

เอกสารอ้างอิง

1. Ali Omar, M. Elementary solid State Physics. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., 1975.
2. Backenstoss, G. "Evaluation of The Surface Concentration of Diffused Layers in Silicon." The Bell System Technical Journal. (May 1958): 699-710.
3. Beyer, K.D. "A New Paint-On Diffusion Source!" Journal of the Electrochemical Society. (October 1976): 1556-1560.
4. Brown, W.L., Higinbotham, W.A., Miller, G.L. and Chase, R.L. Semiconductor Nuclear-Particle Detectors and Circuits. National Academy of Sciences, 1969.
5. Burger, R.M. and Donovan, R.P. Fundamentals of Silicon Integrated Device Technology. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1967.
6. Chandler, T.C., Faust, J.W. and Hilborn, R.B. "Debris-Induced Effects from Spin-On Diffusion Sources!" Journal of Electrochemical Society. (December 1979): 2216-2220.
7. Dearnaley, G. "Nuclear Radiation Detection by Solid State Devices." Journal of Science Instrumentation. 43(1966): 6.1-6.9.
8. Dearnaley, G. and Northrop, D.C. Semiconductor Counters for Nuclear Radiations, New York : John Wiley & Sons, Inc., 1963.
9. Facchini, U., Forte, M., Malvicini, A and Rossini, T. "Analysis of U and Th Minerals by Alpha Spectrum." Nucleonics. 14 (September 1956): 126-131.
10. Grove, A.S. Physics and Technology of Semiconductor Devices. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967.

11. Hofker, W.K. "Semiconductor Detectors for Ionizing Radiation."
Philips Technical Review. 27(1966):323-326.
12. Miller, G.L. "The Physics of Semiconductor Radiation Detectors."
Laboratory Manual A. Semiconductor Detectors and Associated Electronics. (November 1968):1.4-1.28.
13. Moncaster, M.E., Northrop, D.C. and Raines, J.A. "A Semiconductor Monitor for Nuclear Radiations." Nuclear Instruments and Methods.
22(1963): 157-164.
14. Runyan, W.R. Semiconductor Measurements and Instrumentation. Tokyo : McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
15. Sze, S.M. Physics of Semiconductor Devices. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1969.
16. Smits, F.M. "Measurement of Sheet Resistivities with The Four- Point Probe." The Bell System Technical Journal. (May 1958):
711-718.
17. Wolf, F. Silicon Semiconductor Data, Hungary: Pergamon Press, Inc., 1969.
18. William Burford, B. and Gray Verner, H. Semiconductor Junctions and Devices. New York: McGraw-Hill, Inc., 1965.
19. William Price, J. Nuclear Radiation Detection. New York: McGraw-Hill Inc., 1964.
20. ORTEC Inc. "Decay Ratios for Am-241." ORTEC Application Note.
U.S.A. , 1971.
21. Solid-State Electronics Laboratory Manual. University of Cincinnati,
U.S.A.
22. Trademark of Allied Chemical Co. Accuspin Spin-On Dopant Solutions.
U.S.A., 1973.

23. Veeco Instruments Inc. Operation & Maintenance of Four Point Probe Model FPP-100. New York.
24. Information published by Research Triangle Institute. 1 : 2-4.
25. ประมวล วงศ์ภูงา "การศึกษาและการใช้แอนโนดออกซิเดชัน เพื่อหาอิมเพียวริตีโปรไฟล์" วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต แผนกวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 2523

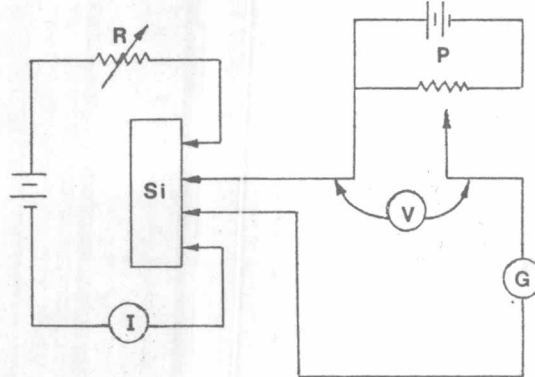


ภาคผนวก ก.

ก.1 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยใช้ Four-point probe

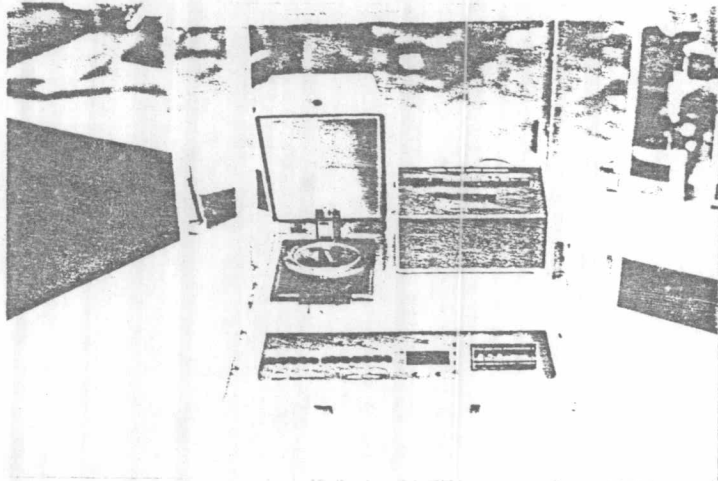
จุดประสงค์ เพื่อวัดชนิดของพาหะ และความต้านทานจำเพาะของผลึกสารกึ่งตัวนำ โดยใช้ Four-point probe model FPP-100

