

Elektronik Devreler ve Laboratuvarı

Dr. Öğr. Üyesi Erhan KURT

Dersin İçeriği

01 Diyotlar

İletken-Yarı İletken-Yalıtkan Malzemeler
Diyot Analizi ve Diyot Devreleri
Diyotlar ile ve/veya mantık kapıları.
Zener Diyotlar ve Uygulamaları

02 Transistörler (BJT)

Transistörlerin (BJT) Kutuplanması
Transistörlerin DC Analizi
Transistör Eşdeğer Devreleri

03 Alan Etkili Transistörler (FET)

Alan etkili transistör (FET)' lerin kutuplanması
FET'lerin DC Analizi

01 Diyotlar

İletken-Yarı İletken-Yalıtkan Malzemeler
İdeal Diyot ve Diyotun Öngerilimlenmesi
Diyot eşdeğer devreleri, dc girişli seri ve paralel diyot devreleri
Diyotlar ile ve/veya mantık kapıları.
Doğrultucu Diyot Devreleri
Kırpıcı Diyot Devreleri
Kenetleyici Diyot Devreleri
Zenerler ve Zener Diyot Uygulamaları

01 Diyotlar

1. Bölüm Amaçları

- **Silisyum (Si), Germanyum (Ge) ve Galyum Arsenit (GaAs)** gibi üç önemli yarıiletken malzemenin genel özelliklerini öğrenmek.
- Elektron ve boşluk teorisini kullanarak iletimi anlamak.
- **N-tipi ve P-tipi malzemeler** arasındaki farkı açıklayabilmek.
- **Diyotların** sıfır bias (kutupsuz), ileri bias (iletim yönü), ve ters bias (kesim yönü) bölgelerindeki temel çalışma prensiplerini ve karakteristiklerini kavramak.
- Diyotun **DC, AC ve ortalama AC direncini** karakteristik eğrilerinden hesaplayabilmek.
- **İdeal ve pratik eşdeğer devrelerin** devre performansına etkisini anlamak.
- **Zener diyot ve ışık yayan diyotun (LED)** çalışma prensibini ve karakteristiklerini öğrenmek.

Temel Kavramlar

Madde

Var olan 105 çeşit elementin tümü atomların birleşiminden oluşmuştur. Bunlar katı, sıvı ve gaz halinde bulunabilirler.

Elektrik akımını iletme durumlarına göre ise maddeler üçe ayrılır: "iletken", "yalıtkan" ve "yarı iletken".

Elektronik devrelerin büyük çoğunluğu katıların iletkenliği temeline dayanılarak yapılır. Bir maddenin elektriği iletme oranı, maddenin serbest elektron üretme yeteneğine bağlıdır.

Temel Kavramlar

Atom

Maddenin özelliklerini taşıyan en küçük yapı taşına atom denir. Akım ve gerilimi anlayabilmek için atom ve yapısını bilmek gerekir. Atom merkezde çekirdek, bunun etrafında negatif yüklü elektronlardan oluşur. Çekirdek pozitif yüklü proton ve yüksüz nötronlardan meydana gelir. Atomu elektronlarla protonlar arasındaki çekim kuvvet bir arada tutar. Nötronlar, protonların çekirdekte bir arada tutulmalarına yardım eder. Proton ve nötronların da adına quarks denilen daha küçük parçacıklardan oluştuğuna inanılmakta ve bu konuda araştırmalar sürmektedir. Biz derslerimizi proton, nötron ve elektronu incelemekle sürdüreceğiz.

