الفصل الأول

Chapter (1)

مقدمة ومسح مرجعي عن الضرر المستحث بواسطة أشعة الليزر في المواد الصلبة

Introduction and literature review on the damage induced by laser radiation in solids

(1-1) مقدمة (1-1) Introduction

إن استخدام مصادر تقليدية لأشعة الليزر ومناشير الألماس و الفوارة المائية كوسائل مختلفة لقطع المواد الصلبة وميكنتها،لا يمكن أن يعطي الدقة العالية التي أتاحتها مصادر أشعة الليزر ذات النبضات متناهية القصر في ميكنة المواد ومعالجتها. حيث أن استخدام الليزرات الصناعية التقليدية يؤدي إلى انصهار وغليان المادة قبل إزالتها وهذا بالتالي يسبب ارتفاع في درجة حرارة الجزء من المادة المعرض للأشعة. ينتج عن ذلك تكون موجات تصادمية تعمل على زيادة رقعة الضرر المحيط بمنطقة التفاعل مما يؤدي إلى تشوه بناء الحبيبات أو حتى تصدع في المادة ذاتها. و يمتد الضرر في هذه الحالة من بضع ميكرومترات إلى العديد من الميليمترات . ويعتمد ذلك على خواص المادة الصلبة وطول نبضة الليزر وكذلك آليات التبريد . بالإضافة إلى أن قليلاً من الإجهاد الحراري أو تأثير الموجة التصادمية يمكن أن يؤدي إلى حدوث ضرر عرضي بالغ لا يمكن أن تتحملها التركيبات الدقيقة والهشة للغاية ، ذات الأبعاد الصغيرة الحجم (في حدود بضع عشرات من الميكرومتر) كالأنسجة البيولوجية أو أجهزة أشباه الموصلات . لذلك فإن استخدام نبضات متناهية القصر يسمح بإمكانية التحكم في الترسيب الموضعي للطاقة في المادة. ويعتبر ذلك

ذا أهمية بالغة في بعض التطبيقات الهامة ابتداء من تقنيات الطب الحيوي (Loesel et al,1998) ،إلى الميكنة الميكروسكوبية للمواد البصرية (Schaffer et al, 2001)، وكذلك من كيمياء الفيمتو إلى تخزين البيانات (Watanabe et al, 2000). يتميز استخدام مصدر لأشعة الليزر يعمل بنبضات تقل عن 10 ps بأن الزمن اللازم لانتقال طاقة الإلكترون إلى الشبيكة يزيد عن زمن النبضة ، ونتيجة لذلك فإن الضرر المتسبب بواسطة هذه النبضات تلازمه عملية انتزاع Laser ablation process ، يحدث فيها إزالة مباشرة لطبقة رقيقة من المادة تصل إلى أجزاء من الميكرون ،في حيز ضيق جدا ، أي ينتج ضرر موضعي فقط . لذلك باستخدام هذه المصادر تترك عملية القطع سطحاً ناعماً جداً لا يحتاج لمزيد من التلميع (Oh et al, 2006) .

وقد لاقت ظاهرة الانتزاع مجالا واسعاً من التطبيقات الجديدة في الطب من أهمها الطب الحيوي مثل جراحة العيون وإزالة التجلطات من أنسجة القلب وغيرها (Birngruber et al, 1987; Sato et al, 2001). وترجع أهمية ترسيب الطاقة في المواد الصلبة إلى العمليات الفيزيائية الميكروسكوبية التي تصاحب تفاعل المادة مع نبضات أشعة الليزر . فعند تشعيع المواد الصلبة الشفافة بأشعة ليزر ذات شدة استضاءة تزيد عن قيمة محددة (عتبة الشدة اللازمة للانهيار) ينتج عن ذلك امتصاص للطاقة في جزء صغير من المادة نتيجة للزيادة السريعة في كثافة الإلكترونات وتكون البلازما ، وتعرف هذه الظاهرة بالانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر Laser induced breakdown . (Jones et al, 1989; Anisimov and Khokhlov,1995; Stuart et al,1996; Petite et al,1996; Quoix et al, 1999)

وتكمن أهمية استخدام نبضات متناهية القصر من أشعة الليزر في التحول المباشر للمادة من الحالة الصلبة الشفافة إلى الحالة الماصة دون أن تغير من طبيعتها ، أي أن الامتصاص يتم في المادة ذاتها، لتتحول مباشرة إلى الحالة الغازية دون المرور بالحالة السائلة . وهذا بعكس ما يحدث عند نبضات طويلة نسبيا من أشعة الليزر (تزيد عن العشرات من البيكوثانية) حيث يؤدي التفاعل إلى ضرر في المادة ينتج عنه تشوهها، وذلك لزيادة كثافة الالكترونات وتسخينها في شريط التوصيل بواسطة أشعة الليزر وانتقال طاقتها إلى الشبيكة (Stuart et al, 1995)، ويحدث الضرر خلال ترسيب حراري تقليدي ناتج عن انصهار وغليان المادة العازلة.

وعلى الرغم من ذلك فإن استخدام مصادر أشعة الليزر التقليدية في التطبيقات الصناعية لمعالجة المواد يتميز بطاقاتها المركزة التي تعمل على الحفر والقطع واللحام وكذلك في تحسين المادة. وقد وجد أن معالجة المواد بالليزر تفوق الطرق الأخرى المستخدمة لذلك من حيث خفض درجة حرارة المنطقة المتأثرة، وسرعة العملية وتعدد استعمالها وكذلك مراعاة البيئة المحيطة أثناء الاستخدام .كما أن طبيعة عدم تلامس أشعة الليزر في تطبيقات الميكنة مثل الحفر والقطع تجعلها وسيلة أسهل في الاستخدام .حيث أن هناك أنواع عديدة من مصادر أشعة الليزر استخدمت لهذا الغرض مثل ليزر ثاني أكسيد الكربون والنيوديميوم ياج وبخار النحاس وليزر الاكسيمر. واستخدمت هذه الأجهزة في الصناعة بنظام زمني يقع ما بين الموجات المستمرة نزولا إلى نبضات تصل إلى مئات من البيكوثانيه .

وبتوفير أنظمة ليزر متناهية القصر لاستخدامها في تطبيقات الليزر الصناعية ، تميزت بالدقة العالية لانتزاع المواد واستخدمت العبارة (الميكنة الميكروسكوبية لليزر) Laser micromachining لوصف كثيراً من هذه التطبيقات (Liu and Mourou, 1997) .

كما استخدمت ظاهرة الانتزاع بالليزر في العديد من التطبيقات مثل الترسيب بنبضات الليزر(Vijayalakshmi et al, 1998) (Chrisey et al, 1994) تصنيع الأجسام النانوية (Becker et al ,1998) الميكنة الميكروسكوبية (Marcinkevicius et al, 1998),(Ameer-Beg et al, 2001) الجراحة (Loesel et al, 1998) بالإضافة إلى التحليل الكيميائي (Vertes et al, 1993),(Winefordner et al, 2000) و صاحب هذه التطبيقات العديد من التقنيات التحليلية التي استخدمت آلية تفاعل أشعة الليزر مع المواد الصلبة في مناطق مختلفة من شدة استضاءة أشعة الليزر من أهمها الانبعاث الطيفي للانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر (Radziemski ,2002).

ونظراً لأن هذه التطبيقات اعتمدت أساساً على تفاعل أشعة الليزر المؤدي إلى انهيار المادة وتكون البلازما لذلك اهتم عدد من الباحثين بإجراء دراسات عملية ونظرية (Du et al ,1994 ; Stuart et al,1995 & 1996; Varel et al,1996; Lenzner et al,1998; Tien et al,1999; Mao et al,2004; Liu et al,2005; Oh et al.2006) لتحديد الآليات الفيزيائية التي تصاحب تفاعل نبضات أشعة الليزر(في حدود النانوثانية) مع أهداف صلبة. وقد نجح هؤلاء الباحثين في

إرساء بعض القواعد التي أدت إلى ترسيخ المفاهيم الأساسية التي تحكم العمليات الفيزيائية المصاحبة لظاهرة الانهيار والضرر في المواد الصلبة الناتج تحت هذه الظروف . ففي حالة النبضات الطويلة نسبياً توصلت الدراسات العملية والنظرية التي أجريت لتفسير ظاهرة تفاعل أشعة الليزر مع المواد الصلبة إلى فهم آليات الضرر المتسبب بواسطة أشعة الليزر laser Mechanisms damage .فقد وجد أنه عند استخدام نبضات طويلة(تزيد عن 100 ps) فإن الضرر الحجمي داخل المواد العازلة خالية العيوب ينتج عن تسخين ومضاعفة الإلكترونات بواسطة حزمة الليزر الساقطة ونقل هذه الطاقة للشبيكة. في هذه الحالة يحدث الضرر خلال ترسيب حراري تقليدي نتيجة لانصهار وغليان حجم واسع النطاق من المادة العازلة.

أما في حالة النبضات المتناهية القصر مازالت هذه الدراسة في مستهلها . وهناك العديد من التساؤلات حول الآليات الفيزيائية المصاحبة لظاهرة الانتزاع بالليزر وهذا ما سيتناوله هـذا البحث .

(1-2) تأثير نبضات متناهية القصر من أشعة الليزر على المواد الصلبة

(1-2) Effect of ultra short pulses of laser radiation solid materials

أدى استخدام نبضات متناهية القصر أشعة الليزر متناهية القصر من أشعة الليزر ذات شدة استضاءة عالية وطاقة منخفضة للحصول على قدرة عالية من أشعة الليزر مركزة في حيز ضيق جداً. فمثلاً عند استخدام نبضة بطول 100 fs لها طاقة تساوي 0.3 mJ فإن شدة الاستضاءة العظمى المصاحبة لهذه النبضة تصل إلى 10^{15} W/cm^2 ، وذلك عند تجميع حزمة الليزر في منطقة التفاعل بقطر يساوي 20 µm . بينما لنبضة من أشعة الليزر بطول 10 ns فإن نفس قيمة شدة الاستضاءة يمكن الوصول إليها إذا ما امتلكت حزمة الليزر مقداراً من الطاقة يساوي مئة ضعف طاقة النبضة متناهية القصر . بناء على ذلك فإن مفهوم النبضة متناهية القصر يؤدي إلى تغيير بعض أساسيات آلية تفاعل أشعة الليزر مع المادة. كمثال لذلك يمكن إهمال الحركة الهيدروديناميكية في المواد الصلبة، وكذلك الحركة الديناميكية للسائل عند تفاعل أشعة الليزر ذات نبضة متناهية القصر مع المادة. ويرجع ذلك لأنه في حالة النبضة الطويلة تُمتص طاقة أشعة الليزر في طبقة البلازما ذات الكثافة المحدودة، بينما تترسب الطاقة في حالة النبضات القصيرة في الكثافة العالية للمادة الصلبة . بالإضافة إلى ذلك في حالة النبضات متناهية القصر يتم التفاعل بطريقة غير متزنة حيث تنتج الإلكترونات

عند درجة حرارة أكبر كثيراً من درجة حرارة الأيونات. وتحتفظ هذه الإلكترونات بطاقتها نظراً لقصر زمن نبضة الليزر عن زمن الارتخاء في طاقة الإلكترون والأيون (Liu and Mourou, 1997). على الرغم من أن التفاعل في هذه الحالة يصاحبه شدة استضاءة عالية مما يؤدي إلى تضرر بعض المواد مثل المواد البصرية. إلا أنه في بعض الحالات يستخدم هذا الضرر الناتج من التفاعل بفاعلية عظمى ، وذلك لإمكانية التحكم فيه على نطاق ميكروسكوبي، لينتج عنه أدنى ضرر عرضي. وقد تم استغلال هذه الظاهرة لإنتاج أجهزة ليزر تعمل بنظام مصفوفة من نقط الضرر تستخدم في الذاكرات البصرية التي تتصف بكثافة عالية لتخزين البيانات (Glezer et al, 1996)، كما أن الحفر الطويلة الناتجة عن الضرر تشكل ما يسمى موجه الموجة Waveguide (Davis et al, 1996; Homoelle et al, 1999). كما تعمل مصفوفة من الحفر المتوازية عمل محازيز منفذة للأشعة (Sudrie et al, 1999) . من هنا يتضح أن المفهوم التفصيلي لآليات تفاعل الليزر المؤدي إلى الضرر في العوازل ذات الحجم هو قضية جوهرية تحتاج للمعالجة.

