

บทที่ 3

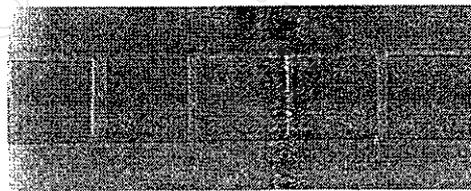
การทดลอง

3.1 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

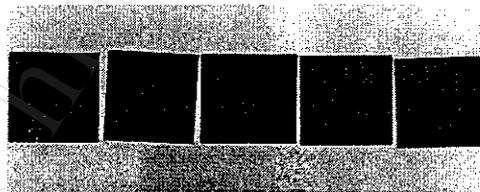
ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ คือ $\alpha-Al_2O_3$ สังกะระห์ขนาด 7 มม x 7 มม x 2 มม จากบริษัท Imetra⁽ⁱ⁾ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยตัวอย่างที่ใช้มี 2 ชนิด คือ

i) $\alpha-Al_2O_3$ ที่ไม่มีสารเจือหรือโพลินสังกะระห์ (synthetic sapphire) จำนวน 5 ชิ้น มีลักษณะใส ไม่มีสี

ii) $\alpha-Al_2O_3$ เจือด้วยโครเมียม 1.2 % หรือทับทิมสังกะระห์ (synthetic ruby) จำนวน 5 ชิ้น มีสีแดง $\alpha-Al_2O_3$ ทั้ง 10 ชิ้น มีแกน c ตั้งฉากกับผิวด้าน 7 มม x 7 มม ให้ชื่อเรียกสำหรับทับทิมสังกะระห์เป็น r1, r2, r3, r4 และ r5 ส่วนโพลินสังกะระห์นั้นให้ชื่อเรียกเป็น s1, s2, s3, s4 และ s5 ลักษณะของตัวอย่างก่อนการฝังไอออน แสดงดังรูปที่ 3.1



(ก)



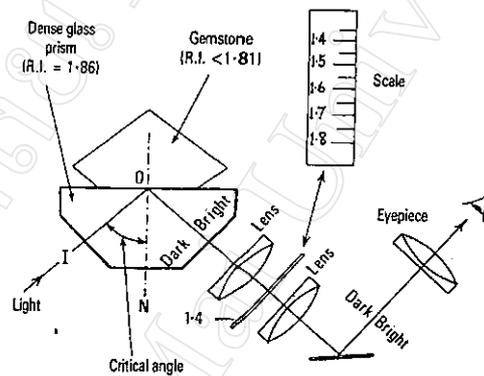
(ข)

รูปที่ 3.1 ลักษณะของโพลินสังกะระห์ (ก) และทับทิมสังกะระห์ (ข) ก่อนการฝังไอออน

⁽ⁱ⁾ Imetra Inc., Cross Westchester Executive Park / 200 Clearbrook Road, Elmsford, N.Y. 10523-1396 USA

3.2 การวัดดัชนีหักเหก่อนการฝังไอออน

ก่อนการฝังไอออนได้วัดดัชนีหักเหของตัวอย่างทั้ง 10 ชิ้น โดยวัดทั้งสองหน้าด้าน 7 มม x 7 มม ของตัวอย่างโดยให้ชื่อเป็นหน้าที่ 1 และหน้าที่ 2 เครื่องวัดดัชนีหักเห (refractometer) ที่ใช้ คือ Rayner Illuminated Dialdex refractometer ซึ่งใช้หลักการของมุมวิกฤต (critical angle) จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า critical angle refractometer ส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ปริซึม (prism) ที่ทำจากแก้วที่มี lead-oxide สูง ซึ่งมีดัชนีหักเห 1.86 (Read, 1991) มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode – LED) ที่ให้แสงสีเหลืองซึ่งมีพีคของ emission ที่ประมาณ 585 นาโนเมตร (Read, 1991) ส่วนประกอบและหลักการวัดของ critical angle refractometer โดยทั่วไป แสดงดังรูปที่ 3.2

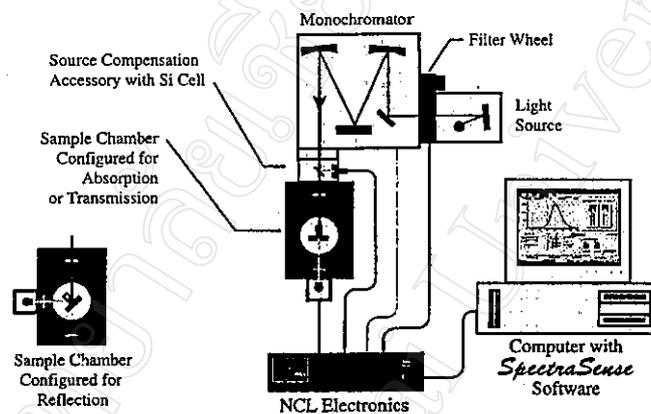


รูปที่ 3.2 แผนภาพของ critical angle refractometer แสงจากแหล่งกำเนิดแสงที่ตกกระทบขอบเขต (interface) ระหว่างปริซึมกับชิ้นงานด้วยมุมน้อยกว่ามุมวิกฤตจะไม่สะท้อนไปยังระบบเลนส์ ส่วนแสงที่มีมุมตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤตจะสะท้อนกลับไปยังระบบเลนส์และถูกโฟกัสไปยังเลนส์ตาทำให้มองเห็นส่วนมืดและส่วนสว่างภายในแถบของสเกล บริเวณที่เรียกว่า shadow edge ระหว่างส่วนมืดและส่วนสว่างจะเป็นตัวชี้ค่าดัชนีหักเหของชิ้นงาน (Read, 1991)

