

COMMENT CHOISIR UN AMPLIFICATEUR À FIBRE OPTIQUE ?

Christophe VITRE¹, Maud JAOUEN¹, Philippe DOARE¹, Mélanie LESEIGNOUX^{2,*}

¹ Keopsys Industries, 2 rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

² Lumibird, 2 rue Paul Sabatier, 22300 Lannion, France

*mleseignoux@lumibird.com



Les amplificateurs à fibre optique se sont d'abord développés pour les télécommunications optiques pour régénérer le signal atténué dans les fibres de ligne. Aujourd'hui, ces systèmes, adaptés aux régimes continus, modulés et impulsionnels, sont largement répandus dans l'industrie civile, militaire, spatiale ainsi que dans le secteur scientifique. Ils peuvent répondre aux exigences d'applications aussi diverses que la communication en espace libre, le LIDAR, la spectroscopie ou la biophotonique.

Un amplificateur optique à fibre est un dispositif qui permet d'amplifier un signal lumineux sans passer par une conversion électrique. Contrairement à un laser, l'amplificateur ne possède pas de source propre, il s'agit essentiellement d'un « milieu à gain », constitué d'une fibre optique de silice dopée aux terres rares pompée optiquement par une ou plusieurs sources appelées diodes de pompage. Le signal est amplifié par émission stimulée lorsque l'inversion de population des ions excités dans la fibre est réalisée. Le modèle le plus

commun est l'amplificateur à fibre dopée Erbium (EDFA) qui permet d'amplifier la lumière dans la bande C (1529 nm -1567 nm) et la bande L (1568 nm -1610 nm). Dans cet article nous allons tout d'abord présenter les grands principes des amplificateurs à fibre optique avant de nous intéresser plus précisément aux différents paramètres clés inhérents à cette technologie.

ARCHITECTURE TYPIQUE

Selon la puissance de sortie et le gain souhaités, l'amplificateur à fibre peut comporter un ou plusieurs étages successifs d'amplification. Pour les étages de pré-amplification ou les amplificateurs de faible puissance

(≤ 200 mW) on utilise des fibres dopées simple gaine (la pompe et le signal utile se propagent uniquement dans le cœur monomode de la fibre). Pour les étages « booster » nécessitant des puissances élevées, on privilégie la fibre dopée double gaine (le signal utile se propageant dans le cœur monomode de la fibre et la pompe dans la gaine multimode).

Le signal utile et la pompe sont injectés dans la fibre dopée par le biais de multiplexeurs ou combineurs optiques. Selon l'architecture, le pompage peut être co ou contra-propagatif. Des isolateurs sont placés en entrée et en sortie de chaque étage d'amplification. Ces isolateurs bloquent l'émission spontanée

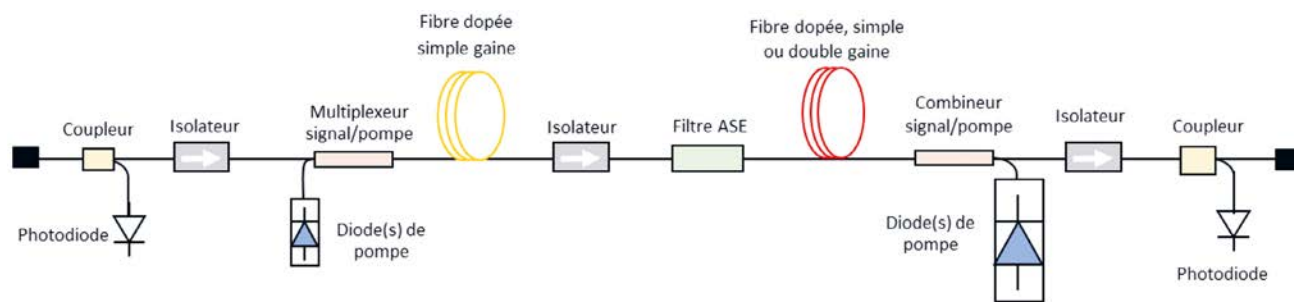


Figure 1. Architecture typique d'un amplificateur à fibre avec filtre intégré

amplifiée contra-propagative et les réflexions parasites internes ou externes à l'amplificateur.

