

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

TR 61292-3

Première édition
First edition
2003-06

Amplificateurs optiques –

**Partie 3:
Classification, caractéristiques
et applications**

Optical amplifiers –

**Part 3:
Classification, characteristics
and applications**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TR 61292-3:2003

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC**

TR 61292-3

Première édition
First edition
2003-06

Amplificateurs optiques –

Partie 3: Classification, caractéristiques et applications

Optical amplifiers –

Part 3: Classification, characteristics and applications

© IEC 2003 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
0 Domaine d'application.....	10
1 Arbre généalogique et abréviations d'amplificateur optique.....	10
2 Bandes de fonctionnement d'amplificateurs optiques	12
3 Amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA).....	16
3.1 Amplificateurs à fibre de silice dopée à l'erbium (EDFA ou EDSFA).....	16
3.2 Amplificateurs à fibre de fluorure dopée à l'erbium (EDFA).....	22
3.3 Amplificateurs à fibre de tellurure dopée à l'erbium (EDTFA).....	24
3.4 Amplificateur à fibre dopée à l'ytterbium/erbium (EYDFA).....	28
4 Amplificateurs à fibre non dopée à l'erbium	32
4.1 Amplificateurs à fibre de fluorure dopée au praséodyme (PDFFA).....	32
4.2 Amplificateurs à fibre de fluorure dopée au thulium (TDFFA).....	36
5 Amplificateurs de Raman à fibre (FRAs)	40
5.1 Introduction	40
5.2 Caractéristiques générales de FRA.....	40
5.3 Performances type de FRA.....	42
5.4 Applications de FRA	44
6 Amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SOAs)	46
6.1 Introduction	46
6.2 Caractéristiques générales de SOA.....	48
6.3 Performances type de SOA.....	48
6.4 Applications de SOA.....	50
7 Amplificateurs à guide d'ondes dopé à l'erbium (EDWA).....	52
7.1 Introduction.....	52
7.2 Caractéristiques générales d'EDWA	52
7.3 Performance d'EDWA.....	54
7.4 Applications d'EDWA.....	54
Figure 1 – Niveaux d'énergie abrégés et primaires pour EDFA.....	18

CONTENTS

FOREWORD	5
INTRODUCTION	9
0 Scope	11
1 Optical amplifier family tree and abbreviations	11
2 Optical amplifier operating bands	13
3 Erbium doped fibre amplifiers (EDFAs)	17
3.1 Erbium doped silica fibre amplifiers (EDFAs or EDSFAs)	17
3.2 Erbium doped fluoride fibre amplifiers (EDFFAs)	23
3.3 Erbium doped tellurite fibre amplifiers (EDTFAs)	25
3.4 Erbium/ytterbium doped fiber amplifiers (EYDFA)	29
4 Non-erbium doped fibre amplifiers	33
4.1 Praseodymium doped fluoride fibre amplifiers (PDFFAs)	33
4.2 Thulium doped fluoride fibre amplifiers (TDFFAs)	37
5 Fibre Raman amplifiers (FRAs)	41
5.1 Introduction	41
5.2 FRA general characteristics	41
5.3 FRA typical performances	43
5.4 FRA applications	45
6 Semiconductor optical amplifiers (SOAs)	47
6.1 Introduction	47
6.2 SOA general characteristics	49
6.3 SOA typical performances	49
6.4 SOA applications	51
7 Erbium doped waveguide amplifiers (EDWAs)	53
7.1 Introduction	53
7.2 EDWA general characteristics	53
7.3 EDWA performance	55
7.4 EDWA applications	55
Figure 1 – Abridged and primary energy levels for EDFAs	19

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

AMPLIFICATEURS OPTIQUES –**Partie 3: Classification, caractéristiques et applications****AVANT-PROPOS**

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent rapport technique peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

La CEI 61292-3, qui est un rapport technique, a été établie par le sous-comité 86C: Systèmes et dispositifs actifs à fibres optiques, du comité d'études 86 de la CEI: Fibres optiques.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
86C/407/DTR	86C/480A/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de ce rapport technique.

La CEI 61292 comprend les parties suivantes, présentées sous le nouveau titre général *Amplificateurs optiques*:

Partie 1: Paramètres des composants pour amplificateurs

Partie 2: Theoretical background for noise figure evaluation using the electrical spectrum analyzer (publiée en anglais seulement)

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

OPTICAL AMPLIFIERS –

Part 3: Classification, characteristics and applications

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 61292-3, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 86C: Fibre optic systems and active devices, of IEC technical committee 86: Fibre optics.

The text of this technical report is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
86C/407/DTR	86C/480A/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical report can be found in the report on voting indicated in the above table.

IEC 61292 consists of the following parts, under the new general title *Optical amplifiers*:

Part 1: Parameters of amplifier components

Part 2: Theoretical background for noise figure evaluation using the electrical spectrum analyzer

Les normes futures de cette série porteront dorénavant le nouveau titre général cité ci-dessus. Le titre des normes existant déjà dans cette série sera mis à jour lors d'une prochaine édition.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2009. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61292-3:2003

Withdrawing

Future standards in this series will carry the new general title as cited above. Titles of existing standards in this series will be updated at the time of the next edition.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2009. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

Withdrawn
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TR 61292-3:2003

INTRODUCTION

L'arrivée rapide à maturité de l'amplificateur à fibre dopée à l'erbium, EDFA, attire de nombreux nouveaux types d'amplificateurs optiques sur le marché et elle stimule également de nombreux nouveaux types de recherche sur les amplificateurs optiques à fibre et sans fibre dans les laboratoires. Cela a engendré la création d'un grand nombre d'abréviations, parfois largement utilisées dans des documentations. Le présent rapport est destiné à promouvoir l'utilisation cohérente des abréviations des amplificateurs optiques et à établir un arbre généalogique pour la classification des amplificateurs optiques, y compris ceux faisant toujours l'objet de recherche dans les laboratoires, de sorte que leurs similarités et leurs différences puissent être aisément identifiées. Le rapport comprend également une brève description de chaque famille d'amplificateurs, mettant en évidence leurs propriétés génériques, performances et applications au moment de la rédaction. Cependant, il importe de signaler que dans une telle technologie à évolution rapide, il convient que le lecteur se réfère toujours aux dernières conférences et publications concernant les résultats des règles de l'art.

Des amplificateurs à fibres optiques peuvent soit être groupés par leur dopant fluorescent soit par leur hôte pour fibres. L'arbre généalogique décrit dans ce rapport utilise le groupement par dopant fluorescent du fait de raisons historiques, c'est-à-dire que l'amplificateur optique bien établi sur le marché est appelé amplificateur à fibre dopée à l'erbium, EDFA, et n'est pas appelé amplificateur à fibre de silice dopée à l'erbium. Comme on peut le voir dans ce rapport, l'erbium peut également être utilisé en tant que dopant dans d'autres hôtes pour fibres, tels que le fluorure et le tellure ainsi qu'en tant que dopant ou un co-dopant dans la fibre de silice. Avec la saturation rapide de la capacité de transmission dans la fenêtre d'erbium, il existe un grand intérêt pour la recherche de nouvelles fibres actives, qui peuvent fournir un gain optique à l'extérieur de la fenêtre d'erbium. Ces nouveaux amplificateurs fonctionnant avec les EDFAs existants peuvent réaliser le plein potentiel de la largeur de bande à faible perte des fibres de silice, de l'ordre de 150 nm à 200 nm, dans des systèmes de transmission futurs.

Tous les amplificateurs optiques dans ce rapport nécessitent une source de pompe optique pour la stimulation de photons, à l'exception du SOA (amplificateur optique à semi-conducteurs) lorsque l'émission de photons stimulés se fait par injection de courant à travers l'hétérojonction d'un matériau à semi-conducteur composé. D'autres types d'amplificateurs optiques sans fibres, tels que ceux utilisant le guide d'onde plan de silice dopé et le guide d'onde polymère dopé atteignent des niveaux utiles de performance. Ils peuvent conduire à une dimension supplémentaire de flexibilité, entraînant une intégration photonique et des fonctionnalités et des éléments de réseaux optiques sans perte. De nouveaux produits fondés sur une telle technologie commencent à émerger et un certain nombre d'abréviations ont été utilisées dans les documentations telles que POWA (amplificateur de guide d'onde optique plan), PWOA (amplificateur optique de guide d'onde plan) et EDWA (amplificateur de guide d'onde dopé à l'erbium). Dans le présent rapport, nous avons tenté de rationaliser l'utilisation de ces nouvelles abréviations comme le montre l'arbre généalogique d'amplificateur. A n'en pas douter, d'autres nouveaux types d'amplificateurs optiques et de nouvelles abréviations apparaîtront à l'avenir qui devront être ajoutés à la liste.

INTRODUCTION

The rapid maturity of erbium doped fibre amplifier, EDFA, is pulling many new types of optical amplifiers into the market place and it is also stimulating many new types of fibre and non-fibre based optical amplifier research in the laboratories. This has created a large number of abbreviations, sometimes used liberally in the literature. This report is to promote the consistent use of optical amplifier abbreviations and to establish a family tree for the classification of optical amplifiers, including those still being researched in laboratories, so that their similarities and differences can readily be identified. The report also includes a brief description of each amplifier family, highlighting their generic properties, performances and applications at the time of writing. However, it is important to point out that in such fast evolving technology, the reader should always refer to the latest conferences and publications for state-of-the-art results.

Optical fibre amplifiers can either be grouped by their fluorescent dopant or by their fibre host. The family tree described in this report is by fluorescent dopant simply because of historical reasons, i.e. the well established optical amplifier in the market place is called erbium doped fibre amplifier, EDFA, and not called silica fibre amplifier doped with erbium. As can be seen in this report, erbium can also be used as a dopant in other fibre hosts, such as fluoride and tellurite as well as a dopant or co-dopant in the silica fibre. With the rapid saturation of transmission capacity in the erbium window, there is a great deal of interest on the search of new active fibres, which can provide optical gain outside the erbium window. These new amplifiers operating together with existing EDFAs can realize the full potential of the silica fibre low-loss bandwidth, of the order of 150 nm to 200 nm, in future transmission systems.

All optical amplifiers in this report require an optical pump source for photon stimulation, with the exception of the SOA (semiconductor optical amplifier) where the stimulated photon emission is by current injection through the heterojunction of a compound semiconductor material. Other types of non-fibre based optical amplifiers, such as those using doped silica planar waveguide and doped polymer waveguide are achieving useful levels of performance. They may lead to an extra dimension in flexibility, leading to photonic integration and lossless optical network elements and functionalities. New products based on such technology are beginning to emerge and a numbers of abbreviations have been used in the literature such as POWA (planar optical waveguide amplifier), PWOA (planar waveguide optical amplifier) and EDWA (erbium doped waveguide amplifier). In this report, we have attempted to rationalize the use of these new abbreviations as shown in the amplifier family tree. No doubt other new types of optical amplifiers and new abbreviations will appear in future to be added to the list.

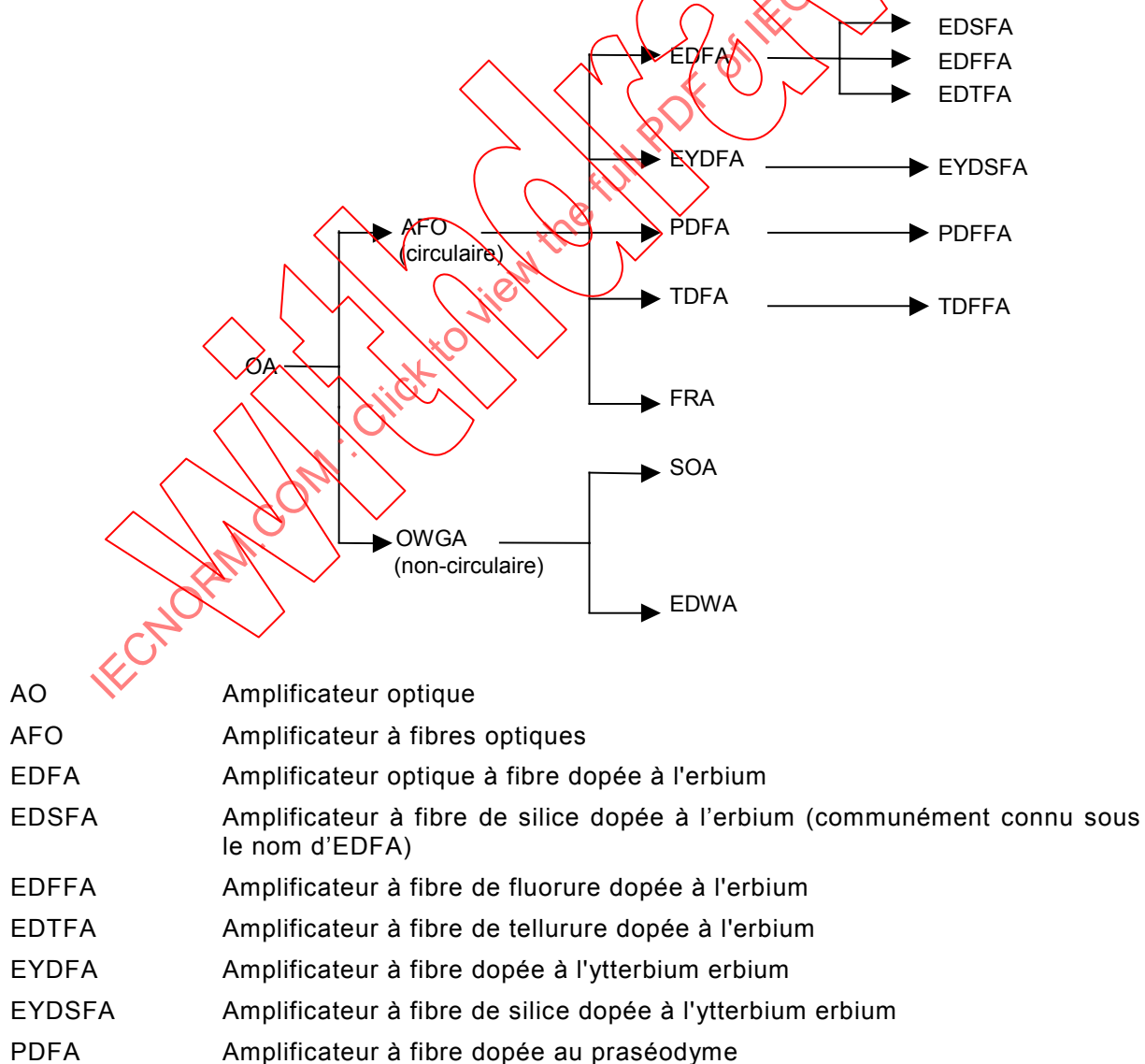
AMPLIFICATEURS OPTIQUES –

Partie 3: Classification, caractéristiques et applications

0 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61292 établit un arbre généalogique pour la classification des amplificateurs optiques, y compris ceux faisant toujours l'objet de recherche dans les laboratoires, de sorte que leurs similarités et leurs différences puissent être aisément identifiées. Le rapport comprend également une brève description de chaque famille d'amplificateurs, mettant en évidence leurs propriétés génériques, performances et applications au moment de la rédaction.

1 Arbre généalogique et abréviations d'amplificateur optique



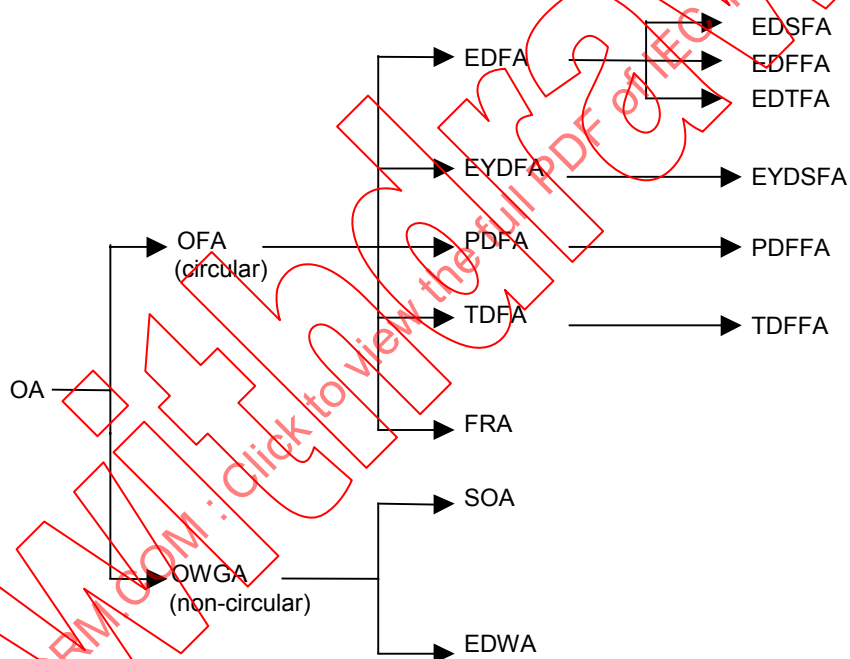
OPTICAL AMPLIFIERS –

Part 3: Classification, characteristics and applications

0 Scope

This part of IEC 61292 establishes a family tree for the classification of optical amplifiers, including those still being researched in laboratories, so that their similarities and differences can readily be identified. The report also includes a brief description of each amplifier family, highlighting their generic properties, performance and applications at the time of writing.

