

Volume (1) Number (1)
Available at: <https://wpu.edu.sy/wpuj/index.php/wpuh>

Dense plasma focus device as a promising method for thin film deposition – a numerical study of Ion beam features from Dense Plasma Focus device

Prof. Dr. Walid Sahyouni¹, Dr. Alaa Nassif^{2*}

ABSTRACT

In this research, a theoretical study was conducted of the possibility of using dense plasma focus devices as one of the thin film deposition methods, by taking advantage of the distinctiveness of these devices in the formation of the plasma pinch, which is an ion source. The number and energy of nitrogen ions produced by the NX2 dense plasma focus device and their changes with the change in gas pressure were found. The energy spectrum of the resulting ions was also found, the nitrogen gas pressure value was determined at which the highest energy carried by the nitrogen ion was achieved, and the number of ions reaching the titanium substrate was calculated in order to obtain the TiN thin film.

KEYWORDS: plasma pinch, Ions beam, Thin films.

Submitted on April 4, 2023; Revised on May 20, 2023; Accepted on June 14, 2023
© 2023 Al-Wataniya Private University, all rights reserved.

1 Faculty of Science, Homs University, Homs, Syria.

2 Faculty of Pharmacy, Al-Wataniya Private University, Hama, Syria.

* Corresponding author. E-mail address: alaa.nassif@wpu.edu.sy

جهاز البلازمـا المحرقـية الكثيفـة وسـيلة واعـدة لترسيـب الأـفلام الرـقيقة - دراسـة عـدديـة

لمـمـيزـات حـزمـةـ أـيونـات صـادـرـة عن جـهاـزـ بلاـزـماـ مـحرـقـيـةـ كـثـيفـةـ

أ.د. ولـيدـ صـهـيـونـيـ، دـ. عـلاءـ نـاصـيفـ

المـلـخـصـ

تم في هذا البحث إجراء دراسة نظرية لإمكانية استخدام أجهزة البلازمـا المحرقـية الكثيفـة كـإـحدـى طـرقـ تـرسـيبـ الأـفـلامـ الرـيقـةـ وـذـلـكـ بـالـاستـفـادـةـ مـنـ تـميـزـ هـذـهـ الأـجـهـزةـ بـتـشـكـلـ قـبـضـةـ البـلاـزـماـ الـتـيـ تـعـتـبـرـ منـبعـ أـيـوـنـيـ.ـ تمـ إـيجـادـ عـدـدـ وـطـاقـةـ أـيـوـنـاتـ الـأـزوـتـ النـاتـجـةـ عـنـ جـهاـزـ البـلاـزـماـ المـحرـقـيـةـ كـثـيفـةـ 2ـ NX2ـ أـيـوـنـيـ.ـ تمـ إـيجـادـ عـدـدـ وـطـاقـةـ أـيـوـنـاتـ الـأـزوـتـ النـاتـجـةـ عـنـ جـهاـزـ البـلاـزـماـ المـحرـقـيـةـ كـثـيفـةـ 2ـ NX2ـ وـتـغـيـرـاتـهاـ مـعـ تـغـيـرـ ضـغـطـ الغـازـ.ـ كـمـ تمـ إـيجـادـ طـيفـ طـاقـةـ أـيـوـنـاتـ النـاتـجـةـ وـتـحـدـيدـ قـيمـةـ ضـغـطـ غـازـ الـأـزوـتـ الـتـيـ يـتـحـقـقـ عـنـدـهـاـ أـعـلـىـ طـاقـةـ يـحـلـمـهـاـ أـيـوـنـ الـأـزوـتـ وـحـسـابـ عـدـدـ أـيـوـنـاتـ الـوـاـصـلـةـ إـلـىـ رـكـيـزةـ الـتـيـتـانـيـوـمـ مـنـ أـجـلـ الحـصـولـ عـلـىـ الفـلـمـ الرـفـيقـ TINـ.

الكلمات المفتاحية: قـبـضـةـ البـلاـزـماـ، حـزمـةـ أـيـوـنـاتـ، الأـفـلامـ الرـيقـةـ.

