

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ลักษณะอะลูมิเนียมออกไซด์หลังฝังอาร์กอนไอออน

4.1.1 การฝังอาร์กอนไอออนในทับทิมสังเคราะห์

ตัวอย่างที่ฝังอาร์กอนไอออนในทับทิมสังเคราะห์ ที่โดสต่ำ คือ 5×10^{15} , 1×10^{16} ไอออน/ซม² มีสีใกล้เคียงกับชิ้นงานก่อนฝังไอออนมาก ไม่สามารถแยกได้ด้วยตาเปล่า ในตัวอย่างที่เหลือคือที่ฝังด้วยโดส 5×10^{16} , 1×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² ให้แสงผ่านได้น้อยลงเมื่อเทียบกับที่ฝังด้วยโดสต่ำ

4.1.2 การฝังอาร์กอนไอออนในแซฟไฟร์สังเคราะห์

การฝังอาร์กอนไอออนในแซฟไฟร์สังเคราะห์ ให้ผลคล้ายกับที่ได้ในทับทิมสังเคราะห์ กล่าวคือที่โดส 5×10^{15} , 1×10^{16} และ 5×10^{16} ไอออน/ซม² ตัวอย่างมีสีและความใสเหมือนกับชิ้นงานก่อนฝังไอออน ไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า ตัวอย่างที่ฝังไอออนด้วยโดส 1×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² ให้แสงผ่านได้น้อยลงเมื่อเทียบกับที่โดสต่ำ เช่นเดียวกัน

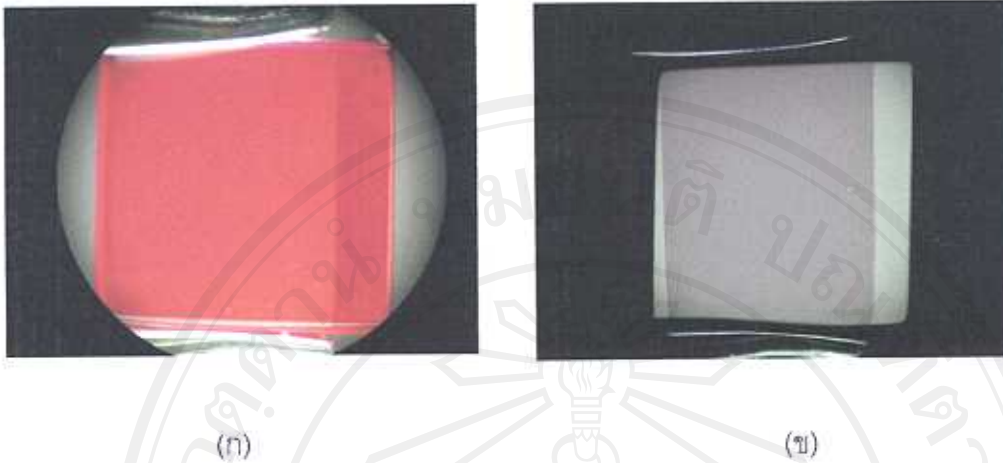
4.2 ลักษณะอะลูมิเนียมออกไซด์หลังฝังออกซิเจนไอออน

4.2.1 การฝังออกซิเจนไอออนในทับทิมสังเคราะห์

การฝังออกซิเจนไอออนในทับทิมสังเคราะห์ ที่โดสต่ำ คือ 5×10^{15} และ 1×10^{16} ไอออน/ซม² ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความใสของตัวอย่าง ส่วนตัวอย่างที่ฝังด้วยโดส 1×10^{17} , 5×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² มีการผ่านแสงได้น้อยลง

4.2.2 การฝังออกซิเจนไอออนในแซฟไฟร์สังเคราะห์

การฝังออกซิเจนไอออนในแซฟไฟร์สังเคราะห์ ให้ผลเหมือนกับในทับทิมสังเคราะห์ กล่าวคือที่โดสต่ำจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เมื่อโดสสูงขึ้นจะมีการผ่านแสงได้น้อยลง



รูป 4.1 ลักษณะตัวอย่างหลังฝังไอออน (ก) ทับทิมสังเคราะห์ (ข) แชนไฟร์สังเคราะห์

4.2 การวัดดัชนีหักเห

ผลการวัดดัชนีหักเหในทับทิมและแชนไฟร์สังเคราะห์ในตัวอย่างทั้ง 20 ตัวอย่าง ของอะลูมิเนียมออกไซด์ก่อนฝังไอออน หลังฝังไอออน และหลังอบ ที่ 800°C แสดงในตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 เนื่องจากทับทิมและแชนไฟร์สังเคราะห์มีเครื่องหมายทางแสงเป็นลบ ดังนั้นจึงมีค่า n_o มากกว่า n_e

หลังการฝังไอออนที่โดสต่างๆ พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีหักเหของตัวอย่าง และในชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง ก็ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเหจากการสังเกตในขณะวัดดัชนีหักเหพบว่า ชิ้นตัวอย่างที่ฝังไอออนในปริมาณโดสที่สูง โดยเฉพาะฝังด้วยอาร์กอนนั้น สามารถสังเกตเห็นแถบมืดของ n_o และ n_e ที่มองผ่านเลนส์ตาได้ยากขึ้นแต่เมื่อชิ้นตัวอย่างผ่านการอบ แถบมืดนี้สามารถสังเกตเห็นได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ 4.1 ดัชนีหักเหของทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์ ก่อนฝังไอออน หลังฝังอาร์กอนไอออน และหลังอบที่ 800 °ซ เวลา 1 ชั่วโมง

รหัสตัวอย่าง	ค่าดัชนีหักเห ^a ที่ $\lambda = 589 \text{ nm}$					
	ก่อนฝังไอออน		หลังฝังไอออน Ar ⁺		หลังอบ	
	n_o	n_E	n_o	n_E	n_o	n_E
R1	1.777	1.768	1.779	1.769	1.778	1.768
R2	1.778	1.769	1.779	1.769	1.778	1.770
R3	1.777	1.768	1.777	1.769	1.778	1.770
R4	1.778	1.768	1.780	1.770	1.778	1.770
R5	1.778	1.769	1.779	1.770	1.778	1.770
S1	1.770	1.762	1.770	1.762	1.770	1.762
S2	1.771	1.762	1.770	1.762	1.770	1.762
S3	1.771	1.762	1.771	1.762	1.770	1.762
S4	1.771	1.761	1.770	1.761	1.770	1.762
S5	1.770	1.762	1.770	1.761	1.770	1.762

^a ค่า uncertainty ของดัชนีหักเหมีค่า ± 0.002

ตารางที่ 4.2 ดัชนีหักเหของทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์ ก่อนฝังไอออน หลังฝังออกซิเจนไอออน และหลังอบที่ 800 °ซ เวลา 1 ชั่วโมง

รหัสตัวอย่าง	ค่าดัชนีหักเห ^a ที่ $\lambda = 589 \text{ nm}$					
	ก่อนฝังไอออน		หลังฝังไอออน O ⁺		หลังอบ	
	n_o	n_E	n_o	n_E	n_o	n_E
R6	1.777	1.769	1.778	1.768	1.778	1.768
R7	1.778	1.768	1.778	1.768	1.778	1.768
R8	1.779	1.768	1.778	1.768	1.778	1.769
R9	1.779	1.770	1.779	1.770	1.779	1.770
R10	1.779	1.770	1.778	1.769	1.778	1.768
S6	1.770	1.762	1.771	1.762	1.772	1.762
S7	1.770	1.762	1.770	1.762	1.770	1.762
S8	1.770	1.762	1.770	1.762	1.770	1.762
S9	1.771	1.762	1.771	1.762	1.771	1.762
S10	1.771	1.762	1.772	1.762	1.772	1.762

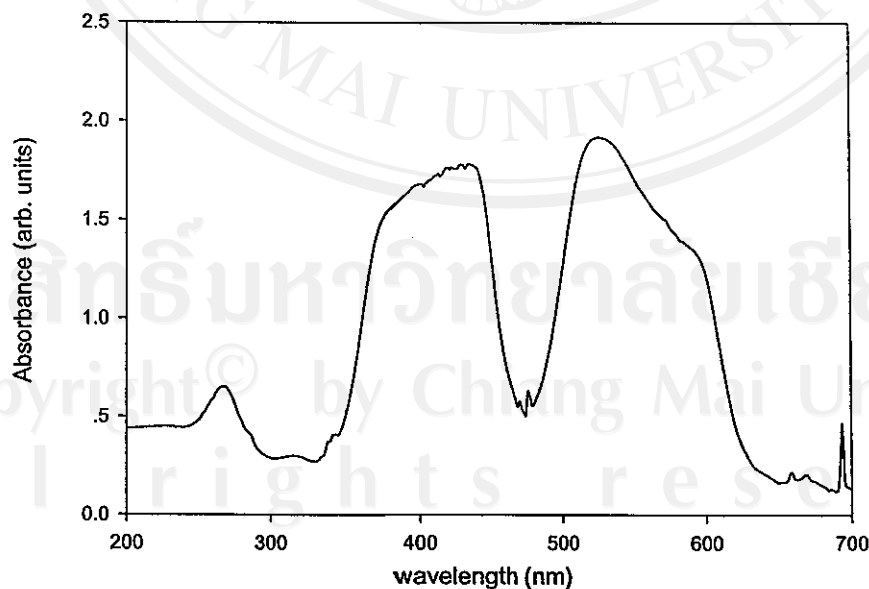
^a ค่า uncertainty ของดัชนีหักเหมีค่า ± 0.002

4.4 การวัดการดูดกลืนแสงก่อนและหลังฝังไอออน

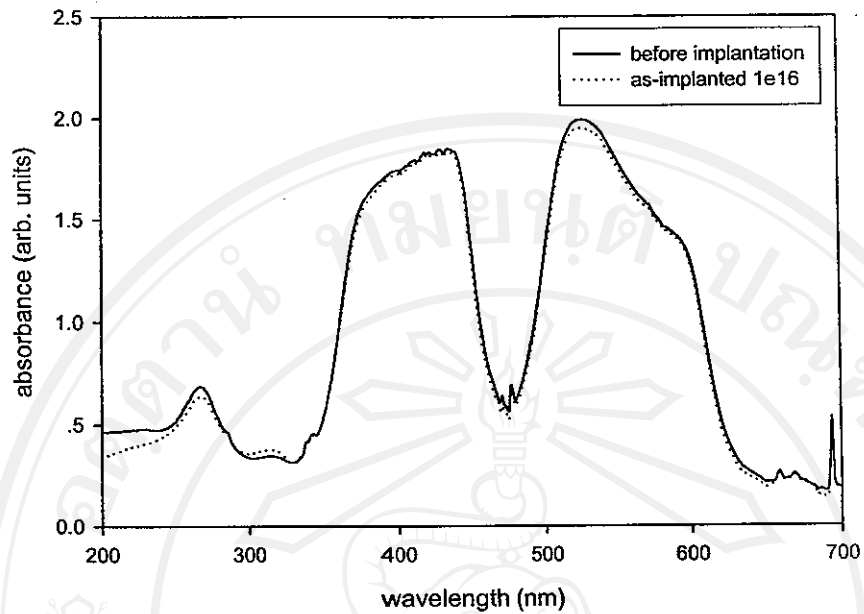
การวัดการดูดกลืนแสงก่อนและหลังฝังไอออนในทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์ ได้ใช้เฉพาะเครื่อง spectrophotometer ของ Acton Research Corporation ได้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของตัวอย่างก่อนและหลังฝังอาร์กอนไอออนที่โดส 1×10^{16} , 1×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการฝังไอออนบนทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การวัดการดูดกลืนแสงก่อนและหลังฝังไอออนในทับทิมสังเคราะห์