(1-3) آليات الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في المواد الصلبة

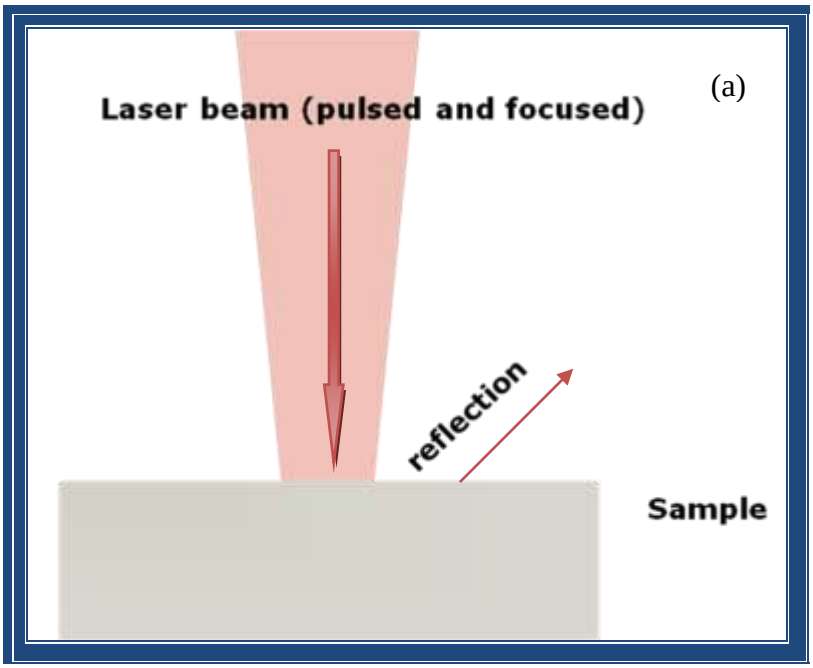
(1-3) Mechanisms of breakdown induced by laser radiation in solids

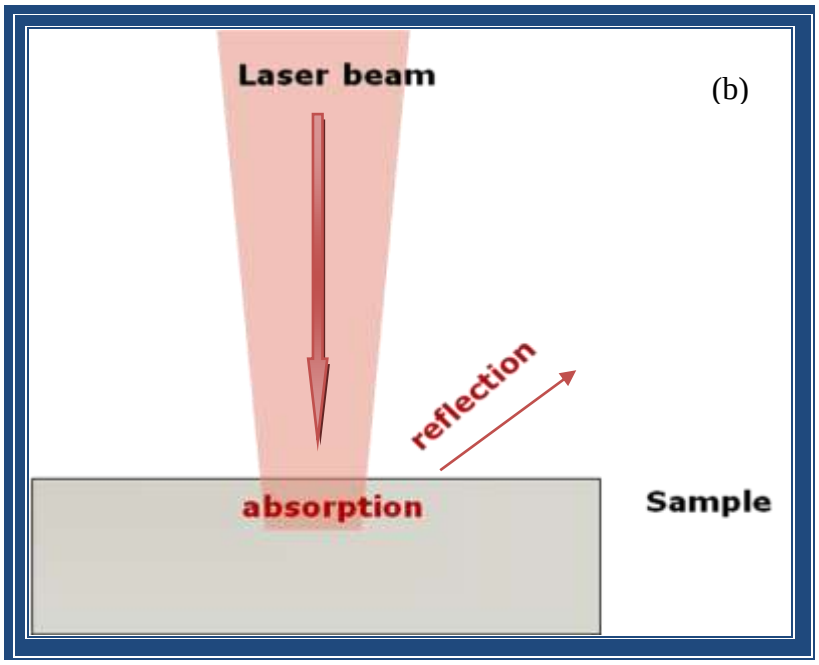
أشارت الدراسات السابقة أن الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في المواد الصلبة المؤدي إلى الضرر يحدث بواسطة ثلاث آليات متتابعة هي (i) إثارة الإلكترونات في شريط التوصيل بالتأين التصادمي والامتصاص متعدد الفوتونات (ii) تسخين الإلكترونات في شريط التوصيل المستحث بواسطة الإشعاع (iii) نقل طاقة البلازما للشبيكة (Lenzner et al, 1998) .

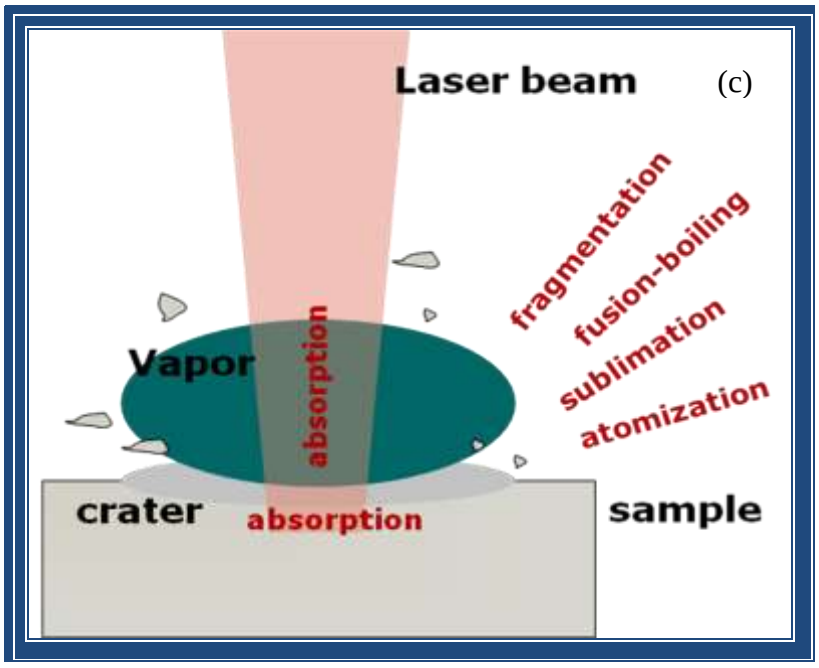
وتكمن أهمية استخدام أشعة ليزر الفيمتوثانية ذات النبضات متناهية القصر في قدرتها على ترسيب الطاقة في المادة خلال فترة زمنية قصيرة جداً ، مما يعمل على تجمد انسياب الحرارة خلال التفاعل .ويتسبب الترسيب الفجائي للطاقة إلى انتزاع طبقة رقيقة جداً من المادة في منطقة التفاعل . كما أن سرعة ترسيب طاقة النبضة يتم دون تفاعل مع سحابة المادة المتبخرة وهذا بالتالي يحول دون تشوه أو انحناء الحزمة الساقطة نتيجة لتغير معامل الانكسار في منطقة التفاعل مما يقلل من انفراج الحزمة (Oh et al, 2006) .

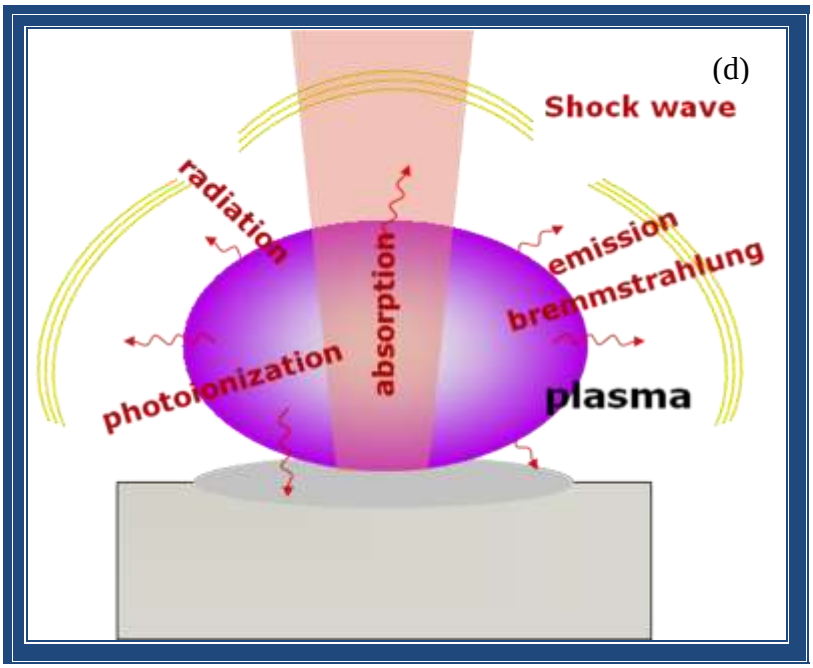
يوضح شكل (1-1) مراحل ترسيب الطاقة في المادة الصلبة وتكون البلازما وإحداث ضرر بالعينة المشعة بحزمة من أشعة الليزر ذات شدة الاستضاءة العالية.

حيث تسقط حزمة الليزر المجمعة في بقعة صغيرة على عمق معين داخل العينة وفقاً للنظام البصري المجمع للحزمة، ونلاحظ انعكاس لجزء من هذه الأشعة عند سطح العينة، يتبع ذلك امتصاص لطاقة حزمة الليزر داخل العينة مع استمرار الانعكاس عند السطح شكل (1-1) a,b ينتج عن هذا الامتصاص عملية انتزاع لجزء صغير جداً من المادة مكوناً حفرة Crater يصاحب ذلك تكون بخار وتجزيء للمادة وغليان لدرجة الانصهار والحصول على مادة العينة على شكل ذرات، يتبع ذلك تكون البلازما التي تؤدي إلى انهيار المادة وتحولها من الحالة العازلة إلى الحالة الموصلة ، مع انبعاث إشعاعي وتأين فوتوني وانبعاث برمشتراهلنج.

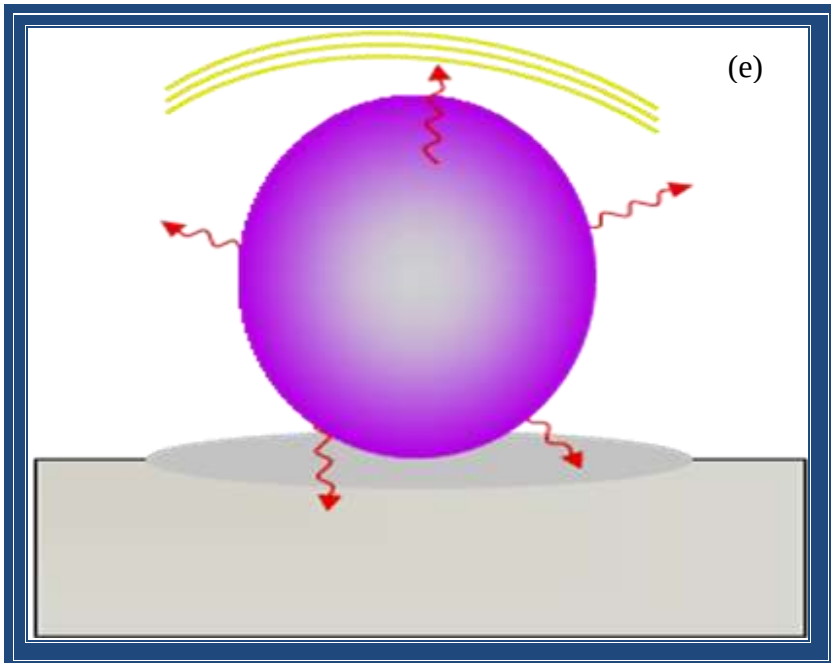


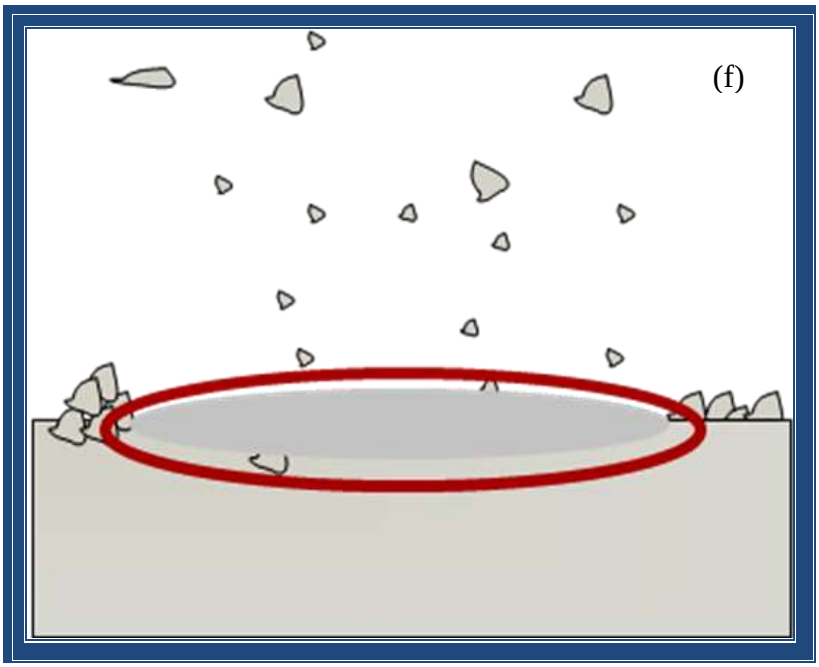

Laser beam
(b)
reflection
absorption
Sample


Laser beam
(c)
fragmentation
fusion-boiling
sublimation
atomization
Vapor
absorption
crater
absorption
sample


(d)
Shock wave
radiation
absorption
emission
bremmstrahlung
photoionization
plasma

يتبع


(e)



شكل (1-1) مراحل ترسيب الطاقة وتكون البلازما وإحداث ضرر في المادة الصلبة.

فتصل البلازما إلى كثافة عالية ودرجة حرارة مرتفعة شكل (1-1)c,d ثم تبدأ البلازما في الاضمحلال تاركة خلفها ما يسمى بالضرر داخل وعلى سطح العينة شكل (1-1) e,f .

