

GİRİŞ

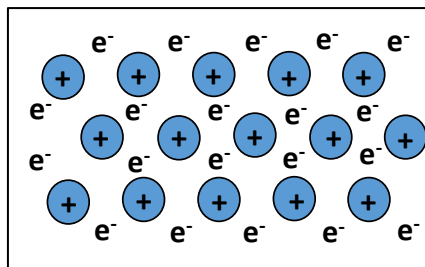
Metallerde bağlanma ile ilgili teoriler (serbest elektron teorisi, değerlik bağı teorisi, molekül orbital teorisi), iletkenler, yarı iletkenler ve yalıtkanlar, üstün iletkenlik, diyotlar, fotovoltaiik etki ve ışık yayan diyotlar (LEDler)

METALLERDE BAĞLANMA İLE İLGİLİ TEORİLER

Metallerdeki bağların izahı diğer bağlarınkine benzemez. Çünkü metal atomları aynı türden 8 (iç merkezli kübik sistem) veya 12 (yüzey merkezli kübik sistem veya hekzagonal) atom ile sarılmıştır ve metal atomları tarafından sağlanan elektronlar, iki elektronlu normal bağları oluşturmaya yetmez. Örneğin Li iç merkezli kübik yapıda kristallenmektedir. Yani her bir Li atomu, 8 Li atomu tarafından çevrilmiştir. Li atomlarının her biri $3e^-$ içermektedir. Bunlardan ikisi 1s orbitaline yerleşmiştir ve çekirdek tarafından oldukça kuvvetli bir şekilde çekilmektedir. Bu durumda her bir Li atomu metalik bağ için $1e^-$ kullanabilecektir. Bu tek elektronun diğer 8 Li atomu ile eşit olarak paylaşılıp iki elektronlu kimyasal bağlar oluşması mümkün değildir. Metaller ile diğer elementler arasındaki en büyük fark, metal atomları arasındaki etkileşimin çok kuvvetli olmasıdır. Metal atomları arasındaki bu etkileşim metalik bağlanma denir. Bu bağlanmanın bir sonucu olarak metallerin büyük bir bölümü katı halde, çok azı ise sıvı haldedir. Birçok metalin birinci (bazen ikinci veya üçüncü) iyonlaşma enerjisi nispeten küçüktür. Bu nedenle, bir metal atomu bir veya daha fazla elektron vererek katyon oluşturabilir. Be ve Mg 'un beklenenden daha düşük erime noktasına sahip olması, bu metallerin kovalent karakteri yüksek bağ oluşturmalarından kaynaklanmaktadır.

1. Serbest Elektron Teorisi

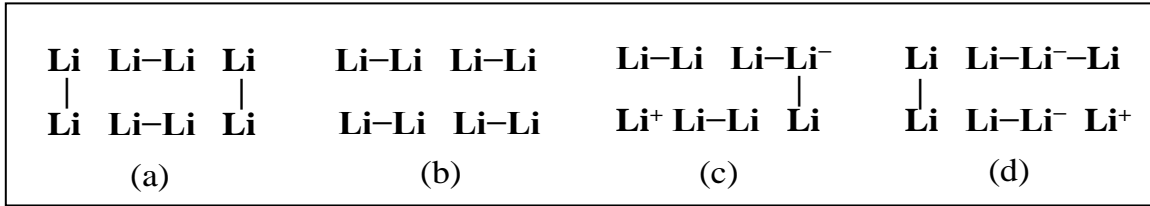
1900' lü yıllarda Drude, metali içinde elektronların hareket ettiği bir örgü olarak kabul etmiş ve elektronların hareketini gaz moleküllerinin serbest hareketine benzetmiştir. Bu fikir 1923 yılında Lorentz tarafından geliştirilmiştir. Lorentz, değerlik elektronlarının oldukça düşük iyonlaşma enerjilerini dikkate alarak, metallerin serbest değerlik elektronları denizinin içine yerleştirmiş pozitif iyonların oluşturduğu katı kümelerden meydana gelen örgü olarak tanımlamıştır (Şekil 8). Bu model, elektronların serbest hareketi ve kristali bir arada tutan kuvvetin, elektron bulutu ile pozitif iyonlar arasında ki etkileşimden kaynaklandığını açıklayabilmektedir. Ancak, değerlik elektronları sayısının artması ile bağlanma enerjisinin kalitatif olarak açıklanmasına karşın, kantitatif hesaplamalarda başarılı olamamıştır.



Şekil 8. Serbest elektron teorisine göre metallerde bağlanma

2. Değerlik Bağı Teorisi

İç merkezli kübik yapıya sahip olan Li kristali içinde koordinasyon sayısı 8 olan bir Li atomunu inceleyelim. Bu Li atomu bir değerlik elektronuna sahiptir ve ancak komşu Li atomlarının birisi ile iki elektronlu bir kovalent bağ verebilir. Kristal içindeki bu atom, diğer komşu Li atomlarına da eşit olarak bağlanmalıdır. Bu durumda Şekil 9' da (a) ve (b) olarak verilen türler ve bunlara benzer türler oluşabilir. Bir Li atomu ancak iyonlaşırsa iki bağ oluşturabilir. Bu durumda Şekil 9' da (c) ve (d) olarak verilen yapılara benzer pek çok yapı oluşabilir. Pauling gerçek yapının bu mevcut bağlama şekillerinin bir melezi olduğunu ileri sürmüştür. Çok sayıda mümkün yapı, çok düşük enerji demektir. Bu da yapıyı bir arada tutan kuvvetin büyük olması anlamına gelir. Metallerin dövülebilme ve çekilebilme özelliğinde de bahsedildiği gibi metalik Li' un atomlaşma enerjisi, Li₂ molekülününkinden üç kat daha fazla bulunmuştur. Atomlaşma enerjisinin I. gruptan III. gruba gidildikçe artması, atomlar arasındaki bağ sayısının arttığını ve daha fazla sayıda yapı yazılabileceğini göstermektedir. İyonların varlığı metallerdeki elektrik iletimini açıklamakla birlikte bu teori ısı iletimi, parlaklık, çözelti ve sıvı halde metalik özelliklerin açıklamasında yetersiz kalmıştır.



