

Le bon émetteur pour l'application

Émetteurs à infrarouges destinés aux applications de spectroscopie

La plupart du temps, un scientifique ou un ingénieur est chargé de développer un système de spectroscopie et une source à infrarouges doit être choisie. Le concepteur peut connaître avec précision l'architecture, l'élément dispersif, la taille de la fente et le capteur à utiliser pour l'application, mais peut se laisser séduire par la propagande marketing lorsqu'il s'agit de choisir la source à infrarouges. Vaut-il mieux faire confiance à l'ancienne technologie, qui a fait ses preuves, ou essayer une nouvelle solution, plus innovante – et quels en sont les avantages ? Peut-être qu'une ampoule pourrait même faire l'affaire... Cette décision est plus facile à prendre lorsque l'on étudie les technologies de chaque type d'émetteur existant et que l'on choisit l'émetteur en fonction d'une application de spectroscopie spécifique donnée.

La spectroscopie infrarouge est un secteur important en plein essor, grâce au développement de nouvelles applications qui prennent en considération les problèmes de coût, de qualité et de sécurité. Certaines d'entre elles sont basées sur la génération d'une énergie infrarouge par l'objet lui-même, mais ces applications restent rares. La plupart des mesures spectroscopiques reposent sur la réflexion ou la transmission à travers un échantillon. La mesure du spectre d'absorbance qui en résulte est alors effectuée sur l'énergie transmise. Ces applications nécessitent des sources d'énergie infrarouge qui présentent des caractéristiques basées sur les exigences de l'application et la conception du spectromètre et du détecteur utilisés.

Les sources ou les émetteurs à infrarouges peuvent être classés en deux catégories : les émetteurs quantiques et les émetteurs thermiques.

Les **émetteurs thermiques** génèrent des photons en chauffant un matériau. Ce sont, par nature, des émetteurs à large bande dont la caractéristique de sortie est principalement déterminée par la température de l'élément, comme le décrit la loi de Planck. Ils se caractérisent par une puissance de sortie élevée et sont considérés depuis longtemps

comme "LA" source de référence pour la spectroscopie infrarouge. Les émetteurs thermiques peuvent être pulsés, mais doivent être conçus avec beaucoup de précaution afin de résister à la masse thermique intrinsèque du filament chauffé.

Les **émetteurs quantiques** (diodes laser, LED IR, etc.) offrent un bon rendement et restituent une puissance correcte dans la région infrarouge. Ces dispositifs sont très utiles dans les applications de spectroscopie pour lesquelles une source monochrome suffit, ou est préférable. Ils offrent une durée de vie prolongée et des vitesses d'impulsion élevées dans les applications modulées.

Chacune de ces technologies peut être évaluée à l'aide des paramètres suivants afin de déterminer leur adéquation pour une application particulière :

- taille ;
- rendement ;
- puissance de sortie ;
- besoins en alimentation ;
- stabilité au fil du temps ;
- coût ;
- durée de vie ;
- vitesse d'impulsion (pour les applications modulées).

De plus, certains détecteurs imposent le type de source utilisé dans un système

Historique

En 1860, Kirchhoff utilise le terme "corps noir" pour désigner un objet qui absorbe et émet une énergie à la perfection.

En 1894, Wien développe sa "loi du déplacement" qui détermine la forme générale de l'équation de répartition spectrale du rayonnement d'un corps noir. Malheureusement, cette loi n'est valable que pour des données expérimentales à des longueurs d'onde courtes.

En 1900, Rayleigh dérive une expression valable pour des données expérimentales avec des longueurs d'onde longues, mais celle-ci prévoit que l'énergie augmente sans limite au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue, ce qui lui confère alors le qualificatif discutable de "catastrophe ultraviolette".

Max Planck tente de s'interposer entre Wien et Rayleigh, et développe une formule de rayonnement valable à toutes les longueurs d'onde. Il présente alors sa découverte à la Société de Physique de Berlin le 19 octobre 1900, et introduit ainsi le concept de physique quantique.

selon leurs caractéristiques. Par exemple, les détecteurs pyroélectriques présentent une réponse lente au rayonnement incident, si bien que le choix d'une source à impulsions rapides ne convient pas.

Émetteurs thermiques

Les émetteurs thermiques sont également appelés "émetteurs incandescents", car ils génèrent des photons en chauffant un matériau jusqu'au point d'émission de ces photons.

