الباب الرابع

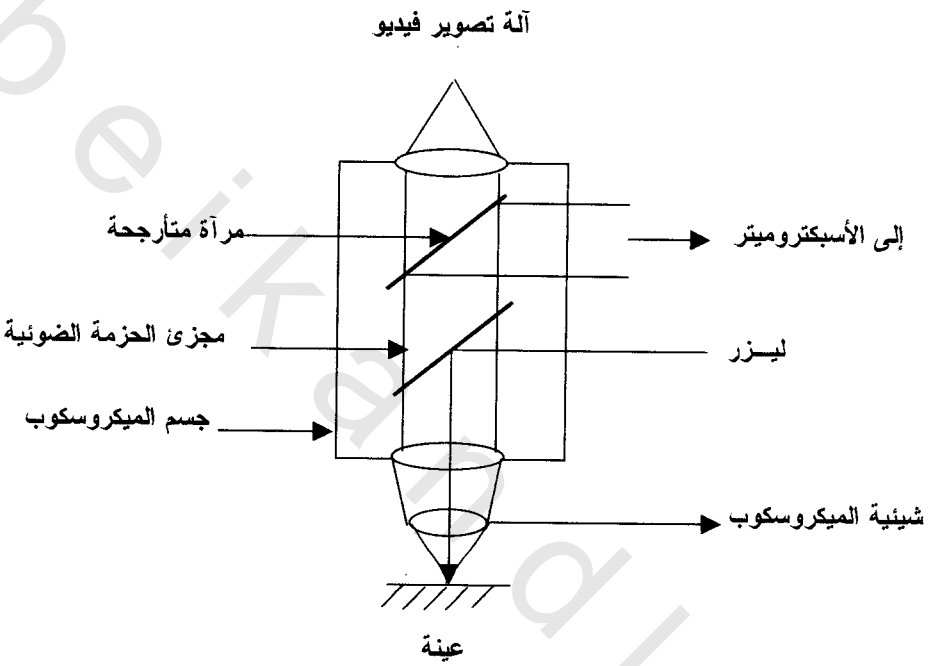
مجهرية رامان
Raman Microscopy

1:4 مقدمة:

فى السنوات الأخيرة استخدمت مجهرية رامان على نطاق واسع فى تحليل العينات الصغيرة جدا (أقل من ميكرومتر على الجوانب وبعمق عدد قليل من الميكرومترات). وأهم خطوة فى إشراك الميكروسكوب مع مطياف رامان هي توجيه حزمة الليزر على طول المحور البصري للميكروسكوب ليتحقق الوضع الهندسي 180^{o}. معظم ميكروسكوبات رامان تستخدم مجزئ الحزمة Beam splitter لإدخال الليزر إلي محور التجميع، وتستخدم العدسات الشيئية لتجميع الضوء المشتت (شكل52)، وتوجد نوعيات مختلفة من التصميمات، ولكن جميعها مبنية على أساس توجيه حزمة الليزر إلي العدسة الشيئية التي تعمل على تجميع الضوء المشتت.

أول نتائج عملية عن مجهرية رامان سجلت فى المؤتمر الدولي الرابع لأطياف رامان 1974م لمجموعتين مستقلتين. وكان نظام المجموعة الأولي (واشنطن) يتكون من مطياف ليزر رامان العادي الذي تتكون بصريا ته من شيئية ميكروسكوب، لتركيز حزمة الليزر لأسفل إلى واحد ميكرومتر وبصريات تجميع رامان، لتركيز الصورة المكبرة على شق مدخل المحلل. وبالرغم من أنه أمكن استخدام هذه المجموعة للعينات الميكرونية إلا أنه، كان هناك بعض الصعوبات فى الاستخدام

وخصوصا بالنسبة لوضع وترتيب العينات. التركيب الأساسي لجهاز المجموعة الثانية(فرنسا) كان يتكون من ميكروسكوب ضوء عادى وسبيكترومتر المحلل الثنائي المزود بمحزوزات هولوجرافية مقعرة وكاشف لتحليل النقط المنفردة.



شكل(52): ميكروسكوب رامان.

