

知っておきたいキーワード

光増幅器

(正会員) 中戸川 剛[†]

[†] NHK 放送技術研究所

"Optical Amplifier" by Tsuyoshi Nakatogawa (NHK Science and Technology Research Laboratories, Tokyo)

キーワード：誘導放出，EDFA，半導体光増幅器，ラマン増幅

まえがき

高精細映像の配信サービスやスマートフォンの急速な普及によって、世界の通信量は増加を続けています。

1990年代、高価な電気再生中継器の代わりに、安価で小型な光増幅器による中継伝送が可能になったことで、高速光通信網の普及が加速しました。ケーブルテレビシステムにおいても、早

期に光増幅器が導入され、多チャンネル番組の配信インフラを実現しました。本稿では、現在の放送・通信システムに欠かせないアイテムとなった光増幅器について解説します。

光の吸収，自然放出と誘導放出

はじめに、物質を構成する原子と光との間で生じる現象から、光増幅の原理を説明します。

原子は原子核と電子で構成されています。原子の中で、電子が存在する場所は離散的な軌道になっており、通常の安定した状態では、電子は低いエネルギーの（原子核に近い）軌道から詰まっています。この状態を基底状態と言い、基底状態のエネルギーを基底準位といいます。

さて、この基底状態の原子に外部から光が入射すると、その光を吸収して、電子が高いエネルギーの軌道に移ることがあります。原子が基底状態よりも高いエネルギーを持つ状態を励起状態、そのときの原子の

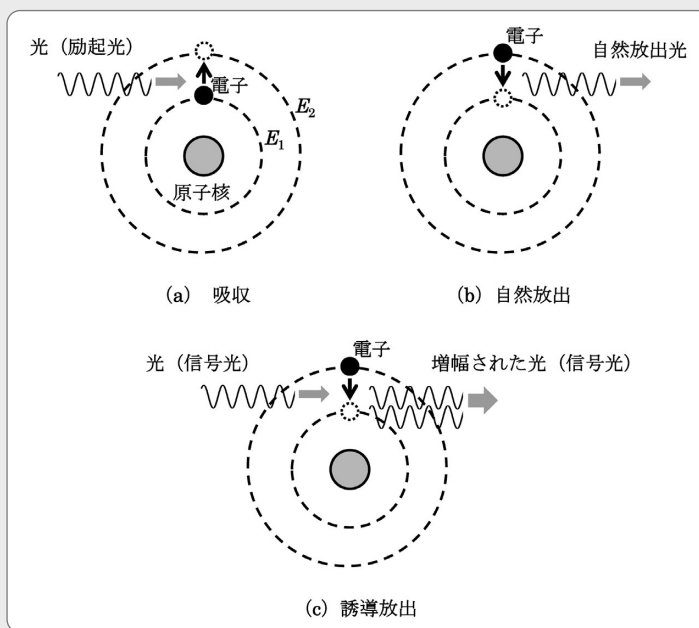


図1 光の吸収と放射

☞ エネルギーを励起準位と言います(図1(a)).

原子にとって高エネルギーの励起準位は不安定ですから、自然に低いエネルギーの基底準位に戻ります。その際、準位間の差分のエネルギーはどこに行

ってしまうのかというと、光となって放出されます。この現象を自然放出と言います(図1(b)).

一方、原子が励起状態のときに、放出される光と同じ波長の光(例えば、増幅したい信号光)を入射すると、不

安定な状態の原子が刺激されて、入射光と同じ波長・同じ位相の光が放射されます(図1(c)). この現象を誘導放出と言います、これが光を増幅する原理です。

エルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA)

現在、最も広く使われている光増幅器のエルビウム添加ファイバ増幅器(EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier)は、光の誘導放出を増幅原理としています。

光ファイバのコア(光が伝送される光ファイバの中心部分)に、エルビウム(Er)という元素を少し混ぜて作った特殊な光ファイバを使うことで光を増幅させることができます(図2)。まず、レーザで発生させた強い光(励起光)をEr添加ファイバに入れて、Erイオンを励起準位に遷移させておきます。ここに、増幅したい信号光を入れてやると、Erイオンが基底準位に戻るときに、信号光と同じ波長で同じ位相の光を放出します。この誘導放出によって信号光を増幅できます。一方、励起準位にあるErイオンが基底準位に戻る際の、信号光とは関係のない自然放出光は雑音となってしまいます。

