الليزر

الفصل الخامس: انواع الليزرات

جامعة الحمدانية

م. بان عبد المسيح بدر

Scanned with CamScanner

الجدول التالي يبين أنواع الليزرات مصنفة حسب نوع الوسط الفعال:

اسم الليزر	نوع الوسط الفعال	تقنية الضخ	الطول الموجي
ليزر الهليوم نيون He-Ne	خليط من غاز الهليوم وغاز النيون	الكهربائي	632.8nm
ليزر ثاني أوكسيد الكربون CO_2	مزيج غازي بنسب معينة يتضمن: $(CO_2 + He + N_2)$	الكهربائي	10.6 µm
ليزر ايون الاركون Ar^+	غاز الاركون	الكهربائي	514.5nm 488nm
الاكسايمر Excimer	فلوريد الاركون ArF فلوريد الزينون XeF	الكهربائي	منطقة فوق البنفسجية UV
ليزر الحالة الصلبة (الياقوت Ruby)	بلورة الياقوت	الضوئي	694.3nm
النوديميوم – ياك Nd:YAG	ياتيريوم المنيوم كرانيت	الضخ الضوئي	1.064 µm
الليزر الكيمياوي مثل: ليزر فلوريد الهايدروجين	غاز الهيدروجين H_2 وغاز الفلور F_2	الضخ الكيميائي	3-10 µm
ليزر الصبغة Dye	إذابة أصباغ عضوية: Rhodamine (R6G) في مذيبات عضوية	الضوئي (ليزر الياقوت)	570-610 µm لكل صبغة لها حزمة معينة لكن بشكل عام 450-630 µm
ليزر أشباه الموصلات	مولد شبه موصلة مادة الكاليوم ارسنايد GaAs	الكهربائي	موجات مرئية وغير مرئية
ليزر الأشعة السينية	بلازما مادة السيلينيوم Se	ليزر بطول موجي 532nm	20.6nm 20.9nm

Scanned with CamScanner

تصنَف الليزرات حسب حالة المادة الفعالة المستخدمة إلى ثلاثة أنواع رئيسية وهي: ليزر الحالة الصلبة، ليزر الحالة الغازية وليزر الحالة السائلة، إضافة إلى هذه الأنواع يأتي الليزر الكيمياوي وليزر شبه الموصل. وعلى الرغم من كون الوسط الفعال في ليزر شيه الموصل مادة بحالة صلبة إلا إن جوهر العمل لهذا النوع من الليزر يختلف تماماً عن ليزر الحالة الصلبة، كذلك يختلف الليزر الكيمياوي عن كل هذه الأصناف في ميكانيكية ضخ الطاقة اليه ولهذا انفرد في فقرة مستقلة.

أولاً: ليزر الحالة الصلبة: Solid State Laser

١. ليزر الياقوت Ruby Laser

٢. ليزر النديميوم

ثانياً: ليزر الحالة الغازية Gas laser

أ- ليزر الغاز الذري

١-ليزر هليوم – نيون He-Ne Laser

٢-ليزر بخار المعدن (ليزر بخار النحاس الذري)

ب- ليزر الغاز الأيوني

١-ليزر أيون الآركون

٢-ليزر بخار المعدن الأيوني

ت- ليزر الغاز الجزيئي

١-ليزر ثاني أوكسيد الكاربون CO_2 laser

٢-ليزر النايتروجين N_2 Laser

ثالثاً: ليزر السائل Liquid Laser

رابعاً: الليزر الكيمياوي: Chemical Laser

خامساً: ليزر شبه الموصل Semiconductor Laser

Scanned with CamScanner

انواع الليزرات

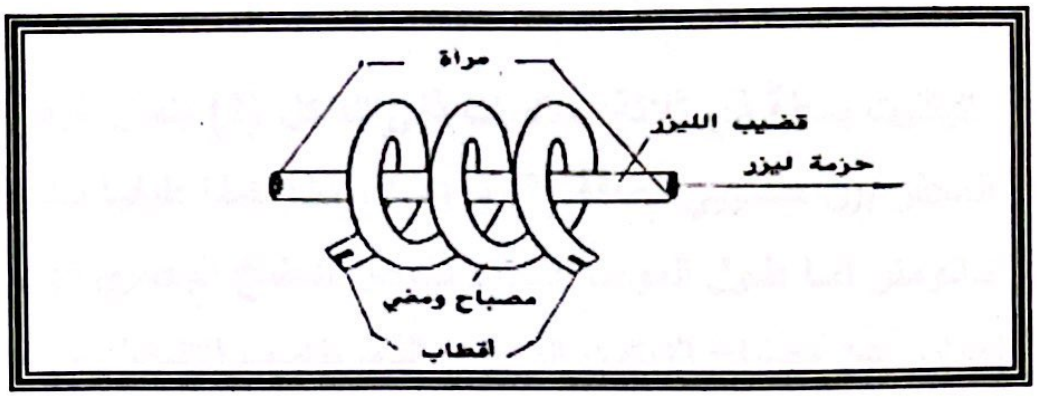
1- ليزر الحالة الصلبة :

ليزر الحالة الصلبة ليزر فيه الوسط الفعال بلورة عازلة او زجاج . اول ليزر اكتشف وعمل بنجاح هو ليزر الحالة الصلبة وكان ذلك في حزيران عام 1960 وهو ليزر الياقوت وما زال استخدامه مستمرا منذ ذلك الحين ، وعلى العموم تكون مواد ليزر الحالة الصلبة شفافة عازلة تقاوم الحرارة وهي بلورات صلبة او قطع زجاجية وتدعى بالمواد المضيفة تحوي نسبة من ايونات الفلز ، فمثلا ايون الكروميوم الثلاثي التاين (Cr^{3+}) في بلورة الياقوت وايون النديميوم الثلاثي التاين (Nd^{3+})في الزجاج.ان هذه الايونات موجودة بنسبة قليلة حوالي 0.01 -0.1 % في البلورة او الزجاج وهي مسؤولة عن توليد وتكبير شعاع الليزر . فعمل الليزر ياخذ محله بين مستويات الطاقة لهذه الايونات وان تردد الاشعة المحفزة هي ميزة من ميزات الايون المفرد المتواجد في البيئة البلورية والمندمج فيها على العموم .

تكون مادة الليزر في شكل قضيب صقل طرفاه وجعلا بدرجة عالية من النعومة ليشكلا سطحين متوازيين يطلق عليه قضيب الليزر يوضع هذا القضيب بين مرآتين متقابلتين(او يطلى طرفاه بمادة عاكسة ليشكلا مرآتي المرنان). يسلط عليه اشعاع كهرومغناطيسي ذو شدة عالية من قبل مصباح ومضي والذي يكون غالبا على شكل لولبي يحيط بقضيب الليزر لاحظ شكل (1) ان استخدام طريقة الضخ البصري الاكثر شيوعا في عمل الليزر الحالة الصلبة كما ان الضخ الومضي أي المتقطع يؤدي الى انتاج ليزر نبضي ايضا.

Scanned with CamScanner

اما ابعاد الليزر نموذج فتبلغ (6 cm) طولا و (6 mm) في القطر واحيانا تستخدم قضبان طولها اقل من (1cm) او اطول من (30 cm) .

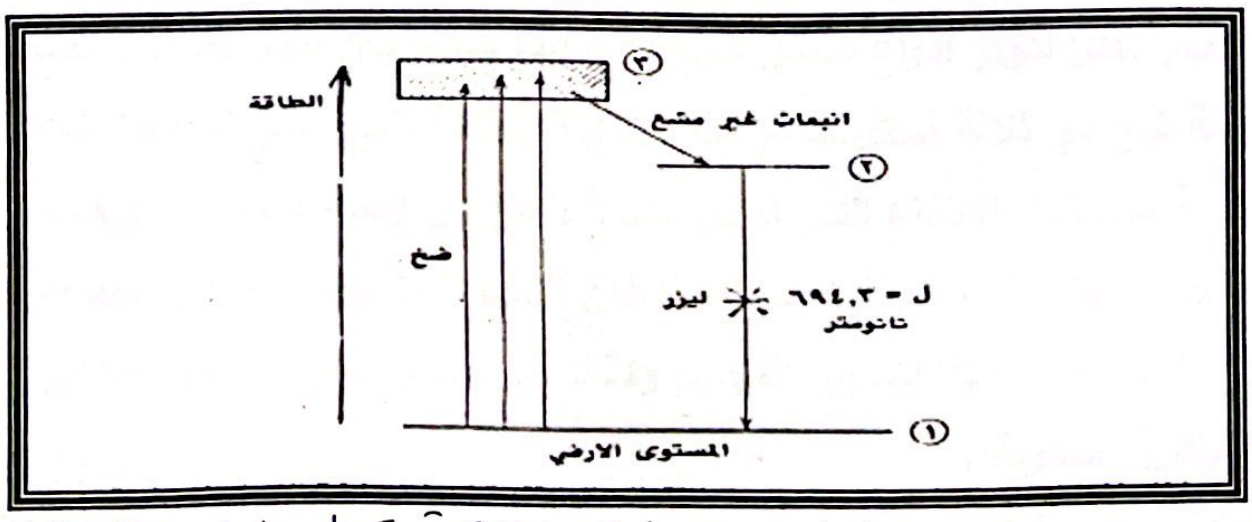


شكل (1) نموذج مبسط لليزر الحالة الصلبة

1- <u>ليزر الياقوت</u> :-

بلورة الياقوت المعروفة جيدا من بين الاحجار الكريمة والتي تتواجد في الطبيعة بلونها الوردي الفاتح هي بلورة اوكسيد الالمنيوم (Al_2O_3)وتحوي نسبة 0.01 -0.1 وزنا من ايونات الكروميوم (Cr^{3+}) التي تعطي اللون الوردي الفاتح للبلورة الياقوت.

اما مادة الليزر فيحصل عليها من انبات بلورة في مزيج مصهور من اوكسيد الكرميوم (Cr_2O_3)(بنسبة حوالي 0.05 %وزنا) واوكسد الالمنيوم (Al_2O_3) ان وجود ايونات الكروميوم (Cr^{3+}) هي مسؤولة عن توليد اشعة الليزر فعمل الليزر كما ذكرنا ياخذ محله بين مستويات الطاقة لايون الكرميوم والمتمثلة بالمخطط (2) . اما بلورة اوكسيد الالمنيوم فلا تساهم مباشرة في دورة الليزر.



شكل (٢) شكل مبسط لمستويات الطاقة لتوليد ليزر 694 نانومتر في بلورة الياقوت .

Scanned with CamScanner

يعمل ليزر الياقوت بخطة ذي ثلاثة مستويات ففي الشكل (2) يتمثل انبعاث الليزر بالانبعاث المحفز بين مستويي الطاقة (2) و (1) باعثا خطا طيفيا بطول موجي (694.3) نانومتر اما طول الموجة اللازم لغرض الضخ البصري فهو الضوء الاخضر الصادر عن مصباح الزيتون الومضي الذي يناسب الانتقال من المستوى الارضي (1) الى المستوى (3) اما التاهيل العكسي للمستويين (2) ، (1) فيتم عن طريق التفريغ السريع من المستوي (3) الى المستوى (2) حيث ان متوسط زمن العمر للمستوى (3) هو(10^{-7}ثانيه) . وبانتقال غير مشع للطاقه الكهرومغناطيسيه .

يعمل ليزر الحاله الصلبه وفي معظم الحالات بشكل نبضات ، ما دامت وسيله الضخ البصري هي طاقه ضوئيه على شكل ومضات ففي ليزر الياقوت يستخدم مصباح الزينون (Xe)بضغط حوالي (600 ملي بار).اما اشعه الليزر الخارجه فتكون على شكل نبضات (ن)وبالامكان ان تعطي قدره في حدود(10-50)ميكاواط في نبضه عملاقه امدها (10 -20 نانو ثانيه).كما يمكن تشغيل ليزر الياقوت بموجه مستمره(م م) اذا ما استخدم مصدر ضوئي ذو موجه مستمره في الضخ مثلا الاستعانه بمصباح زئبقي ذي ضغط عالي .