Rayner refractometer ที่ใช้ในการทดลองนี้จะไม่มีสเกลในเลนส์ตาแต่จะสามารถอ่านค่าดัชนีหักเหได้จากปุ่มปรับที่อยู่ด้านข้างของเครื่องมือ โดยการหมุนปุ่มปรับจนกระทั่งด้านล่างของแถบสีดำ (black shutter) ที่อยู่ด้านข้างของสเกลซึ่งมองเห็นในเลนส์ตา เคลื่อนลงมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกับ shadow edge แล้วอ่านค่าดัชนีหักเหจากสเกลบนปุ่มปรับซึ่งเพิ่มขึ้นทีละ 0.01 ในการวัดดัชนีหักเหนี้ จะต้องใช้ contact fluid เพื่อกำจัดฟิล์มอากาศ (air film) ระหว่างผิวของชิ้นงานและปริซึม ซึ่งได้ใช้ contact fluid จาก The Gemological Association and Gem Testing Laboratory of Great Britain มีดัชนีหักเห 1.79

3.3 การติดตั้งและทดสอบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เครื่องมือที่ใช้วัดการดูดกลืนแสง คือ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) รุ่น SpectraPro-300i จากบริษัท Acton Research Corporation⁽ⁱⁱ⁾ ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดลำแสงคู่ (dual beam) ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลอดซีนอน (xenon lam) ขนาด 75 วัตต์ ให้สเปกตรัมต่อเนื่องจาก 190 – 750 นาโนเมตรแล้วลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 2.6 ไมครอน ส่วนหัววัด (detector) เป็นซิลิกอน ไดโอด (silicon diode) ในการวัดการดูดกลืนแสงนี้จะติดตั้งเครื่องมือดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการติดตั้งระบบของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์สำหรับวัดการดูดกลืนแสง (Acton Research Corporation)

แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านจากสลิตขาเข้า (entrance slit) ไปยังกระจกรวมแสง (collimating mirror) แล้วสะท้อนไปที่เกรตติงซึ่งแยก (disperse) แสงออกเป็นความยาวคลื่นต่าง ๆ ไปที่สลิตขาออก (exit slit) จากนั้นแสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำด้วย beam splitter ใน source compensation assembly โดยลำแสงหนึ่งจะส่องทะลุ (transmit) ไปยังกล่องใส่ตัวอย่าง (sample chamber) แล้วตกกระทบหัววัด ส่วนอีกลำหนึ่งจะสะท้อนไปยังหัววัดอีกอันหนึ่งที่ติดอยู่กับ source compensation assembly โดยตรง ลำแสงนี้มีความเข้มประมาณ 8 % ของแสงที่ออกมาจากสลิตขาออก สัญญาณจากหัววัดทั้งสองนี้จะถูกส่งไปยังระบบประมวลข้อมูล (data acquisition system) ที่มีชื่อเรียกว่า NCL electronics โดยสัญญาณจากลำแสงที่ผ่านกล่องใส่ตัวอย่างจะถูกส่งไปยังช่องที่ 1 (channel 1) ส่วนสัญญาณจากลำแสงที่สะท้อนจาก beam splitter จะถูกส่งไปยังช่องที่ 2 (channel 2) ซึ่งเป็นช่องสัญญาณอ้างอิง (reference channel) สัญญาณจากทั้งสองช่องจะถูกประมวลผลและส่งไปยังคอมพิวเตอร์ซึ่งมีซอฟต์แวร์วิเคราะห์และแสดงผลต่อไป

⁽ⁱⁱ⁾ Acton Research Corporation, 530 Main Street, Acton, MA 01720-3301

3.3.1 การสอบเทียบซอฟต์แวร์ของสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

หลังจากติดตั้งสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แล้วได้สอบเทียบซอฟต์แวร์ของเครื่องมือโดยใช้หลอดปรอท (mercury lamp) จากบริษัท Acton Research Corporation เป็นหลอดที่ใช้สำหรับสอบเทียบโดยเฉพาะ หลอดปรอทนี้จะให้สเปกตรัมที่ไม่ต่อเนื่อง โดยมีพีคที่ใช้อ้างอิงอยู่ที่ 253.7, 313.1, 365, 435.8, 546.1, 577 และ 579 นาโนเมตร การสอบเทียบทำได้โดยการเก็บสเปกตรัมของหลอดปรอทจากช่องสัญญาณที่ 1 ในช่วงความยาวคลื่นที่ครอบคลุมพีคใดพีคหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วจะเลือกพีคที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการวัดในการทดลองจริงแล้วอ่านค่าตำแหน่งของพีคนั้น จากนั้นเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง ในกรณีที่ซอฟต์แวร์บอกตำแหน่งของพีคต่างไปจากค่าอ้างอิง จะสามารถป้อนค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของพีคลงไปได้ แล้วซอฟต์แวร์จะคำนวณค่าชดเชย (offset) สำหรับความแตกต่างระหว่างค่าอ้างอิงกับค่าที่อ่านได้ ค่าชดเชยนี้จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการวัดสเปกตรัมต่อไป ในการสอบเทียบครั้งนี้ได้ใช้พีคที่ 546.1 และ 577 นาโนเมตร เนื่องจากทั้งสองพีคนี้อยู่ในช่วงสเปกตรัมที่ต้องการวัดในการทดลอง คือ 300-700 นาโนเมตร

