

大学院工学研究科  
磁性工学特論第11回  
—磁気光学効果の応用—

佐藤勝昭

東京農工大学大学院  
ナノ未来科学研究拠点

# 光ストレージについて

- 読み出しは、レーザー光を絞ったときに回折限界で決まるスポットサイズで制限されるため、波長が短いほど高密度に記録される。
- 光ストレージには、読み出し(再生)専用のもの、1度だけ書き込み(記録)できるもの、繰り返し記録・再生できるものの3種類がある。
- 記録には、さまざまな物理現象が使われている。

# 光ストレージの分類

- 光ディスク
  - 再生(読み出し)専用のもの
    - CD, CD-ROM, DVD-ROM
  - 記録(書き込み)可能なもの
    - 追記型(1回だけ記録できるもの)
      - CD-R, DVD-R
    - 書換型(繰り返し消去・記録できるもの)
      - 光相変化 CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, DVD+RW, BD, HD-DVD
      - 光磁気: MO, GIGAMO, MD, Hi-MD.AS-MO, iD-Photo
- ホログラフィックメモリ、ホールバーニングメモリ

# スポットサイズ

- レンズの開口数

- $NA = n \sin \alpha$

- $d = 0.6 \lambda / NA$

現行CD-ROM:  $NA = 0.65$

CD-ROM:  $\lambda = 780\text{nm} \rightarrow d = 720\text{nm}$

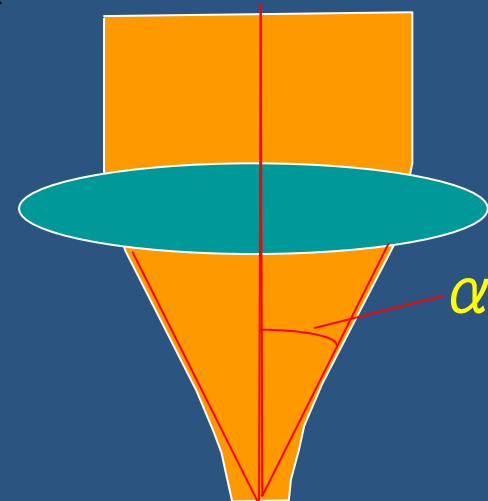
DVD:  $\lambda = 650\text{nm} \rightarrow d = 600\text{nm}$

BD:  $NA = 0.85$

$\lambda = 405\text{nm} \rightarrow d = 285\text{nm}$

HD-DVD:  $NA = 0.65$

$\lambda = 405\text{nm} \rightarrow d = 374\text{nm}$



スポット径  $d$

# 光記録に利用する物理現象

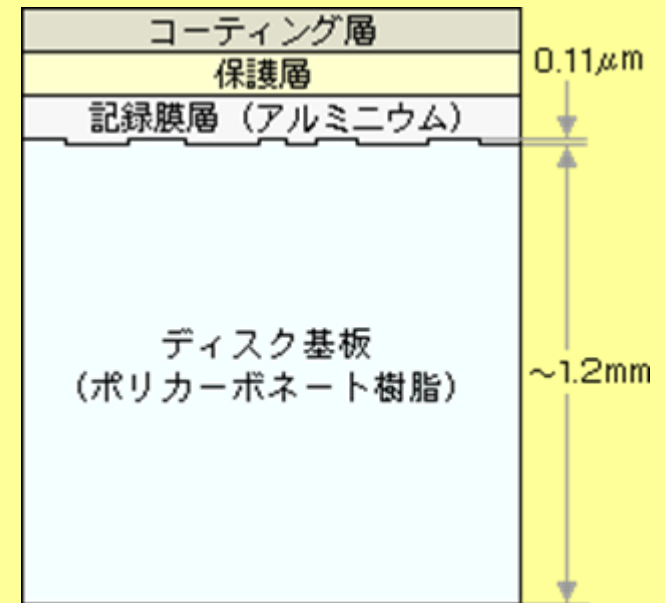
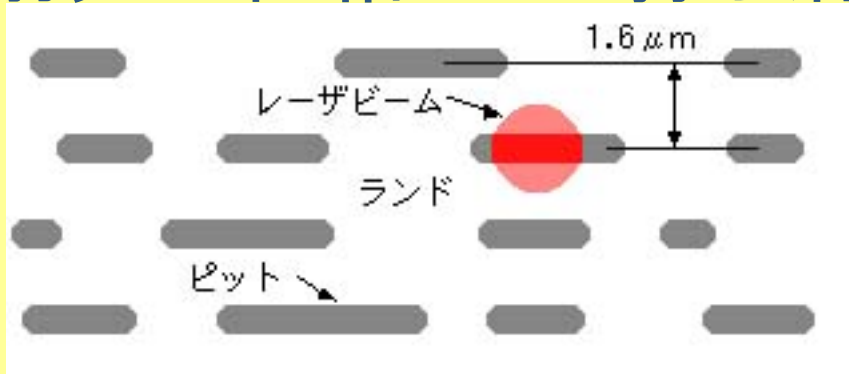
- CD-ROM, DVD-ROM: ピット形成
- CD-R, DVD-R: 有機色素の化学変化と基板の熱変形
- CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, DVD+RW, DVR:
  - アモルファスと結晶の相変化
- MO, MD, GIGAMO, AS-MO, iD-Photo:
  - 強磁性・常磁性相転移
- ホログラフィックメモリ: フォトリフラクティブ効果
- ホールバーニングメモリ: 不均一吸収帯

# いろいろな 光ディスク



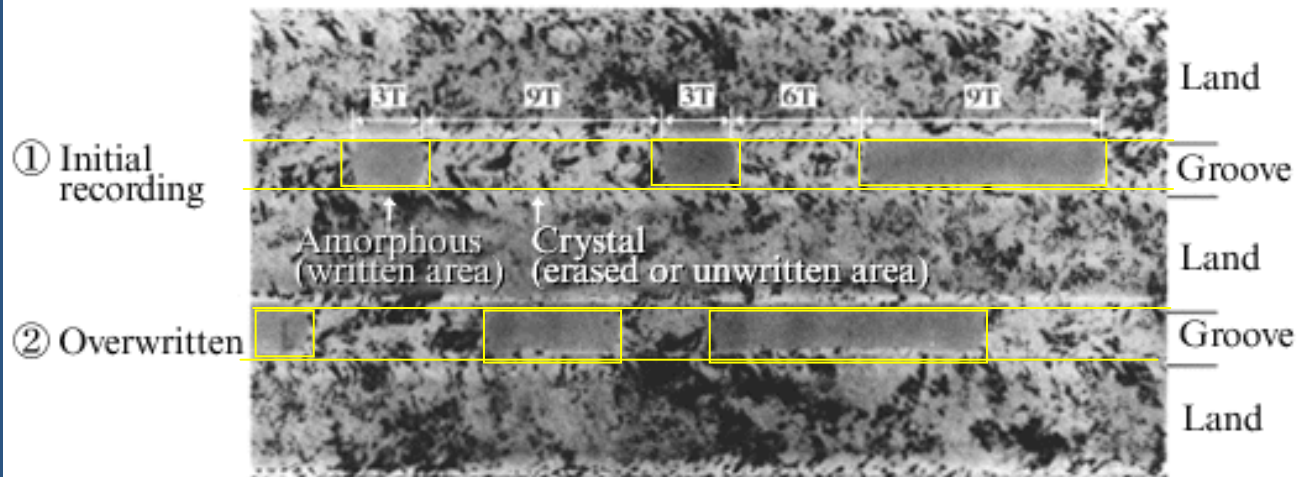
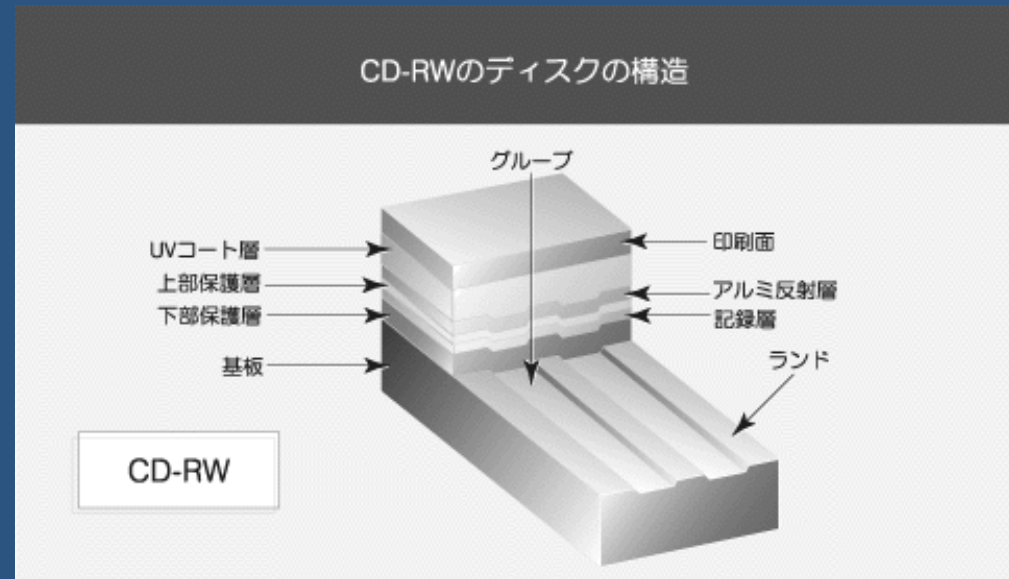
# CD-ROM

- ポリカーボネート基板:  $n=1.55$
- $\lambda = 780\text{nm} \rightarrow$  基板中の波長  $\lambda' = 503\text{nm}$
- ピットの深さ:  $110\text{nm} \sim \frac{1}{4}$ 波長
- 反射光の位相差  $\pi$ : 打ち消し



