4

การศึกษากระบวนการผลิตตัวเก็บประจุมอส และทรานซิสเตอร์แบบมอส

นาย ธนวิชญ์ ชุลิกาวิทย์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2532

ISBN 974-576-887-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

015833

Studies on the MOS Capacitor and MOSFET Fabrication Processes.

Mr. Dhanavich Chulikavit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1989

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษากระบวนการผลิตตัวเก็บประจุมอส และทรานซิสเตอร์แบบมอส

โดย นาย ธนวิชญ์ ชุลิกาวิทย์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงศักดิ์ เฉลิมติระกูล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. โคทม อารียา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงศักดิ์ เฉลิมติระกูล)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนวิชญ์ ชุลิกาวิทย์ : การศึกษากระบวนการผลิตตัวเก็บประจุมอส และทรานซิสเตอร์แบบมอส (STUDIES ON THE MOS CAPACITOR AND MOSFET FABRICATION PROCESSES) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ เฉลิมติระกูล, 164 หน้า. ISBN 974-576-887-1

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการผลิตตัวเก็บประจุมอสและทรานซิสเตอร์แบบมอส โดยอาศัยเทคโนโลยีที่มีในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อเป็นพื้นฐานในการผลิตวงจรรวมขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่อไป ในการวิจัยได้ผลิตตัวเก็บประจุมอสและทรานซิสเตอร์แบบมอสขึ้นบนแว่นผลึกเดียวกัน แว่นผลึกที่ใช้เป็นแว่นผลึกชนิดพี ขัดมันด้านเดียว มีค่าความต้านทานจำเพาะระหว่าง 18-24 โอห์ม-เซนติเมตร โดยศึกษาถึงเงื่อนไขในการผลิตตัวเก็บประจุมอสเพื่อให้ได้ตัวเก็บประจุมอสที่มีเกตออกไซด์คุณภาพดี ศึกษาเงื่อนไขในการแพร่ซึมเพื่อให้ได้ชั้นแพร่ซึมที่มีคุณภาพตามต้องการ และศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบมอสที่มีโครงสร้างต่าง ๆ กัน โดยใช้เงื่อนไขในการผลิตที่ได้ศึกษามาแล้ว

ผลการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่า การผลิตตัวเก็บประจุมอสให้มีเกตออกไซด์คุณภาพดีนั้น ต้องอาศัยความประณีตในการผลิต และมีการดำเนินการผลิตอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการ นอกจากนี้แล้วการทำให้แว่นผลึกเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการดึงแว่นผลึกออกจากเตาอ็อกซิเดชันหลังจากทำเกตออกไซด์อย่างรวดเร็ว จะทำให้อัตราการพบตัวเก็บประจุมอสที่มีเกตออกไซด์คุณภาพดีเพิ่มขึ้นอย่างมาก การแพร่ซึมเพื่อสร้างเดรนและซอร์สของทรานซิสเตอร์แบบมอสจะทำโดยการแพร่ซึมฝาก (Predeposition) ของสารเจือปนฟอสฟอรัส โดยที่ความลึกของหัวต่อของเดรนและซอร์สจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการแพร่ซึม

ทรานซิสเตอร์แบบมอสที่ผลิตขึ้นมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามลักษณะโครงสร้างโดยมีค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold voltage) เป็น -1.81 V และอัตราการพบทรานซิสเตอร์ที่มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าดี (ซึ่งได้จากการวัดทรานซิสเตอร์แบบมอส 33 ตัว) เป็น 82%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2532 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พระบรมราชูปถัมภ์ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DHANAVICH CHULIKAVIT : STUDIES ON THE MOS CAPACITOR AND MOSFET FABRICATION PROCESSES. THESIS ADVISOR : ASSIS. PROF.KRIENGSAK CHALERMTIRAGOOL,Ph.D. 164 PP. ISBN 974-576-887-1

Studies were conducted on fabrication processes of MOS capacitors and MOS transistors, in order to obtain the know-how which could be used in fabricating MOS IC's. Si wafers (p-type), polished on one side, and with specific resistivity of 18-24 Ω-cm, were used as substrates for making both MOS capacitors and transistors on the same chips. Best conditions were determined on how to i) fabricate MOS capacitors with good gate-oxide quality ii) make good diffusion layers. MOS transistors fabricated with different geometries were characterized electrically.