3.3.2 การเก็บสเปกตรัมเพื่อทำ normalization file

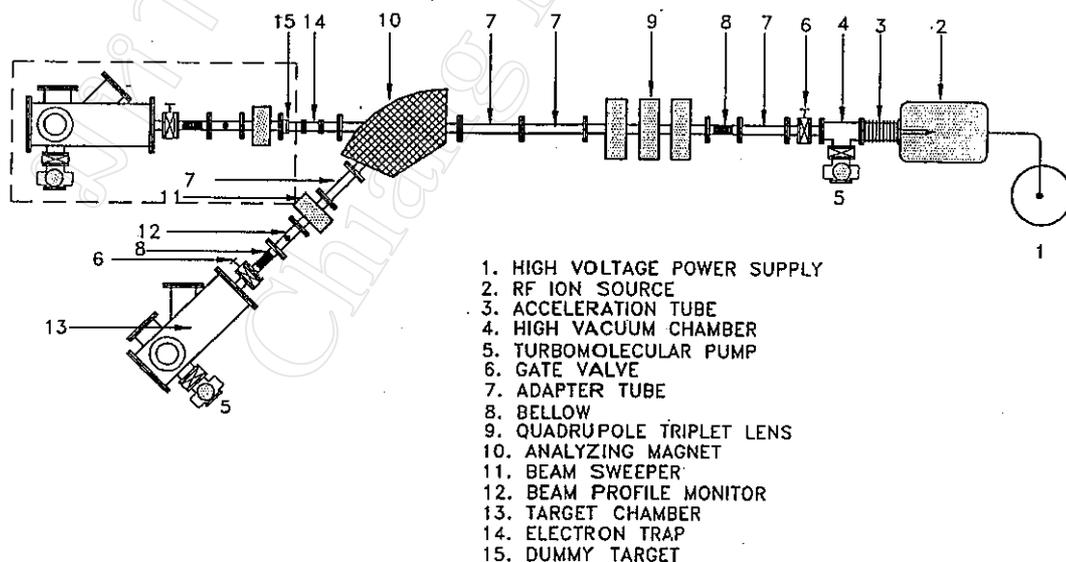
ได้เก็บสเปกตรัมของหลอดซินอนเพื่อทำ normalization file ในช่วงความยาวคลื่น 300-700 นาโนเมตร เนื่องจากสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้เป็นชนิดลำแสงคู่ จึงวัดการดูดกลืนแสงได้แบบ real time กล่าวคือ สามารถเก็บสัญญาณจากทั้ง 2 ช่องสัญญาณและนำมาประมวลผลได้พร้อมกัน การหารสัญญาณจากช่องสัญญาณที่ 1 (ch1) เมื่อยังไม่ใส่ตัวอย่างในกล่องด้วยสัญญาณจากช่องสัญญาณอ้างอิง (ref) จะได้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณของทั้งสองช่องนี้ เรียกว่า normalization file (nf) ซึ่งเมื่อคูณไฟล์นี้ด้วยเอาท์พุทจาก source compensation assembly แล้วจะมีค่าเทียบเท่ากับสัญญาณก่อนที่แสงจะผ่านตัวอย่าง หรือเขียนได้ว่า $ch1 / ref$ (ไม่มีตัวอย่าง) = normalization file {nf} และ $ref \times \{nf\} = ch1$ (มีตัวอย่าง) normalization file นี้จะต้องใช้ในการประมวลผลสำหรับหาการดูดกลืนแสงเมื่อใส่ตัวอย่างลงไป

3.4 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอะลูมิเนียมออกไซด์

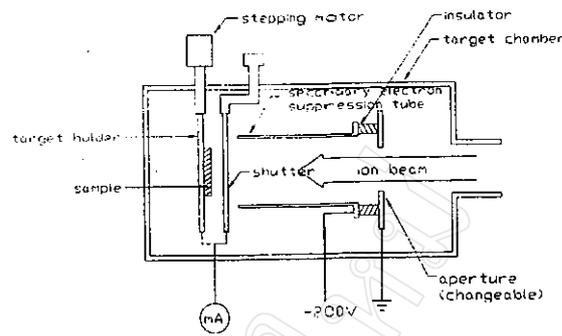
หลังจากติดตั้งและสอบเทียบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แล้ว ได้วัดการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทั้งหมด ในช่วงความยาวคลื่น 300-700 นาโนเมตร โดยใส่ตัวอย่างแต่ละชั้นที่ติดกับตัวจับยึดลงในกล่องใส่ตัวอย่าง และให้แสงตกกระทบหน้าที 1 ของตัวอย่าง ระบบประมวลผลและซอฟต์แวร์จะหาการดูดกลืนแสงจากความสัมพันธ์ การดูดกลืนแสง (absorbance) = $\log \{ (ref \times nf) / ch1 \}$

