الفصل الخامس

النتائج ومناقشتها

Results and discussion

في هذه الدراسة تم **أولاً** اختبار صلاحية النموذج العددي الذي وضع بواسطة محمود وجمال (Mahmoud and Gamal,1995) لتفسير ظاهرة تأين أبخرة القلويات المشعة بواسطة أشعة ليزر منغمة للانتقال الأول في ذرات الروبيديوم . **ثانيًا** تطوير النموذج العددي بأخذ في الاعتبار عمليات فيزيائية تعمل على زيادة كل من كثافة الالكترونات والأيونات . وطبق النموذج على الظروف المعملية التي أجريت بواسطة باربير وشيري (Barbier and Che'ret,1987) وفيها تم تشعيع بخار الروبيديوم بكثافة ابتدائية تساوي 10^{13} cm^{-3} ودرجة حرارة للبخار تساوي 450 K بواسطة أشعة ليزر ذات قدرة P تتراوح مابين 50-500 mW ، والتي تعطي شدة استضاءة من العلاقة $I = P\backslash \pi r^2$ حيث r هي نصف قطر الحزمة المجمعة (r = 0.11 cm) واستخدم طولين لأشعة الليزر هما 795 nm و 780 nm ليتوافقا مع الانتقال $5s \rightarrow 5p_{1/2,3/2}$ على الترتيب .

فيما يلي يتم عرض ومنافشة نتائج الحسابات التي تم الحصول عليها تحت هذه الظروف المعملية ومقارنتها بالقيم المقاسة عمليًا .

5- أ النموذج العددي : نتائج الحسابات .

5 – A Numerical model : Results of computation .

أجريت الحسابات بحل معادلات المعدل بفرض وجود كثافة ضئيلة جدًا من الالكترونات في حجم التفاعل قبل إشعال مصدر الليزر . وقد أخذت هذه الكثافة مساوية 3.0×10^{-2} e/cm^3 . كما أن القيم الابتدائية لكثافة المستويات المثارة تم حسابها كما يوضح

جدول (1-5) . وقد أعطى خارج البرنامج الحسابي عدد كبير من المعاملات والتي سوف نعرضها فيما يلي .

5- أ – 1 دالة توزيع طاقة الالكترون .

5 – A - 1 Electron energy distribution function .

استخدمت هذه الحسابات لدراسة تأثير زمن التشعيع على دالة توزيع طاقة الالكترونات عند قيم مختلفة لقدرة الليزر ، كما سنوضح فيما يلي :

5- أ- 1 – 1 التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات .

5 – A – 1 – 1 Time evolution of the electron energy distribution function .

في شكل (1-5) تم تمثيل التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات عند قيمة قدرة ليزر (i) 50 mW خلال فترة تشعيع تغطي مدى من 1 ns إلى 200 ns . وتهدف هذه العلاقة لدراسة التكوين الزمني خلال فترة التشعيع للعمليات المسؤولة عن نمو وتسخين الالكترونات الابتدائية . يتضح من هذا الشكل أن دالة توزيع طاقة الالكترونات لها تركيب طيفي يتكون من عدد من القمم العظمى(a , b , b` , c , c` , d , e) والتي لا يتغير موقعها بزيادة زمن التشعيع ، و إنما يتغير فقط ارتفاعها بزيادة الزمن . وقد أعزيت القمة الأولى a والتي تقع عند قيم منخفضة من الطاقة (تقترب من الصفر) إلى عملية التأين المشارك . أما القمم b , b` فأرجعت إلى الالكترونات التي نتجت عن تأين بننج خلال تصادمات ذرات الروبيديوم المثارة لأي مستوى nl مع ذرات الروبيديوم المثارة للمستوى 5p . وقد وجد عمليًا أن الذرات المثارة في المستوى nl تناظر المستويات 6d , 5d والتي تملأ خلال عمليتي مشاركة الطاقة والاضمحلال الإشعاعي من المستوى العلوي 8s (Barbier and Che'ret,1983) . وبشكل عام فإن التركيب الطيفي لدالة توزيع طاقة الالكترونات يوضح سيادة عملية تأين بننج على التأين المشارك ، والذي يمكن أن يحدث أيضًا خلال التصادم بين ذرات الروبيديوم المثارة للمستويات العليا nl ومستوى الرنين 5p عند مسافات بينية صغيرة لأنوية الذرات المتصادمة ($R \leq 5A^o$) وتنتج هذه الذرات المثارة في المستوى nl خلال تصادمات مشاركة الطاقة (Energy pooling collisions) (Barbier and Che'ret,1983) . وتأكيد ذلك من القيم المرتفعة لمساحات مقطع عملية تأين بننج والتي تتراوح مابين $10^{-13} \rightarrow 10^{-12}$ cm^2 . وقد تم توضيح ذلك لأول مرة من خلال القياسات الممتدة التي أجريت بواسطة شيري و

مجموعته (Che'ret et. al. ,1982) لتعين مساحات مقطع عمليات تأين بننج والتأين المشارك لأنظمة تحتوي ذرا ت روبيديوم مثارة لمستويات عليا nl وذرا ت الروبيديوم المثارة لمستوى رنيني 5p ، وأوضحت هذه القياسات أن التفاعل طويل المدى بين ثنائي القطب وثنائي القطب يحث على الترابط الرئيسي مع منطقة الاستمرار في عملية تأين بننج ، كما توضح المعادلة التالية .

$$Rb(nl) + Rb(5p) \rightarrow Rb^{+} + Rb(5s) + e(\ 4.19eV - E_{nl}) \qquad (5-1)$$

أما القمم c , c` فقد أعزي تكونها إلى تصادمات فائقة المرونة من الدرجة الأولى بين الالكترونات الحرة الناتجة عن عملية التأين المشارك بطاقة منخفضة (تقترب من الصفر) مع ذرات الروبيديوم المثارة للمستوى 5p والتي تعطي كل منها مقدار من الطاقة يساوي 1.67 eV وفقا للمعادلة

$$Rb(5p) + e(\varepsilon) \rightarrow Rb(5s) + e(\varepsilon + 1.67eV) \qquad (5-2)$$

ويتحدد الزمن اللازم للتصادمات فائقة المرونة للالكترونات ذات الطاقة 0.25eV بمدى يتغير مابين 4×10^{-6} s $\rightarrow$ 4×10^{-7} s لكثافة المستوى المثار 5p التي تتغير مابين $10^{12} \rightarrow 10^{13}$ cm^{-3} . وهكذا نجد أن هذا الزمن أطول كثيرًا من الزمن اللازم لانسياب الالكترونات 10^{-8} s .

أما القمة d عند طاقة 3 eV يمكن أن ترجع إلى عمليات تصادم فائق المرونة من الدرجة الثانية لالكترونات ناتجة عن عملية التأين المشارك . والتي فيها تنتقل طاقة ذرة مثارة في المستوى 5p إلى الكترون له طاقة تساوي أو تزيد عن طاقة المستوى 5p .

أما القمة e ربما ترجع إلى تصادم فائق المرونة من الدرجة الثالثة بين الكترونات نتجت عن تأين مشارك أو تأين بننج ليكتسب طاقة تصل إلى ما يزيد عن طاقة التأين (> 4.19 eV) .

ولدراسة تأثير قدرة الليزر على التركيب الطيفي لدالة توزيع طاقة الالكترونات شكل (5-1) يمثل التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات عند قيم قدرة

الليزر (ii) 300 mW – (iii) 500 mW لنفس الفترة الزمنية من 1 إلى 200 ns . يتضح من هذا الشكل أن زيادة قدرة الليزر تؤدي فقط إلى زيادة قيم دالة التوزيع مما يدل على زيادة معدل العمليات الفيزيائية ، ويوضح ذلك عدم تغير مواضع القمم ، أي تطابق مواضع القمم مع اختلاف كل من قدرة الليزر على مدى فترة التشعيع . مع ملاحظة اختلافات طفيفة في ارتفاع القمم بزيادة قدرة الليزر . تؤكد هذه النتيجة تحليل العمليات الفيزيائية الذي أعطي لشكل (5-1) حيث تعبر القمة a عن تأين مشارك ، بينما القمم b, b` تعبر عن تأين بننج ، أما c , c` فهي تعبر عن التصادم فائق المرونة الأول .

5– أ – 1 – 2 مقارنة دالة توزيع طاقة الالكترونات .

5 – A – 1 – 2 Comparison of the electron energy distribution function .

شكل (5-2) يوضح مقارنة بين القيم المحسوبة لدالة توزيع طاقة الالكترونات لقيم مختلفة لقدرة الليزر عند فترة تشعيع 200 ns . يؤكد هذا الشكل التركيب الطيفي لدالة توزيع طاقة الالكترونات مع تغير قدرة الليزر ، وهذا بالتالي يدل على أن زيادة قدرة أشعة الليزر لا تغير من العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلي نمو وتسخين كثافة الالكترونات . والنقطة الهامة التي يمكن استنباطها من هذه الدراسة هي أنه يمكن أن تتكون بلازما في بخار الروبيديوم بكثافة تصل إلى 10^{13} cm^{-3} ، حتى عند القيم المنخفضة لكل من قدرة الليزر وكثافة الذرات وذلك من خلال عمليات تأين تصادمي .