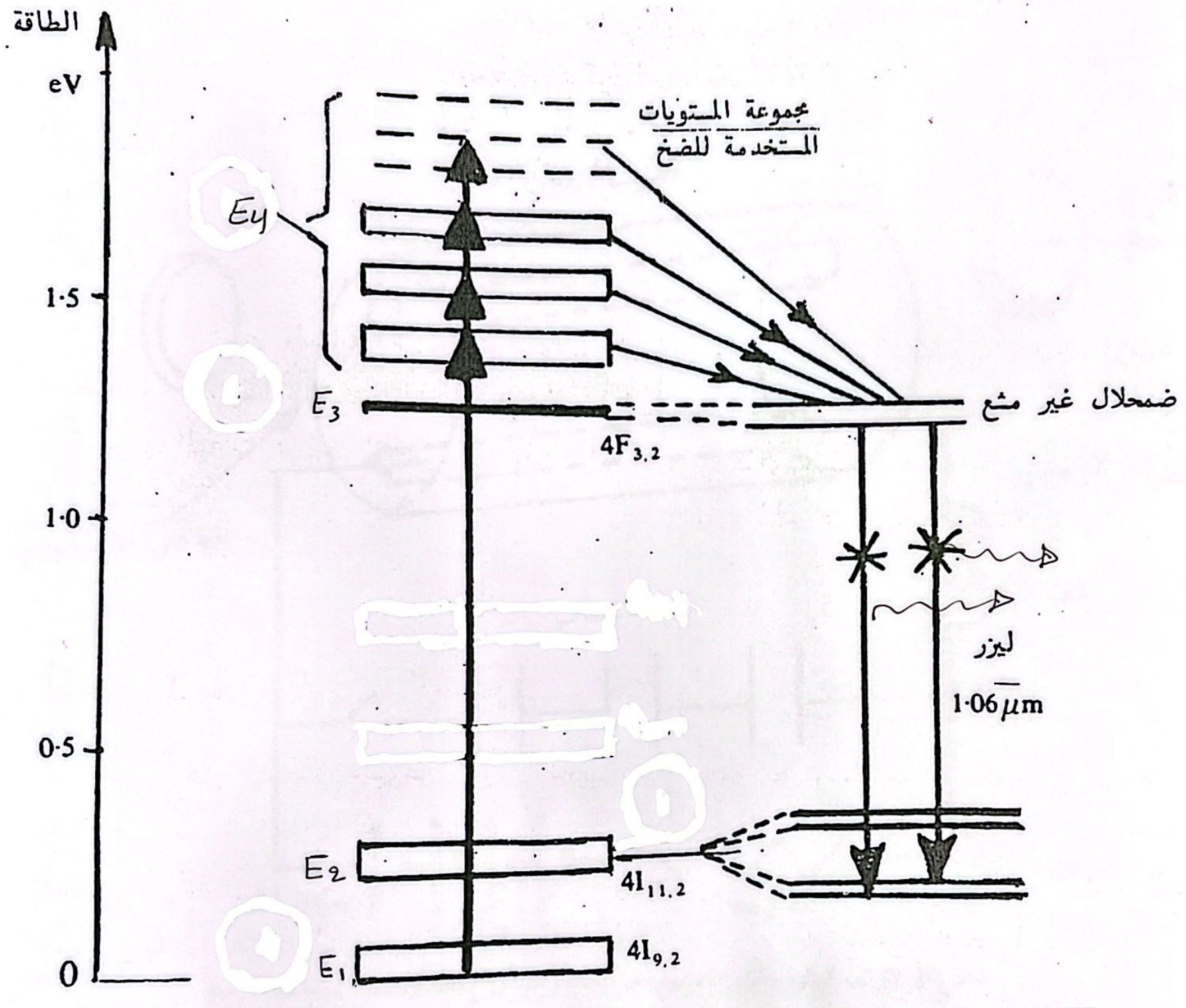
كان لليزر الياقوت شعبية واسعة في وقت ما ولقد تقلص استخدامه في الوقت الحاضر نظرا لتوفر انواع تفضل عليه فكما بينا سابقا بان ليزر الياقوت يعمل بخطة ضخ ذي ثلاثة مستويات أي انه يحتاج الى طاقة ضخ اعلى ليتجاوز شرط العتبة عن تلك الانواع التي تعمل بخطة ضخ ذي اربعة مستويات ويفضل استخدامه على ليزر الياقوت .مع هذا فان الاخير لازال يستخدم في عدد من التطبيقات العملية مثلا لتصوير المجسم وكذلك في تجارب تعيين المدى بما فيها الاغراض العسكرية .

Scanned with CamScanner

ليزر النديميوم:

وهو الليزر الأكثر شيوعاً لأنواع ليزر الحالة الصلبة ويتألف الوسط الفعال فيه من الزجاج الذي يعمل كوسط مضّيف لأيونات الليزر الفعالة، أيونات النديميوم الثلاثية (Nd^{+3}) ويدعى بليزر النديميوم :زجاج ، كذلك تعمل بلورة اليوتريوم المنيوم كارنيت ($Y_3Al_5O_{12}$) والتي تدعى اختصاراً بالياك كوسط مضيَف لأيونات النديميوم Nd^{+3} ويدعى الليزر بليزر النديميوم :ياك. تعطي أيونات النديميوم المتواجدة في الشبيكة البلورية انتقالات متعددة ولكن أشدها يقع عند الأنتقال الذي هو بطول موجة تساوي 1.064 µm بين مستويي الطاقة $^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ وهذا الأنتقال ممنوع وفق قواعد الأنتقاء لثنائي القطب الكهربائي، لذا يكون متوسط زمن العمر للمستوى العلوي لأنتقال الليزر طويل نسبياً (τ=0.23 ms) أما المستوى الأعلى للضخ فيتمثل في مجموعة مستويات الطاقة التي تقع أعلى من المستوى $^4F_{3/2}$ ويحصل الضخ من المستوى الأرضي $^4I_{9/2}$ بنطاقين طيفيين حول الطول الموجي µm (0.8 & 0.73). إن المستويات العديدة المستخدمة للضخ وباستخدام مدر ضوئي ذي نطاق طيفي عريض يزيد من كفاءة الضخ كما أن المستويات العليا للضخ تتفرغ سريعاً وبانتقالات غير مشعة الى المستوى العلوي لأنتقال الليزر ($^4F_{3/2}$) كما ان المستوى الأسفل لأنتقال الليزر ($^4I_{11/2}$) يتفرغ هو الآخر بشكل سريع وبانتقالات غير مشعة أيضاً الى المستوى الأرضي ($^4I_{9/2}$)، من الواضح بأن ليزر النديميوم: ياك يعمل بنظام رباعي المستويات ولهذا يفضل على ليزر الياقوت.

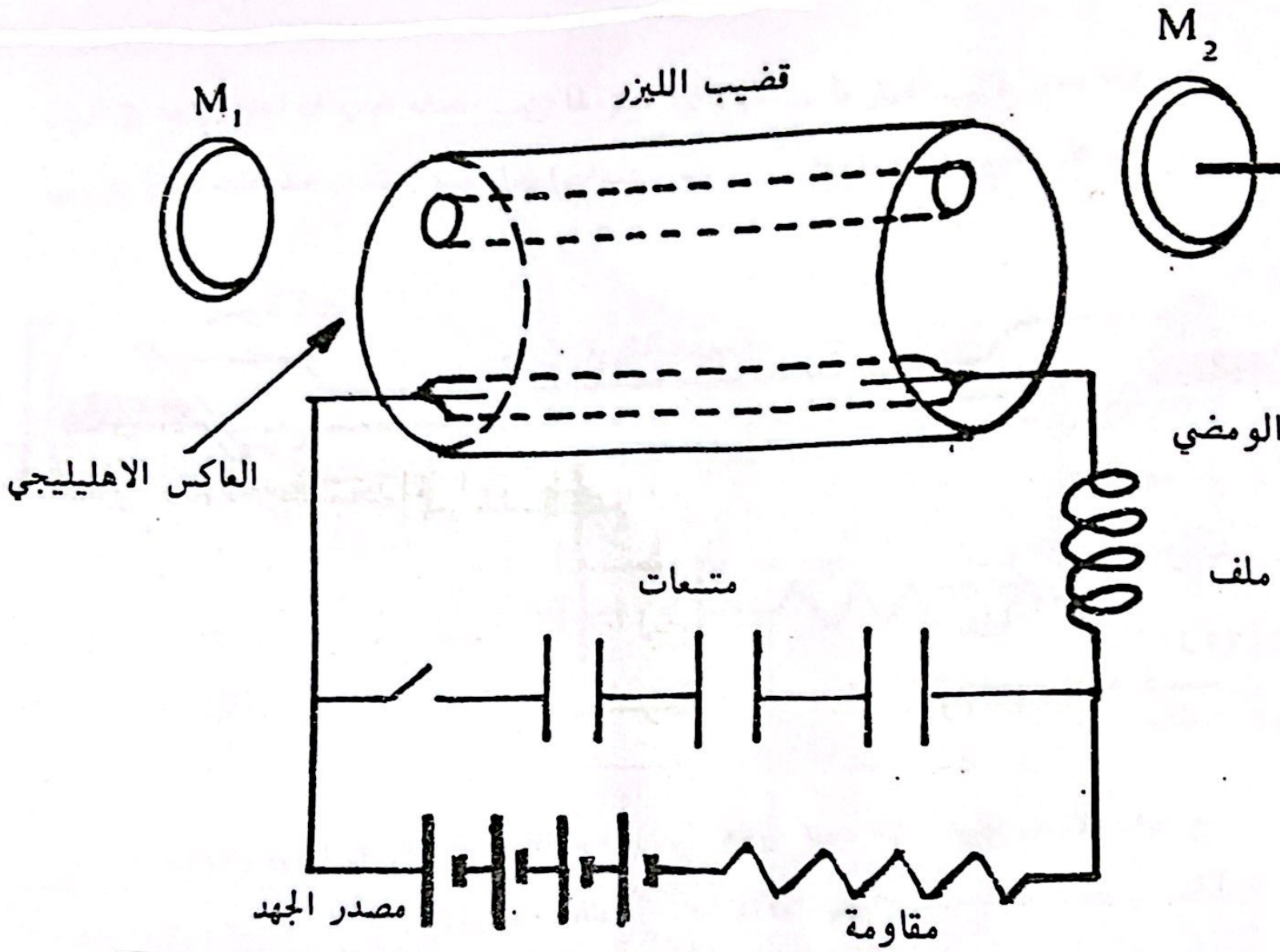
Scanned with CamScanner



شكل (٢): مخطط مستويات الطاقة لايون النديميوم في بلورة الياك ، يبين المخطط المستويات ذات العلاقة بخطة الضخ وانتقال الليزر

يشتغل ليزر النديميوم – ياك بموجة مستمرة (CW) أو بشكل نبضي وغالباً ما يستعان بالترتيب الأهليليجي للعاكس لزيادة كفاءة الضخ الذي يتم باستخدام مصباح الزينون (Xe).

