

Atelier "Systèmes embarqués d'imagerie 3D par laser"
7 avril 2014, LAAS/CNRS, Toulouse

Les technologies laser pour l'imagerie active 3D embarquée et leur niveau de maturité

Pierre BOURDON, Laurent LOMBARD, Guillaume CANAT, ONERA/DOTA

Antoine GODARD, ONERA/DMPH

pierre.bourdon@onera.fr



return on innovation

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Bilan et retour sur les contraintes d'intégration système
6. Conclusion - perspectives

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Bilan et retour sur les contraintes d'intégration système
6. Conclusion - perspectives

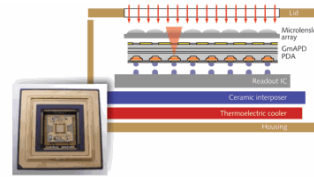
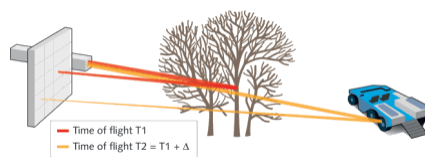
Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

3

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

L'imagerie active 3D - Généralités

- Imagerie active 3D = imagerie active + télémétrie



- Comme en imagerie active : 2 grandes méthodes d'acquisition des images
 - **Imagerie flash** = éclairage de la scène par faisceau laser grand champ et acquisition d'une image par un détecteur matriciel
→ 1 impulsion laser génère 1 image
 - **Imagerie par balayage** = éclairage de la scène point par point, mesure de l'éclairement rétrodiffusé par monodétecteur et balayage de la scène par le laser pour générer l'image
→ 1 train d'impulsions laser génère 1 image
- **Imagerie flash** → nécessite un détecteur matriciel spécifique (voir exposé suivant) mais laser simple (faisceau fixe, faible cadence)
- **Imagerie par balayage** → monodétecteur (plus simple) mais laser plus complexe (balayage du faisceau, haute cadence)

Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

4

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Les lasers pour l'imagerie active 3D - Spécificités

- Choix de la longueur d'onde → 1,5 μm ou 2 μm
 - Sécurité oculaire
 - Propagation atmosphérique
 - Lasers pulsés efficaces disponibles
 - Détecteurs adaptés disponibles
- Qualité spatiale du faisceau
 - Pour l'imagerie flash, impacte la taille de la zone éclairée et l'uniformité de l'éclairage laser → M^2 élevés acceptables sous réserve d'homogénéiser le faisceau a posteriori
 - Pour l'imagerie par balayage, impacte la résolution spatiale (i.e. la taille du spot laser sur cible) → M^2 faible (< 2 – 4) nécessaire
- Largeur de raie laser
 - Pas trop fine pour limiter les effets de speckle → quelques nanomètres au moins

Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

5

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Les lasers pour l'imagerie active 3D - Spécificités

- Durée d'impulsion
 - Impacte le bilan de liaison et la précision de la télémétrie → courte si possible mais pas trop courte (classe nanoseconde)
 - Pour l'imagerie flash → 1 - 50 ns
 - Pour l'imagerie par balayage, impacte aussi le traitement du signal → 1 - 5 ns
- Energie par impulsion
 - Impacte le bilan de liaison → plus l'énergie est élevée, mieux c'est
 - Pour l'imagerie flash, très fortes énergies par pulse → 100 – 200 mJ
 - Pour l'imagerie par balayage, limitations liées à la cadence laser → qq. W moyens souvent suffisants (*classe 10 W préférable à classe 100 W*)
- Fréquence de répétition laser
 - Pour l'imagerie flash, impacte le taux de rafraîchissement image, limité par la puissance moyenne laser → qq. Hz à qq. 10 Hz
 - Pour l'imagerie par balayage, impacte la performance système → qq. 10 kHz à qq. 100 kHz si possible

Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

6

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Les lasers pour l'imagerie active 3D Spécificités liées à l'intégration sur porteur

