

Şekil-3.49. Yüksek doğruluklu statik BJT modeli.

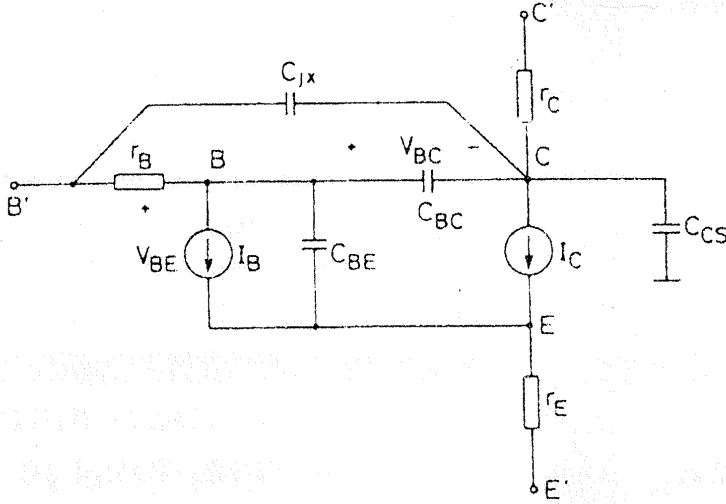
Bütün bu etkilerin dikkate alınmasıyla ortaya çıkan BJT modeli Şekil-3.49'da görülmektedir. Modele ilişkin kolektör ve baz akımı bağıntıları

$$I_C = I_{CC} - I_{EC} - I_2 + I_{GF} + I_{RCB} + I_{BC} \quad (3.5.64)$$

$$I_B = I_1 + I_2 + I_{BE} + I_{BC} - I_{RCB} - I_{GF} \quad (3.5.65)$$

eşitlikleriyle verilmektedir. Bu bağıntılar önerilen modelin statik kısmını karakterize eden temel bağıntılardır ve bu bağıntılarda ileri ve ters yönde Early, Webster, Kirk, Sah-Noyce-Shockley (baz akımı bileşenleri) olayları, kolektör çoğaltması, BC jonksiyonu kaçak direnci temsil edilmektedir. Bunların yanısıra, r_C' kolektör yolu direnci, r_B' baz gövde direnci ve r_E' emetör gövde direnci de model kapsamına alınmışlardır.

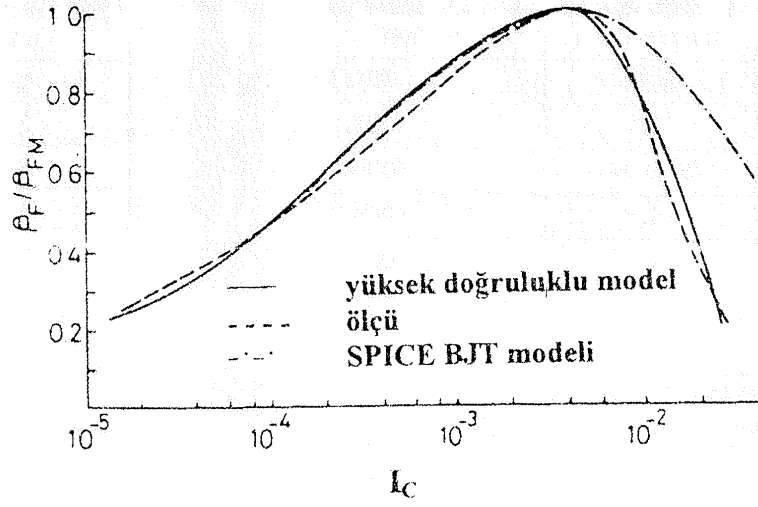
Önerilen modele ilişkin statik davranış bağıntılarının SPICE modeline götürülmesiyle, BJT'nin dinamik davranışını da temsil eden bir model kolayca oluşturulabilir. Jonksiyon ve difüzyon kapasitelerini de içeren bu model Şekil - 3.50'de görülmektedir. Modeldeki I_C ve I_B akım kaynaklarına ilişkin bağıntılar daha önce verilen (3.5.64) ve (3.5.65) bağıntılarıdır. Dinamik model parametreleri daha önce SPICE modelinde ele alınmış olan parametrelerdir ve burada ayrıca ele alınmayacaktır.



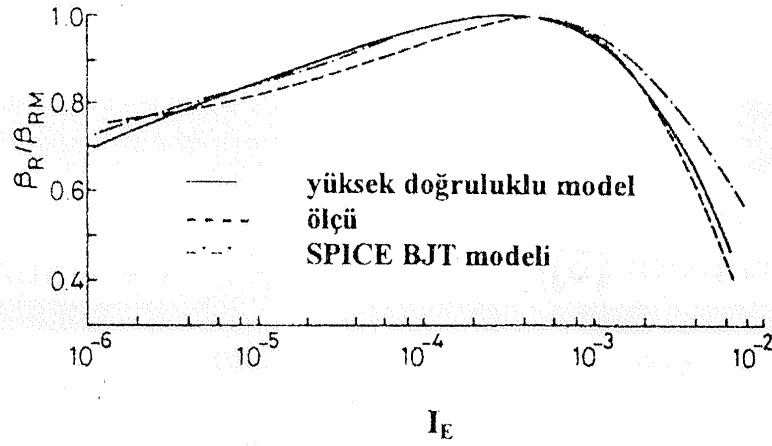
Şekil-3.50. Jonksiyon ve difüzyon kapasitelerinin yüksek doğruluklu BJT modeline katılması.

Deneysel doğrulama

Yüksek doğruluklu modelin doğruluğu seçilen bir örnek eleman, XR B101 npn dizi tranzistoru üzerinde teorik sonuçlar ölçü sonuçları ile kıyaslanarak gösterilmiştir. Yine, XR B101 npn ve XR B102 pnp dizi tranzistorları ile oluşturulan aktif yüklü bir kuvvetlendiricinin harmonik distorsiyonu özellikleri incelenmiş, elde edilen teorik sonuçların ölçüm sonuçları ile uyumlu oldukları gösterilmiştir; daha önce de belirtildiği gibi, bu uyumluluk modelin doğruluğunu test etmek üzere yararlanılan diğer bir kriterdir. XR B101 npn tranzistoru için belirlenen model parametreleri Tablo-3.4'de verilmiştir.



Şekil-3.51. Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen β_F - I_C değişimleri, $\beta_{FM} = 150$, $V_{BC} = 0$.



Şekil-3.52. Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen β_R - I_E değişimleri, $\beta_{RM} = 2.94$, $V_{BE} = 0$.