1. مقدمة

من المعلوم أن الأفلام الرقيقة عبارة عن طبقات من المواد متوضعة على مواد أخرى بسماكات من بضعة نانو مترات إلى عدة ميكرو مترات، تم تطوير الأفلام الرقيقة لاستخدامها في تطبيقات مختلفة، تعتبر الأفلام الرقيقة النانوية (Nanocomposite thin films) ذات الصلابة العالية نوع جديد من الأفلام الرقيقة تُظهر خصائص ميكانيكية والكترونية وبصرية ومغناطيسية ممتازة وذلك بسبب اعتمادها على الحجم والتركيب البلوري للفلم الرقيق [1]. يتم استخدام عدد كبير من تقنيات الترسيب من أجل الحصول على الأفلام الرقيقة يمكن وضع هذه التقنيات في فئتين أساسيتين:

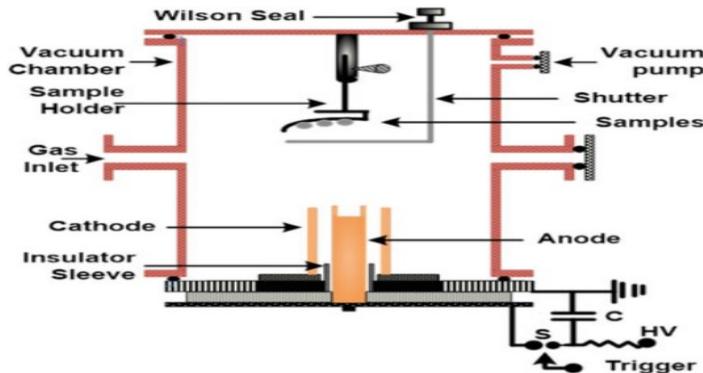
الرسيب الفيزيائي للبخار ((Physical Vapour Deposition (PVD)

الرسيب الكيميائي للبخار ((Chemical Vapour Deposition (CVD))

2. البلازمـا المحرقـية الكثيفـة: تقنية ترسـيب ممكـنة

تم تطوير أجهزة البلازمـا المحرقـية الكثيفـة (DPF) (Dense plasma focus) في الأساس كأجهزة إنـدماـج نوـوي ولكن تم الاهتمام لاحـقاً بهذه الأجهـزة كـمـصـدر وـفـير لـعـدـ من الإـصـدـارـات الإـشـاعـاعـية مـثـلـ الـنـيـوـتـرـونـاتـ وـالـأشـعـةـ السـيـنـيـةـ وـالـحـزـمـ الـإـلـكـتـرـوـنـيـةـ وـالـأـيـوـنـيـةـ [3,2]. يتم في جهاز البلازمـا المحرقـية الكثيفـة تولـيدـ وـتـسـيـعـ وـضـغـطـ البـلـازـمـاـ بـواـسـطـةـ القـوىـ المـغـناـطـيـسـيـةـ حـيـثـ يـنـتـجـ فـيـ نـهـاـيـةـ عـمـلـيـةـ التـمـرـقـ (focusing) عمـودـ مـنـ البـلـازـمـاـ (pinch) يـدـومـ لـفـتـةـ مـنـ الزـمـنـ ($s^7 \sim 10^{-1}$) حرـارـتـهـ (1 – 2 K) وـكـثـافـتـهـ ($m^{-3} 10^{25} \sim 10^{26}$) قادرـ علىـ إـدـهـاـجـ نـوـويـ (nuclear fusion) تـجـعـلـ هـذـهـ الـمـيـزـاتـ قـبـضـةـ الـبـلـازـمـاـ مـصـدرـ لـلـإـشـاعـاعـ المـتـعـدـدـ (multi-radiation source). يعمل جهاز البلازمـا المحرقـية بـطـرـيقـةـ نـبـضـيـةـ (pulsed mode) يمكن استـخـدامـهـ فـيـ العـدـيدـ مـنـ التـطـبـيـقـاتـ مـثـلـ التـصـوـيـرـ الشـعـاعـيـ وـالـطـبـاعـةـ الـإـلـكـتـرـوـنـيـةـ [7-4] كما يمكن استـخـدامـ حـزـمـ الـإـلـكـتـرـوـنـاتـ وـالـأـيـوـنـاتـ ذاتـ الطـاقـةـ العـالـيـةـ الصـادـرـةـ عـنـهـ فـيـ مـعـالـجـةـ الـمـوـادـ وـصـنـاعـةـ الـأـفـلـامـ الرـقـيقـةـ [14-8].

