

Transistörler

Transistor ismi 'transferred resistor'den türetme (akım transferi yaptığı için)

1965 de, Dr. Gordon E. Moore her iki yılda tek bir IC de transistör sayısı ikiye katlanacağını ifade etti

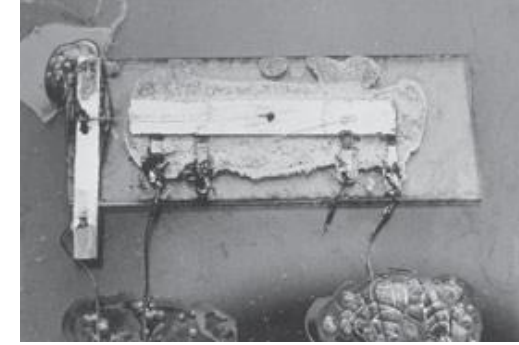
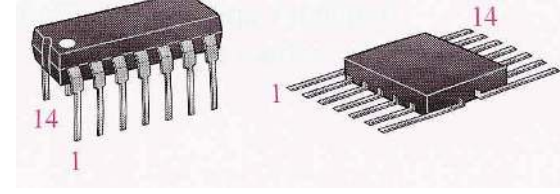
1971, intel 4004 entegresi
2300 transistör, alanı 12 mm²,
10µm



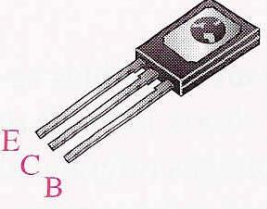
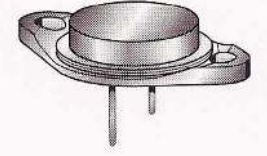
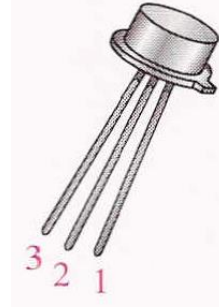
Günümüzde entegre devre,
i7 (Quad) extreme edition
işlemci 731 milyon transistöre
sahip, yıl 2008, alanı 263 mm²,
45nm.

2018, 14nm, 3milyar transistör
(CMOS).

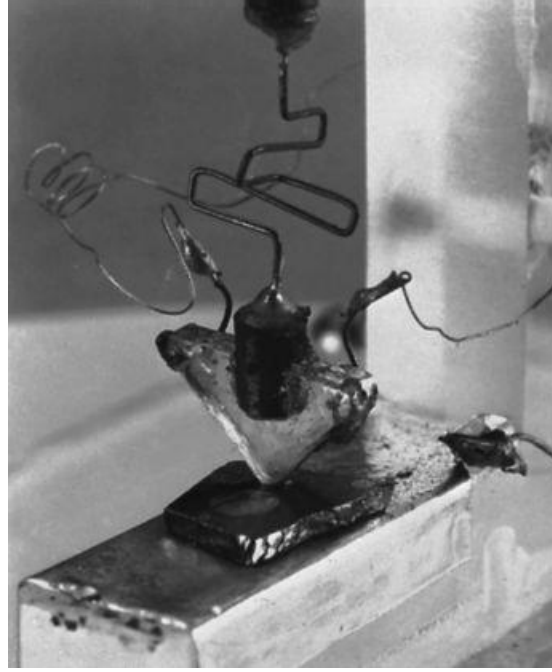
[Apple M1](#) (octa-core 64-bit
ARM64), 16 milyar transistör, yıl
2020, 119mm², 5 nm



Jack S. Kilby tarafından 1958
de ilk entegre devre
Faz kaymalı osilatör



Günümüz Transistör çeşitleri



İlk transistör, Aralık 1947



Vakuum tübe, 1904-1947

1947 de Bell Laboratuvarında BJT nin keşfi, katı-hal devre dönemini başlattı ve bu cihaz hayat tarzımızı değiştiren elektroniğe öncülük etti. BJT nin keşfi bilgi teknolojisinin revaç bulmasını sağladı ve bilgi-bazlı ekonominin ortaya çıkmasına sebep oldu.

Transistörün keşfi hala devan eden teknolojik bir devrimin başlangıcıydı. Yeni bir çağ başlamıştı, bilgi, iletişim, bilişim elektrik çağı, yani bilgisayar çağı.

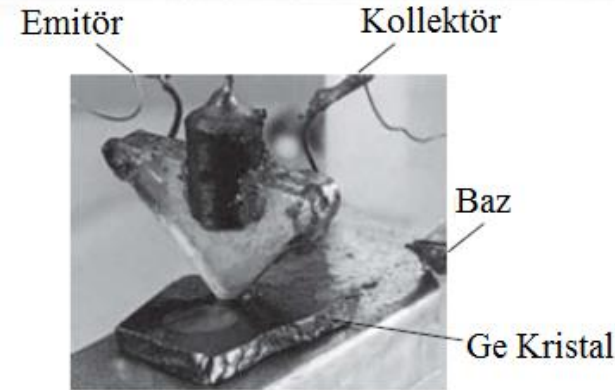
Bu gün transistör bütün sanayi (Kompüter, telekominikasyon, tıp, ev araçları, hava ve uzay araçları, araba, savunma sanayi gibi...), ve endüstrilerde, yani hayatımızın her alanında kullanılıyor. Endüstri yönetimi, sevk ve idare, yapay-zeka gibi birçok uygulamalar hep bu sayede konuşmakta olduğumuz güncel canlı konulardır.

TRANSİSTÖR TARİHÇESİ

- 1904-1947 Vakuum tüb dönemi
 - 1904 Vakuum tüb diyodun kullanılması (J. A. Fleming tarafından)
 - 1906 Triyod: Lee De Forest tarafından vakuum diyoda kontrol gridi diye isimlendirilen üçüncü bir eleman eklendi. Böylece ilk yükseltici olarak triyod yapılmış oldu.
 - İzleyen yıllarda radyo ve televizyon tüb endüstrisine büyük bir hareketlilik getirdi. Üretim 1922 de 1 milyon tübden 1937 civarında 100 milyon tübe ulaştı.
 - 1930'un ilk yıllarında dört elemanlı tetrod ve beş elemanlı pentod, elektron tüb endüstrisinde şöhret kazandı.
 - İlerleyen yıllarda tasarım, imalat tekniklerinde, yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında ve ayrıca minyatürleştirmede hızlı ilerlemeler yapıldı.
- Bütün bunlarla birlikte 23 aralık 1947 de elektronik endüstrisinde bir çığır açacak meşhur bir elektronik cihazın ilk denemesi yapıldı. 23 aralık gününün öğleden sonrasında Dr. S. William Shockley, Walter H. Brattain ve John Bardeen, Bell Telephone Laboratuvarında **ilk transistörün yükseltme işlemini** icra etmesini başarmış oldular. Bu orijinal transistör bir nokta kontak transistördür, polikristal germanyumdan yapılmıştır. 1949 sonunda polikristal yerine tek-kristal malzeme kullanılmaya başlanmasıyla çok önemli bir ilerleme sağlandı, çünkü tek-kristal daha mükemmel özellikler sundu. Bipolar Eklem Transistör de 1951 de yapılmıştır. Difüzyon yoluyla ilk ticari germanyum düz transistör 1957 de ve silikon transistör 1958 de yapıldı. Silikon transistörün etkinliği daha fazlaydı, sıcaklık kararlılığı daha iyiydi.
- Bu üç terminalli katıhal cihazın tübe karşı pek çok üstünlükleri vardı. Bunlar: Daha küçük ve daha hafifti; ısıtıcı gerekliliği yada ısı kaybı yoktu; sağlam bir yapıya sahipti; daha az güç soğurduğundan daha fazla etkindi; ısınma süresi gerektirmediğinden anlık kullanıma elverişliydi; ayrıca daha düşük voltajlarla çalışma imkanı sunmaktaydı.
- 1955 ilk FET, Dr. I. Munro Ross ve G. C. Dacey. İlk MOSFET, 1959 D. Kahng ve M. M. Atalla

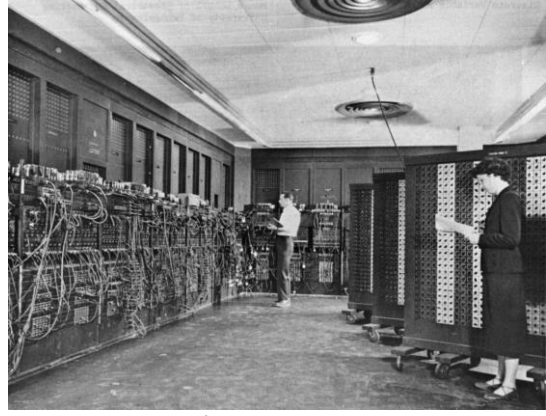


Dr. William Shockley (oturan); Dr. John Bardeen (sol); Dr. Walter H. Brattain. (Courtesy of AT&T Archives and History Center.) Bu çalışmalarından dolayı 1956 da Nobel ödülü aldılar.

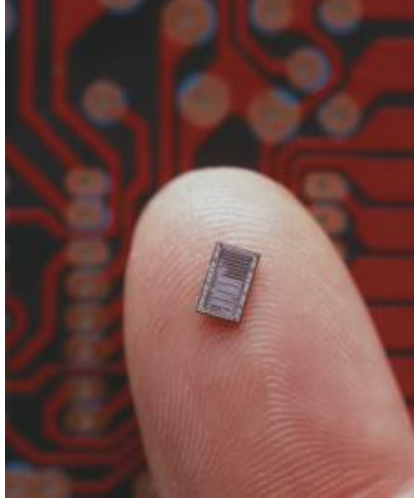


İlk transistör, 23 Aralık 1947

Çok sayıda üründen bir kaçı



1947-1955, İlk bilgisayar (elektron tübünden), ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), 27 ton, 167 m² alan, 150 kW enerji tüketimi. 4 işlem, karekök alma gibi işlemler. Top rota hesabı (20 saatlik hesap 15 saniye).



Computer chip
Intel® Pentium® 4 işlemci
42 milyon transistör, 180nm,
Yıl 2000, 217 mm², bugün ise 5 nm teknolojisi ve milyarlarca transistör



Bilgisayarların tarihsel gelişimi



UNIVAC, 1951



IBM 700, 1952-55



Apple I, 1976



IBM 5100, 1975
Taşınabilir bilgisayar



IBM 5150, 1981



Commodore 64C, (1986)

