

# Amplificateurs optiques dans les télécommunications = Amplificatori ottici nelle telecomunicazioni

Autor(en): **Béguin, Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **71 (1993)**

Heft 2

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-875485>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Amplificateurs optiques dans les télécommunications

## Amplificatori ottici nelle telecomunicazioni

Claude BEGUIN, Berne

### 1 Introduction

Dans le domaine des télécommunications actuelles, la transmission de signaux lumineux au moyen de fibres optiques constitue une technique largement répandue et éprouvée. Dans les réseaux interurbains, régionaux et intercentraux numériques, l'utilisation de guides d'ondes optiques représente le mode de transmission le plus économique lorsqu'il s'agit d'acheminer des débits binaires élevés sur des distances importantes ou de transmettre un nombre élevé de canaux. Dans le domaine de la transmission analogique, on est en train de tester les premiers réseaux à fibres optiques servant à distribuer des signaux de TV, c'est-à-dire d'acheminer une quantité relativement importante d'informations à large bande jusque chez l'utilisateur.

Un des avantages saillants de la transmission par fibres optiques réside dans l'atténuation relativement faible de la lumière dans la fibre, comme le montre la figure 1, qui s'élève à environ 0,35 dB/km dans la gamme d'ondes de  $\lambda = 1300$  nm (2<sup>e</sup> fenêtre optique) et seulement à 0,2 dB/km approximativement dans la gamme d'ondes de  $\lambda = 1550$  nm (3<sup>e</sup> fenêtre optique).

Lorsqu'un flux de données optiques est transmis à une grande distance, il subit un affaiblissement proportionnel au trajet ainsi qu'une déformation des impulsions et il doit être amplifié et régénéré au bout d'un trajet assez long, et cela tant du point de vue de l'amplitude que de celui de la position en phase et de la raideur du front des impulsions. On parle alors d'une régénération 3R: Retimeing, Reshaping et Regeneration de l'amplitude.

Les amplificateurs intermédiaires optoélectroniques utilisés à cette fin sont toutefois des composants de systèmes relativement complexes et coûteux, étant donné que le signal reçu par voie optique doit d'abord être transformé en un signal électrique, puis amplifié électriquement et conditionné avant d'être reconverti en un signal optique.

Avec l'application croissante de la technique des fibres optiques, il paraissait donc naturel de rechercher d'autres solutions. A cet égard, les amplificateurs optiques offrent la possibilité d'amplifier directement la lumière en tant que support d'information à très haute fréquence. Cependant, seule une régénération de l'amplitude a lieu dans un amplificateur optique.

Comme mentionné ci-dessus, les amplificateurs optiques peuvent être utilisés comme amplificateurs de

### 1 Introduzione

La trasmissione di segnali mediante fibre ottiche è attualmente una tecnica molto diffusa e ben avviata nell'ambito delle telecomunicazioni. Nelle reti digitali interurbane, nelle reti regionali e in quelle fra centrali l'impiego di conduttori a onde luminose rappresenta il tipo di trasmissione più economico quando occorre superare grandi distanze con flussi di dati considerevoli risp. con un numero di canali elevato. Nell'ambito della trasmissione analogica si stanno sperimentando le prime reti in fibra ottica per sistemi di distribuzione televisivi in grado di trasmettere grandi quantità di informazioni a larga banda fino al singolo utente.

Un vantaggio rilevante della trasmissione mediante fibre ottiche è l'attenuazione relativamente ridotta della luce

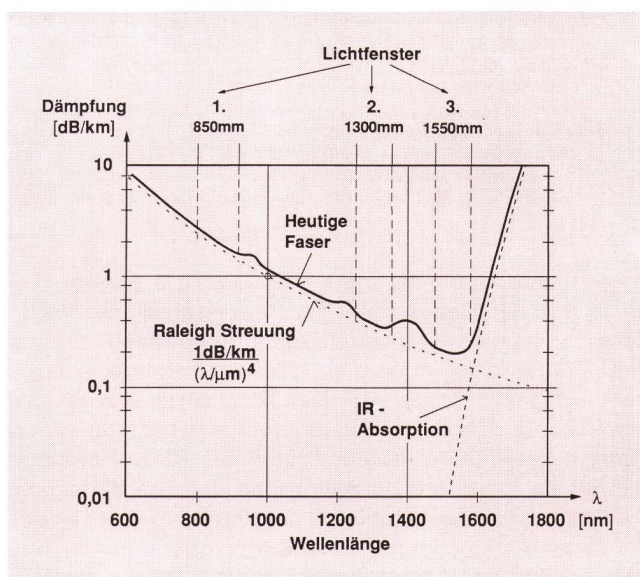


Fig. 1 Atténuation de la fibre en fonction de la longueur d'onde – Attenuazione della fibra in funzione della lunghezza d'onda

2<sup>e</sup> fenêtre optique ~0,35 dB/km – 2<sup>a</sup> Finestra luminosa ~0,35 dB/km

3<sup>e</sup> fenêtre optique ~0,2 dB/km – 3<sup>a</sup> Finestra luminosa ~0,2 dB/km

Lichtfenster – Fenêtre optique – Finestra luminosa

Dämpfung – Atténuation – Attenuazione

Heutige Faser – Fibre actuelle – Fibra attuale

Raleigh Streuung – Dispersion de Raleigh – Diffusione di Raleigh

IR-Absorption – Absorption IR – Adsorbimento IR

Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda

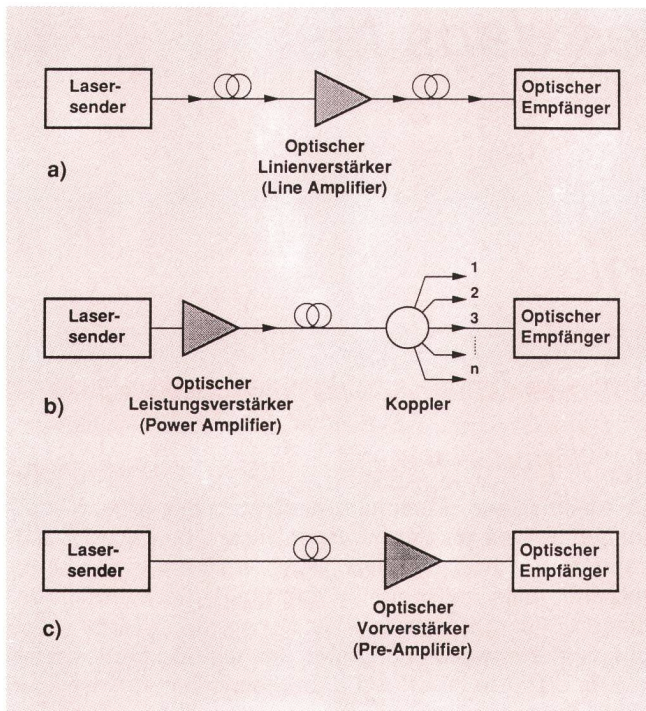


Fig. 2 Utilisations d'amplificateurs optiques – Applications di amplificatori ottici

- a) Amplificateur de ligne optique (Line Amplifier) – Amplificatore di linea ottica (Line Amplifier)
- b) Amplificateur de puissance optique (Power Amplifier) – Amplificatore di potenza ottica (Power Amplifier)
- c) Préamplificateur optique (Pre-Amplifier) – Preamplificatore ottico (Pre-Amplifier)

Lasersender – Emetteur laser – Emittitore laser  
 Optischer Empfänger – Récepteur optique – Ricevitore ottico  
 Optischer Linienverstärker (Line Amplifier) – Amplificateur de ligne optique (Line Amplifier)  
 Optischer Leistungsverstärker (Power Amplifier) – Amplificateur de puissance optique (Power Amplifier)  
 Koppler – Coupleur – Accoppiatore  
 Optischer Vorverstärker (Pre-Amplifier) – Préamplificateur optique (Pre-Amplifier) – Preamplificatore ottico (Pre-Amplifier)

lignes (Line Amplifier) dans les réseaux à grande distance (fig. 2a). Une autre application intéressante réside dans l'utilisation des amplificateurs optiques comme amplificateurs de puissance dans les réseaux à large bande (fig. 2b). Grâce aux niveaux de sortie élevés ainsi amplifiés, la puissance optique peut être répartie sur un nombre beaucoup plus élevé de voies. Un tel procédé permet de raccorder un plus grand nombre d'utilisateurs, les pertes des composants de distribution passifs et des coupleurs étant compensées de manière élégante. Une application supplémentaire est constituée par les pré-amplificateurs à faible bruit du côté des récepteurs, ainsi que le montre la figure 2c [1, 2, 4, 24].

Dans la pratique, deux types d'amplificateurs optiques sont aujourd'hui disponibles:

- d'abord l'amplificateur optique à semi-conducteur SOA (Semiconductor Optical Amplifier)
- et l'amplificateur optique à fibre active OFA (Optical Fiber Amplifier).

Le deuxième type comprend plusieurs sous-types dont l'amplificateur EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) est

nella fibra; come si può osservare nella figura 1, essa è di circa 0,35 dB/km alla lunghezza d'onda di  $\lambda = 1300$  nm (2<sup>a</sup> finestra luminosa) e di soli 0,2 dB/km a quella di  $\lambda = 1550$  nm (3<sup>a</sup> finestra luminosa).

In un flusso ottico di dati trasmesso lungo una grande distanza, gli impulsi subiscono un affievolimento e un'alterazione della forma. Pertanto, dopo un lungo tratto di fibra, devono essere rigenerati sia in ampiezza che in pendenza. In questo caso si parla di *rigenerazione a 3R*: Retiming, Reshaping e Regeneration dell'ampiezza.

Gli amplificatori intermedi optoelettronici impiegati a tale scopo sono componenti relativamente complessi e costosi. Infatti il segnale ottico ricevuto deve essere trasformato in un segnale elettrico, amplificato elettricamente, rigenerato e infine ritrasformato in un segnale ottico.

La crescente diffusione della tecnica delle fibre ottiche ha accelerato la ricerca di altre soluzioni: gli amplificatori ottici offrono la possibilità di amplificare direttamente la luce quale supporto d'informazioni ad altissima frequenza. Tuttavia in un amplificatore ottico viene rigenerata solo l'ampiezza.

Come detto sopra, gli amplificatori ottici possono essere utilizzati nelle reti a grande distanza quali amplificatori di linea (Line Amplifier) (fig. 2a). È inoltre interessante utilizzarli quali amplificatori di potenza nelle reti a larga banda (fig. 2b). Gli elevati livelli d'uscita così amplificati permettono di ripartire la potenza ottica su un numero notevolmente maggiore di linee. In questo modo si possono allacciare più utenti compensando elegantemente le perdite provocate dai componenti di distribuzione e dagli accoppiatori passivi. Gli amplificatori ottici possono essere pure impiegati come preamplificatori a basso rumore nel lato del ricevitore, come illustra la figura 2c [1, 2, 4, 24].

Attualmente sono disponibili due tipi di amplificatori ottici:

- l'amplificatore ottico a semiconduttore (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)
- l'amplificatore di fibre ottiche (Optical Fiber Amplifier, OFA).

Del secondo amplificatore esistono vari tipi: quello con una fibra dotata di erbio (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) è il più avanzato e viene pertanto presentato qui in modo più dettagliato.

Considerando il perfezionamento degli amplificatori ottici e le loro caratteristiche positive si capisce l'importanza attribuita nelle telecomunicazioni a questi componenti.

## 2 Cenni storici

Albert Einstein descrisse i principi di meccanica quantistica, il principio delle emissioni stimolate e quindi l'amplificazione ottica già all'inizio del XX secolo. Prima di realizzare il laser furono tuttavia necessarie molte analisi di materiali che diedero informazioni precise sulla struttura dell'atomo. Solo nel 1960 – ossia vari decenni dopo – si riuscì per la prima volta a generare il laser con un cristallo di rubino in un risonatore ottico (il termine «la-

le plus avancé, si bien qu'il sera décrit en détail dans le présent article.

Les progrès dans le développement des amplificateurs optiques et leurs caractéristiques positives expliquent la grande importance accordée à ces composants de systèmes dans les télécommunications.

## 2 Historique

En examinant l'évolution, on constate qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle déjà, *Albert Einstein* avait décrit les bases de la mécanique quantique, le principe de l'émission stimulée et, partant, celui de l'amplification optique. Pour en arriver au développement du laser, il a toutefois fallu d'abord préparer le terrain par un grand nombre d'analyses du matériel, en vue d'acquérir des connaissances précises de la structure de l'atome. Ce n'est qu'en 1960, c'est-à-dire quelques décennies plus tard, qu'on a réussi pour la première fois à produire un effet laser au moyen d'un rubis dans un résonateur optique (*laser* est une abréviation pour *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Cette invention, associée à une amélioration notable de la qualité des fibres optiques, a engendré un développement fulgurant permettant l'essor de la technique des fibres optiques. L'année 1962 coïncide déjà avec l'invention du premier laser à semi-conducteur. A ce propos, il est intéressant de noter que durant la phase d'introduction de la fibre optique, c'est-à-dire entre 1970 et 1987 environ, relativement peu de travaux ont été réalisés pour mettre au point des amplificateurs optiques, bien que l'Américain *Snitzer* soit déjà parvenu en 1964 à faire fonctionner également des amplificateurs à fibres optiques. Apparemment, il a fallu attendre le passage de la fibre multimode à la fibre monomode en tant que support de transmission type de la technique des fibres optiques pour éveiller l'intérêt pour les amplificateurs optiques. Ainsi, un ouvrage de *N. D. Payne* sur les amplificateurs à fibres optiques dopées à l'erbium publié en 1987 a provoqué une explosion des développements dans ce domaine. Aujourd'hui, on obtient dans le commerce des amplificateurs optiques utilisables pour la gamme d'ondes de 1,5  $\mu\text{m}$ .

## 3 Description physique

Pour permettre aux lecteurs de saisir et d'apprécier les propriétés techniques des amplificateurs optiques, nous allons d'abord brièvement expliquer le fonctionnement des lasers et des amplificateurs optiques.

### 3.1 Génération de la lumière

Conformément à la *figure 3a*, des électrons parcourent leur orbite (bandes quantiques) autour du noyau de l'atome sans dégager d'énergie; ils sont en équilibre thermodynamique. Des influences extérieures peuvent les faire changer de bande quantique, ce qui entraîne une modification de leur niveau énergétique. Lorsqu'un électron se met sur une orbite plus éloignée du noyau atomique, cela s'accompagne d'une absorption d'énergie de l'extérieur, par exemple lorsqu'il y a collision d'un

*ser*) è l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Questa scoperta, accompagnata dal notevole miglioramento della qualità delle fibre ottiche, diede avvio a un frenetico sviluppo che condusse a una forte diffusione della tecnica delle fibre ottiche. Dopo soli due anni, ossia nel 1962, si inventò il primo laser a semiconduttore. A questo riguardo è interessante il fatto che negli anni d'introduzione delle fibre ottiche, cioè dal 1970 al 1987, vennero eseguiti relativamente pochi lavori per lo sviluppo di amplificatori ottici sebbene già nel 1964 l'americano *Snitzer* fosse riuscito a far funzionare anche gli amplificatori di fibre. Evidentemente a risvegliare l'interesse per gli amplificatori ottici fu solo il passaggio dalla fibra multimodo alla fibra monomodo quale mezzo di trasmissione standard della tecnica delle fibre ottiche. Con una pubblicazione sugli amplificatori di fibre dotate di erbio, *N. D. Payne* accelerò notevolmente il loro perfezionamento. Oggi sono disponibili in commercio amplificatori di fibre ottiche per la gamma d'onda di 1,5  $\mu\text{m}$ .

## 3 Descrizione fisica

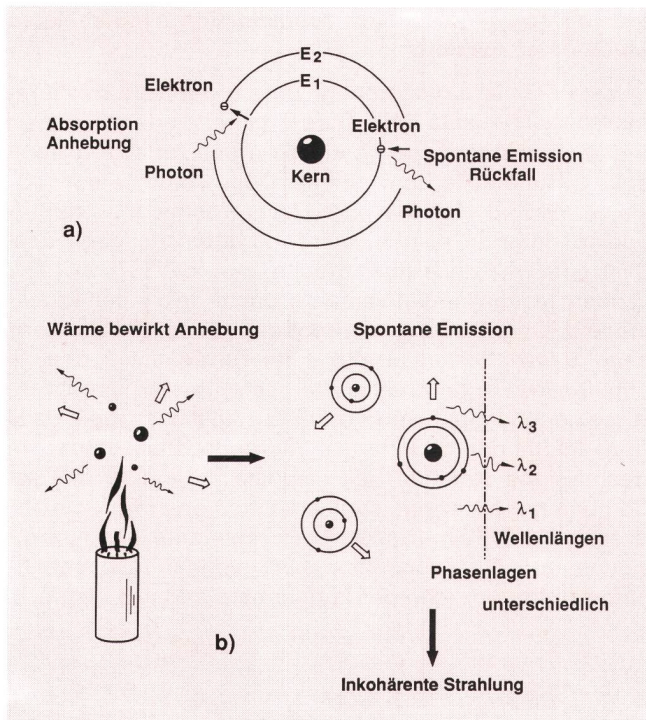
Per poter rilevare e giudicare le caratteristiche tecniche degli amplificatori ottici è utile spiegare brevemente i meccanismi di funzionamento all'interno dei laser e degli amplificatori ottici.