1 Optical amplifier family tree and abbreviations



OA	Optical amplifier
OFA	Optical fibre amplifier
EDFA	Erbium doped fibre amplifier
EDSFA	Erbium doped silica fibre amplifier (commonly known as EDFA)
EDFFA	Erbium doped fluoride fibre amplifier
EDTFA	Erbium doped tellurite fibre amplifier
EYDFA	Erbium ytterbium doped fibre amplifier
EYDSFA	Erbium Ytterbium doped silica fibre amplifier
PDFA	Praseodymium doped fibre amplifier

PDFFA	Amplificateur à fibre de fluorure dopée au praséodyme (également connu sous le nom de PDFA)
TDFA	Amplificateur optique à fibre dopée au thulium
TDFFA	Amplificateur à fibre de fluorure dopée au thulium (également connu sous le nom de TDFA)
FRA	Amplificateur de Raman à fibre
OWGA	Amplificateur à guide d'ondes optique
SOA	Amplificateur optique à semi-conducteurs
EDWA	Amplificateur à guide d'ondes dopé à l'erbium (également désigné POWA)

2 Bandes de fonctionnement d'amplificateurs optiques

Les premiers amplificateurs à fibre optique sur le marché étaient des amplificateurs à fibre de silice dopée à l'erbium, ou des EDFAs, fonctionnant dans la fenêtre de transmission à faible perte de 1,55 microns de la fibre de transmission de silice. Bien que les EDFAs aient approximativement 35 nm de largeur de bande optique entre 1 528 nm et 1 563 nm approximativement, le gain n'est pas plat à travers cette fenêtre ou bande. Les premiers amplificateurs furent des amplificateurs de longueur d'onde unique à bande étroite conçus pour bénéficier des pointes de gain naturelles à l'intérieur de cette fenêtre de gain, à 1 533 nm et 1 557 nm approximativement. Avec l'émergence du marché de WDM, la région du gain "plat" inhérent du EDFA à certaines conditions de gain entre approximativement 1 540 nm et 1 563 nm a été utilisée pour supporter des applications à voies multiples. Cette région de gain plat a été désignée comme la bande rouge par certains fabricants et a généralement entre 18 nm et 23 nm de largeur de bande.

Des recherches sur les amplificateurs à fibre de fluorure dopée à l'erbium, EDFFAs, ont démontré qu'ils ont une largeur de bande similaire aux EDFAs mais le gain est intrinsèquement plus plat; ainsi, ils ont une fenêtre WDM utilisable plus large que la bande rouge d'EDFA, capable de supporter davantage de voies de WDM. Cependant, avec l'introduction des technologies de filtres d'aplanissement de gain, ces gains ont été capables de lisser les pointes de gains d'EDFA, en particulier celui à 1 533 nm, permettant aussi aux EDFAs d'atteindre une fenêtre WDM utilisable globale similaire aux EDFFAs. La solution du filtre et EDFA est couramment la solution la plus communément utilisée dans des produits. Ces amplificateurs ont été appelés amplificateurs à bande pleine mais plus récemment, pour des raisons à expliquer ultérieurement, amplificateurs à bande C, c'est-à-dire la bande conventionnelle. L'UIT-T considère que la bande C est définie sur la plage de longueurs d'onde de 1 530 nm à 1 565 nm pour les systèmes de transmission optiques monomodaux. La moitié inférieure de la bande C est parfois également appelée la bande bleue. La limite précise entre la bande bleue et la bande rouge dépend du vendeur.

Ces dernières années, on a découvert qu'en bénéficiant des pompes haute puissance à faible coût, la région de faible inversion du spectre de gain de fibre erbium à l'extrémité de la longueur d'onde élevée peut être accédée pour des applications pratiques, en ouvrant une fenêtre d'amplification entièrement nouvelle. Cette fenêtre est comprise approximativement entre 1 570 nm et 1 620 nm. On la désigne souvent comme la bande L du fait qu'elle fonctionne dans la longueur d'onde plus élevée que la bande C. L'UIT-T considère que la bande L est définie sur la plage de longueurs d'onde de 1 565 à 1 625 nm pour les systèmes de transmission optiques monomodaux. Les amplificateurs fonctionnant dans cette bande sont souvent désignés LWEDFAs, c'est-à-dire les EDFAs à longueurs d'onde élevées. Cette bande est parfois également désignée bande E, c'est-à-dire bande étendue. La bande combinée C et L est également désignée la bande erbium, réfléchissant la fenêtre de gain optique accessible à partir des EDFAs.

PDFFA	Praseodymium doped fluoride fibre amplifier (also known as PDFA)
TDFA	Thulium doped fibre amplifier
TDFFA	Thulium doped fluoride fibre amplifier (also known as TDFA)
FRA	Fibre Raman amplifier
OWGA	Optical wave guide amplifier
SOA	Semiconductor optical amplifier
EDWA	Erbium doped waveguide amplifier (also called POWA)

2 Optical amplifier operating bands

The first optical fibre amplifiers on the market were erbium doped silica fibre amplifiers, or EDFAs, operating in the 1,55 μm low loss transmission window of the silica transmission fibre. Although EDFAs have approximately 35 nm of optical bandwidth between approximately 1 528 nm and 1 563 nm, the gain is not flat across this window, or band. The first amplifiers were narrow band single wavelength amplifiers designed to take advantage of the natural gain peaks within this gain window, at approximately 1 533 nm and 1 557 nm. With the emerging WDM market, the inherent “flat” gain region of the EDFA at certain gain conditions between approximately 1 540 nm and 1 563 nm were used to support multi-channel applications. This flat gain region has been called the red-band by some manufacturers and has typically between 18 nm to 23 nm of bandwidth.

Research on erbium doped fluoride fibre amplifiers, EDFFAs, has demonstrated that they have a similar bandwidth as EDFAs but the gain is inherently flatter, thus have a wider useable WDM window than the EDFA red-band, able to support more WDM channels. However, with the introduction of gain flattening filter technologies, these filters were able to smooth out the EDFA gain peaks, especially the one at 1 533 nm, allowing EDFAs also to achieve a similar overall useable WDM window as EDFFAs. The EDFA and filter solution is currently the most commonly used solution in products. These amplifiers have been called full band amplifiers but more recently, for reasons to be explained later, C-band amplifiers, i.e. conventional band. The ITU-T considers that the C-band is defined over the 1 530 nm to 1 565 nm wavelength range for single-mode optical transmission systems. The lower half of the C-band is also sometimes called the blue-band. The precise boundary between blue and red band is vendor-dependent.

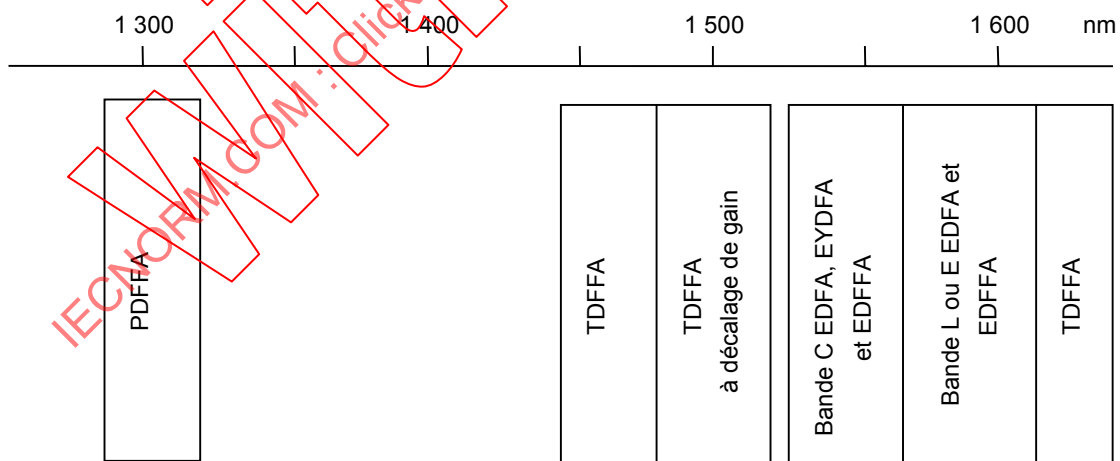
In the last few years, it was discovered that by taking advantages of the high power, low cost pumps, the low inversion region of the erbium fibre gain spectrum at the long wavelength end can be accessed for practical applications, opening up an entirely new amplification window. This window is approximately 1 570 nm to 1 620 nm. It is often referred to as the L-band because it operates in the longer wavelength than C-band. The ITU-T considers that the L-band is defined over 1 565 to 1 625 nm wavelength range for single-mode optical transmission systems. Amplifiers operating in this band often are called LWEDFAs, i.e. long wavelength EDFAs. This band is also sometimes called E-band, i.e. extended band. The combined C and L-band is also called the erbium band, reflecting the optical gain window obtainable from EDFAs.

Les recherches sur de nouveaux matériaux ont conduit à des amplificateurs à fibre de tellure dopée à l'erbium, ou EDTFAs. Ces amplificateurs peuvent donner une fenêtre de gain continue très large de 1 530 nm à 1 620 nm approximativement. Elle comprend tant les bandes C que les L fournies par les EDFAs. D'autres recherches de matériaux ont conduit aux amplificateurs à fibre de fluorure dopée au thulium, ou TDFFA. Ces amplificateurs fournissent un gain entre 1 450 nm et 1 480 nm approximativement. Cette bande est couramment désignée bande S. De récents résultats indiquent que des amplificateurs pour la fenêtre de 1 480 nm à 1 528 nm peuvent être aussi obtenus du système de matériau et cette bande a été appelée bande S à déplacement de gain. Dans certaines publications, la fenêtre entière ci-dessous de 1 520 nm à 1 450 nm approximativement est désignée bande S. L'UIT-T considère que la bande S est définie sur la plage de longueurs d'onde de 1 460 nm à 1 530 nm pour les systèmes de transmission optiques monomodaux. La fibre dopée au thulium avec les ions terbium dans sa gaine a également démontré un gain au-delà de la bande L à 1 650 nm.

En dehors de la fenêtre de transmission de 1,55 μm , l'amplificateur à fibre de fluorure dopée au praséodyme, PDFFA, peut fournir un gain dans la fenêtre de transmission de 1,31 μm , ainsi que les amplificateurs de Raman à fibre, FRAs et amplificateurs optiques à semi-conducteurs, SOAs.

Tant les amplificateurs optiques à semi-conducteurs que les amplificateurs de Raman à fibre, à pompe unique, simples, peuvent fournir approximativement 30 nm de largeur de bande. La longueur d'onde centrale de la fenêtre de gain dans le cas de SOA est déterminée par les propriétés de matériaux à semi-conducteurs et dans le cas de Raman elle est déterminée par la longueur d'onde de pompe et le déplacement de Stoke de la fibre. On a reporté jusqu'à 100 nm de largeur de bande des amplificateurs de Raman à pompes multiples. Les deux amplificateurs peuvent en principe fournir un gain n'importe où dans la fenêtre de transmission à fibre de silice, mais les travaux consignés à ce jour se situent principalement dans les fenêtres de 1,55 μm et 1,31 μm .

Le schéma ci-dessous illustre les fenêtres de fonctionnement, ou les bandes, des amplificateurs décrits dans ce rapport.



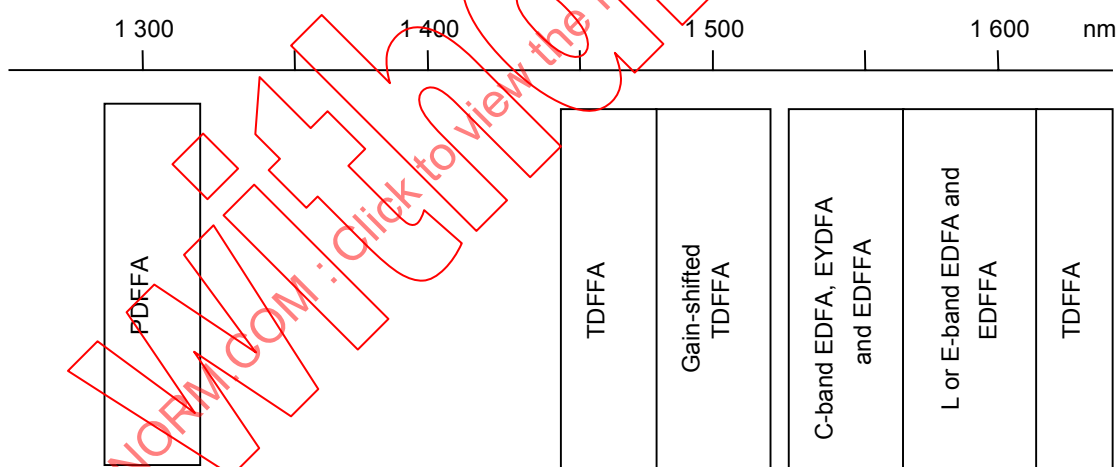
← FRA et SOA en principe – fonctionnement consigné dans les fenêtres 1,31 μm et 1,55 μm →

Research on new materials had led to erbium doped tellurite fibre amplifiers, or EDTFAs. These amplifiers can give a very broad, continuous gain window from approximately 1 530 nm to 1 620 nm. It embraces both the C and L bands provided by EDFAs. Other material research had led to thulium doped fluoride fibre amplifiers, or TDFFAs. These amplifiers give gain between approximately 1 450 nm and 1 480 nm. This band is currently referred to as the S-band. Recent results indicate that amplifiers for the 1 480 nm to 1 528 nm window can also be obtained from this material system and this band has been called gain-shifted S-band. In some publications, the entire window below from approximately 1 520 nm to 1 450 nm is referred as S-band (ITU-T considers that the S-band is defined over the 1 460 nm to 1 530 nm wavelength range for single-mode optical transmission systems). Thulium doped fibre with terbium ions in its cladding have also demonstrated gain beyond L-band at 1 650 nm.

Outside the 1,55 μm transmission window, the praseodymium doped fluoride fibre amplifier, PDFFA, can provide gain in the 1,31 μm transmission window, as well as fibre Raman amplifiers, FRAs and semiconductor optical amplifiers, SOAs.

Both semiconductor optical amplifiers and simple, single pumped fibre Raman amplifiers can provide approximately 30 nm of bandwidth. The center wavelength of the gain window in the case of SOA is determined by the semiconductor material properties and in the case of Raman is determined by the pump wavelength and the Stoke shift of the fibre. Up to 100 nm of bandwidth has been reported from multi-pumped Raman amplifiers. Both amplifiers can in principle, provide gain anywhere in the silica fibre transmission window but reported work to date are mainly in the 1,55 μm and 1,31 μm windows.

The diagram below illustrates the operating windows, or bands, of the amplifiers described in this report.



← FRA and SOA in principle – reported operation in both 1,31 μm and 1,55 μm windows →

Le texte précédent résume les bandes de longueurs d'onde des amplificateurs optiques à partir d'une perspective historique. De nouvelles bandes ont été introduites et les limites de bande ont été accrues par l'évolution rapide de la technologie, qui est toujours en cours. En 2001, L'UIT-T a recommandé des définitions de bande pour faciliter les discussions pour les systèmes de transmission optiques monomodaux. Les six bandes spectrales contiguës suivantes des systèmes de transmission optique sont acceptées:

Bande	Descripteur	Plage (nm)
Bande O	Originale	1 260 à 1 360
Bande E	Etendue	1 360 à 1 460
Bande S	Longueur d'onde faible	1 460 à 1 530
Bande C	Conventionnelle	1 530 à 1 565
Bande L	Longueur d'onde élevée	1 565 à 1 625
Bande U	Longueur d'onde ultra élevée	1 625 à 1 675

- La définition des bandes spectrales doit faciliter la discussion et ne concerne pas l'élaboration d'une spécification. Les spécifications des bandes de longueurs d'onde de fonctionnement sont données dans les Recommandations de système appropriées.
- Les Recommandations de fibres G.65x n'ont pas confirmé l'applicabilité des bandes de longueurs d'onde pour les besoins de fonctionnement du système ou de maintenance.
- La limite (1 460 nm) entre la bande E et la bande S continue d'être à l'étude.
- La bande U concerne uniquement les besoins éventuels de maintenance, et la transmission des signaux de support de trafic n'est pas prévue à l'heure actuelle. L'utilisation pour des besoins sans transmission doit être effectuée dans un cadre susceptible de provoquer des perturbations négligeables aux signaux de transmission des autres bandes. Le fonctionnement de la fibre dans cette bande n'est pas assuré.
- Dans un proche avenir, on s'attend à ce que diverses applications, avec et sans amplificateurs optiques, utilisent une transmission de signaux couvrant la gamme complète comprise entre 1 260 nm et 1 625 nm.