Şekil 9. Değerlik bağı teorisine göre metallerde bağlanma

3. Molekül Orbital Teorisi (Band Teorisi)

Molekül orbital teorisinin kristal yapılara uygulanması band teorisi olarak bilinmektedir. Bir metalik kristalde en azından avogadro sayısının bir kesri kadar atom bulunmaktadır. Örneğin N atomlu bir Li kristalinde N tane 1s orbitali, N tane 2s orbitali ve 3N tane 2p orbitali vardır. N tane 1s orbitalinin etkileşmesinden N/2 tane bağ ve N/2 tane karşı bağ molekül orbitali oluşur. 3N tane 2p orbitalinin etkileşmesinden oluşan bağ molekül orbitali sayısı 3N/2 ve karşı bağ molekül orbitali sayısı 3N/2 dir. Atomların aynı alt kabuktaki orbitallerinin örtüşmesinden oluşan molekül orbitali sayısı çok fazla olduğundan, molekül orbitallerinin enerjileri birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle, bu orbitaller topluluğu bir band olarak göz önüne alınır. Li₂ molekülü gaz fazında kararlıdır ve bağ 2s atomik orbitallerinin girişimi ile oluşur. Ayrıca değerlik tabakasında üç tane 2p orbitali vardır. Bu boş orbitallerin varlığı, metalik özellikler için çok önemlidir. N, O, F, Ne ve

KİM 433 METALLER KİMYASI
PROF. DR. SELEN BİLGE KOÇAK

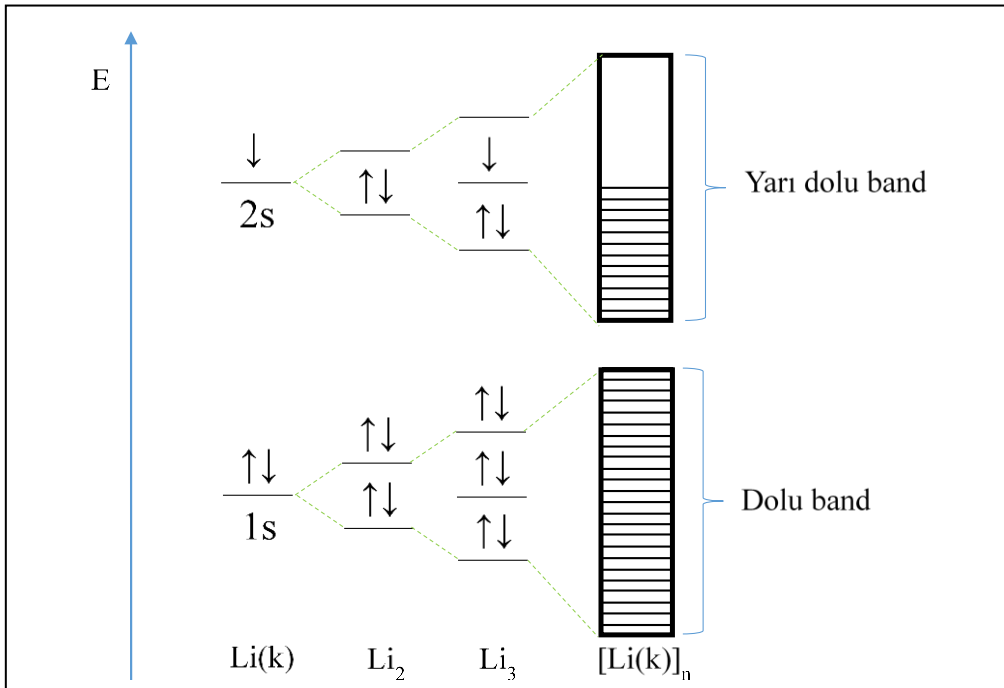
uyarılmış C atomları değerlik tabakalarında boş atomik orbital taşımadığından ametalik özellik göstermektedir. Molekül orbitali oluşumuna katılan atomik orbitallerin sayısı arttıkça oluşan molekül orbitallerinin enerji düzeyleri arasındaki fark azalmaktadır. Özellikle bağ ve karşı bağ molekül orbitalleri arasında yer alan bağ yapmayan molekül orbitallerin varlığı, bu iki grup orbital arasındaki enerji aralığını düşürmektedir. Çok sayıda atom söz konusu olduğundan molekül orbitalleri arasındaki enerji düzeyleri birbirine o kadar yaklaşır ki hemen hemen bir süreklilik söz konusu olur. Çok sayıda aynı tür atomik orbitalin girişimi ile oluşan, birbirine oldukça yakın çok sayıda enerji düzeyi içeren bu topluluğa “enerji bandı” adı verilir (Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12). s orbitallerinden türetilen band s bandı, p orbitallerinden türetilen band p bandı olarak adlandırılır. Aynı değerlik tabakasında bulunan p orbitalleri, s orbitallerinden daha yüksek enerjili olduğundan bunların verdiği s ve p bandları arasında da bir enerji boşluğu bulunmaktadır. Band genişliği, bandın oluşturduğu orbitalin hacmine bağlıdır (Şekil 12). Çekirdekten uzaklaştıkça orbitallerin hacmi büyüdüğünden, daha geniş bandlar oluşur. Bu nedenle 2s bandı 1s bandından daha geniştir. Ardışık iki band arasındaki aralığa band aralığı denir. Periyodik çizelgede bir periyotta → doğru ns ve np alt kabuklarının enerjileri arasındaki fark büyüdüğünden ns ve np band aralığı artmaktadır. Bir grupta ↓ doğru hem ns ve np alt kabuklarının enerjileri arasındaki farkın küçülmesi hem de bandların giderek genişlemesi nedeni ile band aralığı küçülmektedir. Metallerde ns ve np alt kabukları arasındaki enerji farkının küçük ve bandların geniş olması, bu bandların örtüşmesine neden olmaktadır (Şekil 11). Elektron içeren düşük enerjili banda değerlik bandı, diğerine iletkenlik bandı denir. Be’ da olduğu gibi (Şekil 11), band oluşumu sırasında atomik orbitallerin girişimi çok şiddetli ise s ve p bantları oldukça genişler ve 2s bandının üst kısmı 2p bandının alt kısmı ile çakışır. Bu çakışma sonucu, 2p bandının bir kısmı dolu, 2s bandının bir kısmı boş kalır. Benzer band yapısı IIB grubu metalleri Zn, Cd ve Hg için de geçerlidir. Band teorisine göre, metallerin değerlik bandı ile iletkenlik bandının örtüşmesinden oluşan bileşik band kısmen dolu olduğundan, elektronlar serbestçe hareket edebilmektedir (Şekil 10). Elektronların serbestçe hareketi nedeni ile metaller iletken özellik göstermektedir.

