
กระบวนการเจือสารในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ด้วยเทคนิคการยิงฝังประจุไอออนสารเจือ
Semiconductor Device Doping by Ion Implantation Techniques

มนตรี แสนละมุล การุณ แซ่จอก สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ ชาญเดช หรูนันต์ และ อัมพร โพธิ์ไย
ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

Montree Saenlamool*, Karoon Saejok, Suwat Sopitpan, Charndet Hruanun and Amporn Poyai
Thai Microelectronic Center (TMEC)

National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) Chachoengsao 24000

บทคัดย่อ

กระบวนการเจือสารคือ กระบวนการที่ทำให้สารที่มีความบริสุทธิ์สูญเสียความบริสุทธิ์เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของสารนั้นๆ การเจือสารในวัสดุสารกึ่งตัวนำจัดทำขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของสารนั้นให้ดีขึ้น การเจือสารนิยมใช้สองวิธีคือ วิธีการแพร่สารเจือ (Diffusion) และวิธีการยิงฝังประจุสารเจือ (Implantation) ในบทความนี้นำเสนอการเจือสารโดยเทคนิคการยิงฝังประจุไอออน (Ion Implantation) ประกอบไปด้วย เทคโนโลยีการเจือสารโดยกระบวนการยิงฝังประจุไอออน เครื่องยิงฝังประจุ ขั้นตอนการเจือสาร ผลการเจือสาร การวิเคราะห์ผล ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานการยิงฝังประจุ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำขึ้น ณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ทีเมค) ซึ่งนับได้ว่ามีความพร้อมในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดลายวงจรในระดับต่ำกว่า 1 ไมครอน บนแผ่นผลึกซิลิกอนขนาด 6 นิ้ว (ภาวัน สยามชัย และคณะ, 2547)

คำสำคัญ : การเจือสารในผลึกซิลิกอน, การยิงฝังประจุไอออน, เครื่องยิงฝังประจุ

Abstract

Doping is a process of introducing impurities in order to change physical properties of material. In semiconductor, this process is normally used to change electrical properties. The two methods, commonly used, are diffusion and ion implantation techniques. This paper presents an ion implantation technology, an implantation machine, a doping technique, doping results, analytical results, benefits and applications of implantation process. This process is currently used for submicron IC fabrication technology at Thai Microelectronic Center (TMEC).

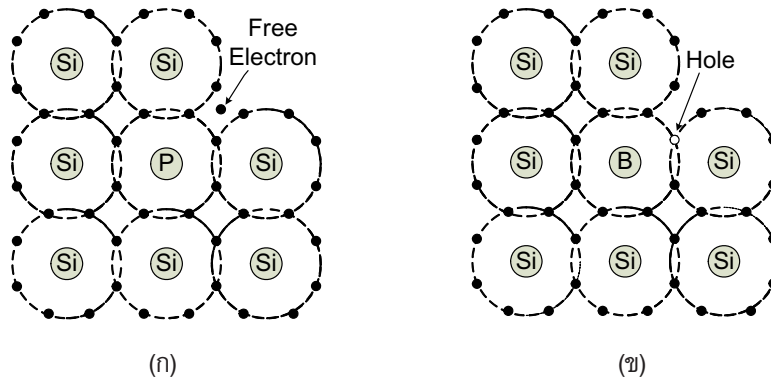
Keyword : Doping process, Ion Implantation, Ion Implanter

*Corresponding author. E-mail: montree.saenlamool@nectec.or.th

บทนำ

การเจือสารในสารกึ่งตัวนำจัดทำขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของสารนั้นให้ดีขึ้น เช่นการเพิ่มอิเล็กตรอน (Electron) โดยการเจือสารฟอสฟอรัส (Phosphorus: P) หรือธาตุหมู่ที่ 5 และการเพิ่มโฮล (Hole) โดยการเจือสารโบรอน

