28

अर्द्धचालक एवं अर्द्धचालक युक्तियाँ

जब से आदमी ने गुफाओं से निकलकर सभ्यताओं का निर्माण किया उसकी आरामदायक जीवन की इच्छा भी लगातार प्रबल होती गयी है। आग एवं पहिये के आविष्कार मानव इतिहास में निर्णायक मोड़ सिद्ध हुए। सम्भवत: अगला बड़ा परिवर्तन 'धूसर क्रांति' के रूप में हुआ जिसने संचार आवागमन के साथ जीवन-शैली को ही बदल दिया। अपने घर में बैठे ही हम अपने प्रियजनों से महासागरों एवं महाद्वीपों के पार वीडियो कॉन्फ्रेन्सिंग द्वारा जुड़ सकते हैं।

इस सबको संभव बनाने के लिए ठोस इलेक्ट्रॉनिकी युक्तियों ने महत्वपूर्ण भूमिका निभाई है। इलेक्ट्रॉनिकी विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी की वह शाखा है, जिसमें कुछ विशिष्ट कार्यों को करने के लिए इलेक्ट्रॉनों की गति को समायोजित किया जाता है। वैज्ञानिको ने पदार्थों की वैद्युत प्रकृति का अध्ययन किया है और ऊर्जा बैंडों की अवधारणा का विकास किया है, जिसके पदों में ठोसों का चालकों, अर्द्ध चालकों एवं विद्युतरोधियों में वर्गीकृत किया जा सकता है। इलेक्ट्रॉनिकी युक्तियों के विकास के लिए प्राय: अर्द्ध चालक उपयोग में लाए जाते हैं। सिलिकन एवं जर्मेनियम सर्वाधिक प्रचलित अर्द्धचालक पदार्थ हैं। सामान्यत: एक अर्द्धचालक की चालकता का मान धातुओं एवं अचालाकों की चालकताओं के मध्य में कहीं होता है। परम शून्य (Absolute zero) ताप पर अर्द्धचालक पूर्णतया अचालक की तरह ही व्यवहार करता है। अर्द्धचालक की चालकता कुछ विशेष अशुद्धियों के अपमिश्रण से अत्यंत प्रभावित होती हैं। अपमिश्रित किए जाने वाले इन तत्वों को ***डोपेंट*** कहते हैं।

इस अध्याय में आप विभिन्न प्रकार के अर्द्धचालक, उनके व्यवहार तथा उनसे निर्मित युक्तियों यथा जेनर डायोड, सौर सेल, फोटो डायोड, प्रकाश उत्सर्जक डायोड तथा ट्रांजिस्टर इत्यादि के बारे में पढेंगे। इस अध्याय में आप जेनर डायोड, प्रकाश उत्सर्जक डायोड, फोटो डायोड एवं सौर सेल के I-V अभिलाक्षणिक वक्र खींचने के विषय में भी अध्ययन करेंगे।

उद्देश्य

इस पाठ के अध्ययन के बाद आप:

- ऊर्जा बैंड क्या हैं और वे किस प्रकार चालकों, कुचालकों और अर्द्ध चालकों का वर्गीकरण करने हेतु प्रयुक्त किए जा सकते हैं, की व्याख्या कर पाएंगे;

- (i) नैज (शुद्ध) एवं बाह्य एवं (ii) *n*-प्रकार तथा *p*-प्रकार के अर्द्धचालकों में विभेद कर सकेंगे;
- *p–n* संधि डायोड में अवक्षय-क्षेत्र तथा विभव-प्राचीर की संरचना समझा पाएंगे;
- *p–n* संधि डायोड की अग्र एवं उत्क्रम अभिनतियों में *I-V* अभिलाक्षणिक वक्र का आरेख बना पाएंगे;
- विभिन्न प्रकार के डायोड-जेनर डायोड, प्रकाश उत्सर्जक डायोड, फोटो डायोड और सौर सेल और उनके *I-V* अभिलाक्षणिक वक्रों के विषय में समझा पाएंगे।
- ट्रांजिस्टर की कार्य-विधि का वर्णन कर सकेंगे;
- ट्रांजिस्टर के विभिन्न क्षेत्रों के आकार, कार्य एवं अपमिश्रण का उन पर प्रभाव बता पाएंगे;
- $p-n-p$ तथा $n-p-n$ ट्रांजिस्टरों के बीच अन्तर बता सकेंगे;
- विभिन्न विन्यास अथवा व्यवस्थायें जिनमें ट्रांजिस्टर को जोड़ा जा सकता है तथा उनके निवेशी एवं निर्गम अभिलक्षण की व्याख्या कर पाएंगे तथा
- निवेश/निर्गम प्रतिरोध, उपयोगों तथा अनुप्रयोगों के आधार पर ट्रांजिस्टर के विभिन्न विन्यासों की तुलना कर सकेंगे।

28.1 ठोसों में ऊर्जा बैंड

परमाणु की संरचना का अध्ययन करते समय आपने सीखा था कि एक विलगित परमाणु में इलेक्ट्रॉन कुछ विविक्त, सुपरिभाषित ऊर्जा अवस्थाओं में विद्यमान रहते हैं। जब दो परमाणु स्थाई संरचना निर्मित करने के लिए एक-दूसरे के पास आते हैं और उनके बीच की दूरी (x) उनके व्यास (d) से कम होने लगती है तो ये ऊर्जा अवस्थाएं एक-दूसरे पर अध्यारोपित होने की ओर प्रवृत्त होती हैं, जो कि पाऊली के अपवर्जन नियम के कारण वर्जित होता है। अत: ये ऊर्जा अवस्थाएं परिवर्धित हो जाती हैं और प्रत्येक अन्योन्यक्रियाकारी ऊर्जा अवस्था के संगत दो अलग-अलग ऊर्जा अवस्थाएं निर्मित हो जाती हैं। एक अवस्था सामान्य ऊर्जा अवस्था से थोड़ी कम हो जाती है, जिसे बंधकारी अवस्था कहते हैं और दूसरी अवस्था सामान्य ऊर्जा अवस्था से थोड़ी अधिक हो जाती है, जिसे बंध रोधकारी अवस्था कहा जाता है।

ठोसों में परमाणुओं की अत्यंत बड़ी संख्या (प्रारूपिकत: 10^{23} परमाणु प्रति घन सेंटीमीटर) पास-पास आकर क्रिस्टल की रचना करती है। यदि N परमाणु अन्योन्य क्रिया करते हैं तो प्रत्येक ऊर्जा अवस्था के संगत 2N ऊर्जा अवस्थाएं निर्मित हो जाएंगी। ये सभी ऊर्जा अवस्थाएं एक-दूसरे के इतने पास होती हैं ($\Delta E \sim 10^{-23}$ eV) कि व्यावहारिक रूप में हम उनकी अलग-अलग पहचान नहीं कर सकते। ऊर्जा अवस्थाओं का यह सतत प्राय: वितरण, जिनमें अलग-अलग होते हुए भी व्यवहारत: भेद नहीं किया जा सकता, ऊर्जा बैंड कहलाता है।

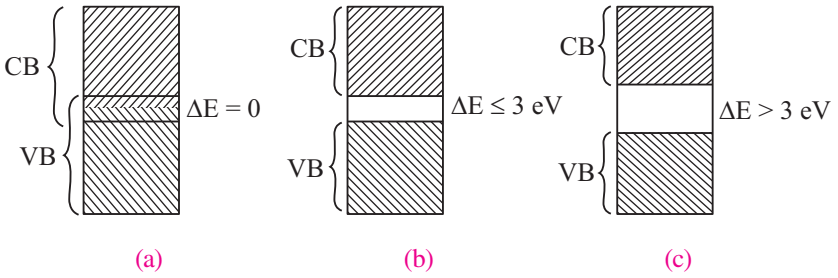
ऊर्जा-अवस्थाओं के बीच अन्योन्यक्रियाओं की यह प्रक्रिया (और परिणामस्वरूप ऊर्जा बैंडों का बनना) बाहरी बिना भरी ऊर्जा अवस्थाओं से शुरू होकर अंदर संयोजकता बैंडों की ओर जाती है। बिना भरी ऊर्जा अवस्थाओं से निर्मित बैंड चालन बैंड कहलाते हैं और फिर भरी

हुई संयोजकता अवस्थाओं से निर्मित बैंड संयोजकता बैंड कहलाते हैं। इन दो बैंडों की साम्य प्राथक्य पर पारस्परिक स्थिति ठोसों की वैद्युत चालकता का निर्धारण करती हैं।

28.1.1 ऊर्जा बैंडों के आधार पर ठोसों का चालकों, अर्द्ध चालकों एवं विद्युत रोधियों में वर्गीकरण

साम्य प्राथक्य पर यदि किसी पदार्थ के चालन बैंड (CB) एवं संयोजकता बैंड (VB) अध्यारोपण करें–जैसा कि धातुओं के प्रकरण में होता है तो पदार्थ चालक होता है (चित्र 28.1a)।

यदि साम्य प्राथक्य पर चालन बैंड पूरी तरह खाली हो। संयोजकता बैंड पूरी तरह भरा हो संयोजकता बैंड के उच्चतम एवं चालन बैंड के निम्नतम स्तर के बीच लघु स्तर के बैंड अंतराल हो, (जिसे वर्जित **ऊर्जा-गैप** कहते हैं) तो पदार्थ अर्द्ध चालक होता है (चित्र 28.1 b)।



चित्र 28.1: ऊर्जा बैंड (a) चालकों, (b) अर्द्ध चालकों (c) विद्युत रोधियों

यदि साम्य प्राथक्य पर CB पूर्णत: खाली हो, VB पूर्णत: भरा हो और उनके बीच विशाल बैंड गैप हो तो पदार्थ विद्युत रोधी होता है (चित्र 28.1c)

28.2 नैज एवं बाह्य अर्द्धचालक

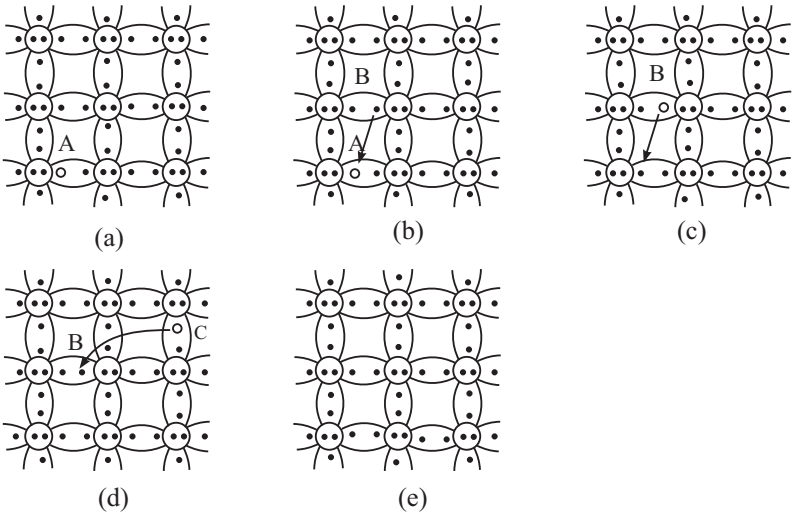
शुद्धता के आधार पर अर्द्धचालकों को नैज (शुद्ध) एवं बाह्य (अशुद्ध) अर्द्धचालकों में वर्गीकृत किया जाता है।

28.2.1 नैज अर्द्धचालक

शुद्ध सिलिकन तथा जर्मोनियम जिनमें कोई अशुद्धि न हो नैज अर्द्धचालक कहलाते हैं। इन तत्वों में इलेक्ट्रॉन क्रिस्टलीय संरचना के अन्तर्गत दृढ़ता के साथ बंधे होते हैं। अर्थात् वे गति के लिये स्वतंत्र नहीं होते। जब शुद्ध सिलिकन को ऊष्मीय ऊर्जा मिल जाती है तो कुछ इलेक्ट्रॉन बंधों से मुक्त हो जाते हैं। प्रत्येक बन्ध के टूटने पर जहाँ एक अवमुक्त इलेक्ट्रॉन प्राप्त होता है तो बन्ध में एक कोटर (होल) भी उत्पन्न हो जाता है। बन्ध में इलेक्ट्रॉन की कमी इलेक्ट्रॉन के बराबर किन्तु धनात्मक आवेश वाले 'कण' के सदृश होती है। इसी रिक्तता को *विवर* (होल) कहते हैं। यहाँ यह ध्यान रखने योग्य है कि इलेक्ट्रॉन तो पूरे क्रिस्टल में भ्रमण के लिये स्वतंत्र होते हैं किन्तु होल केवल एक बंध से दूसरे बंध में ही स्थानान्तरित हो सकते हैं। इलेक्ट्रॉन एवं होल 'स्वतंत्र वाहक' कहलाते हैं तथा इनके प्रवाह से ही धारा उत्पन्न होती है, किन्तु

शुद्ध सिलिकन में इनकी संख्या इतनी कम होती है कि उसकी व्यावहारिक उपयोगिता अत्यन्त सीमित होती है।

ध्यान दें कि नैज अर्द्धचालक में इलेक्ट्रॉन एवं होल सदैव युग्मों में उत्पन्न होते हैं। अतः स्वतंत्र इलेक्ट्रॉनों का ऋणावेश कोटरों के धनावेश के ठीक बराबर होता है। होल का एक बन्ध से दूसरे बन्ध में स्थानांतरण एक इलेक्ट्रॉन के उन्हीं बन्धों के बीच विपरीत दिशा में स्थानान्तरित होने से ही होता है। क्रिस्टल के अन्दर भ्रमण करते हुए अवमुक्त इलेक्ट्रॉन नाभिकों तथा दूसरे अवमुक्त इलेक्ट्रॉनों से लगातार टकराते रहते हैं। इससे उनकी गति यदृच्छ (अनियमित) तथा टेढ़ी-मेढ़ी होती है जो कि गैस में अणुओं की गति से काफी मिलती-जुलती है।



चित्र 28.1: अर्द्धचालक में इलेक्ट्रॉन एवं विवरों (होलों) की गति

चित्र 28.2(a) का अवलोकन करें। बिन्दु A पर इलेक्ट्रॉन व विवर (होल) का एक युग्म उत्पन्न हुआ है। टूटे हुए बन्ध में केवल एक इलेक्ट्रान है जिसकी स्वाभाविक प्रवृत्ति एक अन्य इलेक्ट्रॉन के साथ जोड़ा बनाकर सह संयोजक बन्ध को पूर्ण करने की है। बिन्दु B पर अथवा पास के किसी अन्य बन्ध में से कोई इलेक्ट्रॉन पर्याप्त ऊष्मीय ऊर्जा द्वारा उत्पन्न उत्तेजना से अपने बन्ध को तोड़कर होल A के स्थान पर पहुंच सकता है। परिणामस्वरूप बिन्दु A पर होल विलुप्त हो जाता है। किन्तु बिन्दु B पर एक नया होल प्रकट हो जाता है। इस प्रकार बन्ध में इलेक्ट्रॉन व होल की गति एक दूसरे के विपरीत है। वस्तुतः एक बन्ध से दूसरे बन्ध में इलेक्ट्रॉन के स्थानान्तरण की अवधारणा को ही दूसरे रूप में विपरीत दिशा में *होल गति* कहा जाता है।

