

บทที่ 3

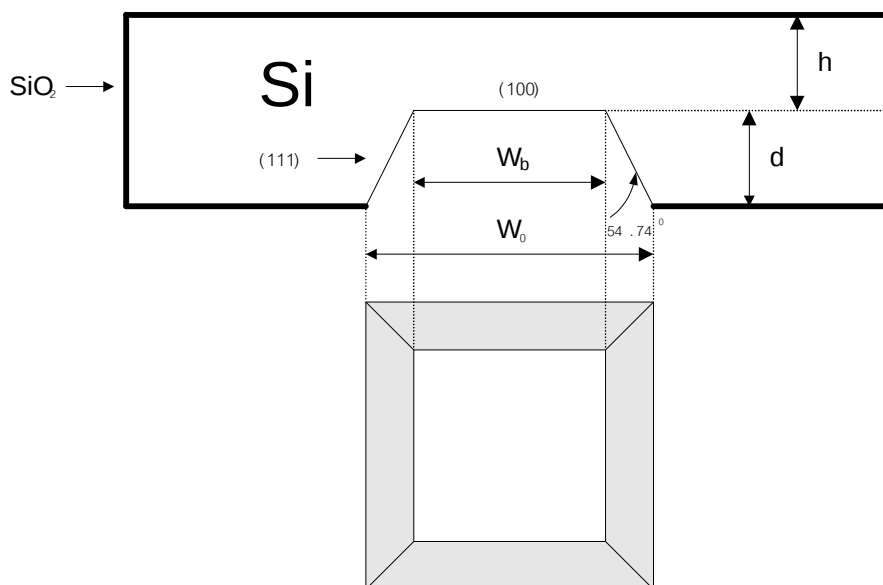
การออกแบบและกระบวนการสร้าง

การออกแบบและสร้างต้นแบบไมโครฮีตเตอร์(microheater) โดยเริ่มต้นจากการกำหนดคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์ แล้วจึงนำคุณสมบัติของไมโครฮีตเตอร์มาออกแบบให้มีขนาดความกว้างและยาวเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการแล้ว

เมื่อได้ลวดลายต้นแบบแล้วจึงนำไปผลิตเป็นกระจกมาสก์ (photographic masks) โดยการถ่ายย่บางส่วนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างบนผลึกซิลิคอน ซึ่งกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นจากการเลือกชนิดความหนา และพิกัดความต้านทานของผลึกฐานรองซิลิคอน หลังจากนั้นจะนำแผ่นผลึกเข้าไปในกระบวนการสร้างที่เป็นลำดับขั้นตอนที่แน่นอนเช่น การทำความสะอาดแผ่นผลึกเริ่มแรก กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการกัดฐานรองเพื่อสร้างไดอะแฟรม กระบวนการเมทัลไลเซชัน เป็นต้น ซึ่งเมื่อจบขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้ แล้วจึงนำมาทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไมโครฮีตเตอร์และการประยุกต์เป็นตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซ

3.1 การออกแบบไดอะแฟรม

ไดอะแฟรมนี้เป็นส่วนหนึ่งของซิลิคอนซึ่งเกิดจากการกัดฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) ในสารละลายซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกให้เป็นไดอะแฟรมบางภาพสี่เหลี่ยมโดย มีผนังของหลุมทั้งสี่ด้านเป็นผนังของระนาบ (111) โดยต้นแบบของไดอะแฟรมได้จากการทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่องออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) หลุมที่เกิดจากการกัดจะมีความสมมาตรของผนังทั้งสี่ด้าน โดยจะต้องปรับแนวให้ด้านของสี่เหลี่ยมขนานแสดงดังภาพที่ 3.1 โดยฐานรองซิลิคอนระนาบ (100) จะถูกกัดเป็นโครงสร้างซิลิคอนไดอะแฟรมเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ โดยสารละลายที่ใช้กัดคือ สารละลาย Ethylenediamine ผสม Pyrocatechol ในน้ำ DI เรียกว่า EPD โดยมีอัตราส่วน E:P:D 750 cc :120 g:100 cc จะมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก[5,9,10]



