

International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

Edited by George Otrio



Technologies pour les microlasers et la micro-optique

Laurent Fulbert, Philippe Thony, Marc Rabarot, Jean Marty, et al.



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570, 105702C · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326638

TECHNOLOGIES POUR LES MICROLASERS ET LA MICRO-OPTIQUE.

Laurent FULBERT Philippe THONY, Marc RABAROT, Jean MARTY, Engin MOLVA

LETI/CEA.G - DOPT - 17, rue des Martyrs - 38054 Grenoble cedex 9.

RÉSUMÉ - Les microlasers sont des lasers solides monolithiques et miniatures pompés par diode laser, avec une excellente qualité spatiale et spectrale du faisceau. Ils sont fabriqués de façon collective et peuvent avoir un fonctionnement continu, déclenché ou modulé en fréquence. Différentes longueurs d'onde et différentes géométries de cavités ont été réalisées. Les applications principales sont la télémétrie, l'injection de lasers de puissance ou l'optique non linéaire. Ces microlasers peuvent de plus être associés à des composants micro-optiques gravés pour donner un véritable microsystème optique.

ABSTRACT - *Diode pumped microchip lasers are solid-state lasers having an excellent beam quality and made with a collective fabrication process. The laser emission can be either in continuous wave, Q-switched or frequency modulated at different wavelengths. The cavity shape can be changed by using micro-optics technologies. These microchip lasers are used in many applications, such range finding, high power laser seeding or non linear optics. By associating microchip lasers and micro-optics components, optical microsystems can be fabricated.*

1 - PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES MICROLASERS

Les microlasers sont des lasers solides monolithiques et miniatures pompés par diode laser. Les premiers dispositifs de ce type ont été réalisés dans plusieurs laboratoires dans le monde, en particulier aux Etats-Unis, au Japon et en France. Au LETI, les microlasers sont étudiés depuis plusieurs années dans un environnement technologique particulièrement favorable.

L'avantage principal du microlaser réside dans son mode de fabrication collective, qui utilise des techniques proches de celles de la micro-électronique et qui autorise une production de masse à très faible coût. Dans le concept de microlaser, tous les éléments constitutifs du laser (milieu amplificateur, miroirs d'entrée et de sortie, microcavité laser et composants éventuels de déclenchement ou de modulation) sont réalisés et assemblés de manière collective. Toutes les opérations de fabrication et de montage sont réalisées avec des procédés pouvant être entièrement automatisés. Ce mode de fabrication collectif, en plus de l'impact évident sur le plan économique, assure un fonctionnement très fiable et sans réglage. Ainsi, dans les systèmes pouvant utiliser les microlasers, la maintenance est extrêmement simplifiée.

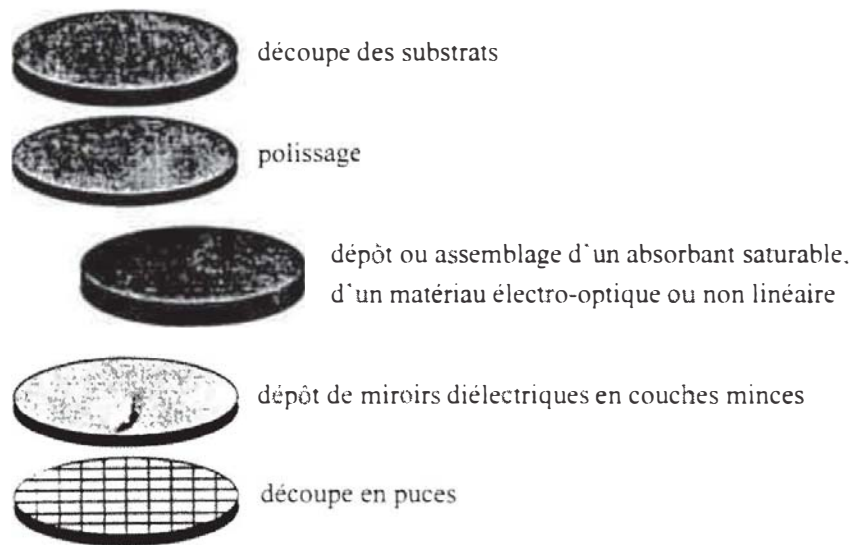


Fig.1 : procédé de fabrication des microlasers

Le procédé de fabrication des microlasers est schématisé sur la figure 1. Ce procédé est pratiquement le même pour tous les types de microlasers et possède quelques variantes en fonction du résultat désiré. Le procédé se déroule de la façon suivante :