2:4 تشغيل المجس الميكروني The micro Probe Operation

توضع العينة المراد قياسها على قاعدة العينة بالميكروسكوب وتشاهد بواسطة إما ضوء أبيض نافذ للعينات المنفذة أو ضوء أبيض ساقط للعينات المعتمة على شاشة المشاهدة، أو بواسطة نظام مشاهدة

تليفزيون الدائرة المغلقة. توضع المساحة المطلوبة للعينة في مركز مجال المشاهدة وتشعع بحزمة الليزر. يوجه شعاع الليزر إلي مجزئ الحزمة، ينعكس جزء من هذه الحزمة إلي أسفل بواسطة مجزئ الحزمة و ينفذ جزء آخر خلاله. بعد ئذ تمر الحزمة المنعكسة خلال شيئية الميكروسكوب التي تعمل على تركيز حزمة الليزر على بقعة صغيرة من العينية، وأيضا تجمع الأشعة المشتتة من العينية. وتنفذ الأشعة المشتتة مرة أخرى من المجزئ إلى كاميرا الفيديو Vedeo camera أو توجه بواسطة منشور قائم الزاوية أو مرآة متأرجحة Swing mirror إلي شق مدخل المحلل، ومن ثم إلي الكاشف لكشف إشارات رامان وتسجيل الطيف.

اختيار العدسة الشيئية Objective Lens Choice

يعتمد اختيار الشيئية على نوع العينات تحت الاختبار. فإذا كانت العينات جسيمات ميكرونية حجمها فى حدود جزء من الميكرون، ينبغي أن تكون عدسة الشيئية عالية التكبير وذات فتحة عددية كبيرة (NA) Numerical aperture (تعرف الفتحة العددية بأنها جيب نصف زاوية مخروط التجميع Sine of the half-angle of the collecting cone). تجمع العدسة الشيئية ذات الفتحة العددية الكبيرة الضوء المشتت على زاوية مجسمة كبيرة أي يصل للكاشف إشارات رامان أكثر. الشيئية العادية يجب أن يكون تكبيرها x 100 والفتحة العددية (NA)0.9 أوx 150 0.95NA. إذا كان حجم العينة 5 ميكرون أو أكثر تكون الشيئية 50x أو 60x، 0.8NA مناسبة. إذا كانت العينة مدفونة داخل مادة مضيفة يكون المطلوب عدسة شيئية ذات مسافة تشغيل طويلة Long working

distance objective. عموما، فى حالة العينات الصغيرة أقل من واحد ميكرون حتى 5 ميكرون تكون الشيئية 150x ,0.95NA أو 0.90NA, 100x . فى حالة العينات من 5 ميكرون فأكثر تكون الشيئية 0.8NA, 60x أو 0.8NA, 50x وفى حالة العينات المدفونة فى مادة مضيفة تكون العدسة الشيئية ذات مسافة تشغيل طويلة جدا (مسافة التشغيل 8nm)، 0.55NA, 50x. فى حالة السوائل فى أنابيب زجاجية شعرية تكون الشيئية 0.45NA, 20x.

يحدد التحليل الفراغي Spatial Resolution فى عينة النقطة المنفردة Single- Point Sampling بالخصائص الضوئية للعدسة الشيئية والبصريات المرتبطة بها وكذلك انفراج الليزر. ويحدد التحليل الفراغي إما بحجم بقعة الليزر أو ببصريات التجميع، وكل منها محدد كليا بالحيود. بالنسبة لمجهرية النقطة المنفردة، حجم بقعة الليزر يحدد غالبا، التحليل الفراغي، ويصمم السبيكترومتر لتجميع الضوء من مساحة تساوى أو أكبر من حجم هذه البقعة, والاعتبارات التالية ذات قيمة عامة.

1- قطر بقعة الليزر عامل هام فى اختيار البعد البؤري للعدسة المجمعة.
2- عمق البؤرة دالة قوية أيضا للبعد البؤرى.
3- يزداد حجم البقعة وعمق البؤرة مع زيادة الطول الموجي لليزر حيث إن تأثيرات الحيود تزداد مع زيادة الطول الموجي.
4- تزداد كثافة القدرة مع قدرة الشيئية.

