



الجمهورية العربية السورية  
هيئة الطاقة الذرية

هـ ط ذ س- ف/ت د ع 762  
شباط 2008

تقرير عن دراسة علمية حاسوبية  
قسم الفيزياء

دراسة أثر تغير قرينة انكسار الغاز في خلية امتصاص موضوعة داخل المجاوب  
على استطاعة خرج الليزر

الدكتور شريف الحواط  
الدكتور محمد اسكيف

هـ ط ذ س- ف/ت د ع 762

## المساعدون في الدراسة

السيدان سامي شحادة و يامن بلول- عضوا الهيئة المخبرية

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

### المحتوى

1. مستخلص..... 3
2. مقدمة..... 4
3. المواد والطرائق والقياسات..... 5
- 1.3 البناء التجريبي..... 5
- 2.3 الامتصاص خارج المجاوب..... 6
- 3.3 الامتصاص داخل المجاوب..... 7
- 1.3.3 معادلات المعدل..... 7
- 2.3.3 نموذج التداخل..... 10
- 3.3.3 الضياعات الناجمة عن تغير زاوية الورود البروستري..... 12
- 4.3.3 الضياعات المتعلقة بتغير زاوية الورود على شبكة الانعراج..... 14
4. النتائج والمناقشة..... 16
- 1.4 المقاطع العرضية واستقطابية الغاز *CFC-11*..... 17
- 2.4 المقاطع العرضية واستقطابية الغاز *CFC-12*..... 19
- 3.4 المقاطع العرضية واستقطابية الغاز *CFC-22*..... 22
- 4.4 أخطاء القياس..... 25
- 5.4 زيادة حساسية الكشف في قياس الامتصاص داخل المجاوب..... 26
5. الخلاصة..... 29
6. التوصيات..... 30
7. المراجع..... 31

## 1. مستخلص

تم تطوير نموذج فيزيائي يسمح بتوصيف تخامد استطاعة الليزر بتابعية ضغط الغاز الماص في خلية امتصاص ضمن المجاوب انطلاقاً من قيمتي الجزأين الحقيقي والتخيلي لقرينة انكسار الغاز. يقوم النموذج على إدخال الفقد الناجم عن الامتصاص إلى معادلات المعدل، ومن ثم حل تلك المعادلات ضمن شروط الاستقرار التي تصف حالة الليزر المستمر. أما الاهتزاز المترابك مع التخامد – لاسيما في حالة الامتصاص الضعيف – فيراعى ضمن إطار نموذج تداخلي ينظر إلى الحقل الكهربائي داخل المجاوب الليزري على أنه محصلة تداخل أمواج مترابطة في الطور متباينة في عدد الأشواط المقطوعة داخل المجاوب الذي يتغير طول الضوئي بتغير ضغط الغاز في خلية الامتصاص نتيجة لتغير الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار. جرى تطبيق النموذج على منحنيات التخامد المقيسة – ضمن إطار عمل سابق - للغازات CFC-11, 12, 22 بواسطة ليزر CO<sub>2</sub> مستمر قابل للتوليف، وباستخدام 44 خطاً من خطوط إصدار جزيئة CO<sub>2</sub> موزعة على الفرعين P و R من العصابتين  $9.6 \mu\text{m}$  و  $10.6 \mu\text{m}$ .

وقد أمكن في جميع الحالات تحديد قيمة المقطع العرضي للامتصاص (الجزء التخيلي لقرينة الانكسار) عبر إجراء مواءمة رياضية بين منحنى التخامد النظري المحسوب وفق النموذج من جهة، ونظيره المقاس تجريبياً من جهة ثانية. وفضلاً عن ذلك فقد أمكن تحديد قيمة الاستقطابية الخطية (الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار) في جميع حالات التخامد المهتر.

تبدي النتائج توافقاً جيداً مع القيم المرجعية المنشورة في قاعدة البيانات Hitran وكذلك مع نتائج قياس الامتصاص خارج المجاوب.

## Abstract

A model describing the intra-cavity absorption has been developed. The model allows for a reliable description of the attenuation of laser power as a function of the gas pressure inside the absorption cell, conducting both real and imaginary parts of the refractive index of the absorbing gas.

The model relies on an adequate integration of the additional loss due to the absorption into the rate equations. After that the rate equations are solved under steady state conditions, which is quite reliable for a cw CO<sub>2</sub> laser. The oscillation, clearly observed in case of weak absorption, is described in the framework of an interference model considering the electric field inside the cavity as the interference result of successive phase correlated waves differing from each other in the number of passes made through the cavity. The phase shift is determined by the optical length of the cavity depending on the real part of the refractive index of the gas in the absorption cell.

The model has been applied to analyze a large set of attenuation curves obtained in a previous work, in which intra-cavity absorption was measured for the three gases CFC-11, 12, 22 using a tunable cw CO<sub>2</sub> laser at 44 lines of the emission spectrum of the CO<sub>2</sub> molecule distributed on the branches P and R of the two bands at 9.6  $\mu\text{m}$  and 10.6  $\mu\text{m}$ .

For mostly all examples, the value of the absorption cross section (imaginary part of the refractive index) has been determined by fitting the model to the experimental data. Furthermore, the value of the linear polarizability (real part of the refractive index) has been calculated from the oscillation period for all examples, in which the attenuation curve exhibits reliable oscillating behavior.

The results are in fair agreement with the values of the absorption cross section published in the Hitran data base, as well as with the results obtained from independent absorption measurements performed outside the cavity.

## 2. مقدمة

يمثل قياس معامل الامتصاص واحدة من أهم الطرائق المستخدمة في الكشف عن غازات الأثر وقياس تراكيز هذه الغازات في الهواء المحيط. تستند طرائق قياس معامل الامتصاص في الغازات بشكل أساسي إلى قياس نفوذية الضوء عبر خلية الغاز. ونظراً للمواصفات المتميزة لضوء الليزر (اتجاهية، شدة مستقرة، ميز طيفي عالي أو مقدرة فصل عالية، قابلية التوليف) فإنه غالباً ما يستخدم الليزر كمنبع ضوئي [1,2]. ومن ناحية أخرى فإن إدخال العينة إلى داخل المجاوب الليزري يسمح بتحقيق زيادة كبيرة في حساسية الكشف وكذلك في دقة قياس التركيز [3-5].

أنجز في هذا المجال العديد من الأعمال العلمية التي عُيّنت بدراسة امتصاص غازات CFC لأشعة ليزر CO<sub>2</sub> قابل للتوليف، وقد شملت تلك الأعمال كلتا الحالتين: الامتصاص من خارج المجاوب [6]، ومن داخل المجاوب [7]. وقد قادت القياسات في الحالة الأخيرة إلى ملاحظة ظاهرة التخماد المهتز لدى بعض خطوط CO<sub>2</sub>، وعزيت هذه الظاهرة إلى الانزياح الطوري الناتج عن تغير المسار الضوئي بتغير قرينة انكسار الغاز في الخلية [8]، حيث أن قرينة انكسار الغاز تتبع الضغط وفق العلاقة التي تعرف باسم قانون لورنتز - لورنس [9,10] والتي تقبل التقريب إلى علاقة خطية.

لكن تغير قرينة انكسار الغاز في خلية الامتصاص الموضوعه داخل المجاوب من شأنه أن يؤثر في استطاعة خرج الليزر ليس فقط عبر تغير المسار الضوئي وإنما أيضاً عبر ظواهر أخرى كالانحراف عن المحور الضوئي للمجاوب والذي يؤدي إلى خروج جزء من الحزمة الليزرية عن شروط التوليف، أو الانزياح عن زاوية بروستر لدى عبور الحزمة بين الغاز والجدار الزجاجي لخلية الامتصاص، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى ضياع جزء من الحزمة عبر الانعكاس على السطح الفاصل بين الوسطين. وبالنتيجة فإن تغير قرينة الانكسار من شأنه أن يدخل بعض الخطأ على عملية قياس معامل الامتصاص داخل المجاوب. وتجدر الإشارة إلى أنه لم يسبق أن تطرق أي من الأعمال السابقة التي تناولت الامتصاص داخل المجاوب إلى دراسة أثر تغير قرينة الانكسار على استطاعة خرج الليزر وما قد ينجم عنه من خطأ في قياس معامل امتصاص الغاز.

يقدم هذا العمل نموذجاً فيزيائياً يسمح بفك التراكب بين أثر كل من الجزء الحقيقي والجزء التخيلي لقرينة انكسار الغاز على استطاعة خرج الليزر، ويعطي توصيفاً دقيقاً لآلية الامتصاص داخل المجاوب. كما يتضمن العمل التطبيق العملي للنموذج في تفسير منحنيات التخماد المقيسة لبعض غازات CFC داخل مجاوب ليزر CO<sub>2</sub> مستمر قابل للتوليف، ومناقشة النتائج المتمثلة في قيم كل من المقطع العرضي للامتصاص (الجزء التخيلي لقرينة الانكسار) والاستقطابية الخطية (الجزء الحقيقي)، وذلك بهدف استكشاف الزيادة الممكن بلوغها في دقة القياس وما يتبعها من زيادة في حساسية الكشف عن غازات الأثر.

### 3. المواد والطرائق والقياسات

#### 1.3 البناء التجريبي

يبين الشكل 1 مخططاً تمثيلاً للوحدة التجريبية المستخدمة . حيث جرى تهيئة منظومة الليزر لإجراء التجارب على امتصاص غازات CFC لأشعة الليزر ، التي تتكون مما يلي:

- ليزر CO<sub>2</sub> مستمر قابل للتوليف باستطاعة خرج أعظمية قدرها  $3.5 \pm 0.2$  W ؛ طول تجويف الليزر (أو المجاوب) يساوي 2.8 m ؛ وطول الوسط الفعال يبلغ حوالي 86 cm و القطر الداخلي لأنبوبة الانفراغ هو بحدود 18 mm .
- خلية امتصاص عبارة عن أنبوبة ستانلس ستيل قطرها الداخلي بحدود 28 mm وطولها مع حوامل نوافذ بروستر من الطرفين حوالي 480 mm ، مزودة عند طرفيها بنافتين مصنوعتين من BaF<sub>2</sub> مائلتين بزواوية بروستر. الخلية مربوطة إلى منظومة خلاء وأسطوانات من غازات CFC-11,12,22 كلاً على حدة.
- مضخة تخلية أولية بمرحلتين Tow stages rotary vane vacuum pump- RZ16 (سرعتها 318 l/min واستطاعتها 0.55 kW ودرجة الخلاء التي تؤديها  $2 \times 10^{-3}$  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 .
- ثلاث أسطوانات من غازات الـ CFC (CFC-22, CFC-12, CFC-11).

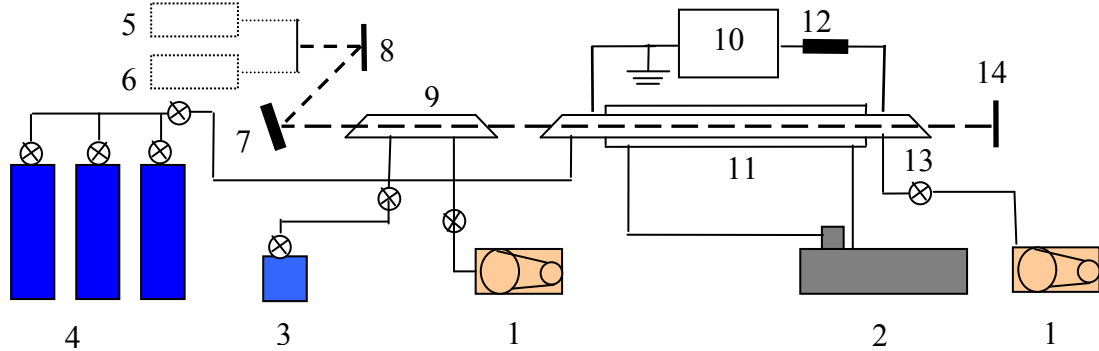
جرى اختبار دارة التزود بأحد غازات CFC الماص حتى خلاء قدره  $10^{-3}$  mbar ، بالإضافة إلى تهيئة الليزر للعمل.

أجريت التجارب على امتصاص غازات CFC باستخدام ليزر CO<sub>2</sub> مستمر قابل للتوليف الذي يعمل على جهد تشغيل قدره حوالي 7.5 kV وتيار قدره 18 mA ضمن مزيج الغازات CO<sub>2</sub>: N<sub>2</sub>: He بنسب 1:2:4 وبضغط كلي قدره 18 mbar .

يتشكل التجويف الليزري في هذا الليزر من شبكة انعراج تعكس 75% من أشعة الليزر إلى داخل التجويف على مرتبة الإنعراج الأولى و تسمح لـ 15% من هذه الأشعة بالخروج خارج التجويف على مرتبة الإنعراج الصفريّة، ومرآة مغطاة بالذهب انعكاسيتها 98.9% ونصف قطر تقعرها 10 m . ويمكن ضبط شبكة الانعراج لتعطي خطأ ليزرياً واحداً وتميرير الحزمة عبر محلل طيفي خاص بالليزر (CO<sub>2</sub> Spectrum Analyzer, Optical Engineering, USA) لتشخيص الخط الطيفي وتحديد طول موجته.

استخدمت راسمة منحنيات بيانية Y(t) مربوطة على خرج مقياس استطاعة الليزر لتسجيل استطاعة خرج الليزر بدلالة ضغط الغاز الماص في الخلية.

يعطي الليزر المستخدم 44 خطأ طيفياً من خطوط إصدار جزيئة CO<sub>2</sub> موزعة على العصابتين  $9.6 \mu\text{m}$  و  $10.6 \mu\text{m}$  ، وعلى الفرعين P و R من كل عصابة.



الشكل 1 المخطط التجريبي لمنظومة الليزر CO<sub>2</sub> المستخدمة في العمل، وتتكون من:

- 1- مضخة خلاء، 2- وحدة تبريد بالماء، 3- أسطوانة غاز CFC، 4- أسطوانات غاز CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He، 5-
- مقياس استطاعة، 6- محلل طيفي، 7- شبكة إنعراج 100 g/mm ، 8- مرآة مستوية عاكسة كلياً، 9- خلية

الغاز الماص، 10- وحدة التغذية الكهربائية 15 kV و 20 mA، 11- الوسط الفعال، 12- مقاومات كبح التيار، 13- صمامات، 14- مرآة عاكسة كلياً.