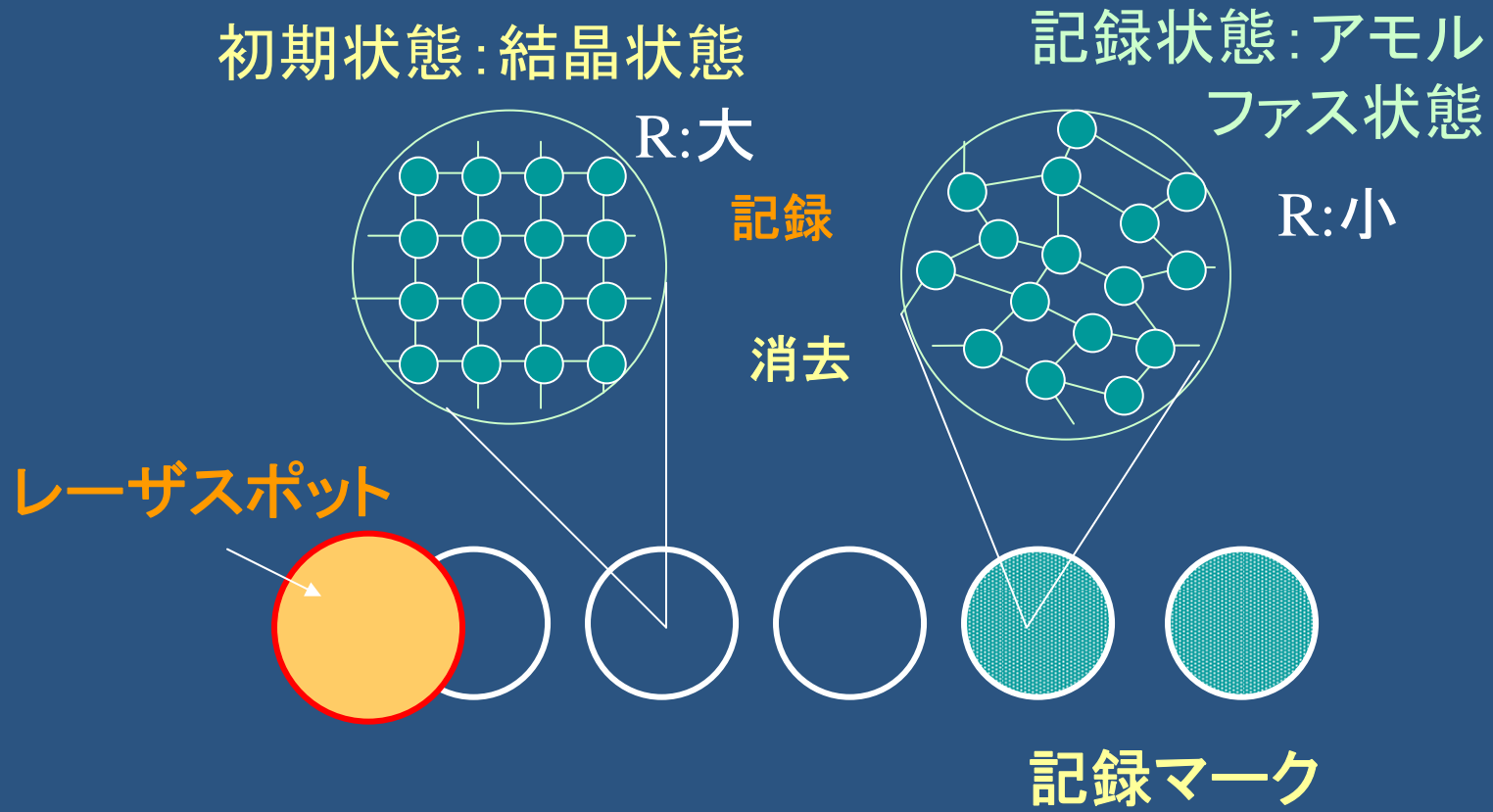
# CD-RW

- 光相変化ディスク
- 結晶とアモルファスの間の相変化を利用





# 相変化と反射率





# CD-R

- 有機色素を用いた光記録
- 光による熱で色素が分解
- 気体の圧力により加熱された基板が変形
- ピットとして働く

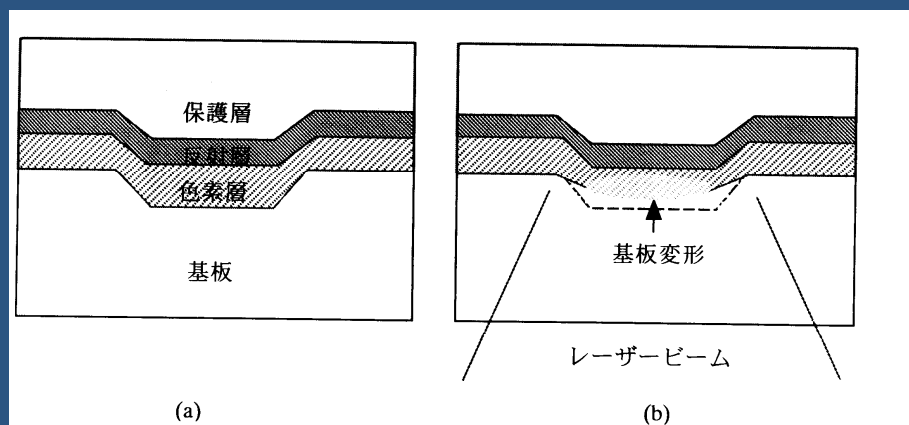
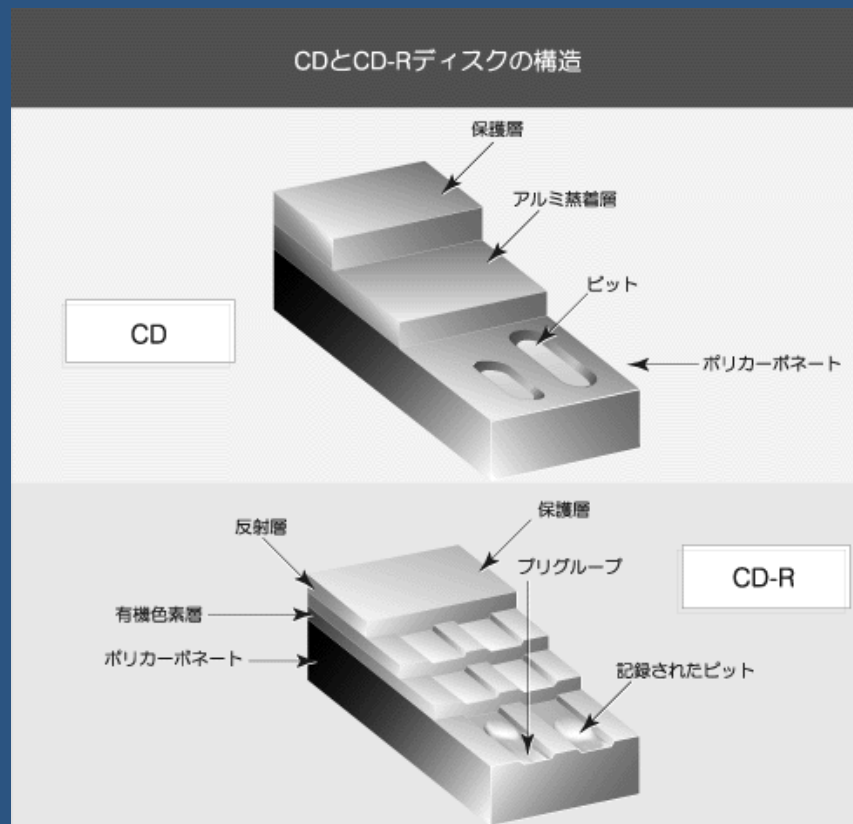


図1 未記録状態(a)、記録状態(b)を示す模式図

# DVDファミリー

	DVD-ROM	DVD-R	DVD-RAM	DVD-RW	DVD+RW
容量(GB)	4.7 / 9.4 2層8.54	3.95 / 7.9	4.7 / 9.4	4.7/9.4	4.7/9.4
形状	disk	disk	cartridge	disk	disk
マーク形成 材 料	ピット形成 1層 R=45-85 2層 R=18-30	熱変形型 有機色素 R=45-85%	相変化型 GeSbTe系 R=18-30%	相変化型 AgInSbTe系 R=18-30%	相変化型 AgInSbTe系 R=18-30%
レーザ波長 レンズNA	650/635 0.6	650/635 0.6	650 0.6	638/650 0.6	650 0.65
最短マーク長	1層:0.4 2層:0.44	0.4	0.41-0.43	0.4	0.4
トラック幅	0.74	0.8 Wobbled Land pre-bit	0.74 Wobbled L/G	0.74 Wobbled Land pre-bit	0.74 HF Wobbled groove
書き換え可能 回数	—	—	10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>

# BDとHD-DVD

- どちらも青紫色レーザー(波長405nm)を使用
- BD=Blu-ray Disc
  - Sony-Panasonic-Philips陣営
  - NAの大きなレンズを使用(0.85)
  - 記録層が表面から0.1mmの深さにある。
- HD DVD=High Definition DVD
  - Toshiba-NEC-Sanyo陣営
  - レンズNAは従来のDVDと同じ(0.65)
  - 記録層の深さ: 表面から0.6mm

# BD vs HD DVD比較表

規格	BD	HD DVD
容量(片面1層)	23.3/25/27 GB	15/20 GB (ROM/ARW)
容量(片面2層)	46.6/50/54 GB	30/40GB
転送速度	36Mbps	36Mbps
ディスク厚み 記録層	1.2mm 保護層0.1mm 記録層1.1 $\mu$ m	1.2mm(0.6mm $\times$ 2層) 記録層0.6 $\mu$ m
レーザー波長	405nm	405nm
レンズ開口数	0.85	0.65
トラックピッチ	0.32 $\mu$ m	0.3-0.4 $\mu$ m
トラック構造	グルーブ	ランド/グルーブ
映像圧縮方式	MPEG-2 Video	Advanced MPEG2

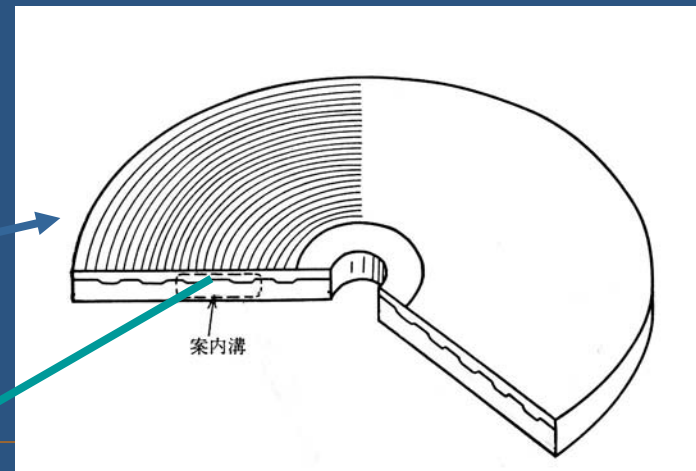
# MO(光磁気)記録

- 記録: 熱磁気(キュリー温度)記録
  - 光を用いてアクセスする磁気記録
- 再生: 磁気光学効果
  - 磁化に応じた偏光の回転を電気信号に変換
- MO, MDに利用
- 互換性が高い
- 書き替え耐性高い: 1000万回以上
- ドライブが複雑(偏光光学系と磁気系が必要)
- MSR, MAMMOS, DWDDなど新現象の有効利用可能

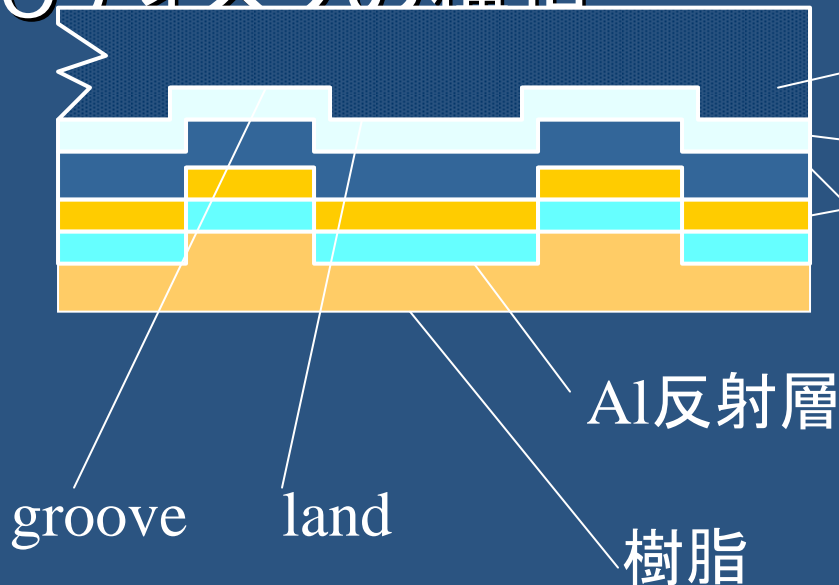
# 光磁気記録の歴史

- 1962 Conger, Tomlinson 光磁気メモリを提案
- 1967 Mee Fan ビームアドレス方式の光磁気記録の提案
- 1971 Argard (Honeywel) MnBi薄膜を媒体としたMOディスクを発表
- 1972 Suits(IBM) EuO薄膜を利用したMOディスクを試作
- 1973 Chaudhari(IBM) アモルファスGdCo薄膜に熱磁気記録(補償温度記録)
- 1976 Sakurai(阪大) アモルファスTbFe薄膜にキュリー温度記録
- 1980 Imamura(KDD) TbFe系薄膜を利用したMOディスクを発表
- 1981 Togami(NHK) GdCo系薄膜MOディスクにTV動画像を記録
- 1988 各社 5"MOディスク(両面650MB)発売開始
- 1889 各社 3.3"MOディスク(片面128MB)発売開始
- 1991 Aratani(Sony) MSR(磁気誘起超解像)を発表
- 1992 Sony MD(ミニディスク)を商品化
- 1997 Sanyo他 ASMO(5"片面6GB:L/G, MFM/MSR)規格発表
- 1998 Fujitsu他 GIGAMO(3.5"片面1.3GB)発売開始
- 2001 Sanyo デジカメ用iD-Photo(2", 780MB)発売
- 2002 Canon-松下 ハンディカメラ用2"3GBディスク発表
- 2004 Sony Hi-MD発表

# 光磁気媒体



## ■ MOディスクの構造



ポリカーボネート基板

窒化珪素保護膜・  
(MOエンハンス  
メント膜を兼ねる)

MO記録膜  
(アモルファスTbFeCo)

Al反射層

groove

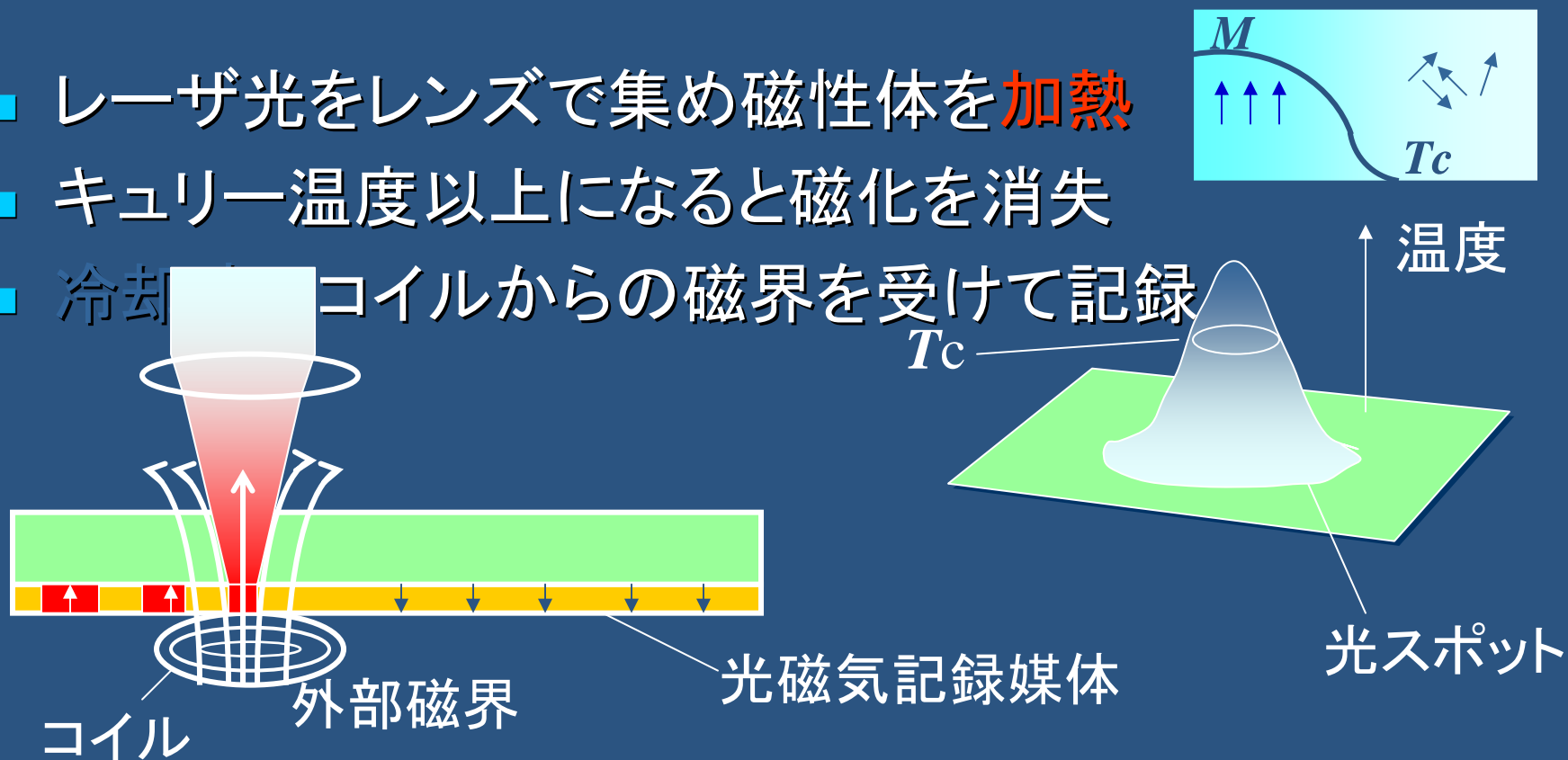
land

樹脂



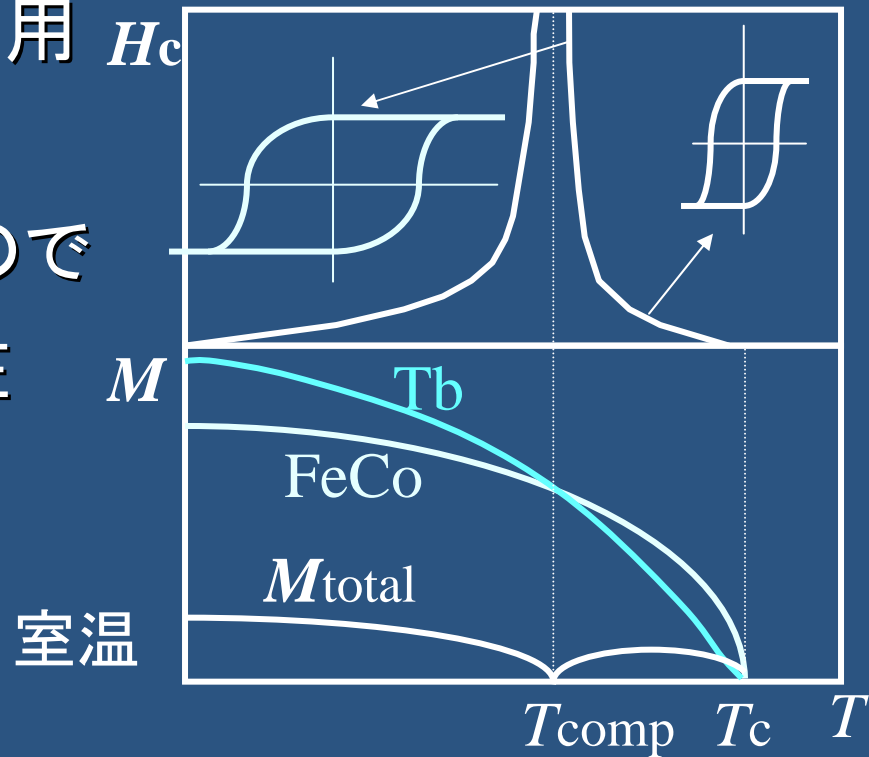
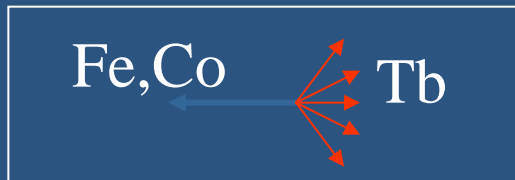
# 光磁気記録 情報の記録(1)

