ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์	ฟิสิกส์
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริง

Study of Al-Cu Thin Film Deposited by RF Sputtering Process

นามผู้วิจัย นายอดุล ดือราแม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

(รองศาสตราจารย์สุปรียา ตรีวิจิตรเกษม, Dr.Ing.)

หัวหน้าภาควิชา ....

(อาจารย์ วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ .... **เดือน** .... **พ.ศ.** ....

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริง

Study of Al-Cu Thin Film Deposited by RF Sputtering Process

โดย

นายอดุล ดือราแม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อดุล คือราแม 255 4: การศึกษาฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดงที่เคลือบด้วยกระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์สุปรียา ตรีวิจิตรเกษม, Dr.Ing. 92 หน้า

ฟิล์มบางอลูมิเนียม ฟิล์มบางทองแดง และฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดงที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง ใช้ความดันก่อนการเคลือบฟิล์มประมาณ 2×10^{-5} mbar ความดันก๊าซอาร์กอนขณะเคลือบประมาณ 8×10^{-3} mbar ใช้เป้าสารเคลือบเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 in เท่ากันและมีความหนาขนาด 0.125 in และ 0.188 in ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มมี 4 ค่า คือ 170, 180 , 190 และ 200 W และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มอลูมิเนียม และฟิล์มทองแดง 3 ช่วง คือ 1.5 , 3 และ 4.5 ชั่วโมง ปรากฏว่าฟิล์มบางทองแดงมีความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มมากกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม โดยความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ตามกำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่เพิ่มขึ้น

การเคลือบฟิล์มบางทองแดงบนฟิล์มบางอลูมิเนียมที่กำลังไฟฟ้าเท่ากัน 4 ค่าและใช้เวลาในการเคลือบ 3.0 ชั่วโมง ได้จากฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง เมื่อศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 ^{o}C เป็นเวลา 5 ,10 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มบางทุกตัวอย่างปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ของอลูมิเนียม สำหรับ ฟิล์มบางที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าทั้ง 4 และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 200 ^{o}C นาน 5, 10 ชั่วโมง ปรากฏพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พีคที่สองของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ที่มุม $2\theta \approx 42.85\ ^{O}C$ มีขนาดเกรน $D_{112} \approx 73$ nm โดยขนาดเกรนและความเข้มการเลี้ยวเบนของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu มีค่ามากขึ้น ตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่สูงขึ้นและอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 200 ^{o}C นาน 10 ชั่วโมง

สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ที่หาด้วยวิธีหัววัดสี่จุด พบว่า ฟิล์มบางมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงตามกำลังไฟฟ้า ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่สูงขึ้น และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ 200 ^{o}C - 500 ^{o}C นาน 10 ชั่วโมง โดยฟิล์มบางมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยอยู่ในช่วง 1.1 – 1.6 $m\Omega.m$

______________________ ______________________________ __ / ___ / ___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Adul Dearamea 2011: Study of Al-Cu Thin Film Deposited by RF Sputtering Process. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Associate Professor Supreya Trivijitkasem, Dr.Ing. 92 pages.

Al, Cu and Al-Cu thin films were deposited on glass slides by RF sputtering process with typically based pressure of 2 x 10 $^{-5}$ mbar and the deposited argon pressure of 8 x 10^{-3} mbar. 99.9 % purity of Al and Cu targets of 3 in diameter, 0.188 in and 0.318 in thickness, respectively, were used The deposition power was 170, 180, 190 and 200 W and the deposition time was 1.5, 3.0 and 4.5 h. The results showed that the thickness and the deposition rate of the film increased as deposition power and deposition time. At a giving deposition power and deposition time, the thickness and the deposition rate of the Cu thin film were higher than Al thin film.

The Al-Cu thin film were obtained by deposited Cu thin film on Al thin film at the same deposition power and 3 h deposition time. X-ray diffraction, XRD was applied to examined the microstructure of Al-Cu film which annealed at 200, 300, 400 and 500 ^{o}C for 5 , 10 h. It was found that each Al-Cu thin film showed diffraction peak of (111) plane of Al phase. The Al-Cu thin film deposited at 170, 180, 190 and 200 W, annealed at 200 ^{o}C for 5, 10 h showed diffraction peak of (112) plane of Al_2Cu phase at Bragg angle, $2\theta \approx 42.85$ ^{o}C with the grain size $D_{112} \approx 73$ nm. The grain size and the intensity of (112) diffraction peak increased as the increased deposition power which annealed at 200 ^{o}C for 10 h.

Resistivity of the Al-Cu thin film determined from 4 point-probe method showed that the resistivity decreased as the increased deposition power, annealed temperature and annealed time. The Al-Cu thin film deposited at 200 W, annealed at 200 – 500 ^{o}C for 10 h provided lower resistivity ρ of 1.1 – 1.6 mΩ.m.

____________________ ____________________ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สุปรียา ตรีวิจิตรเกษม ประธานกรรมการที่ปรึกษาซึ่งได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งตรวจและแนะนำการแก้ไขวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน สำหรับการอบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและด้านอื่นๆ พร้อมทั้งประสบการณ์อันเป็นประโยชน์

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และ ผศ .ดร.สุรศักดิ์ เชียงกา ประธานกรรมการสอบ สำหรับคำปรึกษาและแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ พระเจ้า บิดา มารดา สำหรับ ปัจจัยต่างๆและความ ช่วยเหลือ ดูแล เกื้อหนุนสำหรับช่วงเวลาการศึกษาและช่วงเวลาทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุ ณสำนักหอสมุดมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน สำหรับแหล่งค้นคว้าข้อมูลการวิจัยและอำนวยความสะดวกในการค้นคว้าข้อมูลการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัยและปฏิบัติการสารตัวนำยวดยิ่งและพอลิเมอร์ ห้องปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้า-แม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน สำหรับการปฏิบัติการทดลองในการทำการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ปฏิบัติการวิทยารังสีเอกซ์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำหรับการปฏิบัติการทดลองในการทำการศึกษาและวิจัยในครั้งนี้

อดุล ดือราแม

มิถุนายน 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	38
สรุป	74
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม	80
ภาคผนวก ข ตารางค่ามาตรฐานของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมและทองแดง	82
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณระยะระหว่างระนาบ แลตทิซพารามิเตอร์และขนาดเกรนของฟิล์ม	84
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม	86
ภาคผนวก จ ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุม SPC 2011	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติบางประการของอลูมิเนียมและทองแดงบริสุทธิ์	20
2	รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง	29
3	ความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม R ที่คำนวณจากข้อมูลผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม	39
4	ความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม R ที่คำนวณจากข้อมูลผลการเคลือบฟิล์มบางทองแดง	40
5	เปรียบเทียบความหนา th ของฟิล์ม และอัตราการเคลือบฟิล์ม R ของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางทองแดง ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็น เวลา t ชื่อและสัญลักษณ์ที่ใช้แทนฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง (Al – Cu)	44
6	ความเข้ม I ของระนาบ hkl ที่มุมแบรกก์ ความกว้างของมุม ที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด B และขนาดเกรน D_{hkl} ของฟิล์มบางอลูมิเนียม ฟิล์มบางทองแดง และฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง PXt / T-t$'$ ซึ่งอบความร้อนที่อุณหภูมิ T เป็นเวลา $t' =$ 5 ชั่วโมง	56
7	ความเข้ม I ของพีคที่มุมแบรกก์ 2θ แลตทิซพารามิเตอร์ a และความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูง B ขนาดเกรน D_{hkl} ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง **PXt / T-t$'$** ซึ่งอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T เป็นเวลา t' เท่ากับ 10 ชั่วโมง	58
8	ความต่างศักย์ V ที่วัดได้ที่ค่ากระแสไฟฟ้า I และสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ของฟิล์มบางอลูมิเนียม–ทองแดง PXt / T-t$'$ ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนเป็นเวลา $t' =$ 5 ชั่วโมง	65
9	ความต่างศักย์ V ที่วัดได้ที่ค่ากระแสไฟฟ้า I และสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ของฟิล์มบางอลูมิเนียม–ทองแดง PXt / T-t$'$ ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนเป็นเวลา $t' =$ 10 ชั่วโมง	67

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่ หน้า

ข1 ค่ามาตรฐานรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมและทองแดงที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า fcc 82

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (ก) การทำให้อะตอมหรือโมเลกุลหลุดจากเป้าสารเคลือบ (ข) ไอสารเคลือบตกบนวัสดุรองรับ (ค) การพอกพูนและเติบโตของฟิล์มบาง	13
2	แผนภาพภายในระบบอาร์เอฟสปัตเตอริง	14
3	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (ก) แบบวนเป็นเกลียว (ข) แบบกระโดด	17
4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ยีลด์ และอัตราการเคลือบกับความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในระบบสปัตเตอริง	18
5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I กับศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ V ของพลาสมา (ก) ที่สภาวะเริ่มต้น และ (ข) ที่สภาวะสม่ำเสมอ	18
6	สารละลายของแข็งอลูมิเนียม-ทองแดง αAl	22
7	แผนภาพเฟสสมดุลอลูมิเนียม-ทองแดง	22
8	สารละลายของแข็งเฟส $Al_2Cu(\theta)$ ปะปนอยู่ ใน αAl	23
9	โครงสร้างผลึกของอัลลอยอลูมิเนียม-ทองแดง (ก) Al_2Cu , (ข) Al_3Cu_2 , (ค) AlCu , (ง) $AlCu_3$	23
10	แผนภาพเฟสการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในฟิล์มบางอัลลอย Al – Cu	24
11	การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบอะตอมที่อยู่ถัดกัน	25
12	ความกว้างของพีค B ที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นสูงสุด	26
13	วิธีหัววัดสี่จุดเพื่อใช้หาค่าความต้านทาน	27
14	เครื่องชั่งอย่างละเอียด	30
15	เตาเผาความร้อนสูง	30
16	เครื่องเคลือบฟิล์ม	31
17	เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	31
18	ชุดหัววัดสี่จุด	32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียม และทดสอบฟิล์มบางตัวอย่าง (PXt)	34
20	ความหนา th ของฟิล์มบางอลูมิเนียม PAt และฟิล์มบางทองแดง PCt ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็น เวลา t โดย ○ แทน Al และ ● แทน Cu	42
21	อัตราการเคลือบฟิล์ม R ของฟิล์มบางอลูมิเนียม PAt และฟิล์มบางทองแดง PCt ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็น เวลา t โดย ○ แทน Al และ ● แทน Cu	43
22	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม 17A3.0 ฟิล์มทองแดง 17C3.0 และฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 17X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 170 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	47
23	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 17X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 170 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	48
24	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 18X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	49
25	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 18X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	50
26	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 19X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 190 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	51
27	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 19X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 190 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	52

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
28	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 20X3.0/T-t′ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	53
29	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 20X3.0/T-t′ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 C^0 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	54
30	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 20Xt/T-t′ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา t = 1.5, 3.0 และ 4.5 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300 C^0 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง	55
31	เปรียบเทียบความเข้ม I ของอลูมิเนียมระนาบ (111) และทองแดงระนาบ (200) ในฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งอบที่อุณหภูมิ (T) โดย△,○,□,◇ แทน Al และ ✕,∗,+ แทน Cu ที่อบ 5 ชั่วโมง	61
32	เปรียบเทียบขนาดเกรน D_{hkl} ของอลูมิเนียมระนาบ (111) และทองแดงระนาบ (200) ในฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งอบที่อุณหภูมิ (T) โดย△,○,□, ◇ แทน Al และ ✕,∗,+ แทน Cu ที่อบ 5 ชั่วโมง	63
33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **170 W** ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○, ● แทน การอบที่ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	69
34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **180 W** ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○,● แทน การอบที่ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	70
35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **190 W** ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○, ● แทน การอบที่ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	71

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **200 W** ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○ ,● แทน การอบที่ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	72
37	สภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งอบความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○ , ● แทน การอบที่ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ	73

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การศึกษาฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริง

Study of Al-Cu Thin Film Deposited by RF Sputtering Process

คำนำ

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการเคลือบฟิล์มบางภายใต้ความดันต่ำหลายวิธี เพื่อนำไปใช้ในงานทางการแพทย์ และทางอุตสาหกรรม เทคนิคหนึ่งที่นิยมนำมาใช้เคลือบฟิล์ม ได้แก่ เทคนิคการเคลือบด้วยไอสารทางฟิสิกส์ (Physical Vapour Deposition , PVD) ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ เช่นวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporator) และวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ เป็นวิธีที่ได้ฟิล์มบางที่มีการยึดเกาะดี และมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้น ในวงการอุตสาหกรรมจึงใช้วิธีการเคลือบฟิล์มแบบสปัตเตอริ ง ในการผลิตฟิล์มกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ ฟิล์มตัวนำ และฟิล์มตัวต้านทาน เป็นต้น

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอริงมี 2 แบบคือ วิธีที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการเคลือบฟิล์ม เรียกว่าวิธีดีซีสปัตเตอริง (DC sputtering) และวิธีที่ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับในการเคลือบฟิล์ม เรียกว่าวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง (RF sputtering) การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริ งเป็นวิธีที่นิยมใช้เคลือบฟิล์มทั่วไปมากกว่าวิธีดีซีสปัตเตอริง แต่วิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงให้ปริมาณไอออนของก๊าซน้อยและอัตราการสปัตเตอริงต่ำ วิธีหนึ่งในการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริง คือ การใส่สนามแม่เหล็กให้กับระบบสปัตเตอริง เรียกว่า วิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) หรือเรียกสั้นๆว่า วิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้ความถี่วิทยุ 13.56 MHz ในการเคลือบฟิล์ม

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดงด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยแปรเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ เมื่อนำฟิล์มบางไปอบ (anneal) ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วจึงศึกษาโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค (microstructure) วิเคราะห์ปริมาณธาตุของผลึก และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้าต่างๆ

2. เพื่อศึกษาความเป็นผลึก (crystallinity) ของฟิล์ม ซึ่งอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

3. เพื่อศึกษาขนาดแลตทิซ (lattice) และขนาดเกรน (grain size) ของผลึกในฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

4. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง ด้วยวิธีหัววัดสี่จุด (four-point probe)

ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดงบนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง ที่กำลังไฟฟ้าต่างกัน 4 ค่า คือ 170, 180, 190 และ 200 W โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มต่างกัน 4 ช่วง คือ 1.5, 3.0, 4.5, และ 6.0 ชั่วโมง แล้วศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าทั้ง 4 ค่า ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มต่อความเป็นผลึกของฟิล์มด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ คำนวณขนาดเกรนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การตรวจเอกสาร

ธนัสถา และคณะ (2004) ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ ด้วยวิธีดีซี พลานาร์ แมกนีตรอน สปัตเตอริง (DC planar magnetron sputtering) บนแผ่นรองรับที่เป็นแก้ว และ สเตนเลสเบอร์ 304 โดยใช้อลูมิเนียมบริสุทธิ์ และก๊าซผสมของอาร์กอนกับออกซิเจนเป็นสารเคลือบ ที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน และอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนต่างกัน การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะของฟิล์มด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อทำการเคลือบที่อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 3.0 และ 1.2 cm^3/s ตามลำดับ ฟิล์มที่ได้มีเฟส α-Al_2O_3 ในระนาบ (012) ที่มุม $2\theta = 25.4$ องศา

เบญจพล (2004) ได้เคลือบฟิล์มบาง Copper Phthalocyanine (CuPc) โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง เมื่อศึกษาฟิล์มบางด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic) ในระนาบ(200) โดยสภาพความเป็นผลึกขึ้นกับอุณหภูมิที่แผ่นรองรับในขณะเคลือบฟิล์มบาง เมื่อศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง พบว่าความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนได้ดีคือ 330 และ 620 nm เมื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) พบว่าฟิล์มบางประกอบด้วย CuPc ซึ่งมีขนาดนาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิแผ่นรองรับในขณะเคลือบฟิล์มมีค่ามากขึ้นผลึกจะเปลี่ยนลักษณะจากแผ่นไปเป็นแท่งระดับนาโน

ฉรวุฒิ (2005) ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วย วิธีดีซีสปัตเตอริง และวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้เวลาในการเคลือบเท่ากัน เมื่อศึกษาฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ โดยมีค่าคงตัวแลตทิซ a ระหว่าง 3.9998 – 4.0897 Å และขนาดเกรนของฟิล์มที่เคลือบมีค่าประมาณ 20 – 90 Å เมื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีหัววัดสี่จุด พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มและความเป็นผลึกของฟิล์มบางมีค่าแปรผกผันกับความหนา และฟิล์มอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริงมีความหนามากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง

จิระวัฒน์ (2007) ศึกษาฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยกระบวนการดีซีสปัตเตอริงและอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบฟิล์ม 3 ค่า คือ 100 , 150 และ 200 W และเวลาในการเคลือบฟิล์ม 1 - 3 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริงมีความเป็นผลึก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มากกว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง และความเป็นผลึกของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้อบฟิล์ม เมื่อใช้สมการของเชอร์เรอร์คำนวณขนาดเกรนของฟิล์ม พบว่าได้ผลเช่นเดียวกับความเป็นผลึกของฟิล์ม โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีดีซีสปัตเตอริงมีขนาดเกรนใหญ่กว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง

Liang *et al.* (1979) ได้เคลือบฟิล์มซิลิกอนด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้ซิลิกอนเวเฟอร์เป็นแผ่นรองรับ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าอยู่ในช่วง 12.5 ถึง 14.5 MHz อุณหภูมิระหว่างเคลือบเท่ากับ 25 °C ความดันก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 30 และ 40 mTorr พบว่าความหนาของฟิล์มตัวอย่างเพิ่มขึ้นตามความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า แต่มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้น และความหนาของฟิล์มมีค่าลดลงมากที่ความถี่ 13.56 MHz จากการวัดความเข้มข้นของอาร์กอนในฟิล์มตัวอย่างด้วยเทคนิค Rutherford backscattering พบว่าความเข้มข้นของอาร์กอนและอัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า แต่มีค่าลดลงเมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของฟิล์มบางซิลิกอนเพิ่มขึ้นเมื่อความดันก๊าซอาร์กอนลดลงและความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

Hjortsberg *et al.* (1981) ได้เคลือบฟิล์มบาง อินเดียมออกไซด์ In_2O_3เจือทินออกไซด์ SnO_2 บนกระจก corning 7059 โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนที่อัตราการเคลือบ (deposition rate) ต่างกันและอุณหภูมิแผ่นรองรับต่างกัน เมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปศึกษาสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าฟิล์มบางที่เคลือบด้วยอัตราการเคลือบ 0.2 nm/s และที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ 300 °C มีสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าดีที่สุด และ เมื่อลดอุณหภูมิแผ่นรองรับลงถึง 150 °C การดูดกลืนแสงในช่วงตามองเห็นจะสูงขึ้นจาก 2 % เป็น 8 % และพบว่าฟิล์มบางมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น

Masaki *et al.* (1993) ได้เตรียมฟิล์มบางซิลิกอนบนแผ่นควอ ร์ตซ์ (quartz) ที่อุณหภูมิ 300 °C ด้วยวิธี plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) ได้ความหนาของฟิล์ม 1 μm จากนั้นนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิช่วง 550 °C ถึง 650 °C เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) พบว่าเศษส่วนความเป็นผลึก (crystalline fraction) และขนาดเกรนในฟิล์มบางซิลิกอนขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้อบฟิล์ม โดยเศษส่วนความเป็นผลึกและขนาดเกรนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้อบเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Thomas and Vaidyan (1995) ได้เคลือบฟิล์มบางอัลลอยอลูมิเนียม -ทองแดงด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เมื่ออบแผ่นฟิล์มบางอัลลอยอลูมิเนียม-ทองแดงด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 303 เคลวิน และ 413 เคลวิน แล้วศึกษาการออกซิเดชัน (oxidation) พื้นผิวของฟิล์มบางอัลลอย พบว่าฟิล์มบางที่อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 303 เคลวินจะแสดงพีคของ Al_2O_3 และ CuO เมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งสัปดาห์ ฟิล์มบางอัลลอยจะแสดงพีคทั้งสองที่มีความเข้มเพิ่มขึ้น แต่ฟิล์มบางอัลลอยที่อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน จะแสดงพีคของ CuO_2 และสารประกอบเชิงโลหะ Cu_3Al_2 ซึ่งเป็นการแพร่ไอออนลบและไอออนบวกของพื้นผิวฟิล์มบางอัลลอยระหว่างฟิล์มบางอลูมิเนียมกับฟิล์มบางทองแดงด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

Salehi (1998) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO)โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนบนแผ่นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิห้อง และ 80 °C โดยอัตราการเคลือบฟิล์ม 0.2 Å/s ฟิล์มมีความหนา 1200 Å เท่ากัน จากการวิเคราะห์สภาพต้านทานไฟฟ้าและวิเคราะห์สมบัติทางแสง พบว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 80 °C มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า และมีค่าความโปร่งแสงในช่วงตามองเห็นสูงกว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าฟิล์มที่เคลือบทั้งสองสภาวะมีความเป็นผลึกเหมือนกัน แต่ฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 80 °C แสดงความเป็นผลึกที่สูงและมีขนาดเกรนที่ใหญ่ ทำให้พื้นที่ขอบเกรนลดลง การกระเจิงของอิเล็กตรอนกับโฟตอนลดลง มีผลทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลง และความโปร่งแสงมีค่าเพิ่มขึ้น

Synowicki (1998) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงบนแผ่นรองรับฟิวส์ซิลิกา (fused silica) และนำฟิล์มที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 350 °C นาน 8 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ค่าคงตัวทางแสงด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปิกอิลิปโซมิเตอร์แบบปรับมุมได้ (Variable angle spectroscopic ellipsometer , VASE) พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้แยกเป็น2ชั้นย่อย โดยฟิล์มชั้นบนมีค่าความโปร่งแสง (transparency) ต่ำแต่ค่าการดูดกลืนแสงสูง แสดงว่าฟิล์มชั้นบนมีความหนาแน่นมากกว่าและมีการนำไฟฟ้าที่ดี

Lee *et al*. (1999) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ITO แบบใช้ไอออนช่วย (ion – assisted deposition ,IAD) ในวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน โดยเติมก๊าซออกซิเจนเข้าไปในระหว่างการเคลือบ พบว่าฟิล์มบางที่ใช้ไอออนช่วยมีความต้านทานไฟฟ้าลดลง ค่าความโปร่งแสง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีค่าสูง ดัชนีหักเหของแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าลดลง ผิวหน้าฟิล์มมีความเรียบมากขึ้น

Morton *et al.* (1999) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ITO แบบใช้ไอออนช่วยบนแผ่นกระจกที่อุณหภูมิ 25 $^{\circ}C$ โดยมีเงื่อนไขในการเคลือบต่างกัน พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะในการเคลือบฟิล์มที่มีความโปร่งแสงมากกว่า 90 % คือ อัตราการเคลือบ 8 Å/s อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 18 sccm (standard cubic centimeter per minute) กระแสขับเคลื่อนไอออน (ion drive current) 2 A โดยมีสภาพต้านทานเชิงระนาบเท่ากับ $60\,\Omega/cm^2$

Zhang *et al.*(1999) ได้เคลือบฟิล์ม บาง อินเดียมทินออกไซด์ ITO ด้วยวิธีดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริง อบฟิล์มหลังการเคลือบที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}C$, 200$^{\circ}C$ และ 250 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 40, 80 และ 120 นาที แล้ววัดความหนาฟิล์ม ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนาและวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงระนาบด้วยวิธีหัววัดสี่จุด แล้วคำนวณค่าดัชนีหักเหของแสง และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600-1100 nm กับค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าเมื่อฟิล์มที่อบและไม่อบมีความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะลดลง ฟิล์มที่นำไฟฟ้าได้ดีจะมีจำนวนตัวพาหะอิสระที่มาก มีผลทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่สูงในย่านใกล้แสงอินฟรา รด (Near Infrared , NIR)

Jia *et al.* (2000) ได้เคลือบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิกอน (amorphous silicon, a-Si) บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจก Corning 7059 ด้วยวิธี PECVD โดยใช้ก๊าซไซเลน (silane, SiH_4) ผสมกับก๊าซไฮโดรเจน (SiH_4/H_2 = 25%) อุณหภูมิของแผ่นรองรับ 190 °C ขณะเคลือบใช้แสงจากหลอดไส้ทังสเตนจำนวน 3 หลอด ซึ่งแต่ละหลอดมีกำลัง 1 kW ฉายไปที่แผ่นรองรับ ฟิล์มตัวอย่างมีความหนา 1.5 μm แล้วนำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกไป ต่อจากนั้นอบฟิล์มที่อุณหภูมิในระหว่าง 550°C - 650°C เป็นเวลา 10 นาที ถึง 2 ชั่วโมง เพื่อทำให้ฟิล์มบางซิลิกอนเกิดผลึก เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้อบเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้อบฟิล์มมีค่าลดลงเพื่อให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกเท่ากัน และฟิล์มที่ใช้วิธีฉายแสงขณะเคลือบใช้เวลาอบอย่างมาก เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีความร้อนธรรมดา

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Bin *et al.* (2001) ได้เคลือบฟิล์มบางไทเทเนียม (Ti) และสารประกอบ CoCrPtTa บนแผ่นแก้ว ด้วยวิธีดีซีแมกนิตรอนสปัตเตอริงที่ความดันของก๊าซอาร์กอน 20 mTorr โดยให้แผ่นรองรับมีอุณหภูมิระหว่าง 100 °C ถึง 300 °C และใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบจาก 2 ถึง 4 kW โดยกำหนดความหนาของฟิล์ม Ti ที่เคลือบมีค่าระหว่าง 3 ถึง 10.5 nm แล้วศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม พบว่าฟิล์มบาง Ti และสารประกอบ CoCrPtTa ที่มีความหนา 50 nm มีขนาดเกรน 13 nm สมบัติทางแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบและอุณหภูมิของแผ่นรองรับ แต่ไม่เปลี่ยนตามความหนาของฟิล์ม

Farhi *et al.* (2002) ได้เคลือบฟิล์มบาง a-Si ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อุณหภูมิ 300 °C ให้มีความหนาระหว่าง 0.63 μm ถึง 2.85 μm แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 620 °C ถึง 680 °C จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าการเปลี่ยนจากสถานะอะมอร์ฟัสไปเป็นผลึกของฟิล์มในระหว่างการอบด้วยความร้อนขึ้นกับความหนาของฟิล์ม เนื่องจากอะตอมซิลิกอนในฟิล์มที่มีความหนามากกว่าจะทับถมกันจนทำให้ความไม่เป็นระเบียบ (disorder) และความบกพร่อง (defect) ในเนื้อฟิล์มน้อยลง จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น

Kondo *et al.* (2002) ได้เตรียมฟิล์มบาง μc-Si:H บนแผ่นรองรับที่มีอุณหภูมิต่างๆ ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและไฮโดรเจน พบว่าอัตราการเคลือบมีค่าเกือบคงตัวที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับสองช่วง คือระหว่าง 70 °C - 150 °C และระหว่าง 200 °C - 350 °C โดยทั้งสองช่วงมีอัตราการเคลือบต่างกัน 25% ซึ่งอัตราการเคลือบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับเพิ่มขึ้นจาก 150 °C ไปเป็น 200 °C ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในฟิล์มมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับอัตราการเคลือบฟิล์ม ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนที่ผิวของแผ่นรองรับและการหลุดออกไป (desorption) จากผิวฟิล์มของโมเลกุล ซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาระหว่างอะตอมทั้งสองเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับสูงขึ้น จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับต่ำกว่า 100 °C เป็นอะมอร์ฟัส แต่ฟิล์มที่เตรียมที่อุณหภูมิสูงกว่า 120 °C เป็น microcrystalline ความสูงของพีคในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และขนาดผลึกเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นของแผ่นรองรับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Liu *et al*. (2003) ได้เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ITO โดยวิธีระเหยสาร ด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ลำไอออนช่วย (ion beam – assisted deposition , IBAD) บนแผ่นรองรับฟิวส์ซิลิกา และกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิห้องและ 200 °C อัตราการเคลือบ 1.5 Å/s ฟิล์มหนา 1000 Å จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 200 °C ปรากฏพีค (211), (222), (440) และ (622) ที่มีความเข้มสูง แสดงว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกสูงและมีการจัดเรียงตัวในทิศทาง [111] ซึ่งเป็นลักษณะของฟิล์มที่ได้จากการระเหยสาร โดยฟิล์มที่เคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริงมีการจัดเรียงตัวผลึกในทิศทาง [100] เมื่อเพิ่มพลังงานของความหนาแน่นกระแสออกซิเจน (oxygen current density) การจัดเรียงตัวจะเปลี่ยนทิศทางจาก [111] เป็น[100] เมื่อตรวจสอบความขรุขระของผิวหน้าฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscopy, AFM) พบว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิ 200 °C มีความเรียบมากกว่าฟิล์มที่เคลือบที่อุณหภูมิห้อง การเคลือบฟิล์มบางแบบใช้ลำไอออนช่วย (IBAD) ทำให้ฟิล์มมีผิวหน้าที่เรียบขึ้น แต่ถ้าใช้ลำไอออนที่มีพลังงานสูงมากจะทำให้ผิวฟิล์มหยาบขึ้น เมื่ออุณหภูมิแผ่นรองรับสูงจะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลงและจำนวนตัวพาหะต่ำลงขณะที่ตัวพาหะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (mobility) สูงขึ้น ฟิล์มที่เจือดีบุกมีการนำไฟฟ้าดีขึ้น และมีการกระเจิงอิเล็กตรอนน้อยลง

