

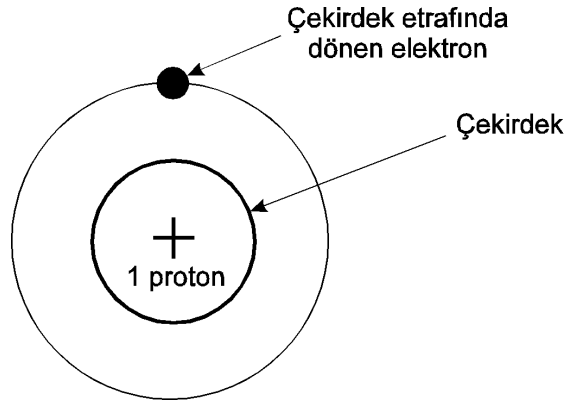
# ANALOG ELEKTRONİK

ANALOG ELEKTRONİK .....	i
A. KISA ATOM BİLGİSİ .....	1
Giriş .....	1
Yörünge ve Kabuk .....	1
Enerji Bantları .....	2
İletken, Yarı İletken ve Yalıtkanlar .....	4
Kovalent Bağ .....	5
Saf Yarı İletken Malzemenin Özellikleri .....	5
N Tipi Malzeme .....	6
P Tipi Malzeme .....	7
Katkı Maddelerine Sıcaklığın Etkisi .....	8
B. DİYOTLAR ve ÇEŞİTLERİ .....	9
P-N Jonksiyonu .....	9
Ters Kutuplama .....	9
Çığ Delinme .....	10
İleri Kutuplama .....	10
Diyodun V-I Karakteristiği .....	11
Diyotlu Devrelerde Grafik Yöntemi ile Çalışma Noktasının Bulunması .....	12
İleri Kutuplama Durumu .....	12
Uygulama 1 : .....	13
Çözüm : .....	13
Ters Kutuplama Durumu .....	14
Uygulama 2 : .....	14
Çözüm : .....	14
Sonuçlar .....	15
Diyodun Direnci .....	15
Uygulama 3 : .....	15
Çözüm : .....	16
Uygulama 4 : .....	17
Çözüm : .....	17
Diyot Devrelerinin Yaklaşık Eşdeğer Analizi .....	17
Uygulama 5 : .....	18
Çözüm : .....	18
Uygulama 6 : .....	19
Çözüm : .....	19
Uygulama 7 : .....	19

## KISA ATOM BİLGİSİ

### Giriş

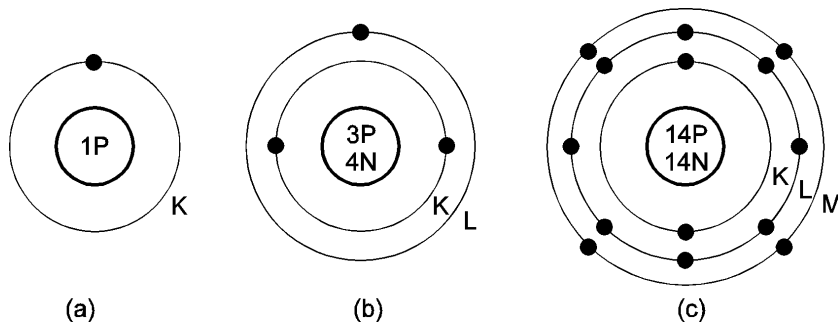
Maddenin en küçük parçası olan atom, merkezinde bir çekirdek ve etrafında dönen elektronlardan oluşur. Çekirdeği oluşturan en ağır parçacıklar proton ve nötronlardır. Proton ve nötronların ağırlığı yaklaşık olarak birbirine eşittir. Protonun ağırlığı elektronun ağırlığının 8000 katıdır. Elektron ve protonun elektrik yükleri birbirine eşittir. Protonlar pozitif yüklü olup, elektronlar negatif yüklüdür. Nötronlar yüksüz parçacıklardır. Serbest halde atom nötr haldedir yani elektron sayısı proton sayısına eşittir. Atomlardaki elektron sayısı birden yüzbeşe kadar değişmektedir. Elektron, nötron ve proton sayısına göre farklı atomlar ve bu atomlardan özellikleri değişik olan elementler oluşur. Bir atomun numarası elektron sayısına veya proton sayısına eşittir. Atomun ağırlığı ise çekirdekteki nötron ve protonların sayısına eşittir. Hidrojen atomunun yapısı şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Hidrojen atomu

### Yörünge ve Kabuk

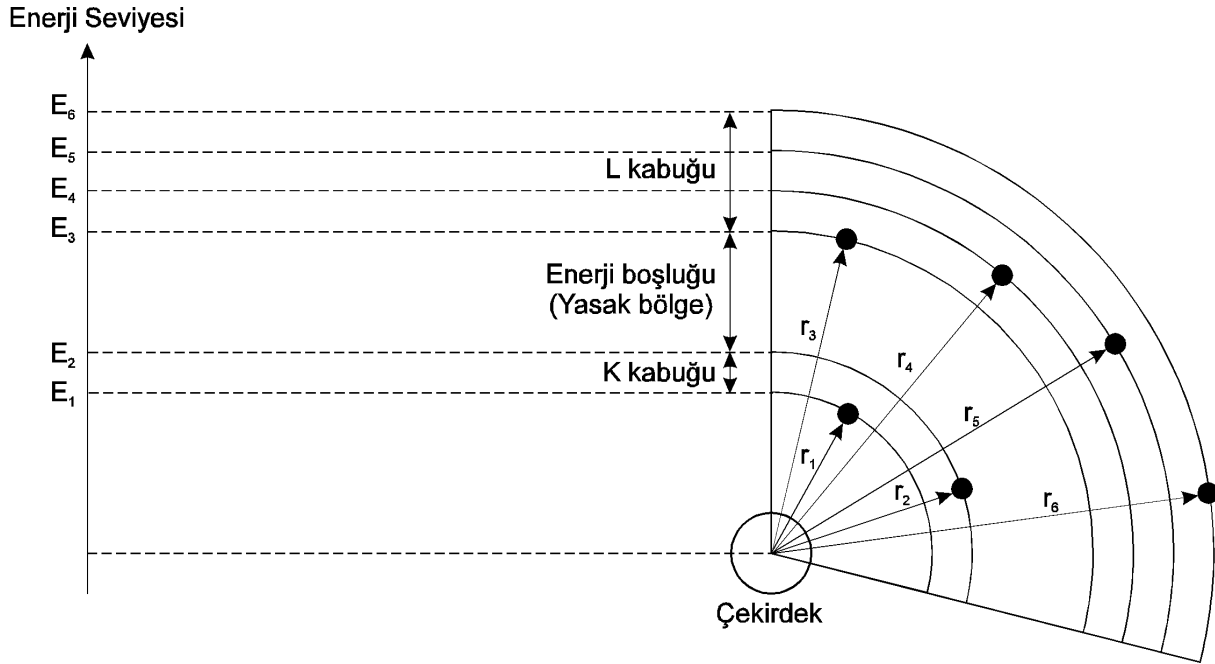
Elektronlar atomun çekirdeği etrafında *yörüngelerde* dönmektedir. Yörüngeler *kabuklarda* toplanmıştır ve kabuklar arasında boşluklar vardır. Bir atomun belirli sayıda kabuğu vardır. Her bir kabukta bulunabilecek maksimum elektron sayısı belirli ve sabittir. Kabuklar çekirdekten itibaren K,L,M,N,O,P,Q olarak adlandırılır. Kabuklarda bulunabilecek maksimum elektron sayısı sırasıyla 2,8,18,32,50,72,98 olarak bilinmektedir. Örnek olarak farklı atomların yapıları şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Değişik atom yapıları a) Hidrojen, b) Lityum ve c) Silisyum.

## Enerji Bantları

Çekirdek etrafındaki dönen elektronların her biri ayrı bir yörüngeye ve her yörünge belirli bir enerji seviyesine sahiptir. Modern fiziğe göre her bir elektronun ayrık bir enerji seviyesi mevcuttur. Elektronlar çekirdekteki pozitif yüklü protonlar tarafından çekilir. Coulomb kanuna göre elektrik yükleri arasındaki çekim kuvveti mesafenin karesi ile ters orantılıdır. Dolayısıyla üst kabuklarda bulunan elektronların çekirdek tarafından çekilme kuvveti daha zayıftır. Bir atomun K kabuğunda bulunan elektronlar, L kabuğundaki elektronlara göre çekirdek tarafından daha kuvvetli bir şekilde çekilir. Elektronun yörüngesinin çapı arttıkça enerjisi de artar. Elektron enerjisi potansiyel ve kinetik enerjilerin toplamıdır. Şekil 1.3'te yörüngelerdeki elektronlar ve enerjileri görülmektedir.



Şekil 1.3. Çekirdek etrafındaki yörüngeler ve enerji seviyeleri.

$$r_1 < r_2 < r_3 < r_4 < r_5 < r_6 \Rightarrow E_1 < E_2 < E_3 < E_4 < E_5 < E_6$$

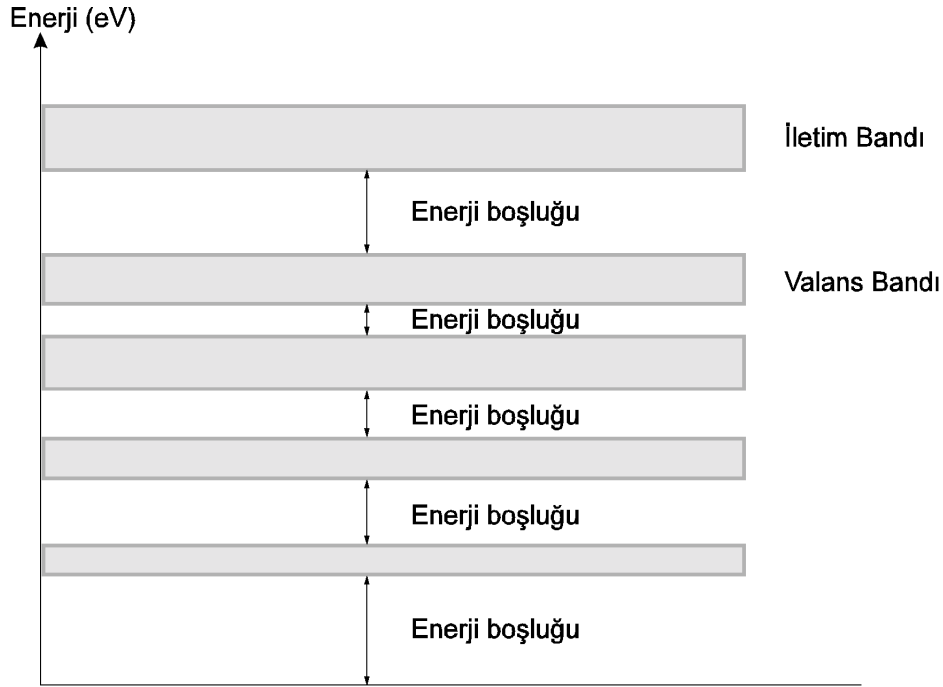
$r$  : yarıçap,  $E$  : elektron enerjisi

Elektronların enerjileri çekirdekten uzaklaştıkça artmaktadır. Yarıçapı küçük olan elektronun enerjisi en küçüktür ve enerji yarıçap ile artar. Kabuk içindeki elektronların enerjileri arasındaki fark küçüktür. Kabuklar arasındaki enerji farkı ise büyüktür. L kabuğunda izin verilen maksimum elektron sayısı sekizdir yani sekiz farklı enerji seviyesi bulunabilir.

Kabuklar arasındaki bölge, yasak bölge veya enerji boşluğu olarak adlandırılır. Elektronlar bu bölgede bulunmazlar. Bütün kabuklar arasında enerji boşluğu mevcuttur. Atomun en dış kabuğundaki elektronlara *valans elektron* adı verilir. Atomun türüne göre dış kabuk K, L, M, N veya başka bir kabuk olabilir. Örneğin bakır atomundaki elektron sayısı 29 olup en dış kabuk N kabuğudur. Bakır atomunda bir tane valans elektron mevcuttur ( $K=2$ ,  $L=8$ ,  $M=18$ ,  $N=1$ ). Atomların kimyasal özellikleri valans elektronlar tarafından belirlenir. Bu elektronlar kimyasal reaksiyonlara girer ve atomlar arasında bağ oluşturur. En dış kabukta bulunan valans elektronlar atomik yapıdan kolaylıkla ayrılarak *serbest elektron* haline gelebilir. Elektronlar bir atomdan başka bir atoma ek bir enerji uygulanarak geçirilebilir. Atomun en dış kabuğu tamamen dolu ise diğer atomlarla elektron alışverişi yapamaz. Bir atom elektron verdiğinde pozitif, aldığı anda ise

negatif iyon olur. Pozitif iyon oluştuğunda serbest kalan elektron, atomun çekirdeğinin etkisinden çıkarak dış etkilere açık hale gelir.

Tek atom için geçerli olan enerji diyagramları, atomlar bir araya gelerek katı maddeyi oluşturduğunda geçerli olmaz. Katı maddelerde atomlar birbirine çok yakın olduğundan tek bir atomdaki enerji seviyeleri, katı maddede enerji bantlarını oluşturur. Katı bir maddede elektronlar için tek bir atoma göre daha fazla enerji seviyesi vardır ve bu seviyeler bantlar içerisinde toplanmıştır. Şekil 1.4'te enerji bantları gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Enerji bantları

Şekil 1.4'te görüldüğü gibi valans bandının altında bir çok bant bulunabilir. Maddenin elektriksel özelliklerini incelemek için açısından valans bandı, iletim bandı ve bu iki bant arasındaki enerji boşluğu üzerinde durmak yeterlidir.

Atom ve yarı iletken teorisinde kullanılan *elektron volt* (eV) birimi, bir elektronun bir V'luk gerilim potansiyeline karşı hareket etmesi sonucu kazandığı enerjidir. Bir katı maddenin valans bandındaki elektronları iletim bandına geçirmek için ısı, ışık, elektrik gibi enerjilerden biri uygulanabilir. Maddeye gerilim uygulandığında oluşan serbest elektronlar elektrik akımı üretir. Akımı taşıyan elektronlar serbest elektronlardır. Akım yük akışı olduğuna göre belirli bir noktadan saniyede akan yük miktarı olarak tanımlanabilir. Yük birimi coulomb ve enerji birimi joule ile elektron enerjisi eV arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

Enerji = Güç x Zaman	$I = Q / t$	1 Amper = 1 Coulomb / saniye
$W = P \times t = V \times I \times t$	$Q = I \times t$	1 Amper = $6.25 \times 10^{18}$ elektron / saniye
Joule = Watt x saniye		1 Coulomb = $6.25 \times 10^{18}$ elektron
$W = V \times Q$		1 elektron yükü = $1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb
$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ joules}$		

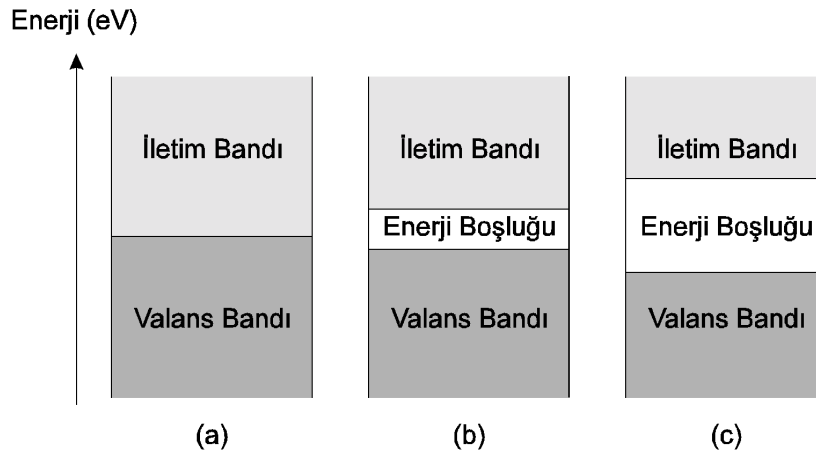
## İletken, Yarı İletken ve Yalıtkanlar

Maddelerin elektriksel iletkenliği serbest elektron miktarına bağlıdır. Maddelerin  $1 \text{ cm}^3$  'lük hacim içerisindeki serbest elektron miktarlarına göre iletken, yarı iletken ve yalıtkanlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 1.1. İletken, Yalıtkan ve Yarı İletkenlerde Serbest elektron sayıları

	Serbest Elektron Sayısı
<b>İletken</b>	$10^{22} / \text{cm}^3 - 10^{23} / \text{cm}^3$
<b>Yarı İletken</b>	$10^8 / \text{cm}^3 - 10^{14} / \text{cm}^3$
<b>Yalıtkan</b>	$10 / \text{cm}^3$

İletken, yarı iletken ve yalıtkanlar enerji boşluklarına göre de sınıflandırılır. Bu durum Şekil 1.5'te gösterilmiştir. Enerji boşluğu bir iletkende 0.05 eV'tan küçük, yalıtkanlarda ise 8 eV'den büyüktür. Yarı iletkenlerdeki enerji boşluğu 0.7 ile 1.4 eV arasındadır.



Şekil 1.5. a) İletken, b) Yarı İletken ve c) Yalıtkan malzemenin enerji bant diyagramları.

İletkenlerde enerji bant diyagramından görüldüğü gibi valans bandı ile iletim bandı arasında boşluk yoktur. Valans elektronlar atomlara zayıf olarak bağlıdır. Valans elektronun atomdan ayrılarak serbest elektron haline gelmesi çok kolaydır. Oda sıcaklığında ilave bir enerji uygulamadan elektrik akımını iletebilecek çok sayıda serbest elektron mevcuttur. Metallerin iyi iletken olmalarının en önemli sebebi son yörüngesinde 1, 2 veya 3 elektron bulunması ve bu elektronları kolaylıkla verebilmeleridir.

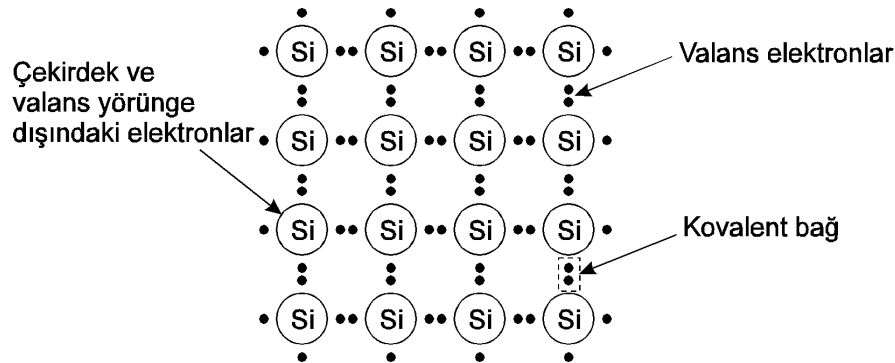
Yarı iletkenlerdeki enerji boşluğu nedeniyle iletim bandında hiç elektron olmadığı kabul edilebilir. Yarı iletkenlerin valans yörüngeleri iletkenlere göre daha fazla dolu olduğundan atomlar arasındaki bağ daha kuvvetlidir. Yarı iletkeni iletken hale getirmek için bu bağ bozabilecek bir enerji uygulamak gerekir. Silisyumun enerji boşluğu 1.1 eV, germanyumun 0.7 eV'tur. Germanyum silisyuma göre daha iyi iletkenidir. Germanyumun serbest elektron sayısı silisyuma göre 1000 kat fazladır. Oda sıcaklığının sağladığı az bir enerji ile bazı elektronlar bağlarını kopararak iletim bandına atlayabilirler. Bundan dolayı yarı iletken malzemeler oda sıcaklığında elektrik akımını iletirler. Örneğin silisyumun serbest elektron miktarı  $25^\circ \text{C}$  'de  $2 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ,  $100^\circ \text{C}$  'de  $2 \times 10^{12} / \text{cm}^3$  'tür. Sıcaklıkla orantılı olarak serbest elektron sayısının

artması yani direncin düşmesi nedeniyle yarı iletkenler negatif sıcaklık katsayısına sahiptir. İletkenlerde ise taşıyıcı sayısı sıcaklık ile artmaz. Sıcaklığın artması ile elektronların hareketlerinde oluşan titreşimler akım geçişini zorlaştırır. Bundan dolayı iletkenlerin direnci sıcaklıkla artar ve direnç pozitif sıcaklık katsayılıdır. Yalıtkanlarda enerji boşluğunun çok büyük olması nedeniyle enerji vererek valans elektronları iletim bandına geçirmek çok zordur. Valans bandının tamamen dolu olmasından dolayı idealde iletim bandında hiç elektron yoktur. Pratikte iletim bandında çok az sayıda elektron olması nedeniyle yalıktanlar çok küçük akımları iletir.

## Kovalent Bağ

Atomlar arasında elektronların ortak kullanılması ile *kovalent bağ* oluşur. Aynı cins atomlar kovalent bağ ile üç boyutlu düzenli bir kristal yapı oluşturur. Kristal yapı periyodik bir şekilde kendini tekrarlayan yapıdır. Katı cisimlerin çoğu kristal yapıdadır. Paylaşılan her elektron, kendisini paylaşan iki komşu atomun çekirdeği tarafından eşit bir şekilde çekilmektedir. Valans elektronların bu şekilde paylaşımı atomları bir arada tutar. Kovalent bağ ile elektron paylaşımı atomun nötr olmasını değiştirmez.

Kararlı bir atom yapısında son yörüngede 8 elektron bulunur. Son yörüngesinde 4 elektron bulunan bir yarı iletken malzemede (silisyum veya germanyum), kendilerine komşu olan atomlar elektron paylaşarak kovalent bağ oluşturur. Böylece atomların son yörüngelerindeki elektron sayısı 8'e tamamlanır ve kristal yapı oluşur. Silisyum kristalinin iki boyutlu yapısı Şekil 1.6'da gösterilmiştir.



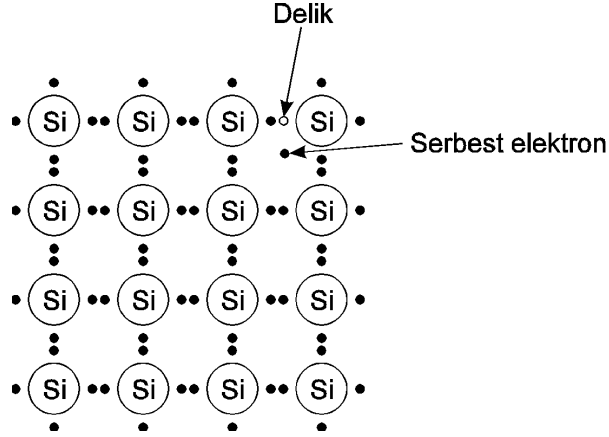
Şekil 1.6. Silisyum kristalinin iki boyutlu yapısı.

## Saf Yarı İletken Malzemenin Özellikleri

Saf bir yarı iletken kristalinde  $0^\circ \text{K}$  ( $-273^\circ \text{C}$ )'de valans elektronların hepsi komşu atomlara sıkı bir şekilde kovalent bağ ile bağlıdır. Bağlı olan elektronlar kristal yapı içinde hareket edemez ve elektrik akımını iletmez. Valans bandı doludur ve iletim bandında hiç elektron yoktur. Yarı iletken kristal bir yalıtkan gibi davranır.

Saf bir yarı iletken kristali oda sıcaklığında bir miktar iletkenlik gösterir. Oda sıcaklığında kristal ısınarak atomları enerjilenir. Atomların enerjilenmesi valans elektronların enerjisi arttırır. Valans bandının üst seviyesinde bulunan elektronlardan bazıları yeterli kinetik enerjiye ulaşarak atomdan bağını koparır ve serbest elektron haline gelir. Yani boşluk bandını atlayarak iletim bandına geçer. Saf olan Ge ve Si'deki serbest elektronlar, sadece valans bandında bulunan ve ısı veya ışık kaynaklarından kovalent bağı koparmaya yetecek enerji alan veya tam saflaştıramamaktan kaynaklanan az sayıdaki elektrondan oluşur.  $10^{13}$  atom içinde bir katkı atomu bulunduran silisyum saf kabul edilir.

Kristal yapıda ısı enerjisi alarak kovalent bağı koparan bir elektron ve elektronun ayrılması nedeniyle oluşan boşluk Şekil 1.7’de gösterilmiştir. Elektron kaybeden atom pozitif yüklü hale gelir. Elektronun atomdan ayrılması ile kovalent bağda oluşan boşluğa *delik* denir. Delik pozitif yüklü olup bir ağırlığa sahip değildir ve elektronları çeker. Serbest kalan elektron ve oluşan delik, *elektron-delik çifti* olarak adlandırılır. Kristal içindeki elektron-delik çifti sayısı sıcaklıkla artar.

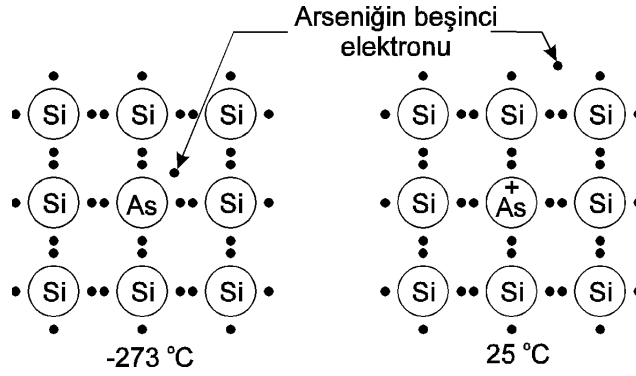


Şekil 1.7. Oda sıcaklığında saf silisyum kristalinde bir elektronun bağı kopartarak serbest hale gelmesi ve delik oluşması.

Oda sıcaklığında bulunan yarı iletken kristale bir gerilim uygulandığında, sıcaklık nedeniyle serbest kalan elektronlar elektrik akımı üretir. Serbest elektronlar atomların çekim etkisinden kurtulduğu için hızlı bir şekilde kaynağın pozitif ucuna doğru hareket eder. Sıcaklığın artması ile serbest elektron ve delik sayısı artar. Kovalent bağlarını koparan serbest elektronların oluşturduğu delikler de hareket halindedir. Kovalent bağ içindeki delik komşu atomun elektronu tarafından doldurulur. Komşu atomda oluşan delik, onun komşusu olan atom tarafından doldurulur. Delik kaynağın negatif ucuna doğru ilerler ve kaynaktan kopan bir elektron deliği doldurur. Sıcaklık nedeniyle elektron-delik çifti sürekli oluşur ve yarı iletkenden bir akım geçer. Delikleri dolduran elektronlar, serbest elektron olmak için yeterli miktarda enerjilenememiş olan valans elektronlardır. Serbest elektronun hareketi delik hareketine göre çok hızlıdır. Yarı iletkenden geçen akım, serbest elektronların oluşturduğu akım ile deliklerin oluşturduğu akımın toplamıdır. Delik hareketi serbest elektronların hareketinin tersinedir. Saf bir yarı iletkende serbest elektronların sayısı ile deliklerin sayısı birbirine eşittir. Saf bir yarı iletken malzemeye katkı atomları eklendiğinde bant yapısı, elektriksel karakteristikleri değişir. Katkı oranı on milyonda bir civarında olmasına rağmen yarı iletkenin davranışı önemli ölçüde farklılaşır. Katkılanan malzeme N tipi veya P tipi malzemeye dönüşür.

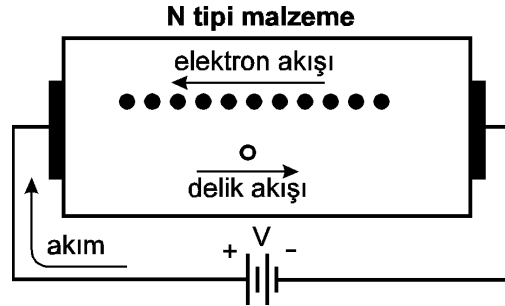
## N Tipi Malzeme

Valans elektron sayısı beş olan antimon, arsenik, bizmut ve fosfor gibi bir katkı maddesi germanyum veya silisyum tabana önceden belirlenmiş miktarda eklenerek N tipi malzeme elde edilir. Şekil 1.8’de silisyum malzemeye az miktarda arsenik eklenerek elde edilen N tipi malzemenin sıcaklık ile ilişkisi gösterilmiştir. Arsenik atomlarının beş valans elektronu silikonun kristal yapısına tam olarak uymaz. Sadece dört elektronu kovalent bağda bulunur. Beşinci elektron kovalent bağa katılmaz ve mutlak sıfır sıcaklıkta komşu atoma gevşek bir şekilde bağlıdır. Bu elektron oda sıcaklığında aldığı enerji (0.05 eV civarında) ile serbest elektron olur. Bu elektronun atomdan ayrılması ile delik oluşmaz. Arsenik atomu elektron kaybettiği için pozitif iyon olur. Pozitif iyonların kristal yapı içindeki konumları değişmez.



Şekil 1.8. Silisyuma arsenik eklenmesiyle elde edilen N tipi malzeme.

Kovalent bağı oluşturan elektronlardan bazıları oda sıcaklığında iletim bandına geçerek delikler oluşur. İletim bandındaki serbest elektron sayısı valans bandındaki delik sayısından çok fazladır. Bu miktar katkılama oranı ile belirlenir. Katkılama işlemi arseniğin serbest elektron sayısı, oda sıcaklığında oluşan elektron-delik çiftinin bir milyon katı olacak şekilde yapılır. Saf kabul edilen silisyum malzemesinde oda sıcaklığında her  $10^{12}$  atomda bir serbest elektron bulunur.  $10^6$  atomda bir katkı atomu bulunursa, taşıyıcı oranı  $10^6$  (bir milyon kat) artar. N tipi malzemede serbest elektronlar çoğunluk akım taşıyıcısı ve delikler azınlık akım taşıyıcısıdır. Şekil 1.9’da N tipi malzemede elektron ve delik akışları gösterilmiştir. Elektronlar kaynağın (-) ucundan (+) ucuna doğru hareket eder. Akım yönü elektron akışının tersi olarak kabul edilir.

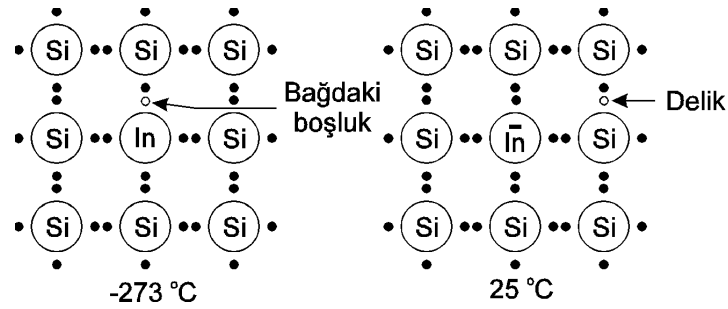


Şekil 1.9. N tipi malzemede elektron ve delik akışları.

