



## مساهمة درجة الحرارة والسّمك في المجال المغناطيسي الفائق الدقة للاغشية الرقيقة W(110)/Fe(110)/Ag

\*طارق محمد فايز<sup>1</sup> و ابراهيم عبدالحفيظ صالح<sup>2</sup> و مصطفى محمد عبدالله<sup>1</sup>

<sup>1</sup> قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة سبها، ليبيا

<sup>2</sup> قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة بنغازي، ليبيا

### الكلمات المفتاحية:

الاجشية الرقيقة  
المجال المغناطيسي الفائق الدقة  
بارامتر موجة البرم  
مجال التلامي لفيرمي  
المجال المغناطيسي الفائق الدقة  
للحالة الارضية

### الملخص

تستند تأثيرات الحجم و درجة الحرارة على عدد من الفرضيات المختلفة والتي تعتمد على كيفية وصف الإثارة المغناطيسية لنظام البرم حسب نماذجه المعروفة. ففي صيغة بلوخ وعند درجات الحرارة المنخفضة تم الاعتماد على نموذج هايزنبرك لوصف المجال المغناطيسي الفائق الدقة (Magnetic hyperfine field) Bhf بوجود البارامترات: Bhf(0) مجال الحالة الأرضية (ground-state magnetic hyperfine field) و b (spin wave parameter). وفي الأغشية الرقيقة في حالة المجس أحادي الطبقة هذه البارامترات تعتمد على سمك الغشاء وموضع طبقة المجس. ولتفسير البارامترات Bhf, b(0) المتحكممة في تأثيرات الحجم على مغنطة الأغشية الرقيقة وهي الحالة التي فيها يكون السّمك المحدود للعينة أيضاً مؤثراً على المجال المغناطيسي الفائق تم التركيز على النقاط التالية: أولاً، تعديلات السّمك المحدود للعينة وذلك لدراسة تأثير الحجم. ثانياً، بسبب التفاعل الإلكتروني حول منطقة السطح/السطح البيئي تم تمييز تأثير الطبقة السفلية probe monolayer/noble substrate/probe monolayer interface عن تأثير مادة الطلاء metal وذلك لدراسة تأثير السطح، وتم التوصل لنموذج يصف سلوك المجال المغناطيسي الفائق في هذه الحالات، والذي اختلف عن صيغة بلوخ بقيمة مميزة سميت (g1, g2, g3, g4)، وأمكن تحديدها g1 والذي يمثل مجال التلامس لفيرمي (Fermi contact field) Bhf, cp، وبواسطة هذه القيم تم تعريف البارامترات Bhf(0), b للطبقات المختلفة، والتي تعتبر أساس البحث في موضوعات الإثارة الحرارية الموضعية واعتمادها على السّمك.

## Contribution of temperature and thickness in the hyperfine magnetic field of W(110)/Fe(110)/Ag thin films

\*T. M. Fayez<sup>a</sup>, Ibrahim A. Saleh<sup>b</sup>, Mustafah M. A. Ahmad<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Physics Department, Faculty of Science, Sebha University, Libya

<sup>b</sup>Physics Department, Faculty of Science, Benghazi University, Libya

### Keywords:

Thin films  
Hyperfine magnetic field  
Spin wave parameter  
Fermi contact field  
ground-state magnetic hyperfine field

### ABSTRACT

The temperature size effects are predicated in framework of different hypothesis such as isotropic spin wave theory, which depends on magnetic excitation of the spin system, while the microscopic approach of magnetization is related to the local magnetization of the system. In Bloch's formula at low temperatures, Heisenberg's model was relied upon to describe the Magnetic hyperfine field Bhf with the presence of the parameters: ground-state magnetic hyperfine field Bhf(0) and spin wave parameter b, and, in thin films in the case of probe monolayer, these parameters depend on the thickness of the film and the position of the probe layer. In order to explain the parameters b and Bhf(0) that control the effects of size on the magnetization of thin films, which is the case in which the finite thickness of the sample also affects the Bhf, the following points were focused on: First, changes in the finite thickness of the sample in order to study the effect of size. Second, because of the electronic interaction around the surface/interface area, the effect of the lower layer

\*Corresponding author:

E-mail addresses: [tar.ahmad@sebhau.edu.ly](mailto:tar.ahmad@sebhau.edu.ly), (I. A. Saleh) [ebrahimelbadry1671974@gmail.com](mailto:ebrahimelbadry1671974@gmail.com), (M. M. A. Ahmad) [mus.ahmed@sebhau.edu.ly](mailto:mus.ahmed@sebhau.edu.ly)

Article History : Received 01 October 2020 - Received in revised form 19 August 2021 - Accepted 14 February 2021

(substrate/probe monolayer interface) was distinguished from the effect of the coating material (probe monolayer/noble metal) in order to study the effect of the surface. A model was found describing the behavior of the Magnetic hyperfine field in these cases, which differed from the Bloch formula with distinct values called ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ), and one of them was identified as  $g_1$ , which is the Fermi contact field  $B_{hf, cp}$ , and by means of these values, the parameters  $b$  and  $B_{hf}(0)$  were defined for the different layers, which are considered the basis of research in the subjects of local thermal excitation and their dependence on thickness.

## المقدمة

تعتبر مساهمة مجال التلامس لفيرمي للألكترونات- $s$  الداخلية المصدر الرئيسي للمجال المغناطيسي الفعال عند النوى في المواد الفيرومغناطيسية. ففي الدراسات النظرية على مجال التلامس لفيرمي يتم التركيز على البرم المستقطب. ففي حسابات الإلكترون المداري تتم دراسة الاختلاف الذي يطرأ على المجال المغناطيسي الفائق الدقة للذرة الحرة والذرة في المحيط البلوري، وتبنى فرضية هذه الحسابات على ان استقطاب البرم يسبب تغير عزم البرم ( $m_s$ ). وتظهر حساسية الكرونات  $3s$  بسلوك  $3d$  في معدل الاختلاف الحادث في المجالات الفعالة المحسوبة، ويتمثل هذا السلوك في توسع كثافة الشحنة وكثافة البرم الناشئ من استقطاب البرم للإلكترونات  $3d$ . أما في حالة حسابات التركيب الشريطي لحزم الطاقة فانه يتم استعمال دالة جرين، واهمية هذا النهج تكمن في امكانية تحديد مساهمة البرم والمساهمة المدارية في كلا من العزم المغناطيسي والمجالات فائقة الدقة. ولحادث التوافق مع البيانات التجريبية يجب حساب كافة المساهمات، وبذلك تعتبر كلا من حسابات الإلكترون المداري وحسابات حزمة الطاقة تعتمد على استقطاب البرم [17,18].