Vaz (2003) ได้เคลือบฟิล์มบาง titanium oxynitrides (TiN_xO_y) ด้วยวิธีรีแอกทีฟอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (reactive rf magnetron sputtering) บนแผ่นรองรับ 3 ชนิดคือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม แผ่นกระจก และซิลิกอนเวเฟอร์ระนาบ (100) โดยใช้แผ่นไทเทเนียมบริสุทธิ์ 99.73% เป็นเป้า ก่อนเคลือบทำความสะอาดแผ่นรองรับในพลาสมาของก๊าซอาร์กอน ด้วยการสปัตเตอริ ง โดยใช้กำลังไฟฟ้าอาร์เอฟ 200 W เป็นเวลา 15 นาที อุณหภูมิของแผ่นรองรับขณะเคลือบเท่ากับ 300 °C ศักย์ไฟฟ้าที่ไบแอสให้กับแผ่นรองรับอยู่ในช่วง -50 V ถึง 0 V แผ่นรองรับติดตั้งบนที่ยึดที่สามารถหมุนได้ด้วยอัตรา 4 รอบต่อนาที ความดันก๊าซผสม (Ar/N_2+O_2) ขณะเคลือบมีค่าเท่ากับ 0.4 Pa ความดันย่อยของก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.05 Pa พบว่าเมื่อมีปริมาณก๊าซออกซิเจนต่ำ ฟิล์มบางมีสีทอง และเมื่อมีปริมาณก๊าซออกซิเจนสูง ฟิล์มบางมีสีน้ำเงินเข้ม จากการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบาง TiN_xO_y มีความเข้มพีคในระนาบ (111) สูงขึ้นเมื่อปริมาณของออกซิเจนต่ำลง ซึ่งมีตำแหน่งเดียวกันกับพีคจากระนาบ (111) ของ TiN ที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า (face center cubic, fcc) ความเป็นผลึกของฟิล์มตัวอย่างลดลงเมื่อปริมาณก๊าซออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ไบแอสแผ่นรองรับช่วยเพิ่มการระดมชนของไอออนบนฟิล์มตัวอย่าง ทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Yongqing and Hejun (2003) ได้ศึกษาฟิล์มบางอัลลอย (alloy) Ti-Ni-Cu ซึ่งเป็นอัลลอยที่สามารถ จำรูปร่างของตัวเองได้ และสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ด้วยความร้อน เมื่อบิดหรือดัดอัลลอยที่จำรูปร่างได้ให้มีรูปร่างเปลี่ยนไปจากรูปร่างเดิมที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัลลอยดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปร่างตัวเองไปยังรูปร่างเดิม

เมื่อเตรียมฟิล์มบาง Ti-Ni-Cu ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริ งโดยการเปลี่ยนความดันของก๊าซอาร์กอน พบว่า เมื่อใ ห้ความดันของก๊าซอาร์กอนสูง ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างแบบคอลัมน์ (columnar structure) และเมื่อให้ความดันของก๊าซอาร์กอนต่ำ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างแบบเรียบ (smooth structure) ซึ่งแสดงสมบัติการจำรูปร่างได้ดีกว่าโครงสร้างแบบคอลัมน์

Fukaya *et al.* (2005) ได้เคลือบฟิล์มบาง μc-Si:H ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยการไบแอสศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป้าสารเคลือบ และใช้ก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนกับไฮโดรเจนในการเคลือบ จากการศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และรามานสเปกโตรสโคปี (raman spectroscopy) พบว่า เมื่อกำลังไฟฟ้าความถี่วิทยุมีค่าเพิ่มขึ้นและศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 0 ถึง -500 V อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเป็นผลึกในฟิล์มตัวอย่างมีค่าสูงสุดที่ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ - 300 V นั่นคือ พลังงานจลน์ของอะตอมซิลิกอนที่ถูกสปัตเตอร์ออกมาช่วยให้อะตอมสามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อตกกระทบผิวฟิล์ม ทำให้อะตอมเคลื่อนมารวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งมีผลอย่างมากต่อความเป็นผลึกของฟิล์ม

Abdesselem *et al.* (2006) ศึกษากลไกการเติบโตของฟิล์มบาง a-Si:H ที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยเตรียมฟิล์มที่อุณหภูมิของแผ่นรองรับและกำลังไฟฟ้าต่างกัน เพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงาน ฟลักซ์ และปฏิกิริยาของอนุภาค Si และ SiH ที่เข้าเคลือบที่พื้นผิวแผ่นรองรับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับมีค่าต่ำ การเติบโตของฟิล์มเกิดจากการทับถมกันของอนุภาค Si และ SiH เมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับเพิ่มขึ้น อะตอมไฮโดรเจนที่ผิวฟิล์มจะลดลงเนื่องจากทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮโดรเจนหรือซิลิกอนที่อยู่ข้างเคียง ได้เป็นโมเลกุลที่สามารถระเหยหลุดออกไปจากผิวได้ง่าย ทำให้อนุภาค Si และ SiH สามารถเข้าเคลือบที่ผิวฟิล์มได้มากขึ้น อัตราการเคลือบจึงเพิ่มขึ้น อัตราการเคลือบมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแผ่นรองรับ 400 °C และ 300 °C สำหรับกำลังไฟฟ้าที่ใช้เคลือบ 70 W และ 100 W ตามลำดับ ที่อุณหภูมิแผ่นรองรับสูงกว่าค่าเหล่านี้ อัตราการเคลือบฟิล์มมีค่าลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอะตอมไฮโดรเจนในเนื้อฟิล์มจะแพร่ออกมาที่ผิวฟิล์ม ซึ่งอะตอมไฮโดรเจนจะทำพันธะกับแขนที่ว่าง (dangling bond) ของซิลิกอน ทำให้มีที่ว่างสำหรับอนุภาค Si และ SiH น้อยลง อัตราการเคลือบจึงมีค่าลดลง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Chan and Teo (2006) ศึกษาผลของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบและความดันขณะเคลือบที่มีต่อสัณฐานวิทยาของพื้นผิว (surface morphology) ฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบบนแผ่นรองรับซิลิกอนชนิดพี (p-type silicon) ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยทำการเคลือบที่อุณหภูมิห้อง พบว่าอัตราการเคลือบฟิล์มทองแดงมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ และมีค่าลดลงเมื่อความดันขณะเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม และการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในการเคลือบสูง อะตอมทองแดงจะสามารถแพร่ไปบนผิวฟิล์มได้ดี จึงทำให้ฟิล์มทองแดงมีโครงสร้างจุลภาคดีขึ้น และเมื่อความดันขณะเคลือบมีค่าสูงจะทำให้ความเป็นผลึกในฟิล์มลดลง เนื่องจากเนื้อฟิล์มมีช่องว่าง (void) สูง

Draissia And Debili (2006) ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง (Al_{1-x} Cu_x, $0<x<0.22$) ที่เคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ ความถี่วิทยุ 13.56 MHz พบว่าโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบางที่ทุกค่าของ x ประกอบด้วยโลหะผสมของสองเฟส เฟสที่หนึ่งเป็นสารละลายของแข็งอลูมิเนียม มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า และ เฟสที่สองเป็นอัลลอยอลูมิเนียม-ทองแดง Al_2Cu ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเ ททรากอนอล (tetragonal) เมื่อฟิล์มบางมีปริมาณทองแดงมากขึ้น ความแข็งจุลภาคของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้น และขนาดเกรนมีค่าลดลง ซึ่งสรุปได้ว่า การทำให้อลูมิเนียมมีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้นโดยวิธีผสมทองแดงในปริมาณเล็กน้อยเกิดจากผลการรวมกันระหว่างสารละลายของแข็งอลูมิเนียมกับอัลลอย Al_2Cu และขนาดเกรนที่ละเอียดขึ้น

Huang *et al.* (2006) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางซิลิกอน (a-Si) ด้วยวิธี RF-PECVD ที่อุณหภูมิ 500 °C แล้วนำฟิล์มตัวอย่างไปอบด้วยกระบวนการ rapid thermal annealing (RTA) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 60 วินาที ก่อนนำไปตกผลึกด้วยกระบวนการ solid phase crystallization (SPC) ที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 22 ชั่วโมง เมื่อนำไปศึกษาขนาดเกรนเฉลี่ยและความเป็นผลึกของฟิล์มบาง polycrystalline silicon ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และรามานสเปกโตรสโคปี พบว่าฟิล์มตัวอย่างที่อบด้วยกระบวนการ RTA ก่อนนำไปตกผลึก มีขนาดเกรนเฉลี่ยใหญ่กว่าและมีความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มที่ไม่อบด้วยกระบวนการนี้ ซึ่งแสดงว่าการอบฟิล์มตัวอย่างด้วยกระบวนการ RTA ช่วยเสริมกระบวนการตกผลึกของฟิล์มและช่วยลดเวลาในการตกผลึก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Jang *et al.* (2006) ได้ทำการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) บนแผ่นรองรับที่เป็นผลึกซิลิกอนชนิดพี ด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยใช้ก๊าซอาร์กอนในการเคลือบ อุณหภูมิของแผ่นรองรับคงตัวที่ 300 °C จากนั้นนำฟิล์มไปอบด้วยวิธี RTA เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม โดยทำการอบในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อนำฟิล์มตัวอย่างไปศึกษาด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์ม AlN ที่ไม่อบจะมีระนาบผลึกเป็น (100) และฟิล์มที่อบจะมีระนาบผลึกเป็น (103) โดยพีคที่ (100) จะหายไป จากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างไปใช้เป็นชั้นฉนวนในอุปกรณ์ metal-insulator-semiconductor (MIS) แล้วศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า (capacitance-voltage, C-V characteristic) พบว่าศักย์แถบแบน (flatband voltage, V_{FB}) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามระนาบผลึก ฟิล์มที่ไม่ผ่านการอบซึ่งมีระนาบผลึก (100) มีค่า V_{FB} เป็นลบ และฟิล์มที่ผ่านการอบซึ่งมีระนาบผลึกเป็น (103) มีค่า V_{FB} เป็นบวก และฟิล์มที่อบด้วยอุณหภูมิ 700 °C มี V_{FB} สูงที่สุด คือ 6.5 V

Chan and Teo (2007) ได้เคลือบฟิล์มบางทองแดงบนแผ่นรองรับที่เป็นซิลิกอนชนิดพี ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยอุณหภูมิของแผ่นรองรับขณะเคลือบเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วศึกษาผลของกำลังไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการเคลือบต่อขนาดผลึกของฟิล์มจากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าการเคลือบฟิล์มด้วยกำลังไฟฟ้าสูงจะช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับฟิล์ม โดยผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น และสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากความสามารถในการแพร่ของอะตอมทองแดงบนผิวฟิล์มเพิ่มขึ้น จึงทำให้โครงสร้างจุลภาคของฟิล์มดีขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศครั้งแรกทำโดย Busen และ Grove ในปี คศ. 1852 ซึ่งฟิล์มบาง หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่มาจัดรวมกันเป็นชั้นบางๆ โดยการเคลือบของสารเคลือบจากเป้าสารเคลือบในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก ขนาดความหนาของฟิล์มที่จะระบุว่าเป็นฟิล์มบางนั้นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก อย่างไรก็ดีปัจจุบันได้มีวิธีระบุว่าฟิล์มมีความหนาเท่าใดจึงเรียกว่าฟิล์มบาง โดยพิจารณาจากลักษณะการใช้งานฟิล์มนั้นว่าใช้งานด้วยสมบัติด้านใด ถ้าเป็นการใช้ฟิล์มนั้นด้วยสมบัติเชิงผิว (surface properties) ก็จะเรียกฟิล์มนั้นว่า ฟิล์มบาง แต่ถ้าใช้ฟิล์มนั้นด้วยสมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) ก็จะเรียกว่า ฟิล์มหนา (thick film) ซึ่งจะพบว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็น ฟิล์มบาง ก็ได้ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางในด้านต่างๆมากมายได้แก่ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่นสารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทาน อุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง กระจกกรองแสงเฉพาะบางช่วงความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาสมบัติต่างๆทางฟิสิกส์ ของฟิล์มบาง ซึ่งสมบัติบางประการไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์มากในการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในทางอุตสหกรรม

กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

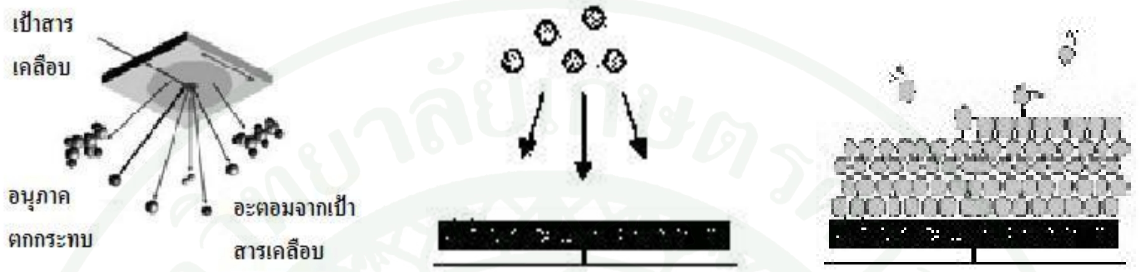
กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (thin film deposition process) เป็นกระบวนการทำให้อะตอมหลุดจากเป้าสารเคลือบ แล้วตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการเคลือบ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งจากกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางฟิสิกส์ กระบวนการเคลือบฟิล์มบางประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน ดังภาพที่ 1

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการทำให้อะตอม โมเลกุลหรืออนุภาคสารเคลือบหลุดออกจากสารเคลือบ ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง โดยสารเคลือบอาจเป็นของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊สก็ได้

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการขนส่ง (transport) ไอระเหยสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ ในสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรงไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เคลื่อนที่ในลักษณะของไหลซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการ กระเจิง กับอนุภาคอื่นในภาชนะสุญญากาศบ้าง



(ก) (ข) (ค)

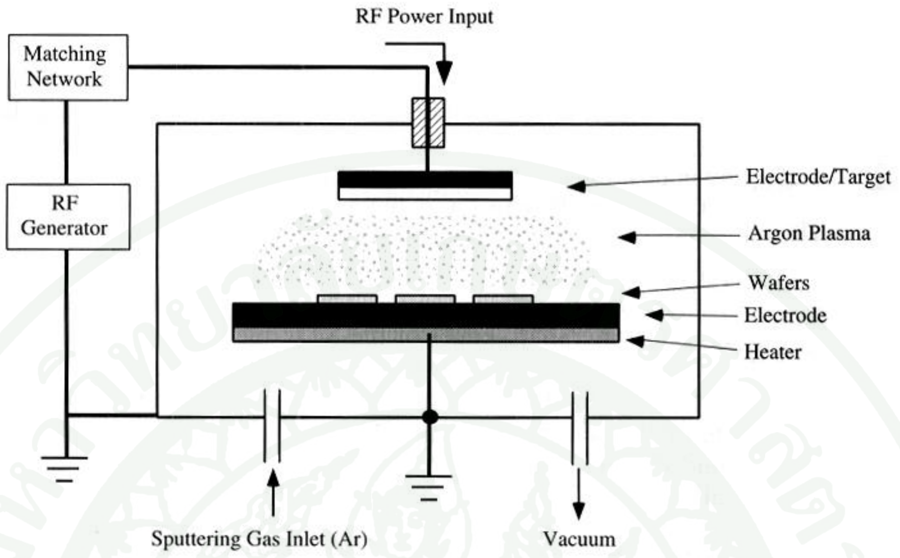
ภาพที่ 1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (ก) การทำให้อะตอมหรือโมเลกุลหลุดจากเป้าสารเคลือบ (ข) ไอสารเคลือบตกบนวัสดุรองรับ (ค) การพอกพูนและเติบโตของฟิล์มบาง

การเคลื่อนย้ายสารเคลือบจะต้องให้ไอระเหยของสารเคลือบมีความสม่ำเสมอเพื่อที่จะทำให้ฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ สารเคลือบจะมีการควบแน่นและเกิดกระบวนการเคลือบชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ซึ่งจะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานพันธะ (bonding energy)ระหว่างอะตอมสารเคลือบกับอุณหภูมิของวัสดุรองรับ ซึ่งเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ เมื่ออะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งการดูดจับ (adsorption site) จะเกิดการเกาะติด ถ้าอะตอมสารเคลือบมีพลังงานมากพอ ก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป ในเวลาชั่วครู่อะตอมสารเคลือบอาจเกิดทั้งการระเหยกลับและการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่

ขั้นตอนที่ 3 เมื่ออะตอมสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ จะมีความเสถียรภาพมากกว่าอะตอมเดี่ยว การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (triplets) หรือสี่อะตอม (quadruplets) หรืออื่นๆ ทำให้ได้เกาะกึ่งเสถียร (quasi-stable island) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มพอกพูนและเติบโตขึ้นเรียกว่า การเติบโตของเกาะ (island growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟ สปัตเตอริง



ภาพที่ 2 แผนภาพภายในระบบอาร์เอฟสปัตเตอริง

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟ สปัตเตอริงเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการเคลือบฟิล์มที่ให้ฟิล์มบางที่มีความบริสุทธิ์สูง มีความหนาสม่ำเสมอ และมีความคงทน ระบบ อาร์ เอฟ สปัตเตอริง (ภาพที่ 2) ประกอบด้วย แชมเบอร์ (chamber) บรรจุก๊าซอาร์กอน โดยขั้วไฟฟ้า แคโทดเป็นที่วางแผ่นเป้าสารเคลือบ และขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นที่วางแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ โดยทั่วไปความถี่วิทยุอยู่ในช่วง 5 - 30 MHz สำหรับระบบอาร์เอฟสปัตเตอริงใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 13.56 MHz เป็นค่าความถี่ที่คณะกรรมการ FCC (Federal Communications Commission) กำหนดไว้สำหรับใช้งานที่เกี่ยวข้องกับพลาสมา ทั้งนี้เพื่อไม่ให้รบกวนการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ ภายในแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของระบบอาร์เอฟสปัตเตอริงจะต้องมีวงจรปรับจูนอิมพิแดนซ์ (impedance matching) เพื่อให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบได้สูงสุด

กระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริงจะต้องทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดจากขั้วไฟฟ้าแคโทดมีพลังงานสูงพอที่จะไปไอออไนซ์ก๊าซอาร์กอนภายในแชมเบอร์ดังสมการ

$$e^{-} + Ar \rightarrow Ar^{+} + 2e^{-} \quad (1)$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อไอออนของก๊าซอาร์กอนวิ่งเข้าขั้วแคโทดจะกระเจิงอะตอมของเป้าสารเคลือบเพื่อให้อะตอมของเป้าสารเคลือบตกลงบนแผ่นรองรับ เมื่อแผ่นรองรับและสารเคลือบเป็นฉนวนขั้วไฟฟ้าทั้งสองของระบบสปัตเตอริงจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งมีความจุ C ดังนี้

$$c = \frac{\varepsilon_0 A}{d} \tag{2}$$

โดย ε_0 เป็นสภาพยอม (permittivity) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

A เป็นพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า

และ d เป็นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุจะกั้นไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านไปได้ แต่ยอมให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านไปได้โดยกระแสไฟฟ้า I ขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ V ระหว่างแอโนดกับแคโทด ดังนี้

$$I = \frac{V}{X_C} \tag{3}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fc} \tag{4}$$

โดย X_c เป็นอิมพิแดนซ์ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อความจุ C มีค่าเพิ่มขึ้นและความถี่ f มีค่าคงตัว

การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ ทำให้ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดมีศักย์ไฟฟ้าบวกลบสลับกัน ดังนั้นในช่วงครึ่งไซเคิล (cycle) แรก จะเกิดการเคลือบฟิล์มขึ้นบนแผ่นรองรับ แต่ในช่วงครึ่งไซเคิลหลัง ฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นรองรับบางส่วนจะถูกสปัตเตอร์หลุดออกด้วยอัตราที่ต่ำกว่าการเคลือบในครึ่งไซเคิลแรก เนื่องจากความแตกต่างของอิมพิแดนซ์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งเป็นที่วางของแผ่นรองรับและเป้าสารเคลือบ จึงเกิดกระบวนการเคลือบและหลุดออกด้วยการสปัตเตอร์สลับกันในแต่ละไซเคิล ดังนั้นแผ่นรองรับและสารเคลือบที่ใช้ควรเป็นวัสดุประเภทเดียวกัน เพื่อลดปริมาณสิ่งแปลกปลอม (contamination) ของฟิล์มบนแผ่นรองรับ และจะต้องวางเป้าสารเคลือบที่ขั้วไฟฟ้าขนาดเล็กกว่าขั้วไฟฟ้าที่วางแผ่นรองรับ ดังสมการ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

$$\frac{V_t}{V_S} = \left(\frac{A_S}{A_t} \right)^4 \quad (5)$$

โดย V_t และ V_s เป็น ศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่วางเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ ตามลำดับ

A_t และ A_s เป็น พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่วางเป้าสารเคลือบและแผ่นรองรับ ตามลำดับ

ในระบบอาร์เอฟสปัตเตอริง จะเกิดบริเวณมืดขึ้นทั้งบริเวณใกล้แคโทดและใกล้แอโนด จึงเสมือนกับว่ามีตัวเก็บประจุ 2 ตัว ต่ออนุกรมกัน ถ้าทำให้ขั้วไฟฟ้าหนึ่งมีพื้นที่น้อยกว่าอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่ง ค่าความจุของขั้วไฟฟ้าแรกจะมีค่าต่ำ ดังสมการ (2) ทำให้อิมพิแดนซ์มีค่าสูงดังสมการ (4) จึงมีความต่างศักย์ตกคร่อมสูงกว่า ดังสมการ (5) ดังนั้นการสปัตเตอร์จะเกิดขึ้นมากบนขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่น้อย การเคลือบบนแผ่นรองรับจึงเกิดบนขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่น้อยกว่า นั่นคือศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมแต่ละบริเวณมืดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการสปัตเตอริงสารเคลือบ ซึ่งมีค่าขึ้นกับอิมพิแดนซ์ของแต่ละบริเวณมืด การต่อขั้วไฟฟ้าที่วางแผ่นรองรับลงดินร่วมกับผนังของแชมเบอร์ จะทำให้พื้นที่ A_s มีขนาดใหญ่มากขึ้น

ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ปริมาณไอออนที่ผลิตได้จาก ระบบอาร์เอฟสปัตเตอริงมีค่าค่อนข้างต่ำมาก ถึงแม้ว่าการแกว่งกวัดของสนามไฟฟ้าจะช่วยเพิ่มโอกาสให้อิเล็กตรอนกระเจิงกับอะตอมก๊าซเฉื่อย แต่ปริมาณไอออนที่ได้ยังไม่มากพอ จึงต้องใส่สนามแม่เหล็กเข้าไปในระบบเรียกว่า ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสกระเจิงกับอะตอมก๊าซมากขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณไอออนในระบบ

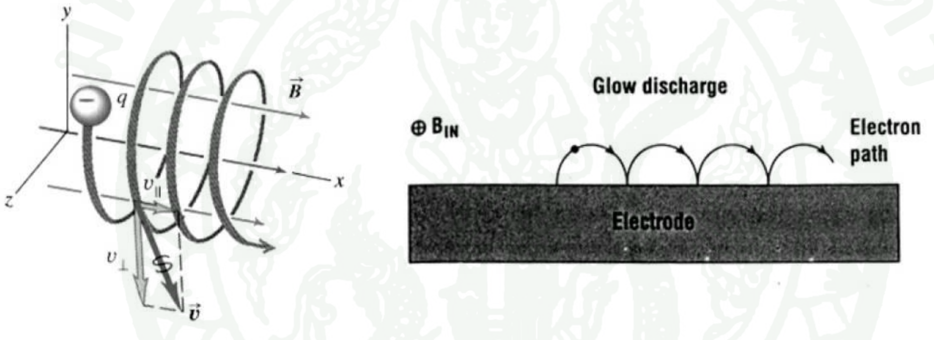
ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงช่วยเพิ่มอัตราการเคลือบฟิล์มได้ประมาณ 10 – 100 เท่า และช่วยลดความดันของก๊าซขณะเคลือบได้มาก ช่วยให้ฟิล์มเคลือบมีความสะอาดสูง จึงทำให้ระบบแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นที่นิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยมีการนำไปใช้กับระบบอาร์เอฟสปัตเตอริง เรียกว่าระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อิเล็กตรอนซึ่งมีประจุ q ภายในพลาสมาจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว **v** ภายใต้สนามไฟฟ้า **E** และสนามแม่เหล็ก **B** ด้วยแรงลอเรนต์ซ์ (Lorentz force, F) ดังสมการ

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

แรงลอเรนต์ซ์จะทำให้อิเล็กตรอนวนเป็นเกลียว (helix) รอบแกนที่ขนานกับสนามแม่เหล็ก ดังภาพที่ 3 (ก) ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในพลาสมานานขึ้น จึงเพิ่มโอกาสที่จะกระเจิงกับอะตอมก๊าซมากขึ้น ส่วนอิเล็กตรอนที่บริเวณใกล้ผิวเป้าจะเคลื่อนที่แบบกระโดด (hopping) ไปบนผิวเป้าดังภาพที่ 3 (ข) ทำให้มีไอออนจำนวนมากเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ผิวเป้า ผิวเป้าส่วนนี้จึงถูกกัดกร่อน (erosion) ออกไปมากกว่าบริเวณอื่น



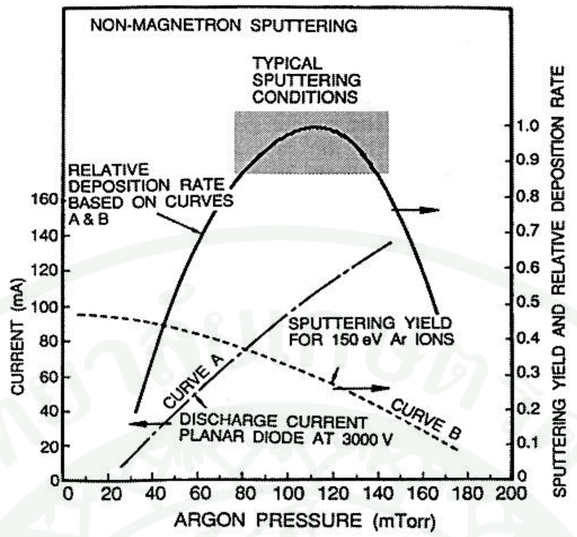
(ก) (ข)

ภาพที่ 3 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
(ก) แบบวนเป็นเกลียว (ข) แบบกระโดด

ความดันก๊าซขณะทำการเคลือบ

การเคลือบฟิล์มที่ความดันต่ำๆ จะมีระยะปลอดการกระเจิงของอิเล็กตรอนกว้าง ซึ่งไม่ค่อยมีการกระเจิงกันระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซ ทำให้ได้ปริมาณไอออนน้อยและมีอัตราการเคลือบต่ำ การเคลือบฟิล์มที่ความดันสูงๆ จะมีระยะปลอดการกระเจิงของอิเล็กตรอนสั้น แต่อิเล็กตรอนมีพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดไอออนได้ ทำให้ได้ปริมาณไอออนน้อย นอกจากนั้นเมื่ออะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเคลื่อนที่ไปยังแผ่นรองรับ จะกระเจิงกับอะตอมก๊าซที่มีอยู่

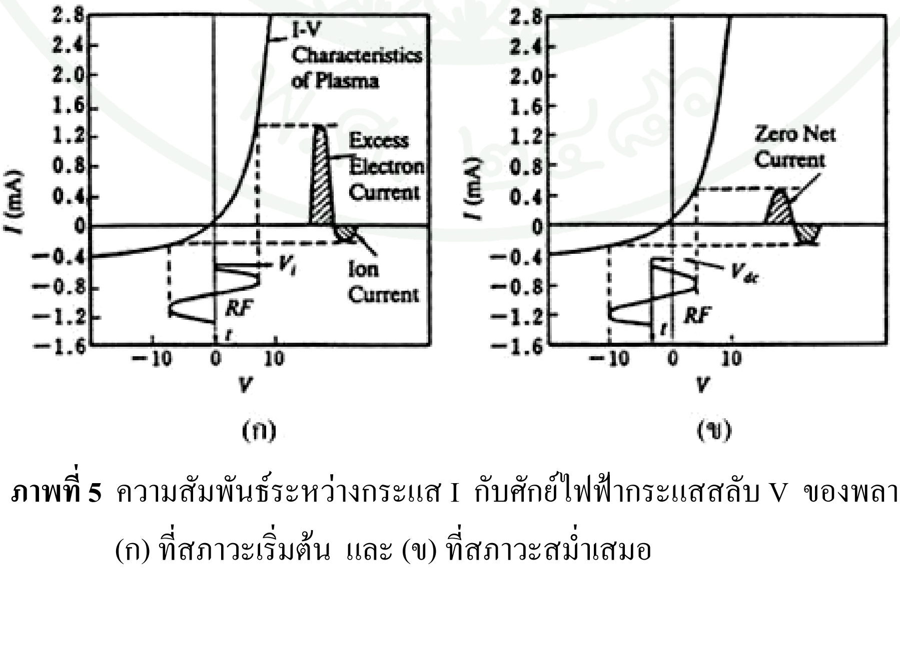
ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส ยีลด์ และอัตราการเคลือบ
กับความดันก๊าซอาร์กอนที่ใช้ในระบบสปัตเตอริง