วิธีวัดความต้านทานจำเพาะที่นิยมกันมากที่สุด คือ การใช้ Four-point probe ซึ่งประกอบด้วย probe ที่ทำด้วยโลหะจำนวน 4 ขา และวางห่างกันด้วยระยะเท่า ๆ กัน เมื่อกดให้สัมผัสกับผิวแวนผลึกพอลดี จะมีกระแส I ไหลผ่าน probe 2 ขาด้านนอก และเหนี่ยวนำให้เกิด voltage drop V คร่อม probe 2 ขาด้านใน ซึ่งสามารถวัดค่าได้โดยใช้ null-type detector ดังแสดงไว้ในรูปที่ ผ. 1



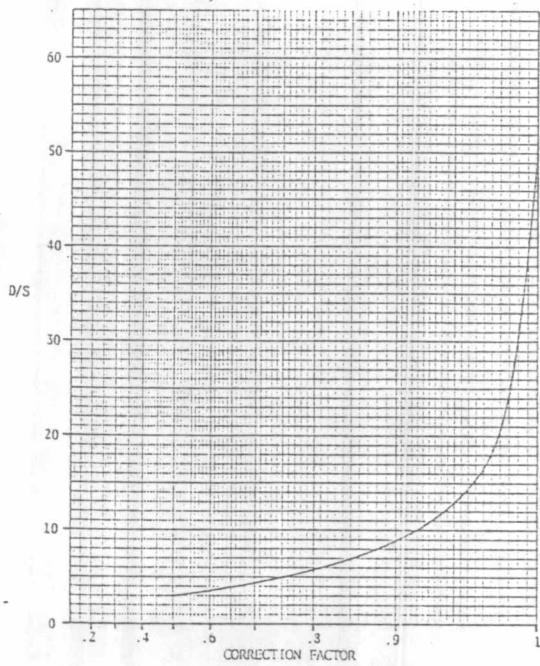
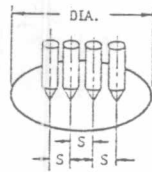
รูปที่ ผ.1 วงจรวัดความต้านทานจำเพาะโดยใช้ Four-point probe (21)

สำหรับ Four-point probe model FPP-100 มีลักษณะดังรูปที่ ผ. 2 และเงื่อนไขในการใช้งานได้แสดงไว้ในรูปที่ ผ.3



รูปที่ น.2 Four-point probe model FPP-100

D/S	CORR.
∞	1.00
40	.995
20	.979
15	.963
10	.920
7.5	.866
5.0	.742
4.0	.646
3.0	.500

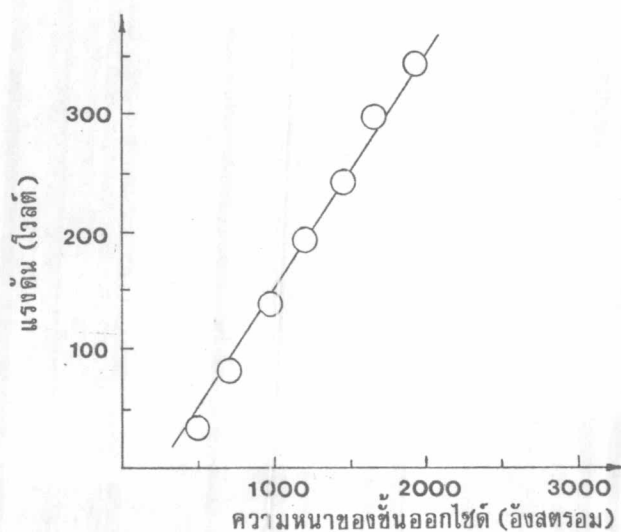


รูปที่ น.3 Geometry correction (23)

ก. 2 การวัดความลึกของหัวต่อพี-เอ็นโดยวิธีแอนโนดิกออกซิเดชัน (25)

จุดประสงค์ เพื่อหาความลึกของหัวต่อพี-เอ็น โดยอาศัยหลักการลอกผิวชั้นแพร่ซึม

แอนโนดิกออกซิเดชันเป็นกระบวนการแบบเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) เพื่อใช้สร้างชั้นออกไซด์ที่ขั้วแอนโนด ความเร็วในการสร้างชั้นออกไซด์ ความหนาของชั้นออกไซด์และคุณภาพของชั้นออกไซด์ควบคุมได้จากปริมาณความหนาแน่นของกระแส แรงดันคร่อมขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้ผสมน้ำปริมาณต่าง ๆ กัน จากผลการสร้างชั้นออกไซด์แบบแอนโนดิกออกซิเดชัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความหนาของชั้นออกไซด์ (ดังรูปที่ ผ. 4) นอกจากนี้แอนโนดิกออกซิเดชันยังมีข้อดีคือ เป็นการสร้างชั้นออกไซด์โดยไม่ใช้ความร้อน ดังนั้นจึงไม่เกิดการ redistribution ของสารเจือปนที่แพร่ซึมในแว่นผลึกในระหว่างกระบวนการสร้างชั้นออกไซด์ด้วย จึงเหมาะที่จะนำไปใช้หาความลึกของหัวต่อ กล่าวคือหลังจากสร้างชั้นออกไซด์ให้มีความหนาตามความเหมาะสมขึ้นแล้ว ก็นำไปลอกชั้นออกไซด์ออกด้วยสารเคมี แล้ววัดค่าความต้านทานจำเพาะโดยใช้ Four-point probe บันทึกค่าเอาไว้ ต่อจากนั้นก็นำไปสร้างชั้นออกไซด์ซ้ำอีก จนกระทั่งค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้ใกล้เคียงกับความต้านทานจำเพาะของแว่นผลึกก่อนการแพร่ซึม ถือว่าตำแหน่งนั้นคือความลึกของหัวต่อ และเนื่องจากไม่มีความร้อนเข้ามาทำให้เกิดการ redistribution ดังนั้นความลึกของหัวต่อที่วัดได้นี้จึงเป็นค่าที่แท้จริง



รูปที่ ผ.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคร่อมขั้วแอนโนด-คาโทดกับความหนาของชั้นออกไซด์ (25)

