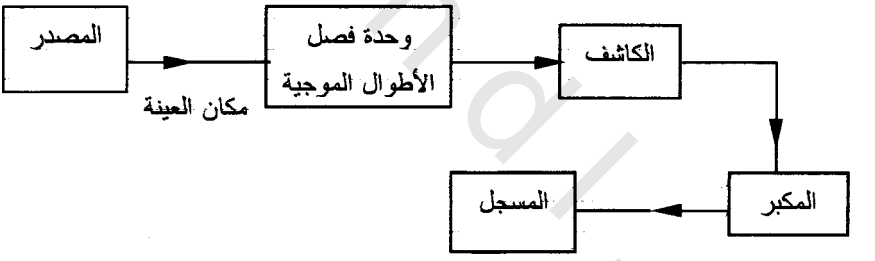
الباب الثاني

الأجهزة وتحضير العينات
Instruments and Sampling

1:2 مطياف الأشعة تحت الحمراء Infrared Spectrophotometer

طيف امتصاص المادة عبارة عن رسم يبين كيفية تغير امتصاص المادة للأشعة تحت الحمراء مع طول الموجة أو العدد الموجي.يسمى الجهاز المستخدم للحصول على هذا الطيف المطياف، يتكون المطياف من الوحدات الأساسية التالية (شكل 22):



شكل (22): الوحدات الأساسية للمطياف المزدوج الحزمة الضوئية.

1- مصدر الإشعاع Source

يصدر إشعاعاً مستمراً من الأشعة تحت الحمراء، لا تتغير شدته مع تغير طول الموجة في منطقة الأشعة تحت الحمراء، إلا بمقدار ضئيل.

2- وحدة تحليل الضوء Monochromator

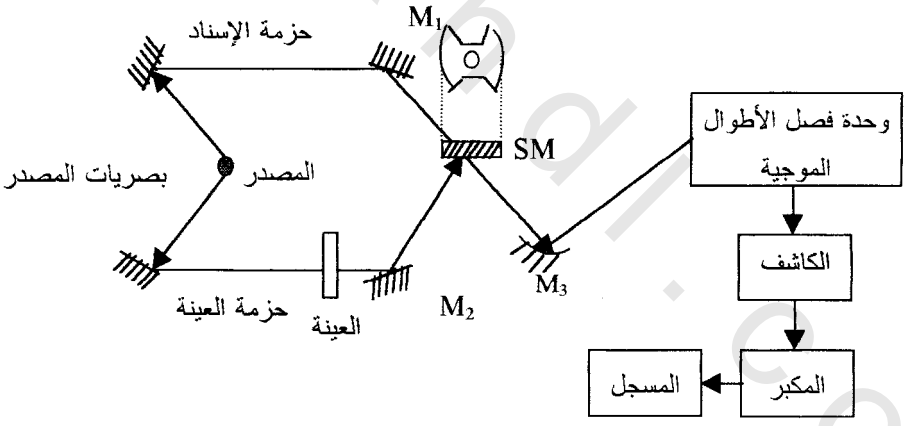
تعمل على فصل الأطوال الموجية للأشعة الساقطة عليها وتنتقى طولاً موجياً معيناً [في الواقع شريط ضيق من الأطوال الموجية] وتمرره إلى الكاشف.

3- الكاشف Detector

يستقبل الطاقة الإشعاعية القادمة إليه من وحدة تحليل الضوء ويحولها إلى نبضات كهربائية بحساسية التأثير الحراري للأشعة تحت الحمراء.

طريقة عمل المطياف Operation Of Spectrophotometer

تتجزأ الأشعة المنبعثة من المصدر إلى حزمتين ضوئيتين متماثلتين تماما (شكل23)، بواسطة مرآتين مستويتين، تمر إحدى الحزمتين وتسمى حزمة العينة إلى خلية العينة وتمر الأخرى وتسمى حزمة الإسناد إلى خلية الإسناد، ثم تنعكس الحزمتان النافذتان من الخليتين بواسطة مرآتين M_1 , M_2 إلى مرآه مقطعية دوارة (Rotating Sector Mirror) تدور بواسطة محرك بسرعة معينة بحيث تعكس كل حزمة بالتناوب عشرين مرة في الثانية إلى المرآه M_3 التي تعكس هذه الحزم إلى وحدة تحليل الضوء[عدد الدوران في الثانية يختلف من جهاز إلى جهاز فمثلا يكون في بعض الأجهزة عشرين وفى البعض الآخر يكون عشرة].

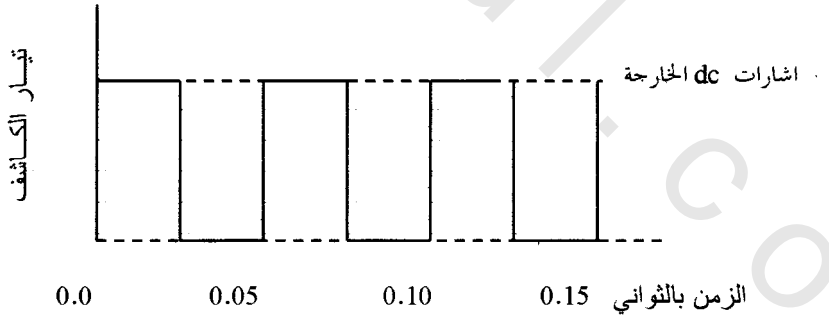


شكل (23): رسم تخطيطي للمسار الضوئي والوحدات الأساسية للمطياف المزدوج الحزمة الضوئية.

تعمل وحدة تحليل الضوء سواء كانت منشوراً أو محزوز حيود على فصل الأطوال الموجية وانتقاء طولاً موجياً معيناً أو شريطاً ضيقاً من الأطوال الموجية ثم تمرره إلى الكاشف. يحول الكاشف الطاقة الإشعاعية الساقطة عليه باستشعاره الحراري للأشعة تحت

الحمراء إلى نبضات كهربائية تصل بعد ذلك إلى المكبر الذي يعمل على تكبيرها ومنه إلى وحدة التسجيل. عندما تكون شدة الضوء النافذ من كل من الخليتين متساوية، تكون شدة الضوء الساقط على الكاشف من كل منهما متساوية أيضاً، وبالرغم من أن كل من الحزمتين تمر بالتناوب من المرآة المقطعية إلا أن الإشارات الصادرة من الكاشف عن كل منهما تكون ثابتة أى تكون عبارة عن إشارات تيار مستمر d . c. signals (شكل 24) .وفي هذه الحالة لا يستقبل الكاشف تلك الإشارات ولا يكبرها حيث إنه حسب تصميمه لا يستجيب إلا لإشارات التيار المتردد فقط.

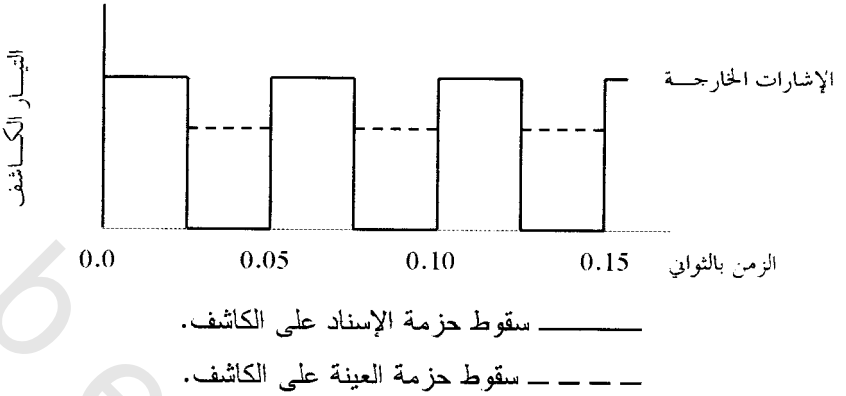
عندما تمتص العينة طولاً موجياً معيناً في هذه الحالة تكون الإشارات الناتجة عن الحزمة الضوئية للعينة أضعف من تلك الناتجة عن الحزمة الضوئية للإسناد، يصدر عن الكاشف في هذه الحالة إشارات تيار متردد a c. Signals تردده 20 Hz حيث أن المرآة الدوارة تقطع الضوء 20 مرة في الثانية كما هو واضح في شكل (25) ويستقبل المكبر بعدئذ هذه الإشارات بتردد 20 Hz ويستجيب لها ويكبرها. الإشارات الصادرة من المكبر تعمل على دفع إسفين ضوئي Optical Wedge إلي الحزمة الضوئية للإسناد لكي تتساوي الحزمتان في الشدة مرة أخرى. يتصل الاسفين الضوئي مباشرة بسن المسجل ويتحركان بمقدار تحدده شدة الامتصاص عند كل طول موجي.



ـــــــــ سقوط حزمة الإسناد على الكاشف.

ـ ـ ـ ـ سقوط حزمة العينة على الكاشف.

شكل (24): إشارات الكاشف في عدم وجود العينة.

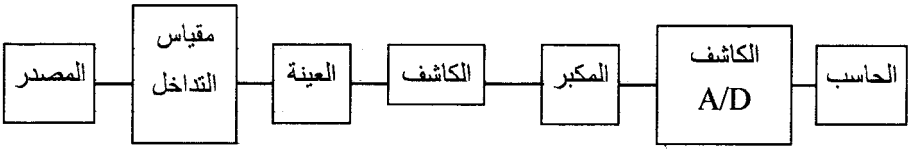


شكل (25): إشارات الكاشف في وجود العينة.