وقد أشارت الدراسات النظريـــة والعمليـــة (Du et al,1994 & 1996; Stuart et al,1995 & 1996; Varel et al,1996; Lenzner et al,1998; Tien et al,1999; Mao et al,2004; Liu et al,2005; Oh et al.2006) إلى أن ترسيب طاقة أشعة الليزر في المادة يتم نتيجة للعمليات الفيزيائية الآتية:

(1-3-1)عملية التـــأين التـــدريجي The cascade ionization process

في المواد العازلة الشفافة يكون جهد التأين (أو فجوة الطاقة للإلكترونات فـــي شـــريط التكافؤ) اكبر من طاقة فوتون أشعة الليزر. بناء على ذلك فإن الإلكترونات المقيدة لا يمكنها أن تمتص طاقة من الأشعة عند القيم المنخفضة لشدة الاستضـــاءة. فعنـــد تواجـــد بعـــض الإلكترونات الحرة أو إلكترونات التوصيل في المواد، والتي يمكن الحصول عليها من شوائب

معدنية أو تأين بصري خطي أو حراري لبعض مستويات الطاقة المنخفضة للمادة ، فإن هذه الإلكترونات تكون بمثابة الإلكترونات الابتدائية اللازمة لعملية التأين التدريجي (الشـــلالي). وعندما يهتز إلكتروناً حراً عمودياً على المجال الكهربي المتذبذب لأشـــعة الليـــزر فإنـــه لا يكتسب أي طاقة خلال متوسط الدورة البصرية ، وبالتالي لا يحدث امتصاص لطاقة أشـــعة الليزر .وإنما يحدث اكتساب لطاقة أشعة الليزر بواسطة الإلكتـــرون الحـــر فقـــط عنـــدما يصطدم تصادماً مرناً بالإلكترونات المقيدة أو الشبيكة ينتج عنه تغير طوري له . هذه العملية هي ما يطلق عليها بعملية تسخين جـــول Joule heating process و تعـــرف أيضـــاً بالعملية العكسية لبرمشتراهلنج Inverse Bremsstrahlung process ، وفيها يمكن للإلكترون الابتدائي أن يكتسب عجلة تؤدي إلى زيادة طاقته عن جهد تأين الإلكترون المقيد . عندئذٍ فإن التصادم غير المرن مع إلكترون مقيد ينتج عنه حادثة تأين. إذا نقل الإلكترون الحر تقريبـــاً كل طاقته للإلكترون المقيد ، ينتج عن ذلك الحصول على إلكترونين حرين بطاقات حركـــة منخفضة كما يوضح شكل (1-2-a) ، وتسمى عملية التأين هذه بالتأين التصادمي Collisional ionization . وبتكرار هذه العملية يحدث في النهاية تأيناً تدريجياً للمادة ، حيث تنمو كثافـــة الإلكترونات الحرة بطريقة أسية مبتدئة من قيمة منخفضة لكثافة الإلكترونات الابتدائية. وعند تحرر كثافة كافية من الإلكترونات المقيدة خلال هذه العملية تتولد بلازما ذات كثافة حرجة ، ويقال أن المادة الشفافة قد انهارت وأصبحت ماصة (ويمكن إهمال الامتصـــاص بواســـطة الإلكترونات الابتدائية نظراً لقيمتها المنخفضة). وفي حالة نبضات النانوثانية أو أطول مـــن ذلك فإن الكثافة الحرجة للبلازما تكون مساوية للمقدار 10^{18} cm^{-3} ، حيث يحدث عنـــد هـــذه الكثافة امتصاص بصري ملحوظ يؤدي لحدوث ضرر مستديم في المادة. أمـــا فـــي حالـــة النبضات متناهية القصر فتعرف الكثافة الحرجة للبلازما كدالة فـــي الطـــول المـــوجي (بوحدات C.G.S.) وفقاً للعلاقة

$$n_c = \frac{m_e \omega^2}{4\pi e^2} \qquad (1\text{-}1)$$

حيث m_e هي كتلة الإلكترون ، ω التردد الزاوي لأشعة الليزر، e شحنة الإلكترون .

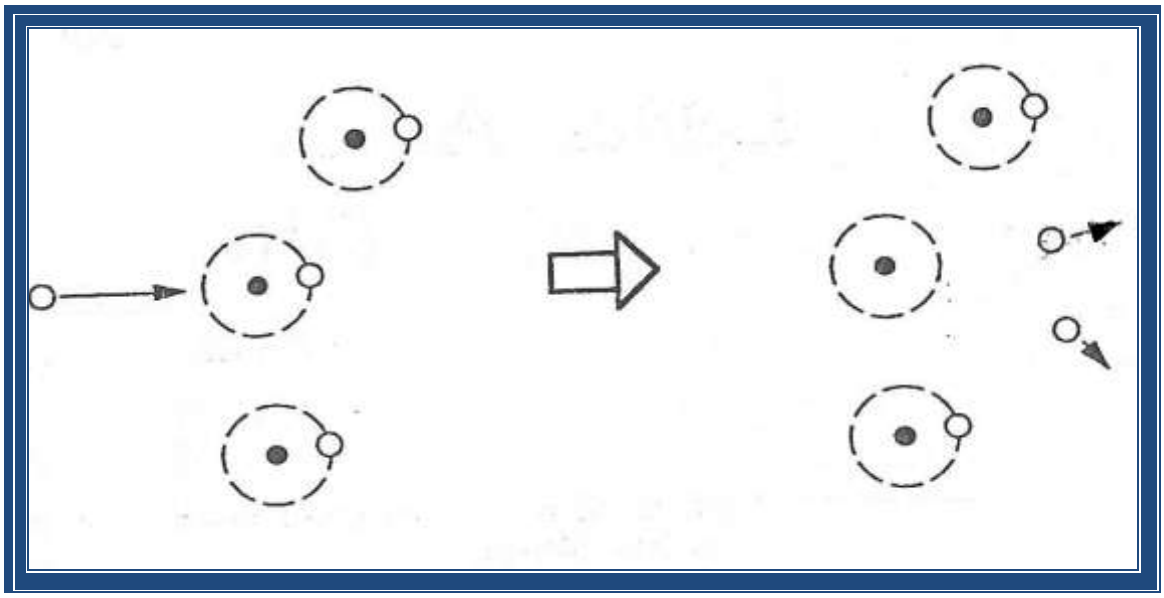
وربما يكون ذلك اختياراً ملائماً ، حيث تحدد هذه العلاقة كثافة البلازما عندما يتساوى تردد تذبذب البلازما مع تردد أشعة الليزر ، عندئذٍ تصبح المادة الشفافة معتمة تماماً لهذه الأشعة . وقد وجد أنه للأطوال الموجية التي تقع في المنطقة المرئية وتحت الحمراء القريبة فإن كثافة البلازما n_c تعطى بالمقدار 10^{12} cm^{-3} . ويصاحب الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليـــزر

انبعاث موجات صوتية وإشعاع بصري من البلازما المتكونة في المنطقة البؤرية (Liu et al, 1997) .

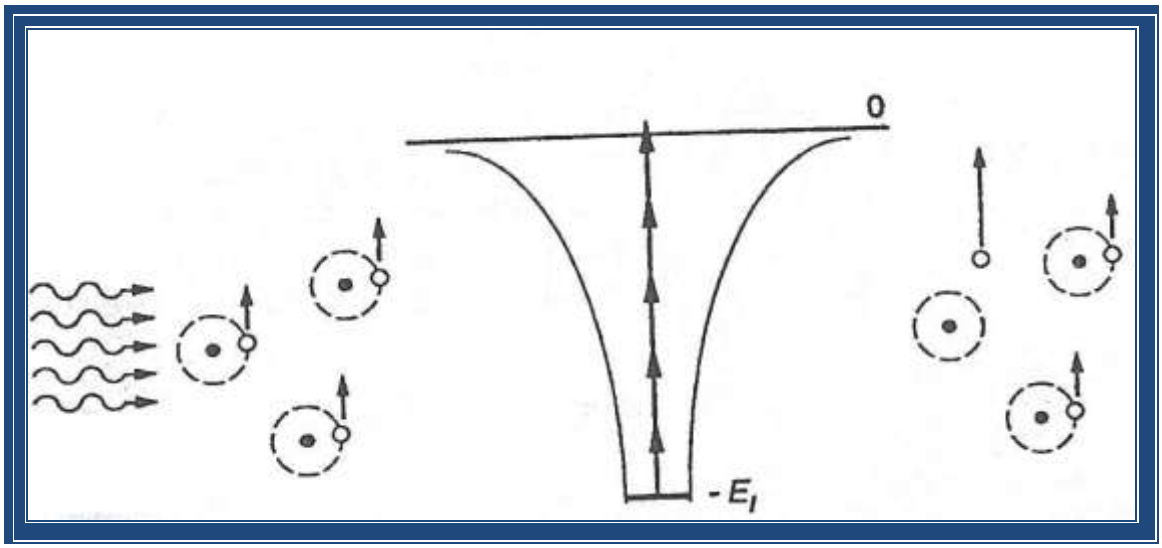
(1-3-2) عملية الامتصاص متعدد الفوتونات

(1-3-2)Multiphoton absorption process

عند المجالات ذات شدة الاستضاءة العالية لأشعة الليزر كما هو الحال للنبضات متناهية القصر فإن التفاعل بين الأشعة والمادة الصلبة يؤدي إلى التأين المباشر للإلكترونات المقيدة في المادة الشفافة، وذلك خلال عملية امتصاص متعدد الفوتونات . يوضح شكل (1-2-b) رسماً تخطيطياً لكيفية حدوث هذه العملية على النحو التالي. يتم رفع إلكترون مقيد من مستوى الطاقة أو شريط التكافؤ إلى مستوى الطاقة الحر أو شريط التوصيل بالامتصاص المتلازم لعدد k من الفوتونات خلال نبضة الليزر بحيث يتحقق الشرط $k\hbar\nu \geq \Delta E$ حيث $\hbar\nu$ هي طاقة فوتون أشعة الليزر ، ΔE هي جهد التأين (أو طاقة الفجوة)، وتسمى هذه العملية التأين متعدد الفوتونات Multiphoton ionization . وقد وجد أن احتمالية حدوث هذه العملية تتناسب مع شدة الاستضاءة مرفوعة للأس k ، لذلك يكون تأثير هذه العملية أكثر فاعلية عند القيم المرتفعة جداً لشدة استضاءة أشعة الليزر، وذلك يتوفر عند النبضات متناهية القصر.أما للنبضات الطويلة حيث تكون شدة استضاءة أشعة الليزر منخفضة نسبياً فإن مساهمة التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات تكون أقل أهمية.



شكل(1-2-a) رسم تخطيطي لكيفية حدوث عملية التأين التدريجي.



شكل(1-2-b) رسم تخطيطي لكيفية حدوث عملية الامتصاص متعدد الفوتونات.

ومن جهة أخرى فإنه لنبضات متناهية القصر($\tau \leq 100$ fs) ذات شدة مجال كهربائي عالية فإن التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات يمكنه إنتاج إلكترونات حرة دون الاعتماد على وجود إلكترونات أولية ، ولذلك يمكن تحديد قيم شدة استضاءة الأشعة اللازمة للانهيار بدقة عالية عند هذه النبضات.

(1-3-3) عمليات كسب وفقد طاقة الإلكترونات

(1-3-3)The electron energy gain and loses processes

عند تولد كثافة من الإلكترونات خلال العمليتين السابقتين يمكنها أن تمتص طاقة أشعة الليزر عند تصادمها مع الأيونات خلال العملية العكسية لبرمشتراهلنج مما يؤدي إلى تسخينها ورفع درجة حرارة البلازما . ووفقاً لقانون حفظ العزم ينتقل جزء من طاقة الإلكترونات إلى الأيونات أو الشبيكة ينتج عنه زيادة في درجة حرارة المادة . تعتمد كمية الطاقة المنتقلة ودرجة التسخين خلال نبضة الليزر على طول زمن النبضة ، وكذلك معدل انتقال معامل الطاقة . كما أن هذه الطاقة الممتصة تنساب خارج حيز التفاعل نتيجة للتوصيل و الانحدار الحراري ، مما يؤدي إلى زيادة الحجم المسخن من المادة عن حجم حيزالتفاعل . ومع صغر عرض نبضة الليزر($\tau <100$ fs) وزيادة شدة المجال الكهربي المصاحب له ، نجد أن الحجم المسخن نتيجة للتوصيل الحراري يكون أصغر من الحجم البؤري حينما تكون قيمة التعرض الإشعاعي لليزر Laser Fluence أو شدة الاستضاءة عند القيمة اللازمة للانهيار أو أعلى قليلاً . (Liu et al, 1997)

يتضح مما سبق أن العمليات الفيزيائية المسؤولة عن الانهيار والضرر في المواد العازلة المستحث بواسطة أشعة الليزر تعتمد أساساً على خصائص الأشعة وكذلك طبيعة المادة ، حيث تتغير كثافة الإلكترونات التي تحدد شرط الانهيار بتغير الطول الموجي أو تردد الأشعة المستخدمة وقيمة شدة الاستضاءة اللازمة وكذلك مقدار فجوة الطاقة للمادة العازلة كما أن معدل انتقال طاقة الليزر للمادة يعتمد على زمن التفاعل أي زمن نبضة الليزر وكذلك معامل التوصيل الحراري للمادة.

(1-4) عملية الانتزاع (1-4) Ablation process

كما رأينا في حالة النبضات متناهية القصر فإن الإلكترونات تسخن إلى درجات حـــرارة عالية بينما تكون الأيونات أو الشبيكة عند درجة حرارة أقل منها بكثير.أي أن الأيونات تظل باردة خلال زمن النبضة، حيث يتم تبادل الطاقة المتتابع بين الإلكترون والأيون مباشرة بعد انقضاء نبضة الليزر. مؤدياً الى سرعة تسخين الأيونات إلى درجات حرارة عالية نسبياً .يتبع ذلك تبخر لجزء كبير من المادة في حيز التفاعل مع مرور سريع بحالة الانصهار ، ويشـــغل الحجم المسخن في هذه الحالة جزء صغير جداً من الحجم البؤري، ونتيجـــة لصـــغر فتـــرة التوصيل الحراري بسبب قصر زمن التفاعل .يحدث ذلك حينما تكـــون الطاقـــة الإشـــعاعية لمصدر الليزر مساوية أو تزيد عن القيمة اللازمة للانهيار.

