપણે હવે એ સમજવા પ્રયત્ન કરીશું કે જંક્શન કેવી રીતે રચાય છે અને આપેલ બાહ્ય વૉલ્ટેજ (જેને *બાયસ* પણ કહે છે)ની અસર હેઠળ તે કેવી રીતે વર્તે છે.

14.5.1 *p-n* જંક્શનની રચના (*p-n* Junction Formation)

Formation and working of p-n junctiondiode
http://www.mtmi.vu.lt/pfk/funkc_dariniai/diod/p-n_devices.htm

PHYSICS

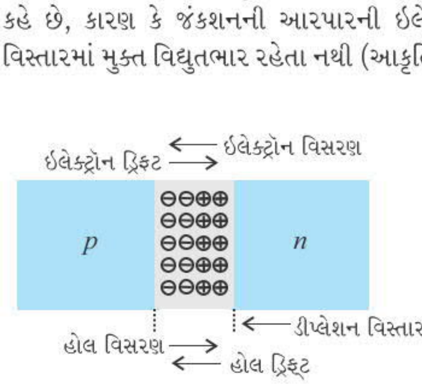
p-પ્રકારના સિલિકોન (*p*-Si) અર્ધવાહકનું પાતળું સ્તર (કપોટી) વિચારો. નિશ્ચિત, થોડા પ્રમાણમાં પેન્ટાવેલેન્ટ અશુદ્ધિ ઉમેરવાથી *p*-Si સ્તરના/પતરીના થોડાક ભાગને *n*-Siમાં ફેરવી શકાય. એવી ઘણી બધી પ્રક્રિયાઓ છે જેના વડે અર્ધવાહક રચી શકાય. હવે આ પતરી (સ્તર) *p*-વિસ્તાર અને *n*-વિસ્તાર ધરાવે છે તથા *p* અને *n* વિસ્તારો વચ્ચે ધાત્વિક જંક્શન પણ ધરાવે છે.

p-n જંક્શન રચવાની ઘટના દરમિયાન બે અગત્યની પ્રક્રિયાઓ થાય છે : *વિસરણ* (*Diffusion*) અને *વહન* (*Drift*).

આપણે જાણીએ છીએ કે, *n*-પ્રકારના અર્ધવાહકમાં ઇલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા ઘનતા (એકમ કદ દીઠ ઇલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા), હોલની સંખ્યા ઘનતા કરતાં વધુ હોય છે. તે જ રીતે, *p*-પ્રકારના અર્ધવાહકમાં, હોલની સંખ્યા ઘનતા, ઇલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા ઘનતા કરતાં વધુ હોય છે. *p-n* જંક્શન બનવાની ઘટના દરમિયાન *p* અને *n*-તરફના વિસ્તારોમાં, સંખ્યા ઘનતામાં તફાવત હોવાથી *p*-વિસ્તારમાંથી હોલ *n*-વિભાગ તરફ ($p \rightarrow n$) વિસરણ (Diffusion) પામે છે, અને *n*-વિસ્તારમાંથી ઇલેક્ટ્રૉન *p*-વિસ્તાર તરફ ($n \rightarrow p$) વિસરણ પામે છે. વિદ્યુતભારોની આ પ્રકારની ગતિના કારણે જંક્શનમાંથી વિસરણ (Diffusion) પ્રવાહ વહે છે.

જ્યારે ઇલેક્ટ્રૉન $n \rightarrow p$ તરફ જાય છે, ત્યારે પાછળ તે *n*-વિસ્તારમાં આયનીકૃત ડોનર રાખતો જાય છે. આ આયનીકૃત ડોનર (ધન વિદ્યુતભારિત) ગતિશીલ નથી (સ્થિર હોય છે) કારણ કે તે આજુબાજુ પરમાણુઓ વડે બંધિત હોય છે. જેમ ઇલેક્ટ્રૉન $n \rightarrow p$ તરફ વિસરણ ચાલુ રાખે છે, તેમ ધન વિદ્યુતભાર ધારિત સ્તર (અથવા ધન સ્પેસ-ચાર્જ વિસ્તાર) જંક્શનના *n*-તરફના વિસ્તારમાં રચાતું જાય છે.

તે જ રીતે સંખ્યા ઘનતા તફાવતના કારણે જ્યારે હોલ $p \rightarrow n$ તરફ વિસરણ પામે છે ત્યારે તે પાછળ આયનીકૃત સ્વીકારનાર (એક્સેપ્ટર) (ઋણ વિદ્યુતભારીત) છોડતા જાય છે જે ગતિશીલ નથી. જેમ હોલ વિસરણ પામતા જાય છે તેમ ઋણ વિદ્યુતભારનું એક સ્તર ઋણ સ્પેસ-ચાર્જ વિસ્તાર, જંક્શનના *p*-તરફના વિસ્તારમાં રચાતું જાય છે. જંક્શનની બંને બાજુના આ સ્પેશ ચાર્જ વિસ્તારને *ડીપ્લેશન વિસ્તાર* કહે છે, કારણ કે જંક્શનની આરપારની ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલની પ્રારંભિક ગતિવિધીને લીધે આ વિસ્તારમાં મુક્ત વિદ્યુતભાર રહેતા નથી (આકૃતિ 14.10). ડીપ્લેશન વિસ્તારની જાડાઈ માઈક્રોમીટરના દશમા ભાગના ક્રમની હોય છે. જંક્શનના *n*-તરફ ધન સ્પેશ ચાર્જ વિસ્તાર અને *p*-તરફ ઋણ સ્પેશ ચાર્જ વિસ્તાર ને લીધે, ધન વિદ્યુતભાર તરફથી ઋણ વિદ્યુતભાર તરફનું વિદ્યુતક્ષેત્ર ઉત્પન્ન થાય છે. આ વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે, જંક્શનના *p*-તરફનો ઇલેક્ટ્રૉન *n*-તરફ અને *n*-તરફનો હોલ જંક્શનની *p*-તરફની દિશામાં ગતિ કરે છે. વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે થતી વિદ્યુતભારોની આ ગતિને ડ્રિફ્ટ (વહન) કહે છે.

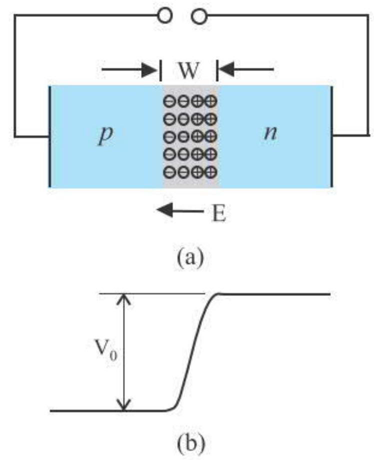


આકૃતિ 14.10 (a) *p-n* જંક્શન રચનાની પ્રક્રિયા

આમ, ડ્રિફ્ટ પ્રવાહ શરૂ થાય છે. જે વિસરણ (ડિફ્યુઝન) પ્રવાહની વિરૂદ્ધ દિશામાં હોય છે (આકૃતિ 14.10).

શરૂઆતમાં ડિફ્યુઝન પ્રવાહ મોટો હોય છે અને ડ્રીફ્ટ પ્રવાહ નાનો હોય છે. જેમ ડિફ્યુઝન (વિસરણ) પ્રક્રિયા આગળ વધે, તેમ જંક્શનની બંને બાજુના સ્પેશ-ચાર્જ વિસ્તાર મોટા થતા જાય છે, જે વિદ્યુતક્ષેત્રની તીવ્રતા વધારે છે અને તેથી ડ્રિફ્ટ પ્રવાહ પણ વધારે છે. જ્યાં સુધી ડિફ્યુઝન પ્રવાહ અને ડ્રિફ્ટ પ્રવાહ સરખા ન થાય ત્યાં સુધી આ પ્રક્રિયા ચાલ્યા કરે છે. આ રીતે *p-n* જંક્શન રચાય છે. સંતુલનમાં રહેલા *p-n* જંક્શનમાંથી *કોઈ ચોખ્ખો* વિદ્યુત પ્રવાહ વહેતો નથી.

n-વિસ્તારમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન સંખ્યા ઘટવા તથા *p*-વિસ્તારમાં ઈલેક્ટ્રૉન સંખ્યા વધવાના કારણે જંક્શનની બંને બાજુના વિસ્તારમાં સ્થિતિમાનનો તફાવત સર્જાય છે. આ સ્થિતિમાનની ધ્રુવીયતા એવી હોય છે કે જે વિદ્યુતવાહકોના પ્રવાહને રોકે કે જેથી સંતુલનની સ્થિતિ સર્જાય. આકૃતિ 14.11માં સંતુલન સ્થિતિમાં રહેલ *p-n* જંક્શન અને જંક્શનની આસપાસ સ્થિતિમાન દર્શાવ્યું છે. *n*-વિસ્તાર ઈલેક્ટ્રૉન ગુમાવે છે જ્યારે *p*-વિસ્તાર ઈલેક્ટ્રૉન મેળવે છે. આથી, *p*-વિસ્તારની સાપેક્ષે *n*-વિસ્તાર ધન (વિદ્યુતભારીત) બને છે. આ સ્થિતિમાન ઈલેક્ટ્રૉનની *n*-વિસ્તારમાંથી *p*-વિસ્તાર તરફની ગતિને રોકતું હોવાથી, તેને *બેરિયર પોટેન્શિયલ (સ્થિતિમાન)* પણ કહે છે.



આકૃતિ 14.11 (a) સંતુલિત સ્થિતિમાં ડાયોડ (V = 0), (b) બાયસ (વોલ્ટેજ) આપ્યા પહેલાનું બેરિયર પોટેન્શિયલ

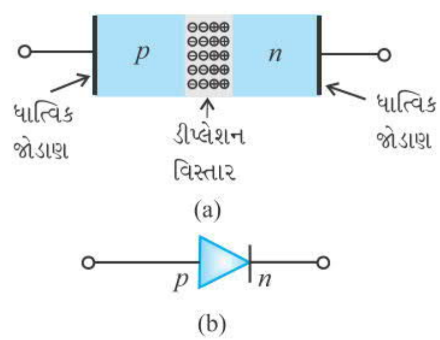
ઉદાહરણ 14.3 : શું આપણે *p*-પ્રકારના અર્ધવાહક ચોસલાને ભૌતિક રીતે બીજા *n*-પ્રકારના અર્ધવાહક સાથે જોડીને *p-n* જંક્શન બનાવી શકીએ ?

ઉકેલ : ના ! કોઈ પણ ચોસલું ભલેને ગમે તેટલું સપાટ હોય, તો પણ સ્ફટિકમાંના આંતર પરમાણ્વિક અંતર (~ 2 થી 3)થી તો વધુ ખરબચડું હોય જ અને તેથી પરમાણ્વિક સ્તરે *સતત જોડાણ* શક્ય નથી. વહેતા વિદ્યુતભાર વાહકો માટે આ જંક્શન *અસતત* (*Discontinuity*) વિસ્તાર તરીકે કાર્ય કરશે.

ઉદાહરણ 14.3

14.6 અર્ધવાહક ડાયોડ (Semiconductior Diode)

અર્ધવાહક ડાયોડ [આકૃતિ 14.12(a)] મૂળભૂત રીતે તો બાહ્ય વોલ્ટેજ લગાડવા માટે છેડાઓ પર ધાત્વિક જોડાણ ધરાવતું *p-n* જંક્શન છે. તે બે વિદ્યુત-અગ્રો વાળી રચના છે. સાંકેતિક રીતે *p-n* જંક્શન ડાયોડને આકૃતિ 14.12(b) મુજબ દર્શાવી શકાય છે.



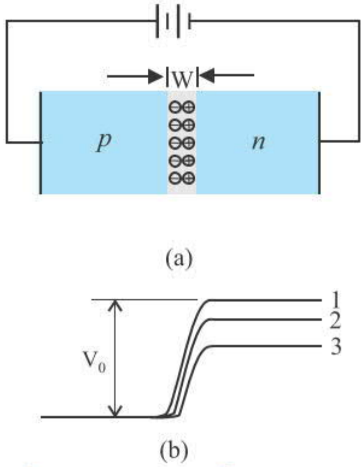
આકૃતિ 14.12 (a) અર્ધવાહક ડાયોડ, (b) *p-n* જંક્શન ડાયોડની સંજ્ઞા

તીરની દિશા વિદ્યુતપ્રવાહની રૂઢિગત (પ્રચલિત) દિશા દર્શાવે છે (જ્યારે ડાયોડ ફોરવર્ડ બાયસમાં હોય). ડાયોડના બે છેડા વચ્ચે બાહ્ય વોલ્ટેજ V લગાડીને સંતુલન બેરીયર પોટેન્શિયલ બદલી શકાય છે. *p-n* જંક્શન ડાયોડની સંતુલન પરિસ્થિતિ (બાયસ વોલ્ટેજ આપ્યા વગરની) આકૃતિ 14.11 (a) અને (b)માં દર્શાવી છે.

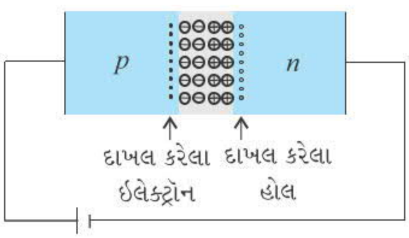
14.6.1 ફોરવર્ડ બાયસની અસર હેઠળ *p-n* જંક્શન ડાયોડ (*p-n* Junction Diode under Forward Bias)

જ્યારે અર્ધવાહક ડાયોડના બે છેડા વચ્ચે બાહ્ય વોલ્ટેજ V એવી રીતે આપવામાં આવે કે જેથી *p*-વિસ્તારને બૅટરીના ધન છેડા સાથે અને *n*-વિસ્તારને બૅટરીના ઋણ છેડા સાથે જોડવામાં આવે [આકૃતિ 14.13(a)], ત્યારે તેને *ફોરવર્ડ બાયસ* કર્યો કહેવાય છે.

આપેલ વોલ્ટેજ ડીપ્લેશન વિસ્તારના બે છેડા વચ્ચે લાગે છે અને જંક્શનના *p*-વિસ્તાર અને *n*-વિસ્તાર વચ્ચેનો સ્થિતિમાનનો તફાવત નહીંવત હોય છે. (આનું કારણ એ છે કે, ડીપ્લેશન



આકૃતિ 14.13 (a) ફોરવર્ડ બાયસ હેઠળ p-n જંકશન ડાયોડ, (b) બેરિયર પોટેન્શિયલ (1) બૅટરી વગર, (2) ઓછા બૅટરી વોલ્ટેજ અને (3) વધુ બૅટરી વોલ્ટેજ



આકૃતિ 14.14
માઇનોરિટી વાહક ઇન્જેકશન

વિસ્તાર કે જેમાં કોઈ ગતિ કરી કરી શકે તેવા વિદ્યુતભાર હોતા નથી, તેનો અવરોધ n-વિસ્તાર અને p-વિસ્તારના અવરોધ કરતાં ઘણો વધારે હોય છે). લાગુ પાડેલ વોલ્ટેજ (V)ની દિશા આ રચનાની અંદરના વોલ્ટેજ V_0 કરતાં વિરૂદ્ધ હોય છે. પરિણામે, ડીપ્લેશન સ્તરની પહોળાઈ ઘટે છે અને બેરિયરની ઊંચાઈ ઘટે છે [આકૃતિ 14.13(b)]. ફોરવર્ડ બાયસની અસર હેઠળ પરિણામી બેરિયર ઊંચાઈ $(V_0 - V)$ હોય છે.

જો લગાડેલ વોલ્ટેજ ઓછો હોય, તો બેરીયર પોટેન્શિયલ સંતુલન સ્થિતિથી થોડુંક જ ઘટશે અને દ્રવ્યમાંના થોડીક સંખ્યાના વાહકો જ, જે સૌથી ઉપરના ઊર્જા સ્તરોમાં હોય તે, પુરતી ઊર્જા મેળવીને જંકશનમાંથી પસાર થશે. આમ, વિદ્યુતપ્રવાહ પણ ઓછો હશે. આપણે જો લગાડેલ વોલ્ટેજ નોંધપાત્ર વધારીએ તો બેરિયર પોટેન્શિયલની ઊંચાઈ ઘટશે અને વધારે વિદ્યુત ભાર વાહકો પુરતી ઊર્જા મેળવશે. આમ, વિદ્યુતપ્રવાહ વધે છે.

