
SPICE MOS Model Parametrelerinin Ölçülmesi (1., 2. ve 3. Düzey Modeller)

504041230

Şuayb Yener

ELE517 Yarıiletken Eleman ve Düzenlerin Modellenmesi

1. Düzey Model Parametreleri

V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doğrusal Çalışma Bölgesinde Ölçümü

Doğrusal bölge şartlarında $(V_{DS} < V_{GS} - V_{TH})$

$$I_{DS} = \beta \cdot \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad \beta = \mu_0 c'_{ox} \left(\frac{W_{eff}}{L_{eff}} \right) = KP \left(\frac{W_{eff}}{L_{eff}} \right)$$

$V_{DS}/2$ teriminin V_{GS} yanında ihmal edilebildiği durumlarda

$$I_{DS} \cong \beta \cdot \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} \right]$$

Bağıntı β ve V_{T0} parametrelerinin tespiti için I_{DS} , V_{DS} ve $V_{GS} - V_{TH}$ arasında doğrusal bir ilişki tanımlar.

V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doğrusal Çalışma Bölgesinde Ölçümü

Sırasıyla $V_{GS}=V_{GS1}$ ve $V_{GS}=V_{GS2}$ ve noktalarına karşılık gelen I_{DS1} ve I_{DS2} noktaları eşik gerilimi cinsinden tek ifadede birleştirilirse

$$V_{TH} = \frac{V_{GS1} - (I_{DS1}/I_{DS2})V_{GS2}}{1 - I_{DS1}/I_{DS2}}$$

$I_{DS2}=2I_{DS1}$ olarak seçilir ve bağıntı düzenlenirse

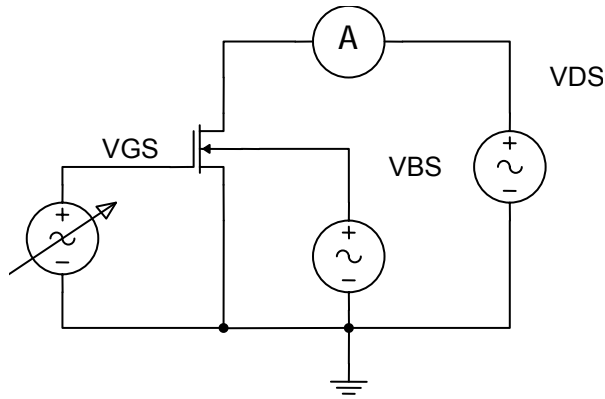
$$V_{TH} = 2V_{GS1} - V_{GS2}$$

$I_{DS1}=1\mu A$ ve $I_{DS2}=2\mu A$ için $V_{T0}=0.9V$ ve $KP=30\mu A/V^2$

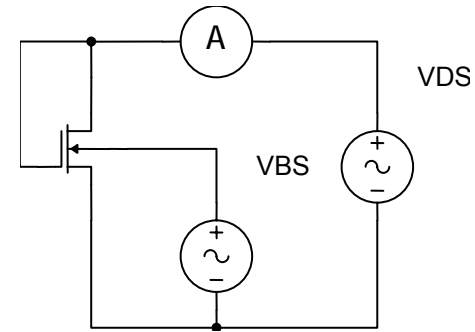
$V_{GS1}=1V$ ve $V_{GS2}=4V$ için $V_{T0}=0.85V$ ve $KP=26\mu A/V^2$

V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doğrusal Çalışma Bölgesinde Ölçümü

- Eşik geriliminin tespiti amacıyla kullanılan ölçüm düzenekleri

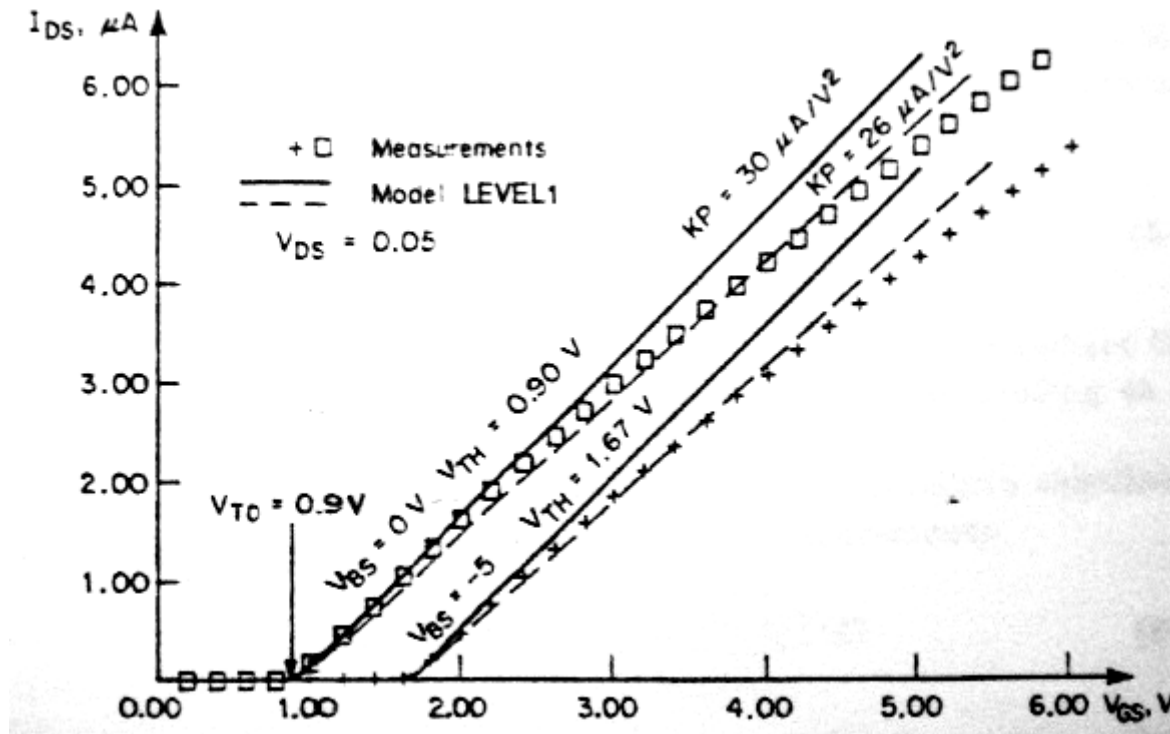


Değişen V_{GS} akımına karşılık sabit V_{DS} ölçüm düzeneği



$V_{GS}=V_{DS}$ ölçüm düzeneği

V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doğrusal Çalışma Bölgesinde Ölçümü



V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doyma Bölgesinde Ölçümü

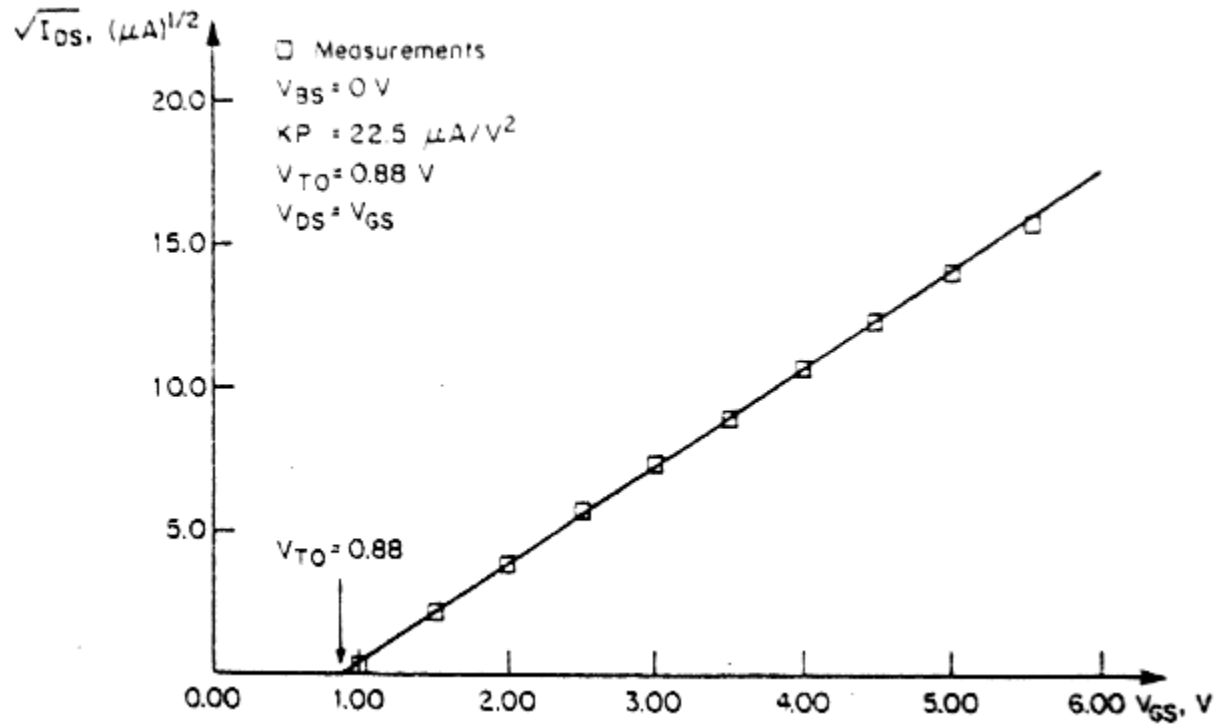
- Doyma bölgesinde çalışma $(V_{DS} > V_{GS} - V_{TH})$
- $V_{DS} = V_{GS}$ ilişkisine dayanan ikinci ölçüm düzeneği kullanılır

$$I_{DS} = \frac{\beta}{2} \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 \Rightarrow \sqrt{I_{DS}} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} \cdot (V_{GS} - V_{TH})$$