- Le milieu actif laser est constitué par un matériau laser de faible épaisseur entre 200-2000 μm . Le matériau laser est d'abord découpé en plaquettes de 25 mm de diamètre (ou plus si le matériau le permet).
- Chaque plaquette est polie sur les deux faces. Le matériau actif utilisé dépend essentiellement de la longueur d'onde émise par le laser on choisira par exemple un matériau dopé néodyme (YAG:Nd, YLF:Nd, LMA:Nd, YVO₄:Nd, ...) pour une émission autour de 1.06 μm , le verre dopé erbium et ytterbium pour une émission à 1.55 μm , ou encore un cristal dopé thulium pour une émission à 2 μm .
- Les autres éléments de la cavité laser peuvent être ajoutés par dépôt direct sur le matériau laser (par exemple épitaxie d'un matériau absorbant saturable, ce qui va permettre le déclenchement passif du microlaser). Ils peuvent aussi être préparés à part puis assemblés plaquette par plaquette (par exemple assemblage avec une lame de cristal électro-optique pour la modulation de fréquence optique). Les différents types d'éléments pouvant être insérés dans la cavité ainsi que les différentes fonctions réalisables seront décrits dans les sections suivantes.
- Les miroirs de la cavité sont ensuite directement déposés sur les faces terminales.
- On découpe ensuite les plaquettes en petites "puces" de l'ordre du mm².

Chaque puce laser est montée sur un support compact et est pompée par une diode laser III-V. Les diodes utilisées sont généralement des diodes à ruban large d'une puissance typique de 1 W. La puce et la diode peuvent être hybridées sur un même support et montées ensemble dans un boîtier scellé, ou bien la puce est montée dans un connecteur en bout de fibre optique et pompée par une diode laser fibrée.

En raison de la faible longueur de la cavité, l'émission du microlaser peut être naturellement monomode longitudinale avec des largeurs de raie extrêmement fines (de l'ordre de 50 kHz). De plus, la qualité spatiale du faisceau est excellente avec une émission TEM_{00} .

2 - MICROLASERS DÉCLENCHÉS PASSIVEMENT PAR ABSORBANT SATURABLE

2.1 Principe et intérêt du déclenchement passif

Le déclenchement ou Q-switch permet d'obtenir des impulsions brèves de forte puissance crête en modifiant très rapidement les pertes à l'intérieur de la cavité. Lorsque les pertes sont élevées, l'émission laser n'a pas lieu et l'énergie de pompe est stockée sous forme d'inversion de population dans le milieu à gain. Lorsque les pertes passent brusquement d'un niveau élevé à un niveau faible, l'émission laser a lieu très rapidement et dépeuple le milieu à gain. Dans le cas du déclenchement passif, on utilise un absorbant saturable qui a la particularité d'introduire des pertes fortes lorsqu'il y a peu de photons dans la cavité et de passer rapidement à un niveau de pertes faible lorsque la densité de photons est suffisante. L'intérêt du système est sa grande simplicité car le phénomène est auto-entretenu en pompage continu et aucune action externe n'est nécessaire pour générer les impulsions lasers. Grâce à la faible longueur de cavité des microlasers, les impulsions obtenues sont très brèves (de l'ordre de 1 ns) et les puissances crêtes élevées (plusieurs kW).

2.2 Absorbant saturable déposé par Epitaxie en Phase Liquide

Le LETI a développé un procédé original de dépôt de $YAG:Cr^{4+}$ sur $YAG:Nd$ par Epitaxie en Phase Liquide (EPL). Le $YAG:Cr^{4+}$ étant un absorbant saturable à 1.06 μm , des microlasers déclenchés passivement ont pu être réalisés avec une structure extrêmement simple. Grâce aux forts taux de dopage réalisés par EPL, des épaisseurs faibles de $YAG:Cr^{4+}$ (quelques dizaines de μm) suffisent pour déclencher le laser. De plus, le $YAG:Nd$ et le $YAG:Cr^{4+}$ sont deux matériaux de même indice, ce qui n'introduit aucune perte à l'interface. Les microlasers obtenus sont parfaitement monolithiques et présentent de très bonnes performances.