5– أ – 2 دراسة التأثير المفرد للعمليات الفيزيائية .

5 – A – 2 Study of the individual effect of the physical processes .

للتأكد من منشأ الالكترونات الابتدائية المسؤولة عن تكون البلازما أجريت الحسابات لدراسة التأثير المفرد لكل عملية فيزيائية على دالة توزيع طاقة الالكترونات عند قدرة لأشعة الليزر 50 mW (شكل 5-3) وقدرة 500 mW (شكل 5-4) . يعطي كل من الشكلين مقارنة بين دالة التوزيع محسوبة عند نهاية زمن التشعيع في وجود وعند إهمال كل من العمليات الآتية (i) التأين المشارك ، (ii) تأين بننج ، (iii) مشاركة الطاقة ، (iv) التصادم فائق المرونة . يتضح من الشكل (5-3) أنه عند إهمال عملية التأين المشارك شكل (i) تختفي قيمة دالة التوزيع الممثلة بالقمة a ، مما يدل على أن هذه القمة تنتج أساسًا عن الكترونات نتجت خلال عملية التأين المشارك ، بالإضافة إلى ذلك فإن دالة التوزيع المحسوبة عند إهمال هذه

العمليـــة (منحنى 2) تقـــع أدنى تلك المحسوبة في وجودها (منحنى 1) عـــــلى الـــمـــــدى 0.75 → 4.25 eV . ومع زيادة قدرة الليزر (شكل 4-5) تنخفض القمة a إلى قيمـــة تعـــادل تقريبًا 10^3 مما يدل على أن هناك عملية أخرى تساهم في الحصول علـــى الكترونـــات ذات طاقات منخفضة . كما أنه عند المدى المرتفع من الطاقة لوحظ أن قيم دالة التوزيع لا تتـــأثر كثيرًا بإهمال عملية التأين المشارك . وربما يرجع ذلك إلى أنه بزيادة قـــدرة الليـــزر فـــإن عمليات التأين مثل تأين بننج والتأين بالتصادم الالكتروني يمكنها أن تتغلب على الفقـــد فـــي كثافة الالكترونات الناتج عن إهمال عملية التأين المشارك .

أما في الشكل (ii) والذي فيه تم إهمال عملية تأين بننج (منحنى 2) فنجـــد أن دالـــة التوزيع المحسوبة تختفي تمامًا عند القمم b , b` مما يؤكد أن كثافة الالكترونات تنتج عن عملية تأين بننج ، بالإضافة إلى ذلك فإنه عند القدرة المرتفعة (شكل 4-5) فنجد أنه على الرغم من اختفاء القمتين b , b` إلا أن قيم دالة التوزيع على المدى 0.75 → 4.25 eV تتوافق في حالة وجود هذه العملية (منحنى 1) وإهمالها (منحنى 2) ، بعكس الحال عند القيم المنخفضة للقدرة (شكل 3-5) فنجد أن قيمة دالة التوزيع الممثلة بمنحنى(2) تقع أدنى منحنى (1) على مـــــدى الطاقة 1. 5 → 2. 5 eV . وذلك يشير إلى أن هذه العملية تؤدي إلى زيادة دالة التوزيع علـــى هذا المدى من الطاقة ، ويعزى ذلك إلى الالكترونات التي تنتج عن عملية بننج بطاقة تتراوح ما بين 0. 5 → 0.25 eV ويتم تسخينها خلال تصادم فائق المرونة مع ذرات المستوى المشبع عند طاقة 1.67 eV .

وبـــإهمال عمليـــة مشـــاركة الطاقة شكل(iii) عند القيمة المنخفضة لقـــدرة الليـــزر (شكل 3-5) والقيمة المرتفعة (شكل 4-5) للقدرة نلاحظ أيضًا اختفاء القمتان b , b` ، بينمـــا تتوافق قيم الدالة تمامًا للمنحنيين (1) و(2) على المدى المرتفع من الطاقة . ويدل ذلك علـــى أن هذه العملية هي المسؤولة عن زيادة نمو إسكان مستويات الإثارة العليا والتي تساهم بشكل مباشر في زيادة معدل حدوث عملية تأين بننج .

أما العملية الأخيرة شكل (iv) والمسؤولة عن تسخين (زيادة طاقة) الالكترونات خلال تصادم فائق المرونة مع ذرات المستوى المشبع 5p . فنجد أنها تؤثر فقط على المدى المرتفع من طاقة الالكترونات 0.75 → 4.25 eV ويؤكد ذلك اختفاء قيم دالة التوزيع على هذا المدى

كما يوضح المنحنى (2) في الشكل (iv) لقدرة الليزر المنخفضة (شكل 3-5) وقدرة الليزر المرتفعة (شكل 4-5) .

5 – أ – 3 التكوين الزمني لكثافة الالكترونات .

5 – A – 3 Time evolution of the electrons density .

لدراسة تأثير قدرة الليزر على التكوين الزمني لكثافة الالكترونات شكل (5-5) يمثل التغير في الكثافة خلال فترة التشعيع عند قيم لقدرة أشعة الليزر 50 mW (منحنى 1) ، 300 mW (منحنى 2) ، 500 mW (منحنى 3) . نلاحظ من هذا الشكل أن كثافة الالكترونات تزيد بشكل سريع عند بداية الزمن ثم تتزايد تدريجيًا إلى 100 ns بعدها تأخذ القيم في الزيادة الطفيفة حتى نهاية الفترة الزمنية . كما أن كثافة الالكترونات تتزايد مع زيادة قدرة الليزر حيث تتغير قيمتها من $10^{1}\ cm^{-3}$ إلى $10^{4}\ cm^{-3}$ عند بداية الفترة الزمنية مع تغير القدرة من 50 mW إلى 500 mW ، بينما عند نهاية الزمن نجد أن كثافة الالكترونات تصل إلى قيمة $10^{6}\ cm^{-3}$ عند القدرة المنخفضة (منحنى 1) وتزداد لتصل إلى $10^{9}\ cm^{-3}$ عند القدرة المرتفعة(منحنى 3) ، أي أنها تعادل نسبة عالية من تأين البخار مما يدل على زيادة معدل التأين بزيادة القدرة . ويمكن تفسير الزيادة لكثافة الالكترونات على النحو التالي : خلال المراحل الأولية لزمن التعريض تتولد الالكترونات بمعدل مرتفع خلال عملية التأين المشارك ، بعدها يبدأ معدل نمو كثافة الالكترونات في الانخفاض نتيجة للمنافسة بين عمليتي إنتاج الالكترونات خلال تأين بنتج وكذلك التأين بالتصادم غير المرن للذرات في المستوى الأرضي والمستويات المثارة وكذلك عمليات فقد الالكترونات بواسطة إعادة الاتحاد الإشعاعي وثلاثي الأجسام .

ولتوضيح تغير كثافة الالكترونات بتغير قدرة أشعة الليزر يعطي شكل (5-6) تغير كثافة الالكترونات كدالة في قدرة الليزر لقيم مختلفة لزمن تشعيع بخار الروبيديوم . نلاحظ في هذا الشكل أنه بزيادة القدرة تزداد كثافة الالكترونات تدريجيًا إلى قيمة القدرة 400 mW لتعاني بعدها من زيادة سريعة ، كما نلاحظ انخفاض معدل الزيادة في نمو كثافة الالكترونات مع زيادة زمن التشعيع . حيث نجد أن قيم كثافة الالكترونات لا تتغير بشكل ملحوظ عند تغير فترة التشعيع من 100 ns إلى 200 ns . وهذا يتفق مع الزيادة البطيئة في كثافة الالكترونات خلال هذه الفترة الموضحة في شكل (5-5) .

5 – أ – 4 متوسط طاقة الالكترون . **5 – A – 4 Electron mean energy .**

من دراسة دالة توزيع طاقة الالكترونات نلاحظ أن الالكترونات تغطي مدى من الطاقة يتراوح ما بين 0 , 4.25 eV . هذا بالتالي يؤدي إلى احتمالية حدوث عمليات تصادمية يكتسب فيها الالكترون مقدارًا من الطاقة . كما أنه يمكن أن يفقد هذه الطاقة خلال عملية تصادم أخرى . من هنا نجد أن متوسط طاقة الالكترون يتغير خلال فترة التشعيع . يؤكد ذلك شكل (5-7) والذي يمثل تغير متوسط طاقة الالكترونات كدالة في الزمن عند القيم المختلفة للقدرة . يتضح من الشكل أنه عند بداية الزمن يبدأ متوسط طاقة الالكترون بقيم منخفضة ويتزايد سريعًا خلال النانوثانية الأولى يتبعه زيادة تدريجية حتى 50 ns ليستقر بعدها إلى نهاية زمن التشعيع وذلك للقيم المنخفضة لقدرة الليزر (منحنى 1) . أما عند أعلى قيمة للقدرة 500 mW (منحنى 3) فنجد أن قيم متوسط طاقة الالكترون على المدى الزمني من 10 ns إلى 200 ns تقع أدنى من كل من القيم المحسوبة عند القدرة 50 mW (منحنى 1) و 300 mW (منحنى 2) وتتزايد ببطء حتى نهاية زمن التشعيع . ويتوافق هذا التغير في متوسط الطاقة للمنحنى (3) مع الزيادة في كثافة الالكترونات (شكل 5-5) خلال زمن التشعيع لنفس المنحنى ، حيث يفسر هذا الانخفاض في متوسط طاقة الالكترون الزيادة في كثافة الالكترونات نتيجة لفقد طاقة الالكترونات خلال عملية تصادم غير مرن يؤدي إلى تأين ذرات الروبيديوم .

