



الجمهورية العربية السورية
هيئة الطاقة الذرية

هـ ط ذ س- ف/ ت ن ب ع 391
تشرين الأول 2007

تقرير نهائي عن بحث علمي
قسم الفيزياء

تبدیل الجودة المنفعل Passive Q-Switching في ليزر CW-CO2 المستمر بواسطة
غاز ماص قابل للإشباع (SF6) ضمن المجاوب

الدكتور شريف الحواط

هـ ط ذ س- ف/ ت ن ب ع 391

المساعدون في العمل:

السيد خير المتعب - عضو هيئة فنية

ساهم في وضع برنامج حاسوبي بلغة الفورتران لنموذج رياضي معروف لتنفيذ الحسابات العددية لظاهرة تبديل الجودة المنفعل لليزر CO_2 المستمر القابل للتوليف في غاز SF_6 . كما ساهم في تجميع دارة الخلاء الخاصة بخلية الغاز الماص . وفي إجراء التجارب على غاز SF_6 للحصول على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل.

السيدان سامي شحادة و يامن بلول- عضوا هيئة مخبرية

ساهما في تهيئة الليزر وملحقاته لإجراء التجارب الخاصة بالبحث وفي تهيئة النتائج رقمياً لتصبح قابلة للمعالجة على الحاسوب.

المحتويات

4	1. مستخلص
5	2. مقدمة
6	3. المواد والطرائق والقياسات
6	1.3 البناء التجريبي
7	2.3 نموذج تبديل الجودة المنفعل
7	1.2.3 النموذج الحركي للمادة الماصة SF_6
8	2.2.3 معادلات الاقتران بين الماص ووسط التضخيم
9	3.3 الحل العددي
10	4.3 مطيافية الامتصاص خارج المجاوب
10	5.3 مطيافية الامتصاص داخل المجاوب
12	4. النتائج
12	1.4 النتائج التجريبية
12	1.1.4 ظاهرة تبديل الجودة المنفعل في SF_6
14	2.1.4 ظاهرة تبديل الجودة المنفعل بدلالة الضغط في المزيج $SF_6 + Xe$
19	3.1.4 ظاهرة تبديل الجودة المنفعل بدلالة الضغط في المزيج $SF_6 + He$
24	2.4 التواتر التكراري لنبضات الليزر بدلالة ضغط الغاز المضاف (الهليوم أو الكزينيون)
24	3.4 طاقة النبضة بدلالة التواتر التكراري
25	4.4 نتائج الحسابات العددية
28	4.4 مقارنة القياسات التجريبية بالحسابات العددية
29	5. 4 معاملات امتصاص غاز SF_6 بدلالة الضغط على الخطوط 10P داخل المجاوب
30	6.4 معاملات امتصاص غاز SF_6 بدلالة الضغط على الخطوط 10P من خارج المجاوب
30	7.4 المقاطع العرضية لامتصاص الخطوط 10P في غاز SF_6
31	5. المناقشة
32	6. الخاتمة
33	7. توصيات وكلمة شكر
33	8. المراجع

1. مستخلص

جرى الحصول على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل باستخدام غاز SF_6 في ليزر CO_2 مستمر قابل للتوليف ، ذي استطاعة خرج حوالي 3.5 W . ودرست الظاهرة (شكل النبضة وعرضها الزمني ودورها التكراري وشروط توليدها) على الخطوط الطيفية التالية : 10P (10) , 10P (26) , 10P (28) , 10P(30) تحت ضغوط لغاز SF_6 وصلت حتى 0.5 mbar ، كما أضيف كل من غاز الهليوم He والكزنيون Xe على انفراد إلى غاز SF_6 للتحكم بشروط تحقيق ظاهرة تبديل الجودة المنفعل. ولوحظ ذلك جلياً في حالة إضافة غازي الكزنيون والهليوم بما يخص تغيير التواتر التكراري للنبضات الحاصلة وطاقة النبضة وعرضها الزمني.

وجرى تطبيق نمذجة حاسوبية على الظاهرة من أجل وسطاء الليزر والثوابت الفيزيائية المستخدمة للعمليات الحاصلة ضمن شروط التجربة، في حالة المزيج SF_6+He وقورنت النتائج المحسوبة والتجريبية ولوحظ وجود تباين غير كبير بينهما .

بالإضافة إلى ذلك، قيس أيضاً معاملات امتصاص الخطوط الطيفية 10P ، في حالتين هما: حالة خلية الغاز خارج المجاوب الليزري، وحالة الخلية داخل المجاوب. وحسبت على أساسها المقاطع العرضية للامتصاص وقورنت مع المقاطع العرضية المأخوذة من قاعدة المعطيات NIST .

Abstract

A passive Q-switching was applied to a tunable CW CO_2 laser with output power about 3.5 W using SF_6 as a saturable absorber inside the cavity. The Q-Switching phenomenon was studied (pulse shape, pulse duration, repetition rate and conditions of its generation) at the spectral lines of 10P(10), 10P(26), 10P(28) and 10P(30) from the branch of 10P of CO_2 laser. These lines had a weak absorption in relation to other lines of this branch, under SF_6 pressure till 0.5 mbar. To control the behaviour of such phenomenon, the gases He and Xe were added separately to SF_6 . It was observed that the Q switching phenomenon was depended on the added gas pressure of Xe and He, through the repetitive rate of pulses , duration and energy of generated laser pulse.

A computational program was written to calculate the Q-switching pulses parameters under similar conditions as those applied in the case of SF_6+He mixture. A comarision was made with the experimental data , not so big discrepancies were observed between them.

In addition to that, absorption coefficients of SF_6 were determibned in two cases: the first one when the absorption cell was located outside the laser cacvity, and the second one when the cell was located inside the cavity. On the basis of obatained coefficients the absorption cross sections of SF_6 were found and compared with NIST database.

2. مقدمة

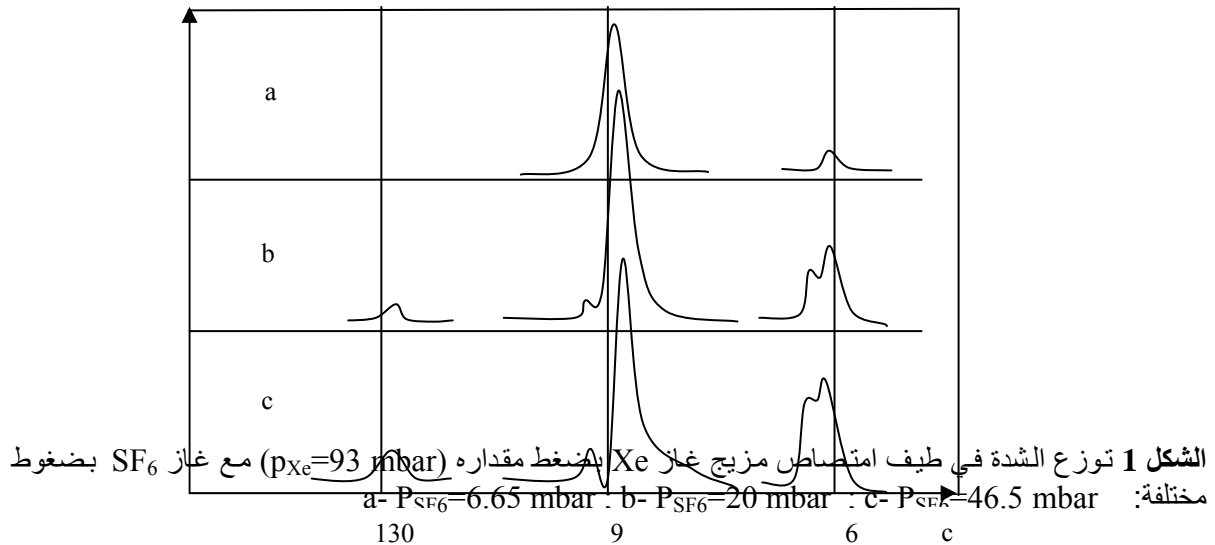
من المعروف أن طريقة تبديل الجودة "Q-switching" تستخدم في الحصول على نبضات قصيرة ذات استطاعة عالية للإشعاع الليزري، حيث تعود Q إلى معامل جودة المجاوب فعندما يكون المجاوب ذا معامل فقد صغير، فجودة المجاوب تكون عالية والعكس صحيح، من هنا يرجع تبديل الجودة إلى التغير في معامل فقد المجاوب. إذا كان معامل الفقد كبيراً عند ضخ الوسط الليزري (كهربائياً أو ضوئياً أو ... الخ) فإنه يعيق الفعل الليزري، حتى ولو حصل إسكان كبير جداً للسوية الليزرية العليا، فحقل الإشعاع الموجود داخل الخلية لا ينمو عن طريق الإصدار المحثوث بسبب أن معامل الكسب لم يصل إلى مرحلة الإشباع و عند مواصلة الضخ فإن معامل الكسب يتزايد إلى قيمة كبيرة جداً. الآن إذا تم فجأة إنقاص معامل الفقد إلى حد يسمح بحصول إهتزازة ليزرية فيكون قد تم الحصول على معامل كسب أكبر بكثير جداً من كسب العتبة، ونتيجة لذلك فإن الشدة الإشعاعية داخل المجاوب تتزايد بسرعة عالية إلى قيمة كبيرة جداً مؤدية إلى نمو كبير في معدل الإصدار المحثوث، من هنا يتم استخلاص سريع للطاقة معطياً إشعاعات ليزرية نبضية قصيرة و شديدة [1].

تم القيام بتبديل الجودة المنفعل في ليزر CO₂ مستمر ذي استطاعة قدرها 5 W ، طول وسطه الفعال 250 cm و قابل للتوليف بموشور، بإدخال غاز SF₆ تحت ضغط قدره 1 Torr في خلية موضوعة داخل المجاوب طولها 10 cm ، وبنتيجه ذلك تم الحصول على نبضات قصيرة عرضها 20 ns و استطاعة ذروتها تتراوح في المجال ما بين 10-100 kW ، وحصل على قطار من النبضات طوله يتجاوز 100 μsec ، على الخططين الطيفيين (10P(24), 10P(20) [2].

كما جرى دراسة شكل النبضات الناتجة عن وجود نوعين من الغازات كوسط ماص قابل للإشباع داخل المجاوب هما SF₆ و BCl₃ بضغظ يتراوح ضمن المجال 50 - 120 μTorr يمزجان مع غاز He في خلية طولها 10 cm . ووضع نموذج نظري لدراسة هذه الظاهرة، في حالة توليد قطار من النبضات، و أظهر جانب من هذه الدراسة الدور الرئيس للاسترخاءات الدورانية لجزيئات الغاز الماص في تحديد مميزات نبضات الخرج ، أما الليزر المستخدم فكان ليزر CO₂ مستمر ذي استطاعة قدرها 5 W ، طول وسطه الفعال 70 cm و قابل للتوليف بشبكة انعراج [3]. من جهة أخرى تم الحصول على هذه الظاهرة في حالة ضغوط مرتفعة ضمن المجال 200-800 Torr لمزيج غازي مكون من غاز SF₆ و غاز He موضوعين في خلية داخل المجاوب طولها 0.8 cm و شدة إشعاعية مرتفعة قدرها 1kW/cm² باستخدام ليزر CO₂ مستمر ذي استطاعة قدرها 1 W مولف بشبكة انعراج على الخطوط (10P(28), 10P(20), 10P(16) [4].

وأمکن أيضاً الحصول على هذه الظاهرة باستخدام نوع آخر من الغازات ألا وهو CH₃F كوسط ماص قابل للإشباع في خلية طولها 121 cm داخل المجاوب لليزر CO₂ مستمر قابل للتوليف بشبكة انعراج طول وسطه الفعال 148 cm و استطاعة خرج قدرها 1 W . ووضع نموذج نظري لمعادلات معدل الوسط الماص و معادلات معدل الوسط الليزري (الوسط الفعال)، وتم حل هذه المعادلات عددياً . لقد أتاح هذا النموذج الحصول على مميزات الوسط الماص مثل معامل الامتصاص و على مميزات هذه الظاهرة مثل الشدة الإشعاعية و مقارنتها مع النتائج التجريبية على الخط الطيفي 9P(20) [5].

عند استخدام غاز SF₆ للحصول على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل، جرى مزجه مع غازات خاملة مثل غازي Xe و He بنسب معينة. تبين الدراسات أن لهذا الغاز ثلاثة خطوط امتصاص 615 cm⁻¹ و 947 cm⁻¹ و 1280 cm⁻¹ . وإن أقوى الخطوط هو الخط 947 cm⁻¹ الموافق للخط الطيفي 10P(16)، من إصدارات ليزر CO₂ كما في الشكل 1 ، حيث كانت استطاعة الليزر 10 W [6].



من ناحية أخرى تم الحصول على أنظمة تشغيل جديدة لليزر CO₂ مستمر باستخدام أبخرة غاز CH₃OH كوسط ماص قابل للإشباع داخل المجاوب [7].

كذلك الأمر تمت دراسة ديناميكية إصدار ليزر CO₂ مستمر قابل للتوليف ذي استطاعة قدرها 1 W شملت معامل الكسب للوسط الفعال، ومعامل امتصاص الغاز SF₆ بضغط قدره 0.1 Torr مضافاً إليه غاز CO₂ بضغط قدره 0.5 Torr كغاز حامل [8].

كما تم إحداث هذه الظاهرة بطريقة مختلفة عن الطرائق السابقة ، وهي طريقة نفث دفقات سريعة من غاز البروبان C₃H₈ داخل المجاوب [9].

تبين الدراسات أن التركيز والاهتمام قد عادا إلى دراسة ديناميكية الإصدار الليزري في ليزرات CO₂ المستمرة عن طريق تبديل الجودة المنفعل فيها، بعد أن ظنَّ لفترة أنها كانت مقتصرة على الليزرات النبضية من أمثال ليزر TEA-CO₂. وتقوم أهم طرق تبديل الجودة المنفعل هنا على إدخال مادة ماصة قابلة للإشباع داخل المجاوب كوسيلة فاعلة في تحقيق ظاهرة تبديل الجودة المنفعل ، ولقد تبين أيضاً أنه يوجد العديد من الغازات القابلة للاستخدام في تحقيق ذلك ومن أهمها: SF₆ , BCl₃ , CH₃F , CH₂OH .

الغاية من هذا العمل هي: تحقيق ظاهرة تبديل الجودة المنفعل على ليزر CO₂ مستمر قابل للتوليف بغية الحصول على خرج نبضي متمثلاً بنبضة واحدة أو قطار من النبضات متحكم بعرضها الزمني وشدتها باستخدام مزيج من غازي SF₆ والكزنيون Xe بضغط مختلف في خلية داخل المجاوب على خطوط إصدار ليزر CO₂ مستمر قابل للتوليف مختلفة. وتطبيق نمذجة رياضية يجري فيها الحل العددي لجملة المعادلات التفاضلية الحاكمة للوسط الليزري و المادة الماصة وفق شروط التجربة لتفسير النتائج التجريبية الحاصلة.

3. المواد والطرائق والقياسات

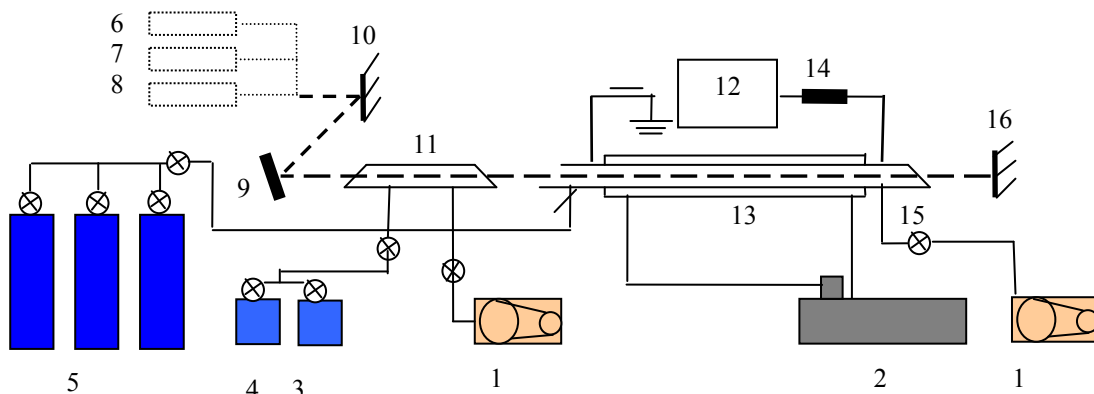
1.3 البناء التجريبي

جرى تهيئة منظومة الليزر لإجراء التجارب بعد تأمين الأجهزة والتجهيزات اللازمة التي ركبت واختبرت وهي:

- مضخة تخلية أولية بمرحلتين من نوع Tow stages rotary vane vacuum pump- RZ16 ، سرعتها 318 l/min واستطاعتها 0.55 kW ودرجة الخلاء التي تؤديها 2×10^{-3} mbar .
- عناصر خلاء متنوعة: أنابيب معدنية مرنة، صمامات دقيقة، وصلات خلاء مختلفة.
- مقياس خلاء من نوع PIZA 1000 يقيس حتى 10^{-5} mbar ، استطاعته 15 W .
- كاشف أشعة ليزر CO₂ وهو من نوع زئبق - كادميوم - تيلوريوم MCT- HgCdTe يبرد بالآزوت السائل و يقيس ضمن المجال الطيفي 5-12 μ m (من شركة Polyte, Germany) .
- ثلاث أسطوانات من غازات الـ SF₆ والكزنيون Xe والهليوم He.
- تصنيع هيكل حامل لقطع الخلاء في منظومة التخلية الخاصة بخلية الغاز SF₆ المتوضعة داخل مجاوب الليزر.