Scanned with CamScanner



شكل (٣): الترتيب المالوف لليزر النديميوم حيث يستخدم العاكس الاهليليجي الشكل لزيادة كفاءة الضخ

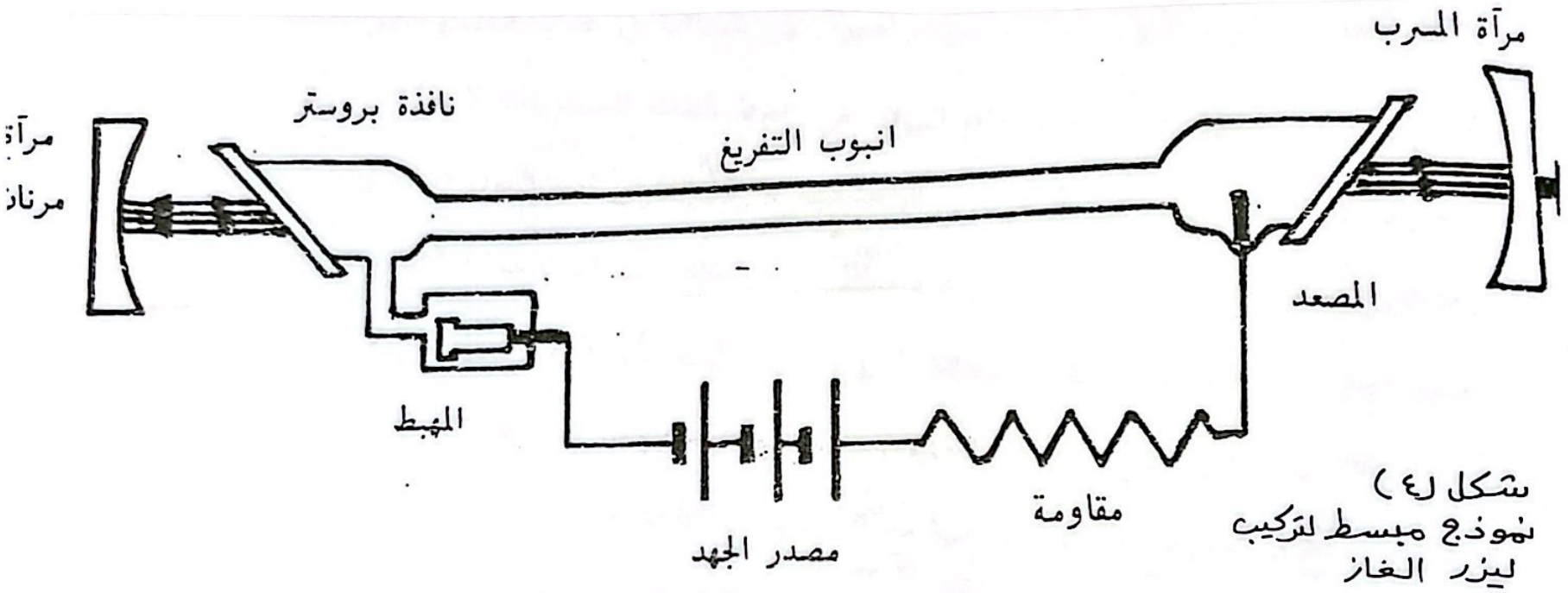
لهذا الليزر تطبيقات كثيرة ومتنوعة منها في تصنيع المعادن وتعيين المدى وكذلك في الجراحة الليزرية، أما ليزر النديميوم: زجاج يستخدم كمضخم ليزر في أنظمة توليد الطاقة العالية المستخدمة في تجارب الأنصهار النووي حيث يمكن أن تعطي قدرة ذروة أكثر من 20 TW بطاقة حوالي 1.5 KJ.

Scanned with CamScanner

ثانياً: ليزر الحالة الغازية Gas laser

تكون مستويات الطاقة للغاز عموماً أضيق مما هي عليه في الحالة الصلبة ولذا تكون الأنتقالات الطيفية بينها أقل تعريضاً حيث يكون ضغط الغاز عادة واطئاً لهذا السبب لاتضخ الغازات باستخدام المصابيح التي يكون طيفها عادة مستمراً لكون نطاق الأمتصاص للغاز ضيقاً وعليه تكون عملية الضخ غير كفوءة. على العموم يضخ الغاز بالطريقة الكهربائية حيث يتم بمرور تيار عالي (مستمر أو نبضي) خلال الغاز.

فيما يتعلق بتركيب الجهاز فأغلب انواع ليزر الغاز لها ترتيب متشابه بحيث ان الغاز يتواجد في انبوب ذي قطر مناسب (بضع مليمترات الى بضع سنتمترات) طوله يحدد بنافذتين عند نهايته تثبت كل منها



شكل (٤)
نموذج مبسط لتركيب ليزر الغاز

مع طرف الأنبوب بزاوية تعرف بزاوية بروستر الغرض منها تقليص الخسائر في الضوء والناجمة عن الأنعكاسات عند سطح نهاية الأنبوب كما انها تحدد استقطاب الضوء النافذ.

تصنف الأنواع المختلفة لليزر الغاز أحياناً وفق تركيب الغاز المستخدم كوسط فعال لعمل الليزر، منها ليزر الذرة المتعادلة وليزر الأيونات الموجبة وليزر الغاز الجزيئي.

Scanned with CamScanner

ليزر الغاز الذري

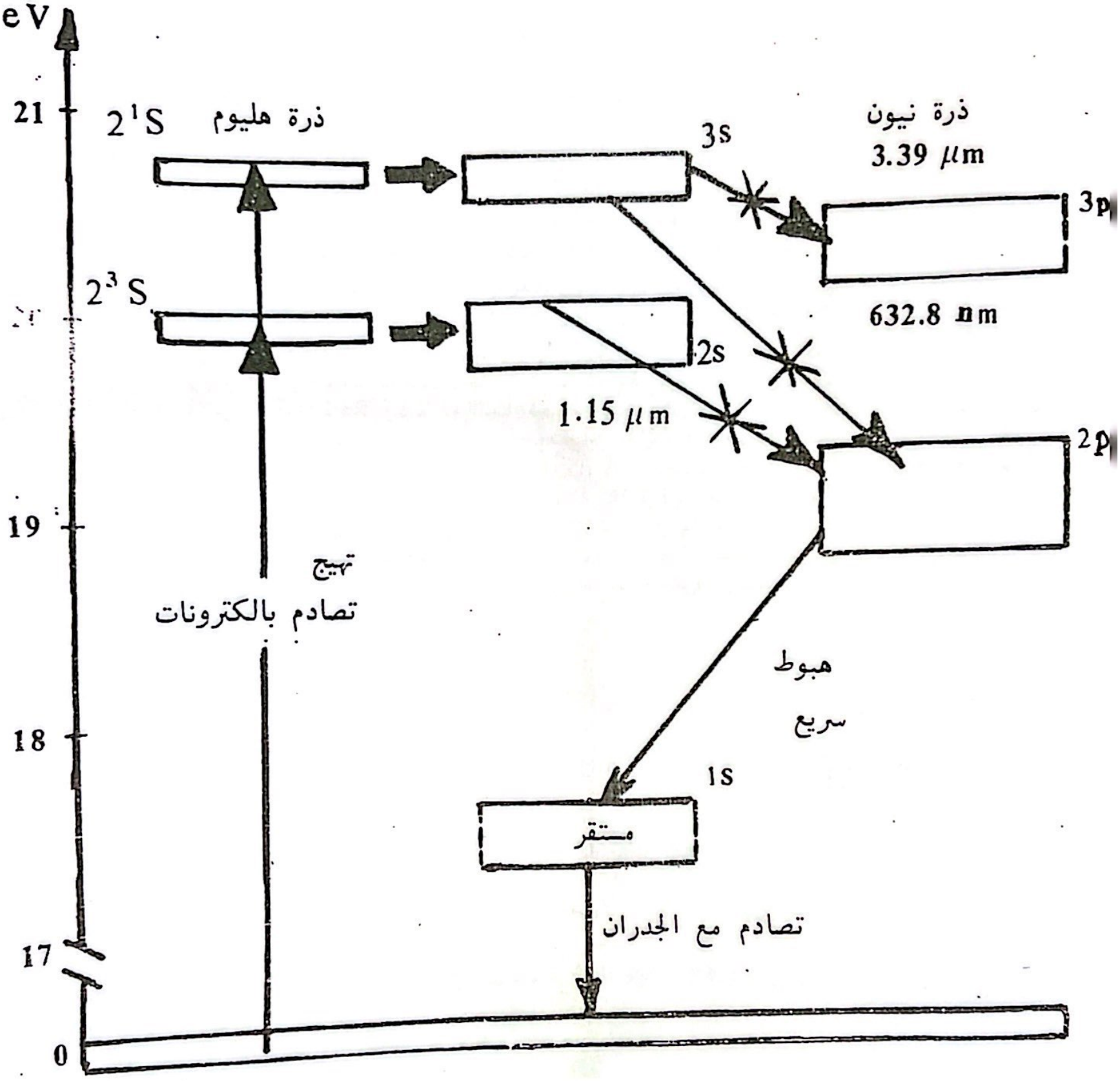
يدعى أيضا بليزر الذرة المتعادلة حبث يكون الوسط الفعال غاز أحادي الذرة وتقع ضمن هذه المجموعة ليزر الغازات النادرة ومجموعة أخرى من ليزر أبخرة بعض المعادن.

ليزر هليوم – نيون He-Ne Laser

يعد هذا الليزر من أهم أنواع ليزر لغازات الشائعة الأستعمال وهو أول ليزر غاز اشتغل بموجة مستمرة CW وبطول موجة 1.15 µm عام ١٩٦٠. إن لهذا النظام ثلاثة انتقالات ليزر بالأطوال الموجية (3.39 µm, 1.15 µm, 633 nm).

يتكون ليزر الهليوم : نيون من مزيج من ذرات الهليوم He وغاز النيون Ne بنسبة معينة وخطوط انبعاث الليزر تعود لذرة النيون. أما دور ذرات الهليوم فهو المساهمة في عملية الضخوتحقيق التأهيل العكسي لمستويات الطاقة ذات العلاقة بنظام النيون. من مخطط الطاقة للمستويات لإنتقالات الليزر لكل من ذرات الهليوم والنيون يتبين بأن مستويي الطاقة 3S, 2S على التوالي لذرة النيون كما يكون كل من مستويي الطاقة 2^1S &2^3S لذرة الهليوم شبه مستقر. هذه المواصفات تساندعملية التهيج الفعال لمستويي النيون 3S, 2S بطريقة انتقال الطاقة الرنيني، حيث ثبت بأن هذه العملية تمثل الوسيلة الأساسية لتحقيق التأهيل العكسي في ليزر الهليوم:نيون، من الممكن أيضاً ان تتحرض ذرات النيون مباشرة الى المستوى المطلوب بواسطة تصادمها مع الألكترونات الناتجة عن التفريغ الكهربائي ولكن عملية التأهيل العكسي للمستويين 2S, 3S لذرة النيون تتم بشكل فعال وكفوء عن طريق ذرات الهليوم المحرضة وبهذا يحصل الأنبعاث المحفز لذرات النيون بين مستويات 3S ومستويات 3P وبين مستويات 2S ومستويات 2P، الإنتقال من $3S_2$ إلى $3P_4$ بطول موجة 3.39 µm والإنتقال من $2S_2$ إلى $2P_4$ بطول موجة 0.633 µm (اللون الأحمر) والإنتقال من $2S_2$ إلى $2p_4$ بطول موجة 1.15 µm، بعدها تهبط هذه الذرات إلى المستوى الأرضي بصورة سريعة تلقائية وقد يحدث ذلك نتيجة تصادمها مع جدران الأنبوب الذي يحوي الغاز.

Scanned with CamScanner



شكل (٥) مخطط مستويات الطاقة لذرة الهليوم ولذرة النيون ذات العلاقة بعمل ليزر الهليوم:نيون

Scanned with CamScanner

أما كون ليزر الهليوم: نيون سيتذبذب بهذا الإنتقال أو بذاك فيعتمد ذلك على انتخاب مرايا المرنان ولتذبذب طول موجة معينة يستخدم طلاء المرآتين بحيث يكون أعظم قدرة انعكاسية عند الطول الموجي المطلوب.

أن نسبة غاز الهليوم الى غاز النيون للإنتقل 0.633 μm تكون بنسبة 1 : 5. إن القدرة الخارجة لأشعاع اللضوء المرئي من انبوب تفريغ اسطواني الشكل بطول متر واحد وقطر 6 mm تكون بحدود 0.1 Watt . إن معظم انابيب ليزر الهليوم: نيون المختبرية تكون بقطر (1-6) mm وطول (15-20) cm فقدرة النتاج لا تتجاوز ملي واط واحد.

بالأضافة الى استخدامات ليزر الهليوم: نيون الذي يتذبذب بالإنتقال الأحمر المرئي في المختبرات التعليمية فإنه يستخدم للأغراض التي تتطلب حزمة ضوئية مستقيمة مرئية بقدرة واطئة لإستخدامها لأغراض الترصيف أو قراءة الرموز أو في ذاكرة أقراص القيديو.