- Grandes familles de porteurs

- Porteurs "périssables" = drones, missiles



- Porteurs "pérennes" = avions, laser souvent monté sur pod



- Contraintes principales

- Encombrement = même en pod, < 10 litres et 10 kg
- Consommation électrique = doit rester limitée < qq. 100 W, refroidissement et Q-switch passifs
- Robustesse = résistance aux accélérations porteur, aux vibrations porteur, durée de vie en conditions de stockage

Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

7

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Bilan et retour sur les contraintes d'intégration système
6. Conclusion - perspectives

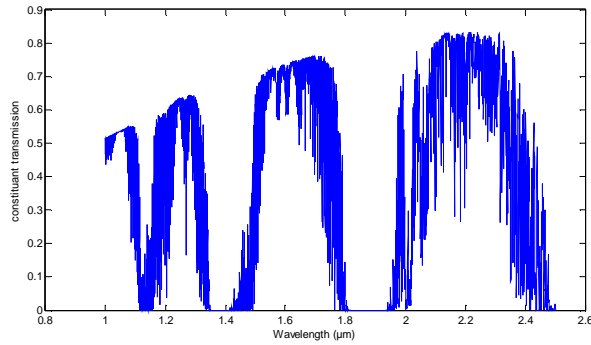
Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

8

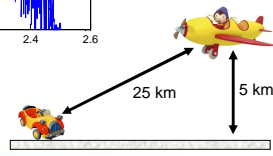
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Choix de la longueur d'onde

- Imagerie active embarquée → portée de **plusieurs km**
 - Sécurité oculaire nécessaire (axe de visée air – sol)
 - Bonne propagation atmosphérique indispensable



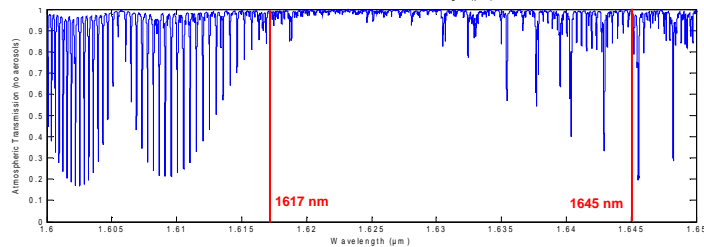
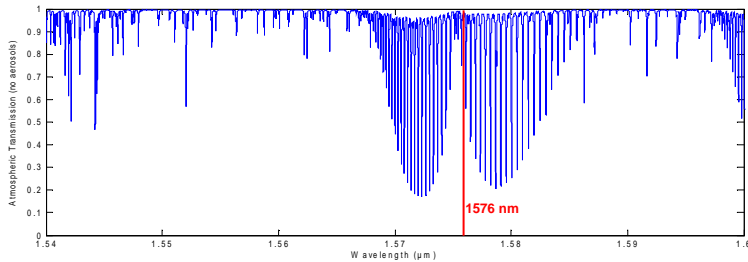
Logiciel "modtran", atmosphère US Std 1976; visibilité 23 km
 Axe de visée air – sol incliné = distance 25 km, altitude 5 km



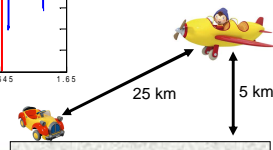
Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CHRS – 7/04/2014

9

Choix de la longueur d'onde – 1,5 μm



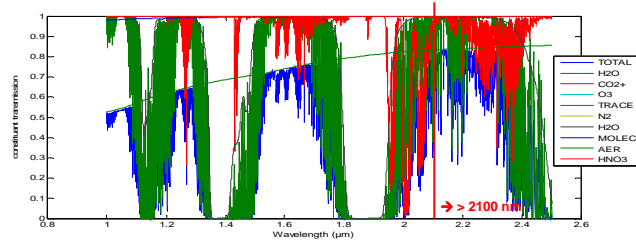
Axe de visée air – sol incliné = distance 25 km, altitude 5 km



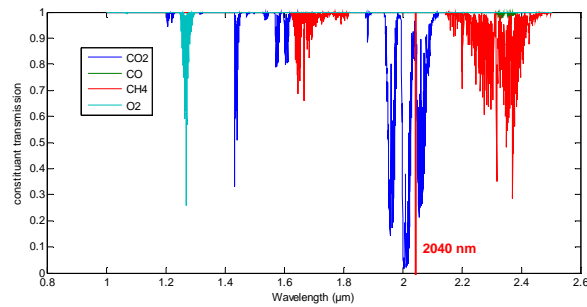
Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CHRS – 7/04/2014

