مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية
مجلد 41-عدد 3 (2025): 171- 183

Damascus University Journal for the Basic Sciences
Vol 41 No.3 (2025): 183-171

تعيين معامل انزياح الضغط لخط امتصاص جزيء ثاني أوكسيد الكربون عند طول موجي محدد

منجد أصف عيسى[1]، سنان خالد الجلالي[2]

[1] طالب حاصل على درجة الماجستير في المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته
monged1.essa@damascusuniversity.edu.sy
[2] مدرس في المعهد العالي لبحوث الليزر اختصاص مطيافية الليزر
sinanaljalali@damascusuniversity.edu.sy

تاريخ الإيداع: 2024/01/07
تاريخ الموافقة: 2024/09/29

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

الملخص:

جرى في هذا العمل دراسة تأثير الضغط على انزياح قمة خط امتصاص جزيء غاز ثاني أوكسيد الكربون المعرض بفعل التصادم عند طول موجي محدد من المجال تحت أحمر القريب

باعتماد منظومة طيفية تعتمد على الامتصاص المباشر. رُسمت الخطوط البيانية المعبرة عن الانزياح الحاصل كتابع للضغط واستُخلصت معاملات الانزياح في ثلاث حالات للتصادم: التصادم الذاتي ثم مع غاز النتروجين ثم مع غاز الأوكسجين، كانت النتائج ضمن المتوقع وتتفق مع الأدبيات العلمية.

الكلمات المفتاحية: مطيافية الليزر، الامتصاص المباشر، المسار الضوئي الطويل، خط الامتصاص، الضغط، تصادم الجزيئات، إزاحة الخط الطيفي.

ISSN (online): 2789-6366
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Determining the pressure shift coefficient for carbon dioxide absorption line at a specific wavelength

Monged Asef Essa[1], Sinan Khaled ALjalali[2]

[1] A student holding a master's degree at the Higher Institute for Laser Research and its Applications monged1.essa@damascusuniversity.edu.sy

[2] Higher Institute for Laser Research, specializing in laser spectroscopy *sinanaljalali@damascusuniversity.edu.sy*

Received :2024/01/07
Accepted:2024/09/29

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA

Abstract:

In this work, the effect of pressure on the shift of the carbon dioxide absorption peak exposed to collision at a specific wavelength in the near infrared range was studied using a spectroscopic system based on direct absorption. The graphs expressing the resulting shift as a function of
pressure were drawn and the shift coefficients were extracted in three collision cases: self-collision, with nitrogen gas, and with oxygen gas. The results were within expectations and were consistent with the literature.

Keywords: Laser spectroscopy, Direct absorption, Long optical path, Absorption line, Pressure, Particle collision, Spectral line shift.

1. المقدمة:

يملك كل جزيء طيف امتصاص خاص به يعتبر بمثابة البصمة التي تميزه، يمكن استخدام هذا الطيف لدراسة خواص الجزيء وللكشف عن وجوده في وسط ما، ومعرفة تركيزه إن وجد. يمكن تمييز الخطوط الطيفية لكل جزيء والعمل عند خط وحيد باستخدام المنابع الليزرية، لما يتصف به الإصدار الليزري من استقرار وعرض طيفي ضيق إضافة للدقة والانتقائية العاليتين في القياسات.

تخضع خطوط الامتصاص لعدة مؤثرات تؤدي الى زيادة عرض الخط الطيفي بما يدعى التعريض الطيفي أو إزاحة قمة الخط الطيفي بما يدعى الانزياح الطيفي وقد يظهر كلا التأثيرين بنفس الوقت.

تساهم العديد من الآليات في تعريض الخطوط الطيفية يمكن تخفيف أثر بعضها بتغيير بعض الشروط، كالتصادم مع الأنواع المضطربة (يسمى تعريض التصادم أو تعريض الضغط) وأثر دوبلر (يسمى تعريض دوبلر)، بعضها الآخر ناشئ عن الخواص الأساسية للمادة لا يمكن تغييره، كالتحلل الإشعاعي (يسمى زمن الحياة أو التعرض الطبيعي). تتأثر الخطوط الطيفية ببعض أو بجميع تلك المؤثرات بنفس الوقت [1].

يصنف التعريض الطيفي إلى نوعين أساسين:

- التعريض المتجانس: ينتج عن التعريض الطبيعي أو التصادم الذاتي بين الجزيئات المتماثلة [2]، فتتفاعل جميع الجزيئات مع الضوء بنفس الطريقة، ويمثل شكل الخط الطيفي بالتابع اللورنتزي [3].
- التعريض غير المتجانس: ينتج عن أثر دوبلر أو عدم تجانس الوسط، فيختلف التفاعل مع الضوء من جزيء إلى آخر، أو من مجموعة جزيئات إلى أخرى، ويمثل بتابع غاوصي [3].

يُعرَّف تعريض الضغط أو التعريض التصادمي، بأنه تداخل أو اضطراب الخطوط الطيفية بسبب الضغط المطبق على عينة غازية تحوي مجموعة من الجسيمات سواء كانت ذرات أو جزيئات [4]، في حال غياب التصادمات مع جسيمات غريبة (الغازات المخمدة) (Buffer gas) فإن تلك الجسيمات تمتص وتصدر الإشعاع الذي يتأثر فقط بالتعرض الطبيعي أو تعرض دوبلر [5] ، بينما تخضع نفس الجسيمات بوجود جسيمات أخرى لتعريض إضافي وانزياح في مركز الخط الطيفي، وبزيادة الضغط يزداد مدى هذا التأثير[6]، يعطي عرض الخط المعرض بالضغط بالعلاقة:

$$\Delta\nu_L = 2.P.\gamma_s.\chi + 2.P.\gamma_f.(1-\chi) \qquad (1)$$

P الضغط الكلي المطبق على العينة.

