وزارة التعليم العالي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

الجمهورية العربية السورية

الفصل الحادي عشر

تطبيقات الليزر

الامتصاص وآليات تفاعل الإشعاع مع النسج

Laser Applications

جامعة الشام الخاصة
Al-Sham Private University

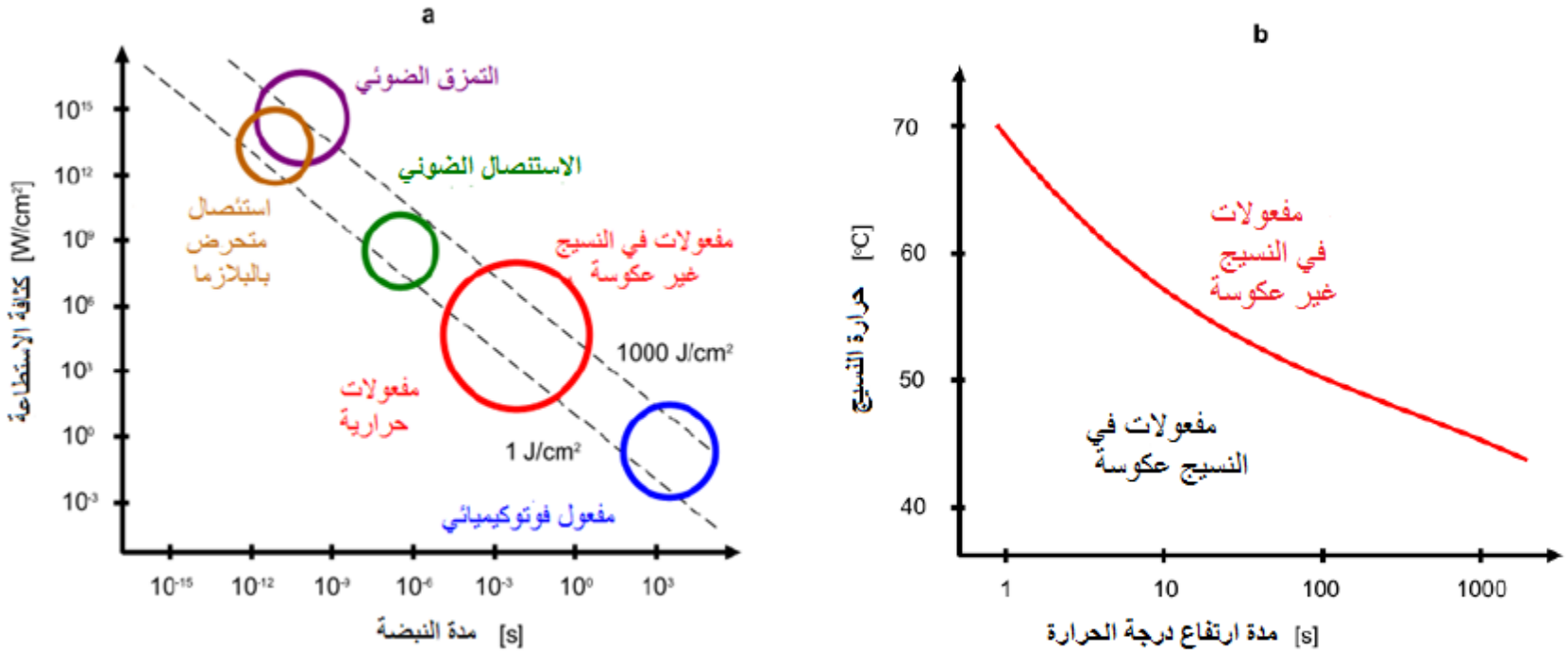
أنواع تفاعلات الليزر مع المادة الحية

- التآثرات الفوتوكيميائية photochemical interactions
- والتآثرات الحرارية thermal interactions
- والاستئصال الضوئي photoablation
- والاستئصال المتحرض بالبلازما plasma-induced ablation
- والتمزق الضوئي photodisruption.

كثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة

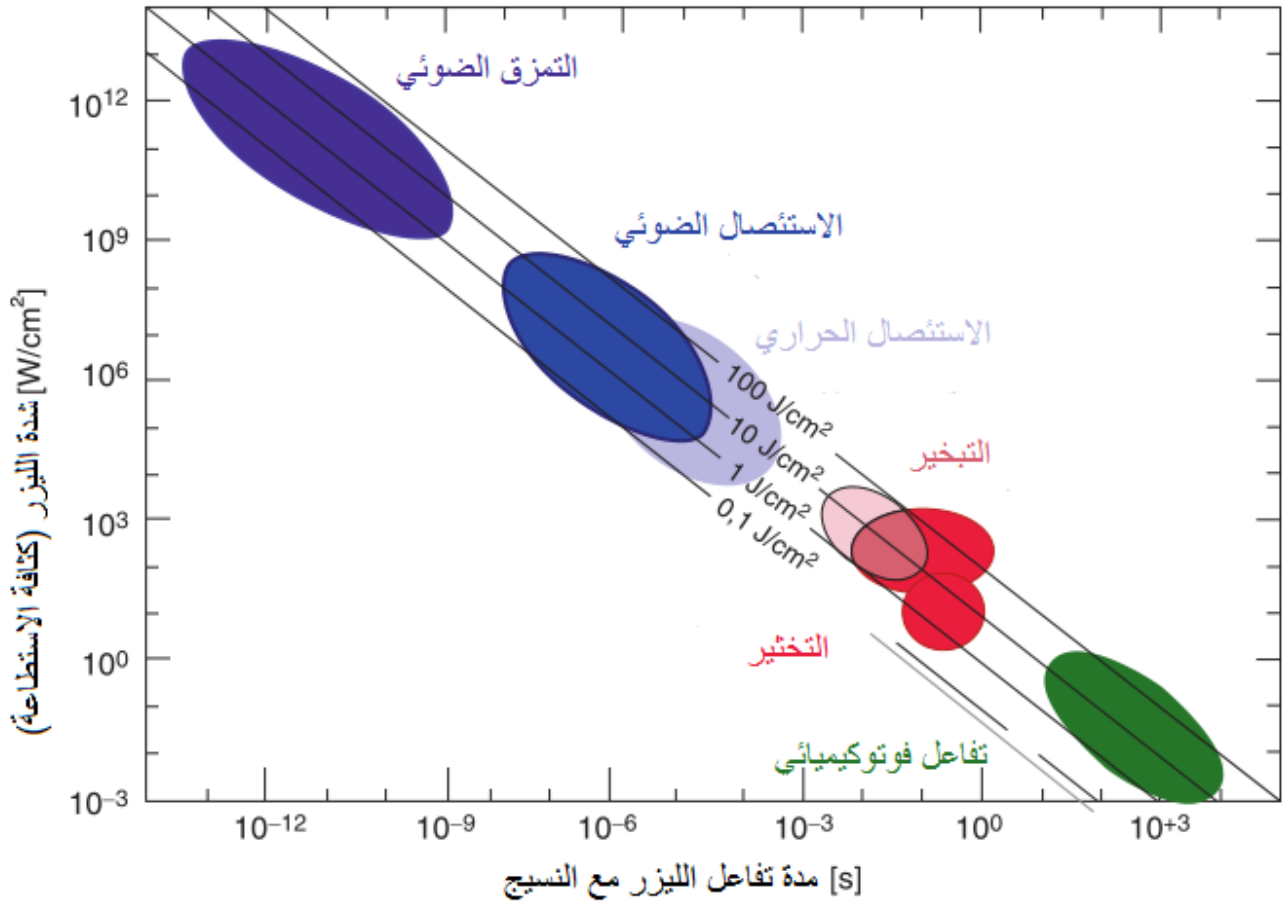
- تشترك هذه التآثرات فيما بينها بوقوع :
- مجال كثافة الطاقة المميز بين $1\ J/cm^2$ إلى $1000\ J/cm^2$،
- يمتد مجال كثافة الاستطاعة على أكثر من 15مرتبة!
- ومِنْ ثَمَّ فإن مدة التعرّض هي التي تميز هذه العمليات وتتحكم فيها بشكل رئيسي.

كثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة



خارطة لتآثرات الليزر- نسيج (a) تمثل الدوائر مجالات خمس آليات تقريباً لتآثر الليزر مع النسيج. إن البرامتر الرئيسي الذي يتحكم بآلية التآثر هو مدة النبضة (التي ترتبط بكثافة الاستطاعة)، في حين أن الطاقة الكلية المتوضعة تكون أقل أهمية وتقع عادة بين 1J و1000J. (b)منحني المفعولات الحرارية غير العكوسة، إذْ تكون مدة استمرار درجة الحرارة المرتفعة مهمة أيضاً. يقدر الخط الأحمر على أنه درجة الحرارة الحرجة الفاصلة.

كثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة



تعتمد الطاقة المتوضعة في الخلايا (الجرعة الطاقية) التي تقاس بالجول على السنتمتر المربع (J/cm2)، على استطاعة الليزر نفسها ومدة تعرض الخلية للضوء. (تمثل الخطوط القطرية المتوازية
جرعات الطاقة المختلفة). وقد ألقينا الضوء على بعض المفعولات التي يمكن حدوثها باجتماعات مختلفة للاستطاعة وزمن التعرض. يشيع بعض التسخين على الأقل في مجال واسع من الطاقات (الأحمر). أما الأحمر الداكن فحيث تكون الحرارة هي الآلية السائدة.

التآثر الفوتوكيميائي

- ينشأ من إمكانية الضوء على تحريض مفعولات وتفاعلات كيميائية ضمن الجزيئات الضخمة أو النسج.
- تؤدي آليات التآثر الفوتوكيميائية، دوراً مهماً في المعالجة الفوتوديناميكية photodynamic therapy (PDT).
- تحدث التآثرات الفوتوكيميائية عند كثافات للاستطاعة منخفضة جداً (في الحالة النموذجية $1W/cm^2$) ومدد تعرض طويلة تمتد من ثوان إلى موجة مستمرة.

المعالجة الفوتوديناميكية

- وهي المفعولات المرتبطة بالامتصاص الاصطفائي للضوء،
- تقوم بالامتصاص في معظم الأحيان إحدى الركائز المكونة للخلية ليبدأ بعض التفاعلات الكيميائية،
- وتتجلى هذه المفعولات:

  – إما بإتلاف الخلايا الخبيثة مباشرة

  – وإمّا على مراحل متعددة، وفي هذه الحالة يطلق على هذا التأثير اسم المفعول الفوتوديناميكي.

المعالجة الفوتوديناميكية

- تعتمد على حقن متحسس ضوئي يتثبت على الورم:
- ويمكن لجزيئاته أن تمتص الضوء بفعالية كبيرة.
- وهذا ما يحملها إلى حالات مثارة، ثم تعود بسرعة كبيرة نحو حالاتٍ طاقاتُها أخفض مع تشكيل نواتج سامة تقتل الخلايا الخبيثة، وهنا تكمن الفائدة الرئيسية من هذه العملية.

التآثر الفوتوكيميائي

- **المعالجة الفوتودينميكية**
- ثمة مركب للبرفرين وهو مشتق الهماتوبرفرين HPD يمتاز بالتثبت على الورم والكشف عن وجوده بالفلورة الحمراء لدى تعريضه للضوء $\lambda = 630\ nm$ (الذي يكون امتصاص الهموغلوبين عنده أضعف ما يمكن) وبتحريض التموُّت بعملية فوتودينميكية.
- ويستخدم حالياً في معالجة مختلف الأورام الخبيثة (في الرئة أو المثانة أو المري).

التآثر الفوتوكيميائي

- **المعالجة الفوتودينميكية**
- إن امتصاص جزيئات الـ HPD للفوتونات ينقلها إلى حالات مثارة، إِذْ يمكنها أن تفقد طاقة الإثارة بإصدار إشعاعات فلورة مميزة حمراء
- . من شأنها تشخيص الورم ،
- كما يمكنها أن تولد، عندما تسقط على الحالة الأساسية، الأكسجين الجزيئي المثار الذي يحرض التموُّت.

التآثر الفوتوكيميائي

- **المعالجة الفوتوديناميكية**
- **إن إتلاف الخلايا الخبيثة بالأكسجين الجزيئي المثار الناتج في داخل الورم نفسه هو أساس المعالجة الفوتوديناميكية التي تستخدم في مراكز عديدة في العالم لمعالجة سرطانات الجلد.**

التفاعل الحراري (التآثر)

- يمكن أن تتحرض المفعولات الحرارية إما بموجة مستمرة وإمّا بإشعاع ليزر نبضي.
- يمكن، تبعاً لمدة تعرض النسيج للحرارة وقيمة ذروة درجة الحرارة، تمييز مفعولات مختلفة:
- كالتخثر coagulation،
- والتبخر vaporization،
- والتفحم carbonization،
- والانصهار melting.

