

工学系12大学大学院単位互換e-ラーニング科目

磁気光学入門 第12回 磁気光学効果の応用(2)

光通信用磁気光学素子

佐藤勝昭

磁気光学効果の応用(2)

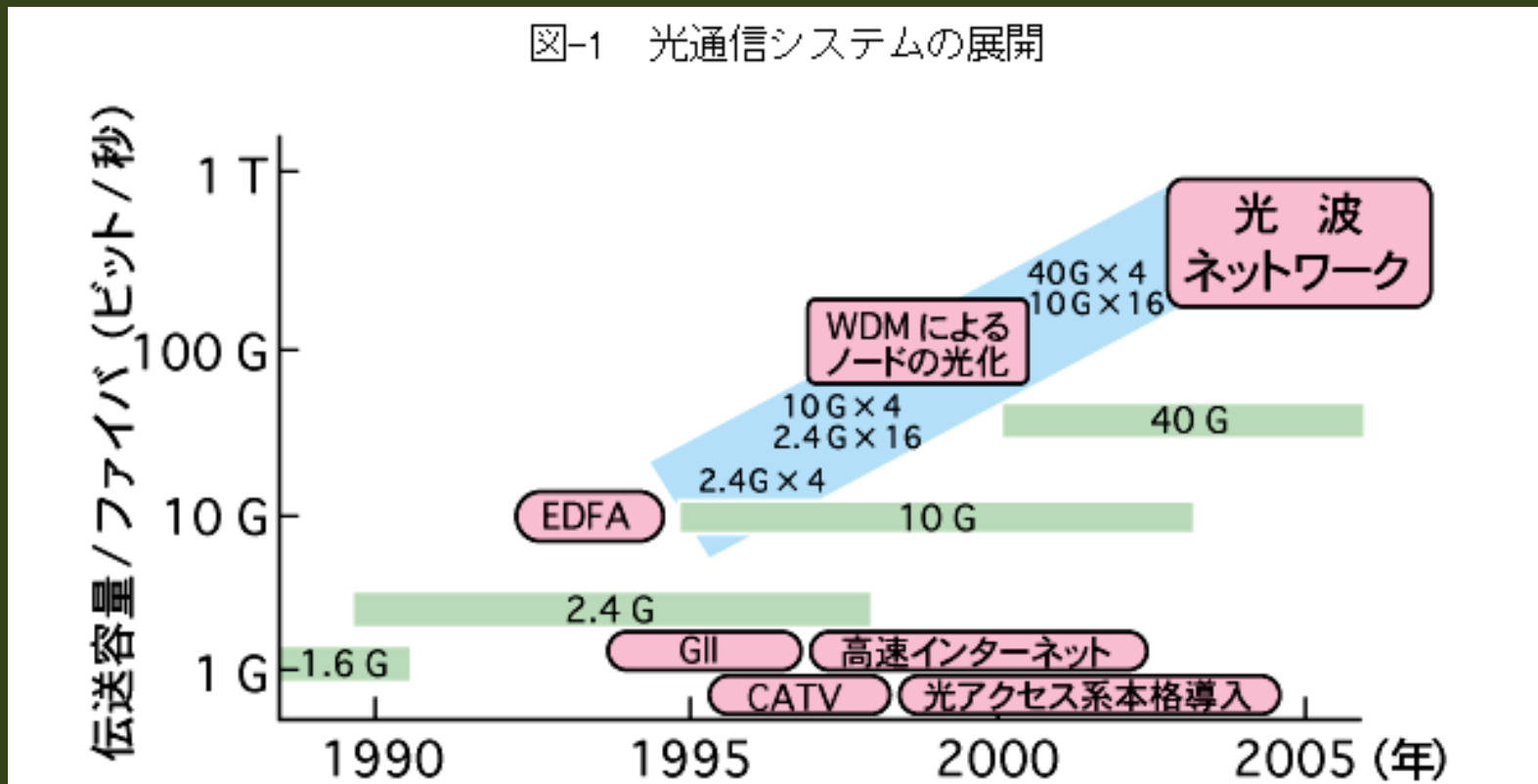
- 光磁気記録(記録情報の読み出し):第11回
- 光アイソレータ(光通信における方向性結合)
高圧電流測定(磁気光学センサ) : 今回
- 空間光変調器(光画像処理) : 第13回
- 微小磁区観察(磁気光学顕微鏡)

今回学ぶこと

- この講義は、主として光ファイバ通信に用いる光アイソレータについて述べます。最後に少し、高圧電流などの非接触測定に用いる電流磁界センサについて触れます。
- はじめに、光ファイバ通信の要素技術について、復習しておきます。

光通信デバイスと磁気光学材料

図-1 光通信システムの展開



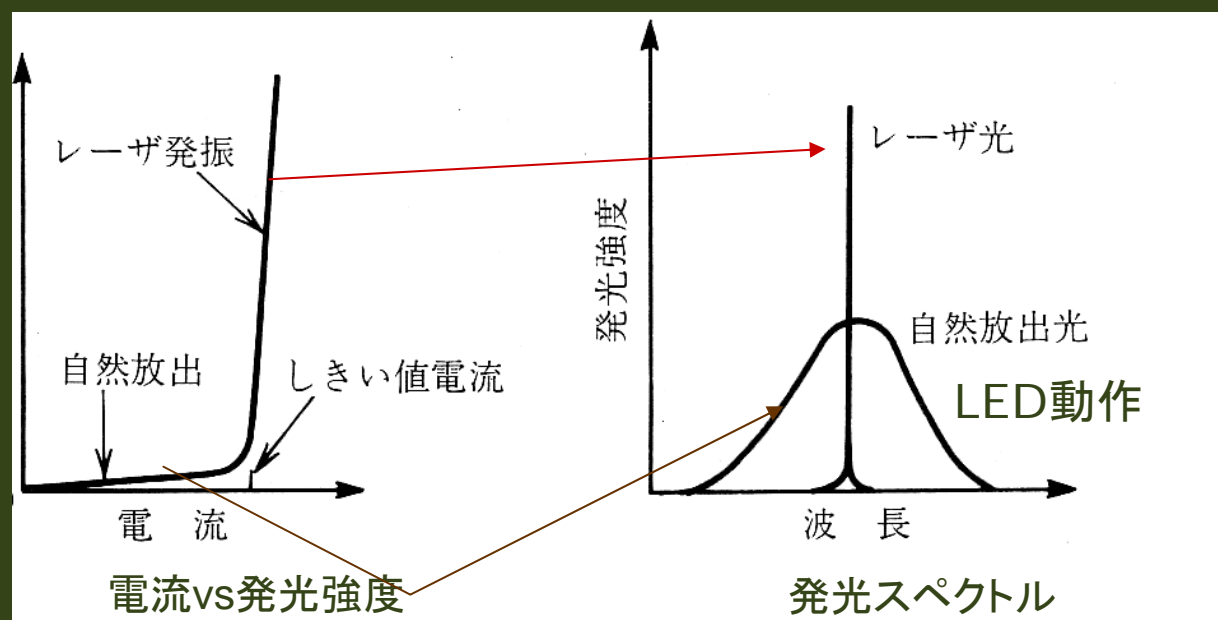
光通信の要素技術1

半導体レーザ

- LED構造において、劈開面を用いたキャビティ(共振器)構造を用いるとともに、ダブルヘテロ構造により、光とキャリアを活性層に閉じ込め、反転分布を作っています。
- DFB構造をとることで特定の波長のみを選択しています。

半導体レーザーの動作特性

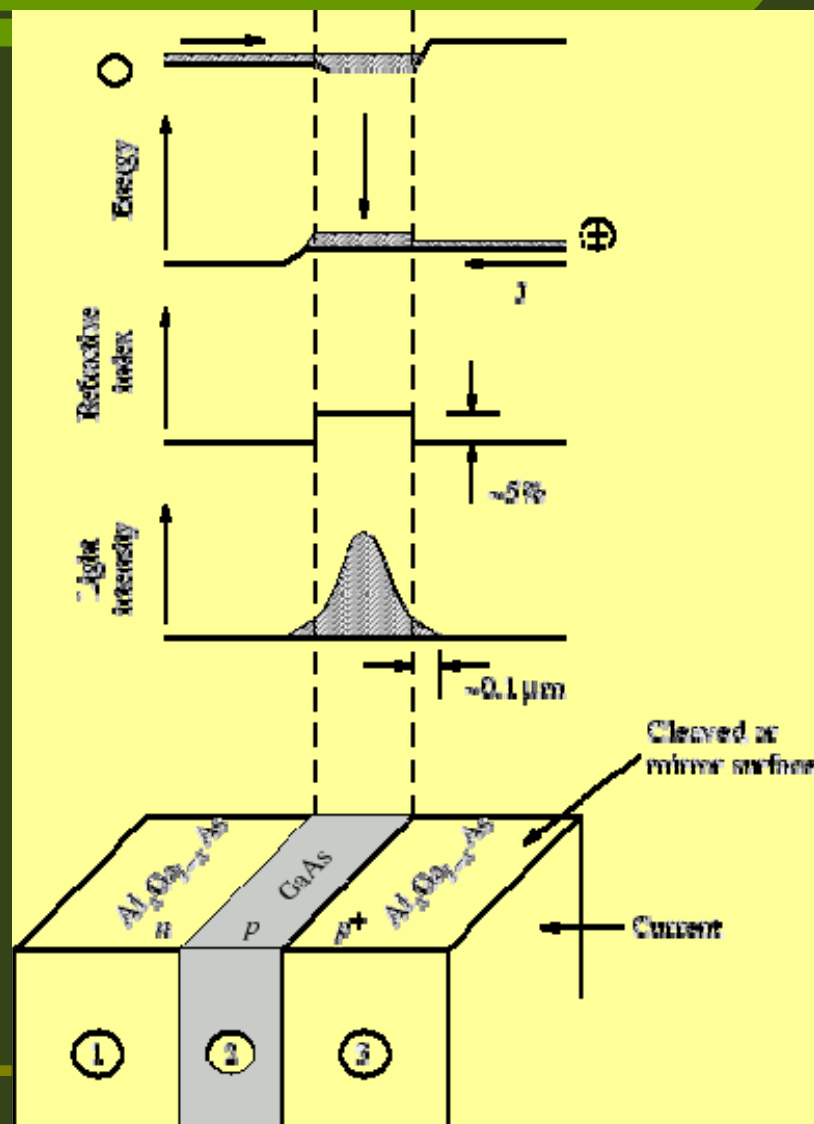
- 半導体レーザーは、閾値以下ではLEDと同じ自然放出による発光ですが、閾値を超えるとコヒーレントとなり、レーザー光となります。