10

Choix de la longueur d'onde – 2 µm



Contributions principales:
-Aerosols
-Eau
-Gaz



Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

11

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Bilan et retour sur les contraintes d'intégration système
6. Conclusion - perspectives

Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

12

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Décalage Raman dans des gaz ou des solides

- Conversion de fréquence par diffusion Raman
 - Décalage Raman dans un cellule de gaz sous pression conversion d'un laser à 1064 nm → 1543 nm
 - Décalage Raman dans un milieu solide (cristal) d'un laser à 1320 nm → 1500 nm
- Limitations actuelles
 - Raman gaz (CH₄)
 - Cellule sous pression pose des problèmes de mise en œuvre
 - Dépôt de carbone sur les fenêtres de la cellule compromettent sa durée de vie
 - Efficacité jusqu'à 40 - 45 % mais pour des cellules multipassage très longues --> encombrant si efficace
 - Raman solide
 - Longueur d'onde de pompe à 1320 nm disponible (Nd:YAG) mais lasers peu efficaces (raie principale du Nd:YAG à 1064 nm)
 - Lockheed Martin Coherent Technologies : 50 mJ à 30 Hz, tête laser 8 litres, alimentation déportée

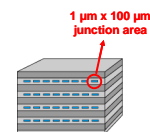
Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

13

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Lasers à semi-conducteurs (diodes laser)

- Intérêt et limites des diodes laser
 - Compacité et rendement à la prise inégalés (60 %) pour les diodes GaAs entre 700 et 900 nm
 - Possibilité de réaliser des matrices 2D de diodes laser (stacks) elles aussi très compactes
 - Largeur de raie satisfaisante = 20 nm @ 1550 nm
- Diodes laser à 1,5 μm et à 2 μm existent
 - Le rendement à la prise diminue quand la longueur d'onde augmente → < 30 % pour les diodes à 1,5 μm et < 20 % pour les diodes à 2 μm
 - Fournisseurs essentiellement aux USA, de + en + en Allemagne.
 - Une inconnue de ces diodes laser = leur durée de vie, surtout si utilisées à forte puissance et/ou en régime impulsionnel (diodes GaAs dans ces conditions = 6000 heures)
- Problèmes supplémentaires
 - Faisceau asymétrique et fort M² dans une direction
 - VCSEL → faisceau circulaire mais puissance limitée
 - Durée d'impulsion : énergie limitée si durée faible car gain switching → difficilement <100 ns



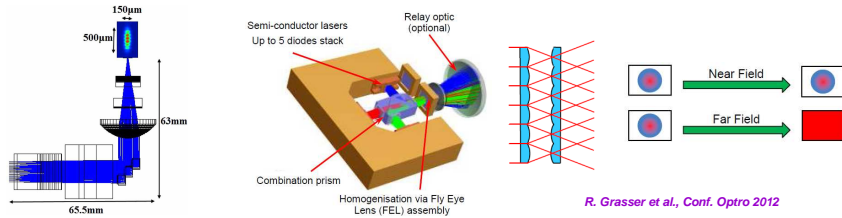
Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

14

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Lasers à semi-conducteurs (diodes laser)

- Mise en forme et homogénéisation des faisceaux
 - Optiques complexes



- Fonctionnement impulsionnel d'une diode laser
 - Gain switch pulses longs
 - adaptation d'impédance nécessaire → 100 ns
 - Gain switch pulses courts
 - limitation de la densité de porteurs (i.e. de l'inversion de population) → qq. 10 ps accessible mais P_{moj} environ 100x inférieure

15

ONERA

Lasers à semi-conducteurs (diodes laser)