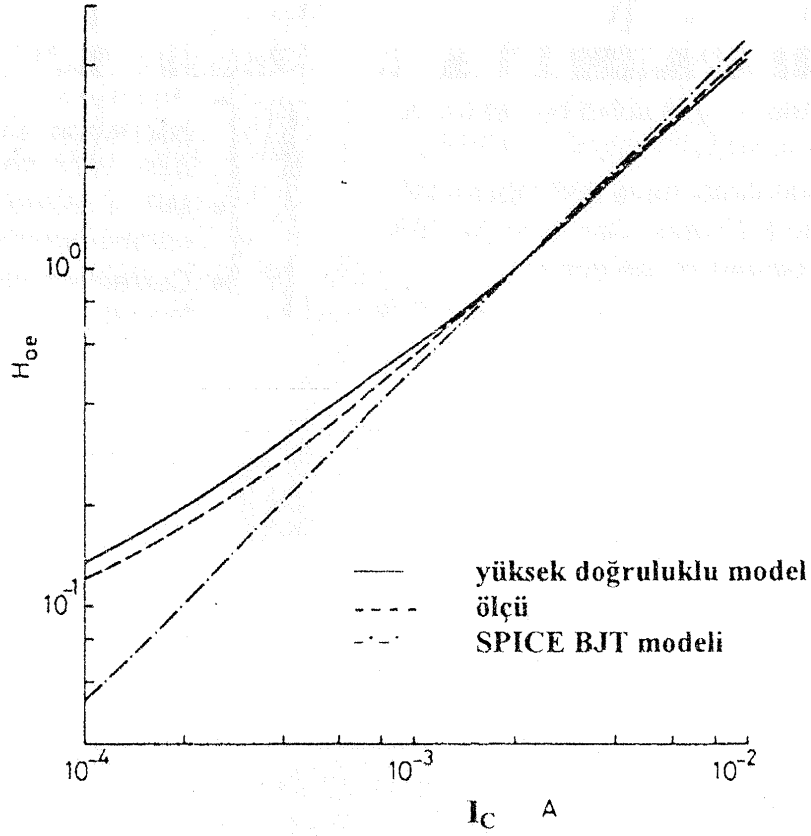
β_F - I_C ve β_R - I_E değişimleri Şekil-3.51 ve Şekil-3.52'de verilmiştir. Bu şekillerde tüm değerler eğrilerin maksimum değerleri olan β_{FM} ve β_{RM} değerlerine göre normalize edilmiştir. İncelenen tranzistor için $\beta_{FM} = 150$ ve $\beta_{RM} = 2.94$ olarak saptanmıştır. SPICE programında kullanılan değiştirilmiş Gummel-Poon

modeli yardımıyla elde edilen sonuçlar da kıyasla amacıyla ek olarak şekillerde verilmiştir. Şekillerden fark edilebileceği gibi, yüksek doğruluklu BJT modeli büyük akımlar bölgesindeki davranışı SPICE BJT modeline göre çok daha gerçekçi biçimde vermektedir.

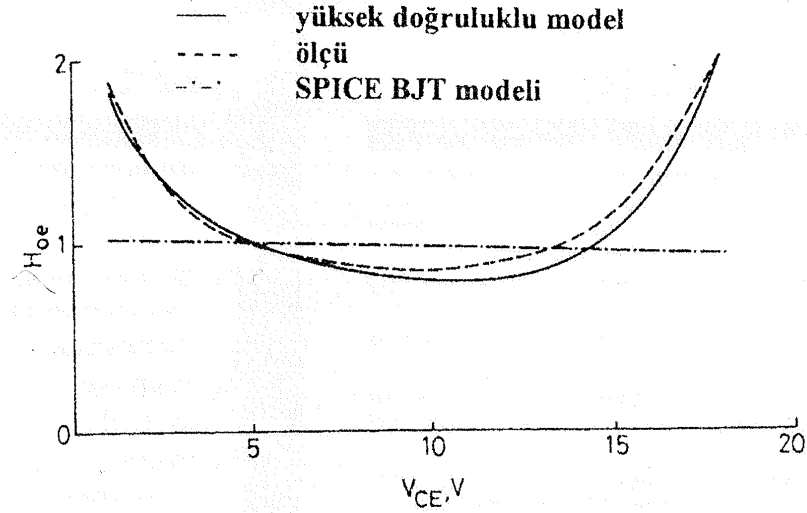
Tablo-3.4. XR B101 npn ve XR B102 pnp dizi tranzistorları için belirlenen model parametreleri

| Par. | XR B101 | XR B102 | Par. | XR B101 | XR B102 |
|--------------|--------------------------|--------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|
| I_{SO} | 1.35×10^{-15} A | 1.21×10^{-15} | k_F | 2.7×10^{-3} | - |
| β_{FO} | 240 | 28 | n_F | 6.8 | - |
| β_{RO} | 3.4 | 0.37 | BV_{CBO} | 25V | - |
| M_F | $0.076 V^{-NF}$ | $0.116 V^{-NF}$ | I_{SC} | 1.43×10^{-14} A | 1.35×10^{-14} A |
| N_F | 0.575 | 0.525 | n_{CL} | 1.22 | - |
| ϕ_C | 0.87V | 0.8V | r_B | 75Ohm | 50Ohm |
| M_R | $0.26 V^{-NR}$ | $0.3 V^{-NR}$ | r_E | 30Ohm | 16Ohm |
| N_R | 0.59 | 0.56 | r_C | 300Ohm | 225Ohm |
| ϕ_E | 0.8 | 0.8V | I_{KF} | 35mA | - |
| I_{SE} | 2.46×10^{-12} A | 6.26×10^{-13} A | I_{KR} | 8mA | - |
| n_{EL} | 1.94 | 1.85 | N_{KF} | 0.84 | - |
| R_{CB} | 27M.Ohm | 14MOhm | N_{KR} | 0.6 | - |
| | | | V_{AF} | 79.5V | 50.5V |
| | | | V_{AR} | 9.64V | 12.2V |

Yüksek doğruluklu modelin getirdiği diğer bir düzeltme de küçük işaret parametrelerinin akım ve gerilime bağımlılığının modellenmesi açısından sağlanmaktadır. Analog tümdevre yapılarının performansının belirlenmesi açısından, tranzistorun çıkış iletkenliğinin modellenmesi büyük önem taşır. Sabit V_{CE} gerilimi için $h_{oe}-I_C$ değişimi Şekil-3.53 ve sabit I_C akımı için $h_{oe}-V_{CE}$ değişimi de Şekil-3.54'de verilmiştir. Her iki şekildeki değişimler de $I_C = 2mA$ ve $V_{CE} = 5V$ çalışma noktasındaki çıkış iletkenliği değerine göre normalize edilmiştir. Bu çalışma noktasında ölçü yoluyla $h_{oe} = 40\mu S$ bulunmuştur. Yüksek doğruluklu model bu iletkenlik değerini $h_{oe} = 42\mu S$ SPICE Gummel-Poon modeli ise $h_{oe} = 23\mu S$ olarak vermektedir.



