अध्याय–16
इलेक्ट्रॉनिकी (Electronics)

विज्ञान एवं तकनीकी के इस युग में हुई प्रगति में इलेक्ट्रानिकी का बहुत बड़ा योगदान है। दूरसंचार, उपग्रह संचार, मनोरंजन के क्षेत्रों से लेकर कम्प्यूटर, मौसम विज्ञान व नाभिकीय भौतिकी जैसे क्षेत्रों में भी इलेक्ट्रॉनिक उपकरणों का प्रयोग किया जाता है। इलेक्ट्रॉनिक युक्तियों में इलेक्ट्रान के प्रवाह को नियंत्रित कर कार्य संपादित किए जाते हैं। यद्यपि निर्वात नलिकाओं (vacuum tubes) पर आधारित युक्तियों के निर्माण के उपरान्त ही इलेक्ट्रॉनिकी का युग प्रारम्भ हुआ पर वर्तमान में अर्धचालकों पर आधारित युक्तियों ने लगभग सभी उपयोगों में निर्वात नलिका युक्तियों को प्रतिस्थापित कर दिया है। अर्धचालक युक्तियों ने न केवल इलेक्ट्रानिक उपकरणों को आकार में छोटा व कार्य कुशलता में अधिक दक्ष बनाया है बल्कि इनकी कम लागत ने इन्हें सर्वसाधारण के उपयोग हेतु सुलभ बनाया है।

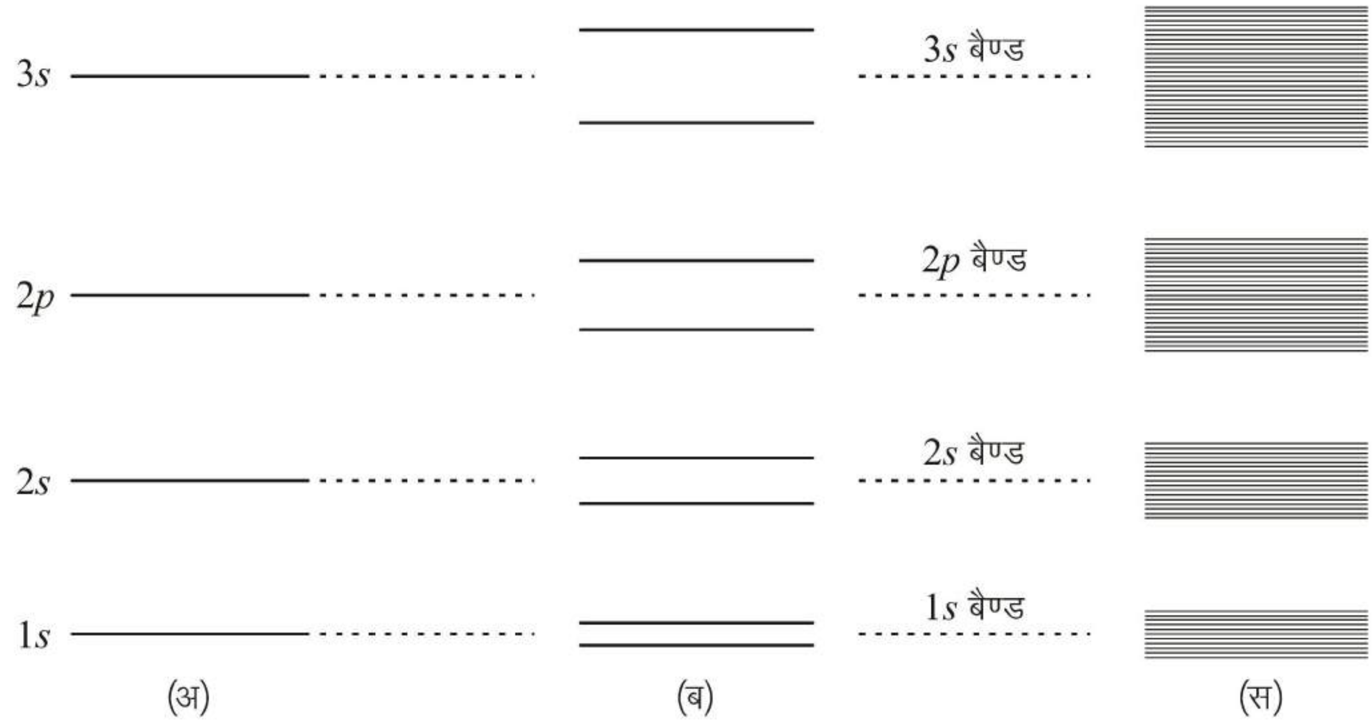
उदाहरण के रूप में पर्सनल कम्प्यूटर को देखा जा सकता है जो आकार में बहुत छोटा है जबकि निर्वात नलिका पर आधारित पुरातन कम्प्यूटर किसी बड़े कमरे के आकार के होने के साथ केवल साधारण गणनाओं के कार्य तक ही सीमित थे। सौर ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में बदलने में कार्य आ रही युक्ति सौर सेल (Solar cell) भी अर्द्धचालकों से ही निर्मित है। अर्धचालक युक्तियों के व्यवहार की जानकारी के लिये अर्धचालकों के सैद्धान्तिक पक्ष की जानकारी अत्यावश्यक है। इस दृष्टि से हम इस अध्याय में अर्धचालकों की प्रकृति, इनमें चालन प्रक्रिया का अध्ययन करेगें एवं कुछ सामान्य अर्धचालक युक्तियों यथा डायोड एवं ट्रांजिस्टर के उपयोगों की भी जानकारी प्राप्त करेंगे।

16.1 ठोस में ऊर्जा बैण्ड (Energy Bands in Solids)

परमाणु संरचना संबंधी अध्ययन से हम जानते है कि किसी विलगित परमाणु (isolated atom) में इलेक्ट्रॉन सुपरिभाषित ऊर्जा स्तरों में रहने के लिये बाध्य होते हैं। परमाणु में स्थित प्रत्येक इलेक्ट्रान इन विविक्त ऊर्जा स्तरों में से किसी एक में रहता है। किसी ऊर्जा स्तर में उपस्थित हो सकने वाले इलेक्ट्रॉनों की अधिकतम संख्या पॉली अपवर्जन नियम (Pauli exclusion principle) की सहायता से निर्धारित होती है। सबसे बाहरी ऊर्जा स्तर जिसमें परमाणु की अनुत्तेजित अवस्था में इलेक्ट्रॉन उपस्थित हो सकते हैं, संयोजकता ऊर्जा स्तर (valence energy level) कहलाता है एवं इसमें उपस्थित इलेक्ट्रॉन संयोजकता इलेक्ट्रॉन कहलाते हैं। उदाहरण के लिये सोडियम (परमाणु संख्या 11) के लिये इलेक्ट्रॉनिक विन्यास $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$ है, यहाँ 3s ऊर्जा स्तर में एक इलेक्ट्रॉन उपस्थित है, जो संयोजकता इलेक्ट्रॉन है।

प्रायः अधिकांश ठोस पदार्थ जिनमें धातुएँ भी सम्मिलित हैं क्रिस्टलीय प्रकृति (crystalline nature) के होते हैं। क्रिस्टलीय ठोसों में परमाणु एक नियमित आवर्ती व्यवस्था में स्थित होते हैं तथा निकटवर्ती परमाणु बहुत ही अल्प दूरी जिसे जालक नियतांक (lattice constant) कहा जाता है, से पृथक होते हैं। जालक नियतांक का मान विभिन्न प्रकार के क्रिस्टलीय पदार्थों के लिये भिन्न–भिन्न होता है पर यह परमाणु के आकार की कोटि(Å) का ही होता है। स्पष्टतः निकटवर्ती परमाणुओं में इतनी अल्पदूरी होने के कारण किसी एक परमाणु के इलेक्ट्रॉन न केवल इसके नाभिक के कूलॉम बल से प्रभावित होंगे अपितु निकटवर्ती परमाणुओं के नाभिक व अन्य इलेक्ट्रॉनों द्वारा भी इन पर कूलॉम बल कार्यकारी होगा। संक्षेप में कहा जा सकता है कि ठोस के परमाणु परस्पर अन्तः क्रिया (interaction) करते हैं। वस्तुतः यह अन्तःक्रिया ही विभिन्न परमाणुओं में आबन्धन (bonding) के लिये उत्तरदायी होती है जो क्रिस्टलीय संरचना निर्मित करते हैं।

जब क्रिस्टल में परमाणु अन्तःक्रिया कर रहे हों तो ये विलगित नहीं होते हैं अतः इन परमाणुओं में इलेक्ट्रॉन के ऊर्जा स्तर विलगित परमाणु के ऊर्जा स्तर के समान नहीं रहते हैं। अन्तः क्रिया के कारण क्रिस्टल के परमाणुओं के ऊर्जा स्तर रूपांतरित हो जाते हैं। इस रूपातंरण को समझने के लिये पहले हम दो समान परमाणुओं (identical atoms) की अन्तःक्रिया पर विचार करते हैं। प्रारंभ में माना कि ये परमाणु परस्पर इतनी दूरी पर हैं कि इनमें कोई अन्तःक्रिया नहीं होती है (यदि दो परमाणुओं के मध्य दूरी इनकी रेखीय विमा ~10 Å से बहुत अधिक ~50 Å है तो ऐसा मानना संभव है) ऐसी स्थिति में दोनों परमाणुओं को विलगित माना जा सकता हैं अतः इन परमाणुओं के ऊर्जा स्तर समान एवं ठीक विलगित परमाणु के ऊर्जा स्तर की भांति होंगे। इसे चित्र16.1 (अ) में दर्शाया गया है। अब यदि दोनों परमाणु और निकट लाये जायें तो इनमें अन्तः क्रिया प्रारंभ हो जाती है। इस कारण दोनों परमाणुओं का प्रत्येक ऊर्जा स्तर दो ऊर्जा स्तरों में विभक्त(split) हो जाता है जिनमें से एक विलगित परमाणु के संगत मूल ऊर्जा से थोड़ी अधिक ऊर्जा व दूसरा मूल ऊर्जा से थोड़ी कम ऊर्जा का होता है। (चित्र16.1 (ब)) दूसरे शब्दों में यह कहा जा सकता है कि दो परमाणुओं से बने इस निकाय(system) में एकल परमाणुक तंत्र के प्रत्येक ऊर्जा स्तर के संगत दो ऊर्जा स्तरों का समूह बन जाता है। ऊर्जा स्तरों में यह परिवर्तन पॉली अपवर्जन नियम के अनुरूप ही है।



चित्र 16.1 (अ) एकल विलगित परमाणु के ऊर्जा स्तर (ब) 2 परमाणुओं की अन्तः क्रिया से ऊर्जा स्तरों में विभाजन (स) N परमाणु (क्रिस्टल संरचना में बैण्ड निर्माण)

अब हम क्रिस्टल के निर्माण की प्रक्रिया देखेंगें। सुविधा के लिये हम N सर्वसम परमाणुओं से बनने वाले एक विमीय क्रिस्टल की कल्पना करते हैं। जब यें परमाणु निकट लाये जाते हैं तब इनकी पारस्परिक अन्तःक्रियाओं के कारण प्रत्येक परमाणु के ऊर्जा स्तरों में रूपांतरण होता है इस रूपातंरण के कारण ऊर्जा स्तरों में होने वाला विभाजन अन्तःक्रिया करने वाले परमाणुओं की संख्या के समानुपाती होता है। इस कारण N परमाणुओं के निकाय में प्रत्येक परमाणु के एकल ऊर्जा स्तर के स्थान पर N ऊर्जा स्तर होंगे। यदि N का मान बहुत अधिक है तो ये N ऊर्जा स्तर इतने निकट होंगे कि इन्हें लगभग संतत ऊर्जा समूह माना जा सकता है। ये संतत ऊर्जा समूह, ऊर्जा बैण्ड कहलाते हैं। एक वास्तविक क्रिस्टलीय ठोस मेंN का मान अत्यधिक होता है यथा 10^{22} से 10^{23} परमाणु / घन सेन्टीमीटर। अतः प्रत्येक ऊर्जा बैंड में इतने ही ऊर्जा स्तर होंगे। इन ऊर्जा स्तरों में पार्थक्य (separation) भी बहुत सूक्ष्म होगा। उदाहरण के लिये यदि बैण्ड की न्यूनतम व अधिकतम ऊर्जा में1 eV का अन्तर है तथा इस बैंण्ड में 10^{22} ऊर्जा स्तर हैं तो दो निकटतम ऊर्जा स्तरों में अन्तराल लगभग 10^{-22}eV का होगा। इतने सूक्ष्म ऊर्जा अन्तराल के लिये व्यवहारिक रूप से यह माना जा सकता है कि किसी ऊर्जा बैण्ड के भीतर ऊर्जा संतत मान रखती है। ऊर्जा बैण्ड निर्माण की यह प्रक्रिया चित्र 16.1 (स) में दर्शायी गयी है। यहाँ ध्यातव्य है कि परमाणुओं को परस्पर निकट लाने की प्रक्रिया में सर्वप्रथम सभी परमाणुओं के बाह्यतम कक्षों में स्थित इलेक्ट्रॉन अन्तः क्रिया से सबसे पहले व सर्वाधिक प्रभावित होंगे। इस कारण इनके संगत ऊर्जा बैण्ड सबसे अधिक ऊर्जा चौड़ाई (energy width) के होंगे। परमाणु के आन्तरिक कक्षों पर अन्तःक्रिया का प्रभाव इतना नहीं होगा इस कारण इनके संगत ऊर्जा बैण्डों की चौड़ाई भी अपेक्षाकृत कम होगी। इसे भी चित्र 16.1 (स) में देखा जा सकता है। चित्र से यह भी स्पष्ट है कि एकल परमाणु के लिये 1s, 2s, 2p, 3s, . . . ऊर्जा स्तरों के संगत ठोस में ऊर्जा बैण्ड होते हैं जिन्हें 1s बैण्ड, 2s बैण्ड, 2p बैण्ड, 3 s बैण्ड . . . कहा जाता है। किसी विलगित परमाणु में जैसे इलेक्ट्रॉन सबसे पहले न्यूनतम ऊर्जा स्तर, फिर इससे उच्चतर ऊर्जा स्तर में भरते हुए संयोजकता स्तर तक पहुँचते हैं उसी प्रकार इन ऊर्जा बैण्डों में इलेक्ट्रॉन उपस्थित रहते हैं। एकल परमाणु के संयोजकता स्तर के संगत ठोस में संयोजी इलेक्ट्रॉन जिस बैण्ड में होते हैं उसे संयोजकता बैण्ड (valence band) कहा जाता है।

जिस प्रकार विलगित परमाणु में अनुमत विविक्त ऊर्जा स्तरों के बीच ऐसे ऊर्जा अन्तराल होते हैं जिनके संगत कोई ऊर्जा इलेक्ट्रॉनों के लिये संभव नहीं होती ठीक उसी प्रकार ठोस में ऊर्जा बैण्डों के मध्य वर्जित ऊर्जा अन्तराल(forbidden energy gaps) होते हैं। इन ऊर्जा अन्तरालों के संगत ऊर्जा का कोई भी इलेक्ट्रॉन ठोस में नहीं होता। यहाँ यह उल्लेखनीय है कि प्रत्येक ठोस में ऊर्जा बैण्डों का बनना एक जैसा नहीं होता है तथा विभिन्न ठोसों में ऊर्जा बैण्डों के ऊर्जा विस्तार एवं वर्जित ऊर्जा अन्तरालों के मान भी भिन्न होते हैं।

जिस प्रकार उपयुक्त ऊर्जा प्राप्त कर परमाणु में इलेक्ट्रॉन किसी निम्न ऊर्जा स्तर से उच्च ऊर्जा स्तर में जा सकते हैं उसी प्रकार ठोस में भी इलेक्ट्रॉनों के लिये संक्रमण(transition) संभव होते हैं। ठोस में यह संक्रमण दो प्रकार के होते हैं(1)एक ही बैण्ड के ऊर्जा

स्तरों में संक्रमण (2) विभिन्न बैण्डों के मध्य ऊर्जा संक्रमण। दोनों ही संक्रमणों के लिये उच्च ऊर्जा स्तर का रिक्त होना अनिवार्य होता है। एक ही बैण्ड के दो क्रमागत ऊर्जा स्तरों में अतिसूक्ष्म अन्तर होने के कारण इस प्रकार के संक्रमणों के लिये अल्प ऊर्जा की आवश्यकता होती है जबकि दो क्रमागत बैण्डों में संक्रमण के लिये इलेक्ट्रॉन को वर्जित ऊर्जा अन्तराल की कोटि की ऊर्जा की आवश्यकता होगी।

16.2 चालक–कुचालक एवं अर्धचालक का वर्गीकरण (Classification of Conductor, Insulator and Semi conductor)

विद्युत चालकता (electrical conductivity) एक ऐसी भौतिक राशि है जिसकी परास बहुत बड़ी है। एक ओर हम धातुओं के बारे में जानते हैं जिनकी विद्युत चालकता बहुत अधिक होती है तो दूसरी ओर क्वार्टज, अभ्रक जैसे कुचालक पदार्थ हैं जिनकी चालकता बहुत कम है। ऐसे पदार्थ भी ज्ञात हैं जिनकी सामान्य तापक्रमों पर चालकता धातुओं से बहुत कम किन्तु कुचालकों से बहुत अधिक होती हैं। इन्हें अर्धचालक कहा जाता है। सिलिकॉन व जर्मेनियम इनके उदाहरण हैं। अर्धचालकों की चालकता न केवल चालकों एवं कुचालकों के मध्यवर्ती है बल्कि इनकी चालकता का ताप के साथ परिवर्तन भी रोचक है। परम शून्य के निकट तो इनका व्यवहार कुचालकों के समान है पर ताप में वृद्धि होने पर इनकी चालकता में वृद्धि होती है जो धातुओं के लिये प्रेक्षित व्यवहार से विपरीत है। विद्युत चालन से संबंधित सामान्य सिद्धान्त जिससे आप परिचित हैं से निम्न प्रश्नों का उत्तर प्राप्त नहीं होता

(1) ठोस पदार्थों की चालकताएं भिन्न–भिन्न क्यों हैं?

(2) कोई पदार्थ अर्धचालक का व्यवहार क्यों प्रदर्शित करता है?

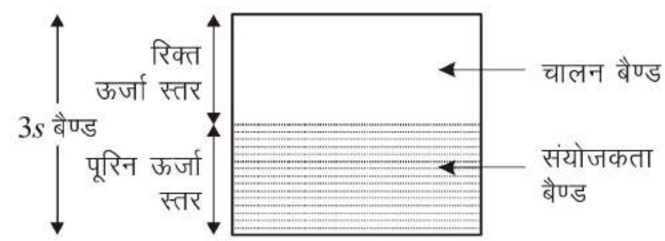
(3) धातुओं व अर्धचालकों की चालकता के ताप के साथ परिवर्तन भिन्न प्रकार के क्यों हैं?

ठोसों के ऊर्जा बैण्ड संबंधी सिद्धान्त के आधार पर इन प्रश्नों का उत्तर देते हुये इन्हें चालक, कुचालक एवं अर्धचालकों की श्रेणी में वर्गीकृत किया जा सकता है। प्रत्येक ठोस पदार्थ की अपनी बैण्ड संरचना होती है जो इसका विद्युत चालन संबंधी व्यवहार निश्चित करती है।

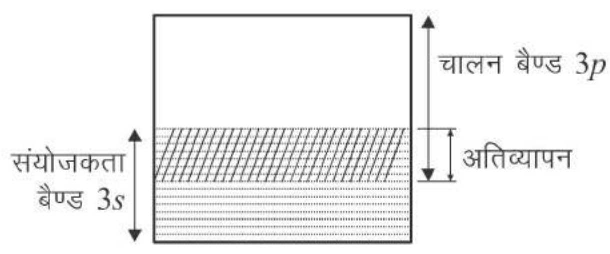
16.2.1 चालक (Conductors)

चालक ऐसे ठोस पदार्थ हैं जिनसे वह बैण्ड जिसमें संयोजकता इलेक्ट्रॉन होते हैं केवल आंशिक रूप से भरा होता है या इस बैण्ड तथा इससे अगले उच्च ऊर्जा बैण्ड में अतिव्यापन होकर एक नवीन बैण्ड बनता है जो भी आंशिक रूप से भरा होता है। इन दोनों ही स्थितियों में बैण्ड में रिक्त ऊर्जा स्तर उपलब्ध होते हैं जिनमें इलेक्ट्रॉन बाह्य विद्युत क्षेत्र से प्राप्त ऊर्जा के कारण उत्तेजित हो संक्रमण कर सकता है।

उदाहरण के लिये हम सोडियम जो एक एकल संयोजी धातु (monovoalent metal) है पर विचार करते हैं। इसके लिये बैण्ड संरचना इस प्रकार से होती है कि 1s, 2s व 2p बैण्ड अपनी क्षमता तक इलेक्ट्रानों से भरे होते हैं पर 3s बैण्ड अपनी क्षमता का आधा ही भरा होता है। इसका कारण है कि विलगित सोडियम परमाणु की इलेक्ट्रॉनिक संरचना में 1s, 2s तथा 2p ऊर्जा स्तर पूर्णतः भरे होते हैं पर 3s ऊर्जा स्तर में इसकी क्षमता दो इलेक्ट्रॉन ग्रहण करने की होने पर भी केवल एक इलेक्ट्रॉन ही है। पूर्ण भरे आन्तरिक बैण्ड विद्युत चालन की दृष्टि से उपयोगी नहीं होते हैं क्योंकि इनके ऊर्जा स्तरों में इलेक्ट्रॉन संक्रमित नहीं हो सकते। आन्तरिक बैण्ड 1s से 2s या 2s से 2p में भी इलेक्ट्रॉन संक्रमित नहीं हो सकते है क्योंकि दोनों ही स्थितियों में इलेक्ट्रॉन को रिक्त ऊर्जा स्तर उपलब्ध नहीं है। इसके विपरीत 3 s बैण्ड में इलेक्ट्रॉन को संक्रमण के लिये इस बैण्ड के आधे स्तर उपलब्ध हैं। इस कारण सोडियम का विद्युत चालकता व्यवहार इस अंशतः भरे हुए बैण्ड के कारण ही होगा। इस बैण्ड को चित्र 16.2 (अ) में दर्शाया गया है। इस बैण्ड का निचला अर्द्ध भाग संयोजी बैण्ड कहलाता है तथा ऊपर स्थित अर्द्ध भाग चालन बैण्ड (conduction band) कहलाता है क्योंकि विद्युत क्षेत्र से ऊर्जा प्राप्त कर इलेक्ट्रॉन जब चालन बैण्ड के इस भाग में पहुँचते हैं तब चालन की क्रिया में भाग लेते हैं।



चित्र 16.2 (अ) सोडियम के लिये अपूरित 3 s बैण्ड



चित्र 16.2 (ब) मैगनीशियम के लिये बैण्ड अतिव्यापन

सोडियम की तरह अन्य एकल संयोजी तत्वों में भी इसी प्रकार के अर्ध पूरित बैण्ड होते हैं।

मैगनीशियम, जिंक व इनकी तरह के अन्य तत्व, जो आवर्त्त तालिका के द्वितीय समूह के सदस्य हैं तथा द्विसंयोजी तत्व कहलाते हैं, भी धातुओं की श्रेणी में आते हैं, इस प्रकार के तत्वों की ठोस अवस्था में बैण्डों का अतिव्यापन होता है। उदाहरण के लिये मैगनीशियम (परमाणु संख्या 12) का इलेक्ट्रानिक विन्यास $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ है व परमाणु अवस्था में 3 s व 3 p ऊर्जा स्तर में ऊर्जा अन्तराल होता है परन्तु क्रिस्टल निर्माण की प्रक्रिया में ऊर्जा स्तरों में विभाजन इस प्रकार होता है कि पूर्णतः भरा 3 s बैण्ड पूर्णतः रिक्त 3 p बैण्ड से अतिव्यापित हो जाता है। इस अतिव्यापित बैण्ड में अब

इलेक्ट्रॉन को संक्रमण के लिये आवश्यक रिक्त स्तर उपलब्ध हो जाते हैं। इस स्थिति में 3 s बैण्ड को यदि संयोजकता बैण्ड कहा जाये तो 3 p बैण्ड चालन बैण्ड कहलाता है व इस प्रकार संयोजकता बैण्ड व चालन बैण्ड अतिव्यापन करते हैं। (चित्र 16.2ब)

निष्कर्षतः उपर्युक्त दोनों प्रकार की धातुओं में संयोजकता बैण्ड की अधिकतम ऊर्जा व चालन बैण्ड की न्यूनतम ऊर्जा के मध्य कोई अन्तराल नहीं होता इस कारण धातुओं के लिये वर्जित ऊर्जा अन्तराल शून्य होता है।

सामान्यतः प्रयुक्त विद्युत धारा स्त्रोतों से इलेक्ट्रॉन को प्राप्त होने वाली ऊर्जा 10^{-4} से 10^{-8} eV कोटि की होती है जो इस प्रकार के अंशतः भरे हुए बैण्ड के इलेक्ट्रॉन को इसी बैंड के रिक्त ऊर्जा स्तरों में पहुँचाने के लिये पर्याप्त है। जैसा पहले स्पष्ट किया जा चुका है कि किसी बैण्ड में ऊर्जा स्तरों में अत्यल्प सूक्ष्म अन्तर होता है इस कारण ऐसे बैण्ड के इलेक्ट्रॉन रिक्त ऊर्जा स्तर उपलब्ध होने के कारण अत्यल्प ऊर्जा प्राप्त करने में उसी प्रकार समर्थ होते हैं जैसे कि मुक्त इलेक्ट्रॉन। इस कारण ये मुक्त इलेक्ट्रॉन भी कहलाते हैं। जब इलेक्ट्रॉन सूक्ष्म ऊर्जा ग्रहण कर रिक्त ऊर्जा स्तरों में पहुँचते हैं तब इनका अपवाह होता है जिसके कारण चालन संभव होता है। धातुओं में इस प्रकार के मुक्त इलेक्ट्रॉन व इनके संक्रमण के लिये आवश्यक ऊर्जा स्तर दोनों ही विपुल मात्रा में उपलब्ध होते हैं। इस कारण धातुओं की विद्युत व ऊष्मा चालकताएँ दोनों ही उच्च होती हैं। धातुओं के लिये सामान्य तापों पर विद्युत चालकताओं की कोटि 10^6 से 10^8 म्हो / मीटर का होना इसी तथ्य को प्रदर्शित करता है।

तापीय ऊर्जा से धातुओं के मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या में कोई परिवर्तन नहीं होता है। तापीय ऊर्जा का प्रभाव केवल यह होगा कि चालन बैण्ड में उपस्थित मुक्त इलेक्ट्रॉनों की ठोस के कम्पन शील आयनों से होने वाली टक्करों में वृद्धि हो जायेगी इस कारण इनकी चालकता, ताप में वृद्धि के साथ घट जायेगी।

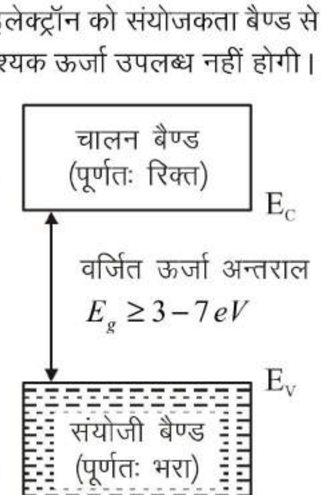
16.2.2 कुचालक (Insulator)

यह ऐसा ठोस पदार्थ होता है जिसकी ऊर्जा बैण्ड संरचना में संयोजकता बैण्ड पूरी तरह भरा होता है जबकि इससे उच्च ऊर्जा वाला चालन बैण्ड पूरी तरह से रिक्त होता है। इसके अतिरिक्त संयोजकता बैण्ड की अधिकतम ऊर्जा E_v व चालन बैण्ड की न्यूनतम ऊर्जा E_c में ऊर्जा अन्तराल जिसे वर्जित ऊर्जा अन्तराल कहा जाता है, बहुत अधिक होता है। बहुधा इस वर्जित ऊर्जा अन्तराल को

$$E_g = E_c - E_v$$

द्वारा प्रदर्शित किया जाता है (चित्र 16.3)। कुचालक पदार्थों के लिये इसका मान 3-7 eV कोटि का होता है। पूर्णतः रिक्त बैण्ड में कोई इलेक्ट्रॉन नहीं होने के कारण इस बैण्ड का विद्युत चालन में कोई योगदान नहीं होता है। इसी प्रकार पूर्णतया भरे बैण्ड में इलेक्ट्रॉन तो बहुत हैं पर इनका विद्युत क्षेत्र से ऊर्जा ग्रहण कर संक्रमण करके उत्तेजित होने के लिये आवश्यक रिक्त ऊर्जा स्तर उपलब्ध नहीं हैं, इस कारण इनका भी विद्युत चालन में योगदान नहीं होगा। जैसा पहले स्पष्ट किया जा चुका है कि सामान्य प्रयुक्त विद्युत स्त्रोतों से प्राप्त ऊर्जा अत्यल्प होती है अतः इलेक्ट्रॉन को संयोजकता बैण्ड से चालन बैण्ड में जाने के लिये आवश्यक ऊर्जा उपलब्ध नहीं होगी।

इसी प्रकार सामान्य ताप व यहाँ तक कि उच्च तापक्रमों पर भी संयोजकता बैण्ड के इलेक्ट्रॉनों को वर्जित ऊर्जा अन्तराल की कोटि की ऊर्जा उपलब्ध नहीं होती है। इस कारण सामान्य प्रयुक्त विद्युत क्षेत्रों व ताप से ऊर्जा ग्रहण कर इलेक्ट्रॉन संयोजी बैण्ड से चालन बैण्ड में नहीं पहुँच सकते हैं। इस कारण ऐसे ठोस कुचालक होते हैं।



चित्र 16.3 कुचालक हेतु ऊर्जा बैण्ड आरेख

उदाहरण के लिये हीरा (वर्जित ऊर्जा अन्तराल ~6 eV) इत्यादि कुचालकों की श्रेणी में आते हैं। प्रायः कुचालक पदार्थों की चालकता(Conductivity) 10^{-12} म्हो / मीटर से 10^{-18} म्हो / मीटर के मध्य (अर्थात् प्रतिरोधकता 10^{12} ओम–मीटर से 10^{18} ओम–मीटर) होती है।

16.2.3 अर्धचालक (Semiconductors)

अर्धचालक ऐसे ठोस पदार्थ हैं जिनकी बैण्ड संरचना मूलतः कुचालकों की तरह ही होती है केवल इनके लिये वर्जित ऊर्जा अन्तराल का मान कुचालकों की अपेक्षाकृत कम लगभग 1 eV कोटि का होता है। परम शून्य ताप पर इनमें संयोजकता बैण्ड पूरी तरह भरा हुआ एवं चालन बैंड पूर्णतया रिक्त होता है इस कारण दोनों बैंडों का विद्युत धारा चालन में कोई योगदान नहीं होता। यह ठीक वही व्यवहार है जो कुचालक प्रदर्शित करते हैं अर्थात् परम शून्य ताप पर अर्धचालक एक कुचालक की तरह व्यवहार करता है।

परिमित ताप जैसे कक्ष ताप या उससे अधिक ताप पर संयोजी बैंड के ऊपरी भाग में स्थित ऊर्जा स्तरों के कुछ इलेक्ट्रॉन तापीय ऊर्जा ग्रहण कर चालन बैंड में चले जाते हैं। इस स्थिति में अब चालन बैंड में इलेक्ट्रॉन होते हैं जो यहाँ चालन की प्रक्रिया में योगदान देते हैं। इसी तरह अब संयोजकता बैंड में कुछ ऊर्जा स्तर रिक्त हो जाते हैं जिनमें उसी बैण्ड के इलेक्ट्रॉन संक्रमित हो कर धारा चालन की प्रक्रिया में योगदान करते हैं। (संयोजकता बैंड में चालन की प्रक्रिया को धनात्मक मुक्त आवेश होल (hole) के द्वारा होना माना जाता है जिसे अगले अनुभाग में समझाया गया है) इस कारण परिमित ताप पर अर्धचालकों की चालकता कुचालकों से अधिक होती है। किन्तु तापीय ऊर्जा के कारण संयोजकता बैण्ड में उपस्थित इलेक्ट्रॉनों का बहुत ही छोटा अंश चालन बैण्ड में पहुँच पाता है। इस कारण इन पदार्थों के चालन बैंड द्वारा चालन की प्रक्रिया में इतना

योगदान नहीं दिया जाता जितना कि चालकों के चालन बैंड में बहुत बड़ी संख्या में उपस्थित इलेक्ट्रॉनों द्वारा दिया जाता है। यही कारण है कि इनकी चालकता, चालक पदार्थों की तुलना में कम होती है। उपर्युक्त विवेचन के आधार पर यह स्पष्ट है कि अर्धचालकों की चालकता कुचालकों एवं चालकों की चालकता के मध्यवर्ती (intermediate) होती है। यही इन्हें अर्धचालक कहने का कारण है।

नैज अर्धचालकों की चालकता ताप बढ़ने पर बढ़ती है जिसे अगले अनुभाग में समझाया गया है। सिलिकॉन, जर्मेनियम व गैलियम आर्सेनाइड कुछ अति उपयोगी अर्धचालकों के उदाहरण हैं। इसके अतिरिक्त लैड सल्फाईड, इन्डियम एन्टीमनाईड, गैलियम फास्फाइड व सिलिकॉन कारबाइड भी अर्धचालक है। कुछ अर्धचालकों के वर्जित ऊर्जा अन्तराल सारणी 16.1 में दिये गये हैं।

सारणी 16.1

अर्धचालक	बैण्ड वर्जित ऊर्जा अन्तराल
सिलिकॉन (Si)	1.12 eV
जर्मेनियम (Ge)	0.7 eV
इन्डियम एन्टीमनाईड (InSb)	0.17 eV
गैलियम आर्सेनाइड (GaAs)	0.33 eV

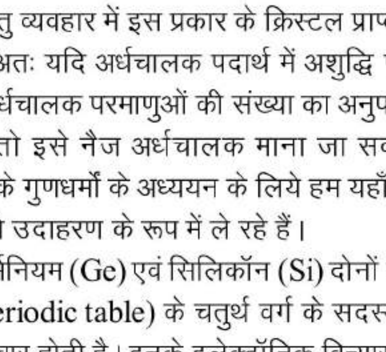
16.3 नैज अर्धचालक (Intrinsic Semiconductors)