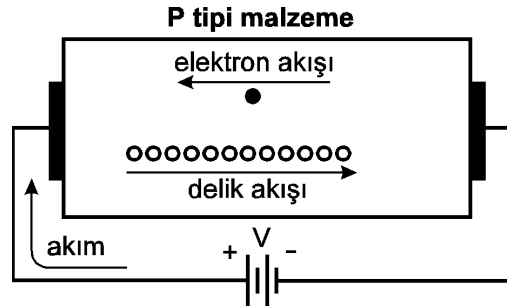
## P Tipi Malzeme

Valans elektron sayısı üç olan indiyum, boron, alüminyum ve galyum gibi bir katkı maddesi germanyum veya silisyum tabana önceden belirlenmiş miktarda eklenerek P tipi malzeme elde edilir. Şekil 1.10’da silisyum malzemeye az miktarda indiyum eklenerek elde edilen P tipi malzemenin sıcaklık ile ilişkisi gösterilmiştir. İndiyum atomlarının üç valans elektronu silisyumun kristal yapısına tam olarak uymaz. İndiyum kristal yapıda üç kovalent bağ oluşturur ve bir kovalent bağ boş kalır. Boş kalan kovalent bağdaki delik, komşu atomların valans elektronları ile kolaylıkla doldurulabilir. Bu deliğin doldurulması için gereken enerji, valans elektronların boşluk bandını atlayarak iletime bandına geçmeleri için gereken enerjiden çok küçüktür. İndiyum atomlarına komşu olan silisyum atomlarının valans elektronları oda sıcaklığında yeterli miktarda enerji alarak (0.08 eV civarında) delikleri kolaylıkla doldurur. İndiyum atomları elektron aldığı için negatif iyon olur. Oda sıcaklığında silisyum atomlarında oluşan elektron-delik çifti nedeniyle iletim bandında az sayıda serbest elektron da bulunur. P tipi malzemede çoğunluk akım taşıyıcıları delikler ve azınlık akım taşıyıcıları elektronlardır. Bu durum Şekil 1.11’de gösterilmiştir.





Şekil 1.10. Silisyuma indiyum katılarak elde edilen P tipi malzeme.



Şekil 1.11. P tipi malzemede elektron ve delik akışları.

### Katkı Maddelerine Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklıkla N veya P tipi malzemede oluşan elektron-delik çifti, yani azınlık akım taşıyıcıları artar. Katkı maddesinden gelen çoğunluk taşıyıcıları ise sıcaklıkla değişmez. Örnek olarak N tipi bir malzemede farklı sıcaklıklarda oluşan elektronlar ve delikler Tablo 1.2’de gösterilmiştir. Mutlak sıfırda (-273 °C) elektron-delik çifti oluşturacak bir enerji yoktur. Aynı zamanda katkı atomlarının elektronlarını iletim bandına geçirecek seviyede bir enerji de yoktur. Oda sıcaklığında (25 °C) azınlık taşıyıcılarının sayısı, katkı maddesinden kaynaklanan serbest elektron sayısına göre çok düşüktür. Sıcaklık 250 °C olduğunda delik sayısı elektron sayısına yaklaşık olarak eşittir ve madde saf bir yarıiletken gibi davranır.

Tablo 1.2. Farklı sıcaklıklarda tipik bir N tipi silisyumun taşıyıcı konsantrasyonları.

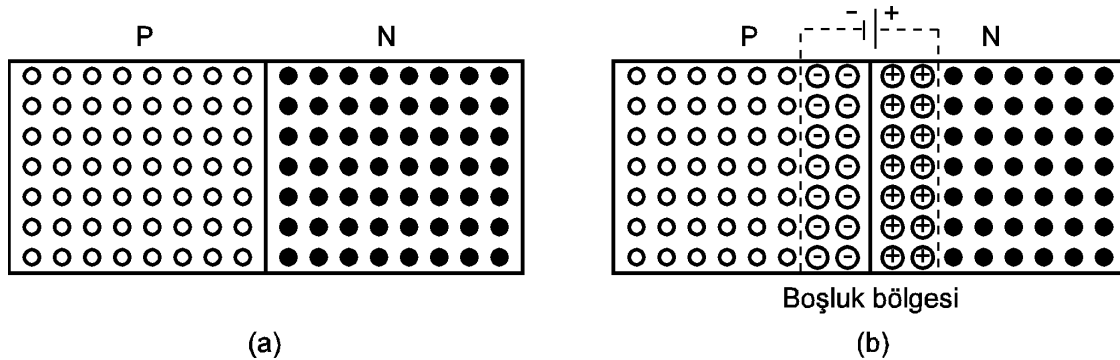
Sıcaklık	Katkı maddesinin serbest elektronları	Sıcaklıkla oluşan elektron (delik) sayısı	Toplam serbest elektron sayısı
-273 °C	0	0	0
25 °C	$10^{15}$	$1.5 \times 10^{10}$	$\approx 10^{15}$
200 °C	$10^{15}$	$10^{15}$	$2 \times 10^{15}$
250 °C	$10^{15}$	$10^{16}$	$1.1 \times 10^{16}$

## A. DİYOTLAR ve ÇEŞİTLERİ

### P-N Jonksiyonu

P ve N tipi malzemeler bir kristal yapı içinde bir araya getirildiğinde iki bölge arasında bir P-N jonksiyonu oluşur. Bu eleman yarı iletken diyot olarak bilinir ve tek yönde akım geçirir. P-N jonksiyonu diyot, transistör ve diğer yarı iletken elemanların temelidir.

Jonksiyon oluşmadan önce oda sıcaklığında, N bölgesinde çok sayıda serbest elektron ve P bölgesinde çok sayıda delik mevcuttur. Elektronlar ve delikler bütün yönlerde serbestçe hareket eder. Jonksiyon oluşması anında elektronlardan bir kısmı P bölgesine doğru hareket eder. Bu hareketin sebebi difüzyon akımıdır. Difüzyon akımı elektron yoğunluğunun çok olduğu yerden az olduğu yere doğru oluşan yayılmadır. P bölgesine geçen elektronlar deliklerle birleşir. N bölgesinde elektronlarını kaybeden atomlar (+) ve P bölgesinde elektron alarak deliklerini kaybeden atomlar (-) olur. Bunun sonucunda P-N jonksiyonu yakınında çok sayıda pozitif ve negatif iyon olur. N bölgesindeki elektronların hepsi P bölgesine geçemez. N bölgesindeki elektronlar pozitif iyonlar tarafından çekilir. Bu elektronların P bölgesine geçebilmeleri için negatif iyonların itme kuvvetini yenmeleri gerekir. Şekil 2.1(a)'da P-N jonksiyonu ve (b)'de jonksiyonun birleşmesinden sonra oluşan boşluk bölgesi gösterilmiştir. Boşluk bölgesi bir pil gibi gerilim üretir. Boşluk bölgesinde oluşan gerilim germanyum diyotlarda 0.3 V, silisyum diyotlarda ise 0.7 V'tur.



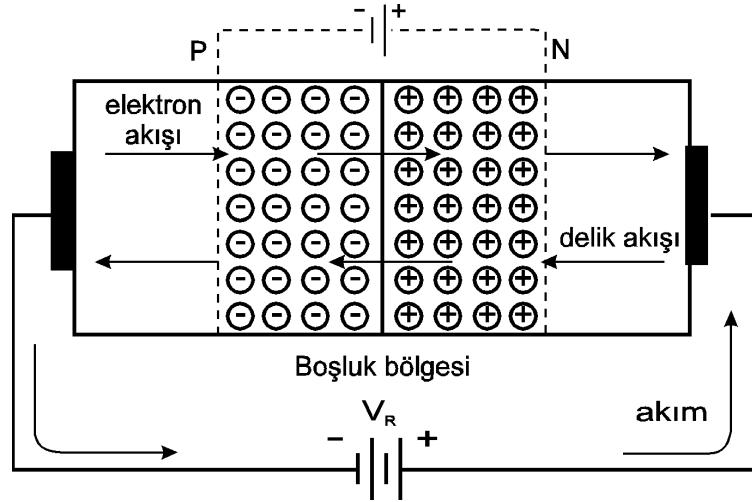
Şekil 2.1. a) P-N jonksiyonu, b) Boşluk bölgesinin oluşması.

Boşluk bölgesi, jonksiyonu difüzyon yoluyla geçmek isteyen çoğunluk taşıyıcıları için bir engel oluşturur. N bölgesindeki bir serbest elektronun P bölgesine geçebilmesi için bu gerilim potansiyelini aşacak bir enerjiye sahip olması gerekir. Boşluk bölgesinde sıcaklık nedeniyle oluşan elektron-delik çiftleri sürüklenme (drift) akımı ile difüzyon akımının tersine hareket eder. Bu iki akımın toplamı sıfırdır.

### Ters Kutuplama

P-N jonksiyonunun P bölgesine negatif ve N bölgesine pozitif bir gerilim uygulanmasına *ters kutuplama* (polarma) denir. P bölgesindeki delikler kaynağın negatif ucu tarafından ve N bölgesindeki elektronlar kaynağın pozitif ucu tarafından çekilir. Çoğunluk taşıyıcıları jonksiyondan uzaklaşarak jonksiyon etrafında daha çok pozitif ve negatif iyon oluşur. Geçici rejimde çoğunluk akım taşıyıcıları bir akım oluşturur. Boşluk bölgesi genişleyerek kararlı rejimde bu bölgenin potansiyeli P-N jonksiyonuna uygulanan  $V_R$  gerilimine eşit olur ve

çoğunluk taşıyıcı akımı sıfır olur. Çok küçük bir  $V_R$  gerilimi çoğunluk akım taşıyıcılarının akışını durdurmak için yeterlidir. Ters kutuplanan bir P-N jonksiyonunda azınlık akım taşıyıcıları jonksiyondan bir sızıntı akımı geçirir.  $V_R$  gerilimi arttıkça sızıntı akımı artar.  $V_R$  geriliminin daha fazla artırılması azınlık akım taşıyıcılarının sayısını arttırmaz çünkü elektron-delik çiftinin miktarı sıcaklığa bağlıdır. Jonksiyondan geçen bu akıma *ters doyma akımı* denir. Şekil 2.2'de ters kutuplama durumundaki P-N jonksiyonu ve içinden geçen sızıntı akımı gösterilmiştir.



Şekil 1.13 Ters kutuplama durumundaki P-N jonksiyonu.

## Çığ Delinme

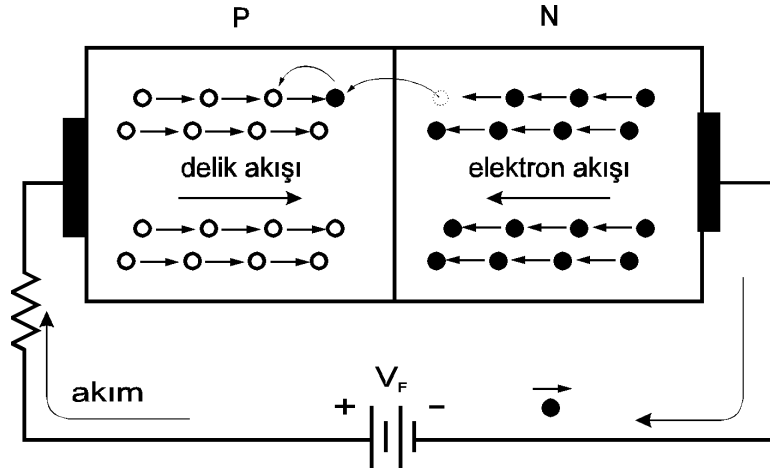
P-N jonksiyonuna uygulanan ters gerilimin artırılması azınlık akım taşıyıcılarının daha hızlı hareket etmelerine neden olur. Bu akım taşıyıcıları kristal içindeki atomlara çarparak valans elektronların enerjilenmesine ve kovalent bağı kopararak valans elektronların serbest kalmasına neden olur. Serbest kalan azınlık akım taşıyıcıları hızla hareket ederek başka atomlara çarpar ve yeni elektron-delik çiftlerinin oluşmasına neden olur. Böylece azınlık akım taşıyıcı sayısı hızlı bir şekilde (çığ gibi) yükselir. Bu olaya çığ delinme denir ve azınlık akım taşıyıcılarını bu şekilde hızlandırmak için gerekli enerjiyi oluşturan gerilime *ters devrilme gerilimi* ( $V_{BD}$ ) denir. Ters devrilme gerilimi sıcaklığa, katkı miktarına ve başka faktörlere bağlıdır.

## İleri Kutuplama

P-N jonksiyonunun P bölgesine pozitif ve N bölgesine negatif bir gerilim uygulanmasına *ileri kutuplama* denir. P bölgesindeki delikler kaynağın pozitif ucu tarafından ve N bölgesindeki elektronlar kaynağın negatif ucu tarafından jonksiyona doğru itilir. Bu bölgedeki pozitif ve negatif iyonlar nötr hale gelmeye başlar. Jonksiyona uygulanan  $V_F$  gerilimi yeteri kadar büyük ise, diyot içinde oluşan gerilim potansiyeli sıfırlanır ve boşluk bölgesi ortadan kalkar. N bölgesindeki elektronlar yeterli enerji alarak P bölgesine geçer. P bölgesine geçen elektron burada valans elektron haline gelir ve delikten deliğe atlayarak kaynağın pozitif ucuna doğru hareket eder. P bölgesinde valans elektronların hareketi, deliklerin ters yönde hareketi demektir. Akım yönü, delik hareketi ile aynı yönde kabul edilir. N bölgesini terk eden her elektron için kaynağın negatif ucundan bir elektron çıkar. Böylece jonksiyondan sürekli akım geçer.  $V_F$  gerilimi silisyum diyotta 0.7 V ve germanyum diyotta 0.3 V'tan büyük olduğunda P-N

jonksiyonundan akım geçmeye başlar. Gerilimin biraz daha arttırılması akımın hızla artmasına neden olur. Akımı sınırlamak için diyoda seri bir direnç bağlanır. Şekil 2.3'te ileri yönde kutuplanmış bir P-N jonksiyonu gösterilmiştir.

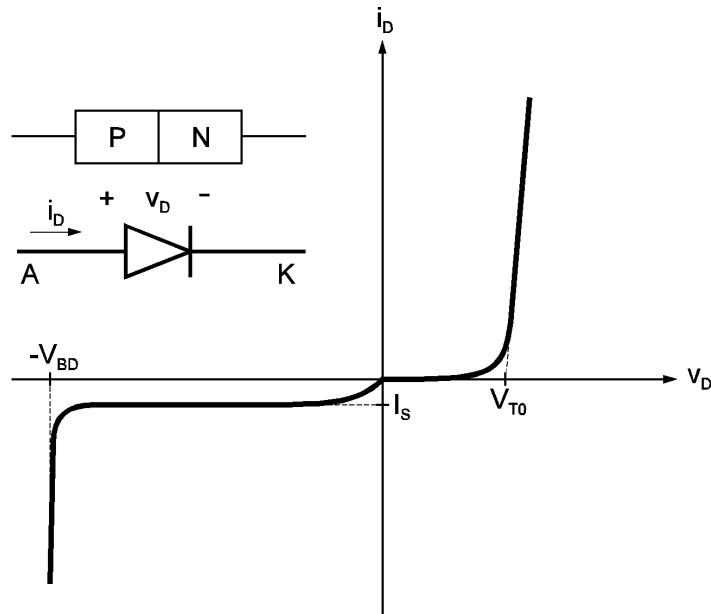
N bölgesinde çoğunluk akım taşıyıcısı olan elektronların, P bölgesine geçmeleri difüzyon ile olur. P bölgesinde elektronlar azınlık akım taşıyıcılarıdır. Bu durum transistörün çalışmasının anlaşılması açısından önemlidir.



Şekil 2.3. İleri yönde kutuplanmış P-N jonksiyonu.

### Diyodun V-I Karakteristiği

P-N diyodunun P bölgesine anot ve N bölgesine katot ismi verilir. İleri yönde kutuplanmış diyotta akım P'den N'ye doğru akar. Diyodun ok sembolü ileri yönde kutuplanmış diyottan geçen akım yönünü gösterir. Şekil 2.4'te diyodun sembolü ve V-I karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Diyodun sembolü ve V-I karakteristiği.

Diyodun akım geçirmeye başladığı gerilim eşik gerilimi ( $V_{T0}$ ) olup, germanyum için 0.3 V ve silisyum için 0.6 V'tur. Eşik gerilimi sıcaklıkla azalır.  $I_S$  ters yönde doyma akımıdır ve

sıcaklıkla artar. Oda sıcaklığındaki doyma akımı silikonda on nano amperler mertebesinde. Germanyumda ise enerji boşluğu daha küçük olduğundan silikona göre daha fazla azınlık akım taşıyıcısı mevcuttur ve sızıntı akımı birkaç mikro amper mertebesinde.  $V_{BD}$  diyodun ters yönde devrilme gerilimidir. Diyoda ters yönde uygulanabilecek gerilimin tepe değeri (PRV),  $V_{BD}$  'den küçüktür ve silisyum diyotta 1000 V , germanyumda ise 400 V civarındadır. PRV kısa süreli ters gerilimdir. Kataloglarda ayrıca ters yönde uygulanabilecek DC gerilimin maksimum değeri ( $V_{RDC}$ ) de verilir. Silisyum diyot 200 °C sıcaklığa kadar kullanılabilirken, germanyum diyot 100 °C'ye kadar kullanılabilir. Silisyum diyodun germanyuma göre dezavantajı eşik geriliminin daha yüksek olmasıdır. Germanyum diyot silisyumdan daha hızlıdır.

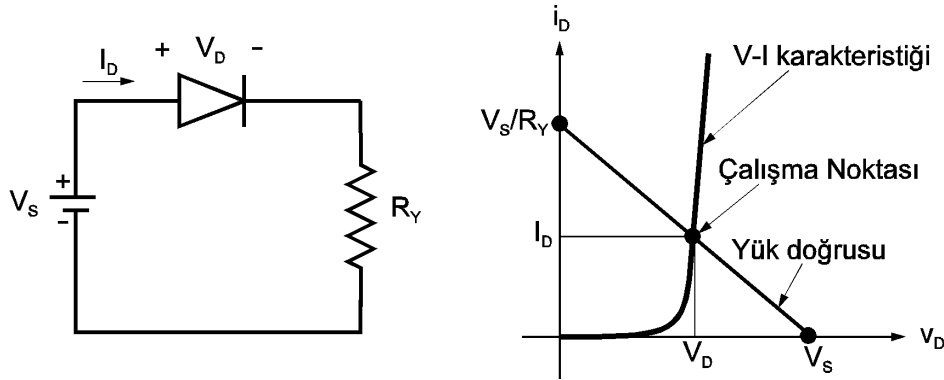
## Diyotlu Devrelerde Grafik Yöntemi ile Çalışma Noktasının Bulunması

Elektronik devrelerde kullanılan diyotların çalışmasını devre analizi yöntemleri ile incelemek mümkündür. Uygulamalarda diyot devamlı iletim, devamlı yalıtım veya zaman zaman iletim ve yalıtım durumunda çalışır. DC devrelerde diyodun tek bir çalışma noktası yani akım ve gerilimi mevcuttur. AC bir devrede ise diyodun çalışma noktası değişkendir.

Diyodun çalışma noktası grafik yöntemleri kullanılarak da bulunabilir. Diyodun çalışma noktasının grafik ile bulunması için önce diyodun hangi bölgede olduğuna karar verilir. Diyot ileri kutuplama, ters kutuplama veya devrilme bölgelerinden birinde olabilir. Daha sonra V-I karakteristiği ile yük doğrusu kesiştirilir ve çalışma noktası bulunur.

### İleri Kutuplama Durumu

İleri yönde kutuplanmış bir diyot ve çalışma noktası Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. DC bir devrede diyodun ileri kutuplanması ve çalışma noktası.

Seri devrede kaynak gerilimi, diyot gerilimi ile yük geriliminin toplamı olarak yazılır.

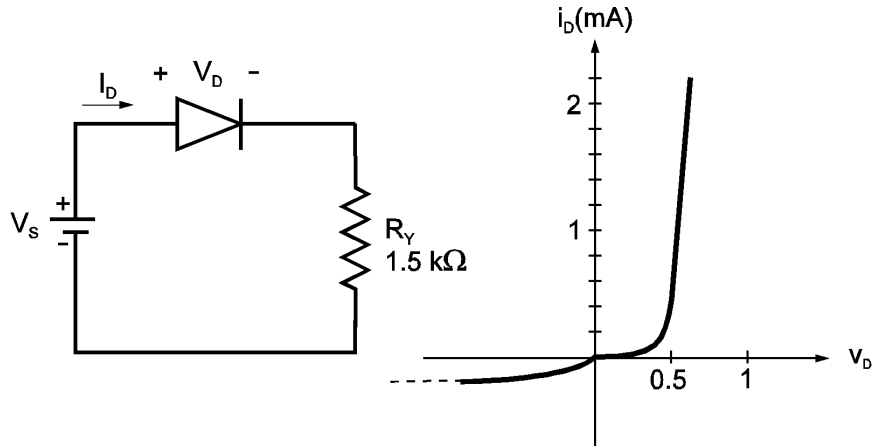
$$V_S = v_D + R_Y i_D$$

Yük doğrusunun çizilmesi için yukarıdaki denklemde  $i_D = 0$  için  $v_D = V_S$  ve  $v_D = 0$  için  $i_D = V_S / R_Y$  değerleri elde edilir. Bu iki değer kullanılarak yük doğrusu çizilir. Yük doğrusu ile diyodun V-I karakteristiğinin kesiştiği nokta çalışma noktasıdır. Bu noktanın akım ve gerilim değerleri  $I_D$  ve  $V_D$  olarak gösterilmiştir.

**Uygulama 1 :**

V-I karakteristiği aşağıda verilen bir diyot  $R_Y = 1.5 \text{ k}\Omega$  olan seri direnç üzerinden ileri kutuplanacak şekilde DC gerilim kaynağına bağlanmıştır. Diyodun çalışma noktasını bulunuz.

- a)  $V_S = 1.5 \text{ V}$       b)  $V_S = 3 \text{ V}$

**Çözüm :**

- a)  $V_S = 1.5 \text{ V}$  için

$$1.5 = v_D + 1500 i_D \quad (\text{yük doğrusunun denklemi})$$

$$i_D = 0 \Rightarrow v_D = 1.5 \text{ V}$$

$$v_D = 0 \Rightarrow i_D = 1.5 / 1500 = 0.001 \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

Bu iki değer kullanılarak yük doğrusu çizilir. Diyodun V-I karakteristiği ile yük doğrusunun kesişme noktası (a) diyodun çalışma noktasıdır. Grafikte (a) noktasında diyodun gerilimi  $v_D = 0.55 \text{ V}$  ve akımı  $i_D = 0.63 \text{ mA}$  olarak görülmektedir. Sonucun doğruluğunu kontrol etmek için bulunan akım ve gerilim denklemde yerine konulur.  $1.5 \cong 0.55 + 1500 \times 0.63 \times 10^{-3}$

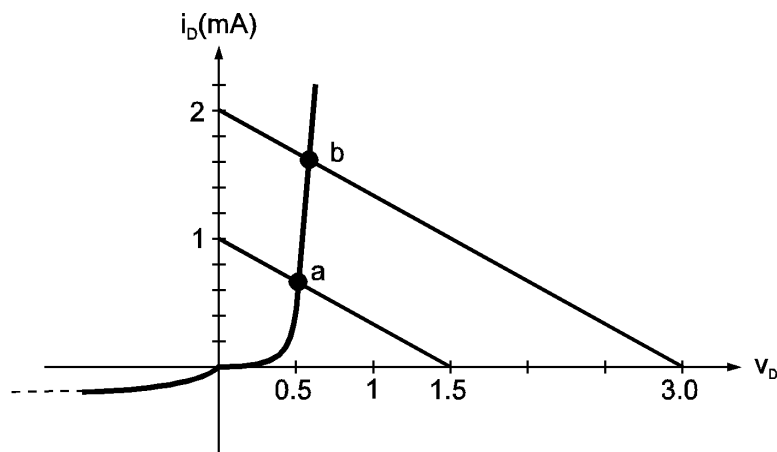
- b)  $V_S = 3 \text{ V}$  için

$$3 = v_D + 1500 i_D \quad (\text{yük doğrusunun denklemi})$$

$$i_D = 0 \Rightarrow v_D = 3 \text{ V}$$

$$v_D = 0 \Rightarrow i_D = 3 / 1.5 \text{ k}\Omega = 2 \text{ mA}$$

Diyodun çalışma noktası (b noktası)  $v_D = 0.6 \text{ V}$  ve akımı  $i_D = 1.6 \text{ mA}$  olarak görülmektedir.

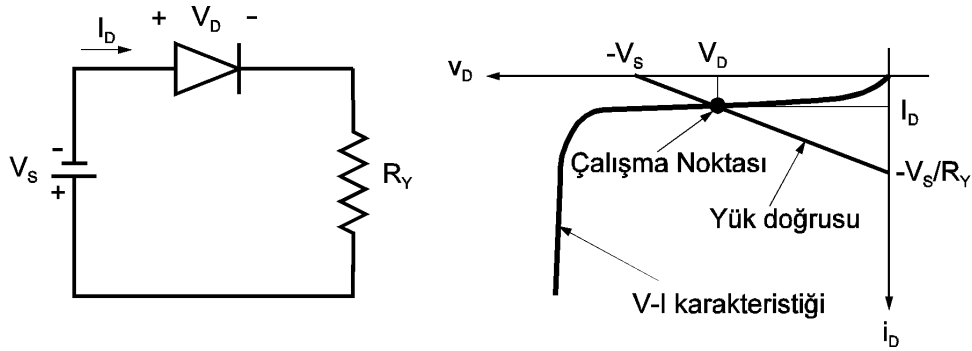


**Ters Kutuplama Durumu**

Ters yönde kutuplanmış bir diyot ve çalışma noktası Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Çevre denklemi aşağıdaki gibi yazılır.

$$-V_S = v_D + R_Y i_D$$

Yük doğrusunun çizilmesi için yukarıdaki denklemde  $i_D = 0$  için  $v_D = -V_S$  ve  $v_D = 0$  için  $i_D = -V_S / R_Y$  değerleri elde edilir. Bu iki değer kullanılarak yük doğrusu çizilir.

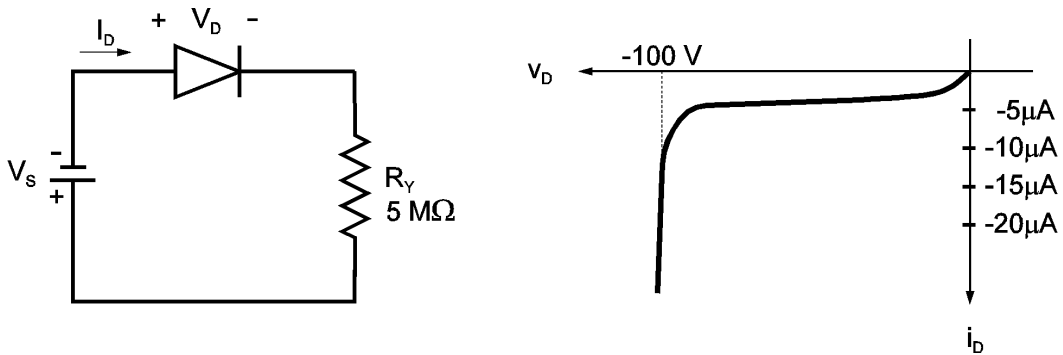


Şekil 2.6. DC bir devrede diyodun ters kutuplanması ve çalışma noktası.

**Uygulama 2 :**

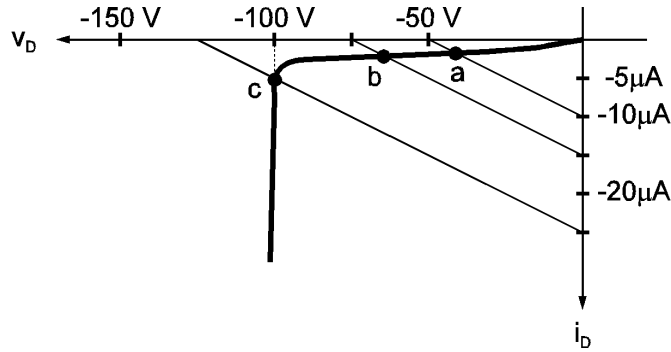
V-I karakteristiği aşağıda verilen bir diyot  $R_Y = 5 \text{ M}\Omega$  olan seri direnç üzerinden ters kutuplanacak şekilde DC gerilim kaynağına bağlanmıştır. Diyodun çalışma noktasını bulunuz.

- a)  $V_S = 50 \text{ V}$       b)  $V_S = 75 \text{ V}$       c)  $V_S = 125 \text{ V}$

**Çözüm :**

- a) Yük doğrusu gerilim eksenini  $-50 \text{ V}$ 'ta, akım eksenini  $-50 / 5 \text{ M}\Omega = -10 \mu\text{A}$  değerinde keser. Çalışma noktası  $v_D = 45 \text{ V}$  ve  $i_D = 1 \mu\text{A}$ 'dir.
- b) Yük doğrusu gerilim eksenini  $-75 \text{ V}$ 'ta, akım eksenini  $-75 / 5 \text{ M}\Omega = -15 \mu\text{A}$ 'de keser. Çalışma noktası  $v_D = 70 \text{ V}$  ve  $i_D = 2 \mu\text{A}$ 'dir. Bu akım ters doyma akımıdır ve gerilimle artmaz. Devrilme gerilimine kadar aynı değerde akım geçer. Bu akım değeri azınlık akım taşıyıcılarının sayısına bağlıdır.
- c) Yük doğrusu gerilim eksenini  $-125 \text{ V}$ 'ta, akım eksenini  $-125 / 5 \text{ M}\Omega = -25 \mu\text{A}$ 'de keser. Çalışma noktası  $v_D = 100 \text{ V}$  ve  $i_D = 5 \mu\text{A}$ 'dir.  $100 \text{ V}$ 'un üzerindeki bir ters gerilim diyodun ters devrilmesine ve aşırı akım geçmesine neden olur. Devrilme bölgesinde diyot akımı

sınırlanmazsa aşırı akım geçer ve diyot bozulur. Bu devrede 5 M $\Omega$ 'luk seri direnç aşırı akım geçmesini önler.