अब शायद आप यह जानना चाहेंगे कि तब क्या होगा जब बिन्दु B पर होल समीप के बंध में बिन्दु C से इलेक्ट्रॉन आकर्षित करता है। चित्र 28.2(d) व (e) में दर्शाया गया है कि इलेक्ट्रॉन का C से B को स्थानान्तरण होल को B से C पर स्थानान्तरित कर देता है। परम्परानुसार विद्युतधारा का प्रवाह होलों की गति के अनुदिश माना जाता है।

परम शून्य ताप पर समस्त इलेक्ट्रान अपने मूल परमाणु के साथ दृढ़ता के साथ बंधे होते हैं, इस कारण अर्द्धचालक एक अचालक की भांति व्यवहार करता है। साधारण ताप पर ऊष्मीय

विक्षोभ के कारण परमाणु में कोई इलेक्ट्रॉन नाभिक के प्रभाव से मुक्त हो सकता हैं इस प्रकार एक सह-संयोजक बन्ध के टूटने से मुक्त इलेक्ट्रॉन क्रिस्टल में स्वतंत्र हो जाता है तथा बन्ध में एक रिक्तता (होल) उत्पन्न हो जाती है। **ऊष्मीय विक्षोभ के कारण उत्पन्न इलेक्ट्रॉन होल के युग्मों के कारण ही अर्द्धचालक की वैद्युत चालकता होती है।** साधारणत (300K) ताप पर Ge में नैज वाहक सघनता लगभग $2.5 \times 10^{19}\ m^{-3}$ होती है। ताप बढ़ने पर उत्पन्न इलेक्ट्रॉन होलों की सघनता बढ़ती है तथा वैद्युत चालकता बढ़ती जाती है। दूसरे शब्दों में यह भी कहा जा सकता है कि ताप बढ़ने पर प्रतिरोधकता घटती है। इससे यह निष्कर्ष निकलता है कि अर्द्धचालकों का प्रतिरोध-ताप गुणांक ऋणात्मक होता है।

28.2.2 बाह्य अर्द्धचालक

आप जानते हैं कि नैज अर्द्धचालक उच्च प्रतिरोधकता वाले होते हैं तथा उनकी चालकता में बहुत अधिक परिवर्तन सम्भव नहीं है। इस कारण से नैज (शुद्ध) अर्द्धचालकों की सीमित उपयोगिता होती है और अधिकतर वे ऊष्मीय अथवा प्रकाश संवेदी प्रतिरोध के रूप में प्रयक्त होते हैं। इन कमियों को दूर करने के लिये नैज (शुद्ध) अर्द्धचालकों में दूसरे पदार्थों की अल्प मात्रा अपमिश्रित की जाती है जिससे होल अथवा इलेक्ट्रॉनों में से किसी एक की संख्या बढ़ जाती है।

ध्यान दें कि इन अपमिश्रित पदार्थों को अपद्रव्य या अशुद्धि इसलिए कहा जाता है क्योंकि एक शुद्ध पदार्थ में दूसरे तत्व का मिश्रण किया जाता है।

नैज (शुद्ध) अर्द्धचालक में अशुद्धि मिश्रण की प्रक्रिया को ही मादन, अपमिश्रण अथवा डोपिंग कहते हैं तथा अशुद्धि परमाणु अपदव्य, मादक, अपमिश्रक या डोपेन्ट कहलाता है। अपमिश्रित अर्द्धचालक ही अपद्रव्यी अर्द्धचालक कहे जाते हैं।

अपमिश्रण के लिए अपद्रव्य (डोपेन्ट) सामान्यत: आवर्त सारणी के तृतीय समूह (जिनमें तीन संयोजी इलेक्ट्रॉन होते हैं) अथवा पंचम समूह (जिनमें पाँच संयोजी इलेक्ट्रॉन होते हैं) के तत्वों से लिए जाते हैं। चित्र 28.3 में आवर्त सारणी का एक लघु अंश दर्शाया गया है जिसमें तृतीय एवं पंचम समूह के अपमिश्रण में प्रयुक्त होने वाले तत्व देखें जा सकते हैं।

	III	IV	V	VI
II	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg				

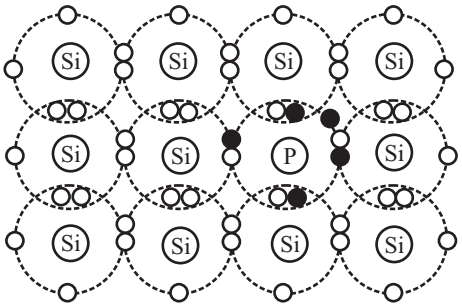
चित्र 28.3: आवर्त सारणी का एक अंश। नैज अर्द्धचालकों के अपमिश्रण में तृतीय व पंचम समूह के तत्व ही प्रयुक्त होते हैं।

सामान्यतया अपद्रव्य (अशुद्धि) की सूक्ष्म मात्रा का ही शुद्ध अर्द्धचालकों में अपमिश्रण किया जाता है। इसका मान शुद्ध अर्द्धचालकों के 10^8 परमाणुओं के मध्य अशुद्धि के एक परमाणु

की कोटि का ही होता हे। ये अशुद्धि परमाणु आवेश वाहकों का सन्तुलन परिवर्तित कर देते हैंक्योंकि इनसे मुक्त इलेक्ट्रॉन अथवा कोटरों में से किसी एक की संख्या बढ़ जाती है। अपमिश्रण अर्द्धचालक की चालकता बढ़ा देता है। अपद्रव्यी अर्द्धचालकों में अधिकांश आवेश वाहक अशुद्धि परमाणु के ही कारण होते हैं।

28.2.3 *n*-प्रकार एवं *p*-प्रकार के अर्द्धचालक

सिलिकन के इलेक्ट्रॉन विन्यास ($1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^2$), से ज्ञात होता है कि दस इलेक्ट्रॉन तो नाभिक के साथ दृढ़ता से बंधे होते हैं और चार इलेक्ट्रॉन बाह्यतम कक्षा में नाभिक के चतुर्दिश परिक्रमण करते हैं। सिलिकन के नैज अर्द्धचालक में, एक Si परमाणु चार अन्य Si परमाणुओं के साथ एक-एक संयोजी इलेक्ट्रॉन की साझेदारी करता है। (इसे सह-'संयोजक बन्ध कहते हैं)। ऐसा ही जर्मेनियम के बारे में भी सत्य है जिसका इलेक्ट्रॉन विन्यास $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^6$, $3d^{10}$, $4s^2$, $4p^2$ होता है। जब सिलिकन अथवा जर्मेनियम क्रिस्टल में पंच संयोजक तत्व (जिसके बाह्यतम कक्षा में पाँच इलेक्ट्रॉन होते हैं) जैसे फॉस्फोरस, आर्सेनिक, एंटीमनी आदि का अपमिश्रण किया जाता है तो अशुद्धि परमाणु के चार इलेक्ट्रॉन तो समीप के चार अर्द्धचालक परमाणुओं के साथ चार सह-संयोजक बन्ध बना लेते हैं किन्तु पाँचवा संयोजी इलेक्ट्रॉन बन्धन मुक्त रह जाता है, जो कि चित्र 28.4 के अनुसार, वैद्युत चालन के लिए उपलब्ध रहता है। इस प्रकार पंच संयोजक तत्व से अपमिश्रित सिलिकन अथवा जर्मेनियम क्रिस्टल में मुक्त इलेक्ट्रॉन की अधिकता होती है तथा वह *n*-प्रकार का अर्द्धचालक कहा जाता है। इन अशुद्धियों को 'दाता अशुद्धि' कहते हैं।

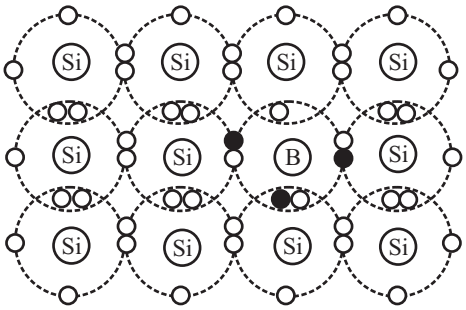


चित्र 28.4: *n*-प्रकार के अर्द्धचालक में सह-संयोजक बन्ध।

ध्यान दें कि *n*-प्रकार के अर्द्धचालक में 'मुक्त इलेक्ट्रॉनों की संख्या होलों की संख्या से बहुत अधिक होती है। अक्षर '*n*' का अभिप्राय इलेक्ट्रॉन के ऋणावेश (negative charge) से है।

यदि सिलिकन (अथवा जर्मेनियम) क्रिस्टल में त्रिसंयोजक (जिसके बाह्यतम कक्ष में तीन इलेक्ट्रॉन होते हैं) तत्व जैसे बोरॉन, एल्यूमिनियम, गैलियम, इन्डियम इत्यादि का अपमिश्रण किया जाय तो तीन सह-संयोजक बन्ध हो जाते हैं किन्तु चौथे बन्ध में एक इलेक्ट्रॉन की रिक्तता' रहती है जिसे 'विवर अथवा होल कहते हैं। यह चित्र 28.5 में दर्शाया गया है। ऐसे अर्द्धचालक को *p*-प्रकार का अर्द्धचालक कहते हैं तथा अशुद्धियाँ 'ग्राही' अशुद्धियाँ कहलाती हैं।

यहाँ यह पूछना स्वाभाविक है कि क्या *n*-प्रकार का अर्द्धचालक ऋणावेशित होता है? उत्तर है—नहीं। नैज तथा अपद्रव्यी अर्द्धचालक दोनों ही विद्युत उदासीन होते हैं।



चित्र 28.5: *p*-प्रकार के अर्द्धचालक में सह-संयोजक बन्ध

ध्यान दें कि *p*-प्रकार के अर्द्धचालके में ग्राही अशुद्धि के कारण उत्पन्न होलों की संख्या उन आवेश वाहकों से बहुत अधिक होती है जो साधारण ताप पर ऊष्मीय विक्षोभ के कारण सहसंयोजक बंधों के टूटने से उत्पन्न होते हैं। अत: होलों की कुल संख्या इलेक्ट्रॉनों की संख्या से बहुत अधिक होती है। अर्थात, *p*-प्रकार के अर्द्धचालक में होल प्रमुख आवेश वाहक होते हैं।

पाठगत प्रश्न 28.1

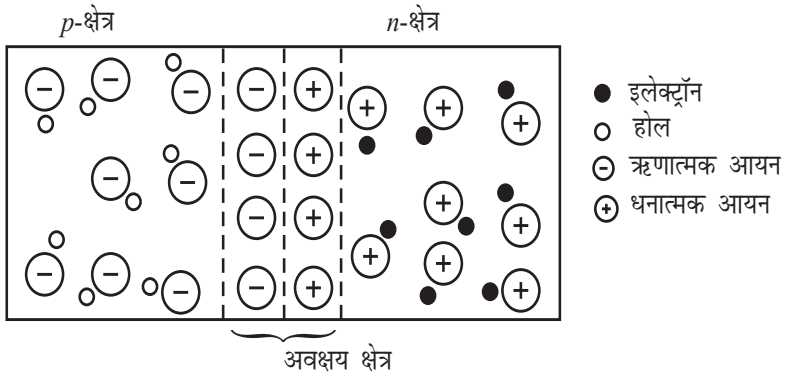
1. शुद्ध सिलिकन में 300K पर नैज आवेश वाहकों की सघनता $1.5 \times 10^{16}\,m^{-3}$ है तो विवरों एवं स्वतंत्र इलेक्ट्रॉनों की सघनता क्या होगी?
2. निम्नलिखित में से किसके अपमिश्रण से *n*-प्रकार का अर्द्धचालक प्राप्त होता है?
   (i) त्रि-संयोजक अशुद्धि
   (ii) पंच संयोजक अशुद्धि
   (iii) चतुर्थ संयोजक अशुद्धि
   (iv) त्रि-संयोजक तथा चतुर्थ संयोजक कोई भी अशुद्धि।
3. नैज अर्द्धचालक को ..... के मिश्रण से बाह्य अर्द्धचालक में परिवर्तित किया जा सकता है। यह प्रक्रिया ..... कहलाती है।
4. इलेक्ट्रॉन *n*-प्रकार के अर्द्धचालक में तथा होल *p*-प्रकार के अर्द्धचालक में ..... आवेश वाहक होते हैं।
5. नैज अर्द्धचालक की तुलना में अपद्रव्यी अर्द्धचालक की प्रतिरोधकता ..... होती है।

28.3 *p-n* संधि

अब तक आप पढ़ चुके हैं कि *n*-प्रकार तथा *p*-प्रकार के अर्द्धचालकों में क्रमश: इलेक्ट्रॉन व होल बहुसंख्यक आवेश वाहक होते हैं। यहाँ यह सोचना बहुत रोचक होगा कि एक *n*-प्रकार तथा एक *p*-प्रकार के अर्द्धचालक के मध्य सम्पर्क स्थापित करने पर क्या कोई उपयोगी युक्ति बनेगी? इसका उत्तर जानने के लिये हमें *p-n* संधि की संरचना व कार्य-विधि का अध्ययन करना होगा।

28.3.1 *p-n* संधि की संरचना

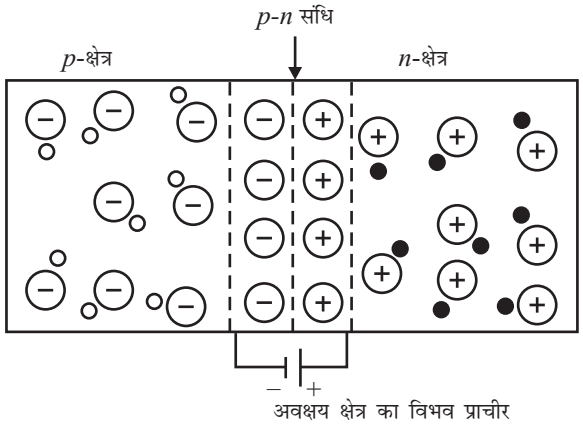
जैसा कि चित्र 28.6 में दर्शाया गया है कि *p–n* संधि के बनने की सबसे सरल विधि यह है कि किसी अर्द्धचालक क्रिस्टल के एक भाग में दाता अशुद्धि का तथा दूसरे भाग में ग्राही अशुद्धि का अपमिश्रण किया जाए।