اختيار مجزئ الحزمة Beamsplitter Choice

مجزئ الحزمة عريض النطاق Broad band beam splitter عبارة عن مرآة نصف عاكسة على قاعدة رقيقة من السيليكا أو الزجاج. الوضع الهندسي فى الشكل (52) يستخدم هذا المجزئ ليعكس الليزر إلي العدسة الشيئية، وينفذ 50% من تشتت رامان الخلفي خلال مجزئ

الحزمة إلي شق المدخل للمحلل. والمجزئ عريض النطاق طريقة بسيطة لجمع محاور الإثارة والتجميع، ولكن أيضا يحدث فقدا واضحا للإشارة. يصل نصف ضوء الليزر فقط إلي العينة، وينعكس نصف الضوء المجمع خلفا إلي الليزر. لذلك تضعف الإشارة 75% مقارنة بالإشارة التي يجب أن تكون، علاوة على ذلك، يوضع مجزئ الحزمة مباشرة فى محور التجميع مع ذلك يمكن أن يصدر عنه إشارة خلفية واضحة. التشتت غير المرن للليزر من المجزئ يمكن أن يدخل إلى السبيكترومتر وتظهر كاستضاءة عريضة النطاق أو رامان للسيليكا. يمكن تخفيض الفقد من المجزئ بوضوح باستعمال مجزئ الحزمة سمارت Smart beam splitter، وهو عبارة عن مرآة Dichroic mirror ثنائية التلوين أو عنصر بصري هيلوجرافى Holographic optical element وتعتمد انعكاسية هذه الأجهزة بشدة على الطول الموجي. ويصنع مجزئ الحزمة ليحقق انعكاسا عاليا لليزر ونفاذ يته عالية لضوء إزاحة رامان.

البديل لمجزئ الحزمة سمارت هو مرشح الرقعة الهولوجرافي عالي الانعكاسية Holographic notch filter عند الطول الموجي لليزر. وهذا المرشح يعمل على إدخال حزمة الليزر إلي محور التجميع، وحيث إن المرشح موضوع عند زاوية قائمة مع محور التجميع فإنه ينفذ جزءا من ضوء إزاحة رامان إلي السبيكترومتر. علاوة على ذلك المرشح يبعد الضوء المشتت تشتتا مرنا من العينة. إذا فإن هذا المرشح يعمل كمجزئ للحزمة وأيضا كمرشح رقعة لتقليل الضوء الشارد فى السبيكتروجراف.

3:4 ميكروسكوب رامان متحد البؤرة Confocal Raman Microscope

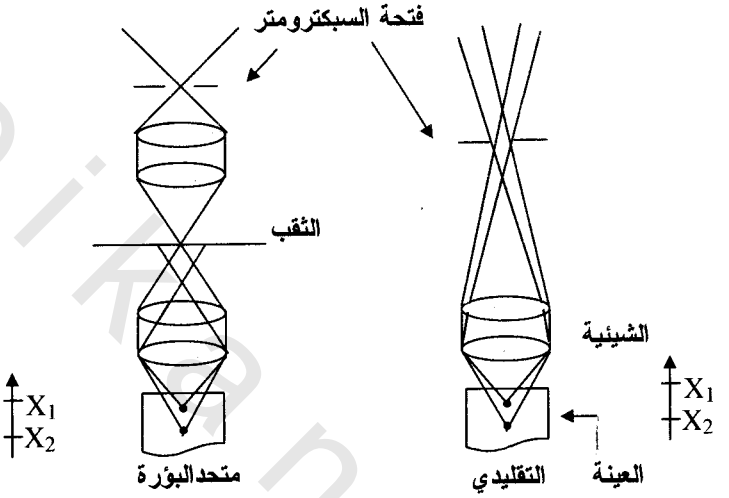
معظم ميكروسكوبات رامان تستخدم بصريات متحدة البؤرة. والفرق بين الميكروسكوب العادي و الميكروسكوب متحد البؤرة هو أن الأخير عنده فتحة إضافية Aperture يطلق عليها أحيانا الثقب Hole،

وتأثيرها هو تقليل عمق بؤرة الليزر. النظام البصري متحد البؤرة يحجز كثيرا من الضوء القادم من أعلى وأسفل المستوى البؤري الذي يتركز عليه ضوء الليزر ، يأتى الضوء المجمع إلى بؤرة عند الفتحة، فإذا كان قطر الفتحة أصغر من القطر المكبر لليزر المركز فإن معظم الضوء من أعلى أو أسفل المستوى البؤري لليزر سوف يستبعد. وأهم فوائد هذا النظام هي تحسين تحليل العمق، وبالتالي زيادة نسبة الإشارة إلي الخلفية فى طيف رامان، أيضا يحسن إلي حد ما - التحليل الفراغي الجانبي Lateral Spatial Resolution.