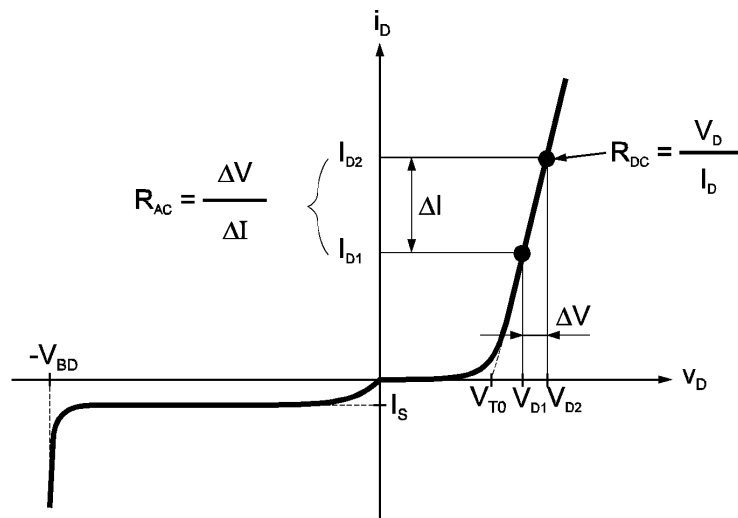
## Sonuçlar

Yük doğrusu analizinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. Kaynak gerilimi diyodu ileri kutupladığında, kaynak geriliminin arttırılması ile diyot gerilimi eşik geriliminden sonra artmaya devam etmez, hemen hemen sabit kalır. Diyottan geçen akım seri direnç tarafından belirlenir.
2. Kaynak gerilimi diyodu ters kutupladığında, diyottan çok küçük bir ters akım geçer. Kaynak gerilimi  $-V_{BD}$  gerilimine ulaşana kadar sabit kabul edilebilir.
3. Diyoda uygulanan ters gerilim  $V_{BD}$ 'den büyük ise, diyot üzerinde  $V_{BD}$  gerilimi düşer. Diyot akımı seri direnç tarafından belirlenir.

## Diyodun Direnci

Diyodun direnci DC veya AC olarak tanımlanabilir. Çalışma noktasındaki direnç DC veya *statik direnç* olarak tanımlanır. İleri yönde kutuplanmış bir diyodun statik direnci akım yükseldikçe artar. Diyot karakteristiğinin belirli bir bölgesinde, gerilimdeki değişimin akımdaki değişmeye oranı AC veya *dinamik direnç* olarak tanımlanır. Şekil 2.7'de direnç tanımları gösterilmiştir.

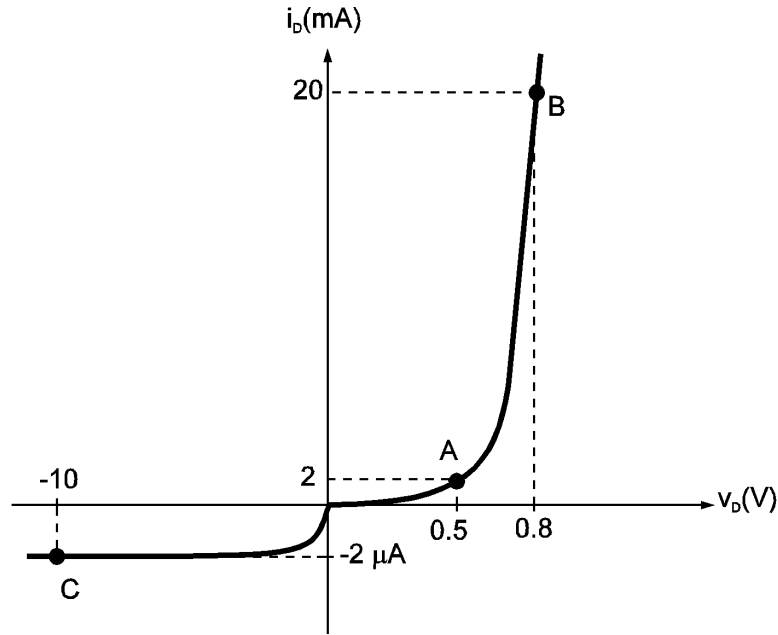


Şekil 2.7 Diyodun AC ve DC direnci.

### Uygulama 3 :

Aşağıdaki verilen diyot karakteristiğini kullanarak A, B ve C noktalarındaki diyodun dirençlerini bulunuz. İdeal diyot ile karşılaştırınız.





**Çözüm :**

A noktasındaki DC direnç;  $R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{0.5}{2 \text{ mA}} = 250 \Omega$

B noktasındaki DC direnç;  $R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{0.8}{20 \text{ mA}} = 40 \Omega$

İleri kutuplama bölgesinde diyodun direnci gerilim ve akım arttıkça artar. İdeal bir diyotta iletimdeki iç direnç sıfır kabul edilir.

C noktasındaki DC direnç;  $R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} = \frac{-10}{2 \mu\text{A}} = 5 \text{ M}\Omega$

Ters kutuplama bölgesinde direnç oldukça yüksektir. İdeal bir diyotta ise bu bölgede direncin sonsuz olduğu ve hiç akım geçmediği kabul edilir.

DC bir devrede belirli bir çalışma noktasında diyodun direnci bulunarak, diyot yerine bu eşdeğer direnç konulabilir.

**Uygulama 4 :**

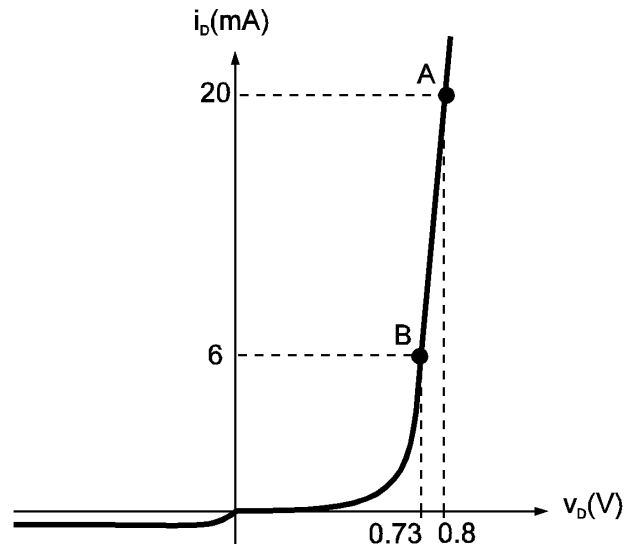
Yanda verilen diyot karakteristiğini kullanarak A, B noktaları arasında diyodun AC direncini bulunuz.

**Çözüm :**

$$R_{AB} = \frac{V_A - V_B}{i_A - i_B} = \frac{0.8 - 0.73}{20 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3}}$$

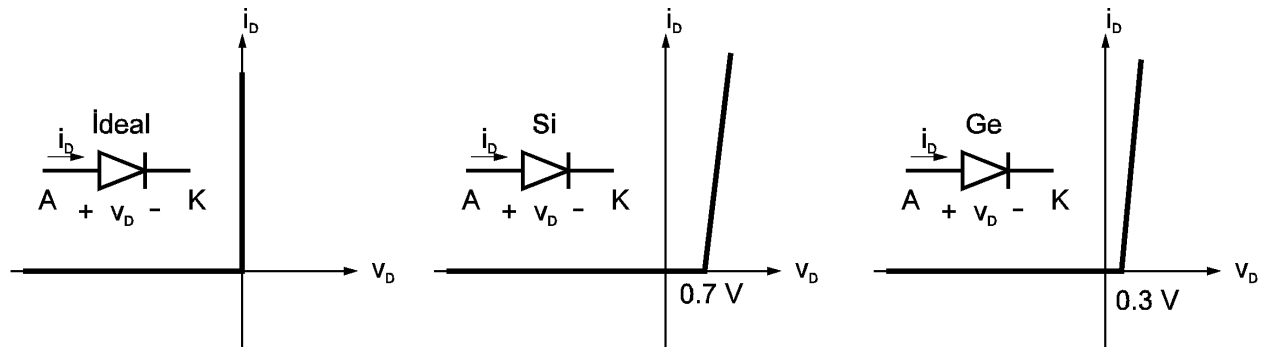
$$R_{AB} = 5 \Omega$$

AB noktaları arasındaki direnç AC direnç veya ortalama direnç olarak adlandırılır.

**Diyot Devrelerinin Yaklaşık Eşdeğer Analizi**

Bir devrede diyodun çalışma noktası grafik metodu ile veya diyodun eşdeğeri kullanılarak bulunabilir. Diyodun yaklaşık eşdeğerini kullanmak kolay bir çözümdür ve doğruluğu daha düşüktür. Çalışma noktasının bulunması grafik metodu ile oldukça güçtür.

Diyodun yaklaşık eşdeğer devresinde, geçirme yönünde diyodun belirli bir eşik geriliminde iletme geçtiği kabul edilir. Bu eşik gerilimi germanyum için 0.3 V ve silisyum için 0.7 V'tur. Diyot eşik geriliminden sonra bir direnç gibi davranır. İletimdeki iç direnç oldukça düşüktür (birkaç ohm mertebesinde) ve bir çok uygulamada ihmal edilir. İdeal diyodun eşdeğeri ile silisyum ve germanyum diyotların eşdeğer devreleri Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 İdeal, silisyum ve germanyum diyotların eşdeğer devreleri.

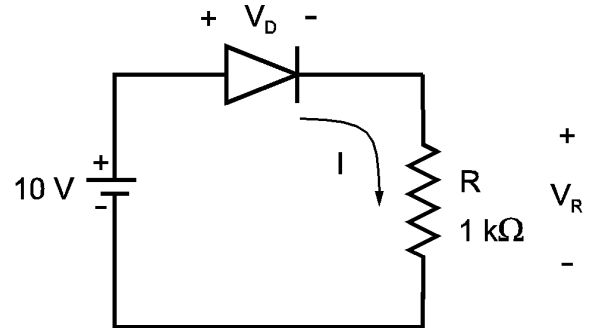
Ters kutuplama bölgesinde diyodun eşdeğer direnci sonsuz kabul edilir. Diyoda ters yönde devrilme geriliminden daha büyük bir gerilimi uygulanırsa diyot devrilerek akım geçirir. Bu akımın değeri dirence bağlıdır. Bu esnada diyodun üzerindeki gerilim devrilme gerilimidir. Uygulamada diyodun ters devrilme gerilimi, üzerine gelebilecek maksimum gerilimden büyük seçilir.

**Uygulama 5 :**

Yanda verilen devrede,

- a) İdeal diyot için,
- b) Silisyum diyot için,
- c) Germanyum diyot için

diyot akımını ve direnç gerilimini bulunuz.

**Çözüm :**

Devrede diyot geçirme yönünde kutuplanmıştır ve iletimdedir. Diyot ve direnç seri bağlı olduğundan diyot akımı direnç akımına eşittir. Diyot gerilimi ile direnç geriliminin toplamı kaynak gerilimini verir.

- a) İdeal diyodun gerilim düşümü sıfırdır ve iletimdeki iç direnci sıfırdır. Devreden geçen akım,

$$I = \frac{10}{1 \cdot 10^3} = 10 \text{ mA bulunur.}$$

Direnç gerilimi,

$$V_R = I \cdot R = 10 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 10 \text{ V bulunur.}$$

- b) Silisyum diyodun iletim gerilim düşümü 0.7 V'tur. Diyodun iletimdeki iç direnci çok küçüktür ve direnç yanında sıfır kabul edilebilir. Devreden geçen akım,

$$I = \frac{10 - 0.7}{1 \cdot 10^3} = 9.3 \text{ mA bulunur.}$$

Direnç gerilimi,

$$V_R = I \cdot R = 9.3 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 9.3 \text{ V bulunur.}$$

- c) Germanyum diyodun iletim gerilim düşümü 0.3 V'tur. Diyodun iletimdeki iç direnci çok küçüktür ve direnç yanında sıfır kabul edilebilir. Devreden geçen akım,

$$I = \frac{10 - 0.3}{1 \cdot 10^3} = 9.7 \text{ mA bulunur.}$$

Direnç gerilimi,

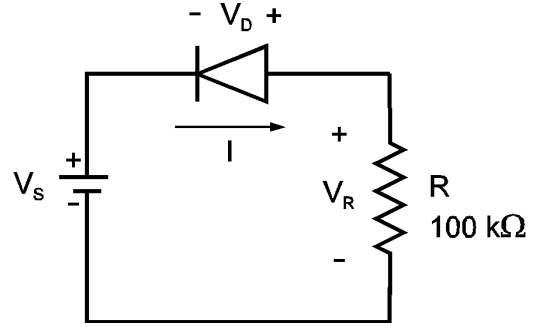
$$V_R = I \cdot R = 9.7 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega = 9.7 \text{ V bulunur.}$$

NOT : Devredeki gerilim çok büyük ise silisyum ve germanyum diyodun eşik gerilimi de ihmal edilerek çözüm ideal diyottaki gibi bulunur.

**Uygulama 6 :**

Şekildeki devrede kullanılan diyodun devrilme gerilimi  $V_{BD} = 75 \text{ V}$  'tur.

- a)  $V_S = 30 \text{ V}$  ve  
 b)  $V_S = 100 \text{ V}$  için,  
 devreden geçen akım ile diyot ve direnç gerilimini bulunuz.

**Çözüm :**

- a) Diyot ters kutuplama bölgesinde olduğuna göre devreden geçen akım sıfır kabul edilir. Bütün gerilim diyot üzerinde oluşur. Direnç üzerindeki gerilim sıfırdır.

$$I \cong 0$$

$$V_D = -30 \text{ V}$$

$$V_R = I.R = 0$$

- b) Diyoda gelen ters gerilim devrilme gerilimini aştığına göre seri direnç akımı belirler.

$$V_D = -50 \text{ V}$$

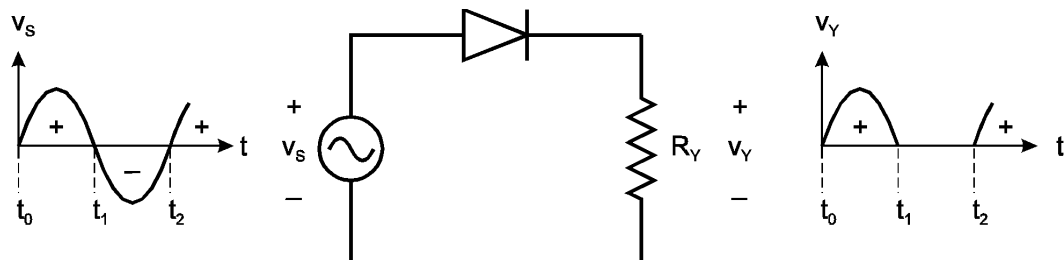
$$I = \frac{V_S - V_{BD}}{R} = \frac{100 - 75}{100 \text{ k}\Omega} = 0.25 \text{ mA} = 250 \mu\text{A}$$

$$V_R = I.R = 100 \text{ k}\Omega \cdot 250 \mu\text{A} = 100 \cdot 10^3 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 25 \text{ V}$$

Diyotta harcanan güç,  $P_D = 50 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 12.5 \text{ mW}$  bulunur.

**Yarım Dalga Doğrultucu**

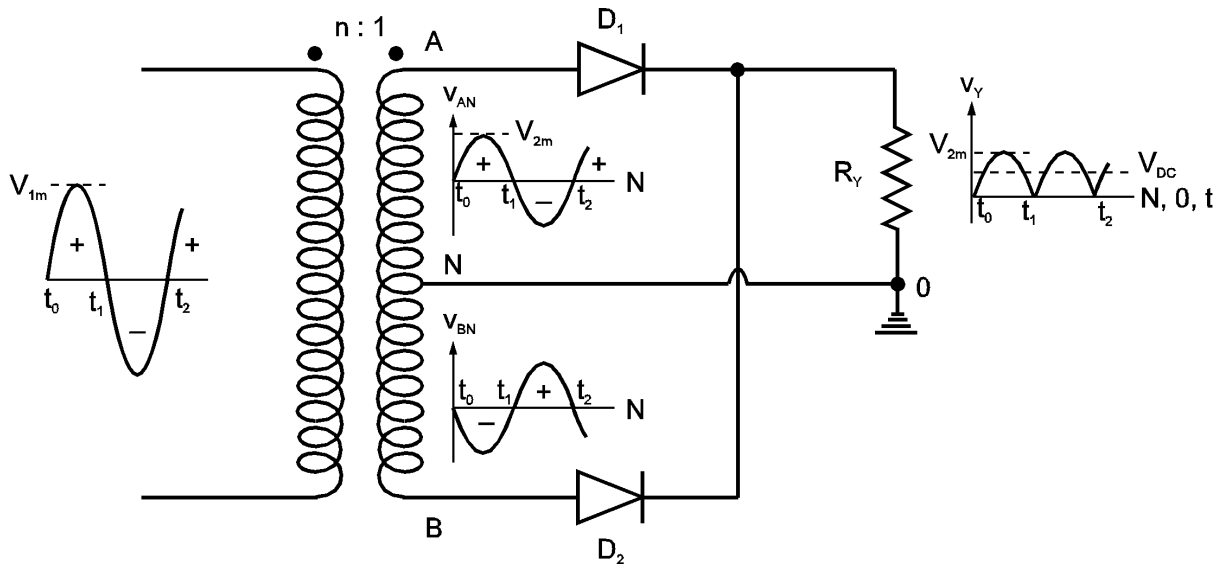
Diyot tek yönde akım geçirme özelliğinden dolayı doğrultucu devrelerinde yaygın olarak kullanılır. Doğrultucu devreleri, AC gerilimi DC gerilime çevirmek için kullanılır. Doğrultucu analizinde diyotlar ideal kabul edilecektir. Şekil 2.9'da yarım dalga doğrultucu devresi gösterilmiştir. Devrenin girişine bir AC gerilim uygulanmıştır.  $t_0 - t_1$  aralığında yani pozitif alternansta diyot iletimdedir. Bu aralıkta diyodun gerilimi sıfır kabul edilirse, giriş gerilimin tamamı yük üzerinde görülür.  $t_1 - t_2$  aralığında yani negatif alternansta diyot kesimdedir. Devreden geçen akım ve yük gerilimi sıfırdır.



Şekil 2.9 Yarım dalga doğrultucu, giriş ve çıkış gerilimleri.

## Tam Dalga Doğrultucu

Tam dalga doğrultma, AC gerilimin her iki alternansının doğrultularak yüke verilmesi ile yapılır. Şekil 2.10'da orta uçlu transformatör ile yapılan tam dalga doğrultucu devresi gösterilmiştir. Transformatör girişine uygulanan şebeke geriliminin ve çıkışındaki gerilimlerin orta uca göre değişimleri şekilde gösterilmiştir. Devrede iki diyot kullanılarak her iki alternans doğrultulur ve yüke verilir.  $t_0 - t_1$  aralığında  $D_1$  diyoduna gelen gerilim orta uca göre pozitifdir.  $D_1$  diyodu iletme girer ve yüke pozitif alternans verilir.  $D_2$  diyodu bu aralıkta negatif gerilime maruz kaldığından kesimdedir.  $t_1 - t_2$  aralığında aralığında,  $D_2$  diyodu orta uca göre pozitif gerilime maruz kalır ve iletme girer. Böylece negatif alternans doğrultularak yüke verilir. Bu aralıkta üst sargı gerilimi orta uca göre negatiftir ve  $D_1$  diyodu kesimdedir. Yükten geçen akım her iki alternansta da pozitifdir dolayısıyla yük gerilimi pozitif olur.



Şekil 2.10. Orta uçlu transformatör ile yapılan tam dalga doğrultma devresi.

Dönüştürme oranı  $n:1$ , giriş gerilimi  $V_1$  ve çıkış gerilimi  $2x V_2$  olan orta uçlu transformatörde,

$$V_{2m} = \frac{V_{1m}}{2n}$$

olarak yazılır. m indisi maksimum değerdir. Yük üzerindeki gerilimini ortalama değeri,

$$V_{DC} = \frac{2V_{2m}}{\pi}$$

olarak hesaplanır. Bir diyodun maruz kaldığı maksimum gerilim,

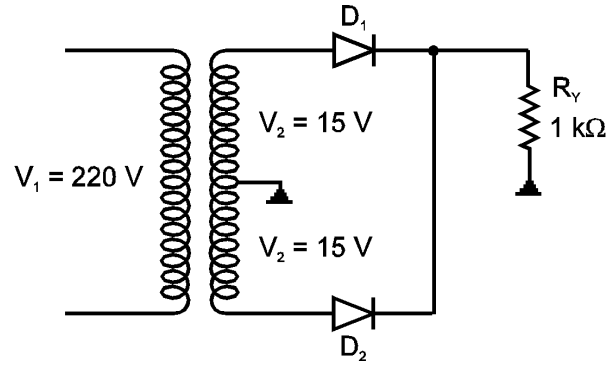
$$PIV = 2V_{2m}$$

şeklinde hesaplanır. PIV (Peak Inverse Voltage) diyot kesimde iken oluşur. Kullanılan diyodun PIV değeri bu değerinde olmalıdır.

**Uygulama 7 :**

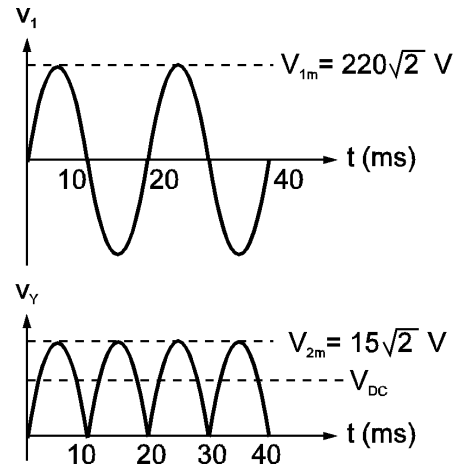
Şekilde verilen tam dalga doğrultucuda transformatör giriş gerilimi 220 V, 50 Hz ve çıkış gerilimi 2x15 V'tur (Gerilim değerleri efektif değerlerdir).

- Giriş ve çıkış gerilimlerinin değişimlerini çiziniz ve çıkış geriliminin ortalamasını bulunuz.
- Bir diyodun minimum PIV değerini hesaplayınız.

**Çözüm :**

- $V_1 = 220 \text{ V}$   
 $V_{2m} = 220\sqrt{2} \text{ V} = 311 \text{ V}$   
 $V_2 = 15 \text{ V}$   
 $V_{2m} = 15\sqrt{2} \text{ V}$   
 $T = \frac{1}{50} = 0.02 = 20 \text{ ms}$

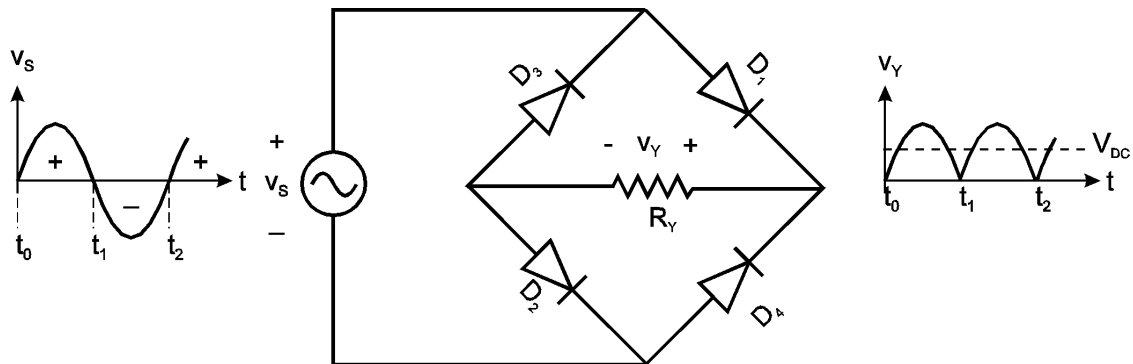
$$V_{DC} = \frac{2V_{2m}}{\pi} = \frac{2 \cdot 15\sqrt{2}}{\pi} = 13.5 \text{ V}$$



- Bir diyoda gelen maksimum gerilim,  
 $PIV = 2V_{2m} = 30\sqrt{2} = 42.4 \text{ V}$   
 Diyodun PIV değeri 42.4 V'tan büyük olmalıdır. PIV değeri 50 V veya 75 V seçilebilir.

**Köprü Doğrultucu**

Köprü doğrultucu ile elde edilen DC gerilim, orta uçlu transformatör ile yapılan tam dalga doğrultucudaki DC gerilimin iki katıdır. Şekil 2.11'de köprü doğrultucu devresi ve giriş çıkış gerilimleri gösterilmiştir.



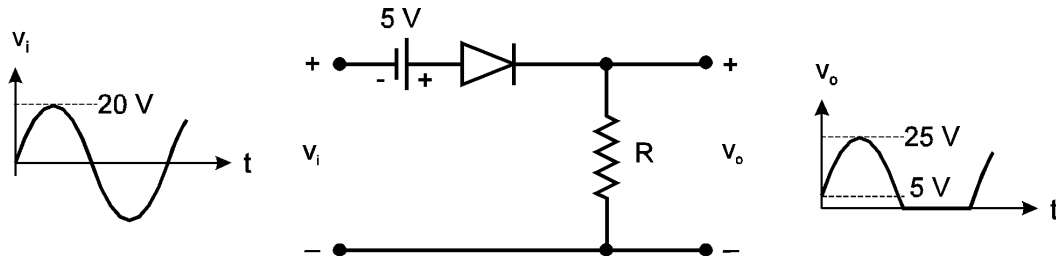
Şekil 2.11. Köprü doğrultucu devresi ve giriş çıkış gerilimleri.

Pozitif alternansta  $D_1 - D_2$  diyotları iletimde,  $D_3 - D_4$  diyotları kesimdedir. Negatif alternansta  $D_3 - D_4$  diyotları iletimde,  $D_1 - D_2$  diyotları kesimdedir. Yükten geçen akım ve yük gerilimi her iki alternansta da pozitiftir. Bir diyodun maruz kaldığı maksimum gerilim giriş geriliminin tepe değeridir.

## KIRPICI DEVRELER

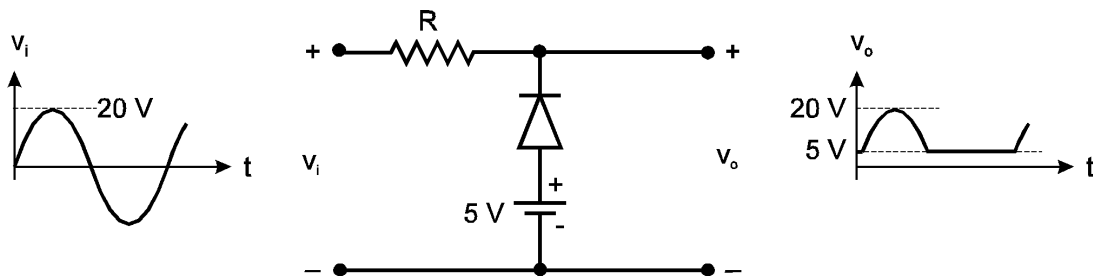
Diyot devreleri giriş işaretinin belirli bir bölgesini kırmak ve işareti ötelemek için kullanılabilir. Kırpıcılar öngerilimli, öngerilimsiz, seri, paralel, pozitif veya negatif türde olabilir. Öngerilimli devrelerde DC gerilim kaynağı kullanılır. Kırpma seviyesi devrede kullanılan DC gerilim kaynağının değeri ile ayarlanabilir. Diyodun yönü ile seri veya paralel bağlı olmasına göre, pozitif veya negatif kırpma yapılabilir. Kaynağın yönünün değiştirilmesi ile kırpma işlemi tamamen değişir.

Şekil 2.12’de öngerilimli seri kırpıcı ve giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu devrede  $-5\text{ V}$ ’tan daha düşük gerilimler için diyot açık devre olur ve çıkış gerilimi sıfır olur.  $-5\text{ V}$ ’un üzerinde diyot iletime girer. Böylece giriş gerilimi  $5\text{ V}$  yukarı ötelenmiş olur ve altı kırpılır.



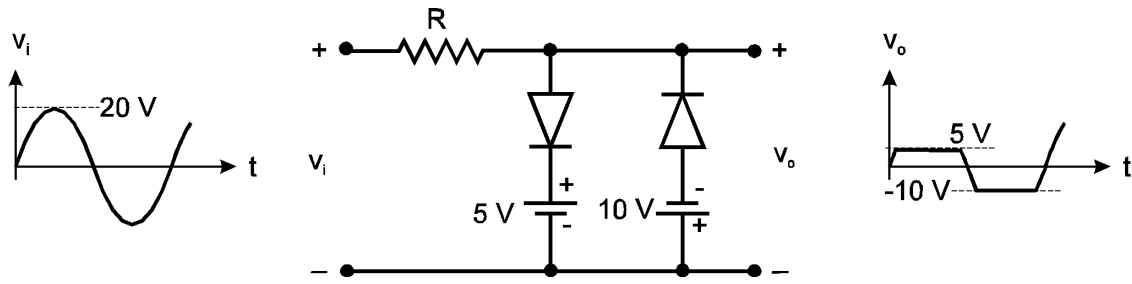
Şekil 2.12 Öngerilimli seri bir kırpıcı.

Şekil 2.13’de öngerilimli paralel kırpıcı gösterilmiştir. Bu devrede  $5\text{ V}$ ’tan daha küçük gerilimler için diyot kısa devre olur ve çıkış gerilimi  $5\text{ V}$  olur. Giriş geriliminin  $5\text{ V}$ ’un altındaki kısmı kırılır.



Şekil 2.13 Öngerilimli paralel kırpıcı.

Şekil 2.14’te gösterilen öngerilimli paralel kırpıcıda iki diyot kullanılmıştır. Pozitif alternansta ve  $5\text{ V}$ ’un üstünde, pozitif yöndeki diyot iletime girer ve çıkış gerilimi  $5\text{ V}$  olur. Negatif alternansta ve  $-10\text{ V}$ ’un altında, negatif yöndeki diyot iletime girer ve çıkış gerilimi  $-10\text{ V}$  olur. Böylece giriş gerilimi hem alttan hem de üstten kırılmış olur. Gerilim değerleri değiştirilerek kırpma seviyeleri değiştirilebilir.