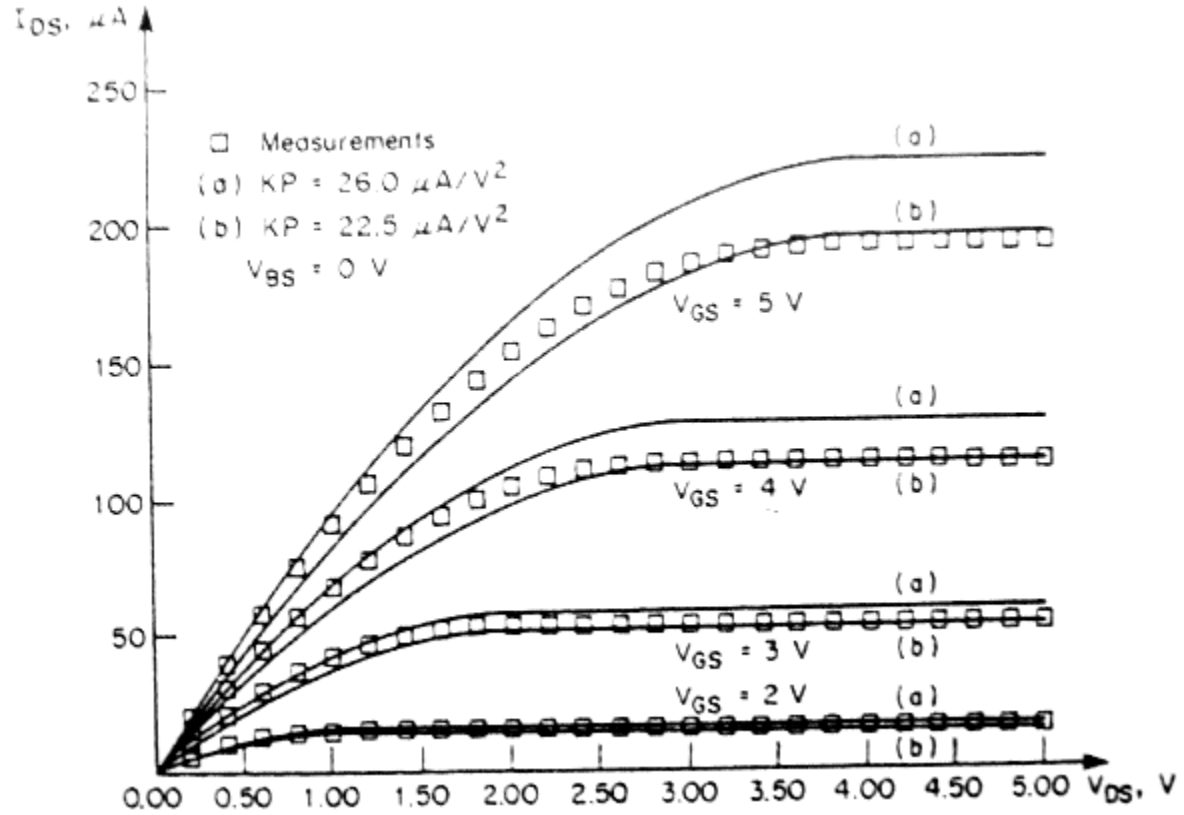
- $\sqrt{I_{DS}} - V_{GS}$ ilişkisiyle grafik üzerinden yada $V_{TH} = \frac{V_{GS1} - \sqrt{I_{DS1}/I_{DS2}} V_{GS2}}{1 - \sqrt{I_{DS1}/I_{DS2}}}$ bağıntısı kullanılarak V_{TH} bulunabilir.

- $I_{DS2} = 4I_{DS1}$ alındığı takdirde $V_{TH} = 2V_{GS1} - V_{GS2}$ ifadesi geçerli olur. Buradan $V_{TH} = 0.88V$ ve $KP = 22.5 \mu A/V^2$ hesaplanır.

V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doyma Bölgesinde Ölçümü



V_{T0} ve KP Parametrelerinin Doyma Bölgesinde Ölçümü



γ Gövde Etkisi Faktörünün Hesaplanması

- Gövde etkisinin V_{TH} eşik gerilimi ile ilişkisi:

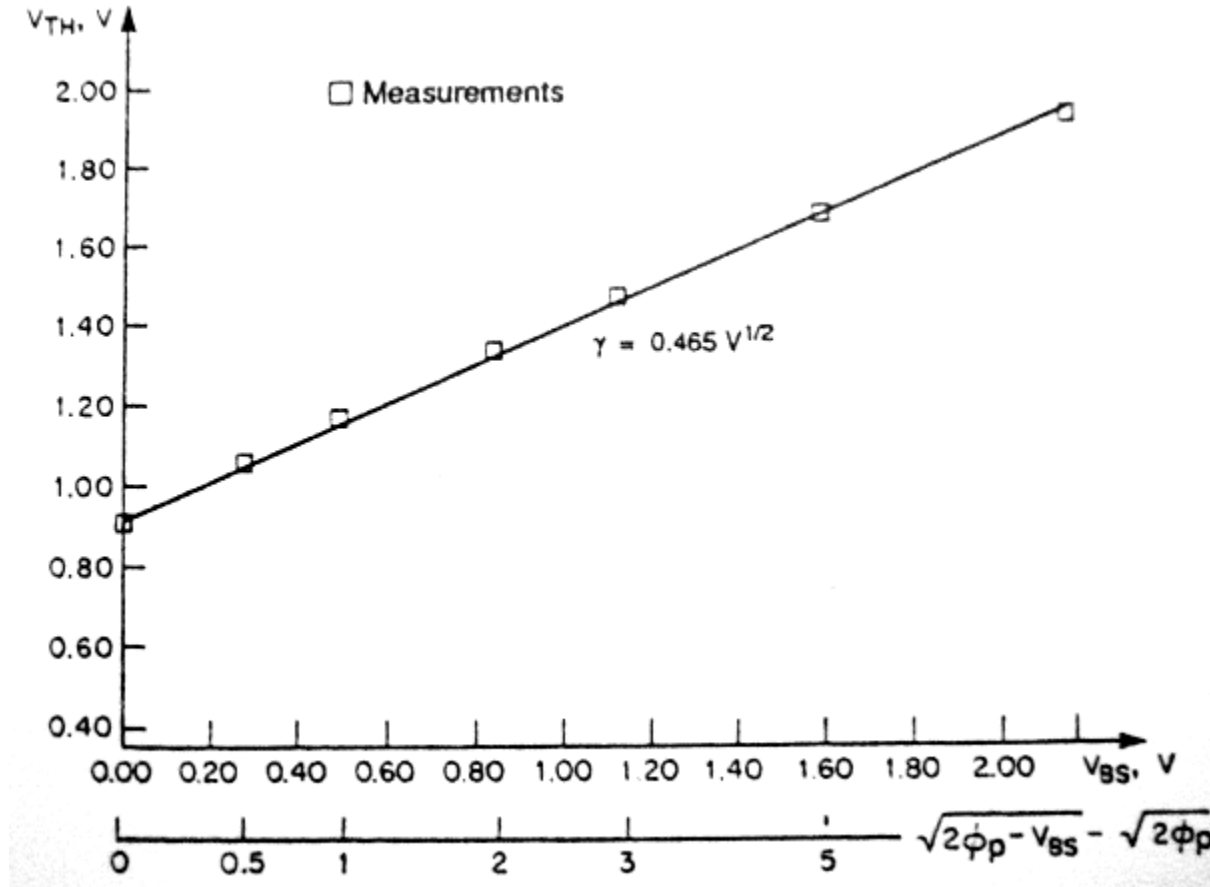
$$V_{TH} = V_{TO} + \gamma \left(\sqrt{2\phi_F - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$$

- γ gövde etkisi belirlenen ölçüm çiftleri için

$$\gamma = \frac{V_{TH2} - V_{TH1}}{\sqrt{2\phi_F - V_{BS2}} - \sqrt{2\phi_F - V_{BS1}}}$$

- Daha yüksek sayıda ölçüm değeri kullanılarak ara değerlerin doğrusal yaklaşımla değerlendirilmesiyle $V_{TH} - \left(\sqrt{2\phi_F - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_F} \right)$ ilişkisi grafiksel olarak belirlenir.

γ Gövde Etkisi Faktörünün Hesaplanması



2. Düzey Model

Parametreleri (Uzun Kanal)

Doğrusal Bölge Ölçümleri

- 1. Düzey modelde uygulanan gerilimle değişmediği kabul edilen taşıyıcı hareket yeteneğinde gerçekte geçit gerilimindeki artışla bir miktar azalma gözlenmektedir.

$$KP' = KP \cdot \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} \cdot \frac{U_c t_{ox}}{V_{GS} - V_{TH} - U_t V_{DS}} \right)^{U_e}$$