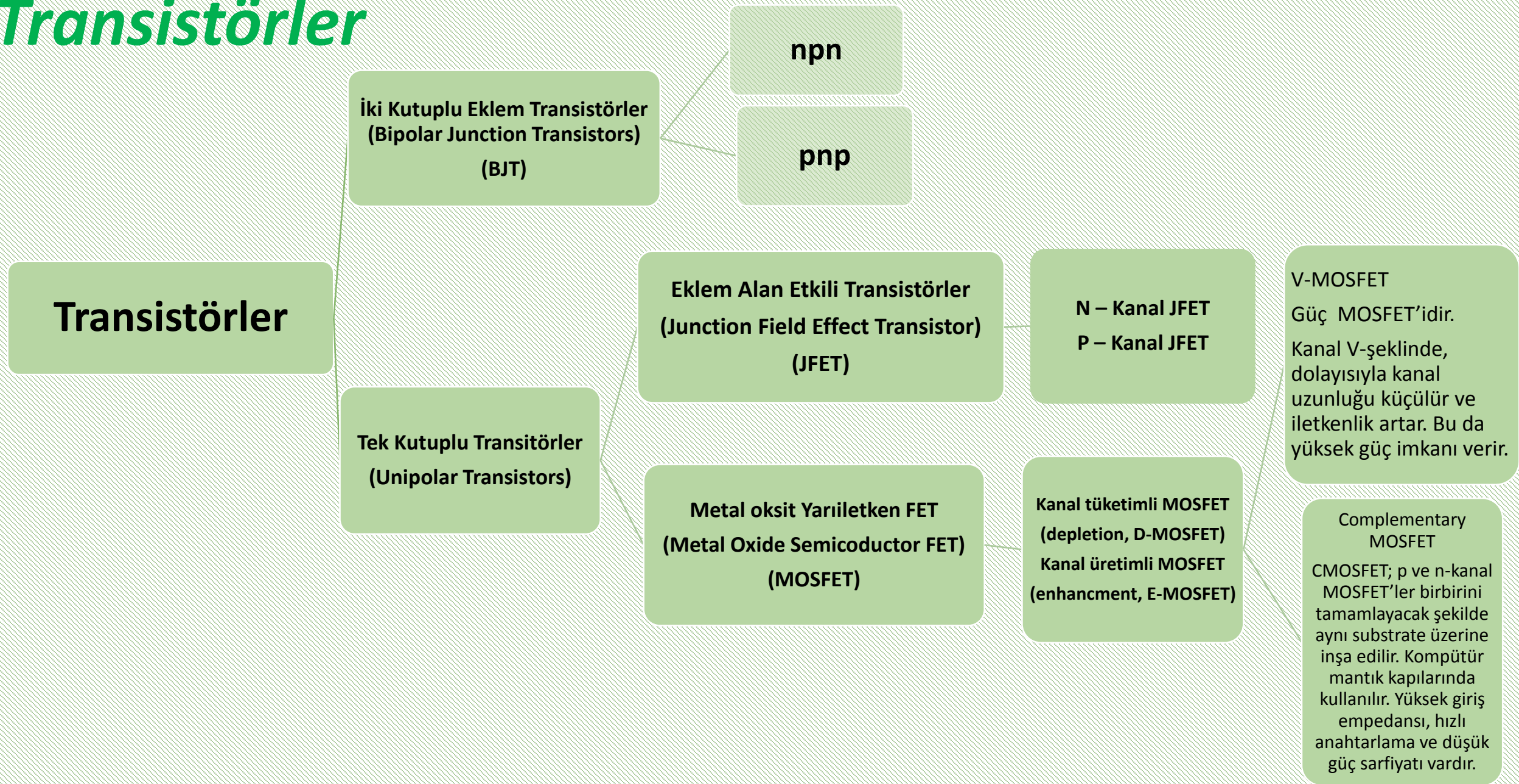


Günümüz Desktop



Günümüz Laptop

Transistörler



BJT ve FET'lerin Kıyaslanması

- MOSFET (metal oxide semiconductor field-effect transistor), geçen 10-20 yıl içerisinde günümüze dijital elektronikte hızlı ilerlemelere sebep olan lider cihazdır.
- BJT'ye kıyasla MOSFET'ler daha küçük yapılabildiği için daha az chip alanı kaplar ve daha az işlem basamaklarıyla üretilebilirler. Çalışması için daha az güç gerekir. Dolayısıyla entegre devre tasarımında çok geniş olarak kullanılmaktadır.
- Hafıza ve mikroişlemci gibi kompleks çok büyük ölçekli dijital devreler genellikle yalnız başına MOSFET'lerle gerçekleştirilebilirler. Devre tasarımcıları, dışarıdan birkaç ya da hiç rezistör kullanmadan MOSFET'lerle dijital ve analog fonksiyonları gerçekleştirecek entegre devreler tasarlayabilmektedirler. Bu özellikler MOSFET'in milyarlarcasının tek bir IC chip üstüne paketlenmesine imkan vermektedir. Bu da daha küçük hacim içerisinde daha yüksek verim, daha yüksek kapasite, daha az güç tüketimi,.. demektir.
- Bipolar eklem transistörler de yükseltici ve mantık kapılarında kullanılmaktadır. Ayrıca BJT'ler, bir kapasitif yükün hızlı anahtarlama için ihtiyaç duyulan büyük çıkış akımlarını üretme kapasitesine sahiptir.
- BJT akım kontrollü doğrusal bir cihazdır, FET voltaj kontrollü doğrusal olmayan bir cihazdır.
- BJT'ler bipolar, yani hem elektron, hem de holü yük taşıyıcı olarak kullanır (ikisini birlikte), Oysa FET'ler unipolar, yani ya elektronu yük taşıyıcı olarak kullanır yada holü yük taşıyıcı olarak kullanır (ikisinden birini).
- FET'ler BJT'lere göre çok daha yüksek giriş empedansına sahiptir.
- BJT'lerin ac kazancı FET'lere göre çok daha yüksektir. Yani BJT'ler sinyal değişimlerine çok daha fazla duyarlıdır.
- FET'ler BJT'lerden daha iyi sıcaklık kararlılığına sahiptir.
- Bu cihazların birbirine göre avantajlı olduğu farklı uygulamalar da vardır.

Transistörler

MOSFET çok önceleri biliniyor olmasına rağmen, 1970 ler ve 80 lere kadar BJT'ye ciddi bir rakip değildi. Yani BJT yaklaşık otuz yıl hem ayrı ayrı cihaz olarak hem de entegre devrelerin tercih edilen cihazı olarak çok rağbet görmüştür. 2009'a gelindiğinde, MOSFET çok yaygın kullanılan bir cihaz, ve entegre devre dizaynında tercih edilen teknoloji CMOS teknolojisi oldu. Bununla birlikte yine de BJT, otomobil uygulamaları gibi belli uygulamalarda çok kullanışlı bir cihaz olarak önemini korumaktadır. BJT hala hem tek cihaz, hem de entegre olarak çok talep gören analog devre uygulamalarında tercih edilen cihazdır. Özellikle, wireless sistemleri için radyo frekans (RF) devreleri gibi yüksek frekans uygulamalarında tercih edilir. Bipolar transistörlere dayalı çok yüksek hızlı dijital-mantık ailesi (emitör-kupl mantık) hala kullanımdadır. Sonuç olarak, MOSFET'in düşük güçlü çalışması ve yüksek giriş empedansı ile bipolar transistörlerin çok yüksek frekans işlemi ve yüksek akım sürme kabiliyetini birleştiren yeni devreler yapılabilir. Bu birleşme neticesi ortaya çıkan teknoloji BiCMOS olarak bilinir. CMOS'ların düşük akım sürme kabiliyeti npn bipolar transistörlerle arttırılarak yüksek hızlara erişilir. Dijital mantıkta yaygın kullanılır.

Transistörün, bir ac voltaj , akım ve güçte herhangi bir artışa sebep olması, uygulanan dc voltaj kaynaklarından enerji transfer etmesinin bir sonucudur.

Transistörün İki temel görevi vardır:

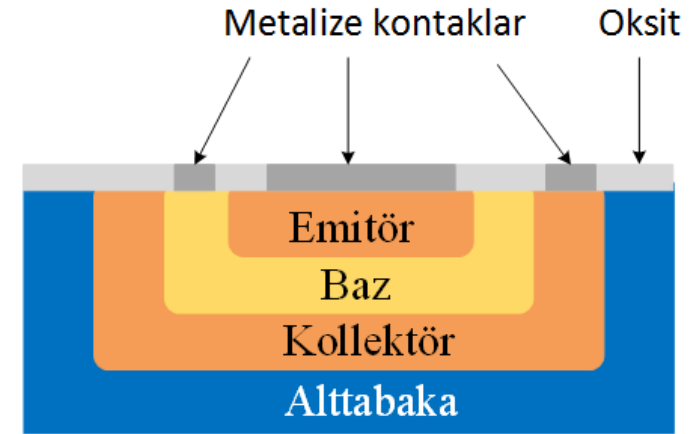
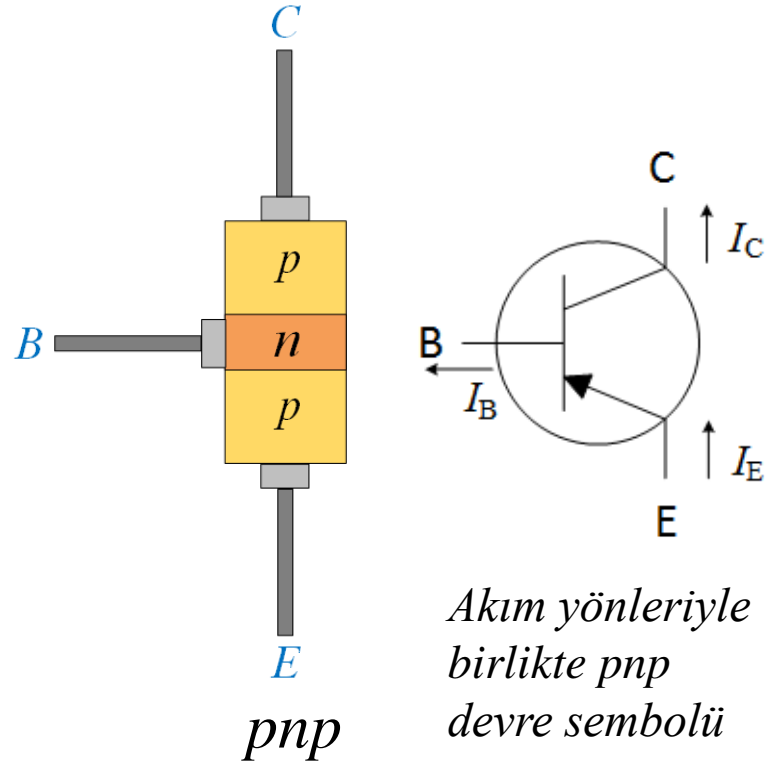
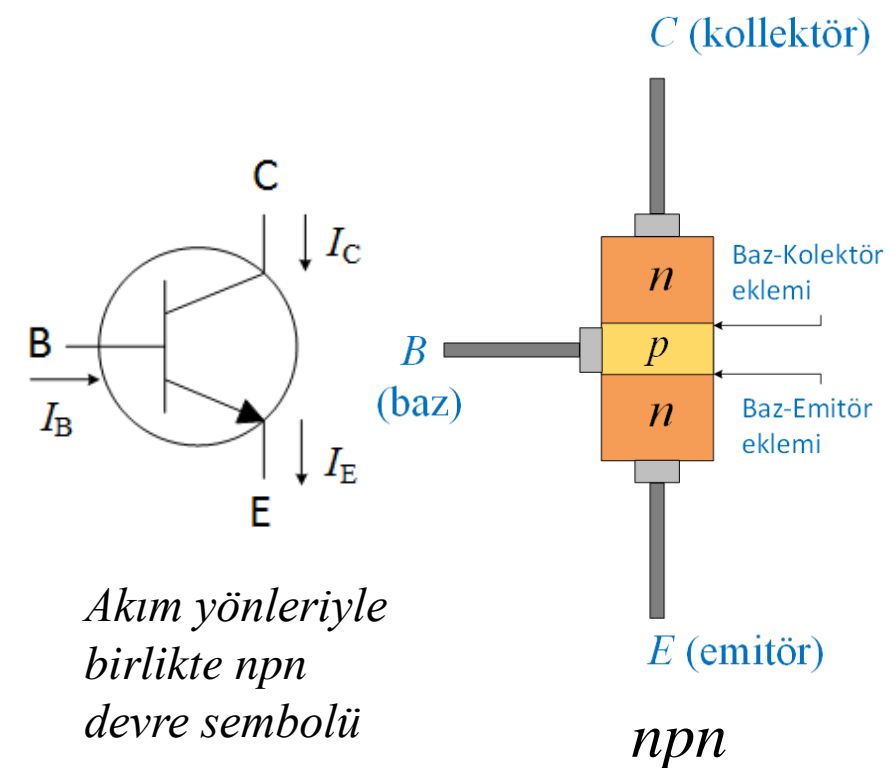
1- Yükseltme (Akım kazancı ile birlikte voltaj kazancıyla bunu sağlar)

2- Anahtarlama (Kesilim ve doyum ile bunu sağlar)

İkikutuplu Eklem Transistörler

(Bipolar Junction Transistors:BJT)

- Bipolar eklem transistörler katkılanmış üç yarıiletken tabakadan oluşur.
- Bu üç tabaka: Emitör (yoğun katkılı), Baz (az katkılı ve çok ince bir tabaka), Kollektör (orta derece katkılı) olarak isimlendirilir.
- BJT ler, p ve n tipi yarıiletkenlerin dizilim sırasına bağlı olarak *nnp* ve *pnp* olmak üzere iki çeşittir.
- BE ve BC olmak üzere iki *pn* eklemi vardır.
- **Doyum**, **aktif bölge** (lineer bölge) ve **kesilim** olmak üzere üç çalışma bölgesi vardır.
- Doyum ve Kesilim **Anahtarlama** özelliğini sağlar.
- Aktif bölgede çalışması ise **yükseltme** özelliğini sağlar.



Epitaksiyel düzlemsel yapı
Epitaksiyel: Kristal yapının uyumlu olduğu bir tabaka üstünde kristal büyütme işlemi

BJT nin çalışma Modları

BJT'nin baz-emitör ve baz kollektör olmak üzere iki eklemi vardır. Bu eklemlerin herbirinin besleme (biasing) şartlarına bağlı olarak BJT'nin farklı çalışma modları elde edilir. Tabloda verilmiştir.

Dolayısıyla transistörün aşağıdaki tabloda gösterilen modların birinde çalışabilmesi için dışardan uygulanan dc voltaj kaynaklarının bu iki ekleme doğru polaritede (ters veya ileri besleme) bağlanması gerekir.

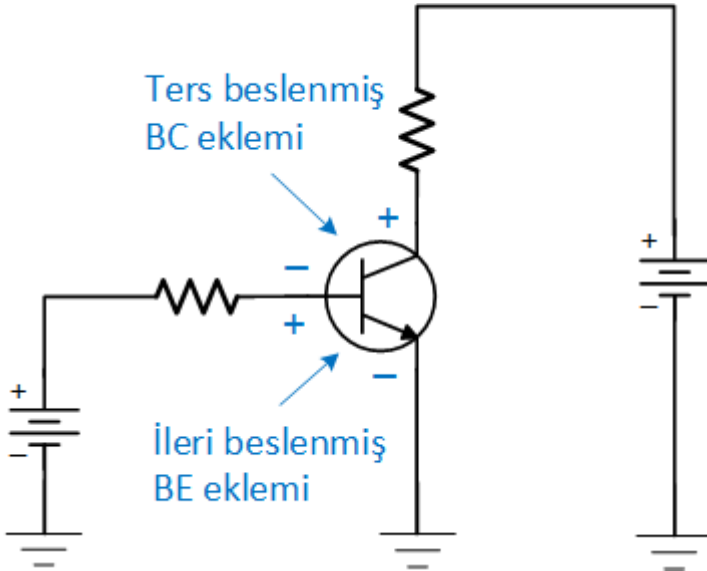
BJT nin çalışma Modları			
Mode	BE eklemi	CB eklemi	İşlem
Aktif (ileri aktif)	İleri besleme (forward bias)	Ters besleme (reverse bias)	Yükseltici
Kesilim (Cutoff)	Ters besleme	Ters besleme	Anahtarlama
Doyum (Saturation)	İleri besleme	İleri besleme	Anahtarlama

Eğer emitör eklemi ters beslenir ve kollektör eklemi de ileri beslenirse, transistör **ters aktif modda** çalışır. Bu çalışma modu ileri aktif çalışma moduna çok benzer olmasına rağmen, bu modda çalışan transistörden zayıf performans elde edilir. Bu durum kollektör ve emitörde farklı katkılama konsatrasyonlarının kullanılmasından kaynaklanır.

