

## دراسة اللا تناحي والدورية في توزيعات للمغطة بمجهريّة القوة المغنطيسية

سهام الطرابيشي<sup>(1)</sup>

تاريخ الإيداع 2013/01/14

قبل للنشر في 2013/05/22

### الملخص

إن مجهرية القوة المغنطيسية (MFM) magnetic force microscopy شكل من أشكال مجهرية القوة الذرية، حيث تقوم نهاية مدببة ممغطة بمسح عينة ممغطة؛ يكشف فيها عن التفاعلات المغنطيسية بين النهاية المدببة والعينة التي تستخدم في إعادة بناء البنية المغنطيسية لسطح العينة. وقد كان نمط تشغيل المجهر المعتمد في هذا العمل هو نمط الالتماس الديناميكي الذي نحصل من خلاله على صور لكل من طوبوغرافية سطح العينة وتغيرات سعة اهتزاز النهاية المدببة وتغيرات طور اهتزاز النهاية المدببة. بالاستعانة بمؤثر الترابط الذاتي أمكن دراسة اللاتناحي anisotropy والدورية في توزيعات مغنطيسية لأجيال مختلفة من الأقراص المرنة.

الكلمات المفتاحية: مجهرية القوة المغنطيسية، الأقراص المرنة، نمط التشغيل الديناميكي، الطوبوغرافية، اللاتناحي، الدورية.

---

<sup>(1)</sup> أستاذة، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

# Study of Anisotropy and periodicity in certain magnetization distributions by Magnetic force microscopy

S. Al-Tarabichi<sup>(1)</sup>

Received 14/01/2013

Accepted 22/05/2013

## ABSTRACT

Magnetic force microscopy (MFM) is a variety of atomic force microscopy, where a sharp magnetized tip scans a magnetic sample; the tip-sample magnetic interactions are detected and used to reconstruct the magnetic structure of the sample surface. In this work, we have used Dynamic (AC) non-contact AFM (NC-AFM) mode. A mode which provide micrographs for topography, oscillation amplitude changes and phase shift. Using the autocorrelation Operator, we studied the anisotropy and periodicity in magnetization distributions in different generations of floppy disks.

**Keywords:** Magnetic force microscopy, Floppy disk, Dynamic mode of operation, Topography, Anisotropy and periodicity.

---

<sup>(1)</sup>Prof., Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria.

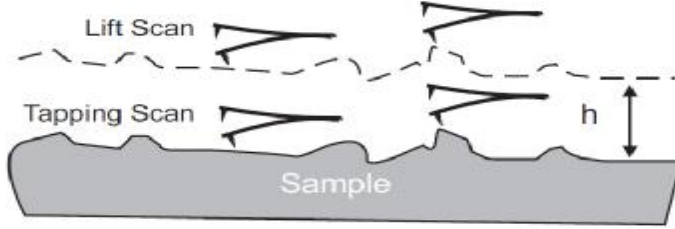
## مقدمة

استخدمنا في قياساتنا مجهرية القوة المغناطيسية magnetic force microscopy، التي تتمتع بمقدرة فاصلة عالية تصل إلى نحو  $60\text{ nm}$  (وهو نصف قطر النهاية المدببة عند منتصف طولها). يجدر بالذكر أنه يتوافر في المراكز البحثية مقاييس متعددة للمغناطيسية النانوية منها مقياس المغناطيسية السكويدي A SQUID (superconducting quantum magnetometer) الذي يتألف من حلقة فائقة النقل تتضمن وصلة جوزفسون واحدة أو وصلتين ويتمتع بحساسية عالية جداً لدرجة أنه يقيس حقولاً منخفضة قد تصل في بعض الحالات إلى  $5 \times 10^{-18}\text{ T}$ ، وبرز دوره في استكشاف وظائف الدماغ من خلال قياس الحقول المغناطيسية الضعيفة التي ترافق الإدراك. من مقاييس المغناطيسية الدقيقة أيضاً ما يعتمد على مفعول كير المغناطيسي Magneto-optic Kerr Effect (MOKE) ويستخدم في قياس الخصائص المغناطيسية للأغشية المغناطيسية والبنى النانوية المغناطيسية، بالاستعانة بحزمة ليزرية يمكن تبئيرها في ثلاثة ميكرومترات، وهي شديدة الحساسية. كما تتوافر مقاييس للمغناطيسية SERF magnetometers (spin exchange relaxation-free) التي تستخدم في قياس الحقول المغناطيسية بوجود حزمة ليزرية بهدف الكشف عن التفاعل المتبادل بين ذرات المعادن القلوية في حالة البخار. غير أن الـ MFM تتفوق عليها من حيث المقدرة الفاصلة.

اعتمدنا في هذه الدراسة على القوة المغناطيسية بين نهاية مغناطيسية مدببة tip واقعة في طرف كابول cantilever مرن و سطح العينة في مجهر القوة المغناطيسية التي يمكن التعبير عنها بالعلاقة [1] [2] [7] (الشكل 1):

$$\vec{F} = m_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} \quad (1)$$

حيث  $\vec{M}$  العزم المغناطيسي magnetic moment للنهاية المدببة،  $\vec{H}$  الحقل المغناطيسي الذي يولده سطح العينة،  $\mu_0$  النفاذية المغناطيسية magnetic permeability للفضاء الحر.



الشكل (1)

يمكن الحصول على مقدرة فصل نموذجية تقدر بنحو  $30\text{ nm}$  [3]، ولو أنه يمكن بلوغ مقدرات فاصلة تصل إلى  $10$  إلى  $20\text{ nm}$  [4].

### الآلية الرئيسية المتبعة في مجهرية القوة المغنطيسية

هي المسح الكهرضغطي Piezoelectric scanning حيث:

- تُمسح العينة بالمفعول الكهرضغطي وفق الاتجاهات  $x$  و  $y$  و  $z$
- إذ يُطبَّق فرق في الكمون بين كل مسريين من مساري الماسح الكهرضغطي الذي تستند إليه العينة التي تتحرك معه وفق الاتجاه الموافق. حيث يؤدي تطبيق كمون قدره فولت واحد في الحالة النموذجية إلى إزاحة للعينة من 1 إلى 10 nm.
- يتم الحصول على الصورة بمسح العينة ببطء على شكل خطوط متوازية.
- لا يزيد مجال مساحات المسح في المجهر المستخدم على عشرة ميكرومترات.
- يقع مجال مدد التصوير من دقيقة إلى بضعة دقائق.
- ويتكون المجس في مجهر القوة المغنطيسية من نهاية مدببة ممغنطة تقع في طرف كابول مرن.

- يتوافر في السوق كابولات محضرة إما من السلكون الأحادي البلورة أو ثاني أكسيد السلكون  $SiO_2$  أو نتريد السلكون  $Si_3N_4$ .
- تغطي النهايات المدببة بغشاء مغنطيسي رقيق ( $> 50\text{ nm}$ ) (من النيكل أو الكوبالت)، يتميز عادة بقدرة عالية  $high\ coercivity$ ، بحيث لا يتغير عزمها المغنطيسي في أثناء التصوير.
- تساق وحدة النهاية المدببة - الكابول بالقرب من تواتر التجاوب ببلورة كهرضغطية بتواترات تمتد في الحالة النموذجية من 10 kHz إلى 1 MHz [5].

#### أنماط تشغيل مجهر القوة المغنطيسية

##### 1- نمط التشغيل السكوني Static mode

- في هذا النمط يطبق الحقل الذي تولده العينة قوة على النهاية المدببة المغنطيسية. يُكشف عن هذه القوة بقياس انحراف الكابول من خلال عكسه لحزمة ليزيرية.
- إما أن يبتعد الكابول أو يقترب من سطح العينة بمسافة قدرها  $\Delta z = F_z / k$  عمودياً على السطح.
- تسجل قوى من مرتبة عشرات البيكونيوتن.

##### 2- نمط التشغيل الديناميكي Dynamic mode of operation

- تتمذج مجموعة النهاية المدببة - الكابول، في حالة الانحرافات الصغيرة، على أنها هزاز توافقي متخامد كتلته الاختبارية ( $m$ ) مقدرة بوحدة الـ [kg]، وثابت نابض مثالي ( $k$ ) بالوحدة [N/m] وثابت تخامد  $a\text{ damper } (D)$  بالوحدة [N·s/m] [12].