في المواد الماصة مثل المعادن وأشباه الموصلات يكون هناك كثافة عالية من الإلكترونات الحرة وإلكترونات التكافؤ لها جهد تأين يقل عن طاقة الفوتون المصاحب لأشعة الليزر .وفي حالة النبضات الطويلة تسود عملية الامتصاص الخطي ويتم تسخين المادة خـــلال تســـخين جول، وعند الوصول إلى درجة حرارة الانصهار أو التبخر يقـــال أن المـــادة انهـــارت أو تضررت . ويصاحب حالة الانهيار موجات صوتية وانبعاث بصري ، ويتم تعيـــين معـــدل التسخين بدلالة معدل امتصاص طاقة الليزر ومعدل فقد الطاقة من الحجـــم البـــؤري خـــلال التوصيل الحراري بعيداً عن منطقة البؤرة . ويأخذ معدل امتصاص أشعة الليزر قيمة ثابتـــة تقريباً قبل الانهيار حيث تترسب الطاقة على الطبقـــة الســـطحية بســـمك يعطـــى معامـــل الامتصاص أو عمق اختراق الجلد علـــى الصـــورة $L_s = \frac{1}{\alpha}$ حيث α : معامـــل الامتصاص، ويمكن وصف امتصاص الطاقة بواسطة طول آخر هو انسياب الحرارة خـــلال نبضة الليزر، والذي يعبر عن عمق اختراق الحرارة نتيجة للتوصيل الحراري ويعطى طول الانسياب بواسطة العلاقة $L_d = \sqrt{D\tau_L}$ حيث D هي معامل انسياب الحرارة . τ_L يعبر عن عرض نبضة الليزر.

في حالة النبضات الطويلة حيث يكون $L_d > L_s$ يتم تعيين حجم المادة المسخنة بواسطة نبضة الليزر أي درجة حرارتها ، بتعيين طول الانسياب الحراري خلال النبضة .في هذه الحالة تتغير طاقة الإشعاع اللازمة للانهيار مع عرض النبضة وفقاً للعلاقة $F_{th} \propto \sqrt{\tau_L}$ ولنبضة قصيرة من أشعة الليزر τ_c فإن $L_d = \sqrt{D\tau_c} < L_s$

في هذه الحالة يتم تعيين عمق الجلد الحجمي المسخن خلال نبضة الليزر Skin depth ، بدلاً من عمق اختراق الحرارة. حيث لا تعتمد قيمة الشدة اللازمة للانهيار على عرض النبضة (Pronko et al,1995) ، ويطبق هذا أيضاً على المواد الشفافة حينما يكون هناك امتصاص ملحوظ نتيجة لتولد البلازما وتستخدم لتفسير تغير الشدة اللازمة للانهيار مع عرض النبضة وفقاً للعلاقة $\sqrt{\tau_l}$ (Bettis et al, 1976) .

(1-5) المسح المرجعي **(1-5) Literature review**

إن الانهيار الكهربي للمواد العازلة (أي التأين السريع) وتكون البلازما عند تعرض المادة لمجالات كهربية تتخطى بعض القيم الحرجة هو ظاهرة عامة إلى حد ما . وقد تم تفسير هذه الظاهرة عند أوضاع مختلفة واسعة التنوع تمتد من المجالات الاستاتيكية (O'Dwyer, 1973) إلى مجالات أشعة الليزر ذات الترددات العالية جداً (Smith, 1978).

في منتصف السبعينات درس بلوم بيرجن (Bloembergen, 1974) الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر للقلويات الهالوجينية وبعض المواد العازلة باستخدام نبضات من أشعة الليزر تمتد من النانوثانية انخفاضاً إلى البيكوثانية. تمكن في هذه الدراسة من تحديد الآليات الفيزيائية المسؤولة عن الانهيار الحجمي البصري الداخلي لهذه المواد ، حيث وجد أن عملية التأين التدريجي التي تشبه الانهيار الكهربي الاستاتيكي هي العملية المسؤولة عن الانهيار. وأكد ذلك دراسة تغير الشدة اللازمة للانهيار كدالة في طول نبضة الليزر، حيث توصل إلى توافق عند مقارنة نتائج القياسات العملية و القيم المحسوبة باستخدام نموذج التأين التدريجي (Fradin and Bloembergen, 1973) .وقد وجد بلوم بيرجن أن شدة المجال الكهربي اللازم للانهيار تساوي 10^7 V/cm ، عند استخدام نبضات قصيرة تصل إلى 10 ps . وبامتداد نبضة الليزر بقدر بسيط إلى منطقة الفيمتوثانية وجد أن قيمة المجالات الكهربية اللازمة للانهيار المتوقعة تتخطى المقدار 10^8 V/cm والتي عندها تظهر أهمية عملية التأين النفقي.كذلك وجد أن عملية التأين النفقي تحدث بشكل ملموس عند قيم شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار هدف صلب عند استخدام نبضات من ليزر الفيمتوثانية. وقد بدأت الدراسة الفعلية لهذه الظاهرة بواسطة ديو ومجموعته (Du et al, 1994) حيث أجريت تجارب عن

الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر على هدف صلب من السيلكا المنصهرة Fused silica بنبضات تغطي مدى يقع ما بين 7 ns إلى قيم صغيرة جداً تصل إلى 150 fs . وأعطت نتائج القياسات علاقة هامة تربط بين التعرض الإشعاعي الحرجThreshold fluence وطول نبضة الليزر، حيث وجد أن قيم التعرض الإشعاعي تعاني من زيادة ملحوظة عندما يقل طول نبضة أشعة الليزر عن 10 ps. وقد فسرت هذه المشاهدات العملية بواسطة نموذج التأين التدريجي للأهداف ذات الحجم الكبير .

ومن وجهة نظر أخرى أجرى ستيوارت ومجموعته (Stuart et al, 1994) دراسة لتغير طول النبضة مع شدة الاستضاءة اللازمة لتضرر سطح هدف صلب، وذلك باستخدام مواد مختلفة ومدى واسع من أطوال النبضة.وأعطت نتائج هذه القياسات تغيراً غير ملموس لشدة الاستضاءة اللازمة للضرر عندما انخفض طول نبضة الليزر لقيمة اقل من 10 ps.

وأشارت القياسات المعملية أن هناك تناقضاً بين قيم شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار عند استخدام نبضة مفردة أو نبضات متعددة كما هو الحال في تجربة ديو ومجموعته (Du et al, 1994) حيث استخدم نبضة مفردة عند طول موجي 780 nm لقياس الضرر الناتج في الهدف الصلب ،بينما استخدم الباحث ستيوارت ومجموعته (Stuart et al, 1995) مصدر بطول موجي 1053 nm يعمل بنبضات متعددة تصل على 600 نبضة بمعدل إعادة 10 Hz وتم فحص الضرر الناتج عن التفاعل في العينة باستخدام ميكروسكوب نومارسكي . وفي قياسات أخرى لشدة الاستضاءة اللازمة للضرر وباستخدام نفس الميكروسكوب عند تشغيل مصدر الليزر بنبضة مفردة وخمس نبضات بمعدل إعادة 50 Hz وطول موجي 790 nm عند مدى من طول النبضة يتراوح مابين 190 fs – 4.5 ps ، وجد فاريل ومجموعته (Varel et al, 1996) أن الشدة اللازمة للضرر عند استخدام نبضة مفردة تزيد قليلاً عن تلك الشدة التي تم الحصول عليها من القياسات عند استخدام خمس نبضات. كما وجد أيضاً أن القيم التي تناظر نتائج خمس نبضات تزيد بمعدل الضعف عن تلك النتائج التي استخدم فيها 600 نبضة بواسطة الباحث ستوارت ومجموعته عند استخدام نفس طريقة الكشف . اوضحت هذه النتائج أن العينة يمكن أن تعاني من تغير تراكمي متزايد في خواص المادة حينما تتعرض لسلسلة من النبضات ذات شدة استضاءة جزئية (Jones et al, 1989) .

وعلى الرغم من تعدد الدراسات التي أجريت على ظاهرة الانهيار المستحث بواسطة أشعة ليزر الفيمتوثانية إلا أن سلوك هذه الظاهرة وكذلك عمليات الضرر الناتجة عنها في المواد مازالت محل دراسة . ويكمن مفتاح هذه الظاهرة في آليات التأين الأساسية الممكن حدوثها أثناء التفاعل مثل التأين التدريجي والتأين بالامتصاص متعدد الفوتونات وكذلك التأين النفقي ، بالإضافة إلى تصنيف عمليات الانهيار السطحي والحجمي . حيث أن عمليات الانهيار في الأهداف الحجمية يجب أن تأخذ في الاعتبار تأثير ظاهرة التجمع الذاتي أو الانفراج الذاتي للأشعة والتي غالباً ما تتواجد تحت هذه الظروف، ويظهر تأثيرها بشكل واضح عند استخدام نبضات متناهية في القصر.

في عام 1996 أجرى فوندرلاند وتشولر (Von der Linde and Schuler, 1996) قياسات لتحديد شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار وتكون البلازما عند تفاعل نبضات من أشعة ليزر الفيمتوثانية مع أسطح مواد لها شفافية بصرية. استخدم لذلك تقنية فعالة للضخ والمجس لمشاهدة التحليل البعدي والزمني لتكون البلازما . وتم ضخ سطح المادة بمصدر لأشعة الليزر ذو طول نبضة 120 fs وطول موجي 800 nm وشدة استضاءة تصل إلى 10^{14} W/cm^2. وتم تعيين الشدة اللازمة للانهيار عن طريق قياس تغير الانعكاسية البصرية المصاحبة لتكون البلازما ، والتي أظهرت تكون البلازما على سطح المادة .وعند إجراء القياسات مع المواد البصرية ذات الأحجام الكبيرة وذلك بضخها بواسطة نبضات من ليزر الفيمتوثانية شوهد مقاومة ملحوظة للانهيار البصري وتضرر المادة.

في عام 1998 أجرى لينزنر ومجموعته (Lenzner et al, 1998) قياسات لتحديد شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار البصري وعمق الانتزاع في المواد العازلة ذات فجوات الطاقة المختلفة .وأجري ذلك باستخدام نبضات من أشعة الليزر تتراوح ما بين (5 fs – 5 ps)وطول موجي يساوي 780 nm . وقد وجد أنه لنبضة ليزر تقل عن 10 fs فإن الإلكترونات الحرة تتكون خلال انتقال الطاقة بواسطة التأين التصادمي أو الامتصاص متعدد الفوتونات وذلك وفقاً لمقدار فجوة الطاقة .كما شوهد أيضاً أن معدلات عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات تقل بشكل كبير عن القيم التي أمكن الحصول عليها نظرياً باستخدام نظرية كيلديش (Keldysh, 1965) . كما أشارت القياسات بأن نبضات أشعة الليزر التي تقل عن 10 fs فتحت الطريق إلى البصريات اللاخطية غيرالمضطربة ذات الوجهين Reversible

nonperturbative nonlinear optics، وذلك عندما تزيد شدة الاستضاءة عـــن 10^{13} W/cm^2 والتي تقل قليلاً عن الشدة اللازمة لإحداث الضرر والانتزاع الناتج بأشـــعة الليـــزر Laser ablation بدقة تصل إلى النانوميتر وذلك عند شدة تزيد قليلاً عن الشدة الحرجة فـــي حالـــة المواد العازلة.

من جهة أخرى أوضحت القياسات التي أجريت بواسطة برونكو ومجموعته (Pronko et al, 1998) باستخدام نبضات من أشعة الليزر تتراوح ما بين (80 fs- 9 ns) وأطوال موجيـــة 786 nm و 1.06 µm وشدة مجال كهربي تتراوح ما بـــين MV/cm (40 - 0.3) ، أن التـــأين التدريجي هو الآلية السائدة لانهيار العوازل في السيلكون بواسطة نبضات ليزر فائقة السرعة عندما تزيد طاقة الفوتون عن فجوة الطاقة . وتم تطبيق نظرية شبه تجريبية للتـــأين بالتيـــار المستمر وحسابات مونتوكارلو للتيار المتغير لمناقشة معاملات التأين التدريجي التي وجد أنها تتراوح ما بين s^{-1} (10^{14} - 10^{10}) ، وأعطت القياسات أيضاً ترابطـــاً بـــين زمـــن التصـــادم الالكتروني ومعدلات التأين المصاحبة.

كما أجرى تيان ومجموعته(Tien et al, 1999) قياسات عن الضرر الناتج عـــن نبضـــة قصيرة لأشعة الليزر في المواد الشفافة .أجريت القياسات لدراسة الضرر الناتج عن نبضـــة مفردة لمصدر من أشعة الليزر بطول موجي nm 800 يعمل بمدى واسع من طول النبضـــة ينخفض إلى 20 fs وذلك على هدف من السيلكا المنصهرة (Fused silica) . بالإضافة إلى هذه الدراسة تمكن الباحثون من وصف العمليات الفيزيائية في المدى البصري الكلي بـــدلاً مـــن المدى الخطي للمعدل الشلالي وذلك باستخدام مدخل معادلة المعدل لضرر الليزر في المـــواد الصلبة العازلة وتعبير فورنر للتأين التصادمي ونظرية كيلديش للتأين الفوتوني فـــي المـــواد الصلبة . كما أشارت الدراسة أيضاً لحساسية شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار لمقدار كثافـــة الشحنات الابتدائية .وأعطي تفسيراً وصفياً للتناقض بين الدراسة النظرية المستخدمة و القـــيم المقاسة لشدة الاستضاءة اللازمة للضرر .