أوضحت هذه الدراسة الدور الهام الذي تلعبه كل من عمليتي التأين المشارك وتأين بنج في الحصول على الكثافة الابتدائية للالكترونات المسؤولة عن تكون البلازما في بخار الروبيديوم . وحيث أن هاتين العمليتين ينتج عنهما تكون تيار من الأيونات الموجبة الجزيئية والذرية على الترتيب . لذلك فيما يلي نوضح التكوين الزمني لهذه الأيونات .

5 – أ – 5 التكوين الزمني لنمو تيار الأيونات .

5 – A – 5 Time evolution of the ionic current .

يوضح شكل (5-8) نمو كثافة الأيونات الجزيئية الناتجة عن عملية التأين المشارك خلال زمن التشعيع عند القيم المختلفة لقدرة الليزر 50 mW (منحنى 1) ، 300 mW (منحنى 2)، 500 mW (منحنى 3) . نلاحظ في هذا الشكل أن تيار الأيونات يتزايد مع زيادة كل من زمن التشعيع وقدرة الليزر ، وتتوقف قيمة التيار عند نهاية الزمن على قدرة الليزر ، فنجد أنه عند القيم المنخفضة للقدرة (منحنى 1) يبدأ التيار بقيمة منخفضة جدًا (10 أيونات) وينتهي عند 10^4 أيون ، بينما عند أعلى قيمة للقدرة (منحنى 3) فإن كثافة الأيونات تبدأ بقيمة 10^4 أيون وتتزايد إلى أن تصل في نهاية الزمن 2×10^6 أيون . كما نلاحظ أيضًا أن معدل نمو التيار يزداد خلال الفترة الزمنية من 1 ns إلى 100 ns . بعدها ينخفض معدل نمو التيار حتى 200 ns . ويعزى هذا السلوك في نمو التيار للدور الفعال الذي تلعبه عملية التأين المشارك وهي العملية الوحيدة المسؤولة عن تكون تيار الأيونات الجزيئية ، نظرًا لاعتمادها على الكثافة العالية من الذرات في المستوى الرنيني المشبع 5p .

وتأكيدًا لهذه الدراسة شكل (5-9) يمثل العلاقة بين التيار الأيوني الجزيئي لبخار الروبيديوم وقدرة أشعة الليزر عند قيم مختلفة لزمن التشعيع . نلاحظ في هذا الشكل أنه عند 1ns يبدأ التيار بقيم منخفضة تتزايد أسيًا حتى 400 mW ، بعدها يعاني التيار من زيادة ملحوظة حتى 500 mW ، ويتكرر هذا السلوك عند الأزمنة المختلفة مع ملاحظة الزيادة السريعة في قيمة التيار من 1 ns إلى 5 ns وكذلك من 10 ns إلى 50 ns بعدها ينخفض معدل نمو التيار ، ويشير إلى ذلك تقارب المنحنيات من 5 إلى 7 . ويتفق ذلك مع التغير الزمني لنفس التيار الممثل في شكل (5-8) .

أما في حالة الأيونات الذرية شكل (5-10) فنجد أن كثافة الأيونات تبدأ بقيم منخفضة جدًا وتتزايد أيضًا بزيادة كل من زمن التشعيع وقدرة الليزر . وتتغير قيم تيار الأيونات الذرية عند بداية الزمن من 6×10^{-3} إلى 30 أيون ويناظر ذلك تغير في زيادة الكثافة عند نهاية الزمن من 2×10^3 (منحنى 1) إلى 2×10^6 أيون (منحنى 3) مع زيادة قدرة الليزر . بالإضافة إلى ذلك نلاحظ أن قيم التيار تتزايد بشكل سريع خلال الفترة الزمنية 1 → 5 ns لينخفض معدل الزيادة مع زيادة زمن التشعيع على المدى 100 → 200 ns . ويرجع هذا إلى الحقيقة التي تنص على أن هذا التيار ينتج أساسًا خلال عملية تأين بنج أثناء المراحل الأولى لزمن التشعيع 1 → 50 ns ، بعد هذه الفترة الزمنية يمكن للالكترونات الناتجة

عن هذه العملية أن تكتسب مقدارًا كافيًا من الطاقة لتعاني من تصادم غير مرن مع ذرات بخار الروبيديوم في المستوى الأرضي والمستويات المثارة مؤدية إلى تأينها ، وهذا بالتالي يعمل على زيادة التيار الذري ولكن بمعدل منخفض .

ولتأكيد هذا السلوك تم تمثيل العلاقة بين تغير تيار الأيونات الذرية مع قدرة الليزر عند قيم مختلفة لزمن التشعيع كما يوضح شكل (5-11) . نلاحظ في هذا الشكل أن قيم التيار تتزايد أيضًا بطريقة أسية مع قدرة الليزر على مدى قدرة 50 → 400 mW ، بعدها يعاني التيار من زيادة سريعة عند 500 mW . بالإضافة إلى ذلك فإن قيم التيار تتزايد بشكل سريع لنفس قيمة القدرة على مدى الزمن 1 → 100 ns ، بعدها ينخفض معدل الزيادة في قيمة التيار بشكل ملحوظ حيث تتقارب القيم المحسوبة والممثلة بالمنحنيات 5,6,7 . ويتفق ذلك مع التغير الزمني لنفس التيار الموضح في شكل (5-10) عند قيم القدرة 50 – 300 - 500 mW .

لاختبار صلاحية النموذج تمت مقارنة القيم المحسوبة والمقاسة عمليًا للأيونات الجزيئية والذرية بواسطة شيري ومجموعته (Che'ret et. al. ,1982) .

حيث تم في هذه التجربة تحليل ومشاهدة تيار الأيونات الذرية والجزيئية الناتجة عن عمليات تأين تصادمي لذرات الروبيديوم المثارة بالليزر ، وقد تم استخدام صيغة أساسية لوصف تيار الأيونات الذرية تعطى على النحو التالي :

$$I_{PI} = e\,V\,K_{PI}\,N(5s)\,N(nl) \qquad (5-3)$$

بينما تيار الأيونات الجزيئية أعطي بواسطة العلاقة :

$$I_{AI} = e\,V\,K_{AI}\,N^2(5p) \qquad (5-4)$$

في هذه العلاقات I_{AI} ، I_{PI} تمثل تيار الأيونات لتأين بيننج والتأين المشارك على الترتيب . e هي شحنة الالكترون . V هي حجم التفاعل والذي يساوي الحجم المتداخل لحزمتي أشعة

الليزر . وقد تم تقدير حجم التفاعل لحزمتى الليزر ليكـــون 1.0×10^{-2} cm^{-3} وفقـــا للشـــروط المعملية (Che'ret et. al. ,1982) .

شكل (5-12) يوضح تغير تيار الأيونات الجزيئية للروبيديوم مع قدرة الليزر ومقارنـــة ذلك بالقيم المقاسة عمليًا بواسطة شيري ومجموعته . وقد أوضح المنحنى توافق في الســـلوك مع القيم المقاسة عمليًا ، ويرجع هذا السلوك لعملية التأين المشارك .

شكل (5-13) يمثل مقارنة بين القيم المحسوبة والمقاسة عمليًا لتغيـــر تيـــار الأيونـــات الذرية مع قدرة الليزر لبخار الروبيديوم . وقد أوضح هذا الشكل تغيرًا أسيًا لتيار الأيونات مع قدرة الليزر ، ويرجع هذا التغير إلى عملية تأين بيننج .

وبشكل عام نجد في كل من الأشكال (5-12) و (5-13) أن هناك توافق في الســـلوك بين القيم المقاسة عملياً وتلك المحسوبة بواسطة النموذج ، مما يؤكد صلاحية النمـــوذج فـــي تفسير النتائج العملية وفقا للعمليات الفيزيائية التي أخذت في الاعتبار.

وحيث أن الأيونات الذرية تنتج أساسًا عن عملية تأين بننج والتي بدورها تعتمد علـــى كثافة مستويات الطاقة المثارة لذلك فيما يلي نقدم شرحًا تفصيليًا عن التكوين الزمني لكثافـــة المستويات المثارة .

5 – أ – 6 التكوين الزمني لكثافة المستويات المثارة .

5 – A – 6 Time evolution of the excited states .