يعتمـدـ نـوـعـ الـإـشـاعـاعـ الصـادـرـ مـنـ جـهـازـ الـبـلـازـمـاـ المـحرـقـيـةـ الكـثـيـفـةـ عـلـىـ نـوـعـ الغـازـ المستـخـدـمـ فـيـ تـشـكـيلـ الـبـلـازـمـاـ وـعـلـىـ مـادـةـ الـأـفـطـابـ دـاخـلـ حـجـرـ التـقـرـيـغـ فـعـلـىـ سـبـيلـ المـثـالـ تمـ اـسـتـخـدـامـ جـهـازـ الـبـلـازـمـاـ المـحرـقـيـةـ الكـثـيـفـةـ فـيـ زـرـعـ (implantation) أـيـوـنـاتـ النـتـرـوجـينـ عـلـىـ الـفـوـلـاذـ [15] وـالـتـتـانـيـومـ [16]. يـوـضـحـ الشـكـلـ (1) مـخـطـطـ جـهـازـ الـبـلـازـمـاـ المـحرـقـيـةـ الكـثـيـفـةـ حـيـثـ تـكـوـنـ الـعـيـنـاتـ الـمـرـادـ معـالـجـتهاـ مـتـمـوـضـعـةـ عـلـىـ حـامـلـ مـقـابـلـ الـحـزـمـ الـأـيـوـنـيـةـ الـمـتـدـفـقـةـ مـنـ المصـدـعـ [1].



الشكل (1): مخطط جهاز البلازما المحرقة الكثيفة المستخدم في ترسيب الأفلام الرقيقة [1]

3. ميزات استخدام البلازما المحرقة الكثيفة في عملية ترسيب الأفلام الرقيقة

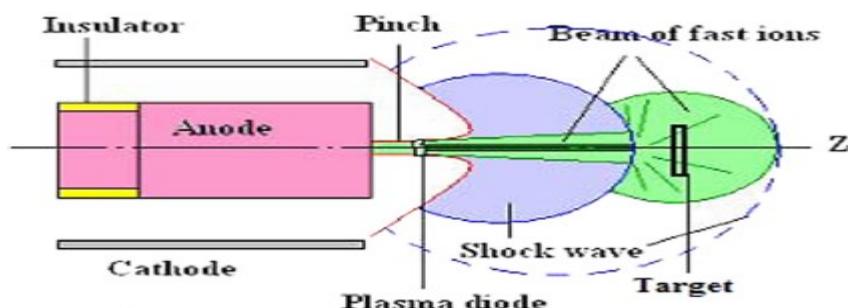
أظهرت نتائج دراسة الأفلام الرقيقة التي تم ترسيبها باستخدام البلازما المحرقة الكثيفة عن وجود تغييرات بنوية أفضل من تلك التي تم الحصول عليها باستخدام طرق الترسيب الأخرى حيث لطريقة الترسيب هذه العديد من الميزات:

- 1- تجمع تقنية ترسيب الأفلام الرقيقة باستخدام البلازما المحرقة بين ثلاث تقنيات ترسيب مختلفة وهي: الترسيب بالتبخير الفيزيائي (PVD) والتبخير باستخدام حزم الالكترونية (electron beam) والترسيب بالبخار الكيميائي المحسّن بالبلازما (plasma-enhanced chemical evaporation) والترسيب بالبخار الكيميائي المحسّن بالبلازما (hybrid deposition technique) وبالتالي فهي تقنية ترسيب هجينة (vapour deposition technique).
- 2- معدلات الترسيب في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة مرتفعة للغاية مقارنة بطرق الترسيب الأخرى وذلك بسبب الاجتذاب الكثيف لمواد المصعد بواسطة حزم الالكترونات عالية الطاقة الناتجة عن قبضة البلازما.
- 3- لا حاجة لتسخين الركيزة حيث تقوم الأيونات ذات الطاقة ($40 \text{ keV} - 2 \text{ MeV}$) الناتجة عن قبضة البلازما في تسخين الركيزة إلى درجات حرارة عالية.
- 4- استهلاك منخفض للغاز حيث إن عملية تشغيل جهاز البلازما المحرقة الكثيفة يتطلب غاز بضغط منخفض مع ثبات كمية الغاز بدلاً من عمليات تدفق الغاز في طرق الترسيب الأخرى.
- 5- إمكانية تشغيل جهاز البلازما المحرقة الكثيفة عن طريق تفريغ مكثف بسيط.
- 6- الالتصاق الجيد بين المادة والركيزة وذلك بسبب معالجة سطح الركيزة بواسطة أيونات الغاز المستخدم ضمن جهاز البلازما المحرقة الكثيفة.
- 7- يمكن إجراء عملية الترسيب في زمن قصير جداً (عدة مئات من نانو ثانية).

