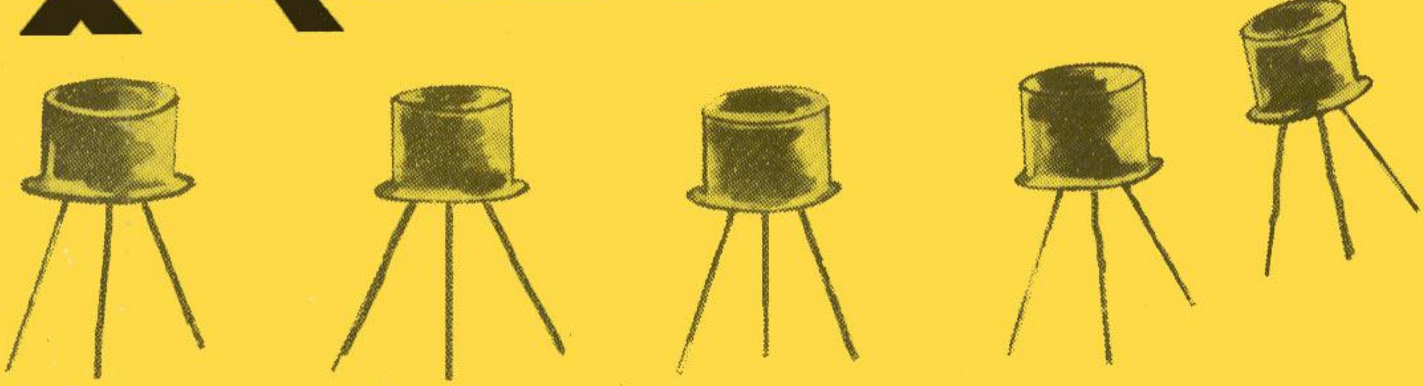
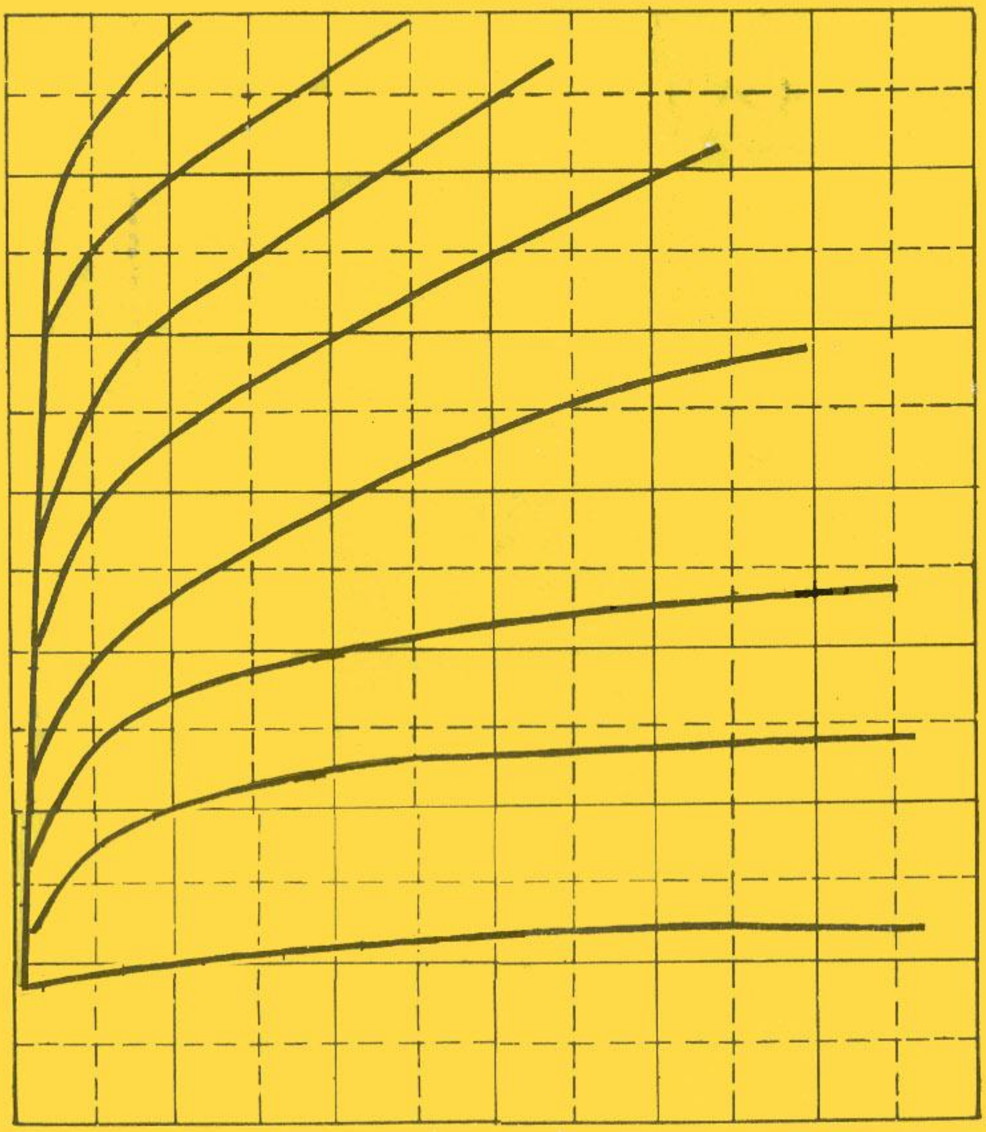
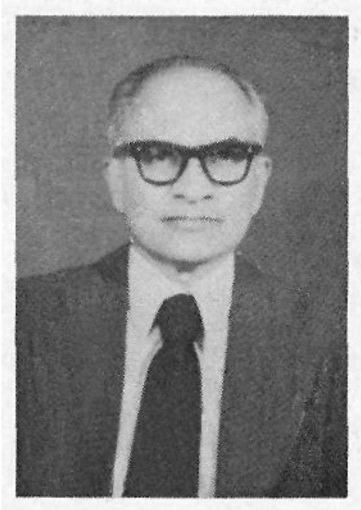
ट्रांझिस्टर





डॉ. पु. वि. खांडेकर

महाराष्ट्र राज्य साहित्य संस्कृति मंडळ, मुंबई



डॉ. पुरुषोत्तम विश्वनाथ खांडेकर
(जन्म २२-७-१९२२)

नागपूरच्या सायन्स कॉलेजमधून एम्. एस्. सी. (भौतिकशास्त्र) झाल्यानंतर जबलपूरच्या रॉबर्टसन् कॉलेजमध्ये व नागपूरच्या सायन्स कॉलेजमध्ये अधिव्याख्याता म्हणून काम केले. नंतर मुंबईच्या इन्स्टिटय़ूट ऑफ सायन्स व नागपूरच्या इन्स्टिटय़ूट ऑफ सायन्समध्ये सहयोगी प्राध्यापक, प्राध्यापक आणि विभाग प्रमुख म्हणून पदोन्नती झाली. १९४६ साली Transmutation of Elements या विषयावर त्यांनी मराठीत लिहिलेल्या निबंधाला नागपूर विद्यापीठाचे वामन रघुनाथ जोशी पारितोषिक मिळाले. पारिभाषिक शब्दावली तयार करणे आणि भारतीय भाषांमधून उच्च शिक्षण देता यावे या हेतूने पुस्तके लिहावी या कामासाठी मध्यप्रदेश शासनाने त्यांना डॉ. रघुवीर यांच्या ॲकेडेमीमध्ये पाठविले. त्यांचे दहा संशोधनपर निबंध प्रसिद्ध झाले असून त्यांनी पी. एच्. डी. पदवीसाठी मार्गदर्शन केले आहे.

नागपूर विद्यापीठाच्या स्नातकपूर्व भौतिकशास्त्राच्या अभ्यासक्रमात आमूलाग्र बदल करून त्यास अद्यावत् करण्यात त्यांचा प्रमुख भाग आहे. NCERT चा नागपूर गट, ULP (भौतिकशास्त्र) नागपूर विद्यापीठ, विज्ञानमंच, नागपूर या संस्थांशी त्यांचा निकटचा संबंध आहे. इंडियन फिजिक्स असोसिएशन, मुंबई आणि नागपूर विभाग, मराठी विज्ञान परिषद, नागपूर विभाग यांमध्ये त्यांनी उपाध्यक्ष, अध्यक्ष अशा जबाबदारीच्या पदावर काम केले आहे. नागपूरच्या राजाराम वाचनालयाचे ते अध्यक्ष होते. महाराष्ट्र ॲकेडेमी ऑफ सायन्सेसचे ते फेलो असून विदर्भ विभागात अनेक ठिकाणी मराठी, इंग्रजी आणि हिंदी भाषांमधून त्यांची लोकरुचि-विज्ञानविषयक भाषणे झाली आहेत. नागपूर आकाशवाणीवर सुरुवातीपासून त्यांनी कित्येक विज्ञानविषयक भाषणे प्रसारित केली आहेत.

प्रायोगिक भौतिकशास्त्र (हिंदी) आणि स्थायू अवस्थेचे भौतिकशास्त्र (इं.) या विषयांवरील त्यांचे लेखन पुस्तकरूपाने प्रसिद्ध झाले असून, मराठी विश्वकोशासाठी त्यांनी लेख लिहिले आहेत. नागपूरच्या 'नागपूर टाइम्स' मधून भौतिकशास्त्रविषयक मनोरंजक माहिती देणारे सदर त्यांनी दीड वर्षे कुशलतेने चालविले. तसेच 'हितवाद' या दैनिकामधून ताऱ्यांविषयी शास्त्रीय माहिती देणारी २० लेखांची चित्तवेधक लेखमाला लिहिली आहे.

विज्ञानविषयक सर्व चळवळीत त्यांना स्वारस्य असून तीत ते अत्यंत आत्मीयतेने भाग घेतात.

अनुक्रमणिका

ट्रांझिस्टर

लेखक :

डॉ. पु. वि. खांडेकर

किंमत रु. १९-००

शासकीय मुद्रणालय आणि ग्रंथागार, नागपूर
१९८२

अनुक्रमणिका

माझे वडील

ती. कै. दादासाहेब

यांच्या स्मृतीस--

अनुक्रमणिका

निवेदन

मराठी भाषेला आणि साहित्याला आधुनिक ज्ञान-विज्ञानाच्या व सांस्कृतिक मूल्यांच्या अविष्काराचे सामर्थ्य प्राप्त व्हावे, आधुनिक शस्त्रे, ज्ञान-विज्ञाने, तंत्र आणि अभियांत्रिकी त्याचप्रमाणे भारतीय प्राचीन संस्कृती, इतिहास, कला इत्यादी विषयात मराठी भाषा सर्वच स्तरांवर ज्ञानदान करण्यास समर्थ व्हावी आणि मराठी भाषेला जगात उच्च स्थान मिळावे या उद्देशाने महाराष्ट्र राज्य साहित्य संस्कृती मंडळाने बहुविध वाङ्‌मयीन व सांस्कृतिक कार्यक्रम आखला आहे. तो व्यवस्थितपणे कार्यवाहीत आणण्याकरिता वाङ्‌मय, ललितकला, समाजविज्ञान, विज्ञान, इतिहास इत्यादी विषयांवरील प्रकल्प साकार करण्यासाठी तसेच मराठी वाङ्‌मयकोश व शब्दकोश इत्यादी योजनांचे नियंत्रण व मार्गदर्शन करण्यासाठी मंडळाने विविध समित्या स्थापन केल्या आहेत.

याच दृष्टीने सर्वसामान्य माणसाला उपयुक्त होतील अशी विज्ञानविषयक पुस्तके प्रकाशित करणेही आवश्यक आहे असे मंडळाला वाटते. मंडळाच्या या धोरणानुसार मंडळाच्या विज्ञान समितीने सर्वसामान्य लोकांसाठी विज्ञानविषयक पुस्तके लिहून घेण्याची योजना आखली आहे. यामुळे सामान्य जनांमध्ये वैज्ञानिक दृष्टीकोन निर्माण होऊन त्यांच्या दैनंदिन जीवनात येणाऱ्या वैज्ञानिक गोष्टींची त्यांना केवळ ओळखच होणार नाही तर आजचे विज्ञान रंजक व वाचनीय पद्धतीने त्यांना उपलब्ध पण होईल. शहरी भागाबरोबरच ग्रामीण भागात ही पुस्तके पोहोचली पाहिजेत अशी या मंडळाची धारणा आहे. यासाठी मंडळाने प्राणीसृष्टीतील नवल, अनुवंशिकी, शेतकऱ्यांचे जीवन उजळून टाकणारा गोबर गॅस, आपला सूर्य, अणुशक्ती आणि अण्वस्त्रे यांचा परस्पर संबंध, जीवरक्षके (Antibiotics), निसर्ग आणि वनस्पती, कापडावरील विविध प्रक्रिया, दैनंदिन व्यवहारातील विज्ञान इत्यादी विविध विषयांवर पुस्तके प्रकाशित करण्याचे योजिले आहे.

विज्ञानाच्या प्रगतीमुळे निर्माण झालेली विविध वैज्ञानिक उपकरणे वापरण्याची प्रवृत्ती सर्वसामान्यांमध्येही वाढीस लागली आहे. मंडळाने प्रकाशित केलेल्या श्री. श्री. वि. सोहोनी लिखित “रेडियो दुरुस्ती या पुस्तकास विज्ञानप्रेमी व तंत्रज्ञान आत्मसात करू इच्छिणाऱ्या वाचकांनी चांगला प्रतिसाद दिला व सदर पुस्तकाची चतुर्थावृत्ती आता मुद्रणावस्थेत आहे. तसेच श्री. वि. वि. देशपांडे लिखित “लुकेना : क्रांतिकारी कल्पवृक्ष” या पुस्तकालाही महाराष्ट्रातील अगदी खेडोपाड्यातूनही प्रचंड मागणी आहे. सदर अनुभव जमेस धरून मंडळाने डॉ. पु. वि. खांडेकर, नागपूर यांजकडे “ट्रांझिस्टर” या पुस्तकाचे लेखन सोपविले व त्यांनी ते अल्पावधीतच पूर्ण करून दिले.

अनुक्रमणिका

या पुस्तकात ट्रांझिस्टरच्या शोधापासून त्याच्या अद्ययावत प्रगतीपर्यन्तची तांत्रिक माहिती सुबोध भाषेत खांडेकरांनी मांडली आहे. पुस्तकातील आकृत्यांमुळे विषयाचे आकलन वाचकांना सहज व सुलभ होण्यास खूपच मदत झाली आहे. या पुस्तकाच्या प्रकाशनामुळे मराठीतील शास्त्रीय वाङ्मयात मोलाची भर पडणार आहे. तेव्हा अशा महत्त्वपूर्ण पुस्तकाचे स्वागत विज्ञानप्रेमी अभ्यासक उत्सूकतेने करतील अशी आशा आहे.

डॉ. सुरेंद्र बारलिंगे,
अध्यक्ष,
महाराष्ट्र राज्य साहित्य संस्कृती मंडळ.

मुंबई,
विजयादशमी,
आश्विन १६, शके १९०३,
गुरुवार, दिनांक ८ ऑक्टोबर १९८१.

अनुक्रमणिका

प्रस्तावना

तंत्रविद्येत झालेल्या प्रगतीमुळे आपल्या दैनिक व्यवहारात रोज नव्या नव्या उपकरणांची भर पडत आहे. निरनिराळ्या देशांमधील दळणवळण जलद आणि सुलभ झाल्याने ही साधने झपाट्याने जगभर पसरत आहेत. आज ट्रांझिस्टर, रेडिओ, टेपरेकॉर्डर इत्यादि करमणुकीच्या साधनांनी जुने रेडिओ आणि ग्रामोफोन यांची जागा घेतली आहे. युद्धोत्तर काळातील या क्रांतीला हातभार लावणारे एक महत्त्वाचे साधन म्हणजे ट्रांझिस्टर.

या पुस्तकात ट्रांझिस्टरच्या जन्माचा थोडक्यात इतिहास दिला आहे. त्यावरून प्रयोग, संकल्पना आणि गरज यांच्या परस्पर प्रक्रियांमधून शोध कसा लागतो याविषयी काही प्रमाणात कल्पना यावी. ट्रांझिस्टरची क्रिया समजावून सांगण्यासाठी वेगळ्याच संज्ञा व संकल्पना वापराव्या लागतात. ह्या संज्ञांचे आकलन आणि ट्रांझिस्टर क्रिया समजण्यासाठी आवश्यक अशी मूलभूत माहिती पार्श्वभूमीदाखल दिलेली आहे: अणूची रचना समजल्यानंतर ऊर्जा पट्ट, अर्धवाहक, संधिस्थान इत्यादि संकल्पनांचे आकलन सहज होऊ शकेल. ट्रांझिस्टर तयार करण्याच्या तंत्राचा थोडक्यात परिचय करून दिल्यानंतर त्याच्या साह्याने संकेत प्रवर्धन कसे होते याविषयी सविस्तर स्पष्टीकरण दिले आहे.

पाश्चात्य देशात ट्रांझिस्टरचा उपयोग हा लहान मुलांचा एक आवडता छंद झालेला आहे. आपल्याकडे देखील इलेक्ट्रॉनिक्स या विषयाचे वाढते महत्त्व ध्यानात घेऊन विद्यार्थ्यांनी हे नवे ज्ञान आत्मसात् करण्याची निकड आहे. या दृष्टीने प्रचलित ट्रांझिस्टरांविषयी माहिती, ते वापरतांना कोणती काळजी घ्यावी, त्यांची चाचणी कशी घ्यावी याविषयी सूचना दिलेल्या आहेत. ट्रांझिस्टरचा प्रत्यक्ष वापर करतांना त्यांचा उपयोग होईल. ट्रांझिस्टर किंबहुना इलेक्ट्रॉनिक्स ही प्रयोगक्षम विद्या आहे. स्वतः प्रत्यक्ष ट्रांझिस्टरांचा वापर करून परिपथ बांधल्याने त्यांच्याविषयी आत्मविश्वासपूर्वक सांगता येते; यासाठी काही सोपे ट्रांझिस्टर परिपथ दिले आहेत. ते वाचकांनी बांधून पहावेत आणि मनोरंजनाबरोबर ज्ञान मिळविण्याची संधी घ्यावी.

तंत्रविज्ञानाची प्रगती एवढ्या वेगाने होत आहे की शोध आणि त्याचे उपयोजन (Application) अथवा व्यावहारिक उपयोग यांमधील कालखंड लहान होत चालला आहे. इलेक्ट्रॉनिक साधनांमध्ये प्रतिदिनी होणाऱ्या नव्या नव्या सुधारणांमुळे ट्रांझिस्टर देखील लौकरच मागे पडेल की काय अशी शंका वाटू लागली आहे. तेव्हा भविष्यकाळाची थोडी चाहूल घेता यावी म्हणून ट्रांझिस्टरांच्या इतर भाऊबंदांच्या माहितीसाठी एक वेगळे प्रकरण खर्ची घातले आहे.

मराठीत ग्रंथ लेखन करतांना मुख्य अडचण पारिभाषिक शब्दांची येते. ह्या पुस्तकाची छपाई पूर्ण होईपर्यंत महाराष्ट्र राज्याच्या भाषा संचालनालयाने प्रकाशित केलेला भौतिकशास्त्र विषयाचा परिभाषा कोश मला न मिळाल्याने त्यांतील शब्दांचा सर्वत्र वापर झाला नसणे साहजिक आहे. परंतु भाषा संचालनालयाच्या नागपूरला होणाऱ्या बैठकींना अभ्यागत म्हणून हजर रहाता आल्याने त्यावेळी मान्य झालेल्या बऱ्याच पारिभाषिक शब्दांचा वापर करता आला. जेथे भाषा संचालनालयाचे शब्द उपलब्ध नव्हते तेथे पूर्वी डॉ. रघुवीर यांच्याकडे केलेल्या कामाच्या अनुभवाच्या आधाराने स्वतःच शब्द बनवून वापरले आहेत. काही ठिकाणी योग्य शब्द न सुचल्याने इंग्रजी शब्द जसेच्या तसे वापरले आहेत. सध्याच्या

अनुक्रमणिका

परिस्थितीत असे प्रसंग अटळ आहेत. नव्या शब्दांचा वापर जितका जास्त होईल तितकी त्यांची दुर्बोधता कमी होईल हे उघड आहे.

विज्ञान हे आजच्या युगातल्या मानवाच्या सांस्कृतिक जीवनाचे आवश्यक अंग आहे. निसर्गाच्या अभ्यासामधून मानवाला नवी तत्वे गवसली आहेत. त्यामुळे केवळ नैसर्गिक उलाढालींच्या मुळाशी असलेल्या एकात्मतेचा साक्षात्कार झाला आहे एवढेच नव्हे तर त्या तत्वांनी मानवाच्या विचारसरणीत आणि संकल्पनांत विलक्षण क्रांति घडवून आणली आहे. दुसऱ्या बाजूने विज्ञानाच्या उपयोगाने नवे द्रव्य, नवे पदार्थ, नवी उपकरणे यांची एक विश्वामित्री प्रतिसृष्टी निर्माण झाली आहे. वैज्ञानिक विचारप्रणालीच्या या स्त्रोतापासून आजच्या मनुष्याला अलग रहाणे शक्य नाही, योग्य नाही आणि श्रेयस्करही नाही. या दृष्टीने 'साहित्य-संस्कृती' मंडळाने या वैज्ञानिक संस्कृतीच्या प्रसारासाठी हे पुस्तक प्रकाशित केले याबद्दल मी मंडळाचा ऋणी आहे.

हे पुस्तक वाचून उद्याच्या पिढीमध्ये ट्रांझिस्टर आणि त्याच्या उपयोगाविषयी आवड निर्माण झाली व त्यांनी स्वहस्ते परिपथ बांधून पाहिले तरी एक महत्त्वाचे कार्य होईल. वाचकांना विनंती हीच की सदरहू पुस्तकात काही चुका अथवा उणीवा आढळल्यास निःसंकोचपणे त्यांची जाणीव लेखकाला करून द्यावी. त्यांचे आनंदाने स्वागत होईल.

हे पुस्तक लिहितांना माझ्या अनेक मित्रांच्या आणि सहकाऱ्यांच्या सूचनांचा उपयोग झाला. जुळणी करण्याचे परिपथ या पुस्तकात प्रसिद्ध करण्यास अनुमति दिल्याबद्दल नागपूर विद्यापीठाच्या भौतिक शास्त्राचे विभाग प्रमुख व युनिव्हर्सिटी लीडरशिप प्रोजेक्टचे संचालक, डॉ. चिंतामणि मांडे आणि भौतिक शास्त्रविभागाचे डॉ. नवनीत यांचा कृतज्ञतापूर्वक उल्लेख करावासा वाटतो.

पुस्तकातील आकृत्या सुबक काढण्याचे श्रेय श्री. ग. रा. देवगडे यांना आहे. तसेच मुखपृष्ठाची सुयोग्य योजना सौ. अचला आगाशे यांच्या कुंचल्याद्वारे व्यक्त झाली आहे. वापरलेल्या पारिभाषिक शब्दांच्या मराठी-इंग्रजी व इंग्रजी-मराठी वर्णानुक्रमी याद्या माझी कन्या सौ. अंजली इनामदार हिने त्वरेने करून दिल्या. या सर्वांचा मी आभारी आहे.

पुस्तकाची मुद्रिते अत्यंत काटेकोरपणे आणि चिकित्सकपणे तपासणे हे विज्ञानविषयक पुस्तकांच्याबाबत अतिशय आवश्यक असते. हे कंटाळवाणे परंतु महत्त्वाचे काम करण्यात शासकीय मुद्रणालयातील कर्मचारीवर्ग यांचे हार्दिक सहकार्य लाभले नसते तर ते एवढ्या कार्यक्षमतेने होऊ शकले नसते. पुस्तकाची सुबक छपाई आणि मनोहर स्वरूप यासाठी शासकीय मुद्रणालयाचे कुशल व्यवस्थापक श्री. वसंत रामचंद्र जोशी आणि संचालक श्री. रो. बो. अल्वा यांचे परिश्रम कारणीभूत झाले आहेत. या सर्वांचे आणि मुद्रणालयातील कर्मचाऱ्यांचे आभार मानणे हे माझे कर्तव्यच आहे.

पुरुषोत्तम विश्वनाथ खांडेकर.

श्रीधाम,
जेल रोड,
नागपूर ४४० ०२२.

अनुक्रमणिका

अनुक्रमणिका

१. ट्रांझिस्टरचा इतिहास १०

२. अर्धवाहक १३

३. पी-एन् संधिस्थान आणि ट्रांझिस्टर २१

४. ट्रांझिस्टरचे विविध उपयोग ३०

५. ट्रांझिस्टरचे वंशज ४२

६. ट्रांझिस्टर : परीक्षा आणि चांचणी ४८

७. ट्रांझिस्टर प्रकल्प ५१

८. ट्रांझिस्टर--उपयुक्त माहिती ५५

९. पारिभाषिक शब्द ५६

मराठी-इंग्रजी ५६

इंग्रजी-मराठी ५८

१०. संदर्भ ग्रंथ ६०

१. ट्रांझिस्टरचा इतिहास

दुसऱ्या महायुद्धानंतर लागलेल्या महत्त्वाच्या शोधांमध्ये ट्रांझिस्टरची गणना होते. ट्रांझिस्टर म्हणजे मूर्ति लहान पण कीर्ती मोठी! खेड्यापाड्यापर्यंत पोहोचलेल्या व लोकांच्या खांद्याला पट्ट्याने अडकविलेल्या रेडिओला आपण ट्रांझिस्टर म्हणतो. पण हा ट्रांझिस्टर नव्हे. हा आहे ट्रांझिस्टर रेडिओ. या रेडिओमध्ये ट्रांझिस्टरचा वापर केलेला आहे. रेडिओ नळ्यांऐवजी ट्रांझिस्टरचा उपयोग केल्यामुळेच रेडिओचा आकार आणि वजन कमी झाले. दिवाणखान्यातल्या शोभेमध्ये भर घालणारा रेडिओ सुवाह्य झाला आणि सर्वत्र संचार करू लागला. रेडिओ नलिका वापरलेले जुन्या प्रकारचे रेडिओ मागे पडले, आणि त्यांची जागा ट्रांझिस्टर रेडिओने घेतली. ट्रांझिस्टरच्या शोधाची कथा म्हणजे जुन्या कल्पनांचा किंवा साधनांचा नव्या संदर्भात कसा उपयोग होऊ शकतो याचे उत्तम उदाहरण आहे.