อย่างหนาแน่นบ่อยครั้ง ทำให้อะตอมสารเคลือบสูญเสียพลังงานและเปลี่ยนทิศทางไปก่อนที่จะไปถึงผิวของแผ่นรองรับ ทำให้มีอัตราการเคลือบต่ำเช่นกัน ดังนั้นความดันก๊าซจึงมีความสำคัญต่อการเคลือบฟิล์มภาพที่ 4 แสดงความดันก๊าซอาร์กอนที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีสปัตเตอริง

การไบแอสตัวเองของเป้าสารเคลือบ



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I กับศักย์ไฟฟ้ากระแสสลับ V ของพลาสมา
(ก) ที่สภาวะเริ่มต้น และ (ข) ที่สภาวะสม่ำเสมอ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำ ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะเป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนด สลับกันไปตามจังหวะสัญญาณไฟฟ้า อิเล็กตรอนและไอออนจะสามารถเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า กระบวนการสปัตเตอริงที่เกิดขึ้นในพลาสมาจึงเหมือนกับกรณีไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อใช้ไฟฟ้ากระแสสลับความถี่มีค่าสูงเกิน 1 MHz จะมีเพียงอิเล็กตรอนเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากอิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าและมีสภาพเคลื่อนที่ได้มากกว่าไอออน จึงทำให้กระแสอิเล็กตรอนเคลื่อนเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าบวกมากกว่ากระแสไอออน ดังภาพที่ 5 (ก) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ (steady state) จุดทำงานของระบบจะเลื่อนไปทางศักย์ไฟฟ้าลบ เพื่อทำให้กระแสสุทธิที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละด้านมีค่าเป็นศูนย์ ดังภาพที่ 5 (ข) โดยกระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการไบแอสตัวเอง (self bias) ของเป้าสารเคลือบ

อลูมิเนียม

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี มีราคาถูกเป็นโลหะที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีอัตราส่วนระหว่างความแข็งแรงต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) สูง โดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก มีสมบัติดังตารางที่ 1 จึงนำมาใช้ทำสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆเช่นทำเครื่องครัว เพราะสามารถทำความสะอาดอลูมิเนียมได้ง่ายและไม่แตกหักง่าย

แต่อลูมิเนียมมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ค่อยดี เช่น มีความแข็ง (hardness) ความแข็งแรง (strength) ความทนทาน (duration) และความเหนียว (toughness) น้อยมาก จึงมีกรรมวิธีต่างๆเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม หรือการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอลูมิเนียม ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเพียง 3 วิธี ดังนี้

1. การทำงานแบบเย็น (cold working) หรือ สเตรนฮาร์ดเดนนิง (strain harddening) เป็นกรรมวิธีที่ใช้แรงเชิงกล เช่น รีด ตี อัด ฯลฯในขณะที่อลูมิเนียมยังเย็นอยู่ การทำเช่นนี้เป็นผลให้อะตอมอลูมิเนียมในโลหะเลื่อนไปจากตำแหน่งที่ ปกติทำให้เกิดความเครียด (strain)ในโลหะทำให้อลูมิเนียมมีความแข็งแรงมากขึ้น สามารถทนต่อแรงกระทำได้มากขึ้น

2. กรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) เป็นกรรมวิธีที่ใช้ความร้อนในการทำให้อะตอมอลูมิเนียมในโลหะเลื่อนไปจากตำแหน่งปกติ ทำให้อลูมิเนียมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 1 สมบัติบางประการของอลูมิเนียมและทองแดงบริสุทธิ์

สมบัติทางกายภาพ	อลูมิเนียม	ทองแดง
เลขอะตอม (atomic number)	13	29
น้ำหนักอะตอม (atomic weight)	26.97	63.57
วาเลนซ์ (valence)	3	1 หรือ 2
สภาพไฟฟ้าลบ(electronegatavity)	1.5	1.8
รัศมีอะตอม (nm)	0.143	0.128
โครงสร้างผลึก (crystal structure)	fcc	Fcc
ค่าคงตัวแลตทิซ (lattice constant , nm)	0.405	0.361
ความหนาแน่น (g/cm^3) ที่ 20^0 C	2.70	8.96
จุดหลอมเหลว (^{0}C)	660.2	1083
จุดเดือด (boiling point) (^{0} C)	2450	2595
การหดตัวขณะแข็ง (Solidification shrinkage) (%)	6.6	4.92
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (cal/g)	94.5	50.6

3. การทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) อลูมิเนียม โดยการนำธาตุชนิดอื่นมาผสมกับอลูมิเนียม จะได้อัลลอยอลูมิเนียม ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาปรับปรุงให้อลูมิเนียมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ต่างๆ เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์หรือปีกเครื่องบิน เป็นต้น ความแข็งและความแข็งแรงของอัลลอยอลูมิเนียมขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุที่ผสมเข้าไป นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับวิธีการผลิตอัลลอยและพารามิเตอร์อื่นๆ โดยความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเกรนลดลง

สารละลายของแข็งอลูมิเนียม

สารละลายของแข็งอลูมิเนียม ได้จาก การผสมโลหะอื่นในปริมาณเล็กน้อยเข้าไปในอลูมิเนียม จะได้สารละลายของแข็งเอกพันธ์ (homogeneous solid solution) ปริมาณอลูมิเนียมที่มากกว่าจะเป็นตัวทำละลาย (solvent) และสารที่มีปริมาณน้อยกว่าจะเป็นตัวถูกละลาย (solute)

สารละลายของแข็งเอกพันธ์ มีโครงสร้างผลึกเหมือนกับตัวทำละลาย โดยอะตอมตัวถูกละลายจะกระจายไปทั่วโครงสร้างผลึกของตัวทำละลายในตำแหน่งต่างกัน ซึ่งมี 2 แบบ ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. สารละลายของแข็งแบบการแทรก (interstitial solid solution) ได้จากอะตอมตัวถูก ละลายกระจายไปแทรกอยู่ในตำแหน่งที่ว่างของอะตอมตัวทำละลายอะตอมที่ไปแทรกต้องมีขนาดเล็กกว่าอะตอมตัวทำละลาย

2. สารละลายของแข็งแบบการแทนที่ (substitutional solid solution)ได้จากอะตอมตั วถูกละลายไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมตัวทำละลายในแลตทิซผลึกสารละลายของแข็งแบบ การแทนที่จะเป็นสารละลายของแข็งอย่างสมบูรณ์ได้ต้องเป็นไปตามกฎของ Hume-Rothery ดังนี้

2.1 อะตอมของธาตุทั้งสองต้องมีขนาดใกล้เคียงกันต่างกันไม่มากกว่า 15% ถ้าอะตอมมีขนาดต่างกันมากกว่า 15% จะมีความสามารถในการละลายน้อย ทำให้แลตทิซมีการเปลี่ยนรูปและได้เฟสใหม่

2.2 ธาตุทั้งสองมีโครงสร้างเหมือนกัน

2.3 สภาพไฟฟ้าลบ (electronegativity) ของธาตุทั้งสองต่างกันไม่มาก ถ้าต่างกันมากจะไม่เป็นสารละลายของแข็ง

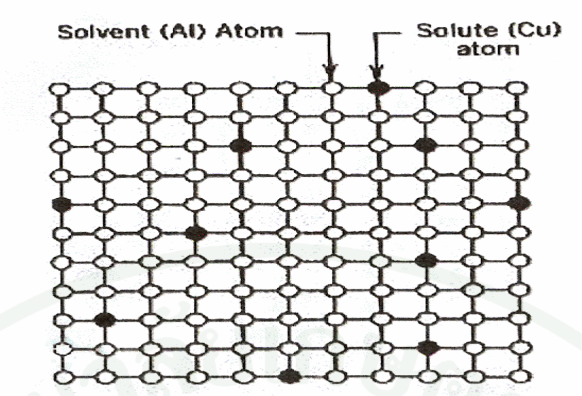
2.4 ธาตุทั้งสองมีเวเลนซ์ (valence) เหมือนกันหรือต่างกันไม่มาก

แผนภาพเฟสสมดุลอลูมิเนียม-ทองแดง

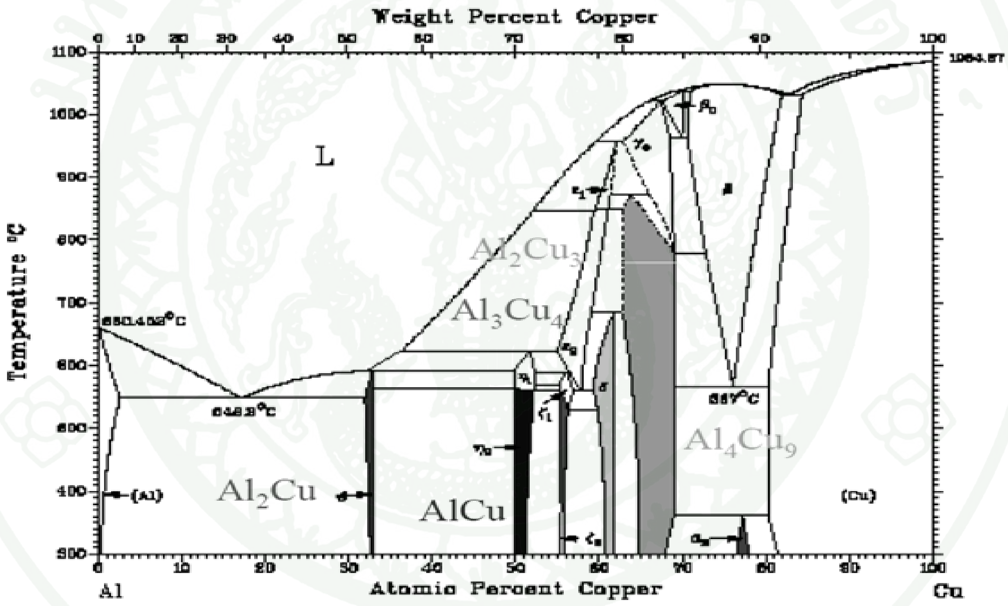
ทองแดงเป็นโลหะที่สำคัญที่มีการนำไปใช้งาน มาก เช่นใช้ทำ สายไฟฟ้า เครื่องใช้ และอาวุธต่างๆ สมบัติบางประการของทองแดงได้แสดงในตารางที่ 1

เมื่อผสมทองแดงปริมาณเล็กน้อยในอลูมิเนียมจะได้สารละลายของแข็งอลูมิเนียม -ทองแดง โดยทองแดงเป็นอะตอม ตัวถูกละลาย และอลูมิเนียมเป็นอะตอม ตัวทำละลายเนื่องจากทองแดงมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้าเหมือนกับอลูมิเนียม และมีขนาดรัศมีอะตอมใกล้เคียงกับอลูมิเนียม ดังตารางที่ 1 จึงมีขีดจำกั ดการละลาย ของทองแดงในอลูมิเนียม เป็นไป ตามกฎของ Hume-Rothery ซึ่งปริมาณอะตอมทองแดงที่สามารถละลายในอลูมิเนียมต่ำกว่า 1.8 เปอร์เซ็นต์อะตอมทองแดง โดยอะตอมทองแดงไปแทนที่ตำแหน่งอะตอมอลูมิเนียม ดังภาพที่ 6 เสมือนกับว่าอะตอมทองแดงตกตะกอนอยู่ในสารละลายของแข็ง จึงสามารถขวางกั้นการเคลื่อนที่ของการคลาดตำแหน่ง (dislocation) ทำให้สมบัติเชิงกลของอัลลอยอลูมิเนียมดีขึ้น

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



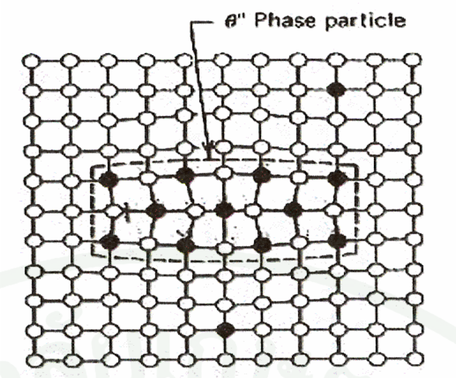
ภาพที่ 6 สารละลายของแข็งอลูมิเนียม-ทองแดง αAl



ภาพที่ 7 แผนภาพเฟสสมดุลอลูมิเนียม-ทองแดง

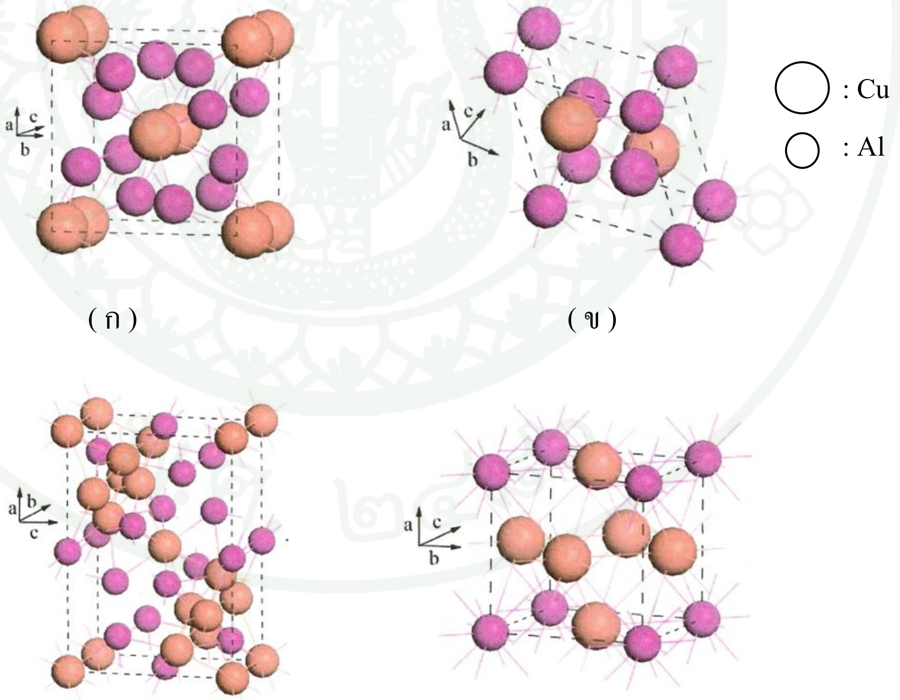
ภาพที่ 7 แสดงแผนภาพเฟสสมดุล (equilibrium phase diagram) ของอลูมิเนียม -ทองแดง (Haidara, 2010) ซึ่งภายในขีดจำกัดการละลายของอะตอมทองแดงในอลูมิเนียม (21.95 % Cu) ประกอบด้วย อัลลอย 2 เฟส โดยเฟสแรกเป็นสารละลายของแข็งอลูมิเนียม αAl ที่มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า fcc และเฟสที่สองเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (intermetalic compound) Al_2Cu หรือ เฟส θ ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเททรากอนอล ดังภาพที่ 8 ซึ่งปะปนอยู่ในสารละลายของแข็ง αAl

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 8 สารละลายของแข็งเฟส Al_2Cu (θ) ปะปนอยู่ ใน αAl

อัลลอยอลูมิเนียม-ทองแดง (Al-Cu) มีสภาพนำสูง (high conductivity) จึงนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างวงจรในวงจรอินทิเกรต (integrated circuit) และระบบที่มีไฟฟ้ากระแสตรงสูง เพื่อส่งผ่านกระแสไฟฟ้า เนื่องจากทองแดงมีสมบัติทางกล ทางไฟฟ้าและทางความร้อนที่ดี



(ค) (ง)

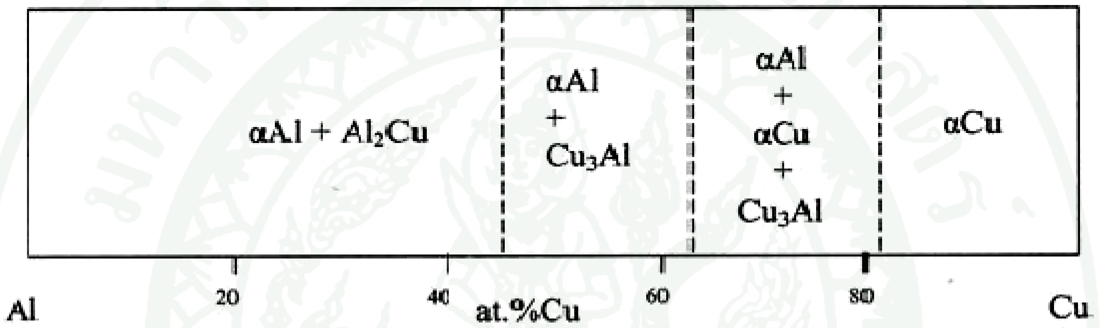
ภาพที่ 9 โครงสร้างผลึกของอัลลอยอลูมิเนียม-ทองแดง

(ก) Al_2Cu , (ข) Al_3Cu_2 , (ค) AlCu , (ง) $AlCu_3$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 9 แสดง โครงสร้างผลึกของอัลลอยอลูมิเนียม -ทองแดง ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบเชิงโลหะ เช่น Al_2Cu , Al_3Cu_2 และ $AlCu_3$ (Zhou, *et al.* , 2008) ซึ่งมีโครงสร้างแบบเททรากอนอล และ AlCu ซึ่งมีโครงสร้างแบบออร์ธอรอมบิก

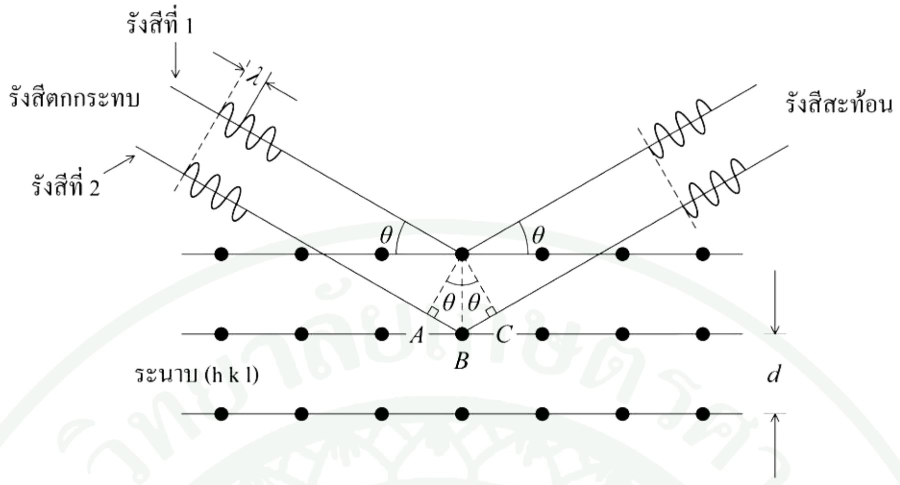
ในกรณีของฟิล์มบางอัลลอย AlCu ที่เคลือบด้วยวิธีของ Draissia *et al.* , (2006) จะได้แผนภาพเฟสดังภาพที่ 10 โดยฟิล์มบางที่มีปริมาณน้อยกว่า 45 % ของอะตอมทองแดง ในอลูมิเนียมจะมี 2 เฟส คือ เฟส αAl และ เฟส Al_2Cu ฟิล์มบางที่มี 65% ของอะตอมทองแดง มีเฟส αAl + Cu_3Al และ ฟิล์มบางที่มี 85% ของอะตอมทองแดง จะมีเฟส αAl + αCu + Cu_3Al



ภาพที่ 10 แผนภาพเฟสการเกิดสารประกอบเชิงโลหะในฟิล์มบางอัลลอย Al – Cu

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบหาสาร (substance) ที่มีอยู่ในฟิล์มตัวอย่าง เมื่อผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในฟิล์มตัวอย่าง อิเล็กตรอนในอะตอมของฟิล์มจะกระเจิงรังสีเอกซ์ออกมาทุกทิศทาง เมื่อรังสีที่กระเจิงออกมาจากอะตอมต่างๆ มีเฟสตรงกัน (in phase) จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ซึ่งจะเกิดขึ้นในบางทิศทางเท่านั้น ถ้าอะตอมในผลึกเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ความเข้มของรังสีที่แทรกสอดกันจะสูงมาก โดยขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอมในระนาบ รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ของสารแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ และเป็นอิสระกันทำให้สามารถระบุสารต่างๆ ในฟิล์มตัวอย่างนั้นได้



ภาพที่ 11 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากระนาบอะตอมที่อยู่ถัดกัน

เมื่อผ่านรังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (monochromatic wavelength, λ) เข้าไปในผลึกที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ดังภาพที่ 11 รังสีที่ 1 และรังสีที่ 2 ตกกระทบเป็นมุม θ กับระนาบ (h k l) ของอะตอม รังสีทั้งสองจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน เมื่อรังสีที่ 2 เดินทางด้วยระยะทางที่มากกว่ารังสีที่ 1 เท่ากับ AB+BC มีค่าเท่ากับจำนวนเต็มคูณกับความยาวคลื่น λ ดังสมการ

$$AB + BC = n\lambda \qquad (6)$$

โดย n เป็นลำดับการเลี้ยวเบน (diffraction order) เท่ากับ 1, 2, 3,…

จากภาพที่ 11 จะได้ AB = BC = d sinθ โดย d เป็นระยะระหว่างระนาบ (interplanar spacing) เมื่อแทนค่า AB และ BC ในสมการ (6) จะได้กฎของแบรกก์ (Bragg’s law) ดังนี้

$$2d\sin\theta = n\lambda \qquad (7)$$

การวิเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถทำได้ โดยใช้วิธี θ-2θ ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (θ-2θ diffractometer method) ซึ่งเป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีผง (powder method) จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2θ ของตำแหน่งที่ปรากฏพีค เมื่อแทนค่า θ และ λ ในกฎของแบรกก์ จะสามารถคำนวณหาระยะห่าง d ระหว่างระนาบ (hkl) ได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

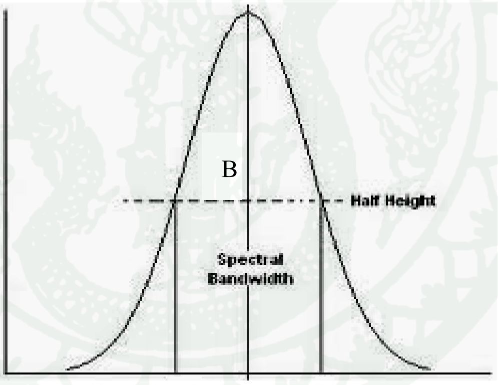
แลตทิซพารามิเตอร์ a , b และ c ของผลึก สำหรับโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ เทเทรากอนอล และออร์ธอรอมบิก (orthorhombic) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

ผลึกลูกบาศก์ $$\frac{1}{d^2}=\frac{1}{a^2}\left(h^2+k^2+l^2\right) \quad (8)$$

ผลึกเททรากอนอล $$\frac{1}{d^2}=\frac{\left(h^2+k^2\right)}{a^2}+\frac{l^2}{c^2} \quad (9)$$

ผลึกออร์ธอรอมบิก $$\frac{1}{d^2}=\frac{h^2}{a^2}+\frac{k^2}{b^2}+\frac{l^2}{c^2} \quad (10)$$

ความสูงของพีคสามารถบอกความเป็นผลึกในฟิล์ม โดยความเป็นผลึกในฟิล์มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูงของพีค พีค ที่สูงที่สุดบอกระนาบที่อะตอมชอบจัดเรียง (preferential orientation) ในฟิล์ม ซึ่งเป็นระนาบที่ขนานกับผิวหน้าของฟิล์ม



ภาพที่ 12 ความกว้าง B ของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด I/2

ความกว้างของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM) B หาได้จากภาพที่ 12 ดังสมการ

$$B=\Delta\theta=\theta_2-\theta_1 \quad (11)$$

โดย และ เป็น มุมแบรกก์ที่น้อยที่สุดและมากที่สุดตามลำดับที่เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขนาดเกรน D_{hkl} คำนวณได้โดยใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Sherrer's equation) ดังนี้

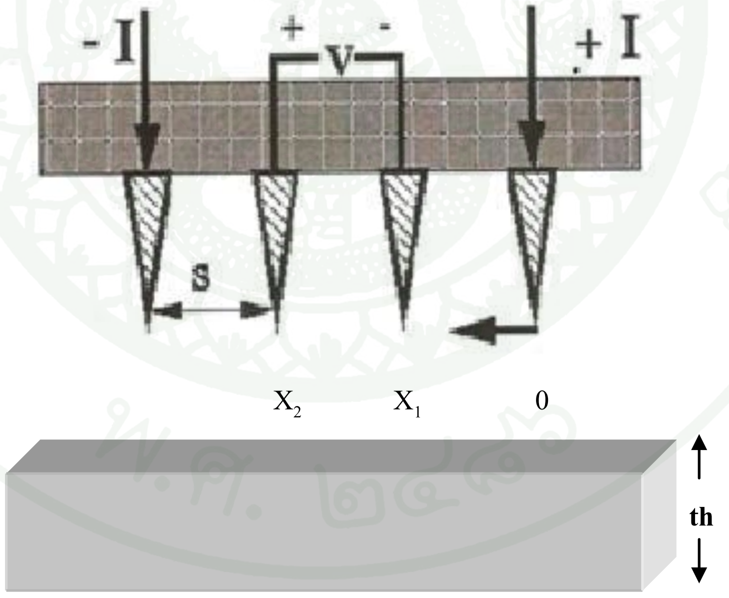
$$D_{hkl} = \frac{0.89\lambda}{B\cos\theta} \tag{12}$$

โดย λ เป็น ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

และ θ เป็น มุมแบรกก์ที่เกิดพีค

การวัดความต้านทานด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

วิธีหัววัดสี่จุดเป็นวิธีที่ใช้หาค่าความต้านทานของวัสดุ โดยสามารถ หาค่าความต้านทานของวัสดุที่เป็นก้อนและเป็นฟิล์มบาง การหาค่าความต้านทานสามารถทำได้โดยการต่ออุปกรณ์ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 วิธีหัววัดสี่จุดเพื่อใช้หาค่าความต้านทาน

วิธีหัววัดสี่จุด ใช้หัววัดที่ทำจากโลหะปลายแหลม ซึ่งมีระยะห่างระหว่างปลายโลหะทั้งสี่เท่ากัน และต้องมีสปริงรองรับแรงที่ปลายโลหะแต่ละอัน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการกดหัววัดลงไปบนผิววัสดุ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในกรณีที่ วัสดุมีความหนา (th) มากกว่าระยะห่าง ระหว่าง ขา (S) ของหัววัดมาก นั้นคือ th >> S จะได้ค่าความต้านทาน dR เป็น

$$dR = \rho\left(\frac{dX}{A}\right)$$

โดย ρ เป็นสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ

dX เป็นระยะเล็กๆ ที่ระหว่างขาหัววัด

และ A เป็นพื้นที่ของฟิล์มทีทำการวัด

ถ้าปลายหัววัดปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมาในลักษณะเป็นวงกลม เมื่ออินทิเกรตจากปลายหัววัดคู่ที่อยู่ตรงกลาง จะได้

(13)

การ หาค่าความต้านทานด้วยวิธี หัววัดสี่จุดต้อง จ่ายกระแสไฟฟ้า I เข้าระหว่างหัววัดที่ 1 และหัววัดที่ 4 ดังนั้นจึงต้องใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถจ่ายค่ากระแสไฟฟ้า ที่ต่ำมาก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการซ้อนทับกันของกระแส (superposition of current) ของหัววัดคู่ที่อยู่ด้านนอก เมื่อใช้เครื่องมือวัดความต่างศักย์ V ที่มีความละเอียดสูงวัดความต่างศักย์ตกคร่อมระหว่างหัววัดคู่ที่อยู่ตรงกลาง จะสามารถหาค่าความต้านทาน R ได้จากสมการ

(14)

เมื่อแทนค่า R จากสมการ (14) ในสมการ (13) จะได้สภาพต้านทาน ρ ของวัสดุดังนี้

(15)

สมการ (15) ใช้ได้กับกรณีที่ วัสดุมี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนามากกว่าระยะ S มากๆ ในกรณีที่วัสดุมีความหนาน้อย โดยที่ th << S จะได้

(16)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางและวิเคราะห์

วัสดุที่ใช้เคลือบฟิล์มตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง มีรายละเอียดดังตารางที่ 2

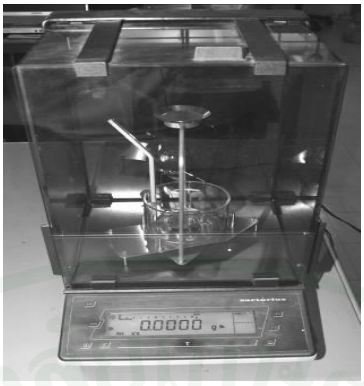
ตารางที่ 2 รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง

วัสดุ	ขนาด	สูตรทางเคมี	บริษัทที่ผลิต	ความบริสุทธิ์
แผ่นอลูมิเนียม	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 in หนา 0.125 in	Al	Kurt J. Lesker Company	99.9%
แผ่นทองแดง	เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 in หนา 0.188 in	Cu	Kurt J. Lesker Company	99.9%
แผ่นกระจกสไลด์	กว้าง 0.394 in ยาว 1.181 in	SiO_2	Sail Brand, China	-