3.5 การฝังไอออนบนอะลูมิเนียมออกไซด์

ก่อนฝังไอออนบนอะลูมิเนียมออกไซด์ ได้ทดลองฝังไอออนลงบนแผ่นแก้วสไลด์พื้นที่ผิว 1.4 มม x 7 มม หน้า 1 มม โดยใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ชนิดกรอมวล ซึ่งติดตั้งที่อาคารเทคโนโลยีไอออน-บีม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ แผนภาพของเครื่องและห้องเป้า (target chamber) ที่ 45 องศา แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และ 3.5 การทดลองฝังไอออนบนแผ่นแก้วนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทดสอบการปนเปื้อนบนผิวของชิ้นงาน เนื่องจาก sputtering ของตัวจับยึดชิ้นงานและเพื่อการปรับแนวของลำไอออนให้ตรงกับชิ้นงาน ตัวจับยึดชิ้นงานที่ใช้ทำจาก glass ceramic ที่มีชื่อทางการค้าว่า MACOR ประกอบด้วย fluorphlogopite mica 55 % ใน borosilicate glass matrix มีสมบัติเป็นฉนวน จากการทดสอบฝัง N^+ พลังงาน 120 กิโลอิ-ล็คตรอน โวลท์ ด้วยกระแสไอออน 10 ไมโครแอมป์ พบว่าขณะเดินเครื่องอิมพลานเตอร์ลำไอออนมีขนาดไม่คงที่ และบางครั้งจะไปตกกระทบที่ตัวจับยึดชิ้นงาน ทำให้เกิดการปนเปื้อนที่ผิวหน้าของชิ้นงาน จึงได้แก้ปัญหา นี้โดยการเจาะช่องขนาด 1.4 มม x 7 มม บนแผ่นเหล็กขนาด 7 ซม x 7 ซม แล้วนำแผ่นเหล็กนี้ไปยึดด้าน หน้าของตัวจับยึดชิ้นงานเพื่อทำหน้าที่จำกัดขนาดและตำแหน่งของลำไอออนไม่ให้ไปตกกระทบบนตัวจับยึดชิ้นงาน แผ่นเหล็กนี้จะอยู่ห่างจากชิ้นงานประมาณ 3 เซนติเมตร จากการทดสอบพบว่าวิธีนี้ช่วยแก้ ปัญหาการปนเปื้อนบนผิวของแผ่นแก้วได้ จึงได้ใช้วิธีการนี้ในการฝังไอออนบนทับทิมสังเคราะห์และ พลินสังเคราะห์



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่อง ไอออนอิมพลานเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของห้องเป้า

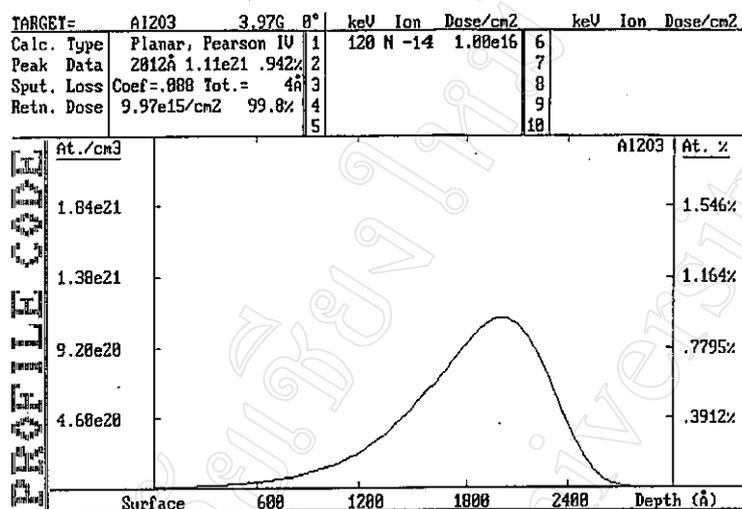
จากนั้นได้ฝัง N^+ ลงบนหน้าที่ 1 ของตัวอย่างทับทิมสังเคราะห์และไพลีนสังเคราะห์ทั้ง 10 ชิ้น โดยใช้พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ กระแสไอออน 10 ไมโครแอมป์ ด้วยโคสดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 โคสของ N^+ ที่ใช้ฝังในทับทิมสังเคราะห์และไพลีนสังเคราะห์

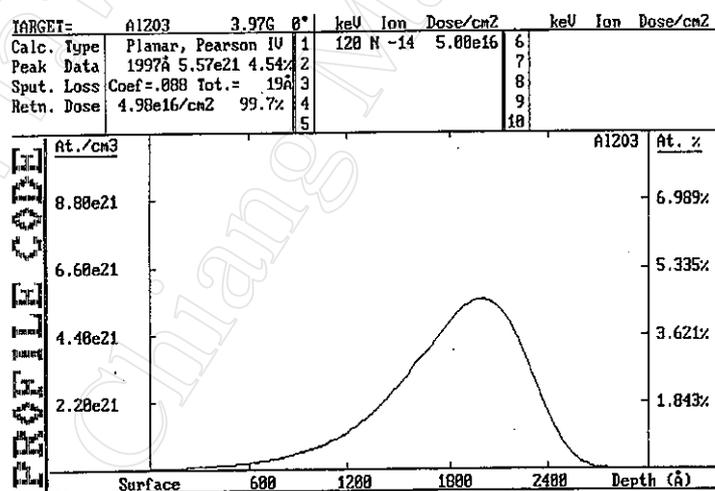
ตัวอย่าง	โคส (ไอออน/ซม ²)
r1	1×10^{16}
r2	5×10^{16}
r3	1×10^{17}
r4	5×10^{17}
r5	1×10^{18}
s1	1×10^{16}
s2	5×10^{16}
s3	1×10^{17}
s4	5×10^{17}
s5	1×10^{18}

เนื่องจากทับทิมสังเคราะห์และไพลีนสังเคราะห์ที่มีหมายเลขเหมือนกันจะถูกฝังด้วยโคสเท่ากัน ดังนั้นจึงฝังชิ้นงานที่มีหมายเลขเหมือนกันพร้อม ๆ กัน และลำไอออนจะถูกกวาดในแนวนอนด้วยความถี่ 1 รอบ / วินาที เพื่อให้ลำไอออนตกกระทบทั่วชิ้นงาน profile ของ N^+ ใน Al_2O_3 ที่โคสต่าง ๆ ในการทดลองครั้งนี้คำนวณโดยใช้โปรแกรม PROFILE Code version 3.2 จำหน่ายโดยบริษัท Implant Science Corporation⁽ⁱⁱⁱ⁾ ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงไว้ในรูปที่ 3.6-3.10