3 Amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA)

3.1 Amplificateurs à fibre de silice dopée à l'erbium (EDFA ou EDSFA)

3.1.1 Introduction

Le concept d'amplificateur à fibre dopée à l'erbium (EDFA) a été démontré pour la première fois en 1985. Au moment où des systèmes conventionnels sans répéteurs approchaient leur performance de crête, un groupe de recherche à l'Université de Southampton a montré que les fibres optiques pouvaient présenter un gain optique à la longueur d'onde proche de 1 550 nm. Ces fibres ont été dopées avec un élément de terres rares, l'erbium, et ont été activées ou pompées avec des faibles puissances de lumière visible. Les EDFA ont depuis attiré une très grande attention dans le domaine des communications à fibres optiques parce qu'ils fonctionnent de façon pratique dans la fenêtre spectrale de télécommunications préférentielle, c'est-à-dire de faible perte, à environ 1 550 nm. Les EDFA sont les amplificateurs optiques les plus largement utilisés de nos jours.

The previous text summarises optical amplifier wavelength bands from a historical perspective. New bands were introduced and band boundaries were augmented by the rapid evolution of the technology, which is still on going. In 2001, the ITU-T recommended band definitions to facilitate discussions for single-mode optical transmission systems. The following six contiguous spectral bands of optical transmission systems were agreed:

Band	Descriptor	Range (nm)
O-band	Original	1 260 to 1 360
E-band	Extended	1 360 to 1 460
S-band	Short wavelength	1 460 to 1 530
C-band	Conventional	1 530 to 1 565
L-band	Long wavelength	1 565 to 1 625
U-band	Ultralong wavelength	1 625 to 1 675

- The definition of spectral bands is to facilitate discussion and is not for specification. The specifications of operating wavelength bands are given in the appropriate system Recommendations.
- The G.65x fibre Recommendations have not confirmed the applicability of all these wavelength bands for system operation or maintenance purposes.
- The boundary (1 460 nm) between the E-band and the S-band continues to be under study.
- The U-band is for possible maintenance purposes only, and transmission of traffic-bearing signals is not currently foreseen. The use for non-transmission purposes must be done on a basis of causing negligible interference to transmission signals in other bands. Operation of the fibre in this band is not ensured.
- It is anticipated that in the near future, various applications, with and without optical amplifiers, will utilize signal transmission covering the full range of 1 260 nm to 1 625 nm.

3 Erbium doped fibre amplifiers (EDFAs)

3.1 Erbium doped silica fibre amplifiers (EDFAs or EDSFAs)

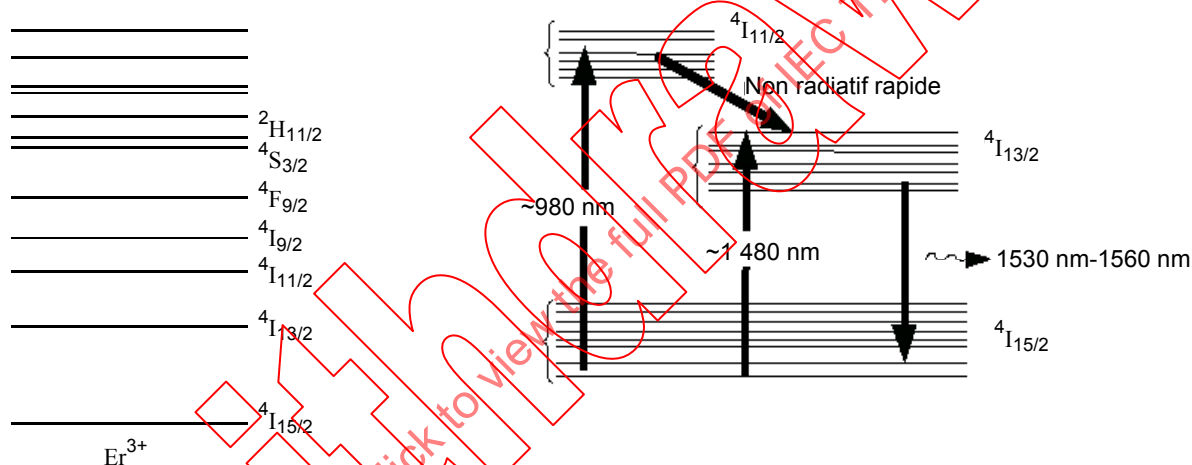
3.1.1 Introduction

The erbium doped fibre amplifier (EDFA) concept was first demonstrated in 1985. Just when conventional un-repeatered systems were approaching their peak performance a research group at the University of Southampton showed that optical fibres could exhibit optical gain at wavelength near 1 550 nm. These fibres were doped with a rare earth element, erbium, and were activated or pumped with low powers of visible light. EDFAs have since attracted considerable attention in the field of optical fibre communications because they conveniently operate in the preferred, i.e. low-loss, telecommunications spectral window at around 1 550 nm. EDFAs are the most widely used optical amplifiers today.

3.1.2 Caractéristiques générales d'EDFA

Un EDFA peut être pompé de manière optique à certain nombre de longueurs d'onde avec des performances optimales atteintes aux longueurs d'onde de 980 nm et 1 480 nm. Ils fournissent un gain aux longueurs d'onde comprises approximativement entre 1 520 nm et 1 625 nm, bien que la partie plus longue de la plage n'ait pas encore été finalisée dans les divers organismes de normalisation. Dans sa forme la plus basique, un EDFA type est constitué d'une section de fibre dopée à l'erbium monomodale, d'un laser à pompe, d'un coupleur WDM pour combiner la puissance de pompe et le signal dans la fibre d'erbium, des isolateurs d'entrée et de sortie et des coupleurs de prise ainsi qu'un dispositif électronique d'entraînement.

Il existe un grand nombre de niveaux d'énergie pour l'atome d'erbium. Cependant, seul un petit ensemble de ces niveaux d'énergie présente un intérêt pour l'amplification optique dans les systèmes de télécommunication. Ceux-ci incluent l'état fondamental et quelques-uns des états des niveaux les plus faibles. Les états d'énergie supérieurs représentent les transitions dans la partie visible et d'ultraviolets du spectre et ces états sont essentiellement inoccupés dans les applications d'EDFA. La Figure 1 ci-dessous illustre (a) les niveaux d'énergie abrégés pour EDFA et (b) les niveaux d'énergie primaires utilisés dans des EDFA.



IEC 1703/03

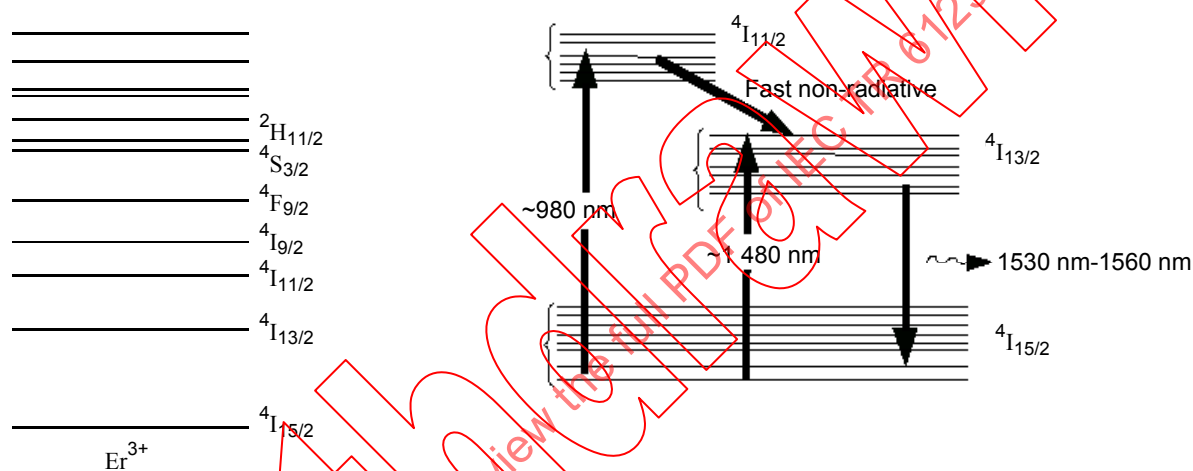
Figure 1 – Niveaux d'énergie abrégés et primaires pour EDFA

L'EDFA a montré qu'il présente un gain insensible à la polarisation, l'immunité à la diaphonie entre voies, une puissance de sortie de saturation élevée et un bruit faible proche de la limite quantique. Les EDFA peuvent amplifier simultanément des signaux faibles aux longueurs d'onde à travers la plage de fonctionnement entière. Cette plage de fonctionnement varie selon la conception de l'amplificateur, mais cette capacité est cruciale pour le multiplexage à répartition en longueur d'ondes (WDM). Les EDFA fournissent toute l'amplification optique dans la région de 1 550 nm où la fibre de transmission de silice connaît sa perte minimale. L'erbium a des propriétés spectroscopiques excellentes, y compris une durée de vie métastable à dégradation radiative limitée et des niveaux d'énergie auxiliaires situés dans des emplacements pratiques. En conséquence, il a été possible de produire des amplificateurs qui fonctionnent dans des fractions d'un dB des limites quantiques de facteur de bruit et du rendement de conversion de puissance. Les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium ont permis d'augmenter considérablement la capacité des systèmes de transmission optiques tout en réduisant les coûts du système. Les augmentations de capacité sont possibles parce que les puissances de sortie élevées permises par les EDFA peuvent être utilisées pour supporter le nombre supérieur de voies, tandis que leur largeur de bande large et lente dynamique de gain permettent un fonctionnement à voies multiples "transparent".

3.1.2 EDFA general characteristics

An EDFA can be optically pumped at a number of wavelengths with optimum performances achieved at wavelengths of 980 nm and 1 480 nm. They provide gain at wavelengths from approximately 1 520 nm to 1 625 nm, although the longer part of the range has not yet been finalized on in the various standards bodies. In its most basic form, a typical EDFA consists of a section of single-mode erbium-doped fibre, a pump laser, a WDM coupler for combining the signal and the pump power into the erbium fibre, input and output isolators and tap couplers and drive electronics.

There are a large number of energy levels for the erbium atom. However, only a small set of these energy levels is of interest to optical amplification in telecommunication systems. These include the ground state and a few of the lowest level states. The higher energy states represent transitions in the visible and ultra-violet part of the spectrum and these states are essentially unoccupied in EDFA applications. Figure 1 below shows (a) the abridged energy levels for EDFAs and (b) primary energy levels used in EDFAs.



IEC 1703/03

Figure 1 – Abridged and primary energy levels for EDFAs

EDFAs have been shown to exhibit polarization insensitive gain, immunity to inter-channel cross-talk, a high saturation output power and low noise close to the quantum limit. EDFAs can simultaneously amplify weak signals at wavelengths across their entire operating range. This operating range varies with amplifier design, but this capability is crucial for wavelength-division multiplexing (WDM). EDFAs provide all optical amplification in the 1 550 nm region where silica transmission fiber has its minimum loss. Erbium has excellent spectroscopic properties including a radiative decay limited metastable lifetime and conveniently located auxiliary energy levels. As a result, it has been possible to produce amplifiers that operate within fractions of a dB of the quantum limits of noise figure and power conversion efficiency. Erbium-doped fiber amplifiers have made it possible to dramatically increase the capacity of optical transmission systems while reducing system costs. Capacity increases are possible because the high output powers afforded by EDFAs can be used to support a higher number of channels, while their broad bandwidth and slow gain dynamics allow “transparent” multi-channel operation.

Une variété de verres hôtes, de dopants et de conceptions de fibres continuent de faire l'objet d'investigations dans le but d'optimiser les caractéristiques d'amplificateurs telles que le rendement de pompe et la largeur de bande spectrale.

3.1.3 Performances type d'EDFA

On a démontré des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium qui fournissent un gain de ~50 dB ou plus, les facteurs de bruit de quelques dixièmes de dB au-dessus de la limite quantique, les puissances de sortie >30 dBm et les variations de gain inférieures à 0,2 dB sur les largeurs de bande supérieures à 14 nm. Le gain, le facteur de bruit, la puissance de sortie, le rendement de conversion de puissance et la variation de gain sur la bande de fonctionnement requise constituent les paramètres optiques primaires qui décrivent la performance d'un EDFA. Cependant, les paramètres ci-dessus tendent à exiger différentes conditions de fonctionnement pour leur optimisation respective. Une bonne caractéristique de bruit nécessite une inversion moyenne élevée tandis que le meilleur rendement de conversion de puissance est disponible aux inversions inférieures dans des amplificateurs hautement saturés. Le gain élevé peut interférer avec une caractéristique de bruit si l'ESA à propagation arrière commence à appauvrir significativement l'inversion dans le frontal de l'EDFA. De nombreuses techniques d'aplanissement de gain réduisent la caractéristique de bruit et/ou le rendement de conversion de puissance. Les systèmes commerciaux, cependant, nécessitent une solide performance sur tous les paramètres essentiels mais un certain compromis est nécessaire pour y parvenir. Toute conception d'amplificateur nécessite toujours un compromis entre les paramètres d'intérêt. Les décisions finales de conception doivent naturellement être prises dans le contexte du système de transmission dans lequel l'amplificateur sera utilisé.

La spectroscopie des fibres de verre dopées à l'erbium joue un rôle fondamental dans l'analyse et la compréhension physique des amplificateurs à fibres optiques. Toutes les caractéristiques importantes des dispositifs des EDFA, à savoir le spectre de gain, le gain par rapport à la puissance de pompe et la longueur d'onde de pompe, la puissance de saturation de sortie, le rendement de conversion de puissance et le facteur de bruit sont fondamentalement liés aux propriétés spectroscopiques. Récemment, il a été démontré que l'on peut obtenir un gain dans la région de 1 480 nm à 1 525 nm en utilisant une conception de fibres dopées à l'erbium appropriée, et qu'une fibre à base d'oxyde de bismuth avec un titre élevé d'erbium peut fournir une amplification jusqu'à 1 620 nm.

3.1.4 Applications d'EDFA

Les EDFA ont eu une influence majeure dans le domaine des communications à ondes lumineuses. Ils sont généralement utilisés dans des systèmes de communication tels que les survolteurs de puissance, les amplificateurs en ligne, et les préamplificateurs. Les EDFA ont rapidement trouvé leur place dans des systèmes de communication à fibres optiques grande distance en fournissant un gain élevé de large bande dans la fenêtre de transmission à faible perte des fibres de silice. Les puissances de sortie élevées et les spectres de gain plat fournis par les EDFA ont fait du multiplexage de longueur d'ondes un moyen peu coûteux d'augmenter la performance du système. Alors que la technologie d'EDFA mûrit, de meilleures performances et de nouvelles fonctionnalités deviennent disponibles, y compris une uniformité de gain, une bi-directionnalité, une signalisation de télémétrie, l'ajout-abandon optiques et les fonctions de commutation. La révolution des technologies de communications optiques introduites par des amplificateurs continuera tant que les liens point à point se rejoignent en réseaux optiques complexes.

3.1.5 Documents de référence

- [1] M.J. Yadlowsky, E.M. Deliso, and V.L. da Silva, "Optical fibers and amplifiers for WDM Systems" Proceedings of IEEE, vol.85, no.11, 11/97, pp1765-1779
- [2] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. New York, John Wiley, 1994
- [3] W.J. Miniscalco, B.A. Thompson, E. Eichen, and T. Wei, "Very high gain Er³⁺ fiber amplifier pumped at 980 nm," Conference on Optical Fiber Communication, 1990, vol.1, p192

A variety of host glasses, dopants and fibre designs continue to be investigated with the aim of optimizing amplifier characteristics such as pump efficiency and spectral bandwidth.