ภาพที่ 3.1 รายละเอียดการกัดซิลิคอนโดยสารละลาย

ขนาดของต้นแบบที่จะนำไปกัดเป็นไดอะแฟรมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$W_b = W_0 - 2d \cot 54.74^\circ$$

$$W_b \approx W_0 - \sqrt{2}d \quad (3.1)$$

โดยที่ W_0 คือ ขนาดของต้นแบบ

W_b คือ ขนาดของไดอะแฟรมหลังการกัด

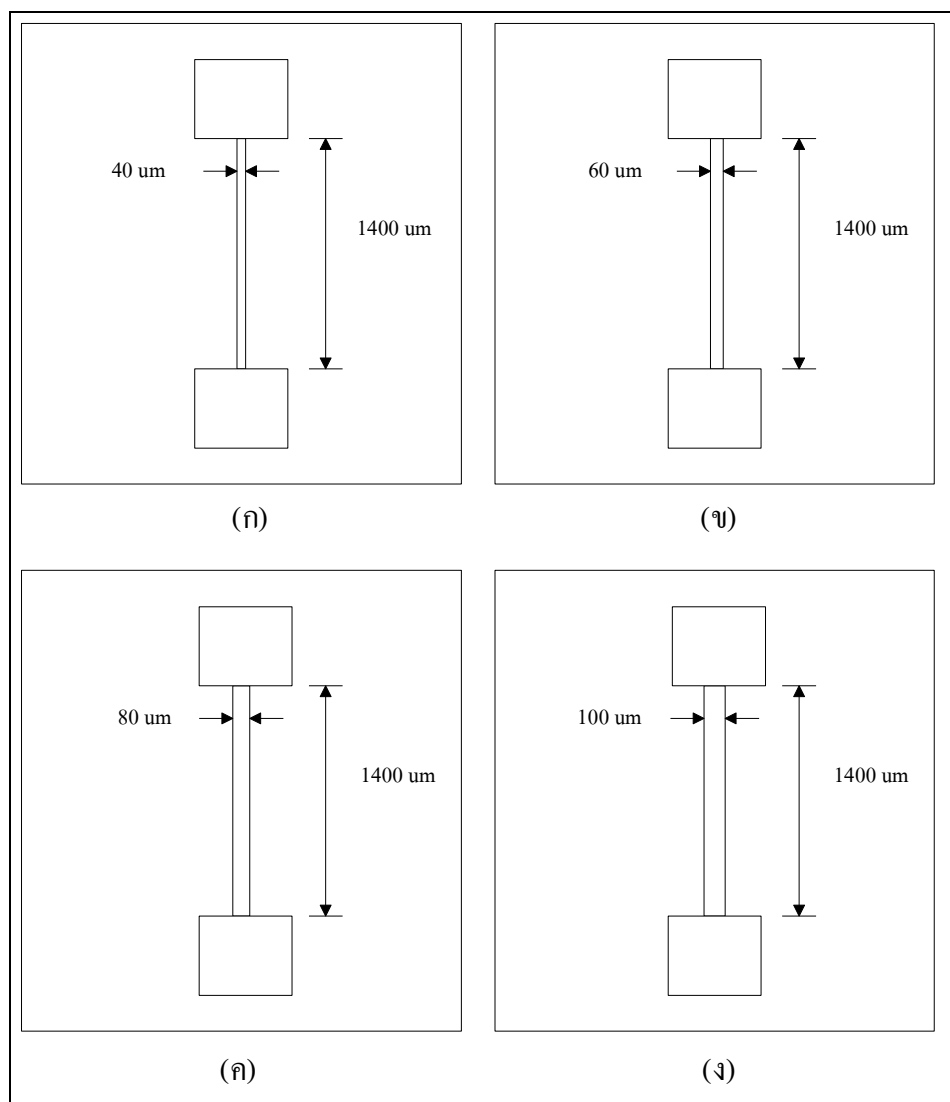
d คือ ความลึกของไดอะแฟรม

h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

การทดลองในงานวิจัยฉบับนี้ ได้กำหนดค่าความหนาของไดอะแฟรมให้มีความหนาน้อยกว่า 50 ไมครอน โดยต้องการให้ขนาดของช่องไดอะแฟรมหลังการกัดมีขนาด $1400 \times 1800 \mu\text{m}^2$ เมื่อใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนหนา 450 ไมครอน ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบขนาดไดอะแฟรมต้นแบบ (W_0) จากสมการ 4.1 ซึ่งได้เป็น 1966 และ 2366 ไมครอน ตามลำดับ