فى شكل (53) الضوء المشتت من العمقين x_1 , x_2 للعينة موضح بالخطوط المتصلة والمقطعة. بالنسبة لشق السبيكترومتر، الضوء القادم من x_1 , x_2 يمكن أن يدخل السبيكترومتر. إذا كانت النقطتان داخل الأسطوانة البؤرية لحزمة الليزر فإن الطيف سيمثل التركيب المتوسط للعينة بين x_1 , x_2 . تحد الفتحة فى النظام البصري متحد البؤرة من عمق العينة بحجز الضوء القادم من x_2 قبل دخوله السبيكترومتر. إذا كانت العينة متجانسة فإن فتحة النظام متحد البؤرة، سوف تقلل أيضًا الإشارة، حيث إنه يقلل طول المسار الفاعل. ولكن بالنسبة للعينة التي يتغير تركيبها مع العمق فإن ذلك يحصر عمق العينة فى منطقة أصغر من تلك التي فى حالة البصريات العادية. يعتمد تحليل العمق على قطر فتحة البصريات متحدة البؤرة.

ونظرًا لأن النظام البصري متحد البؤرة يضعف الإشارة القادمة من منطقة أفضل بؤرة للميكروسكوب فذلك يحسن نسبة الإشارة إلي الخلفية فى طيف رامان، ولكن يحجز 90% من الضوء المجمع بالعدسة الشيئية للميكروسكوب، المرشح الفراغي يخفض الشدة بنفس المقدار. استخدام الضوء المرئي يعطى ميزة أكبر منها فى حالة استخدام تحت الحمراء. واستخدام ليزرات الضوء المرئي تتيح استخدام عدسات شيئية

ذات خصائص معينة. العدسات الشيئية التي تغمر في الزيت أو الماء والتي لها فتحة عددية أكبر تعطى أمثلة على ذلك. هذه العدسات تعطى صوراً ساطعة عالية التحليل. الشيئيات المغمورة غير متوفرة لتحت الحمراء ومكلفة جدا لتحت الحمراء القريبة.



شكل(53): بصريات الميكروسكوب متحد البؤرة.

4:4 تحضير العينات Sample Preparation

توضع العينة في معظم الحالات على شريحة الميكروسكوب الزجاجية العادية Glass Microscope Slide ذلك لأن الزجاج لا يتفاعل، وتشتت رامان له ضعيف وهذا لا يحدث أي تداخل مع طيف رامان. ويستخدم أيضا (السفير الياقوت الأزرق) Sapphire (α Al_2O_3)، وبير كليس(Periclase (MgO . ويمكن الحصول على أطياف العينات العضوية

وغير العضوية ذات الحجم الميكروني على ميكروسكوب رامان. ويمكن تعريض العينات غير العضوية بقدرة من (20 mw إلي 5) عند العينة دون أي تلف. أما العينات العضوية تكون أكثر عرضة للتلف من العينات غير العضوية نتيجة لتعرضها لشعاع الليزر، لذلك تستخدم لها قدرة أقل عند العينة للحصول على أطيافها (عادة من2.5 mw إلي 0.5). في حالة السوائل توضع العينة في أنبوبة شعرية من الزجاج ذات جوانب رقيقة مسطحة أو دائرية. وتستخدم عند تسجيل طيف العينة شيئية قدرتها منخفضة (20 X أو 10 X).

العينات الحساسة للحرارة Thermally Sensitive Samples

في ميكروسكوب رامان يركز شعاع الليزر على العينة و يكون مستوى التشعيع مرتفعا (عادة 10^6 w/m^2) ، ونتيجة لذلك تتحلل المادة وخصوصا عند تعريض المادة لفترات طويلة أثناء التسجيل.