3.1.3 EDFA typical performances

Erbium doped fibre amplifiers have been demonstrated that provide ~50 dB or more gain, noise figures a few tenths of a dB above the quantum limit, output powers of >30 dBm and gain variations of under 0,2 dB on bandwidths greater than 14 nm. Gain, noise figure, output power, power conversion efficiency and gain variation over the required operating band constitute the primary optical parameters that describe the performance of an EDFA. The above parameters, however, tend to require different operating conditions for their respective optimization. Good noise performance requires a high average inversion while the best power conversion efficiency is available at lower inversions in highly saturated amplifiers. High gain can interfere with noise performance if the backward propagating ASE begins to significantly deplete the inversion in the front end of the EDFA. Many gain-flattening techniques reduce noise performance and/or power conversion efficiency. Commercial systems, however, typically require strong performance on all of the essential parameters but some amount of compromise is needed to achieve this. Any amplifier design will still require some trade-off between parameters of interest. The final design decisions naturally have to be made in the context of the transmission system in which the amplifier is to be used.

The spectroscopy of the Er-doped glass fibres plays a fundamental role in the analysis and physical understanding of optical fibre amplifiers. All the important device characteristics of EDFAs, i.e., gain spectrum, gain versus pump power and pump wavelength, output saturation power, power conversion efficiency, and noise figure, are fundamentally related to spectroscopic properties. Recently, it has been demonstrated that by appropriate erbium doped fibre design, gain can be obtained in the 1 480 nm to 1 525 nm region and bismuth oxide based fibre with high erbium concentration can provide amplification up to 1 620 nm.

3.1.4 EDFA applications

EDFAs have had a major impact in the field of lightwave communications. They are typically used in communication systems as power boosters, in-line amplifiers, and preamplifiers. EDFAs have rapidly found their place in long haul optical fibre communication systems by providing high, broadband gain in the low-loss transmission window of silica fibres. The high output powers and flat-gain spectra provided by EDFAs have made wavelength multiplexing a cost-effective way of boosting system performance. As EDFA technology matures, better performances and new functionalities become available, including increased gain flatness, bi-directionality, telemetry signaling, optical add/drop and switching functions. The revolution in optical communication technology introduced by amplifiers will continue as point-to-point links become connected into complex optical networks.

3.1.5 Reference documents

- [1] M.J. Yadlowsky, E.M. Deliso, and V.L. da Silva, "Optical fibers and amplifiers for WDM Systems" Proceedings of IEEE, vol.85, no.11, 11/97, pp1765-1779
- [2] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. New York, John Wiley, 1994
- [3] W.J. Miniscalco, B.A. Thompson, E. Eichen, and T. Wei, "Very high gain Er³⁺ fiber amplifier pumped at 980 nm," Conference on Optical Fiber Communication, 1990, vol.1, p192

- [4] R.I. Laming and D.N. Payne, "Noise characterization of erbium-doped fiber amplifier pumped at 980 nm" IEEE Photonics Technology Letters, vol.2, pp418-421, 1990
- [5] J. Hecht, *Understanding Fiber Optics* – Third Edition, SAMS Publishing, 1999

3.2 Amplificateurs à fibre de fluorure dopée à l'erbium (EDFA)

3.2.1 Introduction

Une des limites les plus sévères à l'utilisation complète de la largeur de bande dans des systèmes WDM est la non-uniformité spectrale du gain présenté par les amplificateurs à fibre de silice dopée à l'erbium conventionnels (EDFA ou EDSFA). Du fait du comportement spectroscopique différent des ions d'erbium dans les matériaux de fluorure, les amplificateurs à fibre de fluorure présentent une uniformité améliorée en comparaison avec des amplificateurs à fibre de silice plus conventionnels.

3.2.2 Caractéristiques générales d'EDFFA

La première réalisation des verres de zircono-fluorure à fin de 1975 a conduit à la définition du système de ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF_3 (ZBLAN) en 1981. Un grand travail avait été effectué depuis concernant la capacité d'un tel matériau à ouvrir de nouvelles applications d'amplification optiques à diverses longueurs d'onde qui sont stratégiques pour la transmission de fibres optiques, y compris la fenêtre de 1,5 μm avec le dopage à l'erbium.

La différence majeure entre les amplificateurs de silice et de fluorure réside dans les modifications des caractéristiques spectroscopiques de laser induites par l'environnement hôte et l'énergie de phonon. Dans le cas des EDFFA, il existe un spectre de gain plus large et plus lisse que les EDFA.

Un autre paramètre dépendant de la matrice de verre est l'énergie de phonon, qui est inférieure dans les verres ZBLAN que dans les verres de silice. Le niveau d'énergie pendant la durée de vie $^4I_{11/2}$ est trop long en ZBLAN pour permettre le pompage de 980 nm efficace du fait de l'effet d'absorption à état excité de la pompe (ESA). Cependant, les EDFFA pompés à presque 1 480 nm impliquent les mêmes transitions de laser que les EDSFA conduisant aux performances de gain, puissance de sortie et bruit proches de celles atteintes par les EDFA de silice.

La configuration des EDFFA est assez similaire à celle des EDFA à silice conventionnels à l'exception des épissures de fibres. L'épissure par fusion entre un ZBLAN et une fibre de silice n'est pas possible pour deux raisons. En premier lieu, la température de fusion requise pour la silice approche 2 300 K, tandis que ZrF_4 atteint la température de sa phase de vapeur à une température d'une valeur aussi faible que 900 K. En second lieu, les coefficients de dilatation des deux matériaux sont assez différents (plus de dix fois supérieurs pour ZBLAN). De ce fait, la technique utilisée consiste à épissurer mécaniquement la fibre dopée à une fibre de silice d'ouverture numérique (NA) élevée ayant un diamètre du champ de mode identique. La fibre de silice à NA élevée est à son tour épissurée par fusion à une fibre de silice standard au moyen d'une technique du cœur à extension thermique.

3.2.3 Applications EDFFA

Les EDFFA peuvent être utilisés comme amplificateurs de puissance, en ligne et comme préamplificateurs pour applications à voie unique et voies multiples. Les caractéristiques pour le fonctionnement à voies multiples sont obtenues avec une puissance d'entrée totale optimisée pour atteindre l'uniformité de gain la meilleure dans les spectres de sortie. Comparé aux EDSFA conçus sans aucun dispositif additionnel pour l'uniformité de gain, le EDFFA présente une meilleure uniformité de gain nécessaire pour le fonctionnement à voies multiples. L'avantage exceptionnel offert par les amplificateurs à fluorure est la possibilité d'exploiter une largeur de bande étendue dans les bandes C et L dans la conception des systèmes WDM à haute capacité.

- [4] R.I. Laming and D.N. Payne, "Noise characterization of erbium-doped fiber amplifier pumped at 980 nm" IEEE Photonics Technology Letters, vol.2, pp418-421, 1990
- [5] J. Hecht, *Understanding Fiber Optics* – Third Edition, SAMS Publishing, 1999

3.2 Erbium doped fluoride fibre amplifiers (EDFFAs)

3.2.1 Introduction

One of the most severe limitations to the full use of bandwidth in WDM systems is the spectral non-uniformity of the gain exhibited by the conventional silica-based erbium doped fiber amplifiers (EDFAs or EDSFAs). Because of the different spectroscopic behavior of the erbium ions in fluoride materials, fluoride-based fiber amplifiers show improved gain flatness in comparison with more conventional silica-based fiber amplifiers.

3.2.2 EDFFA general characteristics

The first realization of fluorozirconate glasses in late 1975 led to the definition of the $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}_3$ (ZBLAN) system in 1981. Much work had since been carried out concerning the ability of such material to open up new optical amplification applications at various wavelengths that are strategic for optical fiber transmission, including the 1,5 μm window with erbium doping.

The main difference between silica-based and fluoride-based amplifiers is in changes of laser spectroscopic characteristics induced by the host environment and phonon energy. In the case of EDFFAs there is a broader and smoother gain spectrum than EDFAs.

Another glass matrix dependant parameter is the phonon energy, which is lower in ZBLAN glasses than in silica glasses. The lifetime energy level $^4\text{I}_{11/2}$ is too long in ZBLAN to enable efficient 980 nm pumping due to the effect of pump excited-state absorption (ESA). However, EDFFAs pumped at near 1 480 nm involve the same laser transitions as EDSFAs resulting in gain, output power and noise performances close to that achieved by silica-based EDFAs.

The configuration of EDFFAs is quite similar to that of conventional silica-based EDFAs with the exception of fiber splices. Fusion splice between a ZBLAN and a silica fiber is not possible for two reasons. First, the fusion temperature required for silica is near 2 300 K, whereas ZrF_4 reaches the temperature of its vapor phase at a temperature as low as 900 K. Second, the dilatation coefficients of both materials are quite different (more than tenfold higher for ZBLAN). Thus, the technique used consists of mechanically splicing the doped fiber to a high numerical-aperture (NA) silica fiber having an identical mode-field diameter. The high NA silica fiber is in turn fusion-spliced to standard silica fiber by means of thermally expanded core technique.

3.2.3 EDFFA applications

EDFFAs can be used as power, in-line and preamplifiers for single and multi-channel applications. The characteristics for multi-channel operation are obtained with a total input power optimized to achieve best gain flatness in output spectra. Compared to EDSFAs designed without any additional devices for gain flattening, the EDFFA exhibit a better gain flatness required for multi-channel operation. The outstanding advantage offered by fluoride-based amplifiers is the possibility to exploit a wide bandwidth in the C and L bands in the design of high capacity WDM systems.

La transmission de seize voies 10 Gb/s couvrant 24 nm entre 1 536,61 nm et 1 560,61 nm sur 531 km de fibre monomodale conventionnelle a été obtenue avec sept EDFAs [2]¹ en ligne à fluorure. Des EDFA hybrides (silice/fluorure) à deux étages à gain plat double, tenant compte d'une fenêtre d'amplification plus large et un facteur de bruit faible, y compris des sections de fibre à compensation de dispersion (DCF) étaient utilisés dans la transmission de 32 voies de 10 Gb/s à espacements égaux couvrant 25 nm sur 500 km de fibre monomodale conventionnelle [3].

Le matériel de transmission, y compris 20 amplificateurs de ligne à fluorure à gain plat avec gain de 22 dB à 27 dB, puissance de sortie type de +15 dBm, facteur de bruit type inférieur à 7 dB et 80 km de DCF, a été utilisé dans un essai sur site de mise en réseau WDM transfrontalier avec branchements [4] à transposition de longueurs d'onde tout optiques.

3.2.4 Documents de référence

- [1] "1.5 μ m Fluoride-Based Amplifiers for Wideband Multichannel Transport Networks", B. Clesca, D. Bayard, and J.L. Beylat. *Optical Fiber Technology* 1, pp135-157, 1995
- [2] "Transmission of 16x10Gbps channels spanning 24 nm over 531 km of conventional single-mode fiber using 7 in-line fluoride-based EDFAs", S. Artigaud, M. Chbat, P. Nouchi, F. Chiquet, D. Bayart, L. Hamon, A. Pitel, F. Goudeseune, P. Bousselet, J.L. Beylat. OFC'96 Postdeadline paper
- [3] "320 Gbps WDM transmission over 500 km of conventional single-mode fiber with 125 km amplifier spacing", S. Bigo, Abertaina, M. Chbat, S. Grib, J. Da Loura, J.C. Jacquinet, J. Hervo, P. Bousselet, S. Borne, D. Bayart, L. Gasca, J.L. Beylat. ECOC'97
- [4] "A cross-border WDM networking field trial with all-optical wavelength-translating crossconnects", L. Berthelon, S. Bjornstad, P. Bonno, P. Bousselet, M. Chbat, C. Coeurjolly, P.J. Godsvang, R. Gronvold, P.M. Kjeldsen, A. Kleivstul, A. Jourdan, J.S. Mapsen, A. Noury, T. Olsen, G. Soulage. OFC'98 Postdeadline paper

3.3 Amplificateurs à fibre de tellure dopée à l'erbium (EDTFA)

3.3.1 Introduction

Le verre au tellure est un matériau à base d'oxyde avec un indice de réfraction élevé d'environ 2. Un EDTFA au tellure (EDTFA) peut être utilisé pour obtenir une largeur de bande à amplification plus large que celle de l'EDSFA et l'EDFFA. De plus, l'EDTFA peut également fournir d'autres propriétés d'amplificateurs à fibres optiques comme l'insensibilité à la polarisation, le facteur de bruit faible et la puissance de saturation élevée.

3.3.2 Caractéristiques générales d'EDTFA

Le mécanisme d'amplification d'amplificateur à fibre de tellure dopée à l'erbium (EDTFA) est le même que celui de l'EDFA à silice. Il est fondé sur l'émission stimulée du niveau $4_{13/2}$ au niveau $4_{15/2}$ d'ions d'erbium. En termes de propriétés optiques, le verre au tellure dopé à erbium présente quelques différences. Elles comprennent des indices de réfraction élevés d'environ 2,0, ce qui entraîne une section d'émission stimulée plus grande que le verre de silice conventionnel [1]. La section dans la région de longueurs d'onde de 1 530 nm à 1 580 nm est plus grande d'un facteur d'environ 1,3 que celle dans le verre de silice et elle est plus grande d'un facteur de plus de 2 à environ 1 600 nm. En se fondant sur l'analyse de Judd-Ofelt, les paramètres Ω dans le verre au tellure sont de $\Omega_2 = 4,116 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $\Omega_4 = 1,805 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ et $\Omega_6 = 8,486 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$. La limite de longueur d'onde plus importante, qui est définie comme l'intersection de l'émission et la section d'absorption d'état excité, est de 1 637 nm. On prévoit que la plage de longueurs d'onde opérationnelle de l'EDTFA s'étende de 7 nm ou 9 nm de plus dans la longueur d'onde plus élevée que celle de l'EDFA de silice ou de fluorure, respectivement.

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent aux documents de référence à la fin du paragraphe.

Transmission of sixteen 10 Gb/s channels spanning 24 nm between 1 536,61 nm and 1 560,61 nm over 531 km of conventional single-mode fiber was achieved with seven in-line fluoride-based EDFAs [2]¹. Dual-stage flat-gain hybrid (silica/fluoride) EDFA's, allowing for a larger amplification window and a low noise figure, including sections of dispersion compensating fibre (DCF) were used in the transmission of 32 equally spaced 10 Gb/s channels spanning 25 nm over 500 km of conventional single-mode fiber [3].

Transmission equipment included 20 flat-gain fluoride-based line amplifiers with 22 dB to 27 dB gain, +15 dBm typical output power, less than 7 dB typical noise figure and 80 km of DCF has been used in a cross-border WDM networking field trial with all-optical wavelength-translating crossconnects [4].

3.2.4 Reference documents

- [1] "1.5 μ m Fluoride-Based Amplifiers for Wideband Multichannel Transport Networks", B. Clesca, D. Bayard, and J.L. Beylat. *Optical Fiber Technology* 1, pp135-157, 1995
- [2] "Transmission of 16x10Gbps channels spanning 24 nm over 531 km of conventional single-mode fiber using 7 in-line fluoride-based EDFAs", S. Artigaud, M. Chbat, P. Nouchi, F. Chiquet, D. Bayart, L. Hamon, A. Pitel, F. Goudeseune, P. Bousselet, J.L. Beylat. OFC'96 Postdeadline paper
- [3] "320 Gbps WDM transmission over 500 km of conventional single-mode fiber with 125 km amplifier spacing", S. Bigo, Abertaina, M. Chbat, S. Gurib, J. Da Loura, J.C. Jacquinet, J. Hervo, P. Bousselet, S. Borne, D. Bayart, L. Gasca, J.L. Beylat. ECOC'97
- [4] "A cross-border WDM networking field trial with all-optical wavelength-translating cross-connects", L. Berthelon, S. Bjornstad, P. Bonno, P. Bousselet, M. Chbat, C. Coeurjolly, P.J. Godsvang, R. Gronvold, P.M. Kjeldsen, A. Kleivstul, A. Jourdan, J.S. Mapsen, A. Noury, T. Olsen, G. Soulage. OFC'98 Postdeadline paper

3.3 Erbium doped tellurite fibre amplifiers (EDTFAs)

3.3.1 Introduction

Tellurite glass is an oxide-based material with a high refractive index of about 2. A tellurite-based EDFA (EDTFA) can be used to achieve wider amplification bandwidth than EDSFA and EDFFA. In addition, EDTFA can also provide other optical fibre amplifier properties such as polarization insensitivity, low noise figure and high saturation power.

