

3.2. 3. EM3 Modeli

EM3 modeli, bipolar tranzistoru temsil etmek üzere geliştirilen, daha yüksek seviyeden nonlinear bir modeldir. Daha önce ele alınan modellerden EM1 modeli sadece basit bir DC modeliydi, EM2 modeli de yük birikimi olaylarının, gövde dirençlerin ana hatlarıyla temsil edildiği biraz daha gelişmiş bir model olarak karşımıza çıkmaktaydı. EM3 modeli ise bir bipolar tranzistorun aşağıda belirtilen özelliklerini temsil edebilmektedir:

- baz genişliği modülasyonu ve β nın akım ve gerilimle değişimi;
- dağılmış elemanları temsil edebilmek üzere, kolektör-baz jonksiyonu kapasitesinin r_B' , gövde direncinin iki yanına dağıtılması;
- yüksek akımlarda τ_F nin artması ,
- eleman parametrelerinin sıcaklıkla değişimi.

Bütün bu etkenlerin modele katılabilmesi için, mevcut EM bağıntıların üzerinde bazı değişiklikler yapılmıştır. Modele iki ek diyot ve bir jonksiyon kapasitesi eklenmiştir. İleri yönde akım kazancının kolektör akımıyla değişimini temsil edebilmek üzere ($\beta_F - I_C$) üç ek model parametresi, ters çalışmadaki (β_R akım kazancının I_E emetör akımıyla değişimini temsil etmek üzere üç, baz genişliği modülasyonu için bir ve jonksiyon kapasitesinin dağılmasını modellemek üzere bir, τ_F nin akım seviyesi ile değişimi için iki ve sıcaklıkla değişim için de altı model parametresine gerek duyulmaktadır.

Modelin getirdiği doğru akım davranışı düzeltmeleri, SPICE programında yer alan değiştirilmiş Gummel-Poon modeline eşdeğerdir. EM3 modeli, 1970'li yılların başlarında geliştirilen Berkeley programları olan SLIC ve SINC'de kullanılmıştır. Gummel -Poon modeli kadar doğru bir model olmamasına karşılık, parametrelerinin kolayca anlaşılabilir ve belirlenebilir olması açısından bu modeli incelemekte yarar vardır.

Belirli bir sıcaklıkta statik karakteristikler açısından modelin getirdiği düzeltmeler

Model, statik karakteristiklerin göz önüne alınması halinde, baz genişliği modülasyonunu, yani Early olayını, β_F nin çalışma akımı ve gerilimiyle değişimlerini temsil etmesi açısından diğer modellere göre farklılık göstermektedir.

Baz genişliği modülasyonu, Early olayı.

1952 yılında J.M.Early, bir PNP tranzistorda akımın temel bileşeni olan delik akımının, fakirleşmiş bölge genişlemesinin bir sonucu olarak, kolektör-baz jonksiyonuna uygulanan gerilimle baz-emetör jonksiyonuna uygulanan gerilimin sabit tutulmasına rağmen değiştiğini göstermiştir. Bu olay Early olayı olarak isimlendirilmektedir.

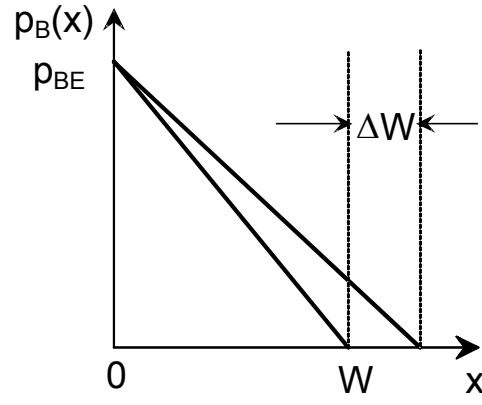
Böyle bir PNP tranzistorda bazın kolektör fakirleşmiş bölgesine ulaşan deliklerin akıttığı akımı I_{pc} ile gösterelim. Bu durumda baz-emetör gerilimi sabit tutulduğunda, başka bir deyişle bunun değişken bileşeni sıfır yapıldığında, I_{pc} 'deki bir (ΔI_{pc} değişiminin V_{CB} deki bir ΔV_{CB} değişimine oranına karşı düşen iletkenliği

$$g_{pc} = - \left. \frac{\Delta I_{pc}}{\Delta V_{CB}} \right|_{V_{EB}=\text{sabit}}$$

şeklinde tanımlayalım ve bu büyüklüğü kolektör iletkenliği olarak isimlendirelim. Daha önce PN jonksiyonu incelenirken belirtildiği gibi, kolektör jonksiyonu gerilimindeki bir artma kolektör fakirleşmiş bölgesi genişliğinde bir artmaya neden olur. Kolektör fakirleşmiş bölgesi genişliğindeki bu artma, kolektör-baz jonksiyonunun özelliklerine bağlı olarak ifade edilebilecek bir miktarda baz genişliğinin azalmasına neden olur. Sabit baz-emetör gerilimi için baz genişliğindeki azalma, baz boyunca delik yoğunluğu gradyanında bir değişme olmasını gerektirir.

Delik yoğunluğu gradyanı bazdan akan akımla orantılıdır. Bu, kolektör-baz gerilimindeki bir artmaya ve baz genişliğindeki bir azalmaya karşı düşen bir delik akımını artması sonucunu verir. Kolektör iletkenliğinin fakirleşmiş bölge kalınlığı ile ilişkisi, Early tarafından ortaya konan şekli ile akım geçiş oranının kolektör gerilimiyle değişimi cinsinden verilebilir. Yukarıda değinildiği gibi, akım transfer oranı baz genişliğine bağlıdır. Baz genişliği ne kadar az olursa, akım transfer oranı da o kadar büyük olur. Bu nedenle, fakirleşmiş bölge genişlemesi nedeniyle baz bölgesi genişliğindeki bir azalma, sabit bir emetör akımı için kolektör akımında bir artmaya neden olur.

Homojen bazlı basit bir tranzistor için delik yoğunluğu baz boyunca uzaklıkla lineer olarak değişir. Bu değişim Şekil-3.31'de görülmektedir. Bu şekilde emetördeki delik yoğunluğu, baz genişliğinin her iki değeri için de aynıdır.



Şekil-3.31. Bazdaki delik yoğunluğunun farklı baz genişlikleri için değişimi.

Her iki durumda da emetör-baz jonksiyonunu kutuplayan gerilim sabit alınmıştır. Yine basitlik sağlama açısından, baz bölgesi boyunca delik doğru akımı yoğunluğu, delik yoğunluğunun uzaklıkla değişim eğimi sabit olacak biçimde sabit alınmıştır. Böylece, basit geometride baz genişliğinde küçük bir ΔW değişimi nedeniyle ortaya çıkacak delik yoğunluğu gradyanı

$$\left(\frac{p_{BE}}{W}\right) = -\left(\frac{p_{BE}}{W^2}\right)\Delta W \quad (3.2.83)$$

olur. Bağlıdaki eksi işareti, baz genişliği arttırıldıkça gradyanın azalacağını göstermektedir. Bir tranzistorda emetör akımı ve (iyi bir yaklaşıklıkla kolektör akımı) doğrudan doğruya $(-p_{BE}/W)$ gradyanı ile orantılıdır. Dolayısıyla, kolektör delik akımındaki (baz genişliğindeki küçük değişime karşı düşen) küçük I_{pc} değişimi

$$\Delta I_{pc} = -I_{pc} \cdot \left(\frac{\Delta W}{W}\right) \quad (3.2.84)$$

şeklinde olur. Baz genişliğindeki küçük değişimler kolektör baz gerilimindeki küçük ΔV_{CB} değişimlerine (dW/dV_{CB}) fakirleşmiş bölge genişleme faktörü ile bağlıdır.

$$\frac{\Delta W}{\Delta V_{CB}} = \left(\frac{dW}{dV_{CB}}\right) \quad (3.2.85)$$

Bu bağıntı daha önceki ifadelerde yerine konursa ve küçük işaret kolektör akımının küçük işaret kolektör-baz gerilimine oranı veya kolektör (delik) iletkenliği oluşacak biçimde yeniden düzenlenirse

$$-\frac{\Delta I_{pc}}{\Delta V_{CB}} \Big|_{V_{EB}=\text{sabit}} = \left(\frac{I_{pc}}{W} \right) \left(\frac{dW}{dV_{CB}} \right) \quad (3.2.86)$$

şeklinde bir bağıntı elde edilir. Fakirleşmiş bölge genişleme faktörü dW/dV_{CB} haz içinde kolektör-baz jonksiyonundaki katkı atomu yoğunluğunun tabiatına bağlıdır ve genelde kolektör geriliminin azalan bir fonksiyonu olmaktadır.

