

دراسة برامترات احتباس الموائع في سطوح الأغشية المسامية بمجهر القوة الذرية

سهام الطرابيشي⁽¹⁾

تاريخ الإيداع 2013/04/07

قبل للنشر في 2013/07/15

الملخص

تعرض الورقة دراسة بيانية لعينات من أغشية رقيقة من ZnS مبخرة حرارياً على ركائز من الزجاج وأخرى من السلكون بمجهر القوة الذرية. شملت هذه الدراسة كلاً من البرامترات الحجمية والبرامترات الوظيفية لسطوح هذه الأغشية بهدف إلقاء الضوء على إمكانية احتباس الموائع في هذه الأغشية. لإجراء هذه الدراسة سُجّلت منحنيات أبوت - فايرستون Abbott-Firestone Curve لهذه الأغشية التي تعتمد على توزع الأعماق في سطوحها، وقيست هذه البرامترات في كامل عمق المسامات وتُعبّرت قيمها في شرائح متتالية من السطح باستخدام المؤثر thresholding operator الذي يسمح بقطع أعلى السطح أو أسفله أو كليهما عند مستوى (أو مستويين) للارتفاع ومقارنة هذه البرامترات بنتائج دراسة أخرى تعتمد على انتقاء شرائح بين المستويين.

الكلمات المفتاحية: احتباس الموائع، منحنى توزع الأعماق (منحني أبوت - فايرستون)، البرامترات الحجمية، البرامترات الوظيفية، الشرائح.

⁽¹⁾ أستاذة، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

The Study of Fluid retention parameters in porous thin films by AFM

S. Al-Tarabichi⁽¹⁾

Received 07/04/2013

Accepted 15/07/2013

ABSTRACT

We present in this paper a graphical study of regions of thermally deposited ZnS thin films on glass by atomic force microscope (AFM). This study consists of volume parameters and functional parameters of these films surfaces for the object of investigating the possibility to retain fluids by these films. For doing so, we registered Abbott-Firestone curves that are based on height distribution for these films, we measured volume and functional parameters in the whole pores. Using the thresholding operator we followed parameters distribution in depth of the surface. At the end we compared these parameters by the results of another study based on slice selection at different levels.

Key words: Fluid retention, Height distribution curve (Abbott-Firestone curve), Volume parameters, Functional parameters, Slices.

⁽¹⁾Prof., Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

مقدمة

تتلخص فلسفة الدراسة البيانية للأغشية عموماً في تعقب نموذج الفراغات في سطوحها الذي يقع بين مستويين سائدين للعمق تمهيداً لدراسة البرامترات الوظيفية كقوائن لاحتباس كل من قيعان السطح ومساحات المادة الداعمة للموائع. نهدف من خلال الدراسة، بالدرجة الأساسية، إلى إلقاء الضوء على بعض جوانب مجهر القوة الذرية التي لم يتم تعرفها حتى الآن في بلدنا؛ وتمهيداً لاستخدام هذا النوع من الأغشية في بعض تطبيقاتها النانوية ولا سيما احتباس الموائع.

وقد جاء في الأدبيات الحديث عن احتباس الموائع في أوساط مختلفة كأغشية المواد المركبة النانوية [1] [2] [6]، وفي الأغشية الكهروليتيكية [3]، وفي المواد المكروية المسامات والميزوية المسامات [4] [5]، وفي كريات السلكا النانوية الجوفاء [7].

تتضمن الدراسة البيانية لسطوح الأغشية بمجهر القوة الذرية كلاً من البرامترات الحجمية والبرامترات الوظيفية باستخدام منحني أبوت-فايرستون (الشكل 1b) Abbott-Firestone Curve الذي يعتمد على توزيع أعماق (ارتفاعات) مختلف النقاط على سطح العينة.

مخطط توزيع الأعماق [8] [9]

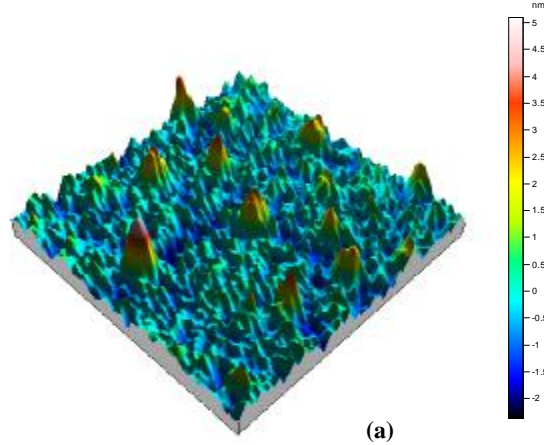
يعطي مخطط توزيع الأعماق المبين في الشكل (1b) على سطح عينة توزع عدد النقاط بدلالة العمق. يسمح هذا النوع من الرسم بتوصيف الشكل العام لتضاريس تلك العينة (الشكل 1a). تعتمد دراسة هذا المخطط على افتراض وجود مستويين سائدين للارتفاع في سطح العينة، كنموذج للفراغات a waffle pattern أو لمساحة المادة الداعمة bearing material area فيه.

منحني أبوت - فايرستون Abbott-Firestone Curve. [8] [9]

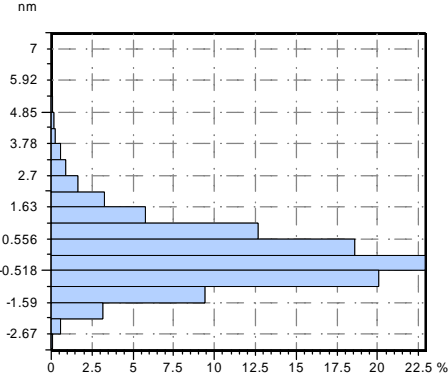
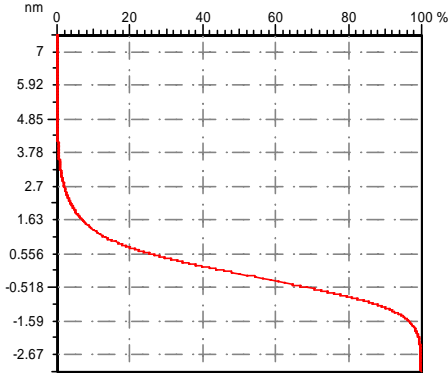
يتم الحصول على منحني أبوت-فايرستون (الشكل 1c) بتكامل قيم توزيع الأعماق من أعلى قمة (0%) إلى أعماق قاع (100%) (المحور الأفقي العلوي على الشكل 1c). يسمح هذا المنحني بحساب نسبة مساحة السطح الداعمة التي تفيد في توصيف العينة وظيفياً. ونسبة مساحة المادة الداعمة عند عمق معين هي نسبة مساحة المادة الفعلية بالنسبة إلى المساحة التي يجري عليها القياس. وهذا التابع ليس إلا تكاملاً لتوزيع الأعماق. يمثل المحور الأفقي النسبة المئوية لمساحة المادة الداعمة، في حين يمثل المحور الشاقولي العمق مقدراً بوحدة القياس المستخدمة.

إذ تُحدّد في هذه الحالة عتبتان لنسبة مساحة المادة الداعمة bearing ratio thresholds (باستخدام الخططين الشاقوليين المرسومين بشكل نقطي) على هذا المنحني. تجري تهيئة

هاتين العتبتين تلقائياً عند نسبي مساحة المادة الداعمة 10% و 80%. تستخدم العتبة الأولى p1 (قيمتها التلقائية 10%) لتعريف مستوى القطع c1، في حين تستخدم العتبة الثانية p2 في تحديد مستوى القطع c2.