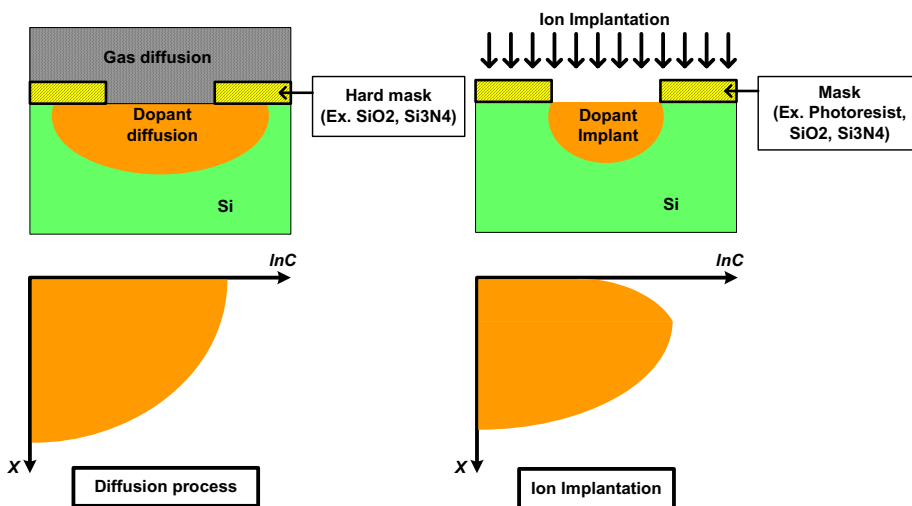
(Boron: B) หรือธาตุหมู่ที่ 3 ในสารกึ่งตัวนำซิลิกอน (Silicon: Si) ซึ่งเป็นธาตุหมู่ที่ 4 ทั้งนี้โฮลและอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ก) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระในการเจือสารฟอสฟอรัสในผลึกซิลิกอน ข) การเกิดโฮลในการเจือสารโบรอนในผลึกซิลิกอน

เทคโนโลยีการเจือสารในปัจจุบันมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีการแพร่ (Diffusion) และ วิธีการยิงฝังประจุ (Implantation) วิธีการแพร่สารเจือ ทำโดยอาศัยการแพร่จากสารที่มีความเข้มข้นมากไปสู่สารที่มีความเข้มข้นน้อยภายใต้อุณหภูมิสูงในบรรยากาศไนโตรเจน หรือก๊าซเฉื่อย วิธีการยิงฝังประจุทำโดยการสร้างประจุไอออนของสารเจือแล้วทำการยิงฝังประจุด้วยพลังงานทางไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิสูง ในปัจจุบันวิธีการยิง

ฝังประจุได้รับความนิยมอย่างมากในกระบวนการสร้างวงจรรวม (Integration Circuit: IC) เพราะวิธีการยิงฝังประจุสามารถควบคุมการแพร่ด้านข้าง (Lateral Diffusion), ควบคุมปริมาณสารเจือ (Dose Control), ควบคุมความลึก (Junction Depth Control), ควบคุมการปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวและการเลือกใช้หน้ากากป้องกัน (Mask) ได้ดีกว่าวิธีการแพร่ ลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือทั้งสองวิธีแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือในกระบวนการแพร่ (Diffusion) และการยิงฝังประจุไอออน (Ion Implantation) โดยในที่นี้ C คือความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ และ X คือความลึกจากผิวหน้าผลึกซิลิกอน

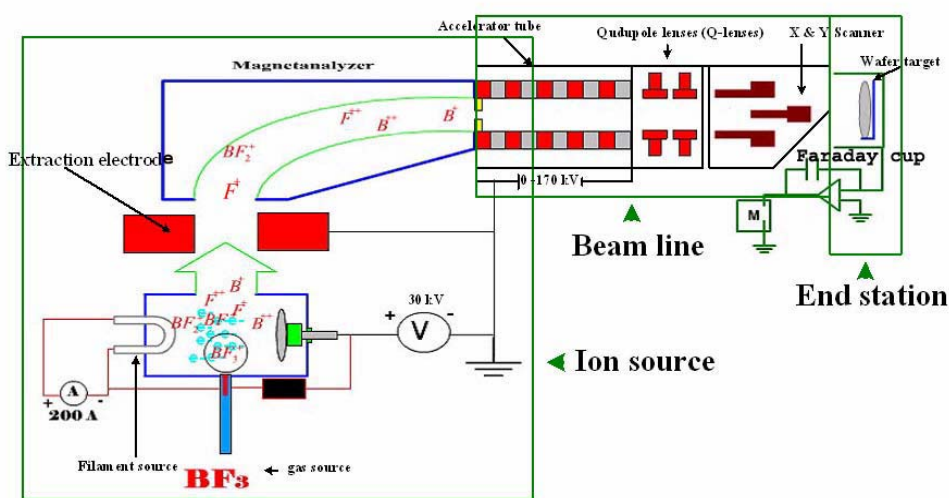
จากภาพที่ 2 พบว่าการกระจายด้วยวิธีการแพร่จะกระจายตัวทุกทิศทุกทาง ซึ่งทำให้การแพร่ด้านข้างมีบริเวณเท่ากับการแพร่ด้านลึก เมื่อการแพร่ด้านข้างมีบริเวณกว้างส่งผลให้การสร้างอุปกรณ์มีขนาดใหญ่ตาม สำหรับการเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุ พบว่าการกระจายตัวของสารเจือด้านข้างเกิดขึ้นเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ของความลึก ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างได้จะมีขนาดเล็กลง เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่เท่ากัน จำนวนของตัวอุปกรณ์โดยวิธียิงฝังประจุจะมีมากกว่าวิธีการแพร่ เมื่อเปรียบเทียบการทำงานในวงจรรวมก็จะมีความเร็วในการทำงานที่เร็วกว่า ส่งผลให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เช่นการสร้าง CPU ของคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนทรานซิสเตอร์เพิ่มมากขึ้นความเร็วในการทำงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่ขนาด CPU เท่าเดิม นั่นหมายความว่าทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กลง ตามกฎของมัวร์ (Moore's Law)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องยิงฝังประจุสามารถแบ่งตามการใช้งานได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. เครื่องยิงฝังประจุกระแสสูง (High Current Ion Implanter) 2. เครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลาง (Medium Current Ion Implanter) หรือรุ่นมาตรฐาน (Standard Ion Implanter) และ 3. เครื่องยิงฝังประจุพลังงานสูง (High Energy Ion Implanter) ซึ่งแต่ละรุ่นจะเหมาะสมกับงานเฉพาะด้าน เช่น เครื่องยิงฝังประจุกระแสสูง เหมาะสำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ต้องการสภาพการนำไฟฟ้าสูง ดังเช่นการสร้างโพลีเกต (Poly-gate) ของทรานซิสเตอร์ซีมอส (Complementary Metal Oxide Semiconductor: CMOS) ที่ต้องการความเข้มข้นของปริมาณ