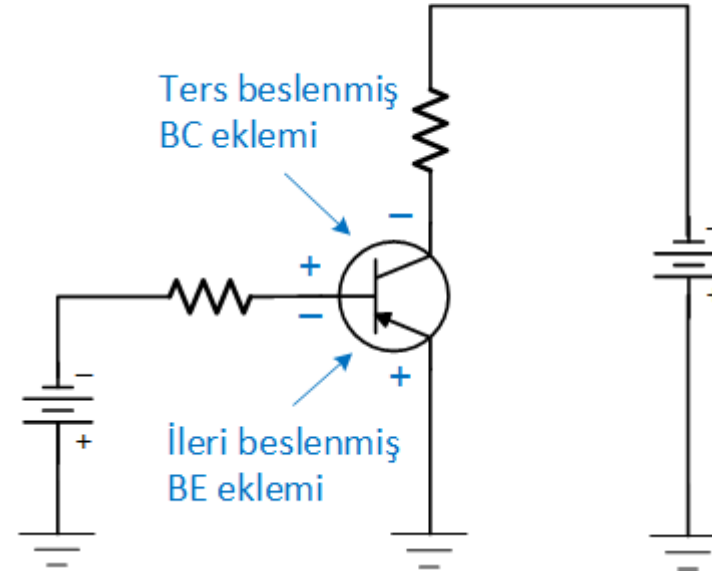
Şimdi BJT transistörün bu işlemleri nasıl yaptığını anlamaya çalışalım.

BJT'nin Aktif Modda çalışması

npn ve *pnp* transistörlerin aktif modda bir yükseltici olarak işlem yapması için hem BE eklemi hem de BC ekleminin dışardan bağlanan dc voltaj kaynakları ile uygun polaritede beslenmesi gerekir. Bu biaslamanın (beslemenin) polarite bağlantısını gösteren devre şemaları aşağıda verilmiştir. Devrelere dikkat edilirse her iki transistör tipi için BE ekleminin ileri besleme, BC ekleminin de ters beslendiği görülür. Transistörün çalışmasını göstermek için *npn* transistörü kullanacağız. *pnp* transistörün çalışma prensibi, besleme polaritelerinin ve akım yönlerinin ters, elektron ve hollerin rolleri haricinde *npn*'inkiyle aynıdır. Bir transistörün yükseltici olarak çalışması için dışardan dc voltaj kaynakları ile beslenmesinin (biasing) üç çeşidi var: Ortak emitörlü bağlantı, ortak kollektörlü bağlantı ve ortak bazlı bağlantı. Bu biaslama çeşitlerinin birbirine göre avantajlı ve avantajsız olduğu durumlar vardır. Bunların içerisinde en yaygın olan ortak-emitörlü biaslama üzerinden incelemeye devam ediyoruz. Bu bağlantılar voltaj bölücü dirençlerle tek bir dc kaynağı ile yapılmaktadır.

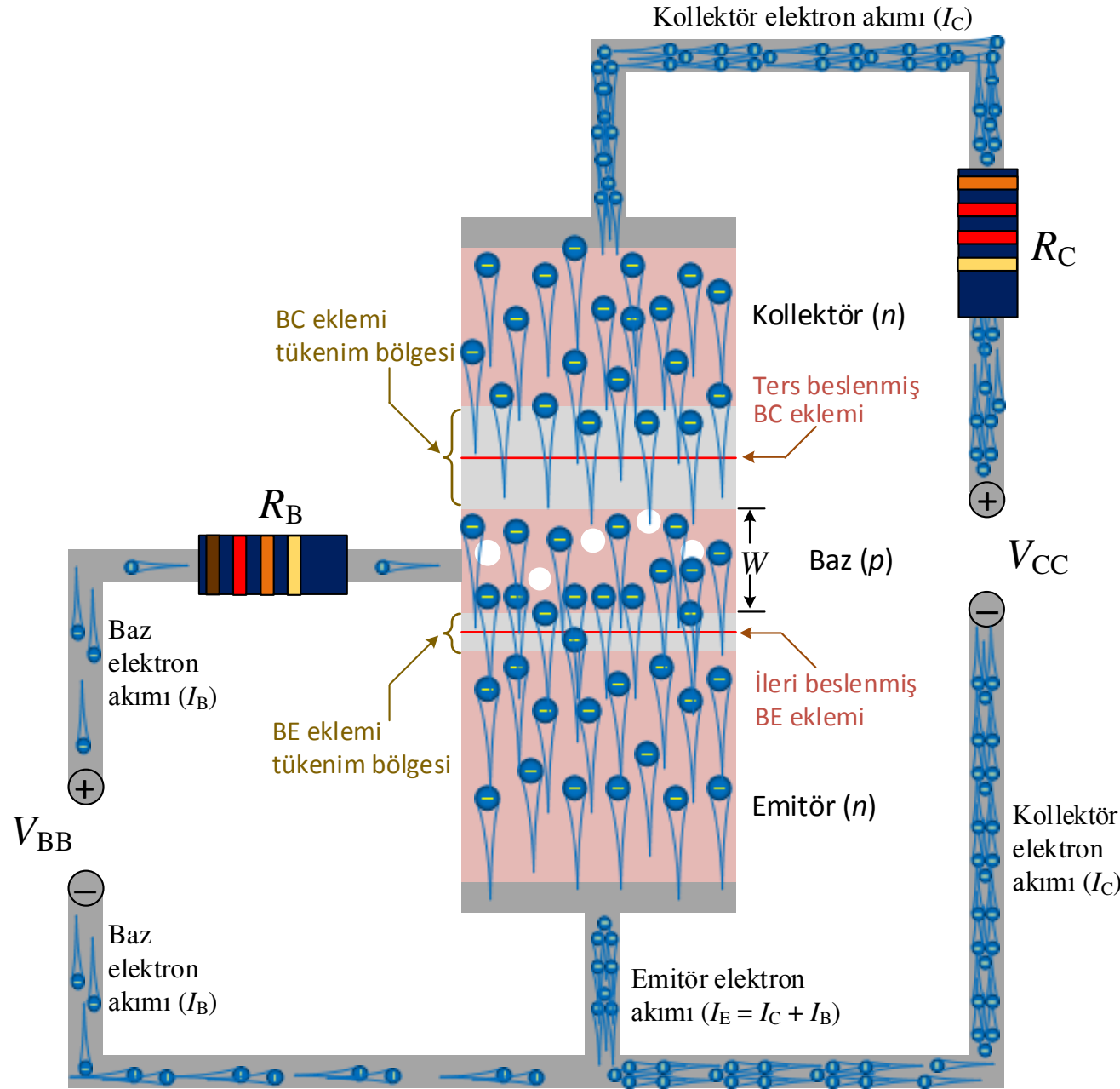


a) *npn*



b) *pnp*

BJT'nin Aktif Modda çalışması



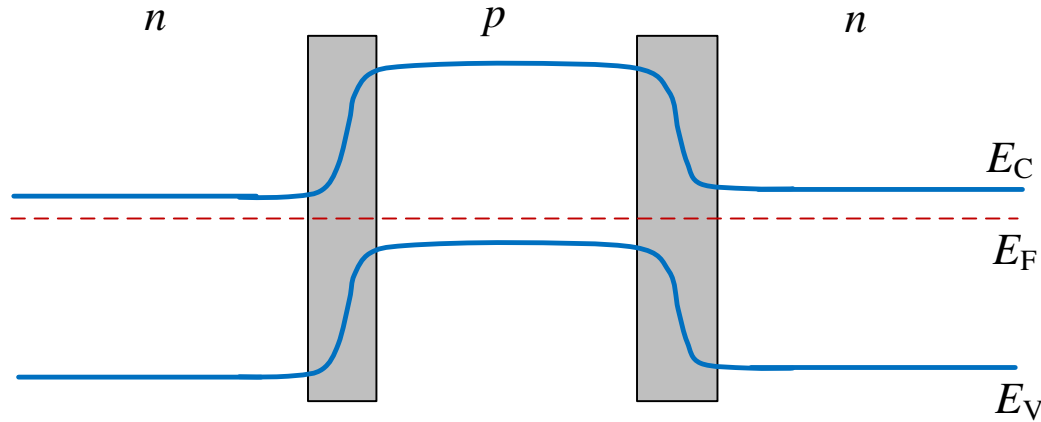
BJT aktif bölge işleminin Gösterilmesi

Aktif modda, *nnp* transistörde neler olduğuna yandaki şekle bakarak anlamaya çalışalım.

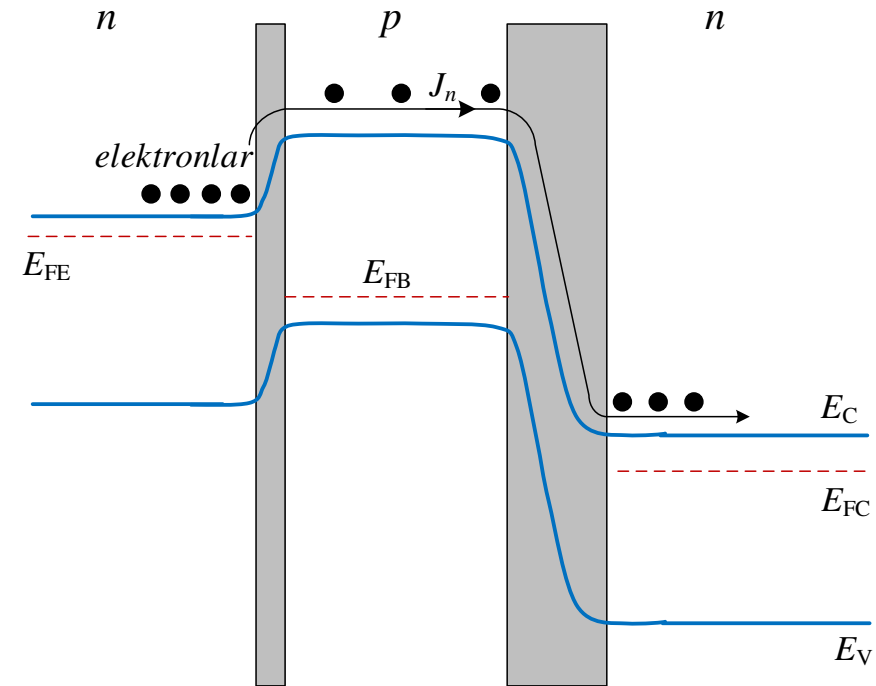
İleri besleme BE deplesyon (tükenim) bölgesini daraltır, ters besleme de bazdan kollektöre BC deplesyon bölgesini genişletir. Yoğun doplu *n*-tipi emitör bölgesindeki iletkenlik bandı (serbest) elektronları ileri beslenmiş BE eklemi içinden p-tipi baz bölgesine nüfuz ederler, ve burada azınlık taşıyıcı olurlar, tıpkı ileri beslenmiş diyotta olduğu gibi. Baz bölgesi sınırlı sayıda hole sahip olması için az doplu ve çok ince yapılır. Böylece BE ekleminden akan bütün elektronların sadece küçük bir yüzdesi bazdaki mümkün hollerle birleşebilir. Bu bağl olarak az sayıda tekrar birleşme (recombine) yapan eletronlar, valans elektronları olarak baz bağlantısından dışa akarlar, bu da küçük bir **baz elektron akımı** oluşturur. Emitörden ince, az doplu baz bölgesine akan elektronların çoğu tekrar birleşmeden BC tükenim (depletion) bölgesine nufüz ederler. Bu bölgeye geçer geçmez, pozitif ve negatif iyonların arasındaki çekim kuvvetinin oluşturduğu elektrik alan bu elektronları ters beslenmiş BC eklemi içerisinden kollektör bölgesine çeker. Gerçekte bu çekime kollektör voltaj kaynağının çekimi olarak ta bakabilirsiniz. Bundan sonra elektronlar kollektör bölgesinin içinden geçerek, kollektör bağlantısıyla dışarı ve kollektör voltaj kaynağının pozitif terminaline doğru hareket ederler. Bu **kollektör elektron akımını** oluşturur. Kollektör akımı baz akımından çok daha büyüktür. Dolayısıyla bu büyük fark da transistörün akım kazancı göstermesinin sebebidir.

BJT'nin Aktif Modda çalışması

Eğer etkin baz genişliği W yeterince büyükse, emitör tarafından baza enjekte edilen bütün elektronlar p -tipi malzemede hollerle tekrar birleşirler (recombine). Çünkü baz genişliği bazdaki elektron difüzyon uzunluğundan (L_{nB}) çok daha büyüktür ($W \gg L_{nB}$). Bu durumda iki eklem arasında etkileşme yoktur ve böylece emitör ve kollektör arasında akım olmaz. Kollektör-baz eklemi içinden akan küçük ters akım ihmal edildiğinde, cihazdan akan tek akım emitör ve baz arasından akan akımdır. Eğer etkin baz genişliği elektron difüzyon uzunluğundan çok daha küçük ise ($W < L_{nB}$), emitörden baza enjekte edilen elektronların bir çoğu, kollektör-baz eklemi etrafındaki tükenim bölgesine nüfuz edebilirler. Bu elektronlar bir kere oraya ulaşır ulaşmaz tükenim bölgesinin elektrik alanı tarafından hızlandırılırlar ve kollektöre taşınırlar. Modern bipolar Transistörlerde, emitörden baza enjekte edilen elektronların büyük bir kısmı (%99 ve daha fazlası) kollektöre ulaşırlar.