3.3.2 EDTFA general characteristics

The amplification mechanism of erbium-doped tellurite-based fibre amplifier (EDTFA) is the same as that of silica-based EDFA. It is based on the stimulated emission from the $^4I_{13/2}$ level to the $^4I_{15/2}$ level of erbium ions. In terms of optical properties, erbium-doped tellurite glass has a few differences. These include high refractive indices of about 2,0, which result in a larger stimulated emission cross-section than conventional silica-based glass [1]. The cross-section in the 1 530 nm to 1 580 nm wavelength region is larger by a factor of about 1,3 than that in silica-based glass and it is larger by a factor of more than 2 at about 1 600 nm. Based on the Judd-Ofelt analysis, the Ω parameters in tellurite glass are $\Omega_2 = 4,116 \times 10^{-20} \text{cm}^2$, $\Omega_4 = 1,805 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ and $\Omega_6 = 8,486 \times 10^{-21} \text{cm}^2$. The longer wavelength limit, which is defined as the intersection of the emission and the excited state absorption cross-section, is 1 637 nm. The operational wavelength range of the EDTFA is expected to extend 7 or 9 nm further into the longer wavelength than that of silica or fluoride based EDFA respectively.

¹ Figures in brackets refer to the reference documents at the end of the subclause.

La fibre de tellurure dopée à l'erbium (EDF) est fabriquée au moyen d'une méthode d'étirage-revêtement. Les dispositifs préformés et les tubes de revêtement sont préparés par une méthode de coulage-aspiration et coulage à rotation, respectivement. La température de transition vitreuse est de 400 °C approximativement. La perte de fond de l'EDF de tellurure est inférieure à 30 dB/km à 1 200 nm.

Concernant l'ensemble de modules d'EDF de tellurure, la différence majeure réside dans la technologie utilisée pour l'épissurage de la fibre de tellurure et de silice. Une technique de connexion à rainure en V inclinée est utilisée pour obtenir l'épissurage à faible perte et faible réflexion entre les fibres. La réflexion et la perte d'insertion à la connexion à rainure en V inclinée sont généralement de 0,3 dB et <-50 dB respectivement [2].

3.3.3 Performances type d'EDTFA

Les longueurs d'onde de pompe pour l'EDTFA sont de 980 nm et de 1 480 nm. Le fonctionnement à faible bruit peut être aisément obtenu en utilisant un plan de pompage de 980 nm. Les longueurs d'onde de fonctionnement pour les EDTFA pompés de 980 nm et 1 480 nm sont presque identiques [3].

Le profil de gain est affecté par le facteur d'inversion des populations moyen. La longueur d'onde de fonctionnement d'un EDTFA avec une faible inversion moyenne des populations peut être réalisée au moyen d'une longueur de fibre plus élevée, en déplaçant la fenêtre de gain dans une région de longueurs d'onde plus élevées.

Pour le fonctionnement à large bande entre 1 530 nm et 1 610 nm, l'EDTFA a une crête de gain élevé à environ 1 560 nm. Les profils de gain des amplificateurs de tellurure et de silice sont légèrement différents à environ 1 580 nm. L'amplificateur à tellurure a un plateau dans son profil de gain. De plus, la fenêtre de gain est légèrement plus large à l'extrémité de la longueur d'onde plus élevée. De ce fait, l'EDTFA peut être utilisé pour fournir une amplification à large bande hautement efficace avec configurations d'égaliseur de gain à étages multiples et étages moyens.

Dans le fonctionnement de la bande de 1 580 nm, l'EDTFA possède une largeur de bande élevée de 50 nm comprise entre 1 560 nm et 1 610 nm avec une variation de gain d'environ 10 %. L'EDSFA possède une largeur de bande d'environ 38 nm avec la même variation de gain. Le rendement de conversion et le facteur de bruit de l'EDTFA à bande de 1 580 nm sont presque les mêmes que ceux de l'EDSFA [4].

3.3.4 Applications d'EDTFA

Les EDTFA possèdent des applications similaires aux EDSFA. Les EDTFA peuvent être une manière intéressante d'obtenir des liens optiques, analogiques ou numériques, avec une plage de longueurs d'onde de fonctionnement comprise entre 1 530 nm et 1 620 nm.

De nos jours, les EDTFA avec une longueur d'onde de fonctionnement large peuvent être utilisés en tant que survolteurs, préamplificateurs et amplificateurs en ligne. Une transmission WDM de 3 Tb/s (voies de 160 Gb/s × 19) a été démontrée au moyen d'un EDTFA comme un amplificateur de récupération. Un EDTFA à bande de 1 580 nm a été utilisé lors d'une expérience de transmission exempte d'erreur à 10 Gb/s.

L'EDTFA à haute concentration d'erbium a également été étudié en vue d'une utilisation dans un amplificateur de petite taille pour compenser la perte d'insertion de divers dispositifs optiques.

Tellurite-based erbium-doped fibre (EDF) is fabricated using a jacketing-drawing method. The preforms and jacketing tubes are prepared by suction-casting and rotational casting method respectively. The glass transition temperature is approximately 400 degree centigrade. The background loss of the tellurite-based EDF is less than 30 dB/km at 1 200 nm.

As regards to tellurite-based EDF module assembly, the main difference is the technology used for splicing the tellurite and silica fiber. A slanted V-groove connection technique is used to achieve low-loss and low-reflection splicing between the fibres. The insertion loss and reflection at the tilted V-groove connection is typically 0,3 dB and <-50 dB respectively [2].

3.3.3 EDTFA typical performances

The pump wavelengths for the EDTFA are 980 nm and 1 480 nm. Low-noise operation can be easily achieved by using a 980 nm pumping scheme. The operation wavelengths for 980 nm and 1 480 nm pumped EDTFAs are almost identical [3].

The gain profile is affected by the mean population inversion factor. The operation wavelength of an EDTFA with a low mean population inversion can be realized by using a longer length of fibre, shifting the gain window into a longer wavelength region.

For wide-band operation between 1 530 nm and 1 610 nm, EDTFA has a high-gain peak at about 1 560 nm. The gain profiles of tellurite and silica-based amplifiers are slightly different at around 1 580 nm. The tellurite-based amplifier has a plateau in its gain profile. In addition, the gain window is slightly wider at the longer wavelength end. Therefore, EDTFA can be used to provide highly efficient wideband amplification with multi-stage and mid-stage gain-equalizer configurations.

In the 1 580 nm band operation, the EDTFA has a broad bandwidth of 50 nm from 1 560 nm to 1 610 nm with a gain variation of around 10 %. The EDSFA has a bandwidth of about 38 nm with the same gain variation. The conversion efficiency and noise figure of the 1 580 nm band EDTFA are almost the same as those of the EDSFA [4].

3.3.4 EDTFA applications

EDTFAs have similar applications as EDSFAs. EDTFAs can be an attractive way to obtain optical links, analogue or digital, with an operation wavelength range from 1 530 nm to 1 620 nm.

Today, EDTFAs with wide operation wavelength can be used as boosters, pre-amplifiers and in-line amplifiers. A 3 Tb/s (160 Gb/s $\times$ 19 channels) WDM transmission has been demonstrated using an EDTFA as a booster amplifier. A 1 580 nm band EDTFA was used in an error-free transmission experiment at 10 Gb/s.

EDTFA with high erbium concentration has also been studied for use in a small-size amplifier to compensate for the insertion loss of various optical devices.

3.3.5 Documents de référence

- [1] Y. Ohishi *et al.*, Opt. Lett., 23(4), pp274-276, 1998
- [2] Mori *et al.*, Electron. Lett., 34(9), pp887-888, 1998
- [3] T. Nakai *et al.*, Technical Digest OAA'98, PD5, 1998
- [4] Mori *et al.*, J. Lightwave Technol., Vol.20, pp822-827, 2002

3.4 Amplificateur à fibre dopée à l'ytterbium/erbium (EYDFA)

3.4.1 Introduction

Les bandes d'absorption relativement étroites de Er^{3+} dans la silice et le manque de lasers à haute puissance à ces longueurs d'onde de pompe dans les premiers jours du développement de l'EDFA a entraîné le développement de fibres co-dopées ou sensibilisées pour une amplification de 1,5 μm . C'est là où un second ion est ajouté au cœur de la fibre ayant un niveau d'énergie supérieur proche de, ou isodyname avec, un niveau d'énergie de l'ion actif. Les ions actifs (amplifiants) sont alors pompés par l'intermédiaire d'un transfert d'énergie d'une espèce d'ion à une autre. Le plan le plus réussi est le co-dopage Er:Yb dans un verre aluminio-phosphosilicate qui permet d'obtenir un pompage efficace et des largeurs de bande relativement élevées. Fortuitement, le niveau de $^2\text{F}_{5/2}$ de Yb est virtuellement isodyname avec le niveau de $^4\text{I}_{11/2}$ dans Er^{3+} , permettant un transfert d'énergie direct. Les ions Yb ont une bande d'absorption large, permettant le pompage sur plage de longueurs d'onde entre 800 nm et 1 080 nm et permettant l'utilisation du pompage de 1 060 nm des lasers haute puissance Nd à solides ou fibres.

3.4.2 Caractéristiques générales d'EYDFA

Des résultats satisfaisants utilisant des fibres de silice co-dopées à l'Er:Yb reposent sur un transfert d'énergie efficace vers les ions d' Er^{3+} [1]. Les ions Yb excités optiquement fournissent un transfert d'énergie vers le niveau $^4\text{I}_{11/2}$ d'Erbium (le même niveau excité que lors du pompage avec 980 nm directement) qui ensuite baisse non radiativement au niveau de laser supérieur de $^4\text{I}_{13/2}$. Le soin d'éviter le retour de transfert d'énergie aux ions Yb nécessite une baisse rapide depuis le niveau de $^4\text{I}_{11/2}$, ce qui favorise les hôtes en verre avec une énergie de phonon élevée. Les fibres de silice pure ont présenté des résultats décevants dus à la faiblesse de l'énergie de phonon ($\sim 1\,190\text{ cm}^{-1}$) comparée aux verres de phosphate qui ont une énergie de vibration du réseau cristallin supérieure ($\sim 1\,325\text{ cm}^{-1}$). Cependant, de tels verres tendres présentent plusieurs inconvénients et ne sont pas aisément compatibles avec les fibres de silice standard, par exemple l'épissurage etc. Des travaux ont démontré que de l' Al_2O_3 ajouté à une fibre de phosphosilicate peut fournir un bon taux de transfert d'énergie à l'Erbium dans une fibre, qui est compatible avec les fibres standard [2]. Les rapports de dopage de Yb:Er entre 10:1 et 30:1 sont typiques et cela combiné avec sa section d'absorption élevée assure que l'Yb domine l'absorption de pompe.

Les ions Yb permettent le pompage sur une large plage de longueurs d'onde mais permettent aussi l'utilisation d'ensembles de lasers haute puissance par une pompe de laser intermédiaire. Un tel plan populaire a consisté dans l'utilisation d'ensembles de diodes lasers de 810 nm pour pomper un laser à solide Nd:YAG fonctionnant à 1 060 nm, qui à son tour pompe l'amplificateur à fibre Er:Yb [2]. Le laser à solide agit comme un « convertisseur » de mode, convertissant la sortie multimode de l'ensemble de diodes lasers dans un balancier monomodal pour l'amplificateur à fibre.

Un verre en phosphate pur comme hôte pour le système Er:Yb présente une largeur de bande bien plus réduite que pour l'erbium dans la fibre de silice. Cela présente des désavantages évidents pour les applications WDM mais les travaux sur les fibres de phosphosilicate ont montré que des spectres de gain similaires à ceux de la fibre de silice Er peuvent être obtenus [2].

3.3.5 Reference documents

- [1] Y. Ohishi *et al.*, Opt. Lett., 23(4), pp274-276, 1998
- [2] Mori *et al.*, Electron. Lett., 34(9), pp887-888, 1998
- [3] T. Nakai *et al.*, Technical Digest OAA'98, PD5, 1998
- [4] Mori *et al.*, J. Lightwave Technol., Vol. 20, pp822-827, 2002.

3.4 Erbium/ytterbium doped fiber amplifiers (EYDFA)

3.4.1 Introduction

The relatively narrow absorption bands of Er^{3+} in silica and the lack of high power lasers at these pump wavelengths in the earlier days of EDFA development drove the development of co-doped or sensitized fibres for 1,5 μm amplification. This is where a second ion is added to the fibre core having an upper energy level close to, or isoenergetic with, an energy level of the active ion. The active (amplifying) ions are then pumped via energy transfer from one ion species to another. The most successful scheme is Er:Yb co-doping in an aluminophosphosilicate glass which enables efficient pumping and relatively broad bandwidths to be obtained. Fortuitously, the $^2\text{F}_{5/2}$ level of Yb is virtually iso-energetic with the $^4\text{I}_{11/2}$ level in Er^{3+} , allowing direct energy transfer. The Yb ions have a broad absorption band, enabling pumping over the wavelength range 800 – 1 080 nm and permitting the use of 1 060 nm pumping from high power Nd solid-state or fibre lasers.

3.4.2 EYDFA general characteristics

Successful results using Er:Yb co-doped silica fibres rely on efficient energy transfer to the Er^{3+} ions [1]. The optically excited Yb ions provide energy transfer to the $^4\text{I}_{11/2}$ level of Erbium (the same level excited when pumped with 980 nm directly) which then decays non-radiatively to the $^4\text{I}_{13/2}$ upper laser level. The avoidance of energy transfer back to the Yb ions requires a fast decay from the $^4\text{I}_{11/2}$ level, which favors glass hosts with a high phonon energy. Pure silica fibres have shown disappointing results due to the low phonon energy ($\sim 1\,190\text{ cm}^{-1}$) compared to phosphate glasses which have a higher lattice vibration energy ($\sim 1\,325\text{ cm}^{-1}$). However, such soft glasses have several drawbacks and are not readily compatible with standard silica fibres, e.g. splicing etc. Work has demonstrated that Al_2O_3 added to a phosphosilicate fibre can provide a good energy transfer rate to the Er in a fibre, which is compatible with standard fibres [2]. Doping ratios of Yb:Er between 10:1 and 30:1 are typical and this combined with its high absorption cross-section, ensures that the Yb dominates the pump absorption.

The Yb ions enable pumping over a wide wavelength range but also allow the use of high power laser arrays through an intermediate laser pump. One such popular scheme has been the use of 810 nm laser diode arrays to pump a Nd:YAG solid state laser operating at 1 060 nm, which in turn pumps the Er:Yb fibre amplifier [2]. The solid state laser acts as a 'mode converter', converting the multi-mode output of the laser diode array into a single-mode pump beam for the fibre amplifier.

A pure phosphate glass as the host for the Er:Yb system shows a much reduced bandwidth than for Er in silica fibre. This has obvious disadvantages for WDM applications, but the work on phosphosilicate fibre has shown that gain spectra similar to that of Er silica fibre can be obtained [2].

3.4.3 Performance d'EYDFA

Les premiers résultats utilisant le pompage de diode ont montré une sortie de +21 dBm à 1 542 nm obtenus avec 390 mW de puissance de pompe dans un plan de pompage bidirectionnel [2]. Un gain optique de petits signaux de 40 dB et un gain de >30 dB ont été obtenus pour une sortie de +20 dBm. Des rendements de conversion optiques de ~40 % peuvent être obtenus.

L'utilisation de lasers à solide ou de lasers fibres comme convertisseurs de mode pour les ensembles de diodes lasers permet la réalisation relativement aisée de la mise à l'échelle de la puissance. Une pompe de 900 mW d'un laser de Nd:YLF fonctionnant à 1 053 nm et 1 047 nm a été utilisée pour obtenir +24,6 dBm [1]. Un laser Nd:YAG à pompage à lampe à éclat de haute puissance a aussi été utilisé pour présenter une mise à l'échelle de la puissance de l'amplificateur linéaire jusqu'à +27 dBm pour une pompe de 1,5 W.

Bien qu'il ne soit pas aussi critique que pour une application de préamplificateur, le facteur de bruit de tels amplificateurs de récupération représente également un paramètre important. Les fibres co-dopées à l'Er:Yb se sont approchées du facteur de bruit à limite quantique similaire aux EDFA standard.

