

ผลของอุณหภูมิต่อการลดถอยของความคล่องตัวของประจุพาหะ

และความต้านทานอนุกรมแฝงของเอ็นมอสเฟต

The Effect of Temperature on the Mobility Degradation and Parasitic Series Resistance of NMOSFETs

อนุชา เรืองพานิช^{1,2} รุ่งทวิ ปิยนันทจักร์ศรี¹

¹ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ณัฐพล สกุนา² สุรศักดิ์ เนียมเจริญ² รังสรรค์ เมืองเหลือ²

² สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลของอุณหภูมิต่อการลดถอยของความคล่องตัวของประจุพาหะและค่าความต้านทานอนุกรมแฝงรวมของมอสเฟตและการหาค่าแบบจำลองพารามิเตอร์โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแตรนและแรงดันเกตของมอสเฟตในย่านเชิงเส้น ที่อัตราส่วนของ W/L ค่าต่าง ๆ ได้แก่ 20/20, 20/3, 20/1.2, 20/1.0, 20/0.8, 20/0.7, 20/0.6 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าการลดถอยของความคล่องตัวของประจุพาหะมีค่าลดลง ขณะที่ความต้านทานอนุกรมแฝงมีค่าสูงขึ้น เป็นไปตามแบบจำลองระดับ BSIM3V3 ด้วยสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิต่อค่าความต้านทาน (PRT) ของ R_{DSW} ประมาณ 35 โอห์มต่อความกว้างช่องทางเดินกระแส 1 หน่วยไมครอน การลดถอยของความคล่องตัวของประจุพาหะมีค่าลดลง ประมาณ $8 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสแตรนในย่านเชิงเส้นจากแบบจำลองของพารามิเตอร์ เทียบกับการวัดมีค่าประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : มอสเฟต, การลดถอยของความคล่องตัวของประจุพาหะ, ความนำถ่ายโอน

Abstract

This article presents the effect of temperature on low field mobility degradation factor and total parasitic series resistance of MOSFET and parameter extraction procedure. The relation of I_{DS} and V_{GS} in a linear region was used with a different structure $W/L = 20/20, 20/3, 20/1.2, 20/1.0, 20/0.8, 20/0.7, 20/0.6$ and $20/0.5$, respectively. The results showed that the low field mobility degradation factor is decreased as the temperature increased, while the parasitic series resistance is increased as the temperature increased according to BSIM3V3 level model. The temperature coefficient (PRT) of R_{DSW} is around 35 ohms approximately per unit channel width. The sensitivity of the low field mobility on temperature is approximately $8 \times 10^{-4} \text{ V}^{-1}/^{\circ}\text{C}$. The error of drain current in linear region from the extracted model compared with measured one is approximately 3 %.

Keywords : MOSFET, Mobility Degradation, Transconductance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

การหาค่าแบบจำลองพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมีความสำคัญอย่างมาก เมื่อขนาดของมอสเฟตมีขนาดลดลง ตัวแปรพารามิเตอร์ที่สำคัญของมอสเฟต สำหรับแบบจำลองวงจร คือการลดลอยของความคล่องตัวประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส และความต้านทานอนุกรมแฝงในด้านซอสและเดรน โดยที่สามารถแทนความต้านทานในด้านซอส/เดรนให้อยู่ในรูปของการลดลอยของความคล่องตัวประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสได้ ในบทความนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการลดลอยของความคล่องตัวประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส และความต้านทานอนุกรมแฝงรวมในด้านซอสและเดรน โดยใช้วิธีการหาค่าแบบจำลองพารามิเตอร์ [1]-[3] ดังกล่าวด้วยการหาค่าความนำถ่ายไอออน (Transconductance) ของมอสเฟต โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนและแรงดันเกตของมอสเฟตที่มีค่าความยาวของช่องทางเดินกระแสค่าต่าง ๆ กัน และอุณหภูมิต่างกัน สุดท้ายเป็นการนำเสนอค่าของแบบจำลองพารามิเตอร์ การลดลอยของความคล่องตัวประจุพาหะที่อุณหภูมิต่างกันพร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการจำลองแบบกับกรวัดค่าจากมอสเฟตที่สร้างขึ้น