U_c (UCRIT): Hareket yeteneği için kritik elektrik alanı

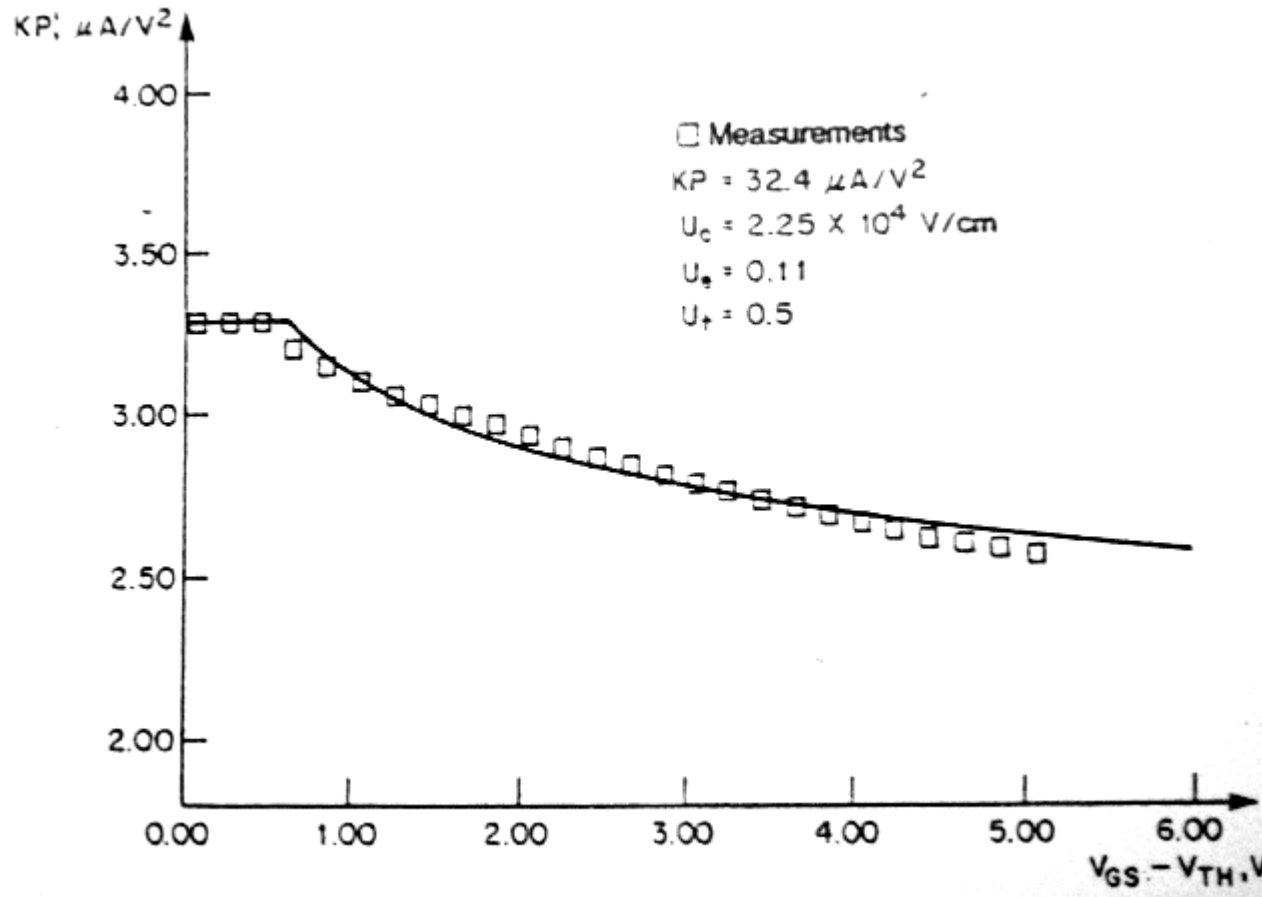
U_t (UTRA): Geçiş alanı katsayısı

U_e (UEXP): Hareket yeteneği için üstel katsayı

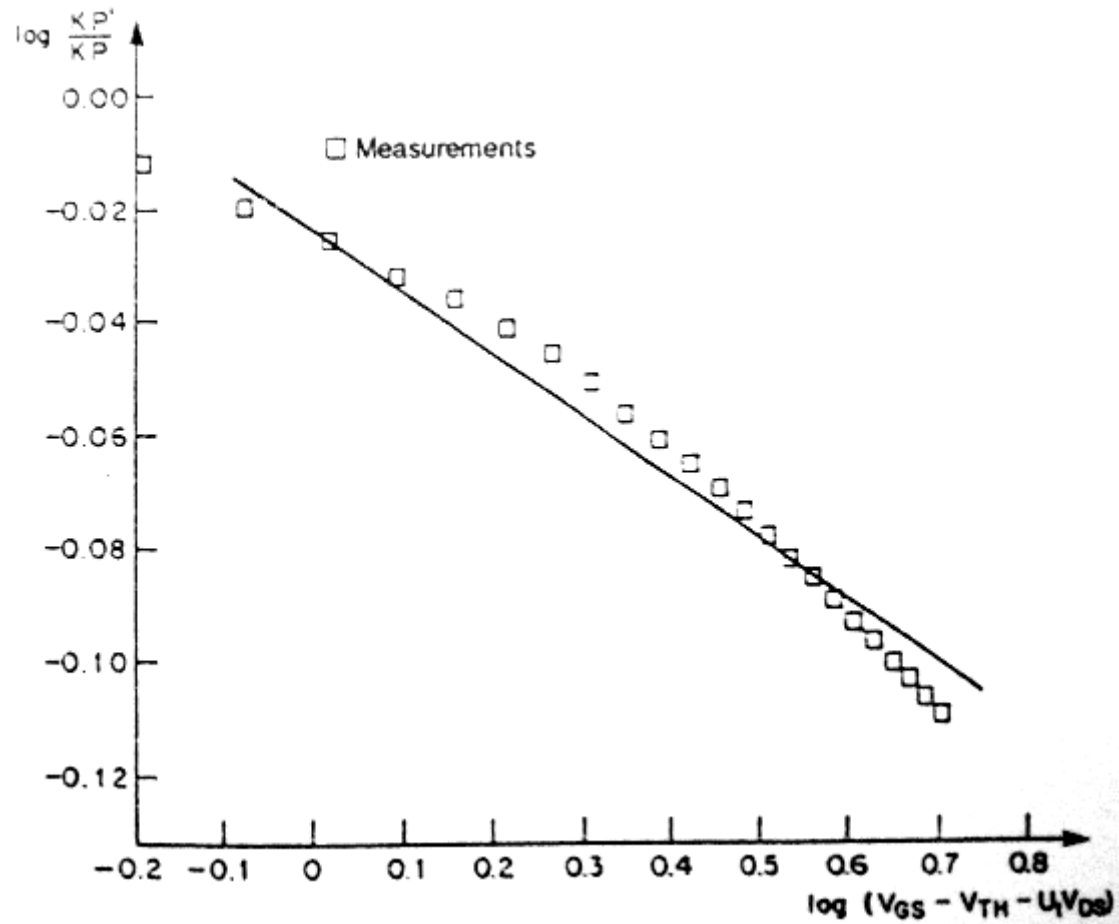
$$\log \frac{KP'}{KP} = \log \frac{\beta'}{\beta} = U_e \left[\log \frac{t_{ox} \epsilon_{Si} U_c}{\epsilon_{ox}} - \log (V_{GS} - V_{TH} - U_t V_{DS}) \right]$$

- Denklemdaki β' parametresi 1. düzey doğrusal bölge için önerilen ifadede hesaplanan β değeridir. Bu değer V_{TH} eşik gerilimi etrafında, I_{DS} ve V_{GS} 'nin bağımlılıklarının yüksek olduğu bölgede hesaplanır.
- U_c , U_e ve U_t parametreleri de grafiksel olarak bulunabilir.

Doğrusal Bölge Ölçümleri

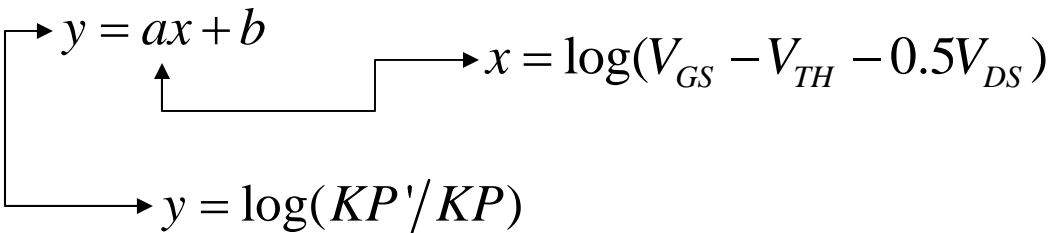


Doğrusal Bölge Ölçümleri



Doğrusal Bölge Ölçümleri

- U_{\dagger} parametresi grafiksel olarak tespit edilemez. Ancak akım üzerinde etkisi çok az olduğundan $U_{\dagger}=0,5$ olarak sabit alınabilir.
- Uygun bilgisayar altyapısı kullanıldığında parametreler lineer regresyon metoduyla bulunabilir.

- 

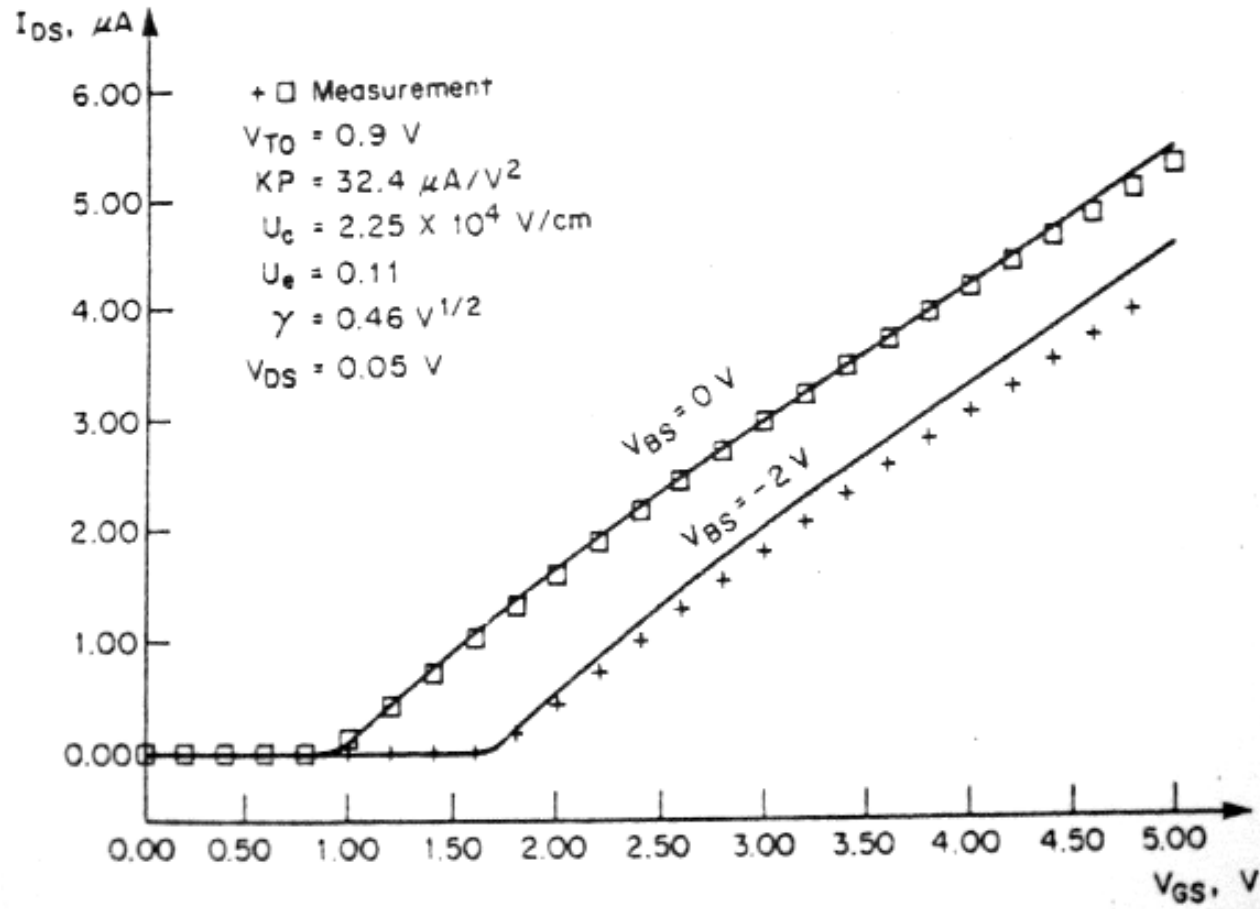
The diagram shows a linear relationship between two variables. The vertical axis is labeled $y = \log(KP'/KP)$ and the horizontal axis is labeled $x = \log(V_{GS} - V_{TH} - 0.5V_{DS})$. A line is drawn through the origin with the equation $y = ax + b$. Arrows indicate the mapping from the axes to the equation.