- レーザ光をレンズで集め磁性体を加熱
- キュリー温度以上になると磁化を消失
- 冷却 コイルからの磁界を受けて記録

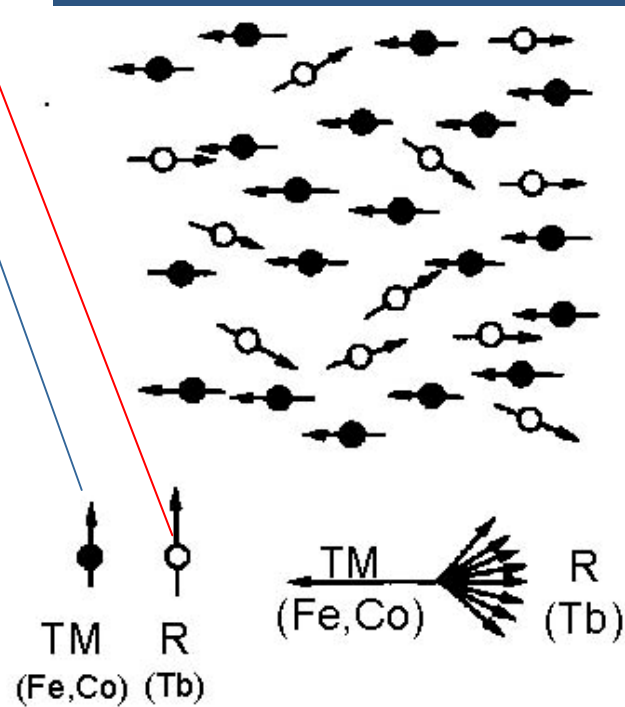
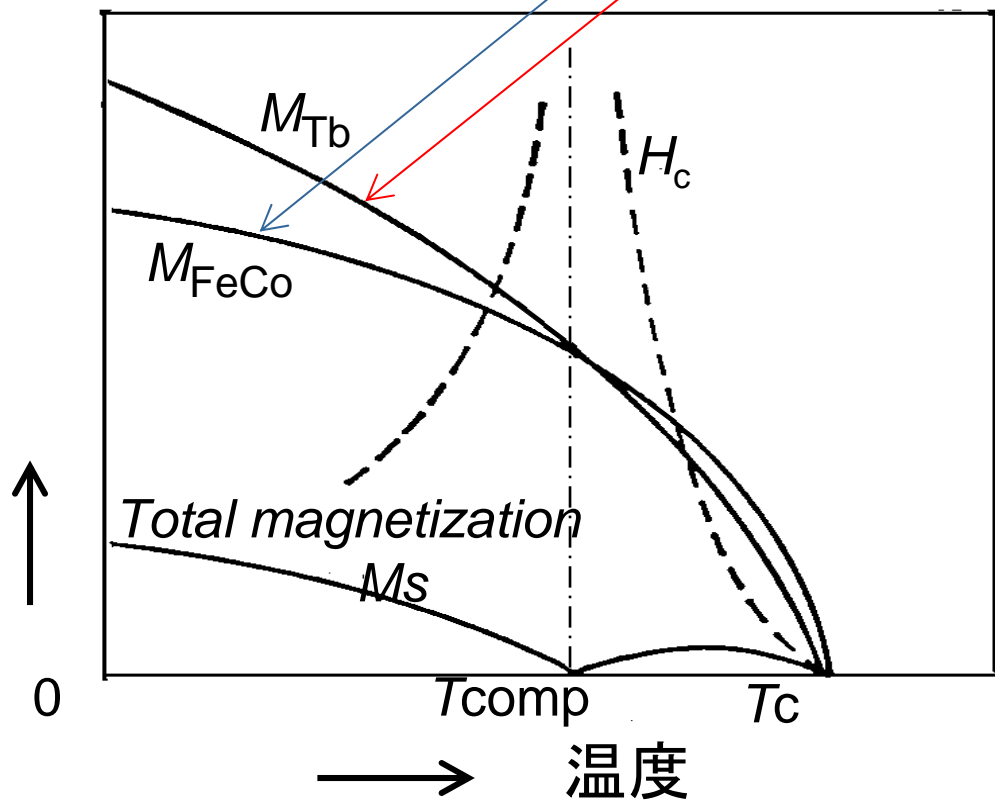


# 光磁気記録 情報の記録(2)

- 補償温度 ( $T_{\text{comp}}$ ) の利用
- アモルファス TbFeCo は一種のフェリ磁性体なので補償温度  $T_{\text{comp}}$  が存在
- $T_{\text{comp}}$  で  $H_c$  最大:
  - 記録磁区安定

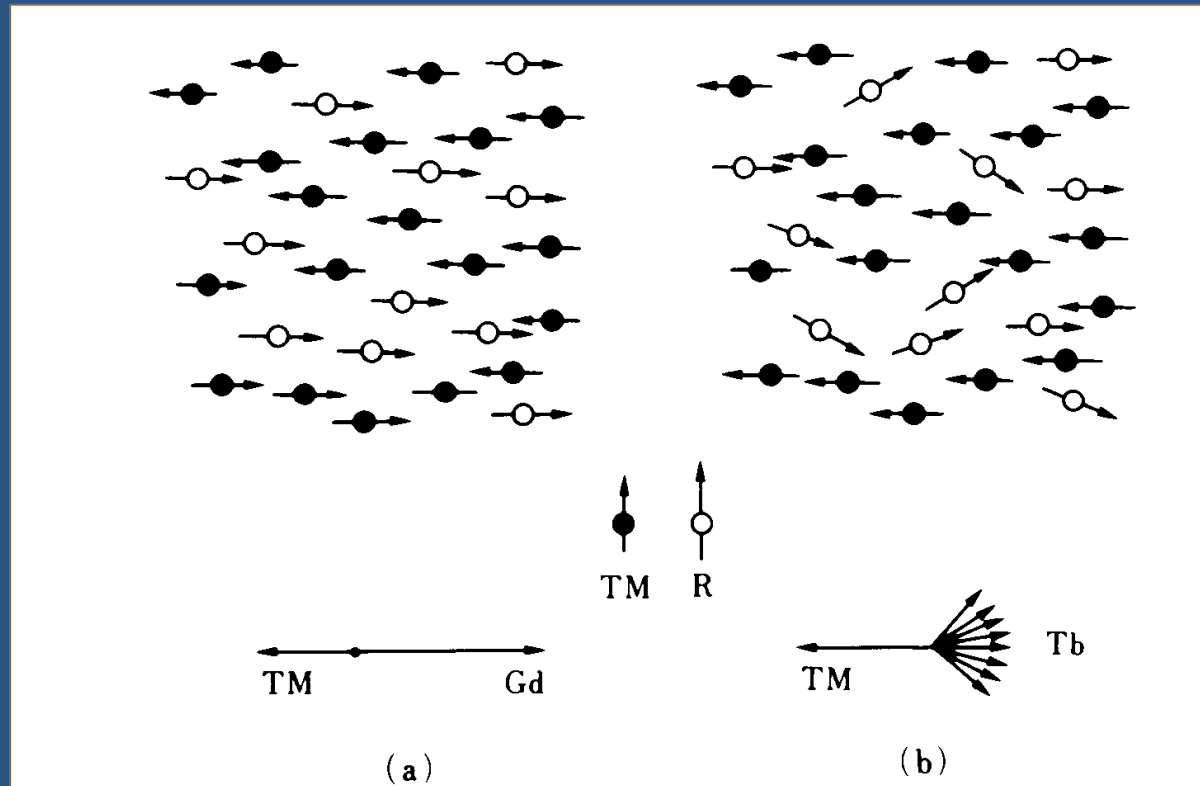


# $a$ -TbFeCo MO媒体



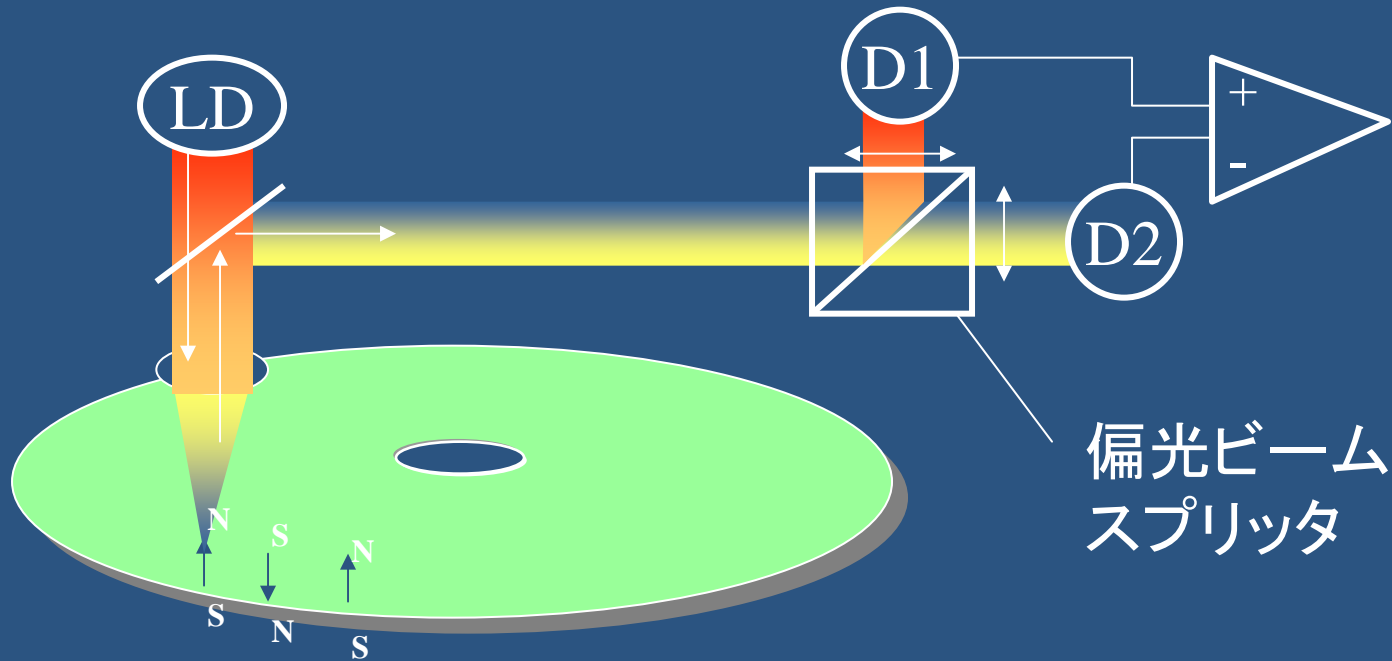
TbFeCo系の場合、補償温度が室温付近に来るよう膜組成が制御されているため、図に示すように、室温付近での $M_s$ が小さく、従って、 $H_c$ が大きいので、超常磁性効果に対して有効である。

