



บทที่ 3

การแพร่ซึมสารเจือปน

โครงสร้างหลักของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากแวนผลึกซิลิกอนเพื่อให้ได้หัวต่อพี-เอ็น ที่อาศัยเทคนิคการแพร่ซึม จะใช้ phosphorus และ boron เป็นสารเจือปน ซึ่งนิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

ในตอนแรกของบทนี้จะกล่าวถึงการแพร่ซึมด้วยสารเจือปน phosphorus โดยใช้ขั้นตอน predeposition และ drive-in ในตอนที่สองกล่าวถึงการปลูกซิลิกอนไอออกไซด์ และในตอนสุดท้ายจะกล่าวถึงการทำขั้วต่อแบบโอห์มมิก

3.1 การแพร่ซึมสารเจือปน (ฟอสฟอรัส) ลงในซิลิกอน [1, 2, 3, 6, 9]

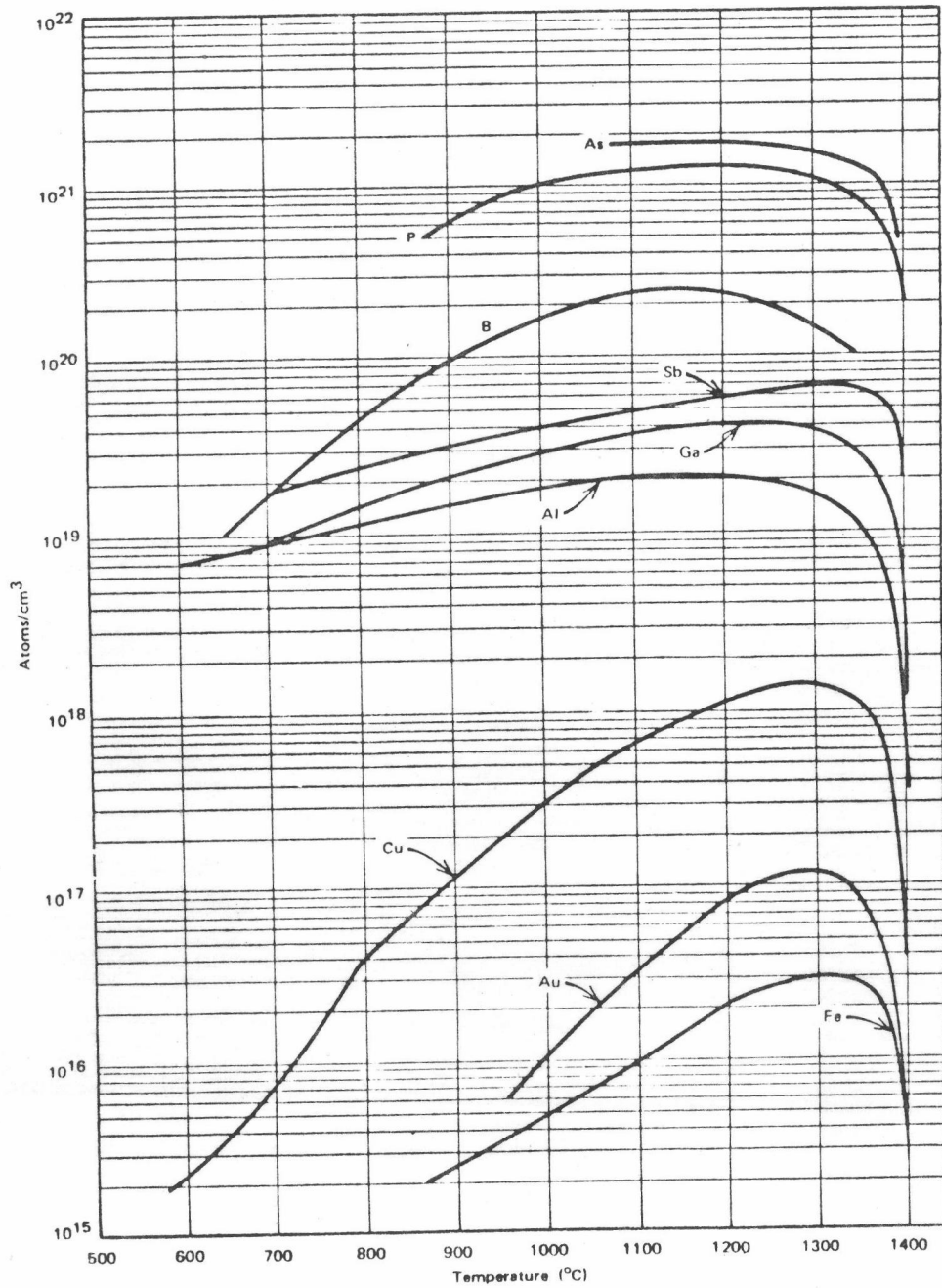
การแพร่ซึมสารเจือปนโดยทั่วๆ ไปแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอน predeposition และขั้นตอน drive-in diffusion

3.1.1 ขั้นตอน Predeposition [6, 9]