- تركيب منظومة التخلية الخاصة بدراسة مفعول تبديل الجودة المنفعل
- تهيئة الليزر للعمل وفق الشكل 2.

جرى تركيب واختبار دارة تشكيل نبضات تبديل الجودة المنفعل من حيث الخلاء الذي قدره 2.10^{-3} mbar والتزود بغازي SF₆ و Xe بالإضافة إلى تهيئة الليزر للعمل وإجراء بعض التعديلات على دارة تزويده بغازات الوسط الفعال CO₂:N₂:He. أجريت التجارب على تبديل الجودة المنفعل باستخدام ليزر CO₂ مستمر قابل للتوليف، طول وسطه الفعال 0.86 m وطول مجاوبه 2.8 m ، يعمل على جهد تشغيل حوالي 6 kV و تيار قدره 18 mA ضمن مزيج الغازات CO₂:N₂:He بنسب 1:2:4 بضغط كلي قدره 18 mbar .

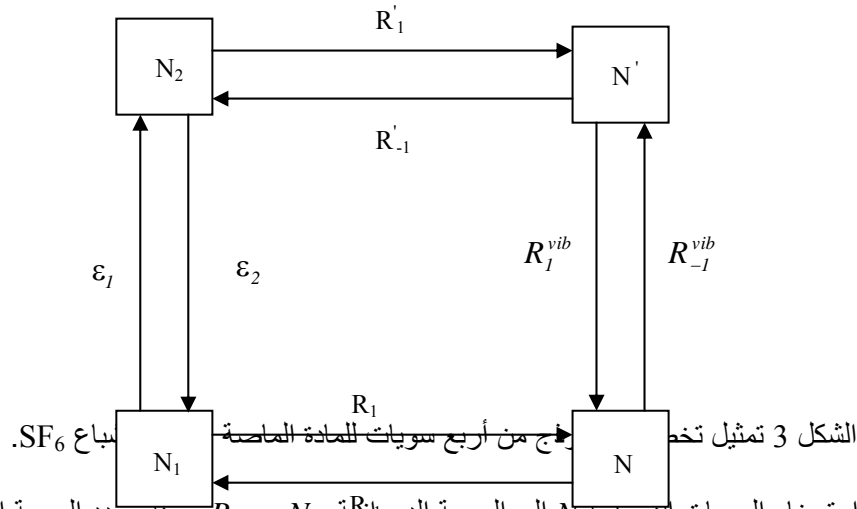


الشكل 2 المخطط التجريبي لمنظومة تبديل الجودة المنفعل بليزر CO₂ مستمر قابل للتوليف ويتألف من:
 1- مضخة خلاء، 2 - وحدة تبريد بالماء، 3- أسطوانة غاز Xe أو He، 4 - أسطوانة غاز SF₆، 5 - أسطوانات غازات CO₂، N₂، He، 6 - كاشف MCT، 7 - مقياس استطاعة، 8 - محلل طيفي، 9- شبكة إنعراج 100g/mm، 10- مرآة مستوية عاكسة كلياً، 11- خلية الغاز الماص، 12-وحدة التغذية الكهربائية 15kV و 20mA، 13- الوسط الفعال، 14- مقاومات كبح التيار، 15- صمامات، 16-مرآة عاكسة كلياً .
 يتشكل التجويف الليزري في هذا الليزر من شبكة انعراج ومرآة مغطاة بالذهب انعكاسيتها 98.9% . ويمكن ضبط شبكة الانعراج لتعطي خطأ ليزرياً واحداً. وتتمرر الحزمة عبر محلل طيفي خاص بليزر CO₂ Spectrum Analyzer, Optical Engineering, USA) لمعرفة الخط الطيفي وطول موجته، مع العلم أن استطاعة خرج الليزر العظمى بلغت حوالي 3.6 W. وتتوضع خلية امتصاص طولها 0.48 m في التجويف الليزري مزودة بنوافذ بروسنر مصنعة من مادة BaF₂ وموصلة بدارة التزود بالغاز SF₆. وتسجيل نبضات الخرج الليزري المتولدة عن مفعول تبديل الجودة المنفعل استخدم الكاشف الذي سبق ذكره مع راسمة Hameg 150MHz مزودة ببرنامج لربطها بالحاسوب الشخصي.

2.3 نموذج تبديل الجودة المنفعل

1.2.3 النموذج الحركي للمادة الماصة SF₆

تقسم في هذا النموذج جزيئات المادة الماصة إلى أربع مجموعات: المجموعتان الأولى والثانية وفيهما N₂, N₁ الكثافتان العديتان للجزيئات في السويتين الاهتزازيتين الدورانيتين 1 و 2 المتفاعلتين مع الحقل الليزري، والمجموعتان الثالثة والرابعة وفيهما N', N تمثلان الكثافتين العديتين لكل الجزيئات المتبقية في الحالتين الأرضية والمثارة المرتبطتين بالسويتين الدورانيتين 1 و 2 على التوالي. ويبين الشكل 3 مخططاً تمثيلاً لهذه السويات [10].



حيث R_{-1} معدل استرخاء السويات الدورانية N إلى السوية الدورانية N_1 ، و R_1 معدل تبدد السوية الدورانية N_1 إلى بقية السويات N في الحالة الأرضية. ويمكن التعبير عن هذين الوسيطين بدلالة وسيطين آخرين هما R و β على النحو التالي:

$$R_1 = R$$

$$R_{-1} = \frac{\beta}{1-\beta} R \quad (1)$$

حيث R هو معدل تبدد الجزيئات N_1 إلى السويات الدورانية الأخرى في الحالة الأرضية و β هي الجزء المتوازن من الجزيئات في السوية الدورانية للماص. وكما هو واضح في الشكل 3، يمثل ϵ_1 معدل إثارة السوية الدورانية العليا في الماص، و ϵ_2 هو معدل الإصدار المحثوث من السوية N_2 إلى السوية N_1 ، وهما تعبير عن تفاعل المادة الماصة مع الحقل الليزري.

حيث المقدار N_2 يعبر عن كثافة الإسكان للسوية الاهتزازية الدورانية العليا للعنصر الماص أما المقدار N' فيعبر عن كثافة الإسكان للسويات الدورانية المقترنة معها في نفس السوية الاهتزازية العليا، حيث R'_{-j} معدل الاسترخاء الدوراني للسويات N' نحو السوية N_2 و R'_j معدل تبديد السوية N_2 إلى بقية السويات N' . المعامل $R_{vib} = 10^5 s^{-1}$ هو معدل الاسترخاء الاهتزازي من السوية N' إلى السوية N ، حيث N' يعبر عن كثافة الإسكان للسوية الاهتزازية العليا للعنصر الماص

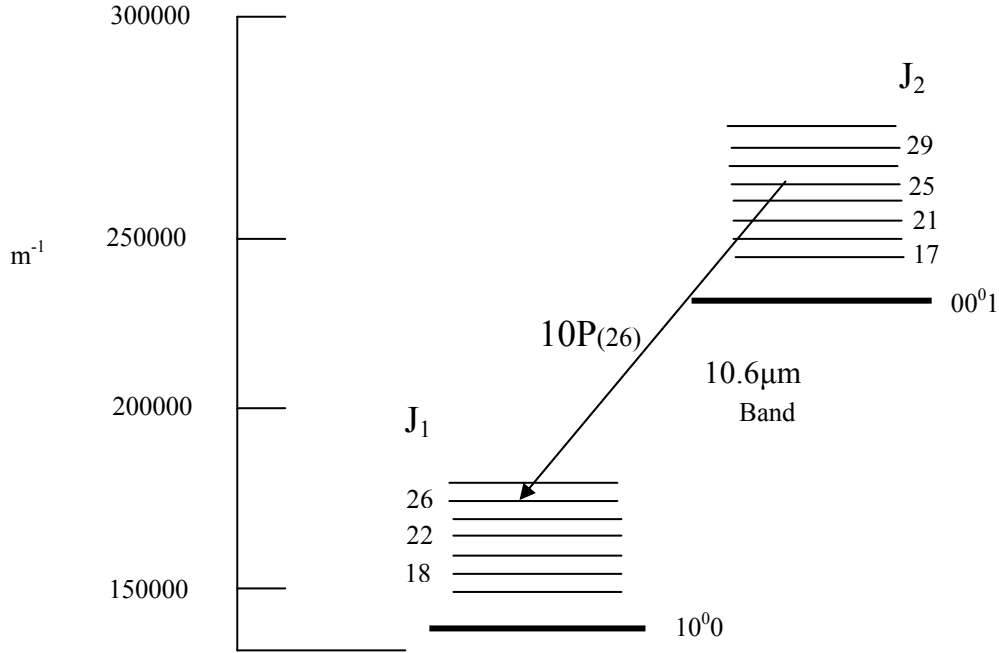
2.2.3 معادلات الاقتران بين الماص ووسط التضخيم

إن دراسة تبديل الجودة المنفعل لجملة ماص – ليزر تعطى على النحو التالي [10-13]:

- (1) يؤخذ حدا الإصدار التلقائي والضخ للحصول على نبضات متكررة .
- (2) يعالج الليزر على أساس أخذ كثافة الإسكان المعكوس للسويتين المتفاعلتين M وكثافة الإسكان المعكوس للسويات الأخرى مجتمعة M' ، ونفترض أن M و M' تخضعان لقانون المعدل التالي:

$$\frac{dM'}{dt} = R_{CO_2} M - \frac{\beta_j}{1 - \beta_j} R_{CO_2} M' \quad (2)$$

حيث يعبر عن الإسكان المعكوس بالفرق بين إسكاني السويتين العليا والدنيا أي $M = M_2 - M_1$ و $M' = M'_2 - M'_1$ وستكون (2) محققة، عندما يكون للحالتين الدنيا والعليا نفس الوسيطين R_{CO_2} و β_j .



الشكل 4 مخطط السويات الدورانية المشاركة في الفعل الليزري.

ويوصف عمل الليزر بالمتحولات الزمنية التالية:

ϕ كثافة الفوتونات، M الإسكان المعكوس المسبب للإصدار المحثوث و M' الإسكان المعكوس لكل السويات الدورانية الأخرى، وفي الجانب الآخر يوصف الماص بالمتحولات الزمنية N_1, N_2, N, N' . وإن التغير الزمني لهذه المتحولات يُعبر عنه بجملة المعادلات التفاضلية المقترنة فيما بينها التالية:

$$\frac{dM}{dt} = - \frac{4 \alpha_0^{CO_2} l c}{\beta_j L} M \phi + \frac{\beta_j}{1 - \beta_j} P - R_{CO_2} M + \frac{\beta_j}{1 - \beta_j} R_{CO_2} M' \quad (3)$$

$$\frac{dM'}{dt} = P - \frac{\beta_j}{1 - \beta_j} R_{CO_2} M' + R_{CO_2} M \quad (4)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\alpha_0^{co_2} lc}{\beta_j L} M \phi - \frac{c}{L} \left\{ \gamma_c + \frac{\sigma_0^{abs} d}{\beta} \left(N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right) \right\} \phi + M.S \quad (5)$$

حيث يعبر المعامل γ_c عن ثابت الفقد الجزئي للفوتونات، ولمرور واحد داخل التجويف الليزري، و يساوي إلى 0.25 ؛ أما المعاملان $d=0.48$ m, $l=0.86$ m ، فيعبران عن طولي الوسطين الفعال والماص على الترتيب؛ و $L=2.8$ m فهو طول المجاوب ؛ و أما $\alpha_0^{co_2} = 0.424 \times 10^{-21} \text{m}^2 \text{molecule}^{-1}$ و $\alpha_0^{abs} = 0.848 \times 10^{-21} \text{m}^2 \text{molecule}^{-1}$ فهما المقطعان العرضيان لامتناص الوسطين المضخم و الماص على الترتيب؛ المعاملان $g_2 = 1, g_1 = 3$ هما الوزنان الإحصائيان للسويتين الاهتزازيتين في الوسط الماص و $c = 3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ سرعة الضوء؛ يبين الحد $M.S$ مساهمة الإصدار التلقائي في كثافة الفوتونات، ويعطى المعامل $S = 10^{-5} \text{s}^{-1}$ الذي هو معدل الإصدار التلقائي في الوسط الفعال، الذي يؤدي الدور الرئيسي للإصدار التلقائي، ألا وهو منع كثافة الفوتونات من الهبوط حتى الصفر تماماً بعد زوال النبضة؛ أما المقدار $\beta_j = 0.067$ فهو الثابت الدوراني للمضخم والمقدار $P = 6.23 \times 10^{24} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$ [5] فيعبر عن معدل الضخ أما المقدار $R_{co_2} = 4 \times 10^7 \text{s}^{-1}$ فيعبر عن معدل الاسترخاء الدوراني لجزيئة CO₂ . وتعطى معادلة المعدل للسوية N_1 بالعلاقة:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{\alpha_0^{abs} dc}{\beta L} \left(\frac{g_1}{g_2} N_2 - N_1 \right) \phi + \frac{\beta}{1-\beta} RN - RN_1 \quad (6)$$

حيث المقدار N_1 يعبر عن كثافة الإسكان للسوية الاهتزازية الدورانية الدنيا للعنصر الماص، أما المقدار N فيعبر عن كثافة الإسكان للسويات الدورانية المقترنة معها في نفس السوية الاهتزازية الدنيا ، $\beta = 1 / 300$ هو الثابت الدوراني للعنصر الماص، أما المعامل $R = 0.77 \times 10^6 \text{s}^{-1}$ فهو معدل استرخاء السوية N_1 إلى السويات N . وتعطى معادلة المعدل للسوية N_2 بالعلاقة:

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{\alpha_0^{abs} dc}{\beta L} \left(N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right) \phi - R'N_2 \quad (7)$$

حيث المقدار N_2 يعبر عن كثافة الإسكان للسوية الاهتزازية الدورانية العليا للعنصر الماص أما المقدار N' فيعبر عن كثافة الإسكان للسويات الدورانية المقترنة معها في نفس السوية الاهتزازية العليا، حيث R'_1 معدل الاسترخاء الدوراني للسويات N' نحو السوية N_2 و R'_1 معدل تبديد السوية N_2 إلى بقية السويات N' . ويعبر عن معدلي الإثارة ε_1 والإصدار ε_2 في المعادلتين (6) و (7) بالعلاقتين: $\varepsilon_1 = \alpha_0^{abs} N_1 dc \phi / L\beta$ و $\varepsilon_2 = \alpha_0^{abs} N_2 g_1 dc \phi / L\beta g_2$ ، وتعطى معادلة المعدل للسويات N بالعلاقة:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\beta}{1-\beta} RN + RN_1 + R_{vib} N' \quad (8)$$

المعامل $R_{vib} = 10^5 \text{s}^{-1}$ هو معدل الاسترخاء الاهتزازي من السوية N' إلى السوية N ، حيث N' يعبر عن كثافة الإسكان للسوية الاهتزازية العليا للعنصر الماص الذي تعطى وفق العلاقة:

$$\frac{dN'}{dt} = R'N_2 + R_{vib} N' \quad (9)$$

يمثل الحد $\frac{d\alpha_0^{abs}}{\beta} \left(N_1 - \frac{g_1}{g_2} N_2 \right)$ الضياع المتعلق بالزمن بالإضافة إلى الحد γ_c ، وتكون المادة الماصة مرتبطة بالليزر عبر المقدارين N_2, N_1 .