En pompant avec une diode de 1 W continue, les résultats typiques sont les suivants :

Energie de l'impulsion	1 μJ à 5 μJ
Largeur d'impulsion	400 ps à 2 ns
Puissance crête	1 kW à 20 kW
Fréquence de récurrence	1 kHz à 100 kHz
Puissance moyenne	< 100 mW

Les performances en terme d'énergie et de puissance crête peuvent être améliorées en pompant le microlaser avec une diode de puissance ou en associant un microlaser avec un amplificateur.

De tels microlasers ont été utilisés dans des télémètres à temps de vol compacts. La portée en classe 1 (sécurité oculaire) est supérieure à 250 m sur une cible diffusante claire et supérieure à 70 m sur une cible fortement absorbante, avec une précision en monocoup de quelques cm. Des portées de plusieurs km peuvent aisément être atteintes en équipant la cible de réflecteurs.

2.3 Absorbant saturable massif à 1.55 μm

Les microlasers fabriqués avec du Verre:Er,Yb ont une émission à 1.55 μm . Dans cette gamme de longueur d'ondes, les normes autorisent des puissances crête beaucoup plus élevées qu'à 1.06 μm pour rester en sécurité oculaire. Ces microlasers sont donc particulièrement adaptés à la télémétrie, en bénéficiant de plus de l'instrumentation et des détecteurs développés pour les télécommunications.

Une des grandes difficultés à cette longueur d'onde est de trouver un absorbant saturable permettant un déclenchement passif à haute cadence. Un nouvel absorbant saturable massif a été développé au LETI qui permet d'obtenir d'excellents résultats résumés dans le tableau suivant :

Energie de l'impulsion	2 μ J à 13 μ J
Largeur d'impulsion	3 ns à 15 ns
Puissance crête	500 W à 4 kW
Fréquence de récurrence	350 Hz à 30 kHz
Puissance moyenne	< 70 mW

Avec de tels microlasers, une portée de 2 km sur cible diffusante peut être atteinte tout en restant en classe I.

3 - MICROLASERS DÉCLENCHÉS ACTIVEMENT OU MODULÉS EN FRÉQUENCE

3.1 - Déclenchement actif par cavités couplées

Dans certaines applications où l'on désire connaître précisément l'instant d'émission de l'impulsion laser ou lorsqu'un absorbant saturable n'est pas adapté, il est possible de déclencher activement les microlasers. Dans ce cas, un matériau électro-optique (comme de Tantalate de Lithium LiTaO_3) est inséré à l'intérieur de la cavité comme cela est décrit en figure 1. Cette étape ne modifie pas le caractère collectif du procédé de fabrication.

En choisissant correctement les coefficients de réflexion des miroirs entre le matériau laser et le LiTaO_3 , on obtient deux cavités couplées. Le LiTaO_3 est placé entre deux électrodes sur lesquelles on applique une tension. L'application d'un champ électrique sur le LiTaO_3 fait varier son indice et ainsi modifie le couplage entre les cavités. Il est ainsi possible de faire varier les pertes du laser et donc de le déclencher activement.

3.2 Modulation de fréquence optique

La structure décrite pour le déclenchement actif peut être modifiée en déposant un anti-reflet à l'interface entre le matériau laser et le LiTaO_3 . Dans ce cas, la modification de l'indice du LiTaO_3 par effet électro-optique modifie la longueur optique de la cavité et donc déplace le peigne Fabry-Pérot du résonateur à l'intérieur de la bande de gain. De tels microlasers ont été réalisés avec du YAG:Nd avec un taux de balayage de 10 MHz/V.

Ces microlasers ont été utilisés dans un télémètre à détection cohérente FMCW. En modulant la fréquence du microlaser par des rampes, il est possible de mesurer simultanément la distance et la vitesse d'une cible avec une excellente précision. La portée actuelle est de l'ordre de 20 m sur une cible diffusante avec une précision inférieure au mm.

4 - DOUBLAGE ET CONVERSION DE FRÉQUENCE AVEC LES MICROLASERS

4.1 - Génération d'harmoniques

Il est possible de générer un faisceau visible ou UV à partir des microlasers infrarouges en utilisant des processus d'optique non linéaire.

