



Système expérimental d'extraction des gaz par ablation laser, permettant de connaître leur composition en fonction de la profondeur dans l'échantillon (CRPG, Vandœuvre-lès-Nancy). © CNRS Photothèque / MANBERT Thierry.

L'industrie est un grand consommateur de lasers, que ce soit pour l'usinage et la transformation des matériaux ou pour l'instrumentation industrielle.

Dans cet article, deux exemples de nouvelles utilisations industrielles de sources lasers sont décrits :

- l'usinage appliqué aux cellules photovoltaïques de haut rendement, pour lesquelles la forte demande commerciale exige des cadences de fabrication élevées ;
- la spectroscopie LIBS, qui répond aux nouvelles préoccupations environnementales, ainsi qu'aux exigences industrielles d'optimisation des ressources énergétiques.

Deux exemples d'applications industrielles des lasers

La fabrication des cellules photovoltaïques et la spectroscopie d'émission

Philippe Aubourg⁽¹⁾ (philippe.aubourg@quantel.fr), **François Fariaut**⁽²⁾, **Patrick Mauchien**⁽³⁾ et **François Salin**⁽⁴⁾

(1) Quantel, 2 bis avenue du Pacifique, BP 23, 91941 Les Ulis Cedex. (2) IVEA SAS, 9 rue Raoul Dautry, 91190 Gif-sur-Yvette.

(3) Département de physico-chimie, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette. (4) Eolite Systems, Cité de la photonique, 33600 Pessac.

Les efforts scientifiques et technologiques qui ont précédé le premier photon généré par le laser à rubis de Ted Maiman, étaient principalement motivés par des besoins aéronautiques. Ce n'est pas le fait du hasard si ce succès s'est passé dans les laboratoires de Hughes Aircraft. Mais de nombreux chercheurs avaient en tête des applications industrielles et médicales, qui ne demandaient que la mise sur le marché de lasers adaptés.

Après quelques années, l'offre s'est stabilisée autour de quelques types de lasers : Nd:YAG, CO₂, excimère, hélium-néon, argon, hélium-cadmium... selon la longueur d'onde et la puissance ou l'énergie

requises. Plus tard, l'arrivée des diodes lasers, des lasers à solides pompés par diodes, des lasers femtoseconde, des lasers à fibres, puis des VECSELs (Vertical-External Cavity Surface-Emitting Lasers, lasers à semi-conducteur pompés optiquement) a changé la palette de choix, et certains pionniers comme les lasers à argon ou hélium-néon ont pratiquement disparu.

Les applications industrielles des lasers sont divisées en deux grands secteurs : l'usinage des matériaux et l'instrumentation. Dans la suite, un exemple pour chacun de ces secteurs est abordé. >>>

Usinage des matériaux

Problématique générale du choix du laser

Le choix du laser est d'abord basé sur les caractéristiques de l'interaction souhaitée et du matériau à traiter.

Laser continu ou à impulsion ?

La soudure et la découpe épaisse demandent une puissance moyenne importante : on se dirigera alors vers des lasers continus. L'ablation, le marquage par oxydation ou la découpe fine nécessitent une puissance instantanée (puissance crête) importante pour générer un champ électrique local élevé : on préférera alors un laser à impulsion.

Laser ultraviolet ou infrarouge ?

L'infrarouge lointain (laser CO_2) sera utilisé pour une application purement thermique (soudure). L'infrarouge proche (laser Nd:YAG ou à fibre dopée en ytterbium) génèrera une ionisation (oxydation, nettoyage de surface). L'ultraviolet (laser excimère ou harmoniques du Nd:YAG) permettra une ablation de grande précision (photolithographie).

Au-delà de ces grandes lignes il faut, bien entendu, tenir compte du spectre d'absorption des matériaux, des phénomènes multiphotoniques (comme dans le cas des lasers femtosecondes). Vient ensuite l'analyse économique du procédé industriel : montant de l'investissement, coût d'entretien, coût des consommables (électricité, gaz, lampes flash...), évaluation des cadences de production (liées généralement à la puissance moyenne du laser)...

L'élaboration de nouveaux matériaux (les supraconducteurs, certains matériaux magnétiques et les nanomatériaux) fait appel à l'assistance de lasers spécifiques au cours de leur fabrication.

De même, le développement rapide de l'industrie photovoltaïque demande de nouvelles sources à impulsion à haute fréquence et forte puissance moyenne, de façon à faire face aux cadences industrielles.