- تتغير سعة اهتزاز  $z$  النهائية المدببة، لدى تطبيق قوة خارجية مهتزة  $F_z$  على الكابول، ويكون هذا التغير مهتزازاً اهتزازاً توافقياً، ويتوافق بانزياح shift في الطور بين القوة المطبقة وانحراف الكابول يعطى على النحو [9] [6] [5]:

$$F_z = F_0 \cos wt \text{ و } z = z_0 \cos(wt + q) \quad (2)$$

يعطى كل من سعة اهتزاز الكابول وطور اهتزازة على النحو:

$$z_0 = \frac{F_0/m}{\sqrt{(w_n^2 - w^2)^2 + (\frac{w_n w}{Q})^2}} \text{ و } q = \arctan \left[ \frac{w_n w}{Q(w_n^2 - w^2)} \right] \quad (3)$$

حيث:

$$Q = 2p \frac{\frac{1}{2} k z_0^2}{p D z_0^2 w_n} = \frac{1}{2d}$$

$$\text{و } w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ التواتر الطبيعي لاهتزاز الكابول،}$$

$$\text{و } d = \frac{D}{2\sqrt{mk}} \text{ عامل تخامد اهتزاز الكابول.}$$

- تقاس الانزياحات في تواتر تجاوب الكابول في أثناء نمط تشغيل الكابول الديناميكي.
- بفرض أن سعات اهتزاز الكابول صغيرة (وهو أمر صحيح عموماً في قياسات مجهرية القوة المغناطيسية)، بتقريب من المرتبة الأولى، فيمكن ربط تواتر التجاوب بالتواتر الطبيعي للاهتزاز وبتدرج القوة. أي إن الانزياح في تواتر التجاوب هو نتيجة لتغيرات في ثابت النابض بفعل القوى (التدافعية والتجاذبية) التي تؤثر في النهاية المدببة

$$w_r = w_n \sqrt{1 - \frac{1}{k} \frac{\partial F_z}{\partial z}} \approx w_n \left( 1 - \frac{1}{2k} \frac{\partial F_z}{\partial z} \right) \quad (4)$$

- يعطى التغير في التواتر الطبيعي للكابول بالعلاقة:

$$f = w/2p \text{ حيث } \Delta f = f_r - f_n \approx -\frac{f_n}{2k} \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (5)$$

تستخدم جملة إحداثيات بحيث تقع القوة الجاذبة بين النهاية المدببة وسطح في الاتجاه السالب لمحور القوى  $F < 0$ ، عندما يكون  $z$  الموجب بعيداً عن سطح العينة وعمودياً

عليه، ومن ثمَّ يكون تدرج القوة موجباً، ومن ثمَّ ينخفض تواتر تجاوب الكابول (كما تصف المعادلة) في حالة القوى التجاذبية.

### حساب القوى التي تؤثر في النهايات المدببة المغنطيسية

يمكن حساب الطاقة المغنطيسية السكونية (U) magnetostatic energy تحليلياً لجملة النهاية المدببة - العينة بإحدى طريقتين [1] [5] [6] [13]:

- يمكن إما حساب العزم المغنطيسي للنهاية المدببة (M) بوجود الحقل المغنطيسي للعينة (H).
- أو حساب العزم المغنطيسي للعينة بوجود الحقل المغنطيسي للنهاية المدببة (وهي الأسهل). ثم مكاملة الجداء الداخلي للعزم المغنطيسي والحقل المغنطيسي على كامل حجم التفاعل بالشكل:

$$U = -m_0 \int_V \dot{\mathbf{M}} \cdot \dot{\mathbf{H}} dV \quad (6)$$

وحساب تدرج الطاقة بالنسبة إلى البعد للحصول على القوة  $F$ . وبفرض أن الكابول ينحرف وفق المحور  $z$ ، وأن النهاية المدببة ممغنطة وفق اتجاه معين (المحور  $z$  مثلاً)، فيمكن تبسيط المعادلات إلى:

$$F_i = m_0 \int_V \dot{\mathbf{M}} \cdot \frac{\partial \dot{\mathbf{H}}}{\partial x_i} dV \quad (7)$$

لما كانت النهاية المدببة ممغنطة وفق اتجاه معين، فإنها تتأثر بمركبة الحقل المغنطيسي للعينة التي تتخذ الاتجاه نفسه.

يمكن استخدام مجهرية القوة المغنطيسية في تصوير مختلف البنى المغنطيسية بما فيها جدر المجالات domain walls (بلوخ ونيل)، والبتات المغنطيسية المسجلة، ... الخ. كما يمكن دراسة حركة جدر المجالات في حقل مغنطيسي خارجي. نهدف من خلال هذا البحث إلى إلقاء الضوء على بعض إمكانيات مجهر القوة الذرية، من خلال دراسة اللاتناحي anisotropy والدورية في الصور الحاصلة لأنواع مختلفة من الأقراص المرنة (المغنطيسية) تمهيداً لاستخدامه في بحوث المغنطيسية النانوية المستقبلية.

### مواد البحث وطرقه

#### العينات المدروسة:

أقراص مرنة من أجيال مختلفة، الشكل  $2a$ ، وقد أُجريت تهيئة (فرمته) كل منها بالسواقة المناسبة ثم اقتطاع عينات منها للدراسة.



(b)



(a)

الشكل (2)

1- الجيل SKC MD2D, Mini Floppy Disk, (double sided, double density)

2- الجيل TDK M2DD, Mini Floppy Disk, (double sided, double density)

3- Maxell 2HD و Imation HD IBM, 1.4MB 3M و creation HD و 3M IBM DS HD و Sony HD micro و SKC Micro Floppy Disk, MF 2HD و Sony MFD 2HD.

يتألف القرص المرن من صفيحة مستوية معدنية أو بلاستيكية، مغطاة بغشاء من أكسيد مغنطيسي، تبلغ ثخانتها:  $2\ \mu\text{m}$  من أكسيد الحديد المغنطيسي في الحالة DD، و  $1.2\ \mu\text{m}$  من أكسيد الحديد المشوب بالكوبالت في الحالة HD، و  $3\ \mu\text{m}$  من فريت الباريوم في الحالة ED، ويذكر أن هذه المواد تختلف بقهرياتها المغنطيسية. (SD = Single Density; DD = Double Density و HD = High Density و ED = Extended Density)، وفي القرص الفارغ غير المهيأ لا يكون لجسيمات الغشاء أي ترتيب مغنطيسي، في حين تصطف هذه الجسيمات في أثناء التهيئة مشكلة نموذجاً من المسارات الدائرية الممغنطة، وقد شطر كل من المسارات إلى قطاعات (الشكل 2b)، الأمر الذي يمكن وحدة التحكم من قراءة البيانات وكتابتها بشكل صحيح.

#### أدوات القياس:

مجهر القوة الذرية نموذج Nanosurf Easy Scan2 Flex AFM، ألحقت به كاميرا فيديو تعطي منظراً علوياً وأخرى تعطي منظراً جانبياً. أبعاد الصور التي يمكن الحصول عليها تبلغ 2mm. الكابل المستخدم في القياسات: **AFM Probe Model: MagneticMulti 75-G**، طرفه الذي تبرز منه النهاية المدببة مغطى بغشاء مغنطيسي، في حين أن الطرف الآخر الذي يقابل حزمة الكشف الليزرية مغطى بغشاء محرز من الألمنيوم لزيادة الانعكاس. تواتر اهتزاز الكابل  $75\ \text{kHz} \pm 15\ \text{kHz}$ ، وثابت قوة النابض من 1 N/m إلى 7 N/m، نصف قطر النهاية المدببة  $60\ \text{nm}$ . وقد شغل مجهر القوة الذرية وفق النمط الديناميكي، وهو نمط نحصل من خلاله على صور أبعادها

$10 \mu m \times 10 \mu m$  تمثل كلاً من طبوغرافية سطح العينات المدروسة، وتغيرات سعة اهتزاز الكابول، وتغيرات طور اهتزاز الكابول.