Le moyen le plus simple consiste à utiliser un microlaser YAG:Nd déclenché passivement et de doubler sa fréquence en plaçant un cristal non linéaire (KTP par exemple) en sortie de cavité. En raison de la très forte densité de puissance, le rendement de doublage peut atteindre 30% et il est ainsi possible de réaliser des lasers verts compacts à 532 nm d'une puissance moyenne supérieure à 10 mW. En rajoutant un autre cristal non linéaire (BBO par exemple), on peut par sommation ou

doublage de fréquence tripler ou quadrupler la fréquence fondamentale du microlaser pour générer un faisceau à 355 nm ou 266 nm.

Afin d'améliorer le rendement de doublage, il est possible de faire du doublage intracavité en plaçant le matériau non linéaire à l'intérieur de la cavité laser. Dans ce cas, on peut réaliser une source continue ou impulsionnelle émettant dans le vert avec une grande efficacité.

4.2 - Oscillateurs Paramétriques Optiques (OPO)

Un OPO permet d'obtenir une source continûment accordable dans une large gamme de longueurs d'ondes. En pompant une cavité OPO avec un microlaser impulsionnel YAG:Nd, il est possible de générer un faisceau entre 1 μm et 4 μm . Des études sont actuellement en cours au LETI pour fabriquer de manière collective des micro-OPO compacts en associant des microlasers déclenchés passivement avec des cristaux non linéaires. Des structures d'OPO monolithiques intracavité ont été réalisées avec de bons résultats et une émission impulsionnelle autour de 1,57 μm .

De tels dispositifs trouvent des applications dans la détection d'espèces chimiques.

5 - MICRO-OPTIQUES ET MICROLENTILLES

5.1 - Microlasers à cavité stable

5.1.1 - Problème posé

Les microlasers présentés dans les sections précédentes ont une cavité plan-plan qui est théoriquement instable. La stabilisation est assurée par les effets thermiques induits par la pompe, ce qui a pour conséquence de modifier les caractéristiques géométriques du faisceau en fonction des conditions de pompage ou du type de matériau utilisé. Les faisceaux dans les cavités plan-plan ont typiquement des waists entre 60 μm et 100 μm . Il est possible de diminuer fortement la taille du waist en gravant un miroir concave sur une des faces du microlaser. Dans ce cas, la taille du faisceau est déterminée par la géométrie de la cavité et les effets thermiques sont négligeables. Pour une cavité plan-concave de longueur L et avec un miroir de rayon de courbure R, la taille du waist est

donnée par $\omega = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi n} \sqrt{L(R-L)}}$. En diminuant le waist du faisceau, il est alors possible de diminuer fortement le seuil d'oscillation laser.

5.1.2 - Procédé de fabrication des microlentilles

Le procédé de fabrication des microlentilles (ou micromiroirs) est un procédé collectif qui vient s'insérer dans la procédure générale de fabrication des microlasers. Cette étape se place juste avant le dépôt de miroirs. Le principe de fabrication des microlentilles s'adapte à tous types de substrats. En gravant des microlentilles dans un matériau laser, on réalise des microlasers à cavité stable et en gravant des microlentilles dans un matériau transparent (silice par exemple), on réalise des microlentilles réfractives pouvant être utilisées dans un microsystème optique. Le procédé de fabrication utilise des étapes de lithographie et de gravure identiques à celles utilisées en micro-électronique.

Le procédé est décrit schématiquement sur la figure 2 :

- l'étape 1 consiste à étaler de la résine photosensible sur le substrat sur lequel on veut graver les microlentilles
- dans l'étape 2, la résine est insolée à travers un masque ayant des motifs en forme de disques de diamètres équivalents à ceux des microlentilles voulues.
- dans l'étape 3, la résine est développée et des formes cylindriques sont révélées.
- lors de l'étape 4, les formes cylindriques sont chauffées et fondent pour donner des formes sphériques grâce aux forces de tension de surface.