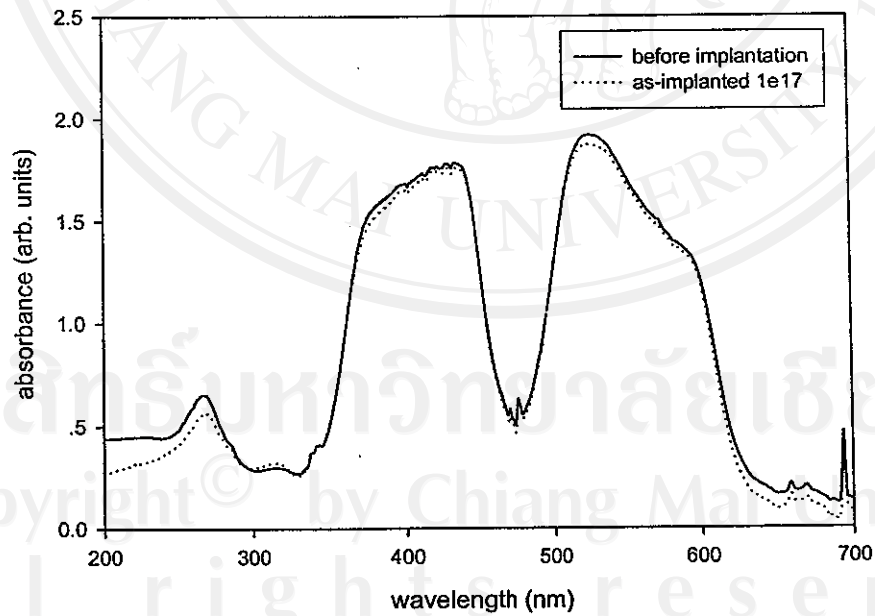
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์ก่อนฝังไอออน มีการดูดกลืนแสงเป็นช่วงแคบที่ 267 นาโนเมตร และช่วงกว้าง 2 ช่วงคือ 370 - 450 นาโนเมตร และ 500-600 นาโนเมตร โดยมีพีคเล็กๆ ที่ 469, 475, 660, 669 และคมชัดที่ 694 นาโนเมตร พีคการดูดกลืนแสงมีค่าสูงสุดที่ 525 นาโนเมตร ซึ่งตำแหน่งของการดูดกลืนแสงเหล่านี้เกิดจาก Cr^{3+} (Themelis, 1992 และ Siripaisarnpipat et al., 2002) โดยลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์ก่อนการฝัง Ar^+ แสดงดังรูป 4.2 และหลังการฝังด้วย Ar^+ ที่โดส 1×10^{16} , 1×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีลักษณะโดยรวมไม่ต่างจากก่อนฝังไอออน แต่ความเข้มของการดูดกลืนแสงหลังฝังไอออนลดลงในช่วง 200-280 และ 620-700 นาโนเมตร โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์ก่อนและหลังฝังด้วยอาร์กอนไอออนแสดงในรูป 4.3-4.5



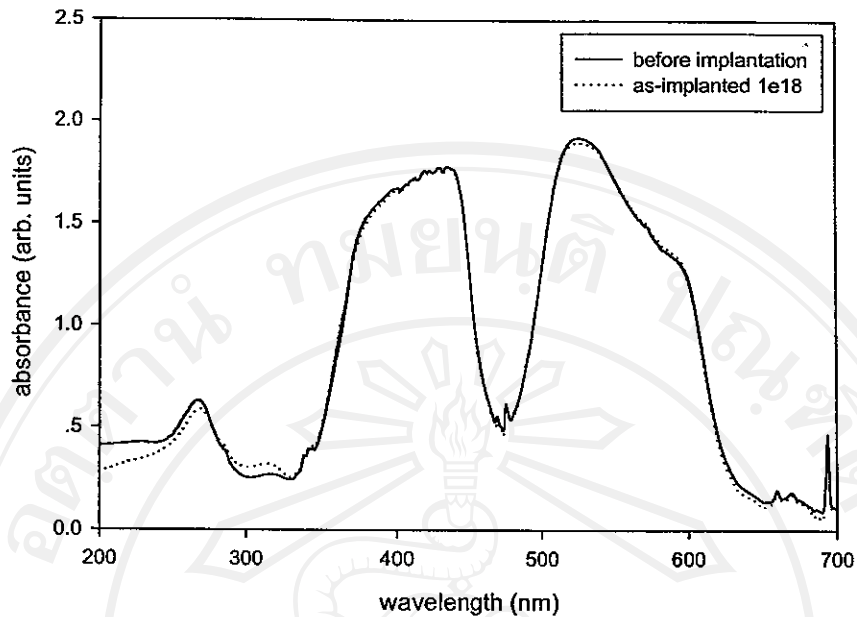
รูป 4.2 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์ก่อนการฝังไอออน



รูป 4.3 การดูดกลืนแสงของฟิล์มสังเคราะห์ ก่อนและหลังฝัง Ar^+ โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 9.30 นาที



รูป 4.4 การดูดกลืนแสงของฟิล์มสังเคราะห์ ก่อนและหลังฝัง Ar^+ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 1.38 ชั่วโมง



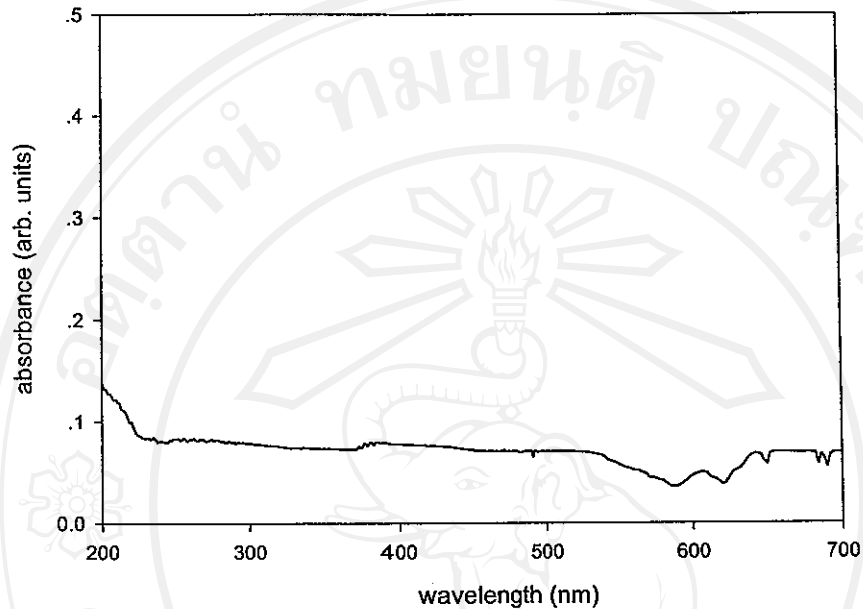
รูป 4.5 การดูดกลืนแสงของฟิล์มสังเคราะห์ ก่อนและหลังฝัง Ar^+ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² เวลา 5.26 ชั่วโมง

4.4.2 การวัดการดูดกลืนแสงก่อนและหลังฝังไอออนในเซฟไฟร์สังเคราะห์

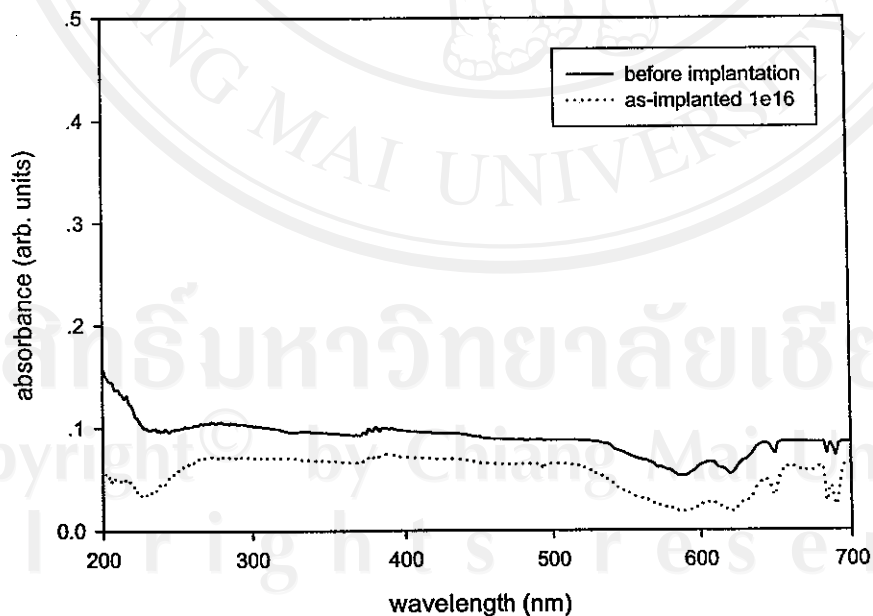
การวัดการดูดกลืนแสงด้วย Acton spectrophotometer เพื่อเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงก่อนและหลังฝังไอออนในเซฟไฟร์สังเคราะห์ เนื่องจากเซฟไฟร์สังเคราะห์มีลักษณะใสและไม่มีสี มีค่าการดูดกลืนแสงซึ่งต่ำตลอดทุกความยาวคลื่น โดยสเปกตรัมก่อนการฝังไอออนมีความเข้มสูงสุดที่ 200 นาโนเมตร และลดลงอย่างต่อเนื่องถึง 230 นาโนเมตร และค่อนข้างคงที่ในช่วง 230-540 นาโนเมตรและลดต่ำลงในช่วง 550 –650 นาโนเมตร หลังจากนั้นจะคงที่จนถึง 700 นาโนเมตร ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ก่อนการฝังอาร์กอนไอออนแสดงดังรูป 4.6

หลังการฝังด้วย Ar^+ ที่โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีลักษณะโดยรวมเหมือนเดิมแต่มีความเข้มหลังฝังไอออนลดลง 63 % ในช่วง 200 –230 นาโนเมตร และประมาณ 26 % ในช่วง 280-700 นาโนเมตร เซฟไฟร์สังเคราะห์ที่ฝัง Ar^+ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² ความเข้มของการดูดกลืนแสงหลังฝังไอออนลดลงมากที่สุดคือ 63 % ในช่วง 200 –230 นาโนเมตร และมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างก่อนฝังไอออนในช่วง 310-450 นาโนเมตรลดลงอีกครั้งในช่วง 280-700 นาโนเมตร และที่โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² สเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังฝังไอออนลดลง 70 % ที่ 200-230 นาโนเมตร และเพิ่มขึ้นจนมีความเข้มเท่ากับก่อนฝังไอออนที่ 262 นาโนเมตร และค่อยๆ ลดลง โดยมีลักษณะการดูดกลืนแสงเหมือนตัวอย่างก่อนฝังไอออนแต่มี

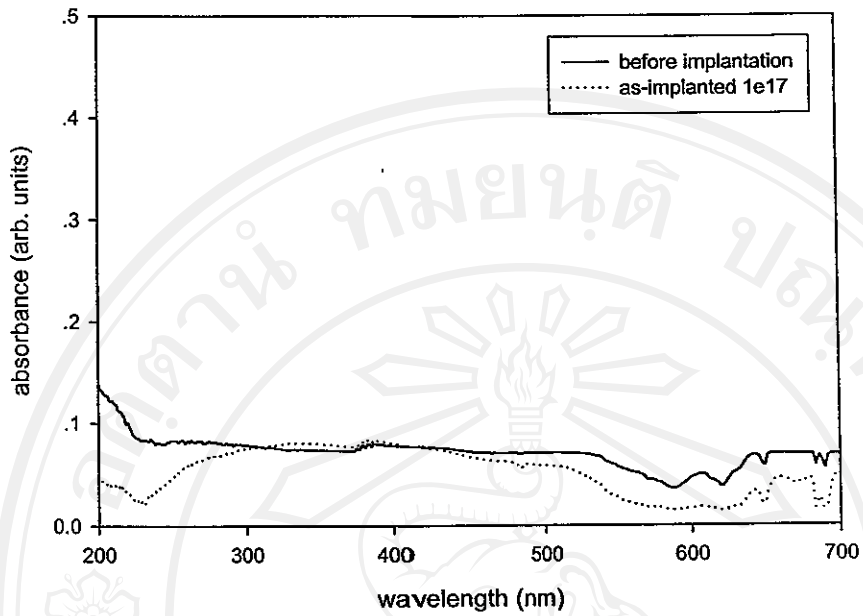
ความเข้มลดลงประมาณ 34% สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ก่อนและหลังฝังด้วยอาร์กอนไอออนที่โดส 1×10^{16} , 1×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² แสดงในรูป 4.7-4.9



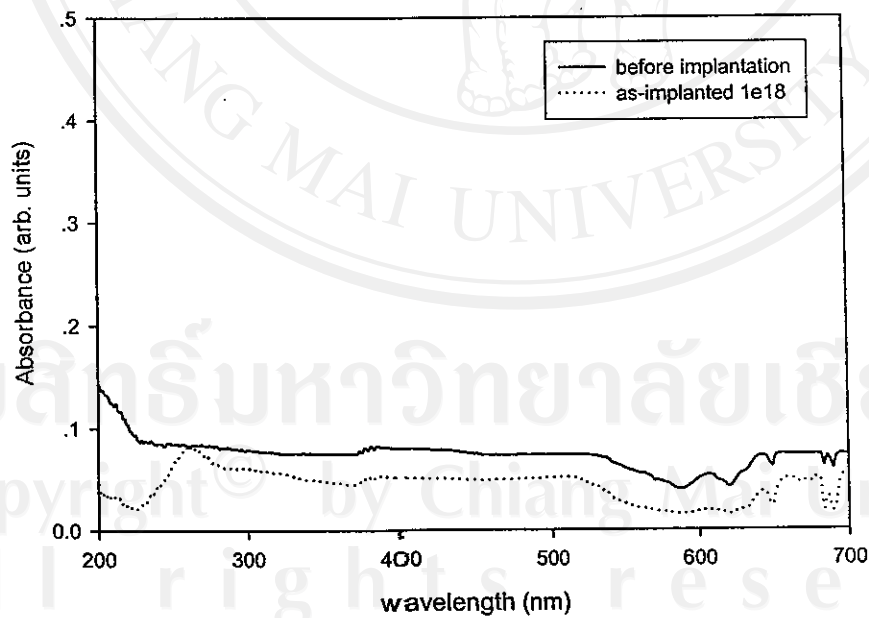
รูป 4.6 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ก่อนการฝังไอออน