2:2 مطياف تحويل فوريير Fourier Transform Spectrophotometer

تفضل المعامل الآن استخدام مطياف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فوريير FTIR. وكل يوم يزداد الإقبال عليه، وهذه الطريقة الحديثة تستخدم الفكرة القديمة لتداخل شعاعين من الضوء لتكوين نموذج تداخل، وهذا النموذج يعتمد على الفرق في طول مسار الشعاعين، وتسمى المعالجات الرياضية التي تحلل الموجة المركبة إلى مركباتها من الترددات تحويل فوريير. وجاءت هذه التسمية بعد أن طور عالم الرياضيات الفرنسي Jeam Bapt, ste Fourier هذه الطريقة سنة 1800م. وبدون تفاصيل يكفى أن نذكر أنها عملية تكامل على شكل الموجة المركبة و يتم تنفيذ هذه العملية بواسطة الحاسب.

مقياس التداخل لميكلسون، الذي يمثل الوحدة الأساسية في المطياف، معروف منذ قرن مضى إلا أنه لم يستخدم في هذا المجال إلا بعد التقدم الهائل في تكنولوجيا الحاسبات. وشكل 26 يبين الوحدات الأساسية لجهاز FTIR .



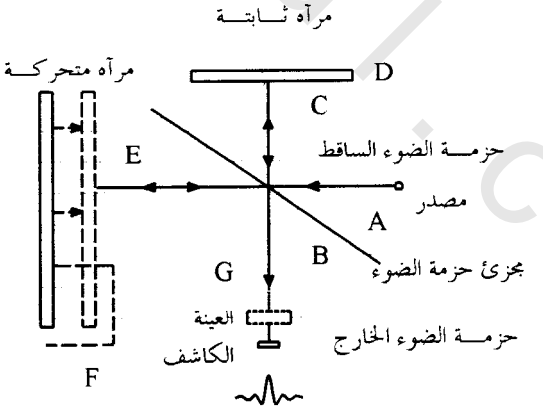
شكل (26): الوحدات الأساسية لجهاز FTIR.

طريقة عمل مطياف فوريير FTIR

تمر الأشعة من المصدر إلى العينة من خلال مقياس التداخل قبل وصولها إلى الكاشف، وعند تكبير الإشارات بالمكبر الذي يستبعد الترددات العالية تتحول البيانات إلى أرقام بواسطة Analog - to - Digital Converter ثم تنتقل إلى الحاسب حيث يتم تحويل فوريير.

مقياس ميكلسون للتداخل Michelson Interferometer

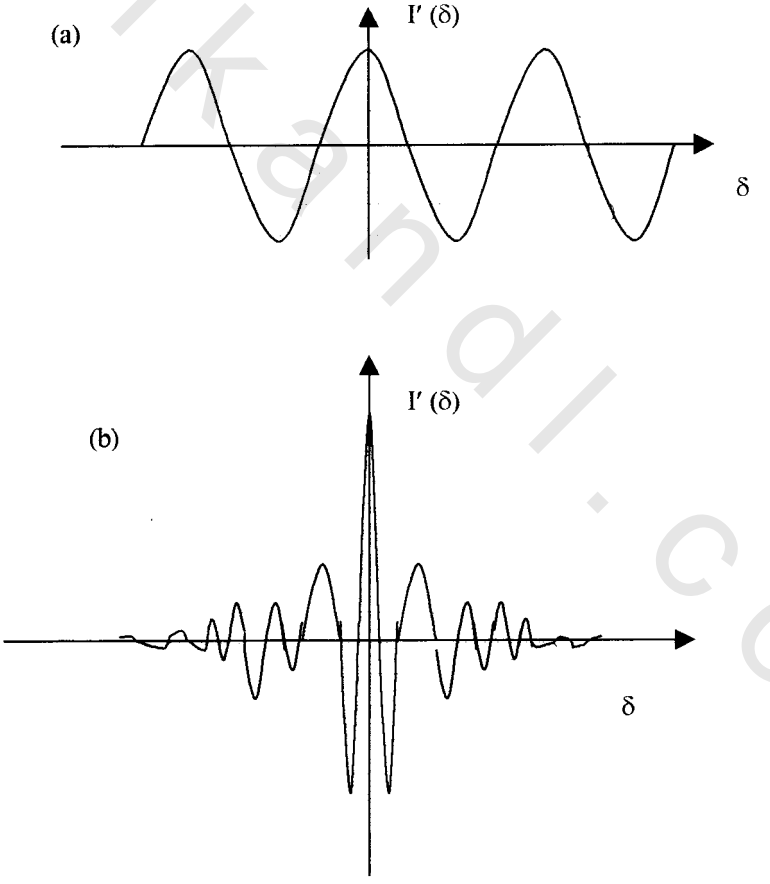
يتكون مقياس ميكلسون للتداخل، كما في شكل (27)، من مرآتين مستويتين موضوعتين على محورين متعامدين إحداهما تتحرك بسرعة ثابته والأخرى ثابته، بالإضافة إلى مجزئ للشعاع عبارة عن لوح نصف مفضض يميل بزاوية 45° على مستوى المرآتين. يسقط ضوء ذو طول موجي واحد من المصدر (A) على المجزئ (B) المصمم على أساس تجزيء الشعاع (A) إلى جزأين ، جزء ينعكس [الشعاع C] إلى المرآه (D) التي تعكسه إلى الخلف مرة أخرى إلى (B)، الجزء الثاني [الشعاع E] ينفذ إلى المرآه المتحركة F التي تعكسه خلفاً إلى (B). ينفذ و يعكس المجزئ الشعاعين السابقين على التوالي مرة ثانية ليتحدا في الشعاع (G) في اتجاه عمودي على انتشار الشعاع (A) ليصل إلى الكاشف.



شكل (27): مقياس التداخل لميكلسون.

إذا كان الفرق في مسار الشعاع من B إلى المرآتين D و F يساوى مضاعفات العدد الصحيح للطول الموجي أي $s = n\lambda$ حيث $n = 0, \pm 1, \pm 2$ فإن الشعاعين (G) يتحدان في

تداخل بناء ويصل الكاشف أشعة ذات شدة عالية. أما إذا كان الفرق في المسار يساوي $s = (n + ½)\lambda$ فإن الشعاعين يتحدان في تداخل هدمي ويصل الكاشف أشعة ضعيفة الشدة [يتغير طول المسار بتحريك المرآة المتحركة F]. والمرآة المتحركة F تتحكم في نوع التداخل فيصل الكاشف بالتناوب صور مضيئة ثم معتمة إذا تحركت المرآة (F) ببطئ بعدا عن أو قرباً من (B). وتكون الإشارات الصادرة من الكاشف كما هو موضح في الشكل (28). ويكون شكل نموذج التداخل في حالة الشعاع وحيد الطول الموجي كما في شكل (28.a). أما إذا كان الشعاع الصادر من المصدر متعدد الأطوال الموجية يكون نموذج التداخل كما في شكل (28.b).



شكل (28): نموذج تداخل (a) شعاع وحيد الطول الموجي، (b) شعاع متعدد الطول الموجي.

يجب أن نذكر أنه لا بد من اختيار مادة المجزئ على أساس منطقة قيـــاس الطيـــف. ترسب مواد مثل الجيرمانيوم أو أكسيد الحديد على أقراص شفافة للأشعة تحت الحمـــراء مـــن بروميد البوتاسيوم أو أيوديد السيزيوم للحصول على مجزئ في منطقة الأشعة تحت الحمـــراء الوسطى والقريبة. وتستخدم أفلام عضوية رقيقة من البولي إيثيلين تريفثاليت للمنطقة البعيدة.

المرآه المتحركة هي أهم وحدة في مقياس التداخل فيجب أن تكون حركتها الإتجاهية دقيقة تماماً لكي يمكن مسح مسافتين بحيث يأخذ فرق المسار قيمة محددة.

لاستنتاج المعادلات الأساسية لنظام تحويل فورير نعتبر أولا أبسط حالة وهـــى التـــي يكون فيها الشعاع الصادر من المصدر ذا طول موجي واحد (υ_0)، وأن هذا الشـــعاع يتجـــزأ بواسطة مقياس التداخل إلى موجتين متساويتي الشدة $I(\upsilon_0)$ I. ويقيس الكاشف الشدة $I(\varphi)$ التي تساوى :

$$I(\varphi) = 2I(\upsilon_0)\,[1 + \cos\varphi] \qquad (2.1)$$

ويمكن التعبير عن فرق الطور φ بدلالة فرق المسار الضوئي (s) للشعاعين الضوئيين والطـول الموجي λ_0

$$\varphi = \frac{2\pi s}{\lambda_0} \qquad (2.2)$$

وبالتعويض تصبح العلاقة السابقة على الصورة:

$$I(s) = 2I(\upsilon_0)\,[1 + \cos 2\pi\,\upsilon_0\, s] \qquad (2.3)$$

وكما ذكرنا فإن التداخل البناء يحدث عندما

$$s = n\lambda_0, \qquad n = 0 \pm 1 \pm 2 \ldots\ldots$$

والتداخل الهدمي يحدث عندما

$$s = (n + \tfrac{1}{2})\,\lambda_0$$

في مقياس تداخل ميكلسون الماسح، يتغير فرق المسار الضوئي بتحريك إحدى المرآتين بسرعة ثابتة v. ينشأ عن هذا المسح تغيير شدة الموجة الصادرة جيبياً بالنسبة للزمن بتردد f يعتمد على العدد الموجي`υ وسرعة حركة المرآة v، أي أن:

$$f = 2\upsilon` \ v \qquad (2.4)$$

أما إذا كان الضوء الصادر من المصدر متعدد الأطوال الموجية أو مستمراً، في هذه الحالة تكون الشدة الناتجة عبارة عن حاصل الجمع أو التكامل على جميع الاهتزازات الناتجة عن كل تردد ضوئي على التوالي. على ذلك تكتب المعادلة (2.3) بالنسبة للمصدر المستمر على الصورة التالية:

$$I(s) = 2 \int_0^{\infty} I(\upsilon`) \, ( 1 + \cos 2 \pi \upsilon`s) \, d \upsilon` \qquad (2.5)$$