เมื่อนำแวนผลึกซิลิกอนใส่ในท่อควอทซ์ที่มีอุณหภูมิสูง สารเจือปนจะถูกนำมาแพร่ซึมลงบนผิวหน้าของแวนผลึกโดย carrier gas ซึ่งแหล่งกำเนิดของสารเจือปนนี้อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือก๊าซก็ได้ กราฟรูปที่ 3.1 แสดงความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือปนชนิดต่าง ๆ (impurity concentration) ที่ถูกแพร่ซึมลงบนผิวหน้าแวนผลึกซิลิกอนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

ขั้นตอน predeposition สามารถใช้กฎของ Fick อธิบายถึงการแพร่ซึมของอะตอมของสารเจือปนภายในแวนผลึกโดยอาศัยสมมติฐานดังต่อไปนี้

3.1.1.1 ตามเงื่อนไข quasi-equilibrium ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าแวนผลึกกับ carrier gas ความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือปน (impurity concentration) ยังคงมีค่าเท่ากับ solid solubility (N_0) เสมอ



รูปที่ 3.1 ความเข้มข้นที่ผิวของอะตอมของสาร เจือปนชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ

- 3.1.1.2 ความหนาแน่นของแวนผลึกเป็นแบบ semi-infinite
- 3.1.1.3 ทิศทางของ x คิดจากผิวหน้าลึกลงเข้าไปในแวนผลึก
- 3.1.1.4 ไม่มีอะตอมของสารเจือปนอยู่ในแวนผลึกที่เวลา $t = 0$

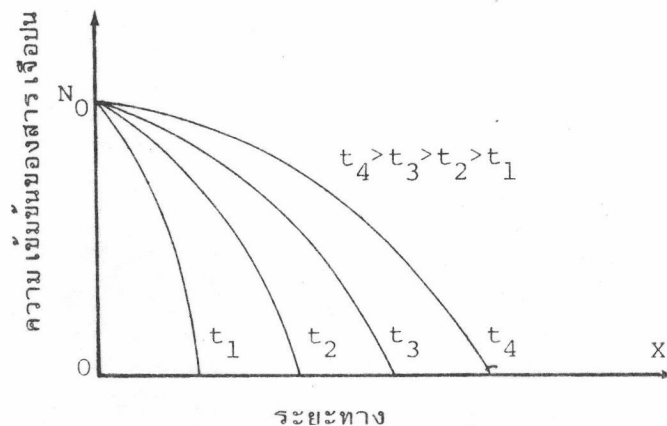
จากเงื่อนไขและข้อกำหนดดังกล่าวจึงได้ขอบเขตของสมการเป็น [6]

$$N(x > 0, 0) = 0 \quad \text{และ} \quad N(0, t \geq 0) = N_0 \quad (3.1)$$

และมีคำตอบเป็น

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (3.2)$$

ในสมการที่ 3.2 การกระจายของอะตอมของสารเจือปนในแวนผลึก (แบบ complementary error function) หลังจากการทำขั้นตอน predeposition จะเป็นดังรูปที่ 3.2

