

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง TOF-RBS นี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการประเมินค่า timing offset และการประเมินหา pulse width ของห้วงคิวทிரอน ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยทำการเปลี่ยนสเปกตรัมที่ได้จากการทดลองจริงไปเป็นสเปกตรัมเชิงพลังงาน

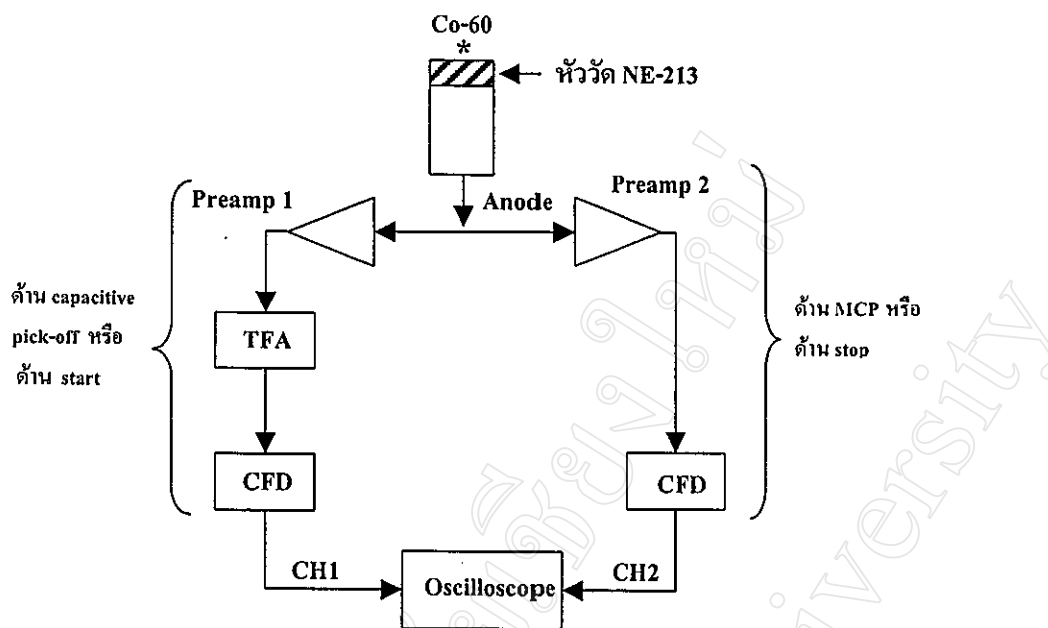
5.1 การประเมินค่าต่างๆของระบบ TOF-RBS

5.1.1 การประเมินค่า timing offset (t_0)ของระบบ TOF-RBS

ในทางอุดมคตินั้น ถ้าสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความแตกต่างเชิงเวลาของสัญญาณ start กับ stop ก่อนเข้า TAC (แกน y) กับตำแหน่งของ peak ที่ปรากฏบนจอ MCA (แกน x) ควรจะสัมพันธ์กันในลักษณะกราฟเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด ที่มีความชัน (slope) เท่ากับค่า time calibration แต่ในทางปฏิบัตินั้นเส้นกราฟนี้มักไม่ผ่านจุดศูนย์กลาง ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดมี timing offset ซึ่งมีสาเหตุ 2 ประการด้วยกัน

5.1.1.1 Timing offset จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสายสัญญาณ

สำหรับการหา offset ส่วนนี้ได้ใช้สารกัมมันตรังสี Co-60 และหัววัดสารอินทรีย์เรืองแสงชนิดเหลว NE-213 ผลิตสัญญาณที่เสมือนว่าเป็นสัญญาณจาก capacitive pick-off และ MCP โดยแยกสัญญาณแอนโคออกเป็น 2 ทาง เพื่อที่จะนำเข้าสู่ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดลอง TOF-RBS จริง ดังรูปที่ 5.1

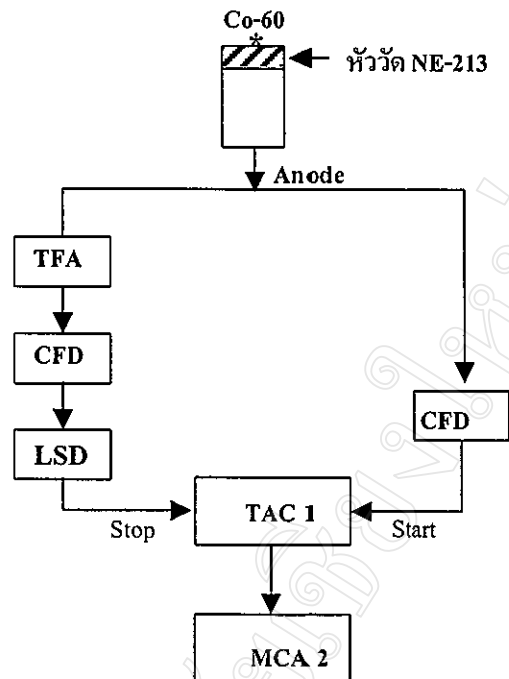


รูปที่ 5.1 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการประเมินค่า offset ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสายสัญญาณ

โดยผลที่ปรากฏในออสซิลโลสโคปนั้นพบว่า สัญญาณจากด้าน capacitive pick-off มาช้ากว่า สัญญาณจากด้านหัววัด MCP อยู่ 25 ns ซึ่งเกิดจากการเสียเวลาใน TFA เป็นสำคัญ โดย timing offset ส่วนนี้จะส่งผลให้เวลาบินของอนุภาคควิที่รอนสั้นไปจากความเป็นจริง 25 ns หรือเสมือนกับว่าอนุภาคควิที่รอนที่วัดได้มีพลังงานสูงกว่าที่ควรจะเป็น

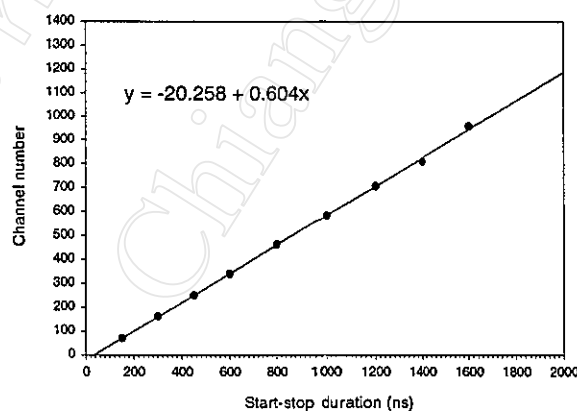
5.1.1.2 timing offset ที่เกิดจากส่วนของการประมวลผล