चित्र 28.6: अवक्षय-क्षेत्र सहित *p-n* संधि

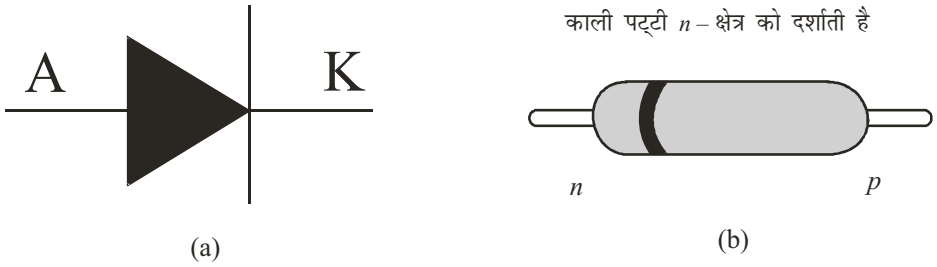
क्रिस्टल के *n*-क्षेत्र में इलेक्ट्रॉनों की तथा *p*-क्षेत्र में विवरों (holes) की सघनता होती है। अत: इलेक्ट्रॉनों का p-क्षेत्र की ओर तथा होलों का *n*-क्षेत्र की ओर विसरण होने लगता है। इस प्रक्रिया में कुछ इलेक्ट्रॉन व होल पुनर्संयोजन (Recombination) कर समाप्त भी हो जाते हैं। इसके परिणामस्वरूप संधि के पास *n*-क्षेत्र में धनायन तथा p-क्षेत्र में ऋणायन उत्पन्न हो जाते हैं। संधि के दोनों ओर इन स्थिर आयनों की उत्पत्ति से इलेक्ट्रॉन व होलों का विसरण बाधित होता है। इस प्रकार इलेक्ट्रॉनों व होलों के पुनर्संयोजन से संधि के दोनों ओर ऐसा सूक्ष्मक्षेत्र उत्पन्न हो जाता है जिसमें चलनशील (Mobile) आवेश वाहकों का अभाव होता है। इसकी चौड़ाई 0.5 माइक्रोमीटर होती है तथा इसे अवक्षय क्षेत्र अथवा अन्तराशील-आवेश क्षेत्र कहते हैं।

संधि के पास एकत्रित आवेश विद्युत-क्षेत्र स्थापित करते हैं जिसके परिणामस्वरूप विकसित स्थिर-विद्युत विभव को 'विभव प्राचीर' कहते हैं। इस विभव की ध्रुवीयता चित्र 28.7 में प्रदर्शित है। बाह्य विद्युत-क्षेत्र की अनुपस्थिति में विभव प्राचीर संधि के पार आवेश वाहकों के विसरण को रोक देता है।



चित्र 28.7: अवक्षय क्षेत्र के कारण विभव प्राचीर

विभव प्राचीर का मान प्रयुक्त अर्द्धचालक के ऊपर निर्भर करता है। Ge व Si के लिए इसका मान क्रमशः 0.3 V व 0.7 V होता है। *p-n* संधि एक डायोड की भांति कार्य करती है। इसका सांकेतिक निरूपण चित्र 28.8(a) में किया गया है। *p*-क्षेत्र वाणाग्र A से प्रदर्शित है तथा धनोद (एनोड) का कार्य करता है। इसी प्रकार *n*-क्षेत्र बार (Bar) K से प्रदर्शित है तथा ऋणोद (कैथोड) का कार्य करताहै। चित्र 28.8(b) में बाजार में उपलब्ध *p-n* संधि डायोड का चित्र प्रदर्शित है।



चित्र 28.8 (a) *p-n* संधि डायोड का प्रतीक। परम्परागत धारा की दिशा वाणाग्र के अनुदिश अर्थात् *p* से *n*-क्षेत्र की ओर है। (b) बाजार में उपलब्ध p - n संधि डायोड

अर्द्धचालक डायोड की पहचान के लिए दो अक्षर तथा एक अंक से बना एक 'कोड' होता है। प्रथम अक्षर प्रयुक्त पदार्थ को इंगित करता है। A ऐसे पदार्थ को निरूपित करता है जिसमें वर्जित क्षेत्र 0.6eV से 1.0eV के मध्य हो यथा जर्मेनियम, B ऐसे पदार्थ को निरूपित करता है जिसमें वार्जित क्षेत्र 1.0eV से 1.3 eV के मध्य हो यथा सिलिकन। द्वितीय अक्षर मुख्य अनुप्रयोग को इंगित करता है।: A संसूचक डायोड (Detection Diode), B परिवर्तनशील धारिता डायोड (Variable Capacitance Diode), E टनल डायोड (Tunnel Diode), Y दिष्टकारी डायोड (Rectifying diode) तथा Z जेनर डायोड को निरूपित करते हैं। क्रोड में दिए गए अंक शक्ति रेटिंग (Power Rating), शिखर उत्क्रम वोल्टता (Peak Reverse Voltage), महत्तम धारा रेटिंग (Maximum Current Rating) इत्यादि के सूचक हैं। निर्माता की केटलॉग में इनका विवरण होता है। उदाहरणतः By 127 सिलिकन दिष्टकारी डायोड का संकेतन है तथा Bz 248 सिलिकन जेनर डायोड का संकेतन है।

एनोड (धनोद) एवं कैथोड (ऋणोद) की दृष्टव्य पहचान के लिए निर्माता निम्नलिखित में से कोई विधि अपनाते हैं:

- डायोड के ऊपर प्रतीक (symbol) बना देते हैं।
- डायोड के ऊपर लाल एवं नीले रंग के चिन्ह बना देते हैं। लाल चिह्न एनोड तथा नीला चिह्न कैथोड को दर्शाता है।
- डायोड के ऊपर एक सिरे की ओर एक छोटा छल्ला बना देते हैं। यह कैथोड को दर्शाता है। चित्र 28.8(b) में *p-n* संधि का *n*-क्षेत्र काली पट्टी (Band) से दर्शाया गया है।

ध्यान रखें कि डायोड रेटिंगों की निर्धारित सीमा के अन्दर कार्य करना आवश्यक है ताकि युक्ति नष्ट न हो।

पाठगत प्रश्न 28.2

1. रिक्त स्थान भरिये:

   (a) ..... के संधि के पार विसरण करने से *p-n* संधि की रचना होती है।

   (b) विभव प्राचीर का मान सिलिकन डायोड में ..... वोल्ट तथा जर्मेनियम डायोड में ..... वोल्ट होता है।

   (c) अचलशील ग्राही एवं दाता आयन वाले क्षेत्र को ..... कहते हैं।

   (d) बिना बाह्य विद्युत क्षेत्र के *p-n* संधि में इलेक्ट्रॉनों का विसरण *n*-क्षेत्र से *p*-क्षेत्र की ओर होता है क्योंकि ..... की सघनता *p* क्षेत्र की तुलना में *n*-क्षेत्र में ..... होती है।

2. सही विकल्प चुनिये:

   (a) *p-n* संधि पर विभव प्राचीर संधि के दोनों ओर स्थित कुछ आवेशों के कारण होता है। ये आवेश हैं–
   - (i) बहुसंख्यक वाहक,
   - (ii) अल्पसंख्यक वाहक,
   - (iii) स्थिर दाता व ग्राही आयन,
   - (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।

   (b) बिना बाह्य विभव के *p-n* संधि में संधि धारा साम्य स्थिति में
   - (i) केवल अल्पसंख्यक आवेश वाहकों के विसरण के कारण होती है।
   - (ii) केवल बहुसंख्यक आवेश वाहकों के विसरण के कारण होती है।
   - (iii) शून्य होती है क्योंकि कोई ओवश संधि को पार नहीं कर पाते।
   - (iv) शून्य होती है क्योंकि बराबर किन्तु विपरीत आवेश संधि को पार कर रहे होते हैं।

   (c) अर्द्धचालक डायोड में, विभव प्राचीर प्रतिकर्षित करता है–
   - (i) दोनों क्षेत्रों के अल्पसंख्यक आवेश वाहकों को।
   - (ii) दोनों क्षेत्रों के बहुसंख्यक आवेश वाहकों को।
   - (iii) बहुसंख्यक तथा अल्पसंख्यक दोनों आवेश वाहकों को।
   - (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।

3. अवक्षय क्षेत्र को इस नाम से क्यों जानते हैं तथा इसमें क्या स्थित होते हैं?

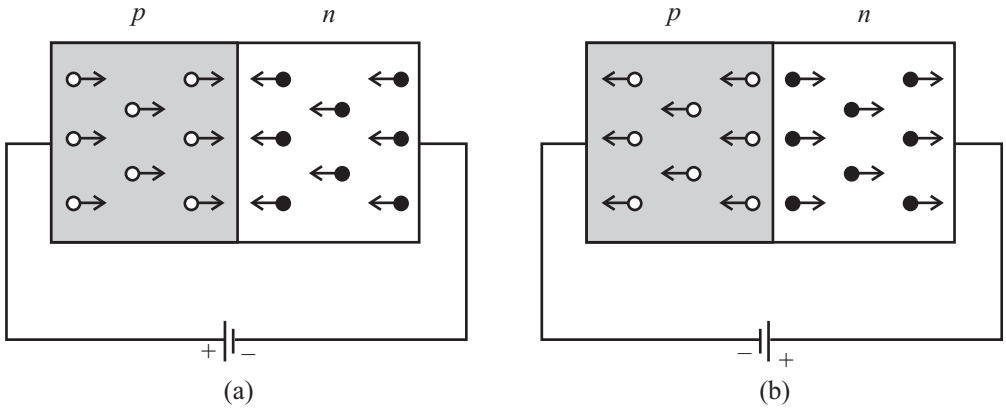
28.4 अग्र एवं उत्क्रम अभिनत *p-n* संधि

अभिनति अथवा बायसिंग का अभिप्राय है: (युक्ति को) वोल्टता देना। *p-n* संधि में वैद्युत चालन के लिए आवश्यक है कि इलेक्ट्रॉन *n*-क्षेत्र से *p*-क्षेत्र को तथा होल उसके विपरीत दिशा में प्रवाहित हो। इसके लिए *p-n* संधि डायोड के दोनों सिरों के बीच एक बैटरी जोड़नी होती है

ताकि विभव प्राचीर के प्रभाव को समाप्त किया जा सके। *p-n* संधि से बैटरी जोड़ने की दो विधियाँ हैं:

- **अग्र अभिनति** जिसमें बैटरी के धनात्मक सिरे को *p*-क्षेत्र से तथा ऋणात्मक सिरे को *n*-क्षेत्र से जोड़ा जाय [चित्र 28.9(a)]
- **उत्क्रम अभिनति** जिसमें बैटरी के ऋणात्मक सिरे को *p*-क्षेत्र से तथा धनात्मक सिरे को *n*-क्षेत्र से जोड़ा जाय [चित्र 28.9(b)]।

जब *p-n* संधि को विभव प्राचीर से अधिक अग्र अभिनति दी जाती है तो होल *p*-क्षेत्र से *n*-क्षेत्र की ओर तथा इलेक्ट्रॉन उसके विपरीत दिशा में संधि के पार अनुगमन करते हैं। इससे डायोड में अग्र धारा उत्पन्न होती है। यह धारा अग्र अभिनति के बढ़ने के साथ बढ़ती है, किन्तु इसका मान कुछ मिली एम्पियर की कोटि का ही होता है। अग्र अभिनति *p-n* संधि के प्रतिरोध को 'अग्र प्रतिरोध' कहते हैं। इसका मान बहुत कम 10Ω से 30Ω के मध्य ही होता है।



चित्र 28.9 (a) अग्र अभिनत, तथा (b) उत्क्रम अभिनत *p-n* संधि।

उत्क्रम अभिनत *p-n* संधि में होल *p*-क्षेत्र में तथा इलेक्ट्रॉन *n*-क्षेत्र में संधि से दूर हटने का प्रयास करते हैं। इसका यह अर्थ कदापि नहीं है कि परिपथ में कोई धारा प्रवाहित नहीं होती। वस्तुत: ऊष्मीय विक्षोभ के कारण भंजित सह-संयोजक बंधो से उत्पन्न इलेक्ट्रॉन व होल सूक्ष्म मात्रा में विद्युतधारा उत्पन्न करते हैं। इन अल्पसंख्यक आवेश वाहकों के द्वारा उत्पन्न धारा को उत्क्रम संतृप्त धारा अथवा लीकेज धारा कहते हैं। वाणिज्यिक रुप से उपलब्ध अधिकतर डायोडों में उत्क्रम धारा नियत होती है तथा उत्क्रम अभिनति पर निर्भर नहीं करती। इसका मान Ge डायोडों में कुछ माइक्रोएम्पियर तथा Si डायोडों में कुछ नेनोएम्पियर होता है।

अग्र अभिनति में अल्प प्रतिरोध तथा उत्क्रम अभिनति में उच्च प्रतिरोध के कारण *p-n* संधि दिष्टकारी के रूप में कार्य करती है।

जब उत्क्रम अभिनति कुछ सौ वोल्ट की होती है तो *p-n* संधि में प्रवाहित उत्क्रम धारा का मान तीव्रता से यकायक बढ़ने लगता है। इससे उत्पन्न अत्याधिक ऊष्मा युक्ति को स्थायी रूप से क्षतिग्रस्त कर सकती है। जिस उत्क्रम विभव पर यह घटना होती है उसे भंजन विभव कहते हैं। इसकी व्याख्या निम्नलिखित तरीके से की जा सकती है–

उत्क्रम अभिनति लगाने से संधि में उच्च विद्युत क्षेत्र उत्पन्न होता है जो (1) अल्पसंख्यक आवेश वाहकों को त्वरित करता है। ये वाहक बन्ध के इलेक्ट्रॉनों को टक्कर द्वारा ऊर्जा प्रदान कर मुक्त कर देते हैं (ऐवलांश प्रभाव), (2) विद्युत बल द्वारा सह संयोजक बन्ध टूट जाते हैं (जेनर प्रभाव)। भंजन की इस घटना में बहुत बड़ी संख्या में इलेक्ट्रॉन व होलों के युग्म उत्पन्न होते हैं जिससे उच्च उत्क्रम धारा उत्पन्न होती है।