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มตัวอย่าง

1. เวอร์เนียร์แคลิเปอร์แบบดิจิตอล
2. เมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol)
3. ที่ตัดกระจก
4. ถุงมือยาง
5. เครื่องชั่งอย่างละเอียด SATORIUS รุ่น AC 2105 จอแสดงผลแบบ black graphic LCD ดังภาพที่ 14 ผลิตโดยบริษัท SATORIUS GMBH GOTTINGGEN ประเทศเยอรมัน ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 230 กรัม ความแม่นยำ 0.1 มิลลิกรัม ความต่างศักย์ 220 V 50 Hz

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



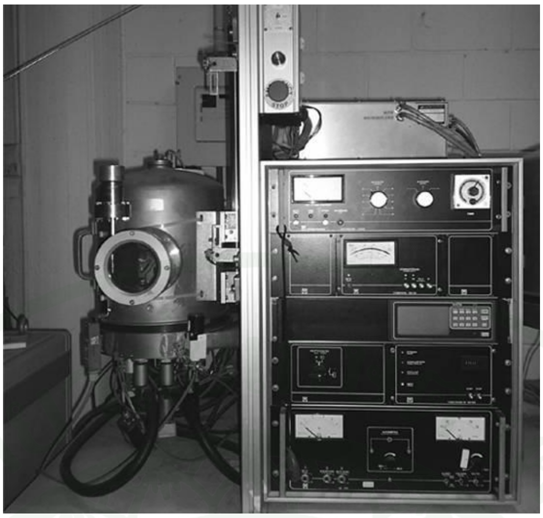
ภาพที่ 14 เครื่องชั่งอย่างละเอียด

6. เตาเผาความร้อนสูง NEY รุ่น 2–525 ดังภาพที่ 15 ผลิตโดยบริษัท NEY ประเทศสหรัฐอเมริกา กำลังไฟฟ้า 1500 W กระแสสูงสุด 6.8 A ขอบเขตอุณหภูมิ 100 ˚C - 1100 ˚C ความแม่นยำอุณหภูมิ ± 5 ˚C อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 0 ˚C – 40 ˚C/min

ภาพที่ 15 เตาเผาความร้อนสูง

7. เครื่องเคลือบฟิล์ม UNIVEX รุ่น 300 ดังภาพที่ 16 ผลิตโดยบริษัท LEYBOLD–HERAEUS GMBH GOTTINGGEN ประเทศเยอรมัน สามารถเคลือบฟิล์มด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน วิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน วิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง และวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 16 เครื่องเคลือบฟิล์ม

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มตัวอย่าง

1. เวอร์เนียร์แคลิเปอร์แบบดิจิตอล
2. ชุดเครื่องชั่งอย่างละเอียด SATORIUS รุ่น AC 2105

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มตัวอย่าง

ภาพที่ 17 เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

1. เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ รุ่น D8 ADVANCE ดังภาพที่ 17 ผลิตโดยบริษัท Bruker Advance X-ray Solutions จำกัด ประกอบด้วย

- เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ รุ่น D8 ADVANCE การวิจัยนี้ใช้หลอดรังสีเอกซ์ชนิด Cu-Kα ความยาวคลื่นเฉลี่ย 0.1541 nm
- เครื่องบันทึกสัญญาณ รุ่น D8 ADVANCE
- เครื่องคอมพิวเตอร์

อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มตัวอย่าง

1. ชุดหัววัดสี่จุด ดังภาพที่ 18 มีระยะห่างระหว่างหัววัดเท่ากันเท่ากับ 0.25 เซนติเมตร พร้อมที่วางแผ่นฟิล์มที่สามารถเลื่อนขึ้นและลงได้
2. เครื่องวัดความต่างศักย์ที่มีความละเอียดสูง
3. แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ต่ำมาก

ภาพที่ 18 ชุดหัววัดสี่จุด

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิธีเคลือบฟิล์มและการวิเคราะห์

การเคลือบฟิล์ม

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดงบนแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำยาล้างจาน แล้วล้างออกด้วยน้ำสะอาด เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลม ทำความสะอาดด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol) แล้วปล่อยให้แห้งในอากาศ หลังจากนั้นนำไปชั่งหามวลก่อนเคลือบ m_1 พร้อมทั้งวัดความกว้าง a และความยาว b ของแผ่นกระจกสไลด์และคำนวณพื้นที่ผิวของแผ่นกระจกสไลด์

2. วางแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้บนที่วางแผ่นรองรับของเครื่องเคลือบฟิล์ม แล้วทำการสูบอากาศออกจากเครื่องเคลือบฟิล์ม จนกระทั่งภายในแชมเบอร์ มีความดันประมาณ 2×10^{-5} mbar

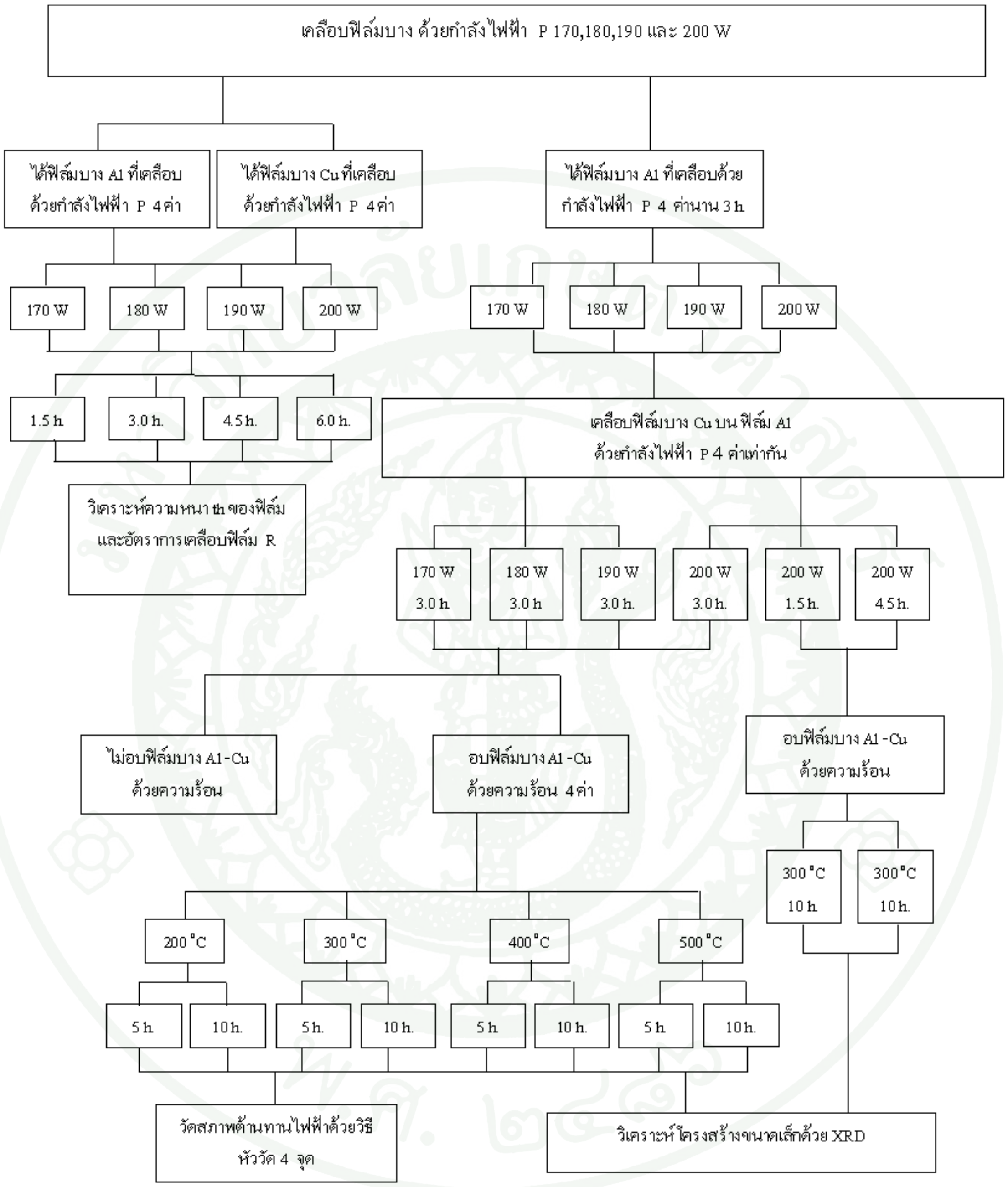
3. ปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าสู่แชมเบอร์ จนกระทั่งภายในแชมเบอร์มีความดันประมาณ 8×10^{-3} mbar

4. เคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง ด้วยกำลังไฟฟ้า P นาน t ชั่วโมง ดังภาพที่ 19 ดังนี้

4.1 เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม และเคลือบฟิล์มบางทองแดงบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า P 4 ค่า คือ 170, 180, 190 และ 200 W ที่กำลังไฟฟ้าแต่ละค่าจะใช้เวลาเคลือบต่างกัน 4 ช่วง คือ 1.5, 3.0, 4.5, และ 6.0 ชั่วโมง

4.2 นำฟิล์มบางอลูมิเนียม ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 4 ค่า คือ 170, 180, 190 และ 200 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มาเคลือบ ด้วยฟิล์มบางทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้า และใช้เวลาเคลือบฟิล์ม เท่ากัน กับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม คือ 3 ชั่วโมงและเคลือบฟิล์มบางทองแดงบนฟิล์มบางอลูมิเนียมด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W นาน 1.5, 4.5 และ 6.0 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 19 แผนภาพแสดงการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม, ฟิล์มบางทองแดง, ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ด้วยกำลังไฟฟ้า P และการอบฟิล์มที่อุณหภูมิ T

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การอบฟิล์มบาง

นำฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ที่เคลือบได้ในข้อ 4.2 มาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 ไม่อบด้วยความร้อนและกลุ่มที่ 2 อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 °C เป็นเวลา 5 และ 10 ชั่วโมง

การวิเคราะห์ฟิล์ม

1. การหาความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม R

นำฟิล์มบางอลูมิเนียม และฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบได้ มาหา ความหนา th ของฟิล์ม และอัตราการเคลือบฟิล์ม R ด้วยสมการ

(17)

และ (18)

โดย m_1, m_2 เป็น มวลของแผ่นกระจกสไลด์ก่อน, หลังเคลือบฟิล์ม ตามลำดับ

$a\,b$ เป็น พื้นที่ของแผ่นกระจกสไลด์

เป็น ความหนาแน่นของสารเคลือบ

และ t เป็น เวลาที่ใช้ในการเคลือบ

2. การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง

นำฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง ที่อบด้วยความร้อนมาศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ใส่แผ่นฟิล์มบางในเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.2 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

2.1.1 มุมเริ่มต้น 20.00 องศา และ มุมสุดท้าย 55.00 องศา

2.1.2 ใช้รังสีเอกซ์ชนิดส่องกวาดต่อเนื่องความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 25 mA

2.1.3 ใช้เป้าทองแดงความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ $\lambda_{Cu\text{-}K\alpha} = 0.1541$ nm

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.1.4 ช่องเล็กยาวลู่ออก 0.25 องศา ช่องเล็กยาวลู่เข้า 0.1 องศา

2.3 นำข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาคำนวณขนาดเกรน D_{hkl} ของโครงสร้างจุลภาค ด้วยสมการของเชอร์เรอร์โดยใช้สมการ (12)

3. การหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีหัววัดสี่จุด

นำฟิล์มบางที่อบและไม่อบด้วยความร้อนมาหาสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ใส่ฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดงในชุดหัววัดสี่จุด

3.2 ตั้งกระแสไฟฟ้าให้มีค่าน้อยๆ แล้ววัดค่าความต่างศักย์

3.3 ค่อย ๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้าขึ้นตามลำดับ พร้อมทั้งวัดความต่างศักย์ในแต่ละครั้ง

3.4 คำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยใช้สมการ (15)

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย

สถานที่ทำการวิจัย

1. เคลือบฟิล์มบาง ศึกษามวล ความหนา อัตราการเคลือบ และโครงสร้างจุลภาค ของฟิล์มบาง ที่หน่วยวิจัยและปฏิบัติการสารตัวนำยวดยิ่งและพอลิเมอร์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

2. ศึกษาแลตทิซพารามิเตอร์ และโครงสร้างจุลภาคของฟิล์มบาง ที่ห้องปฏิบัติการวิทยารังสีเอกซ์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

3. ศึกษาสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของฟิล์ม บาง ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสมบัติทางไฟฟ้า - แม่เหล็ก ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

ระยะเวลาการทำวิจัย

ปีการศึกษา 2551 – ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษา ความหนา และอัตราการเคลือบฟิล์มบาง

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและเคลือบฟิล์มบางทองแดง บนแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้า 4 ค่า คือ 170, 180, 190 และ 200 W ใช้เวลาเคลือบฟิล์ม 4 ช่วง คือ 1.5, 3.0, 4.5 และ 6.0 ชั่วโมง จึงได้ฟิล์มบางอลูมิเนียม 16 ตัวอย่าง และได้ฟิล์มบางทองแดง 16 ตัวอย่าง รวมทั้งหมด 32 ตัวอย่าง ซึ่งใช้สัญลักษณ์ PAt แทนชื่อฟิล์มอลูมิเนียม และใช้สัญลักษณ์ PCt แทนชื่อฟิล์มทองแดง ดังนี้

โดย P เป็นตัวเลขแทนกำลังไฟฟ้า (วัตต์) ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ซึ่งตัวเลข 17, 18, 19 และ 20 แทนกำลังไฟฟ้า 170, 180, 190 และ 200 W ตามลำดับ

A แทน ฟิล์มบางอลูมิเนียม

C แทน ฟิล์มบางทองแดง

และ t เป็นตัวเลขแทนเวลา (ชั่วโมง) ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม

ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางทองแดง

ความกว้าง a ความยาว b พื้นที่ ab มวลก่อนเคลือบ m_1 และหลังเคลือบ m_2 ของแผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง โดย $\triangle m = m_2 - m_1$ เป็นมวลของฟิล์มบางอลูมิเนียม และฟิล์มบางทองแดง ได้แสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ และ $\triangle m/ab$ เป็นมวลต่อพื้นที่ของฟิล์มที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็นเวลา t

ความหนา th ของฟิล์ม และอัตราการเคลือบฟิล์ม R ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็นเวลา t ซึ่งคำนวณจากข้อมูลการเคลือบฟิล์มบาง โดยใช้สมการ (17) และ (18) ตามลำดับ ได้แสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตัวอย่างการคำนวณความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบ ฟิล์ม R ได้แสดงในภาคผนวก ก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 3 ความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม R ที่คำนวณจากข้อมูลผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม

ฟิล์มอลูมิเนียม ตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม PAt	P (W)	t (h)	a (cm)	b (cm)	ab (cm^2)	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m/ab$ (g/cm^2)	th (μm)	R (nm/min)	$R_{เฉลี่ย}$ (nm/min)
1	17A1.5	170	1.5	2.230	2.232	4.977	0.1879	0.1884	0.0005	1.00×10^{-4}	0.4	4.1	4.3
2	17A3.0		3.0	2.224	2.226	4.951	0.1768	0.1778	0.0010	2.02×10^{-4}	0.8	4.2	
3	17A4.5		4.5	2.231	2.239	4.995	0.1948	0.1964	0.0016	3.20×10^{-4}	1.2	4.4	
4	17A6.0		6.0	2.221	2.232	4.957	0.1775	0.1796	0.0021	4.24×10^{-4}	1.6	4.4	
5	18A1.5	180	1.5	2.220	2.231	4.953	0.1774	0.1782	0.0008	1.62×10^{-4}	0.6	6.7	6.7
6	18A3.0		3.0	2.225	2.228	4.957	0.1775	0.1791	0.0016	3.23×10^{-4}	1.2	6.6	
7	18A4.5		4.5	2.216	2.222	4.924	0.1698	0.1723	0.0025	5.08×10^{-4}	1.9	6.9	
8	18A6.0		6.0	2.224	2.228	4.955	0.1774	0.1806	0.0032	6.46×10^{-4}	2.4	6.7	
9	19A1.5	190	1.5	2.221	2.232	4.957	0.1775	0.1786	0.0011	2.22×10^{-4}	0.8	9.1	8.9
10	19A3.0		3.0	2.231	2.239	4.995	0.1948	0.1969	0.0021	4.20×10^{-4}	1.6	8.6	
11	19A4.5		4.5	2.224	2.226	4.951	0.1768	0.1801	0.0033	6.67×10^{-4}	2.5	9.2	
12	19A6.0		6.0	2.230	2.232	4.977	0.1879	0.1922	0.0043	8.64×10^{-4}	3.2	8.9	
13	20A1.5	200	1.5	2.222	2.231	4.957	0.1775	0.1789	0.0014	2.82×10^{-4}	1.0	11.6	11.5
14	20A3.0		3.0	2.219	2.234	4.957	0.1775	0.1803	0.0028	5.65×10^{-4}	2.1	11.6	
15	20A4.5		4.5	2.229	2.231	4.973	0.1866	0.1907	0.0041	8.24×10^{-4}	3.1	11.3	
16	20A6.0		6.0	2.221	2.237	4.968	0.1836	0.1892	0.0056	11.27×10^{-4}	4.2	11.6	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 4 ความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม R ที่คำนวณจากข้อมูลผลการเคลือบฟิล์มบางทองแดง

ฟิล์มทองแดงตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์ม PCt	P (W)	t (h)	a (cm)	b (cm)	ab (cm^2)	m_1 (g)	m_2 (g)	Δm (g)	$\Delta m/ab$ (g/cm^2)	th (µm)	R (nm/min)	$R_{เฉลี่ย}$ (nm/min)
1	17C1.5	170	1.5	2.221	2.232	4.957	0.1775	0.1826	0.0051	10.29×10^{-4}	1.2	12.8	12.8
2	17C3.0		3.0	2.223	2.232	4.962	0.1806	0.1907	0.0101	20.35×10^{-4}	2.3	12.7	
3	17C4.5		4.5	2.224	2.236	4.973	0.1901	0.2054	0.0153	30.77×10^{-4}	3.5	12.8	
4	17C6.0		6.0	2.23	2.232	4.977	0.1911	0.2115	0.0204	40.99×10^{-4}	4.6	12.8	
5	18C1.5	180	1.5	2.220	2.23	4.951	0.1768	0.1829	0.0061	12.32×10^{-4}	1.4	15.3	15.4
6	18C3.0		3.0	2.225	2.232	4.966	0.1835	0.1957	0.0122	24.57×10^{-4}	2.8	15.3	
7	18C4.5		4.5	2.228	2.231	4.971	0.1867	0.2051	0.0184	37.01×10^{-4}	4.2	15.4	
8	18C6.0		6.0	2.227	2.233	4.973	0.1871	0.2117	0.0246	49.47×10^{-4}	5.5	15.4	
9	19C1.5	190	1.5	2.222	2.229	4.953	0.1774	0.1842	0.0068	13.73×10^{-4}	1.5	17.1	17.1
10	19C3.0		3.0	2.229	2.233	4.977	0.1879	0.2014	0.0135	27.12×10^{-4}	3.0	16.9	
11	19C4.5		4.5	2.221	2.229	4.951	0.1768	0.1972	0.0204	41.20×10^{-4}	4.6	17.1	
12	19C6.0		6.0	2.228	2.232	4.973	0.1871	0.2145	0.0274	55.10×10^{-4}	6.2	17.1	
13	20C1.5	200	1.5	2.225	2.231	4.964	0.1816	0.1888	0.0072	14.50×10^{-4}	1.6	18.0	18.6
14	20C3.0		3.0	2.228	2.231	4.971	0.1867	0.2019	0.0152	30.58×10^{-4}	3.4	19.1	
15	20C4.5		4.5	2.229	2.231	4.973	0.1871	0.2095	0.0224	45.04×10^{-4}	5.0	18.7	
16	20C6.0		6.0	2.231	2.239	4.995	0.1948	0.2244	0.0296	59.26×10^{-4}	6.6	18.4	

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาพที่ 20 และภาพที่ 21 แสดงความหนา th ของฟิล์มและอัตราการเคลือบ ฟิล์ม R ตามลำดับ ของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็นเวลา t ซึ่งจะเห็นว่า ฟิล์มมีความหนา th และอัตราการเคลือบฟิล์ม R เพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้า P และเวลา t ที่ใช้เคลือบฟิล์มที่เพิ่มขึ้น

เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าและเวลาในการเคลือบเท่ากัน ฟิล์มบางทองแดงมี ความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มมากกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม

ผลการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง

การวิจัยนี้ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง 2 แบบดังนี้

1. เมื่อนำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม ด้วยกำลังไฟฟ้า P 3 ค่า คือ 170, 180 และ 190 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมง มาเคลือบด้วยฟิล์มบางทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้า P เดียวกันกับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม และ ใช้เวลาเคลือบฟิล์ม 3.0 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง รวม 3 ตัวอย่าง

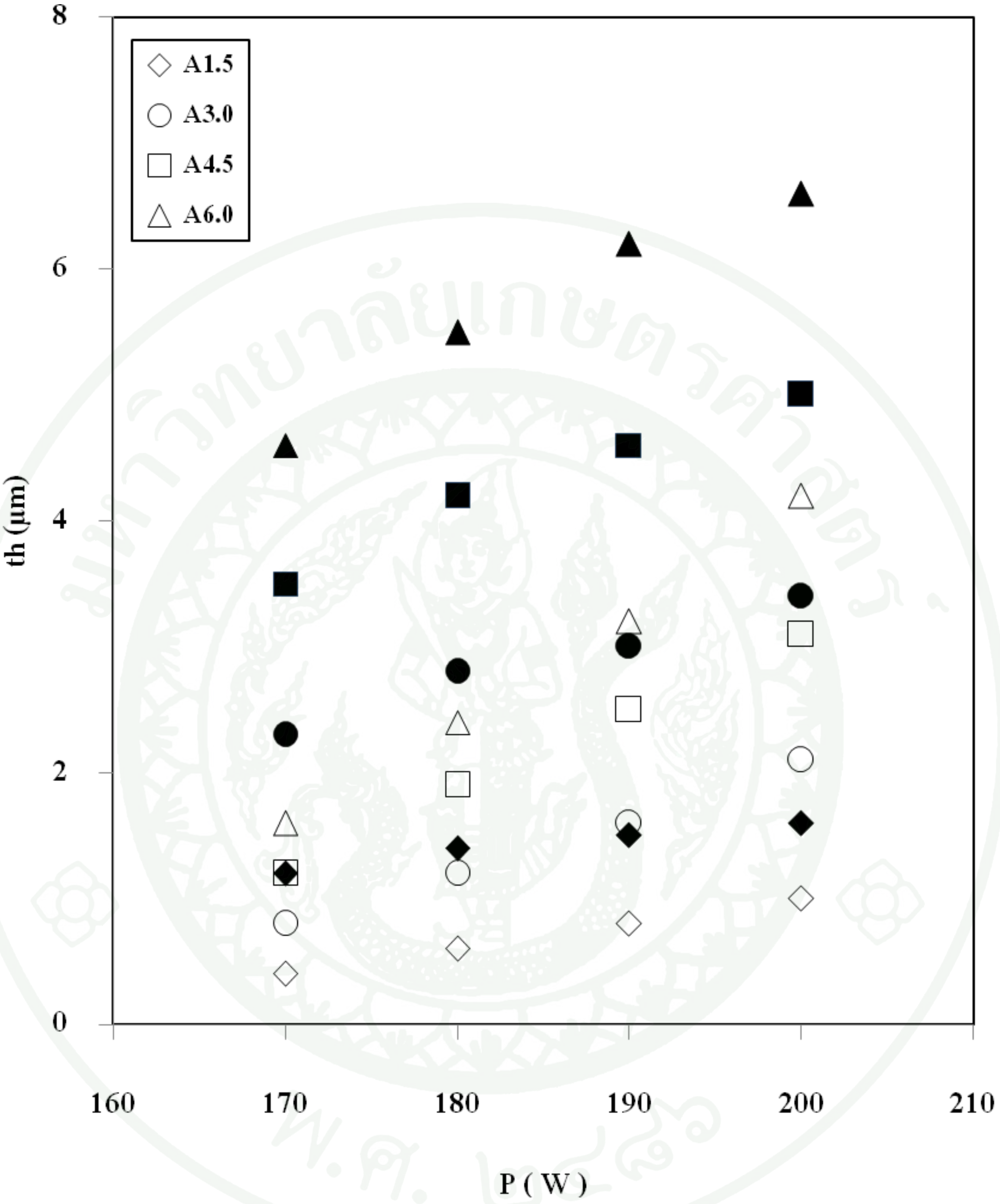
2. เมื่อนำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม ด้วยกำลังไฟฟ้า P 200 W เป็นเวลา 3.0 ชั่วโมง มาเคลือบด้วยฟิล์มบางทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยใช้กำลังไฟฟ้า P เดียวกันกับการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมคือ 200 W และ ใช้เวลาเคลือบฟิล์มต่างกัน 4 ช่วง คือ 1.5, 3.0 และ 4.5 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง รวม 3 ตัวอย่าง

ฟิล์มบาง อลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบได้ในข้อ 1 และ 2 รวมทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ใช้สัญลักษณ์ PXt แทนชื่อฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ดังนี้

โดย	P	เป็นตัวเลขแทนกำลังไฟฟ้า (วัตต์) ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ซึ่งตัวเลข 17, 18, 19 และ 20 แทนกำลังไฟฟ้า 170, 180, 190 และ 200 W ตามลำดับ
	X	แทน ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง
และ	t	เป็นตัวเลขแทนเวลา (ชั่วโมง) ที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มทองแดงบนอลูมิเนียม

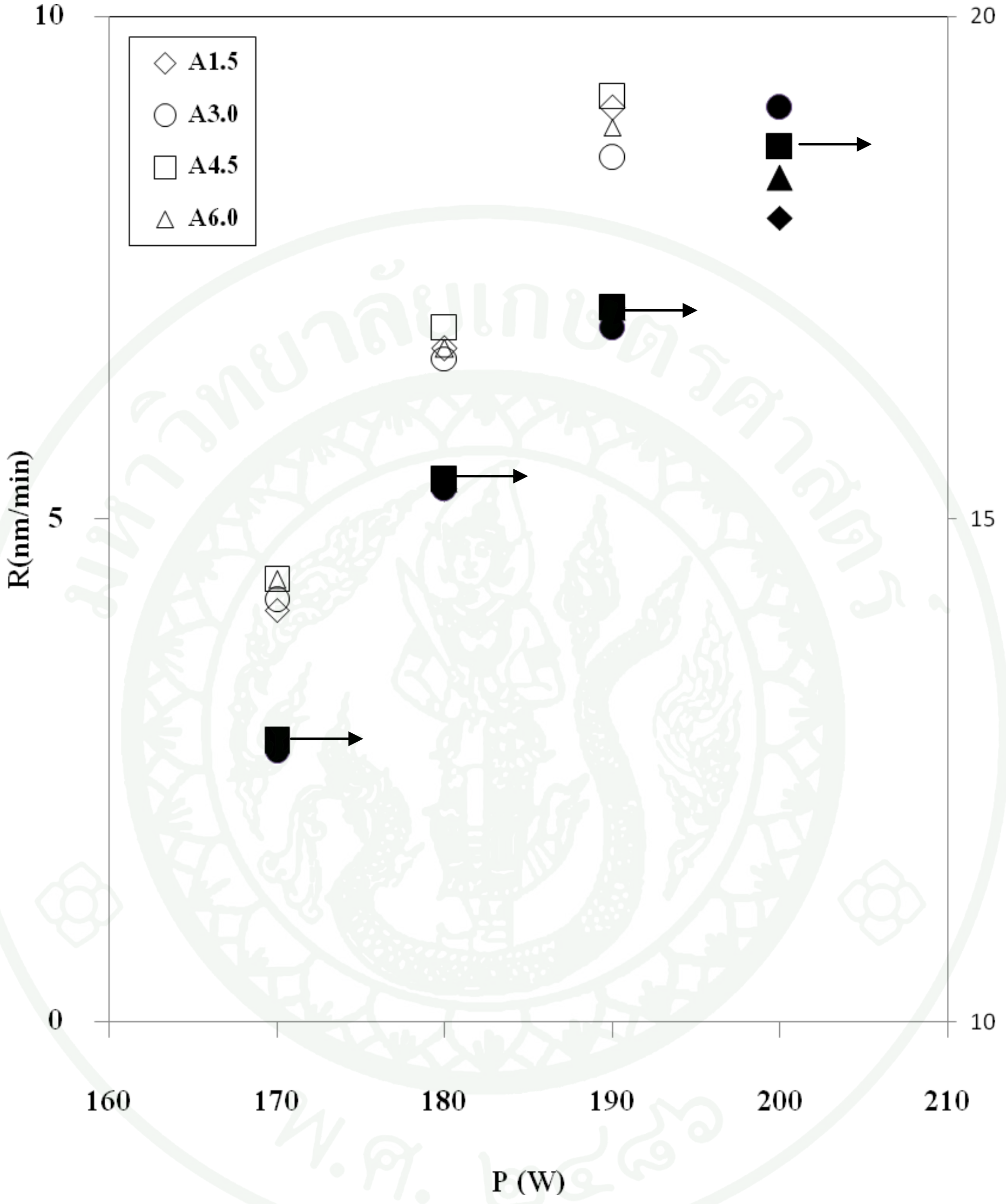
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบความหนา th ของฟิล์ม และอัตราการเคลือบฟิล์ม R ของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็นเวลา t และแสดงสัญลักษณ์ที่ใช้แทนฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 20 ความหนา th ของฟิล์มบางอลูมิเนียม PAt และฟิล์มบางทองแดง PCt ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็น เวลา t โดย ○ แทน Al และ ● แทน Cu