สำหรับการหา timing offset ที่เกิดจากส่วนของการประมวลผลนั้นทำโดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 5.2 โดย Logic Shaper and Delay (LSD) ใช้ทำหน้าที่ delay สัญญาณก่อนที่จะเข้า stop TAC โดยช่วงเวลาห่างระหว่างสัญญาณ start กับ stop นี้สามารถดูได้จากจอออสซิลโลสโคปก่อนที่จะนำสัญญาณทั้ง 2 นี้เข้า TAC 1 แล้วจึงค่อยนำสัญญาณจาก TAC 1 ไปเข้ายัง MCA 1 เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง channel number บน MCA 2 กับช่วงเวลาห่างระหว่างสัญญาณ start กับ stop โดยแปรค่าช่วงเวลาห่างของสัญญาณทั้ง 2 แล้วดูการปรากฏของสเปกตรัมที่ peak บนจอ MCA 1 ว่าตกอยู่ ณ channel number ใด



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรสำหรับการประเมินค่า timing offset ที่เกิดจากส่วนของการ
ประมวลผลอื่น ได้แก่ TAC 1 และ MCA 2

แล้วพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาห่างระหว่างสัญญาณ start และ stop (แกน x)
กับ channel number บน MCA 1 (แกน y) ซึ่งจะได้กราฟเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาห่างระหว่างสัญญาณ start และ stop กับ channel
number บน MCA โดยที่เส้นทึบเป็นผลจากการ fit ด้วยสมการเส้นตรง และจุดทั้งหลายเป็นผลจาก
การทดลอง

โดยมีสมการเป็น

$$\text{CN (channel number)} = -20.258 + 0.604 \Delta t \text{ (ns)} \quad (5.1)$$

หรือ

$$\Delta t \text{ (ns)} = 33.54 \text{ (ns)} + \left[1.6556 \frac{\text{ns}}{\text{ch}} \right] \times \text{CN} \quad (5.2)$$

จากสมการ(5.2) นั้นจะได้ว่า timing offset เนื่องจากการประมวลผลนี้มีค่าเท่ากับ 33.54 ns

โดยเทอมในวงเล็บคือค่า time calibration ของระบบ TOF นั้นนั่นเอง

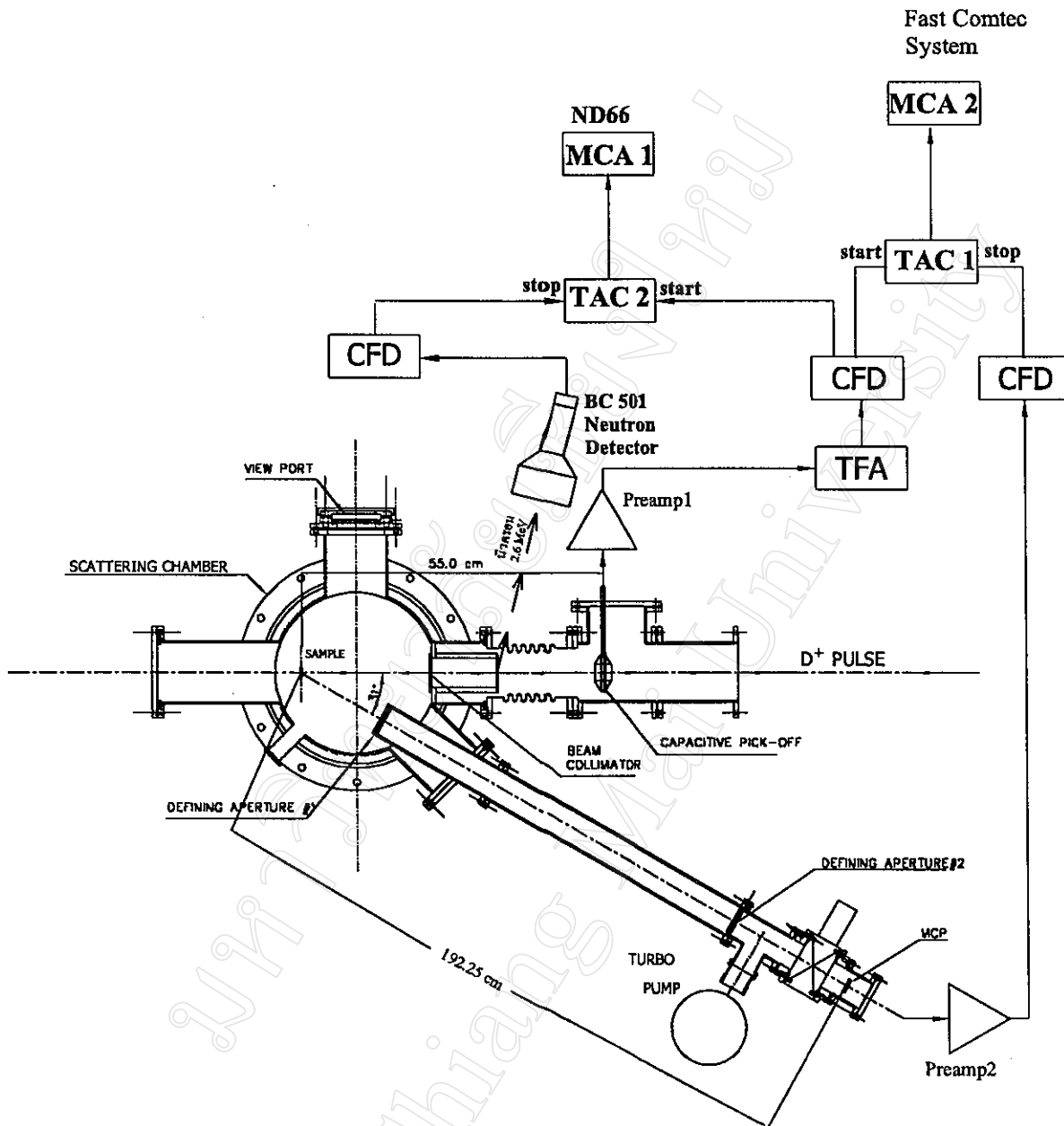
ดังนั้นได้ว่า timing offset รวมของระบบ (t_0) จึงเท่ากับ

$$t_0 = 25 + 33.54 = 58.54 \text{ ns}$$

5.1.2 การประเมินค่า pulse width ของหัวงูภาคคิวทียอน

การบอกขีดความสามารถของระบบในการจำแนกความแตกต่างของธาตุหรืออำนาจการ
จำแนกเชิงมวลของระบบ TOF-RBS นี้จำเป็นจะต้องทราบค่า timing resolution ของระบบ (δt) ซึ่ง
ขึ้นอยู่กับค่า pulse width (δt_{pulse}) ของหัวงูภาคคิวทียอน ดังกล่าวแล้วในสมการที่ 2.46 จึงจำ
เป็นต้องทำการวัดค่า pulse width ของหัวงูภาคคิวทียอน

