

शैक्षणिक संदर्भ अंक १२२ फेब्रुवारी - मार्च २०२०

आवर्तसारणी : सिलिकॉन

लेखक : सव्यसाची चटर्जी

अनुवाद : संजीवनी आफळे

आवर्तसारणी : सिलिकॉन

लेखक : सव्यसाची चटर्जी

अनुवाद : संजीवनी आफळे

आवर्त सारणी आपली पाठ सोडेल असे वाटत नाही! या लेखात सिलिकॉनची पाळी आहे. असे म्हटले जाते की आपण सध्या “सिलिकॉन जगता”मध्ये राहात आहोत.

एक काळ असा होता की जेव्हा आपण उशाखाली विजेरी ठेवून झोपत होतो. रात्रीची झोप झाल्यावर तुम्हाला जाग आली आणि तरीही सगळीकडे अंधार असला, तर तुम्ही तुमच्या हातावरच्या किंवा भिंतीवरच्या घड्याळावर विजेरीचा प्रकाशझोत मारून ठरवत होतात की आता लगेच उठायचे की अजून थोडा वेळ झोपायचे. आता आपल्यापैकी बहुतेकांच्या बाबतीतली परिस्थिती बदललेली आहे. आता आपण आपल्या मोबाईल किंवा स्मार्ट फोनमध्ये किती वाजले ते बघतो. इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांचा लहान झालेला आकार आणि कमी उर्जेवर काम करण्याची त्यांची क्षमता यामुळे हे शक्य झाले आहे.

आपण सर्वांनी कॅलिफोर्निया येथील सिलिकॉन व्हॅली बद्दल ऐकलेले आहे. पण ही जागा काही सिलिकॉनपासून तयार झालेली नाही. पृथ्वीवर इतर ठिकाणी (वाळूने भरलेले सागरी किनारे वगळता. वाळू म्हणजे सिलिकॉन डायऑक्साईड.) जेव्हा सिलिकॉन आढळते तेव्हाच येथेही आहे. या ठिकाणाला सिलिकॉन व्हॅली असे नाव देण्याचे कारण म्हणजे आधुनिक इलेक्ट्रॉनिक उद्योगाचे हे मोठे केंद्र आहे. या उद्योगांमध्ये सिलिकॉनवर आधारित

इलेक्ट्रॉनिक उपकरणे वापरली जातात. याच कारणामुळे बंगळूरूला भारताची सिलिकॉन व्हॅली म्हटले जाते. येथे एक ग्राम सुद्धा सिलिकॉन तयार होत नाही, परंतु जर भारत सरकारने इलेक्ट्रॉनिक उपकरणांसाठी आवश्यक दर्जाचे सिलिकॉन उत्पादन करण्याच्या स्वदेशी प्रयत्नांना पाठींबा दिला असता, तर बंगळूरू हे इलेक्ट्रॉनिक उद्योगाला लागणाऱ्या सिलिकॉन उत्पादनाचे केंद्र होऊ शकले असते. ही कहाणी आहे इंडियन इन्स्टिट्यूट ऑफ सायन्स, बंगलोर आणि मेटूर केमिकल्स, तामिळनाडू यांच्यामधल्या सहयोगाची. एक संशोधन करणारी प्रयोगशाळा आणि एका उद्योगामधला हा सहयोग १९६० ते १९८० या काळात घडून आला. या सहयोगाची शोकांतिका आता बाजूला ठेवतो, ती नंतर कधीतरी सांगेन.

मी १९७०च्या सुरुवातीला फिजिक्स ऑनर्स घेऊन बी.एस्सी. करत होतो. पदार्थविज्ञानाच्या एका शाखेने तेव्हा खळबळ माजवली होती; ती होती सॉलिड स्टेट फिजिक्स म्हणजे 'घन अवस्थेचे पदार्थविज्ञान'. कारण ट्रांझिस्टर, कॅसेट टेपरेकॉर्डर यासारखी नवनवीन सॉलिड स्टेट इलेक्ट्रॉनिक उपकरणे बाजारात मुसंडी मारत होती. नंतर आले टू इन वन, वॉकमन, इलेक्ट्रॉनिक कॅलक्युलेटर, इलेक्ट्रॉनिक घड्याळे, वैयक्तिक संगणक, लॅपटॉप, सेलफोन, स्मार्ट फोन, वगैरे.