Termodinamik dengede beslemesiz enerji bant diyagramı



Aktif modda beslenmiş bir transistörün enerji bant diyagramı

Transistör Akımları

I_C , Kollektör akımı

$$V_T = \frac{kT}{q}, V_T \cong 26 \text{ mV}$$

(oda sıcaklığında)

$$I_C = I_S(e^{V_{BB}/V_T} - 1), I_C \gg I_S \text{ şartı ile } I_C = I_S e^{V_{BB}/V_T} \text{ dir.}$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_{p0}}{W}, n_{p0} = n_i^2 / N_A$$

I_S : Doyum akımı (Dengede doyum değerine erişen difüzyon akımı ile ters yönde drift akımı (azınlık taşıyıcılarının) birbirine eşit olur.)

I_S , baz genişliği ile ters orantılı, baz-emitör kesit alanı ile doğru orantılıdır. Cihazın boyutuna bağlı olarak tipik I_S değerleri 10^{-12} A ile 10^{-18} A aralığındadır. I_S , sıcaklığın kuvvetli bir fonksiyonu olan n_i^2 ile doğru orantılı olduğundan, sıcaklıkta her 5 C°'lık artış için yaklaşık ikiye katlanır.

A_E : Baz-emitör eklemının karşı kesit alanıdır.

n_{p0} : p -tipi baz bölgesindeki azınlık taşıyıcı (elektron) konsantrasyonun termal denge değeridir.

D_n : Bazda elektron difüzyon katsayısı.

q : elektron yükünün değeri.

W : Baz bölgesinin etkin genişliği (Baz bölgesinde iki tükenim bölgesi arasındaki uzaklık).

N_A : Bazda akseptör katkılama konsantrasyonu, n_i : öz taşıyıcı yoğunluğu

Transistör Akımları

I_B , Baz akımı

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$I_B = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{V_{BB}/V_T}$$

BJT transistörlerde kollektör akımının baz akımına oranına akım kazancı (β) denir. Modern *npn* transistörler için β , 50 ile 200 aralığındadır, fakat özel cihazlar için 1000 kadar yüksek olabilir.

β , iki faktörden önemli ölçüde etkilenir. Biri baz bölgesinin genişliği W , diğeri baz ve emitör bölgelerinin bağıl katkılama oranı N_A / N_D dir. Yüksek bir β elde etmek için bazın ince ve az katkılı olması gerekir (W küçük) ve emitörün de yoğun doplu olması gerekir. Modern entegre üretim teknolojileri için, W nanometre aralığındadır.

Transistör Akımları

I_E , Emitör akımı

$$I_E = I_C + I_B$$

Emitör akımı da kollektör ve baz akımların toplamına eşittir.

$I_B = I_C / \beta$ ile,

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_C$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_S e^{V_{BB}/V_T}$$

$$I_C = \alpha I_E$$

Burada α , β ile orantılı bir sabittir.

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

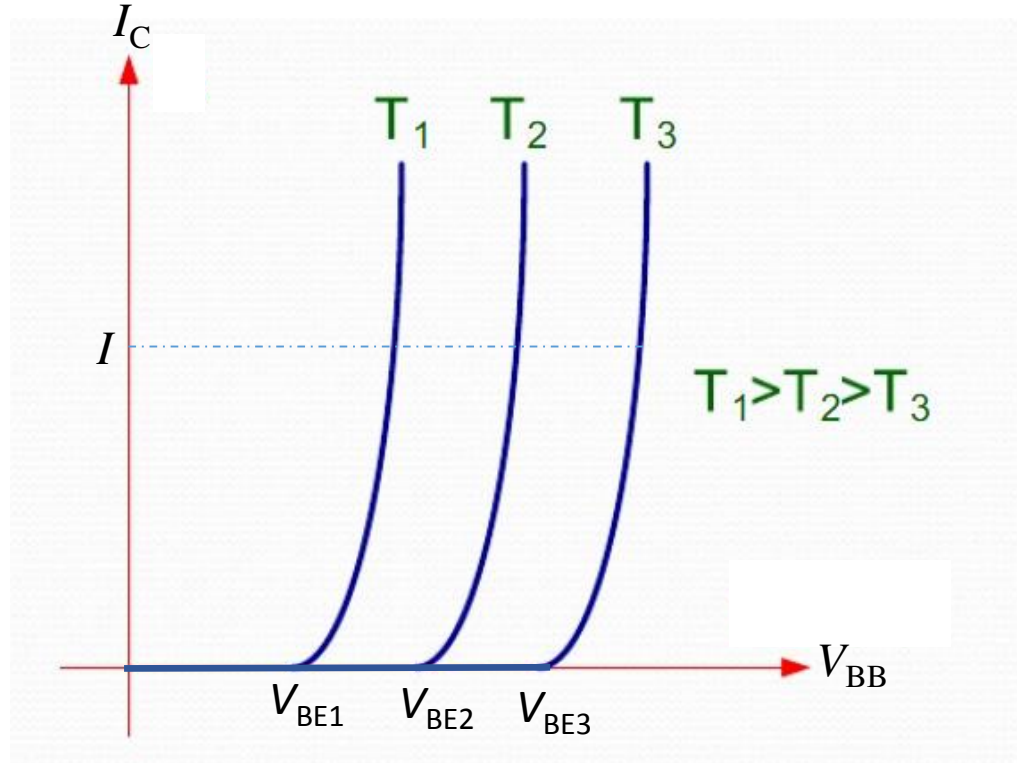
Dolayısıyla, $I_E = (I_S / \alpha) e^{V_{BB}/V_T}$

α , 1 den küçük fakat 1'e çok yakın bir sabittir. Örneğin $\beta = 100$ için $\alpha \cong 0.99$ dur.

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ denklemi önemli bir gerçeği açığa vurur. Kesre dikkat edilirse α daki küçük değişimler, β da büyük değişmelere sebep olur. Bu matemetiksel gözlem kendini fiziksel olarak şöyle gösterir: Aynı tip transistörler önemli ölçüde farklı β değerlerine sahip olabilirler. Mesela, $\alpha = 0.99$ için, $\beta = 99$ dur. Oysa $\alpha = 0.98$ için, $\beta = 49$ dur; $\alpha = 0.97$ için, $\beta = 32$ dir. α , ortak-baz akım kazancı olarak da isimlendirilir.

Silikon diyotlarda olduğu gibi, eklem sabit akımda işlem yapıyor olmak şartıyla, emitör-baz eklemine uçları arasına düşen voltaj, sıcaklıkta her 1 °C yükselme için 2 mV civarında azalır. Bu sıcaklık bağıllığı, *nnp* transistör için, üç farklı sıcaklıkta I_C - V_{BB} grafiği çizilerek aşığıda gösterilmiştir. $T_1 > T_2 > T_3$ ise sırasıyla $V_{BE1} < V_{BE2} < V_{BE3}$ dir.



I_C - V_{BE} karakteristiği üstüne sıcaklığın etkisi. Kesikli çizgi ile gösterilen sabit emitör akımında V_{BE} , $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ile değişir.

Akım ve Voltaj Analizi

$$V_{R_B} = V_{BB} - V_{BE}, \quad V_{R_B} = I_B R_B$$

Dolayısıyla $I_B R_B = V_{BB} - V_{BE}$, ise $I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$ olur.

$$V_{CE} = V_{CC} - V_{R_C}, \quad V_{R_C} = I_C R_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C, \text{ burada } I_C = \beta I_B$$

$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$, $V_{BE} \cong 0.7V$ dur, silikon transistör için.

Geçekte 0.9 V kadar yüksek olabilir. Akım bağımlıdır. Ayrıca sıcaklıkla da değişebilir.

I_B : dc baz akımı

I_E : dc emitör akımı

I_C : dc kollektör akımı

V_{BE} : emitöre göre bazdaki dc voltaj

V_{CB} : baza göre kollektördeki dc voltaj

V_{CE} : emitöre göre kollektördeki dc voltaj

Örnek: Yandaki devrede I_B , I_E , I_C , V_{BE} , V_{CE} , V_{CB} 'yi belirleyiniz.

$$V_{BE} \cong 0.7V$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{6V - 0.7V}{12k\Omega} = 0.442mA = 442\mu A$$

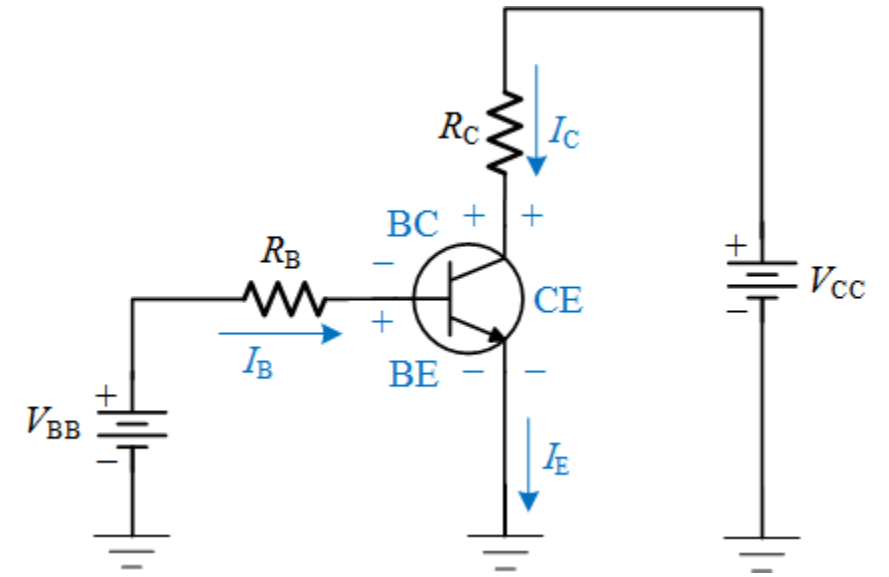
$$I_C = \beta I_B = (100)(442\mu A) = 44.2mA$$

$$I_E = I_C + I_B = 44.2mA + 0.442mA = 44.642mA$$

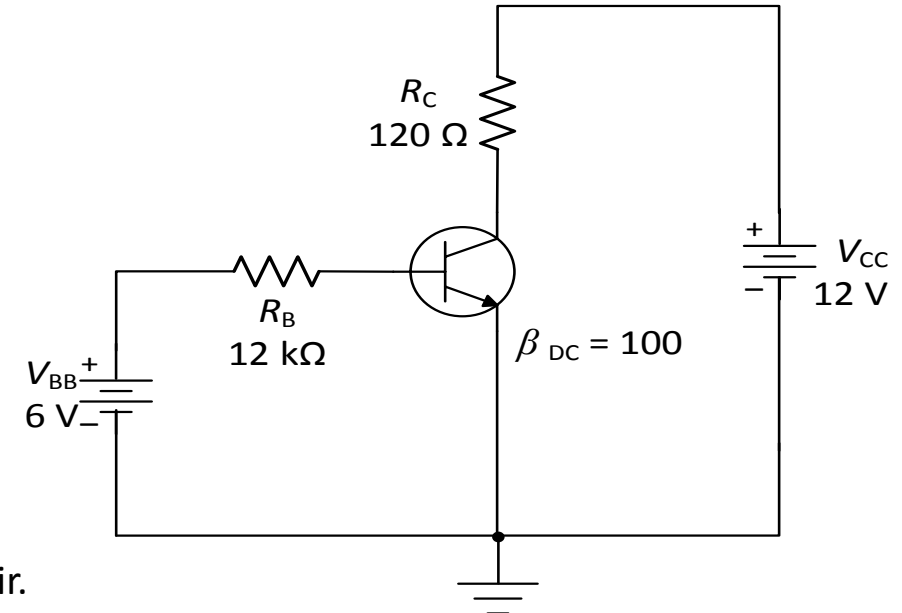
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 12V - (44.2mA)(120\Omega) = 5.304V$$

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 5.304V - 0.7V = 4.604V$$

Kollektör bazdan daha yüksek bir voltajda olduğundan, kollektör-baz eklemi ters-beslenmiştir.