โดยในการทดลองวัดนี้ได้ใช้หัววัดสารอินทรีย์เรืองแสงชนิดเหลว BC-501 ขนาด 25.4
cm $\varnothing$ $\times$ 10 cm หนา ตรวจจับอนุภาคนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา D-D ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อยิงหัวงูภาค
คิวทียอนพลังงาน 140 keV ไปยังวัสดุตัวอย่างนั้นจะต้องผ่านส่วนของ beam collimator ที่ทำจาก
อลูมิเนียม โดยมีหัวงูภาคคิวทียอนบางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนผ่านไปได้ เนื่องจากรูบน
beam collimator นี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวงูภาคคิวทียอน
ที่วิ่งเข้ามาอยู่ประมาณ 2.5 เท่า ดังนั้น จึงเกิดการฝังตัวของหัวงูภาคคิวทียอนบน beam collimator
และเมื่อมีหัวงูภาคคิวทียอน เข้ามาชนบริเวณนี้อย่างต่อเนื่องจึงเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้น แล้วจึงนำ
สัญญาณจากแอมโพลของหัววัดนี้เป็นสัญญาณ stop คู่กับสัญญาณ start จาก capacitive pick-off มา
ทำวงจร TOF อีกวงจรหนึ่ง ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งการหา pulse width นี้ได้ทำควบคู่ไปกับการทำการ
ทดลอง TOF-RBS ของแต่ละเป้าตัวอย่าง



รูปที่ 5.4 แสดงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับระบบ TOF ที่สองเพื่อใช้ในการทดลองหาค่า pulse width ของห้วงคิวที่รอน
 ในกรณีนี้ได้ใช้ TAC range = 500 นาโนวินาที ซึ่งมีค่า time calibration = 0.4458 ns/ch

จากการทดลองข้างต้นนี้พบว่า ความกว้างของ TOF สเปกตรัมที่ FWHM มีค่าประมาณ 38.67 channel หรือคิดเป็น 7 ns ดังนั้นค่า pulse width ที่แท้จริง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$dt = \sqrt{(dt_{\text{pulse}})^2 + (dt_{\text{elec}})^2 + (dt_{\text{detec}})^2} \quad (5.3)$$

เมื่อ $dt = 7/2$ ns คิดจากค่าที่วัดโดยตรงดังกล่าวแล้ว $dt_{\text{elec}} = 1.44/2$ ns คือค่าที่คิดจากค่า timing resolution ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Δt_{elec}) ชุดที่สองนี้ ซึ่งหาได้จากการใช้สารกัมมันตรังสี Co-60 กับ หัววัด NE-213 ขนาด $2'' \times 2''$ หนา สร้างสัญญาณแทน capacitive pick-off กับสัญญาณจากหัววัดนิวตรอน โดยวิธีแยกสัญญาณแอมโพลเป็น 2 สัญญาณแล้วป้อนเข้าสู่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 5.4 ซึ่งได้ว่า FWHM ของ peak ที่ปรากฏบน MCA 2 จะถูกใช้ประเมินค่า dt_{elec}

ส่วน dt_{detec} คือ ค่าที่คิดจาก timing error ที่เป็นผลเนื่องมาจากความหนา 10 ซม.ของหัววัด BC-501 ทั้งนี้เพราะ เมื่ออนุภาคนิวตรอนพลังงาน 2.6 MeV เคลื่อนเข้าไปในหัววัด BC-501 ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์เรืองแสง ($H/C = 1.213$) จะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมไฮโดรเจน (H) หรืออะตอมคาร์บอน (C) โดยระยะ path length นับจากผิวหน้าถึงจุดเกิดอันตรกิริยากับ H หรือ C จะขึ้นอยู่กับค่า macroscopic cross section (Σ) ซึ่ง

$$\Sigma = N_H \sigma_H + N_C \sigma_C$$

เมื่อ σ_H คือ total cross section ของอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งสำหรับนิวตรอนพลังงาน 2.6 MeV แล้วจะมีค่า 2.5 barns

σ_C คือ total cross section ของอะตอมคาร์บอน ซึ่งสำหรับนิวตรอนพลังงาน 2.6 MeV แล้วจะมีค่า 1.8 barns

และ

$$N_H = \left(\frac{\rho N_A}{1.213 m_H + m_C} \right) \times 1.213 = 4.83 \times 10^{22} \text{ nuclei/cm}^3$$

$$N_C = \left(\frac{\rho N_A}{1.213 m_H + m_C} \right) \times 1 = 3.98 \times 10^{22} \text{ nuclei/cm}^3$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารอินทรีย์เรืองแสง BC-501 เท่ากับ 0.874 g/cm^3

จะได้ว่า $\Sigma = 19.239 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$

ซึ่งสามารถนำไปหาค่า path length (x) ของอนุภาคนิวตรอนพลังงาน 2.6 MeV ในตัวกลางสารเรืองแสง BC-501 ได้จากสมการ 5.4 [Kalos and Whitlock, 1986]

$$x = -\frac{1}{\Sigma} \ln(R) \quad (5.4)$$

เมื่อ R คือ random number ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

จากการคำนวณสมการ 5.4 โดยใช้เทคนิค Monte Carlo พบว่านิวตรอนส่วนใหญ่จะเกิดอันตรกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของหัววัด BC-501 แล้วลดลงแบบ exponential เมื่อระยะทางในเนื้อสารเพิ่มมากขึ้น จากพฤติกรรมเช่นนี้ประเมินได้ว่านิวตรอนพลังงาน 2.6 MeV จะมี timing error ในหัววัด BC-501 เท่ากับ 2.4 ns ดังนั้นโดยเฉลี่ยแล้ว dt_{elec} จะมีค่าประมาณ 1.2 ns เมื่อนำผลทั้งหมดนี้ไปแทนในสมการ 5.3 แล้ว จะได้ว่า $dt_{\text{pulse}} = 3.2$ ns หรือประมาณได้ว่าหัววัดที่รอนมีความกว้าง $= 6.4$ ns

จากค่า dt_{pulse} นี้สามารถนำไปคำนวณค่า δt (เมื่อ $\delta t = 2dt$) ของระบบ TOF-RBS นี้ได้ โดยที่เทอม dt_{elec} ที่ได้ นี้เป็นของหัววัด MCP ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่นๆ จึงสามารถละทิ้งได้ เนื่องจาก MCP เป็นหัววัดที่มีขนาดเล็กมากจึงมี timing resolution ที่ดี ดังนั้นจากข้างต้น จึงสรุปเป็น

$$dt(\text{ns}) = \sqrt{(dt_{\text{elec}})^2 + (dt_{\text{pulse}})^2} \quad (5.5)$$