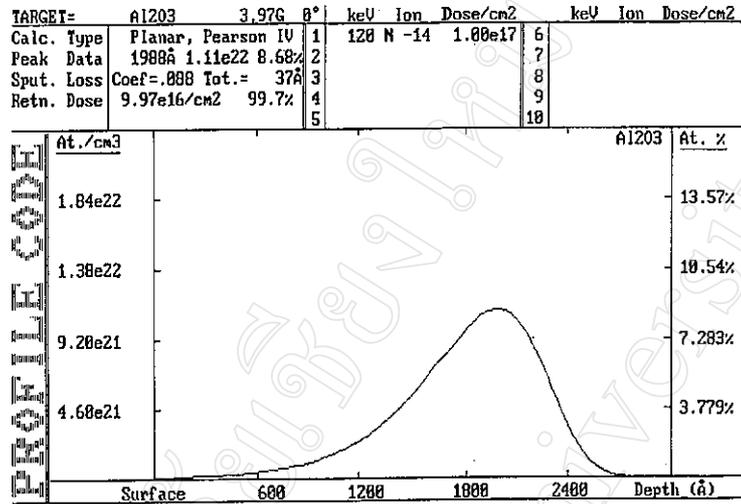
⁽ⁱⁱⁱ⁾ Implant Science Corporation, Wakefield, MA, USA



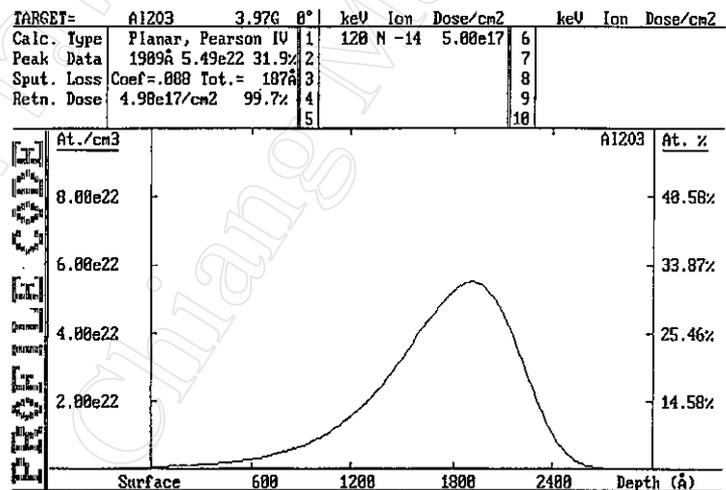
รูปที่ 3.6 Profile ของ N^+ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² ใน Al_2O_3



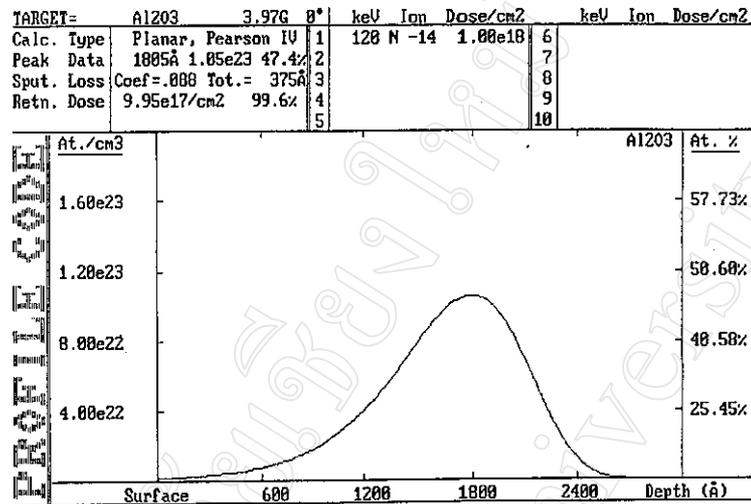
รูปที่ 3.7 Profile ของ N^+ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{16} ไอออน/ซม² ใน Al_2O_3



รูปที่ 3.8 Profile ของ N⁺ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดส 1x10¹⁷ ไอออน/ซม² ใน Al₂O₃



รูปที่ 3.9 Profile ของ N⁺ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดส 5x10¹⁷ ไอออน/ซม² ใน Al₂O₃



รูปที่ 3.10 Profile ของ N⁺ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ โดส 1x10¹⁸ ไอออน/ซม² ใน Al₂O₃

3.6 การประมาณอุณหภูมิของอะลูมิเนียมออกไซด์เมื่อฝังไอออน

เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุ โมเลกุลหรืออะตอมบริเวณแนวทางของไอออน จะถูกกระตุ้นเนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากไอออน ในกรณีที่วัสดุนั้นไม่ใช่โลหะอะตอมหรือโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นจะปลดปล่อยพลังงานที่ได้รับออกมาในรูปแบบของโฟตอนเรียกว่าเกิด luminescence อย่างไรก็ตามพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปแบบของ non-radiative transition และพลังงานส่วนนี้จะถูกถ่ายทอดไปยังแลตทิซทำให้เกิดบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงมากที่เรียกว่า thermal spike ขึ้น (Szenes, 1996; Bringa and Johnson, 1998) อุณหภูมิรอบ ๆ แนวทางไอออนนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น (<10⁻¹² วินาที) แล้วลดลงด้วยอัตรา 10¹⁴-10¹⁵ องศาเซลเซียส / วินาที เนื่องจากการนำความร้อน (heat conduction) อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของชั้นงานที่ถูกฝังไอออนนั้น จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขสมดุลของพลังงาน (energy balance) ระหว่างกำลังจากไอออนที่ป้อนเข้าไปในเป้า (power input) กับความร้อนที่สูญเสีย (thermal output) จากเป้า ซึ่งได้แก่ การแผ่รังสี (radiation) การพาความร้อน (convection) และการนำความร้อน (conduction) power input ในการฝังไอออน คือ (Cahill et al.,1986)

$$P_{in} = I\Delta E \tag{3.1}$$

โดยที่ I คือ กระแสไอออน (ion beam current)