# アモルファスR-TM合金



# 光磁気記録 情報の読み出し

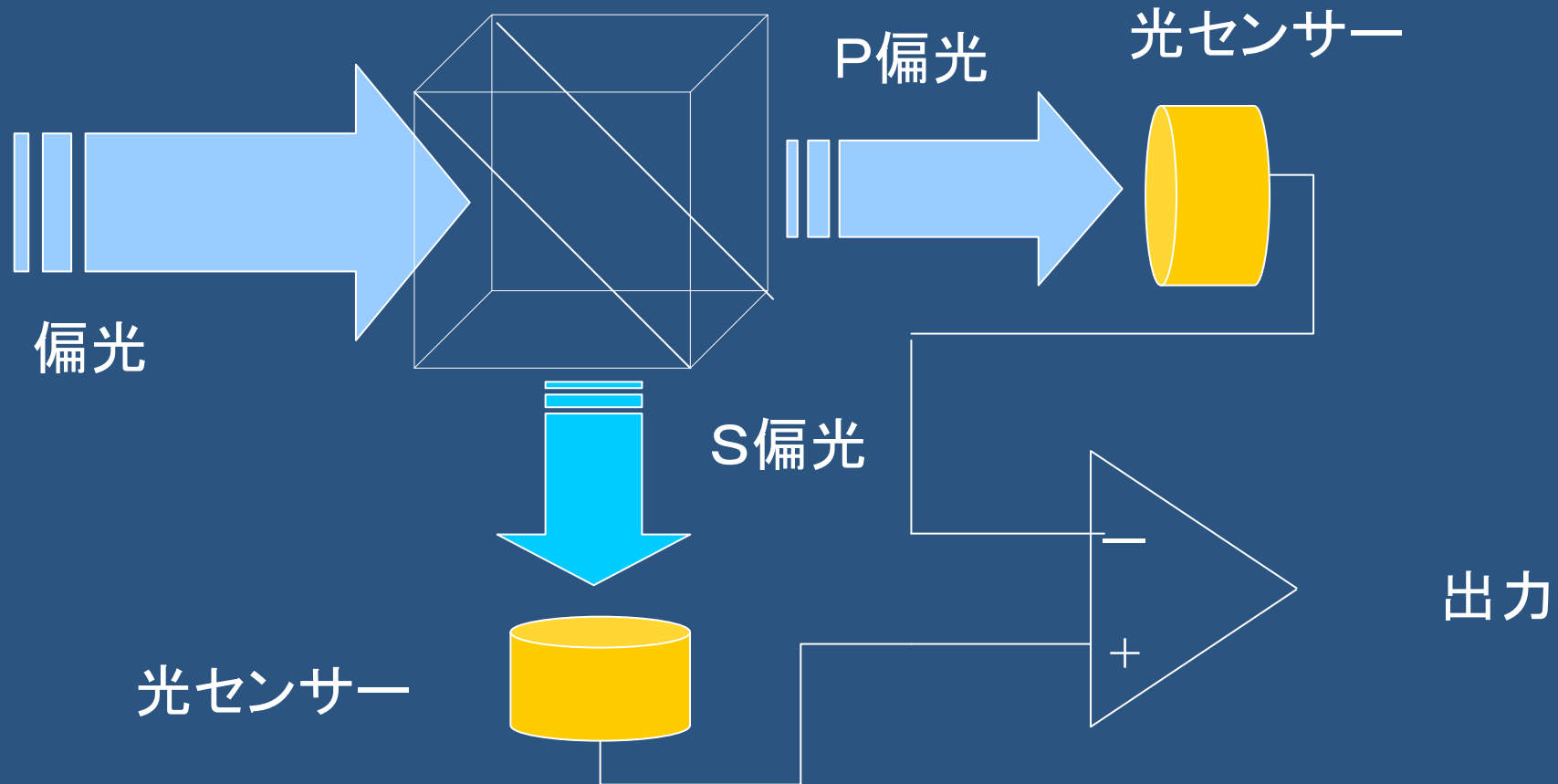
- 磁化に応じた偏光の回転を検出し電気に変換



# 差動検出系

- 差動検出による高感度化

偏光ビームスプリッター



# MOドライブ

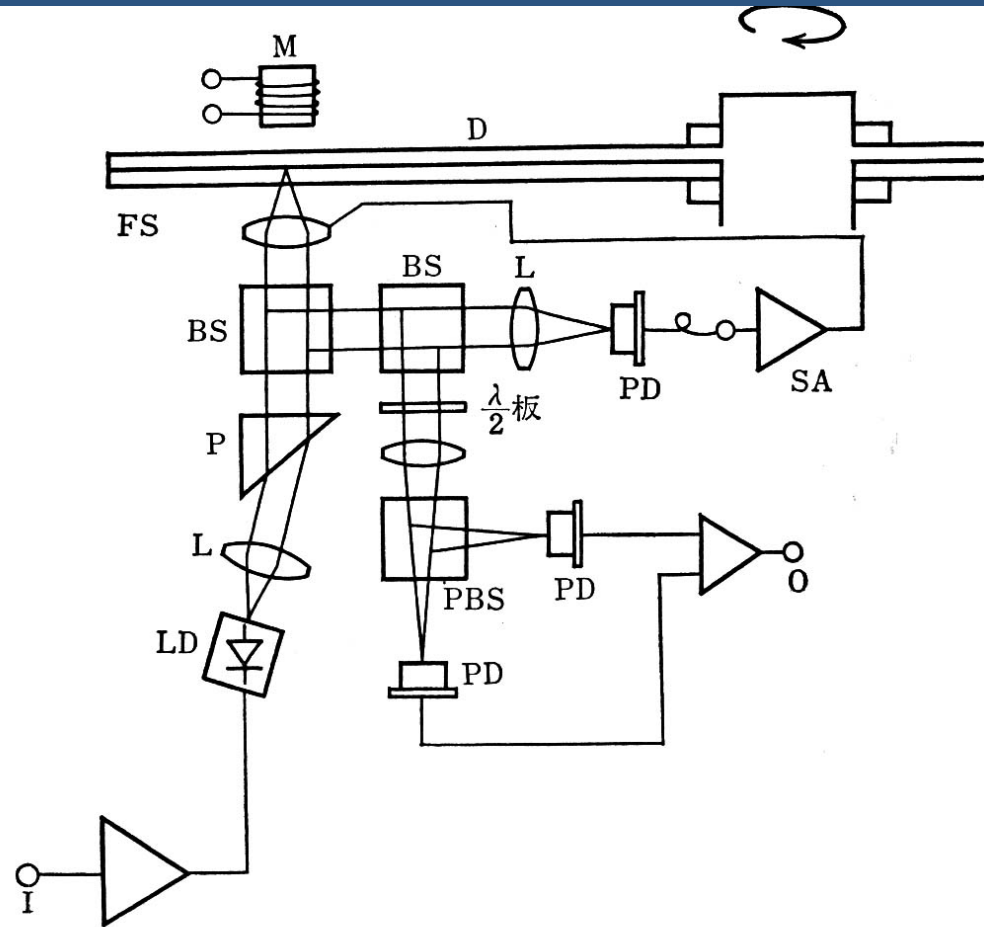
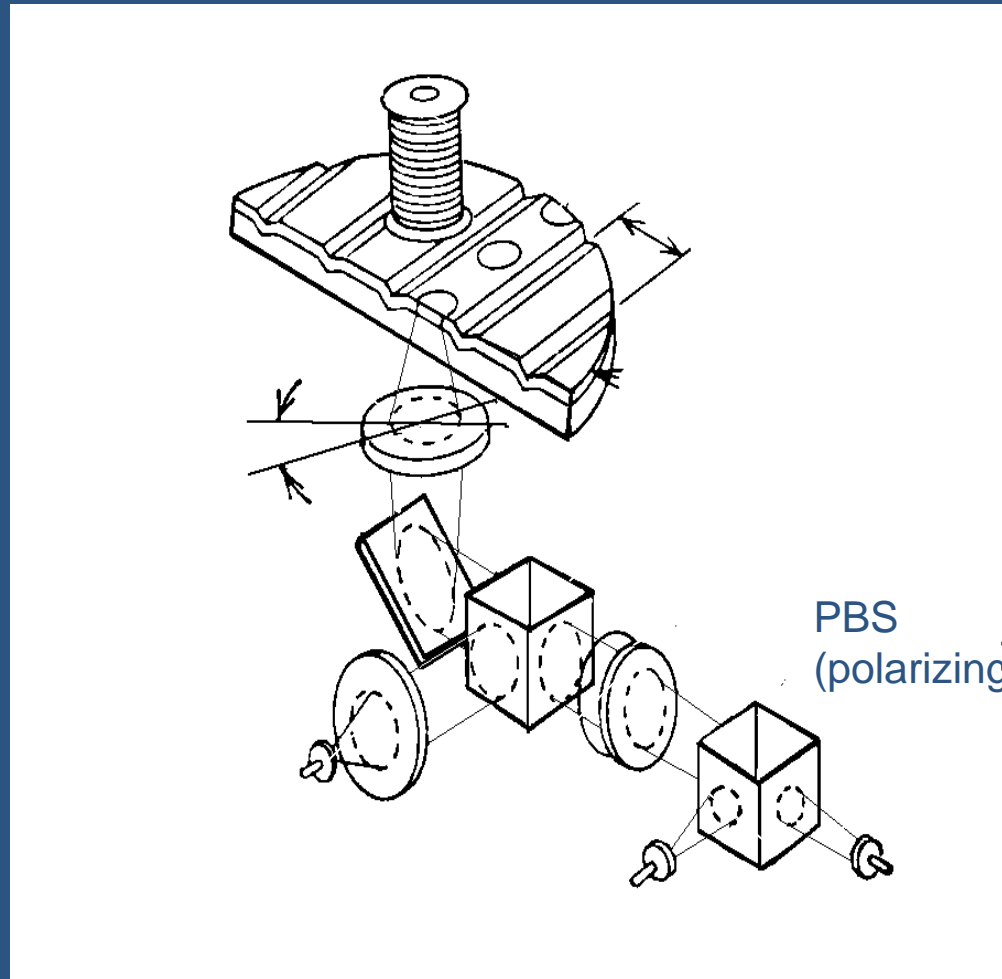


図 7.9 光磁気記録再生システムの模式図<sup>20)</sup>

# MOドライブの光ヘッド



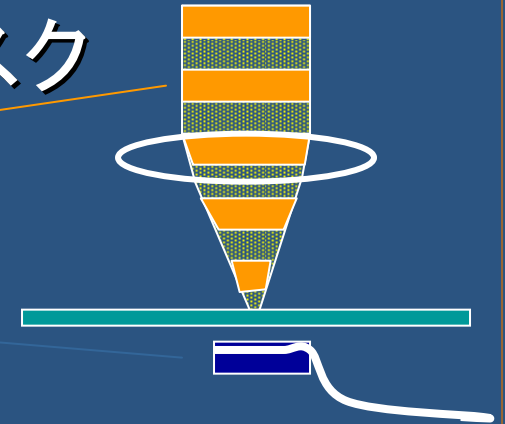
PBS  
(polarizing beam splitter)



# 2種類の記録方式

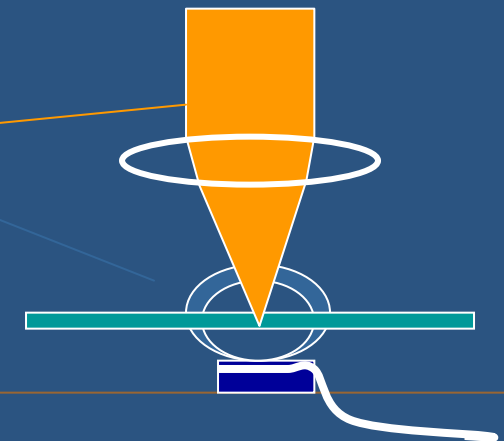
## ■ 光強度変調(LIM): 現行のMOディスク

- 電気信号で光を変調
- 磁界は一定
- ビット形状は長円形

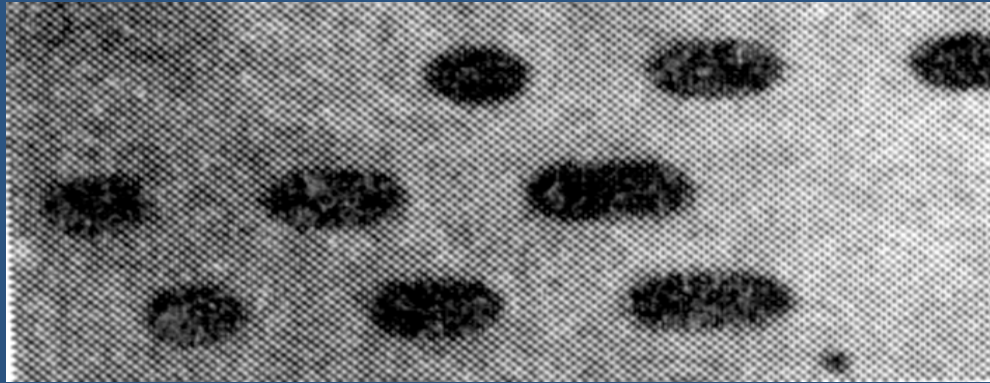


## ■ 磁界変調(MFM): 現行MD, iD-Photo

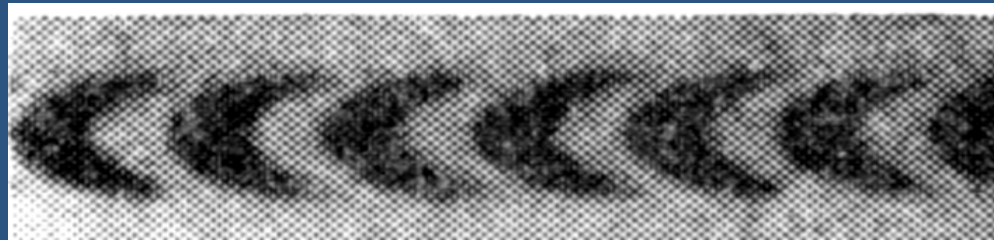
- 電気信号で磁界を変調
- 光強度は一定
- ビット形状は矢羽形



# 記録ビットの形状

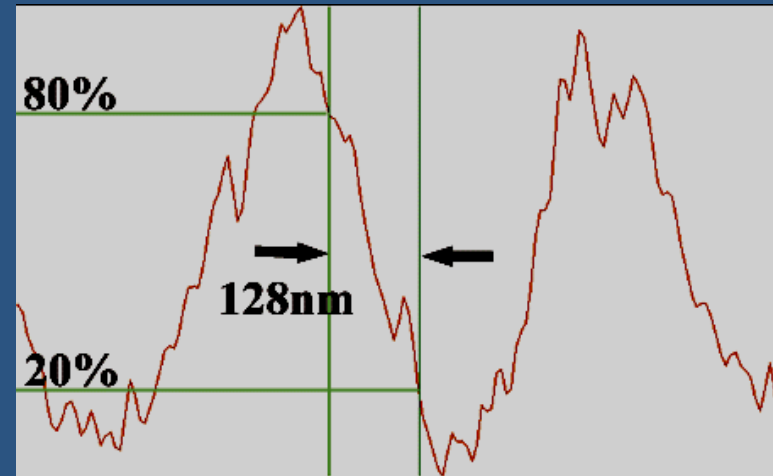
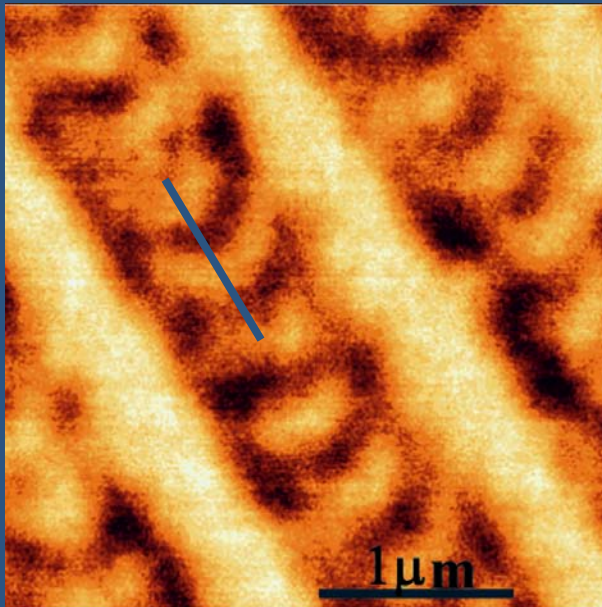