### 3.2. مسح العينة

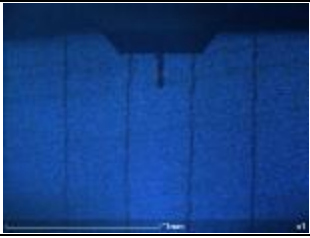

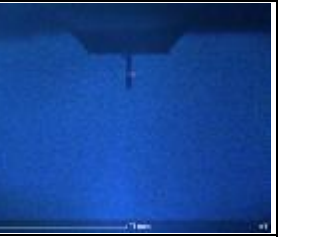
جرى استخدام طريقة زيادة الارتفاع [10] lift height في مجهرية القوة المغنطيسية لمسح العينات. ذلك أن النهاية المدببة عند مسحها سطح عينة على مسافات قريبة ( $10 \text{ nm}$ )، لا تتحسس القوة المغنطيسية فحسب، بل أيضاً القوى الذرية والكهرواكتية. ويجدر بالذكر أن هذه الطريقة تسهم في تعزيز التباين المغنطيسي من خلال ما يأتي:

- تقرب النهاية المدببة في بادئ الأمر من سطح العينة وتسجيل بروفيل الطبوغرافية لكل خط مسح للعينة.
- يزداد ارتفاع النهاية المدببة الممغنطة عن سطح العينة وإجراء المسح الثاني للخط نفسه، وتستخلص الإشارة المغنطيسية [11].

## النتائج

### أبعاد المسارات:

يلاحظ على الصور الحاصلة بالكاميرا فيديو ظهور مسارات البيانات بوضوح على الجيلين الأول والثاني من الأقراص المرنة، وعدم ظهورها في الأجيال الحديثة (الشكل 3)

SKC MD2D	TDK M2DD (IMATION)	SKC Micro HD
		
عرض المسار نحو $400 \mu m$	عرض المسار نحو $200 \mu m$	عدم ظهور مسارات تسجيل البيانات

الشكل (3)

### توزيع المغنطة:

يزودنا نمط اللاتماس الديناميكي المتبع في هذه الدراسة لكل منطقة من سطح العينة يجري مسحها بصورة للطبوغرافية وأخرى لتغيرات سعة اهتزاز الكابول وثالثة لانزياح طور اهتزاز الكابول. وقد قمنا بتنعيم هذه الصور وإزالة الضجيج منها بالمرشحات المناسبة، ثم إزالة الشكل منها (ليكون السطح فقط هو الذي تجري دراسته)، ثم قمنا بتطبيق مؤثر الترابط الذاتي Autocorrelation Operator على كل منها. يجدر بالذكر أن الترابط الذاتي لسطح معين يمثل التشابه في السطح لدى مقارنته بذاته مع إجراء انسحاب.

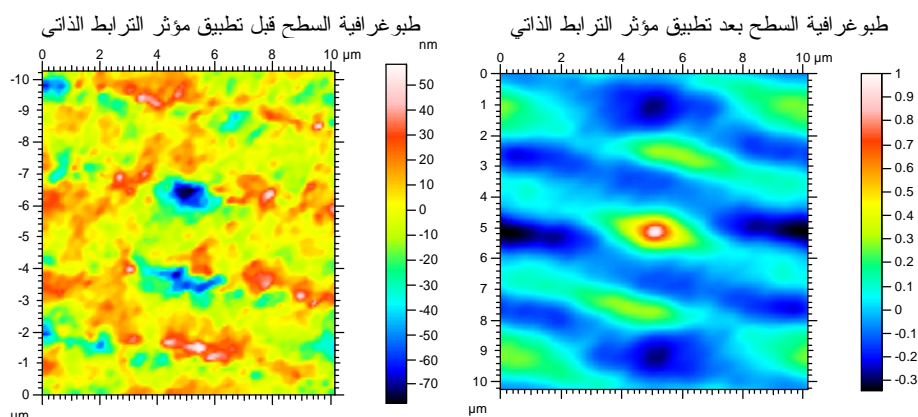


ومن ثمَّ يسمح هذا المؤثر بالكشف عن النماذج الدورية في سطح معين وتوصيف سطح معين بأنه متناح أو لامتناح. تتضمن صورة الترابط الذاتي نهاية عظمى في مركزها، تكون مستديرة إذا كان السطح متناحياً أو بيضوية إذا كان السطح لامتناحياً، كما تتضمن فصوصاً ثانوية تبعاً لوجود النماذج الدورية أو عدمه.

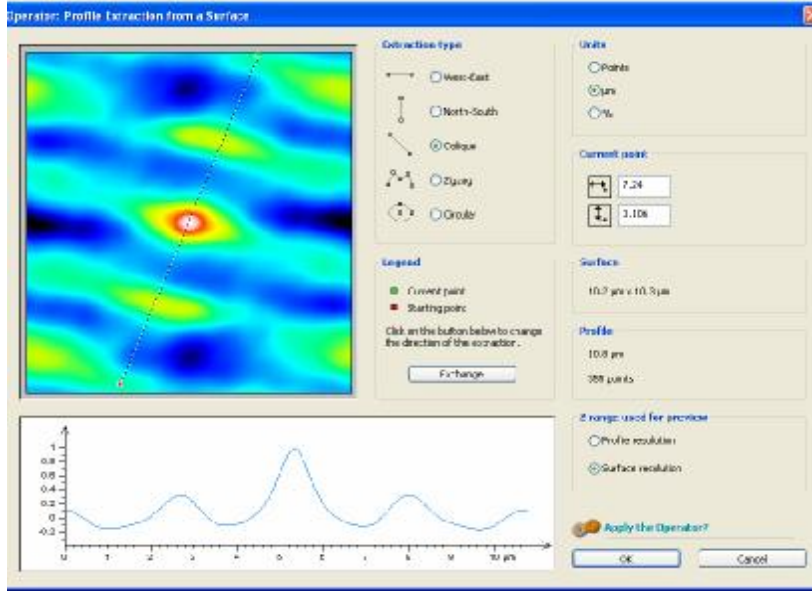
يجدر بالذكر أنه يمكن استخدام تابع الترابط الذاتي autocorrelation function لتعزيز البنى الدورية، كما يستخدم في تحليل تموج السطح waviness (بعد إزالة الخشونة roughness) لاستخلاص بارامترات طول الترابط الذي يمثل دور تكرار البنى الدورية أو أدوارها. فإذا كانت بنية الصورة دورية، فإن تابع الترابط الذاتي يبدي قمماً بدور التكرار نفسه في حالة الصورة الأصلية كما نعرض فيما يأتي:

دلت الدراسة على أنواع مختلفة من الأقراص المرنة المهيأة (المفرمّة: كل منها بالسواقة المناسبة) على أن توزع المغنطة، في منطقة من سطح عينة مساحتها  $10\mu m \times 10\mu m$ ، يختلف من قرص إلى آخر، بل إنه يختلف من نقطة إلى أخرى في القرص نفسه. حيث يبدي بعض النقاط، في القرص نفسه لدى تطبيق مؤثر الترابط الذاتي، نهاية مركزية إهليلجية عظمى فضلاً عن فصوص متوازية (الشكل 4) دالة على اللاتناحي وعلى الدورية وفق منحى النهايات العظمى، في حين تبدي نقاط أخرى فصاً مركزياً، فضلاً عن فصوص أخرى تحيط بالفص المركزي دالة على الدورية في التناحي. نورد هنا مثلاً عن الدورية في حالة اللاتناحي في عينة من القرص المرن Creation HD، بعد أن خضعت لعمليات التنعيم وإزالة الضجيج والشكل والخشونة على الترتيب، ثم نورد مثلاً عن الدورية في حالة التناحي في سطح عينة من القرص المرن Sony MFD 2HD:

#### المثال الأول: الدورية في حالة اللاتناحي في عينة من القرص المرن Creation HD

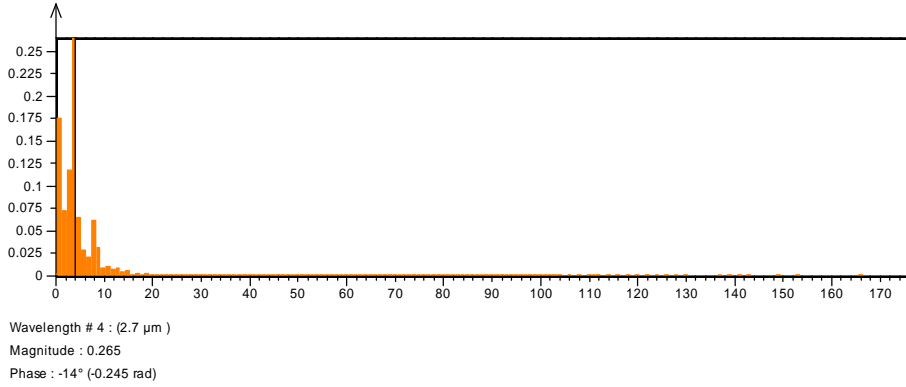


الشكل (4) يدل وجود الفص المركزي البيضوي في الشكل الأيمن على اللاتناحي في طوبوغرافية سطح العينة، كما تدل الفصوص الموازية للفص المركزي على وجود دورية وفق ذلك المنحى