ダブルヘテロ構造

- ダブルヘテロ構造というのは、活性層をバンドギャップの広い材料でサンドイッチした構造のことです。
- 電子とホールを閉じこめ、光を閉じこめるので、低閾値で動作します。
- この構造は、ロシアのアルフォーロフと日本人の林巖夫によって独立に発明されました。

http://www.ece.concordia.ca/~i_statei/vlsi-opt/



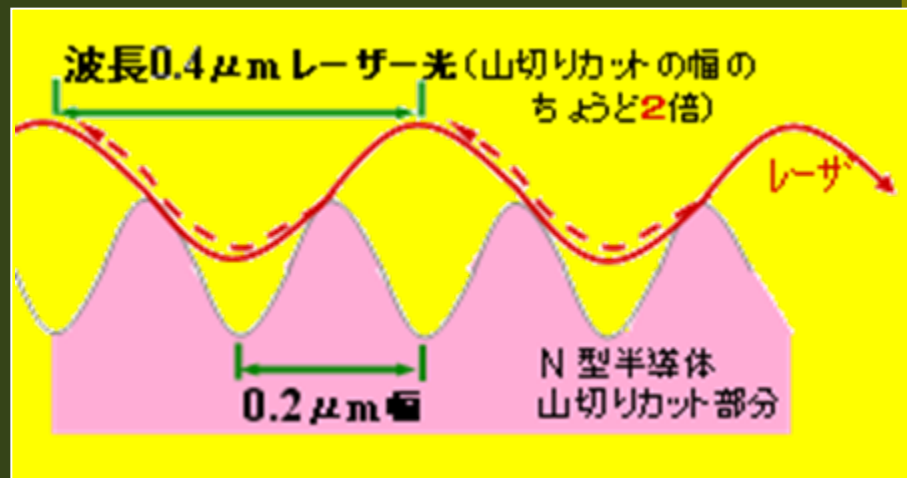
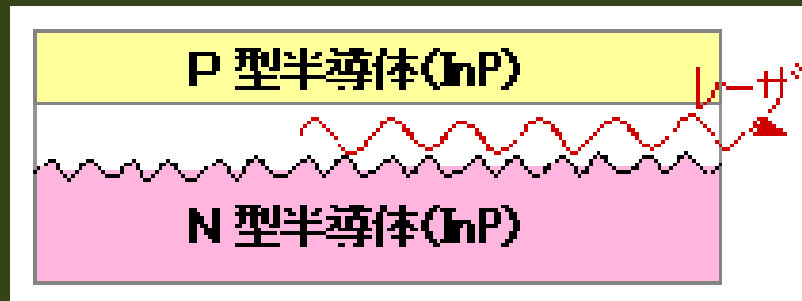
DHレーザー

- 光とキャリアの閉じこめが特徴です。
 - バンドギャップの小さな半導体をバンドギャップの大きな半導体でサンドイッチすることにより、高い濃度の電子・ホールを活性層に閉じこめるので、再結合確率が高くなります。
 - 屈折率の高い半導体(バンドギャップ小)を屈折率の低い半導体(バンドギャップ大)でサンドイッチすることにより、全反射による光の閉じこめが起き、誘導放出が起きやすい状態にしています。

DFBレーザー

- レーザの光路に回折格子を入れて、1波長の光しか出さないレーザーなので、通信時に信号の波がずれることがなく、高速・遠距離通信が可能です。
- (通信速度: Gb/s = 1秒間に10億回の光を点滅する。電話を1度に約2万本通話させることができます)