Temel Kavramlar

Atomun Temel Parçacıkları ile ilgili bilgiler

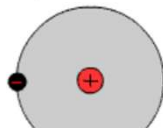
	Parçacık adı	Kütle(kg)	Yük (coulomb)
● Elektron: (-) Negatif yük taşır ve çekirdek etrafındaki yörüngede bulunur.	Elektron	9.11×10^{-31}	1.60×10^{-19}
● Proton : (+) Pozitif yük taşır ve çekirdekte bulunur.	Proton	1.672×10^{-27}	1.60×10^{-19}
● Nötron : (0) Yüksüzdür ve çekirdekte bulunur	Nötron	1.675×10^{-27}	0

Temel Kavramlar

Serbest Elektron

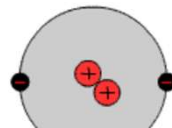
Her temel element atomunda belirli sayıda elektron ve proton vardır, bu özellik bir elementi diğer elementlerden farklı yapar. Her elementte, elektron sayısı proton sayısına eşittir. Bu, elektron sayısı proton sayısına eşit olması nedeniyle meydana getirdikleri elektrostatik alanların eşit ve zıt yönlü olması, atomun yapısında elektriksel dengeyi sağlar.

Hidrojen en basit kimyasal elementtir. Çekirdeğinde bir proton ve onun etrafındaki yörüngede bulunan bir elektrondan oluşur.

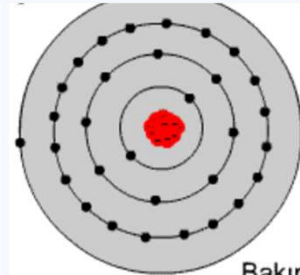


Hidrojen

Helyum atomu çekirdeğinde iki proton ve onun etrafındaki yörüngede bulunan iki elektrondan oluşur.



Helyum



Bakır

Temel Kavramlar

İletkenlerin son yörüngelerinde bakır atomunda olduğu gibi 1 elektron vardır. Bu son yörüngedeki elektron, atom çekirdeğindeki protonlar tarafından en az kuvvetle çekilmektedir. Bu nedenle son yörüngede ki elektron madde içinde başka bir atomun yörüngesine gidebilmekte ve bu elektronun boşalttığı yörüngeye de diğer bir atomun elektronu gelmektedir. İletken maddeye dışarıdan bir elektriksel kuvvet uygulandığında, son yörüngedeki elektronlar hareket ettirilebilmektedir. Bu nedenle malzemelerin elektriksel yapısını analiz etmek için son yörüngedeki elektron yapısını incelemek yeterlidir.

Valans Yörünge (Band)

Herhangi bir atomun en dış yörüngesine valans yörünge denir. Valans yörüngedeki elektronlara da valans elektron denir. Valans elektronlar herhangi bir dış kuvvetle yeteri kadar enerji (ısı gibi, ...) kazanırsa, bağlı olduğu atomdan ayrılır ve serbest elektron olur.

Valans yörüngesinde az elektron olan atomda, valans elektronlar çok küçük kuvvetle çekirdeğe bağlı ise, bu elektronlar serbest elektron olmaya meyillidir. Bakır gibi bazı malzemelerde, elektronlar atoma çok küçük kuvvetle bağlı olduğundan, hareketi esnasında komşu atomlara yaklaşır, bu durumda hangi elektronun hangi atoma ait olduğunu tespit etmek çok zordur. Normal şartlarda elektronların hareketleri tamamen rastgeledir, bunun anlamı elektronların her doğrultudaki hareketleri aynı miktardadır.

Bununla birlikte, eğer herhangi bir dış elektrik kuvveti malzemeye uygulanırsa, elektronların hareketleri tek yöne yönlendirilmiş olur ki bu harekete **elektrik akımı** denir.

Temel Kavramlar

Serbest elektronlara sahip olan ve elektrik akımının kolayca akmasına izin veren malzemelere **iletken** denir. Pek çok malzeme serbest elektrona sahip değildir. Bu nedenle, bu tür malzemeler elektronlarını kolayca paylaşmaya meyilli değildir ve elektrik akımını iletmezler. Bu malzemelere **yalıtkan** denir.

Bir maddenin elektriksel davranışını, o maddenin son yörüngesinde bulunan serbest (valans) elektronların sayısı belirler. Serbest (valans) elektronların sayısına bağlı olarak elementler

1. Yalıtkanlar
2. İletkenler
3. Yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılır

İletken, Yalıtkan ve Yarı İletken Malzemeler

İletken Malzemeler Nelerdir?