### 2.3 الامتصاص خارج المجاوب

نفذت التجربة باستخدام :

- ليزر CO<sub>2</sub> مستمر، قابل للتوليف، (انظر الشكل 1).
- خلية نحاس أسطوانية الشكل بقطر داخلي يساوي 33.4 mm وبطول يساوي 26 cm، مزودة بنوافذ من الـ KBr. تم وصل الخلية إلى نظام تخلية وإلى أسطوانات تحتوي غازات الفريونات، 11، 12، CFC-11، 12، [11] 22.

جرى تمرير الحزمة الليزرية عبر الخلية وقيست الإستطاعة النافذة بمقياس استطاعة ليزر CO<sub>2</sub>. وحدد الطول الموجي للخط الليزري بواسطة محلل الطيف. وتوزعت خطوط الليزر الطيفية المدروسة على العصبيتين 10.6 μm و 9.6 μm.

لتقدير تعريض خطوط الإصدار الليزرية لـ CO<sub>2</sub>، ينبغي أخذ كل من تعريض دوبلر (درجة حرارة الانفراغ حوالي 400 K) والتعريض الناتج عن الضغط (ضغط المزيج الغازي حوالي 18 mbar) بعين الاعتبار [12]. يعطى تعريض دوبلر  $\Delta v_D$  بالعلاقة التالية [1]:

$$\Delta v_D = 2v_0 \sqrt{\frac{2kT}{Mc^2} \ln 2} \quad (1)$$

حيث  $v_0$  التواتر المركزي لخط الإصدار الليزري، M كتلة جزيئة غاز CO<sub>2</sub>، k ثابتة بولتزمان، T درجة الحرارة الحركية للغاز، c سرعة الضوء.

ينتج عن هذه العلاقة أن قيم تعريض دوبلر تتأرجح بين القيمة  $2.02 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  (60.65 MHz) للخط 9R (30)  $(v_0 = 934.92 \text{ cm}^{-1})$  والقيمة  $2.34 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  (70.19 MHz) للخط (30) 9R  $(v_0 = 1084.62 \text{ cm}^{-1})$ .

من جانب آخر يمكن تقدير التعرض الضغطي لخطوط إصدار الليزر CO<sub>2</sub> وفق العلاقة [12]:

$$\Delta v_p (\text{Hz}) = 7.58 \times 10^6 (\Psi_{\text{CO}_2} + 0.73 \Psi_{\text{N}_2} + 0.64 \Psi_{\text{He}}) p (\text{mbar}) \left( \frac{300}{T(\text{K})} \right)^{1/2} \quad (2)$$

حيث  $\Psi_x$  النسبة المئوية لمركبة الغاز x، و p الضغط الكلي للغاز.

تعطي العلاقة (2) من أجل  $p = 18 \text{ mbar}$  والنسب  $1 : 2 : 4$  CO<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : He تعريضاً قدره  $\Delta v_p = 62.39 \text{ MHz}$ .

بتركيب هذين التعرضين، المتجانس (تعريض الضغط) واللامتجانس (تعريض دوبلر) يمكن تقدير التعريض الإجمالي (تعريض فويغت) وفق العلاقة [13,14]:

$$S(\nu) = \frac{0.939}{\delta v_D} \text{Re } W(x+ib), \quad \text{where} \quad (3)$$

$$x = 1.67 \frac{v_0 - \nu}{\delta v_D} \quad ; \quad b = 0.835 \frac{\delta v_p}{\delta v_D}$$

حيث ترمز Re إلى الجزء الحقيقي من التابع W (تابع الخطأ لمتحول عقدي).

تتراوح قيم تعريض فويغت التي نحصل عليها من العلاقة (3) بين القيمة 102.92 MHz عند الخط 10P (30) والقيمة 107.81 MHz عند الخط (30) 9R. يتسع هذا التعريض لنمطين طوليين إذ يبلغ الفاصل النمطي 53.57 MHz. تجدر الإشارة هنا إلى أن النمط المستعرض المركزي TEM<sub>00</sub> هو النمط المهيمن في التجربة.

من المعروف أن الجزيئات غير المتناظرة تحمل عزم ثنائي قطب كهربائي يسمح بحدوث انتقالات اهتزازية ضمن الجزيئة. يرافق هذه الانتقالات امتصاص (أو إصدار) أشعة تحت حمراء توافق في طاقتها فرق طاقتي السويتين العليا والدنيا للانتقال. وتتناسب شدة الامتصاص (أو الإصدار) مع قيمة عزم ثنائي القطب الكهربائي للجزيئة بين كلتا السويتين.

يتبع الامتصاص في خلية الغاز الموضوعه خارج المجاوب القانون الأسي المعروف باسم قانون بيير - لامبير والذي يمكن كتابته بالشكل [15]:

$$P = P_0 \exp[-\sigma_g \frac{P}{kT} L_g] \quad (4)$$

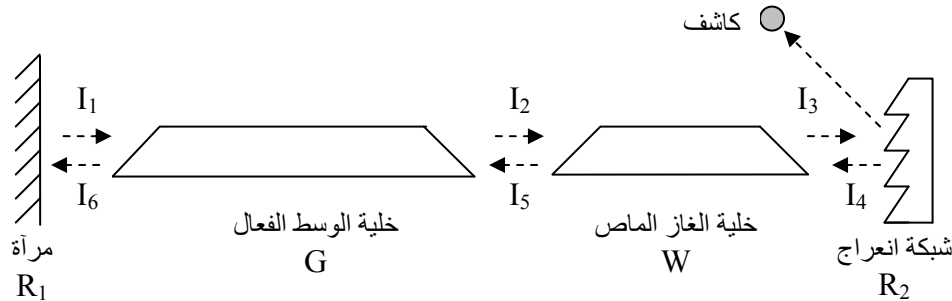
حيث  $P_0$  و  $P$  استطاعتا الخرج الليزري قبل وبعد عبور الوسط الماص،  $\sigma_g$  المقطع العرضي للامتصاص،  $p$  ضغط الغاز المدروس،  $L_g$  طول خلية الغاز الماص.

### 3.3 الامتصاص داخل المجاوب

يتضمن هذا الفصل جملة النماذج الفيزيائية والرياضية التي جرى تطويرها في هذا العمل بغية تفسير وتوصيف التخماد بفعل الامتصاص من داخل المجاوب. أول هذه النماذج وأهمها نموذج معادلات المعدل الذي يمثل تطويراً لنموذج ريغروود [16] لجهة إدخال الفقد الإضافي الناجم عن الامتصاص إلى معادلات المعدل. يلي ذلك عرض لنموذج تداخلي مبسط يسمح بتفسير ظاهرة التخماد المهتز كنتيجة لتغير طول المسار الضوئي في خلية الامتصاص ضمن المجاوب بفعل تغير قرينة انكسار الغاز مع ازدياد ضغط الغاز في الخلية. يأتي بعدها إلى إلقاء بعض الضوء على الأثر المحتمل الذي قد يخلفه تغير الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار على منحنى تخامد استطاعة خرج الليزر لجهة تشويه المعلومة الأساسية التي يحملها منحنى التخماد والمتمثلة في المقطع العرضي للامتصاص، حيث نقدم تقديراً تفصيلياً للضياعات المتعلقة بتغير زاوية ورود البروستري على السطح الفاصل بين الغاز ونافاذة الخلية، وكذلك الضياعات المرتبطة بتغير انعكاسية شبكة الانعراج بفعل تغير زاوية ورود الحزمة على الشبكة.

#### 1.3.3 معادلات المعدل

يقصد بمعادلات المعدل المعادلات التي تصف التطور الزمني لمعدلات إسكان السويات الطاقية المختلفة في الوسط الليزري مضافاً إليها معادلة التطور الزمني لكثافة الفوتونات ضمن المجاوب الليزري. يمكن الوصول إلى صياغة بسيطة لهذه المعادلات على قاعدة إهمال التغيرات التي تطرأ على معدلات الإسكان وكثافة الفوتونات في فواصل زمنية صغيرة بالمقارنة مع زمن الشوط (الزمن الذي يحتاجه الضوء لإتمام شوط كامل عبر المجاوب) وذلك وفق الطريق التي اختطها ريغروود [16]، مع وجود فارق بسيط ولكنه جوهري، وهذا الفارق يكمن في مراعاة خلية الغاز الماص المتوضعة داخل المجاوب كما هو مبين في الشكل 2.



الشكل 2 مخطط تمثيلي لدراسة الإصدار الليزري بوجود خلية امتصاص ضمن المجاوب.

لدى مرور حزمة الليزر عبر الوسط الفعال المكون من المزيج الغازي  $CO_2 : N_2 : He$  والمضخوخ بفعل الانعراج الكهربائي (إسكان معكوس)، تتعرض شدتها للتضخيم بفعل الإصدار المحثوث وفق ما يلي:

$$I = I_0 \cdot \exp[\sigma_{21} (M_2 - M_1) L_m] =: G \cdot I_0 \quad (5)$$

حيث:  $\sigma_{21}$  المقطع العرضي للانتقال الضوئي بين السويتين الليزريتين العليا (0001) والدنيا (1000)،  
 $M_{1(2)}$  كثافة إسكان السوية الدنيا (العليا)،  $L_m$  طول الوسط الفعال،  $I_0$  شدة الحزمة الابتدائية،  $I$  شدتها  
 لدى خروجها من الوسط الفعال، و  $G$  معامل التضخيم بالإصدار المحثوث.  
 من جهة ثانية فإن مرور الحزمة عبر خلية الغاز الماص يترافق مع ضياع جزء من شدتها بفعل الامتصاص  
 ويعبر عن ذلك بالعلاقة:

$$I = I_0 \cdot \exp[-\sigma_g N L_g] =: W \cdot I_0 \quad (6)$$

حيث:  $\sigma_g$  المقطع العرضي للامتصاص لدى جزيئات الغاز الماص،  $N$  كثافة الغاز الماص،  $L_g$  طول  
 أنبوبة الغاز الماص، أما المقدار  $W$  فيمثل معامل التوهين بالامتصاص.  
 كذلك فإن ارتداد الحزمة على سطح المرآة يترافق مع بعض الضياع في شدتها وفق العلاقة:

$$I = R_1 \cdot I_0 \quad (7)$$

حيث تمثل  $R_1$  انعكاسية المرآة. كذلك فإن ارتداد الحزمة على ذاتها لدى ورودها بزاوية مناسبة (زاوية  
 السطوع) على سطح شبكة الانعراج يترافق مع ضياع في الشدة، يُعبر عنه على غرار حالة المرآة وفق  
 العلاقة:

$$I = R_2 \cdot I_0 \quad (8)$$

حيث ترمز  $R_2$  إلى انعكاسية الشبكة.

يمكن الآن تتبع مسار الحزمة على امتداد شوط كامل عبر المجاوب وفق المخطط المبين في الشكل 2 وصولاً  
 إلى العلاقات التالية:

$$\begin{aligned} I_2 &= G \cdot I_1 & I_3 &= WG \cdot I_1 & I_4 &= R_2 WG \cdot I_1 \\ I_5 &= R_2 W^2 G \cdot I_1 & I_6 &= R_2 W^2 G^2 \cdot I_1 & I_7 &= R_1 R_2 W^2 G^2 \cdot I_1 \end{aligned} \quad (9)$$

تعطي العلاقة الأخيرة التغير الإجمالي لشدة الحزمة على امتداد الشوط، ويستفاد منها في صياغة معادلة  
 معدل تغير شدة الحزمة:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{\tau} (R_1 R_2 G^2 W^2 - 1) \cdot I \quad (10)$$

حيث استبدلت  $I_1$  بـ  $I$ .

وقبل الانتقال إلى صياغة معادلتى المعدل للسويتين الليزريتين العليا والدنيا، لا بد من حساب معدل حدوث  
 الإصدار المحثوث. يحسب إجمالي معدل الإصدار المحثوث في الوسط الفعال من إجمالي كسب الشدة (بفعل  
 الإصدار المحثوث)  $\Delta I_{st} = (I_2 - I_1) + (I_6 - I_5)$  بضرب هذا الأخير بمقطع الحزمة  $\sigma_{beam}$  وقسمة  
 الناتج على طاقة الفوتون الواحد  $h\nu$  (حيث ترمز  $h$  إلى ثابتة بلانك، و  $\nu$  إلى تواتر الضوء الذي يرتبط  
 بطول الموجة وفق  $(\nu = c/\lambda)$ . وعليه فإن معدل حوادث الإصدار المحثوث في واحدة الحجم من مادة  
 الوسط الفعال يحسب وفق:

$$\begin{aligned} \beta_{st} &= [(I_2 - I_1) + (I_6 - I_5)] \sigma_{beam} \frac{1}{h\nu} \frac{1}{L_m \sigma_{beam}} \\ &= \frac{1}{L_m h\nu} (G - 1)(1 + R_2 W^2 G) I \end{aligned} \quad (11)$$

وبذلك يمكن كتابة معادلة المعدل لكل من السويتين الفعاليتين الدنيا والعليا كالتالي:



$$\frac{dM_1}{dt} = \frac{1}{L_m h\nu} (G-1)(1+R_2 W^2 G) I + A_{21} M_2 - A_{10} M_1 \quad (12)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = -\frac{1}{L_m h\nu} (G-1)(1+R_2 W^2 G) I - A_{21} M_2 - A_{20} M_2 + \Phi \quad (13)$$

حيث  $\Phi$  معدل ضخ الوسط الفعال،  $A_{10}$ ،  $A_{20}$ ،  $A_{21}$  احتمالات الانتقال بين سويات الليزر 0، 1، 2. تمثل المعادلات (10، 12، 13) مصحوبة بالعلاقة التي تربط معامل التضخيم  $G$  بالإسكان المعكوس  $(M_2 - M_1)$ :

$$\ln G = (M_2 - M_1) \sigma_{21} L_m \quad (14)$$

ما يعرف بجلمة معادلات المعدل التي تصف التطور الزمني لجلمة الليزر.