લગાડેલ વોલ્ટેજના કારણે, n-વિસ્તારમાંના ઇલેક્ટ્રૉન ડીપ્લેશન વિસ્તાર પસાર કરીને p-વિસ્તારમાં આવે છે (જ્યાં તેઓ માઇનોરિટી વાહકો કહેવાય). તે જ રીતે, p-વિસ્તારમાંથી હોલ જંકશન પસાર કરીને n-વિસ્તારમાં પહોંચે છે (જ્યાં તેઓ માઇનોરિટી વાહકો બને છે). ફોરવર્ડ બાયસની અસર હેઠળ આ પ્રક્રિયાને માઇનોરિટી વાહક ઈન્જેકશન (દાખલ કરવું) કહેવાય છે. જંકશનની સીમા પાસે, બંને બાજુ, માઇનોરિટી વાહકોની સંખ્યા ઘનતા જંકશનથી દૂરના છેડાઓ કરતાં ઘણી વધે છે.

આ સંખ્યા ઘનતાના તફાવત (ઢોળાવ-Gradient)ના કારણે p-તરફ દાખલ થયેલા ઇલેક્ટ્રૉન જંકશનની p-તરફની ધાર પાસેથી p-વિસ્તારના બીજા છેડે પહોંચે છે. તે જ રીતે, n-તરફ દાખલ થયેલા હોલ, જંકશનની n-તરફની ધારથી n-વિસ્તારના બીજા છેડે પહોંચે છે (આકૃતિ 14.14). વિદ્યુતભાર વાહકોની બંને તરફની આ ગતિના કારણે વિદ્યુતપ્રવાહ રચાય છે. ડાયોડનો કુલ ફોરવર્ડ વિદ્યુતપ્રવાહ એ હોલ ડિફ્યુઝન પ્રવાહ અને રૂઢિગત ઇલેક્ટ્રૉન ડિફ્યુઝન પ્રવાહના સરવાળા જેટલો હોય છે. આ પ્રવાહનું મૂલ્ય લગભગ mAના ક્રમનું હોય છે.

14.6.2 રીવર્સ બાયસની અસર હેઠળ p-n જંકશન ડાયોડ (p-n Junction Diode Under Reverse Bias)

જ્યારે ડાયોડના બે છેડા વચ્ચે બાહ્ય વૉલ્ટેજ (V) એવી રીતે લગાડવામાં આવે કે જેથી તેનો n-છેડો ધન અને p-છેડો ઋણ હોય, ત્યારે તેને *રીવર્સ બાયસ* કહે છે [આકૃતિ 14.15(a)]. મોટાભાગનો લગાડેલ વોલ્ટેજ ડીપ્લેશન વિસ્તારમાં લાગે છે. આપેલ વોલ્ટેજની દિશા બેરીયર પોટેન્શિયલની દિશામાં હોય છે. આથી, બેરિયરની ઊંચાઈ વધે છે અને વિદ્યુતક્ષેત્રમાં ફેરફાર થવાથી ડીપ્લેશન વિસ્તાર પહોળો થાય છે. રીવર્સ બાયસની અસર હેઠળ પરિણામી બેરિયર ઊંચાઈ $(V_0 + V)$, જેટલી હોય છે [આકૃતિ 14.15(b)]. આના કારણે ઇલેક્ટ્રૉનનો $n \rightarrow p$ તરફનો પ્રવાહ અને હોલનો $p \rightarrow n$ તરફનો પ્રવાહ રૂંધાય છે. આથી, ડિફ્યુઝન પ્રવાહ ફોરવર્ડ બાયસની સ્થિતિમાંના ડાયોડની સરખામણીમાં ઘણો બધો ઘટી જાય છે.

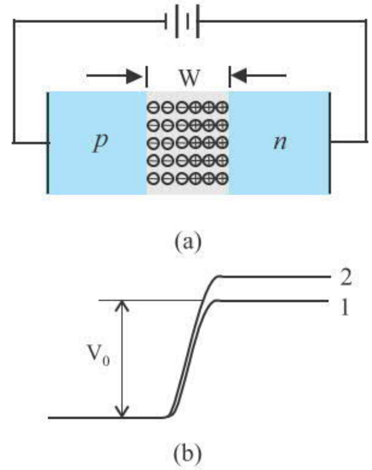
જંકશનના વિદ્યુતક્ષેત્રની દિશા એવી હોય છે કે જેથી જો p-તરફના ઇલેક્ટ્રૉન કે n-તરફના હોલ તેમની અસ્તવ્યસ્ત ગતિ દરમિયાન જંકશનની પાસે આવે, તો તે મેજોરિટી વિસ્તાર તરફ ધકેલાઈ જાય છે. વિદ્યુતવાહકોના આ ડ્રિફ્ટ (ધકેલાઈ જવા)ને કારણે વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે. આ ડ્રિફ્ટ પ્રવાહ અમુક μAના ક્રમનો હોય છે. આ પ્રવાહ ઘણો ઓછો હોય છે, કારણકે તે વાહકોની માઇનોરિટી બાજુથી જંકશનની આરપાર મેજોરિટી તરફની ગતિના કારણે હોય છે. ફોરવર્ડ બાયસ દરમિયાન પણ ડ્રિફ્ટ પ્રવાહ હાજર હોય છે પરંતુ તે દાખલ થયેલા (ઈન્જેક્ટ થયેલા) વિદ્યુત વાહકોના કારણે મળતા mAના ક્રમના પ્રવાહની સરખામણીમાં અવગણી શકાય તેટલો (μA) હોય છે.

ડાયોડનો રીવર્સ પ્રવાહ, લગાડેલ વોલ્ટેજ પર ખાસ આધાર રાખતો નથી. આપેલ થોડોક વોલ્ટેજ પણ

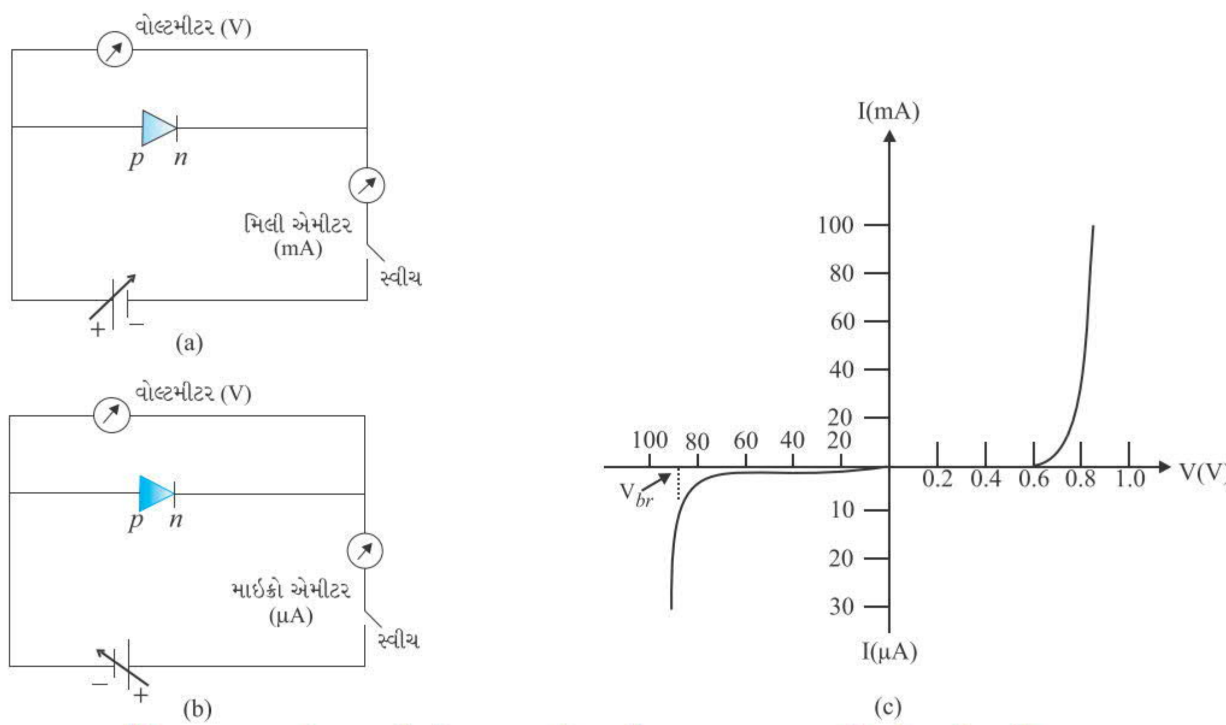
માઈનોરિટી વાહકોને જંકશનની એક બાજુથી બીજી બાજુ લઈ જવા માટે પૂરતો હોય છે. આ પ્રવાહ લગાડેલ વોલ્ટેજ વડે સીમીત થતો નથી, પરંતુ તે જંકશનની બંને બાજુ માઈનોરિટી વાહકોની સંખ્યા ઘનતા વડે સીમીત થાય છે.

રિવર્સ બાયસની અસર હેઠળ વિદ્યુતપ્રવાહ ક્રાંતિ રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજ સુધી સ્વતંત્ર હોય છે, જેને બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ (V_{br}) કહે છે. જ્યારે $V = V_{br}$ હોય ત્યારે ડાયોડનો રિવર્સ વિદ્યુતપ્રવાહ અત્યંત ઝડપથી વધે છે. ત્યારબાદ વોલ્ટેજનો થોડોક વધારો પણ વિદ્યુતપ્રવાહમાં ઘણો મોટો ફેરફાર કરે છે. જો રિવર્સ પ્રવાહને બાહ્ય પરિપથ વડે (તેના નિર્માતા વડે દર્શાવેલ) ચોક્કસ મૂલ્યથી ઓછા મૂલ્ય સુધી નિયંત્રિત કરવામાં ન આવે તો *p-n* જંકશન નાશ પામે છે. એક વખત તે નક્કી કરેલ મૂલ્ય કરતાં વધી જાય એટલે ડાયોડ વધુ પડતો ગરમ થઈને નાશ પામે છે. જો ફોરવર્ડ પ્રવાહ નક્કી કરેલ મૂલ્ય કરતાં વધી જાય તો ડાયોડને ફોરવર્ડ બાયસમાં રાખ્યો હોય તો પણ આવું બની શકે છે.

ડાયોડની V – I લાક્ષણિકતાઓનો (એટલે કે, આપેલ વોલ્ટેજ સાથે વિદ્યુતપ્રવાહના ફેરફારનો) અભ્યાસ કરવા માટે પરિપથની ગોઠવણી આકૃતિ 14.16(a) અને (b)માં દર્શાવી છે. પોટેન્શિયોમીટર (કે રીઓસ્ટેટ) મારફતે બૅટરીને ડાયોડ સાથે જોડવામાં આવે છે કે જેથી ડાયોડને લગાડેલ વોલ્ટેજ બદલી શકાય છે. વોલ્ટેજના જુદા-જુદા આપેલ મૂલ્યો માટે, વિદ્યુતપ્રવાહના મૂલ્યો નોંધવામાં આવે છે. આકૃતિ 14.16(c)માં દર્શાવ્યા મુજબ V અને Iનો આલેખ દોરવામાં આવે છે. નોંધો કે ફોરવર્ડ બાયસમાં માપન દરમિયાન અપેક્ષિત પ્રવાહ મોટો હોવાથી પ્રવાહ માપવા આપણે મિલી એમીટરનો ઉપયોગ કરીએ છીએ (આગળના પરિચ્છેદમાં જોયું હતું તેમ) જ્યારે રિવર્સ બાયસ દરમિયાન પ્રવાહ માપવા માટે માઈક્રોએમીટર (μA)નો



આકૃતિ 14.15 (a) રિવર્સ બાયસમાં ડાયોડ, (b) રિવર્સ બાયસની અસર હેઠળ બેરિયર પોટેન્શિયલ



આકૃતિ 14.16 *p-n* જંકશન ડાયોડની V–I લાક્ષણિકતાઓના અભ્યાસ કરવા માટે પરિપથની પ્રાયોગિક ગોઠવણી (a) ફોરવર્ડ બાયસ, (b) રિવર્સ બાયસ, (c) સિલિકોન ડાયોડની ચોક્કસ પ્રકારની V–I લાક્ષણિકતાઓ.

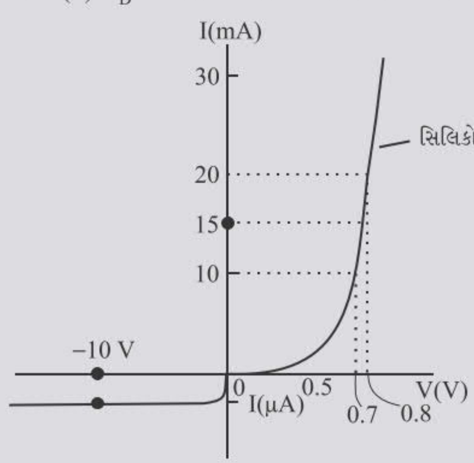
ઉપયોગ કરીએ છીએ. આકૃતિ 14.16(c)માં તમે જોઈ શકો કે, ફોરવર્ડ બાયસમાં શરૂઆતમાં જ્યાં સુધી ડાયોડના છેડાઓ વચ્ચેનો વોલ્ટેજ અમુક ચોક્કસ મૂલ્ય સુધી ના વધે ત્યાં સુધી વિદ્યુતપ્રવાહ નહીવત રીતે ધીમેથી વધે છે. અમુક લાક્ષણિક વોલ્ટેજ પછી બાયસ વોલ્ટેજના નજીવા વધારા સાથે પણ ડાયોડ પ્રવાહ ઘણો બધો (ચરઘાતાંકી રીતે, Exponentially) વધે છે. આ વોલ્ટેજને *થ્રેશોલ્ડ વોલ્ટેજ* કે કટ-ઈન વોલ્ટેજ કહે છે (જે જર્મેનિયમ ડાયોડ માટે ~0.2 V અને સિલિકોન ડાયોડ માટે ~0.7 V જેટલો હોય છે).

ડાયોડને રિવર્સ બાયસમાં જોડવામાં આવે ત્યારે વિદ્યુતપ્રવાહ અતિસૂક્ષ્મ (–μA) હોય છે અને બાયસ વોલ્ટેજના ફેરફાર સાથે લગભગ અચળ રહે છે. તેને *રિવર્સ સેચ્યુરેશન (સંતૃપ્ત) પ્રવાહ* કહે છે. આમ છતાં, વિશિષ્ટ કિસ્સાઓ માટે ઘણાં ઊંચા રિવર્સ બાયસે (બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ માટે), આ પ્રવાહ એકદમ વધવા લાગે છે. ડાયોડની આ અગત્યની વર્તણૂંક, આગળ આવનારા પરિચ્છેદ 4.8માં સમજાવી છે. સામાન્ય ઉપયોગમાં લેવાતા ડાયોડને રિવર્સ સેચ્યુરેશન પ્રવાહના વિસ્તારથી આગળ ઉપયોગમાં લેવાતા નથી.

ઉપરની સમજૂતી દર્શાવે છે કે સામાન્ય રીતે *p-n* જંકશન ડાયોડ વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન એક દિશામાં જ થવા દે છે (ફોરવર્ડ બાયસમાં). રિવર્સ બાયસના અવરોધ કરતાં ફોરવર્ડ બાયસ અવરોધ ઓછો હોય છે. આ ગુણધર્મનો ઉપયોગ એસી વોલ્ટેજના રેક્ટીફીકેશન (એકદિશીકરણ)માં થાય છે જે હવે પછીના પરિચ્છેદમાં સમજાવ્યું છે. ડાયોડ માટે આપણે વોલ્ટેજના નાના ફેરફાર ΔV અને તદનુરૂપ વિદ્યુતપ્રવાહના નાના ફેરફાર ΔIના ગુણોત્તરને *ડાયનેમિક (ચલ)* અવરોધ તરીકે વ્યાખ્યાયિત કરીએ છીએ :

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} \tag{14.6}$$

ઉદાહરણ 14.4 આકૃતિ 14.17માં એક સિલિકોન ડાયોડની V–I લાક્ષણિકતા દર્શાવી છે. (a) $I_D = 15$ *m*A અને (b) $V_D = -10$ V માટે ડાયોડનો અવરોધ શોધો.