8- إمكانية التحكم ببارامترات جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (ضغط الغاز ، طاقة تشغيل الجهاز ، الأبعاد الهندسية للأقطاب) وبالتالي التحكم بتدفق وطاقة حزم الأيونات الصادرة.

4. دراسة حزم الأيونات الصادرة عن البلازما المحرقة الكثيفة

تُسمى عملية تطور البلازما المحرقة إلى مرحلتين أساسيتين هما المرحلة المحورية والمرحلة القطبية، يتم في المرحلة المحورية تأمين الغاز الموجود ضمن الحجرة من خلال الطاقة الكهربائية المخزنة في بنك المكثفات وتشكل غمد البلازما الذي يتحرك تحت تأثير قوة لورنتز على طول محور الحجرة حتى الوصول إلى نهاية المصعد حيث يبدأ بالتحرك قطرياً وتتراكم طبقة البلازما ليتموضع فوق قمة المصعد عمود صغير حار جداً وكثيف جداً من البلازما يدعى القبضة (pinch)، ونظراً لكون شحنة المصعد موجبة فإنه يتم استقطاب الإلكترونات باتجاه المصعد والأيونات الموجبة بالجهة المقابلة ويتشكل ما يصطلح على تسميته "ثنائي البلازما" (plasma diode)، تستمر هذه القبضة لفترة صغيرة من الزمن ثم تنهار نتيجة لاستقرارات البلازما، و يؤدي انهيار القبضة إلى توليد كمون كهربائي نقطي عالي جداً (أكبر من الكمون المستخدم في عملية التشغيل) يؤدي هذا الكمون إلى قذف الأيونات بعيداً عن المصعد والإلكترونات باتجاه المصعد الشكل (2)، وتعتمد طاقة وكثافة حزمة الأيونات الصادرة على نوع وضغط الغاز وعلى بارامترات الجهاز المستخدم.



الشكل (2): يوضح انهيار قبضة البلازما وانطلاق الأيونات منها

درس S.LEE و S.H.Saw [17] خصائص حزمة الأيونات الصادرة عن البلازما المحرقة الكثيفة بعد انهيار قبضة البلازما وقدف الأيونات منها نتيجة الكمون المتولد ضمن قبضة البلازما وتوصلوا إلى العلاقات التي تعطي كلاً من عدد وطاقة أيونات الحزمة وفق الآتي:

عدد أيونات الحزمة (Number of ions beam) [17]: يتم حساب عدد الأيونات الموجودة ضمن الحزمة من خلال جداء سيولة الأيونات بالمقطع العرضي لقبضة البلازما:

$$N_i = 2.75 \times 10^{15} \frac{f_e}{\sqrt{M \cdot Z_{eff}}} \frac{\ln\left(\frac{b}{r_p}\right)}{r_p^2} \frac{I_{pinch}^2}{\sqrt{U}} \cdot \tau \cdot \pi r_p^2$$

حيث: f_e جزء طاقة قبضة البلازمما الذي تحمله الأيونات، M كتلة الأيون، Z_{eff} الشحنة الفعالة، b نصف قطر المهبط، r_p نصف قطر القبضة، I_{pinch} تيار القبضة، U كمون التسريع الناشئ عن انهيار قبضة البلازمما حيث $V \approx U$ حيث V قيمة الكمون المتولد ضمن قبضة البلازمما، τ فترة بقاء القبضة.