励起するための光は、Erイオンが吸収しやすい波長(0.98 μm あるいは1.48 μm など)でなければなりません(図3)。さらに、Erイオンから放出される光は、励起準位と基底準位のエネルギー差で決まる波長になりますので、増幅できる波長帯も限られてしまいます。長距離光通信では一般に

1.55 μm 帯の波長が使われていますので、この波長を増幅できるErが、添加する物質として選ばれました。ツリウム(Tm)を使うと1.4 μm 帯や1.6 μm 帯、

プラセオジウム(Pr)なら1.3 μm 帯の光を増幅可能なため、これらを添加したファイバ増幅器の開発も行われています。

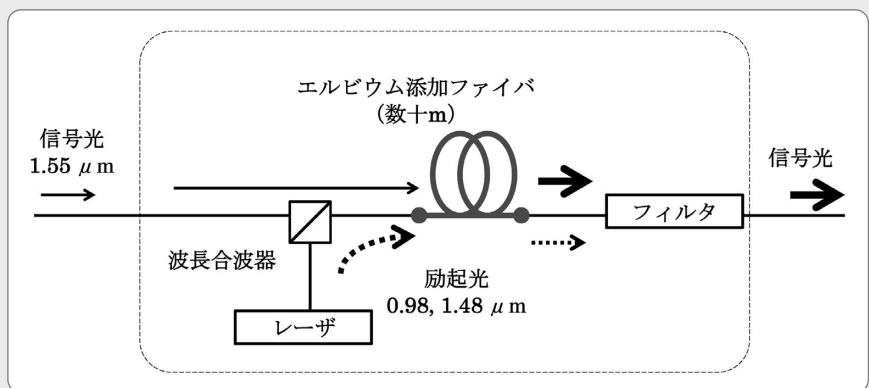


図2 EDFAの構成例

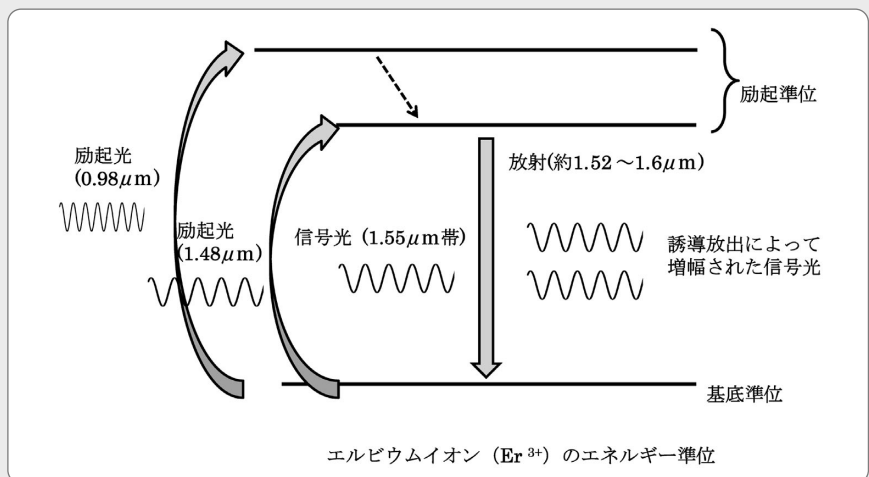


図3 EDFAの増幅原理

半導体光増幅器

半導体光増幅器は、EDFAでの光ファイバの代わりに、半導体の中で誘導放出を発生させる光増幅器です(図4)。

半導体に外部から電流を与えると、半導体中の電子(マイナス)と正孔(プラス)を過剰に増やすことができます。この状態は不安定ですので、電子と正孔は結合するように遷移し、結合時に

光を放ちます。このときに、放出光と同じ波長の光が外部から入射されると、その入射光に刺激されて、入射光と同一波長、同一位相の光が誘導放出されます。半導体の誘導放出は、☞

光増幅のほか、半導体レーザーの原理にもなっています。現状では雑音性能などの課題がありますが、数mmの素子で実現できるため、将来の装置の小型化、低廉化が期待されており、研究開発が活発になっています。