注: DFB=distributed feed back



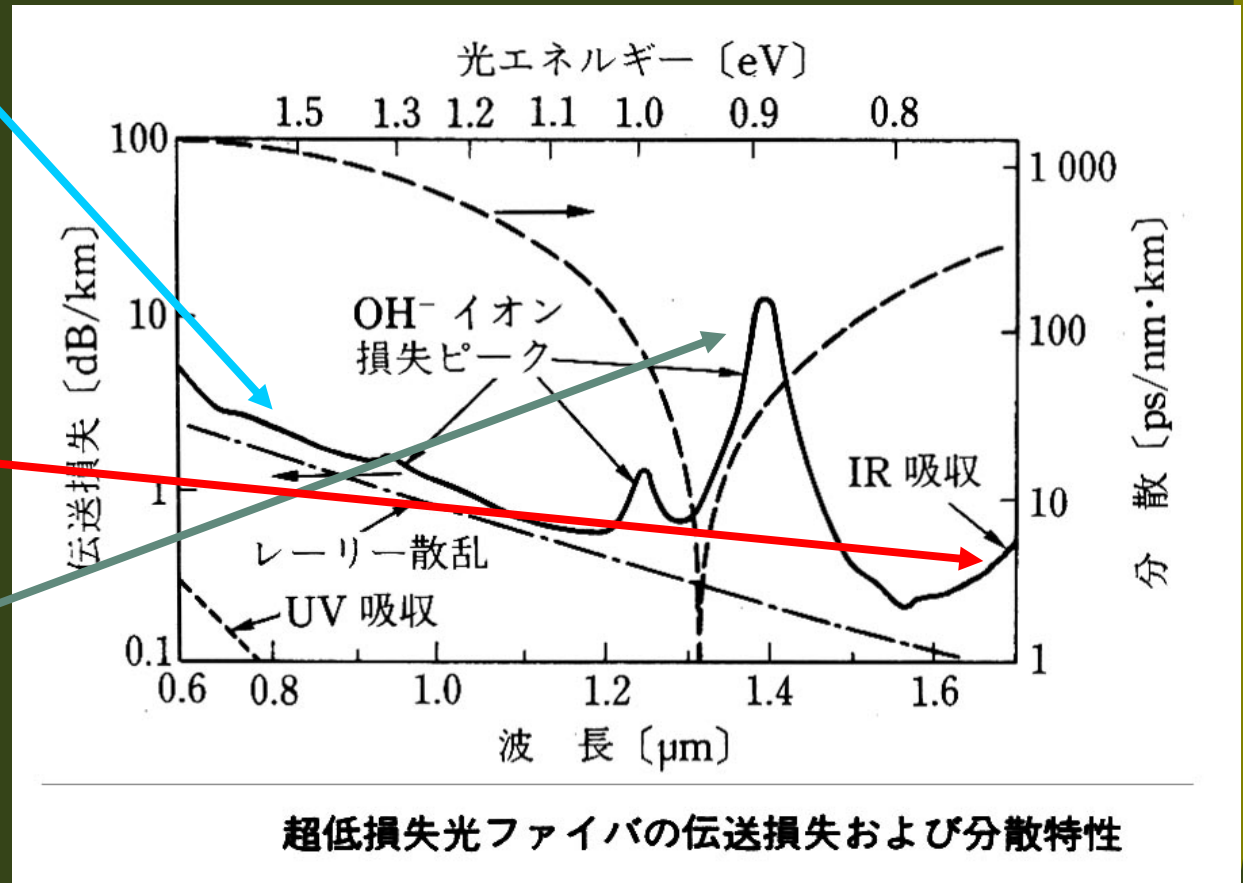
FPLレーザとDFBLレーザ

項目	FPLレーザ	DFBLレーザ
光スペクトル		
伝送距離	近距離	長距離
伝送容量	中容量	大容量
コスト	安い	高い

注: FP=fiber pigtailed

光ファイバーの伝搬損失

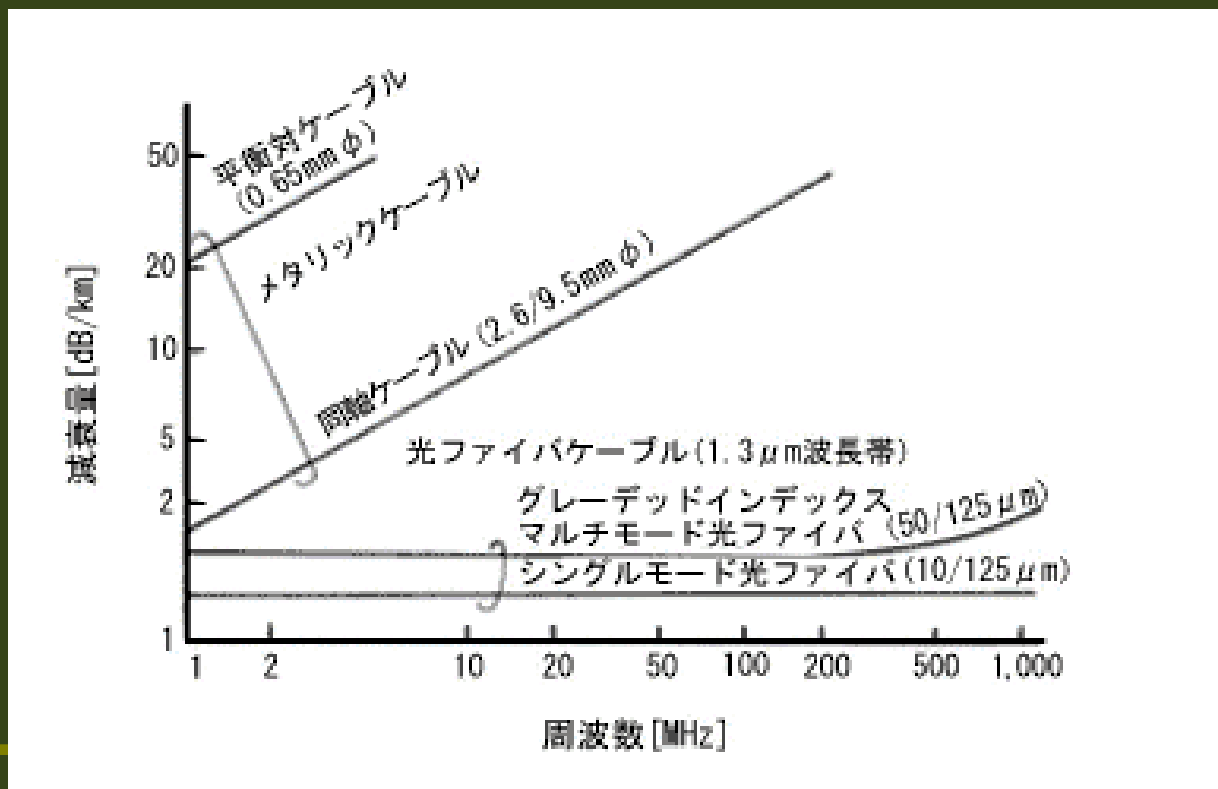
- 短波長側の伝送損失はレーリー散乱によります。
- 長波長側の伝送損失は分子振動による赤外吸収によります。
- 1.4 μm 付近の損失はOHの分子振動によるものです。



佐藤・越田:応用電子物性工学(コロナ社、1989)

光ファイバとメタルの比較

- メタル系ケーブルでは周波数とともに伝送損失が増加しますが、光だと1GHzでもフラットです。



要素技術3

光検出

- 光検出にはフォトダイオードを用います。
- 高速応答の光検出が必要です。
- pinフォトダイオードまたはショットキー接合フォトダイオードが使われます。
- 通信用PDの材料としては、バンドギャップの小さなInGaAsなどが用いられます。

光検出

- Pin-PD
- Schottky PD
- 応答性は、空乏層をキャリアが走行する時間と静電容量で決まるので、空乏層を薄くするとともに、接合の面積を小さくしなければなりません。

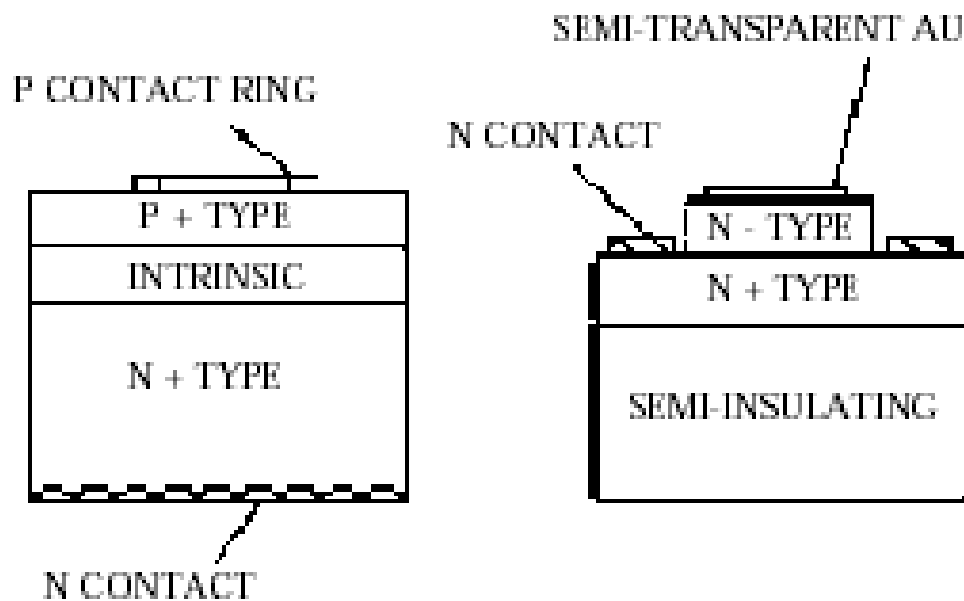


FIGURE 1: The high-field region is the intrinsic layer in the p-i-n photodiode (left) and the n-region in the Schottky photodiode (right).

要素技術4

光中継：ファイバーアンプ

- 光ファイバー中の光信号は100km程度の距離を伝送されると、20dB減衰します。これをもとの強さに戻すために**光ファイバーアンプ**と呼ばれる光増幅器が使われています。
- 光増幅器は、エルビウム(Er)イオンをドープした光ファイバー(EDF: Erbium Doped Fiber)と励起レーザーから構成されており、励起光といわれる強いレーザーと減衰した信号光を同時にEDF中に入れることによって、Erイオンの誘導増幅作用により励起光のエネルギーを利用して信号光を増幅することができます。

旭硝子のHP

<http://www.agc.co.jp/news/2000/0620.html>より



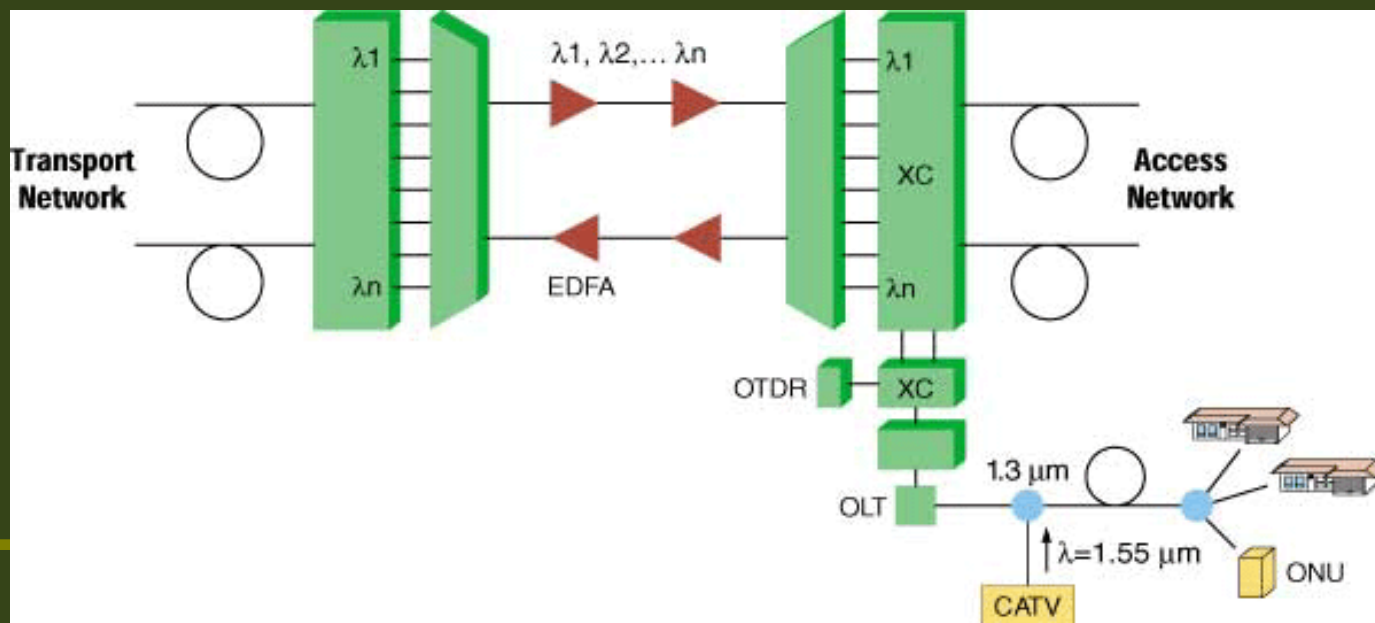
エルビウムの増幅作用

- エルビウム (Er) イオンをドープしたガラスは、980nmや1480nmの波長の光を吸収することによって1530nm付近で発光する。この発光による誘導放出現象を利用することによって光増幅が可能になります。
- 具体的には、EDFAに増幅用のレーザー光を注入すると、Erイオンがレーザー光のエネルギーを吸収し、エネルギーの高い状態に励起され、励起された状態から元のエネルギーの低い状態に戻るときに、信号光とほぼ同じの1530nm前後の光を放出します。信号光は、この光のエネルギーをもらって増幅されます。
- Erをドープするホストガラスの組成によって、この発光の強度やスペクトル幅(帯域)が変化します。発光が広帯域であれば、光増幅できる波長域も広帯域になります。

要素技術5 波長多重

(WDM=wavelength division multiplexing)