أحد طرق التغلب على هذه المشكلة هو عدم تركيز حزمة الليزر على العينة لتقليل كثافة القدرة وخصوصا في حالة العينات الحساسة للحرارة.بالنسبة للمركبات التي تتأثر بالأشعة الساقطة ذات الطاقة العالية (المواد الحمراء مع أشعة الليزر الزرقاء) يمكن استخدام مصادر ليزر ترددها منخفض مثل: ليزرات أيون الكريبتون أو الصبغات. والطريقة الأخرى هي أن نغمس العينة في وسط مناسب يعمل كحوض للحرارة. وأنسب سائل لهذا الغرض هو الماء حيث إن طيفه بسيط وضعيف، علاوة على خواصه الحرارية الممتازة. في هذه الطريقة يوضع الجسيم على الشريحة الزجاجية ويغمس في نقطة من الماء. والجسيمات الصغيرة يمكن منعها من الحركة باستخدام طبقة غروائية رقيقة. وتستخدم شيئيه خاصة بالغمس في الماء لمشاهدة العينة وتسجيل الطيف. في حالة

العينات الحساسة للحرارة والتي تـــذوب فـــى المـــاء يســـتخدم وســـط غمـــس عضوي لا تتفاعل معه المـــادة.

العينات الحساسة للبيئة Environmentally Sensitive Samples

توضع العينات التي تتأثر بالبيئة داخل خلية عينة مسطحة الجوانب مثـــل: الخلايا التي تستخدم فى مطياف الأشعة المرئية وفوق البنفسجية. توضع داخـــل صندوق مملوء هواء جاف وتفحص العينة باستخدام شيئية تعمل علـــى مســافة طويلة خلال جوانب الخلية.

طرق الضغط والحرارة فى ميكروسكوب رامان
Temperature and Pressure Techniques with Raman Microscope

1- قياس الحرارة Temperature Measurements

توجد قواعد لعينات الميكروسكوب المزودة بطـــرق تحكـــم فـــى ضبـــط الحرارة العالية أو المنخفضة. وكذلك التحكـــم فى المنـاخ وذلك لدراســـة انتقـــال أطوار المواد الصلبة تحت ظروف معينة، فى الهواء أوفى أجواء خاملـــة. وهـــذه الخلايا تستخدم فى مدى من $-196\ ^\circ C$ $+100\ ^\circ C$. وتوجد خلايا تستخدم فى المـــدى من درجة حرارة الغرفة حتى $1500^\circ C$. توضع العينة على قاعدة العينـــة داخـــل الخلية و تستخدم شيئية مسافة العمل لها طويلة لمشاهدة و تسجيل طيف رامـــان عند درجات حرارة مختلفة لمتابعة الانتقالات الكيميائية المختلفة.

2- قياسات الضغط Pressure Measurements

تحتاج بعض الدراســـات إلـــي تســـجيل طيـــف رامـــان للعينـــات عنـــد ضغوط مرتفعة لمعرفة تأثير هذه الضغوط علـــى ذبذبـــات بعـــض المجموعـــات

الجزيئية. تستخدم فى هذه الدراسة خلية السندال الألماسية (DAC) Diamond Anvil Cell، توضع العينة فى DAC مع شريحة صغيرة (50 µm) من الياقوت Ruby. يستخدم الياقوت كمقياس للضغط داخل الخلية، حيث يتأثر طيف رامان له بالضغط داخل الخلية. يسجل بعدئذ طيف العينة عند نفس الضغط، يرفع الضغط بعد ذلك ويسجل طيف كل من العينة والياقوت عند كل ضغط. يستخدم المجس الميكرونى لرامان أيضا لقياس الإجهاد فى DAC .