Early olayının modellenmesi, Early gerilimi tanımları

Lindholm-Hamilton modifikasyonu

1971 yılında Lindholm ve Hamilton geometrik bir yaklaşımdan hareket ederek Early olayının Ebers-Moll modeline katılmasını önermişlerdir. Bunun için tek bir ek model parametresine gereksinme duyulmakta, bu parametre Early gerilimi olarak isimlendirilmekte ve V_A sembolü ile gösterilmektedir. Early gerilimini belirleyebilmek üzere bir tranzistorun ileri yönde çalışma karakteristiklerini tekrar ele alalım.

Verilen bir sıcaklık için çıkartılan çıkış özeğrilerinin başlangıç noktalarına doyma bölgesi ihmal edilerek çizilen teğetlerin yaklaşık olarak aynı noktadan, yani $V_{CE} = -V_A$ noktasından geçtikleri kabul edilebilir. Bu görüşe göre, özeğrilerin $-V_{CE}$ bölgesine doğru uzatılmaları halinde, bunlar aynı noktada kesişmektedirler. Elde edilen teğetlerden ve şeklin geometrisinden yararlanılırsa

$$\frac{I_C}{V_{CE} + V_A} = \frac{I_S \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]}{V_A}$$

yazılabilir. $V_{CE} = 0$ da $I_C = I_S \cdot (\exp(V_{BE}/V_T) - 1)$ olduğu kabul edilerek doyma bölgesi ihmal edilmiştir. Bu bağıntıdan hareket edilirse, kolektör akımı ve emetör akımı

$$I_C = I_S \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -I_C \cdot \left[1 + \frac{1}{\beta_{FO} \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right]} \right]$$

$$I_E + I_C + I_B = 0$$

biçimine getirilebilir. ifadeler yeni şekilleriyle Early olayının etkisini de gözönüne alır biçime getirilmiş olmaktadır. Bu ifadelerin geometrik bir yaklaşıma karşı düşüklerini tekrar belirtmekte yarar vardır. Bu aşamada $V_{CE} = 0$ değerine karşı düşen I_S değerini, I_{SO} ve β_F değerini de β_{FO} ile gösterelim. Bu yapılrısa

$$I_S = I_{SO} \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \quad (3.2.87)$$

$$\beta_F = \beta_{FO} \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \quad (3.2.88)$$

olmak üzere, daha önce EMI ve EM2 modelleri için statik şartlarda verilmiş bulunan akım gerilim bağıntıları ayrıca geçerlidir ve aşağıdaki şekli alırlar.

$$I_{CC} = I_{SO} \cdot \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.89)$$

$$I_{EC} = I_{SO} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.90)$$

Bu bağıntıların Ebers-Moll bağıntılarında yerine konmasıyla Early olayı model kapsamına alınmış olur:

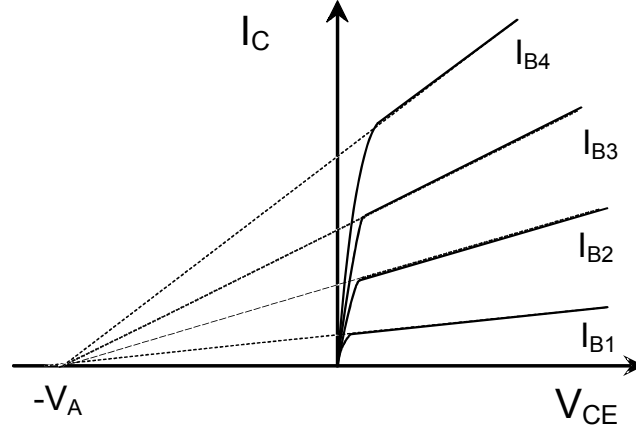
$$I_C = I_{CC} - I_{EC} - \frac{I_{EC}}{\beta_R}$$

$$I_C = \frac{I_{CC}}{\beta_{FO} \left[1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right]} - (I_{CC} - I_{EC}) \quad (3.2.91)$$

$$I_B = \frac{I_{CC}}{\beta_F} + \frac{I_{EC}}{\beta_R}$$

Lindholm-Hamilton modifikasyonu, tümdevre yapı bloklarının el analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çıkış özdeşlerinin bu geometrik yaklaşımla modellenmesi, Şekil-3.32'de görülmektedir.



Şekil-3.32. İleriyönde çalışma karakteristikleri için V_A Early geriliminin tanımlanması.

Yapılan modelleme ileri yönde çalışma için geçerli olduğundan, ters yönde çalışmayı temsil eden I_{EC} referans akımını veren ifadede $I_S = I_{SO}$ şeklinde gerilimden bağımsız bir değer kullanmak daha doğrudur. Ancak, ters yönde çalışan bir tranzistorda baz bölgesinin genişliği, bu defa tıkama yönünde kutuplanmış olan baz-emetör jonksiyonu fakirleşmiş bölgesi genişliğinin bu jonksiyona uygulanan tıkama yönü gerilimiyle değişmesinin bir sonucu olarak değişmekte, diğer bir deyişle bu yönde çalışmada da Early olayı ortaya çıkmaktadır. Bazı yayınlarda bu ters yöndeki Early olayı Late olayı olarak da isimlendirilmektedir. Gerekli olduğu takdirde, bu ters çalışmadaki Early olayını da model kapsamına almak mümkündür. Ters yönde çalışma için tanımlanan Early gerilimi ise V_B veya V_{AR} sembolleri ile gösterilmektedir.

Mc Calla modifikasyonu

Lindholm-Hamilton modifikasyonu daha değişik bir biçimde de verilebilir. Bunun için aşağıda belirtilen yol izlenmektedir. Aktif bölgede çalışan bir tranzistorda bu çalışma sırasında ortaya çıkan baz iletkenliği modülasyonunun toplam etkisi; I_S doyma akımı, β_F ileri yönde akım kazancı ve τ_F ileri yönde geçiş süresinin V_{BC} geriliminin birer fonksiyonu olarak ifade edilmeleriyle modellenilebilir. Bu üç parametre, W baz genişliğine sıkı bir biçimde bağlı olmaları nedeniyle, V_{BC} jonksiyon gerilimine de sıkı bir biçimde bağlı olmaktadır. Bunun için, daha önce de değinildiği gibi, ileri yönde aktif çalışma bölgesi için sadece tek bir parametre, V_A Early gerilimi, kullanılmaktadır. I_C kolektör akımının V_{CE} kolektör-emetör gerilimiyle değişimleri Şekil-3.33'de tekrar gösterilmiştir ve bunlar eğimleri sıfırdan farklı çıkış özdeşleridir. EM1 ve EM2 modellerinin verdikleri sıfır eğimli çıkış özdeşleri de aynı şekil üzerinde kesikli çizgilerle belirtilmişlerdir. Yapılan analiz aşağıda verilmiştir. Analiz yapılırken tranzistorun lineer modda çalıştığı kabul edilecektir. Basit, sabit katkılı tranzistor için kurulmuş olan modele ilişkin sonuçların geçerliliklerini korudukları varsayılmıştır. Bilindiği gibi, Early olayı nedeniyle baz genişliği değişmekte, dolayısıyla baz genişliği

$$W = f(V_{BC})$$

şeklinde V_{BC} geriliminin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elemanın lineer modda çalıştığı varsayılarak, $V_{BC} = 0$ noktası civarında $W = f(V_{BC})$ ifadesi Taylor serisine açılıp küçük değişimler için yüksek dereceden terimler ihmal edilirse

$$W(V_{BC}) = W(0) + V_{BC} \left. \frac{dW}{dV_{BC}} \right|_{V_{BC}=0}$$

$$\frac{W(V_{BC})}{W(0)} = 1 + \frac{V_{BC}}{W(0)} \left. \frac{dW}{dV_{BC}} \right|_{V_{BC}=0} \quad (3.2.92)$$

bulunur. Bağntı, W baz genişliğinin değişimi ile V_{BC} gerilimi arasında lineer bir ilişki verir.

V_A Early geriliminin tanımı

V_A Early gerilimi bir NPN tranzistor için

$$V_A = \left[\frac{1}{W(0)} \frac{dW}{dV_{BC}} \Big|_{V_{BC}=0} \right]^{-1} \quad (3.2.93)$$

ve bir PNP tranzistor için de

$$V_A = \left[\frac{-1}{W(0)} \frac{dW}{dV_{BC}} \Big|_{V_{BC}=0} \right]^{-1} \quad (3.2.94)$$

şeklinde tanımlanır. NPN ve PNP tranzistorlar için yapılan tanımlar arasındaki fark, sadece V_{BC} nin işaretindedir. Normal aktif bölgede çalışan bir NPN tranzistorda V_{BC} negatiftir. V_{BC} deki artma (tıkkama yönünde kutuplamadaki azalma) baz genişliğinde bir artmaya yol açar. Buna ilişkin bağıntıdaki türev pozitif olur, eksi işareti, V_A Early geriliminin pozitif olma özelliğini bir PNP tranzistar için de sağlamaktadır. Bir PNP tranzistorun söz konusu olması halinde, V_{BC} büyüklüğünün yerine V_{CB} büyüklüğünün getirilmesi gerekir. Baz genişliği V_A Early geriliminin bir fonksiyonu olarak

$$\frac{W(V_{BC})}{W(0)} = 1 + \frac{V_{BC}}{V_A} \quad (3.2.95)$$

olur. V_A Early geriliminin tipik değeri 50V-100V arasında yer alır.