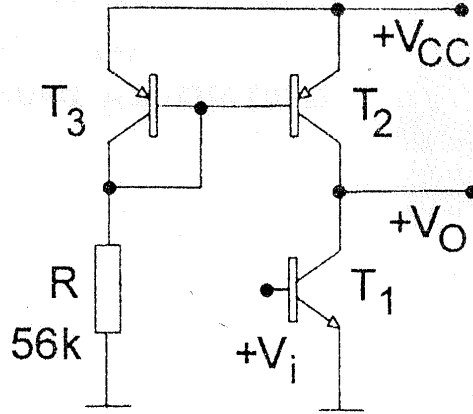
Şekil-3.53. Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen normalize h_{oe} - I_C değişimleri, $V_{CE} = 5V$, $I_C = 2mA$.



Şekil-3.54. Klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen normalize h_{oe} - V_{CE} değişimleri, $V_{CE} = 5V$, $I_C = 2mA$.

Şekil-3.53'den fark edilebileceği gibi, $V_{CE} = 5V$ için yüksek doğruluklu modelden elde edilen $h_{oc}-I_C$ değişimi ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olmakta, SPICE Gummel-Poon modeli ise küçük akımlarda farklı bir değişim vermektedir. Bunun nedeni, yüksek doğruluklu modelde temsil edilen R_{CB} kaçak direncinin SPICE Gummel-Poon modeli kapsamında yer almamasıdır.

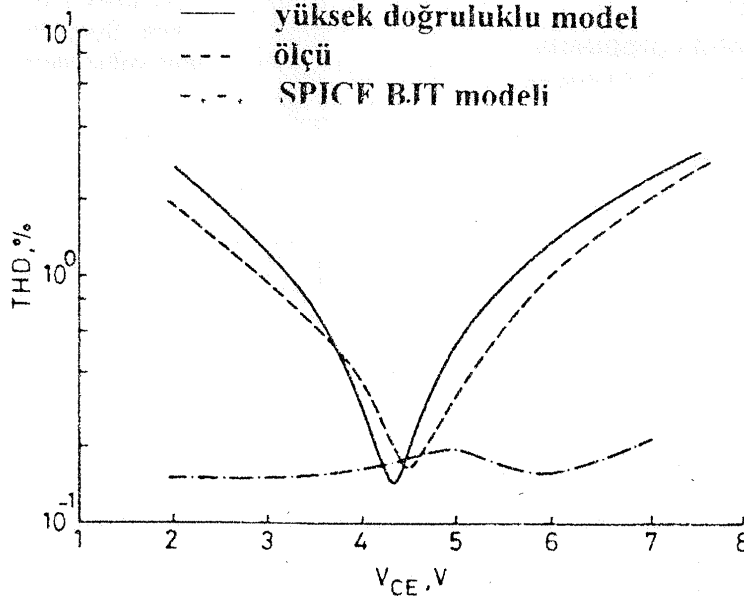
Şekil-3.54'den izlenebileceği gibi, $I_C = 2mA$ için yüksek doğruluklu modelden elde edilen $h_{oc} -V_{CE}$ değişimi de Early olayı için fiziksel modellemeden yararlanılmasının ve kolektör belvermesinin model kapsamına alınmış olmasının doğal bir sonucu olarak ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olmakta, bu açıdan yetersiz kalan SPICE Gummel-Poon modeli ise gerçek eleman davranışına göre çok farklı bir değişim vermektedir.



Şekil-3.55. Aktif yüklü kuvvetlendirici.

Daha önce de belirtildiği gibi, bir modelin doğruluğunun test edilmesi için yararlanılabilecek diğer bir kriter, elemanın devre yapısı içinde neden olduğu lineer olmama distorsiyonu için ölçü ve hesap sonucu elde edilecek sonuçların tutarlılığıdır. Yüksek doğruluklu modelin bu açıdan sağlayacağı yarar, Şekil-3.55'deki aktif yüklü kuvvetlendirici üzerinde gösterilmiştir. Kuvvetlendirici XR B101 npn ve XR B102 pnp dizi tranzistorları ile kurulmuştur. Giriş kutuplama gerilimi değiştirilerek çıkış geriliminin sükunet noktası, dolayısıyla çalışma noktası değiştirilmiş, her çalışma noktası için lineer olmama distorsiyonunun değişimi incelenmiştir. Teorik sonuçlar ölçüm sonuçlarıyla birlikte Şekil-3.56'da verilmiştir. Kıyasla amacıyla, SPICE Gummel-Poon modelinden elde edilen sonuçlar da şekil üzerinde gösterilmiştir. Giriş gerilimi 1kHz frekanslı sinüs biçimli bir işaret uygulanmış, çıkış gerilimi $V_{PP}=2V$ değerinde sabit tutulmuştur. Şekilden fark edilebileceği gibi, $V_{CEQ} = 4.5V$

değerinde devrenin toplam harmonik distorsiyonu minimum olmakta, yüksek doğruluklu modelle gerçekleştirilen simülasyon bu noktayı $V_{CEQ} = 4.35V$ olarak vermekte, SPICE Gummel-Poon modeli ise herhangi bir minimum noktasını vermemektedir.



Şekil-3.56. Aktif yüklü kuvvetlendirici için klasik model, yüksek doğruluklu statik BJT modeli ve ölçüm sonuçlarından elde edilen THD(%)- V_{CE} değişimleri.

SPICE BJT modeli dinamik model parametrelerinin statik model parametreleri yardımıyla belirlenmesi

Bilgisayarla devre simülasyonu devre tasarımının en önemli adımlarından biridir ve tasarımcıya devreyi kurmadan tasarladığı devrenin özelliklerini inceleme olanağını sağlar. Bir simülasyonun doğruluğu ise kullanılan modelin doğruluğu ile sınırlıdır. Model denklemlerinin yanısıra, model parametrelerinin belirlenmesi de önemli faktörlerden birini oluşturmaktadır. Model parametreleri statik davranış (DC) parametreleri ve dinamik davranış (AC) parametreleri başlıkları altında iki grupta toplanabilir. Bu gruptaki parametrelerin belirlenmesi için geliştirilmiş olan çeşitli yöntemler literatürde verilmiştir. Dinamik davranış parametreleri değişken işaret ölçümlerinden hareketle belirlenirler. Öte yandan, bipolar tranzistorun statik ve dinamik davranışları birbirleriyle ilişkilidirler. Örneğin, Early olayı ile jonksiyon

kapasitesinin gerilime bağımlılığı, difüzyon kapasitesi ile akım kazancının büyük akımlarda azalması aynı fiziksel etkenlere dayanmaktadır.

Statik ve dinamik davranışların aynı fiziksel olaylardan kaynaklanması, dinamik davranış parametrelerinin tümünün yahut büyük bir çoğunluğunun statik ölçümler yardımıyla ve fiziksel model denklemlerinden hareketle belirlenebileceğini göstermektedir. Bu fikre dayanan ölçme yöntemlerinin geliştirilmesinin yararlı olacağı, dinamik parametrelerin ölçülmesinde karşılaşılan sorunların da elimine edilebileceği açıktır.