وفي عام 1999 أجريت دراسة بواسطة ويلرشوف(Wellershoff et al, 1999) لتحديد تاثير الترابط بين الإلكترون والفونون على الضرر المستحث بنبضات من ليزر الفيمتوثانية ، وذلك لقياس عمق الطاقة المترسبة وانتقالها إلى شبيكة الأفلام الرقيقة متغيرة السمك في كـــل مـــن

الذهب (Au) والنيكل (Ni) والموليبديوم (Mo). وعرفت نقطة الانصهار بعتبة الضرر وتم الكشف عنها بقياس التغير في تشتت وانعكاس ونفاذية الضوء الساقط . وقد أجريت التجارب باستخدام مصدر متعدد النبضات ، وتم استخلاص التعرض الإشعاعي الحرج لنبضة مفردة بأخذ في الاعتبار مرحلة نمو النبضة. وقد وجد أن القيمة الحرجة للتعريض الإشعاعي تعتمد على سمك الفيلم عندما يقل السمك عن مدى انتقال الطاقة الإلكترونية . كما أمكن وصف تغير التعريض الإشعاعي الحرج مع طول النبضة وسمك الفيلم بنموذج درجتي الحرارة الذي اثبت أن ضرر المعادن المتسبب بأشعة الليزر هو عملية حرارية مطلقة حتى عند استخدام نبضات من الفيمتوثانية . وقد انعكست أهمية الترابط بين الإلكترون والفون بالقيمة الملحوظة للفرق في عمق انسياب الإلكترون في كل من المعادن النبيلة والمعادن الانتقالية.

وصاحب القياسات العملية بعض الدراسات النظرية عن الضرر المستحث بواسطة أشعة الليزر في المواد العازلة لنبضات تقل عن البيكوثانية ذات شدة الاستضاءة العالية والتي أشارت أن الضرر ينتج عن تكون كثافة من الإلكترونات خلال عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات Multiphoton ionization (MPI) والتأين التصادمي للإلكترونات المسخنة بواسطة جول Electron impact ionization (EII) والتي تؤدي الى التأين التدريجي (Stuart et al,1995).

أجرى الباحثون لي ومجموعته (Li et al, 1999) قياسات لشدة استضاءة الانهيار البصري في المواد العازلة ذات فجوات الطاقة المختلفة بواسطة نبضات ليزر محددة التحويل مفردة ومزدوجة بطول نبضة 25 fs وطول موجي 800 nm وقد أشارت قياسات طريقة الضخ والمجس لنبضة مزدوجة أن طاقة البلازما في العوازل تعاني من اضمحلال فائق السرعة والذي يستمر فقط لمدة 100 fs ولا يتبع منحنى الاضمحلال الأسي . لذلك يجب أن تشمل معادلة المعدل لكثافة الإلكترونات حداً يعبر عن اضمحلال البلازما. وقد أوضحت قياسات النبضة المزدوجة أيضاً أن شدة استضاءة الانهيار البصري تعتمد على درجة الحرارة وقد استخدمت تقنية جديدة لتعيين شدة استضاءة الانهيار البصري في المواد العازلة والتي فيها يتم إهمال عدم التأكد في تعريفها وتسمح أيضاً بتجميع البيانات في الوقت الحقيقي.

وفي عام 2000 أجريت دراسة نظرية بواسطة الباحثان ابوستلوفا و هاهن (Apostolova and Hahn, 2000) عن الضرر الناتج بواسطة نبضات أشعة الليزر الفائقة

السرعة بطول نبضة يقل عن 1 ps ، على مادة عازلة ذات فجوة طاقة واسعة ، وذلك كمحاولة لتحديد العمليات الفيزيائية المعقدة التي تصاحب هذه الظاهرة . اعتمدت هذه الدراسة على طريقة عددية لحل معادلة فوكر – بلانك العامة المتغيرة مع الزمن Time dependent Fokker-Planck (F-P) equation لإنتاج إلكترونات حرة . وأوضحت نتائج الحسابات أن عملية التأين التدريجي التصادمي تنافس عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات لنبضات تقل عن 25 fs . وقد تم اختبار حساسية قيم معدلات العمليات الفيزيائية التي استخدمت في هذه المعادلة، كما تم تحديد القيم الحرجة منها . من هذه الاختبارات تم الحصول على معلومات دقيقة لوضع مواد جديدة ذات قيم تعرض إشعاعي يناسب التطبيقات المطلوبة . بالإضافة إلى ذلك تم الأخذ في الاعتبار في هذه الحسابات معدل عملية إعادة الاتحاد ذات الثلاث أجسام لوصف اضمحلال إلكترونات البلازما . وتم ذلك بمعالجة السلوك الزمني لكثافة الإلكترونات خلال نبضة مفردة ثم نبضتين مع أخذ في الاعتبار زمن التأخر بينهما . وقد نجح النموذج جزئياً فقط في تفسير بعض النتائج المعملية .

وفي محاولة أخرى وضع تفسير نظري للدور الذي تلعبه عمليات التأين في البلورات خالية العيوب بواسطة كايزر ومجموعته (Kaiser et al, 2000) وذلك بوضع نموذج يشمل عمليتين متنافستين هما التأين القوي بالمجال الكهربي و التأين بالتصادم الإلكتروني . وتم وصف تسخين الإلكترونات الحرة بدلالة التصادم بين فوتون وفونون وإلكترون . أما ارتخاء الإلكترونات الحرة في الغاز(الجزء المتبخر من المادة الصلبة خلال التفاعل) فيحدث خلال تصادم إلكترون وإلكترون وتصادم إلكترون وفونون . كما أن العملية الأخيرة مسؤولة أيضاً عن تبادل الطاقة من الإلكترونات الحرة إلى فونونات الغاز . وقد تم ذلك بالحل العددي لمجموعة من معادلات بولتزمان المتغيرة مع الزمن حيث تمثل كل معادلة تكامل لعملية التصادم المناظر لها . وأوضحت النتائج أن إلكترونات الغاز تعاني من إثارة وارتخاء في شريط التوصيل . كما أن عملية التأين بالمجال الكهربي القوي هي المسؤولة أساسا عن توليد الإلكترونات الحرة ، بينما لا يحدث تأين تدريجي (شلالي) عند تعريض العينة لنبضات من ليزر الفيمتوثانية . وقد تم حساب كثافة الإلكترونات والطاقات الداخلية للأنظمة الجزئية ، وأعطت توافقاً بين قيم التعرض الإشعاعي الحرجة المحسوبة بهذا النموذج تحت شروط مختلفة لقيم الشدة اللازمة للضرر مع تلك المقاسة عملياً.

في عام 2001 أجرى جاسبار ومجموعته (Jasapara et al, 2001) دراسة عملية عن الانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر في المرايا عالية الكفاءة المتكونة من طبقات متبادلة بسمك ربع طول موجي (λ /4) من مادتي أكسيد التاليوم و أكسيد السيليكون Ta_2O_2 و SiO_2 وكذلك فيلم رقيق مفرد بسمك 500 nm من Ta_2O_2 .وتم تشعيع المواد بواسطة نبضات فيمتوثانية مضخمة وغير مضخمة من أشعة الليزر. واستخدم لتفسير نتائج القياسات العملية نموذج عددي مبسط يعتمد على معادلة معدل تغير كثافة الإلكترونات ، يأخذ في الاعتبار عمليتي الامتصاص متعدد الفوتونات والتأين التصادمي، بالإضافة إلى تغير الشدة الموضعية نتيجة لتأثير التداخل في الأفلام الرقيقة. أشارت النتائج أن الضرر الناتج في الأفلام الرقيقة ذات الكفاءة العالية يشبه في سلوكه الضرر الذي يحدث في المواد الحجمية . كما أمكن إهمال الدور الذي تلعبه العيوب والشوائب في ظاهرة الانهيار تحت هذه الظروف المعملية.

وفي محاولة لدراسة استخدام ظاهرة الضرر الناتج عن تفاعل نبضات من ليزر الفيمتوثانية مع المواد الصلبة كتطبيق مهم في الميكنة الميكروسكوبية أجريت القياسات بواسطة سن ولونجتن (Sun and Longtin, 2001) لتعيين كثافة الإلكترونات الناتجة عن تفاعل أشعة الليزر مع الوسط الغازي المحيط الذي تمر فيه الحزمة قبل سقوطها على المادة الصلبة ، حيث تم إجراء التجربة في أوساط غازية مختلفة من الهواء والنيتروجين والهليوم والنيون وقد سبق تحديد شدة الاستضاءة اللازمة لانهيار كل من غاز الهيليوم (Evans and Gamal, 1984) وغاز النيتروجين (Gamal et al, 1999) وكذلك غاز النيون (Gamal and Azzouz, 2001) باستخدام نبضات من ليزر النانوثانية. وقد وجد في هذه الدراسة أن هناك زيادة سريعة لكثافة الإلكترونات الحرة (البلازما) ، نتيجة لتأين الغاز تحت تأثير شدة الاستضاءة العالية المصاحبة لأشعة الليزر ذات النبضات فائقة السرعة. وتعمل هذه الكثافة على انخفاض معامل انكسار الغاز، مما ينتج عنه انفراج للحزمة في البلازما وتحكم للطور الذاتي .بناءً على ذلك فإن التأثيرات المستحثة للبلازما تشوه التركيب الزمني والبعدي لحزمة الليزر والتي تؤدي إلى انحدار كفاءة المعالم و الجودة التكرارية للميكنة الميكروسكوبية بواسطة النبضات فائقة السرعة لحزمة الليزر . بالإضافة إلى ذلك فإن امتصاص البلازما للطاقة الساقطة تقلل من الطاقة المسموحة لمعالجة المواد والذي ينتج عنها انخفاض في معدل إزالة المادة . ولتحاشي هذه التأثيرات تجرى عمليات الميكنة الميكروسكوبية التقليدية في غرف مفرغة والتي تجعل هذه العملية تستنزف وقتاً حقيقياً في نطاق واسع عند المعالجة

العملية للمواد . بناء على ذلك استخدمت في هذه الدراسة أوساط غازية مختلفة لاختيار انسب وسط غازي يمكن أن تنتشر فيه حزمة الليزر بدلاً من الفراغ. وقد وجد أنه عند استخدام الغازات الخاملة انخفض تأثير كل من الانفراج الناتج عن البلازما وتحكم الطور الذاتي و كذلك تأثيرات الحجب ، وذلك لارتفاع طاقة تأين هذه الغازات الذي يؤدي إلى احتمالية منخفضة لتكون البلازما على امتداد مسار حزمة الليزر . واستخدم في هذه القياسات نبضات ليزر من الفيمتوثانية من ليزر التيتانيوم المطعم بالياقوت Ti-Sapphire في الأوساط الغازية الأربعة المذكورة لميكنة ثقوب خلال لوح من النحاس وتم الحصول على معالم ذات جودة عالية . و كانت أعلى كفاءة ميكنة تم الحصول عليها عند استخدام غاز الهيليوم بينما كانت أقل جودة وكفاءة عند استخدام الهواء . وأوضحت هذه التقنية إمكانية ابتكار طريقة لحفظ جودة عالية للحزمة دون الاحتياج لغرفة تفريغ والتي تحسن بشكل ملحوظ المعالجة عند التطبيق العملي لنبضات فائقة السرعة من أشعة الليزر.

وحيث أن المواد العازلة ذات فجوة الطاقة العريضة تمثل مواد ذات أهمية وانتشار واسع في التقنيات الميكروسكوبية والنانوية والتي تشمل MEMS أنظمة الطب الحيوي والهندسة الحيوية وكذلك تغطية الأفلام الرقيقة متعددة الطبقات والألياف البصرية وغير ذلك، (Fan et al, 2002) حيث تستخدم الميكنة الميكروسكوبية للعوازل مصادر الليزر ذات السرعة الفائقة كمنطقة أبحاث جديدة مثيرة وواعدة بمميزات عديدة تشمل انتزاع المواد بدقة .كذلك الإهمال الحراري لمنطقة العمل وصفات التصنيع ذات الأحجام الميكرونية وأجزاء ميكرونية وطبقات النسب ذات الجودة العالية . وخلال معالجة المواد العازلة بأشعة الليزر فائقة السرعة تؤين الشدة العالية للنبضة المادة المشعة وينتج عنها منطقة انهيار بصري أو بلازما تتصف بكثافة عالية من الإلكترونات الحرة . ويمكن لهذه الكثافة العالية من الإلكترونات أن تمتص بكفاءة جزء كبير من طاقة أشعة الليزر والذي يتفاعل جزء منها في المادة الحجمية . ينتج عنه إزاحة للمادة خلال تبخر مباشر لها وتعتمد الطاقة المترسبة في المادة على الزمن والمنطقة البعدية للانهيار وكذلك على زمن ارتفاع البلازما ومعامل امتصاصها . وبزيادة كفاءة تفاعل الطاقة مع المادة الحجمية يزيد من معدل إزاحة المادة المترسبة لذلك فإن الطاقة المترسبة هي أحد العوامل الهامة في معالجة المواد بنبضات سريعة من أشعة الليزر وخاصة تلك التي تكون في حدود الميكرون أو أجزاء منه . ففي هذا البحث تم وضع نموذج انهيار بليزر الفيمتوثانية لتفسير الطاقة المترسبة خلال تفاعل المواد مع نبضات ليزر ذات السرعة الفائقة.