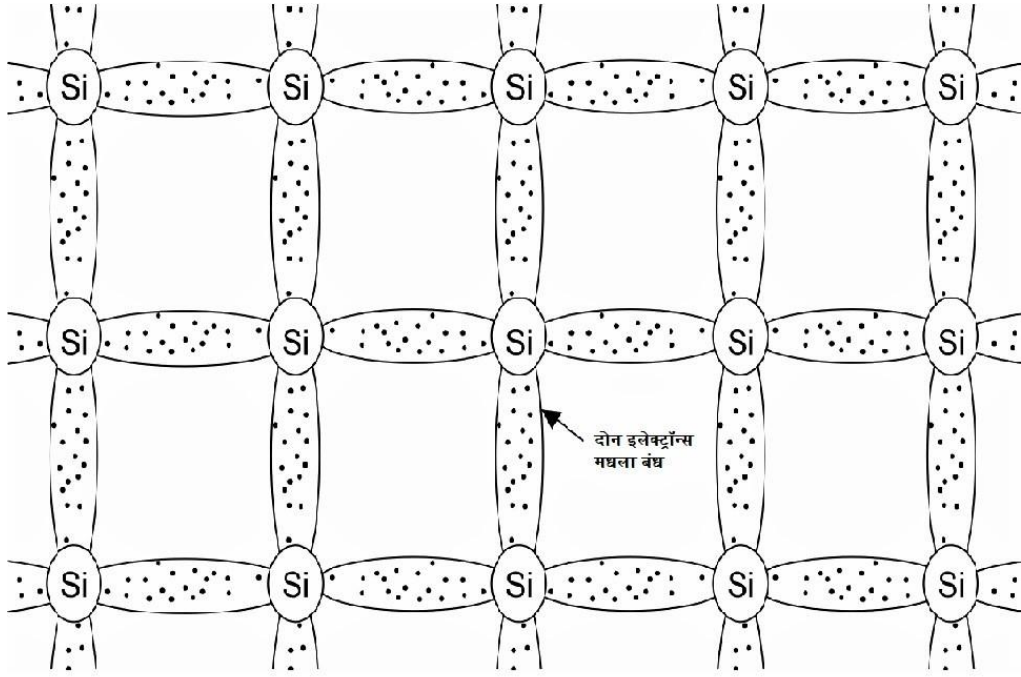
एके दिवशी सुप्रसिद्ध हृदयरोग तज्ञ असलेल्या माझ्या काकांनी मला पोर्टेबल इलेक्ट्रोकार्डियोग्राफ मशिन दाखवले आणि विचारले, “तू फिजिक्स ऑनर्स शिकतो आहेस, या मशिनवर “सॉलिड स्टेट ट्रांझिस्टराइज्ड” असे का लिहिले आहे?”

माझे उत्तर म्हणजे एक अर्धवट बांधलेला अंदाज होता. मी म्हणालो, “आधी डायोड किंवा ट्रायोड व्हाल्व्हसारखी इलेक्ट्रॉनिक उपकरणे म्हणजे निर्वात नळ्या होत्या.

क्लायस्ट्रोनसारख्या काही प्रकारच्या नळ्यांमध्ये वायू भरलेला असे. पण ही नवीन उपकरणे म्हणजे घनरूप वस्तू आहेत; यात निर्वात पोकळीही नाही की कमी दाबाखाली भरलेला वायूही नाही. यातील बऱ्याच उपकरणांमध्ये ट्रांझिस्टर वापरलेला आहे... वगैरे वगैरे... हे पण घनरूप उपकरण आहे, यात वायूही नाही आणि निर्वात पोकळी पण नाही.”