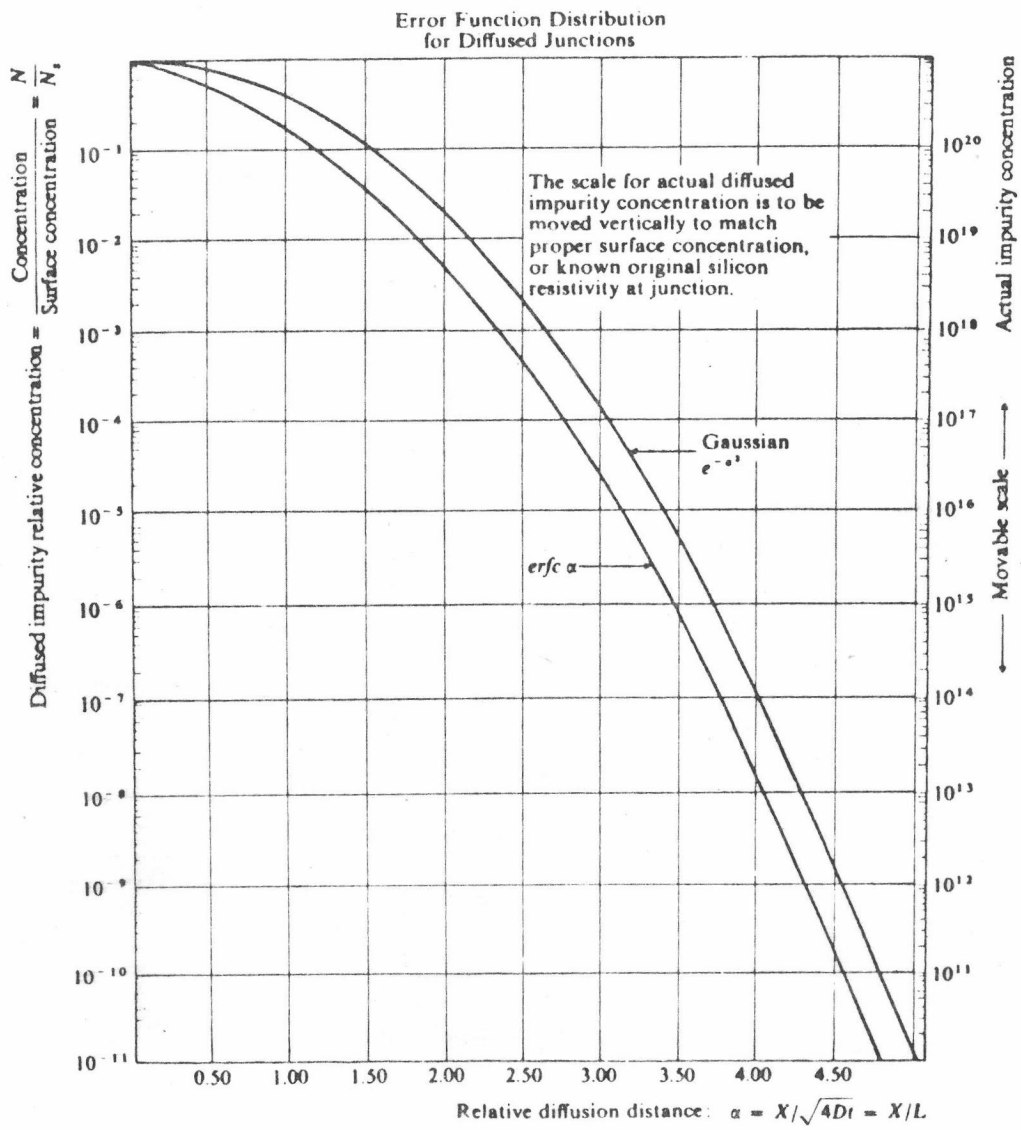


รูปที่ 3.2 แสดงความเข้มข้นของสารเจือปนเทียบกับระยะทาง x ที่เวลาต่างๆ กัน

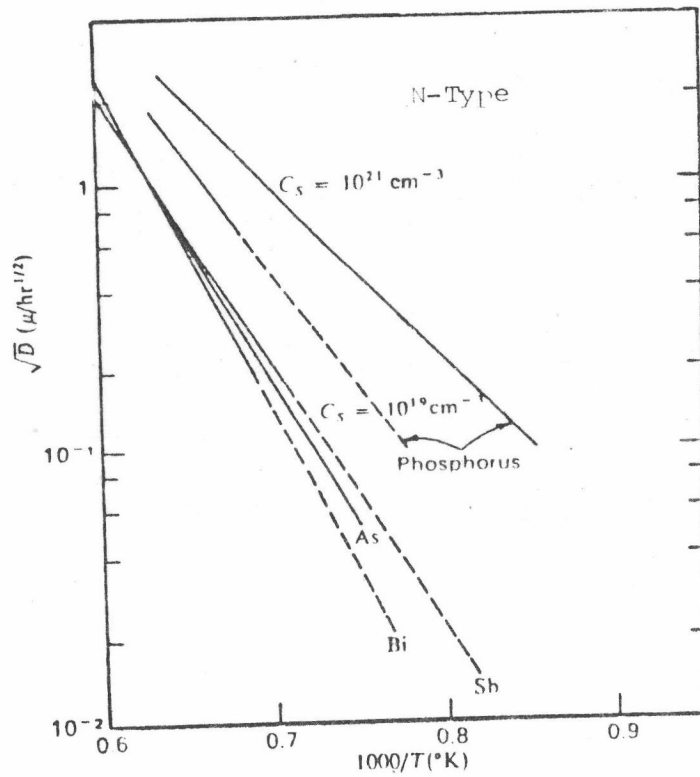
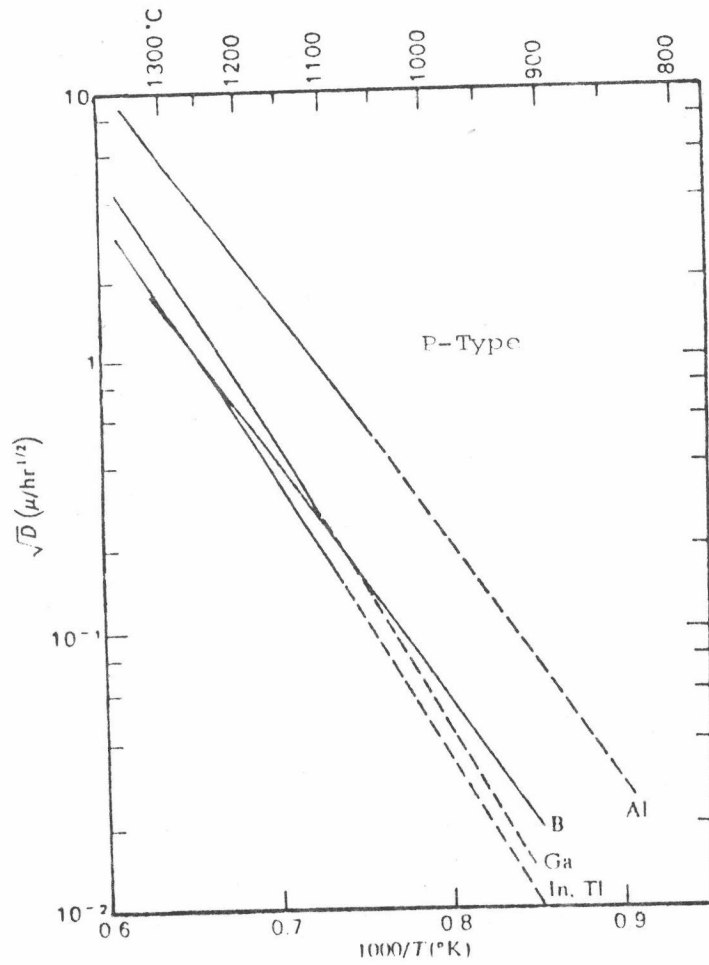
จากสมการที่ 3.2 นำมาเขียนใหม่ดังสมการที่ 3.3 และแสดงค่าดังรูปที่ 3.3