الشكل (5) تظهر في الشكل عملية استخلاص بروفيل تموج الطبوغرافية (أي بعد إزالة الخشونة) المار بالفص المركزي

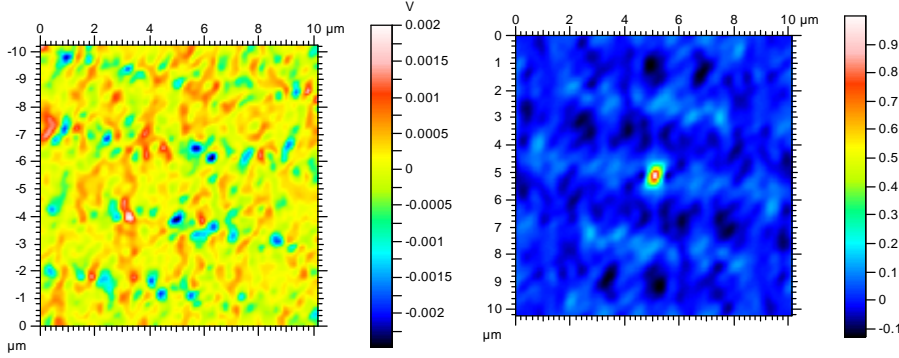
تدل دراسة طيف بروفيل تموج طبوغرافية السطح (الشكل 5) وفق منحى معين في النقطة المدروسة على الدورية أو الدورات الموجودة وفق ذلك المنحى.



الشكل (6) طيف بروفيل تموج طبوغرافية سطح العينة في النقطة المدروسة، يدل المحور الشاقولي على الإسهام التواتري.

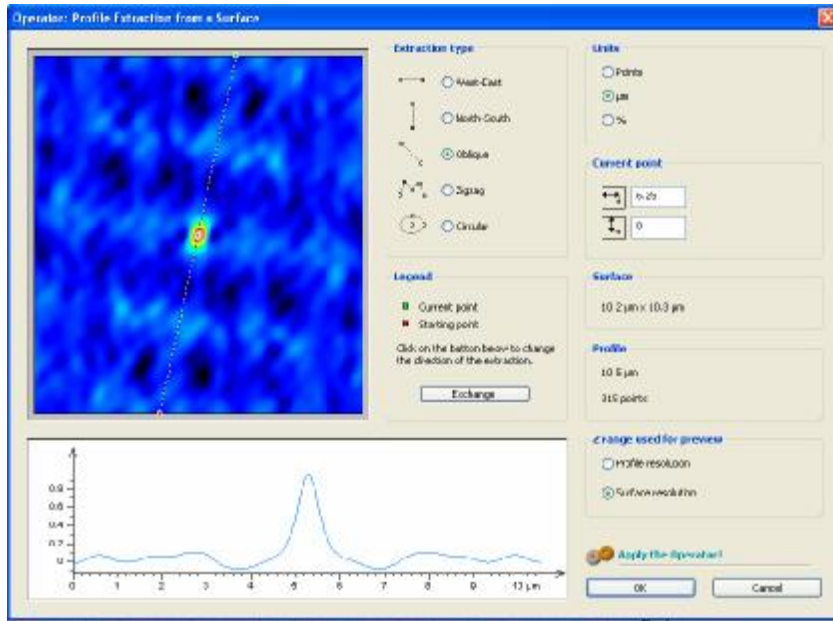
يدل طيف بروفيل تموج الطبوغرافية في الشكل (6) أن الدورية الرئيسية في طبوغرافية السطح تتركز عند الطول الموجي (أي دور التكرارية)  $2.7 \mu m$ .

تغيرات سعة اهتزاز الكابول بعد تطبيق مؤثر الترابط الذاتي تغيرات سعة اهتزاز الكابول قبل تطبيق مؤثر الترابط الذاتي



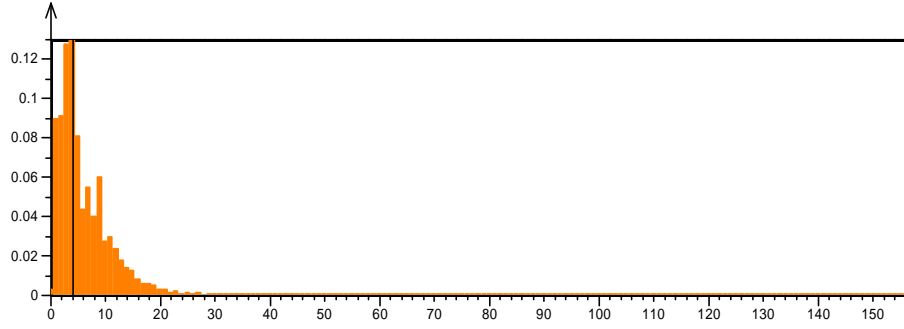
الشكل (7)

يدل وجود الفص المركزي البيضي في الشكل الأيمن (الشكل 7) على الالتئاحي في تغيرات سعة اهتزاز الكابول، كما تدل الخطوط المتوازية فيما بينها على وجود دورية وفق ذلك المنحى.



الشكل (8) عملية استخلاص بروفيل تموج تغير سعة اهتزاز الكابول وفق الدوريات التي تظهر على الشكل.

تدلُّ دراسة طيف بروفيل تموج تغيّرات سعة اهتزاز الكابول وفق منحى معين (الشكل 8) في النقطة المدروسة على الدورية الموجودة أو الدوريات وفق ذلك المنحى.



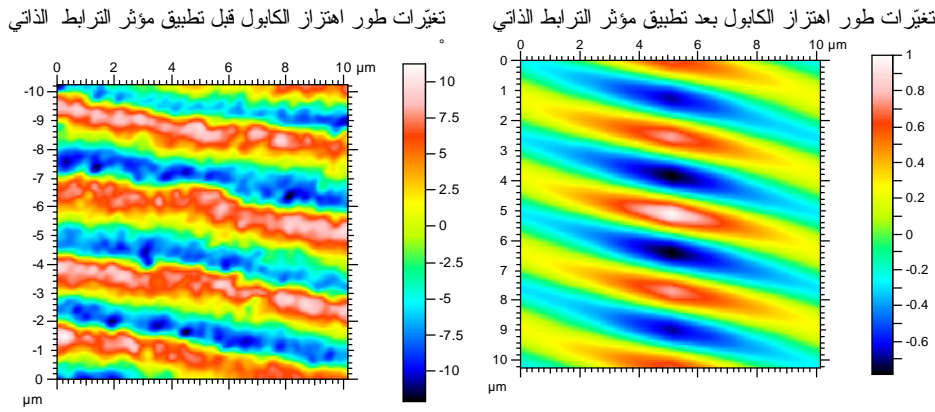
Wavelength # 4 : (2.64 μm )

Magnitude : 0.13

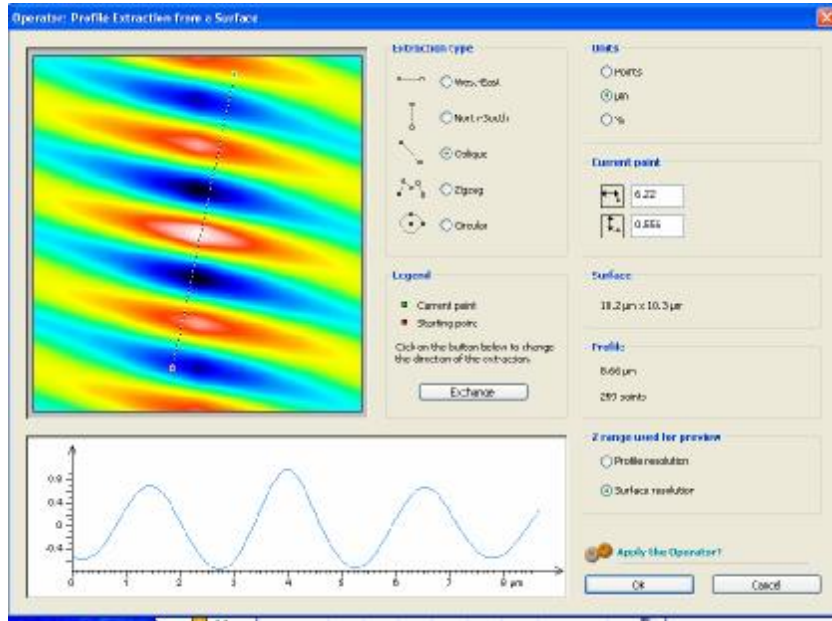
Phase : -3.61° (-0.0629 rad)