ويمكن تجزيء الدالة I (s) إلى مركبتين إحداهما لا تعتمد على s وهي:

$$I(\infty) = 2 \int_0^{\infty} I(\upsilon`) \, d \upsilon` \qquad (2.6)$$

والمركبة التذبذبية يمكن أن تأخذ قيما سالبة أو موجبة. وهذه المركبة هي، في الواقع، المسئولة عن التركيب المميز لنموذج التداخل وتسمى دالة نموذج التداخل F(s)

$$F(s) = 2 \int_0^{\infty} I(\upsilon`) \cos 2\pi \upsilon`s \, d\upsilon` \qquad (2.7)$$

وحيث أن: $I(\upsilon`) = I(-\upsilon`)$

فإن :

$$F(s) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} I(\upsilon`) \cos 2\pi \upsilon`s \, d\upsilon` \qquad (2.8)$$

يبين شكل (28) نموذج التداخل في الحالتين، في حالة الشعاع وحيد الطول الموجي، والشعاع متعدد الأطوال الموجية . واضح من الشكل أنه يبدو من الصعب الحصول على بيانات مفصلة عن الطيف في نموذج التداخل الناتج عن لأشعة متعددة الأطوال الموجية أومن المصدر المستمر ولذلك نطبق الطريقة الرياضية لتحويل فورير. وهذه الطريقة تربط بين الطيف (I(υ` ودالة نموذج التداخل F(s) كمايلى :

$$I(0) = 4 \int_0^{\infty} I(\upsilon`)\, d\upsilon` = 2\, I(\infty) \qquad (2.9)$$

$$I(\upsilon`) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) \cos 2\pi\, \upsilon`s\, ds \qquad (2.10)$$

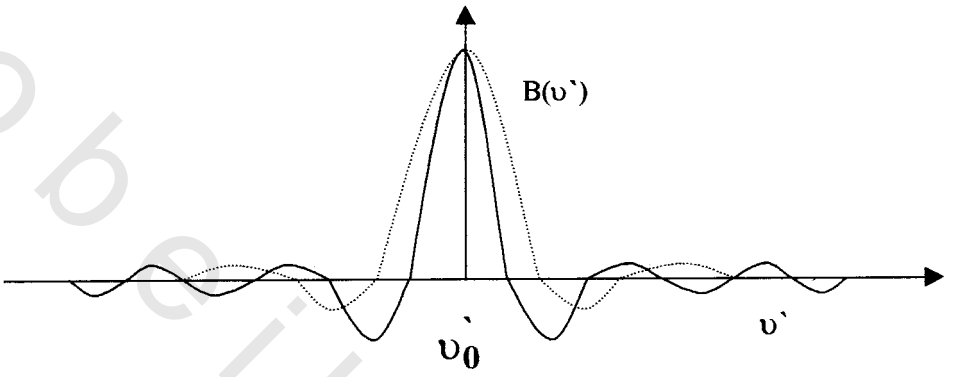
ولأن $F(s) = F(-s)$ فإن

$$I(\upsilon`) = 2 \int_0^{\infty} F(s) \cos\, 2\pi\, \upsilon`s\, ds \qquad (2.11)$$

لحساب الطيف (I (υ` باستخدام العلاقة الجيبية لتحويل فورير السابقة، يلزم معرفة نموذج التداخل لفروق في المسار تصل إلى مالانهاية، ولكن التحويل الذي يتم من الناحية العملية يشمل تكامل على إزاحة محدودة وليست لانهائية، المعالجة الرياضية لتحويل فورير تفرض حدود لانهائية، ونتيجة لهذا التقريب الحتمي فإن الشكل الظاهري للخط الطيفي سيظهر كما في شكل (29) حيث تكون مساحة الشريط الأساسي عبارة عن سلسلة من الفصوص الموجبة والسالبة التي تتناقص سعاتها حتى تتلاشى. يمكن التخلص من هذه الفصوص أو الفلقات (Lobes أوPods) بضرب F(s) بدالة مناسبة قبل إجراء تحويل فورير والدالة المناسبة تجعل شدة نموذج التداخل يهبط إلى الصفر عند كل من نهايتيه بدون ظهور أي فصوص.

إذا كانت الأشعة الصادرة من المصدر ذات طول موجي واحد فإن الأشعة المتحدة التي تغادر الجهاز عند النقطة (B) تتداخل تداخلا بناء أو هدمياً حسب الفرق في طول المسار منB إلى D و من B إلى F .إذا كان طول المسارين متساوي أو كان الفرق بينهما يساوى

مضاعفات الطول الموجي فإن التداخل يكون بناء أما إذا كان الفرق يساوى نصف العدد الصحيح لمضاعفات λ فإن التداخل يكون هدمياً.



شكل (29): الشكل الظاهري للخط قبل التصحيح وبعده.

عندما تتحرك F إلى B أو بعيداً عنها فإن الكاشف يسجل أشعة ذات شدة دورية. فإذا فرضنا أن المصدر يبعث ترددين منفصلين υ_1، υ_2 لهما نفس الطول الموجي فإن نموذج تداخل υ_1، υ_2 سيعطى نموذج التداخل الناتج من F ، D و يسجل الكاشف شدة معقدة و متغيرة عند تحرك F، ولكن تحويل فورير يحول هذه الإشارات بسرعة إلى الترددات والشدة الأصلية الناتجة من المصدر. وحتى إذا بعث المصدر ضوءا أبيض و نتج عن ذلك تداخل معقد فإن تحويل فورير سيعيد ذلك إلى التوزيع الأصلي للترددات. فإذا مر الشعاع المتحد الخارج من مقياس التداخل على العينة قبل وصوله إلى الكاشف فإن العينة ستمتص بعض الترددات ويظهر هذا الإمتصاص كفجوات في توزيع الترددات، هذا يعطى بعد التحويل طيف الإمتصاص العادي. فإنتاج الطيف يمكن أن نفكر فيه كما يلي:

تتحرك المرآه F خلال فترة من الزمن [ثانية مثلاً] مسافة حوالي واحد سم بينما تتجمع إشارات الكاشف (Interferogram) في كمبيوتر متعدد القنوات (Multi Channels). يسجل الكمبيوتر إشارات الكاشف في زمن قدره واحد من ألف من الثانية وأثناء تحرك المرآة تخزن البيانات في ذاكرة الكمبيوتر، يقوم الكمبيوتر بإجراء تحويل فورير على البيانات المخزونة وبعد ذلك يتم تسجيل الطيف المناسب على الورق.

أهم ميزة في FTIR هي سرعة التسجيل حيث يتم الحصول على الطيف بأكمله في صورة التداخل الذي يسجله الكمبيوتر خلال ثانية واحدة وهذا هو زمن التسجيل الفعلي. وحتى

لو أضفنا مثلا زمنا للحاسب وزمنا للتسجيل حوالي 15 ثانية فإن مجموع الزمن الذي نحصل فيه على الطيف الكامل يعتبر ضئيلا جداً مقارنة بالزمن الذي يستغرق في الحصول على نفس الطيف في الأجهزة العادية والمميزات الأخرى هي:

1- في الأجهزة العادية يركز الضوء على شق ضيق و يسجل الكاشف صورة هذا الشق، والشق الرقيق يعطى قوة تحليل جيدة حيث سينفذ منه حزمة ضيقة من الأطوال الموجية لتصل إلى الكاشف في أي لحظة لكن كمية الطاقة الكلية التي تمر في الجهاز تكون محدودة ويلزم تكبيرها باستخدام المكبر. في جهاز FTIR لا توجد حاجة إلى الشق وهذا يعنى أن كل طاقة المصدر تمر خلال الجهاز والحاجة إلى المكبر تقل. وتعتمد قوة التحليل على حركة المرآة وسعة الكمبيوتر. لهذا السبب استخدم جهاز التداخل أولا في حالة منطقة الأشعة تحت الحمراء البعيدة حيث أن طاقتها أقل من طاقة أشعة المنطقة الوسطى.

2-قوة التحليل في جهاز FTIR ثابتة لكل أجزاء الطيف. في أجهزة المنشور ومحزوز الحيود تعتمد قوة التحليل على الزاوية التي يصنعها الشعاع مع المنشور أو المحزوز.

3- وجود الحاسب يساعد على عمليات أخرى مثل تحسين شكل الطيف.

3:2 طرق الانعكاس Reflectance Methods

تستخدم طرق الانعكاس في حالة العينات التي لا يمكن قياسها بطريقة النفاذية المعتادة. ويمكن تقسيم هذه الطرق إلي طريقتين:

1- قياس الانعكاس الداخلي Internal Reflectance Measurement

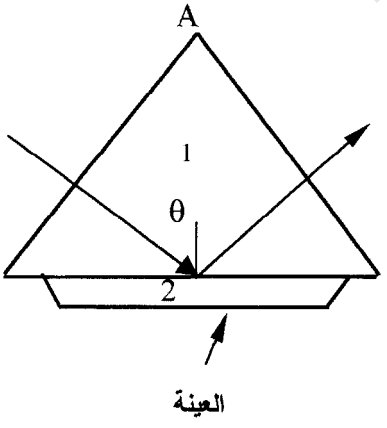
ويتم ذلك باستخدام خلية الانعكاس الكلى الموهن بالتلامس مع العينة.

2- قياس الانعكاس الخارجي External Reflectance Measurement

وفيها يتم قياس الأشعة تحت الحمراء المنعكسة من سطح العينة مباشرة.