ولما كان الليزر المستخدم في هذا العمل ليزراً مستمراً، فإن بالإمكان الاستغناء عن التطور الزمني للجلمة، والاكتفاء بالحل الذي يصف حالة الاستقرار والذي تتعدم عنده جميع المشتقات الزمنية  $dM_1/dt$ ،  $dM_2/dt$ ،  $dI/dt$ .

ضمن هذه الشروط يمكن حل جلمة المعادلات (10-14) تحليلياً، إذ تتحول المعادلة (11) إلى علاقة بسيطة تعطي قيمة معامل التضخيم  $G$  بتابعية معاملات الضياع الأخرى، الأمر الذي يقود مباشرة وفق المعادلة (14) إلى تحديد قيمة الإسكان المعكوس  $(M_2 - M_1)$ . ويمكن عندئذ انطلاقاً من المعادلتين (11) و (12) تحديد قيمة كل من  $M_1$  و  $M_2$  و  $I$ . وبذا يتم الحصول على الحل التحليلي المطلوب، الذي يعطي شدة الحزمة  $I$  بتابعية معدل الضخ ومعاملات الضياع المختلفة بما فيها الضياع عبر الامتصاص  $W$ . ويتجسد هذا الحل في المعادلة التالية:

$$I = L_m h\nu \frac{WR_1 \sqrt{R_2}}{(\sqrt{R_1} + W \sqrt{R_2})(1 - W \sqrt{R_1 R_2})} \left\{ \frac{A_{10} - A_{21}}{A_{10} + A_{20}} \Phi + \frac{A_{10}}{\sigma_{21} L_m} \frac{A_{20} + A_{21}}{A_{10} + A_{20}} \ln \sqrt{W^2 R_1 R_2} \right\} \quad (15)$$

وللانتقال أخيراً إلى استطاعة الخرج  $P_{out}$  المقيسة بمقياس الاستطاعة، نلاحظ أن هذه الأخيرة ترتبط بالشدة الواردة على شبكة الانعراج  $I_3$  وفق العلاقة:

$$P_{out} = (1 - R_2 - \Gamma_2) \sigma_{beam} I_3 \quad (16)$$

حيث تمثل  $\Gamma_2$  الضياعات الإضافية في شبكة الانعراج، وأن  $I_3$  بدورها تحسب وفق العلاقة:

$$I_3 = W G I \quad (17)$$

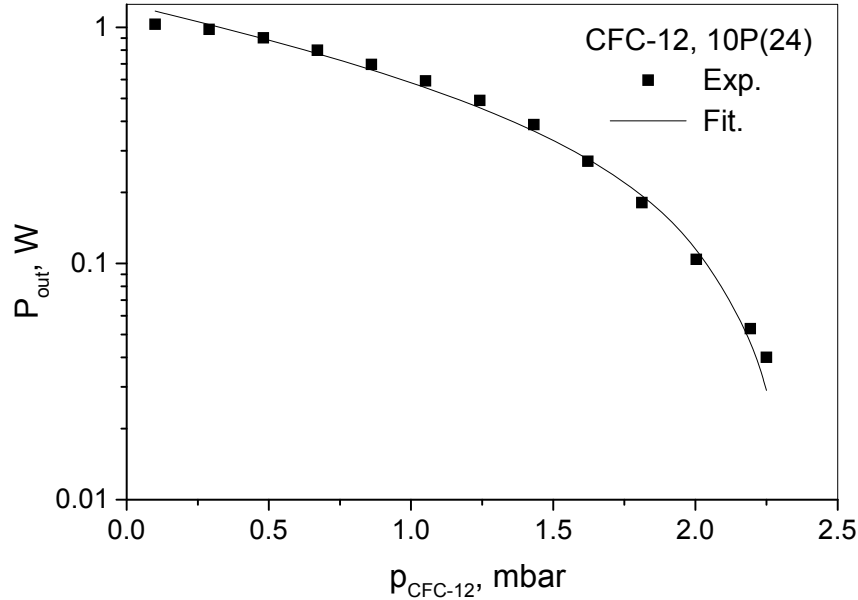
وإذا ما أخذنا الشرط  $A_{10} \square A_{20} \square A_{21}$  بعين الاعتبار، أمكننا حساب استطاعة خرج الليزر وفق المعادلة التالية:

$$P_{out} = (1 - R_2 - \Gamma_2) \sigma_{beam} L_m h\nu \times \frac{W \sqrt{R_1}}{(\sqrt{R_1} + W \sqrt{R_2})(1 - W \sqrt{R_1 R_2})} \left\{ \Phi + \frac{A_{20}}{\sigma_{21} L_m} \ln \sqrt{W^2 R_1 R_2} \right\} \quad (18)$$

تجسد هذه العلاقة جوهر ما يلزم لدراسة الامتصاص داخل المجاوب، إذ أنها تسمح بحساب استطاعة الخرج بتابعية  $W$  التي تتعلق حصرياً بكثافة (أو ضغط) الغاز الماص، والمقطع العرضي للامتصاص لدى جزيئة هذا الغاز أي  $W = \exp(-\sigma_g N L_g)$ . ولما كانت الزيادة التدريجية لضغط الغاز الماص لا تؤثر فيما عدا

$W$  في أي من الوسطاء الواردة في المعادلة (18)، فإن بإمكاننا استخدام هذه المعادلة في موازنة رياضية لمنحنيات التخامد المقيسة بهدف تحديد المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$ .

ييدي هذا النموذج كفاءة جيدة في توصيف الامتصاص داخل المجاوب في حالة منحنيات التخامد غير المهتزة، كما هو مبين في الشكل 3 في مثال الخط 10P(24) والغاز الماص CFC-12.



**الشكل 3** تخامد استطاعة خرج الليزر على الخط 10P(24) مع ازدياد ضغط الغاز الماص CFC-12. يبين الشكل كفاءة العلاقة (18) (الخط المتصل) في توصيف منحنى التخامد المقاس تجريبياً (المربعات المصمتة).

### 2.3.3 نموذج التداخل

يقوم هذا النموذج على تفسير ظاهرة التخامد المهتز التي تمثل الطابع الرئيس لمنحنيات التخامد لدى طيف واسع من الخطوط (لاسيما الخطوط ضعيفة الامتصاص)، كظاهرة ناجمة عن تداخل أمواج الفوتونات المترابطة في الطور، والمتباينة في عدد الأشواط التي قطعتها داخل المجاوب منذ لحظة إصدارها في الوسط الفعال. ولما كان الانزياح الطوري تابعاً لقرينة انكسار الغاز الماص، وهذه بدورها تتغير بتغير ضغط الغاز في خلية الامتصاص، فإن التداخل سيكون بناءً عند قيم معينة للضغط وهداماً عند قيم أخرى. أي أن استطاعة خرج الليزر ستبدي سلوكاً اهتزازياً بتابعية ضغط الغاز الماص.

يمكن توصيف سلوك الوسط الفعال في هذا النموذج (وضمن شروط الاستقرار التي تحكم عمل الليزر المستمر) باعتباره منبعاً مستمراً لموجة جيبية مترابطة ذات سعة ثابتة  $A$ ، يتعلق بالإسكان المعكوس، ويتحدد عبر تحقيق شرط التوازن بين الضخ والخسارة. عندئذ يأخذ الحقل الكهربائي لهذه الموجة  $E(t)$  الشكل التالي:

$$E(t) = \sum_{n=0}^N A \gamma^n \cos(\omega t - n\delta) \quad (19)$$

حيث ترمز  $\gamma$  إلى التوهين الكلي، الذي يتعرض له الحقل على امتداد شوط كامل عبر المجاوب الواحد، وتعبّر  $N$  عن عدد الأشواط المترابطة (مسافة الترابط مقسومة على مسافة الشوط). بينما تمثل  $\omega$  التواتر الدوراني للموجة، و  $\delta$  الانزياح الطوري المرافق للشوط الواحد، وتعبّر  $N$  عن عدد الأشواط المترابطة (مسافة الترابط مقسومة على مسافة الشوط).

لتسهيل الوصول إلى حل تحليلي بسيط للسلسلة (19) نفترض أن  $\gamma^N \ll 1$ ، عندئذ تنتهي السلسلة إلى:

$$E(t) = \frac{A}{\sqrt{1+\gamma^2-2\gamma\cos\delta}} \cos(\omega t - \theta_0) \quad (20)$$

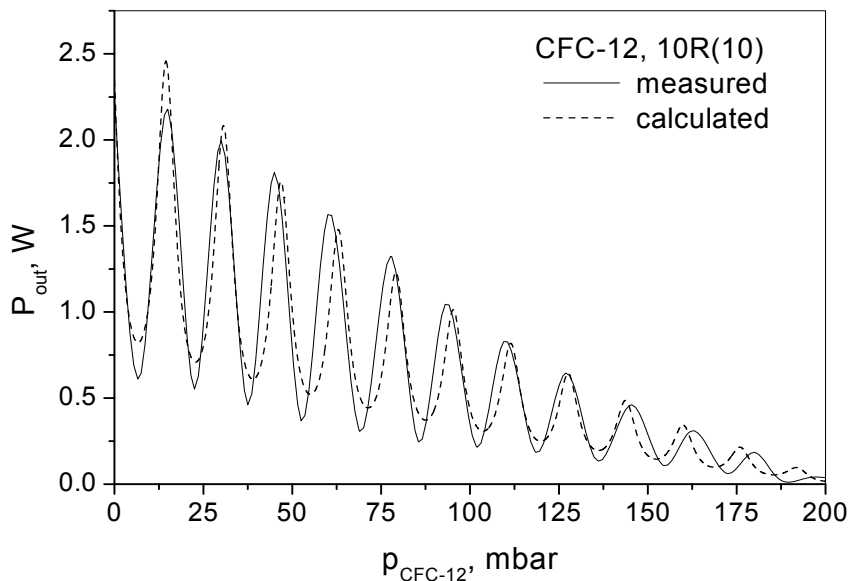
حيث ترمز  $\theta_0$  إلى الطور الابتدائي الثابت للحقل الكلي. أما شدة الحزمة فتحسب والحالة هذه وفق العلاقة:

$$I = \varepsilon_0 c \overline{E^2(t)} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c A^2 \frac{1}{1+\gamma^2-2\gamma\cos\delta} \quad (21)$$

تنطوي هذه العلاقة على تابعة معقدة لضغط الغاز في خلية الامتصاص، حيث أن كلا من  $\gamma$  و  $\delta$  وكذلك  $A$  تتعلق بشكل مباشر أو غير مباشر بالضغط. لكن وقبل الدخول في التفاصيل لا بد من الإشارة إلى أن العلاقة السابقة لا تمثل في أية حال من الأحوال بديلاً عن العلاقة (18)، أي أن نموذج التداخل الجاري عرضه في هذه الفقرة ليس بديلاً لنموذج معادلات المعدل الذي ورد في الفقرة السابقة، إذ أن نموذج التداخل لا يقدم أي معلومة عن علاقة مطال الإصدار  $A$  بالامتصاص  $W$ . لذلك فإن جلاً ما يؤمل من هذا النموذج، هو تقديم تفسير مرض للاهتزاز المتركب مع التخامد. أي أن نموذج التداخل يصلح لحساب الشدة النسبية  $f(p)$  التي تعرف هنا كنسبة الشدة  $I(\delta)$  عند الانزياح الطوري  $\delta$  إلى الشدة عند التوافق الطوري  $I(0)$ . ومن العلاقة السابقة نجد:

$$f(p) = \frac{(1-\gamma)^2}{1+\gamma^2-2\gamma\cos\delta(p)} \quad (22)$$

تمثل العلاقة (22) تابع تعديل modulation للعلاقة السابقة (18) يراعي أثر الانزياح الطوري على استطاعة الخرج في حين تفترض العلاقة (18) في شكلها الأصلي ضمناً تحقق شرط التوافق الطوري لدى جميع نقاط القياس. وبينما يمكننا الاكتفاء بالعلاقة (18) في حالة الخطوط شديدة الامتصاص حيث يأخذ تابع التعديل  $f(p)$  القيمة 1 (أو بالأصح قيمة ثابتة) على امتداد محور الضغط، فإن توصيف منحنيات التخامد في حالة الخطوط ضعيفة الامتصاص يقتضي ضرب الطرف الأيمن من العلاقة (18) بالتابع  $f(p)$  المعروف وفق العلاقة (22)، والذي يترك في هذه الحالة بصمة واضحة على سلوك منحنى التخامد، كما هو مبين في الشكل 4 في مثال الخط 10R(10) والغاز الماص CFC-12.



**الشكل 4** منحني تخامد استطاعة الخرج على الخط (10R(10 في الغاز الماص CFC-12 (داخل (المجاوب). يبين الشكل كفاءة العلاقة (18) المعدلة بالتابع  $f(p)$  (تابع التداخل) المحسوب وفق العلاقة (22) (خط منقطع) في توصيف منحني التخامد المهتز المقاس تجريبياً (خط متصل).

وفيما يخص التطبيق العملي لنموذج التداخل في تحليل منحنيات التخامد المقيسة تجريبياً فإننا نجني فائدة مضاعفة من العلاقة (22). فهي تسمح بحساب الاستقطابية الخطية  $\eta$  لجزيئة الغاز الماص انطلاقاً من قياس دور الاهتزاز (المسافة بين قمتين عظميتين متتاليتين على محور الضغط) من جهة، وتبين من جهة ثانية أن العلاقة (18) صالحة في شكلها البسيط غير المعدل لتوصيف سلوك القمم العظمى في منحني التخامد (حيث يأخذ تابع التعديل القيمة الثابتة 1) وصولاً إلى تحديد قيمة المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$ .