طاقة أيونات الحزمة (Ions beam Energy) [17]: يتم حساب طاقة الحزمة بضرب عدد أيونات الحزمة بالشحنة الفعالة والكمون المتولد ضمن القبضة وفق العلاقة:

$$E_{beam} = N_i \times Z_{eff} \cdot U$$

1.4 دراسة تغيرات خصائص حزمة الأيونات الصادرة عن جهاز البلازمما المحرقية الكثيفة NX2 مع تغير نوع الغاز المستخدم

1.1.4 تحديد بارامترات الجهاز المدروس

باستخدام برنامج Lee الحاسوبي ذي الإصدار (RADPFV5.15de.c1) [18] تمت محاكاة جهاز البلازمما المحرقية الكثيفة NX2 وفق البارامترات التالية [19]:

بارامترات بنك المكثفات: التحريرض, $C_0 = 28 \mu F$ ، السعة $L_0 = 20 nH$ ، المقاومة الداخلية $.r_0 = 2.3 m\Omega$

بارامترات أنابيب البلازمما المحرقية: نصف قطر المهبط $b = 4.1 cm$ ، نصف قطر المصعد $.z_0 = 5 cm$ ، طول المصعد $a = 1.9 cm$

بارامترات التشغيل: الجهد المطبق $V_0 = 14 kV$ ، الضغط $P_0 = 11 Torr$

بارامترات النموذج: عامل الكتلة في المرحلة المحورية $f_m = 0.08$ ، عامل التيار في المرحلة المحورية $f_c = 0.7$ ، عامل الكتلة في المرحلة القطبية $f_{mr} = 0.2$ ، عامل التيار في المرحلة القطبية $f_{cr} = 0.7$

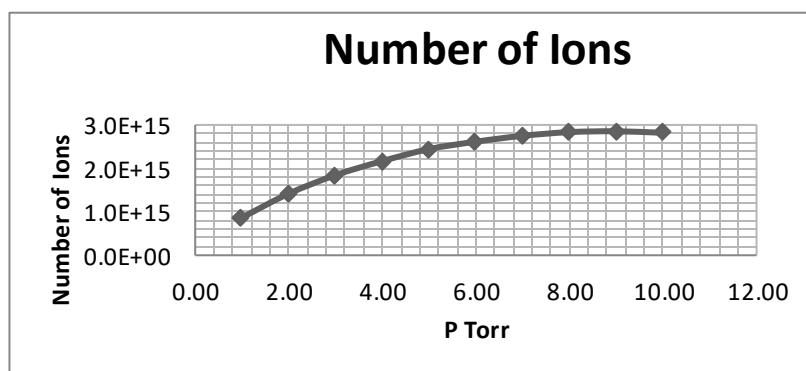
تغير عدد أيونات حزمة أيونات الآزوت

بالاستناده من نتائج مميزات القبضة التي تم الحصول عليها من برنامج Lee تم إيجاد عدد أيونات حزمة الآزوت الناتجة عند كل قيمة للضغط وكانت النتائج كما هي موضحة في الجدول (1) الآتي:

الجدول (1): تغير عدد أيونات الأزوت عند تغير الضغط

الضغط P_0 (Torr)	عدد أيونات الحزمة Ions
1	8.7E+14
2	1.4E+15
3	1.8E+15
4	2.2E+15
5	2.4E+15
6	2.6E+15
7	2.7E+15
8	2.8E+15
9	2.9E+15
10	2.8E+15

يظهر من النتائج ازدياد عدد أيونات الأزوت الصادرة مع ازدياد الضغط حتى الوصول إلى قيمة عظمى ($2.9E+15$ ions) عند الضغط (9 Torr) ثم يبدأ ينخفض قليلاً عند الضغط (10 Torr) كما هو موضح في الشكل (3).



الشكل (3): تغير عدد أيونات الأزوت عند تغير الضغط

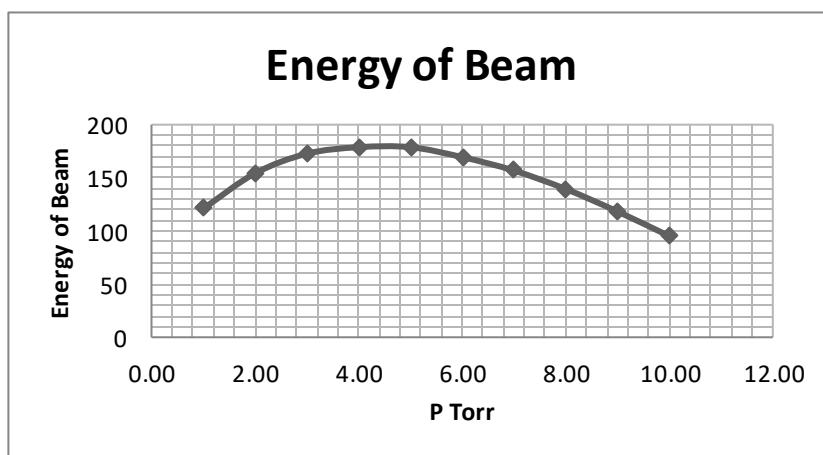
تغير طاقة حزمة أيونات الأزوت:

تم حساب طاقة حزمة أيونات الأزوت الناتجة كما هو موضح في الجدول (2) الآتي:

الجدول (2) تغير طاقة حزمة أيونات الأزوت عند تغير ضغط الغاز

الضغط P_0 (Torr)	طاقة حزمة الأيونات (Joul)
1	121.0
2	154.2
3	172.7
4	178.8
5	178.8
6	169.5
7	156.8
8	139.5
9	118.3
10	95.2

وبرسم تغيرات طاقة حزمة أيونات الأزوت الصادرة بتغير الضغط نلاحظ ازدياد طاقة الحزمة من القيمة (121 Joule) عند الضغط (1 Torr) إلى القيمة (178.8 Joule) عند الضغط (5 Torr) ثم تنخفض مع الاستمرار بزيادة الضغط كما هو موضح في الشكل (4).



الشكل (4): تغير طاقة حزمة أيونات الأزوت عند تغير الضغط

يمكن وفقاً لهذه الميزات استخدام حزمة الأيونات الصادرة عن انهيار قبضة البلازما المتشكلة في جهاز البلازما المحرقة الكثيفة في ترسيب الأفلام الرقيقة ولذلك فقد قمنا بدراسة نظرية لاستخدام

حزمة أيونات الأزوت الصادرة عن جهاز NX2 واصطدامها بركيزة من التيتانيوم للحصول على فلم رقيق TIN من خلال دراسة طيف طاقة أيونات الأزوت الصادرة وحساب طاقة كل أيون وإيجاد عدد الأيونات الوالصلة إلى الركيزة والعوامل المؤثرة عليها.

طيف طاقة حزمة أيونات الأزوت:

كما ذكرنا سابقاً يؤدي انهيار قبضة البلازما (pinch) إلى توليد حل كهربائي يعمل على تسريع الأيونات والإلكترونات باتجاهين متعاكسين بسرعات عالية جداً، إذ تتسع الأيونات انطلاقاً من قمة المصعد بشكل مخروطي بطاقة من عشرات KeV إلى عدة MeV. وجد تجريبياً أن طيف الطاقة لحزمة الأيونات يتبع لقانون الطاقة التجاري [20]:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-x} \quad \dots\dots\dots (1)$$

حيث: E طاقة الأيون و N عدد الأيونات و x عدد يقع ضمن المجال (5-2) في حالتنا نأخذ $x=3.5$ والذي يوافق المجال الطاقي $20 \text{ KeV} < E < 500 \text{ KeV}$ [21] حيث تم اختيار هذا المجال الطاقي بحيث تكون القيمة الصغرى (20 KeV) متوافقة مع الكمون الأعظمي المطبق على أقطاب جهاز البلازما المحرقة الكثيفة (كمون بنك المكثفات) والقيمة العظمى (500 KeV) تأخذ بعين الاعتبار العدد القليل جداً من الأيونات الحاملة لهذا المقدار من الطاقة [20]. بتعويض قيمة x في المعادلة (1) نجد:

$$\frac{dN}{dE} = \alpha E^{-3.5} \quad \dots\dots\dots (2)$$

بإجراء التكامل بالنسبة للطاقة من القيمة 20 KeV وحتى القيمة E :

$$dN = \alpha E^{-3.5} dE$$

$$N(E) = \int_{20}^E \alpha \cdot E^{-3.5} \cdot dE = \frac{\alpha}{2.5} [5.59 \times 10^{-4} - E^{-2.5}]$$

$$N(E) = \frac{\alpha}{2.5} [5.59 \times 10^{-4} - E^{-2.5}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

وبالتالي يمكن الحصول على قيمة الطاقة التي يحملها كل أيون من أيونات الأزوت المقدوفة من قبضة البلازما:

$$E = \left[5.59 \times 10^{-4} - \frac{2.5}{\alpha} N \right]^{-0.4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

حيث: $\alpha = 1.12 \times 10^{19}$ ثابت [21].