$$\frac{N(x, t)}{N_0} = \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4 \cdot Dt}} \quad (3.3)$$

รูปที่ 3.4 เป็นกราฟแสดงค่าความสามารถในการแพร่ซึม (D) ในซิลิกอนของสารเจือปนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน [3]



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์กราฟให้สมบูรณ์สำหรับ $\text{erfc } \alpha$ และ $e^{-\alpha^2}$
ค่าจะเอียงคดได้จากตารางในภาคผนวก ค.



รูปที่ 3.4 ความสามารถในการแพร่ซึม เทียบกับอุณหภูมิของสาร เจือปนชนิดต่างๆ

3.1.2 ขั้นตอน Drive-in Diffusion [6]

ในขั้นตอน drive-in นี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการให้ตัวต่อพี-เอ็น ลึกลงทำให้ความเข้มข้นของอะตอมของสารเจือปนที่ผิวลดลง ซึ่งเป็นผลดีสำหรับการทำ base diffusion ของ bipolar transistor และในขั้นตอนนี้ยังได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เพิ่มขึ้นเพื่อเป็นหน้าฉากป้องกันผิวหน้าซิลิกอนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เนื่องจากมีชั้น SiO₂ ปกคลุมจึงสมมุติว่าไม่มีอะตอมของสารเจือปนแพร่ซึมออกนอกแวนผลึก (out diffusion) นั่นคือค่า $Q(t)$ คงที่ เงื่อนไขขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นจึงเป็น

$$\left. \frac{\partial N}{\partial x} (x, t \geq 0) \right|_{x=0} = 0, \quad N(x, t) = 0 \quad (3.4)$$

$$N(x, 0) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x_j}{2\sqrt{(Dt)_{\text{pre}}}} \quad (3.5)$$

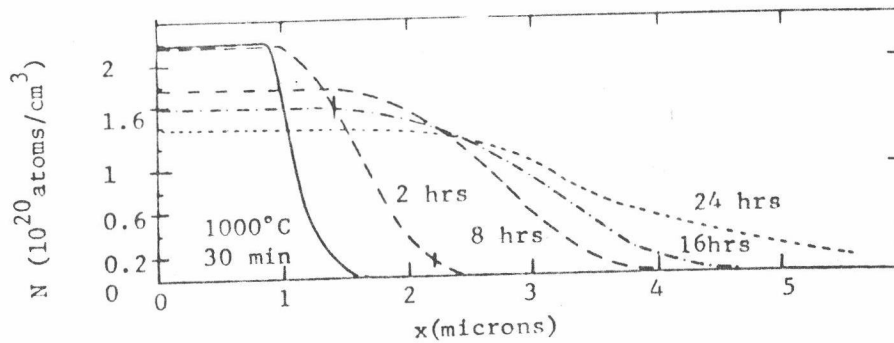
$\sqrt{(Dt)_{\text{pre}}}$ เป็นคุณสมบัติ diffusion length ในขั้นตอน predeposition โดยทั่วๆ ไปแล้ว $\sqrt{(Dt)_{\text{drive-in}}} \gg \sqrt{(Dt)_{\text{pre}}}$

ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตใหม่ของการแพร่ซึมสำหรับกรณี drive-in จึงเป็น

$$N(x, t_d) = \frac{Q_p(t)}{\sqrt{\pi D_d t_d}} \exp \left[\frac{-x_j}{2\sqrt{D_d t_d}} \right] \quad (3.6)$$

เมื่อ $Q_p(t) = \frac{2N_0 A}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D_p t_p}$ และความเข้มข้นของสารเจือปนที่ผิว

$$N(0, t_d) = \frac{Q_p(t_0)}{\sqrt{\pi D_d t_d}} < N_0 \quad (3.7)$$

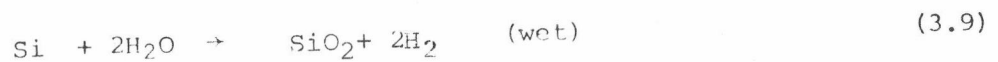
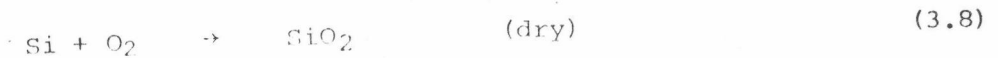