### 3.1 Come nasce la luce

Come illustra la *figura 3a*, gli elettroni si muovono in orbite circolari attorno al nucleo dell'atomo (traiettorie quantiche) senza fornire energia; essi si trovano in un equilibrio termodinamico. Gli elettroni possono cambiare orbita quantica a causa di influssi esterni e modificare così il loro livello energetico. Il fatto che un elettrone salti in un'orbita più esterna è dovuto all'assorbimento di energia dall'esterno, p. es. quando un fotone (quanto di luce) rimbalza sulla struttura dell'atomo e viene assorbito da quest'ultimo.

Se al contrario un elettrone salta da uno stato di eccitazione a un'orbita quantica energeticamente inferiore, ossia più vicina al nucleo dell'atomo, viene liberata energia che può essere emessa sotto forma di fotone.

Nel caso di una candela accesa, il processo chimico genera un forte calore che eccita notevolmente gli atomi e le molecole nella fiamma e trasporta gli elettroni in un'orbita più esterna (*fig. 3b*). Questi stati di eccitazione non sono stabili. Se non sono sottoposti ad influssi esterni, gli elettroni ritornano da soli, ossia *spontaneamente*, allo stato di base dopo un periodo di permanenza media. Siccome questo processo coinvolge diversi tipi di atomi e di molecole, nella fiamma di gas vengono a formarsi quanti di luce di diversa energia risp. lunghezza d'onda. La luce diffusa in tutte le direzioni da una simile fonte si compone pertanto di molte frequenze. Durante questa *emissione spontanea* non vi è alcuna regolarità per ciò che concerne la fase e la direzione di propagazione dei quanti di luce. Questa diffusione viene chiamata luce incoerente nel tempo e nello spazio.



**Fig. 3** *Modèle atomique et génération de la lumière – Modello di atomo e generazione della luce*

- a) Absorption, émission spontanée – Assorbimento, emissione spontanea  
 b) Lumière de bougie et l'explication physique – Luce della candela e spiegazione fisica  
 Elektron – Electron – Elettrone  
 Absorption – absorption – Assorbimento  
 Anhebung – Passage au niveau supérieur – Innalzamento  
 Spontane Emission – Emission spontanée – Emissione spontanea  
 Rückfall – Passage au niveau inférieur – Ricaduta  
 Photon – Photon – Fotone  
 Kern – Noyau – Nucleo  
 Wärme bewirkt Anhebung – La chaleur provoque un passage au niveau supérieur – Il calore provoca l'innalzamento degli elettroni  
 Wellenlängen – Longueurs d'ondes – Lunghezze d'onda  
 Phasenlagen – Déphasage – Fasi  
 Unterschiedlich – Différentes – Diverse  
 Inkohärente Strahlung – Radiation incohérente – Radiazione incoerente

photon avec la structure de l'atome et qu'il est absorbé par celle-ci.

Lorsqu'un électron passe à état d'excitation dans une bande quantique plus profonde, donc plus proche du noyau atomique, de l'énergie est libérée et peut être dégagée sous la forme d'un photon.

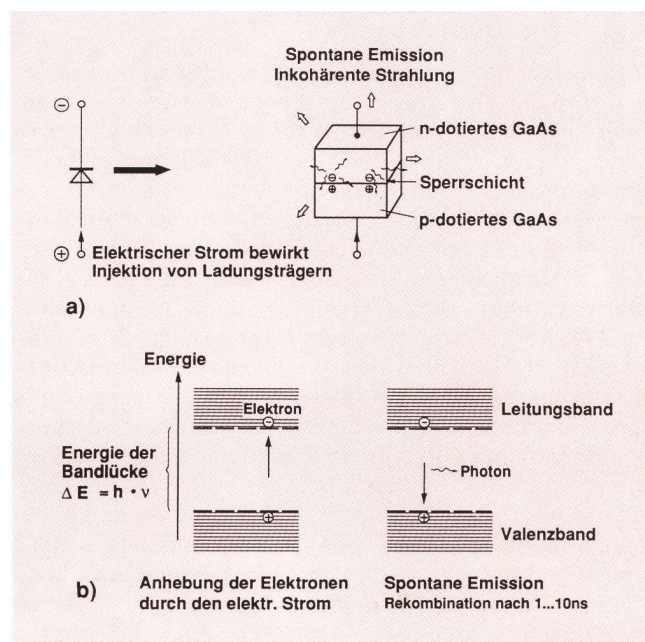
Dans le cas d'une bougie allumée, le processus chimique génère une chaleur intense qui excite fortement les atomes et les molécules dans la flamme, autrement dit qui déplace les électrons sur une orbite plus éloignée (fig. 3b). Ces états d'excitation ne sont pas stables. Sans une influence extérieure quelconque, les électrons retournent d'eux-mêmes, c'est-à-dire *spontanément*, à l'état fondamental au bout d'une période d'attardement moyenne. Vu que ce processus implique la présence d'atomes et de molécules différents dans la flamme du gaz, les photons qui en résultent seront également caractérisés par des énergies et des longueurs d'ondes différentes. La lumière rayonnée à partir d'une telle

I processi d'emissione possono continuare solo se si apporta costantemente energia, nell'esempio della candela ciò avviene mediante la combustione chimica.

### 32 *Generazione della luce nei semiconduttori, emissione spontanea*

Come mostra la figura 4, gli atomi e le molecole possono essere eccitati nei semiconduttori anche con la corrente elettrica. La corrente genera nella giunzione pn un'elevata densità di elettroni e di lacune, che dopo un breve periodo di permanenza si riuniscono (si ricombinano). Questo processo libera energia proporzionalmente alle lacune della banda del materiale utilizzato.

Per generare la luce con i semiconduttori è tuttavia necessario che nel materiale utilizzato si verifichi un *passaggio di banda diretto*. Questa condizione viene soprattutto soddisfatta con i materiali semiconduttori dei com-



**Fig. 4** *Génération de la lumière dans les semi-conducteurs – Generazione di luce in semiconduttori*

- a) Emission spontanée – Emissione spontanea  
 b) Diagramme énergétique – Diagramma del livello energetico  
 Spontane Emission – Emission spontanée – Emissione spontanea  
 Inkohärente Strahlung – Radiation incohérente – Radiazione incoerente  
 n-dotiertes GaAs – GaAs dopé n – GaAs dotato di n  
 Sperrschicht – Couche de jonction – Giunzione  
 Elektrischer Strom bewirkt Injektion von Ladungsträgern – Le courant électrique provoque l'injection de porteurs de charge – La corrente elettrica provoca iniezione di portatori di carica  
 Energie – Energia  
 Elektron – Electron – Elettrone  
 Leitungsband – Bande de conduction – Banda di conduzione  
 Energie der Bandlücke – Energie de l'écart interbandes – Energia della lacuna della banda  
 Valenzband – Bande de valence – Banda di valenza  
 Anhebung der Elektronen durch den elektr. Strom – Passage sous l'effet des électrons par courant électr. – Sollevamento degli elettroni  
 Spontane Emission Rekombination nach 1...10 ns – Emission spontanée recombinaison après 1...10 ns – Emissione spontanea mediante corrente elettrica ricombinazione dopo 1...10 ns  
 Photon – Photon – Fotone

source dans toutes les directions se compose donc de nombreuses fréquences. De même, cette *émission spontanée* ne permet pas d'établir une loi générale concernant le déphasage et la direction de la propagation entre les photons. Ce rayonnement est considéré comme une lumière incohérente dans le temps et dans l'espace.

Pour maintenir ces processus d'émission, il faut continuellement amener de l'énergie, ce qui est dû, dans le cas de la bougie, à la combustion chimique.

## 32 Génération de la lumière dans les semi-conducteurs, émission spontanée

Dans les semi-conducteurs, les atomes et les molécules peuvent également être excités au moyen d'un courant électrique, comme nous le montre la *figure 4*. Dans la couche de jonction pn, le courant produit une haute densité d'électrons et de trous qui se recombinent après un bref délai. Ce processus libère une quantité d'énergie proportionnelle à l'écart *interbandes* du matériau correspondant.

La génération de lumière par le biais de semi-conducteurs exige cependant une *transition de bande directe* dans les matériaux utilisés. Cette exigence est réalisée avant tout par des matériaux semi-conducteurs des *combinaisons III-V*, appelées d'après le système périodique des éléments, et de leurs mélanges. Entrent en ligne de compte les semi-conducteurs composites GaAs (arséniure de gallium), AlAs (arséniure d'aluminium), InP (phosphore d'indium) et InGaAs (arséniure d'indium et de gallium) ainsi que les mélanges correspondants (*fig. 5*). Si l'on veut combiner plusieurs couches de tels cristaux mixtes sans tension mécanique, il faut éviter un déséquilibre entre les constantes du réseau cristallin. C'est pourquoi il n'est possible de combiner que des matériaux présentant des constantes du réseau cristallin pratiquement identiques (lignes de jonction tracées, horizontales).

Ainsi que le révèle la *figure 6a*, les semi-conducteurs dont les maxima et les minima des bandes sont directement superposés sont qualifiés de directs. L'exemple le plus courant d'une source lumineuse semi-conductrice est constitué par une couche de jonction du cristal mixte GaAs. Lorsque des diodes électroluminescentes DEL sont fabriquées à partir de ce cristal mixte binaire, elles rayonnent de la lumière dans la première fenêtre optique vers  $\lambda = 870$  nm.

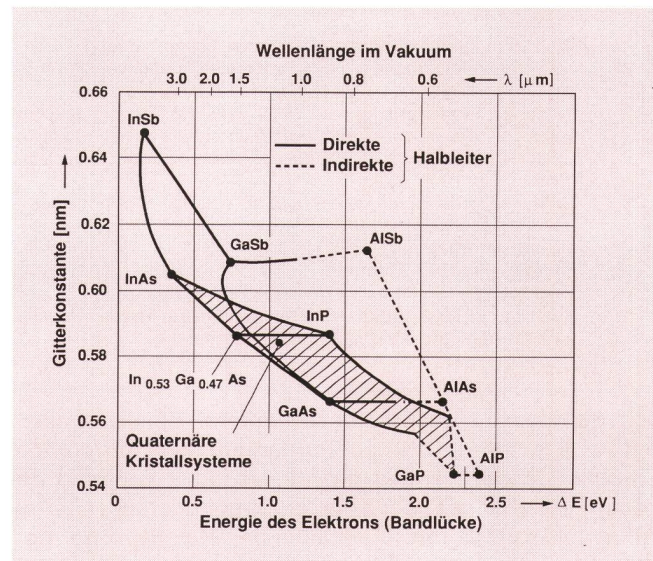
En revanche, les semi-conducteurs indirects tels que Si (silicium), Ge (germanium) et Se (sélénium) produisent uniquement de la chaleur et non pas de la lumière (*fig. 6b*). Le transfert d'électrons se déroule alors latéralement et l'énergie est transmise au réseau cristallin sous la forme d'une impulsion. Ces matériaux sont par ailleurs de purs semi-conducteurs [15, 16].

Un courant passant à travers la couche de jonction d'un semi-conducteur direct provoque donc une excitation d'une minorité d'atomes et de molécules. On parle alors d'un *état d'occupation normal*. Là aussi, la recombinaison

posti III-IV, chiamati così secondo il sistema periodico degli elementi, e delle loro miscele. Si tratta dei semiconduttori misti GaAs (arseniuro di gallio), AlAs (arseniuro di alluminio), InP (fosforo di indio) e InGaAs (arseniuro di gallio e di indio) e delle loro miscele (*fig. 5*). Per unire più strati di questi cristalli misti senza tensione meccanica occorre evitare adattamenti errati fra le costanti del reticolo cristallino. Sono pertanto combinabili solo materiali con costanti del reticolo cristallino praticamente uguali (linee tracciate orizzontalmente fra i composti).

La *figura 6a* illustra che i semiconduttori con bande le cui punte massime e minime si trovano direttamente una sopra l'altra vengono designati semiconduttori diretti. L'esempio più ricorrente di fonte di luce a semiconduttore è rappresentato da una giunzione del cristallo misto GaAs. Se vengono generati da questo cristallo misto binario, i diodi emettono luce nella prima finestra luminosa a  $\lambda = 870$  nm.

I semiconduttori indiretti come Si (silicio), Ge (germanio) e Se (selenio) invece non generano luce ma calore (*fig. 6b*). In questi semiconduttori, lo spostamento degli elettroni avviene trasversalmente e l'energia viene trasferita al reticolo cristallino sotto forma di impulso. Questi materiali sono semiconduttori puri [15, 16].



*Fig. 5* Costante del reticolo cristallin en fonction de l'énergie de l'écart interbandes et de la longueur d'ondes optiques dans le vide dans les matériaux semi-conducteurs III-V – Costanti del reticolo cristallino in funzione dell'energia della lacuna della banda e della lunghezza dell'onda luminosa nel vuoto in materiali semiconduttori III-V

Wellenlänge im Vakuum – Longueur d'onde dans le vide – Lunghezza d'onda nel vuoto  
Halbleiter – Semi-conducteurs – Semiconduttori  
Direkte – Directs – Diretti  
Indirekte – Indirects – Indiretti  
Gitterkonstante [nm] – Costante du réseau cristallin [nm] – Costante del reticolo cristallino [nm]  
Quaternäre Kristallsysteme – Systèmes de cristaux quaternaires – Sistemi di cristalli quaternari  
Energie des Elektrons (Bandlücke) – Energie de l'électron (écart interbandes) – Energia dell'elettrone (lacuna della banda)

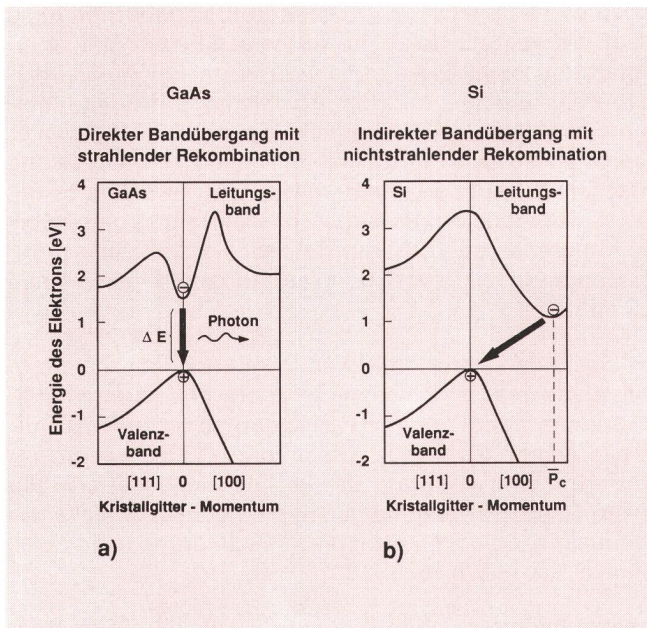


Fig. 6 Structures des bandes de deux semi-conducteurs – Structure della banda di due semiconduttori

- a) Arséniure de gallium, transition de bande directe avec émission de lumière – Arseniuro di gallio, passaggio diretto di banda con emissione di luce  
 b) Silicium, transition de bande indirecte sans génération de lumière – Silicio, passaggio indiretto di banda senza generazione di luce

Direkter Bandübergang mit strahlender Rekombination – Transition de bande directe avec recombinaison radiative – Passaggio diretto di banda con ricombinazione irradiante  
 Indirekter Bandübergang mit nichtstrahlender Rekombination – Transition de bande indirecte avec recombinaison non radiative – Passaggio indiretto di banda con ricombinazione non irradiante  
 Leitungsband – Bande de conduction – Banda di conduzione  
 Energie des Elektrons [eV] – Energie de l'électron [eV] – Energia dell'elettrone [eV]  
 Photon – Photon – Fotone  
 Valenzband – Bande de valence – Banda di valenza  
 Kristallgitter-Momentum – Etat momentané du réseau cristallin – Stato momentaneo del reticolo cristallino

son qui s'ensuit génère de la lumière. L'énergie ainsi émise a la valeur  $\Delta E$ , conformément à la différence énergétique des bandes quantiques ou à l'énergie de l'écart interbandes dans le semi-conducteur (GaAs:  $\Delta E = 1,43$  eV). La formule établie par Max Planck permet de calculer la longueur d'onde dans le vide:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = 870 \text{ nm} \quad (1)$$

$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$ ; constante de Plank  
 $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{m/s}$ ; vitesse de la lumière dans le vide  
 $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{Ws}$ ; conversion en unités SI

Ce phénomène de la génération de lumière est appelé *émission spontanée*. Le rayonnement présente des caractéristiques semblables à celles d'une bougie, à la différence près que la largeur du spectre est nettement plus petite avec 40 nm (fig. 7). Dans ce cas aussi, les photons rayonnés n'ont aucun rapport de phase entre eux, si bien que la lumière est incohérente.