- この方式は、波長の異なる光信号を同時にファイバー中を伝送させる方式であり、多重化されたチャンネルの数だけ伝送容量を増加させることができます。
- 通信用光ファイバーは、1450～1650nmの波長域の伝送損失が小さい(0.3dB/km以下)ため、原理的にはこの波長域全体を有効に使うことができます。



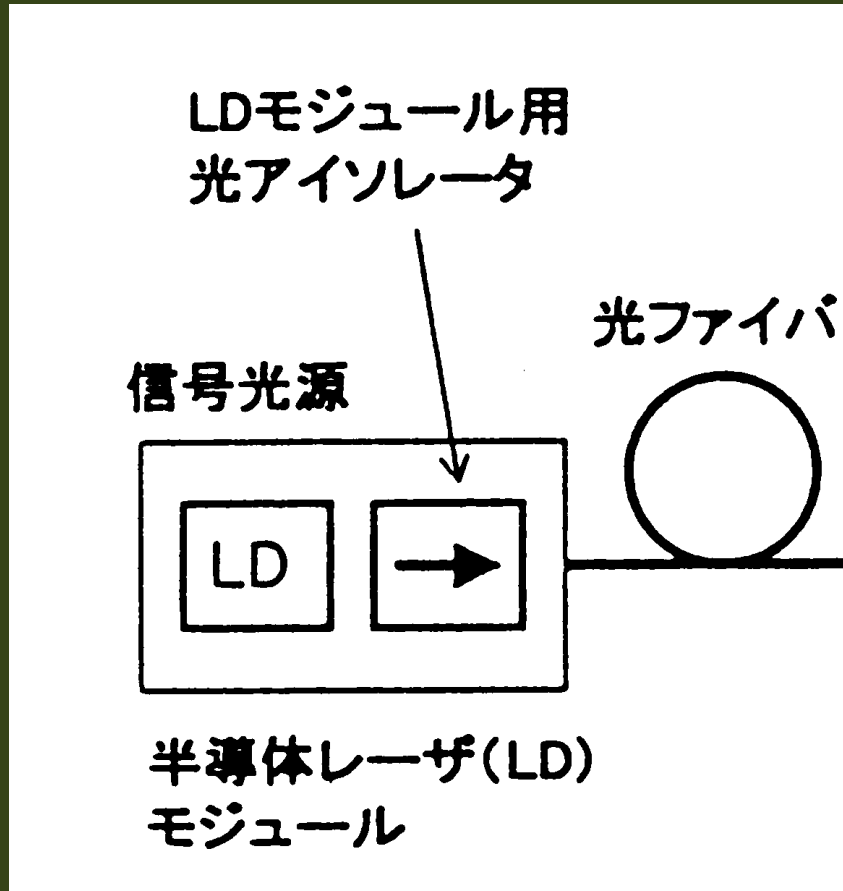
光通信における 磁気光学デバイスの位置づけ

- 光ファイバ通信には、さまざまな磁気光学デバイスが用いられます。
 - 光アイソレータ：光を一方通行にする素子です。
 - 光サーキュレータ：WDMの光アドドロップ多重(OADM)において、ファイバグレーティングと組み合わせて特定波長を選択します。
 - EDFAの前後にアイソレータを配置して動作を安定化します。
 - メカ部分のない光アッテネータ、光スイッチとして利用されます。

光アイソレータ

- 光アイソレータは、光を一方向にだけ通す光デバイスです。
- 光通信に用いられている半導体レーザ(LD)や光アンプは、光学部品からの戻り光により出力変動・周波数変動・変調帯域抑制・LD破壊など不安定な動作を起こします。光学部品との間で共振器が構成されてしまうことが原因です。
- 戻り光による悪影響を取り除き、LDや光アンプを安定化するために必要不可欠な光デバイスが光アイソレータです。

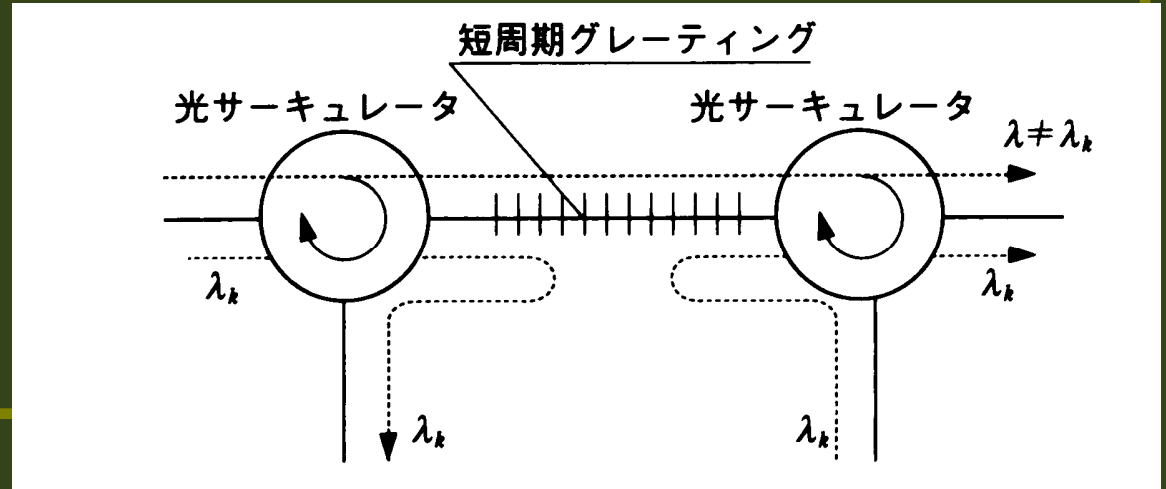
半導体レーザモジュール用アイソレータ



- Multi-quantum wells (MQW) DFB laser diode
- 1.55 μm band of optical emission wavelength
- High-speed response
- Built-in optical isolator
- 4-pin coaxial package
- With photodiode for optical output monitor
- LC receptacle with a single-mode fiber stub

光アドドロップとサーキュレータ

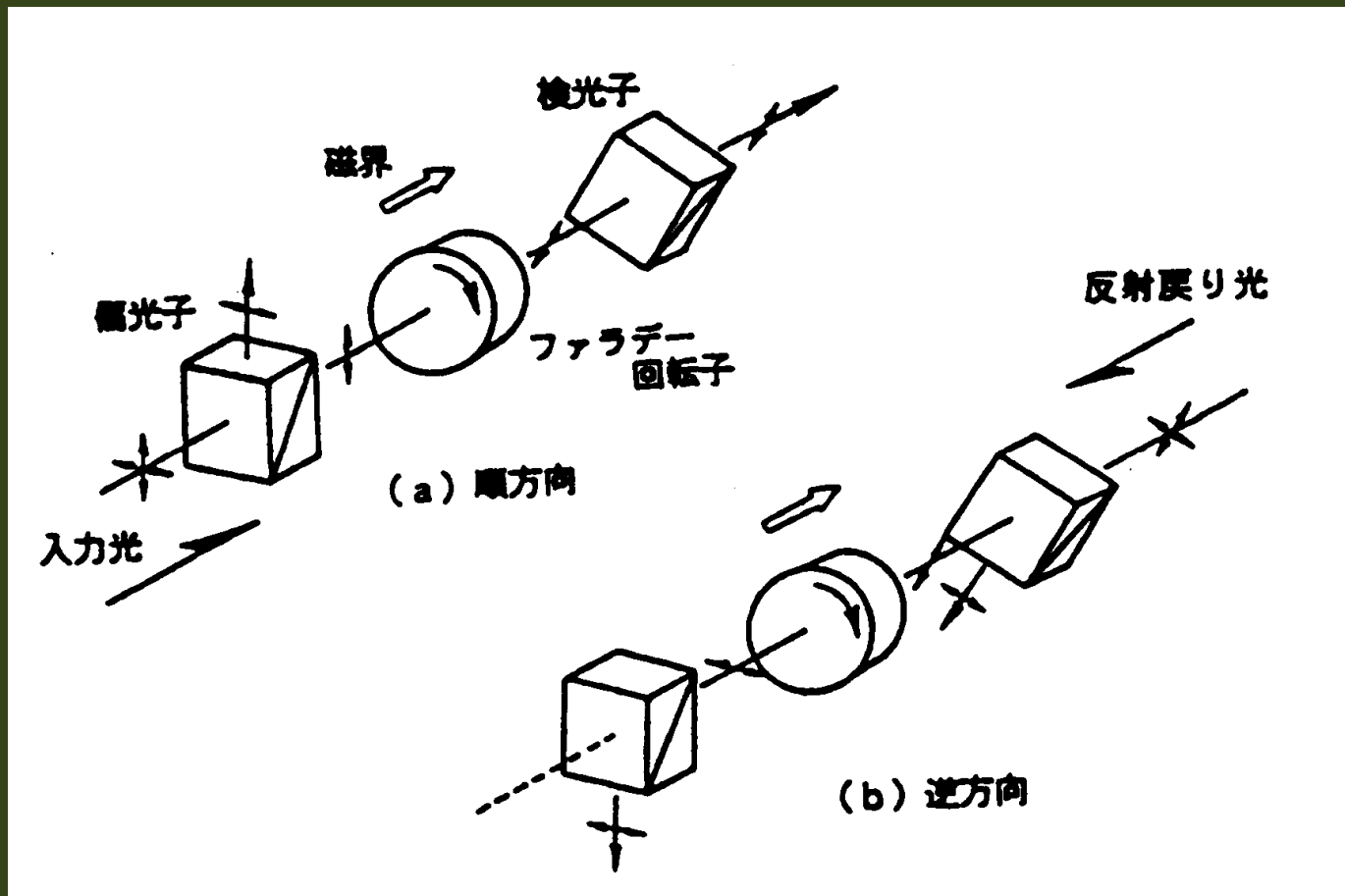
- OADM(Optical Add-Drop Multiplexing光アドドロップ多重) は、多重化された信号からあるチャンネル数の信号を束で抜き出したり、空いている部分にチャンネル束を追加したりする機能を持ちます。
- 図に示すのは短周期ファイバ・グレーティングと2個のサーキュレータを用いたOADMです。
- 左の入力ポートから入った波長多重信号のうち、取り出したい波長 λ_k の信号のみがファイバ・グレーティングによりブラッグ反射されDropポートより出力されます。一方、Addポートから入った波長 λ_k の信号は、グレーティングを通り抜けた他の波長の信号とともに出力ポートに導かれます。