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 21 อัตราการเคลือบฟิล์ม R ของฟิล์มบางอลูมิเนียม PAt และฟิล์มบางทองแดง PCt ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็น เวลา t โดย ○แทน Al และ ●แทน Cu

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบความหนา th ของฟิล์ม และอัตราการเคลือบฟิล์ม R ของฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางทองแดง ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P เป็นเวลา t ชื่อและสัญลักษณ์ที่ใช้แทนฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง (Al – Cu)

ฟิล์ม อลูมิเนียม- ทองแดง ตัวอย่างที่	P (W)	ฟิล์ม Al				ฟิล์ม Cu				ฟิล์ม Al - Cu	
		สัญลักษณ์ PAt_1	t_1 (h)	th (μm)	R (nm/min)	สัญลักษณ์ PCt	t (h)	th (μm)	R (nm/min)	ชื่อฟิล์ม PAt_1 / PCt	สัญลักษณ์ฟิล์ม PXt
1	170	17A3.0	3.0	0.8	4.2	17C3.0	3.0	2.3	12.7	17A3.0/17C3.0	17X3.0
2	180	18A3.0	3.0	1.2	6.6	18C3.0	3.0	2.8	15.3	18A3.0/18C3.0	18X3.0
3	190	19A3.0	3.0	1.6	8.6	19C3.0	3.0	3.0	16.9	19A3.0/19C3.0	19X3.0
4	200	20A3.0	3.0	2.1	11.6	20C1.5	1.5	1.6	18.0	20A3.0/20C1.5	20X1.5
5	200	20A3.0	3.0	2.1	11.6	20C3.0	3.0	3.4	19.1	20A3.0/20C3.0	20X3.0
6	200	20A3.0	3.0	2.1	11.6	20C4.5	4.5	5.0	18.7	20A3.0/20C4.5	20X4.5

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

การอบฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง

1. นำฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ตัวอย่างที่ 1-3 และตัวอย่างที่ 5 ที่ได้แสดงในตารางที่ 5 มาแบ่งเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ไม่อบด้วยความร้อน ได้ ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง 4 ตัวอย่าง

กลุ่มที่ 2 – 5 อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 °C ตามลำดับ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง 32 ตัวอย่าง

ดังนั้น ได้ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ในกลุ่ม 1-5 รวมทั้งหมด 36 ตัวอย่าง

2. นำฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ตัวอย่างที่ 4 และ ตัวอย่างที่ 6 ที่ได้แสดงในตารางที่ 5 ไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง ได้ฟิล์มบาง 4 ตัวอย่าง

ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ที่อบด้วยความร้อนและไม่อบด้วยความร้อนจะใช้ สัญลักษณ์ PXt /T- t' แทนชื่อฟิล์ม ดังนี้

โดย T เป็นตัวเลข แทนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบฟิล์ม ซึ่งตัวเลข 20, 30, 40 และ 50 แทนอุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 °C ตามลำดับ และ N แทนฟิล์มที่ไม่อบด้วยความร้อน

และ t' เป็นตัวเลข แทนเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม ซึ่งตัวเลข 5 และ10 แทนเวลา 5 และ10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง

เมื่อนำฟิล์มบาง อลูมิเนียม-ทองแดง (PXt/T- t') ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P = 170, 180, 190 และ 200 W อบด้วยความร้อนและไม่อบด้วยความร้อน ไปศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางดังภาพที่ 22 – 30 สำหรับฟิล์มบาง PXt/N ที่ไม่อบด้วยความร้อน จะไม่ปรากฏพีคของการเลี้ยวเบนจึงไม่ได้แสดงผลในภาพที่ 22 – 30

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียม 17A3.0/N และฟิล์มบางทองแดง 17C3.0/N ซึ่งเคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 170 W เป็นเวลา 3.0 ชั่วโมงและไม่ได้อบด้วยความร้อนได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

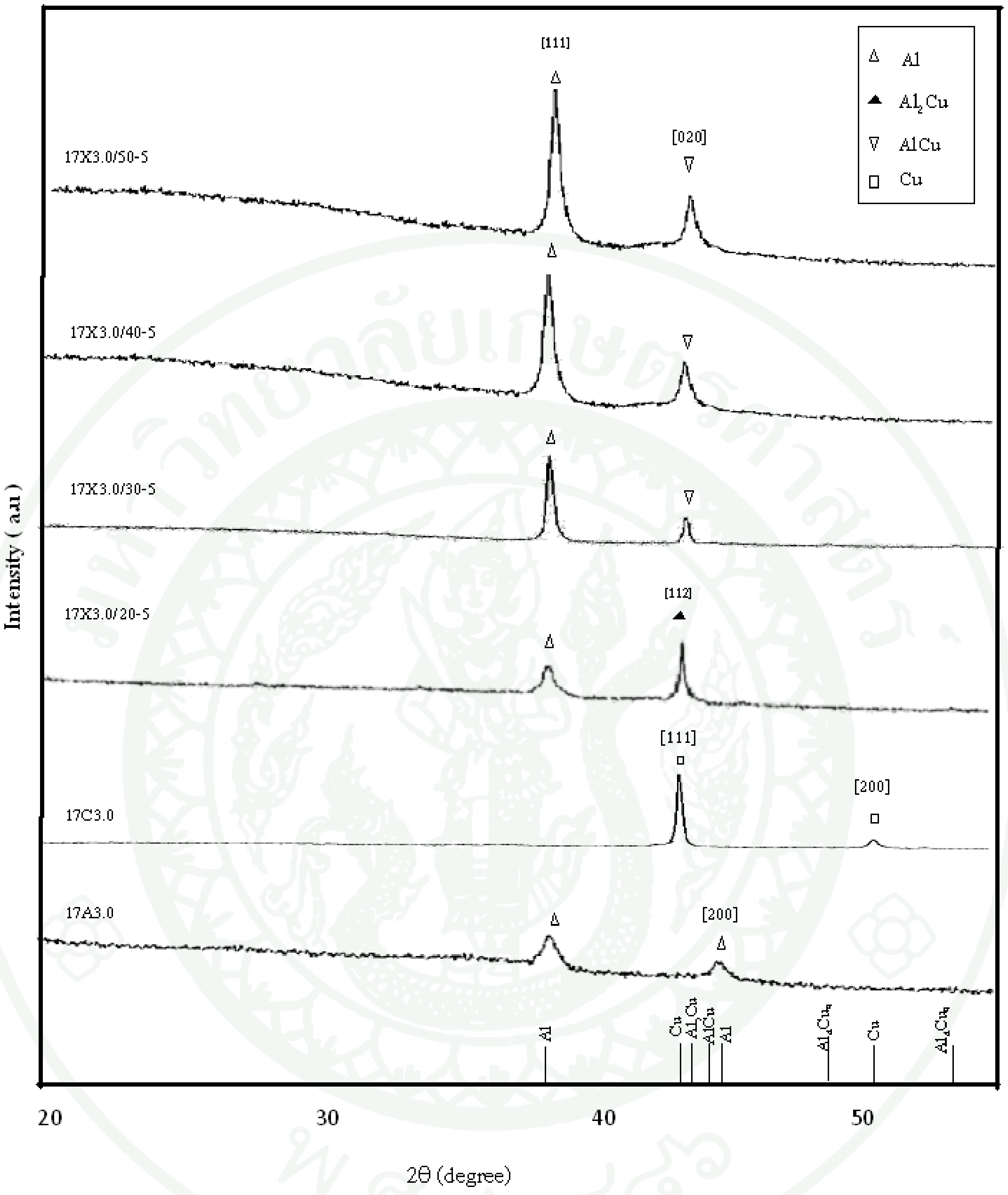
แสดงในภาพที่ 22 เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางอลูมิเนียม 17A3.0 และฟิล์มบางทองแดง 17C3.0 ในภาพที่ 22 พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียมและฟิล์มบางทองแดง มีพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ 2 พีค โดยฟิล์มบางอลูมิเนียมมีพีคของระนาบ (111) กับระนาบ (200) อยู่ที่มุม $2\theta = 38.47^{o}$ กับ 44.82^{o} และฟิล์มบางทองแดงมีพีคของระนาบ (111) กับระนาบ (200) อยู่ที่มุม $2\theta = 43.01^{o}$ กับ 50.78^{o} ตามลำดับ ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมระนาบ (111) และทองแดงระนาบ (200) เท่านั้น

อลูมิเนียมและทองแดง มีโครงสร้างผลึกแบบ ลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า (fcc) ซึ่งสามารถหาค่าระยะระหว่างระนาบ d_{111} ได้จากกฎของแบรกก์ในสมการ (7) ในที่นี้ใช้ค่า $\lambda = 0.1541$ nm และคำนวณแลตทิซพารามิเตอร์ a ได้จากสมการ (8) โดยได้ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของอลูมิเนียม a = 0.405 nm และของทองแดง a = 0.360 nm ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าแลตทิซพารามิเตอร์มาตรฐานของอลูมิเนียมและทองแดงซึ่งมีค่า a = 0.403 nm, 0.360 nm ตามลำดับ โดยค่ามุม 2θ มาตรฐานของระนาบการเลี้ยวเบน (111) ของอลูมิเนียมและระนาบ (200) ของทองแดงได้แสดงในภาคผนวก ข ขนาดเกรน D_{hkl} ของฟิล์มบางที่คำนวณจากสมการเชอร์เรอร์ในสมการ (12)ได้แสดงในตารางที่ 6 โดยอลูมิเนียมมีขนาดเกรน D_{111}= 26 nm ซึ่งเล็กกว่าขนาดเกรนของทองแดงซึ่งมีขนาดเกรน D_{200} = 67 nm

เมื่อพิจารณา รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง PX3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P = 170, 180, 190 และ 200 W ในภาพที่ 22-30 พบว่าฟิล์มบางทุกตัวอย่าง มีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พีคแรกเป็นของระนาบ (111) ของอลูมิเนียม ที่มุม $2\theta = 38.63^{o}$- 38.93^{o} การเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าต่ำลงหรืออบฟิล์มที่อุณหภูมิสูงขึ้นและนานขึ้นมีผลทำให้มีความเข้มของระนาบ (111) ของอลูมิเนียมสูงขึ้นและมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น โดยขนาดเกรนของอลูมิเนียมอยู่ในช่วง 21 nm – 53 nm

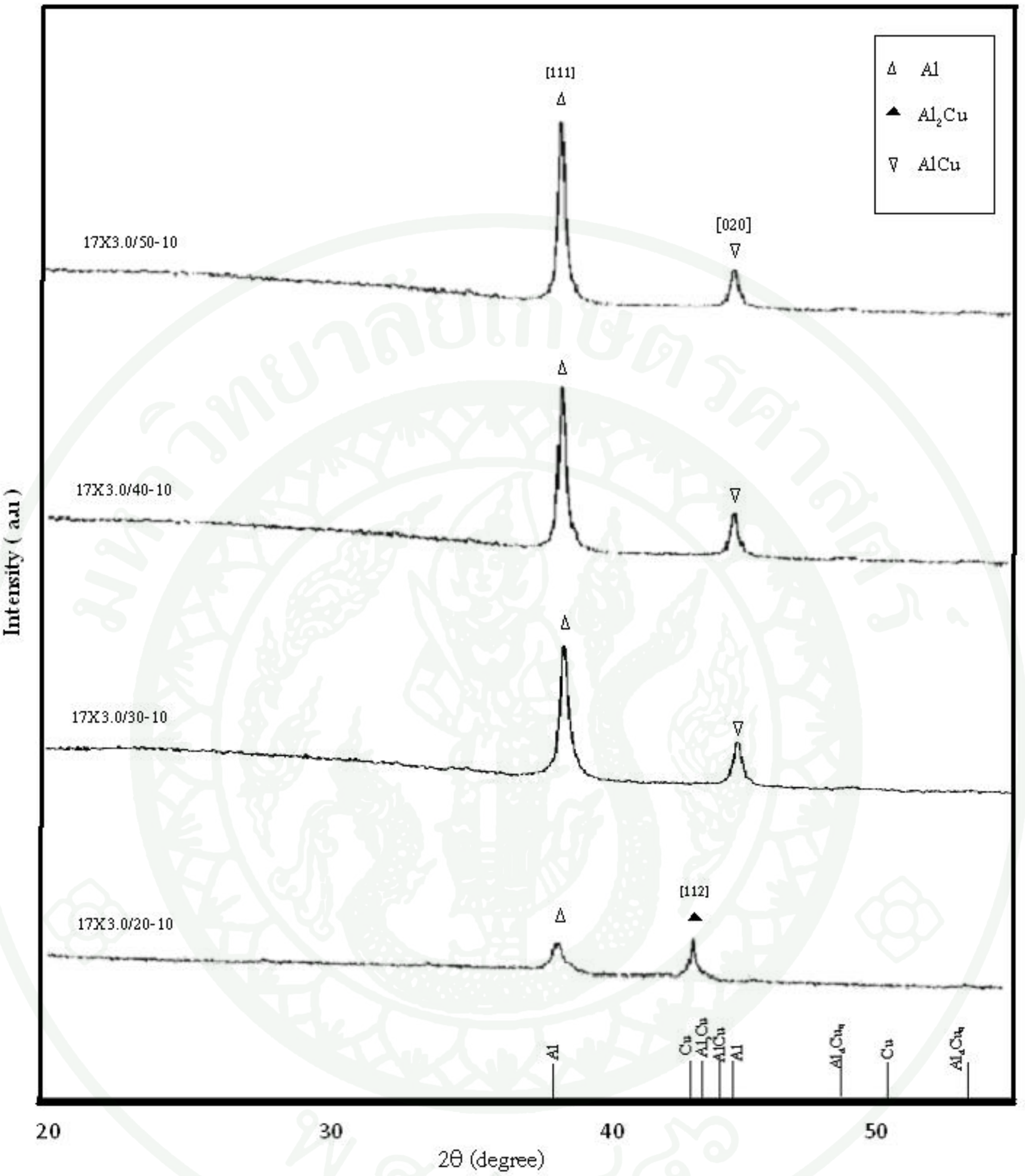
เมื่อพิจารณาฟิล์มบาง PX3.0/20-t$^{/}$ ที่อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 200 ^{o}C นาน $t^{/}$ = 5 h, 10 h พบว่าที่ทุกค่าของกำลังไฟฟ้า P ฟิล์มบางมีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ที่มุม $2\theta = 42.85^{o}$- 42.89^{0} มีขนาดเกรน D_{112} = 33 nm – 73 nm นอกจากนี้ที่กำลังไฟฟ้า P = 180, 190 และ 200 W พบว่ามีพีคการเลี้ยวเบนพีคที่สามของระนาบ (200) ของเฟสทองแดง Cu ที่มุม $2\theta = 50.76^{o}$- 50.78^{o} มีขนาดเกรน D_{200} = 69 nm – 72 nm ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7 โดยความเข้ม I และขนาดเกรน D_{hkl} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้า P ที่ใช้เคลือบและอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้อบฟิล์มดังภาพที่ 31และ 32

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



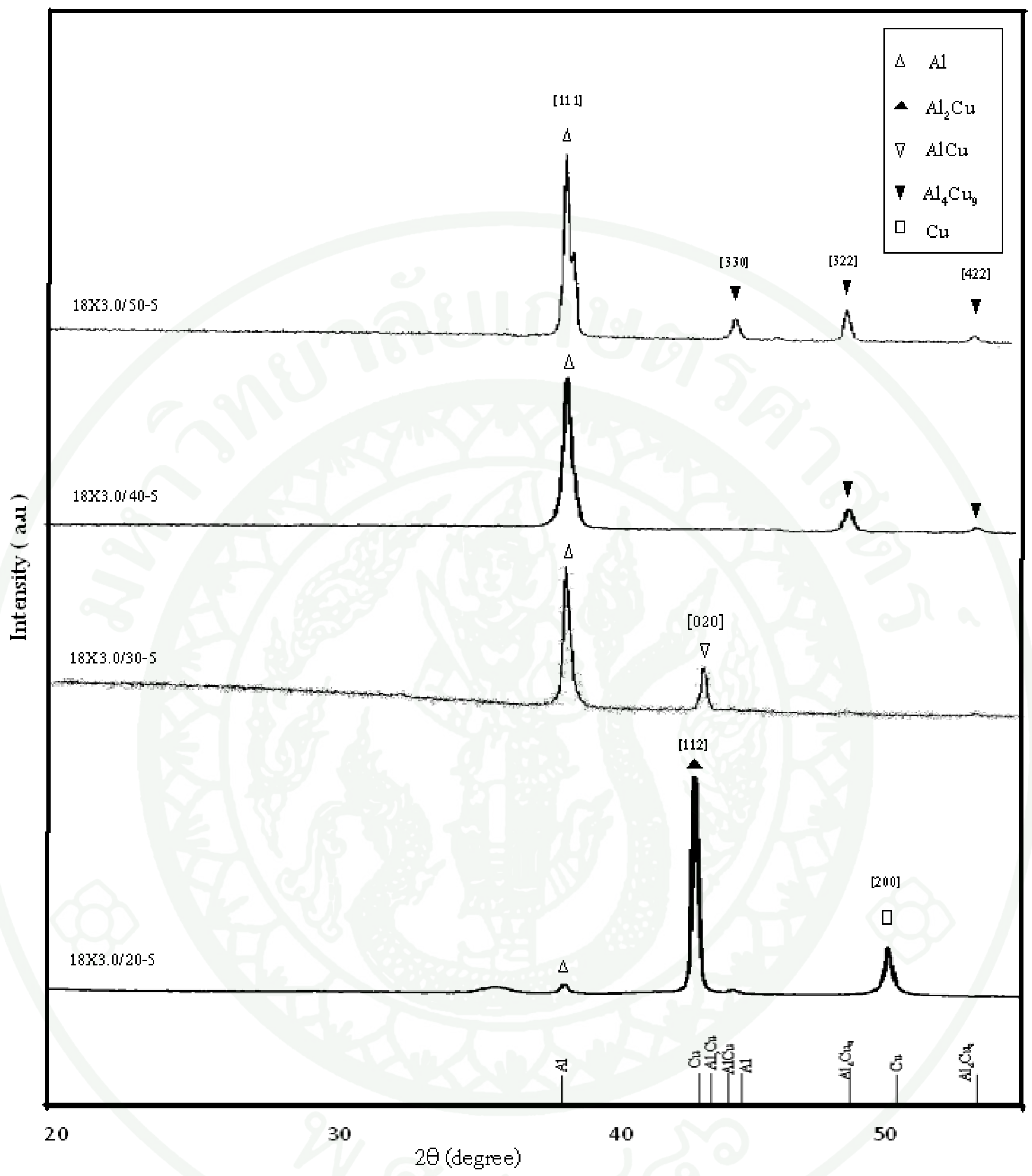
ภาพที่ 22 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม 17A3.0 ฟิล์มทองแดง 17C3.และฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 17X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 170 W เป็นเวลา 3 h และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 5 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



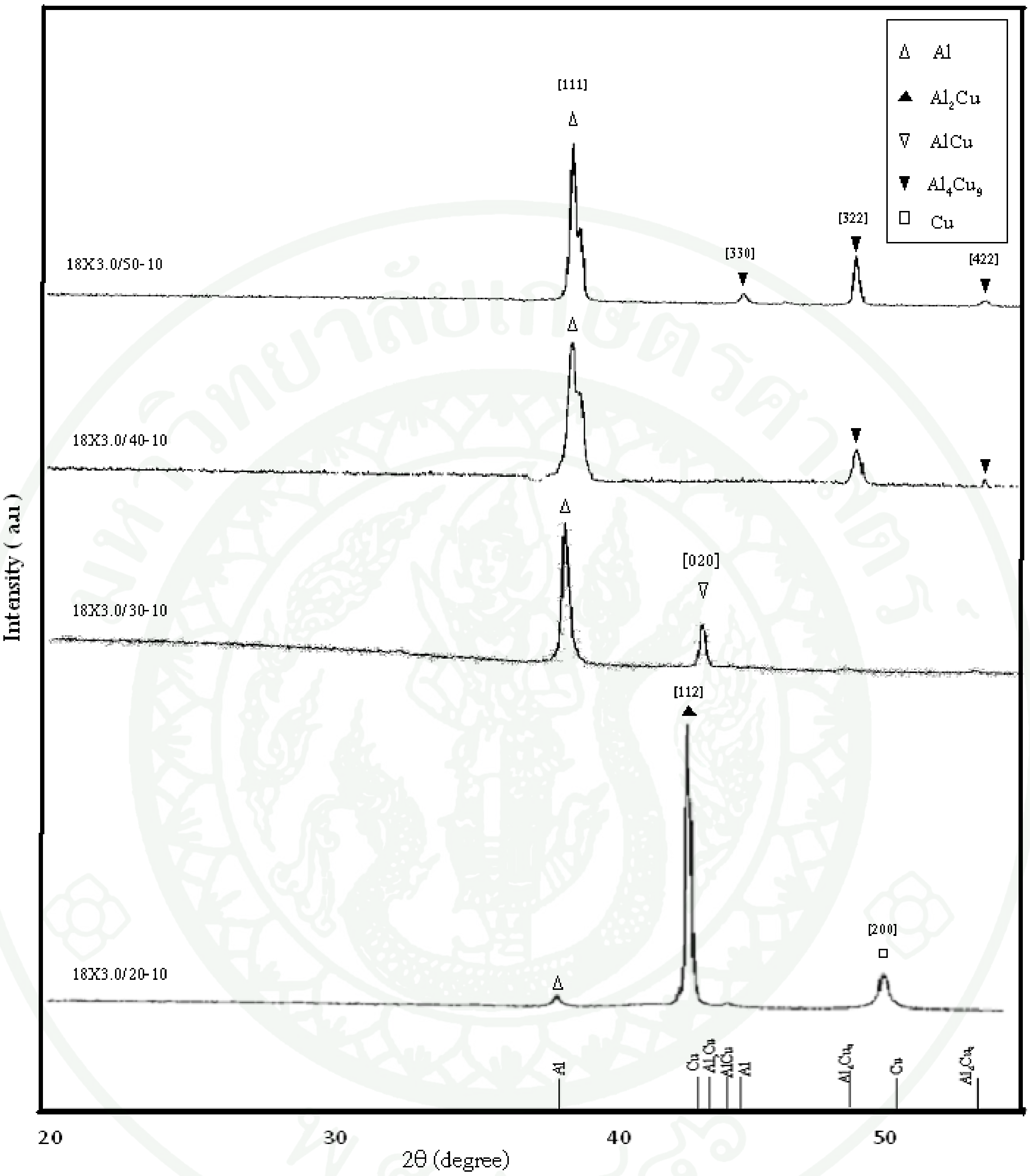
ภาพที่ 23 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 17X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 170 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



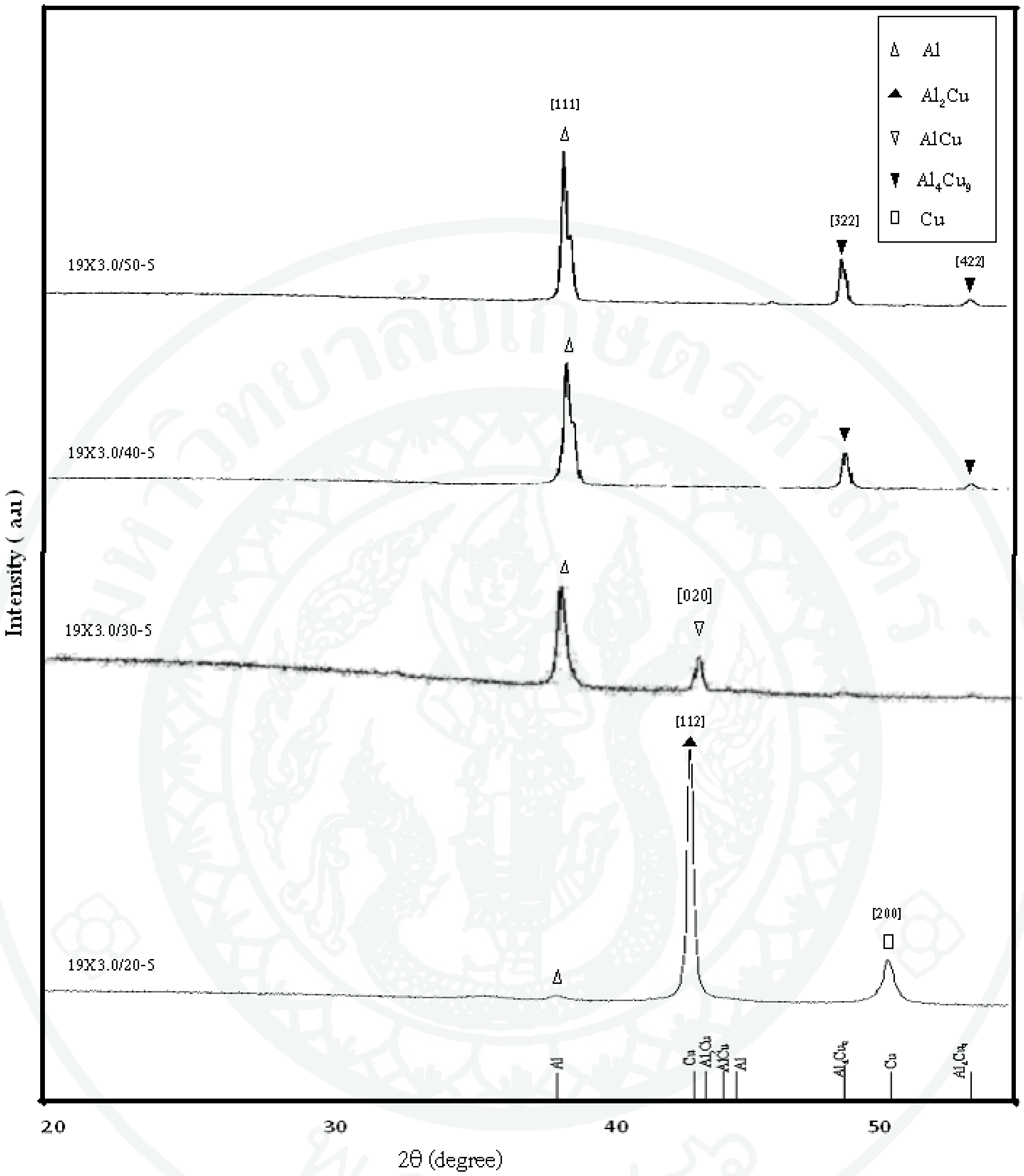
ภาพที่ 24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 18X3.0/T-t$^{/}$ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200,300,400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 5 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



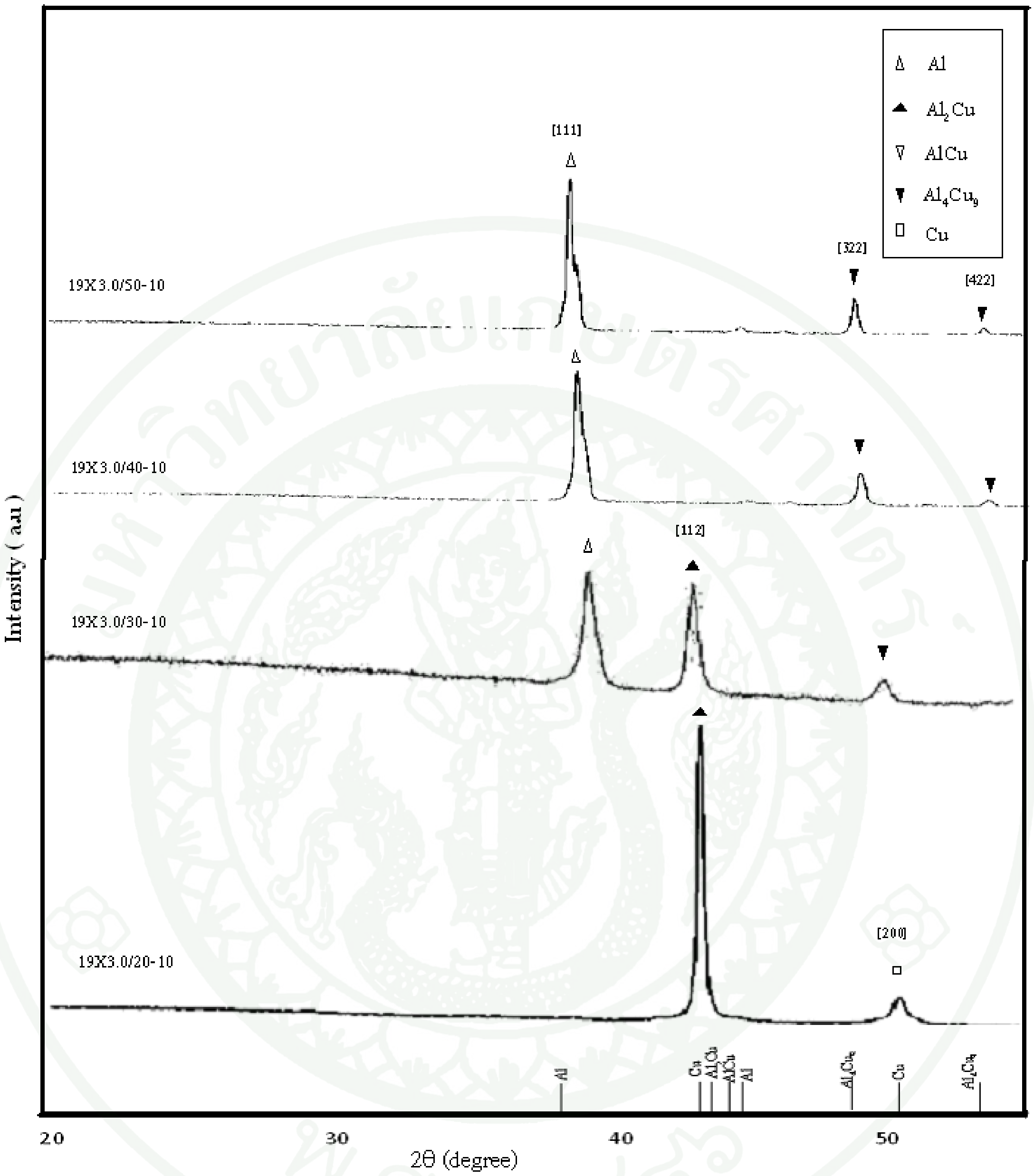
ภาพที่ 25 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 18X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200, 300, 400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