İletken malzemeler, elektriği belirli bir seviyede iletebilen malzemelerdir. Bu tür malzemeler, bir güç kaynağına bağlandıklarında elektronların serbest ve akıcı bir şekilde bir noktadan diğerine geçmesine izin verir. Bakır, demir, altın, alüminyum ve gümüş gibi metaller elektriği en iyi ileten malzemelerdendir.

Bir malzemenin **elektriksel iletkenliği**, belirli bir sıcaklıkta standart bir sulu çözelti içinde elektrotlar aracılığıyla ölçülür. Bu ölçüm, malzemenin iyon içeriğini belirleyerek **elektrik iletim kapasitesinin** anlaşılmasını sağlar.

İletken, Yalıtkan ve Yarı İletken Malzemeler

İletken Malzemelerin Özellikleri Nelerdir?

- Üzerlerinden geçen elektrik akımına karşı direnç göstermezler, bu da elektriğin serbest dolaşımını sağlar.
- Elektronların parçacıklar arasında serbest hareket etmesine izin verirler, böylece elektrik iletimi kolaylaşır. **Bakır**, iletkenlik seviyelerini ölçmek ve diğer malzemelerle karşılaştırmak için referans olarak kullanılır.
- İçlerinde yüksek sayıda serbest elektron bulunur, bu da yükün bir nesneden diğerine geçişini kolaylaştırır.
- Atomik yapıları, elektronların bir atomdan diğerine geçmesi için fazla enerji gerektirmeden elektrik akışına izin verir.
- **Mükemmel şekil verilebilirlik (mukavemet ve süneklik)** özelliklerine sahiptirler, yani kırılmadan işlenebilirler.
- Aşınmaya karşı yüksek direnç gösterirler ve yüksek sıcaklık gibi aşırı koşullara maruz kaldıklarında bile özelliklerini koruyabilirler.
- Elektrik akımının kullanıldığı yüzeyle temas etmesini önlemek için **yalıtkan bir tabaka** ile kaplanabilirler (özellikle ev ve sanayi kullanımlarında).

İletken, Yalıtkan ve Yarı İletken Malzemeler

İletken Malzeme Türleri Nelerdir?

İletken malzemeler, elektriği iletme biçimlerine göre sınıflandırılır:

- 1. Metalik İletkenler:** Elektrik yükü **serbest elektronlar** tarafından taşınır. Metaller ve alaşımlar (iki veya daha fazla metalin birleşimi) bu sınıfa girer.
- 2. Gaz Halindeki İletkenler:** Gaz halindedirler ve iyonlaşma sürecinden geçerek elektron kazanır veya kaybederler. Bu süreç, onların elektrik iletme yeteneğini artırır.
- 3. Elektrolitik İletkenler:** Elektrik iletimi, **kimyasal reaksiyonlar yoluyla** gerçekleşir. Yüklü maddeler **pozitif ve negatif iyonlara ayrılarak** elektrik akımının iletimini sağlar. Burada, elektrik akımı **madde hareketiyle** taşınır.