ISO 25178		
Functional Parameters		
Smr	100	%
Smc	6.82	nm
Sxp	1.57	nm



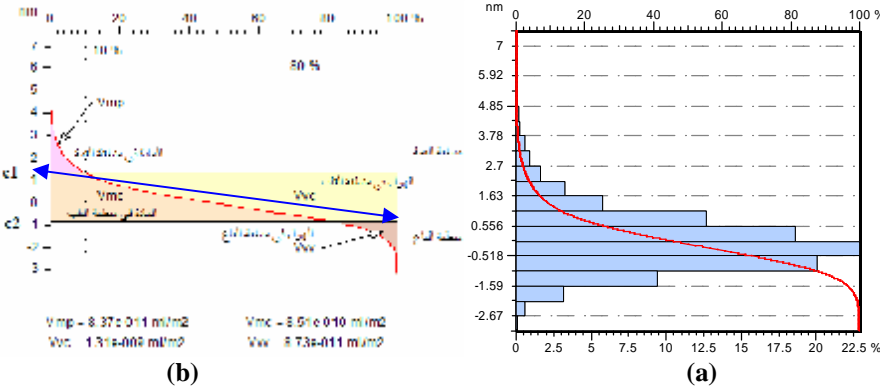
(c)

(b)

الشكل (1) (b) مخطط توزيع الارتفاعات على سطح غشاء ZnS (الشكل a) موضَّع على ركيزة من الزجاج. يدل فيه المحور الشاقولي على الارتفاعات، في حين يدل المحور الأفقي على النسبة المئوية للمساحة التي يمثلها ارتفاع معين من سطح العينة بالنسبة إلى المساحة الكلية. (c) منحنى أبوت-فايرستون (تكامل توزيع الارتفاعات)

البرامترات الحجمية وتوصيف خاصتي الدعم واحتباس الموائع في الأغشية

تحسب البرامترات الحجمية لغشاء بتقسيم منحني أبوت- فايرستون Abbott-Firestone لذلك الغشاء من خلال البحث عن المماس ذي الميل الأخفض على هذا المنحني (الشكل 2b). ثم يجري استقراء هذا المماس بحيث يقطع ممدده مستوى نسبة المادة الداعمة الصفري في النقطة $c1$ ومستوى النسبة المئوية في النقطة $c2$ ، ثم يرسم من النقطتين $c1$ و $c2$ الخطان الأفقيان اللذان يقطعان المنحني في نقطتين على النحو المبين على الشكل 2b، فيقسمانه إلى ثلاثة أجزاء:



الشكل (2) (a) توزيع الأعماق (الارتفاعات) ومنحني Abbott-Firestone في غشاء الشكل (1). (b) الدراسة البيانية للبرامترات الحجمية للعينة نفسها حيث Vmp حجم المادة في القمم الواقعة في المنطقة فوق الخط $c1$ ، و Vmc حجم مادة القلب الواقعة بين $c1$ و $c2$ ، و Vvv حجم الفراغ في القيعان الواقعة تحت $c2$.

1. القمم الواقعة فوق منطقة القلب من السطح المدروس ويعبر عن حجمها بالرمز Vmp .
2. منطقة القلب، إذ يدل الجزء الواقع تحت المنحني على حجم مادة القلب ويرمز له بـ Vmc ، في حين يعبر الجزء فوق المنحني عن حجم الفراغ Vvc في منطقة القلب، ومن ثم خاصة احتباس هذا الحجم للموائع.
3. القيعان بين القمم، ويعبر عنها بحجم الفراغ Vvv في القيعان تحت $c2$ ، الذي يدل على خاصة احتباس القيعان للموائع.

1- البرامترات الوظيفية

من البرامترات الوظيفية لدينا:

1. نسبة مساحة المادة الداعمة عند ارتفاع معين Smr Areal material ratio. وهي نسبة مساحة المادة عند ارتفاع معين c (وهو مستوى القطع) إلى المساحة التي يجري

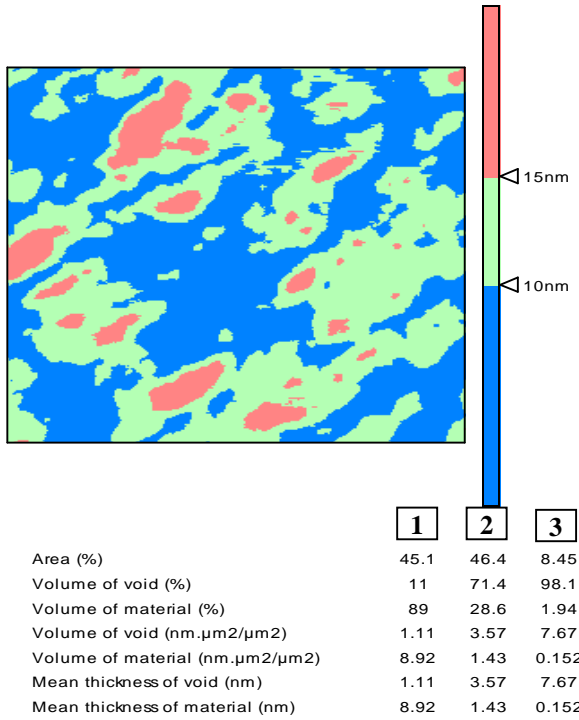
عليها القياس. يُعبّر عن (c) Smr على شكل نسبة مئوية، يؤخذ الارتفاع تلقائياً بالنسبة إلى المستوى المرجعي (تجري تهيئة هذا الارتفاع تلقائياً في المجهر الذي نعمل عليه عند الارتفاع $c=1000\text{nm}$ تحت أعلى قمة).

2. عكس نسبة مساحة المادة **Smc inverse material ratio** الذي يمثل الارتفاع c الذي تتحقق عنده نسبة معينة لمساحة المادة تجري تهيئتها تلقائياً في المجهر الذي نجري عليه القياس عند القيمة $p=10\%$.

3. ارتفاع قاعدة القمم **Sxp Extreme peak height**، الذي يمثل فارق الارتفاع بين نسبتي مساحة المادة $q\%$ و $p\%$ ، تجري تهيئتهما تلقائياً في مجهرنا على النحو:

$$Sxp = Smc(97\%) - Smc(50\%)$$

يبين الجدول في الشكل (1a) البرامترات الوظيفية لغشاء الشكل نقدمه كنموذج للبرامترات.



الشكل (3) نموذج لشريحة تمتد ثخانتها في العمق من 10nm إلى 15nm. نجد في فقرة دراسة الشرائح شرحاً للبيانات المدرجة تحت التمثيل البياني للشريحة.

2- دراسة الشرائح

يسمح استخدام المؤثر Thresholding Operator بقطع أعلى السطح أو أسفله أو كليهما، عند مستوى (أو مستويين) معين (معينين) للارتفاع. يفيد هذا المؤثر بشكل خاص في حذف القمم الكبيرة جداً، ومن ثمَّ في إخفاء تضاريس أخرى، أو في محاكاة عملية اهتراء. كما تسمح برمجية دراسة الشرائح بمعرفة أجزاء السطح (الشكل 3):

- 1. التي تقع تحت ارتفاع معين.
- 2. فوق ارتفاع معين.
- 3. بين الارتفاعين.