من هذه الدراسة وجد أن كثافة المستويات المثارة تلعب دورًا هامًا في معـــدل حـــدوث العمليات التصادمية المسؤولة عن تأين البخار . ويعتمد هذا التغير على كل من زمن التشعيع وكذلك قدرة أشعة الليزر . من الجدول (5-1) يتضح أن كثافة هذه المستويات عند بداية زمن التشعيع تكاد أن تكون خالية . وقد أشارت نتائج الحسابات أن مستويات الطاقة التي تساهم في هذه الحالة هي 4d (a) , 6s (b) , 6p (c) , 5d (d) لذلك سوف نركز فقط على العوامل التـــي تؤدي إلى تغير هذه المستويات .

شكل (5-14) يوضح التغير الزمني لكثافة المستوى المثار 4d (a) عند القيم المختلفة لقـــدرة أشعة الليزر. نلاحظ في هذا الشكل أن كثافة المستوى تتزايد بتزايد كل مـــن قـــدرة الليـــزر وزمن التشعيع ، وقـــد لوحظ هذا السلوك لمستويات الطاقة المثارة المختلفـــة كمـــا توضـــح الأشكال (b),(c),(d) (5-14) مع اختلاف قيمة كثافة المستوى عند بداية ونهاية زمن التشـــعيع

لكل قيم القدرة . حيث نلاحظ أنه خلال فترة التشعيع للقيم المختلفة للقدرة تتغير كثافة المستويات على النحو التالية ، المستوى 4d تتغير قيمه من 10^4 إلى 10^9 ، المستوى 6s تتغير قيمه من 10^4 إلى 10^9 ، المستوى 6p تتغير قيمه من 10^5 إلى 10^{10} ، المستوى 5d تتغير قيمه من 10^2 إلى 10^6 . وربما ترجع هذه الكثافات إلى عملية مشاركة الطاقة وعملية إعادة الاتحاد ثلاثية الأجسام والتي تعمل بشكل فعال في زيادة كثافة مستويات الإثارة المرتفعة للذرة . كما يرجع الانخفاض في كثافة المستوى 5d إلى التأين السريع بواسطة الكترونات ذات طاقة منخفضة نتجت عن عملية تأين بننج والتي توضحها القمم b , b` في التركيب الطيفي للالكترونات عند قيم طاقة 0.5 eV , 0.25 واكتسبت طاقة خلال عملية تصادم فائق المرونة .

ولوضع النموذج في صورة أكثر شمولية وأخذ في الاعتبار بعض العمليات التي أشارت القياسات العملية لأهميتها في تكوين البلازما في أبخرة العناصر القلوية ، لذلك تم تطوير النموذج بدمج كل من عملية التأين الفوتوني وعملية هورنبك مولنار وعملية تكون زوج من الأيونات . حيث أشارت هذه القياسات إلى الدور الفعال الذي تلعبه هذه العمليات في تأين بخار الروبيديوم (Barbier et. al. ,1986;Barbier and Che'ret,1987) .

أجريت الحسابات بتطبيق هذا النموذج وفقا للبرنامج الموضح في ملحق (II) للحصول على النتائج التالية .

5 – ب نتائج النموذج المطور . 5 – B Results of the modified model .

تم تطبيق النموذج المطور لدراسة التأثير المفرد لكل عملية على حدا على البلازما المتكونة في بخار الروبيديوم ، من خلال التركيب الطيفي للالكترونات والتكوين الزمني للمعاملات المتعلقة به ، في وجود وعند إهمال كل عملية فيزيائية كما سنوضح فيما يلي .

5– ب –1 دراسة تأثير عملية التأين الفوتوني .

5 – B – 1 Study of the effect of photoionization process .

لمقارنة تأثير عملية التأين الفوتوني على البلازما المتكونة تم تطبيق النموذج العددي بأخذ في الاعتبار هذه العملية لحساب دالة توزيع طاقة الالكترونات ومتغيراتها عند نفس الفترة الزمنية للتشعيع وكذلك قيم قدرة الليزر .

5 – ب – 1 – 1 دالة توزيع طاقة الالكترون .

5 – B – 1 – 1 Electron energy distribution function .

يوضح شكل (5-15) مقارنة بين دالة التوزيع محسوبة في وجود (a) وعند إهمال (b) عملية التأين الفوتوني . نلاحظ في حالة وجود عملية التأين الفوتوني شكل (a) ظهور قمم عند طاقة 1.25 eV , 0.75 ، واختفاء القمة c عند 1 eV و تغير مواضع القمم على المدى المرتفع لطاقة الالكترونات ، مع زيادة قيمة الدالة بزيادة الفترة الزمنية للتشعيع وذلك عند القيم المختلفة لقدرة الليزر الممثلة بالأشكال 50 mW (5-15-A) ، 300 mW (5-15-B) ، 500 mW (5-15-C) . كما أن زيادة قدرة الليزر تعمل فقط على زيادة ارتفاع القمم ، أي أن زيادة القدرة تعمل على زيادة كثافة الالكترونات . وهذا يؤكد الدور الفعال الذي تلعبه هذه العملية في تكون البلازما .

ولإعطاء نظرة أعمق عن الدور الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني أجريت الحسابات لتعين دالة توزيع طاقة الالكترونات و دراسة الترابط بين هذه العملية والتأثير المفرد لكل من عملية التأين المشارك ، عملية تأين بننج ، عملية مشاركة الطاقة ، عملية التصادم فائق المرونة . حيث أن هذه العمليات هي المسؤولة عن الحصول على كثافة الالكترونات الابتدائية .

يمثل الشكل (5-16) مقارنة بين دالة توزيع طاقة الالكترونات محسوبة في وجود جميع العمليات (منحنى 1) وعند إهمال أحد العمليات الآتية والممثلة بمنحنى (2) على النحو التالي ، عملية التأين المشارك شكل (i) ، عملية تأين بننج شكل (ii) ، عملية مشاركة الطاقة شكل (iii) ، عملية التصادم فائق المرونة شكل (iv) .

نلاحظ من شكل (i) (إهمال عملية التأين المشارك) اختفاء القمة a مع تطابق منحنى (1) و منحنى (2) على مدى طاقة الالكترون . ويدل ذلك على أن كثافة الالكترونات التي تكون هذه القمة تنتج من عملية التأين المشارك . كما يشير التطابق بين منحنى (1) و منحنى (2) أو عدم التغير في قيم دالة التوزيع عند الطاقة (0.75 , 1 eV) أن هذه العملية لا تؤثر على عملية التأين الفوتوني .

كذلك في الشكل (ii) نجد أنه عند إهمال عملية تأين بننج تختفي تمامًا القمتان b,b́ عند طاقة 0.5 eV → 0.25 بينما تتطابق تقريبًا دالة التوزيع للمنحنيين (1) و(2) على المدى الذي

يعلو هذه القمة . وهذا يؤكد أن كثافة الالكترونات التي تكون هاتين القمتين تنتج عن عملية تأين بننج ، وأن هذه العملية لا تؤثر بشكل مباشر على عملية التأين الفوتوني .

وبملاحظة شكل (iii) فنجد أنه عند إهمال عملية مشاركة الطاقة تختفي كثافة الالكترونات عند طاقة 0.75 eV → 0.25 (أي الالكترونات الناتجة عن تأين بننج والتأين الفوتوني). وهذا يدل على أن عملية مشاركة الطاقة تعمل على زيادة كثافة مستويات الإثارة العليا ، والتي تساهم بشكل فعال في زيادة معدل هاتين العمليتين . بالإضافة إلى ذلك يلاحظ اختفاء القمة عند طاقة 2 eV ، والتي ترجع إلى الكترونات تنتج عن عملية تأين بننج وتكتسب طاقة خلال تصادم فائق المرونة مع ذرات المستويات المثارة . توضح هذه الدراسة تأثير عملية مشاركة الطاقة على عملية التأين الفوتوني .[132]

شكل (iv) يوضح مقارنة لدالة التوزيع المحسوبة في وجود وإهمال عملية التصادم فائق المرونة . نلاحظ اختفاء قيم الدالة تمامًا على مدى الطاقة الذي يزيد عن 1.5 eV وهو المدى الذي تؤثر فيه عملية التصادم فائق المرونة بشكل فعال . وهذا يؤكد التأثير الفعال لعملية التأين الفوتوني على تسخين الالكترونات من خلال عملية التصادم فائق المرونة .

ومع زيادة قدرة الليزر الأشكال (5-18) , (5-17) نجد أن دالة التوزيع تسلك نفس السلوك مما يؤكد أن زيادة القدرة تعمل فقط على زيادة قيمة الدالة ، و احتفاظ مواضع القمم عند نفس قيم الطاقة دلالة على عدم تغير العمليات الفيزيائية في هذه الحالة .

من دراسة دالة توزيع طاقة الالكترونات أمكن تحديد العمليات الفيزيائية المسؤولة عن تكون الكثافة الابتدائية للالكترونات ونموها ، وذلك عن طريق تحليل التركيب الطيفي للالكترونات على مدى الطاقة .