Yapılan ilişkilendirmeyeyle U_e ve U_c parametreleri

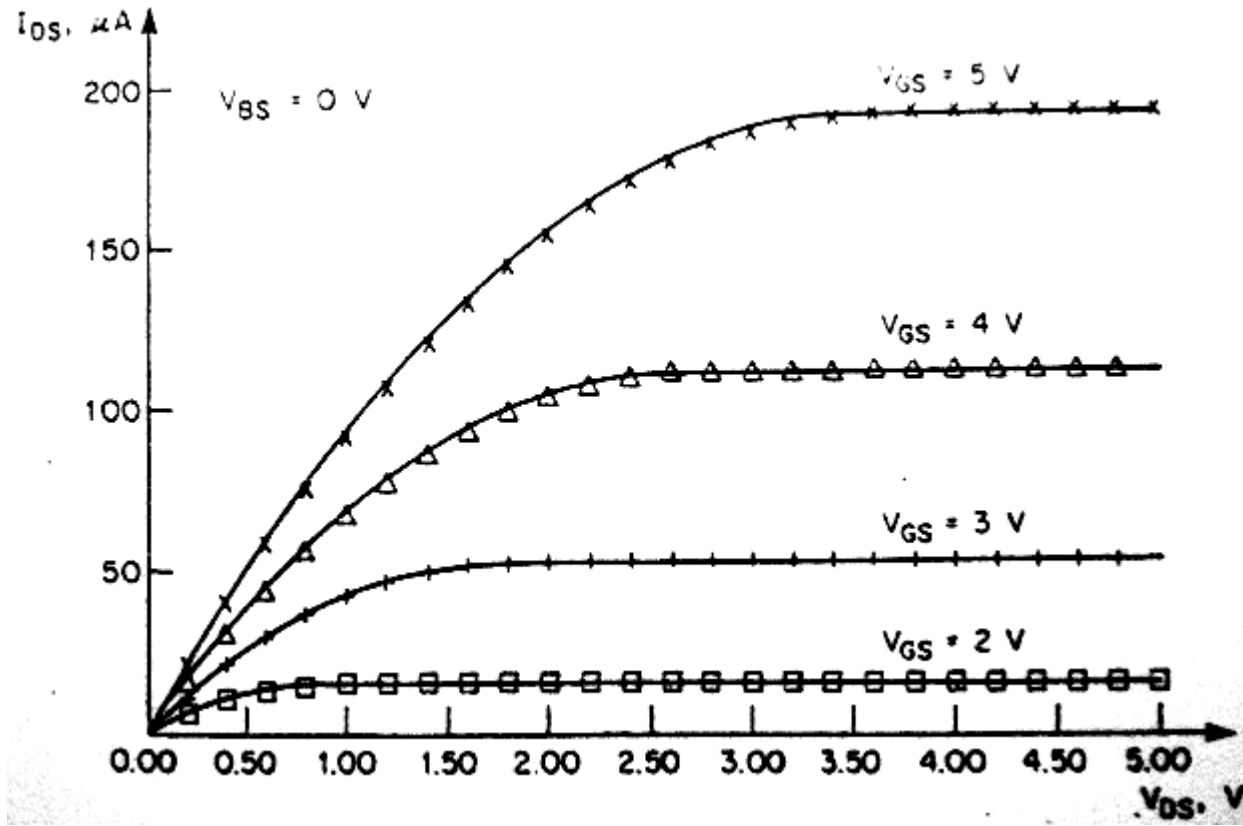
$$U_e = -a \quad U_c = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}\epsilon_s} \cdot 10^{-b/a}$$

olarak bulunur.

Doğrusal Bölge Ölçümleri



Doğrusal Bölge Ölçümleri



Fiziksel Parametrelerin Hesaplanması

- V_{TO} , KP , $2\phi_F$ ve γ elektriksel parametreleri; μ_0 (hareket yeteneği), N_A (taban katkı yoğunluğu), t_{ox} (geçit ince oksit kalınlığı) ve N_{SS} (yüzey durum yoğunluğu) gibi fiziksel parametrelere bağlıdır. t_{ox} ve C'_{ox} parametreleri biliniyorsa

$$\mu_0 = \frac{KP}{C'_{ox}{}^2} \quad N_A = \frac{C'_{ox}{}^2 \gamma^2}{2q\epsilon_s} \quad C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \begin{array}{l} C'_{ox} = 4.32 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2 \\ \mu_0 = 750 \text{ cm}^2/(\text{V.s}) \\ N_A = 1.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \end{array}$$

- Bulunan N_A değeri ile $2\phi_p = 2 \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} = 0,58V$ elde edilir.
- Elde edilen $2\phi_p$ değeri gövde etkisi'nde verilen γ bağıntısından $\gamma = 0,463V^{0,5}$ olarak yeniden hesaplanır.

Fiziksel Parametrelerin Hesaplanması

- Eşik gerilimi fiziksel parametreler cinsinden

$$V_{T0} = \phi_{MS} - \frac{qN'_{SS}}{C'_{ox}} + 2\phi_F + \gamma\sqrt{2\phi_F} \quad \phi_{MS} = -T_{PG} \frac{E_g}{2} - \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

olarak verilir. Denklemlerde N'_{SS} yüzey durum yoğunluğu, T_{PG} geçidin tipi (metal geçit için 0, tabanla aynı polisilisyum geçit için -1, farklı bir polisilisyum için +1).

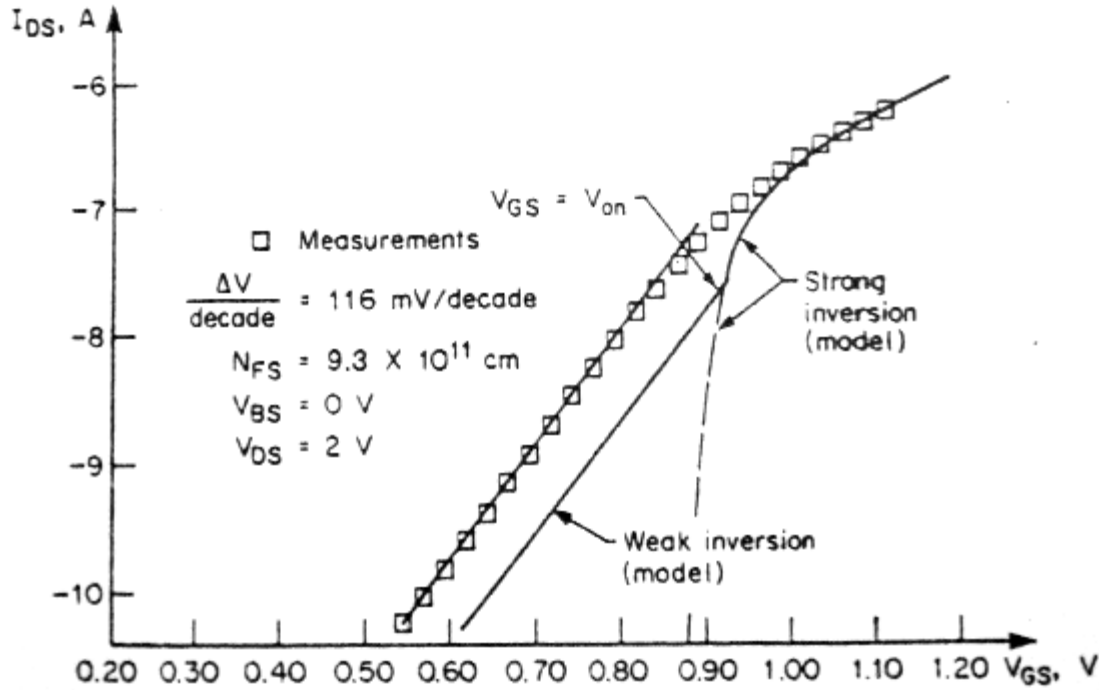
- V_{T0} hesaplandığında N'_{SS} 'nin $-2.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 'ye eşit olduğu görülür. Fiziksel açıdan mümkün olmayan bu durum, gerçek MOS'larda V_{T0} 'ın gerçekleşmesinde **iyon aşılama** ile katkılama bölgesinin, gövde katkılamasından farklı yapılmasıyla açıklanır. Dolayısıyla verilen V_{T0} ifadesi iyon aşılama olmadığında durumlarda kullanılır.

Zayıf Evirtim Bölgesi Ölçümleri

- SPICE yazılımının ele aldığı temel model yüzey potansiyelinin $2\phi_F$ 'den küçük değerleri için sürüklenme akımını hesaplamaz. Gerçekte yüzey güçlü evirtimde olmasa da $V_{GS} < V_{TH}$ durumunda da bir miktar elektron hareketi dolayısıyla akım söz konusudur. Bu akım büyük ölçüde kaynak – kanal arasındaki difüzyondan kaynaklanır.
- NFS değeri bu tanımlamayı modele katmak için kullanılır.

$$N_{FS} = \left(\frac{\Delta V_{GS}}{\Delta \log I_{DS}} \cdot \frac{q}{kT} - 1 \right) \cdot \frac{C'_{ox}}{q}$$

Zayıf Evirtim Bölgesi Ölçümleri



Şekilde $V_{GS} < 0,85 \text{ V}$ ifadesiyle tanımlanan bölge zayıf evirtim bölgesidir. $N_{FS} = 9,3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ elde edilir.