Des coupleurs de prélèvement associés à une photodiode sont ajoutés afin de mesurer la puissance en entrée et en sortie de l'appareil. Une électronique appropriée permet d'asservir l'amplificateur en courant, en puissance ou en gain.

Afin de minimiser l'émission spontanée amplifiée, un filtre peut être inséré en inter-étage. Le signal à amplifier est injecté dans l'amplificateur à travers différents types de connecteurs (FC/APC, FC/SPC, LC/APC...). Le connecteur de sortie peut être du même type ou d'un type différent, comme un collimateur pour les applications de haute puissance en espace libre.

FIBRE DOPÉE ET GAMME DE LONGUEUR D'ONDE D'AMPLIFICATION

Selon la gamme de longueur d'onde d'amplification, différents ions terres rares sont insérés dans le cœur de la fibre optique amplificatrice. Chaque dopant nécessite une longueur d'onde de pompage bien particulière. Des co-dopants peuvent être également rajoutés. Ainsi l'Erbium est souvent associé à l'Ytterbium dans les fibres double gaine. En garantissant une meilleure absorption de la lumière de pompage, cette association permet d'augmenter l'efficacité de la fibre. Les fibres double gaine co-dopée Er/Yb sont privilégiées lorsqu'on souhaite atteindre des puissances > 200 mW. Ce co-dopage présente néanmoins l'inconvénient de réduire la bande d'amplification en début de la bande C.

POLARISATION ET FIBRES À MAINTIEN DE POLARISATION

Pour certaines applications comme le LIDAR cohérent ou encore la spectroscopie, il est nécessaire de conserver la polarisation de la source tout au long de la chaîne d'amplification. Dans ce cas, les fibres passives et actives qui équipent l'amplificateur sont à maintien de polarisation.

Pour maintenir la polarisation, il faut créer une biréfringence dans la fibre. Il existe plusieurs types de fibres mais les plus répandues sont celles de type Panda. Pour cette dernière, la biréfringence est obtenue en insérant des barreaux de contrainte dans la préforme.

Sur le principe, il est possible d'amplifier suivant les deux axes de polarisation, appelés axe lent et axe rapide. Cependant, afin de garantir un bon taux d'extinction entre les deux

axes, l'amplificateur intègre généralement des éléments polarisants qui bloquent la lumière se trouvant sur l'axe rapide et n'autorise ainsi qu'une amplification suivant l'axe lent. Dans ce cas, le taux d'extinction peut atteindre des valeurs supérieures à 20 dB.

CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES

Plusieurs paramètres essentiels sont à considérer pour sélectionner un amplificateur optique : la puissance de sortie, le gain, la gamme de longueur d'onde, la puissance d'entrée, la polarisation... Mais d'autres facteurs comme le mode d'utilisation, la platitude de gain, le facteur de bruit, le rapport signal optique sur bruit, le bruit d'intensité ou la qualité de faisceau peuvent également intervenir.

- Le **mode d'utilisation** peut être continu ou pulsé. En mode continu, l'amplificateur est capable d'amplifier des signaux soit continus, soit modulés jusqu'à des très hauts débits (plusieurs dizaines de GHz, avec des rapports cycliques proches de 50 %). L'amplificateur est « transparent » au débit et supporte la plupart des formats de modulation utilisés en ●●●

Tableau 1. Liste non exhaustive d'ions dopants en fonction de leurs bandes d'émission et de pompage.

DOPAGE	BANDE D'ÉMISSION	POMPAGE
Ytterbium (Yb)	1030 – 1154 nm	915 – 975 nm
Erbium (Er)	1529 – 1610 nm	980 ou 1480 nm
Erbium/Ytterbium (Er/Yb)	1535 – 1620 nm	915 - 975 nm
Thulium (Tm)	1900 – 2100 nm	793 nm
Holmium (Hm)	2100 – 2200 nm	890 nm
Thulium/Holmium (Tm/Hm)	2100 – 2200 nm	793 nm

D'autres gammes de longueur d'onde, et notamment le domaine du visible et du proche UV, sont accessibles en rajoutant en sortie de l'amplificateur un cristal doubleur ou mixeur de fréquence.