ऐसे अर्धचालक क्रिस्टल जिनमें कोई अपद्रव्य (impurity) नहीं हो नैज आर्धचालक कहलाते हैं। आदर्श अवस्था में इस प्रकार के किसी नैज अर्धचालक में केवल उसी अर्धचालक के परमाणु होने चाहिये। किन्तु व्यवहार में इस प्रकार के क्रिस्टल प्राप्त करना संभव नहीं होता। अतः यदि अर्धचालक पदार्थ में अशुद्धि परमाणुओं की संख्या एंव अर्धचालक परमाणुओं की संख्या का अनुपात $1:10^8$ से भी कम हो तो इसे नैज अर्धचालक माना जा सकता है। नैज अर्धचालकों के गुणधर्मों के अध्ययन के लिये हम यहाँ सिलिकॉन व जर्मेनियम को उदाहरण के रूप में ले रहे हैं।

जर्मेनियम (Ge) एवं सिलिकॉन (Si) दोनों ही तत्व आवर्त तालिका (periodic table) के चतुर्थ वर्ग के सदस्य हैं व इनकी संयोजकता चार होती है। इनके इलेक्ट्रॉनिक विन्यास निम्न हैं:

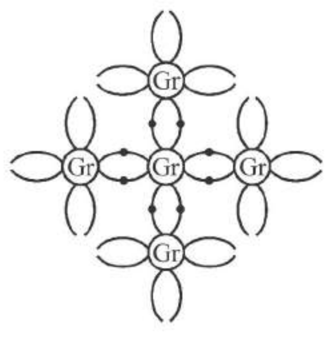
$$Ge(32) = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$$

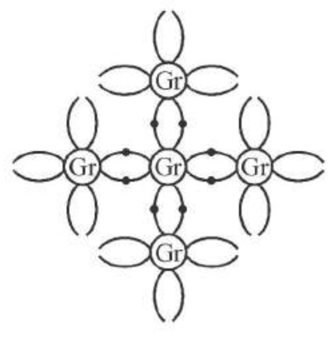
$$Si(14) = 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$$



चित्र 16.4 सिलिकॉन या (या जर्मेनियम) क्रिस्टल के लिये समचतुष्फलकीय संरचना

इन दोनों ही तत्वों की क्रिस्टल संरचना में परमाणु एक क्रमित व्यूह (ordered aray) में इस प्रकार व्यवस्थित होते हैं कि प्रत्येक परमाणु एक समचतुष्फलक (regular tetrahedron) के अन्दर होता है जिसके चार अन्य कोनों पर इसके निकटवर्ती परमाणु होते हैं। चित्र 16.4 में एक ऐसी चतुष्फलकीय इकाई दर्शायी गयी है। एक परमाणु का प्रत्येक संयोजकता इलेक्ट्रॉन, निकटवर्ती परमाणु के संयोजकता इलेक्ट्रॉन से मिलकर सहसंयोजी आबंध (covalent bond) बनाने में भागीदारी करता है। इस प्रकार प्रत्येक परमाणु चार सहसंयोजी बंधों द्वारा अपने निकटवर्ती परमाणुओं से संबद्ध रहता है। प्रत्येक सह संयोजी बंध में दो इलेक्ट्रॉन होते हैं। अध्ययन में सुविधा की दृष्टि से चित्र 16.5 में जर्मेनियम की क्रिस्टलीय संरचना को द्विविमीय रूप से दर्शाया गया है जो सिलिकॉन के लिये भी काम ली जा सकती है।





चित्र 16.5 0K ताप पर जर्मेनियम की क्रिस्टल संरचना

चित्र 16.6 इलेक्ट्रॉन–होल युग्म

परमशून्य ताप (0K) पर सभी संयोजकता इलेक्ट्रॉन, सहसंयोजी आबन्धों में परिबद्ध रहते हैं अतः विद्युत चालन के लिये एक भी मुक्त इलेक्ट्रॉन उपलब्ध नहीं होता। इस कारण परम शून्य ताप पर नैज अर्धचालक कुचालक जैसा व्यवहार प्रदर्शित करते हैं। क्रिस्टल के ताप में वृद्धि करने पर कुछ सहसंयोजक इलेक्ट्रॉन तापीय ऊर्जा (thermal energy) ग्रहण कर अपने सहसंयोजी आबन्ध तोड़ कर मुक्त हो जाते हैं। ऐसे मुक्त इलेक्ट्रॉन क्रिस्टल में यदृच्छ रूप से विचरण करते हैं तथा ये इलेक्ट्रॉन अर्धचालक पर बाह्य विद्युत क्षेत्र आरोपित करने पर विद्युत चालन में योगदान करते हैं।

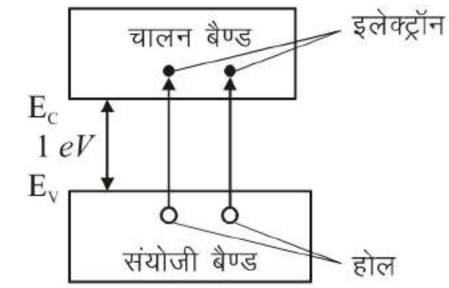
सहसंयोजी आबन्ध में से एक इलेक्ट्रॉन के बाहर निकल जाने पर रिक्तता (vacancy) उत्पन्न हो जाती है। इस रिक्तता को होल या कोटर कहते हैं। इलेक्ट्रॉन की अनुपस्थिति समान परिमाण के धनावेश के तुल्य है अतः होल को आभासी रूप से इलेक्ट्रॉन के परिणाम के समान किन्तु धनात्मक आवेश माना जा सकता है। जैसा आगे समझाया गया है, होल भी अर्धचालकों में विद्युत चालन में योगदान करते हैं। किसी भी अर्धचालक में जब भी एक सहसंयोजी आबन्ध टूटता है तो एक इलेक्ट्रॉन–होल युग्म (electron hole pair) उत्पन्न होता है। कमरे के ताप (300 K) या इसके निकटवर्ती तापक्रमों पर किसी अर्धचालक में ऐसे कई इलेक्ट्रॉन–होल युग्म उपस्थित होते हैं। परिमित ताप पर इलेक्ट्रॉन–होल युग्म उत्पादन की इस प्रक्रिया को चित्र 16.6 में दर्शाया गया है।

सामान्य ताप पर अर्धचालक में इलेक्ट्रॉन व होल यादृच्छिक गति (random motion) करते हैं। होल की यादृच्छिक गति को चित्र 16.6 में दर्शायी गई प्रक्रिया से समझा जा सकता है।

माना तापीय ऊर्जा के कारण किसी सहसंयोजी आबन्ध में स्थान A से एक इलेक्ट्रॉन मुक्त हो जाता है जिससे इस स्थान पर एक होल उत्पन्न हो जाता है। निकटवर्ती परमाणु से संयोजकता इलेक्ट्रॉन सहसंयोजी आबन्ध (स्थान B) तोड़कर स्थान A पर स्थित होल पर संक्रमण करे तो A पर सहसंयोजी आबन्ध पूर्ण हो जाता है पर अब स्थान B पर होल उत्पन्न हो जाता है। ऐसी प्रक्रिया में अत्यल्प ऊर्जा की ही आवश्यकता होती है जो इलेक्ट्रॉन–होल युग्म उत्पादन के लिये आवश्यक ऊर्जा से बहुत कम होती है। इसका कारण यह है कि यहाँ इलेक्ट्रॉन केवल एक आबन्ध से दूसरे आबन्ध में ही संक्रमण कर रहा है एवं आबन्ध में उपस्थित सभी इलेक्ट्रॉन औसतन समान ऊर्जा के होते हैं। चित्र में दर्शाये अनुसार अब C से B पर इलेक्ट्रॉन का संक्रमण होने पर होल B से C पर संक्रमण करेगा, इत्यादि। इस प्रकार किसी अर्धचालक पदार्थ में इलेक्ट्रॉन व होल दोनों यादृच्छिक गति करते हैं। क्योंकि होल को +e आवेश का मुक्त कण माना जा सकता है अतः अर्धचालकों में होल एवं इलेक्ट्रॉन दोनों ही आवेश वाहकों का कार्य करते हुए विद्युत चालन में योगदान करते हैं।

नैज अर्धचालकों में होल–इलेक्ट्रॉन युग्म उत्पादन की इस प्रक्रिया को बैण्ड सिद्धान्त के आधार पर भी समझाया जा सकता है। अर्धचालकों में वर्जित ऊर्जा अन्तराल लगभग 1 eV कोटि का होता है। परम शून्य ताप पर संयोजकता बैण्ड पूरी तरह भरा होता है तथा चालन बैण्ड पूर्णतया रिक्त होता है। अतः अर्धचालक, एक कुचालक का व्यवहार प्रदर्शित करता है। क्रिस्टल के ताप में वृद्धि करने पर कुछ इलेक्ट्रॉन पर्याप्त ऊष्मीय ऊर्जा ग्रहण कर वर्जित ऊर्जा बैण्ड को पार करने में सक्षम हो जाते हैं। ऐसे इलेक्ट्रॉन संयोजकता बैण्ड से चालन बैण्ड में पहुँच जाते हैं तथा संयोजकता बैण्ड में इन इलेक्ट्रॉनों के स्थान पर होल उत्पन्न होते हैं चित्र (16.7)। एक इलेक्ट्रॉन के संयोजकता बैंड से चालन बैंड में संक्रमण के संगत एक होल उत्पन्न होने के कारण यहाँ भी इलेक्ट्रॉन–होल युग्म की उपस्थिति समझी जा सकती है। चालन बैण्ड में उपस्थित इलेक्ट्रॉन मुक्त इलेक्ट्रॉन कहलाते हैं व यादृच्छिक गति करते हैं। इसी प्रकार संयोजी बैण्ड में होल यादृच्छिक गति करते हैं।

वस्तुतः आबन्ध टूटने से या इलेक्ट्रॉन के संयोजकता बैण्ड से चालन बैण्ड में पहुँचने पर मुक्त इलेक्ट्रॉन की तरह व्यवहार करने की बातें समतुल्य हैं। यह भी कहा जा सकता है कि तापीय ऊर्जा के कारण सहसंयोजी आबन्ध टूटने से मुक्त इलेक्ट्रॉन संयोजकता बैण्ड से चालन बैण्ड में पहुँचता है। अतः इस प्रक्रिया के लिये आवश्यक न्यूनतम ऊर्जा, बैण्ड अन्तराल ऊर्जा E_g के बराबर होगी। यहाँ यह प्रश्न उठना स्वाभाविक है कि कमरे के ताप, 300 K पर इलेक्ट्रॉन की औसत गतिज ऊर्जा की कोटि kT = 1/40 = 0.025 eV ही होती है जबकि संक्रमण हेतु आवश्यक ऊर्जा 1 eV कोटि की होती है, तब इलेक्ट्रॉन संयोजी बैण्ड से चालन बैण्ड में किस प्रकार पहुँचते हैं? यहाँ यह ध्यान देना आवश्यक है कि kT का उपयुक्त मान संयोजी बैण्ड में उपस्थित इलेक्ट्रॉन की अधिकतम प्रसंभाव्य ऊर्जा का सूचक है न कि सभी इलेक्ट्रॉन इस ऊर्जा के हैं। बहुत अल्प संख्या में ऐसे इलेक्ट्रॉन भी होंगे जो कमरे के ताप पर 1 eV की कोटि की ऊर्जा रखते हैं। ऐसे इलेक्ट्रॉन ही संयोजी बैण्ड से चालन बैण्ड में संक्रमण कर सकेंगे।



चित्र 16.7 नैज अर्द्धचालक पर ताप का प्रभाव

उपरोक्त विवेचन से स्पष्ट है कि किसी नैज अर्धचालक में सभी परिमित तापों पर ताप जनित इलेक्ट्रॉनों व होलों की संख्या समान होती है। यदि नैज अर्धचालक में प्रति एकांक आयतन में मुक्त इलेक्ट्रॉनों एवं होलों की संख्या क्रमशः n व p हो तो

$$n = p = n_i$$

$$np = n_i^2 \qquad \ldots(16.1)$$

n_i को अर्धचालक में नैज आवेश वाहक घनत्व (intrinsic charge carrier density) भी कहा जाता है।

नैज अर्धचालक के ताप में वृद्धि होने पर पूर्ववर्ती तापों की तुलना में और अधिक सहसंयोजी आबन्ध टूटने से (अथवा और अधिक इलेक्ट्रॉनों के संयोजकता बैण्ड से चालन बैण्ड में पहुँचने के कारण) इलेक्ट्रॉन होल युग्म संख्या में वृद्धि होती है अर्थात् n_i ताप पर निर्भर करता है व ताप वृद्धि के साथ बढ़ता है। इस प्रकार दो भिन्न अर्धचालक (उदाहरणार्थ सिलिकॉन एवं जर्मेनियम) यदि समान ताप पर हों तो क्योंकि इनके लिये वर्जित ऊर्जा अन्तराल E_g के मान समान नहीं है अतः अपेक्षाकृत कम E_g मान के अर्धचालक में टूटने योग्य आबन्ध अधिक होंगे या अधिक इलेक्ट्रॉन संयोजकता बैण्ड से चालन बैण्ड में संक्रमित होंगे। स्पष्टतः समान ताप पर दो अर्धचालकों जिनके लिये वर्जित ऊर्जा अन्तराल समान नहीं है में नैज आवेश वाहक घनत्व समान न होकर अपेक्षाकृत कम E_g मान वाले अर्धचालक के लिये अधिक होगा। इस प्रकार नैज चालक में नैज आवेशवाहक घनत्व n_i (i) ताप (ii) अर्धचालक पदार्थ की प्रकृति पर निर्भर करता है। गणितीय रूप में इस निर्भरता को निम्न सूत्र द्वारा दिया जाता है

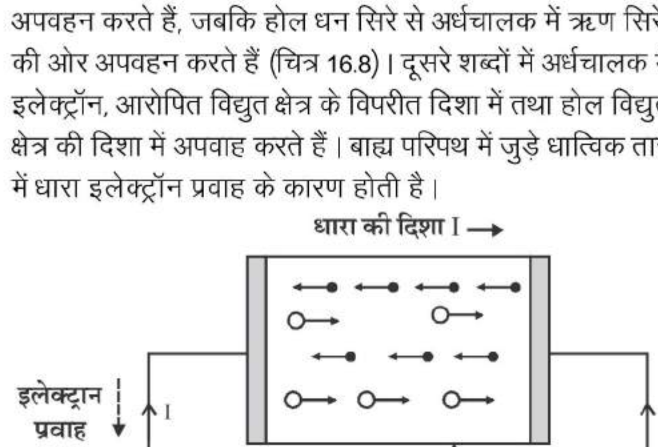
$$n_i \approx AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \qquad \ldots(16.2)$$

जहाँ T परमताप, k बोल्ट्जमान नियतांक व A एक अन्य नियतांक है।

समान ताप पर नैज सिलिकॉन $\left(E_g = 1.1eV\right)$ व जर्मेनियम $\left(E_g = 0.7\,eV\right)$ की तुलना करने पर नैज जर्मेनियम में इलेक्ट्रॉन होल युग्मों की संख्या नैज सिलिकॉन की तुलना में अधिक होगी

16.3.1 अर्धचालक में विद्युत चालन (Conduction in Semiconductor)

किसी नैज अर्धचालक के सिरों पर विद्युत विभव लगाने पर इसमें उपस्थित इलेक्ट्रॉन व होलों की यादृच्छिक गतियाँ संशोधित हो जाती हैं। इलेक्ट्रॉन, अर्धचालक में ऋण सिरे से धन सिरे की ओर अपवहन करते हैं, जबकि होल धन सिरे से अर्धचालक में ऋण सिरे की ओर अपवहन करते हैं (चित्र 16.8)। दूसरे शब्दों में अर्धचालक में इलेक्ट्रॉन, आरोपित विद्युत क्षेत्र के विपरीत दिशा में तथा होल विद्युत क्षेत्र की दिशा में अपवाह करते हैं। बाह्य परिपथ में जुड़े धात्विक तारों में धारा इलेक्ट्रॉन प्रवाह के कारण होती है।



चित्र 16.8 नैज अर्धचालक में धारा प्रवाह

सामान्यतः प्रयुक्त विद्युत क्षेत्रों के लिये इलेक्ट्रॉन व होल के अपवाह वेग आरोपित विद्युत क्षेत्र के समानुपाती होते हैं। यदि v_n व v_p क्रमशः इलेक्ट्रॉन व होल के अपवाह वेग हैं तो

$$v_n \propto E \text{ तथा } v_n = \mu_n E \qquad \ldots(16.3)$$

तथा $$v_p \propto E \text{ या } v_p = \mu_p E \qquad \ldots(16.4)$$

यहाँ μ_n व μ_p क्रमशः इलेक्ट्रॉन एवं होल की गतिशीलता (mobility) कहलाती है। इसे $m^2 V^{-1} s^{-1}$ में मापा जाता है। सदिश रूप में अपवाह वेग

$$\vec{v}_n = -\mu_n \vec{E} \text{ तथा } \vec{v}_p = \mu_p \vec{E} \qquad \ldots(16.5)$$

द्वारा व्यक्त होते हैं क्योंकि इलेक्ट्रॉन, क्षेत्र $\vec{E}$ की दिशा के विपरीत गति करते है। किसी विद्युत क्षेत्र की उपस्थिति में यदि इलेक्ट्रॉन अपवाह के कारण धारा घनत्व $\vec{J}_n$ तथा होल अपवाह के कारण $\vec{J}_p$ द्वारा व्यक्त किया जाये तो अर्धचालक में अपवाह के कारण कुल धारा धनत्व

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p \qquad \ldots(16.6)$$

धारा घनत्व की परिभाषा से

धारा घनत्व = आवेश वाहक संख्या घनत्व × आवेश × अपवाह वेग

$$\vec{J}_n = n(-e)\vec{v}_n = n(-e)\left(-\mu_n \vec{E}\right)$$

या $$\vec{J}_n = ne\mu_n \vec{E} \qquad \ldots(16.7)$$

तथा $$\vec{J}_p = p(e)\vec{v}_p = pe\mu_p \vec{E} \qquad \ldots(16.8)$$

अतः स्पष्ट है कि यद्यपि इलेक्ट्रॉन व होल दोनों का अपवाह वेग विपरीत दिशाओं में है पर दोनों के संगत धारा घनत्व एक ही दिशा (बाह्य विद्युत क्षेत्र की दिशा) में है। अतः कुल धारा घनत्व

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p$$

$$\vec{J} = ne\mu_n \vec{E} + pe\mu_p \vec{E}$$

$$\vec{J} = \left(n\mu_n + p\mu_p\right)e\vec{E} \qquad \ldots(16.9\text{अ})$$

दिया जाता है। उपर्युक्त सूत्र में क्योंकि $\vec{J}$ व $\vec{E}$ एक ही दिशा में है अतः इसे अदिश रूप में

$$J = \left(n\mu_n + p\mu_p\right)eE \qquad \ldots(16.9\text{ब})$$

द्वारा भी व्यक्त किया जाता सकता है।

विद्युत चालकता (electrical conductivity) की परिभाषानुसार अर्धचालक की विद्युत चालकता

$$\sigma = \frac{J}{E} = e\left(n\mu_n + p\mu_p\right)$$

तथा अर्धचालकता की प्रतिरोधकता (resistivity) ...(16.10)

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e\left(n\mu_n + p\mu_p\right)} \qquad \ldots(16.11)$$

द्वारा दी जाती है। उपरोक्त समस्त विवेचन अपद्रव्यी अर्द्धचालकों के लिए भी सत्य है। नैज अर्द्धचालकों के लिये क्योंकि $n = p = n_i$ है, अतः चालकता व प्रतिरोधकता क्रमशः

$$\sigma = n_i e\left(\mu_n + \mu_p\right) \qquad \ldots(16.12)$$

व $$\rho = \frac{1}{n_i e\left(\mu_n + \mu_p\right)} \qquad \ldots(16.13)$$

द्वारा भी व्यक्त की जाती है। यहाँ यह तथ्य ध्यान देने योग्य है कि इलेक्ट्रॉन व होल के आवेश परिमाण में समान होने के उपरान्त भी इनकी गतिशीलताएँ समान नहीं होती है। विद्युत धारा प्रवाह में योगदान के लिये होल ऐसे धनात्मक कण की भांति व्यवहार करता है जिसका कुछ प्रभावी द्रव्यमान (effective mass) भी हो। यह द्रव्यमान इलेक्ट्रॉन के प्रभावी द्रव्यमान से थोड़ा अधिक होता है। इस

कारण इलेक्ट्रॉन व होल है की गतिशीलताएँ भी भिन्न होती हैं। (प्रभावी द्रव्यमान के बारे में विस्तृत अध्ययन आप उच्च कक्षाओं में करेंगे) साथ ही भिन्न–भिन्न पदार्थों में इलेक्ट्रॉन (तथा होल) के प्रभावी द्रव्यमान भिन्न हो सकते हैं। इस कारण इन पदार्थों में इलेक्ट्रॉनों तथा होलों की गतिशीलताएँ भिन्न–भिन्न होंगी। सारणी 16.2 में सिलकॉन व जर्मेनियम के लिये ताप T = 300 K पर μ_n तथा μ_p व n_i के मान दिये गये हैं।

सारणी 16.2

अर्धचालक	$\mu_n (m^2/Vs)$	$\mu_p (m^2/Vs)$	$n_i (/m^{-3})$
Si	0.13	0.048	9.65×10^{15}
Ge	0.39	0.19	2.5×10^{19}

अर्धचालक में धारा प्रवाह में क्योंकि ऋणात्मक एवं धनात्मक दोनों प्रकार के मुक्त आवेश (इलेक्ट्रॉन एवं होल) भाग लेते हैं अतः अर्धचालकों में चालन द्विध्रुवीय चालन (bipolar conduction) कहलाता है। इसके विपरीत धातुओं में केवल इलेक्ट्रॉन ही धारा प्रवाह में योगदान करते हैं अर्थात् धातु में एकल ध्रुवी चालन (unipolar conduction) होता है।

16.3.2 नैज अर्धचालक की चालकता पर ताप का प्रभाव (Effect of Temperature on Electrical Conductivity of Intrinsic Semiconductors)

किसी अर्द्धचालकता की चालकता के लिए समीकरण 16.12 से स्पष्ट है कि किसी नैज अर्द्धचालकता की चालकता इसमें उपस्थित धारावाहकों की संख्या n_i पर निर्भर करती है चूंकि n_i ताप T व अर्धचालक के वर्जित ऊर्जा अन्तराल पर निर्भर करता है, अतः σ भी इन राशियाँ निर्भर करती है। किसी दिये हुए अर्धचालक (E_g = नियत) के लिये ताप T में वृद्धि होने पर σ लगभग चरघातांकी रूप से बढ़ती है (अथवा प्रतिरोधकता, ताप में वृद्धि के साथ चरघातांकी रूप से कम होती है) यद्यपि ताप बढ़ने के साथ, मुक्त इलेक्ट्रॉनों एवं होलों की, अर्धचालकों के कम्पनशील परमाणुओं से टक्कर में वृद्धि होती है जिससे μ_n व μ_p के मान में कमी आती है किन्तु यह कमी उतनी अधिक प्रभावी नहीं होती जितना कि n_i में ताप में होने वाली वृद्धि के कारण σ के मान में होने वाली वृद्धि। नैज अर्ध चालकों की ताप के साथ चालकता में वृद्धि इनका एक विशेष गुण है जो धातुओं में नहीं होता। धातुओं के लिये ताप में वृद्धि के साथ चालकता में कमी (अथवा प्रतिरोधकता में वृद्धि) प्रेक्षित होती है जो सामान्य तापक्रमों पर $\sigma \propto T^{-1}$ (या $\rho \propto T$) का व्यवहार प्रदर्शित करती है। इसका कारण यह है कि धातुओं में मुक्त इलेक्ट्रॉन घनत्व n ताप के साथ नहीं बदलता पर ताप में वृद्धि के साथ इलेक्ट्रॉन व धातु में उपस्थित कम्पनशील आयनों में होने वाली टक्करों में वृद्धि के कारण चालकता में ताप के साथ कमी आती है।

उपरोक्त विवेचना के आधार पर यह भी कहा जा सकता हे कि नैज अर्धचालकों के लिये ताप प्रतिरोध गुणांक (temperature coefficient of resistance) ऋणात्मक होता है। सिलिकॉन के लिये इसका औसत मान $\approx -0.07/K$ है। यहाँ भी ध्यान देने योग्य है कि परमशून्य ताप पर अर्धचालक में $n_i = 0$ होने से $\sigma = 0$ (कुचालक व्यवहार) होती है।

नैज अर्धचालक की चालकता बहुत कम होने के कारण अर्धचालक युक्तियों में इनका सीधा कोई उपयोग नहीं होता है किन्तु इनकी प्रतिरोधकता में ताप या आपतित प्रकाश ऊर्जा के कारण परिवर्तन होता है अतः इन्हें विकिरण सुग्राही प्रतिरोध (radiation senistive resistance) के रूप में काम लिया जा सकता है।

उदाहरण 16.1 300 K ताप पर नैज जर्मेनियम की प्रतिरोधकता का परिकलन करिए। जर्मेनियम के लिये इलेक्ट्रॉन व होल गतिशीलताऐं तथा n_i सारिणी 16.2 में दिये अनुसार है।

हलः नैज अर्धचालक के लिये प्रतिरोधकता के सूत्र

$$\rho = \frac{1}{n_i e(\mu_n + \mu_p)}$$

में $e = 1.6\times10^{-19}\, C$ तथा सारणी 16.2 से

$$\mu_n = 0.39 m^2/Vs,$$

$$\mu_p = 0.19 m^2/Vs,$$

$$n_i = 2.5\times10^{19}/m^3$$

उपर्युक्त सूत्र में रखने पर

$$\rho = \frac{1}{1.6\times10^{-19}\times2.5\times10^{19}(0.39+0.19)}$$

$$= \frac{1}{4\times0.58} = 0.43\,\Omega\, m$$

उदाहरण 16.2 किसी नैज अर्धचालक के लिये वर्जित ऊर्जा अन्तराल, E_g इलेक्ट्रॉन वोल्ट है। अर्धचालक द्वारा किस अधिकतम तरंग दैर्ध्य के आपतित प्रकाश का अवशोषण किया जा सकता है।

हलः यदि आपतित प्रकाश के फोटॉन की आवृत्ति ν है तो इस फोटॉन की ऊर्जा $h\nu$ होगी। यदि आपतित फोटॉन की ऊर्जा का मान अर्धचालक के वर्जित ऊर्जा अन्तराल से अधिक है तो अर्धचालक के संयोजकता बैण्ड में उपस्थित इलेक्ट्रॉन इन फोटॉनों को अवशोषित कर चालन बैण्ड में पहुंच सकेंगे। (यह प्रक्रिया प्रकाशीय इलेक्ट्रॉन–होल युग्म उत्पादन कहलाती है।) अतः फोटॉन की अवशोषण योग्य न्यूनतम आवृत्ति ν_{min}, सूत्र

$$h\nu_{min} = E_g$$

द्वारा दी जायेगी। यदि फोटॉन की अवशोषण योग्य अधिकतम तरंग दैर्ध्य λ_{max} है तो

$$\frac{hc}{\lambda_{max}} = E_g \text{ या } \lambda_{max} = \frac{hc}{E_g}$$

$hc = 1242\, eV\, nm$ तथा E_g को eV मात्रक में लेने पर

$$\lambda_{max} = \frac{1242}{E_g} nm$$

16.4 बाह्य अथवा अपद्रव्यी अर्धचालक (Extrinsic Semiconductor)

जैसा कि पूर्व में वर्णित किया जा चुका है नैज अर्धचालकों की चालकता सीमित होती है, इस कारण इनका सीधे बहुत उपयोग नहीं है। किसी नैज अर्धचालक में यदि अत्यल्प मात्रा में उपयुक्त अपद्रव्य या अशुद्धि (impurities of suitable kind) मिला दी जाये तो प्राप्त अर्धचालक की चालकता नैज अर्धचालक की तुलना में कई गुना अधिक हो जाती है। अर्धचालक की चालकता में वृद्धि करने के लिये इसमें अशुद्धि मिलाने की प्रक्रिया को अपमिश्रण (अथवा मादन) (doping) कहते हैं तथा इस प्रकार प्राप्त अर्धचालक बाह्य (अपद्रव्यी, अपमिश्रित) अर्धचालक कहलाता है। सिलिकॉन अथवा जर्मेनियम जैसे चतुसंयोजी अर्धचालकों के लिये अशुद्धियाँ या तो आवर्त तालिका के पंचम समूह (V-group) के तत्व यथा आर्सेनिक (As), ऐन्टिमनी (Sb), फोस्फोरस (P) आदि अथवा तृतीय समूह (group III) के तत्व यथा एल्यूमिनियम (Al) गैलियम (Ga), इन्डियम (ln), बोरोन (B) आदि होते हैं। इन अपद्रव्यों (समूह V के तत्व) के कारण या तो अर्ध चालकों में मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या बढ़ जाती है अथवा (समूह III के तत्वों के कारण) होलों की संख्या बढ़ जाती है। इस कारण अप्रदव्यी अर्धचालक दो प्रकार के होते हैं।

(i) N प्रकार के अपद्रव्यी अर्धचालक

(ii) P प्रकार के अपद्रव्यी अर्धचालक

किसी अपद्रव्यी अर्धचालक की चालकता का नियंत्रण अपमिश्रित किये गये अपद्रव्य की मात्रा द्वारा किया जाता है। अशुद्धि तत्व की मात्रा अत्यल्प होती है। नैज अर्धचालक के लगभग 10^6 परमाणुओं की संख्या में अपद्रव्य का एक परमाणु मिश्रित किया जाता है। इस कारण मूल क्रिस्टल संरचना में कोई विशेष परिवर्तन नहीं होता, किन्तु चालकता में वृद्धि बहुत अधिक होती है। उदाहरण के लिये 10^9 जर्मेनियम परमाणुओं में 1 अपद्रव्यी परमाणु मिश्रित करने पर इसकी चालकता का मान नैज अर्द्धचालक की तुलना में 10^3 गुना बढ़ जाता है। प्रायः सभी अर्धचालक युक्तियाँ अपद्रव्यी अर्धचालकों द्वारा ही निर्मित होती हैं।

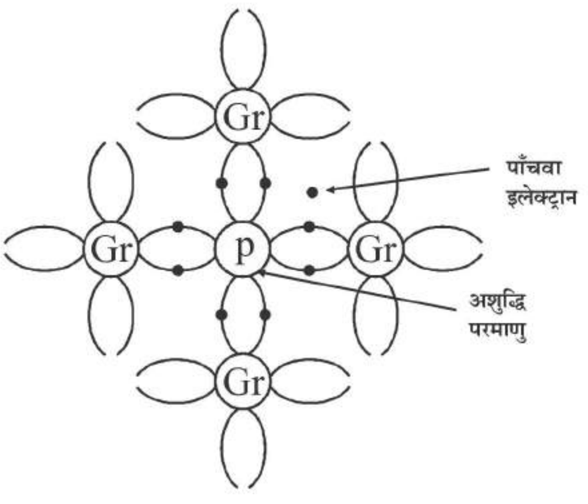
16.4.1 N प्रकार का अर्धचालक (N-type Semiconductor)

जब एक चतुर्संयोजी नैज अर्धचालक में पंच संयोजक तत्व (pentavalent element) की अशुद्धि अत्यल्प मात्रा में मिश्रित की जाती है तब N प्रकार का अर्धचालक प्राप्त होता है। इस प्रकार की अशुद्धि मिश्रण का अर्धचालक पर प्रभाव समझने के लिये हम नैज सिलिकॉन में फास्फोरस परमाणु (अशुद्धि) के मिश्रण का उदाहरण लेते हैं। इस प्रकार के मिश्रण की प्रक्रिया में सिलिकॉन की क्रिस्टल संरचना में कहीं कहीं सिलिकॉन परमाणु, फास्फोरस परमाणु द्वारा प्रतिस्थापित कर दिया जाता है। चूँकि अशुद्धि परमाणु अत्यल्प मात्रा में मिश्रित किये गए हैं। अतः इनके चारों तरफ दूर–दूर तक सिलिकॉन परमाणु होते हैं। फास्फोरस परमाणु के पास आबंध बनाने के लिये पाँच संयोजकता इलेक्ट्रॉन उपलब्ध होते हैं पर निकटवर्ती सिलिकॉन परमाणुओं में प्रत्येक के पास केवल चार संयोजकता इलेक्ट्रॉन ही होते हैं। अतः पंच संयोजी फॉस्फोरस चार निकटवर्ती परमाणुओं से सहसंयोजी आबन्ध बना लेता है पर इसके पास पाँचवाँ इलेक्ट्रॉन अपरिबद्ध (unbound) रह जाता है (चित्र 16.9)। अन्य चार इलेक्ट्रॉनों की तुलना में यह पाँचवाँ इलेक्ट्रॉन फॉस्फोरस से बहुत ही दुर्बल बल द्वारा बंधा होता है तथा इसकी बन्धन ऊर्जा लगभग 0.05 eV कोटि की होती है। यह ऊर्जा क्रिस्टल के परमाणुओं की माध्य तापीय ऊर्जा की कोटि की होने से यह इलेक्ट्रॉन तापीय ऊर्जा ग्रहण कर मुक्त हो जाता है। कक्ष ताप (300 K) पर ऐसे प्रत्येक अशुद्धि परमाणु से एक मुक्त इलेक्ट्रॉन क्रिस्टल को प्राप्त होना माना जा सकता है। दूसरे शब्दों में प्रत्येक अशुद्धि परमाणु अर्धचालक को एक इलेक्ट्रॉन का दान करता है। इस कारण अशुद्धि परमाणु को दाता परमाणु (donor atom) व इस प्रकार की अशुद्धियों को दाता अशुद्धि (donor impurity) कहते हैं। इस प्रकार से प्राप्त इलेक्ट्रॉनों का संख्या घनत्व स्पष्टतः दाता परमाणुओं की संख्या पर निर्भर करता है।

दूसरी ओर सिलिकॉन–सिलिकॉन आबन्धों को तोड़ कर इलेक्ट्रॉन प्राप्त करने के लिये आवश्यक ऊर्जा 1.1 eV की कोटि की होने के कारण ताप से प्राप्त मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या बहुत कम होती है। अतः सामान्य ताप पर 10^{10} सिलिकन परमाणुओं में से लगभग 1 परमाणु ही तापजनित इलेक्ट्रॉन–होल युग्म उत्पन्न करता है। अब यदि अर्धचालक में प्रति 10^6 सिलिकॉन परमाणु पर एक अशुद्धि फोस्फोरस परमाणु उपस्थित हैं तो प्रत्येक फास्फोरस परमाणु से एक इलेक्ट्रॉन क्रिस्टल को प्राप्त होने तथा प्रति 10^{10} परमाणुओं पर एक इलेक्ट्रॉन ताप द्वारा आबन्ध टूटने से प्राप्त होने की क्रिया को तुलनात्मक रूप से देखने पर $10^4 : 1$ अनुपात में इलेक्ट्रॉन क्रमशः दाता अशुद्धियों व तापीय रूप से प्राप्त होते हैं। स्पष्टतः इस प्रकार की अत्यल्प अशुद्धि से भी चालन योग्य मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या तथा चालकता 10^4 के गुणांक से बढ़ जाती है।