The research results showed that in order to get good MOS capacitors, great care must be taken in the fabrication process which had to be done on a continuous fashion from start to finish. Another factor which improved yield considerably was the abrupt cooling of samples after gate-oxidation. Drains and sources on MOS transistors were made by phosphorus-diffusion. Junction depth of diffused layers were time-dependent.

Electrical characteristics of MOS transistors varied according to their structures, with threshold voltage in the neighborhood of -1.81 V. The yield of these transistors was found to be about 82% (based on 33 transistors).

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2532 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พระมหากรุณาธิคุณ สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผศ. ดร.เกรียงศักดิ์ เฉลิมติระกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ซึ่งท่านให้คำปรึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตอย่างดียิ่ง รศ. ดร.โคทม อารียา ซึ่งท่านให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการเขียนวิทยานิพนธ์ และกรุณาสละเวลาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, รศ. ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์, ผศ. ดร.ชุมพล อันตรเสน, ดร.ดุสิต เครืองาม และ ดร.กรกฎ วัฒนวิเชียร ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยด้วยดีตลอดมา ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชวัญเรือน - ศุภโชค ไทยน้อย ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างดียิ่ง คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ, คุณศุภโชค ไทยน้อย และคุณชาบ ทรัพย์พันธ์ ที่ให้คำปรึกษาในงานด้านการเตรียมสารเคมี งานด้านธุรการ และเพื่อน ๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา ตลอดจนทบวงมหาวิทยาลัยฯ บัณฑิตวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในการให้ทุนสำหรับดำเนินงานวิจัยแก่ผู้วิจัยอย่างมาก

อนึ่ง ในการจัดทำหน้ากากแพร่ซึมเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ ได้รับความช่วยเหลือจาก Prof. Toyosaka Moriizumi แห่ง Tokyo Institute of Technology ในการผลิตอย่างดียิ่ง ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา - มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. ทฤษฎีเกี่ยวกับตัวเก็บประจุมอส..... 3

2.1 ซิลิกอนไดออกไซด์..... 10

2.2 อิทธิพลของการทำออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) 12

2.3 อิทธิพลของประจุไฟฟ้าภายในซิลิกอนไดออกไซด์ต่อสิ่งประดิษฐ์มอส... 15

2.4 การควบคุมความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าภายในออกไซด์..... 17

2.5 อิทธิพลของ Interface traps ต่อสิ่งประดิษฐ์มอส..... 19

2.6 การควบคุมความหนาแน่นของ Interface trap ในออกไซด์..... 20

2.7 อิทธิพลของความแตกต่างของฟังก์ชันงาน (Work function difference) ระหว่างซิลิกอนกับโลหะและเสตทระหว่างผิว (Interface state) ต่อสิ่งประดิษฐ์มอส..... 21

3. ทฤษฎีเกี่ยวกับทรานซิสเตอร์แบบมอส..... 25

3.1 สภาวะไม่สมดุลของทรานซิสเตอร์แบบมอส..... 28

3.2 ลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอสในย่านเชิงเส้น (Linear) และย่านอิ่มตัว (Saturation)..... 30