1. Trait de 30 μm de largeur, tracé à 1,2 m/s dans du silicium cristallin, pour l'isolation électrique entre les deux faces d'une cellule solaire.

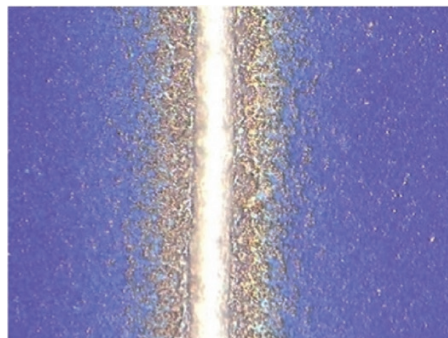
Le photovoltaïque

L'industrie photovoltaïque représente une opportunité très importante pour les lasers industriels. La croissance de ce marché est supérieure à 40 % par an, et l'utilisation des lasers dans la fabrication des cellules et des modules solaires croît tous les jours. La production directe d'électricité à partir de l'énergie solaire se fait selon deux technologies très différentes : le silicium cristallin et les couches minces.

Cellules en silicium cristallin

Ces systèmes utilisent des plaquettes de silicium monocristallin ou multicristallin, de dimensions habituelles $156 \times 156 \text{ mm}^2$, et sur lesquelles sont élaborées une couche p-n⁽¹⁾, puis une couche antireflets et des électrodes. Cette technologie représente 75 % du marché actuel, et les cadences industrielles sont typiquement de 1800 à 3500 cellules par heure.

Les lasers sont pour l'instant essentiellement utilisés pour faire une isolation électrique entre les faces supérieure et inférieure de la cellule⁽²⁾, en gravant une tranchée d'environ 30 μm de large sur 20 μm de profondeur, à 100 μm du bord de la cellule. La difficulté est d'introduire le moins possible de défauts autour de la gravure. On utilise pour cela des lasers émettant des impulsions de 10 ns dans le vert (515 ou 532 nm) et de très fortes puissances à haute cadence (> 100 kHz). Les vitesses de gravure actuelles, de l'ordre de 600 mm/s, limitent la production à deux mille cellules à l'heure ; l'industrie bascule actuellement sur des lasers de très forte puissance, comme le laser à fibre BOREAS 60G de EOLITE Systems, qui peut produire 60 W à 515 nm et conduit à des vitesses de gravure supérieures à 1200 mm/s (fig. 1).



Un nouveau procédé de dopage du silicium permet d'augmenter le rendement des cellules de 5 %, ce qui représente des centaines de millions d'euros d'électricité par an. Ce procédé, dit d'émetteur sélectif, utilise un ou plusieurs lasers nanoseconde pour réaliser un surdopage local du silicium aux emplacements où seront ensuite déposées les lignes métalliques de l'électrode avant. Les surfaces à traiter en des temps très courts imposent, de nouveau, des lasers de très fortes puissances moyennes (> 100 W) dans le vert, avec des qualités de faisceau excellentes. La demande pour ce type de procédé ne fait que commencer, mais elle peut représenter à elle seule un marché de plusieurs centaines de lasers par an.

Dans un terme plus lointain, il est envisagé de percer environ trente mille trous de 30 μm de diamètre dans chaque cellule de 180 μm d'épaisseur, pour transférer les électrons vers l'électrode arrière, sans recourir à des électrodes en face avant. Cette technique part du principe des trous métallisés, largement employé dans les circuits imprimés, pour établir une connexion entre les deux faces d'un circuit. Dans le cas du photovoltaïque, elle évite la grille en face avant, responsable d'une perte de lumière, et permet d'envisager un nouveau procédé de réalisation de modules, totalement automatisable. Il suffit, en effet, de presser les cellules sur un circuit imprimé constituant la face arrière du module et comportant des pistes métallisées, pour réaliser l'interconnexion en série ou en parallèle des cellules. Mais percer autant de trous en un temps de cycle de l'ordre d'une seconde, sans endommager la cellule, reste un challenge difficile à atteindre.

Panneaux en couches minces

Cette technologie utilise des substrats, essentiellement en verre, mais également en métal ou en plastique, sur lesquels sont déposées des couches minces composant les deux électrodes et la couche active. Les épaisseurs sont de l'ordre du micron. S'il était uniforme, un tel module produirait environ 150 W/m², mais sous une tension de 0,8 V. Le courant serait alors énorme, ce qui rendrait difficile son utilisation. Le procédé consiste à découper des bandes d'environ 1 cm de large sur ces panneaux, et d'en faire autant de cellules individuelles qui sont reliées en série. Il convient alors de graver chaque

couche après son dépôt, pour l'isoler de la bande adjacente ou, au contraire, créer un contact⁽³⁾. En fonction de la nature de la couche active, on utilise des lasers nanoseconde ou picoseconde.