On a démontré des puissances de sortie supérieures ces dernières années par l'utilisation de la technologie des pompes à gainage [3]. L'utilisation d'un laser à pompe intermédiaire comme convertisseur de mode diminue le rendement global et la puissance globale disponibles pour pomper la fibre. Etant donné la large absorption de l'ion Yb, il serait utile de pomper la fibre directement avec une diode laser haute puissance. Des fibres constituées de deux cœurs concentriques ont été développées pour permettre le pompage multimode de la fibre directement. Le cœur monomodal dopé est entouré par un second cœur multimodal qui est finalement encapsulé dans une gaine extérieure. La lumière de pompage injectée dans le cœur multimodal croise aléatoirement le cœur monomodal dopé et est absorbée lors de cette action. L'absorption de pompe est réduite à partir du plan de pompage monomodal pur en gros en proportion au rapport des zones de cœur multimodal au cœur monomodal. Le coefficient d'absorption élevé de Yb dans la région 950 nm à 980 nm et les niveaux élevés de dopage de Yb permettent une absorption de pompe efficace et une inversion d'ion Er dans de courts segments de fibres à double gaine et ils rendent ce plan pratique. Le pompage final avec 620 mW à 962 nm a donné une sortie de +17 dBm dans une conception non optimisée [3]. Plus récemment, un dispositif compact utilisant un pompage latéral a été consigné [4]. En utilisant une coupe à rainure en V dans la fibre à double gaine pour coupler la lumière de pompage, on a démontré une sortie de +25 dBm pour une puissance de pompe de 1,25 W et un facteur de bruit de 4,5 dB à 1 570 nm.

3.4.4 Applications d'EYDFA

Les puissances de sortie élevées et les facteurs faibles de bruit que l'on peut obtenir avec le EYDFA ont conduit à son utilisation sur le marché de la CATV où des réseaux optiques de diffusion nécessitent des amplificateurs optiques de type de récupération avec puissances de sortie élevées. L'avancement dans les diodes laser monomodales de 980 nm et 1 480 nm signifie que les exigences de puissance pour les réseaux de télécommunications et de données peuvent actuellement être satisfaites avec ces dispositifs et que les EDFA conventionnels dominent ce marché. De plus, les limites de largeur de bande spectrale des fibres Er:Yb courantes n'ont pas favorisé son utilisation dans le déploiement des réseaux de WDM où des largeurs de bande > 30 nm sont requises. Cependant, de récents résultats ont montré des EYDFA donnant une ondulation du gain de 0,2 dB sur une largeur spectrale de 14 nm avec une sortie de +24,6 dBm et un facteur de bruit de 5,2 dB [5]. Un amplificateur hybride constitué d'un premier étage de fibres à erbium standard suivi par un second étage de fibres Er:Yb, a démontré une sortie atteignant +26 dBm sur 17 nm, avec une ondulation de 0,5 dB et un facteur de bruit de 5 dB [6].

3.4.3 EYDFA performance

Early results using diode pumping showed +21 dBm output at 1 542 nm obtained with 390 mW of pump power in a bi-directional pumping scheme [2]. Small signal optical gain of 40 dB and a gain of >30 dB were obtained for an output of +20 dBm. Optical conversion efficiencies of ~40 % can be achieved.

The use of solid state lasers or fibre lasers as mode-converters for diode laser arrays enables power scaling to be relatively easily achieved. A 900 mW pump from a Nd:YLF laser operating at 1 053 nm and 1 047 nm was used to obtain +24,6 dBm [1]. A high power flash lamp pumped Nd:YAG laser has also been used to show linear amplifier power scaling up to +27 dBm for 1,5 W pump.

Although not as critical as for a preamplifier application, the noise figure of such booster amplifiers is also an important parameter. The Er:Yb co-doped fibres have shown close to quantum limited noise figure similar to the standard EDFAs.

Higher output powers have been demonstrated in recent years through the use of cladding pump technology [3]. The use of an intermediate pump laser as a mode-converter decreases the overall efficiency and power available to pump the fibre. Given the broad absorption of the Yb ion, it would be useful to pump the fibre directly with a high power laser diode. Fibres consisting of two concentric cores were developed to enable multi-mode pumping of the fibre directly. The doped single-mode core is surrounded by a second, multi-mode core which is finally encapsulated in an outer cladding. Pump light launched into the multi-mode core randomly crosses the doped single-mode core and is absorbed as it does so. Pump absorption is reduced from the pure single-mode pumping scheme roughly in proportion to the ratio of the multi-mode to single-mode core areas. The high absorption coefficient of Yb in the 950 nm to 980 nm region and high Yb doping levels, allows efficient pump absorption and Er ion inversion in short double-clad fibre lengths and makes this scheme practical. End pumping with 620 mW at 962 nm has given +17 dBm output in an un-optimised design [3]. More recently, a compact device using side-pumping has been reported [4]. Using a V-groove cut into the double-clad fibre to couple the pump light, +25 dBm output for a pump power of 1,25 W and a noise figure of 4,5 dB at 1 570 nm has been demonstrated.

3.4.4 EYDFA applications

The high output powers and low noise figures obtainable with the EYDFA have led to its use in the CATV market where broadcast optical networks require booster type optical amplifiers with high output powers. The advancements in 980 nm and 1 480 nm single-mode laser diodes has meant that power requirements for telecommunications and data networks can currently be met with these devices and conventional EDFAs dominate this market. In addition, the spectral bandwidth limitations of current Er:Yb fibres has not favored its use in the deployment of WDM networks where bandwidths > 30 nm are required. However, recent results have shown EYDFAs giving 0.2 dB gain ripple over 14 nm spectral width with +24,6 dBm output and 5,2dB noise figure [5]. A hybrid amplifier consisting of a standard erbium fibre first stage followed by a Er:Yb fibre second stage, demonstrated up to +26 dBm output over 17 nm, with 0,5 dB ripple and 5 dB noise figure [6].

La capacité de haute puissance a aussi été utilisée lors de la production de lasers fibres compacts et efficaces. La fibre à Er:Yb a aussi été utilisée dans des lasers haute puissance CW, à déclenchement Q et à blocage de mode fournissant des impulsions à haute énergie et puissance de crête pour des applications telles que le marquage laser, la télémétrie laser et les communications inter-satellites. Des lasers fibres DFB à mono-fréquence ont également été présentés [7], où les supports de gain doivent être courts pour fournir un espacement de mode plus grand et nécessitent ainsi une forte absorption de pompe.

3.4.5 Documents de référence

- [1] S. Grubb *et al.*, Electron Lett. 28 (13) pp1275-1276, 1992
- [2] S. Grubb *et al.*, IEEE Photonics Tech. Lett. 4 (6) pp553-555, 1992
- [3] J.D. Minelly *et al.*, IEEE Photonics Tech. Lett. 5 (3) pp301-303, 1993
- [4] L. Goldberg, J. Koplow, Electron. Lett. 34 (21) pp2027-2028, 1998
- [5] N. Park *et al.*, IEEE Photonics Tech. Lett. 8 (9) pp1148-1150, 1996
- [6] P.F. Wysocki *et al.*, Opt. Lett., 21 (21) pp1744-1746, 1996
- [7] J.T. Kringlebotn *et al.*, Electron. Lett. 30 (12) pp972-973, 1994

4 Amplificateurs à fibre non dopée à l'erbium

4.1 Amplificateurs à fibre de fluorure dopée au praséodyme (PDFFA)

4.1.1 Introduction

L'amplificateur à fibre de fluorure dopée au praséodyme (PDFFA) est un amplificateur à fibre optique pour la longueur d'onde de fonctionnement à environ 1 300 nm. Le PDFFA présente des avantages d'une puissance de sortie de saturation élevée, de gain indépendant de la polarisation, d'une faible distorsion, de facteur faible de bruit en comparaison aux autres amplificateurs dans cette longueur d'onde et, de ce fait, il a été reconnu comme le candidat le plus prometteur pour les systèmes de transmission de 1 300 nm.

4.1.2 Caractéristiques générales de PDFFA

Le mécanisme d'amplification des PDFFA est classé comme un système d'amplification à quatre niveaux. Il est fondé sur l'émission simulée du niveau de $^1G_4$ au niveau de $^3H_5$ des ions de praséodyme [1]. L'absorption à état fondamental de photons de pompage (GSA) se produit entre le niveau de $^3H_4$ et le niveau de $^1G_4$. La longueur d'onde d'absorption de crête est d'environ 1 015 nm. Les ions de praséodyme excités du niveau de $^1G_4$ descendent au niveau de $^3F_4$ très facilement du fait de la relaxation de phonons multiples, parce qu'une différence énergétique entre les deux niveaux n'est que d'environ $3\,000\text{ cm}^{-1}$. La manière la plus efficace d'améliorer ce rendement quantique est de sélectionner un verre à énergie de phonons faible comme hôte de fibre. Parmi les verres à énergies de phonons faibles, le verre de fluorure est le candidat le plus prometteur en tant que matrice de verre hôte pour les ions de praséodyme (Pr). La durée de vie spontanée du niveau de $^1G_4$ est de 110 μs pour la fibre de fluorure à ZrF_4 dopée au Pr [2]. Pour la fibre de fluorure à InF_4 dopée au Pr, la durée de vie spontanée est d'environ 170 μs , parce que le verre de fluorure à InF_4 a un taux de relaxation de phonons multiples plus faible [3]. Le rendement quantique du verre de fluorure à indium pour l'émission spontanée du niveau de $^1G_4$ au niveau de $^3H_5$ est presque le double de celui du verre au zirconium et l'analyse thermique a révélé qu'il possède une stabilité thermique suffisante pour la fabrication de fibre. De plus, la fibre dopée au praséodyme (PDF) avec une structure à diamètre de petit cœur pourrait être utilisée pour obtenir une amplification hautement efficace.

The high power capability has also been used in producing compact and efficient fibre lasers. The Er:Yb fibre has been used in high power CW, Q-switched and mode-locked lasers providing high energy and peak power pulses for applications such as laser marking, laser ranging and inter-satellite communications. Also single frequency DFB fibre lasers have been demonstrated [7], where the gain media needs to be short to provide larger mode spacing and so requires strong pump absorption.

3.4.5 Reference documents

- [1] S. Grubb *et al.*, Electron Lett. 28 (13), pp1275-1276, 1992
- [2] S. Grubb *et al.*, IEEE Photonics Tech. Lett. 4 (6), pp553-555, 1992
- [3] J.D. Minelly *et al.*, IEEE Photonics Tech. Lett. 5 (3), pp301-303, 1993
- [4] L. Goldberg, J. Koplow, Electron. Lett. 34 (21), pp2027-2028, 1998
- [5] N. Park *et al.*, IEEE Photonics Tech. Lett. 8 (9), pp1148-1150, 1996
- [6] P.F. Wysocki *et al.*, Opt. Lett., 21 (21), pp1744-1746, 1996
- [7] J.T. Kringlebotn *et al.*, Electron. Lett. 30 (12), pp972-973, 1994

4 Non-erbium doped fibre amplifiers

4.1 Praseodymium doped fluoride fibre amplifiers (PDFFAs)

4.1.1 Introduction

Praseodymium doped fluoride-based fibre amplifier PDFFA, is an optical fibre amplifier for the operating wavelength at around 1 300 nm. PDFFA has advantages of high saturation output power, polarization independent gain, low-distortion, low-noise figure compared to other amplifiers in this wavelength and therefore has been recognized as a most promising candidate for 1 300 nm transmission systems.

4.1.2 PDFFA general characteristics

The amplification mechanism of PDFFAs is classified as a four-level amplification system. It is based on the stimulated emission of the $^1G_4$ level to the $^3H_5$ level of praseodymium ions [1]. Pump photon ground state absorption (GSA) occurs between the $^3H_4$ level and the $^1G_4$ level. Peak absorption wavelength is about 1 015 nm. The excited praseodymium ions of the $^1G_4$ level descend to the $^3F_4$ level very easily due to multi-phonon relaxation, because an energy difference between both levels is only about $3\,000\text{ cm}^{-1}$. The most effective way of improving this quantum efficiency is to select a low phonon energy glass as the fibre host. Amongst the glasses with low-phonon energies, fluoride glass is the most promising candidate as the host glass matrix for the praseodymium ions. The spontaneous lifetime of the $^1G_4$ level is 110 μs for Pr-doped ZrF_4 -based fluoride fibre [2]. For Pr-doped InF_3 -based fluoride fibre, the spontaneous lifetime is about 170 μs , because InF_3 -based fluoride glass has a lower multi-phonon relaxation rate [3]. The quantum efficiency of indium-based fluoride glass for spontaneous emission of the $^1G_4$ level to the $^3H_5$ level is nearly double that of zirconium-based glass and thermal analysis has revealed that it has sufficient thermal stability for fibre fabrication. In addition, praseodymium-doped fibre (PDF) with small-core diameter structure could be used for achieving highly efficient amplification.

La PDF au fluorure peut être fabriquée en utilisant une méthode d'étirage-revêtement, où le dispositif préformé et le tube de revêtement sont préparés par une méthode de coulage-aspiration et coulage à rotation respectivement. La température de transition vitreuse est d'environ 250 °C pour le verre de fluorure à indium. Les pertes de fond de la PDF de fluorure avec une différence d'indice de réfraction de 3,7 % sont inférieures à 50 dB/km à 1 200 nm.

Concernant l'ensemble de modules de PDF de fluorure, la différence majeure réside dans la technologie utilisée pour l'épissurage de la fibre de fluorure et de silice. Une technique de connexion à rainure en V inclinée est utilisée pour obtenir l'épissurage à faible perte et faible réflexion entre les fibres. La réflexion et la perte d'insertion à la connexion à rainure en V inclinée sont de 0,3 dB et <–50 dB respectivement [2]. Les préoccupations majeures au sujet du PDFFA sont liées à leur fiabilité, telles que l'incompatibilité des verres de fluorure et de silice, la faible température de fusion et la nature hygroscopique du verre de fluorure.

4.1.3 Performances type de PDFFA

Les PDFFAs ne sont pas aussi efficaces que les EDFA. La longueur d'onde de pompe optimale pour le PDFFA est d'environ 1 015 nm bien qu'une source de pompage avec une longueur d'onde d'émission de 980 nm à 1 050 nm puisse être utilisée. Le gain de signal de crête est à environ 1 300 nm et une largeur de bande de 3 dB d'environ 20 nm à 30 nm peut être obtenue pour un fonctionnement en petits signaux. Les coefficients de gain consignés pour les fibres de fluorure, dopées au praséodyme (Pr) à base de zirconium et à l'indium (In), sont de 0,21 dB/mW et 0,26 dB/mW [3] respectivement.

Pour la construction des PDFFA, des sources de pompage à haute puissance sont nécessaires. A ce jour, trois types de sources de pompage ont été consignés. Ce sont des diodes lasers à semi-conducteur de 1 010 nm, des lasers à solide Nd:YLF (de fluorure d'yttrium de lithium dopé au néodyme) à pompage à diode laser et des lasers à fibre dopée au Yb à pompage à diode laser. La longueur d'onde de l'effet laser pour le laser de Nd:YLF est à 1,047 µm, ce qui entraîne une diminution d'approximativement 25 % du rendement de conversion à partir du maximum. La longueur d'onde de l'effet laser pour le laser à fibre dopée au Yb est à 1 030 nm faisant d'elle à peu de chose près la source de pompage optimale de PDFFA.

Pour un PDFFA à pompage Nd:YLF avec configuration à 2 étages, une puissance de sortie saturée d'environ 20 dBm peut être réalisée avec une longueur d'onde de signal à 1 300 nm lorsqu'une puissance de pompage pour chaque étage était d'environ 500 mW. Les facteurs de bruit à 1 300 nm et 1 310 nm sont de 5 dB et de 6 dB respectivement. La dégradation du facteur de bruit aux longueurs d'onde plus élevées est provoquée par une absorption à état fondamental.

4.1.4 Applications de PDFFA

Les PDFFA peuvent être utilisés dans des systèmes de transmission analogiques et numériques. La compatibilité avec la masse des installations à fibres existantes, les fibres monomodales conventionnelles, constitue une considération primordiale pour leur utilisation.

Pour la transmission analogique, une expérience de transmission CATV AM-VSB à 40 voies a été consignée [4]. L'émetteur était un DFB-LD directement modulé fonctionnant à 1,307 µm. La puissance du signal d'entrée dans le module de PDF était 0 dBm et la puissance du signal de sortie était de 17 dBm, et la puissance du signal reçu est de 0 dBm. Avec une profondeur de modulation optique par voie de 7,1 %, CNR de plus de 51 dB, CSO de plus de 65 dB, CTB de plus de 65 dB et un XM de plus de 60 dB pour chaque fréquence porteuse de signal ont été obtenus. On a également confirmé par l'expérience que la qualité de l'image transmise contrôlée sur un téléviseur était excellente.

Pour la transmission numérique, on a effectué une expérience de transmission de signaux NRZ de 10 Gb/s. Un PDFFA a également été utilisé comme amplificateur de récupération ou préamplificateur dans une expérience exempte d'erreurs [5].

