

Elektronik-I

Yrd. Doç. Dr. Özlem POLAT

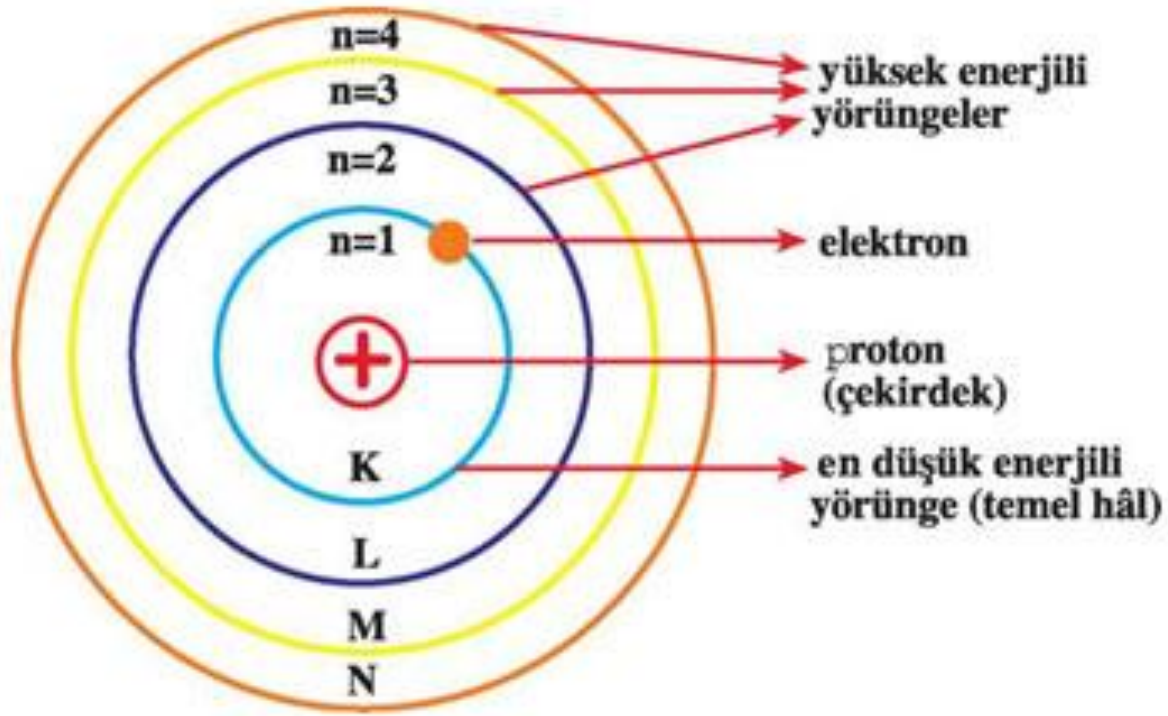
Kaynaklar

- **1-**"Electronic Devices and Circuit Theory", Robert BOYLESTAD, Louis NASHELSKY, Prentice-Hall Int.,10th edition, 2009.
- **2-**"Elektronik Cihazlar ve Devre Teorisi", Robert BOYLESTAD, Louis NASHELSKY, Onuncu baskıdan çeviri, Palme Yayınevi, 2010.
- **3-**"Elektronik-I", Hüseyin DEMİREL, Birsen Yayınevi, 2. Baskı, 2015.
- **4-**"Elektronik", M. Sait TÜRKÖZ, Birsen Yayınevi, 2009.

1- YARIİLETKEN MADDELER

- **Atom:** Bir maddenin özelliklerini taşıyan en küçük parçacıktır. Atom, çekirdek ve çekirdek etrafında dönen elektronlardan oluşur. Atom çekirdeği içinde pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlar bulunurken yörüngede dönen elektronlar negatif yüklüdür.
- **Bohr Atom Modeli:** Atomlar çekirdek ve elektronlardan oluşur. Çekirdek içerisinde + yüklü protonlar ve yüksüz nötronlar bulunmaktadır. – yüklü elektronlar çekirdek etrafında tıpkı gezegenlerin güneş etrafında döndüğü gibi farklı yörüngesel hareketlerle dönmektedir. Normalde proton, nötron ve elektron sayıları birbirine eşittir.

Elektronlar ve Yörüngeler



- Çekirdekten itibaren her bir mesafeye karşılık gelen bir enerji düzeyi vardır. Enerji düzeyleri yörünge veya kabuk ismiyle gruplanmıştır. Her bir atomun sabit sayıda yörüngesi vardır ve her yörüngede sabit maksimum elektron sayısı mevcuttur.

- Çekirdeğin etrafında yörüngelerde dönen elektronların çekirdeğe belli bir mesafesi bulunmaktadır.
- Çekirdeğe daha yakın olan elektronların enerjileri düşüktür.
- Atomik yapı içerisinde farklı enerji seviyelerinde elektronlar bulunmaktadır.
- Bu yüzden elektronlar farklı mesafelerde çekirdek etrafında dönerler.

Elektronlar ve Yörüngeler

- Her bir yörüngedeki bulunabilecek maksimum elektron sayısı E_s aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$\bullet E_s = 2n^2$$

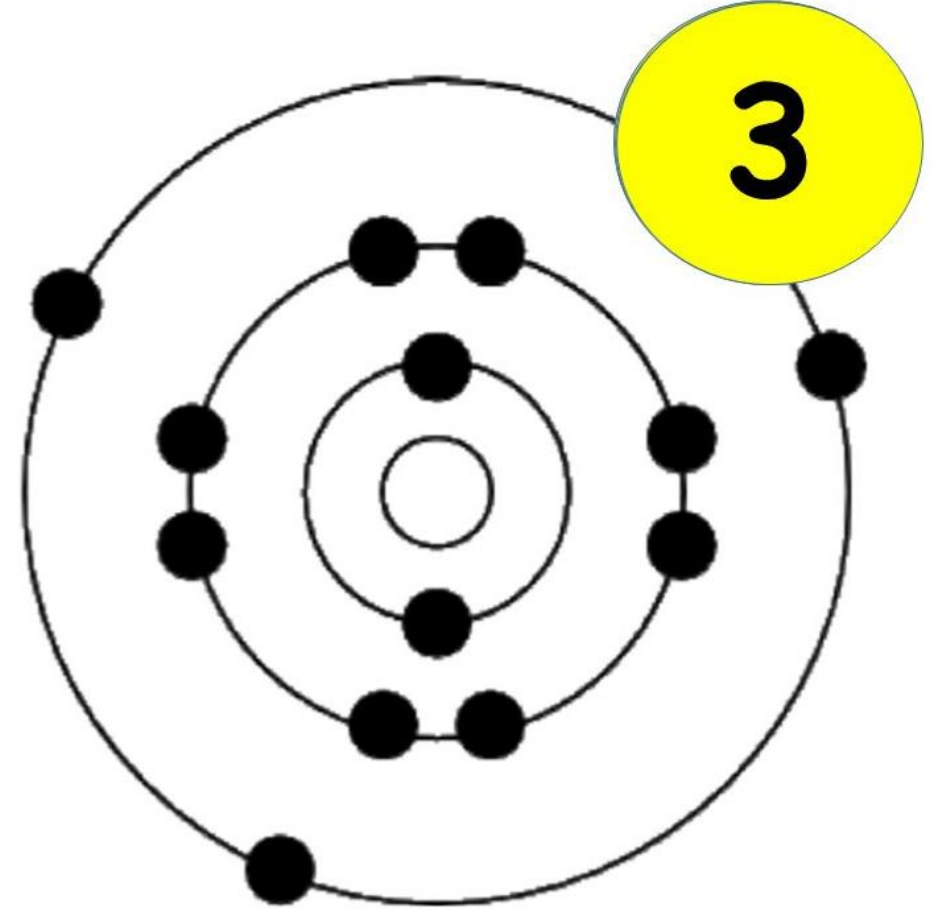
- n kaçınıcı yörünge olduğunu göstermektedir
- Örneğin bir atomda bulunan 1,2,3,4,5. yörüngelerdeki maksimum elektron sayıları aşağıdaki gibidir.
- 1. Yörüngede $E_s=2(1)^2=2$
- 2. Yörüngede $E_s=2(2)^2=8$
- 3. Yörüngede $E_s=2(3)^2=18$
- 4. Yörüngede $E_s=2(4)^2=32$
- 5. Yörüngede $E_s=2(5)^2=50$