- Fonctionnement impulsionnel d'une diode laser
 - Pulses longs

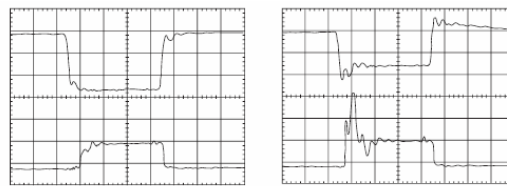
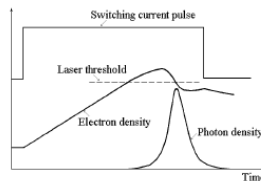


Figure 1A: 45 ohm load in series with laser diode (good load matching)

Figure 1B: 25 ohm load in series with laser diode (load mismatch)

- Pulses courts



D.M. Pataca et al., *J. Microwave and Optoelec.* 1 (1), 46 (1997)

16

ONERA

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Bilan et retour sur les contraintes d'intégration système
6. Conclusion - perspectives

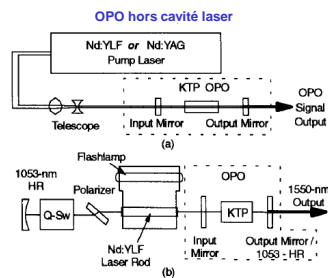
Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

17

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

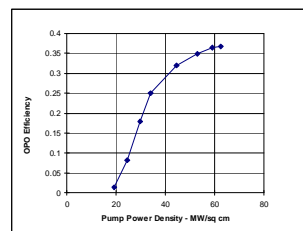
Solution OPO : performances et limites

- OPO KTP NCPM (Non Critical Phase Matching)
 - pompe 1064 nm → signal 1576 nm + complémentaire > 3 μm



OPO intracavité laser
Epuls = 450 mJ
pour 1,1 J de pompe

G.A. Rines et al., Proc. ASSL 1994 vol. 20, 461 (1994)



Saturation de l'efficacité
L.S. Lingvay et al., Proc. SPIE 3928, 52 (2000)
Efficacité max. = environ 40 %
M² très forts
par ex. ici M² = 47

- Fonctionne même à haute cadence *W. Zendzian et al., Proc. SPIE 5958, 595822 (2005)*
 ex. OPO KTP intracavité 40 kHz, 4,5 ns durée pulse
 (Nd:YVO₄ seul 17 ns), 1,5 W (= 40 μJ /pulse) pour 13,5 W pompe fibrée

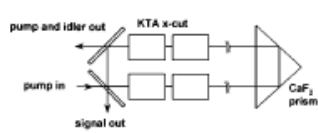
Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

18

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

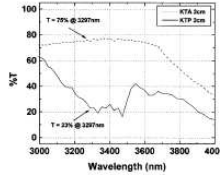
Solution OPO : performances et limites

- OPO KTA NCPM (Non Critical Phase Matching)
 - pompe 1064 nm → signal 1535 nm + complémentaire > 3 μm

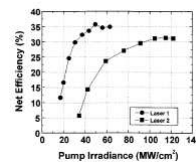


Cavité en anneau

M.S. Webb et al., *Opt. Lett.* 23 (15), 1161 (1998)



Absorption > 3 μm
KTP vs. KTA



Saturation de l'efficacité

Epuls = 330 mJ
pour 1,3 J pompe
cadence 100 Hz

Efficacité max. = 30 - 35 %

M² très forts
par ex. ici M² = 30 - 41

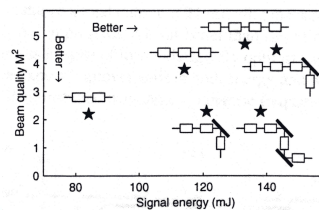
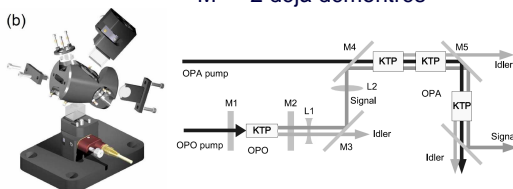
- fonctionne même à haute cadence
 - attention à la puissance moyenne (effets de lentille thermique), à la puissance crête (gain paramétrique) et à la durée d'impulsion (nombre max. d'allers-retours dans la cavité)

19

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Solution OPO : performances et limites