Les émetteurs thermiques modernes reposent tous sur le rayonnement du corps noir et se distinguent généralement par leur émissivité (ϵ), qui est définie comme étant le rapport entre l'exitance énergétique d'une source et l'exitance

OPTIQUE
Avis d'experts

énergétique d'un corps noir parfait à la même température. Des métaux sont le plus souvent utilisés comme éléments sources pour les émetteurs thermiques. Cependant, ils possèdent généralement des valeurs d'émissivité très faibles de l'ordre de 5 %. Heureusement, un processus d'oxydation relativement simple peut accroître l'émissivité des métaux à plus de 80 %, point auquel ils présentent une émissivité suffisante pour pouvoir être utilisés comme des radiateurs thermiques.

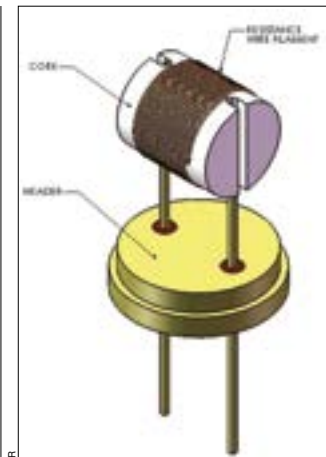
Les émetteurs thermiques offrent l'avantage d'avoir une émission à large bande, mais présentent l'inconvénient d'être lents (pour les applications pulsées) et nécessitent une grande quantité de puissance d'excitation. Certaines applications utilisent une simple ampoule au tungstène comme source, mais, la plupart du temps, les ampoules de verre et de quartz utilisées ne transmettent pas les longueurs d'onde plus longues. Par exemple, le quartz transmet 50 % de sa valeur de crête à 4,3 µm.

Les récentes avancées réalisées dans plusieurs domaines ont permis d'améliorer significativement les émetteurs thermiques dédiés, qui peuvent désormais être utilisés dans une grande variété d'applications de spectroscopie à large bande. Les technologies MEMS permettent aujourd'hui de produire des émetteurs à spectre et à corps noir de très petite taille et à impulsions rapides grâce à la masse réduite de l'émetteur, qui permet d'augmenter la puissance de sortie. Les émetteurs à film déposé offrent un compromis entre les vitesses d'impulsions élevées et la puissance de sortie élevée. De plus, les avancées en matière d'émetteurs à filaments permettent désormais d'avoir des vitesses d'impulsions élevées alliées à une puissance de sortie élevée et une durée de vie prolongée.

Il existe différentes configurations de filaments pour les émetteurs thermiques, qui présentent chacune des avantages et des inconvénients distincts qui influencent le choix du concepteur de systèmes de spectroscopie.

Filament enroulé

Les émetteurs à filament enroulé présentent l'avantage d'offrir une puissance de



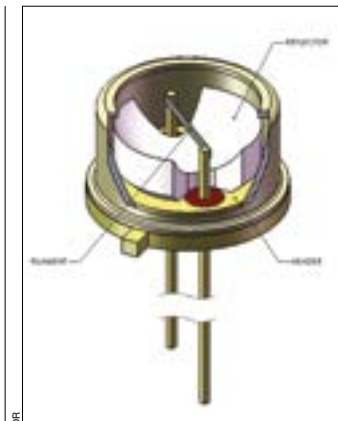
Émetteur à filament enroulé.

sortie très élevée, un coût relativement faible et une grande fiabilité. Ils peuvent être munis d'un noyau à air ou d'un noyau solide. Pour ce dernier, le matériau utilisé est généralement de la céramique.

Dans sa forme la plus basique, l'émetteur à filament enroulé et à noyau à air est similaire à une ampoule, mais, comme cela est indiqué précédemment, l'avantage d'un émetteur à infrarouges dédié est qu'il est conçu pour générer des photons infrarouges, et que tous les matériaux sont fabriqués en tenant compte de cette caractéristique. Un noyau en céramique est souvent ajouté afin de produire une sortie plus uniforme, étant donné que le filament chauffe le noyau, qui irradie à son tour des photons. Dans certains détecteurs à plusieurs éléments, les émetteurs à filament enroulé et à noyau à air peuvent poser des problèmes, car les serpents du filament sont imagés sur le détecteur et produisent un champ de flux non homogène.

Le matériau du filament est un fil de résistance, souvent en NiCr, ou une variété de fils produits par Kanthal (AB) qui sont des alliages de FeCrAl et peuvent être utilisés à haute température (1350 °C pour Kanthal A) tout en offrant une durée de vie prolongée.

En raison de la masse élevée de la source, les émetteurs à filament enroulé



Émetteur à filament en ruban.

ne sont pas compatibles avec les applications modulées. La modulation doit être effectuée à l'aide de moyens mécaniques, comme un hacheur optique.