Valans (Değerlik) Elektronları

- Atomlarda bulunan elektronlar, çekirdekten itibaren dışa doğru yörüngelere yerleşmişlerdir. Elektronlar pozitif yüklü çekirdekten uzaklaştıkça daha fazla enerjiye sahip olurken çekirdeğe olan bağlılıkları azalmaktadır. Aksi durumda ise çekirdeğe daha yakın olan elektronların enerjileri daha azdır ve çekirdeğe bağlılıkları artmaktadır.
- Dolayısıyla en dış yörüngede bulunan elektronların çekirdeğe olan bağlılığı en düşük düzeydedir. Bunun yanında en yüksek enerji düzeyine sahiptir.

Valans (Değerlik) Elektronları

- Atomlarda bulunan en dış yörüngeye valans yörüngesi ve bu yörüngedeki elektronlara da valans elektronları denir.
- Valans yörüngesinde bulunan elektronlar kimyasal reaksiyonlara ve bir maddenin yapısı içindeki kurulan bağlara katkı sağlamaktadır.
- Bunun yanı sıra valans elektronların sayısı o maddenin elektriksel özelliğini de belirlemektedir.
- Eğer valans elektronu dışardan yeterli enerjiyi bulabilirse kendi atomundan ayrılabilir. Bu durum maddelerin iletkenliklerinin temelidir.



Al +13

Valans yörüngesi

Valans elektronları

Elektron alış-verişi (İyonizasyon)

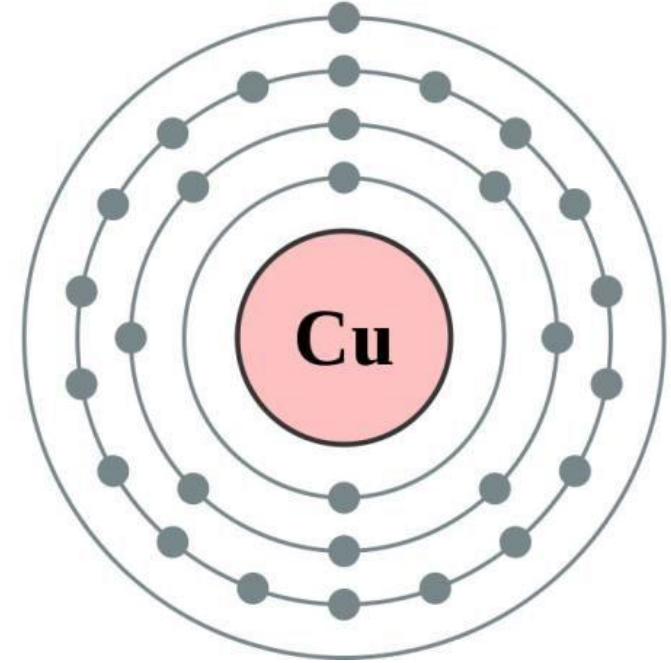
- Bir atom bir ısı veya ışık kaynağından harici bir enerji aldığı anda elektronların enerji düzeyleri artar. Bu durumda valans elektronlar iç yörüngedeki elektronlardan daha fazla enerjiye sahip olur. Eğer bir valans elektronu **iyonizasyon enerjisi** denilen yeterli miktarda enerjiye sahip olursa atomdan kolaylıkla ayrılır. Buna **iyonizasyon** denir. Başlangıçta proton ve elektron sayıları eşitken , iyonizasyon sonucu proton sayısı elektron sayısından 1 fazla olacaktır. Yani +1 yüke sahip olacaktır. Buna **pozitif iyon** adı verilir. Bu sırada kendi atomundan ayrılan elektrona da **serbest elektron** adı verilir.
- Tersî durumunda herhangi bir serbest elektron atoma çarptığında enerji kaybeder ve çarptığı atomun valans yörüngesine bağlanabilir. Bu durumda atom fazladan 1 elektrona sahip olacaktır ve neticede -1 yüke sahip olacaktır. Buna **negatif iyon** ismi verilir.

Elektriksel Maddeler

- Atomların son yörüngelerindeki elektron sayıları maddeleri elektriksel özelliklerini belirlemektedir. Maddeler elektriksel özellikleri bakımından veya elektrik akımını iletme kabiliyetleri açısından üç gruba ayrılır: iletkenler, yalıtkanlar ve yarı iletkenler.
- **iletken:** Atomlarının valans yörüngesindeki elektron sayısı dörtten az (1-2-3) olan elementlere iletken denir. Elektrik akımını iyi iletirler.
- Bakır (Cu), gümüş (Ag), altın (Au) ve Alüminyum (Al) iyi iletkenlerdir.