الشكل (9) طيف بروفيل تغيّرات سعة اهتزاز الكابول

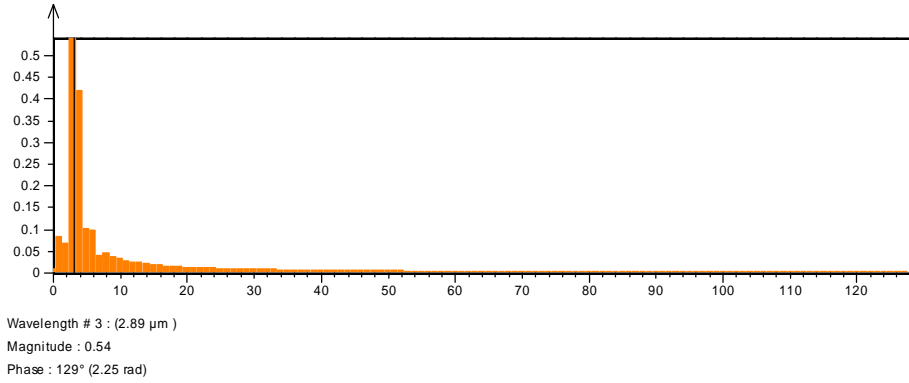
يدلُّ طيف بروفيل تموج تغيّرات اهتزاز الكابول في الشكل (9) أن الدورية تتركز عند الطول الموجي  $2.64 \mu m$ .



الشكل (10)



الشكل (11) استخلاص بروفيل تغير طور اهتزاز الكابل



الشكل (12) طيف بروفيل تغير طور اهتزاز الكابل

يدل طيف بروفيل موج تغيرات طور اهتزاز الكابل أعلاه (الشكل 12) أن الدورية تتركز عند الطول الموجي  $2.89 \mu m$ .

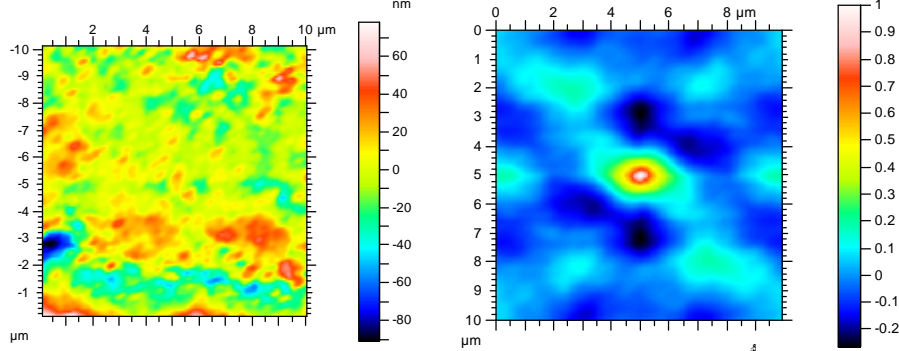
نجد لدى مقارنة أدوار تكرارية كل من طبوغرافية سطح العينة  $2.7 \mu m$  وتغيرات كل من سعة اهتزاز الكابل  $2.64 \mu m$  وطور اهتزاز الكابل  $2.89 \mu m$  أنها متقاربة وتساوي  $2.74 \mu m$  بدقة  $0.10 \mu m$ .

### المثال الثاني: الدورية في حالة التناحي في عينة من القرص المرن Sony MFD 2HD

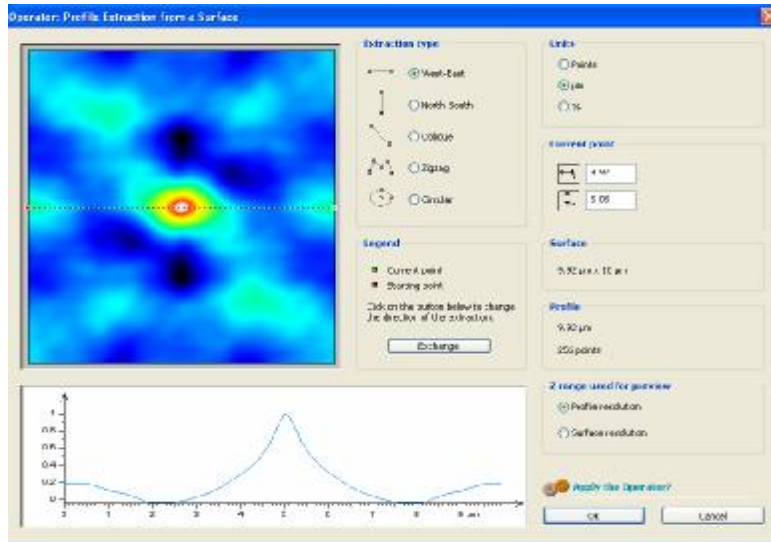
نورد فيما يلي، كما في المثال الأول، صوراً لكل من طبوغرافية السطح وتغير سعة اهتزاز الكابول وتغير إزاحة طور اهتزاز الكابول لمنطقة في قرص مرن آخر فضلاً عن صورها بعد تطبيق تابع الربط الذاتي مرة واحدة واستخلاص بروفيلاتها، ثم إيجاد أطرافها بهدف تعرف الدورية فيها (الأشكال 24 - 13).

طبوغرافية السطح قبل تطبيق مؤثر الترابط الذاتي

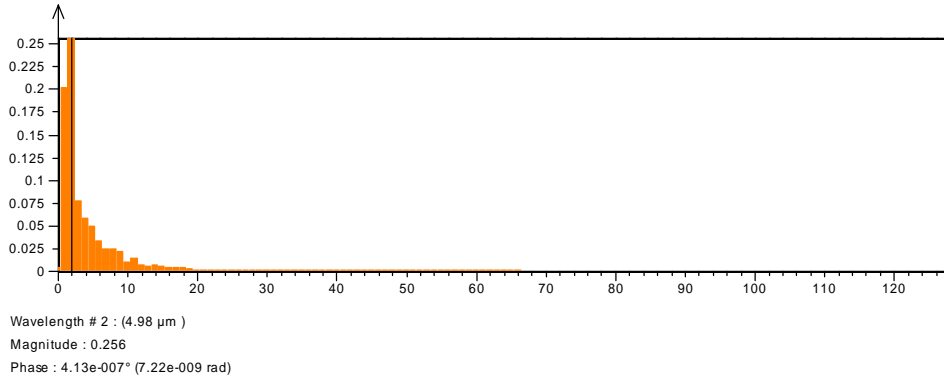
طبوغرافية السطح بعد تطبيق مؤثر الترابط الذاتي



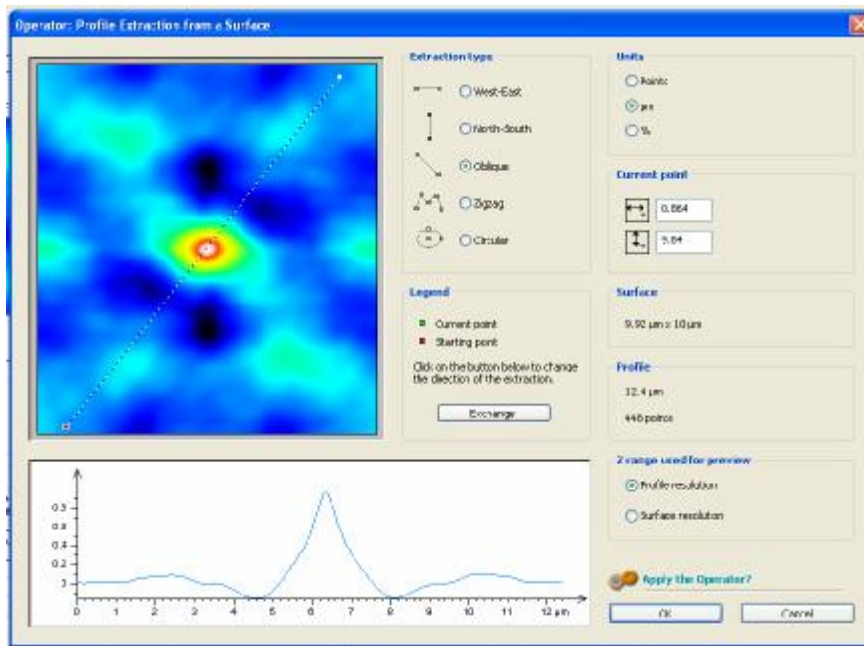
الشكل (13) يدل وجود الفص المركزي البيضوي في الشكل الأيمن على اللاتناحي في طبوغرافية سطح العينة، كما تدل الفصوص الأخرى التي تحيط بالفص المركزي على وجود دوريات أخرى وفق تلك مناحي تلك الفصوص