Elektronlar kristal içinde serbestçe hareket ederek enerji aktarımını sağladıkları için metallerin ısı iletkenlikleri de yüksektir. Bir metal parçası bir ucundan ısıtılırsa, bu kısımdaki elektronlar enerji ($E_k=3/2kT$) kazanarak boş molekül orbitali düzeylerine geçer. Elektronların metalin diğer bölgelerine hareketi sonucu bu bölgeler ısınır. Benzer şekilde elektrik iletimi bir elektronunu küçük bir miktar enerji kazanarak boş bir enerji seviyesine geçmesinden kaynaklanır. Elektrik alanı yokken elektronlar tüm yönlere doğru hareket etmektedir. Pozitif ve negatif elektrotlar metalin iki ucuna yerleştirildiği zaman, elektronlar (+) uca doğru daha kolay hareket edecek ve dolayısı ile

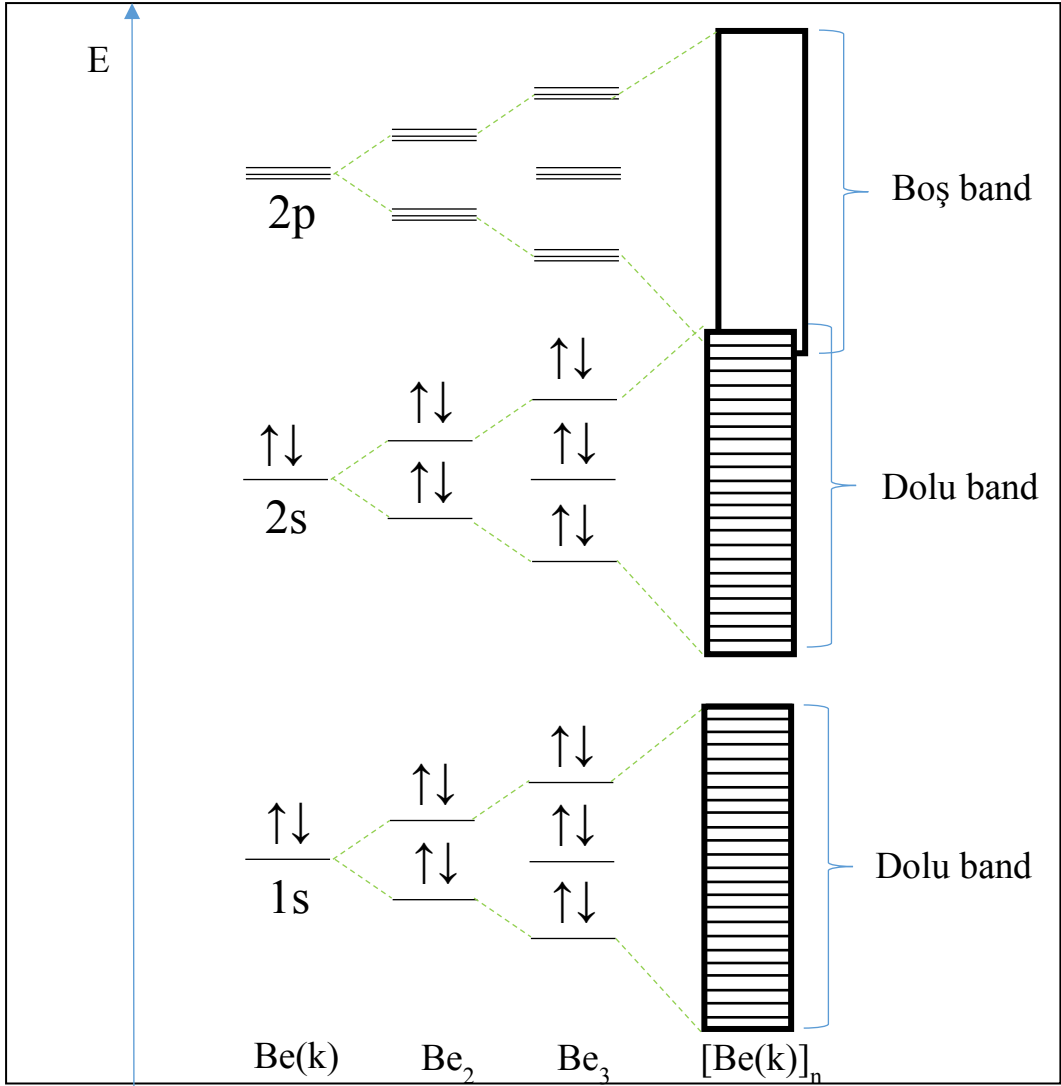
KİM 433 METALLER KİMYASI
PROF. DR. SELEN BİLGE KOÇAK