รูป 4.7 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ ก่อนและหลังฝัง Ar^+ โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 9.30 นาที



รูป 4.8 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ ก่อนและหลังฝัง Ar^+ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 1.38 ชั่วโมง



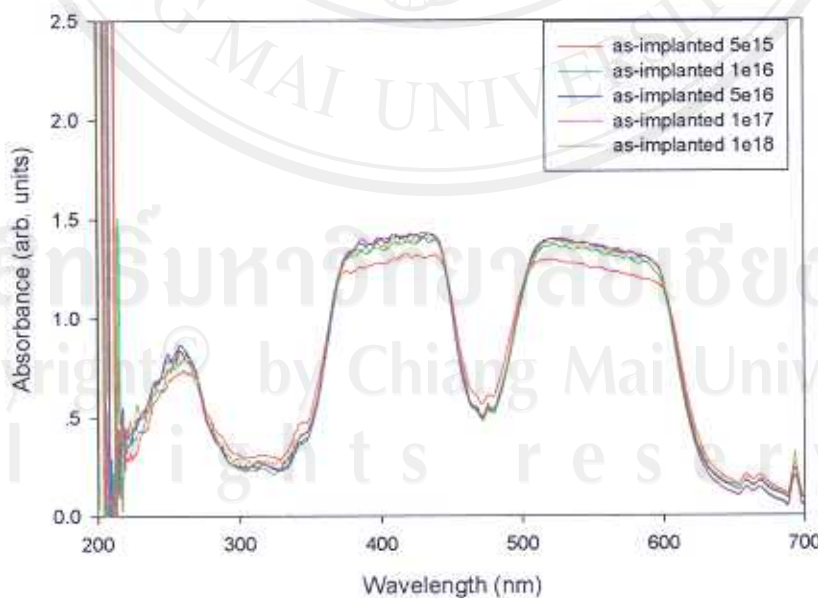
รูป 4.9 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ ก่อนและหลังฝัง Ar^+ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² เวลา 5.26 ชั่วโมง

4.5 การดูดกลืนแสงหลังฝังไอออนและหลังอบในทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์

การวัดการดูดกลืนแสงของทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์ โดยใช้ UV-VIS-NIR spectrophotometer รุ่น U-4100 ของบริษัท HITACHI เพื่อเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงหลังฝังไอออนที่โดสต่างๆ และหลังอบที่ 800 °ซ มีลักษณะการดูดกลืนแสงดังนี้

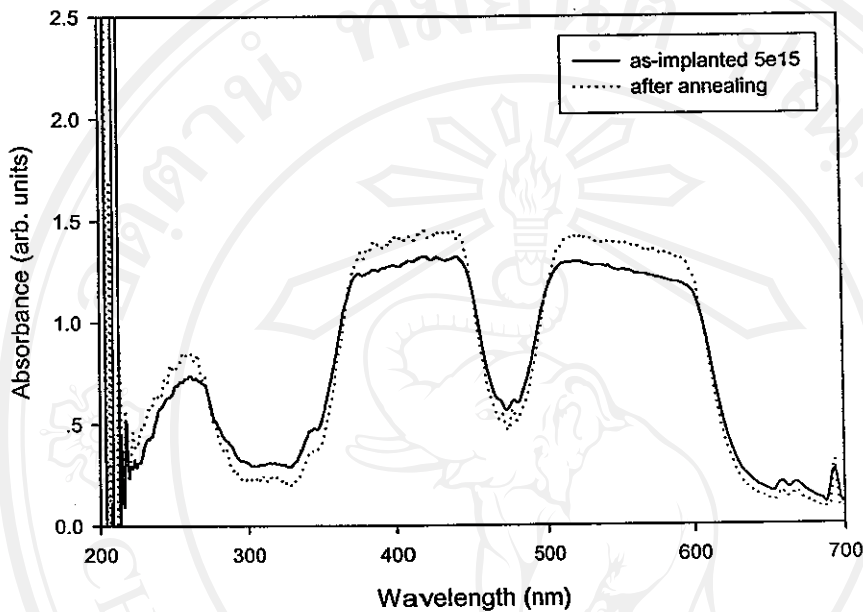
4.5.1 การดูดกลืนแสงหลังฝังอาร์กอนไอออนและหลังอบในทับทิมสังเคราะห์

การดูดกลืนแสงในทับทิมสังเคราะห์หลังฝังอาร์กอนไอออนที่โดสต่างๆ มีลักษณะไม่แตกต่างจากสเปกตรัมก่อนฝังไอออน คือยังคงเป็นลักษณะเฉพาะของการดูดกลืนแสงที่เกิดจาก Cr^{3+} คือ มีการดูดกลืนแสงที่ 260 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงเป็นช่วงกว้างตั้งแต่ 370 ถึงสูงสุดที่ประมาณ 440 นาโนเมตร หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว การดูดกลืนแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนถึง 510 นาโนเมตร ช่วงการดูดกลืนแสงเป็นบริเวณกว้างถึง 590 นาโนเมตร และมีพีคเล็กๆ ที่ 667 และ 696 นาโนเมตร รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังฝัง Ar^+ ในทับทิมสังเคราะห์ที่โดสต่างๆ พบว่าตัวอย่างที่ฝังด้วยโดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² มีการดูดกลืนแสงในช่วง 370 - 450 และ 510 - 590 นาโนเมตร ต่ำกว่าที่โดสอื่นๆ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แตกต่างกันประมาณ 10%

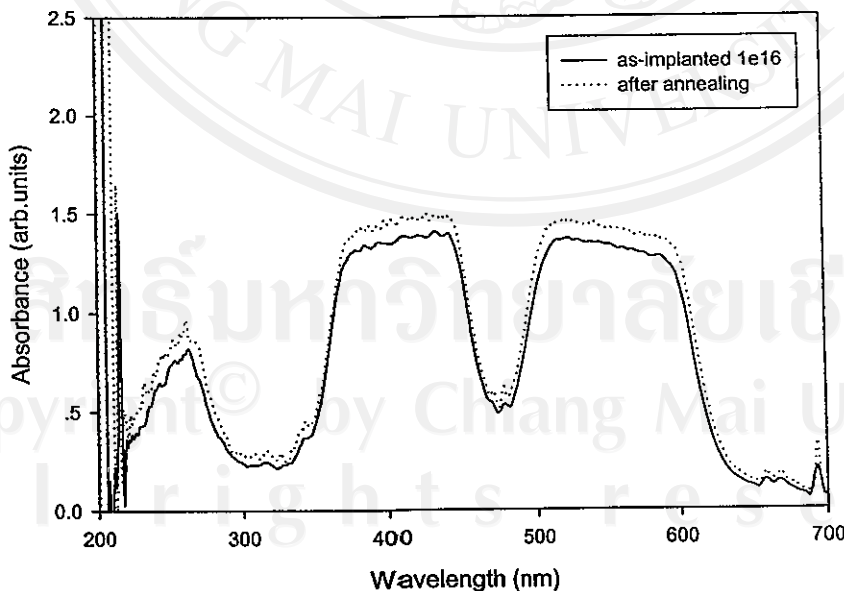


รูป 4.10 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังการฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ที่โดสต่างๆ

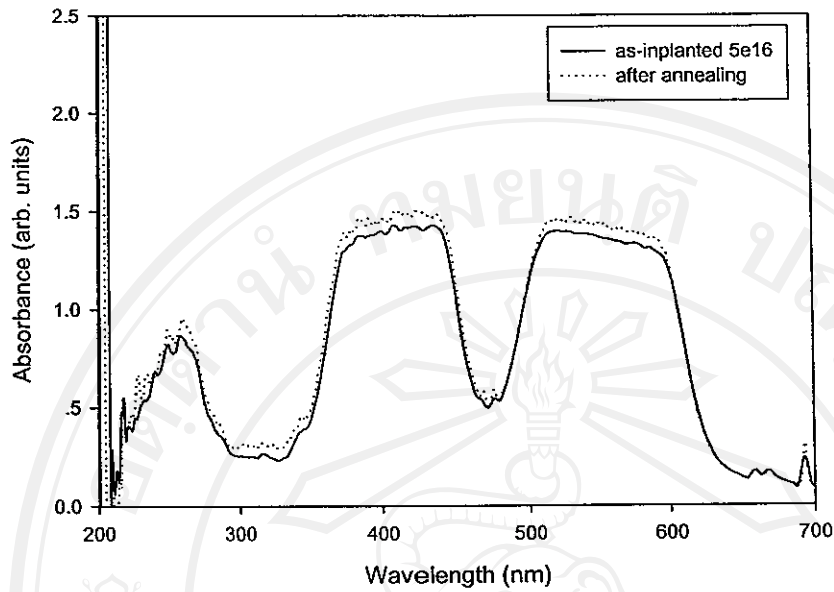
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝังไอออนที่โดสต่างๆ พบว่าหลังอบที่ 800°C สเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดในตัวอย่างที่ฝังด้วยโดสสูงสุดคือ 1×10^{16} ไอออน/ cm^2 คือ ประมาณ 11% การเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ฝังไอออนที่โดสต่างๆ ก่อนและหลังอบ ดังแสดงในรูป 4.11 - 4.15



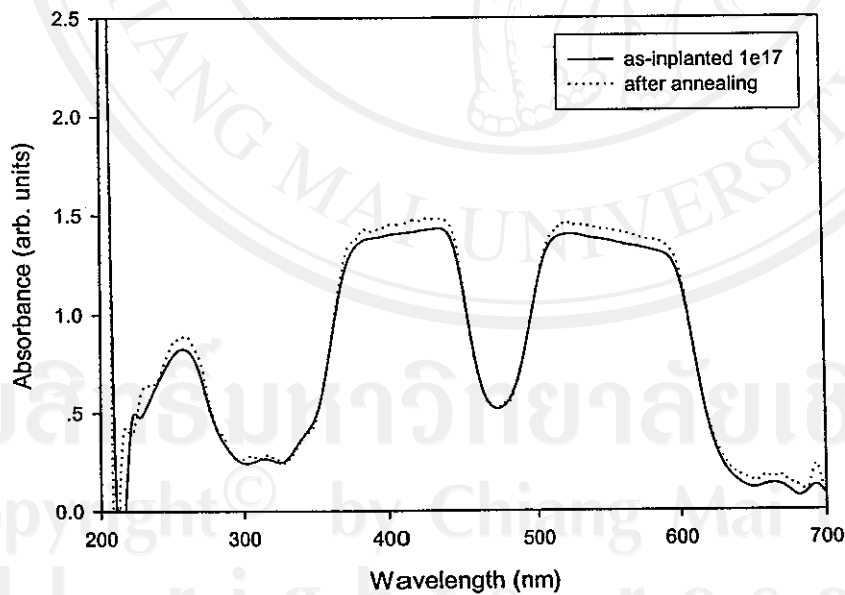
รูป 4.11 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{15} ไอออน/ cm^2 เวลา 30 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



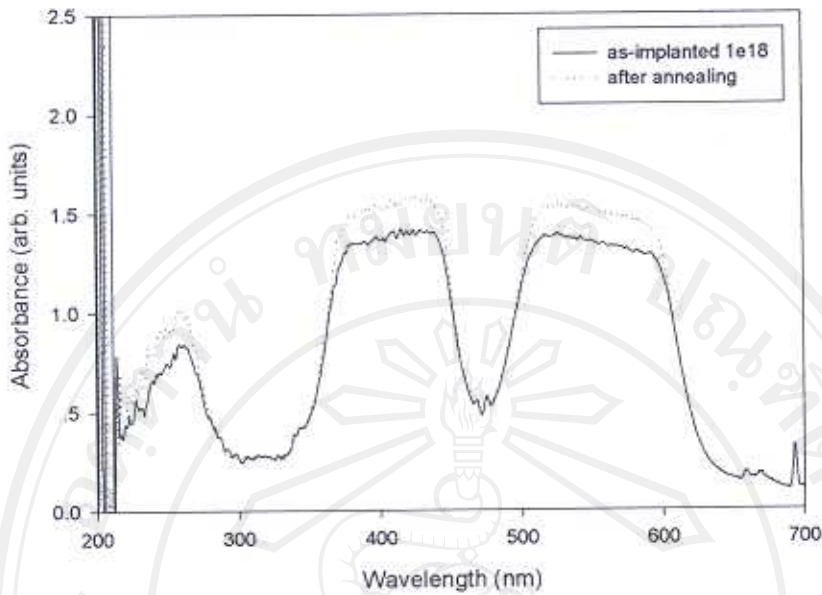
รูป 4.12 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{16} ไอออน/ cm^2 เวลา 9.30 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