تحديد قيمة ضغط غاز الأزوت التي يتحقق عندها أعلى قيمة للطاقة التي يحملها الأيون:

بالاستقادة من قيم عدد أيونات الأزوت التي تم حسابها وباستخدام العلاقة (4) تم حساب قيمة الطاقة التي يحملها أيون عند قيم ضغط الغاز التي تحقق صحة العلاقة وكانت النتائج كالتالي:

$E = 23.72 \text{ KeV}$	\Leftarrow	ضغط الغاز $P = 1 \text{ Torr}$
$E = 27.75 \text{ KeV}$	\Leftarrow	$P = 2 \text{ Torr}$
$E = 33.22 \text{ KeV}$	\Leftarrow	$P = 3 \text{ Torr}$
$E = 47.47 \text{ KeV}$	\Leftarrow	$P = 4 \text{ Torr}$
$E = 71.31 \text{ KeV}$	\Leftarrow	$P = 5 \text{ Torr}$

نلاحظ من أنه عند قيمة الضغط $P = 5 \text{ Torr}$ يتحقق عندها أعلى قيمة للطاقة التي يحملها أيون الأزوت.

حساب عدد أيونات الأزوت الوالصلة إلى ركيزة التيتانيوم:

تصدر أيونات الأزوت ضمن مخروط رأسه يقع على قبضة البلازمما وقاعدته تقع على الركيزة، أي أنه ليس كل الأيونات الصادرة عن قبضة البلازمما سوف تسقط على الركيزة لذلك من الضروري حساب عدد الأيونات الساقطة على الركيزة حيث تعطي بالعلاقة [21]:

$$N_d = \frac{N}{\Delta h \cdot \sigma} \quad (5)$$

حيث: Δh سماكة الركيزة

σ الزاوية المجمدة التي تصدر ضمنها الأيونات وتعطي بالعلاقة:

$$\sigma = \pi \cdot (L \cdot \tan \theta)^2 \quad (6)$$

حيث: θ زاوية رأس المخروط

L المسافة بين قبضة البلازمما والركيزة

بفرض أن $\theta = 20^\circ$ و $L = 20 \text{ cm}$ وسماكة العينة $\Delta h = 0.7 \text{ cm}$

ولدينا عدد أيونات حزمة الأزوت عند قيمة ضغط الغاز $P = 5 \text{ Torr}$ لها القيمة $N = 2.4 \times 10^{15} \text{ ions}$

وبالتعويض في العلاقات (5) و (6) نجد:

$N_d = 3.2 \times 10^{14} \text{ ions}$ وهو عدد أيونات الأزوت الوالصلة إلى ركيزة التيتانيوم.

وبالتالي يمكن حساب قيمة الطاقة التي تحملها هذه الأيونات وذلك حسب زمن تعرض الركيزة لها حيث أثبتت الدراسات التجريبية إمكانية الحصول على الفلم TIN [21].

5. الاستنتاجات

نظرًا لإمكانية استخدام جهاز البلازمما المحرقية كمنبع للأيونات للاستخدام في اصطناع المواد وصناعة الأفلام الرقيقة فقد قمنا بإجراء دراسة نظرية للاستقادة من خصائص حزمة أيونات الأزوت

التي توصلنا إليها في بحثنا للحصول على الفيلم الرقيق TIN. فمنا بإيجاد طيف طاقة أيونات الأزوت الصادرة وتمكننا من تحديد قيمة ضغط غاز الأزوت ($P = 5$ Torr) حيث عند هذه القيمة يحمل أيون الأزوت أكبر مقدار من الطاقة $E = 71.31$ KeV. تم حساب عدد الأيونات الوالصلة إلى ركيزة التيتانيوم $N_d = 3.2 \times 10^{14}$ ions.