3.3 الحل العددي

تمثل المعادلات (3)-(9) جملة معادلات تفاضلية لاخطية من المرتبة الأولى مقترنة مع بعضها ، التي جرى حلها عددياً باستخدام طريقة رونج – كوتا، عن طريق كتابة برنامج بلغة الفورتران، وتنفيذه على الحاسوب الشخصي PC ، باستخدام Microsoft Compiler . نفذت الحسابات على الخط (26)P10 تحت ضغط للغاز الماص SF₆ قدره

ومن ثم إضافة غاز Xe أو He إلى أن أصبح الضغط الكلي لمزيج الغازين حوالي 3.5×10^{-2} mbar .
 3.5×10^{-1} mbar

ولقد استخدمت في الحسابات وسطاء الليزر التالية :

(1) أخذ معامل امتصاص CO_2 مساوياً $\alpha_0^{\text{CO}_2} = 0.424 \times 10^{-21} \text{m}^2 \text{molecule}^{-1}$. من أجل الخط (26) 10P.
(2) ربط الخط (26) 10P لليزر CO_2 بين السويتين الدورانيين $J_1=26$ في السوية الاهتزازية الدنيا 100° و $J_2=25$ في السوية الاهتزازية العليا 001° . وأن نسبة الجزيئات الشاغلة لكل من السويتين الدورانية J_1 و J_2 إلى مجموع الجزيئات الكلي في كل من السويتين الاهتزازيين 10^0 و 00^01 على التوالي، تعطى وسطياً من الحسابات مساوية للقيمة $\beta_r = 0.067$.

(3) أخذ المقدار $R_{\text{CO}_2} = 1.5 \times 10^7 \text{s}^{-1} \text{mbar}^{-1}$ وضغوط غير محددة لكل من He, N_2 في أنبوبة الانفراج.

(4) وأخذت قيمة ثابت الضياع (الفقد) في التجويف مساوية $\gamma_c = 0.25$.

(5) حساب معدل الضخ P من العلاقة $P = X_2 n_e N_{\text{CO}_2}$ ، حيث X_2 معدل إثارة السوية الليزرية العليا، n_e كثافة الإلكترونات، N_{CO_2} كثافة جزيئات CO_2 ، وعليه يساوي $P = 6.23 \times 10^{24} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$.

(6) أخذت قيمة معدل الاصدار التلقائي الفعال S مساوية 10^{-5}s^{-1} .

أما قيم وسطاء الماص فقد أخذت من دراسات سابقة للمادة SF_6 وفق مايلي:

(1) المقطع العرضي للامتصاص على الخط (26) 10P أخذ مساوياً $\alpha_0^{\text{SF}_6} = 0.848 \times 10^{-21} \text{m}^2 \text{molecule}^{-1}$.

(2) المقدار β يساوي $\beta = \frac{I}{300}$.

(3) أخذ الثابتان $R_l = R_l'$ متساويين، $R_l = 0.77 \times 10^6 \text{s}^{-1}$.

(4) استخدمت القيمة $R_{\text{vib}} / R_{\text{rot}} = 5 \times 10^{-4}$ وذلك بالاعتماد على التقدير $R_{\text{rot}} = 3 \times 10^7 \text{s}^{-1} \text{mbar}^{-1}$ من أجل الاسترخاء الدوراني لجزيئة SF_6 عن طريق He .

4.3 مطيافية الامتصاص خارج المجاب

تتمتع الجزيئات غير المتناظرة بوجود عزم ثنائي قطب كهربائي ، أي أنه يمكن الحصول على انتقالات اهتزازية ضمن الجزيء . يحصل امتصاص للأشعة تحت الحمراء على الجزيء عندما تتوافق كمية الطاقة الواردة مع إحدى الطاقات الاهتزازية- الدورانية للجزيء، وينتقل الجزيء من حالته الأساسية المستقرة إلى حالة عليا مثارة.

وكلما كان عزم ثنائي القطب الكهربائي كبيراً، ضمن رابطة أو مجموعة روابط كلما كانت شدة الامتصاص أكبر.

ويمكن إيجاد معامل الامتصاص من قانون بيير - لامبير الذي يربط بين شدتي الليزر الواردة والنافذة عبر الوسط الماص المتوضع في خلية خارج المجاب الليزري بالعلاقة [15,14] :

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)l_c] \quad (10)$$

حيث $I_0(\lambda)$ و $I(\lambda)$ شدتا الليزر قبل المادة الماصة وبعدها ، $\alpha(\lambda)$ معامل الامتصاص، ويعطى بالعلاقة $\alpha(\lambda) = \sigma(\lambda)N$ ؛ $\sigma(\lambda)$ يرمز للمقطع العرضي للامتصاص ، وترمز N لتركيز الغاز المدروس ، أما l_c فهو طول خلية الغاز الماص.

5.3 مطيافية الامتصاص داخل المجاب

تعتمد طريقة الكشف عن الامتصاص من داخل المجاب ذات الحساسية العالية جداً على تعلق استطاعة الخرج الليزري بمفايد الامتصاص داخل التجويف الليزري.

ويمكن تعيين امتصاص الإشعاع الليزري من داخل المجاب خلال انتشاره عبر خلية غاز متوضعة في التجويف الليزري (الشكل 1) بواسطة استطاعة الخرج الليزري المتناقصة مع ضغط الغاز في الخلية.

يمكن لطريقة الامتصاص من داخل المجاب رفع حساسية الكشف بمقدار عدة مراتب بالمقارنة مع طريقة المرور الواحد في خلية امتصاص متوضعة خارج التجويف.

ففي شروط الحالة المستقرة، تتعلق الشدة الليزرية أساساً باستطاعة الضخ وتبلغ قيمة عندما يساوي الكسب المشبع إلى المفاهيم الكلية.

إذا ما أدخلت مفاهيم إضافية $\Delta\gamma = \alpha(k)\ell_c$ بواسطة الغاز الماص، حيث $\alpha(k)$ هو معامل الامتصاص للغاز الماص في الخلية على العدد الموجي k ؛ ℓ_c هو طول الخلية؛ التغير النسبي لاستطاعة الخرج الليزري هي $\Delta P / P_0$ التي يعبر عنها وفقاً لـ [16] بالعلاقة:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{G_0}{G_0 - \gamma} \frac{\Delta\gamma}{\Delta\gamma + \gamma} \quad (11)$$

حيث أخذ التقريب أحادي النمط الليزري للحالة التي نحن بصدها؛ P_0 استطاعة الخرج الابتدائية لليزر بدون وجود أي غاز في الخلية؛ γ الجزء المتبقي من مفاهيم التجويف الكلية؛ G_0 هو الكسب غير المشبع للوسط الفعال لليزر ويعطى بالعلاقة [17,16]:

$$G_0 = \tau_u \sigma_{CO_2}(k) P_r \ell_m \quad (12)$$

حيث $\tau_u = 186 \mu\text{sec}$ وهو زمن السوية الليزرية العليا (001)؛ $\sigma_{CO_2}(\kappa)$ المقطع العرضي للامتصاص لجزيئة CO_2 ؛ ℓ_m طول الوسط الفعال؛ $P_r = X_u n_e n_0$ معدل ضخ السوية الليزرية العليا؛ X_u معدل إثارة السوية الليزرية العليا؛ n_e الكثافة الإلكترونية؛ n_0 كثافة الغاز.

وحسب معدل الضخ $P_r = 0.288 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}^{-1}$ باستخدام معدلات الإثارة الاهتزازية الإلكترونية، والكثافة الإلكترونية المحسوبة من الكود [18]، المطبق على حالة الليزر المستخدم هنا تحت شروط التشغيل من ضغط وحقل كهربائي ونسبة مزيج غازي. بينما أخذت قيمة $8.439 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ ($\kappa = 944.21 \text{ cm}^{-1}$) σ_{CO_2} من أجل الخط 10.6 μm وفق [19].

بعدئذ نفذت القياسات التجريبية لمعاملات الامتصاص بدلالة تغيرات الاستطاعة التي سجلت بدلالة ضغط الغاز في خلية الامتصاص. واستخرجت العلاقة بين $\alpha(\kappa)$ و ΔP من (11) والعلاقة $\Delta\gamma = \alpha(\kappa)\ell_c$ لتصبح:

$$\alpha(\kappa) = \frac{(G_0 - \gamma)\gamma \Delta P}{P_0 G_0 - (G_0 - \gamma)\Delta P} \frac{1}{\ell_c} \quad (13)$$

حيث يعرف $\Delta P = P_0 - P$ من قياس استطاعة الخرج الليزري P بدلالة ضغط الغاز في خلية الامتصاص. لتنفيذ هذه القياسات رفع الضغط حتى بلغ الخرج الليزري القيمة الصفرية. لاستكمال القياسات على أطوال موجية أخرى، كان علينا توليف الليزر على الخط المطلوب، خاصة كون الليزر من النوع القابل للتوليف، على الخطوط الموزعة على الفروع 9R, 9P, 10P, 10R. ومن استطاعة الخرج المقاسة P والقيمة المحسوبة G_0 من (6)، جرى تعيين قيم معاملات الامتصاص من أجل كل قيمة للضغط حسب العلاقة (7). ومن ثم القيم المتوسطة لمقاطع الامتصاص العرضية للغاز SF_6 حسب النتائج الحاصلة لمعاملات الامتصاص بدلالة الضغط وتركيز الغاز N حسب العلاقة [14]:

$$\sigma(\kappa) = \frac{\alpha(\kappa)}{N} \quad (14)$$

إن لمطابفة الامتصاص داخل المجاوب الليزري العديد من التطبيقات منها الكشف عن الانتقالات الجزيئية في غازات الجو وغيرها.

ويمكن بواسطتها تأمين تزامن تواتر الليزر مع خطوط امتصاص الذرات في أنبوبة الانفراغ الكهربائي الموضوعه داخل المجاوب الليزري.

يمكن للمادة الماصة الموضوعه داخل المجاوب الليزري إخماد أو إطفاء تواترات الليزر الموافقة لتواترات بعض خطوط الامتصاص.

كما يمكن استخدام هذه الطريقة أيضاً في التحكم بطيف خرج الليزر وذلك عبر التحكم بالضياعات داخل المجاوب. ويوضع ماص مشبع غازي في مجاوب الليزر يمكن الحصول على نظام تعديل الجودة المنفعل في الليزر، وبالتالي يمكن توليد نبضات ليزرية قصيرة ذات استطاعة عالية بتواتر تكراري معطى. وذلك عن طريق تغيير ضغط الوسط الغازي الماص.

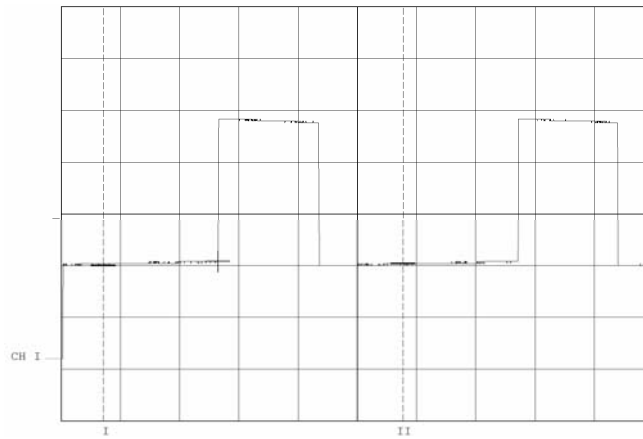
4. النتائج

1.4 النتائج التجريبية

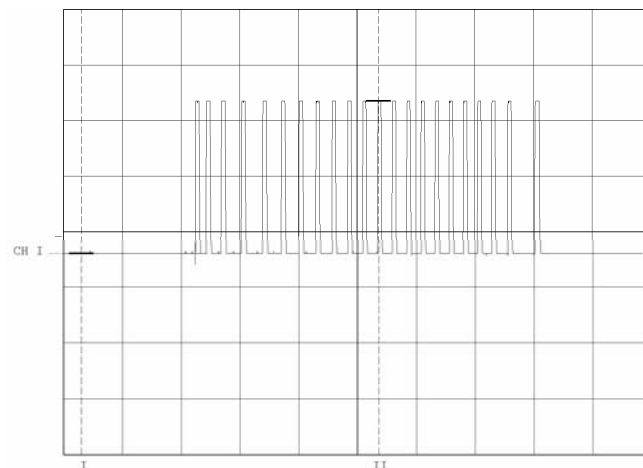
1.1.4 ظاهرة تبديل الجودة المنفعل في SF₆

عند شروط تشغيل الليزر في المزيج CO₂:N₂:He بنسب 1:1.5:4 وضغط كلي قدره 14 mbar، وتيار انفرغ 18 mA، وجهد حوالي 7 kV .

• على الخط 10P(10)

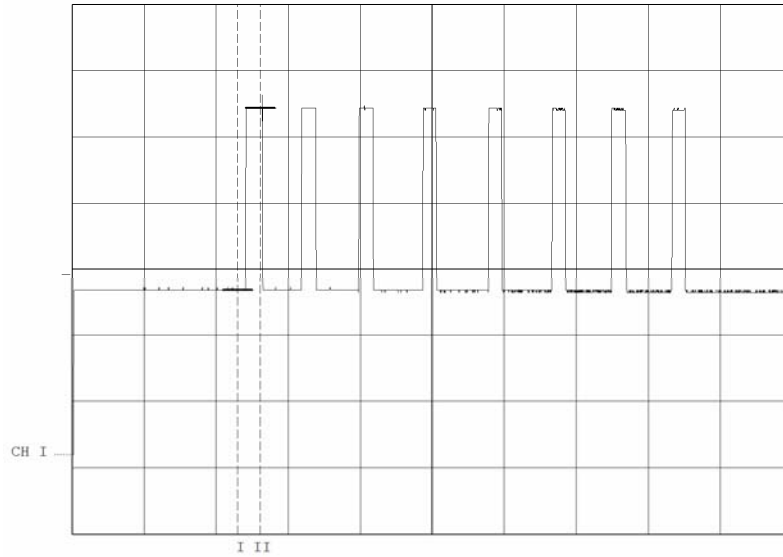


الشكل 5 نبضات الليزر على الخط 10P(10) المتولدة عن تقطيع الحزمة بواسطة المقطع عند استطاعة خرج قدرها 1.0 W قبل التقطيع والتي انخفضت إلى 0.4 W بعد التقطيع بتواتر قدره 100 Hz. وبلغ ضغط الخلاء حوالي 3×10^{-7} mbar، بدون إدخال الغاز SF₆ إلى الخلية. التدرجة الأفقية الواحدة = 2 ms والتدرجة الشاقولية الواحدة = 10 V. عرض النبضة الليزرية يساوي حوالي 4 ms ، وطاقتها 4 mJ .



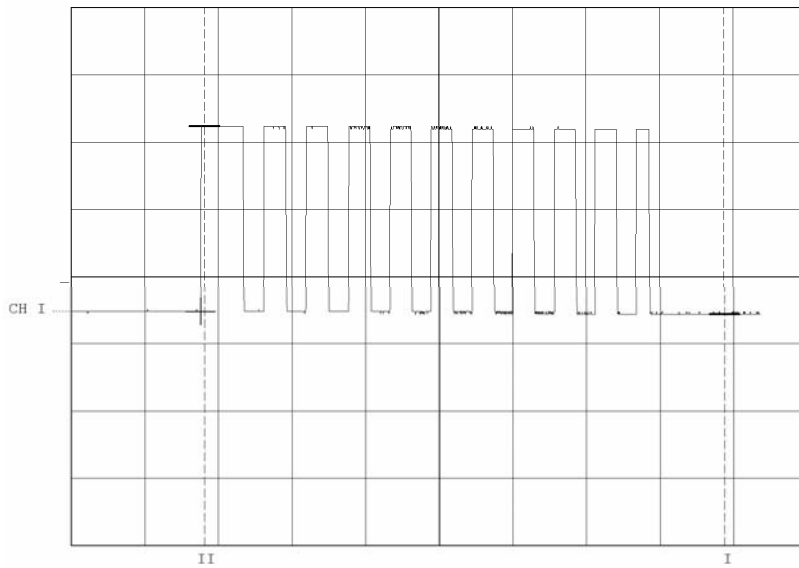
الشكل 6 نبضات الليزر على الخط 10P(10) عند استطاعة وسطية قدرها 0.4 W ، بتواتر تقطيع قدره 100 Hz. عند ضغط SF₆ قدره 4.5×10^{-2} mbar في الخلية. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل 500 μs. التواتر التكراري = 7.33 kHz ، و طاقة النبضة = 47.75 μJ .