3.3 ลักษณะสมบัติขาออก (Output characteristics) ของทรานซิสเตอร์แบบมอส..... 32

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	3.4 ความไม่คงที่ของความคล่องตัวของพาหะ	38
	3.5 ผลของการสิ้นลงของช่องนำไฟฟ้า	46
4.	ทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการผลิต	48
	4.1 การทำออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation)	48
	4.2 การแพร่ซึม (Diffusion)	53
	4.3 การออกแบบหน้ากาก	62
5.	วิธีการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง	69
	5.1 การวัดและวิเคราะห์ผลการวัดของตัวเก็บประจุมอส	70
	5.2 การวัดและวิเคราะห์ผลของชั้นแพร่ซึม	82
	5.3 การวัดและวิเคราะห์ผลของทรานซิสเตอร์แบบมอส	84
6.	กระบวนการผลิตและการทดลอง	87
	6.1 กระบวนการผลิตตัวเก็บประจุมอสและทรานซิสเตอร์แบบมอส	87
	6.2 การปลูกชั้นออกไซด์	90
	6.3 การแพร่ซึมสารเจือปนฟอสฟอรัสโดยใช้ $POCl_3$	90
	6.4 ลักษณะโครงสร้างของตัวเก็บประจุมอส ตัวต้านทานแพร่ซึม และทรานซิสเตอร์แบบมอสที่ใช้ในการศึกษา	91
	6.5 การศึกษาอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิของแว่นผลึกหลังการทำเกตออกไซด์ต่อคุณภาพของเกตออกไซด์	93
	6.6 การศึกษาเงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในการแพร่ซึมฝากสารเจือปนฟอสฟอรัสต่อความลึกของหัวต่อ	93
7.	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	94
	7.1 ผลการทดลองการศึกษาอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิของแว่นผลึกหลังทำเกตออกไซด์ต่อคุณภาพของเกตออกไซด์	94
	7.2 ผลการทดลองการศึกษาเงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในการแพร่ซึมฝากสารเจือปนฟอสฟอรัสต่อความลึกของหัวต่อ	101

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	7.3 ผลการทดลองการศึกษาผลของขนาดของเกตต่อลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบมอส	102
8.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	107
	8.1 สรุปผลการทดลอง	107
	8.2 ข้อเสนอแนะ	108
เอกสารอ้างอิง		109
ภาคผนวก ก.	โปรแกรมการวิเคราะห์ผลของสิ่งประดิษฐ์มอส	113
ภาคผนวก ข.	เงื่อนไขของขั้นตอนการผลิตสิ่งประดิษฐ์มอส	150
ภาคผนวก ค.	การคำนวณลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์มอสทางทฤษฎี	152
ประวัติผู้เขียน		164

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

7.1 ผลการศึกษาเงื่อนไขเวลาในการแพร่ซึมฝากสารเจือปนฟอสฟอรัสต่อความลึกของหัวต่อ..... 101