पाठगत प्रश्न 28.3

1. अग्र अभिनति को परिभाषित कीजिए।
2. उत्क्रम अभिनति को परिभाषित कीजिए।
3. रिक्त स्थान भरिए:
   (a) *p-n* संधि डायोड को अग्र अभिनत करने पर अवक्षय क्षेत्र की चौड़ाई ..... जाती है।
   (b) *p-n* संधि को उत्क्रम अभिनत करने पर अवक्षय क्षेत्र की चौड़ाई ..... जाती है।
   (c) जब उत्क्रम अभिनति अत्याधिक हो जाती है तो *p-n* संधि में धारा अचानक .....। इस वोल्टता को ..... कहते हैं।
4. सही विकल्प चुनिए:
   (a) अग्र अभिनत संधि में
      (i) *n*-क्षेत्र से होल *p*-क्षेत्र की ओर चलते हैं।
      (ii) अल्पसंख्यक वाहक ही चलते हैं।
      (iii) आवेश वाहक नहीं चलते हैं।
      (iv) दोनों ही (*n* तथा *p*) क्षेत्रों के बहुसंख्यक आवेश वाहक दूसरे क्षेत्र की ओर चलने लगते हैं।
   (b) उत्क्रम अभिनत संधि में
      (i) विभव प्राचीर के कारण आवेश वाहक गतिमान नहीं हो पाते।
      (ii) केवल बहुसंख्यक आवेश वाहक ही स्थानान्तरिक होते हैं।
      (iii) केवल अल्पसंख्यक आवेश वाहक ही स्थानान्तरित होते है।
      (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।
5. कौन-से दो प्रकार के 'भंजन' उत्क्रम अभिनत *p-n* संधि में होते हैं। उनमें विभेद कीजिए।

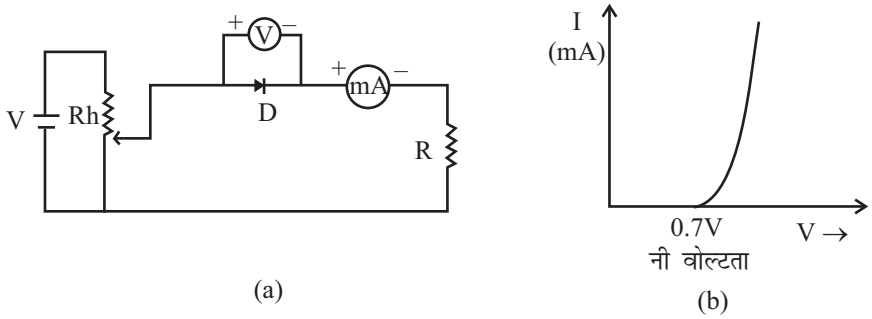
28.5 *p-n* संधि के अभिलक्षण

किसी अर्द्धचालक डायोड का अनुप्रयोग उसके धारा-विभव अभिलाक्षणिक वक्र पर निर्भर करता है।

28.5.1 अग्र अभिनति अभिलक्षण

चित्र 28.10(a) को ध्यान दें। *p-n* संधि डायोड के अग्र अभिनति वक्र खींचने के लिए बैटरी B का धनात्मक सिरा डायोड के *p*-क्षेत्र से जुटा है। धारा-विभाजक के रूप में प्रयुक्त धारा-नियन्त्रक द्वारा डायोड की दी जाने वाली वोल्टता को परिवर्तित किया जा सकता है। मिलीएमीटर (mA) परिपथ में धारा तथा वोल्टमीटर (V) डायोड के बीच वोल्टता को मापता है। परम्परागत धारा की दिशा डायोड के प्रतीक में वाणाग्र की ओर होती है। अग्र अभिनत डायोड में धारा का बहुत कम अवरोध होता है जिसके कारण वोल्टता बढ़ाने पर धारा तीव्रता से बढ़ती है। अत: धारा को नियन्त्रित करने के लिए परिपथ में प्रतिरोध (R) जोड़ा जाता हैं। यदि ऐसा न करे तो अत्यधिक धारा के प्रवाह से डायोड को स्थायी क्षति हो सकती है।

p-n संधि का अग्र अभिनति में *I-V* अभिलाक्षणिक वक्र चित्र 29.10(b) में दर्शाया गया है।



चित्र 28.10: (a) अग्र अभिनत *p-n* संधि डायोड के *I-V* अभिलक्षणों के लिए परिपथ (b) अभिलक्षण वक्र

ध्यान दें कि अभिलक्षण वक्र मूल बिन्दु से नहीं गुजरता, बल्कि V-अक्ष से 0.7V के पास मिलता है। इसका अर्थ है कि *p-n* संधि डायोड में तब तक वैद्युत चालन नहीं होता जब तक कि विभव प्राचीर से अधिक बाह्य वोल्टता न दी जाय। इस आवश्यक न्यूनतम वोल्टता को 'नी वोल्टता' (Knee Voltage) कहते हैं। Si डायोड में इसका मान लगभग 0.7V तथा Ge डायोड में लगभग 0.3V होता है।

यह वोल्टता होल-इलेक्ट्रॉन संयोजन के लिए आवश्यक है। जैसे ही दी गयी वोल्टता (Knee Voltage) से अधिक होती है, धारा वृद्धि रेखीय होती है। 1V की वोल्टता के द्वारा उत्पन्न धारा का मान 30-80 mA हो सकता है।

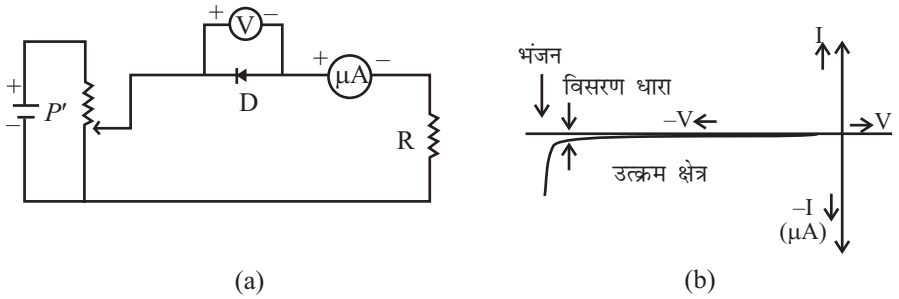
28.5.2 उत्क्रम अभिनति अभिलक्षित

p-n संधि के उत्क्रम अभिनति अभिलक्षण जानने के लिए आवश्यक परिपथ चित्र 28.11(a) में दर्शाया गया है। यदि चित्र 28.10(a) में दर्शाये गये अग्र *I-V* अभिलक्षणों के परिपथ से तुलना करें तो निम्नलिखित अन्तर पायेंगे–

(i) संधि (अथवा बैटरी) के सिरे उलट दिये गये हैं।

(ii) मिलीएमीटर के स्थान पर माइक्रोएमीटर लगाया गया है।

उत्क्रम बायस में *p-n* संधि का एक प्रारुपिक अभिलाक्षणिक आरेख चित्र 28.11 (b) में दर्शाया गया है।



चित्र 28.11: (a) *p-n* संधि के उत्क्रम अभिनति में *I-V* अभिलक्षित हेतु परिपथ
(b) उत्क्रम अभिनति अभिलाक्षणिक वक्र

ध्यान दें कि उत्क्रम अभिनति में भंजन वोल्टता के नीचे संधि धारा का मान न्यून होता है किन्तु भंजन वोल्टता में अल्प वृद्धि से ही धारा का मान तीव्रता से बढ़ता है। इसके अतिरिक्त 28.10(b) तथा 28.11 (b) के चित्रों की तुलना से स्पष्ट है कि *p-n* संधि डायोड का प्रतिरोध अग्र अभिनति में न्यून तथा उत्क्रम अभिनति में उच्च होता है। उत्क्रम धारा में तीव्र वृद्धि संधि के प्रतिरोध में यकायक अत्यन्त कमी के कारण होती है।

इस प्रकार यह निष्कर्ष निकलता है कि *p-n* संधि में वैद्युत चालन एक दिशा में ही होता है। यह एक दिशीय धारा प्रवाह तब होता है जब इलेक्ट्रॉन *n*-प्रकार के क्षेत्र से *p*-प्रकार के क्षेत्र की ओर तथा होल उसके विपरीत दिशा में अनुगमन करते हैं।

आपने मैट्रो स्टेशन के उपमार्ग पर टर्न स्टाइल (Turn Styles) देखें होंगे जो लोगों को एक दिशा में ही जाने की अनुमति देते हैं। डायोड इलेक्ट्रॉनों के लिए एक प्रकार का 'टर्नस्टाइल' ही है।

p-n संधि के अनेकानेक अनुप्रयोग है यथा :

1. डायोड में एक दिशीय वैद्युत चालन के गुण को प्रत्यावर्ती वोल्टता को दिष्ट वोल्टता में परिवर्तित करने के लिए दिष्टकारी के रूप में किया जाता है। डायोड सैलफोनों, सीडी

प्लेयर, लैप-टॉप आदि की बैटरी के ऊर्जन में 'एडेप्टर' में प्रयुक्त होते हैं। आप इसका विस्तृत अध्ययन अगले अध्याय में करेंगे।

2. बैटरी का इस्तेमाल करने वाली कई युक्तियों में डायोड प्रयुक्त होता है क्योंकि वह उत्क्रम अभिनत होकर बैटरी से धारा के निर्गम को अवरुद्ध कर देता हैं। इससे अति संवेदनशील इलेक्ट्रॉनिक युक्तियाँ सुरक्षित रहती है।

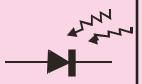
पाठगत प्रश्न 28.4

1. 'नी वोल्टता (Knee Voltage) की अवधारणा को स्पष्ट करिये।
2. (a) नी वोल्टता सिलिकन डायोड में ..... तथा जर्मेनियम डायोड में ..... होती है।
   (b) *p-n* संधि डायोड में धारा प्रवाह केवल ..... दिशा में ही होता है।
   (c) जर्मेनियम डायोड में उत्क्रम अभिनत धारा का मान लगभग ..... होता है।
3. सही विकल्प चुनिये:
   (a) अग्र अभिनत *p-n* संधि डायोड के *I-V* अभिलाक्षणिक वक्र होते हैं–
   (i) केवल अरेखीय
   (ii) केवल रेखीय
   (iii) रेखीय तथा अरेखीय दोनों अंशों सहित
   (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।
   (b) जब अग्र अभिनत *p-n* संधि की वोल्टता बढ़ाई जाती है तो वोल्टता में अल्प वृद्धि के फलस्वरूप धारा में तीव्र परिवर्तन।
   (i) लगभग तुरन्त होता है।
   (ii) तभी होता है जब अग्र अभिनत विभव प्राचीर से अधिक हो।
   (iii) जब संधि का भंजन होता है।
   (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।

28.6 विभिन्न प्रकार के डायोड

p-n संधि डायोड के विद्युतीय एवं प्रकाशीय व्यवहार में परिवर्तन अपदृव्य पदार्थ की प्रकृति, मात्रा तथा डायोड की ज्यामिति (जैसे साइज, क्षेत्रफल आदि) में परिवर्तन करके किया जा सकता है। इस अंक में विभिन्न विशिष्ट क्षमताओं वाले डायोडों को सूचीबद्ध किया गया है। प्रत्येक डायोड का अपना विशिष्ट प्रतीक होता है जो उसकी प्रकृति तथा कार्य-प्रणाली को प्रतिबिम्बित करता है।

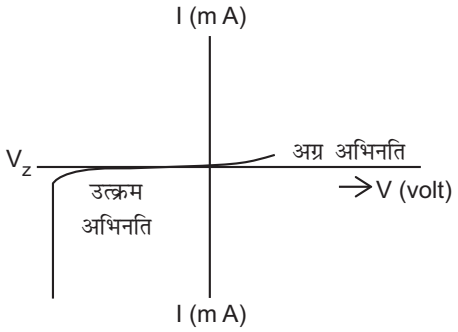
निम्नलिखित सारणी का उपयोग विभिन्न डायोडों की तुलना करने के लिए किया जा सकता है:

नाम	प्रतीक	संरचना-विधि	सिद्धान्त	मुख्य कार्य	मुख्य उपयोग
जेनर डायोड		अत्यधिक अपमिश्रित *p* एवं *n* क्षेत्रों वाला *p-n* संधि डायोड अत्यन्त सूक्ष्म अवक्षय पर्त (<10 nm)।	जेनर/ ऐवलांश भंजन	बिना क्षतिग्रस्त हुए उत्क्रम अभिनति भंजन वोल्टता पर सतत धारा प्रवाहित कर देता है।	वोल्टता स्थायीकारी अथवा नियामक
फोटो डायोड		*p-n* संधि डायोड जिसमें प्रकाश उत्सर्जी अर्द्धचालक पदार्थ प्रयुक्त होता होता है। प्रकाश उत्सर्जक डायोड (LED) p-क्षेत्र की चौड़ाई संसूचित की जाने वाले विकिरण की तरंगदैर्ध्य पर निर्भर करती है।	प्रकाश वोल्टाई प्रभाव	उत्क्रम अभिनति में प्रकाशीय निवेश का विद्युत धारा में परिवर्तित कर देता है।	वीसीआर एवं टी वी में रिमोट कन्ट्रोल का रिसीवर
		p-n संधि डायोड जिसमें प्रयुक्त पदार्थ के वर्जित क्षेत्र की चौड़ाई निकट अवरक्त अथवा दृश्य प्रकाशीय क्षेत्रों में होती है।	विद्युत प्रदीप्ति	अग्र अभिनति में विद्युत निवेश को प्रकाशीय निर्गम में परिवर्तित कर देता है।	मल्टीमीटर डिजिटल घड़ियाँ, प्रदर्शी औजार, कैलकुलेटर, स्विच बोर्ड, चोर घंटी तथा रिमोट कन्ट्रोल युक्तियाँ,
सौर सेल		*p-n* संधि डायोड जिसमें *p*-अथवा *n*-क्षेत्र बहुत पतला होता है ताकि संधि पर पहुंचने से पूर्व प्रकाश का बहुत अधिक अवशोषण न हो	प्रकाश वोल्टाई प्रभाव	सौर ऊर्जा का वैद्युत ऊर्जा में परिवर्तन	1. उपग्रहों की ऊर्जा प्रणालियों 2. बैटरियों को चार्ज करने में 3. केलकुलेटर्स में

28.6.1 जेनर डायोड के अभिलक्षण

जेनर डायोड संधि के *p* क्षेत्र एवं *n* क्षेत्र दोनों को अधिकता में अपमिश्रित कर बनाया जाता है। इसके फलस्वरूप बहुत पतले $(< 10^{-6}\,\text{m})$ अवक्षय क्षेत्र का निर्माण हो जाता है। उत्क्रम अभिनत विभव बहुत कम, 5 वोल्ट होने पर भी, अवक्षय क्षेत्र के पार वैद्युत क्षेत्र अत्यधिक होता है $(\sim 5\times 10^{6}\,\text{N C}^{-1})$।