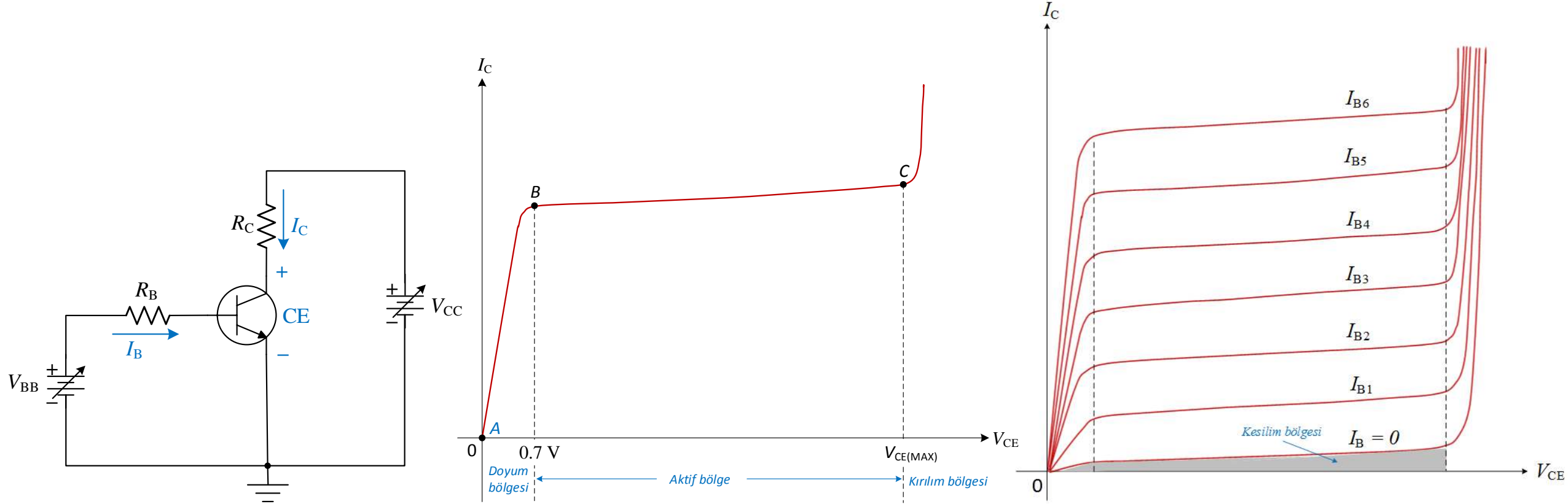


Transistör akım ve voltajları



Kollektör Karakteristik Eğrileri

Şekil (a) daki gibi bir devre kullanarak baz akımı I_B nin belli değerleri için, kollektör-emitör voltaj V_{CE} ile kollektör akımı I_C nin nasıl değiştiğini gösteren bir grup kollektör karakteristik eğrileri üretilebilir. Devrede hem V_{BB} hem de V_{CC} değişken voltaj kaynağıdır. Şimdi V_{BB} nin, I_B nin belli bir değeri için ayarlandığını ve V_{CC} nin de sıfır olduğunu farz edelim. Bu şart altında hem baz-emitör hem de baz-kollektör eklemi ileri beslenir. Çünkü emitör ve kollektör sıfır voltadır ve baz yaklaşık 0.7 tur. Toprağa doğru düşük empedans yolundan dolayı baz akımı baz-emitör eklemi içerisinde oluşur, dolayısıyla I_C sıfırdır. Her iki eklem ileri beslendiğinden transistör **doyum** çalışma bölgesindedir. V_{CC} arttırılırken, I_C artar, fakat V_{CE} daha yavaş artar. Bu davranış şekil (b) de, karakteristik eğrinin A ve B noktaları arasındaki kısım gösterilmiştir. İleri beslenmiş baz-kollektör ekleminden dolayı V_{CE} , 0.7 V tan daha küçük değerlerde kaldığından, V_{CC} artarken I_C artar.



(a) Devre

(b) Bir tane I_B değeri için V_{CE} 'ye karşı I_C eğrisi

(c) I_B nin birkaç değeri için V_{CE} 'ye karşı I_C eğri ailesi
 $I_{B1} < I_{B2} < I_{B3} \dots$

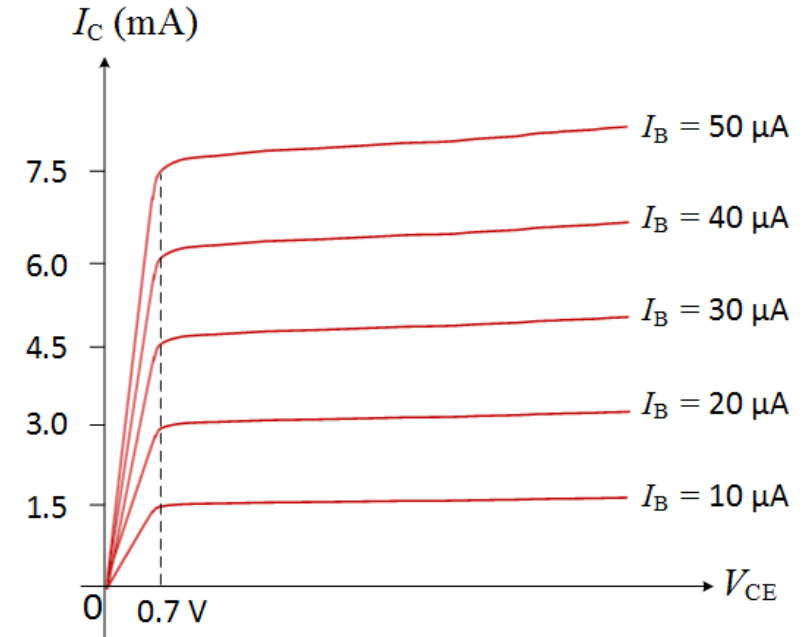
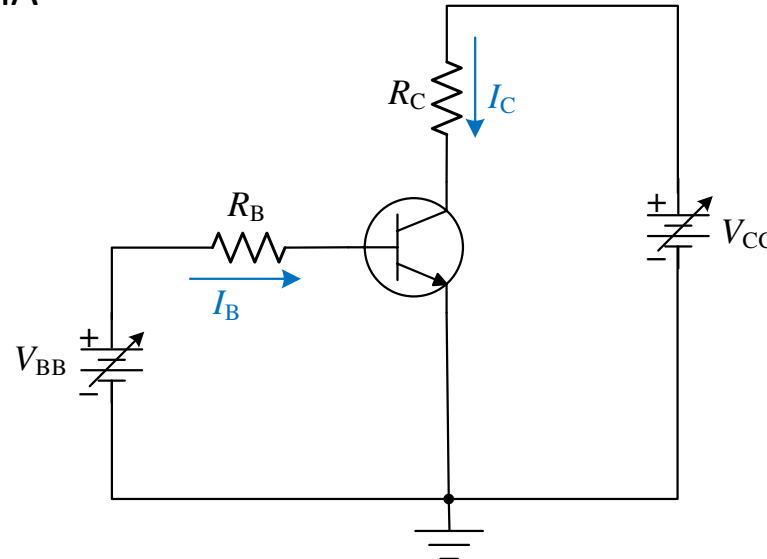
Kollektör Karakteristik Eğrileri

İdeal olarak V_{CE} , 0.7 V'ü aştığında baz-kollektör eklemi ters beslenmiş olur ve transistör **aktif** yada **lineer** çalışma bölgesine girer. Yani $V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$ dir, dolayısıyla V_{CE} , V_{BE} den daha büyük olduğunda V_{BC} negatif olur, yani ters beslenmiş olur. Bu noktadan sonra V_{CE} deki artış ters yönde V_{BC} deki artışla dengelenir. Dolayısıyla, baz-kollektör eklemi ters beslenir beslenmez I_C düzleşir ve bundan sonra V_{CE} artmaya devam ederken I_B nin belli bir değeri için I_C yaklaşık olarak sabit kalır. Gerçekte, I_C baz-kollektör tükenim bölgesinin genişlemesinden dolayı çok hafif artar. Bu genişleme baz bölgesinde tekrar birleşme için mümkün hollerin sayısını azaltır, dolayısıyla bu da etkin olarak β_{DC} de hafif bir artışa sebep olur. Bu davranış şekil (b) de kollektör karakteristik eğrisi üstünde B ve C arasındaki kısımla gösterilmiştir. Karakteristik eğrinin bu kısmı için I_C nin değeri sadece $I_C = \beta I_B$ ile ifade edilen bağıntıyla belirlenir. V_{CE} yeterince yüksek bir voltaja ulaştığında, ters beslenmiş baz-kollektör eklemi **kırılıma (breakdown)** uğrar ve şekil (b) de C noktasının sağındaki eğriyle gösterildiği gibi, kollektör akımı hızlıca artar. Bir transistör asla kırılım bölgesinde çalıştırılmamalıdır. Şekil (c) de gösterildiği gibi I_B nin birkaç değeri için V_{CE} ye karşı I_C çizildiğinde, bir kollektör karakteristik eğri ailesi elde edilir. $I_B = 0$ olduğunda, gösterildiği gibi, çok küçük bir kollektör sızıntı akımı olmasına rağmen transistör **kesilim** bölgesindedir. Bu çok küçük kollektör sızıntı akımı gösterim için grafik üstünde abartılarak çizilmiştir.

Örnek: Şekildeki devre için I_B yi ,10 μA adımlarla 10 μA den 50 μA 'e kadar alıp ideal bir kollektör eğri ailesi çiziniz. $\beta_{DC} = 150$ alınız. V_{CE} nin **kırılımı** aşmadığını kabul ediniz.

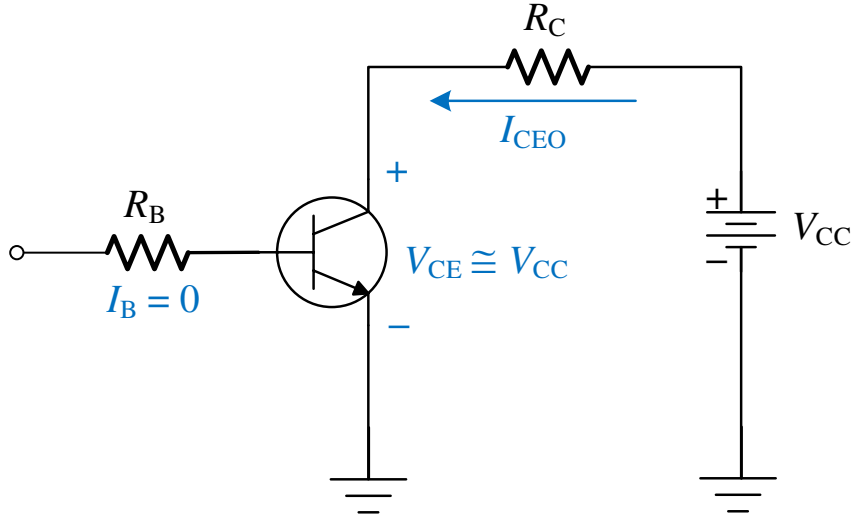
Çözüm: $I_C = \beta I_B = (150)(10\mu A) = 1.5 \text{ mA}$

I_B	I_C
10 μA	1.5 mA
20 μA	3 mA
30 μA	4.5 mA
40 μA	6 mA
50 μA	7.5 mA



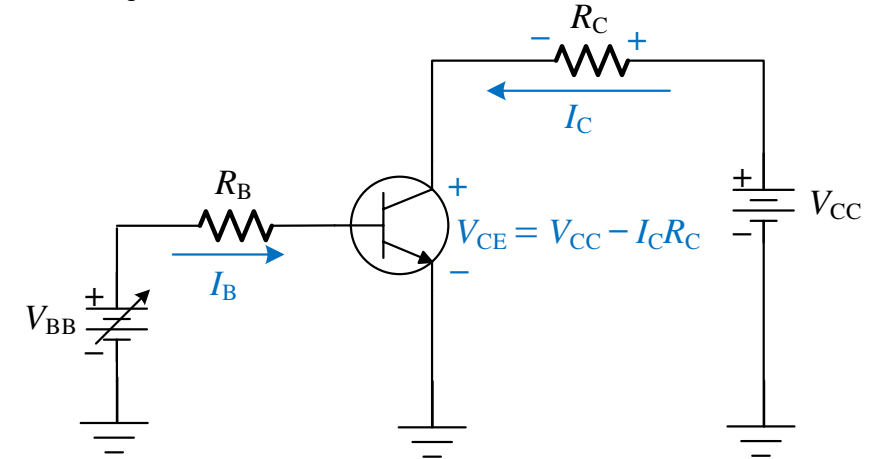
Kesilim (CutOff)

Daha önce ifade edildiği gibi, $I_B = 0$ olduğunda, transistör kesilim bölgesindedir. Bu durum aşağıdaki devrede gösteriliyor. Bazın açık devre olması, sıfır baz akımını netice veriyor. Bu şart altında, termal olarak üretilen azınlık taşıyıcılarından dolayı çok küçük bir kollektör sızıntı akımı (I_{CEO} , base open) oluşur. I_{CEO} son derece küçük olduğundan devre analizinde genellikle ihmal edilir, dolayısıyla kesilimde $I_C = I_{CEO} \cong 0$ olduğundan, $V_{CE} = V_{CC}$ alınır. Kesilimde hem baz-emitör eklemi hem de baz-kollektör eklemi ters beslenmiş olurlar.



Doyum (Saturation)

Baz-emitör eklemi ileri beslendiğinde ve baz akımı arttırıldığında, kollektör akımı da artar ($I_C = \beta I_B$) ve kollektör direnci üzerine daha fazla voltaj düşmesi sonucu ($V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$) den V_{CE} azalır. Bu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. V_{CE} doyum değerine $V_{CE(doy)}$ ulaştığında, baz- kollektör eklemi de ileri beslenir ve artık bundan sonra I_B deki artış devam etse de bile I_C artık artmayacaktır. Bu noktada transistör doyumdadır, $I_C = I_{C(doy)}$ ve artık bu noktadan sonra $I_C = \beta I_B$ bağıntısı geçerli olmayacaktır. Transistör için $V_{CE(doy)}$ kollektör eğrilerinin büküm noktasının aşağısında bir yerde oluşacaktır. Bu değer genellikle silikon transistör için sadece birkaç 0.1 V civarındadır.