X الكسر المولي للمادة الممتصة.

γ_s معامل التوسيع الذاتي.

γ_f معامل التعريض للجسيم الغريب (الغاز المخمد). يعتمد المعاملين السابقين على درجة حرارة الغاز[7].

ينتج عن تركيب التابعين الغاوصي واللورنتزي تابع جديد يدعى تابع فوجيت Voigt يعطى بالعلاقة:

$$I(\omega) = C\int_0^{\infty} \frac{\exp\left\{-\left[\left(\frac{c}{\nu_p}\right)(\omega_0-\omega')\right]^2\right\}}{(\omega-\omega')^2+\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2} d\omega \qquad (2)$$

حيث C: ثابت يتناسب مع سرعة الضوء.

اقتراب الجسيم A ذات مستويي الطاقة E_k و E_i من جسيم آخر B ذرة أو جزيء، يسبب إزاحة السويات الطاقية لكلا الجسيمين ، يعتمد الانزياح على التوزيع الالكتروني للطبقة السطحية لشريكي الاصطدام A و B وعلى المستويات الطاقية لكل منهما وعلى

المسافة بين مركزي الجسيمين [5] ، تعبر المسافة R_C عن نصف قطر الاصطدام أي المسافة التي يصبح عندها التفاعل بين شريكي الاصطدام ملحوظا ومؤثرا، ونعرف مدة(زمن) الاصطدام بالعلاقة:

$$\tau_{coll} = \frac{R_c}{\vartheta} \quad \text{حيث } \vartheta \text{ هي السرعة النسبية} \qquad (3)$$

تعتمد المسافة R_c على ضغط الغاز ودرجة حرارته، ويمكن حساب الانزياح التصادمي من العلاقة التالية:

$$\Delta\nu = \upsilon_0' - \upsilon_0 \qquad (4)$$

υ_0' هو الموقع الجديد للتردد المركزي.

يعتمد الانزياح $\Delta\nu$ على مدى اختلاف إزاحة السويتين الطاقيتين E_i و E_k الذي يتعلق بدوره بقيم الطاقات الداخلية (الاهتزازية والدورانية) E_A, E_B لكل من شركاء الاصطدام [5].

يختلف مقدار الانزياح الطيفي بنوع التصادمات فمن أجل التصادمات الخفيفة (soft collision)، تكون زاوية التشتت θ صغيرة، بالتالي يكون الانزياح ΔE لمستويات طاقة A أو B أثناء الاصطدام صغير، فإذا امتص أحد شركاء الاصطدام أو أطلق إشعاعا أثناء تصادم ناعم يتغير توزع تواتره بشكل طفيف فقط من خلال التفاعل بين A و B ، أي أن تأثير الاصطدامات الناعمة يلاحظ في نواة الخط الطيفي المعرض بالاصطدام، أي في النطاق الطيفي حول نواة الخط (line kernel) ، بالنسبة للتصادمات القاسية (hard collision) تكون ازاحة المستوى ΔE أثناء التصادم أكبر، وبالتالي فإن الاصطدامات القاسية يظهر أثرها على شكل الأجنحة الخطية(line wings) [6].

دُرس في هذا العمل تأثير الضغط (التعريض التصادمي) على انزياح خط امتصاص غاز ثاني أوكسيد الكربون عند الطول الموجي 1639.67 nm، صادر عن ليزر نصف ناقل قابل للتوليف يعمل ضمن المجال تحت أحمر القريب NIR، اعتماداً على مطيافية الامتصاص المباشر مع المسار الضوئي الطويل، بسبب الأهمية المتزايدة لغاز ثاني أوكسيد الكربون في التغيرات المناخية ومراقبة الملوثات البيئية إضافة لأهميته في التطبيقات البيولوجية والطبية.

تُعتمد مطيافية الامتصاص المباشر Direct Absorption Spectroscopy (DAS) في العديد من المجالات والتطبيقات بسبب مزاياها التي لا يمكن الاستغناء عنها مثل الحساسية الجيدة، والانتقائية العالية، وتنفذ بمعدات تجريبية غير معقدة خالية من المعايرة بدقة زمنية عالية [8–10]. قامت العديد من الأبحاث التي اهتمت بدراسة تأثير الضغط على الخطوط الطيفية لمعظم جزيئات الغازات تتقاطع تلك الأبحاث في دراسة كل من التعريض والازاحة الناتجين عن الضغط و الحرارة أحدهما أو كليهما على الخطوط الطيفية سواء من ناحية عرض الخط الطيفي أو الانزياح الناتج عن الضغط، بينما تختلف تلك الدراسات عن بعضها من حيث الطول الموجي، نوع جزيء الغاز المدروس، نوع جزيئات الغازات المخمدة، والمنظومة الطيفية المستخدمة في الدراسة ولوحظ في جميع تلك الدراسات وجود زيادة خطية في كلاً من عرض وانزياح الخط الطيفي بزيادة الضغط [11–22]..

يعتبر هذا العمل جزء من أطروحة ماجستير دراسات عليا أعدت في مخبر مطيافية الليزر في المعهد العالي لبحوث الليزر وتطبيقاته [23].