يكتب الانزياح الطوري  $\delta$  المرافق لشوط كامل عبر المجاوب وفق العلاقة:

$$\begin{aligned}\delta &= \omega \tau \\ &= \omega [2L + 2(n'-1)L_g] / c \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [2L + 2(n'-1)L_g] \\ &= \delta_0 + 4\pi \frac{L_g}{\lambda} (n'-1)\end{aligned}\quad (23)$$

حيث تمثل  $L$  الطول الهندسي الكلي للمجاوب منقوصاً منه طول الخلية، و  $\lambda$  طول الموجة، بينما ترمز  $n'$  إلى الجزء الحقيقي لقرينة انكسار الغاز الماص، وتتبع ضغط الغاز وفق علاقة لورنتز - لورنس [10]:

$$\begin{aligned}n'-1 &= 2\pi \eta N_g \\ &= 2\pi \eta \frac{p}{kT}\end{aligned}\quad (24)$$

حيث ترمز  $N_g$  إلى كثافة الغاز، بينما تعبر  $\eta$  عن قابلية الاستقطاب الخطي للغاز والتي عادة ما يشار إليها باسم "الاستقطابية". بالتعويض في العلاقة السابقة نحصل على الانزياح الطوري كتابع للضغط:

$$\delta(p) = \delta_0 + 8\pi^2 \frac{L_g}{\lambda} \eta \frac{p}{kT}\quad (25)$$

ينتج من هذه العلاقة أن المسافة  $\Delta p$  بين قمتين عظميتين متتاليتين (فارق الانزياح الطوري  $2\pi$ ) ترتبط بالاستقطابية  $\eta$  وفق العلاقة البسيطة التالية:

$$\Delta p = \frac{1}{4\pi} kT \frac{\lambda}{L_g} \frac{1}{\eta}\quad (26)$$

تسمح هذه العلاقة بحساب قيمة الاستقطابية  $\eta$  انطلاقاً من المسافات  $\Delta p$  المقاسة تجريبياً بين القمم المتتالية لدى جميع الخطوط التي تبدي تخامداً اهتزازياً.

### 3.3.3 الضياعات الناجمة عن تغير زاوية الورود البروستري

لدى ورود شعاع من الضوء على السطح الفاصل بين وسطين مختلفين ضوئياً (قرينة انكسار الأول  $n$  والثاني  $n'$ ) بزاوية ورود  $\theta$  (الزاوية بين الشعاع الوارد والناظم على السطح الفاصل) ينقسم شعاع الحقل الوارد  $\vec{E}$  إلى مركبتين تنكسر إحداهما  $\vec{E}'$  مخترقة السطح الفاصل إلى داخل الوسط الثاني بزاوية  $\theta'$  تتحدد وفق قانون سنيل [17]:

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad (27)$$

بينما تنعكس الأخرى على السطح الفاصل مرتدة داخل الوسط الأول بزواوية  $\theta''$  تساوي في قيمتها زاوية الورد  $\theta$ .

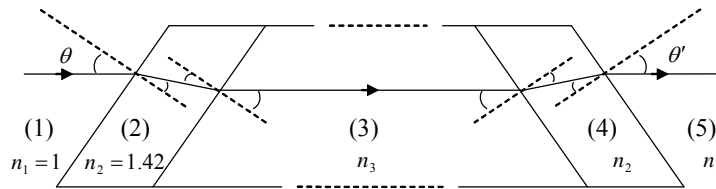
يعرّف معامل الإنفاذ  $\tau$  وفق  $\tau = |\vec{E}'|/|\vec{E}|$ ، ومعامل الانعكاس  $\rho$  وفق  $\rho = |\vec{E}''|/|\vec{E}|$ ، وتعرّف الإنفاذية  $T$  وفق  $T = P'/P$ ، والانعكاسية  $R$  وفق  $R = P''/P$ ، حيث تعبر  $P$ ،  $P'$ ،  $P''$  على الترتيب عن الاستطاعة الواردة، النافذة، والمنعكسة. تحسب  $R$  و  $T$  بتابعية  $\theta$ ،  $\theta'$ ،  $\theta''$  وفق [17]:

$$\begin{aligned} T &= \tau^2 \frac{n' \cos \theta'}{n \cos \theta} & ; & \quad \tau = \frac{2 \sin \theta' \cos \theta}{\sin(\theta + \theta') \cos(\theta - \theta')} \\ R &= \rho^2 & ; & \quad \rho = \frac{\tan(\theta - \theta'')}{\tan(\theta + \theta'')} \end{aligned} \quad (28)$$

(تفترض العلاقات السابقة أن  $\vec{E}$  مستقطب في مستوي الورد، وهي الحالة الأكثر انطباقاً على حالة الليزر). يتضح من العلاقات السابقة أن الانعكاسية تنعدم كلياً عند زاوية ورود معينة  $\theta_B$  تتحقق عندها العلاقة  $\theta_B + \theta'_B = \pi/2$ . يطلق على  $\theta_B$  اسم زاوية بروستر، وتحسب بالاستفادة من قانون سنيل وفق العلاقة  $\tan \theta_B = n'/n$ .

تراعى زاوية بروستر لدى تصميم مختلف جدران الفصل التي تعترض حزمة الليزر في تجوالها داخل المجاوب، وذلك تجنباً للضياعات التي قد تحدث بفعل الانعكاس.

وعلى الخصوص فإن قاعدتي أنبوبة الغاز الماص قد صممتا بحيث يصنع الناظم على كل منهما مع محور الأنبوبة (المحور الضوئي) زاوية قدرها  $54.8^\circ$  مساوية لزاوية بروستر بين الهواء ( $n_1 = 1$ ) ومادة القاعدة  $\text{BaF}_2$  ( $n_2 = 1.42$ ). أي أن حزمة الليزر تنفذ دون أية ضياعات من الوسط (1) إلى الوسط (2) في الشكل التمثيلي التالي الذي يبين مسار الحزمة عبر خلية الغاز الماص:



الشكل 5 مخطط تمثيلي لمسار الحزمة عبر خلية الغاز الماص.

ولكن إذا ما أخذنا بعين الاعتبار أن قرينة انكسار الغاز الماص  $n_3$  قد تشذ بوضوح عن قيمة  $n_1$ ، فإن الورد من الوسط (2) إلى الوسط (3) لن يكون بروسترياً، أي إن الإنفاذية  $T_{23}$  ستأخذ قيمة أصغر من الواحد. وكذلك هي حال  $T_{34}$  عند الجدار الداخلي للقاعدة المقابلة التي ستخرج منها الحزمة. ومن جهة ثانية فإن ما يتبع ذلك من انحراف طفيف للحزمة عن المحور الضوئي يجعل الورد من الوسط (4) إلى الوسط (5) أيضاً غير بروستري ( $T_{45} < 1$ ).

لتقدير حجم الضياعات التي قد تنجم عن تراجع إنفاذية خلية الغاز الماص جرى إعداد برنامج حاسوبي يتتبع مسار الحزمة عبر الخلية على امتداد شوط كامل عبر المجاوب، وبحسب الإنفاذية الكلية للخلية بالاستفادة من العلاقات السابقة مع مراعاة مختلف الانزياحات التي تتعرض لها زاوية الورد جراء تغير قرينة انكسار الوسط 3. وقد بيّن الحساب أن التراجع النسبي في إنفاذية الخلية  $\Delta T_c/T_c$  يبقى من مرتبة  $10^{-4}$  لدى تزايد  $n_3$  من القيمة المثالية 1 إلى القيمة  $n_3 = 1.005$  (وهي قيمة كبيرة نسبياً يصعب تجاوزها بالنسبة للأوساط الغازية).

وبعبارة أخرى فإن الضياعات الناجمة عن تغير  $T_c$  صغيرة إلى حد الإهمال إذا ما قورنت بالضياعات على مرآة الدخول (2%) أو على شبكة الانعراج التي تمثل مرآة الخرج (25%)، وكذلك إذا ما قورنت بالضياعات الناجمة عن الامتصاص.

### 4.3.3 الضياعات المتعلقة بتغير زاوية الورود على شبكة الانعراج

يظهر من الشكل 5 أن خلية الغاز الماص تمثل موشوراً من شأنه – إذا ما أخذنا بعين الاعتبار أن قرينة انكسار الغاز قد تشد بوضوح عن قرينة انكسار الهواء – أن يحرف حزمة الليزر عن المحور الضوئي للمجاوب محدثاً تغيراً ملحوظاً في زاوية ورود الحزمة على شبكة الانعراج، الأمر الذي قد يؤدي بدوره إلى تراجع ملحوظ في انعكاسية الشبكة. عندها ستكون النتيجة تخامداً إضافياً لاستطاعة الليزر مع ازدياد ضغط الغاز الماص يتراكب كخطأ منهجي مع التخامد الناجم عن الامتصاص والمراد قياسه.

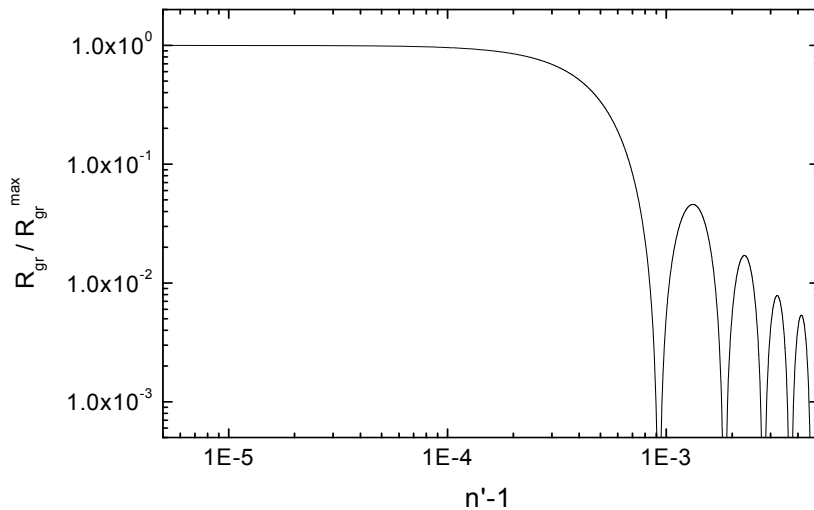
لتقدير حجم ذلك الخطأ المنهجي المحتمل جرى إعداد برنامج حاسوبي ينطلق من حالة الورود المثالي بزواوية  $\alpha_{gr}$  مساوية لزاوية تألق الشبكة من أجل طول الموجة المراد فصله (الأمر الذي يحاكي تماماً عملية ضبط زاوية الشبكة قبل الشروع بضخ الغاز الماص). بعدها يسمح البرنامج لقرينة الانكسار بالنمو تدريجياً (محاكياً في ذلك عملية ضخ الغاز الماص إلى الخلية)، ويحسب عند كل قيمة  $n'$  انحراف الحزمة عن المحور الضوئي وما يتبعه من تغير في زاوية الورود على الشبكة  $\alpha_{gr}(n')$ . بعدها يجري حساب انعكاسية الشبكة وفق العلاقة [1]:

$$R_{gr}(n') = R_{gr}^{\max} \left[ \frac{1}{M+1} \sum_{m=0}^M \cos m\phi(n') \right]^2, \quad (29)$$

$$\phi(n') = \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \alpha_{gr}(n')$$

حيث  $R_{gr}(n')$  انعكاسية الشبكة عند القيمة  $n'$  لقرينة الانكسار،  $R_{gr}^{\max}$  الانعكاسية العظمى التي نحصل عليها من أجل  $n'=1$ ،  $d$  خطوة الشبكة وتبلغ في هذا العمل  $10\mu\text{m}$ ، و  $M$  عدد حزوز الشبكة الواقعة ضمن مقطع الحزمة.

جرى حساب الانعكاسية على امتداد المجال من  $n'=1$  إلى  $n'=1.005$ . يعرض الشكل 6 نتائج الحساب ممثلة بالانعكاسية النسبية  $R_{gr}/R_{gr}^{\max}$  بتابعية  $n'-1$ .



الشكل 6 الانعكاسية النسبية للشبكة  $R_{gr}/R_{gr}^{\max}$  بتابعية قرينة انكسار الغاز الماص  $n'-1$ .

يتضح من الشكل أن  $R_{gr}$  تحافظ على قيمتها العظمى  $R_{gr}^{\max}$  على امتداد المجال  $0 < n' - 1 < 10^{-4}$ . بعدها تتناقص الانعكاسية بشدة إلى أن تنعدم عند  $n' - 1 \approx 10^{-3}$ ، لتعود بعد ذلك إلى النمو من جديد في سلوك اهتزازي متخامد بشدة، إذ لا تتجاوز قيمة الانعكاسية عند القمة العظمى الأولى 5% فقط من قيمة  $R_{gr}^{\max}$ .

يتضح مما تقدم أن تغير انعكاسية الشبكة بفعل التغير الطفيف الذي يطرأ على زاوية ورود الحزمة على الشبكة يبقى صغيراً إلى حد الإهمال طالما بقيت  $n' - 1 < 10^{-4}$  (وهي قيمة كبيرة نسبياً فيما يخص الأوساط الغازية). أما إذا تجاوزت قرينة انكسار الغاز تلك القيمة الحدية فإن تناقص انعكاسية الشبكة  $R_{gr}$  مع ازدياد ضغط الغاز يصبح من مرتبة التخامد الناجم عن الامتصاص، الأمر الذي يشكل خطأ منهجياً لا بد من مراعاته لدى قياس  $\sigma_g$  داخل المجاوب.

## 4. النتائج والمناقشة

جرى استكمال منحنيات تخامد استطاعة خرج الليزر بدلالة ضغط غاز CFC في خلية الامتصاص ضمن المجاوب، المتوفرة من العمل السابق [8]، ليبلغ تعداد الخطوط المقيسة 44 خطأ من خطوط إصدار الليزر CO<sub>2</sub> تقع جميعها في المجال تحت الأحمر موزعة ضمن الفروع الطيفية الأربعة التالية: 10P، 10R، 9P، 9R؛ من أجل ثلاثة غازات هي: CFC-11، CFC-12، و CFC-22.

كذلك جرى قياس منحنيات التخامد للغاز CFC-22 من خارج المجاوب، وذلك بهدف الحصول على قياس تجريبي إضافي للمقطع العرضي للامتصاص مستقل تماماً عن النموذج المستخدم في تحليل منحنيات التخامد داخل المجاوب.