रेडिओच्या शोधाच्या सुरुवातीच्या काळात १९२०-२५ च्या दरम्यान रेडिओतरंग ग्रहण करण्यासाठी धातूची अणकुचीदार तार एका स्फटिकाला संस्पर्श करून ठेवण्यात येत असे. हे साधन एरिअल आणि हेडफोनला जोडल्यास रेडिओसंकेत ग्रहण करता येतो. या कामासाठी गॅलीना, आयर्न पायराइट्स, चालकोपायराइट्स इत्यादि नैसर्गिक स्फटिकांचा उपयोग करण्यात येत असे. या साधनाला बिंदु-संस्पर्श दिष्टकारी (point contact rectifier) असे म्हणतात. हे बिंदु-संस्पर्श फार अस्थायी होते. ते वारंवार खराब होत. त्यामुळे संकेत ग्रहणासाठी संस्पर्शाचे स्थान बदलावे लागत असे. या गैरसोयीमुळे त्यावेळी प्रचलित असलेल्या डायोड (Diode) निर्वात नलिका अधिक सुटसुटीत आणि सोइस्कर ठरल्या आणि १९३० च्या सुमारास त्यांचा मोठ्या प्रमाणात उपयोग होऊ लागला. डायोडच्या साह्याने संदेश ग्रहण करावयाचा असल्यास तो संदेश शक्तिशाली असणे आवश्यक आहे. पण संदेश क्षीण असल्यास या नलिकेच्या साह्याने त्याचे प्रवर्धन करता येत नाही. डायोडच्या आत असलेल्या ॲनोड आणि कॅथोड यांच्यामध्ये तारेची जालिका (grid) बसविल्यास अशा निर्वात नलिकेच्या साह्याने ध्वनिसंकेताचे प्रवर्धन करता येते. या फायद्यामुळे हळूहळू अशा प्रकारच्या नलिकांचा-ट्रायोडचा-संदेश ग्रहण आणि प्रवर्धनासाठी अधिकाधिक प्रमाणात उपयोग होऊ लागला. रेडिओ संदेश ग्रहणाच्या प्रक्रियेंतील अनेकविध कार्ये निर्वात नलिकांच्या-व्हाल्व्हच्या-साह्याने करता येत असल्याने साहजिकच व्हाल्व्हची संरचना आणि त्यांत घडणाऱ्या भौतिक प्रक्रियांवर पुष्कळ संशोधन झाले. या संशोधनातून ट्रायोडनंतर टेट्रोड, पेंटोड, हेक्झोड आदि अनेक इलेक्ट्रोड असलेल्या व्हाल्व्हची निर्मिती झाली.

दुसऱ्या महायुद्धात रॅडारचा शोध लागला. रॅडार-संदेशग्रहणाच्या दृष्टीने तत्कालीन व्हाल्व्ह अकार्यक्षम होते. त्यामुळे त्यांच्या रचनेत बदल करून त्यांची संदेशग्रहणाची क्षमता वाढविण्याचे प्रयत्न झाले. त्यात एका विशिष्ट मर्यादेपलीकडे शास्त्रज्ञांना यश आले नाही. यामुळे शास्त्रज्ञांचे लक्ष आतापर्यंत दुर्लक्षिल्या गेलेल्या बिंदु-संस्पर्श स्फटिक दिष्टकारीकडे पुनःश्च वेधले गेले व सिलिकॉनच्या स्फटिकावर टंग्स्टनच्या तारेच्या टोकाचा संस्पर्श करवून त्याने मिळणाऱ्या स्फटिक डायोडचा प्रथम वापर करण्यात येऊ लागला. लवकरच असे आढळले की, शुद्ध जर्मेनियमच्या स्फटिकावर टोकदार तार संस्पर्श करून बसविल्याने उत्तम प्रकारे रॅडार संदेश ग्रहण करता येतात.

स्फटिक डायोडांच्या योगे संदेशग्रहणाची क्रिया कशी होते या विषयी संशोधन चालू असताना बेल टेलिफोन प्रयोगशाळेतील शास्त्रज्ञांना १९४८ साली एक चमत्कारिक घटना आढळली. बिंदुसंस्पर्शामधून विद्युत्धारा वाहत असताना त्या स्फटिकाच्या पृष्ठभागावरील विद्युत् विभव (Potential) कसे बदलते हे

अनुक्रमणिका

दुसऱ्या बारीक तारेच्या बिंदु-संस्पर्शाच्या साह्याने मोजत असतांना जॉन बार्डीन आणि वॉल्टर ब्रॅटन यांना असे दिसले की, या दुसऱ्या तारेचा संस्पर्श पहिल्या बिंदु-संस्पर्शाच्या अतिशय जवळ असला तर दुसऱ्या तारेमधून वाहणारी विद्युत्धारा पहिल्या तारेमधून वाहणाऱ्या विद्युत्धारेवर अवलंबून असते. म्हणजेच एका परिपथातील विद्युत्धारेच्या साह्याने दुसऱ्या परिपथातील विद्युत्धारेवर नियंत्रण ठेवता येते. पहिल्या संस्पर्शामधून अग्रिम दिशेने धारा वहात असली तर त्या संस्पर्शाचा रोध लहान असतो. दुसऱ्या संस्पर्शातून उलट्या दिशेने धारा वहात असली तर त्या संस्पर्शाचा रोध मोठा असतो. पहिल्या लहान रोधाच्या परिपथातून वाहणाऱ्या धारेचे मोठ्या रोधाच्या परिपथात होणारे संक्रामण या कल्पनेमधून (Transfer-resistor) ट्रांझिस्टर हा शब्द बनला.

ज्याप्रमाणे निर्वात नलिका डायोडमध्ये आणखी एक इलेक्ट्रोड बसविल्याने ट्रायोड बनतो त्याचप्रमाणे स्फटिक डायोडवर आणखी एक बिंदु-संस्पर्श दिल्याने त्यापासून स्फटिक ट्रायोड मिळतो. निर्वात नलिका ट्रायोडप्रमाणेच या स्फटिक ट्रायोडच्या साह्याने संकेताचे प्रवर्धन करता येते. परंतु हे बिंदु-संस्पर्श ट्रायोड अतिशय नाजूक असतात, तसेच निश्चित गुणधर्म असलेले बिंदुसंस्पर्श ट्रायोड बनविणे हे देखील कठीण काम असते. त्यामुळे अशा बिंदु संस्पर्श ट्रांझिस्टर ऐवजी अधिक दणकट साधन बनविण्याच्या दृष्टीने बेल टेलिफोन प्रयोगशाळेतील शास्त्रज्ञांनी प्रयत्न सुरू केले. १९४८ सालीच बेल टेलिफोन प्रयोग शाळेत विल्यम शॉकले आणि जेराल्ड पिअर्सन यांनी बाह्य विद्युत्क्षेत्राच्या साह्याने सिलिकॉन स्फटिकातील विद्युत् धारेवर नियंत्रण ठेऊन अधिक उत्तम प्रकारचे ट्रांझिस्टर बनविण्याचे प्रयत्न केले. परंतु त्यांना त्यात अपयश आले. या अपयशाची चिकित्सा करीत असतांनाच शॉकले यांच्या ध्यानात आले की, ट्रांझिस्टरमध्ये सुधारणा करावयाची असल्यास स्फटिकाच्या पृष्ठभागावरून विद्युत्धारा वाहता कामा नये. या कल्पनेची परिणती होऊन शेवटी, संधिस्थान(junction) ट्रांझिस्टरचा शोध लागला. या शोधाने तंत्रविज्ञानात क्रांती घडून आली. एवढेच नव्हे तर त्यामुळे स्थायूंच्या (solids) अंतर्गत घडणाऱ्या घटना आणि प्रक्रिया याबद्दल अंतर्दृष्टि प्राप्त झाली. या शोधाच्या युग प्रवर्तक महत्त्वामुळे शॉकले बार्डीन आणि ब्रॅटेन यांना १९५६ साली भौतिकशास्त्राचे नोबेल पारितोषिक मिळाले.

ट्रांझिस्टरचा शोध आणि त्यापासून उद्‌भवलेली इतर इलेक्ट्रॉनिक साधने ही सर्व सैद्धान्तिक ज्ञानाची प्रगती आणि तंत्रविज्ञानाचा विकास यांच्या परस्पर प्रक्रिया आणि सहकार्य यांच्यामुळे निर्माण करता आली आहेत. स्काफ आणि त्याचे सहकारी यांनी अतिशुद्ध जर्मेनियम तयार करून त्यात नियंत्रित प्रमाणात अशुद्ध्या मिसळण्याचे तंत्र विकसित केले टील याने जर्मेनियमचे मोठे आणि आदर्श एकल (single) स्फटिक बनविले. बॉन्ड आणि पिअर्सन यांनी स्फटिकावर संस्पर्शबिंदु योग्य प्रकारे बसविण्याचे आणि त्यांचे समायोजन (adjust) करण्याचे सूक्ष्मतंत्र (microtechnique) तसेच स्फटिकाचे बारीक तुकडे कापण्याचे तंत्रविज्ञान निर्माण केले.

संधिस्थान (Junction) ट्रांझिस्टरच्या शोधानंतर जसजशी निरनिराळ्या तंत्रांची प्रगती झाली तसतशी शास्त्रज्ञांनी प्रयोग करून निरनिराळ्या कल्पना पडताळून पहाण्यास सुरुवात केली. स्टीव्हन, हॉफस्टाइन आणि फ्रेडरिक हाइमन या तरुण संशोधकांनी शॉकले व पीअर्सन यांनी १९४८ मध्ये सुचविलेली पण त्यावेळी प्रत्यक्षात असफल ठरलेली कल्पना मूलतः बरोबर आहे हे १९६३ साली दर्शविले. यातून पहिला अवरोधित द्वार क्षेत्र-परिणाम (insulated gate field effect) ट्रांझिस्टर निर्माण झाला. नव्या प्रकारच्या गरजा आणि तंत्रविज्ञानाचा विकास यांच्यामुळे यानंतर ट्रांझिस्टरच्या अनेक प्रकारच्या संरचना तयार करण्यात आल्या. आणि आता तर नव्या नव्या तंत्राची प्रगती झाल्यामुळे अनेक ट्रांझिस्टर, रोध

(resistance), धारिता (capacitor) केवळ एक वर्ग मिलीमीटर एवढ्या लहान जागेत सामावून ठेवता येण्यापर्यंत प्रगती झाली आहे.

अनुक्रमणिका

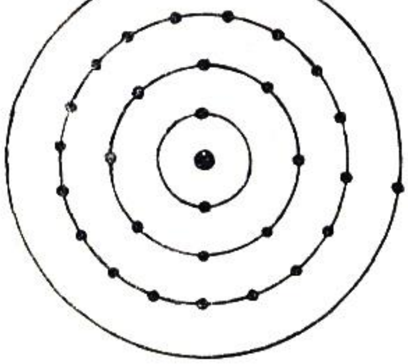
२. अर्धवाहक

ट्रांझिस्टर हे जर्मेनियम आणि सिलिकॉन या मूलतत्त्वांचे (elements) बनविलेले असतात. ही मूलतत्त्वे साधारण तापावर (temperature) स्थायूंच्या (solids) स्वरुपात असतात. अर्थात् ट्रांझिस्टरमध्ये घडून येणाऱ्या भौतिक घटना समजण्यासाठी स्थायूमधून विद्युत्धारा कशा प्रकारे वाहते हे प्रथम कळले पाहिजे.

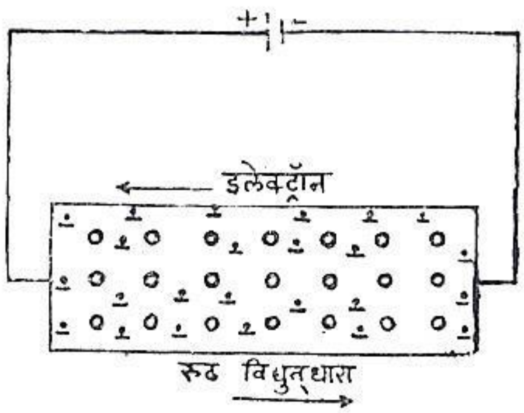
विद्युत्धारा वाहण्याच्या दृष्टीने पदार्थांचे दोन ढोबळ प्रकारात वर्गीकरण होते: वीज वाहून नेण्यासाठी तांबे अथवा अल्युमिनियमच्या तारांचा वापर होतो. हे धातू विजेचे सुवाहक (good conductor) आहेत. विजेच्या तारांना खांबावर चिनी मातीच्या गुटक्यांचा आधार देतात. घरांमध्ये विजेच्या तारांवर रबराचे वेष्टण असलेले दिसते. चिनी माती, रबर इत्यादि पदार्थ विजेच्या प्रवाहाला मोठा विरोध करतात. या पदार्थांना अवरोधी (insulator) म्हणतात. जर्मेनियम आणि सिलिकॉन या ट्रांझिस्टर द्रव्यांचे विद्युत्धारा वाहून नेण्याचे गुणधर्म वरील दोन वर्गांच्या मधोमध असतात. अशा पदार्थांना अर्धवाहक (semiconductor) म्हणतात.

सृष्टीतील सर्व पदार्थ अंतिमदृष्ट्या अणूंचे (atoms) बनलेले असतात. अणू हा आकाराने अतिशय सूक्ष्म म्हणजे १ सें. मी. च्या दशकोट्यांशा एवढा असतो. अणूला स्वतःची संरचना (structure) असते. त्यांत मध्यभागी भारी केंद्र असते. त्यावर धन प्रभार (charge) असतो. या केंद्राला न्यूक्लिअस (nucleus) म्हणतात. न्यूक्लिअसभोवती ऋण प्रभार असलेले कण म्हणजे इलेक्ट्रॉन निरनिराळ्या कक्षामध्ये परिभ्रमण करीत असतात. उदाहरणार्थ आवर्तसारणी (periodic table) मधील २९ व्या क्रमांकाच्या तांबे या मूलतत्त्वाच्या अणूच्या न्यूक्लिअसवर २९ एकक (unit) धन प्रभार असतो व अणूमध्ये २९ इलेक्ट्रॉन निरनिराळ्या कक्षामध्ये परिभ्रमण करतात. (आ. २.१) सर्वांत बाहेरच्या कक्षेत असलेल्या इलेक्ट्रॉनना संयुजता (valence) इलेक्ट्रॉन म्हणतात. तांब्याचे अनेक अणू एकमेकांच्या जवळ येऊन जेव्हा तांबे हा धातूचा तुकडा तयार होतो त्यावेळी हे संयुजता इलेक्ट्रॉन स्वतःच्या अणूपासून विलग होतात आणि त्या तुकड्यात इतस्ततः भ्रमण करू लागतात ; म्हणजे हे इलेक्ट्रॉन मुक्त होतात. प्रत्येक अणूपासून एक इलेक्ट्रॉन मुक्त झाला अशी कल्पना केली तरी या मुक्त इलेक्ट्रॉनची संख्या फार मोठी होते. उदाहरणार्थ १ घन सें. मी. आकारमानाच्या तांब्याच्या ठोकळ्यामध्ये $१०^{२२}$ इलेक्ट्रॉन असतात. आपणाजवळ एवढे रुपये असले आणि जगातल्या सर्व मनुष्यांना ते सारखे वाटून दिले तर प्रत्येक मनुष्याला ३ हजार अब्ज रुपये मिळतील ! तांब्याच्या तारेच्या दोन टोकांना विजेरी जोडल्यास हे मुक्त इलेक्ट्रॉन ऋण टोकाकडून धन टोकाकडे जाऊ लागतात ; यालाच आपण विजेची धारा (current) वाहू लागली असे म्हणतो. तारेमधील धन प्रभार असलेले तांब्याचे अयन (ion) मात्र आपले स्थान सोडून जात नाहीत. ऋण प्रभार असलेले कण उजवीकडून डावीकडे जातात (आ. २.२) याचाच अर्थ म्हणजे धन प्रवाह डावीकडून उजवीकडे जातो म्हणून रूढार्थाने विजेरीच्या धन अग्राकडून ऋण अग्राकडे विद्युत्धारा वाहते असे विधान केले जाते. चिनी माती (पोर्सीलेन) रबर, काच, गंधक इत्यादि पदार्थांच्या अणूमधील इलेक्ट्रॉन मुक्त होत नाहीत. अर्थात् हे पदार्थात इतस्ततः वावरू शकत नाहीत. साहजिकच अशा पदार्थांना विजेरी जोडली तर त्यामधून विद्युत्धारा वाहत नाही.

अनुक्रमणिका



आ. २.१--तांब्याच्या अणूची संरचना



आ. २.२--धातूमधून विद्युत्धारेचे वहन

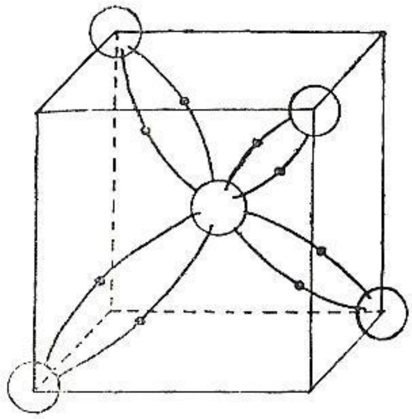
द्रव्याची विद्युत्धारा वाहून नेण्याची क्षमता (ability) वाहिता (conductivity) या भौतिक गुणधर्माच्या साह्याने मोजतात. तांब्याची विद्युत्वाहिता ६०×१०^{५} म्हो/सें. मी. आहे तर चिनी मातीची $१०^{-१४}$ म्हो/सें. मी. आहे. म्हणजे समान परिस्थितीत तांब्यामधून पोर्सीलेनपेक्षा $१०^{२०}$ पट मोठी विद्युत्धारा वाहते. धातू आणि अवरोधी यांच्यामध्ये वाहिता असलेले पदार्थ म्हणजे अर्धवाहक, या पदार्थांमधील मुक्त इलेक्ट्रॉनची संख्या धातूंच्या मानाने बरीच कमी पण अवरोधी पदार्थांच्या तुलनेने पुष्कळ मोठी असते, म्हणून त्यांची विद्युत्वाहिता धातूंपेक्षा कमी आणि अवरोधींपेक्षा मोठी असते. अर्धवाहकांच्या अनेकविध उपयोगांचे मर्म हे की, त्यांमधील मुक्त इलेक्ट्रॉनची संख्या सहज बदलता येते.

पदार्थ		वाहिता	इलेक्ट्रॉन/प्रति घ. सें. मी.
सुवाहक		$१०^{६}$ म्हो/सें. मी.	$\sim१०^{२२}$
		१०+२ ते १०-९ म्हो/सें. मी.	--
अर्धवाहक	{ जर्मेनियम	.०२ म्हो/सें. मी.	$\sim१०^{१३}$
	सिलिकॉन	१०-५ म्हो/सें. मी.	$\sim१०^{१०}$
अवरोधी		१०-१४ ते १०-२२ म्हो/सें. मी.	$<१०^{८}$

अर्धवाहकांत जर्मेनियम आणि सिलिकॉन हे महत्त्वाचे पदार्थ आहेत. जर्मेनियम हे आवर्त कोष्टकातील (periodic table) ३२ व्या क्रमांकाचे मूलतत्त्व आहे. त्याच्या केंद्राच्या सभोवताली ३२ इलेक्ट्रॉन भिन्न भिन्न कक्षात परिभ्रमण करतात. पहिल्या कक्षेत २, दुसरीत ८, तिसरीत १८ आणि चौथ्या-सर्वात बाहेरच्या--कक्षेत ४ इलेक्ट्रॉन अशा प्रकारे ३२ इलेक्ट्रॉन निरनिराळ्या कक्षात वाटले गेलेले असतात. जर्मेनियमचा स्फटिक हा घन (cube) आकाराचा असून त्यांत जर्मेनियम अणू विशिष्ट प्रकारे नियमित रचनेत वसलेले असतात. स्फटिकातल्या प्रत्येक जर्मेनियम अणू भोवती चार जर्मेनियम अणू असतात. (आ. २. ३) प्रत्येक जर्मेनियम अणू आपल्या बाहेरच्या कक्षेतील ४ संयुजी (valence) इलेक्ट्रॉनपैकी एक इलेक्ट्रॉन शेजारच्या अणूशी सामायिकपणे वाटून घेतो (share) म्हणजे दोन जर्मेनियमचे अणू दोन इलेक्ट्रॉनचे सामायिकरीत्या मालक बनतात. या इलेक्ट्रॉनद्वारे जर्मेनियम अणू

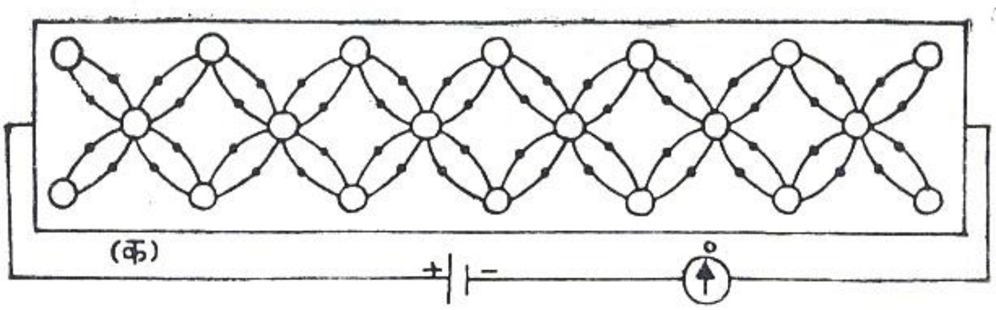
अनुक्रमणिका

एकमेकांशी बद्ध होतात. भागीदारीत वाटलेल्या गेलेल्या इलेक्ट्रॉनद्वारे निर्माण झालेल्या बंधाला सहसंयुजी बंध (covalent bond) म्हणतात.



आ. २.३--जर्मेनियम स्फटिकाची संरचना

०° केल्व्हिन (-२७३° सेल्सिअस) तापावर जर्मेनियमच्या एकल (single) स्फटिकाच्या सहसंयुजी बंधामधील सर्व इलेक्ट्रॉन आपापल्या स्थानी जखडलेले असतात. अर्थात ०° के तापावर जर्मेनियमच्या स्फटिकाच्या दोन पृष्ठभागांना विजेरी जोडली तर त्यातून विद्युत्धारा वाहणार नाही (आ. २. ४-क) म्हणून हा पदार्थ ०° के तापावर अवरोधी असतो. परंतु जर्मेनियमचा ताप वाढविल्यास दिलेली ऊर्जा अणूंना मिळते व ते स्वस्थानी राहून कंपने करू लागतात. अणूंच्या कंपनामुळे सहसंयुजी बंधातल्या काही इलेक्ट्रॉनना एवढी ऊर्जा मिळते की ते बंधामधून निसटतात व मुक्त होतात. हे मुक्त इलेक्ट्रॉन स्फटिकात इतस्ततः भ्रमण करू शकतात. स्फटिकाला विजेरी जोडल्यास इलेक्ट्रॉनवर विद्युत्क्षेत्राचा प्रभाव पडतो आणि ते विजेरीच्या धन अग्राकडे सरकू लागतात. म्हणजे तापविल्याने या पदार्थाची विद्युत्-वाहिता वाढते. विजेच्या अग्राकडे गेल्याने होणारी इलेक्ट्रॉनची उणीव ऋण अग्राद्वारे पुरविले जाणारे इलेक्ट्रॉन भरून काढतात. यामुळे स्फटिक विद्युतद्दष्ट्या अप्रभारितच (uncharged) राहतो.

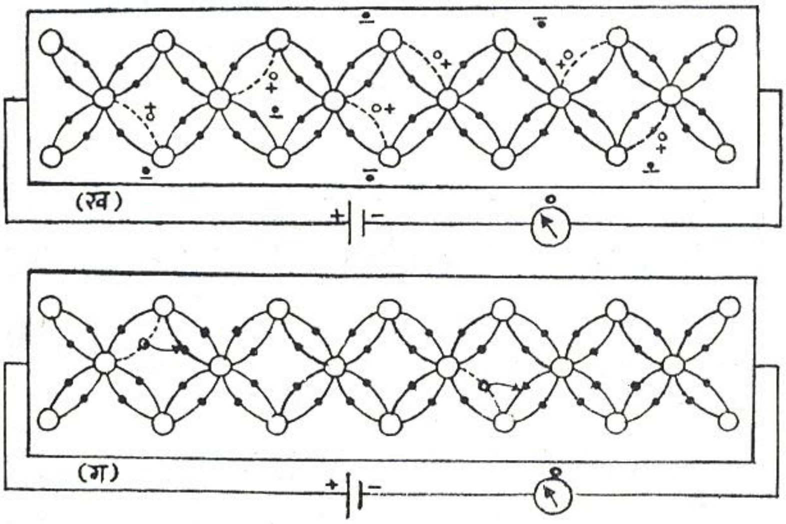


आ. २. ४ (क)--जर्मेनियम स्फटिक (०° के तापावर)

इलेक्ट्रॉन बंधातून सुटून बाहेर पडल्याने त्याची जागा रिकामी होते. ऋण प्रभार नसलेली ही जागा धन प्रभार असलेल्या कणासारखी क्रिया करते. (आ. २. ४-ख). अशा रिकाम्या जागेला धन कोटर (positive hole) असे म्हणतात. अशी धन कोटरे असलेल्या अर्धवाहका ची दोन टोके विजेरीच्या अग्राला जोडल्यास विजेरीच्या विद्युत्क्षेत्रामुळे कोटराजवळच्या अणूच्या बंधामधील इलेक्ट्रॉन तेथे येऊन

अनुक्रमणिका

इलेक्ट्रॉनची तूट भरून काढतो. म्हणजे इलेक्ट्रॉन त्रुटि या दुसऱ्या अणूजवळ पोहोचते. अशा प्रकारची क्रिया एकसारखी होते म्हणजेच कोटर उजवीकडे (आ. २. ४ ग) सरकते.