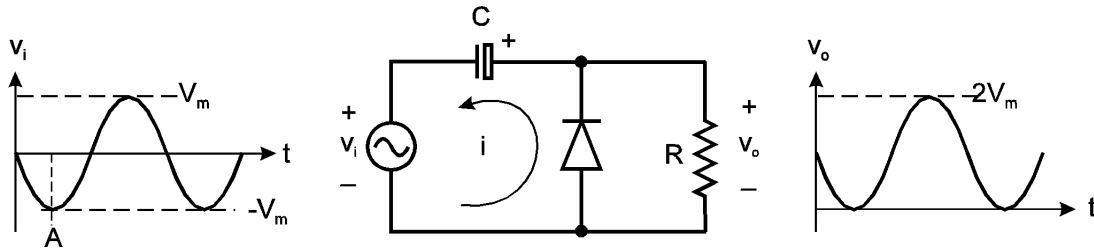


Şekil 2.14 Öngerilimli iki diyotlu paralel kırpıcı.

## KENETLEYİCİ DEVRELER

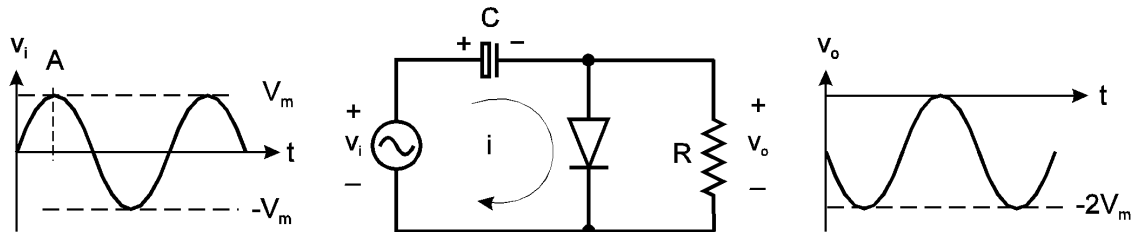
Kenetleyici devreler ac bir işarete dc bir seviye eklemek için kullanılır. Kenetleyiciler televizyon alıcılarında dc seviye elde etmek için kullanılır. Alıcıya gelen video işareti genellikle kapasitif bir amplifikatör ile yükseltilir. Yükseltme işlemi dc bileşenin yani siyah, beyaz ve boşluk seviyelerinin kaybolmasına neden olur. Video işareti resim tüpüne uygulanmadan önce bu referans seviyeler kenetleyici yeniden elde edilir.

Şekil 2.15'te pozitif dc kenetleyici gösterilmiştir. A noktasına kadar kondansatör şarj olur. Daha sonra kondansatör geriliminin sabit kaldığı kabul edilir. Devrede kondansatörün deşarjı R üzerinden olur. RC zaman sabiti uygulanan giriş sinyalinin periyodundan çok büyüktür. Çıkış gerilimi sabit olan kondansatör gerilimi ile giriş geriliminin toplamıdır.



Şekil 2.15 Pozitif bir dc kenetleyici.

Kenetleyici devreler giriş işaretini negatif dc seviyeye de kaydırabilir. Kenetleyici devre içinde dc bir gerilim kaynağı kullanılarak farklı dc seviyeler de elde edilebilir. Şekil 2.16'da negatif bir dc kenetleyici gösterilmiştir.

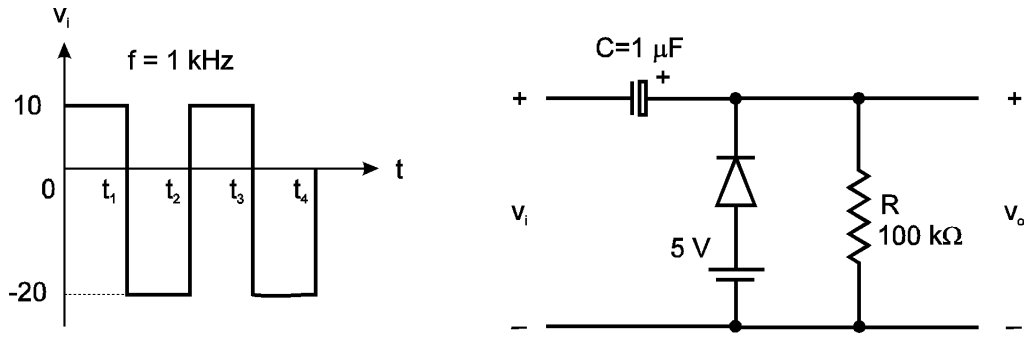


Şekil 2.16 Negatif bir dc kenetleyici.



**Uygulama 8 :**

Aşağıda verilen kenetleyici devrede giriş gerilimi için çıkış gerilimini çiziniz.

**Çözüm :**

Devre girişine uygulanan işaretin frekansı 1 kHz olduğuna göre darbe periyodu,

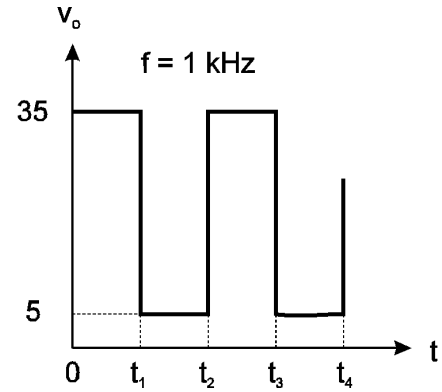
$$T = 1 / f = 1 \text{ ms}$$

olarak bulunur. RC zaman sabiti,

$$R.C = 100k.1\mu = 100.10^3.1.10^{-6} = 100.10^{-3} = 100 \text{ ms.}$$

RC zaman sabiti darbe periyodundan çok büyük olduğu için kondansatör geriliminin R üzerinden deşarj olmadığı kabul edilir.

Analize diyodun iletimde olduğu aralıktan başlayalım.  $t_1 - t_2$  aralığında diyot iletimdedir. Devrenin girişinde  $-20 \text{ V}$  gelmektedir. Yani alt ucuna  $+20 \text{ V}$  uygulanmıştır. Diyot bu aralıkta Anot-Katot gerilimi pozitif olduğundan iletime girer ve çıkış gerilimi  $5 \text{ V}$  olur. Kondansatör ise şekilde gösterildiği gibi  $+25 \text{ V}$ 'a şarj olur.  $t_2 - t_3$  aralığında diyot kesime girer. Çıkış gerilimi giriş gerilimi ile kondansatör geriliminin toplamıdır.  $v_o = 10 \text{ V} + 25 \text{ V} = 35 \text{ V}$ . Çıkış geriliminin değişimi yanda verilmiştir.

**Zener Diyot**

Normal diyotlarda ters devrilme olayı istenmez. Zener diyotlar ise belirli bir güce kadar ters devrilme bölgesinde kullanılabilir. Ters kutuplanmış bir diyodun devrilmesi iki şekilde olur.

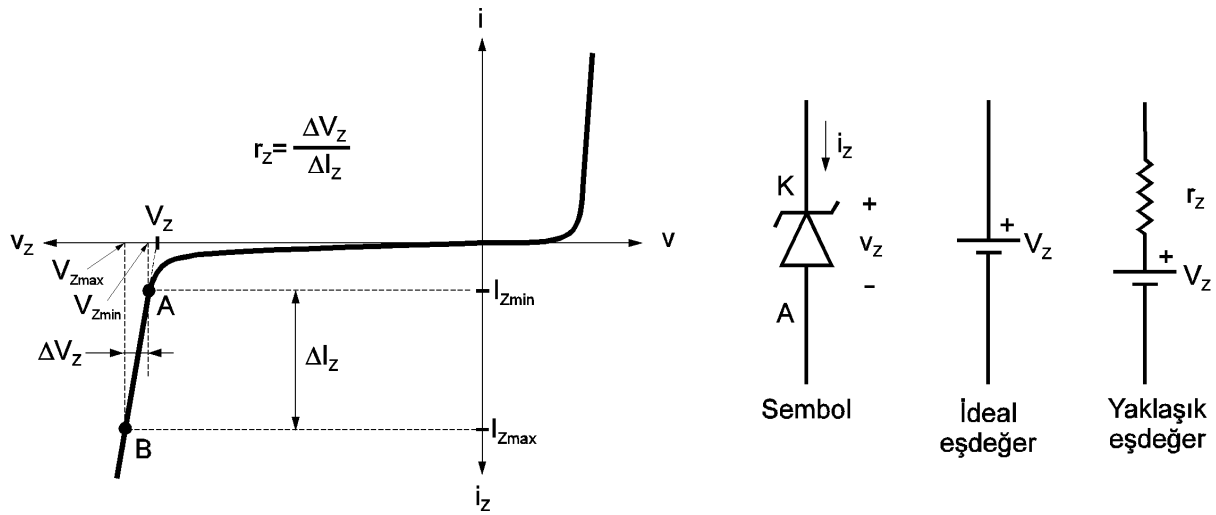
- 1- Çığ devrilme: Ters kutuplama ile hızlanan azınlık taşıyıcıların kovalent bağdaki valans elektronları koparması ile oluşur. Çığ devrilme diyoda 5 volttan daha büyük bir ters gerilim uygulandığında oluşur.
- 2- Zener devrilme : Boşluk bölgesi dar olması durumunda meydana gelen yüksek elektrik alanı nedeniyle oluşur. Bu elektrik alanı kovalent bağdaki valans elektronları koparak diyottan ters yönde yüksek akım geçmesine neden olur. Zener devrilme 5 volttan küçük gerilimlerde oluşur. Katkı oranının artırılması boşluk bölgesini daraltır. Boşluk bölgesinde oluşan elektrik alanı (uzaklık ile ters orantılı) ise artar. Dolayısıyla katkı oranının artırılması zener diyodun devrilme gerilimini azaltır.

Zener diyodun karakteristiği, sembolü ve eşdeğer devreleri Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Zener diyot ileri yönde kutuplanırsa normal bir diyot gibi davranır. Uygulamalarda zener diyot ters devrilme bölgesinde kullanılır. Karakteristik eğride iki önemli nokta gösterilmiştir. A noktası zener diyodunun ters devrilme noktasıdır. Zener diyodun A noktasında çalışabilmesi için, diyottan minimum bir akım geçmesi gerekir. Bu durumda zener gerilimi minimumdur. B noktasında diyottan maksimum akım geçer ve zener gerilimi maksimumdur. B noktasındaki akım değeri katalogda verilen  $I_{ZM}$  değerini aşmamalıdır. Zener diyotlar 1.8 V ile 200 V arasındaki gerilim değerlerinde ve 1/4 W ile 50 W arasındaki güç değerlerinde üretilmektedir.

Zener diyodun ideal eşdeğeri bir gerilim kaynağı kabul edilir. Yaklaşık eşdeğeri ise bir direnç ve kaynak geriliminin toplamı olarak verilir.

$$v_z = V_z + r_z \cdot i_z$$

Zener diyodun iç direncinin tanımı karakteristik eğri üzerinde gösterilmiştir. İç direnç ne kadar küçük olursa, zener uçlarındaki gerilimin akım ile değişmesi o kadar az olur. Zener diyot, regülasyon ve referans gerilim sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.17. Zener diyodun karakteristiği, sembolü ve eşdeğer devreleri.

Zener diyodun devrilme gerilimi sıcaklıkla değişir. Kataloglarda gerilimin  $^{\circ}\text{C}$  başına yüzde olarak değişmesini gösteren bir sıcaklık katsayısı ( $K_T$ ) verilir. Örneğin 15 V’luk bir zener diyotta  $K_T = 0.2 \% / ^{\circ}\text{C}$  ise,  $1^{\circ}\text{C}$ ’lik artış zener geriliminin 0.03 V artmasına neden olur. Sıcaklık katsayısı zener devrilme bölgesinde çalışan diyotlarda negatif, çığ devrilme bölgesinde çalışan diyotlarda pozitifdir. Zener gerilimi arttıkça sıcaklık katsayısı da artar.

### Uygulama : 9

Biz zener diyodun akımında 2 mA’lık bir değişme olduğunda, uçlarındaki gerilim 50 mV değişmektedir. Zener direncini hesaplayınız.

### Çözüm :

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z} = \frac{50 \text{ mV}}{2 \text{ mA}} = 25 \Omega$$

**Uygulama : 10**

Gerilimi 10 V ve iç direnci  $5 \Omega$  olan zener diyottan 20 mA geçmesi durumunda uçlarındaki gerilimin ne olacağını bulunuz.

**Çözüm:**

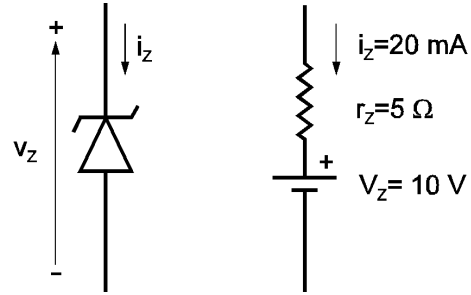
Direnç uçlarındaki gerilim,

$$r_Z \cdot i_Z = 5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0.1 \text{ V}$$

bulunur. Zener uçlarındaki gerilim,

$$v_Z = V_Z + r_Z \cdot i_Z = 10 + 0.1 = 10.1 \text{ V}$$

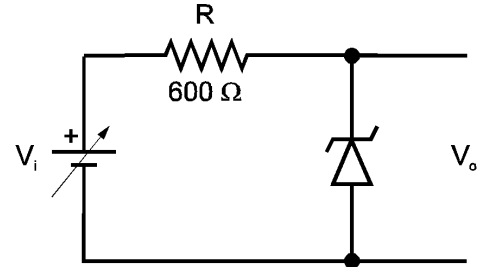
olur. 20 mA akım geçtiğinde zener diyot gerilimi % 10 artar.

**Uygulama : 11**

Şekilde verilen devrede giriş geriliminin hangi aralığında regülasyon sağlanacağını hesaplayınız.

$$I_{Z \min} = 1 \text{ mA}, I_{Z \max} = 15 \text{ mA}$$

$$V_Z = 5.1 \text{ V}, r_Z = 10 \Omega$$

**Çözüm:**

$$I_{Z \min} = 1 \text{ mA için;}$$

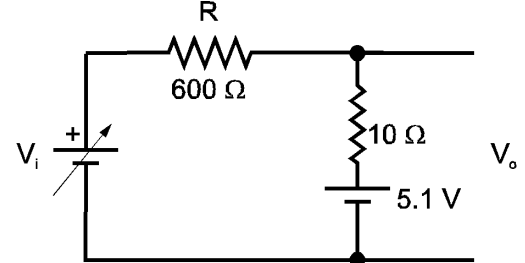
$$V_o = V_Z + r_Z \cdot I_{Z \min} = 5.1 + 10 \cdot 1 \text{ mA} = \underline{5.11 \text{ V}}$$

$$V_{i \min} = R \cdot I_{Z \min} + V_o = 600 \cdot 1 \text{ mA} + 5.11 = \underline{5.71 \text{ V}}$$

$$I_{Z \max} = 15 \text{ mA için;}$$

$$V_o = V_Z + r_Z \cdot I_{Z \max} = 5.1 + 10 \cdot 15 \text{ mA} = \underline{5.25 \text{ V}}$$

$$V_{i \max} = R \cdot I_{Z \max} + V_o = 600 \cdot 15 \text{ mA} + 5.25 = \underline{14.25 \text{ V}}$$



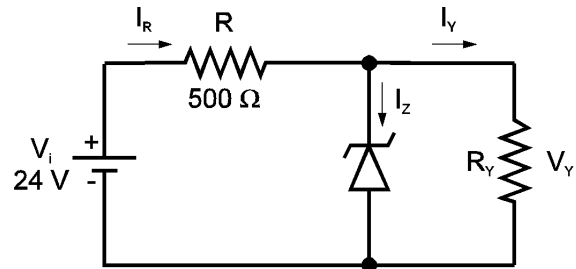
Girişe değişken bir giriş gerilimi uygulanması ile çıkış geriliminin değişmemesi istenmektedir. Çıkış geriliminin regüle edilebilmesi için girişe 5.71 V ile 14.25 V aralığında bir gerilim uygulanması gerekir. Bu durumda çıkış gerilimi 5.11 V ile 5.25 V arasında bir değer alır.

**Uygulama : 12**

Şekilde verilen devrede  $I_{Z \min} = 3 \text{ mA}$ ,

$I_{ZM} = 90 \text{ mA}$ ,  $V_Z = 12 \text{ V}$ ,  $r_Z = 10 \Omega$  olan bir zener diyot kullanılmıştır.

- Regülasyon sağlanabilmesi için  $R_Y$  direncinin minimum değerini hesaplayınız ( $r_Z = 0$  alınır).
- Çıkış geriliminin akıma bağlı değişimini çizin. Çıkış gerilimindeki bağıl regülasyonu hesaplayınız.



**Çözüm:**

a) Devrede yük bağlı değil iken, R direncinden geçen akım maksimum olur. Bu akım aynı zamanda zenerden geçer.

$$I_{R \max} = I_{Z \max} = \frac{V_i - V_Z}{R} = \frac{24 - 12}{500} = 24 \text{ mA} \quad I_{Z \max} < I_{ZM}$$

Zenerden geçen maksimum akım  $I_{ZM}$  değerini geçmemelidir. Devrede  $I_{Z \max} < I_{ZM}$  şartı sağlandığından R direncinin değeri uygundur. Bu devrede R direnci biraz daha küçük seçilebilir.

Yük akımı maksimum iken zenerden geçen akım minimumdur. Zener diyodun regülasyon yapması için  $I_{Z \min} = 3 \text{ mA}$  değerinde bir akım zenerden geçmelidir. Yük akımından geçen maksimum akım ve minimum yük direnci aşağıdaki gibi hesaplanır.

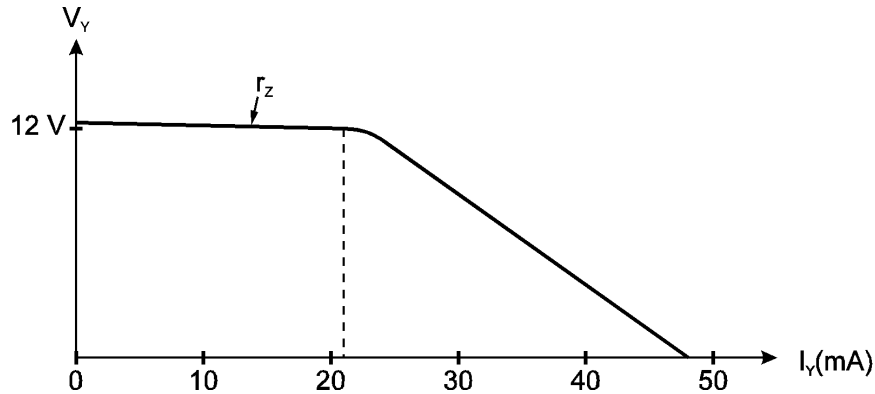
$$I_{Y \max} = I_{R \max} - I_{Z \min}$$

$$I_{Y \max} = 24 \text{ mA} - 3 \text{ mA} = 21 \text{ mA}$$

$$R_{Y \min} = \frac{V_Y}{I_{Y \max}} = \frac{12}{21 \text{ mA}} = 570 \Omega$$

$$\underline{R_Y > 570 \Omega \text{ olmalıdır.}}$$

Yük geriliminin değişimi akıma göre aşağıdaki gibi çizilebilir. Yük akımı 21 mA olana kadar zener diyot regülasyon sağlar. Bu aralıkta doğrunun eğimi  $r_Z$  direncini verir. Bu değerden sonra zener diyot çok az akım geçirir ve yüksek direnç gösterir. Çıkış kısa devre edilirse gerilim sıfır olur, akımı sadece R direnci sınırlar. Kısa devre akımı  $24\text{V}/500 = 48 \text{ mA}$ 'dir.



b) Boşta çalışmada yük akımı sıfırdır ve zenerden maksimum akım geçer. Bu durumda zener gerilimi (yük gerilimi) maksimum olur.

$$V_{Y \max} = V_{Z \max} = V_Z + r_Z \cdot I_{Z \max} = 12 + 10 \cdot 21 \cdot 10^{-3} = 12.21 \text{ V}$$

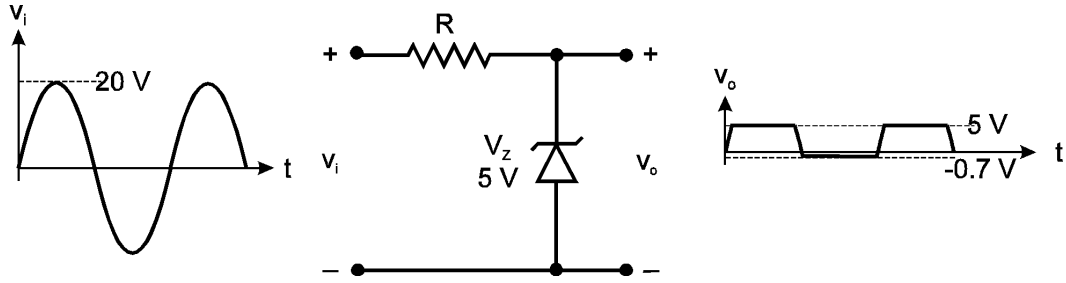
Yük akımı maksimum olduğunda zenerden geçen akım minimumdur. Bu durumda zener gerilimi (yük gerilimi) minimum olur.

$$V_{Y \min} = V_{Z \min} = V_Z + r_Z \cdot I_{Z \min} = 12 + 10 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 12.03 \text{ V}$$

$$\text{Bağıl Yük Regülasyonu} = \frac{12.21 - 12.03}{12} \times 100 = \% 1.5$$

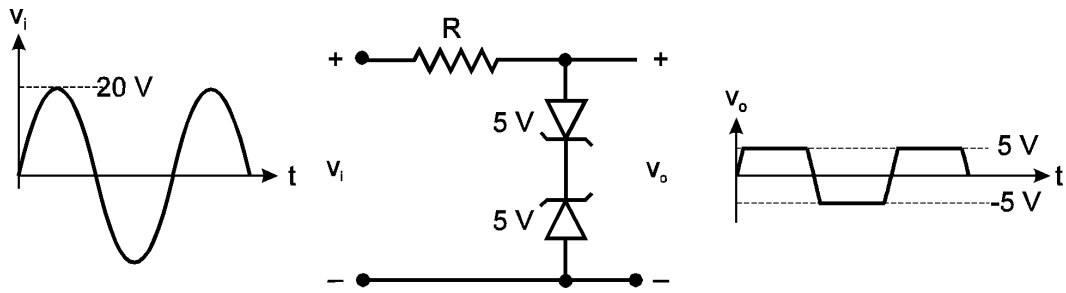
**Zenerli AC regülatör (AC Sınırlayıcı)**

Zener diyot, elektronik eleman ve entegre devrelerin girişlerini aşırı gerilimlerden korumak için kullanılabilir. Şekilde 2.18’de gerilimi tek yönde kırpa devresi gösterilmiştir. Devrede giriş geriliminin pozitif bölgesinde zener geriliminin üstünü kırpar. Negatif alternansta normal diyot gibi davranır ve ilettime girer.



Şekil 2.18. Tek yönlü kırpıcı

Gerilimi iki yönde kırmak için Şekilde 2.19’de verilen devre kullanılabilir. Pozitif alternansta Z1 diyodu normal, Z2 diyodu ise zener diyot gibi davranır. Negatif alternansta ise Z2 normal diyot, Z1 zener diyot gibi davranır. Zener diyotların gerilimleri uygun seçilerek giriş gerilimi istenilen seviyede kırılabilir.



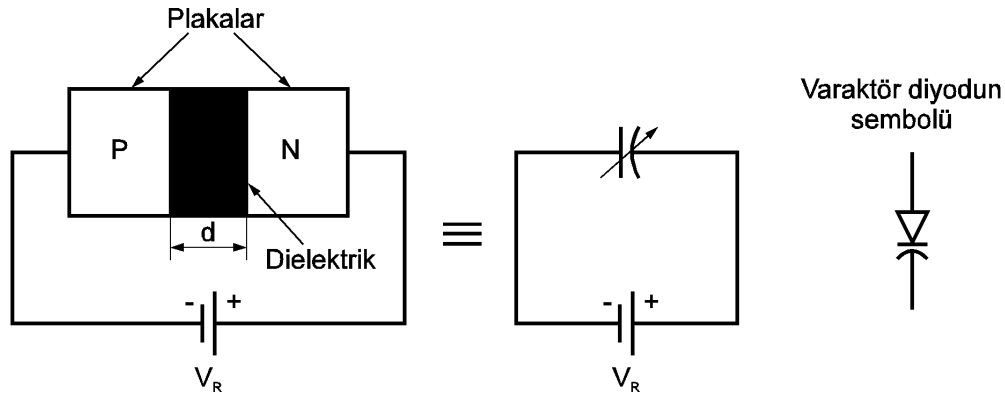
Şekil 2.19. İki yönlü kırpıcı

**Varaktör Diyotlar**

Ters gerilim uygulanan diyot bir kapasite gibi davranır. Normal diyotlarda ters gerilim uygulandığında bir boşluk bölgesi oluşur. Bu boşluk bölgesi uygulanan ters gerilim ile artar. Boşluk bölgesi akım geçirmediğinden yalıtkan kabul edilir. P ve N bölgeleri ise iletken olduğundan kapasitenin plakaları gibi davranır. Normal diyotların kapasitesi uygulanan ters gerilime bağlı olarak az miktarda değişir. Katkılama miktarı jonksiyon civarında arttırılarak kapasitenin değişme oranı yükseltilebilir. Bu şekilde yapılan özel diyotlara varaktör diyot denir. Varaktör diyotların kapasitesi gerilimle değiştirebilir. Diyodun kapasitesi,

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

olarak hesaplanır. Burada  $\epsilon$  geçirgenlik, A jonksiyonun alanı ve d jonksiyonun genişliğidir. Diyoda ters gerilim uygulandığında oluşan kapasite ve varaktör diyodun eşdeğeri Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Ters gerilim arttıkça boşluk bölgesi artar ve kapasite azalır. Kapasitenin gerilime bağlı değişimi Şekil 2.21’de gösterilmiştir. Bir potansiyometre ile diyoda gelen ters gerilim değiştirilerek varaktör diyodun kapasitesi kontrol edilebilir. Varaktör diyot, radyolarda frekansın ayarlanmasında ve televizyonların elektronik tuner devrelerinde yaygın olarak kullanılır.



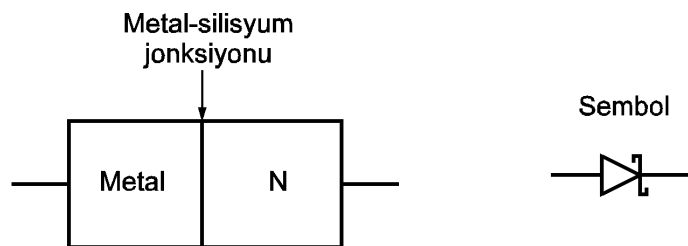
Şekil 2.20. Diyoda ters gerilim uygulandığında oluşan kapasite ve varaktör diyodun eşdeğeri.



Şekil 2.21 . Bir varaktör diyotta kapasitenin gerilime bağlı değişimi.

## Schottky Diyotlar

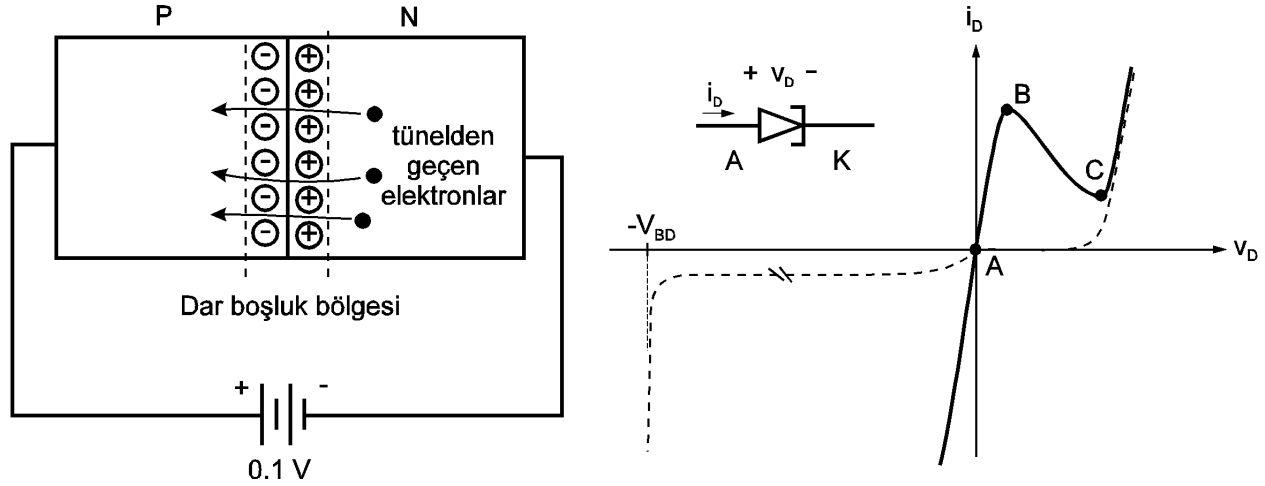
Schottky diyotlar çok yüksek frekanslarda ve hızlı anahtarlama uygulamalarında kullanılır. İletim gerilim düşümünün azlığı ve yüksek anahtarlama hızından dolayı özellikle anahtarlama güç kaynaklarında verim açısından tercih edilir. Hızlarının yüksekliği sebebiyle entegre (IC) devrelerde kullanılır. Schottky diyotta P tipi malzeme yerine altın, gümüş, platin gibi bir metal kullanılır. Metalde iletim bandında çok sayıda elektron mevcuttur. P-N diyodunda mevcut olan boşluk bölgesi Schottky diyotta yoktur ve düşük bir gerilimle iletme girer. Pozitif kutuplama ile N bölgesindeki yüksek enerjili elektronlar metale (P bölgesine) geçerek bu bölgedeki elektronların enerjilerini artırır. Schottky diyot, P-N diyoda göre çok hızlıdır. Çünkü bu diyot sadece çoğunluk akım taşıyıcıları ile çalışır. Serbest elektronların hareketi deliklerin hareketine göre çok hızlıdır. Schottky diyodun yapısı ve sembolü Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. Shottky diyodun yapısı ve sembolü.

## Tünel Diyot

Tünel diyot, P ve N bölgelerinde jonksiyon civarındaki katkılanma miktarı artırılarak yapılan bir diyottur. Bilindiği gibi katkılama miktarının artırılması boşluk bölgesini daraltır ve zener gerilimini azaltır. Tünel diyotta boşluk bölgesinin genişliği normal diyodun yüzde biri kadar küçüktür. Bu nedenle çok küçük bir ileri gerilim diyottan akım geçmesine neden olur. Tünel diyodun yapısı, karakteristiği ve sembolü Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. Tünel diyodun yapısı, karakteristiği ve sembolü.