İletken, Yalıtkan ve Yarı İletken Malzemeler

İletken Malzemelere Örnekler

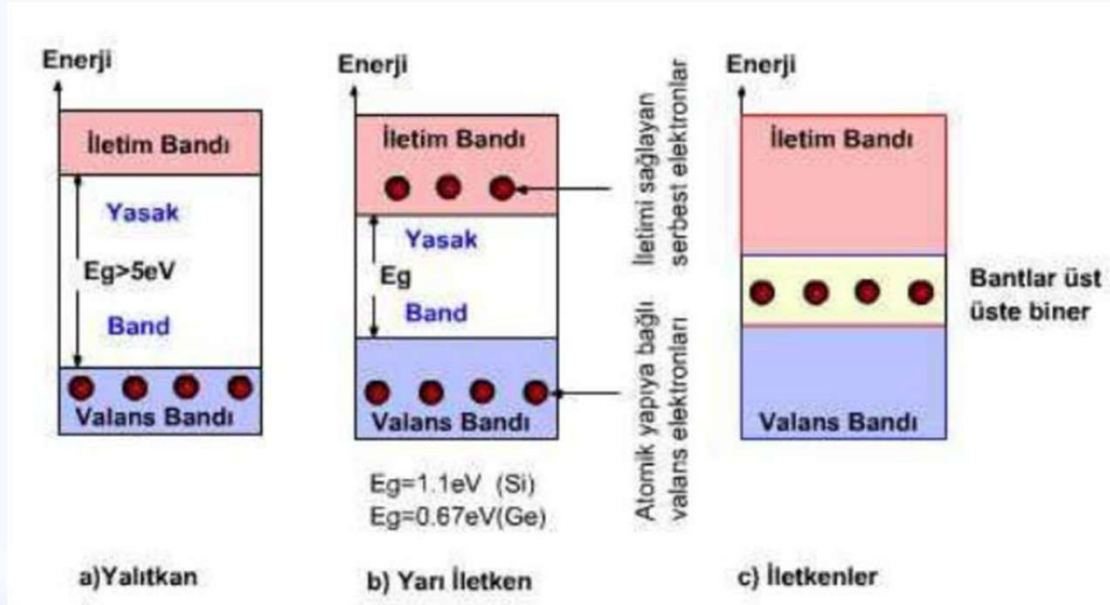
1. **Gümüş:** Elektriği en iyi ileten malzemedir, ancak yüksek maliyeti nedeniyle sınırlı uygulamalarda kullanılır.
2. **Sertleştirilmiş Bakır:** En yaygın kullanılan iletken malzemedir. Gümüş kadar iletken olmasa da düşük maliyeti nedeniyle makinelerde ve elektrikli cihazların kablo sistemlerinde yaygın olarak tercih edilir.
3. **Altın:** Gümüş gibi yüksek iletkenliğe sahiptir, ancak daha çok telefon ve saat gibi özel uygulamalarda kullanılır.
4. **Çelik ve Alüminyum:** Düşük maliyetli ve yüksek iletkenliğe sahip malzemelerdir, sanayi alanında sıkça kullanılırlar.
5. **Bronz:** Gümüş ve altına benzer özelliklere sahiptir, ancak düzenli kullanım için yüksek maliyetlidir.
6. **Hidrojen:** Elektriksel iletkenliği yüksek olan bir gazdır, ancak iyonizasyon sürecinde kimyasal olarak kararsız hale gelebilir.
7. **Cıva:** Toksik olduğu için nadiren kullanılsa da, sıcaklığa bağlı olarak gaz, sıvı veya katı halde bulunabilir.
8. **Tuz Çözeltileri:** Sulu ortamlarda iyonlaşarak mükemmel iletkenlik gösterirler.
9. **Grafit:** Karbon zincirlerinden oluşan organik bir malzemedir ve elektrik devrelerinde yaygın olarak kullanılır.

Yalıtkan Malzemeler

Elektrik akımını iletmeyen maddelere yalıtkan madde denir. Maddelerin yalıtkanlık derecesi son yörüngede(valans yörüngesi) bulunan elektron sayısının fazlalığına bağlıdır. Bu maddelerin atomlarının son yörüngesinde en fazla 8 elektron bulunur. Bu tür maddelerin son yörüngesi elektron açısından doymuş haldedir. Elektron bakımından doymuş yörüngeden elektron koparmak çok zordur.

Bu durumu enerji bandı yönünden ele alırsak, iletim bandı ile valans bandı arasındaki yasak bölge dışarıdan uygulanacak enerji ile aşılamayacak kadar geniştir. Bundan dolayı bu tür maddeler çok iyi yalıtandır. Son yörüngedeki elektron sayısı azaldıkça elektron koparmak kolaylaşacağından yalıtkanlık derecesi düşer. Hava, cam, seramik, plastik, mika ve kağıt gibi maddeler yalıtkanlar grubuna girerler.