(a)



(b)

# MO-SNOMで見た記録マーク



佐藤勝昭:応用物理69 [10] (2000) 1220-1221

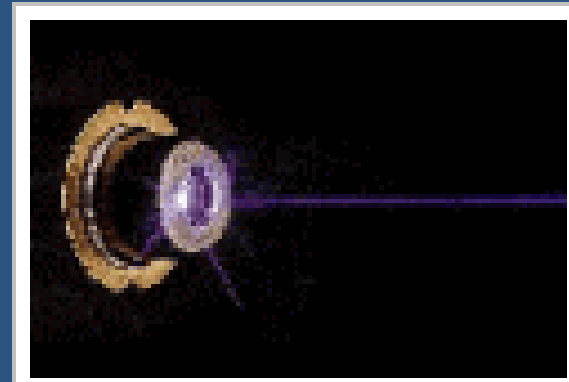
SNOM:近接場顕微鏡

# 光ディスク高密度化の戦略

- 回折限界の範囲で
  - 短波長光源の使用: 青紫色レーザーの採用
  - 高NAレンズの採用:  $NA=0.85$
  - 多層構造を使う
- 回折限界を超えて
  - 超解像技術を使う
    - 磁気誘起超解像: GIGAMOに採用されている技術
    - MAMMOS, DWDD: 磁気超解像を強化する技術
  - 近接場を使う
    - SILの採用
    - Super-RENS
    - Bow-tie antenna

# 光源の短波長化

- 我が国で開発された青紫色レーザーは、最近になって複数の会社から安定供給できるようになり、これを用いた光ディスクが登場した。光ディスクの面密度は原理的に $1/d^2$ で決まるので、波長が従来の650nmから405nmに変わることにより、原理的に2.6倍の高密度化が可能になる。



# 光源の短波長化による高密度化

- $\lambda=405$  nmの青紫色レーザーを光源とし $NA=0.85$ の高NAレンズを用いると $d=0.28$   $\mu\text{m}$ のスポットに絞り込みが可能
- ROMの場合は、ピットの内外からの反射光の干渉でデータを読みとるので、ピット径は $d$ の半分以下にできる。従って、トラックピッチを $d=0.28$   $\mu\text{m}$ としビット長を $d/2=0.14$   $\mu\text{m}$ とすると $16$  Gb/in<sup>2</sup>以上の面密度が得られる。
- 高NA(2.03)のSILを用い、トラックピッチを詰める(0.16)ことで $100$  Gb/in<sup>2</sup>が達成可能
- RAMの場合は、マークの直径は光スポットと同程度なので、記録密度は $8$  Gb/in<sup>2</sup>程度である。

# 多層化による高密度化

- 相変化記録の場合、4層程度にまで多層化できるので、記録密度はこの層数倍となる。
- 光磁気記録においても多層化技術が開発されており、少なくとも波長多重2層化については20 Gb/in<sup>2</sup>程度の記録密度が実証されている[i]。

[i] 伊藤彰義:「最先端光磁気記録技術」日本応用磁気学会第128回研究会「磁気ストレージ技術の趨勢はどこに」(2003.1.30)資料集p.31

# 超高密度光ディスクへの展開

## 1. 超解像

1. MSR/MAMMOS
2. Super-RENS (Sb)

## 2. 短波長化

## 3. 近接場

1. SIL
2. Super-RENS ( $\text{AgO}_x$ )



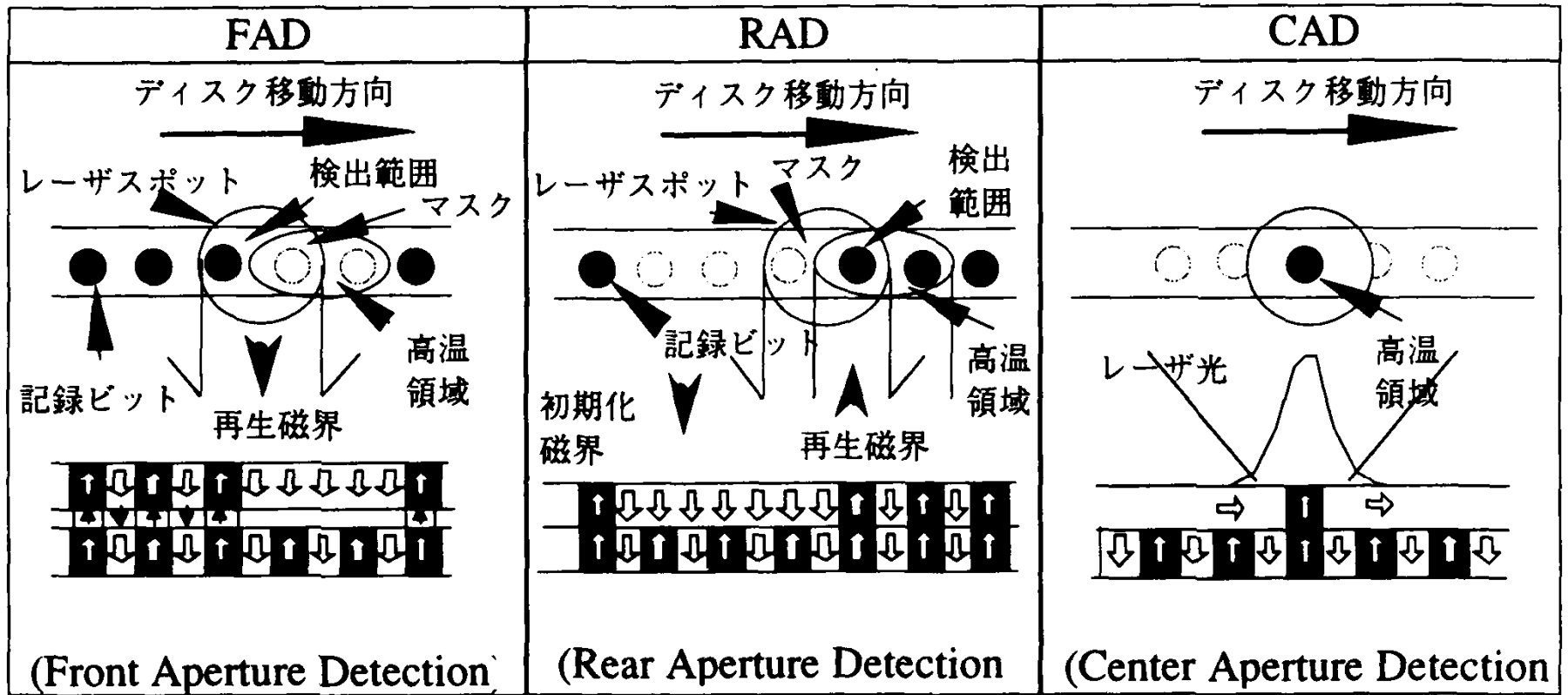
# 磁気誘起超解像技術(MSR)

- 光磁気記録では、磁気誘起超解像(MSR)技術が実用化されており、これを採用したGIGAMOでは、 $\lambda=650$  nm(赤色レーザ)を用いて回折限界を超える直径 $0.3\mu\text{m}$ のマークを読みとっている[1]。直径3.5”のGIGAMOの記録密度は $2.5$  Gb/in<sup>2</sup>程度である。
- 次世代規格であるASMOでは磁界変調記録法を採用することにより $0.235\mu\text{m}$ の小さなマークを記録することが可能で、面記録密度としては約 $4.6$  Gb/in<sup>2</sup>程度となる[2]。

[1] M. Moribe, M. Maeda, H. Nakayama, M. Yoshida, and K. Shono: *Digest ISOM'01, Th-I-01, Taipei, 2001.*

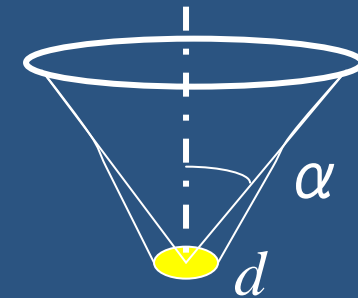
[2] S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: *J. Magn. Soc. Jpn. 23, Suppl. S1 (1999) 173*

# MSR方式の図解



# CAD-MSR

- 解像度は光の回折限界から決まる
  - $d=0.6 \lambda / NA$  (ここに  $NA=n \sin \alpha$ )
  - 波長以下のビットは分解しない
- 記録層と再生層を分離
- 読み出し時のレーザの強度分布を利用
  - ある温度を超えた部分のみを再生層に転写する



# 磁気機能を利用した信号増大

- 光磁気記録においてさらに小さなマークを十分なSN比を以て光学的に読みとる方法として、磁区拡大再生(MAMMOS)および磁壁移動再生(DWDD)という技術が開発された。これらは、光磁気記録特有の再生技術である。

# MAMMOS

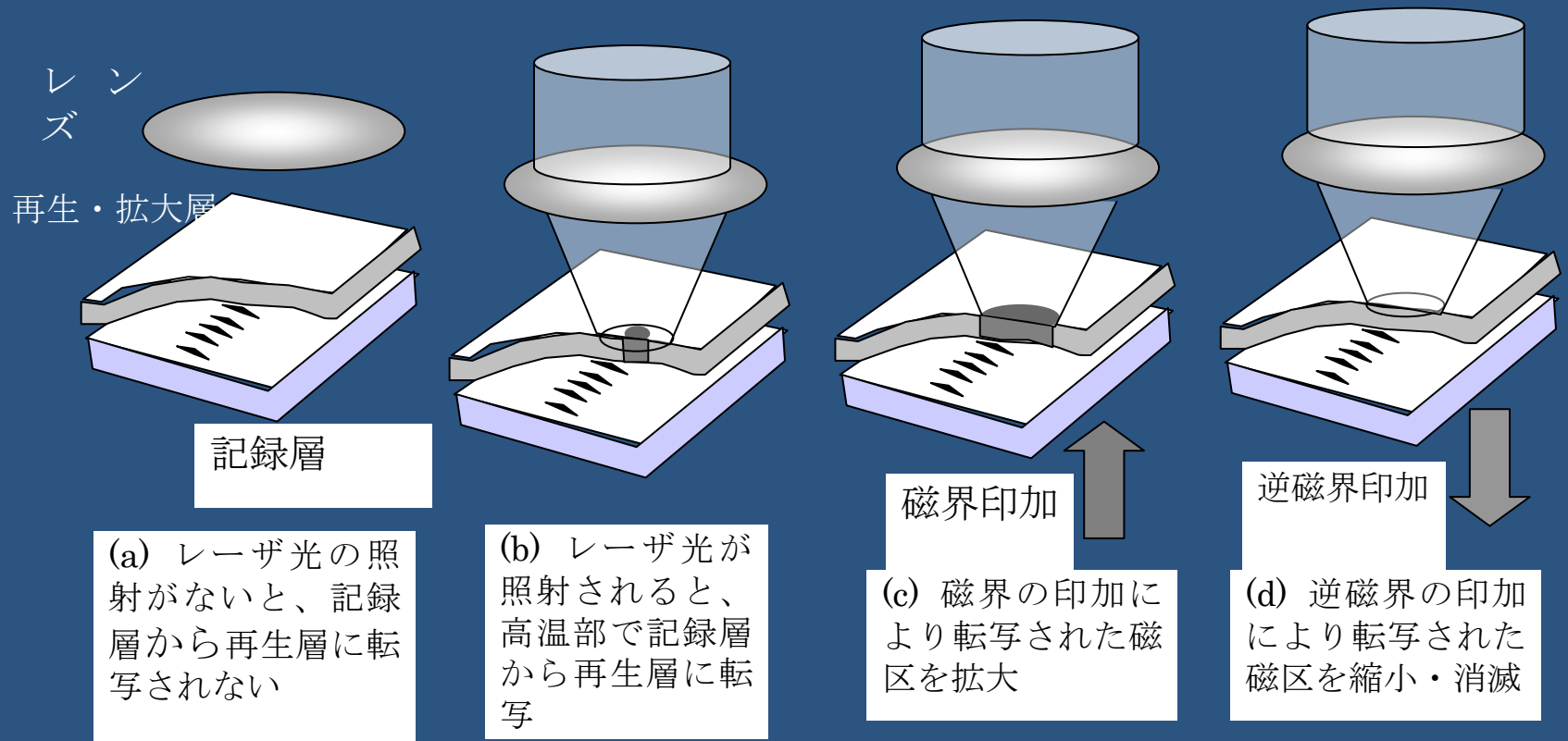
- MAMMOSでは記録層から読み出し層に転写する際に磁界によって磁区を拡大して、レーザー光の有効利用を図り信号強度を稼いでいる[1]。原理的にはこの技術を用いて100 Gb/in<sup>2</sup>の記録密度が達成できるはずで、実験室レベルで64 Gb/in<sup>2</sup>程度までは実証されているようである[2]。無磁界MAMMOSも開発されている。

[1] H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, and N. Ohta: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 4257.

[2] A. Itoh, N. Ohta, T. Uchiyama, A. Takahashi, M. Mieda, N. Iketani, Y. Uchihara, M. Nakata, K. Tezuka, H. Awano, S. Imai, and K. Nakagawa: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30- Nov. 2, Nagoya*, p. 90.

# MAMMOS

## (磁区拡大 MO システム)



# MAMMOS

## の効果

- 通常再生
  - 信号はほとんど0

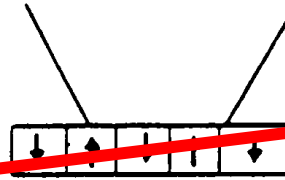
- MSR再生
  - 信号振幅小

- MAMMOS再生
  - フル出力

680nm, NA0.55, 2.5m/s



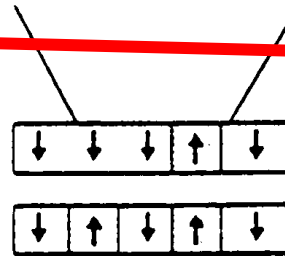
Conventional



Write level (100%)

Erase level (0%)

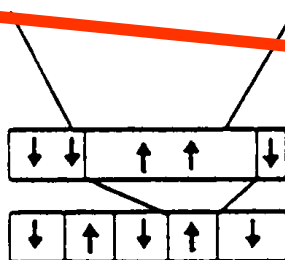
MSR (RAD)



Write level (100%)

Erase level (0%)

MAMMOS



Write level (100%)

Erase level (0%)

# DWDD

- DWDDも記録層から読み出し層に転写する点はMAMMOSと同じであるが、転写された磁区を読み出し層の温度勾配を利用して磁壁を移動させて拡大するので、磁界を必要としない[1]。
- ソニーは2004年にDWDDを用いたHi-MD(1GB)を発売した。[2]
- また、松下が新規格のハンディビデオ用MO(2", 3GB)として商品化を検討した経過がある[3]。

[1] T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: *Proc. MORIS1997*, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, Suppl.S2 (1997) 47.

