

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างและตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางนาโนคริสตัล TiN เพื่อเป็นชั้น
ป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
พร้อมทั้งสร้างชั้น $TiSi_2$ เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสกับฐานรองรับ
ซิลิคอนด้วยระบบการให้ความร้อนแบบรวดเร็วในการผลิตอุปกรณ์ซีมอส

THE FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF NANOCRYSTAL
TiN THIN FILM FOR AlCuSi ALLOY DIFFUSION BARRIER BY DC
MAGNETRON SPUTTERING AND $TiSi_2$ LAYER FOR REDUCING
CONTACT RESISTANCE ON Si SUBSTRATE IN CMOS DEVICES



๐๙พ.
๐๒๕๙๓
๒๕๕๖

เลขหมู่.....**132484**
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี...**1.๘.๐.๐.๒๕๕๗**

b. 1๖๖๐๗๙๘๘
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. ๒๕๕๖

KMITL-2013-NT-M-001-014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF NANOCRYSTAL
TIN THIN FILM FOR AlCuSi ALLOY DIFFUSION BARRIER BY DC
MAGNETRON SPUTTERING AND TiSi₂ LAYER FOR REDUCING
CONTACT RESISTANCE ON Si SUBSTRATE IN CMOS DEVICES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN NANOSCIENCE AND NANOTECHNOLOGY
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013

KMITL-2013-NT-M-001-014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสร้างและตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางนาโนคริสตัล
TiN เพื่อเป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ด้วย
ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง พร้อมทั้งสร้างชั้น
TiSi₂ เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสกับฐานรองรับ
ซิลิคอนด้วยระบบการให้ความร้อนแบบรวดเร็วในการ
ผลิตอุปกรณ์ซีมอส

นักศึกษา

นายอภิรักษ์ ผันเขียว

รหัสประจำตัว

51614265

ปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชา

นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี

พ.ศ.

2556

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนองานวิจัยและพัฒนาเป็นสองส่วนหลัก ส่วนแรกเป็น
การสร้างและการตรวจวิเคราะห์เพื่อศึกษาสมบัติทางวัสดุและไฟฟ้าของฟิล์มบางนาโนคริสตัล
ไทเทเนียมไนไตรด์ สำหรับใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi และส่วนหลังเป็น
การสร้างชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสกับฐานรองรับซิลิคอนด้วยระบบ
การให้ความร้อนแบบรวดเร็วในการผลิตอุปกรณ์ซีมอส ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนแรก ฟิล์มบางนาโนคริสตัลไทเทเนียมไนไตรด์ ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิค ดีซี
แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยทำการศึกษาเงื่อนไขภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ และบรรยากาศ
ไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 420 °C ใน
เตาปฏิกรณ์ จากการศึกษาวิเคราะห์สมบัติโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า
เป็นฟิล์มผลึกระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไนไตรด์ บนระนาบ (111) และไทเทเนียม บนระนาบ
(002) และ (101) ผลการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า พบว่าที่เงื่อนไขของกาซไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่
อัตราส่วน 3:1 มีค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 140.26 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ เมื่อนำไปวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของฟิล์มและ
ตรวจสอบการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ด้วยเทคนิคไอเอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี พบว่ามีปริมาณ
ไทเทเนียมในช่วง 36.8-66.1 at.% และเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนกาซอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น และฟิล์มบางที่
ปลูกได้ในทุกเงื่อนไขสามารถป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ได้

ส่วนที่สอง ชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ถูกสร้างขึ้นเพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสกับฐานรองรับ
ซิลิคอนของอุปกรณ์ซีมอสด้วยระบบการให้ความร้อนแบบรวดเร็ว ภายใต้เงื่อนไขการให้ความร้อนด้วย
เวลาสั้นแบบครั้งเดียว ที่อุณหภูมิ 500-900 °C และแบบสองครั้งโดยอุณหภูมิแรกที่ 600 °C และ
อุณหภูมิหลังที่ 750-850 °C ผลการวิเคราะห์ห่มู่ฟังก์ชันของชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อ
สัมผัสด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี พบว่าการให้ความร้อนด้วยเวลาสั้นแบบสองครั้งนั้นจะทำให้
เกิดห่มู่ฟังก์ชันของ TiSi₂ ชนิด C54 และเมื่อตรวจสอบค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสกับฐานรองรับ
ซิลิคอนชนิด N+ และ P+ ด้วยโครงสร้าง Cross-Bridge Kelvin Resistance พบว่า ความต้านทาน
รอยต่อสัมผัสหลังการสร้างชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์มีค่าลดลงจากเดิมมากกว่า 90%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	The Fabrication and Characterization of Nanocrystal TiN Thin Film for AlCuSi Alloy Diffusion Barrier by DC Magnetron Sputtering and TiSi ₂ Layer for Reducing Contact Resistance on Si Substrate in CMOS Devices
Student	Mr. Apirak Pankiew
Student ID	51614265
Degree	Master of Science
Program	Nanoscience and Nanotechnology
Year	2013
Thesis Advisor	Prof.Dr. Jiti Nukeaw
Thesis Coadvisor	Dr. Supanit Porntheeraphat

ABSTRACT

This thesis presents the research and development work which is divided into two main parts. The first part explains the fabrication and the material and electrical characterization of nano-crystalline titanium nitride (TiN) thin films that will be used as diffusion barrier against the aluminum alloy (AlCuSi) film. Whereas the other part describes the fabrication of titanium silicide (TiSi₂) with rapid thermal annealing (RTA) technique to reduce the contact resistance between aluminum film and silicon substrate of CMOS devices fabricating at Thai Microelectronics Center.

In the first part, the nano-crystalline titanium nitride films were deposited using DC Magnetron Sputtering technique under either purely nitrogen or mixed nitrogen-argon atmosphere with ratio of 3:1, 1:1, and 1:3. The films were then sintered in a furnace at the temperature of 420 °C. The analysis of nano-crystalline film with an XRD technique found the crystalline structure composing of TiN (111), Ti (002) and Ti (101) peaks. The measurement of electrical resistance found that the ratio of 3:1 produced the lowest resistivity of 140.26 μΩ.cm. In addition, the analysis of film composition and aluminum diffusion using Auger Electron Spectroscopy (AES) found the quantity of Ti within the range of 36.8 – 66.1 at.% rising according to the ratio of Argon. Furthermore, every deposition conditions could produce films with the ability to prevent the AlCuSi diffusion.

The second part of this work is the fabrication of TiSi₂ layer in order to reduce the contact resistance to the silicon substrate in CMOS devices using the RTA technique. The first annealing condition used a single annealing step with temperature within the range of 500 to 900 °C. Whereas the second condition used dual annealing steps with the first annealing temperature of 600 °C, and then followed by the second annealing temperature of 750 to 850 °C. The analysis of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

functional group of TiSi_2 using Raman Spectroscopy found that the second condition produced the C54 functional group of TiSi_2 . Furthermore, the measurement of contact resistance on N^+ or P^+ semiconductor substrate, using Cross-Bridge Kelvin Resistance structures, found the contact resistance decreased by more than 90 %.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **III** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นยอดได้ดังนั้น ต้องขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ศาสตราจารย์ ดร.จิตติ หนูแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นผู้มอบโอกาส มอบทุนวิจัย มอบความรู้ สอนให้รู้จักวิธีการแก้ปัญหา และสถานที่ทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร (พี่หน่อง) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยสอนและให้ความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย วิธีการแก้ปัญหา และความรู้ต่างๆ ให้คำปรึกษาทั้งเรื่องวิชาการและเรื่อง การดำเนินชีวิต ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือต่างๆ ที่ให้ด้วยความเต็มใจอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณ คุณวิน บรรจงปรุ (พี่วิน) ที่ได้ช่วยเชี่ยวชาญและเอาใจใส่เป็นอย่างดี ได้สอนให้รู้จัก ระบบการวางแผนงาน แนวความคิด และสามารถที่จะทำงานเป็นระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งให้ความช่วยเหลือในกระบวนการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอร์ริง

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.เบญจพล ต้นธุ์ ดร.ทศติยาภรณ์ ทิววงศ์ ดร.อัมพร โพธิ์โย ที่ให้ความกรุณา เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะ และช่วยแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่เป็นสถานที่และสนับสนุนการทำงาน วิจัยนี้และเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิจัย ให้สะดวกและผ่าน ไปได้ด้วยดี รวมถึงความเป็นกันเองและความเอาใจใส่จากพี่ๆ ทุกคน

ขอขอบคุณ คุณรัตนาวรรณ เมณะเนตร (พี่โส) ที่ช่วยสนับสนุนเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษา ในเรื่องกระบวนการผลิตซีมอสและโฟโตลิโธกราฟีร่วมกับ คุณพัชระ สุนทะโร (เกม)

ขอขอบคุณ ดร.พุทธพล เพ็งพัด (พี่อ้อบ) ที่ให้ความช่วยเหลือแบ่ง Lot ทดลองการทำ $TiSi_2$ ด้วย RTA ร่วมกับ ดร.ดลเดช ต้นตระกูลวิวัฒน์ (พี่โก้)

ขอขอบคุณ คุณรุ่งทวี ปิยนันท์จรัสศรี (พี่หนุ่มเล็ก) ที่ให้ความช่วยเหลือในกระบวนการ Ion Implantation และคอยกระตุ้นให้กำลังใจในการทำเล่มวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณชนะ ลีภัทรพงศ์พันธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในกระบวนการ Thermal Oxidation กระบวนการ Sintering และ Annealing

ขอขอบคุณ คุณอวิรุทธิ์ ศรีสุวรรณ (พี่โจ้) และคุณจักรพงศ์ ศุภเดช (พี่เกน) ที่ให้ความช่วยเหลือ ในกระบวนการ Dry Etching

ขอขอบคุณ คุณเอกชัย ชุ่มมะโน (พี่เอก) ที่ให้ความช่วยเหลือในกระบวนการ Ashing

ขอขอบคุณ คุณอาคม ศรีหาเพท (พี่กล้วย) ที่ให้ความช่วยเหลือในกระบวนการ PECVD

ขอขอบคุณ คุณวิฑูรย์ แยมวงษ์ (พี่ป๊อป) และ คุณบุญเกื้อ ภิญโญ (ยุง) ที่ให้ความช่วยเหลือให้ คำแนะนำในการตรวจสอบทางไฟฟ้าด้วย Probe Station

ขอขอบคุณ ดร.เอกลักษณ์ เขารวิชาร์ตน์ (พี่เอก) ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาเรื่อง กระบวนการผลิตอุปกรณ์ซีมอสและช่วยแปลบทความย่อเป็นภาษาอังกฤษ

ขอขอบคุณ คุณนิทัศน์ อังทองกำเนิด (พี่หนุ่มใหญ่) คุณวันชัย ตั้งฤกษ์พิพัฒน์ (พี่ฮ้อ) คุณวรพันธุ์ ไชยศรีรัตนากุล (พี่หว่าง) ดร.ธวัชชัย คำศรี (พี่ตี) และดร.วุฒินันท์ เจริญศักดิ์ศิริ (พี่เอ) ที่ให้ความช่วยเหลือดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีและให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณอลงกต ตรีทอง (พี่เค) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้ เครื่อง Raman Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ QoS Lab ทุกคน ที่เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับที่นั่งทำงานวิจัย ที่ช่วยดูแลอย่างอบอุ่น
ขอขอบคุณพี่น้องชาววิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังทุกคน ที่ให้การสนับสนุน
และเป็นกำลังใจในการศึกษาได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณ ที่ช่วยเหลือด้านความอนุเคราะห์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเส้นทางด้านอุปกรณ์และ
เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย รวมทั้งความร่วมมือจากหลายๆ หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

สุดท้ายขอขอบคุณความรัก ความเข้าใจ และกำลังใจอันอบอุ่นเสมอมา จากครอบครัว ผันเขียว
ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการผลักดันให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จอย่างสมบูรณ์ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า
เนื้อหาความรู้ จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ทางด้านวิชาการแก่ท่านผู้อ่านไม่มากก็น้อย
คุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขออุทิศแด่ครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อภิรักษ์ ผันเขียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **M** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปีดเทอริง.....	5
2.2 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเทอริง.....	8
2.3 สมบัติของไทเทเนียมไนไตรด์.....	10
2.4 เทคโนโลยีซีลีไซด์.....	12
2.4.1 กระบวนการซาลีไซด์.....	12
2.4.2 กระบวนการพอลิไซด์.....	13
2.5 การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว.....	14
2.6 กระบวนการกัดซาลีไซด์.....	15
2.7 สมบัติของไทเทเนียมซีลีไซด์.....	16
2.7.1 ผลกระทบของความไม่บริสุทธิ์และการออกซิไดซ์ในบรรยากาศ.....	17
2.7.2 ผลกระทบของสารเจือ.....	17
2.8 โครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีจิสแทนซ์สำหรับวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส.....	18
2.9 สมบัติของชั้นป้องกันการแพร่.....	19
2.10 การเกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียมและการทะลุของรอยต่อ.....	19
2.11 ปรากฏการณ์การย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.12 สมบัติของอัลลอย AlCuSi.....	22
2.13 สมบัติยูเทคติกของอัลลอย AlSi.....	22
2.14 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	23
2.14.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก.....	23
2.14.2 รอยสัมผัสชนิดดี.....	24
2.14.3 การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก.....	25
2.15 การเจือสาร.....	26
2.15.1 การแพร่สารเจือ.....	27
2.15.2 การยิงฝังประจุ.....	27
2.16 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม.....	28
2.16.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	28
2.16.2 ระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	30
2.16.3 โอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี.....	32
2.16.4 รามานสเปกโทรสโกปี.....	33
2.17 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม.....	37
2.17.1 โฟร์พอยท์โพรบ.....	37
2.17.2 โพรบสเตชัน.....	39
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.1 ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	41
3.1.1 เครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	42
3.1.1.1 ห้องสุญญากาศ.....	42
3.1.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ.....	43
3.1.1.3 ระบบจ่ายก๊าซ.....	45
3.1.1.4 หน่วยจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและความถี่วิทยุ.....	45
3.1.1.5 ตู้ควบคุมหลัก.....	46
3.1.1.6 PLC.....	48
3.1.1.7 Graphic User Interface.....	48
3.1.2 สาธารณูปโภคที่จำเป็นสำหรับเครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริง.....	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสเปตเตอร์ริง ที่อัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมกาซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ.....	49
3.2.1 การปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเวลาคงที่.....	50
3.3 การสร้างชั้นป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์.....	55
3.4 การสร้างชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ด้วยกระบวนการซาลิไซด์.....	56
3.4.1 การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว.....	56
3.4.2 การกัดเปียกชั้นไทเทเนียมที่ไม่เกิดซิลิไซด์ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์.....	57
3.4.3 การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง.....	58
3.5 การสร้างโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์เพื่อวัดความต้านทานรอยสัมผัส.....	59
3.5.1 การสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมกับฐานรองซิลิคอน.....	59
3.5.2 การสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการ ซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว.....	66
3.5.3 การสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการ ซาลิไซด์ที่การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง.....	67
3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม.....	68
3.6.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	68
3.6.2 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	68
3.6.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี.....	68
3.6.4 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี.....	68
3.6.5 การวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ.....	68
3.6.6 การวัดความต้านทานสัมผัสด้วยโพรบสเตชัน.....	68
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	69
4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอน สเปตเตอร์ริงที่อัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมกาซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ.....	69
4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเวลาคงที่.....	69
4.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเวลาคงที่ หลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่อุณหภูมิคงที่.....	75
4.2 ผลการทดสอบการป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์.....	80

VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลตรวจสอบสมบัติชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ที่สร้างด้วยกระบวนการซาลิไซด์.....	82
4.3.1 ผลตรวจสอบสมบัติชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อน แบบรวดเร็วครั้งเดียว.....	82
4.3.2 ผลการกัดเปื่อยชั้นไทเทเนียมที่ไม่เกิดซิลิไซด์ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์.....	84
4.3.3 ผลตรวจสอบสมบัติชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อน แบบรวดเร็วสองครั้ง.....	88
4.4 ผลการสร้างโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์ เพื่อวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส.....	90
4.4.1 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสไทเทเนียมกับฐานรองซิลิคอน.....	90
4.4.2 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วย กระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว.....	90
4.4.3 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วย กระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงเฟสและโครงสร้างผลึกของโลหะ Ti และ TiN.....	11
2.2 แสดงคุณลักษณะและสมบัติ TiN โดยทุกค่าวัดที่อุณหภูมิ 20 °C.....	11
2.3 สูตรสารละลายที่ใช้ในการกัดซาลิไซด์.....	15
2.4 แสดงรายละเอียดสมบัติของ TiSi ₂	17
3.1 แสดงสารอนุภาคที่จำเป็นสำหรับเครื่องจักร.....	48
3.2 แสดงรายการเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม TiN ด้วย ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอร์ริง ที่อัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนกับอาร์กอนต่างๆ กัน.....	50
4.1 แสดงค่าอัตราการปลูกฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจน ผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ.....	71
4.2 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ยด้วยไพร์พอยท์โพรบของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่าง.....	74
4.3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ยด้วยไพร์พอยท์โพรบของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ หลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 420°C นาน 30 นาที.....	79
4.4 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส Ti กับฐานรอง Si ด้วยโครงสร้าง คอร์สปริตจ์เคลวินรีซิสแทนซ์.....	90
4.5 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส TiSi ₂ กับฐานรอง Si (100) p-type ตัวกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว ด้วยโครงสร้างคอร์สปริตจ์เคลวินรีซิสแทนซ์.....	90
4.6 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส TiSi ₂ กับฐานรอง Si (100) p-type ตัวกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง ด้วยโครงสร้างคอร์สปริตจ์เคลวินรีซิสแทนซ์.....	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลื่อน.....	6
2.2 ระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอร์.....	10
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของไทเทเนียมไนไตรด์แบบ fcc และ (ขวามือ) แบบระนาบ (111).....	10
2.4 การสร้างไทเทเนียมซิลิไซด์ด้วยกระบวนการซาลิไซด์.....	13
2.5 (a) เครื่องจักร RTA และ (b) หลอดทั้งสแตนฮาโลเจนแหล่งกำเนิดความร้อนของ RTA.....	14
2.6 แสดงการวัดอุณหภูมิ RTA ด้วย Pyrometer และ Thermocouple.....	15
2.7 แสดงโครงสร้างของ TiSi ₂ เฟส C49 และ C54.....	16
2.8 แสดงโครงสร้างทดสอบแบบ Cross-Bridge Kelvin Resistance (CBKR).....	18
2.9 แสดงปรากฏการณ์การเกิดเตี้ยแหลมอลูมิเนียมที่เข้าสู่ซิลิคอน ซึ่งทำให้รอยต่อพีเอ็นเกิดการลัดวงจรและชั้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barrier) ใช้ป้องกันการเกิดเตี้ยแหลมของอลูมิเนียม.....	19
2.10 แสดงขั้นตอนการเกิดเตี้ยอลูมิเนียม (Aluminum spikes) ในซิลิคอนเมื่อผ่าน กระบวนการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-450 °C และหลุมบนซิลิคอนหลัง จากกัณฑ์การลุดเตี้ยอลูมิเนียมออกแล้ว.....	20
2.11 แสดงปรากฏการณ์การย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าในแถบโลหะอลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้แถบโลหะขาดช่วง(Voids) และเกิดเนินโลหะ (Hillocks) เป็นสาเหตุทำให้ วงจรเปิดและการลัดวงจร ตามลำดับ.....	21
2.12 แสดงการเกิดปุ่มซิลิคอน (Silicon Nodule) ในโลหะผสม AlSi (ซ้ายมือ) และการตกตะกอน(Presipitate) ของ Al ₂ Cu ในโลหะผสม AlCu (ขวามือ).....	22
2.13 แสดงแผนภูมิสมดุล Al-Si ที่อุณหภูมิจุดหลอมละลายของสารผสมระหว่าง อลูมิเนียมกับซิลิคอนในส่วนผสมต่างๆกัน โดยด้านซ้ายสุดคือแกนของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และด้านขวาคือแกนของซิลิคอนบริสุทธิ์.....	23
2.14 ลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบรอยสัมผัสโอห์มมิค.....	24
2.15 ลักษณะรอยสัมผัสแบบช็อคตต์กี.....	24
2.16 แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี.....	25
2.17 แสดงคุณลักษณะของรอยสัมผัสประเภทต่างๆ คือ (a) รอยสัมผัสแบบโอห์มมิคในอุดมคติ (b) รอยสัมผัสแบบเร็คตีไฟเออร์ และ (c) รอยสัมผัสแบบโอห์มมิคในทางปฏิบัติ.....	26
2.18 (a) การเกิดที่ว่างในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ (b) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	27
2.19 การกระจายตัวของปริมาณสารเจือด้วยวิธีการแพร่และวิธียิงฝังประจุ.....	28
2.20 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	31
2.22 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray Diffractometer.....	31
2.23 แสดงกระบวนการเกิด Auger electron.....	33
2.24 แสดงแทรนซิชันพลังงานควอนตัมสำหรับการกระเจิงแบบเรย์ลีและแบบรามาน.....	35
2.25 แสดงรามานสเปกตรัมของ CCl_4 ที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแสงจากฮีเลียมนีออนเลเซอร์.....	36
2.26 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีโพร์พอยท์โพรบ.....	37
2.27 แสดงอุปกรณ์วัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสบนโครงสร้าง Cross-Bridge Kelvin Resistance ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (a) Probe Station และ (b) Semiconductor Device Analyzer ของบริษัท Agilent รุ่น B1500A	40
3.1 ระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอริง.....	41
3.2 เครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง บริษัท ANELVA รุ่น ILC-1051.....	42
3.3 (a)ห้องสุญญากาศของเครื่องปลูกฟิล์ม (b)เป้าไทเทเนียมในห้องสุญญากาศ L2 และ R2 (c)พลาสมาของกาซอาร์กอนในห้องสุญญากาศ L2 ขณะปลูกฟิล์มไทเทเนียม.....	43
3.4 Cryo pump และ Rotary pump.....	44
3.5 หน่วยควบคุมการทำงานระบบสุญญากาศ.....	44
3.6 (a) Mass Flow Controller (Ar) Maximum flow rate 200 sccm และ (b) ถังกาซต่างๆ.....	45
3.7 (a) Gas Pressure Controller และ (b) Gas Pressure Gage.....	45
3.8 หน่วยจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและความถี่วิทยุ (DC/ RF Power Supply Unit).....	46
3.9 (a) ตู้ควบคุมหลัก (Sequencer) (b) PLC รุ่น MEMOCON U845 ของบริษัท YASKAWA.....	47
3.10 Functional Block ของ Sputtering Machine ANELVA ILC-1051.....	47
3.11 แสดง AlCuSi-Metallization บริเวณหลุมสัมผัส (Contact Hole) ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์.....	49
3.12 ฟิล์ม TiN แบบควบคุมเวลาเพื่อหาอัตราการปลูกและวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น.....	50
3.13 แสดงผังงานของการปลูกฟิล์ม TiN แบบควบคุมเวลา เพื่อหาอัตราการปลูกและวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น.....	51
3.14 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน (a) อ่างควอตซ์บรรจุสารละลาย สำหรับทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, (b) น้ำปอดประจุ และ (c) เครื่องเป่าแห้งด้วยกาซไนโตรเจน.....	52
3.15 ลักษณะเตาปฏิริยา (Furnace) ของบริษัท Thermco System รุ่น TMX-10000 สำหรับ กระบวนการซินเตอริงและแอนนีลลิ่ง.....	54
3.16 ส่วนประกอบของเตาปฏิริยา (Furnace) สำหรับกระบวนการซินเตอริงและแอนนีลลิ่ง.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 แสดงผังงานของการสร้างชั้นป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์ม TiN	55
3.18 การสร้างชั้นป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์ม TiN.....	56
3.19 แสดงผังงานของการสร้างชั้น $TiSi_2$ ด้วยกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว.....	56
3.20 แสดงผังงานของการกัดเปียกชั้นไทเทเนียมที่ไม่เกิดซาลิไซด์ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์.....	57
3.21 แสดงผังงานของการสร้างชั้น $TiSi_2$ ด้วยกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง.....	58
3.22 แสดงผังงานของการสร้างโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์เพื่อวัดความต้านทานรอยสัมผัส.....	59
3.23 ขั้นตอนการเจือสารด้วยการยิงฝัประจุ.....	60
3.24 แสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process).....	61
3.25 แสดงโครงสร้างของการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ.....	62
3.26 แสดงลักษณะของการฉายแสงยูวีผ่านกระจกต้นแบบที่ทำการออกแบบไว้.....	63
3.27 แสดงระบบที่ใช้ในการฉายแสงโดย (a) เครื่อง Stepper สำหรับถ่ายแบบลายวงจร, (b) กระจกต้นแบบของซีมอสซึ่งมีโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์อยู่ภายใน.....	63
3.28 ลายวงจรโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์ในวงจรมือของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ขนาด Contact Hole 0.6, 0.8, 1.0, 2.0 และ $5.0 \mu m^2$	64
3.29 แสดงลักษณะโครงสร้างลวดลายของน้ำยาไวแสงจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	64
3.30 แสดงลักษณะโครงสร้างลวดลายหลังจากกระบวนการกัดแบบแห้งด้วยไอออน.....	65
3.31 แสดงชิ้นงานโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์บนวงจรมือ.....	65
3.32 แสดงผังงานของการสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซาลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว.....	66
3.33 แสดงผังงานของการสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซาลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง.....	67
3.34 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ทางกายภาพ (a) FESEM, (b) XRD, (c) Raman Spectroscope และ (d) AES.....	69
3.35 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (a) Four Point Probe และ (b) Probe Station.....	69
4.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่เวลาการปลูกคงที่ 300 วินาที.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อย ก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ.....71
4.3	รามานสเปกตรัมของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจน ผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ.....72
4.4	กราฟ Depth Profile ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอน เข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3.....73
4.5	กราฟแสดงผลปริมาณไทเทเนียมและไนโตรเจนของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ.....74
4.6	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่เวลาการปลูกคงที่ 300 วินาทีและผ่านกระบวนการซินเทอริงที่ 420 °C.....76
4.7	รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจน ผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ และผ่านกระบวนการซินเทอริงที่ 420 °C.....77
4.8	รามานสเปกตรัมของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสม ก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ หลังผ่านกระบวนการซินเทอริงที่ 420 °C.....78
4.9	กราฟเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานของฟิล์ม TiN ก่อนและหลัง ผ่านกระบวนการซินเทอริงที่อุณหภูมิ 420 °C นาน 30 นาที.....79
4.10	ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่ความหนา 80 nm.....80
4.11	กราฟ Depth Profile ทดสอบการป้องกันการแพร่ของออกซิเจนในฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3.....81
4.12	การเปรียบเทียบรามานสเปกตรัมของชั้น TiSi ₂ ที่สร้างด้วยกระบวนการซาลิไซด์ ด้วยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....82
4.13	กราฟแสดง (a) ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของชั้น TiSi ₂ ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิต่างๆ และ (b) Uniformity ของการวัด.....83
4.14	แสดงภาพของ (a) ฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว ที่อุณหภูมิต่างๆและ (b) หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ (ส่วนครึ่งแผ่นซ้ายมือ คือ ชั้น SiO ₂).....84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 600 °C หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลีไซด์ (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพพื้นผิว และ (c) ไอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกตรัมของตำแหน่งที่วิเคราะห์.....	85
4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 700 °C หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลีไซด์ (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพพื้นผิว และ (c) ไอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกตรัมของตำแหน่งที่วิเคราะห์.....	86
4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 800 °C หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลีไซด์ (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพพื้นผิว และ (c) ไอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกตรัมของตำแหน่งที่วิเคราะห์.....	87
4.18 การเปรียบเทียบปริมาณสเปกตรัมของชั้น $TiSi_2$ ที่สร้างด้วยกระบวนการซาลีไซด์ ด้วยการแอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้งที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....	88
4.19 กราฟแสดง (a) ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของ $TiSi_2$ ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้งที่อุณหภูมิต่างๆ และ (b) Uniformity ของการวัด.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของงานวิจัย

แนวโน้มการออกแบบวงจรรวม (Integrated Circuits) ในปัจจุบันได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว ในทิศทางที่จะลดขนาดให้เล็กลง ทำงานได้รวดเร็วขึ้น และรวมวงจรทั้งหมดไว้ในซิลิคอนชิปเดียว (Single Silicon Chip) ดังนั้นการสร้างวงจรจึงสร้างแบบหลายชั้นซ้อนทับกันโดยมีชั้นฟิล์มโลหะใช้ในการเชื่อมวงจรชั้นต่างๆเข้าด้วยกัน หนึ่งในข้อจำกัดในการออกแบบวงจรรวมให้เล็กลง คือ การลดความหนาชั้นฟิล์มโลหะโดยที่สมบัติการนำไฟฟ้าไม่ลดลงตามด้วย ซึ่งถูกจำกัดด้วยสมบัติจำเพาะของโลหะที่ใช้ เช่น ปรากฏการณ์การย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า (Electromigration), สภาพต้านทาน (Resistivity) และ รวมทั้งข้อจำกัดของกระบวนการผลิตด้วย

การเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connection) ภายในวงจรรวมของชิปซิลิคอน ทำได้โดยการปลูกฟิล์มโลหะแล้วกัดเป็นลวดลาย (Pattern) บนแผ่นซิลิคอน (Silicon Wafer) ซึ่งฟิล์มโลหะจะสัมผัสกับซิลิคอนบริเวณที่เปิดไว้ โดยส่วนอื่นที่ไม่ได้สัมผัสจะปกคลุมด้วยชั้นฉนวนออกไซด์ และจะถูกซินเตอร์ (Sintering) ให้ความร้อนเพื่อให้ฟิล์มโลหะติดแน่นกับแผ่นซิลิคอน โดยทั่วไปนิยมใช้อลูมิเนียมเป็นโลหะสัมผัส (Contact Metal) ในการเชื่อมต่อภายใน (Interconnect) ของวงจรรวมเนื่องจากมีสภาพต้านทานต่ำ

ในกรณีที่ใช้โลหะอลูมิเนียม (Al) ซึ่งมีข้อดีกว่า เงิน (Ag) และ ทองแดง (Cu) เนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับ Electromigration เพราะสามารถเจือทองแดง 1 at.% [1] ให้กับอลูมิเนียมเพื่อแก้ปัญหานี้ได้ แต่ก็มีข้อเสียเมื่ออลูมิเนียมถูกแอนนีสที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดยูเทคติก (Eutectic Point) ระหว่าง 400 °C ถึง 450 °C ในกระบวนการแอนนีส (Annealing Process) จะเกิดการแพร่ของซิลิคอนเข้าไปในอลูมิเนียมตามบริเวณรอยต่อสัมผัสอลูมิเนียม (Contact Interface) กับซิลิคอนทำให้เกิดหลุม (Pit) ในฐานรองซิลิคอนและอลูมิเนียมจะเข้าไปแทนที่ที่เกิดเป็น เดียวแหลมของอลูมิเนียม (Aluminum Spikes) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการลัดวงจรของชิปซิลิคอนได้ จึงมีการเจือซิลิคอนประมาณ 1 at.% [2] เพื่อทำให้อลูมิเนียมอึดตัวด้วยซิลิคอน จึงมีการแพร่ของซิลิคอนจากฐานรองเข้าไปในโลหะอลูมิเนียมน้อยลง ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้

อัลลอย อลูมิเนียม/ทองแดง/ซิลิคอน (AlCuSi Alloys) นิยมใช้เป็นโลหะสัมผัสมากกว่าอลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Al 99.99 %) เนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับ Electromigration และ Aluminum Spikes แต่ก็มีผลกระทบจากซิลิคอนและทองแดงที่เจือให้กับอลูมิเนียมเช่นกัน เช่น ขณะลดอุณหภูมิหลังการแอนนีสให้ความร้อนลดลง ซิลิคอนที่เจือในอลูมิเนียมจะเริ่มอึดตัวและเกิดการตกตะกอนบริเวณรอยต่อ $AlSiO_2$ และ $AlSi$ ทำให้ความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอน (Contact Resistance) มีค่าสูงขึ้น [3]

ส่วนทองแดงที่เจือในอลูมิเนียมมักเกิดอันตรกิริยากันกลายเป็น Al_2Cu ที่มีสภาพต้านทานสูง (High Resistivity) ดังนั้นจึงได้มีการสร้างชั้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barrier Layer) คั่นระหว่างฐานรองซิลิคอนและชั้นอัลลอย AlCuSi เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวมาแล้วในข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride, TiN) มักนำมาสร้างเป็นชั้นป้องกันการแพร่ในเทคโนโลยี ซีมอส เพราะมีสภาพต้านทาน (Resistivity) ต่ำ เมื่อสร้างบนฐานรองซิลิคอนมีค่าประมาณ $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ โดยค่านี้ขึ้นกับสภาพต้านทานของวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งกำแพงศักย์ของ TiN บนฐานรองซิลิคอนที่มีสภาพต้านทานสูงมีค่าเท่ากับ 0.49 eV [4]

ไทเทเนียมซิลิไซด์ (Titanium Silicide, TiSi₂) มักถูกใช้อย่างกว้างขวางในเทคโนโลยีซีมอสเป็นชั้นสัมผัสกับฐานรองซิลิคอน เนื่องจากมีสภาพต้านทานต่ำ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง สามารถป้องกันการเกิด Electromigration ได้ดี เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก และเหมาะสมกับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ซีมอสที่มีฐานรองเป็นซิลิคอน [5] โดย TiSi₂ มี 2 แบบ คือ แบบ C49 มีโครงสร้างผลึกแบบ Base-Centered Orthorhombic ซึ่งมีสภาพความต้านทานสูง (60-300 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$) และแบบ C54 มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-Centered Orthorhombic ซึ่งมีสภาพความต้านทานต่ำ (15-35 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$) สามารถสร้างด้วยวิธีซาลิไซด์ (Salicide) และวิธีพอลิไซด์ (Polycide) ที่อาศัยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (Rapid Thermal Annealing, RTA) ดังนั้นโดยทั่วไป TiSi₂ แบบ C54 จะถูกนำมาใช้ลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนในการเชื่อมต่อภายในของวงจรรวม [6]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง TiN ที่ใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlSiCu แพร่ลงไปยังฐานรองซิลิคอนซึ่งเป็นสาเหตุของการลัดวงจรทำให้ชิปซิลิคอนเสียหายได้ และต้องการลดความต้านทานรอยสัมผัสซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความร้อนในวงจรรวม และเพื่อลดการสูญเสียพลังงานให้ต่ำลงที่สุด รวมทั้งศึกษาการสร้างและสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของชั้น TiSi₂ เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอน

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ส่วนแรกเพื่อศึกษาหาเงื่อนไขการสร้างฟิล์ม TiN ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ระหว่างชั้นอัลลอย AlCuSi กับฐานรองซิลิคอน โดยมีความสามารถป้องกันการแพร่ได้ดีและมีสภาพต้านทานต่ำ

ส่วนที่สองเพื่อศึกษาหาเงื่อนไขการสร้างชั้น TiSi₂ เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการ Salicide ที่แอนนัลให้ความร้อนแบบรวดเร็ว

โดยทั้งสองส่วนนี้ศึกษาและสร้างเพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนที่บริเวณหลุมสัมผัส (Contact Hole) ในส่วนของการเชื่อมต่อภายในวงจรรวมของอุปกรณ์ซีมอส

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

การสร้างฟิล์มบาง TiN ที่สามารถใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของชั้นอัลลอย AlCuSi ไปยังฐานรองซิลิคอนและการสร้างชั้น TiSi₂ เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนสามารถตั้งสมมติฐานได้ ดังนี้

1.3.1 อัตราส่วนกาซไนโตรเจนกับกาซอาร์กอนที่ใช้ปลูกฟิล์ม TiN ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์ม

1.3.2 อุณหภูมิซินเตอริงของฟิล์ม TiN มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์ม

1.3.3 เทคนิคการสร้างชั้น TiSi_2 ด้วยกระบวนการ Salicide มีผลทำให้ความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนลดลง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแก้ปัญหาส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตอุปกรณ์ซีมอสของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับการศึกษาและสร้างชั้นป้องกันการแพร่ด้วยฟิล์ม TiN โดยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสภาพต้านทานต่ำที่สุดและสามารถป้องกันการแพร่ของชั้นอัลลอย AlCuSi ไปยังฐานรองซิลิคอนที่บริเวณหลุมสัมผัสได้ รวมทั้งการสร้างชั้น TiSi_2 เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนด้วยการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มด้วยวิธีทางกายภาพและทางไฟฟ้า โดยการสร้างชั้นป้องกันการแพร่และชั้น TiSi_2 จะต้องสอดคล้องตามการออกแบบและกระบวนการผลิตอุปกรณ์ซีมอสของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างเหมาะสม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ ความเข้าใจ เกี่ยวกับหลักการปลูกฟิล์มด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง และหลักการสร้างชั้นซิลิไซด์ด้วยกระบวนการ Salicide ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว

1.5.2 สามารถสร้างฟิล์ม TiN ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อเป็นชั้นป้องกันการแพร่ที่มีสมบัติสภาพต้านทานต่ำและป้องกันการแพร่ได้ดี

1.5.3 สามารถสร้างชั้น TiSi_2 ด้วยกระบวนการ Salicide ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว เพื่อลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้นโลหะกับฐานรองซิลิคอนได้ต่ำที่สุด

1.5.4 สามารถวิเคราะห์และพัฒนาชั้นป้องกันการแพร่และชั้น TiSi_2 ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

1.5.5 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับกระบวนการผลิตอุปกรณ์ซีมอสของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างเหมาะสม

1.6 รายละเอียดของงานวิจัย

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์แบ่งเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียด ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 เป็นหลักการปลูกฟิล์มบางด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่ถูกนำมาใช้ปลูกฟิล์ม TiN เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ศึกษาสมบัติของฟิล์ม TiN และชั้นป้องกันการแพร่ รวมทั้งหลักการของกระบวนการ Salicide ในเทคโนโลยีซิลิไซด์ที่จะนำมาใช้สร้างชั้น TiSi_2 ลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะกับฐานรองซิลิคอน และหลักการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ในส่วนแรกเป็นการปลูกฟิล์ม TiN ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่เงื่อนไขต่างๆ แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าก่อนนำไปใช้สร้างชั้นป้องกันการแพร่ จากนั้นสร้างชั้นป้องกันการแพร่พร้อมทั้งทดสอบการป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ในส่วนสุดท้ายเป็นการสร้างชั้น TiSi_2 ด้วยกระบวนการ Salicide ที่แอนนัลให้ความร้อนแบบรวดเร็วแล้วตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแตนซ์ (Cross-Bridge Kelvin Resistance)

บทที่ 4 เป็นผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล ในส่วนแรกเป็นผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เงื่อนไขต่างๆ และผลทดสอบการป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ในส่วนสุดท้ายเป็นผลตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชั้น TiSi_2 ที่สร้างด้วยกระบวนการ Salicide ที่แอนนัลให้ความร้อนแบบรวดเร็ว และผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแตนซ์

บทที่ 5 เป็นสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 ทฤษฎีการปลูกฟิล์มบางด้วยเทคนิคสปีดเตอริง

2.1.1 กระบวนการสปีดเตอริง

กระบวนการสปีดเตอริง (Sputtering Process) [7] เป็นกระบวนการปลูกฟิล์มบางของสารต่างๆ ทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะลงบนฐานรอง (Substrate) โดยใช้หลักการทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition) ซึ่งจะแตกต่างจากการปลูกฟิล์มโดยใช้หลักการทางเคมี (Chemical Vapor Deposition) เนื่องจากการปลูกฟิล์มโดยใช้หลักการทางเคมีนั้นจะควบคุมความหนาได้ยากและต้องใช้ฐานรองที่นำไฟฟ้า ส่วนการปลูกฟิล์มโดยใช้หลักการทางกายภาพนั้นสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ดีกว่า ลักษณะเด่นของกระบวนการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคสปีดเตอริง คือ สามารถปลูกฟิล์มที่เป็นโลหะผสม (Alloys) และสารประกอบได้ โดยฟิล์มที่ปลูกได้มีความคงทนในการยึดเกาะสูง เป้าสารเคลื่อน (Target) สามารถใช้งานได้นาน ไม่สิ้นเปลือง สามารถใช้ปลูกฟิล์มบนผิวของรูปทรงแท่งหรือกระบอกได้ นอกจากนี้ความร้อนที่เกิดในกระบวนการมีเพียงเล็กน้อย ระบบสปีดเตอริงประกอบด้วย เป้าสารเคลื่อนซึ่งเป็นวัสดุที่ต้องการปลูกบนฐานรอง ดังรูปที่ 2.1 หลังจากดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศแล้ว ก๊าซอาร์กอนที่ความดันต่ำจะถูกปล่อยเข้ามาในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ ก๊าซอาร์กอนถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออน และถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง ไอออนที่มีพลังงานสูงจะวิ่งไปชนเป้าสารเคลื่อน ทำให้อะตอมของเป้าสารเคลื่อนหลุดออกมาด้วยความเร็วสูงตกลงมาที่ฐานรอง โดยสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปีดเตอริง คือ

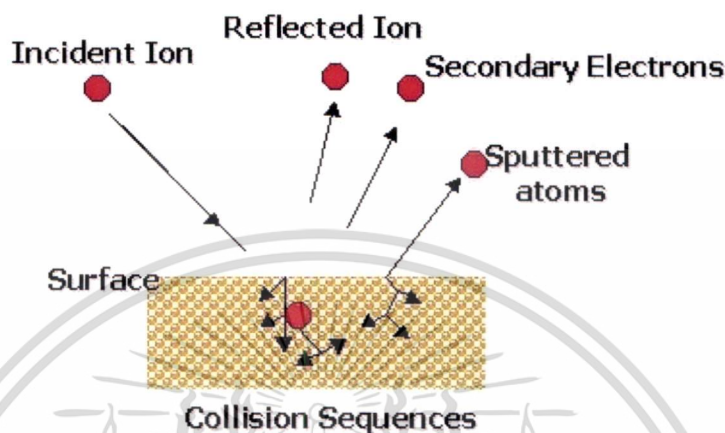
2.1.1.1 เป้าสารเคลื่อนทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลื่อนลงเคลือบบนแผ่นฐานรอง

2.1.1.2 อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งจะวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลื่อน ทำให้อะตอมของเป้าสารเคลื่อนหลุดออกมา ปกติอนุภาคพลังงานสูงนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า เช่น นิวตรอน หรืออะตอมของธาตุต่างๆ แต่การทำให้อนุภาคที่เป็นกลางมีพลังงานสูงเกิน 10 eV เพื่อใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการหนึ่งที่นิยม คือ การเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับพลังงานไอออนได้ตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่เกิดได้ง่ายและสามารถเร่งให้มีพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้แต่อิเล็กตรอนมีมวลน้อยกว่าอะตอมของสารเคลื่อนมากจึงทำให้การถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมต่ออะตอมสารเคลื่อนเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถทำให้กระบวนการสปีดเตอริงเกิดขึ้นได้ ตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การชนระหว่าง 2 อนุภาคที่มีการส่งถ่ายพลังงานและโมเมนตัมดีที่สุดจะเกิดขึ้น เมื่อมวลของอนุภาคทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงเลือกการเร่งไอออนของก๊าซในสนามไฟฟ้าเป็นอนุภาควิ่งชนเป้าสารเคลื่อนซึ่งให้อัตราการปลดปล่อยเป้าสารเคลื่อนสูงเพียงพอกับความต้องการ

2.1.1.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปีดเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มบางตามต้องการทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนในอัตราสูงหรือผลิตจากกระบวนการโกลดิสซาร์จ เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลดิสซาร์จในการผลิตอนุภาคพลังงานสูง



รูปที่ 2.1 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

2.1.2 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดในกระบวนการสปัตเตอริงมีดังนี้

2.1.2.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected and Neutral Ions) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

2.1.2.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงมากพอ

2.1.2.3 การฝังตัวของไอออน (Ion Implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรปรวนกับพลังงานไอออน เช่น แผ่นทองแดงมีความลึกของการฝังตัวของไอออนประมาณ 10 อังสตรอมต่อพลังงานไอออน 1 keV สำหรับไอออนของกาซาร์กอน

2.1.2.4 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก

2.1.2.5 การชนอาจทำให้เกิดการกระเจิงอย่างซับซ้อน และทำให้อะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหลุดออกมาในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของไอออนที่วิ่งเข้าชนอะตอมเหล่านี้ถูกเรียกว่าอะตอมสปัตเตอ์ (Sputtered Atoms)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ค่าyield ของสปัตเตอร์ริง

ค่าyield ของสปัตเตอร์ริง (Sputtering Yield: S) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดออกของอะตอมเป้าสารเคลือบ ต่อ ปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาค (มีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน) ค่าyield แปรเปลี่ยนไปตามสภาวะต่างๆ ในขบวนการสปัตเตอร์ริง ดังนี้

2.1.3.1 ค่าyield แปรเปลี่ยนไปตาม ค่าพลังงานของไอออน คือ ไอออนต้องมีพลังงานมากกว่าพลังงานขีดเริ่ม (Threshold Energies หมายถึง พลังงานที่เริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบในสภาวะที่มีการชนอย่างต่อเนื่องของไอออนกับผิวเป้าสารเคลือบ) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคู่การชนของอนุภาค เมื่อทำการเพิ่มพลังงานของไอออนค่าyield จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียลในช่วงแรก ๆ และจะเปลี่ยนเป็นเชิงเส้น จากนั้นจะอิ่มตัวเมื่อพลังงานของไอออนมาก เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสฝังตัวบนผิวเป้าสารเคลือบสูงขึ้นไปทำให้ค่าyield ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานของไอออนให้สูงมากขึ้น

2.1.3.2 ค่าyield แปรเปลี่ยนไปตามระนาบผลึกของผิวเป้าสารเคลือบ พบว่าค่าyield สูงเมื่อไอออนชนเป้าในระนาบที่มีอะตอมหนาแน่น ส่วนระนาบที่มีความหนาแน่นอะตอมต่ำ ไอออนมีแนวโน้มฝังตัวในเป้าสารเคลือบ

2.1.3.3 ขึ้นอยู่กับมวลของไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ คือ จากที่เราทราบว่าอนุภาคสองอนุภาคที่มีมวลเท่ากันจะสามารถถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมได้ดีที่สุด แต่อะตอมบนเป้าสารเคลือบยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงจึงทำตัวเสมือนมีมวลประสิทธิผลสูงกว่ามวลอะตอมเดี่ยว ๆ ดังนั้นเมื่อต้องการทำให้ค่าyield สูงเราต้องใช้ไอออนที่มีมวลสูงกว่ามวลอะตอมของเป้า (จึงเลือกใช้ไอออนจากก๊าซเฉื่อย)