Atomlarda Bant Yapıları



Yarı İletken Malzemeler

Elektronik devre elemanlarının ve entegre devrelerin (IC) üretimi, yüksek kaliteli yarı iletken malzemeler ile başlar. Yarı iletkenler, iletkenler ile yalıtkanlar arasında bir iletkenlik seviyesine sahip özel bir element sınıfıdır. Bu özellikleri sayesinde elektronik devrelerin temel yapı taşlarını oluştururlar.

Yarı iletken malzemeler genel olarak iki sınıfa ayrılır:

- Tek kristalli (single-crystal) yarı iletkenler
- Bileşik (compound) yarı iletkenler

2. Yarı İletken Malzemeler ve Kristal Yapıları

2.1 Tek Kristalli Yarı İletkenler

Tek kristalli yarı iletkenler, düzenli ve tekrarlayan bir kristal yapısına sahip elementlerden oluşur. Bu tür yarı iletkenlere örnek olarak **germanyum (Ge) ve silikon (Si)** verilebilir.

2.2 Bileşik Yarı İletkenler

Bileşik yarı iletkenler, farklı atomik yapılara sahip iki veya daha fazla yarı iletken malzemeden oluşur. Yaygın bileşik yarı iletkenler şunlardır:

- Galyum arsenit (GaAs)
- Kadmiyum sülfür (CdS)
- Galyum nitrür (GaN)
- Galyum arsenit fosfit (GaAsP)

Bu malzemeler, belirli elektronik uygulamalarda özel avantajlar sunarlar. Örneğin, GaAs yüksek hızlı elektronik devreler için tercih edilirken, GaN yüksek sıcaklık ve güç gerektiren uygulamalar için kullanılır.

3. Yarı İletkenlerin Tarihsel Gelişimi

3.1 Germanyumun Kullanımı

İlk yarı iletken cihazları **1939 yılında keşfedilen diyotlar** ve **1947 yılında icat edilen transistörler** ile ortaya çıkmıştır. Bu ilk cihazların üretiminde ağırlıklı olarak **germanyum** kullanılmıştır. Bunun başlıca nedenleri şunlardır:

- Germanyum doğada bol miktarda bulunuyordu.
- Yüksek saflıkta germanyum üretmek daha kolaydı.
- Üretim süreçleri geliştikçe germanyumun yüksek iletkenlik özelliklerinden faydalanıldı.

Ancak, zamanla germanyumun bazı dezavantajları olduğu keşfedildi:

- Düşük sıcaklık stabilitesi:** Germanyumdan yapılan diyot ve transistörler sıcaklık değişimlerine karşı oldukça hassastı.
- Düşük güvenilirlik:** Elektronik devrelerde germanyumun kullanımı güvenilirlik sorunlarına neden oldu.

3.2 Silikonun Yükselişi

Bilim insanları, germanyumun yerini alabilecek yeni bir yarı iletken malzeme arayışına girdiklerinde **silikonun** üstün özelliklere sahip olduğunu fark ettiler:

- Yüksek sıcaklık dayanımı:** Silikon, germanyuma göre sıcaklık değişimlerine daha dayanıklıydı.
- Bolluk ve düşük maliyet:** Silikon, dünyanın en bol bulunan elementlerinden biri olduğu için üretim maliyetleri düşüktü.
- Yüksek saflık elde edilebilirliği:** 1954 yılında ilk silikon transistör üretildi ve kısa sürede elektronik sektöründe silikon tercih edilmeye başlandı.