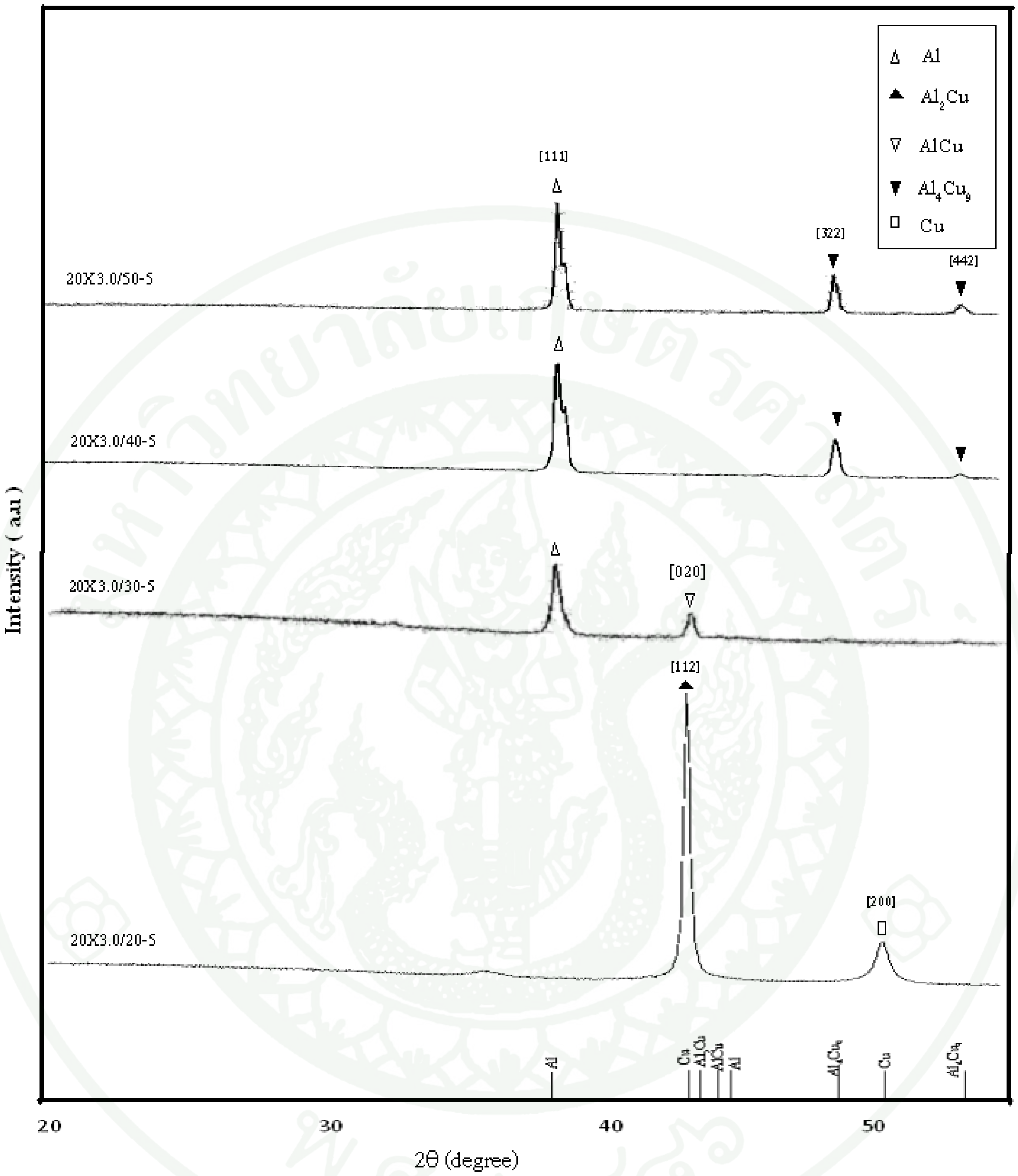
ภาพที่ 26 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 19X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 190 W เป็นเวลา 3 h และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200, 300, 400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 5 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



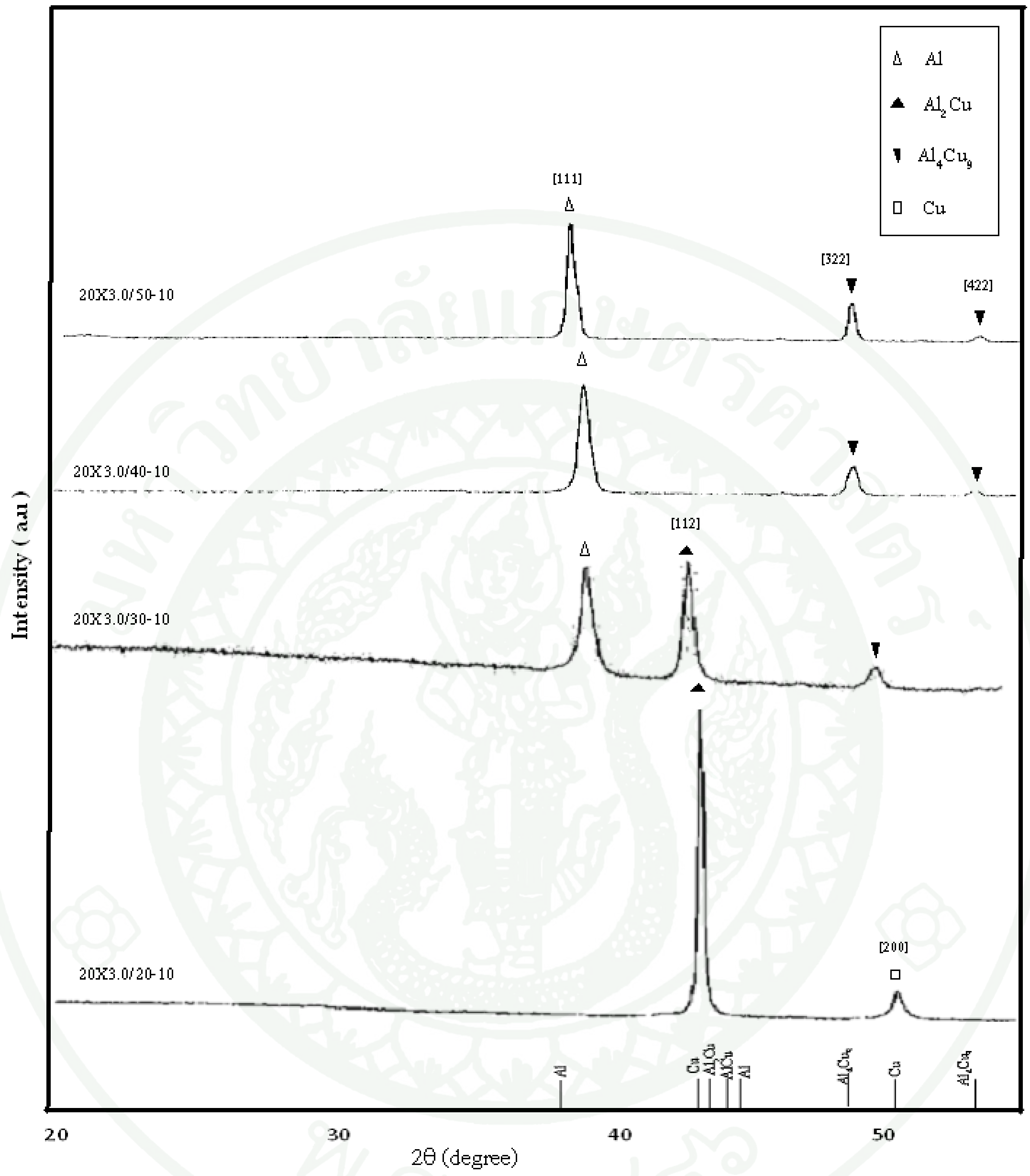
ภาพที่ 27 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 19X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 190 W เป็นเวลา 3 h และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200, 300, 400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



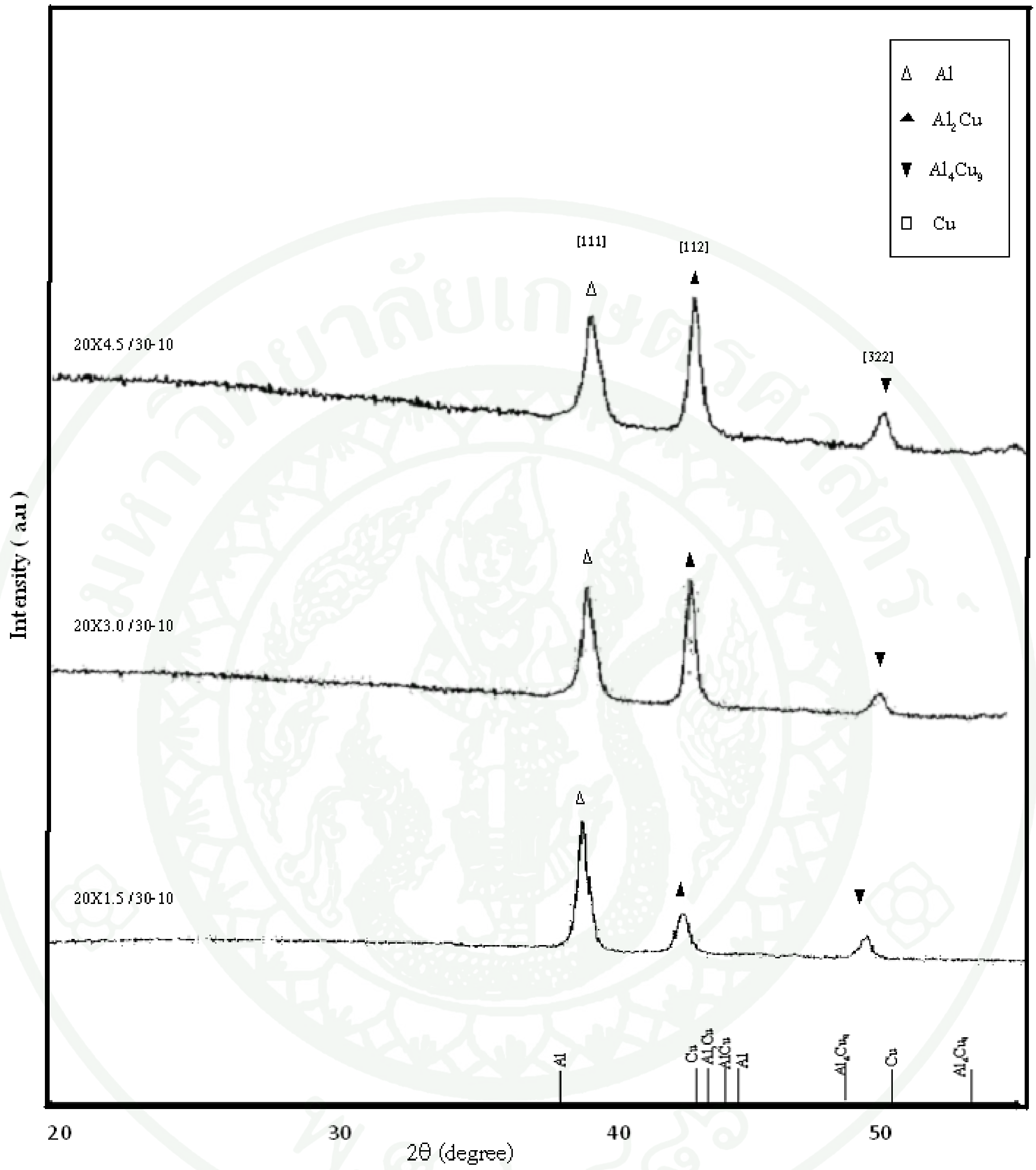
ภาพที่ 28 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 20X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 3 h และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200, 300, 400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 5 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 29 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 20X3.0/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 3 h และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 200, 300, 400 และ 500 ^{0}C เป็นเวลา 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 30 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดง 20Xt/T-t/ ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา t = 1.5, 3.0 และ 4.5 h และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T = 300 ^{0}C เป็นเวลา 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 ความเข้ม I ของระนาบ (hkl) ที่มุมแบรกก์ (^{0}) ผลต่างของมุม (^{0}) และขนาดเกรน D_{hkl} ของฟิล์มบาง อลูมิเนียม ฟิล์มบางทองแดง และฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง PXt / T-t$^{/}$ ซึ่งอบความร้อนที่อุณหภูมิ T เป็นเวลา t$^{/}$ = 5 h

ฟิล์มตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์มบาง	Al (111)				Al_2Cu (112)				AlCu (020) หรือ [Al_4Cu_9 (322)]				Cu (200) หรือ [Al_4Cu_9 (422)]			
		I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)
1	17C3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	600	50.78	0.13	67.50
2	17A3.0	900	38.47	0.32	26.23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	17X3.0/20-5	554	38.68	0.37	22.22	2004	42.85	0.25	33.79	-	-	-	-	-	-	-	-
4	17X3.0/30-5	3858	38.63	0.19	43.76	-	-	-	-	1000	44.86	0.15	55.59	-	-	-	-
5	17X3.0/40-5	4271	38.73	0.17	49.30	-	-	-	-	1250	44.85	0.14	56.07	-	-	-	-
6	17X3.0/50-5	4737	38.66	0.16	51.34	-	-	-	-	1500	44.85	0.14	56.71	-	-	-	-
7	18X3.0/20-5	300	38.70	0.39	21.23	5064	42.88	0.17	50.28	-	-	-	-	900	50.77	0.12	71.64
8	18X3.0/30-5	3554	38.74	0.20	41.32	-	-	-	-	900	44.86	0.16	47.73	-	-	-	-
9	18X3.0/40-5	3852	38.79	0.19	43.29	-	-	-	-	[584	48.97	0.18	47.25]	[52	53.87	0.24	36.18]
10	18X3.0/50-5	4215	38.68	0.17	48.75	-	-	-	-	[726	48.96	0.18	47.85]	[62	53.93	0.24	36.82]
11	19X3.0/20-5	127	38.63	0.40	20.90	6274	42.86	0.15	55.17	-	-	-	-	850	50.76	0.12	70.97
12	19X3.0/30-5	2820	38.77	0.23	36.82	-	-	-	-	700	44.88	0.17	47.12	-	-	-	-
13	19X3.0/40-5	3340	38.81	0.21	38.99	-	-	-	-	[1171	49.00	0.15	56.09]	[142	53.63	0.22	40.14]
14	19X3.0/50-5	3726	38.89	0.20	42.53	-	-	-	-	[1547	49.02	0.14	63.13]	[250	53.33	0.21	41.13]

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 6 (ต่อ)

ฟิล์มตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์มบาง	Al (111)				Al_2Cu (112)				AlCu (020) หรือ [Al_4Cu_9 (322)]				Cu (200) หรือ [Al_4Cu_9 (422)]			
		I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)
15	20X3.0/20-5	-	-	-	-	6448	42.87	0.15	58.23	-	-	-	-	800	50.78	0.12	70.32
16	20X3.0/30-5	2197	38.86	0.28	29.99	-	-	-	-	600	44.85	0.19	45.81	-	-	-	-
17	20X3.0/40-5	3246	38.85	0.22	37.78	-	-	-	-	[1265	49.01	0.15	59.34]	[162	53.63	0.22	40.25]
18	20X3.0/50-5	3486	38.84	0.21	39.96	-	-	-	-	[1600	49.00	0.13	64.41]	[300	53.92	0.21	41.83]

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 ความเข้ม I ของระนาบ (hkl) ที่มุมแบรกก์ (^{0}) ผลต่างของมุม (^{0}) และขนาดเกรน D_{hkl} ของฟิล์มบาง อลูมิเนียม-ทองแดง PXt / T-t$^/$ ซึ่งอบความร้อนที่อุณหภูมิ T เป็นเวลา t$^/$ = 10 h

ฟิล์มตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์มบาง	Al (111)				Al_2Cu (112)				AlCu (020) หรือ [Al_4Cu_9 (322)]				Cu (200) หรือ [Al_4Cu_9 (422)]			
		I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)
1	17X3.0/20-10	573	38.74	0.38	21.77	1701	42.86	0.26	33.1	-		-	-	-	-	-	-
2	17X3.0/30-10	3965	38.71	0.19	44.21	-	-	-	-	1272	44.86	0.08	64.33	-	-	-	-
3	17X3.0/40-10	5021	38.74	0.16	52.32	-	-	-	-	1205	44.85	0.06	63.24	-	-	-	-
4	17X3.0/50-10	5215	38.75	0.16	53.08	-	-	-	-	1104	44.85	0.09	54.87	-	-	-	-
5	18X3.0/20-10	327	38.68	0.39	21.52	8237	42.89	0.12	71.17	-		-	-	870	50.76	0.12	71.31
6	18X3.0/30-10	3652	38.67	0.20	41.75	-	-	-	-	1342	44.86	0.09	66.92	-	-	-	-
7	18X3.0/40-10	4054	38.83	0.17	48.64	-	-	-	-	[1100	49.04	0.15	55.67]	[62	53.92	0.24	36.82]
8	18X3.0/50-10	4465	38.85	0.17	49.30	-	-	-	-	[1500	49.02	0.14	62.61]	[75	53.90	0.24	37.12]
9	19X3.0/20-10	-	-		-	8553	42.86	0.12	69.49	-		-	-	760	50.78	0.13	69.35
10	19X3.0/30-10	3425	38.84	0.21	39.41	3065	42.87	0.20	41.73	[950	48.99	0.16	52.94]	-	-	-	-
11	19X3.0/40-10	3860	38.78	0.19	43.55	-	-	-	-	[1120	48.94	0.15	55.82]	[152	53.87	0.22	40.82]
12	19X3.0/50-10	4012	38.77	0.17	47.69	-	-	-	-	[1550	48.95	0.15	59.57]	[253	53.82	0.21	41.18]
13	20X3.0/20-10	-	-	-	-	9594	42.86	0.12	72.93	-	-	-	-	740	50.78	0.13	68.72
14	20X3.0/30-10	3226	38.81	0.22	37.39	3261	42.88	0.20	43.07	[1000	48.98	0.16	53.44]	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ฟิล์มตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์มบาง	Al (111)				Al_2Cu (112)				AlCu (020) หรือ [Al_4Cu_9 (322)]				Cu (200) หรือ [Al_4Cu_9 (422)]			
		I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)	I (a.u.)			D(nm)
15	20X3.0/40-10	3465	38.92	0.21	39.41	-	-	-	-	[1300	48.99	0.14	60.35]	[165	53.81	0.22	40.29]
16	20X3.0/50-10	3642	38.93	0.20	41.32	-	-	-	-	[1656	49.05	0.13	65.32]	[305	53.83	0.21	42.02]
17	20X1.5/30-10	3868	38.77	0.19	43.68	1500	42.86	0.26	33.1	[850	48.94	0.17	51.94]	-	-	-	-
18	20X4.5/30-10	2976	38.78	0.23	37.01	4010	42.89	0.15	54.97	[1300	48.98	0.14	60.35]	-	-	-	-

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เมื่อพิจารณาฟิล์มบาง PXt /30-10 ที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 190 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W เป็นเวลา t = 1.5 h, 3.0 h และ 4.5 h อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C นาน $t^{/}$ = 10 h พบว่าฟิล์มบางมีพีคการเลี้ยวเบน ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ที่มุม 2θ = 42.86^0 - 42.89^0 และขนาดเกรน D_{112} = 33 nm – 55 nm ดังแสดงในตารางที่ 7

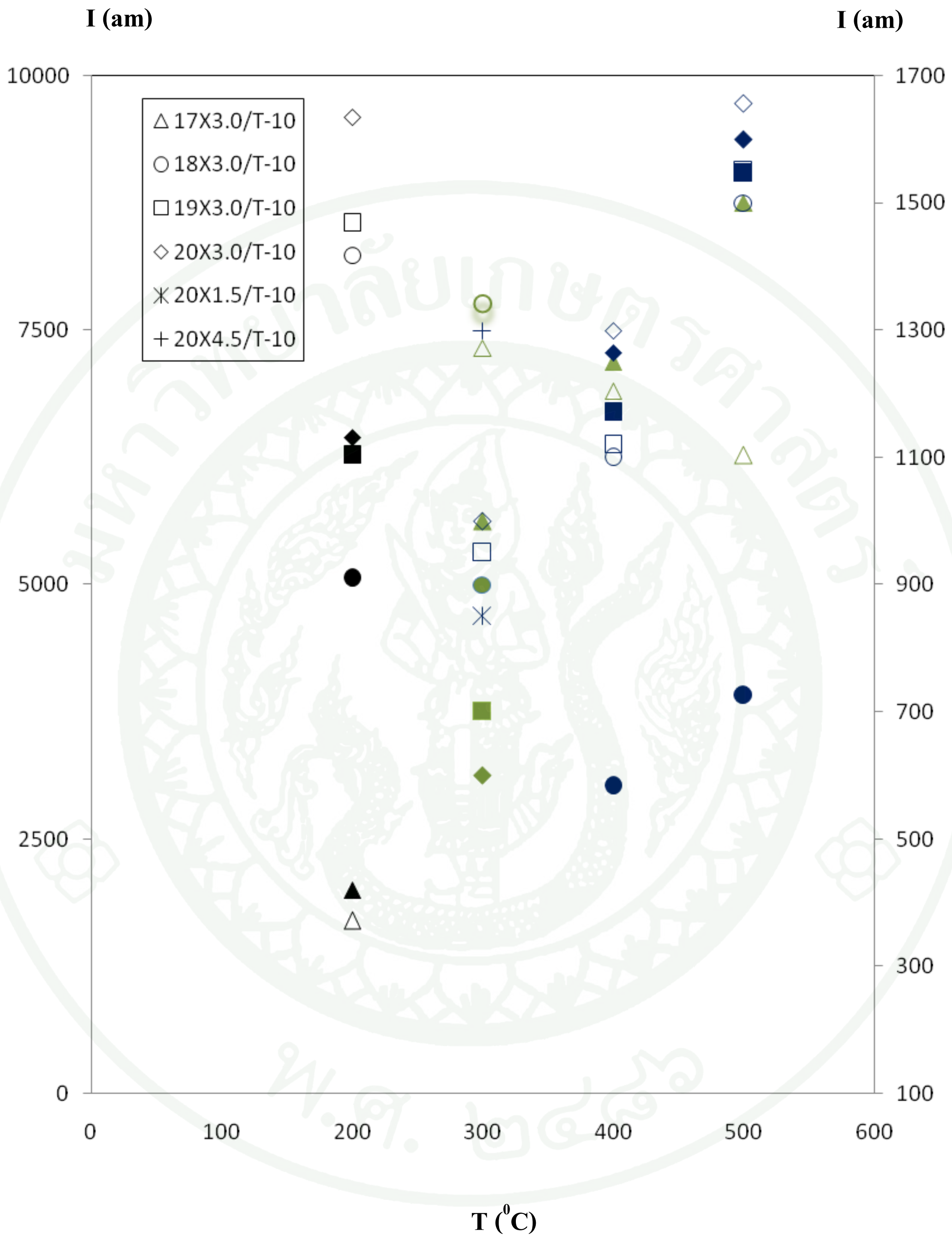
เมื่อพิจารณาฟิล์มบาง PX3.0/T-$t^{/}$ ที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 170 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 300 ^{O}C - 500 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h และเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P= 180 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h และที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 190, 200 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h พบว่าฟิล์มบางมีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (020) ของเฟส AlCu ที่มุม 2θ = 44.85^o- 44.88^o มีขนาดเกรน D_{020} = 46 nm – 67 nm

เมื่อพิจารณาฟิล์มบาง PX3.0/T-$t^{/}$ ซึ่งเคลือบที่กำลังไฟฟ้า P = 180 W, 190 W และ 200 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 400 ^{O}C, 500 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h และที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 190 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h และที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W เป็นเวลา t = 1.5 h, 3.0 h, 4.5 h อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h พบว่าฟิล์มบางมีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (322) ของเฟส Al_4Cu_9 ที่มุม 2θ = 48.94^o– 49.05 ^{o} มีขนาดเกรน D_{322} ระหว่าง 47 nm – 65 nm และมีพีคของระนาบ (422) ของเฟส Al_4Cu_9 ที่มุม 2θ = 53.33^o – 53.93 ^{o} มีขนาดเกรน D_{422} ระหว่าง 36 nm – 71 nm ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7

เมื่อพิจารณาความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ของฟิล์มอลูมิเนียม – ทองแดง PX3.0/20-$t^{/}$ ในภาพที่ 31 ที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P ทั้ง 4 ค่า อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 200 ^{0}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h พบว่าฟิล์มบาง 17X3.0/20-$t^{/}$ ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 170 W อบที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C นาน 5 h, 10 h มีความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu น้อย เมื่อเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นและอบฟิล์มนานขึ้น ความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu จะเพิ่มขึ้นโดยฟิล์มบาง 20X3.0/20-10 ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C นาน 10 h มีความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu มากที่สุด แสดงว่าถ้าต้องการเคลือบฟิล์มบางให้ได้เฟส Al_2Cu จะต้องเคลือบฟิล์มอลูมิเนียม ด้วยกำลังไฟฟ้า P = 200 W นาน 3 ชั่วโมง แล้วจึงเคลือบฟิล์มทองแดงบนฟิล์มอลูมิเนียมด้วยกำลังไฟฟ้า P = 200 W นาน 3 ชั่วโมง เท่ากัน แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ T= 200 ^{O}C นาน 10 h จะได้ฟิล์มบาง อลูมิเนียม – ทองแดงที่มีเฟส Al_2Cu ในปริมาณมากปนกับเฟสอลูมิเนียม Al และเฟสทองแดง Cu

เมื่อพิจารณาความเข้ม I ของระนาบ (002) ของเฟส AlCu และความเข้ม I ของระนาบ (322) ของเฟส Al_4Cu_9 ในภาพที่ 31 พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง PX3.0/T-$t^{/}$ ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P ทั้ง 4 ค่า อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 300 ^{O}C, 400 ^{O}C และ 500 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 31 ความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu, ○, ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดงที่อบที่อุณหภูมิ 200 °C ความเข้ม I ของระนาบ (020) ของเฟส AlCu, ○ และระนาบ (322) ของเฟส Al_4Cu_9, ○ ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดงที่อบที่อุณหภูมิ 300 °C - 500 °C โดย ● , ○ แทน การอบฟิล์มนาน 5 และ 10 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

มีความเข้ม I ของระนาบ (002) ของเฟส AlCu และความเข้ม I ของระนาบ (322) ของเฟส Al_4Cu_9 น้อยกว่าความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu

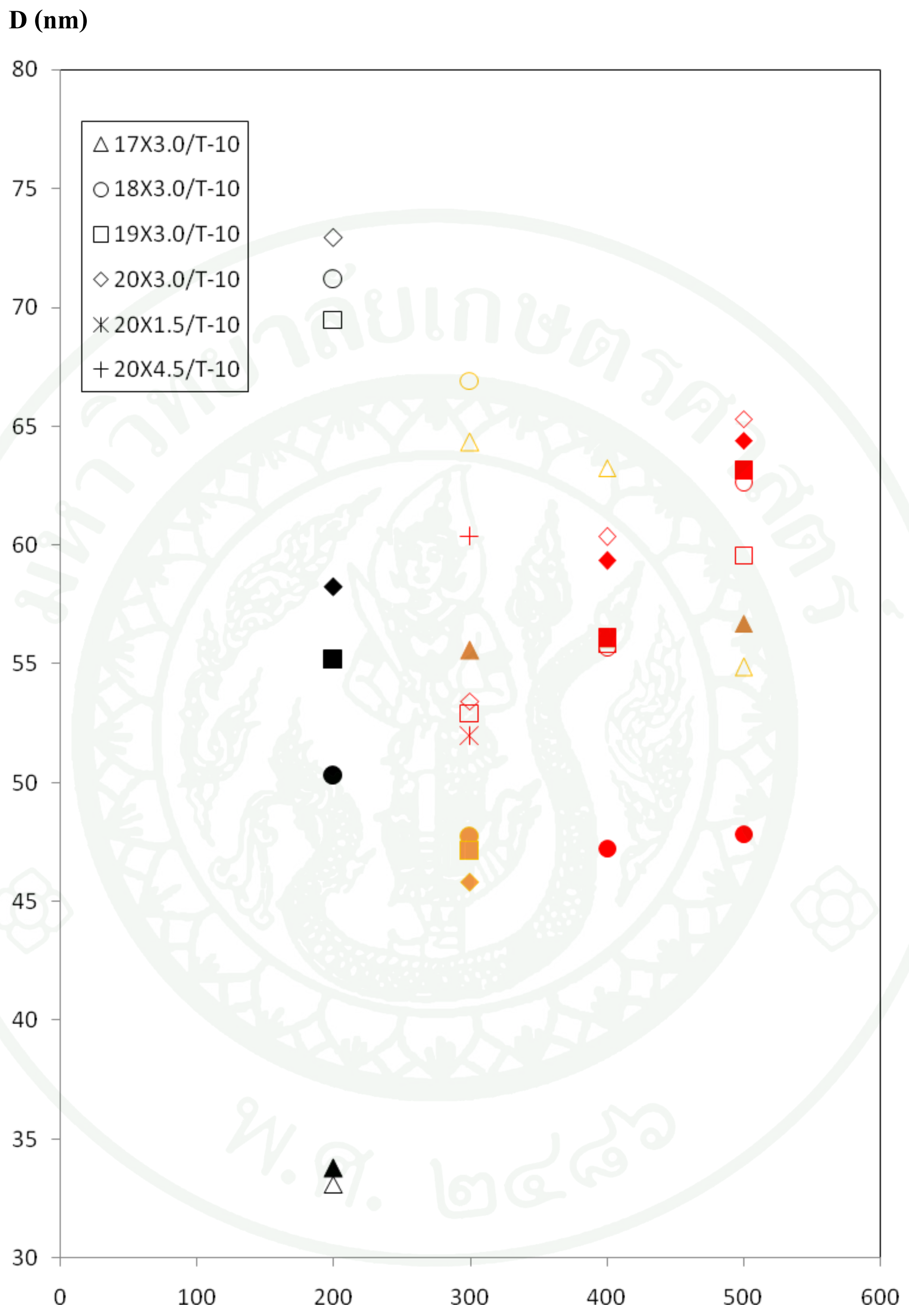
ดังนั้นการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง โดยเคลือบทองแดงบนฟิล์มอลูมิเนียม ด้วยกำลังไฟฟ้า P = 200 W เป็นเวลา t = 1.5, 3.0 และ 4.5 h อบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$= 10 h จึงเหมาะสำหรับได้ฟิล์มที่มีเฟสของสารประกอบ Al_2Cu

ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W เป็นเวลา t = 3.0 h เท่ากันให้เฟสของสารประกอบอลูมิเนียม –ทองแดงต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม เมื่ออบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h ให้เฟสของสารประกอบ Al_2Cu และเฟส Cu ในฟิล์มบาง เมื่ออบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h ให้เฟส Al และเฟสของสารประกอบ AlCu แต่เมื่ออบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ T = 300 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h ให้เฟส Al, เฟสของสารประกอบ Al_2Cu และเฟสของสารประกอบ Al_4Cu_9 เมื่ออบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ T = 400 ^{O}C - 500 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h ให้เฟส Al,เฟสของสารประกอบ Al_4Cu_9 และเฟส Cu ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ซึ่งเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W เป็นเวลา t = 1.5 h, 4.5 h ให้เฟสของสารประกอบ AlCu กับ เฟสของสารประกอบ Al_4Cu_9

เมื่อพิจารณาภาพที่ 32 ซึ่งแสดงขนาดเกรน D_{hkl} ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ของฟิล์มอลูมิเนียม – ทองแดง PX3.0/20-$t^{/}$ ที่เคลือบที่กำลังไฟฟ้า P ทั้ง 4 ค่า อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 200 ^{O}C พบว่าเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นตามกำลังไฟฟ้า P ที่ใช้เคลือบฟิล์มและเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์มบาง 17X3.0/20-$t^{/}$ ซึ่งเคลือบที่กำลังไฟฟ้า P = 170 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h มีขนาดเกรน D_{112} ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu น้อย เมื่อเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและอบ ฟิล์มนานขึ้น ขนาดเกรน D_{112} ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu จะใหญ่ขึ้น โดยฟิล์มบาง 20X3.0/20-10 ซึ่งเคลือบที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h มีขนาดเกรน D_{112} ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ใหญ่ที่สุดโดยมีขนาดเกรน D_{112}= 73 nm

เมื่อพิจารณา ขนาดเกรน D_{002} ของระนาบ (002) ของเฟส AlCu และขนาดเกรน D_{322} ของระนาบ (322) ของเฟส Al_4Cu_9 ในภาพที่ 32 พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง PX3.0/T-$t^{/}$ ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P ทั้ง 4 ค่า อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 300 ^{O}C, 400 ^{O}C และ 500 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 5 h, 10 h มีขนาดเกรน D_{002} ของเฟส AlCu และขนาดเกรน D_{322} ของเฟส Al_4Cu_9 เล็กกว่าขนาดเกรน D_{112} ของเฟส Al_2Cu ดังนั้นการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง ให้มีขนาดเกรนของเฟส Al_2Cu ใหญ่ จึงควรเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้า P = 200 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T = 200 ^{O}C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 32 ความเข้ม I ของระนาบ (112) ของเฟสAl_2Cu, ○, ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดงที่อบที่อุณหภูมิ 200 ^{o}C ขนาดเกรน D_{hkl} ของระนาบ (020) ของเฟส AlCu,○ และระนาบ (322) ของเฟส Al_4Cu_9,○ ของฟิล์มอลูมิเนียม-ทองแดงที่อบที่อุณหภูมิ 300 ^{o}C - 500 ^{o}C โดย● ,○ แทน การอบฟิล์มนาน 5 และ 10 ชั่วโมง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง

สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง อลูมิเนียม – ทองแดง ที่วัด ด้วยวิธีหัววัดสี่จุด โดยให้กระแสไฟฟ้าตรง I = 0.1, 0.2, … , 0.9 mA เข้าที่หัววัดที่ 1 และให้กระแสไฟฟ้า I ออกที่หัววัดที่ 4 แล้ววัดความต่างศักย์ V ของฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง ที่คร่อมหัววัดที่ 3 และ 4 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9 ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดงที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนเป็นเวลา 5 และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ภาพที่ 33 – 36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V กับกระแสไฟฟ้า I ของฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง ซึ่งเป็นกราฟเส้นตรง โดยความชันของกราฟเส้นตรงได้แสดงในตารางที่ 8 และ 9 ซึ่งจะเห็นว่าฟิล์ม บางอลูมิเนียม – ทองแดง ที่ไม่ได้อบด้วยความร้อนมีความชันของกราฟมากกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง ที่อบด้วยความร้อน เมื่ออุณหภูมิหรือเวลาที่ใช้อบฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ความชันของกราฟมีค่าลดลง

สภาพต้านทานไฟฟ้า หาได้จากสมการ (15)โดยระยะห่างระหว่างหัววัด S = 0.25 cm และ V/I หาได้จากความชันของกราฟเส้นตรง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง ที่คำนวณได้จากสมการ (15) ได้แสดงในตารางที่ 8 และ 9 ตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าได้แสดงในภาคผนวก ง

ภาพที่ 37 แสดงสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง อลูมิเนียม – ทองแดง ที่ไม่อบและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ T เป็นเวลา $t^{/}$ ซึ่งจะเห็นว่า ฟิล์มบาง อลูมิเนียม – ทองแดง 17X3.0/N ที่ไม่ได้อบด้วยความร้อน มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ มาก โดยมีค่า ρ = 15.7 mΩ.m ฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น อบที่อุณหภูมิสูงขึ้นและใช้เวลาอบนานขึ้น มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ลดลง

ฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง 20X3.0/20-10 ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า 200 W และอบที่อุณหภูมิ T = 200 $^{\circ}$C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ น้อย โดยมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ = 1.6 mΩ.m เมื่ออบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ T สูงขึ้น สภาพต้านทานไฟฟ้า มีค่าลดลงโดยฟิล์มบางอลูมิเนียม – ทองแดง 20X3.0/50-10 ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า 200 W และอบที่อุณหภูมิ T = 500 $^{\circ}$C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ น้อยที่สุดโดยมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ = 1.1 mΩ.m

ดังนั้นฟิล์มบางอลูมิเนียม –ทองแดงที่เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างวงจรในวงจรอินทิเกรต (integrated circuit, IC) เป็นฟิล์มบาง 20X3.0/T-10 ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า 200 W และอบที่อุณหภูมิ 200 $^{\circ}$C - 500 $^{\circ}$C เป็นเวลา $t^{/}$ = 10 h

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 ความต่างศักย์ V, ค่ากระแสไฟฟ้า I ความชันของกราฟ และสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ของฟิล์มบางอลูมิเนียม–ทองแดง PXt / T-t′ ที่เวลา t′ = 5 ชั่วโมง

ฟิล์มตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์มบาง	ความต่างศักย์ V x 10^{-3} (mV)									ความชันของกราฟ V/I (Ω)	ρ (mΩ.m)
		I = 0.1	I = 0.2	I = 0.3	I = 0.4	I = 0.5	I = 0.6	I = 0.7	I = 0.8	I = 0.9		
1	17X3.0/N	120.512	220.652	320.521	420.522	520.689	620.256	720.365	821.231	921.325	1.001	15.7
2	17X3.0/20-5	90.755	160.365	251.12	341.875	432.63	523.385	614.14	704.895	795.65	0.881	13.8
3	17X3.0/30-5	78.524	157.048	235.572	314.096	392.62	471.144	549.668	628.192	706.716	0.785	12.3
4	17X3.0/40-5	68.121	136.242	204.363	272.484	340.605	408.726	476.847	544.968	613.089	0.681	10.7
5	17X3.0/50-5	65.017	130.034	195.051	260.068	325.085	390.102	455.119	520.136	585.153	0.650	10.2
6	18X3.0/N	58.231	116.462	174.693	232.924	287.924	342.924	401.155	459.386	517.617	0.574	9.0
7	18X3.0/20-5	53.235	104.235	155.235	206.235	257.235	308.235	359.235	410.235	461.235	0.510	8.0
8	18X3.0/30-5	51.056	98.056	145.056	192.056	239.056	286.056	333.056	380.056	427.056	0.470	7.4
9	18X3.0/40-5	50.742	86.742	122.742	158.742	194.742	230.742	266.742	302.742	338.742	0.360	5.7
10	18X3.0/50-5	50.112	83.112	116.112	149.112	182.112	215.112	248.112	281.112	314.112	0.323	5.2
11	19X3.0/N	47.354	79.354	111.354	143.354	175.354	207.354	239.354	271.354	303.354	0.320	5.0
12	19X3.0/20-5	38.435	68.435	98.435	128.435	158.435	188.435	218.435	248.435	278.435	0.300	4.7
13	19X3.0/30-5	36.056	61.056	91.056	121.056	151.056	181.056	211.056	241.056	271.056	0.294	4.6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 8 (ต่อ)

ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มบาง	ความต่างศักย์ V x 10^{-3} (mV)									ความชันของกราฟ V/I (Ω)	ρ (mΩ.m)
		I = 0.1	I = 0.2	I = 0.3	I = 0.4	I = 0.5	I = 0.6	I = 0.7	I = 0.8	I = 0.9		
14	19X3.0/40-5	25.742	50.742	75.742	100.742	125.742	150.742	175.742	200.742	225.742	0.250	3.9
15	19X3.0/50-5	23.112	46.112	69.112	92.112	115.112	138.112	161.112	184.112	207.112	0.230	3.6
16	20X3.0/N	21.343	41.343	61.343	81.343	101.343	121.343	141.343	161.343	181.343	0.200	3.1
17	20X3.0/20-5	19.435	37.935	56.435	74.935	93.435	111.935	130.435	148.935	167.435	0.185	2.9
18	20X3.0/30-5	17.854	34.854	51.854	68.854	85.854	102.854	119.854	136.854	153.854	0.170	2.7
19	20X3.0/40-5	15.742	31.742	47.742	63.742	79.742	95.742	111.742	127.742	143.742	0.160	2.5
20	20X3.0/50-5	13.112	28.112	43.112	58.112	73.112	88.112	103.112	118.112	133.112	0.150	2.4
15	19X3.0/50-5	23.112	46.112	69.112	92.112	115.112	138.112	161.112	184.112	207.112	0.230	3.6
20	20X3.0/50-5	13.112	28.112	43.112	58.112	73.112	88.112	103.112	118.112	133.112	0.150	2.4

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 ความต่างศักย์ V, ค่ากระแสไฟฟ้า I ความชันของกราฟ และสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ของฟิล์มบางอลูมิเนียม–ทองแดง PXt / T-$t^{\prime}$ ที่เวลา $t^{\prime}$ = 10 ชั่วโมง

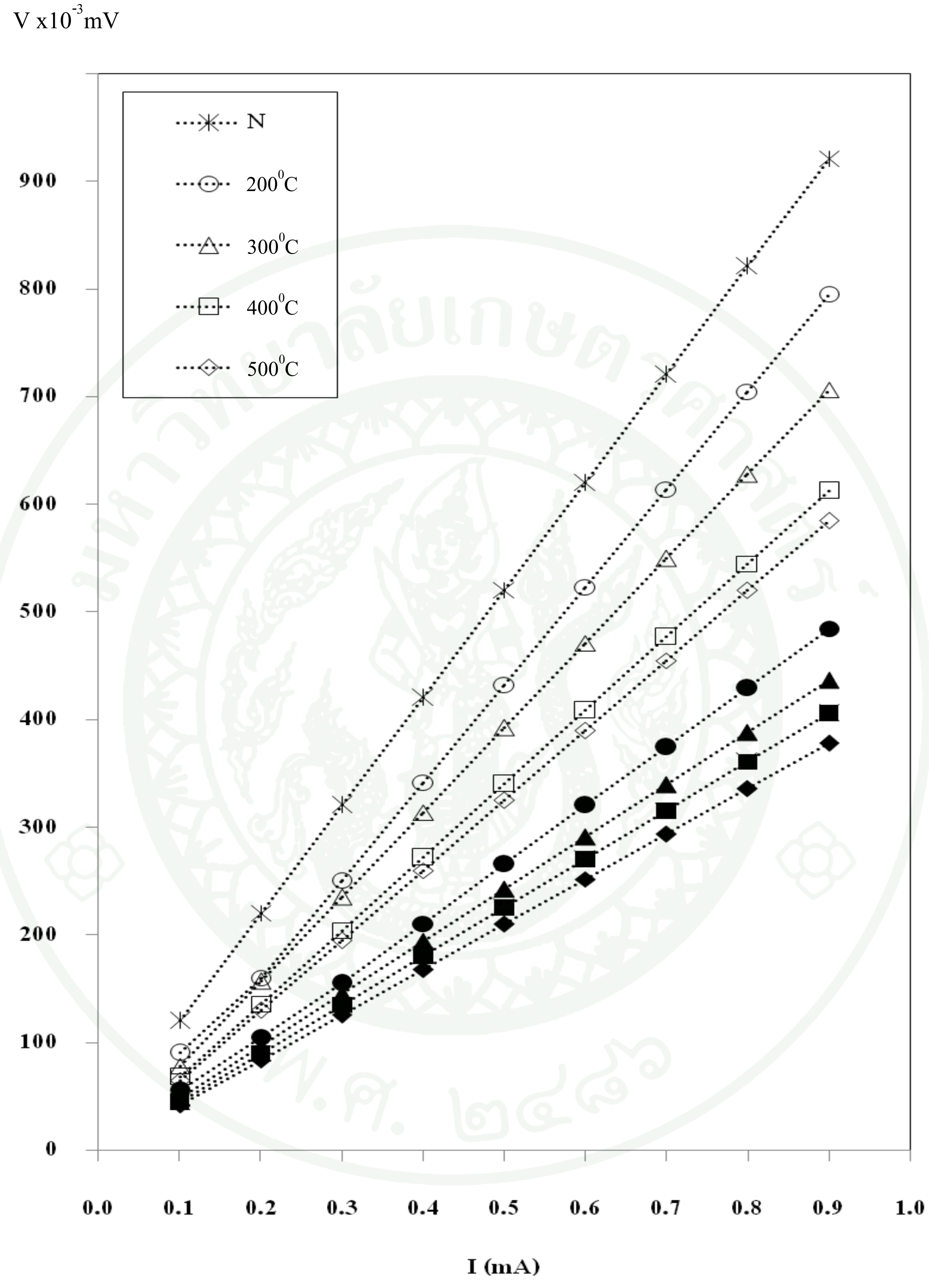
ฟิล์มตัวอย่างที่	ชื่อฟิล์มบาง	ความต่างศักย์ x 10^{-3} (mV)									ความชันของกราฟ V/I (Ω)	ρ (mΩ.m)
		I = 0.1	I = 0.2	I = 0.3	I = 0.4	I = 0.5	I = 0.6	I = 0.7	I = 0.8	I = 0.9		
1	17X3.0/20-10	55.755	105.755	155.755	210.755	265.755	320.755	374.755	429.755	484.755	0.536	8.4
2	17X3.0/30-10	48.524	97.048	145.572	194.096	242.62	291.144	339.668	388.192	436.716	0.485	7.6
3	17X3.0/40-10	45.121	90.242	135.363	180.484	225.605	270.726	315.847	360.968	406.089	0.451	7.1
4	17X3.0/50-10	42.017	84.034	126.051	168.068	210.085	252.102	294.119	336.136	378.153	0.420	6.6
5	18X3.0/20-10	40.545	70.545	99.545	128.545	156.545	185.545	215.545	245.545	275.545	0.293	4.6
6	18X3.0/30-10	35.546	57.546	79.546	101.546	123.546	145.546	167.546	189.546	211.546	0.220	3.5
7	18X3.0/40-10	32.453	49.453	66.453	83.453	100.453	117.453	134.453	151.453	168.453	0.170	2.7
8	18X3.0/50-10	29.654	44.654	59.654	74.654	89.654	104.654	119.654	134.654	149.654	0.150	2.4
9	19X3.0/20-10	20.212	34.212	48.212	62.212	76.212	90.212	104.212	118.212	132.212	0.140	2.2
10	19X3.0/30-10	18.231	30.231	42.231	54.231	66.231	78.231	90.231	102.231	114.231	0.120	1.9
11	19X3.0/40-10	15.654	26.654	37.654	48.654	59.654	70.654	81.654	92.654	103.654	0.110	1.7
12	19X3.0/50-10	13.354	23.354	33.354	43.354	53.354	63.354	73.354	83.354	93.354	0.100	1.6
13	20X3.0/20-10	12.012	21.512	31.512	41.512	51.512	61.512	71.512	81.512	91.512	0.099	1.6

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางที่ 9 (ต่อ)

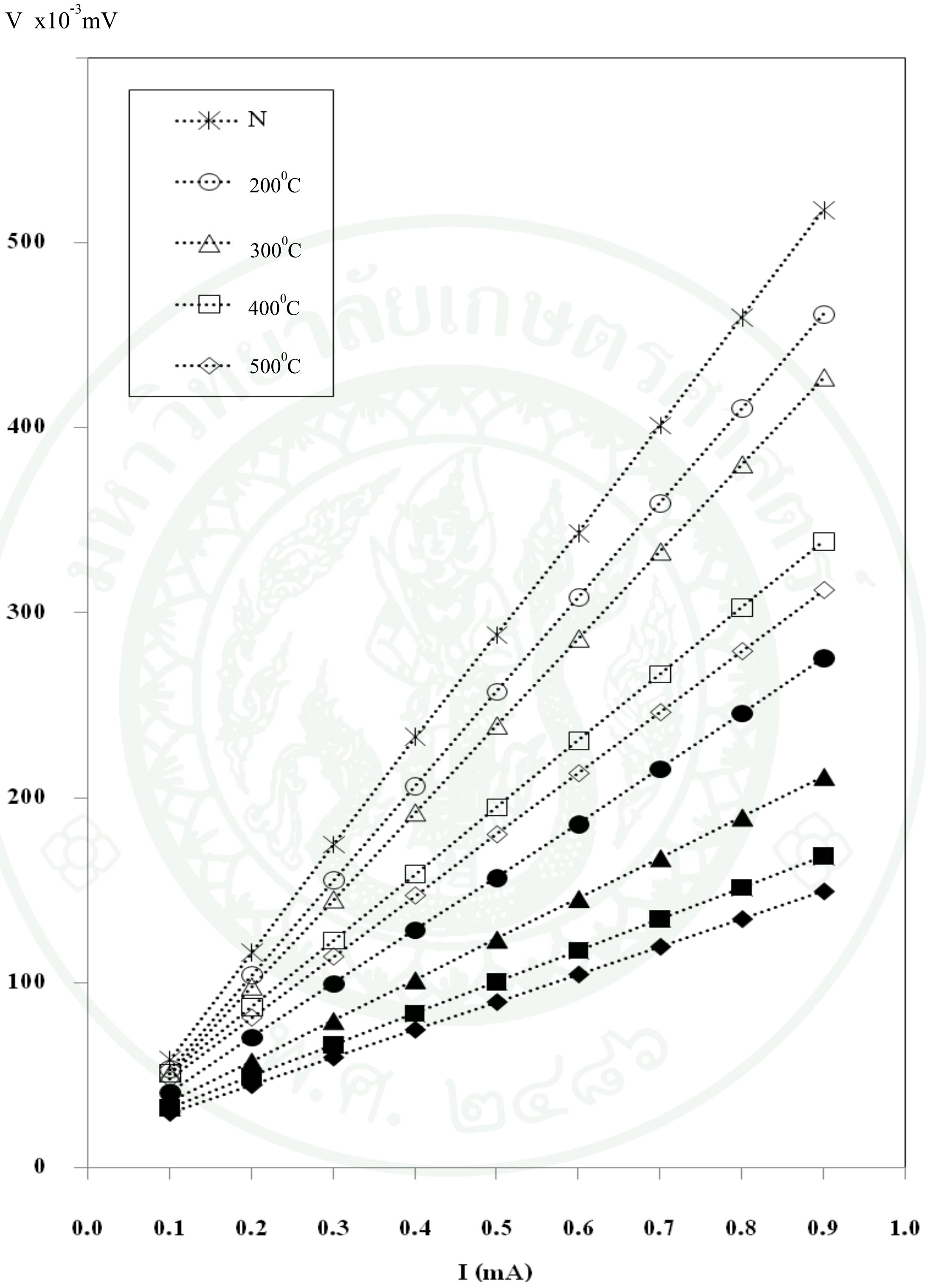
ฟิล์ม ตัวอย่างที่	ชื่อ ฟิล์มบาง	ความต่างศักย์ V x 10^{-3} (mV)									ความชันของกราฟ V/I (Ω)	ρ (mΩ.m)
		I = 0.1	I = 0.2	I = 0.3	I = 0.4	I = 0.5	I = 0.6	I = 0.7	I = 0.8	I = 0.9		
14	20X3.0/30-10	9.546	19.046	28.546	38.046	47.546	57.046	66.546	76.046	85.546	0.095	1.5
15	20X3.0/40-10	6.231	14.231	22.231	30.231	38.231	46.231	54.231	62.231	70.231	0.080	1.3
16	20X3.0/50-10	5.654	12.654	19.654	26.654	33.654	40.654	47.654	54.654	61.654	0.070	1.1

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



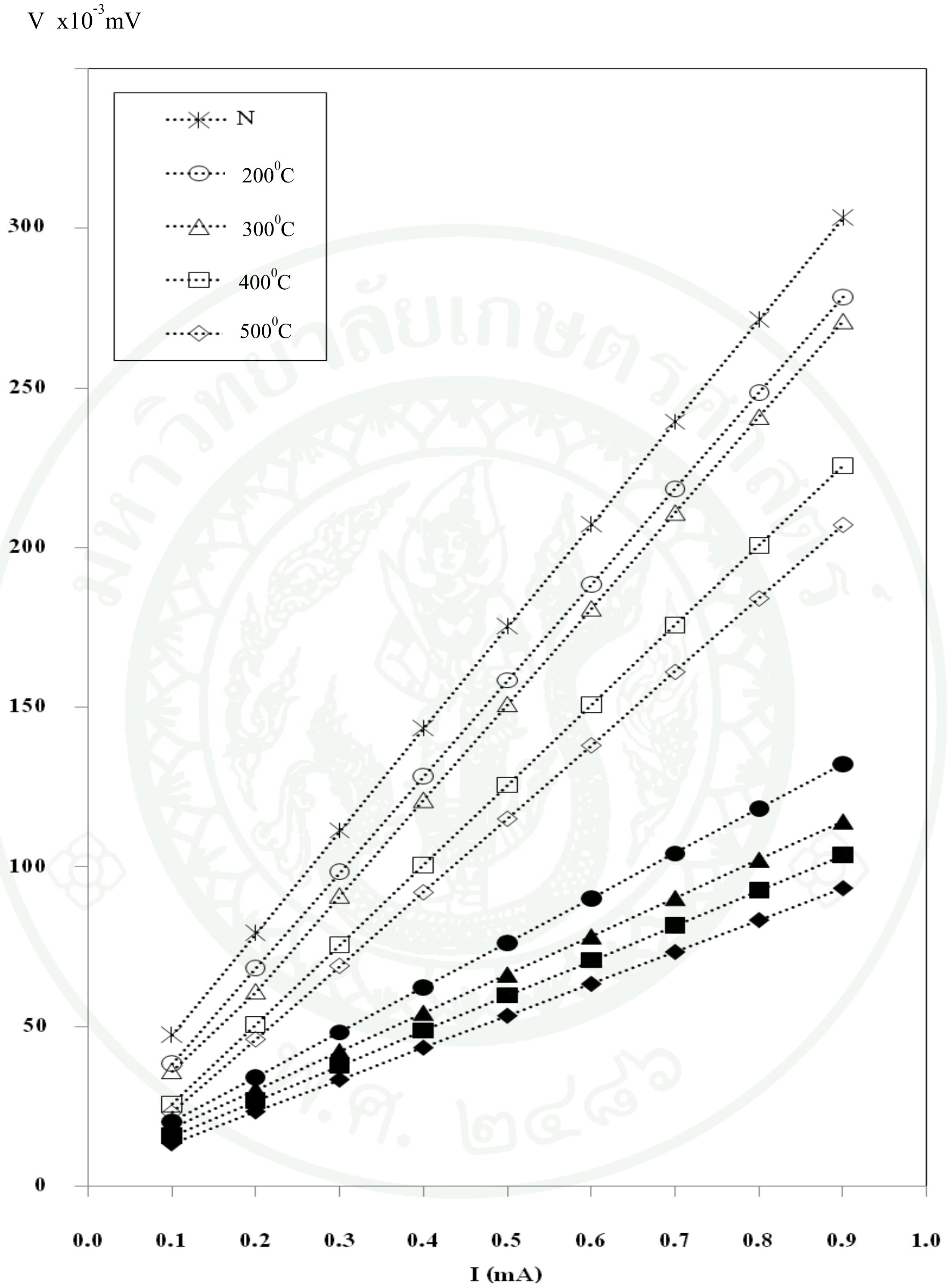
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V กับกระแสไฟฟ้า I ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **170 W** ที่ไม่อบ N และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t โดย ○ , ● แทน การอบ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



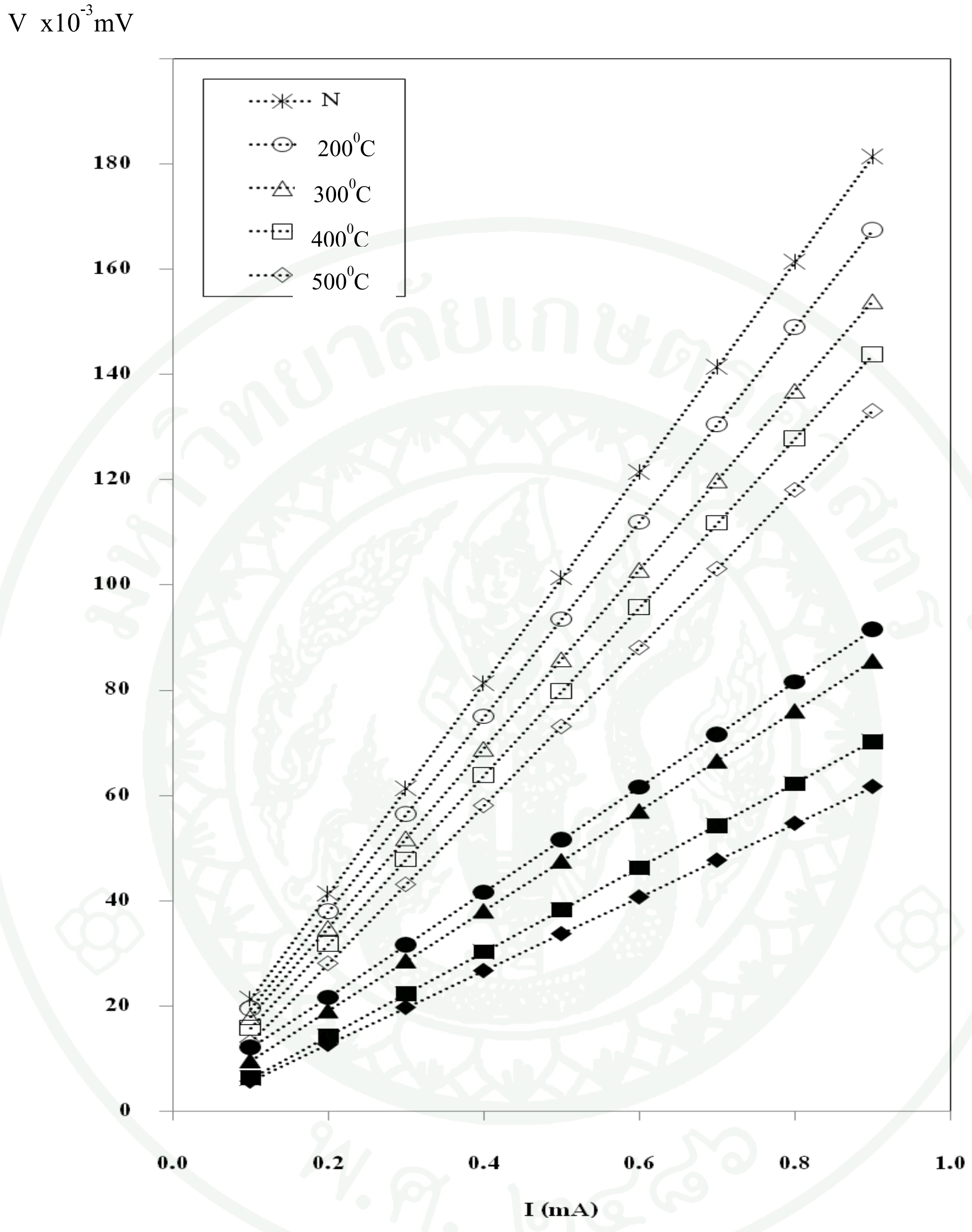
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V กับกระแสไฟฟ้า I ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **180 W** ที่ไม่อบ N และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○, ● แทน การอบ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