Şekilde gösterildiği gibi tünel diyodun karakteristiği belirli bir bölgeden sonra normal diyot ile aynıdır. Tünel diyodun çalışması şu şekildedir. A noktasında bir gerilim uygulanmamıştır ve diyottan akım geçmez. A noktasının altında çok küçük ters bir gerilim uygulandığında diyottan geçen akım ters gerilimle hızlı bir şekilde artar. Diyoda küçük bir pozitif gerilim uygulandığında akım geçer ve pozitif gerilimin artırılması ile akım artar. B noktasından C noktasına kadar akım azalır. B ile C arasında diyodun dinamik direnci negatiftir. Gerilimdeki artış akımda azalmaya neden olur. Tünel diyot bu özelliği nedeniyle osilatör devrelerinde kullanılır.

Tünel diyotta boşluk bölgesini geçen elektronların hızı, normal diyotta difüzyon ile yayılan elektronlara göre çok yüksektir. Tünel diyotta elektronlar P-N jonksiyonu civarında ışık hızına yakın bir hızla hareket eder. Tünel diyot bu nedenle çok yüksek frekanslarda ( $10^7$  MHz'e kadar) kullanılabilir.

## Işık Yayan Diyotlar (LED)

P-N diyot doğru yönde kutuplandığında, N-tipi malzemedeki serbest elektronlar difüzyon ile P bölgesine geçer. Elektronlar P bölgesinde deliklerle birleşerek valans elektron haline gelir. N bölgesinde iletim bandında bulunan elektronların, P bölgesinde valans bandına geçmeleri enerji kaybetmelerine neden olur. Bu enerji kaybı silisyum ve germanyum diyotlarda ısıya dönüşür. Galliyum arsenid ve galliyum fosfat gibi malzemelerden yapılan diyotlarda bu enerjinin bir miktarı ışık enerjisine (fotonlara) dönüşür. Yayılan ışığın enerjisi ve frekansı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E = h \times f$$

$$h = 4.137 \times 10^{-15} : \text{Planck sabiti (Elektronvolt / Hertz)}$$

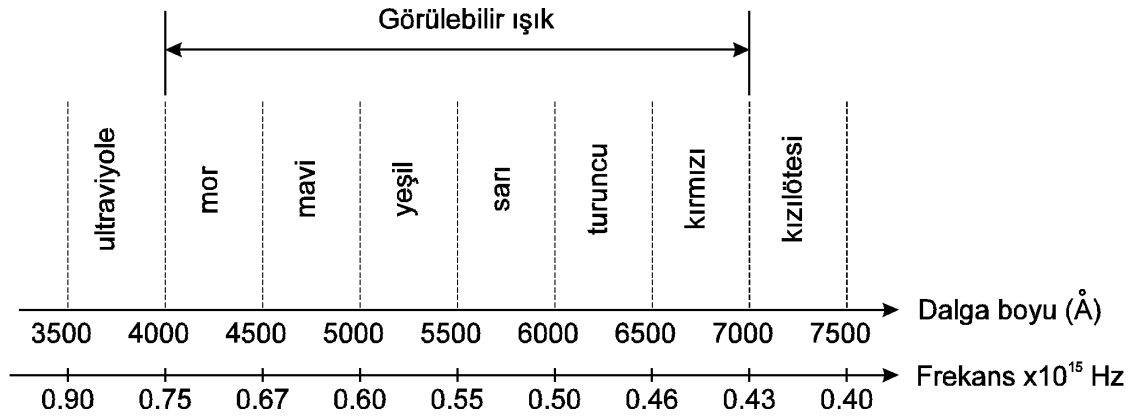
E burada elektronun kaybettiği enerjidir. Enerji ne kadar büyük olursa yayılan ışığın frekansı o kadar yüksektir. Elektronlar elektrik enerjisini taşıdığı gibi, fotonlar ışık enerjisini taşıyan, ağırlığı ve yükü olmayan küçük parçacıklardır. Işık emen cisim enerji almış olur ve ısınır. Bir madde ne kadar çok ısınırsa yaydığı ışıkların dalga boyları o kadar kısa olur. Işığın hızı ile elektromanyetik dalganın hızı aynı olup  $c = 3 \times 10^8$  metre / saniye'dir. Işığın frekansı ile dalga boyu arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Dalga boyu, ışık veya elektromanyetik dalganın bir periyodunda kaç metre yol aldığını gösterir. Yüksek frekanslarda uzunluk birimi olarak metre yerine, milimetrenin onmilyonda biri olan angstrom kullanılır.

$$1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ metre}$$

Farklı renkteki ışık enerjilerinin frekans ve dalga boyları Şekil 2.24'te gösterilmiştir. İnsan gözü 3800-7000 angstrom dalga boyundaki ışıkları görebilir. Gözün en iyi algıladığı renkler sarı ile sarı-yeşil renk bölgeleridir. Güneş ışığı bütün ışıkları eşit içerdiği için beyaz ışık olarak görünür.



Şekil 2.24. Işık enerjisinin frekans ve dalga boyu spektrumu.

### Uygulama : 13

Dalga boyu 7000 Å olan kırmızı ışık fotonlarının enerjisini hesaplayınız.

### Çözüm :

Işığın frekansı,

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{7000 \times 10^{-10}} = 0.43 \times 10^{-15} \text{ Hz}$$

Fotonların enerjisi,

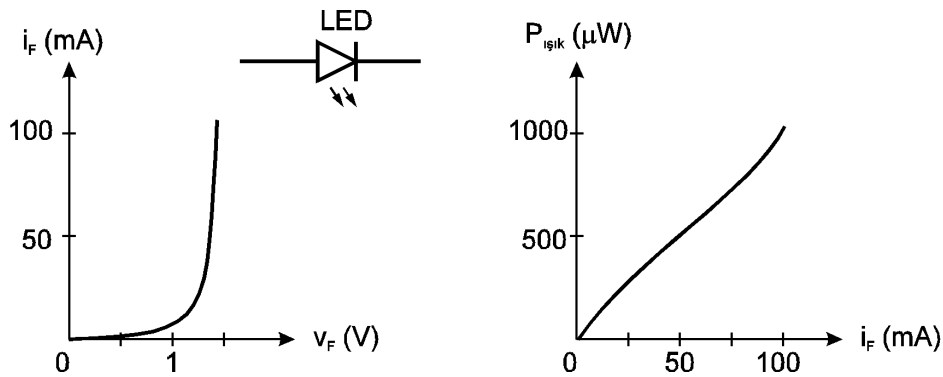
$$E = h \times f = 4.137 \times 10^{-15} \times 0.43 \times 10^{-15} = 1.78 \text{ eV.}$$



Ledlerde galyum arsenit (GaAs), galyum fosfat (GaP), galyum arsenit fosfat (GaAsP) gibi maddeler kullanılır. Bu malzemelerin karıştırılması ve katkılama oranının ayarlanması ile LED'lerin istenilen dalga boyunda ışık vermesi sağlanır. LED'ler kırmızı, turuncu, sarı ve beyaz renklerde üretilmektedir.

### LED Karakteristikleri

LED'in V-I karakteristiği, sembolü ve yaydığı ışığın gücü Şekil 2.25'te verilmiştir. LED'in iletim gerilim düşümü 1 V ve geçen akım 100 mA civarındadır. Buna rağmen ışığa dönüşen güç  $\mu W$  seviyesindedir. Elektrik enerjisinin ışık enerjisine dönüşümündeki verim çok düşüktür. LED'lerin güç ihtiyacı 10 ile 150 mW arasında değişir ve ömürleri 100.000 saatten fazladır. LED'lerin ters dayanma gerilimleri 3-4 V civarındadır.



Şekil 2.25. LED'in V-I karakteristiği, sembolü ve yaydığı ışığın gücü.

### Diyot Katalog Bilgileri

Genel olarak üreticilerin kataloglarda diyotlarla ilgili verdikleri bilgiler 3 kısımda toplanabilir. Bunlar ileri yönde akım-gerilim, ters yönde akım-gerilim ve sıcaklıkla ilgili değerlerdir. Ayrıca mekanik özellikler ve kısa bilgiler de verilir. Diyodun türüne göre parametre çeşitleri değişebilir. Örneğin, zener diyot ile doğrultucu diyodun kataloglarında farklılıklar mevcuttur. Aşağıda bir doğrultucu diyodunda kullanılan genel kısaltmalar ve açıklamaları verilmiştir.

#### Maksimum Değerler ve Termal Karakteristikler

- $V_{RRM}$  : Ters yönde dayanabileceği pik gerilim
- $V_{RMS}$  : Ters yönde dayanabileceği efektif gerilim
- $V_{DC}$  : Ters yönde dayanabileceği DC gerilim
- $I_{F(AV)}$  : Diyottan geçebilecek maksimum doğrultulmuş akım
- $I_{FSM}$  : Diyottan geçebilecek tek bir yarım dalga sinüs şeklindeki akımın tepe değeri
- $R_{\theta}$  : Termik direnç
- $T_A$  : DC gerilimin tutulduğu maksimum sıcaklık
- $T_J$  : Jonksiyonun çalışma sıcaklık aralığı

#### Elektriksel Karakteristikler

- $V_F$  : İleri yönde maksimum ani gerilim düşümü
- $I_R$  : Nominal ters DC gerilimde geçen maksimum ters akım
- $C_J$  : Tipik jonksiyon kapasitesi

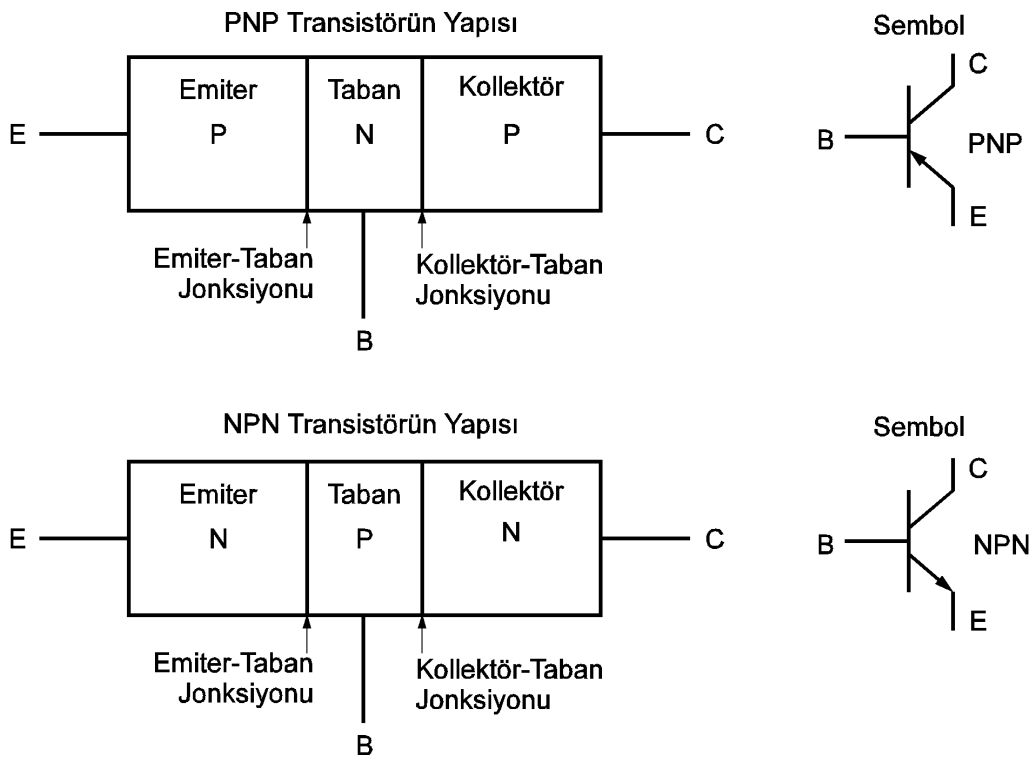
# ANALOG ELEKTRONİK

<b>BİPOLAR TRANSİSTÖR</b>	<b>35</b>
Yapısı ve Sembolü.....	35
Transistörün Çalışması .....	35
Aktif Bölge .....	36
Doyum Bölgesi .....	37
Kesim Bölgesi.....	37
Ters Çalışma Bölgesi.....	37
Ortak Tabanlı Devre .....	37
Kesimde Bölgesi.....	38
Aktif Bölge ve Doyum Bölgesi .....	38
Uygulama 1 : .....	38
Çözüm : .....	38
Uygulama 2: .....	39
Çözüm: .....	39
Ortak Emiterli Devre .....	40
Uygulama 3: .....	40
Çözüm.....	40
Ortak emiterli devrede çıkış karakteristiği .....	41
Kesim Bölgesi.....	41
Aktif Bölge ve Doyum Bölgesi .....	42
Uygulama 4: .....	42
Çözüm : .....	42
Ortak Kollektörlü Devre .....	43
Uygulama 5: .....	43
Çözüm : .....	43
Transistörün maksimum değerleri .....	44
Uygulama 6: .....	44
Çözüm: .....	44
Kutuplama Amacı.....	45

## BİPOLAR TRANSİSTÖR

### Yapısı ve Sembolü

Bipolar transistör iki jonksiyonlu ve üç uçlu bir elemandır. Diyodun çalışmasındaki prensipler kullanılarak bipolar transistörün çalışması açıklanabilir. “Bipolar transistör” yerine genellikle sadece “transistör” kelimesi kullanılmaktadır. NPN ve PNP olmak üzere iki çeşit transistör vardır. Transistör, emiter, taban ve kollektör uçlarından oluşur. NPN transistörde taban (baz), iki N bölgesi arasındadır. N bölgelerinden biri emiter, diğeri kollektördür. PNP transistörde ise taban, iki P bölgesi arasındadır. P bölgelerinden biri emiter, diğeri kollektördür. Transistörde taban bölgesinin genişliği ve katkılama oranı, emiter ve kollektöre göre çok küçüktür. Emiter ve kollektör aynı tür malzeme olmakla birlikte emiterin katkılama oranı kollektöre göre çok yüksektir. Şekil 3.1’de NPN ve PNP transistörlerin yapı ve sembolleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. NPN ve PNP transistörlerin yapı ve sembolü.

### Transistörün Çalışması

Transistörde iki jonksiyon mevcuttur. Emiter ile taban arasındaki jonksiyon ve taban ile kollektör arasındaki jonksiyon. Bu iki jonksiyonun kutuplanmasına göre transistör farklı bölgelerde çalışır. Tablo 3.1’de transistörün çalışma bölgeleri gösterilmiştir.

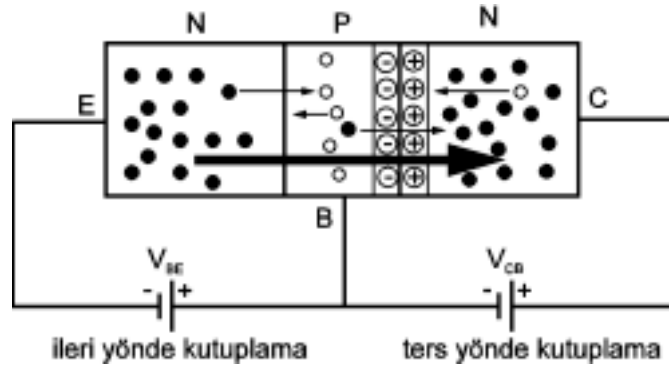
Tablo.3.1 Transistörün çalışma bölgeleri.

Çalışma Bölgesi	E-B jonksiyonu	C-B jonksiyonu
Aktif	İleri kutuplama	Ters kutuplama (veya boş)
Doyma	İleri kutuplama	İleri kutuplama
Kesim	Ters kutuplama	Ters kutuplama (veya boş)
Ters	Ters kutuplama	İleri kutuplama

**Aktif Bölge**

Transistörün dört farklı çalışma bölgesinden öncelikle aktif bölgeyi inceleyelim. NPN bir transistörün aktif bölgede çalışması için kutuplamanın nasıl yapıldığı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Aktif bölgede çalışan bir NPN transistörde E-B jonksiyonu ileri yönde, C-B jonksiyonu ters yönde kutuplanır. Emiter bölgesinde çoğunluk akım taşıyıcıları olan elektronlar kaynağın (-) ucu tarafından itilerek taban bölgesine doğru hareket eder. Taban bölgesinin dar olması ve az miktarda katkılanması sebebiyle, emiter bölgesindeki elektronların çok azı taban bölgesindeki deliklerle birleşir, çoğunluğu kollektör bölgesine geçer. Bunun nedeni C-B jonksiyonunun ters kutuplanmasıdır. Emiterdeki elektronlar, kollektöre bağlı (+) gerilim kaynağı tarafından çekilir. Aynı zamanda C-B’de oluşan boşluk bölgesi emiterden gelen elektronların hareketini destekler. Emiterden gelen elektronların yaklaşık olarak % 99’u kollektöre gider. Bu akım kalın okla gösterilmiştir. Transistördeki diğer akımlar bu akımın yanında çok küçüktür. Emiter elektronları yayan bölgedir. Kollektör ise bu elektronların toplandığı bölgedir. Emiterden gelen elektronların yaklaşık olarak % 1’i tabana doğru gider. Bu esnada taban bölgesindeki deliklerin bir kısmı da emitere doğru hareket eder. Tabanın katkılama oranı çok düşük olduğundan bu akım da çok küçüktür.

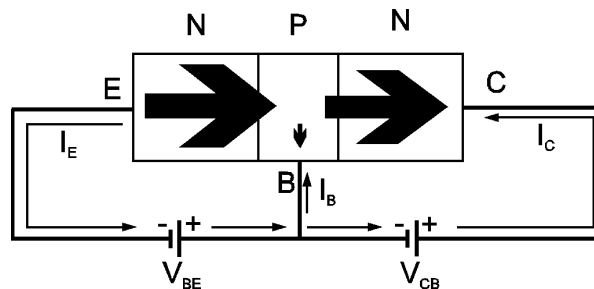
C-B jonksiyonunun ters yönde kutuplanması ile boşluk bölgesi oluşur ve sızıntı akımı geçer. B’de azınlık azınlık akım taşıyıcıları olan elektronlar C’ye doğru, C’de azınlık akım taşıyıcıları olan delikler B’ye doğru hareket eder. B-E uçlarına bir gerilim uygulanmadığında, C-B’den geçen sızıntı akımı  $I_{CB0}$  sembolü ile gösterilir.



Şekil 3.2. Aktif bölgede çalışan bir NPN transistörün kutuplanması.

İleri yönde uygulanan  $V_{BE}$  geriliminin değeri, transistörden geçen emiter akımın miktarını belirler. Ters yönde uygulanan  $V_{CB}$  geriliminin kollektör akımına etkisi çok azdır.  $V_{CB}$  geriliminin arttırılması boşluk bölgesini genişletir ve baz bölgesini daraltır. Bu durumda emiterden kollektöre gelen elektronlar artar, tabana gelen elektronlar azalır.

Devre çözümünde kabul edilen akım yönü elektron akışının tersidir. NPN transistörün aktif bölgede çalışması durumunda elektronların akışı ve akım yönü Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. NPN transistörde akım yönleri.

Transistörde taban akımı ile kollektör akımının toplamı emiter akımını verir. Taban akımı, emiter ve kollektör akımına göre çok küçüktür. Kollektör akımının emiter akımına oranı 1'e yakındır. Bu oran DC akım kazancını verir ve  $\alpha_{DC}$  ile gösterilir.

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_B \ll I_E$$

$$I_C = \alpha_{DC} I_E + I_{CB0}$$

$$I_{CB0} \approx 0 \Rightarrow I_C \cong \alpha_{DC} I_E$$

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E}, \text{ DC akım kazancı, } 0.95 < \alpha_{DC} < 0.999$$

### **Doyum Bölgesi**

Tablo 3.1'de gösterildiği gibi her iki bölge de ileri yönde kutuplanırsa çalışma doyum bölgesinde olur. Doyumda C-B jonksiyonundaki boşluk bölgesi ortadan kalkar. Kollektörün emiterden gelen akım taşıyıcıları toplama özelliği büyük ölçüde azalır. Eğer C-B jonksiyonundaki ileri kutuplama yeterli ise kollektör emiterden gelen akım taşıyıcılarını toplamaz ve emiter gibi tabana doğru akım taşıyıcı yayar.

### **Kesim Bölgesi**

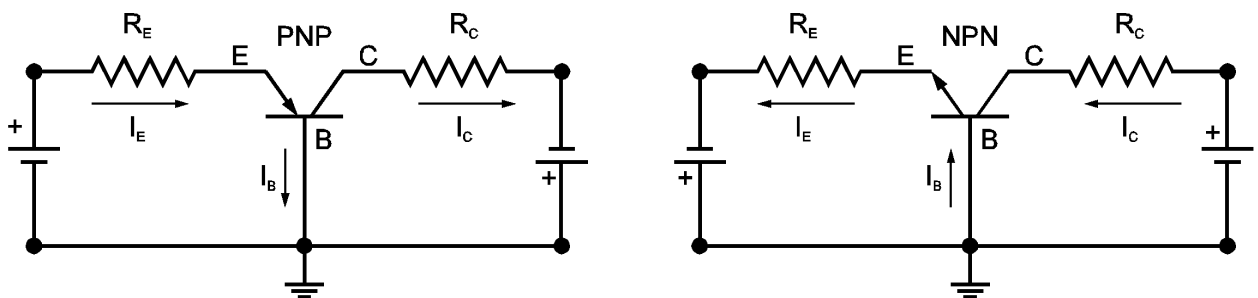
Transistörün her iki jonksiyonu ters yönde kutuplanırsa çalışma kesim bölgesinde olur. Emiter taban bölgesine çoğunluk akım taşıyıcı göndermez. Emiter ve kollektörden sızıntı akımı geçer. Emiter akımının sıfır olması da kesim bölgesinde çalışmadır.

### **Ters Çalışma Bölgesi**

Transistörde kollektör ve emiter yer değiştirilerek kullanılırsa bu bölge ters çalışma bölgesidir. Emiter ve kollektörün katkılama oranı aynı olmadığı için bu bölgedeki çalışma, aktif bölgeden farklıdır. Kollektör ve emiterin değiştirilmesi genellikle mümkün değildir. Fakat bazı özel devrelerde transistör bu şekilde kullanılabilir.

### **Ortak Tabanlı Devre**

Üç uçlu bir devre elemanında bir ortak uç, bir giriş ucu ve bir çıkış ucu vardır. Ortak uca göre transistör devreleri farklı karakteristik gösterir. Ortak uç taban ise ortak tabanlı devre oluşur. NPN ve PNP transistörlerin ortak tabanlı devresi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Ortak tabanlı devrede giriş akımı emiter, çıkış akımı ise kollektör akımıdır. Çıkış akımının giriş akımına oranı DC akım kazancını verir ve  $\alpha_{DC}$  olarak tanımlanır.



Şekil 3.4. NPN ve PNP transistörlerde ortak tabanlı devreler.

**Kesimde Bölgesi**

Kesim durumunda emiterden bir akım geçmez ve kollektör akımı oluşmaz. Transistörün kesimde olmasının sebebi aşağıdakilerden biri olabilir.

- Emiter ucunun açık olması
- E-B jonksiyonun kutuplanmaması ( $V_{BE} = 0$ )
- İleri yöndeki E-B jonksiyon geriliminin yeterli olmaması
- E-B jonksiyonuna ters yönde gerilim uygulanması

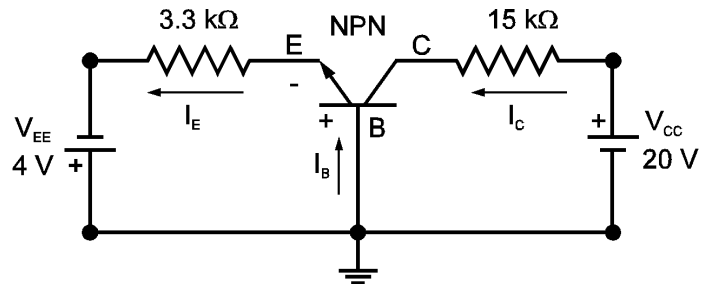
**Aktif Bölge ve Doyum Bölgesi**

E-B jonksiyonu yeterli bir ileri gerilim ile kutuplanırsa, emiter akımı geçer ve kollektör akımı oluşur. Kollektör akımı yaklaşık olarak, emiter akımına eşittir ( $I_C \cong \alpha_{DC} I_E$ ,  $\alpha_{DC} \approx 1$ ,  $I_C \approx I_E$ ). C-B jonksiyonu ters kutuplandığında transistör aktif bölgede çalışır ve  $I_E$  'nin arttırılması  $I_C$  'nin artmasına neden olur. C-B jonksiyonu ileri yönde kutuplandığında transistör doyuma girer ve  $I_E$  'nin arttırılması ile  $I_C$  akımı değişmez.

**Uygulama 1 :**

Şekildeki devrede kullanılan silisyum NPN transistörde  $\alpha_{DC} \approx 1$  kabul ederek,

- a)  $I_E$ ,  $I_C$  ve  $V_{CB}$  değerlerini hesaplayınız.
- b)  $V_{EE} = 5.1$  V olması durumunda  $I_E$ ,  $I_C$  ve  $V_{CB}$  değerlerini hesaplayınız.

**Çözüm :**

- a) Transistörün B-E jonksiyonu doğru yönde kutuplanmıştır.  $V_{BE} = 0.7$  V .

$$I_E = \frac{4 - 0.7}{3.3 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ mA}$$

$$I_C \approx I_E = 1 \text{ mA}$$

$$V_{CB} = 20 - 1 \text{ mA} \times 15 \text{ k}\Omega = 5 \text{ V}$$

- b)  $I_E = \frac{5.1 - 0.7}{3.3 \text{ k}\Omega} = 1.33 \text{ mA}$

$$I_C \approx I_E = 1.33 \text{ mA}$$

$$V_{CB} = 20 - 1.33 \text{ mA} \times 15 \text{ k}\Omega = 0 \text{ V (transistör doyumda)}$$

C-B jonksiyonu ters kutuplanmadığı için ( $V_{CB} = 0$ ) transistör doyuma girmiştir. Doyumda  $I_E$  akımının arttırılması  $I_C$  'yi arttırmaz. Kollektör akımının doyum değeri,

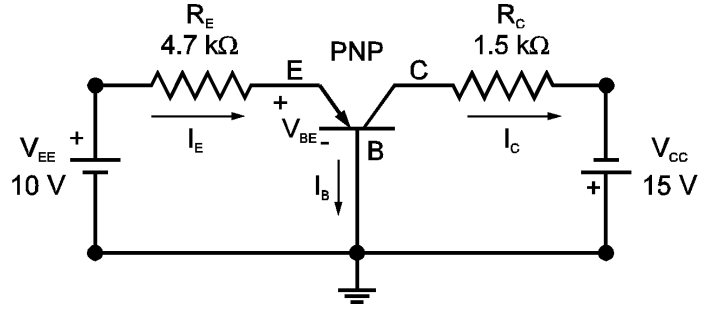
$$I_C R_C = V_{CC}$$

$$I_C = I_{C\text{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = I_{E\text{sat}} \text{ şeklinde hesaplanır.}$$

**Uygulama 2:**

Şekildeki devrede bir silisyum PNP transistör kullanılmıştır.  $I_E$ ,  $I_C$  ve  $V_{CB}$  değerlerini hesaplayınız.

- $R_E = 4.7 \text{ k}\Omega$
- $R_E = 680 \Omega$
- $R_E = 470 \Omega$
- $R_E = 470 \Omega$ ,  $R_C = 150 \Omega$

**Çözüm:**

- a) Transistörün doyma akımı,  $I_{Csat} = I_{Esat} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15}{1.5 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$

$$I_E = \frac{10 - 0.7}{4.7 \text{ k}\Omega} = 1.97 \text{ mA} \approx 2 \text{ mA}$$

$I_E < I_{Esat}$  transistör doymaya girmez. Aktif bölgededir.

$$I_C \approx I_E = 2 \text{ mA}$$

$$V_{CB} = -15 + 2 \text{ mA} \times 1.5 \text{ k}\Omega = -12 \text{ V}, \text{ sonuç negatif. PNP transistörü aktif bölgededir.}$$

- b)  $I_E = \frac{10 - 0.7}{680 \Omega} = 13.7 \text{ mA}$

$I_E > I_{Esat}$  transistör doymaya girer.

$$I_C = I_{Csat} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{CB} = -15 + 10 \text{ mA} \times 1.5 \text{ k}\Omega = 0 \text{ V}$$

- c)  $I_E = \frac{10 - 0.7}{470 \Omega} = 20 \text{ mA}$

$I_E > I_{Esat}$  transistör doymaya girer.

$$I_C = I_{Csat} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{CB} = 0 \text{ V}$$

- d) Transistörün yeni doyma akımı,  $I_{Csat} = I_{Esat} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{15}{150 \Omega} = 100 \text{ mA}$

$$I_E = 20 \text{ mA}$$

$I_E < I_{Esat}$  transistör doymaya girmez.

$$I_C \approx I_E = 20 \text{ mA}$$

$$V_{CB} = -15 + 20 \text{ mA} \times 150 \Omega = -12 \text{ V}, \text{ sonuç negatif. PNP transistörü aktif bölgededir.}$$

## Ortak Emiterli Devre

Ortak emiterli devrede NPN transistörün aktif bölgede çalışması için uygulanan gerilimler Şekil.3.4'te gösterilmiştir. B-E uçlarına  $V_{BE}$  ve C-E uçlarına  $V_{CE}$  kutuplama gerilimleri uygulanır. E-B jonksiyonu ileri yönde kutuplanır yani  $V_{BE}$  gerilimi pozitifdir. Kollektöre, emitere göre pozitif  $V_{CE}$  gerilimi uygulanır. Kollektör gerilimi tabana göre aşağıdaki gibi yazılır.

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

C-B jonksiyonunu ters kutuplamak için  $V_{CB}$  gerilimi pozitif olmalıdır. Yani  $V_{CE}$  gerilimi  $V_{BE}$  geriliminden büyük olmalıdır.  $V_{CE}$  gerilimi  $V_{BE}$  'den küçük ise  $V_{CB}$  gerilimi negatif olur ve C-B jonksiyonu ileri yönde kutuplanır dolayısıyla transistör doymaya girer.