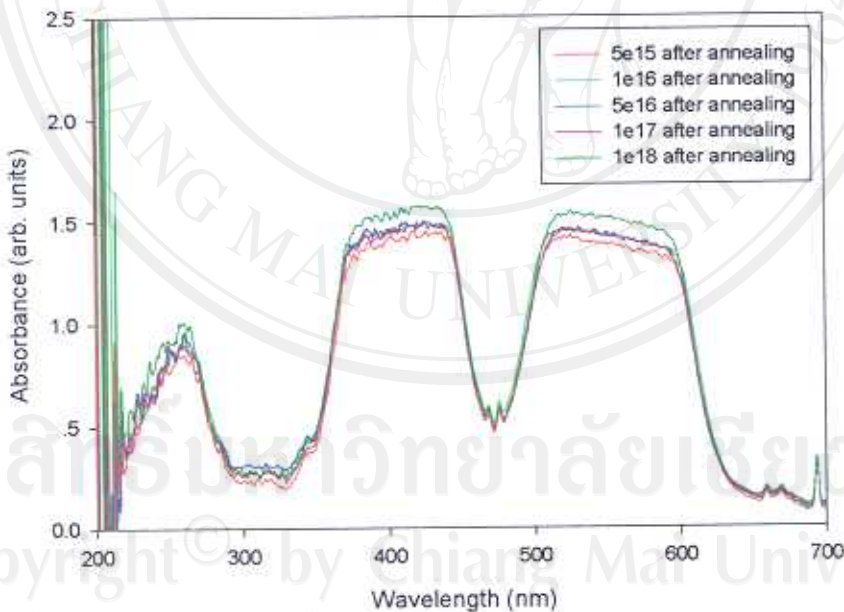
รูป 4.13 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 26 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.14 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 1.38 ชั่วโมง และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.15 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังการฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² เวลา 5.26 ชั่วโมง และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง

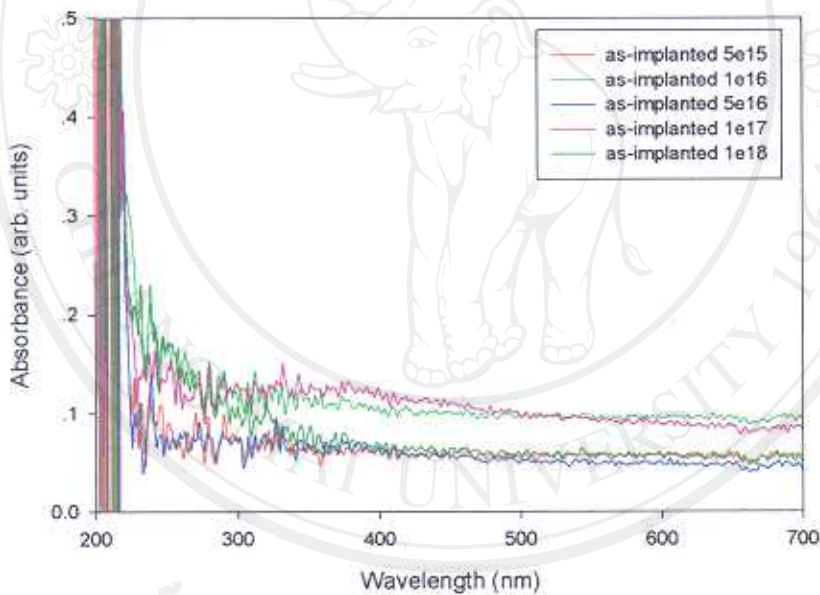


รูป 4.16 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์ที่ฝังด้วย Ar^+ โดสต่างๆหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง

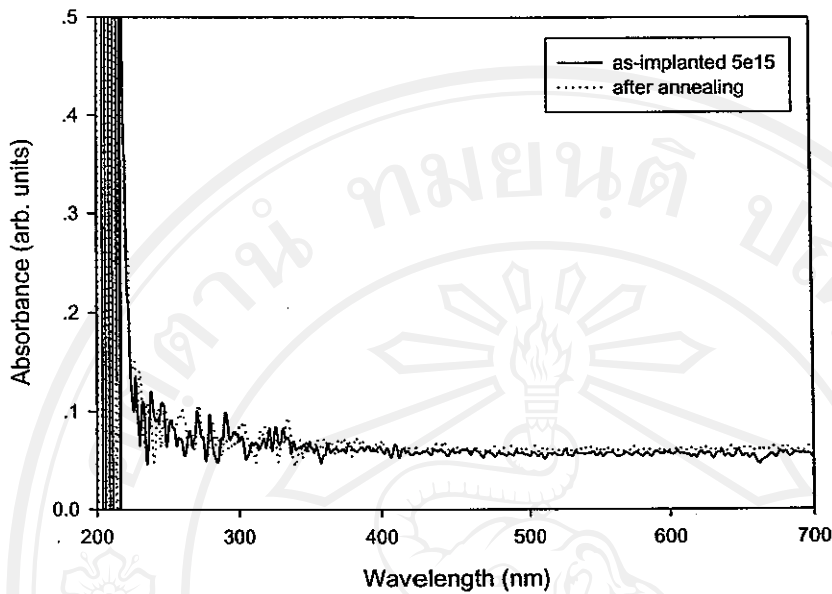
การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์ที่ฝังด้วย Ar^+ โดสต่างๆหลังการอบ ดังรูป 4.16 พบว่าในช่วง 380 - 420 และ 510 - 590 นาโนเมตร หลังการอบตัวอย่างที่ฝังด้วยโดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² มีค่าสูงสุดและสูงกว่าที่โดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² ซึ่งมีค่าต่ำสุดประมาณ 7 %

4.5.2 การดูดกลืนแสงหลังฝังอาร์กอนไอออนและหลังอบในแซฟไฟร์สังเคราะห์

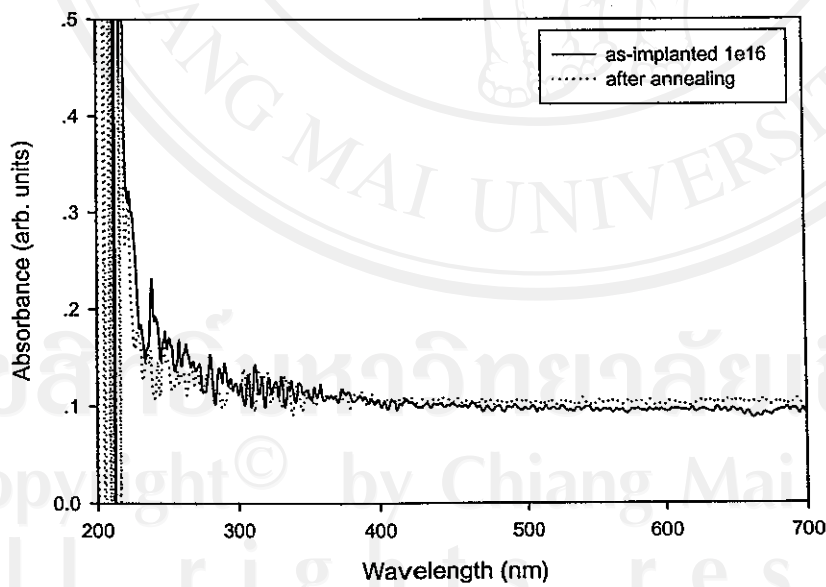
การดูดกลืนแสงในแซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝังอาร์กอนไอออนที่โดสต่างๆ มีลักษณะเหมือนกัน แสดงในรูป 4.17 แต่ความเข้มของการดูดกลืนแสงไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ ที่ 350-700 นาโนเมตร จะมีความแตกต่างของการดูดกลืนแสง โดยที่โดส 1×10^{16} และ 1×10^{17} ไอออน/ซม² มีค่าสูงกว่า 5×10^{15} , 5×10^{16} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² ประมาณ 80% หลังการอบพบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่โดสต่ำ คือ 5×10^{15} และ 1×10^{16} ไอออน/ซม² มีลักษณะไม่ต่างจากหลังฝังไอออน การเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงก่อนและหลังอบในตัวอย่างที่ฝังด้วย Ar⁺ ดังแสดงในรูป 4.18 – 4.22



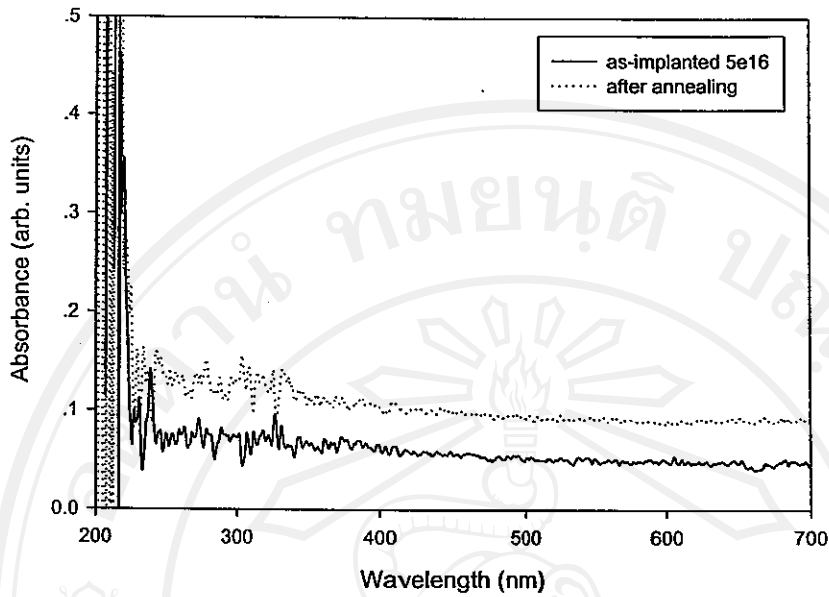
รูป 4.17 การดูดกลืนแสงของแซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง Ar⁺ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่โดสต่างๆ



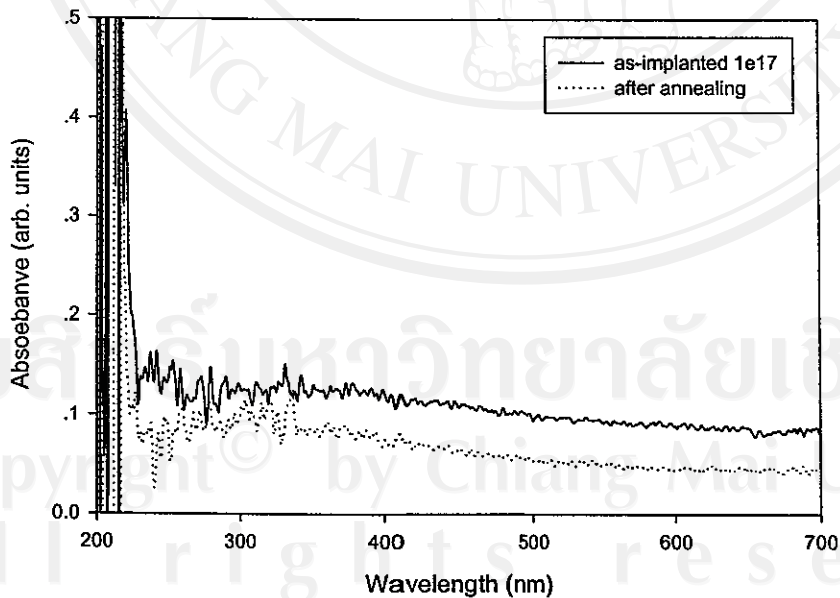
รูป 4.18 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² เวลา 30 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



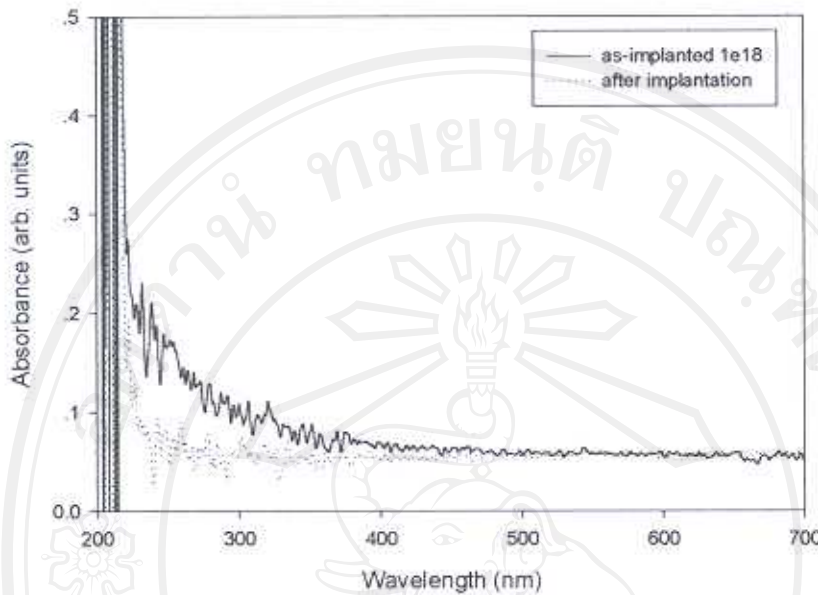
รูป 4.19 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 9.30 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