على غرار استخدام ذرة الغاز النادر النيون لتوليد اشعة ليزر، كذلك تم استخدام بقية الغازات النادرة كالكربتون والآركون والزينون وبنفس الطريقة حيث ان مخطط الطاقة لجميعها تقريبا متشابهة ويشابه ذلك النيون.

ليزر الغاز الأيوني

الوسط الفعال في هذه الحالة غاز متأين أو بخار معدن ذراته متأينة وهذا يعني ان تمدداً بسيطاً قد حدث لمقياس الطاقة لمخطط مستويات الطاقة لذرة المادة، أي أن المسافة بين مستويات الطاقة لأيون الذرة تكون أكبر بقليل من تلك للذرة المتعادلة نفسها. إن هذا يسبب تقليصاً لطول الموجة لخطوط الطيف المنبعثة عنها، أي أن طيف الذرة المتأينة يزحف قليلاً عن الطيف الذري باتجاه الأشعاع المرئي أو فوق البنفسجي.

يقع ضمن هذا الحقل من الليزر مجموعتان وهما مجموعة ليزر أيونات ذرات الغازات النادرة ومجموعة ليزر أيونات ذرات المعادن.

Scanned with CamScanner

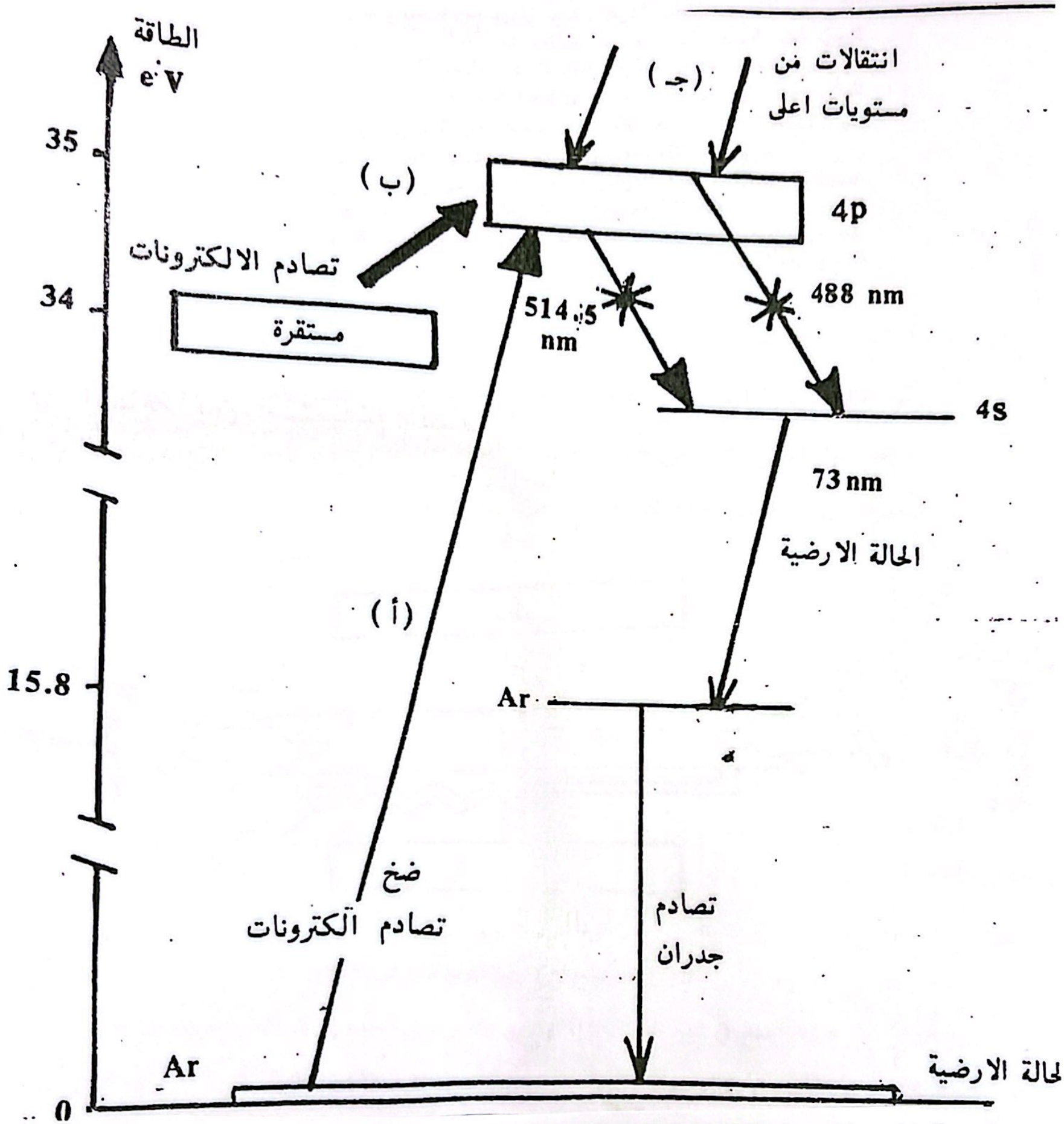
ليزر أيون الآركون:

يتم تأهيل المستوى العلوي لأنتقال الليزر في هذا النوع من الليزر بخطوتين، أي بعمليتي تصادم متتاليتين مع الألكترونات الناتجة عن التفريغ الكهربائي، فالتصادم الأول يؤين الذرة والثاني يحرض هذا الأيون، لهذا السبب يلزم لأتمام عملية الضخ كثافة تيار تفريغ عالية وعلى العموم تكون كثافة التيار اللازم لعمل ليزر الغاز الأيوني أعلى بكثير من تلك اللازمة لعمل الليزر الذري.

يمثل ليزر الآركون Ar^+ الليزر الأكثر شيوعاً في هذه المجموعة وخاصة في مختبرات أبحاث الذرة.

في مخطط مستويات الطاقة لأيون الآركون ذات العلاقة بانبعاث الليزر يتم تأهيل المستوى العلوي للأنبعاث المحفز (المستوى 4P) من خلال ثلاث عمليات مختلفة فقد تتحرض أيونات الآركون على هذا المستوى باصطدامها مع الكترونات التفريغ (أ) وقد تكتسب أيونات الآركون التي هي في مستوى الطاقة شبه المستقر طاقة باصطدامها بالألكترونات لتحرضها الى المستوى 4P (ب) وأيضاً قد يتأهل المستوى 4P من خلال الإنتقالات المتساقطة عليه من المستويات الأعلى منه.

Scanned with CamScanner

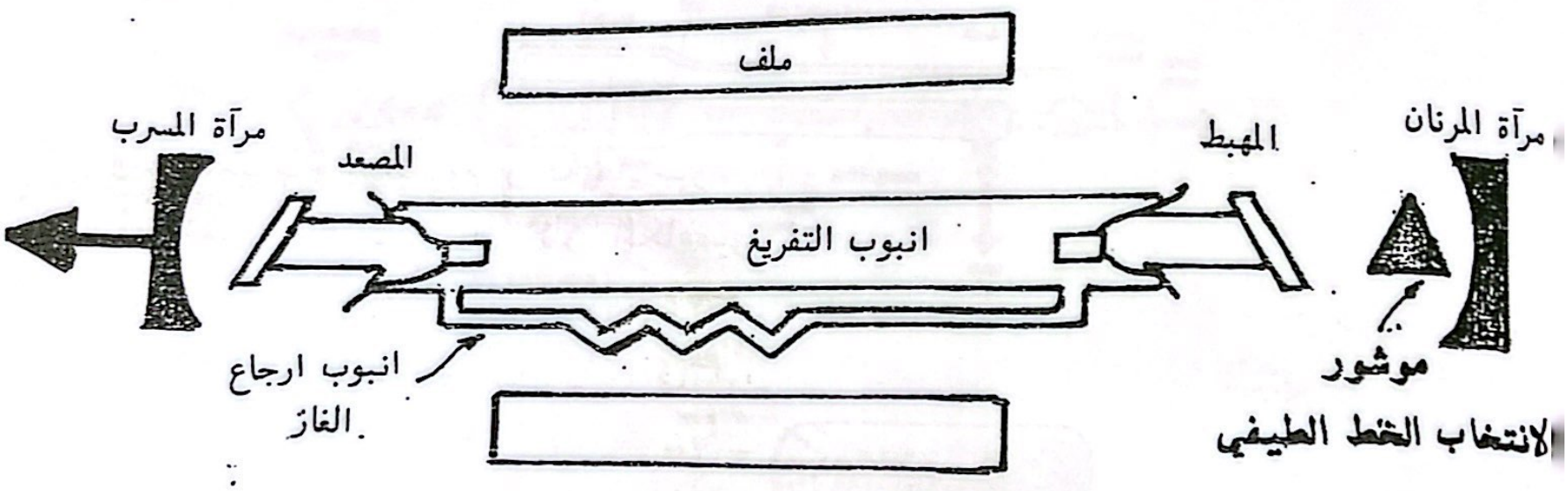


شكل (٦): مخطط مستويات الطاقة الرئيسية لايون الاركون، تتم عملية الضخ للمستوى 4P من خلال ثلاث عمليات (أ)، (ب) و (ج)

Scanned with CamScanner

إن تركيب جهاز ليزر ايون الآركون يختلف عن تركيب جهاز ليزر الهليوم-نيون بسبب كثافة التيار العالية اللازمة للضخ وبالتالي درجة الحرارة العالية الناتجة في الأنبوب. إن كثافة التيار العالية تسبب الأنجراف السريع لأيونات الآركون نحو المهبط، ولأعادتها يستخدم أنبوب آخر ليكمل الدورة والذي يختلف في أبعاده عن الأنبوب الرئيسي لتفادي حدوث التفريغ فيه، كذلك تستوجب كثافة التيار العالية وما ينتج عنها من ارتفاع في درجة الحرارة التي قد تصل الى 3000 °C أخذ الأحتياطات في تصنيع انبوب التفريغ وتبريده بدورة ماء جاري مثلاً، كذلك تقليص التلف في جدران الأنبوب بسبب التصادم ويستخدم لهذا الغرض مجال مغناطيسي يوازي محور الأنبوب وضمن منطقة التفريغ لإلزام الألكترونات الحرة بالأبتعاد عن الجدران والعمل على تواجدها في مركز الأنبوب مما يزيد من كفاءة الضخ وبالتالي قدرة الليزر.

يكون قطر انبوب التفريغ ضيقاً (يضع ميلليمترات) لحصر التذبذب ضمن الصيغة TEM_{oo} وأيضاً لتقليص التيار الكلي اللازم، من جانب آخر تزداد القدرة باستخدام أنابيب أوسع مما يقلل من التعرض للجدران، في كلتا الحالتين تزداد قدرة الليزر بازدياد طول الأنبوب.



شكل (٧): تصميم مبسط لانبوب التفريغ لليزر ايون الاركون

ينتج عن عملية الضخ في ليزر ايون الغاز أكثر من انتقال ليزر واحد، إلا ان أشد خطوط ليزر ايون الآركون يكون عند الأنتقال 514.5 nm وهو الذي يعطي اللون الأخضر المزرق لخرج الليزر ويليه في الشدة الأنتقال عند طول الموجة 488 nm (بنفسجي) وخطوط اخرى كثيرة أقل شدة. يمكن الأنفراد بخط واحد في خرج الليزر عن طريق استخدام المحزز مثلاً. كلك يتميز خرج الليزر بأمكانية زيادة قدرته

Scanned with CamScanner

بزيادة تيار التفريغ فلا يحدث الأشباع إلا عند استخدام قيم للتيار أكبر بكثير من القيم العملية وهو على العكس من ليزر الغاز الذري، إذ ان كفاءة هذا الجهاز واطئة جداً وهي على العموم أقل من 10^{-3} .لليزر ايون الآركون استخدامات كثيرة، فبالأضافة الى شيوع استخدامه في مختبرات ابحاث الذرة، يستخدم أيضاً وبشكل واسع لضخ ليزر السائل ولتطبيقات اخرى منها في الطب مثلاً حيث يعد استخدام هذا الليزر في الجراحة من التطبيقات المهمة.