Ortak emiterli devrede giriş taban, çıkış kollektördür. Belirli bir  $I_B$  giriş akımı için  $I_C$  çıkış akımı oluşur. Transistörün çalışması ortak tabanlı devreki gibidir. Ortak tabanlı devredeki kazanç cinsinden  $I_B$  ile  $I_C$  arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = \alpha_{DC} I_E + I_{CB0}, \quad I_{CB0} \approx 0, \quad I_C \cong \alpha_{DC} I_E$$

$$I_B \approx (1 - \alpha_{DC}) I_E$$

$$I_E \approx \frac{I_B}{1 - \alpha_{DC}}$$

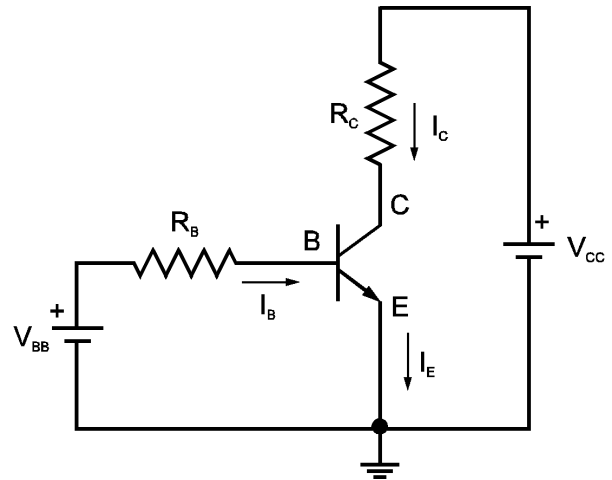
$$I_E = I_C + I_B = \frac{I_B}{1 - \alpha_{DC}}$$

$$I_C = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}} I_B, \quad I_C = \beta_{DC} I_B$$

$$\beta_{DC} = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}}$$

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} : \text{Akım kazancı}$$

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta_{DC} I_B = (1 + \beta_{DC}) I_B$$



Şekil 3.5. Ortak emiterli devre.

### Uygulama 3:

Bir transistör  $\alpha_{DC} = 0.995$  değerine sahiptir. Transistörün  $\beta_{DC}$  değerini hesaplayınız.

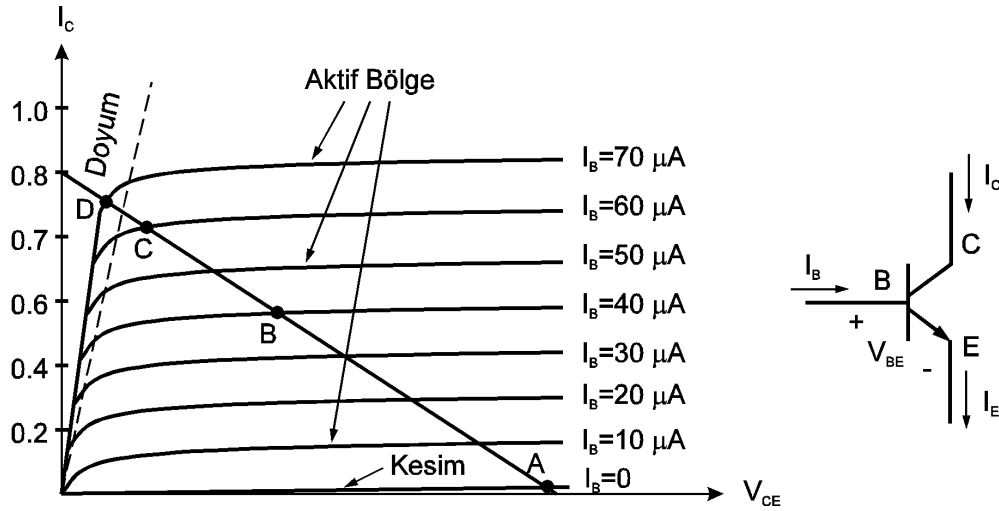
### Çözüm

$$\beta_{DC} = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}} = \frac{0.995}{1 - 0.995} = 199$$

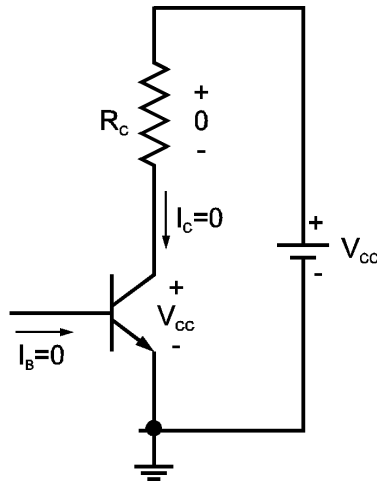


**Ortak emiterli devrede çıkış karakteristiği**

Ortak emiterli devrede bir NPN transistörün çıkış karakteristiği Şekil 3.6'da verilmiştir. A noktasında taban akımı sıfırdır ve transistörden çok küçük bir kollektör akımı geçer. Bu akım  $I_{CE0}$  sembolü ile gösterilir ( $I_{CE0} = \alpha_{DC} \cdot I_{CB0}$ ). A noktasında transistör kesimdedir. B ve C noktalarında transistör aktif bölgededir. Aktif bölgede kollektör akımı, taban akımının  $\alpha_{DC}$  katıdır. Karakteristik üzerinde görüldüğü  $\alpha_{DC}$  gibi her noktada aynı değildir. D noktasında ise transistör doyumda çalışır. Transistörde çalışma noktasının bulunması yük doğrusu çizilerek yapılabilir.  $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$  (Şekil 3.5'ten) denklemi kullanılarak yük doğrusu çizilir. Karakteristik ile kesişen nokta çalışma noktasıdır. Transistör amplifikatör olarak kullanılıyorsa çalışma noktası dikkatli seçilmelidir.



Şekil 3.6. Ortak emiterli NPN transistörün çıkış karakteristiği.

**Kesim Bölgesi**

Kesim bölgesinde transistörden taban akımı geçmez. Bu durum, B-E jonksiyonunun açık devre olması, ters kutuplanması veya yeteri kadar kutuplanmaması ile ortaya çıkar.

Transistörün kollektör-emiter uçları açık devre gibi davranır.

Kollektörden geçen akım sıfırdır ve kollektör-emiter uçlarında maksimum gerilim oluşur.

Şekil 3.7. Ortak emiterli devrede transistörün kesimde olması.

Kesimde transistörden  $I_{CE0}$  akımı geçer. Bu akım ihmal edilebilir.

**Aktif Bölge ve Doyum Bölgesi**

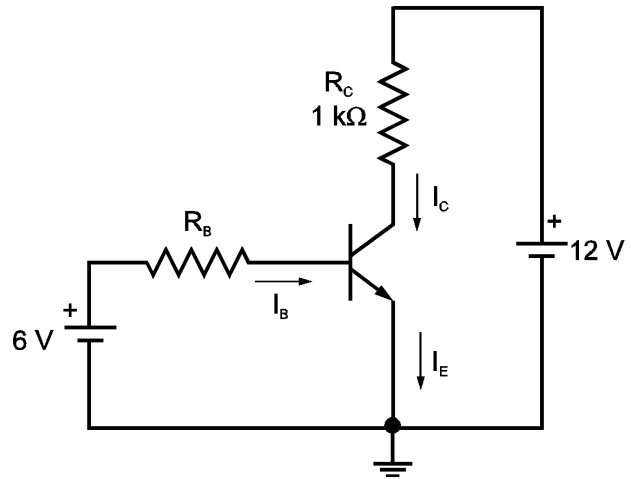
E-B jonksiyonu yeteri kadar kutuplanmışsa taban akımı geçer. Aktif bölgede kollektör akımı  $I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$  olarak hesaplanır. Taban akımı arttırıldığında kollektör akımı orantılı olarak artar. Doyma bölgesinde taban akımının arttırılması ile kollektör akımı artmaz. Doymada kollektör akımı maksimum değerine ve C-E gerilimi minimum değerine ulaşır. Doyma bölgesinde  $V_{CE} \approx 0$  kabul edilerek  $I_{Csat}$  ve  $I_{Bsat}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$I_{Csat} \approx \frac{V_{CEsat}}{R_C}, \quad I_{Bsat} \approx \frac{I_{Csat}}{\beta_{DC}}$$

**Uygulama 4:**

Şekildeki devrede kullanılan NPN transistörde  $\beta_{DC} = 150$  olduğuna göre,

- $R_B = 100 \text{ k}\Omega$  için  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$  ve  $V_{CE}$  değerlerini hesaplayınız.
- Taban direncini  $50 \text{ k}\Omega$  alarak yukarıdaki işlemleri tekrarlayınız.
- $I_B = 1 \text{ mA}$  olması durumunda  $I_C$  ve  $I_E$  'yi hesaplayınız.

**Çözüm :**

$$a) \quad I_B = \frac{6 - 0.7}{100 \text{ k}\Omega} = 53 \mu\text{A}$$

$$I_{Csat} = \frac{12}{1 \text{ k}\Omega} = 12 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{12 \text{ mA}}{150} = 80 \mu\text{A}$$

$I_B < I_{Bsat}$  olduğundan transistör aktif bölgededir.

$$I_C = \beta_{DC} I_B = 150 \times 53 \mu\text{A} = 7.95 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 12 \text{ V} - 7.95 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega = 4.05 \text{ V}$$

$$I_E = I_C + I_B \approx 8 \text{ mA}$$

$$b) \quad I_B = \frac{6 - 0.7}{50 \text{ k}\Omega} = 106 \mu\text{A}$$

$$I_{Csat} = 12 \text{ mA}, \quad I_{Bsat} = 80 \mu\text{A}$$

$I_B > I_{Bsat}$  olduğundan transistör doyuma girer.

$$I_C = I_{Csat} = 12 \text{ mA}$$

$$V_{CE} \approx 0$$

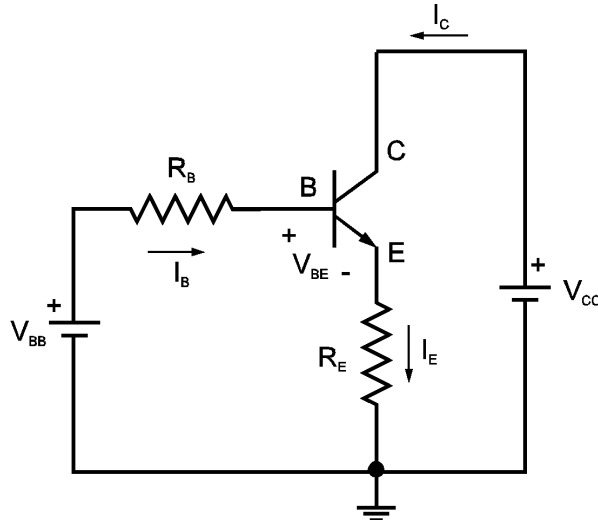
$$I_E = I_C + I_B = 12.11 \text{ mA}$$

- Taban akımı  $1 \text{ mA}$  ise transistör doyumdadır. Doyumda kollektör akımı sabit olup, taban akımı ile orantılı olarak artmaz. Taban akımının fazlalığı emiter akımını artırır.

$$I_E = I_C + I_B = 12 \text{ mA} + 1 \text{ mA} = 13 \text{ mA}$$

## Ortak Kollektörlü Devre

Ortak kollektörlü devrede transistörün kutuplanması ortak emiterli devredeki gibidir. Şekil 3.8’de NPN transistörün ortak kollektör bağlantısı ve eşitlikler verilmiştir. Devrenin girişi taban, çıkışı ise emiterdir.



Şekil 3.8. Ortak kollektörlü devre.

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

$$V_{BB} - V_{BE} = I_B R_B + I_E R_E$$

$$I_E = (\beta_{DC} + 1)I_B$$

$$V_{BB} - V_{BE} = I_B R_B + (\beta_{DC} + 1)I_B R_E$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (\beta_{DC} + 1)R_E}$$

Taban akımı  $R_B + (\beta_{DC} + 1)R_E$  direnci tarafından belirlenir.

$$\text{Doyumda ; } I_{E\text{sat}} \approx \frac{V_{CC}}{R_E}, \quad I_{B\text{sat}} = \frac{I_{E\text{sat}}}{(1 + \beta_{DC})}$$

### Uygulama 5:

Şekil 3.5’teki ortak kollektörlü devrede  $R_B = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{BB} = 12 \text{ V}$ ,  $V_{CC} = 16 \text{ V}$  ve  $\beta_{DC} = 99$  olarak bilinmektedir.

- $I_B$ ,  $I_E$ ,  $V_E$  ve  $V_{CE}$  değerlerini hesaplayınız.
- $V_{BB}$  gerilimi artırıldığında kaç V doymaya neden olur?

### Çözüm :

$$\text{a) } I_B = \frac{12 - 0.7}{50 \text{ k}\Omega + (99 + 1) \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 75.3 \mu\text{A}$$

$$I_E = (1 + \beta_{DC})I_B = 7.53 \text{ mA}$$

$$V_E = I_E R_E = 7.53 \text{ V}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 7.53 + 0.7 = 8.23 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - V_E = 16 - 7.53 \text{ V} = 8.47 \text{ V}$$

$$\text{b) } I_{E\text{sat}} = \frac{V_{CC}}{R_E} = \frac{16}{1 \text{ k}\Omega} = 16 \text{ mA}$$

$$I_{B\text{sat}} = \frac{I_{E\text{sat}}}{1 + \beta_{DC}} = \frac{16 \text{ mA}}{1 + 99} = 160 \mu\text{A}$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - 0.7}{50 \text{ k}\Omega + (99 + 1) \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 160 \mu\text{A}$$

$$\underline{V_{BB} = 24.7 \text{ V}}$$

## Transistörün maksimum değerleri

Transistörün maksimum değerleri, kollektör-taban gerilimi, kollektör-emiter gerilimi, emiter-taban gerilimi, kollektör akımı, jonksiyon sıcaklığı ve harcanan güç için verilir. Transistörün gücü  $V_{CE}$  ile  $I_C$  'nin çarpımıdır.

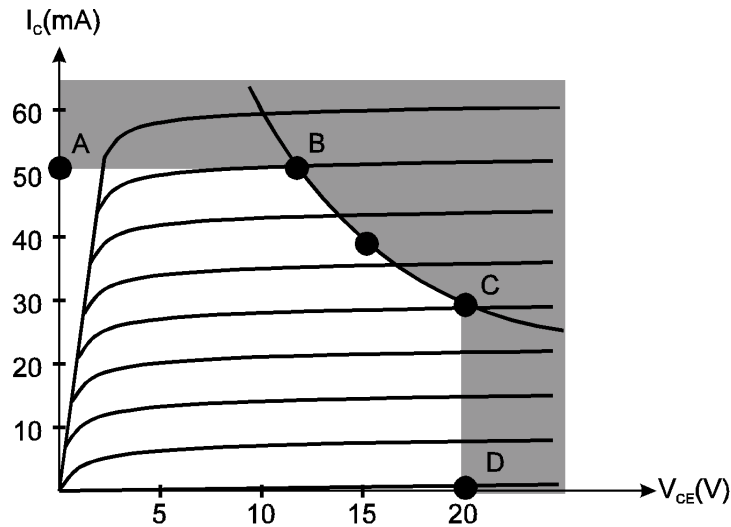
$$P = I_C \cdot V_{CE}$$

A-B noktaları arasındaki bölge  $I_{C_{max}}$  bölgesidir.  $P_{max}$  bölgesi B-C noktaları arasındaki bölgedir. C-D noktaları arasındaki bölge ise  $V_{CE_{max}}$  bölgesidir. Şekil 3.9'da transistörün maksimum güç eğrisi kollektör karakteristiği üzerinde çizilmiştir. B ile C noktası arasındaki herhangi bir noktada akım ve gerilimin çarpımı, transistörde harcanabilecek maksimum güç verir.

$$12 \text{ V} \times 50 \text{ mA} = 600 \text{ mW (B noktasında)}$$

$$20 \text{ V} \times 30 \text{ mA} = 600 \text{ mW (C noktasında)}$$

Transistörde harcanabilecek maksimum güç sıcaklıkla azalır.  $25^\circ\text{C}$ 'de 1 W harcanabilen bir transistörde, sıcaklık katsayısı  $5\text{mW}/^\circ\text{C}$  ise, bu transistörde  $70^\circ\text{C}$ 'de harcanabilecek maksimum güç  $1\text{W} - 5\text{mW}/^\circ\text{C} \times (70^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 0.775 \text{ W}$  bulunur.



Şekil 3.9. Bir transistörün maksimum güç eğrisi.

### Uygulama 6:

Maksimum gücü 0.25 W olan bir transistörde  $V_{CE} = 6 \text{ V}$  durumunda transistörden geçebilecek maksimum akımı bulunuz

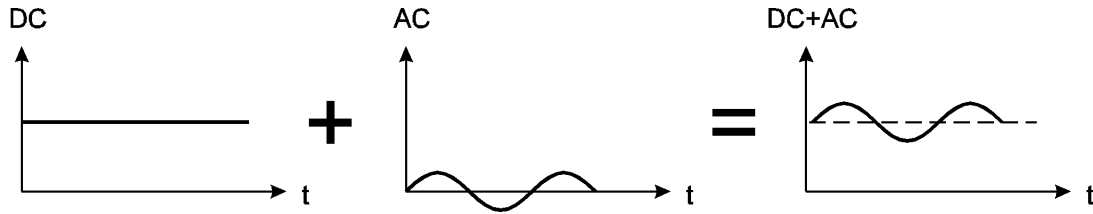
### Çözüm:

$$I_C = \frac{P_{max}}{V_{CE}} = \frac{0.25 \text{ W}}{6 \text{ V}} = 41.67 \text{ mA}$$

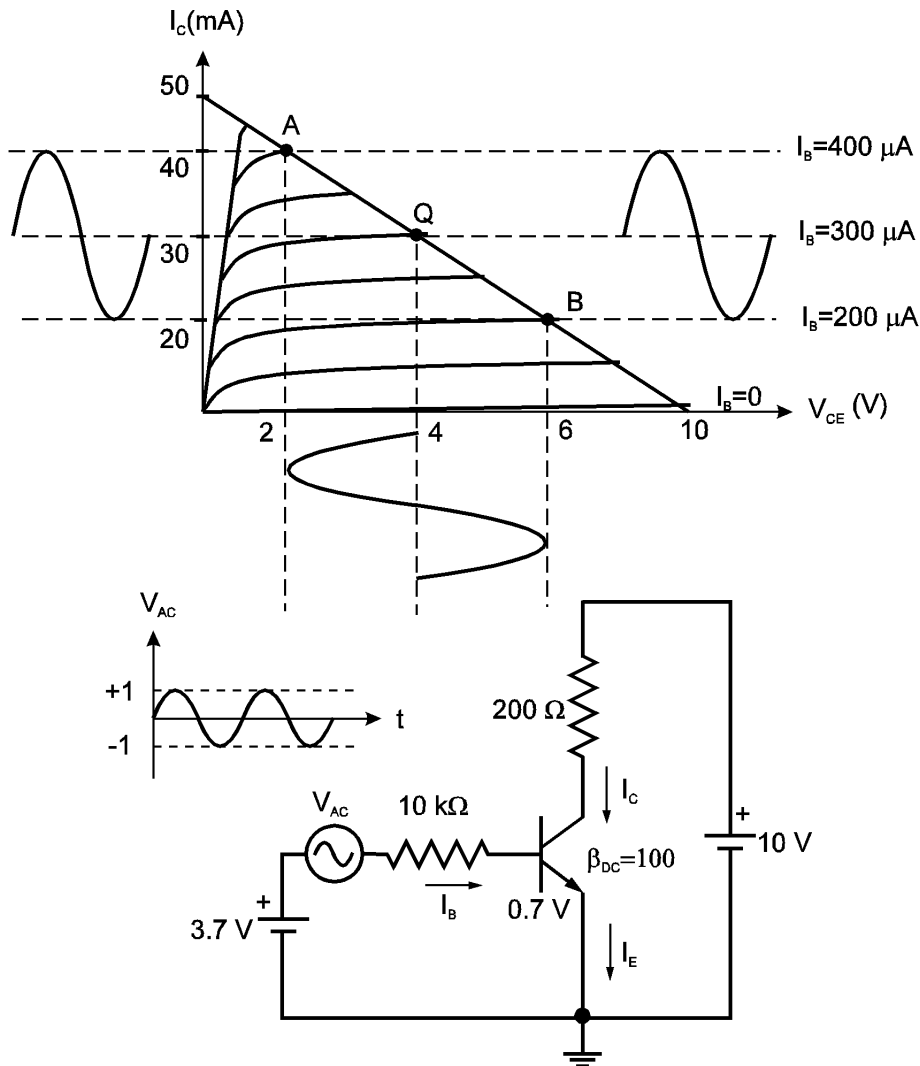
$V_{CE}$  gerilimi düşük iken kollektör akımı artırılabilir. Akım  $I_{C_{max}}$  sınırını, güç  $P_{max}$  sınırını aşmamalıdır.

## Kutuplama Devreleri

Bir transistörün yükseltici (amplifikatör) olarak çalışabilmesi için dc olarak kutuplanması (ön gerilimlenmesi) gerekir. Yükseltici devrenin girişine bir AC işaret uygulandığında, çıkışta elde edilen işaret, DC bileşen ile AC işaretin toplamıdır. Bir AC işaret uygulanmazsa devrede sadece DC bileşen mevcuttur. Şekil 3.10'da bu durum gösterilmiştir. Uygulamada transistör iki ayrı kaynak yerine tek bir kaynak ile kutuplanır. Şekil 3.11'de gösterilen ortak emiterli devrenin girişine bir AC gerilim uygulanmıştır ve taban akımı  $200\mu A$  ile  $400\mu A$  arasında değişmektedir. Taban akımının  $500\mu A$ 'den büyük olması durumunda kollektör akımı ve gerilimi doymaya gider. Taban akımının negatif olması durumunda ise transistör kesime gider. Çalışma noktasına ve sınırlara dikkat edilmelidir.



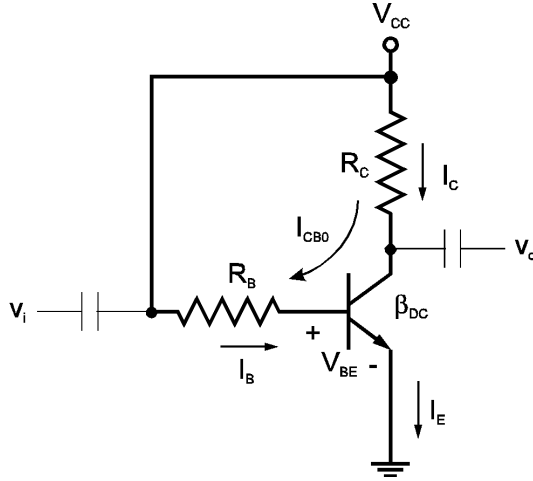
Şekil 3.10. Bir yükselticide DC ve AC bileşenlerin toplamı.



Şekil 3.11. Çalışma noktasının bulunması.

**Taban Kutuplama Devresi**

B-E ve C-E jonksiyonlarının iki ayrı kaynak yerine tek bir kaynak ile kutuplanması daha pratik bir çözümdür. Bu devreye taban kutuplama devresi denir. Şekil 3.12’de taban kutuplama devresi gösterilmiştir. Şekildeki ortak emiterli devrede devrenin giriş ve çıkışına kondansatör konularak DC bileşenler filtre edilmiştir.



$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$$

Aktif bölgede;

$$I_C = \beta I_B$$

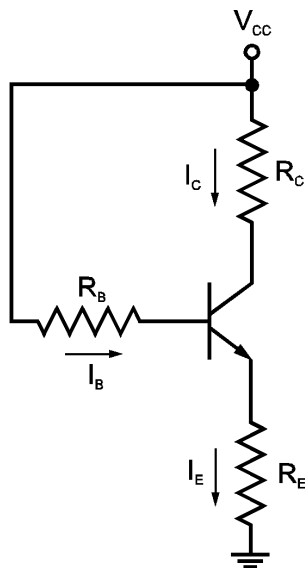
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Şekil 3.12. Ortak emiterli devrede taban kutuplama devresi.

Devrede çalışma noktası kararlı değildir.  $V_{BE}$  gerilimi sıcaklığın artması ile azalır.  $V_{BE}$  geriliminin artması taban akımını azaltır.  $I_{CB0}$  sızıntı akımı sıcaklıkla artar.  $I_{CB0}$  akımı,  $R_B$  direnci üzerinde taban akımını artırıcı yönde bir gerilim oluşturur.  $\beta_{DC}$  de sıcaklıkla değişir. Bu değişimler devrede çalışma noktasının değişmesine yol açar.  $V_{BE}$  ve  $I_{CB0}$ ’ın değişmesi  $V_{CC}$  gerilimine göre oldukça küçüktür. Çalışma noktasındaki kararsızlık daha çok  $\beta_{DC}$ ’deki değişimden kaynaklanır.

**Emiter Dirençli Kutuplama Devresi**

Emiter direncinin eklenmesi kararlılığı artırır. Çalışma noktasındaki değişim çok küçüktür.



$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

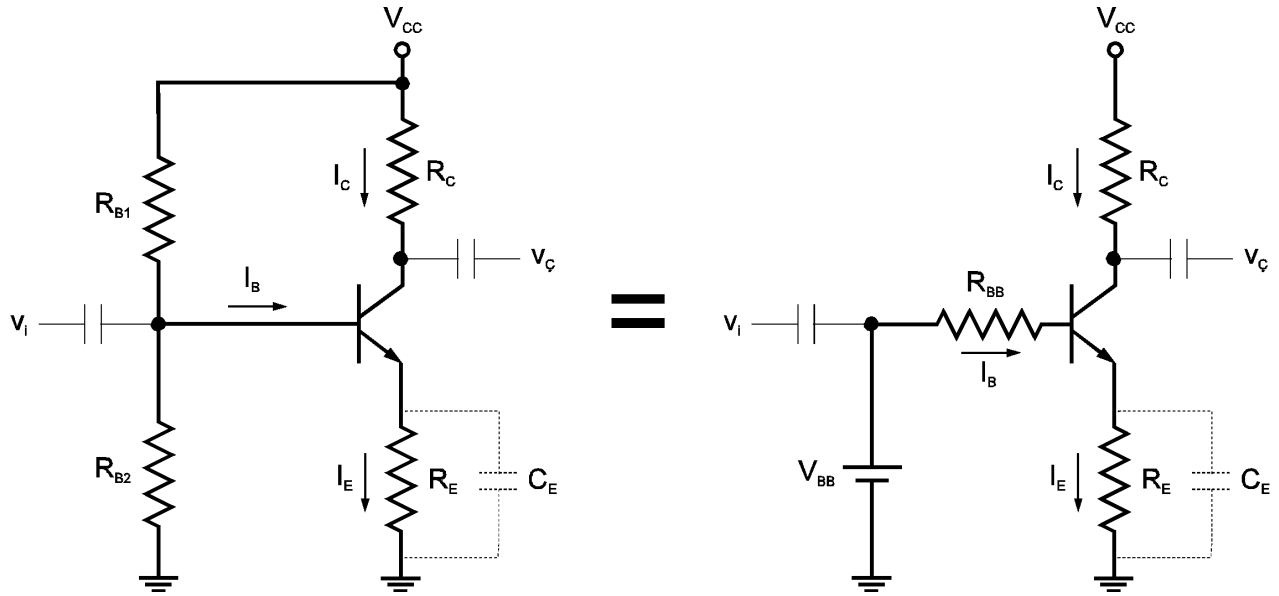
$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Şekil 3.13. Emiter dirençli kutuplama devresi

**Gerilim Bölücü ile Kutuplama**

En çok kullanılan kutuplama devresidir. Çalışma noktası  $\beta_{DC}$  'den bağımsızdır.



**Şekil 3.14. Gerilim Bölücü Devre ile Kutuplama**

$$R_{BB} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$V_{BB} = I_B R_{BB} + V_{BE} + I_B (1 + \beta_{DC}) R_E$$

$$R_{BB} \ll (1 + \beta_{DC}) R_E \text{ ise}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$I_C \cong I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

Emiter akımının  $\beta_{DC}$  'den bağımsız olması nedeniyle devredeki çalışma noktası kararlıdır.

**Uygulama 7:**

Şekil 3.14'teki devrede  $R_{B1} = 39 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{B2} = 3.9 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1.5 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 22 \text{ V}$  ve  $\beta = 140$  olarak verilmiştir. Transistörün  $V_{CE}$  gerilimini,  $i_C$  akımını ve transistörde harcanan gücü hesaplayınız.

**Çözüm:**

$$V_{BB} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = \frac{3.9}{39 + 3.9} 22 = 2 \text{ V}$$

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2 - 0.7 = 1.3 \text{ V}$$

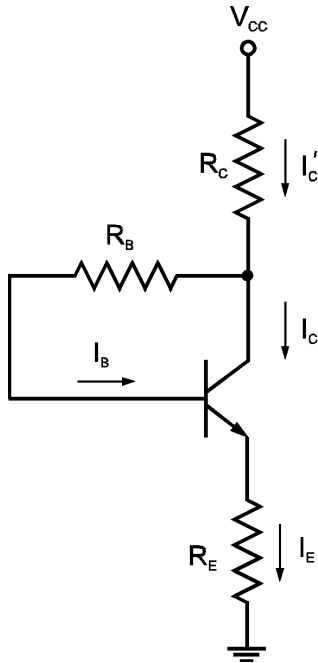
$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \cong I_C = \frac{1.3}{1.5 \text{ k}\Omega} = 0.867 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 22 - 0.867 \text{ mA} \cdot 10 \text{ k}\Omega = 13.3 \text{ V}$$

$$P = I_C \cdot V_{CE} = 0.867 \text{ mA} \cdot 13.33 \text{ V} = 11.55 \text{ mW}$$

**Geribeslemeli DC Öngerilimleme**

Şekil 3.15'te geribeslemeli bir öngerilimleme devresi gösterilmiştir. Geribesleme de emiter direnci gibi öngerilimleme kararlılığını artırır.



$$V_{CC} - I'_C R_C - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$I'_C = I_C + I_B = I_E = (\beta + 1)I_B$$

$$V_{CC} - (\beta + 1)I_B R_C - I_B R_B - V_{BE} - (\beta + 1)I_B R_E = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)}$$

$$V_{CC} - I'_C R_C - V_{CE} - I_E R_E = 0$$

$$I'_C = I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E (R_C + R_E)$$

**Şekil 3.15.** Geribeslemeli DC öngerilimleme

**Uygulama 8:**

Şekil 3.15'teki devrede  $R_B = 250 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $V_{CC} = 10 \text{ V}$  ve  $\beta = 50$  olarak verilmiştir. Transistörün  $V_{CE}$  gerilimini,  $i_C$  akımını ve transistörde harcanan gücü hesaplayınız.