Baz genişliği ile V_{BC} arasındaki ilişki bu şekilde ifade edildikten sonra, W baz genişliğine sıkı bir biçimde bağlı olan I_S, β_F ve τ_F büyüklükleri, bağıntılarda gerekli değişiklikler yapılarak, Early olayının etkisini temsil edebilecek hale getirilebilir.

I_S doyma akımı

I_S doyma akımı sabit baz katkılması için W baz genişliği ile ters orantılıdır. W'ye olan bağımlılığın sabit katkılı olmayan tranzistorlarda da geçerli olduğu kabulü ile

$$I_S \sim \frac{1}{W}$$

$$I_S(V_{BC}) = I_S(0) \frac{W(0)}{W(V_{BC})}$$

$$I_S(V_{BC}) = \frac{I_S(0)}{1 + \frac{V_{BC}}{V_A}} \quad (3.2.96)$$

bağıntısı yazılabilir. $|V_{BC}| \ll V_A$ olması şartı altında

$$I_S(V_{BC}) = I_S(0) \cdot \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A}\right) \quad (3.2.97)$$

şeklinde Binom açılımı da kullanılabilir.

β_F akım kazancı

Baz akımının büyük kısmının baza emetörden enjekte edilen taşıyıcıların etkisiyle aktıkları kabulü ile, sabit baz katkılması için

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} = \frac{D_n \cdot n_p \cdot L_p}{D_p \cdot p_n \cdot W} \sim \frac{1}{W}$$

olduğu gösterilebilir. Bu nedenle I_S de olduğu gibi hareket edilerek β_F , için

$$\beta_F(V_{BC}) = \frac{\beta_F(0)}{1 + \frac{V_{BC}}{V_A}} = \beta_F(0) \cdot \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A}\right) \quad (3.2.98)$$

bulunur, Bu bağıntı baz bölgesindeki yeniden birleşmelerin ihmal edilebilecek kadar küçük olmaları, yani baz akımının tümüyle baza enjekte edilen taşıyıcılar tarafından akıtılması kabulü ile çıkartılmıştır.

τ_B baz geçiş süresi

τ_B baz geçiş süresi, baz. genişliğinin karesi ile orantılıdır. Düşük enjeksiyon seviyelerinde ve sabit baz katkılması şartı altında

$$\tau_B = \frac{W^2}{2 \cdot D_n} \sim W^2$$

olur. Bu nedenle aynı bağımlılık genelde

$$\begin{aligned}\tau_B(V_{BC}) &= \tau_B(0) \left(\frac{W(V_{BC})}{W(0)} \right)^2 \\ \tau_B(V_{BC}) &= \tau_B(0) \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A} \right)^2\end{aligned}\quad (3.2.99)$$

şeklinde ifade edilebilir. Benzer şekilde ters yönde çalışma için de V_{BE} ile bir bağımlılık çıkartılabilir. Bununla beraber τ_{BR} büyüklüğü τ_R nin çok küçük bir parçasını oluşturduğundan τ_{BR} nin V_{BE} ye bağımlılığı ihmal edilebilir,

EM3 modelinde V_A geriliminin geometrik yorumu

V_A Early gerilimi I_C - V_{CE} karakteristiğinin eğiminden yararlanılarak ölçülebilen bir büyüklüktür. Aktif çalışma bölgesinde $V_{BE} = \text{sabit}$ (yahut $I_B = \text{sabit}$) çıkış özgeçirilerinden hareket edilirse, tranzistorun çıkış iletkenliği

$$\begin{aligned}g_o &= \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_{V_{BE}=\text{sabit}} = - \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BC}} \right|_{V_{BE}=\text{sabit}} \\ g_o &= - \left. \frac{\partial}{\partial V_{BC}} \left[I_S(V_{BC}) \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \right] \right|_{V_{BE}=\text{sabit}} \\ g_o &= - \left(\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \left. \frac{\partial}{\partial V_{BC}} \left[I_S(0) \cdot \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A} \right) \right] \right|\end{aligned}$$

$$g_o = \frac{I_C}{V_A} \quad (3.2.100)$$

şeklinde yazılabilir. V_A Early gerilimi, yukarıdaki eğime sahip doğrunun özeğriden negatif V_{CE} değerlerine uzatılması halinde, V_{CE} eksenindeki kesim noktası ile belirlenebilir. Bu kesim noktası V_A' ile gösterilirse

$$V_A = V_A' + V_{BE}$$

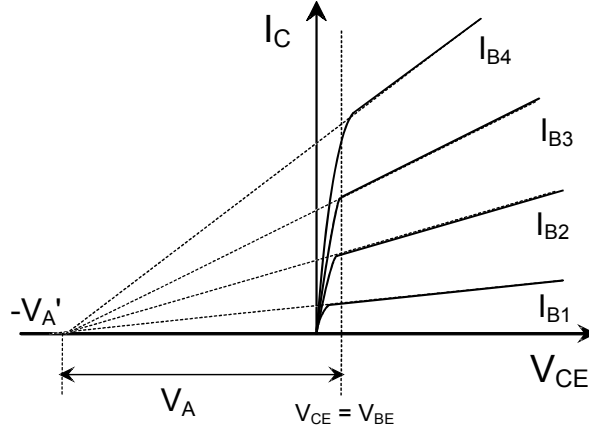
olur. V_A' genellikle V_{BE} den yeteri kadar büyük olduğundan V_A nın yanında V_{BE} ihmal edilirse

$$V_A = V_A'$$

olur.

Yukarıdaki analiz $V_{BE} = \text{sabit}$ eğrileri için yapılmıştır. Ancak, bu $I_B = \text{st}$ çıkış eğrileri için de gerçekleştirilebilir.

Hem I_S ve hem de V_{BE} büyüklükleri W baz genişliği ile ters orantılı olduğundan, bunların oranı W den bağımsız olur. Bunun sonucunda herhangi bir V_{BC} gerilimi için elde edilecek sabit V_{BE} öz eğrisi, I_B baz akımının V_{BC} den bağımsız çıkması nedeniyle ve her I_B değerine bir V_{BE} değeri karşı düşmesinden ötürü, bir sabit I_B çıkış öz eğrisine karşı düşmektedir. Mc Calla yöntemi, Şekil-3.33' de görülmektedir. V_A ve V_A' büyüklükleri şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil-3.33. İleri yönde çalışma karakteristikleri için V_A Early geriliminin tanımlanması, Mc Calla modellemesi.

Akım-gerilim bağıntıları

V_A Early geriliminin fiziksel bir anlamı bulunmamaktadır. Bu büyüklük, sadece eşdeğer devre akım-gerilim bağıntılarında Early olayını temsil edebilmek üzere öngörülen matematiksel bir büyüklüktür. Eşdeğer devrenin biçimini bozmadan devre denklemlerini ve parametrelerini değiştirme yöntemine EM3 ve GP modellerinde yaygın olarak başvurulmaktadır. Bu durumda I_{CT} akımı

$$I_{CT} = \frac{I_S(0)}{\left[1 + \frac{V_{BC}}{V_A}\right]} \left\{ \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] - \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \right\} \quad (3.2.101)$$

ve baz akımı da

$$I_B = \frac{I_S(0)}{\beta_F(0)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] + \frac{I_S(0)}{\beta_R} \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.102)$$

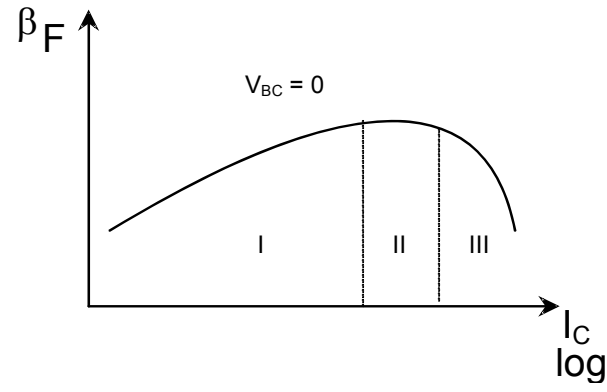
biçiminde ifade edilirler. I_B akımını veren bağıntıda I_S ve β_F nin V_{BC} gerilimine bağımlılığı benzer biçimde ifade edildiğinden, ilk terimde ilgili bileşenler birbirlerini yok ederler. Aktif bölgede ilk terim baskın olduğundan ikinci terim, ihmal edilebilir ve bu durumda baz akını V_{BC} den bağımsız çıkar. β_F akım kazancının V_{BC} gerilimiyle değişimi, I_B sabit tutularak ve I_C nin V_{BC} ile değişiminden yararlanılarak modellenenabilir.

