الفصل السادس

Chapter (6)

الخلاصة والنظرة المستقبلية

Conclusion and future work

قدم هذا البحث دراسة عددية عن ظاهرة الانهيار المؤدي إلى الضرر في السيلكا المنصهرة بواسطة نبضات متناهية القصر من أشعة الليزر.أجريت هذه الدراسة لحساب عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تحت ظروف معملية مختلفة ومقارنتها بالقيم المقاسة عملياً لاختبار صحة النموذج وكذلك تحديد العمليات الفيزيائية المسؤولة عن هذه الظاهرة . وأخذت هذه الدراسة مدخلين مختلفين في النمذجة العددية أحدهما يعتمد على الحل العددي لمعادلة المعدل التي تصف تغير كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري نتيجة للعمليات الفيزيائية المتوقع حدوثها خلال تفاعل أشعة الليزر مع السيلكا المنصهرة لتحديد عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار.أما الآخر فأخذ في الاعتبار الحل العددي لمعادلة فوكر بلانك لدالة توزيع طاقة الإلكترونات والتي تعطي كثافة الإلكترونات كدالة في زمن النبضة ومنها يتم تحديد عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار . بالإضافة إلى ذلك أخذت هذه الدراسة التغير الزمني لشدة الاستضاءة في الحجم البؤري للنبضات القصيرة كما أخذ في الاعتبار التغير الزمني والبعدي لها في حالة النبضات متناهية القصر. واستخدمت هذه النماذج لتفسير القياسات المعملية التي أجريت بواسطة ليو ومجموعته (Liu et al, 2005) والتي استخدم فيها مصدراً لأشعة الليزر يعمل بطول موجي 800 nm وأزمنة نبضة تتراوح ما بين 250 fs- 2.5 ps ، وتم تجميع حزمة أشعة الليزر بنظامين بصريين لفتحات عددية (NA) تساوي 0.255 , 0.126 والتي تعطي أقطاراً لحيز التفاعل لحزمة جاوسية الشكل عند البؤرة تساوي 2.0 µm و 0.95 µm على الترتيب وذلك لتشعيع حجم من السيلكا المنصهرة ذا أبعاد 3×5×10 mm وقد أعطت نتائج دراسة ظاهرة انهيار السيلكا المنصهرة ما يلي

أولاً: نتائج نموذج معادلة المعدل

(أ) بأخذ في الاعتبار فقط التغير الزمني لشدة الاستضاءة أعطت مقارنة القيم المحسوبة لعتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار والقيم المقاسة عملياً توافقاً مناسباً على مدى زمن النبضة الذي يزيد عن 400 fs لكل من الفتحتين العدديتين وأكد ذلك صلاحية النموذج لتفسير ظاهرة انهيار السيلكا المنصهرة تحت هذه الشروط المعملية.

– أوضحت دراسة التغير الزمني لكثافة الإلكترونات عند قيم مختلفة لطول نبضة الليزر ولقيمتي الفتحة العددية، أن نمو كثافة الإلكترونات يتأثر بطول نبضة الليزر في المراحل الأولى للزمن، بينما تتطابق قيم الكثافة على المدى المتبقي لزمن النبضة .يوضح الاختلاف في قيم كثافة الإلكترونات في المراحل الأولى من زمن النبضة إلى اختلاف العمليات الفيزيائية المسؤولة عن نمو هذه الكثافة . حيث وجد أنه بزيادة طول نبضة الليزر يزداد معدل عملية التصادم الإلكتروني بينما مع قصر النبضة فإن عملية التأين الفوتوني تلعب دوراً هاماً في نمو كثافة الإلكترونات. وأكد ذلك دراسة التغير الزمني لمعدل التأين حيث لوحظت زيادة في المعدل مع قصر نبضة الليزر مما يدل على زيادة معدل التأين الفوتوني.

– كما أوضحت دراسة توزيع كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري على امتداد كل من المسافة القطرية والمسافة المحورية لقيمتي الفتحة العددية انحسار منطقة الانهيار في مركز الحجم البؤري حيث أن الكثافة التي تحقق شرط الانهيار يتم الحصول عليها فقط عند المركز (أي عند $z=0$, $r=0$) وتحاط هذه المنطقة بمناطق عالية التأين تنحدر بشكل سريع عند نهاية كل من المسافة المحورية والمسافة القطرية للحجم البؤري . كما أن طول زمن النبضة وكذلك الفتحة العددية تؤثر بشكل طفيف على قيم كثافة الإلكترونات في مناطق التأين المحيطة بمنطقة الانهيار .

– ويؤكد ذلك الدراسة التي أجريت على توزيع شدة الاستضاءة في الحجم البؤري حيث وجد أن قيمة عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار تتواجد فقط في مركز الحجم البؤري ، وتنحدر هذه القيمة كلما ابتعدنا عن المركز في اتجاه كل من المسافة المحورية والمسافة القطرية.

(ب) بأخذ في الاعتبار كل من التغير البعدي والزمني لشدة الاستضاءة.