2. กระแสและแรงดันของมอสเฟต

สมการกระแสเดรนและแรงดันเกตของมอสเฟตในช่วงเชิงเส้นที่รวมผลของความต้านทานอนุกรมแฝงและการลดลอยของค่าความคล่องตัวของประจุพาหะ มีค่าเป็น

$$I_{DS} = K(V'_{GS} - V_{TH})V'_{DS} \quad (1)$$

$$K = \frac{K_0}{1 + \theta(V_{GS} - V_{TH})} \quad (2)$$

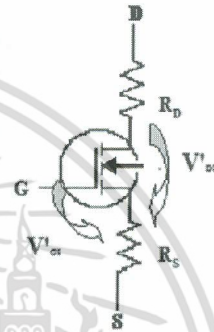
$$K_0 = \mu_0 C_{ox} \frac{W_{eff}}{L_{eff}} \quad (3)$$

$$V'_{GS} = V_{GS} - I_{DS}R_S \quad (4)$$

$$V'_{DS} = V_{DS} - I_{DS}R_{DS} \quad (5)$$

โดยที่ K_0 คือ ค่า Device transconductance parameter, θ คือ ค่า Mobility degradation factor, V_{TH} คือ ค่า Threshold voltage, C_{ox} คือ ความจุไฟฟ้าของเกตออกไซด์ต่อหนึ่ง

หน่วยพื้นที่, μ_0 คือ ค่า Low field mobility, W_{eff} คือ ค่า Effective channel width, L_{eff} คือ ค่า Effective channel length, R_S คือ ค่าความต้านทานอนุกรมแฝงในด้านซอส และ R_D คือ ค่าความต้านทานแฝงในด้านเดรน (สมมุติฐานว่า $R_D = R_S = \frac{R_{DS}}{2}$) วงจรเทียบเท่าของมอสเฟตที่มีค่าความต้านทานของซอสและเดรนแฝงอยู่แสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 วงจรเทียบเท่าของมอสเฟต ซึ่งรวมค่าความต้านทานอนุกรมแฝง

แทนค่าสมการที่ (4) และ (5) ลงในสมการที่ (1) ในช่วงเกิดขึ้นกลับ (inversion) อย่างเต็มที่ในช่องทางเดินกระแสพบว่า $(V_{GS} - V_{TH}) \gg I_{DS}R_S$ ได้สมการใหม่ กลายเป็น

$$I_{DS} = K(V_{GS} - V_{TH})(V_{DS} - I_{DS}R_{DS}) \quad (6)$$

แทนค่าสมการที่ (2) ลงในสมการที่ (6) แล้วจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$I_{DS} = \frac{K_0(V_{GS} - V_{TH})V_{DS}}{1 + \theta_m(V_{GS} - V_{TH})} \quad (7)$$

โดยที่แทนค่า

$$\theta_m = \theta + K_0R_{DS} \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) สามารถหาค่าความต้านทานอนุกรมแฝง R_{DS} ได้จากความชันระหว่าง θ_m และ K_0 [3] ของอุปกรณ์ที่มีขนาดความยาวช่องทางเดินกระแสต่าง ๆ กัน

จุดตัดแกนของ θ_m จะเป็นค่า mobility degradation factor, THETA (θ)

ค่าความต้านทานอนุกรมแฝง R_{DS} ตามแบบจำลอง ในระดับBSIM3 V3 [4] มีค่าเป็น

$$R_{DSW}(T) = RDSW + PRT\left(\frac{T}{T_{nom}} - 1\right) \quad (9)$$

ในสมการที่ (9) ค่า $RDSW$ เป็นค่าความต้านทานต่อหนึ่งหน่วยความกว้างช่องทางเดินกระแสที่ 25 องศาเซลเซียส ส่วน PRT เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของความต้านทาน $RDSW$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า T_{nom} เป็นค่าอ้างอิงของอุณหภูมิ (25 องศาเซลเซียส)