偏光依存アイソレータ

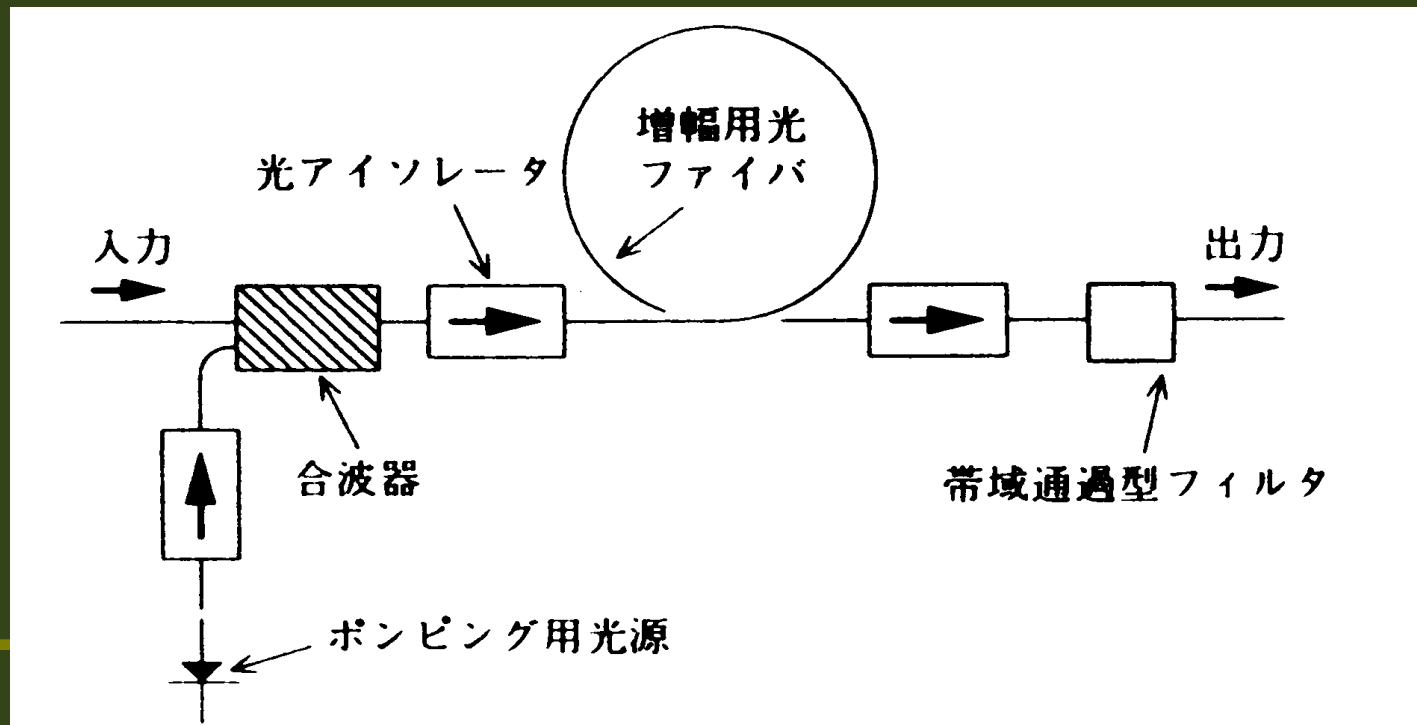
- 偏光依存光アイソレータの構成を図に示します。すなわち、2枚の偏光子P1, P2の間にファラデー旋光子Fをはさみ、孔あき永久磁石中におき光の進行方向と平行に磁界をかけたものです。
- この磁界は旋光子の磁区を揃えて単一磁区にするためのものです。
- 図のように入射光は偏光子P1によって直線偏光にされ、ファラデー旋光子Fを透過します。入射直線偏光はこの旋光子によって正確に 45° の回転を受け、透過方向が鉛直から 45° 傾けておかれた第2の偏光子(検光子)P2を通してファイバなどの光学系に導かれます。
- 戻り光はさまざまな偏光成分をもっていますが、このうち鉛直から 45° 傾いた成分のみがP2を透過します。この偏光成分は、旋光子Fによってさらに 45° の旋光を受けて、P1の透過方向とは垂直に向いた偏光となるため、光源側には光が戻りません。

