

## محاكاة الحاسوب لطوبوغرافية الاغشية الرقيقة

د. عبد الحليم خضير علي

قسم الفيزياء - كلية العلوم / الجامعة المستنصرية

### ملخص البحث:

استخدم نموذج مماثل الى نموذج ايزنك لسبائك ثنائية التركيب AB . النموذج المستخدم شبكية مربعة بهيأة غشاء رقيق يحتوي على 10000 ذرة ويتراوح تركيز الفراغات من  $3 \times 10^{-3}$  الى  $10^{-4}$ . حيث تم غرس ذرات احادية الطور A او B على شكل طبقات في الغشاء الرقيق المرتب AB. ميكانيكية انتشار الذرات في الشبكية اساسها الفراغات ، حيث سمح للفراغات القفز الى اقرب المواقع المجاورة للطبقات الاحادية الطور. اظهرت محاكاة الحاسوب التحولات الطورية للغشاء الرقيق مع وجود عدة ميكانيكات تسبب الحالة الغير مرتبة وهي: عيوب نقاط الاستبدال Sustitution points defect، تجمع من ذرات من نفس النوع clusters ، تجمع من ذرات ليست من نوع واحد segregations ، المايكرو دومين microdomains ، الترتيب اللاطوري antiphase order ، والحدود اللاطورية antiphase boundaries . ركزت الدراسة على استقرارية الاغشية الناتجة واعتمادها على درجة الحرارة وتركيز الفراغات. اظهرت نتائج محاكاة الحاسوب تراكيب جديدة مرتبة تشكلت من تحلل الطبقات الاحادية في داخل الغشاء الرقيق الثنائي التركيب AB.

## Computer simulation of topological monophasic layers in thin films

Dr. Abdul halim kh. Ali

### Abstract:

A model corresponding to Ising model for binary alloys was used, which was a square lattice in the form of a thin film, containing 10000 atoms with a concentration of vacancies ( $3 \times 10^{-3}$  to  $10^{-4}$ ), where a monophasic layers from A or B atoms has been adopted in an ordered AB thin film. The dynamics of atomic diffusion depends mainly on the vacancies in the thin film. Vacancies had been allowed to jump to the nearest -neighbor sites of monophasic layers. Computer simulations

showed the phase transformations in thin films and the existence of several mechanisms causing disordering which are : Sustitution point defects, clusters, segregations, microdomains, antiphase order and antiphase boundary . This study focused on the stability of the resulted thin films and its dependance on the temperature and the concentrations of vacancies. The computer simulation results showed that a new ordered thin film AB.

#### مقدمة البحث:

ان التفسير النظري لمشكلة استقرارية الاغشية الرقيقة تجريبيا كان من اهم المشاكل البحثية في هذا القرن ، ولاسيما فيما يتعلق بالحاجة الى صنع الرقائق الكترونية لشبه موصلة حجمها قريب من النانومتر .

فالتحولات الطورية في الاغشية الرقيقة المنشطة حراريا لايمكن رؤيتها في التجارب العملية الحقيقية . فالمجهر الالكتروني والمجهر الايوني لا يعطي سوى الصورة النهائية للنتيجة. ايضا التجارب العملية الحقيقية تزودنا بنتائج معقدة وصعبة التحليل لوجود عدة عوامل متداخلة ومتبادلة التأثير حيث لايمكن فصل أي عامل من بقية العوامل الاخرى. ونحن نعرف ان استقرارية اي غشاء رقيق تعتمد على تلك العوامل وكيفية السيطرة عليها. هذه المشكلة جلبت انتباه كثير من الباحثين لدراستها لذلك هناك دراسات بطرق نظرية[١-٣] ودراسات بأستخدام الحاسوب[٤-٧]. التجربة بأستخدام الحاسوب تزودنا بمعلومات كاملة وحقائق مباشرة وغير مباشرة في زمن قصير عن التجربة العملية الحقيقية قبل أجزائها وبذلك توفر علينا الوقت اضافة الى ذلك تقليل الكلفة، والوصول الى افضل النتائج وهذا هدف البحث. البحث يتناول ادخال(غرس) طبقات ذرية احادية الطور في شبكة مربعة ثنائية التركيب AB .

#### النموذج المستخدم:

تم تصميم نموذج شبيهه نموذج ايزنك(Ising models)[٨] ، ألا ان اساسه يعتمد على طاقة التفاعل ما بين الذرات في شبكة ثنائية التركيب مربعة ابعادها  $100 \times 100$  ذرة ،مرتبة دوريا بشكل AB .تعود الشبكة للمستوى البلوري (١٠) والذي قطع من المستويات(١٠٠) للبلورات F.C.C. و B.C.C. ذرات A و B على شكل كرات صلدة منعا للحركة الاهتزازية للشبكة. ويتراوح تركيز الفراغات من  $3 \times 10^{-3}$  الى  $10^{-4}$  . وايضا افترض ان التفاعل بين ذرة واخرى وبين ذرة وفراغ يساوي صفرا عند حالة الاتزان . تلعب ميكانيكية الفراغ دورا مهما في اعادة انتشار الذرات في الشبكة مع الارتفاع في درجات الحرارة[٩] . فعند اي درجة حرارة اعلى من الصفر المطلق يمكن للذرة المجاورة للفراغ ان تنتقل من موقعها الى موقع الفراغ فيصبح الموقع الاصلي بعد هذه

الحركة فراغا جديدا يستطيع استقبال ذرة جديدة مجاورة لها. وميكانيكية الانتشار التبادلي الخطي لذرتين متجاورتين غير مسموح بها. بينما الانتشار بواسطة الفراغات البينية يحتاج الى وجود فراغات بينية بين ذرات الشبيكة. فالذرات يمكن لها التحرك بكل سهولة بين هذه الفراغات ولكنها تحتاج الى طاقة تنشيط Activation energy. وعند لحظة بدأ التجربة يسمح النموذج بوجود الثوابت الغير مساوية للصفر متمثلة في التفاعل ما بين الذرات على امتداد المحورين الكرويين بينما يبقي على تفاعل الذرة مع الفراغ مساويا الى الصفر. وزمن العد ليس زمنا حقيقيا ويعتمد على عدد مرات القفز للذرات في فراغات الشبيكة (n)، لذلك فإن  $t_n = n$ . وهنا يحصل توزيع جديد لذرات الشبيكة لذا يستوجب استخدام معادلة التوزيع لماكسويل الاحصائية :

$$Q = \exp(-E_v / \kappa T) \quad \text{----- (1)}$$

حيث K ثابت بولتومان و  $E_v$  طاقة التنشيط و T درجة الحرارة المطلقة. وايضا يتوقف زمن القفز على معامل الاحتمالية p ، وهو ان يكون للذرة قدرا كافيا من الطاقة لكي تنتقل فعلا من موضع الى اخرى . فاذا كان لدينا 4 ذرات فان احتمالية قفز اية ذرة منها من موقعها الاصلي على الاحداثي الكروي 1 = ا لاشغال فراغ مجاور لها عند الاحداثي الكروي 2 = ا توصف بالعلاقة التالية :

$$Q = \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^2 p_{kl} \quad \text{----- (2)}$$

حيث  $p_{kl}$  احتمالية قفز الذرة k. وفي هذه فان احتمالية قفز الذرة في الفراغ وصولا الى ا بعد نقطة في الشبيكة يعتمد على مقدار الطاقة التي تمتلكها الذرة ودرجة حرارة المادة. وتحتاج الذرة k على المحور l الى اكتساب طاقة قليلة  $E_{kl}$  تمكنها من شغل فراغ مجاور لها. بينما تحتاج الذرة k الى اكتساب طاقة اكثر  $E_{max}$  لاشغال فراغ تحيطه دائريا 8 ذرات . وبما ان معادلة التوزيع لماكسويل تحسب لنا احصائيا معدل توزيع الذرات ، فاننا نحتاج ايضا الى معدل الطاقة لتلك الذرات. ومعدل الطاقة  $D_{kl}$  تحسب من خلال المعادلة التالية :

$$D_{kl} = E_{kl} + (E_{max} - (1 - b)E_{kl})b \quad \text{----- (3)}$$

$$k=1, \dots, 4, \quad l=1, \dots, 2,$$

حيث b متغير يصف تأثير درجة الحرارة على عمليات الترتيب وقيمته  $0 < b < 1$ .

$$b = 1 - \exp(-\chi T) \quad \text{----- (4)}$$

حيث  $\chi$  ثابت تجريبي للنموذج يؤخذ من خلال التجارب العملية الحقيقية وتتراوح قيمته من ٣ إلى ١٠. ومن المعطيات السابقة نستطيع كتابة احتمالية قفز ذرة ما في فراغ بصيغة اخرى.

$$p_{kl} = Q(E_{\max} - (1 - b)D_{kl}) / A \quad \text{----- (5)}$$

$$A = \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^2 (E_{\max} - (1 - b)D_{kl})$$

فعند درجات الحرارة المنخفضة تصبح  $b$  قريبة من الصفر، عندئذ تكون  $D_{kl}$  قريبة من  $E_{kl}$ . ان احتمالية قفز ذرات في فراغ يعتمد على الطاقة التي تكتسبها تلك الذرات ، وهذه الطاقة هي طاقة حرارية تعمل على تلدين السبيكة الثنائية التركيب التي هي بهيأة فلم (غشاء) رقيق. عند هذه الحالة يبدأ المتغير  $b$  من الاقتراب من الواحد وبذلك تصبح الاحتمالية  $p_{kl}$  مساوية الى القيمة التالية :

$$p_k = Q/8$$

تعتبر المعادلات (١ الى ٥) من اهم المعادلات الرياضية التي اعتمد عليها النموذج المستخدم في البحث وتفاصيل تلك المعادلات في المراجع [10-14].

#### تقنية تحضير النماذج نظريا:

تتركز الطريقة على انشاء طبقة رقيقة من ذرات احادية الطور في شبكة بلورية ثنائية التركيب  $AB$  مرتبة دوريا والتي هي بهيأة غشاء رقيق. ان وجود الذرات الاحادية والفراغات في الشبكة البلورية الانفة الذكر يؤدي الى انهاء الحالة المثالية لتلك الشبكة وتحول الشبكة من الحالة المرتبة الى الحالة الغير مرتبة. هذه الفوضى التي حصلت في داخل الشبكة تسبب في اضطراب في طاقة النظام البلوري (عدم الاتزان) ، حيث تتحرر طاقة (طاقة المتحررة) تستنفذ من قبل الفراغات في عملية الانتشار وبذلك يحصل إعادة في توزيع ذرات الغشاء الرقيق. علما ان تغيير تركيز الفراغات في الانظمة الحقيقية يؤثر في زمن العد [١٥]. ان التراكيب المتزنة والناجة من عملية الانتشار تلك تكون قريبة من تراكيب  $A_3B_2$ .

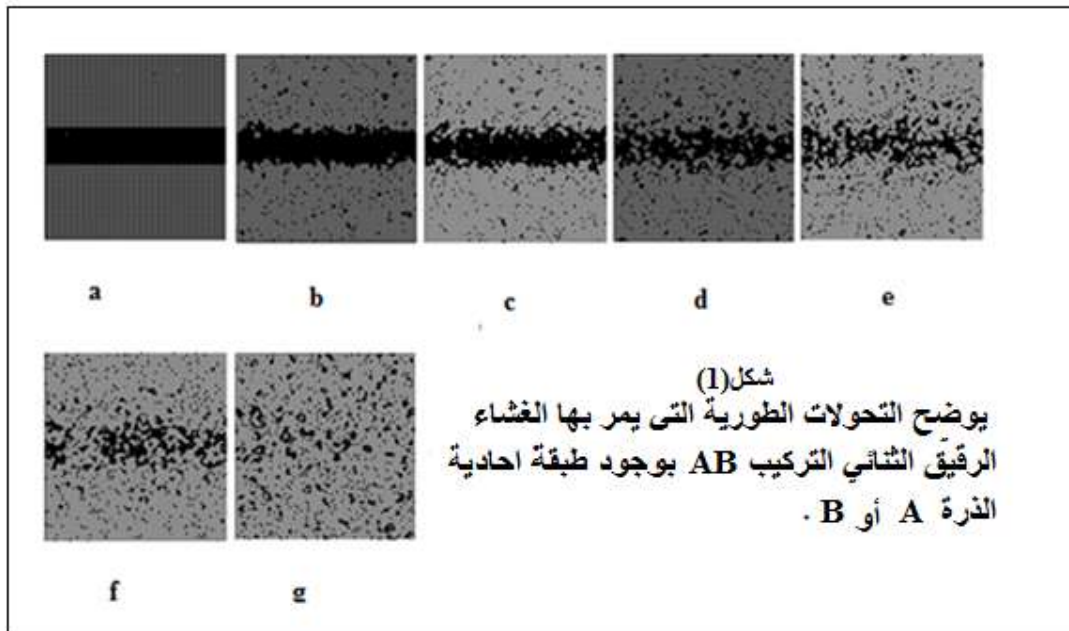
وتتضمن الخطوات التالية:

١. وضع ١٩ طبقة من ذرات احادية الطور  $A$  في منتصف الشبكة المربعة الثنائية التركيب  $AB$  بهيأة شريط واحد، كما هو موضح في الشكل (a.1).
٢. وضع ٩ طبقات و ١٠ طبقات من ذرات احادية الطور  $A$ ، بالقرب من الزوايا الرأسية للشبكة  $AB$  بهيأة شريطين متوازيين، كما هو موضح في الشكل (a.٣).

٣. وضع ٩ طبقات و ١٠ طبقات من ذرات احادية الطور A بهيأة شريطين متعامدين يقسم الشبكة الى اربعة اجزاء متساوية، كما هو وضح في الشكل (a.٥).

ولدرجة الحرارة تأثير كبير على حركة الفراغات في الشبكة لذا تم اختيار مدى لدرجات الحرارة  $(10-100)k$  يتوافق مع مدى تغير تركيز الفراغات. فعندما يكون عدد الفراغات في الشبكة ٣٠ فراغ تكون درجة الحرارة المناسبة للتجربة هي  $100K$  ( $T_c, 13, 0$ ) وهذا الاختيار يعطي تأثير اقوى لعامل الطاقة (طاقة التفاعل مابين الذرات). ويجب ان نؤكد ان عدد الذرات في الشبكة بما فيها من الطبقات الاحادية الذرة يبقى ثابتا ( $10000$  ذرة) اثناء التجربة. من خلال تجربة محاكاة الحاسوب تمكنا من التدقيق عن الواجهة التي تهاجر اليها الفراغات وتنفيذها لعمليات الخلل للطبقات الاحادية الذرة كذلك سمحت التجربة بأستكشاف انماط ناشئة كنتيجة اعادة تنظيم الذرات مع اختيار وتتبع ملامح اصغر التفاصيل لهذه العملية. ويوضح اللون الأبيض في الاشكال التالية التركيب الثنائي المرتب AB بينما اللون الاسود الطور الاحادي الذرة. تتسبب هجرة الفراغات في الشبكة بحدوث تغير في طاقة التفاعل مابين الذرات وايضا تحرر طاقة كنتيجة لانتهاء الترتيب الدوري للشبكة AB ، وهذه الطاقة تستنفذ من قبل الفراغات بشكل طاقة حركية تمكنها من التوغل والتفاعل داخل الطور الاحادي الذرة واقتطاع اجزاء منه وابتعادها الى عمق الشبكة الثنائية التركيب AB ، وفيما يلي المراحل التي تمر بها الأغشية الرقيقة المتكونة من انتشار الطبقة الذرية الاحادية في الشبكة الثنائية التركيب AB.

#### النتائج والحسابات النظرية:



#### المرحلة الاولى:

يوضح الشكل (b.1) المرحلة الاولى لعملية الانتشار، حيث تتسبب حركة الفراغات في الشبكة الى ظهور عيوب نقاط عيوب الأستبدال substitution points defect ، نتيجة لاحتلال ذرات الطبقة الاحادية مواقع بينية في الشبكة الثنائية التركيب AB. اظهرت الصور لمحاكاة الحاسوب أن تواجد الفراغات لا ينحصر في الشبكة الثنائية التركيب AB ، بل يمتد تواجدها في المناطق القريبة من حدود الذرات الاحادية الطور مما تتسبب اقتطاع اجزاء منه .

#### المرحلة الثانية:

يظهر في الشكل (c.1)، بوضوح عملية التدمير التي حدثت بحدود الطبقة الآحادية الذرة مع ملاحظة تواجد اجزاء صغيرة من الشبكة AB داخل حدود الطبقة الاحادية الذرة مكونة تراكيب تعرف بالميكرودومين Microdomian ولهذه التراكيب اهمية في ظهور الترتيب القصير المدى Short-range order. ونظرا لتواجد المايكرودومين داخل الدومين الكبير المتمثل في التركيب AB ظهر لنا مصطلح ما يعرف Anti-phase order.

#### المرحلة الثالثة:

يستمر توغل الفراغات داخل الطبقة الآحادية الذرة ، حيث تتسبب في اقتطاع اجزاء منه وابتعادها الى مناطق ابعد في الشبكة الثنائية التركيب AB. وتتميز هذه المرحلة في زيادة عدد وحجم المايكرودومين مع حصول تآكل في حدود Anti-phase order ، مع ظهور تجمعات ذرية فاذا كانت من نفس النوع من الذرات ( A او B ) تعرف Clusters، اما اذا كانت من نوعين من الذرات ( A و B ) تعرف Segregations ، وكما موضح في الشكل (d.1).

#### المرحلة الرابعة:

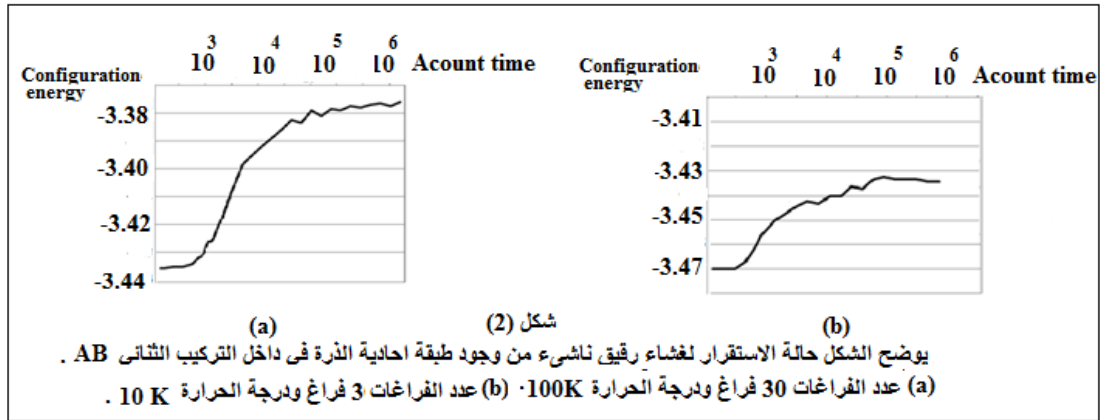
نلاحظ في الشكل (e.1) انه بفعل ميكانيكية الفراغ يستمر اقتطاع اجزاء من الطبقة الاحادية الذرة وابتعادها وتوغل تلك الاجزاء الى داخل الشبكة AB ، وايضا لوحظ تقطع الاجزاء الاكبر الى اصغر . وما يميز هذه المرحلة هو انخفاض في عدد وحجم المايكرودومين الذي يترافق مع التناقص في الطبقة الآحادية الذرة مقارنة مع الحالة السابقة.

#### المرحلة الخامسة:

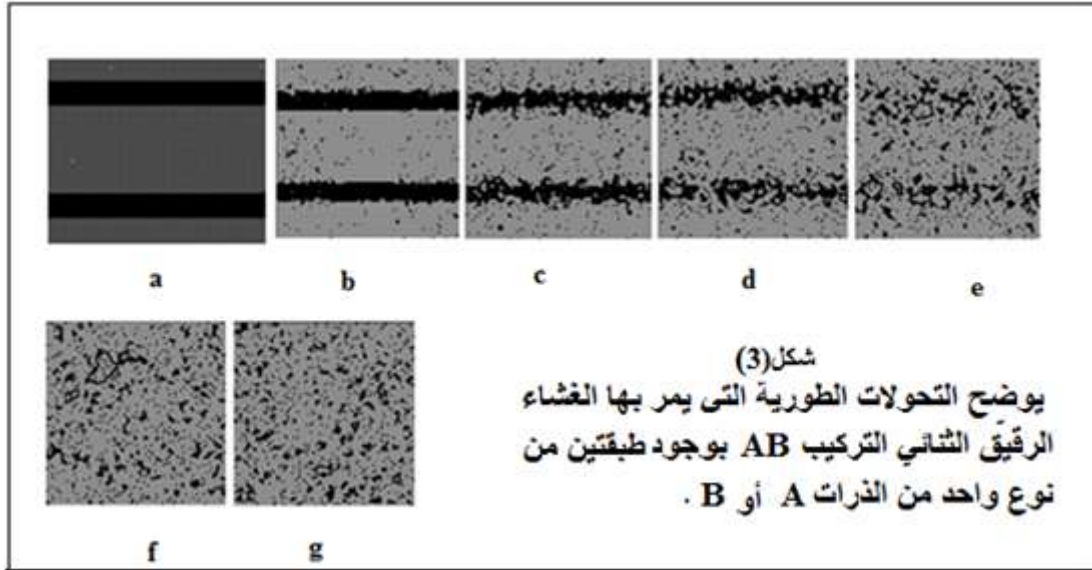
في هذه المرحلة تتحول الطبقة الاحادية الذرة الى قطع متناثرة مختلفة الاحجام ، وبفعل ميكانيكية الفراغ تسحق هذه القطع الى قطع اصغر بحيث يصبح حجمها يماثل حجم الجسيمات. وما يميز هذه المرحلة هو تلاشي المايكرودومين مع زيادة في عدد عيوب نقاط الأستبدال ، كما مبين في الشكل (f.1).

المرحلة السادسة:

تتسب عملية السحق للأجزاء الصغيرة للطبقة الاحادية الذرة الى ظهور مجاميع Cluster ، ومجاميع Segregtions ، بالإضافة الى تواجد اعداد كبيرة من عيوب نقاط الأستبدال Sustitution points defect كما هو واضح في شكل (g.1). تترتب تلك المجاميع بطاقة ترتيب اكثر من الطاقة التي تمتلكها الفراغات مما يعيق من حركتها ، ونتيجة لذلك يقلل من حركة الفراغات في الغشاء الرقيق وهذا يؤدي الى حالة الاستقرار للغشاء الرقيق وكما هو موضح في الشكل (a.2). وحسب نظرية الاضطراب [16] فان مجموع التراكيب اعلاه يعطي حجم البلورة. علما ان عدد وحجم تلك التراكيب يعتمد على كبر الطبقة الأحادية ودرجة الحرارة. ان تواجد تلك التراكيب في حالة الاتزان تؤكد على عدم وجود تركيب المايكرو دومين .

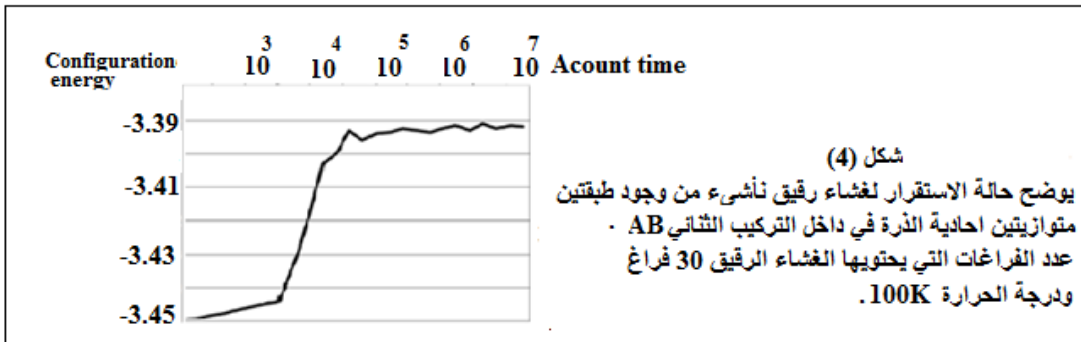


يوضح الشكل (b.2) حالة استقرار اخرى للغشاء الرقيق لكن عند درجة حرارة 10K ، وعدد الفراغات التي يحتويها الغشاء الرقيق هي 3 فراغ. وتؤكد العلاقة البيانية حصول عملية انتشار محدودة لذرات الغشاء الرقيق بالرغم من انخفاض درجة الحرارة وقلة تركيز الفراغات. ان للذرات المترتبة في الطور الاحادي التي بمثابة (Clusters) تمتلك طاقة ترتيب اعلى من الطاقة التي تمتلكها الفراغات في الفلم الرقيق ذي الطور AB، ولهذا ينحصر بقائها عند حدود منطقة الطور AB لذلك نلاحظ انخفاض في عملية الانتشار وهذا يرفع من استقرارية الغشاء الرقيق. من خلال ملاحظة حالة اخرى للغشاء الرقيق تمثلت بوجود طبقتين متوازيتين من الذرات الاحادية الطور من النوع A في الفلم الرقيق الثنائي التركيب AB . كما هو مبين في شكل (3).



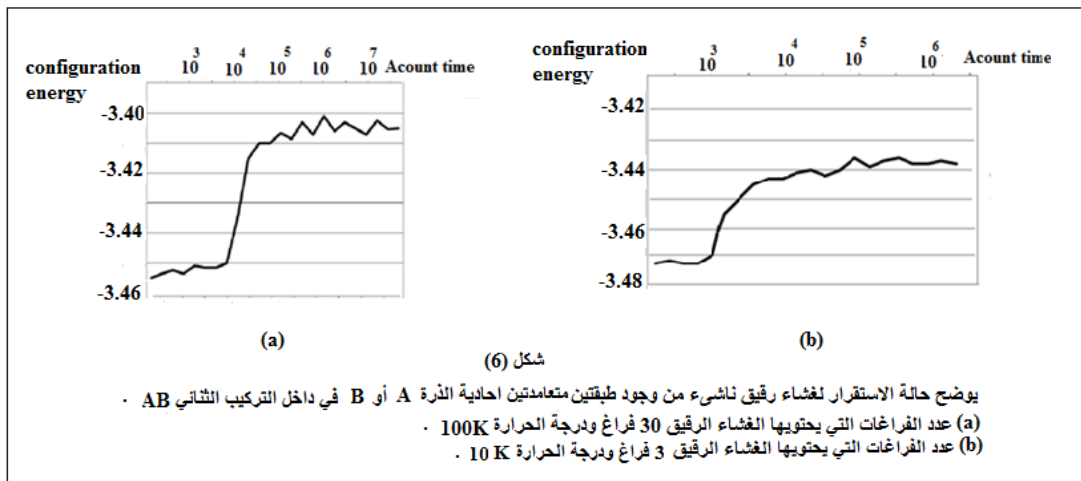
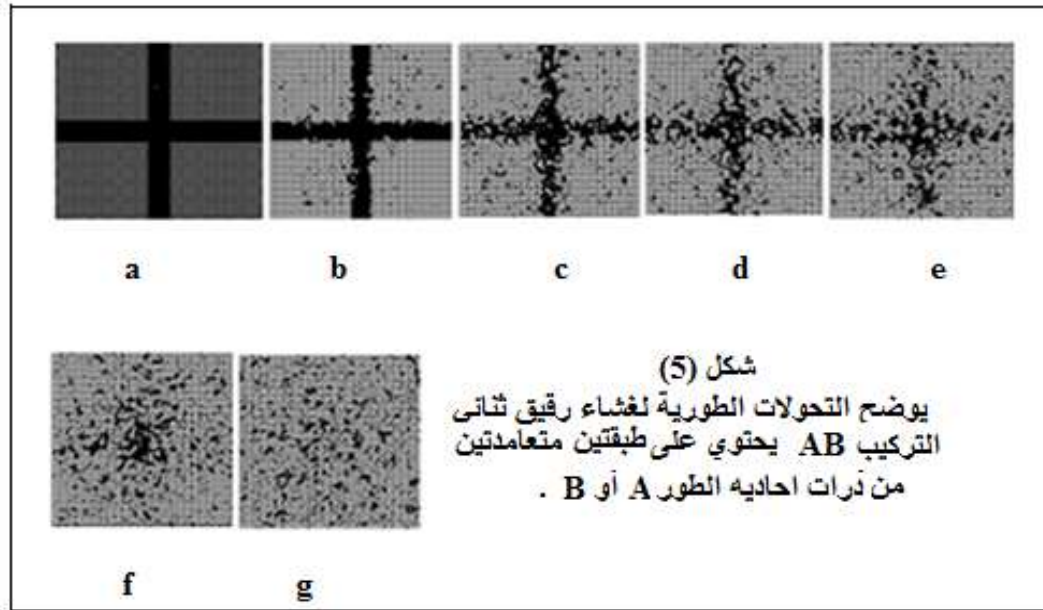
ان وجود الطبقتين يجعل النظام اقل استقرارا مقارنة بالحالة السابقة نظرا لوجود عدد اكبر من الحدود الطورية الاحادية الذرة A لذلك ينهار النظام بسرعة . وان عملية انهيار الغشاء الرقيق بوجود الطبقتين الاحادية الذرة مشابهة الى مراحل انهيار الغشاء الرقيق بوجود الطبقة الاحادية الذرة .

ويوضح الشكل (٤) حالة استقرار الغشاء الرقيق الناشئ من وجود طبقتين متوازيتين احادية الذرة في داخل الشبكة الثنائية التركيب AB، مع وجود ٣٠ فراغا وعند درجة الحرارة ١٠٠ K .



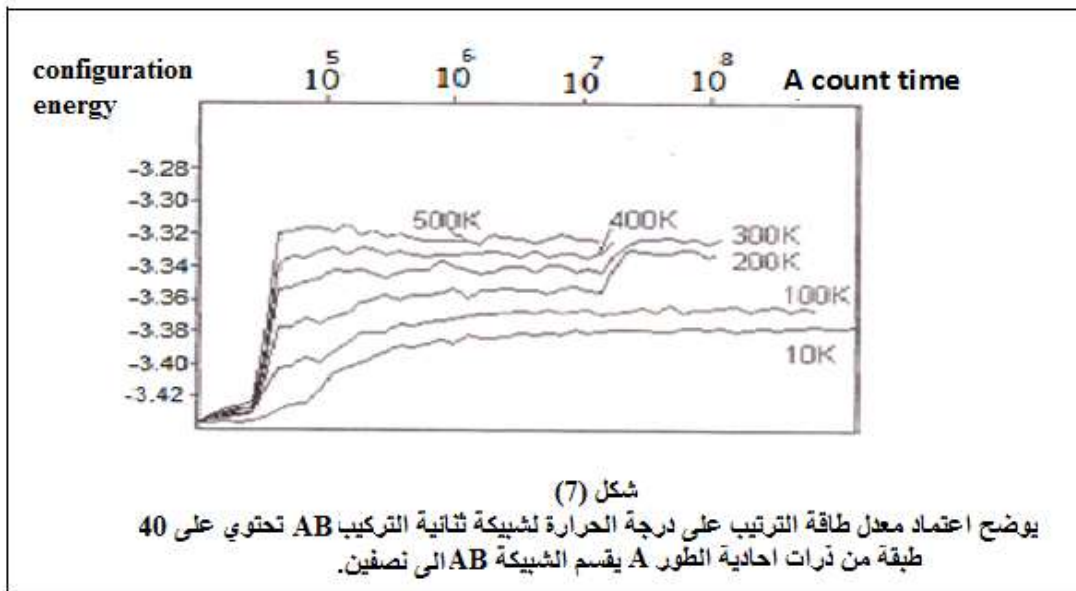
اما المراحل التي يمر بها غشاء رقيق ثنائي التركيب AB يحتوي على طبقتين متعامدتين من الذرات الاحادية الطور من النوع A ، كما موضح في الشكل (٥).





لاحظنا ان الصور التي اظهرها البرنامج في الاشكال (١ و٣ و٥) لاتعطي معلومات كاملة عن التطور الذي حصل لتوزيع الذرات ومع ذلك سمح لنا بمتابعة المراحل التي تنهار فيها التركيب الذرية الاحادية الطور في الفلم الرقيق. ومن السهل ان نرى تدمير التركيب الذرية الاحادية الطور على شكل طبقتين متعامدتين في الغشاء الرقيق الثنائي التركيب AB اسرع من الحالات السابقة بالرغم ان لهم نفس العدد من الذرات الاحادية الطور. حيث تساهم الزيادة في طول الحدود في توطين الفراغات في داخل خلايا الشبكة وتقتصر حركتها على طول الحدود مما يسهل من تغير هيكلية الحدود. ان البنية المنهارة من تركيب الاحادي الطور في المرحلة الخامسة، كما موضح في الشكل (٥.٤) تظهر قطع كبيرة من الذرات الاحادية الطور عند مركز تقاطع الشرائط الاحادية الذرات، وهذه تحتاج الى فترة طويلة لتفتيتها وهي بمثابة تراكم مستقرة. من خلال محاكاة

الحاسوب وجدنا ان الغشاء الذي يحتوي على طبقة واحدة هو اكثر التراكيب استقرارا لان معدل طاقة ترتيبه عند حالة الاستقرار تصل الى (-3,38) وهي طاقة بوحدات نسبية اي نسبة الى طاقة الترتيب المثالية للغشاء AB. بينما لوحظ ان الغشاء الرقيق الذي يحتوي على طبقتين متعامدتين من الذرات الاحادية الطور يبدأ بالانهيار لحظة بدأ عملية الانتشار، ومعدل طاقة ترتيب الغشاء الرقيق الناتج عند حالة الاستقرار تصل الى (-3,41) في حين معدل طاقة ترتيب الغشاء الرقيق الناتج من وجود طبقتين (بوضع افقي) من ذرات احادية الطور (-3,39). ويوضح الشكل (7) اعتماد طاقة الترتيب عند حالات الاستقرار على درجة الحرارة ، حيث احتوى الغشاء الرقيق على 40 طبقة من ذرات احادية الطور.



ان النتائج التي تم التوصل اليها قريبة الى نتائج الباحثين Roberto و Fabrico حيث تمكنوا من التحكم بالعوامل المؤثرة في نمو واستقرارية الاغشية الرقيقة ، فقد وجدوا منحنيات الاستقرارية للاغشية الرقيقة من خلال العلاقة بيانية بين طاقة الترتيب ودرجة الحرارة [17] وهي مماثلة الى العلاقة البيانية التي تم التوصل اليها في هذا البحث.

#### الاستنتاجات:

اظهرت نتائج محاكاة الحاسوب مراحل نمو وحجم التراكيب الدقيقة التي تميز معالم بنية واستقرار الغشاء الناشء من غرس الغشاء الرقيق المثالي AB ، بتراكيب احادية الذرة. التحولات (المراحل) الطورية للغشاء الرقيق اوجدت عدة ميكانيكيات تسبب في انهاء الحالة المرتبة التي كان فيها الغشاء عند بداية التجربة (عيوب نقاط الاستبدال Sustitution points defect ،

تجمع من ذرات من نوع واحد clusters ، تجمع ذرات ليس من نفس النوع segregations ،  
المايكرو دومين microdomains ، الدومين domains ، الترتيب اللاتوري antiphase  
order ، والحدود اللاتورية antiphase boundaries .  
ويتسبب ظهور تلك الميكانيكات في انخفاض تدريجي لمدى الترتيب البعيد Long –range  
order للغشاء الرقيق مع زيادة في نمو الترتيب قصير المدى shrot – range order .

### المراجع

- [1] Martin P. L. & Williams, ( Long range order in Ni<sub>3</sub>Mo based ternary alloys –I.Isothermal aging response), J. C., *Acta metall.*, **32**, P.1681-1993(1984).
- [2] Green H.S., Hurst C.A., (Order-disorder phenomena), Sydney: Interchange, p. 363 (1964).
- [3] Cahn U., ( Short- and long-range order of f.c.c. solid solutions), Phys. Status splidy B. 29, P. 529-533(1975).
- [4] Martin P. L. & Williams, ( Long range order in Ni<sub>3</sub>Mo based ternary alloys –I.Isothermal aging response-II.Coherent phase salvii), J. C., *Acta metall.*, 32 ,P.1695-1702(1984).
- [5] Cahn R. W., ( Thermal analysis of blends with polyamide 6 and  $\gamma$  – irradiated polyethylenes), *Acta metall.*, **8** ,P.261-272(1995).
- [6] Kenneth A. Jackson, (Computer modeling of atomic scale crystal growth processes), J. of crystal growth, V. 198-199, part 1, P. 1-9 (1999).
- [7] Hadi S. & Mehram G., ( A computer model for the growth of thin films in a structure zone model, Nanotechnology), V.15, No.3, P.675 (2003).
- [8] Jacques Kotze, (Introduction to Monto Carlo methods for an Ising model of a Ferromagnet), Cond.-mat. Stat-mech, 3Mar., P.1-27(2008).
- [9] Helmut M., (Diffusion in solids: fundamentals, methods, materials, diffusion – controlled processes) (Book), Springer Science & Business media (2007).
- [10] Zeman Dj. ,(Prentcebe teoria tverdogo tela.), Mer, P.472(1971).

- [11] Krivoglaz M. A., & Smirnov A. A., (Teoria uporiadochivaiushikhsia splavov), M. Phizmatgiz, P. 338 (1958).
- [12] Matveeva H. & M., Kozlov E. V.,( Uporiadochennine fazi v metallicheskih), M . Nauk, P. 248(1989).
- [13] Vaks V. G.,( Kineticheskie iavlenia v uporiadochvaiushikhsia splavakh, Sorovovskii obrazovatel'nyi zhurnal ), V.8, P. 105-115 (1997).
- [14] V.I. Veronova, A. Katsnelson, & P.S. Dazaev, ( Fiz. metall, metalloved),V. 24, P.171(1967).
- [15]Eduard V. and Antoni P.,(Vacancy-driven ordering in a two-dimensional binary alloy), Phys. Rev.,B 47, 2557 (1993).
- [16] F. Aquilante, P.Å. Malmqvist, T. B. Pedersen, A. Ghosh, &B. O Roos, (Cholesky decomposition based multiconfigurational second order perturbation theory (CD-CASPT2)),J. Chem. Theory Comput.,V. 4, P. 694-702( 2008).
- [17] Fabricio L Forgerini & Roberto Marchiori, (A brief review of mathematical models of thin film growth and surfaces),V.4, P.28871(2014).