[2] 伊藤大貴: 日経エレクトロニクス204.2.2, p.28

[3] M. Birukawa, Y. Hino, K. Nishikiori, K. Uchida, T. Shiratori, T. Hiroki, Y. Miyaoka and Y. Hozumi: *Proc. MORIS2002*, Trans. Magn. Soc. Jpn. **2** (2002) 273

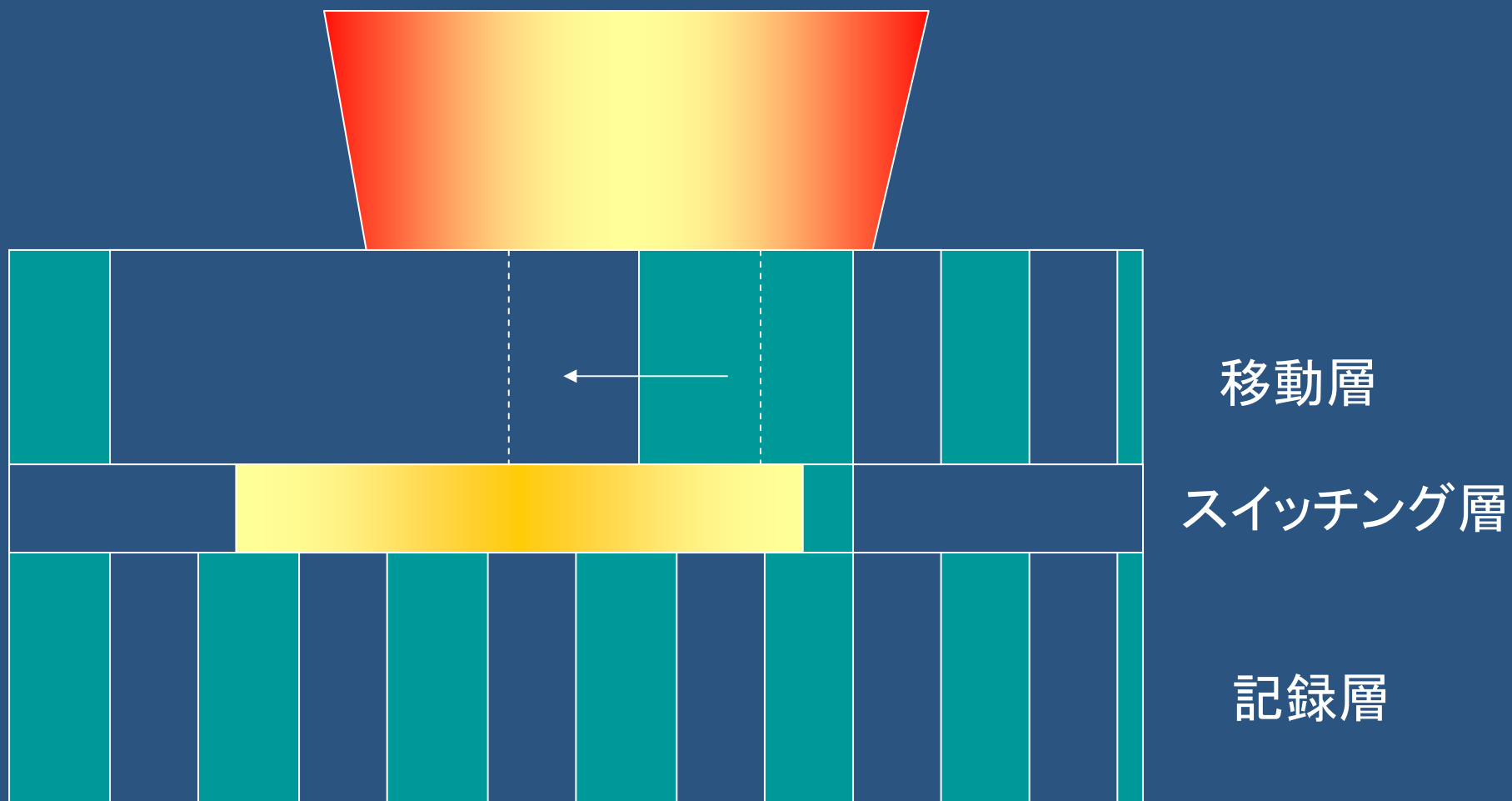


# DWDD(磁壁移動検出)

- 室温状態では、「記録層」の記録マークは、中間の「スイッチング層」を介し、「移動層」に交換結合力で転写されている。
- 再生光スポットをディスクの記録トラックに照射することにより昇温し、中間の「スイッチング層」のキュリー温度以上の領域では磁化が消滅し、各層間に働いていた交換結合力が解消。
- 移動層に転写されていたマークを保持しておく力の一つである交換結合力が解消されることで、記録マークを形成する磁区の周りの磁壁が、磁壁のエネルギーが小さくなる高い温度領域に移動し、小さな記録マークが拡大される
- まるでゴムで引っぱられるように、移動層に転写されている磁区の端(磁壁)が移動。磁壁移動検出方式という名称は、ここから発想されました。読み出しの時だけ、記録メディアの方が、記録層に記録された微小な記録マークを虫眼鏡で拡大するかのようふるまうので、レーザービームスポット径より高密度に記録されていても読み取ることが可能になるわけです。

# DWDD概念図

原理的には再生上の分解能の限界がない。



# DWDDディスク



# 近接場記録

- 回折限界を超えた高密度化に欠かせないのが、近接場光学技術である。1991年、Betzigらは光ファイバーをテーパ状に細めたプローブから出る近接場光を用いて回折限界を超えた光磁気記録ができること、および、このプローブを用いて磁気光学効果による読み出しができることを明らかにし、将来の高密度記録方式として近接場光がにわかに注目を浴びることになった[1]。
- 日立中研のグループはこの方法が光磁気記録だけでなく光相変化記録にも利用できることを明らかにした[2]。しかし、このように光ファイバ・プローブを走査するやり方では、高速の転送レートを得ることができない。

[1] E. Betzig, J.K. Trautman, R. Wolfe, E.M. Gyorgy, P.L. Finn, M.H. Kryder and C.-H. Chang: Appl. Phys. Lett. **61** (1992) 1432

[2] S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsume, M. Terao, M. Yoshida, K. Fujita and S. Kammer: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 443.

# SIL (solid immersion lens)

- 高速の転送レートを得ることができない問題を解決する方法として提案されたのが、SIL[1]というレンズを用いた光磁気記録である。
- Terrisらは波長780 nmのレーザー光を光源としSIL光学系を使ってTbFeCo膜に光磁気記録し、直径0.2  $\mu\text{m}$ の磁区が形成されることをMFMにより確認した[2]。
- SILを磁気ディスク装置のヘッド・アセンブリ(いわゆるジンバル)に搭載して光磁気記録を行うアイデアが1994年Terrisらにより出された[3]。この方法により、面記録密度2.45 Gb/in<sup>2</sup>、データ転送速度3.3 Mbpsを達成している。
- 鈴木らはMFM(磁気力顕微鏡)を用いて、SIL記録されたマークを観測し2 Gmarks/in<sup>2</sup>を達成していると発表した[4]。

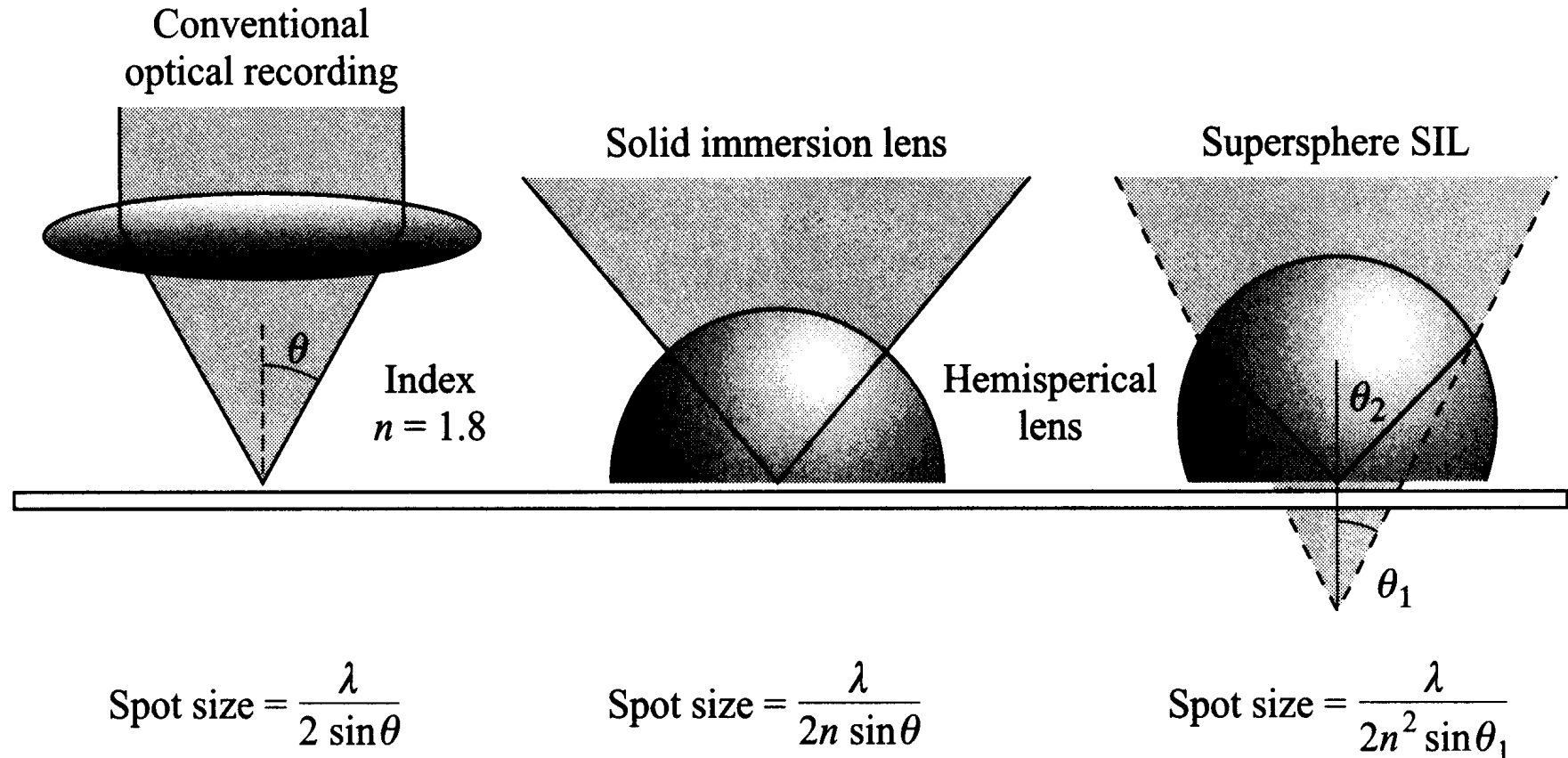
[1] S.M. Mansfield and G. Kino: Appl. Phys. Lett. **57** (1990) 2615.

[2] B. D. Terris, H.J. Maminn and D. Ruger: Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 141.

[3] B.D.Terris, H.J. Mamin, D. Ruger, W.R. Studenmund and G.S.Kino: Appl. Phys, Lett. **65** (1994) 388.

[4] P. Glijer, T. Suzuki, and B. Terris: J. Magn. Soc. Jpn. **20** Suppl.S1 (1996) 297.

# SIL (solid immersion lens)

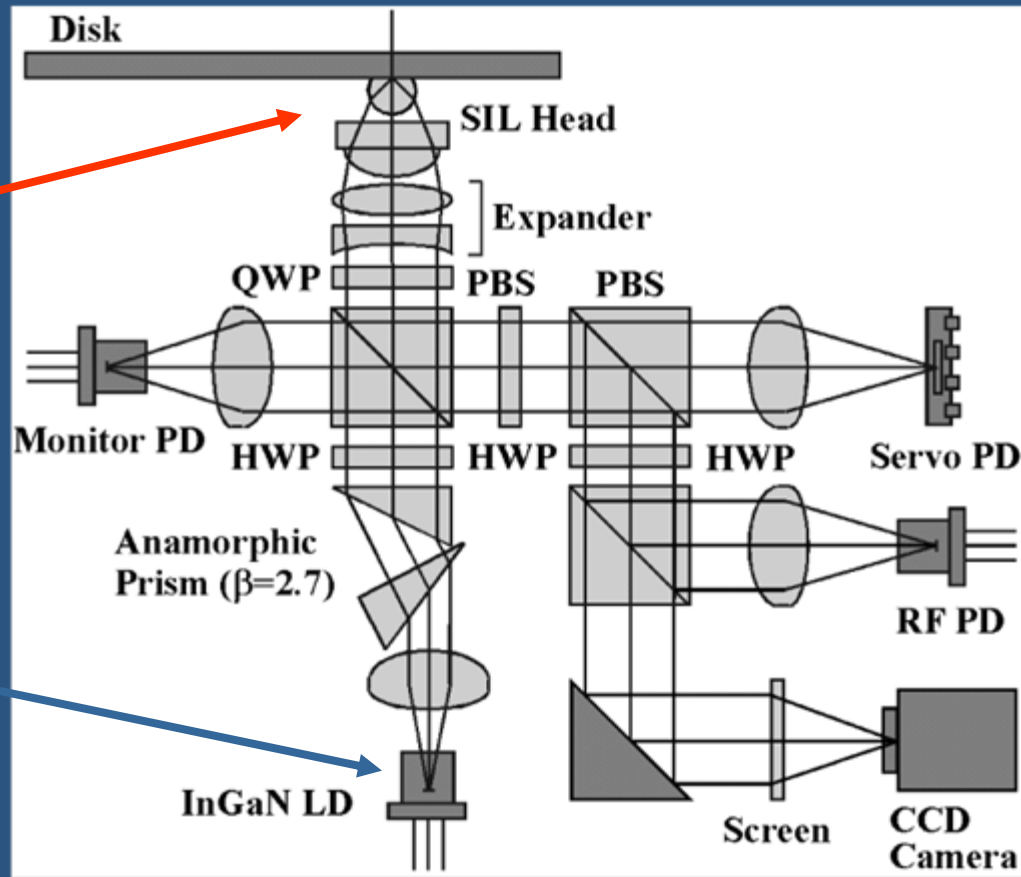


*R. Gambino and T. Suzuki: Magneto-Optical Recording Materilas (IEEE Press, 1999)*