3.3 Galyum Arsenit (GaAs) ile Yüksek Hız Teknolojisi

Zaman içinde elektronik alanında **daha yüksek hızlara ulaşma ihtiyacı** doğdu. Bilgisayar sistemleri ve iletişim teknolojileri hızla gelişirken, silikonun yerine geçebilecek **daha hızlı** bir yarı iletken malzemeye ihtiyaç duyuldu. Bu süreçte **Galyum Arsenit (GaAs)** öne çıktı:

- GaAs transistörleri, silikon transistörlere göre **beş kata kadar daha yüksek hızda** çalışabiliyordu.
 - Ancak GaAs üretimi daha zordu ve maliyetleri yüksekti.
 - İlk yıllarda tasarım desteği yetersizdi ve bu nedenle yaygın kullanımda silikon transistörler daha avantajlıydı.
- Ancak, yüksek hız ihtiyacı arttıkça **GaAs araştırmalarına daha fazla yatırım yapıldı** ve 1980'lerden itibaren **çok büyük ölçekli tümleşik devreler (VLSI)** için GaAs kullanılmaya başlandı.

4. Günümüzde Yarı İletken Teknolojileri

Bugün yarı iletken teknolojileri çok büyük bir gelişme göstermiştir. Kullanım alanlarına göre farklı malzemeler tercih edilmektedir:

- Silikon (Si):** Bilgisayarlar, mikroişlemciler ve genel elektronik devrelerde temel yarı iletken malzeme.
- Galyum Arsenit (GaAs):** Yüksek frekanslı uygulamalar, radar sistemleri ve mobil iletişimde kullanılır.
- Galyum Nitrür (GaN):** Güç elektroniği, LED aydınlatma ve yüksek sıcaklık uygulamaları için tercih edilir.

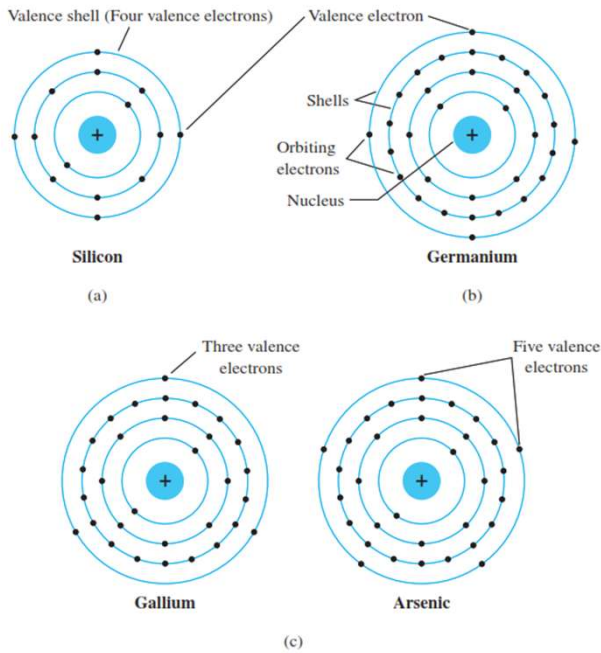


FIG. 1.3

Atomic structure of (a) silicon; (b) germanium; and (c) gallium and arsenic.

Elektronik endüstrisinde neden **Silikon (Si)**, **Germanyum (Ge)** ve **Galyum Arsenit (GaAs)** yarı iletkenler olarak tercih edildiğini tam olarak anlamak için, bu malzemelerin **atomik yapılarının** ve **kristal yapıyı nasıl oluşturduklarının** anlaşılması gerekmektedir. Bir atomun temel bileşenleri **elektron, proton ve nötrondur**. **Kristal kafes yapısında**, nötronlar ve protonlar **atom çekirdeğini** oluştururken, elektronlar **çekirdek etrafında belirli yörüngelerde** hareket ederler. Bu üç malzemenin **Bohr atom modeli**, **Şekil 1.3'te** gösterilmiştir.

n-TİPİ ve p-TİPİ MALZEMELER

Silisyum (Si), katı hâl elektronik cihazlarının üretiminde en yaygın kullanılan **temel (substrat) malzeme** olduğundan, bu ve sonraki bölümlerde yalnızca **Si yarı iletkenleri** ele alınacaktır. Ancak, **Germanyum (Ge)**, **Silisyum (Si)** ve **Galyum Arsenit (GaAs)** benzer **kovalent bağ yapıları** paylaştıkları için, tartışmalar bu diğer malzemelerin üretim süreçlerine de kolaylıkla genişletilebilir.

