Applications aux microtechniques de la photolithographie profonde par UV et par rayonnement synchrotron

S. Ballandras et D. Hauden

Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs du CNRS, Associé à l'Université de Franche-Comté-Besançon, 32 avenue de l'Observatoire, 25044 Besançon cedex, France

Les énormes progrès réalisés en microtechniques au cours de la dernière décennie ont été rendus possible par le transfert des technologies de la microélectronique vers la mécanique et l'optique. Plusieurs procédés de microfabrication ont ainsi vu le jour, fondés principalement sur différentes techniques de lithographie. Parmi ces dernières, on distingue celles dédiées à la réalisation de moules profonds (de 10 μm à 1 mm) parfaitement résolus dans le plan et associées à des méthodes d'électrodéposition de revêtements métalliques. Le présent article détaille le principe de ces nouvelles technologies et montre la qualité et l'originalité des micro-objets pouvant ainsi être élaborés.

The tremendous advances of microtechniques during the last decade are consecutive to technology transfer from microelectronics to mechanics and optics. Many microfabrication techniques have been developed, principally based on lithography processes. Among these techniques, some are devoted to the manufacturing of deep mold inserts (from 10 μm to 1 mm thick) perfectly defined in the plane of the lithography (resolution $\approx 1 \mu\text{m}$, submicron precision). These mold inserts are obtained by combining these lithography techniques and electroforming processes. The present paper will describe the principle of these new technologies and will present attractive results obtained by the different research groups working in this topic.

1. INTRODUCTION

Dans un laps de temps d'environ 10 ans ont été développées plusieurs techniques de construction d'objets de dimensions inférieures au millimètre à vocation microtechnique. Des projets surprenants en micromécanique et en micro-optique ont ainsi vu le jour, grâce à l'extension des méthodes technologiques développées pour la microélectronique à de nouveaux domaines d'applications.

Ainsi, la combinaison des techniques de lithographie et d'usinage chimique sélectif a permis de fabriquer des micromoteurs rotatifs minuscules (diamètre du rotor de l'ordre de 100 μm) [1,2] des microaccéléromètres [3,4] ou des interféromètres intégrés de tailles comparables [5]. Le substrat de base de beaucoup de ces nouveaux microcomposants est le silicium grâce aux possibilités d'usinage chimique simples, variées et efficaces pouvant lui être associées.

Cependant, il existe des procédés complémentaires offrant des avantages indéniables sur le plan de la diversité des matériaux leur étant compatibles. On s'intéresse dans le présent article à l'un d'eux, développé initialement par le Professeur W. Ehrfeld au Centre de Recherche nucléaire de Karlsruhe (KFK) pour des études de physique nucléaire [6].

Il s'agit donc du procédé LIGA (LIthographie-Galvanoformung-Abformung) dont le principe repose sur la combinaison d'une étape de lithographie X-dur à l'aide du rayonnement issu d'un anneau synchrotron, d'une croissance électrolytique de matériaux métalliques et des possibilités de réplication offertes par les multiples méthodes de moulage disponibles.

Les remarquables résultats [7,8,9] obtenus par le procédé LIGA en matière de microfabrication sont essentiellement dus à l'étape de lithographie évoquée ci-avant. Celle-ci, communément appelée DXRL (Deep-etch X-Ray Lithography), consiste à répliquer les motifs d'un masque par ombre portée sur un substrat recouvert d'une résine sensible en utilisant le rayonnement synchrotron dans la gamme de longueur d'onde 0,1 - 0,4 nm. Trois raisons poussent à l'emploi d'une telle source de lumière :

- les qualités géométriques du faisceau (trajectoires quasi-parallèles des photons X) permettant d'atteindre des résolutions voisines du micron sur plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur [10],
- les courtes largeurs d'onde nécessaires à irradier toute l'épaisseur de la résine, offrant une minimisation optimale des différents effets nuisant à la qualité de la lithographie [11],
- le nombre élevé de photons nécessaires à une parfaite sensibilisation de la résine en un temps raisonnable (quelques dizaines de minutes).

Cependant, le procédé LIGA ne peut être envisagé du point de vue industriel que s'il intègre un processus de réplication faible coût afin de compenser l'investissement initial nécessaire à la lithographie ("run-synchrotron", "stepper", masques, etc). Cette contrainte restreint quelque peu le champ d'application du procédé qui ne semble donc adapté qu'à la production industrielle de pièces simples, ne pouvant être fabriquées par d'autres techniques du fait de spécifications sur l'épaisseur, la résolution et la précision des motifs. De telles réalisations seront présentées au sein de l'article.