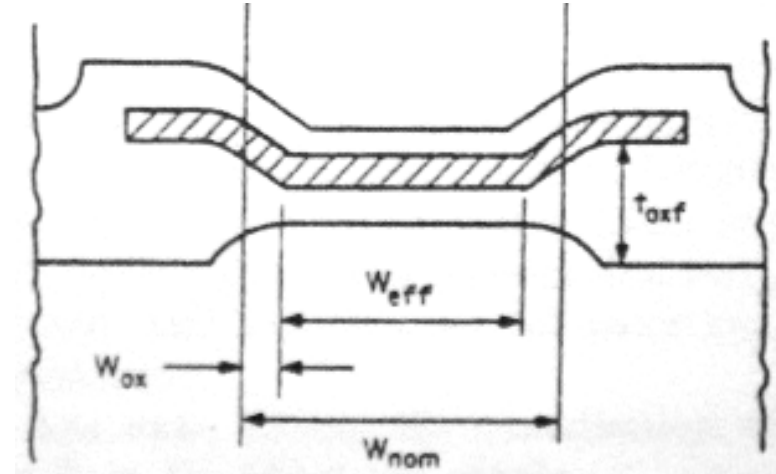
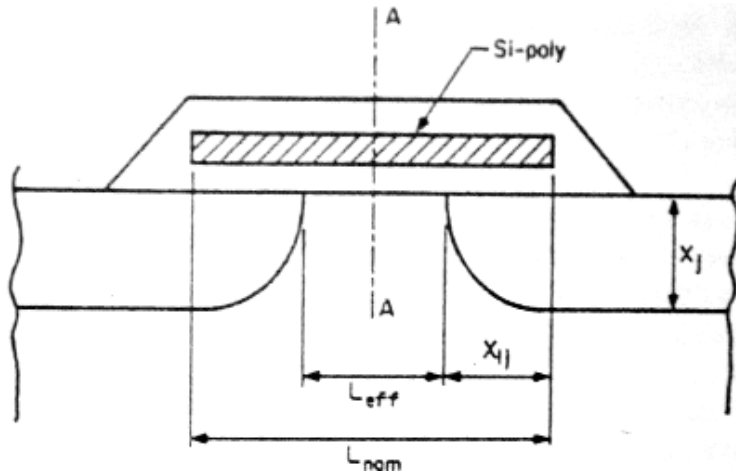
Eğimler aynı olsa da model ile ölçüm sonuçları arasında doğru ilişki olduğu söylenemez. Bu durum geçiş gerilimi V_{on} 'un istenen değere getirilmesini engeller.

2. Düzey Model

Parametreleri (Kısa Kanal)

Efektif Boyutlandırma ve Seri Direncin Hesaplanması

- Şu ana kadar tanımlanan tüm parametreler kanal yapısının uzunluk ve genişlik değerlerine bağımlı olarak ifade edildi. Bu açıdan prosesle ilgili bazı faktörlerden dolayı nominal değerlerden farklı L_{eff} ve W_{eff} değerlerini belirlemek önemlidir.



X_{j1} : Yan difüzyon uzunluğu
difüzyon genişliği

X_j : Metalurjik jonksiyon derinliği

W_{ox} : Yan

Efektif Boyutlandırma ve Seri Direncin Hesaplanması

- Rasgele ortaya çıkan proses hatalarını ifade eden L_{err} ve W_{err} parametrelerinin katılmasıyla

$$\Delta L = L_{nom} - L_{eff} = 2X_{jl} + 2L_{err}$$

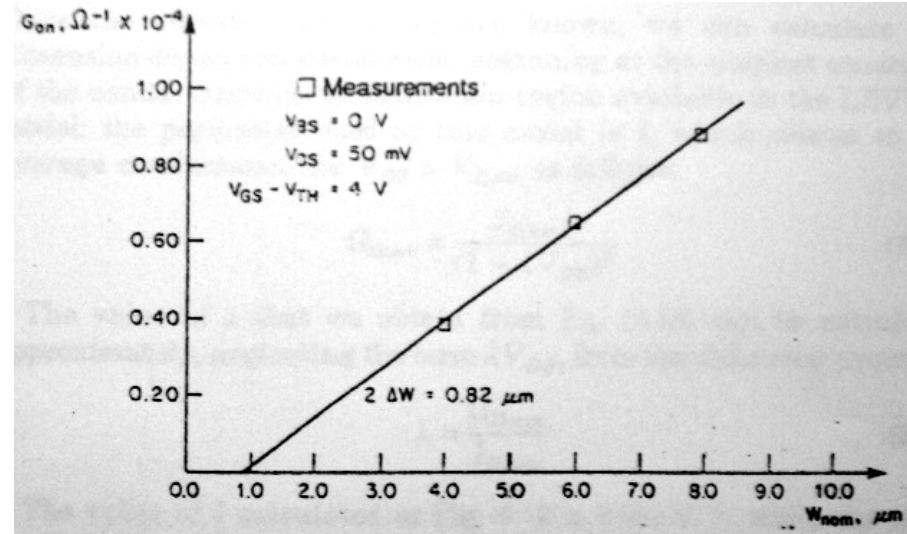
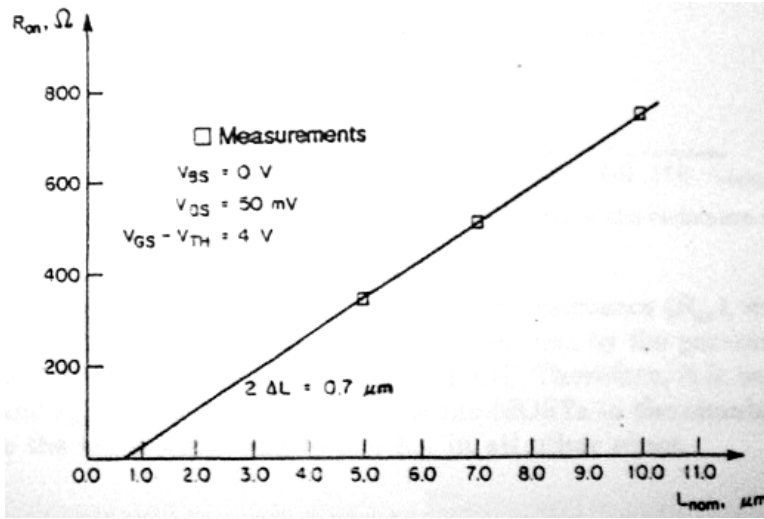
$$\Delta W = W_{nom} - W_{eff} = 2W_{ox} + 2W_{err}$$

- Efektif uzunluk ve genişlik değerleri elektriksel ölçümlerle bulunan kanal direnci ve iletkenliği değerleri yardımıyla belirlenebilir.

$$R_{on} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{1}{\beta(V_{GS} - V_{TH})} = \frac{L_{eff}}{KP \cdot W_{eff} (V_{GS} - V_{TH})}$$

$$G_{on} = \frac{I_{DS}}{V_{GS}} = KP \frac{W_{eff}}{L_{eff}} (V_{GS} - V_{TH})$$

Efektif Boyutlandırma ve Seri Direncin Hesaplanması



R_{on} ölçümleri aynı V_{GS} ve V_{DS} değerleri ile eşit genişlik için ölçeklendirilmiş uzunluk değerleri için soldaki, benzer biçimde ölçeklendirilen uzunluk değerlerinin iletkenliğe bağlı değişimi de sağdaki grafikteki gibi verilir.

Ölçümler farklı V_{GS} değerleri için tekrarlanarak ortalama ΔL ve ΔW değerleri elde edilir. Şekillerden sırasıyla $L_{nom} - L_{eff} = 0,70 \mu m$ ve $W_{nom} - W_{eff} = 0,82 \mu m$ değerleri elde edilir.

Efektif Boyutlandırma ve Seri Direncin Hesaplanması

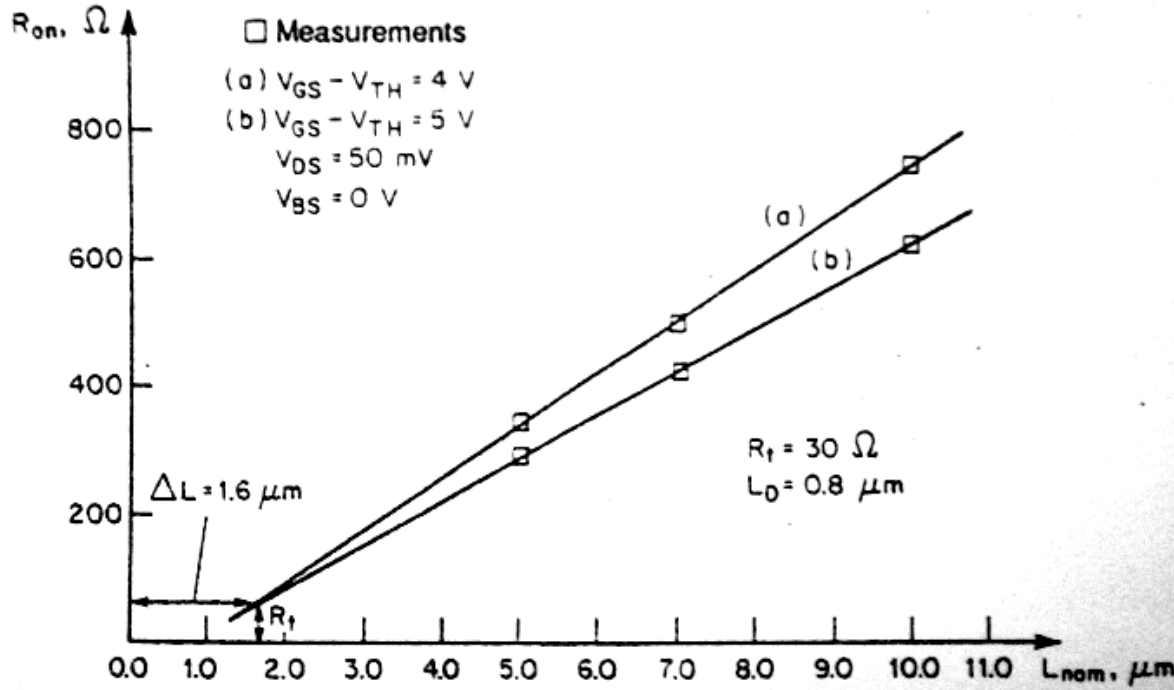
- Kanal uzunluğu küçük seviyelerde olursa R_{on} MOS'un dışındaki parazitik seri dirençle kıyaslanabilir düzeylerde olur. Bu durumda R_t parazitik seri direnci R_{on} ifadesine katılırsa

$$R_{on} + R_t = \frac{L_{nom} - \Delta L}{W_{nom} - \Delta W} \cdot \frac{1}{KP(V_{GS} - V_{TH})}$$

Bağıntı, sabit V_{GS} şartı altında, R_{on} 'un L_{on} 'a bağlı doğrusal değişiminde kesişim noktasının $R_{on}=0$ noktası değil $R=R_t$ ve $L_{nom}=\Delta L$ olacağını ifade eder. R_t parametresi kaynak ve savaktaki tüm seri parazitik dirençlerin toplamını ifade eder.