2.1.3.4 ค่าyield แปรเปลี่ยนไปตามมุมตกกระทบของไอออนที่ทำบนผิวหน้าของเป้าสารเคลือบ คือ มุมตกกระทบยิ่งมากยิ่งมีค่าyield สูงจนถึงมุมที่มากกว่า 45 องศาเล็กน้อย (เนื่องจากอะตอมสารเคลือบที่หลุดออกมาเปลี่ยนจากการกระเจิงแบบ Backscattering เป็น Forward Scattering) จากนั้นเมื่อเพิ่มมุมตกกระทบค่าyield จะลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อมุมตกกระทบมีค่า 90 องศา

2.1.4 กระบวนการก๊าซดิสชาร์จ

กระบวนการก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge Process) คือ การทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออนโดยใช้สนามไฟฟ้ามีขั้นตอนตามลำดับดังนี้

2.1.4.1 เริ่มให้แรงดันค่าน้อย ๆ พบว่ากระแสไหลในวงจรน้อยมาก ซึ่งเป็นกระแสอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนของก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในบรรยากาศซึ่งเกิดจากการชนของรังสีคอสมิก (อัตราการเกิดประจุขึ้นกับความเข้มของรังสี)

2.1.4.2 เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจนมีค่าเข้าใกล้แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) พลังงานของประจุที่ถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้า จะมีค่าสูงขึ้นจนสามารถชนโมเลกุลของก๊าซให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและไอออนลบซึ่งไอออนพวกนี้ก็จะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าให้วิ่งชนโมเลกุลของก๊าซต่อไปอีกจึงเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้น ซึ่งไอออนบวกจะถูกเร่งเข้าชนคาโทดจนเกิดการปลดปล่อยทุติยภูมิอิเล็กตรอน (Secondary Electron)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.3 เพิ่มแรงดันจนถึงค่าแรงดันพังทลาย จะเกิดขบวนการการถล่ม (Avalanche) ขึ้น คือ ไอออนบวกวิ่งไปชนขั้วคาโทด ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสอง (ของสารเคลือบ) แล้วอิเล็กตรอนก็ถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้ไปชนโมเลกุลของก๊าซเกิดการไอออไนซ์เพิ่มขึ้นจนทำให้มีไอออนมากพอสำหรับผลิตอิเล็กตรอนได้เป็นจำนวนที่คงที่ (ช่วงนี้ระบบรักษาสภาพดีสชาร์จได้ด้วยตัวเองไม่ต้องพึ่งแหล่งกำเนิดรังสีจากภายนอก) ขบวนการช่วงนี้เรียกว่า ทาวน์เซนด์ดีสชาร์จ (Townsend Discharge) จากนั้นเมื่อกระแสดีสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆ หนึ่งจึงเกิดการเรืองแสงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมขั้วมีค่าลดลง กระแสเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เรียกช่วงนี้ว่า การเรืองแสงปกติ (Normal Glow) ค่าอิเล็กดจะต่ำ ในช่วงเริ่มต้นของการเรืองแสงหรือโกลว์การชนของไอออนบนคาโทดจะปรับตัวเองให้เกิดขึ้นในบางบริเวณ แนวการเรืองแสงอาจเลื่อนตำแหน่งไปมาได้ และการชนของไอออนบนคาโทดไม่มีความสม่ำเสมอ โดยมักจะมีค่าความเข้มของบริเวณการเรืองแสงตามแนวขอบหรือมุมของคาโทดที่มีสนามไฟฟ้าสูง เพื่อรักษาสภาพการโกลว์ (Self-Sustaining) บางบริเวณไว้ เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น แนวการชนของไอออนจะค่อยๆ ขยายตัวเพิ่มพื้นที่จนครอบคลุมตลอดผิวคาโทด จนกระทั่งมีค่าความหนาแน่นกระแสเท่ากันตลอดโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดคงที่ (ช่วงการเรืองแสงปกติที่ค่าแรงดันไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงนี้เรานำมาประยุกต์ใช้งานในการสร้างหลอดควบคุมแรงดันไฟฟ้าคงที่ (Voltage Regulator Tube))

2.1.4.4 หลังจากที่มีการชนของไอออนครอบคลุมพื้นที่ของคาโทดแล้ว การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจะทำให้ทั้งแรงดันและกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น การเรืองแสงจะจำขึ้นผิดปกติ เรียกช่วงนี้ว่า การเรืองแสงผิดปกติเปล่งแสงจำขึ้น (Abnormal Glow) ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมใช้ในระบบสเปคเตอรिंग ช่วงนี้ถ้าไม่มีการระบายความร้อนให้กับคาโทด เมื่อความหนาแน่นกระแสของคาโทดเพิ่มขึ้นสูงประมาณ 0.1 mA/cm^2 ความร้อนที่เกิดจากการชนของไอออนบวกบนผิวคาโทดจะเกิดขึ้นมากจนเกิดขบวนการปลดปล่อยอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก (Thermionic Electron Emission) เสริมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองและขบวนการอะวาแลนซ์ ทำให้ความนำไฟฟ้าของก๊าซในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดตกลงมาก ในขณะที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงและเปล่งแสงประกายจ้าของการอาร์ค (Arc Discharge)

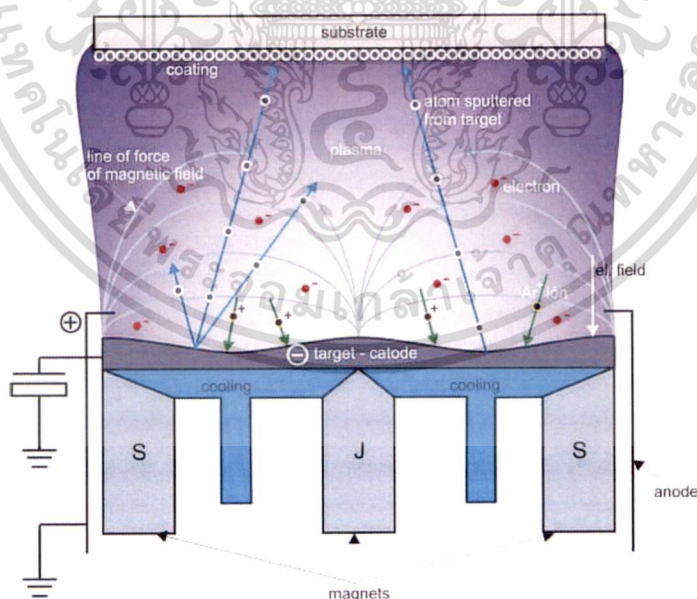
2.2 การปลูกฟิล์มบางด้วยระบบ ดีซี แมกเนตรอนสเปคเตอรिंग

เทคนิคสเปคเตอรिंगสามารถแยกออกได้เป็นหลายประเภท เช่น ดีซี สเปคเตอรिंग (DC Sputtering) อาร์เอฟ สเปคเตอรिंग (RF Sputtering) ดีซี แมกเนตรอนสเปคเตอรिंग (DC Magnetron Sputtering) และสเปคเตอรिंगแบบใช้ก๊าซไวปฏิกิริยา (Reactive Sputtering) การเปลี่ยนเทคนิคในการสเปคเตอรึงจากระบบ ดีซี (DC: Direct Current) เป็นระบบ อาร์เอฟ (RF: Radio Frequency) จะใช้ในการปลูกฟิล์มสำหรับวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าและเทคนิคนี้จะทำให้เกิดพลาสมา (Plasma) ได้โดยใช้ความดันของอาร์กอนที่ต่ำกว่าเทคนิคสเปคเตอรึงแบบธรรมดา การใช้เทคนิคแมกเนตรอน (Magnetron) จะทำให้ไอออนของอาร์กอนเคลื่อนที่เข้าหาเป้าได้มากขึ้นทำให้อัตราการปลูก (Deposition Rate) สูงขึ้น และ การใช้เทคนิคแบบใช้ก๊าซไวปฏิกิริยา (Reactive) เกิดจากการเติมก๊าซที่ช่วยทำปฏิกิริยา (Reactive Gas) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับเป้า ซึ่งข้อดีของการปลูกฟิล์มด้วยเทคนิคนี้ คือ ฟิล์มที่ได้จะมีส่วนประกอบทางเคมีสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ภายใต้ระบบโกลวดิสชาร์จและใช้สนามแม่เหล็กช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพในการสปัตเตอร์ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ และอาเอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ ซึ่งระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ เป็นการสปัตเตอร์โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง เหมาะสำหรับการสปัตเตอร์ปลุกฟิล์มบางที่เป็นโลหะ และมีอัตราการเคลือบฟิล์มสูง ส่วนระบบอาเอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์นั้น สปัตเตอร์โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ เหมาะสำหรับการสปัตเตอร์ปลุกฟิล์มบางที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวน

อัตราการเกิดสปัตเตอร์นั้น จะขึ้นกับผลคูณระหว่างยิลด์และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอร์นั้น นอกจากจะกระทำได้โดยการเพิ่มยิลด์แล้วยังทำได้ โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ซึ่งในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ ปกตินั้นทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดหรือเพิ่มความดัน ซึ่งจะมีขีดจำกัดสูงสุดที่ความหนาแน่นกระแสประมาณ 1 mA/cm^2 และความดันประมาณ $1.33 \times 10^{-5} \text{ mbar}$ นอกจากนี้ยังพบว่าในระบบ ดีซี สปัตเตอร์ทั่วไปอะตอมของก๊าซที่จะเกิดการไอออนไนซ์มีค่าน้อยกว่า 1% นอกจากนี้ยังมีข้อเสีย เมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย ต่อมามีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป้าสารเคลือบและมีทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นทางโค้ง ดังรูปที่ 2.2 ทำให้การไอออไนซ์ เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมก๊าซเฉื่อยมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการสปัตเตอร์สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.2 ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

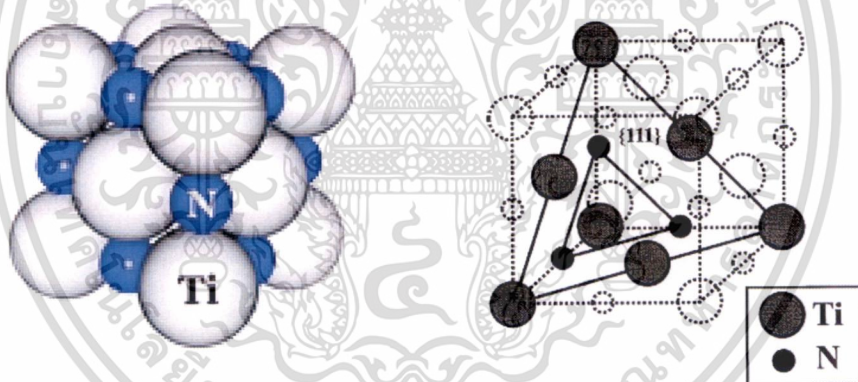
2.3 สมบัติของไทเทเนียมไนไตรด์

โครงสร้างฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ปกติจะพบในรูปโครงสร้างชนิด fcc มีโครงสร้างผลึกแบบ NaCl ดังรูปที่ 2.3 อะตอมขนาดใหญ่ คือ ไทเทเนียมและอะตอมขนาดเล็กกว่า คือ ไนโตรเจน การจัดเรียงโครงสร้างผลึกของโลหะทรานซิชันไนไตรด์คำนวณจาก

$$r = r_x/r_{Me} \quad (2.1)$$

โดยที่ r_x คือ สัดส่วนของรัศมีอะตอมของธาตุแบบแทรกที่
 r_{Me} คือ รัศมีอะตอมของโลหะทรานซิชัน

ตามกฎของ Hagg ถ้าค่าสัดส่วน (r) น้อยกว่า 0.59 ($r_N/r_{TiN}=0.56$) จะมีโครงสร้างเหมือนเช่นโครงสร้างของ NaCl หรือโครงสร้างแบบ Hexagonal ดังในตารางที่ 2.1 และถ้าค่าสัดส่วนมากกว่า 0.59 โลหะทรานซิชันและอะตอมแบบแทรกที่ (interstitial) รวมเป็นโครงสร้างหน่วยเซลล์ (Unit Cell) ได้ยาก ซึ่งแต่ละหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมประมาณ 100 อะตอม



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของ TiN แบบ fcc (ซ้ายมือ) และ TiN บนระนาบ (111) (ขวามือ) [10]

พลังงานเค้นยืดหยุ่น (Elastic Strain Energy) ของ TiN มีค่าน้อยที่สุดเมื่อโครงสร้างผลึกระนาบ (111) ในการปลูกฟิล์มบนฐานรอง โดยระนาบผลึก (111) มีแนวโน้มเกิดได้มากกว่าระนาบอื่น โดยมีสมบัติเด่น คือ มีความทนทานต่อการกัดกร่อนสูง, ทนความร้อนสูง, มีสภาพต้านทานต่ำ และมีความแข็งแรงมาก ดังในตารางที่ 2.2 โดยสมบัติเชิงกลและทางไฟฟ้าของฟิล์ม TiN ขึ้นกับการจัดเรียงโครงสร้างและเงื่อนไขการปลูก ดังนั้น TiN ระนาบผลึก (111) จึงเป็นระนาบที่ต้องการในการใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟสของไทเทเนียมไนไตรด์	โครงสร้างผลึก
α -Ti (Low-temp form)	Hexagonal Close Packed
β -Ti (High-temp form)	Body-Centered Cubic
δ -TiN _{1-x}	Face-Centered Cubic
δ' -TiN _{0.5}	Simple Hexagonal
θ -Ti ₂ N	Simple Hexagonal
η -Ti ₃ N _{2-x}	Rhombohedral
ζ -Ti ₄ N _{3-x}	Rhombohedral

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสและโครงสร้างผลึกของโลหะ Ti และ TiN

สมบัติของไทเทเนียมไนไตรด์	รายละเอียด
Structure and Lattice Parameter	fcc Bl (NaCl), a = 0.424 nm
Composition	TiN _{0.6} to TiN _{1.1}
Molecular Weight	64.95
X-ray Density	5.40 g/cm ³
Bond Energy (E ₀)	13.24 eV
Melting Point	2950 °C
Thermal Conductivity (K)	19.2 W/m.°C
Electrical Resistivity	20 ± 10 μΩ.cm
Vickers Hardness	18-21 GPa
Modulus of Elasticity	251 GPa
Oxidation Resistance	เริ่มเกิดออกไซด์ (Oxidize) ในอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C
Chemical Resistance	มีความเสถียรต่อสารเคมีที่อุณหภูมิห้องและถูกกัดกร่อนอย่างช้าๆ ในสารละลายกรดเข้มข้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะและสมบัติของ TiN โดยทุกค่าวัดที่อุณหภูมิ 20 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 เทคโนโลยีซิลิไซด์ (Silicide Technology)

ชั้นซิลิไซด์เป็นส่วนสำคัญหนึ่งในเทคโนโลยีวงจรรวมเป็นชั้นที่ช่วยกำจัดจุดบกพร่อง (Defect) และอะตอมแปลกปลอมบริเวณพื้นผิวสัมผัส ทำให้รอยสัมผัสสะอาดจึงมีค่าสภาพต้านทานต่ำ มักมีค่าอยู่ระหว่าง 15-50 $\mu\text{m}\cdot\text{cm}$ ดังนั้นการสร้างชั้นซิลิไซด์ในส่วนการเชื่อมต่อภายใน (Interconnect) จะสามารถช่วยลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะกับซิลิคอนได้ ชั้นซิลิไซด์เกิดจากการผสมระหว่างโลหะกับซิลิคอนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยาเคมีสถานะของแข็ง (Solid State Reaction) ระหว่างโลหะกับซิลิคอน เรียกว่า Salicide (Self-Aligned Silicide) หรือจากการปลูกโลหะกับซิลิคอนผสมกัน เรียกว่า Polycide ถึงแม้ว่าโลหะที่ใช้สร้างชั้นซิลิไซด์มีมากกว่า 100 ชนิด แต่มีเพียงโลหะมีตระกูล (Noble Metal) และโลหะต้านปฏิกิริยา (Refractory Metal) เท่านั้น ที่ใช้ในเทคโนโลยีซีมอส [6]

2.4.1 กระบวนการซาลิไซด์ (Salicide Process)

ปฏิกิริยาการเกิดซิลิไซด์ระหว่างโลหะกับซิลิคอนจะเกิดได้เร็วกว่าโลหะกับฉนวนมาก การเกิดซิลิไซด์แบบนี้เรียกว่าเป็น Self-Aligned Process เพราะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่เป็นซิลิคอนปฏิกิริยาเคมีสถานะของแข็งมีความไวต่อความไม่บริสุทธิ์ (Impurities) เช่น ออกซิเจน ที่รอยต่อโลหะกับซิลิคอนหรือภายในโลหะ ดังนั้นความไม่บริสุทธิ์ที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความสามารถทำซ้ำ (Reproducible) ซึ่งอาจทำให้ได้ผลไม่เหมือนเดิม จึงต้องมีการทำความสะอาดด้วยการจุ่มกรดเจือจางไฮโดรฟลูออริก (HF) และล้างด้วยน้ำปอดประจุ (Deionized Water) ให้ไหลผ่านทันที ก่อนจะทำการปลูกโลหะเพื่อลดการเกิด Native Oxide ให้น้อยที่สุด ความดันขณะปลูกโลหะควรต่ำกว่า 10^{-6} Torr เพื่อลดออกซิเจนที่ปนเปื้อนในฟิล์ม และแอนนัลในเตาปฏิกิริยา (Furnace) ภายใต้ความดันต่ำที่มีความเข้มข้นออกซิเจนต่ำ (10 ppm) เพื่อมั่นใจว่าโลหะที่ปลูกจะไม่เกิดออกไซด์ระหว่างทำซิลิไซด์ ถ้าเปลี่ยนเป็นการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (Rapid Thermal Annealing, RTA) จะทำให้ความเข้มข้นออกซิเจนที่เจือปนต่ำกว่าการใช้เตาปฏิกิริยา เนื่องจากใช้เวลาสั้นกว่า ซิลิไซด์ที่สร้างโดยปฏิกิริยาเคมีสถานะของแข็งสามารถทำให้สิ่งปนเปื้อนและความบกพร่องที่รอยต่อระหว่างโลหะกับซิลิคอนหมดไปได้เป็นเหตุผลให้ค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัส (Contact Resistance) ต่ำ เกิดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) แต่ก็มีปัญหาบางประการเกี่ยวกับการสร้างชั้นซิลิไซด์เนื่องจากสิ่งปนเปื้อนหรือสารเจือปนพื้นผิวมีมากเกินไปจึงส่งผลต่อความหนาของซิลิไซด์ไม่สม่ำเสมอ และมีค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet Resistance) สูง โดยมีขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิไซด์ดังนี้

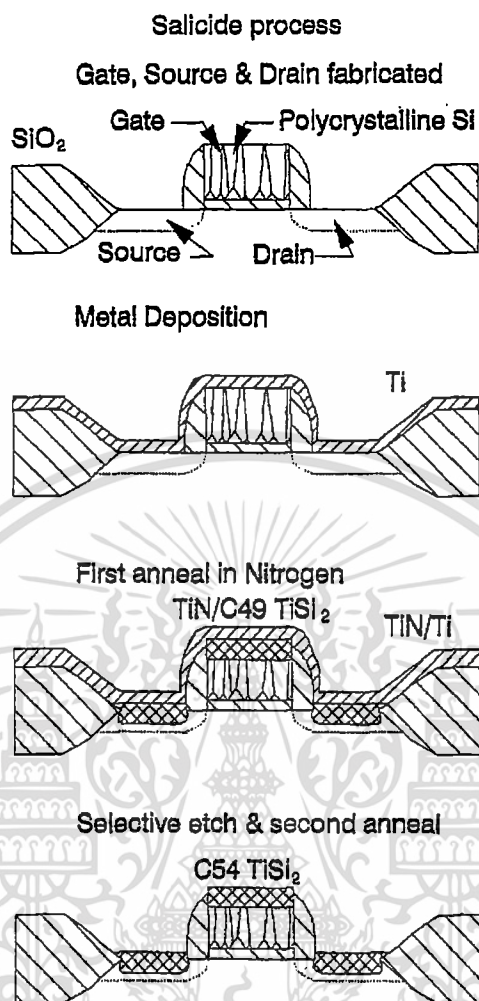
2.4.1.1 ปลูกฟิล์มโลหะด้วยเทคนิคการปลูกด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition) เช่น Sputtering, Electron-Beam Evaporation และ Thermal Evaporation

2.4.1.2 นำไปแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (RTA) ครั้งแรกเพื่อให้เกิดซิลิไซด์ โดยจะเกิดเฉพาะบนซิลิคอน

2.4.1.3 กัดฟิล์มโลหะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาซิลิไซด์เป็นการกัดแบบเลือก (Selective Etch)

2.4.1.4 นำไปแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (RTA) ครั้งที่สองซึ่งจะทำให้ค่าสภาพต้านทานของซิลิไซด์ (Silicide Resistivity) ต่ำลงอีก ดังขั้นตอนในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



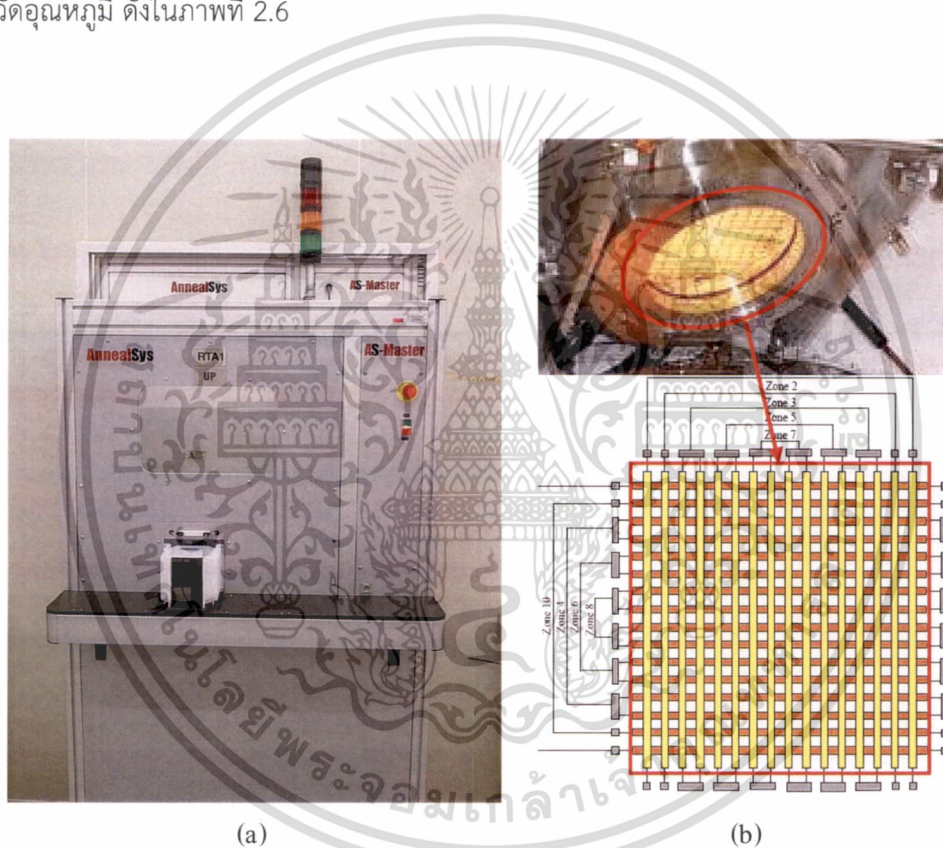
รูปที่ 2.4 การสร้างไทเทเนียมซิลิไซด์ด้วยกระบวนการซาลิไซด์[11]

2.4.2 กระบวนการพอลิไซด์ (Polycide Process)

สิ่งปนเปื้อนมีผลต่อกระบวนการพอลิไซด์ ดังนั้นรอยต่อระหว่างซิลิไซด์กับโพลีซิลิคอน (Polysilicon) ควรสะอาดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อมั่นใจได้ว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าต่ำและเกิดการแพร่ของซิลิคอนเข้าไปในซิลิไซด์ระหว่างการออกซิเดชัน ทำได้โดยการล้างโพลีซิลิคอนด้วย HF เจือจางก่อนการปลูกฟิล์มซิลิไซด์ที่ผสมระหว่างโลหะกับซิลิคอนด้วยวิธี Co-Evaporation หรือ Co-Sputtering ซึ่งต้องมีการควบคุมปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometry) เป็นอย่างดี ซึ่งสภาพความต้านทาน (Resistivity) มีแนวโน้มสูงขึ้นถ้าอัตราส่วนโลหะต่อซิลิคอนภายในฟิล์มมีค่าสูงมากหรือต่ำมาก การแอนนีสสามารถทำในบรรยากาศปกติได้ ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำภายใต้ความดันต่ำเหมือนกับกระบวนการซาลิไซด์ (Salicide Process) แต่ก็ต้องควบคุมเงื่อนไขออกซิเดชันเช่นกันเนื่องจากซิลิคอนถูกออกซิไดซ์ได้ดีกว่าโลหะ การให้ความร้อนสูงในเวลาสั้นๆด้วย RTA สามารถทำให้ชั้นซิลิไซด์จากกระบวนการพอลิไซด์มีสภาพต้านทานลดลงได้เช่นกัน

2.5 การแอนนีสลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว

กระบวนการแอนนีสลด้วยความร้อนแบบเวลาสั้น (Rapid Thermal Annealing; RTA) เป็นกระบวนการแอนนีสลที่ใช้ความร้อนจากหลอดทังสเตนฮาโลเจนที่ถูกจัดเรียงเป็นแถววางสลับกัน ดังในภาพที่ 2.5 (b) ซึ่งสามารถเพิ่มและลดอุณหภูมิได้อย่างรวดเร็วขึ้นอยู่กับ การปรับความเข้มแสงของหลอด โดยกระบวนการนี้สามารถกระทำได้ในบรรยากาศปกติ ซึ่งสามารถเพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลาเพียงไม่กี่วินาที และใช้ Pyrometer และ Thermocouple ในการวัดอุณหภูมิ ดังในภาพที่ 2.6

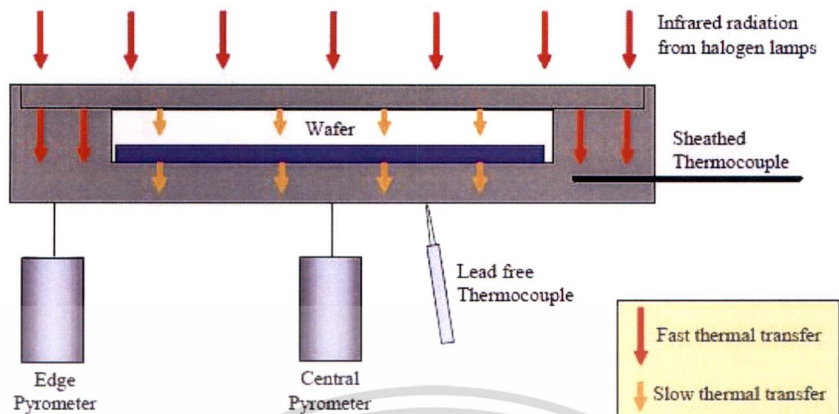


รูปที่ 2.5 (a) เครื่องจักร RTA และ (b) หลอดทังสเตนฮาโลเจนแหล่งกำเนิดความร้อนของ RTA

ข้อดีของกระบวนการแอนนีสลด้วยความร้อนแบบเวลาสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแอนนีสลด้วยเตาแพร่สารหรือเตาปฏิริยา (Furnace)

1. ลดค่าใช้จ่าย เนื่องจากกระบวนการใช้เวลาสั้น
2. สามารถให้ความร้อนอุณหภูมิสูง (เกิน $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$)
3. สามารถให้ความร้อนในบรรยากาศปกติได้
4. กระบวนการใช้เวลาสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงการวัดอุณหภูมิ RTA ด้วย Pyrometer และ Thermocouple

2.6 กระบวนการกัดซาลีไซด์

กระบวนการกัดซาลีไซด์แบบกัดเลือก (Selective Etch) คือ การกัดเป็ยกด้วยสารละลายที่สามารถกัดโลหะที่ไม่เกิดซาลีไซด์ด้วยอัตราการกัดสูง แต่กัดบริเวณที่เกิดซาลีไซด์ด้วยอัตราการกัดต่ำ โดยมีหลายสูตรสารละลายสำหรับการกัด TiSi_2 , CoSi_2 และ NiSi ดังในตารางที่ 2.3 ในกรณี TiSi_2 โดยทั่วไปจะกัดไทเทเนียมที่ไม่เกิดซาลีไซด์ (Unreacted Ti) ได้ยากกว่า CoSi_2 และ NiSi ด้วยสารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2$ ซึ่งอัตราการกัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการกัดและอุณหภูมิการกัดที่เพิ่มขึ้น ในการกัด TiSi_2 นิยมใช้สารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$ กัดอย่างช้าๆ ก่อนในครั้งแรก และใช้สารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ กัดไทเทเนียมที่ไม่เกิดซาลีไซด์ที่หลงเหลืออีกครั้งหนึ่ง

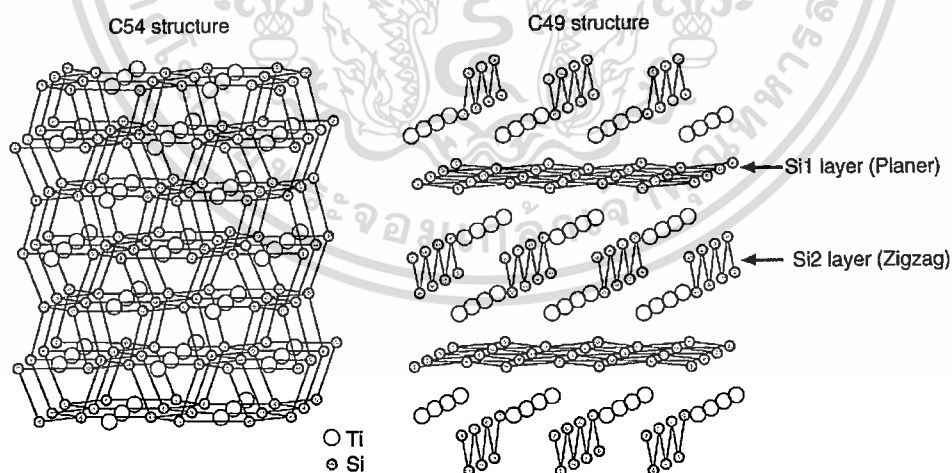
Silicide	Wet Etch
TiSi_2	$\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} (1:1:5)$
TiSi_2	$\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$
TiSi_2	$\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 (4:1), 10 \text{ min}$ + $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} (1:1:5), 5 \text{ min}$
CoSi_2	$\text{CH}_3\text{COOH} : \text{HNO}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{SO}_4 (5:3:1:1), 40^\circ\text{C}$
CoSi_2	$\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 (4:1), 90^\circ\text{C}, 10 \text{ min}$
NiSi	$\text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$
NiSi	HNO_3

ตารางที่ 2.3 สูตรสารละลายที่ใช้ในการกัดซาลีไซด์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สมบัติไทเทเนียมซิลิไซด์ (Titanium silicide, $TiSi_2$)

ไทเทเนียมซิลิไซด์ สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการซาลิไซด์ (Salicide Process) และกระบวนการพอลิไซด์ในบางครั้ง มีสมบัติสภาพต้านทานต่ำและมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพดีในการลด Native Oxide ที่บริเวณรอยสัมผัส (Contact) เพราะออกซิเจนละลายได้สูงในไทเทเนียม (34 at.% ที่ 700 °C) $TiSi_2$ มี 2 เฟสซึ่งมีโครงสร้างผลึกต่างกัน คือ C49 และ C54 โดยที่เฟส C49 มีโครงสร้างผลึกแบบ Base-Centered Orthorhombic ซึ่งถูกสร้างขึ้นเป็นลำดับแรกก่อนและมีสภาพความต้านทานสูง (60-300 $\mu\Omega\cdot cm$) และเฟส C54 มีโครงสร้างผลึกแบบ Face-Centered Orthorhombic ซึ่งถูกสร้างขึ้นเป็นลำดับถัดมาโดยการเพิ่มอุณหภูมิและมีสภาพต้านทานต่ำลง (15-35 $\mu\Omega\cdot cm$) โดยทั่วไปการสร้าง $TiSi_2$ (Self-Aligned $TiSi_2$) จะใช้กระบวนการแอนนیل (Annealing Process) สองครั้ง โดยการแอนนیلครั้งแรกที่อุณหภูมิ 600-700 °C ภายในบรรยากาศไนโตรเจนจะได้ $TiSi_2$ เฟส C49 บรรยากาศไนโตรเจนถูกใช้เพื่อป้องกันการลัดวงจรของรอยสัมผัสที่อยู่ใกล้กันได้ เนื่องจากไนโตรเจนสามารถแพร่เข้าไปในไทเทเนียมระหว่างรอยสัมผัสกลายเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ซึ่งป้องกันการแพร่ด้านข้างของซิลิคอนได้ ดังนั้นการสร้างซิลิไซด์ในบรรยากาศไนโตรเจนจะได้ชั้นคู่ของ TiN/ $TiSi_2$ บนรอยสัมผัสซึ่งดีกว่าใช้ $TiSi_2$ เพียงอย่างเดียว โดยชั้น TiN ที่เกิดขึ้นบนซิลิไซด์และระหว่างรอยสัมผัสสามารถกำจัดได้ด้วยการกัดเปียก ขั้นตอนถัดไปคือการแอนนิลครั้งที่สองที่อุณหภูมิมากกว่า 800 °C ซึ่งจะทำให้ $TiSi_2$ เปลี่ยนเป็นเฟส C54 ซึ่งมีสภาพต้านทานต่ำที่สุด ระบบ Ti/Si มีลักษณะโครงสร้างผลึก 4 แบบ คือ Ti_5Si_3 , $TiSi$, C49- $TiSi_2$ และ C54- $TiSi_2$ โดยแบบ C54- $TiSi_2$ มีความเสถียรมากที่สุด [11]



รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของ $TiSi_2$ เฟส C49 และ C54 [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของไทเทเนียมซิลิไซด์ (TiSi ₂)	รายละเอียด
Formation temperature (°C)	600-700 (C49), 700-900 (C54)
Thin film resistivity (μΩ.cm)	60-70 (C49), 13-20 (C54)
Selective etching solution	NH ₄ OH : H ₂ O ₂ : H ₂ O
Dominant moving species	Si
Si consumption ratio	2.27
Silicide thickness ratio	2.51
Melting point (°C)	1500
Eutectic point (°C)	1330
Thermal stability temperature (°C)	<950

ตารางที่ 2.4 แสดงรายละเอียดสมบัติของ TiSi₂

2.7.1 ผลกระทบของความไม่บริสุทธิ์ (Impurities) และการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation) ในบรรยากาศ

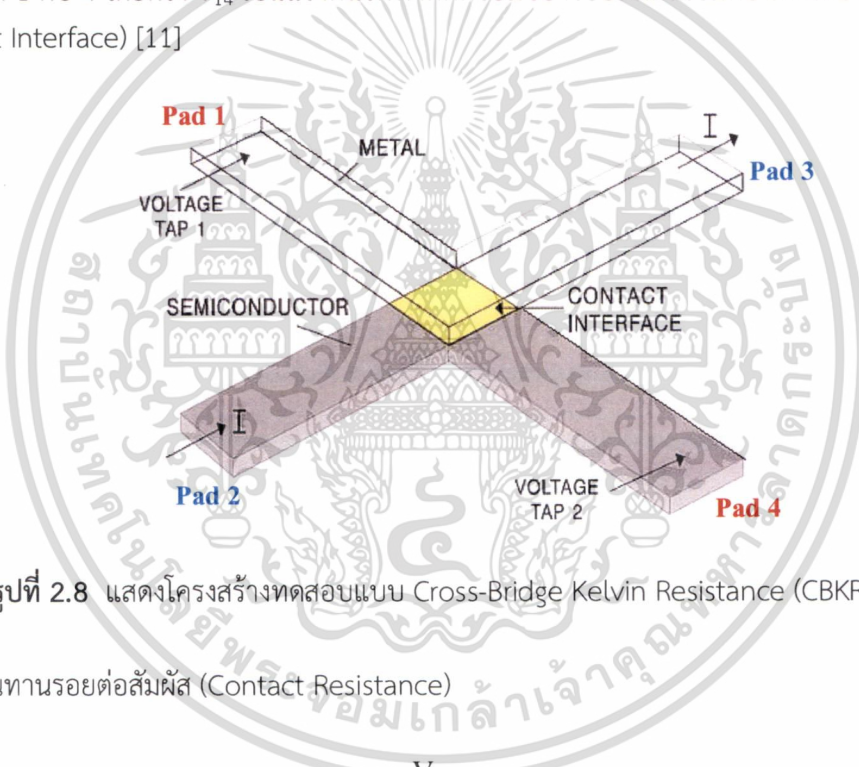
ออกซิเจนและไอน้ำเป็นสิ่งปนเปื้อนที่พบได้ทั่วไปในระบบการปลูกฟิล์มและกระบวนการแอนนีสในบรรยากาศปกติ ออกซิเจนมีผลทำให้การเกิดซิลิไซด์ลดลง หลังการแอนนีสในบรรยากาศปกติมักเกิดชั้นออกไซด์บางเกิดขึ้นบนชั้น TiSi₂ ซึ่งส่งผลให้สมบัติการยึดติดและความนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้นต้องลดปริมาณของออกซิเจนในการแอนนีสให้น้อยที่สุด สำหรับในกระบวนการซาลิไซด์ของในการสร้างไทเทเนียมซิลิไซด์ (TiSi₂) นิยมแอนนีสในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ด้วย RTA (Rapid Thermal Annealing)

2.7.2 ผลกระทบของสารเจือ (Dopant)

การยิงฝังประจุ (ion implantation) และการเกิดซิลิไซด์ ถูกนำมาใช้เป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการผลิตวงจรรวมขนาดเล็กเพื่อทำให้ความต้านทานรอยต่อสัมผัสต่ำลง ซึ่งการยิงฝังประจุมีอิทธิพลต่อการเกิดชั้นซิลิไซด์ เนื่องจากความบกพร่องของโครงสร้างหลังการยิงฝังประจุ เช่น ความเข้มข้นสูงของ As, P และ BF₂ ที่เจือให้ซิลิคอนทำให้เกิด C49-TiSi₂ และ C54-TiSi₂ ลดลง

2.8 โครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์สำหรับวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส

เทคนิคการวัดค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัส (Contact Resistance) ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ด้วยโครงสร้างทดสอบแบบ Four-Terminal Kelvin หรือที่นิยมเรียกว่า Cross-Bridge Kelvin Resistance (CBKR) ดังรูปที่ 2.8 โดยการป้อนกระแสไฟฟ้า ระหว่าง Pad 2 กับ 3 และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง Pad 1 กับ 4 ซึ่งมี 3 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่าง Pad 1 และ 4 คือ 1) แรงดันตกคร่อมระหว่าง Pad 1 กับ ชั้นเซมิคอนดักเตอร์ 2) แรงดันตกคร่อมตลอดแนวของเซมิคอนดักเตอร์ 3) แรงดันตกคร่อมระหว่างชั้นเซมิคอนดักเตอร์กับ Pad 4 โดยวัดด้วยโวลต์มิเตอร์แบบ High Input Impedance ในการวัด $V_{14} = V_1 - V_4$ ด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าต่ำๆ ไหลผ่านระหว่าง pad 1 กับ 4 เพราะฉะนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ Pad 4 จึงสำคัญเช่นเดียวกับศักย์ไฟฟ้าในบริเวณเซมิคอนดักเตอร์ได้ รอยสัมผัส 1 กับ 4 โดยตรง V_{14} เป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมของรอยสัมผัสเซมิคอนดักเตอร์กับโลหะ (Contact Interface) [11]



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างทดสอบแบบ Cross-Bridge Kelvin Resistance (CBKR)

ความต้านทานรอยต่อสัมผัส (Contact Resistance)

$$R_c = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (2.2)$$

สภาพต้านทานรอยสัมผัสจำเพาะ (Specific Contact Resistivity)

$$\rho_c = R_c \cdot A_c \quad (2.3)$$

โดยที่ A_c คือ พื้นที่สัมผัส โดยปกติข้อมูลจากการทดลองมักไม่เป็นไปตามสมการ 2.2 เสมอ ค่าสภาพต้านทานสัมผัสจำเพาะ (ρ_c) สามารถคำนวณจากสมการ 2.3 ซึ่งค่าที่ได้แตกต่างจากค่าจริงอย่างชัดเจน เนื่องจากกระแสที่อยู่ด้านข้างรอยสัมผัสน้อยกว่า กระแสไฟฟ้าจึงแพร่ออกไปด้านข้าง ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกด้านข้างจะทำให้แรงดันตกคร่อมที่ V_{14} เพิ่มขึ้น ดังสมการ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 สมบัติของชั้นป้องกันการแพร่

ไทเทเนียมไนไตรด์ มักนำมาสร้างฟิล์มบางเป็นชั้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barrier) ในเทคโนโลยีซิลิคอน เพราะมีสภาพต้านทานสัมผัสต่ำ เมื่อสร้างบนฐานรองซิลิคอนมีค่าประมาณ 10^{-5} $\Omega \cdot \text{cm}$ โดยค่านี้ขึ้นกับสภาพต้านทานของวัสดุฐานรอง (Substrate) ซึ่งกำพวงศักย์ของไทเทเนียมไนไตรด์บนฐานรองซิลิคอนที่มีสภาพต้านทานสูง มีค่าเท่ากับ 0.49 eV [4]

ชั้นป้องกันการแพร่ในอุดมคติควรมีสมบัติดังนี้

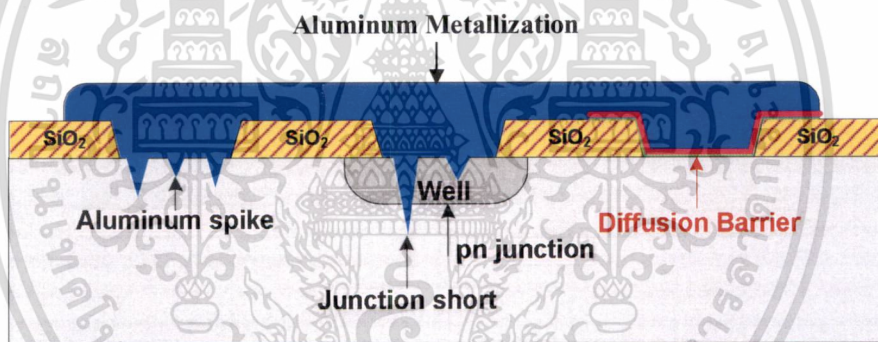
2.9.1 ไม่ทำปฏิกิริยากับชั้นโลหะด้านบนและชั้นซิลิคอนหรือซิลิไซด์ด้านล่างในทุกอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ซิลิคอน

2.9.2 มีความเสถียรต่อการเกิดเป็นสารประกอบอื่น

2.9.3 สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมโลหะและอะตอมซิลิคอนได้

2.9.4 มีสภาพความต้านทานต่ำ เพื่อให้ค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสมีค่าต่ำ

2.9.5 สามารถยึดติดระหว่างชั้นโลหะกับซิลิคอนได้ดี มีความเค้น (Stress) ต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงการหลุดลอก



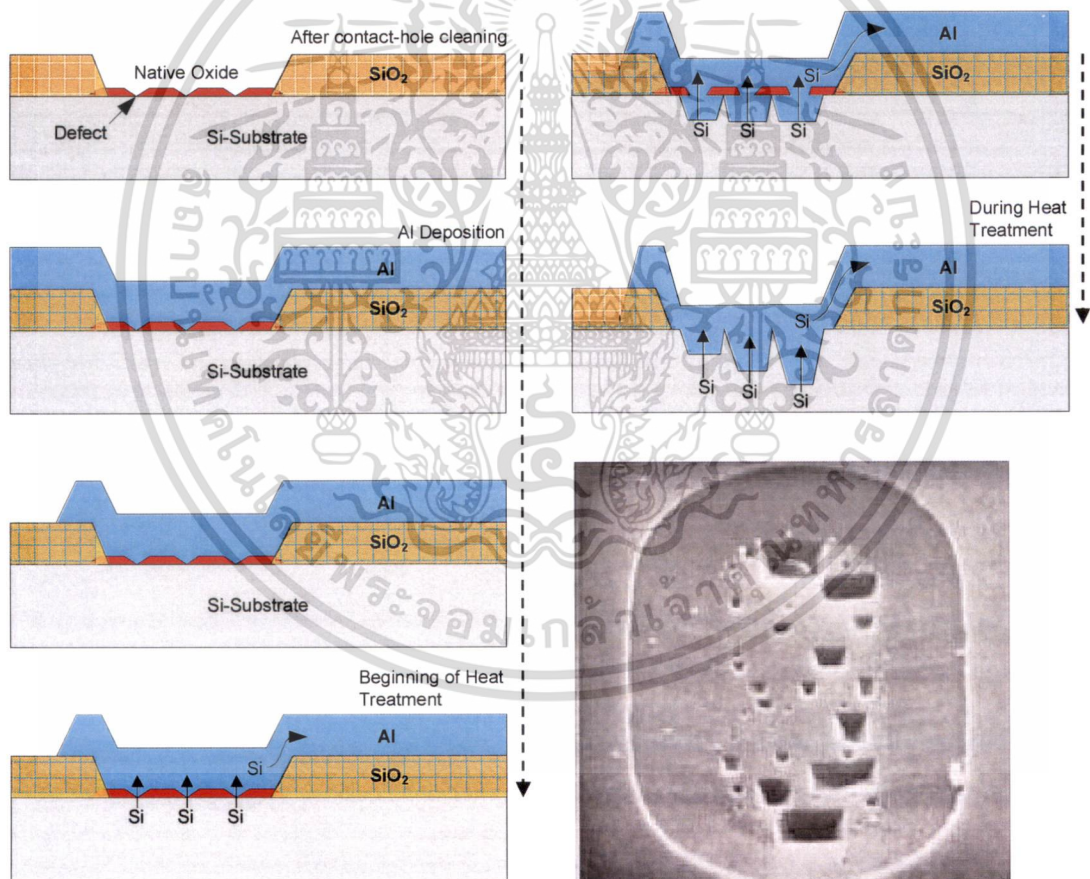
รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์การเกิดเดือยแหลมอลูมิเนียมที่มึ่มเข้าสู่ซิลิคอน ซึ่งทำให้รอยต่อพีเอ็นเกิดการลัดวงจรและชั้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barrier) ใช้ป้องกันการเกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียม

2.10 การเกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียมและการทะลุของรอยต่อ (Aluminum Spikes and Junction Penetration)