આકૃતિ 14.17

ઉકેલ I = 10 *m*A થી I = 20 *m*A વચ્ચે ડાયોડની લાક્ષણિકતા દર્શાવતા વક્રને ઉદ્ગમ બિંદુમાંથી પસાર થતી સીધી રેખા ધારીએ, તો આપણે ઓહ્‌મ (Ohm's)ના નિયમનો ઉપયોગ કરીને અવરોધ શોધી શકીએ :

(a) વક્ર પરથી, I = 20 *m*A માટે, V = 0.8 V, I = 10 *m*A માટે, V = 0.7 V

$r_{fb} = \Delta V/\Delta I = 0.1 V/10\ mA = 10\ \Omega$

(b) વક્ર પરથી V = –10 V માટે I = –1 μA,

આથી,

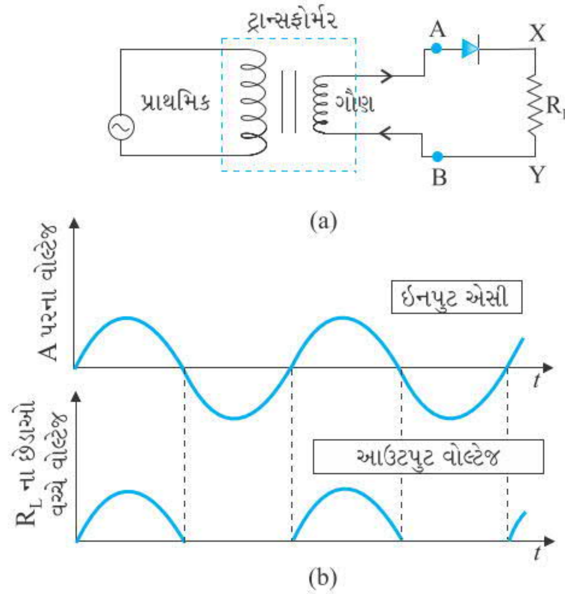
$r_{rb} = 10 V/1\ \mu A = 1.0 \times 10^7\ \Omega$

ઉદાહરણ 14.4

14.7 જંકશન ડાયોડનો રેક્ટિફાયર તરીકે ઉપયોગ (APPLICATION OF JUNCTION DIODE AS A RECTIFIER)

જંકશન ડાયોડની V–I લાક્ષણિકતા પરથી આપણે જોઈ શકીએ કે તેને ફોરવર્ડ બાયસ આપીએ ત્યારે જ તે વિદ્યુતપ્રવાહનું વહન થવા દે છે. આથી જો ડાયોડના બે છેડા વચ્ચે ઉલટસૂલટ વોલ્ટેજ (ac Voltage) આપવામાં આવે તો વોલ્ટેજના જે ચક્ર દરમિયાન ડાયોડ ફોરવર્ડ બાયસ થતો હોય તે દરમિયાન જ વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે. આ ગુણધર્મનો ઉપયોગ ઉલટસૂલટ વોલ્ટેજને *રેક્ટિફાય* કરવા માટે થાય છે અને આ હેતુ માટે ઉપયોગમાં લેવાયેલા પરિપથને *રેક્ટિફાયર* (*એકદિશકારક*) કહે છે.

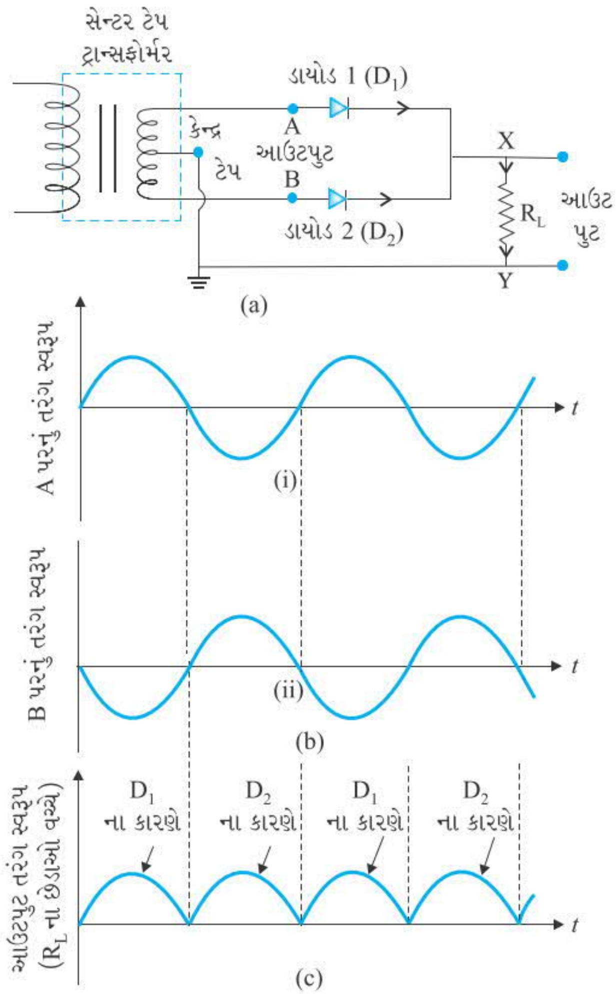
જો ડાયોડ સાથે શ્રેણીમાં એક લોડ અવરોધ જોડીને તેના છેડાઓ વચ્ચે ઉલટસૂલટ વોલ્ટેજ આપવામાં આવે, તો એસી ઈનપુટના જે અર્ધચક્રો દરમિયાન ડાયોડ ફોરવર્ડ બાયસ થતો હોય તે દરમિયાન જ લોડ અવરોધના છેડાઓ વચ્ચે ત્રુટક (કંપીત) (Pulsating) વોલ્ટેજ મળે છે. આકૃતિ 14.18માં દર્શાવ્યા મુજબના, આવા રેક્ટિફાયર પરિપથને *અર્ધતરંગ રેક્ટિફાયર* કહે છે. ટ્રાન્સફોર્મરનું ગૌણ (સેકન્ડરી) ગૂંચળું છેડાઓ A અને B વચ્ચે જરૂરી એસી વોલ્ટેજ પૂરા પાડે છે. જ્યારે A પરનો વોલ્ટેજ ધન હોય ત્યારે ડાયોડ ફોરવર્ડ બાયસ થાય છે અને વિદ્યુતવહન થવા દે છે. જ્યારે A ઋણ બને ત્યારે ડાયોડ રિવર્સ બાયસ થાય છે અને વિદ્યુતવહન થવા દેતો નથી. ડાયોડ માટે રિવર્સ સંતૃપ્ત (સેચ્યુરેશન) પ્રવાહ અવગણી શકાય તેટલો હોય છે અને વ્યાવહારિક હેતુઓ માટે તેને શૂન્ય ગણી શકાય છે. (ટ્રાન્સફોર્મરના સેકન્ડરી ગૂંચળા પર મળતા મહત્તમ એસી વોલ્ટેજ કરતાં ડાયોડનો રિવર્સ બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ પૂરતો મોટો હોવો જોઈએ કે જેથી ડાયોડ રિવર્સ બ્રેકડાઉનમાં જતો અટકે).



આકૃતિ 14.18 (a) અર્ધતરંગ રેક્ટિફાયર પરિપથ (b) રેક્ટિફાયર પરિપથ માટે આપેલ (Input) એસી વોલ્ટેજ અને મળેલ (c) વોલ્ટેજ તરંગ સ્વરૂપો.

આમ, આકૃતિ 14.18(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ, એસીના ધન *અર્ધ ચક્ર* દરમિયાન લોડ અવરોધ R_L માંથી વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે અને આપણને આઉટપુટ વોલ્ટેજ મળે છે, જ્યારે ઋણ અર્ધ ચક્ર દરમિયાન કોઈ પ્રવાહ વહેતો નથી. ત્યાર પછીના બીજા ધન અર્ધચક્ર દરમિયાન, ફરીથી આપણને આઉટપુટ વોલ્ટેજ મળે છે. આમ, હજીય બદલાતો હોવા છતાં આઉટપુટ વોલ્ટેજ ફક્ત *એક જ દિશા* પુરતો સીમીત છે અને તે *રેક્ટિફાય* થયો છે તેમ કહેવાય છે. આ પરિપથ માટે ફક્ત અડધા એસી ઈનપુટ તરંગ માટે રેક્ટિફાય થયેલો આઉટપુટ મળતો હોવાથી તેને *અર્ધ-તરંગ રેક્ટિફાયર* કહેવાય છે.

આકૃતિ 14.19(a)માં દર્શાવેલ બે ડાયોડવાળો પરિપથ, એસી ચક્રના ધન અને ઋણ બંને અર્ધચક્ર દરમિયાન રેક્ટિફાય થયેલો આઉપુટ આપે છે. આથી, તેને *પૂર્ણ તરંગ રેક્ટિફાયર* કહે છે. અહીંયા બંને ડાયોડની p-પ્રકારની બાજુઓ ટ્રાન્સફોર્મરના ગૌણ (સેકન્ડરી) ગૂંચળાના છેડાઓ સાથે જોડેલી છે. બંને ડાયોડની n-પ્રકારની બાજુઓ એકબીજા સાથે જોડેલ છે અને આ બે ડાયોડના સામાન્ય બિંદુ અને ટ્રાન્સફોર્મરના ગૌણ ગૂંચળા (સેકન્ડરી)ના મધ્ય (કેન્દ્ર) બિંદુ વચ્ચે આઉટપુટ લેવામાં આવે છે. આથી, પૂર્ણ તરંગ રેક્ટિફાયર માટે ટ્રાન્સફોર્મરના ગૌણ (સેકન્ડરી) ગૂંચળાના કેન્દ્ર બિંદુમાંથી છેડો કાઢવામાં આવે છે, જેથી તેને *સેન્ટર ટેપ ટ્રાન્સફોર્મર* કહે છે. આકૃતિ 14.19(c) પરથી જોઈ શકાય કે દરેક ડાયોડ વડે રેક્ટિફાય થયેલો વોલ્ટેજ સેકન્ડરીના કુલ વોલ્ટેજનો અડધો હોય છે. દરેક ડાયોડ ફક્ત અર્ધચક્ર દરમિયાન જ રેક્ટિફાય કરે છે, પરંતુ બંને (ડાયોડ) વારાફરતી આવતા ચક્ર માટે આમ કરે છે. આથી, તેમના (ડાયોડના) સામાન્ય બિંદુ અને ટ્રાન્સફોર્મરના સેન્ટર ટેપ (મધ્યબિંદુ) વચ્ચે મળતો આઉટપુટ વોલ્ટેજ પૂર્ણ તરંગ રેક્ટિફાયર આઉટપુટ બને છે. (નોંધો કે પૂર્ણ તરંગ રેક્ટિફાયર માટે બીજો પરિપથ પણ છે જેમાં

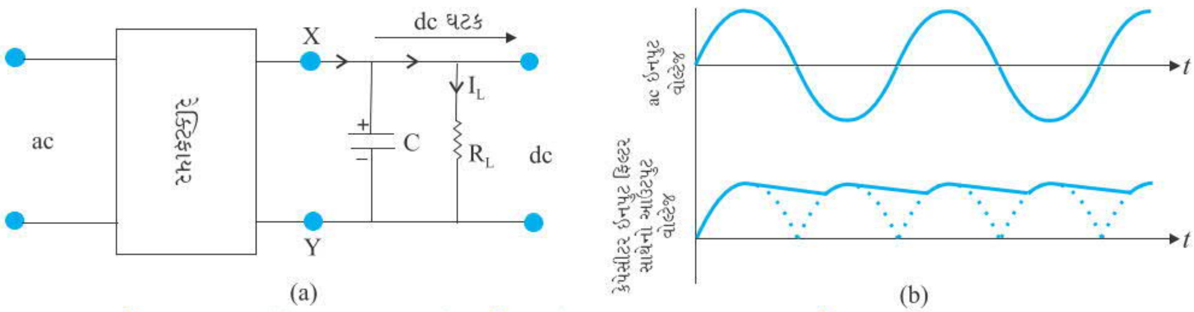


આકૃતિ 14.19 (a) પૂર્ણ તરંગ રેક્ટિફાયર પરિપથ (b) ડાયોડ D_1 ને A અને ડાયોડ D_2 ને B પાસે આપેલ ઈનપુટ તરંગ-સ્વરૂપો, (c) પૂર્ણતરંગ રેક્ટિફાયર પરિપથમાં જોડેલ R_Lના બે છેડાઓ વચ્ચે મળતું આઉટપુટ તરંગ-સ્વરૂપ.

સેન્ટર ટેપ ટ્રાન્સફોર્મરની જરૂર પડતી નથી, પરંતુ તેમાં ચાર ડાયોડની જરૂર પડે છે). ધારોકે કોઈ ક્ષણે સેન્ટર ટેપની સાપેક્ષે B પાસેનો ઈનપુટ વોલ્ટેજ ધન છે. આકૃતિ 14.19(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ એ સ્પષ્ટ છે કે B પાસેનો વોલ્ટેજ વિરુદ્ધ કળા ધરાવતો હોવાથી તે ઋણ છે. આથી ડાયોડ D_1 ફોરવર્ડ બાયસ થાય છે અને તેથી વહન થવા દે છે (જ્યારે D_2 રિવર્સ બાયસ થતો હોવાથી તે વહન થવા દેતો નથી). આથી, આકૃતિ 14.19(c)માં દર્શાવ્યા મુજબ ધન અર્ધ ચક્ર દરમિયાન આપણને આઉટપુટ પ્રવાહ મળે છે (અને લોડ અવરોધ R_Lના છેડાઓ વચ્ચે આઉટપુટ વૉલ્ટેજ મળે છે). એસી ચક્ર દરમિયાન જ્યારે A પાસેનો વોલ્ટેજ સેન્ટર ટેપની સાપેક્ષે ઋણ બને ત્યારે B પરના વોલ્ટેજ ધન હોય છે. એસી ઈનપુટના આ ચક્ર દરમિયાન ડાયોડ D_1 વહન કરતો નથી, જ્યારે ડાયોડ D_2 વહન કરે છે, જેથી એસી ઈનપુટના ઋણ ચક્ર દરમિયાન આઉટપુટ પ્રવાહ અને તેથી (R_Lના છેડાઓ વચ્ચે) આઉટપુટ વૉલ્ટેજ મળે છે. આમ, આપણને ચક્રના ધન અને ઋણ બંને અર્ધ-ચક્ર દરમિયાન આઉટપુટ વોલ્ટેજ મળે છે. દેખીતું છે કે અર્ધતરંગ રેક્ટિફાયરની સરખામણીમાં રેક્ટિફાઈડ વોલ્ટેજ કે પ્રવાહ મેળવવા માટે આ વધુ કાર્યક્ષમ પરિપથ છે.

રેક્ટિફાય થયેલો આઉટપુટ અર્ધ સાઈન (sine, જયાવર્તી) વક્રના આકારના પલ્સના રૂપમાં હોય છે. તે એક દિશામાં હોવા છતાં તેનું મૂલ્ય સ્થાયી હોતું નથી. આવા ત્રુટક (પલ્સ ધરાવતા) વોલ્ટેજમાંથી સ્થાયી ડીસી આઉટપૂટ મેળવવા માટે સામાન્ય રીતે આઉટપુટના છેડાઓ વચ્ચે (લોડ અવરોધ R_Lને સમાંતર) એક કેપેસીટર જોડવામાં આવે છે. આ હેતુ માટે આપણે R_Lની શ્રેણીમાં ઈન્ડક્ટર પણ જોડી શકીએ. વધારાના આ પરિપથો *એસી રીપલ* (*Ripple*)ને *ફિલ્ટર* કરીને (રોકીને) *ચોખ્ખો* (*Pure*) *ડીસી વૉલ્ટેજ* આપતા હોવાથી તેમને *ફિલ્ટર* (પરિપથો) કહે છે.

હવે આપણે ફિલ્ટરની પ્રક્રિયા માટે કેપેસીટરનું કાર્ય સમજીશું. જ્યારે કેપેસીટરના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજ વધતો હોય ત્યારે કેપેસીટર વિદ્યુતભારિત (ચાર્જ) થાય છે. જો કોઈ બાહ્ય લોડ અવરોધ ન જોડેલ હોય, તો તે રેક્ટિફાઈડ આઉટપુટના મહત્તમ (Peak) વોલ્ટેજ સુધી ચાર્જ થયેલો રહે છે. જ્યારે લોડ હાજર હોય ત્યારે, તે લોડમાં થઈને વિદ્યુતવિભારિત (ડીસ્ચાર્જ) થવા લાગે છે અને તેના છેડાઓ વચ્ચેનો વોલ્ટેજ ઘટવા લાગે છે. રેક્ટિફાઈડ આઉટપુટના બીજા અર્ધચક્ર દરમિયાન તે ફરીથી મહત્તમ મૂલ્ય સુધી ચાર્જ થાય છે (આકૃતિ 14.20). કેપેસીટરના બે છેડાઓ વચ્ચે વૉલ્ટેજના ઘટાડાનો દર પરિપથમાં જોડેલા કેપેસીટર C અને અસરકારક અવરોધ R_Lના ગુણાકારના વ્યસ્ત મૂલ્ય પર આધાર રાખે છે અને તેને (RC ને) *સમય અચળાંક* (*Time Constant*) કહે છે. સમય અચળાંક મોટો કરવા Cનું મૂલ્ય મોટું હોવું જોઈએ. આથી, કેપેસીટર ઈનપુટ ફિલ્ટર (પરિપથો)માં મોટા કેપેસીટર વપરાય છે. કેપેસીટર ઈનપુટ ફિલ્ટરનો ઉપયોગ કરીને મેળવેલો *આઉટપુટ વોલ્ટેજ* રેક્ટિફાઈડ વોલ્ટેજના *મહત્તમ* (*Peak*) મૂલ્યની નજીક હોય છે. પાવર સપ્લાયમાં મોટાભાગે આ પ્રકારનું ફિલ્ટર વપરાય છે.