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา

มอสเฟตที่ใช้ในการศึกษานี้ ถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ หรือ TMEC โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างแบบ CMOS ขนาด 0.8 ไมครอน ซึ่งใช้ข้อแยกชนิดคู่ (Twin Well CMOS Process) โดยออกแบบให้เอ็นมอสมีความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) มีค่าคงที่เท่ากับ 20 ไมครอน ส่วนความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) ได้ออกแบบให้มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 20, 3, 1.3, 1.2, 1.0, 0.8, 0.7, 0.6 และ 0.5 ไมครอน ความหนาของเกตออกไซด์ (T_{ox}) เท่ากับ 15 นาโนเมตร ชุดเครื่องมือวัดในการศึกษานี้ประกอบด้วย เครื่อง Agilent B1500A Semiconductor Device Analyzer และ Probe Station Cascade Microtech M150 โดยที่ฐานรองของชุดทดลองดังกล่าวนี้ สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิได้ตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 2 เป็นลักษณะสมบัติของ I_{DS} และ V_{GS} ของเอ็นมอสที่มีขนาดของ $W/L = 20/0.8$ ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$) ซึ่งวัดที่อุณหภูมิ 25, 50, 75, 100 และ 125 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

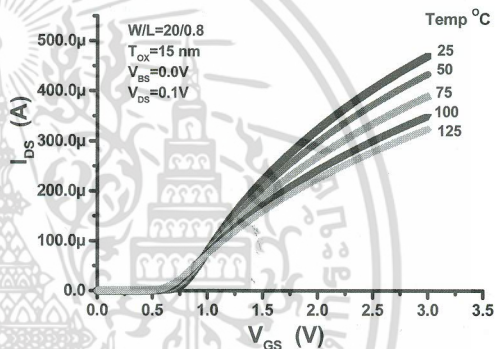
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสทราน กับแรงดันเกตที่สถานะเชิงเส้นของเอ็นมอส ที่ความยาวของช่องทางเดินกระแสค่าต่าง ๆ สามารถนำมาหาค่า $THETA$ (θ) ได้ จากความสัมพันธ์

$$\frac{K_0}{K} = 1 + \theta(V_{GS} - V_{TH}) \quad (10)$$

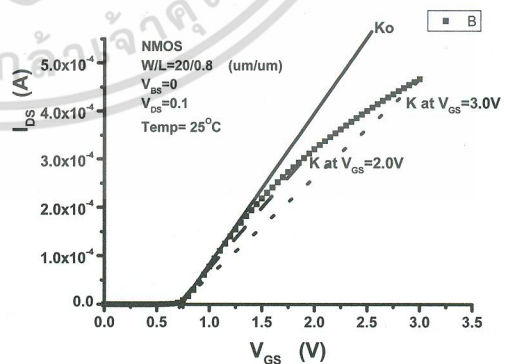
$$K_0 = \frac{\text{slope max } I_{DS} Vs. V_{GS}}{V_{DS}} \quad (11)$$

$$K = \frac{\text{slope } I_{DS} Vs. V_{GS}}{V_{DS}} \text{ ที่ } V_{GS} \text{ ค่าใด ๆ} \quad (12)$$

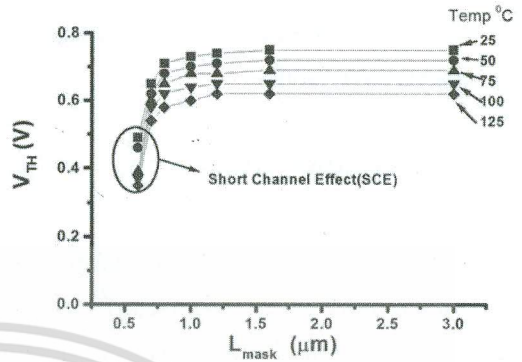
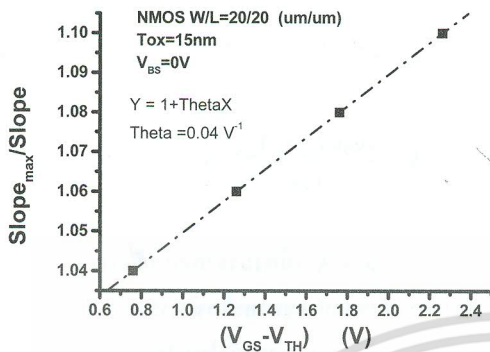
โดยที่ค่า $K < K_0$ เนื่องมาจากผลของการคล้อยของ ความคล่องตัวของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส หาค่า K และ K_0 ดังกล่าว แสดงดังในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} และ V_{GS} ของเอ็นมอสที่มีขนาดของ $W/L = 20/0.8$ ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 3 ตัวอย่างการหาค่า K_0 และ K ของเอ็นมอสที่มีขนาดของ $W/L = 20/0.8$ ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$) จากค่า Slope max และ Slope ที่ V_{GS} เท่ากับ 2 และ 3 โวลต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4 การหาค่า THETA ของเอ็นมอสที่ขนาดของ W/L = 20/20 (µm/µm)