รูปที่ 3.5 แสดง profiles ของชั้นตอน predeposition และ drive-in [22]

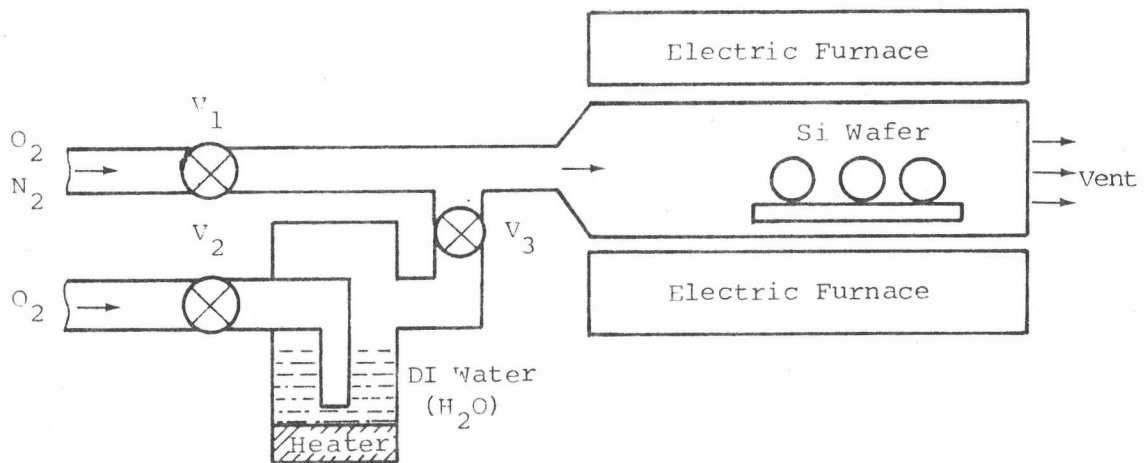
ในรูปที่ 3.5 แสดงถึงการลดทอนของความเข้มข้นตามระยะทาง ของฟอสฟอรัส เส้นทึบแสดงถึงชั้นตอนขณะ predeposition ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที [22] ส่วนเส้นประแสดงถึงชั้นตอนขณะการ drive-in ที่อุณหภูมิ 1015 องศาเซลเซียส เวลา 2, 8, 16 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ และความลึกของหัวต่อพีเอ็น (x_j) สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.6

3.2 การปลูกซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) [1, 6, 9, 19]

จุดประสงค์การปลูก SiO_2 ก็เพื่อสร้างหน้ากปกป้องกันซิลิกอนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ซึ่งสมการ เคมีของการ เกิดซิลิกอนไดออกไซด์จะเป็นดังนี้



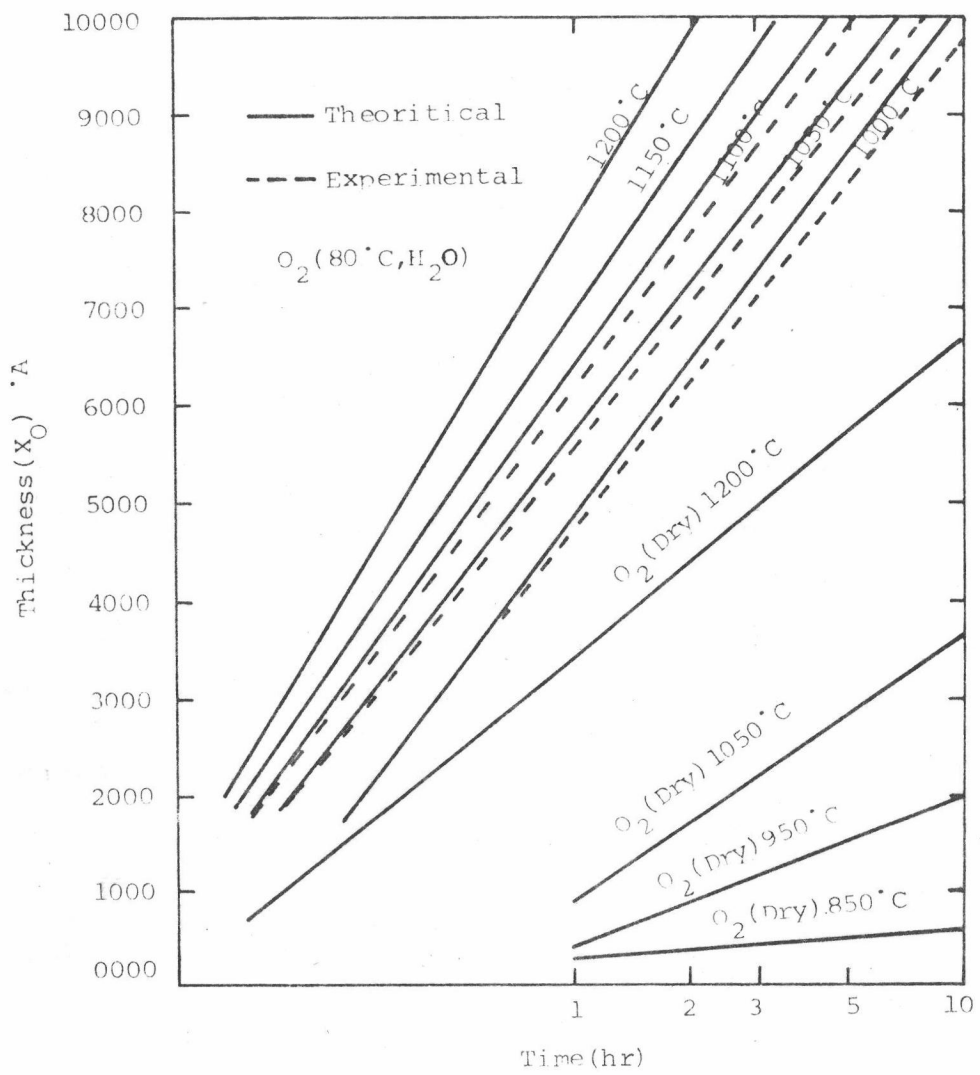
ในสมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.9 เป็นการปลูก SiO_2 แบบแห้งและเปียก ซึ่งการปลูก SiO_2 ดังกล่าวสามารถบรรยายได้ด้วยรูปที่ 3.6 โดยถ้าต้องการปลูกแบบแห้งก็เพียงแค่เปิด V_1 เท่านั้น แต่ถ้าต้องการปลูกแบบเปียกก็ให้เปิด V_2 และ V_3 แล้วเปิด V_1 ทั้งนี้อุณหภูมิของน้ำ (H_2O) ก็มีส่วนสำคัญในการปลูกให้ได้ความหนาของ SiO_2 ตามที่ต้องการอีกด้วย