وأحد المساهمات الفعالة لهذا البحث هي أخذ في الاعتبار تأثير انتشار النبضة والتي اتضحت أهميته عند نبضات ذات طول يقل عن 10 ps . وبأخذ في الاعتبار انتشار النبضة أمكن التحليل الزمني والبعدي وصف تكون البلازما واستخدام ذلك في تعيين الطاقة المترسبة خلال امتصاص البلازما . وبمعلومية امتصاص البلازما أمكن أيضاً تعيين التغير في شكل النبضة أثناء انتشارها في المنطقة البؤرية . وتم اختبار صلاحية النموذج بواسطة دراسة امتصاص نبضة الليزر في البلازما المتكونة في الماء ومقارنة ذلك بالقياسات المعملية كما تم أيضاً تطبيق النموذج على مواد صلبة شفافة ومتوسطة الامتصاص وكذلك أوساط عازلة سائلة أثناء تفاعل المواد مع ليزر ذات سرعة فائقة.

ومن وجهة أخرى أجريت دراسة نظرية بواسطة مازهوكن ومجموعته (Mazhukin et al, 2003) للتكوين الزمني للبلازما غير المتزنة المستحثة بواسطة أشعة ليزر بطول موجي يقع في المنطقة فوق البنفسجية لتفسير ظاهرة الانهيار البصري المستحث بواسطة أشعة الليزر. استخدم في هذه الدراسة نموذج حسابي لتعيين شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار كدالة في الطول الموجي لتحليل الآليات الأساسية للتأين غير المتزن لبخار الألومنيوم .و توضيح الدور الذي تلعبه العمليات البصرية السائدة وهي الإثارة والتأين البصري الرنيني وغير الرنيني . وأعطت القيم المحسوبة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار توافق جيد بين القيم المحسوبة و نتائج القياسات العملية التي أجريت على الانهيار البصري لبخار الألومنيوم المستحث بواسطة أشعة ليزر الإكسيمر في مدى من طول النبضة يتراوح ما بين النانوثانية إلى الميكروثانية(Rosen et al, 1982; Schittenhelm et al,1996-1997).كما أكدت نتائج الحسابات التي أجريت لدراسة البلازما المتكونة في بخار الألمونيوم نتيجة لتفاعل أشعة ليزر النيوديميوم ياج بنبضات من البيكوثانية (Afaf et al, 2001).

من دراسة ظاهرة الانهيار البصري وجد أنها تعمل على تأين للمادة بواسطة أشعة بصرية ذات شدة استضاءة عالية (Radziemski and Cremers ,1989) .لذلك فهي تضع حداً لتكرارية استخدام المكونات البصرية في تطبيقات مصادر الليزر ذات القدرة العالية .وقد أجريت دراسة لاستخدام التأثير الموجب لهذه الظاهرة كحد سريع لمنع الانهيار في المكونات البصرية كتطبيق عند استخدام أشعة ليزر ذات قدرة عالية في لحام المواد (Sheila et al ,2003) . واستخدم في هذه القياسات مصدر ليزر النيوديميوم ياج مع تجميع حزمته تحت

الحمراء في نهاية مدخل الليف البصري . ويمد استخدام الليف البصري نظام مرن في الاستخدامات الصناعية ، والذي يسمح باتجاه اختياري لنهاية مخرج الليف البصري عند مسافة تصل إلى 100 m بينما تحتفظ الحزمة من حيث استطاعتها لتجميع خارج الحزمة في بقعة صغيرة جداً . كما أن هذا النوع من نظام حامل الحزمة يتميز بفقد صغير جداً وقد استخدم ليف بصري له قلب قطره يساوي 300 µm .و لتفادي مشاكل وجود جسيمات صغيرة عند سطح نهاية مدخل الليف البصري تم لحام اسطوانة صغيرة من السيلكا المنصهرة مغطاة بمادة غير عاكسة عند نهاية الليف الزجاجي و قد تم جمع الحزمة عند السطح الفاصل بين الاسطوانة و قلب الليف الزجاجي. و لتفادي الضرر في المكونات البصرية مثل اسطوانة السيلكا المنصهرة في هذا النظام فرض في هذه الدراسة استخدام الانهيار البصري لغاز الأرجون. حيث استخدمت خلية مملوءة بالغاز مجهزة بنوافذ مغطاة بمادة غير عاكسة وضعت هذه الخلية بين مصدر الليزر و الليف الزجاجي بين عدستين التي يمكن استخدامها كنوافذ، مما يسهل عملية التجميع المحكم لحزمة الليزر. و يتم ضبط شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار البصري خلال الاختيار المناسب للغاز و الضغط و النظام البصري المستخدم في تجميع الحزمة بحيث أن الحزمة المستمرة تمر دون أن تتأثر بينما النبضات القصيرة التي باستطاعتها أن تحدث ضرر في مدخل الليف البصري تسبب انهيار بصري للغاز و تمنع مرور هذه النبضات الضارة. لذلك فرض أن خلية الغاز تقوم بعمل محدد بصري (Optical Limiter). و تستخدم هذه الظاهرة في تطبيقات الليزر الصناعية و خاصة في اللحام.

وفي عام 2004 قدم بينج ومجموعته (Peng et al, 2004) طريقة جديدة لتفسير ظاهرة الانتزاع المستحث بواسطة نبضة جاوسية الشكل من أشعة الليزر بطول 100 fs وطول موجي 1053 nm في مادة السيلكا المنصهرة . أوضح البحث الفرق بين آليات الانتزاع الناتج عن نبضة طويلة و نبضة فائقة القصر لمصادر أشعة الليزر . واستخدم لذلك معادلة معدل مطورة لحساب الضرر في المواد العازلة ، وتم اختبار الدور الذي يلعبه كلاً من التأين البصري والتأين التدريجي في الضرر المستحث بواسطة ليزر الفيمتوثانية وقد وجد توافق كمي بين نتائج هذه الحسابات والنتائج التي تمت دراستها من قبل.

ولتفسير الديناميكية الفائقة السرعة لحاملات الشحنة الحرة في المواد العازلة الحجمية بواسطة نبضات ذات شدة عالية من ليزر الفيمتوثانية. صمم تمنوف ومجموعته (Temnov et

(al, 2004 تجربة عملية لتصوير التحليل الزمني فائق السرعة باستخدام جهاز (ماخ – زندر) للتداخل. وسمحت تقنية تحويل فوريير ثنائي الأبعاد بإعادة البناء الدقيقة لإزاحة الطور الحقيقية المستحثة بواسطة أشعة الليزر و تغييرات النفاذية لنبضات المجس التي تعطي خصائص حاملات الشحنة الحرة . أوضحت قياسات التداخل في السيلكا المنصهرة فائقة النقاوة أن آلية التأين السائدة لقيم شدة الاستضاءة التي تقل عن $10TW/cm^2$ هي التأين متعدد الفوتونات.

وفي دراسة أخرى لظاهرة الانهيار البصري الذاتي ومتعدد النبضات للعوازل الشفافة بنبضات ذات مدى زمني يتراوح ما بين الفيمتوثانية والنانوثانية ، أجريت قياسات معملية بواسطة ايفموف (Efimov, 2004) على مدى واسع من كل من الطول الموجي وطول نبضة الليزر وكذلك حجم المنطقة البؤرية . وأوضحت نتائج هذه القياسات أن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار البصري الذاتي في زجاج بوروسيلكا Borosilicate عند طول موجي حوالي 1 µm لا تعتمد على طول النبضة في مدى يتراوح ما بين (200 fs -30 ns) ، ولم تستطع النظريات المتاحة تفسير هذه الظاهرة . وأشار ذلك أن آلية الانهيار يصحبها تأين تجميعي للعازل ككل وليس التجميع الإلكتروني الناتج عن عملية تأين مفردة نتيجة للامتصاص متعدد للفوتونات والتأين النفقي و الإثارة التدريجية. ووجه اهتمام خاص في هذه الدراسة نحو تفسير عمليات الإثارة الإلكترونية في القلويات وسيلكات الرصاص.

وفي دراسة لديناميكية تفاعلات ليزر الفيمتوثانية مع المواد العازلة أوضح ماو و مجموعته (Mao et al, 2004) أن نبضات ليزر الفيمتوثانية تبدو كأداة واعدة لمعالجة المواد العازلة ذات فجوة الطاقة الواسعة وذلك في التطبيقات المختلفة . وقد أعطى الباحث ومجموعته نظرة عامة عن التقدم الحديث في تفهم الفيزياء الأساسية لتفاعلات ليزر الفيمتوثانية مع المواد العازلة التي يمكن أن يكون لها أهمية لابتكارات جديدة في تطبيقات المواد . وتركزت هذه الدراسة على ديناميكية الشحنات المثارة بواسطة ليزر الفيمتوثانية (Yablonovitch and Bloembergen ,1972; Bloembergen ,1974) وكيفية انتشار هذه الأشعة في المواد العازلة (Kelley ,1965; Shen ,1984; Haglund et al ,1994) وعلى عكس النظرة التقليدية للتفاعل بين نبضات طويلة من أشعة الليزر ذات أطوال موجية تقع ما بين الأشعة تحت الحمراء إلى الأشعة فوق البنفسجية والمواد . والتي فيها يتم انتقال طاقة الأشعة إلى

إثارة إلكترونية يتبعها تفاعل بين الإلكترون والشبيكة والتي تتحول فيها الطاقة إلى حـــرارة فنجد أن عمليات تجاوب المادة التي تتبع التشعيع بواسطة نبضات ذات شدة عالية من ليـــزر الفيمتوثانية فتكون أكثر تعقيداً وخاصة للمواد العازلة ذات فجوة الطاقة العريضة . ويمكـــن تفسير ذلك بأنه عندما تتعرض مادة عازلة لشدة استضاءة عالية من نبضات ليزر الفيمتوثانية فإن معامل انكسار المادة يمكن أن يتغير مع شدة الاستضاءة ، حينئذٍ يمكن أن تتولـــد كثافـــة عالية من الإلكترونات المثارة بواسطة نبضات أشعة تحت حمراء في مواد عازلـــة شـــفافة. وذلك خلال تأين لا خطي فيه تتسبب نبضة أشعة الليزر في الإثارة الإلكترونية والتي فيهـــا ينتقل إلكترون من شريط التكافؤ إلى شريط التوصيل تاركاً وراؤه ثقب في شريط التكـــافؤ . ويمكن أن يرتبط الإلكترون والثقب بواسطة تجاذب قوة كولوم والتي يرجع إليه كأكســـيتون وهو مفهوم للإثارة الإلكترونية المتعادلة كهربائيـــاً (Ueta et al ,1986) . يمكـــن أن يكـــون الإكسيتون إما مقيداً بشدة أو مقيد بضعف . وفي المواد ذات فجوة الطاقة الواسعة والتي لهـــا ثابت عزل صغير فتكون الإلكترونات مقيدة بقوة وممركزة بالقرب من ذرة مفـــردة ويمكـــن للإكسيتون أن ينتقل خلال تشتت غير مرن للإلكترونات المثارة(Vasil'ev et al ,1999) والتي تؤدي إلى بطء حركة الإلكترونات في شريط التوصيل أو بواسطة امتصاص مباشر رنينـــي لعدد من الفوتونات.و يعد الترابط بين زوج من إلكترون وثقب في الحالة المثارة هي عمليـــة سريعة جداً حيث غالباً ما تحدث في زمن يقل عن 1.0 ps للمواد ذات فجوة الطاقة العريضة (Haglund et al ,1994)بالإضافة إلى ذلك فإن الإكسيتون هي حالة غير مستقرة مقارنة لعملية إعادة الاتحاد والتي يمكن أن تتم قنوات موضعية وغير موضعية.

ويمكن أن تنتج قنوات استرخاء الإثارة الإلكترونية في المواد ذات فجوة الطاقة الواســـعة عيوب داخلية تؤدي إلى ضرر مستحث بواسطة الأشعة في وسط خالي من العيوب . هـــذه العمليات الأساسية اللاخطية أحثت جهود بحثية ضخمة في كل من تفهم التعقيدات المصاحبة لتفاعل نبضات ليزر الفيمتوثانية مع المـــواد العازلـــة والتطبيقـــات التـــي تحـــدد الآليـــات الميكروسكوبية لتصنيع مواد مبتكرة . وهذا ما توصل ماو ومجموعته (Mao et al, 2004)

حيث وجد أنه على الرغم من أن تفاعل نبضات له اهتمام كبير في معالجة المواد العازلة إلا أنه كان من الصعب تحديد العمليات الفيزيائية التي تصاحب هذا التفاعل بغض النظـــر عـــن التقدم الملموس الذي توصل إليه الباحثين خلال السنوات القليلة الماضية . وقد اعتمدت هـــذه الدراسة على مناقشة موضوعين أساسيين تشمل قنوات الإثارة والاسترخاء لحاملات الشحنة

المستحثة بواسطة ليزر الفيمتوثانية وكذلك تشقق وتجمع وانفراج نبضات ليزر الفيمتوثانية داخل هذه المواد. وتعتبر هذه المواضيع من الأبحاث الأساسية التي تحدد أهمية تفاعل نبضات ليزر الفيمتوثانية مع المواد العازلة . ونظراً للنمو السريع لهذا المجال سوف تلاقي هذه التفاعلات التقدم المستمر سواء في القياسات المعملية باستخدام التصوير السريع و التداخل وكذلك التقنيات الطيفية الحديثة . بالإضافة إلى النمو السريع في قدرة الحاسبات والتقدم في المفهوم النظري لخواص المستويات المثارة للمواد العازلة حيث يؤخذ في الاعتبار العمليات اللاخطية وعدم الإتزان خلال وبعد الإثارة بليزر الفيمتوثانية والتي لم تغطى في الدراسات الحالية.