ในรูปที่ 4 เป็นการหาค่า THETA ของเอ็นมอสขนาด W/L=20/20 (µm/µm) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slope max/Slope กับค่า (V_{GS} - V_{TH}) ของเอ็นมอส ที่ค่าความยาวช่องทางเดินกระแส และความกว้างช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 20 ไมครอน เพื่อลดผลของ Short channel และ Narrow width

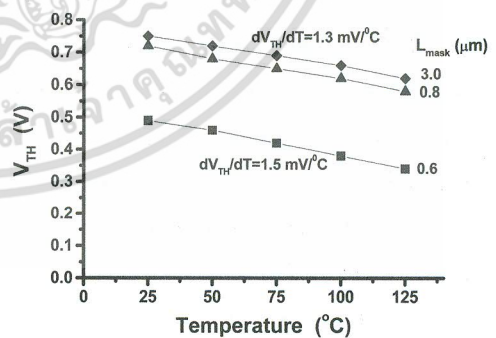
4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 นำมาหาค่าแรงดันขีดเริ่ม ด้วยวิธี linear extrapolation [2] ที่ขนาดของ W/L= 20/0.6, W/L=20/0.7, W/L=20/0.8 และ W/L=20/20 (µm/µm) ที่ อุณหภูมิ 25, 50, 75, 100 และ 125 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

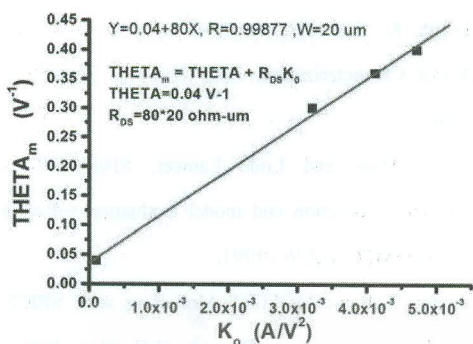
รูปที่ 5 เป็นค่าแรงดันขีดเริ่มของเอ็นมอสที่ขนาดความยาวช่องทางเดินกระแสค่าต่าง ๆ โดยมีอุณหภูมิการวัดเป็นตัวแปร พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าลดลงที่ทุกขนาดความยาวช่องทางเดินกระแสและยังพบว่ามีค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 0.7 ไมครอน

รูปที่ 5 ค่าแรงดันขีดเริ่ม ของเอ็นมอสความยาวช่องทางเดินกระแส 0.6 ถึง 3.0 ไมครอน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ค่าแรงดันขีดเริ่มกับอุณหภูมิของเอ็นมอสที่ความยาวช่องทางเดินกระแสต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่าความไวของแรงดันขีดเริ่มกับอุณหภูมิ มีค่าประมาณ 1.5 mV/°C สำหรับความยาวช่องทางเดินกระแสสั้น และ 1.3 mV/°C สำหรับความยาวช่องทางเดินกระแสที่มีค่ายาว ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการจำลองแบบ ในระดับ BSIM3 V3 [4]



รูปที่ 6 ค่าแรงดันขีดเริ่มกับอุณหภูมิของเอ็นมอสที่ ความยาวช่องทางเดินกระแส L = 3.0, 0.8 และ 0.6 ไมครอน