تم تحليل منحنيات التخامد هذه وفق التفصيل التالي:

### منحنيات التخامد غير المهتز

جرى استخلاص قيمة المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  عبر موازنة العلاقة (18) مع منحنى التخامد باستخدام جميع نقاط القياس.

### منحنيات التخامد المهتز

جرى استخلاص قيمة المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  عبر موازنة العلاقة (18) مع منحنى التخامد المتولد عن القمم العظمى دون سواها من نقاط القياس. جرى حساب قيمة الاستقطابية  $\eta_g$  من الخطوة  $\Delta p$  بين قمتين متتاليتين وفق العلاقة (26).

### منحنيات التخامد خارج المجاوب

جرى استخلاص قيمة المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  عبر الموازنة مع العلاقة (4).

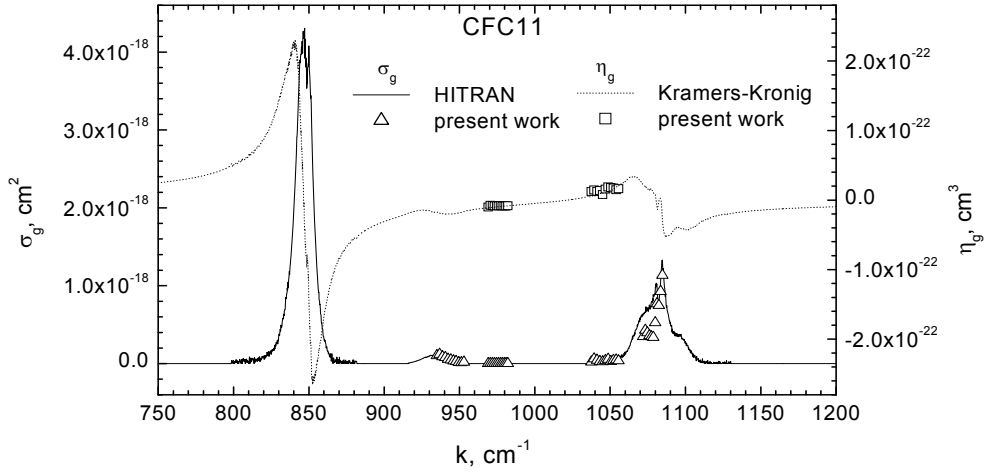
تتضمن الصفحات التالية عرضاً تفصيلياً للنتائج في مقارنة مع قيم  $\sigma_g$  المنشورة في قاعدة البيانات Hitran [18]، وقيم  $\eta_g$  المحسوبة منها وفق علاقة كرامرس - كرونينغ [19]:

$$\eta(k) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{\sigma(k')}{k'^2 - k^2} dk' \quad (30)$$

حيث يرمز  $k$  إلى العدد الموجي (مقلوب طول الموجة).

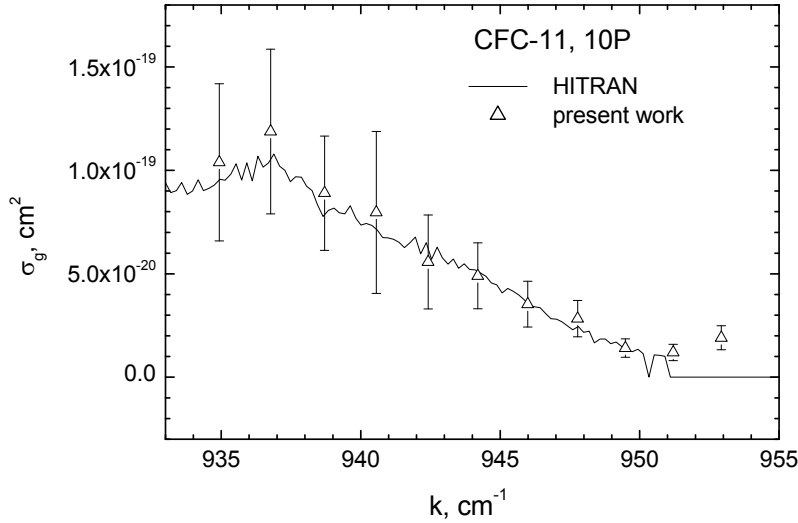


## 1.4 المقاطع العرضية واستقطابية الغاز CFC-11

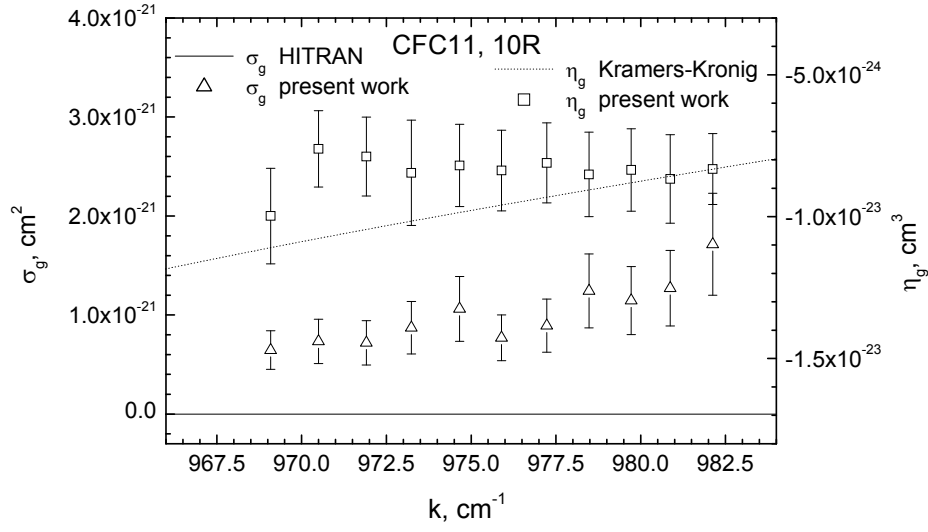


الشكل 7 المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-11. تمثل الرموز نتائج هذا العمل، بينما يمثل الخط المتصل قيم  $\sigma_g$  المنشورة في Hitran، والخط المنقط قيم  $\eta_g$  المحسوبة منها وفق علاقة كرامرس-كرونينغ (30).

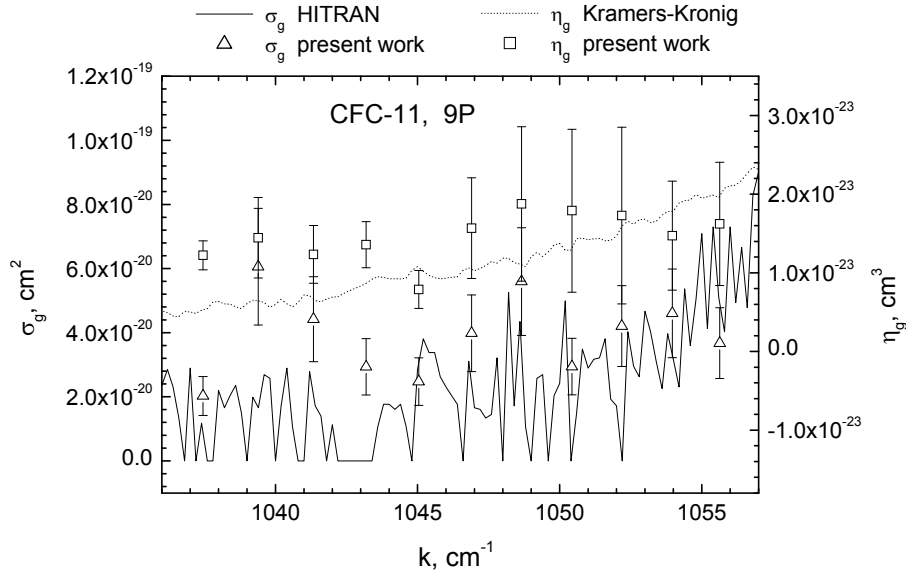
وفيما يلي تفصيل هذه النتائج من أجل كل فرع طيفي من الفروع 9R ، 9P ، 10R ، 10P.



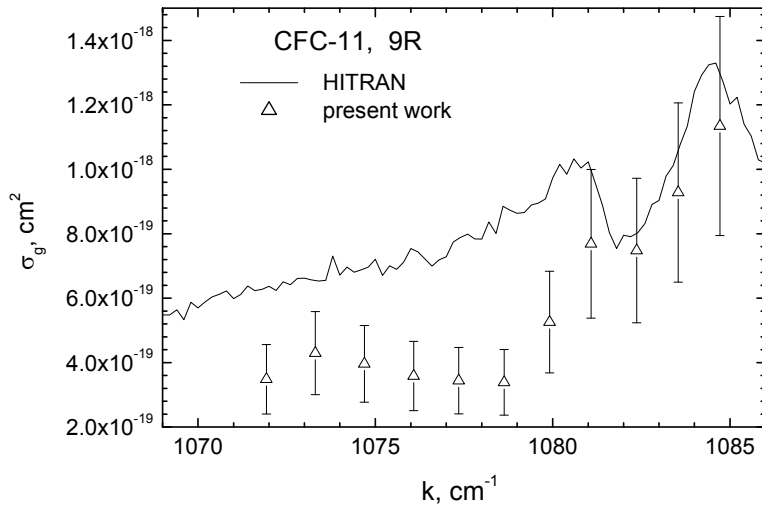
الشكل 8a المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  في الغاز CFC-11 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 10P. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل).



الشكل 8<sub>b</sub> المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-11 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 10R. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونيج (خط منقط).

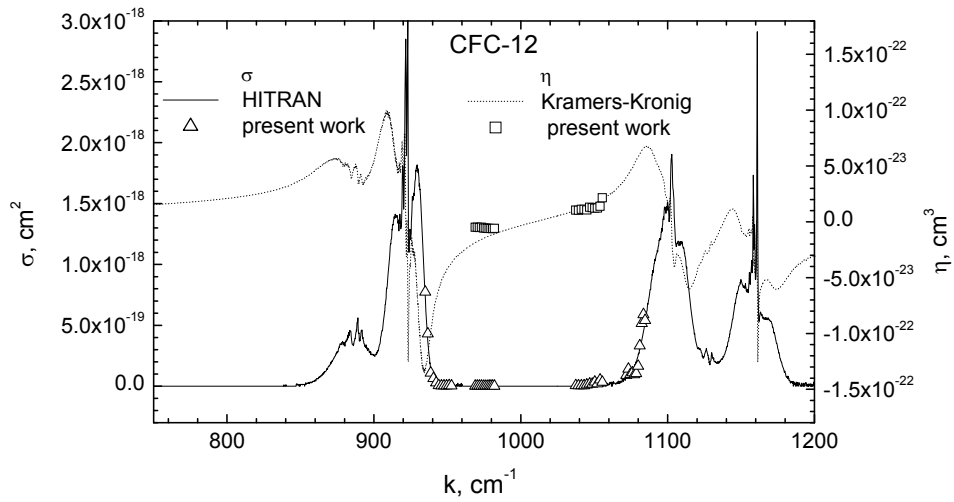


الشكل 8<sub>c</sub> المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-11 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 9P. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونيج (خط منقط).



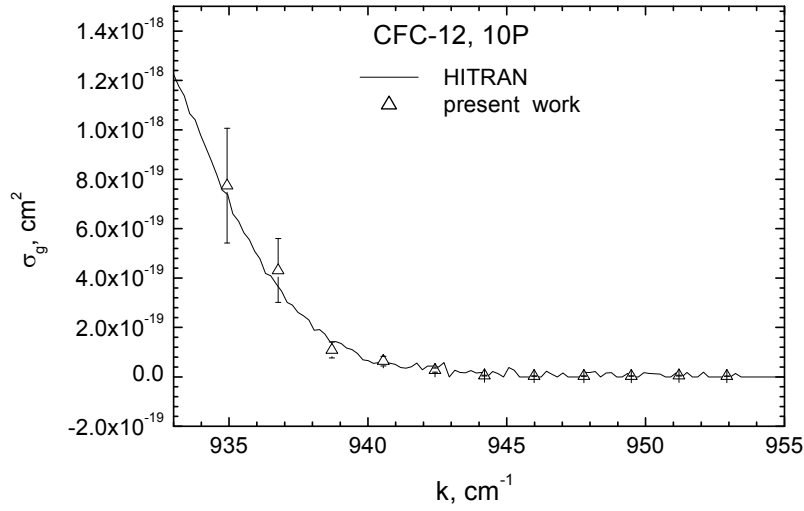
الشكل 8 المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  في الغاز CFC-11 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 9R. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل).

## 2.4 المقاطع العرضية واستقطابية الغاز CFC-12

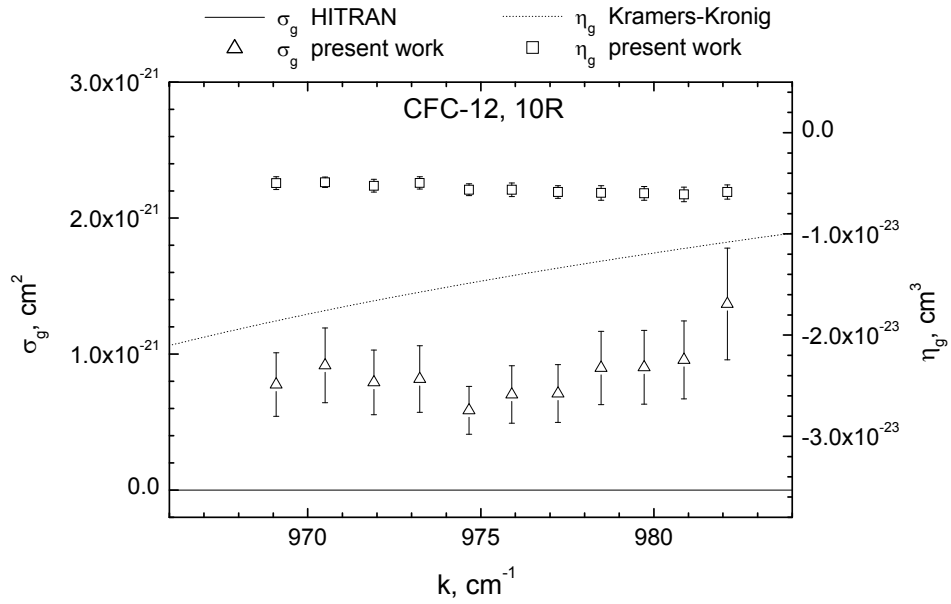


الشكل 9 المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-12. تمثل الرموز نتائج هذا العمل، بينما يمثل الخط المتصل قيم  $\sigma_g$  المنشورة من قبل مجموعة Hitran، والخط المنقط قيم  $\eta_g$  المحسوبة منها وفق علاقة كرامرس-كرونيغ.