2. الإجراء التجريبي:

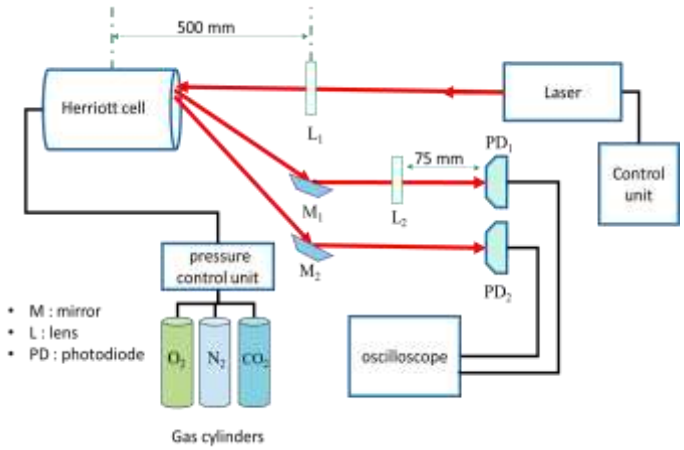
يهدف هذا العمل لحساب معاملات الانزياح الطيفي لقمة خط الامتصاص لجزيء ثاني أوكسيد الكربون عند الطول الموجي 1639.67 nm، في ثلاث حالات:

- حالة التصادم الذاتي (CO_2–CO_2).
- حالة التصادم مع غاز النتروجين (CO_2–N_2).
- حالة التصادم مع غاز الأوكسيجين (CO_2–O_2).

عند قيم الضغط الكلي التالية mbar (100–200–300–400–500–600–700–800–900–1000) للمزيج الغازي، باعتماد مطيافية الامتصاص المباشر، واستخدم منظومة قياس مكونة من الأجهزة التالية:

1. ليزر نصف ناقل قابل للتوليف يعمل في مجال الأطول الموجية nm [1566 – 1647] باستطاعة أعظمية تبلغ 10 mW.
2. خلية امتصاص نمط هيروت بمسار ضوئي 30 m، وضغط التشغيل بإحدى القيم ضمن المجال:
bar $[1.333 \times 10^{-6} - 1.01325]$.
3. موحد طول الموجة MS7504i وفق التصميم Czerny–Tuner، مزود بمضاعف فوتوني (PMT) من Hamamatsu ككاشف.
4. كاشف فوتوني (PbS) من Thorlabs.
5. مقياس ضغط ومضخة تخلية مناسبين وراسم إشارة.
6. مداخل فابري بيرو بمجال طيفي مباشر $FSR = 1\ GHz$.

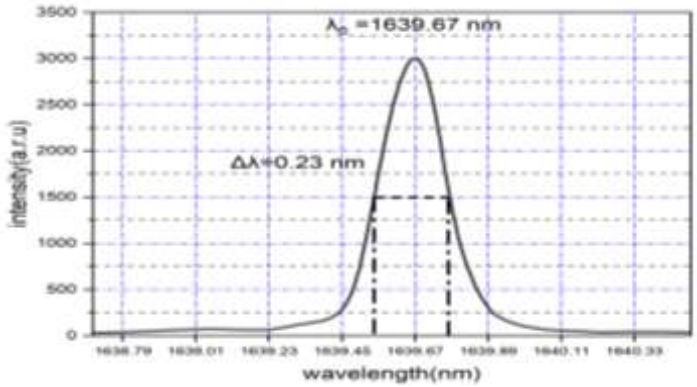
يبين الشكل (1) المخطط البصري لمنظومة الامتصاص المباشر المعتمدة في هذا العمل، توجه حزمة الليزر الصادرة الى نافذة الدخول في الخلية متعددة المسار فتنعكس داخل الخلية 74 مرة لتنفذ أيضاً من نافذة الدخول فيبلغ مسار الامتصاص الضوئي 30m ، تُبأر الحزمة الواردة في منتصف الخلية بعدسة L1 بعدها المحرقي 500 mm كما تُبأر الحزمة النافذة على المنطقة الحساسة للكاشف الضوئي بعدسة L2 بعدها المحرقي 75mm، لتظهر الإشارات المستهدفة على راسم الإشارة، يتم اعتماد الشعاع المنعكس عن نافذة الدخول كإشارة مرجعية، ترصد بالكاشف PD2 الموصول بقناة أخرى على راسم الإشارة.



الشكل (1) منظومة الامتصاص المباشر المعتمدة في العمل

يتم ضبط ومراقبة الضغط داخل الخلية من خلال مضخة تخلية ومقياس ضغط مناسبين، تعالج الطيوف المسجلة باستخدام برنامج (origin).

يستخدم موحد الطول الموجي لضبط طول موجة خرج الليزر عند الطول الموجي 1639.67nm من خلال التحكم بشدة تيار حقن الشريحة الليزرية وكمون الـ PZT (بلورة كهروضوئية) مع تثبيت درجة حرارة الشريحة عند الدرجة 19°C، يوضح الشكل (2) طيف الليزر عند الطول الموجي 1639.67nm بعرض FWHM = 0.23 nm يُعدل طول موجة الخرج بشكل أولي بمطال 136 V وتواتر 11 Hz.