Dc Yük Doğrusu

Şekilde gösterildiği gibi, kollektör karakteristik eğri ailesi üzerinde kesilim ve doyum noktaları arasına çizilen doğruya **dc yük doğrusu** denir. Yük doğrusunun dibi ideal **kesilim**dir, burada $I_C = 0$ ve $V_{CE} = V_{CC}$ dir. Yük doğrusunun tepesi **doyum**dur, burada da $I_C = I_{C(doy)}$ ve $V_{CE} = V_{CE(doy)}$ dur. Yük doğrusu boyunca kesilim ve doyum arası transistörün **aktif çalışma bölgesidir. Yani transistör uygun bir yükseltici olarak çalışabilmesi için bu aralıkta tutulması gerekir.** Grafiğe dikkat edilirse baz akımı arttıkça doğru üzerindeki noktalar doyuma yaklaşmaktadır. $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ den $I_C = (-\frac{1}{R_C})V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$ şeklinde yük doğrusunun negatif eğimli denklemi elde edilir.

Transistörün besleme değerleri transistöre bir dc çalışma noktası dikte eder, buna (*quiescent*) Q-noktası denir. Girişteki sinyalin çıkışta bozulmadan yükseltilmesi için, bu nokta dışardan bağlanan dc bias voltaj ve direnç değerleri tarafından yük doğrusu üstünde doğru yerde kurulmalıdır. Q-noktasının değerleri I_C ve V_{CE} dir. Girişten uygulanan ac sinyalin değişen değerleri bu Q-noktasının değerlerini de yukarı aşağı değiştirecektir. Dolayısıyla Q-noktası yük doğrusu üzerinde doğru yerde kurulmamışsa, mesela kesilime yakın veya doyuma yakın seçilmişse, yada ac sinyalin çıkışta oluşturduğu değişimin maksimum değerleri Q noktasını hem kesilimin hem de doyumun ötesine sürüklerse, bu durumlarda çıkış sinyali bozulacaktır, bu yüzden de istenen düzgün yükseltme işlemi yapılmamış olacaktır. Bu durumlar bir sonraki slaytta gösterilmiştir. Bu yüzden dc besleme çok önemlidir.

Örnek: Şekildeki transistörün doyumda olup olmadığını belirleyiniz.

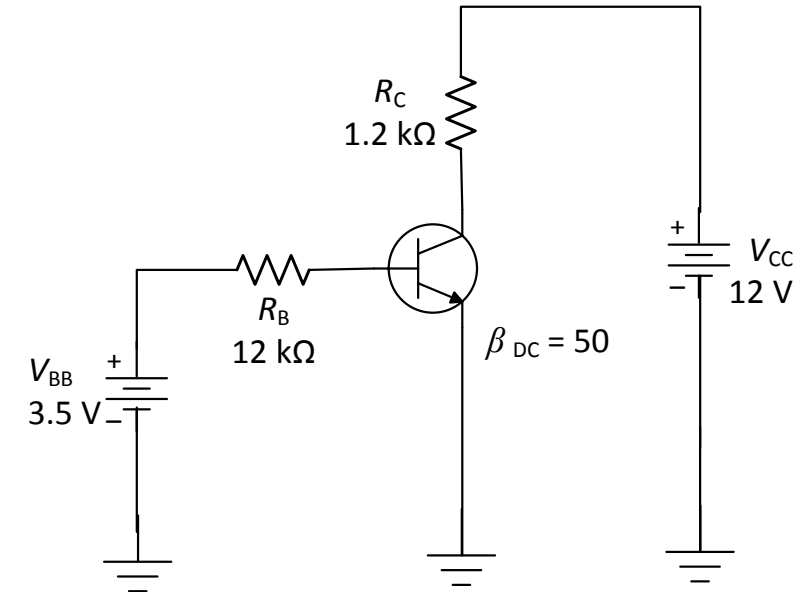
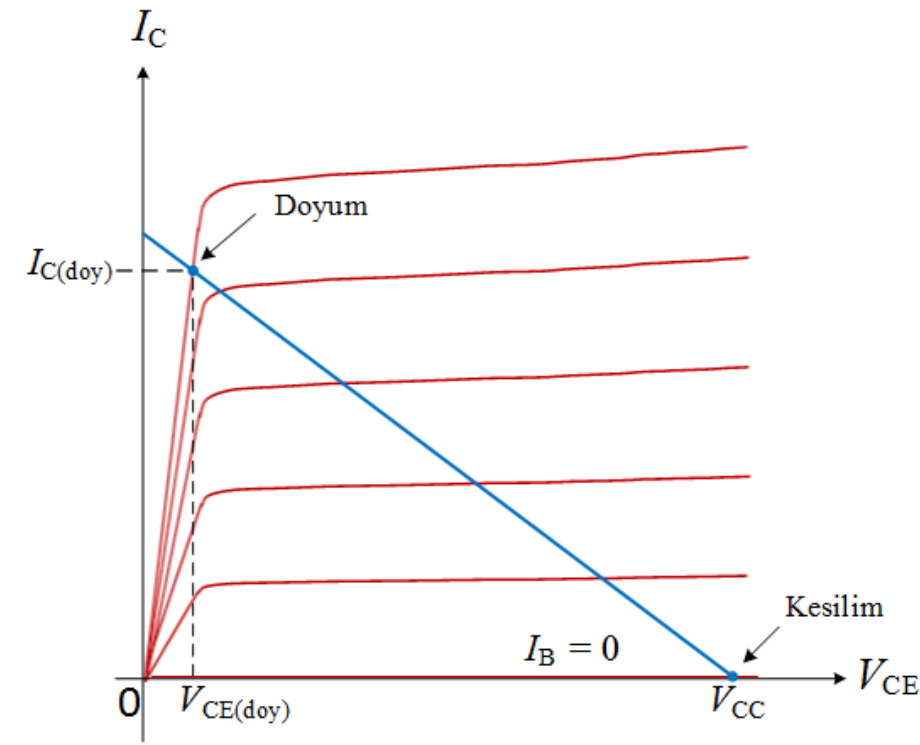
$V_{CE(doy)} = 0.2V$ kabul ediniz. $\beta = 50$. Silikon transistör.

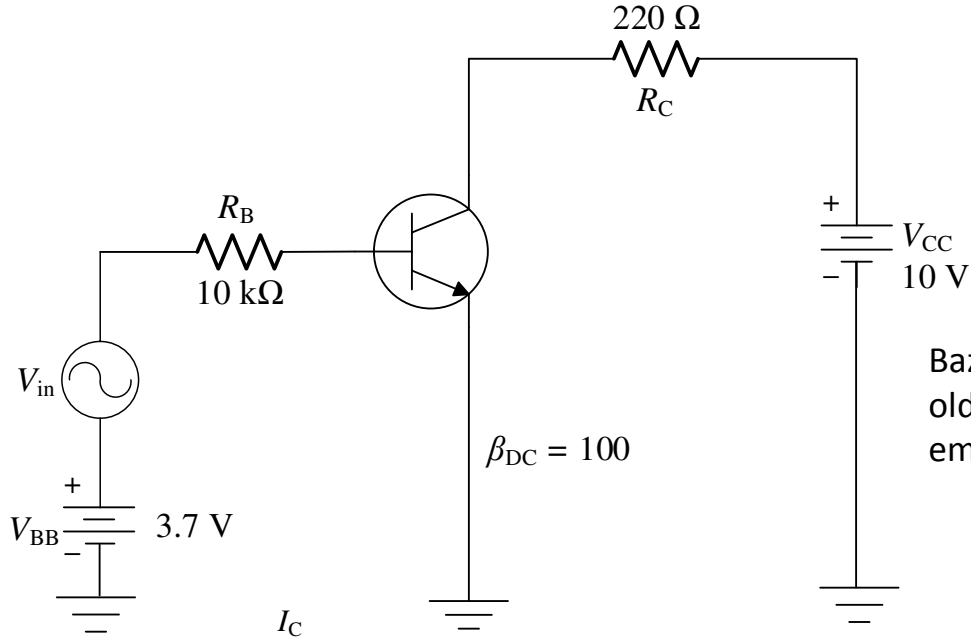
Çözüm: $I_{C(doy)} = \left(\frac{V_{CC} - V_{CE(doy)}}{R_C} \right) = \frac{12V - 0.2V}{1.2k\Omega} = 9.83mA$

Şimdi I_B değerinden I_C yi bulalım ve $I_{C(doy)}$ ile kıyaslayalım.

$I_B = \left(\frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \right) = \frac{3.5V - 0.7V}{12k\Omega} = 0.23mA$ dir.

$I_C = \beta I_B = (50)(0.23mA) = 11.5mA$ olur. Kıyasladığımızda baz akımının ürettiği kollektör akımı doyum akımından daha büyük olduğu için transistör doyuma gitmiş olur ve 11.5 mA lik kollektör akım değerine asla ulaşamaz. I_B yi daha fazla arttırsanız bile kollektör akımı doyum değerinde kalır. Doyum değerini, yukarıda denklemden de anlaşıldığı üzere besleme (biasing) elemanlarının değeri belirler.



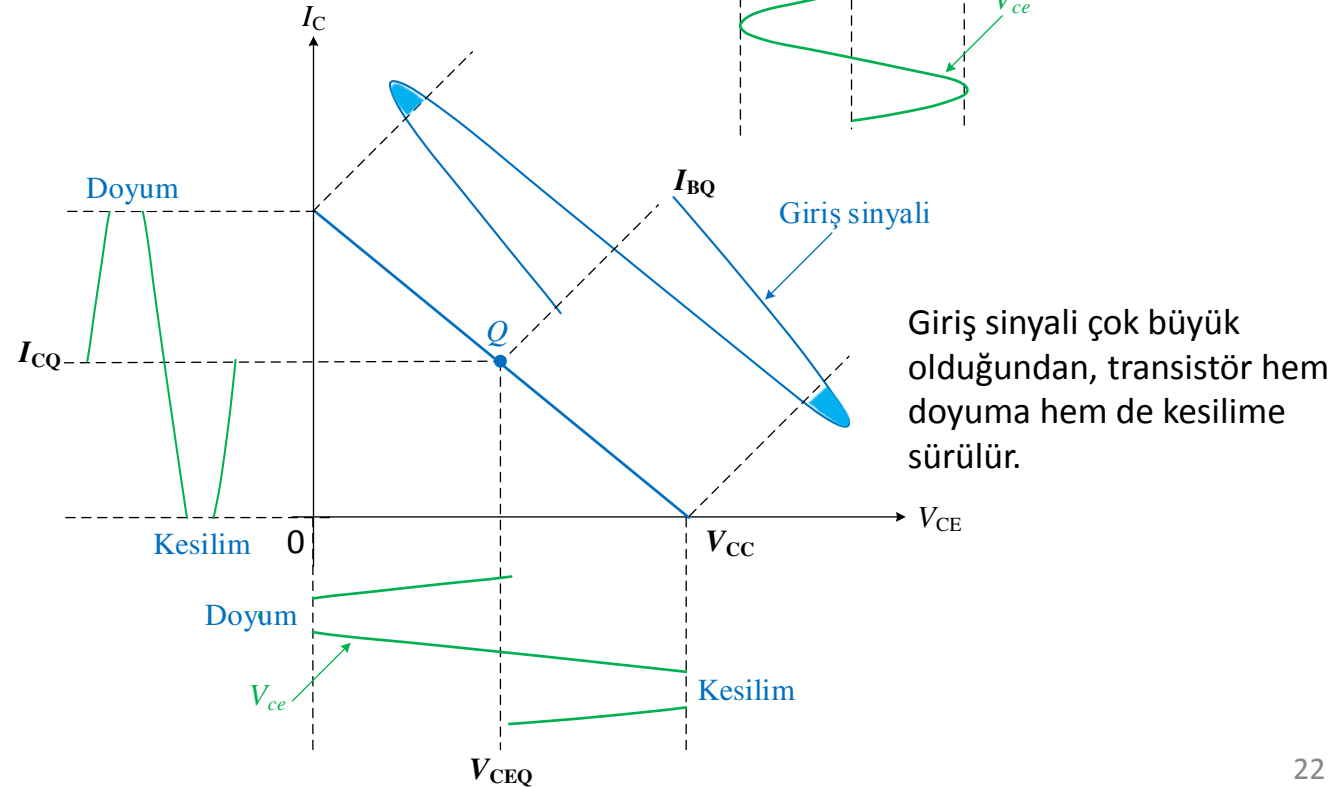
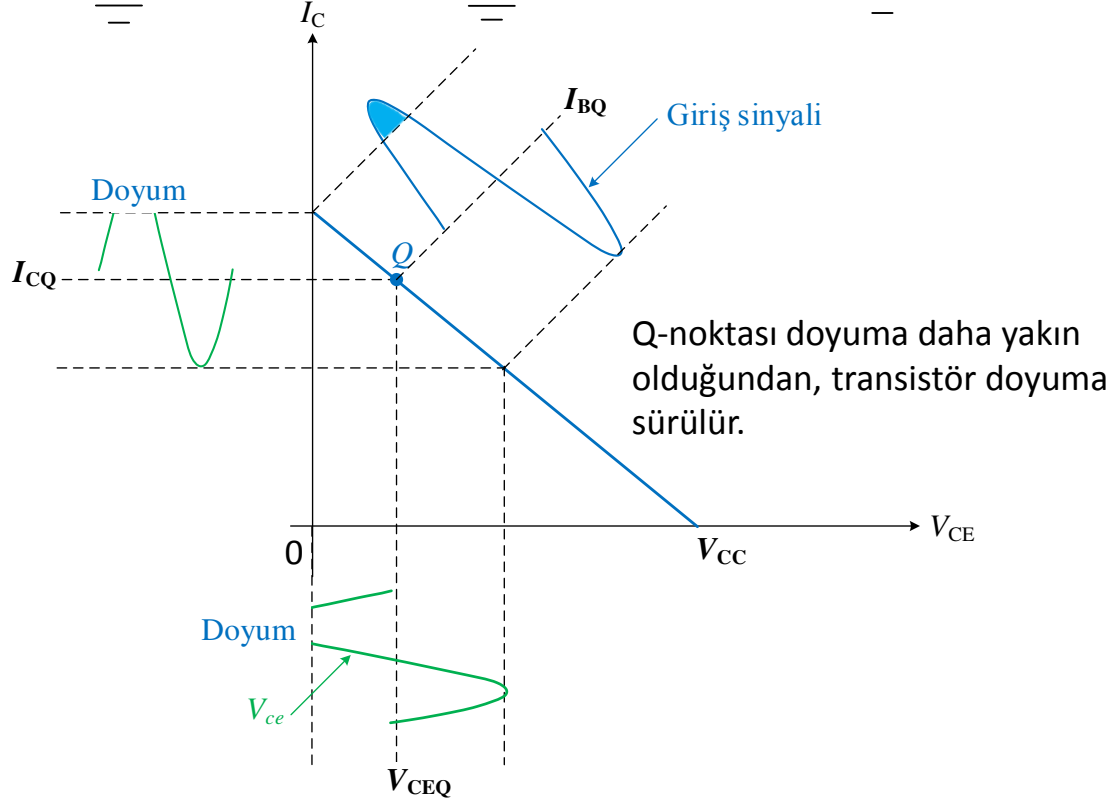
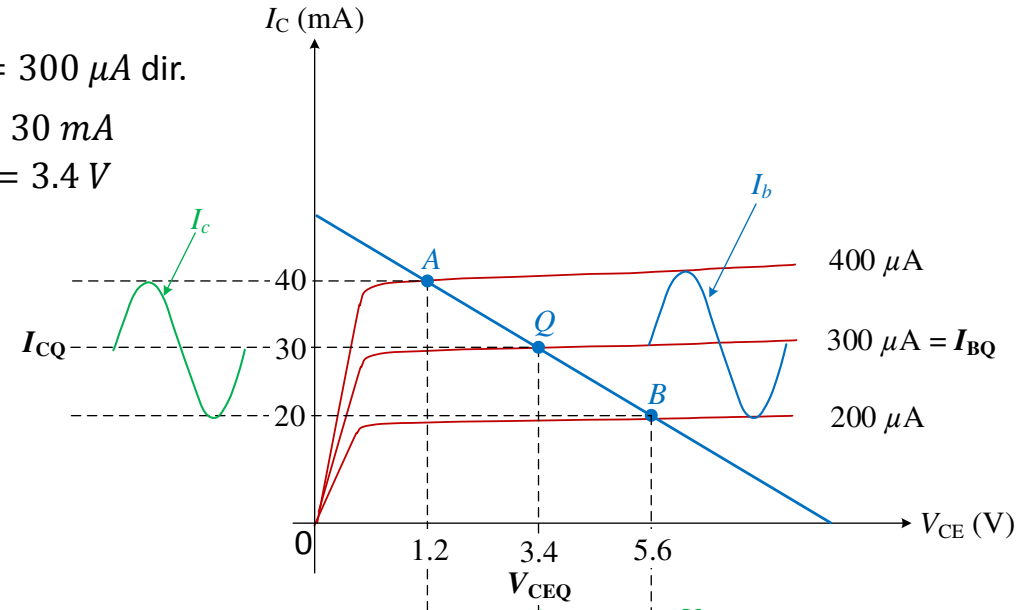