29: Copper

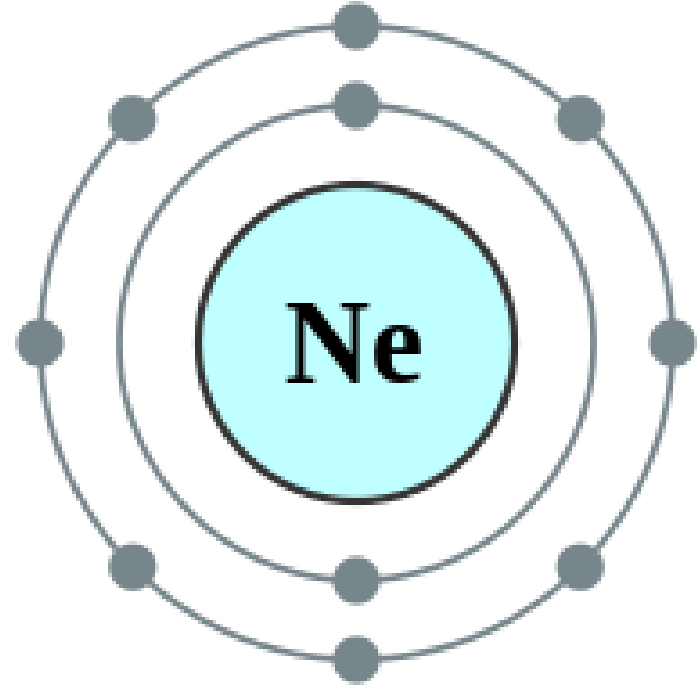
2,8,18,1



Bakır +29

Elektriksel Maddeler

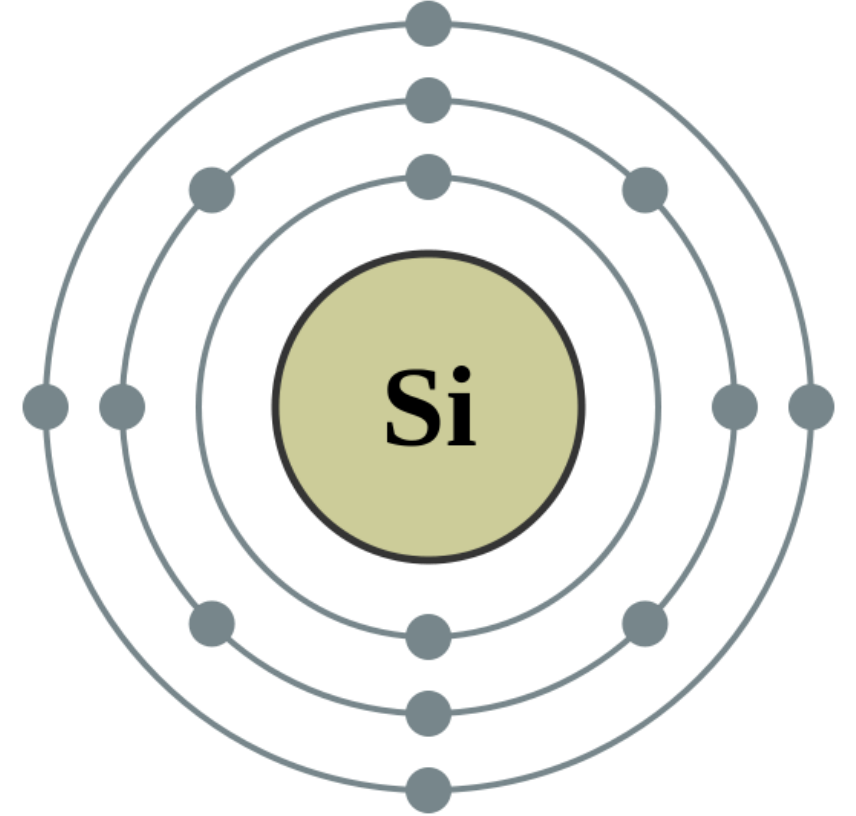
- **Yalıtkan:** Elektrik akımını iletmeyen maddelere yalıtkan denir. Yalıtkan cisimlerde serbest elektron yok denecek kadar azdır. Çünkü valans elektronları çekirdeğe çok sıkı bir şekilde bağlıdır. Porselen, plastik cam, neon



Neon +10

Elektriksel Maddeler

- **Yarı iletken:** Elektriksel özelliği iletkenler ile yalıtkanlar arasında olan elektrik akımını kısmen ileten maddelere yarı iletken denir. Saf halde bulunan bir yarıiletken ne iyi bir iletkenidir ne de iyi bir yalıtıkandır.
- Tek elementten oluşan yarı iletken maddeler: silisyum (Si), germanyum (Ge), antimon (Sb), arsenik (As)
- Bileşik halindeki yarı iletken maddeler: Galyum Arsenit (GaAs), Kadmiyum Sülfid (CdS), Galyum Nitrit (GaN)



Silikon +14

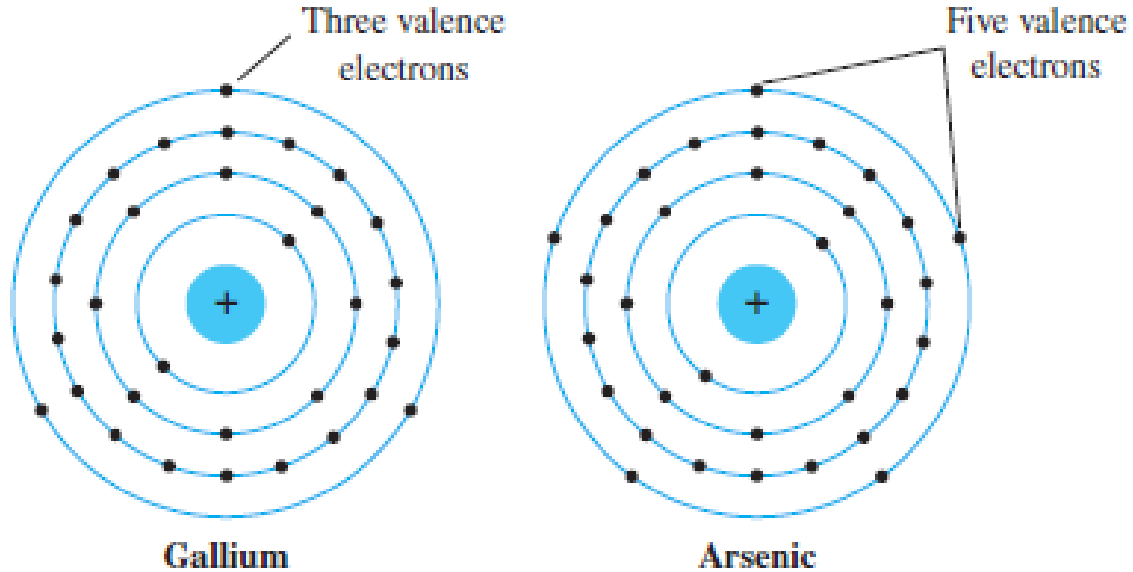
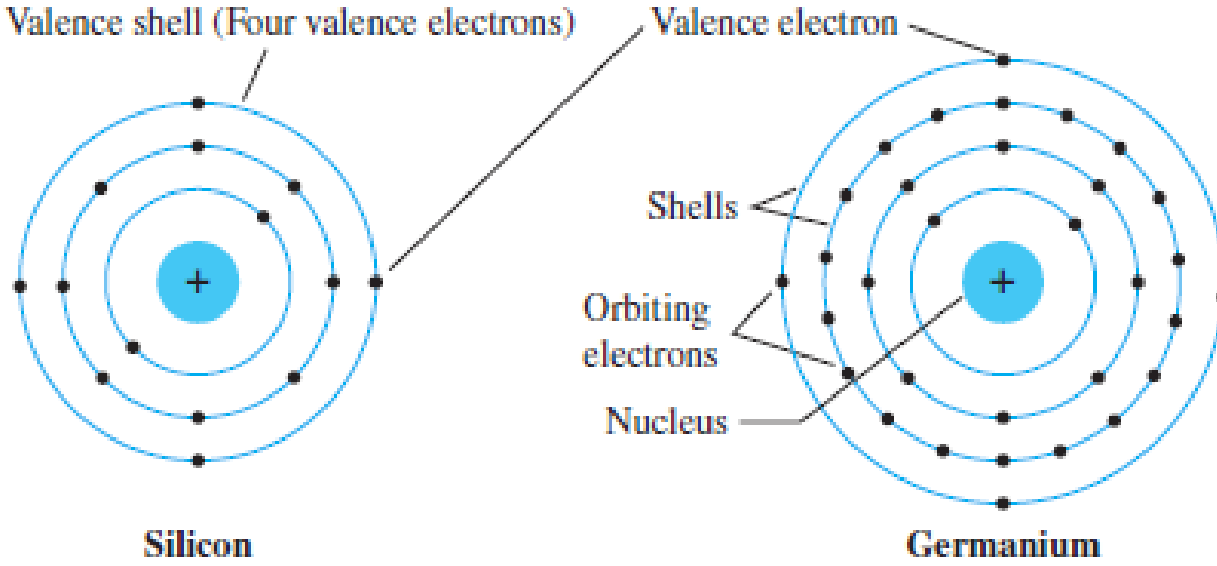
Yarıiletken Malzemeler: Ge, Si, GaAs

- Her bir katı hal (sıkı kristal yapı) elektronik cihazın ya da entegre devrenin üretimi en kaliteli yarıiletken malzemeyle başlar.
- Yarı iletkenler iletkenlikleri, iyi bir iletkenle yalıtkan arasında bulunan özel elementlerdir.
- Tek kristalli ve bileşik olmak üzere ikiye ayrılırlar.
- Ge, Si ve GaAs elektronik cihazların yapımında en sık kullanılan yarıiletkenlerdir.
- Ge, Si: tek kristalli yarıiletken
- GaAs: Bileşik yarı iletken

Yarıiletken Malzemeler: Ge, Si, GaAs

- Diyodun 1939'da ve transistörün 1947'de icadından sonra Ge kolay bulunabildiği ve büyük miktarlarda elverişli olduğu için sıkça kullanılmıştır.
- Sıcaklık değişimine duyarlı olduğu için düşük güvenilirliğe sahiptir.
- Silikonun sıcaklık duyarlığı daha iyi olduğu ve bol bulunabildiği için silikon tercih edilmeye başlanmıştır. 1954'te ilk silikon transistör üretilmiştir.
- Zaman ilerledikçe hızın önemi ortaya çıkmıştır ve daha hızlı yarıiletkenlere ihtiyaç duyulmuştur.
- Bunun için 1970'lerde GaAs transistörler geliştirilmiştir. İlk üretilen Si transistörlerden 5 kat daha hızlıdır.
- Fakat GaAs'ın yüksek saflık derecesinde üretimi daha zor ve pahalı olduğu için ve Silikonlu devrelerin üretimi daha ucuz olduğu için Si için üretim stratejileri geliştirilmiştir.
- Sonuç olarak bu üç madde günümüzde en sık kullanılan yarıiletken olmuştur.