التفاعل الحراري (التآثر)

- يحدث التبخر في أثناء عملية استئصال تجري على السن مثلاً، إِذْ تزال طبقات كاملة منه مخلفة بنيات شبيهة بالدرج. يعود هذا الأمر إلى وجود ما يدعى خطوط ريتسزيوس striae of Retzius وهي طبقات عالية المحتوى من جزيئات الماء.
- يدعى الاستئصال الناتج التحلل الحراري thermal decomposition، ويجب تمييزه من الاستئصال الضوئي.

التفاعل الحراري (التآثر)

- **التفحم**. يحدث التفحم مثلاً لدى معالجة الورم metastases بليزر غاز $CW\ CO^2$ حيث تطبق في هذه الحالة كمية كبيرة من الحرارة ويحدث التفحم وفي درجات أعلى من الدرجة 100^oC.
- حيث تزداد درجة حرارة النسيج المعرَّض الموضعية بشكل كبير.

التفاعل الحراري (التآثر)

- تعد **درجة الحرارة بالتأكيد البرامتر الذي يتحكم بكل تفاعلات** الليزر الحرارية مع النسيج. يعتمد الامتداد المكاني لتلف النسيج ودرجته على مقدار **الحرارة المتوضعة في النسيج ومدة التعرض للطاقة ومكانها.**
- غير أنَّ توضيع طاقة الليزر لا يعتمد على برامترات الليزر كطوله الموجي وكثافة استطاعته ومدة التعرض وأبعاد البقعة ومعدل التكرار فحسب بل يعتمد أيضاً بشدة على الخصائص الضوئية للنسيج كمعاملات الامتصاص والانتثار.

التفاعل الحراري (التآثر)

- في النسيج الحيوي، يحدث الامتصاص بشكل رئيسي بفعل وجود جزيئات الماء الحرة والبروتينات والأصبغة وجزيئات ماكروية أخرى.
- ويعتمد معامل الامتصاص بشدة على طول موجة إشعاع الليزر الوارد.
- تؤدي جزيئات الماء في التفاعلات الحرارية دوراً مهماً.
- يكون معامل امتصاص الماء في المجال المرئي صغيراً للغاية.

التفاعل الحراري (التآثر)

- يكون امتصاص النسج في المجال المرئي من الطيف وفي الأشعة فوق البنفسجية، أعلى، وذلك تبعاً للمحتوى النسبي من الجزيئات الضخمة مثل الميلانين والهموغلوبين.
- غير أن جزيئات الماء تكون هي الماصات السائدة في المجال تحت الأحمر، لأن معامل امتصاصها يزداد عدة مراتب فيه.

التفاعل الحراري (التآثر)

- **يتحكم في توضيع الطاقة في النسج**
- برامترات الليزر
- الخواص الحرارية للنسيج، مثل برامترات انتقال الحرارة
  - كالناقلية الحرارية
  - والسعة الحرارية.
- وتتعين درجة الحرارة التي يمكن بلوغها في المفعولات الحرارية على نوع النسيج.

الاستئصال الضوئي photo-ablation

- وهو المفعول الفوتوكيميائي اللاحراري،
- وينتج بخاصة عند منابع الليزر فوق البنفسجية النبضية (الإكسايمر).
- فهو يعتمد على قطع الروابط الكيميائية مباشرة وفصمها عن النسيج.
- وتفيد هذه المعالجة بخاصة في حالة الشرايين التاجية؛

الاستئصال الضوئي photo-ablation

- يستخدم في معالجة إصابات التصلب العصيدي.
- ويعتمد في هذه الحالة، كما في حالة الأورام على الدلالة الطيفية للمناطق المريضة في التعرف عليها.
- ويسهم الليف الضوئي نفسه حينئذٍ في حمل الحزمة التشخيصية (التي يصدرها ليزر الآزوت مثلاً) وحزمة المعالجة (ليزر الإكسايمر).
- وتكون شدة الحزمة الأولى أخفض بكثير من شدة الثانية لتجنب الإضرار بالنسج خلال مرحلة التشخيص.