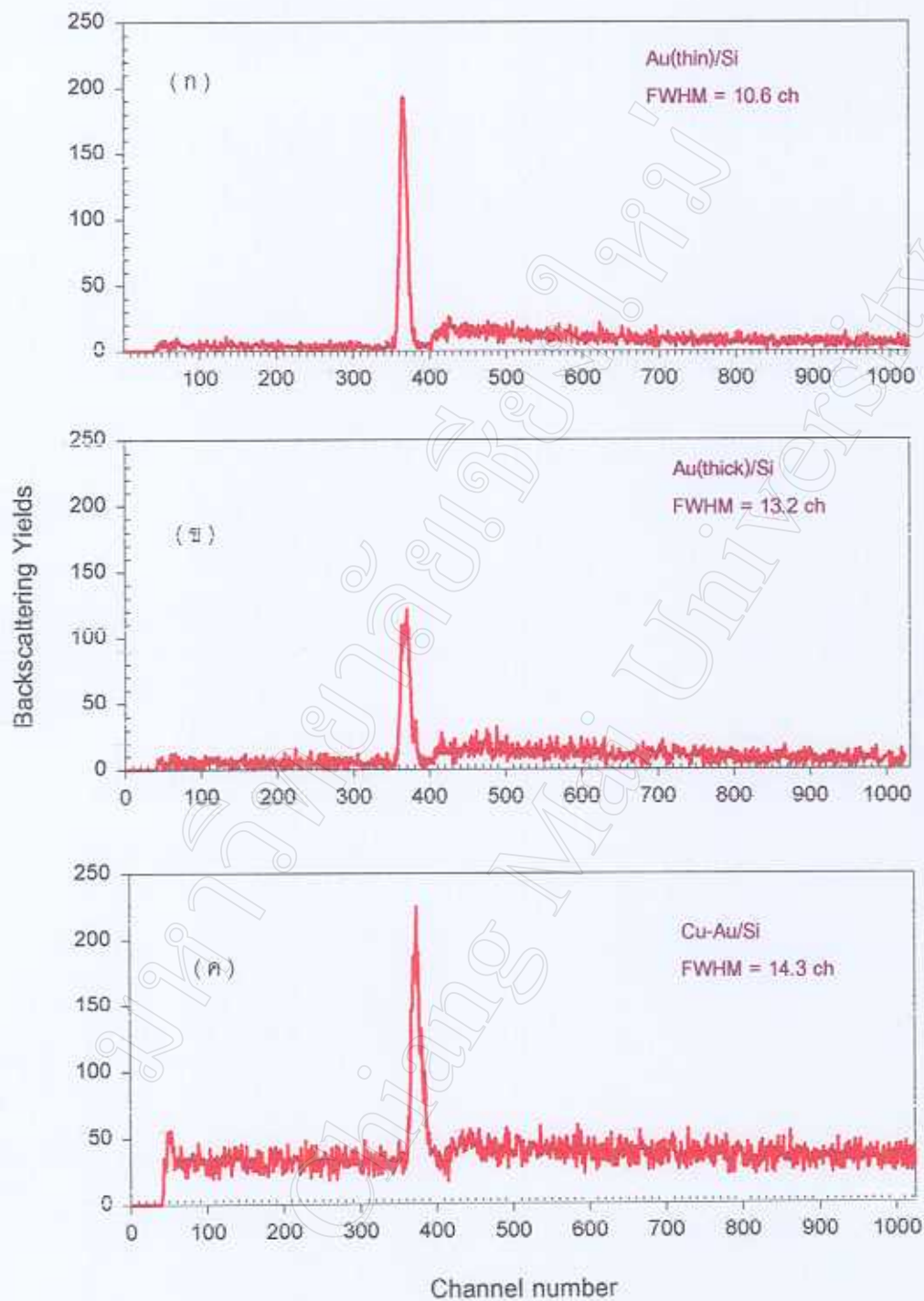
เมื่อ $dt_{\text{elec}} = 3.6/2$ ns (จากหัวข้อ 3.5) ดังนั้นจากสมการ 5.5 จะได้ว่า dt มีค่าประมาณ 3.7 ns หรือจะได้ว่า timing resolution (δt) ของระบบมีค่าเท่ากับ 7.4 ns ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณ energy resolution δE_1 และ mass resolution δM ของระบบที่จะได้กล่าวต่อไป

5.2 การวิเคราะห์สเปกตรัม

หลังจากที่ยิงหัวอนุภาคนิวตรอนพลังงาน 140 keV ไปชนวัสดุตัวอย่าง โดยวัสดุตัวอย่างแรกเป็น ฟิล์มของทองคำที่เคลือบอยู่บนซิลิกอน (Au / Si) ซึ่งมี 2 ระดับความหนา เพราะใช้มวลทองคำตั้งต้นไม่เท่ากัน คือ 28.15 mg กับ 40 mg และวัสดุตัวอย่างชนิดที่สอง เป็นฟิล์มบางผสม 2 ชั้นของทองแดงกับทองคำที่เคลือบอยู่บนซิลิกอน (Cu-Au / Si) โดยมีซิลิกอนเป็น substrate ตัดจากแผ่นเวเฟอร์อันเดียวกันซึ่งจะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.5 (ก) , 5.5 (ข) และ 5.5 (ค) ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการเก็บสเปกตรัมของแต่ละวัสดุตัวอย่างนี้ประมาณ 60 นาที

จากรูปที่ 5.5 (ก) พบว่าตำแหน่งของ peak ทองปรากฏ ณ channel number เท่ากับ 365 โดยมีค่า FWHM ประมาณ 10.6 channel ตำแหน่งของ peak ทองอยู่ห่างจากขอบของซิลิกอน ประมาณ (ΔCh) 40 channel หรือคิดเป็นช่วงห่างในเชิงเวลาได้ประมาณ 66.24 ns โดยคิดจากผลคูณของ ΔCh กับ time calibration ที่มีค่าเท่ากับ 1.656 ns/ch ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับกรณีสเปกตรัมในรูปที่ 5.5 (ข) แต่ต่างกันก็เพียงความกว้างของสเปกตรัมของทองที่ FWHM โดยความกว้างของสเปกตรัม