يمكن للإثارة المغناطيسية في المعادن أن تتطلب طاقة عالية كما في إثارة الجسيم المفرد، وقد تحدث عند درجات حرارة منخفضة بحيث ينقلب البرم الموضوعي على موقع ذري محدد وبسبب كون البرم كميًا فانه يخضع لإثارات جماعية تمتلك صفة كمية وتسمى مغنون (إثارة نظام البرم الكامل أو موجات البرم) [19,4] الذي تتساوى كثافة احتمال حدوثه عند أي موقع [4] ويصف أي انحراف صغير في مجمل نظام المغزليات الالكترونية [20].

تثبت نظرية موجة البرم إن المغنطة في حالة الفيرومغناطيسية الكتلية عند درجات الحرارة المنخفضة تمثل للاعتمادية  $T^{3/2}$  لصيغة بلوخ، ولكن هذا السلوك يكون متغير في الأغشية الأشد رقة، ففي حالة الأغشية المتكونة من طبقات ذرية قليلة فان نظرية موجة البرم تتنبأ باعتمادية خطية للمغنطة مع درجة الحرارة [21,22]. نموذج هايزنبرك موحد الخواص يتضمن إثارة نظام البرم بالكامل المسى موجات البرم أو المغنون، هذه الإثارة الجماعية سوف تسبب نقصان في المغنطة التلقائية في الفيرومغناطيسية الموصوفة بدرجات الحرارة المنخفضة بواسطة قانون بلوخ، وفي عدم وجود تفاعلات موجة البرم قانون بلوخ يعطى بالعلاقة:

$$\frac{M_S(0) - M_S(T)}{M_S(0)} = bT^\alpha \quad (2)$$

حيث  $b$  بارامتر موجة البرم (spin wave parameter)، وعند درجات الحرارة المنخفضة موجات البرم تتأثر بقوة بوجود صفة اختلاف الخواص المغناطيسية حسب الاتجاه (anisotropy) [23]، وجد أن قيمة الأس  $\alpha$  في الحد  $T^\alpha$  في المعادلة (2) تعطي أفضل توافق مع البيانات التجريبية بين 1.4 - 1.6 [4,3]. يوجد نموذجين آخرين لإثارة البرم هما: نموذج (Ising) حيث الإثارة تحدث للبرم في بعد واحد (spin up or spin down)، في حين يقوم

تعتمد الحالة المغناطيسية للذرات (أو الأيونات) على تنسيق هذه الذرات وعلى التفاعل المغناطيسي مع محيطها [1]، وبسبب خفض الأبعاد أو إنقاص عدد الطبقات الذرية في انخفاض المغنطة التلقائية ودرجة حرارة كوري [2]، فالانتقال من مغناطيسية الأبعاد الثلاثية إلى مغناطيسية البعدين ينتج عنه تغير في المجال المغناطيسي الفائق الدقة والعزم المغناطيسي [3].

تشير العزوم المغناطيسية والمجال  $B_{hf}$  إلى استقطابية البرم الموضوعي، ويظهر المجال  $B_{hf}$  كمجال فعال يلاحظ عند موضع النواة، وينتج عن اثر الاقتران بين البرم النووي والبرم الالكتروني [4]، وهو يصف التفاعل الفائق الدقة بين العزم المغناطيسي للنواة والعزم المغناطيسي للإلكترون في المادة [6,5]، ويقاس  $B_{hf}$  بطرق نووية كأثر موسباور والرنين النووي (NMR) [8,7]، ويعتبر مقياساً للمغنطة الموضوعية التي تتناسب مع العزم المغناطيسي [4]، ويستعمل كمجس للمحيط الموضوعي وللعدد ألتنسيقي للذرات المدروسة [9] وأيضاً لتوزيع كثافة البرم الالكتروني بالقرب من النواة في المادة المغناطيسي [5]. ومن تطبيقات المجال  $B_{hf}$  استعماله لدراسة متعددة الطبقات المغناطيسية والأغشية الرقيقة [10]، واستعماله لتعيين تباين الخواص المغناطيسية للأغشية فائقة الرقة ومتعددة الطبقات [12, 13] [11]، ويستعمل لدراسة المغنطة بالحث في المواد الغير مغناطيسية الفاصلة مثل Fe/Au, Fe/Cu multilayers [7]، وبالتالي يقاس المجال  $B_{hf}$  في السطح والسطح البيئي للطبقات المزدوجة من خلال نظام موسباور حيث تستعمل طبقة المجس الأحادية من الحديد ( $^{57}\text{Fe}$  monolayer-probe) [14].

ويتألف المجال  $B_{hf}$  الفعال المقاس في غياب مجال مغناطيسي خارجي من المساهمات الآتية:

$$B_{hf,eff} = B_{hf,cp} + B_{hf,ce} + B_{hf,orb} + B_{hf,dip} \quad (1)$$

حيث  $B_{hf,cp}$  مجال التلامس لفرمي ويتناسب مع العزم المغناطيسي الموضوعي، وينتج من استقطاب الالكترونات الداخلية  $s$ -electrons (حيث تتراكب دوال الموجة مع النواة [15])، وينشأ الاستقطاب من اختلال التوازن في كثافة البرم عند النواة بسبب الالكترونات غير المتزاوجة في المدارات غير المكتملة. ويعتبر  $B_{hf,ce}$  المساهم الأكبر في قيمة المجال الفائق  $B_{hf,eff}$ . يمثل  $B_{hf,ce}$  المجال المنتقل إلى النواة  $^{57}\text{Fe}$  والنتاج عن التفاعل الغير مباشر بين ذرتين متجاورتين، حيث يتأثر برم الكرونات التوصيل بالمغنطة المستحثة من الذرة المجاورة، ويعرف هذا التفاعل الغير مباشر بتفاعل RKKY (Ruderman-Kittel-) (Kasuya-Yoside)، وهذا الحد يمثل المساهمة المعتمدة على المحيط الموضوعي، ولهذا السبب يختلف هذا الحد في سطح الأغشية فائقة الرقة عنه في المادة الكتلية. أما  $B_{hf,dip}$  و  $B_{hf,orb}$  فتمثل مساهمات ثنائي القطب للعزم المغناطيسي المداري والبرمي [4,3]، حيث ينشأ  $B_{hf,orb}$  من محصلة العزم المداري عند النواة الناتجة عن الحركة المدارية للإلكترونات في المدارات غير المكتملة، وينشأ  $B_{hf,dip}$  من تفاعل ثنائي القطب بين النواة والعزم البرمي للإلكترونات في المدارات غير المكتملة [6,16].