تسمح المعلومات المدرجة تحت التمثيل البياني للشريحة بمعرفة:

- النسبة المئوية لسطح كل شريحة.
- النسبة المئوية لكل من الفراغ وحجم المادة في كل شريحة.
- الفراغ وحجم المادة في واحدة السطح.
- الثخانة الوسطية لكل من الفراغ والمادة.

حيث يمكن بالاعتماد على شريط الأدوات استخدام عتبة واحدة أو عتبتين وتحديد قيمتيهما أو تحريكهما بشكل آلي.

مواد البحث وطرائقه

العينات المدروسة

أغشية من ZnS، بسماكات ضوئية مختلفة 50nm و 200nm و 300nm على ركائز من الزجاج وأخرى على السلكون، محضرة في الضغط 7.5×10^{-6} mbar، وقد كانت حوامل الركيزة المسخنة إلى الدرجة 150°C التي تبعد 18 cm عن منبع التبخير، موصولة بمحرك كهربائي لتدوير الركيزة في أثناء توضع الغشاء لضمان تجانسية ثخائنه المقيسة بحساس من الكوارتز [8].

أدوات القياس

مجهر القوة الذرية، الكابول المستخدم في القياسات **AFM Probe Model: Tap190-G**. طرفه المقابل لحزمة الكشف الليزرية مغطى بغشاء محرز من الألمنيوم لزيادة الانعكاس. تواتر اهتزاز الكابول $190\text{kHz} \pm 60\text{Hz}$ ، وثابت قوة النابض 48 N/m، نصف قطر النهاية المدببة $> 10 \text{ nm}$. وقد شغل مجهر القوة الذرية وفق النمط الديناميكي، والصور الحاصلة تمثل في حالتنا طبوغرافية السطح.

خطوات العمل

- (1) إجراء صور طبوغرافية لثلاثة أغشية من ZnS موضوعة على ركائز زجاجية في ثلاث نقاط من الأول 50nm، وأربع نقاط من الثاني 200nm، وأربع نقاط من الثالث (300nm). كما جرى الأمر نفسه على ركائز من السلكون. وقد جرى اختيار هذه النقاط بالاستعانة بالكاميرا المرافقة للمجهر في مناطق يبدو أنها تبدي تلبوراً أفضل على مدى مليمترين اثنين، تقدر أبعاد النقطة المصورة بنحو $10\mu m \times 10\mu m$.
- (2) تطبيق المؤثر Thresholding Operator عند الخط الوسطي للمادة الداعمة في الغشاء وتسجيل كل من توزيعات الأعماق ومنحنيات أبوت-فايرستون والبرامترات الحجمية والوظيفية لكل من الشطرين العلوي والسفلي للمادة الداعمة.
- (3) تطبيق المؤثر Thresholding Operator عند أعماق متعاقبة من السطح بحيث يمكن تعقب صور المسامات كل في كل نانومتر من العمق، وتسجيل كل من البرامترات الحجمية والوظيفية في كل نانومتر من العمق.

النتائج والمناقشة

أجريت الدراسة على عدد كبير من نقاط الأغشية المختلفة في ثخاناتها، ولكننا نورد هنا نموذجاً لغشاء (300nm) موضعاً على ركيزة من الزجاج، ونموذجاً آخر لغشاء (300nm) موضعاً على ركيزة من السلكون بهدف تعقب شكل تغير أبعاد مسامات الغشاء مع العمق.

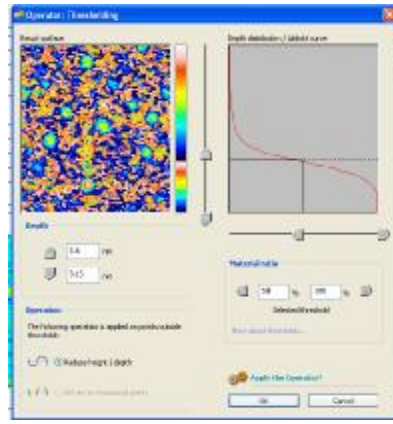
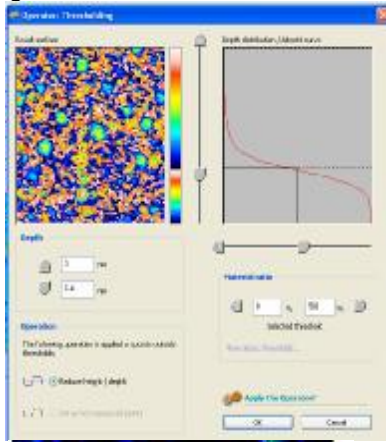
1- دراسة غشاء ZnS الموضع على ركيزة من الزجاج

يضم الشكل (4) نتائج تطبيق المؤثر Thresholding Operator على الغشاء عند عمق يقابل 50% من المادة الداعمة، فضلاً عن توزيع الارتفاعات ومنحنى أبوت-فايرستون والبرامترات الوظيفية والحجمية لكل من الشطر العلوي من الغشاء حيث تظهر القمم، والشطر السفلي الذي تبدو المسامات واضحة فيه.

توصيف القمم الملاحظة في عمق الغشاء المقابل
لمجال المادة الداعمة 50% بدءاً من السطح

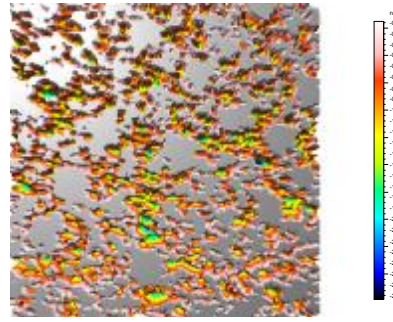
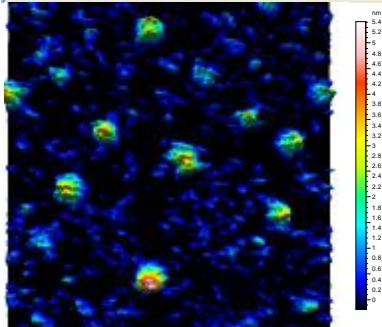
توصيف المسامات الملاحظة في عمق الغشاء المقابل
لمجال المادة الداعمة 50-100%

Depth range for 50% of material ratio



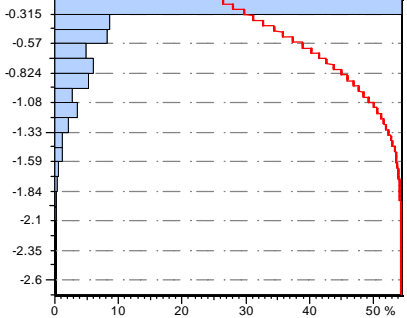
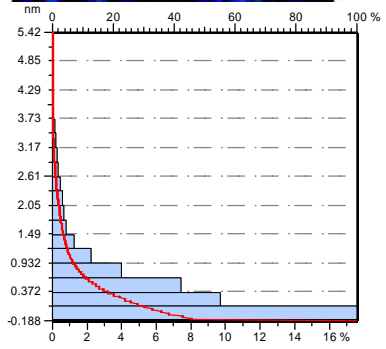
Depth range for 50-100% of material ratio