โดยทั่วไปโลหะอลูมิเนียมมักถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในอุปกรณ์วงจรรวม (IC) อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีสมบัติสภาพต้านทาน (Resistivity) ต่ำ ยึดติดได้ดี และเกิดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกได้ดีบนรอยต่อพี/เอ็น (p/n junction) แต่ในปัจจุบันแนวโน้มขนาดของพื้นที่สัมผัสถูกลดให้เล็กลงในระดับนาโนเมตร จึงส่งผลให้ความต้านทานรอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะกับฐานรองซิลิคอนเพิ่มสูงขึ้น รวมทั้งอิทธิพลจากชั้นออกไซด์ธรรมชาติ (Native Oxide) และสิ่งแปลกปลอมบนผิวสัมผัสก็ส่งผลให้ความต้านทานสัมผัสเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ดังนั้นก่อนการปลูกฟิล์มบางโลหะจำเป็นต้องมีขั้นตอนการทำความสะอาดก่อนเสมอ หลังจากกระบวนการปลูกฟิล์มบางโลหะอลูมิเนียมแล้วต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 450-500 °C เพื่อให้โลหะอลูมิเนียมยึดติดกับซิลิคอนได้ดี แม้ว่าอุณหภูมิการขึ้นเตอรืงจะต่ำกว่าจุดยูเทคติก (577 °C) ก็ตาม ปรากฏว่าอิทธิพลของอุณหภูมิส่งผลทำให้ซิลิคอนแพร่เข้าสู่อลูมิเนียมได้ โดยอุณหภูมิช่วงดังกล่าว อลูมิเนียมจะดูดซับซิลิคอนประมาณ 0.5-1 wt.% ในทางปฏิบัติจะพบว่าซิลิคอนจะแพร่เข้าสู่อลูมิเนียมได้เฉพาะบริเวณบกพร่องของชั้นออกไซด์ธรรมชาติซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติระหว่างรอยต่ออลูมิเนียมกับซิลิคอน ทำให้เกิดหลุมขึ้นและอลูมิเนียมเคลื่อนที่เข้าไปกลบในที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียม (Aluminum Spikes) เจาะลึกเข้าไปในซิลิคอน ดังรูปที่ 2.10 โดยเดือยแหลมของอลูมิเนียมเหล่านี้จะก่อปัญหาได้ในกรณีที่รอยต่อ p/n อยู่ในระดับตื้นมาก (Shallow Junction) ซึ่งมักจะเป็นกรณีในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ที่จะทำงานได้ ณ ความถี่สูงขึ้น ทำให้รอยต่อ p/n ลัดวงจรได้ การป้องกันปรากฏการณ์การเกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียม โดยการผสมซิลิคอนประมาณ 1 wt.% ในอลูมิเนียมโดยตรง ดังนั้นอลูมิเนียมที่มีซิลิคอนผสมอยู่แล้ว จะไม่ดูดซับซิลิคอนอีกต่อไป ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียมหลังผ่านกระบวนการขึ้นเตอรืง

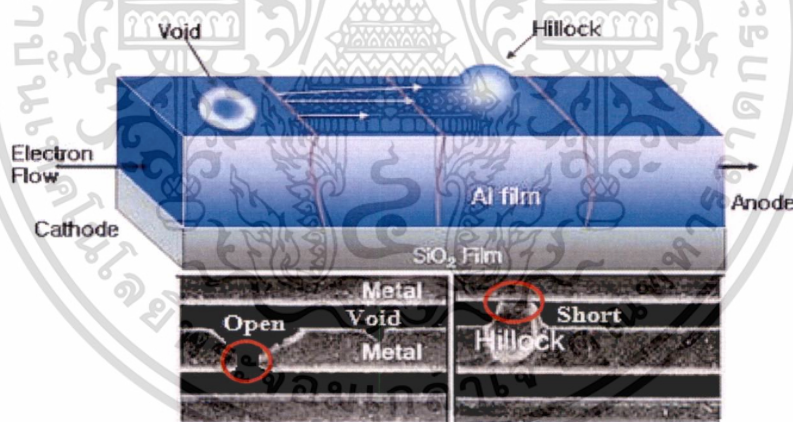


รูปที่ 2.10 แสดงขั้นตอนการเกิดเดือยแหลมของอลูมิเนียม (Aluminum spikes) ในซิลิคอนเมื่อผ่านกระบวนการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400-450 °C และหลุมบนซิลิคอนหลังจากกัดกรดลอกเดือยแหลมของอลูมิเนียมออกแล้ว [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 ปรากฏการณ์การย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า (Electromigration)

ปัญหาประการหนึ่งของการใช้แถบอลูมิเนียมในการทำหน้าที่ต่ออุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรรวม สืบเนื่องจากอะตอมของอลูมิเนียมมีน้ำหนักค่อนข้างเบา ดังนั้นในขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหล จะมีการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับอะตอมของอลูมิเนียม ซึ่งจะมีผลทำให้มีการส่งโมเมนตัมจากอิเล็กตรอนไปสู่อะตอม และส่งผลให้อะตอมของอลูมิเนียมเคลื่อนย้ายถิ่นไปตามทิศทางของไหลของอิเล็กตรอน ยิ่งที่อุณหภูมิสูงการย้ายถิ่นก็จะยิ่งเกิดได้รวดเร็วขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า ปรากฏการณ์ย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้า (Electromigration) ซึ่งจะทำให้แถบโลหะนำกระแสเกิดการขาดเป็นช่วงๆ (Voids) และเกิดเนินโลหะ (Hillocks) จะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ ดังในรูปที่ 2.11 สำหรับอลูมิเนียมปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีผลมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงกว่า 350 °C แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 350 °C ปรากฏการณ์การย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อไม่มากนัก แต่ความเสียหายต่อแถบโลหะนำไฟฟ้าก็ยังคงเกิดขึ้นได้ จากการแพร่ของอลูมิเนียมไปตามรอยต่อของโดเมนบริเวณผลึกเดี่ยว หรืออาจเกิดการแพร่ของอะตอมอลูมิเนียมจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปสะสมยังบริเวณบริเวณอุณหภูมิต่ำ สามารถลดการเกิดปรากฏการณ์นี้ได้ โดยการผสมโลหะทองแดงประมาณ 1-4 wt.% ลงในอลูมิเนียม ซึ่งอะตอมทองแดงจะลดการแพร่ของอะตอมอลูมิเนียมตามแนวรอยต่อของโดเมนบริเวณผลึกเดี่ยว (Grain Boundary) ได้

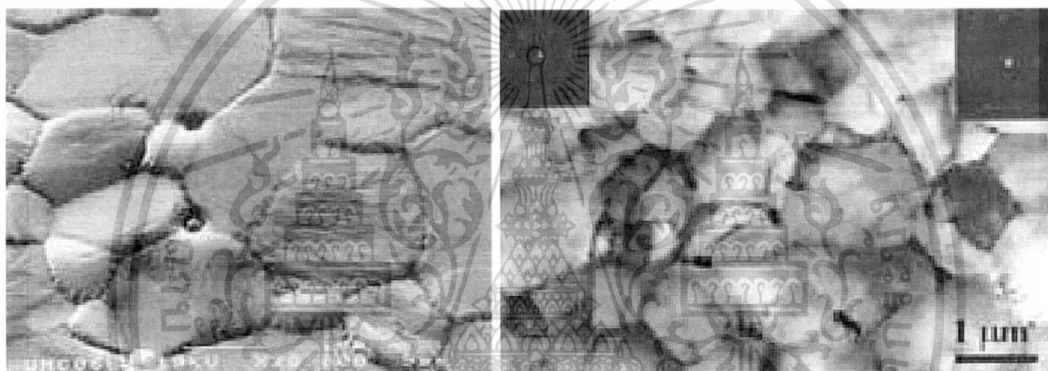


รูปที่ 2.11 แสดงปรากฏการณ์การย้ายถิ่นอันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าในแถบโลหะอลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้แถบโลหะขาดช่วง (Voids) และเกิดเนินโลหะ (Hillocks) เป็นสาเหตุทำให้วงจรเปิดและการลัดวงจร ตามลำดับ[13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 สมบัติของอัลลอย AlCuSi

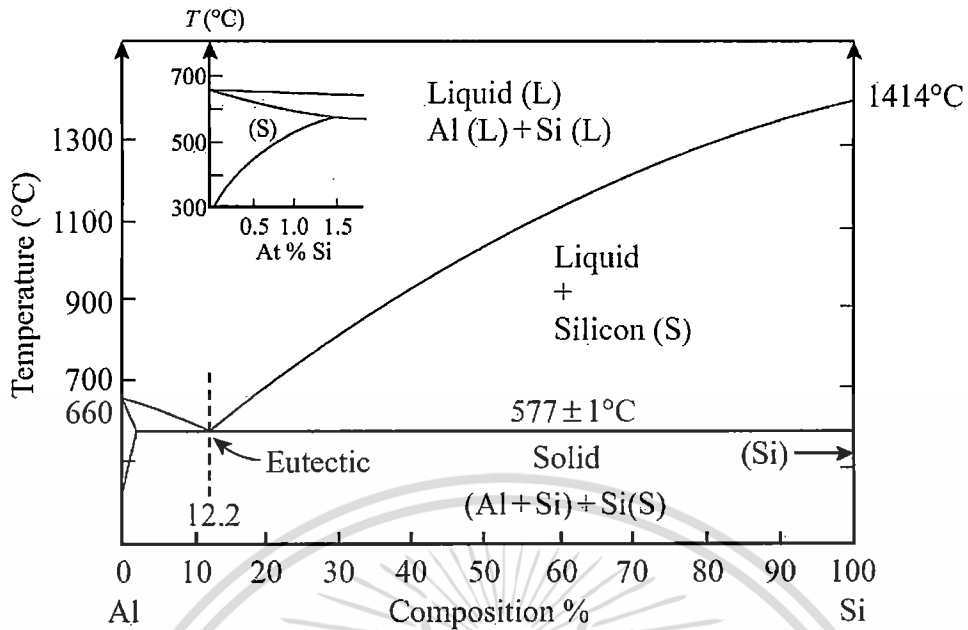
อัลลอย อลูมิเนียม/ทองแดง/ซิลิคอน (AlCuSi Alloys) นิยมใช้เป็นโลหะสัมผัสมากกว่า อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Al 99.99 %) เนื่องจากไม่มีปัญหาเกี่ยวกับ Electromigration และ Aluminum Spiking แต่ก็มีผลกระทบจากซิลิคอนและทองแดงที่เจือให้กับอลูมิเนียมเช่นกัน เช่น ขณะลดอุณหภูมิหลังการแอนนีสลิ่ง ซิลิคอนที่เจือในอลูมิเนียมจะเริ่มอิมพัลและเกิดการตกตะกอนบริเวณรอยต่อ Al/SiO_2 และ Al/Si ทำให้ความต้านทานรอยต่อสัมผัส (Contact Resistance) มีค่าสูงขึ้น ส่วนทองแดงที่เจือในอลูมิเนียมมักเกิดอันตรกริยากันกลายเป็น Al_2Cu ที่มีสภาพต้านทานสูง (High-Resistivity) ดังในรูปที่ 2.12 ดังนั้นจึงได้มีการสร้างขึ้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barrier) คั่นระหว่างฐานรองซิลิคอนและชั้นอัลลอย AlCuSi เพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น [6]



รูปที่ 2.12 แสดงการเกิดปุ่มซิลิคอน (Silicon Nodule) ในโลหะผสม AlSi (ซ้ายมือ) และการตกตะกอน (Precipitate) ของ Al_2Cu ในโลหะผสม AlCu (ขวามือ) [6]

2.13 สมบัติยูเทคติกของอัลลอย AlSi

ซิลิคอนบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ $1,414\text{ }^{\circ}C$ ส่วนอลูมิเนียมบริสุทธิ์มีจุดหลอมละลายที่อุณหภูมิ $660\text{ }^{\circ}C$ แต่สำหรับอัลลอยระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอน จะปรากฏว่าจุดหลอมละลายจะต่ำกว่า $660\text{ }^{\circ}C$ และ $1,414\text{ }^{\circ}C$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของทั้งสอง ดังในแผนภูมิสมดุลของอลูมิเนียมกับซิลิคอนดังรูปที่ 2.13 เมื่ออัลลอยมีซิลิคอนประมาณ 12.2 wt.% อุณหภูมิจุดหลอมละลายของอัลลอยดังกล่าวจะมีค่าต่ำสุดที่ $577\text{ }^{\circ}C$ ซึ่งศัพท์ทางโลหะวิทยาจะเรียกจุดดังกล่าวว่า จุดยูเทคติก (Eutectic Point) และเนื่องจากอุณหภูมิ ณ จุดยูเทคติกของอัลลอยอลูมิเนียมกับซิลิคอนมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงต้องระวังไม่นำไปผ่านกระบวนการที่มีอุณหภูมิสูงอีก [6]



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภูมิสมมูล Al-Si ที่อุณหภูมิจุดหลอมละลายของสารผสมระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนในส่วนผสมต่างๆกัน โดยด้านซ้ายสุด คือ แกนของอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และด้านขวา คือ แกนของซิลิคอนบริสุทธิ์[14]

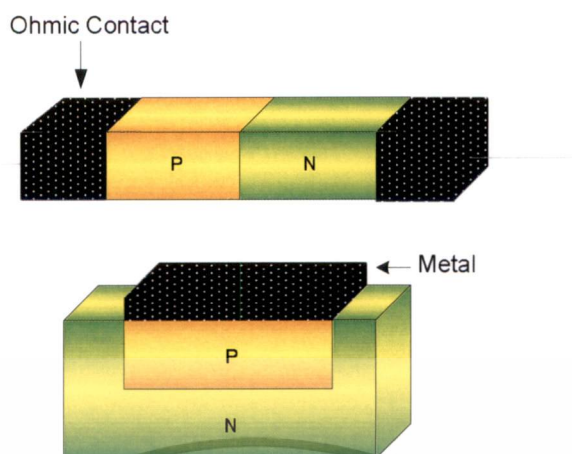
2.14 รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำให้สมบัติของรอยสัมผัส 2 กรณี คือ รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) และรอยสัมผัสแบบช็อตต์กี (Schottky Contact) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นรอยสัมผัส โดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_m) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) และค่าสัมประสิทธิ์ประจุของอิเล็กตรอน (χ_s) ที่นำมาสัมผัสเท่านั้น ไม่ขึ้นกับความหนาแน่นสารเจือในสารกึ่งตัวนำ (Doping Density) [15]

2.14.1 รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact)

รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก แสดงในรูปที่ 2.14 คือ รอยสัมผัสที่ไม่แสดงพฤติกรรมกั้นขวางการไหลของกระแสในทางอุดมคติ โดยปกติถูกนำไปใช้งานเพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกจะไม่มีผลเกี่ยวกับทิศทางกระแส การไหลได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่สามารถนำกระแสได้สูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส กราฟสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสโอห์มมิกแสดงในรูปที่ 2.17(a) โลหะที่ใช้มักเป็นอลูมิเนียม และทองคำ เป็นต้น รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น เป็นขั้วสัมผัสของส่วนต่างๆ ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เพื่อการเชื่อมต่อภายในระหว่างอุปกรณ์ของวงจรรวมหรือเพื่อต่อใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ

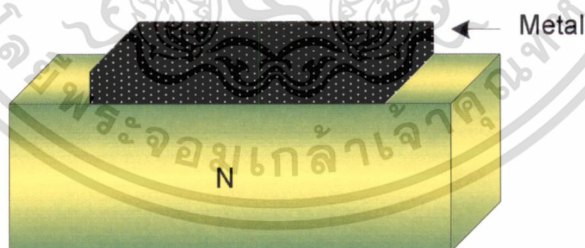
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบรอยสัมผัสโอห์มมิก [16]

2.14.2 รอยสัมผัสชนิดช็อตตี (Schottky Contact)

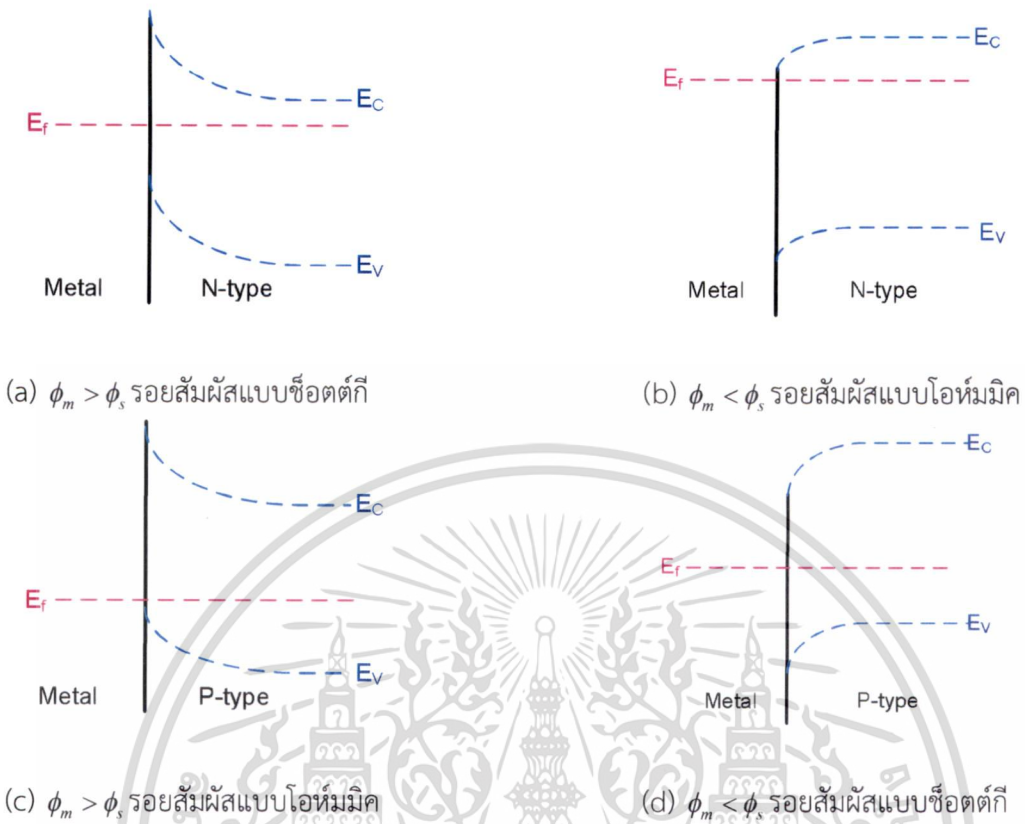
รอยสัมผัสชนิดช็อตตี คือ รอยสัมผัสที่เกิดกำแพงศักย์ไฟฟ้า หรือกำแพงศักย์ช็อตตี (Schottky Barrier) บริเวณผิวสัมผัสกำแพงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแสดงพฤติกรรมกั้นขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง รอยสัมผัสชนิดช็อตตีประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ หรืออาจเรียกว่า ช็อตตีไดโอด สารกึ่งตัวนำอาจเป็นชนิดเอ็นหรือพีก็ได้ แต่เนื่องจากค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าโฮล ดังนั้นในการนำไปใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีอัตราเร็วในการทำงานสูงจึงมักนิยมใช้โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แสดงรอยสัมผัสแบบช็อตตีก็มีสมบัติเป็นเรกติไฟเออร์ (Rectifier) คือ ยินยอมให้กระแสไหลได้ทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น



รูปที่ 2.15 ลักษณะรอยสัมผัสแบบช็อตตี [16]

ชนิดของรอยสัมผัสสามารถแบ่งจาก กรณีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



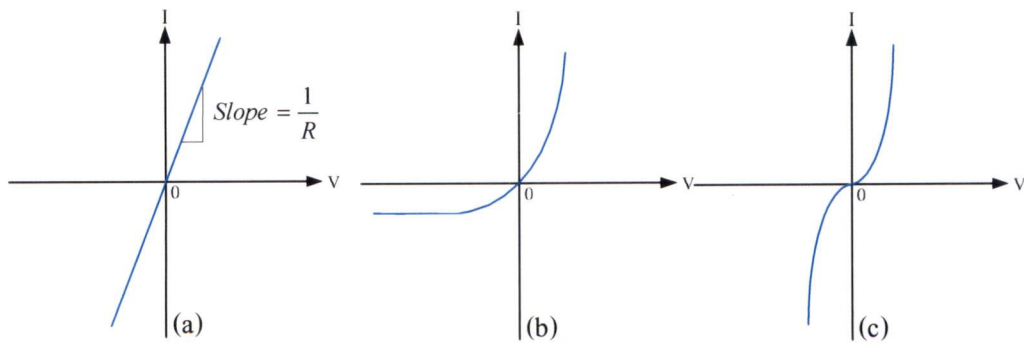
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี [16]

การทำวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่มีฟังก์ชันงานของโลหะมากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกเท่านั้น โดยใช้ทฤษฎีนี้ในการอ้างอิงการสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับบริเวณพีที่เกิดจากการยิงฝังประจุไอออนโบรอนลงบนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นทำให้เป็นบริเวณบ่อพี ซึ่งจะอธิบายคล้ายเนื้อหาของรอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

2.14.3 การสร้างรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact Formation)

โดยทั่วไป มักมีความต้องการให้รอยสัมผัสที่สร้างขึ้น มีลักษณะแบบโอห์มมิก และมีค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสต่ำ โดยลักษณะรอยสัมผัสโอห์มมิกแบบอุดมคติ จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัส และกระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสเป็นเส้นตรงเสมอ รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของรอยสัมผัสลักษณะต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ ณ รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ โดยรูปที่ 2.17(a) แสดงคุณลักษณะของรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกในอุดมคติ ในรูป 2.17(b) แสดงคุณลักษณะของรอยสัมผัสแบบเรกติไฟเออร์ ซึ่งมักจะนำมาใช้เป็นไดโอด เช่น รอยสัมผัสที่เกิดจากรอยต่อแบบซีออตต์กี และในรูป 2.17(c) แสดงคุณลักษณะของรอยสัมผัสโอห์มมิกโดยประมาณ ซึ่งมักนำมาใช้เป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกในทางปฏิบัติ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงคุณลักษณะของรอยสัมผัสประเภทต่างๆ คือ (a) รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกในอุดมคติ, (b) รอยสัมผัสแบบเร็คตีไฟเออร์ และ (c) รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกในทางปฏิบัติ

2.15 การเจือสาร (Doping)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) เมื่อถูกเจือสารเข้าไปแล้ว จะกลายเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic Semiconductor) สารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์นี้จะมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (Negative type: N-Type) และสารกึ่งตัวนำชนิด พี (Positive Type: P-Type) ในการเจือสารเบื้องต้นทำได้โดยการหลอมซิลิคอนบริสุทธิ์ให้ละลายด้วยอุณหภูมิ 900 ถึง 1400 °C แล้วจึงเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 3 หรือ 5 ตัวลงไปให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน รอยเจือปนแล้วนำมาตัดเป็นแผ่นวงกลมโดยแผ่นเจือสารด้วยธาตุหมู่ 3 เรียกว่า ฐานรองที่เจือสารชนิดพี (P-Type Substrate) แผ่นที่เจือสารด้วยธาตุหมู่ 5 เรียกว่า ฐานรองที่เจือสารชนิดเอ็น (N-type Substrate) โดยสารกึ่งตัวนำในแต่ละชนิดมีลักษณะดังนี้

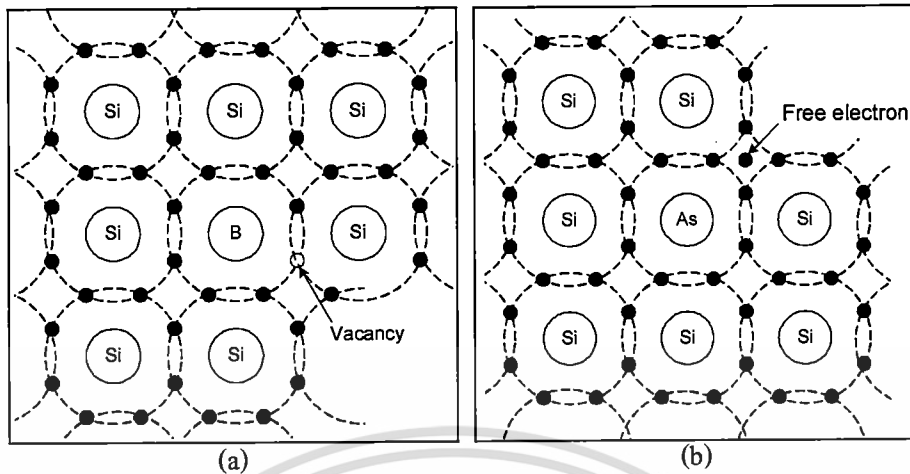
1. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

หากเติมสารเจือที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 3 ตัวลงไป เช่น อลูมิเนียม (Aluminum), โบรอน (Boron), แกลเลียม (Gallium) และ อินเดียม (Indium) อะตอมของสารเจือปนตัวหนึ่งจะยึดเกาะกับอะตอมของเจอร์เมเนียม หรือซิลิคอน จำนวน 4 ตัว ด้วยพันธะโควาเลนต์ ทำให้ขาดอิเล็กตรอนไป 1 ตัว เกิดที่ว่าง (Vacancy) โดยที่ว่างนี้แสดงประจุไฟฟ้าเป็นบวก ลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่ได้นี้จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากภายนอกได้อีก เพื่อให้จำนวนอิเล็กตรอนในพันธะมีครบจำนวน สารเจือปนที่เติมให้นี้เรียกว่า “สารเจือปนผู้รับ” (Acceptor Impurity) หรือที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (Positive Type : P-Type)

2. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารเจือที่มีจำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวน 5 ตัว เช่น สารหนู (Arsenic), พลวง (Antimony), ฟอสฟอรัส (Phosphorus) อะตอมของสารเจือปนตัวหนึ่งจะไปยึดเกาะกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำข้างเคียงในพันธะโควาเลนต์ในการยึดเกาะของหนึ่งอะตอมจะทำให้อิเล็กตรอน 1 ตัว ไม่สามารถเข้ามายึดเกาะในพันธะได้ จึงมีอิเล็กตรอนเกิน 1 ตัว สารเจือปนที่เติมให้นี้เรียกว่า “สารเจือปนผู้ให้” (Donor Impurity) หรือที่เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (Negative Type : N-Type) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 (a) การเกิดที่ว่างในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และ (b) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

กระบวนการเจือสารเพื่อทำให้เกิดเป็นบริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หรือสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่นิยมใช้ทั่วไปในปัจจุบันมี 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีการแพร่ (Diffusion) และวิธีการยิงฝังประจุ (Ion Implantation)

2.15.1 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

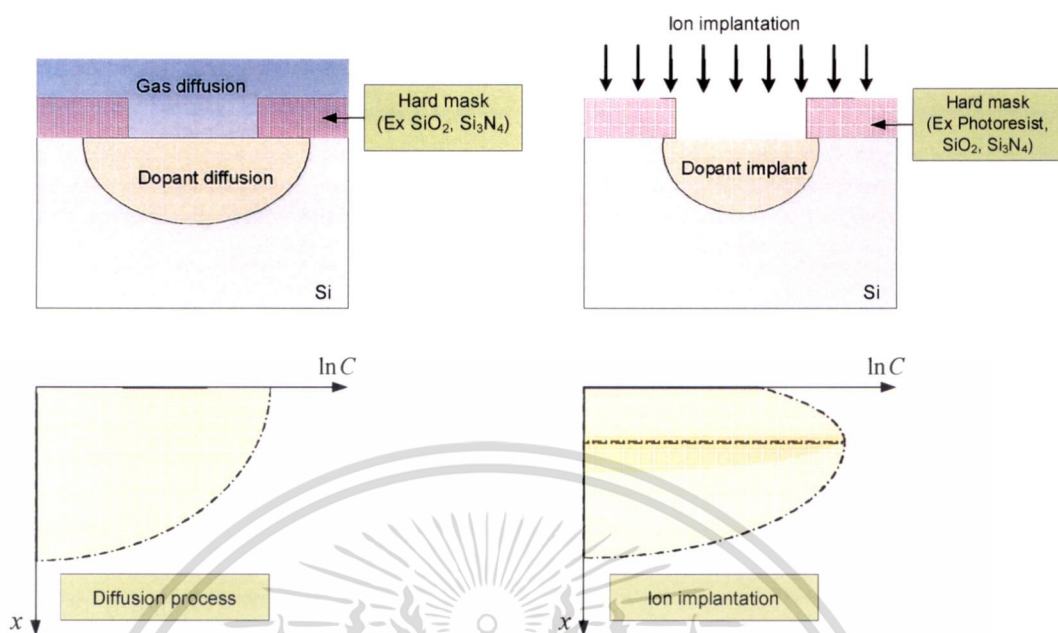
การเติมสารเจือลงในผลึกซิลิคอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) โดยอาศัยการแพร่จากสารที่มีความเข้มข้นมากไปสู่สารที่มีความเข้มข้นน้อยภายใต้อุณหภูมิสูงในบรรยากาศไนโตรเจนหรือก๊าซเฉื่อย กระบวนการแพร่ในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นการแพร่ภายในของแข็ง (Solid State Diffusion) โดยปรากฏการณ์แพร่แบบนี้จะเกิดขึ้นได้ก็เฉพาะในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงๆ ประมาณ $900 - 1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะอุณหภูมิสูงๆ อนุภาคสารใดๆ จะสามารถแพร่เข้าไปในวัตถุของแข็งอื่นๆ ได้

2.15.2 การยิงฝังประจุ (Ion Implantation)

การยิงฝังประจุ (Ion Implantation) คือ การเจือสารโดยการอาศัยเครื่องจักรมาเพิ่มพลังงานให้กับประจุที่ต้องการเจือ เพื่อเร่งให้ประจุนั้นมีพลังงานสามารถเข้าไปฝังในเนื้อแผ่นซิลิคอนได้ วิธีการยิงฝังประจุ ทำโดยการสร้างประจุไอออนของสารเจือแล้วทำการยิงฝังประจุด้วยพลังงานทางไฟฟ้าโดยไม่จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิสูง

ในปัจจุบันการเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุ ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในกระบวนการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit: IC) อย่างมาก เนื่องจากวิธีการยิงฝังประจุสามารถควบคุมการแพร่ด้านข้าง (Lateral Diffusion), ควบคุมปริมาณสารเจือ (Dose Control), ควบคุมความลึก (Junction Depth Control) และควบคุมการปนเปื้อนบริเวณพื้นผิวได้มากกว่าวิธีการแพร่ โดยการเลือกใช้น้ำยาไวแสงหรือชั้น SiO_2 เป็นหน้ากักป้องกัน (Mask) การยิงฝังประจุเป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การกระจายตัวของปริมาณสารเจือด้วยวิธีการแพร่และวิธียิงฝังประจุ

จากรูป 2.19 แสดงลักษณะการกระจายตัวของปริมาณสารเจือวิธีแพร่และวิธียิงฝังประจุ โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของปริมาณสารเจือ และ X คือ ความลึกจากผิวหน้าผลึกซิลิคอน การเจือสารด้วยวิธีการแพร่เกิดการกระจายตัวของสารเจือทุกทิศทาง ซึ่งส่งผลให้การแพร่ด้านข้างมีบริเวณเทียบเท่ากับ การแพร่ด้านลึก อีกทั้งยังยากที่จะควบคุมความลึกในการแพร่ ให้อยู่ในระดับที่แน่นอนได้ยาก เมื่อการแพร่ด้านข้างมีบริเวณกว้างส่งผลให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ตาม สำหรับการเจือสารด้วยวิธีการยิงฝังประจุ พบว่าการกระจายตัวของสารเจือด้านข้างเกิดขึ้นประมาณ 30% ของความลึก ดังนั้น อุปกรณ์ที่สร้างได้จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ที่เท่ากันจำนวนของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยวิธีการยิงฝังประจุจะมีมากกว่าวิธีการแพร่ โดยจะขอกกล่าวเพียงรายละเอียดของการเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุเท่านั้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการเจือสารด้วยวิธียิงฝังประจุ เนื่องจากต้องการปริมาณสารเจือที่แน่นอน [15]

2.16 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของฟิล์ม

2.16.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด หรือ SEM (Scanning Electron Microscope) เป็นเทคนิคที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในหลายแขนงสาขาวิชาไม่ว่าจะเป็นงานด้านวัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะลักษณะพื้นผิวของวัสดุ โดยอาศัยการกวาดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิววัสดุแทนการใช้แสง ซึ่งจะทำให้มีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง โดยสามารถขยายภาพได้มากกว่า 1,000 เท่า จนถึงระดับ 100,000 เท่าขึ้นไป [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16.1.1 จุดเด่นของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดที่สำคัญมีอยู่ 2 ประการ

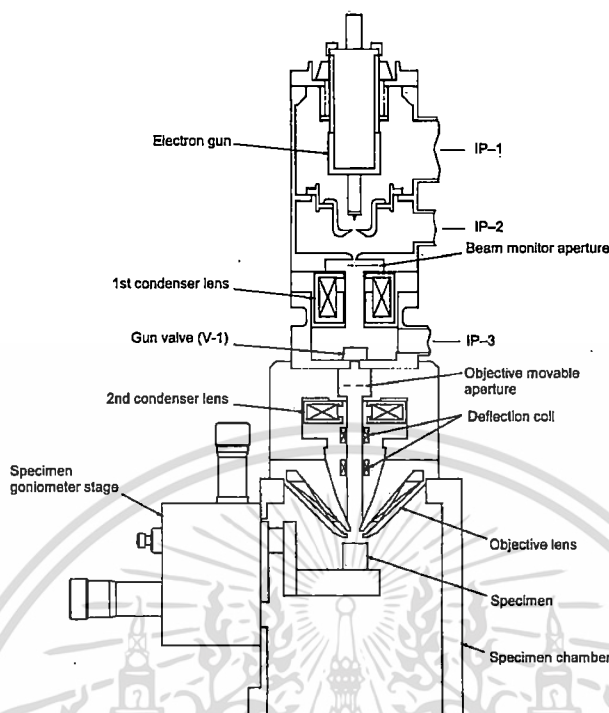
1. สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High Depth of Field)
2. สามารถแยกแยะรายละเอียดสูง (High Spatial Resolution)

2.16.1.2 สำหรับโครงสร้างพื้นฐานการทำงานของ SEM พิจารณาได้ดังรูปที่ 2.20 ในส่วนบนสุดจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน หรือ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดของเครื่อง SEM โดยจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่สามารถผลิตกระแสจำนวนมาก โดยตัววัสดุจะต้องมีความเสถียรและสามารถให้กำเนิดลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 4 ประเภท คือ

1. แบบขดลวดทังสเตน เป็นปืนอิเล็กตรอนที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและไม่ต้องการความเป็นสุญญากาศมากนัก
2. แบบผลึก LaB_6 (Lanthanum Hexaboride) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้ความสว่างสูงกว่าแบบขดลวดทังสเตนประมาณ 10 เท่า มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า และต้องการสภาพสุญญากาศ
3. แบบโคลด์ฟิลด์อิมิสชัน (Cold Field Emission Source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่ให้ความสว่างสูงกว่าแบบทังสเตนและแบบผลึก LaB_6 นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้อง
4. แบบช็อตต์กีฟิลด์อิมิสชัน (Schottky Filed Emission Source) เป็นปืนอิเล็กตรอนที่คล้ายกับแบบโคลด์ฟิลด์อิมิสชัน แต่ต่างกันตรงที่จะต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1800 เคลวิน

อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนนี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 0.5- 30 kV โดยมีคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวแรก (1^{st} Condenser Lens) ซึ่งเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้ผ่านไปที่ช่องเปิดที่มีสามารปรับขนาดต่างๆ กันได้ด้วย ออปเจ็คทีฟ รูพเอเปิล แอปเพอร์เจอร์ (Objective Movable Aperture) เพื่อควบคุมปริมาณของอิเล็กตรอน หลังจากนั้นคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวที่สอง (2^{nd} Condenser Lens) ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอนให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลงและใช้เลนส์วัตถุ (Objective Lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายทำการโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุ โดยมีดีฟเลกชันคอยล์ (Deflection Coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัตถุในกรอบสี่เหลี่ยม (Raster Area) เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิววัตถุจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัตถุ และจะให้สัญญาณต่างๆออกมาซึ่งจะถูกตรวจจับและนำไปแสดงผล ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแบบฟิลด์อิมิสชัน มาใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและวัดความหนาของฟิล์ม TiN โดยใช้ FESEM รุ่น S-4700 จากบริษัท Hitachi ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนชนิดแบบโคลด์ฟิลด์อิมิสชัน ซึ่งให้ความสว่างสูงและกำลังสามารถแยกแยะระดับ 1.5 nm ที่ 15 kV นอกจากนี้ยังมีกำลังขยายสูงสุดถึง 500,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของเครื่อง SEM

2.16.2 ระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมากจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path Different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) [18] ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$N\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (2.4)$$

เมื่อ N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3 ...

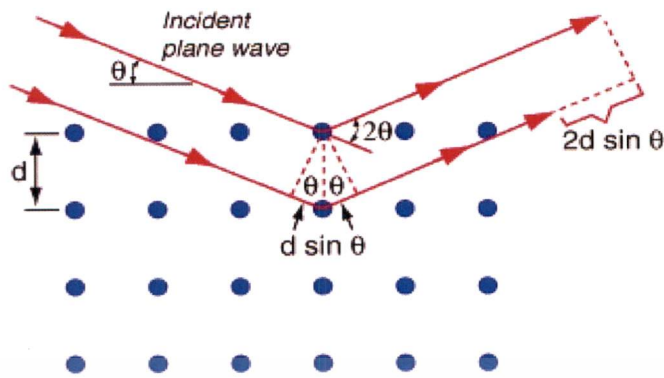
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



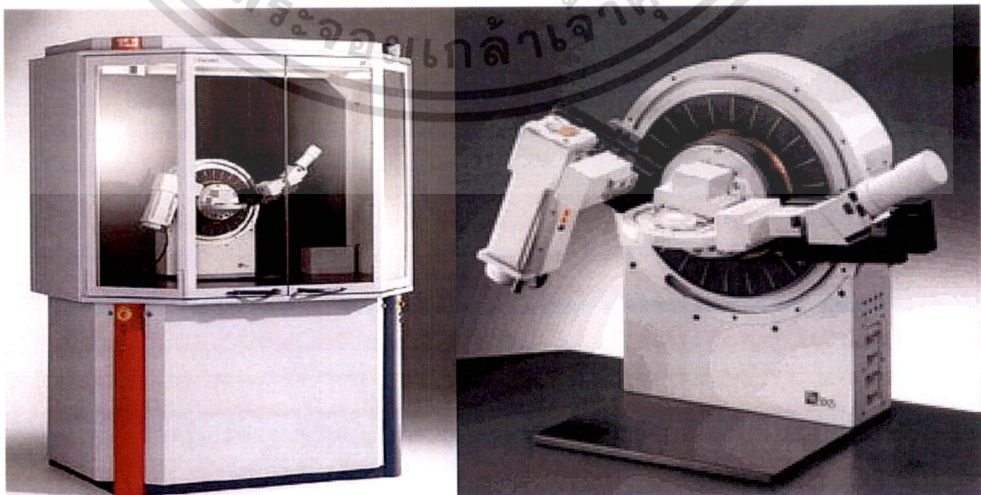
รูปที่ 2.21 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์

พื้นฐานสำคัญในการวิเคราะห์โดยวิธี XRD คือ ความรู้ด้าน Geometrical Crystallography Crystal : การจัดเรียงของอะตอมหรือไอออนที่มีรูปแบบเฉพาะและซ้ำรูปแบบอย่างสม่ำเสมอทั้ง 3 มิติ

Lattice : โครงข่าย 3 มิติ จุดตัดของโครงข่ายเรียกว่า lattice point ซึ่งแทน 1 อะตอม และหน่วยที่เล็กที่สุดที่ยังคงรูป มี รูปแบบและสมบัติ เช่นเดียวกับผลึก เรียกว่า Unit Cell หรือ เซลล์ หน่วยของผลึกต่างๆ สามารถจัดระบบได้ 7 ระบบ

Miller Indices : ระบบการเรียกชื่อระนาบต่างๆ ในผลึก

ระนาบต่างๆ ของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg Plane) แสดงดังรูปที่ 2.21 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction Angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray Diffractometer ดังแสดงดังรูปที่ 2.22 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก



รูปที่ 2.22 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray Diffractometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มของรังสีเอกซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนและยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

ขนาดของเม็ดผลึก (Grain Size) จากสมการ Sherrer สามารถหาค่าขนาดของเม็ดผลึกได้ดังนี้

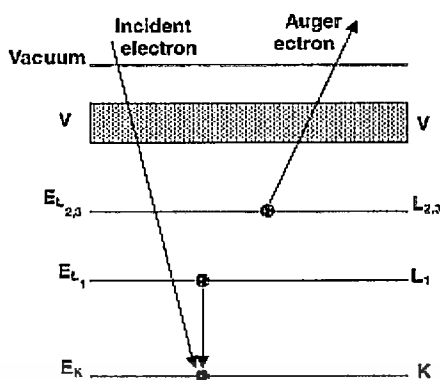
$$D = \frac{K\lambda_x}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.5)$$

- เมื่อ
- D คือ ขนาดของเม็ดผลึก
 - K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเม็ดผลึก ($0.89 \leq K \leq 0.94$)
 - θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน
 - $\beta_{2\theta}$ คือ ค่าครึ่งหนึ่งของความกว้างสูงสุดของยอดการเลี้ยวเบน (Full Width at Half-Maximum of the Diffraction Peak : FWHM)
 - λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

2.16.3 โอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

โอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี (Auger Electron Spectroscopy) เป็นเทคนิคการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non Destructive Analytical Technique) ใช้วิเคราะห์ธาตุ (Elemental Composition) และสถานะทางเคมี (Chemical State) ของชั้นอะตอมบนสุดของพื้นผิว (4-50 Å) หรือใช้วิเคราะห์รอยต่อของวัสดุของแข็ง สามารถตรวจหาได้ทุกธาตุในธรรมชาติ (Li – U) ยกเว้นธาตุไฮโดรเจน และ ฮีเลียม โดยการตรวจวัด (Detection Limit) ต่ำสุดที่ 0.1 at.% โดยใช้ Electron Source แบบ Field Emission ทำให้สามารถ Characterization ได้รวดเร็วขึ้นที่ขนาดตัวอย่างน้อยกว่า 100 อังสตรอมได้ AES จะใช้ภายใต้เงื่อนไขสุญญากาศสูงมาก (UHV) โดยใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron Beam) ในช่วงพลังงาน 3 – 25 keV ให้ตกกระทบบนพื้นผิววัสดุทำให้อิเล็กตรอนภายในชั้นแกน (Core Shell Electrons) ของวัสดุถูกไอออไนซ์ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น (Excited) หลุดออกมา จากนั้นอิเล็กตรอนชั้นนอกถัดออกมาจะเข้าไปแทนที่โฮล (Hole) ที่ว่างอยู่ซึ่งต้องลดระดับพลังงาน (Relaxation) โดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของ Photons, Characteristic X-rays หรือ พลังงาน โดยพลังงานจากการปลดปล่อยจะส่งผ่าน (Transfer) ไปยังอิเล็กตรอนอื่น ทำให้สามารถหลุดออกจากชั้น (Shell) ได้พร้อมพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง เรียกว่า Auger Electron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงกระบวนการเกิด Auger electron

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมประมาณ $E_K - E_{L1} - E_{L2,3}$ โดยพลังงานนี้ขึ้นกับพลังงานอิเล็กตรอนที่ตกกระทบ โดยที่ E_K คือ พลังงานของอิเล็กตรอนชั้นแกนกลาง (Core Shell), E_{L1} และ $E_{L2,3}$ คือ พลังงานของอิเล็กตรอนชั้นถัดจากแกนกลางออกมา

สเปกตรัมของไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger Electron Spectrum) เป็นการพล็อตปริมาตรไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger Electron) ที่ตรวจวัดได้กับฟังก์ชันของพลังงานจลน์ของไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger Electron Kinetic Energy) สามารถระบุธาตุด้วยตำแหน่งพลังงาน (Energy Position) ของ Auger Peak ขณะที่ความเข้มข้นของธาตุ (Concentration of an Element) สัมพันธ์กับ ความเข้ม (Intensity) ของ Auger Peak เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุภายในวัสดุจากพื้นผิวลึกลงไป (Compositional Depth Profile) ได้โดยการใช้ลำประจุบวกของกาซอาร์กอน (Ar^+ Ion Beam) กัดออกเป็นเป็นชั้นๆ (Sputter Etching) โดยอัตราการกัดเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของลำประจุเพิ่มขึ้นและขนาดลำประจุเล็กลง AES ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางกับงานวัสดุประยุกต์ (Materials Application) โดยเฉพาะงานประเภทวิเคราะห์พื้นผิว

2.16.4 รามานสเปกโทรสโกปี

รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy) เกิดอยู่ในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้และไม่ได้วัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดอันเนื่องมาจากการสั่นหรือการหมุนของโมเลกุล แต่เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีเป็นการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงหลังจากได้ชนกับโมเลกุลที่กำลังสั่นและหมุนอยู่ เนื่องจากโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะไม่สามารถถูกกระตุ้นด้วยคลื่นอินฟราเรด เพราะโมเลกุลไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ภายในโมเลกุล อย่างไรก็ตามพันธะของโมเลกุลดังกล่าวยังคงมีการสั่นและพบว่าเทคนิครามานสามารถจะให้สเปกตรัมของดังกล่าวได้ โดยการผ่านรังสีเอกซเรย์ไปยังโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตร กรณีการชนแบบยืดหยุ่นจะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนที่มีพลังงานเท่ากับพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงในลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering) แต่ถ้ากรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นเป็นการชนแบบมีการสูญเสียพลังงาน จะได้คลื่นแสงที่กระเจิงหลังจากการชนที่มีพลังงานสูงกว่าหรือต่ำกว่าพลังงานของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุล การกระเจิงในลักษณะนี้เรียกว่า การกระเจิงแบบรามาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Raman Scattering) ความเข้มของการกระเจิงแบบรามานมีค่าประมาณ 10^{-10} - 10^{-12} เท่าของคลื่นแสงที่ตกกระทบโมเลกุลซึ่งทำให้ตรวจวัดยาก จึงต้องใช้คลื่นแสงที่มีความเข้มสูงโดยใช้คลื่นแสงจากเลเซอร์

รามานสเปกตรัมจัดได้จากการวัดการกระเจิงของคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 15,000 ถึง 25,000 cm^{-1} ใช้ศึกษาสูตรโครงสร้างโมเลกุลกับพันธะเคมี ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน ใช้ตรวจสอบคุณภาพวิเคราะห์ โดยรามานสเปกตรัมมีความสัมพันธ์กับอินฟราเรดสเปกตรัมแต่ให้ข้อมูลที่นอกเหนือจากที่ได้จากอินฟราเรดสเปกตรัม