5:4 نسب الاستقطاب Polarization ratios

تعطى دراسة خواص الاستقطاب معلومات قيمة عن نمط الذبذبة الجزيئية التي ينشأ عنها شريط رامان. المجس الميكرونى لرامان Raman Microprobe هو الأداة المثالية للحصول على قياسات الاستقطاب من البلورات المنفردة الصغيرة ومن شعيرات البلمرات المفردة وعدم التجانس فى أفلام البلمرات. على أية حال نظرا لأن التصميم البصري للمطياف الميكرونى يشتمل على مجزئ الحزمة العزلى Dielectric Beam Splitte فإن القياسات لا تكون بالدقة الكافية. لذا يجب إجراء تصحيحات لتأثيرات مجزئ الحزمة.

6:4 تصوير وتخطيط رامان Raman Imaging and Mapping

فى تصوير رامان توضع العينة على شريحة الميكروسكوب، ثم يضاء كل مجال مشاهدة الميكروسكوب بالليزر. ويتم ذلك بتدوير حزمة الليزر لتكوين حزمة مستديرة من الضوء، والتي توجه إلي مكثف مجال شيئية الميكروسكوب المظلم أي أن يكون تشعيع العينة بضوء أحادى الطول الموجي متجانسا. وينقل الميكروسكوب بعدئذ صورة العينة إلى

المحلل الذي ينتقى الطول الموجي المعنى لتصويره بواسطة آلة التصوير التليفزيونية (Television Camera) الموضوعة عند المستوى البؤري لشق الخروج. إذا كان الطول الموجي المنتقى يقابل تردد شريط رامان لمركب فى العينة، فإن الصورة الميكرونية سوف توضح توزيع هذه المركبة خلال المساحة المضاءة. والتحليل الفراغي للنظام يكون فى حدود واحد ميكرومتر. وهذا النظام يعمل جيدا للعينات جيدة التشتت لرامان، ولكن هذا النظام لا يعمل مع العينات ضعيفة التشتت لرامان. وأهم مميزات هذه الطريقة لتصوير رامان هي أن الكاشف يلاحظ المجال بالكامل فى نفس الوقت.

الطريقة الأخرى فى تصوير رامان تستخدم الحاسب فى التحكم فى الحركة المرحلية لمحرك يعمل على تحريك قاعدة العينة على الميكروسكوب بالنسبة لحزمة الليزر الثابتة. فى هذه الطريقة يتم الكشف عن أطياف رامان عند عدة مئات من المواضع على سطح العينة. ويبرمج الحاسب لتسجيل طيف الموضع الأول على العينة ويخزن الطيف على قرص، بعد ذلك تتحرك قاعدة العينة عن طريق الحاسب الى موضع آخر على العينة ويسجل الطيف لها ثم يخزن، وتكرر العملية على باقي النقط على العينة ويسجل طيف رامان ويخزن. ويمكن بهذه الطريقة الحصول على صورة على خط ذي بعد واحد أو صورة ثنائية البعد للنوعيات Species الموجودة على سطح العينة.

توجد طريقة أخرى مختلفة فيها يتم مسح العينة الثابتة بحزمة الليزر المركزة وتسجيل الطيف عند مواقع مختلفة على العينة. وتتم هذه الطريقة بنوع جديد من البصريات الناقلة موضوعة بين الميكروسكوب والسبيكترومتر. وتتكون هذه البصريات من زوج من العدسات، إحدى العدستين تركز حزمة ضوء الليزر على المستوى البؤري الخلفي للعدسة الشيئية للميكروسكوب. هذه العدسة المرتبطة بصريا بفتحة خلفية

للشيئية يمكن تحريكها في اتجاهين متعامدين على حزمة الليزر. أي أن هذه العدسة يمكن أن تركز حزمة الليزر على أي نقطة فى مجال الميكروسكوب، ومن ثم على أي نقطة من العينية. والعدسة الثانية ترتبط ميكانيكيا بالعدسة الأولى وتوضع فى الحزمة المشتتة لكي توازن أي إزاحة فى صورة المساحة المتطورة، وتركز الحزمة المشتتة على شق المدخل للسبيكترومتر. وهذا التركيب البصري أثبت أنه مناسب لعديد من نوعيات العينات مثل: الكريوستات وخلايا الحرارة العالية أو الضغط العالي.