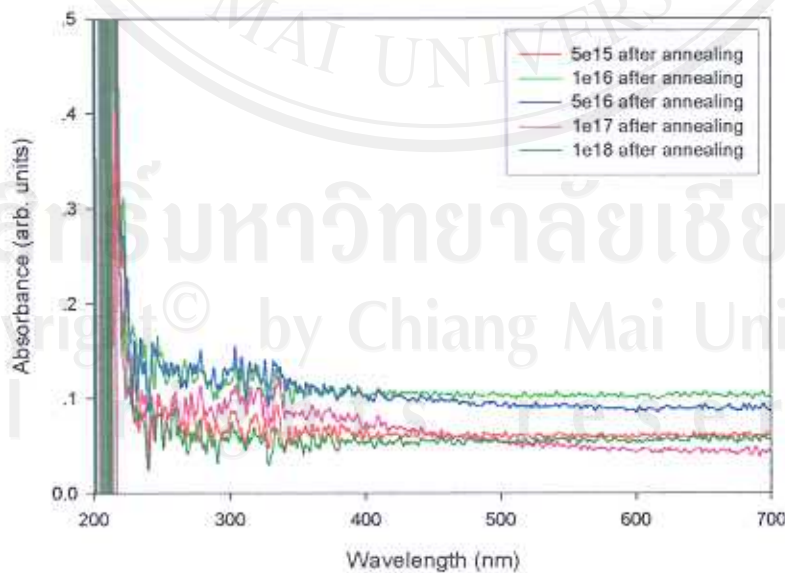
รูป 4.20 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 26 นาทีและหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.21 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 1.38 ชั่วโมงและหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง

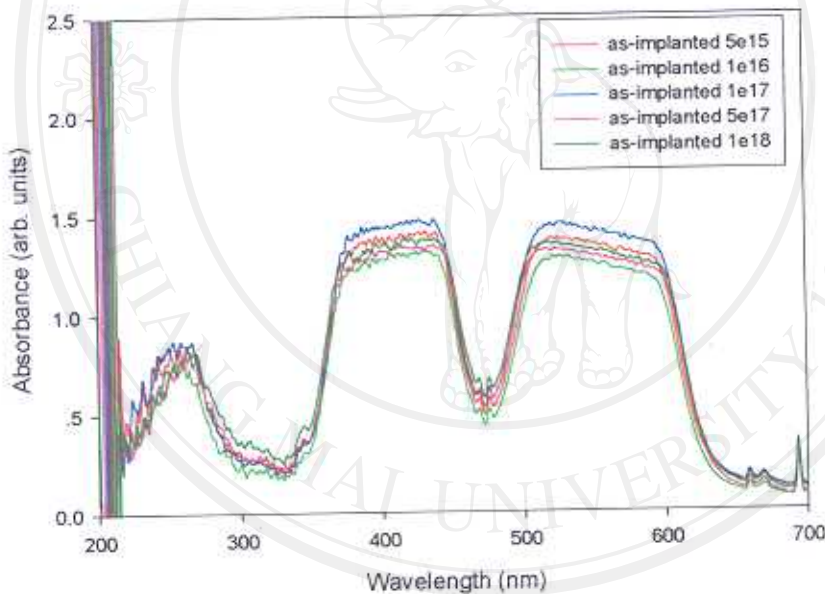


รูป 4.22 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง Ar^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² เวลา 5.26 ชั่วโมงและหลังการอบที่ 800°ซ เวลา 1 ชั่วโมง

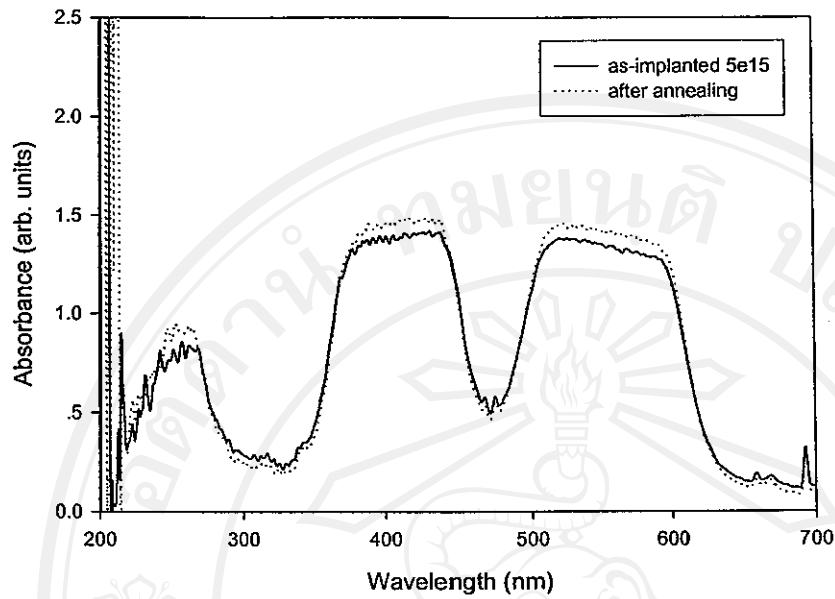


รูป 4.23 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ที่ฝังด้วย Ar^+ หลังการอบที่ 800°ซ เวลา 1 ชั่วโมง

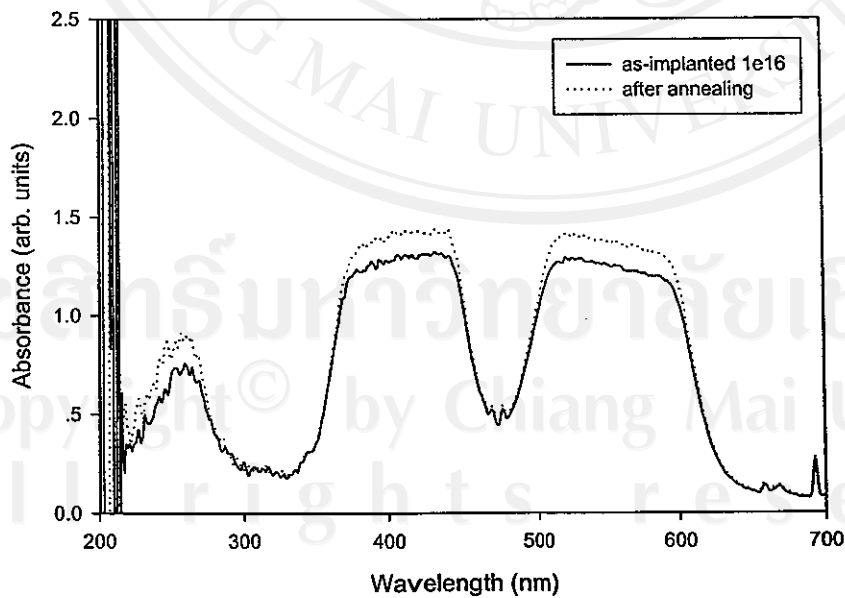
4.5.3 การดูดกลืนแสงหลังฝังออกซิเจนไอออนและหลังอบในทับทิมสังเคราะห์ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงหลังการฝัง O^+ ในทับทิมสังเคราะห์ที่โดสต่างๆ พบว่ามีลักษณะไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 4.24 ในช่วง 370-440 และ 510-600 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงที่โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² มีค่าน้อยที่สุดและแตกต่างจากค่าการดูดกลืนแสงที่สูงที่สุดคือ 1×10^{17} ไอออน/ซม² ประมาณ 11% การอบตัวอย่างหลังฝังไอออนพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างมีความเข้มเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นมากที่สุดในตัวอย่างที่ฝังด้วยโดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² คือมีการดูดกลืนแสงในช่วง 260 , 380-450 และ 510-600 นาโนเมตร ประมาณ 5% สเปกตรัมการดูดกลืนแสงก่อนและหลังอบในตัวอย่างที่ฝัง O^+ ในทับทิมสังเคราะห์ที่โดสต่างๆ แสดงดังรูป 4.25 – 4.29



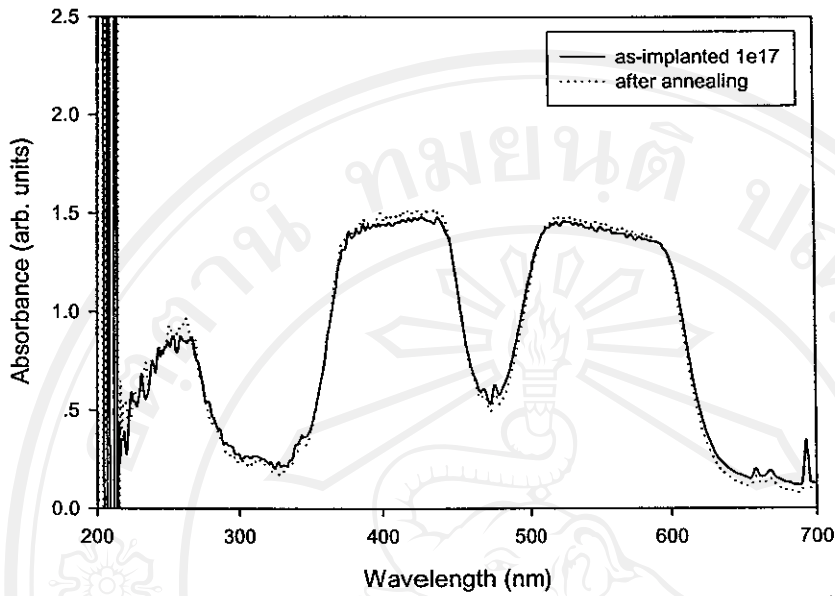
รูป 4.24 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง O^+ หลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดสต่างๆ



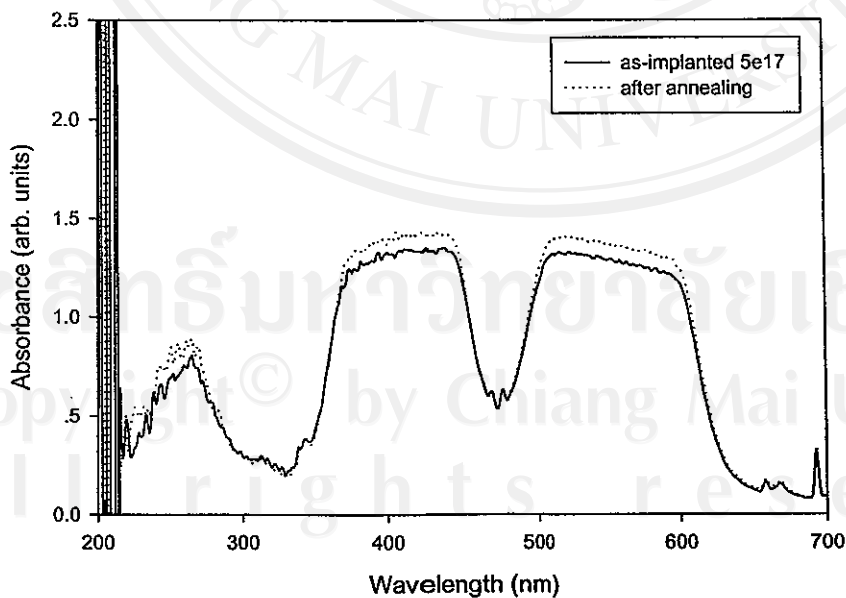
รูป 4.25 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² เวลา 5 นาทีและหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