การกระเจิงแบบรามาน (Raman Scattering) เกิดจากคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความถี่เดียว (ν_0) ไปชนโมเลกุลและเกิดการกระเจิงจนทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานกึ่งสถานะเร้า (Virtual State) แล้วกลับสู่ระดับพลังงานสถานะพื้น และเกิดการกระเจิงแบบรามานขึ้น 2 แบบ ได้สเปกตรัมที่มีความถี่ (ν_m) ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่ของเลเซอร์ (ดังในรูปที่ 2.24) ดังนี้

1. เส้นสโตกส์ (Stokes line) เป็นสเปกตรัมที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ของเลเซอร์ที่เกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นของระดับพลังงานการสั่น ($V=0$) เป็นผลให้โฟตอนมีพลังงานลดลง ส่วนโมเลกุลที่ได้รับพลังงานจากโฟตอนจะอยู่ในสถานะเร้าและกลับลงสู่ระดับพลังงานพื้น

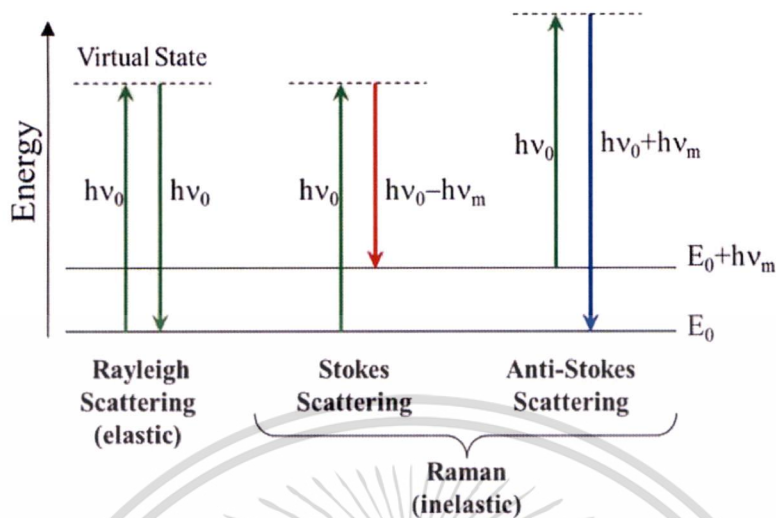
2. เส้นแอนติสโตกส์ (Anti-stokes line) เป็นสเปกตรัมที่มีความถี่มากกว่าความถี่ของเลเซอร์ เกิดจากการชนกันระหว่างโฟตอนของเลเซอร์กับโมเลกุลที่อยู่ในสถานะเร้าของระดับพลังงานการสั่น ($V=1$) ทำให้โฟตอนได้รับพลังงานจากโมเลกุลแล้วกลับลงสู่สถานะพื้น และโฟตอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น

โมเลกุลใดๆ ที่ทำให้คลื่นแสงที่ไปกระตุ้นเกิดการกระเจิงแล้วให้ Raman shift โมเลกุลนั้นจะต้องมีการสั่นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีนั้น พบว่าโมเลกุลที่มีการสั่นแบบสมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีแต่ละโมเลกุลที่มีการสั่นแบบไม่สมมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย สารบางชนิดเมื่อนำไปวัดอินฟราเรดหรือรามานสเปกโทรสโกปีพบว่าบางโหมดของการสั่น (Mode of Vibration) สามารถให้ได้ทั้งอินฟราเรดและรามานสเปกตรัม บางโหมดของการสั่นสามารถให้สเปกตรัมอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงมีกฎของการเลือกสำหรับการเกิดอินฟราเรด และรามานสเปกตรัมที่รู้จักกันดี คือ Rule of Mutual Exclusion ซึ่งมีด้วยกัน 3 ข้อ ดังนี้

1. โมเลกุลที่มี Center of Symmetry ถ้าบางโหมดของการสั่นให้ IR Active การสั่นของโหมดนั้นจะเป็น Raman Inactive หรือกล่าวว่าการสั่นของโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่จะให้ IR Active แต่ถ้าการสั่นของโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลง Polarizability ของพันธะเคมีจะให้ Raman Active

2. โมเลกุลที่ไม่มี Center of Symmetry จะให้ทั้ง IR และ Raman Active

3. โมเลกุลของสารบางชนิดไม่ให้ทั้งอินฟราเรดและรามานสเปกตรัมซึ่งจะพบในโมเลกุลที่มีการสั่นแบบงอประเทงอแบบบิด (Twisting) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทั้งโมเมนต์ขั้วคู่กับ Polarizability ของพันธะเคมีเกิดขึ้นและหักล้างกันเอง จึงไม่ให้อินฟราเรดและรามานสเปกตรัม



รูปที่ 2.24 แสดงแทรนซิชันพลังงานควอนตัมสำหรับการกระเจิงแบบเรย์ลีและแบบรามาน[19]

การวิเคราะห์รามานสเปกโทรสโกปีนั้นมีโหมดของการสั่นที่ให้ Intense Raman band ดังนี้

1. Transverse Acoustic (TA) คือ การสั่นโมเลกุลหรืออะตอมแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่ปลดปล่อยจากโมเลกุลหรืออะตอมหลังจากถูกกระตุ้น โดยมีความยาวคลื่นยาวจึงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นเสียง

2. Longitudinal Acoustic (LA) คือ การสั่นโมเลกุลหรืออะตอมในแนวทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่ปลดปล่อยจากโมเลกุลหรืออะตอมหลังจากถูกกระตุ้น โดยมีความยาวคลื่นยาวจึงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นเสียง

3. Transverse Optical (TO) คือ การสั่นโมเลกุลหรืออะตอมแนวตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่ปลดปล่อยจากโมเลกุลหรืออะตอมหลังจากถูกกระตุ้น โดยมีความยาวคลื่นสั้นจึงเปรียบเทียบกับความสั้นคลื่นแสง

4. Longitudinal Optical (LO) คือ การสั่นโมเลกุลหรืออะตอมในแนวทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงที่ปลดปล่อยจากโมเลกุลหรืออะตอมหลังจากถูกกระตุ้น โดยมีความยาวคลื่นสั้นจึงเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแสง

Raman shift (cm^{-1}) คือ $\frac{1}{\lambda}$ จะสื่อความหมายเกี่ยวกับความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเล็กน้อย

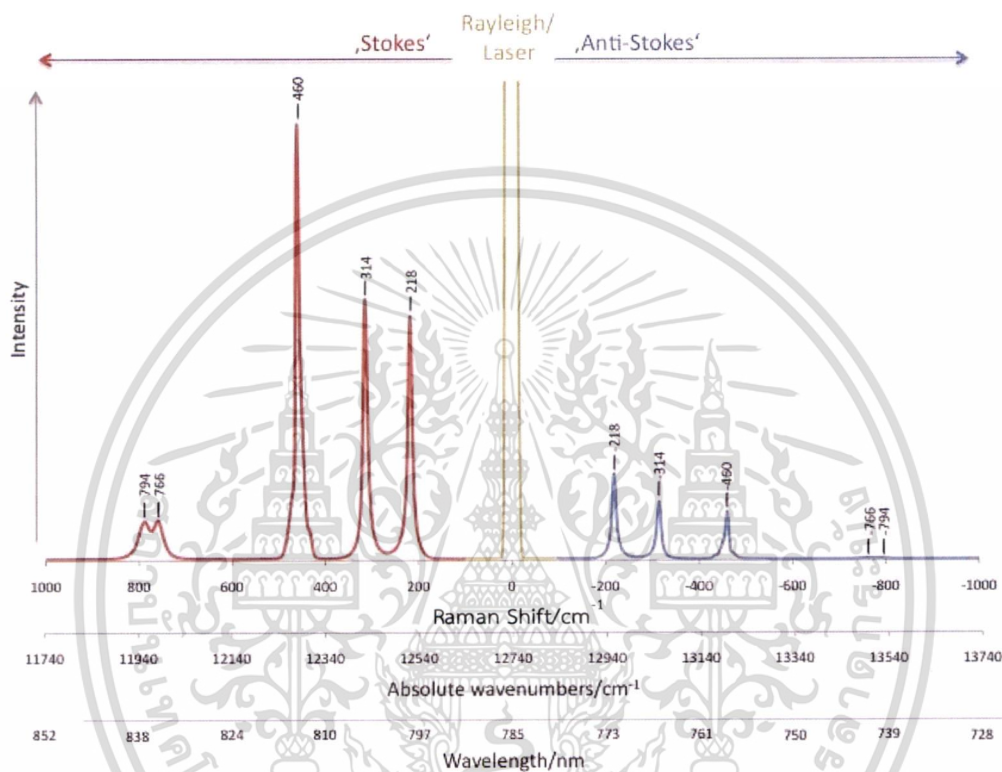
Wave number (n) คือ $\frac{2\pi}{\lambda}$ จะสื่อความหมายเกี่ยวกับพลังงานมากกว่าความแตกต่างของ

ความยาวคลื่น กล่าวคือ Wave number มีค่ามากแสดงถึงมีพลังงานสูงสัมพันธ์ตามสมการ 2.6

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ E คือ พลังงานโฟตอน หน่วย eV
- h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ เท่ากับ 4.135×10^{-15} eV.s
- c คือ ความเร็วแสง เท่ากับ 3×10^8 m/s
- λ คือ ความยาวคลื่นแสง หน่วย nm



รูปที่ 2.25 แสดงรามานสเปกตรัมของ CCl₄ ที่ถูกกระตุ้นด้วยคลื่นแสงจากฮีเลียมนีออนเลเซอร์[20]

จากรูปที่ 2.25 คลื่นแสงจากฮีเลียมนีออนเลเซอร์มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร (คิดเป็นเลขคลื่น 15803 cm⁻¹) เมื่อคลื่นแสงนี้ชนกับโมเลกุลคาร์บอนเตตระคลอไรด์จะปรากฏรามานสเปกตรัม 2 ชุด ชุดละ 5 สเปกตรัม ชุดหนึ่งอยู่ทางด้านที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าสเปกตรัมของคลื่นแสงจากฮีเลียมนีออนเลเซอร์ (แต่มีเลขคลื่นมากกว่า) ก็คือเส้นแอนติสโตกส์มีความเข้มของรามานสเปกตรัมที่เลขคลื่น 12958, 13054, 13200, 13506 และ 13534 cm⁻¹ ตามลำดับ

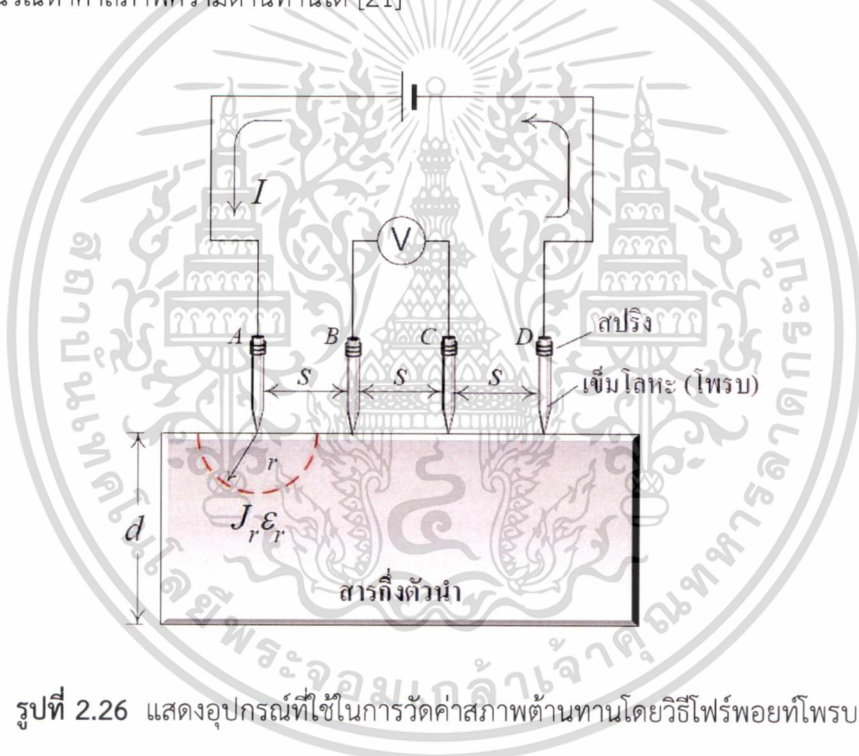
แต่ละเส้นมี Raman shift เป็น 218, 314, 460, 766 และ 794 cm⁻¹ ตามลำดับ จะพบว่าระยะห่าง (Raman shift) ของแต่ละเส้นแอนติสโตกส์ ตามปกติแล้วโมเลกุลที่สภาวะเร็ว จะมีจำนวนน้อยกว่าที่สภาวะพื้นตามกฎของโบลต์ซมันน์ ดังนั้นเส้นสโตกส์จึงมีความเข้มมากกว่าเส้นแอนติสโตกส์มาก การศึกษาทางรามานสเปกโทรสโกปี ส่วนมากจะใช้เส้นสโตกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.17 หลักการของเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

2.17.1 โฟร์พอยท์โพรบ

โฟร์พอยท์โพรบ (Four Point Probe) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานเชิงแผ่นบนแผ่นผลึก ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลมและอาจมีสปริงติดอยู่ เพื่อช่วยทำให้ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าด้านที่ขัดมันของสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ A, B, C และ D อยู่ห่างกันเป็นระยะเท่าๆกัน ซึ่งในทางปฏิบัติทุกๆไป จะมีค่าราว 0.5 – 1 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.24 และอยู่ในแนวระนาบเดียวกัน ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสคงที่ที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด คือ เข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำค่ากระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานได้ [21]



รูปที่ 2.26 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าสภาพต้านทานโดยวิธีโฟร์พอยท์โพรบ

ในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ขนาดของชิ้นสารกึ่งตัวนำนี้มีขนาดใหญ่และมีความหนา (d) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (s) หรือ $d \gg s$ กระแสจากขั้ว A จะกระจายออกไปยังเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส (J_r) ที่รัศมีใดๆ ที่กระจายออกไป จากจุด A คือ

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.7)$$

โดยที่ $2\pi r^2$ คือ ครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีรัศมี r จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้า E_r ที่จุด r คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varepsilon_r = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{2\pi.r^2.\sigma} \quad (2.8)$$

โดยที่ σ คือ สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของแท่งสารนี้ และจากนิยามที่ว่า ศักดาไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ ในรัศมี a คือ

$$V_a = -\int_{-\infty}^a \varepsilon_r dr = -\frac{I}{2\pi.\sigma} \int_{-\infty}^a \frac{1}{r^2} dr = \frac{I}{2\pi.\sigma.a} \quad (2.9)$$

ดังนั้น เมื่อมีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่าน เนื้อสารกึ่งตัวนำ ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้ว B และ C ที่เกิดเนื่องจากกระแส I ไหลผ่าน คือ

$$V_{B-C} = \frac{I}{2\pi.\sigma.s} - \frac{I}{2\pi.\sigma.2s} = \frac{I}{4\pi.\sigma.s} \quad (2.10)$$

และเมื่อพิจารณาว่า มีกระแสไหลออกที่ปลายเข็ม D โดยผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ และทำให้เกิดมีความแตกต่างของศักย์ที่ขั้ว B และ C อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งเหมือนกับการพิจารณาครั้งแรก ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้ว B และ C จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือ

$$V_{B-C(Total)} = 2\left(\frac{I}{4\pi.\sigma.s}\right) = \frac{I}{2\pi.\sigma.s} \quad (2.11)$$

$$\text{สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)} \quad \sigma = \frac{1}{2\pi.s} \frac{I}{V_{B-C(Total)}} = \frac{1}{2\pi.s} \frac{I}{V} \quad (2.12)$$

$$\text{และสภาพต้านทาน (Resistivity)} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} = 2\pi.s \frac{V}{I} \quad (2.13)$$

อย่างไรก็ดี สมการที่ 2.12 และ 2.13 จะใช้ได้ดีและถูกต้องก็เฉพาะในกรณีที่ความหนาของชั้นสาร (d) มีค่ามากกว่าระยะห่างของเข็ม (s) หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข เช่น ในการวัดชั้นสารที่มีขนาดความหนาบางๆ ค่าที่วัดได้จะผิดพลาดจากความเป็นจริง ซึ่งจะได้ว่า

$$\rho_{corrected} = \rho_{measured} \cdot F \quad (2.14)$$

โดยที่ $\rho_{corrected}$ คือ ค่าสภาพต้านทานที่ถูกต้อง
 $\rho_{measured}$ คือ ค่าสภาพต้านทานที่วัดได้ ตามสมการ 2.13
 F คือ สัมประสิทธิ์ความถูกต้อง (Correction factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับขนาด ความหนา และรูปร่างของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ทำการวัด โดยเฉพาะอัตราส่วนของค่า d/s

ในกรณีของการวัดชิ้นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาน้อยๆ หรือบางมากๆ เช่นการวัดชิ้นบางๆของสารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือบนแผ่นผลึกฐานรอง ซึ่งในกรณีนี้ ความหนาของชิ้นสาร (X_j) มีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม หรือ $x_j \gg s$ ในกรณีนี้ ค่าสภาพต้านทานเฉลี่ยหาได้จากสมการ 2.15

$$\bar{\rho} = \frac{\pi V}{\ln 2 I} x_j = 4.532 \frac{V}{I} x_j \quad \text{หน่วย } \Omega \cdot \text{cm} \quad (2.15)$$

โดย X_j คือ ความหนาของชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ทำการวัด หรือ เท่ากับความลึกของรอยต่อ พี-เอ็น นอกจากนี้แล้ว จากสมการที่ 2.15 “สภาพต้านทานแผ่น” หรือ Sheet Resistivity (ρ_s) สามารถแสดงได้ว่า

$$\bar{\rho}_s = \frac{\bar{\rho}}{x_j} = 4.532 \frac{V}{I} \quad \text{หน่วย } \Omega/\text{Square} \quad (2.16)$$

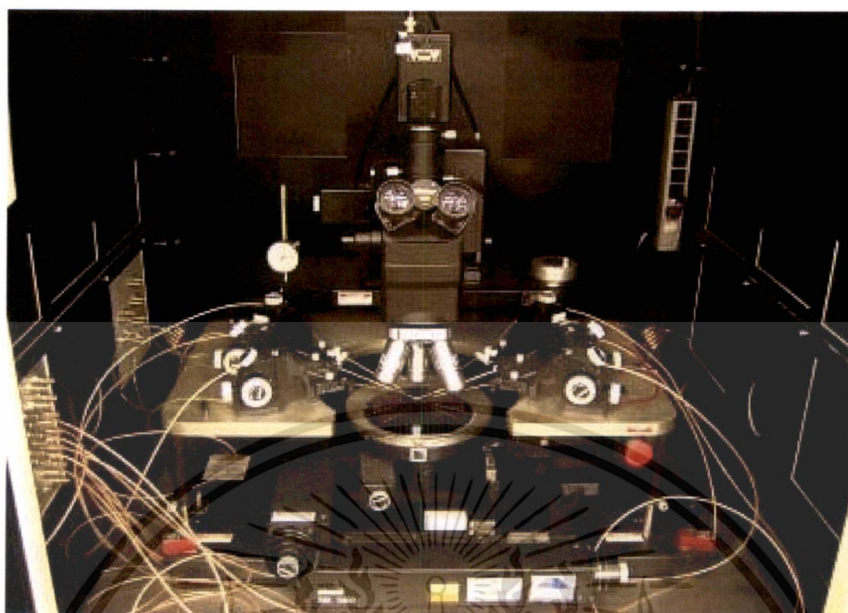
ซึ่งในทางปฏิบัติ สมการที่ 2.16 เป็นสมการที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด เพราะในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการวิเคราะห์ชิ้นสารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ด้วยสารเจือซึ่งมีขนาดบางๆ ราว 1-3 ไมโครเมตร ที่อยู่ด้านบนของแผ่นผลึก สมการนี้จึงสะดวกต่อการนำไปใช้ เพื่อคำนวณและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์อื่นๆต่อไป

ข้อเสียในการวัดด้วยวิธีนี้ คือ อาจทำให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ มีรอยและเสียหายได้ เพราะถูกปลายแหลมของเข็มกดทับ

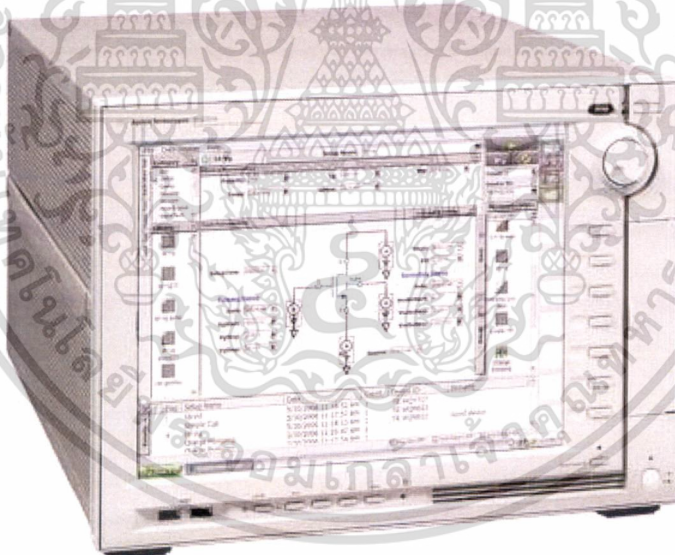
2.17.2 โพรบสเตชัน

เครื่องมือวัดประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Agilent รุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer ทำหน้าที่วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cross-Bridge Kelvin Resistance เพื่อหาค่าความต้านทานรอยสัมผัส (Contact Resistance) โดยควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปรแกรม Easy Expert

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 2.27 แสดงอุปกรณ์วัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสบนโครงสร้าง Cross-Bridge Kelvin Resistance ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (a) Probe Station และ (b) Semiconducter Device Analyzer ของบริษัท Agilent รุ่น B1500A

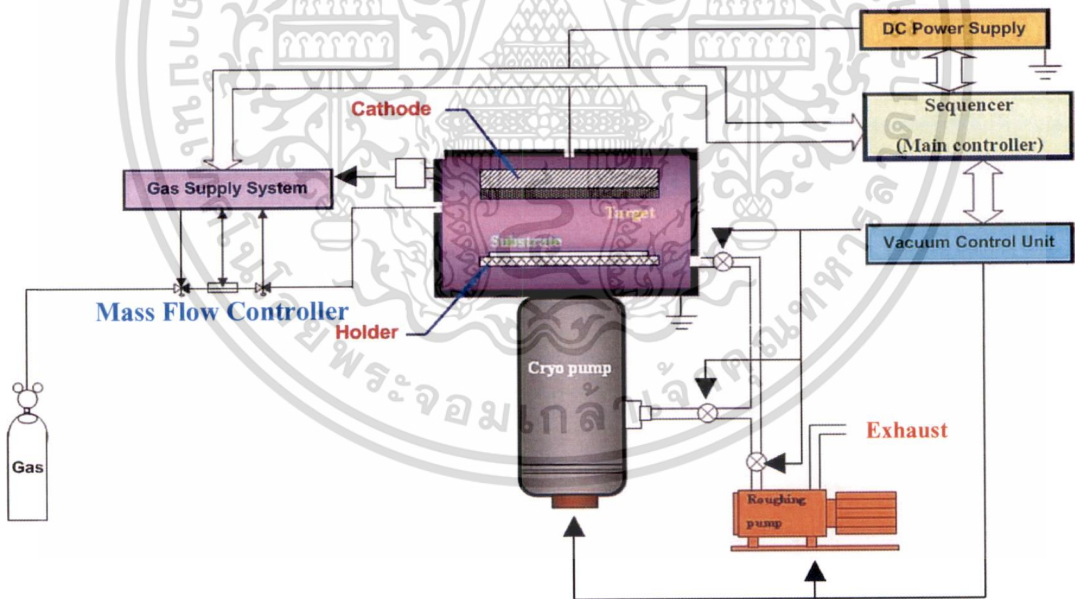
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็น 5 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ขั้นตอนที่สองเป็นการสร้างฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนกับอาร์กอนต่างๆ เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ ขั้นตอนที่สามเป็นการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ รวมทั้งการทดสอบการป้องกันการแพร่ ขั้นตอนที่สี่เป็นการสร้างชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ (TiSi₂) เพื่อลดความต้านทานสัมผัสด้วยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวและสองครั้ง พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้า ขั้นตอนที่ห้าเป็นการวัดความต้านทานสัมผัสด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์ของรอยสัมผัสไทเทเนียม (Ti) กับฐานรองซิลิคอน และรอยสัมผัส TiSi₂ กับฐานรองซิลิคอน

3.1 ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC Magnetron Sputtering System)

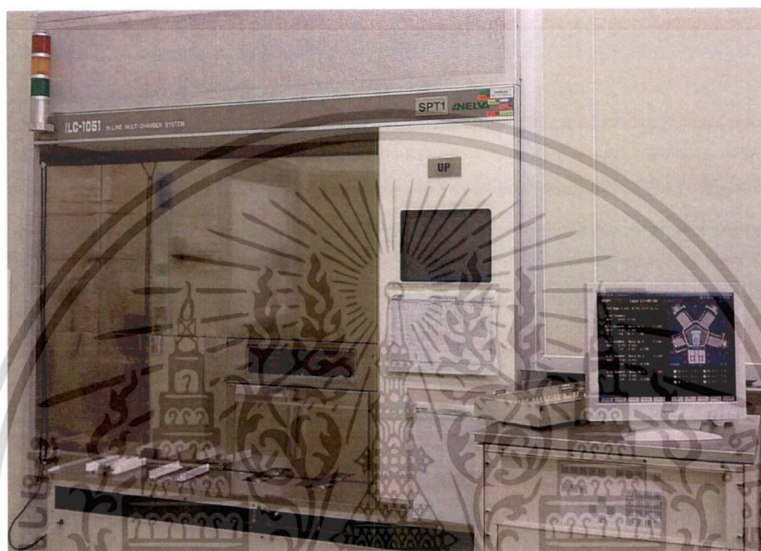


รูปที่ 3.1 ระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 เครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

เครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง เป็นเครื่องจักรที่ใช้ปลูกฟิล์มโลหะ Ti, TiN และอัลลอย AlCuSi บนฐานรองแผ่นซิลิคอน เพื่อใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อภายในวงจรและเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับวงจรอุปกรณ์ซีมอส และสำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่องจักรผลิตโดยบริษัท ANELVA รุ่น ILC-1051 ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง บริษัท ANELVA รุ่น ILC-1051

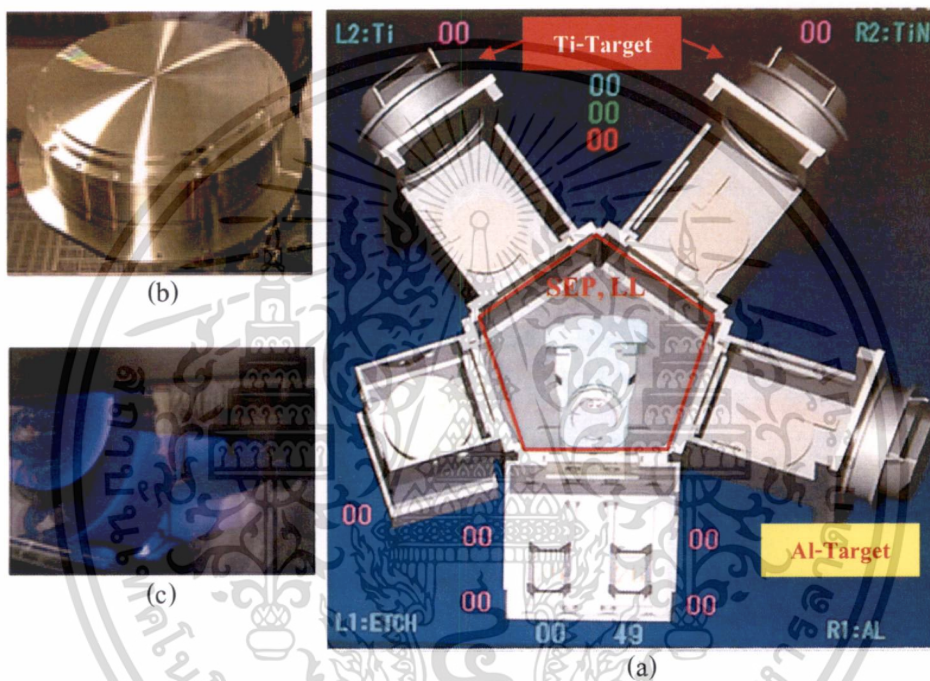
3.1.1.1 ห้องสุญญากาศ

ห้องสุญญากาศของเครื่องจักรนี้ใช้สำหรับแผ่นซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว ที่มีแพลตฟอร์ม โดยสามารถลดความดันต่ำกว่า 5×10^{-7} Torr ด้วย Cryo pump และแบ่งห้องสุญญากาศออกเป็น 3 ส่วน ตามลักษณะการใช้งาน

1. ห้องสุญญากาศสำหรับทำความสะอาดด้วยพลาสมา
 - ห้องสุญญากาศ L1 ใช้สำหรับการกัดด้วยพลาสมาของกาซอาร์กอนเพื่อทำความสะอาดและกำจัดชั้นออกไซด์บนแผ่นฐานรองซิลิคอนก่อนการปลูกฟิล์มโลหะเฉพาะในห้องสุญญากาศนี้สร้างพลาสมาด้วยความถี่วิทยุ
2. ห้องสุญญากาศสำหรับปลูกฟิล์มโลหะซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ห้อง แยกตามเป้าสาร
 - ห้องสุญญากาศ R1 เป็นเป้าอลูมิเนียม เพื่อใช้ปลูกฟิล์มอลูมิเนียมด้วยพลาสมาของกาซเฉื่อยอาร์กอน
 - ห้องสุญญากาศ L2 เป็นเป้าไทเทเนียม เพื่อใช้ปลูกฟิล์มไทเทเนียมเท่านั้น ด้วยการใช้พลาสมาของกาซเฉื่อยอาร์กอนเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ห้องสุญญากาศ R2 เป็นเป้าไทเทเนียม เพื่อใช้ปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์
ด้วยการใช้พลาสมาของกาซปฏิกิริยานาโตรเจนและกาซเฉื่อยอาร์กอน
- 3. ห้องสุญญากาศสำหรับการเคลื่อนย้าย
 - ห้องสุญญากาศ SEP, LL ใช้สำหรับนำแผ่นฐานรองซิลิคอนเข้าและออกห้อง
สุญญากาศสำหรับปลูกฟิล์มโลหะด้วยแขนกล โดยปราศจากการสัมผัส
ความชื้นและออกซิเจนของบรรยากาศภายนอก เพื่อลดการเกิดออกไซด์ชั้น
บนพื้นผิวฐานรองและฟิล์มโลหะ



รูปที่ 3.3 (a) ห้องสุญญากาศของเครื่องปลูกฟิล์ม (b) เป้า Ti ในห้องสุญญากาศ L2 และ R2
(c) พลาสมาของกาซอาร์กอนในห้องสุญญากาศ L2 ขณะปลูกฟิล์ม Ti

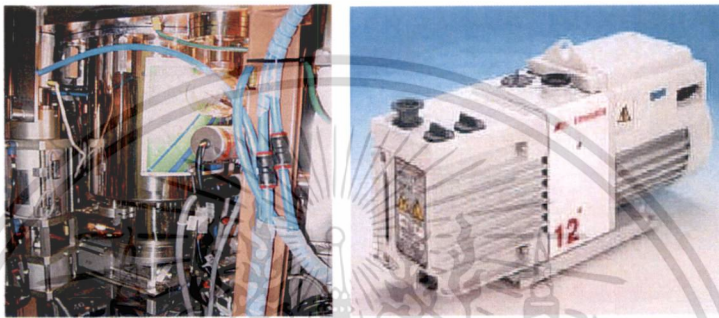
3.1.1.2 ระบบปั๊มสุญญากาศและอุปกรณ์การวัดความดันสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ปั๊มและอุปกรณ์ควบคุม

1. ปั๊มสุญญากาศที่ใช้กับเครื่องนี้มี 2 ชนิด คือ Cryo Pump และ Rotary Pump
 - Cryo Pump คือ ปั๊มสุญญากาศขั้นสูง โดยใช้หลักการลดอุณหภูมิต่ำกว่า 20 K ซึ่งสามารถลดความดันได้ตั้งแต่ 1×10^{-3} ถึง 1×10^{-8} Torr การใช้งาน Cryo Pump นั้นต้องทำงานร่วมกับ Rotary Pump ที่สามารถลดความดันได้ตั้งแต่ความดันบรรยากาศถึง 1×10^{-3} Torr สำหรับ Cryo Pump ที่ใช้งานในเครื่องปลูกฟิล์มโลหะนี้ คือรุ่น CAP-80MK2 ของบริษัท ANELVA

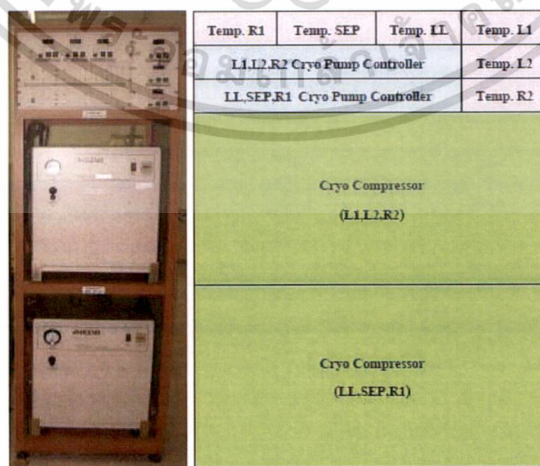
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rotary Pump คือปั๊มกลใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถลดความดันได้ตั้งแต่ความดันบรรยากาศลงถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar โดย Rotary Pump ที่ใช้งาน คือ รุ่น RV12 ของบริษัท EDWARDS
2. เกจวัดความดันสุญญากาศ
- Thermocouple pressure gauge เป็นเกจสำหรับวัดความดันสุญญากาศขั้นต้น ตั้งแต่ระดับความดันบรรยากาศ ถึง 10^{-2} mbar
 - Ion pressure gauge เป็นเกจสำหรับวัดความดันสุญญากาศขั้นสูง



รูปที่ 3.4 Cryo Pump และ Rotary Pump

3. หน่วยควบคุมการทำงานระบบสุญญากาศ (Vacuum Control Unit) เป็นหน่วยควบคุมการทำงานของ Cryo Pump ซึ่งเป็น High Vacuum Pump สำหรับเครื่องจักรรุ่นนี้ สามารถสร้างสุญญากาศได้ที่ 5×10^{-7} Torr – 5×10^{-8} Torr และใช้ Rotary Vane Pump เป็น Backing Pump สำหรับ Cryo pump ซึ่งสามารถทำงานได้ที่ 0.5×10^{-2} Torr ดังรูปที่ 3.5

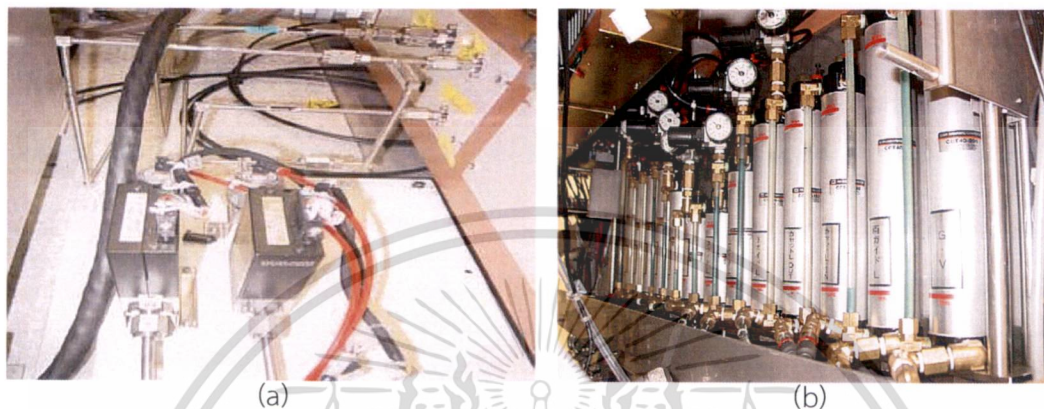


รูปที่ 3.5 หน่วยควบคุมการทำงานระบบสุญญากาศ

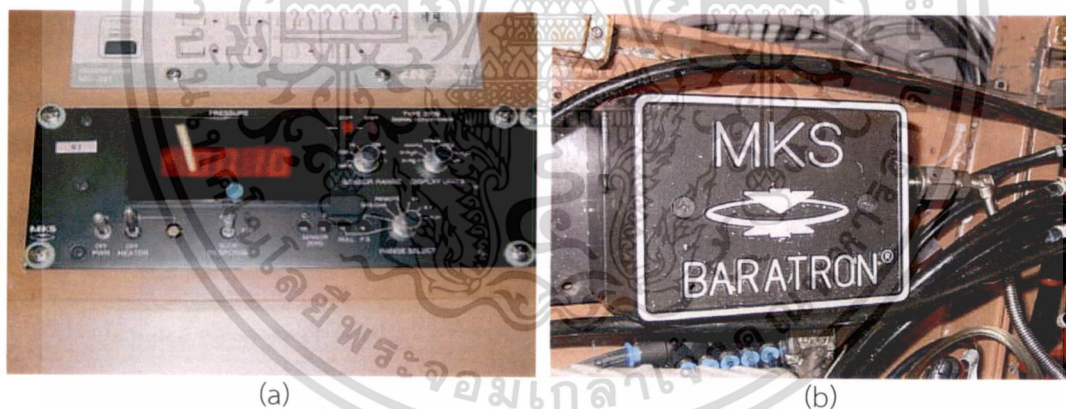
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 ระบบจ่ายก๊าซ (Gas Supply Unit)

เป็นระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ (Ar, N₂) เพื่อความดันภายในห้องสุญญากาศ คงที่จะจึงจะกำเนิดพลาสมา ได้ ซึ่งประกอบไปด้วย Mass Flow Control (MFC), Gas Pressure Controller, Gas Pressure Gage เป็นอุปกรณ์หลัก



รูปที่ 3.6 (a) Mass Flow Controller (Ar) Maximum flow rate 200 sccm และ (b) ถังก๊าซชนิดต่างๆ

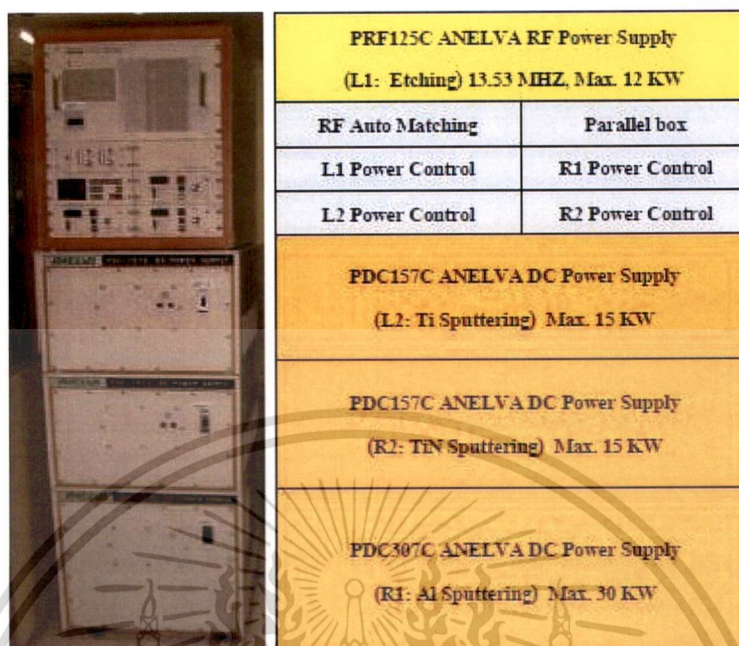


รูปที่ 3.7 (a) Gas Pressure Controller และ (b) Gas Pressure Gage

3.1.1.4 หน่วยจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและความถี่วิทยุ (DC/ RF Supply Unit)

เป็นหน่วยจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current Supply) ให้กับห้องสุญญากาศ สำหรับปลูกฟิล์ม เพื่อกำเนิดพลาสมาใช้ในการปลูกฟิล์มโลหะ ส่วนแหล่งจ่ายความถี่วิทยุ (Radio Frequency Supply) เพื่อใช้กำเนิดพลาสมาในห้องสุญญากาศสำหรับทำความสะอาดด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



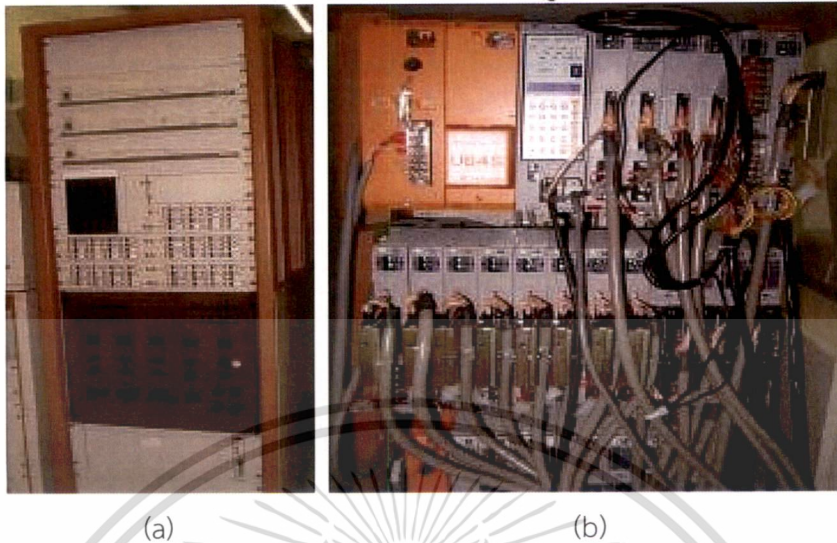
รูปที่ 3.8 หน่วยจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงและความถี่วิทยุ (DC/ RF Power Supply Unit)

3.1.1.5 ตูควบคุมหลัก (Sequencer)

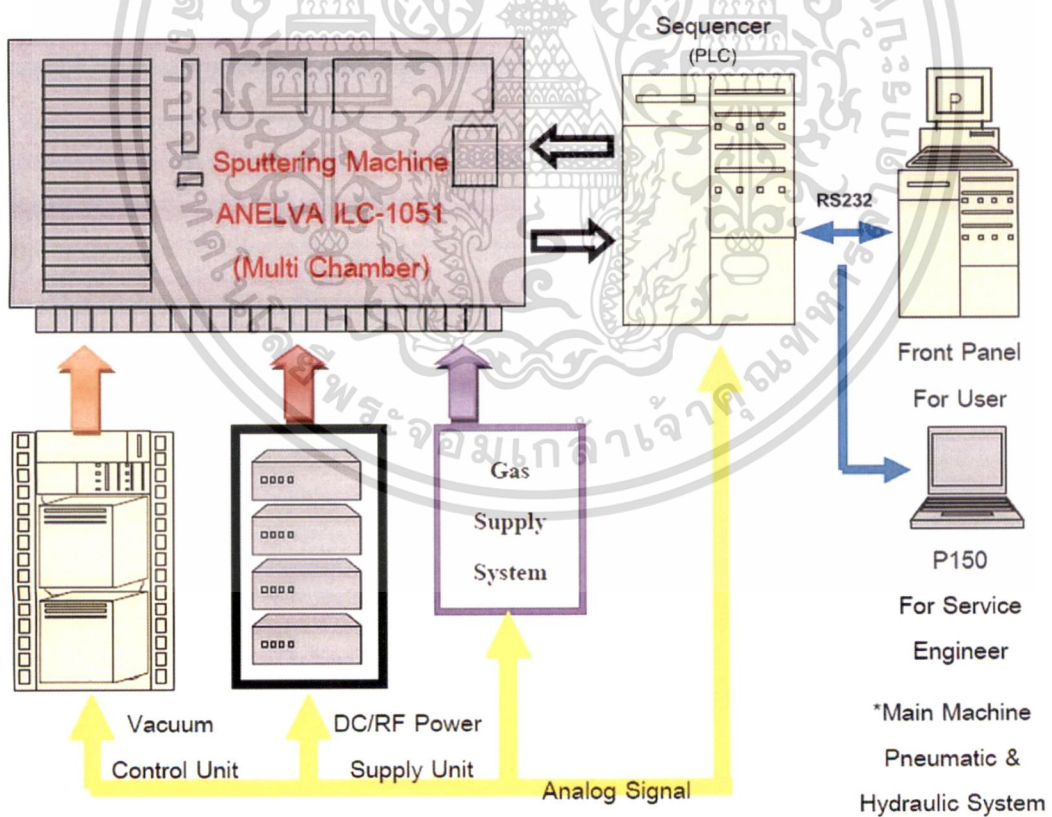
ระบบควบคุมของเครื่องจักรรุ่นนี้ ด้วยระบบ PLC (Programmable Logical Controller) สามารถทำการควบคุมระบบเครื่องจักรได้ทั้งเครื่อง ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำการควบคุมโดย Sequencer ได้แก่

1. ประเภท ON/OFF control เช่น Solenoid Valve, Relay, Magnetic, Pneumatic Valve, Hydraulic Valve เป็นต้น ซึ่งใช้ Module ที่เป็น Input OPTO - Coupling และ Output Relay กับ Switching Power Supply DC 24 Volt
2. ประเภทอุปกรณ์ Analog Signal เช่น Pressure Gage, High/Low Vacuum Gage, DC/RF Power Supply, Bake/Heater Controller เป็นต้น จะต้องมียังจร DAC และ ADC ช่วยในการควบคุมผ่าน Module ที่เป็น Register In/Out
3. การเชื่อมต่อข้อมูลจะสามารถทำได้ด้วยการ Interface แบบ RS232 กับ PC ที่ได้ทำการลงโปรแกรมเพื่อให้ใช้งานได้อย่างสะดวก สำหรับการแก้ไขตั้งค่าต่างๆจะใช้เครื่อง P150 เป็นเครื่องเฉพาะสำหรับ PLC ของเครื่องจักรนี้ ดังแสดงใน Function Block รูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 (a) ตัวควบคุมหลัก (Sequencer) และ (b) PLC รุ่น MEMOCON U84S ของบริษัท YASKAWA



รูปที่ 3.10 Functional Block ของ Sputtering Machine ANELVA ILC-1051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.6 PLC (Programmable Logical Controller)

ระบบควบคุมและสั่งการรวมอยู่ที่ PLC ตัวเดียว ทำให้การควบคุมทั้งเครื่องจักรเป็นแบบอัตโนมัติ มีการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม แบบ RS232 อีกทั้งมี Interlock มาช่วยป้องกันเครื่องจักรเสียหายเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้นกับกระบวนการผลิตหรือผู้ปฏิบัติงานทำงานผิดพลาด