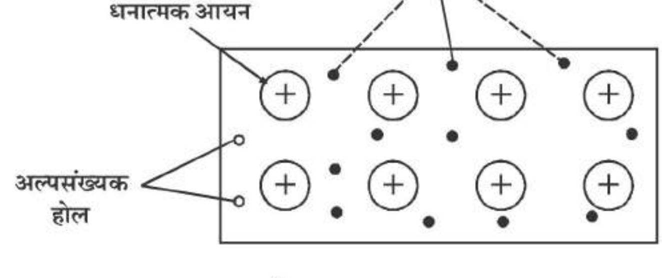
इस प्रकार के अर्धचालकों में इलेक्ट्रॉनों की संख्या होल की संख्या से अधिक होती है। अतः यहाँ इलेक्ट्रॉन बहुसंख्यक आवेश

वाहक (majority charge carriers) तथा होल अल्पसंख्यक आवेश वाहक (minority charge cariers) कहलाते हैं। इस प्रकार के अर्धचालकों को N प्रकार का अर्धचालक कहा जाता है जो इसी तथ्य को इंगित करता है कि यहाँ मुक्त धारावाहकों में ऋणात्मक (negative) इलेक्ट्रॉन बहु संख्या में है।



चित्र 16.9 सिलिकॉन में फास्फोरस परमाणु की अशुद्धि का मिश्रण

यद्यपि N प्रकार के अर्धचालक में ऋणात्मक आवेशवाहक धनात्मक वाहकों की तुलना में बहुत अधिक हैं किन्तु सम्पूर्ण N प्रकार का यह अर्धचालक विद्युत उदासीन होता है। दाता परमाणु एक इलेक्ट्रॉन का परित्याग करता है तो यह धन आयन (positive ion) बन जाता है। जितने अतिरिक्त मुक्त इलेक्ट्रॉन दाता परमाणुओं के माध्यम से क्रिस्टल को प्राप्त होते हैं उतने ही धन आयन भी निर्मित हो जाते हैं। इस कारण क्रिस्टल की विद्युत उदासीनता बनी रहती है। धन आयन, क्रिस्टल में अपने स्थान पर बने रहते है। क्योंकि इनके शेष इलेक्ट्रॉन अन्य परमाणुओं से दृढ़ता पूर्वक आबन्धन में होते हैं। अतः इनका विद्युत चालन में कोई योगदान नहीं होता चित्र (16.10)।

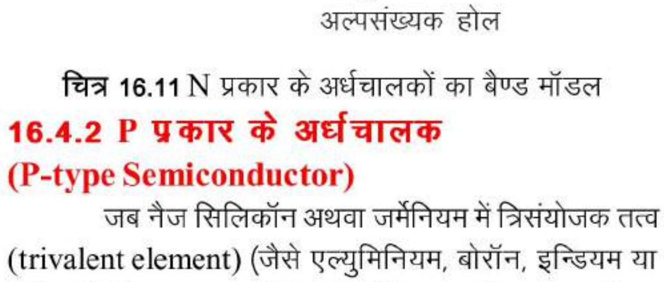


चित्र 16.10

16.4.1 बैण्ड मॉडल के आधार पर N प्रकार के अर्धचालकों की व्याख्या (Energy Band Description for N-type Semiconductors)

जब किसी नैज अर्धचालक में दाता प्रकार की अशुद्धियाँ अपमिमिश्रत की जाती हैं तो इन अशुद्धियाँ के कारण वर्जित ऊर्जा अन्तराल में चालन बैण्ड के तल के थोड़ा नीचे इन अशुद्धि परमाणुओं के ऊर्जा स्तर उपस्थित हो जाते हैं (चित्र 16.11) चालन बैण्ड की न्यूनतम ऊर्जा E_c व इन ऊर्जा स्तरों की ऊर्जा E_d का अन्तर $E_c - E_d$ अत्यल्प होता है (Si के लिये ~0.05 eV व जर्मेनियम के लिये ~0.01 eV)। अतः इन दाता स्तरों के इलेक्ट्रॉन क्रिस्टल के तापीय कम्पनों से इतनी ऊर्जा आसानी से ग्रहण कर इन स्तरों से चालन बैण्ड पहुँच जाते हैं जहाँ अब यह धारा प्रवाह में योगदान कर सकते हैं।

इसके अतिरिक्त कुछ इलेक्ट्रॉन तापीय ऊर्जा से संक्रमण करके भी चालन बैण्ड में पहुँचते हैं जैसा कि नैज अर्धचालक में होता है व इस प्रक्रिया में संयोजी बैण्ड में होल उत्पन्न होते हैं। परन्तु अब संयोजी बैण्ड में होल संख्या, चालन बैण्ड में इलेक्ट्रॉन संख्या की तुलना में कम रह जाती है, क्योंकि तापजनित इलेक्ट्रॉनों के साथ चालन बैण्ड को दाता ऊर्जा स्तरों से भी इलेक्ट्रॉन प्राप्त हो रहे हैं।



चित्र 16.11 N प्रकार के अर्धचालकों का बैण्ड मॉडल

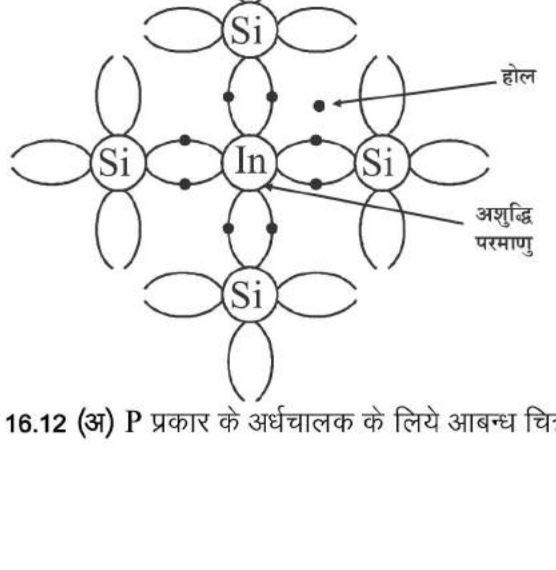
16.4.2 P प्रकार के अर्धचालक (P-type Semiconductor)

जब नैज सिलिकॉन अथवा जर्मेनियम में त्रिसंयोजक तत्व (trivalent element) (जैसे एल्युमिनियम, बोरॉन, इन्डियम या गैलियम) की अत्यल्प अशुद्धि का अपमिश्रण कर दिया जाता है तब P प्रकार का अर्धचालक प्राप्त होता है। उदाहरण के लिये नैज सिलिकॉन में इन्डियम को अशुद्धि तत्व के रूप में मिश्रित किया जाये तो इन्डियम का एक परमाणु अपमिश्रण के कारण क्रिस्टल संरचना में कहीं कहीं एक Si परमाणु का स्थान ले लेता है। इसके तीन संयोजकता इलेक्ट्रॉन निकटवर्ती तीन सिलिकॉन परमाणुओं के साथ सहसंयोजी आबन्ध बना लेते हैं, लेकिन चौथे सिलिकॉन परमाणु का एक संयोजकता इलेक्ट्रॉन आबन्ध नहीं बना पाता। अतः क्रिस्टल में

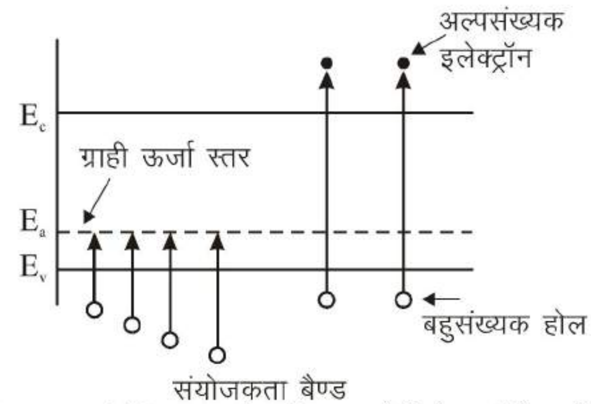
अपद्रव्य परमाणु के एक ओर रिक्त स्थान रह जाता है जो होल उत्पन्न करता है। कमरे के ताप पर ऊष्मीय ऊर्जा के कारण निकट के किसी अन्य सिलिकॉन परमाणु से एक इलेक्ट्रॉन इस अशुद्धि परमाणु के पास उपलब्ध रिक्तता में चला जाता है जिससे यहाँ आबन्ध पूरा हो जाता है (चित्र 16.12 (अ))। इस प्रक्रिया में अशुद्धि परमाणु अब ऋण आवेशित आयन बन जाता है साथ ही जिस सिलिकॉन परमाणु से इलेक्ट्रॉन रिक्तता में आया था वहाँ होल बन जाता है। इस प्रकार से ऐसे अपद्रव्यी अर्धचालक में प्रत्येक अशुद्धि परमाणु एक इलेक्ट्रॉन ग्रहण कर अर्धचालक में एक होल उत्पन्न कर देता है। ये होल उन होल के अतिरिक्त होते हैं जो आबन्ध टूटने के कारण प्राप्त होते हैं। यहाँ अपद्रव्यी परमाणु ग्राही (acceptor) कहलाते हैं क्योंकि परमाणु, होल बनाने की क्रिया में नैज अर्धचालक के आबन्धों से इलेक्ट्रॉन ग्रहण करते हैं। होलों का संख्या घनत्व अपद्रव्य के अपमिश्रण की मात्रा पर निर्भर करती है।

इस प्रकार के अपद्रव्यी अर्धचालक में मुक्त होलों की संख्या मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या से बहुत अधिक होती है अर्थात् यहाँ होल व इलेक्ट्रॉन क्रमशः बहुसंख्यक एवं अल्प संख्यक धारावाहक होते हैं। क्योंकि होल धनावेशित कणों जैसा व्यवहार करते हैं अतः ऐसे अर्धचालक को P प्रकार का अर्धचालक कहते हैं।

बैंड संरचना के आधार पर भी P प्रकार के अर्धचालकों को समझा जा सकता है। ग्राही परमाणुओं के अपमिश्रण से वर्जित ऊर्जा अन्तराल में ग्राही ऊर्जा स्तर उत्पन्न हो जाते हैं जो संयोजकता बैण्ड की अधिकतम अनुमत ऊर्जा E_V से अत्यल्प ऊपर होते हैं (चित्र 16.12 (ब))। यदि E_a इन ऊर्जा स्तरों की ऊर्जा निरूपित करें तो सिलिकॉन में $E_a - E_V \sim 0.05 eV$ (तथा जर्मेनियम में $E_a - E_V \sim 0.01 eV$) कोटि का हैं इतनी ऊर्जा क्रिस्टल के तापीय कंपनों से आसानी से प्राप्त कर संयोजकता बैण्ड से इलेक्ट्रॉनों का इन ग्राही ऊर्जा स्तर में सक्रमण हो जाता है जिससे संयोजकता बैण्ड में होल उत्पन्न हो जाते हैं।



चित्र 16.12 (अ) P प्रकार के अर्धचालक के लिये आबन्ध चित्र



चित्र 16.12 (ब) P प्रकार के अर्धचालक के लिये ऊर्जा बैण्ड मॉडल

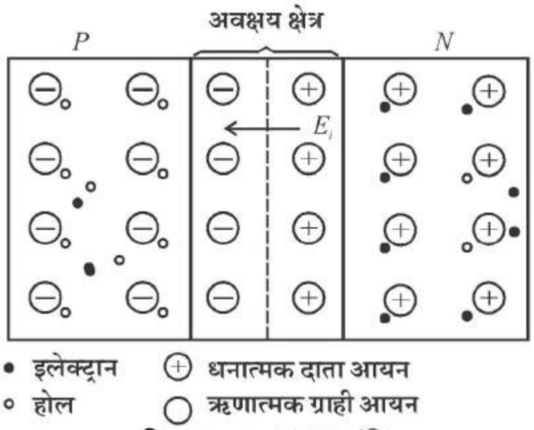
N प्रकार के अर्धचालक की तरह P प्रकार का अर्धचालक भी विद्युत उदासीन होता है। यहाँ जितने अतिरिक्त होल अशुद्धि परमाणुओं से प्राप्त होते हैं उतने ही ऋणात्मक अशुद्धि आयन होते हैं। साथ ही आबन्ध से प्राप्त इलेक्ट्रॉन होल संख्या में समान होने से क्रिस्टलों में धनात्मक व ऋणात्मक दोनों प्रकार के आवेशों का कुल योग शून्य रहता है। ऋण आयन माध्यम में अपने स्थान पर स्थिर रहते हैं अतः इनका धारा प्रवाह में कोई योगदान नहीं होता है।

16.5 P-N संधि (P-N Junction)

जब एक P प्रकार के अर्धचालक को N प्रकार के अर्धचालक से परमाण्वीय स्तर पर इस प्रकार जोड़ दिया जाये कि इनकी सम्पर्क सतह पर क्रिस्टल संरचना संतत बनी रहे तो यह सम्पर्क सतह P-N संधि तथा इस प्रकार बनी युक्ति P-N संधि डायोड (PN junction didoe) कहलाती है। वस्तुतः विशिष्ट विधियों द्वारा सिलिकॉन या जर्मेनियम एकल क्रिस्टल (single crystal) में इस प्रकार अशुद्धियाँ अपमिश्रित की जाती हैं कि इसके एक प्रभाग में P प्रकार का अर्धचालक व दूसरे प्रभाग में N प्रकार का अर्धचालक बन जाता है व इन क्षेत्रों के बीच की परिसीमा P-N संधि कहलाती है। एक P प्रकार के अर्धचालक को N प्रकार के अर्धचालक के साथ दबा कर सम्पर्कित करने पर P-N संधि नहीं बनाई जा सकती है क्योंकि इस अवस्था में सम्पर्क सतह पर क्रिस्टल संरचना संतत नहीं रहती है।

P-N संधि निर्मित होते ही N प्रकार के प्रभाग जहाँ मुक्त इलेक्ट्रॉन बहुसंख्या में है, संधि को पार कर P प्रभाग में विसरण (diffusion) आरंभ करते हैं। इसी प्रकार P प्रभाग में उपस्थित बहुसंख्यक होल संधि को पार कर N प्रभाग में विसरित होना प्रारंभ करते हैं। यद्यपि होल व इलेक्ट्रॉनों के विसरण विपरीत दिशा में हो रहे हैं किन्तु इसके कारण उत्पन्न धाराएँ समान दिशा P क्षेत्र की ओर होती हैं। इस प्रकार विसरण धारा उत्पन्न होती है जो P से N की ओर है। P प्रभाग में उपस्थित ऋणात्मक ग्राही आयन तथा N प्रभाग में उपस्थित धनात्मक दाता आयन अपने स्थान पर स्थिर रहते हैं। बहुसंख्यक आवेशों के विसरण की इस प्रक्रिया में संधि के पास के एक अतिसीमित क्षेत्र में इलेक्ट्रॉन एवं होल परस्पर पुनः संयोजन करते हैं। इस प्रकार इस सीमित क्षेत्र में इलेक्ट्रॉन व होल की संख्या में

कमी आ जाती है। इस कारण संधि के निकट P क्षेत्र में ऋण आयनों की तथा N क्षेत्र में धन आयनों की परत(layer) बन जाती है। चूँकि इस परत के क्षेत्र में मुक्त इलेक्ट्रॉन व होल की कमी हो रही है, यह परत अवक्षय परत (depletion layer) कहलाती है (चित्र 16.13)।



चित्र 16.13 P-N संधि

अवक्षय परत में उपस्थित इन आयनों के कारण इस परत में एक विद्युत क्षेत्र(electric field) उत्पन्न हो जाता है जिसकी दिशा N पार्श्व (N side) से P पार्श्व (P side) की ओर होती है। इस विद्युत क्षेत्र E_i की दिशा इस प्रकार से दिष्ट होने के कारण अब यह P से N पार्श्व में जाने वाले होल व N पार्श्व से P पार्श्व में जाने वाले इलेक्ट्रॉन दोनों को ही प्रतिकर्षित करता है। अर्थात् विसरण धारा का विरोध करता है किन्तु अब यदि P पार्श्व में उपस्थित अल्प संख्यक इलेक्ट्रॉनों व N पार्श्व के अल्पसंख्यक होलों पर विचार करें तो यह विद्युत क्षेत्र इनके अपवाह में सहायक होता है। इस कारण अल्प संख्यक धारा वाहक अपवाह धारा को जन्म देते हैं जोN से P की ओर दिष्ट होती है। संधि निर्माण के पश्चात् अत्यल्प समय में ही यह क्षेत्र इतना प्रबल हो जाता है कि अब बहुसंख्यक धारावाहकों से उत्पन्न विसरण धारा तथा अल्पसंख्यक धारावाहकों से उत्पन्न अपहवन धाराएँ परिमाण में बराबर हो जाती हैं तथा परस्पर निरस्त कर देती हैं। यही कारण है कि साम्यावस्था में PN संधि में कोई धारा नहीं बहती। इस विद्युत क्षेत्र को रोधिका विद्युत क्षेत्र (barrier electric field) कहा जाता है। इस विद्युत क्षेत्र के कारण अवक्षय परत के P प्रभाग व N प्रभाग के मध्य उपस्थित विद्युत विभवान्तर को विभव रोधिका (potential barrier) कहते हैं। यहाँ N प्रभाग P प्रभाग की तुलना में उच्च विभव पर होता है। रोधिका विभव का परिमाण P-N संधि निर्माण के लिये उपयोग में लिये गये अर्धचालक की प्रकृति, इसके ताप तथा अपमिश्रण की मात्रा पर निर्भर करता है। सामान्य रूप से उपलब्ध सिलिकॉन PN संधि के लिये यह लगभग 0.7 वोल्ट व जर्मेनियम PN संधि के लिये 0.3 वोल्ट होता है।

अवक्षय परत की चौड़ाई d, P व N प्रभागों में उपस्थित अपशुद्धियों की मात्रा पर निर्भर करती है यदि अपमिश्रण अधिक मात्रा में उपस्थित है तो यह चौड़ाई बहुत कम होती है। यह चौड़ाई माइक्रॉन (10^{-6} मीटर) कोटि की होती है। रोधिका विभव V_B व रोधिका क्षेत्र E_B परस्पर निम्नांकित सूत्र द्वारा संबंधित होते हैं।

$$E_B = \frac{V_B}{d}$$

यदि सिलिकन P-N संधि की अवक्षय परत की चौड़ाई 1 माइक्रोमीटर मान ली जाये तो इस संधि पर विद्युत क्षेत्र का मान निम्न होगा

$$E_B = \frac{0.7}{1\times10^{-6}} = 7\times10^5 \text{ वोल्ट / मीटर}$$

किसी P-N संधि को परिपथों में दो प्रकार से जोड़ा सकता है।

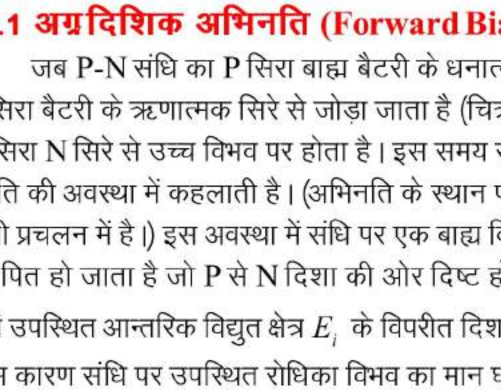
(i) जब P सिरा N सिरे की तुलना में उच्च विभव पर हो

(ii) जब N सिरा P सिरे की तुलना में उच्च विभव पर हो

उपरोक्त स्थितियाँ क्रमशः अग्रदिशिक अभिनति (forward biasing) व उत्क्रम (पश्च) अभिनति (reverse biasing) कहलाती हैं। इन दोनों स्थितियों के लियेP-N संधि का परिपथ में विद्युतीय व्यवहार बहुत अलग होता है। अब हम विस्तार से इनका अध्ययन करेंगे।

16.5.1 अग्रदिशिक अभिनति (Forward Biasing)

जब P-N संधि का P सिरा बाह्य बैटरी के धनात्मक सिरे व N सिरा बैटरी के ऋणात्मक सिरे से जोड़ा जाता है (चित्र 16.14) तो P सिरा N सिरे से उच्च विभव पर होता है। इस समय संधि अग्र अभिनति की अवस्था में कहलाती है। (अभिनति के स्थान पर बायस शब्द भी प्रचलन में है।) इस अवस्था में संधि पर एक बाह्य विद्युत क्षेत्र **E** स्थापित हो जाता है जो P से N दिशा की ओर दिष्ट होता है व संधि में उपस्थित आन्तरिक विद्युत क्षेत्र E_i के विपरीत दिशा में होता है। इस कारण संधि पर उपस्थित रोधिका विभव का मान घट जाता है अब P क्षेत्र के होल व N क्षेत्र के इलेक्ट्रॉन दोनों ही संधि की ओर गति करते हैं। इस कारण अवक्षय परत में पहले से अधिक इलेक्ट्रॉन व होल पहुँचते हैं एवं इसकी चौड़ाई घट जाती है। विभव रोधिका मान कम हो जाने के कारण संधि के आर–पार और अधिक धारावाहक विसरित होते हैं। P सिरे के होल क्षेत्र **E** की दिशा में व N सिरे के इलेक्ट्रॉन क्षेत्र **E** की विपरीत दिशा में गति करते हैं। इस स्थिति में विसरण धारा, अपवाह धारा से बहुत अधिक होती है।



चित्र 16.14 अग्र दिशिक अभिनत P-N संधि

P क्षेत्र में बैटरी के धनात्मक सिरे के समीप सहसंयोजक आबन्ध तोड़ कर कोई इलेक्ट्रॉन यदि इस सिरे तक पहुँचे तो प्रक्रिया के फलस्वरूप एक होल उत्पन्न हो जाता है जो संधि क्षेत्र की ओर गति करने लगता है व इलेक्ट्रॉन, संयोजक तार(connecting wires) में

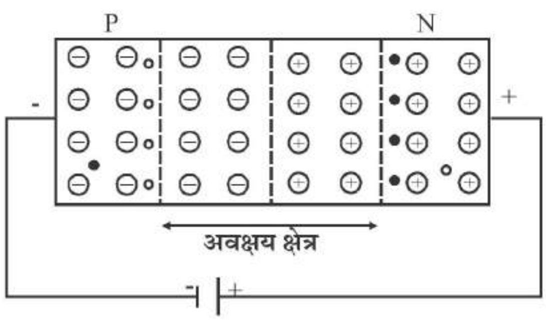
होता हुआ बैटरी के धन सिरे पर पहुँच जाता है। ठीक इसी समय बैटरी के ऋण सिरे से एक इलेक्ट्रॉनN क्षेत्र में प्रविष्ट होकर संधि की ओर गति करता है। इस प्रकार संधि से धारा प्रवाह होता है। P क्षेत्र में धारा प्रवाह होल के कारण व N क्षेत्र में धारा प्रवाह इलेक्ट्रॉन के कारण है जो इन क्षेत्रों के लिये बहुसंख्यक धारावाहक हैं अतः यह धारा प्रवाह मुख्यतः बहुत संख्यक धारा वाहकों के विसरण के कारण है। स्पष्टतः इस अभिनति द्वारा संधि में धारा प्रवाह में सहायता मिलती है इसी कारण इसे अग्रदिशिक या अग्र अभिनति कहा जाता है। बाह्य परिपथ में धारा केवल इलेक्ट्रॉनों के कारण बहती है।

यदि बैटरी द्वारा प्रयुक्त विभवान्तर बढ़ा दिया जाये तो विभवरोधिका और अधिक घट जायेगी, और अधिक बहुसंख्यक धारावाहक संधि क्षेत्र में विसरित होंगे एवं विद्युत धारा का मान बढ़ जायेगा क्योंकि संधि से धारा प्रचालन सुगमता से हो रहा है अतः इस स्थिति में संधि का प्रतिरोध भी अल्प होगा।

16.5.2 उत्क्रम अभिनति (Reverse Biasing)

जब P-N संधि का P सिरा बैटरी के ऋणात्मक सिरे व N सिरा बैटरी के धनात्मक सिरे से जोड़ा जाता है तो सन्धि उत्क्रम अभिनति (reverse biased) में कहलाती है (चित्र 16.15)। इस स्थिति में बाह्य विद्युत क्षेत्र $\mathbf{E}$ व आन्तरिक विद्युत क्षेत्र $\boldsymbol{E_i}$ समान दिशा में (N सिरे से P सिरे की तरफ) दिष्ट होते हैं, परिणामस्वरूप संधि पर उपस्थित **विभव रोधिका का मान पूर्व से भी अधिक हो जाता है।** इस कारण बहुसंख्यक धारा वाहकों का संधि से विसरित होना संभव नहीं होता अपितु P क्षेत्र में होल व N क्षेत्र में इलेक्ट्रॉन दोनों ही संधि से दूर जाने लगते हैं, **इससे अवक्षय परत की चौड़ाई बढ़ जाती है।**

इस स्थिति में संधि से बहुत ही अल्प धारा प्रवाहित होती है जिसका कारण अल्पसंख्यक धारावाहको का अपवाह है। किन्तु इन धारावाहकों की संख्या बहुत कम होने से यह धारा भी अत्यल्प होती है। इस धारा की कोटि जर्मेनियम P-N संधि के लिये माइक्रो एम्पीयर (10^{-6} A) व सिलिकॉन P-N संधि के लिये नैनो एम्पियर (10^{-9} A) होती है। सामान्य प्रयुक्त विभवान्तरों के लिये अल्पसंख्यक धारा वाहकों की संख्या अपरिवर्तित रहती है अतः यह धारा ऐसे विभवान्तरों पर नियत बनी रहती हैं इस कारण इसे उत्क्रम संतृप्त धारा (reverse saturation current) कहते हैं।

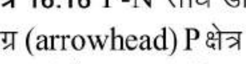


चित्र 16.15 उत्क्रम अभिनत P-N संधि

इस प्रकार उत्क्रम अभिनति में अल्प धारा प्रवाह होने सेP-N संधि का प्रतिरोध बहुत उच्च होता है। यदि संधि के ताप में वृद्धि की जाये तो और सहसंयोजी आबन्ध टूटने से अल्पसंख्यक धारावाहकों की संख्या में वृद्धि हो जाती है। परिणामस्वरूप उत्क्रम अभिनति संतृप्त धारा ताप पर बहुत अधिक निर्भर करती है व संधि का ताप बढ़ने पर बढ़ती हैं यदि विभवान्तर का मान एक सीमा से अधिक बढ़ जाता है तो धारा अचानक तेजी से बढ़ती है। इस प्रक्रिया जिसे संधि का भंजन (breakdown) कहा जाता है को आगे समझाया गया है।

16.6 P-N संधि डायोड एवं उसके विभव–धारा अभिलाक्षणिक (P-N Junction Diode and its Voltage Current Characteristics)

P-N संधि को परिपथ में जोड़ने के लिये इसके P व N सिरों पर धात्वीय इलेक्ट्रॉड बनाये जाते हैं अतः इस युक्ति को डायोड (diode) कहा जाता है। डायोड शब्द di+electrode का संक्षिप्त रूप है जिसका आशय दो इलेक्ट्रॉड से है। P-N संधि डायोड को अर्धचालक डायोड भी कहते हैं। इसे परिपथ में दर्शाने हेतु काम में लिये जाने वाला प्रतीक चित्र 16.16 में दर्शाया गया है।



चित्र 16.16 P-N संधि डायोड

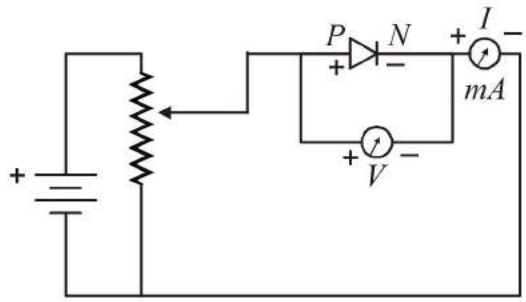
यहाँ बाणाग्र (arrowhead) P क्षेत्र को तथा पट्टी (bar) N क्षेत्र को निरूपित करती है। बाण की दिशा P से N की ओर है जो अग्रअभिनति में धारा के प्रवाह को प्रदर्शित करती है। किसी डायोड पर प्रयुक्त विभवान्तर (V) में परिवर्तन के साथ इसके संगत डायोड में बढ़ने वाली धारा (I) के परिवर्तन को दर्शाने वाले वक्र डायोड के V-I अभिलाक्षणिक कहलाते हैं।P-N संधि का अग्र अभिनति व पश्च अभिनति के लिये व्यवहार अलग–अलग होने से यहाँ से दो प्रकार के अभिलाक्षणिक वक्र खींचे जाते हैं।–

(i) अग्र अभिनति अभिलाक्षणिक (Forward bias characteristics)
(ii) उत्क्रम अभिनति अभिलाक्षणिक (Reverse bias characteristics)

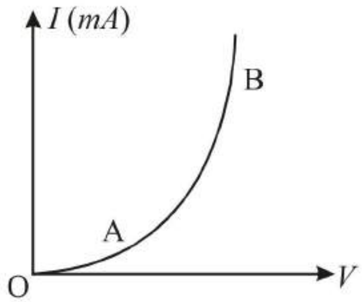
16.6.1 अग्रअभिनति अभिलाक्षणिक (Forward Bias Characteristies)

एक अग्रदिशिक अभिनत P-N संधि डायोड के V-I अभिलाक्षणिक प्राप्त किये जाने के लिये प्रायोगिक परिपथ व्यवस्था को चित्र 16.17 में प्रदर्शित किया गया है।

यहाँ विभव भाजक व्यवस्था (Potential divider arrangement) के द्वारा डायोड पर आरोपित विभवान्तर V को परिवर्तित किया जाता है जिसे डायोड के समान्तर क्रम में लगे वोल्टमीटर द्वारा पढ़ा जा सकता है। विभव के विभिन्न मानों के संगत डायोड में बहने वाली धाराI को मिली अमीटर द्वारा नोट किया जाता है। इस प्रकार प्राप्त V व I के मानों में खींचा गया वक्र चित्र 16.18 में दर्शाये अनुसार प्राप्त होता है, जो P-N संधि डायोड का अग्र अभिलाक्षणिक वक्र कहलाता है।



चित्र 16.17 P-N संधि अग्रअभिलाक्षणिक प्राप्त करने के लिए प्रायोगिक व्यवस्था

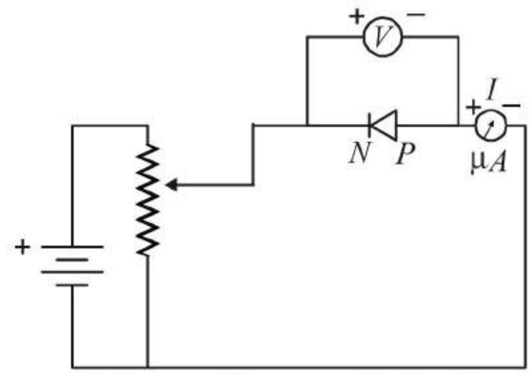


चित्र 16.18 P-N संधि अग्र अभिलाक्षणिक वक्र

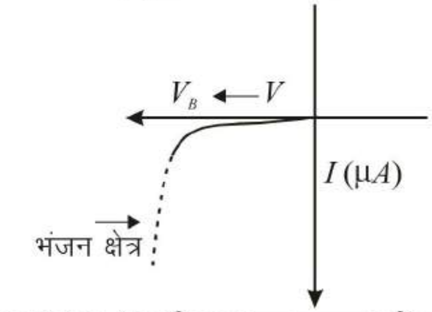
अग्र अभिनति में विभव के अतिअल्प माना (Ge के लिये 0.3 V व Si के लिये लगभग 0.7 V) के लिये अग्रधारा अत्यल्प होती है। इसका कारण आरोपित विभवान्तर का मान रोधिका विभव से कम होना है जिससे धारा प्रवाह सुगम नहीं होता। डायोड का यह व्यवहार वक्र के OA भाग द्वारा निरूपित है। आरोपित विभवान्तर का मान और बढ़ाने पर अब डायोड में धारा तेजी से लगभग चरघातांकी (exponential) रूप से बढ़ती है। यह व्यवहार वक्र के भाग AB से प्रदर्शित है। जिस विभव पर धारा का मान तेजी से बढ़ना प्रारंभ होता है उसे डायोड का 'नी' विभव (knee voltage) या 'कट इन' विभव (cutin voltage) कहा जाता है। यह बिन्दु A के विभव के सन्निकट होता है। जर्मेनियम डायोड के लिये इसका मान लगभग 0.3 V तथा Si डायोड के लिये लगभग 0.7 V होता है।

16.6.2 उत्क्रम अभिनति अभिलाक्षणिक (Reverse Bias Characteristics)

उत्क्रम अभिनत किये गये P-N संधि डायोड के V-I अभिलाक्षणिक वक्र प्राप्त करने के लिये उपयोग में ली जाने वाली प्रायोगिक व्यवस्था को परिपथ चित्र 16.19 (अ) में दर्शाया गया है। यहाँ विभवभाजक की सहायता से डायोड के P व N सिरे बैटरी के क्रमशः ऋणात्मक व धनात्मक सिरों से जोड़े गये हैं। उत्क्रमित धारा के अत्यल्प होने के कारण इस परिपथ में मिली अमीटर के स्थान पर माइक्रोअमीटर का प्रयोग किया गया हैं। विभिन्न उत्क्रमित विभवों के संगत उत्क्रमित धारा का मापन कर इनमें वक्र खींचे जाने पर यह चित्र 16.19 (ब) में दर्शाये अनुसार प्राप्त होता है।



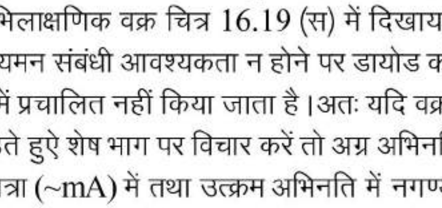
चित्र 16.19 (अ) P–N संधि उत्क्रम अभिनति अभिलाक्षणिक हेतु प्रायोगिक व्यवस्था



चित्र 16.19 (ब) P–N संधि अनुभाग उत्क्रम अभिलक्षणिक वक्र

जैसा पिछले अनुभाग में वर्णित किया जा चुका हैं कि उत्क्रम अभिनति में धारा अल्पसंख्यक धारा वाहकों के कारण होने से अत्यल्प होती है तथा लगभग नियत बनी रहती है जब तक कि उत्क्रम विभव का मान भंजन विभव (breakdown voltage) V_B तक नहीं पहुँच जाता। भंजन विभव पर विभव में अल्प वृद्धि से ही उत्क्रमित धारा तेजी से बढ़ने लगती है।