Daha önce belirtildiği gibi, **yarı iletken bir malzemenin özellikleri**, içerisine **belirli safsızlık atomları** eklenerek **önemli ölçüde değiştirilebilir**. Bu safsızlıklar, **10 milyonda 1 oranında** eklenmelerine rağmen, **bant yapısını önemli ölçüde değiştirerek malzemenin elektriksel özelliklerini tamamen farklı bir hâle getirebilir**.

Doping (katkılama) işlemi uygulanmış bir yarı iletken malzeme, **dışsal (extrinsic) malzeme** olarak adlandırılır.

Yarı iletken cihaz üretiminde **son derece önemli olan iki tür dışsal malzeme** vardır:

- n-tipi malzemeler
- p-tipi malzemeler

n-Tipi Malzeme

Hem **n-tipi** hem de **p-tipi** malzemeler, bir **silikon (Si)** tabanına belirli sayıda **safsızlık atomlarının eklenmesiyle** oluşturulur.

n-tipi malzeme, beş değerlik elektronuna (pentavalent) sahip safsızlık atomları eklenerek elde edilir. Bu tür safsızlık elementleri arasında **antimon (Sb)**, **arsenik (As)** ve **fosfor (P)** bulunur. Bu elementler, **Periyodik Tablo'nun V. Grup (5A grubu) elemanları** olarak sınıflandırılır, çünkü her biri **beş değerlik elektronuna** sahiptir.

n-Tipi Malzemenin Yapısı

n-tipi malzeme oluşturulurken, **silikon kristal kafesine** beş değerlik elektronlu bir safsızlık atomu eklenir. Bu süreç **Şekil 1.7'de** gösterilmektedir (örnek olarak **antimonun silikon tabanına eklenmesiyle** oluşturulan yapı).

•**Dört kovalent bağ yapısı korunur.**

•Ancak, **safsızlık atomunun beşinci elektronu** herhangi bir **kovalent bağ ile bağlı değildir** ve serbest kalır.

•Bu **serbest elektron**, ana (ebeveyn) atom olan **antimon** ile **gevşek bir bağ içinde** olup **hareket etmekte özgürdür.**

Bu nedenle, **n-tipi malzeme**, yapısında **serbest elektronlar** bulunan bir **iletken** hâline gelir.

Donör Atomlar ve Elektriksel Nötrlük

Safsızlık atomları, yapı içersine **serbest elektron bağışladıkları** için **donör atomları** olarak adlandırılır.

Ancak, **n-tipi malzeme serbest elektronlar içerse bile, genel olarak elektriksel olarak nötrdür.** Çünkü:

•**Atom çekirdeklerindeki pozitif yüklü protonların sayısı,**

•**Serbest ve yörüngedeki negatif yüklü elektronların toplamına eşittir.**

Bu denge nedeniyle **n-tipi yarı iletken, elektriksel nötrlüğünü korur**, ancak içersinde serbest elektronlar bulunduğundan **iyi bir iletken** hâline gelir.

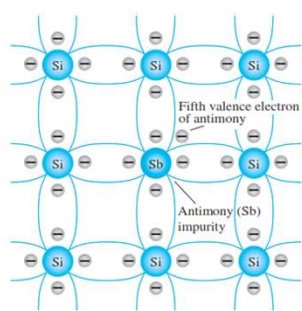


FIG. 1.7

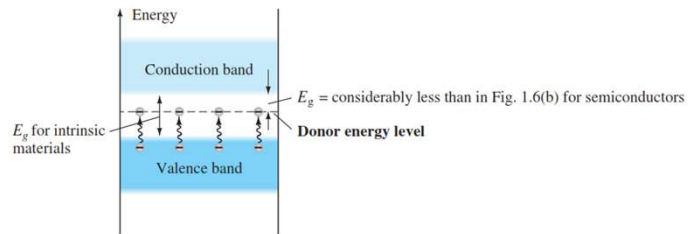


FIG. 1.8

Effect of donor impurities on the energy band structure.

p-Tipi Malzeme

p-tipi malzeme, üç değerlik elektronuna (trivalent) sahip safsızlık atomlarının saf germanyum (Ge) veya silisyum (Si) kristaline eklenmesiyle oluşturulur.