3.1.1.7 Graphic User Interface

สามารถทำการสั่งงานและ Monitoring ผ่าน PC ซึ่งลงโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งานเข้าถึงได้ ตัวโปรแกรมมีหน้าต่างสำหรับการ Monitor หลายระบบกับรูปสัญลักษณ์แทนอุปกรณ์ทำให้เข้าใจเครื่องจักรได้ง่าย เช่น Mechanical System, Vacuum System, Parameter Monitoring, Input Recipe เป็นต้น และเมื่อเครื่องจักรเกิด Alarm ก็จะมี Abort Message แสดงให้ผู้ใช้งานเห็นอีกด้วย

3.1.2 สาธารณูปโภคที่จำเป็นสำหรับเครื่องปลูกฟิล์มโลหะด้วยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สปีดเตอริง

Utility	Detail	Specification	Comment
Electrical	Main	3 Phase , 200V , 100A	
		1 Phase , 100V , 20A	CVCF system
	Sputter power supply	3 Phase , 200V , 25A	RF power supply unit 12.5KW
		3 Phase , 200V , 75A	DC power supply unit 15KW(x2)
		3 Phase , 200V , 125A	DC power supply unit 30KW
Cooling Water	Main	16 l/min , 2.5 – 3.5 Kg/cm ²	
	Cathode	45 l/min , 3.5 – 4 Kg/cm ²	Al = 27 l/min , Ti/TiN = 10 l/min. x 2
	Cryo compressor	23 l/min , 2.5 – 3.5 Kg/cm ²	2 Cryo compressors
Gas	CDA	6 – 7 Kg/cm ²	
	N ₂	< 1.5 Kg/cm ²	Vent chamber
	P- N ₂	< 1.0 Kg/cm ²	High purity
	Ar	< 1.0 Kg/cm ²	
Exhaust		< 1.0 M ³ /min	Stripping exhaust

ตารางที่ 3.1 แสดงสาธารณูปโภคที่จำเป็นสำหรับเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ

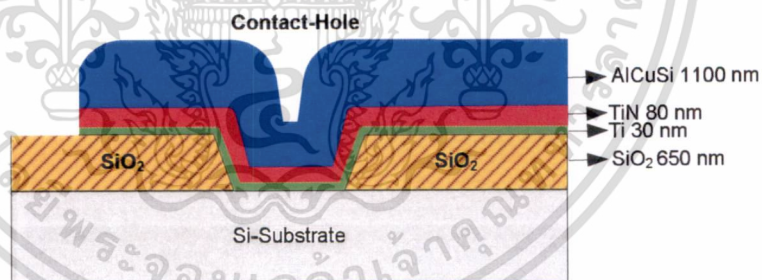
ชั้นป้องกันการแพร่ในงานวิจัยนี้จะถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งในการเชื่อมต่อภายในด้วยอัลลอย AlCuSi ประกอบด้วยฟิล์ม 3 ชั้น ดังนี้

1. Ti เป็นชั้นยึดติด (Adhesion layer) สร้างด้วยระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอริง ในบรรยากาศอาร์กอน ซึ่งชั้นนี้ใช้เป็นชั้นยึดติดระหว่างชั้นป้องกันการแพร่ (TiN) กับฐานรองซิลิคอนได้ดี และยังสามารถลอกออกไซด์ธรรมชาติ (Native Oxide) ที่เกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างขั้นตอนการแอนนัลให้ความร้อนและเกิดปฏิกิริยากับซิลิคอนที่เป็นฐานรองเกิดเป็นชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ (TiSi₂) เป็นผลให้มีความต้านทานสัมผัสต่ำลง

2. TiN เป็นชั้นป้องกันการแพร่ (Diffusion Barrier) ของอัลลอย AlCuSi สร้างโดยการปลูก TiN ด้วยระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอริง ในบรรยากาศไนโตรเจนอย่างเดียวและไนโตรเจนผสมอาร์กอน

3. AlCuSi เป็นชั้นอัลลอยเชื่อมต่อภายในวงจรรวมปลูกด้วยเทคนิค ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอริง ในบรรยากาศอาร์กอน

โดยปกติเมื่อปลูกฟิล์มทั้ง 3 ชั้นเสร็จแล้ว จะนำไปขึ้นเตอริงให้ความร้อนด้วยเตาปฏิกรณ์ภายในบรรยากาศไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 420 °C นาน 30 นาที เพื่อให้ฟิล์มโลหะยึดติดฐานรองซิลิคอนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้จะยึดตามการออกแบบและกระบวนการผลิตซิมอสของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ดังในรูปที่ 3.11

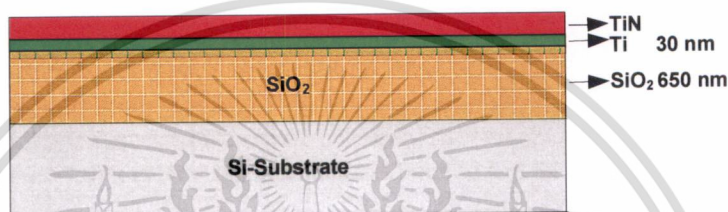


รูปที่ 3.11 แสดง AlCuSi-Metallization บริเวณหลุมสัมผัส (Contact Hole) ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์แบบควบคุมเวลา

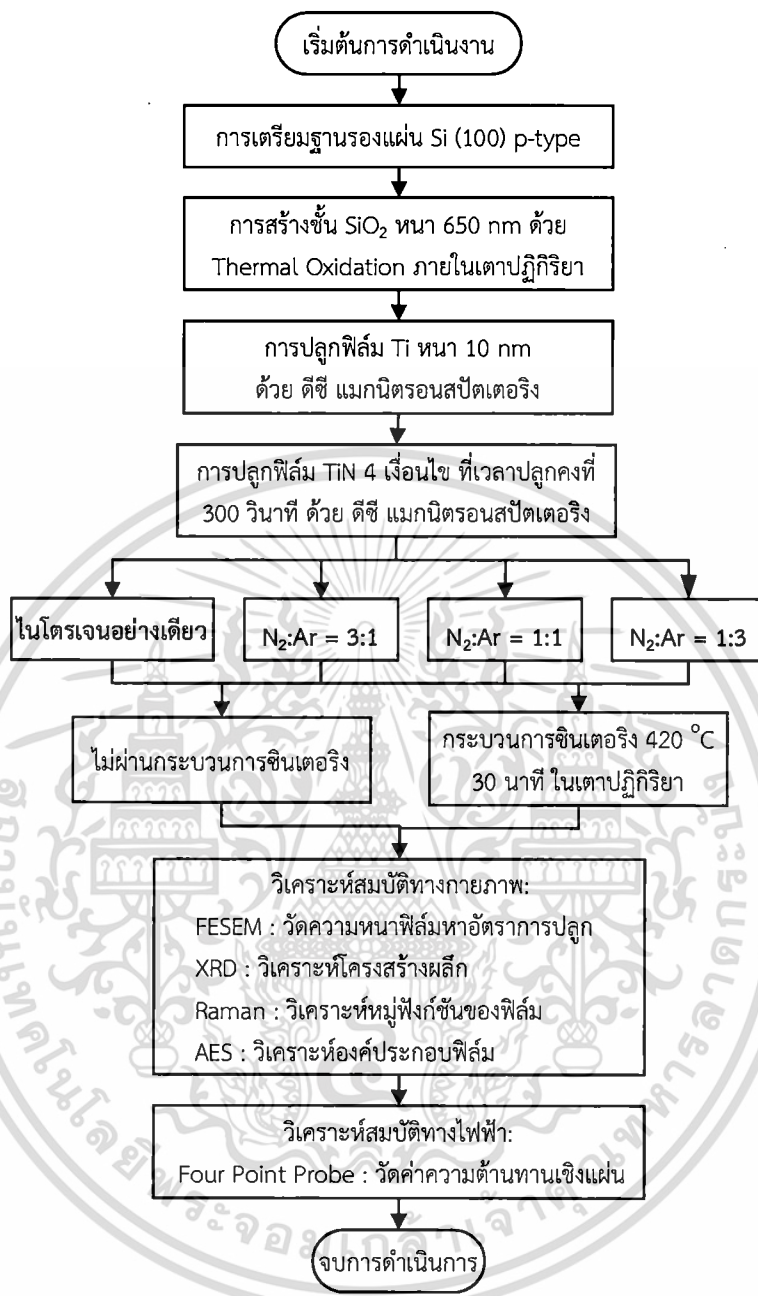
ขั้นตอนนี้เป็น การปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนที่อัตราส่วน 1) ไนโตรเจนอย่างเดียว 2) 3:1, 3) 1:1 และ 4) 1:3 ที่ความดันคงที่ 4 mbar ดังในตาราง 3.2 และผังงานในรูปที่ 3.13 โดยกำหนดเวลาในการปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์คงที่ 300 วินาที ด้วยโครงสร้างชั้นฟิล์มดังในรูปที่ 3.12 โดยฟิล์ม TiN ที่ปลูกได้ถูกแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่หนึ่งไม่ผ่านกระบวนการซินเตอริง และชุดที่สองผ่านกระบวนการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 420 °C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน นาน 30 นาที จากนั้นนำฟิล์มทั้ง 2 ชุดไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.12 ฟิล์ม TiN แบบควบคุมเวลาเพื่อหาอัตราการปลูกและวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น

อัตราส่วนก๊าซ (ไนโตรเจน:อาร์กอน)	อัตราการไหลไนโตรเจน ต่ออาร์กอน (sccm)	DC Power Supply		
		(Voltage)	(Ampere)	(kWatt)
ไนโตรเจนอย่างเดียว	40/0	565	10.6	6
3:1	27/9	517	11.4	6
1:1	21/21	479	12.4	6
1:3	8/24	475	12.5	6

ตารางที่ 3.2 แสดงรายการเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม TiN ด้วย ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนกับอาร์กอนต่างๆ กัน



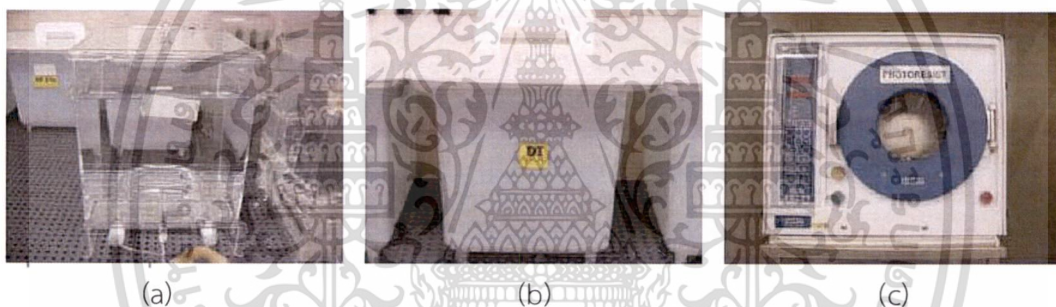
รูปที่ 3.13 แสดงผังงานของการปลูกฟิล์ม TiN แบบควบคุมเวลา เพื่อหาอัตราการปลูกและวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 การเตรียมฐานรองแผ่นซิลิคอน

เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะในกระบวนการต่างๆ สิ่งแปลกปลอมจะเกิดขึ้นได้อย่างง่ายดาย ผลกระทบของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน สามารถสร้างความเสียหายให้กับการผลิตได้ เนื่องจากในปัจจุบันสิ่งแปลกปลอมจะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับสวดลายวงจรมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ สำหรับการเตรียมฐานรองซิลิคอนจะเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนบนระนาบ (100) ชนิดพี (Si (100) p-type) ขนาด 6 นิ้ว โดยขั้นตอนการทำความสะอาดดังนี้

1. ล้างแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ด้วยอัตราส่วน 1: 3 เป็นเวลา 5 นาที
2. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionization Water) นาน 10 นาที
3. ล้างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำการลอก ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Native Oxide) ออกไป
4. ล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (Deionization Water) นาน 5 นาที
5. เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าแห้งด้วยกาซไนโตรเจน (Spin Rinse Dryer)



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน (a) อ่างควอตซ์บรรจุสารละลายสำหรับทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, (b) น้ำปลอดประจุ และ (c) เครื่องเป่าแห้งด้วยกาซไนโตรเจน

3.2.1.2 สร้างชั้นฉนวน

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นขั้นตอนที่จำเป็นต้องใช้ในเกือบทุกกระบวนการ โดยซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) สามารถปลูกลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนได้ เพื่อใช้เป็นชั้นกัน หรือชั้นฉนวน หรือใช้ในการแยกโดตสิ่งประดิษฐ์ตัวหนึ่งออกจากสิ่งประดิษฐ์ตัวอื่นในวงจรรวม (ซึ่งเรียกว่า oxide isolation) หรือใช้เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างซีมอส โดยทั่วไปการปลูกชั้น SiO_2 สามารถกระทำได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการทำออกซิเดชันด้วยกระบวนการทางความร้อน (Thermal Oxidation) ด้วยเตาปฏิริยา โดยกำหนดความหนา 650 นาโนเมตร

สำหรับการสร้างชั้นฟิล์ม SiO_2 จะใช้เงื่อนไขในการสร้างชั้นฟิล์มของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบความหนาและความสม่ำเสมอของฟิล์มทุกครั้งด้วยเครื่องมืออิลลิปโซมิเตอร์ (Ellipsometer) รุ่น Rudolph FEIII ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่ทำลายพื้นผิวของฟิล์ม อีกทั้งยังมีความแม่นยำสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.3 การปลูกฟิล์มไทเทเนียมด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

ใช้ฐานรองเป็นแผ่น Si (100) p-type ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว จากนั้นทำการปลูกฟิล์มบางโลหะ Ti ด้วยเครื่อง ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง รุ่น ILC-1051 ของบริษัท Anelva โดยใช้เป้าสารเคลือบ Ti ความบริสุทธิ์ 99.999 % ใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999 % สำหรับเป็นอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ ความดันก่อนทำการระบวนการสปัตเตอริง ต่ำกว่า 1×10^{-7} mbar ควบคุมอัตราการป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ ขณะทำการสปัตเตอริง 40 cc/min ที่ความดัน 4×10^{-3} mbar ป้อนกำลังไฟกระแสตรงให้ระบบเท่ากับ 6.0 kW ปลูกฟิล์ม Ti หนา 10 nm

3.2.1.4 การปลูกฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง

ใช้ฐานรองเป็นแผ่น Si (100) p-type ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว โดยมีชั้นยึดติด Ti ก่อนการปลูกฟิล์ม TiN จากนั้นทำการปลูกฟิล์ม TiN ด้วยเครื่อง ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง รุ่น ILC-1051 ของบริษัท Anelva โดยใช้เป้าสารเคลือบ Ti ความบริสุทธิ์ 99.999 % ใช้ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.9999 % สำหรับเป็นอนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนเป้าสารเคลือบ และเป็นก๊าซสำหรับทำปฏิกิริยา (Reactive Gas) ความดันก่อนทำการระบวนการสปัตเตอริงต่ำกว่า 1×10^{-7} mbar ควบคุมอัตราการป้อนก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนด้วยอัตราส่วนต่างๆ ตามตารางที่ 3.2 เพื่อปลูกฟิล์ม TiN ที่แตกต่างกัน 4 เงื่อนไข โดยใช้เวลาการปลูกเท่าๆ กัน ที่ 300 วินาที

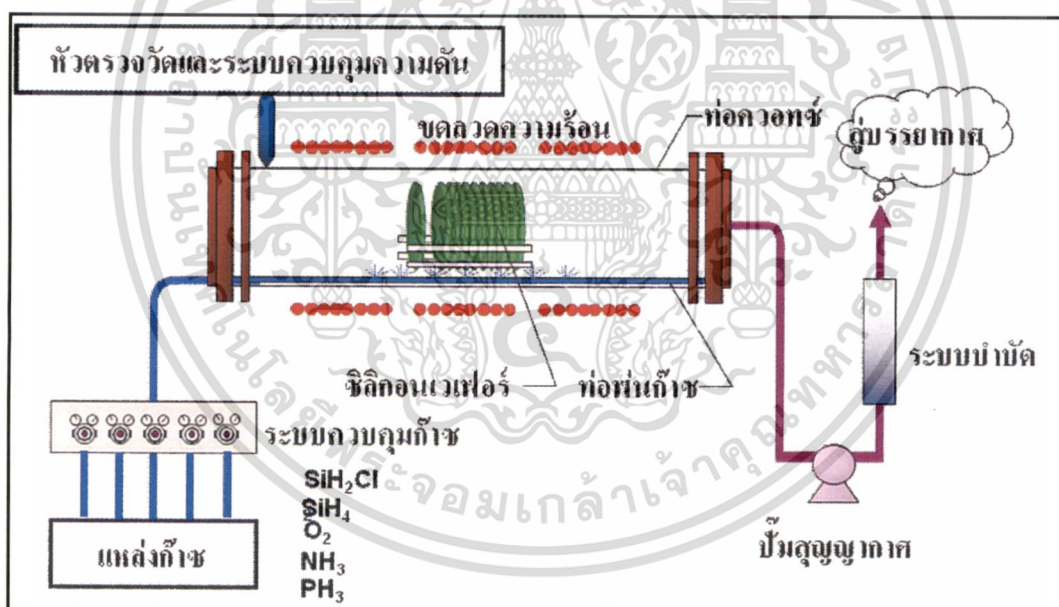
3.2.1.5 กระบวนการซินเตอริงในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศ

หลังกระบวนการปลูกฟิล์ม TiN และ Ti บนฐานรองซิลิคอนแล้ว จะนำมาผ่านกระบวนการซินเตอริง (Sintering Process) เพื่อให้ฟิล์มยึดติดกับฐานรองซิลิคอนได้ดี ด้วยเตาปฏิกิริยา (Furnace) รุ่น TMX-10000 ของบริษัท Thermco System ในบรรยากาศไนโตรเจนผสมไฮโดรเจนที่ความดันบรรยากาศ โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซไฮโดรเจนในท่อให้คงที่เท่ากับ 14 lit/min ที่อุณหภูมิ 420°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำกว่า จุดยูเทคติกของอัลลอย AlCuSi (577°C) เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีขนาดเล็ก จึงสามารถแพร่ลึกลงไปถึงบริเวณรอยต่อสัมผัสโลหะกับซิลิคอนได้ดี กว่าใช้ก๊าซไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว ทำให้ได้รอยสัมผัสมีสมบัติโอห์มมิกที่ดี มีค่าความต้านทานสัมผัสต่ำ

ส่วนกระบวนการแอนนีลลิ่ง (Annealing Process) เป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวด้วยเตาปฏิกิริยาเช่นกัน เพื่อปรับโครงสร้างของเนื้อวัสดุ เป้าหมายหลังการยิงฝังประจุ เพื่อทำการซ่อมแซมส่วนที่ไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการยิงสารเจือหรือสร้างโครงผลึกขึ้นมาอีกครั้ง (Regrowth of Crystal) และเป็นการรวมตัวพันธะระหว่างอะตอมสารเจือกับอะตอมซิลิคอนหรือเรียกว่า แอคติเวชัน (Activation)



รูปที่ 3.15 ลักษณะเตาปฏิกรณ์ (Furnace) ของบริษัท Thermco System รุ่น TMX-10000 สำหรับกระบวนการซินเตอร์ริงและแอนโนลิ่ง

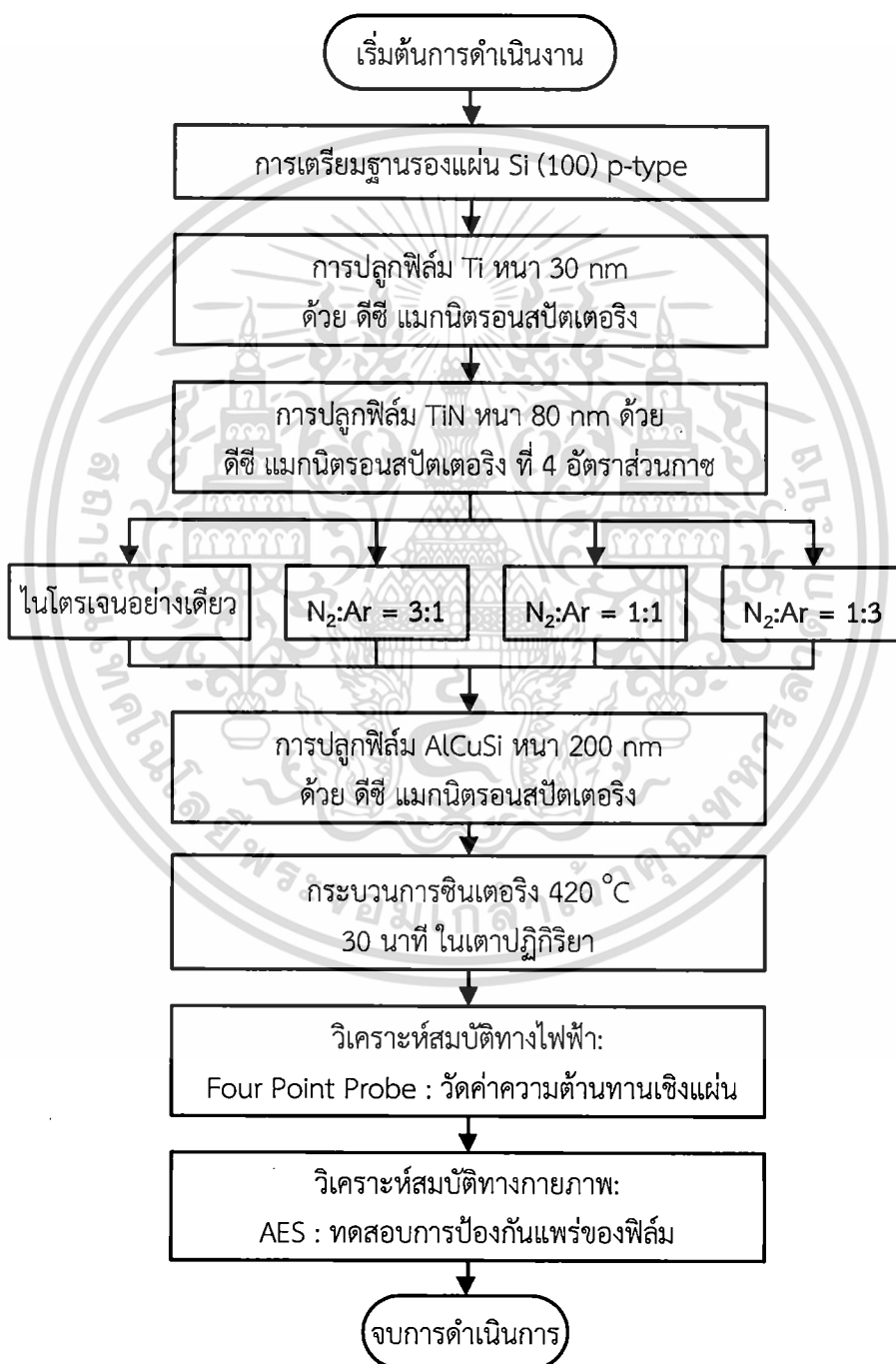


รูปที่ 3.16 ส่วนประกอบของเตาปฏิกรณ์ (Furnace) สำหรับกระบวนการซินเตอร์ริงและแอนโนลิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การสร้างชั้นป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้างชั้นป้องกันการแพร่ด้วยฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนที่อัตราส่วน 1) ไนโตรเจนอย่างเดียว 2) 3:1, 3) 1:1 และ 4) 1:3 ที่ความดันคงที่ 4 mbar ดังในตาราง 3.2 โดยกำหนดความหนา 80 nm ตามโครงสร้างชั้นฟิล์มดังในรูปที่ 3.18 เพื่อใช้ทดสอบการป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi



รูปที่ 3.17 แสดงผังงานของการสร้างชั้นป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์ม TiN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

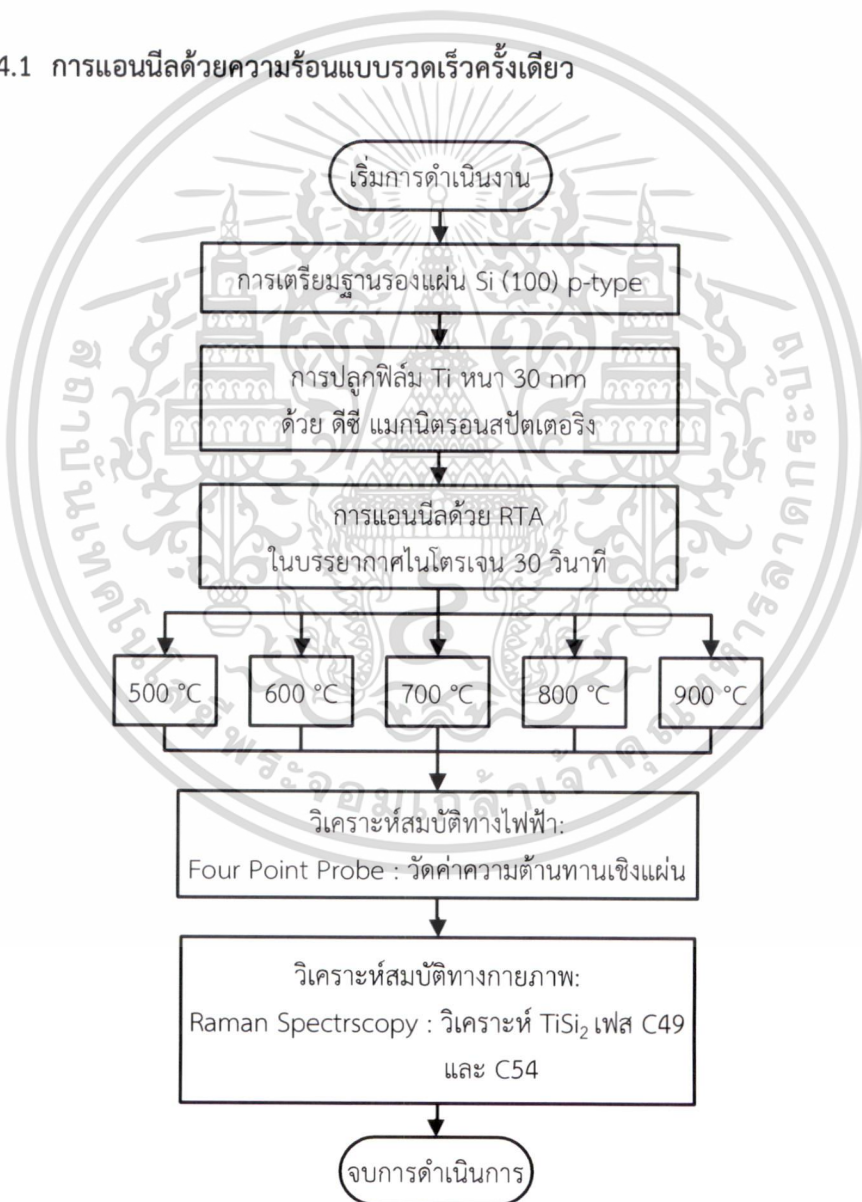
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 การสร้างชั้นป้องกันการแพร่อลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์ม TiN

3.4 การสร้างชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ด้วยกระบวนการซาลิไซด์

3.4.1 การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว



รูปที่ 3.19 แสดงผังงานของการสร้างชั้น TiSi_2 ด้วยกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว

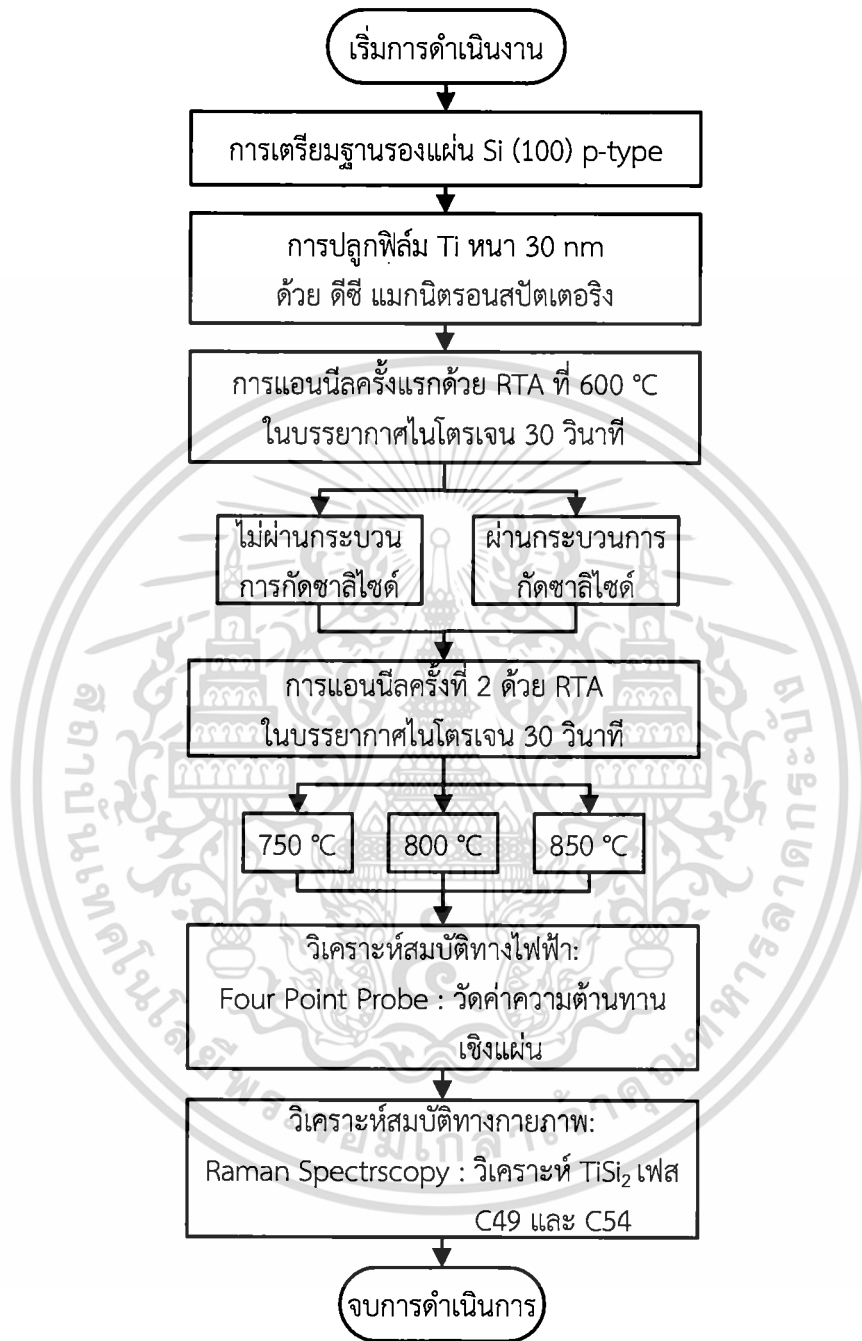
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การกัดเปียกชั้นไทเทเนียมที่ไม่เกิดซิลิไซด์ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์



รูปที่ 3.20 แสดงผังงานของการกัดเปียกชั้นไทเทเนียมที่ไม่เกิดซิลิไซด์ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง



รูปที่ 3.21 แสดงผังงานของการสร้างชั้น TiSi₂ ด้วยกระบวนการซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสร้างโครงสร้างคอร์สปริตจ์เคลวินรีซิสแทนซ์เพื่อวัดความต้านทานรอยสัมผัส

3.5.1 การสร้างรอยสัมผัสที่เตรียมกับฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 3.22 แสดงผังงานของการสร้างโครงสร้างคอร์สปริตจ์เคลวินรีซิสแทนซ์เพื่อวัดความต้านทานรอยสัมผัส

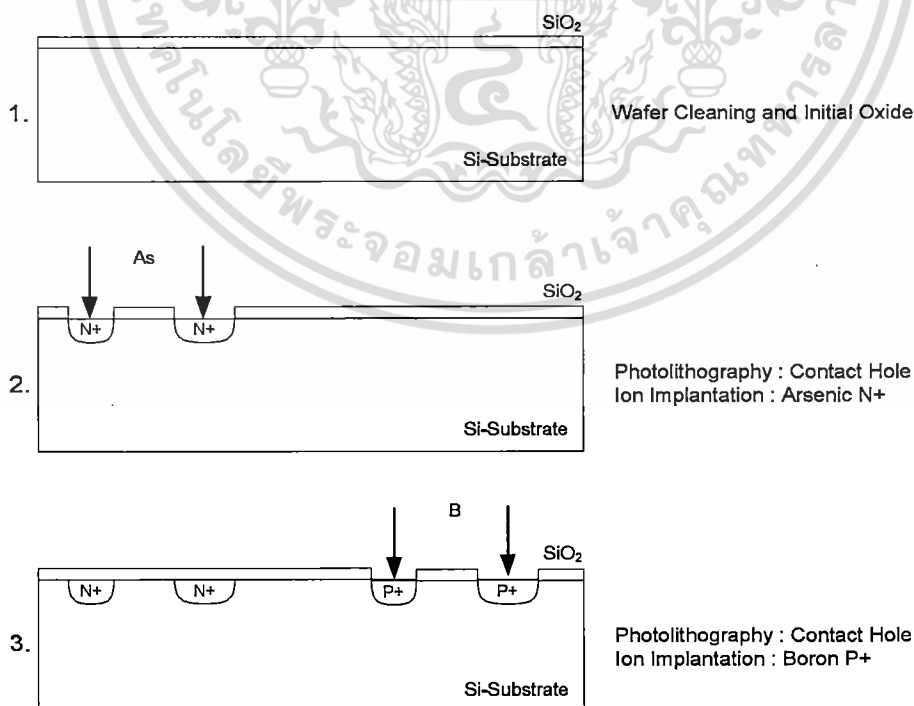
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.1 การเจือสารโดยการยิงฝังประจุ

การยิงฝังประจุ (Ion Implantation) คือ การเจือสารโดยการอาศัยเครื่องจักรมาเพิ่มพลังงานให้กับประจุที่ต้องการเจือ เพื่อเร่งให้ประจุนั้นมีพลังงานสามารถเข้าไปฝังในเนื้อแผ่นซิลิคอนได้ วิธีการยิงฝังประจุ ทำโดยการสร้างประจุไอออนของสารเจือแล้วทำการยิงฝังประจุด้วยพลังงานทางไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องทำภายใต้อุณหภูมิสูง โดยการเลือกใช้น้ำยาไวแสงหรือชั้น SiO_2 เป็นหน้ากากป้องกัน (Mask) การยิงฝังประจุ

ในงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้มีการเจือสารโดยการยิงฝังประจุอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ชนิด P+ โดยการยิงประจุของ Boron ความเข้มข้น (Dose) $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ที่พลังงาน 70 keV
2. ชนิด N+ โดยการยิงประจุของ Arsenic ความเข้มข้น (Dose) $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ที่พลังงาน 100 keV โดยมีขั้นตอนดังนี้
 1. หลังจากทำความสะอาดแผ่นฐานรอง Si (100) p-type แล้ว สร้างชั้น SiO_2 ด้วยวิธี Thermal Oxidation เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันบริเวณที่ไม่ต้องการเจือสาร
 2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีฉายแสงเปิดช่อง Contact Hole บริเวณที่ต้องการเจือสาร ที่ช่องขนาด 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 2.0 และ $5.0 \mu\text{m}^2$ จากนั้นกัดชั้น SiO_2 ด้วย HF ให้เป็นช่องและยิงฝังประจุของ Arsenic ความเข้มข้น (Dose) $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ที่พลังงาน 100 keV เพื่อให้เกิดสารเจือชนิด N+
 3. จากนั้นลอกชั้น SiO_2 ออกด้วย HF แล้วสร้างชั้น SiO_2 ใหม่ ทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเปิดช่อง Contact Hole ขนาดดังขั้นตอนที่สอง จากนั้นกัดชั้น SiO_2 ด้วย HF ให้เป็นช่องและยิงฝังประจุของ Boron ความเข้มข้น (Dose) $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ที่พลังงาน 70 keV เพื่อให้เกิดสารเจือชนิด P+

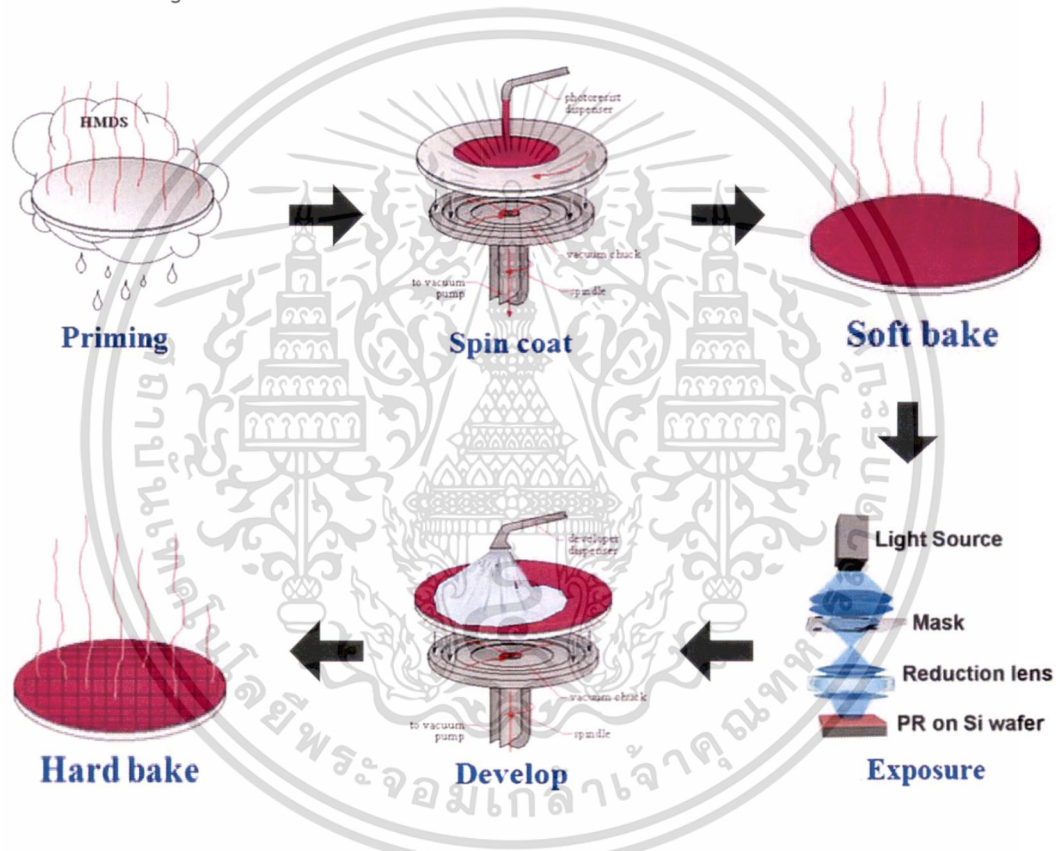


รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการเจือสารด้วยการยิงฝังประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.2 การสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี[18]

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process) เป็นกระบวนการสร้างลวดลาย และการกัดชั้นสารหรือวัสดุใดๆ ในบางส่วนหรือบริเวณที่ต้องการโดยใช้เทคนิคทางแสง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งในการสร้างวงจรรวม โดยจะประกอบด้วยขั้นตอนหลัก คือ การทำความสะอาดผิวชิ้นงาน (Cleaning) การอบชิ้นงานเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของฟิล์มผิว (Vapor Priming) การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง (Photoresist Coating) การอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง ให้แห้ง (Prebake) การฉายแสงเพื่อถ่ายแบบลายวงจรรวม (Exposure) การล้างน้ำยาไวแสง (Develop) การอบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง หลังการล้างลายวงจรรวม (Postbake) และการกัดลายวงจรรวม (Etching) โดยมีขั้นตอนหลักดังนี้



รูปที่ 3.24 แสดงกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography Process)

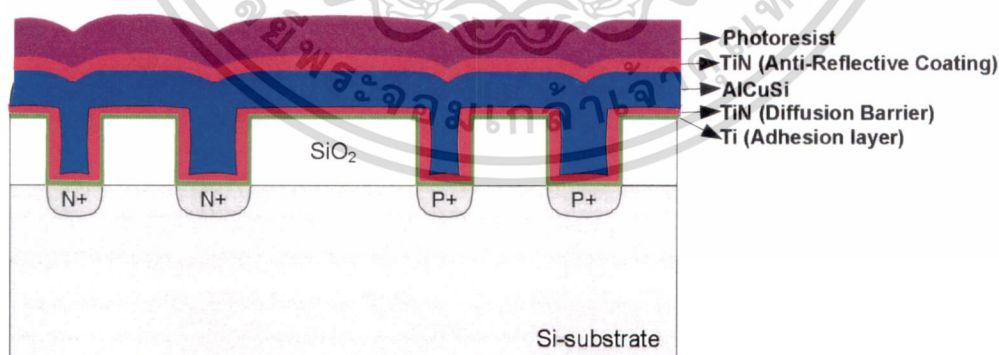
1. การอบไล่ความชื้น นำแผ่นฐานรองซิลิคอนที่จะเคลือบน้ำยาไวแสง มาทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นจะทำการเคลือบสารเคมี Hexamethyl-disilazane (HMDS) ที่อุณหภูมิ 80 °C นาน 80 วินาที เพื่อเพิ่มการยึดเกาะ เนื่องจากโดยทั่วไปน้ำยาไวแสงจะยึดเกาะกับวัสดุที่มีผิวมันได้ไม่ดี จึงอาจเกิดการหลุดร่อนของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงในระหว่างกระบวนการถ่ายแบบ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้สารเคมี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะระหว่างน้ำยาไวแสงกับผิวชิ้นงาน โดยโมเลกุลของ HMDS จะเข้าไปแทนที่โมเลกุลของน้ำ หลังจากนั้นลดอุณหภูมิมาที่ 23 °C และคงที่ไว้นาน 60 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเคลือบชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง มีอยู่หลายวิธี เช่น การหมุนเคลือบ การเคลือบด้วยสเปรย์ และการเคลือบด้วยลูกกลิ้ง เป็นต้น แต่วิธีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือ วิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) โดยใช้เครื่อง Spinner เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก ประหยัดเวลา และสามารถควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม ให้มีความสม่ำเสมอได้

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photoresist) เมื่อโดนแสงแล้วจะสามารถถูกล้างออกด้วยสารเคมีสำหรับล้างน้ำยาไวแสง โดยจะทำการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spin Coater) และมีการสร้างชั้น Anti-Reflective Coating (ARC) ด้วย TiN ก่อนการเคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่มีชั้นฟิล์มที่สะท้อนแสงได้ติดอยู่บนผิวหน้า โดยชั้น ARC จะช่วยลดการสะท้อนของแสงยูวีในขั้นตอนการฉายแสง ทำให้ได้ลวดลายวงจรที่สมบูรณ์ไม่ผิดเพี้ยนจากเดิม

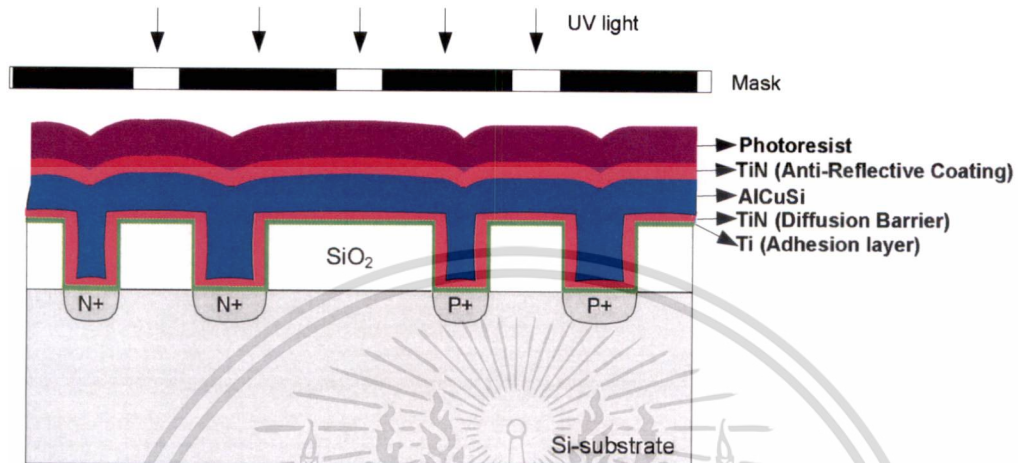
ในส่วนของการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบจะต้องมีการทดลอง เพื่อหาค่าอัตราเร็วรอบที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงตามที่ต้องการ โดยจะทำการเคลือบด้วยความเร็วรอบ 2 ระดับ เริ่มจากหยดน้ำยาไวแสงลงบนฐานรองรับ ทำการเคลือบด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ ประมาณ 500 รอบต่อนาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงกระจายหรือเกลี่ยให้ทั่วแผ่นฐานรองรับและจะทำการหมุนเคลือบด้วยความเร็วสูงประมาณ 3000 รอบต่อนาที เพื่อที่จะทำให้ฟิล์มนั้นมีความเรียบและมีความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งแผ่น ดังนั้นปริมาณสารไวแสงที่หยดลงไป และความเร็วยุโรปของการเคลือบจะเป็นตัวแปรที่ต้องทำการทดลองและบันทึกค่าไว้เพื่อให้สามารถกลับมาทำให้ได้เหมือนเดิมในครั้งถัดไป ซึ่งโครงสร้างของฐานรองรับที่มีการเคลือบน้ำยาไวแสงจะแสดงดังรูปที่ 3.25 หลังจากเคลือบเสร็จจะทำการอบ (Soft Bake) ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 100 วินาที เพื่อทำการอบแห้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้ตัวทำละลาย (Solvent) ในน้ำยาไวแสงระเหยออกไป ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสง มีความแห้ง แข็งตัวและคงรูปอยู่ได้เมื่อผ่านกระบวนการฉายแสง ซึ่งจะช่วยให้การยึดเกาะระหว่างผิวของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงกับผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการทางความร้อน เพื่อลดความเครียด (Stress) ที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์ม โดยมีปัจจัยที่ต้องควบคุมคืออุณหภูมิและเวลา



รูปที่ 3.25 แสดงโครงสร้างของการเคลือบน้ำยาไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ

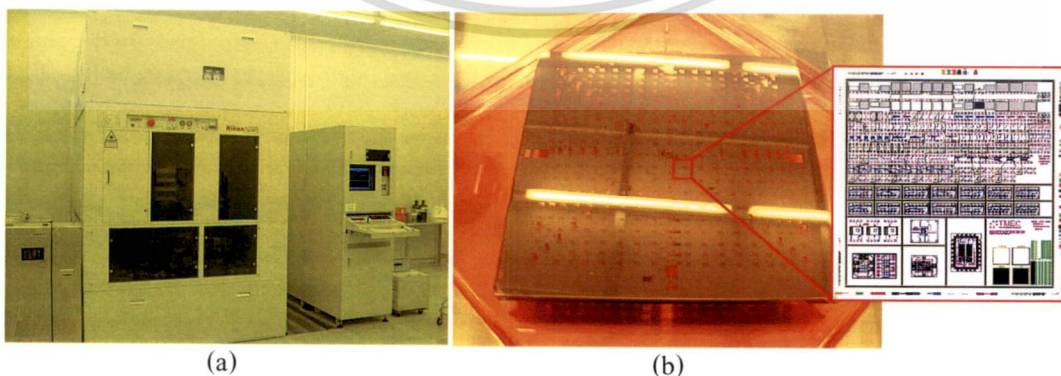
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การฉายแสงยูวีเพื่อถ่ายแบบลายวงจร โดยจะทำการฉายแสงยูวีผ่านกระจกต้นแบบ (mask) ซึ่งเป็นควอตซ์ที่มีลายวงจรเกิดจากการกัดโครเมียมออกไซด์ ที่ได้ทำการออกแบบไว้ ด้วยเครื่อง Stepper ลักษณะโครงสร้างของการฉายแสงจะแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.26 แสดงลักษณะของการฉายแสงยูวีผ่านกระจกต้นแบบที่ทำการออกแบบไว้

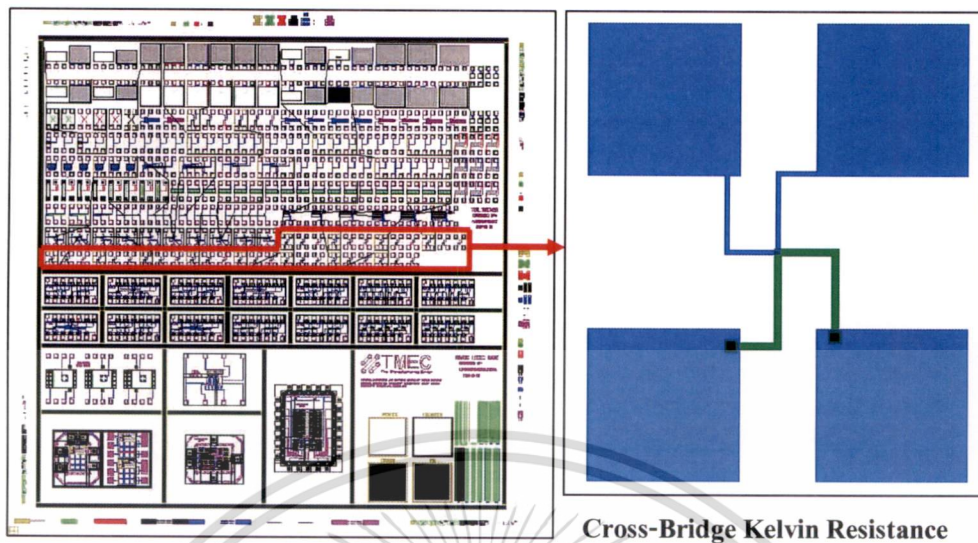
การถ่ายแบบลายวงจรมันจะฉายแสงยูวีผ่านกระจกต้นแบบ ซึ่งมีลายวงจรของอุปกรณ์ ซีมอส ของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่อง Stepper โดยมีลวดลายโครงสร้างของ Cross-Bridge Kelvin Resistance ที่ใช้ในการวัดความต้านทานสัมผัส เป็นส่วนประกอบหนึ่งของลายวงจรซีมอส ดังในรูปที่ 3.27 (b) สำหรับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงก็จะต้องมีการทดลองหาค่าที่เหมาะสมสำหรับความหนาของชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ชั้นน้ำยาไวแสงจะมีความหนาประมาณ 1.0 ไมโครเมตร และจะใช้เวลาในการฉายแสงประมาณ 20 วินาที (เครื่องฉายแสงจะมีความเข้มประมาณ 10.6 mW/cm^2 ซึ่งจะคิดเป็น ความเข้มต่อพื้นที่กับเวลา (Dose) ก็จะใช้ความเข้มคูณกับเวลาที่ใช้ในการฉายแสง) โดยสามารถกำหนดเวลาได้จากตัวเครื่อง



รูปที่ 3.27 แสดงระบบที่ใช้ในการฉายแสงโดย (a) เครื่อง Stepper สำหรับถ่ายแบบลายวงจร,

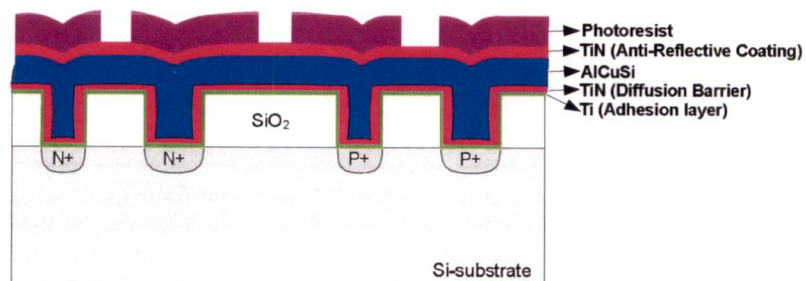
(b) กระจกต้นแบบของซีมอสซึ่งมีโครงสร้างคอร์สบริดจเคลวินรีซิสแทนซ์อยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 ลายวงจรโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์ในวงจรซีมอสของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ขนาด Contact Hole 0.6, 0.8, 1.0, 2.0 และ $5.0 \mu\text{m}^2$

4. การล้างน้ำยาไวแสง เมื่อผ่านขั้นตอนการฉายแสงมาแล้ว ก่อนที่จะทำการล้างน้ำยาไวแสงจะต้องทำการอบที่อุณหภูมิ 110°C นาน 60 วินาที และลดอุณหภูมิลงมาอยู่ที่ 23°C เป็นเวลา 60 วินาที จึงจะเริ่มใช้น้ำยา (developer) ในการล้างน้ำยาไวแสงออกจะมีตัวแปรที่ต้องควบคุมก็คือ เวลาที่ใช้ และชนิดของน้ำยา โดยจากรูปที่ 3.29 จะเห็นได้ว่าน้ำยาไวแสงในส่วนที่โดนแสง (ลวดลายของโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์) จะถูกล้างออกด้วยน้ำยา Developer จะเหลือเฉพาะบริเวณที่ไม่โดนแสง ทิ้งไว้หลังจากนั้นทำการอบเป็นครั้งสุดท้ายที่อุณหภูมิ 120°C นาน 80 วินาที เนื่องจากภายหลังจากกระบวนการล้างลายวงจร ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เกิดขึ้นลายวงจรจะมีสมบัติอ่อนนุ่ม ไม่สามารถทนทานต่อการกัดลาย (Etching) ได้ และมีความชื้นเกิดขึ้นในชั้นฟิล์ม จึงต้องทำการอบชั้นฟิล์ม เพื่อไล่ความชื้นและก่อให้เกิดการเชื่อมพันธะกันระหว่างโมเลกุล (Cross Linked) ของน้ำยาไวแสง ทำให้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการกัดลายวงจรได้ โดยเงื่อนไขที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิและเวลา หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้ได้ลวดลายของน้ำยาไวแสงบนฐานรองรับที่เตรียมไว้ ถึงขั้นตอนนี้เป็นการเสร็จสิ้นในส่วนของการกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

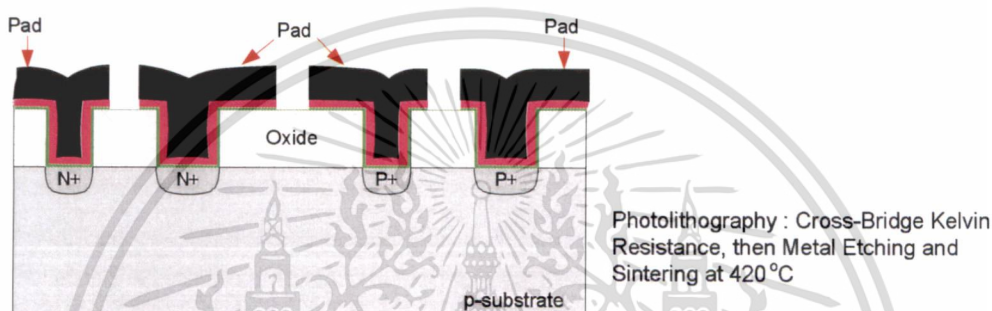


รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะโครงสร้างลวดลายของน้ำยาไวแสงจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

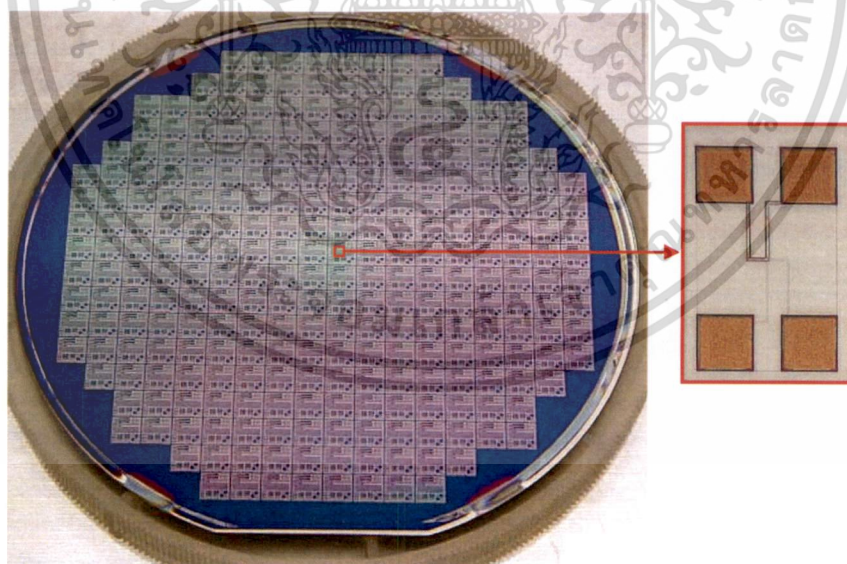
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.3 การกัดลวดลาย

กระบวนการกัดแบบแห้ง (Dry Etching) เป็นการกัดด้วยไอออนแบบรีแอกทีฟ (Reactive Ion Etching : RIE) จะเป็นกระบวนการที่ผสมผสานหลักการกัดด้วยพลาสมาและลำไอออนภายใต้ความดัน 1-100 mTorr ซึ่งความดันระดับดังกล่าว ระยะเดินทางอิสระเฉลี่ยของไอออนของพลาสมาจะมีค่าค่อนข้างมาก และสามารถเร่งไอออนของพลาสมาให้ชนผิวฟิล์มเพื่อการกัดด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า โดยการกัดลวดลายฟิล์มอัลลอย AlCuSi จะใช้พลาสมาของกาซคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ในกรณีการกัดลวดลายฟิล์ม Ti และ TiN จะใช้พลาสมาของกาซคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF_4) ซึ่งมีน้ำยาไวแสงเป็นหน้ากักป้องกันบริเวณที่ไม่ต้องการถูกกัดออก



รูปที่ 3.30 แสดงลักษณะโครงสร้างลวดลายหลังจากกระบวนการกัดแบบแห้งด้วยไอออน



รูปที่ 3.31 แสดงชิ้นงานโครงสร้างคอร์สปริจ์เคลวินรีซิสแทนซ์บนวงจรมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

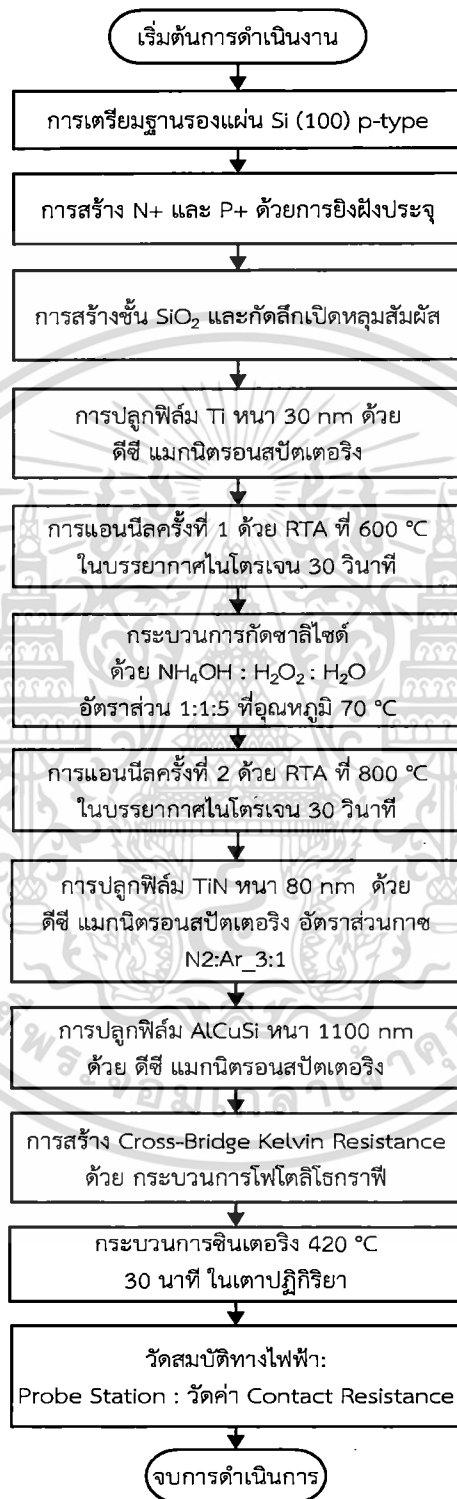
3.5.2 การสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาไลซ์ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว



รูปที่ 3.32 แสดงผังงานของการสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาไลซ์ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการขงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาไลซ์ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง



รูปที่ 3.33 แสดงผังงานของการสร้างรอยสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาไลซ์ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม

สามารถตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางกายภาพของฟิล์มบาง TiN ที่เตรียมได้ โดยใช้เครื่องจักรชนิดต่าง ๆ ดังนี้ คือ

3.6.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเลื่อนกราด
ด้วยเครื่องจักร FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) รุ่น S4700 ของบริษัท Hitachi สำหรับตรวจสอบลักษณะพื้นผิว และ ความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.6.2 การตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ด้วยเครื่องจักร X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker สำหรับตรวจสอบ ชนิด และ ความเป็นผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้

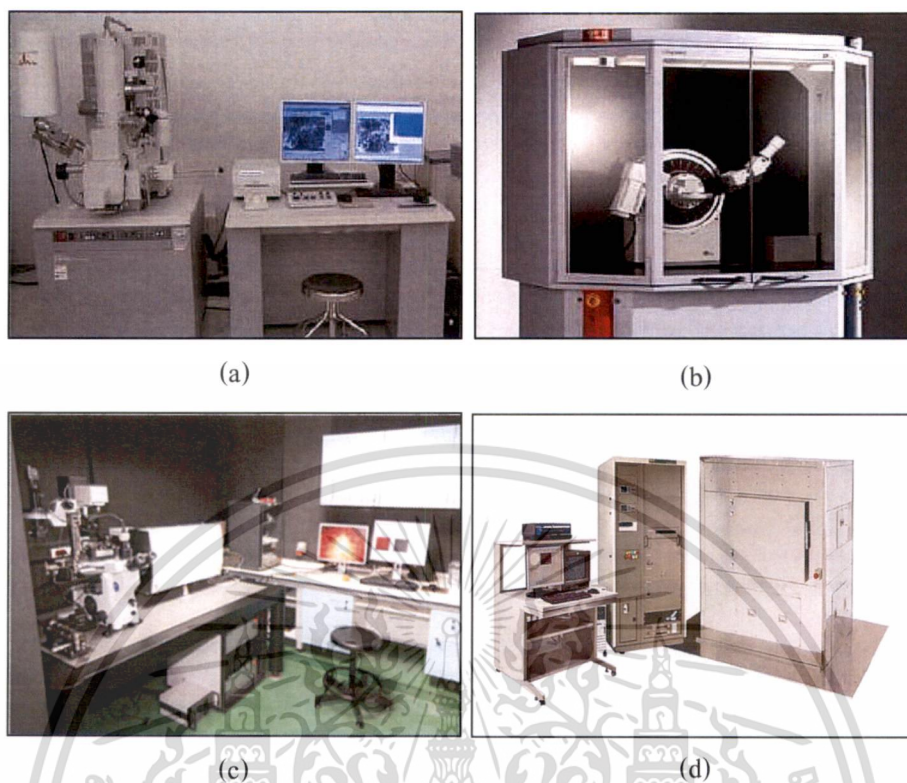
3.6.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี
ด้วยเครื่องจักร Raman Spectroscopy รุ่น NTEGRA Spectra บริษัท NT_MDT สำหรับตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.6.4 การตรวจสอบองค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคไอเจืออิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี
ด้วยเครื่องจักร AES (Auger Electron Spectroscopy) รุ่น PHI 700 Auger Nanoprobe ของบริษัท ULVAC สำหรับตรวจสอบองค์ประกอบธาตุนบนพื้นผิว ในเนื้อฟิล์มบางที่เตรียมได้ และ Depth Profile เพื่อทดสอบการแพร่ของโลหะผสม AlCuSi ได้

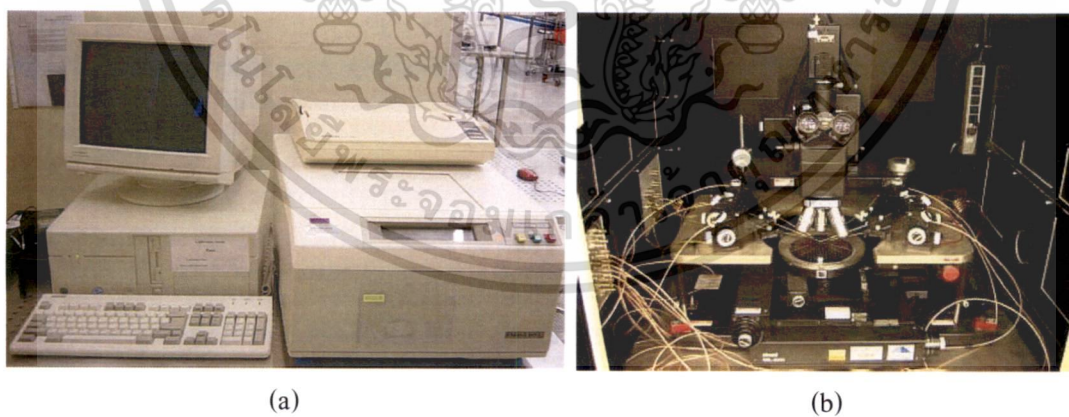
3.6.5 การวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ
ด้วยเครื่อง Four Point Probe รุ่น RS30 ของบริษัท Omnimap สำหรับวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบางที่เตรียมได้

3.6.6 การวัดความต้านทานสัมผัสด้วยโพรบสเตชัน
ด้วยเครื่อง Probe Station ของบริษัท Agilent รุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer ใช้ร่วมกับโปรแกรม Easy EXPERT เพื่อวัดค่าความต้านทานสัมผัส โดยการป้อนกระแสตรง จาก 100 μ A ถึง 100 mA โดยขั้นตอนและการตั้งค่าการวัดสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.34 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ทางกายภาพ (a) FESEM, (b) XRD, (c) Raman Spectroscopy และ (d) AES



รูปที่ 3.35 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ทางไฟฟ้า (a) Four Point Probe และ (b) Probe Station

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

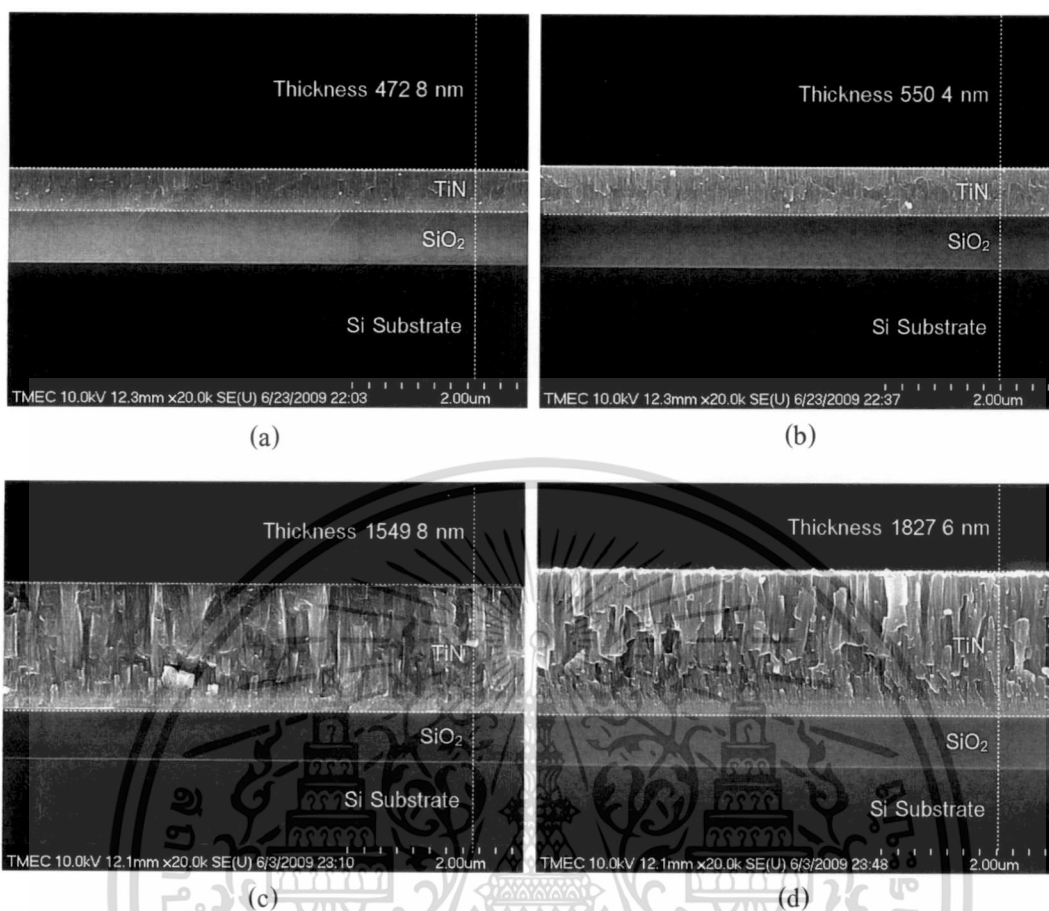
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นการสร้างฟิล์มบาง Nanocrystal-TiN ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่มีการควบคุมการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อนำมาสร้างเป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ที่ใช้ในการเชื่อมต่อวงจรภายในของอุปกรณ์ซีมอสได้อย่างเหมาะสม และส่วนที่สองเป็นการสร้างชั้น $TiSi_2$ ด้วยกระบวนการซาไลไซต์ เพื่อลดค่าต้านทานสัมผัสระหว่างชั้น Ti กับฐานรอง Si (100) p-type โดยมีรายละเอียดการทดลองดังที่กล่าวในบทที่ 3

4.1 ผลการตรวจสอบสมบัติฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ

4.1.1 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเวลาคงที่

ทำการปลูกฟิล์ม TiN ในระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยมีเป้าโลหะเป็น Ti ในบรรยากาศไนโตรเจนอย่างเดียว และบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ที่ความดันคงที่ 4 mbar ซึ่งกำหนดเวลาการปลูกคงที่ 300 วินาที โดยมีฐานรองเป็น Si (100) p-type ที่มีชั้น SiO_2 หนา 650 nm และมีชั้นฟิล์มบาง Ti หนา 10 nm เป็นชั้นยึดติดระหว่างชั้น SiO_2 และชั้น TiN หลังจากปลูกฟิล์ม TiN ครบทั้ง 4 เงื่อนไข นำไปวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยการวัดการกระเจิงแบบรามาน การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยไอजेเรอิลิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี และวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยโพรพอยท์โพรบ



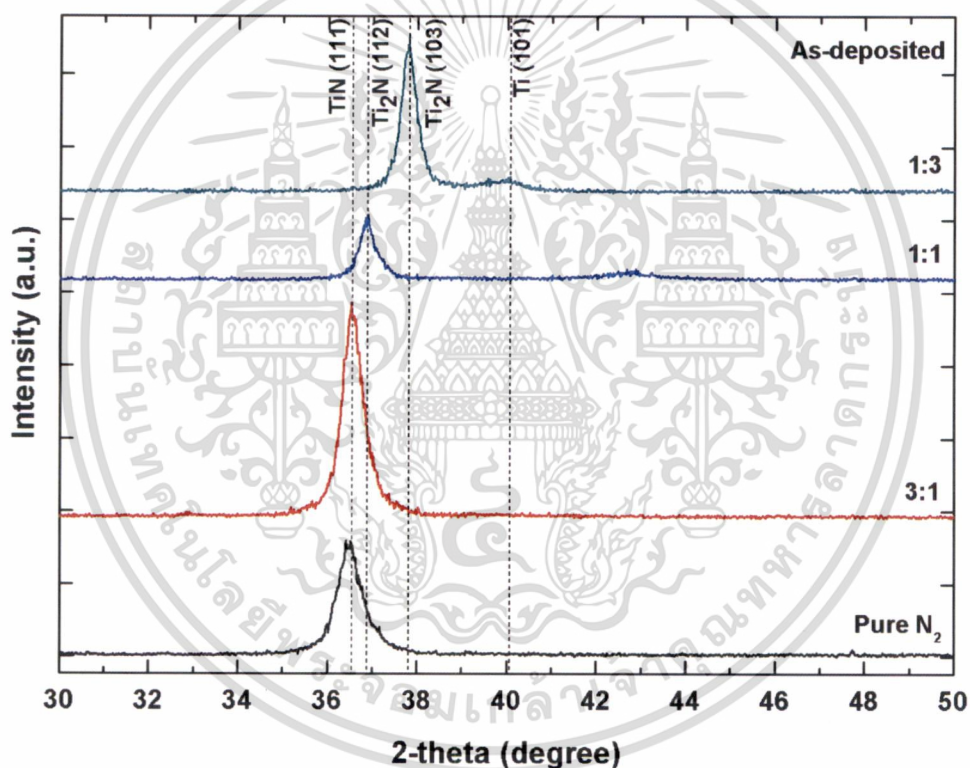
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่เวลาการปลูกคงที่ 300 วินาที

จากรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสเปดเตอริง ในบรรยากาศไนโตรเจนอย่างเดียว ในบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ซึ่งควบคุมด้วยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนที่ความดันคงที่ 4 mbar โดยใช้เวลาการปลูกฟิล์ม 300 วินาทีเท่าๆ กัน และไม่ผ่านกระบวนการซินเตอริง พบว่าความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น และวัดความหนาฟิล์มได้ 472.8, 550.4, 1549.8 และ 1827.6 nm ตามลำดับ โดยนำความหนาฟิล์มที่วัดได้นำมาคำนวณหาอัตราการปลูกฟิล์ม (Growth Rate) ตามสมการ $Growth Rate = Thickness / Growth Time$ จะได้ผลคำนวณดังในตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราการปล่อยก๊าซอาร์กอนเข้าระบบเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการปลูกฟิล์มสูงขึ้น (High Growth Rate) ในเวลาการปลูกที่คงที่ โดยอัตราการปลูกที่คำนวณได้จะถูกนำไปใช้กำหนดเวลา (Growth Time) การปลูกฟิล์ม TiN ที่มีความหนา 80 nm เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของโลหะผสม AlCuSi ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน N ₂ :Ar	อัตราการไหล (sccm)	เวลาการปลูก (second)	ความหนา (nm)	อัตราการปลูกฟิล์ม (nm/second)
Pure N ₂	40/0	300	472.8	1.576
3:1	27/9	300	550.4	1.835
1:1	21/21	300	1549.8	5.166
1:3	8/24	300	1827.6	6.092

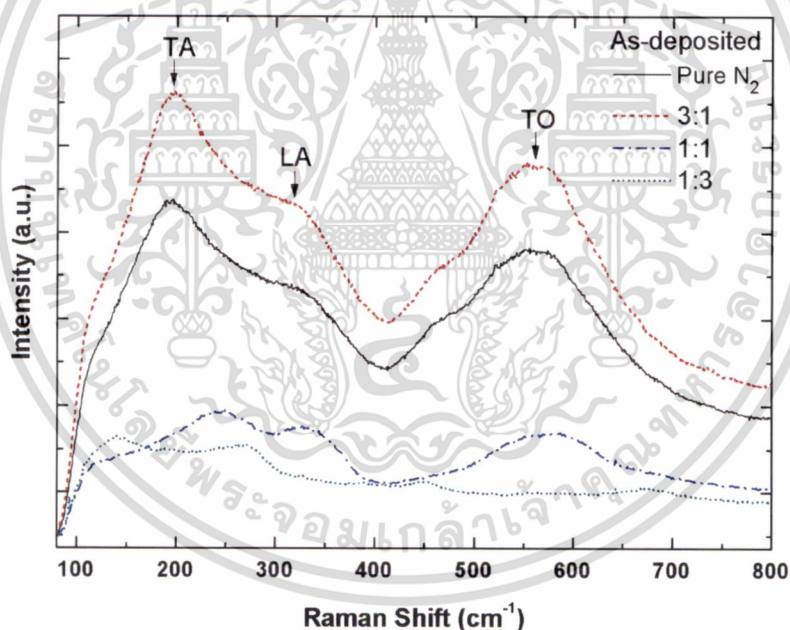
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าอัตราการปลูกฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง ในบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนในอัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียวกัน, 3:1, 1:1 และ 1:3 ตามลำดับ โดยไม่ผ่านกระบวนการซินเทอริงหลังการปลูกฟิล์ม พบว่าเงื่อนไขก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียวกันและบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนในอัตราส่วน 3:1 มีความเป็นผลึกของ TiN (103) โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 2-theta เท่ากับ 36.68 องศา และมีโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered Cubic (อ้างอิงจาก JCPDS : PDF#870633) กรณีเงื่อนไข 1:1 มีความเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกของ Ti_2N (112) โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 2-theta เท่ากับ 36.81 องศา ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ Body-center Cubic (อ้างอิงจาก JCPDS : PDF#771893) และกรณีเงื่อนไข 1:3 มีความเป็นผลึกของ Ti_2N (103) มีโครงสร้างผลึกแบบ Body-center Cubic และ Ti (101) มีโครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal โดยมียอดการเลี้ยวเบนที่มุม 2-theta เท่ากับ 37.56 องศา และ 40.17 องศา ตามลำดับ (อ้างอิงจาก PDF#771893 สำหรับ Ti_2N และ PDF#441294 สำหรับ Ti) นั้นหมายถึงอัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนกับก๊าซอาร์กอนมีผลต่อการเกิดผลึกแบบต่างๆ เมื่ออัตราส่วนของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นฟิล์ม TiN ที่ได้จะมีแนวโน้มเข้าสู่เฟสของ Ti-rich มากขึ้น กรณีเงื่อนไข 3:1 มีความเป็นผลึก TiN (111) ที่สมบูรณ์มากกว่าเงื่อนไขก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว เมื่อพิจารณาจากความเข้มที่สูงมากกว่า เนื่องจากไอออนของก๊าซอาร์กอนสามารถ Bombardment เป่า Ti ได้ดีกว่าไอออนของก๊าซไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว (ยิลด์ของการสปัตเตอริงสูงขึ้น)[18] ทำให้ได้ไอออนของ Ti เพิ่มขึ้นที่จะทำปฏิกิริยากับก๊าซไวปฏิกิริยาไนโตรเจนเกิดผลึก TiN (111) ได้มากขึ้น ส่วนเงื่อนไข 1:1 และ 1:3 เกิดความเป็นผลึก Ti_2N (112), Ti_2N (103) และ Ti (101) จะมีแนวโน้มเข้าสู่เฟสของ Ti-rich มากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณไอออนของก๊าซอาร์กอนที่ Bombardment เป่า Ti มากขึ้นที่ทำให้ได้ไอออนของ Ti เพิ่มขึ้นที่จะทำปฏิกิริยา แต่มีปริมาณก๊าซไวปฏิกิริยาไนโตรเจนลดลง

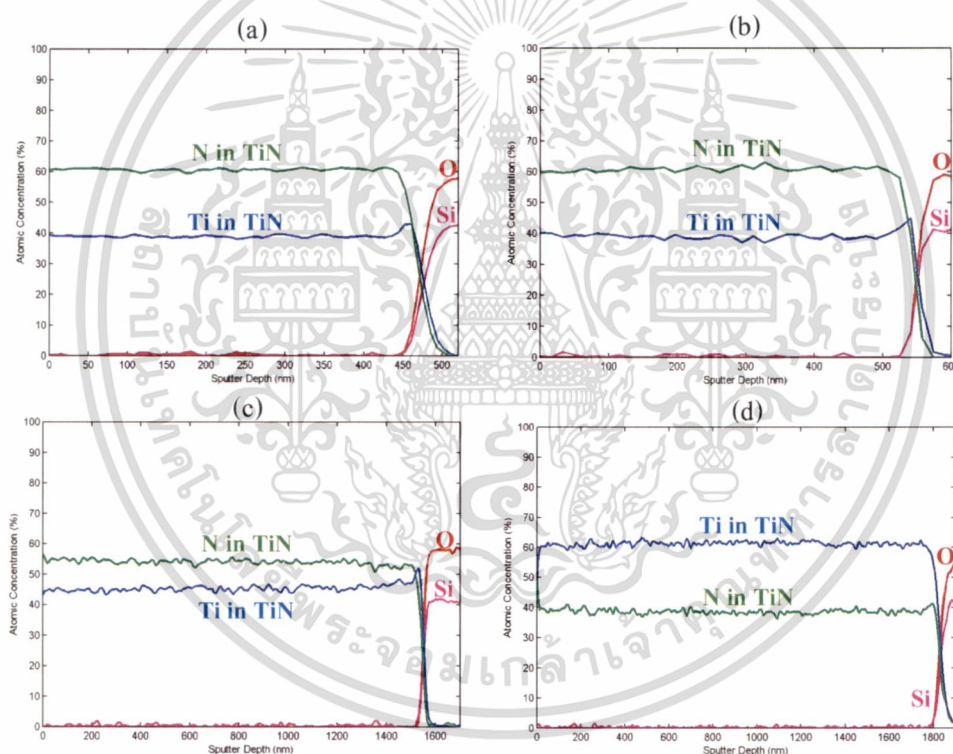


รูปที่ 4.3 รามานสเปกตรัมของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการวัดการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม TiN ปรากฏรามานสเปกตรัมที่ Raman Shift ตำแหน่ง 193, 330 และ 565 cm^{-1} ซึ่งแสดงว่าเป็น TiN โดยมี 2 โหมดความสัมพันธ์คือ 1) Transverse Acoustic (TA) และ Longitudinal Acoustic (LA) อยู่ในช่วง 150-350 cm^{-1} บ่งบอกความสัมพันธ์ของการสั่นของอะตอมไทเทเนียมที่ใกล้ชิดกับช่องว่างอะตอมไนโตรเจน 2) Transverse Optical (TO) อยู่ในช่วง 400-650 cm^{-1} บ่งบอกความสัมพันธ์ของการสั่นของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมไนโตรเจน [23-25] เมื่อพิจารณาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มกรณีไนโตรเจนอย่างเดียวกับเงื่อนไข 3:1 พบว่าปริมาณสเปกตรัมมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งสองโหมด แสดงว่าเป็น TiN แบบเดียวกัน แต่กรณี 3:1 มีความเข้มข้นของปริมาณสเปกตรัมสูงกว่า แสดงถึงปริมาณการเกิด TiN มากกว่า จึงทำส่งผลให้เกิดการสั่นของโมเลกุล TiN มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากกว่าเงื่อนไขการปลูกด้วยก๊าซไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว ส่วนกรณี 1:1 พบว่าความเข้มข้นของทั้งสองโหมดลดลง แสดงถึงปริมาณการเกิด TiN ที่ลดลง และมีการเลื่อนของปริมาณสเปกตรัมไปทางความถี่ที่สูงขึ้น แสดงถึงปริมาณไนโตรเจนใน TiN มีปริมาณลดลง (Deficiency) [26] และเงื่อนไขสุดท้าย 1:3 ปรากฏปริมาณสเปกตรัมที่แตกต่างไปจากเงื่อนไขอื่นและมีความเข้มข้นต่ำ แสดงถึงการเกิด TiN ได้ไม่เต็มที่ หรือเกิดพันธะที่แตกต่างออกไป โดยพบปริมาณสเปกตรัมของ Ti ที่ Raman Shift ตำแหน่ง 138 cm^{-1} [27] แสดงถึงการเกิด TiN ที่มีปริมาณ Ti เพิ่มขึ้น (Ti-rich) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเป็นผลึกแบบ Ti_2N (103) และ Ti (101)

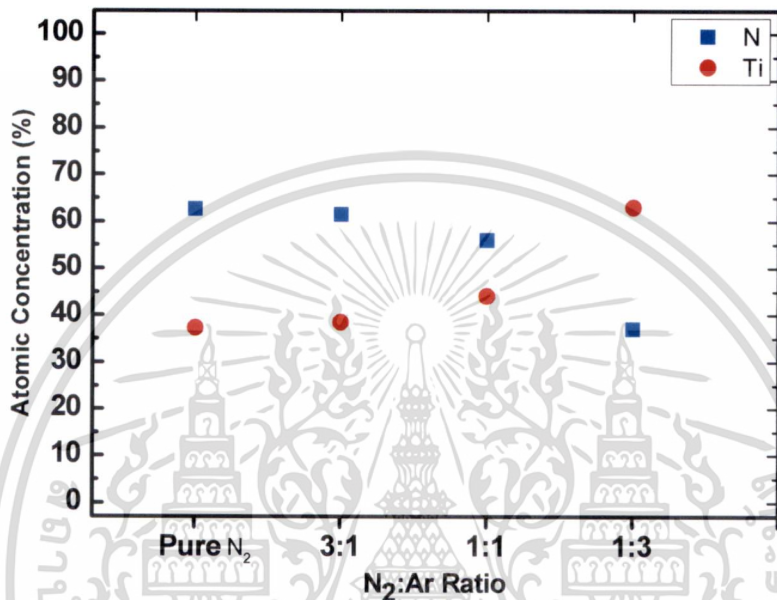


รูปที่ 4.4 กราฟ Depth Profile ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคไอเอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี จะมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณของไทเทเนียมและไนโตรเจนในฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ โดยการวิเคราะห์ในเนื้อฟิล์มซึ่งเกิดจากการกัดชั้นฟิล์มด้วยไอออนของก๊าซเฉื่อยอาร์กอน ทุกๆ 30 วินาที และทำการวัดปริมาณ 300 วินาที ดังในรูปที่ 4.4 กราฟ Depth Profile พบว่าที่เงื่อนไขการปลูกด้วยก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, 3:1 และ 1:1 มีปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทเนียมและไนโตรเจนในเนื้อฟิล์มสม่ำเสมอ โดยมีสัดส่วนของปริมาณไนโตรเจนที่มากกว่าไทเทเนียม และที่เงื่อนไขสุดท้าย 1:3 พบสัดส่วนปริมาณไทเทเนียมเท่านั้นมากกว่าไนโตรเจน โดยปริมาณไทเทเนียมในเนื้อฟิล์มจะเพิ่มขึ้นแปรผันตามอัตราส่วนก๊าซอาร์กอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่า 37.3, 38.5, 44.0 และ 63.0 at.% ตามลำดับ ดังในรูปที่ 4.5 แสดงถึงการเกิด TiN ที่มีเฟสเป็น Ti-rich มากขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลปริมาณไทเทเนียมและไนโตรเจนของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ

อัตราส่วน N ₂ :Ar	ความหนา (nm)	ความต้านทานเชิง แผ่นเฉลี่ย 49 ตำแหน่ง (Ω /square)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (%)	Uniformity (%)	สภาพต้านทาน ($\mu\Omega$.cm)
Pure N ₂	472.8	2.790	0.080	2.861	131.91
3:1	550.4	2.322	0.110	4.701	127.80
1:1	1549.8	1.109	0.140	12.577	171.87
1:3	1827.6	1.163	0.080	6.886	212.54

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ยด้วยโพรมิเตอร์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม TiN ด้วยโพร์พอยท์โพรบจำนวน 49 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยความต้านทานเชิงแผ่นเพื่อนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานของฟิล์ม TiN ในแต่ละเงื่อนไข ตามสมการที่ 4.1 เนื่องจากค่าความต้านทานเชิงแผ่นแปรผันตามความหนาของฟิล์ม ดังนั้นจึงต้องนำมาคำนวณเป็นค่าสภาพต้านทานซึ่งไม่ขึ้นกับความหนาของฟิล์มและมีค่าจำเพาะของแต่ละวัสดุ จากตารางที่ 4.2 พบว่าที่เงื่อนไขการปลูกฟิล์มด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ 3:1 มีค่าสภาพต้านทานต่ำที่สุด

$$\rho = R_s t \quad (4.1)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทาน (Resistivity) หน่วย $\Omega \cdot \text{cm}$

R_s คือ ความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet Resistance) หน่วย Ω/square

t คือ ความหนาของฟิล์ม (Film Thickness) หน่วย nm

โดยที่ค่า Uniformity (%) ของความต้านทานเชิงแผ่นที่ทำการวัด 49 ตำแหน่ง สามารถคำนวณได้จากสมการ 4.2

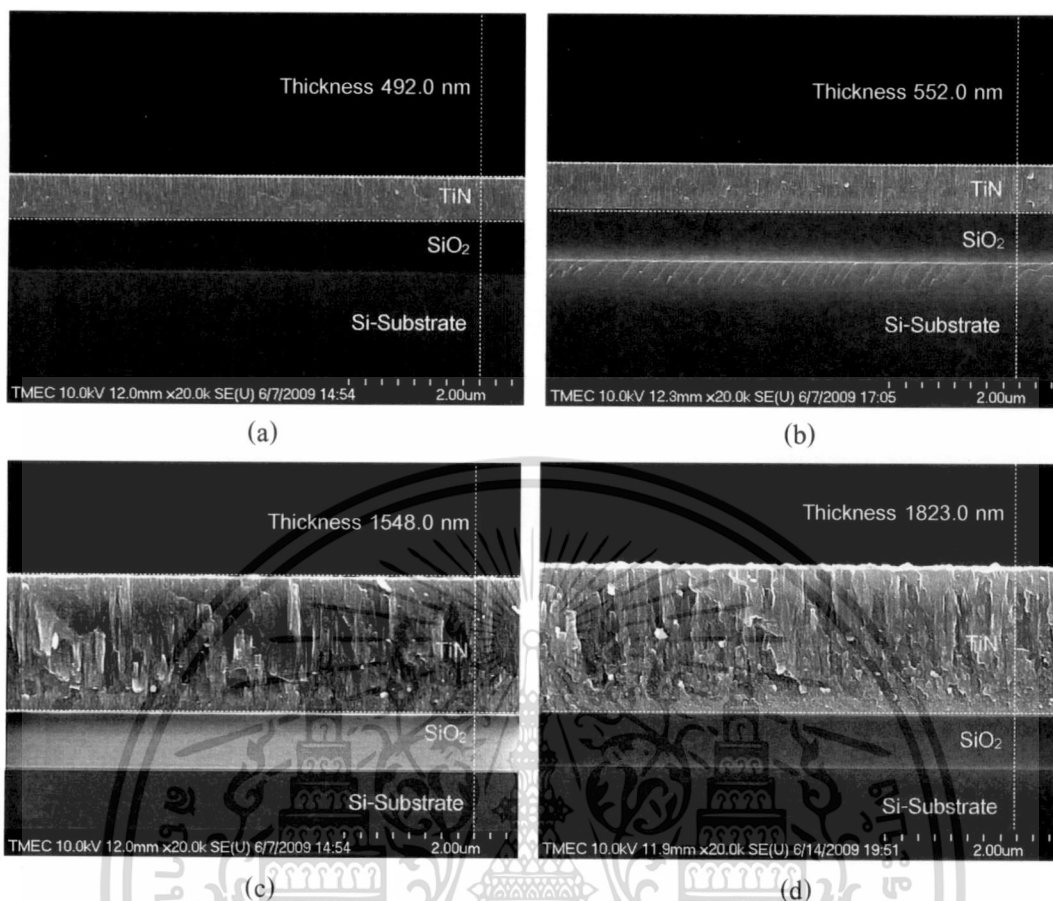
$$\text{Uniformity (\%)} = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100 \quad (4.2)$$

เมื่อ SD คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

\bar{X} คือ ค่าเฉลี่ยของความต้านทานเชิงแผ่น 49 ตำแหน่ง

4.1.2 ผลการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์ที่ปลูกด้วยเวลาคงที่หลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิคงที่

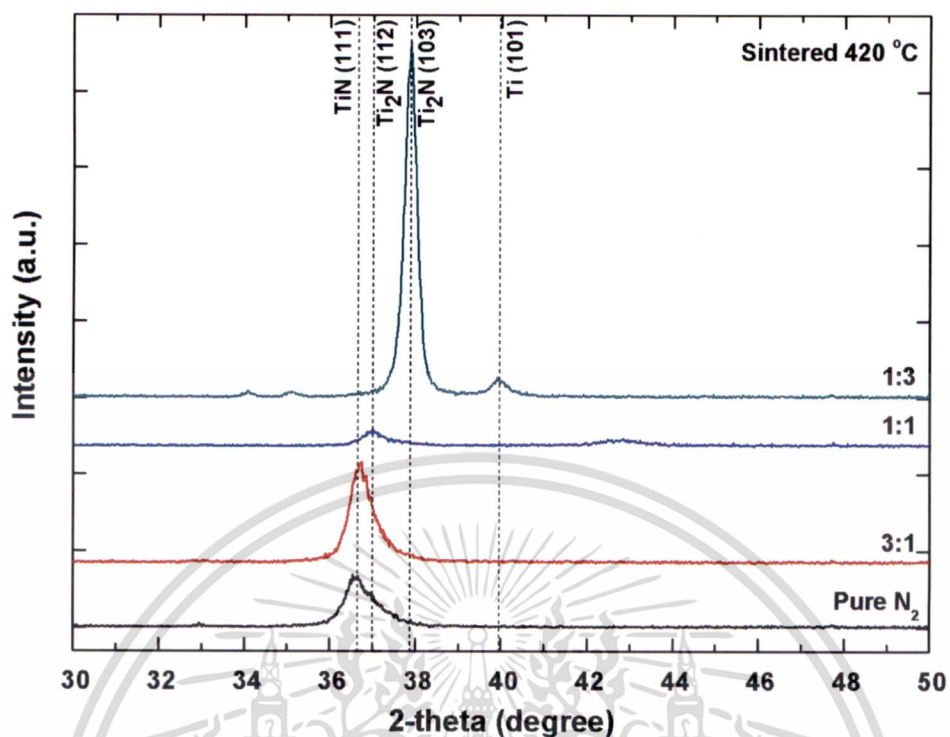
ทำการปลูกฟิล์ม TiN ในระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยมีเป้าเป็นโลหะ Ti ในบรรยากาศไนโตรเจนอย่างเดียว และบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ที่ความดันคงที่ 4 mbar โดยฐานรองเป็นแผ่น Si (100) p-type ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 650 nm และมีชั้นฟิล์มบาง Ti หนา 10 nm เป็นชั้นยึดติดระหว่างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และชั้น TiN ซึ่งกำหนดเวลาการปลูกคงที่ 300 วินาที หลังจากปลูกฟิล์ม TiN ครบทั้ง 4 เงื่อนไข นำไปผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 420 °C นาน 30 นาที ด้วยเตาปฏิริยาในบรรยากาศไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน จากนั้นนำไปวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างด้วยการวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยการวัดการกระเจิงแบบรามาน และวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยโพร์พอยท์โพรบ