आ. २. ४ (ख)--जर्मेनियम स्फटिक (साधारण तापावर) (ग) कोटरांची गति

शुद्ध जर्मेनियम अथवा सिलिकॉन अर्धवाहकाला निज (intrinsic) अर्धवाहक म्हणतात. निज अर्धवाहकास तापविल्यास त्यात मुक्त इलेक्ट्रॉन आणि मुक्त धन कोटरे यांच्या जोड्या निर्माण होतात. जर्मेनियम मधील सहसंयुजी बंधातील इलेक्ट्रॉनला ०.७ इलेक्ट्रॉन-व्होल्ट ऊर्जा मिळाल्यास तो मुक्त होऊन विद्युत्‌वहनाच्या क्रियेत भाग घेतो. सिलिकॉन या अर्धवाहकाच्या संयुजी इलेक्ट्रॉनला मुक्त होण्यासाठी १.१ इलेक्ट्रॉन व्होल्ट ऊर्जेची गरज असते. संयुजी इलेक्ट्रॉनला यापेक्षा कमी ऊर्जा दिल्यास तो मुक्त होऊ शकत नाही. म्हणून या ऊर्जा विस्ताराला प्रतिबंधित अंतराल (forbidden gap) म्हणतात. जसजसा अर्धवाहकाचा ताप वाढवावा तसतसे अधिकाधिक इलेक्ट्रॉन मुक्त होतात. अशा प्रकारे प्रभार वाहनिकांची (charge carriers) संख्या वाढते आणि पदार्थाची विद्युत्‌वाहिता वाढते.

निजेतर अर्धवाहक :

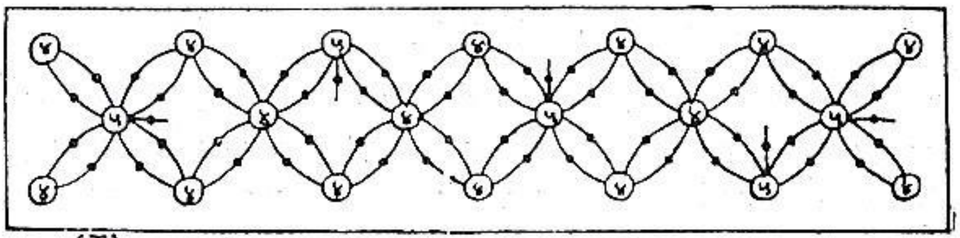
अर्धवाहकांची वाहिता वाढविण्यासाठी दुसऱ्या एका युक्तीचा अवलंब करतात. जर्मेनियम (अथवा सिलिकॉन) वितळलेल्या स्थितीत असतांना त्यामध्ये आवर्त कोष्टकातील (periodic table) ५ व्या किंवा ३ ऱ्या गटाची मूलतत्त्वे १ कोट्यांश एवढ्या अल्प प्रमाणात विरघळवितात. द्रव थिजल्यानंतर मिळणाऱ्या अर्धवाहकाची वाहिता वाढलेली असते. अशा अर्धवाहकांना निजेतर (extrinsic) अर्धवाहक म्हणतात.

एन् प्रकारचे अर्धवाहक :

वितळलेल्या जर्मेनियम (अथवा सिलिकॉन) मध्ये ५ व्या गटाची फॉस्फरस, अँटिमनी, आर्सेनिक ही मूलतत्त्वे विरघळविल्यास जर्मेनियम गोठल्यानंतर हे अणू जर्मेनियम अणूंच्या जागी जातात. ५व्या गटाच्या अणूंच्या बाहेरच्या कक्षेत ५ इलेक्ट्रॉन असतात. यांपैकी ४ इलेक्ट्रॉन सभोवतालच्या ४ जर्मेनियम अणूंशी सहसंयुजी बंध प्रस्थापित करण्यासाठी उपयोगात येतात. उरलेला पाचवा इलेक्ट्रॉन अणूशी अतिशय

अनुक्रमणिका

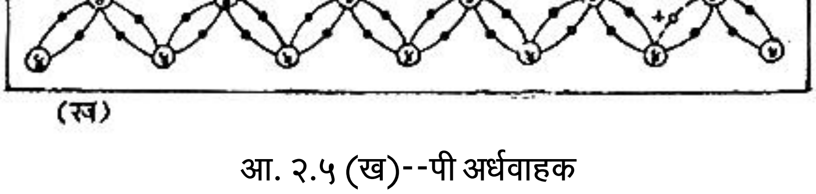
सैलपणे बांधलेला असतो (आ. २. ५-क) या इलेक्ट्रॉनला अणूपासून विलग करण्यासाठी अतिशय कमी ऊर्जा (०.१ इलेक्ट्रॉन व्होल्ट) लागते. यामुळे साधारण तापावर अनेक अशुद्धी अणूंचे इलेक्ट्रॉन विलग होतात व मुक्त झाल्याने ते जर्मेनियम स्फटिकात इतस्ततः भ्रमण करू लागतात. अशा स्फटिकाला विजेरीची दोन अग्रे जोडल्याने मुक्त इलेक्ट्रॉन विद्युत् क्षेत्राच्या प्रभावाखाली विजेरीच्या धन अग्राकडे जाऊ लागतात. अशा प्रकारे ऋण प्रभार असलेल्या कणांच्या म्हणजेच इलेक्ट्रॉनच्या गतीमुळे होणाऱ्या वहनाच्या क्रियेला एन् (n) प्रकारचे वहन म्हणतात. एन् हे अक्षर (negative) वा इलेक्ट्रॉन यांचे निदर्शक आहे. अतिरिक्त (excess) इलेक्ट्रॉनच्या गतीमुळे विद्युत्धारा वाहत असल्यामुळे या वहन क्रियेला अतिरिक्त वहन असे देखील म्हणतात. या प्रकारच्या अर्धवाहकांस एन् (n) प्रकारचे अर्धवाहक म्हणतात. जे अशुद्धी जणू स्वतःचे इलेक्ट्रॉन मुक्त करून स्थायूमध्ये सोडून देतात त्यांना दाता (donor) अशुद्धी म्हणतात.



आ. २. ५ (क)--एन् अर्धवाहक

पी प्रकारचे अर्धवाहक :

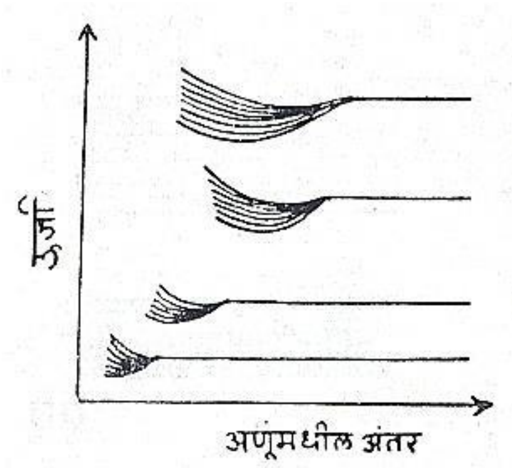
जर्मेनियम (अथवा सिलिकॉन) मध्ये बोरॉन, ॲल्युमिनियम गॅलियम, इंडियम यांसारखे ३ ऱ्या गटातील अणू विरघळविल्यास ते अणू जर्मेनियम अणूंच्या जागी जातात. पण या अणूंच्या बाह्य कक्षेत तीनच इलेक्ट्रॉन असतात. हे तीन इलेक्ट्रॉन सभोवतालच्या ४ जर्मेनियम अणूंपैकी केवळ तिघांशी सहसंयुजी बंध प्रस्थापित करू शकतात. म्हणून चौथ्या बंधामध्ये इलेक्ट्रॉनचा अभाव निर्माण होतो. (आ. २.५ ख) अशा स्फटिकावर विद्युतक्षेत्र लावल्यास त्याच्या प्रभावाखाली जवळच्या दुसऱ्या एखाद्या बंधातील इलेक्ट्रॉन या इलेक्ट्रॉन तुटीच्या जागी येतो. पर्यायाने इलेक्ट्रॉन तूट विद्युतक्षेत्राच्या दिशेने सरकते. इलेक्ट्रॉन तुटीच्या म्हणजेच धन कोटरांच्या गतीमुळे होणाऱ्या वहनाच्या क्रियेला पी (p=positive hole) प्रकारचे वहन म्हणतात. अशा अर्धवाहकास पी प्रकारचे अर्धवाहक म्हणतात. संयुजी इलेक्ट्रॉनच्या तुटीमुळे होणाऱ्या या वहनास तूट वहन (deficit conduction) असेही म्हणतात. ३ ऱ्या गटातील अशुद्ध्या इतर बंधामधून इलेक्ट्रॉन घेतात म्हणून त्यास परिग्राहक (acceptor) अशुद्धी म्हणतात.



आ. २.५ (ख)--पी अर्धवाहक

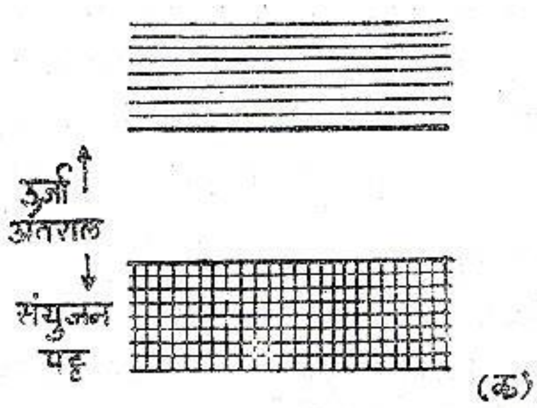
स्थायूंचा पट्ट सिद्धान्त :

वहनक्रियेचा एका वेगळ्या दृष्टीकोनातून देखील विचार करता येतो. अणूमधील इलेक्ट्रॉन निरनिराळ्या कक्षात परिभ्रमण करीत असतात. प्रत्येक कक्षेत इलेक्ट्रॉनला विवक्षित ऊर्जा असते. ही ऊर्जा आडव्या रेषांनी (ऊर्जा पातळ्यांनी) दर्शवितात. अणू परस्परांपासून लांब असले म्हणजे एका अणूचा दुसऱ्या अणूवर आणि त्यामधील इलेक्ट्रॉनवर काहीही परिणाम होत नाही. परंतु दोन अणू परस्पराजवळ येऊ लागले की प्रथम त्यांच्या बाहेरच्या कक्षांचा परस्परांशी स्पर्श होऊ लागतो; त्यामुळे त्या कक्षांतील इलेक्ट्रॉनवर परिणाम होऊन दोन्ही अणू परस्परांशी बांधले जातात. इलेक्ट्रॉनच्या परस्पर-क्रियेमुळे प्रत्येक ऊर्जा पातळीच्या जवळजवळ असलेल्या दोन ऊर्जा पातळ्या बनतात. १ मिलीग्रॅम भाराच्या स्फटिकात परार्धापेक्षा जास्त अणू परस्परांजवळ आलेले असतात. त्यामुळे त्यात अणूच्या बाह्य इलेक्ट्रॉनच्या ऊर्जा पातळीपासून परार्धापेक्षा जास्त पातळ्या उद्‌भवतात. या पातळ्या एवढ्या परस्परांजवळ असतात की त्यांचा प्रत्येकीचा वेगळाविचार करता येणे अशक्य असते. अशा प्रकारे त्यांचा ऊर्जापट्ट (energy band) बनतो (आ. २. ६). अणू जसजसे परस्परांजवळ येतात तसतशी ऊर्जा पटांची रुंदी वाढते. अणूच्या आतील बाजूंच्या कक्षांच्या ऊर्जापातळी पासून ऊर्जापट्ट बनण्यासाठी त्या कक्षांचा परस्परांशी स्पर्श व्हावा लागतो. त्यासाठी अणू एकमेकांच्या अतिशय जवळ यावे लागतात प्रत्यक्षात ते एवढे जवळ येऊ शकत नाहीत. दोन ऊर्जापातळ्यापासून उद्‌भवलेल्या ऊर्जापट्टामधील प्रदेशाला ऊर्जा अंतराल (energy gap, forbidden gap) म्हणतात.



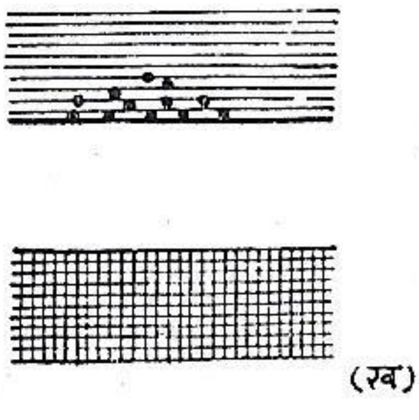
आ.२.६ -अणू परस्परांजवळ आल्याने ऊर्जापातळ्यावर होणारा परिणाम.

अवरोधी (insulator) पदार्थात ऊर्जा अंतराल मोठे असते. हिऱ्याच्या बाबतीत हे अंतराल ५.३ इलेक्ट्रॉन व्होल्ट आहे. त्याचा संयुजन पट्ट (valence band) इलेक्ट्रॉनंनी पूर्णपणे भरलेला असतो व त्याच्या वरच्या अंगास असलेला पट्ट पूर्णपणे रिकामा असतो. (आ. २. ७ क) अशा स्फटिकावर विद्युतक्षेत्र लावल्यास संयुजन पट्टातील इलेक्ट्रॉनला वरच्या बाजूला रिकामी ऊर्जापातळी सापडत नाही. त्यामुळे विद्युतक्षेत्रामुळे इलेक्ट्रॉनची ऊर्जा वाढून त्याला गती मिळू शकत नाही, अशा पदार्थामधून विद्युत्‌धारा वाहू शकत नाही.

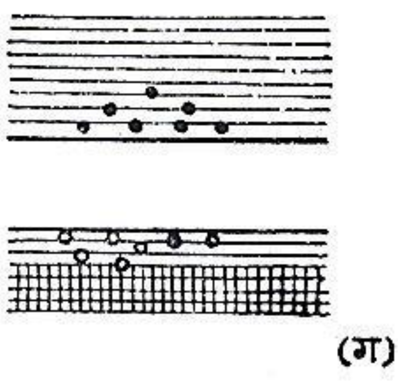


आ. २.७ (क)--अवरोधी

धातूमध्ये सर्वात वरच्या ऊर्जा पट्टामधील ऊर्जापातळ्या अंशतः भरलेल्या असतात. (आ. २. ७ ख) त्यामुळे या पट्टामध्ये असलेल्या इलेक्ट्रॉनना जवळच असलेल्या रिकाम्या ऊर्जापातळीत सहज जाता येते; अथवा विद्युत्क्षेत्राच्या साह्याने इलेक्ट्रॉनची ऊर्जा वाढून ते गतिशील होतात. अशा पदार्थामधून विद्युत्धारा सहज वाहू शकते. हे पदार्थ सुवाहक असतात. अर्धवाहक पदार्थाचे ऊर्जा अंतराल लहान, १ इलेक्ट्रॉन व्होल्टपेक्षा कमी असते. (आ. २.७ ग) शुद्ध अर्धवाहकाचा संयुजन पट ०० केल्व्हिन तापावर पूर्णतः भरलेला असतो. व त्यावरचा ऊर्जापट्ट पूर्णतः रिकामा असतो. अर्थात् हे पदार्थ ०० केल्व्हिन तापावर अवरोधी असतात. अर्धवाहकाचा ताप वाढविल्यास संयुजन पट्टातील काही इलेक्ट्रॉनना ऊर्जा मिळून ते वरच्या रिकाम्या पट्टात जातात. हे मुक्त इलेक्ट्रॉन विद्युत्वहनात भाग घेतात. संयुजन पट्टातील रिकामी स्थाने-कोटरे (holes) हे देखील विद्युत्वहनाच्या क्रियेत भाग घेऊ शकतात. अशा अर्धवाहकांना निज (intrinsic) अर्धवाहक म्हणतात.



आ. २.७ (ख) --सुवाहक

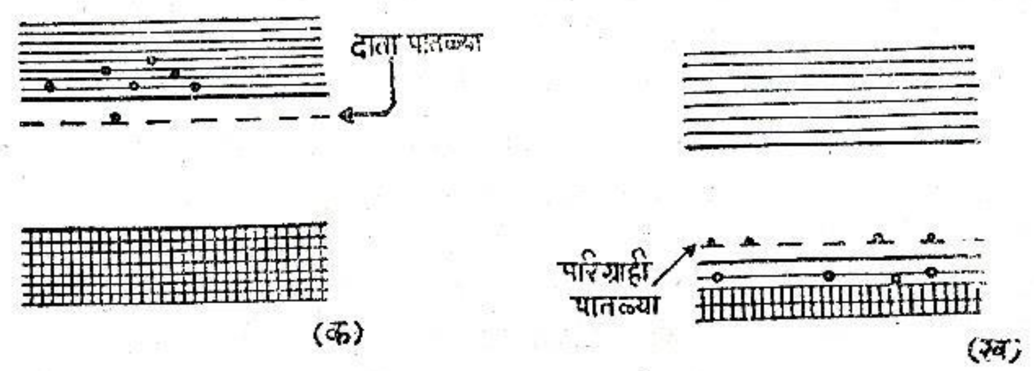


आ. २.७ (ग) --निज अर्धवाहक

अर्धवाहकात ५ व्या गटाचे अणू मिसळल्यास त्या अशुद्ध्यांच्या ऊर्जापातळ्या प्रतिबंधित अंतराळामध्ये (forbidden gap) असतात. त्या संवहन पट्टाच्या (conduction band) किंचित् खालच्या बाजूला असतात (आ. २.८ क) या अशुद्धीच्या ऊर्जापातळ्यातील इलेक्ट्रॉन सहज संवहन पट्टामध्ये जातात आणि विद्युत्वहनाच्या क्रियेत भाग घेतात. या अर्धवाहकांना एन् प्रकारचे अर्धवाहक म्हणतात.

अनुक्रमणिका

शुद्ध अर्धवाहकात ३ ऱ्या गटाच्या अशुद्ध्या मिसळल्यास या अशुद्ध्यांच्या ऊर्जापातळ्या संयुजन पट्टाच्या किंचित् वरच्या बाजूला असतात. (आ. २.८ ख) संयुजन पट्टातील काही इलेक्ट्रॉन या परिग्राही ऊर्जा पातळ्यात सहज जाऊ शकतात. अशा प्रकारे संयुजन पट्टात रिकाम्या जागा अथवा कोटरे निर्माण होतात. या कोटरांच्या गतीने विद्युत् वहनाची क्रिया होते. अशा अर्धवाहकांना पी प्रकारचे अर्धवाहक म्हणतात.



आ. २.८ (क) --(n) एन् प्रकारचा अर्धवाहक आ. २.८ (ख) --(p) पी प्रकारचा अर्धवाहक

निजेतर (extrinsic) अर्धवाहकांबद्दल एक बाब ध्यानात ठेवणे आवश्यक आहे. एन् प्रकारच्या अर्धवाहकात मुक्त इलेक्ट्रॉन असतात. याचा अर्थ असा नाही की, एन् प्रकारच्या अर्धवाहकांत धन कोटरे मुळीच नसतात. संयुजन बंधापैकी काही बंध तुटून इलेक्ट्रान आणि कोटरे यांच्या जोड्या निर्माण होतात. पण या कोटरांची संख्या अतिशय लहान असते. म्हणजे एन् प्रकारच्या अर्धवाहकात इलेक्ट्रॉन बहुसंख्य तर कोटर अल्पसंख्यांक असतात. या उलट पी प्रकारच्या अर्धवाहकात कोटर बहुसंख्य असतात व इलेक्ट्रॉन अल्पसंख्य असतात. पी-एन् संधिस्थानामधून उलट्या दिशेने वाहणाऱ्या विद्युत्धारेच्या दृष्टीने या अल्पसंख्यांकाना महत्त्व आहे.

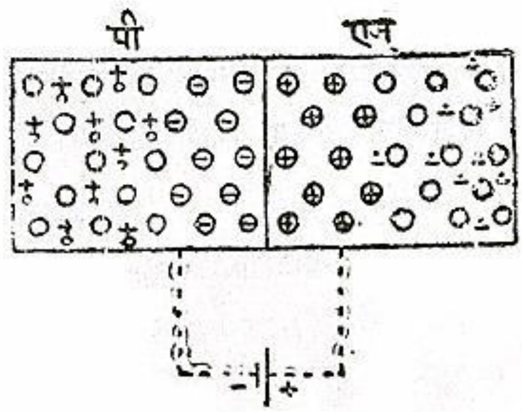
अनुक्रमणिका

३. पी-एन् संधिस्थान आणि ट्रांझिस्टर

ट्रांझिस्टरमध्ये एकाच अर्धवाहक स्फटिकाचा काही भाग पी प्रकारचा व काही भाग एन् प्रकारचा असतो. या दोन प्रकारच्या भागांमधील सीमा प्रदेशास संधिस्थान (junction) म्हणतात. प्रथम अशा प्रकारचे संधिस्थान कसे बनविता येईल हे पाहू.

अर्धवाहकाची इलेक्ट्रॉनिक साधने बनविण्यासाठी अतिशय शुद्ध स्वरूपाचे जर्मेनियम अथवा सिलिकॉन वापरतात. प्रथम हे द्रव्य वितळवितात, आणि त्याला स्पर्श करील असे एक स्फटिक बीज धरून ठेवतात. नंतर हे स्फटिक बीज हळूहळू फिरत ठेऊन हलकेहलके वर उचलत नेतात. म्हणजे स्फटिक बीजावर द्रव्य गोठून एकल (single) स्फटिक प्राप्त करता येतो. स्फटिकाची वाढ होत असता वितळलेल्या द्रव्यात प्रथम ३ ऱ्या गटांची अशुद्धी मिसळली तर पी प्रकारचा स्फटिक मिळतो. असा पी प्रकारचा स्फटिक मिळाल्यानंतर वितळलेल्या द्रव्यात ५ व्या गटाची अशुद्धी विरघळवतात. आणि वरील क्रियेप्रमाणे स्फटिकाची वाढ होऊ देतात. अशा रीतीने हा भाग एन् प्रकारचा बनतो. एवंच एकाच स्फटिकाचा काही भाग पी प्रकारचा आणि दुसरा भाग एन् प्रकारचा मिळतो. या दोन भागांमधील प्रदेश म्हणजे पी-एन् संधिस्थान होय.

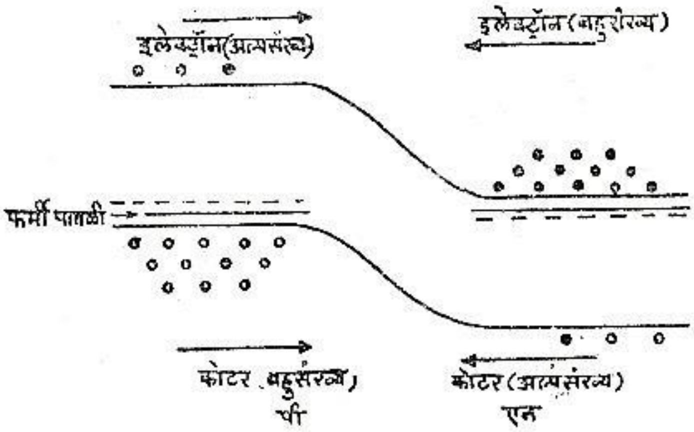
पी-एन् संधिस्थानाजवळ पी अंगात मुक्त कोटरे असतात आणि एन् बाजूला मक्त इलेक्ट्रॉन असतात. हे वाहनिक (carriers) एकमेकांकडे आकर्षित होऊन त्यांचा संयोग होतो. या संयोगामुळे पी-एन् संधिस्थानालगतच्या प्रदेशात मुक्त इलेक्ट्रॉन वा कोटरे राहू शकत नाहीत. त्यामुळे संधिस्थानाच्या पी भागातील ऋण अयन आणि एन् प्रभातील धन अयन जणू कांही उघडे पडतात. उघड्या पडलेल्या स्थिर अयनांच्या भारामुळे मुक्त वाहनिकांची (carrier) संधिस्थान ओलांडण्याची क्रिया थांबते जणू काही हे प्रभारित अयन विजेरी सारखी क्रिया करतात (आ. ३. १).



आ. ३. १ --पी-एन् संधिस्थान

या घटनेचे ऊर्जा-पट्ट सिद्धान्ताच्या (energy band theory) दृष्टिकोणातून स्पष्टीकरण करता येते. स्फटिकाचा एक भाग पी प्रकारचा आणि दुसरा एन् प्रकारचा असल्याने एका भागात बहुसंख्येने कोटरे तर दुसऱ्या भागात बहुसंख्येने इलेक्ट्रॉन असतात. अशी भौतिक परिस्थिती स्थायी स्वरूपाची राहू शकत नाही. यामुळे इलेक्ट्रॉन पी प्रदेशाकडे आणि कोटरे एन् प्रदेशाकडे जातात. असे झाल्याने पी आणि एन् प्रदेशातील फर्मी पातळ्या एका पातळीत येतात. आणि इलेक्ट्रॉनच्या ऊर्जापट्टात बदल होतो (आ. ३.२) म्हणजे आता

एन् भागातील इलेक्ट्रॉनना पी भागाकडे जाण्यासाठी ऊर्जा चढाव चढून जावा लागतो. या अडथळ्याला ऊर्जा अडथळा (energy barrier) म्हणतात. याच प्रमाणे पी भागातील मुक्त कोटरांना एन् भागाकडे जाण्यासाठी ऊर्जा अडथळा ओलांडावा लागतो. कोटरांचा प्रभार इलेक्ट्रॉन प्रभाराच्या विरुद्ध प्रकारचा असल्यामुळे त्यांच्या जास्त ऊर्जेच्या पातळ्या खालच्या बाजूला असतात.