elektrik akımı metal içinde iletilecektir. Elektronlar kristal içinde bir bölgeden diğer bir bölgeye akarken atomlar ile çarpışarak saçılmaktadır. Böyle çarpışmalar iletkenliğin azalmasına neden olmaktadır. Sıcaklığın yükselmesi ile atomların titreşimi artmakta ve titreşimi artan atomlar serbest elektronlar ile daha sık çarpışmaktadır. Bunun sonucu olarak, sıcaklığın yükselmesi ile metallerin iletkenliği azalmaktadır. Metallerin en belirgin özelliklerinden birisi, yüksek iletkenliğe sahip olmaları ve artan sıcaklık ile iletkenliklerinin azalmasıdır.

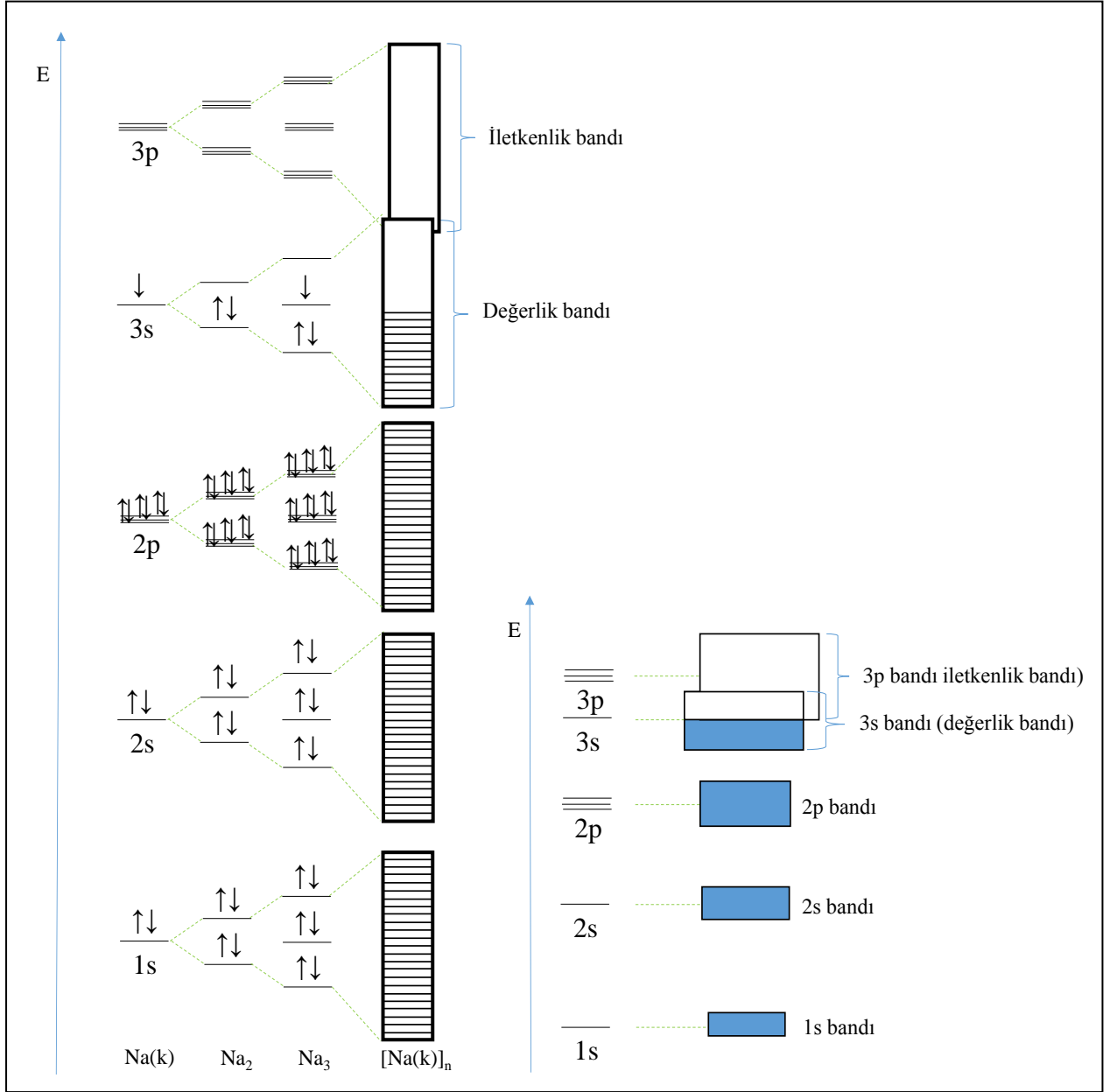
Daha önce de belirtildiği gibi periyodik çizelgede metalik karakter → doğru gidildikçe azalmakta ve ↓ inildikçe artmaktadır. Örtüşük bandın doluluk oranı → doğru gidildikçe artmaktadır. Bu durum, elektron hareketini kısıtladığından iletkenliği azaltmaktadır. Örneğin Na, Mg ve Al kristallerinde doluluk oranı sırası ile 1/8, 2/8 ve 3/8' dir. Bu elementlerin iletkenlik (metalik) sıralaması $Al < Mg < Na$ şeklindedir. Bir grupta ↓ doğru gidildikçe örtüşük bandın doluluk oranı sabittir. Fakat band genişlemektedir. Daha geniş bir band içinde elektronların hareketi daha kolaylaştığından iletkenlik artmaktadır. Metallerin karakteristik özelliklerinden biri olan yüzeylerinin parlaklığı, band kuramı ile başarılı bir şekilde açıklanmaktadır. Maxwell-Boltzmann yasasına göre, elektronların çoğu bandın içindeki düşük enerjili molekül orbitallerinin içinde bulunmaktadır. Yüksek enerjili düzeyler genellikle boştur. Düzeyler arasındaki enerji farkının küçük olması nedeni ile oda sıcaklığında üst enerji düzeylerine çıkan elektronlar tekrar düşük enerji düzeylerine geçerken ışımaya yayımlanmaktadır. Bu ışımaların bir sonucu olarak metal yüzeyleri parlak görünmektedir.