ในการทดลองนี้กำหนดให้สร้างชั้นออกไซด์แต่ละครั้งหนาประมาณ 1000 \AA ระบบเครื่องมือที่ใช้แสดงในรูปที่ ผ. 5 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีส่วนผสมของ

- ethylene glycol 205 ลบ.ซม.
- น้ำ 20 ลบ.ซม.
- KNO_3 หนัก 1 กรัม

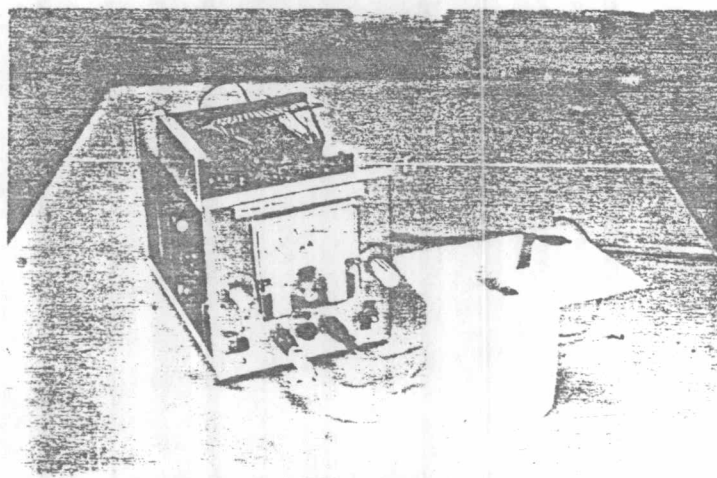
แรงดันที่ใช้สร้างออกไซด์หนา 1000 \AA มีค่าเท่ากับ 150 โวลต์ (รูปที่ ผ.4)

กระแสมีค่าเท่ากับ 7 มิลลิแอมป์

ขั้วแอนโนด-คาโทดอยู่ห่างกัน 2 ซม.

ชั้นออกไซด์ที่ได้จะเป็นสีม่วง (violet)

เมื่อได้ชั้นออกไซด์หนาตามความต้องการแล้วก็นำไปกัดออกไซด์ออก ต่อจากนั้นใช้ Four-point probe วัดค่าความต้านทานจำเพาะของแผ่นผลึก แล้วนำไปสร้างชั้นออกไซด์หนา 1000 \AA ซ้ำอีก จนกว่าจะได้ค่าความต้านทานจำเพาะใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ก่อนการแพร่ซึมจึงหยุดสร้างชั้นออกไซด์ ความลึกของหัวต่อหาได้จากผลรวมของความหนาของชั้นออกไซด์ทั้งหมดคูณด้วยแฟคเตอร์ 0.42⁽¹⁰⁾



รูปที่ ผ.5 ระบบเครื่องมือสร้างชั้นออกไซด์ด้วยวิธีแอนโนดิกออกซิเดชัน

ก.3 การวัดความลึกของหัวต่อพี-เอ็นโดยวิธีเซาะร่อง⁽²¹⁾

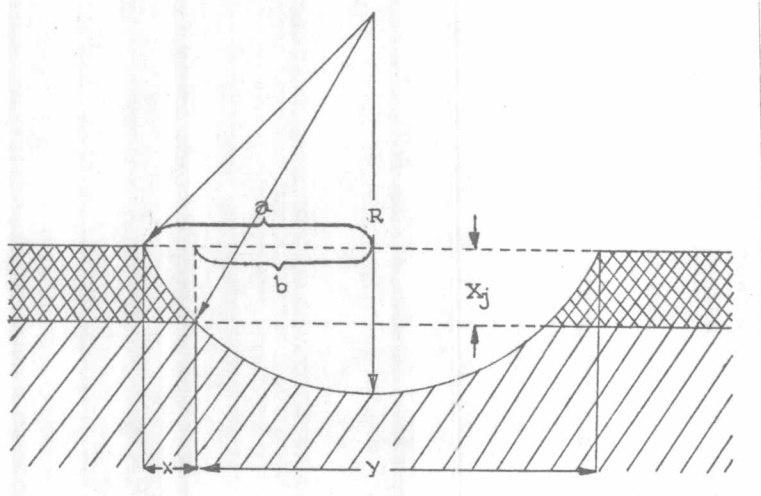
จุดประสงค์ เพื่อวิเคราะห์ขอบเขตของหัวต่อพี-เอ็น โดยอาศัยการย้อมสี และวัดความลึกของหัวต่อ โดยใช้กล้องไมโครสโคป

สารเคมี วัสดุ และ เครื่องมือ

1. Hydrofluoric Acid, 49%, Electronic Grade
2. Nitric Acid, Conc., Electronic Grade
3. Tri chloro ethylene (TCE) Electronic Grade
4. Acetone
5. D.I. Water
6. Apeizon wax
7. 0.3μ Al_2O_3 lapping powder
8. Hot plate
9. A grooving equipment
10. Microscope

การวัดความลึกของหัวต่อโดยใช้สารเคมีในการย้อมสีนั้นก็เพื่อแยกชั้นของรอยต่อออกมาให้เห็นอย่างชัดเจนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนชั้นเอ็น และชั้นพี เป็นไปด้วยอัตราความเร็วที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นสีที่ปรากฏบนผิวแวนผลึกจึงแตกต่างกัน ทำให้เกิดเส้นแบ่งเขตชั้นเป็นการบ่งบอกถึงตำแหน่งของหัวต่อพี-เอ็น

สำหรับการทดลองนี้ได้ทำการขัดผิวของแวนผลึกซิลิกอนโดยใช้วิธีเซาะร่อง (grooving) เพื่อวัดหาความลึกของหัวต่อ วิธีนี้เหมาะสำหรับหัวต่อตัน ๆ โดยใช้แท่งทรงกระบอกขัดถูภาคตัดขวางของชิ้นแพร่ซึมให้เป็นรูปลานโค้ง ดังแสดงไว้ในรูปที่ ผ. 6 แกนของทรงกระบอกที่ใช้ขัดต้องตรงไว้ไม่ให้เปลี่ยนตำแหน่ง