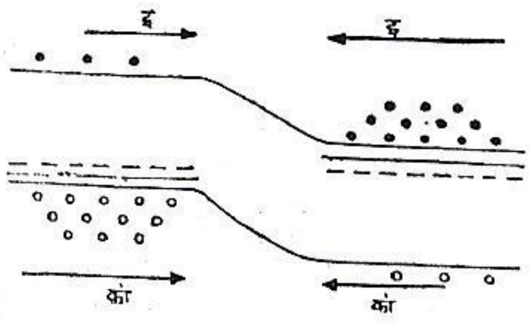


आ. ३.२ --पी-एन् संधिस्थानावरील विभव बांध

येथे मागील प्रकरणात दिलेल्या एका बाबीकडे पुन्हा लक्ष वेधणे आवश्यक आहे. एन् अर्धवाहकात असलेल्या मुक्त इलेक्ट्रॉनपैकी पुष्कळ इलेक्ट्रॉन अशुद्ध्यांपासून प्राप्त झालेले असतात. पण ऊष्माऊर्जेमुळे काही बंध तुटून त्यापासून इलेक्ट्रॉन कोटर जोड्यादेखील तयार होतात. अशा प्रकारे एन् भागात इलेक्ट्रॉन बहुसंख्य असतात पण याशिवाय कोटरेदेखील अल्पसंख्येने असतात. अशाच प्रकारे पी भागात कोटरे बहुसंख्य व इलेक्ट्रॉन अल्पसंख्य असतात. पी प्रदेशातील अल्पसंख्य इलेक्ट्रॉनना एन् भागाकडे ऊर्जा उतार दिसतो म्हणून त्यांना एन् भागाकडे जाण्यासाठी अडथळा होत नाही. याच प्रमाणे एन्. भागातील अल्पसंख्य कोटरांना पी. प्रदेशाकडे जाण्यास अडथळा दिसत नाही. एन्. प्रदेशातील ज्या इलेक्ट्रॉनजवळ विभव अडथळा ओलांडून जाण्याऐवढी ऊर्जा असेल तेच इलेक्ट्रॉन एन् कडून पी प्रदेशाकडे जातात. पी प्रदेशाकडून तेवढ्याच संख्येने इलेक्ट्रॉन एन् प्रदेशाकडे जातात. म्हणजे पी-एन् संधिस्थानामधून समान संख्येने इलेक्ट्रॉन परस्परविरूद्ध दिशांनी जात असतात. अशीच क्रिया कोटरांच्या बाबत देखील घडते. एकंदरीने संधिस्थाना मधून विद्युत्धारा वाहत नाही.

पी-एन् संधिस्थानाच्या पी प्रदेशाला विजेरीचे धन अग्र आणि एन् प्रदेशाला विजेरीचे ऋण अग्र जोडल्यास एन् प्रदेशातील इलेक्ट्रॉनना दिसणारा ऊर्जाचढाव ठेंगणा होतो. यामुळे एन् प्रदेशातील इलेक्ट्रॉन मोठ्या संख्येने पी भागाकडे जातात. अशीच घटना कोटरांच्या बाबतीत घडते व ते मोठ्या संख्येने पी प्रदेशाकडून एन् प्रदेशाकडे जाऊ लागतात. पी प्रदेशातील अल्पसंख्य इलेक्ट्रॉनला आणि एन् प्रदेशातील अल्पसंख्य कोटरांना अनुक्रमे एन् आणि पी प्रदेशाकडे जाण्यासाठी अडथळा असा नसतो. त्यामुळे त्यांच्यामुळे मिळणाऱ्या विद्युत्धारेमध्ये बदल होत नाही. अशा प्रकारे या प्रसंगी पी-एन संधिस्थानामधून एकंदरीने मोठी विद्युत्धारा वाहते. या दिशेला अग्रिम (forward) दिशा म्हणतात. (आ. ३.३ क.)

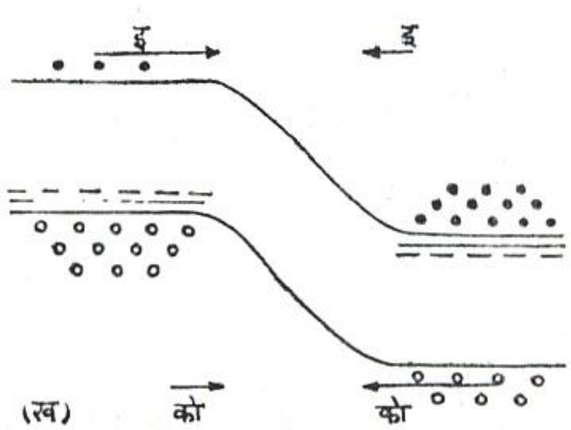
अनुक्रमणिका

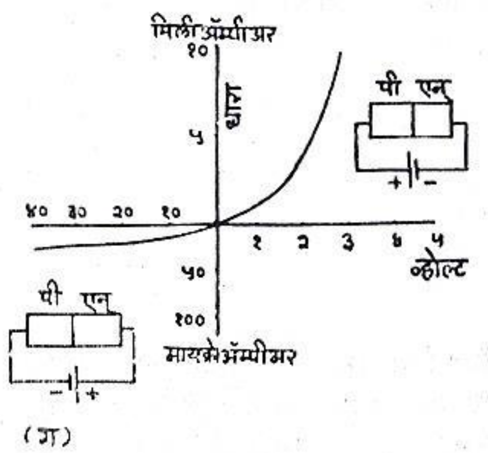


(क)

आ. ३.३ (क) --पी-एन् संधिस्थान (अग्रिम दिशा)

याउलट पी प्रदेशाला विजेरीचे ऋण अग्र आणि एन् प्रदेशास धन अग्र जोडले तर बहुसंख्य इलेक्ट्रॉन व कोटरांना दिसणारा ऊर्जा चढाव उंच होतो (आ. ३.३-ख) एवढ्या विभव अडथळ्याला ओलांडून जाण्याएवढी ऊर्जा असणाऱ्या एन् प्रदेशातील इलेक्ट्रॉन आणि पी प्रदेशातील कोटरांची संख्या लहान असते. त्यामुळे त्यांच्या गतीमुळे मिळणारी विद्युत्धारा लहान होते. याउलट पी आणि एन् प्रदेशातील अल्पसंख्य वाहनिक (carriers) म्हणजे अनुक्रमे इलेक्ट्रॉन आणि कोटर या दोहोंनाही एन् आणि पी प्रदेशाकडे जाण्यासाठी चढाव दिसत नाही. अर्थात् त्याच्या गतीमुळे मिळणारी विद्युत्धारा बदलत नाही. एकंदरीने या प्रसंगी संधिस्थानातून वाहणारी धारा लहान होते. पी-एन्. संधिस्थानावरील विभव अडथळ्याची उंची पुरेशी मोठी झाल्यास बहुसंख्य इलेक्ट्रॉन आणि बहुसंख्य कोटरे यांद्वारे मिळणारी धारा जवळपास शून्य होते ; आणि पी-एन् संधिस्थानामधून केवळ अल्पसंख्य वाहनिकांची धारा वाहते अशा प्रकारे या दिशेने लहान विद्युत्धारा वाहते म्हणून या दिशेला उलटी (reverse) दिशा म्हणतात. पी-एन् संधिस्थानातून उलट्या दिशेने वाहणाऱ्या विद्युत्धारेला गलनधारा (leakage current) असेही नाव आहे. पी-एन् संधिस्थानामधून अग्रिम दिशेने ५-१० मिली ॲम्पीअर तर उलट दिशेने काही मायक्रोॲम्पीअर धारा वाहते. (आ. ३.३-ग) म्हणजे एका दिशेने विद्युत् धारेला कमी अडथळा येतो तर दुसऱ्या दिशेने मोठा अडथळा येतो म्हणून ए. सी. पासून डी. सी. प्राप्त करण्यासाठी अशा पी-एन् संधिस्थान डायोडचा उपयोग करतात.





आ. ३.३ (ख) --पी-एन् संधिस्थान (उलटी दिशा)

आ. ३.३ (ग) --पी-एन् संधिस्थानाचा लक्षणवक्र

अनुक्रमणिका

ट्रांझिस्टर :

ट्रांझिस्टर म्हणजे अर्धवाहक ट्रायोड आहे. त्यात अर्धवाहकाच्या एकल स्फटिकात तीन प्रदेश असतात. मधला भाग टोकाकडील भागांपेक्षा वेगळ्या प्रकारचा असतो पी-एन् पी ट्रांझिस्टरमध्ये बाजूचे प्रदेश पी प्रकारचे तर मधला प्रदेश एन् प्रकारचा असतो. एन् पी एन् ट्रांझिस्टर मधील संरचना याच्या उलट असते.

ट्रांझिस्टरच्या मधल्या प्रदेशास आधार (base) म्हणतात. या थराची जाडी ०.००२ सें. मी. असते. एका अंगाच्या प्रदेशास उत्सर्जी (emitter) म्हणतात, कारण तेथून आधार प्रदेशात वाहनिक सोडले जातात. दुसऱ्या अंगाच्या प्रदेशाला संग्राही (collector) म्हणतात. संग्राहीचे कार्य म्हणजे आधारामध्ये आलेले वाहनिक गोळा करणे सभोवतालच्या वातावरणाचा परिणाम होऊ नये यासाठी ट्रांझिस्टर हवाबंद वेष्टणात बंदिस्त असतो. उत्सर्जी, आधार आणि संग्राही यांना जोडलेल्या तारा वेष्टणांतून बाहेर काढलेल्या असतात. त्यांच्या द्वारे ट्रांझिस्टरमधील विविध प्रदेशांशी विद्युत्संबंध प्रस्थापित करता येतो.

अनुक्रमणिका

ट्रांझिस्टर तंत्रविद्या :

ट्रांझिस्टर तयार करण्याच्या चार प्रमुख रीती आहेत:--

(१) वर्धित संधिस्थान : या रीतीत अर्धवाहकाचा स्फटिक वाढत असतांना वितळलेल्या द्रवात आलटून पालटून दाता, परिग्राहक आणि नंतर पुन्हा दाता अशुद्ध्या मिसळतात. या प्रकारे मिळालेल्या एकल स्फटिकात एन् पी एन् अशी संरचना मिळते. त्यापासून ट्रांझिस्टर बनवितात.

(२) मिश्रातुकरण (alloying) : यांत एन् अर्धवाहकावर परिग्राही द्रव्य ठेऊन ते वितळवितात. त्या द्रवामध्ये अर्धवाहक विरघळतो. तो थिजू दिल्यास पी प्रकारचा बनतो आणि अर्धवाहकात पी-एन् संधिस्थान बनते. अशीच प्रक्रिया दुसऱ्या बाजूने अर्धवाहकावर केल्याने तेथेही पी-एन् संधिस्थान बनते, अशा प्रकारे पी-एन् पी. संरचना मिळते.

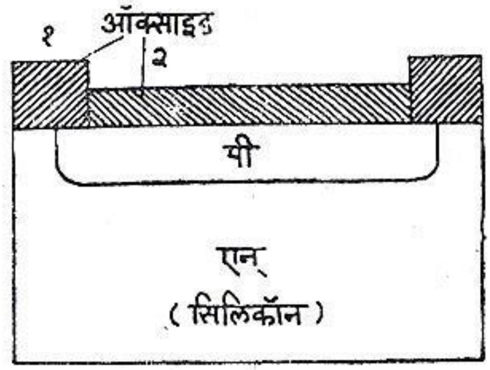
(३) एपिटॅक्सी (epitaxy) रीति : या रीतिमध्ये अर्धवाहक स्फटिकाच्या चकतीवर वायुस्वरूपात अर्धवाहकाचे अणू सोडून त्यांचा थर देतात. या अणू बरोबर दाता अथवा परिग्राहक अणू बाष्परूपात सोडले तर ते देखील चकतीवर जाऊन बसतात आणि अर्धवाहकावर एन् किंवा पी प्रकारचा थर मिळतो. अशा प्रक्रियेच्या पुनरावर्तनाने आवश्यक त्याप्रकारची थरांची संरचना (structure) मिळविता येते.

(४) विसरण (diffusion) रीति : या रीतीचा आणि तिच्या संपरिवर्तनाने (modificaiton) मिळालेल्या समतल (planar) प्रक्रियेचा (process) आजकाल जास्त वापर होत आहे.

या रीतीमध्ये एन् प्रकारचा अर्धवाहक वायुरूप परिग्राहक अशुद्धीच्या वातावरणात ठेवलेला असतो, अर्धवाहकाचा ताप त्याच्या द्रवणांकाच्या (melting point) जवळ असतो : म्हणजे जर्मेनियम ८५०° से. तर सिलिकॉन १०००° से. तापावर असतो. वायुस्वरूपी अशुद्धीचे अणू अर्धवाहकावर आदळून आंत शिरतात. त्यांचे अर्धवाहकात विसरण होते. ही विसरणाची क्रिया अतिशय हळूहळू होते. एक तासात अशुद्धी अणू साधारणतः २/१००० मि. मी. खोलवर जातात, विसरणाच्या दृष्टीने सिलिकॉनसाठी बोरॉन व फॉस्फरस तर जर्मेनियमसाठी गॅलियम व अँटिमनी हे अशुद्धी अणू जास्त सोइस्कर असल्याचे आढळते.

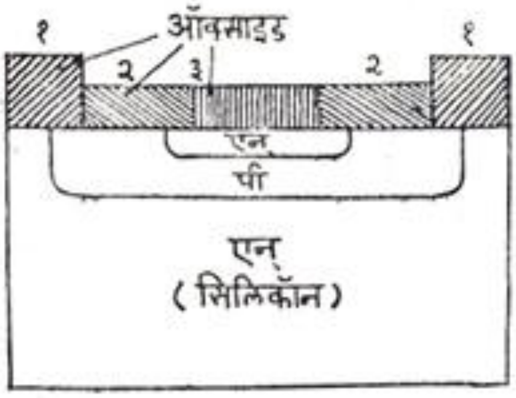
समतल प्रक्रियेत एन् प्रकारच्या सिलिकॉनची चकती १०००° से. तापावर ठेऊन तीवरून पाण्याची वाफ पाठवितात. यामुळे पृष्ठभागाचे ऑक्सिडीकरण होऊन तेथे सिलिकॉन ऑक्साइडचा थर बनतो हा सिलिकॉन ऑक्साइडचा थर म्हणजे जणू काही सिलिकॉन चकतीचे चिलखतच असते. या थराची जाडी साधारणतः १/१००० मि. मी. असते. या थरावर विशेष प्रकारचा प्रकाशसंवेदी (light sensitive) लेप देतात आणि त्यावर मुखवटा (mask) चढवितात. मुखवट्यावर अतिनील (ultraviolet) प्रकाश सोडतात. मुखवट्यामधून ज्या स्थानी प्रकाश पडतो त्या स्थानी लेपावर प्रकाशाची क्रिया होऊन एक संरक्षी थर तयार होतो. यानंतर ही चकती फोटोच्या निगेटिव्ह प्रमाणे विशिष्ट रसायनात धुतात. त्यामुळे ज्या ठिकाणी प्रकाश पडला नव्हता त्या ठिकाणचा लेप धुतला जातो व त्याखालचा ऑक्साइडच्या थर उघडा पडतो. हा ऑक्साइडचा थर हायड्रोफ्लुओरिक ॲसिडच्या द्रावणात विरघळवितात, म्हणजे तेथे सिलिकॉन चकतीचा

भाग उघडा पडतो. चकती ८५०° से. तापावर नेऊन तिला बोरॉनच्या समावरणात ठेवल्याने चकतीवर बोरॉन जमा होतो. नंतर चकती १२००° से. वर जवळ जवळ एक तास ठेवतात यामुळे बोरॉनचे अणू सिलिकॉनच्या आत विसरण पावतात. आणि पी प्रकारचा प्रदेश मिळतो. नंतर चकतीवरून पुनःश्च पाण्याची वाफ पाठवून उघड्या प्रदेशावर ऑक्साइडचा थर बनवितात (आ. ३. ४ क) लेप-मुखवटा-अतिनील प्रकाश इत्यादींच्या उपयोगाने वर वर्णिलेल्या विधीनुसार ऑक्साइड थर (२) मध्ये खिडकी (३) पाडतात. खिडकी मधून फॉस्फरस या दाता अशुद्धीचे विसरण करून तेथे एन् प्रकारचा प्रदेश प्राप्त करतात आणि पृष्ठभागाचे पुनः ऑक्सिडीकरण करतात. (आ. ३.४ ख) प, फ, ख, आणि ब येथील ऑक्साइड थर पूर्व निर्दिष्ट रीतीने काढून टाकून तेथे अल्युमिनियमचे उद्बाष्पन (evaporation) करून त्याचा थर चढवितात आणि त्यांना डाग देऊन तारा जोडतात. या तारांच्या साह्याने उत्सर्जी आणि आधार यांच्याशी विद्युत्संपर्क साधतात. चकतीच्या खालच्या पृष्ठभागाद्वारे संग्राहीआधार संधिस्थानाशी संपर्क साधता येतो (आ. ३. ४ ग).



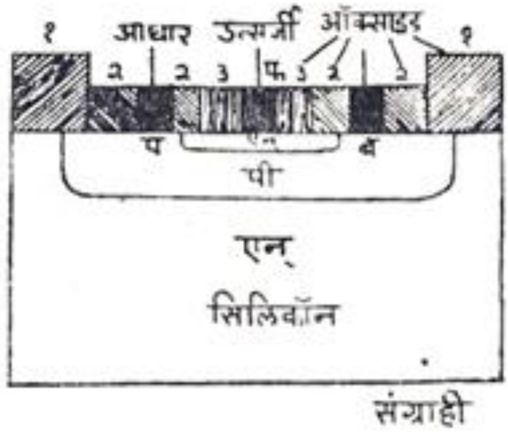
(क)

आ. ३.४ (क) --समतल प्रक्रियेतील निरनिराळ्या अवस्था



(ख)

आ. ३. ४ (ख) --समतल प्रक्रियेतील निरनिराळ्या अवस्था



(ग)

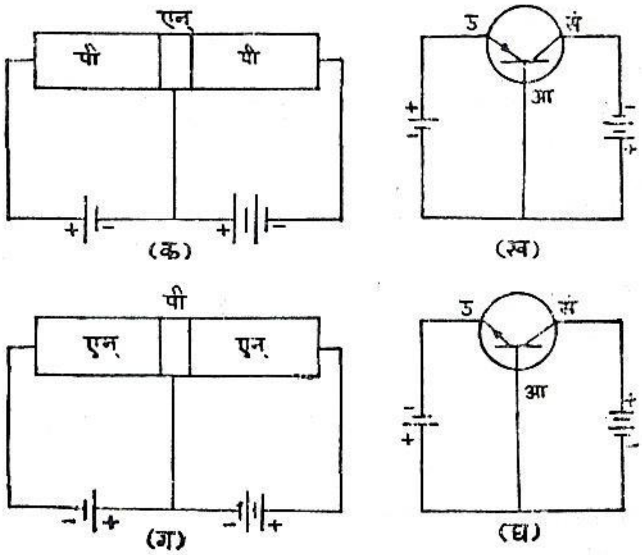
आ. ३. ४ (ग) --समतल प्रक्रियेतील निरनिराळ्या अवस्था

अनुक्रमणिका

ट्रांझिस्टर बनविण्याच्या या रीतीमध्ये संधिस्थानांचा समावरणाशी (environment) मुळीच संपर्क येत नाही. त्यांची गलनधारा अतिशय कमी--१० व्होल्टवर १ नॅनो ॲम्पीअर (१०$^{-१२}$ ॲ.) असते. आधारथराची जाडी अतिशय कमी असल्याने ट्रांझिस्टर कित्येक सहस्त्र मेगॅहर्ट्स वारंवारते पर्यंत (frequency) वापरता येतो. या तंत्राच्या उपयोगाने अनेक ट्रांझिस्टर एकसमयावच्छेदे करून तयार करता येतात. १ सें. मी. व्यासाच्या सिलिकॉनच्या चकतीवर १०० ट्रांझिस्टर सहज बनविता येतात आणि अर्थातच ट्रांझिस्टरला लागणाऱ्या कच्च्या मालात पुष्कळ बचत होते. याच तंत्रामध्ये योग्य ते फेरबदल करून संपूर्ण परिपथ (circuit) तयार करता येतात. अशा परिपथांना संकलित (integrated) परिपथ म्हणतात.

ट्रांझिस्टर क्रिया :

ट्रांझिस्टर वापरतांना त्याचे उत्सर्जी-आधार संधिस्थान अग्रिम दिशेने विजेरीला जोडतात व संग्राही-आधार संधिस्थान उलट्या दिशेने दुसऱ्या विजेरीला जोडतात. म्हणजे पी एन् पी. ट्रांझिस्टर मधील उत्सर्जी पी प्रदेश आधारसापेक्ष धन विभवावर (potential) असतो आणि संग्राहीला विजेरीचे ऋण अग्र जोडतात (आ. ३. ५ क, ख). एन् पी एन् ट्रांझिस्टर मध्ये उत्सर्जी आधार संधिस्थान अग्रिम दिशेने अभिनीत (biassing) करण्यासाठी विजेरीचे ऋण अग्र उत्सर्जीला जोडतात. आणि संग्राही उलट्या दिशेने अभिनीत करण्यासाठी त्याला विजेरीचे धन अग्र जोडतात (आ. ३. ५ ग, घ).



आ. ३. ५ (क) -पी एन् पी ट्रांझिस्टर (अभिनती) (ख) -पी एन् पी ट्रांझिस्टर (संकेत चिन्ह) (ग) -एन् पी एन् ट्रांझिस्टर (अभिनती) (घ) -एन् पी एन् ट्रांझिस्टर (संकेत चिन्ह)

पी एन पी. ट्रांझिस्टरमधील उत्सर्जी आणि आधार ही अनुक्रमे विजेरीच्या धन आणि ऋण अग्राला जोडलेली असल्याने संधिस्थान अग्रिम दिशेने अभिनीत असते ; त्यामुळे बहुसंख्य वाहनिकांना दिसणाऱ्या अडथळ्याची उंची कमी होते. पी प्रदेशातील कोटरे संधिस्थान ओलांडून आधारामध्ये येतात. आधार एन् प्रकारचा असल्याने तेथे कोटरे हे अल्पसंख्य वाहनिक (carrier) असतात. यापैकी काही कोटरांचे आधारातील बहुसंख्य वाहनिकांशी-इलेक्ट्रॉनशी पुनःसंयोजन होते. काही मुक्त कोटरे आधाराला जोडलेल्या ऋण अग्राप्रत पोहोचतात. त्यांच्या योगे आधार-धारा (base current) प्राप्त होते. परंतु

आधाराची जाडी अतिशय लहान (०.०१ मि. मी.) असल्यामुळे तेथे उत्सर्जीपासून आलेल्या कोटरांपैकी ९० टक्के कोटरे आधाराच्या दुसऱ्या अंगाला असलेल्या संधिस्थानापर्यंत जातात. हे संधिस्थान उलट्या दिशेने अभिनीत असते. संग्राहीला विजेरीचे ऋण अग्र जोडलेले असते. त्यामुळे या संधिस्थानावरील विद्युत्क्षेत्रामुळे ही मुक्त कोटरे संग्राहीप्रत पोहोचतात. आधार एन् प्रकारचा असल्याकारणाने त्यामधील बहुसंख्य वाहनिक---- इलेक्ट्रॉन----ऋण विभवावर असलेल्या संग्राहीकडे जाऊ शकत नाहीत. म्हणजे उत्सर्जी धारेचा ९० टक्के भाग संग्राही परिपथात वाहतो.

अशाच प्रकारची क्रिया एन् पी एन् ट्रांझिस्टरांमध्ये घडते. फरक एवढाच की कोटरांऐवजी इलेक्ट्रॉन वरील प्रकारच्या क्रियेमध्ये भाग घेतात.

परिपथांच्या आकृतीमध्ये ट्रांझिस्टर आ. ३.५-ख आणि घ मध्ये दिलेल्या संकेतचिन्हानी दर्शवितात. उत्सर्जी हा बाणाने दर्शविला जातो. बाणाची दिशा पारंपरिक (conventional) विद्युत् धारेची दिशा दर्शविते. पारंपरिक दृष्टीने विद्युत्धारा बाह्य परिपथात विजेरीच्या धन अग्राकडून ऋण अग्राकडे वाहते.

वरील विवेचनावरून हे आढळते की उत्सर्जी आधार संधिस्थानातून वाहणारी विद्युत्धारा, आधार धारा आणि संग्राही धारा यांमध्ये विभागली जाते. या धारा अनुक्रमे I_E, I_B आणि I_C ने दर्शविल्यास

$$I_E = I_B + I_C$$

उत्सर्जीधारा १ मिली ॲम्पीअर असली आणि संग्राही धारा ०.९८ मि. ॲ. असल्यास आधार धारा ०.०२ मि. ॲ. अथवा २० मायक्रोॲम्पीअर असते.