สารเจือสูงในระดับ 10×10^{20} atoms/cm³ แต่ความลึกในการยิงจะตื้น เป็นต้น เครื่องยิงฝังประจุกระแสขนาดกลางเหมาะสำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ต้องการความเข้มข้นระดับกลางและความลึกระดับต่ำกว่าไมครอน เช่นการสร้าง N⁺s/d (N⁺ Source / Drain) ที่ต้องการความลึกไม่เกิน 0.44 ไมครอน ในการสร้าง CMOS ขนาดเกต 0.8 ไมครอน (A. Ruangphanit, et al., 2004) เป็นต้น และเครื่องยิงฝังประจุพลังงานสูง เหมาะสำหรับการสร้างสารกึ่งตัวนำที่ต้องการความลึกในการเจือสารมาก แต่ความเข้มข้นสารเจือต่ำ เช่นการสร้าง N-well ในการสร้าง CMOS ขนาดเกต 0.8 ไมครอน ซึ่งต้องการความลึกประมาณ 1.8 ไมครอน (การุณ แซ่จอก และคณะ, 2548) เป็นต้น

ในกระบวนการเจือสารด้วยเครื่องยิงฝังประจุ ประจุที่ใช้เป็นประจุบวกเกิดจากการแยกสลายก๊าซให้เป็นพลาสมาในบริเวณ Ion Source จากนั้นประจุบวก จะถูกแยกออกมาด้วยศักย์ไฟฟ้า โดย Extraction Electrode ผ่านเข้าสู่ Analyzer Magnet เพื่อคัดแยกเฉพาะประจุที่มีมวลโมเลกุลที่ต้องการ (Atomic Mass Unit : AMU) เช่น B = 11, P = 31, Ar = 40, As = 75 และ BF₂ = 49 เป็นต้น เข้าสู่ Acceleration Tube เพื่อเพิ่มพลังงานในการเคลื่อนที่ของประจุบวก ผ่านระบบเลนส์ (Quadrupole lens) และ X-Y Scanner ในบริเวณส่วน Beam Line ไปโฟกัสและยิงกวาดลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนบริเวณ Target ในส่วน End Station การเคลื่อนที่ของไอออนในเครื่องยิงฝังประจุเกิดขึ้นในระบบสุญญากาศทั้งหมด องค์ประกอบหลักๆ ของ Medium Current Ion Implanter แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 องค์ประกอบหลักของ Medium Current Ion Implanter

พลังงานในการยิงถูกควบคุมจาก 2 ส่วน คือ Extraction Electrode และ Acceleration Tube เช่น เครื่องยิงฟิสิกส์ กระแสขนาดกลาง พลังงานของประจุสามารถกำหนดได้ด้วย ความต่างศักย์ ไฟฟ้าของ Acceleration Tube ซึ่งสามารถแปรค่า ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 170 กิโลโวลต์ ซึ่งเมื่อรวมกับศักย์ไฟฟ้าของ Extraction Electrode ซึ่งสามารถแปรค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 30 กิโลโวลต์ ในการแยกประจุภายในส่วน Ion Source ดังนั้น ค่าพลังงานของประจุสามารถควบคุมได้ในช่วง 0 ถึง 200 กิโล อิเล็กตรอนโวลต์ (0-200 keV)