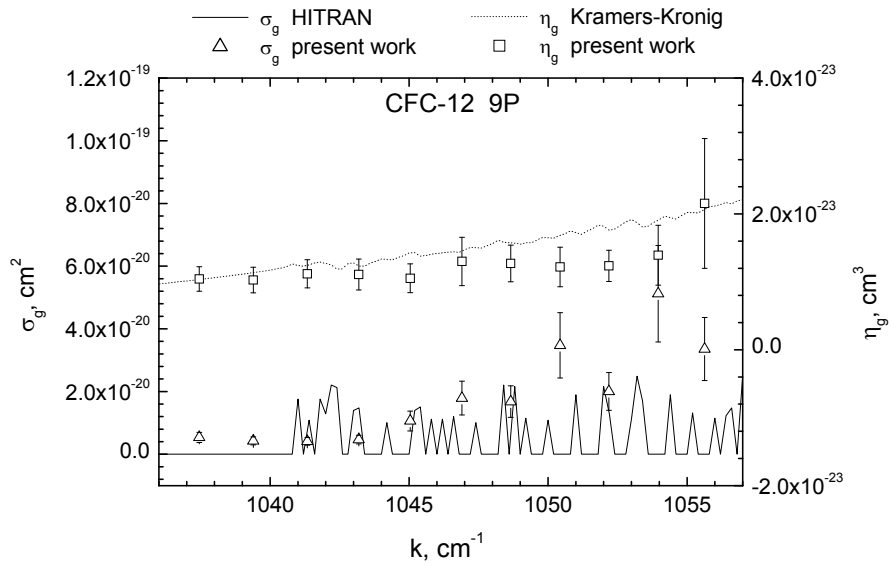
وفيما يلي تفصيل هذه النتائج من أجل كل فرع طيفي من الفروع 9R ، 9P ، 10R ، 10P.



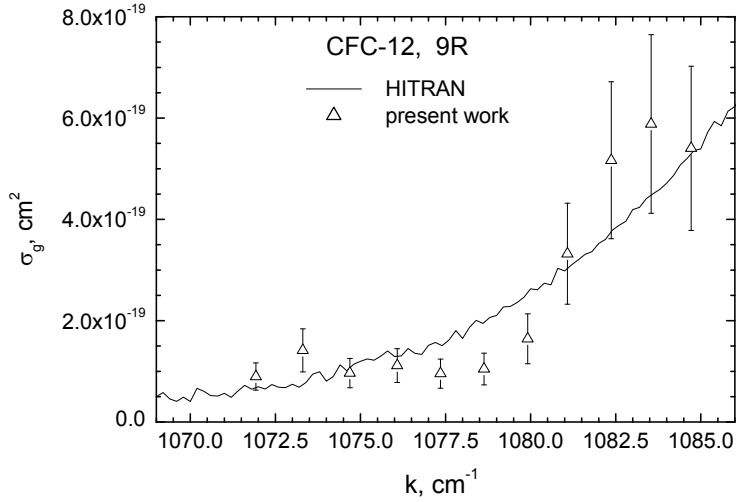
الشكل 10a المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  في الغاز CFC-12 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 10P. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل).



الشكل 10b المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-12 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 10R. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونينغ (خط منقط).

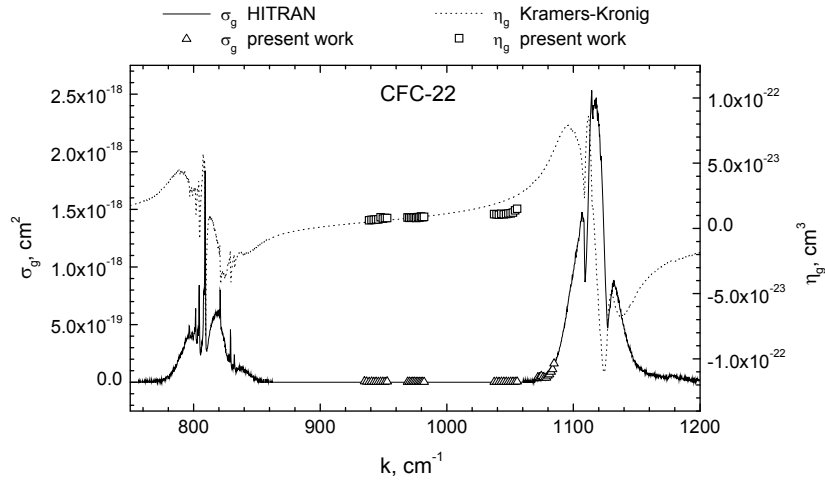


الشكل 10c المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-12 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 9P. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونينغ (خط منقط).



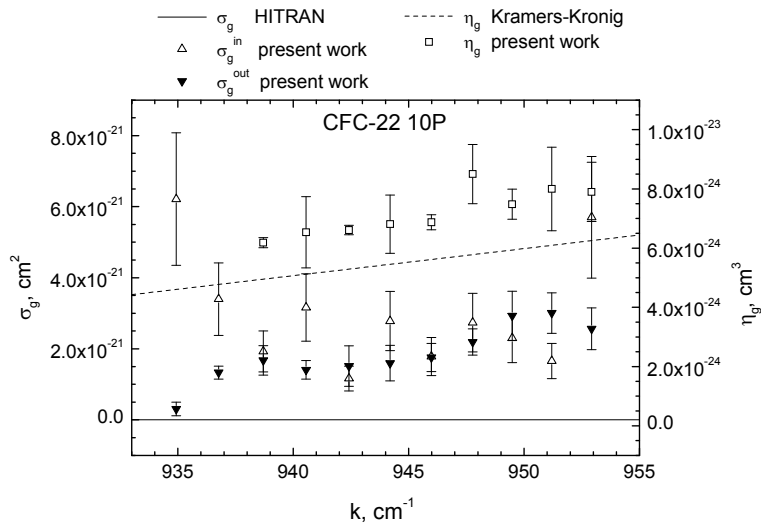
الشكل 10d المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  في الغاز CFC-12 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 9R. تبين الرموز نتائج هذا العمل بالمقارنة مع طيف الامتصاص المقاس من قبل مجموعة Hitran (خط متصل).

### 3.4 المقاطع العرضية واستقطابية الغاز CFC-22

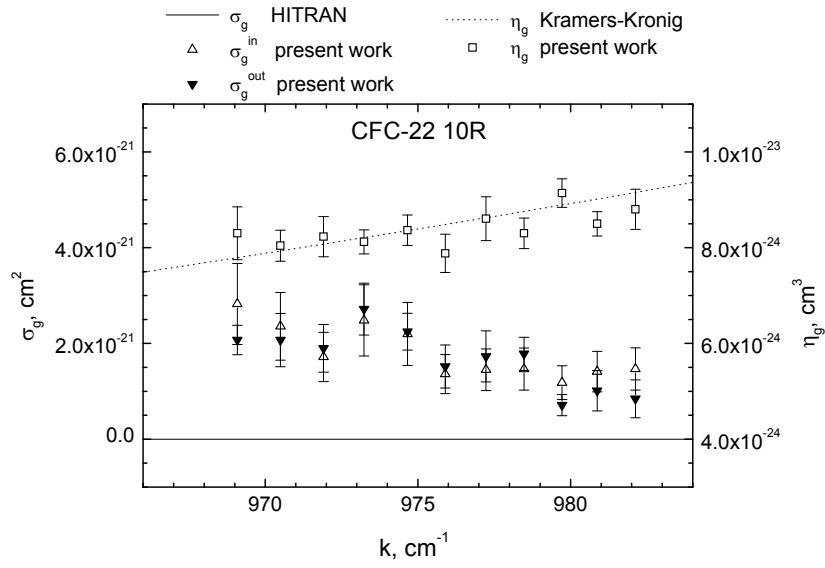


الشكل 11 المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-22. تمثل الرموز نتائج هذا العمل، بينما يمثل الخط المتصل قيم  $\sigma_g$  المنشورة من قبل مجموعة Hitran، والخط المنقط قيم  $\eta_g$  المحسوبة منها وفق علاقة كرامرس-كرونينغ.

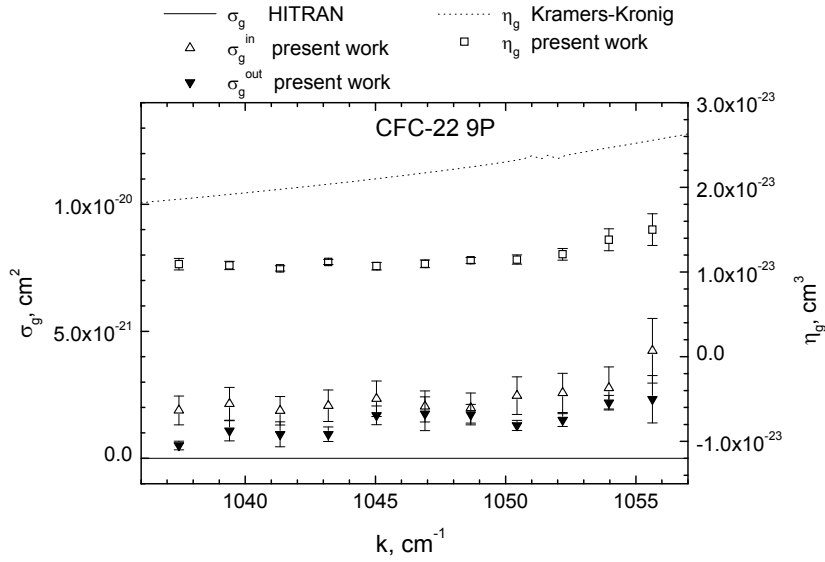
وفيما يلي تفصيل هذه النتائج من أجل كل فرع طيفي من الفروع 9R ، 9P ، 10R ، 10P .



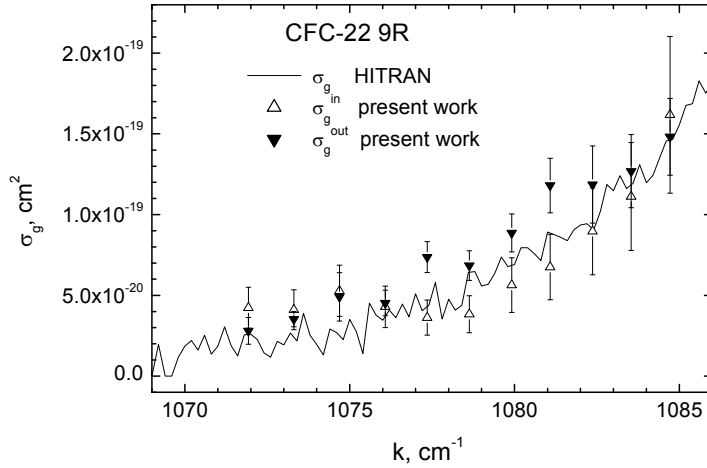
الشكل 12a المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-22 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 10P بالمقارنة مع طيف الامتصاص المنشور في Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونينغ (خط منقط). تبين الرموز الفارغة نتائج القياس داخل المجاوب بينما تمثل المثلاث المصمتة المقلوبة قيم  $\sigma_g$  المقاسة خارج المجاوب.



**الشكل 12b** المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-22 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 10R بالمقارنة مع طيف الامتصاص المنشور في Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونيغ (خط منقط). تبين الرموز الفارغة نتائج القياس داخل المجاوب بينما تمثل المتلثات المصمتة المقلوبة قيم  $\sigma_g$  المقاسة خارج المجاوب.



**الشكل 12c** المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  والاستقطابية  $\eta_g$  في الغاز CFC-22 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 9P بالمقارنة مع طيف الامتصاص المنشور في Hitran (خط متصل) ومنحني الاستقطابية الموافق تبعاً لعلاقة كرامرس-كرونيغ (خط منقط). تبين الرموز الفارغة نتائج القياس داخل المجاوب بينما تمثل المتلثات المصمتة المقلوبة قيم  $\sigma_g$  المقاسة خارج المجاوب.



**الشكل 12د** المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  في الغاز CFC-22 من أجل الخطوط الواقعة في الفرع 9R بالمقارنة مع طيف الامتصاص المنشور في Hitran (خط متصل). تبين المثلاثات الفارغة قيم  $\sigma_g$  داخل المجابوب بينما تمثل المثلاثات المصمتة المقلوبة نتائج القياس خارج المجابوب.

يتبين من النتائج السابقة أن قيم المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  (الأشكال 7-12)، تبدي ضمن حدود الخطأ (30%) تطابقاً جيداً مع القيم المرجعية Hitran [18] في حال توفر هذه الأخيرة. يستثنى من ذلك عدد قليل من خطوط الحزمة 9R في الغاز CFC-11 (انظر الشكل 8د)، حيث تأخذ  $\sigma$  قيمة أصغر بحوالي 50% من القيم المرجعية. ولما كان العمل الحالي لا يعنى بالقياس التجريبي الدقيق لمقطع الامتصاص بقدر ما يعنى بتقديم تفسير لظاهرة التخماد المهتز عبر إيجاد نموذج فيزيائي يصف آلية الامتصاص من داخل المجابوب ويسمح بفصل أثر تغير طول المسار الضوئي (الجزء الحقيقي من قرينة انكسار الغاز الماص) عن أثر الامتصاص (الجزء التخيلي من قرينة الانكسار)، فإن هذا التوافق المحدود بين نتائج النموذج والقيم المرجعية يعتبر جيداً، بل ويفوق التوقعات. وهذا يؤكد صحة النموذج الفيزيائي المعتمد في هذا العمل وكفاءته في توصيف الامتصاص من داخل المجابوب.