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler



Yörünge elektron sayıları:

Si: 14

Ge:32

Ga:31

As:33

En dış kabuktaki elektronlara **değerlik (valans) elektronları** denir.

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler

- **Değerlik kavramı**, bu elektronları atomik yapıdan koparmak için gerekli potansiyelin (iyonizasyon potansiyeli), yapıdaki diğer elektronları koparmak için gerekli potansiyelden önemli ölçüde düşük olduğunu belirtmektedir.

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler

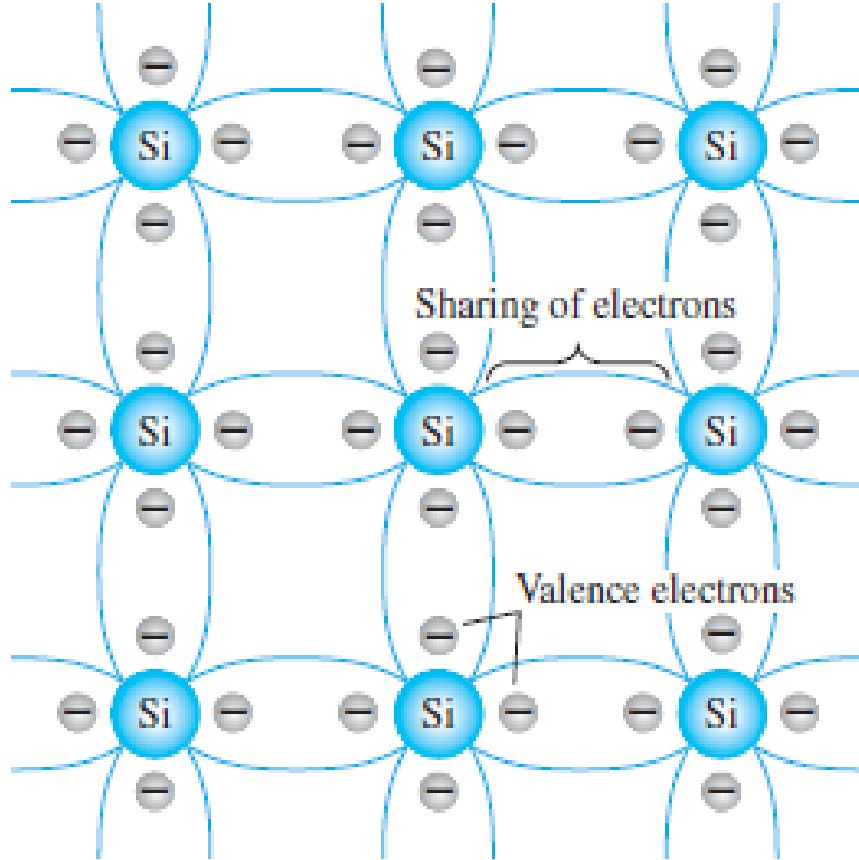


FIG. 1.4

Covalent bonding of the silicon atom.

- Saf Si veya Ge kristalinde şekilde gösterildiği gibi tek bir atomun dört değerlik elektronu, komşu dört atomla bağlanma düzeni oluşturur.
- Elektronların paylaşılmasıyla güçlendirilmiş bu bağlanmaya **kovalent bağlanma** adı verilir

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler

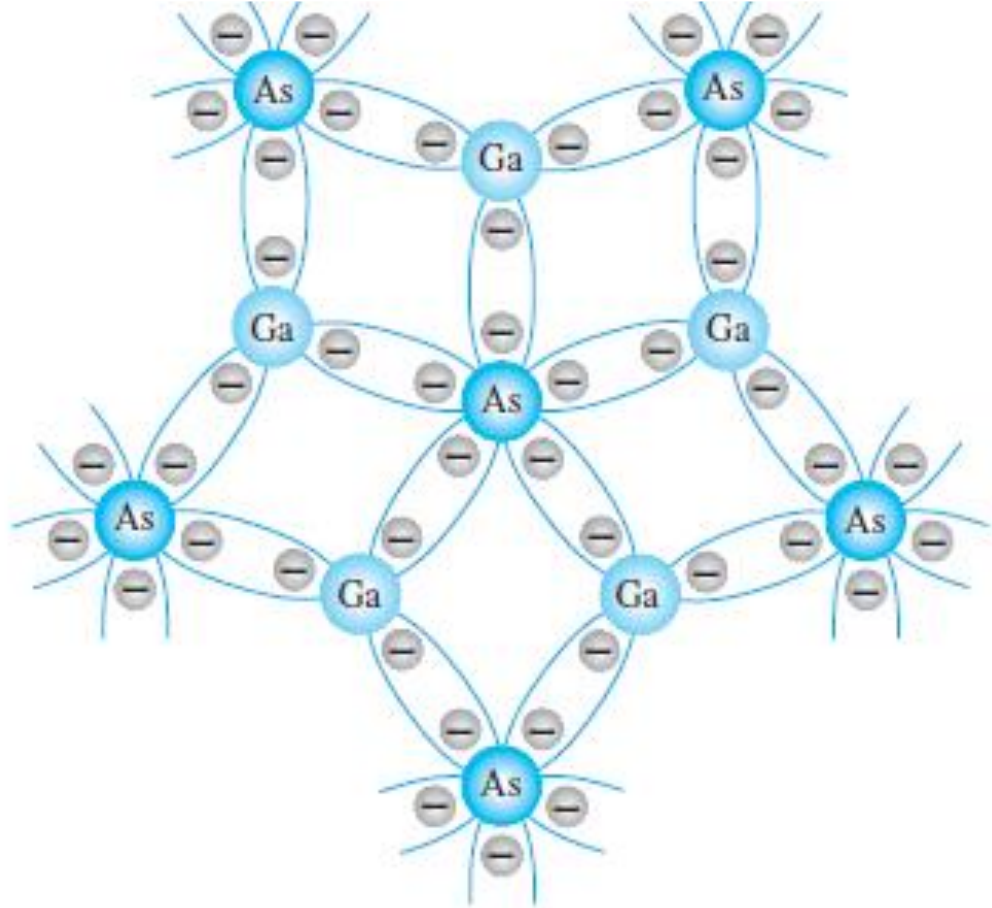


FIG. 1.5

Covalent bonding of the GaAs crystal.

- GaAs bileşigi kristalinin kovalent bağlanmasında her bir atom tamamlayıcı atomlarla çevrelenmiştir.
- Ge ve Si atomlarınının elektron paylaşımına benzerlik vardır ancak burada As atomu tarafından 5 ve Ga atomu tarafından 3 elektron verilmektedir.