Doğru akım β sı β_{Fdc} nin akımla değişimi

Bilindiği gibi, bir tranzistorun akım kazancı $\beta_F = \beta_F(I_C, V_{CE})$ şeklinde hem çalışma akımının hem de çalışma geriliminin bir fonksiyonudur. Gerilime bağımlılık, bir önceki bölümde ele alınan Early olayının etkisi olarak kendisini göstermektedir. β_F nin akıma bağımlılığı ise farklı farklı fiziksel olayların bir sonucudur. β_F nin I_C akımıyla tipik değişimi Şekil-3.34'de verilmiş ve şekil üzerinde önemli bölgeler belirtilmiştir.

Şekilde I ile gösterilen bölgede β_F kazancı akım arttıkça artmaktadır Bu bölge düşük akımlar bölgesi olarak isimlendirilir, II ile gösterilen bölge β_F nin yaklaşık olarak sabit kaldığı bölgedir ve orta akımlar bölgesi olarak adlandırılır. III bölgesinde ise akım arttıkça β_F azalmaktadır. Bu bölge ise yüksek yahut büyük akımlar bölgesi olarak nitelendirilmektedir..

$\beta_F = \beta_F(I_C, V_{CE})$ değişimi V_{CE} gerilimi, yahut V_{BC} gerilimi sabit tutularak çıkartılır. Burada $V_{BC} = 0$ alınmıştır. $V_{BC} = 0$ için Early olayını modelleyen ve daha önceki bölümde verilmiş olan bağıntıdan yararlanılabilir.



Şekil-3.34. β_F nin I_C akımı ile değişimi.

Benzer bir değişim $V_{BE} = \text{sabit}$ tutularak elde edilen ve β_R nin emetör akımı ile değişimini veren eğridir. Yukarıda tanımlanan parametrelere benzer parametrelerin bu ters çalışma bölgesi için de tanımlanabileceği açıktır. Burada basitlik sağlama açısından sadece $\beta_F - \beta_F(I_C)$ değişimi ele alınacaktır.

Yukarıdaki değişimi ifade eden başka bir grafik de $\ln I_C - V_{BE}$ ve $\ln I_B - V_{BE}$ değişimlerinin aynı eksen takımına çizilmesiyle elde edilmektedir. Bu değişim Şekil-3.35'de verilmiştir. Bu şekilde β_F doğrudan doğruya I_C ve I_B eğrileri arasındaki uzaklık olmaktadır. Bunun yanısıra, EM3 modelinde kullanılan önemli parametreler bu değişimler yardımıyla belirlenebilmektedir.

Yine, bazı tranzistörlerde (β_F nin sabit kaldığı II bölgesi bulunmamakta, diğer bir deyişle, I ve II bölgeleri iç içe girmektedir. Bu durumda da tüm değişimin yine üç bölgeye ayrılarak modellenmesi ve analiz edilmesi mümkündür; model parametreleri yine Şekil-3.35 yardımıyla belirlenebilirler. Analiz yapılırken, ohmik gövde dirençlerinin etkisi başta ihmal edilecek, daha sonra bunların etkisi dikkate alınacaktır. Bu şekilde analizin kolaylaşacağı açıktır. Böylece $V_{B'E'}$ ve $V_{B'C'}$ iç jonksiyon gerilimleri olmak üzere $V_{B'E'} = V_{BE}$ ve $V_{B'C'} = V_{BC}$ olmaktadır.

Orta akımlar bölgesi

Akım kazancının akımdan bağımsız kaldığı bu bölge EMI modelinin geçerli olduğu bir bölge olarak da düşünülebilir. Bilindiği gibi, EMI modeli β_F yi sabit kabul etmektedir. Bu değeri β_{FM} ile gösterelim. Bu durumda $V_{BC} = 0$ için akımlar

$$I_C = I_S(0) \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.103)$$

$$I_B = \frac{I_S(0)}{\beta_{FM}(0)} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.104)$$

şeklini alırlar.

Küçük akımlar bölgesi

β_F nin küçük akımlar bölgesinde azalması, buraya kadar yapılan incelemelerde yer almayan ek bileşenlerden kaynaklanmaktadır. Aktif ileri yönde çalışmada $V_{BC} = 0$ şartı altında üç ek bileşen bulunmakta ve bunlar

- yüzeydeki taşıyıcıların yeniden birleşmelerinden,
- emetör-baz f akırleşmiş bölgesindeki yeniden birleşmelerden,
- emetör -baz yüzey kanalı oluşmasından

kaynaklanmaktadır.

Bu üç bileşenin de V_{BE} baz-emetör gerilimine bağımlılıkları aynı biçimdedir. Bu bağımlılıklar aşağıda verilmiştir:

$$I_{B(yüzey)} = I_{S(yüzey)} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{2.V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.105)$$

$$I_{B(EBSCl)} = I_{S(EBSCl)} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{2.V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.106)$$

$$I_{B(kanal)} = I_{S(kanal)} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{4.V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.107)$$

Bu üç bileşenin baz akımını veren (3.2.104) bağıntısına eklenmeleri gerekir. Eöylece $I_{Bbileşke}$ sembolüyle göstereceğimiz baz akımı ek bileşeni ifadesi elde edilir ve bu

$$I_{B(bileşil)} = I_{B(yüzey)} + I_{B(EBSCl)} + I_{B(kanal)} \quad (3.2.108)$$

şeklinde olur. Ancak, imalat prosesinin dikkatli bir biçimde yürütülmesi halinde hem yüzey kanalı etkisi hem de yüzeydeki yeniden birleşmeler yeteri kadar küçük tutulabilir. Böylece

$$I_{B(bileş)} = I_{S(bileş)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{n_{EL} V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.109)$$

yazılabilir. Bu bağntıdaki n_{EL} büyüklüğü ileri yönde çalışmada düşük akımlar için emisyon katsayısı olarak isimlendirilir ve değeri de 1 ile 4 arasında bulunur. yukarıdaki ihmalin yapılp söz konusu bileşenlerin sadece tek bir etkenden, emetör - baz fakirleşmiş bölgesindeki yeniden birleşmelerden, ileri geldiğinin kabul edilmesi halinde, bu parametrenin $n_{EL} = 2$ değerini alacağı açıktır. $I_{S(bileşke)}$ doyma akımı

$$I_{S(bileş)} = C_2 \cdot I_S(0) \quad (3.2.110)$$

şeklinde yeni bir C_2 model parametresi ve $I_S(0)$ cinsinden tanımlanırsa, baz akımı

$$I_B = \frac{I_S(0)}{\beta_{FM}(0)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] + C_2 \cdot I_S(0) \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{n_{EL} V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.111)$$

şeklini alır. C_2 parametresinin tanımlanmasıyla $I_{S(bileşke)}$ akımı $I_S(0)$ 'a göre normalize edilmiş olmaktadır.

Büyük akımlar bölgesi

Yüksek enjeksiyon seviyelerinde baza enjekte edilen azınlık taşıyıcıları çoğunluk taşıyıcıları yoğunluğu ile kıyaslanabilecek oranda yüksek seviyelere ulaşır. Bazda yük nötrlüğünün sağlanması için çoğunluk taşıyıcıları yoğunluğunun da aynı miktarda artması gerekir. Ek çoğunluk taşıyıcılarının kolektör akımına etkisi ilk olarak Webster tarafından hesaplanmıştır ve bu olay Webster olayı olarak isimlendirilmektedir. Webster yüksek enjeksiyon seviyelerinde kolektör akımının

$$I_{Cyük.seviye} \approx \exp\left(\frac{V_{BE}}{2V_T}\right)$$

şeklinde $1/2V_T$ eğimli doğruya asimptot olduğunu göstermiştir. Benzer bir değişimin yarıiletken diyotta da karşımıza çıktığını tekrar hatırlamakta yarar vardır.