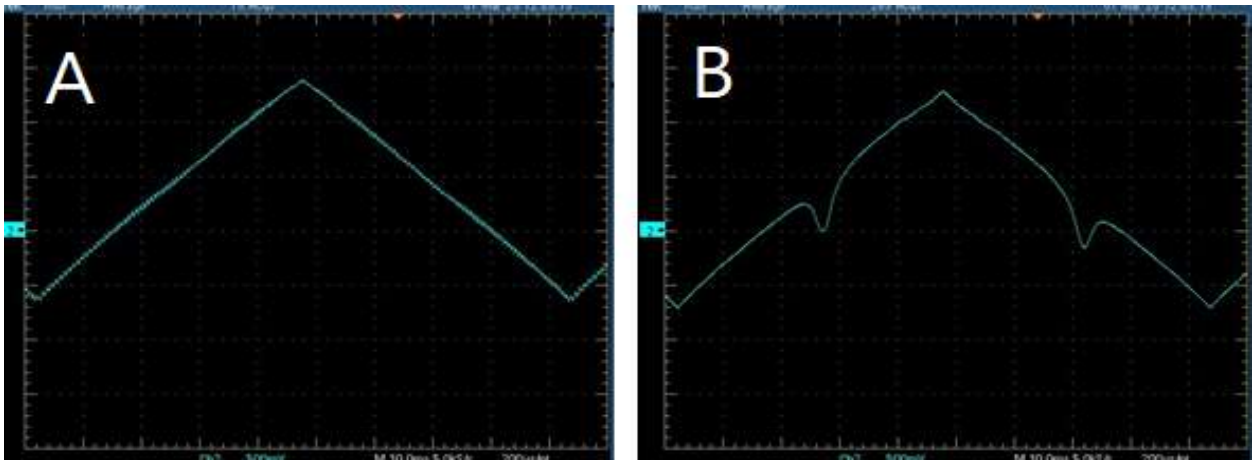


الشكل (2) طيف الليزر عند الطول الموجي 1639.67 nm

تجدر الإشارة إلى أن جزيئات CO_2 فقط دون جزئيات غازي N_2 وO_2 تمتص فوتونات الطول الموجي المعتمد.

3. النتائج والمناقشة:

تفرغ الخلية وتضخ بغاز النتروجين عدة مرات، لضمان خلوها من غاز ثاني أوكسيد الكربون، يبين الشكل (A–3) طيف الإشارة النافذة من الخلية، يلاحظ عدم وجود إشارة امتصاص ما يؤكد خلوها من أي جزيئات يمكن أن تمتص فوتونات الطول الموجي المستخدم.



الشكل (3): الإشارة النافذة

(A) الخلية مليئة بغاز N_2، (B) الخلية مليئة بغاز CO_2 بضغط قدره 100 mbar

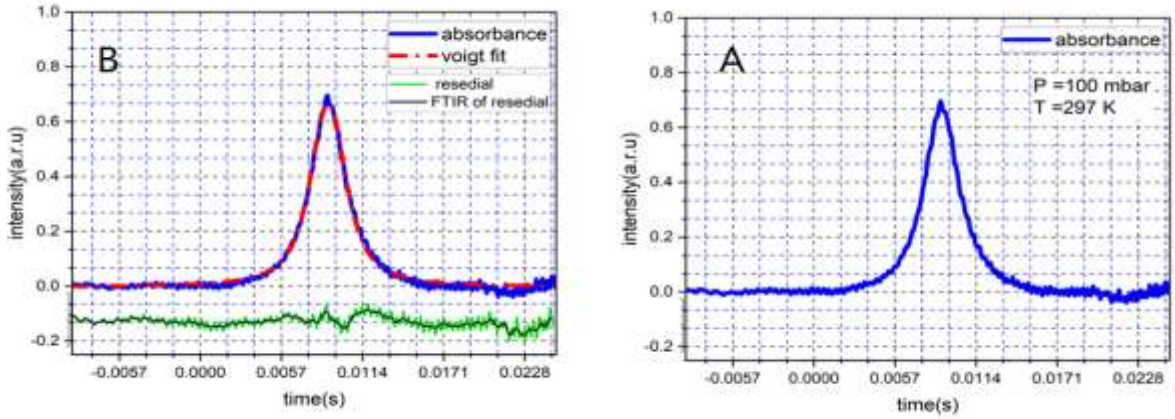
ثم تملأ الخلية بكمية ثابتة من غاز ثاني أوكسيد الكربون بتركيز ثابت 99.99%، وضغط 100 mbar، فيلاحظ خط الامتصاص في الإشارة النافذة الشكل (B–3)، الامر الذي يدل على قدرة المنظومة على كشف خط الامتصاص.

يُستنتج منحني الامتصاصية بالاستفادة من قانون بيير لامبيرت:

$$A = -\ln\frac{I}{I_0} \qquad (5)$$

حيث I_0: شدة الأشعة الواردة، I شدة الأشعة النافذة.

يوائم (Fitting) منحني الامتصاصية مع تابع فوجت الذي يوصف خط الامتصاص عند الضغوط المتوسطة، يبين الشكل (4) منحني الامتصاصية وموائمته مع تابع فوجت.



الشكل (4): A منحني الامتصاصية (B) موائمة منحني الامتصاصية مع تابع Voigt عند ضغط 100 mbar

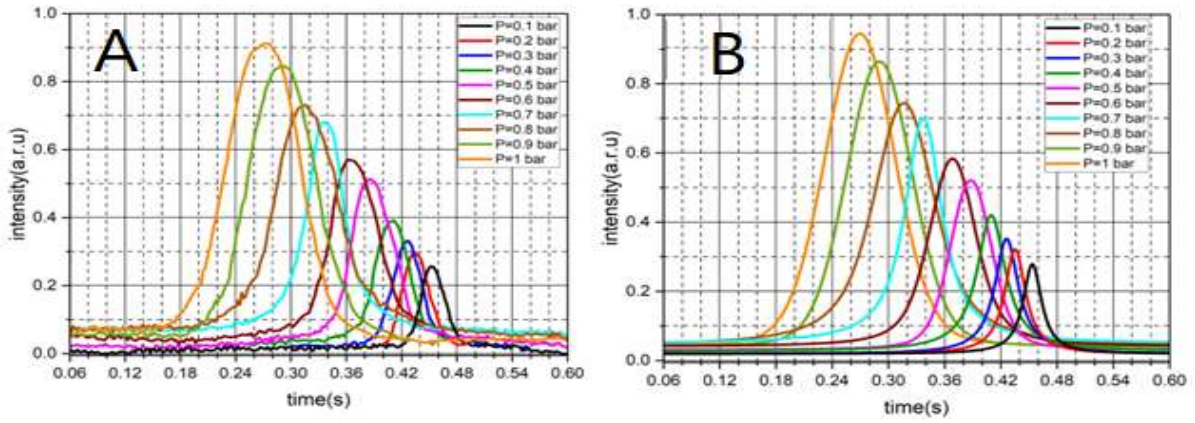
جرت دراسة الانزياح الطيفي لخط الامتصاص في حالات التصادم الثلاث المشار إليها سابقاً، وفق الخطوات التالية:

- تفرغ الخلية عدة مرات باستعمال مضخة التخلية.
- تملأ الخلية بكمية ثابتة من غاز CO_2 ثاني أوكسيد الكربون بتركيز ثابت 99.99%، وضغط جزئي قدره 100 mbar.
- تضاف تدريجياً كميات ثابتة من غازات CO_2 أو N_2 أو O_2 كلاً على حدى بتركيز ثابت 99.99% لكل منها، بحيث يكون ضغط المزيج الغازي الكلي عند إحدى القيم: mbar (100–200–300–400–500–600–700–800–900–1000)، الامر الذي يحقق التصادم الذاتي أو مع الغاز المخمد (N_2 أو O_2).
- تسجل الاطياف الموافقة لكل قيمة من الضغوط العشرة، في كل حالة من حالات التصادم.
- يستنتج منحني الامتصاصية لكل خط امتصاص عند كل قيمة للضغط.
- يوائم منحي الامتصاصية مع تابع فوجت، الذي يوصف خط الامتصاص عند الضغوط المتوسطة.
- رسم تغيرات إزاحة الخط الطيفي بتابعية الضغط.

4. مقارنة النتائج.

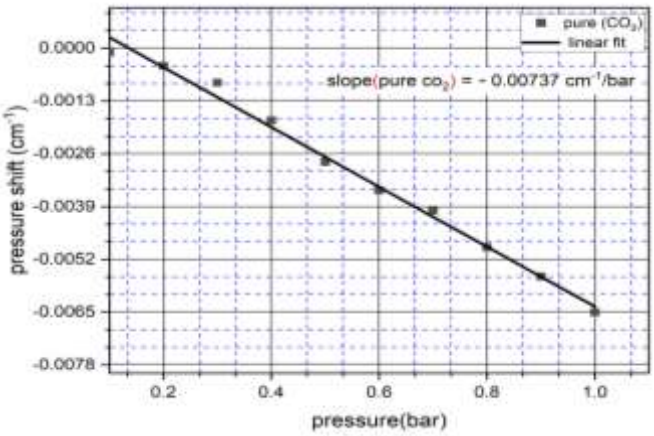
- **حالة التصادم الذاتي (CO_2–CO_2):**

يبين الشكل (5A) خطوط الامتصاص الموافقة لقيم الضغط المختلفة وموائمتها مع تابع فوجت شكل (5B)، فيظهر بشكل واضح كلاً من انزياح قمة خط الامتصاص (العدد الموجي المركزي)، وزيادة عرض الخط الطيفي عند منتصف الشدة العظمى FWHM بشكل يتناسب مع زيادة الضغط، الأمر الذي يوافق الأدبيات العلمية. كما يلاحظ زيادة مطال خط الامتصاص بسبب زيادة تركيز جزيئات غاز ثاني أوكسيد الكربون التي تمتص فوتونات الطول الموجي المستخدم.



الشكل (5): A خطوط امتصاص CO_2 دون وجود غاز مخمد عند ضغوط مختلفة
B خطوط الامتصاص الموائمة مع تابع فوجيت Voigt

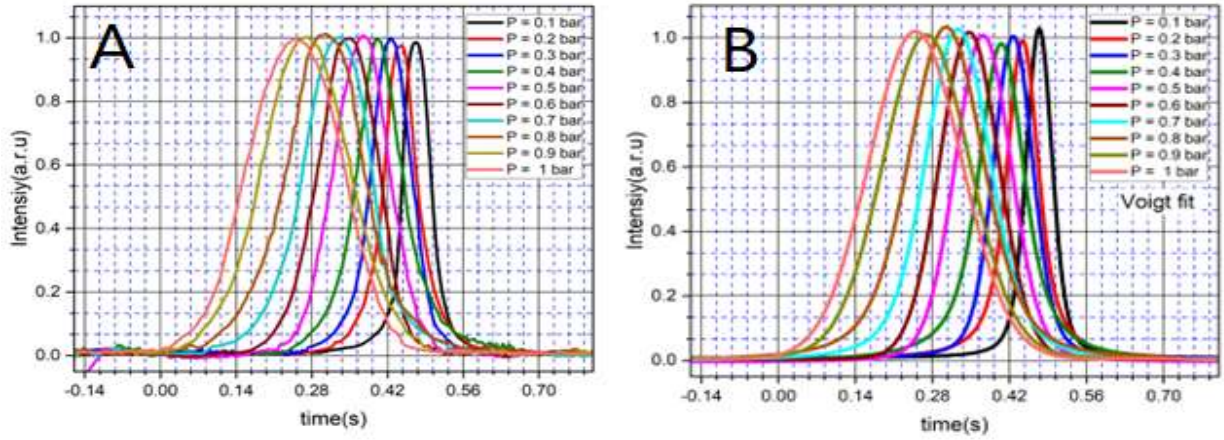
يبلغ ميل المنحني البياني في الشكل (6) المعبر عن تغيرات انزياح قمة خط الامتصاص بدلالة (بتابعية) الضغط القيمة: $S_P(CO_2) = -0.00737\ cm^{-1}/bar$ ويدعى بمعامل انزياح الضغط Shift broadening.