- OPO KTP
 - pompe 1064 nm → signal 1576 nm + complémentaire > 3 μm
 - pompe 1064 nm → signal et complémentaire autour de 2 μm aussi possible mais pas NCPM donc un peu moins efficace
- Comment améliorer le M²
 - Deux approches possibles
 - RISTRA : 150 mJ, rendement 35 %, M² ~ 4 déjà démontrés, architecture protégée par brevet US *D.J. Armstrong et al., Proc. SPIE 5337, 71 (2004)*
 - MOPA : 140 mJ, rendement 23 % à 2,1 μm (→ 30 % à 1,55 μm), M² ~ 2 déjà démontrés *G. Arisholm et al., Opt. Express 12 (18), 4189 (2004)*

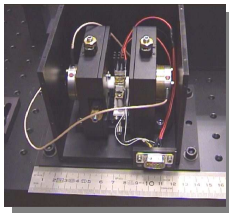


20

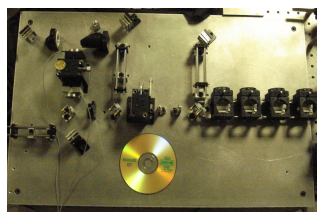
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Solution OPO : performances et limites

- OPO KTP NCPM (Non Critical Phase Matching)
 - pompe 1064 nm → signal 1576 nm + complémentaire > 3 μm
- Le "petit" détail à ne pas oublier
 - Efficacité maximale 30 – 40 % et moins si M^2 faible
 - laser de pompe à 1064 nm très forte énergie
 - possible contrainte refroidissement et Q-switch passifs



Encombrement ~ 1 litre



Encombrement ~ 50 litres



Encombrement ~ 1000 litres

Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

21

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser à fibre

- Fibre dopée Er ou Ho → respectivement 1,5 μm et 2,1 μm
 - Pompage par d'autres lasers (diode 980 nm et laser Tm:fibre)
 - Co-dopage Er-Yb ou Tm-Ho ou émission Tm à 2040 nm
- Avantages des lasers à fibres "tout fibre"
 - Longueur du milieu actif = plusieurs mètres
 - gain élevé, thermique plus simple (échauffement réparti longitudinalement), qualité de faisceau (filtrage spatial)
 - Source "tout fibre" = composants soudés ne se désalignent pas
 - Mais faisceau confiné dans le cœur de fibre → limité à des puissances crêtes de quelques 10 kW
- Des sources faible énergie par pulse pour l'imagerie par balayage
 - Forte cadence accessible
 - Durée de pulse de qq. ns difficile à obtenir (on est plutôt > 10 ns)

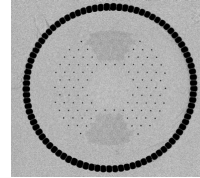
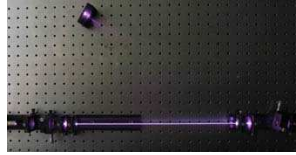
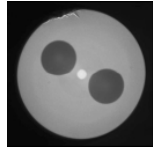
Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

22

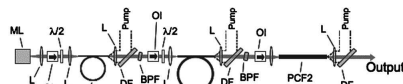
ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser à fibre

- Pour obtenir des puissances crêtes > 1 MW
 - Utilisation d'amplificateurs à fibre dite "rod-type"



Fibre amplificatrice classique

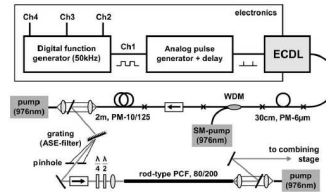


Aculight - Epuls = 4,3 mJ – 1 ns
soit 4,5 MW crête, @ 10 kHz

C.D. Brooks et al., *Appl. Phys. Lett.* 89 (11), 111119 (2006)

Fibre rod-type NKT Photonics

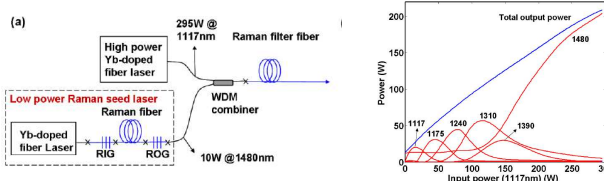
O. Schmidt et al., *Opt. Lett.* 34 (3), 226 (2009)