Günümüzde kullanılan modellerde, örneğin SPICE BJT modelinde, statik ve dinamik olaylar ayrı ayrı ve birbirinden bağımsız parametre gruplarıyla temsil edilmektedir. Bununla beraber, dinamik ve statik davranış parametreleri arasındaki ilişki dikkate alınarak kurulmuş BJT modelleri de bulunmaktadır ve bunlara ilişkin bağıntılardan yararlanarak dinamik parametrelerin belirlenmesi mümkündür. Bu çalışmada, BJT dinamik model parametrelerini statik davranış parametreleri yardımıyla belirlemek üzere yöntemler önerilmiş, dinamik model parametrelerinin dc ölçümler yardımıyla ne şekilde ve hangi doğrulukta ölçülebilecekleri araştırılmıştır.

Ölçme yöntemleri

Statik ve dinamik davranışlar arasındaki ilişkiden hareketle çıkartılmış Gummel-Poon modeli bağıntıları uyarınca, normalize edilmiş baz yükü

$$q_B = 1 + q_C + q_E + q_F + q_R \quad (3.5.66)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu bağıntıdaki ilk bileşen sıfır kutuplamadaki baz yüküne, ikinci ve üçüncü terimler BC ve BE jonksiyonları fakirleşmiş bölge yüklerine düşmektedir. BC ve BE jonksiyonları difüzyon kapasiteleri ile ilişkili q_C ve q_E terimleri ise yüksek enjeksiyon seviyesi olaylarını temsil etmektedir.

Statik ve dinamik davranışlar arasındaki ilişkilerden hareketle çıkartılmış olan ve yüksek doğruluk sağlamayı amaçlayan Geliştirilmiş Ebers-Moll modeli, ileri yönde aktif çalışma bölgesi için Early olayını

$$M_F = 2 \frac{C_{jco} \phi_C^{m_c}}{Q_{BO} \cdot (1 - m_c)} \quad (3.5.67)$$

$$q_C = -\frac{M_F}{2} (\phi_C - V_{BC})^{1-m_C} \quad (3.5.68)$$

olmak üzere

$$I_C = \frac{I_{SO}}{1+q_C} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{n_F \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.5.69)$$

bağıntısıyla modellenmektedir. Bağıntılarda q_C CB joksiyonu normalize fakirleşmiş bölge yükü, m_C kapasite gradyan faktörü, ϕ_C CB jonksiyonu potansiyel seddi, V_{BE} baz-emetör gerilimi, I_C kolektör akımı, C_{jCO} CB joksiyonu sıfır kutuplama kapasitesi, Q_{BO} sıfır kutuplama baz yüküdür. Öte yandan, jonksiyon kapasitesini modelleyen Shockley bağıntısı uyarınca, CB jonksiyonu jonksiyon kapasitesi V_{BC} geriliminin fonksiyonu olarak

$$C_{jC}(V_{BC}) = \frac{C_{jCO}}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{\phi_C}\right)^{m_C}} \quad (3.5.70)$$

bağıntısıyla tanımlanır. (1)-(5) bağıntılarından fark edilebileceği gibi CB joksiyonu joksiyon kapasitesi ile ileri yöndeki Early olayı aynı parametrelerle temsil edilmektedirler ki, bu, kurulan fiziksel modelin getirdiği doğal bir sonuçtur.(1) bağıntısıyla verilen q_C normalize yükünün V_{BC} ye göre türevi alınır

$$\frac{\partial q_C}{\partial V_{BC}} = \frac{C_{jC}(V_{BC})}{Q_{BO}} \quad (3.5.71)$$

bulunur.Öte yandan, yine ileri yönde aktif çalışma bölgesi için, alçak frekans y çıkış iletkenliği hesaplanırsa

$$y_{oe} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} = I_C \frac{\partial q_C}{\partial V_{BC}} \quad (3.5.72)$$

elde edilir ki, bunun y_{oe} ile V_{CE} gerilimi arasında C_{jC} ile V_{BC} arasındakile aynı değişimi vereceği açıktır. Dolayısıyla, y_{oe} - V_{CE} değişimi yardımıyla jonksiyon kapasitesini modelleyen parametrelerden ikisi, m_C kapasite gradyan faktörü ve ϕ_C potansiyel seddi, $C_{jC}(V_{BC})$ eğrisinden parametreleri bulmaya yarayan yöntemden yararlanılarak kolayca bulunabilir. Bunun için $\log(y_{oe})$ - $\log(\phi_C - V_{BC})$

değişiminin çizilmesi gerekir. ϕ_C büyüklüğünün doğru saptanması halinde, değişim bir doğru biçimini alır ve bu değişim

$$\log(y_{oe}) = T - m_C \cdot \log(\phi_C - V_{BC}) \quad (3.5.73)$$

bağıntısı ile verilir. Buradan hareketle m_C kapasite gradyan faktörü doğrunun eğiminden yararlanılarak belirlenebilir.

Klasik ölçü yönteminde, ϕ_C nin yanısıra ölçü düzeninde varolan C_K parazitik kapasitesinin değerinin de belirlenmesi gerekmekte, bu iki büyüklüğün saptanmasından sonra doğru elde edilip m_C bulunmaktadır. Önerilen yöntemle C_K nin etkisi elimine edilmiş, bilinmeyen sayısı bir azaltılmış olmaktadır.

C_{jCO} sıfır kutuplama kapasitesi ise Q_{BO} sıfır kutuplama baz yüküne bağlı olarak (6) bağıntısından hareketle bulunabilir.

$$C_{jCO} = \frac{M_F \cdot Q_{BO} \cdot (1 - m_C)}{2\phi_C^{m_C}} \quad (3.5.74)$$

İleri yönde aktif çalışma bölgesi için verilen ilişkinin benzerinin, ters yönde çalışma için Early olayı ve baz-emetör jonksiyonu kapasitesi arasında da kendini göstereceği açıktır. Bu bölge için Geliştirilmiş Ebers-Moll modeli bağıntıları

$$M_R = 2 \frac{C_{jEO} \phi_E^{m_E}}{Q_{BO} \cdot (1 - m_E)} \quad (3.5.75)$$

$$q_E = -\frac{M_R}{2} (\phi_E - V_{BE})^{1-m_E} \quad (3.5.76)$$

olmak üzere

$$I_C = \frac{I_{SO}}{1 + q_E} \left[\exp\left(\frac{V_{BC}}{n_R \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.5.77)$$

şeklindedir. Bağıntılarda q_E BE jonksiyonu normalize edilmiş fakirleşmiş bölge yükünü, m_E kapasite gradyan faktörünü, ϕ_E BE jonksiyonu potansiyel seddini, C_{jEO} BE jonksiyonu sıfır kutuplama kapasitesini göstermektedir. Öncekine benzer yöntemle bu parametrelerin de statik parametre ölçümleri yardımıyla belirlenebileceği açıktır.