وفي عام 2005 أجرى ليو ومجموعته (Liu et al, 2005) قياسات عملية لدراسة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار المستحث بنبضة مفردة لأشعة الليزر في حجم من السيلكا المنصهرة بطول موجي 800 nm وطول نبضة يغطي مدى من 240 fs- 2.5 ps . وتم استخدام أنظمة بصرية ذات فتحات عددية مختلفة Numercal Apertures لتجميع نبضة الليزر على العينة، وقد وجد أن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار بدأت في الزيادة مع انخفاض طول نبضة الليزر لنبضة أقل من 700 fs بفتحة عددية فعالة تساوي NA= 0.126 . بينما تقل الشدة الحرجة عن ذلك عند فتحة عددية فعالة تساوي NA= 0.255 . ولتحقيق هذه القياسات أجريت محاكاة عددية ارتكزت على نموذج الانتشار اللاخطي ، والتي أفادت أن البلازما المتولدة تلعب دوراً هاماً في عملية الانهيار، وهي المسؤولة عن التغيرات المختلفة التي شوهدت في هذه الدراسة . بالإضافة إلى ذلك لوحظ أن تغير شدة الاستضاءة مع زمن النبضة يتفق بشكل دقيق مع الشرط الذي يحدد كثافة الإلكترونات اللازمة للانهيار ، و يؤدي ذلك إلى تقديرات مختلفة لشدة الاستضاءة اللازمة للانهيار، نتيجة لتنوع الطرق المتخذة لتحديد شرط الانهيار.

كما أجريت قياسات للتحليل الزمني والبعدي لمتوسط الانبعاث الطيفي التلقائي الذي يتبع الانهيار المستحث بالليزر عند نقطة إلتقاء الجرافيت الصلب والغاز المحيط به وكذلك عند هدف من الجرافيت الصلب موضوع في غرفة مفرغة بواسطة نيمز ومجموعته (Nemes et al, 2005) بالإضافة إلى دراسة الانبعاث الطيفي من الانهيار البصري للطور الغازي في بعض الغازات وخليط منها ، مثل الهيليوم وثاني أكسيد الكربون . وقد أوضحت القياسات أن

الانبعاث الطيفي يسوده خط الكربون الأحادي التأين والثنائي التأين وكذلك خط الهيدروجين H_β. وبفرض أن حالة الاتزان الحراري الديناميكي الموضعي وبلازما ذات سمك رقيق أمكن استنتاج كثافة الإلكترونات لها ودرجة حرارتها.حيث وجد أن كثافة الإلكترونات تساوي 10^{16} cm^{-3} ودرجة الحرارة تقترب من 20000 K . بالإضافة إلى ذلك أمكن تعيين درجة حرارة الدوران والتذبذب للجذور الحرة.وقد وجد أنها تتراوح ما بين K(7000-4500) وذلك باستخدام نموذج نظري دقيق لمحكاة طيف الانبعاث لجزيء ثنائي الذرة . هذا المدى من الحرارة ربما لعدم التجانس البعدي للبلازما المستحثة بواسطة أشعة الليزر. وقد أتاحت هذه الدراسة للباحثين بإمكانية وصف البلازما الميكروسكوبية والتي تحتوي على الكربون . كما أن وجود هيدروجين في الوسط أو في الغاز ينتج عنه انبعاث متسلسلة بالمر وبوجه خاص خط H_α والذي له أهمية خاصة في تعيين معاملات البلازما . بالإضافة إلى أن التحليل الزمني للطيف يشير إلى تفسير مفصل لاضمحلال البلازما . وقد تم تطبيق هذه القياسات بنجاح في دراسة تكوين الأجسام النانوية الابتدائية بواسطة أشعة الليزر . هذا بجانب الاستفادة من الانبعاث الطيفي الناتج عن الانهيار المستحث بالليزر والذي يغطي منطقة عريضة من الطيف تحتوي على وجود بعض الجذور الحرة للكربون مثل C_3 والذي يمثل نظام شريطي معقد يسمى شرائط شعلة أول أكسيد الكربون.

وفي دراسة أخرى قام سن ومجموعته (Sun et al, 2005) بتفسير البلازما الإلكترونية المستحثة بنبضات فيمتوثانية (130 fs -800 nm) مجمعة في السيلكا المنصهرة باستخدام تقنية الضخ والمجس وقد تم تعيين زمن التصادم الإلكتروني ليساوي 1.7 fs عند كثافة إلكترونات تقترب من 5×10^{19} cm^{-3} . بالإضافة إلى ذلك أمكن تعيين زمن حياة البلازما الإلكترونية ليساوي 170 fs وذلك باستخدام تقنية التحليل الزمني لتصوير الظل . وقد ساعدت نتائج هذه الدراسة والتحاليل في فهم الآليات الفيزيائية الأساسية لتفاعل ليزر الفيمتوثانية مع المواد الشفافة.

وفي دراسة أخرى لظاهرة الانهيار البصري في المواد العازلة بنبضات من ليزر الفيمتوثانية، أشار كار و مجموعته (Carr et al, 2005) بأن الانهيار البصري في المواد العازلة الشفافة باستخدام نبضات تتراوح ما بين الفيمتو و النانوثانية تؤدي إلى تكون منطقة متأينة لبلازما كثيفة تنحصر داخل المادة الحجمية. و تكون هذه المنطقة المتأينة هي المسؤولة

عن الأشعة العريضة التي تصاحب عملية الانهيار. و قد استخدم قياسات طيفية للضوء المنبعث من البلازما لتوضيح أنه وفقا لمعاملات الليزر فإن الطيف ينشأ عن انبعاث توافقية ذات الدرجة الثانية مستحث بواسطة البلازما أو تولد أشعة فائقة الاستمرار أو انبعاث حراري بواسطة البلازما. و بفحص الانبعاث الطيفي الناتج عن المنطقة المتأينة يمكن التأكد من سيادة آلية الانهيار و دراسة تشكيل منطقة الضرر.

ومن جهة أخرى سجل الباحثون (Samek et al, 2005) دراسة مناسبة لظاهرة الانتزاع باستخدام نبضات من ليزر الفيمتوثانية، و قد تم نقل هذه النبضات متناهية الصغر إلى العينة باستخدام ألياف بصرية. و تم التحكم في المسافة بين نهاية الليف البصري و العينة بواسطة تغذية رجعية لقوة متقطعة ونتيجة لذلك أمكن انتزاع حفرة من المادة ذات أبعاد تساوي أجزاء من الميكرومتر، و لم يتمكن الباحثون من تحليل الانبعاث الطيفي للانهيار المستحث بواسطة أشعة الليزر نظرا لصغر حجم البلازما المتكونة عند نهاية الليف البصري ، لذلك اقترح الباحثون التعديل في نظام كشف التجميع البصري لإتاحة تحليل الانبعاث الطيفي الناتج عن البلازما ذات الحجم متناهي الصغر.

وفي نفس العام أجرى الباحثون ڤاسكز ديل دنا و مجموعته (Vazquez de Aldana et al, 2005) دراسة نظرية و عملية عن انتشار قنوات انتزاع بواسطة نبضات متعددة من ليزر الفيمتوثانية في المواد العازلة. عند استخدام قيم للتعريض الإشعاعي تزيد قليلا عن تلك اللازمة للحصول على انتزاع فائق السرعة و قد ارتكزت الدراسة النظرية على التكامل العددي المباشر لمعادلة الموجة التي تصف انتشار نبضة الليزر بالاشتراك مع معادلات مرتبطة الاستقطاب و تأين الوسط. و قد أوضحت نتائج الحسابات للتقدم في قنوات الانتزاع توافقا مناسبا مع تلك التي شوهدت عمليا و نتج عن هذه العملية صفات أخرى جيدة يطلق عليها تكون مساحات من ضرر بصري جانبي.

في عام 2006 سجلت دراسة بواسطة إكس يو ومجموعته (Xu et al, 2005)عن الشدة اللازمة لإحداث الضرر باستخدام طلقة مفردة لأشعة ليزر بنبضات تتراوح ما بين (40-986) fs وطول موجي 800 nm.واستخدم في القياسات تقنية الضخ والمجس لنبضات ليزر الفيمتوثانية وذلك لتفسير التحليل الزمني لعمليات الإثارة الإلكترونية . وبجانب هذه القياسات

تم تطبيق نموذج نظري يشمل على الحصول على إلكترونات في شريط التوصيل وترسيب طاقة الليزر لمناقشة دور عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات والتأين التدريجي في ظاهرة انهيار المواد العازلة المستحث بواسطة نبضات من الفيمتوثانية وقد أشارت نتائج هذه الدراسة أن التأين التدريجي يلعب دوراً سائداً في انهيار أكسيد المغنيسيوم المستحث بنبضات الفيمتوثانية بالقرب من قيمة شدة الاستضاءة اللازمة لإحداث الضرر.

وفي محاولة لتحليل آليات التأين في العوازل ذات الحجم المشععة بواسطة نبضات ليزر الفيمتوثانية ، أجرى كودرياشوف (Kudryashov,2006)، قياسات لدراسة تغير كثافة الإلكترونات والفجوات المكونة للبلازما مع شدة استضاءة أشعة الليزر وكذلك الطاقة الحرجة المسببة للضرر وحجم الضرر وتغيره مع طاقة فجوة المواد العازلة . وقد وجد أن عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات هي العملية السائدة عند القيم المنخفضة لشدة استضاءة أشعة الليزر 10^{12} W/cm^2 (10-50) $\approx I_{break} > I_{las}$. بينما عند قيم الشدة العالية $I_{las} < I_{break}$ فإن عمليات التأين تتم بواسطة آليات لا خطية غير معروفة . وقد اقترح أن أحد هذه الآليات يمكن أن يكون عملية إعادة الاتحاد لأوجير والتي تسبب ضرراً ميكروسكوبياً في المواد العازلة. كما أعطت القياسات التي أجريت عند القيم المرتفعة لشدة استضاءة الليزر دليلاً عن عمليات التأين المصاحبة للتفاعل . وقد أعطى التحليل النظري لنتائج القياسات العملية مع بعض العلاقات التدريجية العملية نظرة هامة للدور الذي تلعبه آليات التأين المتنوعة و عملية إعادة اتحاد أوجير ، والتي أكدتها بنتائج الحسابات العددية لكثافة الإلكترونات والفجوة في البلازما (Electron Hall Plasma; (EHP كدالة في شدة استضاءة الليزر I_{las} . ساعدت هذه النتائج في تفسير حقائق تجريبية هامة أخرى عن تأين المواد العازلة ذات الاحجام بمصادر لأشعة الليزر ذات شدة استضاءة عالية .

وفي عام 2007 وجد مجموعة من الباحثين لي ومجموعته (Lee et al, 2007) تأثير قوي غير متوقع لظواهر الصوت على كفاءة الميكنة النانوية المستحثة بواسطة ليزر الفيمتوثانية بمساعدة الماء . وبتحليل التفاعلات الصوتية خلال بناء شبه مستقر لسريان طورين في أنبوبة شعرية نانوية .وجد عقد صوتية والتي تحد بشدة كفاءة الميكنة . وقد سمحت الدراسات العملية والنظرية بتعريف طرق لميكنة قنوات بخواص محددة . والتي تختص بتكوين معمل معقد على شريحة صغيرة جداً وكذلك أجهزة تحليل متكاملة ميكروسكوبية وتمثل هذه القنوات

ذات الأقطار التي تمثل أجزاء من الميكرون (600 nm) مميزات فائقة للحصول على أجهـزة معقدة في مساحات محددة وكذلك لطرق تحليل مثل حركة الإلكترونات في أنابيـب شـعرية تحت تأثير المجال الكهربي لأشعة الليزر حيث يسمح القطر المخفض الزيـادة فـي معـدل الفصل بحجم صغير للعينة. ومع ذلك لأخذ ميزة كاملة للقنوات الصغيرة ثلاثية الأبعاد يتطلب ذلك أيضاً طولاً كافياً. أوضحت هذه الدراسة أيضاً أهمية العوامل التي لم تؤخذ في الاعتبار في تحليل الانهيار البصري والميكنة بالليزر مثل الضـغط ومكونـات الغـاز والتركيبـات التوافقية.