Şekil 10. Li' nin molekül orbital enerji diyagramı

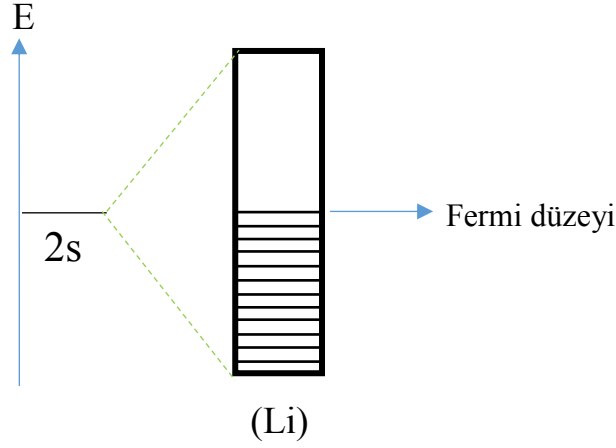


Şekil 11. Be' nin molekül orbital enerji diyagramı



Şekil 12. Na' nın molekül orbital enerji diyagramı

T=OK' de elektronların içinde bulunduğu en yüksek enerjili düzey "Fermi düzeyi" olarak adlandırılmaktadır (Şekil 13). Fermi düzeyine yakın olan elektronlar, yüksek derecede hareketliliğe sahiptir. Bu hareketli elektronlar, çok az bir enerji ile boş enerji düzeylerine geçerek metalin ısı ve elektrik iletkenliğini sağlamaktadır.