معاً) وبالتحليل الإحصائي يمكن التعرف على مساهمة كلا من هذه المتغيرات في قيمة معامل التحديد، ومدى تأثير كلا منهما باستبعاد تأثير الآخر، وبذلك تعتبر درجة الحرارة المؤثر الأعظم في قيمة المجال  $B_{hf}$ ، وتظل هذه النتيجة حتى في حال إهمال تأثير السمك (جدول 3)، وبإجراء الحساب اعتماداً عليهما معاً تزداد نسبة التأثير وهذا ما يدفع للاعتقاد بوجود بارامتر حراري يعمل ضمن تأثيرات السمك.

2- مجموع مربعات الأخطاء SSE ويمثل (Residual) القيم المقدره من النموذج والقيم العملية بالترتيب.

وبالنظر إلى جدول 3 نرى أن اقرب نموذج للدقة هو  $T^\alpha$ ، ووجد أن قيمة  $\alpha=1.5$  توافق معادلة (4) لإحداث أفضل توافق مع البيانات التجريبية، وذلك بملاحظة اتفاق القيم المقدره لهذا النموذج وملامتها لسلوك وقيم المجال للنظامين قيد الدراسة (شكل 3 أ، ب)، وبعد المقارنة مع صيغة بلوخ نستنتج أن:

$$B_{hf}(0) = g_1 \exp(-g_2 D) \quad (7)$$

$$b = -\frac{g_3 \exp(-g_4 D)}{B_{hf}(0)}$$

وحتى تصبح القيم المقدره من النموذج قيم نظرية عامة يجب أن توافق نتائج عملية لم تدخل في المعالجة الإحصائية، لذلك سيتم حساب المجال النظري عند  $\alpha=1.5$  و  $D=3.4ML$  و  $D=5.3ML$  بتغيير درجة الحرارة ومقارنته بالنتائج العملية التي قام بها Korecki [4] عند هذه القيم جدول (4)، وأيضاً المقارنة مع نتائج Przybylski [3] العملية عند  $D=1ML$  وتظهر في جدول (5).

من المعادلة (7) أمكن تحديد قيم  $b$ ،  $B_{hf}(0)$  (جدول 6) للنظام المدروس حيث وضعت مقارنة بنتائج Przybylski [3] ونتائج Korecki [4].

جدول 1. قياسات المجال عند RT: لشرائح W(110)/D/Ag

| $B_{hf}$ [T] | D [ML] |
|--------------|--------|
| 18.11        | 1.08   |
| 18.28        | 1.21   |
| 18.42        | 1.39   |
| 18.51        | 1.64   |
| 18.57        | 1.98   |
| 18.91        | 2.70   |
| 18.94        | 2.89   |
| 19.31        | 4.27   |
| 19.82        | 5.27   |
| 20.33        | 21     |

جدول 2. قياسات المجال عند ثبات السمك W(110)/1.6/Ag

| $B_{hf}$ [T] | T [K]  |
|--------------|--------|
| 16.91        | 378.16 |
| 18.08        | 327.46 |
| 18.5         | 297.88 |
| 19           | 251.40 |
| 19.75        | 194.36 |
| 20.66        | 143.66 |
| 21           | 90.84  |

نموذج المستوى (XY) على فرضية انحصار البرم المقيد داخل مستوى [24]. في المغناطيس البسيط يتم انتقال الطور ( بين النظام -order-disorder) بواسطة درجة الحرارة ويعتمد على بارامتر الترتيب، وبالتالي تتعين المغنطة بقانون القوى [25]:

$$M(T) \propto (-\varepsilon)^\beta, T < T_C \quad (3)$$

حيث  $\varepsilon = \frac{T - T_C}{T}$  درجة الحرارة المخفضة،  $T_C$  درجة الحرارة الحرجة،  $\beta$  الأس الحرج.

أما في حالة الأغشية فائقة الرقة فلا وجود لأي صيغة نظرية تصف علاقة المغنطة بدرجة الحرارة [3] ولا يعتمد عدد المغنونات عند درجة حرارة ثابتة على سمك الغشاء في حين يتناسب العزم المغناطيسي الكلي  $\mu$  معه [4]، ومع ذلك ففي أغشية الحديد تعتمد المجالات المغناطيسية الفائقة الدقة على درجة الحرارة ويجب أن تشملها حدود صيغة بلوخ:

$$B_{hf}(T) = B_{hf}(0)(1 - bT^{3/2}) \quad (4)$$

حيث  $B_{hf}(0)$  و  $b$  تعتمدان على سمك الغشاء وموضع الطبقة، ونظراً للدقة المحدودة للقياسات فمن الصعب تقدير احتمال الانحراف عن هذه العلاقة [3].

تحليل البيانات

#### 1. المجال $B_{hf}(T, D)$ في الطبقة الذرية W/Fe interface

قام بشيبلسكي Przybylski [3] بدراسة شرائح W(110)/Fe(110)/Ag المنمأة بتقنية MBE في نظام UHV، وللتحليل المغناطيسي استخدم طرق التحليل الداخلي في غرفة التفريغ بمجس أحادي الطبقة CEMS *in situ* analysis Monolayer probe عند  $T > 90K$ ، وفي جدول 1، جزء 2 من القياسات العملية لبشيبلسكي، حيث يتضح المجال المغناطيسي الفائق الدقة  $B_{hf}$  (شكل 1 و 2) للطبقة الأولى W/Fe interface لذرات الحديد "المجس"  $Fe^{57}$ . ولغرض دراسة مدى تأثير درجة الحرارة والسمك  $T, D$  على المجال بالصورة  $B_{hf}(T, D)$  والعلاقة التي تربط بينها كان من الضروري تحديد البارامترات المتأثرة بموضع الطبقة عند السطح الفاصل للطبقة السفلية أو مادة الطلاء، ومنها نتمكن من التعرف على المتغير المساهم الأكبر في المجال، وبالاعتماد على الشكل البياني لانتشار  $B_{hf}$  vs.  $D$  و  $B_{hf}$  vs.  $T$  نفترض نماذج تفسر تغيرات المجال الناشئ عند النواة:

Non-linear model :

$$B_{hf}(T, D) = g_1 + g_2 T + g_3 \exp(-g_4 D) \quad (5)$$

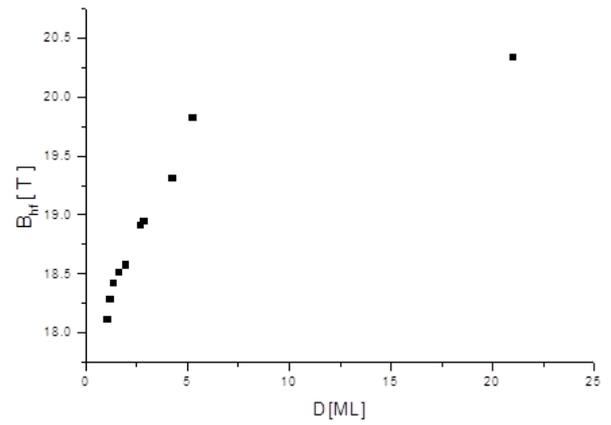
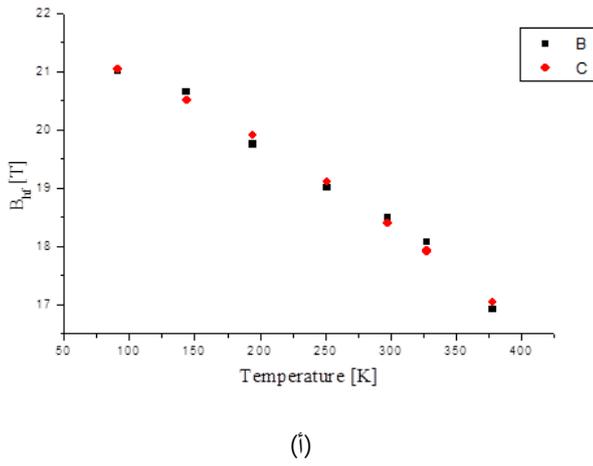
$T^\alpha$  model :

$$B_{hf}(T, D) = g_1 \exp(-g_2 D) + g_3 \exp(-g_4 D) T^\alpha \quad (6)$$

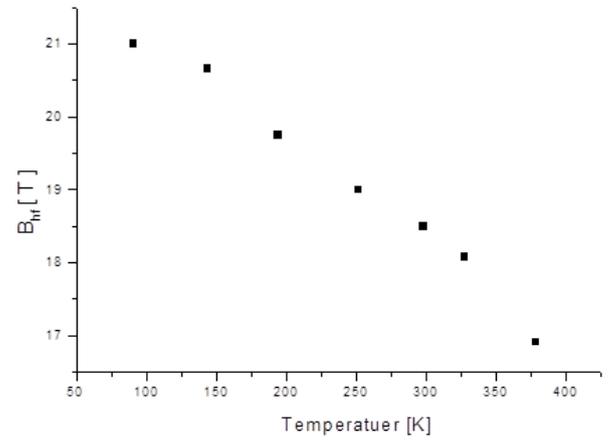
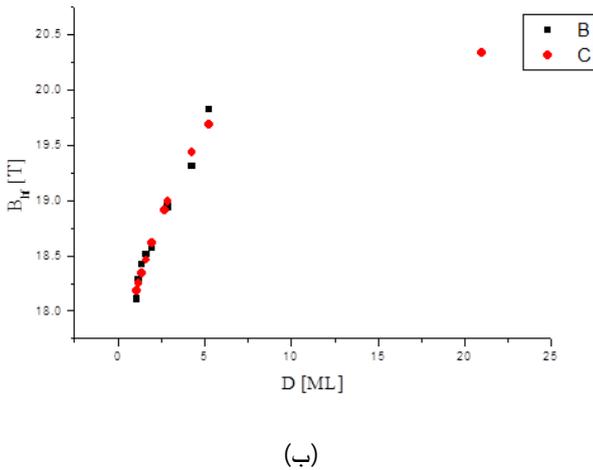
$$90 \leq T \leq 450 K$$

$$1 \leq D \leq 21 ML$$

ولتقدير معالم هذه النماذج ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) تمت المعالجة الرياضية للقيم التقديرية الجيدة باستخدام nls function في برنامج R والذي يعتمد على استخدام طريقة المربعات الصغرى اللاخطية للنماذج اللاخطية. وبعد تحليل هذه المعادلات (5) و (6) كانت النتائج في جدول (3)، وبمراقبة قيم العاملين معامل التحديد ومجموع مربعات الأخطاء لتحديد اقرب نموذج للدقة وجدنا: 1- معامل التحديد R square وهو معدل تفسير المتغيرات  $T, D$  بالنسبة للتابع  $B_{hf}(T, D)$  بواسطة الانحدار ( $R^2$  % من تغيرات المجال تعود إلى  $T, D$



شكل 1. المجال المغناطيسي الفائق الدقة  $B_{hf}$  عند RT وتغيير لسمك الطبقة الذرية W(110)/D/Ag



شكل 2. المجال المغناطيسي الفائق الدقة  $B_{hf}$  عند تغيير لدرجة الحرارة وسمك ثابت W(110)/1.6/Ag

شكل 3. نموذج  $T^\alpha$  (قيم C) ومدى ملائمته للقيم (B) العملية. (أ) في W(110)/D/Ag:RT (ب) لدرجات حرارة مختلفة. (ب) W(110)/1.6/Ag في الطبقة الذرية الأولى W/Fe interface

جدول 3. نتائج التحليل الإحصائي للمعادلات (5) و(6) الخاص بالشرائح W(110)/Fe(110)/Ag

|                  | $g_1$    | $g_2$    | $g_3$    | $g_4$   | R square | SSE Residual |         |
|------------------|----------|----------|----------|---------|----------|--------------|---------|
| Non-linear Model |          |          |          |         |          |              |         |
|                  | 24.42884 | -0.01375 | -3.00656 | 0.26841 | 0.982    | 0.311        |         |
| $T^\alpha$ Model |          |          |          |         |          |              |         |
| $\alpha = 1.4$   | 21.81120 | 0.00303  | -0.00148 | 0.16611 | 0.99019  | 0.17057      |         |
| $\alpha = 1.5$   | 21.66956 | 0.00276  | -0.00081 | 0.17101 | 0.99057  |              | 0.16409 |
|                  |          |          |          |         | $T _D$   | $D _T$       |         |
|                  |          |          |          |         | 0.685    | 0.178        |         |
| $\alpha = 1.6$   | 21.54388 | 0.00251  | -0.00044 | 0.17565 | 0.99042  | 0.16671      |         |

جدول 4. مقارنة النتائج العملية للمجال المغناطيسي الفائقة الدقة مع النتائج النظرية للنموذج المقدم

| W/Fe interface      |              |                    |                     |              |                    |
|---------------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------------|
| D = 3.4 ML          |              |                    | D = 5.3 ML          |              |                    |
| Exp.<br>Korecki [4] |              | Calc.<br>Model     | Exp.<br>Korecki [4] |              | Calc.<br>Model     |
| T [K]               | $B_{hf}$ [T] | $\hat{B}_{hf}$ [T] | T [K]               | $B_{hf}$ [T] | $\hat{B}_{hf}$ [T] |
| 92.59               | 21.51        | 21.0623            | 94.01               | 21.38        | 21.0555            |
| 138.17              | 21.02        | 20.7293            | 163.81              | 20.98        | 20.6705            |
| 192.30              | 20.67        | 20.2557            | 236.46              | 20.38        | 20.1612            |
| 257.83              | 20.03        | 19.5884            | 306.26              | 20.05        | 19.5945            |
| 300.56              | 19.50        | 19.1000            | 349.00              | 19.54        | 19.2146            |
| 350.42              | 18.79        | 18.4872            | 455.84              | 18.37        | 18.1601            |
| 410.25              | 17.86        | 17.6923            |                     |              |                    |

جدول 5. مقارنة النتائج العملية للمجال المغناطيسي الفائقة الدقة مع النتائج النظرية للنموذج المقدم

| W/Fe interface         |              |                    |
|------------------------|--------------|--------------------|
| D = 1 ML               |              |                    |
| Exp.<br>Przybylski [3] |              | Calc.<br>Model     |
| T [K]                  | $B_{hf}$ [T] | $\hat{B}_{hf}$ [T] |
| 91.96                  | 21.25        | 21.0060            |
| 122.20                 | 20.58        | 20.6848            |
| 151.18                 | 20.30        | 20.3369            |
| 182.67                 | 19.64        | 19.9191            |
| 214.17                 | 19.36        | 19.4634            |
| 234.33                 | 19.26        | 19.1533            |
| 253.22                 | 18.60        | 18.8504            |
| 268.34                 | 18.51        | 18.5996            |
| 275.90                 | 18.60        | 18.4715            |
| 279.68                 | 18.70        | 18.4068            |
| 284.72                 | 18.60        | 18.3198            |
| 287.24                 | 18.32        | 18.2760            |
| 299.84                 | 18.22        | 18.0543            |

جدول 6. نتائج Przybylski (\*) لقيم  $B_{hf}(0)$  و b مقارنة مع قيم النموذج المقدر عند  $\alpha = 1.5$ ، تشير إلى نتائج Korecki (\*\*)

| W/Fe interface   |                                     |  |                               |  |
|------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------|--|
| Sample           | Exp.<br>Przybylski [3], Korecki [4] |  | Calc.<br>model-T <sup>α</sup> |  |
|                  | $B_{hf}(0)$<br>[T]                  | b<br>[10 <sup>-6</sup> K <sup>-3/2</sup> ] | $B_{hf}(0)$<br>[T]            | b<br>[10 <sup>-6</sup> K <sup>-3/2</sup> ] |
| W(110)/1.08/Ag   | -                                   | -  | 21.60504                      | 31.26623                                   |
| W(110)/1.21/Ag   | -                                   | -  | 21.59729                      | 30.58976                                   |
| W(110)/1.39/Ag   | -                                   | -  | 21.58656                      | 29.67720                                   |
| W(110)/1.6/Ag*   | 21.5                                | 28.1                                       | 21.57404                      | 28.64692                                   |
| W(110)/1.64/Ag   | -                                   | -  | 21.57166                      | 28.45476                                   |
| W(110)/1.67/Ag*  | 21.57                               | -  | 21.56987                      | 28.311                                     |
| W(110)/1.98/Ag   | -                                   | -  | 21.55142                      | 26.87264                                   |
| W(110)/2.55/Ag*  | 21.0                                | 20.9                                       | 21.51752                      | 24.41514                                   |
| W(110)/2.7/Ag    | -                                   | -  | 21.50861                      | 23.80666                                   |
| W(110)/2.73/Ag*  | 21.11                               | -  | 21.50683                      | 23.686                                     |
| W(110)/2.89/Ag   | -                                   | -  | 21.49733                      | 23.05763                                   |
| W(110)/3.4/Ag**  | 21.8 <sup>+0.3</sup>                | 21.3 <sup>+2.0</sup>                       | 21.46708                      | 21.16156                                   |
| W(110)/4.27/Ag   | -                                   | -  | 21.41557                      | 18.27995                                   |
| W(110)/5.13/Ag*  | 21.7                                | 17.0                                       | 21.36478                      | 15.81731                                   |
| W(110)/5.27/Ag*  | 21.57                               | -  | 21.35652                      | 15.44909                                   |
| W(110)/5.3/Ag**  | 21.5 <sup>+0.3</sup>                | 15.1 <sup>+2.5</sup>                       | 21.35475                      | 15.37129                                   |
| W(110)/8.40/Ag*  | 21.4                                | 14.0                                       | 21.17274                      | 9.124021                                   |
| W(110)/8.6/Ag**  | 21.4 <sup>+0.4</sup>                | 14.0 <sup>+3.0</sup>                       | 21.16105                      | 8.822096                                   |
| W(110)/20.5/Ag** | -                                   | -  | 20.477026                     | 1.191273                                   |
| W(110)/20.6/Ag*  | 21.6                                | 12.9                                       | 20.47137                      | 1.171398                                   |
| W(110)/21.0/Ag   | -                                   | -  | 20.44878                      | 1.095154                                   |
| W(110)/21.05/Ag* | 21.6                                | -  | 20.44595                      | 1.085                                      |

جدول 9. مقارنة النتائج العملية للمجال المغناطيسي الفائق الدقة مع النتائج النظرية بأخذ قيم البارامترات ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) للطبقة الذرية Fe/Ag interface في النموذج المقدم

| Fe/Ag interface  |              |                    |                  |              |                    |
|------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------|
| D = 3.4 ML       |              |                    | D = 5.3 ML       |              |                    |
| Exp. Korecki [4] |              | Calc. Model        | Exp. Korecki [4] |              | Calc. model        |
| T [K]            | $B_{hf}$ [T] | $\hat{B}_{hf}$ [T] | T [K]            | $B_{hf}$ [T] | $\hat{B}_{hf}$ [T] |
| 94.01            | 34.96        | 34.4578            | 95.44            | 34.42        | 34.4069            |
| 138.17           | 34.49        | 33.9921            | 160.96           | 33.92        | 33.7900            |
| 193.73           | 33.52        | 33.2914            | 237.89           | 33.14        | 32.8855            |
| 257.83           | 32.39        | 32.3482            | 299.14           | 32.48        | 32.0490            |
| 299.14           | 31.77        | 31.6727            | 350.42           | 31.84        | 31.2786            |
| 347.57           | 30.53        | 30.8193            | 451.56           | 30.18        | 29.5909            |
| 413.10           | 29.18        | 29.5671            |                  |              |                    |

جدول 10. مقارنة النتائج العملية للمجال المغناطيسي الفائق الدقة مع النتائج النظرية بأخذ قيم البارامترات ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) للطبقة الذرية Fe/Ag interface في النموذج المقدم

| Fe/Ag interface  |              |                    |   |  |                    |
|------------------|--------------|--------------------|---|--|--------------------|
| D = 8.6 ML       |              |                    | D = 1.6 ML  |  |                    |
| Exp. Korecki [4] |              | Calc. model        | Exp. Przybylski [3]   |  | Calc. Model        |
| T [K]            | $B_{hf}$ [T] | $\hat{B}_{hf}$ [T] | T [K]   | $B_{hf}$ [T]   | $\hat{B}_{hf}$ [T] |
| 95.44            | 33.96        | 34.3124            | 90.84   | 31.08  | 34.5157            |
| 160.96           | 33.63        | 33.8465            | 143.66  | 30.50  | 33.8638            |
| 250.71           | 33.05        | 33.0372            | 194.36  | 29.50  | 33.1116            |
| 296.29           | 32.74        | 32.5626            | 251.40  | 28.33  | 32.1396            |
| 356.12           | 32.06        | 31.8822            | 297.88  | 27.56  | 31.2600            |
| 448.71           | 31.24        | 30.7131            | 327.46  | 26.58  | 30.6626            |
|                  |              |                    | 378.16  | 25.20  | 29.5750            |
|                  |              |                    | $B_{hf}(0) = 31.9$ T<br>$b = 28.3 \times 10^{-6} \text{K}^{-3/2}$ | $B_{hf}(0) = 35.17505$ T<br>$b = 21.6491 \times 10^{-6} \text{K}^{-3/2}$ |                    |

### الاستنتاج

1- أمكن استنتاج صيغة للمجال  $B_{hf}(T, D)$ ، والتي تختلف عن صيغة بلوخ بقيم مميزة ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) في الطبقة الذرية W/Fe and Fe/Ag interface:

|                 | $B_{hf}(T, D) = g_1 \exp(-g_2 D) + g_3 \exp(-g_4 D) T^\alpha$ |            |          |           |
|-----------------|---|------------|----------|-----------|
|                 | W/Fe interface ( $21 \geq D \geq 1, 450 \geq T \geq 90$ )     |            |          |           |
|                 | Fe/Ag interface ( $21 \geq D > 2, 450 \geq T \geq 90$ )       |            |          |           |
| $\alpha = 3/2$  | $g_1$   | $g_2$      | $g_3$    | $g_4$     |
| W/Fe interface  | 21.6695   | 0.00276123 | -0.00081 | 0.1710164 |
| Fe/Ag interface | 35.2836   | 0.00192629 | -0.00087 | 0.0850505 |

2- يظل تأثير الطبقة السفلية على Fe/Ag interface ظاهراً في سمك الطبقتين الذريتين، حيث تختلف قيم المعاملات المميزة لها، في حين تثبت القيم حتى سمك 21 ML.

وهذه النتيجة في ثبوت السمك الذري والذي يعزز من قيمة المجال  $B_{hf}$  تبقى متحققة، ففي درجة حرارة 25 K يصل المجال المغناطيسي  $B_{hf}$  إلى قيمة عظمى عند سمك 3 ML، حيث ظهر تأثير الطبقة السفلية عند هذا السمك في Fe/Pd interface [26].

### 2. المجال $B_{hf}(T, D)$ في الطبقة الذرية Fe/Ag interface

بالتحليل العددي يمكن حساب  $B_{hf}(0)$  عند تطبيق معادلة بلوخ لانعدام وجود بارامترات تميز قياسات المجال في الطبقة الذرية Fe/Ag interface عن W/Fe interface عند نفس السمك  $D$  [ML]، ولكن بوجود المعاملات ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) وهي بارامترات تعتمد على موضع الطبقة موضع القياس، صار من الممكن تقدير المجال للطبقة Fe/Ag interface بعد حساب قيم تلك البارامترات والتحقق منها بمقارنة القيم العملية للمجال. ولحساب هذه البارامترات نستعمل النموذج المعروف بالمعادلة (7) بتعريفها كنموذج في برنامج R، ويتطبيق دالة nls function اعتماداً على قيم  $D, b, B_{hf}(0)$  لنتائج J. Korecki [4] جدول (7)، تحصلنا على المعاملات المميزة للطبقة Fe/Ag interface (جدول 8)، وللتحقق من هذه القيم سيتم المقارنة مع البيانات العملية المأخوذة للطبقة Fe/Ag interface مع الحسابات النظرية للمجال (نموذج  $T^\alpha$ ) المعتمد على المعاملات المميزة، وبالنظر إلى هذه المقارنات في جدول (9 و 10) نجد توافق جيد عند سمك 5.3ML, 3.4ML, 8.6ML، وزيادة تقدر بحوالي 3.5 T عن القيمة العملية عند 1.6 ML.

ومن هنا نجد إمكانية تقدير  $B_{hf}$  في ظروف RT في الطبقة الذرية Fe/Ag interface عند نفس سمك الطبقة الذرية W/Fe interface للبيانات العملية ووجد أن حتى سمك (1.6 ML) زيادة 3.5 T في قيمة المجال عن القيمة الحقيقية.

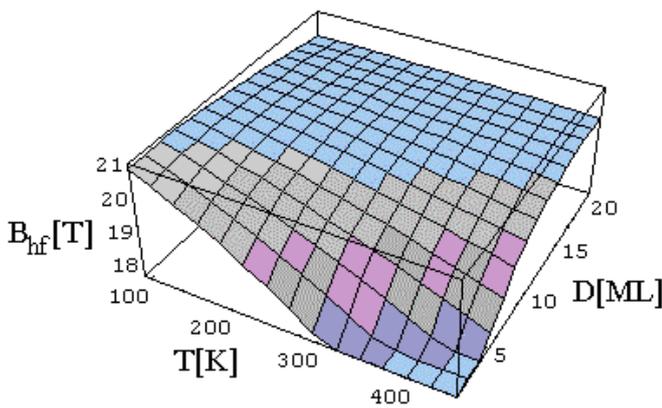
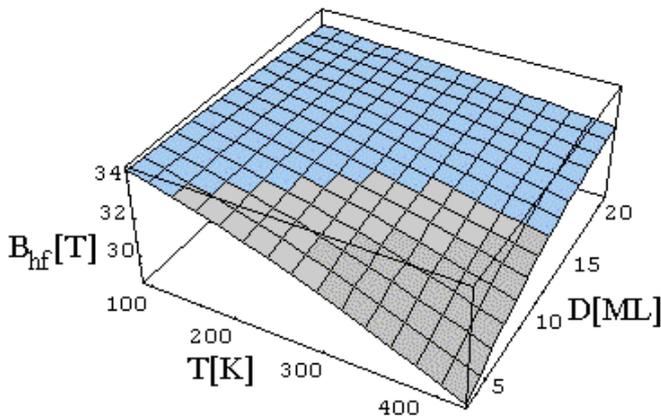
جدول 7. قيم  $B_{hf}(0)$ ،  $b$  للطبقة الذرية Fe/Ag interface متحصل عليها من المطابقات العددية لصيغة بلوخ

$$B_{hf}(T) = B_{hf}(0)(1 - bT^{3/2}) \quad [4] \quad 350 \text{ K}$$

| Film thickness [ML] | $B_{hf}(0)$ [T] | $b [10^{-6} \text{K}^{-3/2}]$ |
|---------------------|-----------------|-------------------------------|
| 3.4                 | $35.6^{+0.2}$   | $21.6^{+1.0}$                 |
| 5.3                 | $34.7^{+0.2}$   | $13.5^{+1.0}$                 |
| 8.6                 | $34.2^{+0.1}$   | $9.5^{+0.5}$                  |
| 20.5                | $34.1^{+0.1}$   | $7.8^{+0.2}$                  |

جدول 8. قيم البارامترات ( $g_1, g_2, g_3, g_4$ ) المميزة للطبقة الذرية Fe/Ag interface

| $g_1$                              | $g_2$       | $g_3$   | $g_4$         |
|------------------------------------|-------------|---|---------------|
| 35.283630622                       | 0.001926298 | -0.0008725172   | 0.08505055840 |
| Initial value (20,0,2)             |             |   |               |
| SST=1.41, SSR=0.7731186,           |             | SST=1.13×10 <sup>-10</sup> , SSR=7.7806×10 <sup>-11</sup> , |               |
| SSE=0.6368814, R square= 0.4583111 |             | SSE=3.5653×10 <sup>-11</sup> , R square=0.6857              |               |

شكل 4. سطح يصف سلوك المجال  $B_{hf}$  في الطبقة الذرية W/Fe interfaceشكل 5. سطح يصف سلوك المجال  $B_{hf}$  في الطبقة الذرية Fe/Ag interface

### المراجع

- [1]- U. Gradmann, *J. Magn. Magn. Mater.* **100**, 481-496 (1991).
- [2]- W. Doring, *Über den Ferromagnetismus des Flachengitters*, *Z. Naturforschung* 1961, 16a, pp. 1008.
- [3]- M. Przybylski, *Dissertations Monographies* 54 (1997), Wydawnictwa AGH, Kraków.
- [4]- J. Korecki, *Physics Bulletin* 19, No. 1364 (1990), Wydawnictwa AGH, Kraków.
- [5]- G. Y. Guo and H. Ebert, *CLRC-013* (1995) pp. 3.
- [6]- M. Kawakami, H. Enokiya and T. Okamoto, *J. Phys. F: Metal Phys.* **15**, 1613 (1985).
- [7]- Q. Y. Jin, Y. B. Xu, H. R. Zhai, C. Hu, M. Lu, Q. S. Bie, Y. Zhai, G. L. Dunifer, R. Naik and M. Ahmad, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 768 (1994).
- [8]- C. E. Johnson, *Hyperfine Interactions* **90**, 24 (1994).
- [9]- Y. Suzuki, T. Katayama and H. Yosuka, *J. Magn. Magn. Mat.* **104-107**, 1843 (1992).
- [10]- Y. Kobayashi, S. Nasu, T. Emoto and T. Shinjo, *Hyperfine Interactions* **94**, 2273 (1994).
- [11]- N. C. Koon, B. T. Joriker, F. A. Volkening, J. J. Krebs and G. A. Prinz, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2463 (1987).
- [12]- O. F. Bakkaloglu, M. F. Thomas, R. J. Pollard, P. J. Grundy, V. Lewis and K. O'Grady, *J. Magn. Magn. Mat.* **125**, 209 (1993).
- [13]- R. Kalvig, E. Jedryka, M. Wojcik, G. Allodi, R. De Renzi, M. Petit, and L. Michez, *Phys. Rev. B* **97**, 174428 (2018).
- [14]- S. Ohnishi, M. Weinert and A. J. Freeman, *Phys. Rev. B* **30**, 36 (1984).
- [15]- J. Bland, *A Mössbauer Spectroscopy and Magnetometry Study of Magnetic Multilayers and Oxides*, Dissertation, Oliver Lodge Laboratory, University of Liverpool (2002).
- [16]- N. N. Greenwood and T. C. Gibb, *Mössbauer spectroscopy*, Chapman and Hall Ltd, London (1971).
- [17]- H. Ebert, R. Zeller, B. Drittler, P. H. Dederichs, *Appl. Phys.* **67**, 4576-4578 (1990).

3- تعتمد  $B_{hf}(0)$  و  $b$  على السمك  $D$  [ML] وعلى موضع الطبقة، حيث تتأثر القيم  $(g_1, g_2, g_3, g_4)$  بالطبقة السفلية ومادة الطلاء، ونلاحظ أن قيمة  $B_{hf}(0)$  تكون عالية كلما كان سمك الغشاء صغير.

Spin wave parameter

$$b = -\frac{g_3 \exp(-Dg_4)}{B_{hf}(0)}$$

Ground-state magnetic hyperfine field

$$B_{hf}(0) = g_1 \exp(-Dg_2)$$

4- والنتيجة الأهم أن معظم قيمة المجال  $B_{hf}(T, D)$  تأتي من المعامل  $g_1$  والذي من المفترض أن تكون وحدته تسلا [T]، والذي تعبر قيمته عن  $B_{hf, cp}$  مجال التلامس لفيرمي، والذي يعتبر المسهم الأكبر في المجال الناشئ عند النواة، وبذلك تكون الصورة النهائية للنموذج:

$$B_{hf}(T, D) = B_{hf, cp} \exp(-g_2 D) + g_3 \exp(-g_4 D) T^\alpha$$

5- ومن السطوح (شكل 4، 5) التي تصف سلوك المجال نستنتج أن:

• درجة الحرارة هي المؤثر الأكبر في المجال  $B_{hf}$  مقارنة بتأثير السمك حيث يكون تأثيره غير ذا أهمية عند درجات حرارة محددة.

• توجد مناطق استقرار في السطح (الشكل 4)، حيث المادة البارامغناطيسية ( $W-4f^{14}5d^46s^2$ ) ليس لها محصلة عزم في درجة حرارة الغرفة ومن الصعب مغنطتها عند هذه الدرجة بسبب التهيؤ الحراري والذي يكون كبير جدا لدرجة لا يمكن معه إنتاج طاقة مجال مغناطيسي للتغلب عليه. ولذلك تظهر مساهمة ذرات الحديد فقط في المجال  $B_{hf}$  وهذا يحدث في سمك اقل من 3ML (بسبب عدم تغير الذرات الأقرب والأقرب التالية إلى سمك ثلاث طبقات ذرية [3])، وعند انخفاض درجة الحرارة يحدث ترتيب عكسي للعزم الذرية داخل الحجيرات ينتج عنه قيمة للطاقة المغناطيسية وتظهر مساهمة ذرات التنجستين من جانب درجة الحرارة، وهذه المساهمة ( $W-4f^{14}5d^46s^2$ ) تعمل على استقرار المجال  $B_{hf}$  في بعض المناطق والزيادة في مناطق أخرى حيث يمكن إثارة العزم المغناطيسي في درجات حرارة محددة فبأخذ اتجاهات عشوائية، أما بالنسبة للسطح في الشكل 5 وجود إلكترون واحد ( $Ag-4d^{10}5s^1$ ) يؤدي إلى عدم وجود مناطق استقرار للمجال  $B_{hf}$  المغناطيسي.

• يوجد زيادة حادثة في المجال  $B_{hf}$  بشكل عام في السطح (الشكل 5) عنها في السطح (الشكل 4)، وبما أن المجال  $B_{hf}$  الناتج ينشأ إما من الكورونات الذرية بنفسها، أو ينشأ من مساهمات الذرات المجاورة، لذلك في السطح (الشكل 5) المساهمة كبيرة لزيادة المجال  $B_{hf}$  لوجود ذرات الحديد  $Fe^{56}$  المجاورة  $Fe^{56}$  ( $Fe^{57}/Ag$  وجود انتشار بيبي بين  $Fe^{56}$  و  $Fe^{57}$  يؤثر في النتائج [4])، أما مساهمة الفضة فإنها لا تؤثر في قيمة محصلة عزم الحديد الفيرومغناطيسي، وفي حالة تأثرها بذرات الحديد المجاورة فمساهمتها ضعيفة. وبالرغم من هذا يبقى اثر الذرات المتجاورة ظاهرا في الخواص المغناطيسية للاغشية الرقيقة اما في النماذج النظرية [27]، او في الدراسات العملية [28].

• في السطح (الشكل 4)  $W/Fe^{57}-Fe^{56}$  المجال حدث له انخفاض بشكل عام بسبب أن محصلة عزم الحديد تأثرت بعزم التنجستين العشوائية الترتيب، أي أن ذرات الحديد  $Fe^{57}$  تأثرت بالخواص المغناطيسية للنظام.

- [18]- R. E. Watson, A. J. Freeman, *Appl. Phys.* **32**, S118-S119 (1961).
- [19]- E. U. Condon, H. Odishaw, Handbook of Physics, Second edition, McGraw-Hill Book Company (1967).
- [20]- P. Sybil Parker, Dictionary of Physics, Second edition, McGraw-Hill Companies (1997).
- [21]- U. Gradmann, Ferromagnetism Near Surface and in Thin Film, *Appl. Phys.* 1974, 3, pp. 161.
- [22]- R. J. Jelitto, Zur spontanen Magnetisierung dünner ferromagnetischer Schichten, *Z. Naturforsch* 1964, 19A, pp. 1580.
- [23]- R. Skomski and J. M. D. Coey, Permanent Magnetism, Studies in Condensed Matter Physics (Institute of Physics Publishing Ltd, Bristol, U. K., 1999).
- [24]- A. M. Blixt, Growth and Magnetic Properties of Fe- and FeNi- based Thin Films and Multilayers, Dissertation, Uppsala University (2004).
- [25]- L. J. de Jongh, Magnetic Properties of Layered Transition Metal Compounds, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1990.
- [26]- B. Roldan Cuenya, W. Keune, Dongqi Li, and S. D. Bader, *Phys. Rev. B* **71**, 064409 (2005).
- [27]- T. Szumiata, M. Gzik-Szumiata, K. Brzozka, M. Gawronski and B. Gorka, *Acta Physica Polonica A* No. **1**, 113 (2008).
- [28]- A. Fischer, R. Kruk, Di Wang and H. Hahn, *J. Nanotechnol.* **6**, 1158–1163 (2015).