Dans le cas de CIGS⁽⁴⁾, la première couche est métallique (molybdène), et des impulsions de 10 ns avec une longueur d'onde de 1 μm conviennent parfaitement. La couche active peut aussi être en silicium amorphe, et les lasers nanoseconde verts (510, 532 nm) sont utilisés (meilleure absorption). La tendance est d'utiliser de plus en plus de CIGS. Or, celui-ci devient métallique dès qu'on le chauffe. Il faut alors se tourner vers des lasers picoseconde verts ou UV. La dernière gravure consiste à isoler les bandes, en enlevant à la fois la couche active et l'électrode supérieure ; elle s'effectue avec des lasers verts nanoseconde ou picoseconde.

Sur un panneau, ces gravures représentent plus de 350 m linéaires d'usinage, avec une largeur typique de 50 μm , et une tendance à la réduction de la dimension du trait pour limiter la zone morte du panneau. Pour une production d'un panneau par minute, il faut utiliser des lasers de relativement forte puissance (de 10 à 30 W) et travailler en parallèle, en partageant le faisceau en plusieurs copies identiques gravant chacune un trait. La manipulation de plusieurs faisceaux sur des distances supérieures à un mètre, tout en conservant une précision de gravure de quelques microns, est un challenge important pour les fabricants de machines. Une solution alternative existe, en transportant les différents faisceaux dans des fibres optiques spéciales, capables de supporter les grandes puissances crêtes des impulsions (OCTOPUS, EOLITE).

En résumé, la fabrication de cellules et de panneaux solaires utilise de plus en plus intensivement des lasers. Les caractéristiques d'absorption des matériaux et l'usinage par ablation imposent des lasers nanoseconde ou picoseconde dans le vert ; la largeur de la gravure demande une bonne qualité de faisceau ($< 1,2$ fois la limite de diffraction), la productivité industrielle est liée à la puissance moyenne (10 – 100 W), la fiabilité et le coût limitent l'énergie par impulsion, donc induisent des cadences élevées (100 kHz – 10 MHz). Ce marché est en forte croissance, et peut représenter à terme un des débouchés les plus importants pour ce type de source.



2. Analyse par LIBS de la qualité de l'air dans une fonderie (IVEA/INERIS)

Instrumentation industrielle

La maîtrise des procédés de fabrication, le contrôle qualité, le contrôle de l'environnement et l'optimisation des coûts de production entraînent un développement rapide de l'instrumentation industrielle. La spectroscopie, ainsi que les mesures de distances et de vitesses, basées sur l'utilisation de lasers, sont maintenant entrées dans le monde industriel. Pour ces deux domaines, comme pour l'usinage, des sources continues ou à impulsions, émettant de l'ultraviolet à l'infrarouge, sont utilisées. Généralement, elles sont moins puissantes que pour l'usinage des matériaux. On recherche alors des performances en stabilité, qualité de faisceau, ou spectre d'émission adapté. Dans ces nouveaux domaines, le choix des sources lasers se fait également sur des critères économiques, qui sont similaires à ceux considérés dans l'usinage.

L'un des domaines actuellement en développement rapide est la LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy).

La technique LIBS

La LIBS est une technique d'analyse de la composition chimique des matériaux, qui présente un large ensemble de caractéristiques attrayantes : analyse multi-élémentaire simultanée, applicable à tout type de matériau (solide, liquide, gaz, aérosol) en temps réel, à distance (fig. 2).

Un laser impulsionnel et une optique de focalisation permettent d'obtenir au niveau de la surface du matériau une irradiance suffisante (typiquement de quelques GW/cm^2 , sur une surface de diamètre compris entre quelques microns et quelques centaines de microns, selon le besoin), pour produire la vaporisation brutale de la surface éclairée. Une faible quantité de matière (inférieure au microgramme) se trouve ainsi transformée en un microplasma transitoire très chaud et très dense. Après l'impulsion laser, le plasma se détend et se refroidit en émettant un rayonnement lumineux.

Ce rayonnement, constitué initialement d'un fond continu à spectre large (rayonnement de corps noir), évolue au fur et à mesure du refroidissement du plasma vers un spectre de raies caractéristiques des éléments le constituant. La durée de vie du plasma est comprise entre 10^{-7} et 10^{-5} secondes, selon le volume de matière vaporisé.