**Çözüm:**

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)(R_C + R_E)} = \frac{10 - 0.7}{250 \text{ k}\Omega + 51.(3 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega)} = 20.03 \mu\text{A}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B = 51.20.03 \mu\text{A} = 1.02 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_E (R_C + R_E) = 10 - 1.02 \text{ mA} . (3 \text{ k}\Omega + 1.2 \text{ k}\Omega) = 10 - 4.28 = 5.72 \text{ V bulunur.}$$

$$P = I_C . V_{CE} = 1.02 \text{ mA} . 5.72 \text{ V} = 5.7 \text{ mW}$$

**Öngerilimleme Devrelerinde Kararlılık**

- Ters yönde kollektör akımı (kaçak akımı  $I_{CB0}$ ) sıcaklıktaki her  $10^\circ \text{C}$  artışla ikiye katlanır.
- Baz emiter gerilimi  $V_{BE}$ , her  $^\circ \text{C}$  başına 2.5 mV azalır
- Transistörün akım kazancı, sıcaklıkla artar.

Kararlılık faktörü S, sıcaklık nedeniyle bir parametrede meydana gelen değişiklik nedeniyle kollektör akımında görülen değişimin ölçüsüdür. Öngerilimleme devrelerinin tasarımında öncelikle transistörün  $\beta$ 'sındaki değişimlere karşı kararlılık hedeflenir.



**Örnek bir DC Kutuplama Devresinin Tasarımı**

Transistörlü bir devrede çalışma noktasının önceden belirlenmesi gerekli olduğunda, devre elemanlarının seçilerek bir tasarım yapılması gerekir. Tasarım işleminde devre türüne göre bazı özel kabuller yapılır. Burada örnek olarak Şekil 3.14'te verilen gerilim bölücülü kutuplama devresinin tasarımı incelenecektir.

Bu devrede emiter ile toprak arasına bir direnç yerleşmek, dc kutuplama kararlılığı sağlar. Transistörün kaçak akımları nedeniyle kollektör akımında ve transistörün  $\beta$  değerinde meydana gelen değişimlerin, çalışma noktasında büyük bir değişikliğe yol açmaması sağlanır. Emiter direnci büyük tutulmaz, çünkü üzerinde düşen gerilim kollektör-emiter arasındaki gerilimin değişim aralığını sınırlar. Emiter direncinin üzerindeki gerilim  $V_{CC}$  geriliminin  $1/10$ 'u seçilerek tasarım yapılır. Önce emiter direnci seçilerek, daha sonra  $R_C$  hesaplanır. Gerilim bölücü dirençlerin hesabı baz akımı ihmal edilerek yapılır.  $R_{B1}$  ve  $R_{B2}$  dirençlerini belirlemek için bu dirençlerden geçen akımın, taban akımının 10 katı olacağını kabul edilirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} V_{CC}$$

$$R_{B2} \leq \frac{1}{10} \beta R_E$$

**Uygulama 9:**

Gerilim bölücü ile yapılan kutuplama devresinde transistörün  $\beta$  akım kazancı 150 ve kaynak gerilimi  $V_{CC} = 16 \text{ V}$  olarak bilinmektedir. Devrede çalışma noktasının  $I_C = 1 \text{ mA}$  ve  $V_C = V_{CC} / 2$  olması için devrede kullanılacak direnç değerlerini hesaplayınız.

**Çözüm:**

Tasarımda emiter gerilimi, kaynak geriliminin yaklaşık onda biri seçilir.

$$V_E = \frac{1}{10} V_{CC} = \frac{1}{10} 16 = 1.6 \text{ V}$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{1.6 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 1.6 \text{ k}\Omega \text{ bulunur } (I_C \approx I_E = 1 \text{ mA}).$$

$$V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2} = 8 \text{ V olması istendiğine göre,}$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_E}{I_C} = \frac{16 - 8 - 1.6}{1 \text{ mA}} = 6.4 \text{ k}\Omega \text{ bulunur.}$$

$$R_{B2} \leq \frac{1}{10} \beta R_E = \frac{150 \times 1.6 \text{ k}\Omega}{10} = 24 \text{ k}\Omega$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 1.6 + 0.7 = 2.3 \text{ V}$$

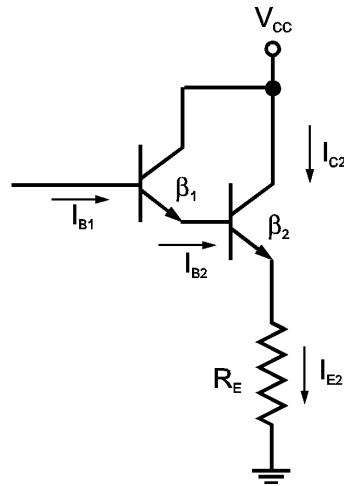
$$V_B = \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} V_{CC}$$

$$2.3 = \frac{24 \text{ k}\Omega}{24 \text{ k}\Omega + R_{B1}} 16$$

$$R_{B1} = 143 \text{ k}\Omega \text{ bulunur.}$$

## Darlington Bağlantı

Akım kazancı yüksek olan transistörler yükseltici devrelerde tercih edilir. Akım kazancı 1000 civarında olan transistörler mevcuttur. Daha yüksek bir kazanç elde etmek için Şekil 3.16'da gösterildiği gibi iki transistörden oluşan darlington bağlantı kullanılır. Darlington bağlantıda akım kazancı iki transistörün akım kazançlarının çarpımına eşittir. Bu kazanç 7000 ile 70000 arasındadır. Darlington çiftinin giriş empedansı yüksektir. Darlington bağlantısındaki iki transistör, genellikle tek bir transistör kılıfında üretilir. Darlington çiftine örnek olarak NPN olan 2N5308A gösterilebilir.



$$I_{E1} = \beta_1 I_{B1}$$

$$I_{B2} = I_{E1}$$

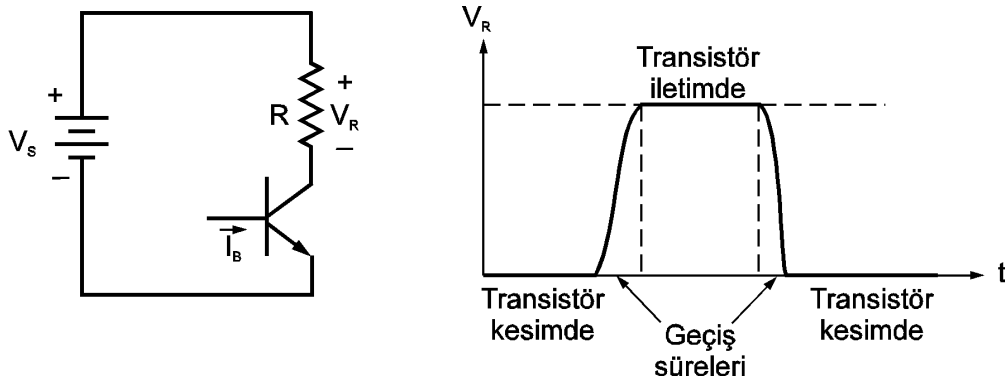
$$I_{E2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_2 \beta_1 I_{B1} = \beta \cdot I_{B1}$$

$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

Şekil 3.15. NPN Darlington transistör çifti

## Transistörün Anahtar Olarak Kullanılması

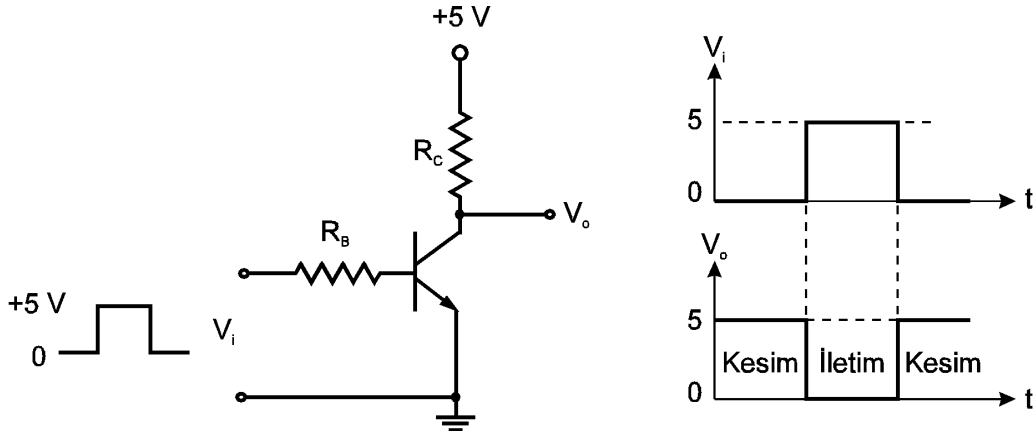
Transistör anahtarlama devrelerinde yaygın olarak kullanılır. Transistör sayısal devrelerde, kontrol, sayıcı, zamanlama, veri işleme, ölçme devrelerinde, radar, televizyon vb. devrelerinde anahtar olarak kullanılır. Transistör anahtar olarak kullanıldığında iletim ve kesim olmak üzere iki konumda çalışır. İletim konumunda direnci  $0.1-100 \Omega$  arasındadır ve kısa devre kabul edilebilir. Kesim konumunda transistör açık devre gibi davranır ve direnci  $100-1000 M\Omega$  arasındadır. Transistörün anahtarlama hızı da önemli bir değişkendir. Transistörün iletime ve kesime girme sürelerinin toplamı  $1 \mu s$  civarında ise, transistörün çalışabileceği maksimum frekans  $f = 1 / T = 1 \text{ MHz}$  olur. Şekil 3.16'da transistörün anahtar olarak kullanıldığı bir devre ve yük geriliminin değişimi verilmiştir.



Şekil 3.16. Transistörün anahtar olarak kullanılması.

**İnverter Devresi**

Transistörün anahtar olarak kullanıldığı devrelerden biri de inverter devresidir. İnverter devresi sayısal devrelerin temelidir. İnverter devresinde girişe kare dalga gerilim uygulanır. Kollektör ile toprak arasından alınan çıkış gerilimi giriş geriliminin tersidir. Giriş gerilimi 0 iken transistör kesimdedir ve çıkış gerilimi 5 V'tur. Giriş gerilimi 5 V iken transistör iletime girer ve çıkış gerilimi 0 olur. Devre transistör iletimde iken doymada çalışacak şekilde tasarlanır. Şekil 3.17'de transistörlü inverter devresi ile giriş ve çıkış gerilimleri gösterilmiştir.

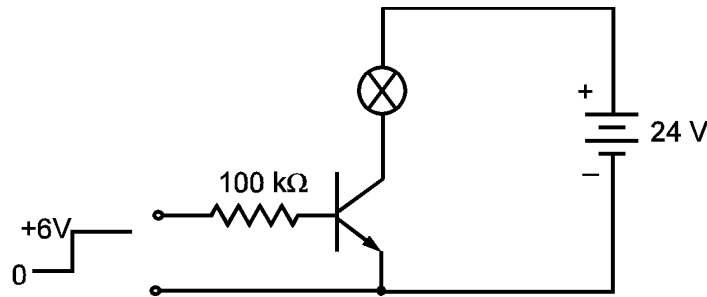


Şekil 3.17. Transistörlü inverter devresi.

**Uygulama 10:**

Şekilde verilen devrede transistör anahtar olarak çalışmakta ve bir lambayı kontrol etmektedir. Giriş gerilimi 6 V iken lamba yanmaktadır. Lamba 24 V'ta 20 mA geçirmektedir.

- Giriş gerilimi 6 V iken transistörün doymada çalışması için akım kazancı ne olmalıdır?
- Lambaya verilen güç ile transistörün giriş gücünü hesaplayınız.

**Çözüm :**

- Transistör iletimde iken lamba gerilimi 24 V ve kollektör akımı 20 mA'dır.

$$I_B = \frac{6 - 0.7}{100 \text{ k}\Omega} = 53 \mu\text{A}$$

$$\beta = \frac{20 \text{ mA}}{53 \mu\text{A}} = 377$$

Transistörün doymada çalışabilmesi için akım kazancı en az 377 olmalıdır.

- Lamba gücü = 24 V x 20 mA = 480 mW

$$\text{Transistörün giriş gücü} = 6 \text{ V} \times 53 \mu\text{A} = 0.318 \text{ mW}$$

Çok küçük bir giriş gücü ile yükün gücü kontrol edilmektedir.

## Transistör Katalog Bilgileri

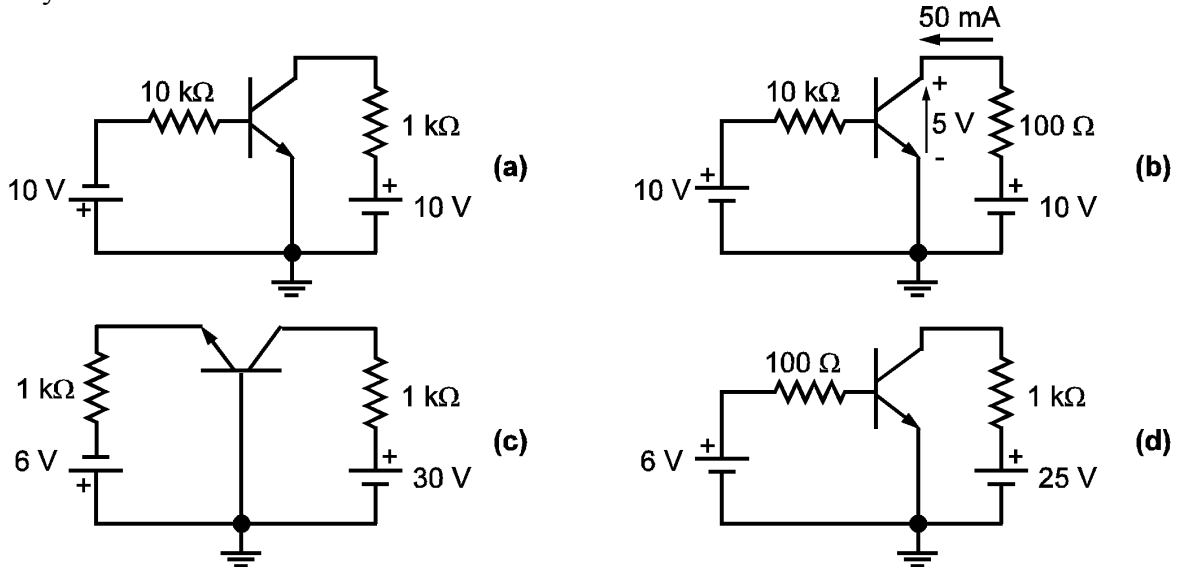
Transistör kataloglarında belirli bir transistöre ait çalışma karakteristikleri, parametre değerleri, karakteristik eğrileri, mekaniksel bilgiler ve maksimum çalışma değerleri verilir. Bir devrede kullanılacak olan transistörün öncelikle maksimum değerlerine dikkat edilmelidir. Aşağıdaki Tablo 3.2’de bir transistörün 25 °C ’deki maksimum değerleri verilmiştir. Tabloda gerilim sembollerinin başındaki B harfi ters yöndeki devrilme gerilimini temsil eder.

**Tablo 3.2.** Bir transistörün 25 °C ’deki maksimum değerleri

$BV_{EB0}$	Emiter-taban gerilimi	6 V
$BV_{CB0}$	Kollektör taban gerilimi	25 V
$BV_{CE0}$	Kollektör emiter gerilimi	20 V
$I_{C\max}$	Kollektör akımı	300 mA
$P_{D\max}$	Toplam kayıp	150 mW
$T_{J\max}$	Jonksiyon sıcaklığı	150 °C

### Uygulama 11:

Şekilde verilen devreleri Tablo 3.2’de verilen transistörün maksimum değerlerini kullanarak inceleyiniz.



### Çözüm:

- E-B jonksiyonu 10 V ile ters kutuplanmıştır. Bu değer 6 V olan  $BV_{EB0}$  değerinden büyüktür. Transistör tahrip olur.
- Kollektör akımı 50 mA olup  $I_{C\max}$  değerden küçüktür. Kollektör-emiter ise gerilimi 5 V’ur. Transistörde harcanan güç  $P = I_C \cdot V_{CE} = 50 \text{ mA} \cdot 5 \text{ V} = 250 \text{ mW}$ ’tır. Güç  $P_{D\max}$  değerinden büyük olduğundan transistör tahrip olur.
- Kollektör-taban arasındaki besleme gerilimi 30 V’ur.  $BV_{CB0}$  gerilimi 25 V olduğundan transistör bozulur.
- Emiter-kollektör arasındaki gerilim 25 V’ur. Bu gerilim 20 V olan  $BV_{CE0}$  geriliminden büyük olduğundan transistör bozulur.

## ALAN ETKİLİ TRANSİSTÖR

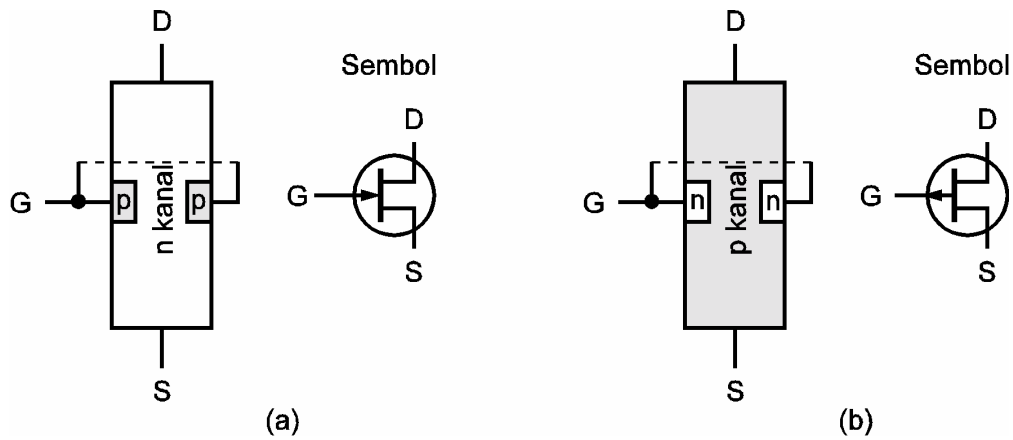
FET (Alan Etkili Transistör) gerilim kontrollü ve üç uçlu bir elemandır. FET'in uçları G (Kapı), D (Drain) ve S (Kaynak) olarak tanımlanır. FET'in yapısı ve sembolü Şekil 4.1'de gösterilmiştir. FET'ler aşağıdaki gibi 3 grupta toplanabilir.

- JFET (Jonksiyon FET)
- IGFET( Kapı izoleli FET)
- MOSFET (Metal oksit yarı iletken FET)

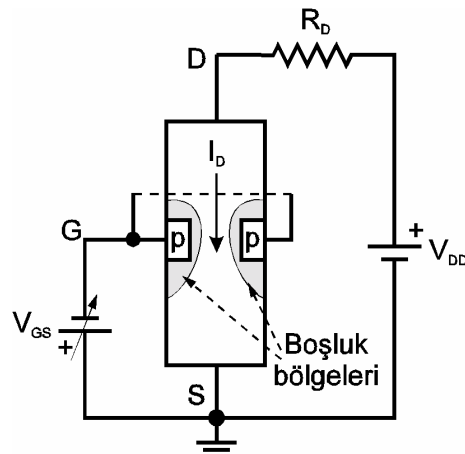
### JFET

BJT akım kontrollü bir elemandır yani taban akımı ile kollektör akımı kontrol edilir. FET ise gerilim kontrollü bir elemandır. FET'in kapı (G) ile kaynak (S) arasına uygulanan gerilim ile, kanaldan (D ile S arasından) geçen akım kontrol edilir. G-S uçlarına uygulanan gerilim, kanaldan geçen akımın yönüne dik olan bir elektrik alanı oluşturur. JFET, N veya P kanal olabilir. N kanal JFET'de, kanal N tipi ve kapı P tipi bir malzemedir. Kapıdan kanala bir P-N jonksiyonu mevcuttur. Kapıya uygulanan gerilim P-N jonksiyonunu ters yönde kutuplar ve kapıdan çok küçük bir sızıntı akımı geçer. Bu nedenle FET'lerde giriş direnci çok yüksektir ( $\sim 1000 \text{ M}\Omega$ ).

G ile S uçlarına ters yönde bir gerilim uygulandığında, P-N jonksiyonunda boşluk bölgesi oluşur. Boşluk bölgesinde akım taşıyıcısı yoktur. Boşluk bölgesi kanal içine doğru genişleyerek kanalın akım geçiren kısmını daraltır ve kanalın direncini artırır. Bu durum Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Kanalın direnci ve kanaldan geçen akım,  $V_{GS}$  ile  $V_{DS}$  'nin fonksiyonudur.



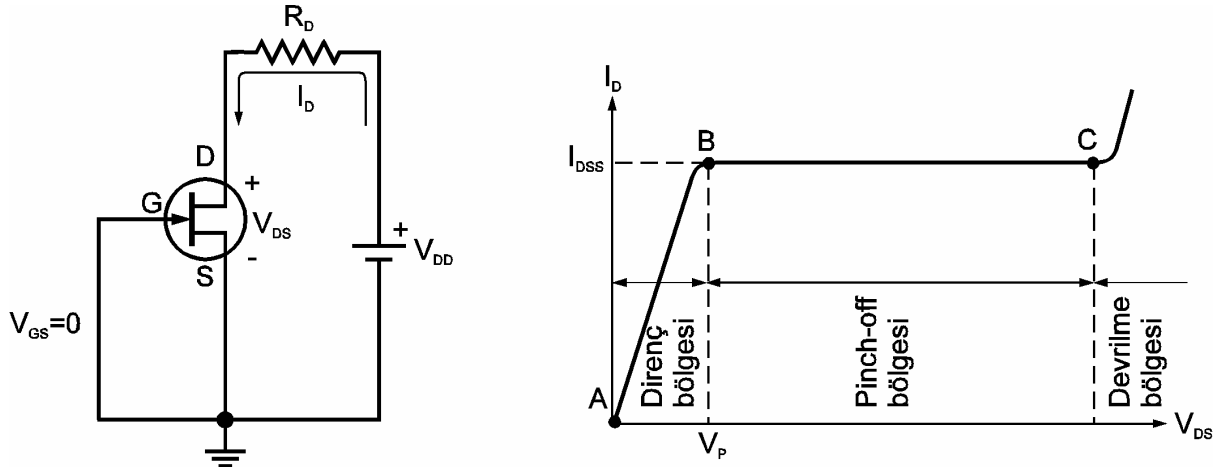
Şekil 4.1. JFET yapı ve sembolleri, a) N kanal ve b) P kanal.



Şekil 4.2. N kanal JFET'in çalışma prensibi.

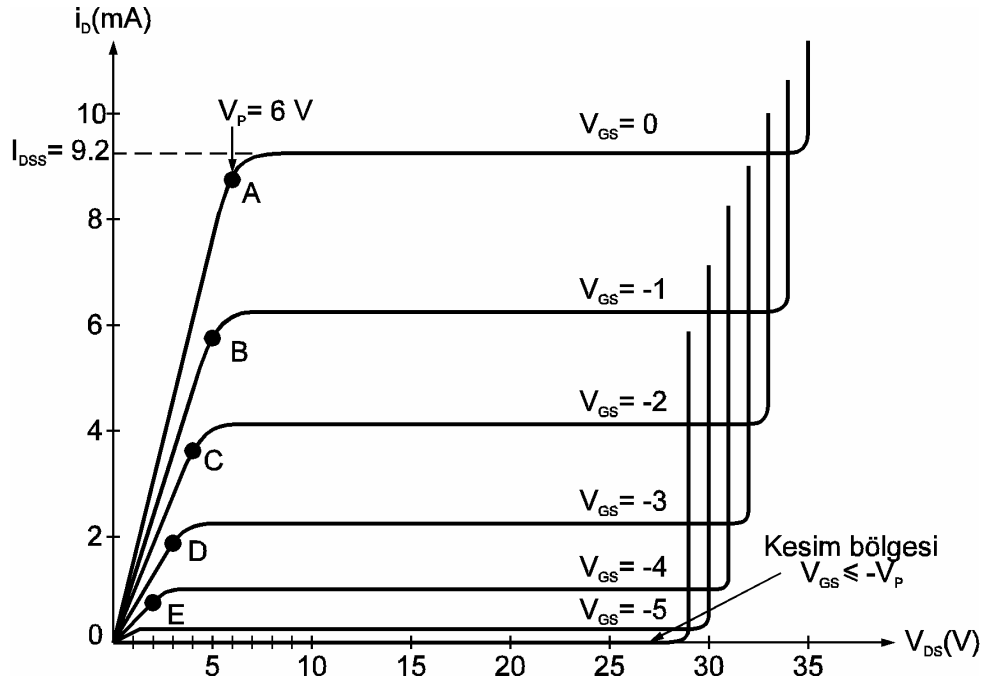
N kanal FET'te G ile S uçları arasında 0 veya negatif bir gerilim, D ile S uçları arasında ise pozitif bir gerilim uygulanır. Kapıdan kanala olan P-N jonksiyonu ters yönde kutuplanır.  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS}$  olduğuna göre,  $V_{GD}$  gerilimi  $V_{GS}$ 'e göre daha negatiftir. Bu nedenle, G ile D arasındaki bölgede ters yönde kutuplanan P-N diyodunun boşluk bölgesi daha geniş olur.

$V_{GS} = 0$  iken  $V_{DS}$  geriliminin arttırılması ile N kanal JFET'te elde edilen karakteristik Şekil 4.3'te gösterilmiştir. A ile B noktaları arasındaki direnç bölgesinde  $V_{DS}$ 'nin 0'dan itibaren arttırılması ile  $i_D$  akımı  $I_{DSS}$  değerine kadar artar. A ile B arasında, boşluk bölgesinin genişliği etkili olmadığından kanalın direnci sabittir.  $V_{GS} = 0$  iken geçen  $I_{DSS}$  akımı FET'in maksimum akımıdır. B noktasında  $V_{DS}$  gerilimi  $V_P$  değerini alır. B noktasından sonra,  $V_{DS}$  geriliminin arttırılması ile  $i_D$  akımı değişmez. C noktasından sonra  $V_{DS}$  geriliminin arttırılması, P-N jonksiyonunun ters yönde devrilmesine neden olur ve  $i_D$  akımı hızla artar. B ile C noktaları arasındaki bölgeye pinch-off bölgesi denir. P-N jonksiyonunun ters kutuplanması ile oluşan boşluk, pinch off bölgesinde kanalı tıkar ve kanal direncini artırır. Buna rağmen kanal akımı sabit kalır. Akımın sabit kalmasının nedeni,  $V_{DS}$  geriliminin kanal direncindeki artışı dengelemesidir.  $V_{DS}$  gerilimi, kaynaktan çıkan elektronların tıkalı bölgeyi geçerek D ucuna ulaşmasını sağlar. B noktasındaki  $V_{DS}$  gerilimine  $V_P$  pinch-off gerilimi denir. FET'in  $V_P$  değeri, BJT'de  $\beta$ 'nin karşılığıdır.

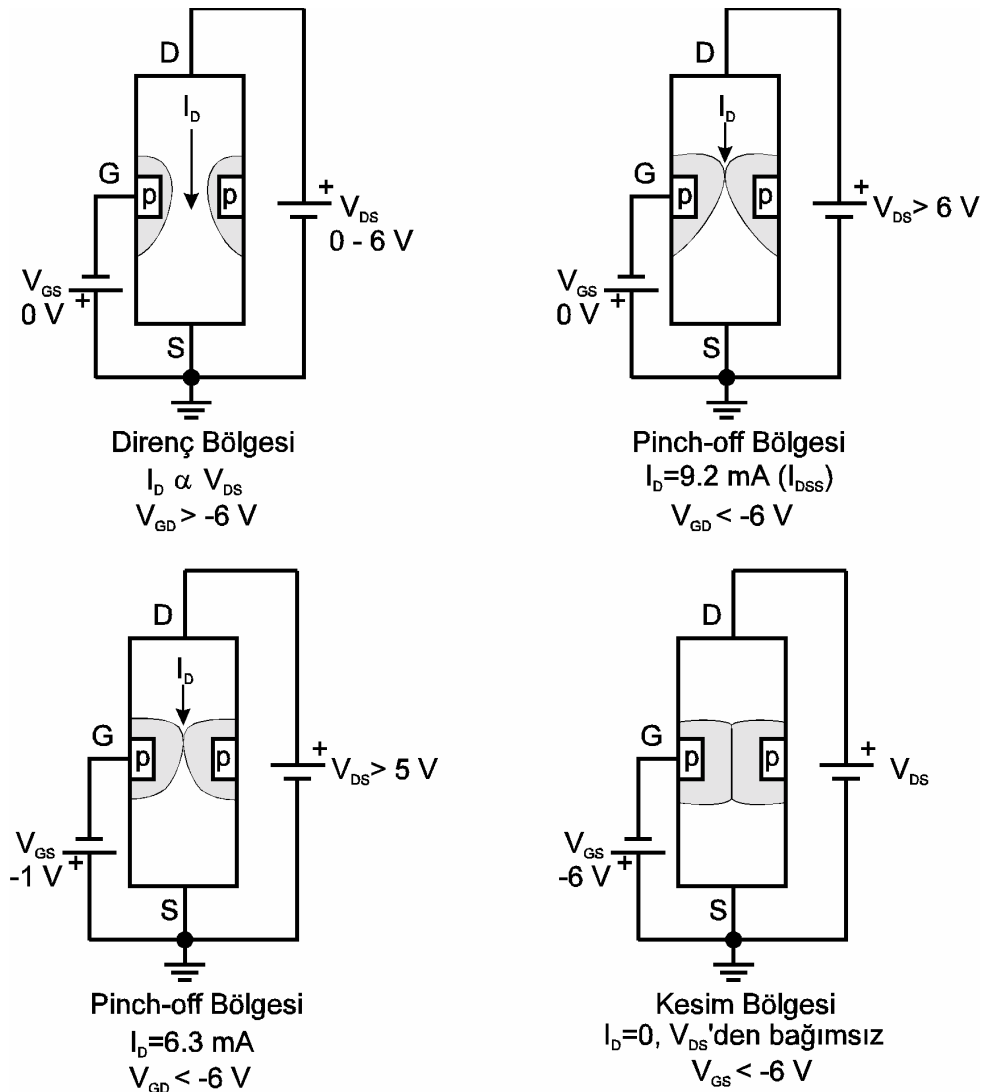


Şekil 4.3.  $V_{GS} = 0$  iken N kanal JFET'in karakteristik eğrisi.