उत्सर्जी धारेचा α वा भाग संग्राहीप्रत जात असल्यास

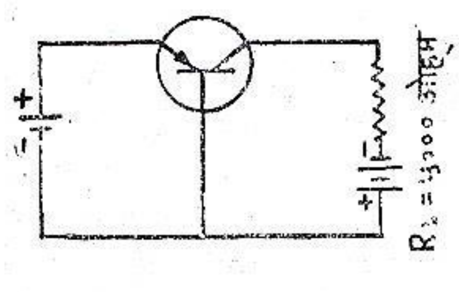
$$I_C = \alpha I_E$$

अथवा $I_B = (1 -- \alpha)\, I_E$

ट्रांझिस्टरची प्रवर्धन क्रिया :

ट्रांझिस्टरच्या अग्रिम दिशेने अभिनीत असलेल्या उत्सर्जी-आधार संधिस्थानाचा रोध साधारणतः ५० ओह्मच्या जवळपास असतो ; तर उलट्या दिशेने अभिनीत असलेल्या संग्राही आधार संधिस्थानाचा रोध जवळपास ५ लक्ष ओह्म असतो. संग्राहीधारा ही उत्सर्जी धारेवर अवलंबून असते ती संग्राही-आधार विभवावर फारशी अवलंबून नसते. या दोन्ही कारणास्तव संग्राही आधार परिपथात काही सहस्त्र ओह्मचा रोध जोडला तरी त्यामुळे या परिपथात वाहणाऱ्या धारेत फारसा फरक पडत नाही. उदाहरणार्थ आ. ३.६ मधील उत्सर्जीआधार संधिस्थान अग्रिम दिशेने अभिनीत आहे. त्या परिपथात V_i हा संकेत प्रवेशित केल्यास त्यामुळे धारेमध्ये होणारा बदल V_i/ ५० ॲ. आहे. या धारेचा ९८ टक्के भाग संग्राही आधार संधिस्थानातून वाहतो, आणि ती धारा यानंतर R_L (५००० ओह्म) या भार रोधामधून वाहते. म्हणून संग्राही धारेतील होणाऱ्या बदलामुळे भार रोधावर.

अनुक्रमणिका



आ. ३.६ --ट्रांझिस्टरद्वारे प्रवर्धन

V_o = (V_i/५०) × ० · ९८ × ५००० विभव भेद मिळतो अथवा V_o/V_i = ९८

म्हणजे संग्राही परिपथातील संकेत (signal) उत्सर्जी परिपथात सोडलेल्या संकेताच्या ९८ पट मोठा असतो. अशा प्रकारे ट्रांझिस्टरच्या साह्याने विद्युत् संकेताचे प्रवर्धन करता येते.

४. ट्रांझिस्टरचे विविध उपयोग

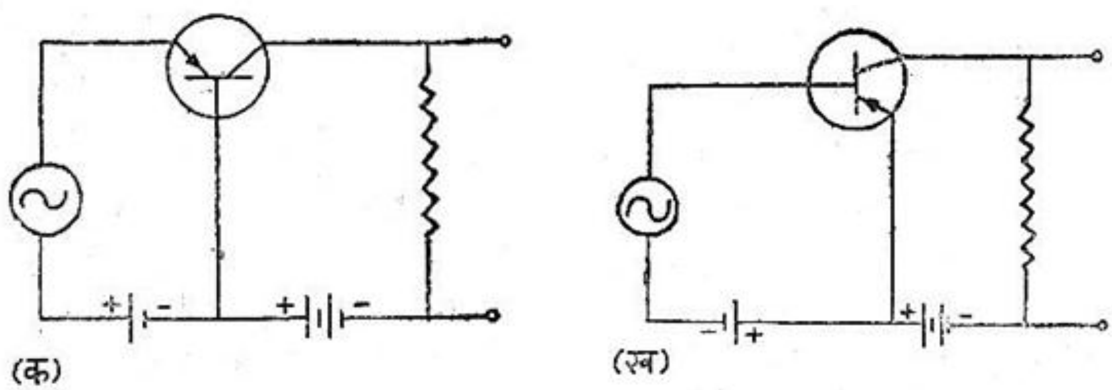
ट्रांझिस्टराच्या साह्याने संकेताचे प्रवर्धन होऊ शकते त्यामुळे त्याचा विविध प्रकारे उपयोग करता येतो. त्याच्या साह्याने ध्वनीचे प्रवर्धन करतात ; बहिऱ्यांना उपयुक्त असलेल्या श्रवण-साधनात (hearing aid) त्याचा बहुमोल उपयोग होतो. रेडिओ आणि दूरदर्शन यांमध्ये ट्रांझिस्टरच्या वापरामुळे मोठी प्रगती झाली आहे. संगणित्राच्या (computer) क्षेत्रात तर ट्रांझिस्टरने मोठी क्रांतीच घडवून आणली आहे. अनेक उद्योगांमध्ये निरनिराळ्या प्रक्रियांवर नियंत्रण ठेवण्यासाठी ट्रांझिस्टर आणि ट्रांझिस्टर परिपथ यांचा वापर होऊ लागला आहे.

ट्रांझिस्टर प्रवर्धीच्या रचना :

ट्रांझिस्टर तीन प्रकारांनी प्रवर्धीमध्ये वापरता येतो—

(१) साधारण आधार परिपथ.--या परिपथात उत्सर्जी .आधार परिपथात संकेत टाकतात-संकेताचे प्रवर्धन झाल्यानंतर तो संग्राही आधार परिपथातून बाहेर घेतातआधार हा आगम . (input) आणि निर्गम (output) या दोन्ही परिपथात साधारण घटक (common component) असतो.(क-१.४ .आ) .

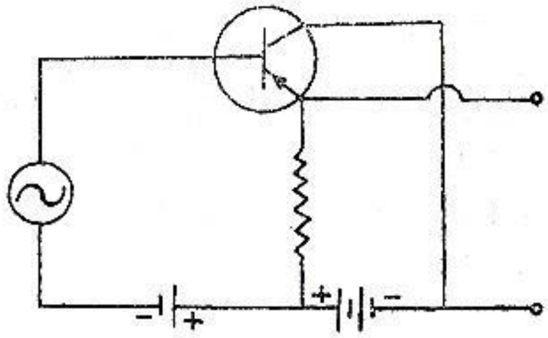
(२) साधारण उत्सर्जी परिपथ.--या परिपथात उत्सर्जी हा साधारण घटक असतो. आधार-उत्सर्जी परिपथात संकेत सोडतात. प्रवर्धित संकेत उत्सर्जीसंग्राही परिपथांतून बाहेर घेतात (आ ४.१-ख). व्यवहारात या परिपथाचा जास्त वापर होतो.



ट्रांझिस्टर प्रवर्धीच्या व्यवस्था

आ. ४.१ (क) -साधारण आधार परिपथ **४.१ (ख) -साधारण उत्सर्जी परिपथ**

(३) साधारण संग्राही परिपथ.--या परिपथात आगम संकेत (input signal) आधार-संग्राही परिपथात सोडतात. प्रवर्धित निर्गम संकेत संग्राही-उत्सर्जी परिपथातून बाहेर घेतात. (आ. ४. १-ग).



आ. ४.१ (ग) -साधारण संग्राही परिपथ

या परिपथांचे गुणधर्म खालील सारणीत (table) दिलेले आहेत. परिपथाची अभिकल्पना (design) करताना ते लक्षात ठेवणे आवश्यक आहे :--

		धारा प्रवर्धन	आगम रोध	निर्गम रोध	व्होल्ट प्रवर्धन
साधारण आधार	..	= १	लहान	मोठा	मोठे
		(०.९८)	(४०)	(१० लक्ष)	(२५०)
साधारण उत्सर्जी	..	मोठे	मध्यम	मध्यम	मोठे
		(४९)	(५००-२०००).	(२००००)	(२५०)
साधारण संग्राही	..	मोठे	मोठे	लहान	
		(५०)	(१०००० ते ५ लक्ष).	(३०)	१

लक्षण वक्र :

ट्रांझिस्टरांचा योग्य प्रकारे वापर होण्यासाठी त्यांचे विभिन्न परिस्थितीत कशा प्रकारे आचरण होते हे माहीत असावयास पाहिजे. ही माहिती प्रत्यक्ष प्रयोगाने मिळवितात. आणि ती आलेख पत्रावर अंकित करतात. आलेखामुळे आपणास एकाच दृष्टिक्षेपात पुष्कळ माहिती मिळते. आवश्यक माहिती मिळविण्यासाठी ट्रांझिस्टरच्या वेगवेगळ्या इलेक्ट्रोडना विद्युत् व्होल्टता लाऊन त्यामुळे वाहणाऱ्या विद्युत्धारा मोजतात. या बाबी आलेखपत्रांवर आलेखाच्या (graph) स्वरूपात दर्शवितात. अशा आलेखांना लक्षण वक्र (characteristic curve) म्हणतात.

ट्रांझिस्टरच्या दृष्टीने दोन प्रकारचे लक्षण वक्र महत्त्वाचे आहेत :--

(१) उत्सर्जी संधिस्थानाचा अग्रिम दिशेचा वक्र. यालाच उत्सर्जी किंवा आगम लक्षण वक्र असे म्हणतात.

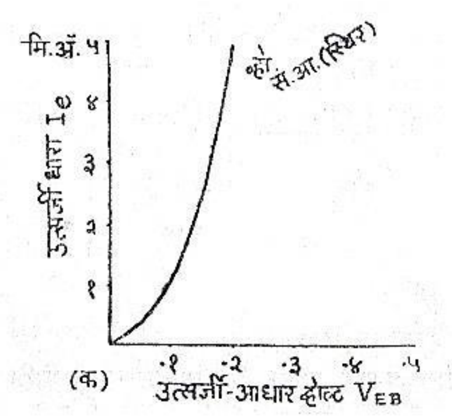
अनुक्रमणिका

(३) संग्राही संधिस्थानाचा उलट दिशेचा वक्र. याला संग्राही किंवा निर्गम लक्षण वक्र म्हणतात.

परिपथांत ट्रांझिस्टर कशा प्रकारे वापरला जातो यावर हे लक्षण वक्र अवलंबून असतात. साधारण आधार व्यवस्थेतील (configuration) लक्षण वक्र हे साधारण उत्सर्जी व्यवस्थेतील लक्षण वक्रापेक्षा भिन्न असतात.

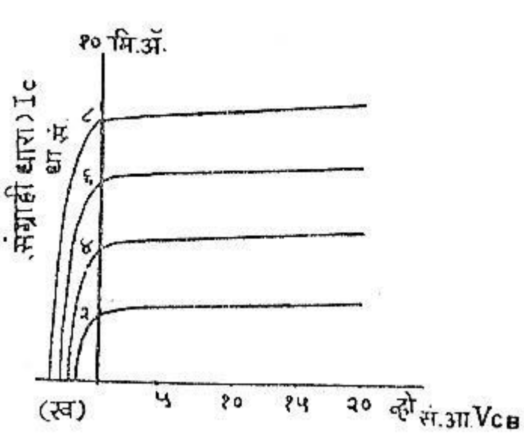
साधारण आधार रचना :

या रचनेत उत्सर्जी आणि आधार यांमधील विभव भेद ०.१ पासून ०.२ व्होल्टपर्यंत वाढविल्यास विद्युत्धारा १ मि. अॅ. पासून ५ मि. अॅ. पर्यंत वाढते (आ. ४.२-क). यावरून आगम रोध (.१/४) × १००० = २५ ओह्म आहे असे दिसते.



आ. ४.२ (क) -आगम लक्षणवक्र (साधारण आधार व्यवस्था)

संग्राही-आधार व्होल्टता वाढविल्यास संग्राही धारेमध्ये विशेष बदल होत नाहीत (आ.४. २-ख). यावरून या परिपथाचा रोध--निर्गम रोध--बराच मोठा असल्याचे दिसते.

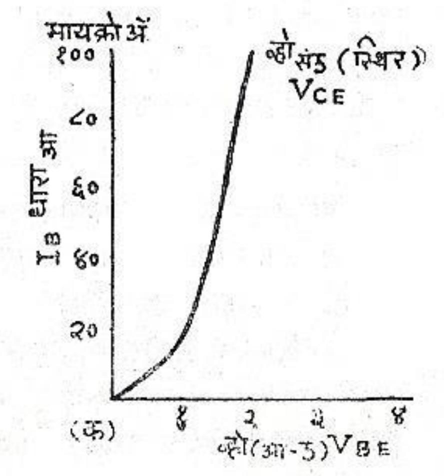


आ. ४.२ (ख) -निर्गम लक्षणवक्र (साधारण आधार व्यवस्था)

अनुक्रमणिका

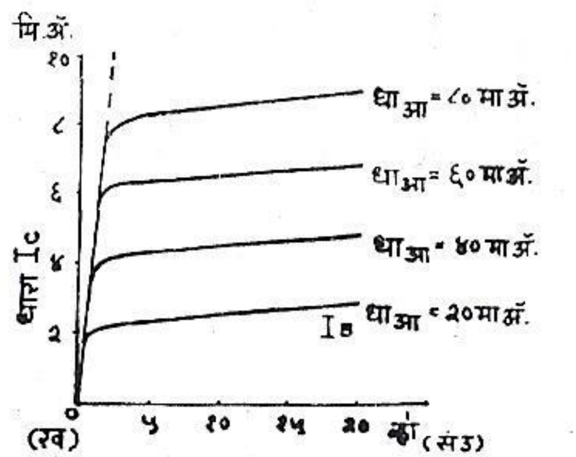
साधारण उत्सर्जी रचना :

या रचनेच्या आगम लक्षण वक्राची (आ. ४.३-क) साधारण आधार रचनेतील आगम लक्षणवक्राशी तुलना केल्यास असे आढळते की साधारण उत्सर्जी रचनेत आधारधारा अतिशय लहान असते. या रचनेत ‘व्होल्टता ०.१ पासून ०.२ पर्यंत वाढविली तर आधारधारा २० पासून १०० मायक्रो ॲम्पीअरपर्यंत वाढते. अर्थात या रचनेत आगम रोध (०.१/८० × $१०^{-६}$ = १२५०) ओह्म आहे.



आ. ४.३ (क) -आगम लक्षणवक्र (साधारण उत्सर्जी)

या परिपथात संग्राही-उत्सर्जी व्होल्टता वाढविल्याने (आ. ४.३-ख) संग्राही धारेमध्ये साधारण आधाररचनेच्या मानाने (आ. ४.२-ख) जास्त धारावाढ होते. यावरून या रचनेवरील निर्गम रोध साधारण आधार रचनेतील निर्गम रोधापेक्षा लहान असतो असे दिसते.



आ. ४.३ (ख) -निर्गम लक्षणवक्र (साधारण उत्सर्जी)

अनुक्रमणिका

संकर प्राचल :

ट्रांझिस्टरच्या क्रियेचे या लक्षणवक्रांच्या साह्याने आकलन होत असले तरी ट्रांझिस्टरविषयी तांत्रिक माहिती देतांना त्याचे चार प्राचल (parameter) देण्याचा प्रघात आहे. त्यांना संकर प्राचल (hybrid parameter) म्हणतात. यांच्या साह्याने ट्रांझिस्टर परिपथाची अभिकल्पना करणे सोपे होते. आपणास ट्रॅंझिस्टर परिपथांचे सखोल विवेचन करण्याचे नसल्यामुळे येथे या प्राचलांचा केवळ उल्लेख केला आहे :--

(१) h_i = आगम रोध = आगम व्होल्टता/आगम धारा. आगम परिपथात प्रयुक्त केलेली व्होल्टता आणि त्या परिपथातील धारा यांचे गुणोत्तर. या प्रसंगी निर्गम परिपथ शॉर्ट (short) केलेला असतो.

(२) h_r = उलटे व्होल्टता-पश्चभरण (feedback) गुणोत्तर = आगम व्होल्टता/निर्गम व्होल्टता.

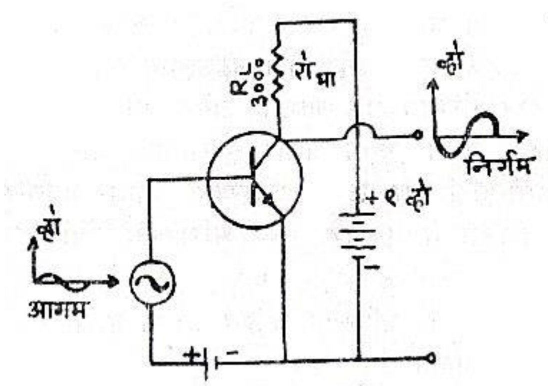
या प्रसंगी आगम खुल्या परिपथात असतो; आगम धारा = ०.

(३) h_f = अग्रिम-धारा वर्धन (gain) = निर्गम धारा/आगम-धारा या प्रसंगी निर्गम शॉर्ट असतो; निर्गम व्होल्टता = ०.

(४) h_o = निर्गम संवहन (admittance) = निर्गम धारा/निर्गम व्होल्टता याप्रसंगी आगम खुल्या परिपथावर असतो; आगम धारा = ०.

ट्रांझिस्टरद्वारे प्रवर्धन :

संकेत प्रवर्धनासाठी बऱ्याच प्रमाणात साधारण उत्सर्जी रचनेचा वापर होतो (आ. ४.४). या रचनेत आधार आणि उत्सर्जी यांमध्ये संकेत सोडतात. येथे एन्-पी-एन् ट्रांझिस्टर वापरला आहे. यथायोग्य बदल करून हेच विवेचन पी-एन्-पी ट्रांझिस्टरांचे बाबत लागू पडते.



आ. ४.४ -एन्-पी-एन् ट्रांझिस्टर प्रवर्धी

अनुक्रमणिका

प्रवर्धीवर आरोपण (superimpose) केलेला संकेत धन दिशेने वाढत असता आधाराचे उत्सर्जीसापेक्ष धन विभव वाढते; अर्थात उत्सर्जी-आधार संधिस्थानाचा विभवभेद अग्रिम दिशेने वाढतो. यामुळे त्या संधिस्थानामधून वाहणारी धारा वाढते. अग्रिम दिशेने अभिनती वाढल्याने संधिस्थानातून वाहणारी धारा ही इलेक्ट्रॉनच्या गतीमुळे मिळते. या विद्युत्धारेचा बराच भाग पी प्रकारचा आधार ओलांडून संग्राही प्रत पोहोचतो आणि त्या परिपथात वाहतो. म्हणजे आधार-धारा वाढली की संग्राही धारादेखील त्यानुसार वाढते. ही धारा R_L या भाररोधातून वाहत असल्याने त्या रोधावरील विभव भेद बदलतो. भाररोधाचे वरचे टोक विजेरीच्या विभवावर म्हणजे स्थिर विभवावर असते. त्यामुळे रोधाच्या खालच्या टोकाचे विभव बदलते. धारा वाढली की भाररोधाच्या संग्राही टोकाचे विभव कमी होते, धारा कमी झाली की ते वाढते. एवंच संकेतामुळे आधाराचे विभव वाढले की आधार-उत्सर्जी धारा वाढते. त्या अनुसार संग्राही धारा वाढून संग्राहीचे विभव कमी होते. याउलट संकेतामुळे आधार-उत्सर्जी यांमधील विभव भेद कमी झाला की उत्सर्जी धारा कमी होते. त्यायोगे संग्राही धारादेखील कमी होते आणि परिणामेकरून संग्राहीचे विभव वाढते. थोडक्यात म्हणजे आधार विभव वाढले की संग्राही विभव कमी होते. आधार विभव कमी झाले की संग्राही विभव वाढते. म्हणजे संग्राहीपासून संकेत बाहेर घेतल्यास तो परिपथात जोडलेल्या संकेताच्या उलट प्रकारचा असतो यालाच संकेताची प्रावस्था (phase) 'उलटणे' असे म्हणतात.

संकेत प्रवर्धनाचे कार्य योग्य प्रकारे होण्यासाठी प्रवर्धीपासून मिळणाऱ्या निर्गम संकेताचा तरंग आकार (wave-shape) आगम संकेतासारखाच असावयास पाहिजे. त्यासाठी संग्राही धारेतील बदल आधार धारेतील होणाऱ्या बदलाच्या समप्रमाणात व्हावयास हवा. परंतु, संग्राही धारा बदलल्याने संग्राहीचे विभव बदलते आणि त्याचा संग्राही धारेवर परिणाम होऊ शकतो. तसेच परिपथात ट्रॅंझिस्टराचे कार्य क्षमतेने (efficient) आणि उत्तम प्रकारे होण्यासाठी योग्य प्रकारची परिस्थिती असावी लागते. अशी परिस्थिती निर्माण करण्यास आधार आणि संग्राही यांना योग्य अभिनती (bias) मिळाली पाहिजे. अशी परिस्थिती निर्माण करण्यासाठी खालील बाबींकडे लक्ष द्यावे लागते :--

(१) उत्सर्जी-आधार संधिस्थान अग्रिम दिशेने व संग्राही-आधार संधिस्थान उलट्या दिशेने अभिनीत झाले पाहिजे.

(२) ट्रॅंझिस्टरची क्रिया त्याच्या लक्षण वक्राच्या सरळ भागावर व्हावयास हवी; नाहीतर निर्गम संकेत हुबेहूब आगम संकेतासारखा रहाणार नाही.

(३) संकेत नसतांना ट्रॅंझिस्टरचा क्रियाबिंदु (operating point) वातावरणाच्या तापामधील फेरबदलांमुळे वा अन्य कारणाने बदलता कामा नये.

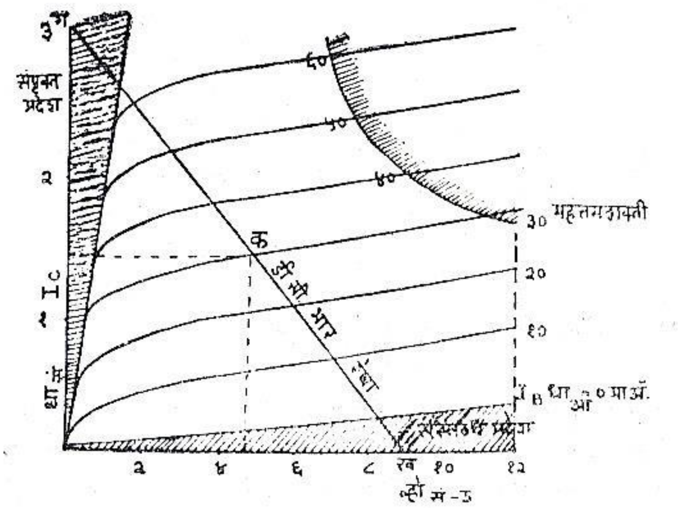
(४) संकेत दिल्यानंतर ट्रॅंझिस्टर परिपथामधून वाहणारी धारा बदलते. अशा प्रसंगी ट्रॅंझिस्टर-निर्मात्याने ठरवून दिलेल्या मर्यादेतच ट्रॅंझिस्टरचे कार्य झाले पाहिजे.

प्रवर्धी (amplifier) मध्ये (आ. ४.४) संकेत शून्य असतांना काही आधार-धारा वाहते. ही ३० मायक्रोॲम्पीअर आहे असे समजा. त्याच्या ४९ पट धारा म्हणजे १·४७ मि. ॲ. धारा संग्राही परिपथात वाहते. संग्राही-उत्सर्जी परिपथातील विजेरीचा विभव भेद ९ व्होल्ट असल्यास संग्राही उत्सर्जी विभव भेद $(९ -- १·४७) \times १०^{-३} \times ३ \times १०^{३} = ४·४९$ व्होल्ट असतो.

अनुक्रमणिका

V_{CE} = ४·५९ व्हो. I_C = १·४७ मि. ॲ.

ही स्थिती क या बिन्दूने (आ. ४.५) दर्शविली आहे. **क** हा क्रिया-बिंदु होय. संकेताच्या ऋण अर्धचक्रात ऋणविभव मोठे झाले की आधार आणि उत्सर्जी यामधील विभव भेद कमी होतो आणि आधार-धारा कमी होते. ती शून्य झाल्यास संग्राही धारा देखील शून्य होईल. [येथे साधारण उत्सर्जी रचनेत वाहत असणारी गलनधारा (leakage current) शून्य आहे असे गृहीत धरले आहे.] अर्थात् भार रोधामधून देखील धारा वाहत नाही. यामुळे संग्राही इलेक्ट्रोडचे विभव विजेरीच्या विभवाएवढे म्हणजे ९ व्होल्ट असते. या प्रसंगी.



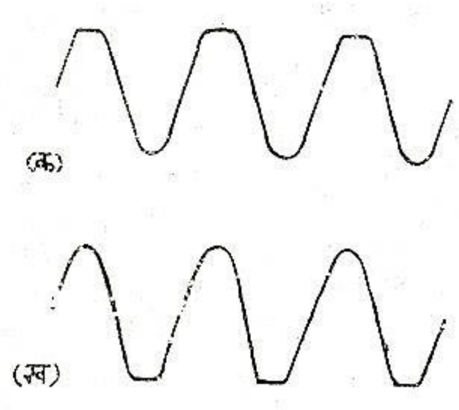
आ. ४.५ -साधारण उत्सर्जी प्रवर्धीचा निर्गम लक्षणवक्र, डी. सी. भाररेषा आणि क्रियाबिंदु

V_{CE} = ९ व्होल्ट, I_C = O ही परिस्थिती ख या बिन्दूद्वारे दर्शविली आहे.

संकेताच्या धन अर्धचक्रात (half-cycle) आधार धारा आणि त्या अनुसार संग्राही धारा वाढते. आगम संकेत पुरेसा मोठा असल्यास संग्राही धारा एवढी वाढेल की भार रोधावरील विभवभेद $I_C R_L$ जवळजवळ ९ व्होल्ट होऊन संग्राहीचे उत्सर्जी सापेक्ष विभव शून्य होते (प्रत्यक्षात ते अतिशय लहान होते). अशा प्रसंगी संग्राही धारा ९ व्हो/३ सहस्त्र ओह्म = ३ मि. ॲ. वाहते.