जेनर डायोड का *I-V* अभिलक्षण - वक्र चित्र 28.12 में दर्शाया गया है।

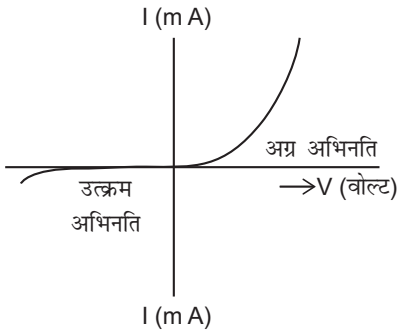


चित्र 28.12

यह देखा गया है कि जेनर डायोड में जब उत्क्रम अभिनत विभव V भंजक विभव के समीप पहुंचता है तो विद्युत धारा में बहुत अधिकत: परिवर्तन होता है। भंजक विभव के बाद विद्युत धारा में अत्यधिक परिवर्तन अधिकांशत: नगण्य उत्क्रम अभिनत विभव द्वारा उत्पन्न किया जा सकता है। यद्यपि जेनर डायोड में विद्युत धारा का परास बहुत बदलता है, परंतु जेनर विभव नियत रहता है।

28.6.2 प्रकाश उत्सर्जक डायोड के *I-V* अभिलक्षण

प्रकाश उत्सर्जक डायोड में जब अग्रधारा कम होती है तो उत्सर्जित प्रकाश की तीव्रता भी कम होती है। जैसे-जैसे अग्रधारा बढ़ती है, उत्सर्जित प्रकाश की तीव्रता भी बढ़ती है एवं अधिकतम मान प्राप्त कर लेती है। पुन: अग्रधारा में वृद्धि के परिणामस्वरूप प्रकाश की तीव्रता घट जाती है। LED को इस प्रकार अभिनत किया जाता है कि उत्सर्जित प्रकाश की दक्षता अधिकतम रहे। LED के *I-V* अभिलक्षण Si संधि डायोड की तरह होते हैं, जो चित्र 28.13 में दिखाए गए हैं।



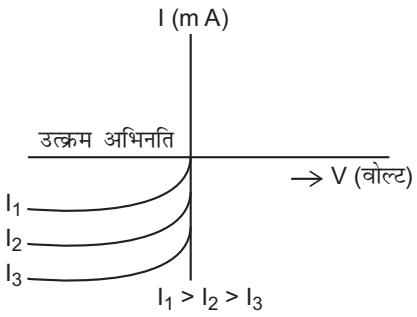
चित्र 28.13

लेकिन देहली वोल्टता बहुत अधिक होती है एवं प्रत्येक रंग के LED के लिए इसका मान अलग-अलग होता है।

LED के लिए भंजक विभव बहुत कम, प्रारूपिक रूप से लगभग 5V, होता है।

28.6.3 फोटो डायोड के *I-V* अभिलक्षण

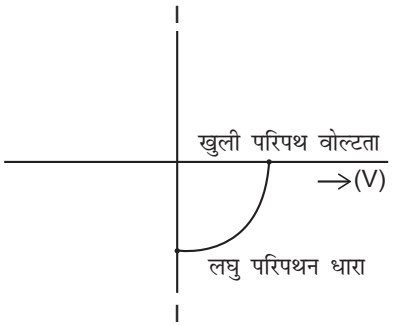
फोटो डायोड इस प्रकार बनाए जाते हैं कि डायोड के अवक्षय-क्षेत्र के समीप इलेक्ट्रॉन- होल युग्म उत्पन्न हो जाएं। संधि के वैद्युत क्षेत्र के कारण इलेक्ट्रॉन-होल युग्म पुनः संयोजित होने से पूर्व पृथक हो जाते हैं।



चित्र 28.14

वैद्युत क्षेत्र की दिशा इस प्रकार होती है कि इलेक्ट्रॉन *n* सिरे एवं होल *p* सिरे की ओर पहुंचते हैं। इलेक्ट्रॉन *n* सिरे पर एवं होल *p* सिरे पर एकत्र हो जाते हैं एवं एक विद्युत वाहक बल (emf) उत्पन्न करते हैं। जब कोई बाह्य लोड जोड़ा जाता है तो धारा प्रवाहित होती है। फोटो धारा का परिमाण आपतित प्रकाश की तीव्रता पर निर्भर करता है।

फोटो डायोड के *I-V* अभिलक्षण चित्र 28.14 में दर्शाए गए हैं।



चित्र 28.15

28.6.4 सौर सेल के *I-V* अभिलक्षण

सौर सेल पर प्रकाश पड़ने से emf की उत्पत्ति निम्नलिखित तीन बुनियादी प्रक्रमों के कारण होती है : जनन, पृथक्करण एवं संचयन। इलेक्ट्रॉन-होल युग्मों का जनन संधि के निकट के प्रकाश ($h\nu > E_g$) के कारण होता है। इलेक्ट्रॉनों और होलों का पृथक्करण अवक्षय-परत के विद्युत क्षेत्र के कारण होता है। इलेक्ट्रॉन *n*-क्षेत्र और होल *p*-क्षेत्र में जाते हैं।

n-क्षेत्र में पहुंचने वाले इलेक्ट्रॉन सम्मुख संपर्क द्वारा एकत्रित किए जाते हैं तथा *n*-क्षेत्र में पहुंचने वाले होल पश्च संपर्क द्वारा एकत्रित किए जाते हैं। इस प्रकार *p*-क्षेत्र धनात्मक तथा *n*-क्षेत्र ऋणात्मक होकर फोटो वोल्टता उत्पन्न करती है।

सौर सेल के *I-V* अभिलक्षण वक्र चित्र 28.15 में दर्शाए गए हैं। ये निर्देशांक अक्षों के चतुर्थ चतुर्थांश में बनाए गए हैं। ऐसा इसलिए है, क्योंकि सौर सेल धारा लेता नहीं है, उल्टे यह लोड को धारा प्रदान करता है।

पाठगत प्रश्न 28.5

1. सही विकल्प चुनें:

   (अ) जेनर डायोड कार्य करता है

   (i) अग्र अभिनति में

   (ii) उत्क्रम अभिनति में

(iii) दोनों में

(iv) दोनों में से किसी में नहीं।

(ब) जेनर डायोड

(i) एक अत्यधिक अपमिश्रित (doped) *p-n* संधि डायोड होता है।

(ii) एक अल्प अपमिश्रित *p-n* संधि डायोड होता है।

(iii) एक मध्यम अपमिश्ररित *p-n* संधि डायोड होता है।

(iv) सामान्य *p-n* संधि डायोड का ही दूसरा नाम है।

(स) जेनर डायोड का उपयोग होता है

(i) एक प्रवर्धक के रूप में।

(ii) एक दिष्टकारी के रूप में।

(iii) एक स्थिर धारा युक्ति के रूप में।

(iv) एक स्थिर वोल्टता युक्ति के रूप में।

2. रिक्त स्थान भरिये:

(क) जेनर डायोड ..... भंजन क्रिया विधि पर आधारित होता है।

(ख) फोटो डायोड ..... अभिनत होने पर कार्य करता है।

(ग) फोटो डायोड में *p-n* संधि ..... अर्द्धचालक पदार्थ से बनायी जाती है।

(घ) एल ई डी (LED) आवर्त सारणी के ..... चालक तत्वों से बनाये जाते हैं।

(ङ) प्रकाश उत्सर्जी डायोड (LED) ..... अभिनति में कार्य करते हैं।

(च) एल ई डी (LED) के प्रतीक चिह्न में तीर प्रकाश के ..... को दर्शाता है।

(छ) एल ई डी (LED) में प्रकाश का उत्सर्जन इलेक्ट्रॉन विवरों (Holes) के ..... के कारण होता है।

(ज) एल ई डी (LED) ..... के सिद्धान्त पर आधारित होता है।

(ज) सौर सेल ..... प्रभाव पर आधारित होते हैं।

(झ) जब वर्जित बैण्ड ऊर्जा से ..... ऊर्जा का सूर्य का प्रकाश सौर सेल पर डाला जाता है तो सौर ऊर्जा ..... हो जाती है तथा होल व इलेक्ट्रॉनों के युग्म उत्पन्न होते हैं।

28.7 ट्रांजिस्टर – *pnp* एवं *npn*

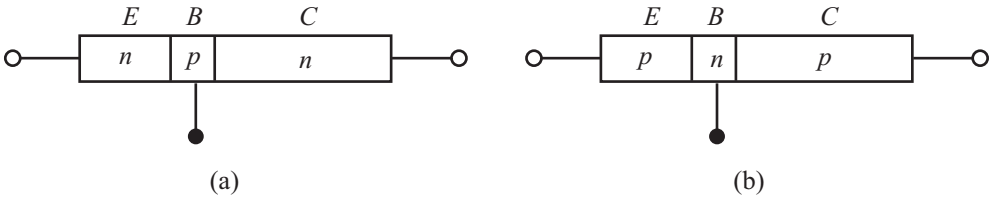
पिछले अनुच्छेद में आपने *p-n* संधि डायोड का अध्ययन किया है जो कि धारा को केवल एक दिशा में ही प्रवाहित होने देता है। इस कारण से इसका उपयोग दिष्टकारी (Rectifier) एवं संसूचक (Detector) के रूप में ही सम्भव है। द्वि-ध्रुवीय संधि ट्रांजिस्टर (Bipolar Junction Transistor) एक अन्य अत्यन्त उपयोगी अर्द्धचालक युक्ति है।

ट्रांजिस्टर का आविष्कार जॉहन बार्डीन, वाल्टर ब्रटेन तथा विलियम शॉक्ले ने 1948 में अमेरिका की सुप्रसिद्ध बैल प्रयोगशाला में किया था। इससे इलेक्ट्रॉनिक उद्योग के क्षेत्र में नयी क्रांति का सूत्रपात हुआ। इसके उपयोग दैनिक जीवन में इस्तेमाल की जाने वाली वस्तुओं जैसे गैस-लाइटर व खिलौनों से लेकर प्रवर्धकों (Amplifiers) तथा रेडियो व टी वी सैटों तक में हैं। एक स्विच-युक्ति के रूप में ये सड़क पर यातायात को नियन्त्रित करने में उपयोग किये जाते हैं तो कम्प्यूटरों, अन्तरिक्षयानों तथा संचार व्यवस्थाओं की ऊर्जा प्रणालियों में भी इनका उपयोग है।

ट्रांजिस्टर मूलत: सिलिकन अथवा जर्मेनियम क्रिस्टल से बने होते हैं जिनके p तथा n प्रकार के क्षेत्र चित्र 28.16 में दर्शाये गए हैं। इन तीन क्षेत्रों को उत्सर्जक (E), आधार (B), तथा संग्राहक (C) कहा जाता है। आधार (B) मध्य में स्थित होता है तथा उत्सर्जक (E) व संग्राहक (C) बाहरी क्षेत्र है।

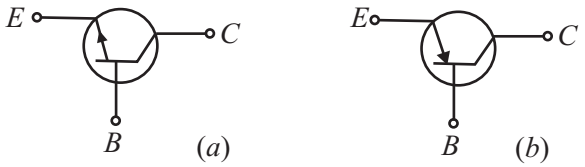
ध्यान दें कि उत्सर्जक एवं संग्राहक एक ही प्रकार (n अथवा p) के अर्द्धचालक होते हैं तथा संग्राहक तीनों में सबसे बड़े आकार का होता है।

आधार (B) उत्सर्जक से संग्राहक के बीच धारा प्रवाह को नियन्त्रित करता है। यह 'नियंत्रण' डायोड में संभव नहीं है। मिश्रित अपदूश्यों के दृष्टिकोण से ट्रांजिस्टर दो प्रकार के होते हैं–*n-p-n* तथा *p-n-p*। सामान्यत: अपमिश्रण का स्तर उत्सर्जक में सर्वाधिक, संग्राहक में मध्यम तथा आधार में से सबसे कम होता है।



चित्र 28.16: (a) *n-p-n* एवं (b) *p-n-p* ट्रांजिस्टर

ट्रांजिस्टर के विभिन्न क्षेत्रों के नाम से उनके कार्य के बारे में पता चलता है। *n-p-n* ट्रांजिस्टर में बहुसंख्यक आवेश वाहक (इलेक्ट्रॉन) उत्सर्जक से आधार में प्रविष्ट होते हैं। बहुत छोटे आकार तथा अत्यंत अल्प अपमिश्रण के कारण आधार अधिकांश इलेक्ट्रॉनों को संग्राहक की ओर जाने देता है। अपने बड़े आकार के कारण संग्राहक में अन्य दो क्षेत्रों की तुलना में अधिक ऊष्मा उत्पन्न होती है।

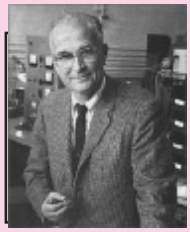


चित्र 28.17 (a) *n-p-n*, (b) *p-n-p* ट्रांजिस्टरों के प्रतीक

चित्र 28.17 में *n-p-n* व *p-n-p* ट्रांजिस्टरों का सांकेतिक निरूपण किया गया है। वाणाग्र परम्परागत धारा-प्रवाह की दिशा को इंगित करता है। आप शायद यह जानना चाहेंगे कि *n-p-n* ट्रांजिस्टर में वाणाग्र बाहर की ओर तथा *p-n-p* ट्रांजिस्टर अन्दर की ओर क्यों होता है? *n-p-n* ट्रांजिस्टर में इलेक्ट्रॉन का प्रवाह उत्सर्जक से आधार की ओर होता है। अत: परम्परागत धारा-प्रवाह आधार से उत्सर्जक की ओर माना जाता है। इसी कारण से वाणाग्र आधार से बाहर की ओर है। *p-n-p* ट्रांजिस्टर में उत्सर्जक धारा होलों के उत्सर्जक से आधार की ओर प्रवाह के कारण होती है। इस प्रकार परम्परागत धारा उत्सर्जक से आधार की ओर प्रवाहित होती है।

ट्रांजिस्टर द्वि-ध्रुवीय युक्ति है, अत: इसकी क्रिया बहुसंख्यक एवं अल्पसंख्यक दोनों प्रकार के आवेश वाहकों पर निर्भर करती है।

विलियम ब्रैडफोर्ड शॉक्ले
(1910 – 1989)



इंग्लैण्ड में जन्में अमेरिकी भौतिकीविद् डब्ल्यू. बी. शॉक्ले उन तीन वैज्ञानिकों में से एक थे जिनको ट्रांजिस्टर के आविष्कार के लिए सन् 1956 में भौतिकी का नोबेल पुरस्कार मिला था। मूलत: ठोस प्रावस्था भौतिक शास्त्री शॉक्ले ने अर्द्धचालकों में बैण्डों की सैद्धान्तिक समझ, मिश्रधातुओं में व्यवस्था एवं अव्यवस्था, निर्वात ट्यूबों का सिद्धान्त, अवस्थिति भ्रंश (Dislocation) का सिद्धान्त तथा लौह चुम्बकीय परिक्षेत्रों (Domains) जैसे विषयों के विकास में महत्वपूर्ण योगदान किया। वे सचमुच इलेक्ट्रॉनिकीय क्रांति के अगुआ थे।