กระบวนการยิงฟิสิกส์สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะการเคลื่อนที่ (x) ของอะตอมสารเจือในผลึกของแข็งและ พลังงาน (E) โดยพิจารณาได้จากอัตราการสูญเสียพลังงานต่อ ระยะทาง ที่คำนวณได้จากสมการที่ 1 (Heiner Ryssel and Ingolf Ruge. (1986))

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Z_1^2 q^4 N Z_2}{m_e v^2} \left[\ln \frac{1.123 M_1 m_e v^3}{\omega Z_1 q^2 (M_1 + m_e)} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right] \quad \dots(1)$$

โดยที่ Z_1 = Charge Number, Z_2 = Atomic Number, v = Ion velocity, N = Atomic density, M_1 = Atomic mass, m_e = Electron mass, q = Electron charge, $\ln \omega = \sum f_i \ln \omega_i$; f_i = Strength of the oscillator. ω_i = Frequency of the i th electron, $\beta = \frac{v}{c_0}$; c_0 = Velocity of light.

จากสมการที่ 1 พบว่าไอออนที่ใช้ในการยิงฟิสิกส์ประจุจำมีมวล (M_1) ต่างกัน จะทำให้ระยะการเคลื่อนที่มีค่าต่างกัน ระยะการเคลื่อนที่ของไอออนสารเจือจะอาศัยพลังงานจนจากพลังงาน ในการยิง และลดพลังงานลงเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์เมื่อเข้าสู่ภายใน วัสดุฐานรอง เนื่องจากไอออนเกิดการชนกับอะตอมฐานรอง ทำให้ ระยะการเคลื่อนที่ของไอออนหรืออะตอมสารเจือ (R) ขึ้นอยู่กับ อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทาง ดังสมการที่ 2

$$R = \frac{1}{N} \int_E^0 \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad \dots(2)$$

โดยที่ R คือ ระยะเฉลี่ยที่ไอออนเข้าไปในเนื้อซิลิกอน (m), E คือ พลังงานในการยิงประจุ (eV), $S_n(E)$ คือ Nuclear Stopping เป็นอัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการชนกับอะตอม ต่อระยะทาง (eV/m), $S_e(E)$ คือ Electronic Stopping เป็น อัตราการสูญเสียพลังงานต่อระยะทางในการ interaction กับ อิเล็กตรอนต่อระยะทาง (eV/m), N คือ เลขอะตอม

การเจือสารโดยวิธียิงฟิสิกส์จำเป็นต้องทำการแอนนัล (Anneal) เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนสารเจือกับ อะตอมฐานรองแบบสมบูรณ (Activation) เมื่อพันธะระหว่าง สารเจือและฐานรองเกิดการจับคู่จะใหพาหะนำไฟฟ้า ซึ่งความร้อน ดังกล่าวทำให้สารเจือเกิดการแพร่ (Diffusion) ซึ่งค่าความลึกในการแพร่ (X_j) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 (Stanley Wolf and Richard N. Tauber., 1986)

$$X_j = \left\{ 4Dt \ln \frac{Q_0}{C_{sub} \sqrt{\pi Dt}} \right\}^{1/2} \quad \dots(3)$$

โดยที่ X_j คือ ความลึกในการแพร่ (m), D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่, t คือ เวลา (sec), Q_0 คือ ปริมาณสารเจือ หรือโดส (Dose) (ions/cm²), C_{sub} คือ ความเข้มข้นของปริมาณสารเจือในฐานรอง (atoms/cm³)

ดังนั้นหลังการยิงฟิสิกส์และแอนนัลจะมีค่าความลึก รวมในการเจือสารคือ $X_{j_{total}} = R + X_j$ การเจือสารเพื่อลดหรือ เพิ่มความต้านทานของฐานรองจำเป็นต้องทราบค่าสภาพต้านทาน (Resistivity: ρ) ในการเจือสาร โดยที่ค่าสภาพต้านทานสามารถ คำนวณได้ดังสมการที่ 4 (Varian Ion Implantation Systems., 1990)

$$\rho = \frac{1}{q(u_n n + u_p p)} \text{ (ohm - cm)} \quad \dots(4)$$

โดยที่ q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} C, u_n คือสภาพคล่องของอิเล็กตรอน (cm²/V-sec), u_p คือสภาพคล่องของโฮล (cm²/V-sec), n คือความเข้มข้นของปริมาณอิเล็กตรอน (atoms/cm³), p คือความเข้มข้นของปริมาณโฮล (atoms/cm³)

ค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Rs) สามารถคำนวณได้ดัง สมการที่ 5

$$R_s = \frac{\rho}{t} \text{ (}\Omega/\square\text{)} \quad \dots (5)$$

โดยที่ t คือความหนาของวัตถุ หรือประมาณได้ว่าเป็นค่าความลึกในการเจือสาร (cm)