المراجع

- [1] Ahmad, R., Khan, I. A., Hussain, T., & Umar, Z. A. (2017). Plasma Focus Device: A Novel Facility for Hard Coatings. In *Plasma Science and Technology for Emerging Economies* (pp. 355-412). Springer, Singapore.
- [2] J.W. Mather, Formation of a high-density deuterium plasma focus. *Phys. Fluids* 8(2), 366–377 (1965).
- [3] N.V. Filippov, T.I. Filippova, V.P. Vinogradov, Dense, high-temperature plasma in a noncylindrical Z-pinch. *Nucl. Fusion Suppl.* 2, 577–587 (1962).
- [4] E.J. Lerner, S. Krupakar Murali, D. Shannon, A.M. Blake, F.V. Roessel, Fusion reaction from greater than 150 keV ions in a dense plasma focus plasmoid. *Phys. Plasmas* 19, 032704 (2012).
- [5] S. Lee, P. Lee, G. Zhang, X. Feng, V.A. Gribkov, M. Liu, A. Serban, T.K. Wong, High rep rate high performance plasma focus as a powerful radiation source. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 26, 1119–1126 (1998).
- [6] S. Hussain, M. Shafiq, R. Ahmad, A. Waheed, M. Zakaullah, Plasma focus as a possible X-ray source for radiography. *Plasma Sources Sci. Technol.* 14, 61–69 (2005).
- [7] M.A. Tafreshi, M.M. Nasseri, N. Nabipour, D. Rostamifard, A. Nasiri, Application of plasma focus device in fast industrial radiography. *J. Fusion Energy* 33(6), 689–692 (2014).
- [8] M.J. Inestrosa-Izurieta, P. Jauregui, L. Soto, Deposition of materials using a plasma focus of tens of joules. *J. Phys. Conf. Ser.* 720, 012045 (2016).
- [9] R.S. Rawat, V. Aggarwal, M. Hassan, P. Lee, S.V. Springham, T.L. Tan, S. Lee, Nano-phase titanium dioxide thin film deposited by repetitive plasma focus: ion irradiation and annealing based phase transformation and agglomeration. *Appl. Surf. Sci.* 255, 2932–2941 (2008).
- [10] M. Sadiq, M. Shafiq, A. Waheed, R. Ahmad, M. Zakaullah, Amorphization of silicon by ion irradiation in dense plasma focus. *Phys. Lett. A* 352, 150–154 (2006).
- [11] Z.P. Wang, H.R. Yousefi, Y. Nishino, H. Ito, K. Masugata, Preparation of silicon carbide film by a plasma focus device. *Phys. Lett. A* 372, 7179–7182 (2008).
- [12] R.S. Rawat, M.P. Srivastava, S. Tandon, A. Mansingh, Crystallization of an amorphous lead zirconate titanate thin film with a dense-plasma-focus device. *Phys. Rev. B* 47, 4858–4862 (1993).
- [13] Z.Y. Pan, R.S. Rawat, R. Verma, J.J. Lin, H. Yan, R.V. Ramanujan, P. Lee, S.V. Springham, T.L. Tan, Miniature plasma focus as a novel device for synthesis of soft magnetic FeCo thin films. *Phys. Lett. A* 374, 1043–1048 (2010).

- [14] O. Mangla, S. Roy, K. Ostrikov, Dense plasma focus-based nanofabrication of III–V semiconductors: unique features and recent advances. *Nanomaterials* 6, 4–16 (2016).
- [15] J.N. Feugeas, E.C. Llonch, C.O. de Gonzalez, G. Galambos, Nitrogen implantation of AISI 304 stainless steel with a coaxial plasma gun. *J. Appl. Phys.* 64, 2648–2651 (1988).
- [16] R.S. Rawat, W.M. Chew, P. Lee, T. White, S. Lee, Deposition of titanium nitride thin films on stainless steel AISI 304 substrates using a plasma focus device. *Surf. Coat. Technol.* 173, 276–284 (2003).
- [17] S. Lee and S. H. Saw. Plasma focus ion beam fluence and flux—For various gases. *PHYSICS OF PLASMAS* 20, 062702 (2013).
- [18] Lee.S., Radiative dense plasma focus computation package: RADPF.
- [19] Lee, S., & Saw, S. H. (2013). Scaling of Ion Beams from Plasma Focus in Various Gases. INTI International University Nilai Malaysia, 14 June 2013.
- [20] M. Hassan , A. Qayyum , R. Ahmad , R.S. Rawat , P. Lee , S.M. Hassan , G. Murtaza , M. Zakaullah. Dense plasma focus ion-based titanium nitride coating on titanium. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 267 (2009) 1911–1917.
- [21] G S'anchez and J Feugeas. The thermal evolution of targets under plasma focus pulsed ion implantation. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30 (1997) 927–936