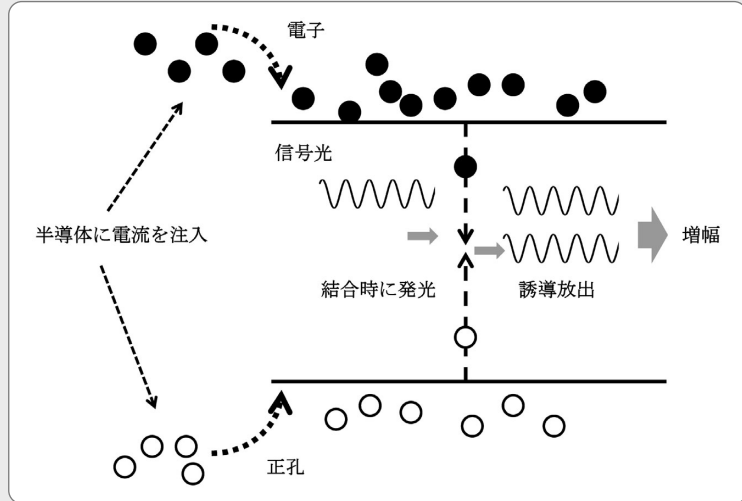


図4 半導体光増幅器の原理

ファイバラマン増幅

ファイバラマン増幅は、EDFAと同じく、励起光を光ファイバに入射して信号光を増幅します。光ファイバに非常に強い光(数百mW以上)を入射すると、入射する光のエネルギーが、ファイバを構成するガラスの熱振動(量子化された熱的な格子振動でフォノンといいます)の分だけ減り、長い波長の光(=周波数の低い光。周波数が低いほど光のエネルギーは小さい)に変換されます*。このとき、変換された光と同じ波長の入射光があると、熱振動がその入射光に刺激され、入射光と

* 物質の入射光の一部が、入射光と異なる波長で散乱する現象をラマン散乱と言い、インドの物理学者ラマン氏(1930年ノーベル物理学賞)が発見しました。

同じ波長、同じ位相の光に変換され、増幅が実現されます(図5)。

ファイバラマン増幅は、特殊なファイバではなく、伝送路の光ファイバを増幅媒体にできる(利得が伝送路に分布するので分布ラマン増幅といいます)ため、受信する信号光のS/N(信

号対雑音電力比)を改善できるので、EDFAや半導体光増幅器より長距離伝送が可能になる点や、広い波長帯で増幅可能である点など、EDFAにはない特長を持っています。しかしながら、非常に強いパワーのレーザーを用意しなければならないことが課題です。

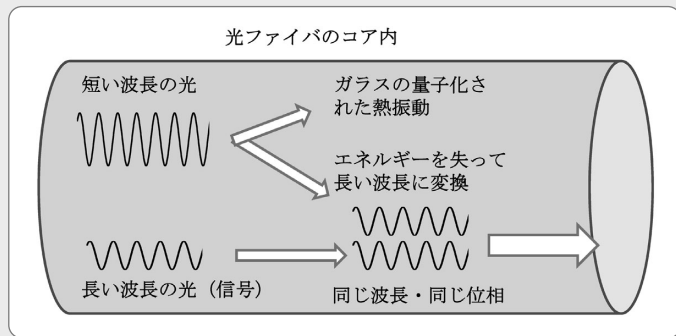


図5 ラマン増幅の原理

むすび

現在実用化されている主な光増幅器について概要を解説しました。世界の通信需要に応えていくために、光通信システムは飛躍的な高度化を続けています。日々進化を続ける光通信システムとその光増幅技術に、今後ご注目頂ければ幸いです。

(2013年9月2日受付)

参考文献

- 1) 三木哲也, 須藤昭一編: “光通信技術ハンドブック”, オプトロニクス社(2002)
- 2) 石尾秀樹監修, 中川清司, 中沢正隆, 相田一夫, 萩本和男: “光増幅器とその応用”, オーム社(1992)
- 3) 井上恭: “光通信ネットワークに登場する非線形光学効果”, O plus E, 32, 8, pp.911-915 (2010)
- 4) G.P. アグラワール, 小田垣孝・山田興一共訳: “非線形ファイバ光学”, 吉岡書店(2004)



なかとがわ つよし
中戸川 剛

2000年、横浜国立大学大学院工学研究科修了。同年、NHK入局。2003年より、放送技術研究所。以来、デジタル放送波や非圧縮映像信号の光ファイバ伝送に関する研究に従事。正会員。