偏光依存アイソレータの仕組み

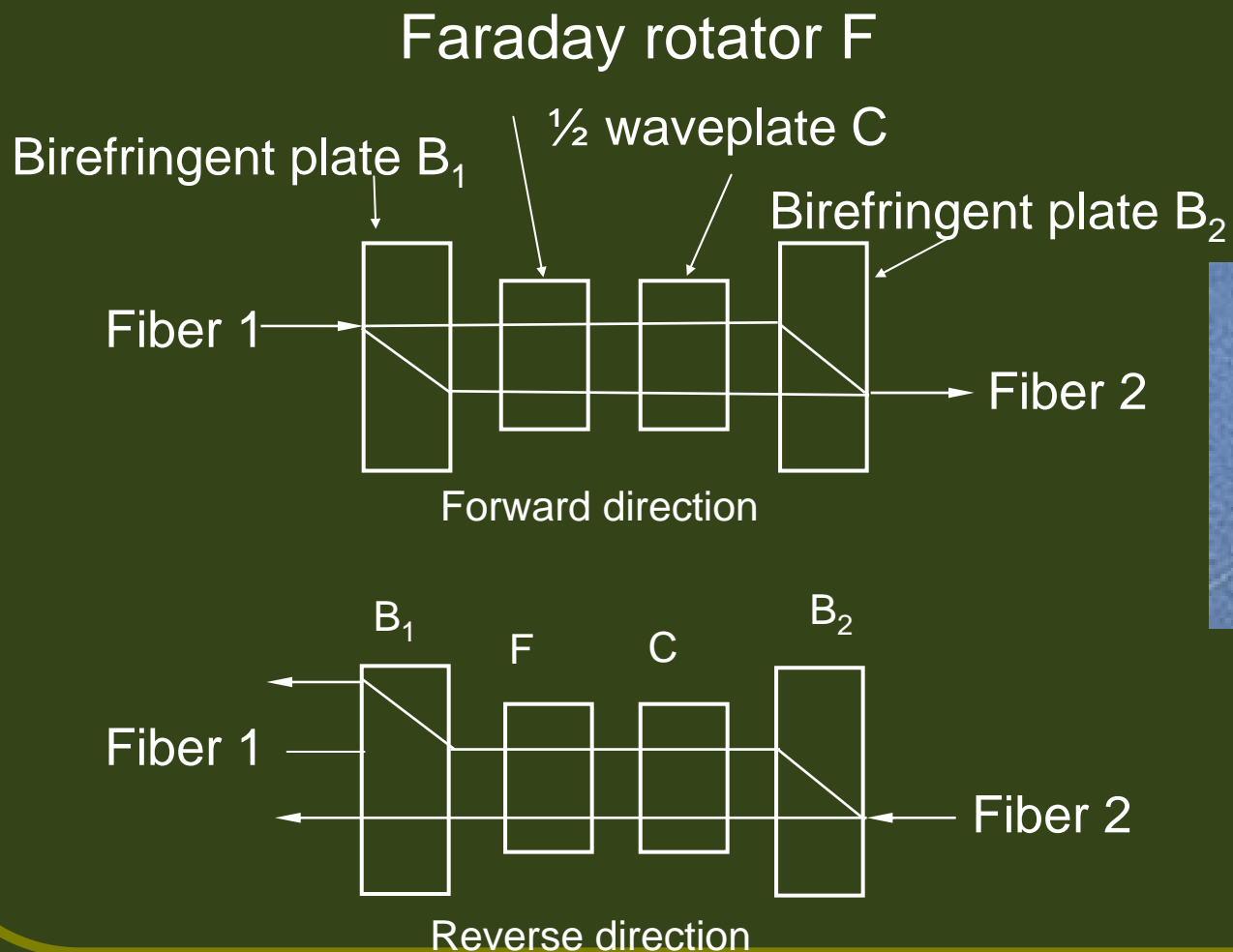


光ファイバ増幅器と アイソレータ

- 光ファイバーアンプに戻り光が入ると、やはりノイズの原因になるので入出力両端にアイソレータを用いています。

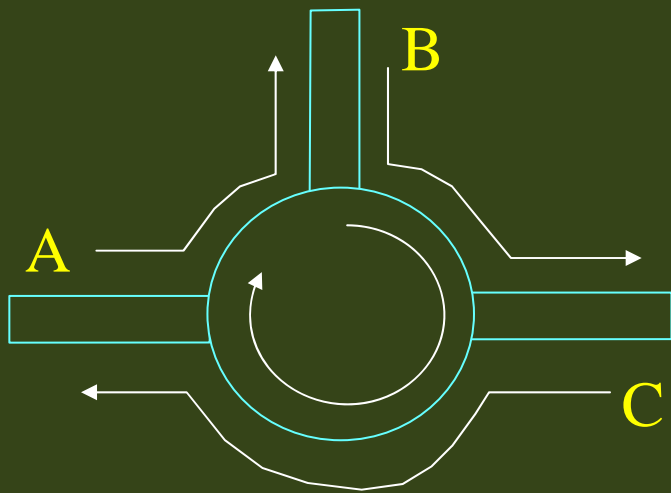


偏光無依存アイソレータ



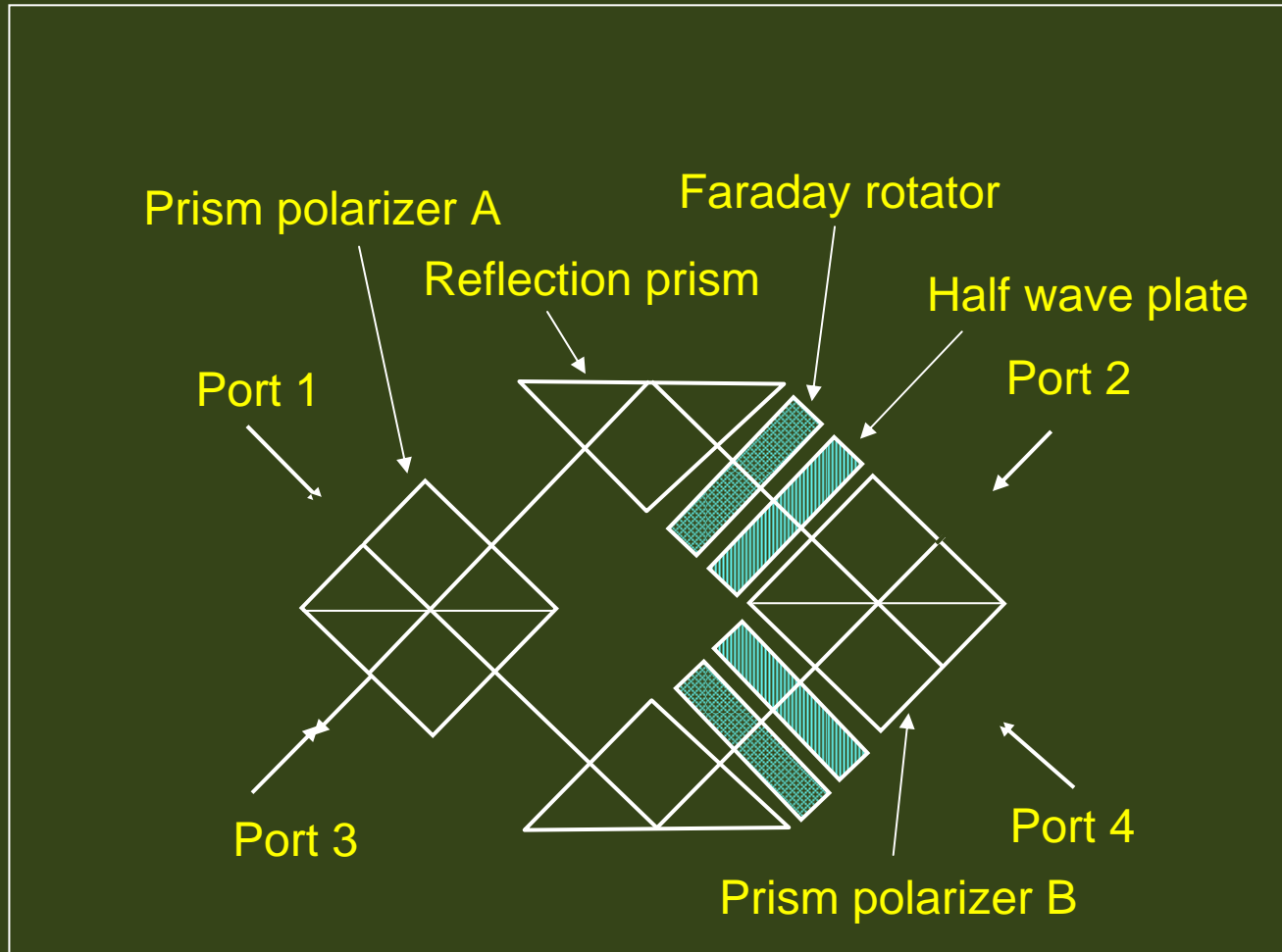
信光社
<http://www.shinkosha.com/products/optical/>

光サーキュレータ



3-port Optical Circulator
C-band : YC-1100-155
FDK

磁気光学サーキュレータ

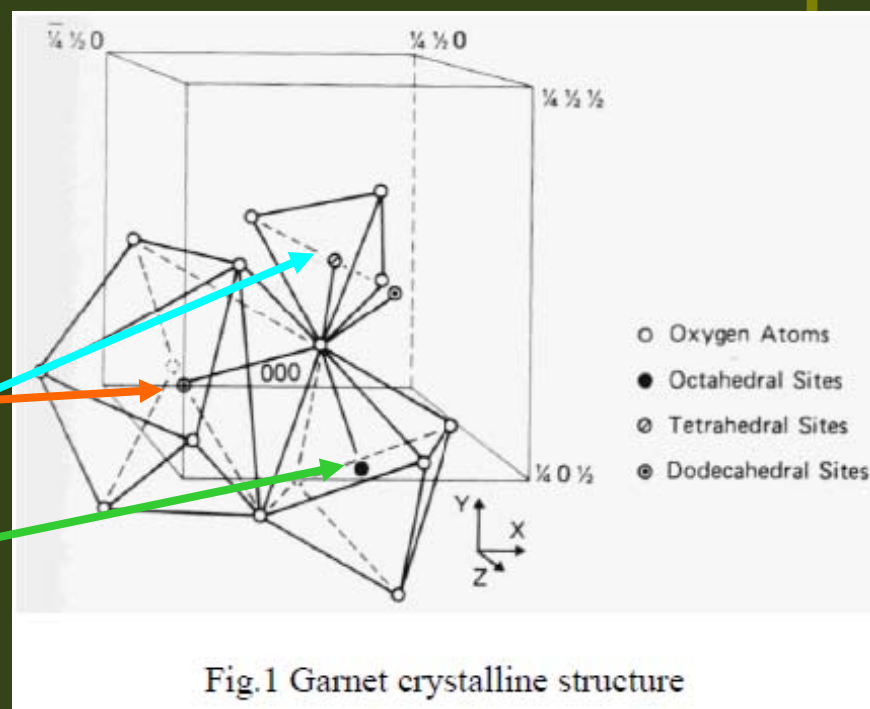


光アイソレータ材料

1. ビスマス添加磁性ガーネット
2. 希薄磁性半導体

磁性ガーネット

- 磁性ガーネット：
 - YIG($Y_3Fe_5O_{12}$)をベースとする鉄酸化物; Y→希土類、Biに置換して物性制御
- 3つのカチオンサイト：
 - 希土類 12面体位置を占有
 - 鉄 Fe^{3+} 4面体位置 8面体位置、反強磁性結合
 - フェリ磁性体