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler

- Kovalent bağda komşu atom ve değerlik elektronları arasında güçlü bir bağ olmasına rağmen, değerlik elektronlarının yeterli kinetik enerjiyi soğurmasıyla kovalent bağın kopması ve elektronların serbest kalması mümkündür. Serbest kavramı kristal yapıdan kopan elektron için kullanılmaktadır ve bu elektron gerilim kaynakları veya herhangi bir gerilim farkıyla oluşturulan elektrik alana karşı duyarlıdır.
- Saf kavramı, katkı (katışkı) seviyesi modern teknoloji yardımıyla en düşük seviyeye indirilen yarıiletken malzemeler için kullanılmaktadır.
- Sadece dış etkilerle ortaya çıkan serbest elektronlara **saf taşıyıcılar** denmektedir.

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler

TABLE 1.1
Intrinsic Carriers n_i

Semiconductor	Intrinsic Carriers (per cubic centimeter)
GaAs	1.7×10^6
Si	1.5×10^{10}
Ge	2.5×10^{13}

TABLE 1.2
Relative Mobility Factor μ_n

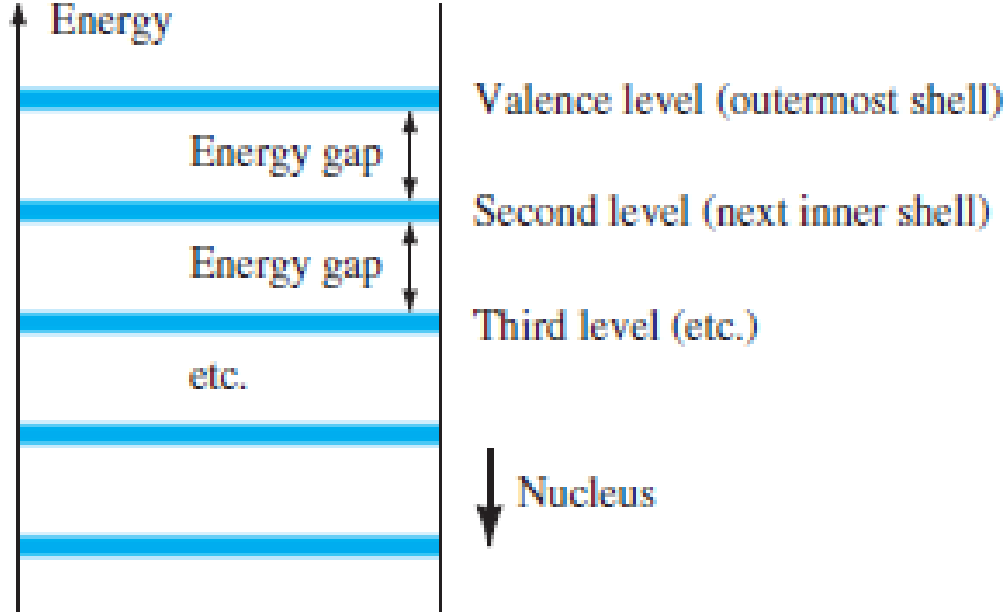
Semiconductor	μ_n (cm ² /V·s)
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

- Serbest taşıyıcıların bağıl hareketliliği, serbest taşıyıcıların malzeme içinde hareket etme yeteneğidir.
- GaAs'deki serbest taşıyıcıların Si'deki taşıyıcıların 5 katından daha hızlı hareket etmektedir.
- GaAs elektronik cihazlar, Si cihazlardan 5 kat daha hızlı çalışmaktadır.

Kovalent Bağ ve Saf Malzemeler

- Yarıiletkenler ve iletkenler arasındaki önemli bir fark ısıya gösterdikleri tepkidir. İletkenlerde direnç ısıyla birlikte artar. Bunun sebebi iletkenlerdeki taşıyıcı sayısının sıcaklıkla belirgin olarak değişmesidir. Taşıyıcıların sabit bir konum etrafında titreşmesi materyalden taşıyıcıların akmasını çok zor kılmaktadır. Bu şekilde tepki veren malzemelerin **pozitif sıcaklık katsayısı** vardır.
- Öte yandan yarıiletken malzemeler uygulanan sıcaklıkla birlikte artan bir iletkenlik gösterir. Sıcaklık arttıkça, değerlik elektronları kovalent bağı kırarak ısıl enerjiyi soğurur ve serbest taşıyıcılara katılırlar. Sonuç olarak; yarıiletken malzemelerin **negatif sıcaklık katsayısı** vardır.

Enerji Seviyeleri

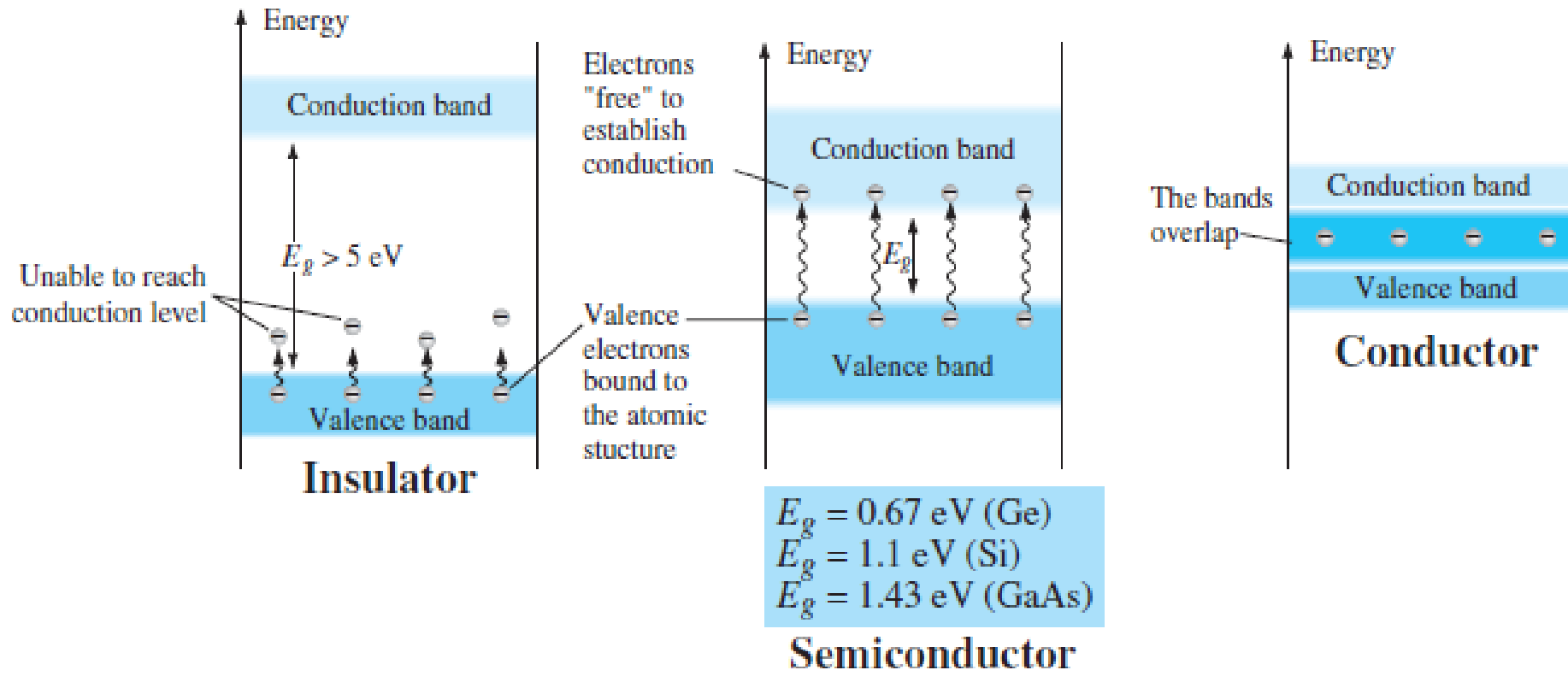


Yalıtılmış atomik yapıdaki
(ayrık) enerji seviyeleri

- Atomik yapıdaki , yalıtılmış her bir atomun kabuklarına ve yörüngedeki elektronlarına karşılık gelen enerji seviyeleri vardır. Her bir kabuğa karşılık gelen enerji seviyesi her element için farklıdır.
- Genel olarak elektron çekirdekten uzaklaştıkça daha yüksek bir enerji seviyesine geçer. Ait olduğu atomu terkeden elektronun enerjisi atomik yapıdaki elektronun enerjisinden fazladır.