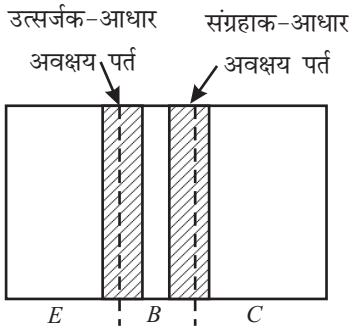
28.7.1 कार्यविधि सिद्धान्त

आप *p-n* संधि की क्रिया-विधि से परिचित हो चुके हैं। अब हम ट्रांजिस्टर की क्रिया-विधि के सिद्धान्त को समझेंगे। पहले *n-p-n* ट्रांजिस्टर की चर्चा की जाएगी क्योंकि इसका उपयोग ज्यादा किया जाता है। जब तक ट्रांजिस्टर को कोई वोल्टता न दी जाय, मुक्त इलेक्ट्रॉनों के संधियों के पार विसरण से चित्र 28.18 के अनुसार दो अवक्षय पर्त बन जाती है। प्रत्येक अवक्षय-पर्त के लिए 25°C पर विभव प्राचीर का मान सिलिकन ट्रांजिस्टर में 0.7V तथा जर्मोनियम ट्रांजिस्टर में 0.3V होता है। जैसा कि आपको विदित है कि सिलिकन ट्रांजिस्टर अधिक वोल्टता रेटिंग, धारा रेटिंग तथा कम ताप सहनशीलता के कारण जर्मेनियम ट्रांजिस्टर की तुलना में अधिक उपयोग में लाए जाते हैं। इस चर्चा में सिलिकन ट्रांजिस्टर की ही बात करेंगे जब तक कि किसी अन्य का उल्लेख न हो।

ट्रांजिस्टर के तीनों क्षेत्रों में अपमिश्रण का स्तर अलग-अलग होता है, अत: अवक्षय पर्त की चौड़ाई भी भिन्न होती है। यदि किसी क्षेत्र में अत्यधिक अपमिश्रण किया जाये तो संधि के समीप आयनों की सघनता भी अधिक होगी। इसके परिणामस्वरूप अवक्षय पर्त पतली होगी। यही बात विलोमत: भी कही जा सकती है। उत्सर्जक एवं संग्राहक की तुलना में आधार अत्यन्त कम अपमिश्रित होता है। अत: अवक्षय पर्त इसमें काफी अन्दर तक होती है, जबकि उत्सर्जक

अथवा संग्राहक में इसका बेधन काफी कम होता है (चित्र 28.18)। इसके अतिरिक्त उत्सर्जक अवक्षय पर्त संग्राहक अवक्षय पर्त की तुलना में संकीर्ण होती है।

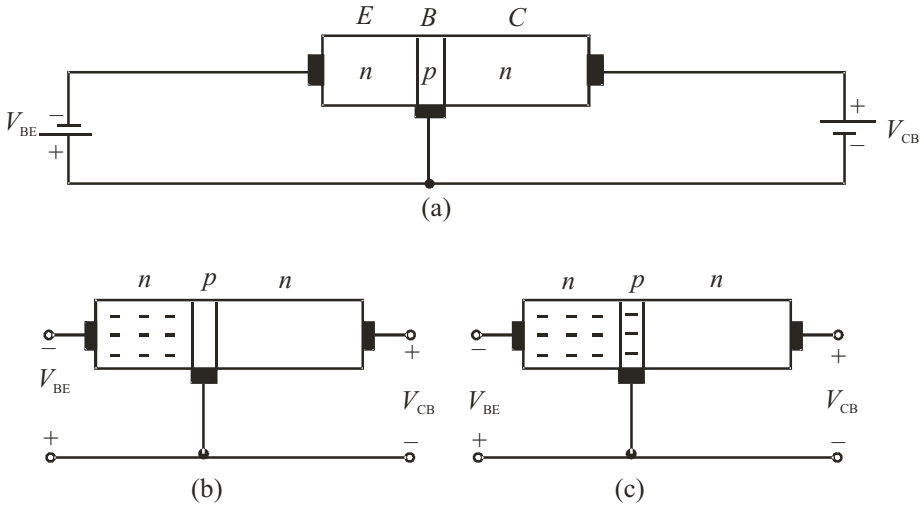
ट्रांजिस्टर के ठीक तरीके से कार्य करने के लिए यह आवश्यक है कि इसके सिरों के मध्य उचित वोल्टता प्रदान की जाय। इसी प्रक्रिया को ट्रांजिस्टर की अभिनति कहते हैं।

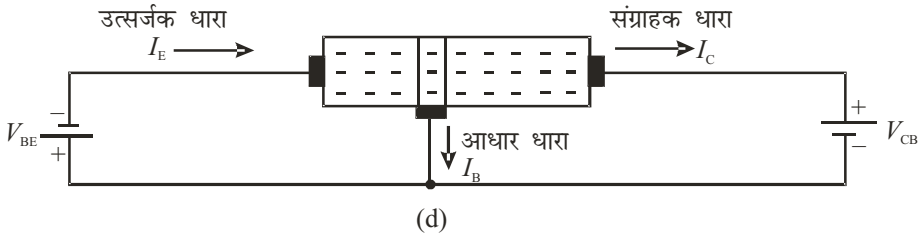


चित्र 28.18 : ट्रांजिस्टर में अवक्षय पर्तें जब उसे कोई वोल्टता न दी जाए।

n-p-n ट्रांजिस्टर

*n-p-n*ट्रांजिस्टर की अभिनति विधि चित्र 28.19(a) में दर्शायी गयी है। **उत्सर्जक-आधार संधि अग्र अभिनत, जबकि संग्राहक-आधार संधि उत्क्रम अभिनत है।** अत: ऐसा प्रतीत हो सकता है कि उत्सर्जक धारा बहुत अधिक तथा संग्राहक-धारा बहुत कम होगी। किन्तु देखा यह गया है कि संग्राहक धारा उत्सर्जक धारा के लगभग बराबर होती है। अब हम इसका कारण समझने का प्रयास करते हैं। अग्र अभिनत उत्सर्जक से मुक्त-इलेक्ट्रॉन विभव-प्राचीर को पार कर आधार में प्रवेश करते हैं (चित्र 28.19(b) को देखें)। जब V_{BE} विभव प्राचीर (0.6 V से 0.7 V सिलिकन ट्रांजिस्टर में) से अधिक हो जाता है तो इलेक्ट्रॉन आधार क्षेत्र में प्रवेश कर जाते हैं, जैसा कि चित्र 28.19(c) में दर्शाया गया है। एक बार आधार में पहुंचने पर ये इलेक्ट्रॉन या तो पतले आधार से होते हुए बाहर आधार की लीड तक पहुंचते है अथवा संग्राहक संधि को पार कर संग्राहक क्षेत्र में अनुगमन करते हैं। आधार धारा जिसे पुनर्संयोजन धारा भी कहते हैं, अत्यन्त अल्प होती है क्योंकि आधार पतला तथा अल्प अपमिश्रित होता है और उसमें बहुत कम होल होते हैं। $V_{BE} > 0.7$ V के लिए अधिकतर इलेक्ट्रॉन संग्राहक की अवक्षय पर्त में विसरित होते हैं इस पर्त के मुक्त इलेक्ट्रॉन अवक्षय पर्त क्षेत्र द्वारा धकेले जाने से संग्राहक भाग [चित्र 28.19(d)] में अनुगमन करते हुए बाहर संग्राहक की लीड तक पहुंचते हैं। इस प्रकार स्रोत के ऋणात्मक सिरे से इलेक्ट्रॉन की स्थिर धारा निकल कर उत्सर्जक भाग में प्रवेश करती है।





(d)

चित्र 28.19: n-p-n ट्रांजिस्टर जब (a) उत्सर्जक अग्र अभिनत तथा संग्राहक उत्क्रम अभिनत हो (b) उत्सर्जक में मुक्त इलेक्ट्रॉन (c) आधार में प्रविष्ट मुक्त इलेक्ट्रॉन (d) आधार के रास्ते संग्राहक जाते हुए मुक्त इलेक्ट्रॉन

अग्र अभिनति के कारण इलेक्ट्रॉन आधार क्षेत्र में प्रवेश करते हैं। लगभग समस्त इलेक्ट्रॉन आधार से गुजरते हुए संग्राहक की अवक्षय पर्त में विसरण करते हैं। अवक्षय पर्त क्षेत्र (Deplition layer field) इलेक्ट्रॉनों की स्थिर धारा को संग्राहक भाग में भेजता है। अधिकतर ट्रांजिस्टरों में उत्सर्जक से निकले 95 प्रतिशत से अधिक इलेक्ट्रॉन संग्राहक में प्रवाहित होते हैं तथा 5 प्रतिशत से भी कम आधार लीड तक पहुंचते हैं।

यहाँ यह निष्कर्ष नहीं निकाला जाना चाहिए कि दो पृथक डायोडों को एक दूसरे से उलटे जोड़कर ट्रांजिस्टर बनाया जा सकता है। ऐसे परिपथ में प्रत्येक डायोड में दो अपमिश्रित भाग तथा सम्पूर्ण परिपथ में चार अपमिश्रित भाग हो जायेंगे। इसके अतिरिक्त आधार भी वैसा नहीं होगा जैसा ट्रांजिस्टर में होता है। **ट्रांजिस्टर की उचित कार्य-विधि के लिए आवश्यक यह है कि अत्याधिक अपमिश्रित उत्सर्जक एवं मध्यम अपमिश्रित संग्राहक के मध्य पतला व अल्प अपमिश्रित आधार हो।** मुक्त इलेक्ट्रॉन आधार को लघु समयान्तराल में ही पार कर संग्राहक में पहुंच जाते हैं।

संग्राहक धारा (I_c) व उत्सर्जक-धारा (I_E) में संबंध धारा-लाभ (α) की भाषा में व्यक्त किया जाता है–

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} . \qquad (28.1)$$

यहाँ α का मान एक के लगभग बराबर, वास्तव में एक से बहुत थोड़ा ही कम होता है।

इसी प्रकार संग्राहक धारा एवं आधार का संबंध भी यूनानी भाषा के अक्षर बीटा द्वारा व्यक्त किया जाता है–

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \qquad (28.2)$$

बीटा ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में धारा-लाभ को व्यक्त करता है। बीटा (β) का मान एक से बहुत अधिक होता है।

संग्राहक धारा व आधार धारा का योग ही उत्सर्जक धारा होता है, अत:

$$I_E = I_c + I_B$$

सम्पूर्ण समीकरण को I_C से विभाजित करने पर,

$$\frac{I_E}{I_C} = 1 + \frac{I_B}{I_C}. \qquad (28.3)$$

α एवं β के पदों में, इसे हम लिख सकते हैं–

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

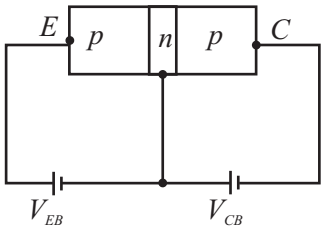
अथवा

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \qquad (28.4)$$

अब हम देखेंगे कि *p-n-p* ट्रांजिस्टर *n-p-n* ट्रांजिस्टर से किस प्रकार भिन्न है:

p-n-p ट्रांजिस्टर

चित्र 28.20 सक्रिय क्षेत्र में क्रिया के लिए अभिनत ट्रांजिस्टर दर्शाया गया है। ध्यान दें कि *n-p-n* ट्रांजिस्टर के स्थान पर *p-n-p* ट्रांजिस्टर लेने पर बैटरी के सिरे उलट दिये हैं।



चित्र 28.20 : सक्रिय क्रिया के लिए अभिनत *p-n-p* ट्रांजिस्टर

पूर्व की भांति, उत्सर्जक-आधार संधि V_{EB} वोल्टता की बैटरी द्वारा अभिनत है तथा संग्राहक आधार संधि V_{CB} वोल्टता की बैटरी द्वारा उत्क्रम अभिनत है। उत्क्रम अभिनत संग्राहक आधार संधि की तुलना में उत्सर्जक आधार संधि का प्रतिरोध बहुत कम है क्योंकि यह अग्र अभिनत है। अत: उत्सर्जक आधार संधि को अल्प अग्र अभिनति वोल्टता (0.6V) दी जाती है, जब कि संग्राहक आधार संधि की दी गयी उत्क्रम अभिनति वोल्टता कहीं अधिक (9V) होती है।

उत्सर्जक-आधार संधि की अग्र अभिनति उत्सर्जक (*p*-क्षेत्र) में विद्यमान बहुसंख्यक वाहकों अर्थात् होलों के आधार (*n*-क्षेत्र) में विसरण करती है क्योंकि वे बैटरी के धनात्मक सिरे से प्रतिकर्षित होते हैं। आधार की चौड़ाई बहुत कम तथा अपमिश्रण बहुत हल्का होने के कारण उसमें प्रवेश करने वाले होलों में से बहुत कम (दो से पाँच प्रतिशत) ही इलेक्ट्रॉनों के साथ पुनर्संयोजन करते है जबकि 95 से 98 प्रतिशत ही संग्राहक भाग में पहुंच जाते हैं। संग्राहक आधार क्षेत्र के उत्क्रम अभिनत होने के कारण वहाँ पहुंचने वाले होल संग्राहक के ऋणात्मक विभव से आकर्षित होते हैं जिससे संग्राहक धारा बढ़ जाती है। अत: उत्सर्जक धारा में वृद्धि संग्राहक धारा में भी वृद्धि करती है। 28.1 से समीकरण 28.4 तक यहाँ भी सत्य हैं।

पाठगत प्रश्न 28.6

1. सही विकल्प चुनिए:
   (a) ट्रांजिस्टर के प्रतीक में वाणाग्र की दिशा होती है–
      (i) उत्सर्जक क्षेत्र में होलों के प्रवाह की ओर।
      (ii) उत्सर्जक क्षेत्र में इलेक्ट्रॉनों के प्रवाह की ओर।
      (iii) उपर्युक्त क्षेत्र में बहुसंख्य आवेश वाहकों के प्रवाह की ओर।
      (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।
   (b) ट्रांजिस्टर में प्राय: की जाने वाली अभिनति में उत्सर्जक धारा–
      (i) संग्राहक धारा से कम होती है।
      (ii) आधार धारा तथा संग्राहक धारा के योग के बराबर होती है।
      (iii) आधार धारा के बराबर होती है।
      (iv) उपर्युक्त में से कोई नहीं।
2. रिक्त स्थान भरिये:
   (a) ट्रांजिस्टर में ..... क्षेत्र तथा ..... संधि होती हैं।
   (b) ट्रांजिस्टर में ..... की चौड़ाई सबसे कम होती है।
   (c) उत्सर्जक क्षेत्र ट्रांजिस्टर में ..... अपमिश्रिण होता है जबकि ..... क्षेत्र सबसे कम अपमिश्रित होता है।
   (d) ट्रांजिस्टर में संग्राहक का आकार ..... तथा अपमिश्रिण ..... होता है।
   (e) ट्रांजिस्टर तब सक्रिय क्षेत्र में कहा जाता है जब ..... संधि अग्र अभिनत तथा ..... संधि उत्क्रम अभिनत होती है।
   (f) दो प्रकार के ट्रांजिस्टर हैं: ..... तथा ..... ।