V_{CE} = ० I_C = ३ मि. ॲ. ही अवस्था ग या बिंदुने दर्शविली आहे **खग** या रेषेला. भार रेषा (load line) म्हणतात कार्य बिन्दु क हा भार रेषेच्या मध्यावर येईल अशी योजना साधारणपणे करतात. त्याचप्रमाणे ट्रॅंझिस्टरची क्रिया आ. ४.५ मधील रेखांकित भागात जाणार नाही अशी काळजी घेतात. ट्रॅंझिस्टर संपृक्त (saturation) अवस्थेत अथवा सस्तब्ध (cut off) अवस्थेत गेल्यास निर्गम संकेत विरूपित (distorted) होतो. (आ. ४.६ क, ख).

अनुक्रमणिका

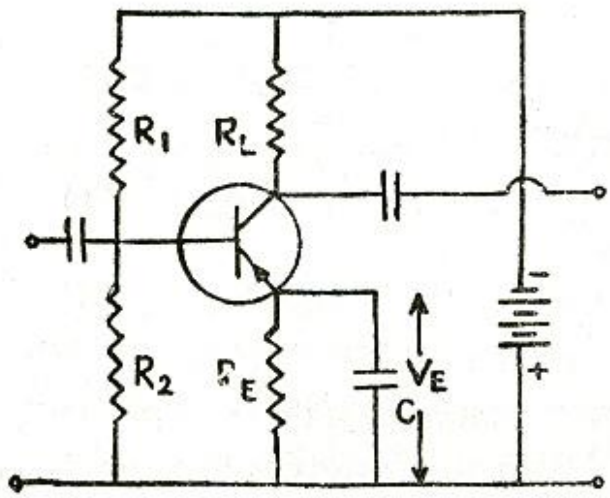


आ. ४.६ -संकेताचे विरूपण (क) संपृक्त अवस्था (ख) सस्तब्ध अवस्था

परिपथाची अभिकल्पना (design) करण्यासाठी भार रेषेचा उपयोग होतो. कधी ठराविक व्होल्टतेची विजेरी आणि विवक्षित ट्रॅाँझिस्टर घेऊन परिपथ बनवावा लागतो तर कधी विवक्षित भार रोध वापरावा लागतो. अशा प्रसंगी भार रेषेची फार मदत होते.

ट्रॅाँझिस्टर अभिनती :

ट्रॅाँझिस्टरची परिपथातील क्रिया त्याच्या कार्य बिंदूवर अवलंबून असते. सभोवतालचा ताप (temperature) बदलल्यास ट्रॅाँझिस्टरची गलन-धारा बदलते आणि कार्य परिस्थिती बदलते. एका ट्रॅाँझिस्टरऐवजी दुसरा ट्रॅाँझिस्टर बदलला तरी त्यामुळे परिपथातील विद्युत् धारा बदलून ट्रॅाँझिस्टरचा क्रिया बिंदू बदलतो. अशा प्रकारच्या कारणांमुळे परिपथाच्या कार्यात बदल होऊ नये यासाठी विशेष परिपथांच्या साह्याने ट्रॅाँझिस्टरची अभिनती स्थायी (stable) राखली जाते. असा एक परिपथ आ. ४.७ मध्ये दर्शविला आहे.



आ. ४.७ -ट्रांझिस्टर अभिनतीचे स्थायीकरण

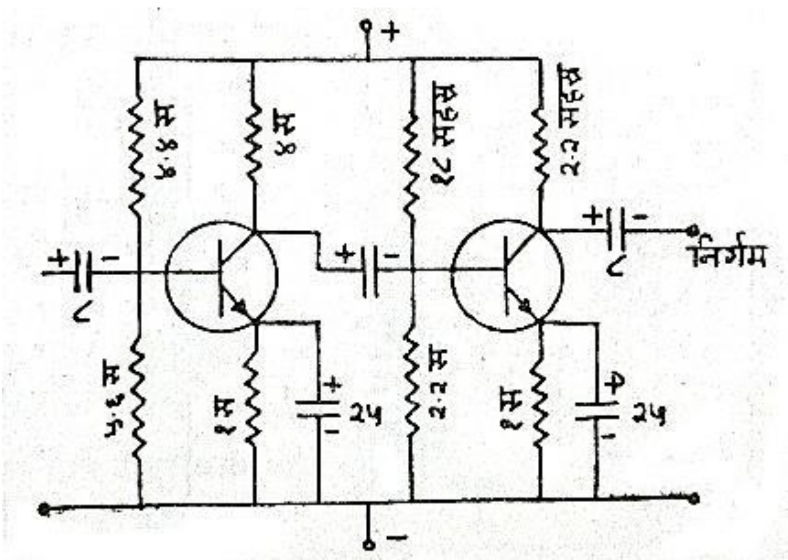
अनुक्रमणिका

या परिपथात विजेरीचा विभवभेद R_l आणि R_2 या रोधामध्ये विभागला जातो. येथे R_2 वरील विभव आधाराला दिले आहे. उत्सर्जीचे अग्र R_E रोधामार्गे R_2 ला जोडले आहे. आणि R_E यामधून वाहणाऱ्या धारांमुळे उत्पन्न होणारा विभव भेद उत्सर्जीला अग्रिम दिशेने अभिनीत ठेवतो. R_l आणि R_2 या विभव-विभाजकामधून (potential divider) वाहणारी धारा आधार-धारेपेक्षा बरीच मोठी असल्यास आधार-विभव V_B, आधार-धारा I_E वर अवलंबून नसते. उत्सर्जी-विभव हे उत्सर्जी मधून वाहणारी धारा आणि R_E हा रोध यांवर अवलंबून असते.

संग्राहीची गलन धारा (leakage current) तापवाढीमुळे अथवा अन्य कारणांनी वाढली तर संग्राही धारा I_C वाढते व त्याचबरोबर उत्सर्जी-धारा I_E वाढून उत्सर्जीविभव V_E वाढते आणि आधार-उत्सर्जी विभव भेद V_{BE} कमी होतो. यामुळे संग्राही धारा I_C कमी होते. अशा प्रकारे ट्रॅंझिस्टर परिपथाची कार्यस्थिती स्थायी (stable) ठेवण्यास मदत होते.

प्रवर्धी :

ध्वनी वर्धन करण्यासाठी वर दिलेल्या प्रवर्धी-परिपथासारखे अनेक परिपथ वापरावे लागतात. प्रवर्धीच्या एका पदाने (stage) वाढलेला संकेत दुसरा पदाला देतात. (आ. ४.८) अशा प्रकारे दोन-तीन पदांच्या साह्याने संकेताचे वर्धन झाल्यानतर शेवटल्या पदामध्ये या संकेताचे ध्वनीमध्ये परिवर्तन करतात. या शेवटल्या पदाचे कार्य म्हणजे विद्युत् संकेताच्या शक्तीचे प्रवर्धन करून त्याचे ध्वनिसंकेतात रूपांतर करणे हे आहे. विद्युत् धारेच्या साह्याने ध्वनी उत्पन्न करण्यासाठी लाऊडस्पीकर (Loud speaker) वापरतात. लाउडस्पीकरच्या साह्याने विद्युत् शक्तीचे उत्तम क्षमतेने ध्वनीशक्तीमध्ये रूपांतर करण्यासाठी रूपांतरित्र (transformer) वापरावा (आ. ४.९) लागतो.

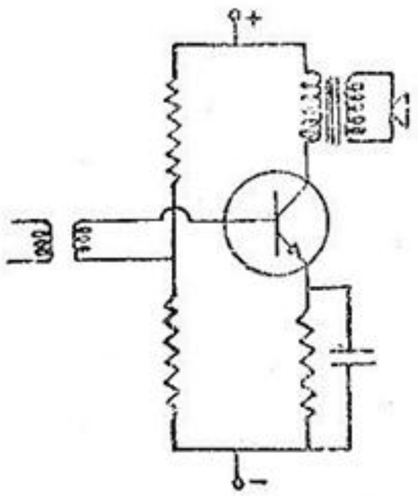


आ. ४.८-द्विपद प्रवर्धी

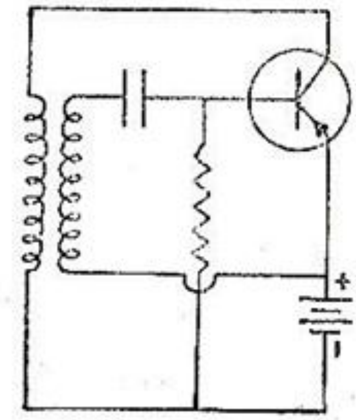
दोलित्र :

मोठमोठाल्या सभांमध्ये वापरण्यात येणाऱ्या ध्वनिवर्धकामधील लाउडस्पीकरसमोर मायक्रोफोन ठेवला तर कर्कश शिटीसारखा ध्वनि ऐकू येतो. याचे कारण असे की (बाहेरून नसला तरी) प्रत्येक विद्युत परिपथांत अंतर्गत कोलाहल (noise) उत्पन्न होत असतो. त्याचे प्रवर्धन होऊन तो लाउडस्पीकर मधून मायक्रोफोनवर पडतो. मायक्रोफोनवरील संकेताचे परिपथाद्वारे प्रवर्धन होऊन तो लाउडस्पीकारला मिळतो. अशा क्रियेचे पुनरावर्तन होते आणि यामुळे परिपथात दोलने निर्माण होतात. म्हणजे प्रवर्धीच्या निर्गम संकेतातील कांही भाग आगम संकेत म्हणून वापरून त्याच प्रवर्धीला दिला तर त्यामध्ये आंदोलने निर्माण होतात. दोलित्रांचे (oscillator) अनेक प्रकार आहेत. त्यांपासून मिळणाऱ्या संकेताचा परिपथ-तपासणीसाठी उपयोग होतो.

आ. ४.१० मधील परिपथाला विजेरी जोडल्याबरोबर ट्रँझिस्टरची संग्राही धारा वाढू लागते. ही ट्रांसफॉर्मरच्या प्राथमिक (primary) कुंडलातून वाहत असल्याने त्या कुंडलातून जाणाऱ्या चुंबकीय बलरेषांच्या संख्येत बदल होतो. या बलरेषा ट्रान्सफॉर्मरच्या द्वितीयक (secondary) कुंडलामधून (coil) जातांत. त्यामुळे कुंडलामध्ये विद्युत्गामक (e. m. f.) निर्माण होते. ही व्होल्टता उत्सर्जी-आधार या संधिस्थानावर प्रयुक्त केली जाते; यामुळे अग्रिम दिशेने अभिनती वाढून आधार-धारा वाढते, अर्थात् पर्यायाने संग्राही धारादेखील वाढते. ही धारा प्राथमिक कुंडलातून वाहत असल्याने वरील क्रियेचे पुनरावर्तन होते. अखेरीस संग्राही धारा फार वाढून ट्रँझिस्टर संपृक्त अवस्थेत जाऊ लागतो. याप्रसंगी संग्राही धारा वाढण्याचा दर कमी होतो. अतएव ट्रँसफॉर्मरच्या प्राथमिकाद्वारे द्वितीयकात कमी व्होल्टता उत्पन्न होते. यामुळे उत्सर्जी आधार अभिनती आणि त्यामुळे आधार-धारा कमी होते. साहजिकच संग्राही धारा कमी होते. त्यामुळे प्राथमिकाद्वारे द्वितीयकात उत्पन्न विद्युतगामक लहान होते. या क्रियेच्या पुनरावृत्तीने ट्रँझिस्टर संस्तब्ध अवस्थेप्रत जाऊ लागतो. त्यानंतर पुन्हा संग्राही धारा वाढू लागते आणि वरील घटनांचे वारंवार पुनरावर्तन होऊन परिपथात विद्युत् आंदोलने उत्पन्न होतात. आ. ४.११ मध्ये एका वेगळ्या प्रकारच्या दोलित्राचा सोपा परिपथ दिलेला आहे.

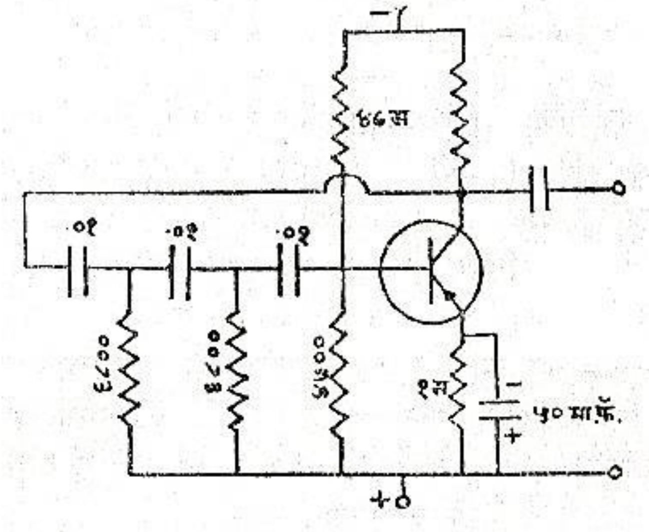


आ. ४.९-शक्ती प्रवर्धी



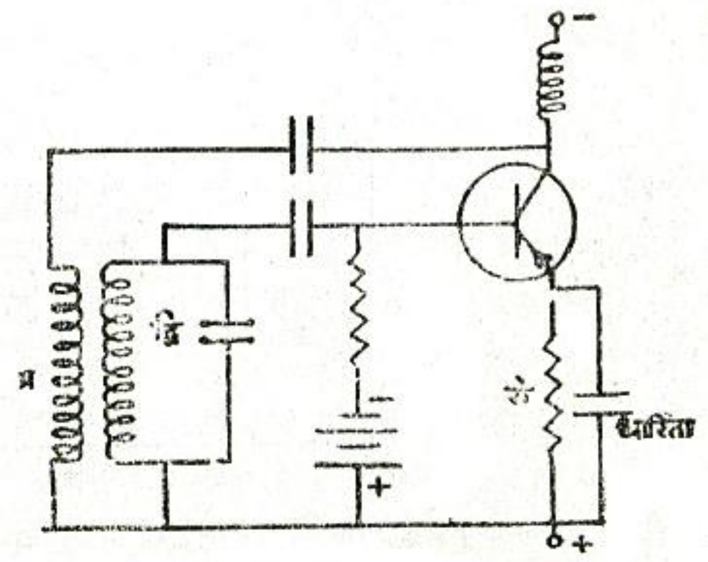
आ. ४.१०-ट्रांझिस्टर दोलित्र

अनुक्रमणिका



आ. ४.११-दोलित्र

वर दिलेल्या दोलित्रांच्या साह्याने ऐकू येणारे ध्वनि-संकेत उत्पन्न करतात. परंतु श्रव्य (audio) वारंवारतेच्या (frequency) पलीकडील म्हणजे रेडियो-वारंवारतांचे (१ लक्ष/सेकंद पेक्षा जास्त कंपने) संकेत वेगळ्या प्रकारच्या परिपथाच्या साह्याने मिळवितात. (आ. ४.१२). या परिपथाला विजेरी जोडल्याबरोबर संग्राहीला मिळालेले विभव धारित्रा (capacitor)मार्गे प्र या प्राथमिक कुंडलावर (coil) प्रयुक्त होते. कुंडलातून विद्युतप्रभार वाहतो त्यामुळे द्वितीयक (secondary) कुंडल आणि धारित्र या परिपथाला विद्युत्-धक्का मिळतो आणि या परिपथात आंदोलने सुरू होतात. टँक (Tank) परिपथाचे एक टोक धारित्रामार्गे ट्रॅंझिस्टरच्या आधाराला जोडलेले असल्याने ट्रॅंझिस्टरच्या आधाराची अभिनती आलटून पालटून बदलते. यामुळे घडणाऱ्या आधार-धारेतील आणि त्या अनुषंगाने होणाऱ्या संग्राही धारेतील बदलामुळे संग्राही व्होल्टतेत बदल होतात व ते वर वर्णिल्याप्रमाणे प्राथमिक कुंडलाद्वारे टँक परिपथास विद्युत् धक्के देतात. अशा प्रकारे परिपथाद्वारे विद्युत्आंदोलने निर्माण होतात.

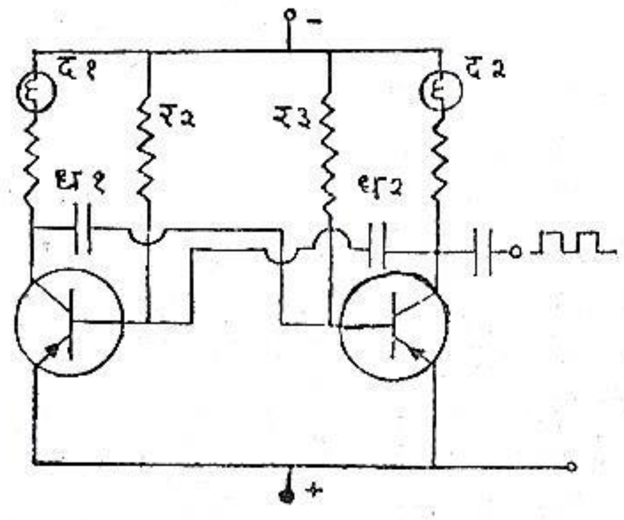


आ. ४.१२-रेडियो वारंवारता दोलित्र

अनुक्रमणिका

बहुकंपित्र :

काही प्रसंगी व्होल्टतेची आयताकार (rectangular) दोलने वापरण्याची आवश्यकता असते. अशी दोलने बहुकंपित्र (multi-vibrator) नावाच्या परिपथाद्वारे निर्माण करतात. मूलतः बहुकंपित्र हा दोन पदें (stages) असलेला प्रवर्धी आहे. (आ. ४.१३) यांतील दुसऱ्या पदाचा निर्गम संकेत पहिल्या पदाला देतात. ट्रॅांझिस्टरच्या संग्राहीमधून वाहणारी धारा ही टॉर्च बल्बमधून वाहते. त्यामुळे ट्रॅांझिस्टरमधून विद्युत-धारा वाहत आहे की नाही हे बल्ब लागलेला आहे की विझलेला आहे यावरून ओळखता येते. परिपथ बांधल्यानंतर त्याला विजेरी जोडल्यास टॉर्च बल्ब द$_{१}$ आणि द$_{२}$ हे आलटून पालटून लागतात असे दिसते. रोध र$_{२}$, र$_{३}$ आणि धारित्र (capacitor) ध$_{१}$ आणि ध$_{२}$ यांची मूल्यें बदलल्यास बल्ब लागले रहाण्याचा काळ बदलता येतो.



आ. ४.१३-बहुकंपित्र

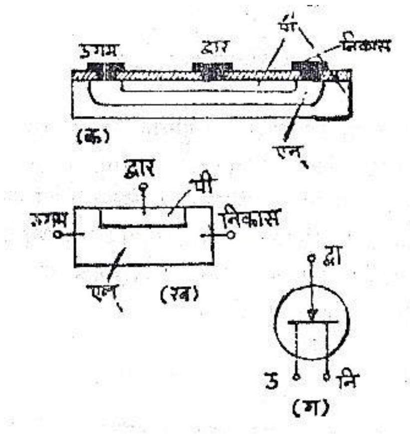
५. ट्रांझिस्टरचे वंशज

ट्रांझिस्टरचा शोध लागल्यानंतर स्थायूंमधून वाहणाऱ्या विद्युत्धारेचे कसे नियंत्रण करता येईल आणि त्याचा कशाप्रकारे उपयोग करता येईल याविषयीच्या संशोधनाला वेगाने चालना मिळाली. तंत्रामध्ये झालेल्या प्रगतीमुळे अतिशुद्ध स्फटिक बनविता येऊ लागले, त्यांमध्ये विवक्षित प्रदेशात नियंत्रित प्रमाणात अशुद्ध्या मिसळणे शक्य झाले. त्यायोगे ट्रांझिस्टरसारख्या अनेक इलेक्ट्रॉनिक साधनांचा शोध लागला. त्यापैकी काहींची माहिती येथे दिली आहे.

क्षेत्र-परिणाम ट्रांझिस्टर :

आतापर्यंत वर्णिलेल्या ट्रांझिस्टरमधून बहुसंख्य आणि अल्पसंख्य वाहनिक (इलेक्ट्रॉन आणि कोटरे) या दोहोंच्याही धारा वाहत असतात, म्हणून या प्रकारच्या ट्रांझिस्टरांना द्विध्रुवीय (bipolar) ट्रांझिस्टर म्हणतात. याउलट काही साधनांमध्ये इलेक्ट्रॉन किंवा कोटरे यांपैकी एकाच प्रकारच्या (बहुसंख्य) वाहनिकांची विद्युत् धारा वाहते. अशा साधनांना एक ध्रुवीय (unipolar) ट्रांझिस्टर म्हणतात. अशा ट्रांझिस्टरवर विद्युत्क्षेत्र लाऊन त्याच्या साह्याने दुसऱ्या विद्युत् परिपथामध्ये वाहणाऱ्या धारेवर नियंत्रण ठेवतात, म्हणून त्यास क्षेत्र परिणाम (field effect) ट्रांझिस्टर (FET क्षे.प.ट्रा) म्हणतात.

हे ट्रांझिस्टर ३ ऱ्या प्रकरणात वर्णिलेल्या समतल प्रक्रियेने तयार करतात. त्यामध्ये पी प्रकारच्या सिलिकॉनच्या पातळ चकतीवर एन् प्रकारचा प्रदेश असतो आणि त्यावर पुन्हा पी प्रकारचा एक पातळ थर असतो (आ. ५.१ क) एन् प्रदेशाला प्रनाल (channel) म्हणतात व त्याची जाडी ०.०५ मि. मी. असते दोन्ही पी प्रदेश परस्परांशी जोडलेले असतात. या संरचनेचे धूळ, वातावरणातील आर्द्रता इत्यादिकांपासून रक्षण व्हावे यासाठी सिलिकॉन ऑक्साइडचा लेप देतात. प्रनाल आणि पी प्रदेशाशी विद्युत्संपर्क साधण्यासाठी त्यांना जोडलेली अग्रे बाहेर घेतलेली असतात. प्रनालाच्या दोन अग्रांना अनुक्रमे उगम (source) आणि निकास (drain) म्हणतात. वरच्या अंगास असलेल्या पी प्रदेशाला द्वार (gate) म्हणतात (आ ५.१ ख) उगम आणि निकास यांमध्ये जवळजवळ ०.०५ मि. मी. अंतर असते. या साधनाच्या संकेत चिन्हामधील द्वार दर्शविणारा बाण (आ. ५.१ ग) द्वाराखाली असलेल्या पी-एन् संधिस्थानातून अग्रिम दिशेने वाहणाऱ्या पारंपरिक विद्युत्धारेची दिशा दर्शवितो येथे द्विधुवीय ट्रांझिस्टर प्रमाणेच पी आणि एन प्रदेशांची अदलाबदल करता येते. म्हणजे दोन एन् प्रकारच्या प्रदेशांमध्ये पी प्रकारचा प्रनाल प्राप्त करून क्षेत्र परिणाम ट्रांझिस्टर बनविता येतो.

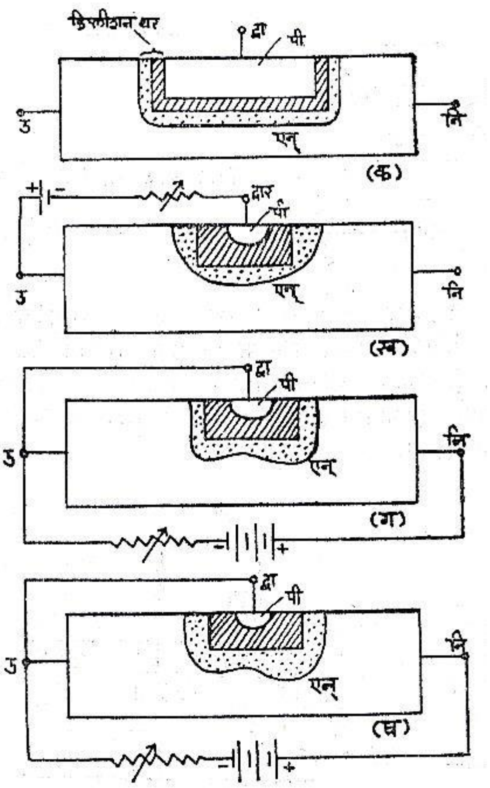


आ. ५.१–
(क) क्षेत्र परिणाम ट्रांझिस्टर संरचना
(ख) क्षे. प. ट्रांझिस्टर
(ग) क्षे. प. ट्रांझिस्टर संकेतचिन्ह

क्षे. प. ट्रांझिस्टरची क्रिया :

आपणास माहित आहे की, पी एन् संधिस्थानावर मुक्त वाहनिक नसलेला प्रदेश असतो. (आ. ५.२ क) या थराला डिप्लीशन (depletion) थर म्हणतात. पी-एन् द्वार आणि उगम यामध्ये विजेरी जोडतात. संधिस्थान उलट्या दिशेने विजेरीला जोडल्यास या थराची जाडी वाढते. (आ. ५.२ ख) द्वाराचे उगम-सापेक्ष विभव वाढवीत गेल्यास अशी अवस्था येते की, डिप्लीशन थराची जाडी प्रनालास व्यापून टाकते आणि प्रनाल बंद होतो. ज्या व्होल्टतेवर प्रनाल बंद होतो त्या व्होल्टतेला सस्तब्ध (cut off) व्होल्टता म्हणतात.