รูปที่ ผ.6 พื้นที่ภาคตัดขวางของแวนผลึกที่ถูกขัดผิวโดยวิธีเซาะร่อง (21)

จากรูปสามารถคำนวณหาความลึกของหัวต่อได้ดังนี้

$$x_j = \sqrt{R^2 - b^2} - \sqrt{R^2 - a^2}$$

$$= \frac{xy}{D}$$

ในที่นี้ $D = 2R =$ เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทรงกระบอกที่ใช้ขัด

การทดลอง

ขั้นตอนการเซาะร่องมีดังนี้

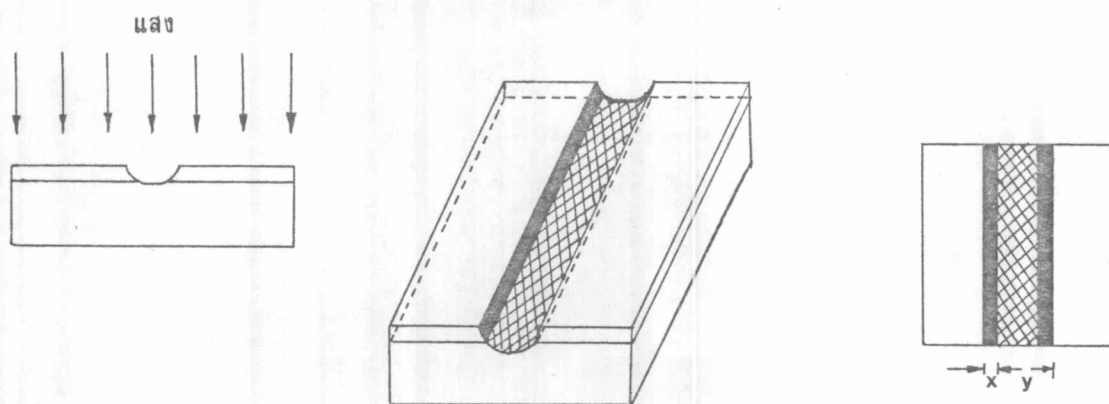
1. นำแวนผลึกซิลิกอนที่ผ่านขั้นตอนการแปรซึมมาแล้วติดตั้งบนแผ่นโลหะที่ร้อนและมี wax ทาติดอยู่เป็นแผ่นบาง ๆ อย่างสม่ำเสมอ
2. ทำแผ่นโลหะร้อนให้เย็น โดยแช่ส่วนล่างลงในน้ำประมาณ 2-3 นาทีแล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2 เตรียมไว้สำหรับขัดผิว

3. ทาผง Al_2O_3 ซึ่งอยู่ในลักษณะ เป็นของเหลวลงบนแท่งทรงกระบอกที่ใช้เป็นตัววัด
4. นำแว่นผลึกที่ติดอยู่บนแผ่นโลหะ เข้าสู่แท่นยึด และปรับให้ผิวของแว่นผลึกแนบสนิทกับแท่งทรงกระบอกพอดี
5. เปิดสวิชส์ให้แท่งทรงกระบอกหมุน ใช้เวลาขีดประมาณ 20-30 นาที
6. แกะแว่นผลึกออกจากแผ่นโลหะ เตรียมพร้อมสำหรับการย้อมสี

ขั้นตอนการย้อมสีมีดังนี้

1. ผสมน้ำยาเคมีที่ใช้สำหรับย้อมสีประกอบด้วย fuming HNO_3 2-3 หยดผสมกับ HF conc. 10 มิลลิลิตร
2. นำแว่นผลึกที่ผ่านการเขาระ่องล้างให้สะอาดด้วย Trichloro ethylene, Acetone และน้ำ D.I. แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2
3. หยดน้ำยาย้อมสีลงบนรอยขีด รอประมาณ 3-5 วินาที
4. ล้างด้วยน้ำ D.I. แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2 นำไปส่องดูด้วยกล้องไมโครสโคป

การวัดความลึกของหัวต่อโดยใช้กล้องไมโครสโคปนั้น ต้องให้แสงที่มีความถี่เดียว (monochromatic light) ตกกระทบตั้งฉากกับแว่นผลึกซิลิกอน แสงสะท้อนที่มองเห็นด้วยกล้องไมโครสโคปจะมีลักษณะ เป็นแถบสีที่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างน้ำยาย้อมสีกับชนิดของสารเจือปน ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปข้างล่างนี้



รูปที่ ผ.7 ลักษณะของแถบสีที่ปรากฏหลังการย้อมสี (21)