આકૃતિ 14.20 (a) કેપેસીટર ફિલ્ટર સાથે પૂર્ણતરંગ રેક્ટિફાયર, (b) (a) માં દર્શાવેલા રેક્ટિફાયરના ઈનપુટ અને આઉટપુટ વોલ્ટેજ

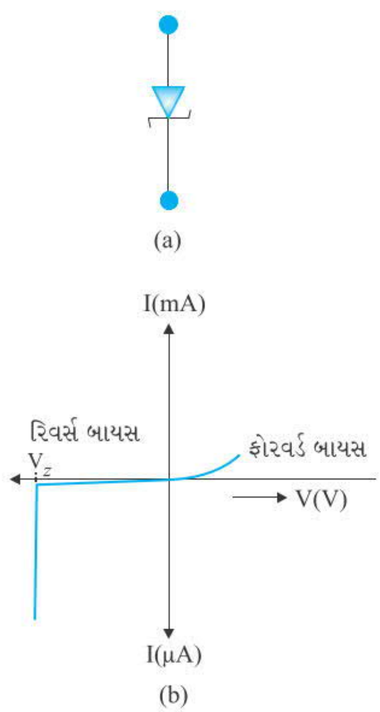
14.8 કેટલાક વિશિષ્ટ હેતુ માટેના *p-n* જંકશન ડાયોડ (Special Purpose *p-n* Junction Diodes)

આ પરિચ્છેદમાં, આપણે કેટલાક સાધનોનો અભ્યાસ કરીશું જે મૂળભૂત રીતે તો જંકશન ડાયોડ છે, પરંતુ જુદા પ્રકારના ઉપયોગો માટે વિકસાવવામાં આવ્યા છે.

14.8.1 ઝેનર ડાયોડ (Zener Diode)

તે વિશિષ્ટ હેતુ માટેનો અર્ધવાહક (સેમિકન્ડક્ટર) ડાયોડ છે, જેને તેના શોધક C. Zener ના કારણે તે નામ આપવામાં આવ્યું છે. તેને રિવર્સ બાયસ હેઠળ બ્રેકડાઉન વિસ્તારમાં ઉપયોગ માટે વિકસાવવામાં આવ્યો છે અને તેનો ઉપયોગ વોલ્ટેજ રેગ્યુલેટર તરીકે થાય છે. ઝેનર ડાયોડની સંજ્ઞા આકૃતિ 14.21(a)માં દર્શાવી છે.

જંકશનની બંને બાજુ p અને nને અતિશય પ્રમાણમાં ડોપિંગ કરીને ઝેનર ડાયોડ બનાવવામાં આવે છે. આના કારણે, રચાતો ડીપ્લેશન વિસ્તાર ઘણો સાંકડો ($< 10^{-6}$m) હોય છે અને લગભગ 5 V જેટલા ઘણાં ઓછા રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજ માટે પણ જંકશનનું વિદ્યુતક્ષેત્ર ખૂબ તીવ્ર ($\sim 5 \times 10^6$ V/m) જેટલું હોય છે. ઝેનર ડાયોડની I–V લાક્ષણિકતા આકૃતિ 14.21(b)માં દર્શાવી છે. એ જોઈ શકાય છે કે જ્યારે આપેલ રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજ (V), ઝેનર ડાયોડના બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ (V_z) જેટલો થાય ત્યારે વિદ્યુતપ્રવાહમાં ઘણો મોટો ફેરફાર (વધારો) થાય છે. નોંધો કે બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ V_z પછી, રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજમાં નજીવો ફેરફાર કરીને પણ વિદ્યુતપ્રવાહમાં ઘણો મોટો ફેરફાર કરી શકાય છે. બીજા શબ્દોમાં, ઝેનરમાંથી પસાર થતો વિદ્યુતપ્રવાહ ઘણો બધો બદલાય તો પણ ઝેનર વોલ્ટેજ અચળ રહે છે. ઝેનર ડાયોડના આ ગુણધર્મનો ઉપયોગ સપ્લાય વોલ્ટેજને (અચળ રાખવા) રેગ્યુલેટ કરવા માટે થાય છે કે જેથી તે અચળ રહે.

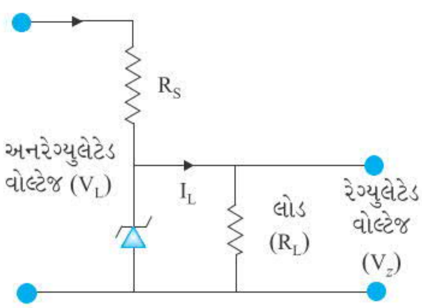


આકૃતિ 14.21 ઝેનર ડાયોડ, (a) સંજ્ઞા, (b) I–V લાક્ષણિકતા

બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ પાસે રિવર્સ વિદ્યુતપ્રવાહ કેમ ઝડપથી વધે છે તે સમજીએ. આપણે જાણીએ છીએ કે $p \rightarrow n$ સુધી ઈલેક્ટ્રૉન (માઈનોરિટી વાહકો) અને $n \rightarrow p$ સુધી હોલના પ્રવાહના કારણે રિવર્સ પ્રવાહ વહે છે. જેમ રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજ વધારીએ તેમ જંકશન પરનું વિદ્યુતક્ષેત્ર નોંધપાત્ર બને છે. જ્યારે રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજ $V = V_z$ થાય, ત્યારે (જંકશનના છેડાઓ વચ્ચે) વિદ્યુતક્ષેત્રની તીવ્રતા એટલી વધી જાય છે કે જે p-બાજુના યજમાન (Host) પરમાણુઓમાંથી વેલેન્સ ઈલેક્ટ્રૉનન ખેંચી લે છે, જે n-વિસ્તાર તરફ પ્રવેગિત થાય છે. આ ઈલેક્ટ્રૉનના કારણે બ્રેકડાઉન વખતે ઊંચો વિદ્યુતપ્રવાહ મળે છે. ઊંચા વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે યજમાન પરમાણુઓમાંથી ઈલેક્ટ્રૉન મુક્ત થવાની ઘટનાને આંતરિક ક્ષેત્ર ઉત્સર્જન (Internal Field Emission) કે ક્ષેત્ર આયનીકરણ (Field ionisation) કહે છે. ક્ષેત્ર આયનીકરણ માટે જરૂરી વિદ્યુતક્ષેત્ર 10^6 V/mના ક્રમનું હોય છે.

વોલ્ટેજ નિયંત્રક (રેગ્યુલેટર) તરીકે ઝેનર ડાયોડ (Zener Diode as a Voltage Regulator)

આપણે જાણીએ છીએ કે જ્યારે રેક્ટિફાયરનો એસી ઈનપુટ વોલ્ટેજ બદલાતો હોય, ત્યારે તેનો રેક્ટિફાઈડ આઉટપુટ પણ બદલાય છે. રેક્ટિફાયરના અનરેગ્યુલેટેડ ડીસી આઉટપુટમાંથી અચળ ડીસી વોલ્ટેજ મેળવવા માટે આપણે ઝેનર ડાયોડનો ઉપયોગ કરીએ છીએ. ઝેનર ડાયોડનો ઉપયોગ કરીને વોલ્ટેજ રેગ્યુલેશન માટેનો પરિપથ આકૃતિ 14.22માં દર્શાવ્યો છે.



આકૃતિ 14.22 ડીસી વોલ્ટેજ રેગ્યુલેટર તરીકે ઝેનર ડાયોડ

અનરેગ્યુલેટેડ ડીસી વોલ્ટેજ (રેક્ટિફાયરનો ફિલ્ટર થયેલો આઉટપુટ)ને ઝેનર ડાયોડ સાથે શ્રેણી અવરોધ R_s વડે એ રીતે જોડવામાં આવે છે કે જેથી ઝેનર ડાયોડ રીવર્સ બાયસ થાય. જો ઈનપુટ વોલ્ટેજ વધે, તો R_s અને ઝેનર ડાયોડમાંથી પસાર થતો પ્રવાહ પણ વધે છે. આથી, ઝેનર ડાયોડના બે છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજના કોઈ ફેરફાર વગર R_sના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજ તફાવત વધે છે. આનું કારણ એ છે કે બ્રેકડાઉન વિસ્તારમાં, ઝેનર ડાયોડમાંથી વહેતો પ્રવાહ બદલાય તો પણ ઝેનર વોલ્ટેજ અચળ રહે છે. તે જ રીતે જો ઈનપુટ વોલ્ટેજ ઘટે, તો R_s અને ઝેનર ડાયોડમાંથી વિદ્યુતપ્રવાહ પણ ઘટે છે. ઝેનર ડાયોડના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજના કોઈ ફેરફાર વગર R_sના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજ તફાવત ઘટે છે. આમ, ઈનપુટ વોલ્ટેજમાં કોઈ પણ વધારો/ઘટાડો થતા, ઝેનર ડાયોડના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજના કોઈપણ ફેરફાર વગર R_sના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજ તફાવતના વધારા/ઘટાડામાં પરિણમે છે. આમ, ઝેનર ડાયોડ વોલ્ટેજ (નિયંત્રક) રેગ્યુલેટર તરીકે કાર્ય કરે છે. જરૂરી આઉટપુટ વોલ્ટેજને અનુરૂપ આપણે ઝેનર ડાયોડ અને શ્રેણી અવરોધ R_s પસંદ કરવો જોઈએ.

ઉદાહરણ 14.5

ઉદાહરણ 14.5 એક ઝેનર રેગ્યુલેટેડ પાવર સપ્લાયમાં $V_z = 6.0$ Vનો ઝેનર ડાયોડ રેગ્યુલેશન માટે ઉપયોગમાં લીધેલ છે. જરૂરી લોડ પ્રવાહ 4.0 mA અને અનરેગ્યુલેટેડ ઈનપુટ 10.0 V છે. શ્રેણી અવરોધ R_sનું મૂલ્ય કેટલું હોવું જોઈએ ?

ઉકેલ R_sનું મૂલ્ય એટલું હોવું જોઈએ કે જેથી ઝેનરમાંથી પસાર થતો પ્રવાહ લોડ પ્રવાહ કરતાં ઘણો મોટો હોય. સારા રેગ્યુલેશન માટે આ જરૂરી છે. લોડ પ્રવાહ કરતાં પાંચ ગણો ઝેનર પ્રવાહ પસંદ કરો, એટલે કે $I_z = 20$ mA. આથી, R_sમાંથી પસાર થતો કુલ વિદ્યુતપ્રવાહ 24 mA. R_sના છેડાઓ વચ્ચે વોલ્ટેજનો તફાવત $10.0 - 6.0 = 4.0$ V છે. આથી, $R_s = 4.0\,\text{V} / (24 \times 10^{-3})\text{A} = 167\,\Omega$.

આની નજીકનું કાર્બન અવરોધનું મૂલ્ય 150 Ω છે. આમ, 150 Ωનો શ્રેણી અવરોધ યોગ્ય છે. નોંધો કે અવરોધના મૂલ્યમાં નજીવો ફેરફાર અગત્યનો નથી, અગત્યનું એ છે કે પ્રવાહ I_zનું મૂલ્ય I_L કરતાં ઘણું મોટું હોવું જોઈએ.

14.8.2 ઓપ્ટોઈલેક્ટ્રૉનિક જંક્શન ડિવાઈસીસ (ઉપકરણો) (Optoelectronic Junction Devices)

અત્યાર સુધી આપણે એ જોયું કે આપેલ ઈલેક્ટ્રીક (વિદ્યુત) ઈનપુટ માટે અર્ધવાહક (સેમીકન્ડક્ટર) ડાયોડ કેવી રીતે વર્તે છે. આ પરિચ્છેદમાં આપણે એવા અર્ધવાહક (સેમીકન્ડક્ટર) ડાયોડ વિષે શીખીશું કે જેમાં ફોટોન (ફોટો-ઉત્દીપન)ના કારણે વાહકો ઉત્પન્ન થાય છે. આ બધા સાધનોને *ઓપ્ટોઈલેક્ટ્રૉનિક ડિવાઈસીસ* કહે છે. આપણે નીચેના ઓપ્ટોઈલેક્ટ્રોનિક ડિવાઈસીસનાં કાર્ય સમજીશું.

(i) ઓપ્ટીકલ (પ્રકાશના) સિગ્નલને પરખવા (Detect) માટે *ફોટોડાયોડ્સ* (ફોટો ડીટેક્ટર્સ).

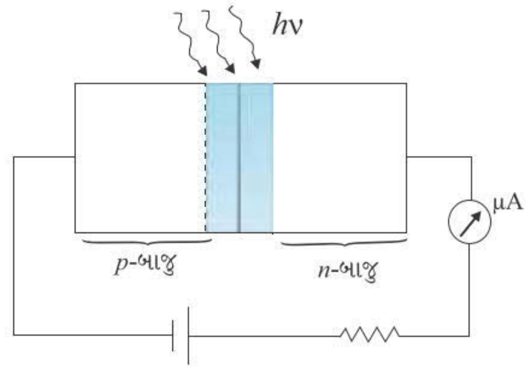
(ii) *લાઈટ ઍમિટીંગ ડાયોડ* (LED) જે વિદ્યુતઊર્જાનું પ્રકાશમાં રૂપાંતર કરે છે.

(iii) *ફોટોવોલ્ટીક ડિવાઈસીસ* જે ઓપ્ટિકલ (લાઈટ)ના વિકિરણને વિદ્યુતઊર્જામાં રૂપાંતરીત કરે (*સોલર સેલ*) છે.

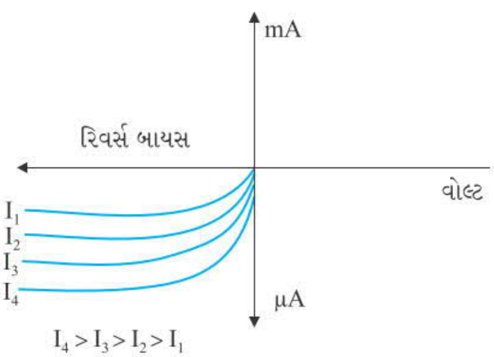
(i) *ફોટોડાયોડ* (*Photodiode*)

ફોટોડાયોડ એક વિશેષ હેતુ માટેનો p-n જંકશન ડાયોડ છે. તે પારદર્શક બારી ધરાવે છે જેમાંથી પ્રકાશ ડાયોડ પર પડી શકે. તેને રિવર્સ બાયસમાં કાર્યાન્વિત કરાય છે. જ્યારે ફોટોડાયોડ પર, સેમીકન્ડક્ટરના ઊર્જા તફાવત (E_g) કરતા વધુ ઊર્જા ધરાવતા ($h\nu$) ઊર્જાના પ્રકાશ ફોટોન આપાત કરવામાં આવે ત્યારે આ ફોટોનના શોષણના કારણે ઇલેક્ટ્રૉન-હોલ (e–h) જોડકાં ઉત્પન્ન થાય છે. ડાયોડ એવી રીતે બનાવવામાં આવે છે કે જેથી e–h જોડકાંઓ ડાયોડના ડેપ્લેશન સ્તરની નજીક ઉત્પન્ન થાય. જંકશનના વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે, ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલ ફરીથી સંયોજાય તે પહેલાં જુદા પડે છે. વિદ્યુતક્ષેત્રની દિશા એવી હોય છે કે જેથી ઇલેક્ટ્રૉન n-બાજુ અને હોલ p-બાજુ પહોંચે. ઇલેક્ટ્રૉન n-બાજુ ભેગા થાય છે જ્યારે હોલ p-બાજુ ભેગા થાય છે, તેથી *emf* ઉદ્ભવે છે. જ્યારે બાહ્ય લોડ અવરોધ જોડવામાં આવે ત્યારે, વિદ્યુતપ્રવાહ વહે છે. ફોટો વિદ્યુતપ્રવાહનું મૂલ્ય આપાત પ્રકાશની તીવ્રતા પર આધાર રાખે છે (ફોટો વિદ્યુતપ્રવાહ આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાના સમપ્રમાણમાં હોય છે).