Come detto in precedenza, una corrente eccita una parte minoritaria di atomi e di molecole attraverso la giunzione di un semiconduttore diretto. Ne consegue uno *stato di occupazione normale*. Anche in questo caso gli elettroni e le lacune si ricombinano generando luce. L'energia emessa assume il valore  $\Delta E$ , che corrisponde alla differenza di energia delle traiettorie quantiche risp. all'energia delle lacune della banda nel semiconduttore (GaAs:  $\Delta E = 1,43$  eV). Impiegando la formula stabilita da Max Planck si può calcolare la lunghezza dell'onda luminosa nel vuoto:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = 870 \text{ nm} \quad (1)$$

$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$ ; costante di Plank  
 $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{m/s}$ ; velocità della luce nel vuoto  
 $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{Ws}$ ; conversione in unità SI

Questo fenomeno della generazione di luce è chiamato *emissione spontanea*. La radiazione presenta caratteristiche simili a quelle di una candela con la differenza che la larghezza spettrale di 40 nm è notevolmente inferiore (fig. 7). I fotoni irradiati non hanno fra di loro alcuna relazione di fase, quindi la luce è incoerente.

### 33 Generazione della luce nei diodi a laser, emissione stimolata

Se si incrementa il numero di portatori di carica continuando ad aumentare la corrente si ottiene lo stato in cui vicino al margine della banda ci sono più portatori di carica in stato eccitato che portatori di carica nello stato di base. Si parla in questo caso di inversione di occupazione o, detto brevemente, di inversione. Il procedimento per ottenere questa inversione è chiamato pompaggio (fig. 8a). Se la zona attiva del diodo a laser è ridotta a una striscia sottile e stretta e se, mediante l'impiego di due specchi, la luce viene più volte riflessa avanti e indietro nel laser, si forma una radiazione intensa (fig. 8b). Siccome l'altezza e la larghezza della striscia sono molto ridotte, la luce può propagarsi pratica-

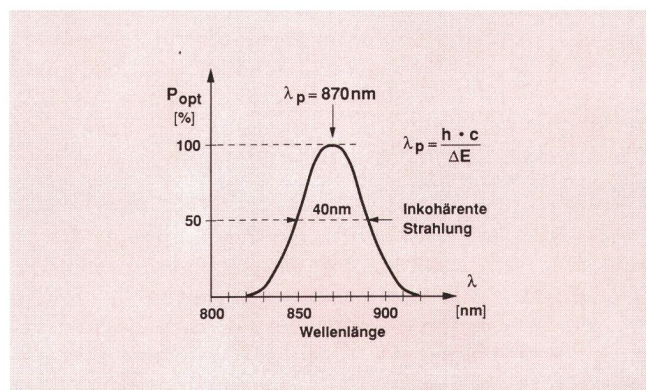


Fig. 7 Spectre de rayonnement d'une diode électroluminescente (DEL) – Spettro di radiazione di un diodo che emette luce (LED)

Inkohärente Strahlung – Rayonnement incohérent – Radiazione incoerente  
 Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda

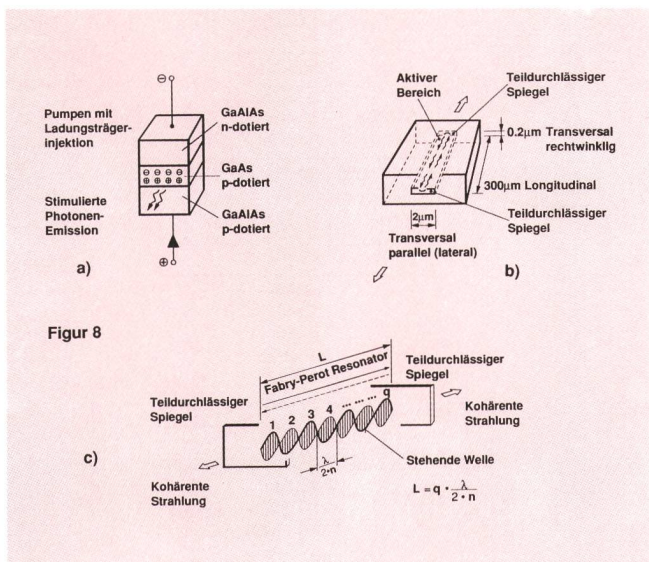


Fig. 8 *Génération de lumière dans les diodes laser – Generazione di luce in diodi a laser*

- a) Pompage électrique dans la puce laser – Pompaggio elettrico nel chip laser
- b) Résonateur Fabry-Perot – Risonatore di Fabry-Perot
- c) Onde optique stationnaire; condition d'interférence dans le résonateur – Onda ottica stazionaria; condizione d'interferenza nel risonatore

Aktiver Bereich – Zone active – Zona attiva  
 Pumpen mit Ladungsträgerinjektion – Pompaggio con iniezione dei portatori di carica  
 GaAlAs n-dotiert – GaAlAs dopé n – GaAlAs dotato di n  
 Transversal rechtwinklig – Transversal à angle longitudinal – Trasversale ad angolo retto  
 Longitudinal – Longitudinal – Longitudinale  
 Stimulierte Photonen-Emission – Emission stimulée de photons – Emissione stimolata di fotoni  
 GaAs p-dotiert – GaAs dopé p – GaAs dotato di p  
 Transversal parallel (lateral) – Transversal parallèle (latérale) – Trasversale parallelo (laterale)  
 Teildurchlässiger Spiegel – Miroir semi-réfléchissant – Specchio parzialmente trasmissivo  
 Fabry-Perot Resonator – Résonateur Fabry-Perot – Risonatore di Fabry-Perot  
 Stehende Welle – Onde stationnaire – Onda stazionaria  
 Kohärente Strahlung – Rayonnement cohérent – Radiazione coerente

### 33 *Génération de la lumière dans les diodes laser, émission stimulée*

Lorsque le nombre de porteurs de charge augmente parce que le courant devient plus intense, on trouvera à la limite de bande davantage de porteurs de charge à l'état d'excitation que de porteurs à l'état fondamental. On parle alors d'une inversion des populations ou d'une inversion tout court. Le processus permettant d'aboutir à cette inversion s'appelle pompaggio (fig. 8a). Lorsque la zone active de la diode laser a la forme d'une bande fine et étroite et lorsque la lumière est réfléchie plusieurs fois dans les deux sens par le laser à l'aide de deux miroirs, on obtient un rayonnement intense (fig. 8b). La hauteur et la largeur de la bande étant très minimes, la lumière ne pourra pratiquement se propager que le long du canal, si bien que l'onde optique sera dirigée. Dans cette cavité de résonance optique appelée résonateur Fabry-Perot, les ondes optiques se superposent positivement (interférences constructives); il en résulte une onde optique stationnaire (fig. 8c). L'équation (2) décrit

mente solo *lungo* la striscia; viene così a crearsi un'onda luminosa *direzionale*. In questo spazio ottico di risonanza, il *risonatore di Fabry-Perot*, si verifica una sovrapposizione positiva (interferenza costruttiva) delle onde luminose; si forma quindi un'onda ottica stazionaria (fig. 8c). L'equazione (2) descrive le condizioni d'interferenza che devono essere soddisfatte nel risonatore:

$$L = q \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot n} \quad (2)$$

L = lunghezza del risonatore  
 q = numero intero  
 $\lambda$  = lunghezza dell'onda luminosa nel vuoto  
 n = indice di rifrazione del materiale del risonatore

In parole: la distanza fra gli specchi deve corrispondere a un multiplo intero della metà della lunghezza dell'onda luminosa nel materiale.

Se nel risonatore si propaga un'onda luminosa sufficientemente intensa, essa influisce nuovi portatori di carica che poco prima sono stati sollevati in grandi quantità. Sotto questo influsso gli stati eccitati vengono stimolati violentemente a emettere un secondo fotone. A questo punto la luce viene amplificata come è illustrato nella figura 9. Il nuovo fotone assume la stessa direzione di propagazione del fotone incidente. La frequenza della luce amplificata corrisponde a quella dell'onda luminosa presente all'inizio. Le diverse onde luminose si sovrappongono in modo da amplificare nella stessa fase l'onda che si propaga. I diodi a laser di Fabry-Perot emettono perciò radiazione coerente, e particolarmente solo in direzione dell'asse del risonatore.

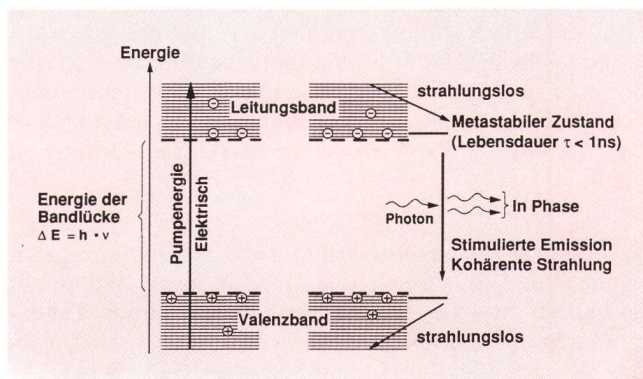


Fig. 9 *Diagramme énergétique de diodes laser – Diagramma del livello energetico dei diodi laser*

Emission stimulée avec rayonnement cohérent – Emissione stimolata con radiazione coerente  
 Energie – Energia  
 Strahlungslos – Non radiatif – Senza radiazione  
 Leitungsband – Bande de conduction – Banda di conduzione  
 Metastabiler Zustand – Etat métastable – Stato metastabile  
 Lebensdauer – Durée de vie – Durata di vita  
 Energie der Bandlücke – Energie de l'écart interbandes – Energia delle lacune della banda  
 Pumpenenergie elektrisch – Energie de pompaggio électrique – Energia di pompaggio elettrica  
 Photon – Photon – Fotone  
 In Phase – En phase – In fase  
 Stimulierte Emission – Emission stimulée – Emissione stimolata  
 Kohärente Strahlung – Rayonnement cohérent – Radiazione coerente  
 Valenzband – Bande de valence – Banda di valenza



la condition d'interférence qui doit être remplie dans le résonateur:

$$L = q \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot n} \quad (2)$$

L = longueur du résonateur  
 q = nombre entier  
 $\lambda$  = longueur d'onde dans le vide  
 n = indice de réfraction du résonateur

Cela signifie que la distance entre les miroirs doit correspondre à un multiple entier de la moitié de la longueur d'onde dans le matériau.

Si elle est suffisamment intense, l'onde optique se propageant dans le résonateur influencera d'autres porteurs de charge libérés en grand nombre peu de temps au préalable. Les états d'excitation sont alors incités (stimulés) «de force» à émettre un deuxième photon. La lumière est ici amplifiée conformément à la figure 9. Le photon nouvellement produit se propagera dans le même sens que le photon incident. En outre, la fréquence de la lumière amplifiée sera conforme à celle de l'onde optique existant initialement. Ensuite, les différentes ondes se superposeront de manière que l'onde qui se propage sera amplifiée en phase correcte. C'est pourquoi les diodes laser Fabry-Perot rayonneront de manière cohérente et, pour l'essentiel, seulement dans le sens de l'axe du résonateur.

Le processus décrit est désigné par le terme *émission stimulée*, dans la mesure où un photon existant initialement stimule ou engendre de force un processus de recombinaison débouchant sur la création d'un nouveau photon.

Il y a lieu de préciser qu'en réalité le retour des électrons de diodes laser à l'état fondamental se déroule à travers plusieurs niveaux énergétiques. Les spécialistes parlent d'un quasi-système à quatre niveaux tel qu'il est illustré dans la figure 9. Le rayonnement laser se produit uniquement lors du passage de la bande de conduction dans la bande de valence.

De nombreux types de lasers semi-conducteurs sont aujourd'hui disponibles sur le marché. Ils se distinguent par leur structure et leur méthode de fabrication. Les lasers les plus répandus sont ceux à *double hétérostructure DH* (fig. 10a). La couche active en GaAs y est, par exemple, enterrée dans deux couches en GaAlAs qui l'enveloppent. Le diagramme énergétique (fig. 10b) révèle qu'un courant polarisé en sens direct fait parvenir horizontalement depuis le haut à gauche les électrons (matériau dopé n) dans la zone active et les trous d'électrons depuis le bas à droite (matériau dopé p). Les barrières de la structure hétérogène empêchent que d'autres porteurs de charge s'échappent de la zone active où l'on constate une accumulation de porteurs de charge (Charge Carrier Confinement). Etant donné que l'écart interbandes atteint son minimum précisément dans la zone active, les porteurs de charge s'y unissent, de sorte que la lumière est amplifiée uniquement dans ce domaine.

En examinant la propagation de la lumière dans le guide d'onde, on constate que l'indice de réfraction des

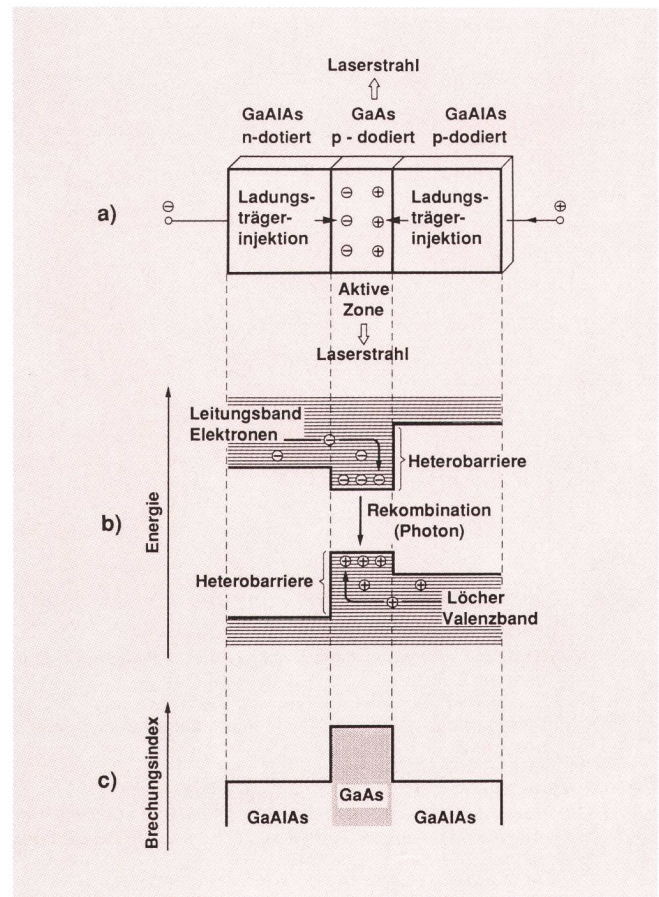


Fig. 10 Structure et principe de fonctionnement d'une diode laser avec double hétérostructure – Struttura e principio di funzionamento di un diodo a laser con doppia eterostruttura

- a) Structure de la couche de jonction pn – Struttura della giunzione pn  
 b) Diagramme énergétique avec barrières à structure hétérogène en cas de courant polarisé dans le sens direct (Charge Carrier Confinement) – Diagramma del livello energetico con eterobarriere, con corrente polarizzata in avanti (Charge Carrier Confinement)  
 c) Profil de l'indice de réfraction (Optical Confinement) – Profilo dell'indice di rifrazione (Optical Confinement)
- Laserstrahl – Rayon laser – Raggio laser  
 GaAlAs n-dotiert – GaAlAs dopé n – GaAlAs dotato di n  
 GaAlAs p-dotiert – GaAlAs dopé p – GaAlAs dotato di p  
 Ladungsträgerinjektion – Injection de porteurs de charge – Iniezione di portatori di carica  
 Aktive Zone – Zone active – Zona attiva  
 Leitungsband – Bande de conduction – Banda di conduzione  
 Elektronen – Electrons – Elettroni  
 Heterobarriere – Barrière de la structure hétérogène – Eterobarriera energia  
 Rekombination (Photon) – Recombinaison (photon) – Ricombinazione (fotone)  
 Löcher – Trous d'électron – Lacune  
 Valenzband – Bande de valence – Banda di valenza  
 Brechungsindex – Indice de réfraction – Indice di rifrazione

Il procedimento qui descritto viene chiamato *emissione stimolata* poiché un fotone presente all'inizio stimola risp. forza il processo di ricombinazione: viene a crearsi un nuovo fotone.

Occorre aggiungere che nel caso dei diodi a laser il ritorno degli elettroni allo stato iniziale avviene attraverso vari livelli energetici. Si parla qui di un sistema a «livello quasi quattro» come viene illustrato nella figura 9. La ra-

couches GaAlAs environnantes est légèrement inférieur à celui de la couche active GaAs (fig. 10c). La lumière est ainsi rayonnée le long de la couche de conduction sous l'effet de la réflexion totale au niveau des jonctions des couches, ce qui est d'ailleurs conforme à la théorie des guides d'ondes optiques (Optical Confinement).

#### 4 Modes de rayonnement laser

Le rayonnement d'une lumière cohérente par une diode laser s'accompagne de la formation d'une onde optique stationnaire dans le résonateur, ce qui s'explique par le fait que la lumière est réfléchiée dans les deux sens. Les fronts d'ondes sont alors parallèles aux miroirs semi-réfléchissants de la cavité. Cette onde stationnaire se compose de modes *longitudinaux* et *transversaux* (fig. 11). Les modes longitudinaux représentent la situation en direction de l'axe du résonateur, c'est-à-dire dans l'axe Z. Les modes transversaux expriment la situation rectangulaire par rapport à l'axe du résonateur (sens X et Y).

Les *modes transversaux* peuvent être subdivisés en modes à faces planes et parallèles et en modes oscillants perpendiculairement par rapport à la couche de jonction.

Les modes à faces planes et parallèles oscillant en direction X sont aussi souvent appelés modes latéraux.

diazione laser viene generata solo durante il passaggio dalla banda di conduzione alla banda di valenza.