الاستئصال الضوئي photo-ablation

- وقد ظهر أن الفلورة الذاتية للنسج تكشف بعد تعرضها لإشعاع نبضة ليزرية عن الخط الفاصل بين إصابات التصلب العصيدي فيها والجدر غير المصابة. وقد كان الجدار السوي الذي يتعرض لإشعاع ليزر غير بنفسجي يصدر فلورة تتوزع بشكل متجانس نسبياً ضمن المجال $(396\,nm < \lambda < 500\,nm)$ ، في حين أن لويح التصلب العصيدي يصدر بشدة بجوار الطول الموجي $(\lambda_{،} = 390\,nm)$ ثم يتناقص إصداره مع تزايد الأطوال الموجية.

الاستئصال الضوئي photo-ablation

- إن تغير الفلورة بدلالة الزمن يحمل كذلك معلومات قيمة.
- ففي نهاية نبضة الإثارة الليزرية، يتناقص إصدار الفلورة لدى عودة الجزيئات إلى حالتها الأساسية.
- ويحدث التناقص في حالة المناطق المريضة أبطأ بكثير منه في المناطق السليمة.
- وبتقسيم شدة الفلورة المتأخرة على شدة الفلورة الفورية، نحصل على إشارة اتساعها في حالة لويح التصلب أكبر منه في حالة النسج السليمة..
- . إن مثل هذه الاختبارات تسمح بتحديد طبيعة النسيج الذي يقابل الليف الضوئي وبتقرير إرسال نبضة ليزرية جديدة للمعالجة أم لا.

الاستئصال الضوئي photo-ablation

- ثمة أمر آخر هو من الأمور الاحتياطية في معالجة لويحات التصلب العصيدي، يعتمد على تسجيل طيف إصدار الطبقة الرقيقة المتأينة بشدة أو البلازما المتولدة بالقطع الليزري.
- فالضوء الصادر عن الصفيحة المتكلسة يحوي خطوطاً طيفية مميزة للكالسيوم المتأين، تختفي بإتلافها بالليزر. عند هذه النقطة يجب إيقاف التعرض لإشعاع الليزر.

الاستئصال الضوئي photo-ablation

- **موجز الاستئصال الضوئي**
- يتم عن طريق التحطم المباشر للروابط الجزيئية بالفوتونات فوق البنفسجية العالية الطاقة، وهو استئصال نظيف جداً يترافق بمعلومات مسموعة وفلورة مرئية.

الاستئصال المتحرض بالبلازما

- لدى الحصول على كثافة استطاعة تتجاوز $10^{11} W/cm^2$ ، في الأجسام الصلبة والموائع أو $10^{14} W/cm^2$ في الهواء،
- تحدث ظاهرة يطلق عليها اسم الانهيار الضوئي optical breakdown، مشابهة لانهيار عازلية المادة عند تجاوز الحقل الكهربائي المطبق عليها قيمة معينة

الاستئصال المتحرض بالبلازما

- ينجم عن هذا النوع من الاستئصال عموماً بالدرجة الرئيسية تأين البلازما Plasma Ionization نفسها.
- هذا على عكس عملية أكثر ميكانيكية تدعى التمزق الضوئي Photodisruption.

الاستئصال المتحرض بالبلازما

- **موجز عن الاستئصال المتحرض بالبلازما**
- الفكرة الرئيسية: الاستئصال بتشكيل البلازما المؤينة.
- المشاهدات: استئصال نظيف جداً، يترافق بتقرير مسموع وبشرارة بلازمية زرقاء.

التمزق الضوئي

- يترافق كل من تشكل البلازما plasma formation وتوليد الأمواج الصادمة shock wave generation بانهيار ضوئي optical breakdown.
- فإذا حدث الانهيار داخل نسج رخوة أو موائع، يمكن أن يحدث بالإضافة إلى ذلك تكهُّف cavitation وتشكل نافورة حية jet formation..

التمزق الضوئي

- تصبح الأمواج الصادمة والآثار الجانبية الميكانيكية الأخرى عند طاقات أعلى للنبضة أكثر أهمية وربما حتى تحدد المفعول الكلي على النسيج.
- يعود هذا بالدرجة الأولى إلى حقيقة أن الآثار الميكانيكية تتناسب scale خطياً مع الطاقة الممتصة. يكون مصطلح disruption في هذه الحالة (المشتق من اللاتينية ruptus = ruptured) أكثر ملاءمةً بسبب الصدمة الميكانيكية.