สำหรับการวัดโดยเทคนิค Four Point Probe โดยทั่วไป ที่มีค่าระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (Probe Spacing: s) มากกว่า ความหนาเป็นจำนวนมากๆ ($s \gg t$) สามารถคำนวณดังสมการที่ 6

$$\bar{\rho} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} (X_j) = 4.532 \frac{V}{I} (X_j) \quad \dots(6)$$

โดยที่ ρ คือ R_s ที่มีค่า t น้อยกว่า s มากๆ (Ω/\square), X_j คือ ความลึกในการเจือสาร (cm), V คือความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt), I คือกระแสไฟฟ้า (Ampere)

ดังนั้นพบว่าความต้านทานเชิงแผ่นที่ต้องการจะเกี่ยวข้องกับ ความลึกในการเจือสาร ดังสมการที่ 5

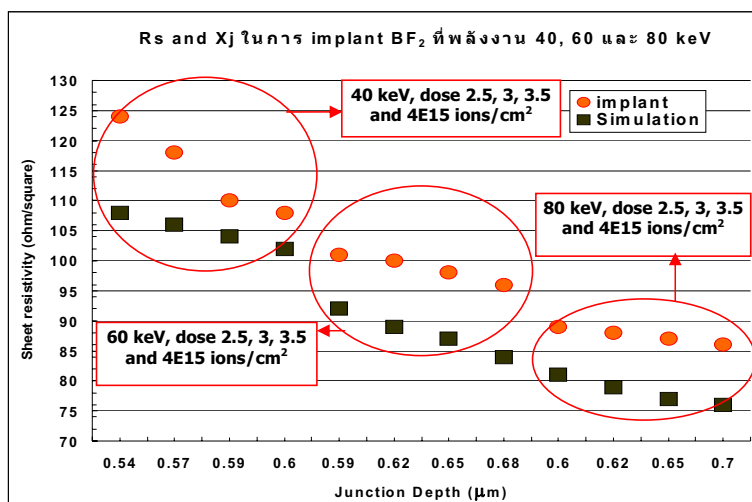
ความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ (Dopant Concentration (C_p): atoms/cm³) สามารถหาได้จากโดสที่ทำการยิงฝังประจุ ดังสมการที่ 7 (Varian Ion Implantation Systems., 1990)

$$C_p = \frac{dose(ions/cm^2)}{\sqrt{2\pi\Delta Rp}} = \frac{0.4}{\Delta Rp} * dose(ions/cm^2) \dots(7)$$

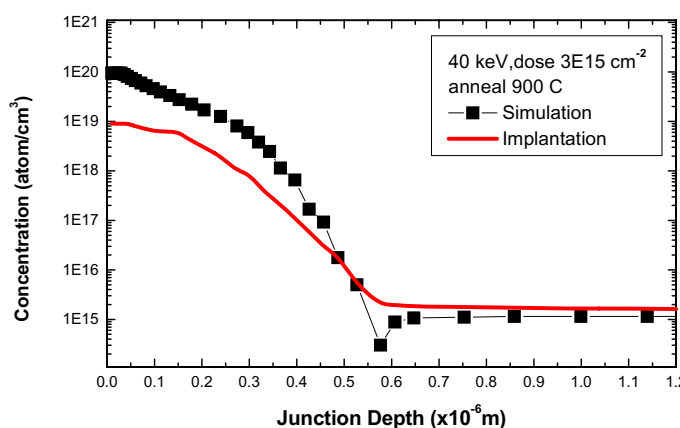
โดยที่ C_p คือความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ (atom/cm³), ΔRp คือ One Standard Deviation; "Straggle."

เมื่อสารเจือเกิดการ Activate ที่สมบูรณ์ จะพบว่า $C_p = n$ หรือ $C_p = p$ ในสมการที่ 4 ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพต้านทานของวัสดุนั้น ดังนั้นการควบคุมความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ สามารถควบคุมได้ด้วยปริมาณสารเจือในการยิงฝังประจุ

ขั้นตอนการเจือสารโดยวิธียิงฝังประจุประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ คือ 1. กระบวนการยิงฝังประจุ 2. กระบวนการแอนนัล และ 3. กระบวนการวิเคราะห์



ภาพที่ 4 ลักษณะความสัมพันธ์ของค่า R_s และ X_j ในกระบวนการยิงฝังประจุ BF_2 และจำลองแบบการสร้างด้วยโปรแกรม TSUPREM-4 (มนตรี แสนละมุล และคณะ, 2548)



ภาพที่ 5 ลักษณะการกระจายตัวของความเข้มข้นสารเจือ (Concentration) กับความลึกในการเจือสาร (Junction depth) ในกระบวนการยิงฝังประจุ BF_2 ปริมาณสารเจือ $3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ที่พลังงาน 40 keV และทำการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 40 นาที โดยเครื่องมือวัด SRP เทียบกับผลการจำลองแบบการสร้าง (Simulation) (มนตรี แสนละมุล และคณะ, 2548)