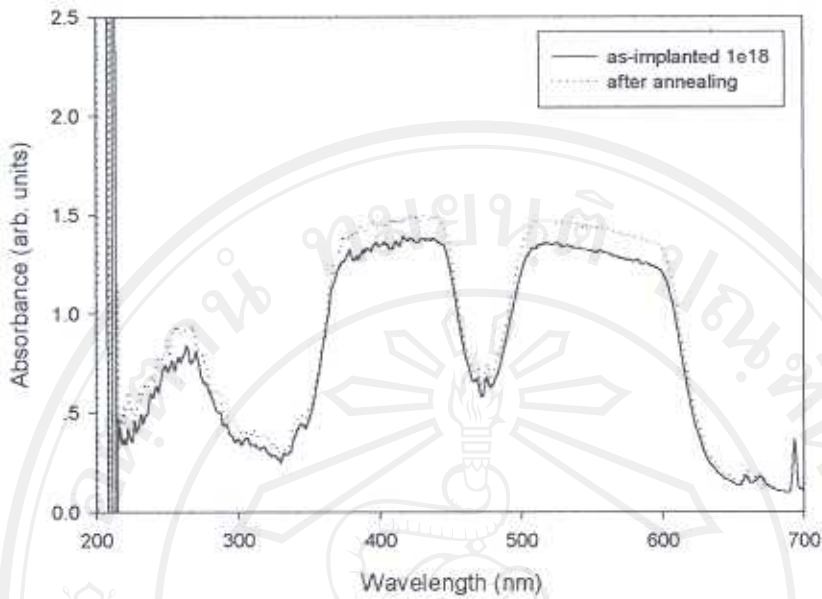
รูป 4.26 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 18 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



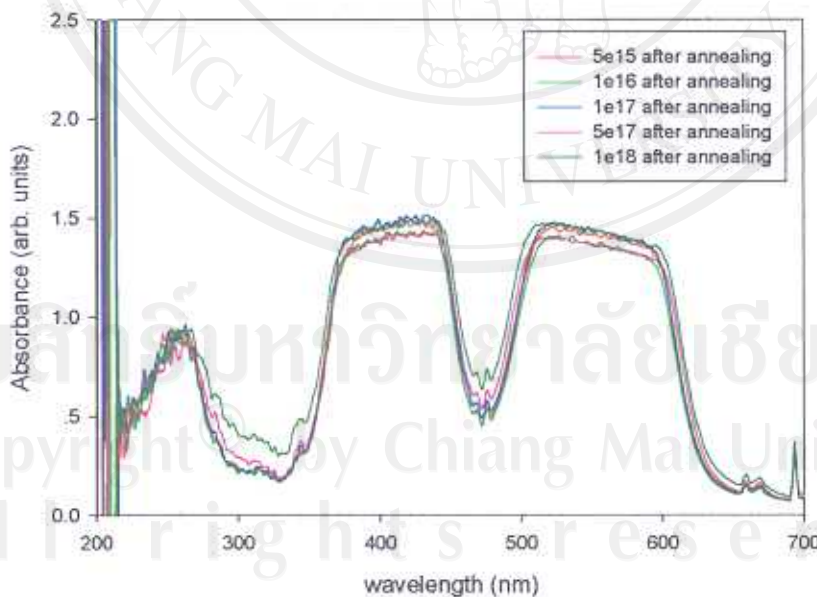
รูป 4.27 การดูดกลืนแสงของฟิล์มสังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 1.43 ชั่วโมงและหลังการอบที่ $800^{\circ}C$ เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.28 การดูดกลืนแสงของฟิล์มสังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 4.18 ชั่วโมงและหลังการอบที่ $800^{\circ}C$ เวลา 1 ชั่วโมง



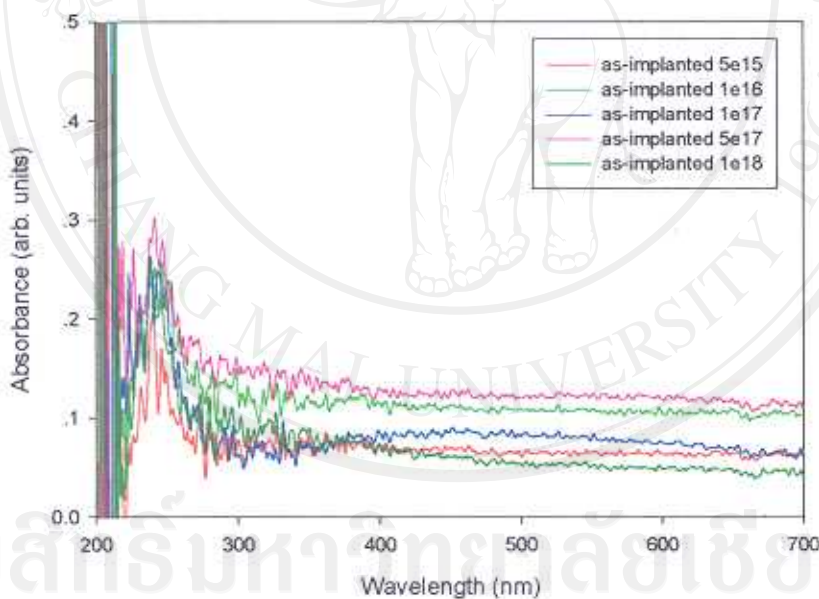
รูป 4.29 การดูดกลืนแสงของทับทิมสังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² เวลา 11.09 ชั่วโมงและหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



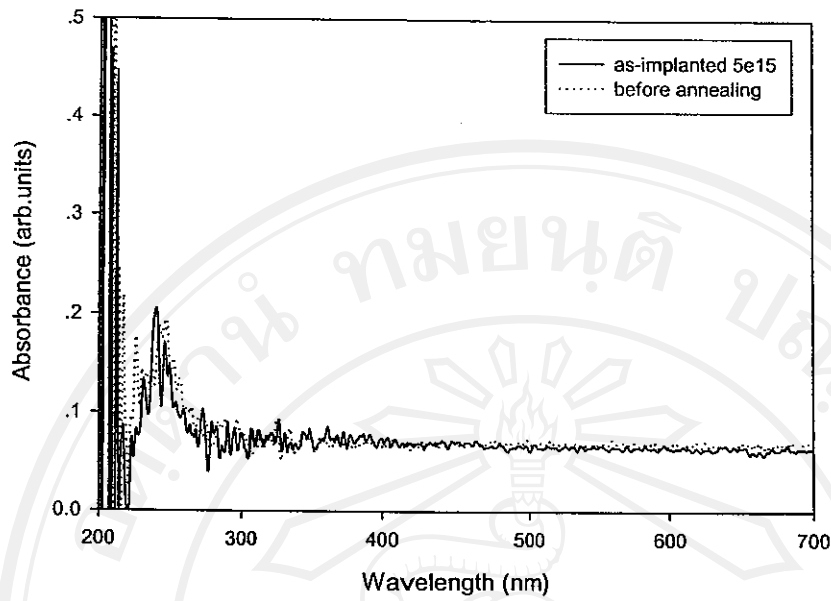
รูป 4.30 การดูดกลืนแสงของแซฟไฟร์สังเคราะห์ที่ฝังด้วย O^+ หลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง

การดูดกลืนแสงหลังการอบในรูป 4.30 มีค่าต่างกันมากที่สุดที่ 300 นาโนเมตร ตัวอย่างที่ฝังด้วยโดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² มีค่าสูงกว่าที่โดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² ซึ่งต่ำสุด 87%

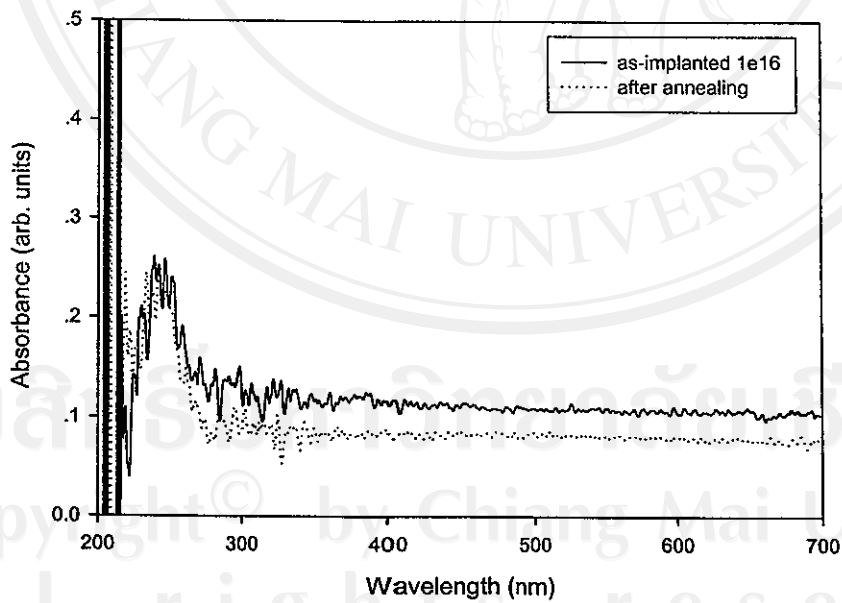
4.5.4 การดูดกลืนแสงหลังฝังออกซิเจนไอออนและหลังอบในแซฟไฟร์สังเคราะห์ การดูดกลืนแสงหลังการฝัง O^+ ในแซฟไฟร์สังเคราะห์พบว่าการดูดกลืนแสงมีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในรูป 4.31 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงทุกตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 240 นาโนเมตร โดยการดูดกลืนแสง ที่โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² มีค่าสูงสุดและมากกว่าในตัวอย่างที่ฝังด้วยโดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² ประมาณ 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงหลังฝัง O^+ และหลังอบ แสดงในรูป 4.32 – 4.36 โดยการฝังไอออนที่โดส 5×10^{15} , 1×10^{16} , 1×10^{17} มีค่าใกล้เคียงกัน ที่โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² หลังการอบพบว่าตัวอย่างมีการดูดกลืนแสงได้น้อยลง แต่การฝัง O^+ ที่โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² พบว่า หลังการอบมีพีคการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ 390 – 600 นาโนเมตร โดยมีค่าสูงสุดที่ 535 นาโนเมตร โดยมีการดูดกลืนแสงมากกว่าตัวอย่างก่อนการอบ 1.8 เท่า ดังแสดงในรูป 4.36



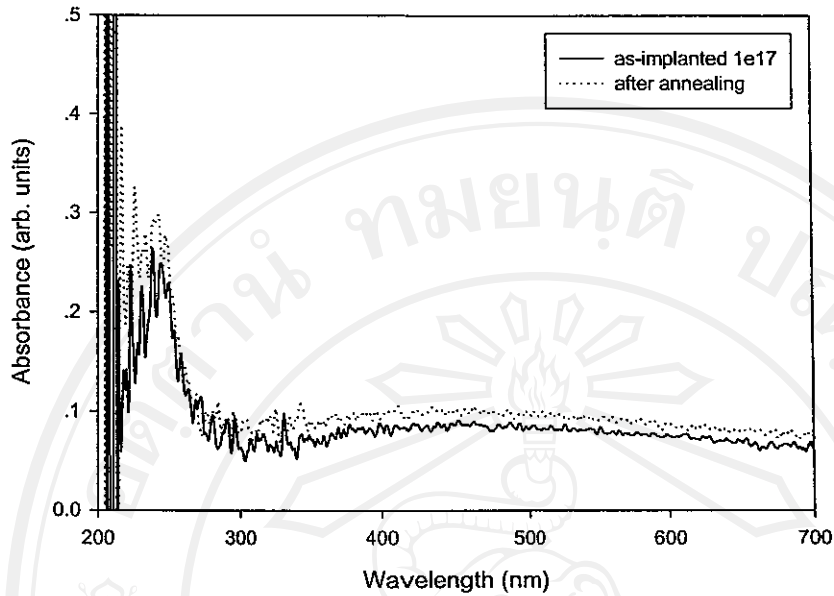
รูป 4.31 การดูดกลืนแสงของแซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ ที่โดสต่างๆ



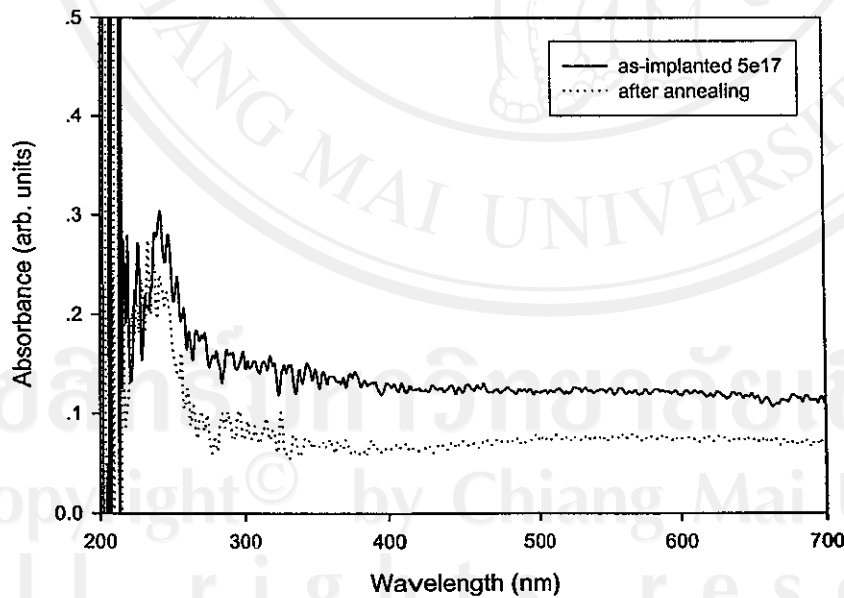
รูป 4.32 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² เวลา 5 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