# 青紫レーザーとSILによる記録再生

SILヘッド

青紫色レーザー

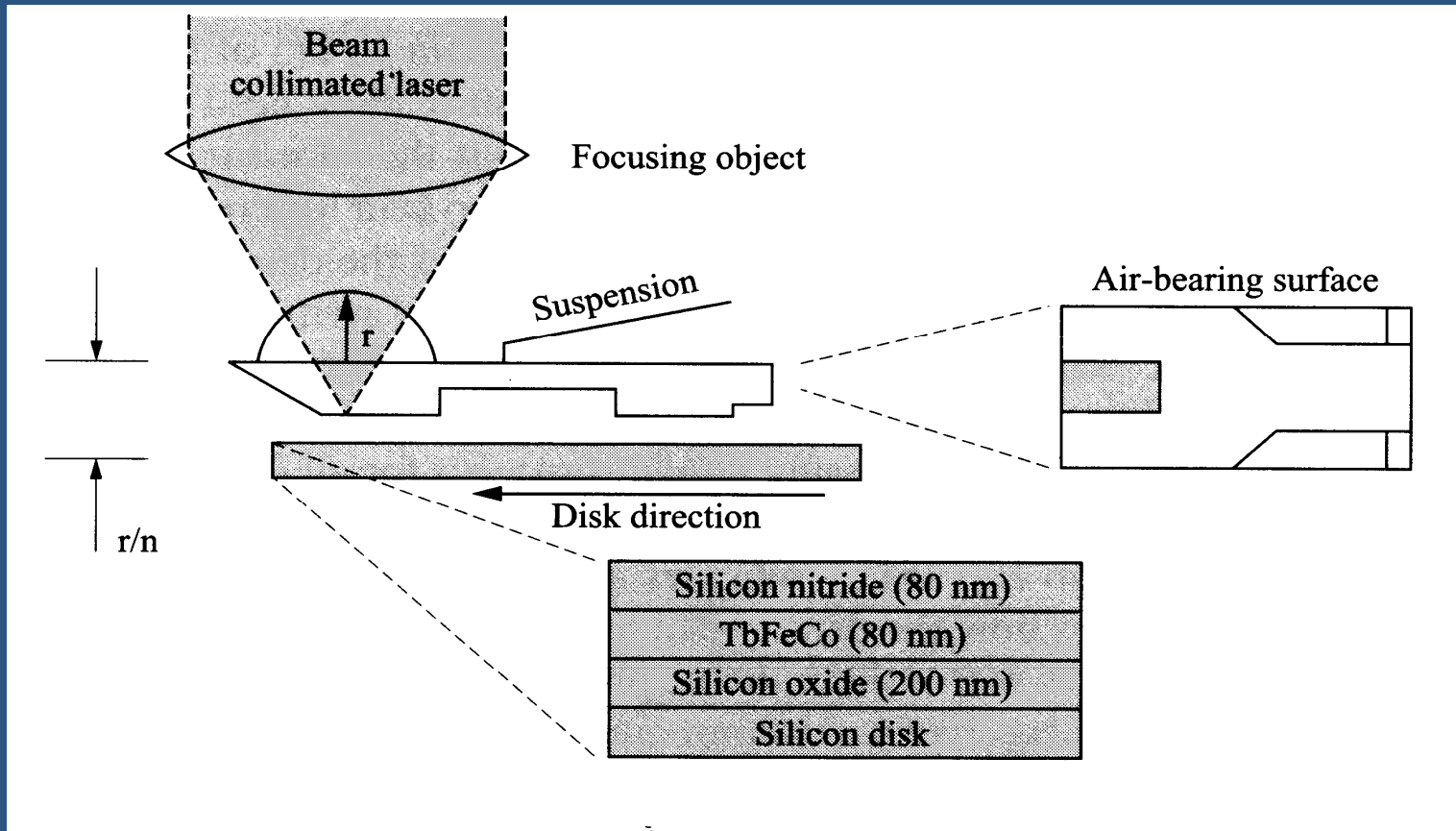


NA=1.5  
405nm  
80nm mark  
40GB

I. Ichimura et. al.  
(Sony),  
ISOM2000  
FrM01

Fig. 1. Schematic diagram of the optical block.

# SILを用いた光記録

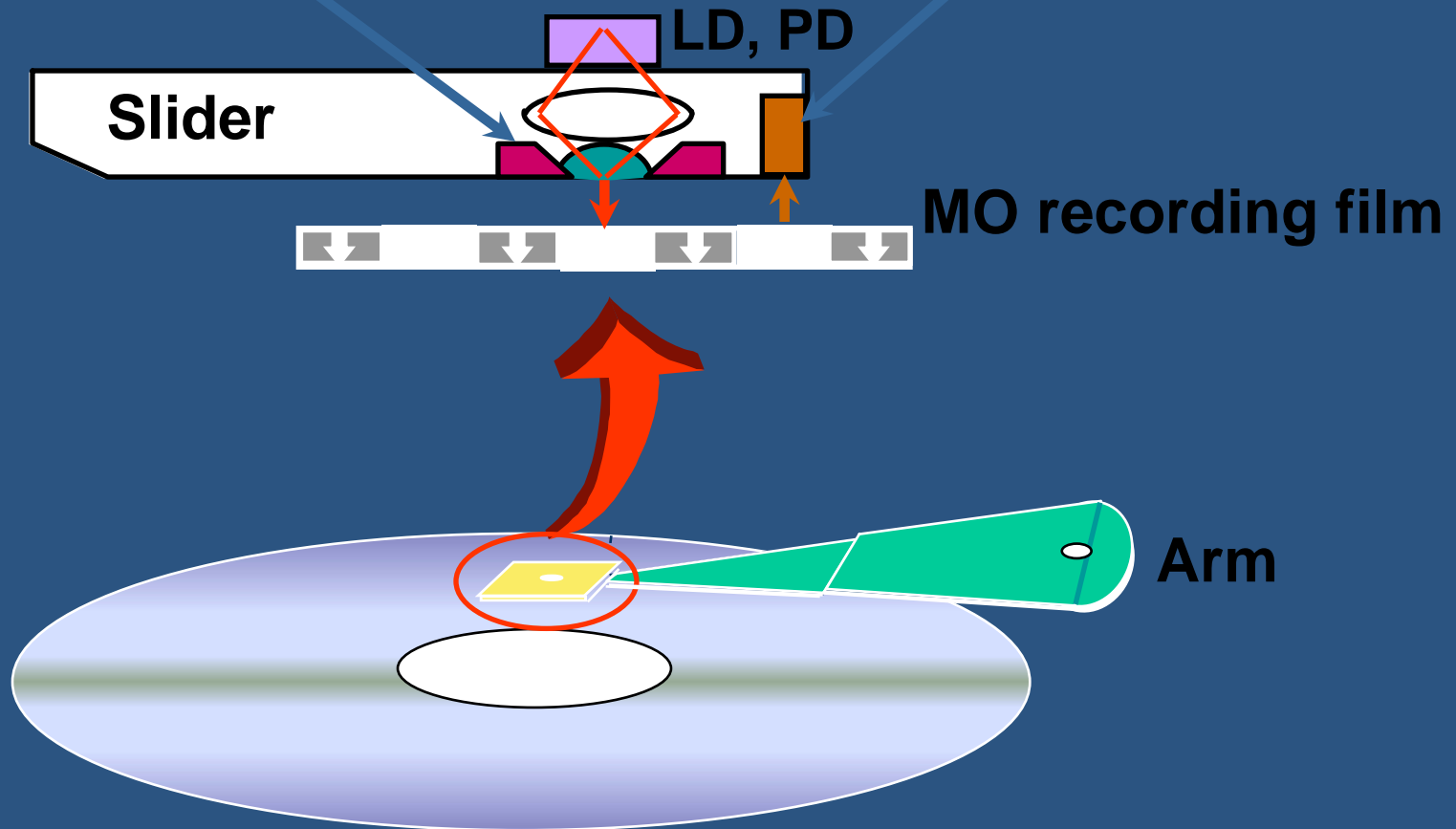




# 熱磁気記録/磁束検出法

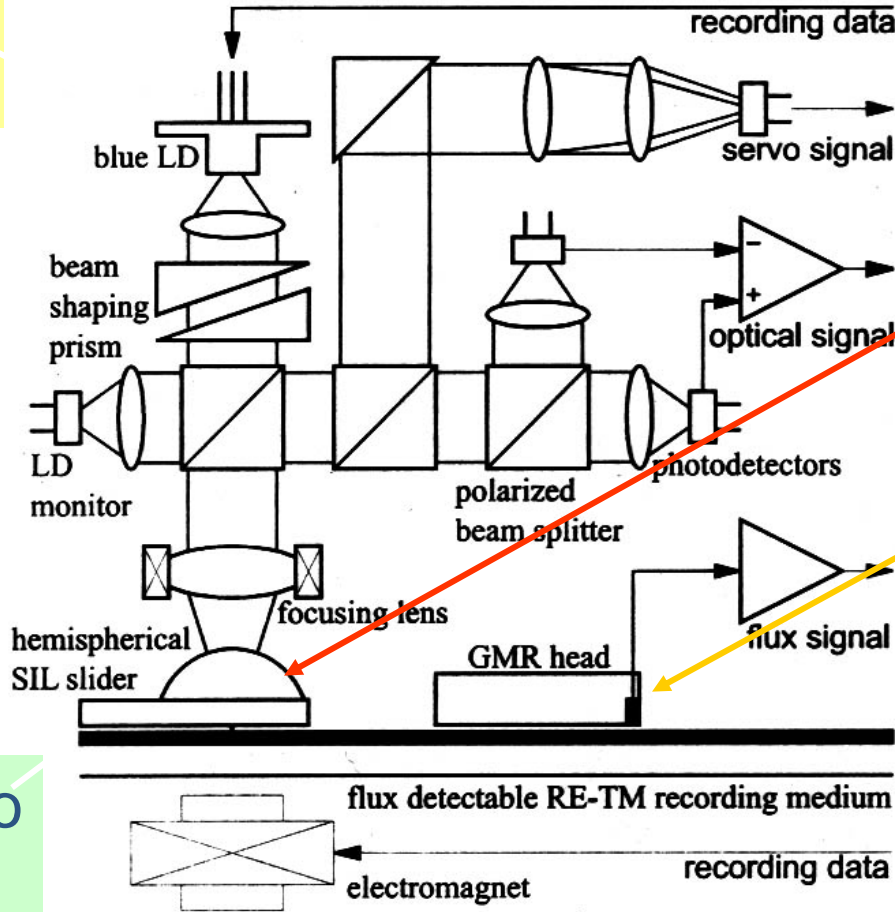
Magnetic coil for recording

GMR element for reading



# 光アシストハードディスク

青紫色  
レーザ



記録用  
光ヘッド  
(SIL)