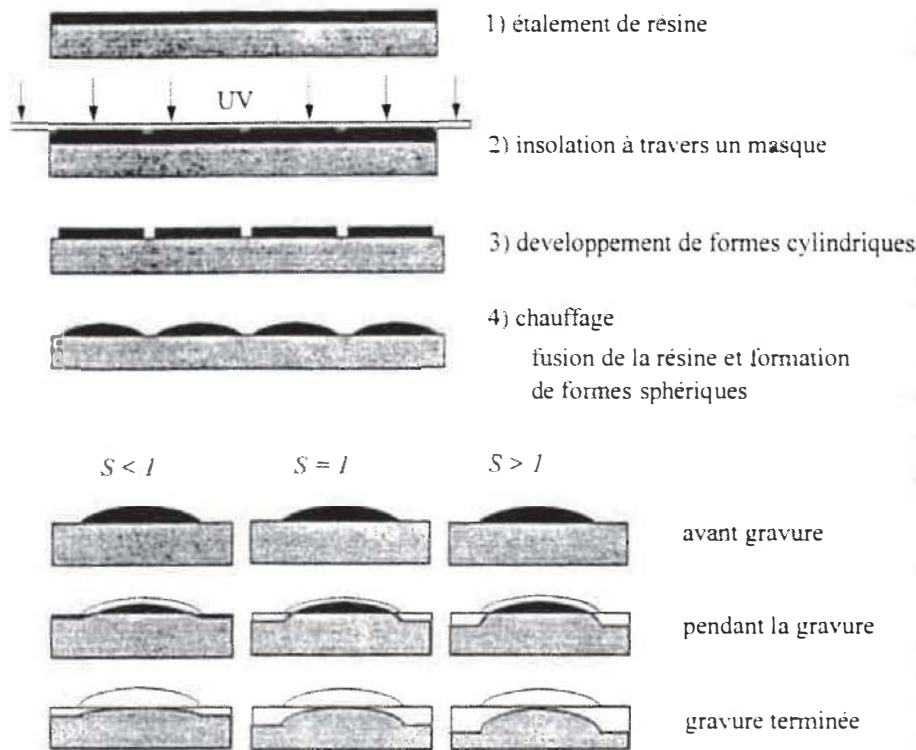


Fig. 2 : procédé de fabrication des microlentilles

- la dernière étape est celle de la gravure de la préforme en résine dans le substrat. La gravure se fait soit par gravure ionique réactive (Reactive Ion Etching) lorsque le substrat est en silice, soit par usinage ionique (Ion Beam Milling) lorsque le substrat est un matériau laser. Il est possible de faire varier le paramètre de sélectivité de gravure

$S = \frac{\text{Vitesse de gravure substrat}}{\text{Vitesse de gravure résine}}$, pour transférer des rayons de courbure plus forts ou plus faibles que la préforme originale.

5.1.3 - Résultats laser

Les micromiroirs gravés pour la réalisation de cavités stables ont de grands rayons de courbure (plusieurs mm) et des diamètres de l'ordre de 150 μm . La qualité de surface n'est pas dégradée par la gravure (rugosité de quelques \AA RMS) et la sphéricité est parfaite. De tels miroirs ont été gravés dans différents types de matériaux laser (YAG:Nd, YLF:Nd, Verre:Er,Yb) avec une diminution spectaculaire du seuil. Par exemple, dans des microlasers continus en YAG:Nd, le seuil passe de 40 mW en cavité plan-plan à moins de 2 mW en cavité plan-concave, avec un rendement différentiel inchangé. Les cavités stables permettent d'envisager le pompage des microlasers avec des diodes de faible puissance (100 mW) et donc un système portable à faible consommation.

5.2 - Microlentilles réfractives

Il est possible de fabriquer des matrices de microlentilles réfractives, en silice ou dans tout autre type de matériau, avec la technique décrite précédemment. Les microlentilles en silice déjà réalisées au LETI ont des diamètres qui varient de 50 μm à 1 mm, et des ouvertures de $f/1.5$ à $f/20$. Les applications sont nombreuses, comme l'imagerie, l'analyse de front d'onde ou la réalisation de microsystemes optiques. Par exemple, de telles microlentilles sont utilisées pour focaliser un microlaser dans une fibre monomode, avec des rendements de couplages supérieurs à 75 % en laboratoire.

6 - CONCLUSION

Les microlasers et les micro-optiques permettent d'envisager des dispositifs ayant des performances et des dimensions inaccessibles jusqu'alors avec les technologies classiques. Les procédés de fabrication collective garantissent une très bonne répétabilité pour un coût réduit. De plus, grâce à leur robustesse et leur fiabilité, les microsystemes optiques pourraient être utilisées dans des applications embarquées.