एक अर्धचालक डायोड के लिये सम्पूर्ण अग्र अभिनति एवं उत्क्रम अभिनति अभिलाक्षणिक वक्र चित्र 16.19 (स) में दिखाया गया है। वोल्टता नियमन संबंधी आवश्यकता न होने पर डायोड को कभी भी भंजन क्षेत्र में प्रचालित नहीं किया जाता है। अतः यदि वक्र के इस भाग को छोड़ते हुऐ शेष भाग पर विचार करें तो अग्र अभिनति अवस्था में अधिक मात्रा (~mA) में तथा उत्क्रम अभिनति में नगण्य (A या nA कोटि की) धारा बहती है। निष्कर्षतः P-N संधि डायोड एक दिशिक युक्ति (unidirectional device) है अर्थात् केवल एक दिशा में धारा प्रवाह को अनुमत करती है। डायोड के अभिलक्षणिक वक्र यह भी प्रदर्शित करते हैं कि यह युक्ति ओम के नियम (Ohm's law) का पालन भी नहीं करती अतः अरेखीय युक्ति (nonlinear device) है।



चित्र 16.19(स) P–N संधि अभिलाक्षणिक वक्र

डायोड में प्रवाहित धारा I की अभिनति V पर निर्भरता निम्नांकित समीकरण द्वारा प्रदर्शित की जा सकती है

$$I = I_S\left[\exp\frac{qV}{kT} - 1\right]$$

यहाँ $q = 1.6\times10^{-19}\, C, k$ बोल्ट्ज़मान नियतांक, T सन्धि का ताप तथा V संधि पर प्रयुक्त विभवान्तर है। I_S संतृप्त धारा (saturation current) है। अग्रदिशिक अभिनति में V के धनात्मक होने पर जब

$$\exp\frac{qV}{kT} >> 1$$

तब $\quad I = I_S \exp\frac{qV}{kT}$

तथा धारा विभव के साथ चरघातांकी रूप से बढ़ती है।
उत्क्रम अभिनति में V के ऋणात्मक होने के कारण

$$\exp\frac{qV}{kT} << 1$$

अतः $\quad I \approx -I_S$

या उत्क्रम अभिनति में धारा लगभग नियत बनी रहती है।

उपर्युक्त समीकरण जर्मेनियम डायोड के अभिलक्षणिक वक्रों के प्रायोगिक मानों से लगभग पूर्ण मेल रखती है। सिलिकॉन से निर्मित डायोड केवल गुणात्मक (qualitatively) रूप से इस समीकरण का पालन करते हैं। साथ ही दोनों प्रकार के डायोड के लिये उत्क्रम अभिनति में यह समीकरण भंजन विभव से अधिक विभव पर लागू नहीं होता।

16.6.3 डायोड प्रतिरोध (Diode Resistance)

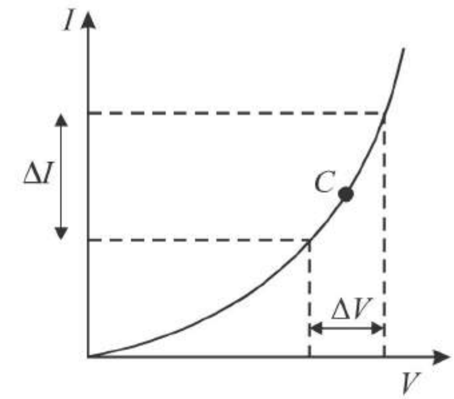
डायोड एक अरेखीय युक्ति है, यह ओम के नियम का पालन नहीं करती इस कारण डायोड का प्रतिरोध नियत नहीं होता है इस प्रकार की युक्तियों के लिये स्थैतिक अथवा डी.सी. प्रतिरोध (static or d.c. resistance) के स्थान पर गतिक प्रतिरोध (dynamic resistance) ज्ञात करना अधिक उपयोगी होता है।

(i) अग्र गतिक प्रतिरोध (Forward Dynamic Resistance)

परिभाषा से अग्र गतिक प्रतिरोध

$$r_f = \frac{\text{अग्र अभिनति विभव में अल्प परिवर्तन}}{\text{अग्र धारा में संगत परिवर्तन}} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

चित्र 16.20 में बिन्दु C के निकट अग्र प्रतिरोध की गणना के लिये ΔV व ΔI को दर्शाया गया है। यदि ΔV व ΔI अत्यल्प हैं तो बिन्दु C पर गतिक प्रतिरोध इस बिन्दु पर वक्र पर खींची गयी स्पर्श रेखा (tangent) के ढाल (slope) के मान का व्युत्क्रम होगा। अग्रगतिक प्रतिरोध सामान्यतः अल्प कुछ ओम कोटि (1 से100 Ω) का होता है।



चित्र 16.20 अग्रगतिक प्रतिरोध

(ii) उत्क्रम प्रतिरोध (Reverse Resistance)

परिभाषा से उत्क्रम प्रतिरोध

$$r_r = \frac{\text{उत्क्रम वोल्टता में अल्प परिवर्तन}}{\text{उत्क्रम धारा में संगत परिवर्तन}}$$

क्योंकि उत्क्रम अभिनति अवस्था में (भंजन से पूर्व स्थिति में) उत्क्रम धारा बहुत अल्प होती है। अतः उत्क्रम प्रतिरोध बहुत उच्च होता है। यह मेगा ओम (10^6 ohm) कोटि का होता है।

16.6.4 उत्क्रम भंजन (Reverse Breakdwon)

जैसा पूर्व में उल्लेख किया जा चुका है कि उत्क्रम अभिनति में डायोड पर विभव का मान एक निर्धारित सीमा V_B से अधिक करने पर उत्क्रम धारा अल्प न रह कर तेजी से बढ़ती है। इस प्रक्रिया को डायोड का उत्क्रम भंजन तथा जिस विभव V_B पर यह प्रारंभ होता है उसे भंजन विभव (breakdwon voltage) कहा जाता है। भंजन का यह प्रक्रम दो क्रियाविधियों में से किसी एक या दोनों के कारण हो सकता है। ये क्रिया विधियाँ हैं।

(i) ऐवेलांशी भंजन (Avlanche breakdown)

(ii) जेनर भंजन (Zener breakdwon)

(i) ऐवेलांशी भंजन (Avlanche Breakdown)

उत्क्रम अभिनति विभव के उच्चमानों पर P व N क्षेत्रों के अल्पसंख्यक आवेश उच्च वेगों से त्वरित होकर जब संधि को पार करते हैं तो इनकी वहाँ उपस्थित सहसंयोजी आबन्धों से टक्करों के कारण ये आबन्ध टूट जाते हैं। इस प्रक्रम में नये–इलेक्ट्रॉल होल युग्म मुक्त हो जाते हैं। यह आवेश वाहक भी त्वरित होकर नये इलेक्ट्रॉन होल युग्म उत्पादित करते हैं। यह प्रक्रिया संचयी(cummulative) होती है जिस कारण अल्पसंख्यक धारावाहकों की संख्या में तेजी से वृद्धि होती है व उत्क्रम धारा एकाएक बढ़ जाती है। यह प्रक्रिया ऐवेलांशी भंजन कहलाती है। यदि धारा पर नियंत्रण नहीं रखा जाये तो धारा से उत्पन्न ऊष्मा से डायोड के क्षतिग्रस्त होने की संभावना रहती है। यदि डायोड के क्षतिग्रस्त होने से पूर्व विभव का मान कम कर दिया जाये तो डायोड धारा कम हो जाती है व डायोड पुनः उत्क्रम संतृप्त व्यवहार दर्शाता है।

(ii) जेनर भंजन (Zenet Breakdown)

यह प्रक्रिया ऐसे डायोड में होती है जिनमें अपेक्षाकृत अधिक डोपिंग होने के कारण अवक्षय परत पतली होती है। ऐसी स्थिति में उत्क्रम अभिनति विभव के अपेक्षाकृत कम मान पर भी संधि पर विद्युत क्षेत्र तीव्र हो जाता है। जिससे संधि के निकट सहसंयोजी आबन्ध के इलेक्ट्रॉनों पर पर्याप्त बल लगता है व ये आबन्ध टूट जाते हैं। इस कारण अल्पसंख्यक धारा वाहकों की संख्या में वृद्धि होती है व धारा का मान तेजी से बढ़ता है। इस प्रक्रिया को जेनर भंजन कहा जाता है।

भंजन चाहे जिस प्रक्रिया से हो प्रचलित परिपाटी के अनुसार ऐसे डायोड जिनमें भंजन प्रक्रिया को उपयोग में लाया जाता है जेनर डायोड कहलाते हैं। इनके उपयोग का अध्ययन हम आगे करेंगे।

उदाहरण 16.3 किसी P-N संधि डायोड की अग्रदशिक अभिनति को 2.0 V से बढ़ाकर 2.5 V करने पर अग्र धारा का माना 16.5 mA से 26.5 mA हो जाता है। इसी डायोड की उत्क्रम अभिनति का मान 5 V से 10 V करने पर उत्क्रम धारा का मान 20 माइक्रोऐम्पियर से बढ़कर 30 माइक्रोऐम्पियर हो जाता है। इस डायोड का दोनों स्थितियों में गतिक प्रतिरोध ज्ञात कीजिये।

हल: (i) प्रश्नानुसार, अग्र अभिनति में

$$\Delta V_f = 2.5 - 2.0 = 0.5V$$

तथा अग्र दिशिक धारा में परिवर्तन

$$\Delta I_f = 26.5 - 16.5 = 10\,mA$$

अतः अग्र दिशिक गतिक प्रतिरोध

$$r_f = \frac{\Delta V_f}{\Delta I_f} = \frac{0.5V}{10mA}$$

$$= \frac{0.5V}{10\times10^{-3}A} = 0.5\times10^2 = 50\,\Omega$$

(ii) उत्क्रमित अभिनति के लिये

$$\Delta V_r = 10 - 5 = 5V$$

तथा संगत धारा परिवर्तन

$$\Delta I_r = 30 - 20 = 10\,\mu A$$

अतः उत्क्रमित गतिक प्रतिरोध

$$r_r = \frac{\Delta V_r}{\Delta I_r} = \frac{5V}{10\mu A}$$

$$= 0.5\times10^6\,\Omega = 0.5\,\text{M}$$

उदाहरण 16.4 किसी P-N संधि डायोड का अग्रअभिनति की स्थिति में गतिक प्रतिरोध 25 ओम है। अग्र अभिनत विभव में कितना परिवर्तन किया जाये कि अग्र धारा में 1 मिली एम्पियर का परिवर्तन हो जाये?

हल: अग्रदिशिक प्रतिरोध

$$r_f = \frac{\Delta V_f}{\Delta I_f}$$

$$\Delta V_f = r_f \cdot \Delta I_f$$

$$= (25)\times(1\times10^{-3})$$

$$= 25\times10^{-3}\,mV$$

$$= 25\,\text{mV}$$

अतः 25 mV का परिवर्तन करना होगा।

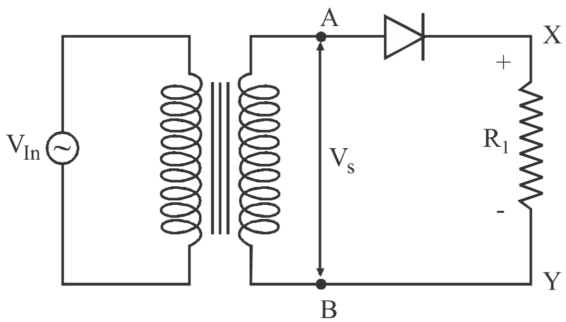
16.7 P-N डायोड का दिष्टकारी के रूप में उपयोग (Use of a P-N Didode as Rectifier)

हम जानते हैं कि प्रत्यावर्ती धारा(alternating current) का जनन (generation) एवं संचरण (transmission) दिष्टधारा (direct current) के जनन व संचरण से अधिक सुविधा पूर्ण एवं कम खर्चीला होता है। इस कारण सामान्यतः प्रत्यावर्ती धारा ही उपयोग में आती है। किन्तु प्रायः सभी इलेक्ट्रॉनिक उपकरणों में दिष्ट धारा या विभव भी प्रयोग में आते हैं। यद्यपि दिष्ट धारा सैल अथवा बैटरी से प्राप्त की जा सकती है किन्तु व्यवहारिक रूप से इसे प्रत्यावर्ती धारा को दिष्ट धारा में परिवर्तित कर प्राप्त किया जाता है।

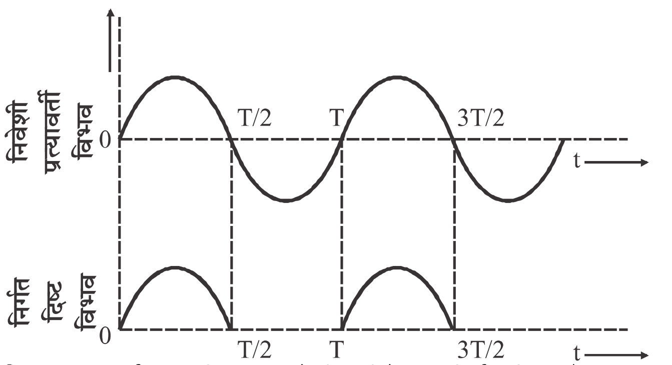
दिष्टकरण (Rectification) वह प्रक्रिया है जिसके द्वारा प्रत्यावर्ती धारा (वोल्टता) को दिष्टधारा (वोल्टता) में परिवर्तित किया जाता है। इस हेतु काम में ली जाने वाली युक्ति दिष्टकारी (Rectifier) कहलाती है। जैसा पूर्व में उल्लेखित किया जा चुका है एक P-N संधि डायोड अग्रदिशिक अभिनति में धारा प्रवाहित करता है एवं उत्क्रम अभिनति में धारा प्रवाहित नहीं करता (नगण्य धारा)। डायोड के इसी एक दिशीय गुण का प्रयोग दिष्टकरण में किया जाता है।

16.7.1 अर्धतरंग दिष्टकारी (Half Wave Rectifier)

चित्र 16.21 में एक अर्धतरंग दिष्टकारी का परिपथ दर्शाया गया है। इसमें निवेशी प्रत्यावर्ती विभव स्त्रोत को एक ट्रान्सफार्मर (Transformer) की प्राथमिक कुण्डली से जोड़ा गया है। ट्रान्सफार्मर की द्वितीयक कुण्डली के श्रेणी क्रम में एक डायोड व लोड प्रतिरोध R_L जोड़े गये हैं। ट्रान्सफार्मर की द्वितीयक कुण्डली से बिन्दु A व B के मध्य वांछित प्रत्यावर्ती V_S प्राप्त होता है। यह प्रत्यावर्ती विभव ट्रान्सफार्मर की प्रकृति के अनुरूप निवेशी प्रत्यावर्ती विभव से कम या अधिक हो सकता है। उदाहरणार्थ यदि प्रयुक्त ट्रान्सफार्मर उच्चायी (step up) प्रकृति का है तो A व B के मध्य प्रत्यावर्ती विभव V_S प्रयुक्त निवेशी विभव V_{in} से अधिक होता है व ट्रान्सफार्मर यदि अपचायी प्रकृति (step down) का है तो विभव V_S, V_{in} से कम होगा।



चित्र 16.21 अर्ध तरंग दिष्टकारी परिपथ



चित्र 16.22 अर्ध तरंग दिष्टकारी के लिए निवेशी व निर्गत विभव के तरंग रूप

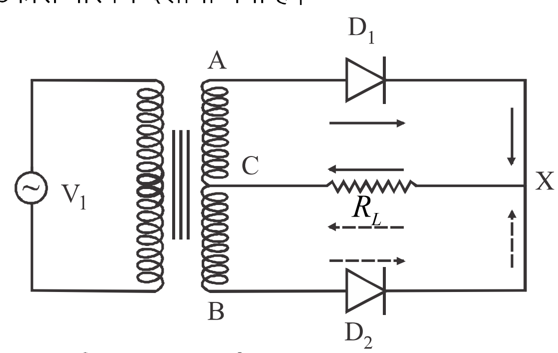
प्रत्यावर्ती विभव V_i (अथवा V_S) के धनात्मक अर्धचक्र के लिये द्वितीयक कुण्डली का सिरा A धनात्मक विभव व सिरा B ऋणात्मक विभव पर होने से डायोड का P सिरा N सिरे से उच्च विभव पर होगा। इस कारण डायोड अग्र अभिनति की अवस्था में होकर धारा चालन करेगा। इस स्थिति में लोड प्रतिरोध R_L पर विभवपात होगा। निवेशी प्रत्यावर्ती विभव के ऋणात्मक अर्ध चक्र में सिरा A ऋणात्मक व सिरा B धनात्मक होने से डायोड उत्क्रम अभिनति की अवस्था में होगा। उत्क्रम अभिनति में धारा प्रवाह नगण्य होने के कारण डायोड को अचालन की अवस्था में माना जा सकता है। इस कारण परिपथ में धारा नहीं बहेगी। लोड प्रतिरोध R_L में केवल एक ही दिशा A से B की ओर धारा प्रवाह होता है। अतः R_L के सिरों पर उत्पन्न विभवपात दिष्ट (dc) प्रकृति का होता है।

यद्यपि यह विभवपात स्पंदयुक्त (Pulsating) अर्थात् परिमाण में परिवर्तनशील है पर इसकी दिशा परिवर्तित नहीं हो रही है। वस्तुतः इस परिपथ में डायोड द्वारा प्रत्यावर्ती विभव के ऋणात्मक अर्धचक्र को निरूद्ध (suppress) कर दिया जाता है जिससे पूर्ण प्रत्यावर्ती चक्र के संगत निर्गत विभव में केवल अर्ध तरंग ही प्राप्त होती है, अतः इस परिपथ को अर्धतरंग दिष्टकारी कहा जाता है। उपरोक्त वर्णित प्रक्रिया प्रत्यावर्ती विभव के क्रमागत चक्रों के लिये दोहराई जाती है। निवेशी प्रत्यावर्ती विभव व निर्गत दिष्ट विभव के तरंग प्रतिरूप चित्र 16.22 में प्रदर्शित किये गये हैं।

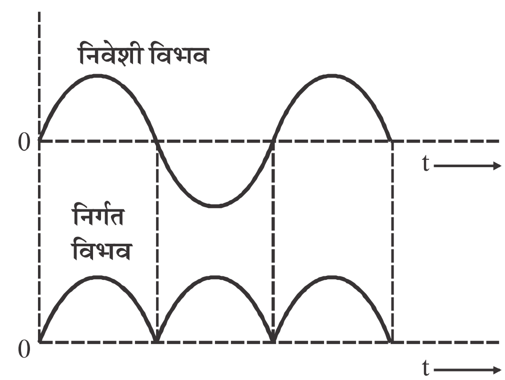
अर्धतरंग दिष्टकारी में निवेशी प्रत्यावर्ती विभव का केवल आधा चक्र उपयोग में आता है। शेष अर्धतरंग अनुपयोगी रहती है। पूर्ण तरंग दिष्टकारी में निवेशी प्रत्यावर्ती विभव का सम्पूर्ण चक्र दिष्ट विभव में परिवर्तन के काम आता है। इस कारण अर्ध तरंग दिष्टकारी की दक्षता पूर्ण तरंग दिष्टकारी से आधी होती है। अतः सामान्यतः अर्धतरंग दिष्टकारी को प्रयोग में नहीं लिया जाता है। यहाँ यह भी उल्लेखनीय है कि अर्धतरंग दिष्टकारी के परिपथ में ट्रान्सफार्मर का प्रयोग ऐच्छिक है। इसके बिना भी निवेशी विभव को सीधे डायोड व लोड प्रतिरोध संयोजक पर प्रयुक्त किया जा सकता है।

16.7.2 पूर्णतरंग दिष्टकारी (Full Wave Rectifier)

पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ में निवेशी प्रत्यावर्ती विभव के दोनों अर्धचक्रों के दौरान निर्गत दिष्ट धारा प्राप्त होती हैं। यहाँ दो संधि डायोड इस प्रकार प्रयुक्त किये जाते हैं कि एक डायोड निवेशी प्रत्यावर्ती विभव के धनात्मक अर्धचक्रों का तथा दूसरा डायोड ऋणात्मक अर्धचक्रों का दिष्टकरण करता है। चित्र 16.23 में पूर्णतरंग दिष्टकारी परिपथ दर्शाया गया है।



चित्र 16.23 पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ



चित्र 16.24 पूर्ण तरंग दिष्टकारी के लिए निवेशी एवं निर्गत विभव तरंग प्रतिरूप

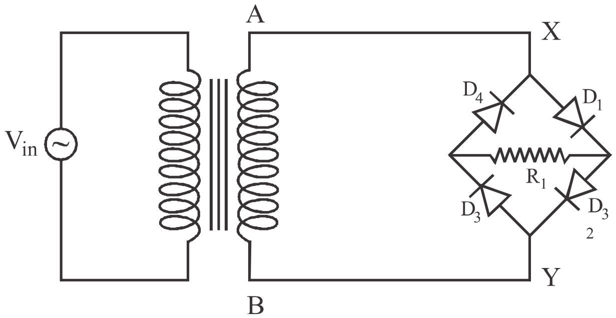
निवेशी प्रत्यावर्ती विभव को मध्य निष्कासी ट्रान्सफार्मर की प्राथमिक कुण्डली से जोड़ दिया जाता हैं ट्रान्सफार्मर की द्वितीयक कुण्डली के दोनों सिरे A व B को संधि डायोड D_1 व D_2 के P सिरों पर जोड़ा जाता हैं। डायोड D_1 व D_2 के N सिरे परस्पर जोड़ कर इस उभयनिष्ठ बिन्दु X तथा ट्रान्सफार्मर की द्वितीयक कुण्डली के मध्यनिष्कासी बिन्दु (centretap) C के बीच लोड प्रतिरोध R_L जोड़ दिया जाता है। इस प्रकार के मध्यनिष्कासी ट्रान्सफार्मर के लिये बिन्दु C को निर्देश शून्य विभव बिन्दु(reference zero potential) माना जाता है। अतः इस बिन्दु के सापेक्ष एक ही समय पर यदि द्वितीयक कुण्डली का एक सिरा धनात्मक है तो दूसरा सिरा ऋणात्मक होगा।

माना पहले धनात्मक अर्धचक्र के लिये द्वितीयक का सिरा A धनात्मक है तथा सिरा B ऋणात्मक है। इस अवस्था में डायोड D_1 अग्र अभिनत है तथा डायोड D_2 उत्क्रम अभिनत, स्पष्टतः डायोड D_1 द्वारा धारा चालन होगा परन्तु D_2 द्वारा नहीं। अतः इस अर्ध चक्र में धारा D_1 से होती हुई X से C की तरफ बहती हुई R_L पर विभवपात करेगी। इस प्रवाह की दिशा चित्र में तीर द्वारा दर्शाई गई है। निवेशी प्रत्यावर्ती विभव के ऋणात्मक अर्धचक्र में सिरा B धनात्मक व सिरा A ऋणात्मक होगा, इस कारण डायोड D_2 अग्र अभिनत व डायोड D_1 उत्क्रम अभिनत होगा। अब डायोड D_1 धारा चालन नहीं करेगा पर डायोड D_2 से धारा प्रवाहित होगी। इस धारा प्रवाह की दिशा को डैशित तीर (dotted arrow) से प्रदर्शित किया गया है। यदि लोड प्रतिरोध में धारा प्रवाह की दिशा देखें तो यह अब भी X से C की ओर है। स्पष्टतः डायोड D_1 व D_2 के कारण क्रमागत रूप से धारा प्रवाहित होती है पर निवेशी विभव के दोनों अर्द्धचक्रों में लोड प्रतिरोध R_L में धारा प्रवाह एक ही दिशा में हैं इसका कारण पूर्ण तरंग दिष्टकारी में निर्गत धारा व विभव न केवल एक दैशिक है अपितु स्पंदो की अविरत श्रेणी भी है। चित्र 16.24 में दिखाये गये निर्गत विभव के तरंग प्रतिरूप में स्पष्ट है कि निवेशी धारा के एक पूर्ण चक्र (तरंग) के संगत निर्गत विभव में भी एक दैशिक पूर्ण चक्र (तरंग) प्राप्त हो रहा है अतः इस दिष्टकारी परिपथ को पूर्ण तरंग दिष्टकारी परिपथ कहा जाता है। स्पष्टतः इस प्रकार का दिष्टकारी अर्धतरंग दिष्टकारी की तुलना में अधिक अच्छा है।

पूर्ण तरंग दिष्टकारी के उपर्युक्त विवेचित परिपथ में मध्यनिष्कासी ट्रान्सफार्मर अनिवार्य है। यहाँ साधारण ट्रान्सफार्मर काम नहीं आ सकता। यदि उच्च विभव पर दिष्ट धारा प्राप्त करनी है तो यह ट्रान्सफार्मर उच्चायी प्रकार का होगा एवं निम्न विभव पर दिष्टकारी प्राप्त करने के लिये यह अपचायी प्रकार का होगा।

16.7.3 पूर्ण तरंग सेतु दिष्टकारी (Full Wave Bridge Rectifier)

इस प्रकार के पूर्ण तरंग दिष्टकारी में मध्यनिष्कासी ट्रान्सफार्मर का होना आवश्यक नहीं है पर यहाँ दो डायोड के स्थान पर चार संधि डायोड चित्र 16.25 में दर्शाये अनुसार एक सेतु(bridge) परिपथ की संरचना में होते हैं। निवेशी प्रत्यावर्ती विभव को साधारण ट्रान्सफार्मर की द्वितीयक कुण्डली के सिरों पर लगाया जाता है।



चित्र 16.25 सेतु दिष्टकारी परिपथ

निवेशी विभव के धनात्मक अर्ध चक्र में द्वितीयक कुण्डली का सिरा A धनात्मक एवं सिरा B ऋणात्मक होता है तो डायोड D_1 व D_3 अग्र अभिनत तथा डायोड D_2 व D_4 उत्क्रम अभिनत अवस्थाओं में होते है। धारा A $D_1 X\ Y\ D_3$ BA दिशा में बहती है, डायोड D_2 व D_4 में चालन नहीं होता है।

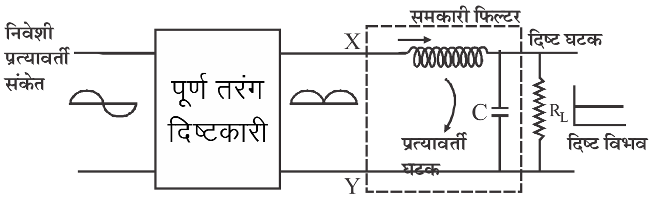
निवेशी विभव के ऋणात्मक अर्धचक्र में द्वितीयक कुण्डली का सिरा A ऋणात्मक व सिरा B धनात्मक होता है तब डायोड D_2 व D_4 अग्रअभिनत तथा डायोड D_1 व D_3 उत्क्रम अभिनत होते हैं। अब धारा B से प्रारंभ हो B $D_2\ X\ Y\ D_4\ AB$ दिशा में बहती है। D_2 व D_3 में चालन नहीं होता।

इस प्रकार सेतु दिष्टकारी में किसी भी समय केवल दो संधि डायोड ही धारा प्रवाह में योगदान देते हैं व शेष दो डायोड चालन नहीं करते। किन्तु लोड प्रतिरोध में धारा प्रत्येक चक्र में X से Y की ओर बहती है, इस कारण यह एक दैशिक होती है व R_L पर निर्गत विभव दिष्ट प्रकृति का होता है। इस निर्गत विभव का प्रतिरूप भी पूर्ण तरंग दिष्टकारी के लिये प्राप्त प्रतिरूप के समान होता है। जैसा ऊपर उल्लेखित किया गया है अधिक मूल्य के मध्यनिष्कासी ट्रान्सफार्मर के स्थान पर साधारण ट्रान्सफार्मर को प्रयोग में लाया जा रहा हैं अतः सेतु दिष्टकारी पूर्व वर्णित पूर्णतरंग दिष्टकारी की तुलना में कम खर्चीला होता है यह इसका पूर्ण तरंग दिष्टकारी के तुलना में एक महत्वपूर्ण लाभ है।

दिष्टकारी परिपथ में काम लिये जाने वाले डायोड ऐसे होने चाहिये कि जब ये चालन नहीं कर रहे हो अर्थात् उत्क्रम अभिनत अवस्था में हो तो इनका भंजन नहीं हो जाये अन्यथा उत्क्रम अवस्था में भी उनकी द्वारा धारा चालन हो जायेगा व दिष्टकरण संभव नहीं होगा। इस कारण इनका भंजन विभव बहुत अर्थात ट्रान्सफार्मर की द्वितीयक कुण्डली पर प्राप्त प्रत्यावर्ती संकेत के शिखर मान से अधिक होना चाहिए। ऐसे डायोड शक्ति डायोड (power diode) भी कहलाते हैं।

पूर्ण तरंग दिष्टकारी से प्राप्त निर्गत विभव (या धारा) के तरंग प्रतिरूप के अवलोकन से यह स्पष्ट है कि यह विभव एक दैशिक प्रकृति का तो है पर परिमाण में नियत नहीं है। सामान्य भाषा में ऐसे विभव को उच्चवचन (उतार चढ़ाव fluctuating) वाला दिष्टविभव कहा जाता है जबकि परिभाषा में शुद्ध दिष्ट विभव परिमाण से नियत रहता है। पूर्ण तरंग दिष्टकारी के तरंग प्रतिरूप के गणितीय विश्लेषण (जिनका अध्ययन इस स्तर पर संभव नहीं है) से यह ज्ञात होता है कि इस प्रकार का परिवर्तनशील विभव एक शुद्ध दिष्ट विभव व विभिन्न संनादी आवृत्तियों(harmonic frequencies) के प्रत्यावर्ती घटक विभवों का अध्यारोपण होता है।

कुछ विशेष परिपथ, जिन्हें समकारी फिल्टर कहा जाता है, की सहायता से प्रत्यावर्ती घटकों को दिष्टविभव से पृथक कर शुद्ध दिष्ट विभव प्राप्त किया जा सकता है। ऐसे परिपथों में मुख्यतः संधारित्र, प्रेरकत्व अथवा इनके संयोजन प्रयुक्त किये जाते हैं क्योंकि इनका व्यवहार दिष्ट व प्रत्यावर्ती विभवों के लिये अलग–अलग होता है। ऐसा एक फिल्टर परिपथ चित्र 16.26 में दर्शाया गया है।



चित्र 16.26 समकारी फिल्टर युक्त पूर्ण तरंग दिष्टकारी

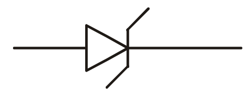
जब दिष्टकारी के निर्गत विभव को प्रयुक्त फिल्टर के टर्मिनल X व Y के मध्य लगाया जाता है तो प्रेरकत्व L के द्वारा उत्पन्न प्रतिबाधा से इस विभव का प्रत्यावर्ती घटक बाधित होता है व दिष्ट विभव पर कोई प्रभाव नहीं होता है। इसके उपरान्त भी यदि कुछ प्रत्यावर्ती घटक L से गुजर कर आगे बढ़ जाये तो भी लोड R_L के समान्तर क्रम में लगा संधारित्रC इस घटक के लिये लघु प्रतिबाधा उत्पन्न करेगा व यह घटक C के द्वारा पार्श्वपथित (bypassed) हो जायेगा जबकि दिष्टघटक के लिये C अनंत प्रतिबाधा उत्पन्न करता है, अतः यह C से नहीं गुजरकर R_L पर उपलब्ध होगा। इस प्रकार R_L पर लगभग परिशुद्ध दिष्ट विभव प्राप्त होगा।

16.8 विशिष्ट प्रयोजन डायोड (Special Purpose Diode)

दिष्टकरण के अतिरिक्त भी P-N संधि डायोड के अन्य कई उपयोग हैं। किसी प्रयोजन विशेष के लिये काम में लिये जाने वाले डायोड किसी अन्य प्रयोजन विशेष में काम आने वाले डायोड से कई बातों यथा प्रयुक्त अर्धचालक, इनमें अपमिश्रण की मात्रा एवं संरचना इत्यादि में भिन्न होते हैं। अब हम कुछ विशिष्ट प्रयोजनार्थ काम आने वाले डायोंडों का संक्षिप्त अध्ययन करेंगे।

16.8.1 जेनर डायोड (Zener Diode)

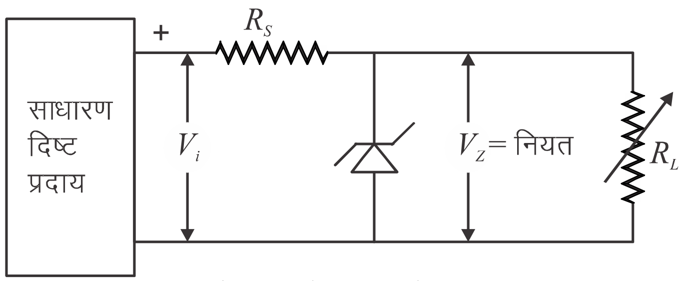
P-N संधि डायोड की उत्क्रम अभिनति व्यवस्था के संदर्भ में हमने देखा है कि भंजन विभव की स्थिति में डायोड की उत्क्रम धारा संतृप्त न रह कर तीव्रता से बढ़ने लगती है पर डायोड के सिरों पर विभव लगभग भंजन विभव के समान अर्थात् नियत मान का बना रहता है। किसी डायोड के लिये भंजन विभव अपमिश्रण की मात्रा पर निर्भर करता है। अतः अपमिश्रण की मात्रा के अनुरूप किसी भी विशिष्ट भंजन वोल्टता के डायोड का संविचरण (fabrication) किया जा सकता है। जब किसी डायोड की रचना किसी विशिष्ट भंजन वोल्टता के लिये इस प्रकार की जाती है कि उत्क्रम अभिनति में भंजन वोल्टता पर भी यह बिना क्षतिग्रस्त हुये कार्य कर सके तो इस प्रकार के डायोड को जेनर डायोड कहा जाता है। विभिन्न मात्राओं के अपमिश्रण द्वारा 1 वोल्ट से भी कम मान से प्रारंभ कर कई सौ वोल्ट तक के भंजन विभव वाले डायोड वर्तमान में उपलब्ध हैं। जेनर डायोड का प्रतीक चित्र 16.27 में दिखाया गया है।