જો રિવર્સ બાયસ આપવામાં આવ્યો હોય, તો પ્રકાશની તીવ્રતાના ફેરફાર સાથે વિદ્યુતપ્રવાહનો ફેરફાર જોવો સહેલો છે. આમ, પ્રકાશના સિગ્નલો (તરંગો)ની પરખ (ડિટેક્ટ) કરવા માટે ફોટોડાયોડનો ઉપયોગ ફોટોડિટેક્ટર તરીકે કરી શકાય છે. ફોટોડાયોડની I–V લાક્ષણિકતાઓ મેળવવા માટેનો પરિપથ આકૃતિ 14.23(a)માં અને તેની ચોક્કસ I–V લાક્ષણિકતાઓ આકૃતિ 14.23(b)માં દર્શાવેલ છે.



(a)



(b)

આકૃતિ 14.23 (a) રીવર્સ બાયસમાં પ્રકાશિત કરેલ ફોટો ડાયોડ, (b) જુદી જુદી આપાત પ્રકાશની તીવ્રતાઓ $I_4 > I_3 > I_2 > I_1$ માટે ફોટો ડાયોડની I–V લાક્ષણિકતાઓ

ઉદાહરણ 14.6 રીવર્સ બાયસના પ્રવાહ (~μA)ની સરખામણીમાં ફોરવર્ડ બાયસનો પ્રવાહ વધુ (~mA) હોવાનું જાણીતું છે. તો પછી શા માટે ફોટોડાયોડનો ઉપયોગ રિવર્સ બાયસમાં કરવામાં આવે છે ?

ઉકેલ n-પ્રકારના અર્ધવાહકનો કિસ્સો ધ્યાનમાં લો. દેખીતું છે કે મેજોરિટી વિદ્યુતવાહક ઘનતા (n), માઈનોરિટી હોલ ઘનતા p કરતાં નોંધપાત્ર વધુ હોય (એટલે કે $n >> p$) છે. પ્રકાશ આપાત કરવાથી, ધારોકે વધારાના ઉત્પન્ન થયેલા ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલ અનુક્રમે Δn અને Δp છે.

$$n' = n + \Delta n$$

$$p' = p + \Delta p$$

અહીંયા n' અને p' એ કોઈ એક આપાત પ્રકાશ-તીવ્રતા માટે ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલની સંખ્યા ઘનતા* છે, તથા n અને p એ પ્રકાશની ગેરહાજરીમાં વાહક સંખ્યા ઘનતા છે. યાદ રહે કે

ઉદાહરણ 14.6

* નોંધો કે e–h જોડકું ઉત્પન્ન કરવા માટે આપણે ઊર્જા વાપરવી પડે છે [ફોટો ઉત્તેજન (Excitation), ઉષ્મીય ઉત્તેજન વગેરે]. આથી, જ્યારે ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલ પુનઃસંયોજાય ત્યારે પ્રકાશના રૂપમાં (વિકિરણ દ્વારા પુનઃસંયોજન) અથવા ઉષ્માના રૂપમાં (વિકિરણ વગર પુનઃસંયોજન) ઊર્જામુક્ત થાય છે. તેનો આધાર સેમીકન્ડક્ટર અને p-n જંકશનની બનાવટ પર છે. LED બનાવવા માટે GaAs, GaAs – GaP જેવા સેમીકન્ડક્ટરોનો ઉપયોગ થાય છે. જેમાં વિકિરણ દ્વારા થતું પુનઃસંયોજન વધુ પ્રભાવી હોય છે.

$\Delta n = \Delta p$ અને $n >> p$. આથી, બહુમતી વાહકોનો આંશિક ફેરફાર (એટલે કે $\Delta n/n$) એ માઈનોરિટી વાહકોના આવા ફેરફાર (એટલે કે $\Delta p/p$)ની સરખામણીમાં ઘણો ઓછો હશે. સામાન્ય રીતે, આપણે એમ કહી શકીએ કે ફોટો અસરના કારણે રિવર્સ બાયસ દરમિયાન *માઈનોરિટી વાહકોનું પ્રભુત્વ ધરાવતો રિવર્સ બાયસ પ્રવાહ*માંનો આંશિક ફેરફાર ફોરવર્ડ બાયસ પ્રવાહના આંશિક ફેરફારની સરખામણીમાં સરળતાથી માપી શકાય છે. આથી, પ્રકાશની તીવ્રતા માપવા માટે ફોટોડાયોડને મોટેભાગે રીવર્સ બાયસમાં ઉપયોગમાં લેવામાં આવે છે.

(ii) *લાઈટ ઍમિટીંગ ડાયોડ* (*Light Emitting Diode*)

તે વધારે પ્રમાણમાં ડોપિંગ ધરાવતું *p-n* જંકશન છે જે ફોરવર્ડ બાયસ દરમિયાન સ્વતઃ (આપમેળે) વિકિરણનું (Spontaneous) ઉત્સર્જન કરે છે. ડાયોડને પારદર્શક પડમાં (આવરણમાં) રાખવામાં આવે છે કે જેથી ઉત્સર્જિત પ્રકાશ બહાર નીકળી શકે.

જ્યારે ડાયોડને ફોરવર્ડ બાયસ આપવામાં આવે ત્યારે, ઇલેક્ટ્રૉન $n \rightarrow p$ તરફ જાય છે (જ્યાં, તેઓ માઈનોરિટી વાહકો બને છે) અને હોલ $p \rightarrow n$ તરફ જાય છે (જ્યાં, તેઓ પણ માઈનોરિટી વાહકો છે). જંકશનની સીમા પાસે માઈનોરિટી વાહકોની સંખ્યા, સંતુલન વખતની સંખ્યા (એટલેકે બાયસ ના આપ્યો હોય ત્યારની) કરતાં વધી જાય છે. આમ, જંકશનની સીમા પાસે બંને બાજુ વધારાના માઈનોરિટી વાહકો હોય છે. જેઓ જંકશન પાસેના મેજોરિટી વાહકો સાથે પુનઃ સંયોજાય છે. આ પુનઃ સંયોજન થતાં ફોટોનના રૂપમાં ઊર્જાનું ઉત્સર્જન થાય છે. બૅન્ડ ગેપ (ઊર્જા તફાવત) જેટલી ઊર્જા કે તેનાથી સ્હેજ ઓછી ઊર્જા ધરાવતા ફોટોન ઉત્સર્જન પામે છે. જ્યારે ડાયોડનો ફોરવર્ડ વિદ્યુતપ્રવાહ ઓછો હોય ત્યારે ઉત્સર્જિત પ્રકાશની તીવ્રતા પણ ઓછી હોય છે. જેમ ફોરવર્ડ પ્રવાહ વધે તેમ પ્રકાશની તીવ્રતા વધે છે અને એક મહત્તમ મૂલ્ય સુધી પહોંચે છે. ફોરવર્ડ પ્રવાહને હજી પણ વધારતાં પ્રકાશની તીવ્રતા ઘટે છે. LEDને એટલો બાયસ આપવામાં આવે છે કે જેથી પ્રકાશ ઉત્સર્જન ક્ષમતા મહત્તમ મળે.

LEDની V–I લાક્ષણિકતા S*i* જંકશન ડાયોડ જેવી જ છે. પરંતુ તેમના થ્રેશોલ્ડ વોલ્ટેજ વધુ હોય છે અને દરેક રંગ માટે જુદા જુદા હોય છે. આ LEDના રિવર્સ બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ ઘણા ઓછા હોય છે, જે લગભગ 5 V ની આસપાસ હોય છે. આથી કાળજી રાખવી જોઈએ કે તેમના છેડાઓ વચ્ચે ઊંચા રિવર્સ વોલ્ટેજ ના મળે.

લાલ, પીળો, નારંગી, લીલો અને વાદળી પ્રકાશ ઉત્સર્જિત કરતી LED બજારમાં મળી રહે છે. દૃશ્ય પ્રકાશ આપે તેવી LEDની રચના માટે વપરાતા સેમીકન્ડક્ટરની બૅન્ડ ગેપ (ઊર્જા તફાવત) ઓછામાં ઓછી 1.8 *e*V હોવી જોઈએ (દૃશ્યપ્રકાશની તરંગ લંબાઈ 0.4 μm થી 0.7 μm જેટલી હોય છે, એટલે કે 3 *e*V થી 1.8 *e*V). ગેલિયમ આર્સેનાઈડ ફોસ્ફાઈડ ($GaAs_{1-x}P_x$)નું સેમીકન્ડક્ટર સંયોજન જુદા જુદા રંગ માટેની LED બનાવવા વપરાય છે. $GaAs_{0.6}P_{0.4}$ ($E_g \sim 1.9$ *e*V)નો ઉપયોગ લાલ LED માટે થાય છે. GaAs ($E_c \sim 1.4$ *e*V)નો ઉપયોગ ઈન્ફ્રારેડ LED બનાવવા માટે થાય છે. આ LEDનો ઉપયોગ રીમોટ કન્ટ્રોલમાં, બર્ગલર (ચોરી રોકવા માટે)ના એલાર્મ તંત્રમાં, પ્રકાશીય (Optical) સંચાર વ્યવસ્થા વગેરેમાં થાય છે. સફેદ પ્રકાશ ઉત્સર્જિત કરતી LED બનાવવા માટે ખૂબ સંશોધન થઈ રહ્યું છે જેથી ઈન્કેન્ડેસન્ટ (ફિલામેન્ટવાળા) લેમ્પની જગ્યાએ ઉપયોગ થઈ શકે.

રોજિંદા વપરાશમાં લેવાતા ઓછા પાવરના ઈન્કેન્ડેસન્ટ લેમ્પની સરખામણીમાં LEDના ફાયદા આ મુજબ છે :

(i) ઓછા કાર્યકારી વોલ્ટેજ અને ઓછો પાવર.

(ii) ઝડપી કાર્ય અને ગરમ થવા માટે સમય નથી જોઈતો.

(iii) ઉત્સર્જિત પ્રકાશની બૅન્ડ વીડ્થ 100 Å થી 500 Å જેટલી છે, બીજા શબ્દોમાં તે લગભગ (પણ ચોક્કસ નહિ) એકરંગી (Monocrometic) છે.

(iv) લાંબુ આયુષ્ય અને મજબૂત.

(v) ઝડપી ચાલુ-બંધ થવાની ક્ષમતા.

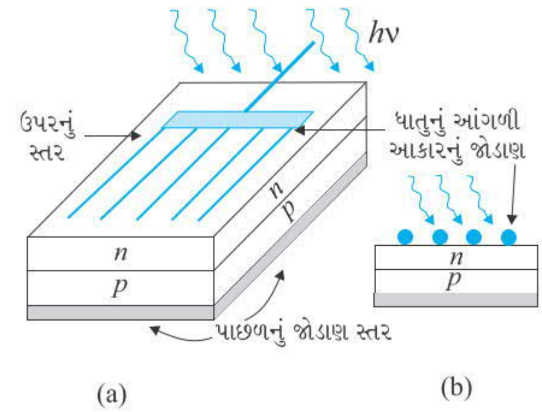
(iii) *સોલર સેલ* (*Solar Cell*)

સોલર સેલ એ મૂળભૂત રીતે *p-n* જંકશન છે, જેના પર સૂર્યપ્રકાશ પડે ત્યારે તે *emf* (વોલ્ટેજ)

ઉત્પન્ન કરે છે. તે પણ ફોટો ડાયોડના સિદ્ધાંત (Photovolatic Effect ફોટોવોલ્ટીક અસર) પર કાર્ય કરે છે, ફરક એટલો કે કોઈ બાહ્ય બાયસ આપવામાં આવતો નથી અને સૂર્યપ્રકાશ આપાત થાય તે માટે જંકશનનું ક્ષેત્રફળ (સપાટી) ઘણું મોટું રાખવામાં આવે છે કારણ કે આપણને વધુ પાવર જોઈએ છીએ.

એક સાદો p-n જંકશન સોલર સેલ આકૃતિ 14.24માં દર્શાવ્યો છે.

એક p-પ્રકારની Si તકતી (વેફર), લગભગ 300 μm જાડી લેવામાં આવે છે જેના પર (~ 0.3 μm)નું n-પ્રકાશના Siનું પાતળું સ્તર એક તરફ ડીફ્યુઝનની પ્રક્રિયા દ્વારા તૈયાર કરવામાં આવે છે. p-Siની બીજી બાજુને ધાતુ (પાછળનું જોડાણ માટે)નું પડ ચઢાવવામાં આવે છે. n-Si સ્તરની ઉપર ધાતુની જાળીદાર નકશી (જોડાણ માટે)નું પડ ચઢાવવામાં આવે છે. તે આગળના જોડાણ (Contact) તરીકે કાર્ય કરે છે. ધાતુની જાળીદાર નકશી સોલરસેલના ઘણા નાના વિસ્તાર (<15%)ને આવરે છે જેથી સેલ પર પ્રકાશ ઉપરથી આપાત કરી શકાય.



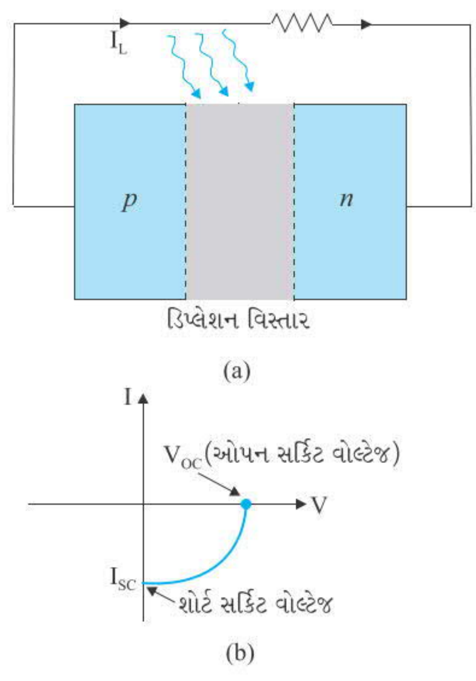
આકૃતિ 14.24 (a) એક ચોક્કસ p-n જંકશન સોલર સેલ, (b) તેનો આડછેદનો દેખાવ

જ્યારે સોલરસેલ પર પ્રકાશ આપાત થાય ત્યારે *emf*ની ઉત્પત્તિ નીચેની ત્રણ મૂળભૂત પ્રક્રિયાઓના કારણે થાય છે : (ઈલેક્ટ્રૉન હોલ જોડકાની) ઉત્પત્તિ, છુટા પડવું અને ભેગા થવું : (i) જંકશનની આસપાસ પ્રકાશ ($h\nu > E_g$)ના કારણે e-h જોડકાંની ઉત્પત્તિ, (ii) ડેપ્લેશન સ્તરના વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે ઈલેક્ટ્રૉન અને હોલનું છુટા પડવું, ઈલેક્ટ્રૉન n-વિસ્તાર તરફ અને હોલ p-વિસ્તાર તરફ ધકેલાય છે. (iii) n-વિસ્તાર તરફ જતા ઈલેક્ટ્રૉન ઉપરના છેડા પર ભેગા થાય છે અને p-વિસ્તાર તરફ જતા હોલ પાછળના (ધાતુના) જોડાણ પર ભેગા થાય છે. આમ, p-વિસ્તાર ધન અને n-વિસ્તાર ઋણ બને છે, જેથી તે *ફોટો વોલ્ટેજ* આપે છે.

આકૃતિ 14.25(a)માં દર્શાવ્યા મુજબ જ્યારે બાહ્ય લોડ અવરોધ જોડવામાં આવે છે, ત્યારે ફોટોપ્રવાહ I_L, લોડ અવરોધમાંથી વહે છે. સોલરસેલની એક લાક્ષણિક I–V લાક્ષણિકતા આકૃતિ 14.25(b)માં દર્શાવી છે.

નોંધો કે સોલરસેલની I–V લાક્ષણિકતા યામ પદ્ધતિના ચોથા ચરણમાં દોરવામાં આવે છે. આનું કારણ એ છે કે સોલરસેલ વિદ્યુતપ્રવાહ મેળવતો નથી પણ તે લોડ અવરોધને વિદ્યુતપ્રવાહ પૂરો પાડે છે.