Fluoride-based PDF can be fabricated using a jacketing-drawing method, where the preform and jacketing tube are prepared by suction-casting and rotational casting methods respectively. The glass transition temperature is about 250 degree centigrade for In-based fluoride glass. The background losses of the fluoride-based PDF with refractive index difference of 3,7 % are less than 50 dB/km at 1 200 nm.

With regard to fluoride-based PDF module assembly, the main difference is the technology used for splicing the fluoride and silica fibre. A slanted V-groove connection technique is used to achieve low-loss and low-reflection splicing between the fibres. The insertion loss and reflection at the tilted V-groove connection are 0,3 dB and <–50 dB respectively [2]. The major concerns about PDFFAs are related to their reliability such as the incompatibility of fluoride and silica glasses, the low melting temperature and the hygroscopic nature of the fluoride-glass.

4.1.3 PDFFA typical performances

PDFFAs are not as efficient as EDFAs. The optimum pump wavelength for the PDFFA is about 1 015 nm although a pump source with emission wavelength from 980 nm to 1 050 nm can be used. The peak signal gain is at about 1 300 nm and a 3 dB bandwidth of about 20 nm to 30 nm can be obtained for small signal operation. The gain coefficients reported for zirconium-based and In-based Pr-doped fluoride fibres are 0,21 dB/mW and 0,26 dB/mW [3] respectively.

For the construction of PDFFAs high-power pump sources are required. To date, three types of pump sources have been reported. They are 1 010 nm semiconductor laser diode, laser diode pumped Nd:YLF (neodymium-doped yttrium lithium fluoride) solid state laser and laser diode pumped Yb-doped fiber laser. Lasing wavelength of the Nd:YLF laser is at 1,047 μm , resulting in approximately 25 % decrease in conversion efficiency from maximum. Lasing wavelength of the Yb-doped fiber laser is at 1 030 nm making it almost the optimum pump source of PDFFA.

For a Nd:YLF-pumped PDFFA with 2 stage configuration, a saturated output power of about 20 dBm can be realized with a signal wavelength at 1 300 nm when a pump power for each stage was about 500 mW. Noise figures at 1 300 nm and 1 310 nm are 5 dB and 6 dB respectively. The noise figure degradation at longer wavelengths is caused by ground state absorption.

4.1.4 PDFFA applications

PDFFAs can be used in analogue and digital transmission systems. Their compatibility with bulk of the existing fibre plant, the conventional single mode fibre, is a prime consideration for their use.

For analogue transmission, a 40 channel AM-VSB CATV transmission experiment has been reported [4]. The transmitter was a directly modulated DFB-LD operating at 1,307 μm . The input signal power into the PDF module was 0 dBm and the output signal power was 17 dBm, and the received signal power is 0 dBm. With an optical modulation depth per channel of 7,1 %, CNR of over 51 dB, CSO of over 65 dB, CTB of over 65 dB and an XM of over 60 dB for each signal carrier frequency were obtained. Also confirmed in the experiment was that the transmitted picture quality monitored on a television set was excellent.

For digital transmission, a 10 Gb/s NRZ signal transmission experiment has been carried out. A PDFFA was also used as a booster or pre-amplifier in an error-free experiment [5].

4.1.5 Documents de référence

- [1] Y. Ohishi *et al.*, Opt. Lett., 16, pp1747-1749, 1991
- [2] Y. Ohishi *et al.*, IEICE Japan Trans. Comm., E77-B, pp421-440, 1994
- [3] Y. Nishida *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 9(3), pp1972-1973
- [4] H. Yoshinaga *et al.*, Technical Digest OFC'95, PD2, 1995
- [5] M. Yamada *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 7, pp869-871, 1995

4.2 Amplificateurs à fibre de fluorure dopée au thulium (TDFFA)

4.2.1 Introduction

L'amplificateur à fibre dopée au thulium au fluorure (TDFFA) est un amplificateur à fibres optiques avec région de longueurs d'onde de fonctionnement double à environ 1 460 nm et 1 650 nm. Les avantages du TDFFA résident dans la puissance de sortie de saturation élevée, le gain indépendant de la polarisation et le facteur de bruit faible.

4.2.2 Caractéristiques générales de TDFFA

4.2.2.1 Amplification à 1 460 nm

Les ions de thulium agissent comme un système de laser à quatre niveaux avec une transition stimulée du niveau de $^3H_4$ au niveau $^3F_4$. L'amplification de 1 460 nm est limitée par le fait que la durée de vie du niveau supérieur, $^3H_4$, est plus élevée que celle du niveau inférieur, $^3F_4$, que l'on nomme "système d'auto-termination". Les durées de vie mesurées pour les niveaux de $^3H_4$ à $^3F_4$ sont d'environ 1,4 ms et 9,0 ms respectivement [1]. Les techniques de pompage à conversion ascendante et de pompage à longueur d'onde double apparaissent être des moyens efficaces de surmonter ce problème et d'obtenir une inversion de population élevée entre les niveaux de $^3H_4$ et du $^3F_4$ [1] [2].

Avec le pompage de conversion ascendante utilisant un laser Nd:YAG ou Nd:YLF, les ions de thulium excités dans le niveau de $^3F_4$ inférieur sont continuellement excités au niveau $^3H_4$ supérieur [1]. Cela résulte dans la dépopulation du niveau de $^3F_4$ d'ions de thulium ainsi que l'excitation du niveau de $^3H_4$. Avec le pompage à longueur d'onde double, les ions de thulium sont les premiers excités au niveau de $^3F_4$ en utilisant une source laser de 1 560 nm [2]. Les ions de thulium excités dans le niveau de $^3F_4$ inférieur sont excités au niveau de $^3H_4$ supérieur en utilisant un laser Nd:YAG ou Nd:YLF. Cette approche peut réaliser une population légèrement plus élevée dans le niveau de $^3F_4$ que le pompage de conversion ascendante. De ce fait, le profil de gain de petit signal peut être déplacé vers la région de longueur d'onde plus élevée.

4.2.2.2 Amplification à 1 650 nm

Les ions de thulium agissent comme un système de laser à trois niveaux avec une transition stimulée du niveau de $^3F_4$ au niveau de $^3H_6$. La région de gain élevé de la transition $^3F_4$ à $^3H_6$ est comprise entre 1 750 nm et 2 000 nm, de ce fait l'amplification de signal peut obtenue à 1 650 nm en supprimant la grande émission spontanée amplifiée (ESA) ou l'oscillation de laser autour de 1 900 nm. On a consigné que l'ESA et l'oscillation de laser peuvent être supprimés en dopant la gaine avec le terbium [3]. Un pompage efficace peut être obtenu en utilisant une source lumineuse de 1 200 nm.

La différence majeure entre le TDFFA et les autres AFO à fibre de silice réside dans la manière dont le TDFFA est assemblé, à savoir la technologie utilisée pour épissurer la fibre de fluorure et de silice. Une technique de connexion à rainure en V inclinée est utilisée pour obtenir l'épissurage à faible perte et faible réflexion entre les fibres. La réflexion et la perte d'insertion à la connexion à rainure en V inclinée étaient de 0,3 dB et <-50 dB respectivement.

4.1.5 Reference documents

- [1] Y. Ohishi *et al.*, Opt. Lett., 16, pp1747-1749, 1991
- [2] Y. Ohishi *et al.*, IEICE Japan Trans. Comm., E77-B, pp421-440, 1994
- [3] Y. Nishida *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 9(3), pp1972-1973
- [4] H. Yoshinaga *et al.*, Technical Digest OFC'95, PD2, 1995
- [5] M. Yamada *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 7, pp869-871, 1995

4.2 Thulium doped fluoride fibre amplifiers (TDFFAs)

4.2.1 Introduction

Fluoride-based thulium doped fiber amplifier (TDFFA) is an optical fiber amplifier with dual operating wavelength region at around 1 460 nm and 1 650 nm. The advantages of the TDFFA are high saturation output power, polarization independent gain and low-noise figure.

4.2.2 TDFFA general characteristics

4.2.2.1 1 460 nm amplification

Thulium ions act as a four-level laser system with a stimulated transition from the $^3H_4$ to the $^3F_4$ level. The 1460 nm amplification is limited by the fact that the lifetime of the upper level, $^3H_4$, is longer than that of the lower level, $^3F_4$, which is called a "self terminating system". The measured lifetimes for the $^3H_4$ to the $^3F_4$ levels are about 1,4 ms and 9,0 ms respectively [1]. Up-conversion pumping and dual-wavelength pumping techniques appear to be effective ways of overcoming this problem and achieving high population inversion between the $^3H_4$ and the $^3F_4$ levels [1] [2].

With up-conversion pumping using a Nd:YAG or Nd:YLF laser, thulium ions excited in the lower $^3F_4$ level are continuously excited to the upper $^3H_4$ level [1]. This results in the depopulation of the $^3F_4$ level of thulium ions as well as excitation of the $^3H_4$ level. With dual-wavelength pumping, thulium ions are first excited to the $^3F_4$ level by using a 1 560 nm- laser source [2]. Thulium ions excited in the lower $^3F_4$ level are excited to the upper $^3H_4$ level by using a Nd:YAG or Nd:YLF laser. This approach can realize a slightly higher population in the $^3F_4$ level than up-conversion pumping. Therefore, the small signal gain profile can be shifted to the longer wavelength region.

4.2.2.2 1 650 nm amplification

Thulium ions act as a three-level laser system with a stimulated transition from the $^3F_4$ to the $^3H_6$ level. The high gain region of the $^3F_4$ to $^3H_6$ transition is from 1 750 nm to 2 000 nm, therefore signal amplification can be achieved at 1 650 nm by suppressing the large amplified spontaneous emission (ASE) or laser oscillation around 1 900 nm. It has been reported that ASE and laser oscillation can be suppressed by doping the cladding with terbium [3]. Effective pumping can be achieved by using a 1 200 nm light source.

The main difference between the TDFFA and other silica-based fiber OFAs is the way the TDFFA is assembled, i.e. the technology used for splicing the fluoride and silica fiber. A slanted V-groove connection technique is used to achieve low-loss and low-reflection splicing between the fibers. The insertion loss and reflection at the tilted V-groove connection were 0,3 dB and <-50 dB, respectively.

4.2.3 Performance de TDFFA

4.2.3.1 Amplification à 1 460 nm

Avec le pompage à conversion ascendante, la longueur d'onde de gain crête du TDFFA est d'environ 1 460 nm. Le TDFFA peut réaliser un gain maximal de petit signal de plus de 30 dB. L'uniformité de gain est d'environ 27 % pour la longueur d'onde de signal dans la région comprise entre 1 450 nm et 1 480 nm [4]. Le rendement de conversion est d'environ 12 %. Le rendement de conversion augmente tandis que la puissance de pompe augmente. Un facteur de bruit de moins de 6 dB peut être atteint.

Le gain maximal de petit signal peut être amélioré pour le plan de pompage de longueur d'onde double. De plus, la longueur d'onde de crête peut être déplacée à 1 490 nm si une fibre plus longue de fluorure dopée au thulium est utilisée.

4.2.3.2 Amplification à 1 650 nm

Pour le TDFFA avec ions de terbium dopé dans sa gaine, le gain maximal de petit signal et sa longueur d'onde sont affectés à la fois par le rapport de la concentration de terbium à la concentration de thulium et le facteur de recouvrement entre le cœur et le champ de mode du lumière de signal. A ce jour, un gain maximal de petit signal de 35 dB a été consigné en utilisant une puissance de pompe d'environ 140 mW à 1 220 nm [3]. La longueur d'onde de gain crête était à 1 658 nm.

4.2.4 Applications de TDFFA

Les applications de TDFFA sont susceptibles d'être les mêmes que celles l'EDSFA. Le TDFFA peut être une manière intéressante d'obtenir des liens optiques, analogiques ou numériques, avec une plage de longueurs d'onde de fonctionnement comprise entre 1 450 nm et 1 500 nm.

Aujourd'hui, les TDFFA peuvent être utilisés en tant qu'amplificateurs de récupération, préamplificateurs et amplificateurs en ligne. Une expérience de transmission optique à 3 bandes employant un TDFFA et un EDSFA a déjà été démontrée [5]. Des progrès rapides sont en train d'être réalisés dans la TDFFA et quelques publications récentes importantes [6]-[9] sont ajoutées aux références.

4.2.5 Documents de référence

- [1] T. Komukai *et al.*, IEEE Quantum Electron. vol.31, pp1880-1889, 1995
- [2] T. Kasamatsu *et al.*, Proc. OAA'99 (Nara, Japan), PD-1, 1999
- [3] T. Sakamoto *et al.*, Proc. OAA'96 (Monterey, USA), ThC3, 1996
- [4] S. Aozasa *et al.*, IEEE Photon. Tech. Lett., vol.12, pp1331-1333, 2000
- [5] J. Kani *et al.*, Electron Lett., vol.34, p1118-1119, 1998
- [6] F. Roy, OFC'02 (Anaheim), ThZ1 (invited paper), 2002
- [7] F. Roy *et al.*, OFC'01 (Anaheim), PD2, 2001.
- [8] F. Roy *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol.13, pp788-790, 2001
- [9] B.N. Samson *et al.*, OAA'00 (Quebec City), PD6, 2000

4.2.3 TDFFA performance

4.2.3.1 1 460 nm amplification

With the up-conversion pumping, the peak gain wavelength of the TDFFA is about 1 460 nm. The TDFFA can realize a maximum small signal gain of more than 30 dB. Gain flatness is about 27 % for the signal wavelength in the region from 1 450 nm to 1 480 nm [4]. Conversion efficiency is about 12 %. The conversion efficiency increases as the pump power increases. A noise figure of less than 6 dB can be achieved.

The maximum small signal gain can be improved for the dual-wavelength pump scheme. Moreover, the peak gain wavelength can be shifted to 1 490 nm if a longer thulium-doped fluoride fiber is used.

4.2.3.2 1 650 nm amplification

For the TDFFA with terbium ions doped in its cladding, the maximum small signal gain and its wavelength are affected by both the ratio of the terbium concentration to the thulium concentration and the overlapping factor between the core and mode-field of the signal light. To date, a maximum small signal gain of 35 dB has been reported using a pump power of about 140 mW at 1 220 nm [3]. The peak gain wavelength was at 1658 nm.

4.2.4 TDFFA applications

TDFFA applications are likely to be the same as that of the EDSFA. TDFFA could be an attractive way to obtain optical links, analogue or digital, with an operation wavelength range of 1450 nm to 1500 nm.

Today, TDFFAs can be used as boosters, pre-amplifiers and in-line amplifiers. A 3-band optical transmission experiment employing a TDFFA and an EDSFA has already been demonstrated [5]. Rapid progress is being made in TDFFA and a few relevant recent publications [6-9] are added to the references.

4.2.5 Reference documents

- [1] T. Komukai *et al.*, IEEE Quantum Electron. vol.31, pp1880-1889, 1995
- [2] T. Kasamatsu *et al.*, Proc. OAA'99 (Nara, Japan), PD-1, 1999
- [3] T. Sakamoto *et al.*, Proc. OAA'96 (Monterey, USA), ThC3, 1996
- [4] S. Aozasa *et al.*, IEEE Photon. Tech. Lett., vol.12, pp1331-1333, 2000
- [5] J. Kani *et al.*, Electron Lett., vol.34, pp1118-1119, 1998
- [6] F. Roy, OFC'02 (Anaheim), ThZ1 (invited paper), 2002
- [7] F. Roy *et al.*, OFC'01 (Anaheim), PD2, 2001.
- [8] F. Roy *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., vol.13, pp788-790, 2001
- [9] B.N. Samson *et al.*, OAA'00 (Quebec City), PD6, 2000

5 Amplificateurs de Raman à fibre (FRAs)

5.1 Introduction

L'effet de Raman spontané fut découvert par C.V. Raman en 1928, mais ce n'est qu'en 1972 que R.H. Stolen a le premier consigné l'émission stimulée de Raman dans les fibres de silice. Dans les années 1980, on a réalisé des investigations intensives sur les amplificateurs de Raman à fibre (FRA) avec le potentiel de très faible bruit. Les amplificateurs de Raman nécessitent des puissances de pompe élevées et, initialement, seules des pompes de haute puissance à impulsions pouvaient être obtenues avec une puissance suffisante pour pomper les amplificateurs de Raman. Du fait de l'inefficacité de Raman et la performance bien meilleure des EDFA émergentes, l'intérêt pour les FRA a diminué à un moment donné. Récemment, l'intérêt s'est à nouveau accru du fait de la demande pour davantage de largeurs de bande. L'amplification de Raman ne repose pas sur la fluorescence d'un atome et peut être utilisée à n'importe quelle longueur d'onde tant que l'on peut trouver un laser à pompe à haute puissance de la longueur d'onde appropriée. Des développements dans les diodes lasers continus (CW) haute puissance ont stimulé l'intérêt en utilisant les FRA pour fournir le gain à l'extérieur de la fenêtre d'erbium. Une autre raison de cet intérêt récent est l'utilisation de l'amplification de Raman à répartition dans la fibre de transmission pour étendre la distance entre les EDFA et les régénérateurs 3R électriques.