डायोड किंवा ट्रायोड सारख्या निर्वात नळ्या साधारण १९०० सालापासून उपयोगात आल्या आणि अशा प्रकारे इलेक्ट्रॉनिक युग सुरू झाले. रेडियो, टेलीव्हिजन, बिनतारी उपकरणे आणि राक्षसी आकाराच्या संगणकांमध्ये १९७० पर्यंत निर्वात नळ्या वापरल्या जात होत्या. ट्रान्झिस्टर आणि इंटिग्रेटेड सर्किट चिप सारख्या घनरूप इलेक्ट्रॉनिकसवर आधारित वस्तूंच्या आगमनामुळे १९६० च्या उत्तरार्धात त्या हळूहळू टप्प्याटप्प्याने नाहीशा झाल्या. हे होण्यामागे आवर्त सारणीच्या चौथ्या भागातील काही मूलद्रव्यांचे इलेक्ट्रॉनिक गुणधर्म कारणीभूत ठरले. ही मूलद्रव्ये होती जर्मेनियम (रासायनिक सूत्र: Ge) आणि सिलिकॉन (रासायनिक सूत्र: Si). या मूलद्रव्यांच्या सर्वात बाहेरील इलेक्ट्रॉन कक्षेत ४ इलेक्ट्रॉन असतात. इलेक्ट्रॉनिक उपकरणे तयार करण्यासाठी जर्मेनियम आणि सिलिकॉनच्या अतिशय शुद्ध स्वरूपातील स्फटिकांची आवश्यकता असते. त्यातील अशुद्ध घटकांचे प्रमाण प्रतीअब्ज एक भागापेक्षा कमी असावे लागते (१,०००,०००,००० भागांमध्ये एका भागापेक्षा कमी). नंतर त्यामध्ये विशिष्ट प्रमाणात अतीशुद्ध बोरॉन (तिसऱ्या गटातील मूलद्रव्य, रासायनिक सूत्र: B) - ज्याच्या बाह्य इलेक्ट्रॉन कक्षेत ३ इलेक्ट्रॉन असतात - किंवा अतीशुद्ध फॉस्फरस (पाचव्या गटातील मूलद्रव्य, रासायनिक सूत्र: P) - ज्याच्या बाह्य इलेक्ट्रॉन कक्षेत ५ इलेक्ट्रॉन असतात - मिसळले जातात. याला डोपिंग असे म्हटले जाते.

‘सारखा विद्युतभार असलेले कण एकमेकांना दूर ढकलतात’, या नियमाप्रमाणे दोन इलेक्ट्रॉन्सनी एकमेकांना दूर ढकलायला हवे. जेव्हा दोन सिलिकॉन किंवा जर्मेनियम अणू एकत्र आणले जातात, तेव्हा त्यांच्या बाह्य कक्षेतील इलेक्ट्रॉन्सना अडचणीचा सामना करावा लागतो. हे इलेक्ट्रॉन्स एकमेकांना दूर ढकलतात, पण त्याच वेळी ते अणूच्या खूप जास्त धनभारित असलेल्या केंद्रकाच्या आकर्षणापासून दूरही जाऊ शकत नाहीत.