Enerji Seviyeleri

- Bir malzemenin atomları birbirine yaklaştıkça kristal yapı oluşur ve atomlar arası etkileşim sonucu komşu iki atomun aynı yörüngedeki iki farklı elektronunun enerji seviyeleri arasında çok az bir fark oluşur. Bunun sonucunda genişlemiş enerji seviyeleri ortaya çıkar.



Enerji Seviyeleri

- Silikonun değerlik bandındaki bir elektron serbest taşıyıcı olmak için, germanyumun değer bandındaki elektronlardan daha çok enerji soğurmalıdır. Benzer şekilde, galyum arsenidin değer bandındaki bir elektron iletim bandına geçmek için silikondaki veya germanyumdaki elektrondan daha çok enerji kazanmalıdır.
- Enerji aralığındaki bu farklar her bir yarıiletkenin sıcaklık değişimine olan duyarlılığını açığa çıkarmaktadır. Örneğin Ge'nin sıcaklığı arttıkça ısı enerjisi alan ve iletim bandına giren elektronların sayısı Si ve GaAs'e göre daha fazla olacaktır.

Enerji Seviyeleri

- Enerji aralığını ifade etmede kullanılan enerji birimi elektron volt'tur (eV). $W(\text{enerji})=Q.V$ eşitliğinden dolayı bu birim uygundur (bu eşitlik gerilimi tanımlayan: $V=W/Q$ eşitliğinden türetilir). Tek bir elektronun yükü ve 1V gerilim farkı eşitlikte yerine konursa, bir **elektron volt'a** karşılık gelen enerji elde edilir.

$$\begin{aligned}W &= QV \\ &= (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \text{ V}) \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}\end{aligned}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Katkılı Malzemeler: n-Tipi ve p-Tipi

- Bir yarıiletken malzemenin karakteristiği, belirli bir katkı atomlarının eklenmesiyle belirgin şekilde değiştirilebilir. Bu katkılar 10 milyonda 1 oranında eklense dahi, malzemenin elektriksel özelliklerini tamamen değiştirebilir.
- Katkılama yapılan yarıiletken malzemelere **katkılı malzeme** adı verilir.
- Yarıiletken cihaz üretiminde yüksek öneme sahip iki katkı malzeme tipi vardır: n tipi ve p tipi malzemeler.

n-Tipi Malzemeler

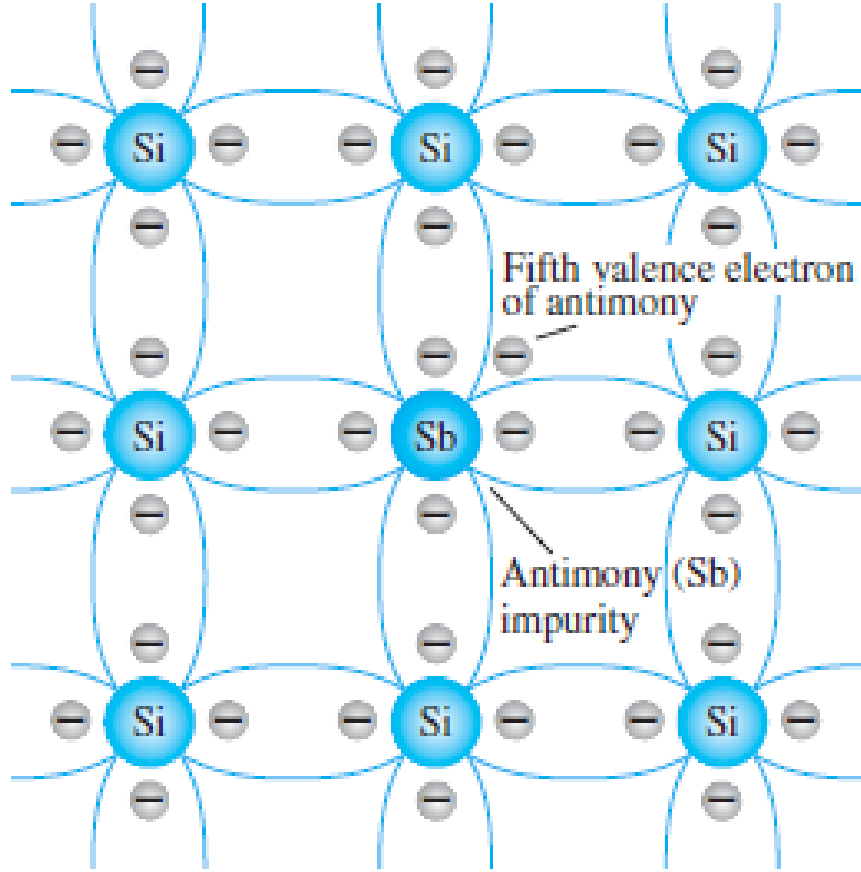


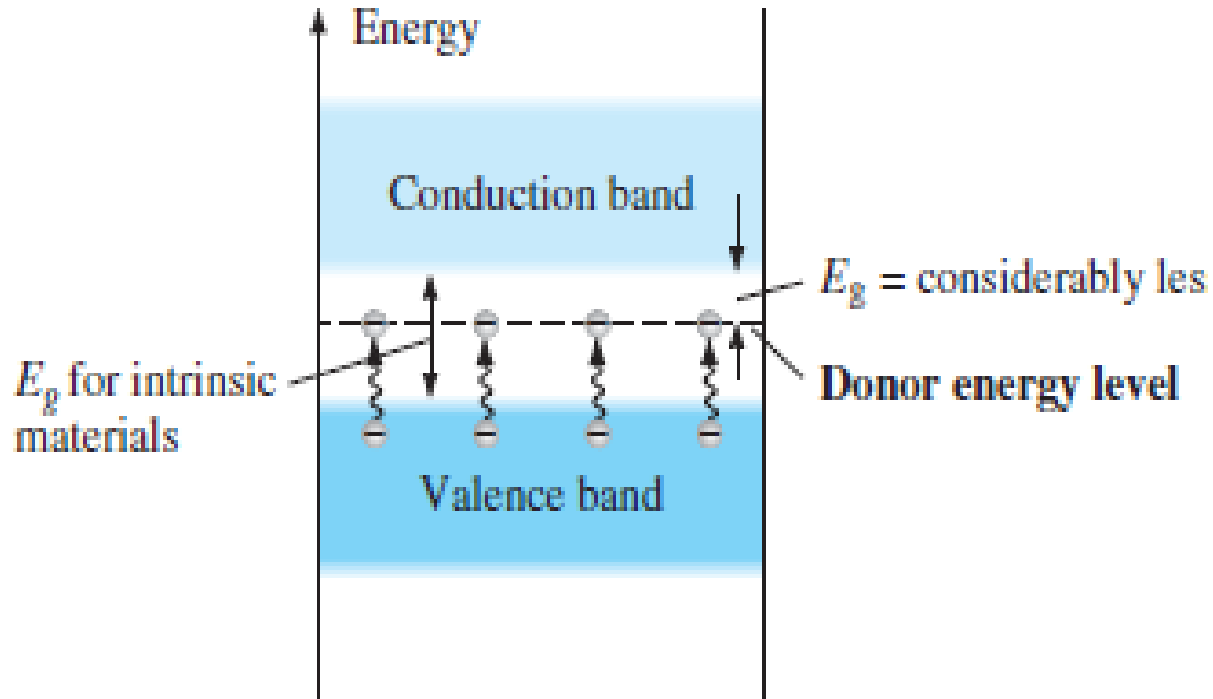
FIG. 1.7

Antimony impurity in n-type material.