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วย อัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่เวลาการปลูกคงที่ 300 วินาทีและผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่ 420 °C

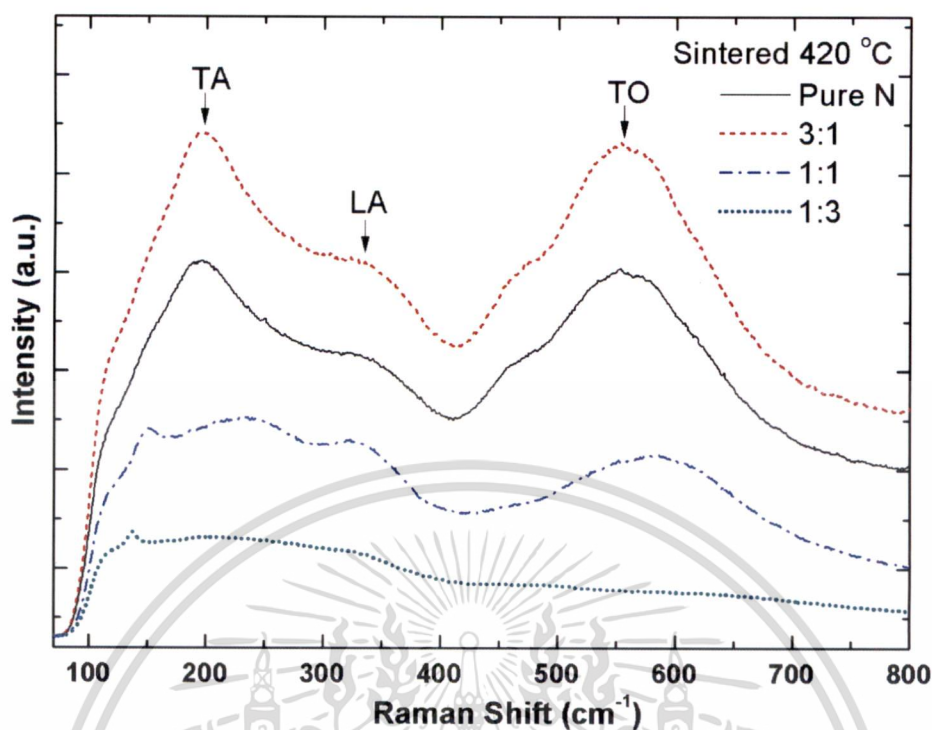
จากรูป 4.6 แสดงภาคตัดขวางของฟิล์ม TiN ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ซึ่งมีลักษณะเป็นคอลัมน์ (Columnar) สำหรับทุกเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม โดยวัดความหนาฟิล์มที่ ปลูกด้วยก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียวได้ 492.0 nm ส่วนเงื่อนไขการปลูกด้วยอัตราการผลิตก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนที่ 3:1, 1:1 และ 1:3 วัดความหนาได้ 552.0, 1548.0 และ 1823.0 nm ตามลำดับ ซึ่งความหนาของฟิล์ม TiN ก่อนและหลังกระบวนการซินเตอร์ริงมีความหนาใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการผลิตก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ และผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่ 420 °C

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนในอัตราส่วนก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, 3:1, 1:1 และ 1:3 ตามลำดับ แล้วผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่ 420 °C นาน 30 นาที พบว่าลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม TiN ก่อนและหลังกระบวนการซินเตอร์มีลักษณะและมีแนวโน้มความเข้มเหมือนกัน นั่นแสดงว่าอุณหภูมิซินเตอร์ที่ 420 °C ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของโครงสร้างผลึก



รูปที่ 4.8 รามานสเปกตรัมของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการผลิตก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ หลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่ 420 °C

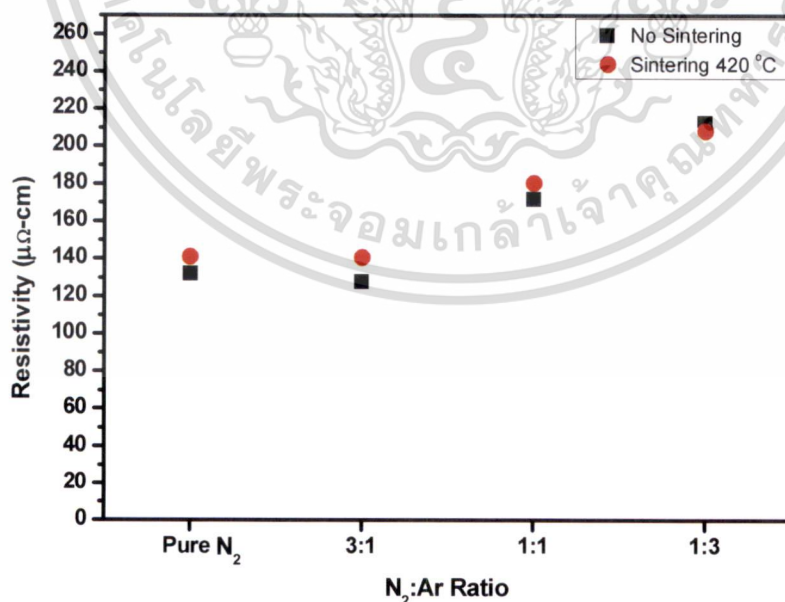
จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการวัดการกระเจิงแบบรามานของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการผลิตก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่เวลาการปลูกคงที่ 300 วินาทีและผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่ 420 °C พบรามานสเปกตรัมที่ Raman Shift ตำแหน่ง 193, 330 และ 565 cm^{-1} ซึ่งแสดงว่าเป็น TiN เมื่อพิจารณาเงื่อนไขการปลูกฟิล์มกรณีไนโตรเจนอย่างเดียวกับเงื่อนไข 3:1 พบว่ารามานสเปกตรัมมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งสองโหมด แสดงว่าเป็น TiN แบบเดียวกัน แต่กรณี 3:1 มีความเข้มของรามานสเปกตรัมสูงกว่า แสดงถึงปริมาณการเกิด TiN มากกว่า จึงทำส่งผลให้เกิดการสั่นของโมเลกุล TiN มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากกว่าเงื่อนไขปลูกด้วยก๊าซไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว ส่วนกรณี 1:1 พบว่าความเข้มของทั้งสองโหมดลดลง แสดงถึงปริมาณการเกิด TiN ที่ลดลง และมีการเลื่อนของรามานสเปกตรัมไปทางความถี่ที่สูงขึ้น แสดงถึงปริมาณไนโตรเจนใน TiN มีปริมาณลดลง พร้อมทั้งพบรามานสเปกตรัมของ TiO_2 ที่ Raman Shift ตำแหน่ง 143 cm^{-1} [23] ซึ่งอาจเกิดจากออกซิเจนที่หลงเหลือในเตาปฏิกิริยา และเงื่อนไขสุดท้าย 1:3 พบรามานสเปกตรัมของ Ti ที่ Raman Shift ตำแหน่ง 138 cm^{-1} [27] แสดงถึงการเกิด TiN ที่มีปริมาณ Ti เพิ่มขึ้น (Ti-rich) ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลก่อนและหลังกระบวนการซินเตอร์ริงแล้ว มีลักษณะความสัมพันธ์เหมือนกัน บ่งชี้ว่าอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่ 420 °C ไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน TiN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน N ₂ :Ar	ความหนา (nm)	ความต้านทานเชิง แผ่นเฉลี่ย 49 ตำแหน่ง	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	Uniformity (%)	สภาพต้านทาน ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)
		(Ω/square)	(%)		
Pure N ₂	492.0	2.860	0.066	2.280	140.71
3:1	552.0	2.541	0.081	3.210	140.26
1:1	1548.0	1.164	0.150	12.900	180.19
1:3	1823.0	1.141	0.063	5.500	208.00

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ยด้วยโพรมิเตอร์ของฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ หลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 420 °C นาน 30 นาที

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์ม TiN ด้วยโพรมิเตอร์จำนวน 49 ตำแหน่ง หาค่าเฉลี่ยความต้านทานเชิงแผ่นเพื่อนำไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานของฟิล์ม TiN ในแต่ละเงื่อนไข ตามสมการที่ 4.1 พบว่าที่เงื่อนไขการปลูกฟิล์มด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบ 3:1 มีค่าสภาพต้านทานต่ำที่สุด เท่ากับ 140.26 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานก่อนและหลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ มีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อย ดังในรูปที่ 4.9

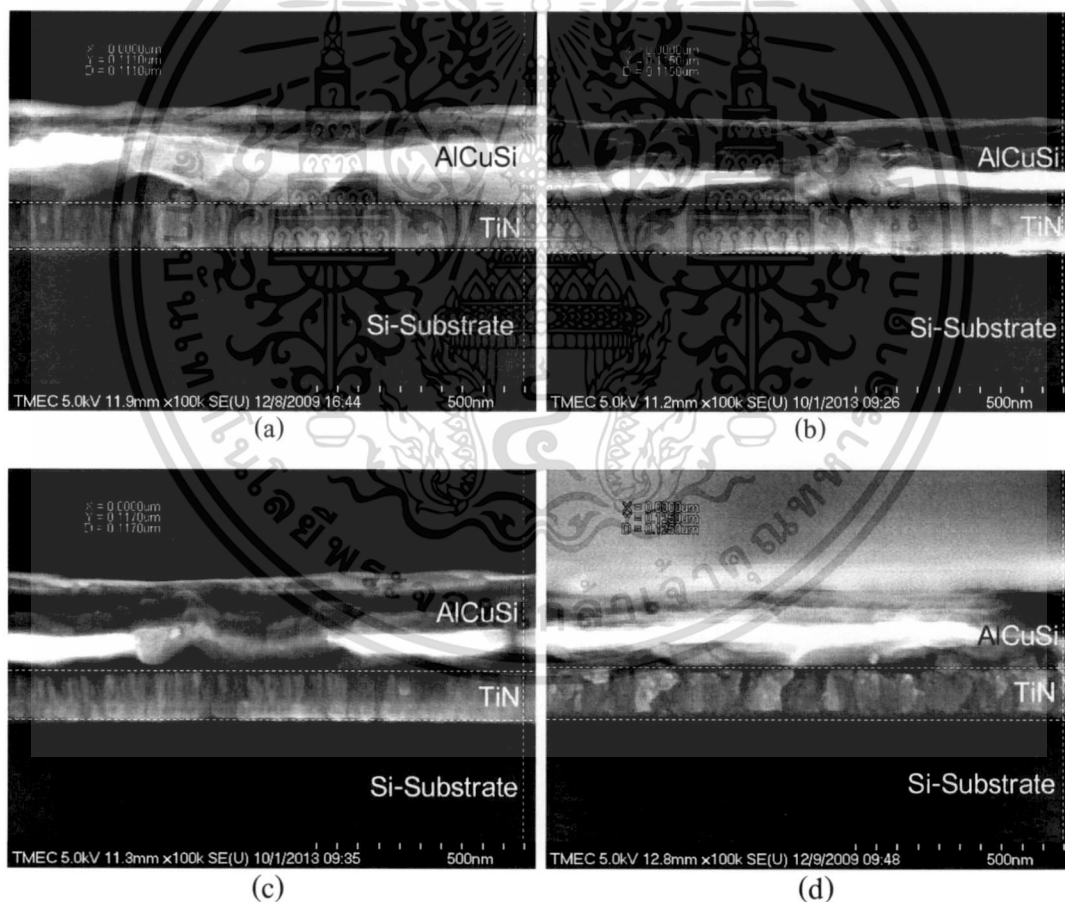


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าสภาพต้านทานของฟิล์ม TiN ก่อนและหลังผ่านกระบวนการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 420 °C นาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

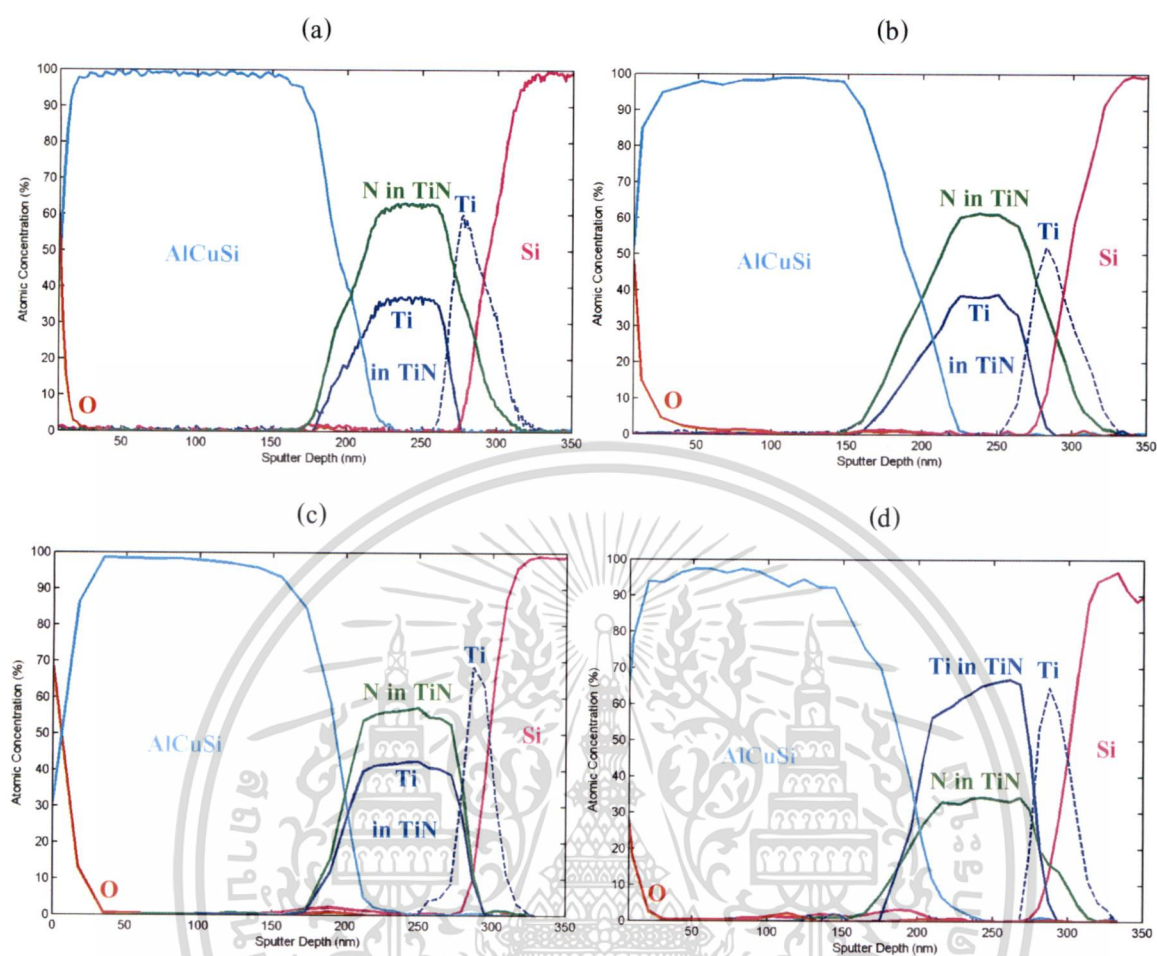
4.2 ผลการทดสอบการป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi ของฟิล์มไทเทเนียมไนไตรด์

ทำการปลูกฟิล์ม TiN หนา 80 nm ด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง โดยมีเป้าเป็นโลหะ Ti ในบรรยากาศไนโตรเจนอย่างเดียว และบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ที่ความดันคงที่ 4 mbar โดยกำหนดความหนาฟิล์มด้วยการควบคุมเวลาการปลูกซึ่งใช้อัตราการปลูกตามตารางที่ 4.1 มีฐานรองรับเป็นแผ่น Si (100) p-type ที่มีชั้นฟิล์มบาง Ti หนา 30 nm เป็นชั้นยึดติดระหว่างฐานรอง Si (100) p-type และฟิล์ม TiN หลังจากการปลูกฟิล์ม TiN เสร็จแล้วจะทำการปลูกฟิล์มอัลลอย AlCuSi หนา 200 nm ต่อทันที จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการขึ้นเตอรังที่อุณหภูมิ 420 °C นาน 30 นาที ด้วยเตาปฏิกรณ์ในบรรยากาศไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน จากนั้นนำไปวัดความหนาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ทดสอบการป้องกันการแพร่ด้วยไอเจ็ทอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดแสดงความหนาฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ที่ความหนา 80 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟ Depth Profile ทดสอบการป้องกันการแพร่ของอลูมิเนียมในฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยอัตราการผลิตก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3

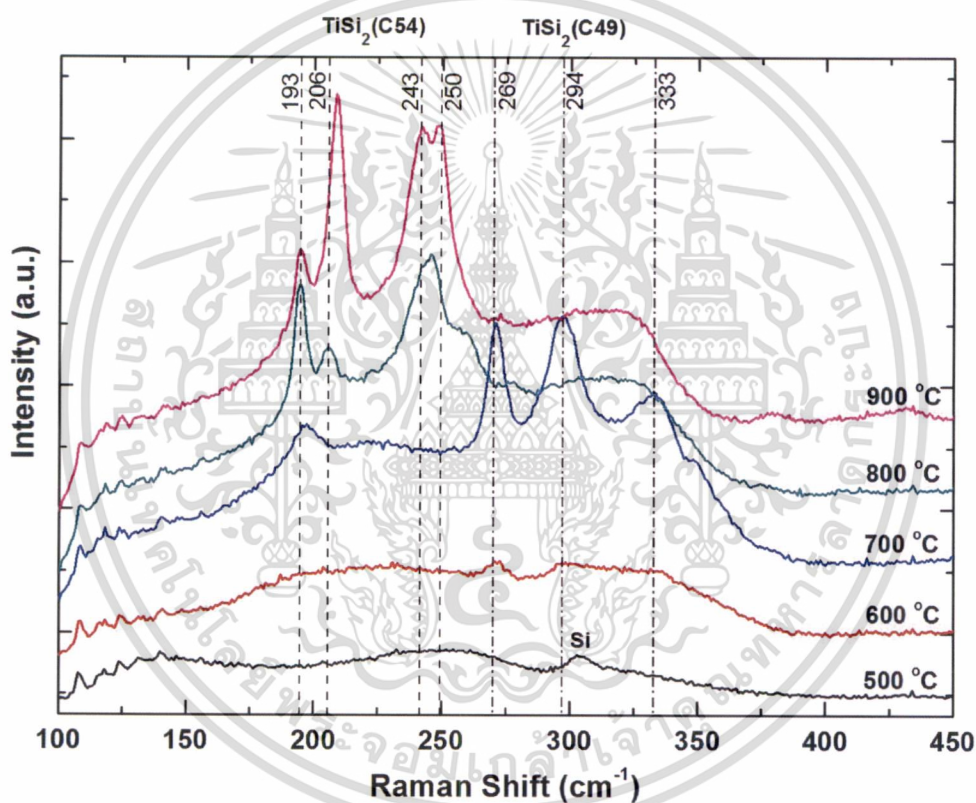
จากรูปที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคไอजेเรอิลีกตรอนสเปกโทรสโกปี จะมีการวิเคราะห์ถึงปริมาณของธาตุในแต่ละชั้นฟิล์ม โดยการวิเคราะห์นี้ในเนื้อฟิล์มซึ่งเกิดจากการกัดชั้นฟิล์มด้วยไอออนของก๊าซเฉื่อยอาร์กอน ทุกๆ 30 วินาที และทำการวัดปริมาณ 300 วินาที เมื่อพิจารณากราฟ Depth Profile พบว่าทุกเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม TiN ด้วยอัตราการผลิตก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบค่าต่างๆ (a) ไนโตรเจนอย่างเดียว, (b) 3:1, (c) 1:1 และ (d) 1:3 ไม่พบปริมาณอลูมิเนียมแพร่ผ่านฟิล์ม TiN ไปยังฐานรอง Si (100) p-type ได้ (เส้นประ Ti คือชั้นยึดติด) ซึ่งแสดงว่าฟิล์ม TiN ทุกเงื่อนไขการปลูกสามารถป้องกันการแพร่อัลลอย AlCuSi เข้าไปสู่ฐานรอง Si (100) p-type ได้ และมีปริมาณ Ti ในเนื้อฟิล์ม TiN เท่ากับ 36.8, 37.9, 43.0 และ 66.1 at.% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลตรวจสอบสมบัติชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ที่สร้างด้วยกระบวนการซาไลไซด์

4.3.1 ผลตรวจสอบสมบัติชั้นไทเทเนียมซิลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว

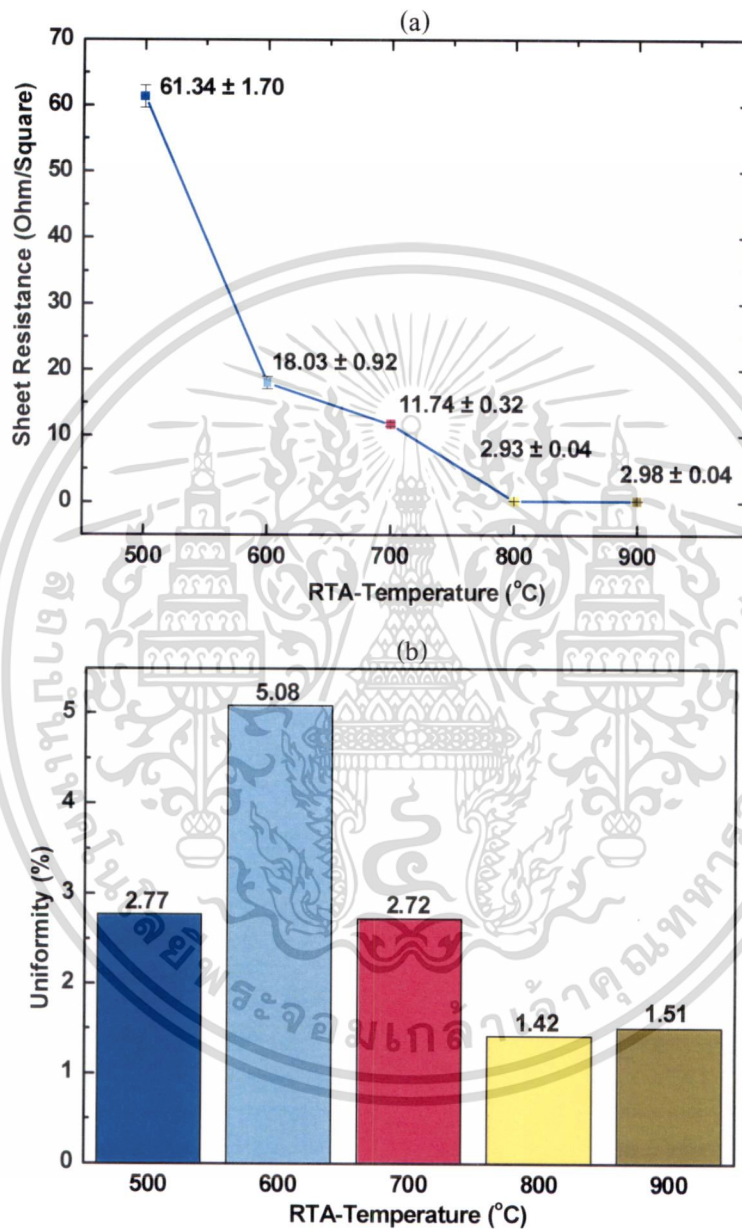
ทำการปลูกฟิล์ม Ti ในระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอร์ โดยมิเป้าโลหะเป็น Ti ในบรรยากาศอาร์กอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งกำหนดความหนาที่ 30 nm บนฐานรอง Si (100) p-type จากนั้นนำไปแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (RTA) ครั้งเดียว ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700, 800 และ 900 °C นาน 30 วินาที จากนั้นตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยการวัดการกระเจิงแบบรามาน และวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยโพรบอยทีโพรบ



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบรามานสเปกตรัมของชั้น TiSi_2 ที่สร้างด้วยกระบวนการซาไลไซด์ด้วยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบของรามานสเปกตรัมของชั้น TiSi_2 ที่อุณหภูมิการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว ที่อุณหภูมิแอนนัล 500 °C พบเฉพาะพิกของซิลิคอนที่ตำแหน่ง 303 cm^{-1} [24] สำหรับที่อุณหภูมิแอนนัล 600 °C พบพิกของ TiSi_2 ชนิด C49 ที่ตำแหน่ง 269 cm^{-1} ที่อุณหภูมิแอนนัล 700 °C พบพิกของ TiSi_2 ชนิด C49 ที่ตำแหน่ง 269, 294 และ 333 cm^{-1} [28] รวมทั้งยังพบพิกของ TiSi_2 ชนิด C54 ที่ตำแหน่ง 193 cm^{-1} สำหรับอุณหภูมิแอนนัลที่ 700-800 °C พบเฉพาะ TiSi_2 ชนิด C54 ที่ตำแหน่ง 193, 206, 243 และ 250 cm^{-1} [29] จากผลการวัดการเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระเจิงแบบรามานสรุปได้ว่า การแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิแอนนัล 500 °C ยังไม่เกิด TiSi_2 โดยจะเริ่มเกิด TiSi_2 ชนิด C49 ที่อุณหภูมิแอนนัล 600-700 °C และเกิด TiSi_2 ชนิด C54 ที่อุณหภูมิ 800-900 °C



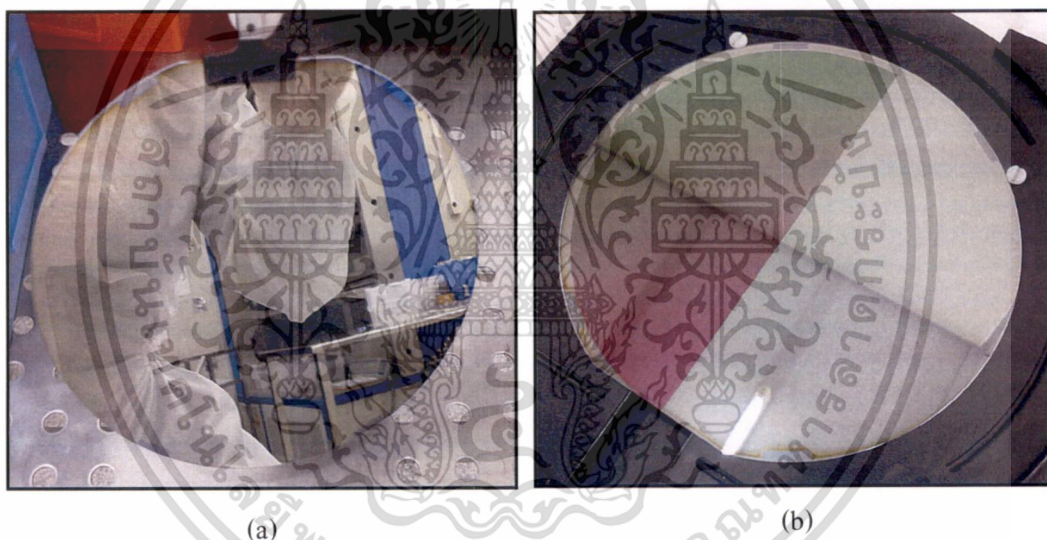
รูปที่ 4.13 กราฟแสดง (a) ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของชั้น TiSi_2 ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิต่างๆ และ (b) Uniformity ของการวัด

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นเฉลี่ยด้วยโพรมิเตอร์โพรมิเตอร์ 49 ตำแหน่งของชั้น TiSi_2 ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 500-900 °C นาน 30 วินาที พบว่าค่าความต้านทานเชิงแผ่นมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิแอนนัลที่เพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิแอนนัลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 800 °C มีความต้านทานเชิงแผ่นต่ำที่สุดและมีความสม่ำเสมอในการเกิด TiSi_2 ที่ดี เนื่องจากมีค่า Uniformity ของการวัดที่ต่ำ

4.3.2 ผลการกัดเปียกชั้นไทเทเนียมที่ไม่เกิดซิลิไซด์ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์

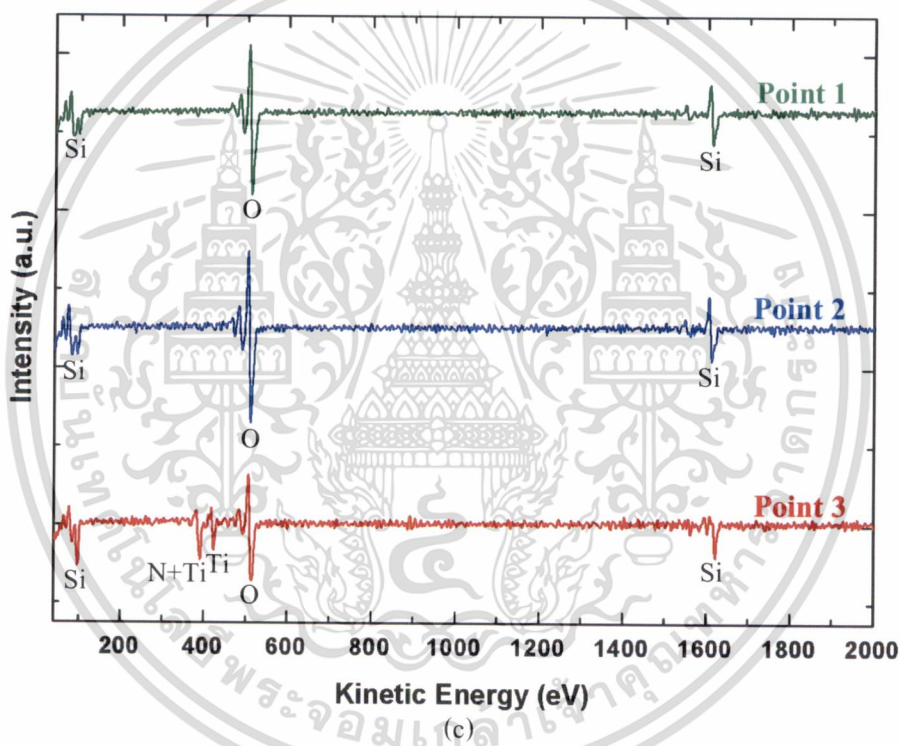
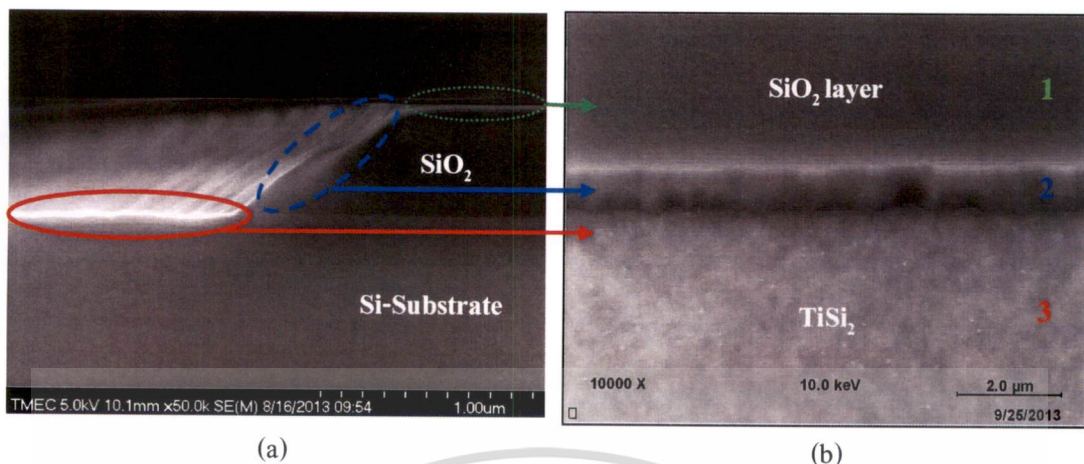
การสร้างชั้น TiSi_2 เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่เป็นซิลิคอน บริเวณที่เป็นฉนวนออกไซด์จะไม่เกิด TiSi_2 ดังนั้นจำเป็นต้องกำจัด Ti ที่ไม่เกิดซิลิไซด์ออกไป โดยการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ ซึ่งใช้ $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 70 °C ในการทดลองทำการปลูกฟิล์ม Ti ในระบบ ดีซี แมกนิตรอนสปัตเตอริง โดยมีเป้าเป็น Ti ในบรรยากาศอาร์กอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งกำหนดความหนา 30 nm บนฐานรอง Si (100) p-type ที่มีชั้น SiO_2 อยู่ครึ่งแผ่น จากนั้นนำไปแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (RTA) ครึ่งเดียว ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C นาน 30 วินาที แล้วนำไปกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบบนพื้นผิวด้วยไอเออร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี



รูปที่ 4.14 แสดงภาพของ (a) ฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครึ่งเดียวที่อุณหภูมิต่างๆ และ (b) หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ (ส่วนครึ่งแผ่นซ้ายมือ คือ ชั้น SiO_2)

จากรูปที่ 4.14 แสดงภาพของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครึ่งเดียวที่อุณหภูมิ 600 °C ก่อนและหลังการกัดเปียกด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่าหลังจากกัดจะเห็นชั้น SiO_2 ที่สร้างไว้ครึ่งแผ่นอย่างชัดเจน (ส่วนอุณหภูมิแอนนัลที่ 700 และ 800 °C ให้ผลลักษณะเช่นเดียวกัน) เนื่องจากไม่สามารถตัดสินได้ว่ามีชั้น Ti ที่ไม่เกิดซิลิไซด์หลงเหลือของอยู่บนชั้น SiO_2 หรือไม่จากการมองเห็น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยไอเออร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์พื้นผิว

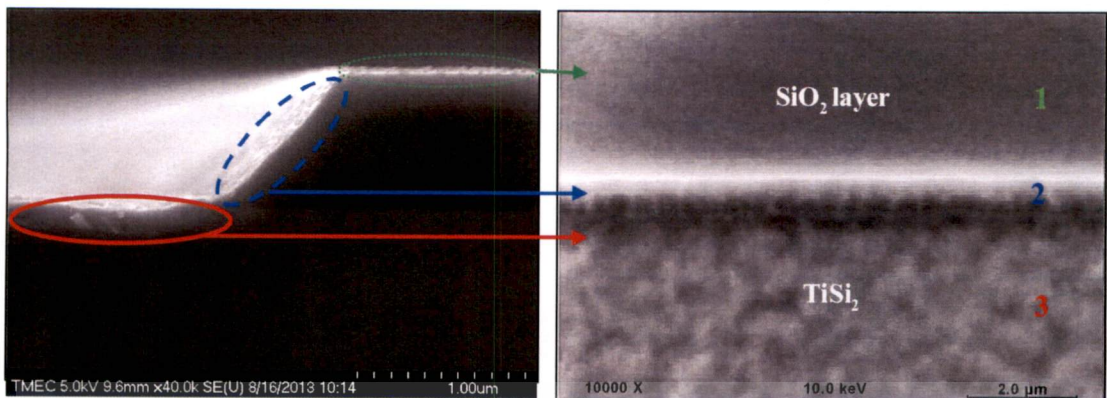
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจรีอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 600 °C หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพพื้นผิว และ (c) ไอเจรีอิเล็กตรอนสเปกตรัมของตำแหน่งที่วิเคราะห์

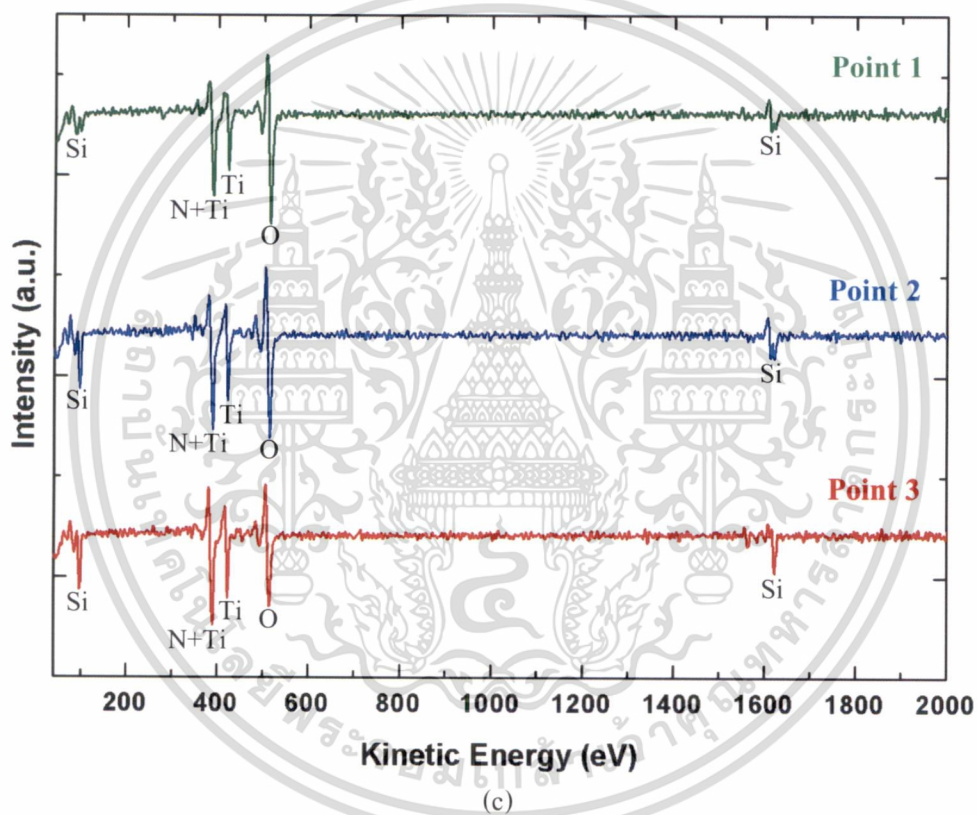
จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจรีอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 600 °C 30 วินาที หลังการกัดเปียกด้วยสารละลาย NH₄OH : H₂O₂ : H₂O อัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 70 °C จากผลจากการวิเคราะห์ไม่พบ Ti บนพื้นผิว (ตำแหน่งจุดที่ 1) และด้านข้าง (ตำแหน่งจุดที่ 2) ของชั้น SiO₂ แสดงว่าไม่หลงเหลือชั้น Ti ที่ไม่เกิดซิลิไซด์ทั้งบริเวณด้านบนและด้านข้างของชั้น SiO₂ โดยตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณที่เกิด TiSi₂ พบปริมาณออกซิเจน ซึ่งอาจเกิดจากออกไซด์ธรรมชาติ (Native Oxide)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

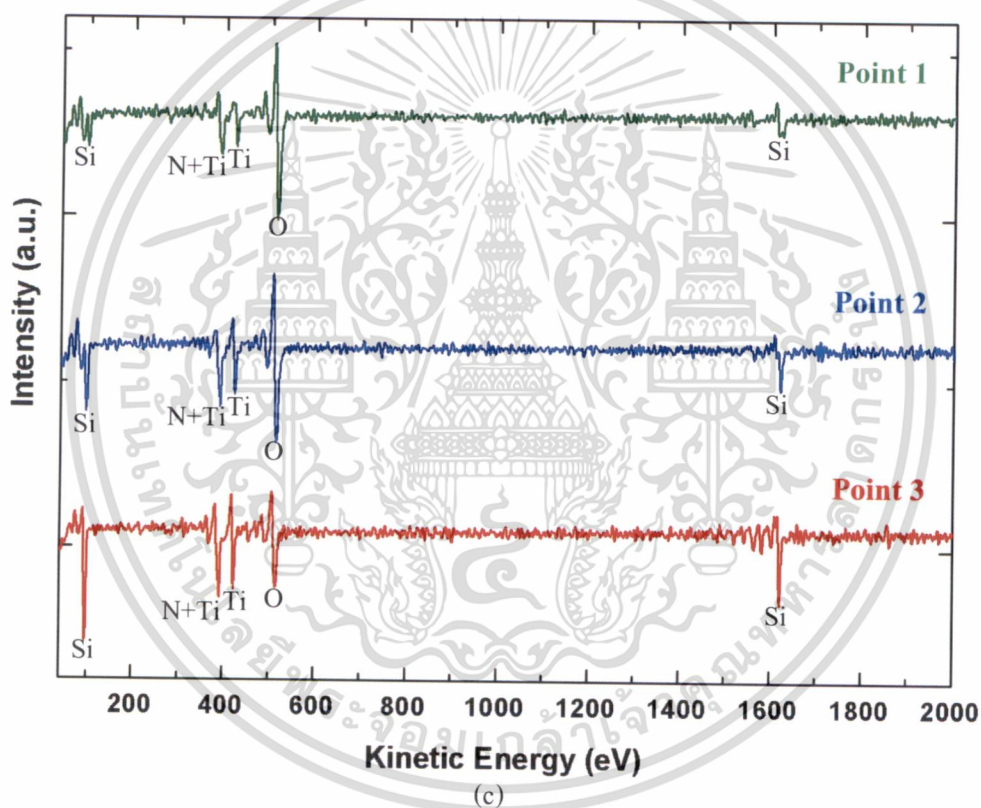
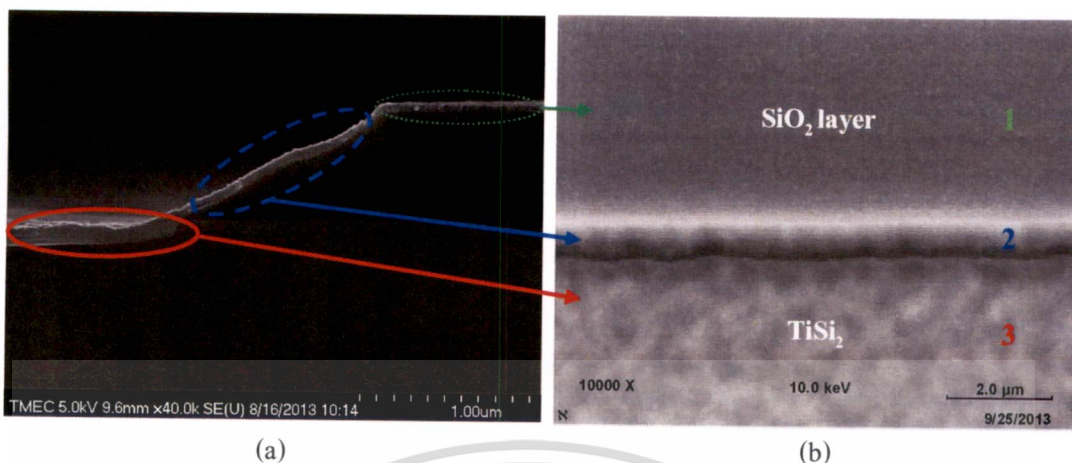
(b)



(c)

รูปที่ 4.16 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจรีอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 700°C หลังการกัดเป็ยกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพพื้นผิว และ (c) ไอเจรีอิเล็กตรอนสเปกตรัมของตำแหน่งที่วิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



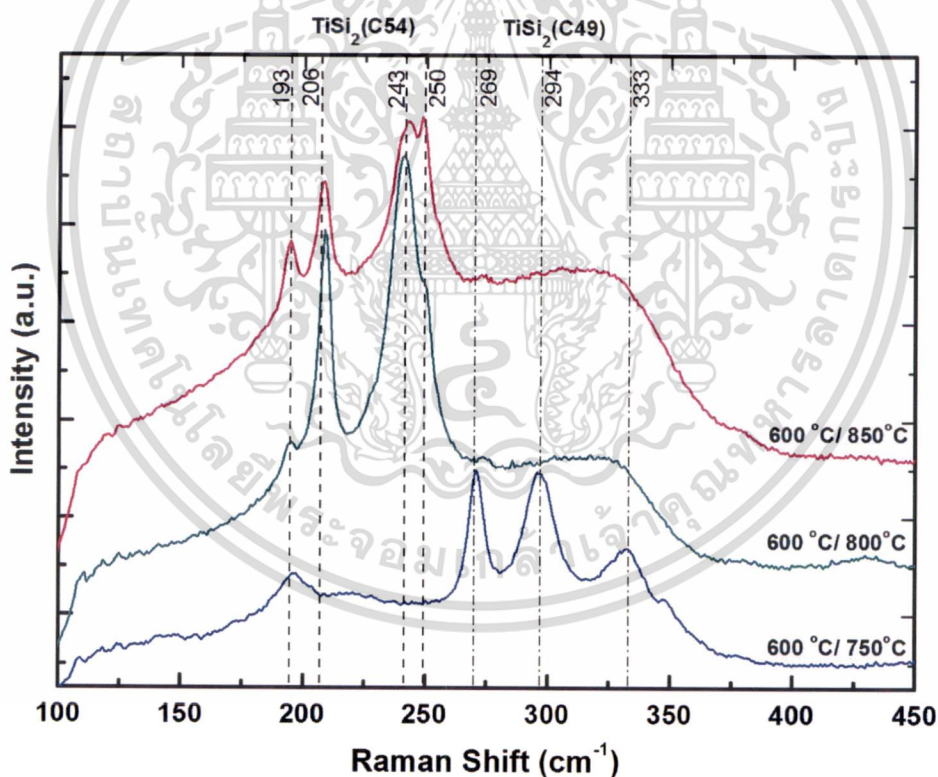
รูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 800°C หลังการกัดเปียกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ (a) ภาพตัดขวาง (b) ภาพพื้นผิว และ (c) ไอเจอีเล็กตรอนสเปกตรัมของตำแหน่งที่วิเคราะห์

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ไอเจอีเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 600°C 30 วินาที หลังการกัดเปียกด้วย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วน 1:1:5 ที่อุณหภูมิ 70°C จากผลจากการวิเคราะห์พบ Ti บนพื้นผิว (ตำแหน่งจุดที่ 1) และด้านข้าง (ตำแหน่งจุดที่ 2) ของชั้น SiO_2 แสดงว่ายังหลงเหลือชั้น Ti ที่ไม่เกิดซิลิไซด์ทั้งบริเวณด้านบนและด้านข้างของชั้น SiO_2 โดยตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณที่เกิด TiSi_2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบปริมาณออกซิเจน ซึ่งอาจเกิดจากออกไซด์ธรรมชาติ (Native Oxide) จากผลการวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวด้วยไอเอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม Ti ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800 °C หลังผ่านกัดเป็ยกด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์ มีเฉพาะที่อุณหภูมิแอนนัลที่ 600 °C เท่านั้นที่สามารถกัดชั้น Ti ที่ไม่เกิดซาลิไซด์ได้ทั้งหมด

4.3.3 ผลตรวจสอบสมบัติชั้นไทเทเนียมซาลิไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง

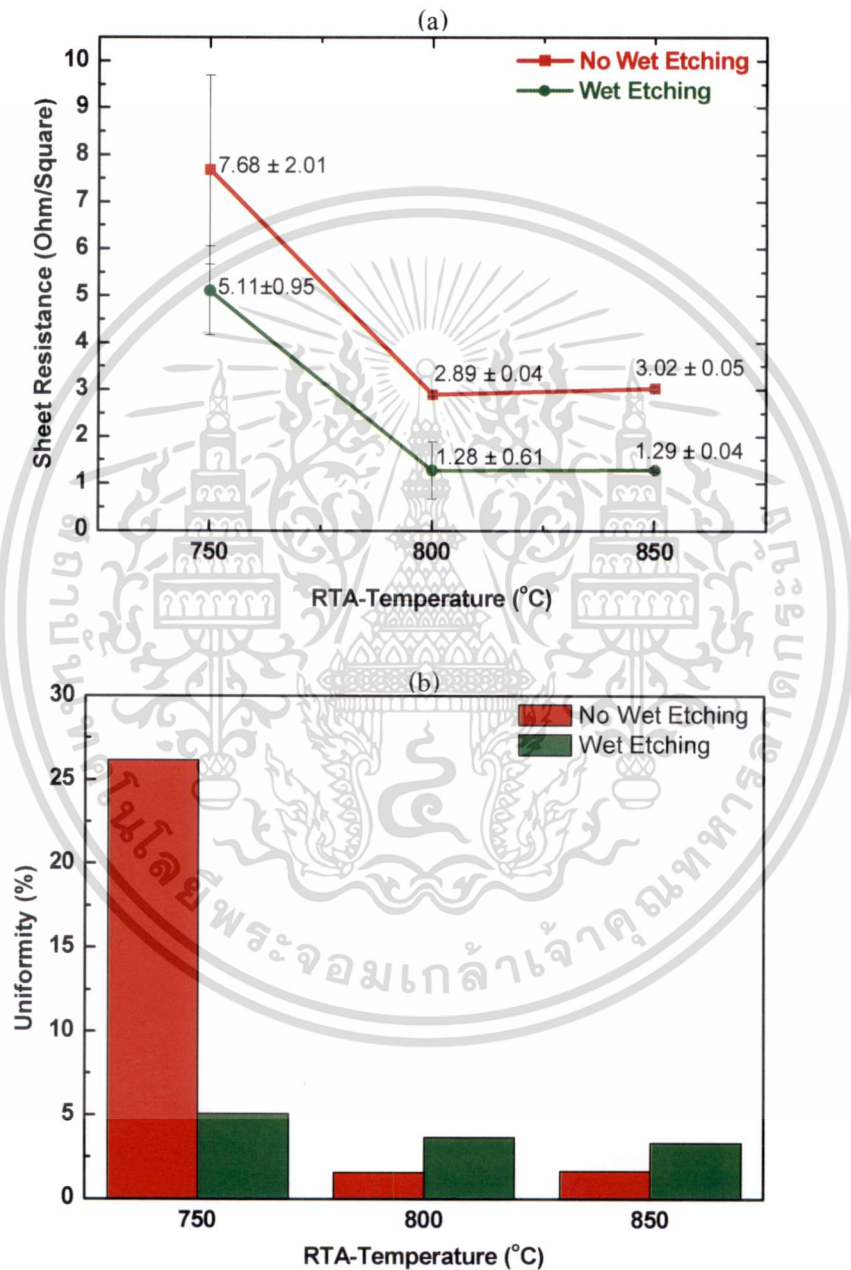
ทำการปลูกฟิล์ม Ti ในระบบ ดีซี แมกนีตรอนสปัตเตอริง โดยมีเป้าโลหะเป็น Ti ในบรรยากาศอาร์กอนเพียงอย่างเดียว ซึ่งกำหนดความหนาที่ 30 nm บนฐานรอง Si (100) p-type จากนั้นนำไปแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว (RTA) สองครั้ง ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยที่อุณหภูมิครั้งแรกใช้ 600 °C นาน 30 วินาที จากนั้นกัดเป็ยก Ti ส่วนที่ไม่เกิด TiSi_2 ด้วยกระบวนการกัดซาลิไซด์แล้วจึงนำไปแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งที่สอง ที่อุณหภูมิ 750, 800 และ 850 °C เสร็จแล้วนำไปตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยการวัดการกระเจิงแบบรามาน และวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยโพรพอยท์โพรบ



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบรามานสเปกตรัมของชั้น TiSi_2 ที่สร้างด้วยกระบวนการซาลิไซด์ด้วยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้งที่อุณหภูมิต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบของรามานสเปกตรัมของชั้น TiSi_2 ที่อุณหภูมิกการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง ที่อุณหภูมิแอนนัล 700 °C พบรามานสเปกตรัมของ TiSi_2 ชนิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C49 ที่ตำแหน่ง 269, 294 และ 333 cm^{-1} [28] รวมทั้งยังพบพีคของ TiSi_2 ชนิด C54 ที่ตำแหน่ง 193 cm^{-1} สำหรับอุณหภูมิแอนนัลที่ 750-800 $^{\circ}\text{C}$ พบเฉพาะ TiSi_2 ชนิด C54 ที่ตำแหน่ง 193, 206, 243 และ 250 cm^{-1} [29] จากผลการวัดการกระเจิงแบบรามาน สรุปได้ว่าการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง โดยเกิด TiSi_2 ชนิด C49 ที่อุณหภูมิแอนนัล 750 $^{\circ}\text{C}$ และเกิด TiSi_2 ชนิด C54 ที่อุณหภูมิ 800-900 $^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.19 กราฟแสดง (a) ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของ TiSi_2 ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้งที่อุณหภูมิต่างๆ และ (b) Uniformity ของการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของ TiSi_2 ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง พบว่าที่อุณหภูมิแอนนัล 800°C มีความต้านทานเชิงแผ่นต่ำที่สุด ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการกัดซาลีไซด์ เท่ากับ 2.89 และ $1.28 \Omega/\text{square}$ ตามลำดับ และมีค่า Uniformity ของการวัดความต้านทานเชิงแผ่นต่ำที่สุดเช่นกันที่ก่อนผ่านกระบวนการกัดซาลีไซด์ แต่หลังผ่านกระบวนการกัดซาลีไซด์มีค่า Uniformity สูงขึ้น อาจเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอในการกัดของสารละลาย $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$

4.4 ผลการสร้างโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์เพื่อวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส

4.4.1 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสไทเทเนียมกับฐานรองซิลิคอน

Dopant	Contact Resistance of Contact size (Ohm)					
	5.0 um	2 um	1.2 um	1.0 um	0.8 um	0.6 um
N+	26.0	37.0	54.7	87.8	763.1	N/A
P+	26.0	37.0	60.8	76.5	745.3	N/A

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส Ti กับฐานรอง Si (100) p-type ด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์

4.4.2 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาลีไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว

RTA-Temperature ($^\circ\text{C}$)	Dopant	Contact Resistance of Contact Size (Ohm)					
		5.0 um	2 um	1.2 um	1.0 um	0.8 um	0.6 um
600	N+	25.4	33.9	43.6	50.2	103.8	530.2
	P+	25.4	25.2	40.8	49.8	119.7	550.0

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส TiSi_2 กับฐานรอง Si (100) p-type ด้วยกระบวนการซาลีไซด์ที่แอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.3 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสไทเทเนียมซิลิไซด์กับฐานรองซิลิคอนด้วยกระบวนการซาไลซ์ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง

RTA- Temperature (°C)	Dopant	Contact Resistance of Contact Size (Ohm)					
		5.0 um	2 um	1.2 um	1.0 um	0.8 um	0.6 um
600/800	N+	19.29	32.16	36.27	38.65	34.20	52.89
	P+	4.71	13.36	47.40	58.40	56.82	47.34

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัส $TiSi_2$ กับฐานรอง Si (100) p-type ด้วยกระบวนการซาไลซ์ที่แอนนีสด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้ง ด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยทั้งหมดที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ด้วยฟิล์ม TiN พร้อมทั้งการสร้างชั้น TiSi₂ ด้วยกระบวนการซาไลไซด์ โดยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว เพื่อใช้ลดความต้านทานรอยต่อสัมผัสของชั้น Ti กับฐานรอง Si ซึ่งจะขอสรุปเป็นแต่ละหัวข้อที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของฟิล์ม TiN ปลุกด้วยระบบ ดีซี แมกนีตรอนสเปดเตอริง โดยมีเป้าเป็น Ti ซึ่งมีเงื่อนไขการปลุกแตกต่างกัน 4 เงื่อนไข คือ ในบรรยากาศไนโตรเจนอย่างเดียว และบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 เพื่อนำมาใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi พบว่าทุกเงื่อนไขการปลุกฟิล์มสามารถใช้ป้องกันการแพร่ของอัลลอย AlCuSi ได้ทั้งหมด แต่เงื่อนไขภายในบรรยากาศไนโตรเจนผสมอาร์กอนที่อัตราส่วน 3:1 มีสภาพต้านทานต่ำที่สุด เท่ากับ 140.26 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ จึงเหมาะสมเลือกใช้เงื่อนไขนี้เป็นชั้นป้องกันการแพร่มากที่สุด

2. ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของชั้น TiSi₂ ด้วยกระบวนการซาไลไซด์ โดยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียว ทำให้ทราบถึงช่วงอุณหภูมิแอนนัลที่ส่งผลต่อการเกิด TiSi₂ แบบ C49 และ C54 โดยที่อุณหภูมิแอนนัลตั้งแต่ 600-700 °C จะพบการเกิด TiSi₂ แบบ C49 และที่อุณหภูมิแอนนัลตั้งแต่ 800-900 °C จะพบการเกิด TiSi₂ แบบ C54 ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการสร้างชั้น TiSi₂ เพื่อลดความต้านทานสัมผัส จึงต้องการ TiSi₂ ที่มีความต้านทานต่ำที่สุด นั่นคือ TiSi₂ แบบ C54 เนื่องจากมีค่าความต้านทานเชิงแผ่นที่วัดได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 2.93 Ω/square ซึ่งใช้อุณหภูมิแอนนัลด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วที่ 800 °C

3. ผลจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของชั้น TiSi₂ ด้วยกระบวนการซาไลไซด์ โดยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวและสองครั้ง พบว่าที่อุณหภูมิแอนนัลเดียวกัน การให้ความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้งส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงแผ่นต่ำกว่าแบบครั้งเดียว โดยอุณหภูมิแอนนัลที่ 800 °C มีค่าความต้านทานเชิงแผ่นต่ำที่สุดเท่ากับ 2.89 Ω/square

4. ผลของการกัดเปียกชั้น Ti ที่ไม่เกิดซิลิไซด์ก่อนการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งที่สองสามารถลดความต้านทานเชิงแผ่นจากเดิมก่อนกัดด้วยกระบวนการกัดซาไลไซด์ลดลงได้มากกว่า 40%

5. ผลจากการวัดความต้านทานรอยต่อสัมผัสด้วยโครงสร้างคอร์สบริดจ์เคลวินรีซิสแทนซ์ของรอยสัมผัส Ti กับฐานรอง Si (100) p-type พบว่ามีค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสสูงมากกว่า 700 Ω ที่ขนาด Contact Hole 0.8 μm และที่ขนาด Contact Hole 0.6 μm มีความต้านทานรอยต่อสัมผัสสูงมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ เมื่อสร้างชั้น TiSi₂ สัมผัสกับฐานรอง Si (100) p-type โดยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่าค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสลดลงจากเดิม 80% ที่ขนาด Contact Hole 0.8 μm และยังสามารถวัดค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสที่ขนาด Contact Hole 0.6 μm ได้อีกด้วย และเมื่อสร้างชั้น TiSi₂ สัมผัสกับฐานรอง Si (100) p-type โดยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็วสองครั้งที่อุณหภูมิแรก 600 °C และอุณหภูมิที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สอง 800 °C พบว่าค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัสลดลงจากเดิม (ไม่มีชั้น TiSi_2) มากกว่า 90% ที่ขนาด Contact Hole 0.8 μm

ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยในช่วงเวลาจำกัดของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่สมบูรณ์มากนัก ยังมีประเด็นที่น่าสนใจศึกษาเพิ่มเติม ดังต่อไปนี้

1. ในส่วนการสร้างชั้นป้องกันการแพร่ของอัลลอย AiCuSi ด้วยการใช้ฟิล์ม TiN ที่ปลูกด้วยระบบ ดีซี แมกเนตรอนสปัตเตอริง อาจแบ่งอัตราการปล่อยก๊าซไนโตรเจนผสมก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ระบบให้มีความละเอียดมากขึ้นในช่วงใช้ก๊าซไนโตรเจนอย่างเดียว ถึงอัตราส่วน 1:1

2. ในการสร้างชั้น TiSi_2 โดยการแอนนัลด้วยความร้อนแบบรวดเร็ว พบในส่วนของ การกัดเปียกชั้น Ti ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาซิลิไซด์สามารถกำจัดได้เฉพาะเงื่อนไขแอนนัลที่ 600 °C อาจต้องมีการศึกษาหาสารละลายสูตรอื่นใช้แทน $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$

3. ในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเทคนิคไอเอเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม TiN นั้น อาจให้ผล Atomic Concentration ที่ไม่ถูกต้องแม่นยำมากนัก เนื่องจากการซ้อนทับกันของพีค N_{KLL} กับ Ti_{LMM} รวมกันเป็นพีคเดียว จึงทำให้ Intensity ที่ตำแหน่งพลังงานจลน์นั้นสูงขึ้นเกินความเป็นจริง ทำให้เมื่อนำ Intensity มาคำนวณ Atomic Concentration จึงมีค่าคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ ดังนั้นอาจต้องอาศัยเทคนิคอื่นช่วยในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบ TiN ที่แท้จริงเพิ่มเติม เช่น เทคนิค TOF-SIMS เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.W. Mayer, S.S. Lau. **Electronic Materials Science For Integrated Circuits in Si and GaAs**. New York : Macmillan. 1990.
- [2] M. Hansen. **Constitution of Binary Alloys**. New York : McGraw-Hill. 1958.
- [3] Y.C. Peng, L.J. Chen, W.Y. Hsieh and Y.F. Hsieh. **J. Korean Phys.** vol.35. 1999. p.80–83.
- [4] M. Wittmer. **J. Vac. Sci. Technol. A, USA**, vol.3, 1985. p.1797–1803
- [5] S.P. Murarka, Refractory silicides for integrated circuits. critical review, **J. Vac. Sci. Technol.** 17 (1980) 775–792.
- [6] Lih J. Chen. **Silicide Technology for Integrated Circuits**. London : The Institution of Engineering and Technology. 2004.
- [7] นันทนัช วัฒนสุภิญญา. “สมบัติทางกายภาพของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียมและอินเดียม เตรียมโดยเทคนิค ดีซี แมกนีตรอน สเป็คเตอริง” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2553.
- [8] <http://gmlab.vn/semvn/threads/magnetron-sputtering.16759/>
- [9] Mark J., Ajit D. and Mannur J. **Nanoengineering of Structural, Functional, and Smart Materials**. Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group. 2006.
- [10] Ren-Qin Zhang, Tae-Hun Lee, Byung-Deok Yu, Catherine Stampfl and Aloysius Soon **Phys. Chem. Chem. Phys.**, 2012, 14, 16552
- [11] Gambino J.P. and Colgan E.G. “Silicides and Ohmic Contacts” **Materials Chemistry and Physics**. vol.52, 1998. pp. 99-146.
- [12] Wolf S. **Microchip Manufacturing**. California : Lattice Press. 2004.
- [13] Semipark Company. “Electromigration.” [Online]. Available : <http://www.semipark.co.kr/semidoc/waferfab/metal.asp>. 2000.
- [14] Hansen M. **Constitution of Binary Alloys**. New York : McGraw-Hill. 1958.
- [15] Rhoderick E.H. and Williams R.H. **Metal-Semiconductor Contacts**. 2nd ED. New York : Oxford University Press. 1998.
- [16] รัตนาวรรณ สันบุญตัน. “การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ โครงสร้างซั้วอินเตอร์ดิจิตัลร่วมกับกระบวนการผลิตซีมอส” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [17] กาญจนา แซ่เตียว. “อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เลียนแบบประสาทสัมผัสรับรสโดยวิธีเคมีไฟฟ้าเพื่อใช้ตรวจวัดไอออนในน้ำ” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2555.

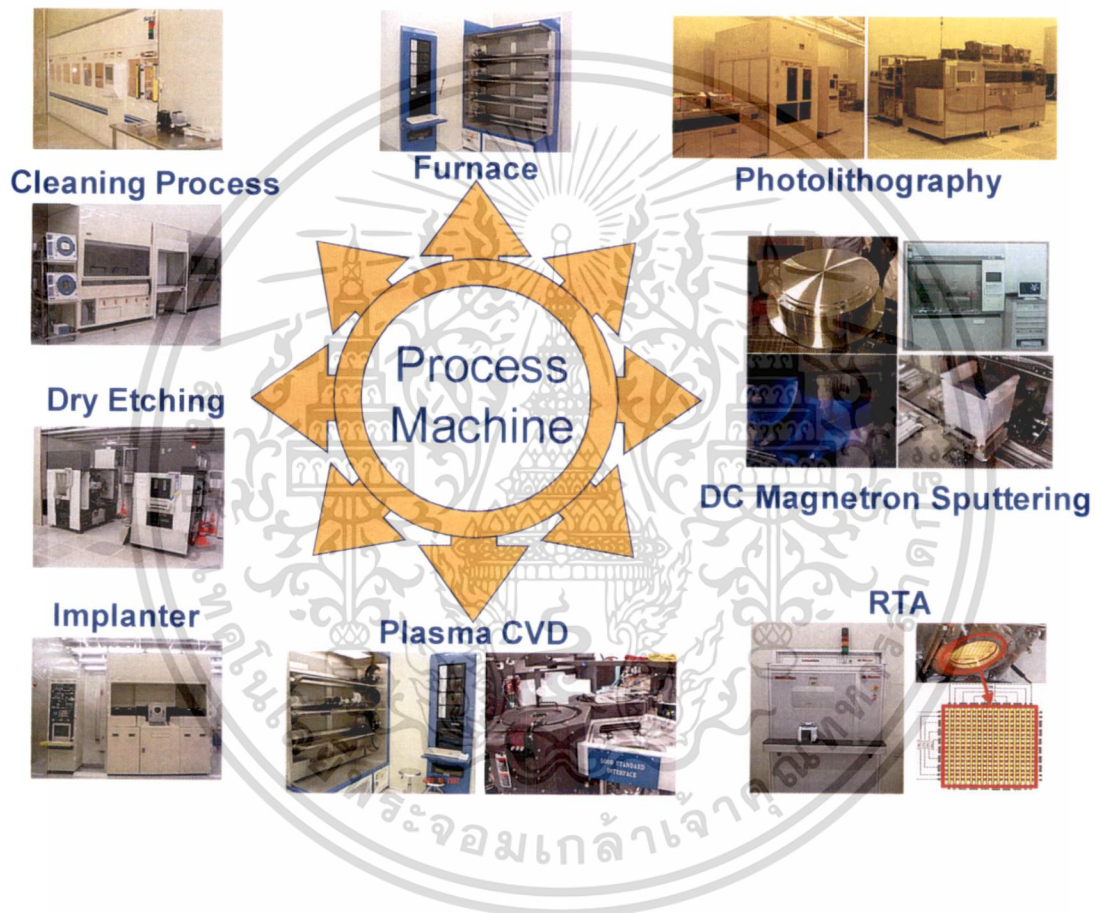
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [18] วิศรุต ศรีฟุ่มไข่. “การออกแบบและสร้างไมโครฮีทเตอร์ร่วมกับตัวตรวจวัดอุณหภูมิด้วยวัสดุเพอไลท์สำหรับชีพเพิ่มจำนวนดีเอ็นเอ” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [19] สิทธิชัย โภโคยอุดม. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยมหานคร. พ.ศ.2551.
- [20] BWTEK Inc. “**Theory of Raman Scattering.**” [Online]. Available : <http://www.bwtek.com/raman-theory-of-raman-scattering/> 2013.
- [21] Bernd Dippel. “**Raman Scattering Intensity Stokes/Anti-Stokes Raman Spectra.**” [Online]. Available : <http://www.raman.de/htmlEN/basics/intensityEng.html>. 2011.
- [22] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2544.
- [23] Z. Han, J. Tian, Q. Lai, X. Yu, G. Li, Surf. Coat. Technol. 162 (2003) 189
- [24] M. Bernard, A. Deneuve, O. Thomas, P. Gergaud, P. Sandstrom, J. Birch, Thin Solid Films. 380 (2000) 252–255.
- [25] C.C. Chen, N.T. Liang, W.S. Tse, L.Y. Chen, J.G. Duh, Chin. J. Phys. 32 (1994) 2.
- [26] H.C. Barshilia, K.S. Rajam, J. Mater. Res. 19 (2004) 11.
- [27] W. Spengler, R. Kaiser, A.N. Christensen, and G. Muller-Vogt: Raman scattering, superconductivity and phonon density of states of stoichiometric and non-stoichiometric TiN. Phys. Rev. B 17, 1095 (1978).
- [28] R.J. Nemanich, R.T. Fulks, B.L. Stafford, H.A. Vander Plas. “Initial reactions and silicide formation of titanium on silicon studied by Raman spectroscopy, J. Vac. Sci. Technol. A 3, 1985. p.938-941.
- [29] P.A. Temple, C.E. Hathaway, Multiphonon Raman spectrum of silicon, Phys. Rev. B 7(8) (1973) 3685.
- [30] R.J. Nemanich, R.W. Fiordalice, H. Jeon, “**Raman scattering characterization of titanium silicide formation**”, IEEE J. Quantum Elec. 25(5) (1989) 997.
- [31] R.W. Mann, L.A. Clevenger, P.D. Agnello, F.R. White, Silicides and local interconnections for high-performance VLSI applications, IBM J. Res. Develop. 39(4) (1995) 403.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องมือในกระบวนการสร้าง

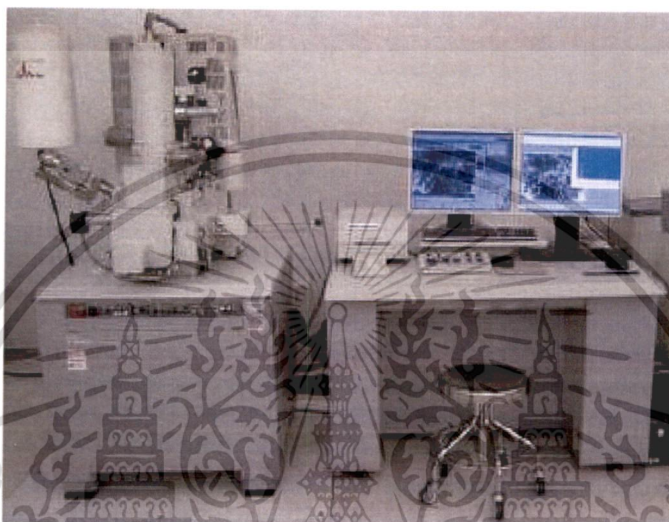


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องมือการตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางกายภาพ

สามารถตรวจวัดสมบัติเฉพาะทางกายภาพ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ชนิดต่างๆ ดังนี้ คือ

- 1) เครื่องจักร FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscope) รุ่น S4700 ของบริษัท Hitachi สำหรับตรวจสอบลักษณะพื้นผิว และ ความหนาของชั้นฟิล์มบางที่เตรียมได้

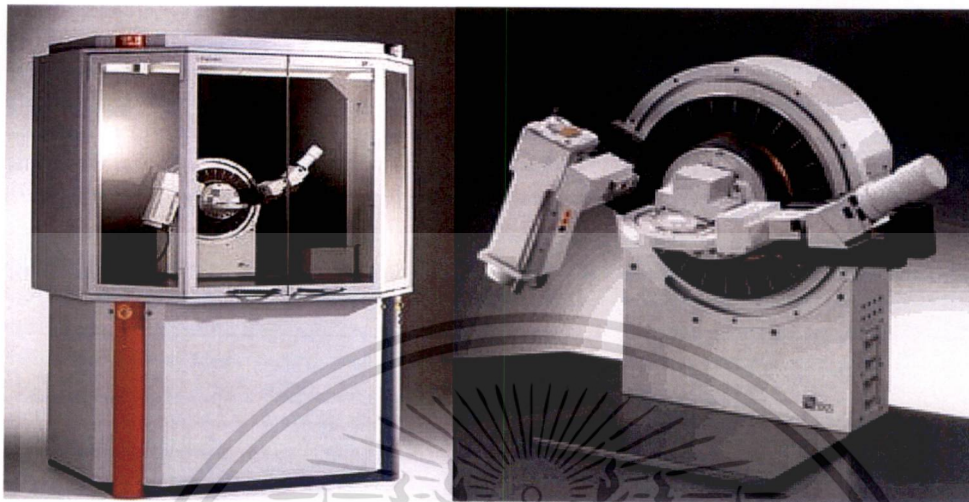


SPECIFICATION :

- Magnification 30x – 500,000x
- 2.1 nm. resolution at 1 kV.
- 1.5 nm. resolution at 15 kV.
- Sample size up to 6 inches diameter with a thickness <1cm.
- 2 secondary electron detectors at different positions for optimum surface image
- Measure the size of the structure by using CD measurement mode
- Storage image with digital file or thermal printing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance ของบริษัท Bruker สำหรับตรวจสอบชนิดของผลึก และ ความเป็นผลึกของฟิล์มบางที่เตรียมได้



SPECIFICATION :

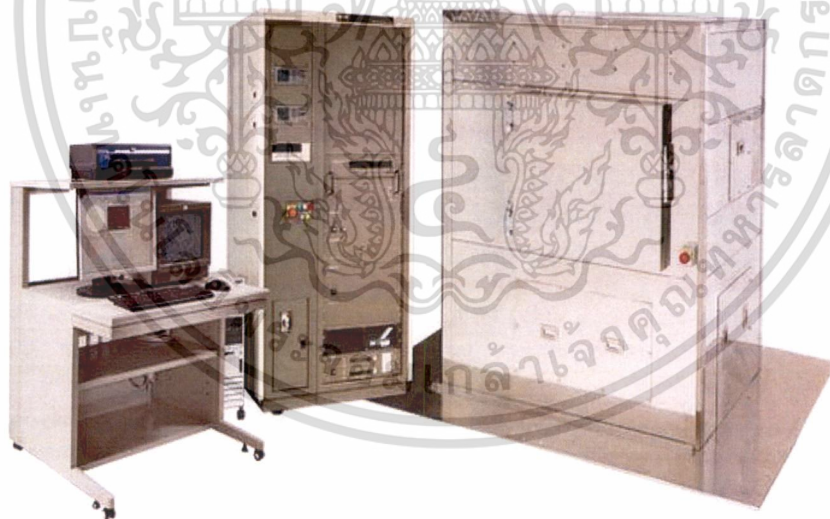
- X-ray tube assembly. There are no user-changeable parts.
- Anti-scatter slit module is used to adjust peak resolution.
- Ni filter is typically used to remove Cu K β .
- Soller slit corrects for axial divergence.
- Lynxeye_XE detector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) เครื่องจักร Raman Spectroscopy รุ่น NTEGRA Spectra บริษัท NT_MDT สำหรับตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มบางที่เตรียมได้



4) เครื่องจักร AES (Auger Electron Spectroscopy) รุ่น PHI 700 Auger Nanoprobe ของบริษัท Ulvac สำหรับตรวจสอบองค์ประกอบธาตุบนพื้นผิว และ ในเนื้อฟิล์มบางที่เตรียมได้



Specification:

- Detect all elements (Li-U) except H and He
- Detection limits: ~1 - 0.1 atomic %
- Surface sensitive: top 4-50 Å
- Spatial resolution: ≤ 60 Å probe size
- Analysis beam: Electrons
- Information content: Elements

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) Four Point Probe ยี่ห้อ OmniMap รุ่น RS-30



Measurement Performance

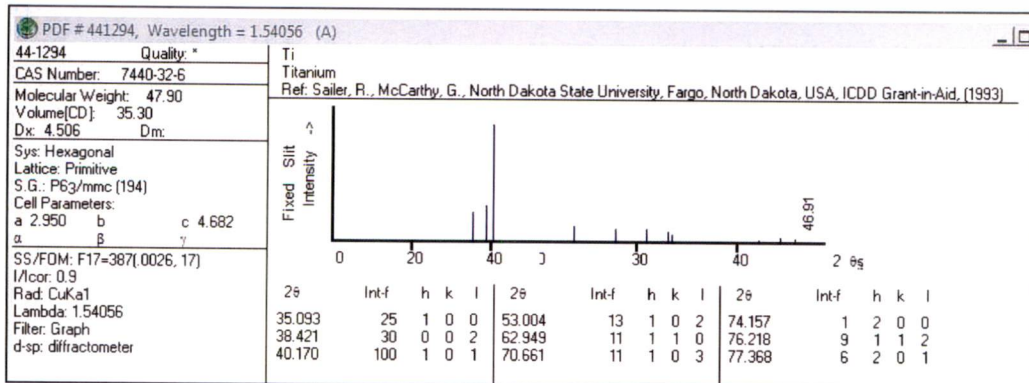
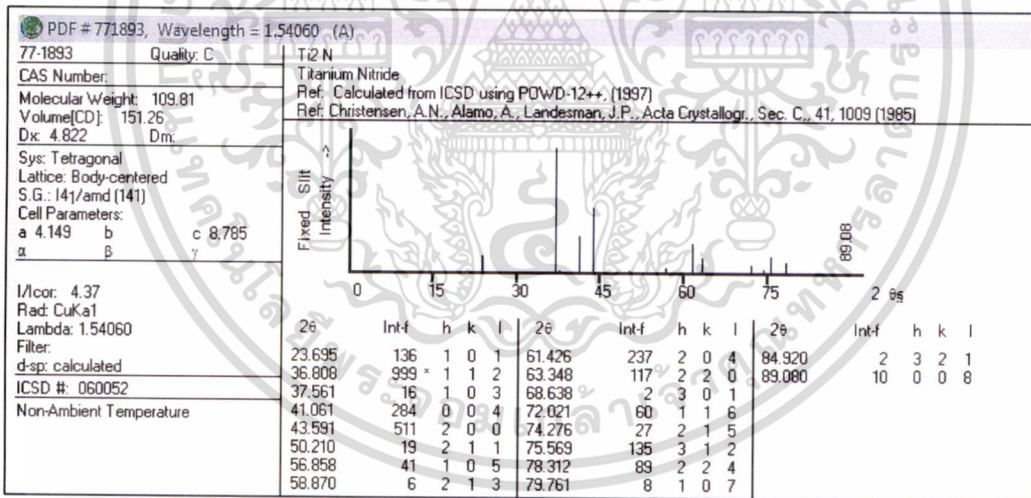
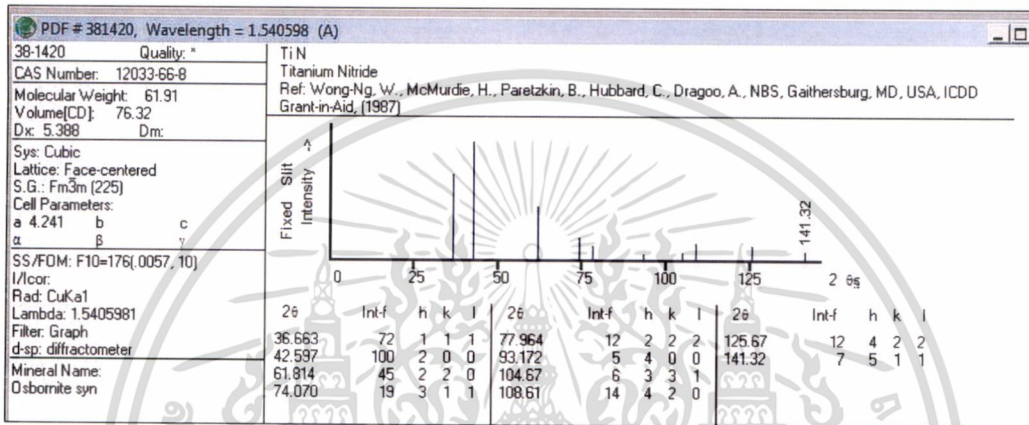
- Measurement range: $5\text{m}\Omega/\text{sq.}$ to $5\text{M}\Omega/\text{sq.}$
- Measurement time: typically 3.5-4.5 seconds per test site
 - Absolute accuracy based on NBS standard wafers corrected to $23^\circ\text{C} \pm 1\%$
 - Measurement repeatability based on NBS standard wafers: $<0.2\%$ (1σ)
 - Accuracy based on precision resistor networks: ± 0.1 (1 mV- 1V)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การอ้างอิงพีคของ XRD และ Raman Shift

1. การอ้างอิงพีคของ XRD จาก PCPDFWIN



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การอ้างอิงพีค Raman Shift จากบทความวิชาการ

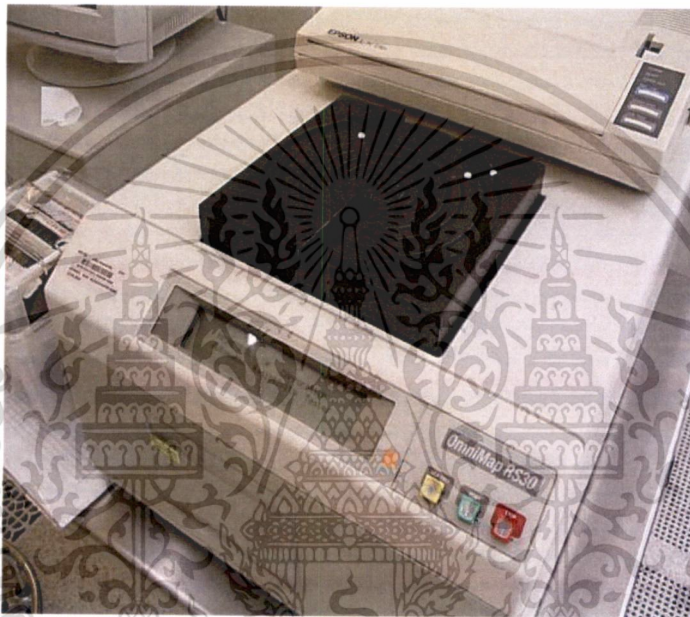
ชื่อวัสดุ	Raman Shift (cm^{-1})	อ้างอิง
Si (100)	116, 228, 302, 435, 521, 619, 671, 820	[27]
Ti (hcp)	138	[27]
TiN	100, 400, 500, 700 (Broad Peak), 200-210, 242, 310, 515-540, 556-559, 562-565, 605, 820, 1128	[23-26]
TiO ₂ (Rutile)	143, 445, 605, 615 (Strong Peak)	[25]
TiO ₂ (Anatase)	143-147 (Strong Peak), 147, 155, 197, 395, 514, 518, 527, 639, 792	[23],[24]
TiAlN	273, 651	[24]
TiSi ₂ (C49)	269, 294, 333, 355	[28, [30]]
TiSi ₂ (C54)	196, 206, 245, 252	[29], [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

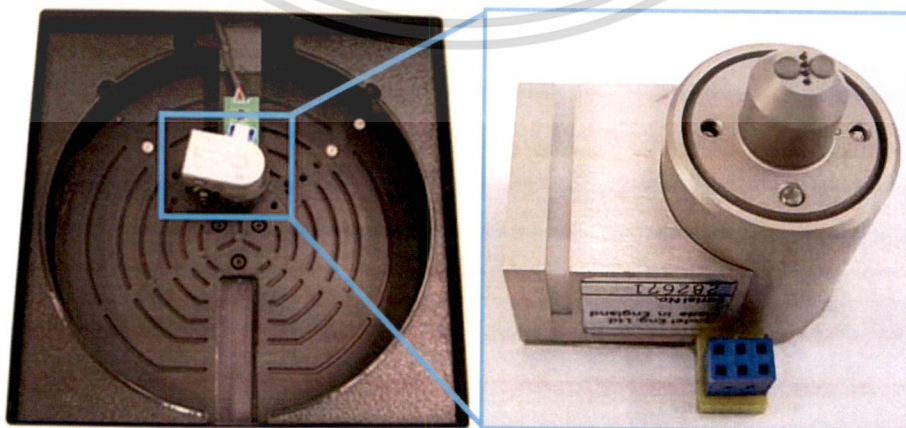
ภาคผนวก ค

รายละเอียดการตั้งค่าการวัดทางไฟฟ้า

1. การวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่นด้วยเครื่อง Four Point Probe



โดยใช้หัววัดชนิด A ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดฟิล์มโลหะ

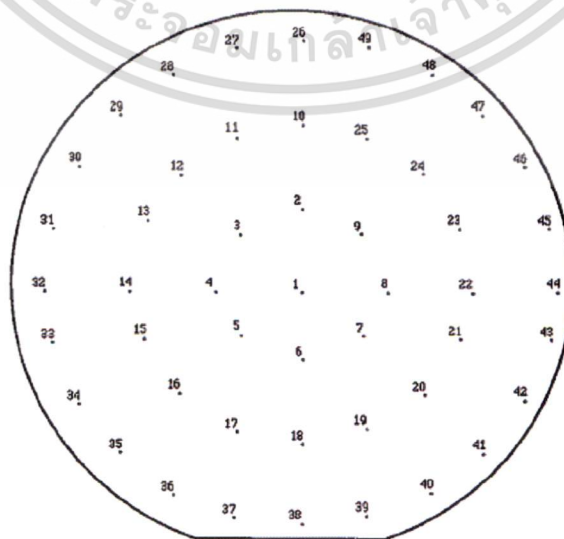


ตารางแสดงชนิดของหัววัด Four Point Probe ชนิดต่างๆ ตามการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROBE TYPE	TIP RADIUS	SPRING LOAD	MATERIAL	SPACING	APPLICATION
A	1.6 mils (40 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	40 mils (1mm)	For measuring metals
F	1.6 mils (40 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	25 mils (0.6mm)	
B	4.0 mils (100 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	40 mils (1mm)	General purpose head for implantation, doped poly, epitaxy, diffusion.
G	4.0 mils (100 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	25 mils (0.6mm)	
C	8.0 mils (200 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	40 mils (1mm)	For high impedance surfaces such as low implant doses and shallow junctions.
H	8.0 mils (200 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	25 mils (0.6mm)	
D	20 mils (500 μm)	100 grams	Tungsten Carbide	40 mils (1mm)	For very difficult implant and high impedance surfaces beyond the 8.0 mils (200 μm)
E	1.6 mils (40 μm)	200 grams	Tungsten Carbide	62.5 mils (1.5mm)	For substrate measurements

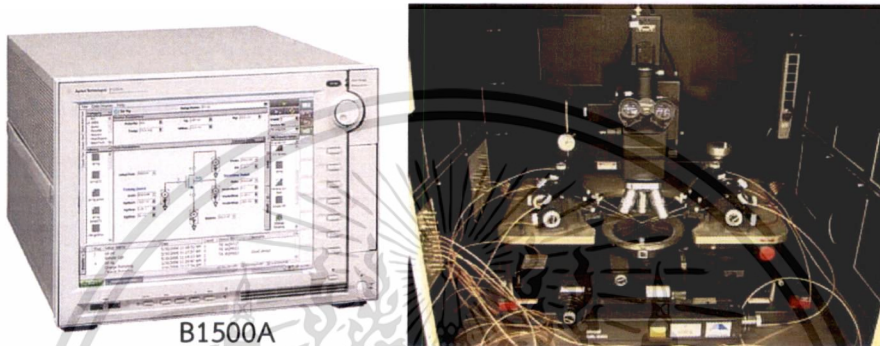
ในการวัดค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet Resistance) เพื่อนำไปคำนวณหาสภาพต้านทาน (Resistivity) จะทำการวัดจำนวน 49 ตำแหน่ง ของฟิล์มโลหะที่ปลูกบนฐานรองซิลิคอนขนาด 6 นิ้ว แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

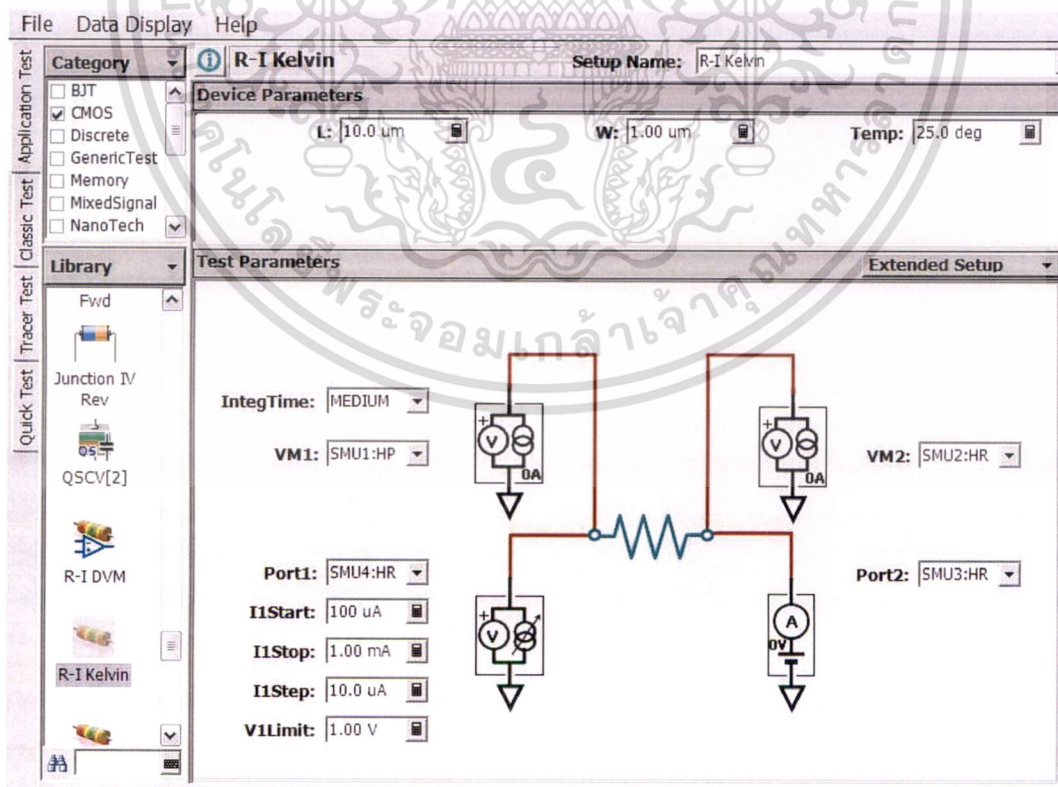
2. การวัดค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัส (Contact Resistance) ด้วย Probe Station

เครื่องมือวัดประกอบด้วยหัวเข็มวัดชิ้นงาน (Probe Station) ต่อกับ Agilent รุ่น B1500A Semiconductor Device Analyzer ทำหน้าที่วัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cross-Bridge Kelvin Resistance เพื่อหาค่าความต้านทานรอยต่อสัมผัส (Contact Resistance)



B1500A

โดยควบคุมการทำงานและบันทึกผลด้วยโปรแกรม Easy Expert



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าในการวัดค่าความต้านทานสัมผัสของโปรแกรม Easy Expert

R-I kelvin: Resistor R-I characteristics, Kelvin connection (A.01.11)

[Description]

Measures the resistance vs current characteristics (R-I characteristic).

[Device Under Test]

Resistor, 2 terminals

Connect the Port1 and VM1 modules to a terminal, the Port2 and VM2 modules to the other terminal.

[Device Parameters]

L: Resistor length

W: Resistor width

Temp: Temperature

[Test Parameters]

IntegTime: Integration time

Port1: SMU connected to resistor, primary sweep current output

I1Start: Sweep start current

I1Stop: Sweep stop current

I1Step: Sweep step current

V1Limit: Port1 voltage compliance

Port2: SMU connected to resistor, constant voltage output

VM1: SMU connected to resistor, constant current output

VM2: SMU connected to resistor, constant current output

[Extended Test Parameters]

V2: Port2 output voltage

IM1: VM1 output current

IM2: VM2 output current

HoldTime: Hold time

DelayTime: Delay time

[Measurement Parameters]

Port1 measurement voltage V1

VM1 measurement voltage Vm1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VM2 measurement voltage Vm2

[User Function]

Voltage between terminals $\Delta V = V_{m1} - V_{m2}$

Resistance $R = \Delta V / I_1$

Sheet resistance $R_{sheet} = R * W / L$

[X-Y Graph]

X axis: Port1 output current I1 (LINEAR)

Y1 axis: Resistance R (LINEAR)

Y2 axis: Voltage between terminals ΔV (LINEAR)

[List Display]

Port1 output current I1

Port1 measurement voltage V1

Resistance R

Voltage between terminals ΔV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายอภิรักษ์ ผันเขียว
 Name-Surname Mr. Apirak Pankiew
 วัน เดือน ปีเกิด 7 พฤษภาคม 2527 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
 ที่อยู่ 360/ 95 ซอยร่มเกล้า 18 ถนนร่มเกล้า แขวง/ เขต มีนบุรี กทม. 10510
 โทรศัพท์ 085-9065507

ประวัติการศึกษา

มัธยมศึกษา โรงเรียนเทพศิรินทร์ร่มเกล้า จบการศึกษา พ.ศ. 2545
 ปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 จบการศึกษา พ.ศ. 2549
 ปริญญาโท วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
 สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จบการศึกษา
 พ.ศ. 2556

ความสนใจเฉพาะด้าน

- 1) Materials Characterization
- 2) Measurement Analysis (MSA)

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. A.Pankiew, W.Bunjongpru, N.Somwang, S.Porntheeraphat, S.Pratontep, S.Sophitpan, J.Nukeaw, C.Hruanun and A.Poyai, "The Optimization of TiN Film Deposited by DC Magnetron Sputtering Provided for Al Diffusion Barrier", Advanced Materials Research, Vols. 93-94, 2010, pp 578-582.
2. A.Pankiew, W.Bunjongpru, N.Somwang, S.Porntheeraphat, S.Sophitpan, J.Nukeaw, C.Hruanun and A.Poyai, "A Study of TiN Films Morphology Deposited by DC Magnetron Sputtering in Different N₂:Ar Mixtures", Proceedings of the 27th MST Annual Conference, 20-22 January 2010, Samui, Thailand.
3. Udom Jiramongkolsiri, Pitiporn Thanomngam, **Apirak Pankiew**, Supanit Porntheerapat, and Jiti Nukeaw, "Surface Morphology and Structural Investigation of TiN Nanocrystal Thin Films Grown with Different N₂ Concentration", Advanced Materials Research, Vol. 651, 2013, pp 91-96.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานที่ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ

1. P.Khomdet, P.Wipathawit, W.Bonjongpru, S.Porntheeraphat, **A.Pankiew**, N.Klunngien, S.Sopitpan, C.Hruanun, A.Poyai and J.Nukeaw, “The study of Diffusion Barrier Layer in Al-alloy/TiN/TiSi₂/Si Structures by D.C. Magnetron Sputtering”, Proceedings of the 27th MST Annual Conference, 20-22 January 2010, Samui, Thailand (Poster Presentation).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้