ومن جهة أخرى قام سميث ومجموعتـه (Smith et al ,2007) بدراسـة لفهـم الضـرر البصري الفجائي البالغ لنبضات النانوثانية في مكبرات الألياف . وقد استخدم نبضة مفـردة بنمط طولي TEM_{oo} لمصدر الليزر النيوديميوم ياج الذي يعمل بطول موجي 1064 nmبزمن نبضة 7.5 nsec تم تجميعه لنصف قطر بقعة يساوي 7.45 µm في حجم من السيلكا المنصهرة .وقد تم تصحيح شدة الإشعاع اللازم لإحداث الضرر في الحجم من السيلكا المنصهرة لأخـذ في الاعتبار ظاهرة التجمع الذاتي لحزمة الليزر . وقد وجد أن التغير في قيمة شدة الإشعاع اللازمة لإحداث الضرر من نبضة إلى نبضة للسيلكا النقية تصل إلى أقل من 1.0% كمـا أن الضرر يظهر تقريباً بشكل لحظي بزمن تأثيري يقل عن 1.0 ns .وقد توافقت هذه المشاهدات مع نتائج نموذج يعتمد على معادلة معدل الإلكترون الشلالي ، عند اسـتخدام قـيم مناسـبة للمعاملات وقد وجد أن شدة الاستضاءة اللازمة للانهيـار البصـري لحجـم مـن السـيلكا المنصهرة النقية تساوي $5.0\times10^{11}\pm7\%$ W/cm^2 . كما تم أيضاً قياس شدة الإشعاع اللازمـة لإحداث ضرر على السطح وذلك للسيلكا المنصهرة المطعمـة بواسـطة 1.0% مـن مـادة اليوبيتريم Yb^{3+} والتي تكون أحد أنواع الألياف المسمى (Liekki Yb^{1200} Fiber) وقد وجد أنها تساوي نفس القيمة المناظرة للسيلكا النقية في حدود 2.0% .بالإضافة إلى ذلك أشارت هـذه الدراسة أن شكل الضرر البصري يتكرر بنفس الطريقة من نبضة إلى أخـرى . ولتسـهيل دراسة شكل الضرر تم وضع تقنية لموضع بؤرة الليزر يعتمد على إشارة التوافقيـة الثالثـة المتولدة عند نقطة إلتقاء السيلكا المنصهرة والهواء . وقد أعطت هذه التقنية عدم تحديـد ذو قيمة صغيرة جداً لموضع البؤرة في حدود (10 µm) والذي له أهمية فـي تفسـير تركيـب الضرر . كما استخدمت أيضاً طريقة التوافقية الثالثة للسطح لتعيـين حجـم بقعـة الليـزر

المجمعة. وتحقيق جودة حزمة الليزر . كما أعطت هذه الدراسة دليلاً لعدم تغير شدة الإشعاع اللازم لإحداث الضرر بتغير حجم البقعة البؤرية لحزمة الليزر المجمعة.

في عام 2008 قدم أوتوب ومجموعته (Otobe et al, 2008) حساب المبادئ الأولية للانهيار البصري للعوازل في الألماس المستحث بواسطة مجال ذو شدة عالية لأشعة الليزر وقد تم استخدام نظرية دالة الكثافة المتغيرة مع الزمن وذلك بحل معادلة كوهن وشام المتغيرة مع الزمن في كل من الزمن والموقع الحقيقي. أوضحت الحسابات تغير وصفي لديناميكية الإلكترون وذلك بتغير شدة استضاءة أشعة الليزر من قيم منخفضة عند حجب العازل إلى انهيار عند قيم للشدة تزيد عن $3.0\times10^{14}W/cm^2$. بالإضافة إلى ذلك أوضحت هذه الدراسة بأنه وفقاً للنبضة فإن الإلكترونات التي تثار لشريط التوصيل تعاني من تذبذب متوافق للبلازما والذي يستمر لفترة زمنية تتراوح عشرات من الفيمتوثانية. كما أوضحت الحسابات أيضاً أن التعرض الإشعاعي اللازم لإحداث الضرر في الألماس يزيد كثيراً عن القيم المقاسة عملياً 0.15±0.63 عند طاقة نبضة 2.0 eV وزمن 90 fs (Reitze et al ,1992). وقد أعزي ذلك لمسؤلية عملية التأين التدريجي في تحديد قيمة التعريض الإشعاعي اللازم للضرر. من جهة أخرى أشارت هذه الدراسة أيضاً أن حزمة أشعة الليزر ربما تعاني من تجميع ذاتي داخل المادة (Mao et al ,2004; Wu et al, 2005; Winkler et al, 2006) . لذلك يجب أخذ هذه العملية في الاعتبار قبل الوصول إلى نتيجة نهائية لتحديد الآليات المسؤولة عن الانهيار البصري في الألماس.

تعد معالجة الأسطح المعدنية أو الصلبة في وجود غاز مساعد من أحد التطبيقات الهامة لظاهرة الانهيار المستحث بأشعة االليزر ففي عام 2008 استخدم الباحثون كباشين ومجموعته (Kabashin et al, 2008) البلازما المتكونة نتيجة للانهيار البصري لمجموعة من الغازات لمعالجة هدف من الزنك عند الضغط الجوي . وقد تم الحصول على الانهيار بالقرب من الهدف بواسطة نبضة من ليزر ثاني أكسيد الكربون نتج عنه تدمير موضعي للهدف عند البقعة المشعة وتكون عند ذلك طبقة مسامية ذات تركيب نانوي . تتكون من كرات في حدود النانو من أكسيد الزنك. وقد وجد أن هذه الطبقات ذات التركيب النانوي الناتجة تعاني من شريط انبعاث اكسيتوني يقع في منطقة الأشعة فوق البنفسجية على مدى nm (380-385) . بينما ظهرت شرائط وميضية ضعيفة عن العيوب المرتبطة بالمادة . وأمكن أزالتها تماماً

وذلك بتغيير معاملات التصنيع كما اعتبرت خواص الطبقات الناتجة واعدة جـداً لتحضـير الأجهزة الإلكتروبصرية.

حيث أنه مازالت عملية التأين التدريجي والتأين الفوتوني هما العمليات السائدة في دراسـة الضرر المستحث بواسطة أشعة الليـزر .ووفقـاً للنمـوذج المقتـرح بواسـطة سـتوارت ومجموعته(Stuart et al,1996) ،تمت حديثاً دراسة الدور الـذي يلعبـه كـل مـن التـأين بالامتصاص متعدد الفوتونات والتأين التدريجي في الضرر المستحث بواسطة أشعة الليـزر بواسطة هوانج ومجموعته (Huang et al, 2009) وذلك لعينتين من مواد عازلة على شـكل أفلام رقيقة من السيلكا المنصهرة FS وبوروسيلكات بورات الألمنيوم BBS المشعع بواسـطة نبضة ليزر بطول موجي 780 nm ومدى من أطوال النبضة يتراوح ما بين ps (5-0.01) وقد تم تحليل تأثير عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات و الكثافة الابتدائيـة للإلكترونـات على الإلكترونات الأولية المتولدة خلال التفاعل وقد وجد أنه في حالة السيلكا المنصهرة فإن الضرر المستحث بواسطة أشعة الليزر يحكمه التأين التدريجي على مـدى طـول النبضـة المختبر معملياً وذلك نتيجة لعرض فجوة الطاقة بينما لبوروسيلكات بورات الألمنيـوم فـإن التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات هي العملية القائدة للضرر عند نبضات تقل عن ps 0.03 ويعمل التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات على رفع قيمة التعرض الإشعاعي اللازم لحدوث الضرر بينما يمكن أن يؤدي التأين التدريجي إلى زيادة متوسطة أو حتى قيمة ثابتة للتعرض الإشعاعي اللازم. وتعمل عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات على إنتاج الإلكترونات الأولية اللازمة لحدوث التأين التدريجي عندما تقترب كثافة الإلكترونات الناتجة عن العمليـة الأخيرة أو تتخطى قيمتها قبل نهاية تأثير عملية التأين متعدد الفوتونات.وهذا يعني أنه يمكن إهمال تأثير الإلكترونات الابتدائية عندما تسود عملية التأين بالامتصاص متعدد الفوتونات . وقد لوحظ أن قيمة التعرض الإشعاعي اللازم لحدوث الضرر تنخفض بزيادة الكثافة الابتدائية للإلكترونات عندما تتخطى الأخيرة قيمة حرجة.

وحديثاً في عام 2009 أجريت دراسة بواسطة بي إيميه ومجموعته (Bien-Aime et al, 2009) عن تأثير الملوثات الجزيئية العضوية على كثافة الضرر المستحث بواسطة طلقة مفردة مـن مصدر ليزر يعمل بطول موجي 351 nm وزمن نبضة 3 ns وتم إجراء التجارب عند تلـوث محدد بمادة عضوية دايأوكتين فاثاليت (DOP) في الطور الغازي والسائل على سطح عينات

من السيلكا المنصهرة المصقولة غير المغطاه والمغطاه بالسولجيل . وتمت مشاهدة الضـــرر المستحث بواسطة أشعة الليزر فقط في حالة التلوث بالطور السائل . كما تم استخدام طـــرق وصف مختلفة كيميائية وتركيبية لتحديد وفهم آلية الضرر.وأوضحت هذه الدراسة أن الطبيعة التركيبية للشوائب هي المسؤولة عن انخفاض عتبة الشدة اللازمة للضرر المستحث بواسطة أشعة الليزر في المكونات البصرية.

(1-6) الهدف من البحث

(1-6) Aim of the work

وضح المسح المرجعي اهتمام الباحثين بدراسة ظاهرة انهيار المواد الصلبة المؤدي إلـــى الضرر بواسطة أشعة الليزر والتي استخدم فيها مصادر مطورة تعمل بنبضات تغطي مـــدى من النانوثانية إلى الفيمتوثانية . وقد استخدمت هذه الظاهرة في العديد من التطبيقات حيـــث أعطت نتائج ذات دقة عالية وخاصة في مجال الميكنة الميكروسكوبية عند استخدام نبضـــات متناهية القصر من أشعة الليزر .واعتمدت هذه على ظاهرة الانتزاع بليزر الفيمتوثانية والتي تنتج عن الامتصاص فائق السرعة لطاقة أشعة الليزر ذات شدة الاستضاءة العالية بواســـطة المادة في منطقة التفاعل والتي لا تتخطى حيز صغير جداً يصل إلى cm^3 (10^{-9}-10^{-6}) . على الرغم من أن هناك العديد من النماذج التي وضعت لتفسير هذه الظاهرة والتي وضحها المسح المرجعي ، حيث توصلت تلك الدراسات إلى ترسيخ المفاهيم الأساسية التي تحكم العمليـــات الفيزيائية المصاحبة لظاهرة الانهيار المؤدي إلى الضرر في حالة النبضات الطويلة .إلا أنه في حالة النبضات متناهية القصر مازالت هذه الدراسة موضع تساؤل وتتطلب المزيـــد مـــن التحاليل النظرية لتحديد الآليات الفيزيائية المسؤولة عن هذه الظاهرة وعلاقتهـــا بخصـــائص أشعة الليزر من حيث شدة الاستضاءة وزمن النبضـــة وكـــذلك تـــأثير الأنظمـــة البصـــرية المستخدمة في تجميع حزمة الليزر. وهذا ما يهدف إليه هذا البحث.

سوف يقدم هذا البحث دراسة نظرية لظاهرة انهيار المواد الصلبة المؤدي إلـــى الضـــرر بواسطة نبضات متناهية القصر من أشعة الليزر في المـــواد العازلـــة ذات فجـــوة الطاقـــة العريضة وتم اختيار السيلكا المنصهرة Fused silica لاستخداماتها المتعـــددة فـــي الأنظمـــة البصرية كعدسات ومرشحات ومناشير وعواكس ونوافذ بصرية حيث تدخل هـــذه الأنظمـــة البصرية في الأجهزة المختلفة التي تتعرض لمدى واسع من الأطوال الموجية لأشعة الليزر،

وتدمج هذه الأنظمة في مختلف الأجهزة كالتي تقوم برسم الدوائر الإلكترونية المتكاملة وفي الأجهزة الطبية وكذلك أجهزة الانصهار النووي وغيرها من الأجهزة التي تستخدم حزم الليزر ذات القدرة العالية .

ولتحقيق ذلك استخدم نموذج عددي يأخذ مدخلين مختلفين لتحديد عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار.

أولاً: بحل معادلة المعدل التي تصف تغير كثافة الإلكترونات نتيجة لعمليات تأين بالامتصاص متعدد الفوتونات وتأين بالتصادم الإلكتروني بجانب عمليات فقد الإلكترونات نتيجة لانسيابها خارج حيز التفاعل وإعادة اتحادها مع الثقوب .

ثانياً:حل معادلة فوكر بلانك المتغيرة مع الزمن لدالة توزيع طاقة الإلكترونات والتي منها يمكن حساب تغير كثافة الإلكترونات خلال نبضة الليزر نتيجة لنفس العمليات الفيزيائية التي أخذت في الاعتبار في الحالة الأولى ، ويطبق هذا النموذج تحت الشروط المعملية التي أعطيت بواسطة ليو ومجموعته (Liu et al, 2005) لدراسة تغير عتبة شدة الاستضاءة اللازمة للانهيار والضرر كدالة في زمن النبضة وكذلك تحديد العمليات الفيزيائية المسؤولة عن هذه الظاهرة.

تتكون الرسالة من ستة فصول بجانب قائمة من المراجع المستخدمة في البحث و الملاحق ثم ملخص الرسالة باللغة الانجليزية .

- يشمل الباب الأول مقدمة و مسح مرجعي لموضوع البحث.
- يقدم الباب الثاني نظرة شاملة عن العمليات الفيزيائية المصاحبة لانهيار المواد الصلبة بأشعة الليزر والمؤدي إلى تضرر المواد الصلبة.
- يعطي الباب الثالث دراسة شاملة عن نمذجة ظاهرة الانهيار في الأوساط الصلبة المستحث بواسطة أشعة الليزر.
- يقدم الباب الرابع نمذجة عددية لانهيار السيلكا المنصهرة بنبضات متناهية القصر من أشعة الليزر .
- الباب الخامس يعرض نتائج الحسابات ومناقشتها .
- الباب السادس يضم الخلاصة و النظرة المستقبلية لموضوع البحث.