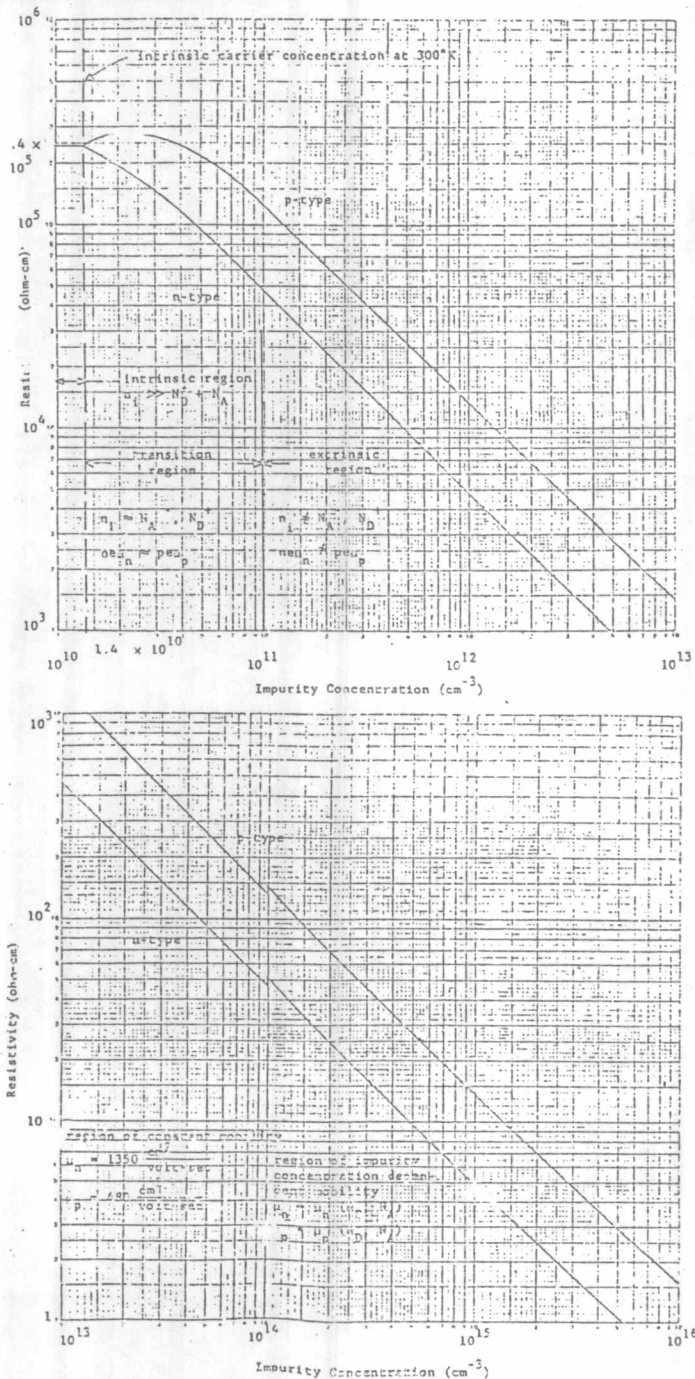
วัดค่า x และ y โดยใช้กล้องไมโครสโคป แล้วนำมาคำนวณหาความลึกของหัวต่อจากสูตร

$$x_j = xy/D$$

จากวิธีการที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ เราก็สามารถวัดความลึกของหัวต่อพี-เอ็นได้โดยใช้วิธีเซาะร่อง

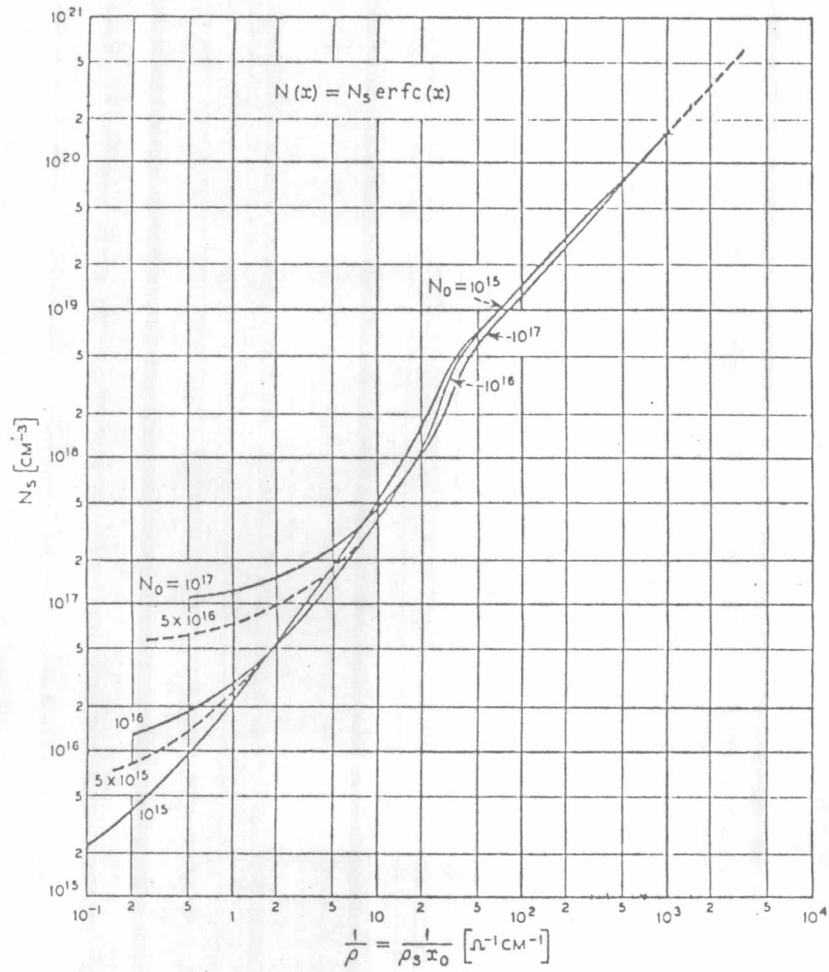
ภาคผนวก ข.