ΔE คือ พลังงานที่ไอออนสูญเสียให้กับเป้า

ในกรณีที่ไอออนหยุดอยู่ในเป้านั้น สามารถประมาณ power input สำหรับไอออนพลังงาน E_0 ที่มีรัศมีของลำไอออน r_0 ชม ได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{power input} &= IE_0 \\ \text{areal density} &= (IE_0) / \pi r_0^2 \end{aligned}$$

อุณหภูมิของเป้าที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนจากเป้า ในระหว่างการฝังไอออนในการทดลองครั้งนี้ กลไกสำคัญในการสูญเสียความร้อนจากเป้า คือ การแผ่รังสี โดยสามารถลดการพาความร้อนและการนำความร้อนได้ เพราะชิ้นงานอยู่ในสุญญากาศ ไม่มีระบบหล่อเย็น และสัมผัสกับตัวจับยึดชิ้นงานเพียงบางจุด การนำความร้อนจากชิ้นงานไปยังตัวจับยึดจึงเกิดขึ้นเฉพาะบางจุดที่สัมผัสกันเท่านั้น นอกจากนี้ความขรุขระของพื้นผิว (surface roughness) ทำให้มีการสัมผัสทางความร้อน (thermal contact) ที่ดีในสุญญากาศเป็นไปได้ยาก การสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนจึงมีบทบาทน้อยมากเมื่อเทียบกับการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี (Curello et al., 1997)

การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสี สามารถหาได้จากสมการ Stefan-Boltzmann

$$\text{radiation energy} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{surr}^4) \quad (3.2)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิของเป้า

T_{surr} คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

ε คือ emissivity

σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} วัตต์/(เมตร² องศาเคลวิน⁴))

ในการคำนวณนี้ถือว่าพลังงานจากไอออนจะถูกถ่ายเทออกไปยังบริเวณ sub-surface layer ที่มีค่าน้อยกว่าความหนาของชิ้นงานมาก (Curello et al., 1997) จึงถือว่าเกิดความร้อนขึ้นที่ผิวโดยเสมอกัน (uniform surface heating) ค่าคงที่ทางความร้อน (thermal constants) ของชิ้นงานไม่ขึ้นกับทิศทางหรืออุณหภูมิ และสิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเคลวิน เมื่อเริ่มต้นชิ้นงานจะอยู่ในสมดุลความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นสมการความร้อนของชิ้นงานขณะถูกฝังไอออน คือ

$$\rho LC \frac{dT}{dt} = \frac{P_m}{A_s} - 2 \sigma \varepsilon (T^4 - T_{surr}^4) \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น

C คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity)

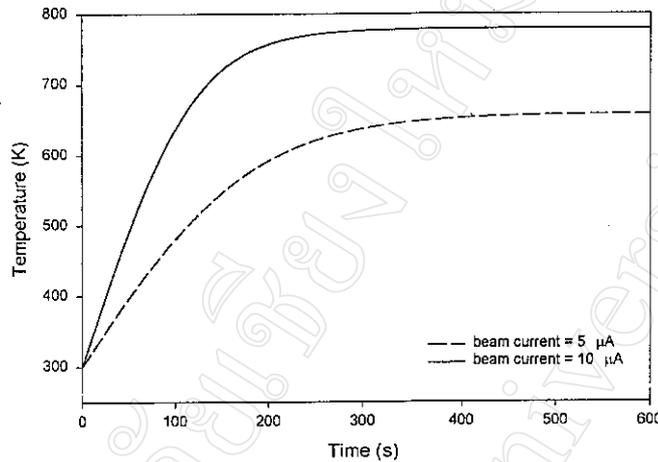
L คือ ความหนาของชิ้นงาน

P_m คือ กำลังของลำไอออน (beam power)

A_s คือ พื้นที่ผิวของเป้านั้นที่ไอออนตกกระทบ

เทอมด้านซ้ายของสมการ (3.3) คือ ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเพิ่มขึ้น ΔT ภายในเวลา Δt จะมีค่าเท่ากับเทอมในด้านขวาซึ่งได้แก่ กำลัง (power) ที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่ (เทอมแรก) ลบด้วยการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี (เทอมที่สอง) โดยถือว่าเกิดการแผ่รังสีจากพื้นผิวทั้ง

ด้านหน้าและด้านหลังและไม่คิดว่ามีการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมมายังชิ้นงาน สำหรับ Al_2O_3 จะมี $\rho = 3970$ กิโลกรัม / เมตร³, $C = 765$ จูล / (กิโลกรัม.องศาเซลวิน) และ $\varepsilon \approx 0.6$ วิธีหาคำตอบของสมการ (3.2) ที่ใช้ในที่นี่คือ วิธีของ Runge-Kutta อันดับที่ 4 (Nakamura, 1991) ผลจากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.11