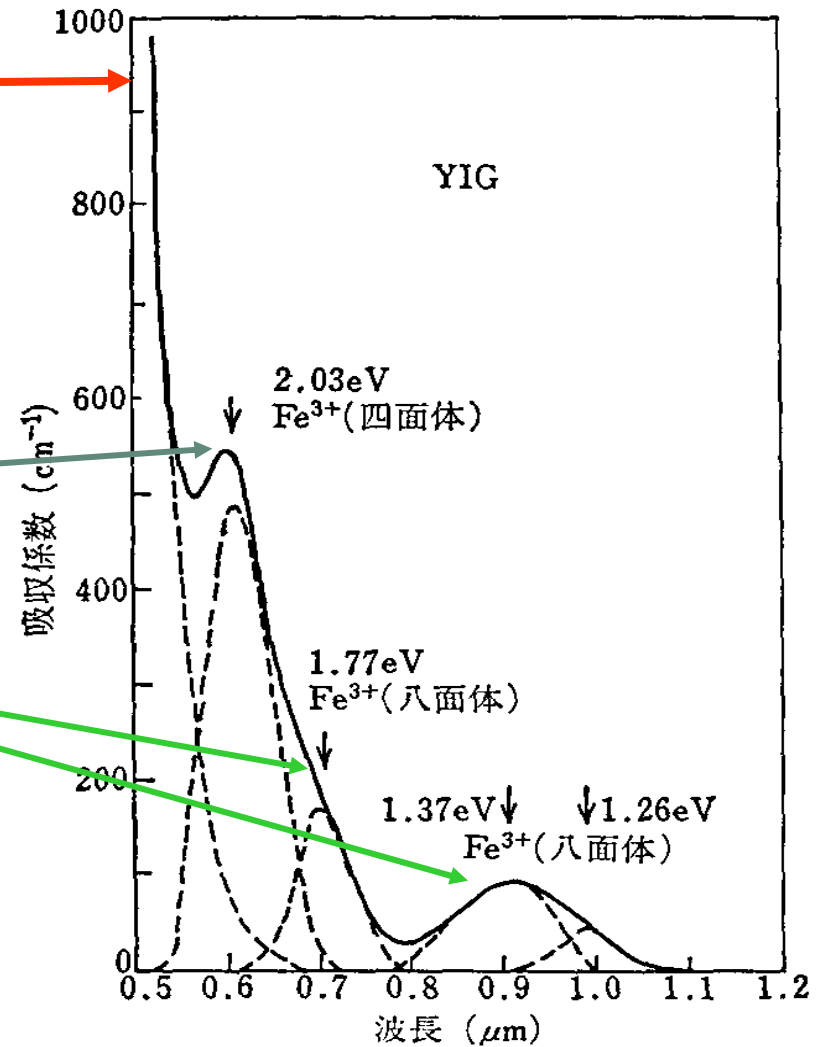
ガーネットの結晶構造

磁性ガーネットの物性とファラデー効果

- Yはガーネット構造の十二面体サイトを占める. Feは四面体サイトと八面体サイトを占める. 両者は反強磁性的に結合しフェリ磁性となる.
- Yを希土類Rに置き換えた希土類磁性ガーネット $R_3Fe_5O_{12}$ (Rは希土類)もYIGと同様の性質をもつ.
- 磁性ガーネット $R_3Fe_5O_{12}$ のRの一部をBiに置換するとBi置換量とともに磁気光学効果が増加する.
- Bi置換を行ったものでは吸収量をあまり増加させずに、ファラデー効果だけを強めることができるので性能指数が増加し、薄い試料でも45°の回転を得ることができる.

YIGの光吸収スペクトル

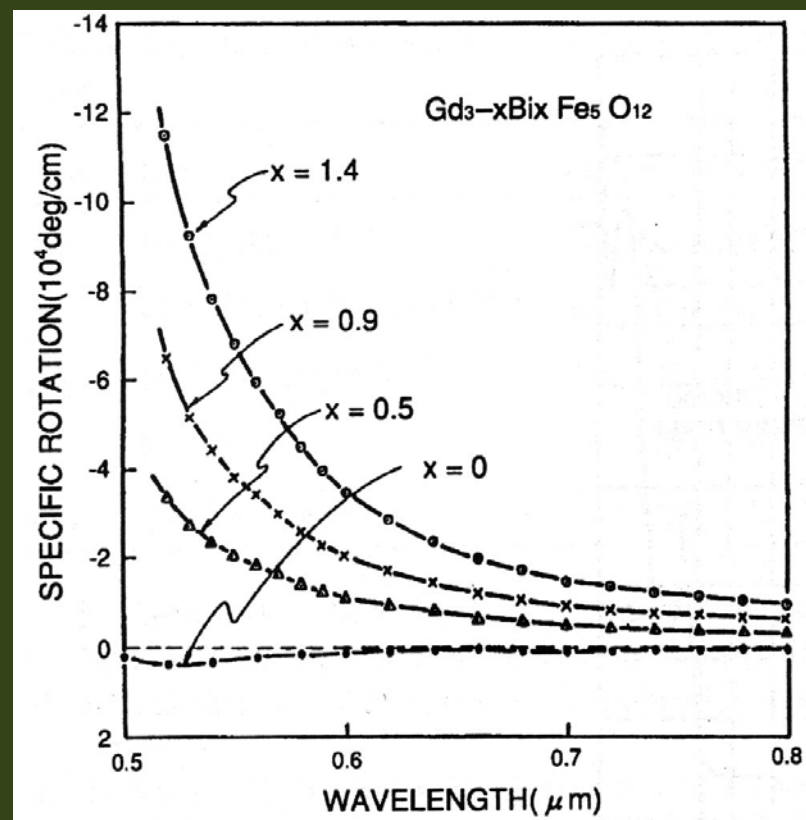
- 電荷移動型(CT)遷移
(強い光吸収)2.5eV
- 配位子場遷移
(弱い光吸収)
 - 4面体配位: 2.03eV
 - 8面体配位:
1.77eV, 1.37eV, 1.26eV



YIGの光吸収スペクトル(室温)²²⁾

Bi置換磁性ガーネット

- Bi: 12面体位置を置換
- ファラデー回転係数: Bi置換量に比例して増加。
- Biのもつ大きなスピン軌道相互作用が原因。
- Bi置換によって吸収は増加しないので結果的に性能指数が向上

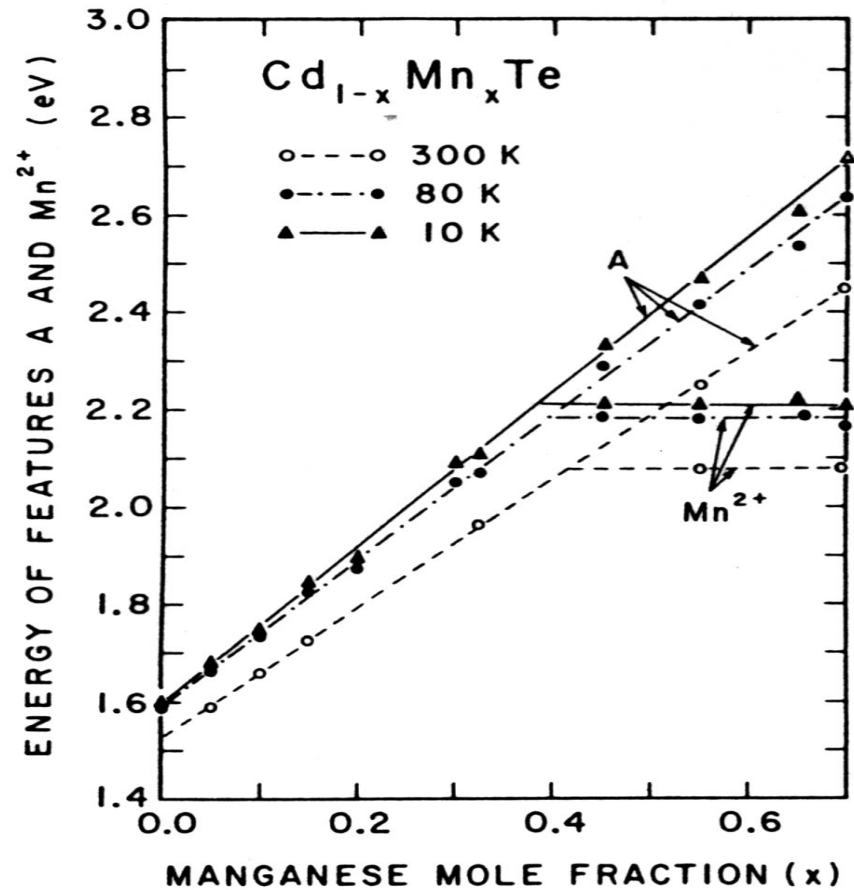


II-VI系希薄磁性半導体

- 磁性ガーネットには, $1\ \mu\text{m}$ より短波長側に強い吸収帯が存在するため, これより短波長の光通信アイソレータ材料として用いることがむずかしい.
- II-VI族半導体のII族元素をMnに置換した磁性半導体は, 可視-近赤外領域で透明であり, 光学吸収端付近の波長で大きなファラデー回転をもつので短波長用のファラデー旋光子材料として期待される.

Cd_{1-x}Mn_xTeにおける バンドギャップのMn濃度依存性

- Cd_{1-x}Mn_xTeのバンドギャップは、Mnの添加量を増やすとMn濃度に比例して高エネルギー側にシフトする。
- 2.2eVにMn²⁺の配位子場遷移があるのでこれ以上のエネルギーでは使用できない。



$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ のバルク成長

●ブリッジマン法

- 出発原料: Cd, Mn, Te元素
- 石英管に真空封入
- 4 mm/hの速度でるつぼを降下させる。
- 融点: 1100°C
- WZ (高温相) \rightarrow ZB (低温相) 相転位 (温度低下)
- 過剰融液組成 \rightarrow 相晶を防ぐ効果

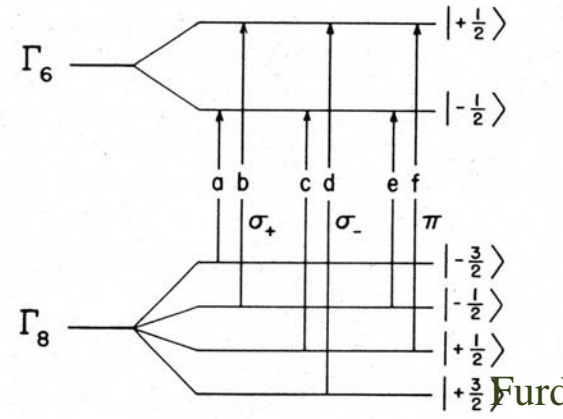
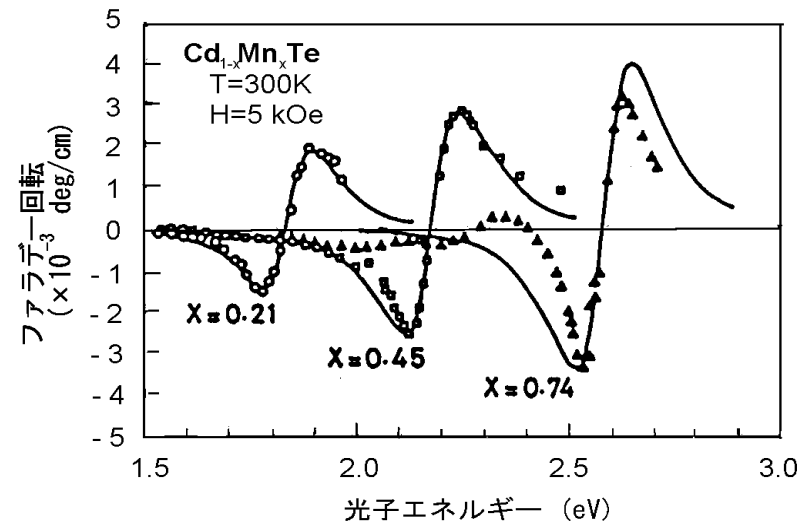
II-VI系希薄磁性半導体の 結晶構造と組成存在領域