5.2 Caractéristiques générales de FRA

Le mécanisme physique fournissant un gain dans les amplificateurs de Raman à fibre (FRA) diffère en divers aspects de celui des amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA). Tandis que les EDFA reposent sur la fluorescence de l'atome d'erbium, les FRA utilisent un mécanisme de diffusion non linéaire faible pour générer leur gain. Lorsque la lumière traverse un matériau diélectrique optique, une petite fraction de la lumière est diffusée par les vibrations moléculaires (phonons). Une partie de cette lumière diffusée est décalée en fréquence d'une quantité égale à la fréquence de vibration des molécules. Pour certains gaz et cristaux, ce décalage de fréquence peut être discret. Dans des verres, les molécules sont disposées dans une structure amorphe et il peut en résulter une plage beaucoup plus large de modes de vibrations. La crête de décalage de fréquence est d'environ 440 cm^{-1} qui équivaut à environ 100 nm pour une pompe à 1 450 nm, donnant un spectre de gain à 1 550 nm d'environ 30 nm de largeur. L'utilisation de dopants tels que le bore ou le phosphoreux déplace le spectre de gain vers d'autres décalages de fréquences.

Ce processus de diffusion a un temps de réponse de l'ordre des femto-secondes, qui peut être comparé à la durée de vie à fluorescence de l'erbium de 0,5 ms à 10 ms. En conséquence, les FRA peuvent subir la perturbation de saturation à travers voies. Cela peut entraîner que le FRA se comporte comme un dispositif non linéaire lorsqu'il fonctionne dans le régime saturé, ce qui donne une performance médiocre dans les systèmes WDM.

Etant donné que l'effet de Raman est réduit dans la fibre de silice, des longueurs de fibre de l'ordre de dizaines de kilomètres ou plus sont exigées et des puissances de pompes de quelques centaines de milliwatts à plusieurs watts. Les FRA sont en cours d'investigation dans deux différentes configurations:

- a) comme amplificateurs répartis utilisant la fibre de système comme le support de gain, et
- b) comme un amplificateur discret où la fibre de gain a été sélectionnée pour le gain élevé.

Les pompes peuvent être plusieurs diodes discrètes à la longueur d'onde appropriée, fournissant jusqu'à 250 mW chacune. Elles peuvent être à multiplexage en longueurs d'onde et en polarisation pour donner des puissances de pompes supérieures. En variante, des lasers à fibre dopée au Yb et des lasers Raman en cascade peuvent être utilisés pour donner plusieurs puissances de pompe en watts. Le multiplexage en polarisation de pompe peut aussi être utilisé pour minimiser le gain dépendant de la polarisation et le multiplexage en longueurs d'onde de pompe peut être utilisé pour élargir le spectre de gain.

5 Fibre Raman amplifiers (FRAs)

5.1 Introduction

The spontaneous Raman effect was discovered by C.V. Raman in 1928, but was until 1972 that R.H. Stolen first reported of stimulated Raman emission in silica fibres. Fibre Raman amplifiers (FRA) with the potential of very low noise were investigated intensively in the 1980's. Raman amplifiers require high pump powers and initially, only pulsed high power pumps could be achieved with sufficient power to pump Raman amplifiers. Due to the Raman inefficiency and the much better performance of emerging EDFAs, interest in FRAs has dwindled at one time. Recently interest has grown again because of the demand for more bandwidth. Raman amplification does not rely on the fluorescence of an atom and may be used at any wavelength so long as a high power pump laser of the appropriate wavelength can be found. Developments in high power CW diode-lasers have stimulated interest in using FRAs to provide gain outside the erbium window. Another reason for the recent interest is to use distributed Raman amplification in the transmission fibre to extend the distance between EDFAs and electrical 3R regenerators.

5.2 FRA general characteristics

The physical mechanism providing gain in fibre Raman amplifiers (FRA) differs in various aspects from that of erbium doped fibre amplifiers (EDFA). Whereas EDFAs rely on the fluorescence of the erbium atom, FRAs use a weak non-linear scattering mechanism to generate their gain. When light travels through an optical dielectric material, a small fraction of the light is scattered by the molecular vibrations (phonons). Some of this scattered light is shifted in frequency by an amount equal to the vibrational frequency of the molecules. For some gases and crystal, this frequency shift can be discrete. In glasses, the molecules are arranged in an amorphous structure and a much broader range of vibrational modes can result. The frequency shift peak is at about 440 cm^{-1} which equates to about 100 nm for a pump at 1 450 nm, giving a gain spectrum at 1 550 nm of about 30 nm width. The use of dopants such as boron or phosphorous moves the gain spectrum to other frequency shifts.

This scattering process has a response time of the order of femto-seconds, which can be compared to the fluorescent lifetime in erbium of 0.5 ms to 10 ms. Consequently, FRAs may suffer from cross-channel saturation interference. This can result in FRAs behaving as non-linear device when operated in the saturated regime which will give poor performance in WDM systems.

Since the Raman effect is small in silica fibre, lengths of fibre on the order of tens of kilometers or more are required and pump powers from a few hundred milliwatts up to several watts. FRAs are currently being investigated in two different configurations:

- a) as distributed amplifiers using the system fibre as the gain medium, and
- b) as a discrete amplifier where the gain fibre has been selected for high gain.

The pumps may be several discrete diodes at the appropriate wavelength, providing up to 250 mW each. These can be polarization and wavelength multiplexed to give higher pump powers. Alternatively Yb-doped fibre lasers and cascaded Raman lasers can be used to give several Watts pump power. Pump polarisation multiplexing can also be used to minimise polarisation dependent gain and pump wavelength multiplexing can be used to broaden gain spectrum.

La lumière de pompe est habituellement à contre-propagation par rapport au signal dans la fibre de Raman. Cela moyenne le transfert du bruit d'amplitude de la pompe vers le signal. Dans un système de co-propagation, les fluctuations de pompe causent des fluctuations de gain, qui apparaissent comme bruit d'amplitude sur le signal. Cela peut être réalisé au moyen d'un coupleur dépendant de la longueur d'onde, ou au moyen de circulateurs optiques qui ont une largeur de bande élevée de fonctionnement et fournissent également une isolation d'entrée et de sortie.

L'effet de Raman est également dépendant de la polarisation, de sorte qu'une pompe et un signal à polarisation orthogonale ne produisent aucun gain. Dans les systèmes à contre- et co-pompage, les états de polarisation de pompe et de signaux varient lentement les uns par rapport aux autres pendant leur propagation et cette variation peut aussi être instable avec le temps. L'utilisation d'une pompe non polarisée, de pompes à multiplexage en polarisation ou d'un système dans lequel l'état relatif de polarisation entre la pompe et le signal varie de manière significative produit un amplificateur avec gain dépendant de la polarisation faible.

5.3 Performances type de FRA

La performance de FRA peut être caractérisée par un ensemble de paramètres similaire à ceux utilisés pour les EDFA.

La source dominante de bruit dans un FRA bien conçu est le battement spontané de signaux. Le niveau d'ESA du fait de l'effet de Raman est intrinsèquement faible et le bruit de battement de signal spontané peut être comparé à celui d'un amplificateur à l'erbium à inversion complète. Il peut y avoir une petite quantité de perte passive de la fibre de gain ou des coupleurs, bien que des facteurs de bruit externes de moins de 4,5 dB puissent être réalisés. Si le gain d'amplificateur est élevé, alors le bruit de la diffusion de Rayleigh peut devenir dominant. Il existe deux possibilités pour que cela se produise. Premièrement, la diffusion de Rayleigh unique de l'ESA à propagation arrière peut provoquer une augmentation de l'ESA à propagation avant. Cela se manifestera en soi-même comme une augmentation du bruit de battement spontané de signaux. Deuxièmement, le signal de propagation avant peut être à diffusion de Rayleigh deux fois. Il s'agit de la double diffusion de Rayleigh (DRS) et elle provoque une augmentation de la perturbation à chemins multiples. La diffusion de Rayleigh peut être réduite en divisant l'amplificateur en au moins deux étages isolés de gain inférieur. Il convient de noter que les amplificateurs peuvent présenter un facteur de bruit optique faible mais être inutiles pour les communications optiques du fait de la perturbation élevée à chemins multiples. Les mesures de bruits électriques sont de ce fait également nécessaires.

Le spectre de gain pour la fibre de silice n'est pas plat et possède une forme à crête double. Cela peut être compensé par des filtres d'uniformisation de gain ou en utilisant des pompes multiples pour construire une forme de gain composite à largeur de bande élevée. En utilisant huit lasers à pompe à répartition de longueurs d'onde, on a relevé un gain de 4 dB gain en utilisant un amplificateur réparti à 45 km avec une uniformité d'ondulation p-p 1,1 dB sur 100 nm. L'utilisation de pompes multiples peut aider à étendre la largeur de bande mais il existe aussi une interaction entre les pompes tandis qu'elles parcourent la fibre. Des longueurs d'onde plus courtes transfèrent la puissance vers des longueurs d'onde plus grandes et il faut compenser cela en variant les puissances d'entrée de pompe et par une sélection rigoureuse de longueurs d'onde de pompe.

Une faible diaphonie de signal à signal est importante pour les applications WDM. La diaphonie peut avoir lieu lorsque l'amplificateur est mis en fonctionnement en saturation par l'appauvrissement de la pompe, puisque l'amplificateur a une dynamique de gain rapide. La configuration de contre-pompage moyennera les effets d'appauvrissement de pompe sur le temps de transit de l'amplificateur et elle peut réduire la diaphonie de signal à signal à de hautes fréquences. En général, la plupart des FRA à gain élevé sont mis en fonctionnement hors saturation.

The pump light is usually counter propagating with respect to the signal in the Raman fibre. This averages the transfer of amplitude noise from the pump to the signal. In a co-propagating system, pump fluctuations will cause gain fluctuations, which will appear as amplitude noise on the signal. This can be implemented using a wavelength dependent coupler, or by using optical circulators which have a wide bandwidth of operation and will also provide input and output isolation.

The Raman effect is also polarization dependent so that an orthogonally polarized signal and pump will produce no gain. In both counter and co-pumped systems, the pump and signal polarization states will vary slowly with respect to each other as they propagate and this variation may also be unstable with time. The use of an unpolarized pump, polarization multiplexed pumps or a system where the relative state of polarization between the pump and signal varies significantly, will produce an amplifier with low polarization dependent gain.

5.3 FRA typical performances

The performance of FRAs can be characterized by a similar set of parameters to those used for EDFAs.

The dominant noise source in a well-designed FRA is signal-spontaneous beating. The ASE level due to the Raman effect is inherently low and the signal-spontaneous beating noise may be compared to that of a completely inverted erbium amplifier. There may be a small amount of passive loss from the gain fibre or from the couplers, though external noise figures of less than 4,5 dB are achievable. If the amplifier gain is high, then noise from Rayleigh scattering can become dominant. There are two possibilities for this to happen. Firstly, single Rayleigh scattering of the backward propagating ASE can cause an increase in the forward propagating ASE. This will manifest itself as an increase in signal-spontaneous beating noise. Secondly, the forwards propagating signal may be Rayleigh scattered twice. This is double Rayleigh scattering (DRS) and will cause an increase in the multi-path interference. Rayleigh scattering may be decreased by dividing the amplifier into two or more isolated stages of lower gain. It should be noted that amplifiers may exhibit a low optical noise figure but be useless for optical communications due to high multi-path interference. Electrical noise measurements are therefore also necessary.

The gain spectrum for silica fibre is not flat and has a double peak shape. This can be compensated for by gain flattening filters or by using multiple pumps to build a wide-bandwidth composite gain shape. By using eight wavelength distributed pump lasers, 4 dB gain has been shown using a 45 km distributed amplifier with a flatness of 1,1 dB p-p ripple over 100 nm. Using multiple pumps can help extend the bandwidth but there is also interaction between the pumps as they travel along the fibre. Shorter wavelengths transfer power to longer wavelengths and this must be compensated for by varying the pump input powers and careful selection of pump wavelength.

Low signal-signal crosstalk is important for WDM applications. Crosstalk can take place when the amplifier is operated in saturation through the depletion of the pump, since the amplifier has fast gain dynamics. The counter-pumped configuration will average pump depletion effects over the transit time of the amplifier and can reduce signal-signal crosstalk at higher frequencies. In general most high gain FRAs are operated out of saturation.

5.4 Applications de FRA

Le développement de la technologie FRA répartis progresse rapidement parce que comme un processus de gain réparti, à large bande potentielle, il agit comme un préamplificateur à faible bruit réduisant l'accumulation de bruit en cascade globale. L'amélioration résultante du rapport signal à bruit optique et du facteur de qualité du système, Q , a été appliquée dans le sens d'une extension de la portée du système, du rendement spectral et des débits de données. Les FRA deviennent également plus importants tandis que la demande de largeurs de bande augmente étant donné qu'ils sont en mesure de produire un gain à toute longueur d'onde. Des expériences de transmission ont déjà démontré l'utilisation d'amplificateurs discrets dans les fenêtres de 1,3 μm , 1,4 μm et 1,5 μm à 1,6 μm . Les FRA répartis et discrets peuvent fournir plus de 100 nm de largeur de bande en utilisant des pompes à longueurs d'onde multiples.

Les FRA ont été utilisés pour compléter les EDFA et fournir un gain supplémentaire aux longueurs d'onde plus élevées. Ces amplificateurs à l'Erbium/Raman discrets composites ont présenté des gains de 20 dB sur 76 nm avec ondulation de 3 dB. Des FRA à répartition de gain inférieur peuvent être également utilisés avec des EDFA. Neuf voies de 2,5 Gb/s étalées sur ces 76 nm ont été transmises sur 85 km de fibre de système à décalage de dispersion. La fibre à décalage de dispersion possède une teneur en germanium supérieure et fournit un gain supérieur à la fibre standard. Dans une autre expérience, le gain de Raman n'a pas été utilisé pour étendre la largeur de bande de l'EDFA mais plutôt pour la compléter. Le gain réparti présente l'avantage que les puissances d'entrée inférieures peuvent être utilisées dans le système. Cela contribue à atténuer les effets non linéaires tels que la modulation à phase croisée et FWM. Lors d'une expérience récente des voies de 32×10 Gb/s à espacement de 50 GHz ont été transmises dans la région à dispersion nulle sur 640 km de fibre à décalage de dispersion de 1,55 μm .

Les FRA répartis peuvent être utilisés pour compléter un préamplificateur EDF, en utilisant la fibre de système installée comme milieu de gain. Cela peut être utile pour fournir au système une marge pour améliorer un système à un débit binaire supérieur ou à plus de voies tout en maintenant la même fibre installée. Cela peut être utilisé pour des systèmes non répétés ou des systèmes amplifiés à pompage optique à distance pour fournir une portée supplémentaire. Des démonstrations de $8 \times 2,5$ Gb/s sur 5 280 km avec un espacement de répéteurs de 240 km, avec des EDFA à pompage à distance tous les 80 km et un gain de Raman réparti ont été réalisées.

Le gain de Raman peut également trouver une application dans les modules de compensation de dispersion. Étant donné que le gain de Raman est accru dans les fibres à germanium élevé, les fibres à compensation de dispersion peuvent être combinées avec l'amplification de Raman pour fournir une compensation de dispersion sans perte. Une unité a été démontrée au moyen de huit lasers à pompe avec une puissance totale de 390 mW, fournissant 50 nm de fonctionnement à gain plat à travers 16 km de fibre à dispersion avec une dispersion de $-1\,269$ ps/nm à 1 550 nm.

Les FRA possèdent un grand potentiel pour augmenter la performance du système en augmentant la largeur de bande amplifiée et en étendant la portée de systèmes existants avec gain réparti. Les FRA sont déployés commercialement ou figureront dans les prochaines mises en vente de produits par la plupart des vendeurs de systèmes. Bien que la technologie courante soit très prometteuse, il existe encore de la place pour des améliorations significatives dans l'efficacité des amplificateurs et l'utilisation des largeurs de bande.

5.4.1 Documents de référence

- [1] Raman Oscillation in Glass Optical Waveguide, R.H. Stolen, E.P. Ippen, Applied Physics Letters, Vol.20, No.2, 15 January 1972.
- [2] Nonlinear Fiber Optics, G.P. Agrawal, Academic Press, London, 1995.