• على الخط 10P(26)



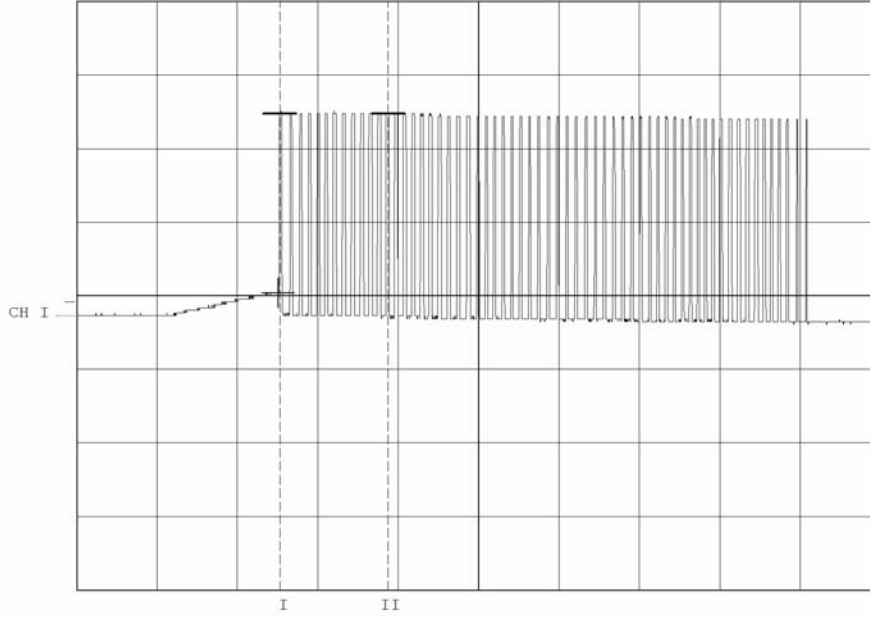
الشكل 7 نبضات الليزر على الخط 10P(26) عند استطاعة وسطية قدرها 0.4 W بتواتر تقطيع 50 Hz. لدى إدخال غاز SF₆ إلى الخلية بضغط قدره 4.5x10⁻² mbar وهو الضغط الذي ظهرت عنده إشارة QS. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل 500μs ، التواتر التكراري = 2.67 kHz ، وطاقة النبضة = 149.81 μJ.

• على الخط 10P(28)



الشكل 8 نبضات الليزر على الخط 10P(28) عند استطاعة وسطية قدرها 0.4 W بتواتر تقطيع 100. لدى إدخال غاز SF₆ إلى الخلية بضغط قدره 4.5x10⁻² mbar. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل 500μs . التواتر التكراري = 3.67 kHz ، و طاقة النبضة = 87.2 μJ .

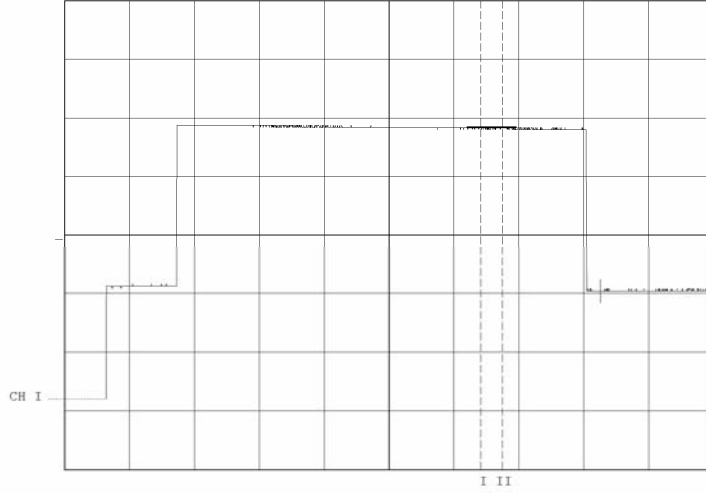
• على الخط 10P(30)



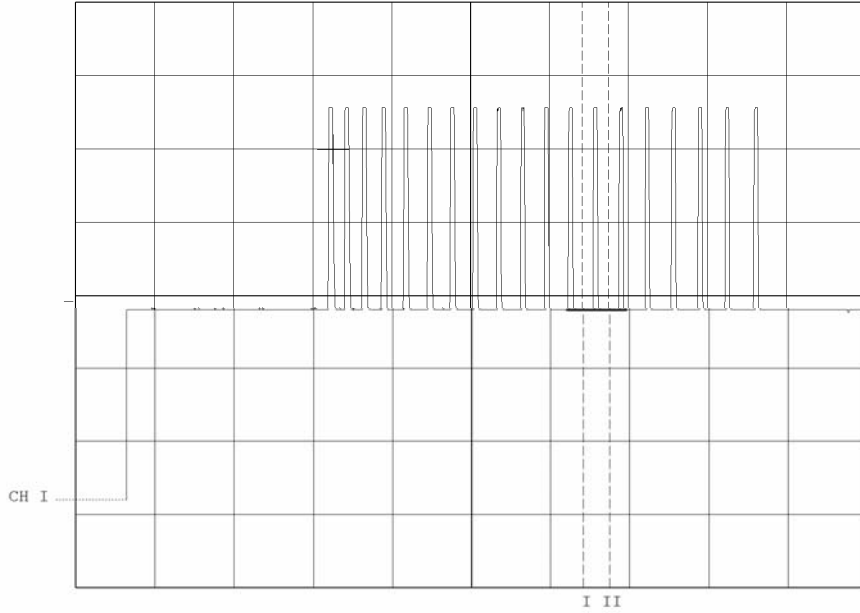
الشكل 9 نبضات الليزر على الخط 10P(30) عند استطاعة وسطية قدرها 0.2 W لدى تقطيعها بتواتر 25 Hz (وهو تواتر اختياري). لدى إدخال غاز SF₆ إلى الخلية بضغط قدره 4.5×10^{-2} mbar وهو الضغط الذي ظهرت عنده إشارة QS . التدرجة الأفقية الواحدة تساوي 500μs، التواتر التكراري = 20.33 kHz ، وطاقة النبضة = 9.84 μJ .

2.1.4 ظاهرة تبديل الجودة المنفعل بدلالة الضغط في المزيج SF₆ + Xe

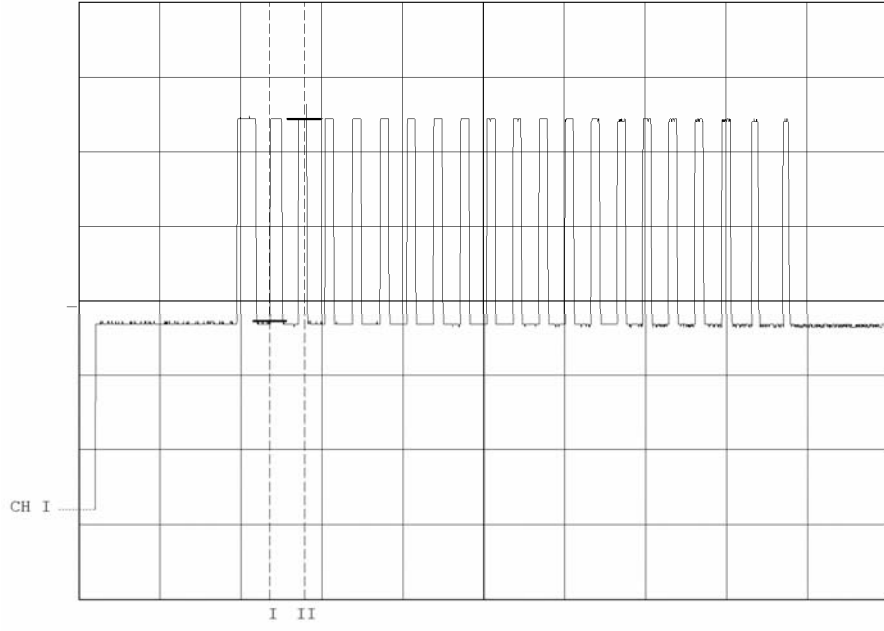
عند شروط تشغيل الليزر السابقة، مع ضغط كلي 15 mbar ، وجهد حوالي 7.4 kV . تم التحقق من تأثير الكزينون كغاز إضافي إلى الغاز الأساسي SF₆ على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل.
على الخط 10P(26)



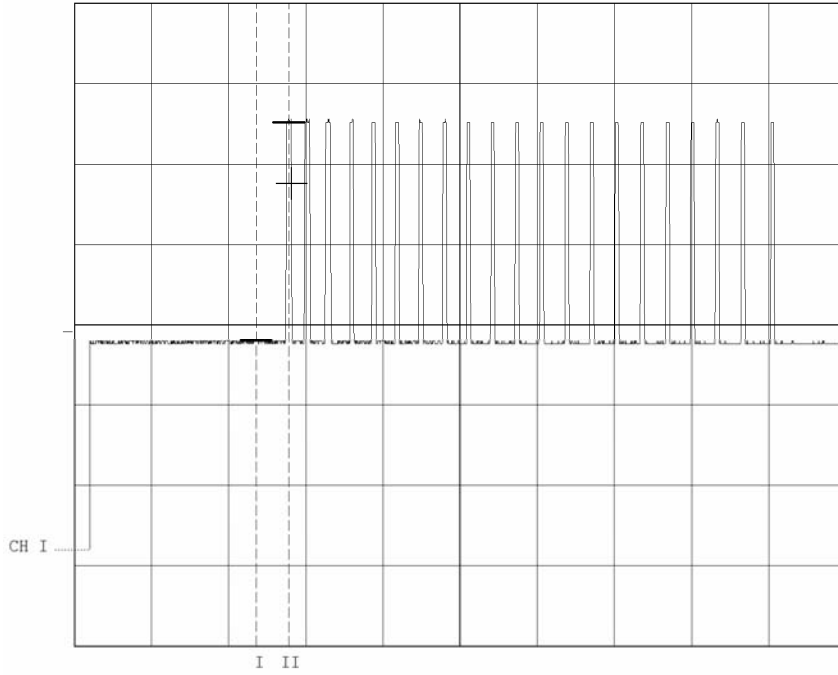
الشكل 10 نبضة الليزر على الخط (26)P10 المتولدة عن التقطيع الميكانيكي للحزمة الليزرية ، عند استطاعة خرج قدرها 1.7 W قبل التقطيع والتي انخفضت إلى استطاعة وسطية 0.5 W بتواتر تقطيع 100 Hz. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل 500 μ s والتدرجة الشاقولية الواحدة تقابل 10 V. طاقة نبضة الليزر الناتجة عن التقطيع = الاستطاعة المتوسطة لتواتر التقطيع = 5 mJ ، وعرض نبضة الليزر يساوي 3.125 ms .



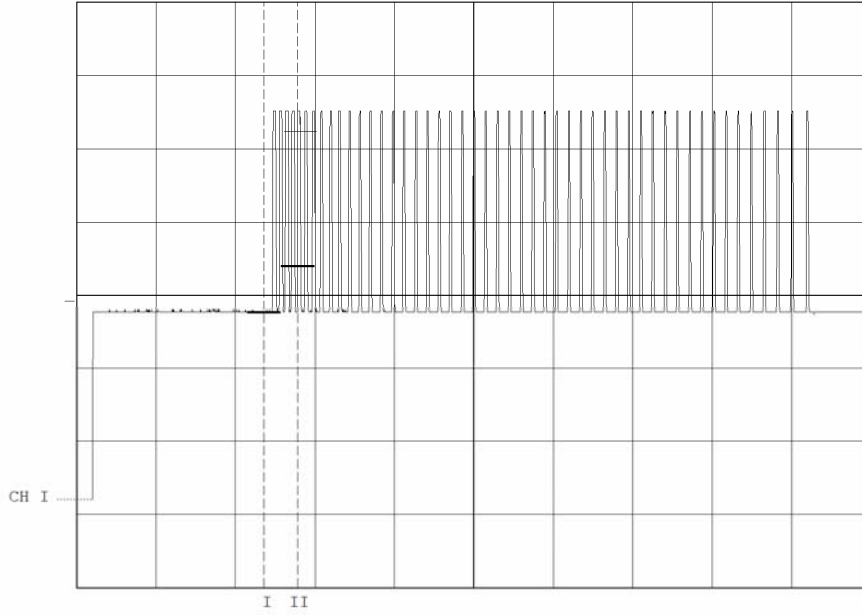
الشكل 11 نبضات الليزر على الخط (26)P10 عند استطاعة وسطية 0.5 W بتواتر تقطيع 100 Hz. مع إدخال غاز SF_6 بضغط 3.4×10^{-2} mbar وإضافة غاز Xe إلى أن أصبح الضغط الكلي للغازين 6.0×10^{-2} mbar ، وكان ضغط الخلاء 9.6×10^{-3} mbar. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل 500 μ s والتدرجة الشاقولية الواحدة تقابل 10 V. التواتر التكراري 6.33 kHz ، وطاقة النبضة 78.99 μ J.



الشكل 12 نبضات الليزر على الخط (26P10) عند استطاعة وسطية 0.5 W بتواتر تقطيع 100 Hz. و إضافة غاز Xe حتى أصبح الضغط الكلي للغازين 6.5×10^{-2} mbar. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu s$ التواتر التكراري 6.22 kHz ، و طاقة النبضة $80.39 \mu J$.

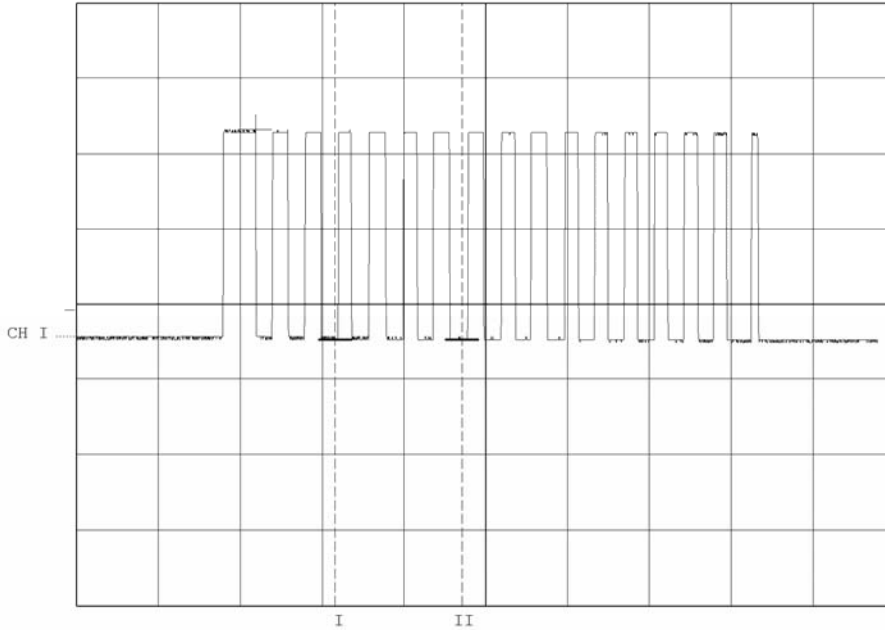


الشكل 13 نبضات الليزر على الخط (26P10) عند استطاعة وسطية 0.5 W بتواتر تقطيع 100 Hz. مع إضافة غاز Xe حتى أصبح الضغط الكلي للغازين 1.0×10^{-1} mbar. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu s$ ، التواتر التكراري 6.4 kHz ، و طاقة النبضة $78.13 \mu J$.

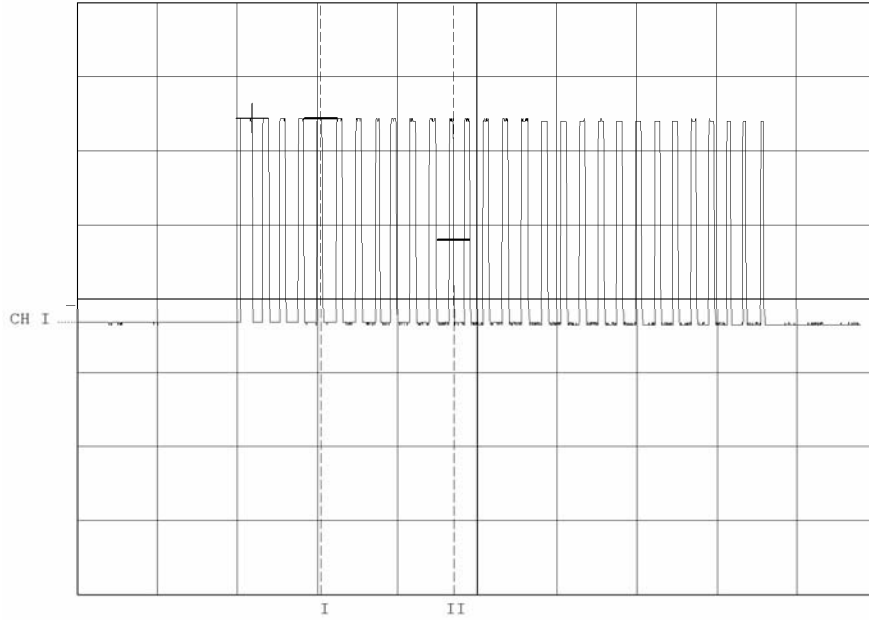


الشكل 14 نبضات الليزر على الخط (26P10) عند استطاعة وسطية و 0.5 W بتواتر تقطيع 100 Hz . مع إضافة غاز Xe حتى أصبح الضغط الكلي للغازين $3.5 \times 10^{-1} \text{ mbar}$. وأن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu\text{s}$. التواتر التكراري 14.52 kHz ، و طاقة النبضة $34.44 \mu\text{J}$.