ضمن هذه المجموعة ومن الأنواع الشائعة الأستخدام أيضاً ليزر ايون الكربتون Kr^+ المعروف جيداً في ابحاث الفيزياء الذرية بلونه الأحمر القاني الذي يقع بطول نوجة 647.1 nm كما يتضمن خطوطاً أخرى اقل شدة وذات موجة اقصر.

ليزر الغاز الجزيئي:

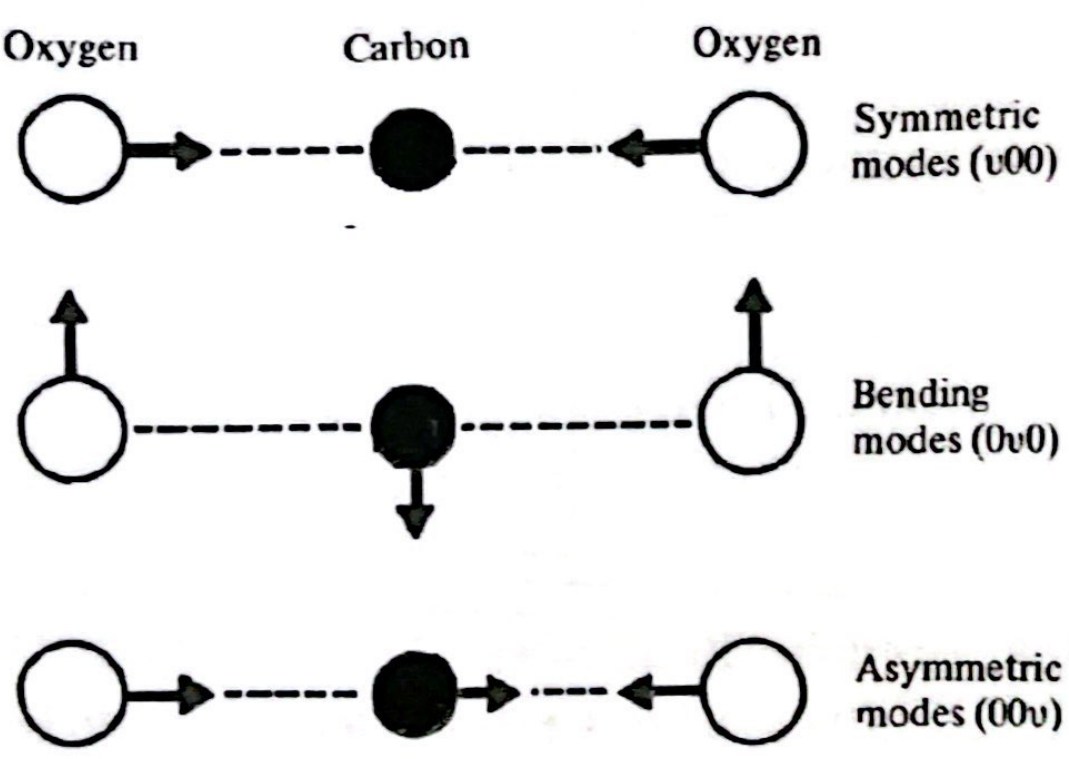
يحدث فعل الليزر بين مستويات الطاقة المختلفة للجزيئة، فلهذه مستويات طاقة الكترونية على غرار تلك التي للذرة وايضاً مستويات طاقة دورانية واهتزازية ، والأنتقال الطيفي قد يحدث بين اثنين من هذه المستويات وعلى هذا الأساس صنَفت الأنواع المختلفة لليزر الغاز الجزيئي. فالصنف الأول تكون فيه الأنتقالات بين المستويات الأهتزازية والدورانية العائدة الى حالة الكترونية واحدة ويعطي فرق الطاقة بين المستويات المناظرة انتقالات ليزر تقع في مدى الأشعة تحت الحمراء والبعيدة منها (5 – 300 μm) من أهم هذه الأنواع هو ليزر ثاني أوكسيد الكاربون CO_2 الشائع الأستعمال.

ليزر ثاني أوكسيد الكاربون CO_2 laser:

تتألف جزيئة CO_2 من ذرتي أوكسجين تقع بينهما ذرة الكربون، بهذا الترتيب الخطي يمكن اجزيئة CO_2 ان تتذبذب وفق إحدى الصيغ الاساسية. يوصف مستوى التذبذب بثلاثة أرقام (i,j,k) ليعبر عن مقدار الطاقة المناظرة لصيغ التذبذب الثلاث للجزيئة، فمثلاً يعني الترتيب (100) ان الجزيئة بهذه الحالة تتذبذب بصيغة متماثلة نقية يعبر عنها بكم واحد من الطاقة التذبذبية وليس لها طاقة تناظر الصيغة غير المتماثلة او الصيغة المنحنية. اما مستويات الطاقة الدورانية المرافقة لكل مستوى تذبذبي

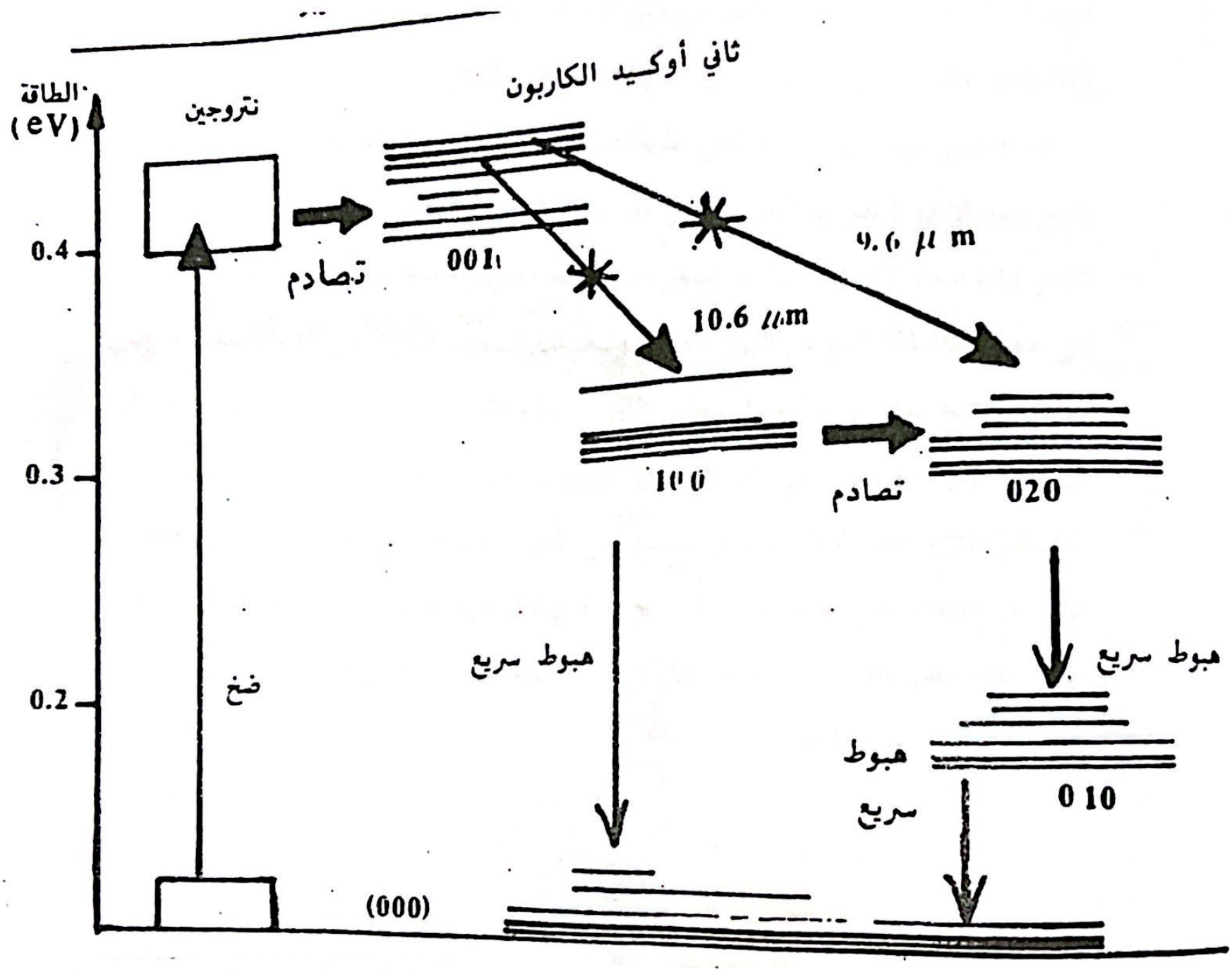
Scanned with CamScanner

فيعبر عنها بالعدد الكمي J . من مخطط مستويات الطاقة التذبذبية للمستوى الارضي لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون تضخ الجزيئات من المستوى (000) الى المستوى (011) وعن طريق الهبوط السريع المشع وغير المشع يتم تأهيل المستوى (001) والذي يمثل المستوى الأعل لانتقال الليزر وهو مستوى شبه مستقر. فاذا تم الضخ بطاقة مناسبة فالتأهيل العكسي يتحقق بين المستوى (001) والمستويين (100)& (020) فاذا كانت الخسارة في المرنان صغيرة يبدأ التذبذب باعثاً أشد انتقالاته عند طول الموجة 10.6 µm والذي يقع في مدى الأشعة تحت الحمراء، اما الانتقال الاخر وهو الاضعف فيحدث بطول موجة تساوي 9.6 µm. ولزيادة كفاءة عمل ليزر ثاني اوكسيد الكاربون يضاف اليه غاز النتروجين وغاز الهليوم بنسب (40% N_2 & 50% He) حيث يلعب غاز النتروجين نفس الدور الذي يلعبه غاز الهليوم في ليزر الهليوم:نيون (عملية انتقال الطاقة الرنيني)، اما غاز الهليوم فيعمل في هذه الحالة على زيادة سرعة تفريغ المستوى (100) وبالتالي زيادة درجة التأهيل العكسي للانتقال 10.6 µm.



شكل (٨): صيغ التذبذب لجزيئة ثاني اوكسيد الكاربون

Scanned with CamScanner



شكل (٩): تخطيط مبسط لمستويات الطاقة لجزيئة CO_2 ذات العلاقة بانتقال الليزر ، كل مستوى تذبذبي له عدد كبير من مستويات الطاقة الدورانية مشار اليها بالعدد J اشد الانتقالات يقع بطول موجة 10.6 µm.