Jonksiyon kapasitesi ile Early olayı arasındakine benzer bir ilişki de difüzyon kapasitesi ile yüksek enjeksiyon seviyesi olayları arasında yer alır.

$$I_{CC} = \frac{I_{SS}}{q_B} \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{n_F \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.5.78)$$

olmak üzere, BE jonksiyonu difüzyon kapasitesi

$$Q_{BE} = \tau_F \cdot I_{CC} \quad (3.5.79)$$

BC jonksiyonu difüzyon kapasitesi de

$$Q_{BC} = \tau_R \cdot I_{EC} \quad (3.5.80)$$

bağıntılarıyla verilirler. Öte yandan, (3.5.66) eşitliğindeki q_F ve q_R büyüklükleri

$$q_F = \frac{I_{CC}}{I_{KF}} \quad (3.5.81)$$

$$q_R = \frac{I_{EC}}{I_{KR}} \quad (3.5.82)$$

bağıntılarıyla tanımlanırlar. Gummel-Poon modelinde ilgili statik davranış

$$I_{KF} = \frac{Q_{BO}}{\tau_F} \quad (3.5.83)$$

$$I_{KR} = \frac{Q_{BO}}{\tau_R} \quad (3.5.84)$$

bağıntılarıyla belirtilmektedir. Bu bağıntılar karşı düşürülerek geçiş süreleri bulunabilir. I_{KF} ileri yönde çalışma için dirsek akımı τ_F ileri yönde geçiş süresine, I_{KR} ters yönde çalışma için dirsek akımı da τ_R ters yönde geçiş süresine bağlıdır. Bu iki bağıntıdan da fark edilebileceği gibi, I_{KF} ve I_{KR} nin bilinmesi halinde, τ_F ve τ_R geçiş süreleri Q_{BO} cinsinden ifade edilebilecektir.

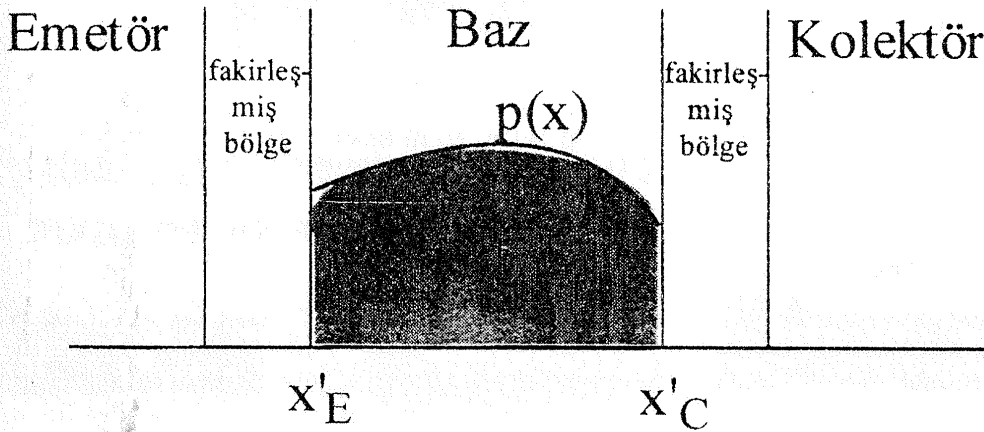
(3.5.67), (3.5.75), (3.5.83) ve (3.5.84) bağıntıları, Q_{BO} sıfır kutuplama baz yükünün önemli bir ara çözüm büyüklüğü olduğunu, Q_{BO} nun bilinmesi halinde C_{jCO} , C_{jEO} , τ_F ve τ_R nin statik davranış eğrilerinden hesaplanabileceğini göstermektedir.

Q_{BO} büyüklüğünün tanımı ve belirlenmesi için yöntemler

Q_{BO} büyüklüğü, jonksiyon gerilimleri sıfır iken elde edilen baz çoğunluk taşıyıcıları yüküdür ve npn tranzistor için

$$Q_{BO} = \int_{x_{EO}}^{x_{CO}} q \cdot A_j \cdot N_A(x) \cdot dx \quad (3.5.85)$$

bağıntısıyla tanımlanır. Bağıntıda A_j jonksiyon kesiti, $N_A(x)$ baz bölgesi katkı yoğunluğu, q elektron yükü, x_{EO}' ve x_{CO}' de tranzistora uygulanan gerilimler sıfır iken nötr baz bölgesi sınırlarıdır, bu sınırlar ve baz bölgesi katkı profili Şekil-3.57'de gösterilmiştir.



Şekil-3.57. Baz bölgesi katkı profili.

(3.5.85) bağıntısındaki integral Gummel sayısı olarak isimlendirilir ve Şekil-3.57'deki taralı alana karşı düşer. Bu integralin belirlenmesi halinde Q_{BO} büyüklüğünün bulunabileceği açıktır. Q_{BO} büyüklüğünün belirlenmesi için çeşitli yöntemlerden yararlanılabilir. Bunlardan biri, jonksiyon kesitinin bilinmesine dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem integralin adım adım çıkartılması ilkesine dayanmaktadır. Bilindiği gibi, bir BJT de emetör katkı yoğunluğu baz katkı yoğunluğundan, baz katkı yoğunluğu da kolektör katkı yoğunluğundan çok daha yüksek olur. Tranzistörün ters çalışması halinde, BE jonksiyonu fakirleşmiş bölgesi geniş ölçüde az katkılı baz bölgesi içinde oluşur ve bu bölge artan V_{BE} gerilimi ile genişler (Ters Early Olayı), bununla da I_E emetör akımı değişir. Elde edilen I-V çifti verileri ve tranzistörün fiziksel bağıntıları yardımıyla bir bilgisayar programında veriler işlenerek aktif baz profili çıkartılıp Q_{BO} bulunur.

İkinci bir yol, dinamik parametrelerden birinin konvansiyonel yoldan belirlenmesi ve buradan Q_{BO} in bulunmasına dayanır. Bunun için $C_{JC}-V_{CE}$

değişiminin çıkartılması gerekir. Yapılan çalışmalarda, daha önceki bölümde belirtildiği gibi, $C_{JC} - V_{CE}$ ilişkisinin

$$C_{JC}(V_{CE}) = \frac{M_F \cdot (1 - m_C)}{2} Q_{BO} \cdot V_{CE}^{-m_C} \quad (3.5.86)$$

olduğu gösterilmiştir. Bu bağıntı yardımıyla Q_{BO}

$$Q_{BO} = \frac{2}{M_F \cdot (1 - m_C)} = \frac{C_{JC}(V_{CE1}) - C_{JC}(V_{CE2})}{V_{CE1}^{-m_C} - V_{CE2}^{-m_C}} \quad (3.5.87)$$

olarak belirlenebilir. Q_{BO} sıfır kutuplama baz yükünün belirlenmesinden sonra, daha önce önerilmiş olan yöntemler yardımıyla diğer dinamik parametreler statik parametre ölçümleri yardımıyla belirlenebilir.