ในรูปที่ 5.5 (ข) จะกว้างมากกว่า(FWHM =13.2 channel) เนื่องจากทองที่เคลือบอยู่บนซิลิกอนนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าดังกล่าวแล้ว และสำหรับกรณีทีวัสดุตัวอย่างเป็น Cu-Au / Si จะได้สเปกตรัมดังรูปที่ 5.5 (ค) ซึ่งจะพบว่าไม่เพียงแต่สเปกตรัมของ peak ทองจะบวมมากกว่า แต่ยังพบอีกว่าตำแหน่ง peak ทองนั้นเลื่อนไปอยู่ ณ channel number ที่สูงกว่าสเปกตรัมของทองในรูปที่ 5.5 (ก) และ 5.5(ข) เนื่องจากห้วงอนุภาคดิวทีรอนที่เคลื่อนเข้าไปในวัสดุตัวอย่าง Cu-Au / Si นี้จะเคลื่อนผ่านชั้นของทองแดงและมีการสูญเสียพลังงานจนบางส่วนไปในระหว่างทางที่เคลื่อนก่อนไปเจอชั้นของทอง ดังนั้น พลังงานจลน์ของห้วงอนุภาคดิวทีรอนที่เคลื่อนไปเกิดอันตรกิริยากับทองนั้นจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานจลน์เริ่มต้น ซึ่งจะส่งผลให้พลังงานที่กระเจิงย้อนกลับของห้วงอนุภาคดิวทีรอนหลังจากเกิดอันตรกิริยา จะมีค่าลดลง และเวลาที่ห้วงอนุภาคดิวทีรอนใช้ในการเคลื่อนไปยังหัววัดในระยะทาง (L) 192.25 เซนติเมตร หลังจากเกิดอันตรกิริยานั้นจะมีค่ามากขึ้น ซึ่งหมายถึงว่าช่วงห่างระหว่างสัญญาณ start จาก capacitive pick-off ที่ถูกผลิตในอัตราที่คงที่ด้วยความถี่ 500 kHz กับสัญญาณ stop จากหัววัด MCP จะมีค่ามาก และเมื่อทั้ง 2 สัญญาณผ่าน TAC เข้า ADC แล้วจะได้ว่า ตำแหน่งของ peak ทองจะไปปรากฏที่ channel number ที่สูงกว่าอยู่ 9 channel ของกรณีวัสดุตัวอย่างที่เป็นทองบางเคลือบบนซิลิกอนและรวมถึงเกิด energy straggling ขึ้นในบริเวณชั้นของ Cu



รูปที่ 5.5 แสดงสเปกตรัมของห้วงคิวทีรอนที่กระเจียอนกลับหลังจากชนกับวัสดุตัวอย่างที่เป็น Au/Si ที่มีฟิล์มทองคำเคลือบบางกว่าดังรูป (ก) ที่หนากว่าดังรูป (ข) และที่เป็น Cu-Au/Si ดังรูป (ค) โดยในขั้นตอนการผลิตนั้นได้ตั้งใจทำให้ชั้นทองคำของรูป (ก) มีความหนาเดียวกันกับชั้นทองคำในรูป (ค)

5.2.1 การวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงพลังงาน

สำหรับการเปลี่ยนสเปกตรัมของวัสดุตัวอย่างทั้งที่เป็นฟิล์มทองบางและฟิล์มทองคำที่เคลือบอยู่บนซิลิกอน และ Cu-Au / Si โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนด้วยภาษาฟอร์แทรน (ดูรายละเอียดในภาคผนวก จ) เพื่อใช้ในการสร้างสเปกตรัมพลังงานที่กระเจิงย้อนกลับของห้วงอนุภาคดิวทีรอนหลังจากเกิดอันตรกิริยากับวัสดุตัวอย่างข้างต้นนี้ โดยมีหลักการเบื้องต้นดังนี้ คือ ทำการเปลี่ยนจากแกน x ที่เป็นแกนของ channel number ของสเปกตรัมที่ได้จากการเก็บข้อมูลไปเป็นแกนเวลา t (ns) จากความสัมพันธ์

$$t(\text{ns}) = \text{channel number} \times \text{time calibration (ns/ch)} \quad (5.6)$$

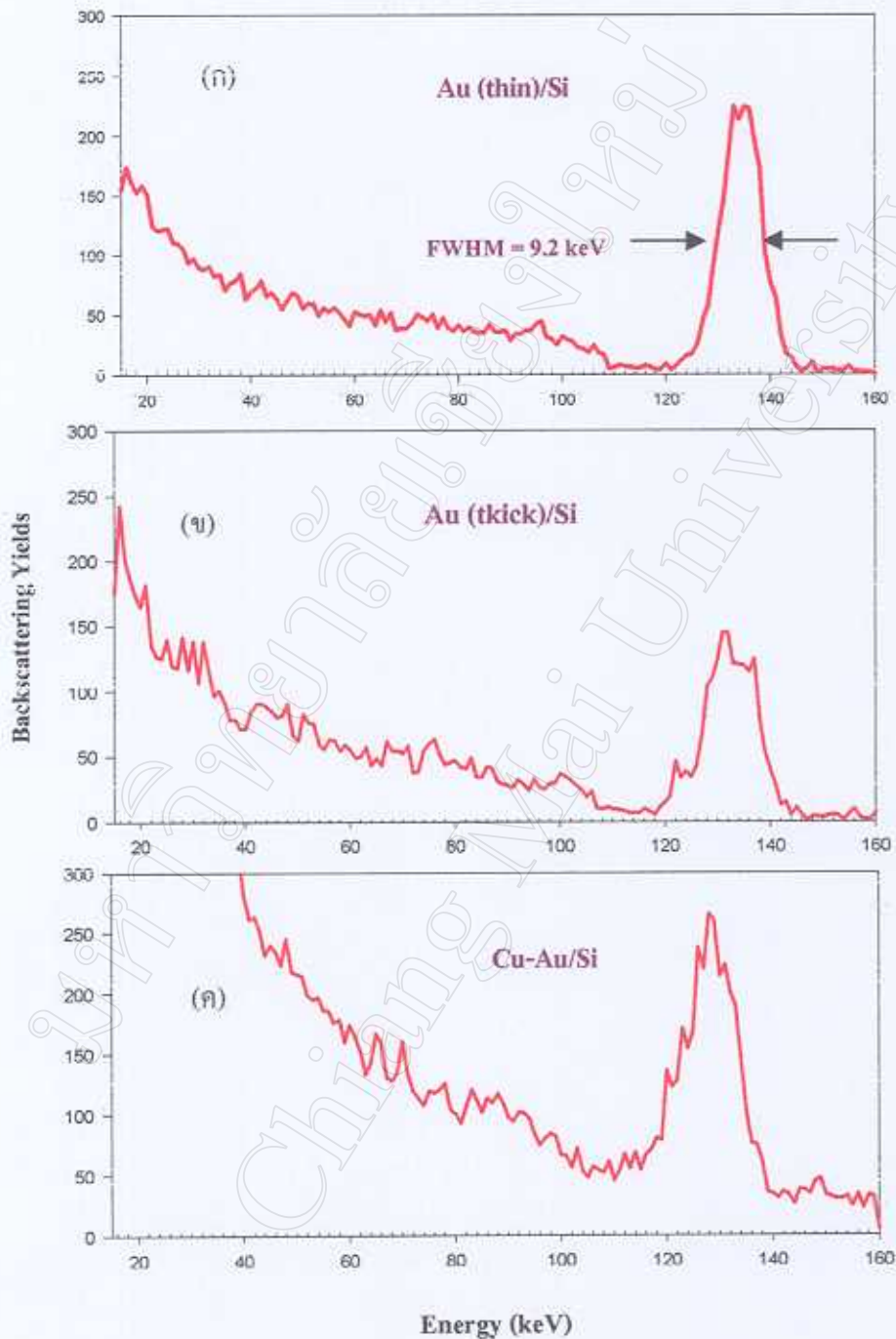
แล้วจึงค่อยเปลี่ยนจากแกนของเวลาไปเป็นแกนของพลังงานโดยอาศัยความสัมพันธ์

$$t(\text{ns}) = t_0 + 32.33 \frac{L(\text{cm})}{\sqrt{E_1(\text{keV})}} \quad (5.7)$$