Scanned with CamScanner

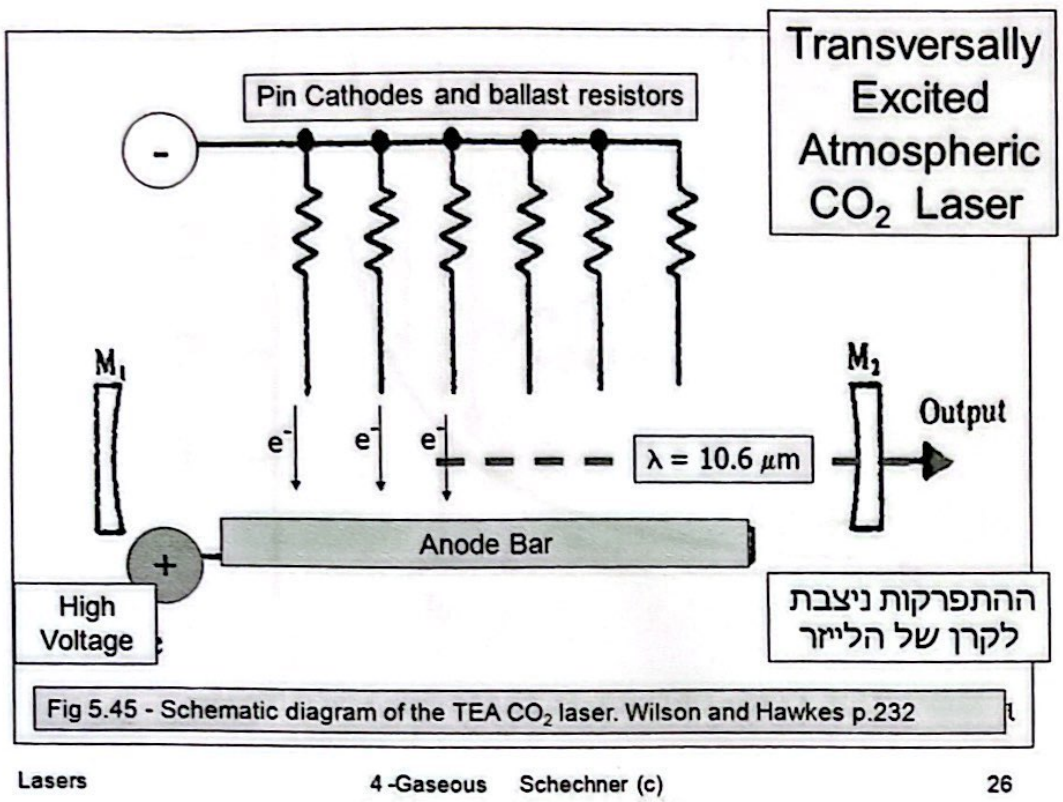
Scanned with CamScanner

يمكن لليزر ثاني اوكسيد الكاربون ان يعطي قدرة عالية من خلال الانتقال الشديد للخط 10.6 µm فيمكن ان ترتفع كفاءة هذا الليزر الى 30% (وهي كفاءة عالية مقارنة مع كفاءة ليزر الهليوم : نيون التي تقدر بحوالي 0.02%) كما يمكن الحصول على قدرة ذروة تقع في المدى كيكاواط عند التشغيل النبضي. ان قدرة نتاج هذا الليزر تتناسب طردياً مع طول الوسط الفعال لذا جاءت محاولات لزيادة قدرة النتاج (CW) الى عشرات كيلوواط ببناء ليزر CO_2 بطول عشرات الامتار.

هناك تصاميم اخرى لليزر CO_2 تخص تطبيقات القدرة العالية. منها مايستخدم في الصناعة والذي يدعي بليزر الاثارة المستعرضة الجوي وتختصر هذه التسمية بليزر TEA. على العموم يمكن زيادة قدرة النتاج بزيادة ضغط غاز CO_2 فاذا ما اشتغل هذا بضغط جوي واحد فانه سيعطي قدرة اعلى من تلك التي استحصلت لهذا النوع من الليزر بالطول نفسه. اما الصعوبة الناجمة عن هذا التصميم فتقع في ميكانيكية ضخ الغاز كهربائياً حيث يتطلب الامر في هذه الحالة الى مصدر هائل للجهد الكهربائي لاحداث التفريغ والمحافظة على استقراريته في ضغط يساوي الضغط الجوي. يقدر مقدار الجهد الكهربائي اللازم بحوالي 12 KV لكل سنتيمتر من طول انبوب التفريغ، اذ تتطلب الحالة عادة في انبوب فيه الضغط حوالي 13.3 mbar ($\approx 10^{-3}$ atom) فرق جهد مقداره حوالي 8 KV/m من انبوب التفريغ لهذا يتطلب توفير مصدر جهد هائل لاحداث تفريغ كهربائي بصورة طولية في انبوب طوله متر واحد تحت ضغط جوي واحد.

Scanned with CamScanner

لقد وضع الحل لهذه المشكلة بطريقة يفصح عنها الحرفين الاوليين للمختصر TEA طريقة الاثارة المستعرضة.



شكل (١٠): ليزر TEA يحدث التفريغ بشكل مستعرض على امتداد مرنان الليزر

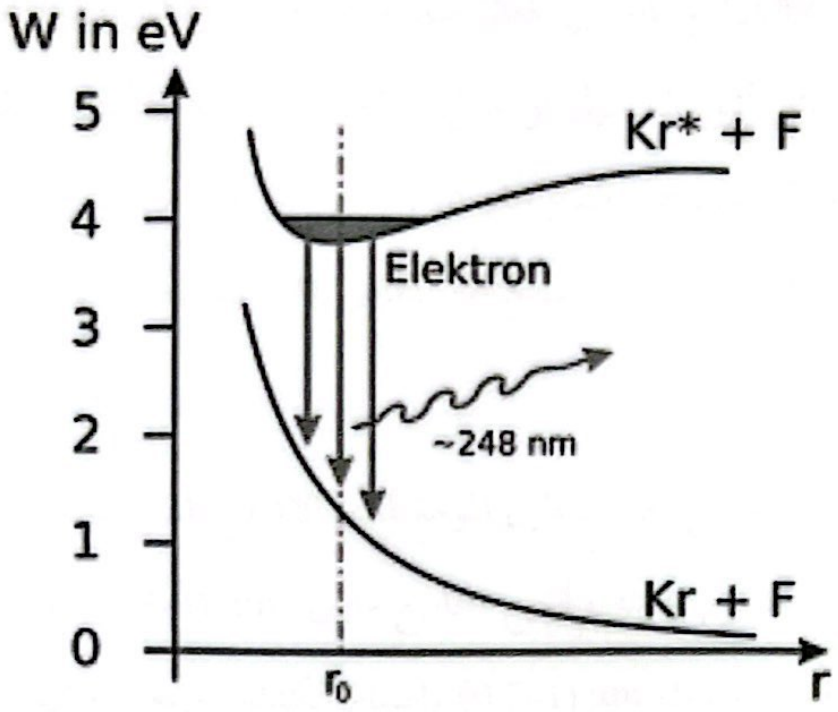
ليزر الأكسايمر:

وهو الصنف الأخير من انواع الليزر الغازي فيحدث نتيجة الانتقال الطيفي بين مستويات الطاقة الالكترونية ولقد أعطيت له تسمية خاصة إذ يدعى بليزر الأكسايمر أو ليزر الجزيئة الثنائية المحرضة .

الأكسايمر جزيئة في حالة مهيجة تتكون من اتحاد ذرتين ولا يمكن ان تتواجد هذه الجزيئة في الحالة الأرضية فأذا ما اضمحلت الجزيئة المهيجة الى الحالة الأرضية انفكت مباشرة الى الذرتين المكونتين لها، مثل اتحاد ذرة من الغازات النبيلة (Ar, Xe, Cr) مع احد ذرات الهالوجين (Cl, F)، وبهذا يكون المستوى الأوطأ لمثل هذا الانتقال والعائد لجزيئة الأكسايمر فارغاً وهكذا يتحقق التأهيل العكسي. ويتم الضخ يصرياً او باستخدام تفريغ كهربائي.

Scanned with CamScanner

$$Kr^* + F_2 \xrightarrow{h\nu} KrF^* + F$$



شكل (١١) مخطط مستويات الطاقة التنبذبية لليزر الاكسايمر

$KrF^* \rightarrow \lambda$=248 nm

$ArF^* \rightarrow \lambda$=193 nm

$XeF^* \rightarrow \lambda$=351 nm

$XEcl^* \rightarrow \lambda$=308 nm

ثالثاً: ليزر السائل Liquid Laser

لليزر السائل ما يتميز به عن كل من ليزر الحالة الصلبة وليزر الغاز، حيث تكمن الصعوبة في ليزر الحالة الصلبة في تحضير البلورة التي يجب ان تكون على قدر عالي من التجانس وبتركيز معين من الايونات الفعالة ولايمكن تغيير مواصفاتها بتغيير تركيز المادة العالة فيها. كذلك هناك احتمالية تلف البلورة بسبب الحرارة العالية التي قد تتعرض لها اثناء التشغيل، اما الغاز فانه لا يحتوي على قدر عالي من الذرات او الجزيئات الفعالة بسبب قلة كثافة الغاز، لذلك اختيرت السوائل او محاليل المواد المختلفة حيث يحوي السائل على كثافة عالية من الذرات او الجزيئات الفعالة التي يمكن تغيير تركيزها بسهولة

Scanned with CamScanner

كذلك يكون تحضير السائل الفعال سهلاً ورخيصاً ويتم التعامل معه ببساطة. هناك الكثير من المواد العضوية التي تشكل محاليلها اوساط ليزر فعالة منها مادة الصبغة (محلول صبغة عضوية معينة في سائل مذيب معين مثل سائل أثيل الكحول او مثيل الكحول او الماء يشكل وسطاً فعالاً لليزر السائل ويدعى بليزر الصبغة. اكتشف هذا النوع عام ١٩٦٥ من قبل الباحث سوروكين ومجموعته من خلال تجاربهم على ايجاد محلول صبغة يمكن استخدامه كماص قابل للتشبع في عملية احكام عامل النوعية Q-witching.

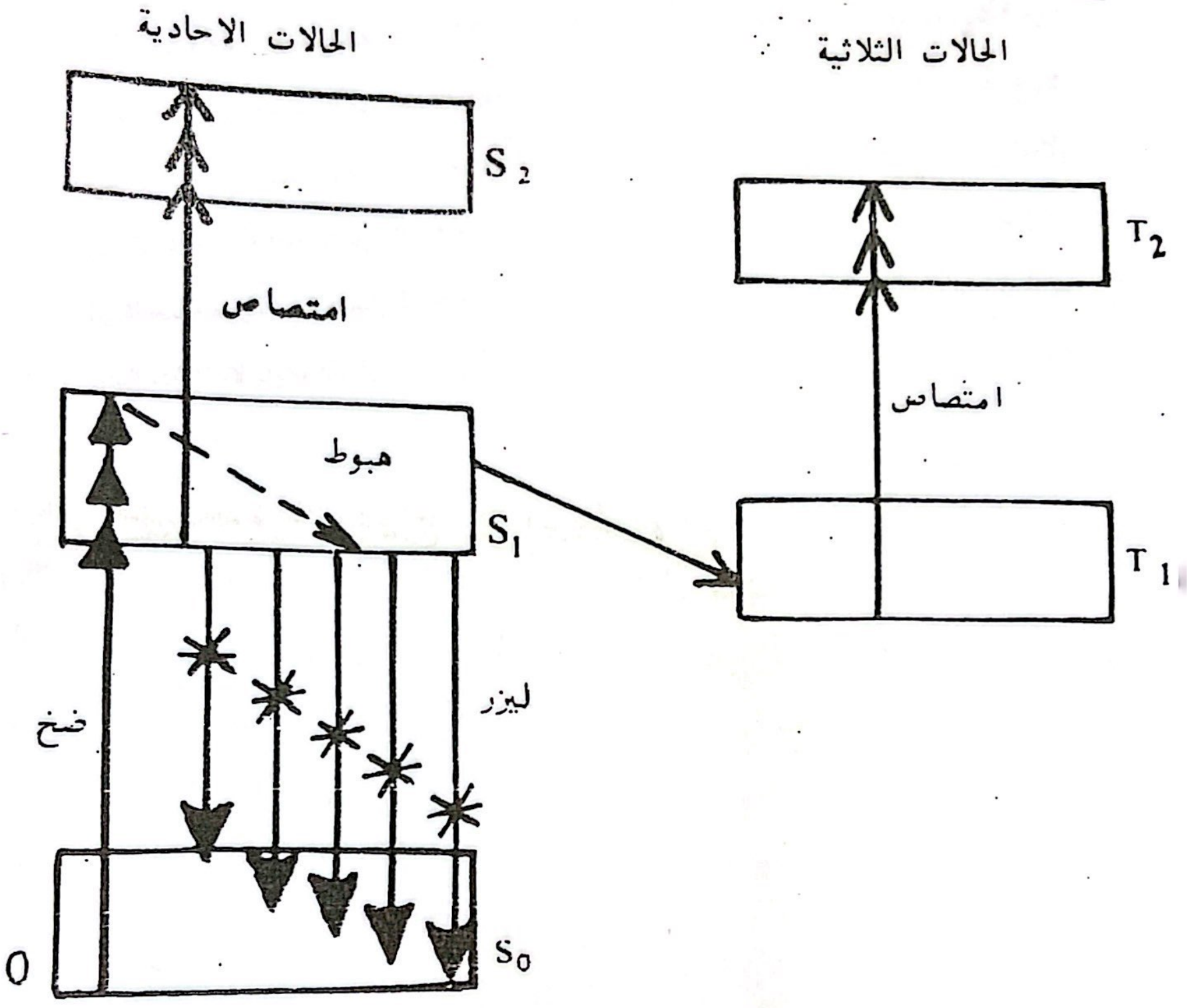
تصنف الصبغة عادة الى مجاميع حسب طول الموجة لمدى الاشعاع الذي تبعثه حيث تبعث كل مجموعة مدى معين من الطيف يتراوح مجمله ولجميع المجاميع مابين µm (0.4-1). هذه المجاميع هي: أصباغ البوليميثان والتي لها مدى انبعاث µm (0.7-1) واصباغ الكانثين ويقع انبعاثها بين µm (0.5-0.7) واصباغ الكومارين ويقع انبعاثها بين µm (0.4-0.5) والاصباغ التلألؤية ويقع انبعاثها بطول موجة حوالي (0.4 µm).