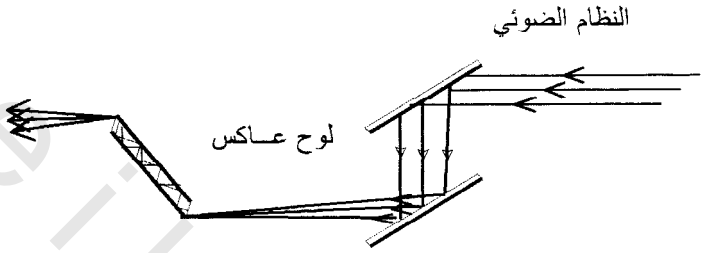
الانعكاس الكلى الموهن: Attenuated Total Reflectance

إذا سقط شعاع من الأشعة تحت الحمراء على السطح الخلفي لمنشور بزاوية θ أكبر من الزاوية الحرجة فإنه يعانى انعكاساً كلياً. إذا طلى هذا السطح بالعينة فإن الأشعة تنفذ خلال العينة عند الأطوال الموجية التي تمتصها بينما يحدث الانعكاس الكلى في مكان آخر. عندئذ يكون الانعكاس الكلى قد وهن عند هذه الأطوال الموجية. والعلاقة بين شدة الامتصاص والأطوال الموجية للضوء المنعكس تشبه طيف امتصاص العينة مع بعض الخلافات في الشدة النسبية وشكل أشرطة الامتصاص. وطريقة ATR (الانعكاس الكلى الموهن) مهمة خصوصاً في حالة العينات التي لا يمكن دراستها بطرق الامتصاص العادية و التي لا تذوب في المذيبات المناسبة للأشعة تحت الحمراء مثال على هذه المواد أفلام البوليميرات أو الفوم، المنسوجات، العجائن السميكة، الطلاء مثل أفلام الدهانات ، أحبار الطباعة على المعادن والمعادن. يمكن تسجيل الطيف بواسطة عاكس متطور بطريقة تعتمد على الانعكاس الكلى للضوء. إذا علم أن معامل انعكاس المنشور1 (الشكل 30) أكبر من معامل إنكسار 2 و إذا كانت زاوية السقوط θ أكبر من الزاوية الحرجة فإن الحزمة الضوئية للأشعة تحت الحمراء في2 سوف تعانى انعكاسا كلياً عند سطح التلامس بين 2,1 وحزمة الضوء يجب أن تقطع مسافة قصيرة جداً (عدد قليل من الميكرون) في الوسط 2 قبل نفاذها مرة ثانية إلى 1، إذا امتص الوسط 2 جزءاً من الضوء فإن الحزمة النافذة سوف توهن بدلا من أن تنعكس كلياً. هذا المبدأ يمكن أن يمتد لينتج طيف امتصاص الأشعة تحت الحمراء للوسط 2 وهذه الطريقة تسمى الانعكاس الكلى الموهن ATR.

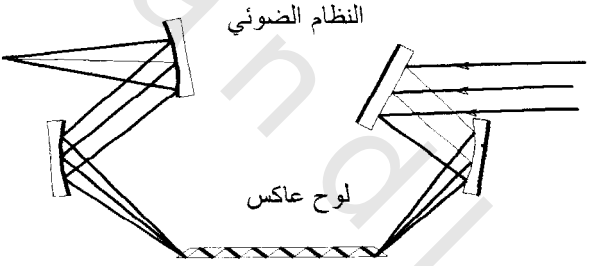


شكل (30): الانعكاس الكلى.

الانعكاس الواحد في الوسط (الشكل 30) ينشأ عنه طول مسار قصير جداً في الوسط 2 وينشأ عن ذلك طيف ضعيف الشدة إذا لم يحدث تكرار الانعكاس كما في الشكل (31). هذا النظام يمكن إدخاله إلى حزمة الضوء في مطياف الأشعة تحت الحمراء. وبذلك يمكن الوصول إلى عدد من الانعكاسات يمكن أن يصل إلى 25 انعكاساً وبهذا نحصل على طيف يشابه طيف الامتصاص العادي.



(a) 10 انعكاسات.



(b) 15 انعكاسات.

شكل (31): وحدة انعكاس كلي.

نجاح الطريقة يعتمد على استخدام الوسط I المنفذ لضوء الأشعة تحت الحمراء و الذي له معامل انكسار عالي (μ = 2.5 - 3.5). شدة الطيف تعتمد على درجة الالتصاق بين البلورة والعينة وعلى مساحة الالتصاق وزاوية الانعكاس. وعمق نفاذية الشعاع في الانعكاس الكلي الموهن دالة لطول الموجة λ شكل (32) ومعامل انكسار المنشور وزاوية سقوط الشعاع θ.

ويمكن تعيين عمق النفاذ dp للوسط الذي لا يمتص من الصيغة التالية:

$$dp = \frac{(\lambda / n_1)}{2II\left[\sin\theta - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\right]^{0.5}} \qquad (2.12)$$

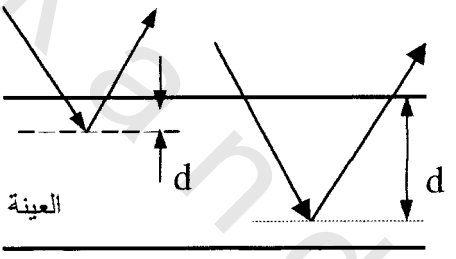
حيث n_1 معامل انكسار العينة.

n_2 معامل انكسار منشور الانعكاس الكلى الموهن.

ويتضح من هذه المعادلة ما يلي:

1 – زيادة عمق النفاذ مع زيادة الطول الموجي.

2 – لأي قيمة من n_1/n_2 يقترب عمق النفاذ من القيمة العظمى في إتجاه الزاوية الحرجة للانعكاس الداخلى(θ_c).



شكل (32): تأثير الطول الموجي على مقدار عمق الاختراق.

وتصنع مادة المنشور أو البلورة المستخدمة من مادة قليلة الذوبان في الماء ولها معامل إنكسار كبير جداً. هذه المواد تشمل :

Thalium iodide (KRS-5), Germanium(Ge) , Zinc Selenide(Znse).

وخواص هذه المواد موضحة بالجدول (4).

جدول(4): خواص مادة المنشور.

المادة	معامل الإنكسار	الخواص
KRS-5	2.4	تذوب في القاعدة bases تذوب قليلاً في الماء لا تذوب في الأحماض، لينه Soft ،سامة جداً ولابد من الحذر عند استخدامها.
Zn Se	2.4	لا تذوب في الماء أو المذيبات العضوية والأحماض المخففة و القاعدة.
Ge	4	لا تذوب في الماء، هش.

وحدة الإنعكاس الكلى الموهن ATR Cell

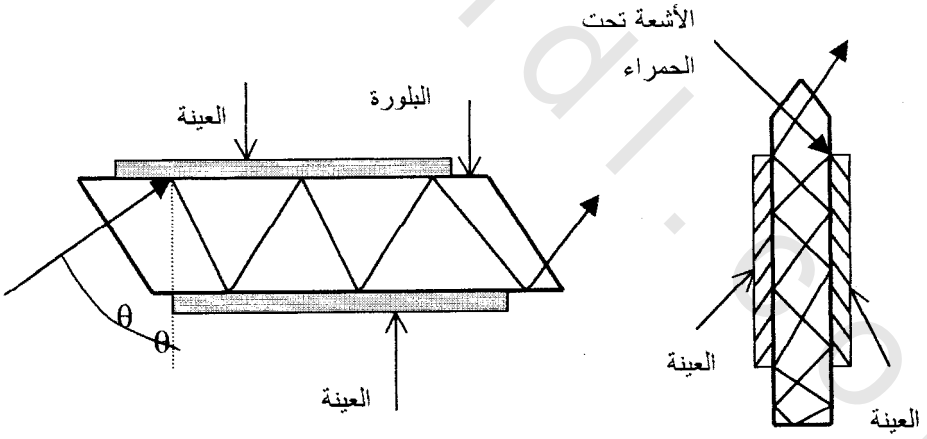
تتكون الوحدة من جزأين أساسيين.

1- بلورة optical system وتقوم بدور الوسط العاكس.

2- مجموعة بصرية وعملها تركيز أشعة المصدر على السطح الأمامي للبلورة وفـــى بعـض الأحيان تجمع الأشعة النافذة وتوجهها إلى وحدة تحليل الأشعة.

لكي يحدث الإنعكاس الكلى الموهن لابد أن يوجد فرق كبير بين معامل إنكسار الوسـط العاكس والعينة. وبما أن معامل إنكسار معظم العينات يكون في حدود الواحد فإن معامل إنكسار الوسط يجب أن يكون على الأقل 2.

في البداية كان الوسط العاكس على شكل منشور وكان يتم تكبير زاوية سقوط الشعاع حتى يمكن الحصول على أنسب طيف بالشدة المناسبة وكانت المجموعة البصرية لهذه الأجهزة ليست عالية الحساسية مما يؤدى إلى صعوبة تحليل بعض العينات. وقد استبدل هذا النظام فـي الأجهزة الحديثة باستخدام نظام الإنعكاس المتعدد ويستخدم فيه ألواح عاكسة على شكل مقطع من متوازي أضلاع أو معين شكل (33).



شكل (33): الإنعكاس الداخلي المتكرر.