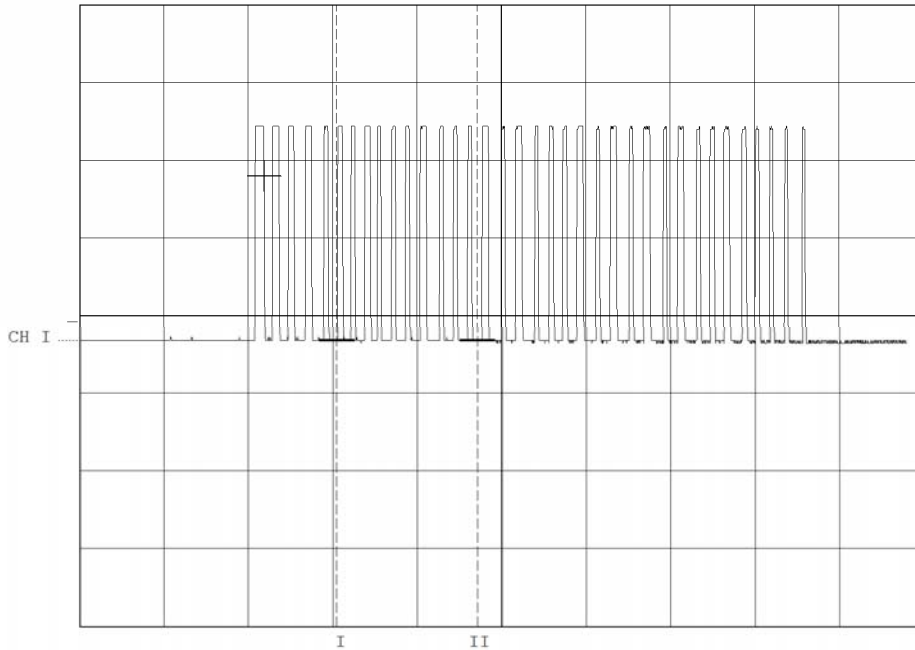
على الخط (28P10)



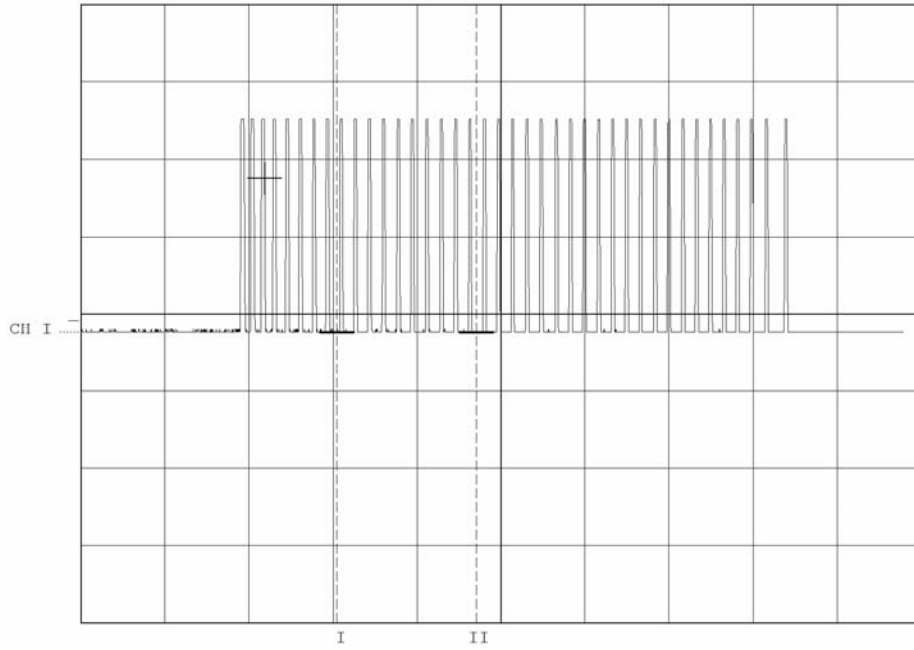
الشكل 15 نبضا الليزر على الخط (28P10) عند استطاعة وسطية و 0.55 W بتواتر تقطيع 100 Hz . مع إدخال غاز SF_6 بضغط قدره $4.8 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ و إضافة غاز Xe ليصبح الضغط الكلي $5 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ وكان ضغط الخلاء $7.5 \times 10^{-3} \text{ mbar}$. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu\text{s}$ والتدرجة الشاقولية الواحدة تقابل 10 V . التواتر التكراري 5.23 kHz ، و طاقة النبضة $105.16 \mu\text{J}$.



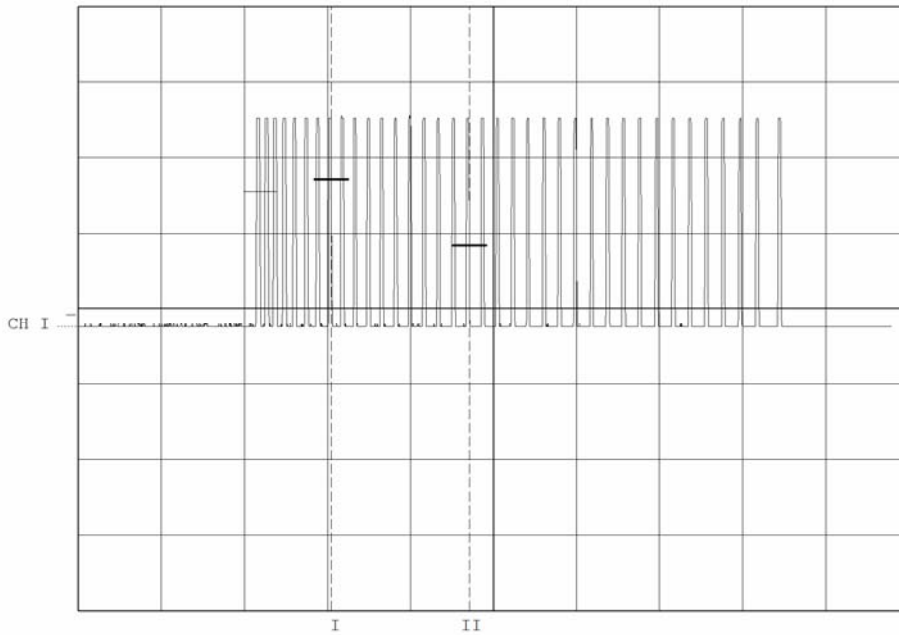
الشكل 16 نبضات الليزر على الخط 10P(28) عند استطاعة وسطية 0.55 W بتواتر تقطيع 100 Hz . مع إضافة غاز Xe ليصبح الضغط الكلي للغازين $6 \times 10^{-2}\text{ mbar}$. وتقابل التدرجة الأفقية الواحدة $500\mu\text{s}$. التواتر التكراري 8.92 kHz ، وطاقة النبضة $61.66\mu\text{J}$.



الشكل 17 نبضات الليزر على الخط 10P(28) عند استطاعة وسطية 0.55 W بتواتر تقطيع 100 Hz . مع إضافة غاز Xe ليصبح الضغط الكلي $7.8 \times 10^{-2}\text{ mbar}$. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل $500\mu\text{s}$. التواتر التكراري 11.08 kHz ، وطاقة النبضة $49.64\mu\text{J}$.



الشكل 18 نبضات الليزر على الخط (28)P10 عند استطاعة وسطية 0.55 W بتواتر تقطيع 100 Hz. مع إضافة غاز Xe ليصبح الضغط الكلي 1.0×10^{-1} mbar. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu s$. التواتر التكراري 12.31 kHz، وطاقة النبضة = $44.68 \mu J$.

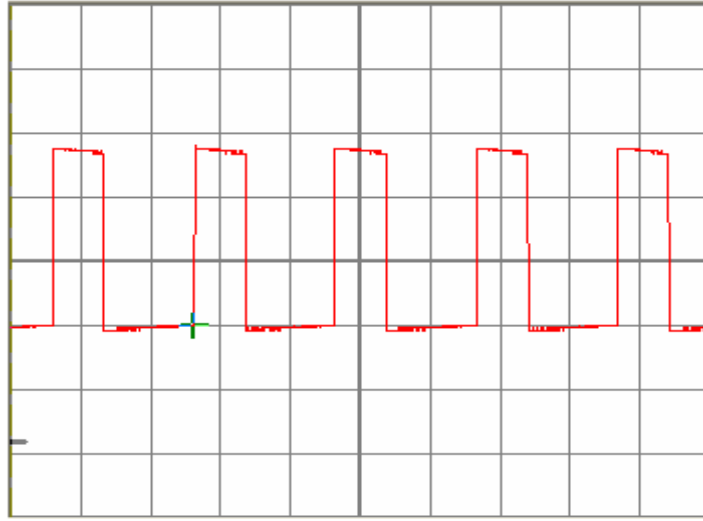


الشكل 19 نبضات الليزر على الخط (28)P10 عند استطاعة وسطية 0.55 W بتواتر تقطيع 100 Hz. مع إضافة غاز Xe ليصبح الضغط الكلي 2.3×10^{-1} mbar. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu s$. التواتر التكراري 11.84 kHz، وطاقة النبضة = $46.45 \mu J$.

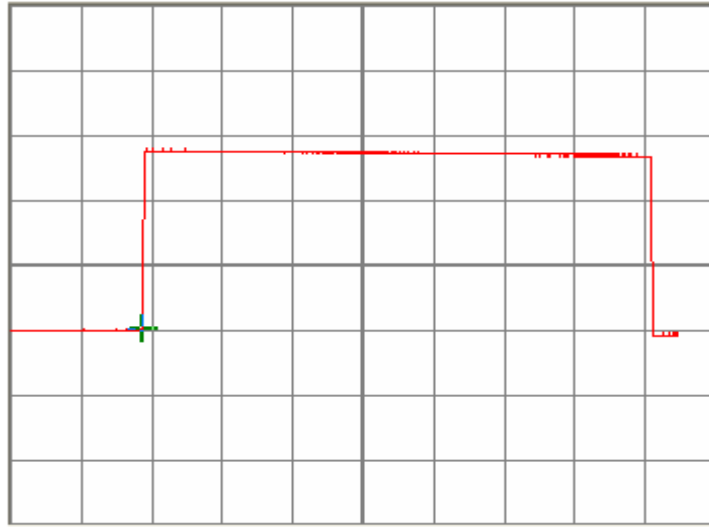
3.1.4 ظاهرة تبديل الجودة المنفعل بدلالة الضغط في المزيج $SF_6 + He$

عند شروط تشغيل الليزر السابقة تحت ضغط كلي قدره 18 mbar، وجهد حوالي 7.75 kV. تم التحقق من تأثير الهليوم كغاز إضافي إلى الغاز الأساسي SF_6 على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل.

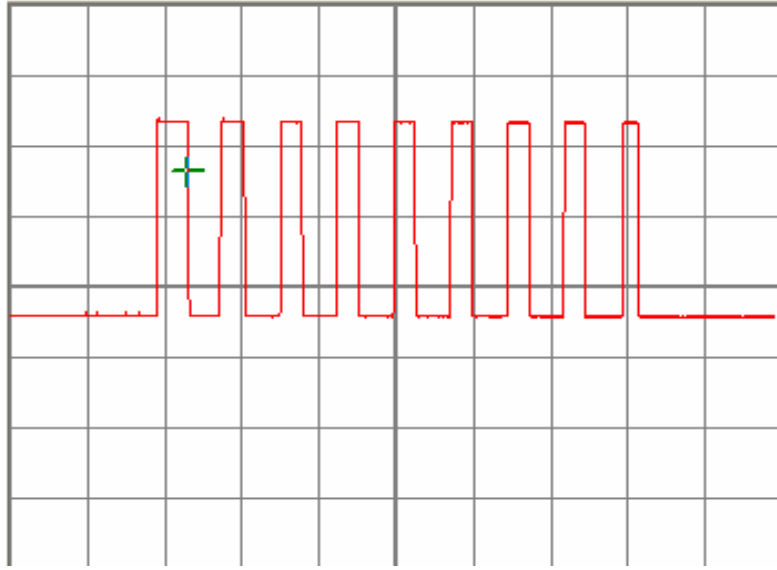
• على الخط 10P(26)



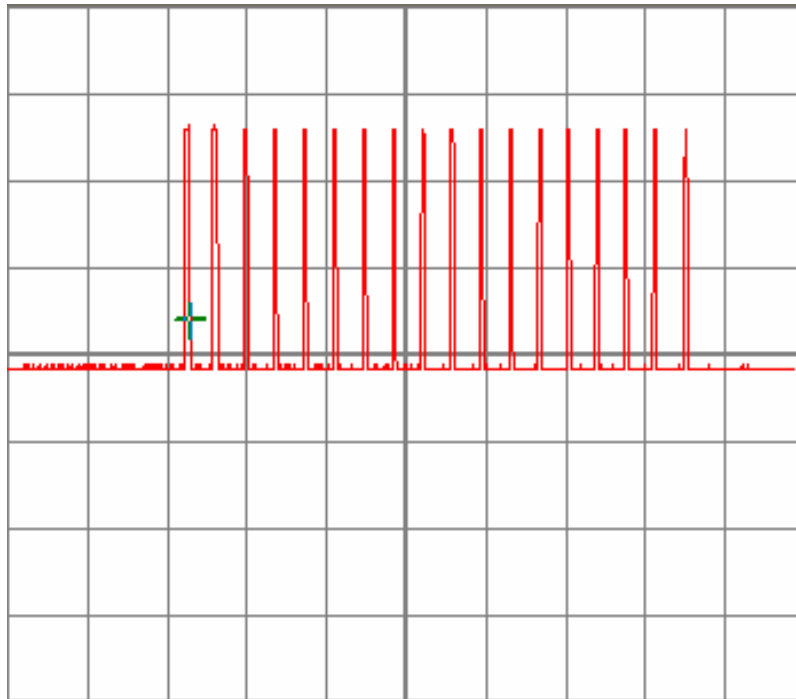
الشكل 20 نبضات خرج الليزر على الخط 10P(26) عند استطاعة خرج قدرها 2.53 W ، قبل تفتيح الحزمة بالمقطع shutter، والتي انخفضت إلى 0.98 W لدى تقطيعها بتواتر 100 Hz ، عند ضغط خلاء قدره $1.2 \times 10^{-2}\text{ mbar}$. مع العلم أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل 5 ms والتدرجة الشاقولية الواحدة تقابل 10 V . عرض النبضة الليزرية $= 3.75\text{ ms}$ ؛ وطاقتها $= 100 \times 0.98 = 9.8\text{ mJ}$.