Jena - Epuls = 1,2 mJ – 2,2 ns
soit > 500 kW crête, @ 50 kHz

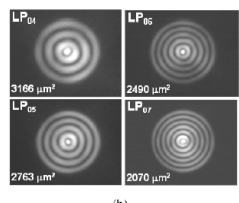
Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser à fibre

- Amplification de modes d'ordres supérieurs (HOM) dans une fibre dopée Er
 - Pompage par laser Raman fibré à 1480 nm (optimisé)

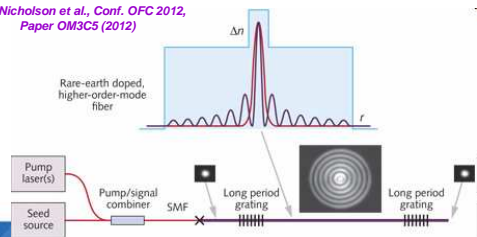


V.R. Supradeepa et al., *Opt. Express* 21 (6), 7148 (2013)

- Conversion de mode LP_{01} – LP_{0n} et amplification LMA

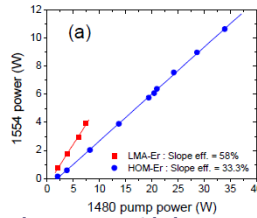


J.W. Nicholson et al., *Conf. OFC 2012, Paper OM3C5* (2012)



Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser à fibre

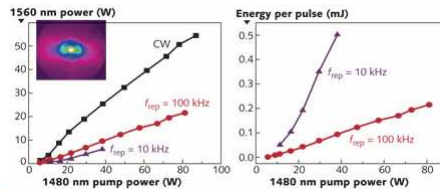
- Amplification de modes d'ordres supérieurs (HOM) dans une fibre dopée Er
 - Première démonstration en 2010 → 107 μJ , 1 ns, 100 kHz (11 W)



J.W. Nicholson et al.,
Conf. CLEO 2010,
Paper CPDB5 (2010)

- Résultats confirmés et complétés en 2012

J.W. Nicholson et al.,
Conf. OFC 2012,
Paper OM3C5 (2012)



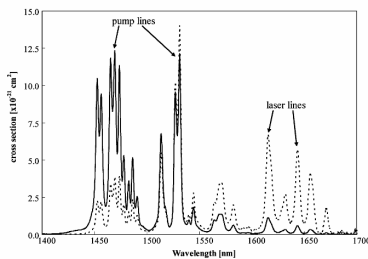
Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

25

ONERA

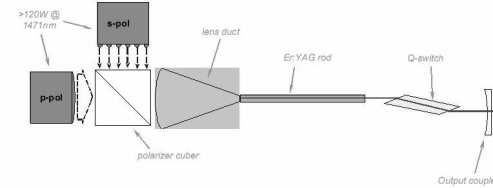
Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser solide

- Er:YAG ou Ho:YAG → respectivement 1,6 μm et 2,1 μm
 - Pompage résonnant à 1532 nm et 1900 nm

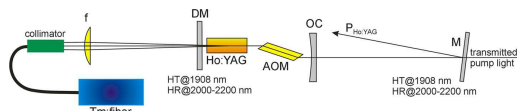


Spectres d'absorption et d'émission de l'Er:YAG

S.D. Setzler et al., IEEE J. Sel. Top. Quant. Elec. 11 (3), 645 (2005)



Configuration typique d'une source Er:YAG solide pompée par diode



Configuration typique d'une source Ho:YAG solide pompée par laser fibré

J. Kwiatkowski et al., Appl. Phys. B 114 (3), 395 (2014)

Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

26

ONERA

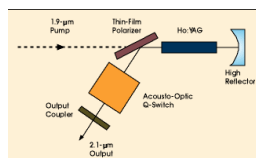
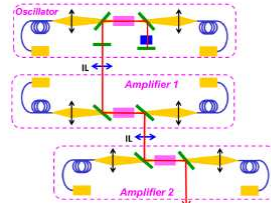
Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser solide