- Şekilden $L_{nom}=5\mu m$ ve $L_{eff}=3,4\mu m$ elde edilir. Değerler standart R_{on} grafiğinin verdiği sonuçlardan oldukça farklıdır.

Efektif Boyutlandırma ve Seri Direncin Hesaplanması



Şekilden $R_f=30\Omega$ seri direnci SPICE yazılımına $R_S=R_D=15\Omega$ değerlerinde kaynak ve savak direnci olarak ya da R_{sh} (kaynak ve savak tabaka direnci) olarak kullanılmaktadır.

Doyma Bölgesine ait İletkenlik Parametrelerinin Belirlenmesi

- Efektif boyutların bilinmesi durumunda boyuta bağımlı parametreler de hesaplanabilir. $V_{DS} > V_{D,sat}$ şartı altında

$$G_{D,sat} = \frac{I_{D,sat} \lambda}{(1 - \lambda V_{DS})^2}$$

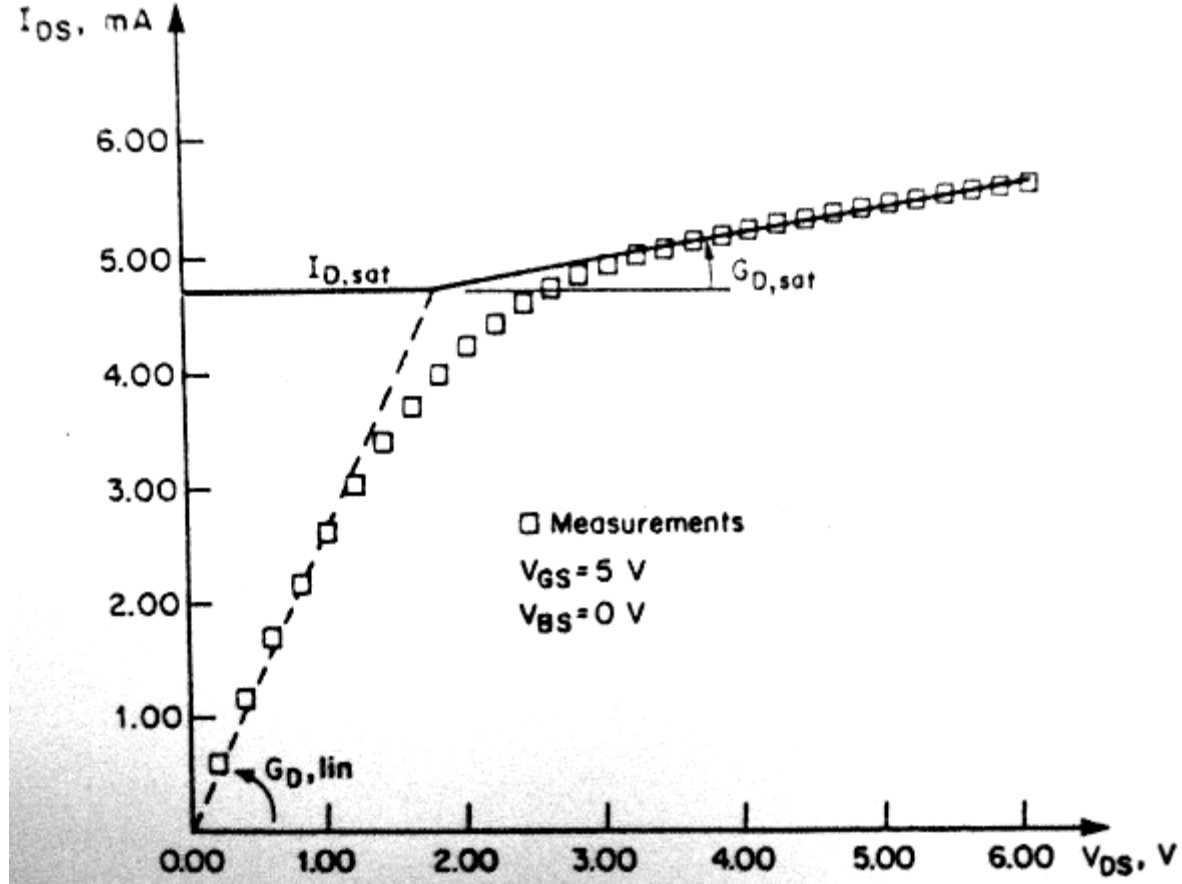
Denklemdaki λ parametresi ortalama iletkenlikle ilişkilendirilmiştir

λV_{DS} ifadesi 1'in yanında ihmal edilebilir

$$\lambda = \frac{G_{D,sat}}{I_{D,sat}}$$

Şekilden $\lambda = 0,053V^{-1}$ elde edilir.

Doyma Bölgesine ait İletkenlik Parametrelerinin Belirlenmesi



Kısa – Kanal İçin Eşik Gerilimi Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi

- Jonksiyon derinliği X_j küçük V_{DS} değerlerinde

$$X_j = \frac{L_{eff}^2 \cdot (1 - \gamma'/\gamma)^2}{2[W_S - L_{eff}(1 - \gamma'/\gamma)]}$$

γ' : VBS için hesaplanan gövde etkisi faktörü

W_S : Kaynak, savak ve kanal için fakirleşmiş bölge kalınlıkları

$$W_S = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}(-V_{BS} + 2\phi_F)}$$

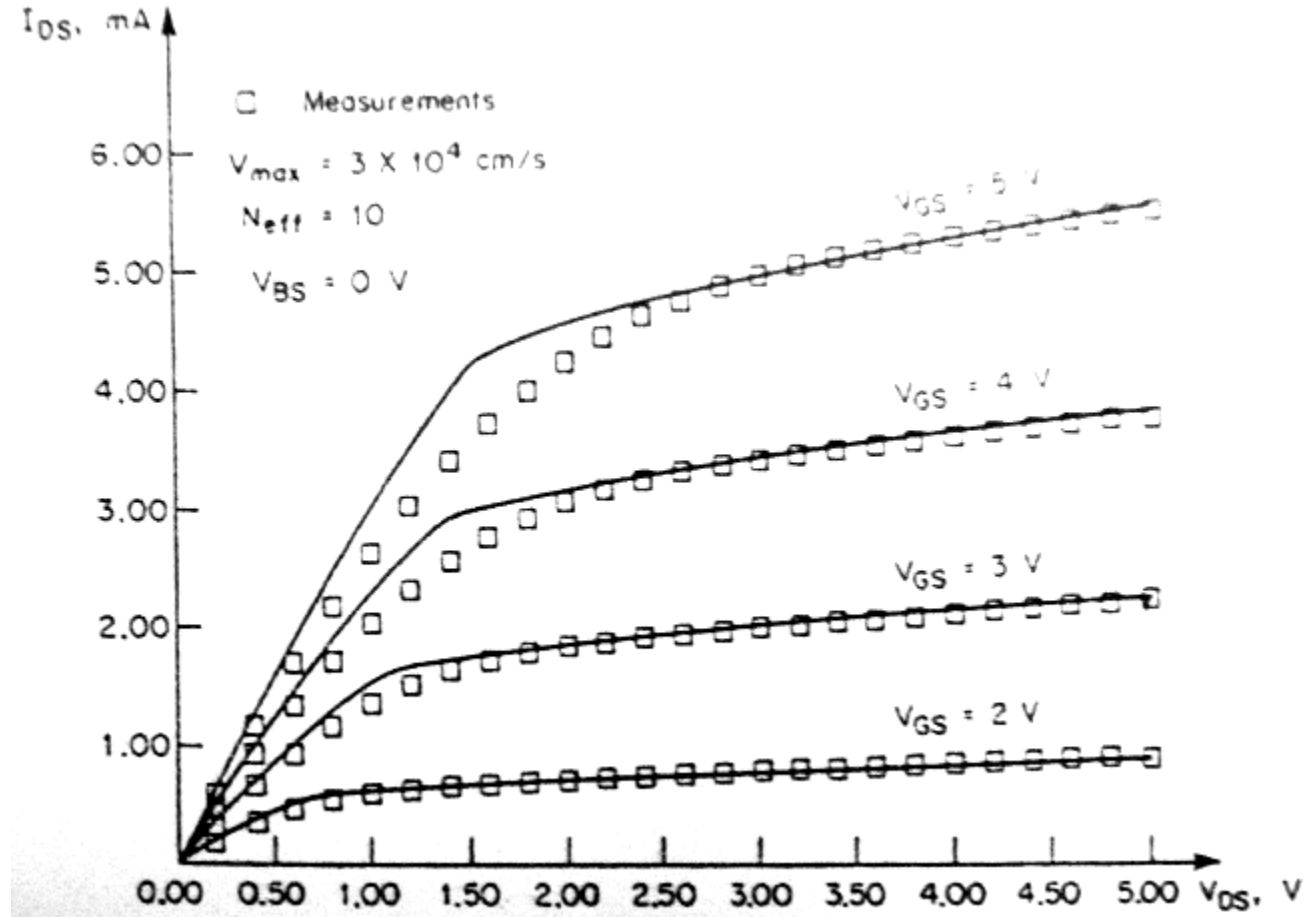
Katkılama yoğunluğu N_A W_S 'ye bağlı olarak

$$N_A = \frac{2\varepsilon_s}{qW_S^2} \cdot (-V_{BS} + 2\phi_F)$$

Kısa – Kanal İçin Hareket Yeteneği Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi

- Enine elektrik alanla oluřan hareket yeteneđindeki azalma modelde doyma gerilimiyle iliřkili v_{max} parametresiyle gösterilmiřtir.
- Verilen modellerdeki kompleks yapılardan dolayı v_{max} ve N_{eff} değerlerini yeterli doğrulukta basitçe belirlemek mümkün değildir. Uygun yöntem olarak ancak v_{max} değerini değiştirilerek doğru doyma akımının ve N_{eff} değerini değiştirilerek doğru iletkenliğin belirlenmesi amaçlanır.
- şekilden $v_{max}=3.10^4V/cm$ ve $N_{eff}=10$ olarak elde edilir.