أعطت مقارنة القيم المحسوبة لعتبة شدة الاستضاءة والقيم المقاسة عملياً توافقاً فقط عند قيمة النبضة القصيرة (250 fs) وذلك لقيمتي الفتحة العددية ، بينما وقعت القيم المحسوبة لقيمة عتبة الشدة اللازمة للانهيار أعلى كثيراً من القيم المقاسة عملياً على مدى الأزمنة الطويلة لنبضة الليزر وهذا يؤكد أن نموذج الفيـ 156 ـحقق فقط الشروط المعملية التي تستخدم فيها مصادر لأشعة الليزر ذات نبضات متناهية القصر تقل عن 300 fs . وتتغير شدة الاستضاءة في الحجم البؤري وذلك لتغير نصف القطر على طول المسافة المحورية ، لذلك أعطت القيم المحسوبة لعتبة شدة الاستضاءة على امتداد محور الحجم البؤري قيماً مختلفة ، حيث وجد أن عتبة الشدة يختلف موضعها على امتداد المسافة المحورية وفقاً لطول نبضة الليزر.بقصر طول نبضة الليزر نجد أن الانهيار يحدث على امتداد المسافة المحورية بعيداً عن المركز، بينما للنبضات الطويلة يحدث الانهيار في المركز. ويتبع الانهيار انتشار نبضة الليزر في الحجم البؤري مع تناقص نصف القطر مما يؤدي إلى زيادة شدة الاستضاءة وبالتالي زيادة كثافة الإلكترونات عن القيمة التي تحقق شرط الانهيار وذلك عند مركز الحجم البؤري.ويوضح ذلك الانهيار اللحظي للمادة عند استخدام نبضات متناهية القصر(في حدود القليل من المئات من الفيمتوثانية).

– أكد التكون الزمني لكثافة الإلكترونات الدور الفعال الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني وذلك من خلال القيم المرتفعة لكثافة الإلكترونات التي تم الحصول عليها لقيمتي الفتحة العددية.

– أظهرت دراسة توزيع كثافة الإلكترونات في الحجم البؤري أن البلازما تتكون في شكل اسطواني يحيطها مناطق تأين في اتجاه كل من المسافة القطرية والمحورية . يزداد حجم منطقة الانهيار مع قصر نبضة الليزر وفقاً لتوزيع قيم كل من شدة الاستضاءة وكثافة الإلكترونات.

ثانياً: نموذج معادلة فوكر بلانك

أعطت نتائج الحسابات لقيم عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيارتوافقاً مناسباً مع القيم المقاسة عملياً بواسطة ليو ومجموعته (Liu et al, 2005) في مدى زمن النبضة الذي يزيد عن 300 fs لكل من قيمتي الفتحة العددية.

– أوضح حساب دالة توزيع طاقة الإلكترونات عند منتصف زمن النبضة زيادة معدل فقد طاقة الإلكترونات مع طول نبضة الليزر ، كما أشارت القيم المحسوبة لدالة توزيع طاقة

الإلكترونات عند نهاية زمن النبضة أن معظم الإلكترونات تتواجد في مدى طاقة يعادل مدى فجوة الطاقة للسيلكا المنصهرة eV (9-0)

– أشار التكوين الزمني لكثافة الإلكترونات أنه عند قصر نبضة الليزر يحدث الانهيار بالقرب من نهاية زمن النبضة، ومع طول النبضة فإن الانهيار يحدث تماماً عند نهايتها.كما أوضحت دراسة التكوين الزمني لكثافة الإلكترون 157 . الفعال الذي تلعبه عملية التأين الفوتوني في تكوين كثافة الإلكترونات والذي يزداد أهميته مع قصر نبضة الليزر.

– أشارت دراسة التغير الزمني لمتوسط طاقة الإلكترون أهمية فقد طاقة الإلكترونات خلال تصادم غير مرن في النصف الأخير من زمن النبضة، وذلك لتأين الإلكترونات المقيدة والوصول بالمادة إلى حالة الانهيار، ويزداد معدل الفقد مع زيادة طول نبضة الليزر.

– أعطت دراسة التكون الزمني لدالة توزيع طاقة الإلكترونات صورة حقيقية لموقع البلازما المتكونة في الحجم البؤري وتغيره مع طول نبضة الليزر ومدى الطاقة الذي تتواجد فيه هذه الإلكترونات.

نظرة مستقبلية

أوضحت هذه الدراسة أن انهيار السيلكا المنصهرة بواسطة نبضات متناهية القصر من أشعة الليزر يتم أساساً خلال عملية تأين فوتوني وتأين بالتصادم الإلكتروني. وللنبضات متناهية القصر هناك احتمالية لحدوث ما يسمى بالتجمع الذاتي لحزمة أشعة الليزر والذي يؤدي إلى زيادة شدة الاستضاءة نتيجة لصغر قطر الحجم البؤري وهذا بالتالي يمكن أن يؤدي إلى زيادة الضرر غير المرغوب فيه في المادة ، لذلك من الضروري عند النمذجة العددية أخذ في الاعتبار هذه العملية ، وذلك لتحديد قيماً أكثر دقة لعتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار ومراعاة ذلك عند استخدام أشعة ليزر في التطبيقات الصناعية لمعالجة المواد وغيرها.

– ولاختبار صلاحية النموذج يمكن أيضاً تطبيقه على بعض المواد العازلة الأخرى مثل أوكسيد المغنيسيوم والمواد التي تستخدم في الأنظمة البصرية وخاصة تلك التي تستخدم في تصنيع العدسات والمرايا العاكسة والنوافذ البصرية.