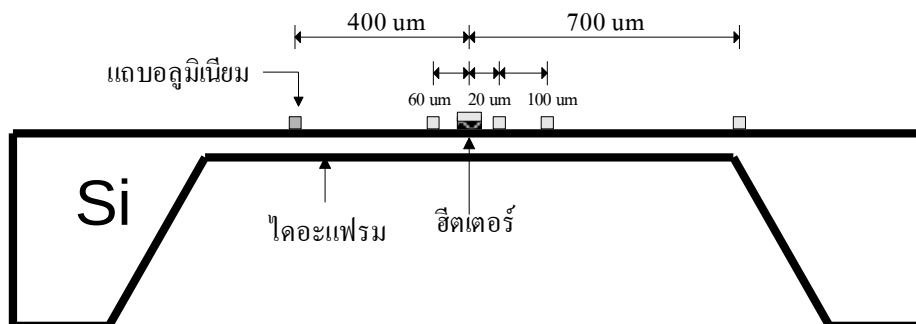
3.2 การออกแบบไมโครฮีตเตอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างไมโครฮีตเตอร์ ให้มีขนาดความกว้างต่างกันคือ 40, 60, 80 และ 100 ไมครอน แสดงดังภาพที่ 3.2 และโดยมีขนาดความยาวเท่ากันคือ 1400 ไมครอน



ภาพที่ 3.2 การออกแบบไมโครชิตเตอร์

และยังมีแถบความต้านทานที่สร้างจากฟิล์มของโลหะมีขนาดความกว้าง 20 ไมครอน และยาว 1200 ไมครอน อยู่ห่างจากไมโครชิตเตอร์ 20 60 100 400 และ 700 ไมครอน ตามลำดับ โดยโครงสร้างทั้งหมดจะอยู่บนไดอะแฟรมของซิลิคอนมีขนาด 1400x1800 ไมครอนxไมครอน มีขนาดความหนาไดอะแฟรมคือ 25 ไมครอน แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 โครงสร้างของไมโครฮีตเตอร์

3.3 กระบวนการสร้างไมโครฮีตเตอร์ด้วยฟิล์มอลูมิเนียม

ในกระบวนการสร้างฮีตเตอร์เป็นตัวกำเนิดความร้อนอยู่บนโครงสร้างไดอะแฟรมนั้น แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบและ ขั้นตอนการสร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอน

3.3.1 การผลิตกระจกมาสก์ต้นแบบ

เมื่อได้ต้นแบบของไมโครฮีตเตอร์จึงนำต้นแบบนั้นมาเขียนลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยการออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวดลายทุกชั้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบด้วยแผ่นพลาสติกลามิเนต ซึ่งประกอบด้วยไมลาร์ซีทเคลือบพลาสติกสีแดง การตัดต้นแบบบนแผ่นพลาสติกลามิเนตนั้นจะใช้ไมโครคัตเตอร์ ซึ่งมีความละเอียด 0.1 มิลลิเมตร ซึ่งปัจจุบันไม่ได้ใช้แล้ว

ซึ่งปัจจุบันการออกแบบลวดลายด้วยคอมพิวเตอร์ มีความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายด้วย โดยการสร้างมาสก์ต้นแบบลงแผ่นพลาสติก แล้วนำแผ่นต้นแบบไปติดกับกระจกขนาด 3x3 นิ้ว

3.3.2 มาสก์ต้นแบบไมโครฮีตเตอร์

ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาสก์ต้นแบบทั้งหมด 4 มาสก์ ด้วยกันซึ่งใช้สำหรับกระบวนการสร้างต่าง ๆ ดังนี้

มาสก์ที่ 1 ใช้สำหรับกระบวนการสร้างไดอะแฟรม เพื่อเปิดช่องออกไซด์ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนระนาบ 100 เพื่อกำหนดบริเวณที่ต้องการกัดด้วยสารละลาย EPD เพื่อให้ได้เป็นโครงสร้างไดอะแฟรม

มาสก์ที่ 2 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะไทเทเนียม

มาสก์ที่ 3 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียม

มาสก์ที่ 4 ใช้สำหรับสร้างลวดลายของโลหะอลูมิเนียมสำหรับวัดการกระจายความร้อน

ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ในการสร้างไมโครฮาร์ดแวร์ ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนนั้นก็จะทำการสร้างเป็นสองขั้นตอน คือ การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้างไมโครฮาร์ดแวร์

การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

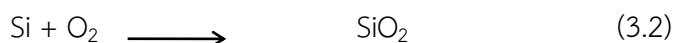
สำหรับการสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่นิยมกันมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีขั้นตอนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. การออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
3. การสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ $1000-1200^\circ\text{C}$ โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไป

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือ ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนกึ่งที่เรียกว่าเกตออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิคอนในส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากัก

ป้องกันการแพร่ระลอกสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ 4000-5000 Å ขึ้นไปและชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้ากักป้องกันการสารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนให้เป็นไดอะแฟรมต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 Å ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากักจะทำการสร้าง โดยใช้วิธีการสร้างโดยวิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็วแต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นจะต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

กระบวนการโฟโตลิโกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้ลำแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนสำหรับการแพร่ระลอกสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโกราฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิคหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซิลิคอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

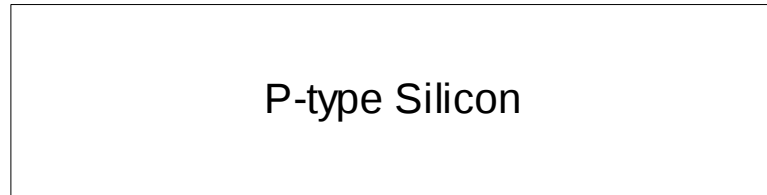
สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 μm แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 12 นาที เพื่อให้ รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิค

ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างไมโครฮิตเตอร์ด้วยโลหะอลูมิเนียม

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดที่ระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิถีความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 450 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

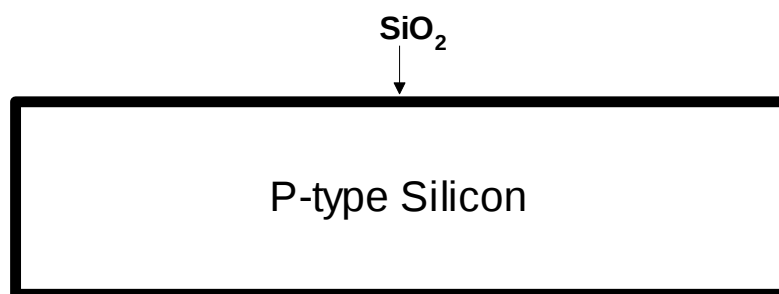
2. ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทำความสะอาดผิวน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้า ด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 7000 Å จึงทำการออกซิเดชันโดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ก I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีของน้ำยาไวแสง(Photo resist) มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์กที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ Å}$ เป็นเวลา 10 วินาที ที่ด้านหลัง

- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำ
จุ่มในน้ำยา developer 2 แก้ว ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันที
ด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
 - ทาด้านหน้าแผ่นผลึกด้วย น้ำยาไวแสง
 - อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ใน
ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

6. การลอกชั้นสารไวแสง

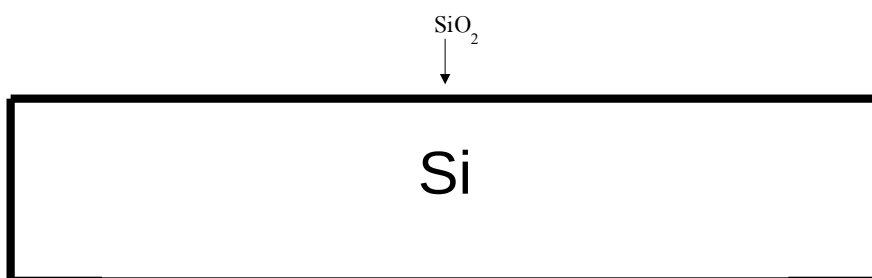
สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ละลายฟิล์มน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้วยอะซิโตน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอททีลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

8. กระบวนการกัดเป็นไดอะแฟรมบาง

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะที่จะใช้อุณหภูมิ 95-100 °C กัดให้ได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการ

9. การลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ใน การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