Peaks in 0-5.6nm range of depth

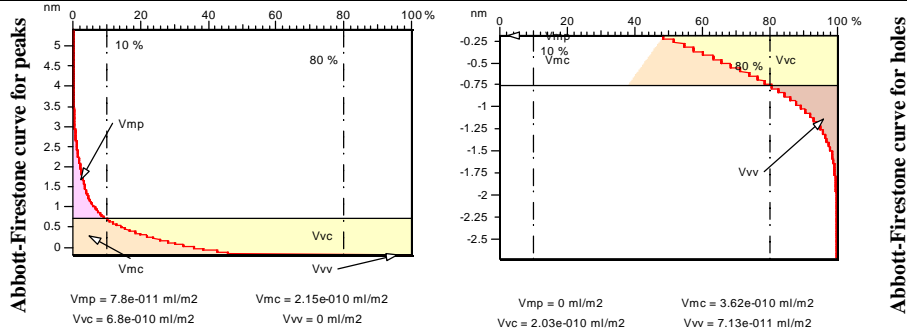


Holes in 5.6-8.15nm range of depth

Height distribution of in peaks



Height distribution in holes



ISO 25178		
Functional Parameters		
Smr	100	%
Smc	4.71	nm
Sxp	0.0049	nm
Slice Parameters		
Area (%)	100	
Volume of void (%)	94.8	
Volume of material (%)	5.23	
Mean thickness of void (nm)	5.31	
Mean thickness of material (nm)	0.293	

ISO 25178		
Functional Parameters		
Smr	100	%
Smc	0	nm
Sxp	1.22	nm
Slice Parameters		
Area (%)	51.4	
Volume of void (%)	10.8	
Volume of material (%)	89.2	
Mean thickness of void (nm)	0.274	
Mean thickness of material (nm)	2.27	

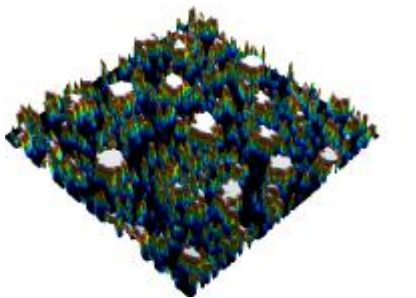
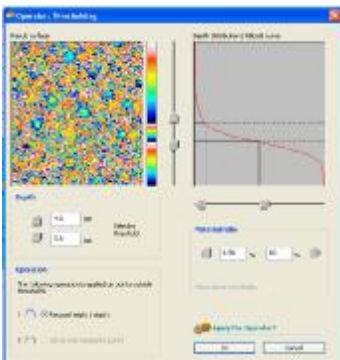
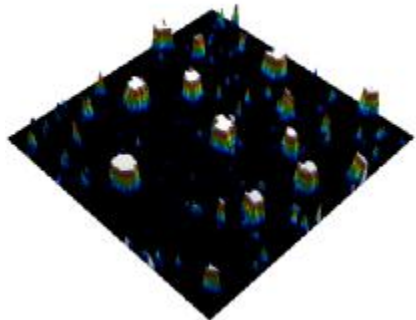
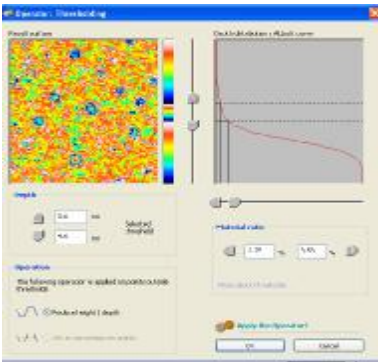
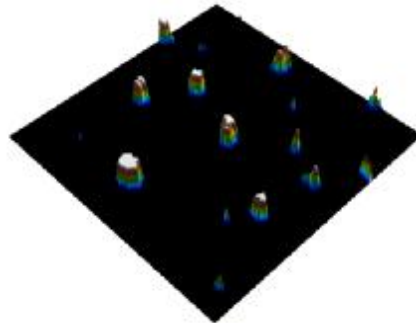
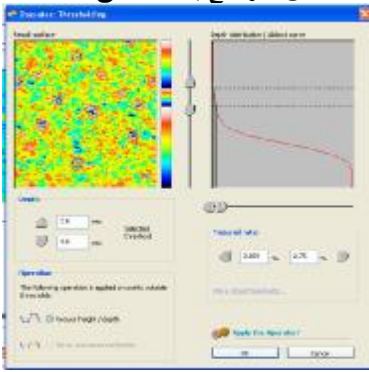
الشكل (4) تطبيق المؤثر Thresholding Operator على غشاء الشكل 1 عند الخط الوسطي للمادة الداعمة. يتضمن العمود الأيسر الأشكال والبرامترات الخاصة بالشطر العلوي من المادة الداعمة في السطح، ويتضمن العمود الأيمن الأشكال والبرامترات التي تخص الشطر السفلي من المادة الداعمة.

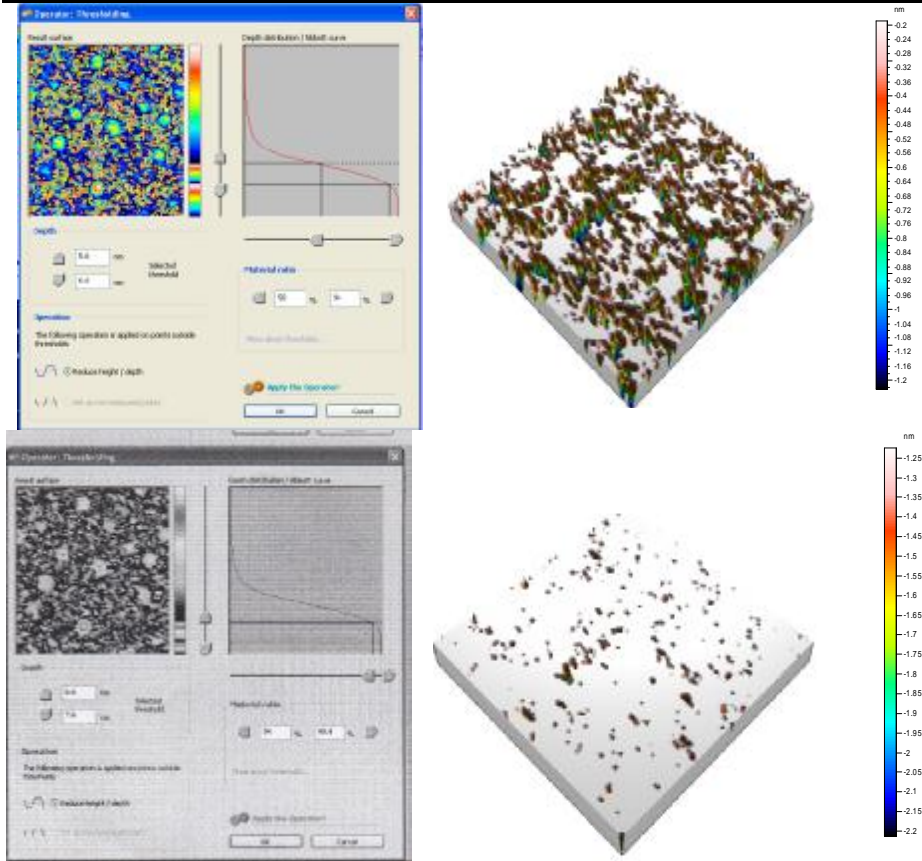
نلاحظ أن الخط الوسطي للمادة الداعمة في هذا الغشاء يقع على عمق 5.6nm من السطح، في حين يمتد النصف الآخر للمادة الداعمة على عمق 5.6-8.15nm، أي إن الخط الوسطي للعمق (الذي يقع على عمق 4.08nm من السطح) لا ينطبق على الخط الوسطي للمادة الداعمة. بينما نلاحظ من كل من الصور الحاصلة وتوزيع الارتفاعات ومنحنيات أبوت-فايرستون لشطري المادة الداعمة في غشاء الشكل (4)، وجود القمم في الشطر العلوي والمسامات في الشطر السفلي، في حين نلاحظ من كل من البرامترات الوظيفية وبرامترات الشرائح المقابلة سيادة الفراغ في الشطر العلوي من الغشاء (الثخانة الوسطية 5.3nm) على المادة الداعمة (الثخانة الوسطية 0.293nm) وسيادة المادة الداعمة في الشطر الأخفض (الثخانة الوسطية 2.27nm) على الفراغ (الثخانة الوسطية 0.274nm).