Attualmente sul mercato sono disponibili molti tipi di laser a semiconduttore, che si differenziano l'uno dall'altro nella struttura e nel processo di costruzione. La più diffusa è la *eterostruttura doppia* (fig. 10a). Lo strato attivo, formato per esempio di GaAs, viene collocato in due strati di GaAlAs che lo circondano (sandwich GaAs). Dal diagramma dei livelli di energia (fig. 10b) risulta che una corrente polarizzata in avanti lascia fluire nella zona attiva gli elettroni in senso orizzontale da sinistra in alto (materiale dotato di n) e le lacune da destra in basso (materiale dotato di p). Le eterobarriere impediscono un'ulteriore fuga dei portatori di carica dalla zona attiva. In questa zona si forma un'accumulazione di portatori di carica (Charge Carrier Confinement). Dato che nella zona attiva si trova anche la distanza più piccola fra le due bande, i portatori di carica si uniscono in questo spazio e, di conseguenza, solo qui la luce viene amplificata.

Se si analizza la diffusione della luce nella striscia si nota che l'indice di rifrazione degli strati di GaAlAs circostanti è un po' inferiore a quello nello strato attivo di GaAs (fig. 10c). Ne consegue una conduzione della luce dei raggi lungo la giunzione attraverso riflessione totale ai passaggi di strato come dimostra la teoria dei semiconduttori (Optical Confinement).

#### 4 Modi laser

Se un diodo a laser emette luce coerente, nel risonatore si è formata contemporaneamente un'onda ottica stazionaria poiché la luce viene riflessa avanti e indietro. I fronti d'onda hanno un andamento parallelo agli specchi del risonatore parzialmente trasmissivi. L'onda stazionaria è costituita da modi *longitudinali* e *trasversali* (fig. 11). I modi longitudinali rappresentano la situazione nella direzione dell'asse del risonatore ossia nell'asse Z. I modi trasversali indicano le condizioni in senso perpendicolare rispetto all'asse del risonatore (direzioni X e Y).

I *modi trasversali* possono essere suddivisi in modi che oscillano in parallelo ad angolo retto rispetto alla giunzione.

I modi paralleli al piano e oscillanti nella direzione X vengono spesso chiamati anche modi laterali. Riducendo le dimensioni geometriche della zona attiva si può mantenere l'irradiazione, anche lateralmente, solo monomodale sia per i laser «Index Guided» (IGL) sia per i laser «Gain Guided» (GGL).

La figura 8 illustra la formazione dell'onda stazionaria nel *modo longitudinale* nella striscia attiva del laser e l'equazione (2) descrive la condizione d'interferenza. Se per esempio un diodo a laser con una lunghezza del risonatore  $L = 300 \mu\text{m}$  emette luce a  $\lambda = 850 \text{ nm}$  (indice di rifrazione di GaAs:  $n 3,5$ ), nel risonatore trovano posto 2470 semi-oscillazioni.

Se il valore  $q$  cambia ogni volta di uno si hanno nuove lunghezze d'onda che differiscono di  $\Delta\lambda = 0,34 \text{ nm}$ .

Per ottenere amplificazione è necessario che la densità dei portatori di carica nella zona attiva superi un determinato valore critico. Siccome funge da amplificatore di

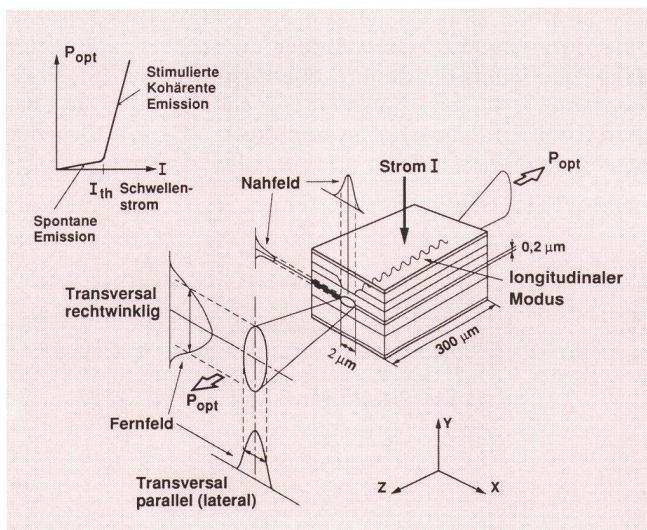


Fig. 11 Modes de rayonnement laser dans la puce semi-conductrice – Modi laser nel circuito a semiconduttore

En haut à gauche: puissance optique en fonction du courant laser – In alto a sinistra: potenza ottica in funzione della corrente laser

Stimulierte kohärente Emission – Emission stimulée cohérente – Emissione coerente stimolata

Strom I – Courant I – Corrente I

Schwellenstrom – Courant de seuil – Corrente di soglia

Nahfeld – Champ proche – Campo vicino

Spontane Emission – Emission spontanée – Emission spontanea

Longitudinaler Modus – Mode longitudinal – Modo longitudinale

Transversal rechtwinklig – Transversal perpendiculaire – Transversale ad angolo retto

Fernfeld – Champ lointain – Campo lontano

Transversal parallel (lateral) – Transversal parallèle (latéral) – Transversale parallelo (laterale)

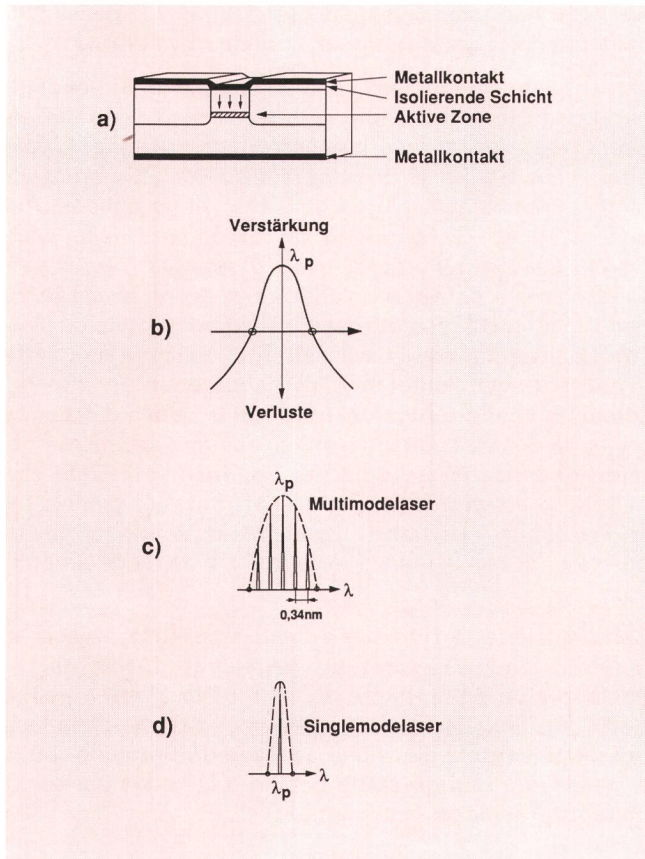


Fig. 12 Propriétés des diodes laser – Propriété dei diodi a laser

- a) Structure – Struttura  
 b) Courbe d’amplification – Curva di amplificazione  
 c) Laser multimode (Multimode Laser) – Laser multimodo (Multimode Laser)  
 d) Laser monomode (Single Mode Laser) – Laser monomodo (Single Mode Laser)  
 Metallkontakt – Contact métallique – Contatto metallico  
 Isolierende Schicht – Couche isolante – Strato isolante  
 Aktive Zone – Zone active – Zona attiva  
 Verstärkung – Amplification – Amplificazione  
 Verluste – Pertes – Perdite  
 Multimodelaser – Laser multimode – Laser multimodo  
 Singlemodelaser – Laser monomode – Laser monomodo

Grâce à des dimensions géométriques réduites de la zone active, il est aujourd’hui possible d’obtenir latéralement aussi un rayonnement monomode, cela aussi bien pour les lasers à guidage d’indice (Index Guided Laser IGL) que pour les lasers à guidage de gain (Gain Guided Laser GGL).

La figure 8 illustre la génération de l’onde stationnaire en *mode longitudinal* dans la bande laser active et l’équation (2) décrit la condition d’interférence. Si une diode laser avec une longueur de résonateur  $L = 300 \mu\text{m}$  émet par exemple de la lumière lorsque  $\lambda = 850 \text{ nm}$  (indice de réfraction de GaAs:  $n$  environ 3,5), on peut calculer que le résonateur peut traiter 2470 demi-oscillations.

Lorsque le nombre  $q$  est modifié à chaque fois de 1, de nouvelles longueurs d’ondes apparaissent qui seront différentes de la valeur  $\Delta \lambda = 0,34 \text{ nm}$ .

Pour qu’une certaine amplification soit obtenue, la densité des porteurs de charge dans la zone active doit dé-

luce, il laser presenta un’amplificazione ottica che può essere rappresentata con una tipica curva di amplificazione (fig. 12a + b). Nel caso dei laser a semiconduttore, la curva di amplificazione ha pressappoco la forma della curva di inviluppo mostrata nella figura e risultante dai passaggi d’energia di diversa durata dalla banda di conduzione alla banda di valenza. La lunghezza d’onda  $\lambda_p$ , la quale presenta la punta massima di amplificazione, è determinata dall’energia delle lacune della banda del materiale semiconduttore (equazione 1).

Come mostrato, si possono formare diversi modi longitudinali la cui lunghezza d’onda differisce di 0,34 nm. A seconda della larghezza della curva di amplificazione vengono amplificati più o meno i modi longitudinali. Se sotto la curva di inviluppo si presentano numerosi modi longitudinali si parla di un *laser multimodo* (fig. 12c).

Se si aumenta la qualità del risonatore migliorando la struttura del laser, il materiale e il tipo d’iniezione, sotto la curva di amplificazione appare praticamente solo un modo longitudinale (fig. 12d). In questo caso si parla di *laser monomodo* [15, 16, 20].

## 5 Amplificatore ottico a semiconduttori (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)

Un chip amplificatore laser a semiconduttore è strutturato in modo simile a un diodo a laser normale con la differenza che la riflessione delle due superfici di uscita della luce viene mantenuta quanto più bassa possibile mediante strati antiriflesso. Ne consegue che la proprietà del risonatore viene soppressa (fig. 13). Si evita così che l’onda si rifletta [7, 8, 9, 10].

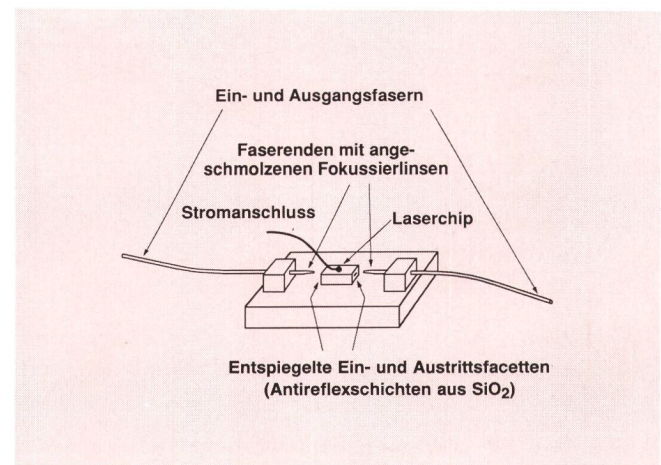


Fig. 13 Structure d’un amplificateur semi-conducteur – Struttura di un amplificatore a semiconduttore

- Ein- und Ausgangsfasern – Fibres d’entrée et de sortie – Fibre di entrata e di uscita  
 Faserenden mit angeschmolzenen Fokussierlinsen – Extrémités de fibres avec lentilles de focalisation tondues – Parti terminali delle fibre con lenti di focalizzazione  
 Stromanschluss – Raccordement électrique – All. corrente  
 Laserchip – Chip-laser – Chip laser  
 Entspiegelte Ein- und Austrittsfacetten (Antireflexschichten aus  $\text{SiO}_2$ ) – Facettes d’entrée et de sortie antireflet (couches antireflet en  $\text{SiO}_2$ ) – Faccette di entrata e di uscita antiriflettenti (strati antiriflettenti di  $\text{SiO}_2$ )

passer une valeur critique déterminée. Fonctionnant comme amplificateur de lumière, le laser présente une amplification optique qui peut être représentée par une courbe de gain typique (fig. 12a+b). Dans les lasers semi-conducteurs, cette courbe de gain revêt grosso-modo la forme de l'enveloppe montrée, déterminée par les jonctions énergétiques de longueurs différentes entre la bande de conduction et la bande de valence. La longueur d'onde  $\lambda_p$ , qui coïncide avec l'amplification maximale, est définie par l'énergie des écarts interbandes du matériau semi-conducteur (équation 1).

Comme on le voit dans la figure, plusieurs modes longitudinaux peuvent se constituer, lesquels se différencient par la longueur d'onde qui varie à chaque fois de 0,34 nm. Le nombre de modes longitudinaux qui sont amplifiés dépend de la largeur de la courbe de gain. Lorsque plusieurs modes longitudinaux apparaissent sous cette enveloppe, on est en présence d'un *laser multimode* (fig. 12c).

En augmentant la qualité du résonateur par une amélioration de la structure du laser, du choix du matériau et du type d'injection, on parvient en pratique à ne générer qu'un seul mode longitudinal sous la courbe de gain (fig. 12d). On parle alors d'un *laser monomode* [15, 16, 20].

## 5 Amplificateurs semi-conducteurs SOA (Semiconductor Optical Amplifier)

La structure d'une puce d'un amplificateur semi-conducteur à laser est semblable à celle d'une diode laser ordinaire, à la différence près que la réflexion des deux surfaces émettrices est réduite au strict nécessaire à l'aide de couches antireflet, ce qui modifie le comportement du résonateur (fig. 13). On évite de la sorte une réflexion de l'onde [7, 8, 9, 10].

Afin que les signaux optiques puissent être injectés et extraits, les facettes d'entrée et de sortie sont munies de raccordements à fibres. Une polarisation de la puce laser légèrement inférieure au seuil de l'effet laser entraîne la formation d'un grand nombre d'atomes excités dans la zone active du point de vue optique (état d'inversion) ainsi qu'une *émission spontanée amplifiée ASE* (Amplified Spontaneous Emission).

En injectant en plus de la lumière extérieure dans la zone active, on obtient une émission stimulée, ce qui aboutit nécessairement à l'émission de nouveaux photons qui amène, elle, une amplification de la lumière d'entrée. S'agissant d'un laser dépourvu d'un miroir réfléchissant, qui permet par conséquent une amplification en un seul passage, on parle d'un amplificateur à ondes progressives TWA (Traveling Wave Amplifier).

Les amplificateurs semi-conducteur présentent des facteurs d'amplification dans la gamme de 10...20 dB, mesurés entre la fibre d'entrée et la fibre de sortie. Ils peuvent fonctionner dans les deux sens (mode bidirectionnel). Cela offre l'avantage qu'une fibre peut contenir des informations transmissibles dans les deux directions. Un inconvénient réside dans les réflexions, porteuses de dérangements, qui proviennent de connecteurs et d'épissures.

Le facette di entrata e di uscita sono collegate con allacciamenti di fibre per l'accoppiamento e il disaccoppiamento di segnali luminosi. Se il circuito laser viene polarizzato con una corrente un po' al di sotto della soglia laser, si forma nella zona otticamente attiva un gran numero di atomi eccitati (stato di inversione). Si verifica quindi un'*emissione spontanea amplificata* (Amplified Spontaneous Emission, ASE).

Se dall'esterno è irradiata luce supplementare nella zona attiva si verifica un'emissione stimolata. Di conseguenza viene stimolata l'emissione di nuovi fotoni che porta all'amplificazione della luce d'entrata. A questo riguardo si parla di *amplificatore a onde progressive* (Traveling Wave Amplifier, TWA) poiché le superfici degli specchi del laser non sono riflettenti e quindi l'amplificazione avviene in un solo passaggio.

Gli amplificatori a semiconduttori presentano fattori di amplificazione nell'ambito di 10...20 dB misurati fra la fibra d'entrata e quella d'uscita. Essi possono essere impiegati in entrambe le direzioni (in modo bidirezionale). Il vantaggio consiste nel fatto che su una fibra si possono trasferire informazioni nelle due direzioni. Lo svantaggio è invece rappresentato dai riflessi che provengono da connettori e punti di giunzione e possono provocare disturbi.

La larghezza di banda dell'amplificazione illustrata dalla figura 14 presenta oscillazioni periodiche più o meno forti che vengono designate con il termine di ondulatione di amplificazione (Gain Ripple) e provengono da riflessi residui (tracce di modi del risonatore di Fabry-Pérot). Gli amplificatori ottici a semiconduttori con una notevole ondulatione dell'ordine di grandezza di 3 dB sono pure chiamati *Near Traveling Wave Amplifier, NTWA* [17, 19, 20, 21].