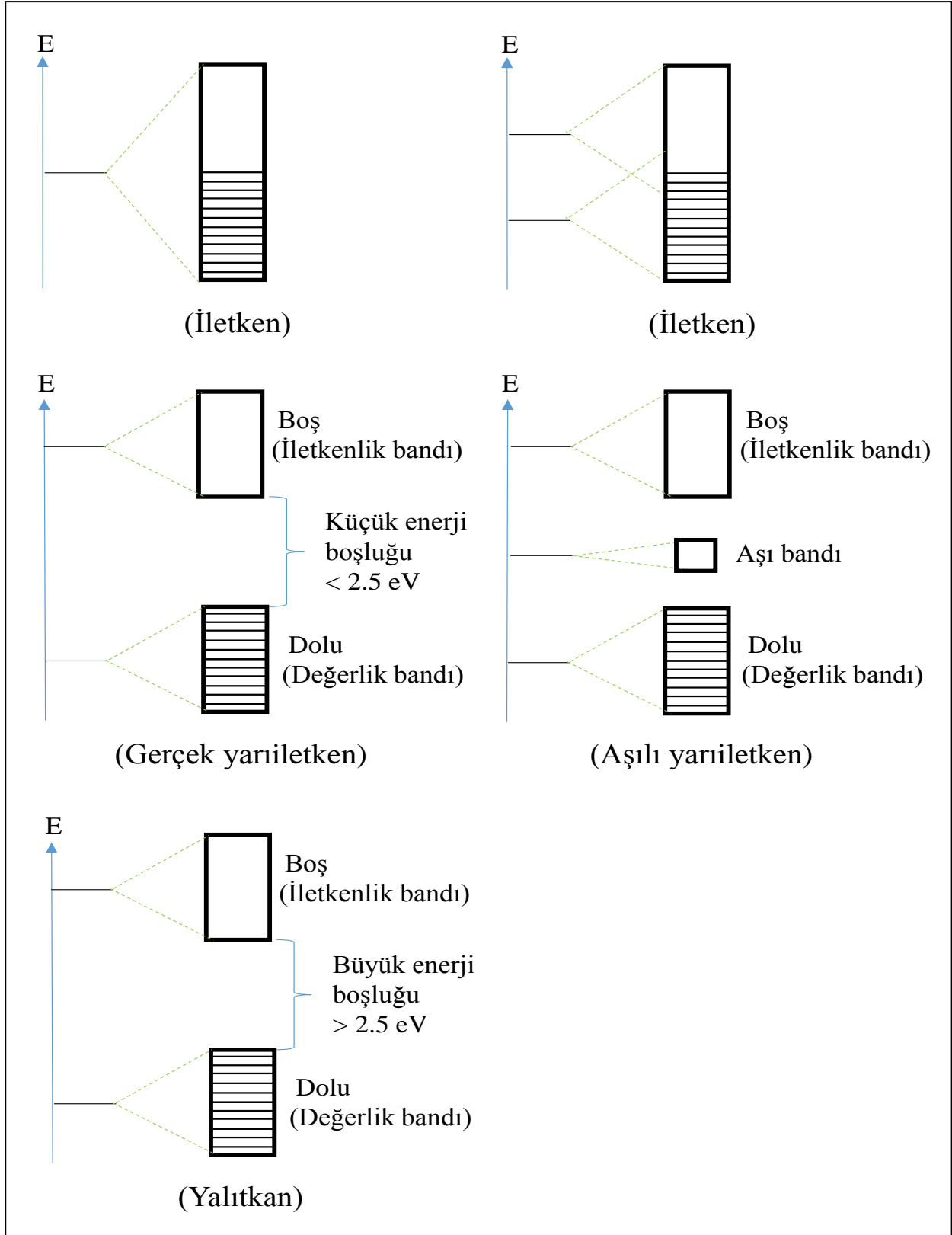


Şekil 13. Li için fermi düzeyi

İLETKENLER, YARI İLETKENLER VE YALITKANLAR

İletkenlerde (metallerde), değerlik bandı kısmen doludur ya da değerlik bandı ile iletkenlik bandı çakışmaktadır. Yani dolu ve boş molekül orbitalleri arasında önemli bir enerji aralığı yoktur ve elektron geçişi kolaylıkla gerçekleşebilmektedir (Şekil 14). **Yalıtkanlarda** (ametallerde), değerlik bandı doludur ve bu yüzden band içinde elektron geçişi mümkün değildir. Ayrıca değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında önemli bir enerji aralığı vardır. Bu nedenle elektronlar, serbest olarak hareket edebilecekleri bu boş banda geçemez (Şekil 14). **Gerçek yarı iletkenler**, yalıtkanlara benzemekle birlikte tam dolu değerlik tabakası ile boş iletkenlik bandı arasındaki enerji aralığı, az sayıda elektronun değerlik bandından boş iletkenlik bandına geçmesini sağlayacak derecede düşüktür (Şekil 14). Sıcaklığın yükseltilmesi ile iletkenlik bandına geçen elektronların sayısı artar ve iletkenlik bandındaki bu elektronlar ile değerlik bandında geriye kalan eşleşmemiş elektronlar yarı iletkenlerin iletkenliğini sağlar. Örneğin Ge ve Si için oda sıcaklığında ancak birkaç elektron, atomların termik titreşimlerinden enerji kazanarak iletkenlik bandına geçebilir. Eğer bu kristaller bir elektrik devresine bağlanırsa, termik yolla uyarılmış bu elektronlar küçük miktarlarda akım taşıyıcı ve Si ve Ge kristallerini bir miktar iletken yapar. Bu özellik "gerçek yarı iletkenlik" olarak tanımlanır. Bu tip yarı iletkenlerde bazı bağlar kırılarak değerlik elektronları hareket eder ve elektriği iletir. Sıcaklık arttırıldığında çok sayıda elektron değerlik bandından iletkenlik bandına

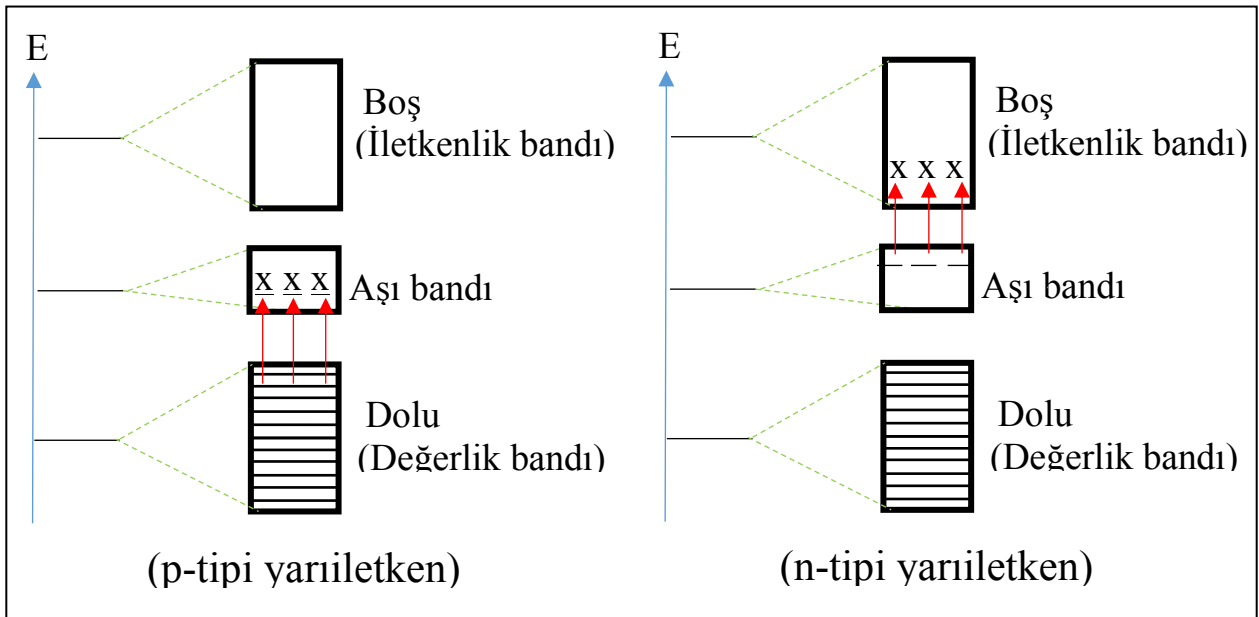
uyarılmış olur. Belli bir kritik sıcaklık üzerinde bu durum kristalin parçalanmasına neden olur. Bu nedenle gerçek yarı iletkenler belli bir sıcaklık altında kullanılmalıdır.