चित्र 16.27 जेनर डायोड का प्रतीक

भंजन बिन्दु पर जेनर डायोड से प्रवाहित धारा में काफी वृद्धि होने पर भी इसके दोनों सिरों पर विभवान्तर नियत बने रहने के गुण का प्रयोग वोल्टता स्थायीकरण (voltage stabilization) या वोल्टता नियमन (voltage regulation) के लिये किया जाता है। हम जानते हैं कि एक साधारण दिष्ट शक्ति प्रदाय(ordinary dc power supply) में दिष्टकारी व समकारी फिल्टर के उपयोग से प्रत्यावर्ती विभव को दिष्ट विभव में बदला जाता है। इस प्रकार के शक्ति प्रदायकों में लोड धारा में परिवर्तन हो जाने पर दिष्ट विभव का मान भी परिवर्तित हो जाता है। अतः ऐसी स्थितियों जिनमें नियत दिष्ट विभव पर धारा प्राप्त करनी हो ऐसे शक्ति प्रदाय काम नहीं आ सकते। एक जेनर डायोड के उपयोग से शक्ति प्रदाय का निर्गत विभव नियत बनाये रखा जा सकता है।

चित्र 16.28 में एक दिष्ट प्रदाय जिसका निर्गत विभव माना V_i है के निर्गम सिरों (output terminals) पर एक प्रतिरोध R_S व एक जेनर डायोड लगे हैं तथा लोड प्रतिरोध R_L जेनर डायोड के समान्तर क्रम में लगाया गया है। जेनर डायोड ऐसा चुना जाता है जिसकी भंजन वोल्टता V_Z उस नियत मान दिष्ट विभव के समान हो जिसे लोड प्रतिरोध R_L पर प्राप्त करना है। जेनर डायोड को परिपथ में इस प्रकार लगाया जाता है कि यह उत्क्रम अभिनत अवस्था में हो। यदि V_i का मान V_Z से अधिक हो जाये तो डायोड भंजन क्षेत्र में आ जाता है व इसके सिरों पर विभव V_Z ही बना रहता है। चूँकि R_L डायोड के समान्तर क्रम में है, इसलिये इस पर भी विभव V_Z ही रहेगा। यदि R_L का मान परिवर्तित भी कर दिया जाये तो इस पर विभव V_Z ही रहेगा। इस प्रकार जेनर डायोड के दोनों सिरों पर निर्गत वोल्टता लगभग स्थायी होती है। प्रतिरोधR_S का मान इस प्रकार चयनित करते हैं कि जेनर धारा इतनी अधिक न हो जाये कि इससे तापीय ऊर्जा के कारण डायोड क्षतिग्रस्त हो जाये। (इस धारा के मान का ज्ञान जीनर डायोड निर्माता कम्पनी द्वारा दिये गये विवरण पत्रक (data sheet) से होता है।)

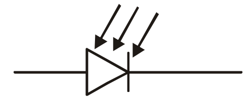


चित्र 16.28 जेनर डायोड द्वारा वोल्टता नियमन

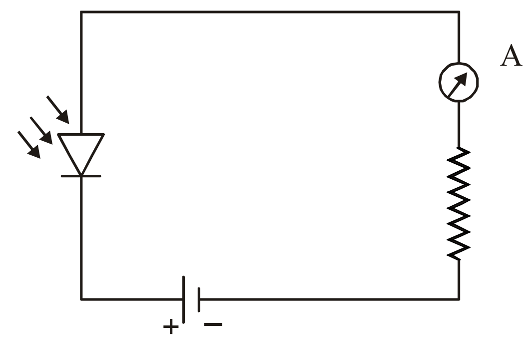
16.8.2 फोटोडायोड (Photo Diode)

उपर्युक्त आवृत्ति का प्रकाश (विद्युत चुम्बकीय विकिरण) किसी अर्धचालक पर आपतित होने पर इसका अवशोषण कर प्राप्त ऊर्जा से अर्धचालक के संयोजकता बैण्ड के इलेक्ट्रॉन चालन बैण्ड में संक्रमित हो सकते हैं। ऐसे इलेक्ट्रॉनों में प्रत्येक के संगत एक होल संयोजी बैण्ड में उत्पन्न होता है इस प्रकार इलेक्ट्रॉन होल युग्म उत्पादन होता है। ये होल–इलेक्ट्रॉन युग्म उन होल–इलेक्ट्रॉन युग्मों के अतिरिक्त है जो तापीय जनन के कारण पहले से ही उपस्थित हैं। स्पष्टतः इस प्रक्रिया में अर्धचालक की चालकता में वृद्धि होती है। आपतित प्रकाश के कारण अर्धचालक की चालकता में प्रेक्षित की जाने वाली इस वृद्धि को प्रकाशिक चालकता (photo conductivity) व इस प्रभाव को प्रकाशिक चालकता प्रभाव (photo conductive effect) कहते हैं। यदि आपतित प्रकाश के फोटॉनों की आवृत्ति ν है और इसकी ऊर्जा $h\nu$ अर्धचालक की बैण्ड अन्तराल ऊर्जा E_g के बराबर या अधिक $\left(h\nu \geq E_g\right)$ है तो ये फोटॉन अर्धचालक द्वारा अवशोषित होकर उपर्युक्त प्रभाव दर्शाते हैं।

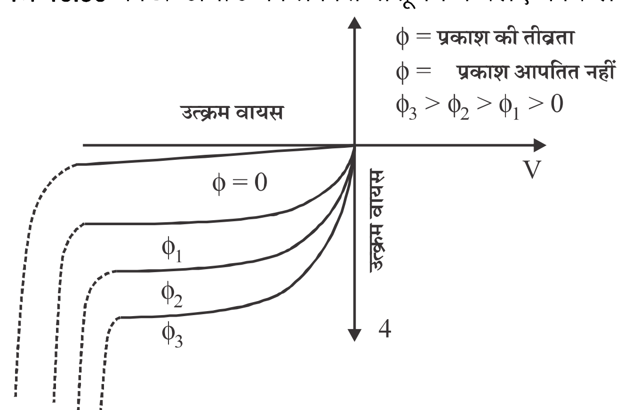
फोटो डायोड ऐसे P-N संधि डायोड हैं जिनका प्रचालन (operation) प्रकाश चालकता प्रभाव पर आधारित होता है। इस प्रकार के डायोडों की रचना में P या N में से किसी एक क्षेत्र को अत्यधिक पतला रखा जाता है जिससे कि आपतित प्रकाश अवशोषित होने पर फोटॉन संधि स्थान तक पहुँच सके। सामान्यतः फोटो डायोड उत्क्रम अभिनत व्यवस्था में रखे जाते हैं। फोटो डायोड का प्रतीक चित्र 16.29 में दिखाया गया है। चित्र 16.30 में फोटो डायोड को प्रकाश संसूचक की तरह काम लिये जाने से संबंधित परिपथ दिखाया गया है। आपतित प्रकाश की अनुपस्थिति में उत्क्रम बायस के कारण उत्क्रम धारा अत्यल्प (कुछ A) होती है। आपतित प्रकाश की उपस्थित में फोटॉन संधि स्थल पर अवशोषित होकर अतिरिक्त इलेक्ट्रॉन–होल–युग्म निर्मित करते हैं जो संधि पर उपस्थित विद्युत क्षेत्र के कारण पृथक हो जाते हैं व संधि से होकर प्रवाहित होते हैं, इस कारण उत्क्रम संतृप्त धारा के मान में वृद्धि होती है। यह धारा प्रकाश की अनुपस्थिति में बहने वाली धारा की तुलना में बहुत अधिक होती है। आपतित प्रकाश की आवृत्ति नियत रखते हुये यदि प्रकाश की तीव्रता बढ़ायी जाये तो धारा का मान और बढ़ जाता है। विभिन्न तीव्रताओं (ϕ) के संगत उत्क्रम धारा में परिवर्तनों को चित्र 16.31 में प्रदर्शित किया गया है। प्रकाश की उपस्थिति में उत्क्रम धारा कई सौ माइक्रो एम्पियर तक हो सकती है। डायोड को भंजन विभव से कम विभव पर रखा जाना आवश्यक होता है। प्रकाश की तीव्रता में परिवर्तन के कारण उत्क्रम धारा में उत्पन्न परिवर्तन के मापन से प्रकाश की तीव्रता का मापन संभव होता है।



चित्र 16.29 प्रकाश उत्सर्जक डायोड का प्रतीक चिह्न



चित्र 16.30 फोटो डायोड को प्रकाश संसूचन के लिए काम लेना



चित्र 16.31 फोटो डायोड के उत्क्रम धारा विभव वक्रों पर प्रकाश तीव्रता का प्रभाव

फोटो डायोड का उपयोग निम्नलिखित युक्तियों में किया जाता है:

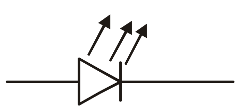
1. प्रकाश संसूचन में(Light detection)
2. प्रकाश चलित स्विच (Light operated switch)
3. फिल्मों में ध्वनि पुनः उत्पादन(Reproduction of sound in films)
4. कम्प्यूटर टेप कार्ड पढ़ने में (For reading computer tapes and computer cards)

16.8.3 प्रकाश उत्सर्जक डायोड (Light Emitting Diode) LED

ये ऐसे P-N संधि डायोड हैं जिन्हें अग्र अभिनत करने पर प्रकाश का उत्सर्जन होता है। जब अर्धचालक के चालन बैंड में स्थित कोई इलेक्ट्रॉन इसके संयोजकता बैण्ड में उपस्थित किसी होल पर संक्रमण करता है अर्थात् इलेक्ट्रॉन–होल का पुनः संयोजन (recombination) होता है तो इस प्रक्रिया में ऊर्जा निर्मुक्त होती है

इलेक्ट्रॉन सामान्यतः चालन बैंड के न्यूनतम ऊर्जा स्तर (E_C) पर तथा होल संयोजी बैण्ड के उच्चतम ऊर्जा स्तर(E_V) के संगत होते हैं अतः प्रक्रिया में मुक्त ऊर्जा $E_C - E_V = E_g$ अर्थात् बैण्ड अन्तराल की ऊर्जा के बराबर होती है। सिलिकॉन व जर्मेनियम व कई अन्य अर्धचालकों में यह ऊर्जा ऊष्मा के रूप में प्रकट होती है किन्तु गैलियम आर्सेनाइड फास्फाइड (GaAsP) व गैलियम फास्फाइड (GaP) जैसे अर्धचालकों में यह ऊर्जा दृश्य प्रकाश के रूप में मुक्त होती है।

प्रकाश की तीव्रता अधिक हो इस हेतु आवश्यक है कि इस प्रकार के पुनः संयोजनों की संख्या अधिक हो परन्तु नैज एवं अपमिश्रित दोनों ही अर्धचालकों में पुनः संयोजन सीमित संख्या में होते हैं। नैज अर्धचालक में ऐसा इलेक्ट्रॉन–होल युग्मों की कम संख्या होने के कारण है, वहीं अपमिश्रित अर्धचालकों में एक प्रकार के आवेश वाहक अधिक संख्या में व दूसरे प्रकार के आवेश वाहक कम संख्या में होने से ऐसा होता है। GaP जैसे अर्धचालकों से निर्मितPN संधि में यदि संधि क्षेत्र के P व N क्षेत्र दोनों में अपमिश्रण अधिक मात्रा में रखा जाये तो अवक्षय क्षेत्र अत्यधिक पतला होगा। संधि को अग्र अभिनत करने परP क्षेत्र के बहुसंख्यक होल N क्षेत्र की ओर तथा N क्षेत्र से बहुसंख्यक इलेक्ट्रॉन P क्षेत्र की ओर गमन करेंगे तब अवक्षय परत के निकट बड़ी संख्या में इलेक्ट्रॉन होल का पुनः संयोजन होगा, परिणाम स्वरूप प्राप्त उत्सर्जित प्रकाश अपेक्षाकृत अच्छी तीव्रता का होगा। प्रकाश उत्सर्जक डायोड का प्रतीक चित्र 16.32 में दिखाया गया है।



चित्र 16.32 LED का प्रतीक

LED के लिये अर्धचालक का चयन वांछित प्रकाश के रंग के अनुसार किया जाता है। वर्तमान में लाल, हरे, पीले, नारंगी व नीले रंग के प्रकाश उत्सर्जित करने वाले LED उपलब्ध हैं। LED का उपयोग मुख्यतः निम्नलिखित कार्यों में किया जा रहा है।

1. सूचक लाइट (indicator light) के रूप में
2. सप्त खंड प्रदर्शन इकाई(seven segment display unit) के रूप में
3. उच्च तीव्रता के प्रकाश उत्पन्न करने वालेLED का प्रकाशिक तन्तु संचार (opitcal fibre communication) में
4. कम शक्ति व्यय कर उच्च तीव्रता का प्रकाश देने वालेLED बल्ब

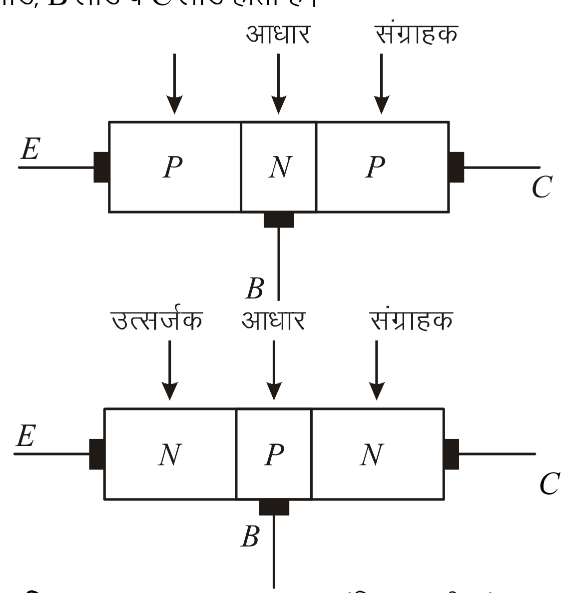
16.9 ट्रांजिस्टर (Transistor)

ट्रांजिस्टर एक तीन टर्मिनल वाली अर्द्धचालक युक्ति है जिसमें प्रत्यावर्ती संकेतों के प्रर्वधन की क्षमता होती है ट्रांजिस्टर का आविष्कार 1948 में संयुक्त राज्य अमेरिका(USA) के बेल टेलिफोन लेबोरेटरी के वैज्ञानिकों, बारडीन(Bardeen), ब्राटैन(Brattain) एवं शॉक्ले (Shockley) ने किया, इस हेतु उन्हें 1956 में भौतिकी के नोबेल पुरस्कार से सम्मानित किया गया। यद्यपि संसूचक तथा दिष्टकारी के रूप में अर्धचालक युक्तियाँ 1948 से पहले से ही काम आ रही थी परन्तु ट्रांजिस्टर के अविष्कार ने ही वर्तमान अर्द्धचालक इलेक्ट्रानिकी के युग की आधारशिला रखी। आज ट्रांजिस्टर के कई प्रकार जैसे संधि ट्रांजिस्टर (Junction-transistor), क्षेत्र प्रभाव ट्रांजिस्टर (field effect ransistor या FET) एवं धातु अर्धचालक ऑक्साइड क्षेत्र प्रभाव ट्रांजिस्टर(metal-oxide semiconductor field effect transistor या MOSFET) उपलब्ध हैं। यहाँ हम संधि ट्रांजिस्टर के बारे में अध्ययन करेंगे। अन्य ट्रांजिस्टरों का अध्ययन आप उच्च कक्षाओं में करेंगे।

16.9.1 संधि ट्रांजिस्टर (Junction Transistor)

एक सामान्य संधि ट्रांजिस्टर मूलतः एक अपद्रव्यी अर्धचालक (सिलिकॉन या जर्मेनियम) का एक ऐसा एकल क्रिस्टल होता है जिसमें भिन्न चालकताओं के तीन क्षेत्र उपस्थित होते हैं। बीच वाले क्षेत्र की मोटाई अन्य दोनों की अपेक्षा कम होने के साथ इस क्षेत्र के अर्धचालक की प्रकृति अन्य दोनों क्षेत्रों से भिन्न होती है। इस प्रकार हमें दो प्रकार के संधि ट्रांजिस्टर प्राप्त होते हैं, जिन्हें क्रमशः PNP तथा NPN ट्रांजिस्टर कहा जाता है। किसी PNP ट्रांजिस्टर में दोP प्रकार के अर्धचालक क्षेत्रों के मध्यN प्रकार के अर्धचालक की अल्प मोटाई का क्षेत्र अन्तर्दावित (sandwiched) होता है। इसी प्रकार एकNPN ट्रांजिस्टर में दोN प्रकार के अर्धचालक क्षेत्रों के मध्य एक अल्पमोटाई काP प्रकृति का अर्धचालक क्षेत्र अन्तर्दावित होता है।

दोनों ही प्रकार के ट्रांजिस्टरों के लिये मध्य के क्षेत्र को आधार (base), B कहा जाता है तथा बाहरी भागों में से एक को उत्सर्जक (emitter), E तथा दूसरे को संग्राहक (collector), C कहा जाता है (चित्र 16.33)। इन तीनों क्षेत्रों में प्रत्येक पर एक धात्विक इलेक्ट्रॉड व एक लीड (lead) लगी होती है जिनकी सहायता से ट्रांजिस्टर को बाह्य विद्युतीय परिपथ में जोड़ा जाता है। यह लीड–जिस भाग से जुड़ी होती है उसी के अनुरूप इनका नाम, यथा E लीड, B लीड व C लीड होता है।

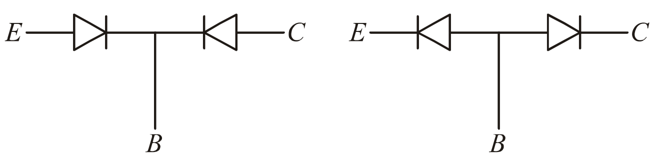


चित्र 16.33 PNP व **NPN** ट्रांजिस्टर की संरचना

उत्सर्जक व संग्राहक यद्यपि एक ही प्रकार के (या तो P या N) अर्धचालक होते हैं पर इनमें अशुद्धियों का अपमिश्रण मात्रात्मक रूप से भिन्न होता है साथ ही संग्राहक क्षेत्र आकार में उत्सर्जक क्षेत्र से बड़ा होता है। इस कारण इनके भौतिक एंव विद्युतीय गुण अलग–अलग होते हैं अर्थात् इनका अपना–अपना विशिष्ट कार्य होने से इन्हें परस्पर अदल–बदल(interchange) कर काम में नहीं लिया जा सकता है।

उत्सर्जक गहन रूप से मादित (dopped) होता है क्योंकि इसका कार्य आधार को अधिक संख्या में बहुसंख्यक आवेश वाहक प्रदान करना होता है। आधार में बहुत ही अल्प मादन होता है। साथ ही यह अल्प मोटाई का होता है ताकि यह उत्सर्जक से आने वाले बहुसंख्यक आवेश वाहकों को पुनः संयोजन के लिये विपरीत प्रकृति के आवेशवाहक अधिक संख्या में प्रदान न कर सके। संग्राहक का कार्य उत्सर्जकता से आधार को पार कर आने वाले बहु संख्यक आवेशों को एकत्र करना होता है। यहाँ मादन उत्सर्जक से कम पर आधार से अधिक अर्थात् मध्यम होता है।

संग्राहक–आधार सम्पर्क क्षेत्रफल, उत्सर्जक आधार क्षेत्रफल से बड़ा होने के कारण आवेशवाहकों का संग्रहण भली भांति करने के साथ–साथ ट्रांजिस्टर को प्रवर्धक के रूप में काम लेते समय उत्पन्न ऊष्मा का शीर्घ विसर्जन करने में भी सहायक होता है। इस प्रकार इन ट्रांजिस्टरों में दो P-N संधियाँ होती हैं जिन्हें क्रमशः उत्सर्जक–आधार संधि (E-B junction) व आधार संग्राहक संधि (B-C junction) कहा जाता है। सिद्धांतः इन दोनों संधियों की एक दूसरे के साथ पश्च–पश्च संबंधन में कल्पना की सकती है (चित्र 16.34)।

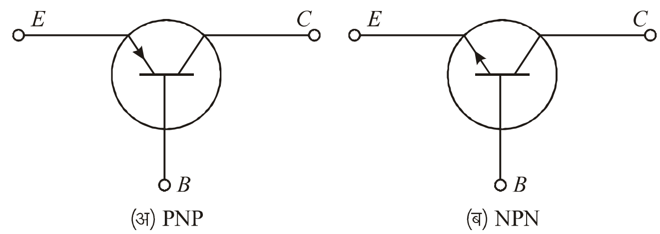


चित्र 16.34 ट्रांजिस्टर डायोड संधि परिकल्पना

किन्तु यहाँ यह ध्यान रखना अति आवश्यक है कि यदि दो अलग P-N संधियाँ चित्र (16.34) के अनुसार जोड़ दी जायें तो कभी भी ट्रांजिस्टर प्राप्त नहीं होगा, क्योंकि ट्रांजिस्टर में ये दोनों संधियाँ एक ही क्रिस्टल में होती हैं जबकि दो डायोड जोड़ने पर एकल क्रिस्टल बनना संभव नहीं है। ट्रांजिस्टर के आधार की चौड़ाई माइक्रोमीटर कोटि की होने के कारण ये दोनों संधियाँ अति निकट होती हैं।

ट्रांजिस्टर को प्रवर्धक के रूप में काम लेने के लिये उत्सर्जक आधार संधि को सदैव अग्रअभिनत तथा आधार–संग्राहक संधि को सदैव उत्क्रम अभिनत रखा जाता है। इस कारण बहुसंख्यक आवेश वाहक तो हमेशा उत्सर्जक से आधार की ओर प्रवाहित होते हैं, पर इस संधि पर प्रवाहित धारा की दिशा धारावाहकों की प्रकृति के अनुरूप उत्सर्जक से आधार(E से B) या आधार से उत्सर्जक (B से E) की ओर हो सकती है। विद्युत धारा की इन दो भिन्न दिशाओं को PNP तथा NPN ट्रांजिस्टर के प्रतीकों में भिन्नता करने के काम में लिया जाता है। इन प्रतीकों को चित्र 16.35 में दिखाया गया है।

जिस रेखा खंड पर तीर का चिह्न है वह उत्सर्जक को निरूपित करता है मध्य रेखाखंड आधार को व तीसरा रेखा खंड संग्राहक को प्रदर्शित करता है, तीर की दिशा धारा प्रवाह की दिशा को व्यक्त करती है। चूँकि अग्र अभिनत अवस्था में PNP ट्रांजिस्टर की उत्सर्जक आधार संधि पर P प्रकार के उत्सर्जक से बहुसंख्यक होल N प्रकार के आधार की ओर गति करते हैं इसलिये संधि पर धारा प्रवाह E से B की ओर होगा। अतः PNP ट्रांजिस्टर के प्रतीक में तीर E से B की ओर इंगित है। इसी प्रकार NPN ट्रांजिस्टर में अग्रअभिनति के लिये बहुसंख्यक धारा वाहक इलेक्ट्रॉन तो N प्रकार के उत्सर्जक से P प्रकार के आधार की ओर ही जायेंगे पर धारा इनके विपरीत B से E की दिशा में होगी। अतः NPN ट्रांजिस्टर के प्रतीक में तीर का निशान B से E की ओर इंगित है।



चित्र 16.35 संधि ट्रांजिस्टर के लिये प्रतीक

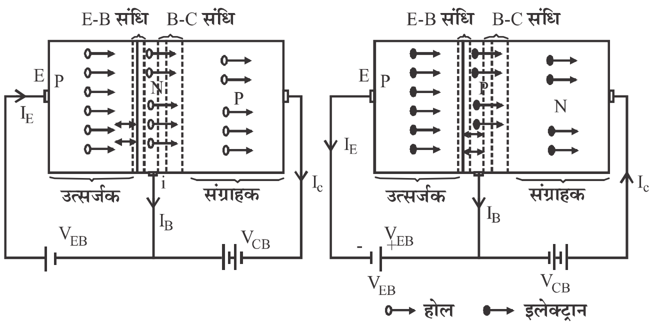
एक ट्रांजिस्टर की दो P-N संधियों को अभिनत करने के लिये निम्नलिखित चार संभावनाएँ हो सकती हैं–

1. जब उत्सर्जक आधार संधि अग्र अभिनत व आधार संग्राहक सन्धि उत्क्रम अभिनत है, ऐसी अभिनति के लिये ट्रांजिस्टर सक्रिय क्षेत्र में प्रचालन (active region of operation) करता है। सामान्यतः ट्रांजिस्टर को इसी प्रकार अभिनति प्रदान की जाती है।
2. जब उत्सर्जक आधार संधि व आधार संग्राहक संधि दोनों ही अग्र अभिनत हो। ऐसी स्थिति ट्रांजिस्टर का प्रचालन संतृप्त क्षेत्र (saturation region) में माना जाता है।
3. जब उत्सर्जक आधार संधि व आधार संग्राहक संधि दोनों उत्क्रम अभिनत हो तब ट्रांजिस्टर प्रचालन अंतक क्षेत्र(cut off region) में माना जाता है।
4. जब उत्सर्जक आधार संधि उत्क्रम अभिनत एवं आधार संग्राहक संधि अग्र बायसित हो तो ट्रांजिस्टर को प्रतिलोमित (inverted) अवस्था में माना जाता है।

उपर्युक्त अभिनतियों में से पहली अर्थात् सक्रिय अभिनति ही ट्रांजिस्टर के प्रवर्धक एवं दोलित्र रूप में कार्य करने के लिये उपयुक्त होती है। अतः हम ट्रांजिस्टर के प्रचालन को समझने के लिये इसी अभिनति का प्रयोग करेंगे। उपर्युक्त उल्लेखित अन्य अभिनतियाँ स्विचिंग एवं तर्क द्वार संबंधी परिपथों में ली जाती हैं जिनका विस्तृत अध्ययन इस स्तर पर अपेक्षित नहीं है।

16.9.2 ट्रांजिस्टर क्रिया विधि (Operation of a Transistor)

ट्रांजिस्टर के उचित विधि से कार्य करने के लिये E-B संधि को अग्र अभिनत एवं B-C संधि को उत्क्रमअभिनत अवस्था में रखा जाता है। इस समय ट्रांजिस्टर का प्रचालन सक्रिय अवस्था में माना जाता है। चित्र 16.36 (अ) व (ब) में क्रमशः NPN व PNP ट्रांजिस्टर के लिये सक्रिय–अभिनति प्रदान करने वाले परिपथ दिखाये गये हैं। इन चित्रों में इन दोनों संधियों के संगत अवक्षय क्षेत्र भी दिखलाये गये हैं। क्योंकि E-B संधि अग्रबायसित है तथा उत्सर्जक में मादन गहन है अतः E-B संधि संकीर्ण होगी जबकि B-C संधि उत्क्रम अभिनत होने के कारण अपेक्षाकृत चौड़ी होगी। E-B संधि पर प्रयुक्त अग्र अभिनत विभवान्तर V_{EB} का मान अल्प (0.5 से 1V) तथा B-C संघि पर प्रयुक्त उत्क्रम अभिनत विभवान्तर V_{CB} अपेक्षाकृत अधिक (5 से 15 V) रखा जाता है।



(अ) (ब)

चित्र 16.36 PNP व NPN ट्रांजिस्टर के लिये सक्रिय अभिनति हेतु व्यवस्था एवं ट्रांजिस्टर प्रचालन

चित्र 16.36 (अ) में दर्शायेPNP ट्रांजिस्टर परिपथ पर यदि विचार करें तो क्योंकि E-B संधि अग्र अभिनत है अतः E क्षेत्र (P प्रकार) के बहुसंख्यक आवेश वाहक 'होल' बड़ी संख्या में इस संधि के पार विसरित होंगे। इसे उत्सर्जक से आधार में 'होल' का अन्तः क्षेपण (injection) कहा जाता है। इसी प्रकार आधार जो N प्रकार का अर्धचालक है से इलेक्ट्रॉन संधि को पार कर उत्सर्जक में पहुँचते हैं। दोनो आवेश वाहकों की गति विपरीत दिशाओं में है पर इनके संगत धारा प्रवाह E से B की ओर ही होता है। यह धारा उत्सर्जक धारा I_E कहलाती है जो होल व इलेक्ट्रॉन दोनों के कारण है पर आधार क्षेत्र में मादन कम होने के कारणPNP ट्रांजिस्टर के लिये यह धारा मुख्यतः होल के कारण होगी।

यद्यपि उत्सर्जक से आधार में अन्तःक्षेपित होलों की प्रवृत्ति आधार में उपस्थित इलेक्ट्रॉन से पुनः संयोजन की होती है किन्तु आधार के पतला व कम मादित होने के कारण बहुत कम होल (5 प्रतिशत से भी कम) ही इलेक्ट्रॉनों से पुनः संयोजित होते हैं व अधिकाँश होल आधार संग्राहक संधि को पार कर संग्राहक में पहुंच जाते हैं। संग्राहक टर्मिनल के ऋणात्मक होने के कारण ये होल आसानी से संग्राहक टर्मिनल तक पहुँच जाते हैं व इस प्रकार संग्राहक धारा I_C का निर्माण करते हैं।

उत्सर्जक से आधार में अन्तः क्षेपित कुछ होल आधार में इलेक्ट्रॉन से पुनः संयोजित होते है तथा अल्पमान की आधार धारा I_B का निर्माण करते हैं। पुनः संयोजन की प्रक्रिया में नष्ट हुए प्रत्येक इलेक्ट्रॉन की पूर्ति के लिये बैटरी V_{EB} के आधार पर जुड़े ऋणात्मक सिरे से एक इलेक्ट्रॉन आधार को प्रदान किया जाता है। अतः यहाँ आधार धारा I_B आधार टर्मिनल B की ओर प्रवाहित होती है।PNP ट्रांजिस्टर के लिये धाराओं I_E, I_B व I_C की दिशायें चित्र 16.36(अ) में प्रदर्शित की गई है।

चित्र में दर्शाये गये पूर्ण ट्रांजिस्टर के लिये किरचॉफ धारा नियम का प्रयोग करें तो स्पष्ट है कि उत्सर्जक धारा, आधार धारा व संग्राहक धारा के योग के बराबर होगी, अर्थात्

$$I_E = I_B + I_C \qquad \ldots(16.14)$$

जहाँ $I_B << I_E$ व $I_B << I_C$

क्योंकि E-B संधि अग्र अभिनत है इसका अग्रप्रतिरोध बहुत अल्प होता है एवं B-C संधि उत्क्रम अभिनत है अतः इसका उत्क्रम प्रतिरोध अत्याधिक होता है। इस कारण ऐसा प्रतीत होता है कि उत्सर्जक संधि पर धारा I_E, संग्राहक संधि पर धारा I_C से बहुत अधिक होगी। किन्तु समीकरण (16.14) के अनुसार I_B बहुत कम होने से $I_C \approx I_E$ प्राप्त होती है। अतः प्रचालन की दृष्टि से ट्रांजिस्टर एक ऐसी युक्ति है जो अल्प प्रतिरोध (अग्र अभिनत EB संधि) वाले परिपथ से धारा I_E को लगभग वही मान $I_C\left(I_C \approx I_E\right)$ रखते हुऐ उच्च प्रतिरोध (उत्क्रम अभिनत BC संधि) वाले परिपथ को स्थानांतरित करती है। इसी धारा स्थानान्तरण की प्रक्रिया के लिये अंग्रेजी भाषा के शब्दों Transfer + resistor का संयुक्तिकरण व संक्षिप्तिकरण कर Transistor शब्द निर्मित कर इस युक्ति का नामकरण किया गया है।

दूसरे शब्दों में यह भी कहा जा सकता है कि ट्रांजिस्टर में द्वारा प्रचालन की प्रक्रिया में B-E संधि पर उपस्थित विभवान्तर का प्रभाव संग्राहक धारा पर बहुत अधिक होता है। V_{EB} का मान अधिक होने पर उत्सर्जित धारा व संग्राहक धारा दोनों ही अधिक होती हैं।

उपर्युक्त विवेचना कोNPN ट्रांजिस्टर की सक्रिय प्रचालन विधा के लिये भी काम लिया जा सकता है। इस ट्रांजिस्टर में बहुसंख्यक धारा वाहक इलेक्ट्रॉन होंगे जो N प्रकार के उत्सर्जक से P प्रकार के आधार में अन्तः क्षेपित होने के पश्चात संग्राहक में पहुँच कर संग्राहक धारा I_C निर्मित करेंगे। चित्र 16.36 (ब) में एकNPN ट्रांजिस्टर के लिये I_E, I_B व I_C की दिशाएँ प्रदर्शित की गई हैं।

NPN ट्रांजिस्टर में उत्सर्जक धारा अधिकांशतः इलेक्ट्रॉनों के कारण होती है। यद्यपि PNP व NPN दोनों ही प्रकार के ट्रांजिस्टर काम लिए जाते हैं परन्तु इलेक्ट्रॉनों की गतिशीलता होल से अधिक होने के कारण उच्च आवृति परिपथों में NPN ट्रांजिस्टर ज्यादा प्रभावी होते हैं।

16.10 ट्रांजिस्टर परिपथीय अभिविन्यास (Transistor Circuit Configurations)

सामान्यतः अधिकतर इलेक्ट्रॉनिक परिपथ चर्तु:टर्मिनल जाल (four terminal network) होते हैं जिनमें दो टर्मिनल निवेशी संकेत (input signal) प्रयुक्त करने हेतु व शेष दो टर्मिनल निर्गत संकेत (output signal) प्राप्त करने हेतु काम आते हैं। किसी संधि ट्रांजिस्टर में केवल तीन टर्मिनल उत्सर्जक (E), आधार (B) एवं संग्राहक (C) ही होते हैं। अतः इसप्रकार के परिपथो में ट्रांजिस्टर को इस प्रकार जोड़ा जाता है कि तीन टर्मिनलों E, B व C में से कोई एक निवेशी एवं निर्गत दोनों के लिये उभयनिष्ठ रहे। इस प्रकार ट्रांजिस्टर को परिपथ में जोड़ने के लिये निम्न तीन विन्यास उपयोग में लाये जाते हैं।

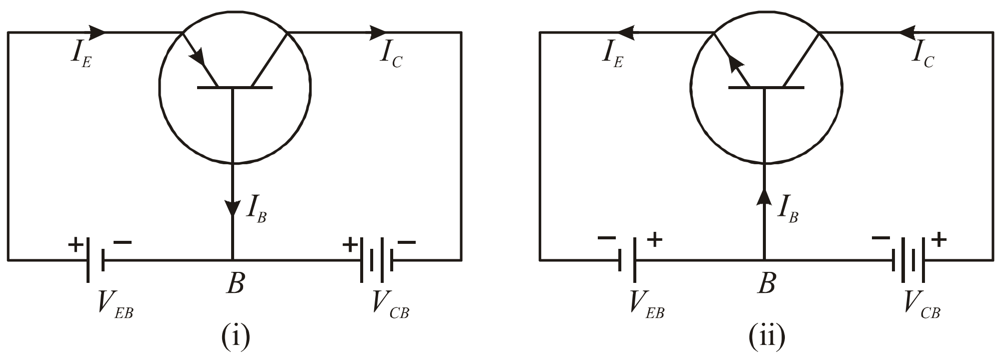
1. उभयनिष्ठ आधार विन्यास (common base (CB) configuration)
2. उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास (common emitter (CE) configuration)
3. उभयनिष्ठ संग्राहक विन्यास (common collector (CC) configuration)