เมื่อ t_0 คือ ค่า timing offset ของระบบ

โดยค่า t_0 ที่ใช้ในโปรแกรมนี้ได้จากการ fit สเปกตรัมเชิงพลังงานนี้จากโปรแกรม SIMNRA โดยพยายามให้ peak ของวัสดุที่เป็นฟิล์มทองบางเคลือบอยู่บนซิลิกอนนั้นอยู่ ณ พลังงานที่สอดคล้องกับการคำนวณจาก kinematic ใน โปรแกรม เมื่อห้วงอนุภาคดิวทีรอนมีพลังงานเริ่มต้นเท่ากับ 140 keV ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $t_0 = 70.54$ นาโนวินาที การที่ค่า t_0 ที่ได้จากการประเมินในหัวข้อ 5.1.1 กับการคำนวณข้างต้นนั้นมีค่าต่างกันเท่ากับ 12 ns สันนิษฐานว่าเป็นผลเนื่องจาก error จากการอ่านช่วงเวลาห่างที่มีค่ามากมายระหว่างสัญญาณ start และ stop บนจอออสซิลโลสโคป ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้เราจะใช้ค่า t_0 ที่ได้จากการ fit สเปกตรัมจากโปรแกรม SIMNRA เพื่อนำไปใช้ในการเปลี่ยนสเปกตรัมจากการทดลองไปเป็นสเปกตรัมเชิงพลังงาน ซึ่งจะได้อ้างอิงรูปที่ 5.6 โดยสเปกตรัมเชิงพลังงานที่ได้จากวัสดุตัวอย่างที่มีซิลิกอนเป็น substrate ทั้ง 3 นั้นพบว่า ลักษณะสเปกตรัมของซิลิกอนจะไม่ปรากฏเป็น peak ให้เห็นเช่นเดียวกับกรณีสเปกตรัมของทอง เนื่องจากซิลิกอนนี้มีความหนาแน่นทำให้พลังงานของอนุภาคดิวทีรอนที่กระเจิงย้อนกลับหลังจากเกิดอันตรกิริยากับอะตอมซิลิกอนมิได้หลายค่าพลังงานมากแล้วแต่ว่า กระเจิงจากระยะลึกมากน้อยเพียงใด แต่ในทางปฏิบัตินั้นจะพบว่าสเปกตรัมของซิลิกอนนี้จะไม่ลดลงจนเป็นศูนย์ดังรูป 5.6 (ก) เนื่องจากที่พลังงานต่ำๆนั้น ผลของสัญญาณรบกวนในระบบการวัดจะมีบทบาทมาก ซึ่งส่งผลให้มี background เกิดขึ้นที่พลังงานต่ำๆ และจากค่า cross section ที่พลังงานต่ำของอนุภาคดิวทีรอน จะมีค่าสูงกว่าที่

พลังงานสูง ดังนั้นสเปกตรัมของซิลิกอนจะมีลักษณะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อพลังงานที่กระเจิงย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงสเปกตรัมเชิงพลังงานที่กระเจิงย้อนกลับของห้วงคิวที่รอนหลังจากเกิดอันตรกิริยากับวัสดุตัวอย่างที่เป็นฟิล์มทองบางและฟิล์มทองหนาที่เคลือบบนซิลิกอน และ Cu-Au/Si ในรูป (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.6 (ก) และ (ข) พบว่าพลังงานของห้วงอนุภาคคิวเทรอนที่กระเจิงย้อนกลับหลังจากเกิดอันตรกิริยากับทอง (E_{Au}) และซิลิกอน (E_{Si}) ต่างกันประมาณ 28 keV ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการคำนวณจากสมการ 2.19 และจากความสัมพันธ์ $K = E_i / E_0$ ที่ได้ว่า

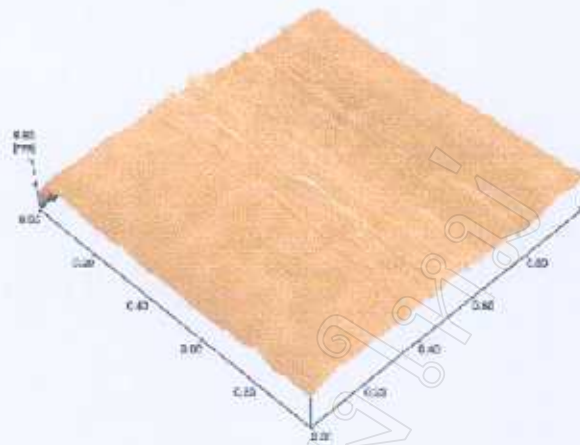
E_i ของ Au เท่ากับ 134.8 keV

E_i ของ Si เท่ากับ 107.3 keV

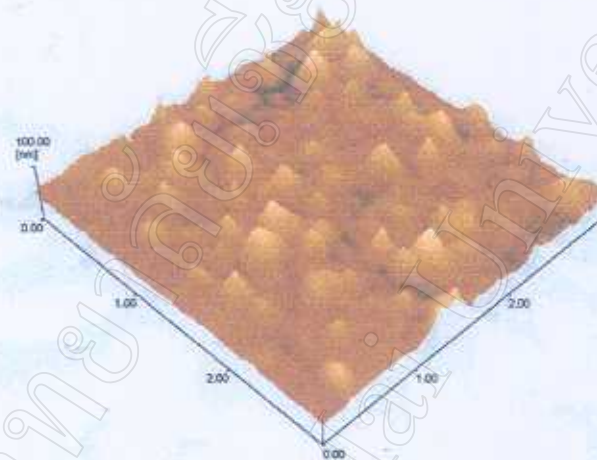
ซึ่งจะได้ว่า $E_{Au} - E_{Si}$ ประมาณ 27.5 keV