- Er:YAG ou Ho:YAG → respectivement 1,6 μm et 2,1 μm
 - Pompage résonnant à 1470 ou 1532 nm et 1900 nm

- Sources pour l'imagerie flash

- 120 mJ Er:YAG, 30 Hz, 100 ns, $M^2 < 4$, $L_{\text{cavité}} = 76 \text{ cm}$!, efficacité
- 50 mJ Er:YAG, qq. 10 Hz, qq. 10 ns obtenus par plusieurs équipes
- 50 mJ Ho:YAG, 60 Hz, 14 ns, $M^2 < 1,3$

C. Larat et al., Opt. Express 22 (5), 4861 (2014)



BAE Systems, résultat unique, publié en conf. uniquement...

- Pmoy de qq. 10 W couramment obtenues en Ho:YAG avec de bonnes efficacités

Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CHRS – 7/04/2014

27

ONERA
THE FRENCH EXPERIMENTAL LAB

Solution laser solide dopé Er ou Ho – laser solide

- Er:YAG ou Ho:YAG → respectivement 1,6 μm et 2,1 μm
 - Pompage résonnant à 1470 ou 1532 nm et 1900 nm

- Sources pour l'imagerie par balayage

- Pmoy 1 – 10 W, Er:YAG, 1 - 10 kHz, ~30 ns, $M^2 < 2$
- Efficacité 20-30 %
- Pmoy 4- 20 W, Ho:YAG, 10 - 100 kHz, < 30 ns, $M^2 < 1,3$, plusieurs équipes
- Produit IPG Photonics Ho:YAG 1-50 mJ, 10-100 ns, 100 Hz – 10 kHz, $M^2 < 1,2$
- 1 résultat Ho:YAG, 2,18 mJ, 8,8 ns, 4 kHz
0,8 mJ, 20 ns, 15 kHz
 $M^2 < 1,5$



Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CHRS – 7/04/2014

28

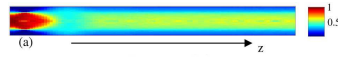
ONERA
THE FRENCH EXPERIMENTAL LAB

Solution laser solide dopé Er – fibre cristalline

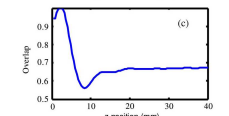
- Architecture permettant d'optimiser le recouvrement du faisceau de pompe et du faisceau amplifié
 - Démontrée en Nd:YAG ou Yb:YAG (1 μm) et en Er:YAG (1,5 μm)



Format type d'une fibre cristalline – diamètre < 1 mm



(a)

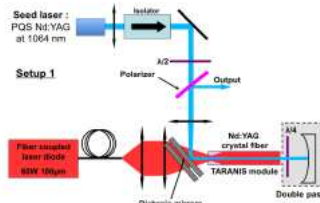


(c)

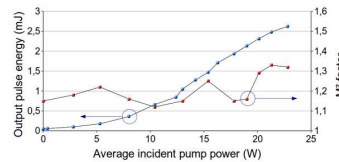
Guidage de la pompe et recouvrement avec le laser



Modules Taranis de refroidissement des fibres cristallines Fibercryst



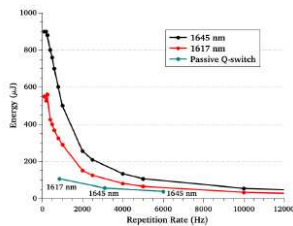
I. Martial et al., Opt. Express 19 (12), 11667 (2011)



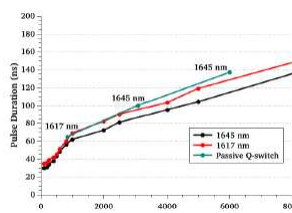
Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

Solution laser solide dopé Er – fibre cristalline

- Laser à fibre cristalline Er:YAG
 - Très compact
 - Pmoy accessible 2- 5 W, cadence 100 Hz – 100 kHz, 30-40 ns en configuration laser