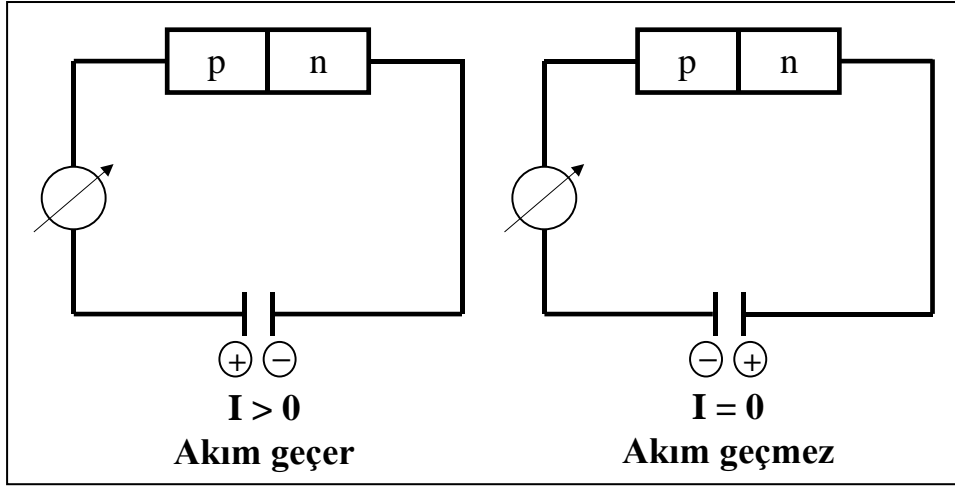
Şekil 14. İletkenlerde, yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda bandlar

Çok yüksek basınçlar uygulanarak bandlar arasındaki enerji aralığı küçültülerek yalıtkan bir madde iletken hale dönüştürebilir. Çekirdekler birbirine yaklaşır ve bandlar genişler. Sıcaklık değiştirilmeden bir yarı iletkenin iletkenliği, değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasında elektron geçişini kolaylaştırmak için başka bir bandın (aşılma bandının) konulması ile artırılabilir. Bu şekilde aşılı yarı iletkenler (safsızlık yarı iletkenleri) elde edilir. Bu tür yarı iletkenler n- ve p-tipi olmak üzere iki çeşittir (Şekil 15). Eklenen aşılma bandı, değerlik bandından saafsızlık bandına veya saafsızlık bandından iletkenlik bandına elektronların geçişinde köprü görevi yapar. P ve As gibi VA grubu elementleri, n-tipi yarı iletkenler için aşılma elementi olarak kullanılırken, B, Al, Ga ve In gibi IIIA grubu elementleri p-tipi aşılma elementi olarak kullanılır. IVA grubu elementlerinden Ge, yarı iletkenlerdir. Ge' nin içine çok az miktarda IIIA grubu elementlerinden Ga katıldığında, enerji aralığına boş bir band konulmuş olur. Eklenen Ga atomları çok az sayıda olduğundan kristal içinde birbirlerinden çok uzakta bulunacak ve bunların elektronları lokalize olarak dar bir band oluşturacaktır. Ga' nın 3 değerlik elektronu olduğu için bu dar band tam dolu değildir. Ga' nın dar bandının enerjisi, Ge' nin dolu bandının biraz üstündedir. Ge' nin dolu bandından Ga' nın boş bandına elektron geçer ve geride elektron noksanlığı veya pozitif boşluk oluşur. Bu nedenle bu tip yarı iletkenlere, p-tipi veya pozitif yarı iletkenler denir. Ge' ye VA grubu elementlerinden As katıldığında, enerji aralığına bu kez dolu bir band konulmuş olur. As bandının enerjisi Ge' nin boş bandının biraz altındadır. As' nin dolu bandından Ge' nin boş bandına elektron geçerek kısmen dolu bir band oluşur ve iletkenlik sağlanır. Dışardan dolu band eklemek sureti ile elde edilen yarı iletkenlere n-tipi veya negatif yarı iletkenler denir. İster p-tipi isterse n-tipi yarı iletkenler olsun aşılma bandı ile diğer bandlar arasındaki elektron geçişini termik yolla yani yüksek sıcaklıklarda olmaktadır.

Şekil 15. n- ve p-tipi yarı iletkenlerde bandlar



Alternatif akımı doğru akıma p-n bağlantısı ile çevrilebilir. n-Tipi yarı iletken p-tipi yarı iletkene elektron akışı olur (Şekil 16). Bu tür sisteme diod denir. n- ve p-tipi yarı iletkenlerden oluşturulan tabakalar, yalıtkan ile birlikte elektronik endüstrisinin temeli olan entegre devrelerin üretiminde kullanılır. Tabakalar arasındaki bağlantıya kontrollü voltaj uygulanarak istenen akım entegre devreden geçirilebilir.



Şekil 16. Diodların çalışma prensibi

İki ayrı p-tipi yarı iletken blok arasına n-tipi yarı iletken kesilmiş başka bir yarı iletken levhanın yerleştirilmesi ile hazırlanan sisteme transistör (voltaj yükseltici) denir. Transistörlerde küçük bir potansiyel fark, büyük bir potansiyel farka dönüştürülür.