الشكل(6) تغيرات انزياح قمة خط الامتصاص بتابعية الضغط دون وجود غاز مخمد

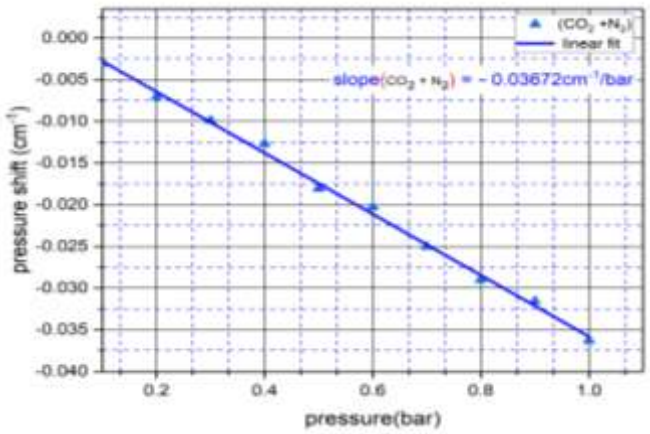
- **حالة التصادم مع غاز النتروجين (CO_2-N_2):**

يظهر بشكل واضح في الشكل (7) أيضاً كلاً من انزياح قمة خط الامتصاص، وزيادة عرض الخط الطيفي عند منتصف الشدة العظمى FWHM بشكل يتناسب مع زيادة الضغط، لكن مع ثبات مطال الامتصاص، لثبات تركيز جزيئات غاز ثاني أوكسيد الكربون التي تمتص وحدها فوتونات الطول الموجي المستخدم.



الشكل (7): A خطوط الامتصاص الموافقة لقيم للضغط الكلي بوجود النتروجين كغاز مخمد
B خطوط الامتصاص الموائمة مع تابع فوجيت Voigt

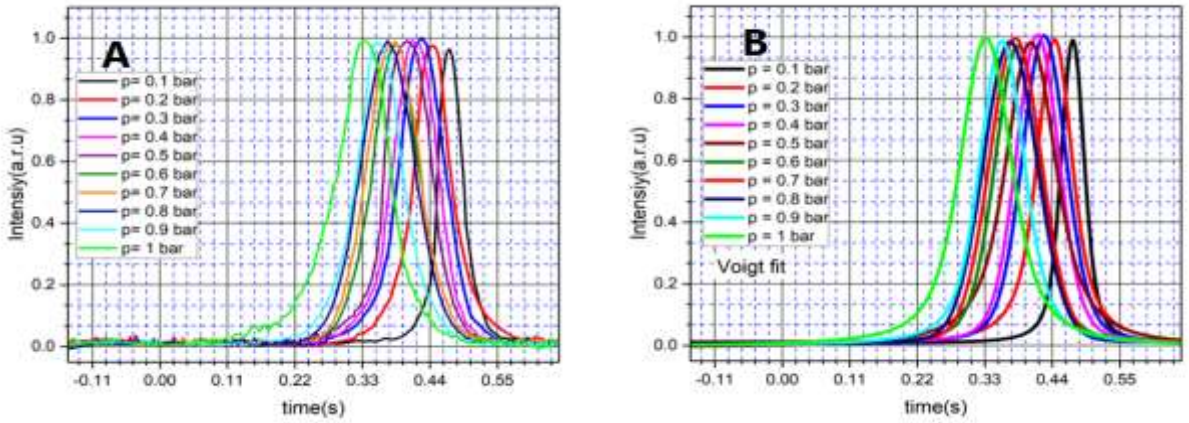
يبلغ ميل المنحني البياني في الشكل (8) المعبر عن تغير انزياح قمة خط الامتصاص بدلالة الضغط وبوجود النتروجين غازا مخمدا القيمة: $S_P(N_2) = 0.03672\ cm^{-1}/bar$.



الشكل (8): تغير انزياح قمة خط الامتصاص بدلالة الضغط بوجود النتروجين غازا مخمدا

- **حالة التصادم مع غاز الأوكسيجين (CO_2-O_2):**

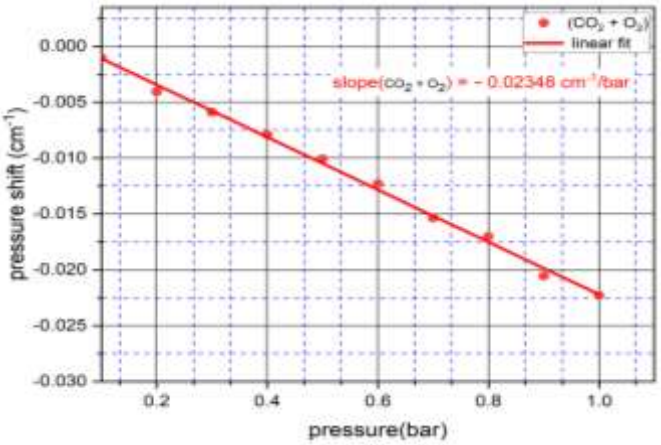
يوضح الشكل (9) انزياح قمة خط الامتصاص وزيادة عرض الخط الطيفي عند منتصف الشدة العظمى FWHM بزيادة الضغط مع ثبات مطال الامتصاص.



الشكل(9): A خطوط الامتصاص الموافقة لقيم للضغط الكلي بوجود الأوكسيجين كغاز مخمد

B خطوط الامتصاص الموائمة مع تابع فوجيت Voigt

يبلغ ميل المنحني البياني في الشكل (10) المعبر عن تغير انزياح قمة خط الامتصاص بدلالة الضغط بوجود الأكسجين غازا مخمدا القيمة: $S_P(O_2) = -0.02348\ cm^{-1}/bar$.



الشكل (10): تغيرات الازاحة بتابعية الضغط بوجود الأكسجين غازا مخمدا

5. مقارنة النتائج:

يبين الجدول (1) قيم معاملات ازاحة الضغط لقمة خط امتصاص جزيء غاز ثاني أوكسيد الكربون عند الطول الموجي 1639.67nm، المحسوبة من خلال دراسة التصادمات (CO_2-CO_2)، (CO_2-N_2)، و (CO_2-O_2)

فيلاحظ ان معامل انزياح الضغط لخط امتصاص الجزيء المستهدف يزداد بوجود الغاز المخمد، كما أن معامل انزياح ضغط غاز النتروجين أكبر بالقيمة المطلقة من معامل انزياح ضغط غاز الاكسجين.