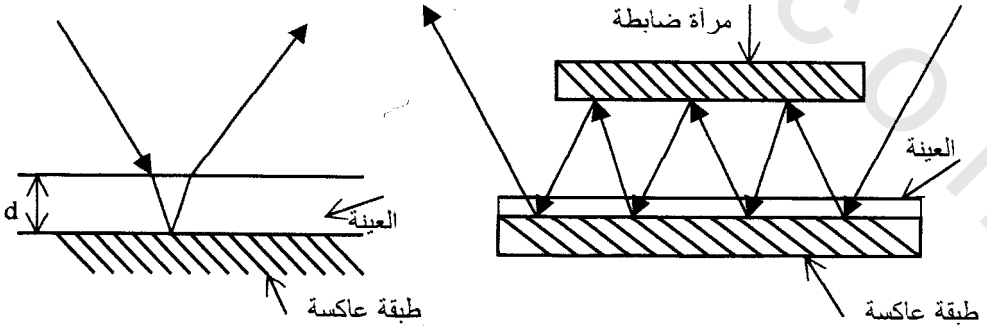
ويوجد نوعان من وحدة الانعكاس المتعدد أحدهما ثابت الزاوية والثاني متغير الزاوية. يستخدم في النوع الأول ألواح عاكسة ذات أبعاد 30 mm × 20mm وسمك 3mm وتعطـى 9

أو 10 إنعكاسات عند زاوية إنعكاس 45° . هذه الوحدة ذات حساسية كافية لمعظم الاستخدامات. يمكن تغيير سمك هذه الألواح لتغيير عدد الإنعكاسات للحصول على الطيف المناسب الشدة.

النظام البصرى في الوحدة التي تستخدم زاوية سقوط متغيرة يكون أكثر تعقيداً من النظام في الوحدة السابقة، حيث تستخدم مرايا مقعرة لتكبير أشعة المصدر على السطح الأمامي للوح العاكس ومجموعة أخرى لتركيز الأشعة الخارجة من السطح العاكس. وأبعاد الألواح العاكسة فى هذه الوحدة يكون في حدود 50mm×20 mm وسمك 2 mm وتعطى 25 إنعكاسا عند زاوية سقوط 45° .

الانعكاس المنظاري Specular Reflectance

في الإنعكاس الخارجي تركز الأشعة الساقطة على العينة ويمكن حدوث شكلين من الإنعكاسات أحدهما يسمى الانعكاس المنظارى Specular والآخر يسمى الانعكاس المنتشر diffuse ، لقياس الإنعكاس الخارجي للأشعة المنعكسة من السطح لابد إذن أن تكون العينة عاكسة أو تكون ملتصقة من الخلف بمادة عاكسة. ويحدث الإنعكاس المنظارى عندما تكون زاوية إنعكاس الأشعة الساقطة مساوية لزاوية السقوط كما في الشكل (34). كمية الضوء المنعكسة تعتمد على زاوية السقوط ومعامل الانكسار وخشونة السطح وخواص امتصاص العينة. والتطبيق المفيد لهذه الطريقة هو دراسة أسطح الطلاء مثل أسطح المعادن المعالجة، والدهانات و البلمرات .

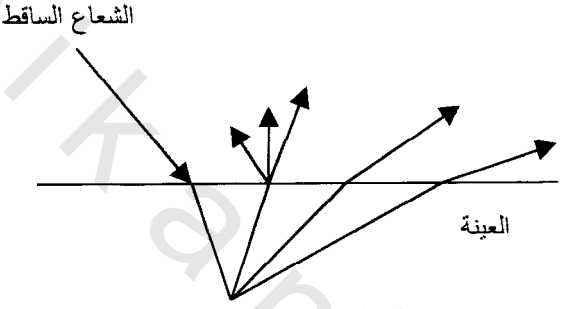


(a): إنعكاس متكرر. (b): إنعكاس منظاري

شكل (34) : انعكاس منظارى متكرر

الإنعكاس المنتشر: Diffuse reflectance

عندما تسقط الأشعة على سطح مادة فإنها إما تمتص أو تنعكس مباشرة كما في الإنعكاس المنظارى Specular أو إنها تنتشر متشتتة في مساحة واسعة. والإنعكاسات المنتشرة في كل الإتجاهات يطلق عليها الإنعكاسات المنتشرة [كما في الشكل (35) في هذه الطريقة تخلط العينات في صورة مسحوق بمسحوق KBr. تعكس خلية الإنعكاسات المنتشرة الأشعة إلىالمسحوق و تجمع الأشعة المنعكسة خلال زاوية كبيرة. هذه الطريقة معقدة جداً في حالة المساحيق.



شكل (35) : الإنعكاس المنتشر

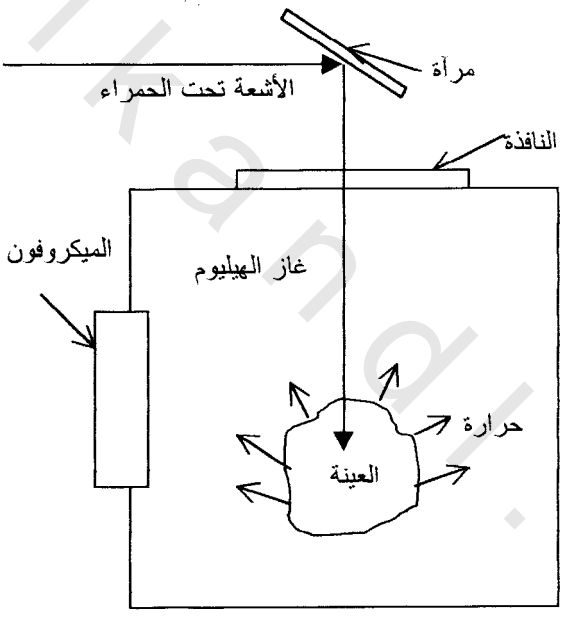
وقد طور كيوبلكا ومنك Kubelka & Munk نظرية توصف الإنعكاس المنتشر لعينات المساحيق وتربط بين تركيز المسحوق وشدة الأشعة المشتتة والمعادلة التي وصفاها هي :

$$\frac{(1-R_\infty)^2}{2R_\infty} = \frac{C}{K}$$

حيث R_∞ الإنعكاس المطلق لطبقة المسحوق و c تركيز العينة و K معامل الإمتصاص المولى Molar extenction coefficient.

4:2 الطيف الضوء ــ صوتي Photo Acoustic Spectroscopy [PAS]

بنيت هذه الطريقة على أساس تحويل الأشعة تحت الحمــراء المعدلــة Modulated إلى ذبذبات ميكانيكية. ويمكن قياس المادة في صورها الثلاث الصلبة والسائلة و الغازية بــهذه الطريقة. تظهر أهمية هذه الطريقة في حالة المواد عالية الإمتصاص مثل الكاوتشوك والفحــم. عندما تمتص العينة الأشعة تحت الحمراء المعدلة Modulated فإن المادة تســـخن و تــبرد حسب الاستجابة للأشعة التي تصل العينة. وهذا النموذج من التسخين و التبريد يتحــول الــى موجة ضغط يمكن كشفها بالميكروفون وشكل (36) يوضح خلية PAS .



شكل (36): خلية الطيف الضوء- صوتى.

طريقة الطيف الضوء – صوتي مفيدة جداً لأن الإشارة المكتشفة detected تتناســب مع تركيز العينة ويمكن استخدامها في حالة العينات عالية الإمتصاص أو السوداء جداً. هــذه الطريقة تمسح في الغالب المادة من السطح أو لعدة ميكرو مترات تحت الســطح لذلــك فــهي طريقة لها أهمية خاصة في دراسة السطوح.

5:2 طرق القياس المشتركة Combination Techniques

التحاليل الجرافومترية الحرارية TGA طريقة لقياس الفقد في كتلة العينة عند تسخينها ويمكن الحصول منها على معلومات كمية عن عملية تحلل العينة ولكن لا نستطيع تمييز نواتج التحلل باستخدام هذه الطريقة و يتم الآن استخدام طريقتي TGA , IR مشتركين في جهاز واحد للحصول على معلومات كمية ووصفية عن نواتج التحلل في المراحل المختلفة. كما تستخدم طريقة IR مشتركة مع طريقة الغاز جروماتوجرافى GC-IR لمعرفة تركيب المواد الناتجة.

6:2 طرق تحضير العينات Sampling Techniques

تعيين التركيب الجزيىء لمدة ما من طيف إمتصاصها للأشعة تحت الحمراء يشمل ثلاثة مراحل، تحضير العينة، تسجيل الطيف بالمطياف ثم تفسير الأطياف. لا تقل أهمية أي مرحلة عن الأخرى ووجود خطأ ما في أي من هذه المراحل يتسبب في عدم دقة النتائج. معنى ذلك أنه عندما نرغب في الحصول على طيف مادة ما يجب أن نختار أولاً الشكل المناسب الذي تكون عليه العينة التي يتم عليها القياس. والأشكال المختلفة التي يمكن أن تكون عليها العينة هي :

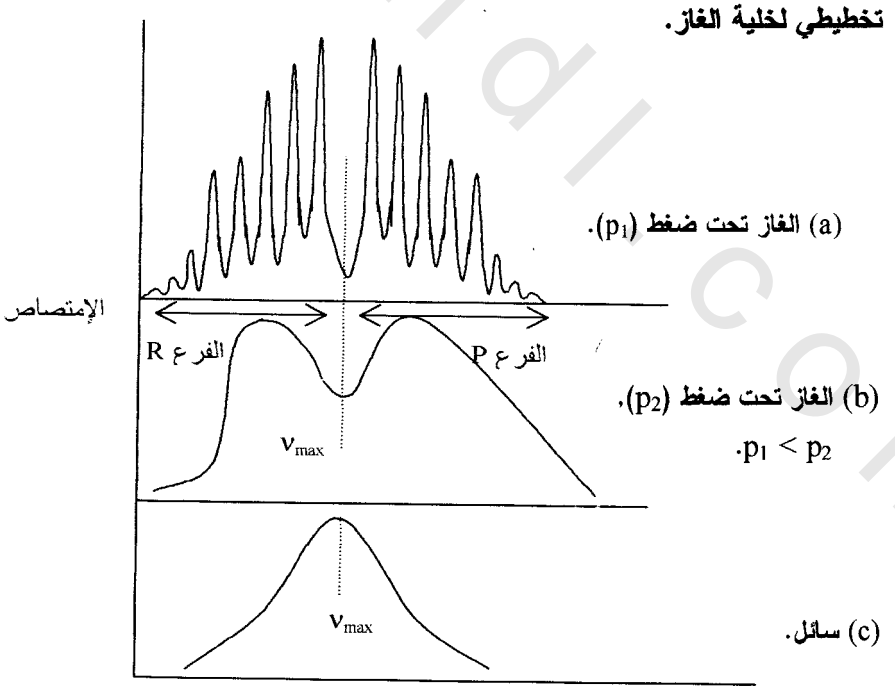
1- محلول في مذيب مناسب أو سائل.
2- فيلم رقيق من السائل أو الصلب [في حالة البلمرات مثلا].
3- عجينه ملساء.
4- قرص مضغوط لخليط من بروميد البوتاسيوم و العينة.
5- سطح أملس ينعكس منه الشعاع.
6- غاز.