التمزق الضوئي

- أما التكهُّف فهو مفعول يحدث لدى تبئير حزمة الليزر داخل نسيج معين وليس على سطحه؛ فتتكون فقاعات (التكهف) من أبخرة غازية – من بخار الماء وأكسيد الكربون بشكل رئيسي- تتبعثر في الوسط المحيط في نهاية الأمر.

التمزق الضوئي

- من أهم تطبيقات التفاعل التمزقي خزع المحفظة الخلفية لعدسة العين posterior capsulotomy of the lens – غالباً ما يكون ضرورياً بعد جراحة الساد – وتفتيت الحصى البولية المتحرض بالليزر laser-induced lithotripsy of urinary calculi.

التمزق الضوئي

- لما كانت آليتا التفاعل – الاستئصال المتحرض بالبلازما والتمزق الضوئي كلتاهما - تعتمدان على توليد البلازما، ليس من السهل دائماً التمييز بينهما.
- كانت جميع آثار النسج المتحرضة بالنبضات الليزرية الفائقة القصر تعزى في السبعينيات والثمانينيات في الواقع للتمزق الضوئي.

التمزق الضوئي

- يمكن النظر للتمزق الضوئي عموماً على أنه مفعول ميكانيكي متعدد الأسباب يبدأ بالانهيار الضوئي breakdown.
- إن الآليتين الرئيسيتين هما توليد موجة صادمة والتكهُّف وتستكملان بتشكل النافورة في حال انهيار التكهُّفات في الموائع بالقرب من حدود صلبة.

التمزق الضوئي

- **توليد الأمواج الصادمة**
- يترافق الانهيار الضوئي المتحرض بالليزر، بارتفاع مفاجئ كظوم في درجة حرارة البلازما إلى قيم تصل إلى بضع عشرات آلاف الكلفن.
- يمكن رد هذا الارتفاع في درجة الحرارة بشكل رئيسي إلى الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة.
- غير أنَّ إلكترونات البلازما لا تُحتبس في البقعة البؤرية لحزمة البلازما، بل تنتشر في الوسط المحيط نظراً لارتفاع طاقتها الحركية.

التمزق الضوئي

- **توليد الأمواج الصادمة**
- عندما تتبع الإيونات العاطلة تأخيراً زمنياً معيناً، تنتقل الكتلة التي هي الأصل الأساسي لتوليد موجة الصادمة.
- وسرعان ما تنفصل هذه الموجة الصادمة عن حافة البلازما.
- وهي تنتقل في بادئ الأمر بسرعة تفوق سرعة الصوت hypersonic speedوتتباطأ في نهاية المطاف إلى سرعة الصوت.

التمزق الضوئي

- **توليد الأمواج الصادمة**
- وتكون الأمواج الصادمة الحاصلة بنبضات البيكوثانية أضعف بكثير من الأمواج الصادمة المتحرضة بنبضات النانوثانية بضغوط ذروية قابلة للمقارنة. وقد رصد انزياح في جزيئات الخلايا قدره 1.2µm في حالة نبضات طولها 30ps وانزياح قدره 4µm في حالة نبضات طولها نحو 6ns. يمكن لهذه الانزياحات الصغيرة بالأحرى أن تسبب تلفاً ميكانيكياً على مستوى أجزاء من الخلية فقط، وربما تحرض تغيرات وظيفية في الخلايا.

التمزق الضوئي

- **موجز التمزق الضوئي**
- **الفكرة الرئيسية:** تحطم النسيج وقطعه بقوى ميكانيكية، يترافق بظهور شرارة بلازما plasma sparking، وتوليد أمواج صادمة، وتكهُّف، وتشكل نافورة.
- التطبيقات الخاصة: تفتيت العدسة lens fragmentation وتفتيت الحصى.