يضم الشكل (5) نتائج تطبيق المؤثر Thresholding Operator على غشاء ZnS الموضَّع على الركيزة الزجاجية، بين مستويين للارتفاع يفصل بينهما نانومتر واحد بدلالة العمق. حيث نجد في العمود الأيسر الشكل الذي يظهر النسبة المئوية للمادة الداعمة المقابلة لكل نانومتر من الارتفاع بدلالة العمق، في حين يظهر العمود الأيمن أشكال الحبيبات وأبعادها في كل نانومتر من الارتفاع وتطورها بدلالة العمق.

النسبة المئوية للمادة الداعمة في كل نانومتر
من الارتفاع بدلالة العمق

تعقب الحبيبات في كل نانومتر من الارتفاع بدلالة
العمق





الشكل (5) تطبيق المؤثر Thresholding Operator بين مستويين للارتفاع يفصل بينهما نانومتر واحد في غشاء ZnS الموضَّع على الزجاج، بدلالة العمق بدءاً من السطح.

يتضمن الجدول 1 مقارنة بين البرامترات الوظيفية والحجمية لمختلف الشرائح الواردة في الشكل (5)، بدءاً من الشريحة الواقعة في مجال العمق 2.6-3.6nm بدءاً من سطح الغشاء وانتهاء بالعمق 6.6-7.6nm.

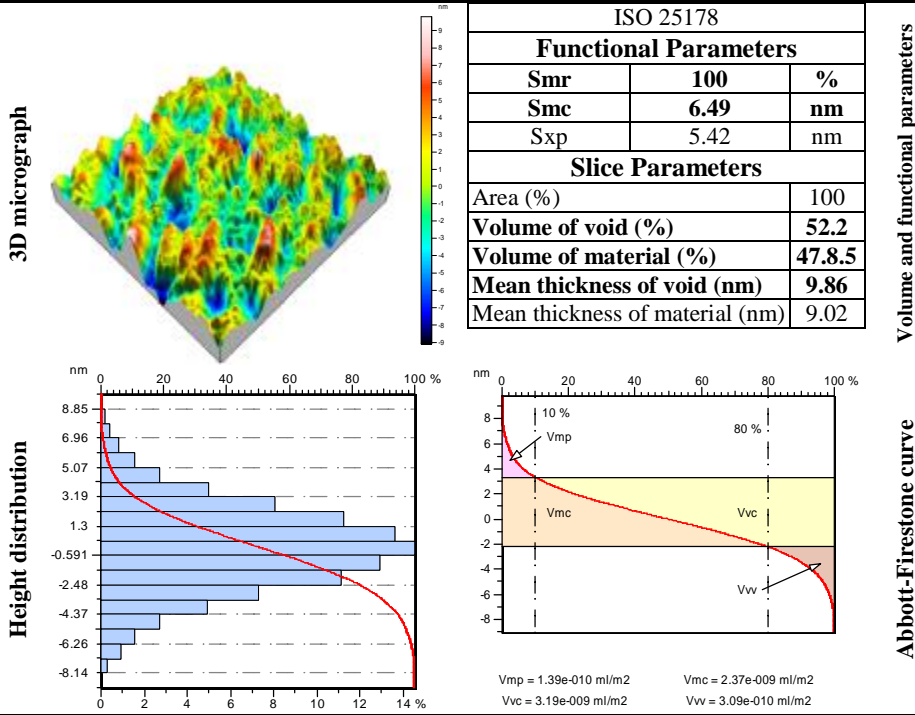
الجدول (1) البرامترات الوظيفية والحجمية في كل شريحة نانومترية من الشكل (5).

Depth range (nm)	2.6-3.6	3.6-4.6	4.6-5.6	5.6-6.6	6.6-7.6
Bearing area (%)	0.86-2.75	2.75-8.58	8.58-50	50-94	94-99.9
Area (%)	99.1	97.2	91.4	51.4	5.11
Volume of void (%)	98.3	95.3	77.4	25	1.46
Volume of material (%)	1.7	4.73	22.6	75	98.5
Mean thickness of void (nm)	0.972	0.942	0.765	0.259	0.0145
Mean thickness of material (nm)	0.0168	0.0468	0.223	0.77	0.974

حيث نجد أن النسبة المئوية للمادة الداعمة تزداد بدلالة العمق، ولكنها تزداد بشكل مفاجئ من 8.58% إلى 50% في النانومتر الذي يسبق الخط الوسطي للمادة الداعمة مباشرة، ومن 50% إلى 94% في النانومتر الذي يلي الخط الوسطي مباشرة، كما نلاحظ من الجدول كيفية تناقص حجم الفراغ وثخانتها الوسطية بدلالة العمق، وزيادة حجم المادة الداعمة وثخانتها الوسطية.

2- دراسة غشاء ZnS الموضَّع على ركيزة من السلكون

يتضمن الشكل (6) توصيف غشاء ZnS الموضَّع على ركيزة السلكون $1.2\mu\text{m}\times 1.2\mu\text{m}$



الشكل (6) توصيف غشاء ZnS الموضَّع على ركيزة من السلكون

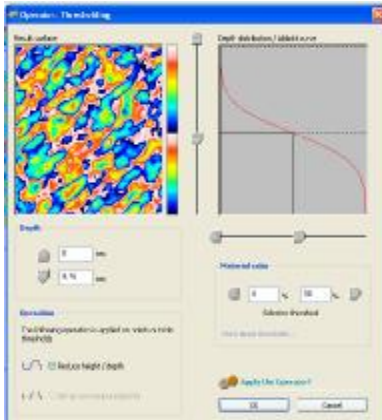
كما يتضمن الشكل (7) نتائج تطبيق المؤثر Thresholding Operator على الغشاء عند الخط الوسطي للمادة الداعمة. حيث نلاحظ أنه يتم بلوغ 50% من المادة الداعمة على عمق 9.76nm من السطح فيما يمتد مجال النسبة 50-100% للمادة الداعمة على مجال العمق 9.76-18.9nm؛ مما يدل على أن الخط الوسطي 9.76nm للمادة الداعمة قريب جداً من الخط الوسطي للعمق $18.9/2 = 9.45\text{nm}$ ، ولو أنه يزيد عليه ببضعة أعشار النانومتر.

كما يتضمن صورة ثلاثية لقمم الشطر العلوي للسطح وأخرى لمسامات الشطر السفلي، فضلا عن توزيع الارتفاعات ومنحنى أبوت-فايرستون لكل من الشطرين.