Webster olayının EM3 modeline katılabilmesi için ek bir θ parametresi tanımlanmış ve $V_{BC} = 0$ şartı altında kolektör akımı ifadesi

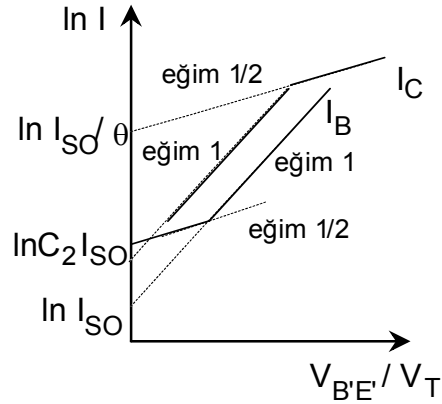
$$I_C(0) = \frac{I_S(0)}{1 + \theta \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{2V_T}\right)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.112)$$

şeklinde θ parametresini içerecek ve Webster olayını temsil edecek biçimde değiştirilmiştir. Gerçekten, yüksek enjeksiyon seviyelerinde $\theta \cdot \exp(V_{BE}/V_T) \gg 1$ ve $\exp(V_{BE}/V_T) \gg 1$ olduğu dikkate alınır, (3.2.112) bağıntısı

$$I_C(0) = \frac{I_S(0)}{\theta} \exp\left(\frac{V_{BE}}{2V_T}\right)$$

şeklinde bir değişim verecektir.

Baz akımı ve kolektör akımı ifadelerinin logaritmik eksenle verecekleri değişimler Şekil-3.36' da gösterilmiştir.



Şekil-3.36. $\ln I_C$ ve $\ln I_B - V_{BE}$ değişimleri, $V_{BC} = 0$ alınmıştır.

Şekilden fark edilebileceği gibi, yüksek enjeksiyon seviyelerindeki değişimin asimptotu $V_{BE} = 0$ noktasına doğru uzatılırsa, bu noktada $I_S(0)/\theta$ değerini vermektedir. $V_{BC} \neq 0$ durumu için Early olayını temsil eden terimin de dikkate alınması gerekir. Bu durumda I_S akımının tam ifadesi

$$I_S(V_{BE}, V_{BC}) = \frac{I_S(0)}{\left(1 + \frac{V_{BC}}{V_A}\right) \left(1 + \theta \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{2V_T}\right)\right)} \quad (3.2.113)$$

şeklinde olacaktır.

Ters tranzistor olarak çalışma

Baz-kolektör jonksiyonunun iletim yönünde ve baz-emetör jonksiyonunun da tıkama yönünde kutuplanması halinde, aynı olaylar bu defa ters yönde. çalışma için kendilerini gösterirler. Dolayısıyla $\beta_R - I_E$ ilişkisi söz konusu olacaktır. Bu nedenle düşük akımlarda aynı olayları modellemek üzere ek parametreler tanımlanmalıdır. İleri yöndeki çalışmadakine benzer biçimde C_4 ve n_{CL} parametreleri tanımlanırsa, I_B yi veren genel ifade

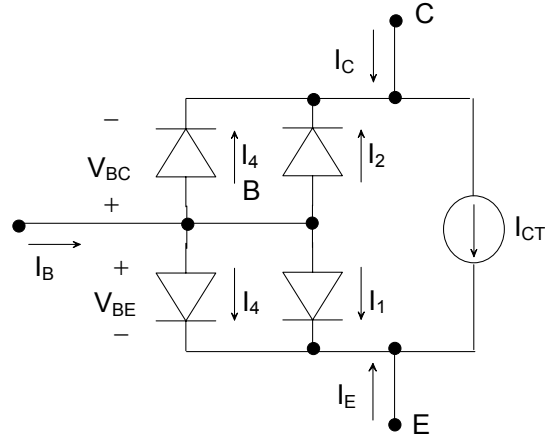
$$I_B = \frac{I_S(0)}{\beta_{FM}(0)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] + C_2 \cdot I_S(0) \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{n_{EL} \cdot V_T}\right) - 1 \right] + \frac{I_S(0)}{\beta_{RM}} \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right] + C_4 \cdot I_S(0) \left[\exp\left(\frac{V_{BB}}{n_{CL} \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2.114)$$

şeklini alır. Bu bağıntıdaki n_{CL} parametresi ters çalışma bölgesinde küçük akımlar için emisyon katsayısı olarak adlandırılır.

θ_R şeklinde ek bir parametre tanımlanarak, ters yönde çalışma için Webster olayını temsil etmek mümkündür. Bu durumda I_S doyma akımı ifadesi

$$I_S(V_{BE}, V_{BC}) = \frac{I_S(0)}{\left(1 + \frac{V_{BC}}{V_A}\right) \left(1 + \theta \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{2 \cdot V_T}\right) + \theta_R \cdot \exp\left(\frac{V_{BC}}{2 \cdot V_T}\right)\right)} \quad (3.2.115)$$

şeklini alır. Yine, ters yönde çalışmada da Early olayının ortaya çıkacağı ve bunun da modellenmesi gerekeceği açıktır, ancak EM3 modelinde ters yöndeki Early olayı dikkate alınmamıştır. Ayrıca, bu olayın modellenmesinin gerekliliği de tartışma konusudur. Bir olayın modellenmesi, o fiziksel olayın elemanın çalışmasına ne derecede etki ettiğine bağlı olmaktadır. Bütün bu olayların modele katılması için büyük akımlardaki etkiyi temsil etmek üzere I_{CT} akım kaynağında I_S doyma akımı yerine (3.2.115) bağıntısı ile verilen ifade kullanılmakta, I_B baz akımının ek bileşenlerini modellemek üzere de iki ideal olmayan diyot eklenmektedir. İdeal olmayan diyotlardan biri CB arasına, diğeri ise BE arasına gelmektedir. Burada ideal olmayan diyot olarak isimlendirilen eleman; emisyon katsayısı birden farklı olan bir elemandır. EMI modeline söz konusu eklerin yapılmasıyla elde edilen model Şekil-3. 37' de gösterilmiştir. Burada EMI modelinin lineer olmayan karma

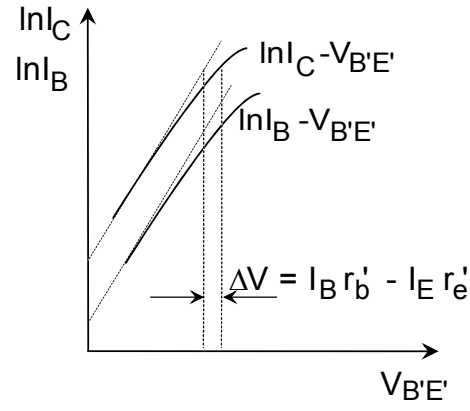


Şekil-3.37. EMI modeline yapılan ekler.

tipi kullanılmıştır. Yeni eklenen model parametreleri olan C_2 ve C_4 parametrelerinin tipik değerleri 100 ile 1000 arasında, n_{CL} ve n_{EL} nin değerleri 1 ile 4 arasında, θ ve θ_R nin değerleri 10^{-7} ile 10^{-6} arasında yer almaktadır. β_{FM} 10 ile 1000 arasında değerlere sahip bulunmakta, β_{RM} de normalde 0,1 ile 10 arasında yer almaktadır.

Ohmik gövde dirençlerinin etkisi

Buraya kadar yapılan incelemelerde r_C' , r_E' ve r_B' gövde dirençlerinin etkileri ihmal edilmişti. Bilindiği gibi, bu gövde dirençleri yukarıda yapılan analizi etkilememekte, bunların etkisi ölçü sonuçları üzerine olmaktadır. Buraya kadar yapılan analizlerde yer alan V_{BE} ve V_{BC} gerilimleri aslında iç düğüm gerilimleri olmaktadır. Bu iç jonksiyon gerilimlerini bu defa $V_{BE'}$ ve $V_{BC'}$ sembolleriyle gösterelim. V_{BE} ve V_{BC} gerilimleri ise dışarıdan ölçülen gerilimler olsun. Bu nedenle, ölçü sonucu bulunan gerilimlerden gerekli düzeltmeler yapılarak iç düğüm gerilimlerine geçmek gerekeceği açıktır. Bunun için $V_{BE'}$ yü bulmak üzere V_{BE} geriliminden $(I_C \cdot r_C' + |I_E| \cdot r_E')$ gerilim düşümünün çıkarılması gerekir. Normal çalışmada V_{BC} sadece baz genişliği modülasyonuna etki ettiğinden, bunun etkisi az olur. r_B' ve r_E' nün etkisi V_{BE} geriliminde bir artma olarak belirtisini gösterir. Bu etkiler Şekil-3.38' de belirtilmiştir.



Şekil-3.38. r_B' ve r_E' gövde dirençlerinin $\ln I_C$ ve $\ln I_B - V_{BE}$ değişimlerine etkisi.

r_B' ve r_E' nün etkilerini düzeltmek üzere, $\ln I_B - V_{B'E'}$, değişiminin eğimi sabit kabul edilerek, aradaki fark yardımıyla $\Delta V = I_B r_b' - I_E r_e'$ gerilim düşümü bulunur. Aynı miktar $\ln I_C$ eğrisinden çıkarılarak düzeltme yapılırsa, gerçek $\ln I_C - V_{B'E'}$ değişimine geçilebilir.