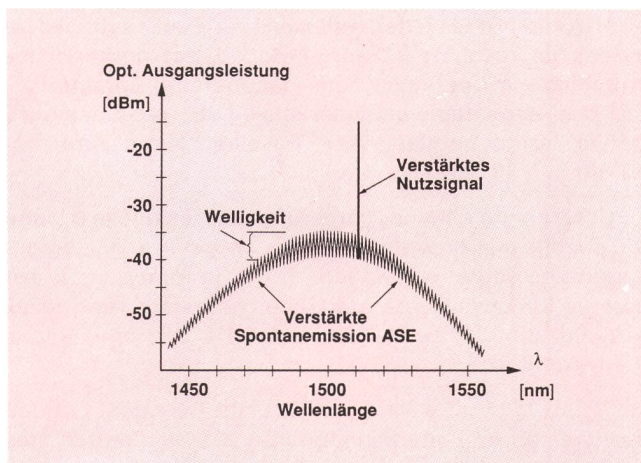


Fig. 14 Amplificateur semi-conducteur – Amplificatore a semiconduttore

Amplification en fonction de la longueur d'onde – Amplificazione in funzione della lunghezza d'onda  
 ASE Amplified Spontaneous Emission  
 Opt. Ausgangsleistung – Puissance optique de sortie – Potenza ottica di uscita  
 Verstärktes Nutzsinal – Signal utile amplifié – Segnale utile amplificato  
 Welligkeit – Ondulation – Ondulazione  
 Verstärkte Spontanemission ASE – Emission spontanée amplifiée ASE – Emissione spontanea amplificata ASE  
 Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda

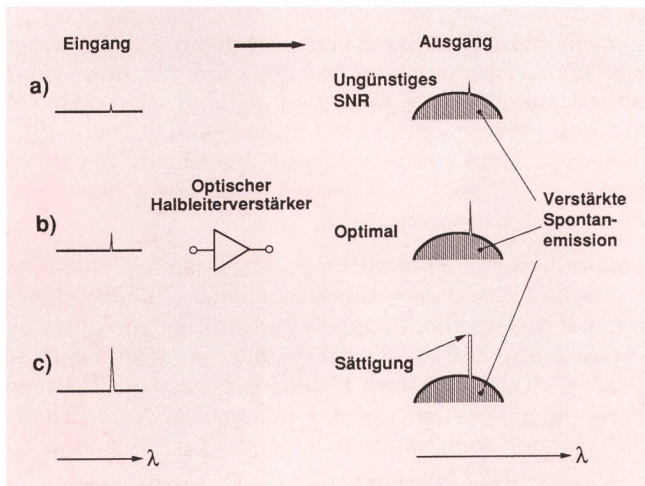


Fig. 15 Situations d'amplification – Situazioni di amplificazione

- a) Signal d'entrée trop faible, rapport signal/bruit défavorable (SNR) – Segnale di entrata troppo debole, rapporto segnale-rumore (SNR) sfavorevole
  - b) Signal d'entrée adapté, amplification optimale – Segnale di entrata adattato, amplificazione ottimale
  - c) Signal d'entrée trop puissant, saturation de l'amplificateur – Segnale di entrata troppo grande, saturazione dell'amplificatore
- Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda  
 Eingang – Entrée – Entrata  
 Ausgang – Sortie – Uscita  
 Ungünstiges SNR – SNR défavorable – SNR sfavorevole  
 Optischer Halbleiterverstärker – Amplificateur optique semi-conducteur – Amplificatore ottico a semiconduttore  
 Verstärkte Spontanemission – Emission spontanée amplifiée – Emissione spontanea amplificata  
 Optimal – Optimal – Ottimale  
 Sättigung – Saturation – Saturazione

La largeur de bande d'amplification représentée dans la figure 14 présente des fluctuations périodiques plus ou moins grandes appelées ondulation du gain (Gain Ripple), qui sont dues à des réflexions résiduelles (traces de modes de résonateur Fabry-Perot). C'est pourquoi les amplificateurs optiques semi-conducteurs caractérisés par une ondulation considérable (3 dB) sont désignés par le terme anglais *Near Traveling Wave Amplifier* NTWA [17, 19, 20, 21].

En parvenant à éliminer cette réflexion résiduelle à l'aide de couches antireflet parfaites, on pourra également supprimer toute ondulation. Dans la pratique, il est aujourd'hui possible de réduire les réflexions résiduelles à moins de  $10^{-4}$ , ce qui correspond à des ondulations d'environ 0,5 dB.

La figure 15 montre l'aspect qualitatif du signal optique avant et après l'amplification. Un signal d'entrée très faible est amplifié, mais associé à la sortie au bruit relativement fort de l'émission spontanée. Il en résulte un rapport signal/bruit SNR (Signal to Noise Ratio) défavorable. Si, en revanche, un signal d'entrée très important est amplifié, l'amplificateur optique arrivera à saturation et le facteur d'amplification pourra ainsi être réduit. Il convient dès lors de souligner que seul un signal d'entrée moyen adapté permet une amplification optimale.

Etant donné que la zone optique active d'un amplificateur laser semi-conducteur présente une coupe à angle droit, celui-ci sera sensible à la polarisation de la lumière

Eliminando queste riflessioni residue mediante strati antiriflettenti perfetti non si constatano più ondulazioni. Nella pratica si possono attualmente raggiungere riflessi residui inferiori a  $10^{-4}$ , il che dà un'ondulazione di 0,5 dB circa.

La figura 15 mostra l'aspetto qualitativo del segnale ottico prima e dopo l'amplificazione. Un segnale di entrata molto debole viene amplificato e si presenta all'uscita con il rumore, relativamente forte, dell'emissione spontanea. Ne deriva un rapporto segnale-rumore SNR sfavorevole (Signal to Noise Ratio). Se d'altro canto viene amplificato un segnale d'entrata molto forte, l'amplificatore ottico raggiunge la saturazione e il fattore di amplificazione viene diminuito. Solo un segnale d'entrata medio adattato può essere amplificato in modo ottimale.

L'amplificatore laser a semiconduttori è sensibile alla polarizzazione della luce irradiata poiché la sua zona otticamente attiva presenta una sezione trasversale ad angolo retto. Nella struttura rettangolare di un conduttore a striscia di un amplificatore laser viene amplificata preferibilmente luce polarizzata parallelamente alla giunzione (polarizzazione TE: *Transversal Elektrisch*) (fig. 16). Se la luce viene immessa in un amplificatore a semiconduttori mediante una polarizzazione che cambia, subentrano nel segnale d'uscita oscillazioni di potenza che provocano disturbi. Strutture laser perfezionate hanno permesso di ridurre la sensibilità di polarizzazione a meno di 0,5 dB.

## 6 Amplificatori di fibre ottiche (Optical Fibre Amplifier, OFA)

Come è stato detto esistono vari tipi di amplificatori. Dato che oggi lo sviluppo degli *amplificatori a fibre do-*

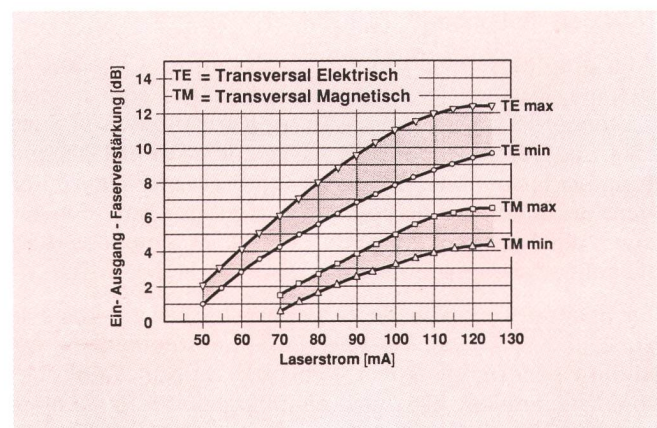


Fig. 16 Fluctuations de l'amplification en cas de polarisation TE et TM en fonction du courant laser – Oscillazioni di amplificazione con polarizzazione TE e TM in funzione della corrente laser

Les valeurs maximales et minimales résultent de l'ondulation, la longueur d'onde étant modifiée par le courant laser – I valori massimi e minimi risultano dall'ondulazione; con la corrente laser viene modificata la lunghezza d'onda  
 TE = Transversal Elektrisch – Electrique transversal – Trasversale elettrico  
 TM = Transversal Magnetisch – Magnétique transversal – Trasversale magnetico  
 Ein-Ausgang-Faserverstärkung – Amplification entrée/sortie fibre – Amplificazione della fibra all'entrata e all'uscita  
 Laserstrom – Courant laser – Corrente laser

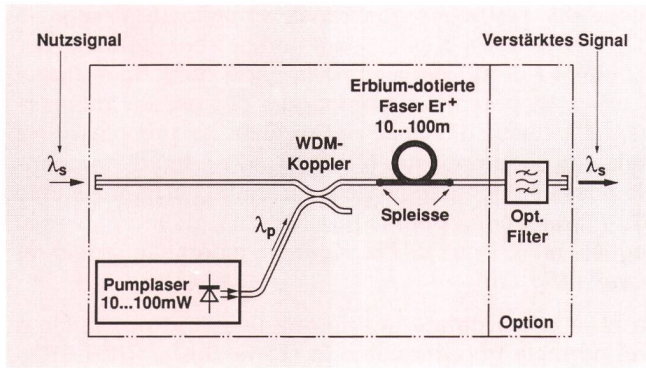


Fig. 17 Structure schématique d'un amplificateur optique à fibre active – Struttura schematica di un amplificatore di fibre ottiche

WDM Wavelength Division Multiplexer  
 Nutzsinal – Signal utile – Segnale utile  
 Verstärktes Signal – Signal amplifié – Segnale amplificato  
 Erblum-dotierte Faser Er<sup>+</sup> – Fibre dopée à l'erbium Er<sup>+</sup> – Fibra dotata di erbio Er<sup>+</sup>  
 Spleisse – Epissures – Giunti  
 WDM-Koppler – Coupleur WDM – Accoppiatore WDM  
 Option – Option – Opzione  
 Opt. Filter – Filtre optique – Filtro ottico  
 Pumplaser – Laser de pompage – Laser di pompaggio

incidente. Lorsqu'un amplificateur laser a la structure d'un guide d'ondes à rubans rectangulaires, la lumière polarisée parallèlement à la couche de jonction (polarisation TE: onde électrique transversale) est amplifiée plus facilement (fig. 16). Lorsqu'une lumière à polarisation variable est injectée dans un amplificateur à semi-conducteur, le signal de sortie sera affecté de fluctuations de puissance gênantes. Les modèles d'amplificateurs les plus récents, qui se distinguent par une structure mieux adaptée du laser, permettent de diminuer la sensibilité à la polarisation à moins de 0,5 dB.

## 6 Amplificateurs optiques à fibre active OFA (Optical Fibre Amplifier)

Il existe plusieurs types d'amplificateurs optiques à fibre active. Le développement des amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium (EDFA) étant aujourd'hui le plus avancé et ses facteurs d'amplification étant les plus élevés, nous décrivons surtout cet amplificateur.

### 61 Structure d'un amplificateur optique à fibre active

Les amplificateurs optiques à fibre active sont constitués de trois éléments de base (fig. 17):

- une fibre optique d'une longueur de 1...100 m, enrichie de traces d'atomes d'erbium (concentration des atomes environ 10...1000 ppm)
- un laser de pompage d'une puissance variant entre 10 et 500 mW
- et un coupleur avec sélection de la longueur d'onde WDM (Wavelength Division Multiplexer).

Dans de nombreuses applications, il est en outre nécessaire de bloquer la lumière de pompage gênante et celle de l'émission spontanée amplifiée en utilisant un filtre

tati di erbio (EDFA) è in fase avanzata e i fattori di amplificazione ottenuti sono i più elevati questo tipo di amplificatore verrà descritto in modo particolarmente dettagliato.

### 61 Struttura di un amplificatore di fibre ottiche

Gli amplificatori di fibre ottiche sono costituiti di tre componenti di base (fig. 17):

- una fibra ottica lunga 1...100 m arricchita di tracce di atomi di erbio (concentrazione degli atomi: circa 10...1000 ppm)
- un laser di pompaggio con una potenza nell'ambito di 10...500 mW
- e un accoppiatore WDM (Wavelength Division Multiplexer).

In molte applicazioni è inoltre necessario bloccare con un filtro ottico la luce di pompaggio che disturba e

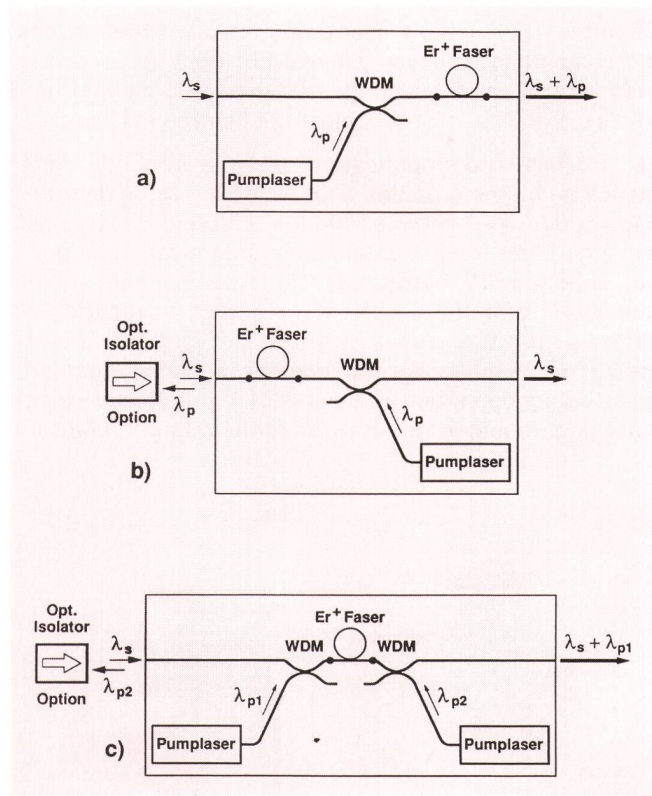


Fig. 18 Modes de pompage – Tipi di pompaggio

- a) Pompage en direction du signal utile (Co-Propagation) – Pompaggio in direzione del segnale utile (Co-Propagation)  
 b) Pompage en sens inverse du signal utile (Counter-Propagation) – Pompaggio nella direzione contraria a quella del segnale utile (Counter-Propagation)  
 c) Pompage bidirectionnel – Pompaggio bidirezionale  
 $\lambda_s$  Signalwellenlänge – Longueur d'onde du signal – Lunghezza d'onda del segnale  
 $\lambda_p$  Pumpwellenlänge – Longueur d'onde de pompage – Lunghezza d'onda di pompaggio  
 Er<sup>+</sup>Faser – Fibre Er<sup>+</sup>, dopée au moyen d'ions d'erbium positifs  
 – Fibra Er<sup>+</sup>, dotata di ioni di erbium positivi  
 WDM Wellenlängenmultiplexer – Multiplexeur de longueurs d'ondes – Wavelength Division Multiplexer  
 Pumplaser – Laser de pompage – Laser di pompaggio  
 Opt. Isolator – Isolateur optique – Isolatore ottico  
 Option – Option – Opzione

optique. Le signal utile et la puissance de pompage optique sont réunis dans le coupleur et acheminés vers la partie de fibre dopée à l'erbium. La puissance de pompage peut alors être injectée aussi bien dans la direction du signal à amplifier que dans la direction opposée. Il en résulte trois modes de pompage possibles: pompage en direction du signal utile (*co-propagation*), en sens inverse du signal utile (*counter-propagation*) et pompage *bidirectionnel* (fig. 18).

La composition de la fibre optique dopée à l'erbium est similaire à celle d'une fibre monomode ordinaire (13 %  $\text{GeO}_2$  / 87 %  $\text{SiO}_2$ ), à la différence que son noyau est enrichi de quelques ions de *terres rares* du système périodique des éléments, tels que l'erbium Er, le praséodyme Pr, le néodyme Nd et l'ytterbium Yb. Ceux-ci ont la propriété de relever le niveau énergétique des électrons liés au noyau de l'atome lorsqu'ils sont exposés à la radiation lumineuse d'une certaine longueur d'onde.

## 62 Processus d'amplification dans l'EDFA (Erbium-Doped Fibre Amplifier)

L'énergie optique d'un laser de pompage excite les ions d'erbium dans le noyau d'une fibre optique, ce qui a pour effet d'amplifier l'onde lumineuse du signal d'entrée sans qu'elle soit réfléchiée entre l'entrée et la sortie.

Le processus d'amplification optique (fig. 19) commence au moment où des photons de la source de pompage cèdent leur énergie à un ion d'erbium. Celui-ci est élevé de l'état fondamental stable à un niveau énergétique supérieur  $E_H$ . Cet état est toutefois instable, si bien que l'ion retombera, suivant le genre d'excitation, à l'état  $E_M$  métastable sans rayonner. Cet état durera environ 10 ms, ce qui représente une durée relativement longue. Si plus rien d'autre ne survient, l'ion retombera ensuite spontanément à l'état fondamental en libérant un

quella dell'emissione spontanea amplificata. Il segnale utile e la potenza di pompaggio ottica sono uniti nell'accoppiatore e fatti pervenire alla parte della fibra dotata di erbio. La potenza di pompaggio può essere immessa sia nella stessa direzione del segnale da amplificare sia nella direzione opposta. Ne derivano tre tipi di pompaggio possibili: pompaggio nella direzione del segnale utile (*Co-Propagation*), pompaggio nella direzione opposta al segnale utile (*Counter Propagation*) e pompaggio *bidirezionale* (fig. 18).