Kısa – Kanal İçin Hareket Yeteneği Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi



Dar – Kanal Etkisi İçin Parametrelerin Belirlenmesi

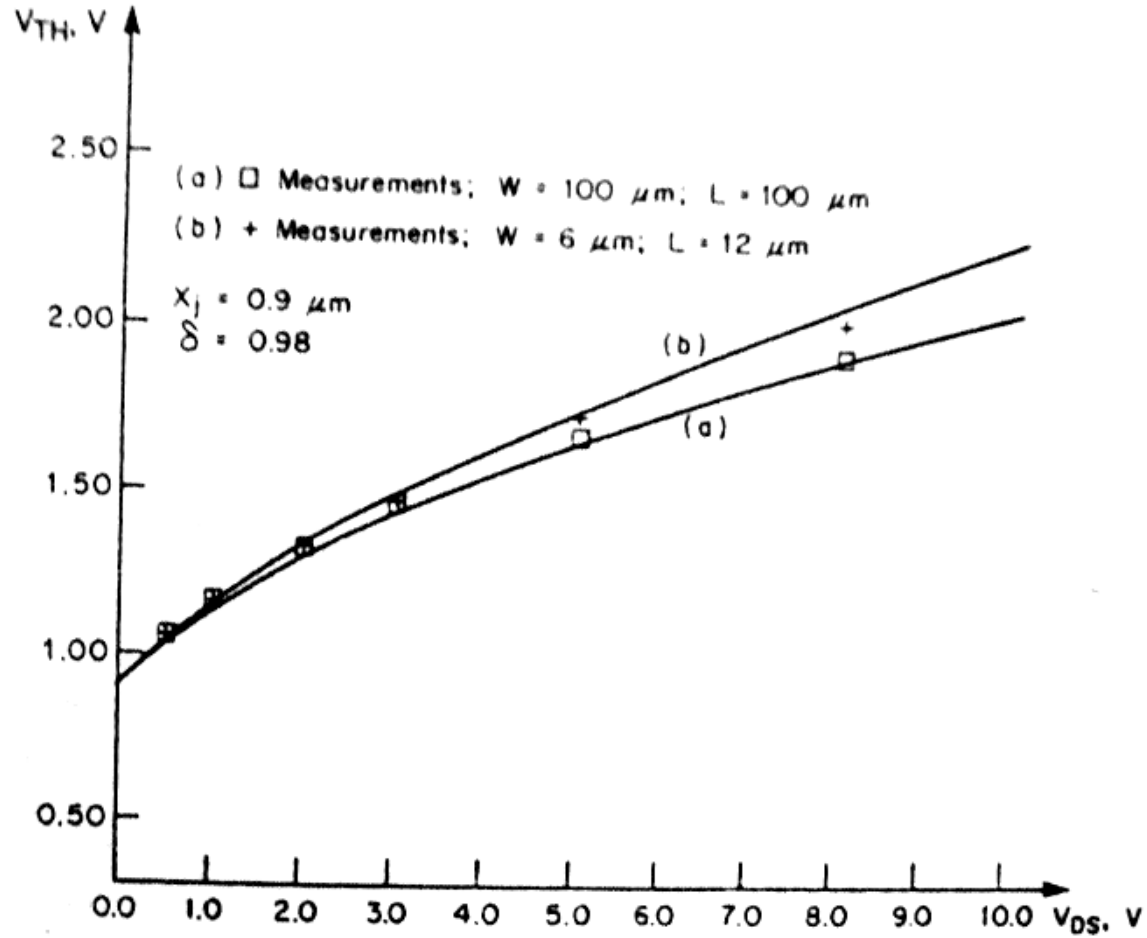
- Kanalın darlığı eşik gerilimini etkileyecektir. Modelde eşik geriliminin genişlik değerine bağımlılığını ifade etmede δ parametresi kullanılır. δ dar – kanallı bir MOS için gövde – etkisi eğrisinden belirlenebilir. Örnekte $W_{eff}=5,2\mu m$ değerindedir.

$$\delta = \frac{\Delta V_{TH}}{\Delta(1/W)} \cdot \frac{4C'_{ox}}{\pi X_D^2}$$

$$X_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A}}$$

δ verilen bağıntılar ve “deneme yanılma” metodu kullanılarak belirlenebilir.

Dar – Kanal Etkisi İçin Parametrelerin Belirlenmesi



3. Düzey Model Parametreleri

Doğrusal Çalışma Bölgesi Ölçümleri

- Güçlü evirtim için eşik gerilimi civarlarındaki V_{GS} değerlerinden başlanarak iteratif metotla V_{T0} ve θ hesaplanmalıdır.

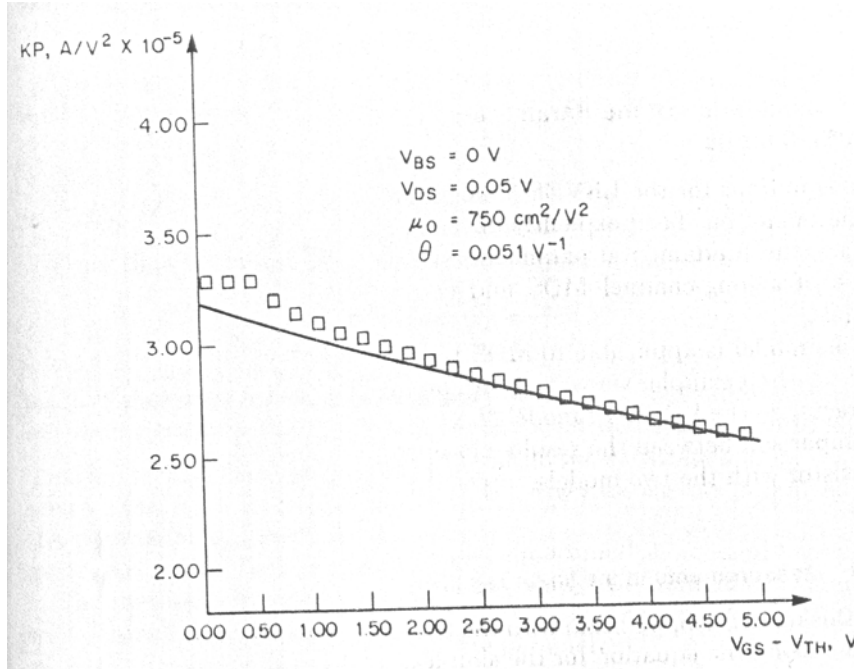
$$\theta = \frac{\beta'_1/\beta'_2 - 1}{V_{GS2} - V_{T0} - (\beta'_1/\beta'_2)(V_{GS1} - V_{T0})}$$

$$KP = \beta'_1 \frac{L}{W_{eff}} [1 + \theta(V_{GS1} - V_{T0})]$$

- Doğru denklemi ifadesinden β ve θ hesaplanır. β 'i, $V_{GS}=V_{GSi}$ iken β' değeridir.