Verilen bir sıcaklıkta yük birikimi olaylarının modellenmesinin iyileştirilmesi.

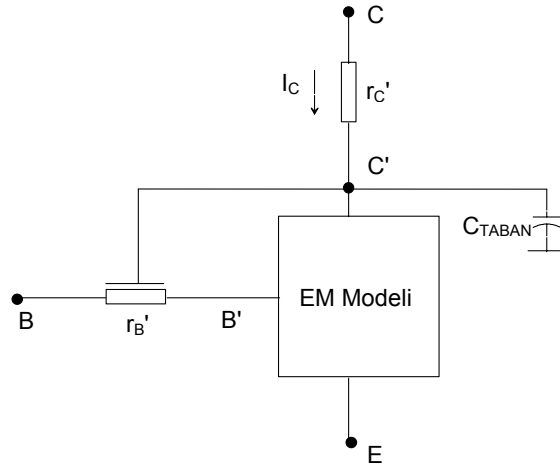
EM2 modelinde birinci dereceden temsil edilen yük birikimi olayları, burada ikinci dereceden etkilerin de dikkate alınmasıyla iyileştirilmektedir. Bunun için kolektör-baz jonksiyonu kapasitesi r_B' nün iki yanına dağıtılmış ve τ_F ileri yönde geçiş süresi kolektör akımına bağımlı olarak ifade edilmiştir.

a) $C_{jC} - r_b$ dağılımının modellenmesi

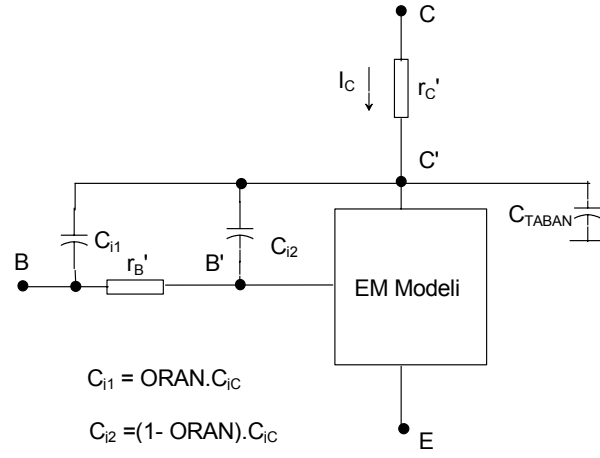
İdeal durumda kolektör-baz jonksiyonu kapasitesi r_b' direnci boyunca dağılmış bir kapasite şeklinde kendini gösterir. Bu durum Şekil-3.39'da belirtilmiştir.

Birinci mertebeden bir kapasite modeli EM2 modelinde yer almakta, burada C_{jC} tümüyle r_B direncinin iç tarafında, bulunmaktadır. Daha düzeltilmiş bir modelleme EM3 modelinde yer almakta, burada C_{jC} kapasitesi biri r_B' nün bir tarafında, diğeri öte tarafında olmak üzere iki parçaya ayrılmakta; bunun için ORAN olarak isimlendirilen ek bir model parametresi kullanılmaktadır. Yapılan düzeltme Şekil-3.40'da görülmektedir.

3.66



Şekil-3.39. r_B' boyunca C_{jC} nin dağılıma diyagramı.



Şekil-3.40. C_{jC} nin r_B' nün iki yanına dağıtılması.

ORAN olarak isimlendirilen parametrenin değeri 0 ile 1 arasında değişir. Tipik değeri 0,8 civarındadır.

b) τ_F ileri yönde geçiş süresinin. akımla değişimi

τ_B baz geçiş süresinin V_{BC} ile değişimi, ilk başta baz genişliği modülasyonu incelenirken ele alınmıştı. τ_B büyüklüğü, aynı anda I_C kolektör akımı ile de değişmektedir. Bu değişme, yüksek enjeksiyon seviyelerinde ortaya çıkan ve Kirk

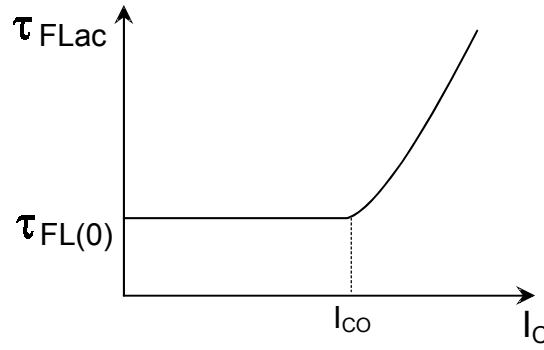
olayı olarak isimlendirilen baz genişlemesi olayı ile ilişkilidir. Bunun yanısıra, Kirk olayı (β_F akım kazancının yüksek enjeksiyonlu çalışma bölgesindeki değişimine de etki eder ve bu değişimin Webster olayının belirlediği eğimden daha fazla bir eğime sahip olmasına yol açar.

EM3 modelinde τ_F - I_C değişimi $I_C \geq I_{CO}$ olmak üzere

$$\tau_{Fac}(I_C) = \frac{\partial Q_{DE}}{\partial I_{CC}} = \tau_{FL}(0) \cdot \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{L_E}{W} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{CC}}{I_{CO}} - 1 \right)^2 \right] \quad (3.2.116)$$

bağıntısı ile temsil edilmektedir. Bu bağıntıda $\tau_{FL}(0)$ büyüklüğü ileri yönde çalışma için geçiş süresinin düşük akımlardaki değeri olup, daha önce EM2 modelinde τ_F ile gösterilen büyüklüğe karşı düşmektedir. Bağıntıda L_E emetör genişliğinin en küçük değeri, W baz genişliği ve I_{CO} da τ_F nin artmaya başladığı akım değeridir.

Görüldüğü gibi, bunun için iki ek parametre, I_{CO} ve (L_E/W) parametreleri, gerekli olmaktadır. Yüksek akım seviyelerinde τ_{Fac} nin I_C ile değişimi Şekil-3.41'de verilmiştir. τ_{Fac} nin yüksek akımlarda artması, yüksek akımlarda f_T nin



Şekil-3.41. τ_{Fac} nin I_C ile değişimi .

düşmesine yol açacağından, yapılan modelleme ile bu olayın da temsil edileceği açıktır. Bu durumda $\tau_{Fac} \neq \tau_{Fdc}$ olacağından

$$\tau_{Fdc} = \frac{Q_{DE}}{I_{CC}} = \frac{\int_0^{I_{CC}} \tau_{Fac} \cdot dI_{CC}}{I_{CC}}$$

$$\tau_{Fdc} = \tau_{FL}(0) \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{L_E}{W} \right)^2 \left[\frac{1}{3} \left(\frac{I_{CC}}{I_{CO}} \right)^2 - \left(\frac{I_{CC}}{I_{CO}} \right) + 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{I_{CO}}{I_{CC}} \right) \right] \right\} \quad (3.2.117)$$

şeklinde ifade edilir. Açıkça ki, bu bağıntı da $I_{CC} > I_{CO}$ için geçerli olacaktır.

G τ_{Fac} nin akımla artması olayı, baz genişliğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bunun da doğru akım karakteristiklerini etkileyeceği açıktır, Bu etkileri modellemek üzere, θ ve θ_R parametreleri öngörülmüştür. Bu parametreler ise $\sqrt{\tau_B}$ ve $\sqrt{\tau_{BR}}$ ile orantılıdır.

c) Çalışma sıcaklığına bağlılığın düzeltilmesi

Buraya kadar yapılan incelemelerde çalışma sıcaklığı ile değişen tek parametre I_S doyma akımıydı ve bunun sıcaklığa bağlılığının ne şekilde ifade edileceği EMI modeli incelenirken belirtilmişti. EM3 modelinde bir dizi düzeltme ek olarak gelmektedir. Burada iki ayrı tip düzeltme söz konusudur. Bunlardan ilki elemanın fiziğine dayanan düzeltmelerdir. İkinci grup ise eğri uydurmaya dayanan düzeltmeleri içerir.

Elemanın fiziğine dayanan düzeltmeler

Sıcaklıkla değişimleri elemanın fiziğine dayandırılarak modellenen model parametreleri τ_F , C_{jE} ve C_{jC} parametreleridir.