الجدول (1) قيم معاملات الازاحة

Buffer gas	Pressure shift coefficient S_P ، (cm^{-1}/bar)
CO_2	−0.00737
O_2	−0.02348
N_2	−0.03672

يمكن تفسير ذلك حسب نظرية الطاقة الحركية للغازات واختلاف كتل الجزيئات، فكتلة جزيء الأكسجين أكبر من كتلة جزيء النتروجين الامر الذي يجعل سرعة جزيئات النتروجين أكبر من سرعة جزيئات الأكسجين، فيرتفع الضغط بوجود النتروجين مقارنة بالضغط بوجود الأوكسجين عند ذات الحجم ودرجة الحرارة، لزيادة عدد التصادمات بين الجزيئات الأمر الذي يؤدي لتغير في طاقة السويات المثارة لكل جزيء، فيتغير تواتر الانتقال بالتالي يُزاح تواتر الانتقال المركزي (العدد الموجي المركزي) أي يُزاح مواقع قمة خط الامتصاص[2] .

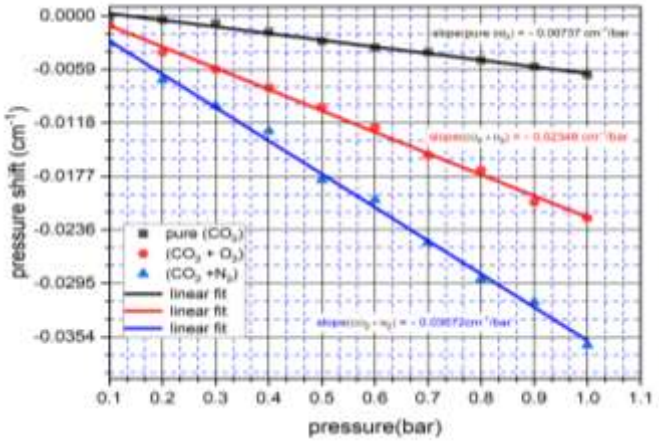
توجز المعادلات (6) تأثير زيادة الضغط (التصادمات) على انزياح قمة خط الامتصاص:

$$\begin{aligned} V_{O_2} < V_{N_2} &\Leftarrow M_{O_2} > M_{N_2} \\ P_{O_2} < P_{N_2} &\Leftarrow \\ S_{p(CO2-O2)} < S_{p(CO2-N2)} &\Leftarrow \end{aligned} \qquad (6)$$

حيث:

M: الكتلة المولية ($g.mol^{-1}$)، v: سرعة انتشار الغاز ($m.s^{-1}$)، P: الضغط (Bar)

كما يوضح الشكل (11) تغيرات الازاحة بدلالة الضغط مع أثر الغاز المخمد على انزياح قمة خط الامتصاص للحالات الثلاث السابقة.



الشكل (11): تغيرات الازاحة بدلالة الضغط وأثر الغاز المخمد على انزياح قمة خط الامتصاص

6. الاستنتاج:

دُرس في هذا العمل انزياح قمة خط امتصاص جزئ ثاني أوكسيد الكربون CO_2 عند الطول الموجي 1639.67 nm بدلالة الضغط في حالات التصادم الذاتي أو بوجود غاز مخمد، باستخدام مطيافية الامتصاص المباشر، فلوحظ زيادة خطية لانزياح الخط الطيفي بزيادة ضغط الغاز في جميع حالات التصادم، وهذا ما يتوافق مع الأدبيات العلمية. كما حُسبت معاملات الانزياح في حالات التصادم الذاتي أو بوجود غازات النتروجين أو الأوكسجين كغازات مخمده، وتبين أن معامل انزياح الضغط يزداد بوجود الغاز المخمد، خاصة إذا كانت كتلته المولية صغيرة.

كما أثبتت مطيافية الامتصاص المباشر كفاءة عالية لكشف خطوط الامتصاص لغازات متنوعة، وأعطت نتائج دقيقة وسريعة بطريقة سهلة الاستخدام بالرغم من وجود تقنيات طيفية حديثة مثل مطيافية تعديل الطول الموجي، يمكن أن تكون هذه الدراسة مساهمة بسيطة في تطوير قاعدة البيانات العالمية HITRAN [24].

7. المراجع:

[1] G. Durry *et al.*, 'Pressure-broadening coefficients and line strengths of H2O near 1.39μm: application to the in situ sensing of the middle atmosphere with balloonborne diode lasers' , *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 94, no. 3–4, pp. 387–403, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jqsrt.2004.09.033.

[2] Erich N. Wolf, Pressure broadening and pressure shift of diatomic iodine at 675 nm, PhD thesis ,University of Oregon , Proquest, Umi Dissertation Publishing (1 Sept. 2011) .'ISBN-10: 1244103667، ISBN-13: 978-1244103665.

[3] Wolfgang Demtröder, Laser Spectroscopy Vol. 1: Basic Principles, 4th edition , Kaiserslautern: Springer Berlin, Heidelberg, 2008, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-73418-5.

[4] G. Peach, 'The width of spectral lines'، Contemporary Physics, vol. 16, no. 1, pp. 17–34, Jan. Published online: 20 Aug 2006, doi: 10.1080/05107517508228028.

[5] W. Demtröder, Atoms, Molecules and Photons. in Graduate Texts in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-10298-1.