ولدراسة الدور الفعال الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني في تكون البلازما ، ومساهمة هذه العملية بجانب عمليات تأين بننج والتأين المشارك والتأين بالتصادم الالكتروني ، فيما يلي نوضح دراسة عن التكوين الزمني لكثافة الالكترونات .

5 – ب –1 –2 التكوين الزمني لكثافة الالكترونات .

5 – B – 1 – 2 Time evolution of the electrons density .

أجريت الحسابات للحصول على التكوين الزمني لكثافة الالكترونات خلال فترة التشعيع عند القيم المختلفة لقدرة الليزر، وتم تمثيل ذلك بيانيًا كما يوضح الشكل (5-19) . في

هذا الشكل يمثل منحنى (1) وجود جميع العمليات بينما منحنى (2) يمثل كثافة الالكترونات عند إهمال عملية التأين الفوتوني . من الشكل نلاحظ أن كثافة الالكترونات تزداد زيادة ملحوظة عند وجود عملية التأين الفوتوني كما يوضح المنحنى (1) عند القيم المختلفة لقدرة الليزر. ونلاحظ أن كثافة الالكترونات الممثلة بمنحنى (1) تأخذ قيم مرتفعة عند بداية زمن التشعيع ، وتتزايد تدريجيًا حتى نهاية الزمن . كما نلاحظ أيضًا عند القدرة المنخفضة 50 mW تبدأ كثافة الالكترونات عند بداية زمن التشعيع في وجود عملية التأين الفوتوني بمقدار يصل إلى 10^{7} (منحنى 1) ويصل في نهاية الزمن إلى 10^{10} e\cm^3 . و مع زيادة القدرة تصل كثافة الالكترونات عند نهاية الزمن إلى 10^{13} e/cm^3 .

من هذه الدراسة نجد أن عملية التأين الفوتوني تعمل على زيادة كثافة الالكترونات بطريقة مباشرة .

ومع زيادة قدرة أشعة الليزر نجد أن سلوك كثافة الالكترونات خلال فترة التشعيع في وجود وإهمال عملية التأين الفوتوني لا يختلف تمامًا عنه في حالة القدرة المنخفضة ، وإنما فقط تزداد كثافة الالكترونات مع زيادة قدرة الليزر . حيث تصل الكثافة عند أعلى قيمة للقدرة 500 mW إلى 10^{9} e\cm^3 في نهاية زمن التشعيع عند إهمال عملية التأين الفوتوني ، بينما يزداد هذا المقدار ليصل إلى حوالي 10^{13} e\cm^3 عند نفس الفترة الزمنية بأخذ هذه العملية في الاعتبار .

5- ب -1 – 3 تأثير التأين الفوتوني على متوسط طاقة الالكترون .

5 – B – 1 – 3 The effect of photoionization on the electron mean energy .

كما رأينا أن وجود عملية التأين الفوتوني يؤدي إلى زيادة كثافة الالكترونات والتي تظهر على شكل قمم في دالة توزيع طاقة الالكترونات عند الطاقات المنخفضة (0.75 , 1.25 eV) . وقد أعزي ذلك إلى الدور الفعال الذي تلعبه هذه العملية في زيادة معدل تأين المستويات المثارة التي تملأ خلال عملية مشاركة الطاقة . بالإضافة إلى أن هذه الزيادة في كثافة الالكترونات عند الطاقات المنخفضة يناظرها انخفاض في كثافة الالكترونات على المدى المرتفع من الطاقة مما يعطي تغير في متوسط طاقة الالكترون . وربما يرجع ذلك إلى زيادة معدل التأين الفوتوني عن معدل التأين بالتصادم الالكتروني والذي غالبًا ما ينتج عنه الكترونات تقع في المدى المرتفع من الطاقة . شكل (5-20) يمثل التغير الزمني لمتوسط طاقة الالكترون خلال زمن التشعيع عند القيم المختلفة

لقدرة الليزر (iii)500 mw , (ii) 300 mW , (i) 50 mW . ولدراسة تأثير عملية التأين الفوتوني منحنى(2) في هذا الشكل يمثل قيم متوسط الطاقة محسوبة عند إهمال هذه العملية . نلاحظ من منحنى (1) أن متوسط طاقة الالكترون يأخذ قيمًا ثابتة على مدى زمن التشعيع للقيم المختلفة للقدرة ، وتناظر هذه القيمة طاقة الالكترون التي تظهر عندها أعلى قمة في دالة التوزيع وهي 1.25 eV . ويدل ذلك على أن معظم الالكترونات في وجود عملية التأين الفوتوني يكون لها طاقة 1.25 eV .

نظرًا لأن عملية التأين الفوتوني تعمل على تآكل كثافة المستويات ، لذلك كان من الضروري دراسة تأثير عملية التأين الفوتوني على المستويات المثارة . لعمل ذلك أجريت الحسابات للحصول على التكوين الزمني للمستويات المثارة 4d (a) , 6s (b) , 6p (c) , 5d (d) كما يوضح الشكل(21-5) عند قيم القدرة 50 mW منحنى (1)، 300 mW منحنى (2) ، 500 mW منحنى (3) . وقد وجد أن عملية التأين الفوتوني لا تؤثر بشكل ملحوظ على التكوين الزمني لمستويات الطاقة المثارة ، وربما يرجع ذلك إلى تنافس كلٍ من عمليتي التأين الفوتوني وتأين بنج في تأين هذه المستويات . كما أظهرت دراسة تأثير الترابط بين العمليات المختلفة وهذه العملية أن كثافة المستويات لا تتأثر إلا عند إهمال عملية المشاركة في الطاقة حيث تختفي تمامًا كثافة المستوى مهما تغيرت قدرة الليزر كما يوضح المنحنى (4) في هذه الأشكال . وهذا يوضح الدور الفعال الذي تلعبه هذه العملية في زيادة كثافة المستويات المثارة .

5 – ب – 2 تأثير عملية تأين هورنبك مولنار .

5 – B – 2 The effect of Hornbeck –Molnar ionization process .

أجريت الحسابات باستخدام النموذج المطور الذي أخذ في الاعتبار فقط عملية تأين هورنبك مولنار لتعين التكوين الزمني لدالة توزيع طاقة الالكترونات على مدى زمن التشعيع يصل إلى 200 ns وذلك عند القيم المختلفة لقدرة الليزر (i) 50 mW, (ii) 300 mW, (iii) 500 mW ، كما يوضح الشكل (22-5) . نلاحظ في هذا الشكل أن وجود عملية تأين هورنبك مولنار يؤدي إلى زيادة طفيفة في قيم الدالة على مدى طاقة الالكترون ، مع عدم تغير مواقع القمم (شكل 1-5) . و يرجع ذلك إلى أن هذه العملية تنتج عن تصادم بين إحدى الذرات في مستويات الإثارة العليا التي يمكن أن تأخذ قيمًا مختلفة من الطاقة وذرة في المستوى الأرضي ، وبالتالي يؤدي إلى تكون كثافة من الالكترونات تغطي مدى الطاقة .

كما يلاحظ أيضًا أن قيم دالة التوزيع تزداد بزيادة كل من زمن التشعيع وقدرة أشعة الليزر، وهذا ما يؤكده شكل (5-23) والذي يمثل تأثير قدرة الليزر على قيم دالة التوزيع عند نهاية الفترة الزمنية (200 ns) . نلاحظ أن أعلى قيمة تقع عند قدرة 500 mW مع تماثل دالة التوزيع من حيث مواضع القمم مما يؤكد أن زيادة القدرة لا تغير في العمليات الفيزيائية ولكنها فقط تزيد من معدل حدوثها .

وتدعيمًا لهذه الدراسة في شكل (5-24) تم تمثيل التغير الزمني لكثافة الالكترونات الناتجة عن عمليات التأين في وجود عملية تأين هورنبك مولنار عند قيم قدرة الليزر تحت الدراسة . نلاحظ في هذا الشكل أن كثافة الالكترونات تبدأ بقيم منخفضة تتزايد مع زيادة الزمن لتصل إلى قيم تتراوح مابين $10^{8} \rightarrow 10^{10}\ cm^{-3}$ عند نهاية زمن التشعيع عند تغير قدرة الليزر من $50 \rightarrow 500\ mW$. وهذا يؤكد أن عملية تأين هورنبك مولنار تعمل على زيادة كثافة الالكترونات ، أي أنها تزيد من كثافة البلازما المتكونة .

وحيث أن زيادة كثافة الالكترونات تؤدي إلى زيادة احتمالية عمليات التصادم والتي بدورها تعمل على تغير في طاقة الالكترون خلال زمن التشعيع عند القيم المختلفة لقدرة الليزر ، شكل (5-25) يوضح تأثير عملية تأين هورنبك مولنار على التغير الزمني في متوسط طاقة الالكترون . يتضح من هذا الشكل أن متوسط طاقة الالكترون يبدأ بقيم منخفضة ويتغير بتغير قدرة الليزر خلال المراحل الابتدائية لزمن التشعيع ، وتتقارب قيم متوسط الطاقة مع زيادة الزمن ، حيث تستقر بقيمة حوالي 2 eV . مع أخذ في الاعتبار أن قيمة متوسط الطاقة تزيد بزيادة القدرة ؛ بعكس ماهو الحال عند إهمال هذه العملية ، حيث يتناقص متوسط طاقة الالكترون مع زيادة القدرة خلال نفس الفترة الزمنية شكل (5-7) . وهذا يوضح تأثير عملية هورنبك مولنار والتي فيها يتم الحصول على توزيع طيفي من الكترونات يغطي مدى واسع من الطاقة .