ข. 1 การหาค่าความเข้มข้นของพาหะของซิลิกอน



รูปที่ ผ.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานจำเพาะกับค่าความเข้มข้นของพาหะของซิลิกอนที่อุณหภูมิ 300 K (24)

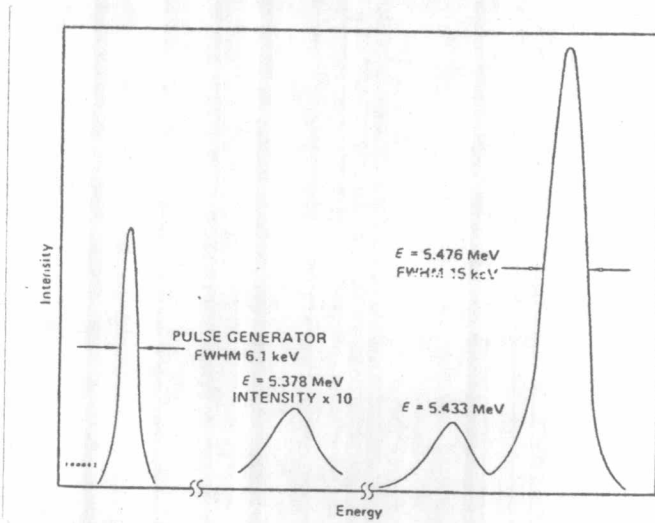
ข. 2 การหาค่าความเข้มข้นของพาหะแพร่ซึมบนผิวซิลิกอน



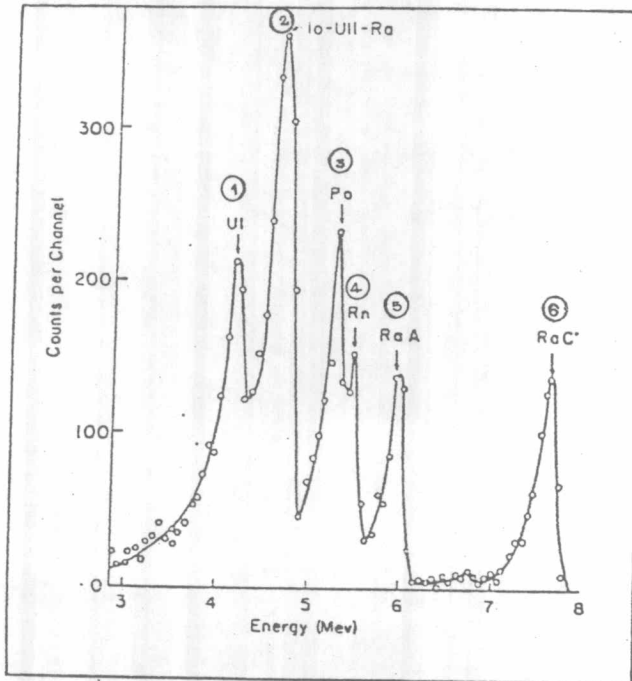
รูปที่ ผ.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำจำเพาะ (1) กับค่าความเข้มข้นของพาหะบนผิว (N_s) สำหรับชั้นพาหะชนิดเอ็นและเป็นแบบ complementary error function distribution (2)

ภาคผนวก ค.

ค.1 สเปกตรัมของรังสีเอมอริเซียม (Am-241) และเรเดียม (Ra-226)



รูปที่ ผ.10 สเปกตรัมของรังสีเอมอริเซียม (20)



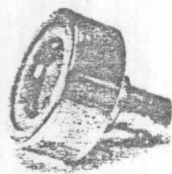
รูปที่ ผ.11 สเปกตรัมของรังสีเรเดียม (9)

จากรูปที่ ผ. 11 ธาตุยูเรเนียม (U-238) จะสลายตัวให้ธาตุต่าง ๆ อีกหลายชนิด และ
รับสีของแต่ละธาตุมีค่าพลังงานดังต่อไปนี้

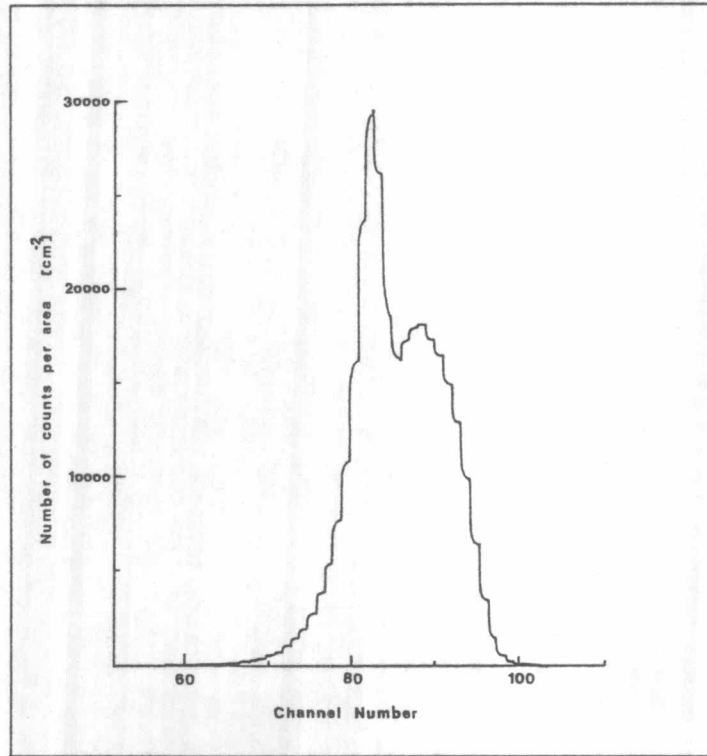
ยอดที่ 1	U-238	พลังงาน	4.20 MeV
ยอดที่ 2	Ra-226	พลังงาน	4.78 MeV
ยอดที่ 3	Po-210	พลังงาน	5.30 MeV
ยอดที่ 4	Rn-222	พลังงาน	5.49 MeV
ยอดที่ 5	Po-218 (RaA)	พลังงาน	6.00 MeV
ยอดที่ 6	Po-214 (RaC')	พลังงาน	7.69 MeV