Un système optique collecte une partie de la lumière émise par le plasma vers un spectromètre équipé d'un détecteur. Le signal émis par le plasma dépendant du temps, un générateur de retard et un générateur de porte sélectionnent l'instant et la durée de l'acquisition. Il est ainsi possible de s'affranchir en grande partie du fond continu émis à l'origine par le plasma très chaud, et de ne détecter que le signal caractéristique des atomes et des ions du plasma.

Le tout est piloté par un système de contrôle/commande ; un logiciel d'acquisition détermine l'intensité reçue en fonction de la longueur d'onde.

>>>

Le traitement du spectre permet de reconnaître les raies qui le composent et, par comparaison à une base de données, d'identifier les éléments chimiques présents dans le plasma (fig. 3).

Détermination des concentrations et reconnaissance des matériaux

Du fait de la rapidité de l'éjection de matière, le plasma a la même composition que le matériau d'origine, donnant ainsi accès à des mesures quantitatives fiables. Cependant, pour une concentration donnée de l'élément d'intérêt, l'intensité du signal dépend du matériau analysé ; cette influence du matériau sur la réponse analytique est connue sous le nom d'effet de matrice. La quantification précise passe donc par une étape préalable d'étalonnage effectuée sur différents étalons de composition voisine de celle de l'échantillon, dans lesquels l'élément à quantifier se retrouve à des concentrations connues.

La technique de la LIBS présente ainsi de nombreux avantages :

- ♦ Analyse multi-élémentaire : la LIBS permet de détecter en une seule impulsion tous les éléments, y compris les plus légers, sur tout type de matériau.
- ♦ Analyse sans contact, à distance, particulièrement adaptée aux milieux hostiles, par exemple à haute température ou corrosifs, ou aux milieux difficilement accessibles.
- ♦ Analyse sans préparation d'échantillon, sous atmosphère ambiante, ce qui rend sa mise en œuvre simple et rapide.
- ♦ Analyse en temps réel.
- ♦ Analyse peu destructive : les masses de matière ablatée sont très faibles ; elles varient de quelques nanogrammes à quelques centaines de nanogrammes.
- ♦ Analyse localisée, la limite de résolution spatiale atteignant quelques micromètres,

et même un micromètre, avec possibilité de réaliser des microcartographies.

- ♦ Large plage d'analyse : la limite de détection usuellement atteinte varie de la fraction de ppm (partie par million) à quelques centaines de ppm, selon l'élément et le matériau.

Spectromètres LIBS

Les premiers analyseurs LIBS industriels sont désormais proposés à la vente (fig. 3).

Pour la création du plasma, les lasers utilisés sont en général des lasers à solide Nd:YAG ; la longueur d'onde retenue peut varier du fondamental, à 1,06 μm , aux différents harmoniques, selon le type de matériau analysé. Une durée d'impulsion de quelques nanosecondes et des énergies de 10 μJ à 100 mJ (selon la surface d'interaction) permettent d'atteindre l'irradiance crête requise sur le matériau à analyser.

Les détecteurs sont couramment des caméras CCD intensifiées, qui permettent le traitement temporel de l'acquisition en jouant le rôle d'obturateur rapide. Ils peuvent être associés à différents spectromètres. Les spectromètres classiques, adaptés à la spectroscopie atomique, c'est-à-dire lumineux et à fort pouvoir de résolution ($\lambda/\Delta\lambda = 10\,000$), ne permettent d'analyser que quelques éléments simultanément, en raison de leur faible plage spectrale (10 nm), due à la taille limitée du capteur CCD. En revanche, les spectromètres à dispersions horizontale et verticale (« spectromètres à échelle ») permettent l'exploitation simultanée de la totalité du spectre (200 à 900 nm), avec un pouvoir de résolution pouvant aller jusqu'à 10 000 sur des modèles courants. Il existe aussi des spectromètres de très faible volume, robustes, bien adaptés à l'analyse de terrain, mais de performances moindres.