Bu amaçla en sık kullanılan elementler şunlardır:

- Bor (B)
- Galyum (Ga)
- İndiyum (In)

Bu elementler, **Periyodik Tablo'nun III. Grup (3A grubu) elemanları** olarak sınıflandırılır, çünkü her biri **üç değerlik elektronuna** sahiptir.

p-Tipi Malzemenin Yapısı

p-tipi malzeme oluşturulurken, **silikon kristal kafesine** üç değerlik elektronlu bir safsızlık atomu eklenir. **Şekil 1.9'da**, bor elementinin silikon tabanına eklenmesi sonucu oluşan yapı gösterilmektedir.

•**Üç değerlik elektronuna sahip safsızlık atomu**, komşu silikon atomları ile **yalnızca üç kovalent bağ oluşturabilir.**

•**Ancak, tam bir bağ oluşturabilmek için bir elektrona daha ihtiyaç duyulmaktadır.**

•Bu eksik elektron nedeniyle **bir boşluk (hole/delik) oluşur.**

Bu **delik**, genellikle **küçük bir daire (○) veya pozitif işaret (+)** ile gösterilir ve **negatif yük eksikliğini temsil eder.**

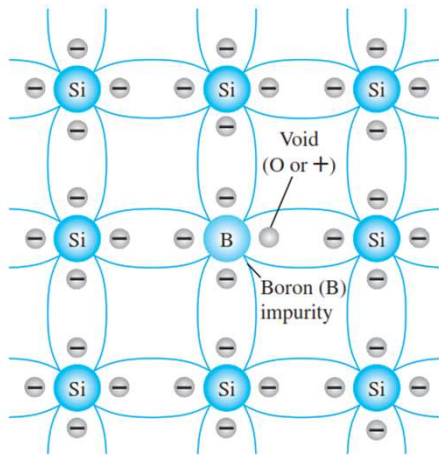
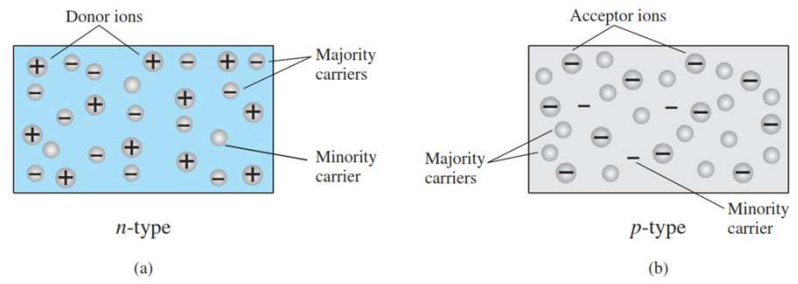
Akseptör Atomlar ve Elektriksel Nötrlük

Bu tür safsızlık atomları, yapı içerisine **serbest elektron almak için boşluk sağladıklarından, akseptör atomları** olarak adlandırılır.

Tıpkı **n-tipi malzeme**de olduğu gibi, **p-tipi malzeme** de genel olarak elektriksel olarak nötrdür çünkü:

- Pozitif yüklü protonların toplamı,**
- Negatif yüklü elektronların ve deliklerin toplamına eşittir.**

Ancak, **delikler elektronları kabul etmeye eğilimli olduğu için, p-tipi malzeme pozitif yüklü delikler aracılığıyla elektrik akımını taşır.** Bu nedenle, **p-tipi yarı iletkenlerde elektriksel iletim mekanizması delikler üzerinden gerçekleşir.**

**FIG. 1.9***Boron impurity in p-type material.***FIG. 1.11***(a) n-type material; (b) p-type material.*