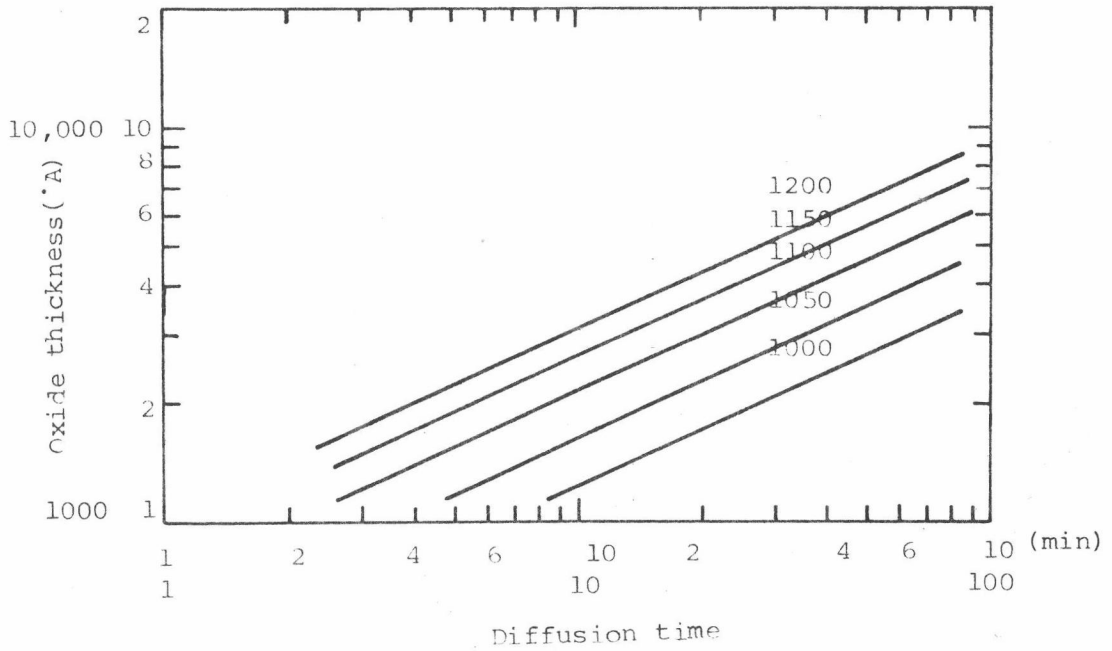
รูปที่ 3.6 แสดงเตาปลูกซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

ในรูปที่ 3.7 กราฟแสดงการปลูก SiO_2 สำหรับเตาของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (จุฬาฯ) ทั้งการปลูกแบบแห้งและแบบเปียกโดยแกนตั้งเป็นความหนาของ SiO_2 ที่ต้องการ และแกนนอนเป็นแกนเวลาที่ต้องใช้ในการปลูก SiO_2