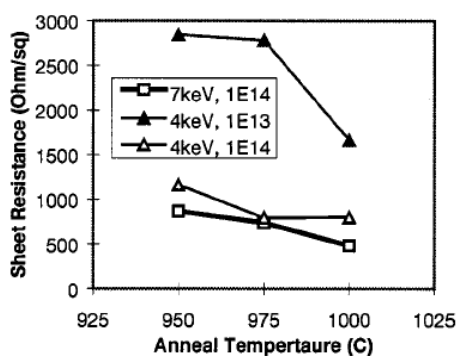
กระบวนการยึฟงประจุ สามารถเลือกชนิดของไอออนสารเจือ เพื่อกำหนดชนิด (Type) ของสารกึ่งตัวนำหลังการเจือสารนั้นๆ การกำหนดปริมาณสารเจือ เพื่อควบคุมความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ การกำหนดพลังงานในยึฟงประจุ เพื่อควบคุมความลึกในการเจือสาร และการกำหนดมุม (Tilt) ในการยึฟงประจุ เพื่อลดปรากฏการณ์ Channeling Effect (R. Simonton and L. Rubin., 2000) และ Channeling Tail ในชั้นโพลีเกต (Polycrystalline Si Gates) (Kunihiro Suzuki and Yuji Kataoka., 2004)

กระบวนการแอนนัล หลังจากทำกระบวนการยึฟงประจุเสร็จแล้ว บริเวณที่ถูกยึฟงประจุ จะมีการเปลี่ยนรูปร่างจากโครงสร้างผลึกไปเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งจะต่อมสารเจือจะอยู่ภายนอกแลททิซ (Lattice) ของอะตอมที่ทำการเจือ

กระบวนการวิเคราะห์ผล หลังจากผ่านกระบวนการยึฟงประจุ และการแอนนัล จะทำการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet Resistance: R_s) ด้วยเครื่องมือวัด Four Point Probe และค่าความหนาแน่นสารเจือ (Dopant Density) ค่าความลึกในการเจือสาร (Junction Depth: X_j) ด้วยเครื่อง Spreading Resistance Profiling (SRP)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลการเจือสารโดยวิธียึฟงประจุไอออนพบว่า เมื่อปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานเชิงแผ่นจะลดลง ดังสมการที่ 5 เนื่องจากค่า p ในสมการที่ 4 ลดลง แต่ความลึกในการเจือสารจะเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 3 เนื่องจากปริมาณสารเจือ (Q_d) มาก เกิดการแพร่มากกว่าปริมาณสารเจือน้อย ส่งผลให้ค่าความลึกในการแพร่หลังการแอนนัลมีค่ามากกว่า



ภาพที่ 6 ค่าความต้านทานเชิงแผ่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในการยึฟงประจุไอออน Decaborane หรือ decaboron tetradecahydride ที่พลังงาน 4 และ 7 keV ปริมาณสารเจือ 1×10^{13} และ 1×10^{14} cm^{-2} และแอนนัล ด้วยเทคนิค RTA (Rapid Thermal Annealing) เป็นเวลา 5 วินาที (Majeed A. Foad, et al., 2000)

เมื่ออุณหภูมิในการแอนนัลมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานลดลง ดังภาพที่ 6 เนื่องจากการกระตุ้นที่สมบูรณ์มากขึ้นและความลึกในการแพร่ที่มากขึ้น

สรุป

การเจือสารในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในวงจรรวมนิยมใช้วิธียึฟงประจุ เพราะสามารถกำหนดความต้านทานที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ โดยสามารถควบคุมชนิดของสารเจือ เช่น สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นใช้การยึฟงประจุฟอสฟอรัสหรืออาซิติกส์ (As) สารกึ่งตัวนำชนิดพีใช้การยึฟงประจุโบรอน และยังสามารถใช้โบรอนไดฟลูออไรด์ (BF_2) ได้ (มนตรี แสนละมูล และคณะ, 2550) เป็นต้น สามารถควบคุมปริมาณความเข้มข้นสารเจือโดยควบคุมปริมาณสารเจือในการยึฟงประจุ สามารถควบคุมความลึกในการเจือโดยการควบคุมพลังงานในการยึฟง

ที่เมคสามารถทำการเจือสาร P, As, B และ BF_2 ในปริมาณสารเจือช่วง 10^{11} - 10^{17} cm^{-2} ที่พลังงานตั้งแต่ 10-200 keV และสามารถทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 200-1200 °C และมีความพร้อมในการผลิตและออกแบบการสร้างวงจรรวมที่มีลวดลายต่ำกว่าไมครอน ได้

ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งาน

ปัจจุบันที่เมคพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำหลากหลายชนิด เช่น ทรานซิสเตอร์มอสเฟตชนิดซีมอส หัววัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-sensor) อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็ก (Magnetic transistor sensor) อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure sensor) และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic) บนฐานรองซิลิกอน การสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบไปด้วยกระบวนการเจือสารหลายๆ ขั้นตอน เช่น การสร้างบ่อเอ็น (N-well) การสร้างซอส-เดรน (Source-Drain) และการสร้างโพลีเกต (Polycrystalline gate) ในการสร้าง CMOS ซึ่งแต่ละขั้นตอนการสร้างมีเงื่อนไขการสร้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ ปริมาณสารเจือ (Dose) พลังงานการยึฟง (Energy) และชนิดของอะตอมสารเจือ (Impurity Atom) ขึ้นอยู่กับกระบวนการนั้นๆ

ค่า R_s และ X_j เป็นตัวกำหนดที่สำคัญในการสร้าง เช่น N-well มี R_s ประมาณ 2400 (Ω/\square) และ X_j ประมาณ 1.8 μm ดังนั้นจึงจำเป็นต้องยึฟงประจุที่พลังงานสูง 140,000 โวลต์ ที่ปริมาณสารเจือต่ำที่ 4.0×10^{12} cm^{-2} ซึ่งต่างจากการสร้างซอส-เดรนที่ต้องการค่า R_s น้อยประมาณ 50 (Ω/\square) และ X_j ประมาณ 0.44 μm ยึฟงประจุที่พลังงานต่ำ 40,000 โวลต์ ที่ปริมาณสารเจือ

สูงที่ $3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (มนตรี แสนละมูล และคณะ, 2548) ซึ่ง จะเห็นว่า N-well มีความลึกมากกว่า P-Source/Drain เป็นจำนวน 1.36 μm เพื่อป้องกัน Punch through ยังรวมไปถึงส่วนอื่นๆ ในการสร้าง CMOS ได้แก่ P-well, N-field หรือ N-channel stop, APT (Anti-Punch Through), $V_{T,A}$ (Threshold Voltage Adjust), Polycrystalline gate หรือ Poly-gate, N-LDD (N-Lightly Doped Drain), P-LDD (P-Lightly Doped Drain) และ N^+s/d เป็นต้น ในส่วนการสร้าง Magnetic Transistor Sensor ใช้ในส่วน การสร้างคอลเล็คเตอร์ (Collector) และ อิมิตเตอร์ (Emitter) รวมไปถึงการสร้าง Poly Straingauge สำหรับ Pressure sensor และอื่นๆ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณพนักงานที่เมค ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ ในการทดลอง และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการ อนุเคราะห์เครื่องมือวัด SRP

เอกสารอ้างอิง

การุณ แซ่จอก, มนตรี แสนละมูล, อนุชา เรืองพานิช, สุวัฒน์ โสภิตพันธ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ อัมพร โพธิ์ไย. (2548). การศึกษาการยิงฝังประจุในการสร้างบ่อเอ็นสำหรับ วงจรรวม $0.8 \mu\text{m}$ CMOS. ใน *เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28*. (หน้า 1073-1077). กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ภาวัน สยามชัย, อธิธิ ฤทธาภรณ์ และ Kzuo Imai. (2547). การพัฒนากระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์ซิลิกอนระดับต่ำกว่า ไมครอน สำหรับการผลิตวงจรรวมต้นแบบในประเทศไทย. ใน *เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27*. (หน้า 217-220). กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

มนตรี แสนละมูล, การุณ แซ่จอก, อนุชา เรืองพานิช, โอภาส ตริทวิศักดิ์, อัมพร โพธิ์ไย และ อธิธิ ฤทธาภรณ์. (2548). การศึกษาคุณสมบัติในการยิงฝังโบรอนโดฟฟลูออไรด์ใน กระบวนการสร้างซอสเดรนสำหรับ $0.8 \mu\text{m}$ CMOS. ใน *เอกสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28*. (หน้า 1081-1083). กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

มนตรี แสนละมูล, การุณ แซ่จอก, ชาญเดช หรือนันต์, วิสุทธิ จิตรุ่งเรือง และ อัมพร โพธิ์ไย. 2550. การศึกษาค่า ความต้านทานเชิงแผ่นและความลึกการเจือสาร ในการ ยิงฝังประจุโบรอนไอออนจากพลาสมา BF_3 . 6 ใน *เอกสาร การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30*. (หน้า 969-972). กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Anucha Ruangphanit, Sarayuth Wisawaswansuk, Pawadee Mesappawong. (2004). The development of CMOS Fabrication Technology by TSUPREM-4&MEDICI. *The International Conference on Smart Materials*. Imperial Mae Ping. Chiangmai:Thailand.