จากรูปที่ 5.6(ค) และ 5.5 (ค) พบว่าระบบ TOF-RBS นี้ไม่สามารถแยกทองออกจากทองแดงได้เลย อาจเป็นผลเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น backscattering yield จากทองคำมีค่ามากกว่าทองแดงมากและตอนผลิตวัสดุตัวอย่างนี้ได้ใช้มวลทองแดงน้อยกว่าทองคำประมาณ 2 เท่าและรวมถึงผลของสเปกตรัมของ peak ทองที่บวมอันเนื่องมาจากการสูญเสียพลังงานในชั้นของทองแดงที่อยู่หน้าชั้นทองคำมากกว่ากรณีที่เป็นฟิล์มทองคำที่เคลือบอยู่เป็นชั้นแรก บนซิลิกอน ที่จะส่งผลให้เกิดการซ้อนทับของสเปกตรัมทั้ง 2 นี้ ซึ่งจากการคำนวณ kinematic นั้นจะได้ว่าตำแหน่ง peak ทองแดงควรจะอยู่ ณ channel number ที่สูงกว่า โดยควรอยู่ ณ channel number ที่ 387 ซึ่งห่าง peak ทองประมาณ 13 channel เนื่องจากเวลาของห้วงอนุภาคที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในระยะทาง L หลังจากเกิดอันตรกิริยากับทองแดงมากกว่าของทองประมาณ 22 นาโนวินาทีแต่จากรูปที่ 5.5 (ค) จะพบว่าระบบ TOF-RBS นี้ไม่สามารถแยก peak ทองแดงออกจาก peak ทองได้ เนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ ซึ่งประการแรกคือ การทำงานของ buncher ที่ไม่เสถียรในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งทำให้ timing resolution ของระบบไม่ดี (แล้วทำให้ค่า mass resolution ของระบบนั้นไม่ดีตามไปด้วย) เสริมกับการที่ระบบที่ใช้อนุภาคกระสุนมวลต่ำและพลังงานต่ำนั้นยังส่งผลให้ค่า mass resolution ของระบบไม่ดีด้วย และประการที่สอง คือ ผิวของวัสดุตัวอย่างที่ใช้สำหรับเทคนิค TOF-RBS นี้จะต้องเรียบ แต่จากการตรวจสอบผิวของวัสดุตัวอย่าง Cu-Au/Si และ Au(thin) /Si โดยเทคนิค AFM (Atomic Force Microscope) นั้นพบว่าผิวของวัสดุตัวอย่าง Cu-Au/Si ไม่เรียบ แต่สำหรับ Au(thin)/Si นั้นมีผิวเรียบดังรูปที่ 5.7 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

(ก)



(ข)



รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายของผิววัสดุ Cu-Au/Si และ Au(thin)/Si โดยเทคนิค AFM

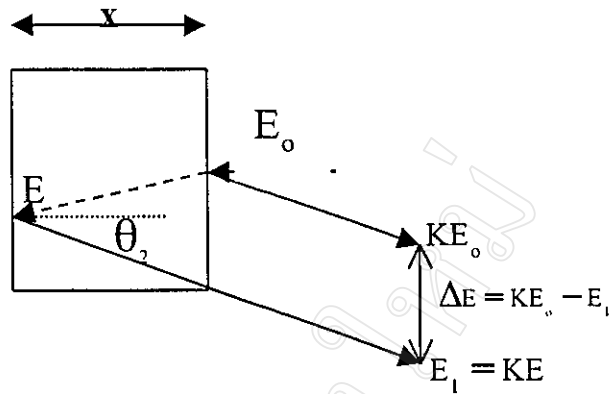
จากรูป 5.6 (ก) นั้นพบว่า อนุภาคควีที่ร่อนพลังงาน 140keV จะสูญเสียพลังงานในชั้นทองคำของวัสดุตัวอย่าง Au(thin)/Si เมื่อเคลื่อนเข้าไปในชั้นของทองคำ โดยพลังงานของอนุภาคควีที่ร่อนที่ระยะลึก x จากผิวหน้าของชั้นทอง [Doolittle, 1985]

$$E(x) = E_0 - x \frac{dE}{dx} + \frac{1}{2} x^2 \frac{d^2 E}{dx^2} + \dots$$

เมื่อ E_0 คือ พลังงานเริ่มต้นของอนุภาคควีที่ร่อน ซึ่งในที่นี้จะใช้การประมาณลำดับที่หนึ่งเท่านั้น จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะได้ว่า

$$E(x) = E_0 - x \frac{dE}{dx}$$

และจากการพิจารณาจากรูป



จะได้ว่า
$$E = E_0 - x \frac{dE}{dx} \Big|_{in}$$

และ
$$E_1 = KE_0 - \frac{x}{\cos \theta_2} \frac{dE}{dx} \Big|_{out}$$

โดยประมาณว่า $\frac{dE}{dx} \Big|_{in}$ และ $\frac{dE}{dx} \Big|_{out}$ มีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่เข้าและออกภายในความหนาของชั้นทองตามลำดับ

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถหาค่าความแตกต่างระหว่างพลังงานของอนุภาคตัวที่ร่อนที่กระเจิงย้อนกลับหลังชนกับทองคำบริเวณผิวหน้า (KE_0) และทองคำบริเวณรอยต่อระหว่างกับซิลิกอน (E_1) คือ ΔE

$$\Delta E = KE_0 - E_1 = x \left[K \frac{dE}{dx} \Big|_{in} + \frac{1}{\cos \theta_2} \frac{dE}{dx} \Big|_{out} \right]$$

$$= [s]x$$

เมื่อ
$$[s] = K \frac{dE}{dx} \Big|_{in} + \frac{1}{\cos \theta_2} \frac{dE}{dx} \Big|_{out} \equiv \text{energy loss factor}$$

หรือ
$$\Delta E = [\epsilon]Nx \quad \text{เมื่อ} \quad [\epsilon] = K\epsilon_{in} + \frac{1}{\cos \theta_2} \epsilon_{out} \equiv \text{stopping power factor}$$

ซึ่งจากการประมาณค่าพลังงานที่ผิวทำให้ได้ว่า

$$[\epsilon] \approx [\epsilon_0] = \left[K\epsilon(E_0) + \frac{1}{\cos \theta_2} \epsilon(KE_0) \right]$$

จากโปรแกรม SRIM นั้นพบว่า

$$\epsilon(E_0 = 140 \text{ keV}) = 33.52 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$$

$$\epsilon(KE_0 = 134.8 \text{ keV}) = 33.18 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$$