किसी ट्रांजिस्टर परिपथ में सभी वोल्टताएँ उभयनिष्ठ टर्मिनल को भूसम्पर्कित मान कर इसके सापेक्ष व्यक्त की जाती हैं।

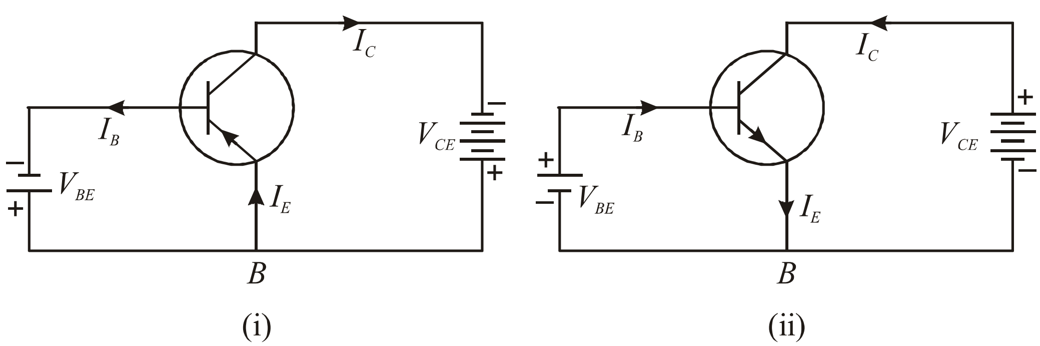
चित्र 16.37 में ट्रांजिस्टर के लिये इन विन्यासों के परिपथ दर्शाये गये हैं। प्रत्येक परिपथ में उत्सर्जक आधार संधि अग्रअभिनत व आधार–संग्राहक संधि उत्क्रम अभिनत है।

16.10.1 ट्रांजिस्टर के अभिलाक्षणिक वक्र (Transistor Characteristic Curves)

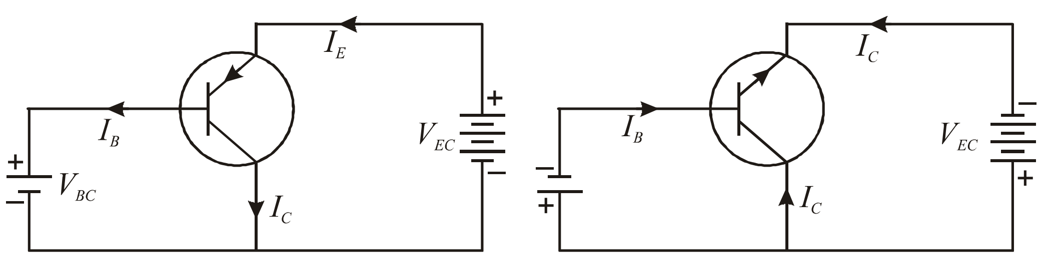
ट्रांजिस्टर के निवेशी परिपथ व निर्गत परिपथ में प्रवाहित धाराओं का इन परिपथों में प्रयुक्त विभवान्तर के साथ होने वाले परिवर्तनों को दर्शाने वाले ग्राफ इसके अभिलाक्षणिक वक्र कहलाते हैं। जब परिपथ में केवल दिष्ट धाराएँ ही प्रवाहित हों तथा निर्गत टर्मिनलों के मध्य कोई लोड प्रतिरोध नहीं जुड़ा हो तो ऐसे वक्र स्थैतिक अभिलाक्षणिक (static characteristics) कहलाते हैं जब परिपथ में प्रत्यावर्ती धाराऐं उपस्थित हों व निर्गत सिरों पर लोड़



चित्र 16.37 (अ) **CB परिपथ (i) PNP ट्रांजिस्टर (ii) NPN ट्रांजिस्टर के लिये**



चित्र 16.37 (ब) **CE परिपथ (i) PNP ट्रांजिस्टर (ii) NPN ट्रांजिस्टर के लिये**



चित्र 16.37 (स) **CC परिपथ (i) PNP ट्रांजिस्टर (ii) NPN ट्रांजिस्टर के लिये**

प्रतिरोध लगा हो तब प्राप्त अभिलाक्षणिक वक्र गतिक अभिलाक्षणिक (dynamic characteristics) कहलाते हैं। अभिलाक्षणिक वक्रों की सहायता से ट्रांजिस्टर के विभिन्न परिपथों की रचना में सुविधा होती है। यहाँ हम स्थैतिक अभिलक्षाणिक का ही अध्ययन करेंगे। सामान्यतः दो प्रकार के अभिलक्षणिक वक्रों की जानकारी उपयोगी होती है।

निवेशी अभिलाक्षणिक (Input Characteristics)

ट्रांजिस्टर की निर्गत वोल्टता को नियत रखते हुऐ निवेशी धारा व निवेशी विभवान्तर में खींचा गया ग्राफ निवेशी अभिलाक्षणिक वक्र कहलाता है। विभिन्न नियत निर्गत वोल्टताओं के लिये ऐसे कई वक्र खींच कर प्राप्त किये गये वक्रों के समूह को निवेशी अभिलाक्षणिक कहते हैं।

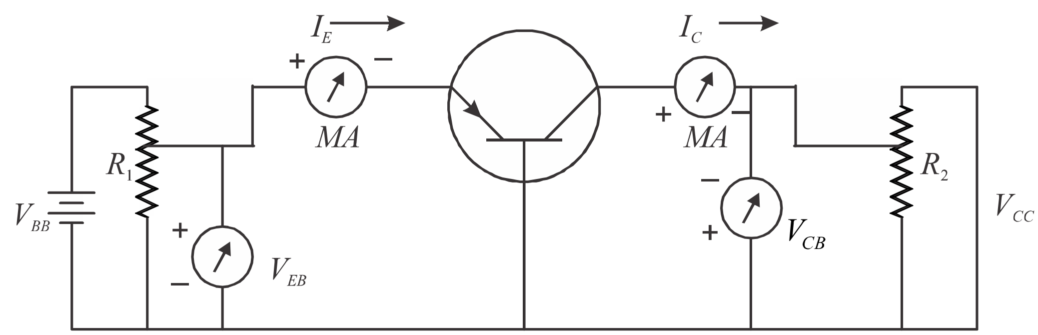
निर्गत अभिलक्षणिक (Output Characteristics)

नियत निवेशी धारा के लिये निर्गत वोल्टता एवं निर्गत धारा में खींचा गया ग्राफ निर्गत अभिलाक्षणिक वक्र कहलाता हैं। विभिन्न नियत निवेशी धाराओं के लिए प्राप्त इस प्रकार के कई वक्रों के समूह को निर्गत अभिलाक्षणिक कहते हैं।

ट्रांजिस्टर के तीनों विन्यासों में ट्रांजिस्टर के अभिलाक्षणिक एवं प्रचालन में बहुत अन्तर होता है। अतः इनका अलग–अलग अध्ययन करना होता है। यहाँ हम उभयनिष्ठ उत्सर्जक एवं उभयनिष्ठ आधार विन्यासों का ही अध्ययन करेंगे।

16.10.2 उभयनिष्ठ आधार विन्यास (Common Base Configuration)

इस विन्यास (चित्र 16.37 (अ)) में ट्रांजिस्टर का आधार टर्मिनल निवेश व निर्गम में उभयनिष्ठ होता है। उत्सर्जक एवं आधार के बीच उपस्थित विभवान्तर निवेशी वोल्टता कहलाती है। जबकि संग्राहक एवं आधार के मध्य विभवान्तर निर्गत वोल्टता कहलाती है। उत्सर्जक धारा I_E निवेशी धारा कहलाती है तथा संग्राहक धारा I_C को निर्गत धारा कहा जाता है। चित्र (16.37 (अ)) में दर्शाई गयी व्यवस्था इस विन्यास की मूलभूत व्यवस्था है जिसमें कुछ परिवर्तनों को किया जाकर चित्र 16.38 में दर्शाये गये परिपथ को बनाया जा सकता है। इस परिपथ का उपयोग ट्रांजिस्टर के अभिलाक्षणिक वक्रों को प्रायोगिक रूप से प्राप्त करने के लिये होता है। प्रदर्शित चित्र में PNP ट्रांजिस्टर काम लिया गया हैं। अभिनति व्यवस्था में उचित परिवर्तन कर ऐसा ही परिपथ NPN ट्रांजिस्टर के अभिलाक्षणिक वक्र खींचने के लिये भी बनाया जा सकता है।



चित्र 16.38 PNP ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ आधार अभिलाक्षणिक वक्र प्राप्त करने हेतु परिपथ संयोजन

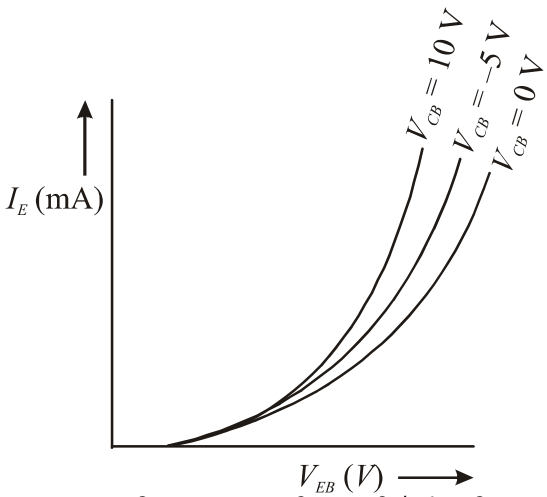
चित्र 16.38 में बैटरी V_{BB} द्वारा B-E संधि को अग्र अभिनति एवं बैटरी V_{CC} द्वारा B-C संधि को उत्क्रम अभिनति प्रदान की जाती है। क्योंकि दोनों तरफ से आरोपित वोल्टता V_{EB} व V_{CB} को परिवर्तित करने पर I_E व I_C पर प्रभाव देखना है अतः V_{BB} व V_{CC} के साथ विभव विभाजक व्यवस्था (potential divider arrangement) क्रमशः R_1 व R_2 रखी जाती है।

V_{EB} व V_{CB} के मापन के लिये संबंधित परिपथों में वोल्टमीटर व इसी प्रकार I_E व I_C के मापन के लिये मिली मीटर लगाये गये हैं।

इस परिपथ की सहायता से निवेशी व निर्गत अभिलाक्षणिक वक्र निम्नानुसार प्राप्त किये जाते हैं।

निवेशी अभिलक्षणिक

यहाँ निर्गत वोल्टता V_{CB} को स्थिर रखते हुए निवेशी वोल्टता V_{EB} में परिवर्तन के संगत निवेशी धारा I_E में परिवर्तन का मापन मुख्य उद्देश्य होता है। इस हेतु पहले R_2 की सहायता से V_{CB} को किसी वांछित मान पर समायोजित कर इसे स्थिर रखा जाता है। इसके उपरान्त R_1 की सहायता से V_{EB} शून्य से प्रारंभ कर विविक्त पदों (discrete step) (उदाहरणार्थ 0–5 वोल्ट की परास में) में परिवर्तित कर I_E के संगत मानों को मिलीअमीटर से ज्ञात करते हैं। इस प्रकार V_{CB} के स्थिर मान पर प्राप्त विभिन्न V_{EB} तथा संगत I_E में ग्राफ खींच लेते हैं। जो चित्र 16.39 में प्रदर्शित है। यही प्रक्रिया V_{CB} के अन्य स्थिर मानों के लिये दोहराई जाती है। ध्यान रहे कि उत्क्रम अभिनति होने के कारण V_{CB} के मान ऋणात्मक लिखे जाते हैं।



चित्र 16.39 उभयनिष्ठ आधार ट्रांजिस्टर निवेशी अभिलाक्षणिक

किसी निवेशी अभिलाक्षणिक वक्र का स्वरूप P-N संधि डायोड के अग्र अभिलाक्षणिक वक्र के समान ही होता है। क्योंकिE-B संधि भी अग्र बायसित है अतः ऐसा होना स्वाभाविक भी है। प्रारंभ में V_{EB} के शून्य होने पर धारा भी शून्य होती है, अतः वक्र मूल बिन्दु से प्रारंभ होते हैं। V_{EB} के मान में वृद्धि होने पर पहले I_E में नगण्य वृद्धि होती है पर V_{EB} के एक मान के उपरान्त जिसे ट्रांजिस्टर की देहली वोल्टता (threshold voltage) कहा जाता है, धारा तीव्रता से बढ़ती है। इसका कारण भी PN संधि के अग्र अभिनति अभिलक्षणिक के लिये समझाये अनुसार ही है। ट्रांजिस्टर की प्रकृति के अनुरूप इसका मान 0.1 V से 0.5 V के मध्य होता है।

ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ आधार विन्यास के लिये गतिक निवेशी प्रतिरोध

$$R_{ib} = \left.\frac{\Delta V_{EB}}{\Delta I_E}\right|_{V_{CB}=\text{नियत}}$$

द्वारा दिया जाता है। पादाक्षर के रूप में V_{CB} = नियत यह इंगित करता है कि वक्रों के समूह के किस वक्र विशेष के लिये R_{ib} की गणना की गई है। R_{ib} मान 50 से 100 ओम कोटि का होता है।

निर्गत अभिलाक्षणिक

यहाँ निवेशी धारा I_E को स्थिर रखते हुऐ निर्गत वोल्टता V_{CB} के परिवर्तन के संगत निर्गत धारा I_C के परिवर्तनों का अध्ययन किया जाता है।

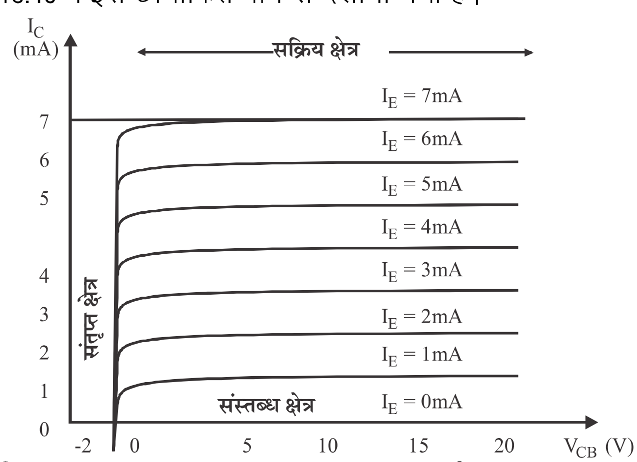
प्रारंभ में R_1 की सहायता से I_E को किसी वांछित मान पर समायोजित कर इसे स्थिर रखा जाता है। अब R_2 की सहायता से V_{CB} को शून्य से प्रारंभ कर विविक्त पदों में बदलते हुए I_C के संगत मानों को मिलीअमीटर से पढ़ लिया जाता है। V_{CB} तथा I_C में खींचा गया वक्र निर्गत अभिलाक्षणिक वक्र कहलाता है। यही प्रक्रिया I_E के अन्य स्थिर मानों के लिये दोहरा कर ऐसे वक्रों का समूह, जिन्हें निर्गत अभिलाक्षणिक कहते हैं, प्राप्त किया जाता है। इन्हें चित्र 16.40 में प्रदर्शित किया गया है।C-B संधि के पश्च अभिनत होने के कारण इन वक्रों के लिये V_{CB} व I_C दोनों ऋणात्मक हैं इन वक्रों के अध्ययन से निम्नांकित तथ्य दृष्टिगोचर होते हैं:

(i) $I_E = 0$ के लिये $V_{CB} = 0$ होने पर I_C भी शून्य है, पर $I_E = 0$ के लिये V_{CB} के अन्य मानों पर I_C का अल्प मान प्राप्त हो रहा हैं ऐसा इस कारण है कि $V_{CB} \neq 0$ के लिये उत्क्रम बायसित B-E संधि में नगण्य मान $(\sim \mu A)$ कोटि की उत्क्रम धारा बहती है। $I_E = 0$ के लिए प्राप्त वक्र उत्क्रम अभिनत डायोड के लिये प्राप्त वक्र के समान ही है।

(ii) I_E के अन्य मानों $(I_E \neq 0)$ के लिए V_{CB} के शून्य मान पर भी I_C का मान शून्य है। V_{CB} का मान शून्य से बढ़ाने पर V_{CB} अल्प मानों के लिये I_C पहले बढ़ती है, पर शीघ्र ही संतृप्त हो जाती है। इस स्थिति में वक्र वोल्टता अक्ष V_{CB} के समान्तर होता है।

(iii) I_E का मान बढ़ने पर I_C का मान बढ़ता है। संतृप्त अवस्था में I_C का मान I_E के मान से थोड़ा सा ही कम होता है।

(iv) I_E के अशून्य मानों पर I_C को शून्य करने के लिये यह आवश्यक होता है कि V_{CB} के लिये बैटरी V_{CC} की ध्रुवता को बदल कर C-B संधि को उत्क्रम अभिनति के स्थान पर अग्र अभिनति कर दिया जाये। ऐसी स्थिति में V_{CB} धनात्मक होगा। V_{CB} को शून्य से धनात्मक करने पर V_{CB} के अल्पमान पर ही I_C शून्य हो जायेगी। विभिन्न I_E पर संग्राहक आधार संधियाँ अग्र अभिनति की इस स्थिति में ट्रांजिस्टर को संतृप्त क्षेत्र में कार्यरत कहा जाता है। चित्र 16.40 में इसे छायांकित भाग से दर्शाया गया है।



चित्र 16.40 ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ आधार निर्गत अभिलाक्षणिक

उभयनिष्ठ आधार विन्यास के लिये गतिक निर्गत प्रतिरोध R_{ob} निम्नानुसार परिभाषित किया जाता है–

$$R_{ob} = \left.\frac{\Delta V_{CB}}{\Delta I_C}\right|_{I_E = \text{नियत}}$$

निर्गम अभिलाक्षणिक वक्रों से स्पष्ट है कि V_{CB} के मान में बहुत अधिक परिवर्तन करने पर I_C में बहुत कम परिवर्तन होता है, इस कारण गतिक निर्गत प्रतिरोध अत्यंत उच्च $10^6\,\Omega$ कोटि का होता है।

निर्गत प्रतिरोध के व्युत्क्रम को निर्गत चालकता (output conductance) कहा जाता है।

16.10.3 ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ आधार विन्यास के लिये धारा लाभ या धारा प्रवर्धन गुणांक (Current Gain or Current Amplification Factor for Transistor in CB Configuration)

उभयनिष्ठ आधार विन्यास में स्थिर संग्राहक–आधार वोल्टता (V_{CB}) पर संग्राहक धारा I_C (निर्गम धारा) व उत्सर्जक धारा I_E (निवेशी धारा) के अनुपात को स्थैतिक धारा लाभ या स्थैतिक धारा प्रवर्धन गुणांक कहते हैं। इसे α_{dc} द्वारा व्यक्त करते हैं, अर्थात्

$$\alpha_{dc} = \left.\frac{I_C}{I_E}\right|_{V_{CB} = \text{नियत}} \qquad \ldots(16.15)$$

स्थिर V_{CB} पर यदि निवेशी धारा I_E में ΔI_E परिवर्तन किये जाने पर यदि निर्गत धारा I_C में परिवर्तन ΔI_C होता है तो गतिक धारा प्रवर्धन गुणांक α_{ac} या α द्वारा व्यक्त किया जाता है जो इस प्रकार दिया जाता है

$$\alpha_{ac} = \alpha = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}\right|_{V_{CB} = \text{नियत}} \qquad \ldots(16.16)$$

क्योंकि I_C, I_E से कुछ कम होता है। ΔI_C भी ΔI_E से कम होता है अतः α_{dc} व α_{ac} के मान 1 के निकट, परन्तु 1 से थोड़े कम होते हैं। α_{ac} के मान 0.9 से लेकर 0.99 तक प्राप्त होते हैं।

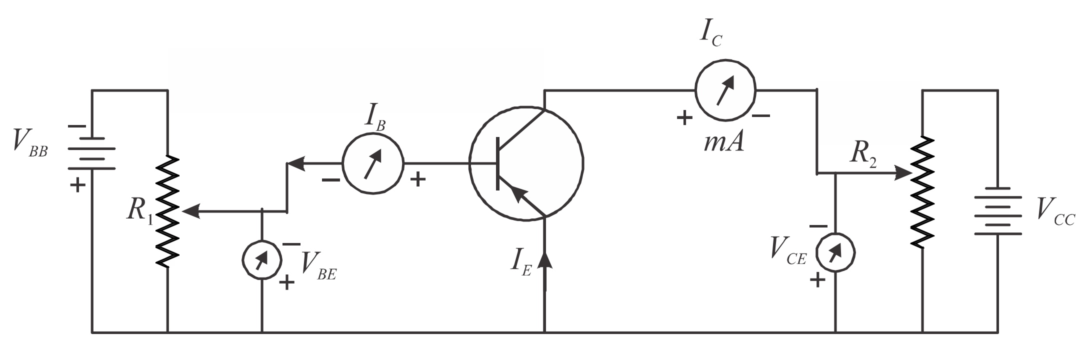
16.10.4 उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास (Common Emitter Configuration)

इस विन्यास में उत्सर्जक (E) निवेशी परिपथ और निर्गम परिपथ दोनों के लिये उभयनिष्ठ होता है। आधार एवं उत्सर्जक के बीच उपस्थित विभवान्तर निवेशी वोल्टता कहलाती है जबकि संग्राहक एवं उत्सर्जक के मध्य उपस्थित विभवान्तर को निर्गम वोल्टता कहा जाता है। इस विन्यास के लिये मूलभूत व्यवस्था चित्र 16.37 (ब) में दर्शाई गई है। यहाँ आधार धारा I_B निवेशी धारा तथा संग्राहक धारा I_C निर्गत धारा है।

एक PNP ट्रांजिस्टर को काम लेते हुऐ उभयनिष्ठ उत्सर्जक अभिलाक्षणिक वक्र खींचने के लिये प्रायोगिक परिपथ व्यवस्था चित्र 16.41 में प्रदर्शित की गई है। बैटरी V_{BB} व विभवभाजन व्यवस्था R_1 के माध्यम से आधार उत्सर्जक संधि को आवश्यक अग्र अभिनति V_{BE} प्रदान की जाती है। V_{BE} का मापन आधार व उत्सर्जक सिरों के मध्य उपस्थित वोल्टमीटर द्वारा किया जाता है। यहाँ आधार धारा I_B के अल्प (~ A) होने के कारण इसका मापन माइक्रोअमीटर द्वारा किया जाता है। बैटरी V_{CC} एवं विभव भाजन व्यवस्था R_2 के द्वारा संग्राहक व उत्सर्जक के मध्य विभवान्तर V_{CE} का मापन इस परिपथ में लगे वोल्टमीटर व संग्राहक धारा I_C का मापन मिलीअमीटर द्वारा किया जाता है।

यहाँ यह प्रश्न उठना स्वाभाविक है कि आधार संग्राहक संधि को उत्क्रम अभिनति कैसे प्रदान की गई जब कि इनके मध्य बैटरी नहीं लगी है? इस प्रश्न का उत्तर पाने के लिये चित्र 16.41 को ध्यानपूर्वक देखें।

यहाँ आधार व संग्राहक दोनों अपने–अपने परिपथों की बैटरियों (V_{BB} व V_{CC}) के ऋणात्मक पर जुड़े हैं। यदि V_{CE} का

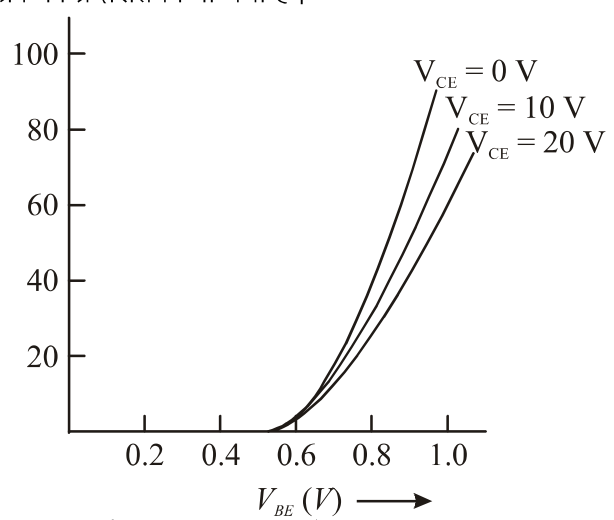


चित्र 16.41 PNP ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास हेतु अभिलाक्षणिक वक्र प्राप्त करने के लिये परिपथ संयोजन

परिमाण V_{BE} से अधिक हो तो आधार(N type) संग्राहक (P type) से कम ऋणात्मक विभव पर होगा। दूसरे शब्दों में N प्रकार का आधार P प्रकार के संग्राहक से अधिक धनात्मक विभव पर है, स्पष्टतः यह संधि उत्क्रम अभिनत होगी।

निवेशी अभिलाक्षणिक:

यहाँ निर्गत वोल्टता V_{CE} को स्थिर रखते हुऐ निवेशी वोल्टता V_{BE} में परिवर्तन के संगत निवेशी धारा I_B में परिवर्तनों का अध्ययन किया जाता है। इसके लिये पहले R_2 की सहायता से V_{CE} को किसी नियत मान पर स्थिर रखा जाता है। अब R_1 की सहायता से V_{BE} को शून्य से प्रारंभ कर विविक्त पदों में बदलते हुऐ I_B के संगत मान पढ़ लिया जाता है। I_B व V_{BE} के मध्य ग्राफ खींच लिया जाता है। यही प्रक्रिया V_{CE} के अन्य नियत मानों के लिये दोहराई जाती है। इस प्रकार से प्राप्त वक्रों के समूह उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास के निवेशी अभिलाक्षणिक कहलाते हैं। चित्र 16.42 में V_{CE} के तीन नियत मानों के लिये इन निवेशी अभिलाक्षणिक वक्रों को प्रदर्शित किया गया है।



चित्र 16.42 CE निवेशी अभिलक्षाणिक

गतिक निवेशी प्रतिरोध:

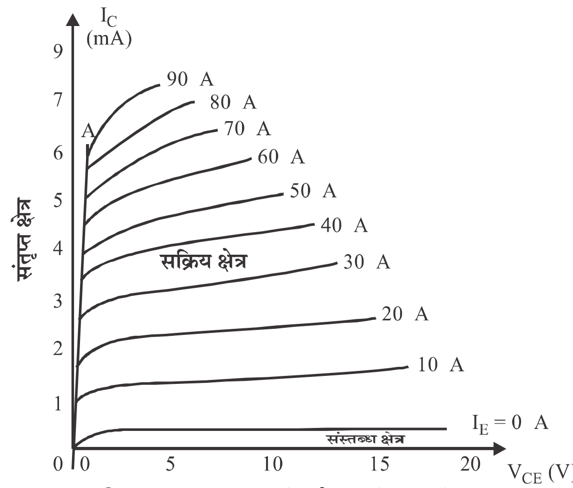
ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास के लिये गतिक निवेशी प्रतिरोध, निम्न सूत्र द्वारा दिया जाता है।

$$R_{ie} = \left.\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}=\text{नियत}}$$

इसका मान कुछ सौ ओम कोटि का होता है। यदि इसकी तुलना उभयनिष्ठ आधार परिपथ के लिये निवेशी प्रतिरोध R_{ib} से की जाये तो $R_{ie} > R_{ib}$ होगा।

निर्गत अभिलाक्षणिक:

यहाँ निवेशी धारा I_B को स्थिर रखते हुए निर्गम वोल्टता V_{CE} के परिवर्तन के संगत निर्गत धारा I_C में परिवर्तनों का अध्ययन किया जाता है। इन्हें ज्ञात करने के लिये R_2 की सहायता से V_{CE} के मान परिवर्तित करते हुऐ इनके संगत I_C के मान पढ़ लिये जाते हैं। V_{CE} तथा I_C के मध्य ग्राफ खींचा जाता है। यही प्रक्रिया I_B के अन्य स्थिर मानों के लिये दोहराई जाती है। इस प्रकार प्राप्त वक्रों के समूह को निर्गत अभिलाक्षणिक कहते हैं। इन्हें चित्र 16.43 में प्रदर्शित किया गया है।



चित्र 16.43 CE निर्गत अभिलक्षणिक

I_B के किसी नियत मान पर V_{CE} के शून्य से बढ़ाने पर I_C बहुत जल्दी लगभग संतृप्त हो जाती है। जिसके बाद I_C का मान बहुत धीरे बढ़ता है। चित्र 16.43 में रेखा OA संतृप्ती रेखा कहलाती है तथा इस रेखा व I_C अक्ष के मध्य का क्षेत्र संतृप्त क्षेत्र कहलाता है। $I_B = 0$ रखने पर भी I_C शून्य नहीं होता। अर्थात् निवेशी धारा शून्य होने पर भी थोड़ी निर्गम धारा बहती है। (जोकि पश्च बायसित CE संधि में अल्प संख्यक धारा वाहकों के कारण उत्क्रम संतृप्त धारा है) $I_B = 0$ वाले वक्र एवं V_{CE} अक्ष के बीच के क्षेत्र को अंतक क्षेत्र (cutoff region) कहा जाता है।

अंतक क्षेत्र तथा संतृप्ति क्षेत्र के अतिरिक्त शेष क्षेत्र सक्रिय क्षेत्र (active region) कहलाता है। यहाँ ट्रांजिस्टर की उत्सर्जक आधार संधि अग्र बायसित व आधार संग्राहक संधि उत्क्रम बायसित होती है। सक्रिय क्षेत्र में I_C, V_{CE} पर लगभग अनाश्रित होता है।

इस विन्यास के लिये निर्गत गतिक प्रतिरोध R_{oe} निम्नानुसार परिभाषित किया जाता है।

$$R_{oe} = \left.\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C}\right|_{I_B=\text{नियत}}$$

क्योंकि I_C, V_{CE} के साथ बहुत अधिक नहीं बदलती (V_{CE} के प्रारंभिक मानों को छोड़कर) अतः R_{oe} बहुत उच्च लगभग 50 से 100 kΩ किलोओम कोटि का होता है।

धारा प्रवर्धन गुणांक (β)

उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में, स्थिर संग्राहक उत्सर्जक वोल्टता (V_{CE}) पर संग्राहक धारा I_C (निर्गत धारा) व आधार धारा I_B (निवेशी धारा) के अनुपात को स्थैतिक धारा लाभ या स्थैतिक धारा प्रवर्धन गुणांक कहते हैं। इसे β_{dc} से व्यक्त करते हैं। अर्थात्

$$\beta_{dc} = \left.\frac{I_C}{I_B}\right|_{V_{CE}=\text{नियत}}$$

स्थिर V_{CB} पर I_C में परिवर्तन (ΔI_C) व I_B में परितर्वन (ΔI_B) के अनुपात को गतिक धारा प्रवर्धन गुणांक (β_{ac} या β) कहते हैं।

$$\beta = \left.\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}=\text{नियत}}$$

क्योंकि $I_C >> I_B$ एवं $\Delta I_C >> \Delta I_B$, अतः β_{dc} व β दोनों ही 1 से बहुत अधिक होते हैं अर्थात् $\beta >> 1$

α एवं β में संबंध

ट्रांजिस्टर के किसी भी विन्यास के लिये उत्सर्जक धारा I_E आधार धारा I_B व संग्राहक धारा I_C के योग के बराबर होती है, अर्थात्

$$I_E = I_B + I_C \quad \ldots(16.18)$$

इसलिये धाराओं में अल्प परिवर्तनों के लिये

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_C \quad \ldots(16.19)$$

लिखा जा सकता है

या $$\frac{\Delta I_E}{\Delta I_C} = \frac{\Delta I_B}{\Delta I_C} + 1 \quad \ldots(16.20)$$

किन्तु $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \alpha$ तथा $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta$ होता है।

अतः समीकरण (16.20) में ये मान रखने पर

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} + 1 \quad \ldots(16.21)$$

या $$\frac{1}{\alpha} = \frac{\beta+1}{\beta}$$

या $$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta} \quad \ldots(16.22\text{अ})$$

समीकरण (16.21) से

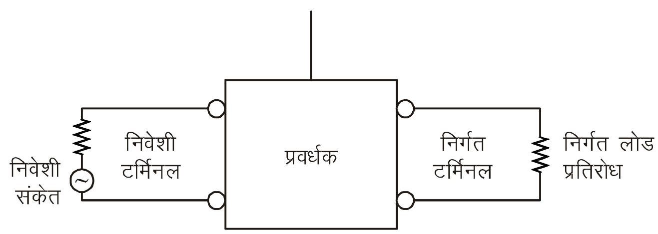
$$\frac{1}{\beta} = \frac{1-\alpha}{\alpha}$$

या $$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \ldots(16.22\text{ब})$$

क्योंकि α एक से थोड़ा ही कम होता है अतः β का मान α की तुलना में काफी अधिक होता है।

16.11 ट्रांजिस्टर प्रवर्धक (Transistor Amplifier)

प्रवर्धक से आशय ऐसी सक्रिय इलेक्ट्रॉनिक युक्ति से है जिससे प्राप्त निर्गत संकेत का आयाम इस पर प्रयुक्त निवेशी संकेत के आयाम से अधिक होता है। निवेशी संकेत सामान्यतः प्रत्यावर्ती (ac) धारा या वोल्टता होती है। संकेत के आयाम की वृद्धि की यह प्रक्रिया प्रवर्धन कहलाती है। इसमें संकेत की आकृति व आवृति (shape and frequency) में कोई परिवर्तन नहीं होता है। संकेत के आयाम की वृद्धि में आवश्यक ऊर्जा की प्राप्ति प्रवर्धक परिपथ में लगी दिष्ट प्रदायक (DC power suply) से होती है। चित्र 16.44 में प्रवर्धक का ब्लॉक आरेख दिखाया गया है।



चित्र 16.44 प्रवर्धक का ब्लॉक आरेख

प्रवर्धक के एक प्रकार, श्रव्य आवृति प्रवर्धक के दैनिक जीवन में उपयोग से हम भली भांति परिचित हैं। माइक्रोफोन के द्वारा ध्वनि संकेतों को इनके तुल्य आवृत्ति के विद्युत संकेतों में परिवर्तित कर प्रवर्धक में निवेशित किया जाता है जिसके निर्गत में उच्च आयाम के विद्युत संकेत प्राप्त होते हैं जिन्हें लाउड स्पीकर द्वारा पुनः ध्वनि संकेतों में बदला जाता है क्योंकि ये संकेत उच्च आयाम के विद्युत संकेतों के संगत होते हैं। अतः हमें अधिक तीव्रता की ध्वनि सुनाई देती है।