τ_F nin sıcaklığa bağlılığı

Baz genişliğinin sıcaklığa bağlılığının

$$\left(\frac{W(V_{BC}, T)}{W(0, T)} \right) = \frac{V_{BC}}{V_A} + \frac{\phi_C}{V_A} (T - T_{nom}) (\gamma_T^\varepsilon - \gamma_T^{\phi_C}) \quad (3.2.118)$$

şeklinde ifade edilebileceği Mc Calla tarafından gösterilmiştir. Bu bağıntıda ϕ_C kolektör -baz jonksiyonu potansiyel seddi, T çalışma şartlarındaki sıcaklık, yani parametre değerlerinin hesaplandığı sıcaklık değeri, T_{nom} model

parametrelerinin ölçüldüğü sıcaklık, γ_T^ε dielektrik sabitinin sıcaklığa göre duyarlılığı (Si için 200ppm/ $^\circ$ C), $\gamma_T^{\phi_C}$ de ϕ_C potansiyel seddinin T sıcaklığına göre duyarlılığıdır ve

$$\gamma_T^{\phi_C} = \frac{1}{T_{nom}} - \frac{kT_{nom}}{q\phi_C} \left(\frac{3}{T_{nom}} + \frac{E_g}{k \cdot T_{nom}^2} \right) \quad (3.2.119)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Böylece, τ_F ileri yönde geçiş süresinin sıcaklığa bağımlılığı

$$\tau_F(T) = \tau_F(T_{nom}) \left[\frac{W(T)}{W(T_{nom})} \right]^2 \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^{1.5} \quad (3.2.120)$$

biçiminde ifade edilmektedir. Bu bağıntıda W^2 terimi τ_F nin W^2 ye bağımlılığına, $T^{1.5}$ terimi de τ_F nin D difüzyon katsayısına bağımlılığına dayanmaktadır.

Bu ifadeler çıkartılırken jonksiyonun her iki tarafındaki katkı yoğunlukları sabit kabul edilmiştir. Gerçekte, W^2/D ile sadece τ_B orantılıdır. Burada, τ_F nin de aynı bağımlılığa sahip olduğu kabul edilmiştir.

C_{JC} ve C_{JE} nin bağımlılıkları

Yukarıda verilen $\gamma_T^{\phi_C}$ ve buna benzer bir ifade olan $\gamma_T^{\phi_E}$ büyüklükleri C_{JC} ve C_{JE} nin sıcaklıkla değişimlerini temsil etmek üzere kullanılmaktadırlar. Yine, Mc Calla, her iki jonksiyon için jonksiyon kapasitelerinin

$$C_j(T) = C_j(T_{nom}) \cdot [1 + (T - T_{nom}) \cdot m \cdot (2\gamma_T^\varepsilon - \gamma_T^\phi)]$$

olduğunu göstermiştir. Sıcaklığa bağımlılığı temsil eden bu bağıntılar, EM3 modelinin kullanıldığı Berkeley programlarında yer almıştır.

Ek giriş parametrelerine gereksinme gösteren sıcaklığa bağımlı model parametreleri

Bu şekilde sıcaklığa bağımlılıkları temsil edilen model parametreleri için ek bir parametre gerekmede, bu ek parametre genel amprik ilişkiye uygunluk sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. β_F , r_B' ve r_C' nün sıcaklığa bağımlılıkları bu şekilde temsil edilmektedir. Par söz konusu büyüklük, TCI

birinci dereceden sıcaklık katsayısı, TC2 ikinci dereceden sıcaklık katsayısı olmak üzere, sıcaklığa bağımlılık

$$Par(T) = Par(T_{nom}) \cdot [1 + TC1 \cdot (T - T_{nom}) + TC2 \cdot (T - T_{nom})^2]$$

şeklinde ifade edilmektedir. Modelde bu şekilde ifade edilmeyen parametreler ise sıcaklıkla değişmiyor kabul edilmektedir. Buradaki TC1 ve TC2 sıcaklık katsayılarının tipik değerleri aşağıdaki TABLO'da verilmiştir.

Tablo. Birinci ve ikinci dereceden sıcaklık katsayılarının tipik değerleri

Parametre	TC1 [K ⁻¹]	TC2 [K ⁻²]
β_F	6.67×10^{-3}	-3.6×10^{-6}
r_B' ve r_C'	2×10^{-3}	8×10^{-6}

$\beta_F = \beta_F(I_C)$ değişiminin programa verilmesi için kullanılan parametreler

$\beta_F = \beta_F(I_C)$ değişimini temsil edebilmek üzere, β_{FM} , C_2 , n_{EL} ve θ parametreleri kullanılmıştır. Ancak, bu parametreler, uç akımları ve gerilimleri ile çalışmaya almış olan bir devre tasarımcısına çok fazla bir şey ifade etmez. Bu nedenle, tasarımcı için daha anlamlı parametreler kullanılması yoluna gidilmiştir. Bunun için $\beta_F = \beta_F(I_C)$ değişimini veren eşitliğin çıkartılması gerekir. Söz konusu değişim çıkartılırken, farklı bölgelerde ortaya çıkan olaylar ayrı ayrı ele alınmış, bir olaya ilişkin bağıntı çıkartılırken diğer olay ihmal edilmiştir.

En sonunda elde edilen bağıntılar biraraya getirilerek toplam bağıntı elde edilmiştir. Bu şekilde elde edilen yaklaşık bağıntılar, dışarıdan verilecek büyüklüklerle model parametreleri arasında bir köprü oluştururlar. Dikkate alınması gereken önemli bir husus, verilen büyüklüklerin model parametresi olmaması, ancak parametrelerin belirlenmesi amacıyla kullanılan ara büyüklükler olmasıdır.

$V_{BC} = 0$ da $\beta_F = \beta_F(I_C)$ nin düşük akımlardaki değişimi I ve II bölgeleri için

$$\beta_F^{-1} = \frac{\frac{I_S(0)}{\beta_{FM}(0)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] + C_2 \cdot I_S(0) \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{n_{EL} \cdot V_T}\right) - 1 \right]}{I_S(0) \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]}$$

$$\beta_F^{-1} = \frac{1}{\beta_{FM}(0)} + \left[C_2 \cdot I_S(0) \right]^{\left(1 - \frac{1}{n_{EL}}\right)} \cdot I_C^{\left(\frac{1}{n_{EL}} - 1\right)}$$

$$\beta_F^{-1} = a_1 + a_2 \cdot I_C^{\left(\frac{1}{n_{EL}} - 1\right)}$$

yazılabilir. III ile gösterilen yüksek akımlar bölgesinde ise C_2 li terim ihmal edilerek

$$\beta_F^{-1} = \frac{\frac{I_S(0)}{\beta_{FM}(0)} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]}{\frac{I_S(0)}{\theta} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{2V_T}\right) - 1 \right]}$$

$$\beta_F^{-1} = \frac{\theta^2}{\beta_{FM}(0) \cdot I_S(0)} I_C$$

$$\beta_F^{-1} = a_3 I_C$$

elde edilir. Bu iki eşitliğin toplanmasıyla, bütün bölgelerde geçerli olacak yaklaşık bir bağıntı elde edilir:

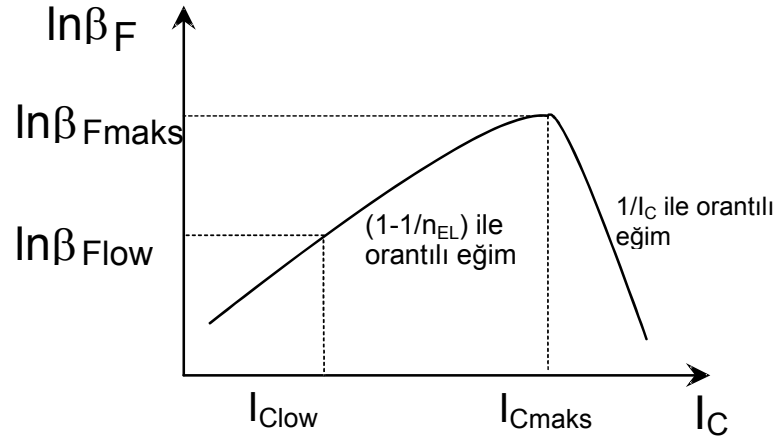
$$\beta_{Fmaks}^{-1} = a_1 + a_2 \cdot I_{Cmaks}^{\left(\frac{1}{n_{EL}} - 1\right)} + a_3 \cdot I_{Cmaks}$$

$$\beta_{Flow}^{-1} = a_1 + a_2 \cdot I_{Clow}^{\left(\frac{1}{n_{EL}} - 1\right)} + a_3 \cdot I_{Clow}$$

$$I_{Cmaks}^{BCEC-2} = \frac{a_3}{a_2} [1 - BCEC]^{-1}$$

şeklindeki bu yaklaşık bağıntı, I ve II bölgeleri arasında etkileşme olmadığı kabulü ile çıkartılmıştır. Bağıntı bu şekilde elde ettikten sonra, programa verilecek büyüklükleri ele alabiliriz. Bu büyüklükler β_{Fmaks} , I_{Cmaks} , β_{Flow} , I_{Clow} , BCEC ve V_{CE} büyüklükleridir. β_{Fmaks} büyüklüğü, β_F nin maksimum değeri, I_{Cmaks} akımı ise β_{Fmaks} değerinin ortaya çıktığı kolektör akımıdır. β_{Flow} akım kazancının β_{Fmaks} 'dan daha küçük olduğu düşük akımlar bölgesinde herhangi bir β_F değeri, I_{clow} da bu akım kazancının ölçüldüğü kolektör akımı değeri olmaktadır. BCEC

büyüklüğü $1/n_{EL}$ ye karşı düşmekte, V_{CE} de verilerin elde edildikleri çalışma noktasındaki kolektör-emetör gerilimi olmaktadır. $\ln\beta_F - \ln I_C$ değişimi Şekil-3.42'de görülmektedir.