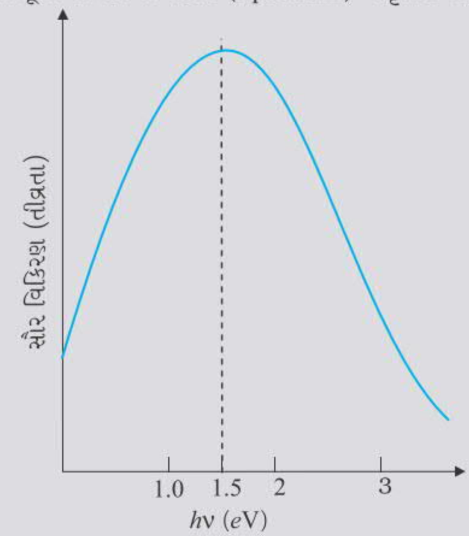
Si (E_g = 1.1 *e*V), GaAs (E_g = 1.43 *e*V), CdTe (E_g = 1.45 *e*V), $CuInSe_2$(E_g = 1.04 *e*V) વગેરે જેવા, 1.5 *e*Vની નજીકની બૅન્ડ ગેપ (ઊર્જા તફાવત) ધરાવતા સેમીકન્ડક્ટર, સોલરસેલ બનાવવા માટેના આદર્શ દ્રવ્યો છે. સેમીકન્ડક્ટરમાંથી સોલરસેલ બને છે. સોલરસેલ બનાવવા માટે યોગ્ય પદાર્થની પસંદગી કરવા માટેના અગત્યના માપદંડો આ મુજબ છે : (i) બૅન્ડ ગેપ (E_g ~ 1.0 *e*V થી 1.8 *e*V), (ii) ઊંચું પ્રકાશીય શોષણ (Optical Absorption) (~ $10^{-4} cm^{-1}$), (iii) વિદ્યુત વાહકતા, (iv) કાચો પદાર્થ મળતો હોવો જોઈએ, (v) કિંમત. નોંધો કે સોલરસેલ માટે સૂર્ય પ્રકાશ જ હોવો જરૂરી નથી. *કોઈ પણ* પ્રકાશ કે જેના ફોટોનની ઊર્જા બૅન્ડ ગેપ કરતાં વધુ હોય તે ચાલી શકે. સોલર સેલનો ઉપયોગ ઉપગ્રહોને તથા અવકાશી વાહનોને પાવર પૂરો પાડવા અને કેટલાંક કેલ્ક્યુલેટરોમાં પાવર સપ્લાય તરીકે થાય છે. ઓછી કિંમતના ફોટોવોલ્ટીક સેલનો ઉપયોગ કરી મોટા પ્રમાણમાં સૂર્યની ઊર્જા મેળવવી એ એક સંશોધનનો વિષય છે.



આકૃતિ 14.25 (a) એક પ્રકાશિત સોલરસેલ (b) સોલરસેલની I–V લાક્ષણિકતા

ઉદાહરણ 14.7 સોલરસેલમાં શા માટે Si અને GaAs પસંદ કરવામાં આવે છે ?

ઉકેલ આપણને મળતા સૂર્ય વિકિરણનો વર્ણપટ (Spectrum) આકૃતિ 14.26માં દર્શાવ્યો છે.



આકૃતિ 14.26

1.5 eV પાસે તે મહત્તમ છે. ફોટોન વડે ઉત્તેજિત કરવા માટે $h\nu > E_g$ હોવું જોઈએ. આથી જે સોલર સેલ માટે બૅન્ડ ગેપ ~ 1.5 eV કે તેથી ઓછી હોય તે સૂર્ય ઊર્જાના રૂપાંતર માટે મહત્તમ ક્ષમતાથી કાર્ય કરે. સિલિકોન માટે E_g ~ 1.1 eV છે જ્યારે GaAs માટે ~ 1.53 eV છે. હકીકતમાં Si કરતાં GaAs વધુ સારું છે (વધુ ઊંચી બૅન્ડ ગેપ હોવા છતાં) કારણ કે તેનો શોષણાંક પ્રમાણમાં મોટો છે. જો આપણે CdS કે CdSe (E_g ~ 2.4 eV) જેવા પદાર્થોનો ઉપયોગ કરીએ તો આપણે સૂર્ય ઊર્જાના ઊંચી ઊર્જા ધરાવતા ભાગનો જ ઉપયોગ ફોટો-રૂપાંતરણ માટે કરી શકીએ અને ઊર્જાનો નોંધપાત્ર ભાગ ઉપયોગમાં ન આવે .

પ્રશ્ન એ થાય કે : શા માટે આપણે PbS (E_g ~ 0.4 eV) જેવા પદાર્થનો ઉપયોગ ન કરી શકીએ, જે સૂર્ય ઊર્જાના વર્ણપટમાં મહત્તમને અનુરૂપ ν માટે $h\nu > E_g$ની શરતનું પાલન કરે છે ? જો આપણે આમ કરીએ તો મોટાભાગનાં સૂર્ય વિકિરણ સોલર સેલના *ઉપરના સ્તર*માં શોષાઈ જાય અને તે ડેપ્લેશન સ્તરની અંદર અથવા નજીક પહોંચી જ ન શકે. ઇલેક્ટ્રૉન હોલના કાર્યક્ષમ રીતે છુટા પડવા માટે, જંકશનના વિદ્યુતક્ષેત્રના કારણે, ફોટો-જનરેશન, જંકશનની નજીકના વિસ્તારમાં થવું જોઈએ.

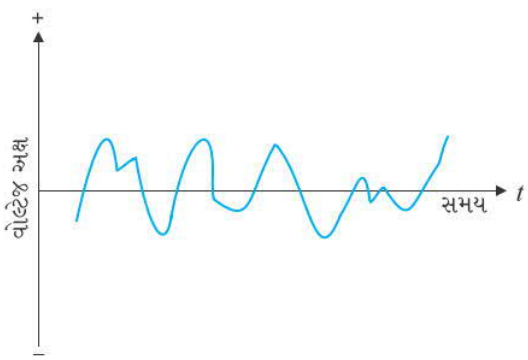
ઉદાહરણ 14.7

14.9 ડિજિટલ ઇલેક્ટ્રૉનિક્સ અને લોજિક ગેટ (Digital Electronics and Logic Gates)

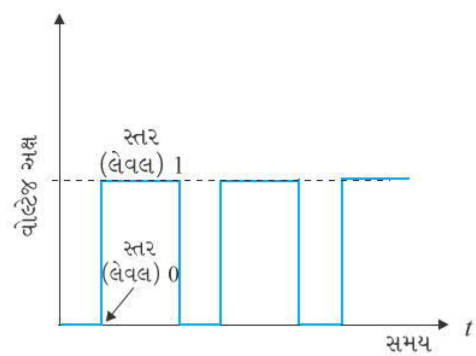
આગળના વિભાગોમાં દર્શાવેલ ઇલેક્ટ્રૉનિક પરિપથો જેવાં કે એમ્પ્લિફાયર, ઓસિલેટર વગેરેમાં સિગ્નલ (પ્રવાહ કે વૉલ્ટેજ) સતત સમય સાથે બદલાતા વોલ્ટેજ કે પ્રવાહના રૂપમાં હતો, આવા સિગ્નલને સતત કે *એનાલોગ સિગ્નલ* કહે છે. આકૃતિ 14.27(a)માં કોઈ એક એનાલોગ સિગ્નલ દર્શાવ્યો છે. આકૃતિ 14.27(b)માં *સ્પંદ* (*Pulse*) *તરંગસ્વરૂપ* (*Waveform*) દર્શાવ્યું છે. જેમાં, વોલ્ટેજના છુટક મૂલ્યો જ શક્ય છે. આવા સિગ્નલને દર્શાવવા માટે બાઈનરી નંબર (દ્વિગુણી સંખ્યાઓ) સગવડ રૂપ છે. બાયનરી સંખ્યાને ફક્ત બે અંકો હોય છે, '0' (ધારોકે 0 V) અને '1' (ધારોકે 5 V). આકૃતિ 14.27(b)માં દર્શાવ્યા મુજબ, ડિજિટલ ઇલેક્ટ્રૉનિક્સમાં આપણે વોલ્ટેજના ફક્ત આ બે સ્તરો (મૂલ્યો)નો ઉપયોગ કરીએ છીએ. આવા સિગ્નલને *ડિજિટલ સિગ્નલ* કહેવાય છે. ડિજિટલ પરિપથોમાં ફક્ત બે મૂલ્યો (0 અને 1 વડે દર્શાવેલ) ઈનપુટ અને આઉટપુટ વોલ્ટેજ માટે માન્ય છે.

આ પરિચ્છેદનો હેતુ ડિજિટલ ઈલેક્ટ્રૉનિક્સની સમજૂતીમાં પ્રથમ સોપાન પુરું પાડવાનો છે. આપણે અત્યારે ડિજિટલ ઈલેક્ટ્રોનિક્સના બંધારણીય એકમો (*લૉજીક ગેટ્સ*) પુરતો જ અભ્યાસ કરીશું જે ડિજિટલ સિગ્નલ પર ચોક્કસ પ્રક્રિયાઓ કરે છે. લોજિક ગેટનો ઉપયોગ કેલ્ક્યુલેટર, ડિજિટલ ઘડિયાળો, કોમ્પ્યુટર, રોબોટ, ઔદ્યોગિક નિયંત્રક પ્રણાલિઓ અને ટેલિકોમ્યુનિકેશનમાં થાય છે.

તમારા ઘરમાં વપરાતી લાઈટની સ્વિચને ડિજિટલ પરિપથના ઉદાહરણ તરીકે ગણી શકાય. સ્વિચની સ્થિતિના આધારે લાઈટ 'ઑન' કે 'ઑફ' હોઈ શકે. જ્યારે લાઈટ 'ઓન' હોય ત્યારે આઉટપુટનું મૂલ્ય 1 હોય છે. જયારે લાઈટ 'ઑફ' હોય ત્યારે આઉટપુટનું મૂલ્ય '0' હોય છે. લાઈટ સ્વિચની સ્થિતિઓ ઈનપુટ દર્શાવે છે. લાઈટને ચાલુ બંધ કરવા, સ્વિચને ઑન કે ઑફ સ્થિતિમાં મૂકવામાં આવે છે.



(a)

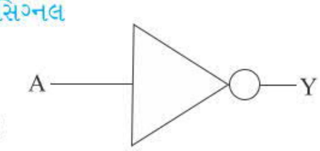


(b)

આકૃતિ 14.27 (a) એનાલોગ સિગ્નલ, (b) ડિજિટલ સિગ્નલ

14.9.1 લોજિક ગેટ (Logic Gates)

ગેટ એક ડિજિટલ પરિપથ છે જે તેના ઈનપુટ અને આઉટપુટ વોલ્ટેજ વચ્ચેના ચોક્કસ *લૉજિકલ સંબંધો*નું પાલન કરે છે. આથી, તેમને સામાન્ય રીતે *લૉજિક ગેટ* કહે છે. ગેટ એટલા માટે કે તે માહિતીના પ્રસરણનું નિયમન કરે છે. જે પાંચ સામાન્ય લૉજિક ગેટ ઉપયોગમાં લેવાય છે, તે NOT, AND, OR, NAND, NOR છે. દરેક લૉજિક ગેટને યોગ્ય સંજ્ઞા વડે દર્શાવાય છે તથા તેનું કાર્ય તેના *ટ્રુથ ટેબલ* (*સત્યાર્થ સારણી*) વડે વ્યાખ્યાયિત થાય છે જેમાં શક્ય એટલા ઈનપુટના લૉજિક લેવલનાં શક્ય સંયોજનો (Combinations) અને તેમને અનુરૂપ આઉટપુટ લૉજિક લેવલ દર્શાવેલા હોય છે. લૉજિક ગેટનું કાર્ય સમજવા માટે ટ્રુથ ટેબલ ઉપયોગી છે. સેમિકન્ડક્ટર રચનાઓનો ઉપયોગ કરીને આ લૉજિક ગેટ બનાવી શકાય છે.



(a)

ઈનપુટ	આઉટપુટ
A	**B**
0	1
1	0

(b)

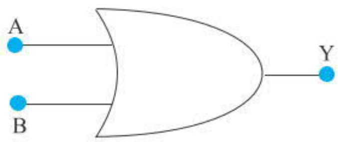
આકૃતિ 14.28 (a) લૉજિક સંજ્ઞા, (b) NOT ગેટનું ટ્રુથ ટેબલ

(i) *NOT ગેટ*

આ સૌથી પ્રાથમિક (મૂળભૂત) ગેટ છે. જેમાં એક ઈનપુટ અને એક આઉટપુટ હોય છે. તેનો ઈનપુટ '0' હોય તો તે આઉટપુટમાં '1' આપે છે અને તેથી ઉલટુ પણ. એટલે કે, તેના આઉટપુટમાં ઈનપુટનું ઉલટું આપે છે. આથી, તેને *ઈનવર્ટર* પણ કહે છે. આકૃતિ 14.28માં આ ગેટની સામાન્ય રીતે ઉપયોગમાં લેવાતી સંજ્ઞા અને તેનું ટ્રુથ ટેબલ દર્શાવેલ છે.

(ii) *OR ગેટ*

OR ગેટને બે કે વધુ ઈનપુટ અને એક આઉટપુટ હોય છે. આકૃતિ 14.29માં તેની લૉજિક સંજ્ઞા અને ટ્રુથ ટેબલ દર્શાવ્યાં છે. જો ઈનપુટ A *અથવા* ઈનપુટ B *અથવા* બંને 1 હોય તો આઉટપુટ Y, 1 હોય છે, એટલે કે જો એક પણ ઈનપુટ ઉચ્ચ (High) (1) હોય તો આઉટપુટ 1 મળે છે.



(a)

ઈનપુટ		આઉટપુટ
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(b)

આકૃતિ 14.29 OR ગેટ માટે (a) લોજિક સંજ્ઞા, (b) ટ્રુથ ટેબલ

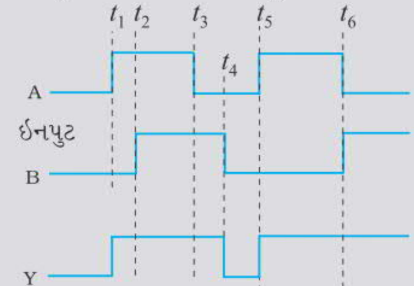
ઉપરનું ગાણિતિક કાર્ય કરવા ઉપરાંત, આ ગેટનો ઉપયોગ નીચેના ઉદાહરણમાં દર્શાવ્યા મુજબ પલ્સના તરંગ સ્વરૂપમાં ફેરફાર કરવા માટે પણ થાય છે.

ઉદાહરણ 14.8 આકૃતિ 14.30માં દર્શાવ્યા મુજબ આપેલા ઈનપુટ A અને B માટે મળતા OR ગેટના આઉટપુટ (તરંગ સ્વરૂપ) (Y)ની સત્યતા ચકાસો.

ઉકેલ : નીચે મુજબ નોંધ કરો :

- $t < t_1$ માટે, A = 0, B = 0; આથી Y = 0
- t_1 થી t_2 માટે, A = 1, B = 0; આથી Y = 1
- t_2 થી t_3 માટે, A = 1, B = 1; આથી Y = 1
- t_3 થી t_4 માટે, A = 0, B = 1; આથી Y = 1
- t_4 થી t_5 માટે, A = 0, B = 0; આથી Y = 0
- t_5 થી t_6 માટે, A = 1, B = 0; આથી Y = 1
- $t > t_6$ માટે, A = 0, B = 1; આથી Y = 1

આથી, તરંગ સ્વરૂપ Y આકૃતિ 14.30માં દર્શાવ્યા મુજબ મળશે.



આકૃતિ 14.30

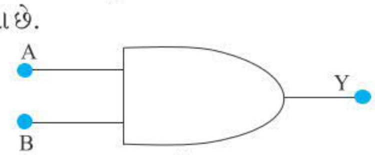
ઉદાહરણ 14.8

(iii) *AND ગેટ*

AND ગેટને બે કે વધુ ઈનપુટ અને એક આઉટપુટ હોય છે. જ્યારે ઈનપુટ A *અને* ઈનપુટ B બંને 1 હોય ત્યારે જ AND ગેટનો આઉટપુટ Y, 1 મળે છે. આ ગેટની લોજિક સંજ્ઞા અને ટ્રુથ ટેબલ આકૃતિ 14.31માં દર્શાવ્યા છે.