ومن جهة ثانية فإن قيم  $\sigma_g$  المقيسة داخل المجابوب تتطابق ضمن حدود الخطأ مع نظيراتها المقيسة خارج المجابوب (الغاز CFC-22)، الأمر الذي يؤكد كفاءة النموذج في توصيف الامتصاص داخل المجابوب في حالات الامتصاص الضعيف حيث لا تتوفر قيم مرجعية للمقارنة.

تبين الأشكال 7-12 أيضاً، أن قيم الاستقطابية  $\eta_g$  الناتجة عن قياس دور الاهتزاز (الخطوة  $\Delta p$  بين قمتين عظيمتين متتاليتين) وفق العلاقة (26)، تبدي على العموم توافقاً مقبولاً، ضمن حدود الخطأ مع القيم المرجعية المحسوبة من المقطع العرضي للامتصاص وفق علاقة كرامرس-كرونينغ (29). يشذ عن ذلك قيم الفرع 9P بالنسبة للغاز CFC-22، حيث تأخذ  $\eta_g$  هنا قيمة أصغر بحوالي 30-40% من القيم المرجعية. وكذلك الفرع 10R في حالة الغاز CFC-12 حيث تتراوح قيم  $\eta_g$  الناتجة بين  $4 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$  و  $6 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$  بينما تتراوح القيم المرجعية الموافقة بين  $1.8 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$  و  $1 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$  على الترتيب. ولوضع هذه المقارنة في إطارها الصحيح لا بد من الإشارة إلى أن القيم المرجعية المستخدمة لا تتمتع في هذه الحالة بالدرجة المطلوبة من الوثوقية. وذلك لأنها ليست قيمة مقيسة تجريبياً كما في حالة  $\sigma_g$ ، وإنما قيم تقريبية محسوبة وفق العلاقة (30) بالاستناد إلى قيم  $\sigma_g$  المرجعية المقاسة تجريبياً ضمن مجال محدود للعدد الموجي  $k$ . وبالنظر إلى العلاقة (30)، يتضح أن الحساب الدقيق للاستقطابية  $\eta_g$  يقتضي معرفة  $\sigma_g$  على امتداد كامل المجال الطيفي (نظرياً من  $k = 0$  إلى  $\infty$ )، وليس فقط ضمن المجال الضيق المدروس ( $k = 900 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ ).



#### 4.4 أخطاء القياس

يقدر الخطأ المحتمل في تحديد  $\sigma_g$  بحوالي 30% (الخطأ المرتكب في عملية الموازنة الرياضية)، والخطأ في تحديد  $\eta_g$  بحوالي 15% (خطأ إحصائي يصغر كلما كبر عدد القمم المسجلة في منحني التخامد). أما منابع الخطأ فتتوزع بين طرائق القياس من جهة، والنموذج الفيزيائي المستخدم في الموازنة من جهة ثانية.

يكن خطأ القياس بالدرجة الأولى في عدم دقة قيم الضغط، وهذا يتعلق إلى حد ما بالموضع الذي يربط فيه المقياس بالنسبة لخلية الامتصاص وبالسرع الابتدائية لتدفق الغاز إلى داخل الخلية. كما أن طريقة التسجيل تقوم على افتراض خطية نمو الضغط مع الزمن بين ضغط ابتدائي يقارب الصفر وضغط نهائي تتعدم عنده استطاعة خرج الليزر، وهذا الافتراض غير دقيق بسبب تراجع تدفق الغاز إلى الخلية مع ازدياد الضغط في داخلها.

ومن جهة أخرى فإن محدودية استقرار الليزر تمثل مصدراً آخر لخطأ القياس. والأمر لا يقتصر هنا على الذبذبات الإحصائية، بل يتعدى ذلك ليشمل التغيرات المتعلقة بتغير في واحد أو أكثر من شروط عمل الليزر أو الشروط المحيطة، كالتغير في تدفق أحد غازات الوسط الفعال، والتغير في درجة حرارة الهواء، وحوادث انحراف طفيف في زاوية شبكة الانعراج بسبب الاهتزازات الخارجية وغيرها.

أما بالنسبة لمنابع الخطأ المتعلقة بالنموذج فهناك أولاً الخطأ الناجم عن الارتياح في قيم بعض الوسائط كمعدل ضخ الوسط الفعال الذي جرى تحديده بالاعتماد على شروط التشغيل وعلى بعض الحسابات العددية [20]. ولهذا السبب فقد وجب التعامل مع كل من معدل الضخ  $\Phi$  ومقطع الانتقال الضوئي  $\sigma_{21}$  كوسائط تخضع لبعض التآرج. ولذلك فقد أخذت قيم معدل الضخ ضمن المجال  $5 \cdot 10^{19} - 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ،

وقيم مقطع الانتقال الضوئي  $\sigma_{21}$  بما يوافق  $10^{18} - 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ، الأمر الذي ترك أثراً سلبياً

واضحاً على دقة قيم المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  الناتجة عن عملية الموازنة.

ومن جهة أخرى فإن النموذج يفنقر إلى الشمولية، إذ أنه لا يتطرق إلى تفاصيل طيف الإصدار الليزري، مما يجعله عاجزاً عن مراعاة التغيرات التي قد تطرأ على الطيف مع ازدياد ضغط الغاز الماص. وعلى وجه الخصوص فإن نموذج التداخل المعتمد في توصيف الاهتزازات المترابكة مع منحنيات التخامد يفترض ضمناً أن الليزر يهتز بنمط وحيد، وأن موقع ذلك النمط يتعلق فقط بموقع القمة العظمى في بروفييل التضخيم، أي أنه لا يتأثر بتغير الضغط، وأن عرض النمط منته في الصغر. وهذه الافتراضات لا تصح إلا في حالة التعريض تام التجانس، وهي حالة مثالية لا تنسحب على شروط تجربتنا حيث يأخذ التعريض اللامتجانس قيمةً مشابهة لقيمة التعريض المتجانس (انظر الفقرة 2.3 والمرجع [12]). فإذا ما غلب على جزئيات الوسط الفعال السلوك اللامتجانس فإن الليزر سوف يهتز في أكثر من نمط، ذلك أن التعريض الإجمالي يتجاوز ضعفي الفاصل النمطي. عندها سوف تنسحب الأنماط بتغير ضغط الغاز الماص ضمن حدود معينة يرسمها بروفييل التضخيم وشرط العتبة (الذي يتعلق بدوره بضغط الغاز الماص).

من هنا يمكن تلمس حجم التعقيد الذي يلف المسألة في حالتها العامة، ويجعل التوصيف الدقيق لمنحنيات التخامد لاسيما في حالة التخامد المهتز مطلباً يقتضي تحقيقه تطويراً جذرياً للنموذج ليصبح قادراً على مراعاة كلا النوعين من التعريض بأن واحد معاً من جهة، واللاحق زمنياً بأية متغيرات تطرأ على الجملة، بما في ذلك تغير ضغط الغاز الماص، من جهة ثانية. أي إننا بحاجة هنا إلى نموذج دينامي لا يقتصر على حلول الاستقرار بل يتعداها ليقدم حلاً دينامياً يصف التطور الزمني للجملة. ولا يخفى أن تطوير نموذج دينامي يتضمن حساباً دقيقاً لطيف الليزر مسألة بالغة التعقيد.

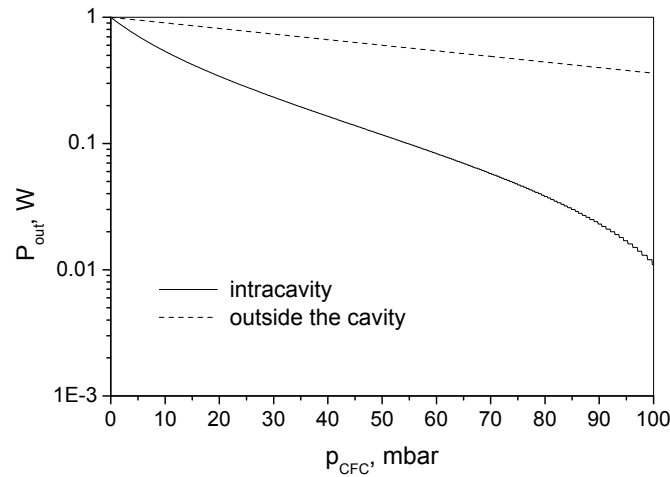
غير أن الحسابات الأولية تؤكد أن من الصعب الحصول على اهتزازات دورية منتظمة كتلك المبينة في الشكل 4 إلا في حالة النمط الوحيد، أي إن سلوك الليزر ضمن شروط تجربتنا ليس بعيداً عن الشروط الافتراضية التي يقوم عليها النموذج المعتمد في هذا العمل.

## 5.4 زيادة حساسية الكشف في قياس الامتصاص داخل المجاوب

تتميز تقنية الامتصاص داخل المجاوب الليزري بقدرتها الكبيرة على تضخيم أثر الامتصاص وزيادة حساسية الكشف. وبفضل هذه الميزة فقد باتت مطيافية الامتصاص داخل المجاوب واحدة من أهم تقنيات الكشف والقياس، لاسيما في حالة التراكيز شديدة الانخفاض (تراكيز الأثر) [1,21].

ولإعطاء صورة واضحة عن كفاءة تلك التقنية في تضخيم أثر الامتصاص نبين في الشكل 13 مقارنة مباشرة بين منحنى التخماد المحسوب وفق العلاقة (18) والذي يصف حالة الامتصاص داخل المجاوب، ومنحنى التخماد الموافق لحالة الامتصاص خارج المجاوب والذي يتبع قانون بيير-لامبير العلاقة (4). يعتمد الحساب قيم وسائط الليزر  $CO_2$  المستخدم في هذا العمل، وتعطى  $P_0$  القيمة الافتراضية  $1W$ ، كما يعطى المقطع العرضي للامتصاص القيمة الافتراضية  $\sigma_g = 10^{-20} \text{ cm}^2$ .

يظهر جلياً في الشكل 13 أن التخماد في حالة الامتصاص داخل المجاوب أشد بوضوح منه في حالة الامتصاص خارج المجاوب ضمن الشروط التجريبية ذاتها. وتعزى هذه الزيادة في شدة الامتصاص إلى الزيادة في مسافة العبور الوسطية التي تقطعها الفوتونات عبر خلية الغاز الماص، حيث أن وجود الخلية داخل المجاوب يضاعف مسافة العبور بحوالي ضعفي عدد الأشواط التي يقطعها الفوتون وسطياً في المجاوب قبل أن يجد طريقه إلى الانفلات خارجاً.



**الشكل 13** مقارنة بين تخامد استطاعة خرج الليزر في حالتي خلية الغاز الماص داخل المجاوب محسوباً وفق العلاقة (18) (خط متصل)، و خارج المجاوب محسوباً وفق العلاقة (4) (خط منقطع).

وللانتقال من هذه المعرفة الكيفية البسيطة إلى الحساب العددي للزيادة الممكنة في حساسية الكشف عن تراكيز الأثر نسوق أولاً تعريف شدة الامتصاص  $K$  [21]:

$$K = \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \quad (31)$$

وبالاستناد إلى هذا التعريف نعرف معامل تضخيم الامتصاص أو بالأحرى معامل زيادة حساسية الكشف  $\beta$  كنسبة شدة الامتصاص داخل المجاوب إلى شدة الامتصاص خارج المجاوب:

$$\beta = \frac{K_{in}}{K_{out}} \quad (32)$$

يمكن قراءة شدة الامتصاص  $K$  في الشكل 13 من خلال القيمة المطلقة لميل منحنى التخماد (وفق التمثيل اللوغاريتمي المستخدم في الشكل). تبين النظرة الفاحصة إلى الشكل 13 أن  $K_{in}$  خلافاً لنظيرتها  $K_{out}$  لا تبقى ثابتة على كامل المجال من 0 إلى 100 mbar، وإنما تبدي تناقصاً طفيفاً مع ازدياد الضغط أو بعبارة

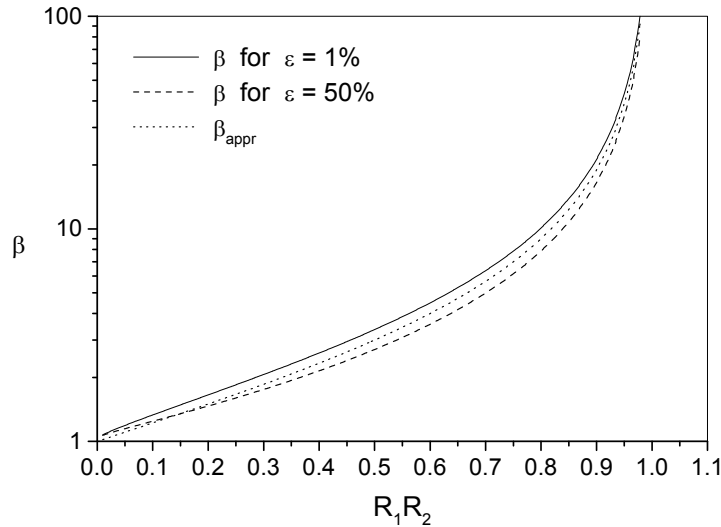
أخرى مع ازدياد الخسارة الكلية الناجمة عن الامتصاص. لذلك فإن الحديث عن معامل زيادة حساسية الكشف  $\beta$  ينبغي أن يقتصر بتحديد مجال معين لشدة الامتصاص، وذلك عبر تحديد قيمة معامل الخسارة  $\varepsilon = \frac{P_0 - P}{P_0}$  على سبيل المثال. ولما كان هدف التقنية يدور حول تحسين حساسية الكشف عن تراكيز منخفضة من الغاز الماص، فإن اهتمامنا يتركز هنا على المجال  $\varepsilon = 1-5\%$ .