10. ทำความสะอาดผิวผลึก

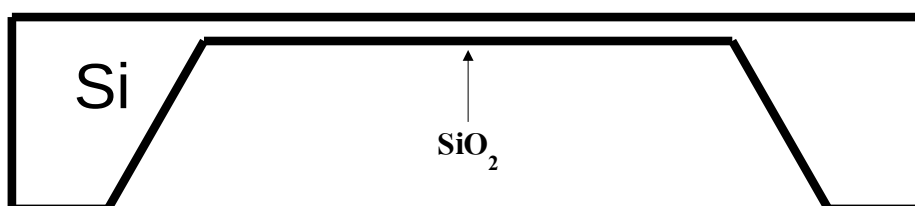
- ต้มในไตรโครโลเอทที่ล้นเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสักัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

12. การเคลือบชั้นไทเทเนียม (Ti) ในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ $0.5\ \mu\text{m}$

13. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ $85-90\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ $85-90\ ^\circ\text{C}$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ $85-90\ ^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 20 นาที

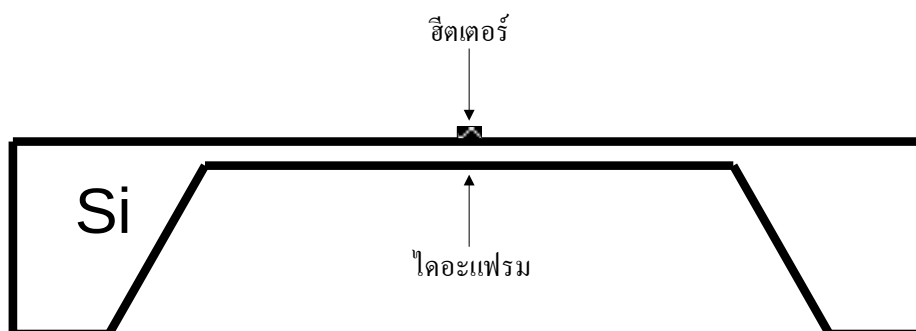
14. การกัดชั้นไทเทเนียม [11,12]

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

15. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แสดงการสร้างแถบไททาเนียม

16. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

โดยใช้อุปกรณ์ Vacuum evaporation ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm

17. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี III

ใช้กระจกมาสก์ที่ III เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ III ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

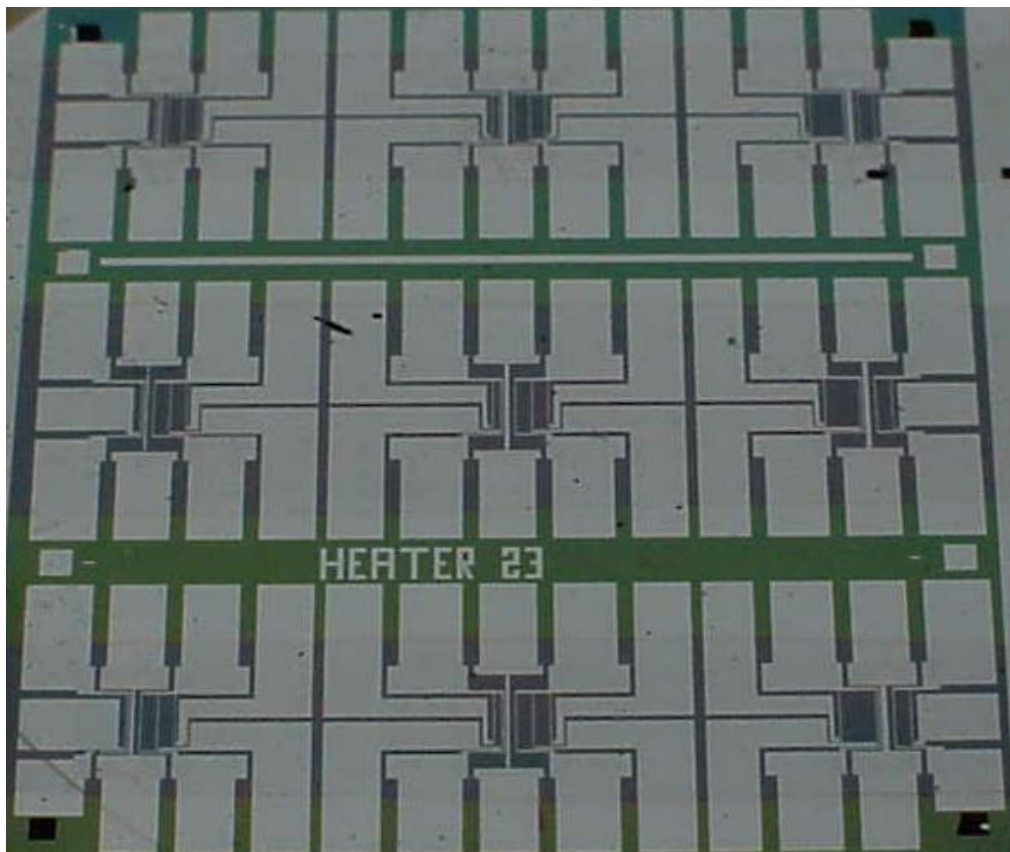
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที

18. การกัดชั้นอลูมิเนียม กระจกมาสก์ที่ IV

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอลูมิเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 °C เป็นเวลา 1-2 นาที

19. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนข้อสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังภาพที่ 3.9



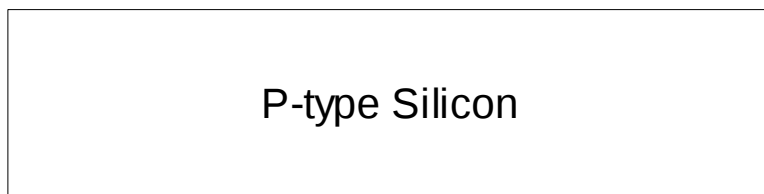
ภาพที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีเตอร์ขั้นสุดท้าย

3.4 กระบวนการสร้างฮีเตอร์ด้วยฟิล์มโลหะทองคำ

ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ชิ้นนี้ มีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น (Starting Wafer)

ใช้แผ่นผลึกเดี่ยวของซิลิคอนที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพีระนาบของผลึกคือ (100) มีค่าพิงัดความต้านทาน 8-12 โอห์ม-เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกเป็น 450 ไมโครเมตร โดยภาพตัดขวางแสดงดังในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มแรก

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning)

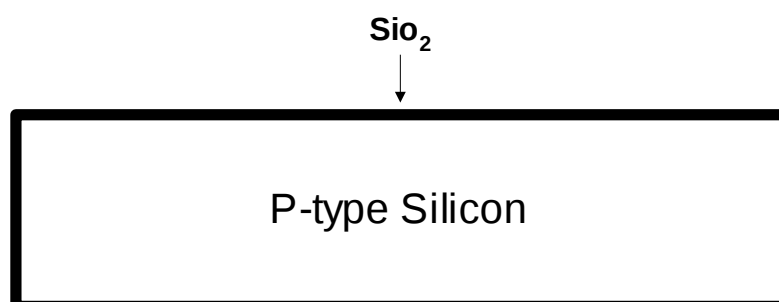
- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic cleaning)

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก (First oxidation)

เพื่อการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 7000 Å จึงทำการออกซิเดชัน โดยการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทั้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตรต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อนาที แผ่นผลึกดังแสดง ภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชันเริ่มแรก

4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี I

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังสำหรับการกัดช่องของไดอะแฟรมบาง ในขั้นตอนนี้ใช้กระจก มาส์กที่ I โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Spinner แล้วทำการอบให้แห้ง แล้วนำไปทำการพิมพ์ภาพ ด้วยกระจกมาส์ก I สำหรับรายละเอียดของ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีของน้ำยาไวแสงชนิดลบ มีลำดับขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ที่ด้านหลัง
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกมาส์กที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอัลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสงคือหลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ เป็นเวลา 10 วินาที ที่ด้านหลัง
- การล้างภาพ จะทำการจุ่มในน้ำยาล้างภาพ 2 ครั้ง ๆ ละ 1.5 นาที จุ่มน้ำยาทำความสะอาด developer 2 แก้ว ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นผลึกด้วย น้ำยาไวแสง
- อบครั้งที่สามให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที

5. การใช้สารละลายเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ที่มีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