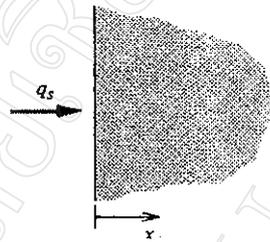
รูปที่ 3.11 อุณหภูมิทั้งก้อน (bulk temperature) ของ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขนาด 7 มม x 7 มม x 2 มม ขณะฝัง N^+ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้กระแสไอออน 10 และ 5 ไมโครแอมป์ ไอออนตกกระทบบนด้าน 7 มม x 7 มม

เมื่อโคสของไอออนเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่งหรือได้ฝังไอออนไปในช่วงเวลาหนึ่ง จะเกิดสภาวะคงตัว (steady state) ของอุณหภูมิ อุณหภูมิของชิ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ความร้อนที่เกิดขึ้นจะสูญเสียไปในรูปของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (black-body radiation) กล่าวคือ

$$\frac{P_{in}}{A_s} = 2 \sigma \varepsilon (T^4 - T_{surr}^4) \quad (3.4)$$

เมื่อได้ประมาณอุณหภูมิทั้งก้อนของเป้าขณะฝังไอออนแล้ว ได้ประมาณอุณหภูมิของพื้นผิวบริเวณที่ถูกฝังไอออน เนื่องจากวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้มีสมบัติเป็นฉนวน เมื่อถูกระดมยิงด้วยไอออนในบริเวณชั้นของพื้นผิวที่มีความหนาอยู่ในอันดับของไมครอน ย่อมทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) ขึ้นระหว่างชั้นที่ถูกฝังไอออนกับบริเวณอื่น Townsend และคณะ (1994) ได้กล่าวถึงอุณหภูมิของชั้นที่ถูกฝังไอออน (implant layer) ของทับทิมไว้ว่า ทับทิมหนา 0.5 มิลลิเมตร ถูกฝังไอออนที่ 77 องศาเซลวิน ด้วยกำลังจากลำไอออน 0.2 วัตต์/ซม² จะทำให้อุณหภูมิในชั้นที่ถูกฝังไอออนเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 10 องศาเซลวิน ส่วนทับทิมหนา 2 มิลลิเมตร ที่ถูกฝังไอออนด้วยกำลัง 3 วัตต์ /ซม² ที่อุณหภูมิห้อง ชั้นที่ถูกฝังไอออนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น 120 องศาเซลวิน ทับทิมนับเป็นตัวอย่างที่น่าสนใจเนื่องจากสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) ที่อุณหภูมิมีค่าสูงกว่าของทองแดงแต่จะลดลงถึง 100 เท่าที่

อุณหภูมิห้อง เมื่อฝังไอออนด้วยกำลังจากลำไอออนที่เท่ากันในอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิห้องจึงทำให้เกิด ความร้อนต่างกัน การประมาณอุณหภูมิบริเวณชั้นที่ถูกฝังไอออนของ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ จะใช้สมการความร้อน (heat flow equation) ใน 1 มิติ (Mills, 1995) โดยพิจารณาว่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปในทิศทางที่ ถัดลงไปใ้ในเป่าเพียงทิศทางเดียว และความหนาของชั้นที่ถูกฝังไอออนซึ่งเกิดกระบวนการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของเป่า (Timans et al., 1989) และในแบบ จำลองนี้จะไม่พิจารณาถึง thermal spike ที่เกิดขึ้นในแนวทางของไอออน (ion track) ดังนั้น จึงสามารถใช้ แบบจำลองของการถ่ายเทความร้อนในของแข็งกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ตกกระทบที่ผิวหน้า (constant surface heat flux) ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงของแข็งกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ผิว (Mills, 1995)

สมการความร้อนใน 1 มิติสำหรับแบบจำลอง semi-infinite solid คือ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

t คือ เวลา

α คือ thermal diffusivity

x คือ ระยะทางในเป่า

ชั้นงานมีอุณหภูมิเริ่มต้น T_0 ดังนั้นเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) คือ

$$T(x,0) = T_0 \quad (3.6 \text{ ก})$$

และเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

$$-\left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = q_s \quad (3.6 \text{ ข})$$

ผลเฉลยของสมการ (3.5) คือ (Mills, 1995)

$$\Delta T(t) = \frac{q_s}{k} \left[\left(\frac{4\alpha t}{\pi} \right)^{1/2} \exp(-x^2 / 4\alpha t) - x \operatorname{erfc} \frac{x}{(4\alpha t)^{1/2}} \right] \quad (3.7)$$

เมื่อ k คือ สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity)

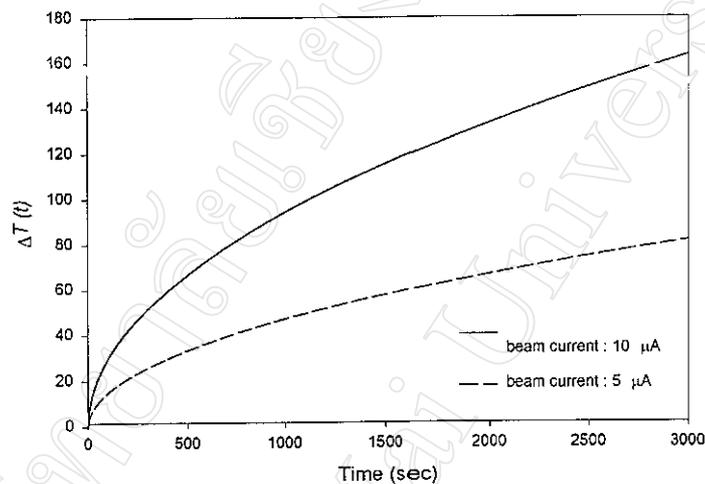
q_s คือ ฟลักซ์ที่ผิวหน้า (surface flux)

$$\operatorname{erfc} \eta = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-u^2} du \quad \text{คือ complementary error function}$$