ค. 2 ตัววัดรังสีอัลฟามาตรฐานแบบ surface barrier

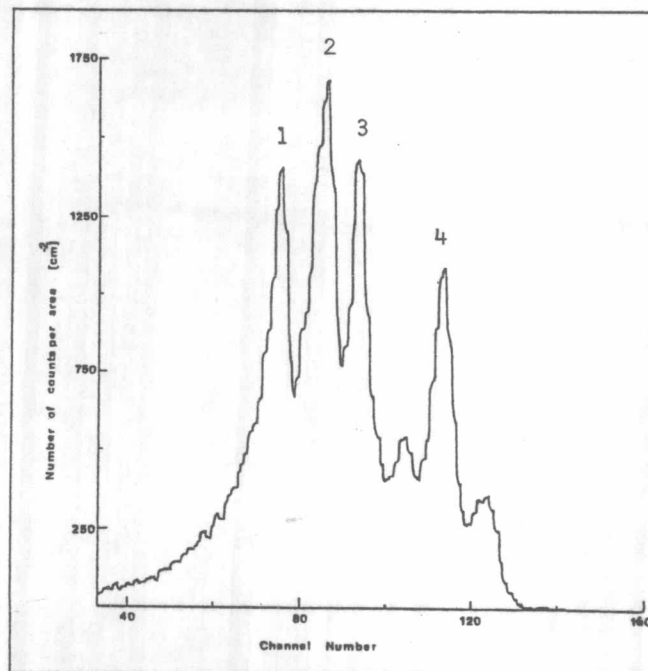
รูปร่างลักษณะของตัววัดรังสีอัลฟาแบบ surface barrier ที่สั่งซื้อจากต่างประเทศได้แสดง
ไว้ดังรูปที่ ผ. 12 เมื่อนำไปทดสอบกับรังสีเอมริเซียม (Am-241) และเรเดียม (Ra-226)
(แหล่งกำเนิดเป็นแบบ point source) จะให้ผลตอบสนองทางรังสีดังรูปที่ ผ. 13 และ ผ. 14 ตามลำดับ
สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสรุปไว้ในตารางที่ ผ. 1



รูปที่ ผ. 12 ตัววัดรังสีอัลฟามาตรฐานแบบ surface barrier



รูปที่ ผ.13 ผลตอบสนองทางรังสีของตัววัดฯ แบบ surface barrier ที่มีต่อรังสี
อเมอริเซียม



รูปที่ ผ.14 ผลตอบสนองทางรังสีของตัววัดฯ แบบ surface barrier ที่มีต่อรังสี
เรเดียม

ตารางที่ ผ.1 คุณสมบัติทางรังสีของตัวตรวจจับอัลฟามาตรฐานแบบ surface barrier

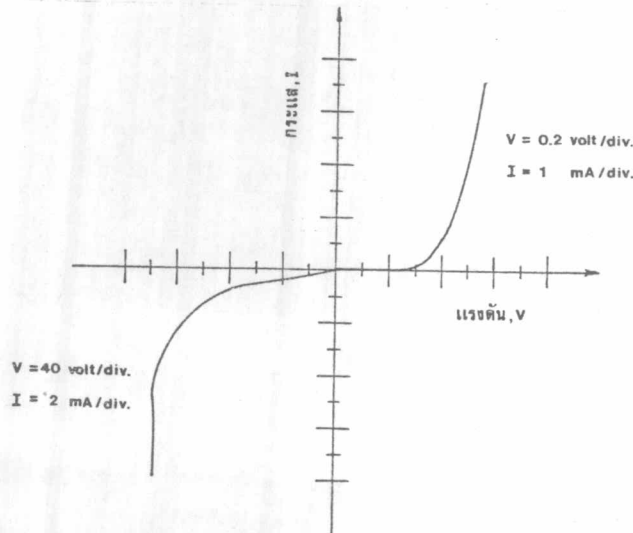
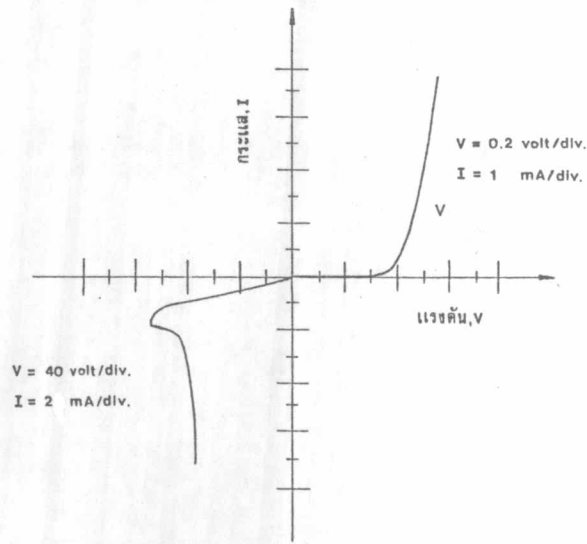
พื้นที่รับรังสี (ตร.ซม)	แรงดันไบแอสย้อน ที่เหมาะสมในการใช้งาน (โวลต)	จำนวนนับปริมาณรังสี อเมอริเซียมต่อ ตร.ซม.	FWHM (keV)	จำนวนนับปริมาณรังสีเรเดียมต่อ ตร.ซม.			
				ยอดที่ 1 4.78 MeV	ยอดที่ 2 5.30 MeV	ยอดที่ 3 6.00 MeV	ยอดที่ 4 7.69 MeV
2	50	29902	313	1417	1701	1440	1094

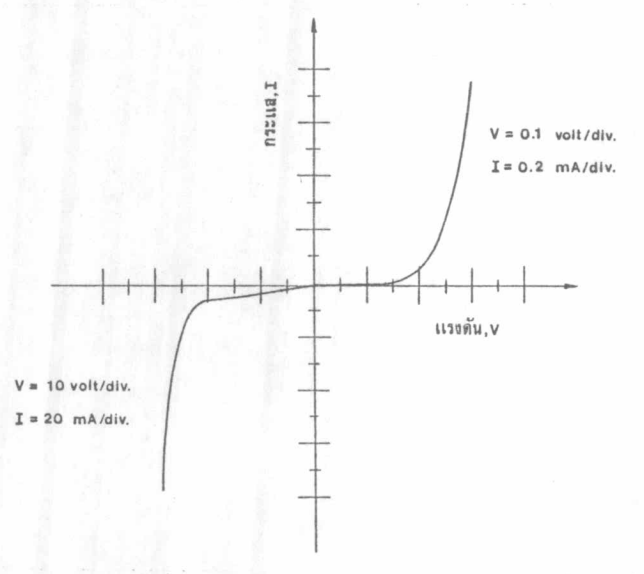
หมายเหตุ แหล่งกำเนิดรังสีและตัวตรวจจับ อยู่ห่างกัน 1 ซม.