आतां उगम आणि निकास यावर विभव भेद लावला आणि द्वार आणि उगम या दोहोंची व्होल्टता एकच आहे अशी कल्पना करू. या प्रसंगी प्रनालामधून धारा वाहते. जसजसे उगमाकडून निकासाकडे जावे तसतसे विभव वाढत जाते. अर्थात् प्रनालाच्या निरनिराळ्या भागांचे द्वारसापेक्ष विभव भिन्न असते निकासाजवळील भागाला उलट्या दिशेने जास्त मोठे विभव मिळाल्याने तेथे डिप्लीशन थर अधिक जाड होतो (आ. ५.२ ग). आणि तो पाचरीच्या आकाराचा होतो. उगम-निकास व्होल्टता (V_{DS}) वाढवीत नेल्यास या पाचरीची जाडी वाढत जाते. अखेरीस एका विशिष्ट व्होल्टतेवर व्हो$_{\text{च}}$ (V_p) प्रनाल चिमटला (pinch) जातो. (आ. ५.२ घ). इलेक्ट्रॉनच्या परस्परांमधील अपकर्षण बलामुळे प्रनाल पूर्णपणे बंद होत नाही.



(क) द्वार-उगम व्होल्ट = ०;
निकास उगम व्होल्ट = ०

(ख) व्हो द्वा-उ < ०;
व्हो नि-उ = ०

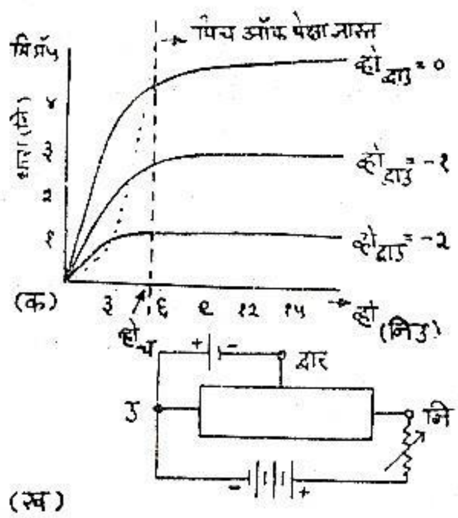
(ग) व्हो द्वा-उ = ०;
व्हो नि-उ < ०

(घ) व्हो द्वा-उ = ०;
व्हो नि-उ = व्हो$_{\text{च}}$

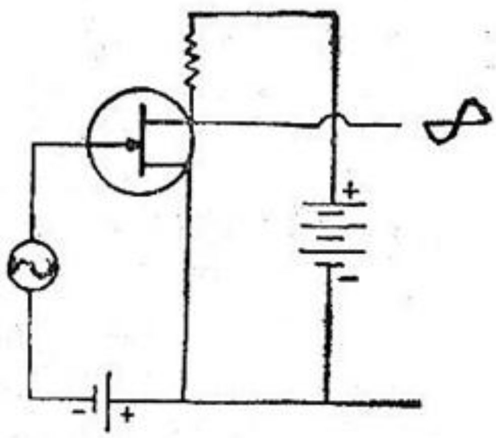
आ. ५.२-क्षेत्र परिणाम ट्रांझिस्टरची क्रिया : डिप्लिशन थरावरील परिणाम-

एवंच प्रनालातील निकास-धारा (drain current) उगम-निकास व्होल्टता व्हो$_{\text{नि-उ}}$ (V_{DS}) आणि उगम-द्वार व्होल्टता व्हो$_{\text{द्वाउ}}$ (V_{GS}) या दोहोंवर अवलंबून असते (आ. ५.३ क आणि ख). चिमट व्होल्टते पलीकडे निकासधारा विशेष वाढत नाही. उगम-द्वार परिपथात संकेत सोडला तर त्याच्या बदलत्या

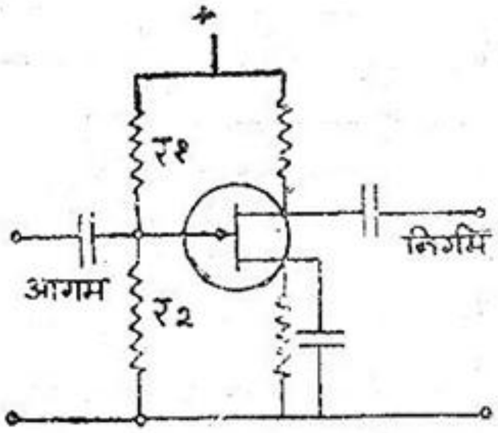
व्होल्टतेमुळे प्रनालाची जाडी बदलून उगम-निकास परिपथातील धारा बदलते व या परिपथात भार-रोध जोडला असल्यास त्यापासून मोठी निर्गम (output) व्होल्टता मिळते. आणि संकेत प्रवर्धन होते (आ. ५.४) क्षे-पट्रा (FET) प्रवर्धीमध्ये द्वाराची अभिनती र १-र२ या विभव-विभाजकाद्वारे प्राप्त करतात. (आ. ५.५).



आ. ५.३--(क) निर्गम लक्षणवक्र (ख) क्षे. प. ट्रा. (अभिनती)



आ. ५.४-क्षेपट्रा प्रवर्धी : बाह्य अभिनती



आ. ५.५-क्षेपट्रा प्रवर्धी : स्व-अभिनती

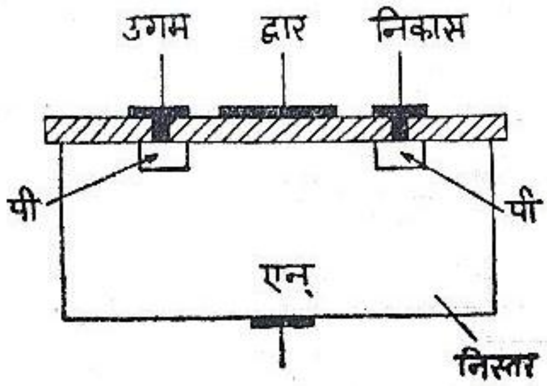
क्षे. प. ट्रा. मधून वाहणारी धारा तापावर अवलंबून असते. त्यामुळे ताप बदलल्यास त्याची गलनधारा (leakage current) बदलते तसेच प्रनालाचा रोध बदलतो आणि परिणामेकरून या साधनाची क्षमतेने कार्य करण्याची मर्यादा लहान होते· या प्रकारचा ट्रांझिस्टर जास्त शक्ती हाताळू शकत नाही. त्याचा उपयोग ५० कोटी हर्टझ् वारंवारतेपर्यंतच्या संकेतासाठीच होतो. सध्या हा ट्रांझिस्टर द्विध्रुवी ट्रांझिस्टरपेक्षा बराच महाग आहे. क्षेपट्रा (FET) मध्ये वरील दोष असले तरी त्यापासून काही लाभ देखील आहेत. यामध्ये व्होल्टतेच्याद्वारे धारेचे निर्यत्रण होते. त्याचा आगम संरोध (impedance) मोठा असतो, म्हणून या परिपथात संकेत सोडल्यास त्यामुळे संकेतावर परिणाम होत नाही. या ट्रांझिस्टरमध्ये कोलाहल (noise) अल्प प्रमाणात उत्पन्न होतो. ट्रांझिस्टर चालू आणि बंद असतांना असलेल्या संरोधाचे गुणोत्तर फार मोठे

अनुक्रमणिका

असल्याने स्वीचन (switching) परिपथात त्यांचा उत्तम प्रकारे उपयोग होऊ शकतो. क्षे. प. ट्रांझिस्टर हे एक नवे इलेक्ट्रॉनिक साधन आहे व ते अजून विकसनशील अवस्थेत आहे. त्यांत सुधारणा करण्याच्या दृष्टीने वेगाने संशोधन चालू आहे.

अवरोधितद्वार क्षेत्र-परिणाम ट्रांझिस्टर :

क्षेपट्रांच्या संरचनेत थोडा बदल करून हे नवे इलेक्ट्रॉनिक साधन (insulated gate) FET (Igfet) बनविण्यात आले आहे. या ट्रांझिस्टरमध्ये खाली एन् प्रकारच्या सिलिकॉनचा पातळ थर असतो त्यास निस्तर (substrate) म्हणतात. त्यावर जास्त प्रमाणात परिग्राही अशुद्धता असलेले दोन प्रदेश असतात. त्यांची जाडी ०.००५ मि.मी. असते व त्या प्रदेशांमधील अंतर ०.०२ मि.मी. असते. साधनाच्या रक्षणासाठी त्यांच्या पृष्ठभागावर सिलिकॉन ऑक्साइडचा थर बनवतात. या थराला असलेल्या छिद्रांमधून पी प्रदेशांवर धातूचे थर देऊन त्यांच्याद्वारे पी प्रदेशांशी विद्युत्संस्पर्श करता येतो. या दोन पी प्रकारच्या प्रदेशांना उगम आणि निकास म्हणतात. उगम आणि निकास यांमधील प्रदेशावर असलेल्या सिलिकॉन ऑक्साइडवर धातू चढवितात. या थराचा द्वार म्हणून उपयोग करतात. निस्तराच्या खालच्या अंगाला तार बसविलेली असते (आ. ५.६)

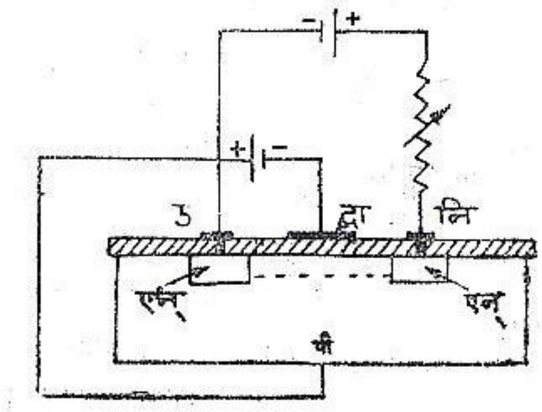


आ. ५.६-अवरोधितद्वार क्षेत्र परिणाम ट्रांझिस्टर (एन्हॅन्समेंट मॉस्फेट)

द्वाराला विभव दिलेले नसतांना उगम आणि निकास विजेरीला जोडले तर त्या परिपथातून लहान धारा वाहते कारण या प्रसंगी धारा पी-एन्-एन्-पी अशा संरचनेमधून वाहते यांपैकी एका संधिस्थानातून उलट्या दिशेने धारा वाहते. आता द्वाराला निस्तरसापेक्षा ऋण विभव दिले तर उत्पन्न झालेल्या विद्युत्क्षेत्रामुळे द्वाराखाली असलेल्या उगम आणि निकास यांच्यामधल्या प्रदेशातून मुक्त इलेक्ट्रॉन प्रतिकर्षिले जातात आणि निस्तरामधील अल्पसंख्य वाहनिक म्हणजे कोटरे तेथे आकर्षिली जातात. अशाप्रकारे तो थर एन् प्रकारचा न राहता पी प्रकारचा बनतो व उगम आणि निकास या थराने जोडले जातात. निकासाला उगमसापेक्ष ऋण विभव दिल्यास त्या परिपथातील धारा वाढते. या प्रकारच्या ट्रांझिस्टरला (enhancement mosfet) म्हणतात.

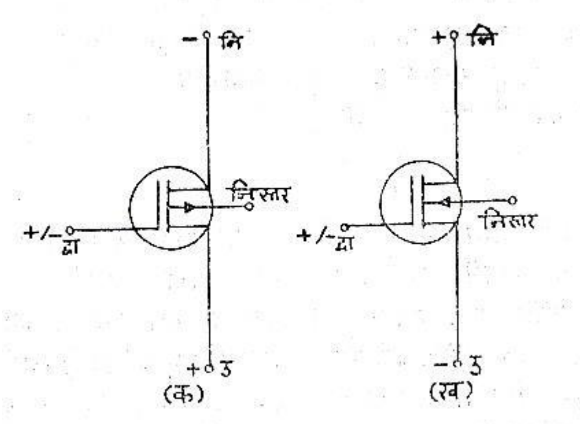
या उलट डिप्लीशन मॉस्फेटमध्ये निस्तर पी प्रकारचा असून उगम आणि निकास एन् प्रकारचे असतात. उगम आणि निकास यामधील प्रदेशात कमी प्रमाणात दाता अशुद्ध्या असलेला एन् प्रकारचा प्रनाल असतो. उगम, प्रनाल आणि निकास हे तिन्ही एन् प्रकारचे असल्याने निकासाला उगमसापेक्ष धन विभव दिल्यास परिपथातून विद्युत्धारा वाहते. निस्तराचे अग्र उगमाला जोडले आणि द्वाराला उगमासापेक्ष

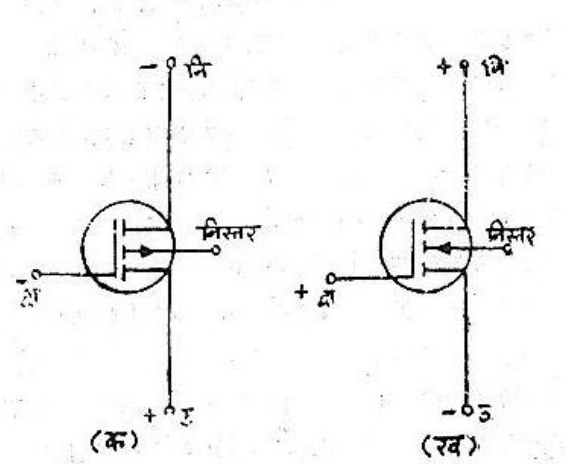
ऋण विभव दिले (आ. ५.७). तर द्वार आणि निस्तर यांमधील विद्युत्क्षेत्रामुळे एन् प्रकारच्या प्रनालामधील मुक्त वाहनिक खाली ढकलले जातात. प्रनालातील धारा वाहनिकांची संख्या कमी झाल्याने प्रनालातून वाहणारी धारा कमी होते अथवा प्रनालाचा रोध वाढतो. अशाप्रकारे द्वाराच्या विभवाच्या साह्याने उगम-निकास परिपथातील विद्युत्धारेवर नियंत्रण ठेवता येते.



आ. ५.७-डिप्लिशन मॉस्फेट

डिप्लीशन मॉस्फेट द्वाराला धन तसेच ऋण विभव देऊन वापरता येतो. (आ. ५.८ क ख) परंतु एन्हँन्समेंट मॉस्फेट (आ. ५.९ क ख) त्याच्या आतील संरचनेनुसार केवळ धन किंवा ऋण विभवाद्वारेच कार्यान्वित करता येतो.


आ. ५.८ डिप्लीशन मॉस्फेट-- (क) पी प्रनाल (ख) एन् प्रनाल येथे आकृती आहे.


आ. ५.९ एन्हॅन्समेंट मॉस्फेट-- (क) पी प्रनाल (ख) एन् प्रनाल

वर वर्णिलेल्या ट्रांझिस्टरला अवरोधित (insulated) द्वार क्षेत्र-परिणाम (Field effect) ट्रांझिस्टर म्हणतात. त्याच्या विशिष्ट संरचनेमुळे त्याला धातु-ऑक्साइड-अर्धवाहक (Metal oxide-semiconductor transistor) ट्रांझिस्टर अथवा (MOST) देखील म्हणतात. आजकाल मॉस्फेट (MOSFET) हे नाव अधिक प्रचारात आहे.

अनुक्रमणिका

मॉस्फेटचे द्वार १ दशसहस्त्रांश मिलीमीटर जाडीच्या सिलिकॉन ऑक्साइडच्या थरावर चढविलेले असल्याने त्याचा आगम संरोध फार मोठा ($१०^{१२}$ ओहम) असतो. साध्या द्विध्रुवी ट्रांझिस्टरच्या मानाने हा संरोध पुष्कळ मोठा आहे. द्वार परिपथातील धारा $१०^{-१५}$ ॲम्पीअरपर्यंत लहान असते. या कारणामुळे या साधनाच्या साह्याने रोधी पदार्थांच्या अथवा अर्धवाहकाच्या पृष्ठभागावरून वाहणारी, व्हाल्व्हच्या जालिके (grid) कडे वाहणारी धारा अशा अतिसूक्ष्म विद्युत् धारा मोजता येतात. या प्रकारच्या ट्रांझिस्टरचा प्रवर्धी आणि स्वीचन परिपथात उपयोग होतो.

संकलित परिपथ :

समतल प्रक्रियेच्या साह्याने ट्रांझिस्टरचा आकार लहान करण्यात यश मिळाल्यान एक नवी कल्पना मूर्त स्वरूपात आणणे शक्य झाले. ही कल्पना म्हणजे वरील प्रक्रियेचा उपयोग करून केवळ ट्रांझिस्टर न तयार करता संपूर्ण परिपथच तयार करावा. परिपथात लागणारे घटक म्हणजे डायोड, ट्रांझिस्टर, रोध, धारित्र (capacitor) आणि प्रेरितता (inductance), यांतील प्रेरितता सोडल्यास इतर घटक समतल प्रक्रियेच्या साह्याने बनविता येतात. या प्रक्रियेच्या साह्याने एकाच संरचनेमध्ये परिपथाला लागणारे सर्व घटक एकदम तयार करता येतात. हे घटक परस्परांपासून वेगळे करता येत नाहीत. यामुळे अशाप्रकारचा इलेक्ट्रॉनिक परिपथ योग्यप्रकारे कार्य करीत नसल्यास तो पूर्ण परिपथ फेकून द्यावा लागतो. परंतु यामुळे विशेष हानि होत नाही कारण पूर्ण परिपथाचा आकार अतिशय लहान असतो. उदाहरणार्थ या नव्या तंत्राचा उपयोग करून १ वर्ग मि मी. क्षेत्रफळाच्या आणि ०.२५ मि मी. जाड सिलिकॉनच्या चकतीमध्ये ५० ते ७५ रोध, धारित्र आणि ट्रांझिस्टर इत्यादि इलेक्ट्रॉनिक घटक सामावता येतात, व तेथेच ते आपापसांस यथायोग्य जोडलेले असतात. अशा परिपथास संकलित परिपथ (integrated circuit) म्हणतात. २-३ सें.मी. व्यासाच्या आणि अर्धा मि. मी. जाडीच्या सिलिकॉनच्या एका चकतीमध्ये असे शेकडो काप (chips) असतात. प्रत्येक कापाची तपासणी करून तो चकतीमधून कापून काढतात. त्यावर योग्य ठिकाणी जोडतारा (connecting wires) बसवून काप डबीमध्ये बंद करतात. डबीमधून केवळ तारा बाहेर आलेल्या असतात. डबी (१) १ सें. मी. व्यास ०.५ सें. मी. जाड आणि (२) ६ मि. मी. × ३ मि. मी. × १ मि. मी. अशा दोन प्रकारच्या आकारात येते.

संकलित परिपथाच्या शोधाने परिपथ बांधताना अनेक घटक बसविणे आणि डाग देऊन तारांनी ते जोडणे हे सर्व अनावश्यक झाले आहे. अर्धवाहक साधनांवर तापबदलाचा पुष्कळ परिणाम होतो पण या परिपथाचा आकार अतिशय लहान असल्याने त्याचा ताप सर्वत्र एकसमान असतो शिवाय त्याच्या वापरासाठी अल्प विद्युत् शक्ती लागत असल्याने त्यात ऊष्मा निर्माण होत नाही. या सर्व कारणांमुळे इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांच्या विश्वसनीयतेमध्ये मोठी वाढ झाली आहे.

संकलित परिपथांनी इलेक्ट्रॉनिक विश्वात क्रांती घडवून आणली आहे. इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांचा आकार अतिशय लहान झाला असून ती सुवाह्य झाली आहेत, तसेच उपकरणासाठी लागणाऱ्या कच्च्या मालात पुष्कळ बचत झाली आहे. आज बाजारात मिळणारी परिगणित्रे (calculators) कॅसेट टेपरेकॉर्डर्स इत्यादि उपकरणे ही इलेक्ट्रॉनिक क्रांतीची दृश्य फलें होत.

६. ट्रांझिस्टर : परीक्षा आणि चांचणी

ट्रांझिस्टर हे नाजूक इलेक्ट्रॉनिक साधन आहे. त्यामुळे ट्रांझिस्टर हाताळतांना त्यांची विशेष काळजी घ्यावी लागते :--

(१) ट्रांझिस्टर वापरण्यापूर्वी पुस्तिकेमधून त्याविषयी संपूर्ण माहिती मिळवावी. तो पी-एन्-पी की एन्-पी-एन् प्रकारचा आहे हे पहावे म्हणजे विजेरी योग्य प्रकारे जोडता येईल.

(२) ट्रांझिस्टरच्या क्रिया-मर्यादा लहान आहेत. पुस्तिकांमध्ये साधारणतः संग्राही व्होल्टता, संग्राही धारा, संग्राही-शक्ती यांच्या मर्यादा दिलेल्या असतात; तसेच संधिस्थानाच्या तापाची मर्यादा दिलेली असते. ट्रांझिस्टर या मर्यादांच्या आंतच वापरावा. या मर्यादांपैकी एकीचेही उल्लंघन होऊ देऊ नये.

(३) जर्मेनियम ट्रांझिस्टरची तापमर्यादा ८५० से. तर सिलिकॉन ट्रांझिस्टरची २००० से. असते. म्हणून ट्रांझिस्टर परिपथात जोडण्यासाठी डाग देतांना विशेष काळजी घ्यावी :--

(क) डाग देण्याची सळई)soldering iron.स्वच्छ आणि लहान असावी (

(ख) ट्रांझिस्टरच्या जोडतारांची टोके आणि ती परिपथात जेथे जोडावयाची आहे या सर्व ठिकाणी अगोदर कल्हई द्यावी)tinning(.

(ग) डाग देतांना ट्रांझिस्टर आणि जोडतारेचे टोक यामधील भाग तांब्याच्या पट्टीमध्ये पकडीने)pliers.म्हणजे ऊष्मा संधिस्थानापर्यंत पोहोचणार नाही .धरावा (

(घ) डाग देण्याची क्रिया लवकर आटोपावी.

(४) ट्रांझिस्टरच्या जोडतारा ट्रांझिस्टरपासून ३--४ मि.मी. अंतरावर वाकवाव्या.

(५) परिपथात शक्ति-ट्रांझिस्टर ऊष्मा-शोषकावर (heat sink) नीट बसवावा.

(६) ट्रांझिस्टरभोवती हवा खेळत असावी.

(७) ट्रांझिस्टरला डाग देण्याची सळई भूसंपर्कित (earthed) असावी.

(८) ट्रांझिस्टर परिपथात जोडताना अथवा काढून घेताना त्याचा विजेऱ्याशी अथवा शक्ति-प्रदायाशी (power supply) असलेला संबंध तोडावा.

अनुक्रमणिका

ट्रांझिस्टरची परीक्षा आणि चाचणी :

ट्रांझिस्टर एका डबीमध्ये बंदिस्त असतो. डबीमधून उत्सर्जी, आधार आणि संग्राही यांना जोडलेल्या अशा तीन तारा बाहेर काढलेल्या असतात. पुस्तिकात ट्रांझिस्टर खालच्या बाजूने कसा दिसतो याची आकृती दिलेली असते. तीवरून ट्रांझिस्टरची तीन अग्रे ओळखता येतात. अशी पुस्तिका जवळ नसल्यास केवळ एका ओह्म मीटरच्या साह्याने काही साधे प्रयोग करून ट्रांझिस्टरविषयी आवश्यक माहिती मिळविता येते. अनेक ओह्म मीटरमध्ये ५० मि. ॲ. विद्युत् धारा वाहते. एवढी मोठी धारा ट्रांझिस्टरमधून गेल्यास तो जळून जाण्याची शक्यता असते. हा धोका टाळण्यासाठी ओह्म मापीच्या जोडतारांच्या परिपथात २०० ओह्मचा रोध जोडून नंतर चाचणी करावी :--

(१) ज्या दोन तारांमधील रोध उलटसुलट अशा दोन्ही दिशांनी मोठा असतो त्या तारा उत्सर्जी आणि संग्राही यांना जोडलेल्या आहेत.

(२) उरलेली तार आणि वरीलपैकी कोणतीही तार यामध्ये एका दिशेने रोध लहान तर उलट दिशेने रोध मोठा असल्याचे आढळते. ही उरलेली तार आधारास जोडलेली आहे.

दोन तारांपैकी उत्सर्जी कोणती आणि संग्राही कोणती हे ओळखण्यासाठी ट्रांझिस्टर पी-एन्-पी किंवा एन्-पी-एन् प्रकारचा आहे हे प्रथम माहीत हवे; यासाठी खालील चाचणी घ्यावी.

सर्वसाधारणपणे मल्टीमीटर ओह्म मीटर म्हणून वापरतांना त्याचे लाल अग्र हे ऋण अग्र असते. परंतु तरी ओह्म मीटरच्या तारा एखाद्या ज्ञात व्होल्टमापीला जोडून त्याचे धन अग्र कोणते आणि ऋण अग्र कोणते हे निश्चित करून घेणे उत्तम

(३) ट्रांझिस्टरच्या आधार-तारेला ओह्ममापीचे ऋण अग्र जोडून दुसरे अग्र (धन) उत्सर्जी अथवा संग्राही तारेला जोडल्यास रोध लहान असल्याचे आढळले तर हा ट्रांझिस्टर पी-एन्-पी प्रकारचा आहे. याउलट ओह्म मापीचे धन अग्र आधाराला जोडल्याने उत्सर्जी अथवा संग्राहीचा रोध कमी असल्याचे आढळते तर ट्रांझिस्टर एन्-पी-एन् प्रकारचा आहे.

पी-एन्-पी ट्रांझिस्टरमध्ये उत्सर्जी आणि संग्राही ओळखण्यासाठी खालील चाचणी घ्यावी.

(४) आधार आणि एक इलेक्ट्रोड यांना परस्परांशी जोडून त्यास ओह्म मापीचे धनाग्र जोडावे आणि उरलेल्या तिसऱ्या इलेक्ट्रोडला ऋणाग्र जोडून रोध मोजावा. नंतर आधार आणि तिसरा इलेक्ट्रोड परस्परांस जोडून त्यास ओह्म मापीचे धनाग्र जोडावे आणि पहिला इलेक्ट्रोडला ऋणाग्र जोडून रोध मोजावा. ज्या इलेक्ट्रोडला ऋणाग्र जोडल्यास कमी रोध आढळतो तो संग्राही आहे.