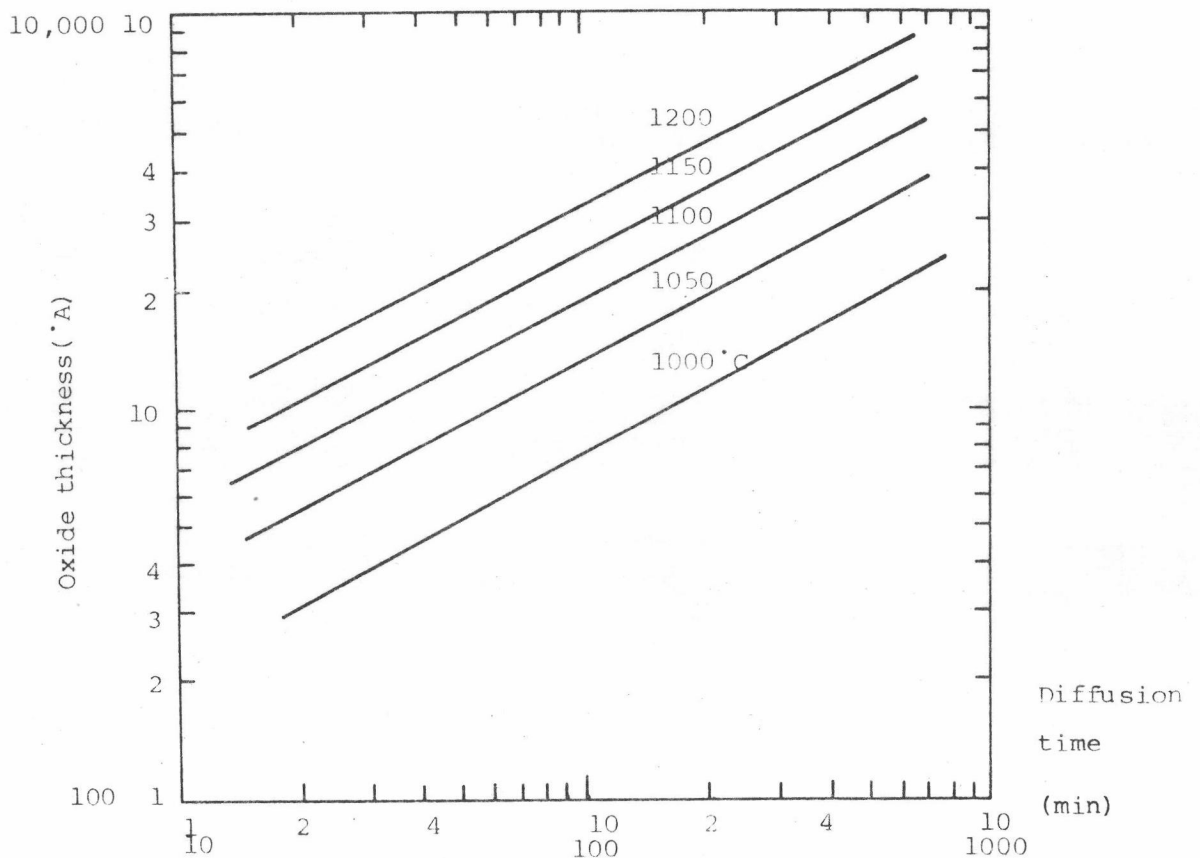
หลังจากที่ได้ทำการปลูก SiO_2 แล้วจะสามารถเห็นแนวผลึกซิลิกอนมีสีต่างๆ ตามความหนาของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้ (ดูภาคผนวก ก.) เนื่องจาก SiO_2 ที่ปลูกขึ้นโดยส่วนใหญ่จะนำไปเป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ซึมสารเจือปน ถ้า SiO_2 บางไปแต่ใช้เวลาในการแพร่ซึมสารเจือปนมากเกินไป SiO_2 จะไม่สามารถที่จะป้องกันสารเจือปนได้ ดังนั้นในกราฟรูปที่ 3.8 และกราฟรูปที่ 3.9 จึงเป็นกราฟแสดงถึงความหนาของ SiO_2 ต่ำสุด เพื่อที่จะสามารถป้องกันการแพร่ซึมสารเจือปนทั้งของ phosphorus และ boron ตามลำดับ ที่เวลาต่างๆ กัน [6]



รูปที่ 3.7 กราฟการปลูก SiO_2 ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (จุฬา)



รูปที่ 3.8 ความหนา SiO₂ ต่ำสุดที่ต้องการเพื่อป้องกันการแพร่ซึมสารเจือปน phosphorus ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ [6]



รูปที่ 3.9 ความหนา SiO₂ ต่ำสุดที่ต้องการเพื่อป้องกันการแพร่ซึมสารเจือปน boron ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ [6]