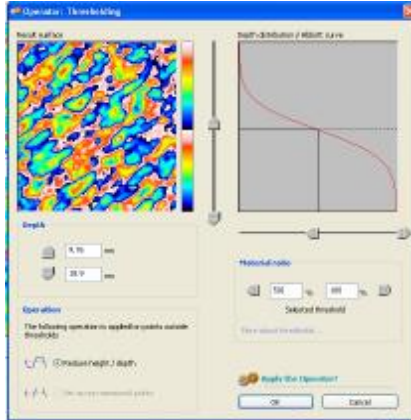
توصيف مسامات الغشاء قبل الخط الوسطي للمادة
الداعمة

توصيف مسامات الغشاء بعد الخط الوسطي
للمادة الداعمة 50-100%

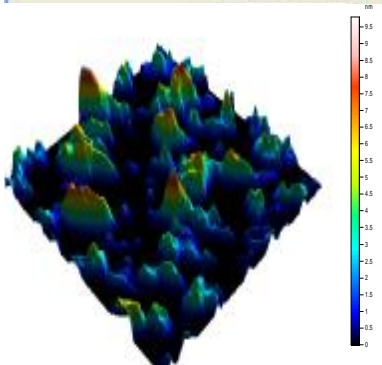
Depth range for 0-50% of material ratio



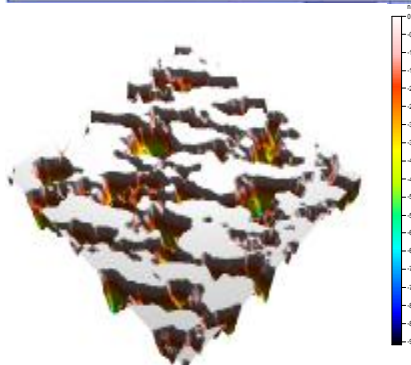
Depth range for 50-100% of material ratio



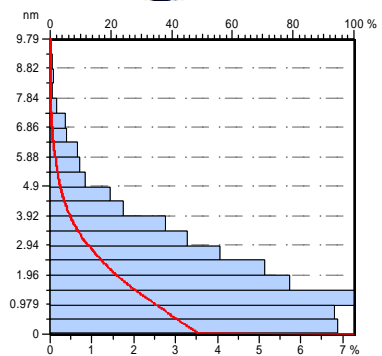
3D micrograph for Peaks



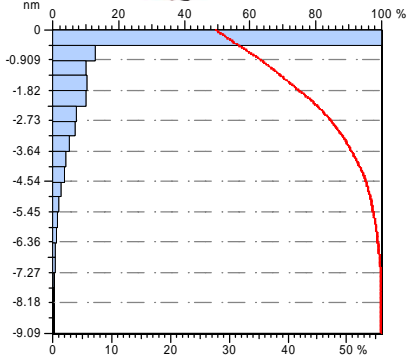
3D micrograph for Holes

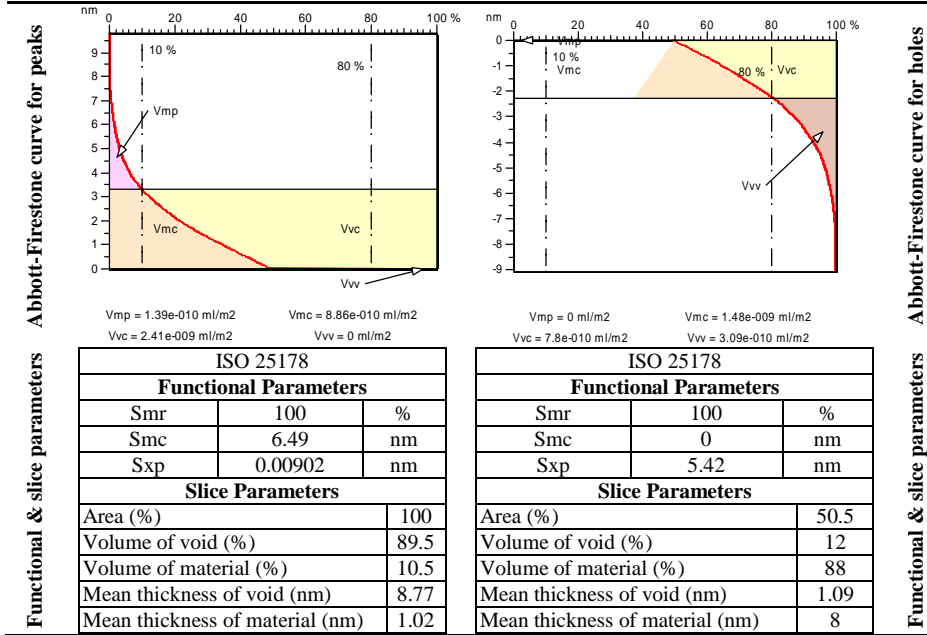


Height Distribution for Peaks



Height Distribution for holes



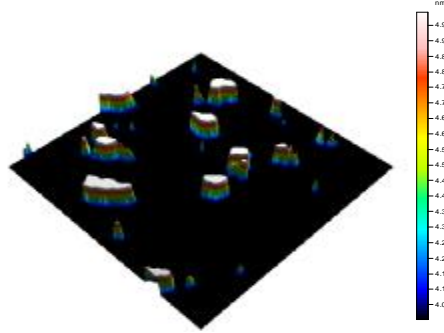
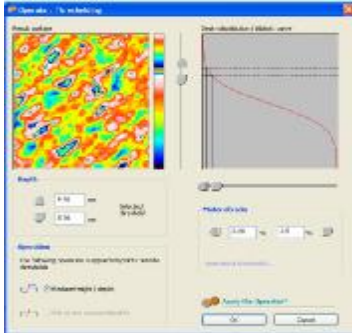


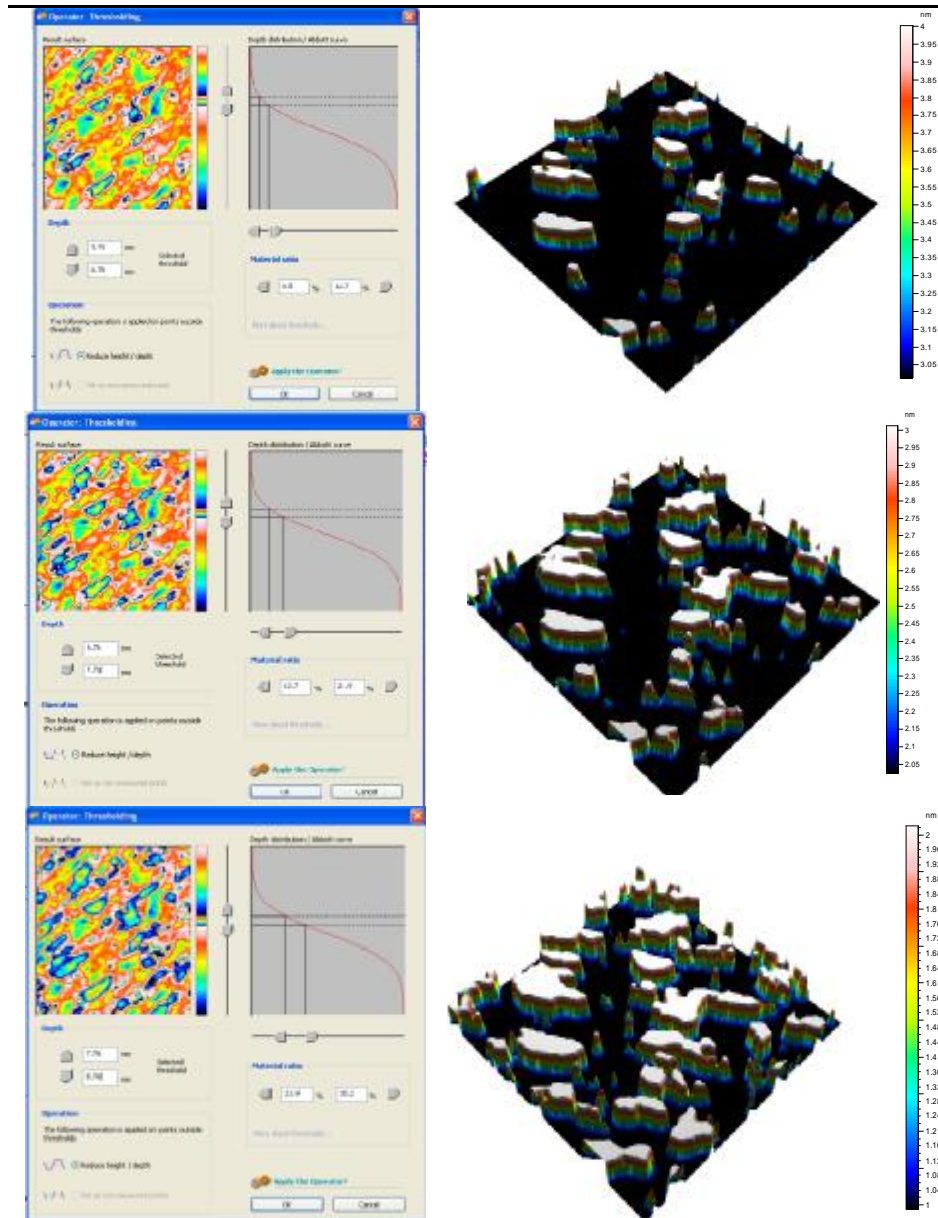
الشكل (7) تطبيق المؤثر Thresholding Operator على غشاء ZnS الموضَّع على ركيزة من السلكون عند الخط الوسطي للمادة الداعمة.