$$I_{BQ} = \left(\frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \right) = \frac{3.7 \text{ V} - 0.7 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 300 \mu\text{A} \text{ dir.}$$

$$I_{CQ} = \beta I_B = (100)(300 \mu\text{A}) = 30 \text{ mA}$$

$$V_{CEQ} = 10 - (30 \text{ mA})(220\Omega) = 3.4 \text{ V}$$

Baz akımındaki değişimin sebep olduğu kollektör akımı ve kollektör-emitör voltajındaki değişimler.



Yükseltici Olarak Transistör

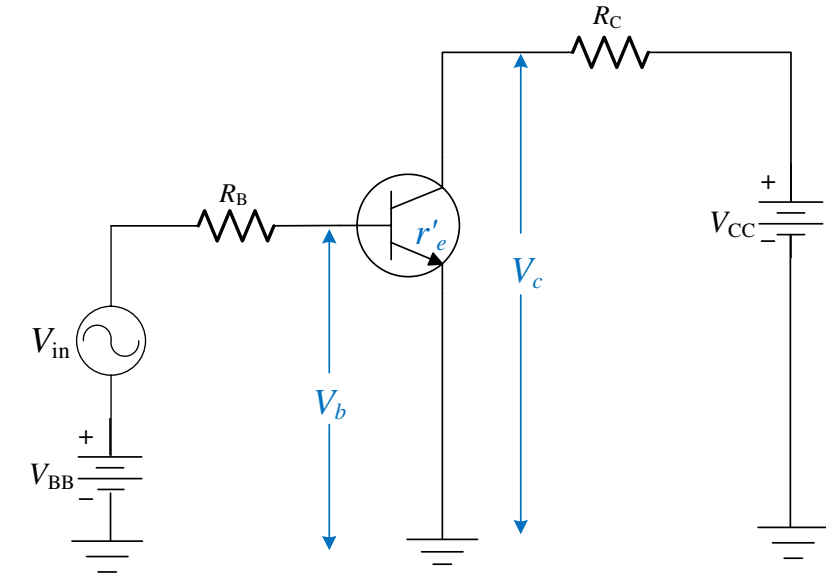
Yükseltme bir ac elektrik sinyalinin genliğini doğrusal olarak arttırma sürecidir ve transistörlerin en önemli özelliklerinden biridir. Daha önce öğrendiğiniz gibi, transistör akımı yükseltir, çünkü kollektör akımı baz akımının β (akım kazancı) katına eşittir. Baz akımı kollektör ve emitör akımlarına kıyasla çok küçüktür. Bu yüzden kollektör akımı yaklaşık olarak emitör akımına eşit alınır. Bu bilgileri akılda tutarak aşağıdaki devreye bakalım. R_B baz rezistörüne seri bağlayarak bir V_{in} ac voltajı, dc baz besleme voltajı V_{BB} üstüne bindiriliyor. Dc bias voltaj V_{CC} de kollektör rezistörü R_C üzerinden kollektöre bağlanıyor. Bir ac giriş voltajı bir ac baz akımı üretir, bu da çok daha büyük ac kollektör akımı ile sonuçlanır. Ac kollektör akımı da R_C nin uçları arasında bir ac voltaj üretir.

Böylece, şekil (b) de gösterildiği gibi, ac giriş voltajı, transistörün aktif çalışma bölgesinde, yükseltilmiş fakat ters çevrilmiş olarak yeniden üretilir. ileri beslenmiş baz-emitör eklemi ac sinyaline çok küçük bir direnç gösterir. Bu ac emitör iç direnci r'_e ile gösterilmektedir. Şekil (a) da ac emitör akımı $I_e \cong I_c = \frac{V_b}{r'_e}$ dir. Ac kollektör voltajı $V_c = I_c R_C$ dir. $I_e \cong I_c$ olduğundan $V_c \cong I_e R_C$ olur.

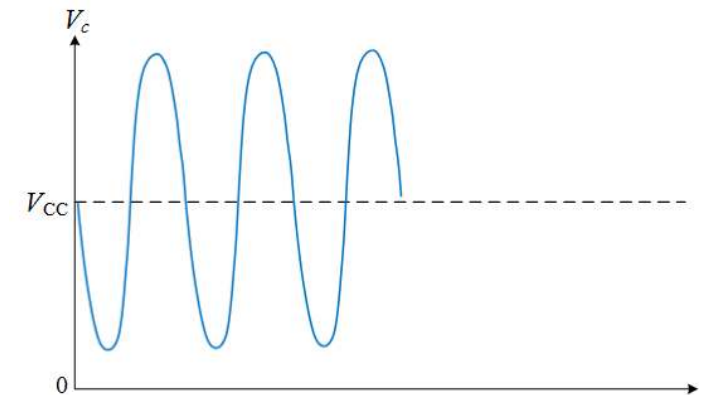
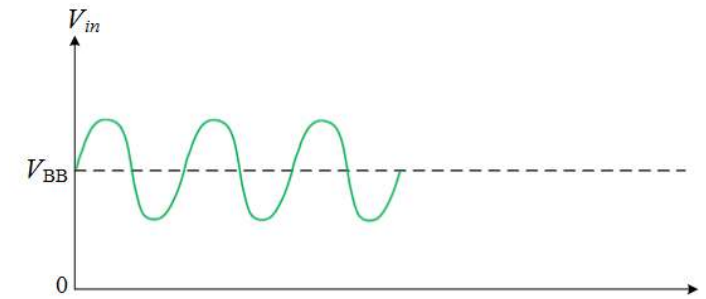
V_b transistörün ac giriş voltajı ($V_b = V_{in} - I_b R_B$) olarak alınır. V_c de transistörün ac çıkış voltajı olarak alınır. Dolayısıyla V_c nin V_b ye oranı transistör devresinin, A_v , ac voltaj kazancıdır.

$A_v = \frac{V_c}{V_b}$ dir. $A_v = \frac{V_c}{V_b} \cong \frac{I_e R_C}{I_e r'_e}$ burada I_e ler sadeleşir. Dolayısıyla $A_v \cong \frac{R_C}{r'_e}$ olur. Bu denklem, R_C ve r'_e ye bağlı olarak, şekil (a) daki transistörün voltaj kazancı formunda yükseltme yaptığını göstermektedir. R_C , r'_e den daima önemli ölçüde büyük olduğundan çıkış voltajı giriş voltajından daima daha büyük olur.

Not: Alt indisdeki italik küçük harfler ac büyüklükleri temsil eder.



(a) Ac giriş voltajı ile dc bias voltajının üstüste bindiği devre

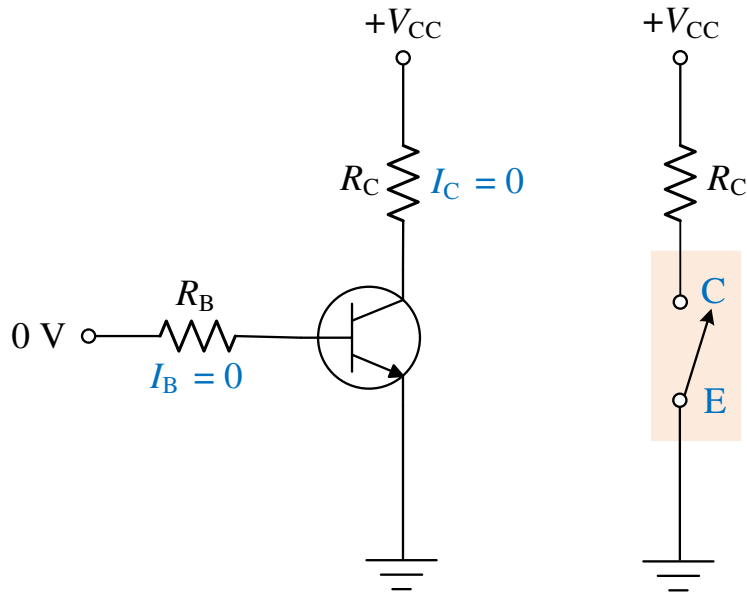


(b) Dalga şekilleri

Anahtar Olarak Transistör

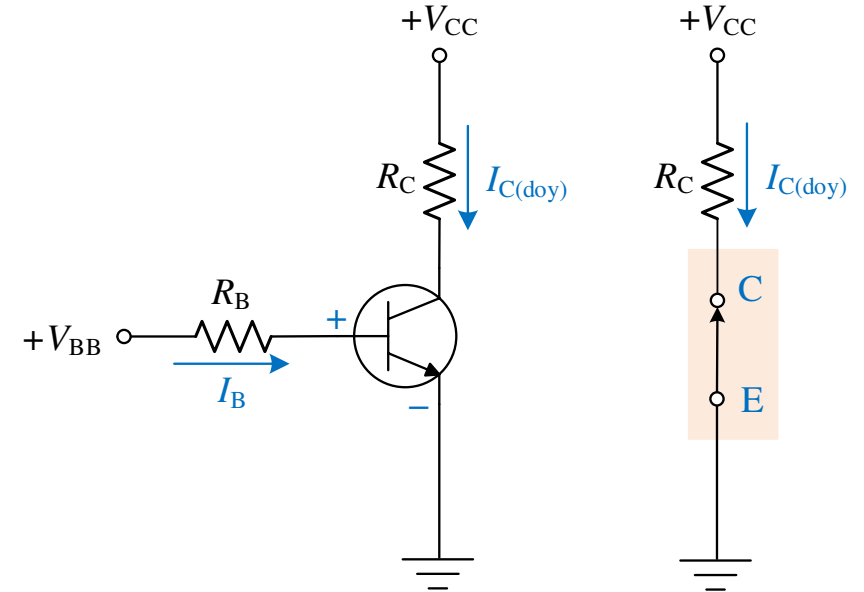
Transistörün ikinci çok kullanılan uygulama alanı anahtarlama uygulamalarıdır. Elektronik anahtar olarak bir transistör değişmeli olarak kesilim ve doyumda işlem yapar. Dijital devrelerde transistörlerin bu anahtarlama karakteristiği kullanılır. Aşağıdaki şekiller transistörün bir anahtarlama cihazı olarak çalışmasını göstermektedir.