يبين الشكل 14 معامل زيادة الحساسية  $\beta$  محسوباً وفق العلاقة (32) بتابعية الانعكاسية الكلية للمرايا  $R_1 R_2$  من أجل  $\varepsilon = 1\%$ ، بالمقارنة مع حالة الامتصاص الشديد  $\varepsilon = 50\%$ ، ومع القيمة التقريبية  $\beta_{appr}$  المساوية لعدد العبورات الوسطية عبر الخلية والتي تحسب وفق [1]:

$$\begin{aligned} \beta_{appr} &= 1 + 2q \\ &= \frac{2}{1 - R_1 R_2} - 1 \end{aligned} \quad (33)$$

حيث ترمز  $q$  إلى العدد الوسطي للأشواط التي يقطعها الفوتون داخل المجاوب والذي يحسب في حالة المجاوب المنفعل وفق العلاقة:

$$q = \frac{1}{1 - R_1 R_2} - 1 \quad (34)$$



**الشكل 14** معامل زيادة حساسية الكشف  $\beta$  محسوباً وفق العلاقة (32) من أجل قيمتين مختلفتين لمعامل الخسارة الكلية  $\varepsilon$ ، بالمقارنة مع التقريب  $\beta_{appr}$  المحسوب من عدد العبورات الوسطية عبر الخلية.

يظهر جلياً في الشكل 14 أن العلاقة (32) تمثل تقريباً جيداً لمعامل الزيادة في حساسية الكشف  $\beta$  على اختلاف قيمة الانعكاسية  $R_1 R_2$ . بيد أن نظرة فاحصة إلى الشكل تبين أن قيم  $\beta$  المحسوبة عددياً بالاستناد إلى العلاقة (18) تفوق قيم  $\beta_{appr}$  في حالة الامتصاص الضعيف  $\varepsilon = 1\%$  (وهي الحالة الأهم من الناحية التطبيقية) بحوالي 10%، وتصغرها بنفس النسبة تقريباً في حالة الامتصاص الشديد  $\varepsilon = 50\%$ .

كذلك نلاحظ في الشكل 14 أن معامل الزيادة في حساسية الكشف  $\beta$  يتزايد باعتدال مع تزايد الانعكاسية في المجال  $R_1 R_2 = 0 - 0.8$  ليبدأ بعدها تزايداً متسارعاً يقوده إلى  $\infty$  مع اقتراب الانعكاسية من القيمة

النظرية 1. وبعبارة أخرى فإن تقنية الامتصاص داخل المجاوب تسمح بتحقيق زيادة كبيرة في حساسية الكشف لا يحدها إلا محدودية انعكاسية المرايا. وكمثال بسيط فإن  $R_1 R_2 = 0.99$  تعطينا  $\beta \approx 200$ ، و  $R_1 R_2 = 0.999$  تعطي  $\beta \approx 2000$ . أما في حالة تجربتنا ( $R_1 R_2 = 0.74$ ) فإن زيادة حساسية الكشف (أو بالأحرى زيادة الدقة في قياس الامتصاص) تأخذ القيمة التقريبية  $\beta = 7.6$ .

من المفيد أن نوضح هنا أن شروط استخدام تقنية الامتصاص داخل المجاوب في هذا العمل تختلف جذرياً عن الشروط التقليدية لاستخدام هذه التقنية في ما يعرف باسم مطيافية الامتصاص داخل المجاوب. حيث تقوم الشروط التقليدية على استخدام ليزر ذي طيف إصدار عريض ومستمر (عدد كبير جداً من الأنماط المتلاصقة) في الكشف عن تراكيز صغيرة من مواد تبدي خط امتصاص ضيق جداً يتقاطع مع نمط وحيد أو مع عدد قليل من الأنماط المتجاورة في طيف الليزر [21,22]. أي أن ما يحدث في تلك الحالة هو امتصاص انتقائي تتجسد نتيجته في فتح ثغرة ضيقة في طيف الإصدار يتناسب عمقها مع شدة الامتصاص، دون أن يرافق ذلك تغير ملحوظ في الاستطاعة الكلية لخرج الليزر. أما في تجربتنا فإن المقطع العرضي للامتصاص  $\sigma_g$  لا يبدي تجاوبات حادة في المجال الطيفي المدروس، وبعبارة أخرى فإن  $\sigma_g$  يأخذ قيمة ثابتة على امتداد طيف الإصدار بالنسبة لكل خط من خطوط الليزر. أي أن الامتصاص في حالتنا هذه ليس انتقائياً، وقياس الامتصاص إنما يتم عبر قياس تغيرات الاستطاعة الكلية لخرج الليزر. ولما كان ما تقدم في هذه الفقرة من حساب لمعامل زيادة الحساسية  $\beta$  يستند في مجمله إلى شروط تجربتنا، فإنه لا ينسحب على حالة الامتصاص الانتقائي حيث تصل قيمة  $\beta$  إلى ما يتجاوز  $10^5$  [23, 24].

## 5. الخلاصة

درست ظاهرة الامتصاص من داخل المجاوب الليزري، وتم تطوير نموذج فيزيائي يسمح بفك الارتباط بين أثري الجزأين الحقيقي والتخليقي لقرينة انكسار الغاز الماص على استطاعة خرج الليزر.

يعتمد النموذج على حل معادلات المعدل بعد توسيعها لتشمل الفقد الإضافي الناجم عن الامتصاص (الجزء التخليقي من قرينة الانكسار). أما أثر الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار فيراعى ضمن إطار نموذج تداخلي يتعامل مع الحقل الكهربائي داخل المجاوب الليزري على أنه محصلة تداخل أمواج متداخلة مترابطة في الطور متباينة في عدد الأشواط المقطوعة داخل المجاوب الذي يتغير طوله الضوئي بتغير ضغط الغاز في خلية الامتصاص نتيجة تغير الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار.

تم تطبيق النموذج على منحنيات التخماد المقيسة تجريبياً للغازات CFC-11,12,22 بواسطة ليزر CO<sub>2</sub> مستمر قابل للتوليف، وباستخدام 44 خطأً من خطوط إصدار جزئية CO<sub>2</sub> موزعة على الفرعين P و R من العصبتين 10.6  $\mu\text{m}$  و 9.6  $\mu\text{m}$ .

وقد أمكن في جميع الحالات تحديد قيمة المقطع العرضي للامتصاص (الجزء التخليقي لقرينة الانكسار) عبر إجراء مواءمة رياضية بين منحنى التخماد النظري المحسوب وفق النموذج من جهة، ونظيره المقاس تجريبياً من جهة ثانية. فضلاً عن ذلك فقد أمكن تحديد قيمة الاستقطابية الخطية (الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار) في جميع حالات التخماد المهتز.

قورنت النتائج فيما يخص المقطع العرضي للامتصاص مع القيم المرجعية المنشورة في قاعدة البيانات Hitran وكذلك مع نتائج قياس الامتصاص خارج المجاوب (في حالة الغاز CFC-22). وقد أعطت المقارنة توافقاً جيداً في حدود الخطأ.

قورنت نتائج العمل فيما يخص الجزء الحقيقي لقرينة الانكسار - ممثلاً بالاستقطابية الخطية - مع القيم المرجعية المحسوبة من طيف الامتصاص وفق علاقة كرامرس - كرونيج، ولوحظ توافق جيد فيما عدا حالتى العصابة 10R في الغاز CFC-12، والعصابة 9P في الغاز CFC-22، حيث لوحظ انزياح منهجي نحو قيم أصغر (بالقيمة المطلقة) من القيم المرجعية.

نوقشت زيادة حساسية الكشف عبر قياس الامتصاص داخل المجاوب، وتبين أن حساسية الكشف تتضاعف حوالي 7.6 مرة ضمن شروط التجربة، وأن من الممكن رفع هذه القيمة إلى حوالي 200 عبر زيادة انعكاسية المرايا (إنفاذية المجاوب) من 0.74 إلى 0.99.

## 6. التوصيات

يتضح من نتائج هذا العمل أن التوليف الدقيق لطول المسار الضوئي عبر المجاوب يلعب دوراً بالغ الأهمية في عملية أمثلة خرج الليزر، وأن من الممكن إجراء هذا التوليف بطريقة بسيطة زهيدة التكلفة وذلك عبر التحكم بضغط الغاز في خلية امتصاص داخل المجاوب. وحرصاً على إبقاء الضياعات في حدودها الدنيا فإن من الأفضل استخدام غاز ضعيف الامتصاص كالهواء مثلاً في حالة ليزر CO<sub>2</sub>.

من المفيد متابعة تجارب الامتصاص داخل المجاوب بهدف استثمار هذه التقنية في الكشف عن غازات الأثر، لاسيما غازات CFC الملوثة للغلاف الجوي والمعروفة بأثرها التخريبي على طبقة الأوزون.

ينصح بالعمل على إدخال بعض التحسينات على بناء وتجهيزات تجربة قياس الامتصاص داخل المجاوب بهدف إضفاء المزيد من الدقة على منحنيات التخماد المراد تسجيلها في الأعمال المستقبلية. وأهم تلك التحسينات:

- تهيئة المزيج الغازي الفعال He : N<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> بالنسب الثابتة 4 : 2 : 1 قبل ضخه بتدفق ثابت إلى أنبوبة الانفراغ. فذلك من شأنه أن يضمن الحفاظ على استقرار الليزر خلال المدة اللازمة لتسجيل منحنيات التخماد.
- إعطاء الليزر الوقت الكافي للوصول إلى حالة الاستقرار بعد كل تغيير في ضغط الغاز الماص. وهذا يعني بعبارة أخرى تبطيء عملية القياس، أو بالأحرى الانتقال من تسجيل منحنى تخامد مستمر إلى تسجيل نقاط قياس منفصلة.
- تحسين شروط الخلاء في خلية الغاز بما يضمن التخلص من أخطار التسريب.
- أتمتة تسجيل كل من الضغط والاستطاعة.

وأخيراً فإن من المفيد جداً، بل ومن الضروري أيضاً، العمل على استكمال التجهيزات المخبرية بما يضمن إمكانية مراقبة طيف إصدار الليزر.

## 7. المراجع

- [1] W. Demtröder, Laser Spectroscopy, third ed., (Springer-Verlag, Berlin, 1988) or W. Demtröder, *Laserspektroskopie*, 3. Auflage (Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993).
- [2] A. Tönnissen, J. Wanner, K.W. Rothe, and H. Walther, Appl. Phys. **18**, (1979) 297
- [3] W. Brunner, and H. Paul, Opt. Comm. **12**, (1974) 252
- [4] H. Atmanspacher, H. Scheingraber, and C.R. Vidal, Phys. Rev. A **32**, (1985) 254
- [5] T.D. Harris, Laser intracavity enhanced spectroscopy, in Ultra-sensitive Laser Spectroscopy, ed. by D.S.Klinger, (Academic, New York 1983) pp. 398-434
- [6] د. شريف الحواط، د. محمد درغام زيدان " دراسة امتصاص غاز الفريون -12 لاشعاع ليزر  $CO_2$  " تقرير عن تجربة استطلاعية مخبرية ه ط ذ س - ف / ت ت ا 45 كانون الأول 1996.
- [7] محمد ياسين علي (إشراف د.شريف الحواط) "دراسة امتصاص الفريون-12 ( $CF_2Cl_2$ ) لأشعة ليزر  $CO_2$  من داخل المجاوب" مشروع تخرج طالب (هندسة فيزيائية) - المعهد العالي للعلوم التطبيقية و التكنولوجيا 1997.
- [8] د. شريف الحواط "دراسة ظاهرة التخماد المهتز لامتصاص إشعاع ليزر  $CO_2$  مستمر قابل للتوليف بواسطة الفريونات -CFC في المجاوب". تقرير نهائي عن بحث علمي ، ه ط ذ س - ف / ت ن ب ع 308 تموز 2004..
- [9] K.E. Oughstun, and N.A. Cartwright, Opt. Express Vol. **11**, No. 13 (2003) 1541-1546
- [10] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, 7<sup>th</sup> edition (Cambridge U. Press, 1999) Ch. 2
- [11] Al-Hawat S, Saloum S, Zidan M D "Absorption of  $CO_2$  laser emission by freon-12" Applied Physics B, Lasers and Optics, 2004, **78**, 439-442.
- [12] W. J. Witteman, "The  $CO_2$  laser , Springer, Berlin, 1987.
- [13] P. W. Milonni and H. J. Eberly , " Lasers ", John Wiley & Sons Inc. 1988.
- [14] M. Abramowitz and I. A. Stegun "Handbook of mathematical functions" (Dover, New York), 1971
- [15] M. W. Sigrit, "Air Monitoring by Spectroscopic Techniques", John Wiley, New York, 1994

- [16] W.W. Rigrod, J. Appl. Phys., 1965, **36**, 2487.
- [17] M. V. Klein, T. E. Furtak, Optics, second edition, (John Wiley) New York 1986.
- [18] L.S. Rothman et.al, *The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database*, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer **96**, 139-204 (2005).
- [19] John S. Toll, Causality and the Dispersion Relation: Logical Foundations, Phys. Rev. **104**, 1760 - 1770 (1956).
- [20] Thompson R. M. et al. 1976 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. Comm., **11**, 369-383.
- [21] V.M. Baev, T. Latz, P.E. Toschek, Laser intracavity absorption spectroscopy, Appl. Phys. B **69**, 171 (1999)
- [22] W. Brunner, H. Paul, *On the theory of selective intracavity absorption*, Opt. Comm. **12**, 252 (1974).
- [23] T.W. Hänsch, A.L. Schawlow, P. Toschek, Ultrasensitive response of a cw dye laser to selective extinction, IEEE J. QE-**8**, 802 (1972).
- [24] R.G. Bray, W. Henke, S.K. Liu, R.V. Reddy, M.J. Berry, Measurement of highlyforbidden optical transitions by intracavity dye laser spectroscopy, Chem. Phys. Lett. **47**, 213 (1977).



**SYRIAN ARAB REPUBLIC  
ATOMIC ENERGY COMMISSION (AECS)  
DAMASCUS, P.O. BOX 6091**

**Report on Scientific Informatic Study  
Department of Physics**

**The effect of refractive index changes in an intracavity  
absorption cell on the laser output power**

**Dr. Sh. Al-Hawat  
Dr. M. Eskef**

**October 2007**