$V_{GS}$  ve  $V_{DS}$  gerilimleri değiştirildiğinde, N kanal JFET'te  $i_D$  akımının değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. FET'in kesim bölgesinde  $V_{GS}$  gerilimi  $-V_P$ 'ye eşit olur. Bu durumda boşluk bölgesi kanalı tamamen tıkar ve kanal direnci çok büyüktür.  $V_{DS}$  geriliminin arttırılması ile (ters devrilmeye kadar) kanaldan akım geçemez.  $V_{GS} = 0$  iken,  $V_{DS}$  gerilimi  $V_P$  değerini aldığı anda FET'in akımı  $I_{DSS}$  değerini alır. Bu esnada G ile D uçları arasındaki P-N jonksiyonu,  $-V_P$  gerilimi ile ters yönde kutuplanır ve G ile D arasındaki boşluk bölgesi kanalı tıkar.  $V_{GD} = -V_P$  durumu pinch-off bölgesinin başlangıcıdır.  $V_{GS}$  negatif bir gerilim ve  $V_{DS}$  gerilimi  $V_P$  değerinden küçük iken  $V_{GD} = -V_P$  şartı sağlandığında, G-D arasındaki kanal tıkanır ve pinch off bölgesinde çalışma gerçekleşir. Bu durumda  $V_{DS}$  küçük olduğundan  $i_D$  akımı da  $I_{DSS}$ 'ten küçüktür.  $V_{DS}$ 'in pinch off değeri  $V_{DS(P)} = V_P + V_{GS}$  şeklinde hesaplanır. Şekil 4.4 ve 4.5'te FET'in karakteristik eğrileri ve çalışma bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.4. N kanal JFET'in karakteristik eğrileri.

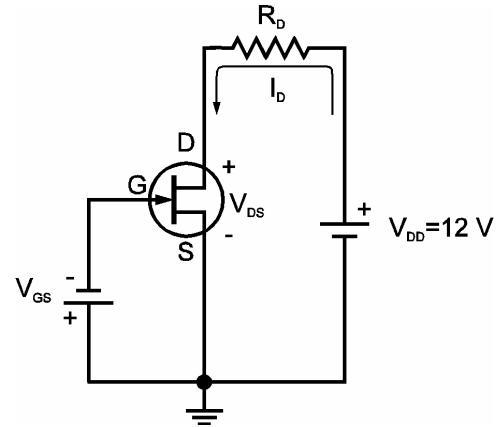


Şekil 4.5. N kanal JFET'in çalışma bölgeleri.

**Uygulama 1:**

Şekilde verilen FET'te  $V_P = 8\text{ V}$  ve  $I_{DSS} = 12\text{ mA}$  'dir.

- $V_{GS}$  gerilimi  $-5\text{ V}$  ise, pinch-off'un başladığı  $V_{DS}$  gerilimini bulunuz.
- $V_{DD}$  gerilimi  $12\text{ V}$ ,  $V_{DS}$  pinch- off geriliminden büyük ve kapı ucu toprağa bağlı ise  $I_D$  akımını hesaplayınız.
- $V_{GS}$  gerilimi  $-10\text{ V}$  iken  $I_D$  akımı ne olur ?

**Çözüm :**

- $V_{DS(P)} = V_P + V_{GS} = 8 + (-5) = 3\text{ V}$
- $V_{GS} = 0$  ve  $V_{DS}$  pinch- off geriliminden büyük ise,  $I_D = I_{DSS} = 12\text{ mA}$  olur.
- JFET kesimdedir ve  $I_D = 0$  olur.

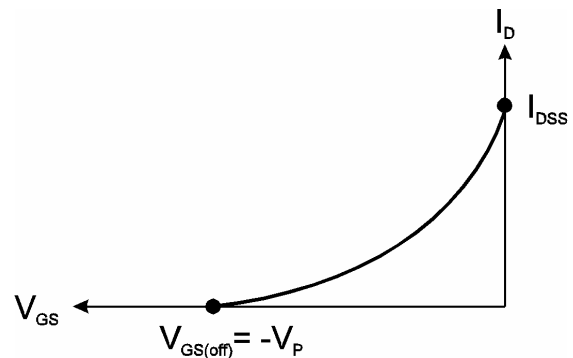
**JFET'in Transfer Karakteristiği**

N kanal FET'te  $V_{GS}$  gerilimi, 0 ile  $-V_P$  arasında değiştirilerek  $I_D$  akımı kontrol edilir. P kanal FET'te ise  $I_D$  akımının kontrolü için  $V_{GS}$  gerilimi 0 ile  $V_P$  arasında değiştirilir. Kesimdeki  $V_{GS}$  değerine  $V_{GS(off)}$  da denir.  $V_{GS(off)}$  ile  $V_P$  mutlak değer olarak birbirine eşittir. Katalogların çoğunda sadece  $V_{GS(off)}$  değeri verilir. Bu değer  $10\text{ nA}$  gibi çok küçük bir akımda tanımlanır.  $V_{GS}$  gerilimi ile  $I_D$  akımı arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikte verilmiştir. Bu eşitliğe göre,  $V_{GS}$  gerilimi ile  $I_D$  akımı arasındaki ilişki, yani transfer karakteristiği parabolik bir değişim gösterir. N kanal FET'in transfer karakteristiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2$$

$$V_{GS} = V_{GS(off)} \Rightarrow I_D = 0$$

$$V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS}$$



Şekil 4.6. N kanal JFET'in transfer karakteristiği.

**Uygulama 2:**

N kanal bir JFET'te  $V_{GS(off)} = -8\text{ V}$  ve  $I_{DSS} = 10\text{ mA}$  'dir.  $V_{GS} = 0\text{ V}$ ,  $-2\text{ V}$ ,  $-4\text{ V}$  ve  $-6\text{ V}$  için  $I_D$  akımını hesaplayarak transfer karakteristiğini çiziniz.



**Çözüm:**

$$V_{GS} = 0 \Rightarrow I_D = I_{DSS} = 10 \text{ mA}$$

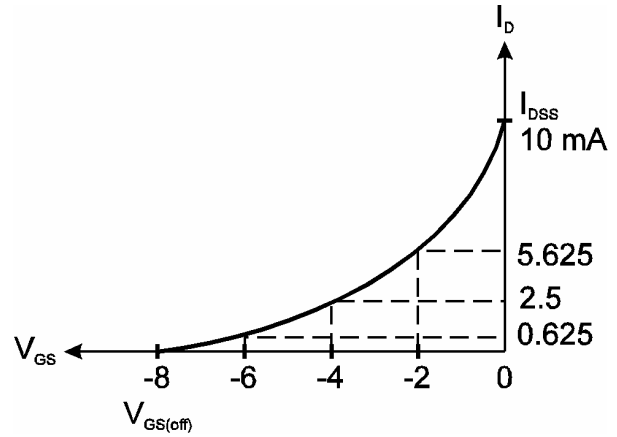
$$V_{GS} = -8 \text{ V} \Rightarrow I_D = 0$$

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]^2$$

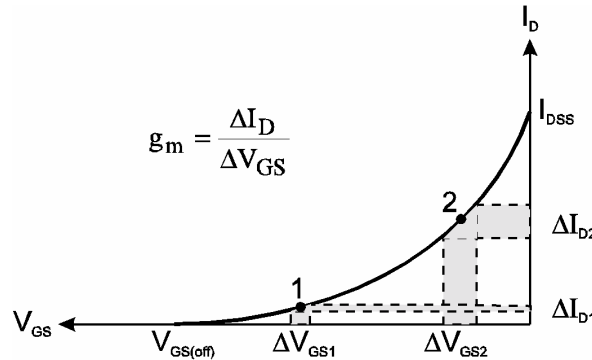
$$V_{GS} = -2 \text{ V} \Rightarrow I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-2}{-8} \right]^2 = 5.625 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = -4 \text{ V} \Rightarrow I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-4}{-8} \right]^2 = 2.5 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = -6 \text{ V} \Rightarrow I_D = 10 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-6}{-8} \right]^2 = 0.625 \text{ mA}$$

**İleri Yön Geçiş İletkenliği**

FET’de ileri yön geçiş iletkenliği  $g_m$ ,  $V_{DS}$  gerilimi sabit iken,  $I_D$  akımındaki değişimin  $V_{GS}$  gerilimindeki değişime oranı olarak tanımlanır. FET’in transfer karakteristiği lineer olmadığı için  $g_m$  çalışma noktasına bağlı olarak değişir. Şekil 4.7’de farklı çalışma noktalarında  $g_m$ ’in bulunması gösterilmiştir.



Şekil 4.7. N kanal JFET’te farklı çalışma noktalarındaki  $g_m$ .

$V_{GS} = 0$  iken  $g_m$  değeri  $g_{m0}$  olarak tanımlanır. Herhangi bir noktadaki  $g_m$  değeri,  $g_{m0}$ ’a göre aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$g_m = g_{m0} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right]$$

**Uygulama 3:**

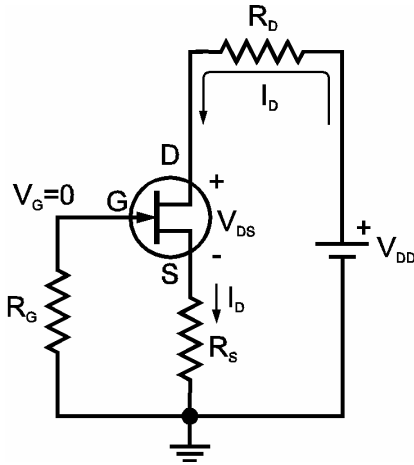
$V_{GS(off)} = -8 \text{ V}$ ,  $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$  ve  $g_{m0} = 4000 \mu\text{s}$  olan JFET’in  $V_{GS} = -4 \text{ V}$  için ileri yön geçiş iletkenliğini bulunuz

**Çözüm:**

$$g_m = g_{m0} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right] = 4000 \left[ 1 - \frac{-4}{-8} \right] = 2000 \mu\text{s}$$

**JFET'in kutuplanması**

JFET'de kutuplamanın amacı uygun bir  $V_{GS}$  gerilimi ile istenilen  $I_D$  akımını sağlamaktır.



Şekil 4.8 JFET'in kutuplanması.

$V_G$  gerilimi sızıntı akımı çok küçük olduğundan 0 kabul edilir.

$$V_{GS} = V_G - V_S = 0 - I_D R_S$$

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

$$V_{DS} = V_D - V_S$$

$$V_S = I_D R_S$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$$

**Uygulama 4:**

Şekil 4.8'de verilen devrede  $R_D = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_S = 500 \Omega$ ,  $V_{DD} = 10 \text{ V}$  ve  $I_D = 5 \text{ mA}$  olarak verilmiştir.  $V_{DS}$  ve  $V_{GS}$ 'yi hesaplayınız.

**Çözüm:**

$$V_S = I_D R_S = 5 \text{ mA} \times 500 \Omega = 2.5 \text{ V}$$

$V_G = 0$  olduğuna göre,

$$V_{GS} = V_G - V_S = -2.5 \text{ V} \text{ bulunur.}$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D = 10 \text{ V} - 5 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega = 5 \text{ V}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 5 \text{ V} - 2.5 \text{ V} = 2.5 \text{ V} \text{ bulunur.}$$

**Uygulama 5:**

$V_{GS(\text{off})} = -10 \text{ V}$ ,  $I_{DSS} = 25 \text{ mA}$  olan N kanal JFET'te  $V_{GS} = -5 \text{ V}$ 'tur.  $R_S$  direncinin değerini hesaplayınız.

**Çözüm:**

$$I_D = I_{DSS} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(\text{off})}} \right]^2 = 25 \text{ mA} \left[ 1 - \frac{-5}{-10} \right]^2 = 6.25 \text{ mA}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S$$

$V_G = 0$  olduğuna göre,

$$V_{GS} = -I_D R_S$$

$$R_S = \left| \frac{V_{GS}}{I_D} \right| = \frac{5 \text{ V}}{6.25 \text{ mA}} = 800 \Omega \text{ bulunur.}$$

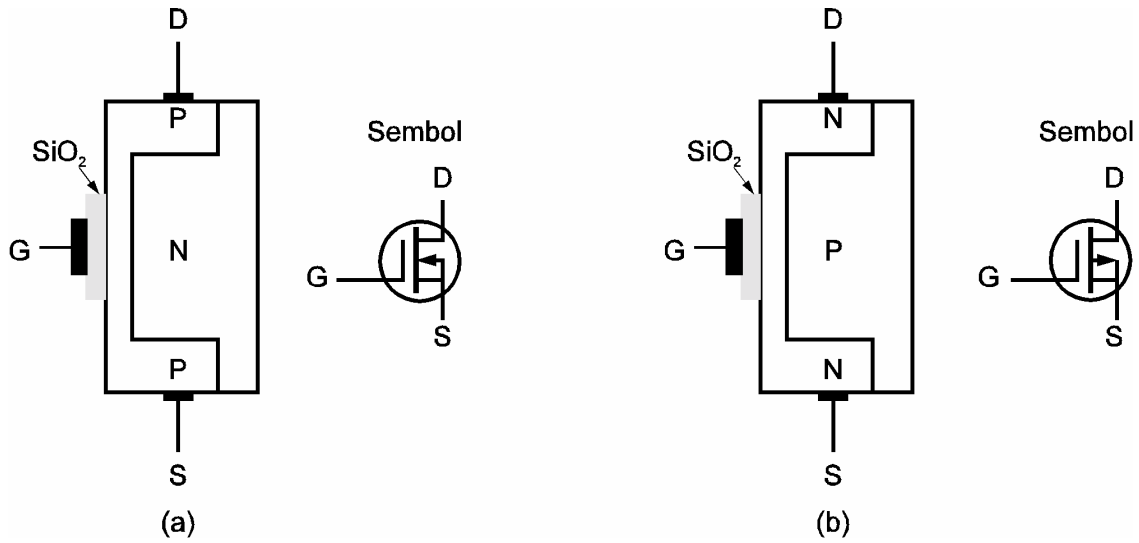
## MOSFET (Metal Oksit Yarı İletken FET)

MOSFET’de kapı ile kanal arasında JFET’deki gibi bir P-N jonksiyonu yoktur. MOSFET’in kapısı silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) tabakası ile kanaldan izole edilmiştir. İki temel MOSFET mevcuttur.

- DE MOSFET
- E MOSFET

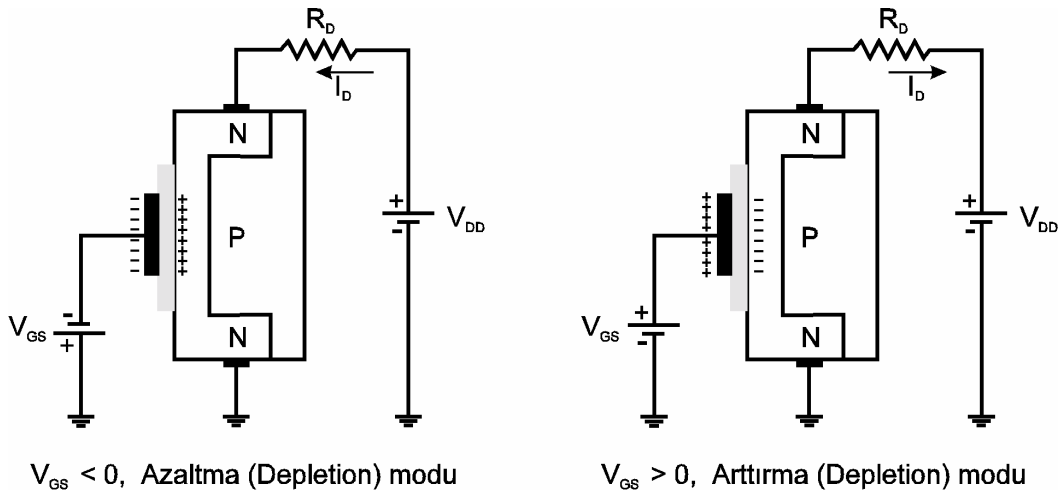
### DE MOSFET

DE MOSFET’in temel yapısı Şekil 4.9’da gösterilmiştir. DE MOSFET’te D ve S altkatman malzeme üzerine katkılanarak, kapıya komşu olan dar bir kanal ile birbirine bağlanmıştır. DE MOSFET N kanal ve P kanal olabilir. Burada sadece N kanallı DE MOSFET incelenecektir. P kanallı DE MOSFET’te gerilim yönleri terstir fakat çalışma prensipleri aynıdır.



Şekil 4.9 DE MOSFET’in temel yapısı ve sembolü a) N kanal ve b) P kanal.

Kapı kanaldan izole olduğu için kapıya negatif veya pozitif gerilim uygulanabilir. DE MOSFET kapısına negatif gerilim uygulanırsa Azaltma (Depletion), pozitif gerilim uygulanırsa Arttırma (Enhancement) modunda çalışır. DE MOSFET’te kapı ve kanal bir kapasitenin iki paralel plakası ve  $\text{SiO}_2$  tabakası bir dielektrik malzeme gibidir.

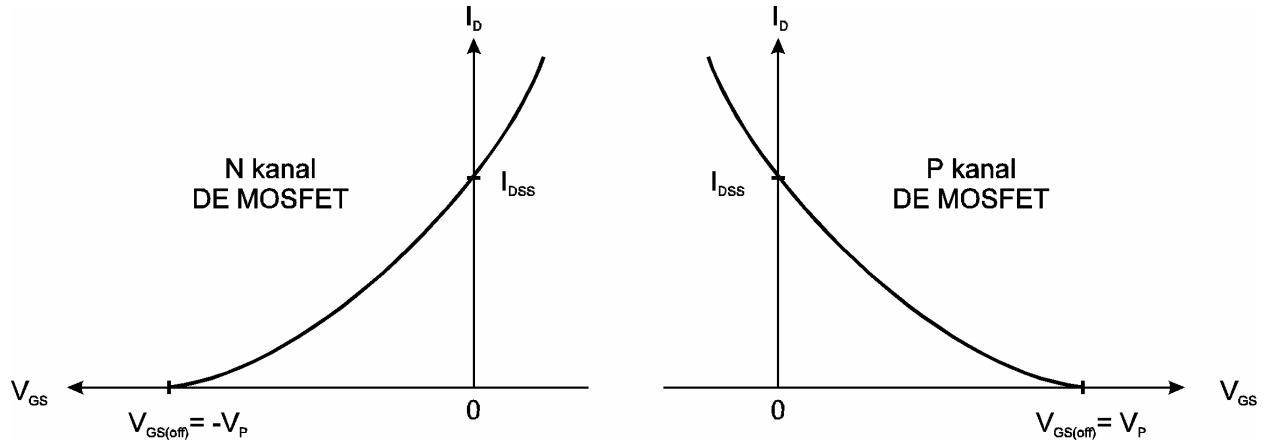


Şekil 4.10. N kanal DE MOSFET’in çalışması.

Negatif bir kapı gerilimi uygulandığında, P malzemesindeki delikler N kanala doğru çekilir ve elektronlar kanaldan uzaklaşır. Bu elektronların yerine pozitif iyonlar oluşur ve N kanaldaki serbest elektronlar azalır. Bu durumda kanal direnci artar ve kanal akımı azalır (Şekil 4.10(a) ).

Pozitif bir kapı gerilimi uygulandığında, elektronlar kanala doğru çekilir ve P malzemesindeki delikler uzaklaştırılır. Böylece kanalda daha çok serbest elektron olur. Bu durumda kanal direnci azalır ve kanal akımı artar (Şekil 4.10(b) ).

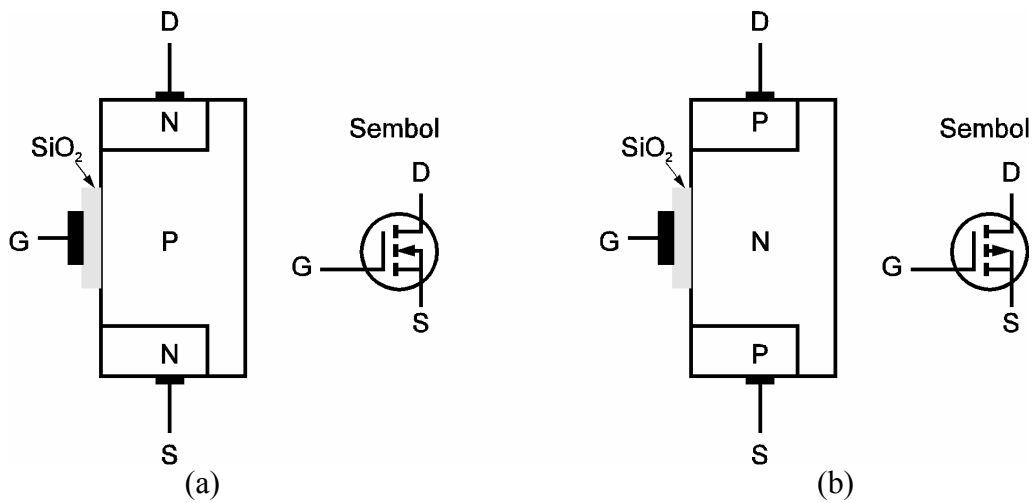
DE MOSFET'in transfer karakteristiği Şekil 4.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. N ve P kanal DE MOSFET'in transfer karakteristikleri.

## E MOSFET

E MOSFET'in yapı ve sembolü Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Bu MOSFET'te fiziksel bir kanal yoktur. N kanal E MOSFET'te kapıya uygulanan gerilim eşik değerinde, SiO<sub>2</sub> tabakasına komşu olan P malzemesinde ince bir negatif yük tabakası ve bir kanal oluşturur. Eşik geriliminin altında bir kanal oluşmaz. Kapı kaynak arasındaki pozitif gerilim arttırıldığında kanala daha çok elektron çekilir ve kanalın iletkenliği artar. N kanal E MOSFET'in çalışma prensibi Şekil 4.13'te gösterilmiştir.

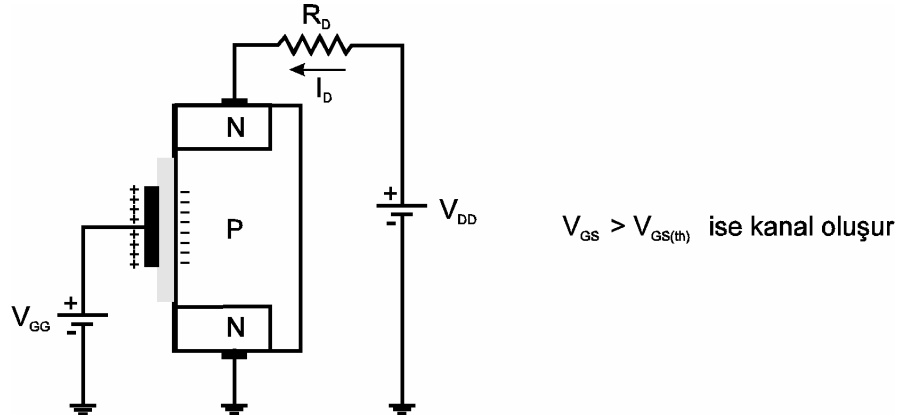


Şekil 4.12 E MOSFET'in temel yapı ve sembolü a) P kanal ve b) N kanal.

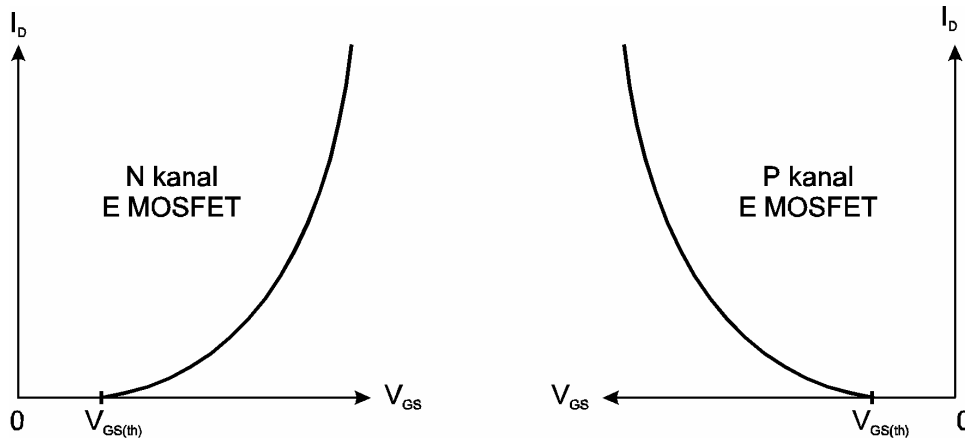
E MOSFET yalnız kanal arttırma ile kullanılır. N kanallı bir E MOSFET pozitif kapı kaynak gerilimi ile çalışır. P kanallı türünde ise negatif kapı kaynak gerilimi gerekir. Şekil 4.14'te gösterildiği gibi E MOSFET'in transfer karakteristiğinde  $V_{GS} = 0$  iken bir akım geçmez. Yani

E MOSFET’te, JFET ve DE MOSFET’teki gibi  $I_{DSS}$  parametresi yoktur.  $V_{GS}$  gerilimi  $V_{GS(th)}$  eşik gerilimine ulaşana kadar  $I_D$  akımı sıfırdır. E MOSFET’in transfer karakteristiğinin eşitliği aşağıda verilmiştir. MOSFET’in K sabiti  $V_{GS}$ ’nin belirli bir değeri için verilen  $I_{D(on)}$  akımı için katalogda verilir.

$$I_D = K [V_{GS} - V_{GS(th)}]^2$$



Şekil 4.13. N kanal E MOSFET’in çalışması.



Şekil 4.14. N ve P kanal E MOSFET’in transfer karakteristikleri.

#### Uygulama : 6

$V_{GS} = 10\text{ V}$  için  $I_{D(on)} = 3\text{ mA}$  olan E MOSFET’in  $V_{GS(th)} = 5\text{ V}$  verilmiştir.  $V_{GS} = 8\text{ V}$  için  $I_D$  akımını hesaplayınız.

#### Çözüm:

$$K = \frac{I_{D(on)}}{[V_{GS} - V_{GS(th)}]^2} = \frac{3\text{ mA}}{(10 - 5)^2} = \frac{3\text{ mA}}{25\text{ V}^2} = 0.12\text{ mA / V}^2$$

K sabiti kullanılarak  $V_{GS} = 8\text{ V}$  için  $I_D$  akımı hesaplanır.

$$I_D = K [V_{GS} - V_{GS(th)}]^2 = 0.12 \times (8 - 5)^2 = 1.08\text{ mA}$$

**Uygulama : 7**

Yanda verilen DE MOSFET kutuplama devresinde  $I_D$  akımını ve  $V_{DS}$  gerilimini hesaplayınız.

$$V_{GS(off)} = -8 \text{ V}, I_{DSS} = 12 \text{ mA}$$

$$V_{DD} = 18 \text{ V}, R_D = 600 \Omega, R_G = 10 \text{ M}\Omega$$

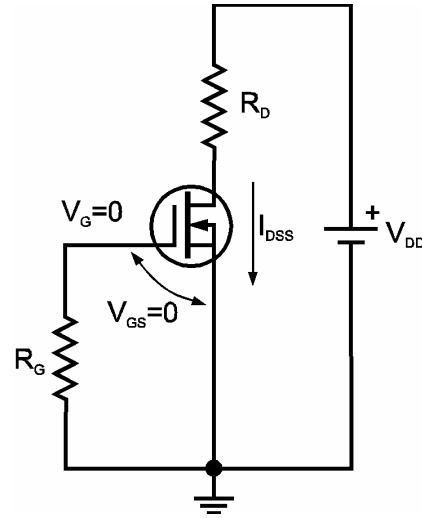
**Çözüm:**

$V_{GS} = 0$  olduğundan  $I_D = I_{DSS}$  olur.

$V_{DS} = V_{DD} - I_{DSS}R_D$  şeklinde hesaplanır

$$I_D = I_{DSS} = 12 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_{DSS}R_D = 18 - 12 \text{ mA} \times 600 \text{ M}\Omega = 10.8 \text{ V}$$

**Uygulama : 8**

Yanda verilen Geribeslemeli E MOSFET kutuplama devresinde  $V_{GS}$  gerilimi ölçü aleti ile 8.5 V olarak ölçülüyor. Devrede  $I_D$  akımını hesaplayınız.

$$V_{GS(th)} = 3 \text{ V}$$

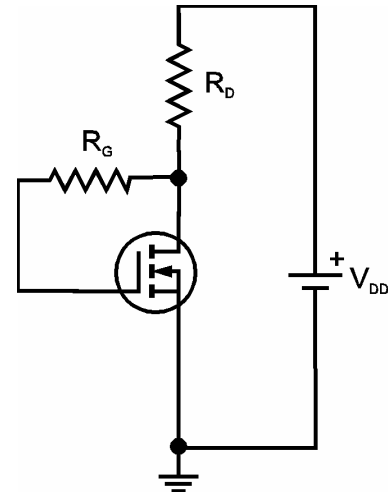
$$V_{DD} = 15 \text{ V}, R_D = 5 \text{ k}\Omega, R_G = 50 \text{ M}\Omega$$

**Çözüm:**

Geribeslemeli devrede kapı akımı sıfır kabul edilir.

$$V_{DS} = V_{GS} = 8.5 \text{ olur.}$$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D} = \frac{15 - 8.5}{5 \text{ k}\Omega} \text{ olur.}$$

**Uygulama : 9**

Yanda verilen gerilim bölücülü E MOSFET kutuplama devresinde  $V_{DS}$  ve  $V_{GS}$  gerilimlerini hesaplayınız.

$$I_{D(on)} = 3 \text{ mA @ } V_{GS} = 10 \text{ V}$$

$$V_{GS(th)} = 5 \text{ V}$$

$$V_{DD} = 24 \text{ V}$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 15 \text{ k}\Omega, R_D = 1 \text{ k}\Omega$$

**Çözüm:**

$$V_{GS} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} = \frac{15 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 15 \text{ k}\Omega} 24 = 14.4 \text{ V}$$

$$K = \frac{I_{D(on)}}{[V_{GS} - V_{GS(th)}]^2} = \frac{3 \text{ mA}}{(10 - 5)^2} = \frac{3 \text{ mA}}{25 \text{ V}^2} = 0.12 \text{ mA / V}^2$$

$$I_D = K [V_{GS} - V_{GS(th)}]^2 = 0.12 \times (14.4 - 5)^2 = 10.6 \text{ mA}$$

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D = 24 \text{ V} - 10.6 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega = 13.4 \text{ V}$$