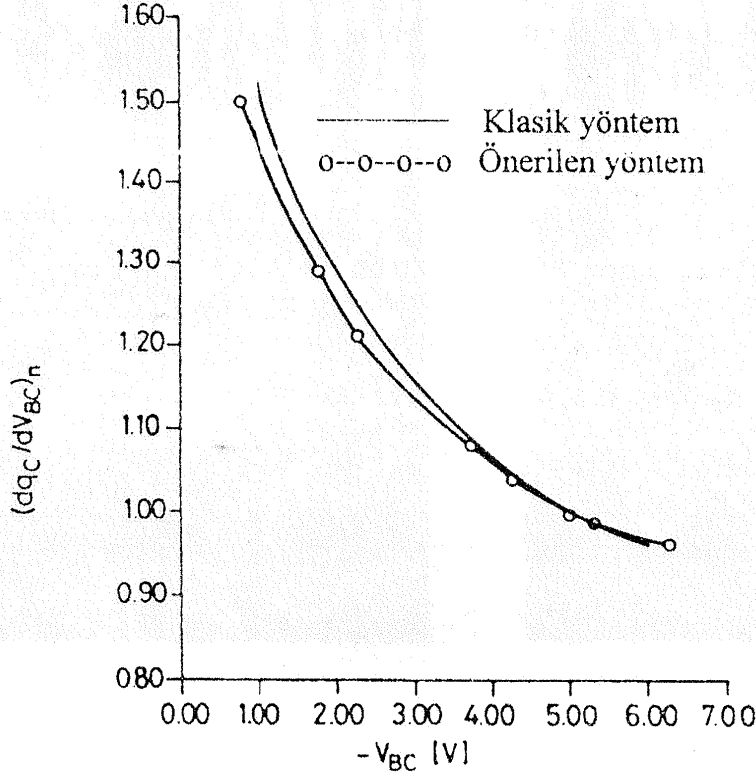
Bu iki yöntemden ilki jonksiyon kesitinin bilinmesine dayanmakta ve tümdevre tasarımına yönelik bir yöntem olmaktadır. Buna karşılık, tüm ölçümler HP 4145 parametre analizörü ile yapılabilmektedir.

İkinci yöntem ise, tranzistorun geometrisini bilmeyen devre tasarımcısına yöneliktir; jonksiyon kapasitesi ölçümleri ile Q_{BO} bulunmakta, geri kalan diğer dinamik parametreler ise yine statik parametre ölçümlerinden saptanmaktadır.

DeneySEL sonuçlar

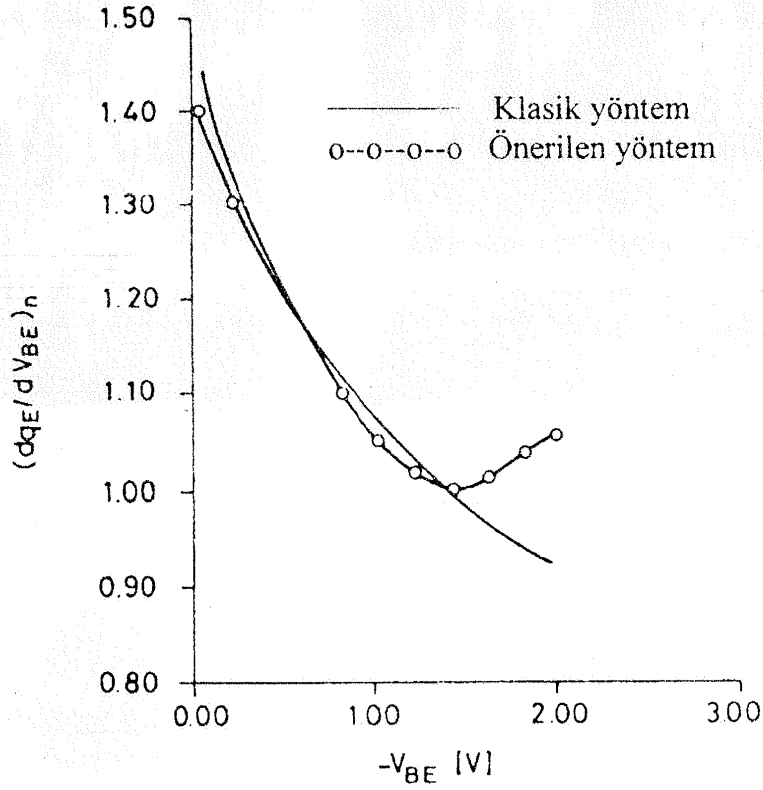
Önerilen yöntemin doğruluğu, bu yöntemle elde edilen sonuçlar konvansiyonel ölçü teknikleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. BC548B tipi npn tranzistoru için dinamik model parametreleri hem konvansiyonel hem de önerilen yöntemle ölçülmüştür.

$\partial q_C / \partial V_{BC}$ türevinin V_{BC} gerilimi ile değişimi konvansiyonel yöntemle ve bu bölümde önerilen yöntemle ölçü yoluyla elde edilmiş ve Şekil-3.58'de gösterilmiştir. Klasik yöntemlerle yapılan ölçümler $f = 1\text{MHz}$ 'lik bir ölçü frekansında yapılmıştır. Şekil-3.58'deki tüm değerler $V_{BC} = -5\text{V}$ 'daki değerlere göre normalize edilmiştir.



Şekil-3.58. Yeni yöntem ve konvansiyonel yöntemle elde edilen $\partial q_C / \partial V_{BC} - V_{BC}$ değişimleri. Tüm değerler $V_{BC} = -5V$ 'daki değerlere göre normalize edilmiştir.