Material	Crystal structure	Range of Composition
$\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$	ZB WZ	$0 < x < 0.10$ $0.10 < x \leq 0.45$
$\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$	ZB WZ	$0 < x \leq 0.30$ $0.30 < x \leq 0.57$
$\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$	ZB	$0 < x \leq 0.86$
$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$	WZ	$0 < x \leq 0.45$

Material	Crystal structure	Range of Composition
$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$	WZ	$0 < x \leq 0.50$
$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$	ZB	$0 < x \leq 0.77$
$\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{S}$	ZB	$0 < x \leq 0.37$
$\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$	ZB	$0 < x \leq 0.38$
$\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$	ZB	$0 < x \leq 0.75$

CdMnTeの磁気光学スペクトル

- II-VI族希薄磁性半導体: E_g (バンドギャップ)がMn濃度とともに高エネルギー側にシフト
- 磁気ポーラロン効果(伝導電子スピンと局在磁気モーメントがsd相互作用 \rightarrow 巨大g値: バンドギャップにおける磁気光学効果)



半導体とアイソレータの一体化

- 貼り合わせ法
 - 半導体上に直接磁性ガーネット膜作製→格子不整合のため困難
 - ガーネット膜を作っておき、半導体基板に貼り合わせる方法が提案されている
- 希薄磁性半導体の利用
 - DMSの結晶構造:GaAsと同じ閃亜鉛鉱型→
 - 半導体レーザとの一体化の可能性。
 - 導波路用途の面内光透過の良質の薄膜作製
 - 安藤ら：GaAs基板上にMBE法でCdMnTeの薄膜を作製。
バッファ層：ZnTe, CdTe層

電流磁界センサ

- 高圧送電線を流れる電流を安全に測定する方法として、磁気光学効果を用いたセンサがあります。

電流磁界センサ

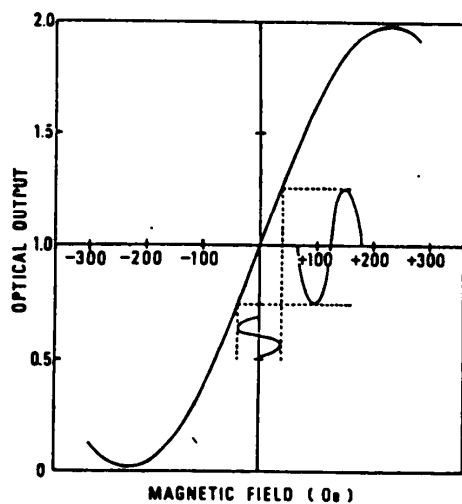
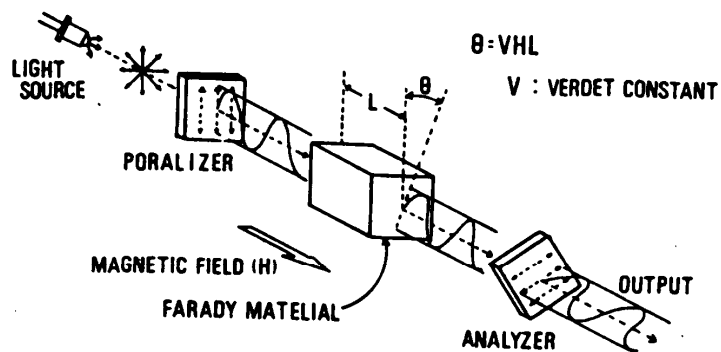


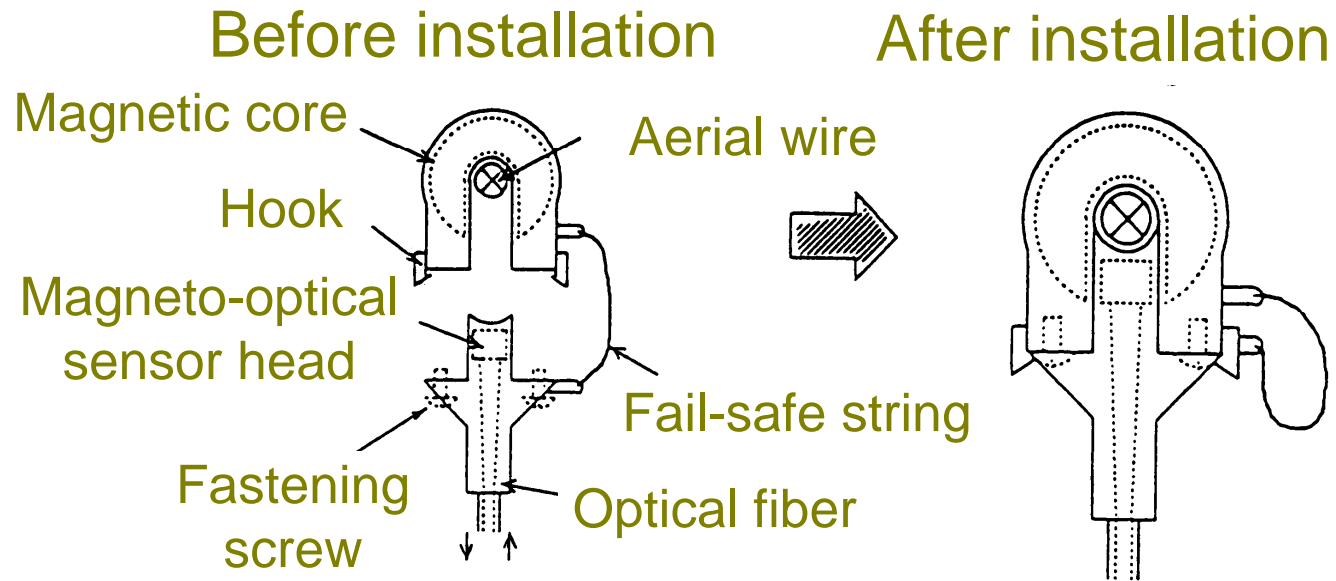
表1 Ce:YIG単結晶とBi:YIG単結晶の比較

	Ce:YIG (今回試作)	Bi:YIG (文献最高値)
ヴェルデ定数	4.2 deg/A	1.9 deg/A
コットン・ムートン効果	-1.7×10^{-4}	-0.5×10^{-4}

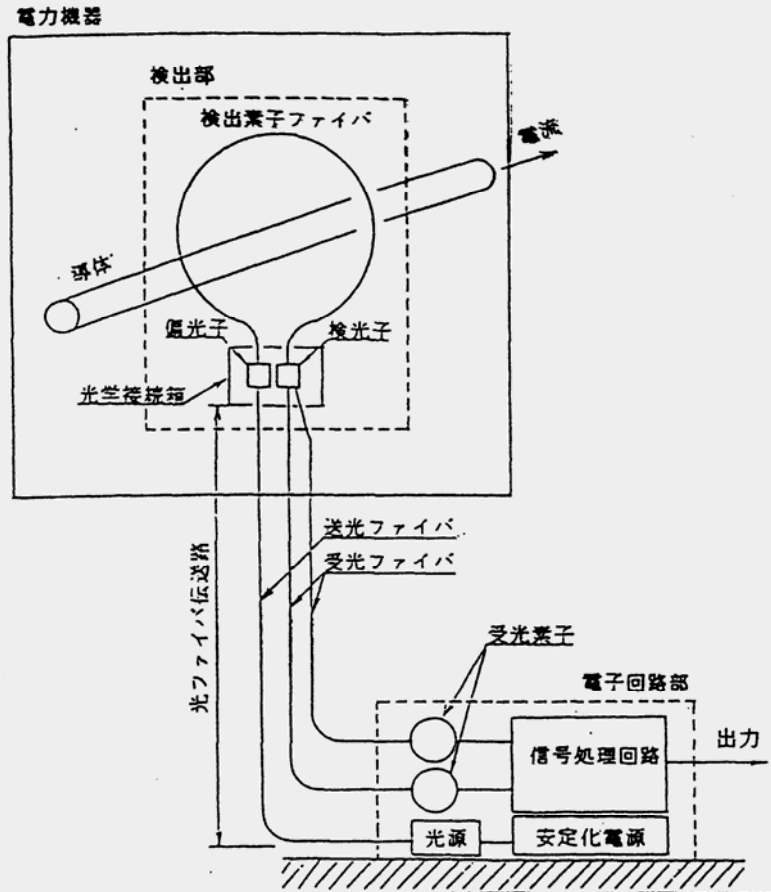
高感度光応用磁界センサ用材料 Ce:YIG の開発

<http://ge-rd-info.denken.or.jp/ge-leaflet/pdf/T03072.pdf>

電流センサ



光ファイバ磁界センサ



第12回の課題

- 光アイソレータはなぜ光ファイバ通信にとって必要か述べてください。
- 光アイソレータにおける磁気光学素子の役割について述べてください。