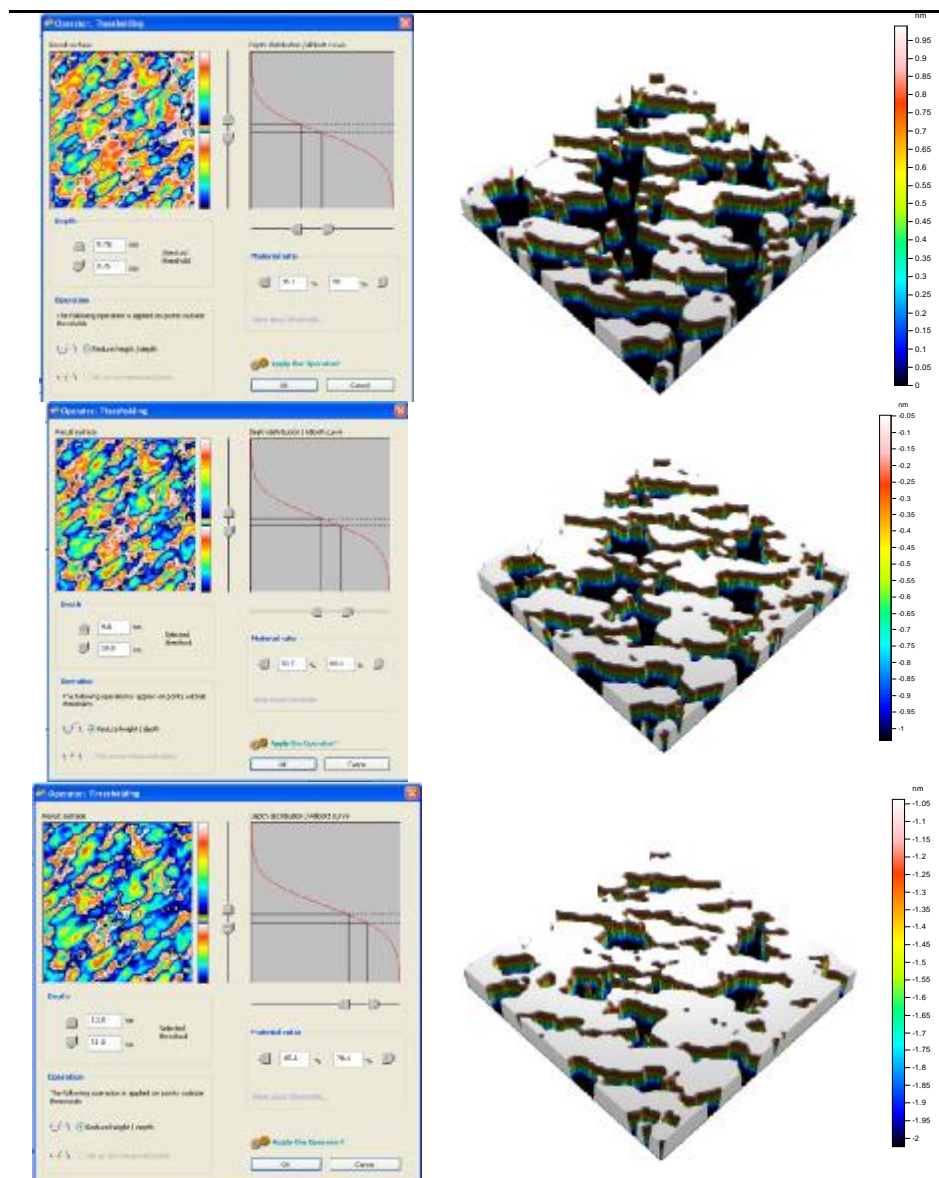
أما الشكل (8) فيتضمن نتائج تطبيق المؤثر Thresholding Operator على الغشاء بين مستويين للارتفاع يفصل بينهما نانومتر واحد، بدلالة العمق. إذ نجد في العمود الأيسر الشكل الذي يظهر النسبة للمادة الداعمة المقابلة لكل نانومتر من الارتفاع بدلالة العمق، في حين يُظهر العمود الأيمن أشكال الحبيبات وأبعادها في كل نانومتر من الارتفاع وتطورها بدلالة العمق.

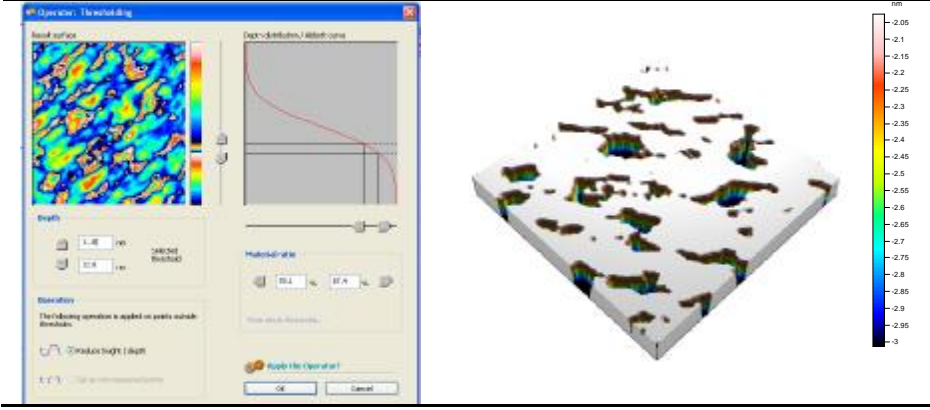
النسبة المئوية للمادة الداعمة في كل نانومتر من الارتفاع بدلالة العمق

تعقب الحبيبات في كل نانومتر من الارتفاع بدلالة العمق









الشكل (8) تطبيق المؤثر **Thresholding Operator** بين مستويين للارتفاع يفصل بينهما نانومتر واحد في غشاء ZnS الموضَّع على ركيزة من السلكون بدلالة العمق بدءاً من السطح.