[6] Wolfgang Demtröder, Laser Spectroscopy, Vol. 2: Experimental Techniques, 4th edition, Kaiserslautern: Springer Berlin, Heidelberg, 2008, DOI https://doi.org/10.1007/978-3-540-74954-7 .

[7] Z. Qu, J. A. Nwaboh, G. Li, O. Werhahn, and V. Ebert, 'Measurements of N2, CO2, Ar, O2 and Air Pressure Broadening Coefficients of the HCl P (5) Line in the 1–0 Band Using an Interband Cascade Laser'، Appl. Sci., vol. 11, no. 11, p. 5190, Jun. 2021, doi: 10.3390/app11115190.

[8] H. I. Schiff, G. I. Mackay, and J. Bechara, 'The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for atmospheric measurements', Res. Chem. Intermed., vol. 20, no. 3–5, pp. 525–556, Jan. 1994, doi: 10.1163/156856794X00441.

[9] C. Liu and L. Xu, 'Laser absorption spectroscopy for combustion diagnosis in reactive flows: A review'، Appl. Spectrosc. Rev., vol. 54, no. 1, pp. 1–44, Jan. 2019, doi: 10.1080/05704928.2018.1448854.

[10] D. J. Son, 'Development of a fast methane sensor based on wavelength modulation spectroscopy for exhaust methane emission measurement'، University of British Columbia, 2019-10-21, DOI 10.14288/1.0384580.

[11] G. Durry et al., 'Pressure-broadening coefficients and line strengths of H2O near 1.39μm: application to the in situ sensing of the middle atmosphere with balloonborne diode lasers'، J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., vol. 94, no. 3–4, pp. 387–403, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jqsrt.2004.09.033.

[12] Anand Ramanathan, Jianping Mao, Graham R. Allan, Haris Riris, Clark J. Weaver, William E. Hasselbrack, Edward V. Browell, and James B. Abshire, "Spectroscopic measurements of a CO2 absorption line in an open vertical path using an airborne lidar" ,APPLIED PHYSICS LETTERS, 2013. Related DOI: https://doi.org/10.1063/1.4832616.

[13] O. M. Lyulin, T. M. Petrova, A. M. Solodov, A. A. Solodov, and V. I. Perevalov, 'CO2-broadening and shift coefficients in the ν3 and ν 2 + (ν 4 + ν 5) + 0 bands of acetylene'، J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf., vol. 208, pp. 96–100, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.12.029.

[14] R. Hashemi, A. Predoi-Cross, A. S. Dudaryonok, N. N. Lavrentieva, A. C. Vandaele, and J. Vander Auwera, 'CO2 pressure broadening and shift coefficients for the 2–0 band of 12C16O'، J. Mol. Spectrosc., vol. 326, pp. 60–72, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.jms.2016.02.014.

[15] T. GiesenI, R. Schieder, G. Winttewisser, and K. M. T. Yamada, "Precise Measurements of Pressure Broadening and Shift for Several H2O Lines in the v2 Band by Argon, Nitrogen, Oxygen, and Air," journal of molecular spectroscopy", Volume 153, Issues 1–2, May–June 1992, https://doi.org/10.1016/0022-2852(92)90485-7.

[16] N. Schmucker, C. Trojan, T. Giesen, R. Schieder, K. M. T. Yamada, and G. Winnewisser, ‘Pressure Broadening and Shift of Some H2O Lines in the n2 Band: Revisited’, "journal of molecular spectroscopy", Volume 184, Issue 2, August 1997, https://doi.org/10.1006/jmsp.1997.7329.

[17] W. C. Swann and S. L. Gilbert, ‘Line centers, pressure shift, and pressure broadening of 1530-1560 nm hydrogen cyanide wavelength calibration lines’, J. Opt. Soc. Am. B, vol. 22, no. 8, p. 1749, Aug. 2005, doi: 10.1364/JOSAB.22.001749.

[18] A. V. Domanskaya, M. O. Bulanin, K. Kerl, and C. Maul, ‘Pressure broadening and shifting parameters for the spectral lines in the fundamental vibration–rotation bands of HBr and HI in mixtures with rare gases’, Journal of Molecular Spectroscopy, vol. 243, no. 2, pp. 155–161, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.jms.2007.02.015.

[19] Anand Ramanathan, Jianping Mao, Graham R. Allan, Haris Riris, Clark J. Weaver, William E. Hasselbrack, Edward V. Browell, and James B. Abshire, "Spectroscopic measurements of a CO2 absorption line in an open vertical path using an airborne lidar" ,applied physics letters, 2013, Related DOI: https://doi.org/10.1063/1.4832616.

[20] R. Hashemi, A. Predoi-Cross, A. S. Dudaryonok, N. N. Lavrentieva, A. C. Vandaele, and J. Vander Auwera, ‘CO2 pressure broadening and shift coefficients for the 2–0 band of 12C16O’, Journal of Molecular Spectroscopy, vol. 326, pp. 60–72, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.jms.2016.02.014.

[21] O. M. Lyulin, T. M. Petrova, A. M. Solodov, A. A. Solodov, and V. I. Perevalov, ‘CO2-broadening and shift coefficients in the ν3 and ν2 + (ν4 + ν5) + 0 bands of acetylene’, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 208, pp. 96–100, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.12.029.

[22] Dongdong Chen, L. Shi, P. Xu, R. Wang, and C. Zhang, ‘Buffer-gas pressure broadening at high J values in the ν3 band of CO2 measured with tunable diode laser absorption spectroscopy’, Journal of Molecular Spectroscopy, vol. 377, p. 111429, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jms.2021.111429.

[23] Monjed Essa, SINAN ALJALALI, ‘The effect of pressure on the spectral line width of carbon dioxide absorption at a specific wavelength’, Higher Institute for Laser Research and Applications, Damascus University,14-1-2024.

[24] HITRAN on line, hitran.org.