بسبب امكانية موالفة طول الموجة لجمل نطاق انبعاث الطيفي لهذا النوع من الليزر وبطريقة بسيطة سهلة ولمدى لا باس به من طول الموجة فقد لعب ليزر الصبغة دوراً مهماً في كثير من التطبيقات مما ساعد ايضاً على تطوره المستمر، ومن اهم هذه الحقول حقل ابحاث علم الاطياف والكيمياء الضوئية وفي عملية فصل النضائر.

تكون جزيئة الصبغة العضوية كبيرة ومعقدة، تذوب في بعض المذيبات المعروفة ولها قدرة امتصاص عالية ولنطاق عريض من مدى الطيف الواقع في الجزء المرئي او البنفسجي من الضوء الساقط عليها ولهذا السبب تتم اثارة محاليل هذه المواد بواسطة الضخ البصري باستخدام مصابيح ومضية او باستخدام ليزر الحالة الصلبة، اما الضوء المنبعث عن هذه المحاليل فيغطي مدى طيفي واسع نسبياً ويعتمد هذا على المذيب وعلى تركيز الصبغة ويكون طيف الانبعاث مزاحاً بعض الشئ عن طيف الامتصاص ونحو الموجة الاطول.

Scanned with CamScanner

تعتبر صبغة رودامين (6G) مادة نموذجية شائعة الاستعمال في ليزر السائل، هذه الصبغة تتصف بوجود عدد من الخطوط المزدوجة وهو سر فعالية هذه المواد، يطلق على هذه الازواج في الربط (الربط الثنائي الاقترابي). اما سبب هذا النطاق العريض للامتصاص والانبعاث لجزيئة الصبغة فيتبين من دراسة الشكل (١٢).



شكل (١٢): مستويات الطاقة ذات العلاقة بانتقالات الليزر لجزيئة الصبغة.

Scanned with CamScanner

يوضح هذا الشكل مخطط الطاقة لجزيئة صبغة عادية حيث يكون للجزيئة مجموعتان من حالات الطاقة. الحالات الاحادية (S_2, S_1, S_o) والحالات الثلاثية (T_2, T_1) فالاولى تحدث عندما يكون البرم الكلي للالكترونات المحرضة في كل جزيئة مساوية الى الصفر اما الحالات الثلاثية فتحدث عندما يكون البرم الكلي مساوياً الى واحد. وكما نعلم ان الانتقال بين الحالات الاحادية والحالات الثثية او العكس ممنوع حسب قواعد الانتقاء لثنائي القطب الكهربائي فاغلبية الانتقالات المسموحة تتم بين الحالات الاحادية وايضاً فيما بين الحالات الثلاثية. ان تهيج جزيئة الصبغة يتم بارتقاء الجزيئة من الحالة الارضية S_o الى الحالة المهيجة S_1 كما تحدث انتقالات سريعة غير مشعة في المستويات المختلفة للحالة S_1 والى اوطا مستوى لها. اما انتقالات الليزر فتتم بين اوطا مستوى للحالة S_1 والمستويات المتوسطة للحالة S_o ولما كان هناك مستويات طاقة دورانية وتذبذبية عديدة لكل من S_1 & S_o لذا يكون لانتقالات الليزر

Scanned with CamScanner

نطاق عريض. ان الحالات الثلاثية للجزيئة لا تدخل بشكل مباشر في عمل الليزر ولكن تاثيرها عمله سلبي. فهناك احتمالية صغيرة لحدوث الانتقال الممنوع $S_1 \rightarrow T_1$ ولما كان الانتقال $T_1 \rightarrow S_o$ ممنوعاً ايضاً فان الجزيئات تزداد في المستوى T_1 لكن الانتقال من T_1 الى T_2 مسموحا ويحدث بتردد مطابق تقريباً لتردد انبعاث الليزر وهذا غير مستحسن اذ حالما يتواجد جزء ملحوظ من الجزيئات التي تنتقل من المستوى S_1 الى T_1 فان الامتصاص من المستوى T_1 الى T_2 يكون شديداً ويعمل بسرعة على تقليص ربح الليزر وبامكانه ان يوقف عملية الانبعاث المحفز. لهذا السبب تعمل بعض انواع ليزر الصبغة بشكل نبضي وبنبضة امدها اقصر من الزمن اللازم لتاهيل المستوى T_1 بمقدار ملحوظ. اضافة الى ذلك قد يحدث امتصاص بين الحالات الاحادية الاعلى (S_1 S_2) لبعض انواع ليزر الصبغة لذا يتم انتخاب الصبغة بحيث ان تردد هذه الانتقالات لاتقع في المدى ذات الاهمية.

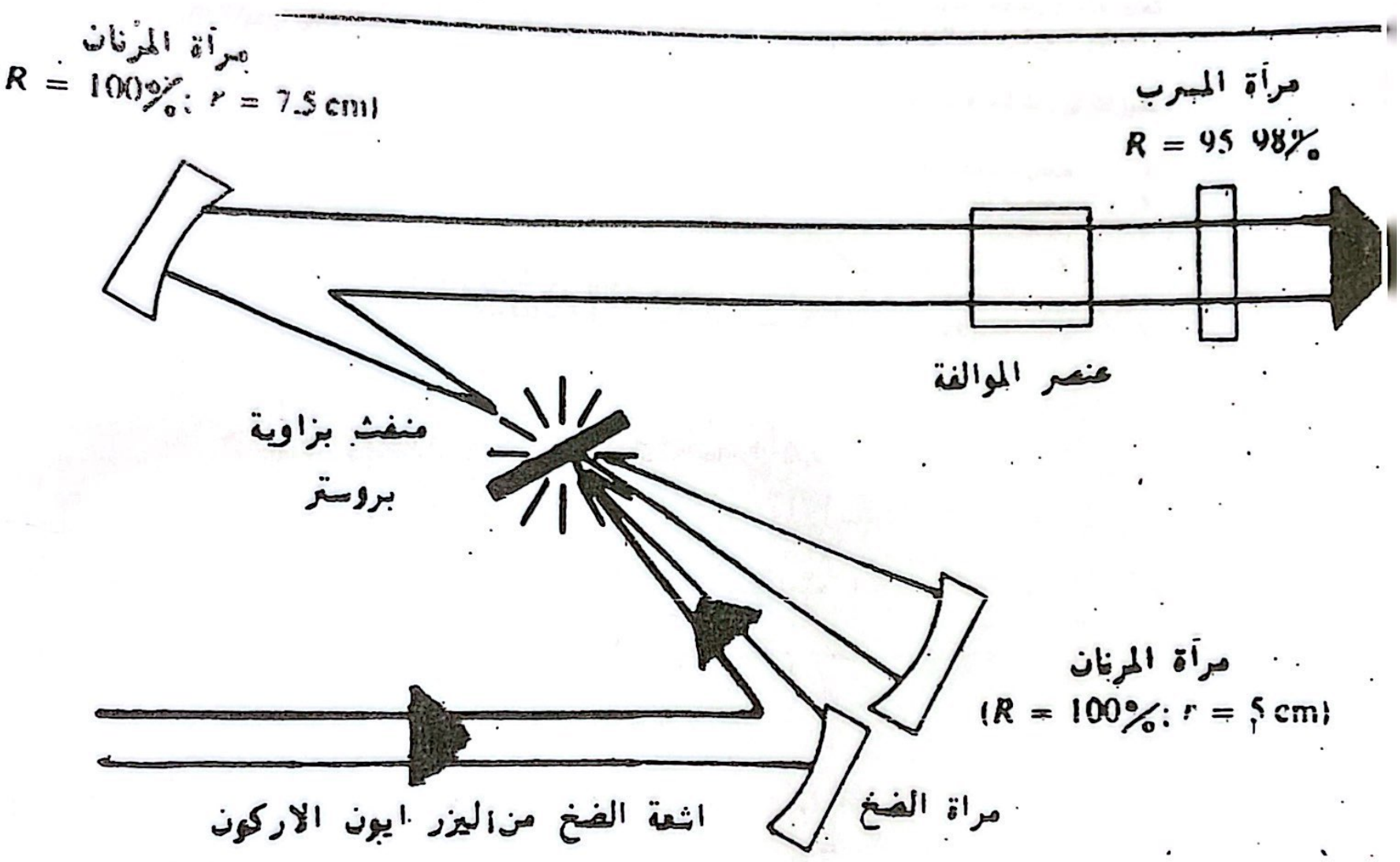
تضخ جميه انواع ليزر الصبغة بصريا ويكون طول الموجة للمصدر المستخدم للضخ اقل بقليل من طول موجة الانبعاث المحفز. يتم الضخ باستخدام المصابيح الوميضية وليزر غاز النتروجين وليزر الحالة الصلبة وليزر ايون الاركون وايضا ليزر ايون الكربتون. اما كيفية انتخاب المصدر فيعتمد على نطاق الامتصاص للصبغة المستخدمة ، للحصول على نتاج ذات موجة مستمرة CW يستخدم ليزر الغاز الايوني، اما بقية المصادر فتستخدم للحصول على نتاج نبضي.

تعتمد كفاءة ليزر الصبغة على نشاط المحلول الذي يتباطأ تدريجيا مع الزمن وكذلك بسبب ارتفاع درجة حرارته بسبب تشعيعه، لذا جعل محلول الصبغة يدور في حركة مستمرة بواسطة مضخة فيدفع المحلول خلال منفث (خرطوم دقيق يتدفق منه السائل بجريان طبقي) حيث يضخ بصريا وبنفس الوقت يبرد المحلول العائد بعد ضخه بصريا بالتبادل الحراري مع الماء الجاري. بهذه الطريقة امكن تشغيل سائل الصبغة بموجة مستمرة CW وفي درجة حرارة الغرفة وبنتاج قدرة تتراوح بين (10 mW- 1 W).

لليزر الصبغة اهمية في كثير من التطبيقات بسبب امكانية موافة الطول الموجة لنتاجه وتتم عملية الموالفة بوضع موشور في طريق اشعة الليزر او بتبديل احدى مرايا المرنان بمحزز عاكس الذي يعمل كمراة وعنصر تفريق في آن واحد، بتدوير المحزز (او المرآة في حالة الموشور) يمكن انتقاء اي طول موجي واقع

Scanned with CamScanner

في نطاق انبعاث الصبغة، ففي حالة استخدام محلول صبغة رودامين (6G) يقع نطاق الانبعاث في مدى يتراوح بين nm (550-600).



شكل (١٣): شكل تخطيطي لليزر الصبغة الذي يجري محلوله خلال منفث (عمودي على سطح الورقة) ويتم موالفة نتاجه بوجود عنصر تفريق يوضع في طريق اشعة الليزر وداخل المرنان ذاته.

باستخدام محليل صبغ مختلفة كوسط فعال يمكن الحصول على تنتاج يغطي الجزء المرئي للاشعاع الكهرومغناطيسي، ويتضح بان لمحلول صبغة رودامين (6G) اعلى كفاءة (20%) كذلك يتميز بنطاق انبعاث عريض. ان اعلى قدرة يعطيها محلول صبغة ما تعتمد على المحلول ذاته وعلى طول الموجة المستخدمة للضخ كذلك على ترتيب المرايا وطلائها وترصيفها.