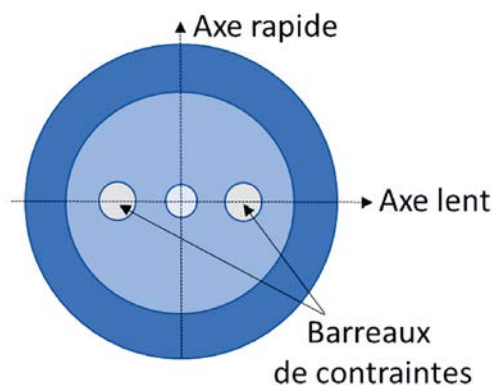


Figure 2. Section d'une fibre à maintien de polarisation de type Panda

Les effets non linéaires les plus courants sont dus à l'effet Kerr, qui induit une modification locale de l'indice de réfraction au passage de la lumière, ou à des diffusions inélastiques avec des photons acoustiques (diffusion Brillouin stimulée) ou optiques (diffusion Raman stimulée).

transmission numérique. Notons qu'en mode continu, l'amplificateur optique de forte puissance ne supporte pas des absences trop longues de signal d'entrée au risque d'être endommagé. Le mode pulsé est défini par un rapport cyclique très faible (< 1 %) ce qui se traduit par de fortes puissances crêtes. Pour ce mode de fonctionnement, il est nécessaire d'adapter les architectures des amplificateurs afin de repousser le seuil d'apparition des effets non linéaires.

• **La platitude de gain** est un critère important lorsque, pour maximiser la quantité d'information à transmettre, la source utilisée comporte de nombreux canaux répartis sur toute la bande C (ou L). L'amplificateur doit avoir un gain uniforme sur toute cette bande ; c'est ce que l'on appelle la platitude de gain. Dans ces architectures, un filtre égaliseur de

gain est ajouté en inter-étage pour compenser la réponse naturelle des fibres Erbium.

- Le **facteur de bruit** ou « *Noise Figure* », exprimé en dB, permet de mesurer la dégradation du signal incident. Ce facteur est lié à la perte issue des composants en entrée d'amplificateur et à la manière dont se réalise l'inversion de population. Un signal d'entrée trop fort par exemple sature trop rapidement le milieu amplificateur ce qui dégrade cette valeur. La valeur minimale théorique est de 3 dB.
- Le **rapport signal optique sur bruit** (OSNR) caractérise le rapport entre la puissance maximale et le niveau de bruit essentiellement dû à l'émission spontanée amplifiée. Ce niveau de bruit est d'autant plus important que la puissance d'entrée est faible ou en limite des bandes d'amplification.

Tableau 2. Applications et critères de sélection

TYPE	APPLICATIONS	FACTEUR DE BRUIT	PLATITUDE DE GAIN	RIN	LARGEUR SPECTRALE	STABILITÉ DE PUISSANCE	SENSIBILITÉ EN T°C	STABILITÉ D'IMPULSION	QUALITÉ DE FAISCEAU	CONSOMMATION
CW OU MODULÉ	Télécom, réseaux fibrés	x	x			x			x	x
	Spectroscopie, refroidissement d'atomes			x	x	x			x	
	Biophotonique, médical					x			x	x
	Optique non linéaire	x		x	x	x			x	
	ADAS					x	x		x	x
PULSÉ	LIDAR cohérent			x	x		x	x	x	x
	ADAS						x	x	x	x
	Scanning 3D						x	x	x	x