Toutefois, les microtechniques sont parfois demandeuses de structures complexes qui requièrent l'association de plusieurs technologies de fabrication. En ce cas, toutes les étapes techniques du procédé à mettre en oeuvre devront présenter un coût d'investissement voisin, et de préférence faible. Ainsi, les méthodes utilisant une lithographie UV sur résines épaisses (jusqu'à 100 μm) constituent un substitut intéressant au procédé LIGA, pour peu que l'on soit prêt à sacrifier certaines qualités géométriques des objets

réalisés de la sorte. On tentera ici de montrer les limites de cette technologie complémentaire que l'on nomme souvent LIGA-UV [12].

En conclusion, on rappellera les équipes travaillant sur le sujet, les installations accueillant ou susceptibles d'accueillir des manipulations de type LIGA et enfin les domaines privilégiés d'application de tels procédés.

2. GÉNÉRALITÉS SUR LA TECHNIQUE LIGA

La philosophie du procédé LIGA peut être décrite indépendamment de la nature de la source de photons utilisée. Le diagramme synoptique de la figure 1 en décrit les différentes phases.

Une source de rayonnement électromagnétique est utilisée pour insoler localement une résine photosensible, à travers un masque supportant des motifs absorbants qui définissent le dessin à transférer. La couche photosensible est déposée sur des épaisseurs variant de 10 μm à 1 mm en surface d'un substrat métallique, ou recouvert d'un film conducteur électrique. La résine irradiée est éliminée grâce à un solvant dont la sélectivité d'attaque entre zones protégée et exposée est nécessairement très grande. C'est alors que l'on dépose par voie électrolytique un revêtement métallique dans le moule de résine obtenu précédemment. A ce stade, deux démarches sont envisageables. Dans un cas, l'épaisseur de matériau électrodéposé est rigoureusement contrôlée et l'électroformage stoppé avant remplissage complet du moule. L'élimination de la résine, suivie éventuellement d'autres traitements technologiques fournit l'objet final. Bien que beaucoup de démonstrateurs de la technologie LIGA aient été réalisés selon ce principe, cette démarche semble mieux convenir à la LIGA-UV, compte tenu bien sûr des impératifs industriels économiques du moment.

La seconde option consiste à laisser croître le métal électrodéposé bien au-delà des limites de la résine afin d'obtenir une structure métallique adaptée aux techniques de moulage plastique destinées à la production de masse. Une fois de plus, on se trouvera face à une alternative identique à la précédente, c'est-à-dire obtenir un produit fini ou utiliser l'objet moulé pour une ultime étape d'électroformage. Ces opérations font appel à des spécialités différentes. Elles s'avèrent néanmoins primordiales pour la production de micro-composants de faible coût de fabrication. L'utilisation d'une étape de lithographie X-dur en début de procédé contribue fondamentalement à la production d'objets d'excellente définition géométrique. Son coût doit donc être réparti sur le plus grand nombre possible de pièces ainsi fabriquées. Avant de passer à la présentation de réalisations LIGA très spectaculaires, on fournira quelques données techniques relatives aux étapes de lithographie du procédé.

Fig. 1 : Synoptique général des procédés LIGA

3. LITHOGRAPHIES POUR PROCÉDÉS LIGA

Une particule chargée soumise à une accélération quelconque émet un rayonnement électromagnétique. Selon la théorie d'une telle émission en électrodynamique relativiste, le rayonnement émis est blanc, focalisé suivant la tangente à l'orbite de la charge, et faiblement divergent en dehors du plan de celui-ci [13]. Sur la ligne centrale de l'anneau DCI, cette divergence est de 0,22 m rad. La hauteur du faisceau à une distance de 24 m du point d'émission est de 20 mm, d'intensité régie par une loi normale. Cette excellente focalisation du faisceau oblige à balayer le couple masque-substrat devant la fenêtre de lumière à l'aide d'un "stepper". Les motifs absorbants du masque seront en or, matériau particulièrement opaque aux courtes largeurs d'onde à cause de son numéro atomique élevé. Un masque de fort contraste sera donc composé d'une membrane transparente aux X-durs, supportant des motifs en or d'une épaisseur de 10 μm typiquement. Une très grande résolution peut être obtenue en utilisant une étape de lithographie X-mous pour réaliser leurs masques, suivie d'un électroformage d'or. Les membranes pourront être constituées de titane (elles ne feront que 2 μm à cause de l'opacité du matériau à ces longueurs d'onde), de Béryllium (matériau très transparent aux X-durs mais dont l'oxyde est cancérigène) ou de carbone-diamant. En fait, un masque constitué d'une membrane de 15 μm de Silicium, dont les motifs absorbants ont été obtenus par lithographie UV et électroformage, peut suffire pour la lithographie X-dur. La figure 2 montre une roue dentée obtenue à l'aide d'un masque Silicium et résolue sur une épaisseur de 590 μm .