الشكل (14) استخلاص بروفيل تموج الطبوغرافية (أي بعد إزالة الخشونة) المار بالفص المركزي وفق أحد محاور التناظر a

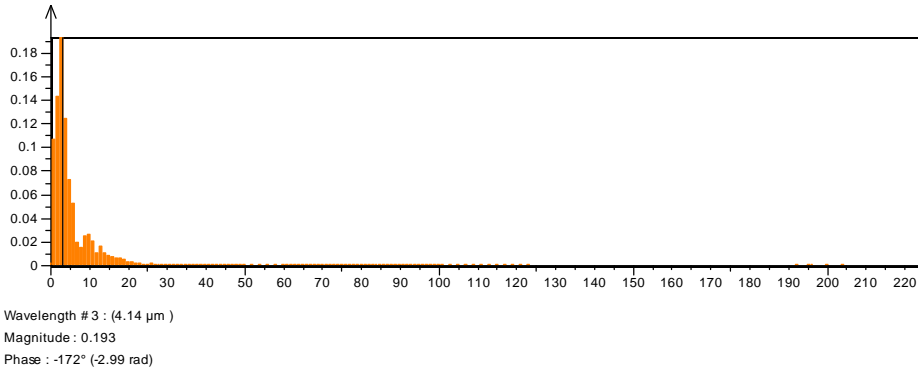


الشكل (15) طيف تموج طبوغرافية السطح في النقطة المدروسة من العينة وفق المحور a .  
 يدل طيف بروفيل تموج طبوغرافية السطح في الشكل (15) أن الدورية وفق محور التناظر a المبين على الشكل أعلاه تتركز عند الطول الموجي  $4.98 \mu\text{m}$ .



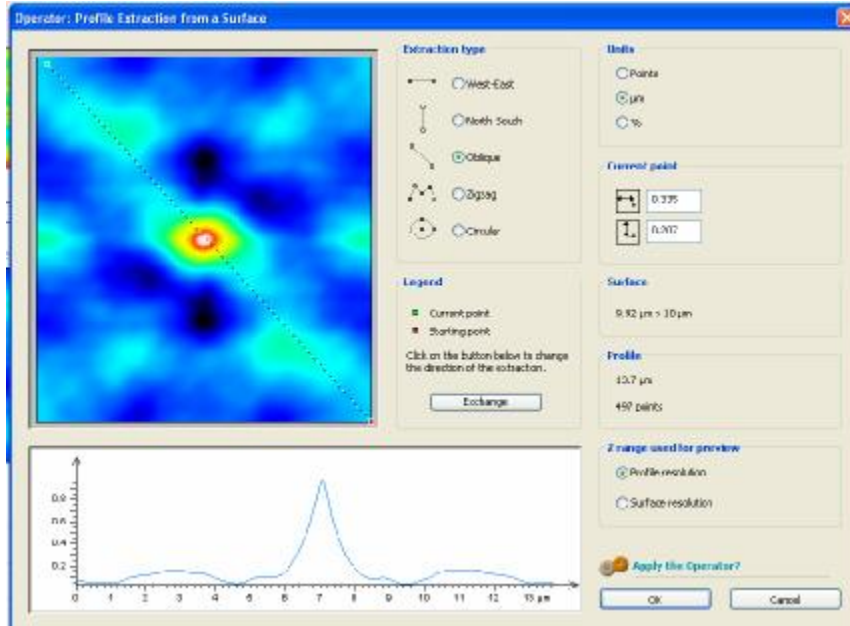
الشكل (16) استخلاص بروفيل تموج الطبوغرافية وفق المحور b





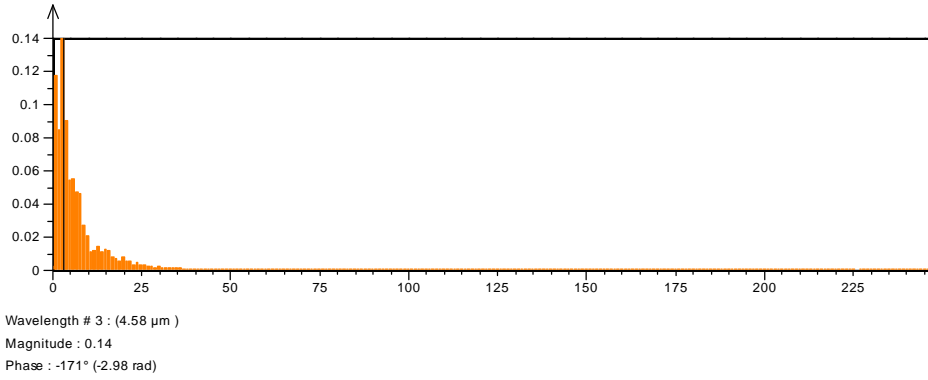
الشكل (17) طيف تموج الطبوغرافية وفق المحور b

يدلُّ طيف بروفيل تموج طبوغرافية السطح في الشكل (17) أن الدورية وفق محور التناظر b المبين على الشكل أعلاه تتركز عند الطول الموجي  $4.14 \mu\text{m}$ .



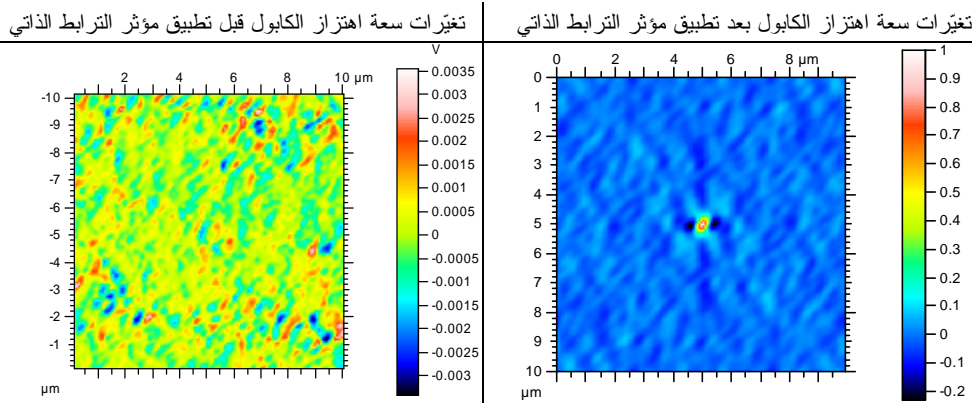
الشكل (18) استخلاص بروفيل تموج الطبوغرافية وفق المحور c