الغازات Gasses

عند دراسة التركيب الجزيىء لمادة ما، من الأفضل دراسة الجزيئات وهى غير واقعة تحت تأثير المؤثرات الخارجية، مثل تأثير الجزيئات المجاورة (كما في حالة الغازات). عند

ضغط الغاز المنخفض (أقل من 10^{-2} جو) لا تؤثر الجزيئات المجاورة على الجزيء إلا بأقل قدر ويكون التغير في مستويات الطاقة الجزيئية ضعيف. الجزيء في حالة الغازات حر الدوران والتذبذب أيضا حيث أن التأثير المتبادل بين الجزيئات يمثل أدنى قيمة له، لذا يكون طيف الأشعة تحت الحمراء للغاز عبارة عن أشرطة إمتصاص عريضة ناشئة عن تراكب عديد من أشرطة الدوران الحادة على أشرطة الذبذبات.

يسجل طيف الأشعة تحت الحمراء للغازات في خلايا على هيئة أسطوانة جدرانها من البيركس Pyrex وقاعدتيها (النوافذ) من مادة شفافة منفذة للاشعة تحت الحمراء مثل KBr أو Na cl، ويتراوح طولها من واحد سنتيمتر إلى 10 سم. توضع الخلية في مسار شعاع الضوء مباشرة. في بعض القياسات تتكرر إنعكاسات الضوء في الخلية (خلية الغاز متعددة الإنعكاسات) ولذلك توضع مرايا في مسار شعاع الضوء لتتيح له الإنعكاس عدة مرات خلال الخلية لزيادة حساسيتها وطول مسار الضوء. يمكن بسهولة تسجيل طيف إمتصاص الأشعة تحت الحمراء للغازات حيث يسهل التحكم في تركيز العينات بتغيير ضغط الغاز. وتزود الخلية بفتحات لقياس الضغط والتفريغ. تستخدم الخلية في دراسة ملوثات الهواء والشوائب في الغازات. يعتمد شكل طيف الغاز على ضغطه كما في شكل (37) وشكل (38) يوضح رسم تخطيطي لخلية الغاز.

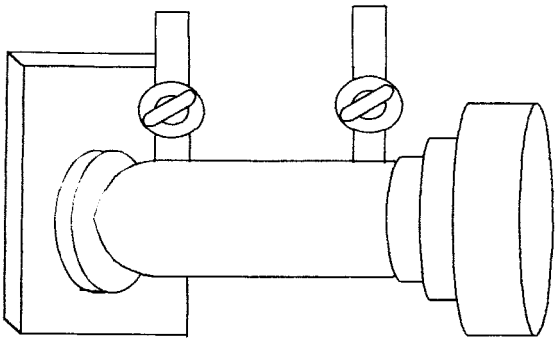


(a) الغاز تحت ضغط (p_1).

(b) الغاز تحت ضغط (p_2)، $p_1 < p_2$.

(c) سائل.

شكل (37): طيف المادة في الحالة الغازية.



شكل (38): رسم تخطيطي لخلية الغاز.

السوائل Liquids

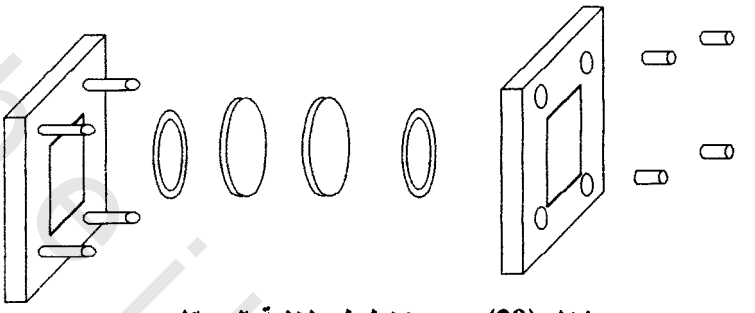
أ- السوائل اللزجة أو الغليظة Viscous Liquids

توضع نقطة من السائل فوق قرص [نافذة] من مادة الهالوجينات القلوية مثل بروميد البوتاسيوم أو كلوريد الصوديوم ويغطى القرص بقرص آخر مماثل ويضغط على القرصين معاً ضغطاً خفيفاً عن طريق ماسك فيتكون بينهما فيلم رقيق. إذا حدث وكانت شدة امتصاص العينة ضعيفة بسبب صغر سمك العينة فيمكن وضع رقائق فاصلة بينهما من التفلون أو الرصاص أو الألمونيوم للحصول على السمك المناسب .هذه الرقائق يختلف سمكها من 0.06 mm إلى1 mm. السوائل تحتاج الي سمك يصل 0.025mm لكي تعطى الطيف المناسب. هذه الخلية لا تصلح للسوائل المتطايرة و الخفيفة لأنها تسيل من جوانب الخلية قبل التسجيل وشكل (39) يوضح شكل تخطيطي للخلية.

ب ــ السوائل الطيارة غير اللزجة Non-viscous Liquids (Volatile)

توجد أنواع مختلفة من الخلايا المنفذة للأشعة تحت الحمراء خاصة بالسوائل منها الخلايا ذات السمك الثابت المحكمة، للسوائل الطيارة ومن عيوبها عدم إمكانية تنظيف الأقراص أو النوافذ قبل و بعد التسجيل. وهناك الخلايا النصف دائمة والتي يمكن فكها لتنظيف النوافذ. والشكل يبين مكونات هذه الخلية. والرقائق كما ذكرنا من قبل متغيرة السمك فيمكن التحكم في

سمك العينة. ويوجد نوع آخر من الخلايا محكمة ومتغيرة السمك مزودة بنظام لتغيير السمك و تدريج لقراءة قيمة السمك. يساعد التدريج على التحكم وضبط السمك بدقة.



شكل (39): رسم تخطيطي لخلية السوائل.

أهم عنصر في اختيار الخلية المناسبة هو مادة النوافذ ومن أهم خصائص مادة النوافذ أن تكون منفذة للأشعة الساقطة عليها. والجدول المرفق يوضح أهم المواد المستخدمة وخصائصها.

مادة النافذه	منطقة القياس cm^{-1}	معامل الإنكسار	الخواص
كلوريد الصوديوم NaCl	$4000cm^{-1}$ - $600cm^{-1}$	1.52	يذوب فى الماء، قليل الذوبان فى الكحول، رخيص الثمن، مقاومة متوسطة للصدمات الميكانيكية والحرارية. سهل الصقل.
بروميد البوتاسيوم KBr	$4000cm^{-1}$ - 400 cm^{-1}	1.5 3	يذوب فى الماء والكحول وقليل الذوبان فى الأكاسيد والقاعدة. تمتص الماء. مقاومته للصدمات جيدة.
فلوريد الكالسيوم Ca F2	$4000cm^{-1}$ - $1100cm^{-1}$	1.4	لا يذوب فى الماء، يقاوم الأحماض والقاعدة،لا يتعتم، مفيد فى حالة الضغوط المرتفعة.
فلوريد الباريوم Ba F2	4000 cm^{-1} - 800 cm^{-1}	1.45	لا يذوب فى الماء ويذوب فى NH4 Cl7 ، لا يتعتم، حساس للصدمات الميكانيكية والحرارية.
كلوريد البوتاسيوم KCl	4000 cm^{-1}-400 cm^{-1}	1. 5	له خواص مشابهه NaCl ولكنه أقل ذوبان فى الماء ويمتص الماء.
بروميد السيزيوم Cs Br	4000 cm^{-1}-250 cm^{-1}	1.7	يذوب في الماء والأحماض ويمتص الماء.
أيوديد السيزيوم CsI	$4000cm^{-1}$- 200 cm^{-1}	1.7	يذوب في الماء والكحولات ويمتص الماء.

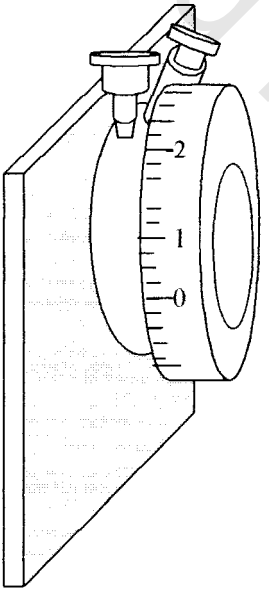
إذا كان إمتصاص المادة المراد تسجيل طيفها، سواء كانت سائلة أو صلبة، قويا و يصعب تسجيله وكان من السهل إذابة المادة في مذيب عضوي، يفضل تسجيل طيف محاليل هذه المواد في المذيبات. و تستخدم نفس الخلايا التي تستخدم في حالة السوائل ولكن يجب وضع خلية مملوءة بالمذيب في المسار الآخر للضوء لطرح إمتصاص المذيب من إمتصاص المحلول لنحصل على إمتصاص المادة فقط.