La fibra ottica dotata di erbio ha una struttura simile a una normale fibra monomodo (13 %  $\text{GeO}_2$  / 87 %  $\text{SiO}_2$ ) ma il suo nucleo è arricchito di alcuni ioni di *terra rara* del sistema periodico degli elementi come l'erbio Er, il praseodimio Pr, il neodimio Nd e l'itterbio Yb. Essi sono caratterizzati dal fatto che gli elettroni legati al nucleo dell'atomo, se sono esposti alla radiazione luminosa di una determinata lunghezza d'onda, possono essere sollevati a un livello di energia più elevato.

## 62 Processo di amplificazione nell'EDFA (Erbium-Doped Fibre Amplifier)

L'energia ottica di un laser di pompaggio stimola gli ioni di erbio nel nucleo di una fibra ottica. Di conseguenza l'onda luminosa del segnale d'entrata viene amplificata nel suo corso dall'entrata all'uscita senza essere riflessa. Anche qui si tratta di un amplificatore ottico di onde progressive.

Il processo di amplificazione della luce (fig. 19) si inizia quando i fotoni della fonte di pompaggio forniscono la loro energia a uno ione di erbio. Quest'ultimo viene sollevato dallo stato di base stabile a un livello di energia più elevato  $E_H$ . Tuttavia questo stato è instabile e lo ione cade, a seconda del tipo di eccitazione, nello stato metastabile senza fornire radiazioni. Lo ione rimane per un

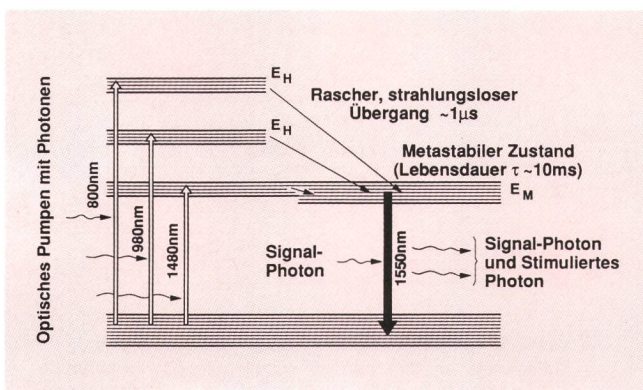


Fig. 19 Diagramme énergétique pour les amplificateurs à fibres optiques dopées à l'erbium – Diagramma del livello energetico con amplificatori di fibre dotate di erbio

Rascher, strahlungsloser Übergang – Transition rapide sans rayonnement – Transizione rapida senza radiazioni  
 Optisches Pumpen mit Photonen – Pompaggio ottico au moyen de photons – Pompaggio ottico con fotoni  
 Metastabiler Zustand (Lebensdauer) – Etat métastable (durée de vie) – Stato metastabile (durata di vita)  
 Signal-Photon – Photon de signal – Fotone-segnale  
 Signal-Photon und stimuliertes Photon – Photon de signal et photon stimulé – Fotone-segnale e fotone stimolato

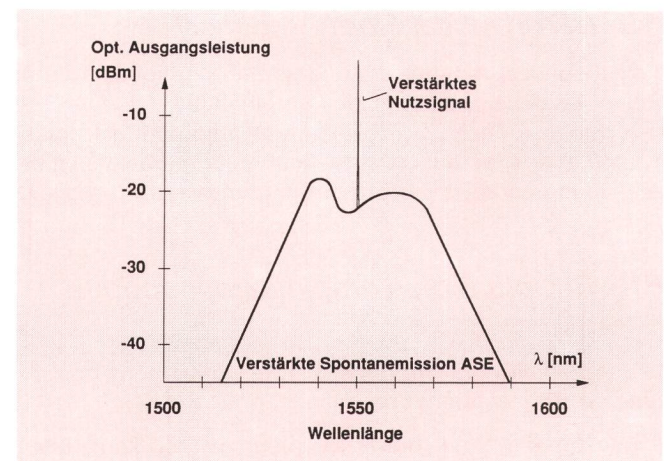


Fig. 20 Puissance optique de sortie en fonction de la longueur d'onde – Potenza di uscita ottica in funzione della lunghezza d'onda

Opt. Ausgangsleistung – Puissance optique de sortie – Potenza ottica di uscita  
 Verstärktes Nutzsinal – Signal utile amplifié – Segnale utile amplificato  
 Verstärkte Spontanemission ASE – Emission spontanée amplifiée ASE – Emissione spontanea amplificata ASE  
 Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda

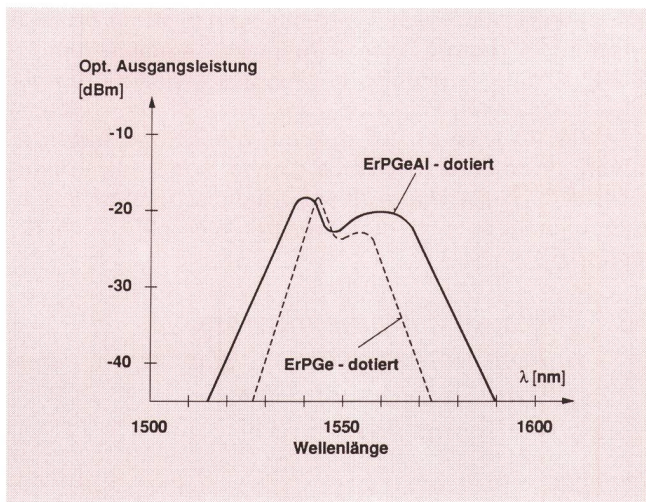


Fig. 21 Spectres d'amplification différents avec matériaux de dopage supplémentaires – Diversi spettri di amplificazione con ulteriori materiali di drogaggio

Opt. Ausgangsleistung – Puissance optique de sortie – Potenza di uscita ottica  
 ErPGeAl-dotiert – Dopé ErPGeAl – Dotato di ErPGeAl  
 Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda

photon. Cette émission de lumière est appelée fluorescence dans le spectre de l'émission spontanée amplifiée (fig. 20) [3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 18, 21, 24].

Toutefois, si un photon de signal entrant de la longueur d'onde approximative  $\lambda = 1550$  nm rencontre pendant ce temps l'ion d'erbium excité de la structure du verre, l'ion retournera obligatoirement à l'état fondamental en libérant un nouveau photon supplémentaire de longueur d'onde et de phase identiques. Ce processus se déroule avec tous les ions d'erbium présents dans la fibre optique et dure aussi longtemps qu'une puissance de pompage optique suffisante est fournie. Dans ce cas, le spectre de fluorescence présente une pointe de puissance marquante supplémentaire à la longueur d'onde du signal entrant (fig. 20).

Il importe de savoir qu'une fibre dopée à l'erbium permet d'amplifier uniquement des longueurs d'ondes situées entre 1530 nm et 1570 nm. Des spectres d'amplification de largeur différente peuvent être atteints par un dopage supplémentaire à l'aide de traces de phosphore P, d'aluminium Al ou de germanium Ge (fig. 21).

Le facteur d'amplification dépend de la capacité de pompage (fig. 22a). En optimisant la longueur de la fibre, on peut en outre obtenir une forte amplification ou une largeur de bande importante, compte tenu de la capacité de pompage donnée (fig. 22b).

La fibre dopée à l'erbium doit être pompée avec une longueur d'onde lumineuse dont l'énergie photonique correspond à un niveau énergétique  $E_H$  dans le spectre d'absorption de l'erbium. Ce spectre est toujours supérieur à celui de l'état métastable  $E_M$ . Pour des raisons technologiques et économiques, les longueurs d'ondes de pompage de 800 nm, 980 nm et 1480 nm sont considérées comme les plus prometteuses pour ces amplifi-

periodo, relativamente lungo, di circa 10 ms in questo stato metastabile. Se non succede nient'altro lo ione ritorna allo stato di base emettendo un fotone. Nello spettro dell'emissione spontanea amplificata, quest'emissione luminosa è chiamata fluorescenza (fig. 20) [3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 18, 21, 24].

Se tuttavia durante questo tempo un fotone-segnale che arriva alla lunghezza d'onda di  $\lambda = 1550$  nm colpisce lo ione di erbio eccitato della struttura di vetro, questo ione ritorna violentemente allo stato di base liberando un nuovo fotone supplementare della stessa lunghezza d'onda e della stessa fase. Ciò avviene con tutti gli ioni di erbio presenti nella fibra ottica e dura finché la potenza ottica di pompaggio fornita è sufficiente. Lo spettro di fluorescenza presenta in questo caso un'ulteriore punta di potenza marcante alla lunghezza d'onda del segnale in arrivo (fig. 20).

È importante sapere che con una fibra dotata di erbio si possono amplificare solo lunghezze d'onda fra 1530 nm e 1570 nm circa. Dotando ulteriormente la fibra di tracce di fosforo P, alluminio Al o germanio Ge (fig. 21) si possono ottenere spettri di amplificazione di ampiezza diversa.

Il fattore di amplificazione dipende dalla potenza di pompaggio (fig. 22a). Mediante l'ottimizzazione della lunghezza della fibra è possibile ottenere un'amplificazione elevata o una larghezza di banda considerevole lasciando costante una potenza di pompaggio fissa (fig. 22b).

La fibra dotata di erbio deve essere pompata con una lunghezza d'onda luminosa la cui energia di fotone corrisponde a un livello di energia  $E_H$  nello spettro di assorbimento dell'erbio. Questo livello è sempre superiore a quello dello stato metastabile  $E_M$ . Per motivi tecnologici ed economici le lunghezze d'onda di pompaggio a 800 nm, 980 nm e 1480 nm sono le più ricche di prospettive per questi amplificatori. Il grande margine di tolleranza dell'erbio per ciò che concerne gli spostamenti di 20 nm circa nella lunghezza d'onda di pompaggio consente di impiegare laser multimodo più convenienti al posto di laser monomodo costosi.

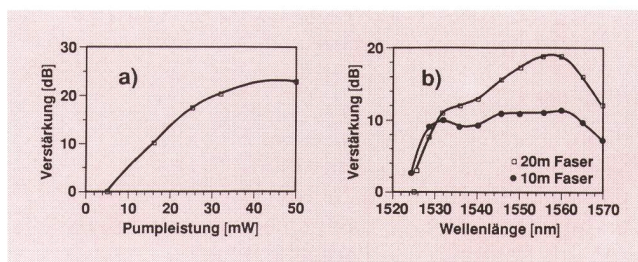


Fig. 22 Propriétés des amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium – Caratteristiche dell'amplificatore di fibre dotate di erbio

a) Amplification en fonction de la capacité de pompage – Amplificazione in funzione della potenza di pompaggio

b) Amplification en fonction de la longueur d'onde pour différentes longueurs de fibres – Amplificazione in funzione della lunghezza d'onda per diverse lunghezze di fibra

Verstärkung – Amplification – Amplificazione

Faser – Fibre – Fibra

Pumpleistung – Capacité de pompage – Potenza di pompaggio

Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda



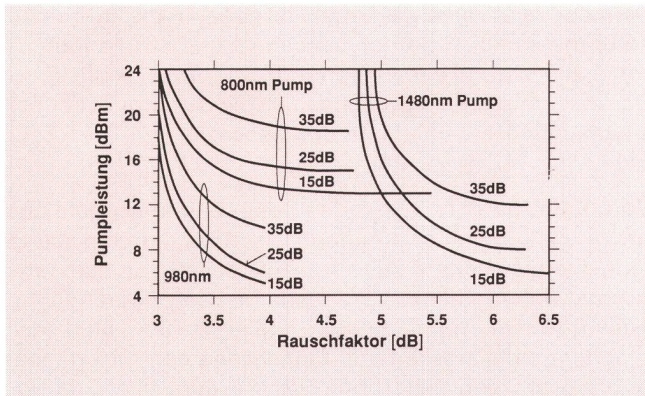


Fig. 23 Coefficients de bruit pour capacités de pompage et longueurs d'ondes de pompage différentes – Fattori di rumore con diverse potenze di pompaggio e lunghezze d'onda

Comme paramètres: 15 dB, 25 dB, 35 dB amplification de signaux faibles – Parametri: piccola amplificazione di segnale 15 dB, 25 dB, 35 dB  
 Pumpleistung – Capacité de pompage – Potenza di pompaggio  
 Rauschfaktor – Coefficient de bruit – Fattore di rumore

cateurs. Grâce à la grande largeur de tolérance de l'erbium par rapport à des décalages dans la longueur de l'onde de pompage d'environ 20 nm, il est possible d'employer également des lasers multimodes plus avancés à la place des lasers monomodes coûteux.

Le coefficient de bruit constitue un critère important pour caractériser les amplificateurs optiques. Il s'agit du rapport signal/bruit (SNR) à l'entrée de l'amplificateur rapporté au SNR à la sortie de l'amplificateur. Pour les longueurs d'ondes de pompage usuelles de 800 nm, 980 nm et 1480 nm, les modèles d'amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium utilisés dans la pratique présentent des coefficients de bruit différents. La figure 23 révèle des valeurs théoriques de différentes capacités de pompage et amplifications [25].

### 63 Comparaison entre l'amplificateur à fibre active dopée à l'erbium et l'amplificateur optique à semi-conducteur

Avantages:

- degré d'amplification plus élevé
- ne dépend pas de la polarisation
- puissance de sortie plus élevée
- pratiquement aucune diaphonie entre canaux dans la zone de saturation de l'amplificateur
- faible bruit
- aucune ondulation du gain

Inconvénients:

- puissance optique de sortie décelable en cas de longueur d'onde non désirée (du laser de pompage)
- niveau relativement élevé de l'émission spontanée amplifiée
- dimensions géométriques assez importantes
- intégration planaire difficilement réalisable.

Una caratteristica importante dell'amplificatore ottico è il fattore di rumore, cioè il rapporto segnale-rumore (SNR) all'entrata rispetto al rapporto segnale-rumore all'uscita dell'amplificatore. Esecuzioni pratiche di amplificatori di fibre dotate di erbio presentano fattori di rumore diversi alle lunghezze d'onda di 800 nm, 980 nm e 1480 nm. Nella figura 23 sono indicati i valori teorici determinati a potenze di pompaggio e amplificazioni diverse [25].

### 63 Vantaggi dell'amplificatore di fibre dotate di erbio rispetto all'amplificatore ottico a semiconduttore

Vantaggi:

- fattore di amplificazione maggiore
- indipendenza dalla polarizzazione
- potenza di uscita più elevata
- praticamente nessuna diafonia di canale nella zona di saturazione dell'amplificatore
- rumore ridotto
- nessuna ondulation di amplificazione

Svantaggi:

- presenza di una potenza ottica d'uscita in caso di lunghezza d'onda indesiderata (a causa del laser di pompaggio)

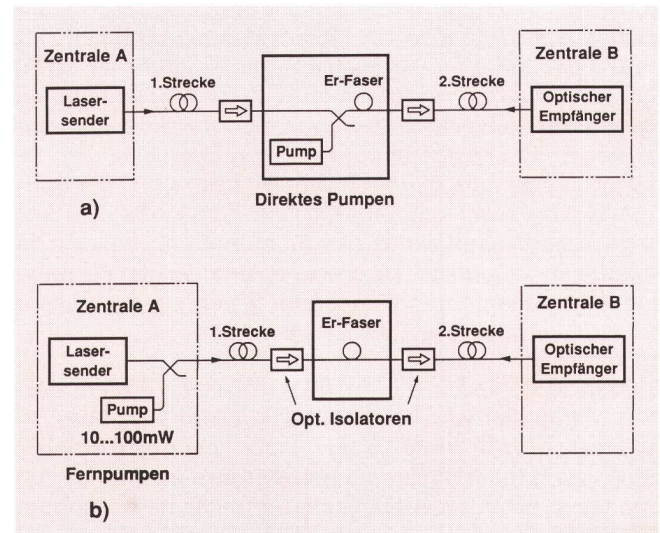


Fig. 24 Amplificateurs optiques de ligne avec emplacements différents de la source de pompage – Amplificatori di linea ottica con fonte di pompaggio ubicata in posti diversi

- a) Pompaggio diretto, emplacement dans la fibre dopée à l'erbium – Pompaggio diretto, ubicazione presso la fibra dotata di erbio  
 b) Pompaggio à distance, emplacement au central – Pompaggio a distanza, ubicazione in centrale  
 Zentrale A – Central A – Centrale A  
 1. Strecke – 1<sup>er</sup> tronçon – 1<sup>a</sup> tratta  
 Er-Faser – Fibre Er – Fibra Er  
 Lasersender – Emetteur laser – Emittitore laser  
 Optischer Empfänger – Récepteur optique – Ricevitore ottico  
 Pump – Pompe – Pompaggio  
 Direktes Pumpen – Pompaggio direct – Pompaggio diretto  
 Opt. Isolatoren – Isoloteurs optiques – Isolatori ottici  
 Fernpumpen – Pompaggio à distance – Pompaggio a distanza

## 7 Possibilités d'utilisation

Dans un réseau à fibres optiques, les amplificateurs optiques peuvent être utilisés de différentes façons:

- bouclés comme amplificateurs de ligne sur la voie de transmission
- installés directement en aval de la diode laser d'émission en tant qu'amplificateurs d'attaque ou de puissance
- comme préamplificateurs dans la zone de réception.