Scanned with CamScanner

ليزر أشباه الموصلات *(SEMICONDUCTOR LASER)*

تم اكتشاف هذا النوع من الليزر عام ١٩٦١ وهو يعتبر من ليزرات الحالة الصلبة لأن الوسط الفعال عبارة عن مادة صلبة ولكنه ليس بلورة مطعمة بأيونات فعالة وإنما تركيب من مواد شبه موصلة مانحة *(n-type)* وقابلة *(p-type)* وتمثل حزمة التوصيل *(Conduction band)* مستوي الليزر العلوي وحزمة التكافؤ *(Valence Band)* مستوي الليزر السفلي ويتم الضخ من خلال تيار كهربائي يحرك الإلكترونات والفجوات ما بين هاتين الحزمتين.
تعتبر مادة زرنيخيد الكاليوم *(GaAs)* أكثر المواد شبه الموصلة التي تستخدم كقاعدة لتصنيع ليزرات أشباه الموصلات وهذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات يبعث في المنطقة تحت الحمراء القريبة حول الطول الموجي *(0.87μm)*.

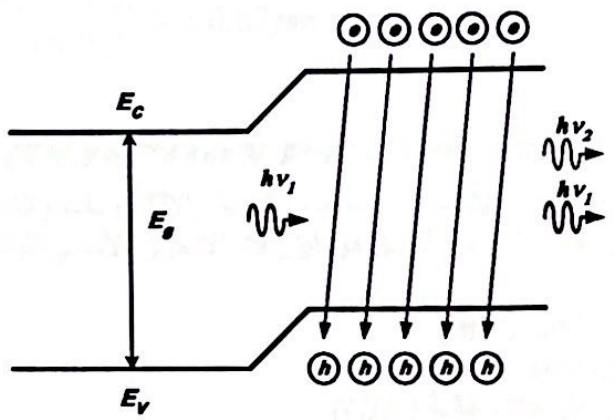
مميزات ليزرات أشباه الموصلات:

١. صغيرة الحجم *(50*10*300)μm*
٢. رخيصة الثمن
٣. يتم ضخها مباشرة باستخدام التيار الكهربائي
٤. كفاءتها عالية (تصل إلى *32%*)
٥. يمكن التحكم بشدة شعاع الليزر المنبعث من خلال التحكم بتيار الضخ الكهربائي
٦. يمكن تتغيم الليزر الخارج أي الحصول على أطوال موجية محددة من نفس الجهاز

Scanned with CamScanner

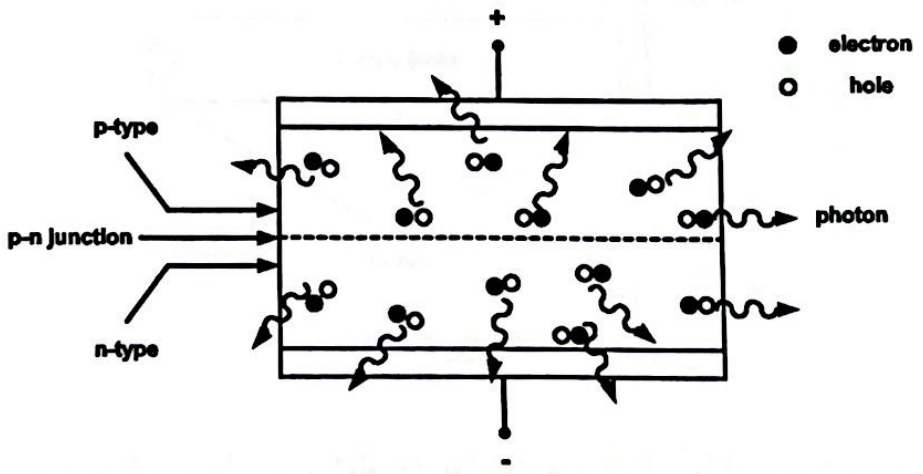
ليزرات ثنائي الوصلة *(P-N JUNCTION LASERS)*

عند سقوط موجة ضوئية (فوتون) يمتلك طاقة أكبر من فجوة الطاقة (E_g) للمادة شبه الموصلة فإن الإلكترونات *(electrons) (e)* تتهيج وتصعد من المستوي الأرضي (حزمة التكافؤ) إلى المستوي المتهيج (حزمة التوصيل) وتترك وراءها فجوات *(holes) (h)*. تبقى الإلكترونات في المستوي المتهيج فترة زمنية محددة تسمى فترة حياة المستوي أو عمر المستوي *(Level Lifetime)* وتنزل بعد ذلك إلى المستوي الأرضي مرة أخرى وتتحد مع الفجوات وتبعث إشعاع. وهذه العملية تمثل الانبعاث التلقائي.
إذا كانت الإلكترونات في المستوي المتهيج وسقط فوتون يمتلك طاقة تساوي فجوة الطاقة (E_g) فإن الإلكترونان تتحفز على النزول إلى المستوي الأرضي وتتحد مع الفجوات وتبعث إشعاع. وهذه العملية تمثل الانبعاث المحفز التي هي شرط توليد الليزر.



مخطط للمستويات الطاقية لليزر أشباه الموصلات ذي الوصلة الثنائية

هذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات ذات الوصلة الثنائية تعمل في حالة الانحياز الأمامي *(Forward Bias)* أي أن الطرف الموجب لمصدر الفولتية يربط إلى الجزء الموجب *(p-type)* والجزء السالب لمصدر الفولتية يربط إلى الجزء السالب لثنائي الوصلة *(n-type)*. وإن الوصلة الثنائية تمثل المنطقة الفعالة التي يتولد فيها وينبعث منها الليزر.



مخطط توضيحي لليزر أشباه الموصلات ذي الوصلة الثنائية

كما هو واضح من الشكل، فإن هنالك ٦ اتجاهات في تركيب الليزر يمكن أن تتجه إليها فوتونات الليزر المنبعثة هي:
إلى الأعلى وإلى الأسفل من منطقة الوصلة *(p-n junction)* وهذه الفوتونات يمتصها الجزء الموجب *(p-type)* والجزء السالب *(n-type)*.
بعيداً عن الوصلة الثنائية داخل وخارج مستوى الورقة وهذه الفوتونات لا تخرج بسبب جعل سطح التركيب صقيل يشبه المرآة.
إلى اليمين وإلى اليسار من الوصلة الثنائية وهذه الفوتونات يمكن أن تخرج على شكل حزمة ليزر.

Scanned with CamScanner

هذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات يعمل بالنمط النبضي فقط لأنه يحتاج إلى تيار انحياز أمامي عالي وكذلك بسبب ارتفاع درجة حرارة التركيب الذي يتلف الليزر. كما أن شعاع الليزر الخارج منها يكون متعدد النمط *(Multimode)*.
يعتمد الطول الموجي (λ) لشعاع الليزر المنبعث على قيمة فجوة الطاقة (E_g) للمادة شبه الموصلة وكالآتي:

$$\lambda = \frac{hc}{E_g}$$

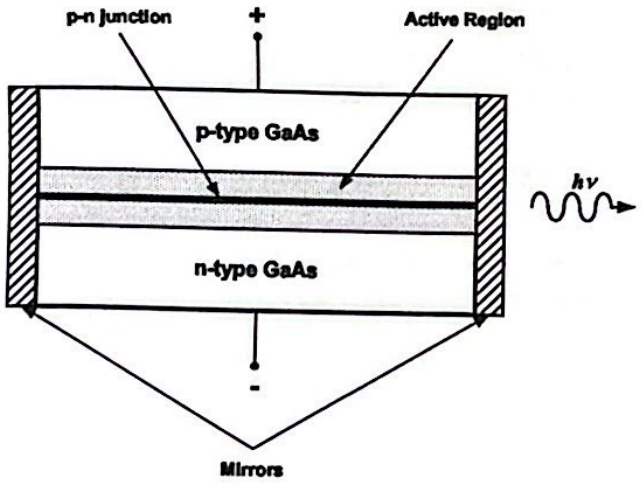
مثال: لحسب الطول الموجي المنبعث من ليزر زرنيخيد الكاليوم *(GaAs)* عند درجة حرارة الغرفة.
الحل:
عند درجة حرارة الغرفة تكون قيمة فجوة الطاقة لمادة زرنيخيد الكاليوم $(E_g=1.43eV)$ فيكون

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} = \frac{6.63\times10^{-34}\,J.s\times3\times10^{8}\,m/s}{1.43eV\times1.6\times10^{-19}\,J} = 0.87\,\mu m$$

ليزرات الحقن *(INJECTION P-N JUNCTION LASERS)*

في هذا النوع من ليزرات أشباه الموصلات يتم حقن حاملات الشحنة (الإلكترونات والفجوات) إلى داخل المنطقة الفعالة لغرض زيادة تركيز فوتونات الليزر المنبعثة وهي أفضل من ليزرات الانحياز الأمامي للوصلة الثنائية بما يلي:

١. قدرة الليزر الخارجة تكون أعلى *(mW)*
٢. عرض خط الانبعاث يكون أضيق *(10-9m)*
٣. قابليتها على التضمين أكبر بترددات عالية *(GHz)*
٤. كفاءة الانتقال داخل الألياف البصرية أعلى



مخطط لليزر الحقن

يتم ضخ ليزر أشباه الموصلات بواسطة ليزر أشباه موصلات آخر ذي طول موجي أقصر مثل ضخ ليزر *InSb* ذي الطول الموجي *(5.3μm)* بواسطة ليزر *GaAs* ذي الطول الموجي *(0.84μm)*. كما يمكن استخدام حزمة سريعة من الإلكترونات تضرب المادة شبه الموصلة وتولد أزواج إلكترون-فجوة التي تتحد مع بعضها فتبعث شعاع الليزر.

حسابات الكفاءة لليزرات أشباه الموصلات:
تحسب الكفاءة الكمية الكلية (η_T) لليزر أشباه الموصلات كالآتي:

$$\eta_T = \eta_D\left(1-\frac{I_{th}}{I}\right)$$

حيث η_D الكفاءة الكمية الخارجية و I_{th} تيار العتبة و I تيار الحقن.

Scanned with CamScanner

أما كفاءة منظومة الليزر (η_{ep}) فتعطى كالآتي:

$$\eta_{ep} = \eta_T(\frac{E_g}{V}) \times 100\%$$

حيث E_g قيمة فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة و V الفولتية المسلطة على جهاز الليزر.

مثال: احسب كفاءة جهاز ليزر أشباه الموصلات نوع $GaAs$ إذا كانت قيمة تيار العتبة تساوي $(10^{-6}A)$ وقيمة تيار الحقن يساوي أربعة أضعاف قيمة تيار العتبة و الكفاءة الكمية الخارجية (90%) والفولتية المسلطة تساوي $(4V)$ عند درجة حرارة الغرفة.

الحل:

عند درجة حرارة الغرفة قيمة فجوة الطاقة لمادة $GaAs$ تساوي $(E_g=1.43eV)$ إذن

$$\eta_T = \eta_D(1-\frac{I_{th}}{I}) = 0.9\times(1-\frac{I_{th}}{4I_{th}}) = 0.675$$

$$\eta_{ep} = \eta_T(\frac{E_g}{V}) \times 100\% = 0.675\times(\frac{1.43}{4}) \times 100\% = 24.13$$

هنالك أنواع أخرى حديثة من ليزرات أشباه الموصلات تستخدم بكثرة في الوقت الحاضر في منظومات الاتصالات البصرية وهي:

١. ليزر فابري-بيرو *(FP)*
٢. ليزر التغذية الخلفية الموزعة *(DFB)*
٣. ليزر حيود عاكس براك *(DBR)*
٤. ليزر اقتران الحجرة الملصوقة *(CCC)* أو (C^3)
٥. ليزر بئر الجهد الكمي *(QW)*
٦. ليزر بئر أو آبار الجهد الكمية المتعددة *(QW & MQW Lasers)*

ليزرات *DFB* و *DBR* و *CCC* تعمل بنمط واحد (منفرد) *(Single-mode)* وهذه المسألة مهمة جداً في الاتصالات البصرية لأنها تقلل من الضوضاء *(Noise)* وتحسن كفاءة عمل منظومة الاتصالات.

Scanned with CamScanner