- N-tipi ve p-tipi malzemeler daha önce belirlenen sayıdaki katkı atomlarının silikon tabana eklenmesiyle oluşur.
- Bir n-tipi malzeme *antimon*, *arsenik* ve *fosfor* gibi **beş** değerlik elektronlu (beş değerli) elementlere katışı eklenmesiyle oluşur.
- Şekilde silikon tabanda katkı olarak antimon kullanılmıştır.
- Katkı atomu yapıya serbest bir elektron kattığı için; beş değerlik elektronlu katışıklara **verici atom** denir

n-Tipi Malzemeler

- Katkılama sürecinin bağıl iletkenlik üzerine etkisi: E_g önemli ölçüde saf malzemedekinden azdır.



Eklenen katkıların oluşturduğu serbest elektronlar bu enerji seviyesinde durur ve oda sıcaklığında yeterli ısı enerjisi soğurup iletim bandına kolaylıkla geçerler.

Sonuç olarak oda sıcaklığında malzemenin iletkenliği önemli oranda artar.

p-Tipi Malzemeler

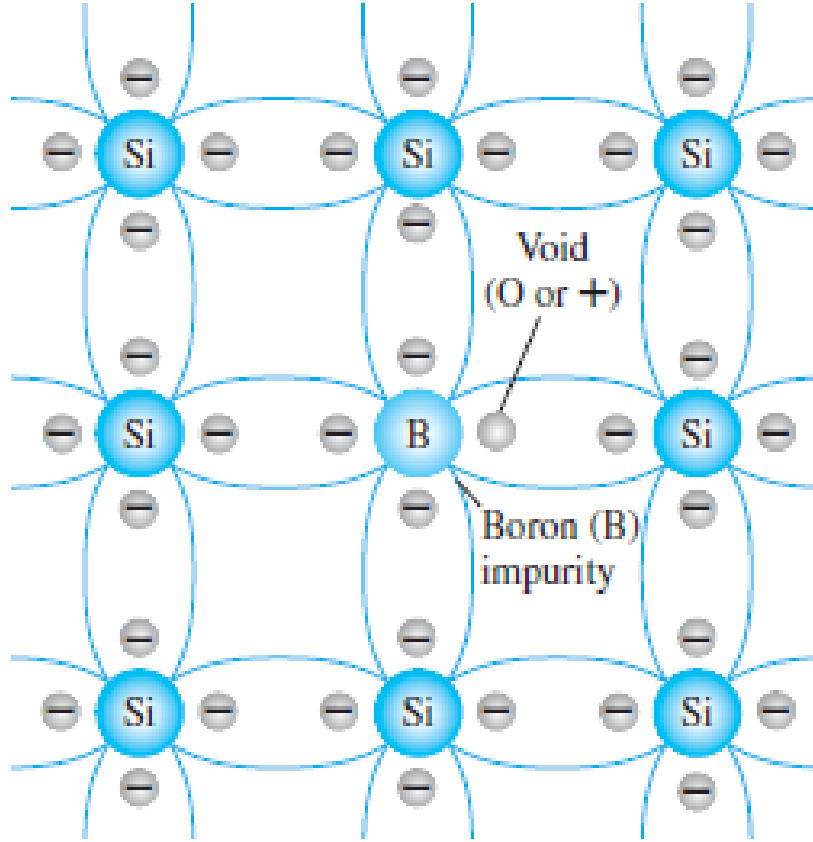


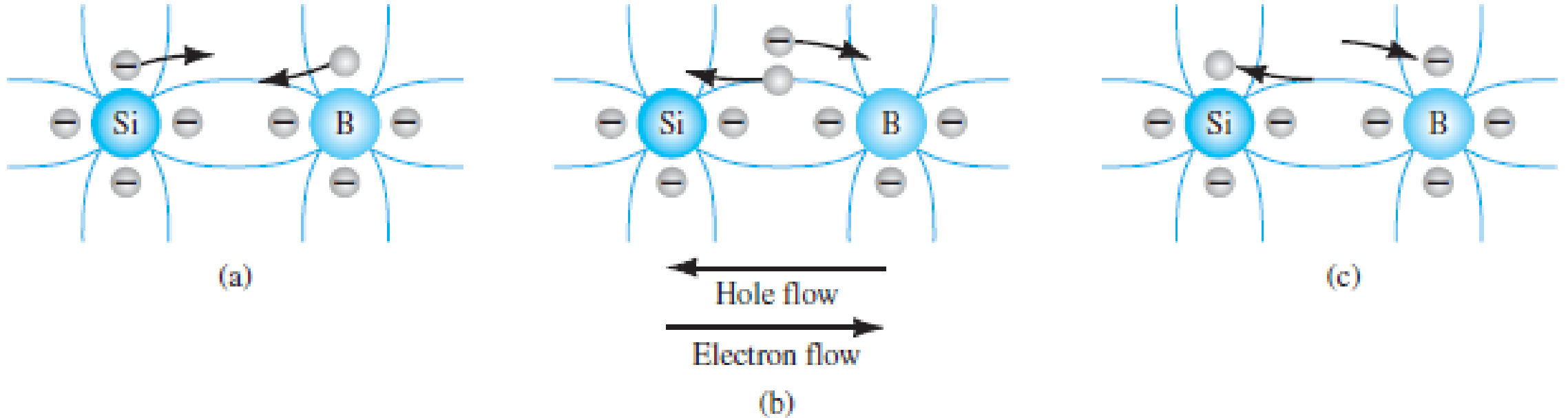
FIG. 1.9

Boron impurity in p-type material.

- P-tipi malzeme üç değerlik elektronlu katkı atomlarının saf silikon veya germanyum kristaline katılmasıyla oluşturulur.
- Bunun için en sık kullanılan malzemeler: *boron, galyum ve indiyum*'dur.
- Oluşan boşluk serbest bir elektron kabul edeceği için üç değerlik elektronlu katışkılara **alıcı atom** denir.