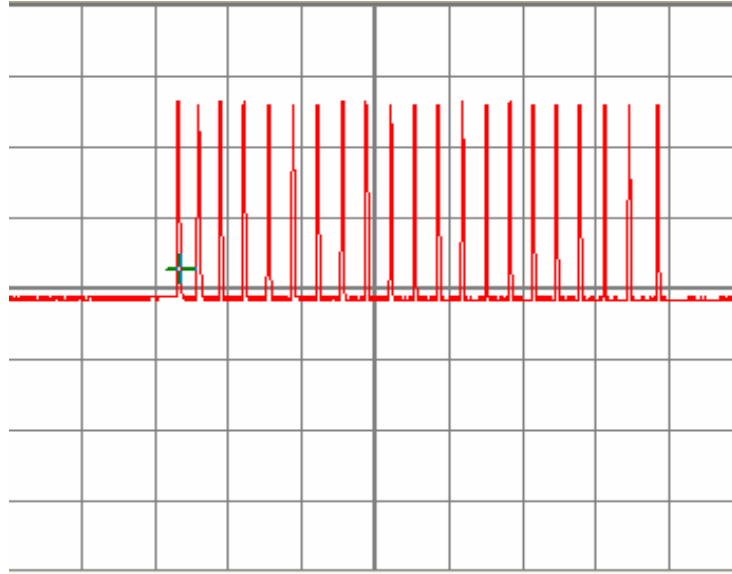
الشكل 21 نبضة واحدة لليزر على الخط 10P(26) عند نفس شروط الشكل 20. مع اختلاف أن التدرجة الأفقية الواحدة تقابل $500\mu\text{s}$



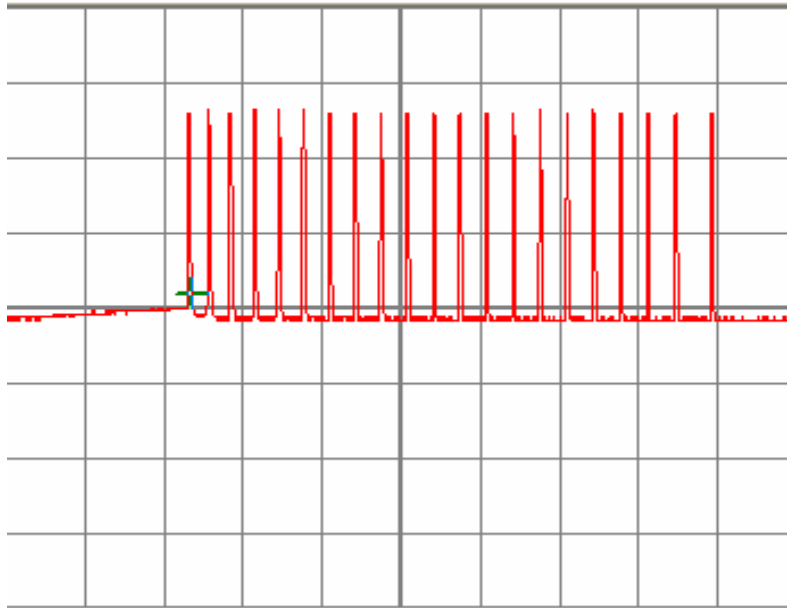
الشكل 22 نبضات خرج الليزر على الخط 10P(26) عند استطاعة وسطية 0.98 W بتواتر تقطيع 100 Hz ، مع إدخال غاز SF_6 بضغط $5.15 \times 10^{-2} \text{ mbar}$. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu\text{s}$. التواتر التكراري 2.88 kHz ، وطاقة النبضة $340.28 \mu\text{J}$.



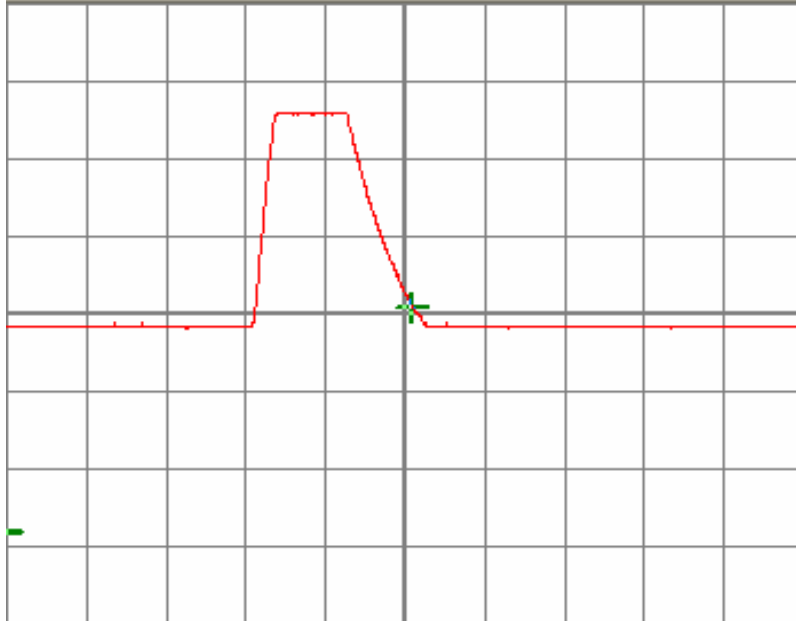
الشكل 23 نبضات خرج الليزر على الخط 10P(26) عند استطاعة وسطية 0.98 W بتواتر تقطيع 100 Hz ، مع إضافة غاز He إلى SF_6 حتى أصبح الضغط الكلي للغازين 1.5×10^{-1} . مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu\text{s}$. التواتر التكراري 5.76 kHz ، وطاقة النبضة $170.14 \mu\text{J}$.



الشكل 24 نبضات خرج الليزر على الخط 10P(26) عند استطاعة وسطية 0.98 W بتواتر تقطيع 100 Hz ، مع إضافة غاز He حتى أصبح الضغط الكلي للغازين $2 \times 10^{-1} \text{ mbar}$. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu\text{s}$. التواتر التكراري 6.46 kHz ، و طاقة النبضة $151.70 \mu\text{J}$.

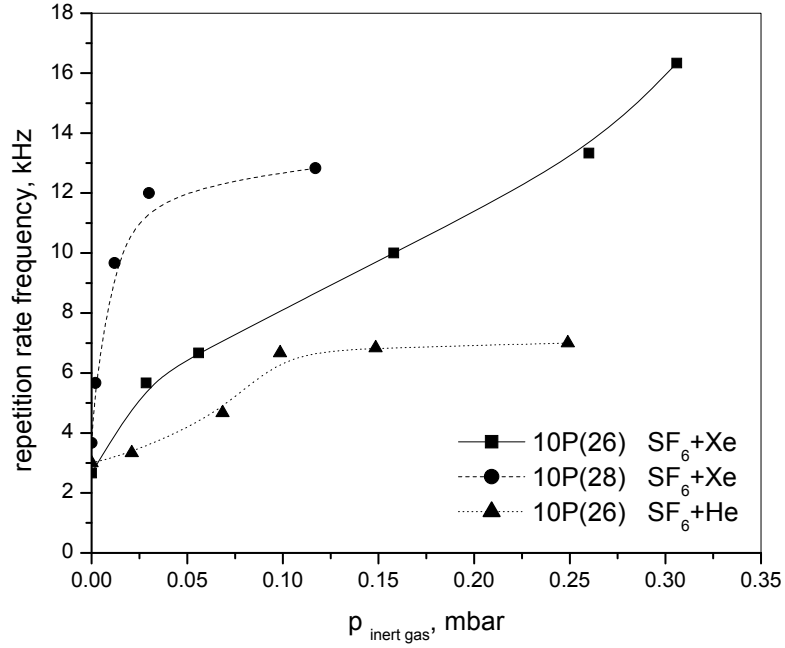


الشكل 25 نبضات خرج الليزر على الخط 10P(26) عند استطاعة وسطية 0.98 W بتواتر تقطيع 100 Hz ، مع إضافة غاز He حتى أصبح الضغط الكلي للغازين $3 \times 10^{-1} \text{ mbar}$. مع العلم أن التدرج الأفقية الواحدة تقابل $500 \mu\text{s}$. التواتر التكراري 6.46 kHz ، و طاقة النبضة $151.7 \mu\text{J}$.



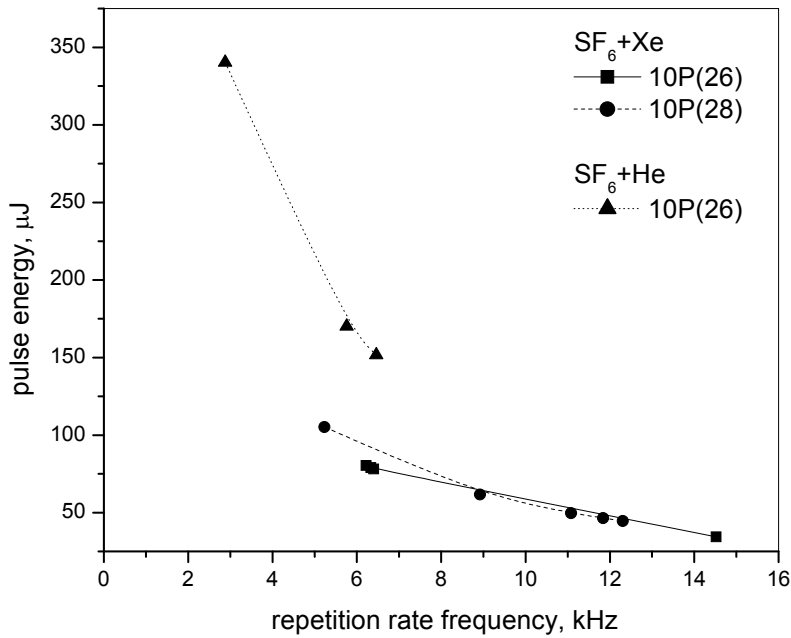
الشكل 26 نبضة واحدة لخرج الليزر على الخط (26)10P عند استطاعة وسطية 0.98 W لدى تقطيعها بتواتر 100 Hz، مع إدخال غاز SF₆ بضغط 5.15X10⁻² mbar وإضافة غاز He حتى أصبح الضغط الكلي للغازين 3X10⁻¹. مع العلم أن التدريجة الأفقية الواحدة تقابل 10 μs. عرض النصف = 16μs وطاقة النبضة = 151.7 μJ.

2.4 التواتر التكراري لنبضات الليزر بدلالة ضغط الغاز المضاف (الهليوم أو الكزنيون)



الشكل 27 تواتر نشوء النبضات في ظاهرة تبديل الجودة المنفعل بدلالة ضغط الغاز النادر لدى إضافته إلى غاز SF₆، على الخطين 10P(28) و 10P(26).

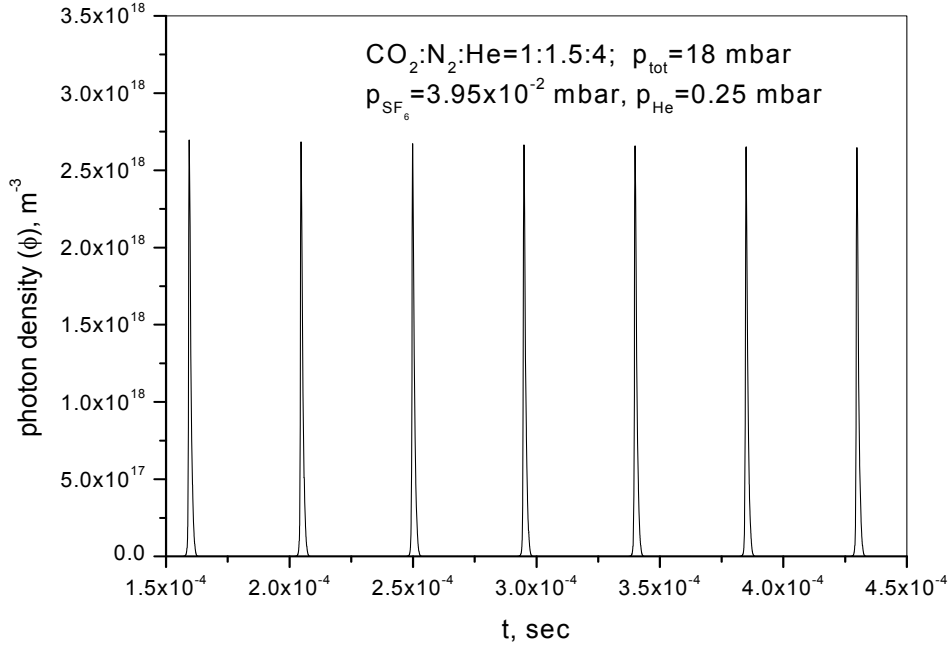
3.4 طاقة النبضة بدلالة التواتر التكراري



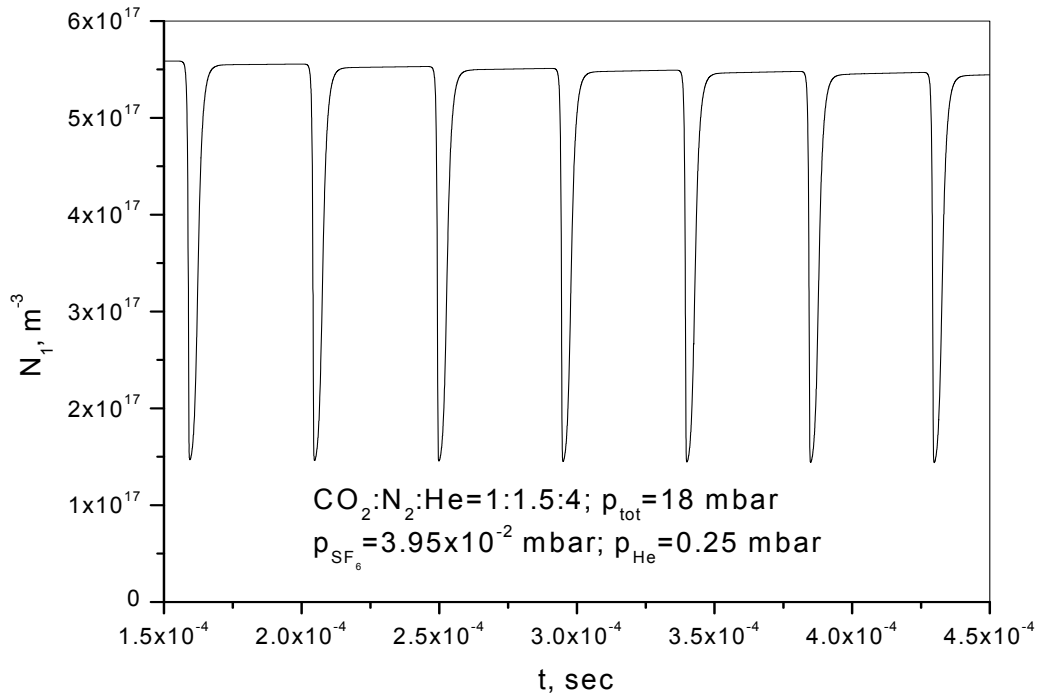
الشكل 28 طاقة نبضة الليزر الناتجة عن تبديل الجودة المنفعل بدلالة التواتر التكراري في المزيجين SF₆+Xe و SF₆+He على الخطين 10P(28), 10P(26).

4.4 نتائج الحسابات العددية

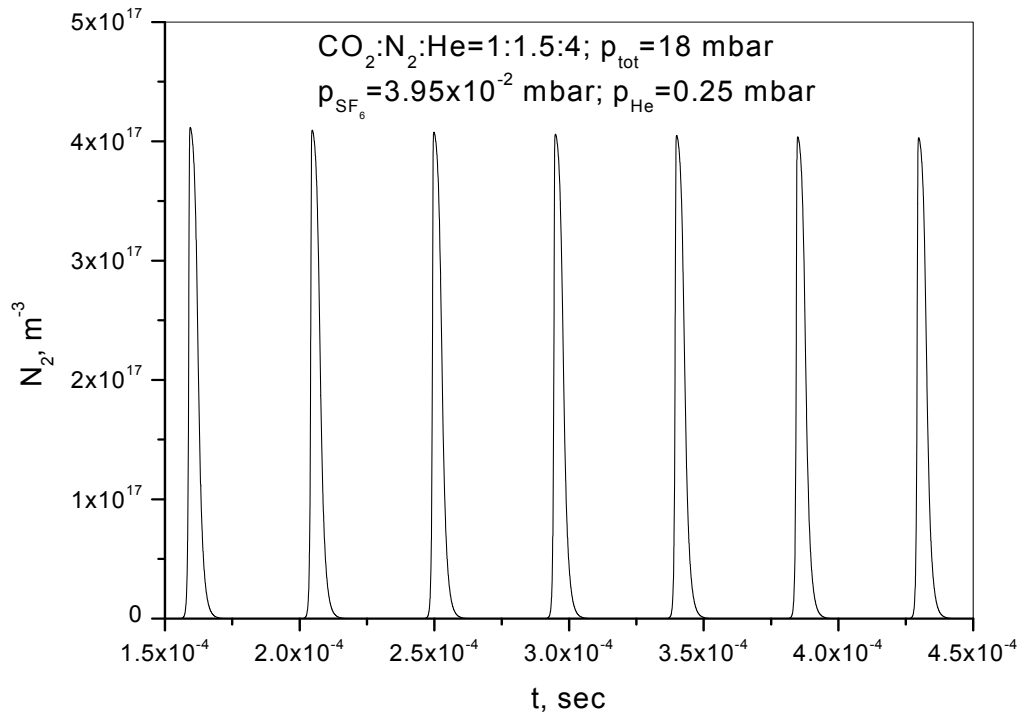
تتبع الأشكال 29-33 و 35 نتائج الحسابات العددية لحلول المعادلات (3)-(9) وفق شروط تجربة تبديل الجودة المنفعل المأخوذة في حالة المزيج SF_6+He الموافق لما هو وارد في الشكلين 25 و 26 . فالشكل 29 يظهر نبضات كثافة فوتونات الخرج الليزري، ويبين الشكل 30 الهبوط الحاد في كثافة الإسكان N_1 خلال كل نبضة . وفي نفس الوقت يبين الشكل 31 كثافة الإسكان في سوية الماص العليا N_2 . وأما الشكل 32 فيعطي سلوك الإسكان المعكوس M و M' لوسط التضخيم على التوالي مع كثافة الفوتونات، حيث يبدأ الإسكان المعكوس بالتعاظم حتى يبلغ حداً أعظماً، وعندها ينهار الإسكان المعكوس معطياً نبضة خرج ويبيض عندها الماص (bleach) . كما يبين الشكل 33 نبضات استطاعة الخرج الليزري المتولدة بفعل تبديل الجودة المنفعل.