وعلى الرغم من أن عملية تأين هورنبك مولنار تعتمد أساسًا على تفاعل بين ذرة في المستوى الأرضي وأخرى في أحد المستويات المثارة العليا ذات الكثافة المنخفضة . فإن هذا التفاعل لم يؤثر بشكل ملحوظ في كثافة هذه المستويات كما يوضح شكل (5-26) والذي يمثل التغير الزمني لكثافة بعض المستويات المثارة التي تشارك في عملية هورنبك مولنار عند القيم المختلفة لقدرة الليزر 50 mW منحنى (1) ، 300 mW منحنى

(2)،500 mW منحنى (3) . وهذا يتوافق مع الزيادة الطفيفة في دالة التوزيع وكثافة الالكترونات والتي أوضحتها الأشكال (5-22) ، (5-24) على الترتيب .

ومن جانب أخر تؤدي عملية تأين هورنبك مولنار إلى زيادة تيار الأيونات الجزيئي كما يوضح شكل (5-27) ، والذي يمثل العلاقة بين تيار الأيونات الجزيئي وزمن التشعيع عند قيم القدرة المختلفة لليزر . من هذا الشكل يلاحظ زيادة أسية لتيار الأيونات مع زمن التشعيع وكذلك مع قدرة الليزر . بمقارنة هذا الشكل بشكل (5-8) وجد أن عملية تأين هورنبك مولنار تعمل فقط على زيادة طفيفة في تيار الأيونات الجزيئية ، بينما ينتج هذا التيار أساسًا عن عملية التأين المشارك . نلاحظ أن قيم التيار عند نهاية زمن التشعيع تتراوح مابين $10^4 \rightarrow 10^6$ عند إهمال عملية هورنبك مولنار شكل (5-8) ، بينما في وجودها تتغير مابين $10^6 \rightarrow 10^8$ شكل (5-27) . وعلى الرغم من ذلك فإن تكون البلازما من بخار الروبيديوم يؤدي إلى الحصول على تيار نقي من الأيونات الجزيئية والذي يمكن أن يجد أحد التطبيقات في المجالات المختلفة .

كما رأينا من الدراسة السابقة أن عملية تأين هورنبك مولنار تعمل على زيادة طفيفة في كثافة الالكترونات . كما أنها تؤدي أيضًا إلى زيادة تيار الأيونات الجزيئية . ونظرًا لأن تكون البلازما في هذه الحالة يتم خلال العديد من العمليات الفيزيائية مثل (التأين المشارك ، تأين بننج ، مشاركة الطاقة ،.....) لذلك فيما يلي نوضح الترابط بين عملية تأين هورنبك مولنار وهذه العمليات . يتم ذلك بحساب دالة توزيع طاقة الالكترونات عند الإهمال المتتابع لكل عملية على حدا . كما يوضح شكل (5-28) عند إهمال (i) عملية التأين المشارك ، (ii) عملية تأين بننج ، (iii) عملية مشاركة الطاقة ، (iv) عملية التصادم فائق المرونة ، دالة توزيع طاقة الالكترونات عند زمن تشعيع 200 ns وقدرة ليزر 50 mW .

نلاحظ في شكل (i) أن وجود عملية تأين هورنبك مولنار لا يؤثر على شكل الدالة عند إهمال عملية التأين المشارك حيث تختفي القمة a (منحنى 2) ، بينما في شكل (ii) يؤدي إهمال عملية تأين بننج فقط إلى اختفاء القمم b , b` (منحنى 2) . كما أن إهمال عملية مشاركة الطاقة تعمل أيضًا على اختفاء القمم b , b` مع انخفاض قيم الدالة على مدى طاقة الالكترون(منحنى 2) . أما إهمال عملية التصادم فائق المرونة فتؤدي إلى اختفاء دالة التوزيع على المدى 0.75 → 4.25 eV . من هنا يتضح أن وجود عملية تأين هورنبك مولنار لا يؤثر بشكل فعال على أي من هذه العمليات الفيزيائية . ربما يرجع ذلك إلى أن هذه العمليات تعتمد

أساسًا على المستوى المشبع 5p ذو الكثافة العالية والذي يؤدي إلى زيادة معدل حدوث هذه العمليات ، بينما عملية هورنبك مولنار تعتمد على كثافة المستوى الأرضي ذو الكثافة العالية أيضًا وأحد مستويات الطاقة المثارة العليا التي تكون في بادئ الأمر شبه خالية ، وتعتمد كثافتها على عمليات مشاركة الطاقة بالتصادم بجانب عملية إعادة الاتحاد والإثارة بالتصادم الالكتروني . والعمليتين الأخيرتين يستلزم لحدوثها فترة زمنية ، كما تعتمد أيضًا على قدرة الليزر .

ومع زيادة قدرة الليزر نجد أن هذه العمليات تسلك نفس السلوك مع اختلاف طفيف في قيم دالة توزيع طاقة الالكترونات عند إهمال العمليات الفيزيائية كما توضح الأشكال (5-29) (5-30) .

من هذه الدراسة يتضح أن كل من عملية التأين الفوتوني وتأين هورنبك مولنار يعمل على زيادة كثافة الالكترونات الحرة . وحيث أن كلا العمليتين تشتركان في نفس مستويات الطاقة المثارة ، لذلك كان من الضروري دراسة التأثير المشترك لهاتين العمليتين كما سنوضح فيما يلي .

5 – ب – 3 دراسة التأثير المشترك بين عملية تأين هورنبك مولنار وعملية التأين الفوتوني .

5 – B – 3 Study of the combined effect for Hornbeck- Molnar and photo ionization processes .

فيما سبق أخذ في الاعتبار فقط التأثير المفرد لكل من عملية التأين الفوتوني وتأين هورنبك مولنار على دالة توزيع طاقة الالكترونات ومعاملاتها .ولدراسة التأثير المشترك لكل من هاتين العمليتين تمت مقارنة دالة توزيع طاقة الالكترونات ومعاملاتها للحالات (عدم وجود عملية التأين الفوتوني وتأين هورنبك مولنار – الحالة الأولى ، أخذ في الاعتبار التأثير المفرد لكل من عمليتي التأين الفوتوني وتأين هورنبك مولنار – الحالة الثانية والثالثة على الترتيب ، التأثير المشترك لهاتين العمليتين – الحالة الرابعة) .

5 – ب – 3 – 1 دالة توزيع طاقة الالكترونات .

5 – B – 3 – 1 Electron energy distribution function .

شكل (5-31) يمثل دالة توزيع طاقة الالكترونات عند الأربع حالات المنحنيات (1), (2), (3), (4) عند قدرة ليزر 500 mW وزمن تشعيع 200 ns ، نلاحظ من الشكل عند التأثير المفرد لعملية التأين الفوتوني (منحنى 2) تظهر زيادة ملحوظة في كثافة الالكترونات عند 0.75 eV , 1.25 ، بينما تنخفض قيم دالة التوزيع على المدى المرتفع من طاقة الالكترونات . في حين يؤدي التأثير المفرد لعملية تأين هورنبك مولنار إلى زيادة طفيفة في كثافة الالكترونات عند الطاقة المنخفضة (0 eV) ، وزيادة ملحوظة في قيم الدالة على المدى المرتفع من طاقة الالكترون . أما التأثير المشترك لكلا العمليتين فيغير من قيم الدالة على المدى المرتفع لطاقة الالكترون ، حيث تأخذ الدالة قيمًا مرتفعة ، بينما لا تتأثر قيمها عند المدى المنخفض لطاقة الالكترون . من هنا نجد أن التأثير المشترك لهاتين العمليتين يؤدي إلى زيادة قيم الطيف الالكتروني على مدى طاقة الالكترون ، ويوضح ذلك قيم الدالة المحسوبة في هذه الحالات المذكورة جدول (5-2) . وجد أن هناك تغير طفيف في دالة التوزيع عند طاقة للالكترونات تساوي صفر ، حيث تنخفض دالة التوزيع في حالة تأثير عملية التأين الفوتوني في وجود وعدم وجود عملية تأين هورنبك مولنار . بينما التأثير المفرد لعملية هورنبك مولنار يؤدي إلى زيادة ملحوظة في دالة التوزيع عند هذه الطاقة . أما عند 0.25 eV فتتوافق قيم الدالة المحسوبة عند إهمال عملية التأين الفوتوني سواء بأخذ في الاعتبار أو إهمال عملية تأين هورنبك مولنار ، وتكون قيم الدالة أعلى في حالة إهمال عملية التأين الفوتوني ، كما أن توافق قيم الدالة عند أخذ وإهمال عملية هورنبك مولنار يشير إلى أن هذه العملية لا تؤثر على عملية تأين بننج والتي تعمل على زيادة الدالة عند طاقة 0.25 eV . كذلك الحال عند 0.5 eV مع ملاحظة انخفاض قيم الدالة عند هذه الطاقة . وعند طاقة 0.75 eV يظهر تأثير عملية التأين الفوتوني حيث ترتفع قيم الدالة إلى قيم عالية جدًا مع أخذ في الاعتبار أن هذا التأثير ينفرد تمامًا لهذه العملية ، حيث أن عملية تأين هورنبك مولنار لا تؤثر في قيم الدالة تمامًا . أما عند طاقة 1.0 eV نجد أن هناك تأثير متفاوت للعمليات الفيزيائية على قيمة الدالة ، حيث نلاحظ أنه تكون لها أدنى قيم في وجود عملية التأين الفوتوني بينما أعلى قيم في في وجود عملية تأين هورنبك مولنار . ويقع التأثير المشترك لعملية هورنبك مولنار والتأين الفوتوني وكذلك الإهمال المطلق لهذه العمليات بين القيمتين السابقتين للدالة . وتوضح هذه الدراسة أن الزيادة في دالة التوزيع عند 1.0 eV نتيجة للتأثير المفرد لعملية تأين هورنبك مولنار . عند طاقة 1.25 eV يظهر التأثير المفرد لعملية التأين الفوتوني بشكل ملحوظ حيث تصل قيم الدالة إلى أعلى قيمة لها . بالإضافة إلى