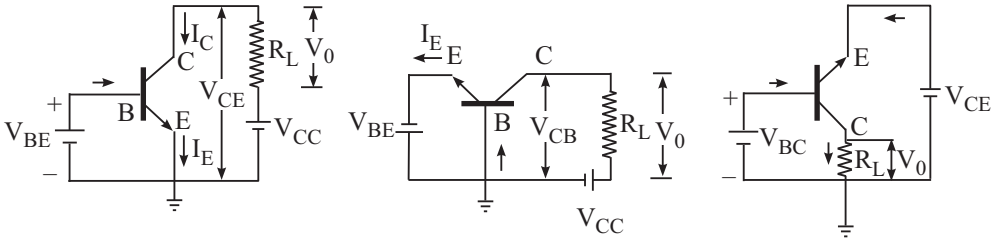
अब आप ट्रांजिस्टर के कार्य सिद्धांत के बारे में सीख चुके हैं। आइये देखें कि किसी ट्रांजिस्टर को हम किन विभिन्न विन्यासों में उपयोग कर सकते हैं।

28.7.2 ट्रांजिस्टर विन्यास

ट्रांजिस्टर दो 'पोर्ट' वाली युक्ति है। निवेश मिलने पर वह एक निर्गम प्रदान करता है। निवेश एवं निर्गम में प्रत्येक के लिए दो टर्मिनलों की आवश्यकता है। तीन टर्मिनलों में से एक को उभयनिष्ठ कर दें तो ट्रांजिस्टर में यह आवश्यकता पूर्ण हो जाती है। 28.21 के चित्रों में ट्रांजिस्टर के विभिन्न विन्यास दर्शाये गये है, जो निवेश एवं निर्गम के मध्य एक टर्मिनल को उभयनिष्ठ करने पर बनते हैं।

- जब उत्सर्जक निवेशी एवं निर्गम परिपथों के बीच उभयनिष्ठ हो तो उभयनिष्ठ-उत्सर्जक (*CE*) विन्यास बनता है [चित्र 28.21 (a)]।
- जब आधार निवेशी एवं निर्गम परिपथों के बीच उभयनिष्ठ हो तो उभयनिष्ठ आधार (CB) विन्यास बनता है [चित्र 28.21(b)]।
- जब संग्राहक निवेशी एवं निर्गम परिपथों के बीच उभयनिष्ठ हो तो उभयनिष्ठ संग्राहक (CC) विन्यास बनता है [चित्र 28.21(c)]।

तीनों विन्यासों में ट्रांजिस्टर अभिलक्षण भिन्न-भिन्न होते हैं। CE विन्यास सबसे अधिक प्रयुक्त होता है क्योंकि यह उच्च वोल्टता-लाभ, धारा-लाभ एवं शक्ति-लाभ प्रदान करता है। CB विन्यास में ट्रांजिस्टर को नियत धारा स्रोत के रूप में उपयोग किया जा सकता है, जबकि CC विन्यास अक्सर 'प्रतिबाधा-मैचिंग' (Impedence Matching) के रूप में इस्तेमाल होता है।



(a) (b) (c)

चित्र 28.21: ट्रांजिस्टर विन्यास (a) CE, (b) CB, तथा (c) CC

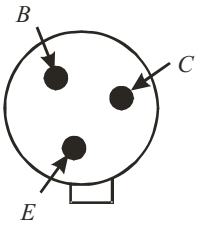
प्रत्येक विन्यास के लिए अभिलक्षण खींचे जा सकते हैं: (a) निवेशी अभिलक्षण, (b) निर्गम अभिलक्षण, (c) पारस्परिक हस्तान्तरण अभिलक्षण।

सारणी 28.2: ट्रांजिस्टर के विभिन्न अभिलक्षणों से संबंधित भौतिक राशियाँ

विन्यास	निवेशी अभिलक्षण	निर्गम अभिलक्षण	पारस्परिक (हस्तान्तरण) अभिलक्षण	महत्वपूर्ण ट्रांजिस्टर नियंतांक
CE	V_{BE} एवं I_B में जबकि V_{CE} नियत	V_{CE} एवं I_C में जबकि I_B नियत	I_B एवं I_C में	धारा-लाभ (β)
CB	V_{BE} एवं I_E में जबकि V_{CB} नियत	V_{CB} एवं I_C जबकि I_E नियत	I_E एवं I_C	धारा-लाभ α
CC	V_{CB} एवं I_B में जबकि V_{CE} नियत	V_{CE} एवं I_E जबकि I_B नियत	I_B एवं I_E	

ट्रांजिस्टर को व्यवहारिक प्रयोग में लाने से पूर्व उसके आधार, उत्सर्जक व संग्राहक के सिरों (leads) की पहचान आवश्यक है। इसके लिए निम्नलिखित विधि अपनायी जाती है:

धातु की टोपी (cap) पर छोटे से खाचे (Notch) को देखिये। इसके समीप स्थित सिरा (टर्मिनल) ही उत्सर्जक है। अन्य दो भागों (टर्मीनलों) की पहचान के लिए ट्रांजिस्टर को उलटिए। आधार एवं संग्राहक को चित्र 28.22 के अनुसार आसानी से पहचाना जा सकता है।



चित्र 28.22: ट्रांजिस्टर के भागों की पहचान

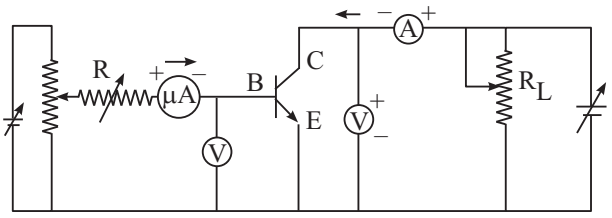
p-n संधि की तरह ट्रांजिस्टरों का भी दो अक्षर व एक संख्या से बना एक 'कोड' होता है। प्रथम अक्षर प्रयुक्त पदार्थ को इंगित करता है तथा दूसरा अक्षर मुख्य अनुप्रयोग बताता हैं। C श्रृव्य आवृत्ति ट्रांजिस्टर, D शक्ति ट्रांजिस्टर, F रेडियो आवृति ट्रांजिस्टर को प्रदर्शित करते हैं। संख्या क्रमांक निर्माता द्वारा पहचान के लिए निर्धारित अंक होते हैं। उदाहरणत: AC 125 AF (श्रृव्य आवृत्ति) अनुप्रयोग के लिए जर्मेनियम ट्रांजिस्टर का कोड है।

28.8 ट्रांजिस्टर अभिलक्षण

जैसा कि पहले बताया गया है कि ट्रांजिस्टर की क्रियाविधि का अध्ययन निवेशी एवं निर्गम *I-V* अभिलक्षणों से किया जा सकता है। ये अभिलक्षण विशिष्ट होते हैं तथा विन्यास पर निर्भर करते हैं। सर्वप्रथम हम CE विन्यास का अध्ययन करेंगे।

28.8.1 *npn* ट्रांजिस्टर का उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास

जब उज्सर्जक निवेशी एवं निर्गम परिपथों के बीच उभयनिष्ठ हो तो *CE* अभिलक्षण ट्रांजिस्टर के धारा एवं वोल्टता के मध्य संबंध को व्यक्त करते हैं। *npn* ट्रांजिस्टर के *CE* अभिलक्षणों के लिए परिपथ चित्र 28.23 में प्रदर्शित है। V_{BB} 0 – 3 *V* की परिवर्तनशील (Variable) *dc* (दिष्ट) आपूर्ति है तथा V_{ce} 0 – 15*V* की परिवर्तनशील *dc* आपूर्ति (Supply) है। R_1 एवं R_2 विभव विभाजक है तथा *R* परिवर्तनशील प्रतिरोध (Variable Resistance) हैं। यह आधार व उत्सर्जक के मध्य वोल्टता V_{BE} को नियन्त्रित करने के लिए प्रयोग में लाया गया है।

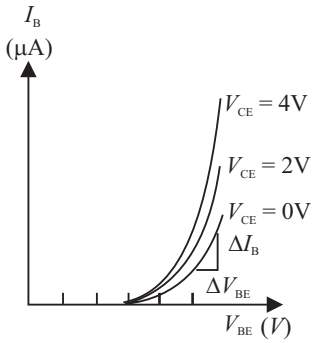


चित्र 28.23 : ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में निवेशी एवं निर्गम अभिलक्षणों के लिए परिपथ

निवेशी अभिलक्षण

CE विन्यास में निवेशी अभिलक्षण V_{BE} को परिवर्तित करने पर I_B में परिवर्तन प्रदर्शित करते हैं जबकि V_{CE} को नियत रखा गया हो। अभिलाक्षणिक वक्र खींचने के लिए *R* एवं R_1 की

सहायता से V_{CE} को स्थिर रखते हुए V_{BE} में धीरे-धीरे परिवर्तन किया जाता है तथा I_B के समवर्ती मान आधार से जुड़े माइक्रोएम्पियरमीटर द्वारा मापे जाते हैं। चित्र 29.24 में *npn* ट्रांजिस्टर का CE विन्यास में सामान्य अभिलाक्षणिक वक्र दर्शाया गया है।



चित्र 28.24: npn ट्रांजिस्टर का CE विन्यास में निवेशी अभिलाक्षणिक वक्र

ध्यान दें कि V_{CE} के निश्चित मान के लिए, वक्र *p-n* संधि के *I-V* अभिलाक्षणिक वक्र की भांति ही है। $V_{BE} < 0.5V$, पर I_B में तीव्रता से वृद्धि होती है।

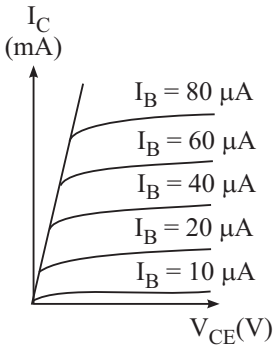
निवेशी अभिलक्षणों की प्रवणता (ढलान) के व्युत्क्रम (Reciprocal) से ट्रांजिस्टर का निवेशी प्रतिरोध ज्ञात किया जा सकता है जो कि आधार-उत्सर्जक वोल्टता में अल्प परिवर्तन एवं उत्पन्न आधार-धारा में परिवर्तन के अनुपात के बराबर होता है जबकि संग्राहक-उत्सर्जक वोल्टता नियत हो:

$$R_{ie} = \left.\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\right|_{V_{BE}} \qquad (28.5)$$

सामान्यतया R_{ie} का मान 20-100Ω के मध्य होता है। यहाँ ध्यान देने योग्य तथ्य है कि वक्र रेखीय नहीं है, अत: निवेशी प्रतिरोध का मान मापन-बिन्दु (क्रियाकारी-बिन्दु) के बदलने पर बदल जाता है। V_{CE} के बढ़ने पर वक्र ऊर्ध्वाधर (Vertical) हो जाता है, अत: R_{ie} घटता जाता है।

निर्गम अभिलक्षण

निवेशी अभिलाक्षणिक वक्र V_{CE}, के साथ संग्राहक धारा I_C में परिवर्तन को चित्रित करते है जबकि आधार-धारा I_B स्थिर रखी गयी हो। निर्गम अभिलक्षण जानने के लिए I_B को R_1 एवं R के समायोजन से स्थिर रखते हैं। V_{CE} को 0.5V के अन्तराल में 0 से 10V तक R_2 में परिवर्तन करके बढ़ाते जाते हैं तथा समवर्ती $I_B = 40\ \mu A, 60\ \mu A, 80\ \mu A$ आदि पर प्राप्त किये जा सकते हैं। यहाँ यह सावधानी रखना परम आवश्यक है कि I_B का मान रेटिंग के मान से कभी अधिक न होने पाये।



चित्र 28.25: npn ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में निर्गम अभिलाक्षणिक वक्र

इस विन्यास के निवेशी अभिलक्षाण चित्र 28.25 में दर्शाए गए हैं।

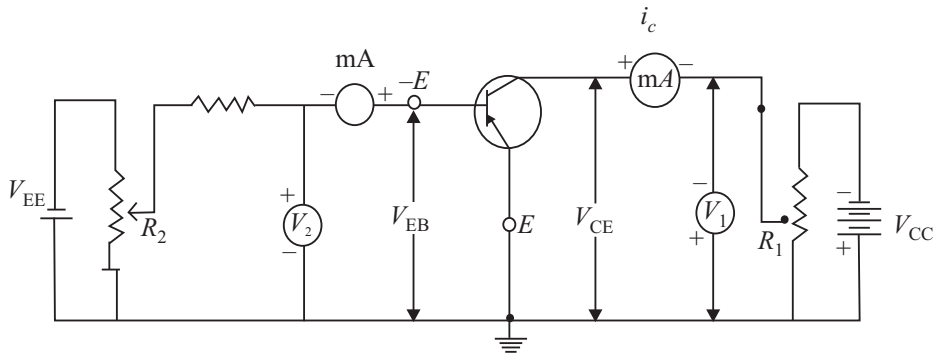
निवेशी अभिलक्षणों में आपने ध्यान दिया होगा कि I_B के निश्चित मान के लिए V_{CE} के बढ़ने पर I_C में परिवर्तन हो रहा है, तथा V_{CE} के निश्चित मान के लिए I_B के बढ़ने पर I_C भी बढ़ जाती है। इन अभिलक्षणों से निर्गम प्रतिचालकता या एडमिटैन्स (Admittance) h_{oe} ज्ञात की जा सकती है:

$$h_{oe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \qquad (28.6)$$

यहाँ Δ न्यून परिवर्तन को इंगित करता है।

28.8.2 ट्रांजिस्टर का उभयनिष्ठ उत्सर्जक (*CE*) विन्यास

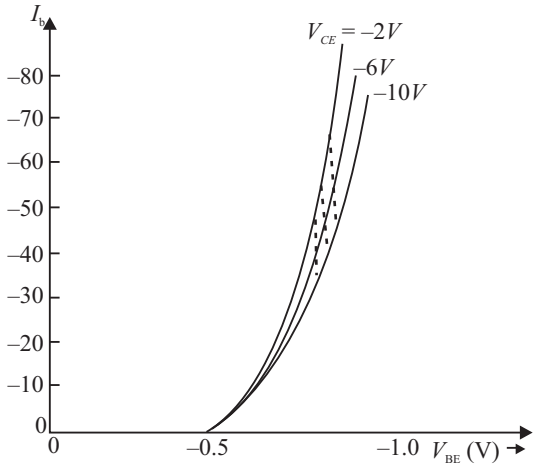
पिछले अनुच्छेद में आपने *n-p-n* ट्रांजिस्टर के उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास में निवेशी एवं निर्गम अभिलक्षण जाने। अब हम *p-n-p* ट्रांजिस्टर पर विचार करेंगे। चित्र 28.26 में *p-n-p* ट्रांजिस्टर के CE अभिलक्षणों के लिए परिपथ दर्शाया गया है। ट्रांजिस्टर सक्रिय क्षेत्र में क्रिया करने के लिए अभिनत है। माइक्रोएमीटर एवं वोल्टमीटर आधार-उत्सर्जक परिपथ में क्रमशः आधार-धारा (I_B) एवं आधार व उत्सर्जक के बीच वोल्टता के मापन के लिए लगाये गये हैं। इसी प्रकार मिलीएमीटर व वोल्टमीटर संग्राहक-उत्सर्जक परिपथ में क्रमशः संग्राहक धारा एवं संग्राहक व उत्सर्जक के मध्य वोल्टता मापन के लिए जोड़े गये हैं।