A. Aubourg et al., Conf. Optro 2014



- Configuration amplificateur injecté par micro-laser très intéressante en particulier par sa compacité
 - En Nd:YAG (1 μm), injecteur 80 mW, 1 kHz, 450 ps \rightarrow 2,7 mJ, 1 kHz, 450 ps (6 MW crête)
 - En Nd:YAG (1 μm), injecteur 350 mW, 100 kHz, 1 ns \rightarrow 12 W moyens (= 120 μJ /pulse), 100 kHz, 1 ns

I. Martial et al., Opt. Express 19 (12), 11667 (2011)

Imagerie laser 3D embarquée – Atelier LAS/CNRS – 7/04/2014

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Bilan et retour sur les contraintes d'intégration système
6. Conclusion - perspectives

Maturité et applicabilité des technologies laser

- Maturité et applicabilité pour l'imagerie active 3D
 - On distingue **imagerie flash** vs. **imagerie par balayage**
 - On distingue **porteur "périssable"** vs. **porteur "pérenne"**
- OPO
 - **Forte énergie par pulse** facilement accessible
 - **Haute cadence** réalisable, l'OPO suit le laser de pompe
 - **Qualité de faisceau** faible en configuration compacte
 - Architectures bas M² encombrantes et complexes
 - **Laser de pompe** forte énergie **encombrant**
- Laser à fibre Er ou Tm/Ho
 - **Robustesse et compacité** en configuration "tout fibre"
 - **Qualité de faisceau** très bonne, **refroidissement** facile
 - **Haute cadence** réalisable facilement
 - **Faible énergie** par pulse, **basse cadence** difficile
 - **Durée pulse** < 10 ns difficile → "rod-type" complexe + volume

Maturité et applicabilité des technologies laser

- Lasers solides Er ou Ho
 - Forte énergie par pulse accessible
 - Haute cadence réalisable, mais puissance moyenne limitée
 - Faible efficacité à forte énergie par pulse
 - Efficacité tout régime limitée
 - Durée pulse faible difficile car longueur de cavité courte exigée
- Laser à fibre HOM
 - Robustesse et compacité en configuration "tout fibre"
 - Puissance crête acceptée supérieure car LMA
 - Potentiellement → mêmes avantages que les fibres sans les inconvénients
- Laser à fibre cristalline
 - Durée pulse potentiellement réduite car cavités courtes
 - Fort potentiel en configuration amplificateur injecté par μ -laser
 - Non compatible forte énergie → mais peut être amplifié

Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

33

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Maturité et applicabilité des technologies laser

Tableau récapitulatif :

Technologie laser	Imagerie flash	Imagerie balayage	Porteur périssable	Porteur pérenne
Diodes laser	+	+	ok/no	ok
OPO	++	+	no	ok
Fibres	- + matrice	++	ok	ok
Solides	+	+	no	ok
Fibres HOM	+ ++ matrice	++	ok	ok
Fibres cristallines	--	++	ok	ok

Imagerie laser 3D embarquée - Atelier LAS/CNRS - 7/04/2014

34

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB

Plan de l'exposé

1. L'imagerie active 3D embarquée et ses spécificités
2. Choix de la longueur d'onde et des technologies laser
3. Quelques technologies un peu obsolètes ou mal adaptées
4. Performances atteignables pour les technologies les plus prometteuses
5. Les contraintes liées à l'intégration système
6. Conclusion - perspectives

Conclusions - Perspectives

- Plusieurs technologies laser concurrentes
 - Diodes laser offrent un bon rapport performance vs. coût et encombrement mais limitées en portée
 - OPO KTP NCPM → reste encore aujourd'hui la solution la mieux adaptée pour l'imagerie flash
 - Technologies fibre → compacité et robustesse idéales pour porteur "périssable"
 - Technologies fibres cristallines et fibres HOM encore à TRL bas mais méritent qu'on évalue leur potentiel
- Perspectives
 - OPO = à maturité, pas de progression technologique sensible attendue
 - Mise en matrice d'autres sources que des diodes peut offrir un intérêt pour l'imagerie flash
 - Ne pas oublier les sources picoseconde (OPO, fibres, solides, sub-ns) car faible énergie par pulse mais cadences > 10 MHz possibles