ภาคผนวก ง.

ง. 1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัววัดรังสีอัลฟาทั้ง 3 ตัวอย่างที่สร้างขึ้น

ผลจากการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัววัดฯ ทั้ง 3 ตัวอย่าง ปรากฏว่าได้ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันดังรูปที่ ผ. 15

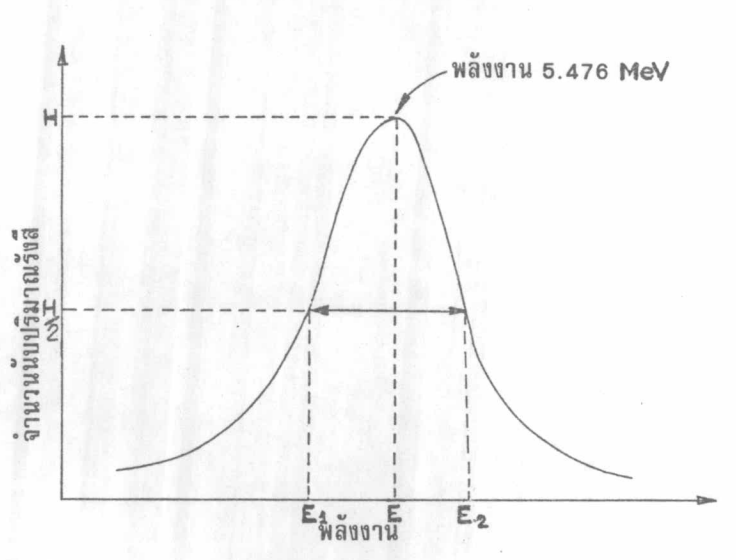




รูปที่ ผ.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตัววรั้งสี่อัลฟาทั้ง 3 ตัวอย่างที่สร้างขึ้น

ง. 2 วิธีคำนวณหาค่า Full Width at Half Maximum (FWHM)

นำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบผลตอบสนองทางรังสีของตัววัดรังสีอัลฟาทั้ง 3 ตัวอย่างมาเขียนกราฟ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอนุภาคอัลฟา กับจำนวนนับปริมาณรังสี (number of counts) รูปกราฟที่ได้จะเป็นสเปกตรัมของรังสีที่ใช้ทดสอบ สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นสเปกตรัมของอเมอริเซียม (Am-241) ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่มีพลังงาน 5.476 MeV (สเปกตรัมมีเพียงยอดเดียว) ดังแสดงในรูปที่ ผ. 16



รูปที่ ผ.16 สเปกตรัมของอเมอริเซียมสำหรับใช้หาค่า FWHM

ค่า FWHM ก็คือ ความกว้างของสเปกตรัมที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของจำนวนนับปริมาณรังสีที่วัดได้ทั้งหมดภายในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ดังนั้นจากรูปที่ ผ. 16 จะเห็นว่า FWHM มีค่าเท่ากับ $E_2 - E_1$ ค่านี้เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของตัววัดฯ ว่ามีความสามารถในการแยกพลังงานได้มากน้อยเพียงใด ค่า FWHM ยิ่งน้อย ความสามารถในการแยกพลังงานของตัววัดฯ จะยิ่งดีขึ้นเป็นลำดับ

ง. 3 วิธีคำนวณหาความกว้างของเซตปลอดพาหะ

ความกว้างของเซตปลอดพาหะสามารถคำนวณได้จากค่าความจุของหัวต่อพี-เอ็น โดยอาศัยสมการที่ (2.37) คือ

$$C = \frac{XA}{4\pi x}$$

$$x = \frac{XA}{4\pi C}$$

ในที่นี้ x คือ ความกว้างของเซตปลอดพาหะ มีหน่วยเป็น ซม.

C คือ ความจุของหัวต่อพี-เอ็น มีหน่วยเป็น pF

X คือ dielectric constant ของซิลิกอน มีค่าเท่ากับ 11.7

A คือ พื้นที่รับรังสีของตัววัดฯ มีหน่วยเป็น ตร.ซม.

ตัวอย่างการคำนวณ

ให้คำนวณหาความกว้างของเซตปลอดพาหะของตัววัดรังสี ในเมื่อป้อนแรงดันไบแอสย้อน 100 โวลต์ให้กับตัววัดฯ แล้วทำให้มีค่าความจุของหัวต่อเท่ากับ 30 pF พื้นที่รับรังสีของตัววัดฯ เท่ากับ 1 ตร.ซม.

จากสูตร

$$x = \frac{XA}{4\pi C}$$

$$= \frac{11.7 \times 1}{4\pi \times 30}$$

$$= 0.0310 \quad \text{ซม.}$$

ความกว้างของเซตปลอดพาหะ 310 ไมครอน



ประวัติผู้เขียน

นาย พรพิทักษ์ โภธิเวชกุล เกิดเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2500 ณ จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาชั้นบัณฑิต จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปี พ.ศ. 2522 แล้วเข้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในขณะที่ศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ได้มีโอกาสเสนอผลงานวิจัยในการประชุมและแสดง นิทรรศการทางวิชาการ เรื่อง วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาประเทศ ณ มหาวิทยาลัย-มหิดล ในปี พ.ศ. 2523