ذلك فإن أخذ عملية تأين هورنبك مولنار في الاعتبار سواء مع عملية التـــأين الفوتـــوني أو إهمالها يؤدي إلى زيادة قيم الدالة على المدى لطاقة الالكترون الذي يـــزيد عن 1 eV . كما أن تأثير عملية التأين الفوتوني يؤدي إلى تغير مواقع قيم الدالة على هذا المدى . مما يـــدل على اختلاف العمليات الفيزيائية التي تؤدي إلى تكون القـــمم . ويشير ذلك إلى زيادة معدل فقد طاقة الالكترونات نتيجة لعمليات التصادم غير المرن .

وبشكل عام يمكن استخلاص تأثير عملية تأين هورنبك مولنار فيما يلي :

- زيادة طفيفة في دالة التوزيع عند طاقة 0 eV .
- زيادة قيم دالة التوزيع على المدى ابتداء من 4.25 eV → 1 .

ونتيجة لذلك فمن المتوقع أن تؤثر هذه الزيادة على كثافة الالكترونات وكذلك متوسط طاقـــة الالكترون . وحيث أن هذه العملية تنتج عن تفاعل إحدى الذرات في المســـتوى الأرضـــي والأخرى في المستويات المثارة العليا لذلك من المتوقع أن تؤثر هذه العملية على كثافة هـــذه المستويات . وهذا ما سوف نوضحه فيما يلي :

5 – ب –3 – 2 التغير الزمني لكثافة الالكترونات .

5 – B – 3 – 2 Time variation of the electrons density .

شكل (5-32) وجدول (5-3) يوضح التغير الزمني لكثافة الالكترونات للحالات الأربع الممثلة بالمنحنيات (1), (2), (3), (4) على الترتيـــب ، نلاحـــظ تطـــابق قـــيم كثافـــة الالكترونـــات للمنحنيين(2) و (4) مما يدل على أن هذه الكثافة تتكون أساسًا من عملية التأين الفوتوني . كما أن تطابق المنحنيين (1) و (3) خلال الفترة الزمنية 5 ns → 1 يشير إلى عدم تـــأثير عمليـــة هـــورنبك مولنار خـــلال هذه الفترة ، حيث أن تأثير هذه العملية يظهر بشكل تدريجي مـــن 200 ns → 10 كما يوضح منحنى(3) . علمًا بأن هذه الزيادة لا تتخطى تأثير عمليـــة التـــأين الفوتوني حيث يقع منحنى (3) أدنى بكثير عن المنحنيين (2) و (4) واللذان يوضحان الزيادة الملحوظة في كثافة الالكترونات نتيجة لعملية التأين الفوتوني . أي أن تـــأثير عمليـــة تـــأين هورنبك مولنار يمكـــن إهمـــاله بجـــانب عملية الـــتأين الفـــوتوني وهـــذا ما يوضحـــــه التطـــابق بين المنحنـــيين (2) و (4) .

5 – ب –3 – 3 التغير الزمني لمتوسط طاقة الالكترون .

5 – B – 3 – 3 Time variation of the electron mean energy .

يوضح شكل (5-33) دراسة التغير الزمني لمتوسط طاقة الالكترون للحالات الأربع الممثلة بالمنحنيات (1), (2), (3), (4) . نلاحظ من هذا الشكل أن متوسط طاقة الالكترون الحالة الثانية (المنحنى 2) تتوافق مع القيم المحسوبة للحالة الرابعة (المنحنى 4) ، حيث يأخذ كلاهما قيمًا شبه مستقرة عند متوسط طاقة حوالي 1.25 eV كما يوضح جدول (5-4) تناظر قمة لدالة التوزيع (شكل (5-31) منحنى (2) و (4)) . أما المنحنيين (1) و (3) يمثلان إهمال و وجود عملية تأين هورنبك مولنار فنجد أن متوسط طاقة الالكترون يبدأ بقيم منخفضة ، ثم يتزايد خلال فترة التشعيع تتخطى القيم المناظرة للمنحنيين (2) و (4) عند أزمنة 50 ns و 10 ns ، حيث يصل متوسط الطاقة إلى 1.5 eV , 2.2 على الترتيب . وتتوافق هذه القيم المرتفعة لمتوسط طاقة الالكترون مع الزيادة في قيم دالة توزيع طاقة الالكترونات على مدى الطاقة 4.25 eV → 1 (المنحنيات (1) و (3) شكل (5-31)) . أما الانخفاض في متوسط طاقة الالكترون للمنحنيات (2) و (4) فيدل على أن معظم الالكترونات تتواجد عند الطاقة المنخفضة 1.25 eV , 0.75 .

5 – ب – 4 تأثير عملية تأين هورنبك مولنار على التيار الجزيئي .

5 – B – 4 Effect of Hornbeck Molnar ionization process on the molecular ionic current .

نلاحظ في شكل(5-34) أنه بإهمال عملية تأين هورنبك مولنار فإن تيار الأيونات الجزيئية يتكون فقط خلال عملية التأين المشارك كما يوضح المنحنى (1) ، والعكس صحيح عند إهمال عملية التأين المشارك حيث نجد أن التيار في هذه الحالة ينتج عن تاين هورنبك مولنار ، مع ملاحظة أن قيمة هذا التيار تكون أدنى من التيار الناتج عن عملية التأين المشارك وذلك في المراحل الأولى من زمن التشعيع ، بينما تتخطى قيمته قيمة التيار الناشئ عن عملية التأين المشارك في مدى زمن 200 ns → 10 كما يوضح منحنى (2) . أما التأثير المشترك لهاتين العمليتين (منحنى 3) فأعطى تطابق بين المنحنى (1) و المنحنى (3) في المدى 10 ns→1 . وهذا يؤكد أن قيم التيار الناتج من عملية التأين المشارك تسود تلك الناتجة عن عملية تأين هورنبك مولنار . كما عند زمن التشعيع يزيد عن 10 ns فنجد أن التيار الناتج عن عملية تأين هورنبك مولنار (منحنى 2) يزيد عن التيار الناتج عن التأين المشارك . ويؤكد ذلك سيادة عملية تأين هورنبك مولنار عن التأين المشارك . منحنى (4)

في هذا الشكل يمثل تيار الأيونات الجزيئية عند إهمال كلا العمليتين ، نلاحظ اختفاء التيار تمامًا عند القيم المختلفة لقدرة الليزر ، وهذا يؤكد أن التيار ينتج أساسًا خلال هاتين العمليتين .

نظرًا لاعتماد عملية تأين هورنبك مولنار على كثافة المستوى الأرضي لذلك شكل(5-35) يمثل التغير الزمني لكثافة المستوى عند قيم مختلفة لقدرة الليزر . يتضح من هذا الشكل أنه بزيادة قدرة الليزر تنخفض كثافة المستوى الأرضي ، مما يدل على زيادة معدل عملية تأين هورنبك مولنار مع زيادة قدرة الليزر .

5 – ب – 5 عملية تكون الزوج الأيوني . 5 – B – 5 Ion pair formation process .