Filament en ruban

La vitesse d'impulsion d'un filament incandescent dépend de la vitesse à laquelle le filament peut être chauffé et de la vitesse à laquelle la chaleur peut être éliminée. La prise en considération de ce problème implique d'analyser l'ensemble des aspects du cycle de l'énergie, y compris la masse du filament, la direction des photons, la "dissipation thermique" du filament et la conception de l'alimentation. Les émetteurs à filament en ruban sont des dispositifs simples sur le plan mécanique, rentables et fiables. La plupart du temps, le tungstène est utilisé comme matériau du filament. Cependant, il présente une très faible émissivité, plus particulièrement dans la région infrarouge, si bien que des traitements de surface doivent être appliqués afin d'améliorer l'émissivité. L'atmosphère doit donc être contrôlée avec précaution afin d'empêcher toute autre variation de l'émissivité due aux interactions atmosphériques. L'utilisation d'un joint hermétique et d'un gaz de remplissage thermiquement conducteur garantit la stabilité de l'émissivité du filament et une vitesse de refroidissement maximale au cours du cycle de refroidissement (en mode pulsé).

Des réflecteurs sont souvent utilisés

OPTIQUE
Avis d'experts

(comme avec les émetteurs à filament enroulé) pour diriger le plus possible le rayonnement vers l'extérieur du boîtier, plus particulièrement dans les filaments orientés à la verticale.

Pendant la partie "ACTIVE" du mode pulsé, il est important de transmettre le plus de puissance possible au filament sans le surcharger, en raison de l'évaporation de film en certains points de chauffage. Lorsque la forme d'onde d'alimentation et l'environnement de remplissage sont définis avec précision, la vitesse d'impulsion et le taux de modulation peuvent être améliorés de manière significative. Lorsqu'ils sont correctement contrôlés, ces paramètres permettent de fabriquer des émetteurs qui présentent des vitesses d'impulsion d'environ 200 Hz à un taux de modulation de 50 %. Ces émetteurs peuvent également être utilisés comme des sources en régime établi et ne provoquent pas les problèmes d'imagerie des serpents associés aux sources à filament enroulé.

Filament déposé

La masse du filament peut être réduite à l'aide de procédés de dépôt de façon à augmenter la vitesse d'impulsion. En raison de leur nature, les émetteurs à filament déposé nécessitent un substrat comme mécanisme de support, contrairement au filament en ruban, qui tient tout seul. L'émetteur à filament déposé se compose d'un film de matériau électriquement résistif déposé sur un substrat en matériau thermiquement résistif. Le film déposé peut être n'importe quel matériau qui est compatible avec les techniques de dépôt de film, possède une résistance et une émissivité suffisantes, et peut résister aux températures élevées associées à l'émission de photons incandescents.

Des métaux comme le tungstène sont utilisés, ainsi que différentes configurations de silicium, dans lesquelles la résistivité est contrôlée à l'aide d'un dopage. Les filaments en polysilicium dopé présentent certains problèmes de migration des dopants, et, la plupart du temps, ne fonctionnent pas à des températures suffisantes pour la spectroscopie quasi



Émetteur à filament déposé.

infrarouge. L'avantage des filaments non métalliques est que les matériaux peuvent avoir une résistivité plus élevée et donc un courant d'alimentation plus faible.

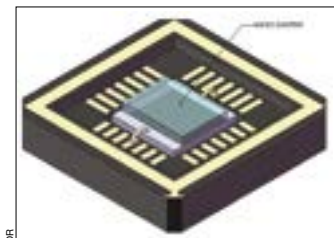
Les avantages des sources à filament déposé sont leur vitesse d'impulsion élevée et leur coût relativement faible selon le matériau de filament utilisé. Une grande quantité de traitement des substrats peut être utilisée afin de fabriquer des volumes importants à un coût relativement faible. L'inconvénient est que la petite taille du filament entraîne une faible puissance de sortie, et, pour les applications pulsées, le substrat provoque un effet de masse thermique.

Mécanismes de défaillance des émetteurs incandescents

Le principal mécanisme de défaillance des émetteurs à filament incandescent est dû à l'évaporation du filament. Cette évaporation du filament a 2 effets, qui réduisent la durée de vie de l'émetteur. Le filament devient de plus en plus fin au fur et à mesure qu'il s'évapore, souvent de manière non uniforme, ce qui provoque un chauffage localisé dû à l'augmentation de la résistance à un point précis. De plus, le filament évaporé

se dépose sur le matériau de la fenêtre, ce qui réduit le rendement optique et augmente la température interne de l'émetteur. Lorsque ces émetteurs sont utilisés à des températures moins élevées, leur durée de vie est considérablement prolongée. Pour les émetteurs pulsés, le compromis se fait toujours sur les filaments à faible masse, pour leur rapidité de modulation et leur durée de vie suffisante.