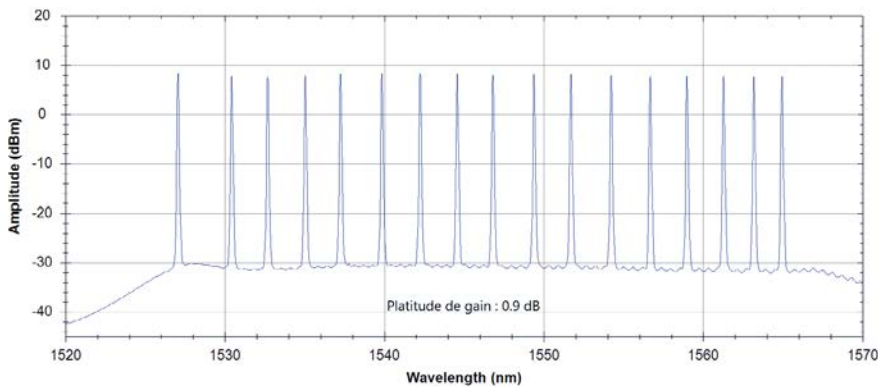


Figure 3. Réponse spectrale typique d'un amplificateur sur la bande C sans rajout de filtre égaliseur de gain.

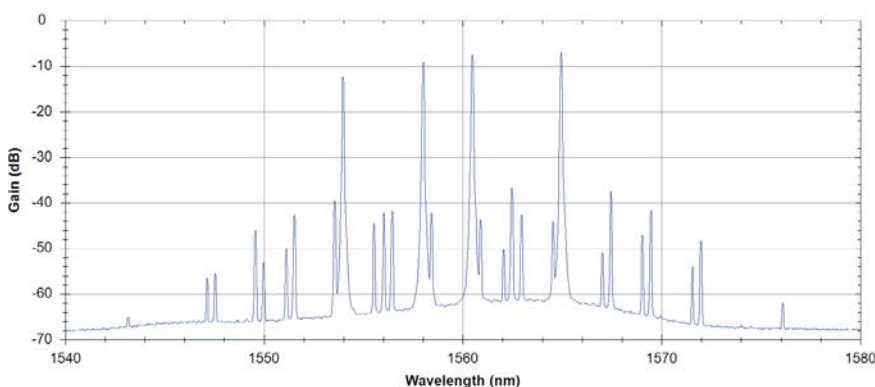
- Le **bruit d'intensité relative** (RIN) quantifie la densité spectrale de puissance optique sur une bande de fréquence donnée et met en évidence tous les bruits parasites présents sur cette bande. Il dépend fortement de la source utilisée, du bruit de battement signal-ASE et est influencé par l'environnement; Notamment l'électronique de contrôle doit être optimisée pour ne pas faire apparaître de fréquences parasites indésirables.
- La **qualité de faisceau**, souvent exprimée au travers de la valeur du M^2 , et la stabilité de pointé sont deux critères importants notamment en Lidar et en imagerie. Tant que le système utilise des fibres monomodes, dont le diamètre de cœur est de l'ordre de 5 à 8 μm selon la gamme spectrale, le mode

guidé possède une très bonne qualité spatiale avec un M^2 proche de 1. Dans le cas de forte puissance et notamment en régime impulsionnel, il est souvent nécessaire de réduire la densité de puissance surfacique pour repousser le seuil des effets non linéaires [1]. Le recours à des fibres de plus large diamètre (LMA pour « *Large Mode Area* ») est largement répandu bien qu'elles soient légèrement multimodes. Elles ont comme inconvénient d'être sensibles aux courbures et il est donc conseillé de fixer la fibre de sortie pour limiter les instabilités.

LES EFFETS NON LINÉAIRES

Au-delà d'un certain seuil de puissance ou d'énergie, des effets non linéaires apparaissent et dégradent la réponse de l'amplificateur. Des formats de ●●●

Figure 4. Exemple de mélange à 4 ondes pour un amplificateur de 10 W à maintien de polarisation.