ولابد أن تتوافر الخواص التالية للمذيب المناسب:

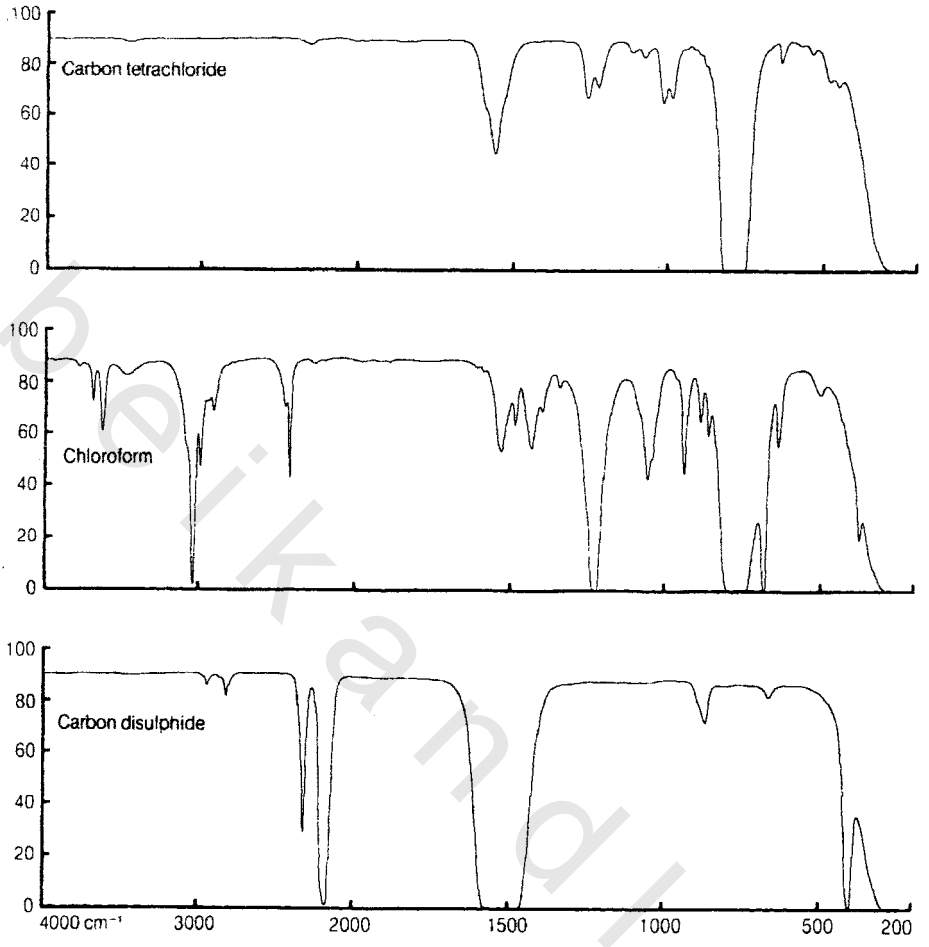
1- لا يكون للمذيب إمتصاص قوى فى منطقة القياس.

2- لا يتفاعل مع المذاب.

ومن أهم المذيبات المستخدمة رابع كلوريد الكربون، الكلوروفورم و ثاني كبريتيد الكربون. لا يوجد مذيب واحد يغطى منطقة طيف الأشعة تحت الحمراء بأكملها ولكن يمكن إستخدام أكثر من مذيب حسب المنطقة التي لا يمتص فيها هذا المذيب وشكل (40) يوضح رسم تخطيطي لخلية متغيرة السمك. كمايبين شكل(41) أطياف بعض المذيبات الشائعة الاستخدام.



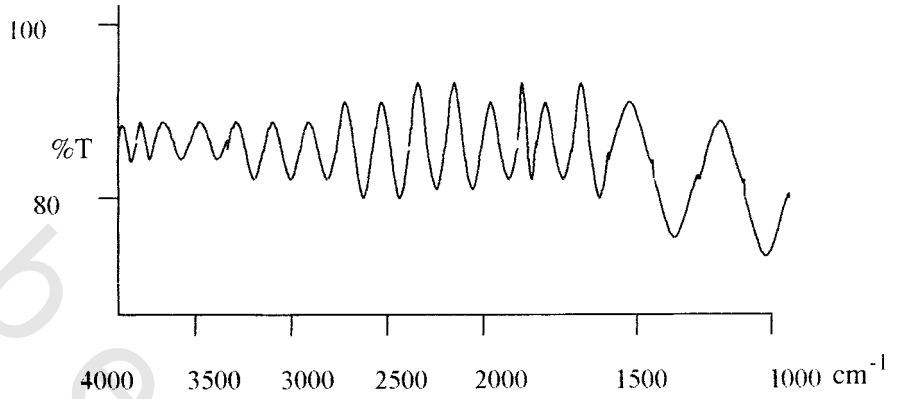
شكل (40) : رسم تخطيطي للخلية متغيرة السمك



شكل (41): أطياف بعض المذيبات.

تعيين و معايرة سمك الخلية

من المفيد أن نعرف بدقة سمك الخلية التي تحتوى السوائل والمحاليل وخصوصاً في حالة القياسات الكمية. يمكن أن يتم ذلك بطريقة حساب عدد حلقات التداخل interference fringes كما يلي: توضع الخلية فارغة في مسار الضوء في المطياف ويتم تسجيل منطقة من الأطوال الموجية. سيظهر نموذج تداخل مثل الموضح في الشكل (42) و تتغير سعة الموجة من 2% إلى 15% حسب حالة النوافذ.



شكل (42): نموذج التداخل في الخلية.

عندما تسقط الأشعة عمودياً على سطح الخلية شكل (43) فإن معظمها ينفذ في خط مستقيم مثل A وبعض منها يعانى إنعكاساً مزدوجاً داخل الخلية مثل B الذي سوف يقطع مسافة 2l زيادة عن A. إذا كان فرق المسار 2l يساوى عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية أي $2l = n\lambda_1$ فإن الشعاعين B, A يكونان في طور واحد وتكون شدة الشعاعين قيمة عظمى A + B مثل النقطتين a,c كما في الشكل (43) بينما تكون شدتيهما قيمة صغرى مثل النقط b,d عندما يكون فرق المسار

$$2l = (n + ½)\,\lambda_2$$

فإذا كان λ_1 هو طول الموجة عند القيمة العظمي (a) و λ_2 طول الموجة عند القيمة الصغرى التي تليها مباشرة في شكل (43) أي عندما تكون

$$2l = n\lambda_1,\quad 2l = (n + ½)\,\lambda_2 \qquad (2.13)$$

فإذا عوضنا عن قيمة n نجد أن :

$$2l = \lambda_2\left[\frac{2l}{\lambda} + \frac{1}{2}\right] \qquad (2.14)$$

وبدلالة التردد

$$\upsilon_1' = \frac{1}{\lambda_1}\ \text{cm}^{-1}\ ,\ \upsilon_2' = \frac{1}{\lambda_2}\ \text{cm}^{-1}$$

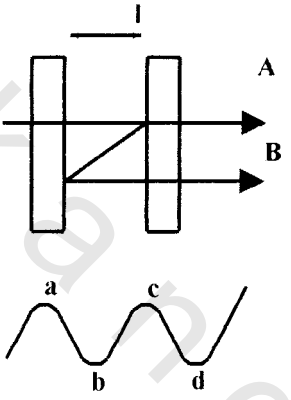
$$\therefore\ 2\,l\,\upsilon_2' = 2\,l\,\upsilon_1' + \tfrac{1}{2} \qquad (2.15)$$

أو

$$4\,l\,\upsilon_2' = 4\,l\,\upsilon_1' + 1$$

وهذا يعطى

$$l = \frac{1}{4(\upsilon_2' - \upsilon_1')}\ \text{cm} \qquad (2.16)$$



شكل (43) : مسار الأشعة داخل الخلية الفارغة

لقياس l نحدد قيمة العدد الموجي عند القيمة العظمى والعدد الموجي عند القيمة الصغرى التي تليها مباشرة ولكن من الناحية العملية لابد أن نقيس عدد كامل من الهدب Fringes وليكن العدد الموجي υ_1' عند أول قيمة عظمى و υ_2' عند القيمة العظمى لعدد كامل من الهدب فيصبح السمك

$$l = \frac{N}{2(\upsilon_2' - \upsilon_1')}$$

فمثلا إذا كانت

$$\upsilon_1' = 500\ \text{cm}^{-1},\ \upsilon_2' = 1980\ \text{cm}^{-1},\ N = 30$$

obeikandl.com

إذن

$$l = \frac{0.5\,N}{(\upsilon_2' - \upsilon_1')}\ mm = \frac{5 \times 30}{(1980 - 500)} = 0.1014\ cm$$

مثال: إذا كان عدد القيم العظمى بين الترددين $3780-1180\ cm^{-1}$ يساوى 13 إحسب سمك الخلية.