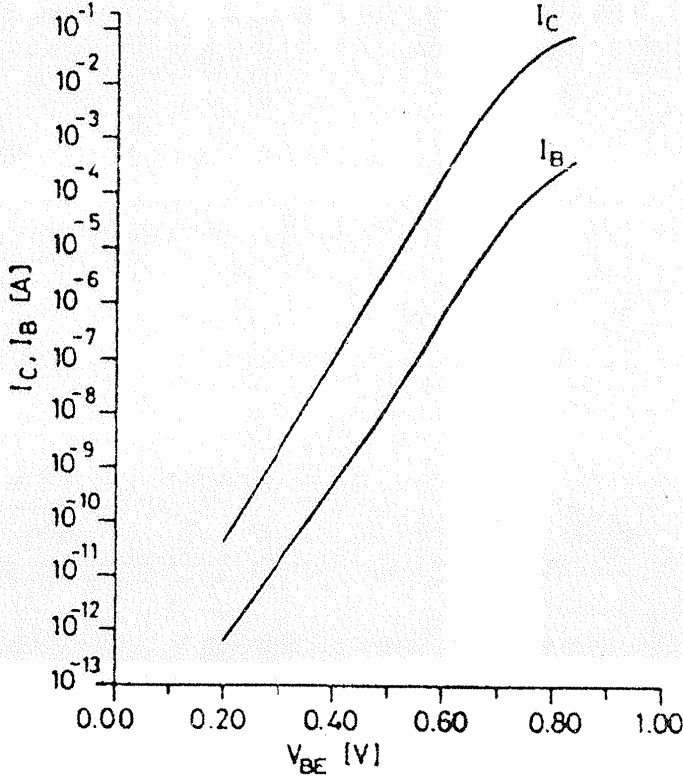
$\partial q_E / \partial V_{BE}$ türevinin V_{BE} gerilimi ile değişimi de $\partial q_C / \partial V_{BC}$ türevinin V_{BC} gerilimi ile değişimine benzer biçimde konvansiyonel yöntemle ve yeni önerilen yöntemle ölçü yoluyla elde edilmiş ve Şekil-3.59'da verilmiştir. Klasik yöntemlerle yapılan ölçümler $f = 1\text{MHz}$ 'lik bir ölçü frekansında yapılmıştır. Şekil-3.59'daki tüm değerler $V_{BE} = -1.4V$ 'deki değerler göre normalize edilmiştir. Baz-emetör jonksiyonunun belverme geriliminin yüksek katkılama nedeniyle düşük gerilimlerde ortaya çıkan etkisini gidermek amacıyla, normalizasyon düşük bir gerilim değerindeki değere göre yapılmış ve gerilim aralığı düşük tutulmuştur.



Şekil-3.59. Yeni yöntem ve konvansiyonel yöntemle elde edilen $\partial q_E / \partial V_{BE} - V_{BE}$ değişimleri. Tüm değerler $V_{BE} = -1.4V$ 'daki değerlere göre normalize edilmiştir.

τ_F ileri yönde ve τ_R ters yönde geçiş sürelerini belirlemek amacıyla yararlanmak üzere ölçü yoluyla HP4145A parametre analizörü yardımıyla elde edilen $\ln I_C - V_{BE}$ ve $\ln I_E - V_{BC}$ değişimleri Şekil-3.60 ve Şekil-3.61'de görülmektedir.

Şekil-3.58 ve Şekil-3.59'daki ölçü sonuçları ϕ_C , m_C , C_{jCO} , ϕ_E , m_E ve C_{jEO} parametrelerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Şekil-3.60 ve Şekil-3.61'deki ölçü verilerinden hareketle ileri ve ters yönde çalışma için I_{KF} ve I_{KR} dirsek akımları belirlenmektedir ve bu dirsek akımı değerlerinden yararlanılarak da τ_F ileri yönde ve τ_R ters yönde geçiş süreleri hesaplanmaktadır. Klasik ölçü yöntemlerinden hareket edildiğinde ise bu parametreler darbe ölçme tekniğinden yararlanılarak belirlenmektedir.

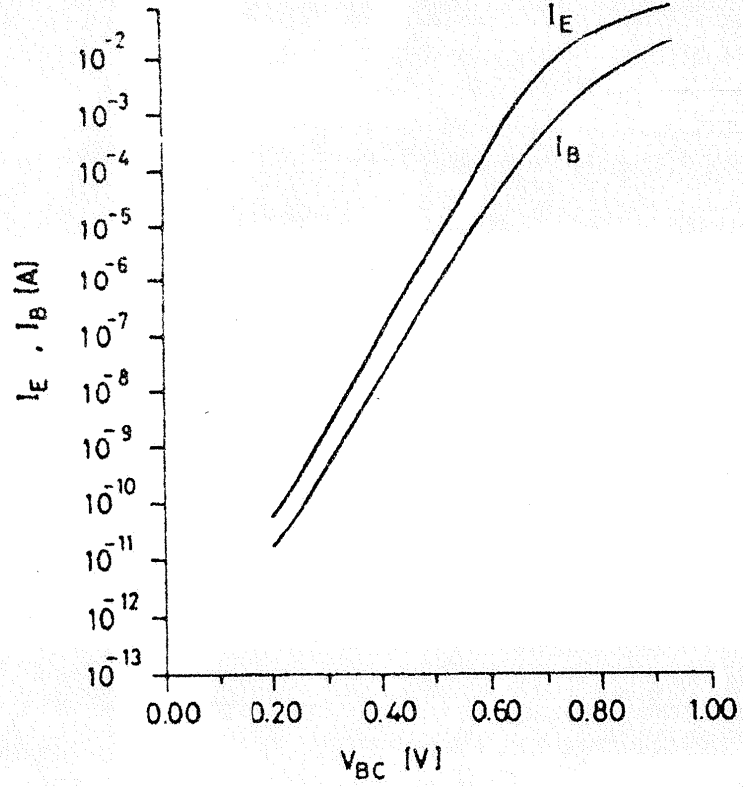


Şekil-3.60. I_{KF} dirsek akımını belirlemek üzere HP4145A parametre analizörü yardımıyla elde edilen $\ln I_C - V_{BE}$ ve $\ln I_B - V_{BE}$ değişimleri.

Üzerinde ölçüm yapılan BC 548B tipi npn tranzistor için belirlenen statik model parametreleri Tablo 3.5'de verilmiştir. Sıfır kutuplamadaki toplam baz yükü $Q_{BO} = 4.5 \times 10^{-10} C$ olarak belirlenmiştir. Önerilen yöntem ve konvansiyonel yöntemle elde edilen dinamik model parametreleri de Tablo-3.6'da görülmektedir. Tablodan fark edilebileceği gibi, HP 4145A parametre analizörü ile DC ölçmelere dayanan yeni yöntem konvansiyonel yöntemle uyumlu sonuçlar vermektedir.

Yeni yöntemle ölçüm yapılırken dikkate alınması gereken bir güçlük, ileri ve ters yönde çalışmaya ilişkin I_{KF} ve I_{KR} dirsek akımları belirlenirken r_B baz gövde direncinin bu iki bölgede farklı değerler almasıdır. Bu nedenle, r_B direncinin üzerinde oluşan gerilim düşümünü elimine etmek üzere ek algoritmalar gerekli olmaktadır. Gövde dirençlerinin parametrelerin belirlenmesi üzerine etkisi, EM3

modelinde kullanılan dolaylı yöntemden yararlanılarak giderilebilir. Bu yöntemde $\beta_F - I_C$ ve $\beta_R - I_E$ değişimlerinden yararlanılarak I_{KF} (EM3 modelinde θ) ve I_{KR} (EM3 modelinde θ_R) büyüklükleri hesapla belirlenmektedir.