Domaines d'application

Maîtrise des procédés industriels et des impacts environnementaux

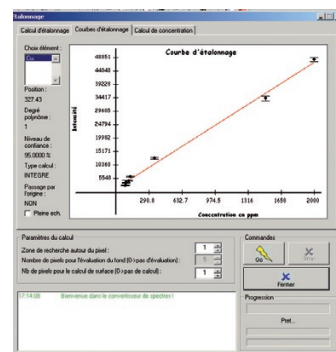
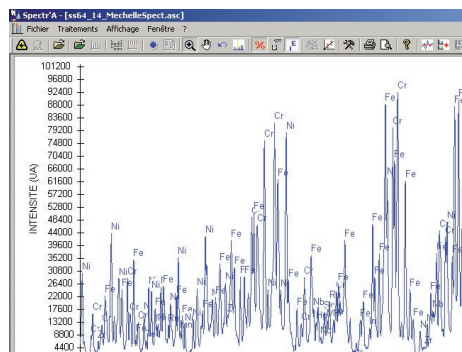
Les gains de productivité et la réglementation toujours plus exigeante, obligent en permanence les industriels à mieux maîtriser leurs procédés, de la qualité des matières premières consommées (diminution des rebuts et maîtrise des délais) jusqu'au suivi en temps réel des rejets industriels, et leur valorisation. C'est, en particulier, le cas de l'analyse de liquides dans les aciéries, de celle de coulées de verre, dont il faut contrôler la composition et le taux d'impuretés, ou encore de l'analyse de sels fondus. C'est d'ailleurs pour de telles applications d'analyse à distance que le CEA a lancé, dès le début des années 90, ses travaux d'étude et de développement de la LIBS.

Pour les procédés industriels, la LIBS permet d'opérer directement sur les lignes de production, à distance suffisante pour éviter toute difficulté liée à la température ou aux projections éventuelles. Adaptée à l'analyse des aérosols, la LIBS permet aussi de contrôler la composition des fumées et résidus de calcination, ou la concentration et la composition d'aérosols présents au voisinage des postes de travail (fig. 2).

Analyse de terrain

De manière générale, l'absence de préparation d'échantillon et la facilité de transport et de mise en œuvre de la technique, font de la LIBS un outil de choix pour les analyses de terrain. On peut citer l'analyse d'ambiances de travail (gaz et aérosols), celle des sols, l'analyse minéralogique et l'analyse archéologique, en particulier sous-marine (en milieu liquide).

La faible intrusivité de la LIBS en fait aussi une technique d'intérêt pour l'étude d'objets précieux et fragiles, comme



3. LIBS transportable commercialisée par IVEA sous licence CEA, et logiciel de traitement associé.

les œuvres d'art. Ainsi, l'analyse du plasma créé à partir de quelques nanogrammes de peinture permet d'en déterminer la composition élémentaire, et donc de dater ou de révéler la présence de différentes couches.

Analyse de laboratoire : microsonde LIBS

L'analyse des phénomènes de diffusion d'un matériau dans un autre, par exemple lors d'opérations de soudage, ou la détermination de l'homogénéité de la composition d'alliages, peuvent requérir des cartographies à l'échelle micrométrique (fig. 4). La résolution latérale des mesures de la microsonde LIBS peut atteindre le micron, et les éléments (y compris les plus légers comme l'hydrogène) peuvent être détectés à des niveaux de teneur de quelques parties par million pour les plus sensibles.

Le degré de maturité de l'analyse par LIBS, son grand potentiel d'applications, tant dans le secteur industriel que dans le domaine des mesures de terrain, ainsi que l'apparition sur le marché de matériel fiable et robuste, en font un outil de choix, actuellement en plein essor, dans le domaine de l'analyse chimique en temps réel.