ดังนั้น

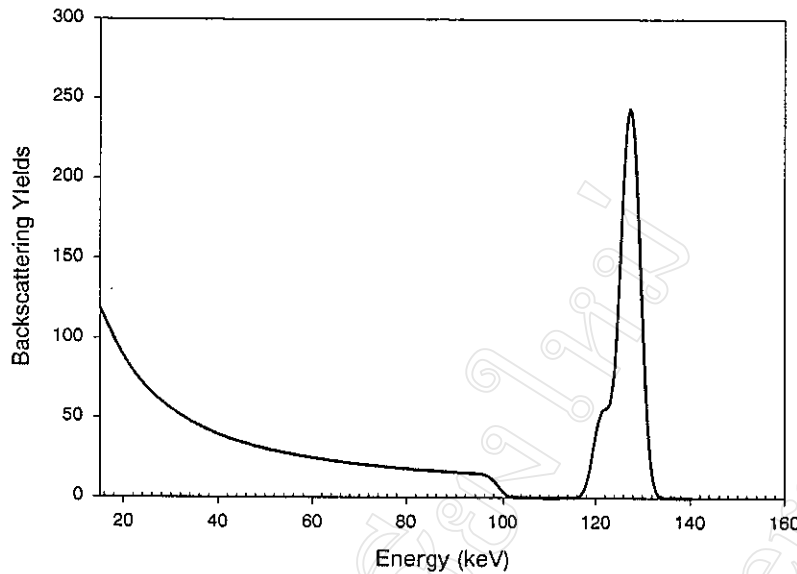
$$\epsilon = 70.98 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{cm}^2$$

และจะได้ $\Delta E \approx 4.4 \text{ keV}$ เมื่อ $N_x = 61.5 \times 10^{15} \text{ atom/cm}^2 \equiv \text{areal density}$ ซึ่งได้จากการ simulate ด้วยโปรแกรม SIMNRA

ดังนั้น จะได้ว่า อนุภาคดิวเทรียมพลังงาน 140 keV เมื่อเคลื่อนเข้าไปใน Au(thin)/Si จะสูญเสียพลังงานในชั้นของทองคำประมาณ 4.4 keV ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่าค่า FWHM ของรูปที่ 5.6 (ก)

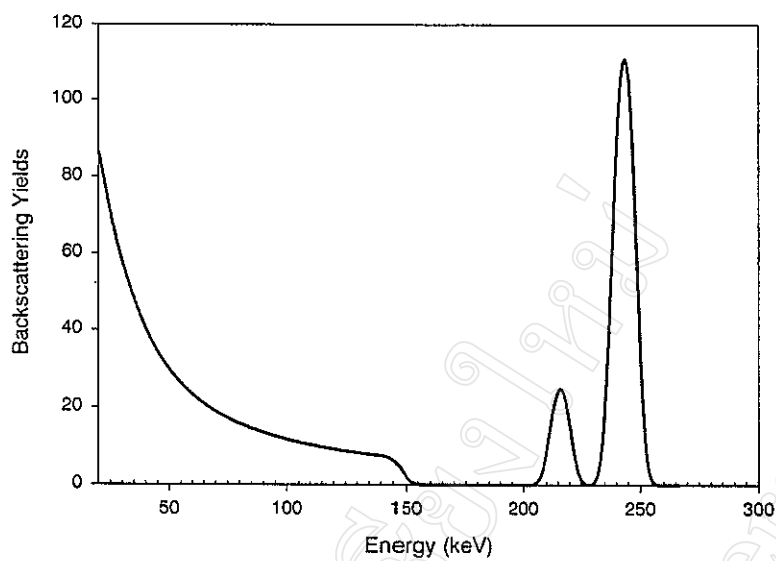
5.2.2 อำนาจการจำแนกมวลของระบบ TOF-RBS

จากหัวข้อ 5.1.2 นั้นได้ว่า Δt ของระบบมีค่าประมาณ 7.4 ns ซึ่งจะนำไปใช้ในการคำนวณหา ΔE_1 ของระบบจากสมการที่ 2.45 ได้เท่ากับ 3.7 keV เมื่อพิจารณาจากการกระเจิงย้อนกลับของห้วงดิวเทรียมหลังจากเกิดอันตรกิริยากับธาตุทอง ($M=197 \text{ u}$) และจากสมการที่ 2.42 จะได้ว่า ΔM ของระบบมีค่าเท่ากับ 143 u เมื่อคิดเทียบกับมวลของทอง ดังนั้นระบบ TOF-RBS นี้จะสามารถแยกธาตุอื่นๆออกจากทองได้ก็ต่อเมื่อธาตุนั้นมีมวลต่างจากทองอย่างน้อยเท่ากับ 132 u ดังจะเห็นได้จากสเปกตรัมในรูปที่ 5.5 (ค) และ 5.6 (ค) ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบระบบ TOF-RBS ในการแยกทองออกจากทองแดงของสเปกตรัมดังกล่าวแล้วในงานวิจัยนี้ได้อาศัยโปรแกรม SIMNRA ช่วย โดยให้ input data คือ setup ของการทดลอง ส่วนเป้าก็คือ Cu-Au/Si ที่เราทราบความหนาของทองแดงและทองที่เคลือบบนซิลิกอนจากการทำการทดลองจากวิธีการของ Conventional RBS (Singkarat et al., 2001) โดยอนุภาคกระสุนคืออัลฟาพลังงาน 2.0 MeV จะได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการ simulate ด้วยโปรแกรม SIMNRA โดยอนุภาคกระสุนเป็น อนุภาคดิวทีรอนพลังงาน 140 keV และเป้าประกอบด้วยทองแดงและทองที่เคลือบอยู่บนซิลิกอน ด้วยความหนาเท่ากับ 88.2×10^{15} และ 61.5×10^{15} atom/cm² ตามลำดับ

ค่า mass resolution ที่ได้จากการคำนวณและจากการ simulate ด้วยโปรแกรม SIMNRA นั้นได้แสดงให้เห็นว่าระบบ TOF-RBS นี้มีค่า mass resolution ที่ยังไม่ดีพอ แต่ถ้ระบบนี้ได้เปลี่ยน อนุภาคกระสุนเป็น อนุภาคอัลฟาพลังงาน 280 keV จะพบว่าระบบ TOF-RBS จะมีค่า mass resolution ดีขึ้น จากการใช้โปรแกรมนี้ โดยเงื่อนไขของการทดลองเหมือนเดิม เพียงแต่เปลี่ยนค่า detector resolution ใน Setup menu เป็น 7.5 keV ที่สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.45 โดย Δt ของระบบมีค่าเท่ากับ 7.4 ns โดยสมมุติว่าระบบ TOF-RBS นี้ยังคงมีประสิทธิภาพเช่นเดิมเพียงแต่ เปลี่ยนแค่อนุภาคกระสุนและพลังงานจลน์เริ่มต้นของอนุภาคกระสุนเท่านั้น ซึ่งพบว่า ระบบTOF-RBSที่ใช้อนุภาคอัลฟานี้สามารถแยกธาตุทองออกจากทองแดงได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการ simulate ด้วยโปรแกรม SIMNRA โดยอนุภาค กระสุนเป็นอัลฟาพลังงาน 280 keV และเป้าประกอบด้วยทองแดงและทองที่เคลือบอยู่บนซิลิกอน ด้วยความหนาเท่ากับ 88.2×10^{15} และ 61.5×10^{15} atom/cm² ตามลำดับ