Fig. 2 : Roue dentée (PMMA) réalisée par technique LIGA X et résolue sur une épaisseur de 590 μm
(source : Groupe LIGA Français)

La résine utilisée en technique LIGA est du poly-méthyl-méthacrylate, abrégé en PMMA. Elle doit avoir absorbé une dose minimale de 2 kJ/cm^2 pour être soluble dans le solvant (du chloroforme). En pratique, une dose de

3,5 kJ/cm³ au niveau du substrat permet une meilleure révélation de la résine. Toutefois, on ne devra pas dépasser 25 kJ/cm³ en surface afin d'éviter la formation de bulles et de fissures pouvant dégrader irréversiblement la résine. Les motifs absorbants ne devront pas permettre d'atteindre une dose supérieure à 100 J/cm³ en surface protégée, valeur critique pour laquelle commencent à apparaître des dégradations notables de la résine pendant la phase de révélation.

Ces valeurs extraites de la référence [7] sont généralement confirmées par les expériences menées sur DCI par l'équipe française.

La lithographie UV sur résine épaisse ne nécessite pas de masques aussi élaborés que ceux décrits précédemment. Les masques optiques classiques conviennent parfaitement à ce genre d'application, le contraste entre le matériau absorbant (chrome) et le support du masque (SiO₂) étant extrêmement élevé aux largeurs d'onde utilisées. La source n'est ni plus ni moins qu'une lampe à mercure haute pression installée dans un aligneur de masque utilisé classiquement en microélectronique. Une telle lampe fournit principalement 3 raies (405 nm, 380 nm, 360 nm) et la puissance mesurée à 360 nm est voisine de 20 mW/cm². Différents types de résine s'avèrent bien adaptées à une telle application. Les TF-20 et STR 1110 de Shippley ainsi que la série des AZ46xx de Hoechst ont donné lieu à de très belles réalisations sur des épaisseurs allant de 10 à 90 µm [12, 14]. La présence d'une optique adaptée sur l'aligneur permet d'obtenir un bon parallélisme du flux de photons. Contrairement à la lithographie X, les applications UV nécessitent un excellent plaquage entre masque et résine. Peu d'expériences ont été réalisées à ce jour avec d'autres sources UV telles que lasers excimères, etc.

4. APPLICATIONS

Un des domaines privilégiés de la technique LIGA est la micro-optique et ce au moins pour trois raisons. Premièrement, il est possible grâce aux qualités de la lithographie X-dur de réaliser des composants optiques (filtres, réseaux, microlentilles, etc) avec une précision sub-micronique. Ces considérations de précision revêtent un caractère fondamental en optique géométrique. Ensuite, les flancs de résine obtenus après révélation sont d'une excellente planéité (rugosités de l'ordre de 50 nm [9]). Cela implique la possibilité de construire des dioptrés ou des miroirs efficaces sur un très large domaine de longueurs d'onde optiques. Enfin, le PMMA lui-même peut constituer un très bon guide optique. On peut en plus modifier son indice optique par dopage et réaliser ainsi des couches de guidage pour les rayons lumineux. Ces avantages sont mis à profit dans le microspectrographe présenté en figure 3.

Des montages optiques plus compliqués encore, mélangeant différents signaux optiques de façon non linéaire sont réalisables grâce au procédé LIGA. Un exemple en est reporté en figure 4. Il s'agit d'un système optique interférométrique destiné à des applications en télécommunications à haute densité d'informations.

Une très belle application optique de la technique LIGA consiste en la réalisation de réseaux périodiques destinés au filtrage dans le domaine des infrarouges. La figure 5 montre un de ces dispositifs dont les caractéristiques fréquentielles sont conditionnées par les dimensions du motif et sa période de répétition spatiale.