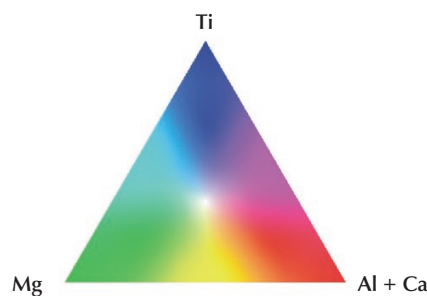
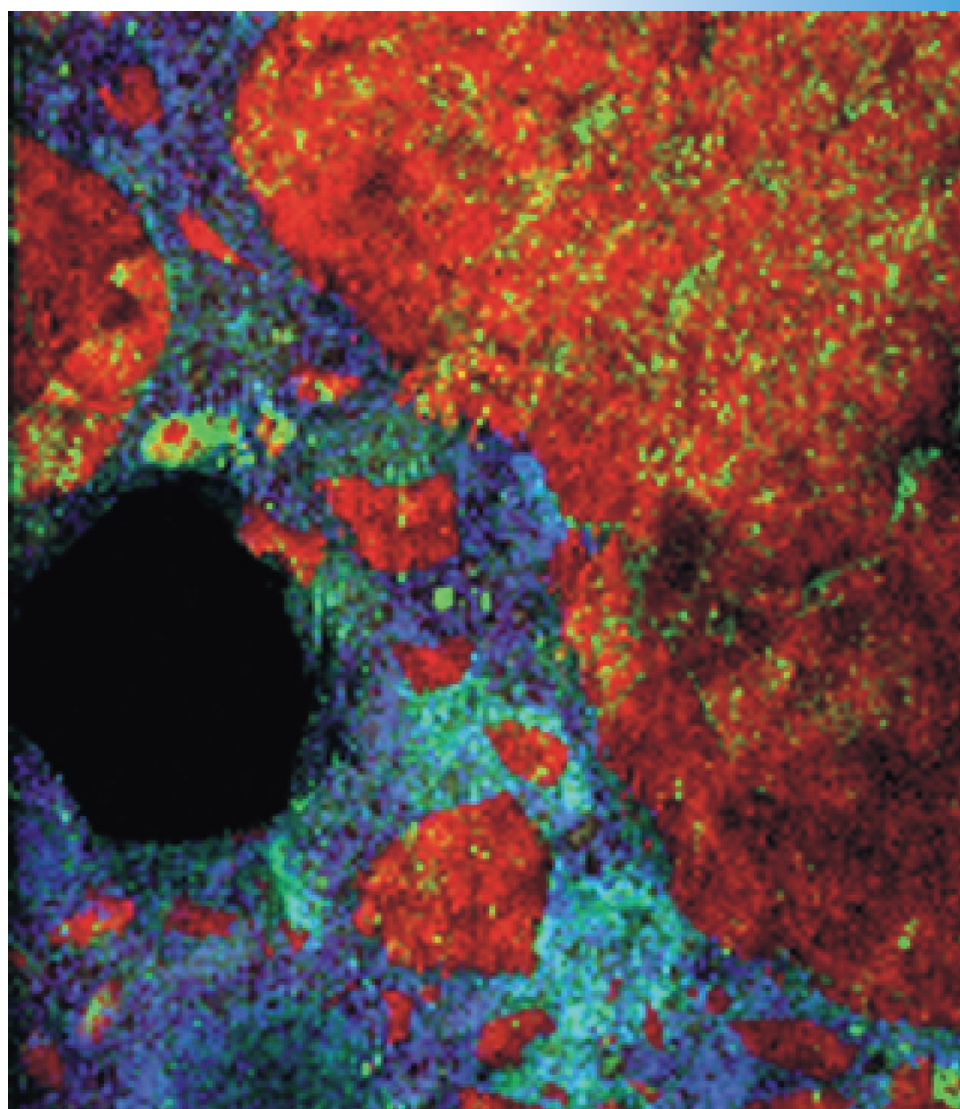
Conclusion

Ces deux applications industrielles du laser montrent l'importance de celui-ci dans le progrès technologique. Des objets devenus courants, comme un téléphone portable, sont soumis à plusieurs opérations « laser » en cours de conception, de fabrication, de livraison. Le design est validé par prototypage rapide, les circuits intégrés sont réalisés par lithographie laser, les couches minces composant l'écran sont réparées par ablation laser, les touches sont marquées laser, les codes-barres permettant la logistique sont lus par laser...

L'importance industrielle du laser ne tient pas au chiffre d'affaires réalisé par l'ensemble des fabricants de sources (quelques milliards de dollars, chiffre très modeste au vu de l'économie mondiale), mais résulte de la diffusion de son utilisation dans les procédés industriels à haute valeur ajoutée. Cinquante ans après son invention, le laser est devenu incontournable dans l'industrie. ■

Remerciements

Nous tenons à remercier Bernard Equer pour sa relecture attentive de la section sur le photovoltaïque.



4. Image obtenue par microsonde LIBS, développée au CEA, de l'insertion de titane dans un béton d'ouvrage d'art pour le stockage en milieu géologique profond (résolution 3 µm, mesure en atmosphère ambiante).

(1) Par diffusion du phosphore, dans le cas usuel de substrats de type p.

(2) Selon le procédé de fabrication utilisé, les bords des plaquettes contribuent plus ou moins fortement à une perte d'efficacité de la cellule, par recombinaison des électrons et des trous photogénérés.

(3) Voir *Reflète de la physique* n° 5 (2007), p. 19.

(4) CIGS : Cu(In,Ga)(S,Se)₂. Voir *Reflète de la physique* n° 5 (2007), p. 16.