ઈનપુટ		આઉટપુટ
A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(b)



(a)

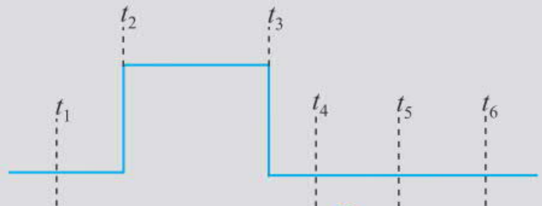
આકૃતિ 14.31 AND ગેટ માટે (a) લોજિક સંજ્ઞા, (b) ટ્રુથ ટેબલ

ઉદાહરણ 14.9 ઉદાહરણ 14.8 પ્રમાણે A અને B ઈનપુટ તરંગ સ્વરૂપ લો. AND ગેટની મદદથી મળતું આઉટપુટ તરંગ સ્વરૂપ દોરો.

ઉકેલ

- $t \leq t_1$ માટે, $A=0, B=0$; આથી $Y=0$
- t_1 થી t_2 માટે, $A=1, B=0$; આથી $Y=0$
- t_2 થી t_3 માટે, $A=1, B=1$; આથી $Y=1$
- t_3 થી t_4 માટે, $A=0, B=1$; આથી $Y=0$
- t_4 થી t_5 માટે, $A=0, B=0$; આથી $Y=0$
- t_5 થી t_6 માટે, $A=1, B=0$; આથી $Y=0$
- $t>t_6$ માટે, $A=0, B=1$; આથી $Y=0$

આપેલ મૂલ્યો પરથી, AND ગેટ માટે આઉટપુટ તરંગ સ્વરૂપ, નીચે મુજબ દોરી શકાય.

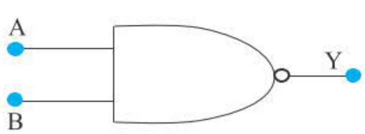


આકૃતિ 14.32

(iv) *NAND ગેટ*

AND ગેટના આઉટપુટને NOT ગેટના ઈનપુટમાં આપવાથી આ ગેટ મળે છે. જો ઈનપુટ A *અને* B બંને '1' હોય તો 'Y' આઉટપુટ 1 *નથી* મળતો. આ ગેટનું નામ NOT AND પ્રકારની વર્તણૂંકથી પડ્યું છે. આકૃતિ 14.33માં NAND ગેટની સંજ્ઞા અને ટ્રુથ ટેબલ દર્શાવ્યા છે.

NAND ગેટની મદદથી મૂળભૂત લોજિક ગેટ OR, AND, NOT (સ્વાધ્યાય 14.12 અને 14.13) તૈયાર કરી શકાતા હોવાથી NAND ગેટને *સાર્વત્રિક* (*યુનિવર્સલ*) ગેટ પણ કહે છે.



(a)

ઈનપુટ		આઉટપુટ
A	**B**	**Y**
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(b)

આકૃતિ 14.33 NAND ગેટ માટે (a) લોજિક સંજ્ઞા, (b) ટ્રુથ ટેબલ

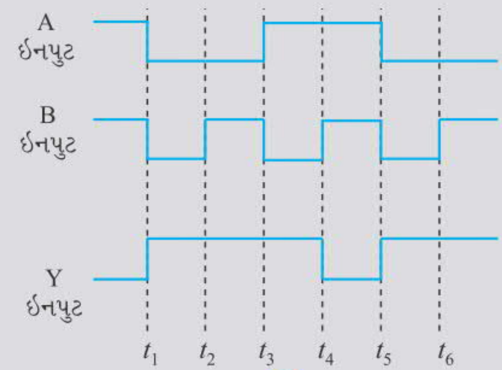
ઉદાહરણ 14.10 આપેલ ઈનપુટ A અને B માટે NAND ગેટના આઉટપુટ Y માટે આકૃતિ દોરો.

ઉકેલ

- $t<t_1$ માટે, $A=1, B=1$; આથી $Y=0$
- t_1 થી t_2 માટે, $A=0, B=0$; આથી $Y=1$
- t_2 થી t_3 માટે, $A=0, B=1$; આથી $Y=1$
- t_3 થી t_4 માટે, $A=1, B=0$; આથી $Y=1$

ઉદાહરણ 14.10

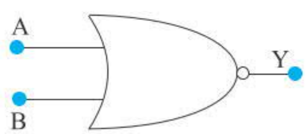
- t_4 થી t_5 માટે, A = 1, B = 1; આથી Y = 0
- t_5 થી t_6 માટે, A = 0, B = 0; આથી Y = 1
- $t > t_6$ માટે, A = 1, B = 1; આથી Y = 1



આકૃતિ 14.34

(v) *NOR ગેટ*

તેને બે કે વધારે ઈનપુટ અને એક આઉટપુટ હોય છે. OR ગેટના આઉટપુટને NOT ગેટના ઈનપુટમાં આપવાથી NOT-OR ગેટ (એટલે કે NOR ગેટ) મળે છે. જો તેના બંને ઈનપુટ A અને B '0' હોય ત્યારે જ તેનો Y આઉટપુટ 1 મળે છે, એટલે કે કોઈ એક અથવા બીજો ઈનપુટ 1 નથી. આકૃતિ 14.35માં NOR ગેટની સંજ્ઞા અને તેનું ટ્રુથ ટેબલ દર્શાવેલ છે.



(a)

ઈનપુટ		આઉટપુટ
A	**B**	**Y**
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

(b)

આકૃતિ 14.35 NOR ગેટ માટે (a) લોજિક સંજ્ઞા, (b) ટ્રુથ ટેબલ

માત્ર, NOR ગેટનો ઉપયોગ કરીને AND, OR, NOT જેવા મૂળભૂત લોજિક ગેટ તૈયાર કરી શકતા હોવાથી (સ્વાધ્યાય 14.14 અને 14.15) NOR ગેટને સાર્વત્રિક (યુનિવર્સલ) ગેટ પણ કહે છે.

ઝડપી અને નાનું : કોમ્પ્યુટર ટેકનોલૉજીનું ભવિષ્ય (FASTER AND SMALLER : THE FUTURE OF COMPUTER TECHNOLOGY)

ઈન્ટિગ્રેટેડ ચીપ (IC) એ દરેક કોમ્પ્યુટરનું હૃદય ગણી શકાય. હકીકતમાં તો IC લગભગ બધા વિદ્યુત ઉપકરણોમાં જોવા મળે છે. જેમકે, કાર, ટેલિવિઝન, CD પ્લેયર, સેલ ફોન વગેરે. અર્વાચીન મોડર્ન વ્યક્તિગત કોમ્પ્યુટરનું નાનું કદ IC વગર શક્ય ન હતું. IC એવા વિદ્યુત ઉપકરણો છે કે જે એક જ પેકેજમાં ઘણાં બધા ટ્રાન્ઝિસ્ટર, અવરોધ, કેપેસીટર અને તેમને જોડતાં તાર સમાવે છે. તમે

સેમિકન્ડક્ટર ઈલેક્ટ્રૉનિક્સ : દ્રવ્યો, રચનાઓ અને સાદા પરિપથો

*માઈક્રો પ્રોસેસર*નું નામ તો સાંભળ્યું જ હશે. માઈક્રો પ્રોસેસર એવી IC છે કે જે કોમ્પ્યુટરમાં દરેક માહિતી પર પ્રક્રિયા કરે છે, જેમકે કઈ કળો દબાવવામાં આવી છે તેનું ધ્યાન રાખવું, પ્રોગ્રામ ચલાવવા, રમતો (ગેઈમ) ચલાવવી વગેરે. ICની સૌ પ્રથમ શોધ 1958માં ટેક્સાસ ઈન્સ્ટુમેન્ટ્સ ખાતે જેક કિલ્કીએ કરી હતી અને તેના માટે તેમને 2000માં નોબેલ પારિતોષિક એનાયત થયું હતું. સેમિકન્ડક્ટર સ્ફટિક (કે ચીપ)ના ટુકડા પર *ફોટોલિથોગ્રાફી* તરીકે ઓળખાતી પ્રક્રિયા દ્વારા IC બનાવવામાં આવે છે. આમ, સમગ્ર ઈન્ફર્મેશન ટેક્નોલૉજી (IT)ની ઈન્ડસ્ટ્રીઝ સેમીકન્ડક્ટર્સ પર આધારિત છે. વર્ષો જતાં, ICની જટિલતા વધી છે અને તેનું કદ ઘટતું ગયું છે. છેલ્લાં પાંચ દસકામાં, કોમ્પ્યુટર ટેકનોલૉજીમાં અકલ્પનિય (Dramatic) લઘુકૃતિકરણ (Miniaturisation)ના કારણે અર્વાચિન કોમ્પ્યુટર્સ *ઝડપી અને નાના (કદના)* થયા છે. 1970માં INTELના સહસ્થાપક ગોર્ડન મૂરેએ દર્શાવ્યું હતું કે, IC (ચીપ)ની મેમરી ક્ષમતા દર દોઢ વર્ષે લગભગ બમણી થતી જાય છે. તે *મૂરેના નિયમ* તરીકે જાણીતું છે. ચીપ દીઠ ટ્રાન્ઝિસ્ટરોની સંખ્યા ચરઘાતાંકી રીતે (એક્ષ્પોનન્શીયલી) વધી છે અને દર વર્ષે કોમ્પ્યુટરો વધુ શક્તિશાળી (Powerful) છતાં આગલાં વર્ષ કરતાં સસ્તા બનતા જાય છે. અત્યારના વલણોને આધારે એવું માનવામાં આવે છે કે, 2020માં મળતા કોમ્પ્યુટરો 40 GHz (40,000 MHz) (આવૃત્તિએ) કાર્ય કરતા હશે અને તે ઘણા નાના, વધુ કાર્યક્ષમ અને અત્યારના કોમ્પ્યુટરો કરતાં ઘણાં સસ્તા હશે. સેમીકન્ડક્ટર અને કોમ્પ્યુટર ટેકનોલૉજીની વિસ્ફોટક વૃદ્ધિને ખૂબ જાણીતા ગોર્ડન મૂરેના વાક્ય (વિધાન) વડે દર્શાવી શકાય : ''જો સેમીકન્ડક્ટર ઈન્ડસ્ટ્રી જેટલી ઝડપથી ઓટોઈન્ડસ્ટ્રીનો વિકાસ થાય તો, રોલ્સ રોય એક ગેલન દીઠ પચાસ લાખ માઈલ ચાલે અને તેને પાર્ક કરવા કરતાં ફેંકી દેવી સસ્તી પડે.''

સારાંશ

1. સેમિકન્ડક્ટર એ વર્તમાન સોલિડ સ્ટેટ ઈલેક્ટ્રૉનિક રચનાઓ (Divices) જેમકે, ડાયોડ, ટ્રાન્ઝિસ્ટર, IC વગેરેમાં વપરાતા પ્રાથમિક (પાયાના) દ્રવ્યો છે.
2. ઘટક તત્ત્વોના સ્ફટિક બંધારણ અને પરમાણ્વિક બંધારણ પરથી નક્કી થાય છે કે આપેલ દ્રવ્ય અવાહક, ધાતુ (વાહક) કે અર્ધવાહક (સેમિકન્ડક્ટર) હશે.
3. ધાતુઓની અવરોધકતા ઓછી હોય છે (10^{-2} થી 10^{-8} Ωm), અવાહકોની અવરોધકતા ઘણી વધુ હોય છે ($> 10^8$ Ωm), જ્યારે અર્ધવાહકોની (સેમિકન્ડક્ટરોની) અવરોધકતા આ બેની વચ્ચે હોય છે.
4. સેમિકન્ડક્ટર (Si, Ge) જેવા તત્ત્વોના તેમજ (GaAs, CdS વગેરે) સંયોજનોના બનેલા હોય છે.
5. શુદ્ધ સેમિકન્ડક્ટરને આંતરિક '(ઈન્ટ્રીન્ઝીક) સેમીકન્ડક્ટર્સ' કહેવાય છે. વિદ્યુતભાર વાહકો (ઈલેક્ટ્રૉન અને હોલ)ની હાજરી એ દ્રવ્યનો 'આંતરિક' ગુણધર્મ છે જે ઉષ્મીય ઉદ્દીપનના કારણે ઉદ્‌ભવે છે. શુદ્ધ અર્ધવાહકોમાં ઈલેક્ટ્રૉનની સંખ્યા (n_e) અને હોલની સંખ્યા (n_h) એક સરખી હોય છે. હોલ એ ખરેખર તો ઈલેક્ટ્રૉનની ખાલી જગ્યા છે જે અસરકારક ધન વિદ્યુતભાર ધરાવે છે.
6. શુદ્ધ સેમિકન્ડક્ટરોમાં યોગ્ય અશુદ્ધિનું 'ડોપિંગ' કરવાથી વિદ્યુત વાહકોની સંખ્યા બદલી શકાય છે. આવા સેમિકન્ડક્ટરોને એક્સ્ટ્રીન્ઝીક (અશુદ્ધ) સેમિકન્ડક્ટરો કહે છે. તે બે પ્રકારના હોય છે (n-પ્રકારના અને p-પ્રકારના).
7. n-પ્રકારના સેમિકન્ડક્ટરોમાં $n_e >> n_h$, જ્યારે p-પ્રકારના સેમિકન્ડક્ટરોમાં $n_h >> n_e$.
8. n-પ્રકારના Si કે Ge અર્ધવાહક મેળવવા માટે પેન્ટાવેલન્ટ પરમાણુઓ (ડોનર કે દાતા) જેમ કે, As, Sb, P વગેરેનું ડોપિંગ કરવામાં આવે છે, જ્યારે p-પ્રકારના Si કે Ge અર્ધવાહક મેળવવા માટે ટ્રાઈવેલન્ટ પરમાણુઓ (એક્સેપ્ટર કે ગ્રાહી) જેમ કે, B, Al, In વગેરેનું ડોપિંગ કરવામાં આવે છે.
9. દરેક કિસ્સામાં $n_e n_h = n_i^2$ તથા દ્રવ્ય *સમગ્રપણે વિદ્યુતભાર તટસ્થતા* ધરાવે છે.