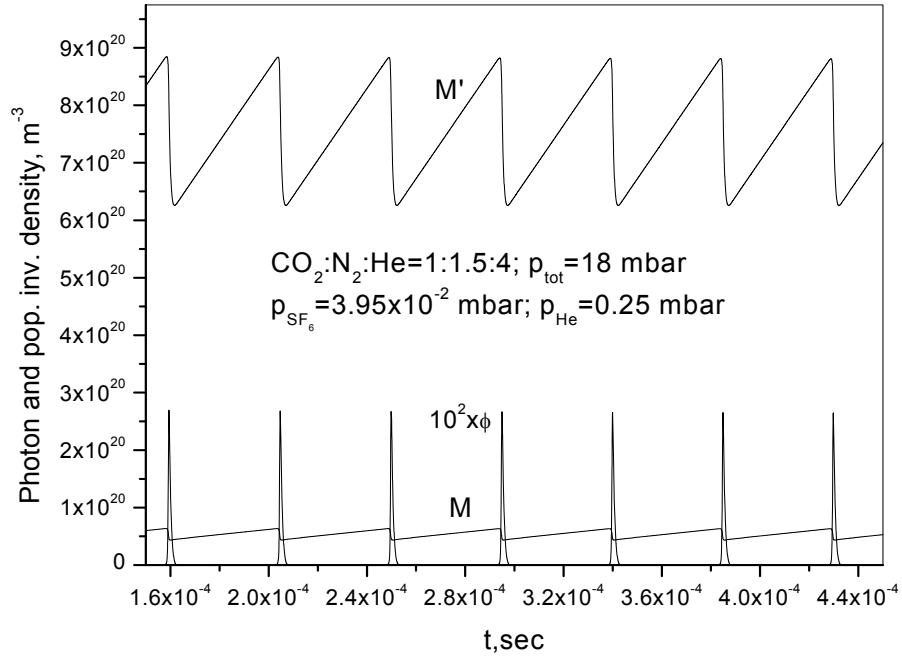
الشكل 29 نبضات كثافة فوتونات الخرج الليزري.



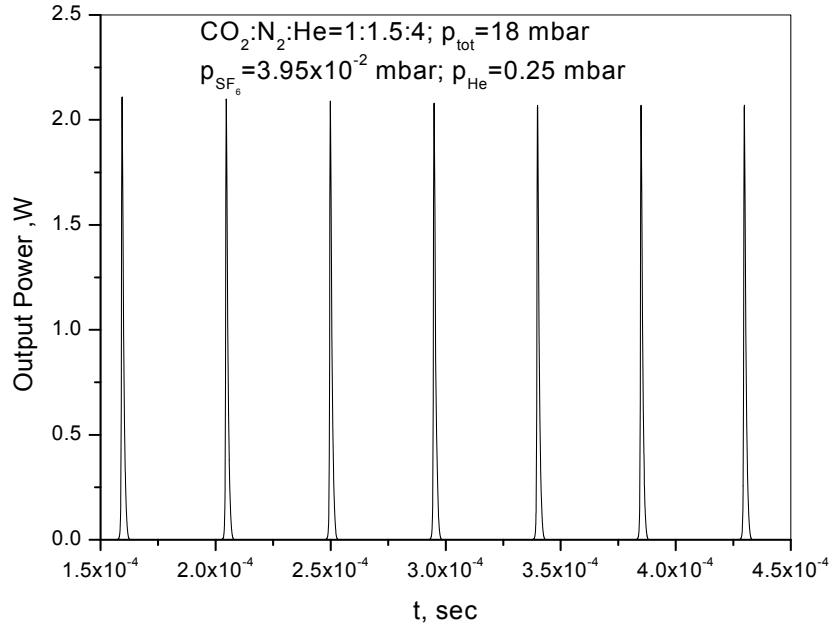
الشكل 30 كثافة جزيئات الماص في السوية الدورانية الدنيا N_1 .



الشكل 31 كثافة جزيئات الماص في السوية الدورانية العليا N_2 .

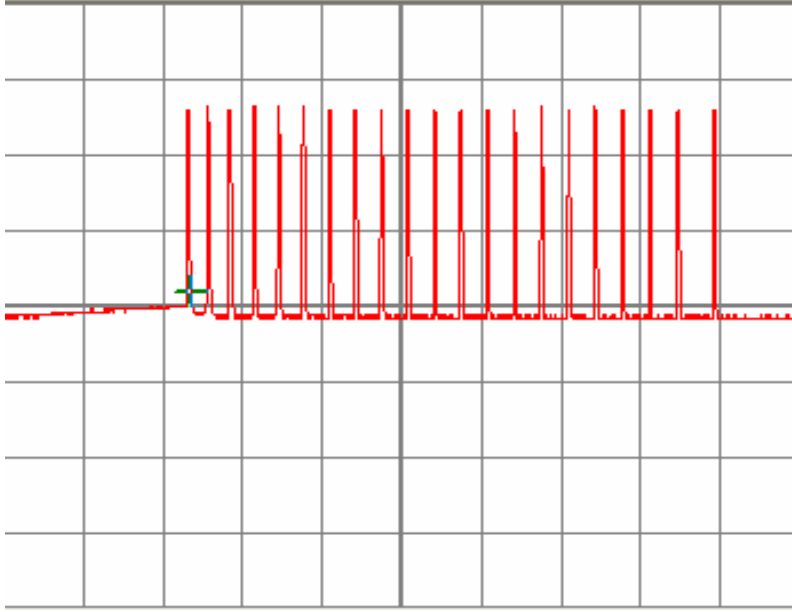


الشكل 32 كثافة الاسكان المعكوس M و M' في وسط التضخيم وكثافة الفوتونات في الخرج الليزري مع الزمن.

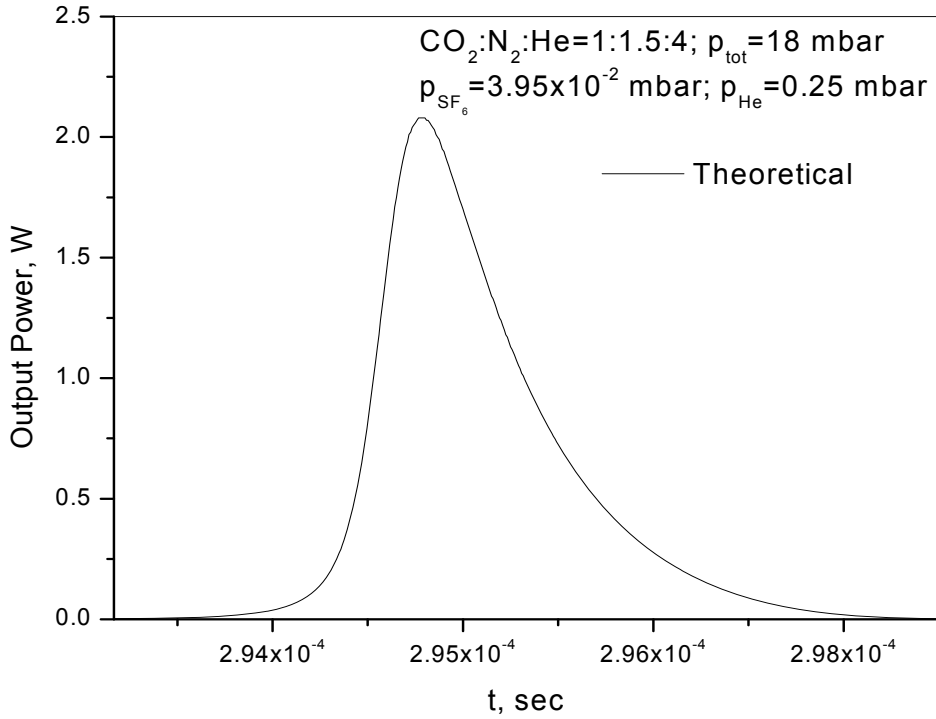


الشكل 33 قطار نبضات تبديل الجودة المنفعل لاستطاعة خرج الليزر نظرياً . الاستطاعة الوسطية 2.08 W بينما استطاعة الليزر قبل التقطيع كانت 2.53 W . الدور يساوي $44.82 \mu\text{s}$ ، والتواتر 22.31 kHz ، وطاقة النبضة $94.13 \mu\text{J}$.

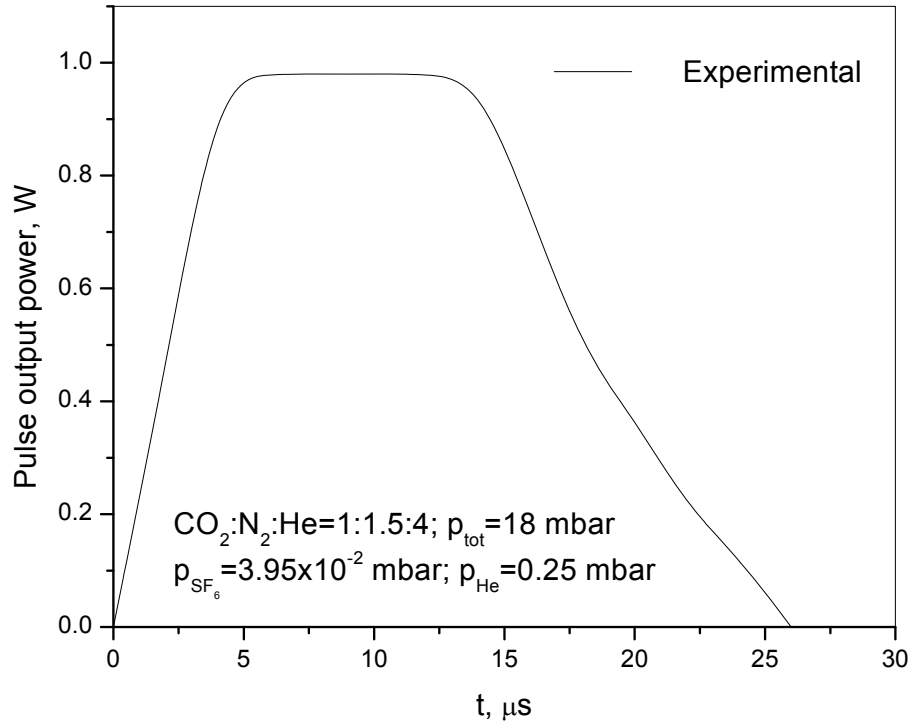
4.4 مقارنة القياسات التجريبية بالحسابات العددية



الشكل 34 قطار نبضات تبديل الجودة المنفعل لاستطاعة خرج الليزر تجريبياً . الدور = $154.76 \mu\text{s}$ ، والتواتر يساوي 6.46 kHz ، وطاقة النبضة = $151.7 \mu\text{J}$.



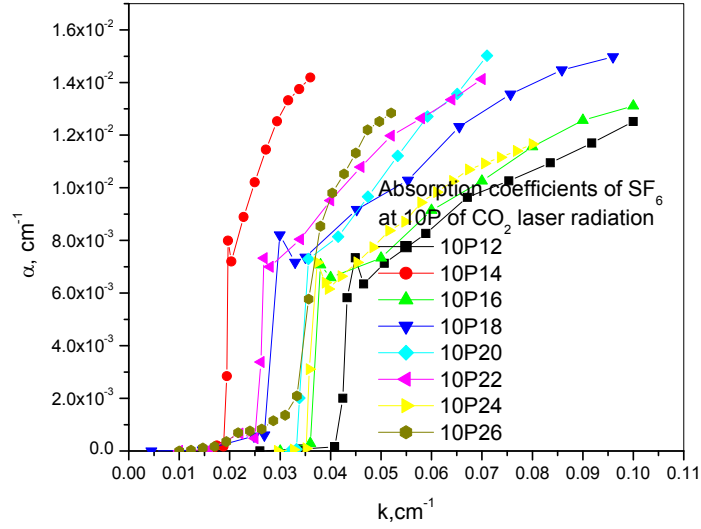
الشكل 35 نبضة الليزر في تبديل الجودة المنفعل المحسوبة من النموذج النظري. ، حيث بلغ عرض النبضة عند المنتصف حوالي $1 \mu\text{s}$.



الشكل 36 نبضة تبديل الجودة المنفعل لاستطاعة خرج الليزر تجريبياً. حيث بلغ عرض النصف 16 μs تقريباً.

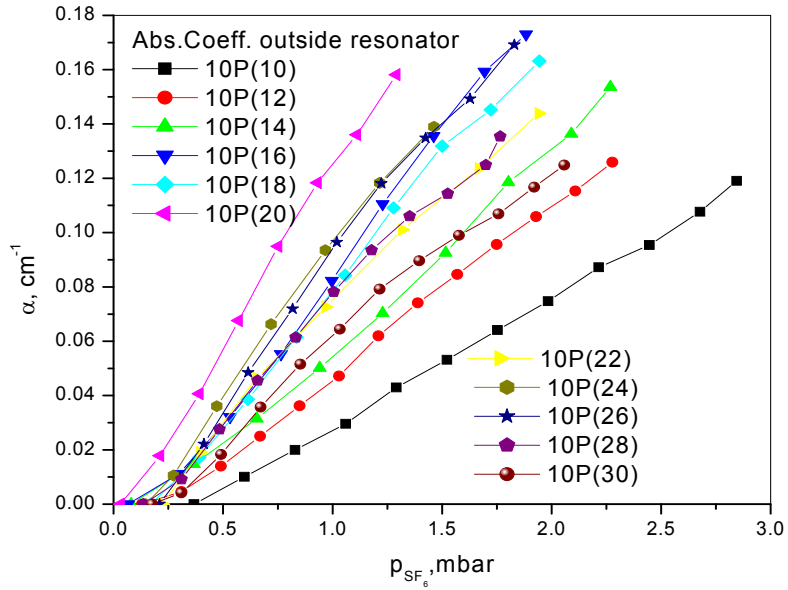
5.4 معاملات امتصاص غاز SF₆ بدلالة الضغط على الخطوط 10P داخل المجاوب

يبين الشكل 37 نتائج القياسات التجريبية لمعاملات امتصاص غاز الـ SF₆ بدلالة ضغط الغاز داخل المجاوب من أجل الخطوط الطيفية 10P(12)-10P(26). يشير الهبوط في هذه المنحنيات إلى حصول امتصاص شديد لهذه الأشعة بواسطة الغاز SF₆ عند ضغوط محددة ، بما يتفق ضمن حدود أخطاء القياس مع النتائج في المرجع [10].



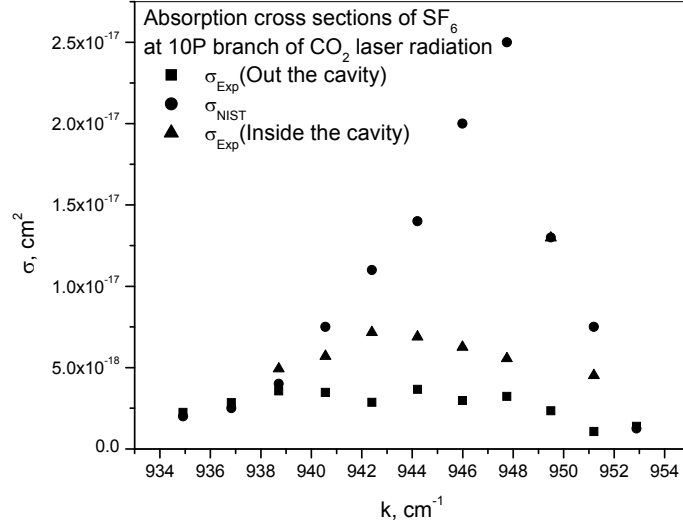
الشكل 37 معامل الامتصاص محسوباً من داخل المجابوب على الخطوط المبينة.