- Veille technologique et conseil
- Etudes de faisabilité
- Prototypage et sous traitance
- Support à l'intégration industrielle
- Bureau d'études techniques
- Systèmes d'usinage sur mesure

Les amplificateurs et lasers à fibre sont donc facilement intégrables dans des équipements industriels et de nombreux systèmes embarqués (hélicoptères, drones, véhicules). Des modèles spatiaux embarqués sur satellites sont également réalisables en adaptant l'architecture par rapport au profil de mission désiré (taux de radiation, durée de vie...)

modulation spécifiques peuvent faire apparaître des effets de phase comme la conversion « FM-AM » (*Frequency Modulation – Amplitude Modulation*) dans laquelle une variation de fréquence induit une variation d'amplitude. Les effets non linéaires les plus courants sont dus à l'effet Kerr, qui induit une modification locale de l'indice de réfraction au passage de la lumière, ou à des diffusions inélastiques avec des photons acoustiques (diffusion Brillouin stimulée) ou optiques (diffusion Raman stimulée) :

- **L'auto-modulation de phase** est surtout importante dans le cas d'une source impulsionnelle.
- **Le mélange à 4 ondes** apparaît dès que plusieurs longueurs d'onde sont envoyées dans l'amplificateur. Elles peuvent se recombinaison et faire apparaître de nouvelles longueurs d'onde.
- La **diffusion Brillouin stimulée** se manifeste notamment dans le cas de sources de faibles largeurs spectrales (inférieures ou de l'ordre du MHz). Cet effet s'auto-entretient et s'amplifie au-delà d'un certain seuil. Etant contra-propagatif, ce signal revient vers les étages d'amplification et peut être destructeur [2], [3]. Pour repousser ce seuil, il faut à la fois limiter la longueur de fibre optique et utiliser des fibres de large diamètre de type LMA.
- La **diffusion Raman stimulée** entraîne une distribution de l'énergie majoritairement vers les hautes longueurs d'onde par rapport au signal incident.

Un autre effet limitant à prendre en compte est la dispersion chromatique

qui devient non négligeable dans le cas d'impulsions très courtes (ordre de la ps) et larges spectralement. L'impulsion est déformée à cause de la différence de vitesse de propagation entre les basses et les hautes longueurs d'onde.



CONCLUSION

Les amplificateurs à fibre permettent d'amplifier un signal de la gamme 1 à 2 μm. Ils sont utilisables en régime continu, pulsé et amplifient des signaux modulés à très haut débit. Les produits fibrés ont l'avantage d'être plutôt compacts et légers et ne nécessitent pas de maintenance. Un simple refroidissement par conduction ou par flux d'air est suffisant jusqu'à des puissances de l'ordre de 20 W. Les amplificateurs et lasers à fibre sont donc facilement intégrables dans des équipements industriels et de nombreux systèmes embarqués (hélicoptères, drones, véhicules). Des modèles spatiaux embarqués sur satellites sont également réalisables en adaptant l'architecture par rapport au profil de mission désiré (taux de radiation, durée de vie...). ●

Figure 5. Les amplificateurs à fibre optique sont disponibles en modules, facilement intégrables.

FOURNISSEUR	SITE INTERNET	PAYS
Accelink	http://en.accelink.com/	Chine
Advalue Photonics	https://www.advaluephotonics.com/	USA
Amonics	https://www.amonics.com/	Chine
BKTEL	http://www.bktel-photonics.com/	France
Connet Lasers	http://en.connet-laser.com/	Chine
Cybel	https://cybel-llc.com/	USA
Fiberlabs	https://www.fiberlabs.com/	Japon
IPG	https://www.ipgphotonics.com/en	USA
Licomm	https://www.licomm.com/	Corée
Lumibird	https://www.keopsys.com/	France
MPB Communications	https://mpbcommunications.com/	Canada

RÉFÉRENCES

- [1] A. Dolfi-Bouteyre *et al*, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **15**, 441 - 450 (2009)
- [2] G. Kulcsar *et al*, IEEE Photonics Technol. Lett. **15**, 801 - 803 (2003)
- [3] Y. Jaouen *et al*, Optical Fiber Commun. Conference, paper FB6 (2003)