MEMS



Émetteur MEMS.

Les techniques MEMS (microsystèmes électromécaniques) sont utilisées dans une grande variété d'applications, y compris les émetteurs à infrarouges, afin d'améliorer les performances à l'aide de techniques de micro-usinage qui étaient impossibles auparavant.

Les dispositifs MEMS sont disponibles dans les configurations d'émetteurs thermiques (à corps noir) et dans les émetteurs à spectre ciblés sur des longueurs d'onde ou des plages de longueurs d'onde spécifiques.

Un émetteur MEMS thermique classique est similaire à l'émetteur à filament déposé, et offre en outre l'avantage selon lequel le substrat sur lequel est déposé le filament peut être conçu comme un élément très fin. Cela permet de réduire considérablement la masse thermique du système et d'améliorer les performances de modulation.

Plusieurs matériaux de filament différents ont été utilisés, y compris des métaux traditionnels, du polysilicium et d'autres matériaux résistifs. Les techniques MEMS sont utilisées pour fabriquer des sources à filament en silicium monocristallin qui peuvent fonctionner à 1 200°K avec une puissance totale de

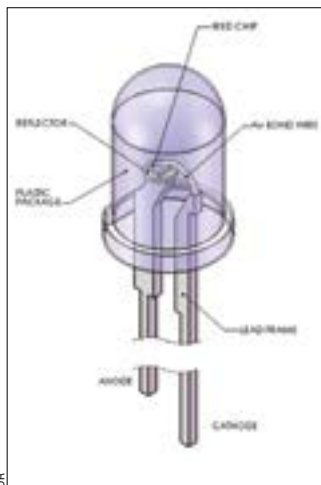
OPTIQUE
Avis d'experts

10,7 mW irradiée par un émetteur de 1 mm². Le DLC (carbone sous forme de diamant amorphe) ou les DLN (nanocomposites sous forme de diamant) sont également utilisés comme autres matériaux de filament. Ce sont des matériaux très durables qui présentent des propriétés de conductance électrique très variables.

Les techniques MEMS permettent également de fabriquer des émetteurs à spectre à l'aide d'une variété de procédés, y compris des cristaux photoniques. Les émetteurs limités sur le plan spectral ne conviennent pas pour la spectroscopie à large bande, mais peuvent s'avérer avantageux pour l'analyse spectrale de composants fixes, étant donné qu'ils peuvent éliminer la nécessité de filtres optiques à limitation de bande.

Émetteurs quantiques

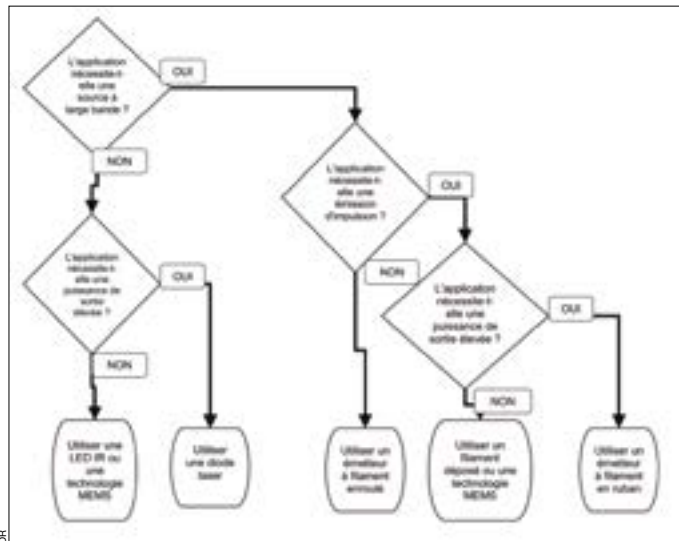
Bien que les émetteurs thermiques génèrent des photons en chauffant un matériau de filament, les émetteurs quantiques génèrent des photons par recombinaison d'électrons et de trous au sein d'une bande interdite de semi-conducteur. L'énergie du photon émis est égale à la différence entre l'électron et le trou de la paire recombinée et sa longueur d'onde est donc déterminée par le matériau semi-conducteur hôte. La largeur de bande peut aller de "très



LED infrarouges.