Fig. 3 : Schéma de principe d'un microspectrographe
réalisé en technique LIGA
(source KFK)

Fig. 4 : Microcuvette pour dispositifs optiques non linéaires
(source IMM)

Fig. 5 : Détail d'un filtre infrarouge et réponse en transmission du filtre suivant la longueur d'onde incidente
(source KFK)

De même, on peut imaginer d'utiliser de telles structures pour le micro-filtrage de fluides biocompatibles.

La micromécanique, pour laquelle de nombreux démonstrateurs ont été conçus via ce procédé, constitue un domaine important de la technique LIGA.

La figure 6 présente différents micromoteurs réalisés en associant aux procédés de lithographie X-dur et d'électroformage un procédé de couche sacrificielle permettant de libérer sélectivement certains degrés de liberté. Il est ainsi possible de mettre en mouvement l'élément rotor du moteur indépendamment des parties fixes constituant le stator. Les principes d'actionnement mis en jeu sont fondés sur les forces électrostatiques particulièrement avantageuses aux dimensions submillimétriques ou encore sur des effets électromagnétiques plus classiques en motorisation.

Pour en finir avec cette énumération d'applications et de réalisations, on a reporté en figure 7 un exemple d'accéléromètre réalisé également à l'aide d'une étape de couche sacrificielle dont l'efficacité a été testée et démontrée [9]. La masse sismique mise en mouvement lors de l'accélération évolue dans un système d'électrode permettant donc de mesurer les variations de capacités ainsi engendrées. On montre également en figure 8 des objets obtenus par la technique LIGA-UV. Il est évident que de telles réalisations sont loin de présenter des caractéristiques structurelles aussi remarquables que les objets LIGA-X. Cependant, on peut attirer l'attention du lecteur sur le fait que la nature fonctionnelle de celles-ci ne diffère pas fondamentalement des composants présentés précédemment. Aussi peut-on espérer, sous condition d'accepter de travailler avec des épaisseurs moindres mais à un coût beaucoup moins important qu'en LIGA-X, la mise en oeuvre de dispositifs micromécaniques efficaces tels qu'accéléromètres, préhenseurs, micro-moteurs, etc, grâce à la technique LIGA-UV.

Fig. 6 : Exemples de micromoteurs électrostatiques et électromagnétiques réalisés par technique LIGA
(Sources : Université du Wisconsin - Microparts - IMM)

Fig. 7 : Microaccéléromètre à réponse logarithmique
(source IMM)

Fig. 8 : Roue dentée en nickel réalisée par technique LIGA-UV
(épaisseur voisine de 40 µm)
(source IMFC)

CONCLUSION

Parmi toutes les techniques de microfabrication engendrées par les technologies de la microélectronique, le procédé LIGA s'avère être des plus intéressants pour la mise en oeuvre d'objets microtechniques de très grande qualité structurale. La profusion de démonstrateurs spécifiques tant en micromécanique qu'en micro-optique prouve clairement l'intérêt des scientifiques pour ce nouvel outil aux possibilités multiples.

Cependant, le transfert de cette technologie vers l'industrie semble ne pas s'effectuer à la même vitesse que les développements prospectifs des laboratoires impliqués dans de telles recherches. Il est vrai qu'actuellement, seuls le KFK et l'IMM en Allemagne, l'Université du Wisconsin aux USA et l'équipe française (IMFC, L2M, LURE) ont effectivement réalisé des objets par lithographie X-durs et électroformage. On s'attend toutefois à un engouement plus marqué pour cette technologie, particulièrement de la part du BSAC (Berkeley, Californie) ou de l'équipe russe de Novosibirsk, et bien sûr des industriels japonais à l'affût des débouchés du procédé LIGA. Dans cette perspective, la technique LIGA-UV offre une alternative plus attirante pour les faibles investissements. Sa complémentarité avec le procédé LIGA (X-dur) en fait un candidat sérieux parmi les outils de microfabrication disponibles aujourd'hui. Certains laboratoires ne s'y trompent pas et investissent en conséquence dans ces applications (TU Berlin, IMT Neuchâtel, Institute of Industrial Science Tokyo, etc). De tous les domaines concernés par le procédé LIGA, il en apparaît deux privilégiés aujourd'hui, nommément la connectique, grâce à l'extrême précision offerte, et la micro-optique demandeuse de tolérances extrêmes pour la fabrication de microlentilles, filtres et autres guides d'ondes. L'association d'un procédé de fabrication de masse et le développement des techniques de micro-assemblage conditionneront quoiqu'il en soit le succès industriel de la technique LIGA pour les années à venir.