مجالات التطبيق Application Areas

التطبيقات الصناعية Industrial Applications

وجود شوائب فى الألياف أو أفلام البلمرات يتسبب فى تغيير مظهر و خواص هذه الألياف أو الأفلام. وتحديد هذه الشوائب يمكن من معرفة المشكلة وتصحيحها. ويستخدم مجهر رامان لتعيين هذه الشوائب والفروق الموضعية فى التبلور والتركيزات الموضعية للبلمرات المشتركة فى عمليات البلمرة.

تصنيع الدوائر الميكرونية يتضمن العديد من العمليات الكيميائية المعقدة، خلال هذه العمليات يمكن أن تؤثر الشوائب العارضة فى وظائف هذه الدوائر. الشوائب فى دوائر البلورات شبه الموصلة والدوائر المتكاملة يمكن توصيفها ومعرفة أسبابها، والتخلص منها.

تحليل الشوائب الدخيلة والرواسب فى الفقاعات الموجودة بالزجاج يمكن أن يعطى معلومات دقيقة عن عملية التكرير أو أسباب تكوين الفقاعات الغير مرغوب فيها. والتطبيقات الصناعية الأخرى تشمل

دراسات التبلـور فـى الجرانيـت وأليـاف الكربـون و المحفـزات الصناعيـة لكشف درجة النشاط التى يتم الحصول عليـها فـى تحضـير المحفـزات. وتـم أيضا قياس مستوى تركيز الطعم فى الألياف البصرية.

المجال البيولوجي و الباثونوجي Biology and Pathology

يمكن باستخدام مجهرية رامان تحديد موقع تحجر أو تصلب حمض اليوريك فى الموقع، والجوانين Guanine أو يورات الصوديوم والبوتاسيوم و الزانتين (حامض الصفراوين Xanthene) فى أنسجة الأسماك، العناكب، الرخويات، أو اللافقاريات والحشرات، وتراكم مكونات كبريتات النحاس الإبرية داخل Cytosomes of Littorina Littorea . ويمكن أيضا دراسة التمعدن البيولوجي فى الأسنان، والعظام، وتصلب الشرايين، و Bioprosthetic Calcification ، والتكلس فى الإنسان و الحيوان، ومعرفة تركيب حصوات المسالك.

ويستخدم ميكروسكوب رامان لكشف الأجسام الغريبة فى الأنسجة الحيوية، وقد تم تسجيل نسيج عقدة لمفاوية فى حجم 5 µm تم الحصول عليه بواسطة عينة Biopsy من المريض. وتعتبر مجهرية رامان تقنية فاعلة فى دراسة خلايا الطحالب، وأيضا التعرف على مكونات وخصائص حصوات المرارة.

التعدين والجيولوجيا Mineralogy and Geology

تستخدم مجهرية رامان فى تحليل الشوائب، سواء كانت صلبة أو سائلة أو غازية، داخل المعادن وتفيد معرفة هذه الشوائب فى العمليات الجيولوجية والجيوكيميائية. كما يمكن تحديد الشوائب فى الأحجار الكريمة والزجاج غير العضوي الشفاف دون تفتيت العينة.

دراسة صدأ أو تآكل السطوح Corrosion Studies

أثبتت مجهرية رامان أنها أداة مفيدة جدا فى تحديد مكونات الصدأ على أسطح المعادن. من المعروف أن تآكل السطوح المعدنية يشمل تفاعلات معقدة بين سطح المادة و البيئة المحيطة. وتؤدى هذه التفاعلات إلي تلف أو كسر المعدن يمكن التوصل الى معرفة عملية التآكل عن طريق توصيف نواتج التفاعل على السطح المتآكل. ومن ثم يمكن فهم التفاعل بين السطح و البيئة المحيطة به.

سطوح التلامس الهيدروديناميكية المرنة
Elastohydrodynamic Contacts

من أهم التطبيقات الحديثة لمجهرية رامان هو دراسة الضغط الناتج عن الشحم عند سطح تلامس كرة الصلب والقرص الزجاجي. فى أسطح التلامس ذات الأحمال العالية يحدث لها تشوه مرن حول غشاء رقيق من الشحم. ويمكن تسجيل طيف رامان باستخدام مجهرية رامان فى منطقة التلامس. ويمكن مراقبة هذا الطيف كدالة للحمل والسرعة والموضع داخل منطقة التلامس.