$$\frac{\beta}{\beta'_i} = 1 + \theta(V_{GS} - V_{T0})$$

Doğrusal Çalışma Bölgesi Ölçümleri



Daha önce değerleri belirlenen parametreler

$$V_{T0} = 0,9V$$

$$\gamma = 0,46V^{1/2}$$

$$N_A = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

İterasyon prosedürü sonucunda bulunan değerler

$$KP = 30,9 \mu A/V^2$$

$$\theta = 0,051V^{-1}$$

$$\mu_0 = 715 \text{ cm}^2/(Vs)$$

$V_{GS1}=2V$ ve $V_{GS2}=5V$ için basit yöntemle bulunmuş değerler

$$KP = 32,4 \mu A/V^2$$

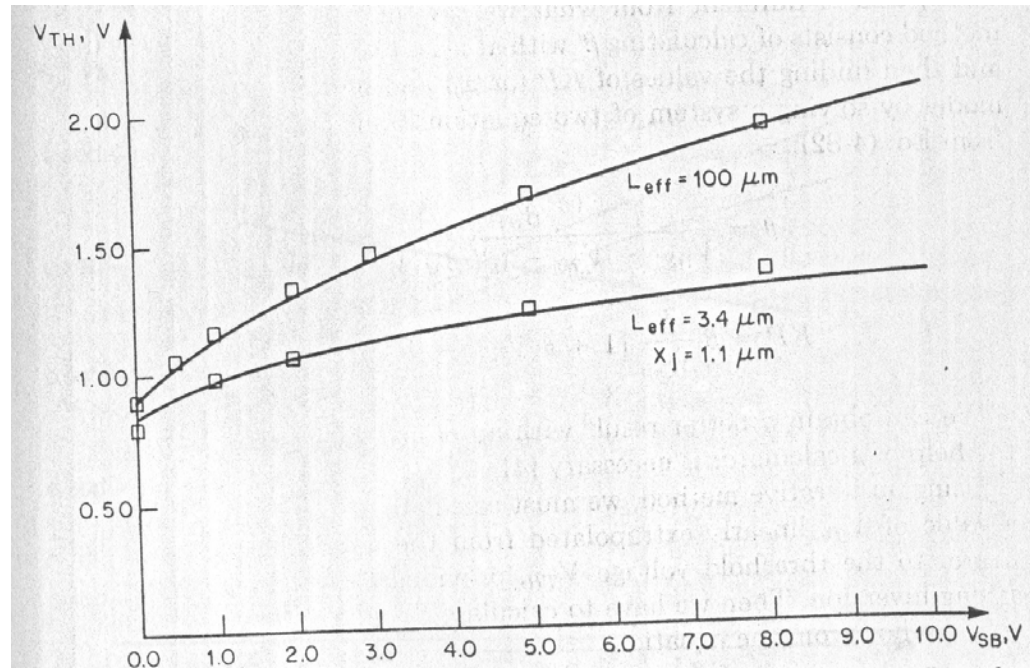
$$\theta = 0,052V^{-1}$$

$$\mu_0 = 750 \text{ cm}^2/(Vs)$$

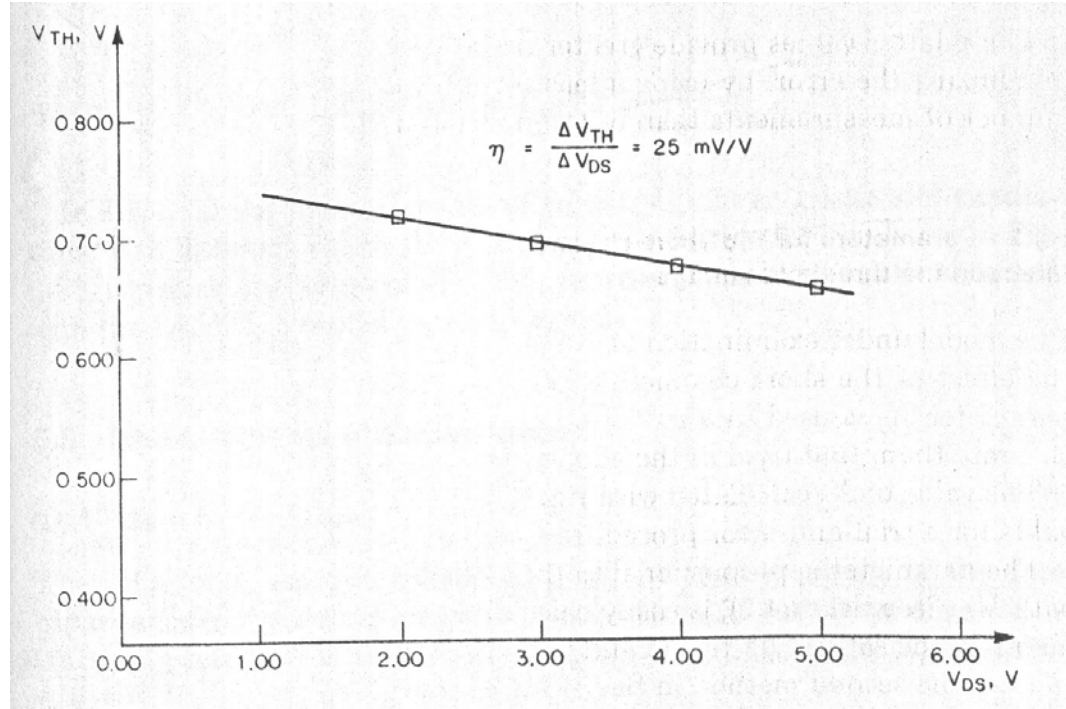
Kısa – Kanal İçin Eşik Gerilimi Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi

- Eşik gerilimindeki değişimin V_{DS} 'deki değişimine oranını ifade eden η parametresi

$$\eta = \frac{\Delta V_{TH}}{\Delta V_{DS}} \frac{C'_{ox} L_{eff}^3}{8,15 \cdot 10^{-22}}$$



Kısa – Kanal İçin Eşik Gerilimi Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi



Şekillerden $X_j=1,1 \mu\text{m}$ ve $\eta=0,98$ olarak belirlenir.

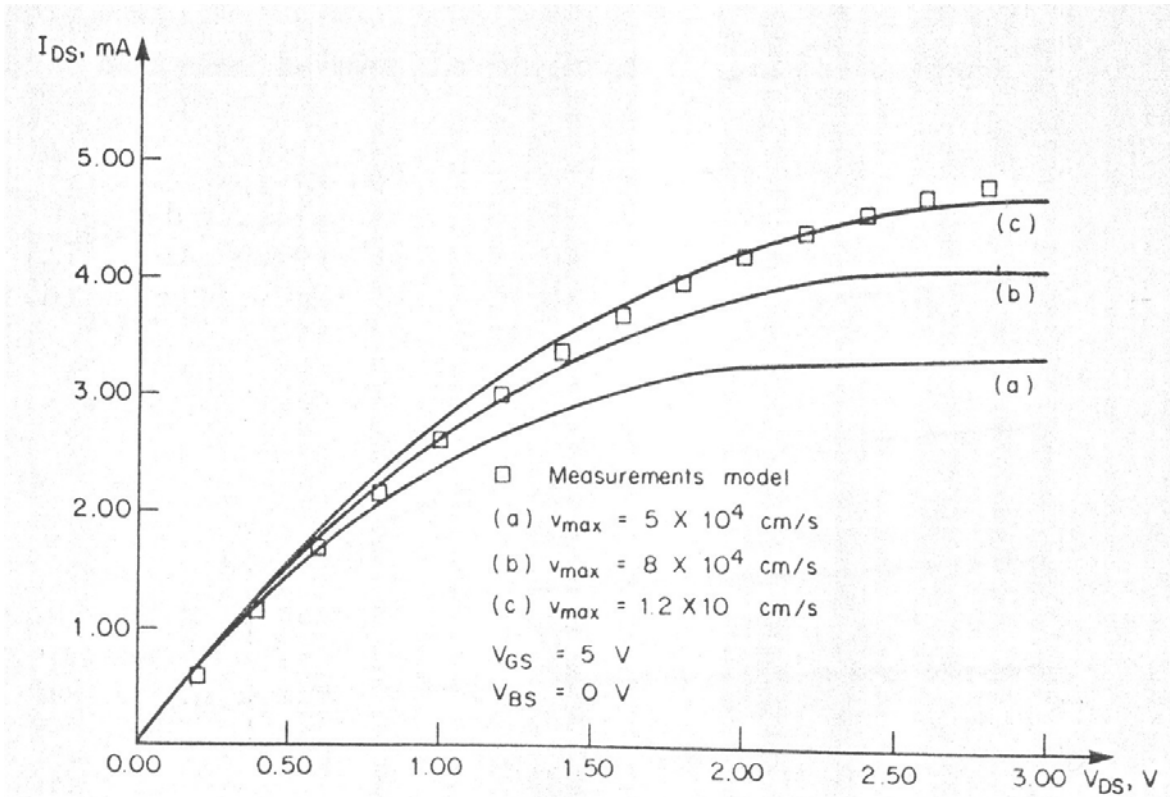
Kısa – Kanal İçin Hareket Yeteneği Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi

- Hesaplanabilen μ_s ve μ_{eff} değerleri ile v_{max} değeri belirlenebilir.

$$\frac{1}{\mu_{eff}} - \frac{1}{\mu_s} = \frac{V_{DS}}{L_{eff} v_{max}}$$

- Bir başka seçenek olarak “deneme yanılma” metodu kullanılabilir. Bu yöntemle şekilden Düzey 2 için bulunan değerden farklı olarak $v_{max} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$ elde edilir. Hesaplama VGS'nin başka değerleri için de tekrarlanabilir.

Kısa – Kanal İçin Hareket Yeteneği Üzerinde Etkili Olan Parametrelerin Belirlenmesi



Doyma Bölgesine ait İletkenlik Parametrelerinin Belirlenmesi

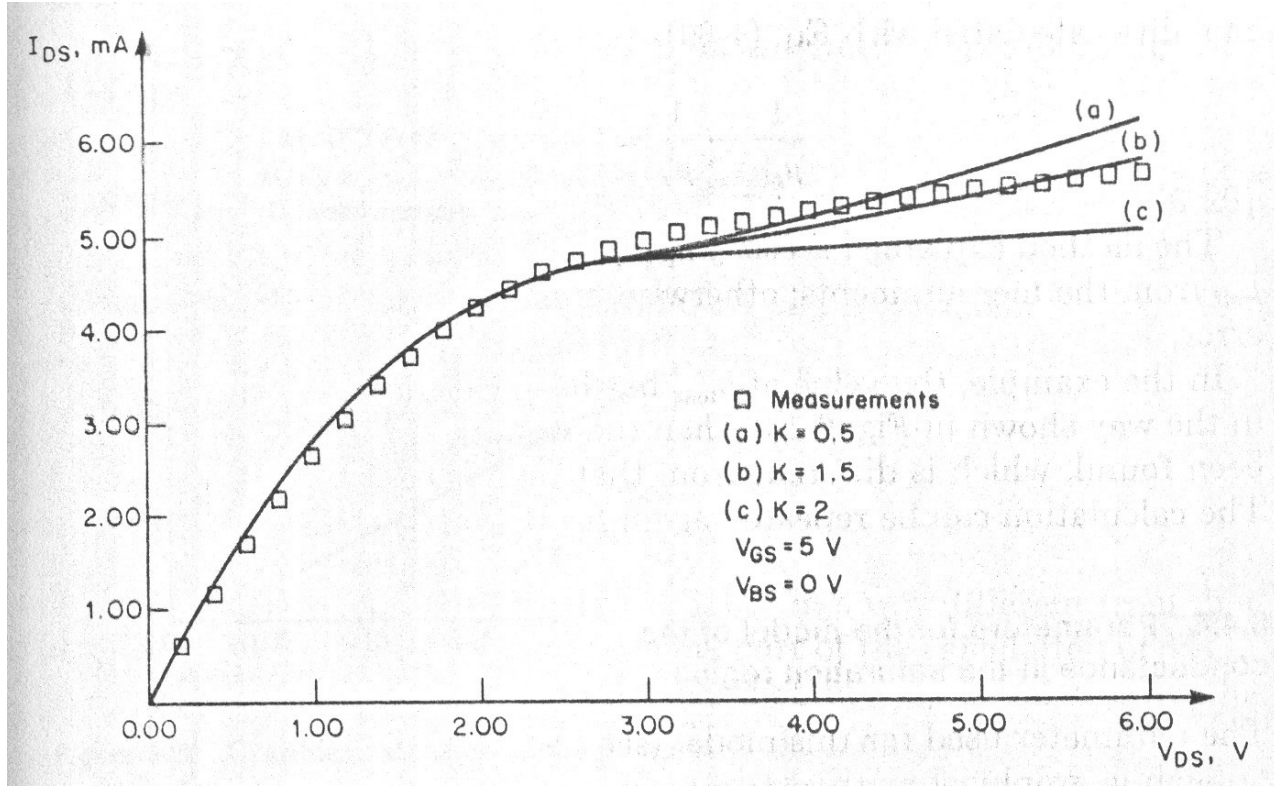
- Bu model için kullanılan K parametresi ile doyma bölgesinde kanal kısalmasının ilişkisi

$$KX_D^2 = \frac{\Delta(L_{eff} - L')^2}{\Delta V_{DS}}$$

olarak verilir.

$$L_{eff} - L' = L_{eff} \left(1 - \frac{I_{DS}}{I_{D,sat}} \right)$$

Doyma Bölgesine ait İletkenlik Parametrelerinin Belirlenmesi



Şekilde farklı K değerleri için çıkış karakteristiğine ait ölçüm ve benzetim sonuçları verilmiştir.

3. Düzey modelle elde edilen en doğru benzetim sonucu $K=1,5$ değerinde gerçekleşmiştir.

KAYNAKLAR

- P. Antognetti, G. Massobrio, Semiconductor device modeling with SPICE, Mc Graw Hill, 2th Edition, 1993.
- H. Kuntman, Elektronik Elemanların Modellenmesi, İTÜ Kütüphanesi, Sayı 1600, 1998.