प्रवर्धकों के लिये निर्गत तथा निवेशी संकेतों के अनुपात को प्रवर्धन गुणांक (amplification factor) या लाभ (gain) कहते हैं। यदि निवेशी संकेत की वोल्टता V_i व निर्गत संकेत की वोल्टता V_0 द्वारा निरूपित की जाये तो

वोल्टता प्रवर्धन गुणांक (Voltage amplification factor) या वोल्टता लाभ (Voltage gain)

$$A_V = \frac{\text{निर्गत संकेत वोल्टता}}{\text{निवेशी संकेत वोल्टता}} = \frac{V_0}{V_i}$$

इसी प्रकार धारा प्रवर्धन गुणांक(Current amplification factor) या धारा लाभ (Current gain)

$$A_i = \frac{\text{निर्गत संकेत धारा}}{\text{निवेशी संकेत धारा}} = \frac{I_0}{I_i}$$

तथा शक्ति प्रवर्धन गुणांक (Power amplification factor) या शक्ति लाभ (Power gain)

$$A_p = \frac{\text{निर्गत संकेत शक्ति}}{\text{निवेशी संकेत शक्ति}} = \frac{P_0}{P_i}$$

द्वारा दिया जाता है।

$\because \quad P_0 = V_0 \times I_0$

तथा $\quad P_i = V_i \times I_i$

$$\therefore \quad A_p = \frac{V_0 I_0}{V_i I_i}$$

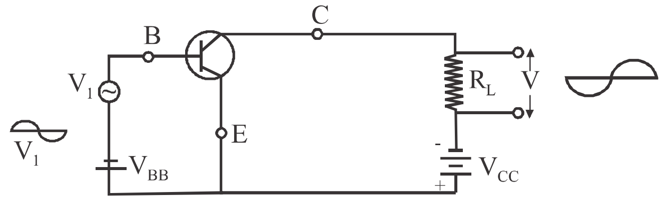
$$A_p = A_v A_i$$

अतः प्रवर्धक के लिये तीनों प्रवर्धन गुणांक परस्पर संबंधित होते हैं।

ट्रांजिस्टर को प्रवर्धक के रूप में काम लेने के लिये इसका एक टर्मिनल निवेशी व निर्गत परिपथों में उभयनिष्ठ रखा जाता है। निवेशी संकेत, जिसका कि प्रवर्धन किया जाना है को निवेशी परिपथ में प्रयुक्त किया जाता है तथा निर्गत परिपथ में लोड प्रतिरोध R_L लगाया जाता है। ट्रांजिस्टर द्वारा प्रवर्धन क्रिया उभयनिष्ठ आधार व उभयनिष्ठ उत्सर्जक दोनों विन्यासों में संभव है। किन्तु उभयनिष्ठ उत्सर्जक प्रवर्धक के लिए वोल्टता, धारा एवं शक्ति लाभ उभयनिष्ठ आधार प्रवर्धक की तुलना में अधिक होते है। अतः यहां हम उभयनिष्ठ उत्सर्जक प्रवर्धक का ही अध्ययन कर रहे हैं।

16.11.1 उभयनिष्ठ–उत्सर्जक प्रवर्धक (Common Emitter Amplifier)

चित्र 16.45 में PNP ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ उत्सर्जक परिपथ दर्शाया गया है। यहाँ उत्सर्जक निवेशी व निर्गत परिपथों के लिये उभयनिष्ठ है। बैटरी V_{BB} द्वारा उत्सर्जक–आधार संधि को अग्र अभिनति प्रदान की जाती है, जबकि बैटरी $V_{CC}\,(>V_{BB})$ के द्वारा संग्राहक–उत्सर्जक संधि को उत्क्रम अभिनति पर रखा जाता है। V_i संकेत वोल्टता है जिसका प्रवर्धन किया जाना है को निवेशी परिपथ में प्रयुक्त किया जाता है। एक लोड प्रतिरोध R_L को निर्गत परिपथ में जोड़ा गया है जिस पर प्रवर्धित वोल्टता V_0 प्राप्त की जाती है।



चित्र 16.45 उभयनिष्ठ उत्सर्जक प्रवर्धक

प्रत्यावर्ती संकेत V_i की अनुपस्थिति में आधार–उत्सर्जक संधि पर उपस्थित विभवान्तर V_{BE} नियत होता है। इस कारण निवेशी धारा I_B व इसके संगत निर्गत धारा I_C भी नियत दिष्ट प्रकृति की होती है। V_i की उपस्थिति में आधार–उत्सर्जक संधि का विभवान्तर परिवर्तित होता है। इसमें अल्प परिवर्तन होने पर I_B में अल्प परिवर्तन i_b होता है व इसमें संगत संग्राहक धारा I_C में माना परिवर्तन i_c है तो परिभाषा अनुसार

धारा लाभः

$$A_{ie} = \frac{\text{निर्गत संकेत धारा}}{\text{निवेशी संकेत धारा}}$$

$$= \frac{i_c}{i_b} = \beta$$

क्योंकि $\beta >> 1$, अतः निर्गत संकेत धारा निवेशी धारा से बहुत अधिक होती है अतः उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में धारा प्रवर्धन है। [प्रतीक A_{ie} में पादांक e उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास को इंगित करता है।]

वोल्टता प्रवर्धनः

परिभाषा से वोल्टता प्रवर्धन या वोल्टता लाभ

$$A_{ve} = \frac{\text{निर्गत संकेत वोल्टता}}{\text{निवेशी संकेत वोल्टता}} = \frac{V_0}{V_i}$$

यहाँ $V_0 =$ लोड प्रतिरोध R_L पर उत्पन्न प्रत्यावर्ती वोल्टता

$$= i_c R_L$$

एवं $\quad V_i = i_b R_{ie}$

जहाँ R_{ie} उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में ट्रांजिस्टर का निवेशी प्रतिरोध है।

$$\therefore \quad A_{ve} = \frac{i_c R_L}{i_b R_{ie}} = \beta \times \frac{R_L}{R_{ie}}$$

$\frac{R_L}{R_{ie}}$ को उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास के लिये प्रतिरोध लाभ कहा जाता है।

अतः $A_{ve} = A_{ie} \times$ प्रतिरोध लाभ

भी लिखा जा सकता है।

क्योंकि $\beta >> 1$ अतः R_L व R_{ie} तुल्य होने पर भी $A_{ve} \approx \beta >> 1$ होने से वोल्टता प्रवर्धन संभव है। यदि $R_L > R_{ie}$ है तो $A_{ve} > \beta(>>1)$ व और अधिक वोल्टता प्रवर्धन प्राप्त होता है।

शक्ति प्रवर्धनः

परिभाषा से शक्ति प्रवर्धन

$$A_{pe} = A_{ie} \cdot A_{ve}$$

$$= \beta \cdot \beta \frac{R_L}{R_{ie}} = \beta^2 \frac{R_L}{R_{ie}}$$

$\beta >> 1$ अतः $\beta^2 >> 1$ इस कारण $A_{pe} >> 1$ अर्थात् इस विन्यास में उच्च शक्ति प्रवर्धन संभव है।

कला संबंध

उभयनिष्ठ उत्सर्जक प्रवर्धक में निवेशी संकेत व निर्गत संकेत में 180° का कलान्तर (विपरीत कला) होता है।

उदाहरण 16.5 एक ट्रांजिस्टर के लिये उभयनिष्ठ आधार विन्यास में धारा लाभ 0.99 है इसी ट्रांजिस्टर का उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में धारा लाभ कितना होगा।

हलः उभयनिष्ठ आधार विन्यास व उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास के धारा लाभ क्रमशः α व β

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

द्वारा परस्पर संबंधित होते हैं।

$\because \quad \alpha = 0.99$

$$\therefore \quad \beta = \frac{0.99}{1-0.99} = \frac{0.99}{0.01} = 99$$

उदाहरण 16.6 चित्र में प्रदर्शित उभयनिष्ठ आधार विन्यास परिपथ में $2.0\,k\Omega$ प्रतिरोध के सिरों पर विभवान्तर $2.0\,V$ है। ट्रांजिस्टर के लिए $\alpha = 0.95$ है। आधार धारा I_B का मान ज्ञात करो।

हलः संग्राहक परिपथ में लगे $2.0\,k\Omega$ प्रतिरोध पर विभवान्तर $2\,V$ है।

$$\text{अतः} \quad I_C = \frac{2V}{2k\Omega} = 1\,\text{mA}$$

$$\therefore \quad I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{1}{0.95} = 1.05\,\text{mA}$$

$$\text{अतः} \quad I_B = I_E - I_C = 1.05 - 1.0 = 0.5\,\text{mA}$$

उदाहरण 16.7 किसी संधि ट्रांजिस्टर में जब इसकी संग्राहक वोल्टता V_{CB} को नियत रखते हुए उत्सर्जक वोल्टता V_{EB} को 5 mV से परिवर्तित किया जाता है तो इसकी उत्सर्जक धारा का मान 0.15 mA से परिवर्तित होता है। ट्रांजिस्टर का निवेशी प्रतिरोध ज्ञात कीजिये।

हलः प्रश्न में दी गई सूचना के अनुसार ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ आधार विन्यास में है, जहाँ इसका निवेशी प्रतिरोध

$$R_{ib} = \frac{\Delta V_{EB}}{\Delta I_E}$$

प्रश्नानुसार

$$\Delta V_{EB} = 5\,mV$$

$$\Delta I_{EB} = 0.15\,\text{mA}$$

$$\therefore \quad R_{ib} = \frac{5 \times 10^{-3}}{0.15 \times 10^{-3}} = 33.33\Omega$$

उदाहरण 16.8 एक प्रवर्धक परिपथ में ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में प्रयुक्त किया गया है। आधार धारा में 20 A का परिवर्तन संग्राहक धारा में 1 mA का परिवर्तन करता है तथा आधार–उत्सर्जक वोल्टता में 0.04 V का परितर्वन हो रहा है। ज्ञात कीजिये (i) निवेशी प्रतिरोध (ii) धारा प्रवर्धन गुणांक। यदि संग्राहक परिपथ में $6\,k\Omega$ का लोड प्रतिरोध प्रयुक्त किया जाये तो प्रवर्धक का वोल्टता लाभ भी ज्ञात कीजिये।

हलः उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में

(i) निवेशी प्रतिरोध

$$R_{ie} = \frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{0.04\,V}{20\ \ A} = \frac{0.04}{20 \times 10^{-6}} \frac{V}{A}$$

$$= 2000\Omega = 2\,k\Omega$$

(ii) धारा प्रवर्धन गुणांक

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{1mA}{20\ \ A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} \frac{A}{A}$$

$$= 50$$

वोल्टता लाभ

$$A_{ve} = \beta \frac{R_L}{R_{ie}} = 50 \times \frac{6k\Omega}{2k\Omega} = 150$$

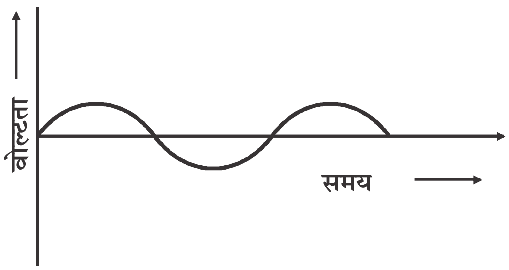
16.12 अंकीय इलेक्ट्रॉनिकी (Digital Electronics)

इलेक्ट्रॉनिकी में हम मूलतः दो प्रकार के संकेत या सिग्नल (signal) काम लेते है।

(i) अनुरूप (analog)

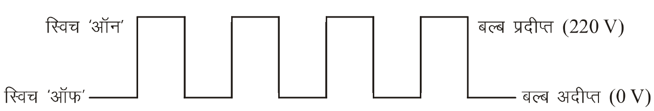
(ii) अंकरूप (digital)

जब हम किसी धारा (या वोल्टता) को अनुरूप प्रकृति कहते हैं तो इससे हमारा अभिप्राय ऐसी धाराओं या वोल्टता से होता है जो समय के साथ संतत रूप से परिवर्तित हो रही है (चित्र 16.46)। इस प्रकार के सिग्नल में धारा (वोल्टता) के किसी परास में संतत मान होते हैं। इलेक्ट्रॉनिक परिपथ जैसे दिष्टकारी, प्रवर्धक जिन्हें हम इस अध्याय में पढ चुके है अनुरूप प्रकृति के परिपथ कहलाते हैं क्योंकि निर्गम व निवेशी संकेत अनुरूप प्रकृति के होते हैं।

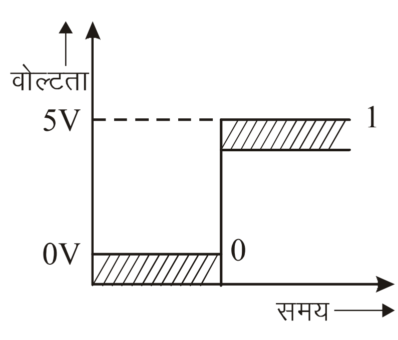


चित्र 16.46 अनुरूप संकेत

एक अंकरूप संकेत ऐसा संकेत होता है, जिसमें वोल्टता (या धारा) समय के साथ संतत रूप में परिवर्तित नहीं होती हैं यहाँ वोल्टता के केवल विविक्त (discrete) मान होते हैं। दूसरे शब्दों में संकेत स्पंद (pulse) के रूप में प्राप्त होते हैं। उदाहरण के रूप में यदि एक बल्ब को लें जिसके साथ एक स्विच भी जुड़ा है तो इस बल्ब में वोल्टता के लिये केवल दो ही स्तर संभव है 0 जब स्विच ऑफ (OFF) है व अधिकतम मान 220 V जब स्विच ऑन (ON) है। इस अवस्था में बल्ब एक ऐसी युक्ति है जिसे द्विआधारी चर (binary variable) पर आधारित माना जा सकता है। यदि शून्य वोल्टता को 0 से व अधिकतम वोल्टता 220 V को 1 से व्यक्त किया जाये तो स्विच नियमित क्रमागत अन्तरालों पर से ऑन ऑफ करने पर बल्ब पर उपस्थित वोल्टता चित्र 16.47 में दर्शाये अनुसार बदलती है यह अंकरूप (digital) संकेत का उदाहरण है।



चित्र 16.47 अंकरूप संकेत



चित्र 16.49 प्रतिनिधिक अंकीय संकेत

उपर्युक्त उदाहरण से स्पष्ट है कि अंकरूप संकेतों को द्वि–आधारी अंकों 0 व 1 (बिट्स) की सहायता से व्यक्त किया जा सकता है। वस्तुतः 0 और, 1 0 V व 1 V को प्रदर्शित नहीं करते। बिट 0 संकेत की अनुपस्थिति बिट 1 संकेत की उपस्थिति को प्रदर्शित करती है। डिजीटल घड़ियाँ, आधुनिक कम्प्यूटर इत्यादि अंकरूप युक्तियों के उदाहरण हैं। अंकरूप परिपथों में सामान्यतः उच्च वोल्टता स्तर $V_{high}\,(5\pm0.5)V$ होता है जिसे 1 से व निम्न वोल्टता स्तर $V_{low}\,(0\pm0.5)V$ होता है जिसे 0 से निरूपित किया जाता है। V_{high} व V_{low} के यथार्थ मान का ज्ञान आवश्यक नहीं होता है क्योंकि इन स्तरों में वोल्टता स्तर में बहुत अन्तराल होता है। इस प्रकार का एक प्रतिनिधिक अंकीय संकेत चित्र 16.48 में प्रदर्शित किया गया है।

16.13 तार्किक या लॉजिक द्वार (Logic Gates)

तार्किक या लॉजिक द्वार अंकरूप परिपथों के आधारभूत भाग हैं। एक तार्किक द्वार ऐसा तर्क संगत परिपथ होता है जिसमें एक या अधिक निवेशी टर्मिनल किन्तु केवल एक निर्गत टर्मिनल होता है। निर्गत टर्मिनल पर केवल उसी समय निर्गत संकेत प्राप्त होता है जब निवेशी टर्मिनल पर कुछ प्रतिबंध संतुष्ट हो रहे होते हैं अर्थात् निवेशी संकेत (या संकेतों) के मध्य एक तर्क संगत सम्बन्ध होता है। मूल तार्किक द्वार निम्न होते हैं–

(i) ओर द्वार (OR Gate) (ii) एन्ड द्वार (AND Gate) (iii) नॉट द्वार (NOT Gate) उपरोक्त द्वारों के संयोजनों की सहायता से नॉर एवं नेन्ड द्वार (NOR and NAND Gate) भी बनाये जा सकते हैं।

एक तार्किक द्वार के लिये निवेशी संकेतों की सभी सम्भावनाओं एवं इन सम्भावनाओं से सम्बंधित निर्गत संकेतों के बीच के संबंध को बहुधा एक सारणी के रूप में व्यक्त किया जाता है जिसे इस तार्किक द्वार की सत्यता सारणी (truth table) कहा जाता है। अतः किसी तार्किक द्वार की सत्यता सारणी वह सारणी है जो इस द्वार के लिये सभी निवेशी संयोजनों तथा संगत निर्गतों को दर्शाती है।

16.13.1 ओर अथवा अपि द्वार (OR Gate)

ओर (अपि) द्वार एक ऐसा तार्किक द्वार है जिसमें दो या अधिक निवेश (inputs) तथा केवल एक निर्गत (output) होता है तथा किसी भी एक निवेश के उच्च (1) होने पर निर्गम भी उच्च (1) प्राप्त होता है अर्थात् इस प्रकार के द्वार में जब कोई एक या अधिक निवेश टर्मिनल पर संकेत बिट् 1 द्वारा निरूपित अवस्था में हैं तो निर्गत भी बिट् 1 द्वारा निरूपित अवस्था में होता है। यदि सभी निवेशी शून्य (0) अवस्था में है तब निर्गत भी शून्य (0) अवस्था में होगा।

तार्किक द्वार क्योंकि ऐसे चरों पर आधारित है जिनके केवल दो मान ही संभव होते हैं 0 एवं 1, इस प्रकार के चरों की बीजगणित सामान्य बीजगणित से भिन्न होती है। इस बीजगणित को इसके प्रतिपादक जार्ज बूल के नाम पर बूलीय बीजगणित (Boolean

Algebra) कहा जाता है एवं इस प्रकार के चरों में परस्पर संबंध प्रदर्शित करने वाले समीकरणों को बूलीय व्यंजक (Boolean expressions) कहा जाता है। एक द्वि–निवेशी ओर द्वार (two input OR gate) के लिये यदि दो निवेशी क्रमशः A व B व निर्गत को Y द्वारा व्यक्त किया जाये तो इस द्वार के संगत बूलीय व्यंजक

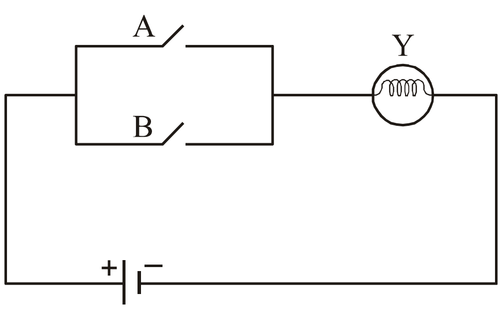
$$Y = A + B$$

द्वारा दिया जाता है। यहाँ A व B के मध्य + चिन्ह 'ओर' संक्रिया (OR operation) को व्यक्त करता है। $Y = A + B$ का अर्थ है कि Y, A OR B के बराबर है। A व B क्योंकि द्वि आधारी चर हैं अतः A = 0, 1 तथा B = 0, 1 ही हो सकते हैं, इस संक्रिया के लिये सत्यता सारणी निम्नानुसार होती है।

A	B	Y = A + B
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

इससे स्पष्ट है कि जब भी निवेशी A व B में से किसी एक अथवा दोनों का मान 1 होता है तब निर्गम Y का मान भी 1 होता है। जब दोनों निवेशी (A व B) 0 होते हैं तो निर्गम (Y) भी शून्य होता है।

OR संक्रिया को समान्तर क्रम में जुड़े विद्युत स्विचों की सहायता से समझाया जा सकता है। चित्र 16.49 में दिखाये परिपथ में स्विच A व B समान्तर क्रम में हैं व ये एक बैटरी व एक बल्ब Y के साथ जुड़े है। यदि A व B की बन्द अवस्था (ON state) को 1 से व इनके खुले होने की अवस्था (OFF state) को 0 से तथा बल्बों को प्रदीप्त एवं अदीप्त अवस्था अवस्थाओं को भी क्रमशः 1 व 0 से व्यक्त किया जाये तो इस परिपथ के लिये निम्न चार संभावनाएँ होती हैं।



चित्र 16.49 विद्युत स्विचों की सहायता से OR संक्रिया का प्रदर्शन

(i) यदि स्विच A व B दोनों खुलें हैं तो Y में कोई धारा नहीं बहेगी अतः यह अदीप्त स्थिति में होगा। गणितीय रूप में इसे

A = 0, B = 0 तब Y = A + B = 0 कहा जायेगा।

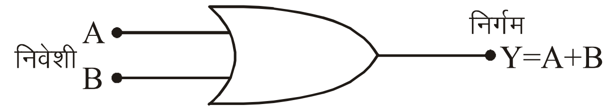
(ii) यदि स्विच A बंद (A = 1) व B खुला (B = 0) तो बैटरी से स्विच A में होते हुए धारा बल्ब Y को प्रकाशित करेगी अर्थात् Y = 1 अवस्था होगी। अतः A = 1, B = 0 तो Y = A + B = 1

(iii) यदि स्विच A खुला व B बंद हो तब भी बल्ब प्रदीप्त (Y=1) होगा। अतः

A = 0, B = 1 तो Y = A + B = 1 प्राप्त होगा।

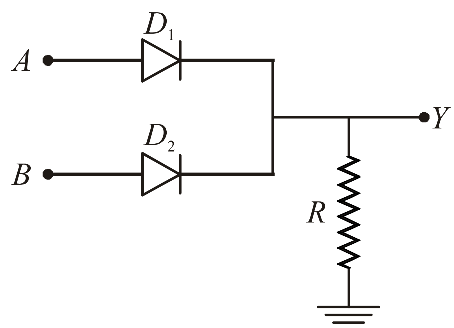
(iv) यदि स्विच A व B दोनों ही बंद (A = B = 1) है तब भी बल्ब Y प्रदीप्त होगा (Y = 1) अतः A = 1, B = 1 हो तो Y = A + B = 1 प्राप्त होगा।

ये चारों संभावनाएँ उपरोक्त लिखित सत्यता सारणी के अनुरूप ही हैं। चित्र 16.50 में एक द्विनिवेशी ओर द्वार का प्रतीक चिह्न बतलाया गया है।



चित्र 16.50 द्वि निवेशी ओर द्वार का प्रतीक

व्यवहार में एक द्वि निवेशी ओर द्वार दो डायोड D_1 व D_2 से निर्मित विद्युत परिपथ (चित्र 16.51) से प्राप्त किया जा सकता है।



चित्र 16.51 डायोड पर आधारित द्विनिवेशी OR द्वार

निवेशी A व B दोनों पर वोल्टताओं के मान 0 V या 5 V रखे जा सकते हैं। 0 V को 0 से व 5 V को 1 से निरूपित किया जाता है। निर्गत Y, प्रतिरोध R के सिरे पर वोल्टता है जब प्रतिरोध R का दूसरा सिरा भूसंपर्कित है।

(v) जब A = B = 0 है अर्थात् A व B दोनों पर कोई संकेत नहीं है तब कोई भी डायोड प्रचालित नहीं होगा व R पर कोई विभवपात नहीं होगा या Y = 0 प्राप्त होगा। यह स्थिति सत्यता सारणी की प्रथम पंक्ति के अनुरूप है।

यदि निवेशी A को 5 V (अवस्थ 1) व B को 0 V (अवस्था 0) पर रखा जाये तो डायोड D_1 अग्र बायसित होकर बंद स्विच की भांति व्यवहार करेगा अर्थात् चालन अवस्था में होगा। अब यदि D_1 आदर्श डायोड है तो इस पर कोई विभवपात नहीं होगा। अतः प्रतिरोध R पर पृथ्वी के सापेक्ष 5 V विभवपात होगा या Y = 1 अवस्था प्राप्त होगी। यह परिणाम OR संक्रिया की सत्यता सारिणी की द्वितीय पंक्ति के अनुरूप है।

(vi) यदि A = 0 व B = 5 V (अवस्था 1) है तो अब D_1 के स्थान पर डायोड D_2 चालन की स्थिति में होगा। अभी भी Y = 1 प्राप्त होगा। यह सत्यता सारिणी की तीसरी पंक्ति के अनुरूप है।

(vii) यदि A व B डायोड दोनों पर 5 V (अवस्था 1) प्रयुक्त किये जाये तो दोनों डायोड चालित होंगे क्योंकि दोनो डायोड समान्तर क्रम में है अतः प्रतिरोध R पर अब भी 5 V विभवपात होगा व Y = 1 प्राप्त होगी। यह स्थिति सत्यता सारिणकी की चतुर्थ पंक्ति के अनुरूप है।

16.13.2 ऐन्ड द्वार (AND Gate)

ऐन्ड द्वार में दो या अधिक निवेशी तथा एक निर्गत होता है तथा इसमें निर्गत 1 तभी प्राप्त होता है जब सभी निवेशी एक ही समय पर 1 अवस्था में हों। एक द्वि निवेशी ऐन्ड द्वार जिसमें A व B निवेशी चर व Y निर्गत को व्यक्त कर रहा है के लिये बूलीय व्यंजक

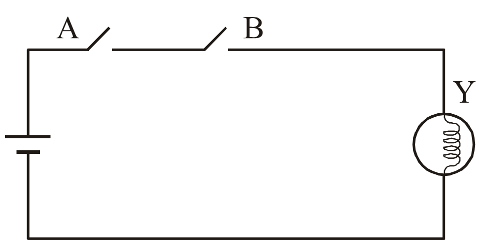
$$Y = A.B$$

द्वारा दिया जाता है यह ऐन्ड संक्रिया (AND Operation) को व्यक्त करता है। उपरोक्त बूलीय समीकरण का अर्थ है Y, A AND B के बराबर है। इस संक्रिया की सत्यता सारणी निम्न होगी।

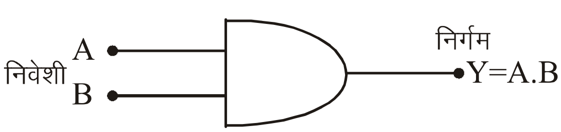
A	B	Y = A . B
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

इस प्रकार AND द्वार में यदि किसी निवेश की बिट 0 है तो निर्गम की बिट भी 0 प्राप्त होगी। निर्गत (1) तभी होगा जब सभी निवेशी उच्च (1) हों।

AND संक्रिया श्रेणी क्रम में लगे विद्युत स्विचों के संयोजन से समझायी जा सकती है (चित्र 16.52)। जब दोनों स्विच A व B खुले हैं (A = B = 0) तब परिपथ में कोई धारा नहीं होने से बल्ब Y अदीप्त होगा (Y = 0). यह स्थिति सत्यता सारणी की प्रथम पंक्ति के अनुरूप हैं किसी भी एक स्विच के खुले होने (या तो A = 0 या B = 0) पर भी बल्ब अदीप्त होगा (Y = 0)। जब दोनों स्विच बंद होंगे (A = B = 1) तब ही बल्ब Y प्रदीप्त (Y = 1) होगा। एक द्वि निवेशी ऐन्ड द्वार का प्रतीक चित्र 16.53 दर्शाया गया है।

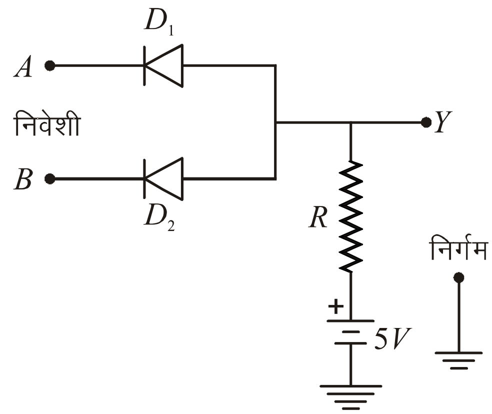


चित्र 16.52 विद्युत स्विचो द्वारा AND संक्रिया का प्रदर्शन



चित्र 16.53 द्विनिवेशी AND गेट का प्रतीक

व्यवहार में ऐन्ड द्वार डायोडों की सहायता से प्राप्त किये जा सकते हैं। चित्र 16.54 में दो डायोड से निर्मित एक द्विनिवेशी ऐन्ड द्वार का परिपथ चित्र प्रदिर्शत किया गया है।



चित्र 16.54 डायोड निर्मित द्वि–निवेशी ऐन्ड द्वार

यहाँ प्रतिरोध R एक 5 V विभवान्तर की बैटरी के धन टर्मिनल से जुड़ा है व इस बैटरी का ऋण सिरा भू–सम्पर्कित है। निवेशी टर्मिनल A व B में प्रत्येक को 0 अथवा 5 V विभव स्तर पर रखा जा सकता है।

यदि A व B दोनों शून्य विभव पर हैं (A = B = 0) तो डायोड D_1 व D_2 दोनों अग्र बायसित होंगे व चालन करेंगे। यदि ये आदर्श डायोड हैं तो इन पर कोई विभवपात नहीं होगा व प्रतिरोध R पर 5 V विभव पतन होगा। इसका सिरा Y पृथ्वी के सापेक्ष शून्य विभव पर होगा। (Y = 0) यह सत्यता सारणी की प्रथम पंक्ति में व्यक्त किया गया है।

यदि A व B में से कोई एक मान A = 5 V व दूसरा शून्य पर हो (B = 0) तो अब डायोड A चालन में व B अचालन अवस्था में होगा। यदि डायोड A आदर्श है तो इस पर कोई विभवपात नहीं होगा तथा पुनः प्रतिरोध R पर 5 V विभव पतन होगा व अब भी Y = 0 प्राप्त होगा। यही स्थिति A पर 0 V व B पर 5 V लगाने पर होगी। ये स्थितियाँ सत्यता सारणी की द्वितीय व तृतीय पंक्ति के अनुरूप हैं। यदि A व B दोनों पर 5V विभव प्रयुक्त किया जाये (A = B = 1) तो दोनों डायोड अचालन अवस्था में होंगे व प्रतिरोध R में कोई धारा नहीं होगी अतः इसका ऊपरी सिरा उतने ही विभव पर होगा जितना कि निचला भाग अर्थात् पृथ्वी के सापेक्ष +5V (Y=1) पर होगा। यह स्थिति सत्यता सारणी की चतुर्थ पंक्ति में प्रदर्शित की गई है।

16.13.3 नॉट द्वार (NOT Gate)

यह एक ऐसा तार्किक द्वार हैं जिसमें केवल एक ही निवेश तथा केवल एक ही निर्गत होता है तथा निर्गत पर निवेशी की विपरीत अवस्था होती है। दूसरी शब्दों में निर्गत, निवेशी का नकार (Negation) होता है अर्थात् यदि निवेशी 1 अवस्था है तो निर्गत 0 अवस्था में होगा निवेशी 0 होने पर निर्गत 1 होगा। इस कारण इसे प्रतिलोमक (inverter) भी कहा जाता है।

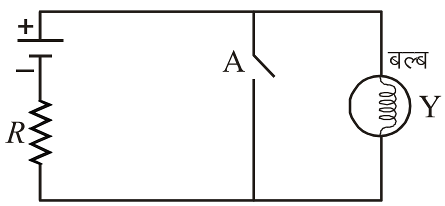
यहाँ निवेशी A निर्गत Y से निम्न बूलीय व्यंजक द्वारा संबंधित होता है।

$$Y = \overline{A}$$

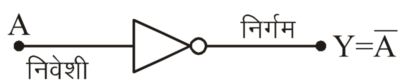
$\overline{A}$ का अर्थ है NOT A अर्थात् जो A नहीं है (अतः A= 0 होने पर $Y=\overline{0}=1$ व $A=1$ होने पर $Y=\overline{1}=0$) इसकी सत्यता सारणी निम्न होगी।

A	Y
0	1
1	0

नॉट संक्रिया को चित्र 16.55 में दिखाये विद्युतीय परिपथ जिसमें निर्गत (बल्ब) के समान्तर क्रम में एक स्विच जुड़ा है से समझाया जा सकता है। जब स्विच आन (1) है तब बल्ब Y ऑफ (0) है। जब स्विच ऑफ (0) है तब बैटरी से प्राप्त धारा के कारण बल्ब Y प्रदीप्त (1) है। (यहाँ R एक अल्प प्रतिरोध है जो स्विच A बंद होने पर बैटरी को लघुपथित होने से बचाता है।) चित्र 16.56 में NOT द्वार का प्रतीक चिह्न दर्शाया गया है।

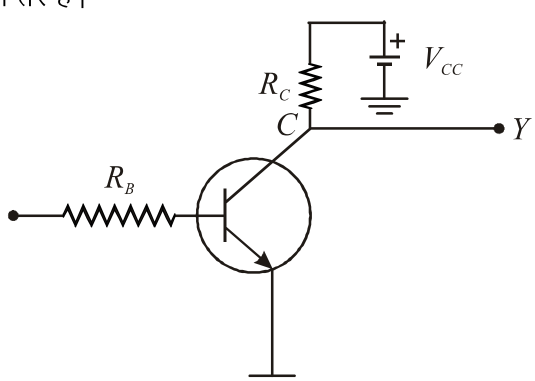


चित्र 16.55 NOT संक्रिया का विद्युत स्विच द्वारा प्रदर्शन



चित्र 16.56 NOT द्वार का प्रतीक

व्यवहार में नॉट द्वार प्राप्त करने के लिये ट्रांजिस्टर प्रयोग में लिये जाते हैं। चित्र 16.61 में एक नॉट गेट के लिये सरलतम परिपथ दर्शाया गया है जिसमें एक NPN ट्रांजिस्टर प्रयुक्त किया गया हैं ट्रांजिस्टर के आधार B को प्रतिरोध R_B के द्वारा निवेशी टर्मिनल A से जोड़ा गया है। उत्सर्जक E, भू सम्पर्कित है व संग्राहक C को प्रतिरोध R_C के द्वारा दिष्ट प्रदायक $V_{CC}=(5V)$ के धनात्मक सिरे पर जोड़ा गया है। इस दिष्ट प्रदायक का ऋणात्मक सिरा भू–सम्पर्कित है। निर्गत Y, संग्राहक C का पृथ्वी के सापेक्ष विभवान्तर है।