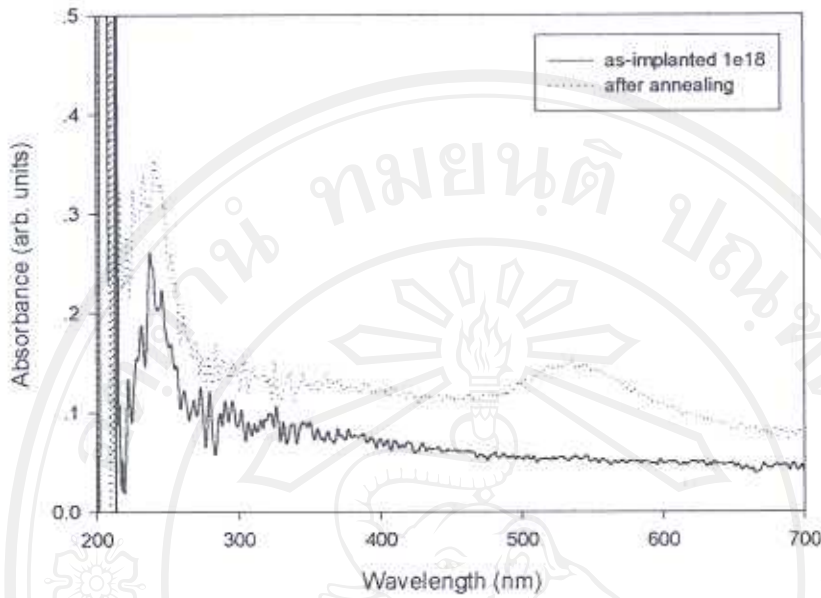
รูป 4.33 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{16} ไอออน/ซม² เวลา 18 นาที และหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



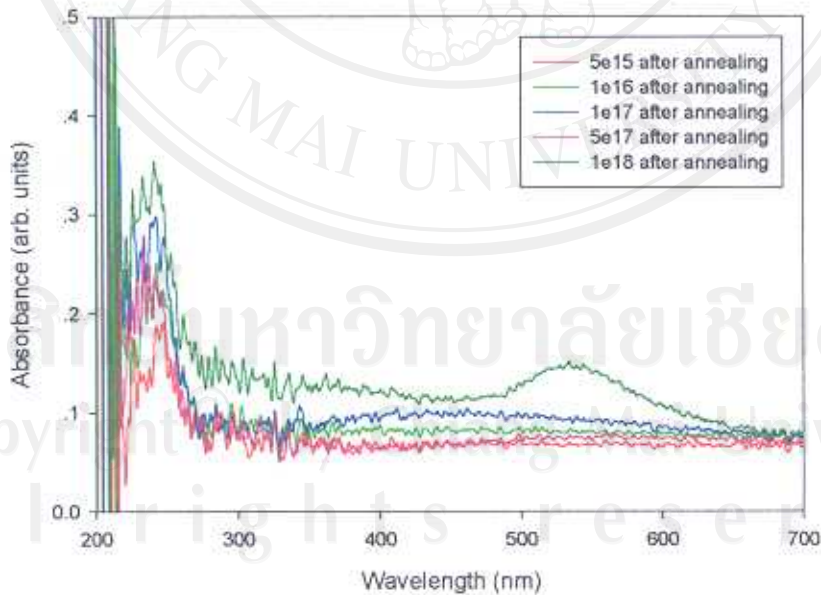
รูป 4.34 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 1.43 ชั่วโมงและหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.35 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังการฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² เวลา 4.18 ชั่วโมงและหลังการอบที่ 800°C เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.36 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์หลังการฝัง O^+ พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² เวลา 11.09 ชั่วโมง และหลังการอบที่ 800°ซ เวลา 1 ชั่วโมง



รูป 4.37 การดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์สังเคราะห์ที่ฝังด้วย O^+ โดสต่างๆ หลังการอบที่ 800°ซ เวลา 1 ชั่วโมง

จากรูป 4.37 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซฟไฟร์ที่ฝังด้วย O^+ พบว่าหลังอบที่ $800^{\circ}C$ เวลา 1 ชั่วโมง การดูดกลืนแสงแตกต่างกันมากที่สุดที่ 250 นาโนเมตร และค่อนข้างคงที่ในช่วง 280-350 นาโนเมตร โดยโดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² มีค่าสูงสุดและมากกว่าที่โดส 5×10^{15} ไอออน/ซม² ซึ่งต่ำสุด 48% การเพิ่มขึ้นที่ของการดูดกลืนแสงที่ 535 นาโนเมตร คาดว่าเนื่องจากอาจมี Cr^{3+} ในโครงสร้างผลึก

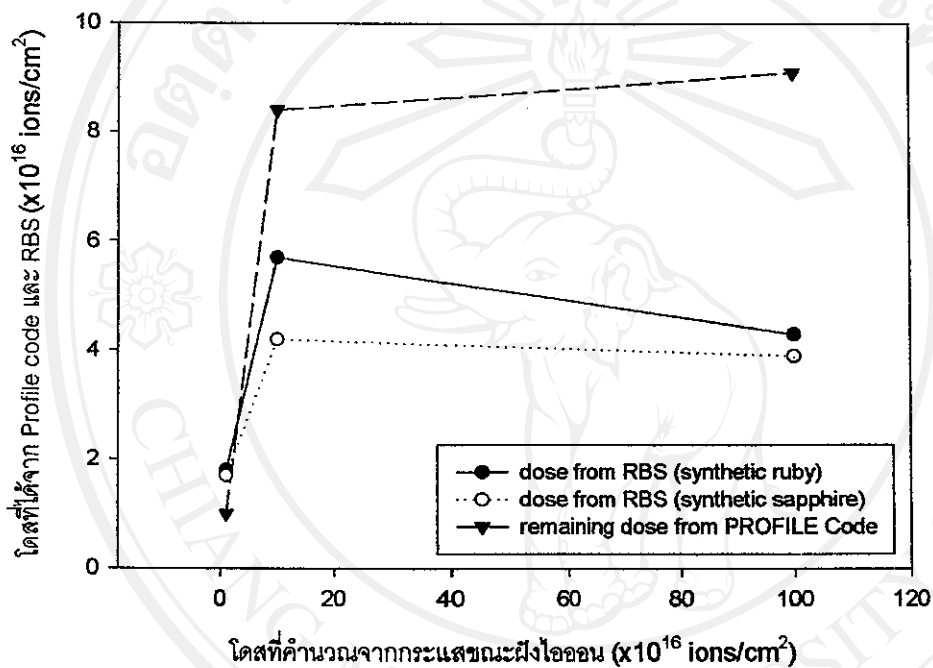
4.6 ผลการวิเคราะห์โดสด้วย Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)

การวิเคราะห์ปริมาณโดสบนตัวอย่างด้วยเทคนิค RBS ได้ดำเนินการที่ Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University สาธารณรัฐประชาชนจีน โดยเครื่อง Tandem Tandem accelerator ซึ่งเทคนิค RBS เป็นเทคนิคที่สามารถหาลักษณะเฉพาะของอะตอมที่แปลกปลอมไปจากเนื้อวัสดุเดิม โดยใช้ไอออนของ He^{2+} พลังงาน 2.0 MeV (Songsiriritthigul, 1997) ยิ่งไปบนวัสดุและวัดพลังงานของอนุภาคที่กระเจิงมาตกกระทบกับหัววัด โดยค่าโดสที่วัดจาก RBS เมื่อเปรียบเทียบกับโดสที่ได้จากการคำนวณกระแสขณะฝังไอออนและโดสจากโปรแกรม Profile code ซึ่งคำนวณปริมาณโดสที่เหลือ (remaining dose) จากการฝังไอออน แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบโดสที่ได้จากการวัดกระแสขณะฝังไอออน โดสจาก Profile code และโดสจากการวัดด้วยเทคนิค RBS

รหัสตัวอย่าง	R2	R1	R3	S2	S1	S3
โดสที่ได้จากการคำนวณ กระแสขณะฝังไอออน ($\times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$)	1	10	100	1	10	100
โดสจาก Profile code ($\times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$)	0.99	8.40	9.10	0.99	8.40	9.10
ปริมาณ Ar^+ วัดโดย RBS ($\times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$)	1.8	5.7	4.3	1.7	4.2	3.9

ปริมาณโดสที่ฝังลงบนวัสดุที่โดสต่ำจากการวัดด้วย RBS มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้จากการคำนวณค่ากระแสขณะฝังไอออนและจากโปรแกรม Profile code เมื่อโดสสูงขึ้นมีแนวโน้มคงที่ไม่เพิ่มขึ้นตามการคำนวณจากกระแส เนื่องจากที่โดสสูงค่า sputtering ของไอออนที่เกิดขึ้นจะสูงขึ้นด้วย และเนื่องจากการอบประจุที่ผิวทำให้ไอออนไม่สามารถฝังลงบนวัสดุได้ ในการทดลองนี้พบว่าปริมาณโดสจะเริ่มคงที่ที่โดสตั้งแต่ 1×10^{17} ไอออน/ซม² ซึ่งแนวโน้มของโดสที่ได้จากการวัดกระแสและจาก RBS มีลักษณะเดียวกัน แสดงดังรูป 4.38



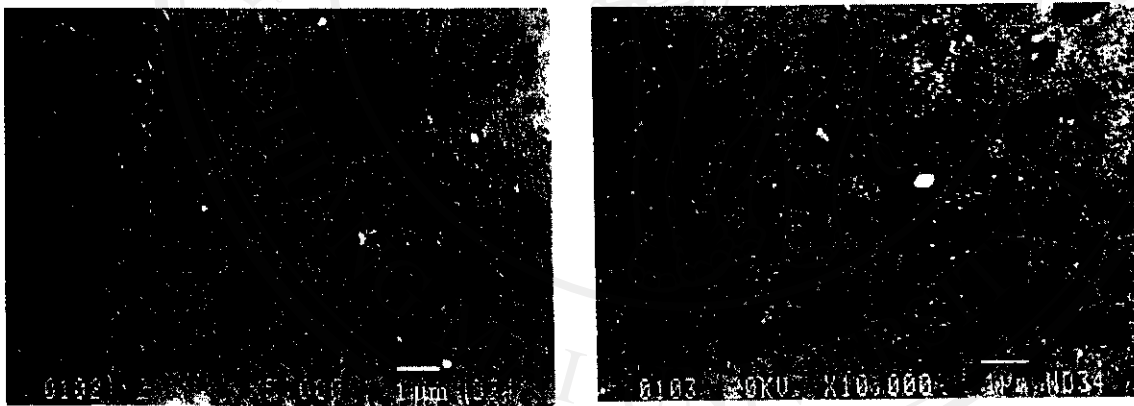
รูป 4.38 เปรียบเทียบโดสจาก Profile code และโดสบนทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์จากการวัดด้วย RBS

4.7 การตรวจสอบพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบพื้นผิวตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในตัวอย่างหลังฝังไอออนไม่พบการเปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นผิว เมื่ออบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800 °ซ เวลา 1 ชม. พบว่าตัวอย่างที่ฝังด้วยออกซิเจนไอออนมี blister และ crater เกิดขึ้น ในขณะที่ตัวอย่างที่ฝังด้วยอาร์กอนมีผิวขรุขระแต่ไม่พบ blister ซึ่งการเกิด blister และ crater นี้จะไม่ปรากฏในตัวอย่างที่ไม่ฝังไอออน

4.7.1 ลักษณะพื้นผิวจากการฝังอาร์กอนไอออนในทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์

ในการฝังอาร์กอนไอออนในทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์ ไม่พบ blister ที่บริเวณผิว แต่จะมีลักษณะผิวที่ไม่เรียบและเกิดเป็นหลุมขึ้นทั่วไป ตัวอย่างดังรูป 4.39