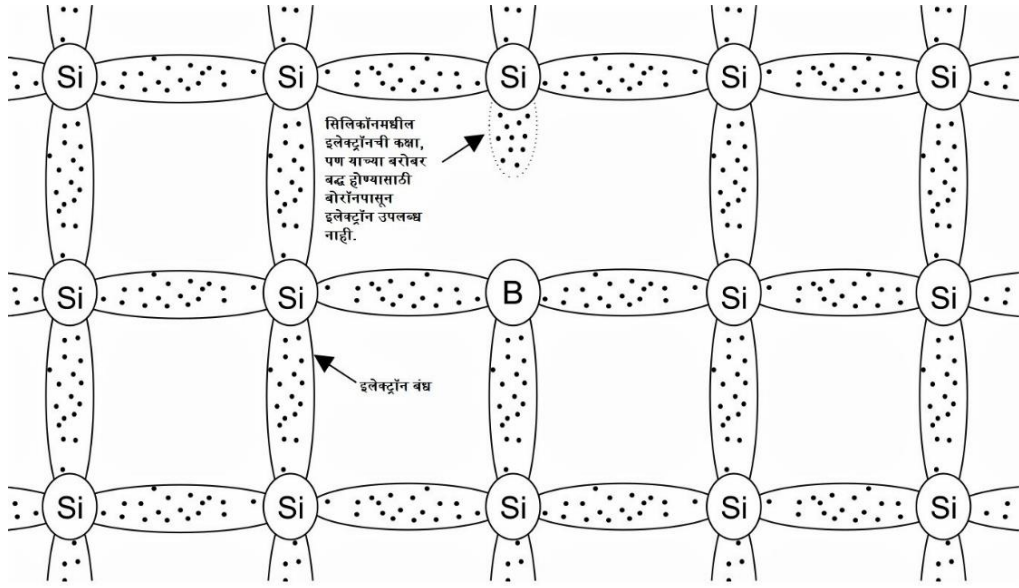


आकृती १ : शुद्ध सिलिकॉनच्या स्फटिकातील अणूमधले बंध

जेव्हा हे दोन अणू एकमेकांपासून $1/100,000,000$ सेंमी इतक्या कमी अंतरावर असतात, तेव्हा इलेक्ट्रॉन्सना कोणत्या केंद्रकाबरोबर जावे ते समजत नाही. ते एका अणूकडून दुसऱ्या शेजारच्या अणूकडे पुंजभौतिकीच्या नियमानुसार उड्या मारत राहतात. हे इलेक्ट्रॉन्स शेजारशेजारच्या अणूंमध्ये वाटून घेतले जातात. या शांत सहजीवनामध्ये जो मैत्रीचा करार होतो, त्याला कोव्हॅलेंट बंध असे म्हणतात. यामुळे दोन अणू एकमेकाला बांधले किंवा

जोडले जातात. अशा प्रकारे, अणू जोडले जाऊन रेणू तयार होतात, आणि घन पदार्थाचे स्फटिक तयार होतात. हे कोव्हॅलंट बंध शक्तीशाली असतात आणि ते मोडणे खूप अवघड असते. अशा प्रकारे शुद्ध सिलिकॉनमध्ये इलेक्ट्रॉन्समधील बंध आकृती १ मध्ये दाखवल्याप्रमाणे असतात. सगळे इलेक्ट्रॉन्स कोव्हॅलंट बंधाने एकत्र जोडलेले असतात. हे इलेक्ट्रॉन्स त्यामुळे वाहून जाऊ शकत नाहीत. शुद्ध सिलिकॉन किंवा शुद्ध जर्मेनियममध्ये मुक्त इलेक्ट्रॉन्स नसल्यामुळे ते विद्युत प्रवाह वाहून नेऊ शकत नाहीत.

आता आपण सिलिकॉन (किंवा जर्मेनियम) मध्ये बोरॉनचे अणू मिसळले, तर हे बंध आकृती २ मध्ये दाखवल्याप्रमाणे असतील.