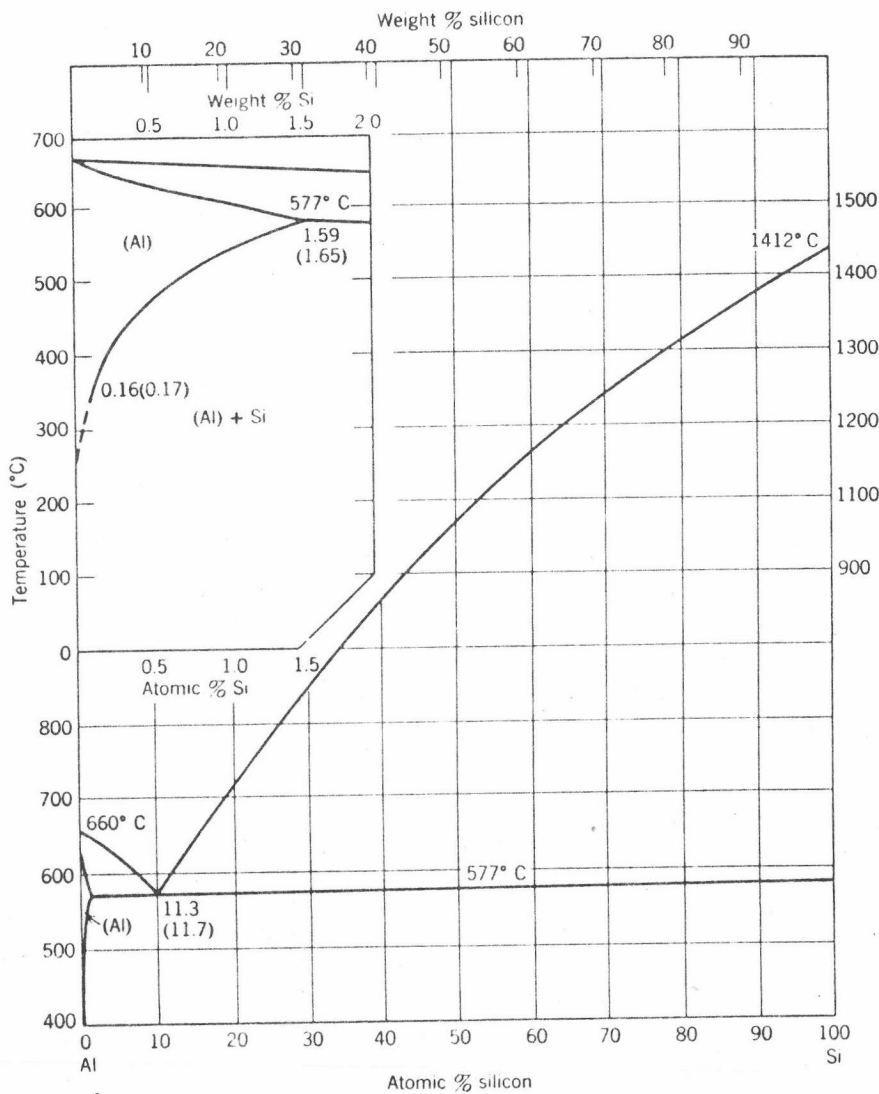


3.3 การทำขั้วต่อแบบโอห์มมิก

การทำขั้วต่อ เพื่อให้ นำกระแสไฟฟ้าและความร้อนที่บริเวณหัวต่อพี-เอ็น ออกสู่ภายนอก เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในตารางที่ 3.1 แสดงถึงค่าต่างๆ ของโลหะที่จะนำมาทำหัวต่อแบบโอห์มมิก ซึ่งห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (จุฬา) ได้ใช้อลูมิเนียม (Al) ทำขั้วต่อแบบโอห์มมิก และอลูมิเนียม (Al) แพร่ซึม เข้าไปในซิลิกอนยังทำให้ได้ P^+ - type ที่บริเวณผิวของซิลิกอน อีกด้วย กระบวนการที่จะนำเอา Al ไปติดบนผิวของซิลิกอนได้ใช้วิธี evaporation และหลังจากนั้นก็ให้นำทั้ง Al และซิลิกอนไป annealing ในเตาเพื่อให้ Al และซิลิกอนได้หลอมตัวกัน ทำให้ได้หัวต่อแบบโอห์มมิกที่ดี ซึ่งค่าของอุณหภูมิและอัตราส่วนผสมของซิลิกอนกับ Al ได้แสดงดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ

Material	Thermal Expansion Coefficient ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}\times 10^{-6}$	Thermal Resistivity ($^{\circ}\text{C}\text{-cm/W}$)	Volume Heat Capacity (W-sec)/ $^{\circ}\text{C}\text{-cm}^3$
Si	2.6	0.69	1.75
Mo	5.4	0.66	2.75
W	4.5	0.6	2.75
Al	23.1	0.43	2.6
Au	14.2	0.34	2.5
Ag	19.6	0.24	1.81
Cu	17.3	0.26	3.37
Lead	29.3	2.86	-
Mild steel	15.1	1.65	3.3-3.6
Ni	13.3	1.09	-
Mica	9-13	200-300	0.54-0.66
Al_2O_3	6.6	4.0	3.31



รูปที่ 3.10 อุณหภูมิและอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมกับซิลิกอน

เนื่องจาก Al เป็นโลหะที่บดกรรียม ดังนั้นจึงได้นำเอาแว่นผลึกซิลิกอนที่ annealing กับ Al นี้ไปเคลือบด้วยโลหะที่สามารถบดกรรียมได้ ซึ่งห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (จุฬา) ได้ใช้นิเกิล (Ni) โดยวิธีการไม่ใช้ไฟฟ้า (electroless) ฤภาคผนวก ข.)