Şekil (a) da **baz-emitör eklemi ileri beslenmediğinden** transistör *kesilim* bölgesindedir. Bu durumda , anahtar eşdeğeri ile gösterildiği gibi, kollektör ve emitör arasında ideal olarak bir açık devre vardır. Kesilimde, sızıntı akımı ihmal edildiğinde bütün akımlar sıfır olur. $V_{CE(kesilim)} = V_{CC}$ olur.



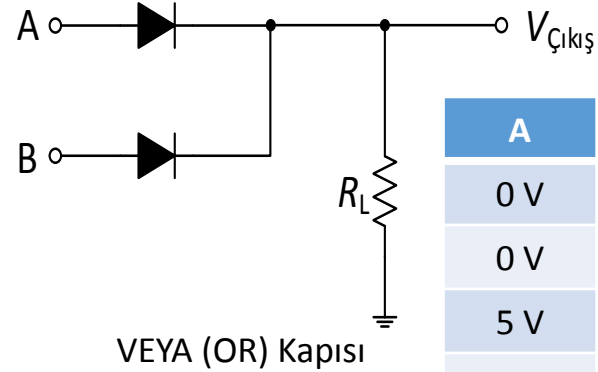
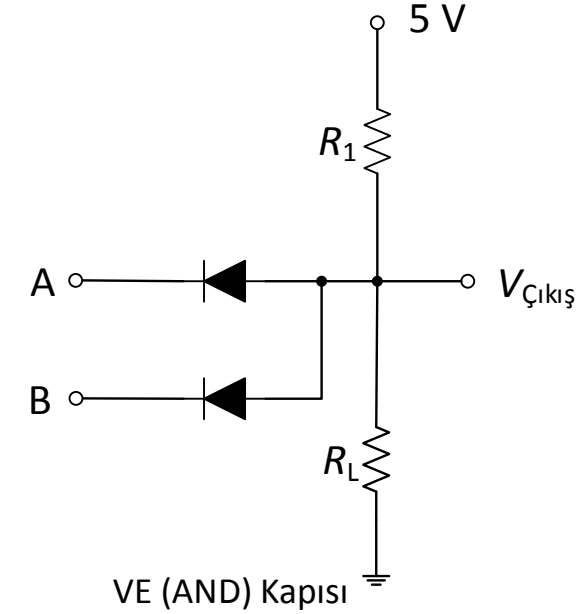
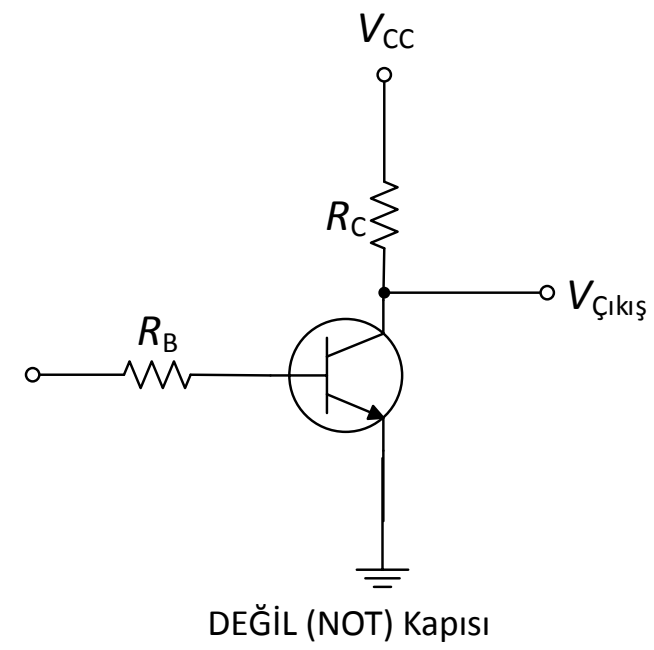
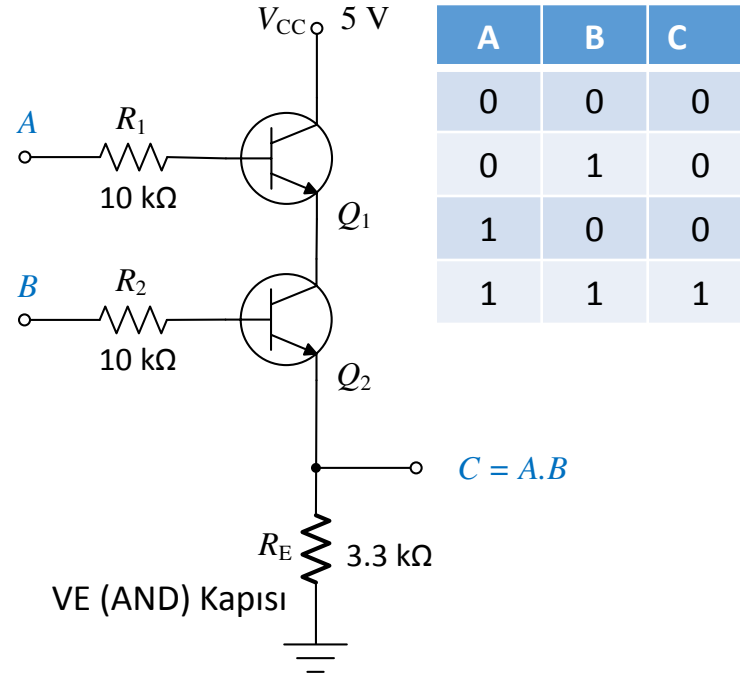
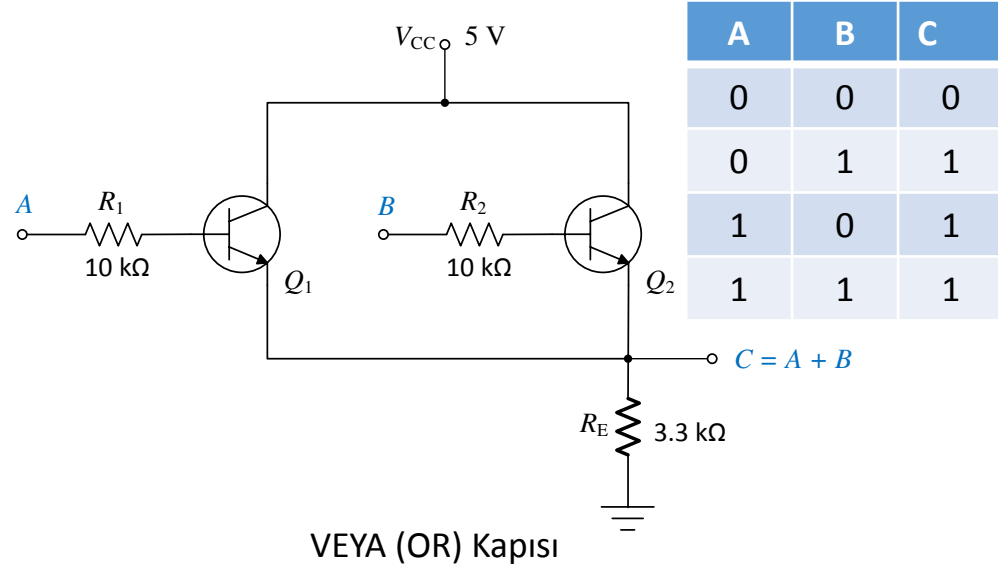
(a) Kesilim—açık anahtar

Şekil (b) de **baz-emitör eklemi ve baz-kollektör eklemi ileri beslendiğinde ve kollektör akımının doyum değerine ulaşması için baz akımı yeterince büyük yapıldığında**, transistör *doyum* bölgesindedir. Bu durumda , anahtar eşdeğeri ile gösterildiği gibi, kollektör ve emitör arasında ideal olarak bir kısa devre vardır. Gerçekte, normal olarak C ve E arasında birkaç onda bir voltluk bir voltaj düşmesi oluşur, o da, $V_{CE(doy)}$, doyum voltajıdır. Kollektör doyum akımı $I_{C(doy)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(doy)}}{R_C}$ dir. $V_{CE(doy)}$, V_{CC} ye kıyasla çok küçüktür, ihmal edilebilir. Doyum üretmek için ihtiyaç duyulan baz akımının minimum değeri $I_{B(min)} = \frac{I_{C(doy)}}{\beta_{DC}}$ dir. Transistörü tam olarak doyumda tutmak için I_B nin, $I_{B(min)}$ den önemli ölçüde çok daha büyük olması gerekir.

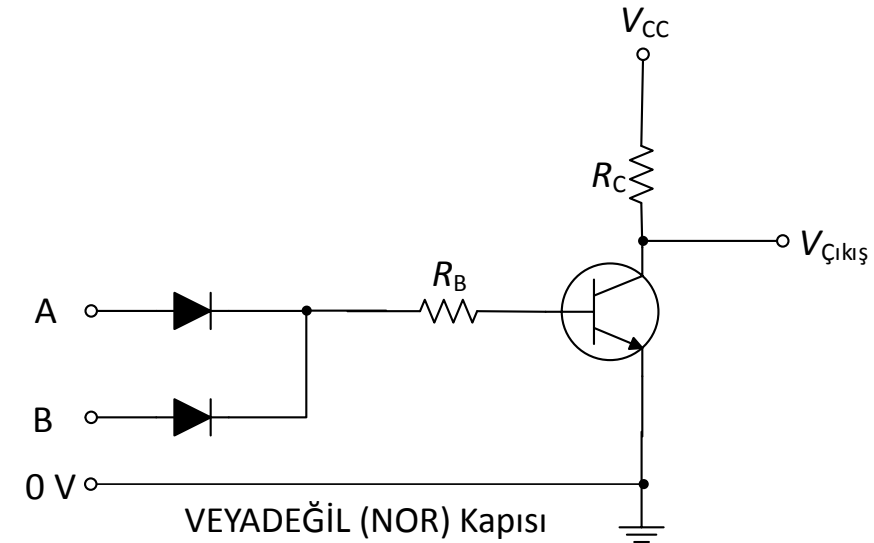


(b) Doyum—kapalı anahtar

Mantık Kapılarında Transistör



A	B	V _{Çıkış}	Mantık
0 V	0 V	0	0
0 V	5 V	4.3 V	1
5 V	0 V	4.3 V	1
5 V	5 V	4.3 V	1



Maksimum Oranlar

Transistörün çalışması üstüne sınırlama getiren maksimum oran değerleri vardır. Bunlar üretim sırasında belirlenir ve veri sayfalarında verilir. Tipik olarak bu değerler kollektör-baz voltajı, kollektör-emitör voltajı, emitör-baz voltajı, kollektör akımı ve güç tüketimidir.

Maksimum güç tüketimi V_{CE} ve I_C nin çarpımını aşmamalıdır. Dolayısıyla hem V_{CE} hem de I_C aynı anda maksimum olamaz. Çünkü üretim sırasında belirlenen hem V_{CE} nin hem de I_C nin bir maksimum değeri vardır. Eğer V_{CE} maksimum ise,

$$I_C = \frac{P_{D(maks)}}{V_{CE}}$$

dir. Eğer I_C maksimum ise,

$$V_{CE} = \frac{P_{D(maks)}}{I_C}$$

dir. Çünkü her bir transistörün tüketebileceği bir maksimum güç ($P_{D(maks)}$) değeri vardır.

Birde maksimum **gücün azalması** (Derating $P_{D(maks)}$) vardır. $P_{D(maks)}$ genellikle 25 °C de verilir. Yüksek sıcaklıklarda transistörde kullanılabilen bu maksimum güç değeri azalır. 25 °C'nin yukarısındaki sıcaklıklarda maksimum gücü hesaplamak için veri sayfalarında güç azalma faktörü de verilir. 25 °C'nin yukarısında artan her bir °C başına güçteki azalma miktarına **güç azalma faktörü** denir. Örneğin değeri 2mW/°C olan bir güç azalma faktörü, her bir derece sıcaklık artışı için maksimum gücün 2 mW azalacağı anlamına gelir.

Örnek: Bir transistör 25 °C de 1 W ($P_{D(maks)}$) maksimum güce sahiptir. Güç azalma faktörü 5mW/°C ise 75 °C de maksimum güç ne olur?

Çözüm: $\Delta P_{D(maks)} = (5 \text{ mW/°C})(75^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 250\text{mW}$, dolayısıyla 75 °C de $P_{D(maks)} = 1 \text{ W} - 250 \text{ mW} = \mathbf{750 \text{ mW}}$ olur.

Kaynaklar

1. Electronic Devices- Thomas L. Floyd
2. Electronic Devices and Circuit Theory- Robert Boylestad and Louis Nashelsky
3. Microelectronic circuits, Sedra/Smith
4. Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Donald A. Neamen
5. Fenciler için Temel Elektronik- James J. Brophy, Çeviri, Ankara üniversitesi, Mehmet Zengin
6. Fenciler ve Mühendisler için Elektronik- R. Ralph Benedict, çeviri, Ondokuz Mayıs Üni., Fevzi Köksal
7. Temel Elektrik Mühendisliği, çeviri, Ankara Üni, Kerim KIYMAÇ
8. Physics Of Semiconductor Devices, J. P. Colinge, C. A. Colinge