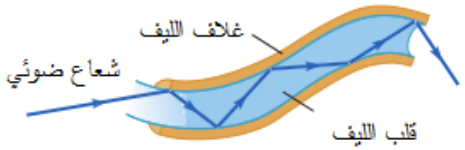
النقاط الكمومية ومعالجة الأورام

- يمكن معالجة الأورام بطريقة مأمونة بالاعتماد على التقانة النانوية والليزر:
- بتصميم كريَّات مكروية من السيليس قطرها نحو مئة نانومتر، ومغشاة بطبقة من الذهب.
- تتوضع في النسج السرطانية لدى حقنها في الأوعية الدموية (جرى تجريبها على فئران مصابة)، لأن الالسريعة النمو أورام تكون مرواة أكثر تروّى بشكل أفضل من النسج السليمة

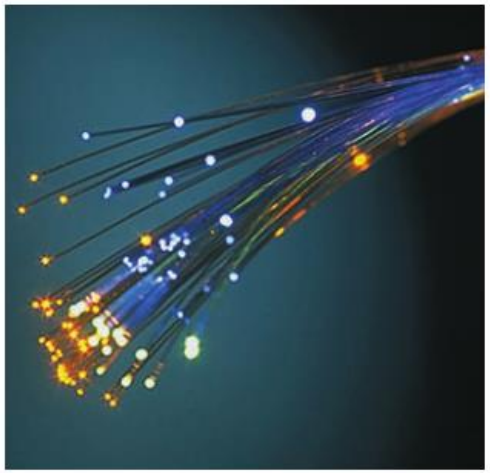
النقاط الكمومية والليزر ومعالجة الأورام

- تتشكل على سطحها لدى تعريضها لموجة كهرطيسية تتجاوب معها أمواج بلازمونية ،
- هذه الأمواج البلازمونية هي أمواج كثافة إلكترونية
- هذه الأمواج ترفع درجة حرارية الكرية من 37°C إلى 45°C وهي درجة كافية لقتل الخلايا التي توجد فيها من دون أن تؤثر على الخلايا المجاورة

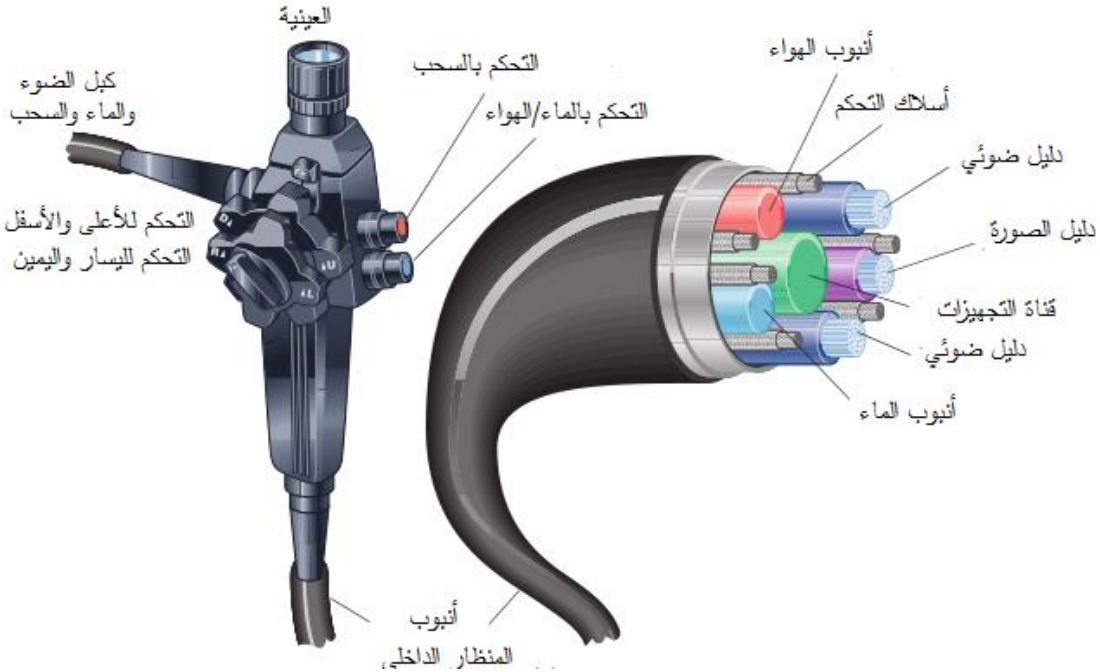
الألياف الضوئية في الكشف والمعالجة



(a)



(b)



(b)