ÜSTÜN İLETKENLER

Elektriği hemen hemen hiç direnç göstermeden ileten maddelere üstün iletkenler denir. Diğer bir deyişle, bir üstün iletkenin elektrik direnci sıfır veya sıfıra çok yakındır. Bu yüzden elektrik akımı enerji kaybı olmaksızın taşınır ve teorik olarak akım sınırsız iletilir. Metallerin normal sıcaklıklardaki yüksek elektrik iletkenliği, sıcaklığın düşürülmesi ile daha da artmaktadır. 1919 yılında Kammerling Onnes, sıvı He' da Hg' yi incelerken üstün iletkenliği keşfetmiştir. Onnes, Hg ve Pb gibi metallerin mutlak 0'a yakın sıcaklıklarda üstün iletken olduğunu bulmuştur. Maddelerin elektrik direncinin ani olarak düştüğü ve üstün iletimin görüldüğü bir kritik sıcaklık T_k vardır. Kritik sıcaklığın üzerine çıktığında, atomların artan termal hareketi küçük olan elektronlar arası çekim kuvvetine üstün gelmekte ve üstün iletkenlik son bulmaktadır. Bazı metaller sıvı He sıcaklığına yakın sıcaklıklarda (çoğunlukla 10 K' in altında) üstün iletken hale geçmektedir. Kimyacıların en çok kullandıkları üstün iletkenlerden biri, NMR cihazlarında kullanılan ve çok büyük magnetik alan oluşturan üstün iletken mıknatıslardır. En yaygın olarak kullanılan üstün

KİM 433 METALLER KİMYASI

PROF. DR. SELEN BİLGE KOÇAK

iletkenler, Nb alaşımlarıdır. Özellikle Nb-Ti alaşımları kolay işlenebilme özelliğinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Nb₃Sn, Nb₃Ge, Nb₃Al, V₃Si gibi alaşımların 20 K' de üstün iletken olduğu bulunmuş ve bu alaşımlar, güçlü elektromıknatıslar için tel yapımında kullanılmıştır. Düşük sıcaklık üstün iletkenleri, çok pahalı olan sıvı He sıcaklığında üstün iletkenlik gösterdiğinden yaygın olarak kullanılamamıştır. Metalik olmayan ilk üstün iletken, 1964 yılında bulunan perovskit kristal yapısındaki bir bileşiktir. Ancak bu bileşik alaşım olmaması ve T_k değerinin 0.01 K olması nedeni ile uygulama alanı bulamamıştır. 1968 yılında Bednorz ve Müller' in T_k değeri 35 K (-238 °C) olan üstün iletken oksit bileşikler [La_(2-x)Ba_xCuO_(4-y) (x=0.15-0.20)] elde etmesi kendilerine Nobel Fizik Ödülü' nü kazandırmıştır. Wu, Chu ve arkadaşları, 1987 yılında perovskit YBa₂Cu₃O_{7-x} (Y=Sm, Eu, Nd, Dy ve Yb gibi lantanitler) bileşiklerinin 93 K' de üstün iletken olduğunu bulmuştur. 1988 yılında lantanitlerin yerine Bi ve Tl' nin kullanıldığı Bi₂Sr₂Ca_(n-1)Cu_nO_{2n+4} ve Tl₂Ba₂Ca_(n-1)Cu_nO_(2n+4) (n=1,2,3,4) seramiklerinin T_k değeri sırası ile 110K (-163°C) ve 122K (-151°C) olarak belirlenmiştir.

Later, Meissner ve Ochsenfeld, üstün iletkenlerin manyetik alanın geçmesine izin vermediğini bulmuştur. Meissner etkisi olarak adlandırılan bu etki ise havada yükselmeyi arttırmaktadır. Bu durum daimi bir mıknatıs ile bir üstün iletken arasındaki karşılıklı itme sonucu ortaya çıkmaktadır. Üstün iletkenler, eşleşmemiş elektron çiftlerinden kaynaklanan manyetik alanları itmektedir. Bu nedenle üstün iletkenler diamagnetiktir.

Üstün iletkenlerin önemi:

- 1) Alternatif akımın üstün iletkenlerden yapılmış dirençsiz kablolar kullanılarak düşük kayıplar ile taşınması mümkündür.
- 2) Bilgisayarların küçültülmesindeki en büyük sıkıntı, kabloların ısınması ve istenmeyen bu ısının nasıl uzaklaştırılacağıdır. Üstün iletkenlerin ısınmamasından dolayı kabloların üstün iletken malzemelerden yapılması ile ısı problemi ortadan kaldırılacaktır.
- 3) Güçlü elektromıknatıslar, üstün iletken sarımlar kullanarak hazırlanmaktadır. Bunu daha yüksek sıcaklıklarda yapmak daha kolay olacaktır.
- 4) Manyetik alan üzerinde yüzerek havada hareket eden üstün iletken Maglev trenlerinin kullanımı, yüksek sıcaklık üstün iletkenlerinin keşfi ile yaygınlaşacaktır.

Metal alaşım ve seramiklerde üstün iletkenliğin nasıl oluştuğuna dair tam bir açıklama yoktur ancak, üstün iletkenliğin Cooper çifti olarak bilinen iki elektronun aynı anda ve birlikte kristal içindeki serbest hareketinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Üstün iletkenliğin keşfinden 40 yıl

KİM 433 METALLER KİMYASI

PROF. DR. SELEN BİLGE KOÇAK

sonra Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından üstün iletkenliği açıklamak için öne sürülen teoriye göre iki elektron ters spinli olduğu sürece birbirini itmesine rağmen Cooper çifti ile adlandırılan bir çift olarak hareket etmektedir. Cooper çiftinin oluşmasında örgü içindeki atomların titreşimi yardım etmektedir. Bir elektronun örgü boşluğundan geçerken kendisine en yakın (+) yüklü iyonları kendisine doğru çekmesi, o bölgede (+) yük yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. (+) yüklü iyon denge konumuna varma şansını elde etmeden, o civardan geçen başka bir elektron (Cooper çiftinin ikinci elektronu) (+) yüklü bölgeye doğru çekilmektedir. İki elektron arasındaki çekim kuvveti küçük olduğundan elektronlar sıkça eş değiştirebilmekte ve bu durum, spor seyircilerinin oluşturduğu Meksika dalgasına benzer şekilde kristal boyunca devam etmektedir.