من مستويات الطاقة لذرة الروبيديوم شكل (4-1) نجد أن مجموع الطاقة لذرات المستوى الأرضي و إحدى الذرات في أي من المستويات المثارة لا يتخطى بأي حال من الأحوال طاقة تأين الذرة ، لذلك فعند تصادم ذرة في المستوى الأرضي وأخرى في مستوى مثار ينتج عن ذلك تكون جزيء الروبيديوم والذي يتبعه مباشرة تفكك أيوني للجزيء إلى أيون موجب وأخر سالب . وتقل الطاقة اللازمة لهذه العملية عن طاقة تأين الذرة . حيث أن هذه العملية لا تؤدي إلى تكون الكترونات لذلك فهي لا تؤثر في تغير كثافتها ، وبالتالي في متوسط طاقتها ولكن تؤثر بشكل غير مباشر على دالة توزيعها . ويظهر تأثير هذه العملية بشكل واضح في مقدار تيار الأيونات السالبة كما يوضح شكل (5-36) والذي أخذ كدليل لحدوث هذه العملية في القياسات المعملية التي أجريت بواسطة باربير وشيري (Barbier and Che'ret,1987) .

5 – ب – 5 – 1 دالة توزيع طاقة الالكترون .

5 – B – 5 – 1 Electron energy distribution function .

بدأت الحسابات أولاً بأخذ في الاعتبار التأثير المفرد لعملية تكون الزوج الأيوني . أشارت الحسابات بأن هذه العملية لا تؤثر على الإطلاق في أي من المعاملات (دالة توزيع طاقة الالكترونات ، متوسط طاقة الالكترون ، التكوين الزمني لكثافة الالكترونات ، غيرها) . بينما يظهر تأثير هذه العملية بشكل طفيف عند أخذ في الاعتبار عملية التأين الفوتوني كما يوضح شكل (5-37) .

نـــلاحـــظ في هذا الشكـــل وجود عملية تكون زوج من الأيونات يؤدي إلى زيـــادة قيم دالة التوزيع على المدى المرتفع من طاقة الالكترون (≥ 1 eV) ، ويزداد معدل هذه الزيادة مـــع زيادة قدرة الليزر . وربما يرجع ذلك إلى زيادة معدل تسخين الالكترونات وانخفاض معـــدل تأين بننج الذي يشارك هذه العملية في مستويات الطاقة العليا . بالإضافة إلى انخفاض معدل التأين بالتصـــادم الالـــكتروني والتأين الفوتوني ، حيث أن هذه العمليات تعتمد على كثـــافة مستويـــات الطاقة العليا في الذرة .

بالإضافة إلى ذلك فإن هذه العملية تؤدي إلى زيادة التيار الأيوني الموجب كما يوضح شكل (5-38) والذي يعطي مقارنة بين التكوين الزمني للتيار الأيوني تحت التأثير المفرد لكل من عملية التأين الفوتوني (منحنى1) وتأين بننج (منحنى2) والـــتأين بالتصـــادم الالكتروني (منحنى4) بجانب عملية تكون زوج من الأيونات (منحنى3) ، مع التأثير المشـــترك لهـــذه العمليات الممثل بالمربعات المظللة للقيم المختلفة لقدرة الليزر . يتضح من هذا الشـــكل أنـــه بشكل عام تزداد كثافة الأيونات الذرية بزيادة قدرة الليزر كما توضح الأشكال (i),(ii),(iii) ، وأن عـــمـلـــية التـــأين الـــفوتـــوني لا تؤثر بشكـــل ملحوظ على تكون التيـــار الأيـــــوني الموجب (منحنى1) . وربما يرجع ذلك إلى زيادة معدل عملية إعادة الاتحاد نتيجة لزيـــادة كثـــافة الالكترونات التي تعمل على اختفاء الأيونات الموجبة وتكون كثافـــة مـــن الـــذرات المتعادلة . من جهـــة أخرى نجد أن تـــأين بـــننـــج (منحنى2) يساهم بشكل فعال في تكون تيار الأيونات الموجبة ، ويزداد معدل هذا التيار مع زيادة قدرة الليزر كما نـــلاحظ فـــــي شكل (iii) . حيث تتخطى قيمة التيار المناظر لتأين بننج قيم التيار المحسوبة عنـــد التـــأثير المفرد لكل عملية من التأين بالتصادم الالكتروني (منحنى 4) وكذلك عملية تكون زوج مـــن الأيونات (منحنى3) . أما عملية تكون زوج أيوني فنجد أن التيار الأيوني يبدأ بقيم منخفضة نسبيًا تتزايد مع زمن التشعيع ، ولكن بنسبة أقل مقارنة بالتيار الناتج عن كل من تأين بنـــنج والتأين بالتصادم الالكتروني . وربما يرجع ذلك إلى مشاركة هذه العملية وعملية هورنبـــك مولنار في ذرات المستوى الأرضي والذرات في مستويات الطاقة العليا .

وبشكل عام نجد أن التيار الأيوني الموجب ينتج أساسًا من عملية تأين بننج ويوضـــح ذلك تطابق قيم التيار للمنحنى (2) و المربعات المظللة الذي يمثل التأثير المشـــترك لجميـــع العمليات على كثافة تيار الأيونات الموجبة .

5 – ب – 5 – 2 دراسة التغير في كثافة المستويات المثارة الناتج عن عمليات التأين .

5 – B – 5 – 2 Study of excited states density variation due to ionization processes .

تؤدي عمليات التأين إلى تغير في كثافة المستويات المثارة وفقا لما يلي :

في عملية تأين بنتج يؤدي تصادم ذرة في المستوى المشبع وأخرى في أحد المستويات المثارة العليا إلى تكون الكترون حر وأيون ذري موجب ، وهذا بالتالي يعمل على خفض كثافة مستويات الإثارة العليا .

كما أنه في عملية التأين الفوتوني فإن أحد الذرات في مستويات الطاقة العليا يمكنها أن تمتص فوتونًا مفردًا يؤدي إلى تأين الذرة تاركًا خلفه أيونًا ذريًا موجبًا والكترونًا حرًا ، وبناءً على ذلك تُفقد ذرة مثارة .

وكذلك الحال في عملية التأين بالتصادم الالكتروني فنجد أنه عندما يكتسب الالكترون مقدارًا كافيًا من الطاقة فإنه يصطدم بذرة مثارة تصادمًا غير مرنًا مؤديًا إلى تأينها ، وينتج عن ذلك الكترونًا حرًا وأيونًا ذريًا موجبًا . وبناءً عليها تُفقد ذرة مثارة .

نتيجة لهذه العمليات كان من الضروري دراسة تأثير عمليات التأين على تغير كثافة كل مستوى طاقة مفرد .

شكل (5-39) يمثل نسبة الانخفاض في كثافة المستوى كدالة في زمن التشعيع . ويوضح هذا الشكل التغير في كثافة كل من المستوى 5d (3.19 eV) و المستوى 7s (3.25 eV) ، وتم اختيار هذه المستويات بناءً على القياسات المعملية التي أجريت لدراسة عملية تكون زوج أيوني (Barbier et. al. ,1986) . يتضح من هذا الشكل أن الانخفاض في كثافة كل من المستوى 5d , 7s يتزايد مع زيادة الزمن . ويكون أكثر وضوحًا للمستوى 5d ، حيث نجد أن نسبة الانخفاض في كثافة المستوى 5d عند نهاية زمن التشعيع (0.13) تزيد كثيرًا عن نسبة الانخفاض في المستوى 7s (0.03) ، وذلك عند قدرة أشعة الليزر 500 mW (منحنى2) ، بينما عند القدرة المنخفضة فإن كثافة هذه المستويات تظل ثابتة كما يوضح المنحنى(1) .

ومن جهة أخرى تشارك مستويات الطاقة العليا (> طاقة التأين الجزيئي) 6d,8s,7d,9s,8d,10s في عمليات التأين مما يؤدي إلى تغير كثافتها . وتزداد كثافة هذه المستويات أساسًا خلال عمليات مشاركة الطاقة وإعادة الاتحاد . يمثل شكل(5-40-A) التغير في كثافة المستويات 6d , 8s عند قيمتي قدرة الليزر 50 mW منحنى (1) و 500 mW منحنى (2) . نلاحظ في هذا الشكل أن كثافة المستويات تبدأ بقيمة مرتفعة عند بداية زمن

التشعيع وتنخفض إلى قيمة صغرى يختلف موقعها وفقا لقدرة الليزر لكل من المستويين . فنجد أنه عند القدرة المنخفضة تكون أدنى قيمة لكثافة المستوى عند زمن تشعيع 50 ns ، بينما عند القدرة المرتفعة فتنخفض كثافة المستوى خلال المراحل الأولى لزمن التشعيع (10 ns) . بعدها تبدأ الكثافة بالزيادة مرة أخرى حتى نهاية زمن التشعيع للمنحنيين (1) و(2) لكل مستوى . ويدل الانخفاض في كثافة المستوى من بداية زمن التشعيع على زيادة معدل عمليات التأين . ويصل أعلى معدل للتأين عند فترة زمنية تتوقف على قدرة الليزر (أدنى قيمة لكثافة المستوى) . أما زيادة الكثافة في المراحل الأخيرة لزمن التشعيع فتؤكد زيادة معدل عملية إعادة الاتحاد وهي العملية المنافسة لعملية التأين . وقد لوحظ تكرار هذا السلوك عند مستويات الطاقة العليا 9s , 7d شكل (5-40-B) ، وكذلك 10s , 8d شكل (5-40-C) ، مع اختلاف قيم كثافة هذه المستويات .