	Émetteurs thermiques				Émetteurs quantiques	
	Filament enroulé	Filament en ruban	Filament déposé	MEMS	LED IR	Diode laser
Taille	Grande	Grande	Moyenne	Moyenne	Petite	Petite
Rendement (Puissance en fonction de la temp.)	Moyen	Moyen	Moyen/Élevé	Moyen/Élevé	Élevé	Élevé
Puissance de sortie	Élevée	Élevée	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible/Moyenne
Stabilité en alimentation	Courant élevé	Courant élevé	Courant moyen	Courant moyen	Courant faible	Courant faible/moyen
Stabilité	Faible/Moyenne	Faible/Moyenne	Faible/Moyenne	Moyenne	Élevée	Élevée
Coût	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Moyen/Élevé	Moyen/Élevé
Largeur de bande	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne/Longue	Longue durée de vie	Longue
Vitesse d'impulsion	N/A	Faible/Moyenne	Faible/Moyenne	Faible/Moyenne	Rapide	Rapide
Application	Puissance élevée Large bande continue	Puissance élevée Large bande modulée	Puissance moyenne/faible surface Large bande	Puissance moyenne/faible surface Large bande	Faible puissance Petite taille Longue durée de vie	Puissance élevée/moyenne Petite taille Longue durée de vie

Comparatif des caractéristiques entre les émetteurs thermiques et les émetteurs quantiques.



La logique suivante peut être utilisée pour choisir un émetteur en fonction de votre application.

large" dans le cas des LED infrarouges à pompage, à "très étroite" dans le cas d'une diode laser.

Cela peut être avantageux pour certains systèmes de spectroscopie, et élimine ainsi la nécessité d'utiliser des filtres optiques pour différencier les longueurs d'onde en question. Ces dispositifs ne sont pas pratiques dans les systèmes qui nécessitent un rayonnement infrarouge à large bande et à forte puissance.

LED infrarouges

Des LED ont été développées avec des longueurs d'onde dans le spectre quasi infrarouge, des puissances de sortie continues d'environ 1 mW et une puissance pulsée de plusieurs dizaines de milliwatts pour des longueurs d'onde allant jusqu'à 2,2 µm. Des LED ayant une longueur d'onde plus élevée existent, mais leur puissance de sortie ne dépasse pas les microwatts.

OPTIQUE
Avis d'experts


Afin d'étendre la longueur d'onde et d'augmenter la puissance de sortie, des techniques de pompage sont utilisées. Une source qui présente une longueur d'onde plus courte (LED ou laser à semi-conducteurs) est utilisée pour exciter un matériau qui possède une bande interdite ayant la longueur d'onde souhaitée. Le matériau excité émet ensuite des photons à une longueur d'onde plus longue. Cette technique permet de multiplier la puissance de sortie par 20 par rapport aux LED standard à des longueurs d'onde supérieures à 3 µm.

Diodes laser

En raison du processus de stimulation d'émission de photons, une diode laser possède une largeur de bande encore plus étroite qu'une LED traditionnelle. Les diodes laser peuvent également avoir une puissance de sortie de plusieurs milliwatts et conviennent donc pour les applications qui nécessitent une source à forte puissance et à bande étroite. Les lasers à cascades quantiques peuvent produire des

dizaines ou des centaines de milliwatts en mode pulsé dans l'infrarouge lointain.

Les émetteurs quantiques sont très rapides et très efficaces, mais ne conviennent pas pour les applications de spectroscopie à large bande. Les émetteurs thermiques conviennent sur le plan spectral pour les applications à large bande, avec des puissances de sortie approchant la courbe de corps noir de Planck.

Les évolutions technologiques comme le micro-usinage et l'application des lois physiques existantes ont permis de créer des radiateurs thermiques qui possèdent une durée de vie prolongée et des vitesses d'impulsion relativement élevées avec un taux de modulation important. Le coût reste également un critère de taille pour n'importe quel système pratique, et les solutions plus "exotiques" sont plus coûteuses, mais tendront à disparaître au fur et à mesure des avancées technologiques.

Toutes ces évolutions améliorent la qualité des systèmes de spectroscopie,

mais nécessitent de prendre en considération l'ensemble des compromis possibles lorsqu'il s'agit de choisir un émetteur spécifique.

Conclusion

Il existe un grand nombre d'émetteurs compatibles avec les applications de spectroscopie infrarouge. Le choix d'un émetteur est régi par les exigences de l'application spécifique.

Même en ce qui concerne le type d'émetteur lui-même, il existe un grand nombre de caractéristiques qui rendent la généralisation difficile. Le tableau ci-dessus permet d'évaluer globalement chaque catégorie d'émetteurs et indique son application spécifique ■

Brian Elias⁽¹⁾ et Christian Merry⁽²⁾

(1) Brian Elias, responsable ingénierie,

Cal Sensors, États-Unis, brian@calsensors.com.

(2) Christian Merry, directeur général, Laser

Components, c.merry@lasercomponents.fr.