चित्र 28.26: *p-n-p* ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में निवेशी व निर्गम अभिलक्षण जानने के लिए परिपथ

निवेशी अभिलक्षण

निवेशी अभिलक्षण V_{CE} के स्थिर मानों के लिए V_{BE} तथा I_B के मध्य ग्राफ हैं। निवेशी अभिलक्षण खींचने के लिए उत्सर्जक-संग्राहक परिपथ में विभव-विभाजक इस प्रकार समायोजित किया जाता है कि वोल्टमीटर स्थिर मान दर्शाता है। तदुपरान्त उत्सर्जक-आधार परिपथ का विभव-विभाजक इस प्रकार समायोजित किया जाता है कि आधार-उत्सर्जक वोल्टता शून्य हो। इस स्थिति में आधार-धारा भी शून्य पायी जाती हैं। V_{CE} को स्थिर रखते हुए V_{BE} को धीरे-धीरे बढ़ाया जाता है तथा आधार-धारा में परिवर्तित को माइक्रोएमीटर द्वारा ज्ञात करते हैं। जैसे $V_{CE} = -2V$ पर



चित्र 28.27 : एक विशिष्ठ *p-n-p* ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में निवेशी अभिलक्षण

निवेशी अभिलक्षण खींचने हों तो उत्सर्जक-संग्राहक परिपथ का वोल्टमीटर 2V प्रदर्शित करे। तब उत्सर्जक-आधार परिपथ के विभव-विभाजक को V_{BE} के शून्य मान के लिए समायोजन करते हैं। इसी प्रकार $V_{CE} = -6V, -10V$ इत्यादि के लिए ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में निवेशी अभिलाक्षणिक वक्र बनाये जा सकते हैं। चित्र 28.27 में CE विन्यास के निवेशी अभिलक्षण दर्शाये गये हैं। जैसा कि देखा जा सकता है कि इन निवेशी अभिलक्षणों की प्रकृति p - n संधि की अग्र-अभिलक्षणों के समान ही है। जब तक आधार-वोल्टता का मान विभव प्राचीर (सिलिकन ट्रांजिस्टर में 0.7V के लगभग) से कम रहता है तब तक आधार-धारा शून्य रहती है। जैसे ही आधार वोल्टता विभव प्राचीर से अधिक होने लगती है, धारा भी शुरू में धीरे -धीरे बढ़ने लगती है और फिर तीव्रता से बढ़ती है।

आपको स्मरण होगा कि ये वक्र *n-p-n* ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में अभिलाक्षणिक वक्रों के समान ही हैं।

निवेशी अभिलाक्षणिक वक्रों की प्रवणता (Gradient) या ढलान के व्युत्क्रम (Reciprocal) से ट्रांजिस्टर का a.c. निवेशी प्रतिरोध ज्ञात किया जा सकता है।

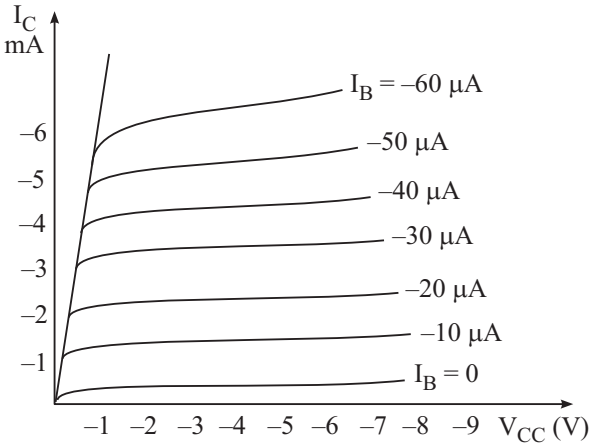
ट्रांजिस्टर के *CE* विन्यास में a.c. निवेशी प्रतिरोध,

$$R_{in} = \left.\frac{\Delta V_{BC}}{\Delta I_B}\right|_{V_{CE}}$$

इस विन्यास में R_{in} 1 KΩ की कोटि का होता है।

निर्गम अभिलक्षण

ये आधार-धारा विभिन्न स्थिर मानों के लिए संग्राहक-उत्सर्जक वोल्टता (V_{CE}) तथा संग्राहक धारा (I_C) के बीच के ग्राफ होते हैं। इन अभिलक्षणों को बनाने के लिए V_{CE} को शून्य रखकर V_{BE} को समायोजित किया जाता है ताकि आधार-उत्सर्जक परिपथ में माइक्रोएमीटर में प्रदर्शित धारा का मान स्थिर रहे। अब I_B को स्थिर रखते हुए V_{CE} को शून्य से आगे छोटे-छोटे अन्तरालों में बढ़ाया जाता है तथा समवर्ती संग्राहक धारा (I_c) का मान संग्राहक के साथ श्रेणी में लगे मिलीएमीटर से ज्ञात कर लिया जाता है।



चित्र 28.28: *p-n-p* ट्रांजिस्टर के CE विन्यास में निर्गम अभिलक्षण

$I_B = 50\mu$ पर निर्गम अभिलक्षण कैसे बनाए जाएं?

इसके लिए V_{BE} इस प्रकारा समायोजित किया जाता है मिलीएमीटर 50 μA पढ़ें। V_{CE} को धीरे-धीर बढ़ाकर I_c का समवर्ती मान ज्ञात किया जाता है। V_{CE} व I_c के बीच का ग्राफ $\boldsymbol{I_B = 50\ \mu A}$ पर निर्गम अभिलक्षण दर्शाता है। इसी प्रकार $I_B = 100\ \mu A, 200\ \mu A$ इत्यादि पर निवेशी अभिलक्षण प्राप्त किये जा सकते हैं।

उदाहरण 28.1: यदि किसी ट्रांजिस्टर का धारा-लाभ $\alpha = 0.98$ हो तो धारा-लाभ (β) की गणना कीजिए।

हल : $\beta = \dfrac{\alpha}{1-\alpha} = \dfrac{0.98}{1-0.98} = 49$

उदारहण 28.2 किसी ट्रांजिस्टर में उत्सर्जक धारा में 1mA का परिवर्तन संग्राहक-धारा को 0. 99 mA से परिवर्तित कर देता है तो a.c. धारा-लाभ बताइए।

हल : दिया है, $\Delta I_e = 1\ mA = 1 \times 10^{-3}\ A$ एवं $\Delta I_c = 0.99\ mA = 0.99 \times 10^{-3}\ A$

अत: ट्रांजिस्टर का a.c. धारा-लाभ, $\alpha = \dfrac{\Delta I_c}{\Delta I_e} = \dfrac{0.99 \times 10^{-3}\ A}{1 \times 10^{-3}\ A} = 0.99$

पाठगत प्रश्न 28.7

1. पाठ्य अन्तर्गामी प्रश्न

   (a) ..... वक्र एक निश्चित निर्गत वोल्टता के लिये निवेशी धारा तथा निवेशी वोल्टता के मध्य संबंध को प्रदर्शित करता है।

   (b) ..... वक्र एक निश्चित निवेशी धारा के लिए निर्गत धारा तथा निर्गत वोल्टता के मध्य संबंध को प्रदर्शित करता है।

   (c) उभयनिष्ठ उत्सर्जक विन्यास के ट्रांजिस्टर में ..... एवं ..... निर्गती सिरों का कार्य करते हैं।

   (d) उभयनिष्ठ आधार विन्यास वाले ट्रांजिस्टर में ..... एवं ..... निवेशी सिरे जबकि ..... एवं ..... निर्गती सिरे हैं।

आपने क्या सीखा

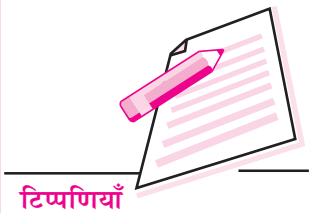
- अर्द्धचालक पदार्थों की चालकता का मान चालकों एवं अचालकों के मध्य होता है। उदाहरण–सिलिकन एवं जर्मेनियम।
- अर्द्धचालक दो प्रकार के होते हैं: नैज (शुद्ध) तथा बाह्य (अपमिश्रित अथवा मादित)।

- बाह्य अर्द्धचालक *p*-प्रकार (जिनमें तृतीय समूह की अशुद्धि से अपमिश्रण किया जाता है) अथवा *n*-प्रकार (जिसमें पंचम समूह की अशुद्धि का अपमिश्रण किया जाता है) के हो सकते हैं।
- *p-n* संधि डायोड एक *p*-प्रकार के तथा *n*-प्रकार के क्षेत्र से मिलकर बना होता है जिसके प्रत्येक सिरे पर एक टर्मीनल बनाया होता है।
- जब *p-n* संधि की रचना होती है तो विवरों (होलों) एवं इलेक्ट्रॉनों के संधि के पार विसरण से अवक्षय क्षेत्र उत्पन्न हो जाता है जिसमें कोई चलनशील आवेश वाहक नहीं होते।
- अवक्षय क्षेत्र के आयन संधि पर विभवान्तर उत्पन्न कर देते हैं जिसे विभव प्राचीर कहते हैं।
- अग्र अभिनत *p-n* संधि का अल्प प्रतिरोध होता है।
- उत्क्रम अभिनत *p-n* संधि का उच्च प्रतिरोध होता है।
- *p-n* संधि में धारा प्रवाह केवल एक दिशा में ही होता है।
- विभिन्न प्रकार के डायोड फोटो डायोड, प्रकाश उत्सर्जक डायोड, जेनर डायोड और सौर सेल हैं।
- फोटो डायोड परिपथ में हमेशा उत्क्रम अभिनति में संयोजित किया जाता है।
- ट्रांजिस्टर में तीन अलग-अलग क्षेत्र (उत्सर्जक, आधार एवं संग्राहक) तथा दो संधियां होती हैं। उत्सर्जक सर्वाधिक अपमिश्रित तथा आधार सबसे कम अपमिश्रित होता है। संग्राहक का आकार सबसे बड़ा जबकि आधार सबसे पतला होता है।
- ट्रांजिस्टर *p-n-p* अथवा *n-p-n* प्रकार का हो सकता है।
- ट्रांजिस्टर को तीन विन्यासों अथवा व्यवस्थाओं में जोड़ा जा सकता है-

  उभयनिष्ठ आधार (*CB*), उभयनिष्ठ उत्सर्जक (*CE*) अथवा उभयनिष्ठ संग्राहक (*CC*).
- ट्रांजिस्टर के अभिलक्षण विन्यास के अनुसार भिन्न-भिन्न होते हैं।
- *CE* विन्यास को अन्य विन्यासों के ऊपर वरीयता दी जाती है, क्योंकि, इसमें धारा-लाभ तथा 'वोल्टता-लाभ' दोनों ही उच्च होते हैं।

पाठांत प्रश्न

1. *p-n* संधि डायोड की महत्वपूर्ण विशेषताओं का वर्णन करिये।
2. *p-n* संधि डायोड में अवक्षय क्षेत्र की संरचना की व्याख्या करिये।
3. कौन से आवेश वाहक *p-n* संधि डायोड में अग्र धारा प्रवाहित करते हैं?



4. विभेद कीजिये:

   (i) अग्र अभिनति तथा उत्क्रम अभिनति,

   (ii) एवलांश भंजन तथा जेनर भंजन।

5. *p-n-p* तथा *n-p-n* ट्रांजिस्टरों की कार्यविधि समझाइए।

6. किसी ट्रांजिस्टर के लिए धारा-लाभ α एवं β को परिभाषित कीजिए।

7. यदि $\alpha = 0.998$, तो I_E में 4 mA. परिवर्तन के कारण I_C में परिवर्तन की गणना कीजिए।

पाठगत प्रश्नों के उत्तर

28.1

1. प्रत्येक 7.5×10^{15} 2. (ii)
3. अशुद्धि अथवा अपद्रव्य, अपमिश्रण (डोपिंग)
4. बहुसंख्यक 5. कम

28.2

1. (a) बहुसंख्यक आवेश वाहकों (b) अवक्षय क्षेत्र
   (c) 0.7 वोल्ट , 0.3 वोल्ट (d) अधिक, इलेक्ट्रॉनों
2. (a) (iii), (b) (iii), (c) (i)

28.3

3. (a) घटता है (b) बढ़ता है (c) बढ़ जाती है, भंजन वोल्टता
4. (a) (iv); (b) (iii)

28.4

2. (a) 0.7 वोल्ट, 0.3 वोल्ट (b) एक (c) μA
3. (a) (iii); (b) (ii)

28.5

1. (a) (ii), (b) (i), (c) (iv)

2. (a) जेनर, (b) उत्क्रम, (c) प्रकाश संवेदी,
(d) समूह तृतीय व पंचम, (e) अग्र, (f) उत्सर्जन,
(g) पुनर्संयोजन (h) विद्युत प्रदीप्ति (Electroluminiscence),
(i) फोटो वोल्टाइक (j) अधिक, अवशोषित।

28.6

1. (a) (i); (b) (ii)
2. (a) तीन, दो (b) आधार (c) सर्वाधिक, आधार,
(d) सर्वाधिक, मध्यम (e) उत्सर्जक–आधार, आधार–संग्रहाक
(f) *npn, pnp*

28.7

1. (a) निवेशी अभिलाक्षणिक (b) निर्गम अभिलाक्षणिक
(c) संग्राहक, उत्सर्जक (d) आधार एवं उत्सर्जक, आधार एवं संग्राहक

पाठांत प्रश्न

7. 3.992 mA