7.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอสที่มีเกตขนาดต่าง ๆ กัน. 102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของตัวเก็บประจุมอส.....	3
2.2	แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอส เมื่อมีการไบอัสแรงดันในย่านต่าง ๆ ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N.....	5
2.3	แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสในอุดมคติ.....	7
2.4	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวเก็บประจุมอส ในอุดมคติ.....	8
2.5	โครงสร้างผลึกพื้นฐานของซิลิกอนไดออกไซด์.....	11
2.6	ภาพ 2 มิติของโครงสร้างซิลิกอนไดออกไซด์.....	12
2.7	ความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิวของซิลิกอนหลังจากทำออกซิเดชันด้วยความร้อน..	15
2.8	แถบพลังงานของตัวเก็บประจุมอสในอุดมคติเมื่อไม่มีการไบอัส.....	22
2.9	ผลของความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	23
3.1	โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	25
3.2	โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอสและลักษณะสมบัติขาออกในการทำงานแบบเพิ่มพาหะ (Enhancement mode).....	27
3.3	โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอสประกอบ.....	27
3.4	แถบพลังงาน 3 มิติของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n.....	29
3.5	การกระจายของประจุและการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานของชั้น p ในทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n.....	30
3.6	ลักษณะการทำงานของทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	31
3.7	โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	33
3.8	ลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n.....	37
3.9	ชั้นอินเวอร์ชันในทรานซิสเตอร์แบบมอสชนิด n เมื่อป้อนแรงดันบวกให้กับเกต....	39
3.10	ผลของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับผิวสารกึ่งตัวนำต่อความคล่องตัวประสิทธิผลของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้า.....	40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.11	การเปลี่ยนแปลงของความคล่องตัวสูงสุดของพาหะในช่องนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารเจือปนภายในวัสดุฐานรอง เปรียบเทียบกับความคล่องตัวของพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ.....	41
3.12	การเปลี่ยนแปลงของความคล่องตัวของโฮลในชั้นอินเวอร์ชันกับประจุไฟฟ้าภายในชั้นอินเวอร์ชัน.....	43
3.13	การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติขาออกของทรานซิสเตอร์แบบมอส เมื่อความคล่องตัวของพาหะภายในช่องนำไฟฟ้าคงที่ และเมื่อเกิดการอิ่มตัวของความเร็วของพาหะ	45
3.14	ผลของการสั้นลงของช่องนำไฟฟ้า.....	46
4.1	ภาพตัดขวางของซิลิกอนและซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งอธิบายลักษณะการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในการทำออกซิเดชันด้วยความร้อน.....	49
4.2	ความสัมพันธ์ทั่ว ๆ ไป สำหรับออกซิเดชันด้วยความร้อนของซิลิกอน.....	52
4.3	การขึ้นอยู่กับความดันย่อยของ oxidant ของค่า A และ B.....	54
4.4	การขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของค่า B และ B/A.....	54
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ และเวลาที่ใช้ทำออกซิเดชันของ Dry oxidation และ Wet oxidation.....	55
4.6	ปริมาตรส่วนหนึ่งของเนื้อสารกึ่งตัวนำที่สารเจือปนแพร่ซึมผ่าน.....	56
4.7	การกระจายของสารเจือปนหลังจากการทำแพร่ซึมฝาก.....	58
4.8	Solid solubility ของสารเจือปนในซิลิกอน.....	59
4.9	การกระจายของสารเจือปนหลังจากทำการแพร่ซึมลึก.....	61
4.10	Diffusion mask.....	64
4.11	Clean oxide mask.....	65
4.12	Gate oxide mask.....	66
4.13	Contact mask.....	67
4.14	Metalization mask.....	68
5.1	ชุดเครื่องมือวัด.....	70

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.2	Flowchart ของโปรแกรมย่อยการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันและความนำไฟฟ้า-แรงดัน.....	73
5.3	Flowchart โปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของตัวเก็บประจุมอส.....	75
5.4	Flowchart การหาค่าแรงดันแถบราบของตัวเก็บประจุมอส.....	80
5.5	ตัวต้านทานแพร่ซีม.....	82
6.1	โครงสร้างของตัวเก็บประจุมอส.....	91
6.2	โครงสร้างของตัวต้านทานแพร่ซีม.....	92
6.3	โครงสร้างของทรานซิสเตอร์แบบมอส.....	93
7.1	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์จำนวนตัวเก็บประจุมอสที่มีคุณภาพดีกับเวลาที่ใช้ในการดึงแว่นผลึกออกจากเตาออกซิเดชันหลังทำเกตออกไซด์.....	94
7.2	ลักษณะสมบัติและผลการวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวเก็บประจุมอสที่ดี.....	96
7.3	ลักษณะสมบัติและผลการวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวเก็บประจุมอสที่ไม่ดี.....	98
7.4	ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันวัดที่ความถี่ 1.0 MHz.....	100
7.5	ลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบมอส W = 700 μm L = 50 μm.....	103
7.6	ลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบมอส W = 700 μm L = 75 μm.....	103
7.7	ลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์แบบมอส W = 700 μm L = 100 μm.....	104
7.8	ลักษณะสมบัติกระแสเดรน-แรงดันเกตเมื่อมีกระแสรั่วที่ผิว.....	106
8.1	ลักษณะของสิ่งประดิษฐ์มอสที่มี Channel stop.....	108

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย