



FINAL REPORT FOR SCIENTIFIC RESEARCH

IRRADIATION EFFECTS IN Fe-30Zn1
ALLOY DURING Ar ION IMPLANTATION

DR. MOHAMAD SOUKIEH
DEPARTMENT OF PHYSICS
DR. ALI AL-MOHAMAD
DEPARTMENT OF SCIENTIFIC SERVICES

AECS-PH-S/FRSR 77 .

DECEMBER 1993

ATOMIC ENERGY COMMISSION

P.O. BOX 6091 DAMASCUS SYRIA

We regret that some of the pages in the microfiche copy of this report may not be up to the proper legibility standards, even though the best possible copy was used for preparing the master fiche

579400286

تقرير نهائي عن بحث عليّ



التغيرات البنيوية - الطورية في سبيكة Fe-30%Ni
عند تشعيمها بجرعات أيونية عالية

الدكتور محمد سوقية
قسم الفيزياء
الدكتور علي محمد
قسم الخدمات العلمية

كانون الأول ١٩٩٢

هـ ط ذ س - ف - ع / ت ن ب ع ٧٧

سورية - دمشق - مر. ب. ٦٠٩١

مركز الطاقة الذرية

الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذرية

قسم الفيزياء
قسم الخدمات العلمية

التغيرات البنيوية - الطورية في سبيكة Fe-30Zn1
عند تشعيمها بجرعات أيونية عالية

الدكتور محمد سوقي
الدكتور علي المحمد

كانون الأول ١٩٩٢

ه ط ذ م - ف - ع/ت ن ب ع ٧٧

حقوق النشر

يسمح بالنسخ والنقل من هذه المادة العلمية للاستخدام الشخصي بشرط الإشارة الى المرجع ، أما
النسخ والنقل لأهداف تجارية فغير مسموح بهما الا بموافقة خطية مسبقة من ادارة الهيئة .

تعتبر الأفلام الرقيقة المعدنية المشعة بالأيونات السرعة أداة مناسبة لدراسة العمليات والتغيرات التي تطرأ على بنية المعادن في أثناء التشعيع وبالأنس عمليات تشكل المسام والقاعات الغازية أو ما يسمى بظاهرة التورم التشعيعي . لقد تم وضع النظم العامة لسلوك المواد في حقل التشعيع وفي أثناء التعيين، ولكن آلية حدوث هذه العمليات غير مفهومة تماماً "حتى الآن" ، لمقلاً لم يحدد بعد كون التورم التشعيعي في سبيكة الحديد الحاوية لتراكيز حوالي 30-35% من النيكل أقل ما يمكن ، أيضاً لا توجد معطيات أو دراسات حول إمكانية حدوث التحولات الطورية في سبيكة Fe-Ni في أثناء التشعيع ، وكحاولة لهم بعض جوانب ظاهرة التورم التشعيعي وسلوك سبيكة Fe-Ni في حقل التشعيع فقد تم القيام بدراسة التغيرات البلورية الطورية في أثناء التشعيع بأيونات الأيون .

حضرت أفلام سبيكة Fe-30%Ni بطريقة التبخير بحزمة الكترونية في الغلاء على قواعد من KBr, Be والسيراميك والكوارتز : أجهزت الأفلام للتشعيع بأيونات الأيون (40 KeV) جرع في المجال $10^{15}-10^{17}$ ions/cm² . أجريت هذه الدراسة باستخدام مجهر الكتروني نافذ (TEM) ومطيافية رزوفورد للتشتت العكسي (RBS) . كما تمت دراسة تغيرات المقاومة الكهربائية والقوة القهرية وثابت التفاحسي المغناطيسي للأفلام المشعة .

أظهرت دراسة التحليل العنصري انزياح ذروة طيف توزيع أيونات الأيون باتجاه السطح وانخفاض تركيزها عن مقدار الجرعة التشعيعية : وبملت نتائج الدراسة المجهرية أن تلدين الأفلام المشعة يمكن أن يحرص على شكل طور مرتب من النمط Fe₃Ni . قد يكون تشكل هذا الطور المرتب أحد الأسباب التي تكبح عمليات التورم التشعيعي . لقد لوحظ بأن تشكل القاعات الغازية يبدأ عند حدود البلورات في أثناء تلدين الأفلام المشعة عند الدرجة (400 °C) وتزداد أبعاد هذه القاعات مع زيادة درجة حرارة التلدين حتى حد معين ثم تتناقص عند درجات حرارة مرتفعة .

إن التطور الواسع لمجالات التكنولوجيا النووية والفضائية قد أعطى موضوع تفاعل الإشعاع مع المادة أهمية خاصة . إذ تعتبر مسألة توسيع الأبحاث النظرية والعملية بهدف الوصول (على أساس علمي) إلى مواد جديدة ذات قدرة كبيرة على تحمل التأثيرات الإشعاعية من أهم المسائل المتعلقة بتطوير العلوم التكنولوجية وخصوصاً الطاقة النووية .

لقد تبين أن إيجاد مواد جديدة وتنقيتها بشكل عام يمكن أن يتما فقط عن طريق معرفة القوانين العامة الناجمة لتغير بنية وخواص المواد في حقل الإشعاع ولكن النشاط الإشعاعي المكتسب للمواد المشعة في المفاعلات النووية وضمن التشعيع الطويل اللازم لإحداث التخریب يجعلان دراسة تأثير الأشعة النووية على بنية وخواص المواد مسألة صعبة وذلك لأنها تحتاج لآمن طويل ولأجهزة قياس خاصة ذات حماية من الإشعاع (مخابر حارة) . يمكن التغلب على هذه الصعوبة بالتشعيع بحزم أيونية مسرعة ، والذي يمكنه ليس فقط من إحداث درجة عالية من التخریب في بنية المواد خلال زمن قصير جداً (وذلك لأن سرعة تشكل الذرات المزاحة *displacement atoms* ، والتي تعتبر المخرب الرئيسي لبنية المواد في أثناء التشعيع ، تتم بـ $10^3 - 10^6$ مرة أسرع منها في حالة التشعيع بالأشعة النووية) بل أن التشعيع بالأيونات المسرعة بطاقات متوسطة $10-100\text{KeV}$ لايسبب حدوث تفاعلات نووية ولايكسب المواد المشعة نشاطاً إشعاعياً .

من ناحية أخرى أضحت الطرق الكيميائية الحرارية التقليدية في معالجة المواد بهدف تعديل بنيتها وخواصها ، قليلة الفائدة بالمقارنة مع طريقة التشعيع بالحزم الأيونية أو الغرز الأيونية *Ion Implantation* . تعتبر طريقة الغرز الأيونية من الطرق الحديثة والفعالة في تعديل الخواص الفيزيائية والميكانيكية للطبقات السطحية للمواد حيث يمكن بواسطة هذه الطريقة دوز أو إدخال أية كمية من الشوائب وبتركيز محددة بدقة وعلى أي عمق مطلوب وعند أي درجة حرارة في مادة ما ، مما يمكن من التغلب على الحواجز الترموديناميكية مثل الانحلال وغيرها [1-2] .

إن من أخطر الظواهر الناتجة عن تفاعل الإشعاع النووي مع المواد المركبة للمفاعلات النووية هي ظاهرة زيادة حجم المادة المشعة أو مايسمى بظاهرة التورم التشعيعي *Irradiation Swelling* . التي اكتشفت عام 1961 [3] . تعتبر هذه الظاهرة التخریبية معقدة وذلك نظراً لتأثرها بعوامل كثيرة يمكن تقسيمها إلى نوعين [4-7] :

- ١ - بنية المادة (التركيب الكيميائي - البنية الالكترونية - البنية الطورية ..) .
- ٢ - ثوابت التشعيع (الجرعة - رجة الحرارة ..) .

على الرغم من وجود الكثير من الأعمال النظرية والتجريبية المكرسة لفهم آلية تشكل هذه الظاهرة وأنه لا توجد حتى الآن نظرية متكاملة حول آلية حدوث هذه الظاهرة في مواد المفاعلات النووية .

يستخدم في بناء المفاعلات النووية وعلى نطاق واسع سبائك مكونة من الحديد مع تركيز حوالي $30\%Ni$ ، حيث تبين أن مثل هذا التركيز للنيكل يكسب السبيكة ممانعة كبيرة ضد تشكل الأورام التشعيعية ؛ ولم يحدد بعد سبب كون التورم اصغرياً " في مثل هذه السبائك في حين لا تملك مكونات هذه السبيكة هذه الميزة في الحالة النقية وهذا يعود لعدة عوامل مجهولة تعيق تشكل المسام ونموها [8-11] . كما أنه لا توجد أية دراسات أو معطيات حول امكانية حدوث التحولات الطورية في سبيكة الحديد والنيكل في أثناء تشعيعها . ان هدف هذا العمل هو دراسة التغيرات البنيوية والطورية في سبيكة $Fe-30\%Ni$ في أثناء تشعيعها بجرعات كبيرة من ايونات الأرجون ، وكذلك دراسة تأثير التلدين *annealing* على بنية وخواص الألياف المشعة بهدف فهم القوانين العامة والحاكمة لتفاعل الاشعاع مع المادة .

يتم في الأجسام الصلبة ، في أثناء تشعيعها ، تغيرات في بنيتها وخواصها نتيجة لتولد العيوب النقطية وتراكمها ، وبالتالي تظهر فيها اجهادات ميكانيكية وتشكل أطوار جديدة . ولذلك ونظراً لتعدد الظواهر والعمليات التي يمكن أن تحدث في أثناء التشعيع ويهدف محاولة الاحاطة بهذه العمليات مع الأخذ بعين الاعتبار الامكانيات المتاحة وجدنا أنه من الضروري دراسة النقاط التالية :

- ١ - دراسة تغير التركيب العنصري للألياف المشعة وتحديد الطيف النظري والتجريبي لايونات الأرجون في عمق السبيكة .
- ٢ - دراسة التغيرات الطورية في الألياف المشعة وتأثير التلدين عليها .
- ٣ - دراسة التغير في بعض الخواص الفيزيائية للألياف المشعة مثل تغير المقاومة الكهربائية - ثابت الإتحالي المغناطيسي - دورة البطء المغناطيسية .

٢ - المواد والطرائق والقياسات :

أ - المواد :

حضرت سبيكة Fe-30%Ni من صهر حديد (99,998) مع نيكيل (99,998) بنسبة 3:7 على الترتيب ، في خلاء من رتبة 10^{-4} Pa . ومن ثم حضرت العينات المطلوبة وهي على نوعين :

١ - صفائح معدنية :

عبارة عن رقائق معدنية تم الحصول عليها بطريقة السحب الميكانيكي حتى اللخانة $1mm$ ومن ثم أخضعت لعملية تلدين (معالجة حرارية) *annealing* عند الدرجة $800^{\circ}C$ لمدة ثلاث ساعات ضمن الخلاء من رتبة 10^{-1} Pa بغية إزالة الإجهادات الميكانيكية في الشبكة البلورية للسبيكة الناتجة عن عمليات التحضير بعد ذلك صقلت الصفائح بطريقة كهربائية للتخلص من طبقات الأكاسيد المعدنية المتشكلة على سطح الصفائح في أثناء المعالجة الحرارية . أستخدم للملئ وعاء تحليل كهربائي مع كهروليت مكون من المواد الكيميائية التالية :
 $6\% H_2SO_4$, $94\% H_3PO_4$, $100g CrO_3$, $I=0,33A/cm^2$, $T=60^{\circ}C$
وأخيراً غسلت العينات بالكحول اللقي والأسيتون وحفظت في أوعية مناسبة .

٢ - أفلام رقيقة :

تم تحضير الأفلام الرقيقة بتبخير السبيكة Fe-30%Ni في جهاز تبخير المعادن بواسطة حزمة الكترونية $12KeV$ في خلاء من رتبة 10^{-4} Pa ومن ثم وُضع بخار السبيكة بمعدل $4-6 nm/min$ على أنواع مختلفة من الركائز :
بلورات $Kel(10 \times 10mm)$ - سراميك زجاجي $(10 \times 3 \times 3mm)$ - صفائح مصقولة من $Be(2 \times 2mm)$ وأقراص كوارتزبة (القطر $10mm$) مسخنة إلى الدرجة $200^{\circ}C$.
بلغت سخانة الأفلام المحضرة حوالي $60nm$.

ب - الطرائق والقياسات :

أستخدمت في هذا البحث مجموعة من الطرق الفيزيائية لدراسة التغيرات في بنية المواد وخواصها . نورد فيما يلي الطرق المستخدمة مع فكرة موجزة عن كل منها :

1 - تشعيع العينات :

تم تشعيع العينات في قسم فيزياء الحالة الصلبة - جامعة بيلاروسيا - باستخدام مسرع سيكلتروني (FLY-40) بأيونات الأيونات ذات الطاقة 40KeV وبجرع في المجال $10^{15} - 10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$. بلغت كثافة التيار الأيوني $2 \frac{\mu\text{A}}{\text{cm}^2}$ في خلاه من رتبة 10^{-4}Pa . عند درجة حرارة الغرفة . اختبرت طاقة أيونات الأيونات 40KeV لأن طول المسار الحر الوسطي النظري لأيونات Ar^{+} في سبيكة Fe-30%Ni ($R_p \# 17 \pm 9 \text{nm}$) [12] عند هذه الطاقة مساو لأقل من نصف سمك الأفلام . وبذلك نضمن بمس أكبر تركيز ممكن من أيونات الأيونات وبالتالي أحداث تركيز أعظمي من العيوب البنيوية في الأفلام المشعة . يمكن تقدير الزمن اللازم لتشعيع الأيونات السرعة ومعدل إزاحة ذرات المادة (dpa/sec) المشعة باستخدام العلاقتين التاليتين [12] :

$$D = \frac{j \cdot t}{e} \quad (1)$$

$$\frac{dpa}{sec} = \frac{0.4 \cdot Nu \cdot D}{\sqrt{2\pi} \cdot E_d \cdot R_p \cdot N \cdot t}$$

حيث : D - الجرعة التشعيعية

j - كثافة التيار الأيوني

t - زمن التشعيع

e - شحنة الإلكترون

Nu - الطاقة المتحررة في خلال التصادمات المرنة

E_d - طاقة إزاحة ذرات المادة

R_p - جدر متوسط مربعات مساق المسار الحر للأيون

N - كثافة المادة

بمخلص الجدول [1] الأزمنة المستخدمة لتشعيع سبيكة Fe-30%Ni بأيونات

الأيون ، وقد شععت العينات بالجرعات التالية :

$10^{15} - 5 \cdot 10^{16} - 10^{16} - 5 \cdot 10^{15} - 10^{15} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ وهذا يوافق لمعدل إزاحة للذرات حوالي : $2 \cdot 10^{-6} \frac{dpa}{sec}$

الجدول [1] الأزمنة المستخدمة لتشعيع سبيكة Fe-30%Ni بأيونات الأيون .

| | | | | | |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------|
| $D (\frac{\text{ions}}{\text{cm}^2})$ | 10^{15} | $5 \cdot 10^{15}$ | 10^{16} | $5 \cdot 10^{16}$ | 10^{17} |
| $t \pm t (sec)$ | 80 | 400 | 800 | 4000 | 8000 |

٢ - مطيافية رزفورد للتشتت العكسي : (Rutherford backscattering)

تعتبر مطيافية رزفورد للتشتت العكسي (RBS) من أهم الطرق الفيزيائية - النووية في دراسة التركيب العنصري للمواد . يعتمد مبدأ هذه الطريقة على فكرة التصادم المرين بين ايون (M_1, E_0, v_0) وذرة حرة (M_2) [13] . كما هو معلوم من نظرية التصادمات المرنة فان الايون سوف يغير من اتجاه حركته بزاوية θ بعد التصادم وتصبح سرعته v_1 بينما تترد الذرة الحرة بسرعة v_2 وبزاوية ϕ كما هو مبين بالشكل (1) .

نحصل بتطبيق قوانين انحفاظ الطاقة والاندفاع على العلاقات التالية :

$$\begin{aligned} M_1 v_0^2 &= M_1 v_1^2 + M_2 v_2^2 \\ M_1 v_0 &= M_1 v_1 \cos \theta + M_2 v_2 \cos \phi \quad (2) \\ M_1 v_1 \sin \theta - M_2 v_2 \sin \phi &= 0 \end{aligned}$$

يمكن من حل جملة المعادلات (2) ايجاد نسبة سرعتي الايون قبل وبعد التصادم K_m :

$$K_m = \frac{v_1}{v_0} = \left(\frac{M_1 \cos \theta + \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta}}{M_1 + M_2} \right)^2 \quad (3)$$

من أجل $M_1 < M_2$

إن النسبة K_m هي أيضاً نسبة طاقة الايون بعد التصادم إلى طاقته قبل التصادم وتسمى بالمعامل الحركي (Kinematic Factor) :

$$E_1 = K_m \cdot E_0 \quad (4)$$

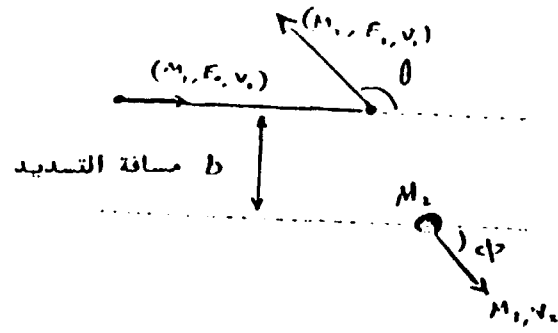
حيث : E_0 طاقة الايون قبل التصادم .

E_1 طاقة الايون بعد التشتت .

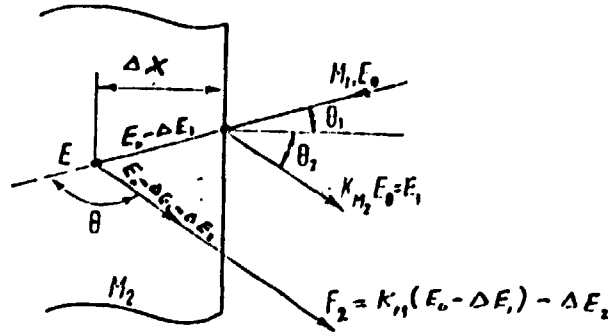
وتعتبر هذه النسبة عن مقدار الطاقة الذي يحتفظ به الايون بعد التصادم .

تنتشت حزمة الايونات عن سطح المادة كما تنتشت أيضاً عن الطبقات الداخلية ، لذلك فان الايون الذي يخترق شريحة من المادة سماكتها ΔX سيفقد طاقة اضافية ΔE_1 عند دخوله اليها و ΔE_2 عند خروجه منها ، انظر الشكل (2) . لذلك فان الفرق الطاقي بين طاقة الايونات المنتشرة عن الذرات السطحية وعن الذرات الواقعة على عمق ΔX هو ΔE :

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_1 - E_2 \\ \Delta E &= K_m \cdot \Delta E_1 - \Delta E_2 \quad (5) \end{aligned}$$



الشكل (1) مخطط التصادم المرين بين ذرة M_1 ذات طاقة E_0 وذرة حرة M_2 .



الشكل (2) مخطط التشتت العكسي للأيونات M_1^+ عن سطح العييلة وعن شريحة سُمكها ΔX .

يمكن التعبير عن الفرق الطاقى ΔE في المعادلة (5) بالشكل التالي :

$$\Delta E = \left(\frac{K_m}{\cos\theta_1} \frac{dE}{dx} \right)_{E_0} + \frac{1}{\cos\theta_2} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{K_m E_0} \Delta x \quad (6)$$

للسهولة ندخل مفهوم المقطع العرضي للكبح *Stopping cross section* وهو عبارة عن مفهوم فيزيائي مجرد يعبر عن مقدار الشيع في طاقة الايونات محسوباً بالنسبة لذرة واحدة من المادة :

$$[\bar{E}] = \frac{K_m}{\cos\theta_1} \bar{E}(E_0) + \frac{1}{\cos\theta_2} \bar{E}(K_m E_0) \quad (7)$$

حيث : $\bar{E}(E_0)$ المقطع العرضي للكبح بايونات الهليوم ذات الطاقة E_0
 $\bar{E}(K_m E_0)$ المقطع العرضي للكبح بايونات الهليوم ذات الطاقة $K_m E_0$
 أو بعبارة أخرى عن قدرة كل ذرة من ذرات المادة على كبح الايونات المسرعة
 ويمكن حساب هذا المقطع عددياً باستخدام العلاقة التالية :

$$\bar{E}(E) = \sum_{i=0}^{i=5} \lambda_i \cdot E^i \quad (8)$$

حيث : E طاقة حزمة الايونات المسرعة

λ_i ثوابت تتعلق بنوع الذرة المشتقة للايونات المسرعة .

وبتبدال العلاقة (7) في العلاقة (6) يأخذ الفرق الطاقى الشكل التالي :

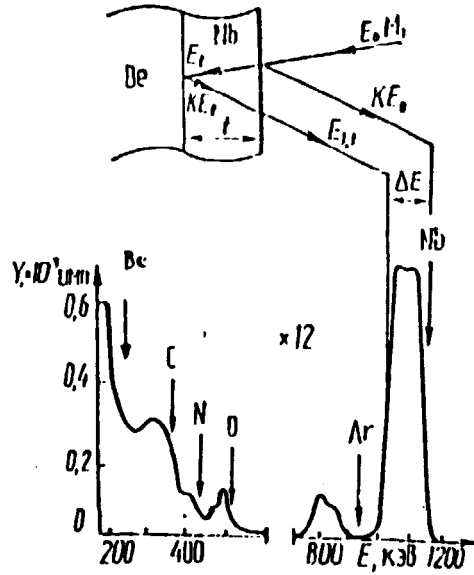
$$\Delta E = [\bar{E}] \cdot N \cdot \Delta x \quad (9)$$

تسمح هذه العلاقة بالتحويل من المقياس الطاقى ΔE إلى الطولي Δx . يمكن التعبير عن وحدات الطول بالمتر أو بوحدات $N \cdot \Delta x$ ، وتعتبر الواحدة الأخيرة أكثر ملاءمة عند دراسة طيف توزع الشواثب في المواد نظراً لعدم معرفة قيمة الكثافة الذرية N للمواد بعد التشيع .

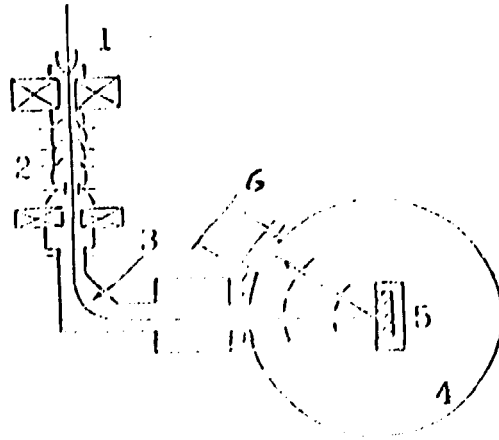
يبين الشكل (3) مخططاً "توضيحياً" لطيف *RNS* لفيلم *Nb* يحوي الشواثب

التالية : O ، N ، C وموضع على دكيزة من B_0 .

تكون المادة المدروسة عادة مكونة من أكثر من عنصر . وبالتالي لحساب قيمة المقطع العرضي للكبح يلجأ إلى قاعدة براغ :



الشكل (3) مخطط توضيحي لتليف RBS لعيلم Nb مرسب على ركيزة من Be



الشكل (4) مخطط التجهيزات المستخدمة في مطيافية رزرفورد للتشتت العكسي

- 1 - منبع ايوني .
- 2 - مجموعة التوجيه والتسريع .
- 3 - مفناطيس قوي للصل وصل وفقاً للكتلة .
- 4 - حجرة التشتت العكسي .
- 5 - حامل العينة مع مقياس للزوايا .
- 6 - كاشف الحائل السطحي .

$$[\bar{\epsilon}] = \frac{1}{N} \frac{dE}{dx} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_t} \epsilon_i \quad (10)$$

حيث : C_i تركيز ذرات العنصر i في شريحة سمكها dx .
 C_t التركيز الكلي لذرات العناصر المكونة للمادة .
 ϵ_i المقطع العرضي للكبح محسوباً بالنسبة لواحدة الذرات من العنصر .
 عندئذ يأخذ الفرق الطاقي الصيغة العامة التالية :

$$\Delta E = \left[\frac{K_m}{\cos \theta_1} \sum_i \epsilon_i (E_0) \frac{\bar{C}_i}{C_t} + \frac{1}{\cos \theta_2} \sum_i \epsilon_i (K_m E_0) \frac{\bar{C}_i}{C_t} \right] N \cdot \Delta X \quad (11)$$

حيث : \bar{C}_i متوسط تركيز ذرات العنصر i في شريحة سمكها ΔX .
 وهكذا فإن تحديد تركيز عنصر ما غير ممكن بشكل مطلق وإنما بشكل نسبي أي بالمقارنة مع تركيز العنصر الأساسي (أو مجموع العناصر المكونة للمادة) . كما تمكن العلاقة (11) من تقدير كثافة الأفلام المدروسة وذلك عند تطبيقها على الدورة العائدة للعنصر الأساسي من طيف RBS .
 من ناحية أخرى فإن لكل عنصر في المادة قمة في طيف RBS ناتجة عن جمع كل الاشارات الصادرة عنه ويمكن تقديرها من العلاقة التالية :

$$A_i = \sum_k H_i^k = \sum_k \sigma_i(E_k) \cdot \eta \cdot \Omega \cdot N_i \cdot \Delta X_i \quad (12)$$

حيث : H_i^k شدة (ارتفاع) الاشارة الصادرة عن العنصر i في القناة k .
 η العدد الكلي للايونات الواردة إلى القناة k خلال فترة عد الطيف
 $\sigma_i(E_k)$ المقطع العرضي لتشتت حزمة الايونات ذات الطاقة E_k
 Ω الزاوية المجسمة للكاشف
 ΔX_i العرض الخطي للقناة الموائمة للعرض الطاقي ΔE_i

ويمكن اعادة كتابة العلاقة (12) بالنسبة للمكون الأساسي للمادة :

$$H_I = \sigma_I(E_k) \cdot \eta \cdot \Omega \cdot N_I \cdot \Delta X_I \quad (13)$$

من العلاقتين (12) و (13) يمكن الوصول إلى العبارة التي تسمح بحساب التركيز النسبي للعنصر i في المادة I :

$$\frac{N_i}{N_I} = \frac{\sigma_I(E_k)}{\sigma_i(E_k)} \cdot \frac{H_i}{H_I} \cdot \frac{[\epsilon]_I^I}{[\epsilon]_i^I} \quad (14)$$

يستخدم عادة في مطيافية RBS حزم ايونية وحيدة الطاقة (1-2 MeV) تصدر عن مسرع فاندغراف .

يوضح الشكل (4) مخططاً للتجهيزات المستخدمة في مطيافية RBS ، حيث تمرر الحزم الايونية من خلال مرشح طاقي بهدف الحصول على حزمة ايونية وحيدة الطاقة ومن ثم تسدد على سطح المادة المدروسة بزوايا صغيرة مع الناظم (10^{-5} - 10^{-6}) وتوضع العينة المدروسة في حجرة مخللة من الهواء (10^{-8} torr) ويسجل الطيف الطاقي للجسيمات المنتشرة عن سطح العينة بواسطة كاشف الحائل السطحي ومن ثم تنتقل الاشارات إلى محلل متعدد الأقدية حيث تتراكم لتشكيل طيف رزفورد للثنت العكسي .

٢ - حساب طيف توزع الشوائب نظرياً :

لايجاد الطيف النظري لتوزع الشوائب الايونية المدروسة في مادة نفرض أنه لدينا حزمة ايونية تسقط ناظماً على سطح طبقة من مادة ما . فمن المعروف أن الشوائب المدروسة سوف تعاني من تصادمات مرنة وغير مرنة .
يمكن ايجاد طيف التوزع النظري لأي شائبة مدروسة في مادة ما من العلاقة التالية :

$$n(x) = \frac{10^7 \cdot D \cdot F(x)}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \quad (15)$$

$$x = X \cdot \Delta R_p + R_p$$

حيث : $n(x)$ طيف توزع الشوائب المدروسة في العمق (x)

$F(x)$ تابع توزع بيرسون

x العمق

R_p المسار الحر الوسطي للايون في المادة

X معاملات .

١ - المجهر الإلكتروني النافذ (TEM) :

يستخدم المجهر الإلكتروني النافذ لدراسة البنية الدقيقة للمواد الشفافة بالنسبة لحزمته الإلكترونية . ويمكن من الحصول على تكبير لبنية المادة يصل حتى $100.000-150.000$ مرة ، كما يتيح إجراء دراسة للأطوار البلورية وتحولاتها ... الخ [١٤] .

كان المجهر المستخدم ياباني الصنع موديل $JEM-100CX$ وموجونا "١" في مختبر الفيزيولوجيا التابع لأكاديمية العلوم البيلاروسية .

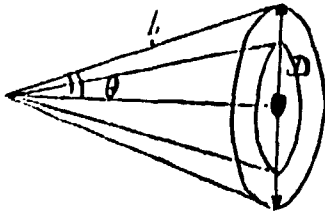
تم توضيح الأفلام الرقيقة على شبكات نحاسية عيارية ($\phi=3mm$) وذلك بعد حل الركيزة في الماء المقطر . ومن ثم تجفف الشبكات النحاسية وتدخل في قناة خاصة في عمود المجهر الإلكتروني وتثبت بشكل عمودي مع الحزمة الإلكترونية للمجهر .

تُسرَّع الحزمة الإلكترونية عادة حتى $100kv$ مخترقة الفيلم ويتم تصوير بنية المادة بعد تكبيرها بشكل مناسب (وذلك بتشغيل عدسات مغناطيسية مكبرة) . وإجراء التحليل الطوري للأفلام يتم أخذ صور لحلقات الانعراج عن قطاعات بنهوية معينة من الفيلم ومن ثم تعابير الحلقات بالطريقة التالية :

يمكن استخدام العلاقة (16) معايرة حلقات الانعراج وتحليلها باستخدام جداول

15 ASTM

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d} = \frac{D}{2L} \quad , \quad \lambda = d \cdot D = \lambda \cdot L = \text{Const.} \quad (16)$$



حيث : θ زاوية الانعراج .

λ طول موجة الحزمة المستخدمة .

d المسافة بين المستويات البلورية .

D قطر حلقة الانعراج .

L بعد فيلم التصوير عن العينة في المجهر الإلكتروني

A ثابتة معايرة حلقات الانعراج .

تحدد الثابتة A من معايرة (تحليل) حلقات الانعراج لمادة عيارية (أخذ في حالتنا فيلم رقيق من الألمنيوم) . بلغت قيمة الثابتة $A=21,84$. ونحصل على المسافات بين المستويات البلورية المعينة من تقسيم الثابتة A على كل قطر من أنظار الحلقات في صورة حلقات الانعراج . تقارن هذه القيم للمسافات بين المستويات البلورية مع الجداول العيارية المتوفرة في جداول ASTM فنحصل على

معلومات كاملة عن الطور المدروس .

تم تحديد نسبة التورم في الأفلام المشعة باستخدام العلاقة التالية :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^n n_v \cdot d_v^3 \quad (17)$$

حيث : $\frac{\Delta V}{V}$ النسبة المئوية للتورم .

n_v تركيز الفقاعات الغازية في الجسم

d_v نصف قطر الفقاعات الغازية .

5 - قياس المقاومة الكهربائية والخواص المغناطيسية للأفلام :

تم قياس المقاومة الكهربائية للأفلام الرقيقة باستخدام طريقة النقاط الأربع حيث يتم تمرير تيار ثابت بين نقطتين على طرفي الفيلم ويقاس فرق الكمون بين النقطتين الأخرى . استخدم لقياس فرق الكمون والتيار جهاز كتيلى الرقعي *kethely* . أجري قياس المقاومة الكهربائية للأفلام المشعة وغير المشعة عند درجة حرارة الغرفة وبلغت دقة القياس 5% .

تم تحديد دورة البطاء المغناطيسية (*Hy stresis loop*) وقياس ثابت الاتحادي المغناطيسي *constant magnetic anisotropy* للأفلام سبيكة *Fe - 30%Ni* باستخدام مقياس للخواص المغناطيسية *Magnetometer* والموجود في معهد فيزياء الحالة الصلبة وأنصاف النواقل التابع لأكاديمية العلوم البيلاروسية .

وتعرف دورة البطاء المغناطيسي بأنها تابعة تمنظ مادة (تابعة لعاكسة) لحقل مغناطيسي خارجي متغير (بالقيمة والاشارة) وهي صفة مميزة للمواد الحديدية . يعمل الحقل المغناطيسي الخارجي على تدوير اللطاعات المغناطيسية بحيث تصبح مسابرة له وذلك تبعاً لشدة . ولدورة البطاء عدة شوابت أهمها القوة القهرية *Hc* وعدة تمنظ الاشباع . تتأثر دورة البطاء المغناطيسي ببنية المادة وتركيبها الكيميائي وحبوبها ودرجة الحرارة . . . الخ .

ينتج التناحي المغناطيسي من جراء التفاعل بين الذرات الحاملة لمغناطيسية ، أي بسبب التفاعل بين الذرات المتجاورة والكتروناتها . ويتجلى في بلورات المواد الحديدية بوجود محور للتمنظ السهل يكون موازياً لشعاع التمنظ الذاتي I_0 . يؤدي تطبيق حقل مغناطيسي خارجي إلى دوران الشعاع I_0

ويُلمز لذلك عمل يسمى الطاقة الحرة H تتناسب مع ثابت الاتساح المغناطيسي
تعتمد قيمة وإشارة هذا الثابت على بنية البلورة والحرارة ... الخ [16].

أ - دراسة التركيب العنصري لأفلام سبيكة Fe-30%Ni :

تمت دراسة التركيب العنصري لسبيكة Fe-30%Ni المشعة بايونات الأرتغون وتحديد ملحي توزع الشوائب ضمنها باستخدام مطيافية رزرفورد للتشتت العكسي أجريت الدراسة بتسليط حزمة من أشعة He ذات الطاقة 2MeV على سطح الأفلام بزاوية ورود مقدارها 10° درجات .

نورد في الشكل (5) طيف رزرفورد للتشتت العكسي لأفلام سبيكة Fe-30%Ni المشعة بايونات Ar^+ .

يلزم للقراءة الأولية لطيف رزرفورد للتشتت العكسي تحديد القناة الصفريية N_0 لكل عنصر من العناصر المكونة للمادة المدروسة ويمكن ذلك باستخدام العلاقة التالية :

$$N_0 = \frac{K_m \cdot F_0}{E} + \Delta N_0 \quad (18)$$

حيث : ΔN_0 انزياح بداية الطيف عن القناة الصفريية .

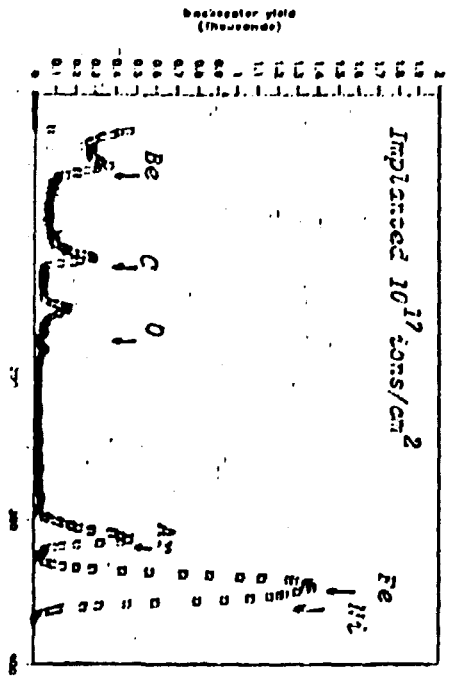
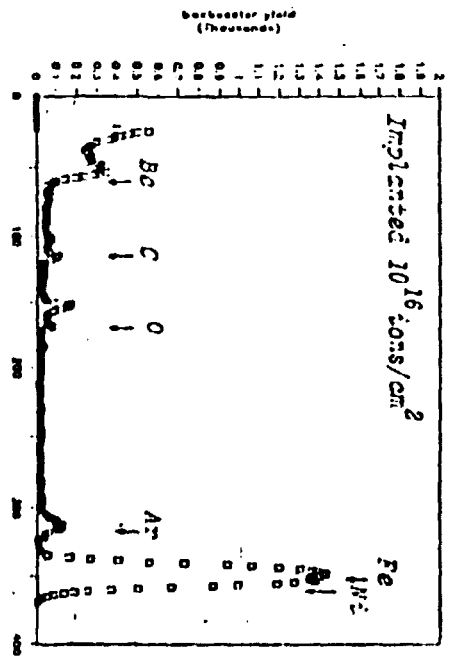
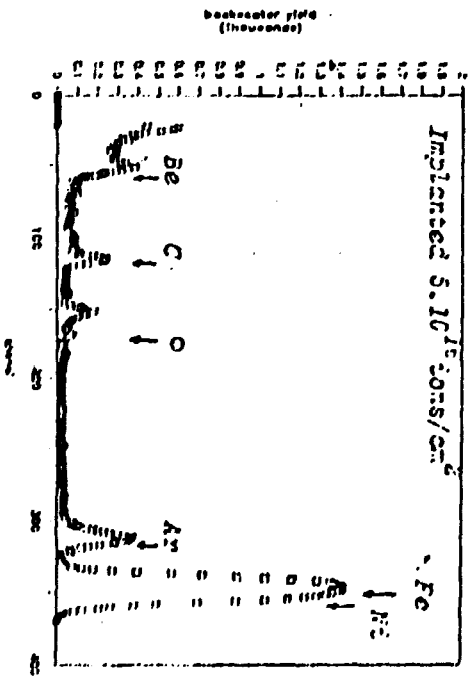
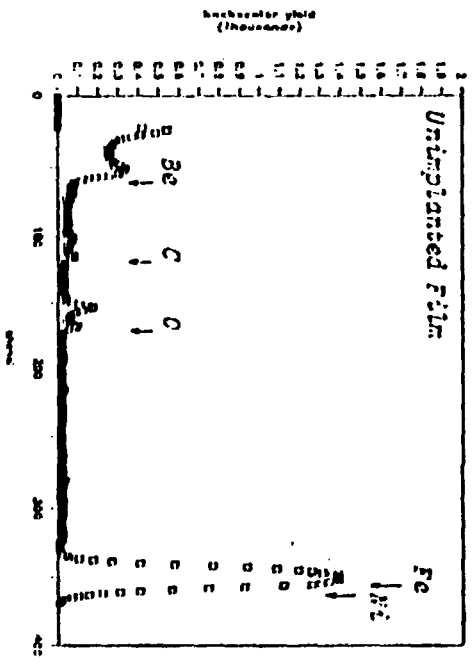
يبين الجدول (I) القناة الصفريية لكل مكون من العناصر المكونة للسبيكة .

الجدول (I) قيم المعامل الحركي (K_m) والقناة الصفريية N_0 لكل مكون من مكونات السبيكة .

| | Fe | Ni | Ar | O | C | Be |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| K_m | 0.7520 | 0.7626 | 0.6409 | 0.3625 | 0.2526 | 0.1502 |
| N_0 | 357 | 362 | 317 | 170 | 118 | 70 |

كما هو واضح من الشكل (5) فإن القمة الناتجة عن ذرات الركيزة (Be) تبدأ اعتباراً من القناة رقم 70 وشم تليها اشارات صادرة عن تشتت حزمة الهليوم عن ذرات (C,O) علماً بأن هذه الشوائب تدخل في تركيب الفيلم في أثناء عمليات التحضير والتشبيع . تصدر عن ذرات الكربون المتوضعة على الحدود بين الفيلم والركيزة اشارات اعتباراً من القناة 110 . أما ذرات

المجلد (5) طيف رزوفورد للمنتج الكمي للألام سبيكة Fe-30%Ni بالعمق بايريات الأرفون.



الكربون المتوضعة على سطح الفيلم فتعطي ذروة اعتباراً من القناة 118 في حين أن نرات الأكسجين المتراكمة على السطح الداخلي للفيلم تعطي اشارات اعتباراً من القناة 161 . أما اشارات ذرات الأكسجين الموجودة على السطح فتبدأ اعتباراً من القناة 170 .

يلاحظ أن الذروة العائدة لذرات Fe و Ni هي الأكبر من حيث الشدة وتبدو على شكل ذروة عملاقة مزدوجة ممتدة على حوالي 40 قناة اعتباراً من القناة 330 وحتى القناة 370 . في حين تبدأ الذروة العائدة لذرات الأرجون عند القناة 317 . وتظهر في أفلام الشبكة المشعة وتناسب مساحتها طرداً مع زيادة مقدار الجرعة كما يوضح الشكل (5) . وتكن الخطوة الثانية في تحليل طيف رزرفورد للتشتت العكسي في تحديد قيمة معامل المقطع العرضي للكبح (E) والتي تتحدد بالعلاقة (8) .

نورد في الجدول (II) قيم الثوابت Λ للعناصر الداخلة في تركيب شبكة $Fe-Ni$ المشعة [13] .

الجدول (II) قيم الثوابت Λ_i لمكونات الشبكة $Fe-30\%Ni$

| العنصر | Λ_i | Λ_0 | Λ_1 | Λ_2 | Λ_3 | Λ_4 | Λ_5 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Fe | 44.36 | 137.5 | -143.1 | 61.07 | -12.03 | 0.9011 | |
| Ni | 41.59 | 97.79 | -91.19 | 37.32 | -7.482 | 0.5893 | |
| Ar | 48.33 | 150.7 | -186.6 | 88.28 | -18.81 | 1.502 | |
| O | 25.9 | 73.3 | -80.5 | 35.17 | -7.1 | 0.5462 | |
| C | 15.95 | 69.35 | -76.59 | 33.79 | -6.859 | 0.5991 | |

وبالتالي يمكن بسهولة حساب المقطع العرضي للكبح $[E]$ لمكونات الشبكة عند دراستها بايونات He^+ ذات الطاقة $2MeV$ (من أجل $\theta = \theta = 10^0$) باستخدام العلاقة (7) .

ويوضح الجدول (III) نتائج حساب $\epsilon(E_0)$, $\epsilon(K_m E)$ لكل مكون من مكونات الشبكة المشعة .

الجدول (III) . قيم معامل المقطع العرضي لكبح الذرات المكونة للشبكة المشعة لجسيمات الاشعاع (He^+)

| العنصر | $\epsilon(E_0) 10^{-20} \frac{MeV \cdot cm^2}{atom}$ | $\epsilon(K_m E) 10^{-20} \frac{MeV \cdot cm^2}{atom}$ | $[\bar{\epsilon}] 10^{-20} \frac{MeV \cdot cm^2}{atom}$ |
|--------|--|--|---|
| Fe | 7,108 | 8,061 | 13,634 |
| Ni | 7,012 | 7,540 | 13,086 |
| Ar | 5,667 | 7,525 | 11,329 |
| O | 3,554 | 4,820 | 6,211 |
| C | 2,804 | 3,073 | 3,84 |

عندئذ يمكن بسهولة حساب كثافة الأفلام الشامدة وذلك باستخدام المعادلة (10) ومعطيات الجدول (III) .

يبين الحساب أن كثافة الأفلام الرقيقة الشامدة (قبل التشعيع) هي :

$$N \cdot t = \frac{\Delta E}{[\bar{\epsilon}]} = \frac{18 \cdot 4,28 \cdot 10^{-3}}{13,4693 \cdot 10^{-20}} = 5,719 \cdot 10^{17} \frac{atom}{cm^2}$$

$$t = \frac{N \cdot t}{N} = \frac{5,719 \cdot 10^{17}}{8,692 \cdot 10^{22}} \approx 65 \text{ nm}$$

أي أن الكثافة الحقيقية للأفلام المحضرة هي حوالي 65 nm وهذه القيمة قريبة جداً من القيمة المطلوبة 60 nm وتعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق دقة في تحديد سماكة الأفلام الرقيقة حيث تكون الدقة من رتبة ± 3 nm .

ويمكن إجراء التحليل العنصري الكمي للذرات الشبكة وتدقيق قيم الجرعة التشعيعية من مقارنة المساحة تحت ذروة المكون الأساسي للشبكة في طيف RBS وذلك باستخدام العلاقة (14) .

الجدول (IV) تغير التركيب العنصري لسبيكة Fe-30%Ni المشعة بجرع مختلفة من ايونات Ar*

| المرحلة العنصر | | الشامد | $5 \cdot 10^{15}$ | 10^{16} | $5 \cdot 10^{16}$ | 10^{17} |
|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| FeNi | مجال القنوتات | 330 - 370 | 323 - 370 | 323 - 370 | 323 - 370 | 322 - 370 |
| | المساحة تحت المنطقة | 126081 | 136885 | 129944 | 138404 | 137194 |
| | N.t | $5,72 \cdot 10^{17}$ | $5,87 \cdot 10^{17}$ | $6,03 \cdot 10^{17}$ | $6,19 \cdot 10^{17}$ | $6,35 \cdot 10^{17}$ |
| C _I | مجال القنوتات | 111 - 122 | 109 - 122 | 110 - 121 | 108 - 121 | 103 - 121 |
| | المساحة تحت المنطقة | 651 | 1972 | 797 | 1909 | 2855 |
| | النسبة المئوية % | 0,5% | 1,4% | 0,6% | 1,4% | 2,0% |
| | N.t | $2,95 \cdot 10^{15}$ | $8,59 \cdot 10^{15}$ | $3,5 \cdot 10^{15}$ | $8,61 \cdot 10^{15}$ | $1,31 \cdot 10^{16}$ |
| C _{II} | مجال القنوتات | 95 - 111 | 96 - 109 | 96 - 110 | 96 - 108 | 95 - 103 |
| | المساحة تحت المنطقة | 860 | 1280 | 662 | 999 | 802 |
| | النسبة المئوية % | 0,7% | 0,9% | 0,5% | 0,7% | 0,5% |
| | N.t | $4,12 \cdot 10^{15}$ | $5,5 \cdot 10^{16}$ | $2,9 \cdot 10^{15}$ | $4,63 \cdot 10^{15}$ | $3,4 \cdot 10^{15}$ |
| O _I | مجال القنوتات | 162 - 175 | 162 - 172 | 162 - 172 | 163 - 171 | 163 - 171 |
| | المساحة تحت المنطقة | 727 | 819 | 505 | 482 | 397 |
| | النسبة المئوية % | 0,6% | 0,6% | 0,7% | 0,3% | 0,3% |
| | N.t | $3,54 \cdot 10^{15}$ | $3,68 \cdot 10^{16}$ | $2,33 \cdot 10^{15}$ | $1,99 \cdot 10^{15}$ | $307 \cdot 10^{15}$ |
| O _{II} | مجال القنوتات | 148 - 162 | 147 - 160 | 147 - 159 | 145 - 163 | 143 - 163 |
| | المساحة تحت المنطقة | 1416 | 1680 | 1108 | 1735 | 1901 |
| | النسبة المئوية % | 1,1% | 1,2% | 0,8% | 1,3% | 1,4% |
| | N.t | $0,48 \cdot 10^{15}$ | $7,36 \cdot 10^{15}$ | $4,66 \cdot 10^{15}$ | $7,94 \cdot 10^{15}$ | $8,95 \cdot 10^{15}$ |
| Ar | مجال القنوتات | 0 | 310 - 322 | 302 - 324 | 297 - 323 | 297 - 322 |
| | المساحة تحت المنطقة | 0 | 306 | 1527 | 4450 | 5644 |
| | النسبة المئوية % | 0% | # 0% | 1,5% | 6,5% | 8% |
| | N.t | 0 | | $9,28 \cdot 10^{15}$ | $4,03 \cdot 10^{16}$ | $5,08 \cdot 10^{16}$ |

حيث : C_I , O_I - تركيز ذرات الكربون والاكسجين على سطح الفلم .
C_{II} , O_{II} - تركيز ذرات الكربون والاكسجين على للسطح الفاصل
بين الفيليم والركيزة .

يقدر الارتباب في حساب تراكيز الشوائب بحوالى 0.4%

يبين الجدول (IV) تغير التركيب العنصري لسبيكة Fe-30%Ni المشعة بجرع مختلفة من ايونات الأرجون Ar^+ .

يلاحظ من الجدول (IV) أن تركيز كل من ذرات الكربون مع الأكسجين الواقعة على السطح الفاصل بين الفيلم والركيزة ثابت تقريباً مع زيادة الجرعة في حين يتغير تركيز هذه الذرات على السطح مع زيادة الجرعة وذلك بسبب غمر (دخول) هذه الشوائب الغازية المدمجة على سطح الأفلام في أثناء التشعيع . كما يلاحظ زيادة تركيز ايونات (ذرات) الأرجون المغروزة في عمق الأفلام المشعة مع زيادة الجرعة ولكن لا تتناسب هذه الزيادة بشكل خطي مع مقادير الجرعة . انظر الجدول (V) .

الجدول (V) تركيز ذرات الأرجون المتبقية في الفيلم بعد التشعيع

| | | | |
|--|----------------------|-------------------|---------------------|
| الجرعة $\frac{ions}{cm^2}$ | 10^{16} | $5 \cdot 10^{16}$ | 10^{17} |
| تركيز الأرجون $\frac{atoms}{cm^2}$ | $9,28 \cdot 10^{15}$ | $4 \cdot 10^{16}$ | $5,1 \cdot 10^{16}$ |
| النسبة المئوية لذرات الأرجون المتبقية في الأفلام % | 93% | 80% | 51% |

يبين الشكل (6) منحنى توزيع الأرجون في عمق أفلام Fe-30%Ni المشعة يلاحظ من الشكل (6) انزياح ذروة طيف توزيع ايونات الأرجون في عمق السبيكة المشعة بجرعة $5 \cdot 10^{16} ions/cm^2$ نحو سطحها وذلك بالمقارنة مع طيف التوزيع المحسوب نظرياً باستخدام العلاقة (15) ، انظر الجدول (VI) . كما يلاحظ أيضاً انخفاضاً في تركيز الأرجون عند هذه الجرعة ، انظر الجدول (V) .

عادة تعزى ظاهرة انزياح ذروة طيف توزيع الشوائب المغروزة وبالتالي انخفاض تركيزها بالمقارنة مع مقدار الجرعة التشعيعية إلى ظاهرة الاحت السطحي Ion Sputtering والتي ترافق التشعيع بالايونات الغاملة كيميائياً ، ولكن في حالتنا فإن الصورة أكثر تعقيداً ، حيث تبقى ذروة الحديد والنيكل في طيف (RBS) بدون أي تغيير ملحوظ في أبعادها من أجل كل الجرعة التشعيعية

الجدول (٧٦) قيم التراكيز النظرية لأيونات الأرجون Ar^+ في عمق سبيكة Fe-30%Ni المشعة بأيونات الأرجون ($R_p=9,3nm$, $R_p=16,8nm$) [١٢]

| x (nm) | $F(x)$ | $n(x)$ ions/cm ³ |
|----------|----------------------|-----------------------------|
| 7,5 | $5,48 \cdot 10^{-1}$ | $2,35 \cdot 10^{21}$ |
| 11,22 | $2,78 \cdot 10^{-1}$ | $3,33 \cdot 10^{21}$ |
| 13,08 | $8,82 \cdot 10^{-1}$ | $3,78 \cdot 10^{21}$ |
| 14,84 | $9,04 \cdot 10^{-1}$ | $4,13 \cdot 10^{21}$ |
| 15,87 | $9,93 \cdot 10^{-1}$ | $4,56 \cdot 10^{21}$ |
| 16,8 | 1,013 | $4,35 \cdot 10^{21}$ |
| 17,73 | 1,022 | $4,38 \cdot 10^{21}$ |
| 18,66 | 1,021 | $4,38 \cdot 10^{21}$ |
| 19,59 | 1,009 | $4,33 \cdot 10^{21}$ |
| 20,52 | $9,85 \cdot 10^{-1}$ | $4,23 \cdot 10^{21}$ |
| 21,45 | $9,51 \cdot 10^{-1}$ | $4,08 \cdot 10^{21}$ |
| 22,38 | $9,08 \cdot 10^{-1}$ | $3,89 \cdot 10^{21}$ |
| 23,31 | $8,55 \cdot 10^{-1}$ | $3,67 \cdot 10^{21}$ |
| 24,24 | $7,96 \cdot 10^{-1}$ | $3,41 \cdot 10^{21}$ |
| 26,1 | $6,63 \cdot 10^{-1}$ | $2,84 \cdot 10^{21}$ |
| 30,75 | $3,31 \cdot 10^{-1}$ | $1,42 \cdot 10^{21}$ |
| 35,4 | $1,14 \cdot 10^{-1}$ | $4,89 \cdot 10^{20}$ |
| 44,7 | $4,15 \cdot 10^{-3}$ | $1,78 \cdot 10^{19}$ |

من هنا نستنتج أن تأثير الحث الايوني لسطح الفيلم غير ملحوظ لكن يلاحظ في الوقت نفسه تناقص ذروة ملحي توزع ذرات الاكسجين ونمو ذروة منحلبي توزع ذرات الكربون على سطح الأفلام . انظر الشكل (7) . وبالتالي يتضح أن تأثير الحث الايوني قوي على هذين العنصرين وان سرعة الاشابة بالكربون أكبر بكثير . من معدل الحث الايوني لسطح الأفلام . يمكن تقدير معامل الحث الايوني لسطح الأفلام المشعة باستخدام العلاقة التالية [17] :

$$S \approx 22,1 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot N_1 \cdot N_2}{\sqrt{Z_1^4 + Z_2^4} (N_1 + N_2) E_n} \left(1 - \frac{M_1}{M_2}\right) \quad (19)$$

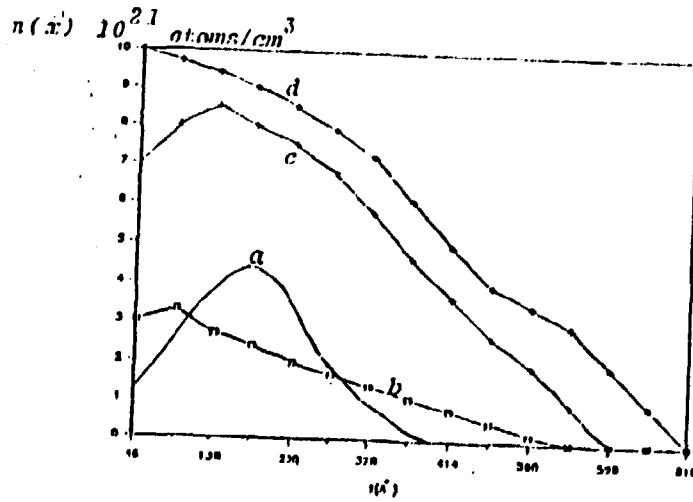
- حيث : N_1, Z_1 - شحنة وكتلة الأيون .
 N_2, Z_2 - شحنة وكتلة ذرات السبيكة .
 E_n - طاقة الرابطة بين ذرات السبيكة .

بالتعويض نجد أن معامل الحث الايوني لسطح سبيكة Fe-30%Ni يساوي :

$$S \approx 0,4 \frac{\text{atom}}{\text{ion}}$$

هذا يعني أن مقدار الشريحة من السبيكة التي يمكن أن تكون قد أزيلت من جراء الحث الايوني حوالي 2 nm و 4 nm من أجل الجرعة $5 \cdot 10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}}$ و $10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}}$ على الترتيب وبالتالي لا يمكن أن يكون الحث الايوني هو المسؤول عن ظاهرة انزياح ذروة طيف توزع ذرات الأيون . إذ أن مقدار انزياح الذروة عن السطح بلغ حوالي 5 nm و 15 nm عند الجرع $5 \cdot 10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}}$ و $10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}}$ على الترتيب . وإذا فرضنا جدلاً غياب الحث الايوني السطحي للأفلام فمن الضروري البحث عن آلية أخرى لتغير انزياح طيف توزع ايونات الأيون في سبيكة Fe-30%Ni . يلاحظ من شكل طيف توزع ايونات الأيون عند أعماق تفرق مسقط المسار الحر الوسطي R_p ان معدل تناقص تركيز ذرات الأيون مع زيادة العمق يكون بطيئاً بالمقارنة مع المعدل النظري ، ومن هنا نرى أن التفسير الممكن القادر على تفسير شكل طيف توزع ذرات الأيون هو التالي : يمكن أن تؤدي الطاقة المتحررة من تفاعل ايونات الأيون ، ضعيفة الانحلال في الشبكة البلورية للسبيكة ، إلى تعريض ظاهرة الهجرة الحرارية (Thermal migration) لايونات الأيون من مناطق التركيز الأعظم باتجاه تدرج التوترات الحرارية والميكانيكية (باتجاه العمق والسطح) . وبالتالي تغادر كمية كبيرة من ايونات الأيون سطح الأفلام في أثناء التشعيع ، انظر الجدول (7) . وهذا لا يمكن تفسيره

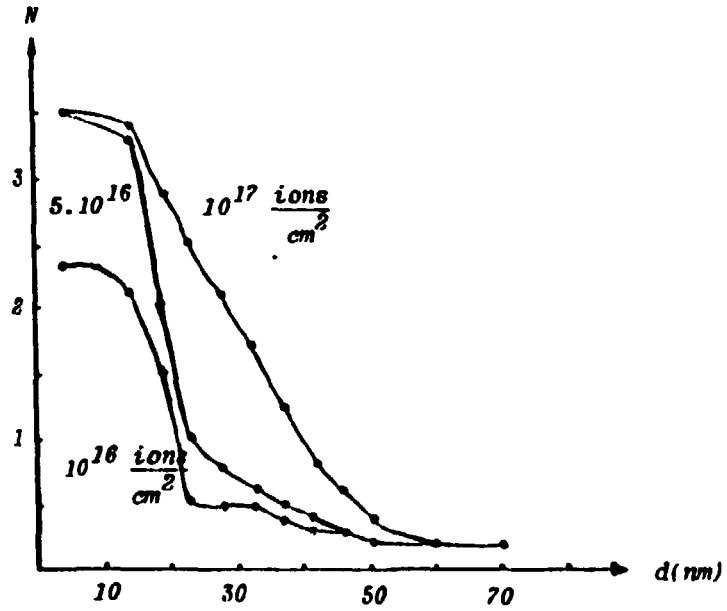
بقائمة الانتشار حيث تؤدي عمليات انتشار ذرات الأرجون إلى تراكمها وتشكل مواليد الفقاعات الغازية والتي لم تلاحظ في بنية الأفلام المشعة و غير المبدنة (كما ستبينه الدراسة المجهرية لبنية الأفلام المشعة لاحقاً ، انظر البند (b-4))
 بلغ متوسط تركيز الأرجون 6,5% و 8% من أجل الجرعة $5 \cdot 10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ و $10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ على الترتيب .



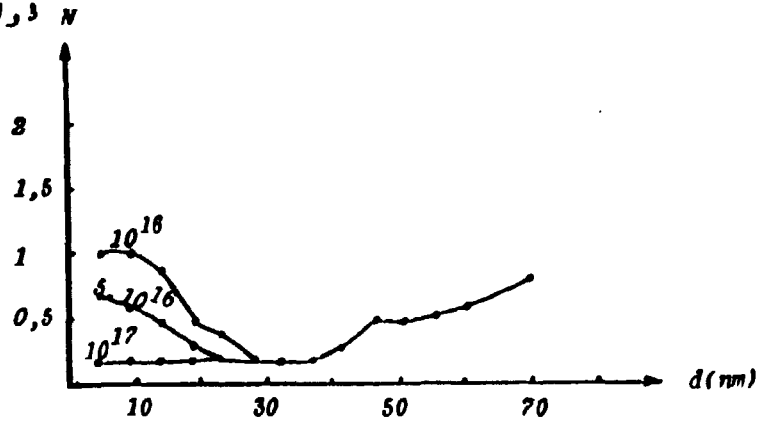
الشكل (6) . طيوف توزيع ايونات الأرجون في عبق سبيكة Fe-30%Ni المشعة ;

- a الطيف المحسوب تقريباً من أجل الجرعة $10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$
- b الطيف التجريبي من أجل الجرعة $10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$
- c الطيف التجريبي من أجل الجرعة $5 \cdot 10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$
- d الطيف التجريبي من أجل الجرعة $10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$

تركيز ذرات الكربون



تركيز ذرات الاكسجين



الشكل (7) تغير تركيز ذرات الاوكسجين والكربون في عسق أفلام سبيكة Fe-30%Ni المشعة بايونات الأرجون .

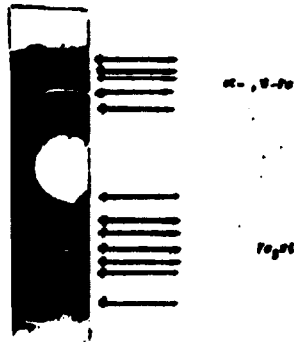
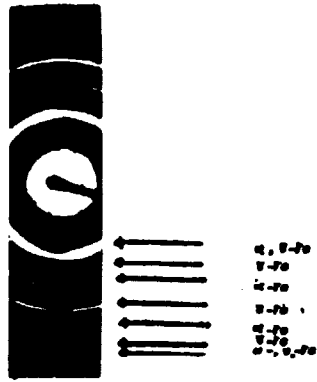
ب - دراسة التغيرات البنيوية - الطورية في أفلام السبيكة المشعة :

درست التغيرات البنيوية الطورية في أفلام السبيكة الشامدة والمشعة بواسطة مجهر الكتروني (TEM) . نورد في الجدول (VII) تحليلاً لحلقات الانعراج الأخوذة عن أفلام سبيكة Fe-30%Ni الشامدة والمشعة بجرعة $10^{16} \text{ ions/cm}^2$ والمدنسة عند الدرجة 400°C . انظر الشكل (8) .

يلاحظ من الجدول (VII) أن بنية الأفلام قبل التشعيع تتكون من طورين بلوريين مكعبين (الطور - α والطور - β) ذات شبكة بلورية Bcc و Fcc على الترتيب . بحيث أن شدة خطوط حلقات الانعراج العائدة للطور - β أكبر بكثير من تلك العائدة للطور - α . كما يلاحظ من الجدول (VII) أن تحليل حلقات الانعراج للأفلام المشعة بأيونات الأرجون $10^{16} \text{ ions/cm}^2$ والمدنسة عند الدرجة 400°C يؤكد على وجود طور مرتب (ordered phase) من النمط Fe_3Ni بالإضافة إلى آثار من الأوكسيد $\text{Fe}_{2,43}\text{Ni}_{0,53}\text{O}_4$ والطورين - α و - β . في حين يؤدي تلدين الأفلام الشامدة عند نفس الدرجة 400°C إلى زيادة أبعاد الحبيبات البلورية . انظر الشكل (9a) . وتشكل آثار بسيطة من الطور $\text{Fe}_{2,43}\text{Ni}_{0,53}\text{O}_4$ وبالتالي يمكن القول بأن التشعيع بأيونات الأرجون يمكن أن يحدث على ترتيب ذرات السبيكة خلال عملية التلدين . كما لوحظت أيضاً بعض التغيرات في البنية الدقيقة لأفلام السبيكة في أثناء تشعيها . تتميز البنية الدقيقة للأفلام الشامدة باحتوائها على قطاعات مغناطيسية شريطية (Stripe magnetic domain) متوضعة في مستوي الفيلم أي في المستوي الحاوي لـ محور اتجاه التـمغنط السهل . بلغ عرض هذه القطاعات حوالي 7 nm وطولها من رتبة أبعاد الحبيبات البلورية أي حوالي $70-90 \text{ nm}$. كما هو واضح من الشكل (9b) . يتغير شكل القطاعات في الأفلام المشعة ($10^{16} \text{ ions/cm}^2$) حيث تدور هذه القطاعات الشريطية حتى تقطع مستوي الفيلم وتصبح بذلك اسطوانية الشكل . انظر الشكل (9c) . يقارب متوسط أقطار هذه القطاعات الاسطوانية من متوسط عرض القطاعات الشريطية . يمكن أن يعزى هذا التغير في بنية القطاعات إلى عدة عوامل : من أهمها وجود العيوب البنيوية التشعبية والشواثب (أيونات الأرجون) مما يساهم في تغير قوى التآشير المتبادل بين الذرات في السبيكة وبالتالي تغير في الترتيب القريب (order Short-range) لذرات السبيكة المشعة .

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|--------------|----------------------|--------------------|----------------|---------------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------------|
| $d(\text{nm})$ Un-implanted | | | | 2,04 | 1,76 | | 1,43 | | 1,24 | | 1,14 | 1,05 | 1,02 |
| $d(\text{nm})$ implanted ($10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ $T=400$) | 3,52 | 2,51 | 2,12 | 2,02 | 1,75 | 1,51 | 1,46 | 1,36 | 1,25 | 1,19 | 1,12 | 1,07 | 1,02 |
| hkl $d(\alpha\text{-Fe})\text{nm}$ I/I | | | | 110 2,0263 100 | | | 200 1,4332 19 | | | 211 1,1702 38 | | | 220 1,0134 9 |
| hkl $d(\gamma\text{-Fe})\text{nm}$ I/I | | | | 111 2,034 100 | 200 1,762 42 | | | | 220 1,246 21 | | | 311 1,062 20 | 222 1,017 7 |
| hkl $d(\text{Fe}_3\text{Ni})\text{nm}$ I/I | 100* 3,577 | 110* 2,529 | 111 2,065 | | 200 1,7885 | 210* 1,5997 | 211* 1,4603 | | 220 1,2647 | 221 1,1923 | | 311 1,0785 | |
| hkl $d(\text{Fe Ni O})\text{nm}$ I/I | | 311 2,52 | 400 2,09 | | 422 1,708 | 440 1,479 | | 620 1,323 | 533 1,276 | 444 1,208 | 642 1,118 | 800 1,09 | |
| | | 100 | 40 | | 20 | 60 | | 50 | 60 | 5 | 30 | 30 | |

الجدول (VII) . تحليل حلقات الانعراج لأفلام سبيكة Fe-30%Ni الشاردة، والشحنة ($10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$, 400°C)



الشكل (8) تحليل حلقات الانعراج لأفلام سبيكة $^{60}\text{Fe}-^{59}\text{Ni}$

(a) - الشامدة .

(b) - المشعة عند الجرعة $10^{16} \frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^2}$ والمعدنة عند الدرجة 400°C .

من ناحية أخرى يؤدي التلدين عند الدرجة 400°C للأفلام المشعة بـ ^{60}Co الأيونات الأرجون إلى تشكل عدد كبير من الفقاعات الغازية (Gas bubbles) والتي تتراوح أبعادها بين (90nm - 1,5).

يوضح الشكل (10-a) بنية الأفلام المشعة بالجرعة 10^{16} ions/cm^2 والمعدنة عند الدرجة 400°C لمدة ساعة.

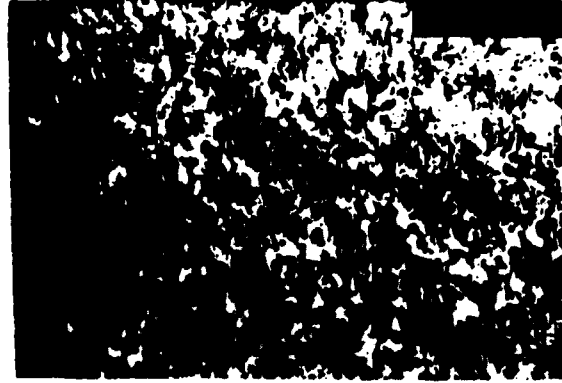
يبين الشكل (10-b) مخطط توزيع الفقاعات الغازية وفقاً لأبعادها.

تم باستخدام العلاقة (17) حساب تركيز وأبعاد المسام الغازية وأيضاً نسبة التورم. بلغ متوسط تركيز الفقاعات الغازية حوالي $4,3 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ ومتوسط أبعادها حوالي 12nm وبلغت درجة التورم حوالي 1,5%. بلغ عدد ذرات الأرجون في الفقاعة الغازية باستخدام العلاقة (17') حوالي $23 \cdot 10^5$ ذرة أرجون / فقاعة.

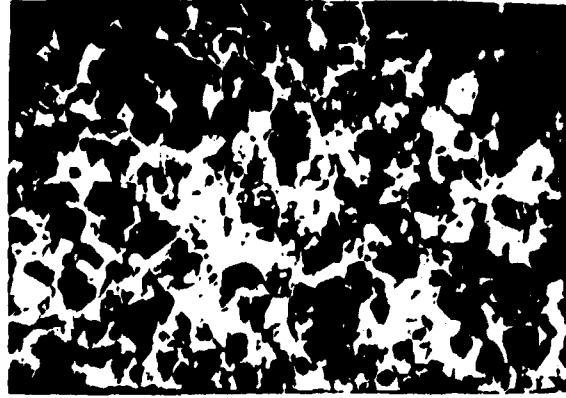
يؤدي رفع درجة حرارة التلدين حتى الدرجة 500°C إلى زيادة أبعاد المسام الغازية، (انظر الشكل (11)).

بلغ متوسط تركيز الفقاعات الغازية حوالي $2,3 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ ومتوسط أبعادها حوالي 19nm وتحتوي هذه الفقاعات على حوالي $1,9 \cdot 10^5$ ذرة أرجون وقدرت درجة التورم بحوالي 2,6%. يلاحظ عند زيادة درجة حرارة التلدين تناقص تركيز وأبعاد الفقاعات الغازية، كما يلاحظ تشكل تجمعات الفقاعات الغازية مختلفة الأبعاد عند الحبيبات البلورية. كما تتميز بعض التجمعات بأنها مكونة من فقاعات مربعة الشكل وذلك تبعاً لأشكال الحبيبات البلورية للحدود التي تفصلها، كما هو مبين بالشكل (12).

300 nm



(a)



(b)

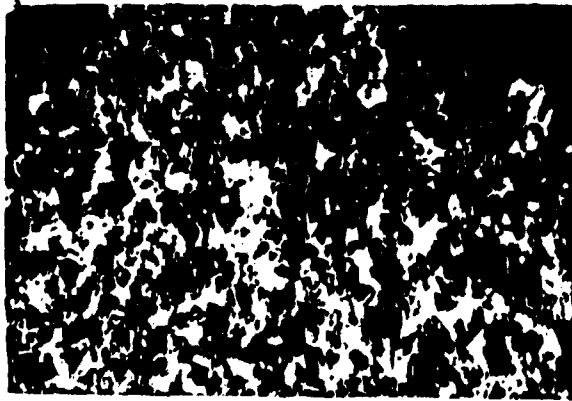


(c)

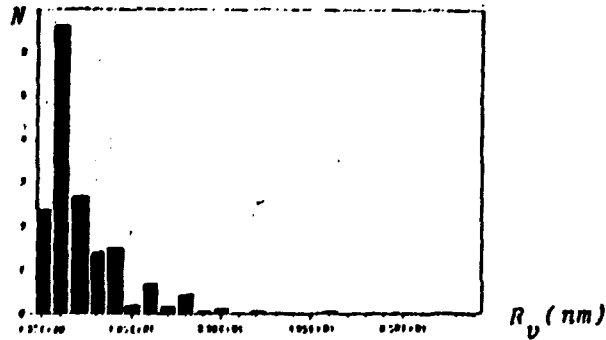
الشكل (9) : البنية المجهرية لأفلام سبيكة Fe-30%Ni

- a- الشاهدة (التكبير 36000 مرة) .
- b- الشاهدة والمعدنة عند الدرجة 400°C (التكبير 36000 مرة) .
- c- المشععة بجرعة قدرها 10^{16} ions/cm² (التكبير 72000 مرة) .

300nm



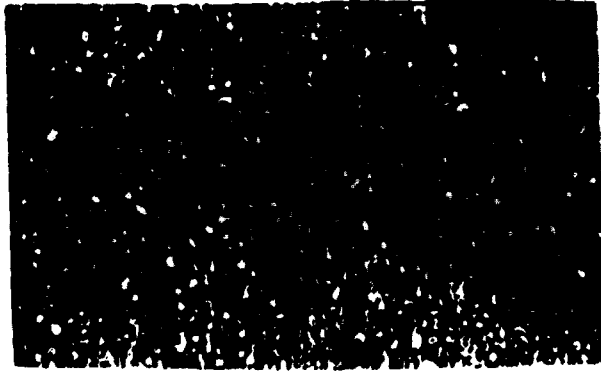
(a)



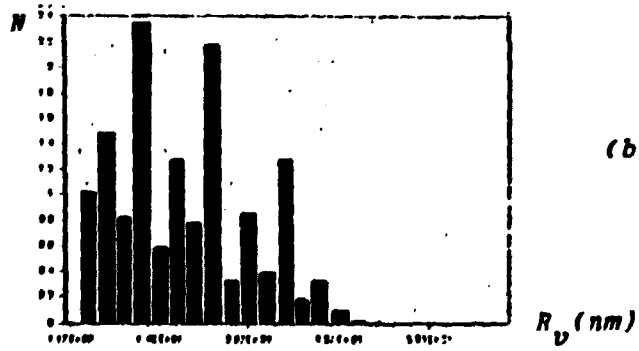
(b)

الشكل (10): (a) البنية المجهرية لسيبكا Fe-30%Ni المشعة بايونات الأروغون بجرعة $10^{16} \frac{ions}{cm^2}$ والمعدنة عند الدرجة $400^\circ C$.
(b) مخطط توزيع الفقاعات الغازية في السببكا وفقاً لأبعادها.

300 nm

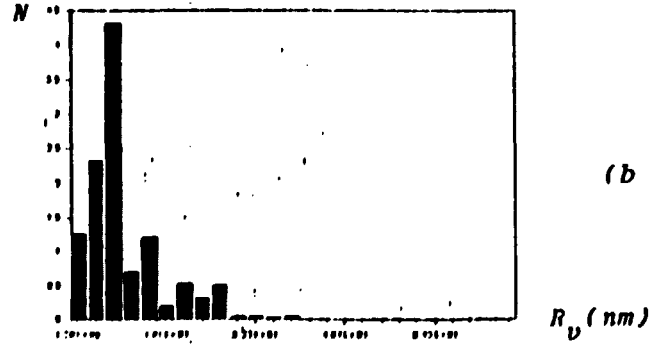
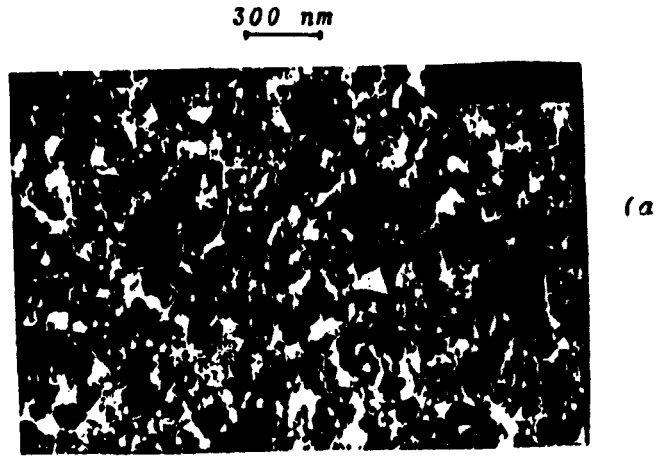


(a)



(b)

الشكل (11) : (a) البنية المجهرية لسبيكة Fe-30%Ni المشعة بـ⁶⁰Co في الأيون
بجرعة 10^{16} ions/cm² والمعدنة عند الدرجة 500 °C .
(b) مخطط توزيع القاعات الغازية في السبيكة وفقاً لأبعادها .



الشكل (12) : (a) البنية المجهرية لسبيكة Fe-30%Ni المشعة بإيونات الأرتغون بجرعة $10^{16} \text{ ions/cm}^2$ والمعدنة عند الدرجة 800°C .
 (b) مخطط توزيع القاعات الغازية في السبيكة وفقاً لأبعادها .

ج - قياس الخواص الكهربائية والمغناطيسية للأفلام المشعة :

تعتبر طريقة قياس المقاومة الكهربائية من أبسط الطرق في دراسة تغيرات بنية المادة نظراً لحساسيتها لأي تغير قد يطرأ على بنية أو تركيب المادة .

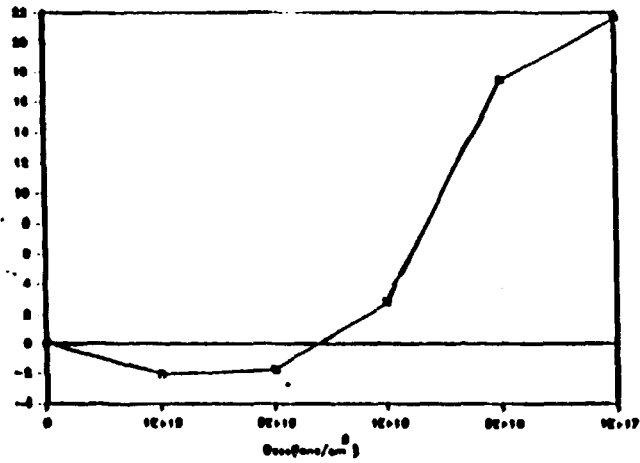
يبين الشكل (13) تابعة تغير المقاومة الكهربائية لأفلام سبيكة $Fe-30\%Ni$ كتابع لمقدار الجرعة الإشعاعية . كما يلاحظ من الشكل (13) أن تشعيع أفلام سبيكة $Fe-30\%Ni$ بـ 10^{15} - $5 \cdot 10^{15} \frac{ions}{cm^2}$ يؤدي إلى تناقص المقاومة الكهربائية بنسبة 3% - 2,5 . يمكن أن يعزى هذا النقصان إلى عمليات فناء العيوب البلورية في أثناء التشعيع أو ما يسمى عملية التلدين المحرض بالتشعيع (Irradiation stimulated annealing) .

تزداد المقاومة الكهربائية مع زيادة مقدار الجرعة الإشعاعية حتى 23% في أثناء التشعيع بالجرعة الأعظمية $10^{17} ions/cm^2$ يمكن أن تعزى هذه الزيادة في المقاومة الكهربائية إلى تراكم وتجمع العيوب النقطية (of point defects) و *Clustering*) وأيضاً لتآكل الحث الأيونية السطحي والتي تؤيدها نتائج *RBS* انظر الفقرة (4- a) . كما تمت دراسة بعض التغيرات في الخواص المغناطيسية مثل قياس ثابت التناحي المغناطيسي ، ودورة البطاء المغناطيسية للأفلام السبيكة المشعة .

يبين الشكل (14) تابعة ثابت التناحي المغناطيسي لأفلام السبيكة للجرعة الإشعاعية . نستدل من هذا الشكل أن ثابت التناحي المغناطيسي يغير من اتجاه المسار لمستوي الفيلم إلى شبه عمودي عليه وذلك عند الجرعة $10^{16} ions/cm^2$ وهذا ما تؤكده نتائج الدراسة الميكروسكوبية ، انظر الفقرة (4- b) .

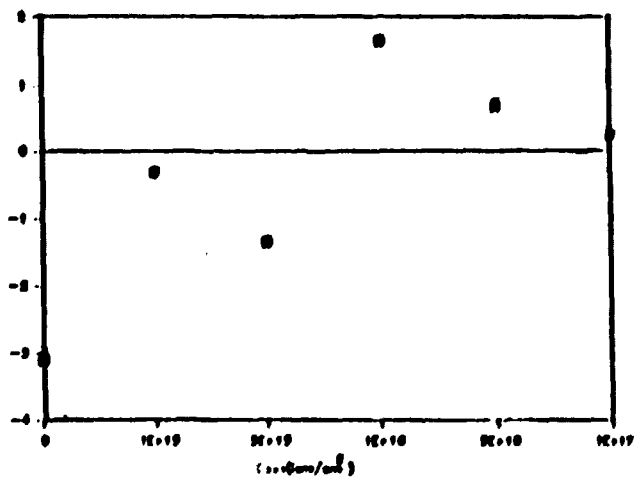
يبين الشكل (15) مخطط دورة البطاء المغناطيسية لأفلام سبيكة $Fe-30\%Ni$ الشامدة ولأفلام المشعة بجرعة قدرها $10^{16} ions/cm^2$. كما هو واضح من الشكل (15) . تنخفض القوى القهرية للأفلام المشعة بمقدار 50% وتزداد قيمة التغير النسبي لتمغنت الاشباع بمقدار 13% . يمكن أن تعزى هذه التغيرات في الخواص المغناطيسية إلى التغير في قوى التفاعل المشترك بين ذرات السبيكة نتيجة لتشوه الفجوات الإلكترونية بسبب وجود شوائب غازية وعيوب بلورية من جراء التشعيع .

$\Delta R/R \%$

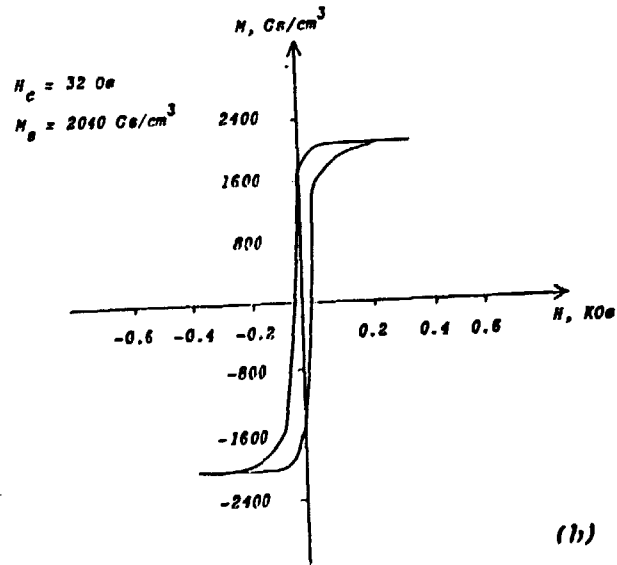
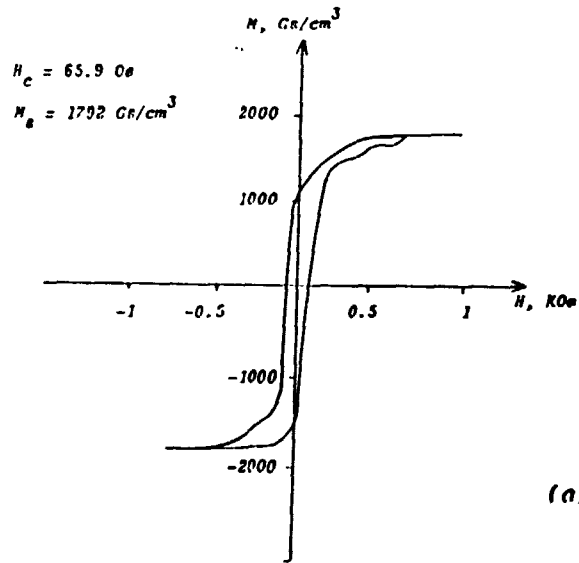


الشكل (13) تابعة التغير النسبي للمقاومة الكهربائية لأفلام سبيكة Fe-30%Ni للجرع الإشعاعية

$K \cdot 10^6 \text{ erg/cm}^3$



الشكل (14) تابعة ثابت الاقاصي المغناطيسي لأفلام سبيكة Fe-30%Ni للجرع الإشعاعية



الشكل (15) شكل حلقة البطانة المغناطيسية لأفلام سبيكة $Fe - 30\%Ni$.

a - للأفلام السائبة .

b - للأفلام المشعة بجرعة $10^{16} \frac{ions}{cm^2}$.

تمت في هذا العمل دراسة التغيرات البلورية والطورية في سبيكة Fe-30%Ni أثناء تشعيها بأيونات الأرجون .

بيّلت الدراسة المجهرية لبنية الأفلام المشعة عدم ملاحظة تشكل أية فقاعات غازية أو مسام في الأفلام عند كل الجرعات التشيعية . لكن الفقاعات الغازية تبدأ بالتشكل أثناء التلدين عند الدرجة 400°C وذلك لأن التلدين يكسب الشوائب الغازية والعيوب النقطية طاقة حركية إضافية ، تساعد على الانتشار الحر في الشبكة البلورية مما يمكنها من التصادم وبالتالي تشكيل تجمعات (فقاعات غازية ومسام) شبه مستقرة في مناطق عيوب الشبكة البلورية . تزداد أبعاد هذه التجمعات مع زيادة حرارة التلدين وذلك بسبب زيادة حركية الشوائب الغازية والعيوب مع زيادة درجة الحرارة مما يمكن أن يساهم في زيادة أبعادها على حساب الشوائب والعيوب وتجمعاتها الصغيرة وذلك حتى درجة حرارة تلدين معينة . ويمكن لهذه التجمعات أن تأخذ أشكالاً هندسية منتظمة (مسطحة في حالتنا مربع) وفقاً للشبكة البلورية للمادة الأم ، والتي تنمو بلوراتها بشكل واضح في أثناء عمليات التلدين معطية أشكالاً هندسية للتجمعات الغازية الواقعة في ما بين حدودها . ومن ثم تبدأ هذه التجمعات بالتفكك مصدرة ذرات غازية وفجوات وذلك أثناء التلدين عند درجات حرارة عالية . ويمكن الاعتقاد أن يكون سبب هذا التفكك هو أن درجة حرارة التلدين تفوق درجة استقرار هذه التجمعات ، بالإضافة إلى أن نمو البلورات في أثناء التلدين يؤدي إلى زيادة الاجهادات الميكانيكية على جدران مسببه التجمعات ، الأمر الذي يجعل عملية تفككها أنسب طاقياً . (لم نتكلم في هذا العمل من دراسة تفاصيل عمليات تشكل الفقاعات الغازية وتفككها بسبب عدم توفر مجهر الكتروني في القطر) .

كما لوحظ تشكل طور مرتب من النمط Fe_3Ni في أثناء تلدين الأفلام المشعة $10^{16} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ عند الدرجة 400°C . يمكن أن يكون تشكل هذا الطور المرتب أحد الأسباب التي تعيق مجرة الحثوات إلى المصاب وبالتالي تزيد احتمال اتحاد العيوب النقطية ، الأمر الذي يساهم في إعاقة عمليات تشكل الفقاعات والمسام ونموها .

أظهر التحليل العنصري لأفلام السبيكة باستخدام طريقة (RBS) أن كمية ذرات الأرجون المتبقية في الأفلام المشعة أقل من الكميات المفروزة في السبيكة (عند الجرعة العظمى $10^{17} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2}$ النسبة حوالي 50%) .

يمكن أن يعزى هذا إلى أن ذرات الأرجون الخاملة كيميائياً لن تستطيع الدخول في اتحادات مع ذرات الشبكة لذا سيتوضع بعضها في مناطق العيوب البلورية (حدود البلورات) والفائض منها سوف يهاجر منطقة الفرج إلى مناطق التدرج الحراري والميكانيكي . أي نحو العمق والسطح بفعل الهجرة الحرارية لهذه الذرات وهذا ما تبينه دراسة توزيع ذرات الأرجون المغروزة في عمق الشبكة $Fe-30\%Ni$ الشكل (ب) . حيث لوحظ انتشار ايونات الأرجون إلى أعماق تفوق بكثير قيمة المسار الحر الوسطي (R_p) .

لقد بينت نتائج هذا العمل أن هذا الموضوع يحتاج للكثير من الدراسة ، والسبب في عدم تغطية الدراسة بشكل كامل يعود لأسباب كثيرة : منها عدم توفر التجهيزات المناسبة مثل *TEM* ، ومقياس للخواص المغناطيسية ، لذا اكتفي ببعض القياسات ، أثناء الإيفاد الخارجي ، نظراً لأدق الوقت . ومن المفيد استكمال الدراسة التفصيلية لتأثير درجة حرارة على تغيرات بنية الشبكة وتغيرات الخواص المغناطيسية (حيث لوحظت بعض التأثيرات الهامة من الناحية الفيزيائية والتطبيقية وخصوصاً الحصول على قلاعات مغناطيسية استوائية) والميكانيكية .

من ناحية أخرى ، يفضل أن تقوم الهيئة مستقبلاً بتجهيز مخابر (مثل مخبر علم المواد) تمكن من القيام بمثل هذه المواضيع ، ولاسيما أن في خطتها الحصول على مفاعل أبحاث .

بعد الانتهاء من البحث والحصول على النتائج المرجوة منه اتوجه بالشكر إلى :

- ١ - إدارة الهيئة التي قدمت كل التسهيلات اللازمة لانجاح هذا البحث خصوصاً الإيفادات الخارجية التي كانت كفيلاً بتدليل الصعوبات العلمية التي اعترضت اجراء هذا البحث .
- ٢ - السيد الدكتور بسام المعصراني ، المشرف على قسم الفيزياء ، لمتابعته وتشجيعه المستمر . والسيد الدكتور حازم صابوني ، المشرف على قسم الخدمات العلمية ، لتوجيهاته وملاحظاته القيمة . والسيد الدكتور توفيق قسام لدعمه وتشجيعه وتوجيهه لنتائج هذا العمل .
- ٣ - الاستاذ دراكوف م. ، رئيس قسم فيزياء الحالة الصلبة - جامعة بيلاروسيا - لمساعدته في استخدام التجهيزات المخبرية اللازمة (*RDS, TEM*) لانجاز البحث ، ومناقشته للنتائج .

IRRADIATION EFFECTS IN Fe-30% Ni ALLOY DURING + Ar ION IMPLANTATION

Soukieh M. , Al Mohamad Ali
Syrian A.E.C. P.O.Box 6091 Damascus

ABSTRACT :

The use of metallic thin films for studying the processes which take place during ion irradiation has recently increased [1]. For example, ion implantation is widely used to study the structural defects in transition metallic thin films such as (Fe,Ni,Co), because it can simulate the effects occurring in nuclear reactors during neutron irradiation especially the swelling of reactor materials [2,3]. The swelling of metals and alloys is strongly related to the material structure and to the irradiation conditions .

The general feature of formation of structural defects as a function of irradiation dosage and annealing temperature is well known[4]. However, the detailed mechanisms are still not well understood. For example , the swelling of iron alloy with 30-35% Nickel is very small in comparison with other Ni concentrations[5], and there is no clear information on the possibility of phase transitions in Fe-Ni alloys during irradiation.

The aim of this work is to study the phase - structural changes in Fe- 30% Ni implanted by high dose of Argon ions . The effect of irradiation with low energy Argon ions (40KeV, and fluences of $10 \cdot E15$ to $10 \cdot E17$ ions/cm) on the deposited thin films of Fe-30% Ni Alloy was investigated using RBS and TEM techniques. The thicknesses of these films were about 65 ± 10 nm deposited on ceramic, KBr, and Be foils substrates. Gas bubble formation and profile distribution of the implanted Argon ions were investigated. Formation of an ordered phase Fe₃Ni during irradiation appears to inhibit gas bubble formations in the film structure.

9-REFERENCES:

- 1) Komarov F.F, *Ion implantation in metals*, P173, Moscow, 1990.
- 2) *Physics of radiation effects in crystals*. Editors Johanson R.A, Orlov A.N., P.623-668, Elsevier Pub, 1986.
- 3) Cawthorne C. and E.Fulton, *Nature*, 216, P.576, 1961.
- 4) Nandedkar R.V, et al. *Microhardness, Microstructure, and Nimonic 90*. *Phys. Stat. Sol. (a)*, V72, P.89-94, 1982.
- 5) Silvester G. et al. *Alliages de Ni-Fe Et de Ni-Si Ne gonflant pas sous irradiation aux neutrons rapides*. *J.of.Nucl. Mat.* V57, P125-135, 1975.
- 6) Bordin G, and Montanari T, *Neutron irradiation effects on the martensitic Iron-Nickel alloys*. *Il NUOVO CIMENTO*, V50, No 6, P473-482, 1985.
- 7) Mayer R.M, *Nucleation and growth of voids by radiation*. *J.Nucl. Mat*, V95, P46-57, 1980.
- 8) Brailsford A.D, *Influence of point defect trapping on sink strength*. *J. Nucl. Mat.* V102, P77-86, 1981.
- 9) Martel. L.O, St-jucques R, Terrenult. B, *Fussion Reactor Materials Research*. *J. Vac. Sci. Tech*, Vol 14, P 543, 1977.
- 10) Eyre B.L. *Irradiation damage structures generated in metals and alloys during irradiation at elevated temperature*. *USERDA Report Conf-751006- P2*, P729-763, 1975.
- 11) Johnston W.O, Rosolowski J.H. *An experiment survey of swelling in commercial Fe-Cr-Ni alloys bombarded with 5 MeV Ni ions*. *J. of Nucl. Mat.* V.54, P24-40, 1974.
- 12) Brenkov A.F., Komarov F.F., Temkin M.M. *Spatial distribution of energy deposited in cascaded atomic collision of solids*, P.146, 1985.

- 13) *Wei-kan chu Backscattering spectrometry*
Acad. press NY, 1978.
- 14) *Hirsch P.B. et al.*
Electron Microscopy of thin films crystals
Butter-worth, Washington D.C. 1965.
- 15) *(ASTM) American society for Testing Materials, X-ray*
diffraction data cards. Philadelphia.
- 16) *Проропанеттский А.А.*
Теория Магнетизма, Магнитные Материалы и Явления
изд. Высш. школы, Москва, 1972.
- 17) *Pranevičius L. Ion Beam Modification of solid state*
Vilnos, 1980.