चित्र 16.57 ट्रांजिस्टर नॉट द्वार

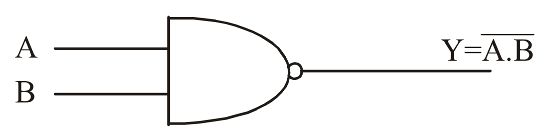
जब निवेशी टर्मिनल A भी भू सम्पर्कित किया जाये $V_A=0$ तो आधार भी भू सम्पर्कित हो जाता है अर्थात् उत्सर्जक संधि पर कोई अभिनति नहीं है पर आधार–संग्राहक संधि उत्क्रम अभिनत होती है। इस स्थिति में आधार धारा शून्य, उत्सर्जक धारा शून्य होने के साथ–साथ संग्राहक धारा भी शून्य होगी व ट्रांजिस्टर संस्तब्ध या अंतक (cut off) अवस्था में होगा। अतः संग्राहक पर विभव पृथ्वी के सापेक्ष, +5 V (= V_{CC}) होगा अतः निवेशी A = 0 V होने पर निर्गत उच्च (+5V) होगा या A = 0 तब Y = 1 प्राप्त होगा।

अब यदि आधार पर पृथ्वी के सापेक्ष +5V वोल्टता प्रयुक्त की जाये (अर्थात् A = 1) तो आधार उत्सर्जक संधि अग्र अभिनत होगी। अब आधार धारा, उत्सर्जक धारा व संग्राहक धारा तीनों उपस्थित होती हैं। यदि R_B व R_C के मान इस प्रकार से चयनित किये जायें कि संग्राहक धारा उच्च हो तो ट्रांजिस्टर संतृप्त (saturation) अवस्था में होगा। इस स्थिति में R_C पर विभवपात ठीक +5V होगा जो कि संग्राहक परिपथ में लगी बैटरी V_{CC} के विभव के ठीक बराबर पर विपरीत है इस प्रकार C पर वोल्टता शून्य होगी अर्थात् Y = 0 प्राप्त होगा।

16.13.4 नॉर–द्वार (NOR Gate)

यह एक ऐसा तार्किक द्वार है जो एक ओर द्वार के श्रेणी क्रम में अनुगामी एक नॉट द्वार लगा कर प्राप्त किया जाता है। यहाँ ओर द्वार के निर्गत को नॉट द्वार के निवेशी को दिया जाता है। इस प्रक्रिया में ओर द्वार से प्राप्त निर्गत को नॉट द्वार के द्वारा प्रतिलोमित कर दिया जाता है। इस संयोजन को चित्र 16.58 (अ) में दर्शाया गया है।

चित्र 16.58 (अ) नॉर गेट की संक्रिया



चित्र 16.59 (ब) NOR द्वार का प्रतीक

नॉर द्वार में दो या अधिक निवेशी हो सकते हैं पर निर्गम केवल एक ही होता है। एक द्विनिवेशी नॉर द्वार का प्रतीक चिन्ह चित्र 16.59 (ब) में दिखाया गया है जिसमें OR द्वार के निर्गत पर बुलबुला (bubble) लगा है।

इस द्वार के लिये बूलीय व्यंजक

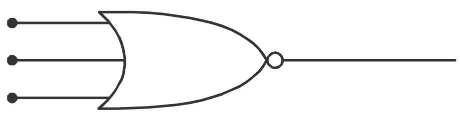
$$Y=\overline{A+B}$$

दिया जाता है। इसके लिये सत्यता सारिणी निम्न है।

A	B	A+B	$Y=\overline{A+B}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

इस सारिणी से स्पष्ट है कि नॉर द्वार में सभी निवेशी निम्न (0) होने पर ही निर्गम उच्च (1) प्राप्त होता है।

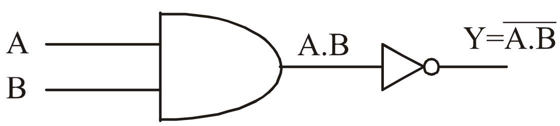
तीन या अधिक निवेशी होने पर भी इसी प्रकार नॉर द्वार के लिये प्रतीक चिन्ह व सत्यता सारिणी बनाई जा सकती है। तीन निवेशी नॉर द्वार का प्रतीक चिन्ह चित्र 16.60 में दिखाया गया है व सत्यमान (सत्यता) सारिणी आपके अभ्यास हेतु छोड़ दी गई है।



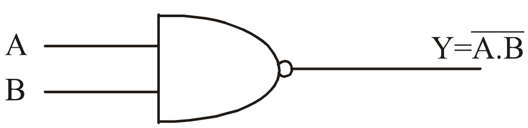
चित्र 16.60 नॉर द्वार (तीन निवेशी)

16.13.5 नेन्ड द्वार (NAND Gate)

यह तर्क द्वार एक ऐन्ड द्वार के श्रेणी क्रम में अनुगामी नॉट द्वार जोड़ कार बनाया जाता है जैसा कि चित्र 16.61 में प्रदर्शित किया गया है।



चित्र 16.61 NAND द्वार की संक्रिया



चित्र 16.62 द्विनिवेशी NAND द्वार का प्रतीक

इस तर्क द्वार में दो या अधिक निवेश होते हैं एवं एक निर्गत होता है तथा निर्गत निम्न (0) केवल तब होता है जब सभी निवेशी उच्च (1) होते हैं। एक द्विनिवेशी नेन्ड द्वार का प्रतीक चित्र 16.62 में दिखलाया गया है।

नेन्ड द्वार में क्योंकि ऐन्ड द्वार का निर्गम A.B नॉट द्वार के लिये निवेशी है जो इसके द्वारा प्रतिलोमित कर दिया जाता है अतः नेन्ड द्वार के निर्गम को निवेशी से निम्न प्रकार संबंधित किया जाता है।

$$Y=\overline{A\cdot B}$$

इस तार्किक द्वार के लिये सत्यता सारिणी निम्नानुसार होगी।

A	B	A.B	$Y=\overline{A\cdot B}$
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

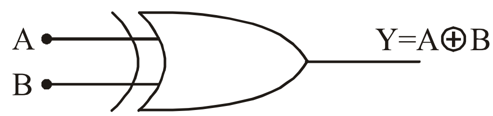
16.13.6 XOR द्वार (XOR Gate)

दो तार्किक चरों A व B के लिए XOR संक्रिया के लिए बूलीय व्यंजक है।

$$Y=A\oplus B$$

इस द्वार में निर्गत तभी प्राप्त होता है जब निवेशी चरों A व B में से केवल एक ही 1 अवस्था में है। यदि दोनों ही चर 0 है अथवा 1 है तो निर्गत 0 प्राप्त होता है। अतः इस द्वार की सत्यता सारणी नीचे दिए गए अनुसार है।

A	B	$Y=A\oplus B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



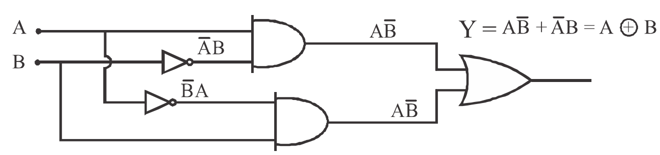
चित्र 16.63 XOR द्वार का प्रतीक

इस द्वार के लिए प्रतीक चिह्न चित्र 16.63 में दर्शाया गया है। नीचे दिए गए अनुसार सत्यमान सारणी बनाकर देखा जा सकता है कि

$$A\oplus B=A\overline{B}+\overline{A}B$$

A	B	$\overline{A}$	$\overline{B}$	$A\overline{B}$	$\overline{A}B$	$A\overline{B}+\overline{A}B$
0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	0	0	0	0

अतः बूलीय व्यंजक $A\overline{B}+A\overline{B}$ का उपयोग कर XOR गेट का निर्माण किया जा सकता है। इस प्रक्रिया को चित्र 16.64 में दर्शाया गया है जिसमें हमने AND, OR तथा NOT द्वारों को उपयोग में लिया है।

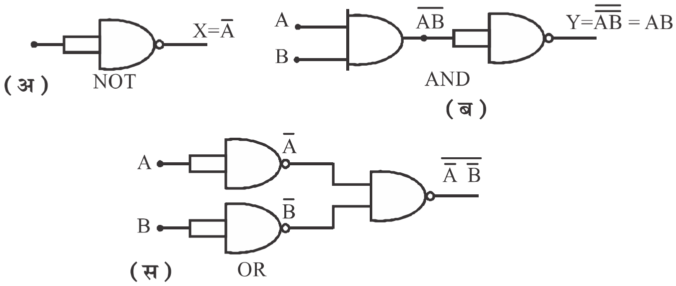


चित्र 16.64 XOR द्वार के लिए बूलीय परिपथ

विशेष:

नेन्ड द्वार (तथा नॉर द्वार) अंकीय परिपथों के लिये निर्माण खंड (building blocks) के रूप में काम में लिये जाते है अर्थात् नेन्ड द्वारा (या नॉर द्वार) का उपयोग कर ओर द्वार, ऐन्ड द्वार एवं नॉट द्वार बनाए जा सकते है। इस कारण इन्हें सार्वत्रिक द्वार (universal gate) भी कहते हैं।

NAND द्वार की सहायता से NOT, AND तथा OR गेट प्राप्त करने के लिए बूलीय परिपथ चित्र 16.65 में दर्शाए गए हैं।



चित्र 16.65 NAND द्वारों की सहायता से विभिन्न तर्क द्वारों की रचना

चित्र 16.65 (अ) में NAND द्वार के दोनों निवेशी A हैं अतः NAND संक्रिया से $X = \overline{A \cdot A} = \overline{A}$ प्राप्त होगा जो कि NOT द्वार की संक्रिया है।

चित्र 16.65 (ब) में प्रथम NAND द्वार का निर्गम $\overline{AB}$ है जो कि द्वितीय NAND द्वार के लिये निवेशी है अतः NAND संक्रिया से द्वितीय NAND द्वार का निर्गम $Y = \overline{\overline{AB}} = AB$ प्राप्त होगा जो कि AND द्वार की संक्रिया है

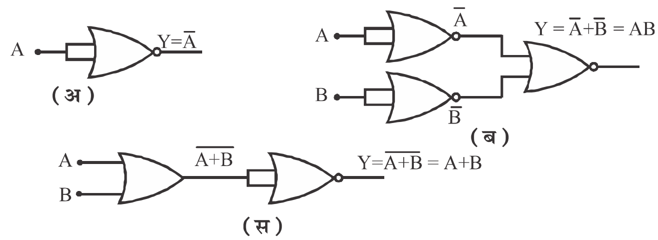
चित्र 16.65 (स) में OR द्वार की संरचना दर्शाई गई है। पहले दो निवेशी चरों A व B को पृथक–पृथक NAND द्वारों के द्वारा प्रतिलोमित किया गया जाकर संकेत $\overline{A}$ व $\overline{B}$ को एक अन्य NAND द्वार के निवेशी की तरह प्रयुक्त किया गया है।

इस प्रकार प्राप्त निर्गम संकेत $Y = \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}}$ है। नीचे दी गई सत्यमान सारणी बनाकर सिद्ध किया जा सकता है कि $\overline{\overline{A} \cdot \overline{B}} = A + B$

A	B	$\overline{A}$	$\overline{B}$	$\overline{A}\overline{B}$	$\overline{\overline{A}\overline{B}}$
0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1

अतः $\overline{\overline{A}\overline{B}} = 1$ है यदि या तो A अथवा B में से कोई एक 1 अथवा दोनों 1 है तो $\overline{\overline{A}\,\overline{B}} = 1$ जो कि OR संक्रिया है।

NOR द्वार से NOT, AND तथा OR द्वार प्राप्त किए जाने के लिए बूलीय परिपथ चित्र 16.66 में दर्शाए गए है।



चित्र 16.66 NOR द्वार की सहायता से विभिन्न तर्क द्वारा की रचना

चित्र 16.66 (अ) में NOR द्वार के लिए दोनों निवेशी A हैं अतः निर्गत $X = \overline{A + A} = \overline{A}$ होगा जो NOT संक्रिया है।

चित्र 16.66 (ब) में दो अलग–अलग NOR द्वारों पर क्रमशः निवेशी A व B उपस्थित हैं। इनके निर्गम $\overline{A}$ व $\overline{B}$ एक अन्य NOR द्वार के लिए निवेशी है जिसका निर्गम $Y = \overline{\overline{A} + \overline{B}}$ होगा। सत्यमान सारिणी की सहायता से सिद्ध किया जा सकता है कि $Y = \overline{\overline{A} + \overline{B}} = A \cdot B$ होगा अतः AND संक्रिया प्राप्त हो जाती है। सत्यमान सारणी आपके अभ्यासार्थ छोड़ दी गई है।

चित्र 16.66 (स) में प्रथम NOR गेट का निर्गम $\overline{A + B}$ है जो दूसरे NOR गेट के लिए निवेशी है यह दूसरा NOR द्वार NOT की तरह काम कर रहा है जिसका निर्गम $Y = \overline{\overline{A + B}} = A + B$ है इस प्रकार OR संक्रिया प्राप्त होती है।

महत्वपूर्ण बिन्दु (Important Points)

1. विलगित परमाणुओं में इलेक्ट्रॉनिक ऊर्जा स्तर विविक्त होते हैं। ठोस पदार्थों में परमाणुओं की अन्योन्य क्रिया के कारण प्रत्येक परमाणु के ऊर्जा स्तरों का विपाटन होता है तथा ऊर्जा स्तरों के स्थान पर ऊर्जा बैण्ड निर्मित होते हैं।
2. ऊर्जा बैण्डों के मध्य वर्जित ऊर्जा अन्तराल उपस्थित होते है जिनके संगत ऊर्जा का कोई भी इलेक्ट्रॉन ठोस में नहीं होता है।
3. पदार्थों की विद्युत चालन क्षमता एवं ऊर्जा बैण्ड संरचना के आधार पर इन्हें (i) चालक (ii) कुचालक एवं (iii) अर्धचालक के रूप में वर्गीकृत किया जाता है। पूर्णतः रिक्त अथवा पूर्णतः भरे बैण्ड चालन में कोई योगदान नहीं करते है।
4. चालक पदार्थों में या तो संयोजकता इलेक्ट्रॉनों के संगत बैण्ड अंशतः भरा होता है अथवा इस बैण्ड तथा इससे अगले बैण्ड में अतिव्यापन होता है जिससे बनने वाला नवीन बैण्ड अंशतः भरा होता है। अंशतः भरे बैण्डों द्वारा चालन संभव होता है।
5. कुचालक पदार्थों में संयोजकता बैण्ड पूर्णतः भरा होता है व इससे उच्च बैण्ड (चालन बैण्ड) पूर्णतः रिक्त होता है। इन बैण्डों के मध्य ऊर्जा अन्तराल को वर्जित ऊर्जा अन्तराल $\left(E_g\right)$ कहते है। कुचालकों में यह वर्जित ऊर्जा अन्तराल 3 से 6 eV परास में होता है।
6. नैज अर्धचालकों में वर्जित ऊर्जा अन्तराल कुचालकों की तुलना में बहुत कम लगभग 1 eV कोटि का होता है। परम शून्य ताप पर इनका व्यवहार कुचालकों जैसा ही होता है। कक्ष ताप पर संयोजकता बैण्ड के कुछ इलेक्ट्रॉन तापीय ऊर्जा ग्रहण कर चालन बैण्ड में पहुँच जाते हैं। संयोजकता बैण्ड में इन इलेक्ट्रॉनों के स्थान पर "होल" उत्पन्न होते हैं।
7. नैज अर्धचालक में इलेक्ट्रॉन व होल दोनों ही धारा चालन में योगदान करते हैं तथा इनकी चालकता चालकों व कुचालकों के मध्यवर्ती होती है। ताप वृद्धि होने पर नैज अर्धचालकों की चालकता में वृद्धि होती है।
8. नैज अर्धचालकों में अत्यल्प मात्रा में उपयुक्त अपद्रव्य मिश्रण करने पर इनकी चालकता बहुत बढ़ जाती है। ऐसे अर्धचालक अपद्रव्यी अर्धचालक कहलाते हैं।
9. अपद्रव्यी अर्धचालक दो प्रकार के होते हैं– (i) N प्रकार (ii) P प्रकार
10. सिलिकॉन या जरमेनियम जैसे चतुर्संयोजी नैज अर्धचालकों में पंचम समूह के तत्वों यथा आर्सेनिक, फास्फोरस को अपद्रव्य के रूप में मिलाने पर N प्रकार के अर्धचालक प्राप्त होते हैं। अपद्रव्य को दाता अशुद्धि कहा जाता है।
11. नैज सिलिकॉन या जरमेनियम में तृतीय समूह की अशुद्धि यथा इन्डियम, बोरॉन, के मिश्रण से P प्रकार का अर्धचालक प्राप्त होता है। अपद्रव्यों को ग्राही अशुद्धि कहा जाता है।
12. N प्रकार के अर्धचालकों में इलेक्ट्रॉन बहुसंख्यक एवं होल अल्पसंख्यक धारा वाहक होते है। P प्रकार के अर्धचालकों में इसके विपरीत होता है। दोनों ही प्रकार के अर्धचालक विद्युत उदासीन होते हैं।
13. P प्रकार व N प्रकार के अर्धचालकों को परमाणविक स्तर पर जोड़ने पर इनकी सम्पर्क सतह P-N संधि कहलाती है। लगभग सभी अर्धचालक युक्तियों में P-N संधि की मुख्य भूमिका होती है। P-N संधि निर्माण के समय संधि के निकट अवक्षय परत निर्मित होती है, जिसमें आबद्ध धन एवं ऋण आयन होते हैं तथा मुक्त इलेक्ट्रॉन व होल की संख्या में कमी आती है। यही संधि पर विद्युत क्षेत्र व विभव प्राचीर की उपस्थिति का कारण है।
14. P-N संधि पर आधारित युक्ति P-N डायोड या अर्धचालक डायोड कहलाती है। बायस विभव स्त्रोत की उपस्थिति में संधि विभव का परिवर्तन होता है। संधि की अग्रअभिनति में P टर्मिनल, N टर्मिनल की तुलना में उच्चविभव पर होता है। उत्क्रम अभिनति अवस्था में इसकी विपरीत स्थिति होती है।
15. अग्र अभिनति में डायोड द्वारा धारा चालन होता है जबकि उत्क्रम अमिनति अवस्था में अत्यल्प धारा प्रवाह के कारण डायोड को अचालन अवस्था में माना जाता है।
16. P-N संधि डायोड का मुख्य उपयोग दिष्टकरण में होता है जिसमें प्रत्यावर्ती धारा को दिष्ट धारा में बदला जाता है।
17. अर्द्धचालक डायोड कुछ अन्य विशिष्ट कार्यों के लिये भी उपयोग में लाये जाते है। इनमें से जीनर डायोड भी एक है जो उत्क्रम अभिनति अवस्था में प्रचालित होकर वोल्टता नियमन में काम आता है। चालक के प्रकाशिक गुण धर्मों पर आधारित P-N युक्तियाँ भी होती है जिनमें फोटोडायोड, प्रकाश उत्सर्जक डायोड मुख्य हैं।
18. संधि ट्रांजिस्टर एक अत्यन्त महत्वपूर्ण युक्ति है जिसमें दो P-N संधियाँ होती हैं। ये दो प्रकार होते हैं (i) P-N-P (ii) N-P-N। इनका मध्य भाग "आधार" बहुत ही पतला व अत्यल्प मादित होता है। तथा अन्य दो भाग क्रमशः उत्सर्जक व संग्राहक कहलाते है। उत्सर्जक में संग्राहक की तुलना अधिक अपद्रव्य मिश्रण होता है परन्तु अपद्रव्य मिश्रण की प्रकृति समान होती है।

19. संधि ट्रांजिस्टर के सामान्य प्रचालन में आधार–उत्सर्जक संधि अग्र अभिनति व आधार–संग्राहक संधि उत्क्रम अभिनति में रखी जाती है।

20. परिपथ संयोजन में ट्रांजिस्टर को इस प्रकार जोड़ा जाता है कि आधार(B), संग्राहक (C), या उत्सर्जक (E) में से कोई एक निवेशी व निर्गत दोनों परिपथों में उभयनिष्ठ होता है। इस प्रकार ट्रांजिस्टर के तीन परिपथीय विन्यास संभव है इन विन्यासों में ट्रांजिस्टर के विद्युतीय गुणधर्म भिन्न होते हैं।

21. ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ आधार एवं उभयनिष्ठ उत्सर्जक संरचनाओं में धारा प्रवर्धन गुणांक क्रमशः α व β परस्पर निम्नानुसार संबंधित होते है।

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \text{ तथा } \alpha < 1 \text{ व } \beta >> 1$$

22. उभयनिष्ठ उत्सर्जक ट्रांजिस्टर प्रवर्धक में उच्च वोल्टता लाभ, उच्च धारा लाभ तथा उच्च शक्ति लाभ प्राप्त होता है।

23. अंक रूपीय इलेक्ट्रोनिक परिपथों में द्वि–आधारी संख्या पद्धति प्रयुक्त होती है। इस संख्या पद्धति में दो ही संकेतों 0 व 1 का प्रयोग करते हैं।

24. विशिष्ट तार्किक संक्रियाओं पर आधारित युक्तियाँ तर्क द्वार कहलाती हैं। ये युक्तियाँ है:OR द्वार, AND द्वार, NOT द्वार, XOR द्वार तथा NAND व NOR द्वार। NAND द्वार व NOR द्वार ''सार्वत्रिक द्वार'' भी कहलाते हैं क्योंकि NAND द्वार अथवा NOR द्वार के विभिन्न संयोजनों से अन्य तर्क द्वार प्राप्त किए जा सकते हैं।

अभ्यासार्थ प्रश्न

बहुचयनात्मक प्रश्न

1. परमशून्य ताप पर नैज जर्मेनियम और नैज सिलिकॉन होते हैं–

(अ) अतिचालक (ब) अच्छे अर्धचालक
(स) आदर्श कुचालक (द) चालक

2. कुचालक में संयोजकता बैंड और चालन बैंड के मध्य वर्जित ऊर्जा अन्तराल निम्निलिखित कोटि का होता है

(अ) 1 eV (ब) 6 eV
(स) 0.1 eV (द) 0.01 eV

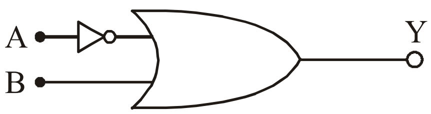
3. नैज सिलिकॉन में कक्ष ताप पर आवेश वाहकों की प्रति एकांक आयतन संख्या $1.6 \times 10^{16}/m^3$ है। यदि इलेक्ट्रॉन की गतिशीलता $0.150\, m^2 V^{-1} s^{-1}$ तथा होल गतिशीलता $0.05\, m^2 V^{-1} s^{-1}$ है तब सिलिकॉन की चालकता ($\Omega^{-1} m^{-1}$ में) है

(अ) 1.28×10^{-4} (ब) 3.84×10^{-4}
(स) 5.12×10^{-4} (द) 2.14×10^{-4}

4. एक NPN ट्रांजिस्टर को प्रवर्धक की तरह उपयोग में लाया जा रहा है तो–

(अ) इलेक्ट्रॉन आधार से संग्राहक की ओर चलते हैं
(ब) होल उत्सर्जक से आधार की ओर चलते हैं
(स) होल आधार से उत्सर्जक की ओर चलते हैं
(द) इलेक्ट्रॉन उत्सर्जक से आधार की ओर चलते हैं

5. संलग्न चित्र में दिये गये परिपथ के लिये बूलीय समीकरण होगा।



(अ) $Y = A + \overline{B}$ (ब) $Y = \overline{A + B}$
(स) $Y = \overline{A} + B$ (द) $Y = \overline{A} \cdot B$

6. किसी 'एन्ड द्वार' के लिये तीन निवेशी क्रमशः A, B व C है तो इसका निर्गत Y होगा

(अ) $Y = A \cdot B + C$ (ब) $Y = A + B + C$
(स) $Y = A + B \cdot C$ (द) $Y = A \cdot B \cdot C$

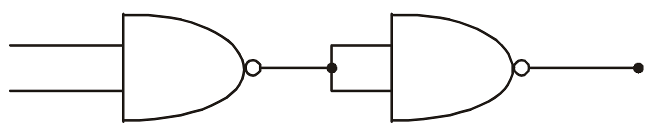
7. किसी ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ आधार परिपथ में धारा प्रवर्धन गुणांक 0.95 है। जब उत्सर्जक धारा 2 mA है तब आधार धारा है

(अ) 0.1 mA (ब) 0.2 mA
(स) 0.19 mA (द) 1.9 mA

8. जर्मेनियम में वर्जित ऊर्जा अन्तराल लगभग 0.7 eV है। वह तरंग दैर्ध्य जिसका अवशोषण जर्मेनियम प्रारंभ करता है, लगभग है

(अ) 35000 Å (ब) 17700 Å
(स) 25000 Å (द) 51600 Å

9. चित्र में प्रदर्शित दो NAND द्वारों से प्राप्त तर्क द्वार है



(अ) AND द्वार (ब) OR द्वार
(स) XOR द्वार (द) NOR द्वार

10. दो सर्वसम PN संधियाँ एक बैटरी के साथ श्रेणीक्रम में चित्र के अनुसार जोड़ी जा सकती है किन संधियों के लिए विभव पतन बराबर है

(अ) परिपथ 1 व 2 में (ब) परिपथ 2 व 3 में

(स) परिपथ 3 व 1 में (द) केवल परिपथ 1 में

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1 संधि डायोड में विसरण धारा की दिशा क्या होती है?

2 ट्रांजिस्टर के लिये धारा प्रवर्धन गुणोंका α व β में सम्बन्ध लिखिये।

3 क्या किसी अनअभिनत P-N संधि पर उपस्थित रोधिका विभव को संधि के सिरों के मध्य वोल्टमीटर जोड़ कर नापा जा सकता है?

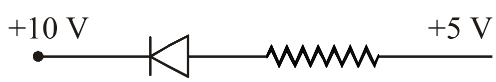
4 ***ओर द्वार के लिये सत्यता सारणी बनाईये।***

5 उस तर्क द्वार का नाम लिखिये जिसमें निर्गत तब ही 1 होता है जब सभी निवेशी 1 होते हैं।

6 ट्रांजिस्टर को प्रवर्धक के रूप में काम लाने के लिये कौनसी संधि पश्च बायसित की जाती है?

7 उस ट्रांजिस्टर के लिये α का मान क्या होगा जिसके लिये $\beta = 19$ है?

8 चित्र में प्रदर्शित डायोड किस अभिनति में है?



लघूत्तरात्मक प्रश्न

1 दिष्टकरण क्या है? सेतु तरंग दिष्टकारी का परिपथ चित्र बनाईये।

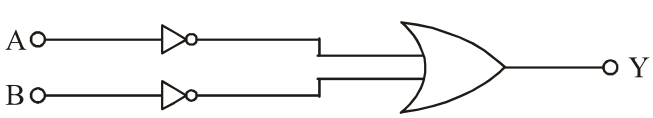
2 ट्रांजिस्टर में उत्सर्जक एवं संग्राहक की तुलना में आधार को बहुत पतला क्यों बनाया जाता है?

3 आदर्श PN संधि डायोड के लिये संपूर्णI-V अभिलाक्षणिक वक्र बनाईये। अग्र बायस अवस्था में गतिक प्रतिरोध परिभाषित कीजिये।

4 तर्क द्वार से आप क्या समझते है। XOR द्वार का प्रतीक चिन्ह बनाते हुए इसकी सत्यता सारणी दीजिये।

5 ट्रांजिस्टर आधारित NOT द्वार का परिपथ चित्र बनाईये तथा इसकी सत्यता सारिणी दीजिये।

6 चित्र में दिये गये तार्किक परिपथ के लिये बूलीय व्यंजक लिखिये। इस परिपथ के लिये सत्यता सारणी भी बनाईये।



7 जेनर डायोड द्वारा वोल्टता नियमन के लिये काम आने वाले परिपथ का चित्र बनाइकर इसकी प्रक्रिया संक्षेप में समझाइये।

निबन्धात्मक प्रश्न

1 ऊर्जा बैण्ड सिद्धांत के आधार पर चालकों, अर्धचालकों तथा कुचालकों में विभेदन स्पष्ट कीजिये। नैज अर्द्धचालकों में धारा चालन की प्रक्रिया समझाईये।

2 PN संधि क्या होती है? इसके निर्माण के समय संधि तल पर होने वाली क्रिया को समझाइये। इस संधि को अग्र अभिनत करने पर अवक्षय परत पर होने वाले प्रभाव को भी समझाइये।

3 प्रत्यावर्ती धारा को दिष्ट धारा में परिवर्तित करने हेतु आवश्यक पूर्ण तरंग दिष्टकारी का परिपथ चित्र बनाइयें एवं इसकी कार्यविधि समझाइये।

4 किसी PN संधि डायोड के अग्र एवं उत्क्रम अभिनति अभिलाक्षणिक वक्र प्राप्त करने हेतु आवश्यक प्रायोगिक व्यवस्था को परिपथ चित्र बनाते हुए समझाइए। प्राप्त वक्रों के आरेख भी बनाइए।

5. संधि ट्रांजिस्टर क्या होता है? आवश्यक चित्र बनाकर PNP ट्रांजिस्टर की क्रिया विधि समझाइए।

6 उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में संयोजित किसी ट्रांजिस्टर के अभिलाक्षणिक वक्र प्राप्त करने के लिए प्रायोगिक व्यवस्था का परिपथ का चित्र बनाते हुए वर्णन कीजिए। प्राप्त वक्रों के आरेख भी बनाईए तथा वोल्टता लाभ व धारा लाभ के सूत्र लिखिए।

7 प्रवर्धन से आप क्या समझते है? एक PNP ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ प्रवर्धक का नामांकित चित्र बनाते हुए इसमें प्रवर्धन की क्रिया समझाते हुए वोल्टता लाभ का सूत्र ज्ञात कीजिए।

8 विशिष्ट प्रयोजनार्थ कार्य लिए जाने वाले कुछ डायोड के नाम लिखिए तथा इनके परिपथ प्रतीक बनाइए। इनकी कार्यप्रणाली एवं उपयोगो का संक्षेप में उल्लेख कीजिए।

9 द्विनिवेशी डायोड ओर (OR) द्वार एवं एन्ड (AND) द्वार के परिपथ चित्र बनाते हुए इसकी कार्य विधि समझाइए तथा संगत सत्य सारणी बनाइए।

उत्तरमाला (बहुचयनात्मक प्रश्न)

1. (स) 2. (ब) 3. (स) 4. (द) 5. (स) 6. (द)

7. (अ) 8. (ब) 9. (अ) 10. (ब)

अतिलघूत्तरात्मक प्रश्न

1. P क्षेत्र से N क्षेत्र की ओर

2. $\beta = \dfrac{\alpha}{1-\alpha}$

3 नहीं

4

A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

5 AND द्वार

6 आधार संग्राहक संधि

7 $\alpha = 0.95$

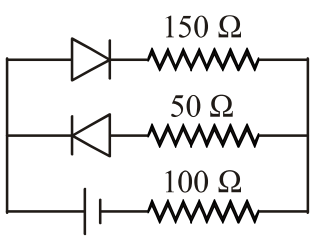
8 पश्च अभिनति

आंकिक प्रश्न

1 कक्ष ताप पर नैज जरमेनियम की एक प्लेट जिसका क्षेत्रफल $2\times10^{-4}\,m^2$ तथा मोटाई $1.2\times10^{-3}\,m$ है में उत्पन्न विद्युत धारा ज्ञात करो जब इसके फलकों के मध्य 5 V का विभवान्तर आरोपित किया जाता है। कक्ष ताप पर जरमेनियम में नैज आवेश वाहक घनत्व $1.6\times10^{6}/m^3$ है। इलेक्ट्रॉन तथा होल की गतिशीलताएँ क्रमशः $0.4\,m^2V^{-1}s^{-1}$ तथा $0.2\,m^2V^{-1}s^{-1}$ है।

(उत्तर 1.28×10^{-13} A)

2 चित्र में प्रदर्शित परिपथ में लगे दोनों डायोडों का अग्र प्रतिरोध 50 Ω तथा उत्क्रम प्रतिरोध अनन्त है। यदि बैटरी का विद्युत वाहक बल 6 V है तो 100 Ω प्रतिरोध से प्रवाहित धारा ज्ञात करो।



(उत्तर 0.02 A)

3 उभयनिष्ठ आधार विन्यास में किसी ट्रांजिस्टर का धारा प्रवर्धन 0.99 है। इसकी उत्सर्जक धारा में 5.0 मिलीऐम्पियर परिवर्तन करने पर संग्राहक धारा में परिवर्तन की गणना कीजिये। आधार धारा में क्या परिवर्तन होगा।

(उत्तर 0.95 mA)

4 एक PN संधि के लिए विभव प्राचीर का औसतमान 0.1 V है तथा संधि क्षेत्र पर 10^5 V/m का विद्युत क्षेत्र उपस्थित है। इस संधि के लिए अवक्षय परत की मोटाई कितनी होगी।

(उत्तर 10^{-6} m)

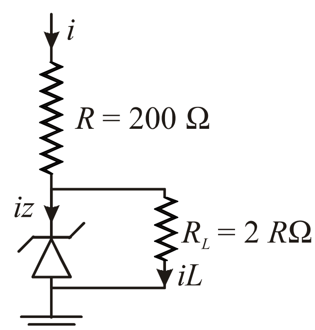
5 एक ट्रांजिस्टर उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में जोड़ा गया है। संग्राहक परिपथ में 8 V का शक्ति प्रदाय लगा है तथा संग्राहक के श्रेणी क्रम में लगे800 Ω प्रतिरोध पर विभवपात 0.5 V है। यदि धारा प्रवर्धन गुणांक $\alpha = 0.96$ है तो आधार धारा ज्ञात कीजिए।

(उत्तर 26 A)

6 एक उभयनिष्ठ उत्सर्जक प्रवर्धक में आधार धारा में 50 A की वृद्धि होने पर संग्राहक धारा में 1.0 mA की वृद्धि होती है। धारा लाभ β की गणना करो। उत्सर्जक धारा में क्या परिवर्तन होगा। β के प्राप्त मान से α की गणना करो।

(उत्तर $\beta = 20$, $\Delta I_E = 1050$ A, $\alpha = 0.95$)

7 संलग्न चित्र के परिपथ में बहने वाली धारा तथा जेनर डायोड के सिरों के बीच विभवान्तर ज्ञात करो, यदि लोड प्रतिरोध $R_L = 2\,k\Omega$ के सिरो के बीच विभवान्तर 15 V रहता है। जेनर डायोड की कार्यशील न्यूनतम धारा 10 mA है।



(उत्तर 17.5 mA, 15 V)