### 7.1 Amplificateurs de lignes (Line Amplifier)

Utilisée en tant qu'amplificateur de lignes (fig. 24), la fibre dopée à l'erbium peut être directement épissurée sur la voie. Les amplificateurs de lignes optiques peuvent être pompés soit à l'emplacement de la fibre dopée à l'erbium, soit à distance.

Lorsqu'il s'agit d'un amplificateur optique pompé directement, la capacité de pompage est modulée à proximité immédiate de la fibre dopée à l'erbium. Dans la configuration avec pompage à distance, un certain tronçon du réseau à fibres optiques se trouve toujours entre le laser de pompage et la fibre dopée à l'erbium. Vu les conditions d'environnement souvent sévères pouvant apparaître en dehors des bâtiments des télécommunications et vu la sensibilité du laser de pompage à la température, le mode d'exploitation «pompage à distance» permet d'installer ledit laser soit dans un local protégé du central, soit dans un répartiteur décentralisé. Si le laser est monté au central, un équipement d'alimentation électrique sera en outre superflu. La méthode d'alimentation à distance exige un laser de pompage pour 1480 nm; seule cette *troisième fenêtre optique* garantit une atténuation suffisamment faible pour qu'une grande puissance de pompage puisse atteindre la fibre amplificatrice dopée à l'erbium.

Lorsque des amplificateurs optiques sont insérés dans des réseaux de distribution de télévision à plusieurs canaux, des perturbations importantes peuvent surgir à la suite de réflexions sur les connecteurs et les épissures. Ces dérangements sont appelés «bruit de réflexion multiple» (*Multiple Reflexion Noise, MRN*). Ce genre de bruit résulte de l'interférence optique entre la lumière émise et la lumière réfléchiée à plusieurs reprises entre connecteurs, épissures et autres composants optiques. L'utilisation des amplificateurs optiques en tant qu'amplificateurs de ligne demande par conséquent des connecteurs et des épissures présentant des coefficients de réflexion très faibles. Si tel n'était pas le cas, les distances de transmission et les sensibilités du récepteur prévues selon les calculs ne seraient pas atteintes. De plus, le bruit de réflexion multiple peut être éliminé à l'aide d'*isolateurs optiques* installés à l'entrée et à la sortie de la fibre dopée à l'erbium (fig. 24). Un isolateur optique laisse passer la lumière dans un sens et la retient dans l'autre.

Lorsque des amplificateurs de lignes sont pompés à distance avec des puissances optiques de 10...500 mW, ces hautes intensités peuvent présenter un danger pour les yeux du personnel d'installation et d'exploitation, ce qui nécessite des mesures de protection adéquates.

- niveau relativement élevé de l'émission spontanée amplifiée
- dimensions géométriques plus grandes
- perspectives d'intégration planaire limitées.

## 7 Modi d'impiego

Gli amplificatori ottici possono essere impiegati in una rete in fibre ottiche in diversi modi:

- come amplificatori di linea inseriti nella tratta di trasmissione
- come amplificatori di eccitazione o di potenza allacciati direttamente al laser a diodo di trasmissione
- come preamplificatori nella zona di ricezione.

### 7.1 Amplificatori di linea (Line Amplifier)

Se l'amplificatore ottico viene impiegato come amplificatore di linea (fig. 24) la fibra dotata di erbio può essere giuntata direttamente nella tratta di fibra. Gli amplificatori ottici di linea possono essere pompati sia nel punto in cui si trova la fibra dotata di erbio sia a distanza.

Nel caso degli amplificatori ottici pompati direttamente la potenza di pompaggio viene accoppiata nelle immediate vicinanze della fibra dotata di erbio. Nella configurazione con pompaggio a distanza, fra il laser di pompaggio e la fibra dotata di erbio si trova sempre una determinata tratta della rete in fibra ottica. All'esterno degli edifici delle telecomunicazioni possono vigere condizioni ambientali sfavorevoli; grazie al sistema di pompaggio a distanza, il laser di pompaggio che è sensibile alle variazioni di temperatura può essere collocato nella centrale protetta o in un impianto di distribuzione dislocato. Se il laser di pompaggio si trova nella centrale non occorrono alimentatori elettrici. Per l'alimentazione a distanza è tuttavia necessario un laser di pompaggio a 1480 nm poiché solo in questa *terza finestra luminosa* l'attenuazione della fibra è così ridotta che la fibra dotata di erbio amplificata può essere raggiunta da una potenza di pompaggio sufficiente.

Se gli amplificatori ottici vengono impiegati in reti di distribuzione televisive a più canali possono sorgere notevoli disturbi a causa delle riflessioni a connettori e giunture provocate e comprese sotto il concetto di rumore di riflessione multipla (*Multiple Reflexion Noise, MRN*). Questo tipo di rumore deriva dalla sovrapposizione di onde luminose (interferenze) fra la luce emessa e la luce riflessa più volte avanti e indietro fra connettori, giunture e altre componenti ottiche. L'impiego di amplificatori ottici nella funzione di amplificatori di linea richiede pertanto connettori e giunture con fattori di riflessione molto bassi poiché altrimenti le distanze di trasmissione e le sensibilità di ricezione calcolate non verrebbero raggiunte. Il rumore di riflessione multipla può inoltre essere eliminato all'entrata e all'uscita della fibra dotata di erbio per mezzo di *isolatori ottici* (fig. 24). Un isolatore ottico lascia passare la luce in una direzione e la blocca nella direzione opposta.

Se gli amplificatori di linea vengono pompati a distanza con potenze ottiche di 10...500 mW, queste elevate in-

## 72 Amplificateurs de puissance (Power Amplifier)

Lorsque l'amplificateur optique est utilisé dans une configuration de réseau comme étage d'attaque de puissance, il est placé directement derrière l'émetteur laser modulé, donc dans le même environnement que l'équipement d'émission laser (fig. 25). Dans la plupart des cas, il s'agit d'un central de télécommunications présentant des températures équilibrées ou d'une installation décentralisée surveillée à distance. Les conditions ambiantes y ont des répercussions favorables sur la durée de vie du laser de pompage et limitent en plus à un minimum les réglages de température et de puissance.

Une caractéristique importante de l'amplificateur de puissance réside dans sa capacité d'amplifier un signal optique jusqu'à un niveau de plus de 10 dBm (supérieur à 10 mW) sans que le signal utile subisse une distorsion notable. Dans le cas des amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium, la diaphonie gênante dans le canal voisin n'apparaîtra pas non plus lorsque la puissance optique de sortie s'approche de la limite de saturation. La raison en réside dans le fait que le processus d'amplification est lié à la durée de vie  $\tau$  de 10 ms des ions excités. Pendant ce laps de temps relativement long, des réserves considérables d'ions (par exemple  $2 \cdot 10^{14}$  ions pour 16 mW et 50 MHz) sont constituées. Sur une période moyenne, ces réserves empêchent une modification de l'amplification due à un nombre beaucoup plus petit d'ions excités du signal utile (par exemple  $2 \cdot 10^9$ ).

Pour éviter des distorsions et les effets de diaphonie, on veillera à ce que la fréquence de modulation soit supérieure de quelques puissances de dix au terme  $2\pi/\tau$ . Un calcul approximatif montre qu'un amplificateur à fibre optique dopée à l'erbium exclut pratiquement toute distorsion non linéaire lorsque la fréquence de modulation dépasse quelques centaines de kHz. Pour un système de répartition de télévision par exemple, les fréquences de modulation les plus basses se situent aux alentours de 50 MHz. Ainsi, il n'y aura pratiquement pas de distorsions non linéaires, même dans les amplificateurs fortement saturés [2, 12, 21, 22, 23].

Ces considérations montrent que la puissance optique de sortie relativement élevée d'un amplificateur à fibre active est très favorable à une transmission TV analogique à plusieurs canaux. Le signal utile peut être divisé en un nombre beaucoup plus élevé de voies, de sorte qu'il peut alimenter plusieurs récepteurs. Cela explique également pourquoi on introduit les premiers systèmes expérimentaux dans les réseaux de distribution de signaux TV à des usagers.

La répartition de la puissance optique sur plusieurs voies représente également dans les réseaux numériques une exigence fondamentale, par exemple dans les réseaux optiques passifs (Passive Optical Network PON). Ainsi, l'amplificateur à fibre active peut également être inséré dans ce genre de réseau pour compenser les pertes dues à la division de la puissance optique. Il peut être intégré de manière relativement simple dans des configurations de réseaux quelconques telles que les structures en étoile, en étoile multiple, en bus et en anneau [26, 27].

tensité possono mettere in pericolo gli occhi del personale incaricato dell'installazione e dell'esercizio. È quindi indispensabile prendere le necessarie misure di sicurezza.

## 72 Amplificatori di potenza (Power Amplifier)

Se è impiegato in una rete quale eccitatore di potenza, l'amplificatore si trova subito dopo il trasmettitore a laser modulato, ossia nello stesso ambiente in cui si trova il trasmettitore a laser (fig. 25): il più delle volte dunque in una centrale di telecomunicazione con temperature equilibrate o in un impianto lontano sorvegliato a distanza. Le condizioni ambientali in quei luoghi decentralizzati hanno un effetto positivo sulla durata di vita del laser di pompaggio e provocano spese ridotte per la regolazione della temperatura e della potenza.

Una caratteristica importante dell'amplificatore di potenza è costituita dalla possibilità di amplificare un segnale ottico a un livello di più di 10 dBm (superiore a 10 mW) senza distorcere notevolmente il segnale utile. Nel caso degli amplificatori di fibre dotate di erbio non si verifica diafonia nel canale adiacente nemmeno se la potenza ottica d'uscita è vicina al limite di saturazione. Il motivo è rappresentato dal fatto che il processo di amplificazione è accoppiato con la durata di vita  $\tau$  di 10 ms degli ioni eccitati. In questo spazio di tempo relativamente lungo si forma una grande riserva di ioni (p. es.  $2 \cdot 10^{14}$  ioni a 16 mW e 50 MHz). Considerata per un periodo medio, questa riserva impedisce una modifica di amplificazione, che deriva da un numero molto inferiore di ioni eccitati del segnale utile (p. es.  $2 \cdot 10^9$ ).

Per evitare distorsioni e diafonia basta accertarsi che la frequenza di modulazione sia superiore di alcune potenze decimali al livello d'energia  $2\pi/\tau$ . Un calcolo approssimativo dimostra che con un amplificatore di fibre dotate di erbio non si verificano praticamente distorsioni non lineari se la frequenza di modulazione si trova al di sopra di qualche centinaio di kHz. In un sistema di distribuzione televisivo, le frequenze di modulazione più basse sono a 50 MHz. È così garantito che in questo caso non subentreranno praticamente distorsioni non li-

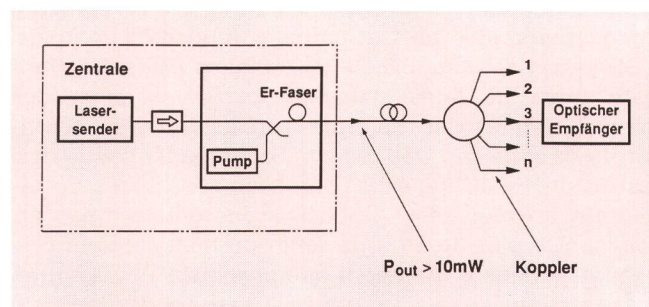


Fig. 25 Amplificateur optique de puissance – Amplificatore di potenza ottico

Zentrale – Central – Centrale  
Er-Faser – Fibre Er – Fibra Er  
Lasersender – Emetteur laser – Emettitore a laser  
Optischer Empfänger – Récepteur optique – Ricevitore ottico  
Pump – Pompe – Pompaggio  
Koppler – Coupleur – Accoppiatore

Pour l'avenir, on peut également envisager des transmissions analogiques et numériques simultanées sur une fibre, comme le montre la *figure 26*. Des signaux analogiques et numériques sont acheminés sur la même fibre optique et amplifiés dans des amplificateurs optiques. Du côté opposé, ces signaux sont de nouveau séparés et transmis aux milliers d'utilisateurs. Cette technique fait apparaître un avantage essentiel de l'amplificateur optique: il traite simultanément des signaux quelconques avec des fréquences, des vitesses de transmission et des types de modulation différents et constitue un canal optique *transparent* à large bande en relation avec la voie à fibre optique.

### 73 Préamplificateur (Pre-Amplifier)

Exercant la fonction de préamplificateur optique (*fig. 27*), l'amplificateur à fibre active est monté en amont du récepteur optoélectronique. Ce type de réception améliore notablement la sensibilité de systèmes optiques.

Le signal de sortie du préamplificateur se compose du signal amplifié et de l'émission spontanée amplifiée ASE. Lorsque le signal d'entrée est relativement faible, la part de puissance de l'émission spontanée amplifiée sera proportionnellement importante, s'étendant au spectre de fluorescence entier, tandis que le signal utile ne présente qu'une raie étroite du spectre. Un filtre optique à bande étroite empêche que cette émission spontanée amplifiée sature la photodiode. (Avec les possibilités d'utilisation décrites précédemment, c'est l'atténuation de la fibre du tronçon qui empêche une saturation de la photodiode.)

Pour les systèmes de distribution TV à plusieurs canaux, le niveau de réception atteint normalement -5 dBm (environ 320 µW) au moins, afin que l'écart entre la portuse et le bruit CNR (Carrier to Noise Ratio) demeure suffisamment grand pour garantir une bonne qualité de l'image. Des niveaux de réception optique inférieurs entraînent en effet une détérioration de cette proportion qu'aucun amplificateur optique, aussi performant soit-il, ne peut améliorer.

Un inconvénient de la configuration concernée réside dans le fait que *chaque* récepteur exige un amplificateur optique. Il en résulte un accroissement des coûts qui diminue l'attrait d'une telle variante pour les systèmes de distribution de programmes de télévision.

## 8 Amplificateur à fibre active pour la gamme d'ondes de 1,3 µm

Actuellement, la plupart des systèmes à fibres optiques fonctionnent dans la gamme d'ondes de 1310 nm. Malheureusement, les amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium ne sont pas utilisables dans cette deuxième fenêtre optique. C'est pourquoi la mise au point d'amplificateurs à fibre active dans cette gamme suscite un intérêt particulièrement grand. Selon des analyses récentes effectuées sur des matériaux autres que l'erbium, on sait qu'il est aussi possible de réaliser des amplificateurs à fibre active pour la gamme de 1,3 µm et que ceux-ci

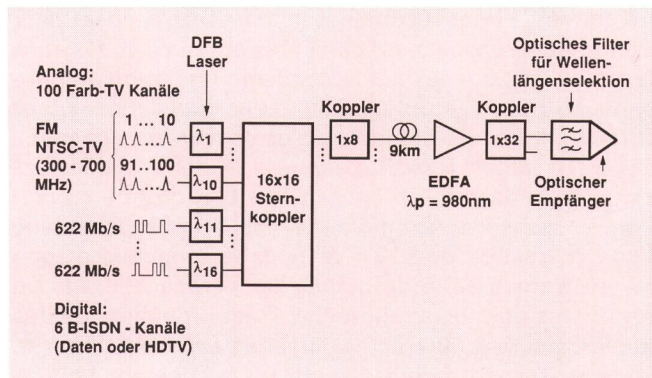


Fig. 26 Réseau mixte analogique-numérique (hypothétique) – Rete mista analogico-digitale (ipotetica)

Analogique: 300 canaux TV couleur, à modulation de fréquence (FM) – Sistema analogico: 300 canali TV a colori con modulazione di frequenza (MF)  
 Numérique: débit binaire 622 Mb/s (environ 7000 canaux téléphoniques), à modulation par impulsions codées (PCM) – Sistema digitale: tasso di bit 622 Mb/s (~7000 canali telefonici) con modulazione a impulsi codificati (PCM)  
 HDTV Télévision haute définition – Televisione ad alta risoluzione  
 DFB Distributed Feedback  
 EDFA Erbium Doped Fibre Amplifier  
 Optisches Filter für Wellenlängenselektion – Filtre optique pour sélection de la longueur d'onde – Filtro ottico per la selezione delle lunghezze d'onda  
 Analog: 100 Farb-TV-Kanäle – Analogue: 100 canaux de TV couleur – Sistema analogico: 100 canali TV a colori  
 Koppler – Coupleur – Accoppiatore  
 Sternkoppler – Coupleur en étoile – Accoppiatore a stella  
 Optischer Empfänger – Récepteur optique – Ricevitore ottico  
 Digital – Numérique – Sistema digitale:  
 B-ISDN-Kanäle – Canaux B-RNIS – Canali B-ISDN  
 (Daten oder HDTV) – (Données ou TVHD) – (dati o HDTV)

neari anche se l'amplificatore è molto saturo [2, 12, 21, 22, 23].

Queste conclusioni dimostrano che la potenza ottica d'uscita relativamente elevata di un amplificatore di fibre è molto adatta a una trasmissione televisiva analogica a più canali. Il segnale utile può essere ripartito su un numero notevolmente maggiore di cammini e può pertanto alimentare più ricevitori. Ciò spiega anche perché i primi sistemi sperimentali nell'ambito degli utenti si trovano soprattutto nelle reti di distribuzione televisive.

La ripartizione della potenza luminosa su più cammini è un'esigenza fondamentale anche nelle reti digitali, p. es. nelle *reti ottiche passive* (Passive Optical Network, PON). L'amplificatore di fibre può essere impiegato per compensare le perdite dovute alla ripartizione. Esso può essere inserito in modo relativamente semplice nelle reti come le strutture siano esse configurate a stella, a più stelle, a bus o ad anello [26, 27].