Remerciements

L'équipe LIGA française composée de S. Megtert, A. Labèque, Liu Zewen, H. Dexpert, F. Rousseaux, M.F. Ravet, H. Launois, W. Daniau, S. Basrour, M. Rouillay, P. Bernède, P. Blind et P. Berçot trouvera ici les sincères remerciements des auteurs pour tous les résultats et les efforts produits pour le développement de la technique LIGA en France.

Bibliographie

- [1] Y.C. Tai, L.S. Fan, R.S. Müller, "IC-processed micromotors : design, technology and testing", Proc. of the IEEE MEMS Workshop, Salt Lake City, Utah, 20-22 February 1989, p. 1-6.
- [2] M. Mehregany, S.F. Bart, L.S. Tavrow, J.M. Lang, D. Senturia, M.S. Schlecht, "A study of three microfabricated variable capacitance motors", *Sensors and Actuators A*21(1-3) (1990) 173-179.
- [3] C.L. Inder, T. Tschan, N.F. de Rooij, "Deep dry etching techniques as a new IC-compatible tool for silicon micromachining", Proc. of Transducers 91, San Francisco.

- [4] W. Yan, R.T. Howe, "Recent developments in Silicon micro-accelerometers" *Sensors magazine*, pp. 31-41, October issue, 1992.
- [5] Recherche en Microtechniques : réalités et perspectives, Chapitre micro-optique, pp 197-218, Collection du Livre Vert, janvier 1992.
- [6] E.W. Becker, H. Bets, W. Ehrfeld, W. Glashauser, A. Heuberger, M.J. Michel, D. Münchmeyer, S. Pongratz, R.U. Siemens, "Production of separation nozzle systems for Uranium enrichment by a combination of X-Ray lithography and Galvanoplastics", *Naturwissenschaften* **69** (1982), 520-523.
- [7] W. Ehrfeld, D. Münchmeyer, "Three dimensional microfabrication using synchrotron radiation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A303** (1991), 523-531, North Holland.
- [8] M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Menz, A. Michel, J. Mohr, "Molding of three-dimensional microstructures by the LIGA Process", *Proc. of the IEEE MEMS Workshop*, Travenünde, February 4-7, pp.202-207, 1992.
- [9] P. Bley, J. Gottert, M. Harmening, M. Himmelhaus, W. Menz, J. Mohr, C. Müller, U. Walbrabve, "The LIGA process for the fabrication of micromechanical and microoptical components", *Microsystems Technologies* **91** (1991), Berlin, 302-314.
- [10] S. Megert, A. Labeque, Liu Zewen, H. Dexpert, R. Comès, F. Rousseaux, M.F. Ravet, H. Launois, S. Ballandras, W. Daniau, S. Basrour, M. Rouillay, P. Blind, D. Hauden, Deep etch Lithography at LURE-DCI Storage-Ring, European Symposium on Frontiers in Science and Technology with Synchrotron Radiation, Aix-en-Provence, April 5-8, 1994.
- [11] J. Mohr, W. Ehrfeld, D. Munchmeyer, A. Stutz, Resist Technology for deep-etch synchrotron radiation lithography, *Makromol-Chem, Macromol. Symp.* **24**, pp. 231-251 (1989).
- [12] W. Daniau, S. Ballandras, P. Bercot, D. Hauden, "Metallic micro-devices fabricated by deep-etch UV Lithography", *Material Science and Engineering*, A 1650 (1993) L5-L8.
- [13] P. Dagneaux, C. Depantex, P. Dhez, J. Durup, Y. Farge, R. Fourme, P.M. Guyan, P. Jaegle, S. Leach, R. Lopez-Delgado, G. Morel, R. Pinchaux, P. Thiery, C. Vermeil, F. Wuilleumier, "L'utilisation du rayonnement synchrotron en France", *Ann. Phys.*, 1975, t. 9, pp. 9-65.
- [14] A.B. Frazier, M.G. Allen, "High Aspect ratio electroplated micro-structures using a photosensitive polyimide process", *Proc. of the IEEE MEMS*, Travemünde, Feb. 4-7, pp. 87-92, 1992.