6.4 معاملات امتصاص غاز SF₆ بدلالة الضغط على الخطوط 10P من خارج المجابوب



الشكل 38 معامل الامتصاص محسوباً من خارج المجابوب على الخطوط المبينة.

7.4 المقاطع العرضية لامتناس الخطوط 10P في غاز SF₆



الشكل 39 مقاطع الامتصاص العرضية محسوبة بطريقتي خارج وداخل المجاوب بالمقارنة مع معطيات NIST [20].

5. المناقشة

جرى الحصول على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل بواسطة غاز ماص SF_6 قابل للإشباع في خلية داخل المجاوب لليزر CO_2 مستمر قابل للتوليف، باستطاعة لآتزيد على 3 W على العصابتين $10.6 \mu m$ و $9.6 \mu m$ ، العامل على المزيج $CO_2:N_2:He$ بنسب 1:1.5:4، وضغط كلي تراوح ما بين 14-18 mbar، وتيار انفراغ 16-20 mA، وجهد تغذية ما بين 7.4-7.8 kV. درست ظاهرة تبديل الجودة المنفعل في الغاز الماص SF_6 المعبأ في خلية موضوعة داخل المجاوب الليزري، باستخدام كاشف أشعة ليزر CO_2 من نوع MCT- HgCdTe، يعمل على التبريد بالأزوت السائل، بعد تقطيع الحزمة بمقطع (chopper) على تواتر اختياري قدره 100 Hz، وذلك من أجل تأمين شروط مناسبة لعمل الكاشف، كونه لا يعمل على الأشعة المستمرة. نُفذت الدراسة على الخطوط 10P(10)، 10P(26)، 10P(28)، 10P(30) وهي الخطوط الأقل امتصاصاً من العصابة $10.6 \mu m$ ، عند ضغوط معينة للغاز الماص لم تتجاوز 0.5 mbar. تبين الأشكال 6-9 نتائج هذه الدراسة. حيث تراوح معدل التواتر التكراري للنبضات فيها حسب الخط وضغط الغاز المستعمل ما بين 2.67 kHz و 20.33 kHz.

كما درست، عند نفس الشروط، ظاهرة تبديل الجودة المنفعل في المزيج الغازي SF_6+Xe على الخطين 10P(26) و 10P(28) بدلالة ضغط الغاز المضاف، وتبين الأشكال 10-19 النتائج التجريبية لهذه الظاهرة في المزيج المعطى. كما درست ظاهرة تبديل الجودة المنفعل في المزيج الغازي SF_6+He على الخط 10P(26)، بدلالة ضغط الغاز المضاف، وتبين الأشكال 20-26 النتائج التجريبية لهذه الظاهرة في المزيج المدروس.

جرى، من هذه النتائج، إيجاد التواتر التكراري لنبضات الليزر بدلالة ضغط الغاز المضاف (الهليوم أو الكزنيون)، بوجود ضغط أولي كاف من غاز SF_6 لتحقيق ظاهرة تبديل الجودة المنفعل، وهذا مبين في الشكل 27. حيث يلاحظ أن تأثير غاز Xe أكثر فعالية من غاز He في تقطيع الإشعاع الليزري إلى نبضات ليزرية وتحسين شروط ظاهرة تبديل الجودة المنفعل في الحصول على تواتر تكراري أعلى تبعاً لنوع الخط المدروس. كما تم تمثيل طاقة نبضة الليزر بدلالة التواتر التكراري لنبضات الليزر الناتجة عن ظاهرة تبديل الجودة المنفعل والمبينة في الشكل 28 حيث لوحظ التناسب العكسي بين طاقة النبضة وتواترها التكراري، ويتبع ذلك لنوع الغاز المضاف وللخط الطيفي المختار.

أعطى البرنامج الحاسوبي المنفذ في حالة المزيج SF_6+He على الخط 10P(26) ضمن شروط التشغيل السابقة، بعض النتائج المبينة في الأشكال 29-33 و 35، التي قورنت مع النتائج التجريبية المبينة في الشكلين 34 و 36، سواء من حيث التواتر التكراري لقطار النبضات، شكل وعرض النبضة الواحدة وطاقتها. ولوحظ وجود بعض التباين في هذه النتائج، الذي يمكن أن يكون سببه عائداً إلى التقريبات المتبعة في النموذج الرياضي الواصف للتجربة وإلى دقة النتائج التجريبية، بما فيها تأثير درجة الخلاء المستخدم في التجربة على شروط تحقيق الظاهرة المدروسة QS بشكل عام. فالشكل 29 يظهر نبضات الليزر أي كثافة فوتونات الخرج، ويبين الشكل 30 الهبوط الحاد في كثافة الإسكان N_7 خلال النبضة. وفي نفس الوقت يبين الشكل 31 كثافة الإسكان في سوية الماص العليا N_2 . ويعبر الشكل 32 عن كثافة الإسكان المعكوس M و M' في وسط التضخيم وكثافة الفوتونات في الخرج الليزري مع الزمن. حيث يبدأ الإسكان المعكوس

بالنمو حتى يبلغ حداً أعظماً، وعندها ينهار الإسكان المعكوس معطياً نبضة خرج وبييضُ (bleach) عندها الماص. ويظهر الشكل 35 النبضة الناتجة عن النموذج ، التي يبلغ عرض النصف فيها حوالي $1.0 \mu\text{s}$. يمثل الشكل 33 استطاعة الخرج الليزري المحسوبة بالبرنامج، والشكل 34 يمثل استطاعة خرج الليزر تجريبياً ، ويظهر عليه قطار النبضات، حيث تواتر النبضات يساوي 22.31 kHz نظرياً و 6.46 kHz تجريبياً ، الاستطاعة الوسطية للخرج الليزري حوالي 2.08 W نظرياً ، بينما هي 2.53 W تجريبياً. ويظهر الشكلان 35 و 36 نبضتي الليزر في حالتي الحساب والتجربة ويلاحظ أن عرض النصف لهما هو $1.0 \mu\text{s}$ و $16 \mu\text{s}$ على التوالي، وذلك من أجل حالة المزيغ SF_6+He . لوحظت ظاهرة تبديل الجودة المنفعل على الخطوط $10\text{P}(10)$ ، $10\text{P}(26)$ ، $10\text{P}(28)$ ، $10\text{P}(30)$ في غاز SF_6 وكان التواتر التكراري للنبضات الناتجة هو: 7.33 kHz ، 14.52 kHz ، 11.84 kHz ، 20.33 kHz على التوالي، و طاقة النبضة هي: $47.75 \mu\text{J}$ ، $34.44 \mu\text{J}$ ، $46.45 \mu\text{J}$ ، $9.84 \mu\text{J}$ على التوالي أيضاً.

تجدر الملاحظة أن نبضات خرج الليزر على الخط $10\text{P}(26)$ ، عند استطاعة خرج قدرها 2.53 W قبل تقطيع الحزمة بواسطة المقطع shutter، والتي انخفضت إلى 0.98 W ، لدى تقطيعها بتواتر 100 Hz ، مع إدخال غاز SF_6 بضغط $5.15 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ وإضافة غاز He حتى أصبح الضغط الكلي للغازين 3×10^{-1} ، عند ضغط خلاء قدره $1.2 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ أن طاقة نبضة الليزر المقطع بالمقطع = الاستطاعة المتوسطة \تواتر التقطيع تساوي 25.3 mJ ، وعرضها يساوي 3.625 ms .

يبين قطار نبضات تبديل الجودة المنفعل لاستطاعة خرج الليزر تجريبياً ، أن الدور = $154.76 \mu\text{s}$ ، والتواتر = 6.46 kHz ، و طاقة النبضة = الاستطاعة \التواتر التكراري = $151.7 \mu\text{J}$. وعرض النصف فيها = $16 \mu\text{s}$. وأن دور النبضات = $44.82 \mu\text{s}$ والتواتر التكراري للنبضات المحسوبة = 22.31 kHz ، وأن طاقة النبضة المحسوبة = الاستطاعة الوسطية \التواتر التكراري = $2.1 \times 10^3 \mu\text{J} = 22.31 \times 10^3 \mu\text{J}$. وعرض النصف للنبضة = $1 \mu\text{s}$.

بالإضافة إلى ما سبق فقد سُجّلت أيضاً استطاعات الخرج الليزري على كل خطوط العصابة 10P ، من $10\text{P}(10)$ و حتى $10\text{P}(30)$ بدلالة ضغط الغاز SF_6 سواء من داخل المجاوب أو خارجه ، وأمكن منها حسابات معاملات الامتصاص بتطبيق الطريقة المناسبة لكل حالة من هاتين الحالتين كما هو موضح سابقاً. ويبين الشكلان 37 و 38 نتائج هذه القياسات بدلالة ضغط الغاز. كما أمكن من هذه المعاملات حساب قيم المقاطع العرضية للامتصاص في الحالتين ومقارنتها مع ما هو متوفر في هذا المجال من قاعدة البيانات NIST للغاز SF_6 كما هو مبين في الشكل 39.

6. الخاتمة

وهكذا نخلص إلى أنه، جرى الحصول على ظاهرة تبديل الجودة المنفعل ودراستها على أربع خطوط طيفية من طيف إصدار ليزر CO_2 مستمر قابل للتوليف من العصابة $10.6 \mu\text{m}$ والفرع P ، وهذه الخطوط هي $10\text{P}(10)$ ، $10\text{P}(26)$ ، $10\text{P}(28)$ ، $10\text{P}(30)$ ، وهي خطوط واقعة على أطراف العصابة 10P ، وتعد من الخطوط الأقل امتصاصاً من بين بقية خطوط طيف امتصاص غاز SF_6 ، وذلك باستخدام غاز SF_6 كغاز ماص قابل للإشباع ، تحت ضغوط وصلت حتى 0.5 mbar ، كما أضيف إليه غاز الكزنيون والهليوم كلاً على حدة بغية التأثير على آلية حدوث هذه الظاهرة وتحسين خواصها. ولقد حدد الضغط التقريبي الذي تبدأ فيه هذه الظاهرة بالنشوء لكل خط من هذه الخطوط. ولقد بينت الحسابات والتجربة أن تواتر النبضات المحسوب عند الشروط المأخوذة يساوي 22.31 kHz ، وأن تواتر النبضات المقيس بالتجربة يساوي و 6.46 kHz . وحسبت الاستطاعة الوسطية للخرج الليزري فكانت حوالي 2.1 W تقريباً، بينما كانت الاستطاعة المقيسة بحدود 2.53 W في ظروف التجربة المجراة، حيث قُطعت حزمة الليزر بتواتر تقطيع قدره 100 Hz .

كما قيست معاملات امتصاص غاز SF_6 باستخدام طريقتين معروفتين هما: طريقة وضع خلية الامتصاص خارج التجويف الليزري ، و خلية الامتصاص داخل التجويف الليزري بدلالة ضغط الغاز داخل الخلية ، وذلك على خطوط الانتقال الواقعة في العصابة $10.6 \mu\text{m}$ والفرع 10P من ليزر CO_2 مستمر قابل للتوليف ، وحسبت منها معاملات المقاطع العرضية للامتصاص ولوحظ تفاوت مقبول بين القيم المحسوبة والمرجعية المأخوذة من قاعدة المعطيات NIST.

7. توصيات وكلمة شكر

يوصى بمتابعة دراسة ظاهرة تبديل الجودة المنفعل باستخدام غازات من أمثال غازات الهيدروفلوروكربون CFC وغيرها ، التي يقع طيف امتصاصها في المجال الطيفي لليزر CO_2 . وذلك لما لهذه الظاهرة من فائدة في الحصول على نبضات ليزيرية قصيرة ، ذات استطاعة عالية، وخاصة إذا ما طبقت على ليزرات $TEA CO_2$ النبضية المستعرضة المثارة بالضغط الجوي أو بضغط أعلى. ولهذه الليزرات تطبيقات مفيدة في مجال الكيمياء الضوئية والمطباغية الليزرية وفي المجالات الصناعية وغيرها.

الشكر لكل من ساعد في إنجاز هذا البحث. وأخص لجنة الشراء والورشة الميكانيكية في قسم الفيزياء، اللتان ساعدتا في تأمين تجهيزات ومستلزمات التجارب الخاصة بتنفيذ هذا البحث.

8. المراجع

- [1] Peter W. Milonni , Joseph H. Eberly, "Lasers", Wiley, New York, pp370-375, 1988.
- [2] O.R.Wood, S.E.Schwarz, "Passive mode locking of a CO_2 laser", Appl. Phys. Letters, Vol.12, No8, pp.263-265, 1968.
- [3] J. Dupré, F. Meyer, C. Meyer, "Influence des phénomènes de relaxation sur la forme des la forme des impulsions fournies par un laser CO_2 déclenché par un absorbant saturable", Revue De Physique Appliquée, Tome 10, pp.285-293, 1975.
- [4] Yoram J. Kaufman , "Passive-Q- switching high intensities and high absorber pressures", Appl. Optics, Vol.15, No 6, pp.1530-1534, 1976.
- [5] Adam D. Devir, Uri P. Oppenheim, " Passive-Q- switching of a CO_2 laser by CH_3F : an analysis", Appl. Optics, Vol. 16, No.10, pp.2757-2763, 1977.
- [6] J. N. Olsen, "Laser-initiated channels for ion transport: CO_2 -laser absorption and heating of NH_3 and C_2H_2 gases", J. Appl. Phys., Vol.52, No.5, pp.3279-3285, 1980.
- [7] V.V. Nevdakh, O. L. Gaiko, L. N. Orlov, "New operation regimes of a CO_2 laser with intracavity saturable absorber", Opt. Comm., Vol. 127, Iss 4-6, pp.303-306 ,1996.
- [8] P. C. De Oliveira, M.B. Danailov, Y. Liu, J.R.R. Leite, "Experimental dynamical variables of a chaotic CO_2 laser with saturable absorber", Ph. Rev. A, Vol.55, Iss 3, pp.2463-2466, 1997.
- [9] G. Sliwinski, S. A. Labuda, "Gas-dynamic Q switching of a CO_2 laser by a pulsed absorber jet", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol 32, pp.30-33, 1999.
- [10] Itamar Burak, Paul L. Houston, David G. Sutton, and Jeffrey I. Steinfeld, "Mechanism of Passive Q Switching in CO_2 Lasers" IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-7, No.2, February 1971, pp.73-82.
- [11] Peter K. Cheo, ' Handbook of Molecular Lasers', Marcel Dekker, Inc. New York and Basel , 1987, Ch.1.
- [12] E. Arimondo, F. Casagrande , L. A. Lugiato, and P. Glorieux, 'Repetitive Passive Q-Switching and Bistability in Lasers with Saturable Absorbers' Appl. Phys. B, Lasers and Optics, 30, 57-77, 1983.

[13]

دراسة علمية مكتبية " الحلول الممكنة لمعادلة بولتزمان لتابع توزيع الالكترونات حسب الطاقة في المزيج الغازي الليزري CO₂:N₂:He " د. شريف الحواط ، د. عماد خضير، هـ ط ذ س – ف / ت د ع 140 كانون الثاني 1996 .

[14] Markus W. Sigrit: Air monitoring by spectroscopic techniques (John Wiley & Sons, Inc, New York) 1994, Ch.1,2.

[15] S. Al-Hawat, M. D. Zidan, S. Saloum "Absorption of CO₂ laser emission by freon-12" Applied Physics B, Lasers and Optics , **78**, 439-442, 2004.

[16] W. Demtröder "Laser spectroscopy", Berlin: Springer-Verlag, 1988, Ch. 5,8.

[17] Y. J. Kaufman and U. P. Oppenheim "Rate equations of high gain lasers and determination of laser parameters", Applied Optics, **13**(2), 374-378, 1974.

[18] R. M. Thompson. et al. BOLTZ: A code to solve the transport equation for electron distributions and then calculate transport coefficients and vibrational excitation rates in gases with applied fields Comp. Phys. Commu., **11**, 369-383, 1976.

[19] D. Devir and U. P. Oppenheim "Passive Q- switching of a CO₂ laser by CH₃F: an analysis" Applied Optics, Vol. **16**(10), 2757-2763, 1977.

[20] Internet, NIST Database.

SYRIAN ARAB REPUBLIC
ATOMIC ENERGY COMMISSION
DAMASCUS- P.O.BOX: 6091



Final Report on Scientific Research
Department of Physics

**Passive Q-Switching in CW-CO₂ Laser with SF₆ as an Intracavity
Saturable Absorber**

Dr. Sharif Al-Hawat

AECS – Ph \FRSR 391

October 2007