Per il futuro si possono prevedere anche trasmissioni analogiche e digitali combinate su una fibra, come mostra la *figura 26*. I segnali analogici e digitali sono condotti sulla stessa fibra ottica e amplificati da amplificatori ottici. Nella parte opposta essi vengono nuovamente divisi e condotti a migliaia di utenti. Un vantaggio importante dell'amplificatore ottico è la sua capacità di elaborare contemporaneamente numerosi segnali con frequenze, tassi di bit e tipi di modulazione diversi e di

ont donné de bons résultats. Les deux systèmes les plus prometteurs reposent sur des fibres optiques en fluorure de zirconium, dopées au praséodyme (Pr) et/ou au néodyme (Nd) et à l'ytterbium (Yb). Leur appellation, *fibres ZBLAN*, est formée par les initiales de leurs composants:  $ZrF_4-BaF_2-LaF_3-ALF_3-NaF$ . La *figure 28* porte sur le facteur d'amplification obtenu en fonction de la longueur d'onde. Dans cet exemple, un laser en saphir-titane d'une puissance de 925 mW pour la longueur d'onde  $\lambda = 1017$  nm a servi de source de pompage. Dans un avenir plus ou moins rapproché, il est probable que des amplificateurs à fibre active linéaires et à faible bruit et haute puissance seront disponibles également pour la deuxième fenêtre optique [28, 29, 30].

## 9 Répercussions des amplificateurs optiques pour les futurs réseaux de télécommunications

Les tests réalisés ces derniers temps ont confirmé les nombreuses caractéristiques positives des amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium. Dans le cadre d'un tel essai, sept amplificateurs à fibre active montés en cascade ont permis de transmettre des données pratiquement sans erreur avec un débit binaire de 2,5 Gbit/s (correspond à 30 000 canaux téléphoniques) sur une distance de plus de 500 km [22, 24].

Dans un autre essai en laboratoire, la répartition de 40 canaux de télévision sur plus de 65 000 usagers a été démontrée à l'aide d'amplificateurs à fibre active dopée à l'erbium et d'une chaîne de coupleurs optiques passifs [23].

Ces résultats étonnants montrent l'utilité pratique des amplificateurs optiques ainsi que les répercussions importantes qu'ils auront sur les futurs systèmes de télécommunications. Les experts estiment que les amplificateurs à fibre active révolutionneront d'une certaine manière la communication optique. C'est ainsi qu'ils seront déjà utilisés prochainement dans les réseaux de câbles transocéaniques, dans les réseaux terrestres interurbains et régionaux, dans les réseaux de distribution de télévision ainsi que dans les réseaux de raccordement d'abonnés.

Dans toutes ces applications, la nouvelle possibilité de répartir davantage de puissance optique sur plusieurs voies ou de transmettre des signaux sur une plus grande distance permettra de réaliser des économies de coûts pour la fibre optique et les stations de répartition et, partant, d'obtenir des structures de réseaux plus économiques. Par conséquent, des amplificateurs optiques pourront sans doute être intégrés dans des réseaux de télécommunications modernes en tant qu'éléments performants des systèmes.

### Bibliographie

- [1] Nakagawa K. et al. Trunk and Distribution Network Application of Erbium-Doped Fiber Amplifier. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [2] Walker G. R. et al. Erbium-Doped Fiber Amplifier Cascade for Multichannel Coherent Optical Trans-

formare con la tratta di fibra ottica, un canale luminoso *trasparente* a larga banda.

## 73 Preamplificatori (Pre-Amplifier)

Nella configurazione di preamplificatore ottico (*fig. 27*) l'amplificatore di fibre è collegato a monte del ricevitore optoelettronico. In questo modo si migliora notevolmente la sensibilità di sistemi ottici.

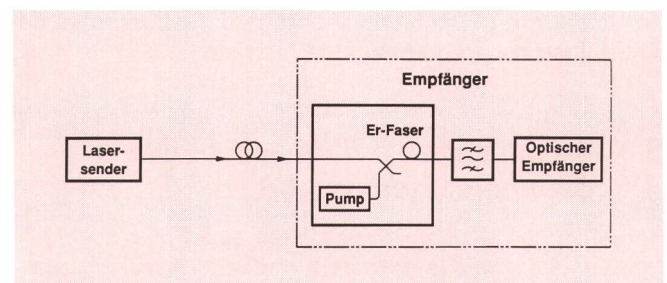
Il segnale d'uscita del preamplificatore è formato dal segnale amplificato e dall'emissione spontanea amplificata ASE. Se il segnale d'entrata è relativamente piccolo, la quota di potenza dell'emissione spontanea amplificata è relativamente elevata poiché appare su tutto lo spettro di fluorescenza mentre il segnale utile occupa solo una stretta riga spettrale. Un filtro ottico a banda stretta impedisce che questa emissione spontanea amplificata saturi il fotodiodo. (Nei precedenti modi d'impiego l'attenuazione della fibra impedisce la saturazione del fotodiodo.)

Di regola il livello di ricezione dei sistemi di distribuzione televisivi è almeno di  $-5$  dBm ( $320 \mu W$ ) affinché il rapporto portante-rumore CNR (*Carrier to Noise Ratio*) rimanga sufficientemente grande per assicurare una buona qualità dell'immagine. I livelli di ricezione ottici inferiori hanno come conseguenza un peggioramento di questo rapporto, che non può essere migliorato nemmeno con l'impiego di amplificatori ottici molto buoni.

Uno svantaggio della configurazione con preamplificatori sta nel fatto che *ogni* ricevitore richiede un amplificatore ottico. Ne consegue un aumento dei costi che rende questa variante poco interessante per i sistemi di distribuzione televisivi.

## 8 Amplificatori di fibre per la gamma delle onde luminose a $1,3 \mu m$

Attualmente la maggior parte dei sistemi in fibra ottica opera nella gamma delle onde luminose a 1310 nm. Come già detto, gli amplificatori di fibre dotate di erbio non sono purtroppo utilizzabili in questa seconda fine-



*Fig. 27* Modes de pompage de préamplificateurs optiques – Tipi di pompaggio del preamplificatore ottico

Empfänger – Récepteur – Ricevitore  
 Er-Faser – Fibre Er – Fibra Er  
 Lasersender – Emetteur laser – Emittitore a laser  
 Optischer Empfänger – Récepteur optique – Ricevitore ottico  
 Pump – Pompe – Pompaggio

- mission. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [3] *Miniscalco W. J.* Erbium-Doped Glasses for Fiber Amplifiers at 1500 nm. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [4] *Ainslie B. J.* A Review of the Fabrication and Properties of Erbium-Doped Fibers for Optical Amplifiers. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [5] *Giles C. R.* et al. Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [6] *Shimizu M.* et al. Compact and Highly Efficient Fiber Amplifier Modules Pumped by 0.98- $\mu\text{m}$  Laser Diode. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [7] *Fujiwara M.* et al. Studies on Semiconductor Optical Amplifiers for One Capacity Expansion in Photonic Space-Division Switching Systems. Journal of Lightwave Technology, Vol. 5, No. 2, Feb. 91.
- [8] *O'Mahony M. J.* Semiconductor Laser Optical Amplifier for Use in Future Fiber Systems. Journal of Lightwave Technology Journal of Lightwave Technology, Vol. 6, No. 4, April 88.
- [9] *Boudreau R.* et al. High Gain (21 dB) Packed Semiconductor Optical Amplifiers. Electronics Letters, Vol. 27, No. 20, 26th Sept. 91.
- [10] *Ludwig R.* et al. Properties of Two-Section Traveling Wave Amplifiers. ECOC'90-Paper, p. 239.
- [11] Bellcore-Script. Fiber Amplifiers for Video Transport in the Loop. Fiber Optics, Jan. 91
- [12] *Saifi M. A.* et al. Optical Fiber Amplifiers for Broadband Optical Network Applications. Fiber Optics, Jan. 91.
- [13] *Laming R. I.* et al. Pump Excited-State Absorption in Erbium-Doped Fibers. Optics Letters, Vol. 13, Dec. 88.
- [14] *Laming R. I.* et al. Erbium-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. SPIE-Paper, Boston.
- [15] *Petermann K.* Laser Diode Modulation and Noise. Kluwer Academic Publisher, Boston 1991.
- [16] *Cheo P. K.* Fiber Optics & Optoelectronics. Prentice Hall, New York 1990.
- [17] *Jeunhomme L. B.* Single-Mode Fiber Optics. Marcel Dekker, New York and Basel 1990.
- [18] *France P. W.* Optical Fiber Lasers & Amplifiers. Blackie, Glasgow and London.
- [19] BT&D-Application Note and Data Sheets. Erbium-Doped Fiber Amplifier EFA3000. Semiconductor Optical Amplifier SOA 1100.
- [20] *Grau G.* et al. Optische Nachrichtentechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag 1991.
- [21] *Hall D. W.* Rare-Earth Doped Fiber-Optic Amplifiers. Short Course Notes CLEO'91, Baltimore.
- [22] *Becker P. C.* Erbium-Doped Fiber Makes Promising Amplifiers. Laser Focus World, Oct. 90.
- [23] *Hall D. W.* Optical Amplifier will Boost Capacity and Distance. Laser Focus World, Jan. 92.
- [24] *Giles C. R.* System and Application of Optical Amplifiers. OFC'92-Paper, Tutorial Session.
- [25] *Pedersen B.* et al. Power Requirement for Erbium-Doped Fiber Amplifiers Pumped at 800, 980 and 1480 nm. p. 35. OFC'92-Paper.

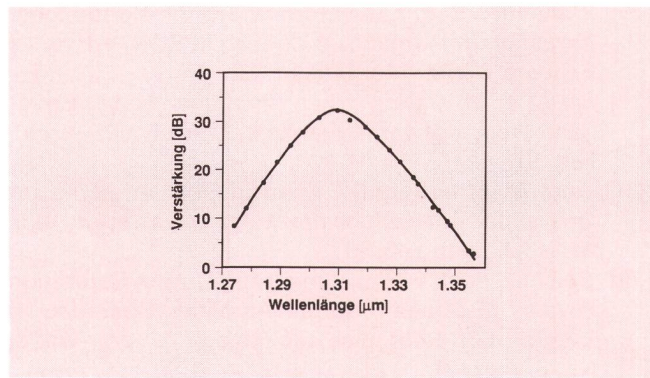


Fig. 28 Amplificateur à fibre active de 1,3  $\mu\text{m}$ : amplification en fonction de la longueur d'onde – Amplificatore di fibre a 1,3  $\mu\text{m}$ : amplificazione in funzione della lunghezza d'onda

Source de pompage: laser saphir-titane, 925 mW,  $\lambda = 1017$  nm  
 – Fonte di pompaggio: laser a zaffiro e titanio, 925 mW,  $\lambda = 1017$  nm  
 Verstärkung – Amplification – Amplificazione  
 Wellenlänge – Longueur d'onde – Lunghezza d'onda

stra. Esiste pertanto un forte interesse nei confronti dello sviluppo di amplificatori di fibre in questa gamma. Le prove più recenti con materiali diversi dall'erbio hanno dimostrato che è pure possibile fabbricare amplificatori ottici di fibre a 1,3  $\mu\text{m}$  che forniscono buoni risultati. I due dispositivi più promettenti si basano su fibre ottiche di fluoruro di zirconio dotate di praseodimio (Pr) e/o di neodimio (Nd) e itterbio (Yb). Il loro nome «fibre ZBLAN» è formato dalla lettera iniziale dei loro componenti:  $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ . La figura 28 mostra il fattore di amplificazione raggiunto in funzione della lunghezza d'onda. In questo esempio la fonte di pompaggio è costituita da un laser a zaffiro e titanio con una potenza di 925 mW a una lunghezza d'onda  $\lambda = 1017$  nm. Bisogna tener conto del fatto che in un prossimo futuro anche per la seconda finestra saranno disponibili sul mercato amplificatori di fibre lineari, a basso rumore e con un'elevata amplificazione [28, 29, 30].

## 9 Effetti degli amplificatori ottici sulle reti di telecomunicazione future

Le prove eseguite negli ultimi tempi hanno confermato che gli amplificatori di fibre dotati di erbio presentano molte caratteristiche positive. Durante una prova è stato trasferito praticamente senza errori un flusso di dati di 2,5 GBit/s (che corrisponde a 30 000 canali telefonici) lungo una tratta di oltre 500 km mediante sette amplificatori ottici in cascata [22, 24].

In un'altra prova di laboratorio è stata dimostrata la distribuzione di 40 canali televisivi a più di 65 000 utenti con l'ausilio di amplificatori di fibre dotate di erbio e vari livelli di accoppiatori ottici passivi [23].

Questi risultati sorprendenti mostrano l'uso pratico e il forte influsso che gli amplificatori ottici eserciteranno sui sistemi di telecomunicazione futuri. Gli esperti sono dell'opinione che gli amplificatori di fibre ottiche rivol-

- [26] *Menendez R. C.* Economics of Erbium-Doped Fiber Amplifiers for Broadcast Overlay in PON Networks. Bellcore-Script. Morristown NJ.
- [27] *Lin C.* et al. Optical-Fiber Amplifiers Make Broadband Fiber Networks Practical. Laser Focus World, Feb. 91.
- [28] *Obro M.* et al. Highly Improved Fiber Amplifier for Operation Around 1300 nm. Electronics Letters, Vol. 27, No. 5. 28th Feb. 91.
- [29] *Ohishi Y.* et al. A High Gain, High Output Saturation Power Pr3-Doped Fluoride Amplifier Operating at 1.3  $\mu\text{m}$ . IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 8, Aug. 91.
- [30] *Ohishi Y.* et al. Gain Characteristics of Pr3-Yb3 Co-doped Fluoride Fiber for 1.3  $\mu\text{m}$  Amplification. IEEE Transaction Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 11, Nov. 91.

zioneranno in un certo senso la comunicazione ottica. Essi verranno già impiegati prossimamente in cavi transoceanici, in reti interurbane e regionali terrestri, in reti di distribuzione televisive e in reti di collegamenti fra utenti.

In tutte queste applicazioni la possibilità di ripartire più potenza ottica su più percorsi o di trasferirla su una distanza più grande permette di ridurre la quantità di fibre ottiche e le stazioni di distribuzione impiegate e di conseguenza di diminuire i costi delle strutture della rete. Molto presto gli amplificatori ottici saranno utilizzati nella funzione di componenti di sistemi di elevata potenza nelle reti di telecomunicazione moderne.

## Zusammenfassung

### *Optische Verstärker in der Telekommunikation*

Optische Verstärker sind neue Systemkomponenten, die der faseroptischen Übertragungstechnik interessante, zusätzliche Impulse verleihen, da sie in der Lage sind, das Licht direkt zu verstärken. Ihre positiven Eigenschaften wie hohe Verstärkung und geringes Rauschen helfen mit, dass optische Verstärker schon bald in modernen Telekommunikationssystemen anzutreffen sein werden. In einer Übersicht werden die gebräuchlichen optischen Verstärker vorgestellt und die darin angewendeten Verstärkungsvorgänge und deren Eigenschaften beschrieben. Anschliessend werden die Anwendungsgebiete, die Einsatzmöglichkeiten und die neusten Entwicklungstendenzen optischer Verstärker in der Telekommunikation aufgezeichnet.

## Résumé

### *Amplificateurs optiques dans les télécommunications*

Les amplificateurs optiques constituent de nouveaux composants de systèmes donnant de nouvelles impulsions intéressantes à la technique de transmission par fibres optiques, vu qu'ils sont en mesure d'amplifier directement la lumière. Leurs propriétés positives et leur haut degré d'amplification sous faible bruit font que les amplificateurs optiques seront bientôt présents dans les systèmes de télécommunication modernes. Après un aperçu général, des amplificateurs usuels, les processus d'amplification et les caractéristiques des appareils sont présentés. Pour terminer, l'auteur examine les domaines d'application, les possibilités d'utilisation et les dernières tendances du développement des amplificateurs optiques dans les télécommunications.

## Riassunto

### *Amplificatori ottici nelle telecomunicazioni*

Gli amplificatori ottici sono nuovi componenti sistemici che conferiscono alla tecnica di trasmissione in fibra ottica impulsi supplementari di grande importanza, poiché sono in grado di amplificare direttamente la luce. Grazie alle caratteristiche positive quali l'elevato fattore di amplificazione e il basso fattore di rumore, gli amplificatori ottici faranno presto la loro apparizione nei sistemi di telecomunicazione moderni. L'autore presenta brevemente gli amplificatori ottici più comuni, i processi di amplificazione applicati e le loro caratteristiche. Descrive quindi i campi d'applicazione, le possibilità d'impiego e illustra in che direzione va lo sviluppo degli amplificatori ottici nelle telecomunicazioni.

## Summary

### *Optical Amplifiers in Telecommunications*

Optical amplifiers are new components rendering interesting further impetus to signal transmission because of their capability to amplify light in a direct way. Their positive properties, such as high gain and low noise, bear a share to the rapid spread of optical amplifiers into telecommunications systems. In an overview, the current optical amplifiers are presented and the applied principles of amplification explained, including their properties. The fields of application, the possibilities for use and the latest development trends of optical amplifiers in telecommunications are shown.