10. કોઈ પણ દ્રવ્યના ઇલેક્ટ્રૉનો બે અલગ ઊર્જા બૅન્ડ (જેમને વેલેન્સ બૅન્ડ અને કન્ડકશન બૅન્ડ કહે છે)માંથી કોઈ એકમાં હોઈ શકે. કન્ડકશન બૅન્ડ ઊર્જાઓની સરખામણીમાં વેલેન્સ બૅન્ડ ઊર્જા ઓછી હોય છે. વેલેન્સ બૅન્ડના બધાં ઊર્જા સ્તરો ભરાયેલા હોય છે જ્યારે કન્ડકશન બૅન્ડના ઊર્જા સ્તરો સંપૂર્ણ ખાલી કે અધુરા ભરેલા હોઈ શકે. કન્ડકશન બૅન્ડમાં રહેલાં ઇલેક્ટ્રૉન ઘન પદાર્થમાં ગતિ કરવા માટે મુક્ત હોય છે અને તે વાહકતા માટે જવાબદાર હોય છે. વાહકતાની માત્રા (પ્રમાણ), વેલેન્સ બૅન્ડ (E_V)ના મહત્તમ સ્તર અને કન્ડકશન બૅન્ડના તળિયા (લઘુત્તમ) સ્તર E_C વચ્ચે ઊર્જા તફાવત (E_g બૅન્ડ ગેપ) પર આધાર રાખે છે. વેલેન્સ બૅન્ડમાં રહેલા ઇલેક્ટ્રૉનને ઉષ્મા, પ્રકાશ અને વિદ્યુતઊર્જા વડે ઉદ્દીપ્ત કરીને કન્ડકશન બૅન્ડમાં મોકલી શકાય છે, જેથી સેમિકન્ડક્ટરમાં પસાર થતો પ્રવાહ બદલાય છે.
11. અવાહકો માટે $E_g > 3\ eV$, સેમિકન્ડક્ટરો માટે E_gનું મૂલ્ય 0.2થી 3 eV, જ્યારે ધાતુઓ માટે $E_g \approx 0$ હોય છે.
12. બધી અર્ધવાહક રચનાઓ માટે *p-n* જંકશન મહત્વનું છે. જ્યારે આવું જંકશન બને છે, ત્યારે ઇલેક્ટ્રૉન અને હોલ ગુમાવેલા હોય તેવું બિન-ગતિશીલ આયન-કેન્દ્રો ધરાવતું 'ડીપ્લેશન સ્તર' રચાય છે. તે જંકશનના પોટેન્શિયલ બેરિયર માટે જવાબદાર છે.
13. આપેલ બાહ્ય વોલ્ટેજ બદલીને જંકશન બેરીયર (ની ઊંચાઈ) બદલી શકાય છે. ફોરવર્ડ બાયસમાં (*n*-બાજુ બેટરીના ઋણ છેડા સાથે અને *p*-બાજુ ધન છેડા સાથે જોડેલી હોય છે). બેરીયર (ની ઊંચાઈ) ઘટે છે, જ્યારે રિવર્સ બાયસમાં બેરીયર વધે છે. આથી *p-n* જંકશન ડાયોડમાં ફોરવર્ડ બાયસ પ્રવાહ વધુ (mA) હોય છે જ્યારે રિવર્સ બાયસમાં પ્રવાહ ઘણો ઓછો (μA) હોય છે.
14. એસી વોલ્ટેજને રેક્ટિફાય કરવા (જે એસી વોલ્ટેજને એક જ દિશામાં વહેવા દે છે) માટે ડાયોડનો ઉપયોગ થાય છે. કેપેસીટર કે યોગ્ય ફિલ્ટરનો ઉપયોગ કરીને ડીસી વોલ્ટેજ મેળવી શકાય છે.
15. કેટલાક વિશિષ્ટ હેતુ માટેના ડાયોડ પણ હોય છે.
16. ઝેનર ડાયોડ આવો જ એક વિશિષ્ટ હેતુ માટેનો ડાયોડ છે. રીવર્સ બાયસમાં, અમુક ચોક્કસ વોલ્ટેજ પછી, ઝેનર ડાયોડમાંથી પસાર થતો પ્રવાહ અચાનક વધે છે (બ્રેકડાઉન વોલ્ટેજ). આ ગુણધર્મનો ઉપયોગ *વોલ્ટેજ રેગ્યુલેશન*માં થાય છે.
17. *p-n* જંકશનનો ઉપયોગ કેટલાક ફોટોનિક કે ઓપ્ટોઇલેક્ટ્રૉનિક ઉપકરણો બનાવવામાં પણ થાય છે, જેમાં ફોટોન ભાગ લે છે. (a) ફોટોડાયોડમાં ફોટોન વડે ઉદ્દીપન થતાં રિવર્સ સેચ્યુરેશન પ્રવાહ બદલાય છે, જેના પરથી પ્રકાશની તીવ્રતા માપી શકાય છે. (b) સોલર સેલ, ફોટોન ઊર્જાનું વિદ્યુતમાં રૂપાંતર કરે છે. (c) લાઇટ એમિટીંગ ડાયોડ અને લેસર ડાયોડમાં બાયસ વોલ્ટેજ વડે ઇલેક્ટ્રૉનનું ઉદ્દિપન થતાં પ્રકાશ ઉદ્ભવે છે.
18. એવા કેટલાક ચોક્કસ પ્રકારના પરિપથો છે, જે 0 અને 1 સ્તર ધરાવતા ડિજિટલ ડેટા સાથે કામ પાર પાડે છે. તે ડિજિટલ ઇલેક્ટ્રૉનિક્સના વિષયમાં આવે છે.
19. ચોક્કસ પ્રકારના લોજિક કાર્યો કરતા અગત્યના ડિજિટલ પરિપથોને લોજિક ગેટ કહે છે : તેઓ OR, AND, NOT, NAND અને NOR ગેટ છે.

ગહન વિચારણાના મુદ્દાઓ

1. સેમિકન્ડક્ટરોમાં ઊર્જા પટો (E_C અથવા E_V) પદાર્થમાં કોઈ ચોક્કસ સ્થાન પર ગોઠવાયેલા હોતા નથી. આ ઊર્જાઓ તેમના સમગ્રપણે સરેરાશ મૂલ્યો હોય છે. જ્યારે તમે ચિત્રમાં E_C કે E_Vને સીધી (આડી) રેખા તરીકે જુઓ ત્યારે તેમનો અર્થ એ સમજવો જોઈએ કે તે અનુક્રમે કન્ડકશન બૅન્ડના ઊર્જા સ્તરોનું *તળિયું* કે વેલેન્સ બૅન્ડના ઊર્જા સ્તરોનું *ટોચ*નું સ્તર છે.
2. તાત્વિક સેમિકન્ડક્ટર (Si કે Ge)માંથી *n*-પ્રકાર કે *p*-પ્રકારના સેમિકન્ડક્ટર મેળવવા તેમાં 'ડોપન્ટ'ને અશુદ્ધિ તરીકે ઉમેરવામાં આવે છે. સંયોજન સેમિકન્ડક્ટરમાં તેમના સાપેક્ષ પ્રમાણમાં ફેરફાર કરવાથી સેમિકન્ડક્ટરનો પ્રકાર બદલી શકાય છે. ઉદાહરણ તરીકે, આદર્શ

GaAsમાં Ga : Asનો ગુણોત્તર 1 : 1 છે પરંતુ Ga-Rich અથવા As-Richમાં તે પ્રમાણ અનુક્રમે $Ga_{1.1}As_{0.9}$ અથવા $Ga_{0.9}As_{1.1}$ હોઈ શકે. વ્યાપક રૂપે અશુદ્ધિઓનું પ્રમાણ, સેમીકન્ડક્ટરના ગુણધર્મો ઘણી રીતે બદલે છે.

3. વર્તમાન સમયના પરિપથમાં ઘણા લોજિક ગેટ કે પરિપથો એક જ 'ચીપ' પર રચવામાં આવે છે (ઇન્ટિગ્રેટ કરવામાં આવે છે). તેમને ઇન્ટિગ્રેટેડ સર્કિટ (IC) કહે છે.

સ્વાધ્યાય

14.1 *n*-પ્રકારના સિલિકોન માટે નીચેના વિધાનોમાંથી કયું સાચું છે ?

(a) ઇલેક્ટ્રૉન મેજોરિટી વાહકો છે અને ટ્રાઈવેલન્ટ પરમાણુઓ ડોપન્ટ છે.

(b) ઇલેક્ટ્રૉન માઇનોરિટી વાહકો છે અને પેન્ટાવેલન્ટ પરમાણુઓ ડોપન્ટ છે.

(c) હોલ્સ માઇનોરિટી વાહકો છે અને પેન્ટાવેલન્ટ પરમાણુઓ ડોપન્ટ છે.

(d) હોલ્સ મેજોરિટી વાહકો છે અને ટ્રાઈવેલન્ટ પરમાણુઓ ડોપન્ટ છે.

14.2 *p*-પ્રકારના સેમિકન્ડક્ટર માટે સ્વાધ્યાય 14.1માં આપેલ કયા વિધાન સત્ય છે ?

14.3 કાર્બન, સિલિકોન અને જર્મેનિયમ દરેકને ચાર વેલેન્સ ઇલેક્ટ્રોન હોય છે. તેમને અનુક્રમે $(E_g)_C$, $(E_g)_{Si}$ અને $(E_g)_{Ge}$ જેટલા ઊર્જા બૅન્ડ ગેપ વડે છુટા પાડતા વેલેન્સ અને કન્ડકશન બૅન્ડ વડે દર્શાવવામાં આવે છે. નીચેનામાંથી કયું વિધાન સત્ય છે ?

(a) $(E_g)_{Si} < (E_g)_{Ge} < (E_g)_C$

(b) $(E_g)_C < (E_g)_{Ge} > (E_g)_{Si}$

(c) $(E_g)_C > (E_g)_{Si} > (E_g)_{Ge}$

(d) $(E_g)_C = (E_g)_{Si} = (E_g)_{Ge}$

14.4 બાયસિંગ કર્યા વગરના *p-n* જંકશનમાં, હોલ *p*-વિસ્તારમાંથી *n*-વિસ્તારમાં વિસરણ (Diffuse) પામે છે કારણ કે,

(a) *n*-વિસ્તારના મુક્ત ઇલેક્ટ્રૉન તેમને આકર્ષે છે.

(b) તેઓ સ્થિતિમાન તફાવતના કારણે જંકશનમાં થઈને ગતિ કરે છે.

(c) *p*-વિસ્તારમાં હોલની સંખ્યા-ઘનતા *n*-વિસ્તાર કરતાં વધુ હોય છે.

(d) ઉપરના બધા.

14.5 જ્યારે *p-n* જંકશનને ફોરવર્ડ બાયસ આપવામાં આવે, ત્યારે તે

(a) પોટેન્શિયલ બેરિયર (ની ઊંચાઈ) વધારે છે.

(b) બહુમતી વાહકોનો પ્રવાહ ઘટાડીને શૂન્ય કરે છે.

(c) પોટેન્શિયલ બેરિયલ (ની ઊંચાઈ) ઘટાડે છે.

(d) ઉપરનામાંથી એકપણ નહીં.

14.6 અર્ધ તરંગ રેક્ટિફિકેશનમાં ઈનપુટ આવૃત્તિ 50 Hz હોય તો આઉટપુટ આવૃત્તિ કેટલી હશે ? આ જ ઈનપુટ આવૃત્તિ માટે પૂર્ણ તરંગ રેક્ટિફાયરની આઉટપુટ આવૃત્તિ કેટલી હશે ?

14.7 2.8 *e*Vની બૅન્ડ ગેપ ધરાવતા સેમીકન્ડક્ટરમાંથી *p-n* ફોટો ડાયોડ બનાવેલ છે. શું તે 6000 nmની તરંગલંબાઈની પરખ (Detect) કરી શકશે ?

વધારાના સ્વાધ્યાય

14.8 એક m^3 દીઠ સિલિકોનના પરમાણુઓની સંખ્યા 5×10^{28} છે. તેને એક જ સમયે (એક સાથે) આર્સેનિકના 5×10^{22} પરમાણુ/m^3 અને ઈન્ડિયમના 5×10^{20} પરમાણુ/m^3 વડે ડોપિંગ કરવામાં આવે છે. ઈલેક્ટ્રૉન અને હોલની સંખ્યા ગણો. આપેલ છે કે $n_i = 1.5 \times 10^{16}/m^3$. આ દ્રવ્ય *n*-પ્રકારનું કે *p*-પ્રકારનું હશે ?

14.9 ઈન્ટ્રિન્ઝિક (શુદ્ધ) સેમીકન્ડક્ટરમાં ઊર્જા તફાવત $E_g = 1.2\ eV$ છે. તેની હોલ ગતિશીલતા, ઈલેક્ટ્રૉનની ગતિશીલતા (Mobility) કરતાં ઘણી ઓછી છે અને તે તાપમાન પર આધારિત નથી. તો 600 K અને 300 K તાપમાને તેની વાહકતાનો ગુણોત્તર કેટલો હશે ? શુદ્ધ (ઈન્ટ્રિન્ઝિક) વાહકની સંખ્યા ઘનતા *n*નો તાપમાન પરનો આધાર, સમીકરણ

$$n_i = n_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_BT}\right)$$ વડે અપાય છે તેમ ધારો.

અહીંયા, n_o એ અચળાંક છે.

14.10 *p-n* જંકશન ડાયોડમાં, પ્રવાહ Iનું સમીકરણ આ મુજબ છે :

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{2k_BT} - 1\right)$$

જ્યાં, I_0ને રિવર્સ સેચ્યુરેશન પ્રવાહ કહે છે, V એ ડાયોડના છેડાઓ વચ્ચે લાગતો વોલ્ટેજ છે. જે ફોરવર્ડ બાયસ માટે ધન અને રિવર્સ બાયસ માટે ઋણ છે, તથા I એ ડાયોડમાંથી પસાર થતો પ્રવાહ, k_B બૉલ્ટ્ઝમાન અચળાંક ($8.6 \times 10^{-5}\ eV/K$) અને T નિરપેક્ષ તાપમાન છે. જો આપેલ ડાયોડ માટે $I_0 = 5 \times 10^{-12}$ A અને T = 300 K હોય, તો

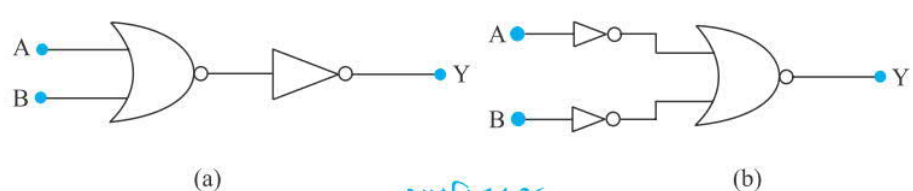
(*a*) 0.6 V જેટલા ફોરવર્ડ વોલ્ટેજ માટે ફોરવર્ડ પ્રવાહ કેટલો હશે ?

(*b*) જો ડાયોડ પરનો વોલ્ટેજ વધારીને 0.7 V કરવામાં આવે તો તેમાંથી પસાર થતાં પ્રવાહમાં કેટલો વધારો થશે ?

(*c*) ડાયનેમિક ચલ (Dynamic) અવરોધ કેટલો હશે ?

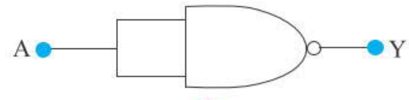
(*d*) જો રિવર્સ બાયસ વોલ્ટેજ 1 Vથી 2 V થાય તો પ્રવાહનું મૂલ્ય શોધો.

14.11 આકૃતિ 14.36માં દર્શાવ્યા મુજબ તમને બે પરિપથ આપવામાં આવ્યા છે. દર્શાવો કે પરિપથ (*a*) OR ગેટ તરીકે અને પરિપથ (*b*) AND ગેટ તરીકે કામ કરે છે.



આકૃતિ 14.36

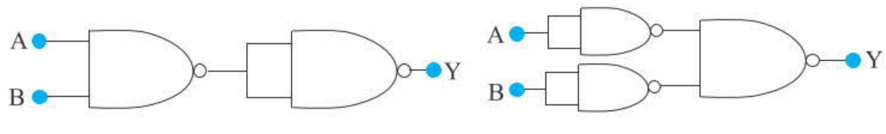
14.12 આકૃતિ 14.37માં દર્શાવ્યા મુજબ જોડેલ NAND ગેટના પરિપથ માટે ટ્રુથ ટેબલ લખો.



આકૃતિ 14.37

આ પરથી આ પરિપથ વડે થતું ચોક્કસ લોજિક કાર્ય (Operation) જણાવો.

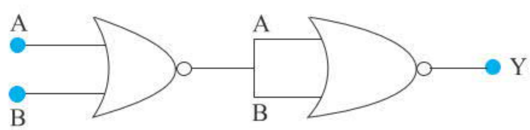
14.13 આકૃતિ 14.38માં દર્શાવ્યા મુજબ તમને NAND ગેટના બનેલા બે પરિપથ આપવામાં આવ્યા છે. આ બંને પરિપથો વડે થતું લોજિક ઓપરેશન નક્કી કરો.



(a) (b)

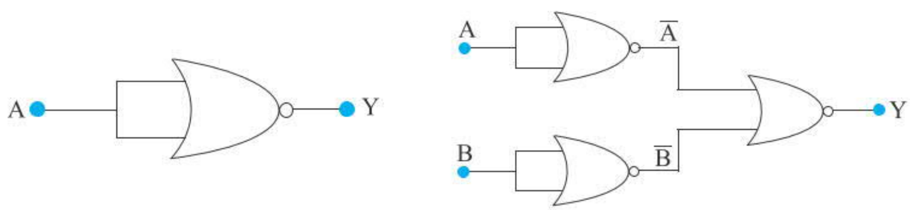
આકૃતિ 14.38

14.14 NOR ગેટનો ઉપયોગ કરીને બનેલા નીચેની આકૃતિ 14.39માં આપેલ પરિપથ માટે ટ્રુથ ટેબલ લખો અને આ પરિપથ કયું લોજિક ઓપરેશન (OR, AND, NOT) કરે છે તે નક્કી કરો.
(Hint : જો A = 0, B = 1 તો બીજા NOR ગેટના A અને B ઇનપુટ 0 હશે અને તેથી Y = 1. તે જ રીતે A અને Bના બીજા મૂલ્યો માટે Yના મૂલ્યો શોધો. આ ટ્રુથ ટેબલને OR, AND, NOT ગેટના ટ્રુથ ટેબલ સાથે સરખાવો અને સાચો જવાબ શોધો).



આકૃતિ 14.39

14.15 માત્ર NOR ગેટનો ઉપયોગ કરીને આકૃતિ 14.40 મુજબ બનતા પરિપથો માટે ટ્રુથ ટેબલ લખો. આ પરિપથો વડે થતા લોજિક ઓપરેશન (OR, AND, NOT) નક્કી કરો.



(a) (b)

આકૃતિ 14.40