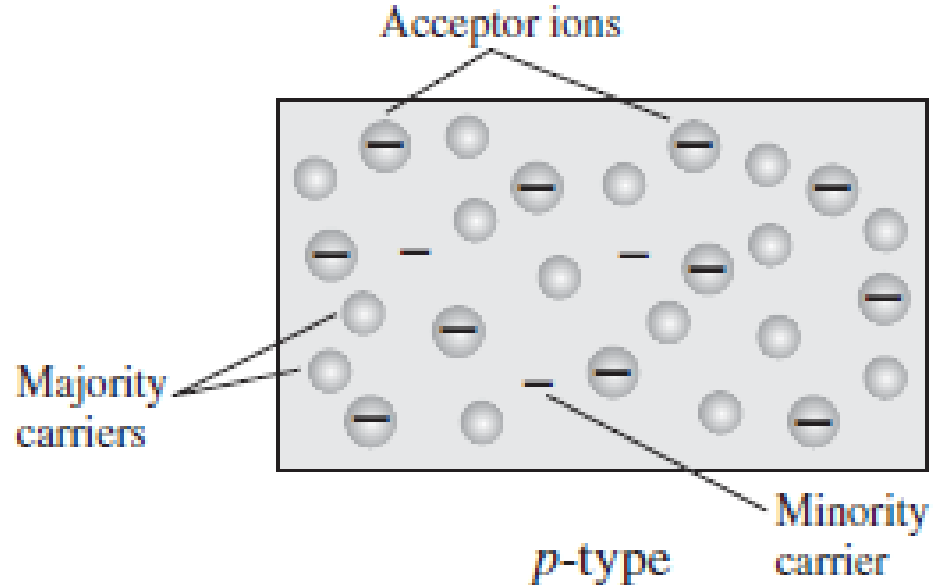
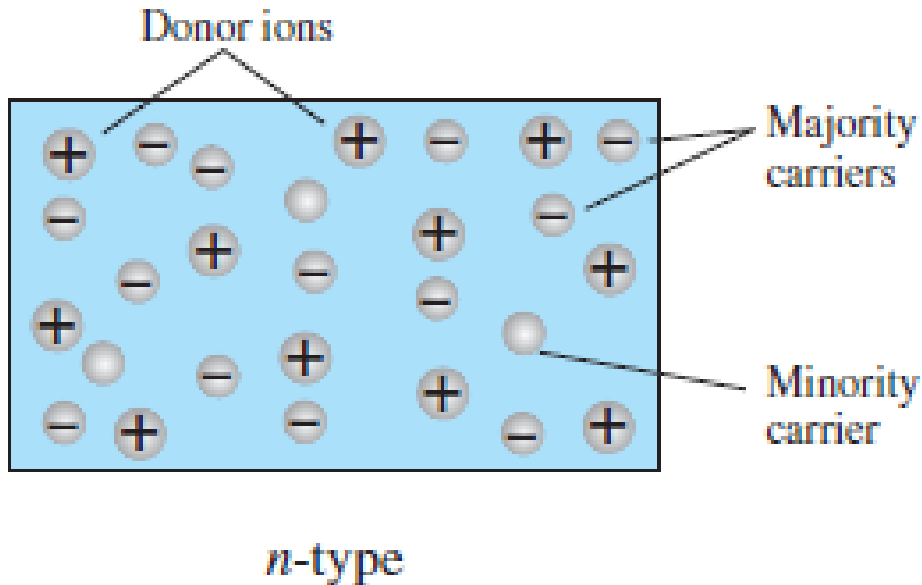
Delik (oyuk) akışına karşı elektron akışı

- Eğer bir değerlik elektronu kovalent bağı kırmaya yeterli kinetik enerjiyi alır ve delik tarafından oluşturulan boşluğu doldurursa, elektronu salan kovalent bağda bir delik oluşur. Bu yüzden deliklerin sola elektronların sağa doğru aktarımı vardır.



Çoğunluk ve Azınlık Taşıyıcıları

- n-tipi malzemede elektronların sayısı deliklerden daha fazladır. Bu nedenle elektrona çoğunluk taşıyıcısı deliğe azınlık taşıyıcısı denir.
- P-tipi malzemede ise deliğe çoğunluk taşıyıcısı elektrona azınlık taşıyıcısı denir.



Çoğunluk ve Azınlık Taşıyıcıları

- Verici atomun beşinci elektronu ana atomu terkettiğinde, kalan atom pozitif yüklü olur; bu nedenle verici iyon gösteriminde + işaret vardır.
- Alıcı atoma dışardan bir serbest elektron bağlandığında negatif yüklü olur, bu nedenle alıcı iyon gösteriminde – işaret kullanılır.

BÖLÜM ÖZETİ

- Bir atomun çekirdeği proton ve nötronlardan meydana gelmektedir. Protonlar pozitif yüklere sahipken nötronlar yüksüzdür. Protonların sayısı atom numarasına eşittir.
- Elektronlar negatif yüke sahiptir. Atom çekirdeği etrafında yörüngelerde bulunurlar. Enerji seviyesi fazla olan elektronlar dışardaki yörüngelerde yer alırken enerji seviyesi düşük olan elektronlar çekirdeğe yakın yörüngelerde yer almaktadır.

- Doğal koşullarda tüm atomlar nötr durumdadır. Çünkü atomların elektron sayıları proton sayılarına eşittir. Atom elektron kaybettiği zaman -1 iyonuna dönüşürken, elektron kazandığı zaman +1 iyonuna dönüşür.
- Atomların en dış yörüngesine valans yörüngesi ismi verilir. Bu yörüngedeki elektronlara da valans elektronları denir. Bu elektronlar en yüksek enerji düzeyine sahiptir.

- Eğer bir atoma ısı, ışık, gerilim gibi harici bir enerji uygulanırsa valans elektronu yörüngesini terk edip serbest elektron haline dönüşür.
- Yalıtkan maddeler çok az serbest elektrona sahiptir ve normal şartlarda elektrik akımını iletmezler.
- İletken maddeler çok fazla serbest elektrona sahiptir ve normal şartlarda elektrik akımını iletirler.

- Yarıiletken maddeler akım iletme kabiliyeti açısından iletken ve yalıtkanların arasındadır. Ne iyi bir iletken ne de iyi bir yalıtkanlardır.
- Yarıiletken atomlar 4 adet valans elektrona sahiptir. Silisyum çok yaygın olarak kullanılan bir yarıiletken atomdur.
- Yarıiletken atomları valans elektronlarını paylaşarak simetrik bir kristal yapı oluştururlar. Bu kristal yapıya aynı zamanda kovalent bağ adı verilir.

- Valans elektronu yörüngesini terk ettiği zaman serbest elektron haline geçer. Ayrıldığı valans yörüngesinde ise bir oyuk bırakır. Buna elektron-oyuk çifti denir.
- Serbest bir elektron eninde sonunda enerjisini kaybeder ve tekrar bir oyuk içerisine yerleşir. Buna yeniden birleşme denir.
- Yarıiletken bir maddenin uçlarına gerilim uygulandığı zaman başıboş bir şekilde hareket eden serbest elektronlar negatiften pozitive doğru akar. Bu akıma elektron akımı ismi verilir.

- Elektronlar oyuklardan oyuklara hareket ederken elektronlarının hareketinin tersi istikametinde oyuk akımı meydana gelir.
- Yalıtkanda enerji aralığı çok geniştir. Dolayısıyla bir elektronun valans bandından iletim bandına atlaması çok zordur.
- İletkende valans bandı ile iletim bandı ötrüşmüştür. Dolayısıyla harici bir enerji uygulanmadan bile çok sayıda elektron valans bandından iletim bandına rahatlıkla geçebilir.

- Yarıiletkende enerji aralığı yalıtkandan daha dar ve iletkenden daha geniştir.
- Yarıiletken atomların iletim bandındaki elektronlarının sayısını artırmak için son yörüngesinde 5 elektron olan Arsenik, Fosfor, Antimon gibi atomlar eklenerek N-tipi yarıiletken maddeler elde edilir.
- Yarıiletken atomların iletim bandındaki oyukların sayısını artırmak için son yörüngesinde 3 elektron olan Alüminyum, Boron ve Galyum gibi atomlar eklenerek P-tipi yarıiletken maddeler elde edilir.

- 3 valans elektronlu ve 5 valans elektronlu atomların yarıiletken atomların arasına eklenmesine katkı maddesi ekleme (katkılama) işlemi adı verilir.
- P-tipi yarıiletken madde N-tipi yarıiletken madde ile birleştğinde PN birleşimi meydana getirilmiş olur. Bu PN birleşimi bütün yarıiletken devre elemanlarının temelini oluşturmaktadır.