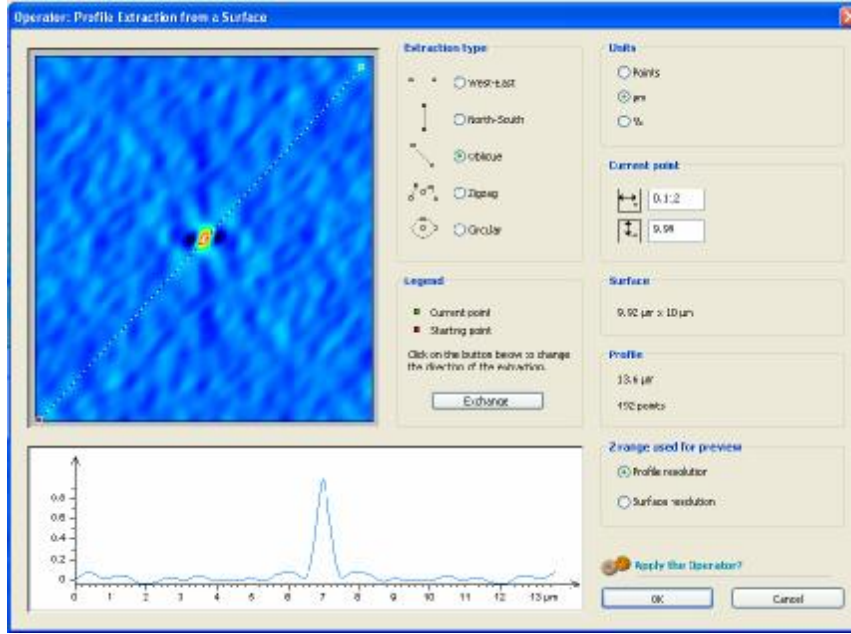


الشكل (19) طيف تموج الطبوغرافية وفق محور التناظر الثالث

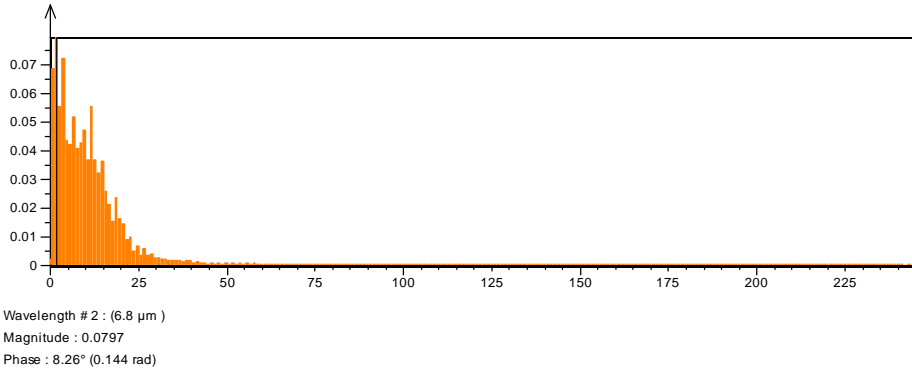
يدل طيف بروفييل تموج طبوغرافية السطح في الشكل (19) أن الدورية وفق محور التناظر المبين على الشكل أعلاه تتركز عند الطول الموجي  $4.58 \mu\text{m}$ .  
 تدل مقارنة الأطوال الموجية وفق المحاور الثلاثة  $4.98 \mu\text{m}$  و  $4.14 \mu\text{m}$  و  $4.58 \mu\text{m}$  أن المساحة المدروسة من سطح العينة تبدي دورية وفق المناحي الثلاثة وفق الطول الموجي  $4.57 \mu\text{m}$  بدقة  $0.28 \mu\text{m}$ .



الشكل (20)

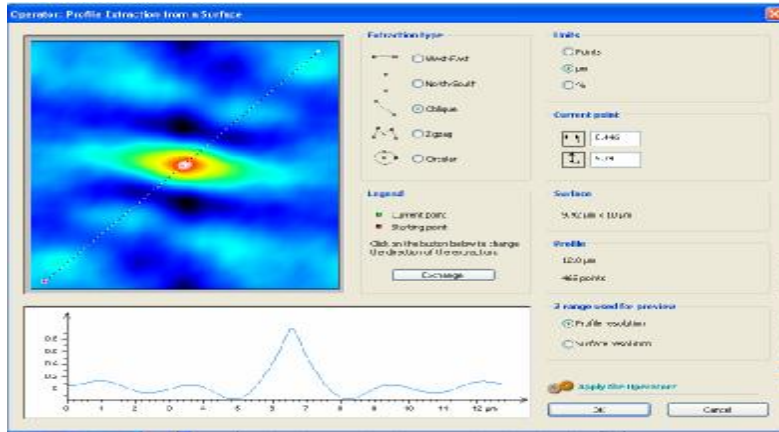
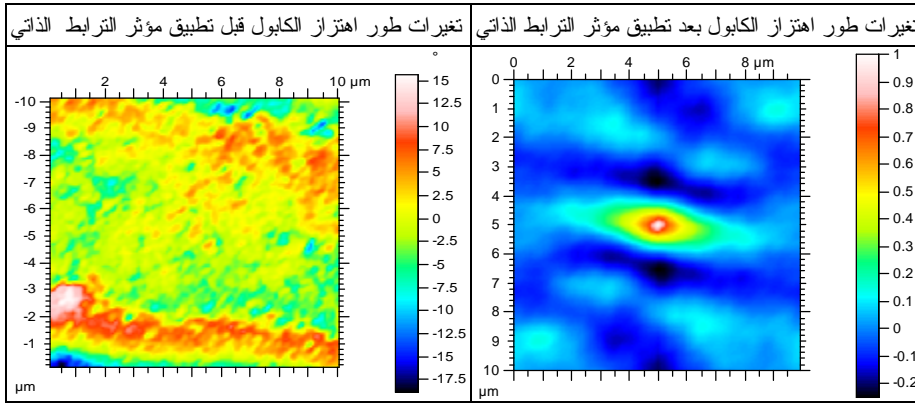


الشكل (21) استخلاص بروفيل تغير سعة اهتزاز الكابول

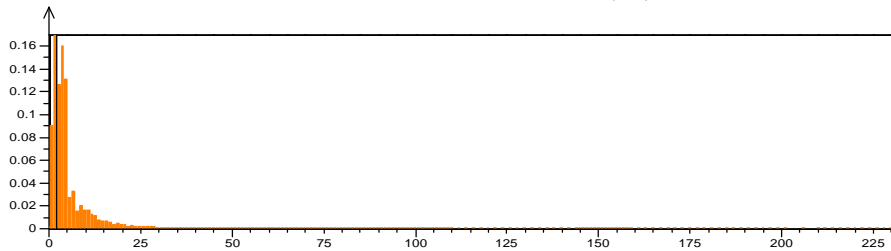


الشكل (22) طيف بروفيل تغير سعة اهتزاز الكابول

يدل طيف بروفيل تغيرات سعة اهتزاز الكابول في الشكل (22) أن الدورية تتركز عند الطول الموجي  $6.8 \mu m$ .



الشكل (23) استخلاص بروفيل تغير طور اهتزاز الكابل



Wavelength # 2 : (6.43  $\mu\text{m}$ )  
Magnitude : 0.17  
Phase : 6.09° (0.106 rad)

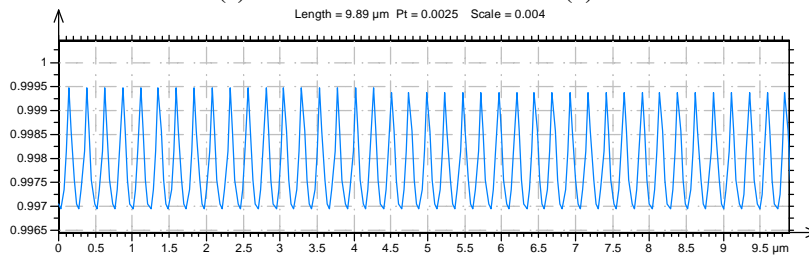
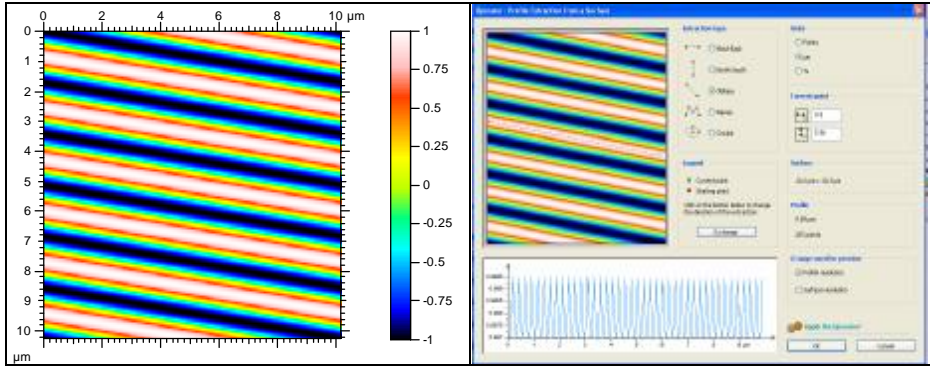
الشكل (24) طيف بروفيل تغير طور اهتزاز الكابل

يدلُّ طيف بروفيل تغير طور اهتزاز الكابل في الشكل (24) أن الدورية تتركز عند الطول الموجي  $6.43 \mu\text{m}$ .

نجد لدى مقارنة أذوار تكرارية كل من طبوغرافية سطح العينة  $4.57 \mu m \pm 0.28 \mu m$  وتغيرت سعة اهتزاز الكابل  $6.8 \mu m$  وتغيرت طور اهتزاز الكابل  $6.43 \mu m$  أن دور الطبوغرافية يختلف عن دوري تغير كل من اهتزاز الكابل وطوره اللذين نجدهما متقاربين بدقة  $0.18 \mu m$ ، وهو أمر طبيعي نظرا إلى عدم تسجيل أي بيانات على الأقراص.

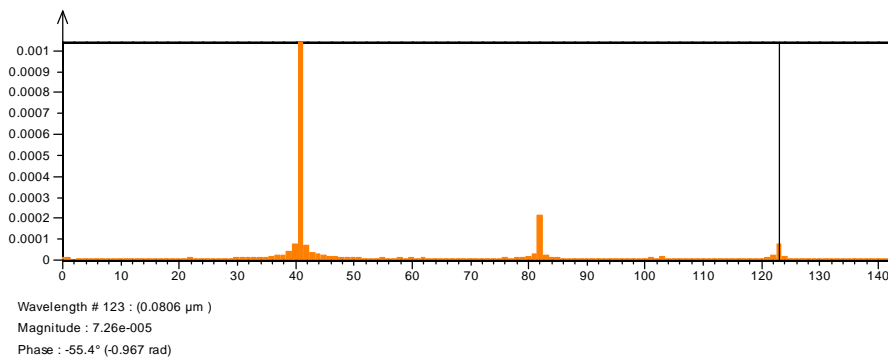
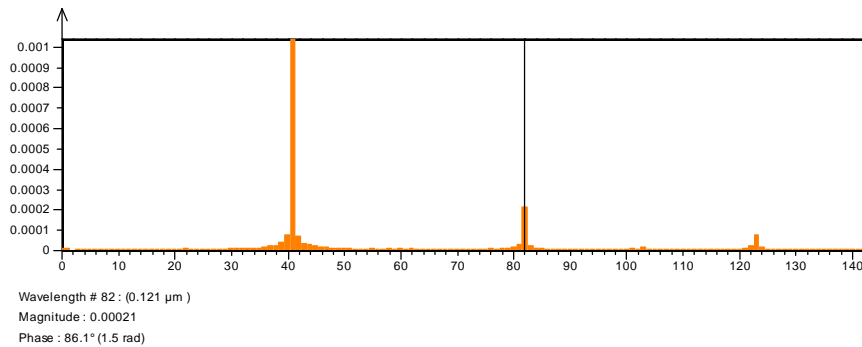
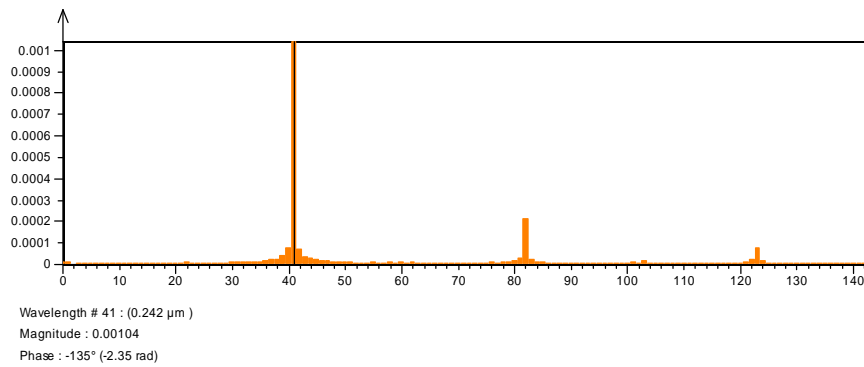
### الخلاصة

نخلص مما أوردنا أن توزيع المغنطة في الأقراص المرنة يختلف من نوع إلى آخر، كما يختلف من نقطة إلى أخرى في القرص المرن نفسه. ربما يعود الأمر في الحالة الأولى إلى اختلاف نوع الغشاء المغنطيسي. أمّا في الحالة الثانية فيعود -على الأرجح- إلى عدم انتظام أبعاد حبيبات الغشاء المغنطيسي في القرص نفسه. وقد حصلنا لدى تكرار تطبيق تابع الربط الذاتي على صور مجهرية القوة المغنطيسية على أصغر طول موجي في طيف البروفيل المار في الفص المركزي، كما يظهر في الشكلين (25) و (26). يقع هذا الطول الموجي، الذي يختلف من منطقة إلى أخرى على القرص الواحد، وتبعاً لاتجاه القياس (الذي يمكن التحكم فيه نسبياً بمعالجة السطح) بين 50nm و 100nm.



(c)

الشكل (25) (a) الشكل الذي حصلنا عليه بتكرار تطبيق تابع الربط الذاتي على صورة الطبوغرافية في المثال الأول (القرص المرن HD Creation)، (b) استخلاص بروفيل الطبوغرافية في هذه الحالة، (c) البروفيل الحاصل في الحالة المذكورة.



الشكل (26) الطيف الموجي الموافق لبروفيل الشكل (25) يتميز هذا الطيف بالأطوال الموجية  $0.0806 \mu\text{m}$  و  $0.121 \mu\text{m}$  و  $0.242 \mu\text{m}$ .

كما حصلنا على نهايات أخرى في الطيف، أهم ما يميزها أن الطول الموجي لإحداها يساوي ضعف الطول الموجي للأخرى (الشكل 26). كان يعتقد في بادئ الأمر أن أقصر طول موجي ناجم عن تأثير النهاية المدببة المغنطيسية في سطح العينة، ولكن ظهور هذا الطول الموجي في صور تغير سعة اهتزاز الكابول وتغير طور اهتزاز الكابول أيضاً، يؤكد علاقته بأبعاد الحبيبات وليس بالتأثير المتبادل بين النهاية المدببة وسطح العينة. ولكن السؤال المطروح الآن: ما طبيعة العلاقة التي تربط الطول الموجي  $0.242 \mu m$  بالطول الموجي  $0.121 \mu m$ ؟ وهل يشكل اجتماع طولين موجيين قصيرين (حبتين مغنطيسيتين) الطول الموجي الأطول (بئة مغنطيسية)؟ وما الدور الذي تقوم به الأطوال الموجية الأقصر ( $0.0806 \mu m = 80.6nm$ )؟ هذا ما ستجيب عليه الدراسة الإحصائية التي سنجرىها على أطياف بروفيلاات صور الترابط الذاتي المتتالي، والتي ستسمح لنا لاحقاً بتحليل النماذج المسجلة على الأقراص المرنة بعد فرمتتها.

وهنا لا بدّ من الإشارة إلى أن الأمثلة التي أوردناها هي للدلالة على أحد الجوانب التي يمكن أن يقوم بها مجهر القوة الذرية الذي استقدم حديثاً إلى بلدنا والذي يمكن استخدامه في بحوث المغنطيسية النانوية قريباً.

## REFERENCES

1. D. A. Bonnell, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy (2000). "7" (2 ed.). Wiley-VCH.
2. D. Jiles. (1998). "15". *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials* (2 ed.). Springer.
3. L. Abelman, S. Porthun, *et al.* (1998). "Comparing the resolution of magnetic force microscopes using the CAMST reference samples". *J. Magn. Mater.* 190: 135–147.
4. <http://www.nanoscan.ch/products/hr-mfm.php>, Quantum leap in Hard disk Technology.
5. H. Hopster, and H.P. Oepen, Magnetic Microscopy of Nanostructures. (2005). "11-12". Springer.
6. M. De Graef, and Y. Zhu. (2001). "3". *Magnetic Imaging and Its Applications to Materials: Experimental Methods in the Physical Sciences*. 36. Academic Press.
7. Xiaobin Zhu. (2002). Magnetic Force Microscopy Studies of Submicron and Nanoscale Magnet Arrays, Centre for the Physics of Materials, Department of Physics, McGill University Montréal, Canada.
8. Roger Robbins. (10/30/2009). "Magnetic Force Microscopy, Operating Procedure, FA2009-CR-002, The University of Texas at Dallas.
9. U. Hartmann. (1999). "Magnetic Force Microscopy". *Annu. Rev. Mater. Sci.* 29: 53–87.
10. Nanosurf Flex AFM, Operating Instructions for Easyscan 2 control software, version 3.1, 2013
11. Alvarado, "Procedure to Perform Magnetic Force Microscopy (MFM) with VEECO Dimension 3100 AFM", NRF, 2006
12. <http://www.ntmdt.com/spm-basics/view/linear-oscillations>, Cantilever Analysis
13. R. Gomez, E. R. Burke, and I. D. Mayergoyz. (1996). "Magnetic Imaging in the Presence of External Fields: Technique and Applications". *J. Appl. Phys.* 79 (8): 6441–6446.
14. D. Rugar, H. J. Mamin, P. Guenther, *et al.* (1990). "Magnetic Force Microscopy: General Principles and Application to Longitudinal Recording Media". *J. Appl. Phys.* 68 (3): 1169–1183.
15. [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_force\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_force_microscope)