Heiner Ryssel and Ingolf Ruge. (1986). *Ion Implantation*. New York: John Wiley & Sons Inc. p. 5.

Kunihiro Suzuki and Yuji Kataoka. (2004). High-Tilt-Angle Boron Implantation Into Polycrystalline Si Gates... *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES*. VOL. 51, NO. 1. 136-140.

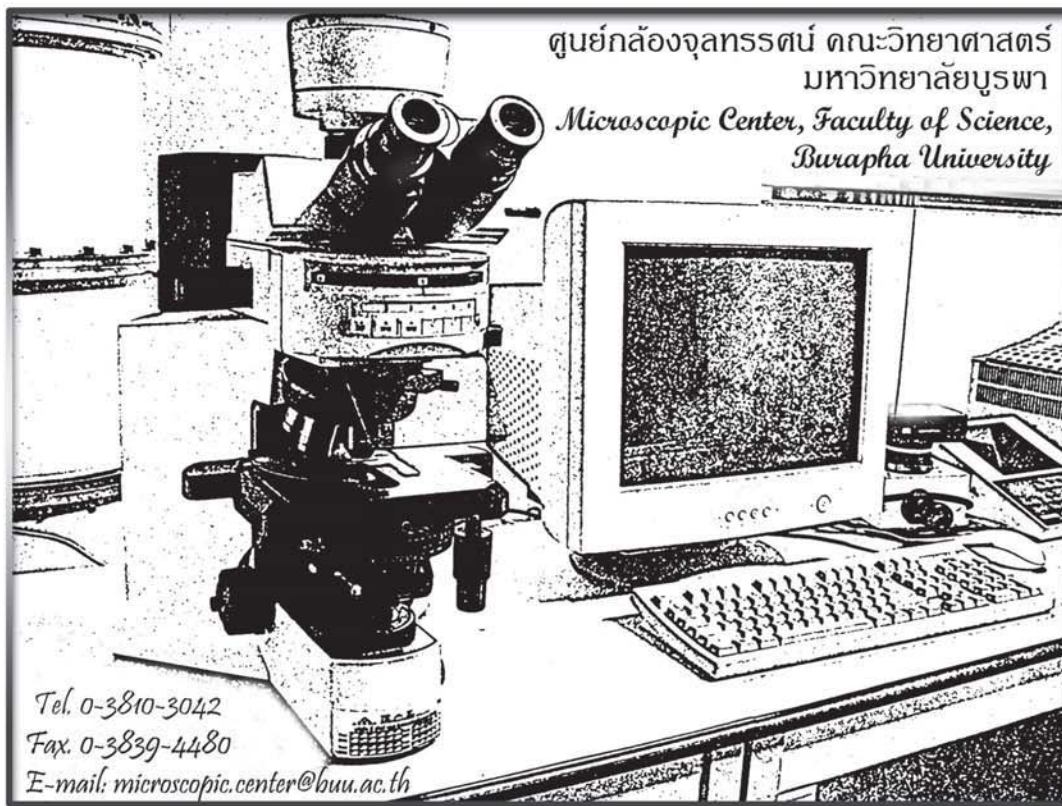
Majeed A. Foad, Roger Webb, Roger Smith, Jiro Matsuo, Amir Al-Bayati, T-Sheng-Wang and Tony Cullis. (2000). Shallow junction formation by decaborane molecular ion implantation. *J. Vac. Sci. Technol. B* 18.1. 445-449.

R. Simonton and L. Rubin.(2000). Channeling Effects in Ion Implantation into Silicon. in *Ion Implantation Technology*. (303-340). J. Ziegler, ed., Ion Implantation Technology Co.

Stanley Wolf and Richard N. Tauber. (1986). *SILICON PROCESSING FOR THE VLSI ERA* Volume 1: process technology. Lattice Press.

T. Hadfersi, N. Boussaa, M. Zilabdi and C. Benazzouz. (2002). Study of phosphorus implanted and annealed silicon by electrical measurement and ion channeling technique. in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. B 193. 336-340.

Varian Ion Implantation Systems. (1990). *Ion Implantation Process Handbook*. ME115024001 Revision 5.



วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

ขอเชิญส่งผลงานทางวิชาการ ประเภทบทความทางวิชาการ / วิจัย

เพื่อพิจารณาลงตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

ติดต่อสอบถามโดยตรงที่

กองบรรณาธิการ วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา

อาคารสิรินธร คณะวิทยาศาสตร์

อ.ดร.อาตุลย์ มีพูล หรือ คุณรังสิมา สุตรอนันต์

โทรศัพท์ 0-3810-3042 โทรสาร 0-3839-4480