الحل:

$$l = \frac{N}{2(\upsilon_2' - \upsilon_1')} = \frac{5 \times 13}{3780 - 1180}$$

$$= 2.5 \times 10^{-3}\ cm$$

العينات الصلبة Solid Samples

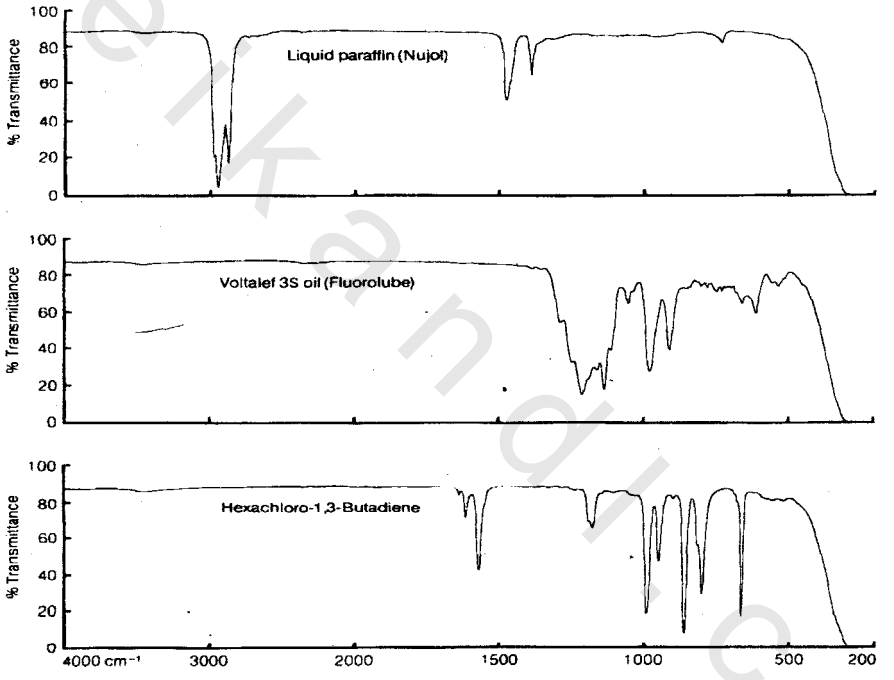
أهم عامل يجب أخذه في الاعتبار للحصول على أفضل طيف للمادة هو حجم الحبيبات. من الوجهة النظرية يتحتم أن يكون حجم الحبيبات أقل من طول الموجة الساقطة عليها لتقليل تشتت وإنكسار الأشعة.لذًا يجب أن لا يزيد حجم الحبيبات عن 2 ميكرون للعينات التي تقاس في المنطقة من $200\ cm^{-1}$ - 5000 . للحصول على الأحجام المناسبة للحبيبات يلزم طحن العينات مما ينشأ عنه رفع درجة حرارتها أو تغيير شكلها البلوري. يمكن التغلب على مساوئ الطحن إما بتبريد العينة أثناء الطحن أو الطحن لفترات دورية قصيرة.

أما العامل الثاني الذي يجب أخذه في الاعتبار للحصول على طيف جيد هو ضرورة تقارب معاملي إنكسار المادة والوسط الموزعة فيه المادة. وهذا التقارب يقلل من تشتت أو إنكسار الأشعة ولا يتسبب في إزاحة أو تشويه أشرطة الإمتصاص.

طريقة المعلق Mull

أبسط طريقة لتحضير العينات الصلبة التي لا تذوب في مذيب مناسب هي طريقة توزيع حبيبات العينة في سائل شفاف غليظ القوام مثل زيت البرافين أو Nujol. في هذه الطريقة تطحن العينة جيدا إلى مسحوق ناعم، يقلب جزء من المسحوق جيدا في عدة قطرات من السائل اللزج ثم يضغط المعلق بين قرصين من بروميد البوتاسيوم أو كلوريد الصوديوم أو

أيوديد السيزيوم فيتكون فيلم رقيق للمخلوط بين القرصين. في هذه الطريقة يجب أن يكون حجم الحبيبات صغيراً جداً لتلافى التشتت والإنكسار و هذا يفقد المادة أحد خصائصها التركيبية حيث تفقد الخاصية البلورية. ومن عيوب هذه الطريقة كذلك أنه لا يمكن إجراء دراسات كمية على العينات حيث لا يمكن التحكم في سمكها أو تجانسها وأيضا تركيزها ؛ علماً بان هذا السائل شفاف في منطقة الأشعة تحت الحمراء ولا يتفاعل مع المواد .يوضع في المسار الأخر للضوء عينة من هذا السائل لطرح الطيف الخاص به من طيف العينة.شكل (44) يبين طيف بعض المواد التى تستخدم Mull.



شكل (44): طيف Nujol وبعض مواد Mull.

طريقة الصهر Melting Method

يمكن صهر كمية صغيرة من المادة ، التي لها نقطة إنصهار منخفضة بين قرصين من بروميد البوتاسيوم ثم تبريد القرصين فتتكون طبقة رقيقة من المادة يمكن قياس طيف إمتصاصها ولكنها طريقة غير كمية.

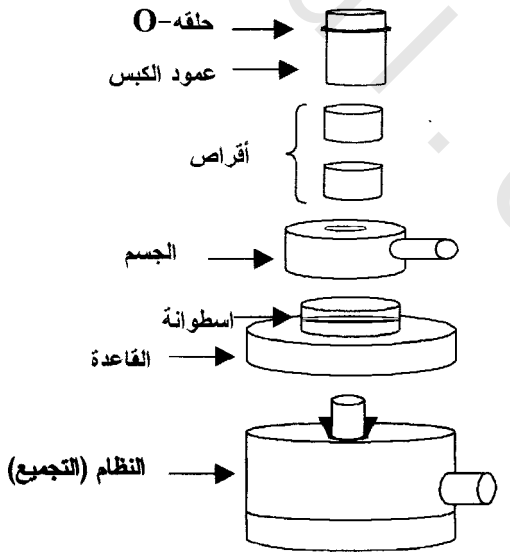
طريقة الأفلام الرقيقة من المحاليل Thin Films

تذاب المادة في مذيب مناسب ثم يصب المحلول على لوح من الزجاج أو بروميد البوتاسيوم و يترك المذيب عند درجة حرارة مناسبة أو تحت تفريغ حتى يتبخر. يمكن سحب الفيلم بسهولة وقياسه. هذه الطريقة كمية ودقيقة. يجب أن يتوافر في المذيب الخصائص التالية:

1- قدرته على إذابة المادة تماما.
2- له درجة غليان منخفضة و يتطاير بسهولة.
3- لا يتفاعل مع المادة.

طريقة أقراص بروميد البوتاسيوم KBr Disc Method

تعد العينة أولاً على هيئة مسحوق ناعم. يضاف من 1-3 ملليجرامات من المادة على حوالى 200 ملليجرام من آي من بروميد البوتاسيوم أو أيوديد السيزيوم ويقلب المخلوط جيداً للحصول على خليط متجانس. يوضع الخليط في قالب خاص شكل (45) ثم يضغط على العينة أثناء التفريغ لسحب بخار الماء للحصول على قرص شفاف متماسك.



شكل(45): الأجزاء المختلفة لقالب أقراص بروميد البوتاسيوم.

تتميز هذه الطريقة بمايلي:

ا – يمكن حساب تركيز العينة وسمك القرص مما يساعد على إجراء دراسة كمية لطيف المادة.

ب– يمكن توزيع حبيبات المادة توزيعاً متجانساً في الوسط كما أن حجم الحبيبات لا يلزم أن يكون صغيرا إلى حد يفقد المادة خواصها البللورية.

ج– يمكن حفظ القرص لفترة طويلة لإعادة القياس عليه مرة أخرى إذا لزم الأمر.

ويجب أخذ الإحتياطات لكى لايمتص القرص بخار الماء من الجو فتظهر خطوط الماء في الطيف كما أن إمتصاص الماء يقلل من شفافية القرص وهذا يؤثر على شكل أشرطة إمتصاص مجموعات OH، NH.

العينات المجهرية Micro Samples

طيف الأشعة تحت الحمراء أداة ممتازة في تمييز المواد غير المعروفة و تتفوق على غيرها من الطرق التحليلية الأخرى في كونها لا تحتاج الا لميكرو جرامات قليلة من المادة. ولكن لا يمكن استخدام الطرق المعتادة لقياس طيف الكميات الصغيرة جداً. وتوجد قطع إضافية خاصة لتحضير هذه الكميات سواء كانت صلبة أو سائلة في حدود الميكروجرامات أو الميكروملليمترات. يتم ذلك بتكثيف شعاع الضوء الساقط على العينة بحيث يمر بالعينة أكبر قدر ممكن من الشعاع. وتوجد خلايا صغيرة جداً يصل حجمها إلى 4 ميكرو ملليمترات وسمكها 1mm. وتوجد أنواع متعددة من الخلايا. ومثال على ذلك خلية الألماس للعنيات الصلبة وتتكون من قطعتين من الألماس تضغطان بينهما العينة للسمك المناسب للقياس ولزيادة مساحة السطح. ويمكن استخدام الخلية المتعددة الإنعكاسات الداخلية وهذه الطريقة تمكن من الحصول على أطياف قوية الإمتصاص.

الخلايا الحرارية Temperature Cells

توجد أنواع من الخلايا التي يمكن بواسطتها قياس طيف العينات عند درجات حـــرارة مختلفة من 180°c – 250°c + بدقة 0.1°c. وهذه الخلايا مزودة بنظام تســـخين كـــهربائي للحرارة فوق درجة حرارة الغرفة و بالنيتروجين السائل و التسخين لدرجات أقل مـــن درجـــة حرارة الغرفة ويمكن بواسطة هذه الخلايا دراسة انتقال المادة من حالة إلى أخرى وميكانيكيـــة التفاعل. كما توجد خلايا حرارية للقياس في حالة الإنعكاس الكلى الموهـــن وكذلـــك العينـــات المجهرية.

obeikandl.com