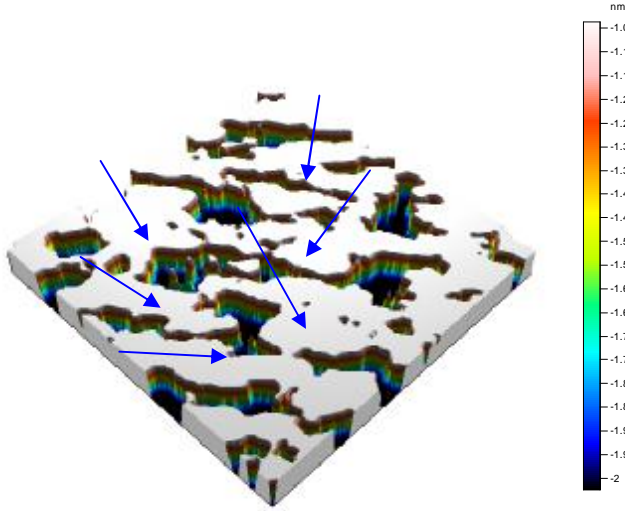
يتضمن الجدول (2) مقارنة بين البرامترات الوظيفية والحجمية لمختلف الشرائح بدءاً من الشريحة الواقعة في مجال العمق 4.8-5.8nm بدءاً من سطح الغشاء وانتهاء بالعمق 11.8-12.8nm. حيث نجد أن النسبة المئوية للمادة الداعمة تزداد بدلالة العمق ولكن زيادتها في النانومتر قبل الخط الوسطي للمادة الداعمة والنانومتر بعد الخط الوسطي لم تكن لها الحدة نفسها في حالة غشاء الركيزة الزجاجية. وهو أمر تؤكد البرامترات الوظيفية (الفقرة 4.1) منها ارتفاع قاعدة القمم Sxp، الذي تبلغ قيمته في غشاء ركيزة السلكون 5.42nm (الشكل 7)، في حين لا تزيد قيمته على 1.57nm (الشكل 1) في غشاء الركيزة الزجاجية. الأمر الذي يجعل الغشاء الموضَّع على ركيزة السلكون أكثر جدوى في احتباس الموائع منه في حالة ركيزة الزجاج. كما نلاحظ من الجدول كيفية التناقص التدريجي لحجم الفراغ وثخانتها الوسطية بدلالة العمق، وزيادة حجم المادة الداعمة وثخانتها الوسطية.

الجدول (2) البرامترات الوظيفية والحجمية في كل شريحة نانومترية من الشكل (8).

Depth range (nm)	4.8-5.8	5.8-6.8	6.8-7.8	7.8-8.8	8.8-9.8	9.8-10.8	10.8-11.8	11.8-12.8
Bearing area (%)	3.3-6.5	6.5-12.7	12.7-21.9	21.9-35.2	35.2-50	50.7-65.1	65.6-78.1	78.1-87.4
Area (%)	96.8	93.7	87.8	78.8	65.2	49.7	34.9	22.4
Volume of void (%)	95.5	91.2	83.7	72.6	58.4	42.6	28.2	17.5
Volume of material (%)	4.5	8.77	16.3	27.4	41.6	57.4	71.2	82.5
Mean thickness of void (nm)	0.944	0.902	0.828	0.753	0.578	0.421	0.285	0.173
Mean thickness of material (nm)	0.0445	0.0868	0.161	0.283	0.411	0.568	0.704	0.815

الخلاصة

يبدو مما سبق أن أحجام المسامات ربما لن تكون ظاهرياً كافية لاحتباس الموائع. لكننا لا بد أن نذكر هنا بمبدأ القياس بمجهر القوة الذرية الذي يعتمد على القوة المتبادلة بين النهاية المدببة لمجس القياس والذرات المقابلة من سطح العينة ومن ثم لا يوفر الـ AFM إلا معلومات عن الطبقة الذرية الأولى من سطح العينة، ويقف معصوب العينين أمام الطبقات الذرية التالية، خلافاً لتقنيات القياس الأخرى التي تستخدم أمواجاً أو إشارات تتغلغل في أعماق العينة فتكشف عنها النقاب. ونحن عندما نتعقب المسامية في شرائح الغشاء المتتالية التي نحصل عليها بتطبيق المؤثر Thresholding Operator كما في الشريحة التالية التي تبلغ سماكتها نانومتراً واحداً، لا شيء ينبئنا عن بنية المناطق (ذات المظهر الممتلي) الواقعة بين المسامات (المشار إليها بالأسهم) لأنه لم يجر أي تفاعل بينها وبين النهاية المدببة للمجس، بل مع أولى الطبقات الذرية التي تعلوها.



ولاختبار مدى تغلغل المسامات في هذه المناطق ومدى فاعلية هذا الغشاء في احتباس الموائع، لابد من البحث عن تقنيات استكشاف نظرية وأخرى تجريبية. أخيراً إن بحوث احتباس الموائع ماتزال في المهد وهي بحاجة إلى المزيد من الدراسات المعمقة والمكثفة حتى تؤتي أكلها. ولا تمثل هذه الورقة إلا كوة صغيرة نضيء من خلالها جانباً من إمكانيات مجهر القوة الذرية القادم حديثاً إلى بلدنا الحبيب.

REFERENCES

- [1] Nicotera Isabella *et al*, Effective Improvement of Water-Retention in Nanocomposite Membranes Using Novel Organo-Modified Clays as Fillers for High Temperature PEMFCs, *J. Phys. Chem. B*, 2011, 115 (29), pp 9087–9097
- [2] Enotiadis A. *et al*, Graphene-based nafion nanocomposite membranes: enhanced proton transport and water retention by novel organo-functionalized graphene oxide nanosheets. 2012 Nov 5;8(21):3338-49.
- [3] Jeong Park Moon *et al*, Increased Water Retention in Polymer Electrolyte Membranes at Elevated Temperatures Assisted by Capillary Condensation *Nano Lett.*, 2007, 7 (11), pp 3547–3552
- [4] Antoniou M. K. *et al*, Naphthalene-based periodic nanoporous organosilicas: II. Hydrogen and methane adsorption and physicochemical study, *Microporous and Mesoporous Materials* (2012) 158, 332-338.
- [5] Dimos K. *et al*, Naphthalene-based periodic nanoporous organosilicas, *Microporous and Mesoporous Materials* (2012) 158, 324-331.
- [6] N. Isabella *et al*, Effective Improvement of Water-Retention in Nanocomposite Membranes Using Novel Organo-Modified Clays as Fillers for High Temperature PEMFCs, *Journal of Physical Chemistry B*. (2011) 115 (29), 9087-9097
- [7] Yuan Junjie *et al*, Nano-sized silica hollow spheres: Preparation, mechanism analysis and its water analysis, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol.71, Issue 7, July 2010, Pages 1013–1019.
- [8] Nanosurf FlexAFM, Operating Instructions for Easyscan 2 control software, version 2.1 2009, 3.1, 2013
- [9] Scanning Probe Image Processor, SPIP™! manual (guide for AFM algorithms)