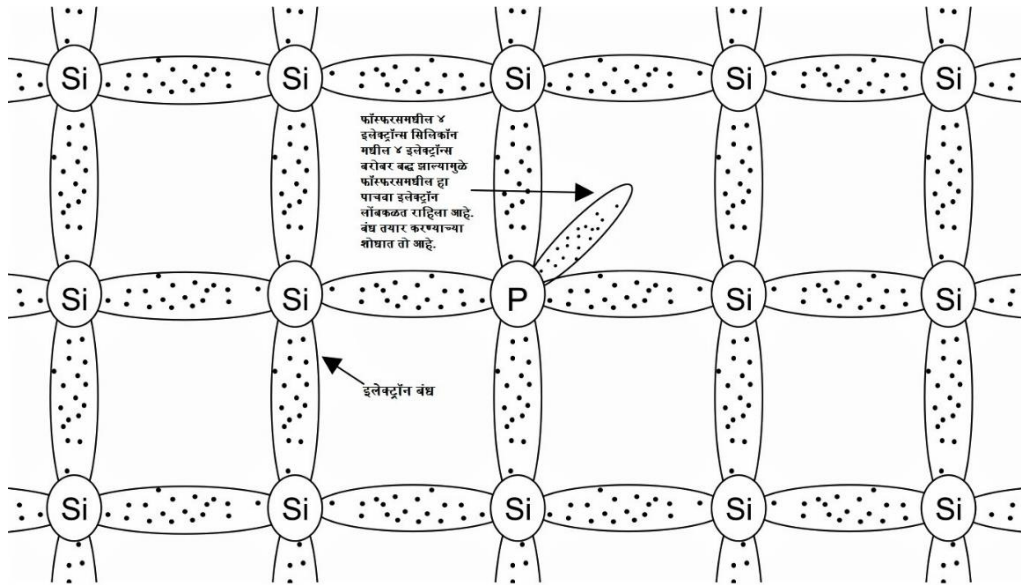
आकृती २ : बोरॉन मिसळलेल्या सिलिकॉनच्या स्फटिकातील अणूंमधले बंध

बोरॉनजवळच्या सिलिकॉन अणूंमधला एक इलेक्ट्रॉन बद्ध नाही आहे कारण बोरॉनच्या बाह्य कक्षेत तीनच इलेक्ट्रॉन्स आहेत. यामुळे हे बंध असमतोल आहेत. जर आता आपण विद्युतदाब दिला तर शेजारच्या सिलिकॉनच्या अणूमधील इलेक्ट्रॉन्स बंध तोडून हा

असमतोल कमी करण्यासाठी धावत येतील. असा बंध तोडल्यामुळे, बंध तोडला त्या जागी असमतोल निर्माण होतो. मग, त्याच्या शेजारचे इलेक्ट्रॉन ती जागा घ्यायला धावतील. अशा रितीने विद्युतप्रवाह वाहायला सुरुवात होते. अशा अगदी थोड्या प्रमाणात बोरॉन मिसळलेल्या सिलिकॉन स्फटिकांना पी प्रकारचे अर्धसंवाहक (सेमीकंडक्टर) म्हणतात.

आता समजा आपण फॉस्फरस सारख्या पाचव्या गटातल्या मूलद्रव्याचे काही अणू सिलिकॉनच्या स्फटिकांमध्ये मिसळले. फॉस्फरसच्या बाह्य कवचात ५ इलेक्ट्रॉन्स आहेत.

आता आकृती ३ मध्ये आपण एक जास्तीचा इलेक्ट्रॉन फॉस्फरसमधून बाहेर लोंबकळताना बघू शकतो.



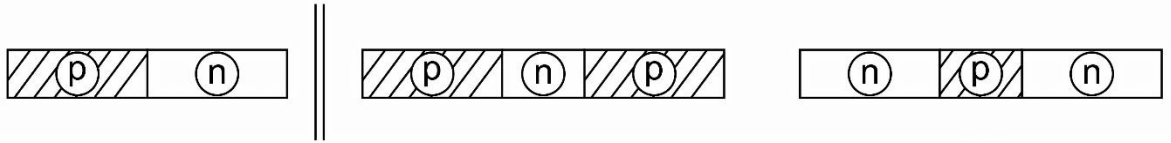
आकृती ३ : फॉस्फरस मिसळलेल्या सिलिकॉनच्या स्फटिकातील अणूमधले बंध

जर आता यामधून विद्युतप्रवाह सोडला तर हा लोंबकळत असलेला इलेक्ट्रॉन बंध तोडून दुसरा बंध जोडण्यासाठी सोबती शोधत दुसऱ्या जागी जातो. अशा प्रकारे, विद्युत प्रवाह

वाहता होतो. अशा अल्प प्रमाणात फॉस्फरस मिसळलेल्या सिलिकॉन स्फटिकांना एन प्रकारचे अर्धसंवाहक म्हणतात.