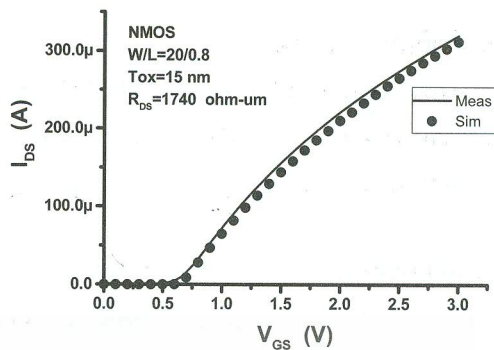
รูปที่ 7 การหาค่า $THETA$ และค่า R_{DS} ของมอสเฟตที่ความกว้างช่องทางเดินกระแส 20 ไมครอน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การหาค่า $THETA$ และ R_{DS} ดังที่ไว้แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการหาค่า $THETA$ และ R_{DS} ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยได้ค่า $THETA = 0.04 V^{-1}$ และ $R_{DS} = 1600 \Omega\text{-}\mu\text{m}$ ในทำนองเดียวกันนี้ สามารถหาค่า $THETA$ ที่ $L = 0.8$ ไมครอน และ R_{DS} ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า $THETA$ ที่ อัตราส่วน $W/L = 20/0.8$ และ ค่า R_{DS} ที่อุณหภูมิ 25, 100 และ 125 องศาเซลเซียส

Parameter	25 °C	100 °C	125 °C	unit
$THETA$	0.40	0.24	0.22	V^{-1}
R_{DS}	1600	1660	1740	$\Omega\text{-}\mu\text{m}$

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าความต้านทานอนุกรมแฝงที่ความกว้างของทิสทางกระแสที่ไหล 20 ไมครอนมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการลดลงของค่าความคล่องตัวประจุพาหะอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นและยังทำให้ค่าความชันสูงสุด (Slope max, K_0) มีค่าลดลงรวมทั้งค่าแรงดันขีดเริ่มด้วยที่ทุก ๆ อุณหภูมิ ผลการชดเชยดังกล่าวทำให้ค่าการลดถอยของประจุพาหะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิต่างๆ ค่าการลดถอยของประจุพาหะในตารางเป็นของ



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของ I_{DS} และ V_{GS} ของเอ็นมอสที่ อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส จากการวัด (เส้นทึบ) และจากการจำลองแบบ (จุด ●) ในกรณีหาค่า $THETA = 0.22 V^{-1}$ และ $R_{DS} = 1740 \Omega\text{-}\mu\text{m}$

อุปกรณ์ที่มีความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 0.8 ไมครอน

5. สรุป

การลดถอยความคล่องตัวของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแสและความต้านทานอนุกรมแฝงในด้านซอสและเดรนเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ไปลดประสิทธิภาพการทำงานของมอสเฟตในทุกช่วงอุณหภูมิการทำงาน โดยทั่วไปเราสามารถแทนค่าความต้านทานอนุกรมแฝงในด้านซอสและเดรนให้อยู่ในรูปของการลดถอยความคล่องตัวของประจุพาหะสุทธิต่ออนุกรมกับการลดถอยความคล่องตัวของประจุพาหะในช่องทางเดินกระแส ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิต่อความต้านทานมีค่าเป็น 35 โอห์มต่อความกว้างช่องทางเดินกระแส 1 ไมครอน จากการเปรียบเทียบค่าของ I_{DS} จากการวัด และจากแบบจำลองพารามิเตอร์ที่หาได้พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของ I_{DS} ที่ $V_{GS} = 3$ โวลต์มีค่าประมาณ 3 % การศึกษาดังกล่าวและวิธีการที่นำเสนอมีประโยชน์อย่างมากให้เข้าใจผลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมอสเฟตที่เกิดขึ้นต่อการทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยการคำนวณหาด้วยมือ ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อนแต่ให้ผลลัพธ์ที่ยอมรับได้ โดยมีผลการคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยจัดเตรียมชิ้นงาน สำหรับใช้ทดสอบในบทความนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fransisco J, Garcia Sanchez, "A Method to Extract Mobility Degradation and Total series Resistance of Fully-Depleted SOI MOSFETS," IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 49, No. 1., pp. 82-88, January, 2002.
- [2] Dieter K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [3] Willy Maes and Lode Lauwer, SIMPARII A Parameter extraction and model evaluation software package,IMEC V.Z.W., 1991.
- [4] Daniel P. Foty, MOSFET Modelling with SPICE Principle and Practice, Prentice Hall, New Jersey, 1997.