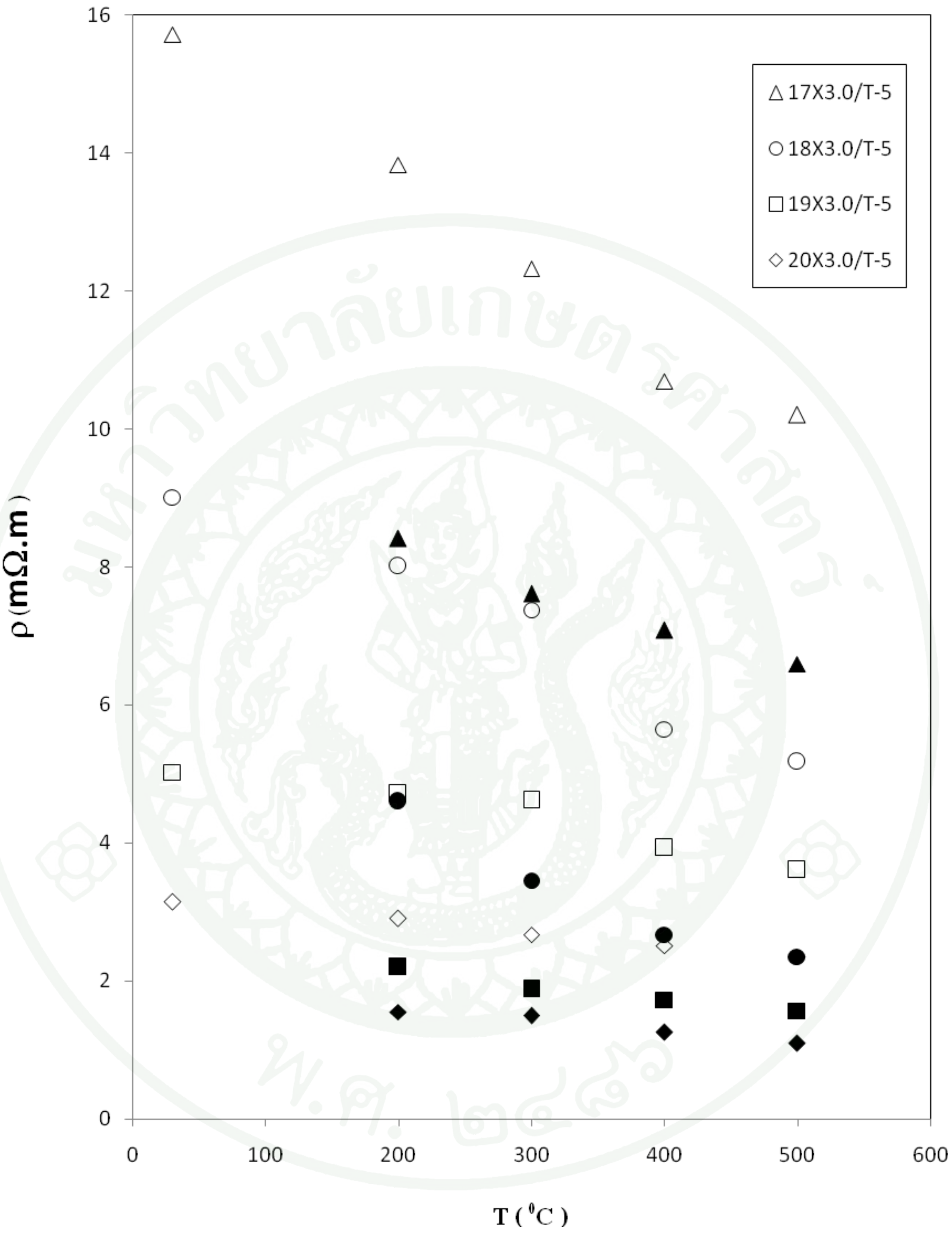
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V กับกระแสไฟฟ้า I ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **190 W** ที่ไม่อบ N และอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○, ● แทน การอบ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V กับกระแสไฟฟ้า I ของฟิล์มบาง อลูมิเนียม-ทองแดงที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า **200 W** ที่ไม่อบ N และ อบด้วย ความร้อนที่อุณหภูมิ (T) เป็นเวลา t′ โดย ○, ● แทน การอบ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



ภาพที่ 37 สภาพต้านทานไฟฟ้า ρ ของฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง ที่ไม่อบและอบความร้อนที่อุณหภูมิ T เป็นเวลา t′ โดย ○ , ● แทน การอบที่ 5, 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สรุป

การวิจัยนี้ ได้เคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม ฟิล์มบางทองแดง และฟิล์มบางอลูมิเนียม - ทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริง ความดันก่อนการเคลือบฟิล์มมีค่าประมาณ 2 $\times 10^{-5}$ mbar และความดันก๊าซอาร์กอนขณะเคลือบมีค่าประมาณ 8 $\times 10^{-3}$ mbar โดยใช้เป้าสารเคลือบเป็นอลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.9% และทองแดงบริสุทธิ์ 99.9% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 in เท่ากันและมีความหนาขนาด 0.125 in และ 0.188 in ตามลำดับ ใช้แผ่นรองรับเป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยได้เคลือบฟิล์มบางดังนี้

1. ฟิล์มบางอลูมิเนียม ซึ่งเคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P = 170, 180, 190 และ 200 W นาน 1.5, 3.0, 4.5 และ 6.0 ชั่วโมง

2. ฟิล์มบางทองแดง ซึ่งเคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P = 170, 180, 190 และ 200 W นาน 1.5, 3.0, 4.5 และ 6.0 ชั่วโมง

3. ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง PXt โดยนำฟิล์มบางอลูมิเนียมในข้อ 1 ที่ใช้เวลาเคลือบนาน 3 ชั่วโมง มาเคลือบด้วยทองแดง

   3.1 ด้วยกำลังไฟฟ้า P = 170, 180, 190 และ 200 W นาน 3 ชั่วโมง

   3.2 ด้วยกำลังไฟฟ้า P = 200 W นาน 1.5 และ 4.5 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ ความหนา และอัตราการเคลือบฟิล์ม ของฟิล์มบางอลูมิเนียม และฟิล์มบางทองแดง พบว่า ฟิล์มบางอลูมิเนียม และ ฟิล์มบางทองแดง มีความหนาและอัตราการเคลือบ ฟิล์มเพิ่มขึ้น ตามกำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการเคลือบฟิล์มด้วยกำลังไฟฟ้าและใช้เวลาในการเคลือบเท่ากัน ปรากฏว่าฟิล์มบางทองแดงมี ความหนาและอัตราการเคลือบฟิล์มมากกว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม

เมื่อนำฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง PXt ที่เคลือบได้ในข้อ 3 มาแบ่งออกเป็น 5 ชุด โดยชุดที่ 1 ไม่อบด้วยความร้อน และชุดที่ 2 – 5 อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 $^{\circ}$C เป็นเวลา 5 และ 10 ชั่วโมง แล้วศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง อลูมิเนียม-ทองแดง PXt ที่อบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 $^{\circ}$C เป็นเวลา 5 และ 10 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดงทุกตัวอย่าง ปรากฏพีคการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ พีคแรกเป็นของระนาบ (111) ของอลูมิเนียม ที่มุม 2θ $\approx$ 38.63° - 38.93° การเคลือบฟิล์มที่กำลังไฟฟ้าต่ำลงหรืออบฟิล์มที่

อุณหภูมิสูงขึ้นและใช้เวลาในการอบฟิล์มนานขึ้น มีผลทำให้มีความเข้มของระนาบ (111) ของเฟสอลูมิเนียมสูงขึ้นและมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้น โดยขนาดเกรนของเฟสอลูมิเนียมอยู่ในช่วง 21 – 53 nm

ฟิล์มบางอลูมิเนียม-ทองแดง PX3.0 /20-t/ ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P=170, 180, 190 และ 200 W อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 200 ^{O}C เป็นเวลา t/ = 5 h, 10 h มีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พีคที่สองเป็นของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu ที่มุม 2θ = 42.85^{o}- 42.89^{0} ซึ่งมีความเข้ม I สูงและมีขนาดเกรน D_{112} = 33 nm – 73 nm นอกจากนี้ มีพีคการเลี้ยวเบนพีคที่สามของระนาบ (200) ของเฟสทองแดง Cu ที่มุม 2θ = 50.76^{o}-50.78^{o} มีขนาดเกรน D_{200} = 69 nm – 72 nm โดยความเข้ม I และขนาดเกรน D_{hkl} มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามกำลังไฟฟ้า P ที่ใช้เคลือบและอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้อบฟิล์ม

ฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง PXt /T-t/ ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 190 W, 200 W เป็นเวลา t = 1.5 h, 3.0 h และ 4.5 h อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 300 ^{O}C เป็นเวลา t/ = 10 h มีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พีคที่สองเป็นของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu เช่นเดียวกัน

ฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง PX3.0 /T-t/ เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้าทั้ง 4 ค่า อบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 300 ^{O}C เป็นเวลา t/ = 5 h มีพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พีคที่สองเป็นของระนาบ (020) ของเฟส AlCu และระนาบ (322) และพีคที่สามเป็นของ(422) ของเฟส Al_4Cu_9 ซึ่งมีความเข้ม I น้อยกว่า และขนาดเกรน D_{hkl} เล็กกว่าความเข้ม I และขนาดเกรน D_{112} ของระนาบ (112) ของเฟส Al_2Cu

ดังนั้นการเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง ด้วยวิธีอาร์เอฟโดยเคลือบทองแดงบนฟิล์มอลูมิเนียม จึงเหมาะสำหรับได้ฟิล์มที่มีเฟสของสารประกอบ Al_2Cu

สภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางอลูมิเนียม -ทองแดง ที่หาด้วยวิธีหัววัดสี่จุด พบว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้อบ ด้วยความร้อนมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามาก โดย ฟิล์มบาง อลูมิเนียม – ทองแดง 17X3.0/N ที่เคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า P = 170 W เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และไม่ได้อบด้วยความร้อน มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ = 15. 7 mΩ.m แต่ฟิล์มบางที่เคลือบที่กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นและอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ใช้เวลาในการอบฟิล์มนานขึ้น มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลง โดย ฟิล์ม บาง อลูมิเนียม – ทองแดง 20X3.0/T-10 ที่เคลือบด้วยกำลังไฟฟ้า P = 200 W อบที่อุณหภูมิ T=200 ^{O}C, 300 ^{O}C, 400 ^{O}C และ 500 ^{O}C เป็นเวลา t/ = 10 h มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ น้อย ซึ่งอยู่ในช่วง 1.1 - 1.6 mΩ.m

ดังนั้น ฟิล์มบางอลูมิเนียม –ทองแดงที่เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างวงจรในวงจรอินทิเกรต เป็นฟิล์มบางอลูมิเนียม –ทองแดง 20X3.0/T- t/ ซึ่งเคลือบฟิล์มบางที่กำลังไฟฟ้า 200 W และอบฟิล์มที่อุณหภูมิ T= 200 ^{O}C - 500 ^{o}C เป็นเวลา t/ = 10 h

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ฉรวุฒิ ต. เทียนประเสริฐ. 2005. **การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟสปัตเตอริง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิระวัฒน์ เกลื้อนรัตน์. 2007. **การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางซิลิกอนที่เคลือบด้วยวิธีดีซีและอาร์เอฟสปัตเตอริง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พนม กาศรุณ. 2007. **การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางนิกเกิลที่เคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ด้วยลำอิเล็กตรอน, ดีซีและอาร์เอฟสปัตเตอริง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์, พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ และ พิษณุ เจริญสมศักดิ์. 1988. **รายงานการวิจัย เรื่อง การวิจัยและพัฒนาการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริง.**

Abdesselem, S., M.S. Aida, N. Attaf and A. Ouahab. 2006. Growth mechanism of sputtered amorphous silicon thin films. **Physica B.** 373: 33–41.

Aryal, H. R., S. Adhikari, D. C. Ghimire, H. Uchida, and M. Umeno. 2007. Argon gas dilution effect on the properties of amorphous carbon nitride thin films. **Diamond & Related Materials.** 16: 1269-1272.

Chan, K. Y. and B. S. Teo. 2006. Atomic force microscopy (AFM) and X-ray diffraction (XRD) investigations of copper thin films prepared by dc magnetron sputtering technique. **Microelectronics J.** 37: 1064-1071.

Chan, K. Y. and B. S. Teo. 2007. Investigation into the influence of direct current (DC) power in the magnetron sputtering process on the copper crystallite size. **Microelectronics J.** 38: 60-62.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Farhi, G., M. Aoucher and T. Mohammed-Brahim. 2002. Study of the solid phase crystallization behavior of amorphous sputtered silicon by X-ray diffraction and electrical measurements. **Solar Energy Materials & Solar Cells.** 72: 551–558.

Fukaya, K., A. Tabata and T. Mizutani. 2005. Influence of target direct current bias voltage on the film structure of hydrogenated microcrystalline silicon prepared by direct current–radiofrequency coupled magnetron sputtering. **Thin Solid Films.** 478: 132– 136.

Huang, G., Z. Xi and D. Yang. 2006. Crystallization of amorphous silicon thin films: The effect of rapid thermal processing pretreatment. **Vacuum.** 80: 415–420.

Jang, K., K. Lee, J. Kim, S. Hwang, J. Lee, S. K. Dhungel, S. Jung and J. Yi. 2006. Effect of rapid thermal annealing of sputtered aluminium nitride film in an oxygen ambient. **Materials Science in Semiconductor Processing.** 9: 1137–1141.

Jia, S., H. Ge, X. Geng and Z. Wang. 2000. Preparation of thin film polycrystalline silicon on glass by photo-thermal annealing. **Solar Energy Materials & Solar Cells.** 62: 201-205.

Kondo, J., A. Tabata, T. Kawamura and T. Mizutani. 2002. Dependence on substrate temperature of the film structure of mc-Si:H prepared by RF magnetron sputtering. **Vacuum.** 66: 409–413.

Konuma, M. 1992. **Film Deposition by Plasma Techniques.** Springer-Verlag, Berlin.

Liang, S. L., K. W. Wang and Y. C. Liu. 1979. Argon Concentration of RF Sputtered Silicon Films. **Chinese J. Phys.** 17 (2): 102-106

Makihara, H., A. Tabata, Y. Suzuoki and T. Mizutani. 2000. Effect of the hydrogen partial pressure ratio on the properties of uc-Si : H films prepared by rf magnetron sputtering. **Vacuum.** 59: 785-791.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Masaki, Y., P. G. LeComber and A. G. Fitzgerald. 1993. Solid phase crystallization of thin film of Si prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition. **J. Phys.** 74 (1): 129-134.

Ohring, M. 2002. **Materials Science of Thin Films.** 2nd ed. Academic Press, London.

Plummer, J. D., M. D. Deal and P. B. Griffin. 2000. **Silicon VLSI Technology: Fundamentals, Practice, and Modeling.** Prentice Hall, New Jersey.

Smith, D. L. 1995. **Thin-Film Deposition: Principle and Practice.** 1st ed. McGraw-Hill, Inc., New York.

Vaz, F., P. Cerqueira, L. Rebouta, S.M.C. Nascimento, E. Alves, Ph. Goudeau and J.P. Riviere. 2003. Preparation of magnetron sputtered TiN_xO_y thin films. **Surface and Coatings Technology.** 174 –175: 197–203.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณความหนาและอัตราการเคลือบ ฟิล์ม ของฟิล์ม บางอลูมิเนียม17A1.5 ซึ่งจากตารางที่ 3 ได้ค่า $\Delta m/ab = 1.00 \times 10^{-4}$ g/cm^2 และจากตารางที่ 1 ได้ความหนาแน่นของอลูมิเนียม $\rho' = 2.70$ g/cm^3 ดังนั้นจะได้ความหนา th ของฟิล์มที่คำนวณโดยใช้สมการ (17) ดังนี้

เมื่อทำการเคลือบฟิล์มโดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง (90 นาที) จะได้อัตราการเคลือบ R ที่คำนวณโดยใช้สมการ (18) ดังนี้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ข

ตารางค่ามาตรฐานของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมและทองแดง

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตารางผนวกที่ ข1 ค่ามาตรฐานของรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอลูมิเนียมและทองแดง ที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า fcc

ธาตุ	2θ (^{0})	ความเข้ม (a.u.)	ระนาบ (hkl)	ระยะระหว่างระนาบ d_{hkl}(nm)	แลตทิซพารามิเตอร์ a(nm)
Al	38.63	999	111	0.232948	0.403478
	44.82	455	200	0.202108	0.404216
Cu	43.01	1219	111	0.210185	0.364051
	50.75	655	200	0.179796	0.359592

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณระยะระหว่างระนาบ แลตทิซพารามิเตอร์

และขนาดเกรนของฟิล์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณฟิล์มบางอลูมิเนียม 17A3.0

1. จากตารางที่ 6 ระนาบ (111) ของอลูมิเนียม มีมุมแบรกก์ $2\theta = 38.47°$, $n = 1$ และ $\lambda = 0.1541$ nm ดังนั้นจากสมการ (7) จะได้ ระยะระหว่างระนาบ d_{111} เป็น

2. แลตทิซพารามิเตอร์ a คำนวณได้จากสมการ (8) ดังนี้

3. จากตารางที่ 6 = ความกว้าง B ของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด หาได้จากสมการ (11) จะได้

$$B = \Delta\theta = 0.32^0 = 5.54 \times 10^{-3} \text{ radian}$$

4. ขนาดเกรน D_{111} คำนวณได้จากสมการ (12) โดย $B = 5.54 \times 10^{-3}$ radian และ $\theta = 19.24^0$ จะได้

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบางอลูมิเนียม - ทองแดง 17X3.0/N ที่ไม่ได้อบความร้อน ซึ่งระยะห่างระหว่างขาหัววัด (S) เท่ากับ 0.25 cm และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ V กับกระแสไฟฟ้า I ของภาพที่ 33 ได้ความชันของกราฟ $\approx$ 1.001 Ω ดังนั้นจากสมการ (15) จะได้

$$= 15.7\ \text{m}\Omega\text{.m}$$

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภาคผนวก จ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในการประชุม SPC 2011

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

THAI JOURNAL OF PHYSICS, SERIES 6, (2010)

Effect of RF Sputtering power on Al-Cu thin film

A. Dearamea [1*], S. Trivijitkasem[1], S. Suwanatus[1], R. picha [2]
[1]*Physics Department, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand*
[2]*TINT, Thailand Institute of Nuclear Technology, Nakornnayok, 26210,Thailand*

Abstract

Pure Cu (99.9%) was deposited over pure Al (99.9%) thin film . Four RF sputtering powers were performed : 170, 180, 190 and 200 kW. The films annealed at 673 K for 5 h and 10 h were studied by XRD. The results show the presence of Al and $AlCu_3$, AlCu intermetallic compounds. The annealed time, 5 h and 10 h did not significantly effect on the XRD lines. More $AlCu_3$ phase was formed in lower power sputtering film, and more $AlCu_3$ phase was formed in higher power sputtering film. There are only Al and AlCu phase in the 200 kW sputtering film. The grain size determined from Sherrer's equation of AlCu phase was increased and the $AlCu_3$ phase was decreased as the increasing sputtering power.

Keyword : Al-Cu thin film, RF sputtering power, XRD, grain size.

1. INTRODUCTION

Aluminium – Copper thin films are used in several applications depending on the composition of aluminium and copper in the film.Recently Cu/Al joints are used for interconnections in integrated circuits to transmit the electricity. Techniques of growing Al-Cu thin films have been reported in many publications (1-4). Phase transformations in Al-Cu thin films containing up to 1 at. % was investigated (5). First principles calculations was used to calculate electronic properties of Al-Cu intermetallics and metastable phase boundaries in Al-Cu alloys (7).

In present work, Al-Cu thin films were deposited using various RF sputtering powers, and the microstructures of the films were determined by X-ray diffraction, XRD.

2. EXPERIMENT

Pure Al (99.9%) was deposited on glass slide by radiofrequency (13.56 MHz) magnetron sputtering. The sputtering time was 3h under argon plasma pressure. Four constant RF powers were applied 170, 180, 190 and 200 kW. Pure Cu (99.9%) was then deposited over the Al film under the same condition as depositing Al film. The Al-Cu films were annealed in air at 673 K for 5h and 10h. Microstructure of the films were characterized by means of XRD analysis. XRD experiments were carried out using CuKα radiation (λ= 0.1541 nm) in the $2\theta = 20^0$-60^0 range with 1.3^0 step/min.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The XRD pattern of the Al-Cu thin films annealed at 673 K for 5 h are shown in Fig 1.The 10 h annealed thin films exhibited similar XRD profiles but higher intensity.

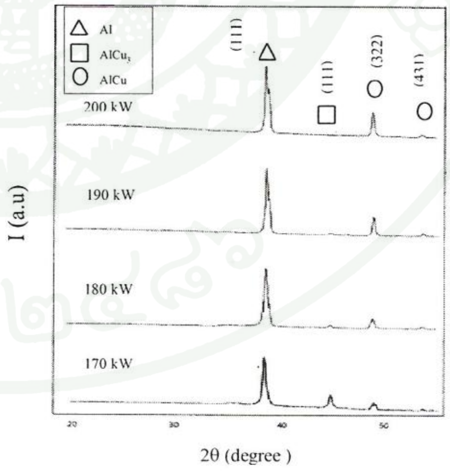


Fig.1 XRD patterns of Al-Cu films deposited at various sputtering power 5 and annealed at 673 K for 5 h.

[*]Corresponding author. *Email*: physic.dul@gmail.com

© 2010 Thai Physics Society

Table 1. Intensity I and grain size D of Al, $AlCu_3$ and AlCu phases deposited at sputter power p.

Phase	p (kW)	2θ (^{0})	I (a.u)	hkl	D (nm)
Al	170	38.73	9271	111	24.81
	180	38.79	18521	111	25.26
	190	38.81	21978	111	26.47
	200	38.85	28207	111	26.89
$AlCu_3$	170	44.99	2603	111	28.36
	180	44.98	1504	111	27.45
	190	44.97	885	111	26.68
	200	-	-	-	-
AlCu	170	48.98	890	332	29.00
	180	48.97	5841	332	31.42
	190	49.00	7661	332	32.00
	200	49.01	8171	332	32.24

The calculated cubic lattice parameter a of Al and $AlCu_3$ phases are 0.4023 and 0.3485 nm, respectively. The grain size D_{hkl} of the hkl peak can be determined from Sherrer's equation :

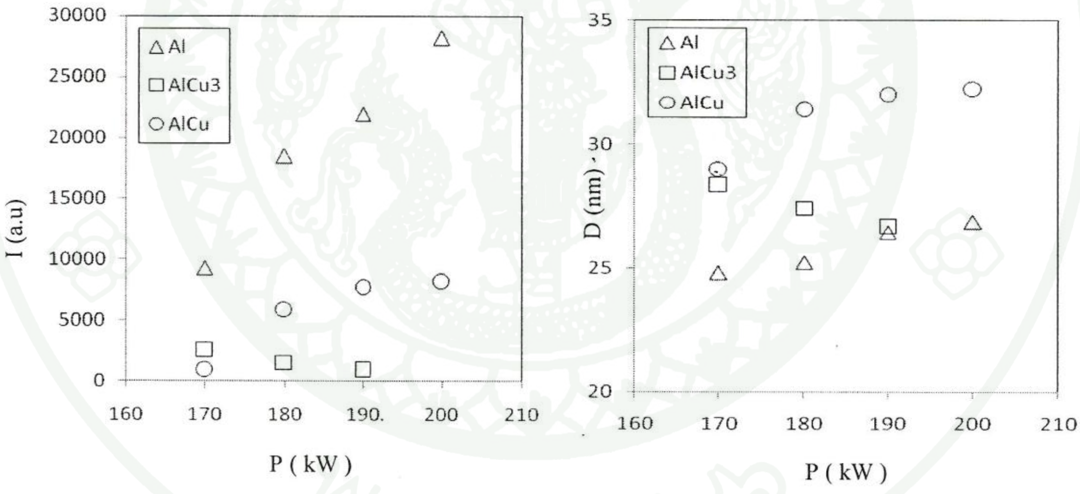
$$D_{hkl} = \frac{0.89\lambda}{B\cos\theta} \qquad (1)$$

here, λ is the wavelength of X-ray,

B is full width at half maximum, FWHM,

and θ is the Bragg's angle of hkl peaks.

The intensity and grain size of Al, AlCu and $AlCu_3$ phases are reported in Table 1. The grain size Fig 2 b. of Al (111) was about 24.81-29.25 nm, $AlCu_3$ (111) was about 26.07 - 28.36 nm and AlCu (332) was about 26.58-30.32 nm.



(a) (b)

Fiq.2 (a) Intensity I and (b) grain size D of Al, AlCu and $AlCu_3$ phases in the Al-Cu films.

The detected XRD peaks of Al, $AlCu_3$ and AlCu are indexed. The Al (111) peak occurs at $2\theta = 38.7^0 - 38.9^0$, while the $AlCu_3$ (111) peak occurs at $2\theta = 44.9^0 - 45.0^0$, and the two peaks of AlCu (332), (431) occur at $2\theta = 48.9^0$–49.0^0, 53.6^0-53.8^0, respectively.The evolution in Fig 2 a. for intensity of the Al, AlCu and $AlCu_3$ peaks the sputtering power 170 kW, 200 kW are observed. The intensity of the $AlCu_3$ peak decreased and the Al, AlCu peaks increased as the increased sputtering power. At lower sputtering power,more $AlCu_3$ intermetallics were formed, but at high sputtering power, more Al and AlCu intermetallics were formed.

4. CONCLUSION

The Al-Cu thin films were deposited on glass slides using four RF sputtering powers: 170, 180, 190 and 200 kW. The annealed films at 673 K for 5 h and 10 h were studied by XRD analysis. The Al, AlCu and $AlCu_3$ phases were observed. The annealed time did not significantly effect on the XRD intensity. The $AlCu_3$ phase was increased in lower sputtering power, and the AlCu phase was increased in higher sputtering power. The grain size of Al (111) was about 24.81-29.25 nm, $AlCu_3$ (111) was about 26.07 - 28.36 nm and AlCu (332) was about 26.58-30.32 nm.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

REFERENCES

1. Draissia, M. and Debili, M.Y., Atomic size effects on the hardness of RF sputtered Al-Cu (rich) thin films, Cryst Growth, Vol. 270, pp. 254, 2004
2. Draissia, M., Boudemagh, H. and Debili, M.Y., Structure and hardness of the sputtered Al-Cu thin films system, Physica Scripta, Vol. 69, pp. 349, 2004
3. Shusterman,Y.V., Yakovlev, N.L., Dovidenko, K. and Schowalter, L.J., Growth and structure of epitaxial Al and Cu films on CaF_2, Thin solid films, Vol.443, pp. 23, 2003
4. Hassan Aly, E., Mohsen, M. and Ahmed, E.M., Investigation of precipitation in aluminum-copper alloy using positron annihilation lifetime technique, Egypt. J. Solids, Vol. 31, pp.184, 2008
5. Lokker, J.P., Bottger, A.J., Sloof, W.G., Tichelaar, F.D., Janssen, G.M. and Radelaar,S.,Phase transformations in AlCu thin films: precipitation and copper redistribution, Acta Materi, Vol. 49, pp.1349,2001
6. Zhou, W., Liu, L., Li, B., Song, Q. and Wu, P., Structural, elastic, and electronic properties of Al-Cu intermetallics from first-principles calculations, J. Electron Materi, Vol. 38, pp. 357, 2008
7. Ravi, C., Wolverton, C. and Ozolins, V., Predicting metastable phase boundaries in Al-Cu alloys from first-principles calculations of free energies: The role of atomic vibrations, Europhysi Lett, Vol.73, pp.719,2006

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ นายอดุล ดือราแม

เกิดวันที่ 20 กันยายน 2525

สถานที่เกิด อำเภอยี่งอ จังหวัดนราธิวาส

ประวัติการศึกษา ค.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ตำแหน่งปัจจุบัน ครู

สถานที่ทำงานปัจจุบัน โรงเรียนศิริวัฒน์วิทยา กรุงเทพมหานคร

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์