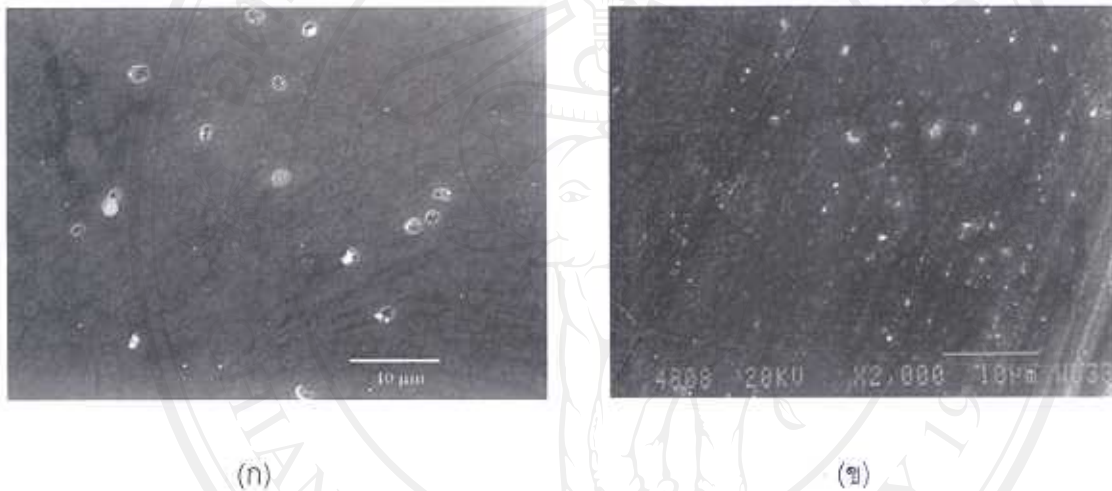
(ก)

(ข)

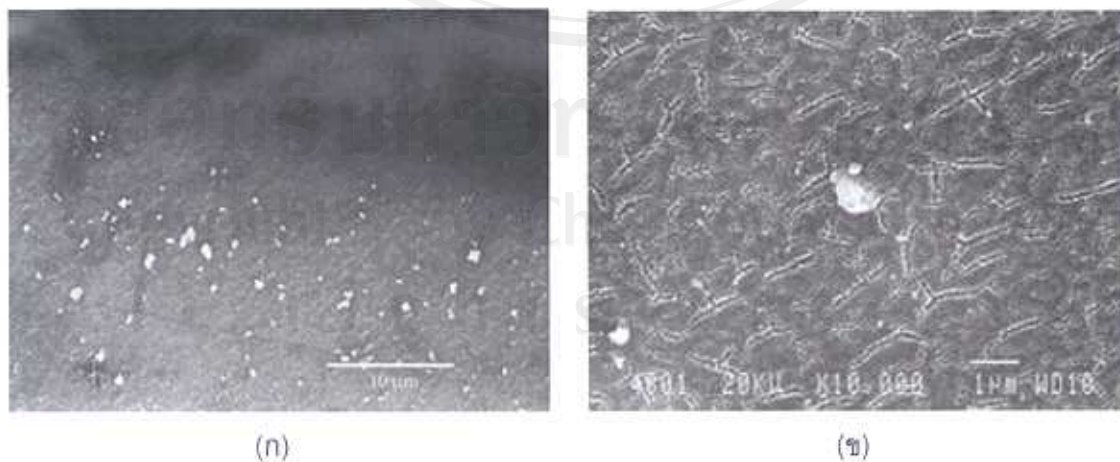
รูป 4.39 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการฝัง Ar^+ บนทับทิมสังเคราะห์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² (ก) กำลังขยาย 5000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

4.7.2 ลักษณะพื้นผิวจากการฝังออกซิเจนไอออนในทับทิมและแซฟไฟร์สังเคราะห์

การฝังออกซิเจนไอออนในแซฟไฟร์สังเคราะห์ที่โดส 1×10^{17} และ 5×10^{17} ไอออน/ซม² พบ blister และ crater เป็นจำนวนมาก ที่โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² ผิวตัวอย่างมีความหนาแน่นและปริมาณของ blister มากกว่าฝังไอออนที่โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² ขนาดของ blister ประมาณ 1 μm ดังแสดงในรูป 4.40 และที่โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² บริเวณผิวเกิดรอยแตกทั่วไปทั้งผิว ซึ่งรอยแตกเหล่านี้ไม่ปรากฏในบริเวณที่ไม่ฝังไอออน ดังแสดงในรูป 4.41 (ก) บริเวณรอยต่อระหว่างแนวที่ถูกฝังและไม่ฝังไอออน รูป 4.41 (ข) ขยายบริเวณพื้นผิวที่เกิดรอยแตก

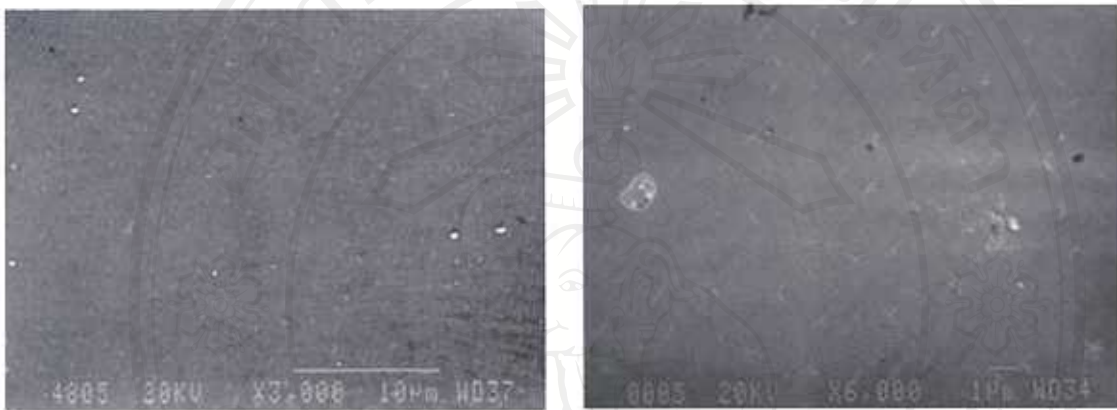


รูป 4.40 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการฝัง O^+ บนแซฟไฟร์สังเคราะห์ กำลังขยาย 2000 เท่า (ก) 1×10^{17} ไอออน/ซม² (ข) 5×10^{17} ไอออน/ซม²



รูป 4.41 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการฝัง O^+ บนแซฟไฟร์สังเคราะห์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² (ก) กำลังขยาย 2500 เท่า (ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

การฝังออกซิเจนในทับทิมสังเคราะห์ที่โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² พบว่าเกิดรอยแตกทั่วทั้งผิวแต่มีขนาดเล็กและปริมาณน้อยกว่าในโพลีสังเคราะห์ ดังรูป 4.42 ลักษณะของรอยแตกที่เกิดขึ้นเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนการฝังออกซิเจนไอออนในทับทิมสังเคราะห์ ไม่พบ blister เหมือนในแซฟไฟร์สังเคราะห์ ฝังตัวอย่างซรุขระ ดังรูป 4.43



(ก)

(ข)

รูป 4.42 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการฝัง O^- บนทับทิมสังเคราะห์ โดส 5×10^{17} ไอออน/ซม² (ก) กำลังขยาย 3000 เท่า (ข) กำลังขยาย 6000 เท่า



(ก)

(ข)

รูป 4.43 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการฝัง O^- บนทับทิมสังเคราะห์ โดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² (ก) กำลังขยาย 2000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10000 เท่า

4.8 อภิปรายผลการทดลอง

การฝังไอออนของออกซิเจนและอาร์กอนบนทับทิมและเซฟไฟร์สังเคราะห์ ที่พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลท์ พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของดัชนีหักเห แต่จากการสังเกตลักษณะตัวอย่างด้วยตาเปล่าจะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่ถูกฝังด้วยไอออนจะมีการสะท้อนแสงน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังไอออน

การอบตัวอย่างหลังการฝังออกซิเจนไอออนพบว่าเกิด blister ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ไมโครเมตร ขึ้นเป็นจำนวนมาก สาเหตุของการเกิด blister นั้น Zhod and Sood (1991) กล่าวว่าในการฝังไอออนของก๊าซด้วยปริมาณโดสที่เกินขีดจำกัด จะทำให้เกิด blister ขึ้นเนื่องจาก

- i) ความสามารถในการละลายในของแข็ง (solid solubility) ของอะตอมที่ใช้ฝังมีค่าต่ำ
- ii) ความสามารถในการแพร่มารวมกันเป็นกลุ่มมีค่าสูงพอ
- iii) ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของอะตอมหลักและอะตอมที่ฝังต่ำ
- iv) Sputtering yield ต่ำ ทำให้เกิดความเข้มข้นวิกฤต (critical concentration) ขึ้น

ในการฝังออกซิเจนไอออนที่โดส 1×10^{17} และ 5×10^{17} ไอออน/ซม² พบว่าความหนาแน่นของ blister มีปริมาณมากขึ้นเมื่อโดสสูงขึ้น เพราะออกซิเจนส่วนเกินที่มีอยู่เป็นจำนวนมากได้ผิวของตัวอย่างนี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมารวมกันเป็นกลุ่ม (agglomeration) ที่อุณหภูมิประมาณ 700 °ซ โดยขีดจำกัดของโดสวิกฤตของการเกิดอสัณฐาน (threshold critical dose for amorphous) และขีดจำกัดของโดสวิกฤตของการเกิด blister (critical blistering threshold dose) มีค่าเท่ากันคือ $(3 - 4) \times 10^{16}$ ไอออน/ซม² และจากผลการวิเคราะห์โดสด้วย RBS ในเซฟไฟร์สังเคราะห์ที่ฝังด้วย Ar⁺ ที่ 1×10^{17} และ 1×10^{18} ไอออน/ซม² พบว่าค่าโดสมีค่าคงที่ที่ประมาณ 4×10^{16} ไอออน/ซม² ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าโดสวิกฤต และในระหว่างการอบด้วยความร้อน (thermal annealing) ชั้นที่เกิดความเสียหาย (damage layer) จะเคลื่อนที่ออกมาสู่บริเวณผิวมากกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุ (Xie et al., 1997) จึงทำให้ไม่สามารถเห็น blister ในตัวอย่างหลังการฝังไอออน แต่เมื่อให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ไอออนของก๊าซที่กระจายอยู่ได้ผิวตัวอย่างจะเคลื่อนที่มารวมกันทำให้เกิดเป็น blister ขึ้น และพบว่าการฝังออกซิเจนไอออนโดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² และอาร์กอนไอออน โดส 1×10^{17} ไอออน/ซม² มีรอยแตกเกิดขึ้นทั่วไปบริเวณผิวบน blister ซึ่ง Auciello และ Kelly (1984) อธิบายสาเหตุของการแตกของ blister ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากการลดความเค้น (stress release) ที่เกิดขึ้นใน blister cap ทำให้เกิดรอยแตกบริเวณผิวของ blister ในตำแหน่งที่มีความเค้นสูง เนื่องจากการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วของก๊าซในการเกิด blister

ที่โดสวิกฤต ทำให้ระยะทางระหว่างฟองอากาศ (bubble) น้อยลงและความหนาแน่นของฟองอากาศมีมากขึ้น

การดูดกลืนแสงของทึบทิมสังเคราะห์ก่อนการฝังไอออนมีการดูดกลืนแสงมากในช่วงสีม่วงและช่วงสีเขียวถึงเหลือง และส่องผ่านแสงในช่วงสีน้ำเงินและสีแดง ซึ่งเกิดจากสารเจือของโครเมียม (Hughes, 1997) เมื่อฝังไอออนและอบตัวอย่างที่ 800°C พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีลักษณะโดยรวมเหมือนเกิดแต่มีความเข้มเพิ่มขึ้น แสดงว่าการฝังอาร์กอนและออกซิเจนไม่ทำให้เกิดตำหนิใหม่ขึ้นและไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของโครเมียมในทึบทิมสังเคราะห์

การดูดกลืนแสงของแซฟไฟร์สังเคราะห์ก่อนการฝังไอออนมีความเข้มใกล้เคียงกันตลอดทุกความยาวคลื่น แต่มีค่าสูงในช่วง 200-230 นาโนเมตร และต่ำในช่วง 550-650 นาโนเมตร ลักษณะของสเปกตรัมหลังการฝังอาร์กอนไอออนพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ตัวอย่างที่ฝังออกซิเจนไอออนมีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นที่ประมาณ 240 นาโนเมตร เนื่องจากอาจเกิดตำหนิแบบ F^+ ขึ้น ซึ่งหลังการอบตัวอย่างตำหนินี้ยังคงอยู่ และตัวอย่างที่ผ่านการฝังออกซิเจนไอออนโดส 1×10^{18} ไอออน/ซม² พบว่ามีการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นที่ 535 นาโนเมตร ซึ่งจากการวัดการดูดกลืนแสงในคอร์ันดัมธรรมชาติ โดย Saminpanya (2000) พบว่าช่วงการดูดกลืนแสงที่เกิดจาก Cr^{3+} นั้นสามารถครอบคลุมสเปกตรัมในช่วง 535 นาโนเมตรนี้ได้ ออกซิเจนไอออนที่ฝังลงบนตัวอย่างอาจเกิดอันตรกิริยากับ Cr^{3+} ในตัวอย่างเกิดเป็นสารประกอบ Cr_2O_3 ได้