एन्-पी-एन् ट्रांझिस्टरमधील उत्सर्जी आणि संग्राही ओळखण्यास ओह्म मापीच्या धन अग्राऐवजी आणि ऋण अग्र आणि ऋण अग्राऐवजी धन अग्र वापरून वरीलप्रमाणेच चाचणी घ्यावी. संग्राही लहान रोध दर्शवितो.

(५) उत्सर्जी अथवा संग्राही यापैकी एखादा इलेक्ट्रोड आणि आधार यामधील रोध दोन्ही बाजूंनी मोठा असल्याचे आढळले तर ते संधिस्थान खुले झाले आहे. याउलट दोन्ही दिशांनी रोध लहान असल्याचे आढळले तर ते संधिस्थान लघुपरिपथित (short-circuit) झाले आहे.

(६) आधार-संग्राही रोध उलट्या दिशेने मोजल्यानंतर तो १ कोटी ($१०^{७}$) ओहम्‌पेक्षा मोठा असल्याचे आढळले तर तो ट्रांझिस्टर सिलिकॉनपासून बनविलेला असतो. हा व्युत्क्रमी (reverse) रोध १ कोटी ओह्मपेक्षा बराच लहान असल्यास तो ट्रांझिस्टर जर्मेनियमपासून बनविलेला आहे असे समजावे.

ट्रांझिस्टर परिपथांची चाचणी घेतांना काळजीपूर्वक काम करावे. विशेषतः छापील परिपथांबाबत (printed circuits) दक्षतेने काम करणे आवश्यक आहे. चाचणीसाठी वापरण्यात येणाऱ्या उपकरणाच्या चाचणी-शलाकांची (testing prods) केवळ टोके उघडी असावी, इतर भागावर अवरोधाचे चांगले वेष्टण असावे. परिपथातील व्होल्टता मोजण्यासाठी वापरण्यात येणारा व्होल्टमापी २० संहस्त्रओह्म प्रति व्होल्टचा असल्यास उत्तम.

परिपथात निरनिराळे बदल करून प्रयोग करावयाचे असल्यास ट्रांझिस्टरला त्याच्या बैठकीत बसविणे सोइस्कर असते. त्यायोगे ट्रांझिस्टरला वारंवार डाग देणे अथवा डाग काढून घेणे टाळते. ट्रांझिस्टरचा परिपथ क्रियाशील असतांना उत्सर्जीला जोडलेल्या रोधावरील व्होल्टता मोजल्याने त्या ट्रांझिस्टरच्या कार्याबद्दल बरीच कल्पना येते.

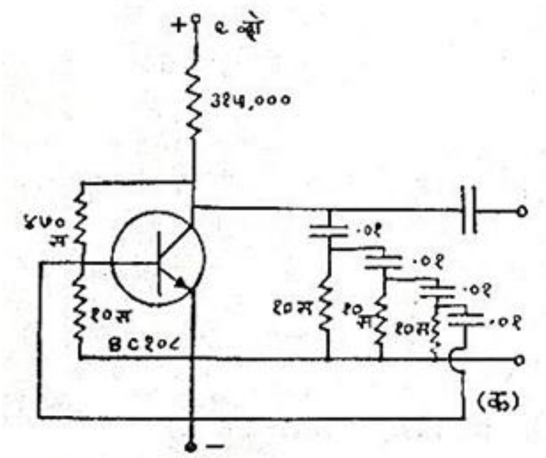
अनुक्रमणिका

७. ट्रांझिस्टर प्रकल्प

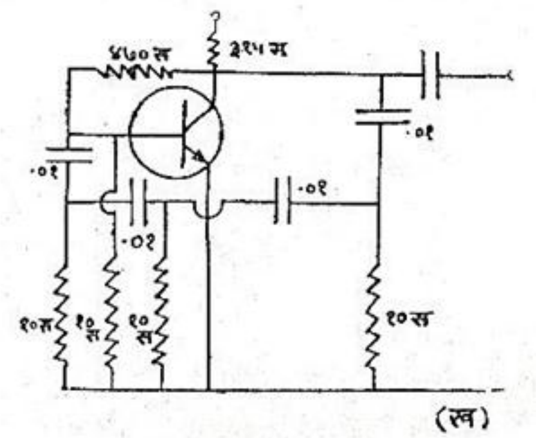
ट्रांझिस्टर वापरण्यात आत्मविश्वास निर्माण होण्यासाठी स्वतः त्यांचे परिपथ बांधणे यासारखा दुसरा मार्ग नाही. त्यादृष्टीने येथे काही परिपथ दिलेले आहेत. ते काळजीपूर्वक बनविल्यानंतर त्याला विजेरी जोडावी आणि निरनिराळ्या स्थानांवर असलेली व्होल्टता मोजावी आणि ती टिपून ठेवावी. एखादा परिपथ योग्य प्रकारे कार्य करीत नसल्यास या माहितीच्या आधारे दोष नाहीसा करण्यास मदत होते.

(१) दोलित्र :

आ. ७.१ क मध्ये दिलेल्या परिपथाची आ. ७.१ ख मध्ये दर्शविल्यानुसार जुळणी करा. निर्गम अग्रांमध्ये हेडफोन लावल्यास आवाज ऐकू येईल.



आ. ७.१ (क) -दोलित्र परिपथ



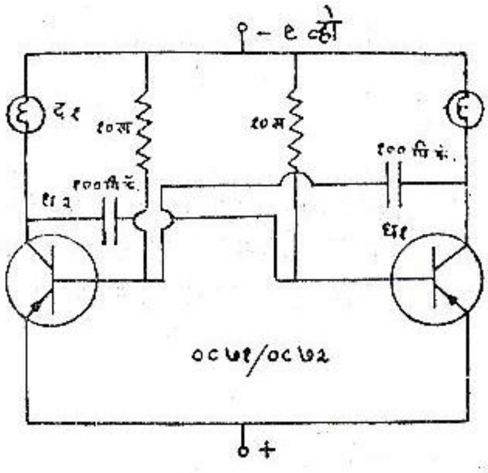
आ. ७.१ (ख) --परिपथाची जुळणी

(२) बहुकंपित्र :

या परिपथात द$_१$, द$_२$ हे ६ व्हो (४०-५० मिली ॲपीअर) वर चालणारे टॉर्चबल्ब आहेत. धारित्र १०० पिकोफॅरॅडचे आणि रोध १० सहस्त्र ओह्मचे आहेत. या परिपथात OC७१ अथवा OC७२ हे ट्रांझिस्टर वापरले आहेत (आ. ७.२) विजेरी जोडल्यास दिवे आलटून पालटून लागतात. रोध आणि धारित्राची मूल्यें बदलल्यास आवर्तन काल बदलतो. अशा बहुकंपित्राची वारंवारता.

$$\text{वा} = \frac{१}{०\cdot७\,(\text{र}_१\text{ध}_१ + \text{र}_२\text{ध}_२)}$$ या सूत्राने मिळते.

अनुक्रमणिका

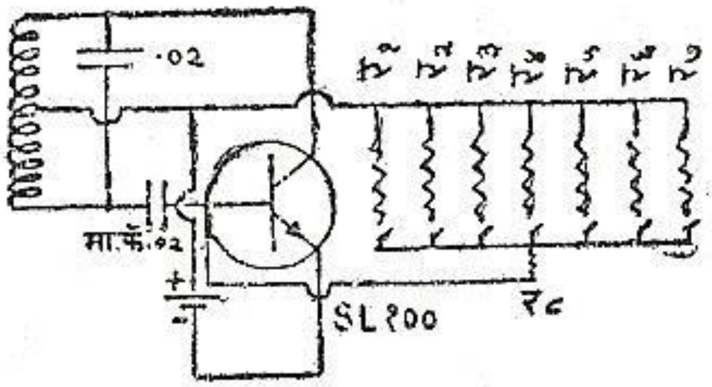


आ. ७.२ -बहुकंपित्र

(३) इलेक्ट्रॉनिक हार्मोनियम :

यांत ट्रांझिस्टर दोलित्रांच्या द्वारे निरनिराळ्या वारंवारतेची आंदोलने उत्पन्न करून ती निर्गम रुपांतरित्राच्या (output transformer) साह्याने लाऊडस्पीकरला दिली जातात.

र$_{८}$ हा ५० सहस्त्र ओह्मचा रोध असून र$_{१}$ र$_{२}$. . . . . र$_{७}$ हे ४७ लक्ष ओह्मच्या जवळपासचे रोध आहेत SL१०० हा ट्रांझिस्टर वापरण्यात आलेला असून र$_{१}$, र$_{२}$. . . . . . र$_{७}$ या रोधांचा त्यांना जोडलेल्या पितळेच्या पट्यांच्या साह्याने र$_{८}$ शीं संपर्क प्रस्थापित केल्यास आंदोलने सुरू होऊन लाऊडस्पीकर मधून ध्वनी ऐकू येतो. र$_{१}$. . . . . . र$_{७}$ या रोधांचे योग्य प्रकारे समायोजन (adjustment) करून सप्तकांतील सा रे ग म प ध नि हे स्वर या इलेक्ट्रॉनिक हार्मोनियममधून काढतां येतात (आ. ७.३).

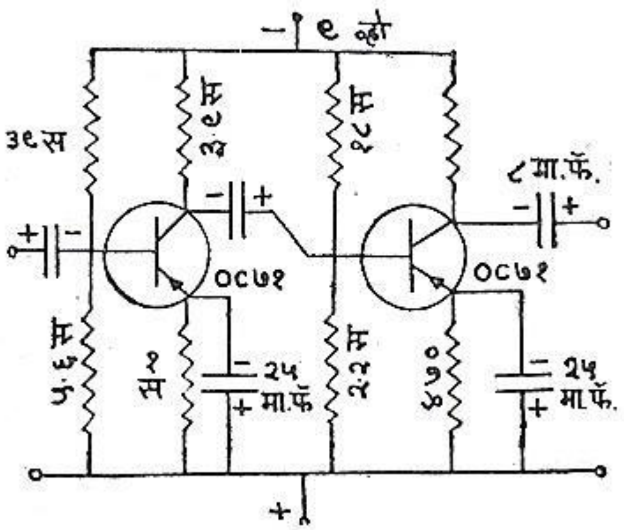


आ. ७.३-इलेक्ट्रॉनिक हार्मोनियम

अनुक्रमणिका

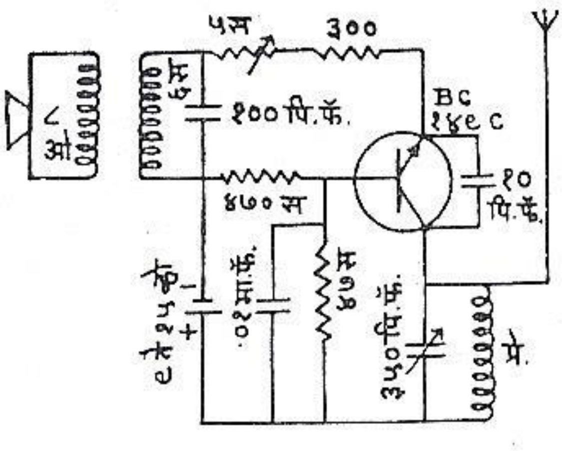
(४) द्विपद प्रवर्धी :

या परिपथात OC७१ या ट्रांझिस्टरांचा उपयोग करून संकेताचे प्रवर्धन करण्यात आले आहे. निर्गमाला हेडफोन लावल्यास अथवा हा निर्गम एका शक्ती-प्रवर्धी (power amplifier) पदाला (stage) जोडल्यास लाऊडस्पीकरमधून ध्वनी ऐकू येतो. (आ. ७.४).



आ. ७.४-द्विपद प्रवर्धी

(५) लहान ट्रांसमिटर :



आ. ७.५-पारेषित्र (ट्रांसमिटर)

या परिपथात लाऊडस्पीकरचा अणुभाषासारखा (मायक्रोफोन) उपयोग केलेला आहे. निर्गम रूपांतरित्र रु हा उलटा वापरून त्याच्या साह्याने ध्वनि रेडिओ तरंगांवर आरूढ केला आहे. रेडिओतरंग ३५० पिकोफॅरेडच्या विचरणशील (variable) धारित्र (ध) आणि त्याला समांतर असलेली प्रेरितता प्रे च्या साह्याने उत्पन्न केले जातात. (आ. ७.५) तरंगांची वारंवारता.

अनुक्रमणिका

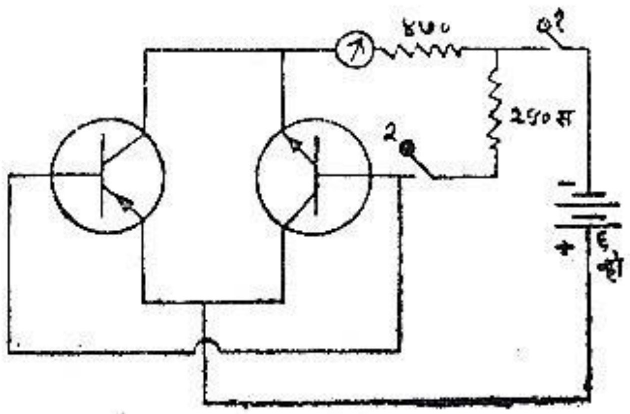
वा = १/२ ø √ प्रे.ध या सूत्राद्वारे मिळते.

प्रे = २.५४ (त्र^{२}स^{२}) / [९त्र +१०ल].

येथे त्र = प्रेरितता कुंडलाची त्रिज्या (सेंमी); स=कुंडलाच्या वेटोळ्यांची संख्या; ल=कुंडलाची लांबी. या ट्रांस्मिटरचा संकेत १ किलोमीटरपर्यंत पोहोचतो.

(६) ट्रांझिस्टर परीक्षित्र :

या परिपथात पी एन् पी आणि एन् पी एन् असे दोन्ही प्रकारचे ट्रांझिस्टर बसविण्याच्या बैठकी वापरल्या आहेत. स्विच १ बंद केल्याने ट्रांझिस्टरमधून वाहणारी उत्सर्जी संग्राही गलन धारा मोजली जाते. ही फार लहान असल्याने या प्रसंगी धारामापी मिलीॲमीटर मध्ये वाचन मिळत नाही. परंतु १ व २ ही दोन्ही स्विच बंद असल्यास, आधारधारा वाहू लागून तिचे संग्रही परिपथात प्रवर्धन होते. संग्राही धारेमुळे धारामापीची सुई सरकते. या परिपथाच्या साह्याने ट्रांझिस्टरचा लाभ (gain) मोजता येतो.

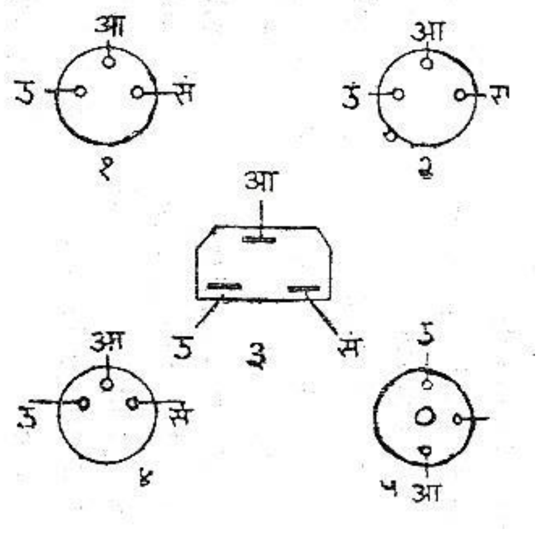


आ. ७.६-ट्रांझिस्टर परीक्षित्र

अनुक्रमणिका

८. ट्रांझिस्टर--उपयुक्त माहिती

ट्रांझिस्टर	$P_C max$ mw	V_{CBO}	V_{CEO}	V_{EBO}	I_C	h_{fe}	(मिअॅ)	I_{CB}	at V_{CB}	उपयोग	बैठक
		व्हो	व्हो	व्हो	(मिअॅ)			मा.अॅ.	व्हो		
OC४४	७०	—१५	—१५	..	१०	..	..	..	..	मिश्रक/दोलित्र	१
OC४५	७०	—१५	—१५	..	१०	..	..	..	..	मो.वा. प्रवर्धी	१
OC७०	७५	—३०	—३०	..	१०	..	..	..	..	श्र.वा. प्रवर्धी	१
OC७१	७५	—३०	—३०	..	१०	..	..	..	..	,,	१
OC७२	७५	—३२	—३२	..	१२५	..	..	..	..	वर्ग ब निर्गम प्रवर्धी	१
BC१०७	३००	५०	४५	६	१००	२४०	२	·०१५	२०	श्र.वा. प्रवर्धी	२
BC१०८	३००	३०	२०	५	१००	२४०	२	·०१५	२०	सर्वसाधारण उपयोग	२
BC१०९	३००	३०	२०	५	१००	४१०	२	·०१५	२०	श्र.वा. प्रवर्धी	२
BC१४७	२२०	५०	४५	६	१००	२४०	२	५	२०	श्र.वा.	३
BC१४८	२२०	३०	२०	५	१००	२४०	२	५	२०	सर्वसाधारण उपयोग	३
BC१४९	२२०	३०	२०	५	१००	४१०	२	५	२०	श्र.वा. आगम	३
BC१५७	२२०	—५०	—४५	—५	१००	१४०	२	०·१	२०	श्र.वा. ड्रायव्हर	३
AC१२६	५००	—३२	—१२	—१०	१००	१४०	२	१०	१०	..	..
AC१२७	३४०	+३२	+३२	..	५००	५०	५००	..	..	वर्ग ब (निर्गम)	४
AC१२८	७००	—३२	—३२	—१०	१अॅ.	९०	३००	१०	१०	वर्ग अ (निर्गम)	४
AC१८७	५००	+२५	+१५	+१०	१अॅ.	२००	३००	१००	२५	श्र. वा. प्रवर्धी	४
AC१८८	८००	—२५	—१५	—१०	१अॅ.	२००	३००	२००	२५	श्रव्यवा.	४
SK१०० PNP	४ वॉ.	६०	५०	६	५अॅ.	४०—३००	१५०	१	..	..	२
SL१०० NPN	४ वॉ.	६०	५०	६	५अॅ.	४०—३००	१५०	१	..	..	२
2N३०५५	११·५ वॉट	+१००	+६०	+७	१५अॅ.	२०	४अॅ.	..	..	मोठी शक्ती हाताळणे	५



९. पारिभाषिक शब्द

मराठी-इंग्रजी

अग्रिम	forward
अडथळा	Barrier
अणू	atom
अतिनील	ultraviolet
अतिरिक्त	excess
अभिकल्पना	design
अभिनीत	biassed
अयन	ion
अर्धचक्र	half cycle
अर्धवाहक	semi-conductor
अवरोधी	insulator
अवरोधित	insulated
आगम	input
आधार	base
आयताकार	rectangular
आरोपण करणे	to superimpose
आलेख	graph
आवर्त सारणी	periodic table
उगम	source
उद्बाष्पन	evaporation
उत्सर्जी	emitter
उलटी दिशा	reverse direction
ऊर्जा पट्ट	energy band
एकक	unit
एक ध्रुवीय	unipolar
एकल	single
काप	chip
कुंडल	coil
कोटर	hole
कोलाहल	noise
प्रवर्धी	amplifier
प्राचल	parameter
प्राथमिक	primary
क्रियाबिंदु	operating point
गलन धारा	leakage current
घटक	component
जालिका	grid
ताप	temperature
तूट	deficit
दाता	donor
दिष्टकारी	rectifier
दोलित्र	oscillator
द्रवणांक	melting point
द्वार	gate
द्वितीयक	secondary
द्विध्रुवीय	bipolar
धारा	current
धारिता, धारित्र	capacitor
निकास	drain
निज अर्धवाहक	intrinsic semi-conductor
निजेतर	extrinsic
निर्गम	output
निस्तर	substrate
न्यूक्लिअस	nucleus
पद	stage
परिगणित्र	calculator
परिग्राहक	acceptor
परिपथ	circuit
पश्चभरण	feed back
प्रतिबंधित अंतराल	forbidden gap
प्रनाल	channel
प्रभार	charge
समतल प्रक्रिया	planar process
समायोजन	adjustment
समावरण	environment

अनुक्रमणिका

प्रावस्था	phase
प्रेरितता	inductance
बहुकंपित्र	mulivibrator
बिंदुसंस्पर्श	point contact
बंध	bond
मिश्रातुकरण	alloying
मूलतत्त्व	element
रोध	resistance
रूपांतरित्र	transformer
लक्षणवक्र	characteristic curve
वर्धन	gain
वारंवारता	frequency
वाहनिक	carrier
वाहिता	conductivity
विचरणशील	variable
विद्युत्गामक	electromotive force
विभव	potential
विभाजक	divider
विरूपित	distorted
विसरण	diffusion
श्रवण साधन	hearing aid
श्रव्य	audio
सस्तब्ध	cut off
सहसंयुजी	covalent
सुवाहक	good conductor
सूक्ष्मतंत्र	microtechnique
साधारण	common
संकर	hybrid
संकलित	integrated
संगणित्र	computer
संग्राही	collector
संधिस्थान	junction
संपरिवर्तन	modification
संपृक्त	saturation
संयुजता	valency, valence
संयुजन पट्ट	valence band
संरचना	structure
संरोध	impedance
संवहन	admittance
संवहन पट्ट	conduction band
संवेदी	sensitive
स्थायी	stable
स्थायू	solid
क्षेत्रपरिणाम	field effect

इंग्रजी-मराठी

acceptor	परिग्राहक
adjustment	समायोजन
admittance	संवहन
alloying	मिश्रातुकरण
amplifier	प्रवर्धी
atom	अणू
audio	श्रव्य
barrier	अडथळा
base	आधार
biassed	अभिनीत
bipolar	द्विध्रुवीय
bond	बंध
calculator	परिगणित्र
capacitor	धारिता, धारित्र
carrier	वाहनिक
channel	प्रनाल
characteristic curve	लक्षण वक्र
charge	प्रभार
chip	काप
circuit	परिपथ
coil	कुंडल
collector	संग्राही
common	साधारण
component	घटक
computer	संगणित्र
conduction band	संवहन पट्ट
conductivity	वाहिता
covalent	सहसंयुजी
current	धारा
cut off	सस्तब्ध
inductance	प्रेरितता
input	आगम
insulated	अवरोधित
insulator	अवरोधी
integrated	संकलित
intrinsic semiconductor	निज अर्धवाहक
ion	अयन
deficit	तूट
design	अभिकल्पना
diffusion	विसरण
distorted	विरूपित
divider	विभाजक
donor	दाता
drain	निकास
electromotive force	विद्युत् गामक
element	मूलतत्व
emitter	उत्सर्जी
energy band	ऊर्जा पट्ट
environment	समावरण
evaporation	उद्बाष्पन
excess	अतिरिक्त
extrinsic	निजेतर
feed back	पश्चभरण
field effect	क्षेत्र परिणाम
forbidden gap	प्रतिबंधित अंतराळ
forward	अग्रिम
frequency	वारंवारता
gain	वर्धन
gate	द्वार
good conductor	सुवाहक
graph	आलेख
grid	जालिका
half-cycle	अर्धचक्र
hearing aid	श्रवण साधन
hole	कोटर
hybrid	संकर
impedance	संरोध
primary	प्राथमिक
rectangular	आयताकार
rectifier	दिष्टकारी
resistance	रोध
reverse direction	उलटी दिशा
saturation	संपृक्त
secondary	द्वितीयक

अनुक्रमणिका

Junction	संधिस्थान
leakage current	गलनधारा
melting point	द्रवणांक
microtechnique	सूक्ष्मतंत्र
modification	संपरिवर्तन
multivibrator	बहुकंपित्र
noise	कोलाहल
nucleus	न्यूक्लिअस
operating point	क्रियाबिंदु
oscillator	दोलित्र
output	निर्गम
parameter	प्राचल
periodic table	आवर्त सारणी
phase	प्रावस्था
planar process	समतल प्रक्रिया
point contact	बिंदु संस्पर्श
potential	विभव
semiconductor	अर्धवाहक
sensitive	संवेदी
single	एकल
solid	स्थायू
source	उगम
stable	स्थायी
stage	पद
structure	संरचना
substrate	निस्तर
to superimpose	आरोपण करणे
temperature	ताप
transformer	रूपांतरित्र
ultraviolet	अतिनील
unipolar	एकध्रुवीय
unit	एकक
valence, valency	संयुजता
valence band	संयुजन पट्ट
variable	विचरणशील

अनुक्रमणिका

10. संदर्भ ग्रंथ

(1) Transistor Pocket Book—R. J. Hibberd, John Wright & Sons Ltd., Bristol 1967.

(2) Introduction to Semiconductor Devices—F. J. Bailey, George Allen & Unwin Ltd., London 1972.

(3) Basic Electronics for Scientists—J. J. Brophy, Mc Graw Hill Kogakusha Ltd., 1972.

(4) Basic Electronics Vol. 1 to 7 Ed—H. Mileaf D. B. Taraporewala Sons & Co. Pvt. Ltd., 1974.

(5) Using Semiconductors—J. Hughes and T. M. Johnston H. E. B. Ltd., London 1970.

(6) The New Electronics—B. H. Shore, Mc Graw Hill 1970.

(7) Electrons and Holes in Semiconductors—W. Shockley.

(8) Projects in Solid State Electronics—G. N. Navaneeth, U. L. P. Department of Physics, Nagpur University, 1976.

(9) Understanding Solid State Circuits—N. H. Crowhurst, TAB Books.

(10) Elementary Electronics—D. H. White, Harper & Row, New York.

(11) Electronic Circuits—P. M. Chirlian, Mc Graw Hill, 1971.

अनुक्रमणिका