6. การลอกชั้นสารไวแสง

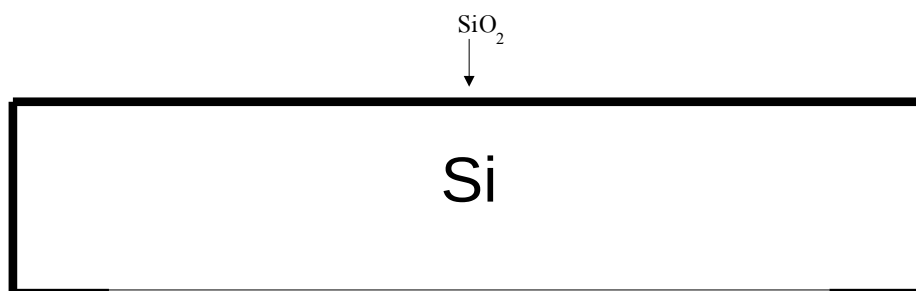
สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้โดย

- ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. การทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอททีลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- เมื่อถึงขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 7

8. กระบวนการกัดเป็นไดอะแฟรมบาง

ใช้น้ำยาส่วนผสมของ Ethylene diamine : Pyrocatechol : DI Water (EPD) ในอัตราส่วน 50:8:16 ในขณะกัดจะใช้อุณหภูมิ 95-100 °C กัดให้ได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการ

9. การลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุม

เพื่อทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก เพราะว่าออกไซด์มีคุณภาพลดลง ซึ่งทำเหมือนข้อ 5

10. ทำความสะอาดผิวผลึก

- ต้มในไตรโครโลเอทิลีนเป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

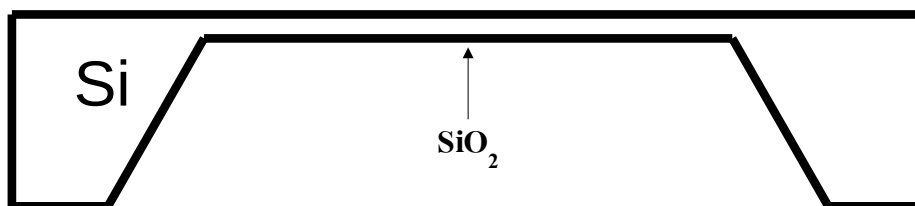
11. ทำการสร้างออกไซด์ครั้งที่สอง

เมื่อได้ไดอะแฟรมตามขนาดที่ต้องการแล้ว ทำการสกัดออกไซด์เก่าทิ้งเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการสร้างออกไซด์ใหม่ให้ได้ความหนาประมาณ 5000 Å ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส โดยมีขั้นตอนการออกซิเดชันดังนี้

- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตรต่อวินาที

- ออกซิเดชันแบบขึ้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.0 ลิตร ต่อนาที
- ออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร ต่อนาที

เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกดังแสดงภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 แสดงภาพตัดขวางของแผ่นผลึกที่ผ่านขั้นตอนที่ 11

13. การเคลือบชั้นไทเทเนียม (Ti) ในสุญญากาศและชั้นทองคำ(Au)

โดยใช้อุปกรณ์สุญญากาศ (Vacuum evaporation) ทำการเคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นไทเทเนียม หนา ประมาณ หนา 300 Å Ti/Au มีความหนารวมประมาณ 0.276 μm

14. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี II

ใช้กระจกมาสก์ที่ II เป็นต้นแบบสำหรับการกัดส่วนของไทเทเนียม ที่ไม่ต้องการออก ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ Spinner ขนาด 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านมาสก์ที่ II ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างภาพโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์

แล้วเป่าแห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สองให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที

15. การกัดชั้นไทเทเนียม และชั้นทองคำ

สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียมได้แก่ สารละลายซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลาย

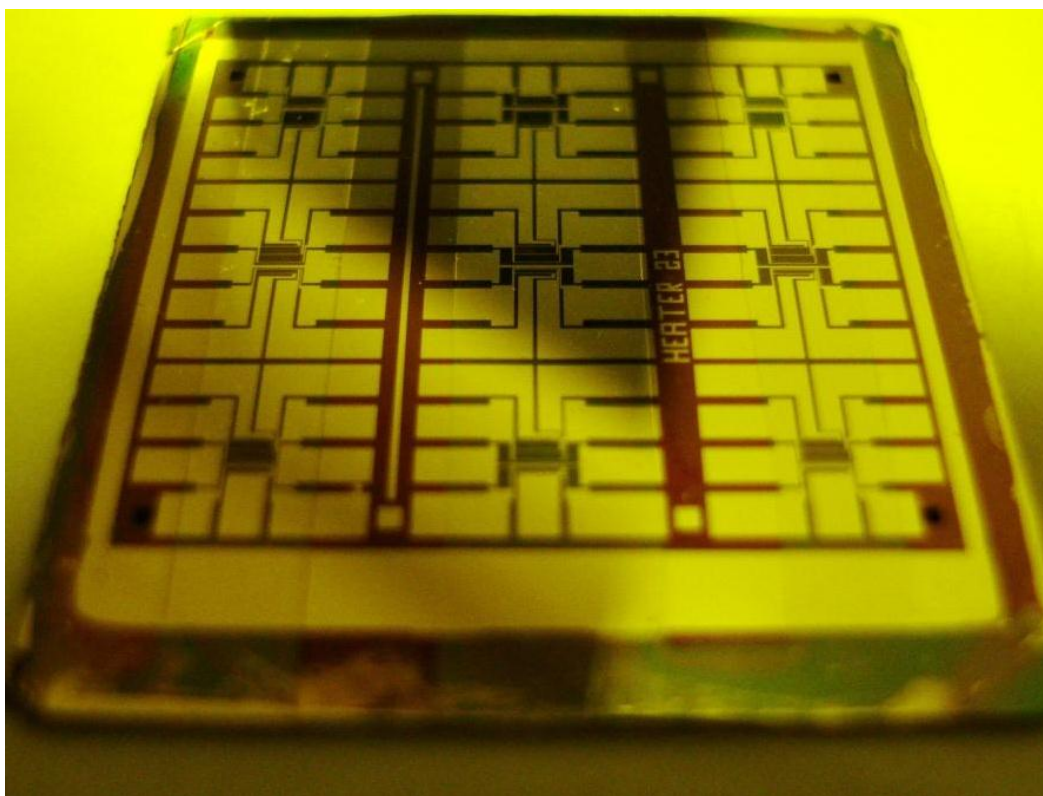
16. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก

- จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที

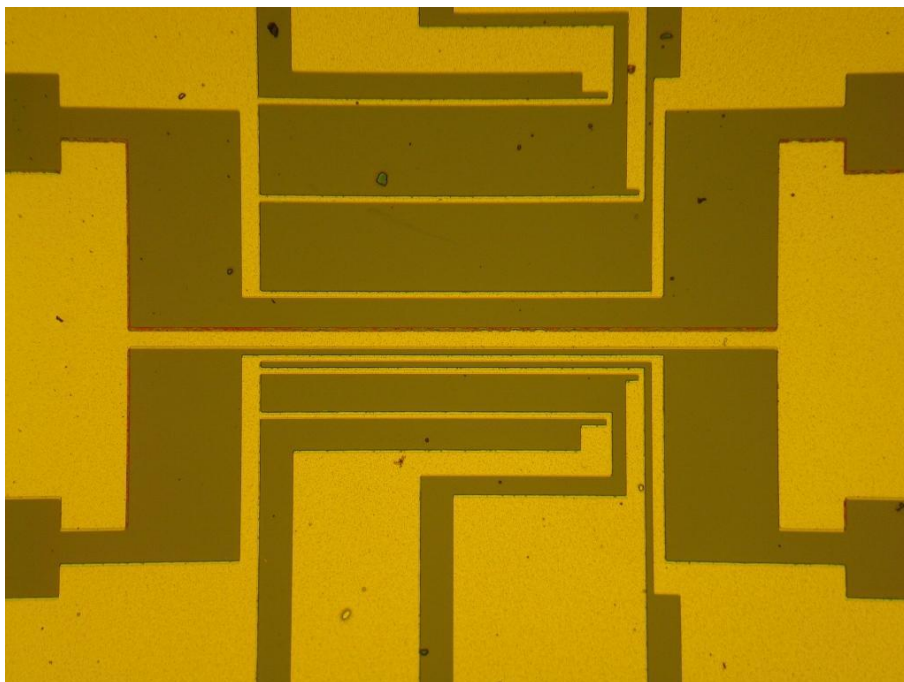
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

16. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิคอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกโดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 500°C เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วจะได้แผ่นผลึกแสดงดังภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 แสดงภาพถ่ายด้านบนไมโครฮีตเตอร์ทองคำ



ภาพที่ 3.15 แสดงไมโครฮีเตอร์ทองคำ จำนวน 1 ตัว