Şekil-3.61. I_{KR} dirsek akımını belirlemek üzere HP4145A parametre analizörü yardımıyla elde edilen $\ln I_E - V_{BC}$ ve $\ln I_B - V_{BC}$ değişimleri.

Tablo-1. Ölçülen statik model parametreleri.

| M_F | M_R | I_{KF} | I_{KR} |
|-------------------|------------------|----------|----------|
| $0.0245V_C^{m-1}$ | $0.081V_C^{m-1}$ | 180mA | 19mA |

Tablo-2.Ölçülen dinamik model parametreleri

| | C_{jCO} (pF) | ϕ_C (V) | m_C | τ_F (nsn) |
|----------------------|-------------------|-----------------|-------|-------------------|
| yeni yöntem | 3.88 | 0.84 | 0.337 | 1.6 |
| Konvansiyonel yöntem | 3.95 | 0.8 | 0.34 | 1.45 |
| | C_{jEO} (pF) | ϕ_E (V) | m_E | τ_R (nsn) |
| yeni yöntem | 12.9 | 0.77 | 0.35 | 24 |
| Konvansiyonel yöntem | 12 | 0.784 | 0.36 | 32 |

Sonuçlar

SPICE BJT modeli dinamik model parametrelerinin sadece statik model parametreleri için yapılan ölçümler yardımıyla belirlenmesi için bir dizi yöntem önerilmiş, elde edilen sonuçlar klasik ölçü yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve birbiriyle uyumlu oldukları görülmüştür. Jonksiyon kapasitelerini modelleyen parametrelerin belirlenmesi için ileri ve ters yönde çalışma bölgeleri için çıkış iletkenliğinin gerilimle değişiminden ve Early olayını fiziksel olarak modelleyen Geliştirilmiş Ebers-Moll modeli bağıntılarından yararlanılmaktadır. Yüksek enjeksiyon seviyesi olaylarını modelleyen I_{KF} ve I_{KR} dirsek akımları $\ln I_C - V_{BE}$ ve $\ln I_E - V_{BC}$ değişimlerinden saptanmakta fiziksel bağıntılar yardımıyla τ_F ve τ_R büyüklüklerine geçilmektedir. Jonksiyon ve difüzyon kapasitelerine ilişkin parametrelerin belirlenmesinde bir ara büyüklük olarak kullanılan Q_{BO} sıfır kutuplama baz yükü, bu amaçla geliştirilmiş olan yöntemler yardımıyla belirlenebilir.

Önerilen yöntemlerde gerekli olan ölçümler, statik parametre ölçümleri yapabilmek üzere geliştirilmiş olan HP 4145A parametre analizörü yardımıyla gerçekleştirilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] İ.E.,Getreu, Modeling The Bipolar Transistor, Tektronix, Inc., Beaverton, Oregon, 1984.
- [2] P. Antognetti, G. Massobrio, Semiconductor Device Modeling with SPICE, Mc Graw-Hill, 1988.
- [3] L.W.,Nagel, SPICE 2: Program to Simulate Semiconductor Circuits, Rep.No. ERL-M520,University of California, Berkeley, 1975.
- [4] D. Leblebici, Geliştirilmiş Bir Ebers-Moll Modeli, Rapor 80-14, Elektrik Fak. Elektronik ve Yüksek Frekans Tek.Kür.1980.
- [5] H. Kuntman, Modified Ebers-Moll Model,Electron.Lett.,18, 293-294,1982.
- [6] H. Kuntman, Ebers-Moll modeli üzerinde yeni bir modifikasyon (Doktora Tezi), İTÜ Elektrik Fakültesi, 1982.
- [7] H. Kuntman, Lineer Tümdevre Tasarımına Yönelik Bir Bipolar Tranzistor Modeli, Elk. Müh. 3.Ulusal Kogresi Bildiri Kitabı,Cilt 2, 413-416, İstanbul,1989.
- [8] H. Kuntman, Novel modification on SPICE BJT model to obtain extended accuracy, IEE Proc. Pt-G, Vol.138, pp.673-678,1991.
- [9] H. Kuntman, New Method for modelling high-injection effects in bipolar transistors, Bulletin of The Technical University of İstanbul, Vol.37,No.1,pp.73-79, 1984.
- [10] H. Kuntman, H. Çelik, A nonlinear analysis and simulation program for bipolar transistor circuits, Bulletin of The Technical University of Istanbul, Vol.39, No.1, pp.89-107, 1986.
- [11] H. Kuntman, S. Özcan, Minimisation of total harmonic distortion in active-loaded differential BJT amplifiers, Electronics Letters,Vol.27, pp.2381-2383, 1991.
- [12] H. Kuntman, On the harmonic distortion coefficients of active-loaded BJT amplifiers, International Journal of Electronics, Vol.72,pp.459-465,1992.
- [13] H. Kuntman, S. Özcan, Extraction of SPICE BJT model dynamic parameters from dcmeasurement data, International Journal of Electronics, Vol.74, No.4,pp.541-551,1992.
- [14] O.E. Akçasu, B. De Long . and O. Steve, Non-Destructive and Fast-Electrical Profiling Method for the Active Base Regions of Vertical BJT Structures,Brooktree Cor.,San Diego,1989.
- [15] H. Kuntman, Bipolar Tranzistorlarda kolektör-baz kapasitesinin modellenmesi, Elek. Müh. 2.Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, 163-166, Ankara, 1987.

- [16] H. Çelik, H. Kuntman, Tranzistorlu kuvvetlendiriciler için geliştirilmiş bir lineer olmayan devre analizi ve simülasyonu programı, Elektrik Müh. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, s 169-174, Çukurova Üniversitesi, Eylül 1985, Adana.
- [17] H. Çelik, H. Kuntman, Tranzistorlu kuvvetlendiriciler için geliştirilmiş bir lineer olmayan devre analizi ve simülasyonu programı, Yarıiletken Teknolojisi ve Mikroelektronik Kongresi Bildiri Kitabı, ÖY-86/03, s50-56, TÜBİTAK Mar. Ar. Enst., Aralık 1985, Gebze.
- [18] H. Kuntman, V. Kaynar, New algorithm for computer-aided extraction of SPICE static and dynamic BJT model parameters from dc measurement data, Proc.of the 6th International Conference on Microelectronics (ICM'94), pp.26-29, September 5-7, İstanbul, 1994.
- [19] E.İ. Tekdemir, H. Kuntman, Implementation of a novel BJT model into the SPICE simulation program to obtain extended accuracy, International Journal of Electronics, Vol.75, No.6, pp.1185-1199, 1993.
- [20] E.İ. Tekdemir, H. Kuntman, Yüksek doğruluklu bir BJT modelinin SPICE programına katılması, Elektrik Müh. 4. Ulusal Kongresi Bildiri Kitabı, s 685-688, DEÜ, Eylül 1991, İzmir.