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ $x = 0$ คือ

$$\Delta T(t) = \frac{q_s}{k} \left(\frac{4\alpha t}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.8)$$

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ผิวของ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ แสดงไว้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ผิวของ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ขณะยิง N^+ พลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ กระแสไอออน 5 และ 10 ไมโครแอมป์ ถ้าไอออนมีรัศมี 0.35 ซม ตกกระทบบนชิ้นงานด้าน 7 มม x 7 มม

3.7 การวัดอุณหภูมิของชิ้นงานที่ถูกยิงไอออน

การวัดอุณหภูมิของชิ้นงานที่เป็นฉนวนและอยู่ภายในห้องเป่าสุญญากาศที่มีขนาดจำกัด โดยใช้วิธีวัดแบบสัมผัส (contact measurement) จะสามารถทำได้ยาก การวัดที่เหมาะสมจึงเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส (non-contact measurement) ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมาใช้ คือ เครื่องวัดอุณหภูมิจากอินฟราเรด (infrared temperature sensor) ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุได้โดยไม่ต้องมีการสัมผัสกับวัตถุ เครื่องวัดอุณหภูมิจากอินฟราเรดนี้ทำงานด้วยหลักการที่ว่า พลังงานที่วัตถุเปล่งออกมาจะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิของวัตถุนั้น เครื่องวัดอุณหภูมิจากอินฟราเรดที่ใช้นี้เป็นแบบความยาวคลื่นคู่ (dual wavelength) จากบริษัท Williamson Corporation^(iv) ประเทศสหรัฐอเมริกา วัดอุณหภูมิได้ในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส มี field of

^(iv) Williamson Corporation, 70 Domino Drive, Concord, MA 01742

view (FOV) 1.8 เซนติเมตรที่ระยะ 45 เซนติเมตร มีการตอบสนองต่อสเปกตรัม (spectral response) ที่ความยาวคลื่น 2.1 และ 2.4 ไมครอน ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ระบบเลนส์ หัววัดรังสีอินฟราเรด และ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากอินฟราเรดที่ตกกระทบให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วแสดงผลที่หน่วยแสดงผล (display unit) เป็นอุณหภูมิของวัตถุที่วัดได้ อย่างไรก็ตาม วงจรนี้ยังมีเอาต์พุตที่สามารถนำไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นอีก ได้แก่ 0-100 มิลลิโวลต์, 0-1 โวลต์, 0-10 โวลต์, 4-20 ไมโครแอมป์ และ 1 มิลลิโวลต์ / องศา เนื่องจากชิ้นงานที่จะวัดอุณหภูมิอยู่ในห้องเป่าที่ศูนย์องศาซึ่งมีหน้าต่าง (window) เป็นพลาสติก จากการทดสอบพบว่าไม่สามารถวัดอุณหภูมิของวัตถุผ่านพลาสติกนี้ได้ จึงเปลี่ยนหน้าต่างของห้องเป่าเป็นแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF_2) ซึ่งให้อินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.13-7.0 ไมครอนทะลุผ่าน เนื่องจากหน่วยแสดงผลของเครื่องวัดอุณหภูมิไม่สามารถบันทึกค่าได้ทำให้ไม่สะดวกในการวัดอุณหภูมิ จึงได้นำสัญญาณเอาต์พุต 1 มิลลิโวลต์ / องศา ผ่านวงจรขยายไปยัง analog-to-digital convertor (ADC) แล้วต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีโปรแกรมที่เขียนด้วยภาษา Visual BASIC บันทึกและแสดงอุณหภูมิของวัตถุ โดยไม่จำเป็นต้องบันทึกด้วยมือ จากการวัดอุณหภูมิของผลอยที่ถูกฝังไอออนในห้องเป่าศูนย์องศา พบว่าอุณหภูมิของผลอยจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการฝังไอออน และเมื่อฝังไอออนไปได้ระยะหนึ่ง อุณหภูมิจะคงที่ที่ค่าสูงสุดค่าหนึ่ง อุณหภูมิสูงสุดนี้แตกต่างกันตามกระแสไอออนและพลังงานที่ใช้ ตัวอย่างเช่น เมื่อฝังไนโตรเจนพลังงาน 120 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ด้วยกระแสไอออน 80 ไมโครแอมป์ ชิ้นงานจะมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 350 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้กระแส 100 ไมโครแอมป์ จะมีอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ในการฝังไอออนบนอะลูมิเนียมออกไซด์ในการทดลองครั้งนี้ ไม่ได้วัดอุณหภูมิของชิ้นงานขณะฝังไอออน เนื่องจากแผ่นเหล็กที่ใช้เป็น aperture สำหรับจำกัดขนาดของลำไอออนซึ่งอยู่ด้านหน้าจะบังชิ้นงาน และถ้าเปลี่ยนตำแหน่งของเครื่องวัด ก็จะมี electron suppressor บังอยู่อีกด้วย

3.8 การวัดดัชนีหักเหและการดูคลื่นแสง ของอะลูมิเนียมออกไซด์หลังจากการฝังไอออน

หลังจากฝังไอออนแล้วได้วัดดัชนีหักเหและการดูคลื่นแสงของตัวอย่างทั้ง 10 ชิ้นอีกครั้งหนึ่งเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ก่อนการฝังไอออน โดยใช้เครื่องมือและวิธีการเช่นเดียวกับก่อนฝังไอออน