आपण पाहिले की शुद्ध सिलिकॉन विद्युत प्रवाह वाहून नेऊ शकत नाही, पण फॉस्फरस किंवा बोरॉन मिसळल्यावर त्याला अंशतः विद्युतवाहक (अर्धसंवाहक) बनवता येते. हे अणू एक अब्ज भागांस एक भाग (१०००,०००,००० मध्ये १ भाग) या प्रमाणात मिसळले तर विद्युतवाहकता ३० पटींनी वाढते!

विद्युतवाहकतेवर डोपिंगचा होणारा परिणाम बघून एक प्रश्न उद्भवतो: आपण जर पी आणि एन प्रकारचे स्फटिक एकमेकांना जोडले तर काय होईल? असा स्फटिकांचा जोड डायोड म्हणून वापरता येतो. व्हॅक्युम डायोडला हा झाला घनरूप पर्याय.



आकृती ४ : घन रूपातील पी-एन डायोड व पी-एन-पी आणि एन-पी-एन ट्रांझिस्टर

पुढचा प्रश्न असा: आपण जर त्यांना सॅंडविच सारखे म्हणजे पी-एन-पी किंवा एन-पी-एन असे एकत्र केले तर काय होईल? अशा उपकरणांना ट्रांझिस्टर असे म्हणतात आणि हे व्हॅक्युम ट्रायोडची जागा घेऊ शकतात. आकृती ४ मध्ये याची रचना दाखवली आहे.

या उपकरणांमध्ये सुरुवातीला जर्मेनियम वापरले जात असे. पण नंतर, सिलिकॉनने त्याच्या अष्टपैलू गुणधर्मांमुळे आणि उपकरणे बनवण्याच्या सरलतेमुळे अर्धसंवाहक उपकरणांमध्ये जर्मेनियमची जागा घेतली. पी प्रकारचे अर्धसंवाहक तयार करण्यासाठी तिसऱ्या गटातल्या बोरॉनखेरीज गॅलियम आणि इंडियमही वापरले जातात तर एन प्रकारचे

अर्धसंवाहक तयार करण्यासाठी पाचव्या गटातल्या फॉस्फरसबरोबरच अँटिमनी आणि आर्सेनिकही वापरले जातात.

ट्रांझिस्टरची कल्पना सर्व प्रथम ऑस्ट्रो-हंगेरियन पदार्थवैज्ञानिक ज्युलियस एडगर लीलिएनफिल्ड यांना १९२६ मध्ये सुचली. १८९० मध्ये भारतात जगदीशचंद्र बोस यांनी रेडियो रिसीव्हर तयार करण्यासाठी स्फटिकांच्या विद्युत गुणधर्मांचा अभ्यास केला होता. मात्र असे रिसीव्हर आता वापरले जात नाहीत.

पहिला ट्रांझिस्टर विल्यम शॉकले, वॉल्टर ब्राटेन आणि जॉन बार्डीन यांनी १९४७ मध्ये अमेरिकेतील बेल लॅब्स येथे तयार केला. त्याबद्दल त्यांना १९५६ सालचे नोबेल पारितोषिक विभागून देण्यात आले. १९४८ मध्ये हर्बर्ट मातारे आणि हाईनरीश वेल्कर या जर्मन पदार्थवैज्ञानिकांनीही स्वतंत्ररित्या ट्रांझिस्टर तयार केला.

अर्धसंवाहक तयार करणारे कारखाने हा जगातील मल्टी ट्रिलियन डॉलर मूल्याचा उद्योग झाला आहे. भारताचे त्यातील स्थान नगण्य आहे आणि आपण इलेक्ट्रॉनिक वस्तू आयात करणारा देश आहोत.

§§§

लेखक : सव्यसाची चटर्जी, ऑल इंडिया पीपल्स सायन्स नेटवर्कचे अध्यक्ष.

इ-मेल : chatsab99@gmail.com

अनुवाद : संजीवनी आफळे, शैक्षणिक संदर्भ गटात सहभागी.

इ-मेल : saaphale@rediffmail.com