Şekil-3.42. Logaritmik eksenlerde $\beta_F - I_C$ değişimi ve program giriş verileri.

Seçilen değerler belirli bir V_{CE} gerilimi için elde edilmişlerdir. Bu, çoğu zaman $V_{BC} = 0$ değerindeki durumdan farklıdır. Dolayısıyla, önce $(1 + V_{BC}/V_A)$ çarpanı ile bir düzeltme yapılması gerekir. Daha sonra, verilerden yararlanılarak esas model parametreleri olan β_{FM} , C_2 , n_{EL} ve θ aşağıdaki denklemler yardımıyla bulunabilir. Bu bağıntılar yardımıyla a_1 , a_2 ve a_3 büyüklükleri, bunlardan hareketle de β_{FM} , C_2 , n_{EL} ve θ elde edilmektedir. Bazı programlarda $BCEC = 0,5$ değerinde sabit kılınmıştır.

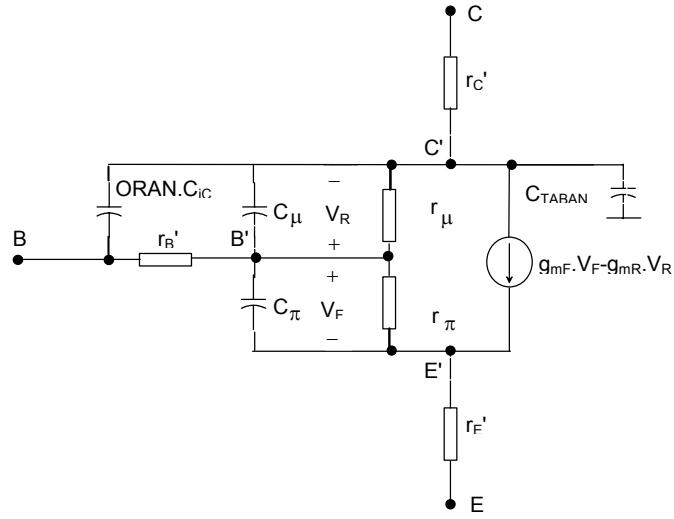
Lineerleştirilmiş küçük işaret EM3 modeli

Lineerleştirilmiş küçük işaret EM3 modeli yapı olarak EM2 modelinde verilen küçük işaret modeline benzemekle birlikte arada temel iki fark vardır.

a- C_{jC-r_B} ' dağılımının modellenmiş olmasının bir sonucu olarak B ve C' düğümlerinin arasına ek bir $ORAN \times C_{jC}(V_{BC})$ kapasitesi gelir.

b- r_π , r_μ , C_π ve C_μ elemanları EM3 modelinde temsil edilen fiziksel olaylara bağlı olurlar. Dolayısıyla bunların belirlenmesi de EM2 modelinden farklı olur.

Lineerleştirilmiş küçük işaret EM3 modeli Şekil-3.43'de görülmektedir.



Şekil-3.43. Lineerleştirilmiş küçük işaret EM3 modeli.

Lineerleştirilmiş küçük işaret EM3 modelinin eleman bağıntıları aşağıdadır :

$$r_{\pi} = \frac{\beta_{Fac}}{g_{mF}}$$

$$r_{\mu} = \frac{\beta_{Rac}}{g_{mR}}$$

$$C_{\pi} = g_{mF} \cdot \tau_{Fac} + C_{IE}(V_{B'E'})$$

$$C_{\mu} = g_{mR} \cdot \tau_{Rac} + C_{IC}(V_{B'C'})$$

$$g_{mF} = \left. \frac{dI_{CC}}{dV_{B'E'}} \right|_{V_{B'C'}=0} = \frac{q \cdot I_{CC}}{kT} \left(1 + \frac{I_{CC}}{I_S(0) \cdot [\exp(V_{B'E'} / V_T) - 1]} \right)$$

$$g_{mR} = \left. \frac{dI_{CC}}{dV_{B'C'}} \right|_{V_{B'E'}=0} = \frac{q \cdot I_{EC}}{kT} \left(1 + \frac{I_{EC}}{I_S(0) \cdot [\exp(V_{B'C'} / V_T) - 1]} \right)$$

$$\beta_{Fac} = \frac{dI_C}{dI_B} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{FM}(0)} + \frac{C_2}{n_{EL}} \left[\frac{I_C}{I_S(0)} \right]^{\left(\frac{1}{n_{EL}} - 1 \right)} + \frac{2 \cdot \theta^2}{\beta_{FM}(0) \cdot I_S(0)} I_C}$$

$$\beta_{Rac} = \frac{dI_E}{dI_B} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{RM}} + \frac{C_4}{n_{CL}} \left[\frac{I_E}{I_S(0)} \right]^{\left(\frac{1}{n_{CL}} - 1\right)} + \frac{2 \cdot \theta_R^2}{\beta_{RM} \cdot I_S(0)} I_E}$$

$$\tau_{Fac} = \tau_{FL} \cdot \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{L_E}{W} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{CC}}{I_{CO}} - 1 \right)^2 \right]$$

$$\tau_{Rac} = \tau_{Rdc} = \tau_R$$

Sonuç

EM3 modeli doğru akım karakteristiklerini, yük birikimi olaylarını ve parametrelerin sıcaklığa bağımlılığını yeterli bir biçimde temsil eden yüksek seviyeli bir lineer olmayan bipolar tranzistor modelidir. Baz genişliği modülasyonunun, yani Early olayının modele katılması için I_S , β_F ve τ_F parametreleri uygun bir biçimde değiştirilmiştir. Aktif çalışma bölgesinde $\ln I_C - V_{BE}$ değişiminin V_{CE} gerilimine bağımlı çıkmasına karşılık, EM3 modeli $\ln I_B - V_{BE}$ değişimini V_{CE} geriliminden bağımsız vermektedir. Gerçek bir tranzistor üzerinde yapılan ölçmeler bu değişimin de, yani giriş özeğrisinin de V_{CE} ye bağlı olduğunu ortaya koyduğuna göre, modelin bu açıdan yetersiz kalacağı açıktır.

$\beta_F - I_C$ ve $\beta_R - I_E$ değişimlerini temsil edebilmek üzere, altı model parametresi; θ , θ_R , C_2 , C_4 , n_{EL} ve n_{CL} parametreleri gerekli olmaktadır. Yük birikimi olaylarının temsil edilmesini iyileştirmek üzere C_{jC} nin r_B ' nün iki yanına dağıtılması sağlanmış, bunun için ORAN olarak isimlendirilen ek bir parametre tanımlanmıştır. Ayrıca, τ_F nin I_C ile değişimini temsil edebilmek üzere EM3 modeli iki ek parametreye, I_{CO} ve L_E/W parametrelerine gerek göstermektedir.

EM3 modelinde sıcaklıkla değişimin temsil edilmiş biçimini iyileştirmek üzere altı ayrı parametre gerekli olmaktadır. Bunlar r_B' , r_c ' ve β_F parametrelerine ilişkin birinci ve ikinci dereceden sıcaklık katsayılarıdır. Üç parametre için üç takım oluşturulmaktadır. τ_F , C_{jE} ve C_{jC} üzerine sıcaklığın etkisi EM3 modelinde ek parametrelere gerek kalmadan temsil edilmektedir.

Sonuç olarak EM3 modelinde şu parametreler kullanılmaktadır:

a- V_A Early gerilimi	Early olayı
b- β_{FM} , C_2 , n_{EL} ve θ	β_F nin I_C akımına bağımlılığı
c- β_{RM} , C_4 , n_{cL} ve θ_R	β_R nin I_E akımına bağımlılığı
d-ORAN (RATIO)	C_{jC} nin r_B ' boyunca dağılımı
e- (I_E/W) , I_{CO}	En düşük emetör kalınlığının baz genişliğine oranı ve τ_F nin artmaya başladığı I_C akımı, $\tau_F \cdot I_C$ değişimi.
TC1, TC2	Birinci ve ikinci dereceden sıcaklık katsayıları (R_B ' , r_C ' ve β_F için)