再生用  
磁気ヘッド

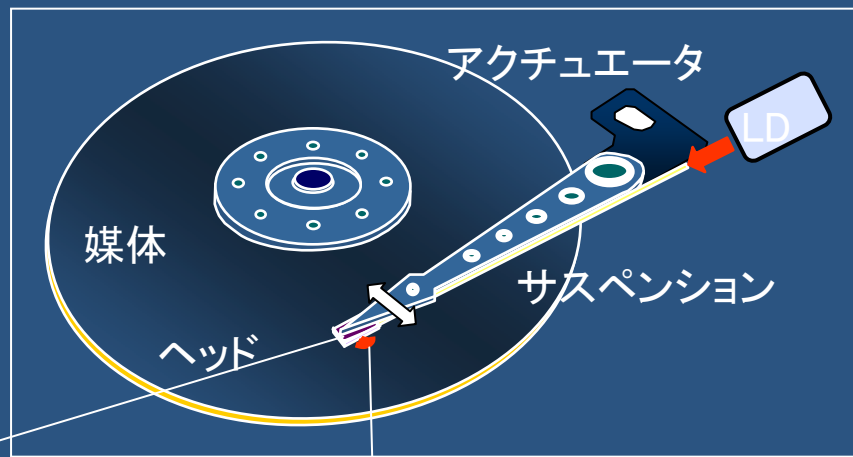
60Gbit/in<sup>2</sup>を達成

H. Saga et al. Digest  
MORIS/APDSC2000,  
TuE-05, p.92.

TbFeCo  
disk

# ハイブリッドヘッド（記録・再生の最適な組合せ）

高効率記録 / 高S/N再生の各ブレークスルー技術の両立により、テラビット記録を実用化

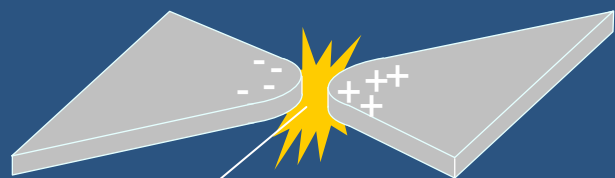


近接場光記録ヘッド

+

近接場光再生ヘッド

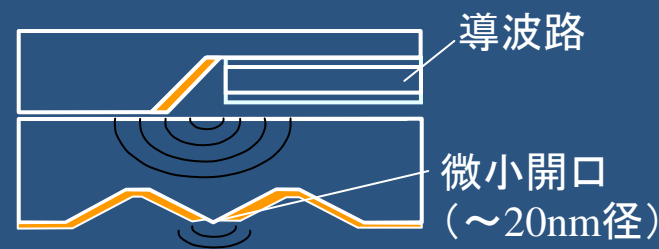
プレーナ・プラズモンヘッド（記録）



近接場光  
〔スポット径 < 20nm  
効率 > 10%〕

高効率 高分解能 高生産性

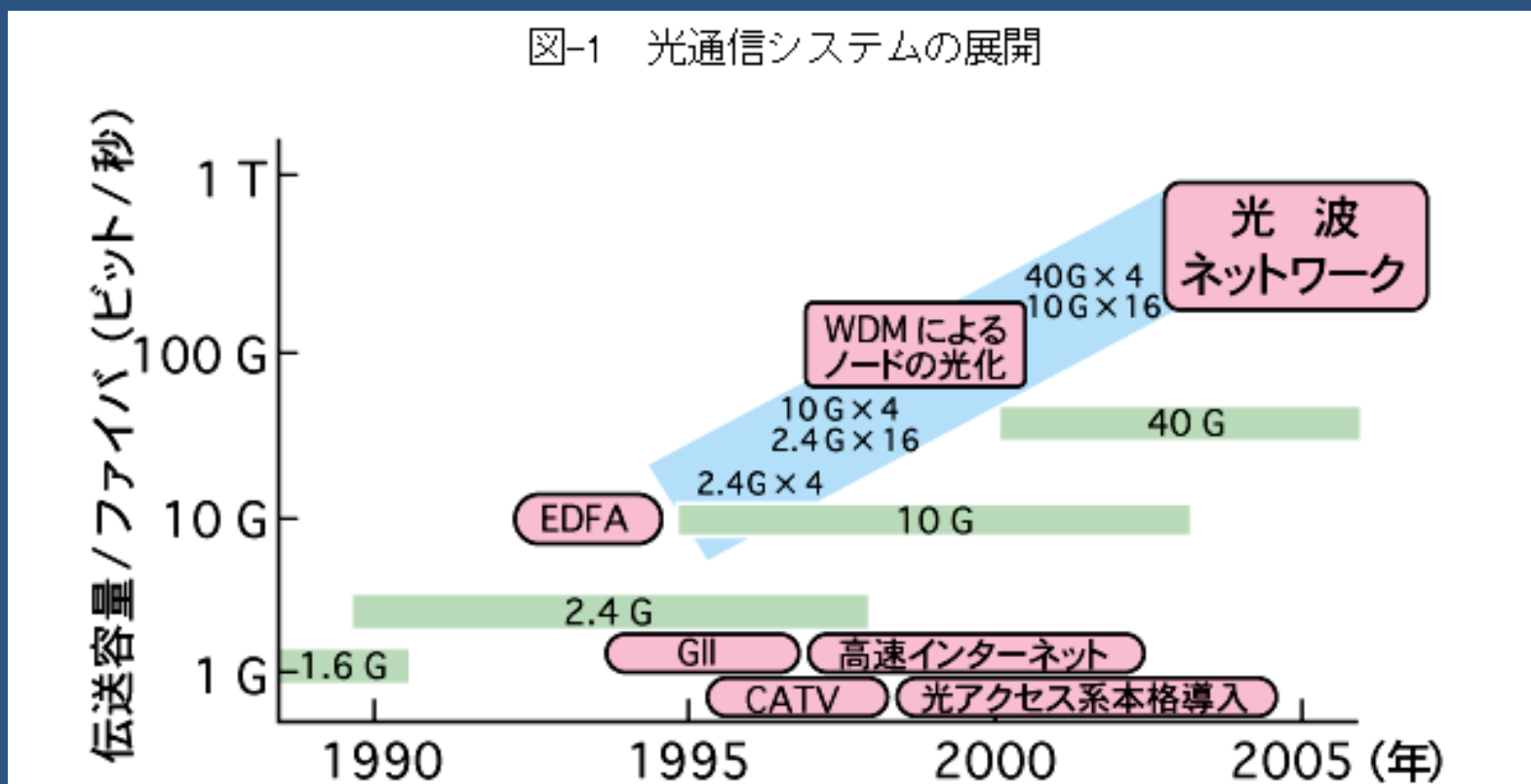
偏光制御ヘッドシステム（再生）



高C/N比 小型薄型化

# 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

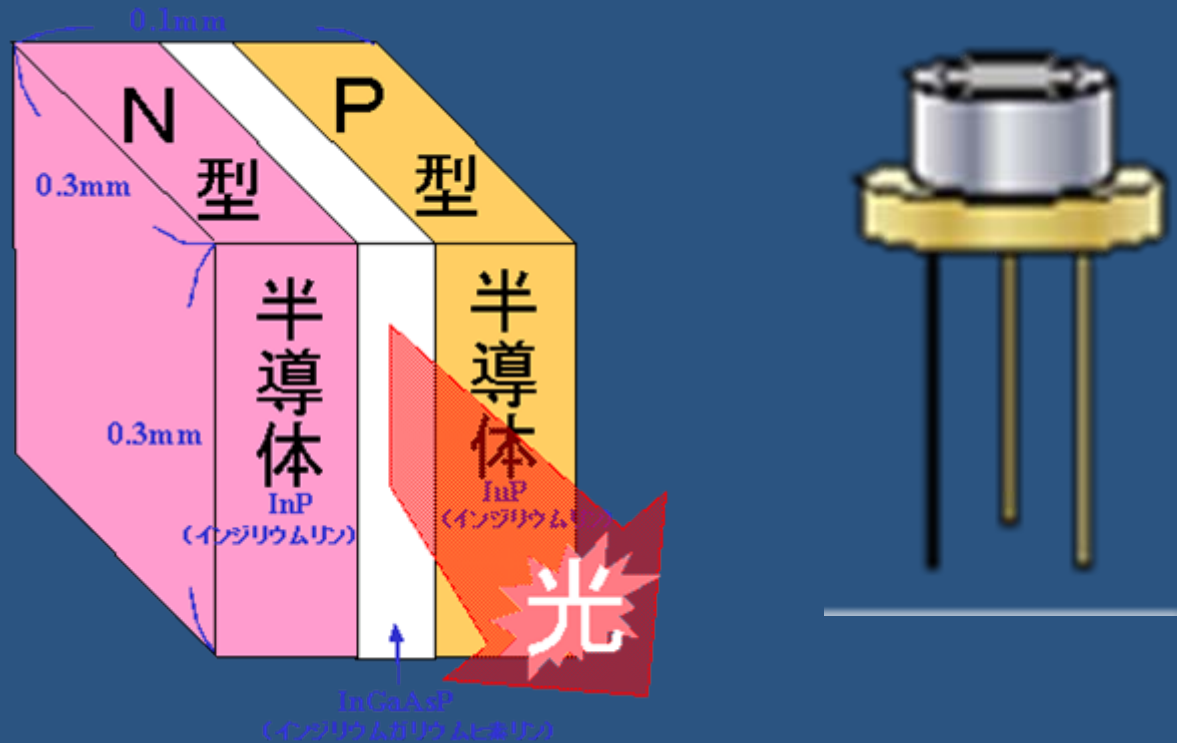


# 光通信の要素技術1

## 半導体レーザ

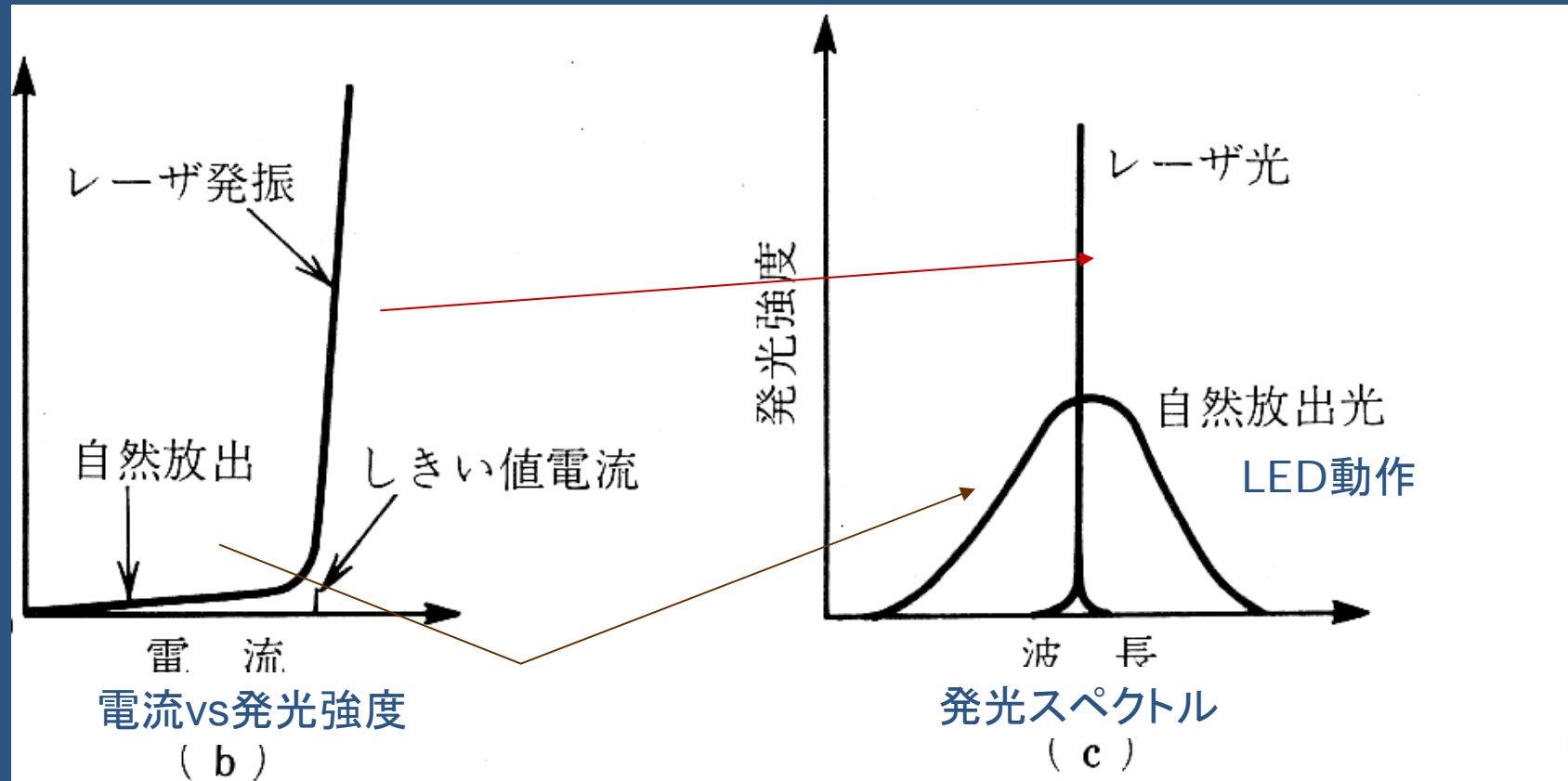
- LED構造において、劈開面を用いたキャビティ構造を用いるとともに、ダブルヘテロ構造により、光とキャリアを活性層に閉じ込め、反転分布を作る。
- DFB構造をとることで特定の波長のみを選択している。

# 半導体レーザーの構造



<http://www.labs.fujitsu.com/gijutsu/laser/kouzo.html>

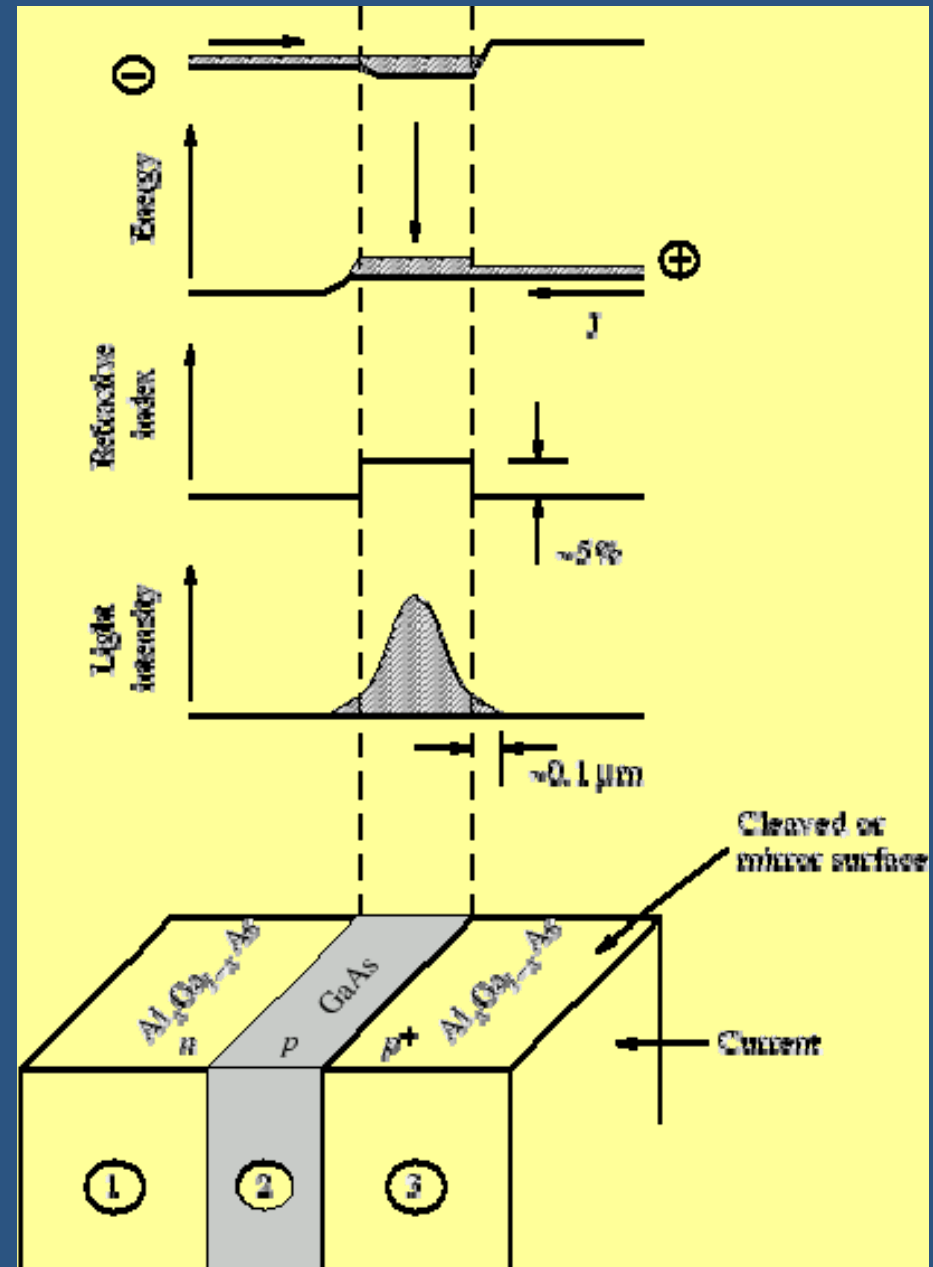
# 半導体レーザーの動作特性



# ダブルヘテロ構造

- 活性層 (GaAs) をバンドギャップの広い材料でサンドイッチ: ダブルヘテロ (DH) 構造4

[http://www.ece.concordia.ca/~i\\_statei/vlsi-opt/](http://www.ece.concordia.ca/~i_statei/vlsi-opt/)



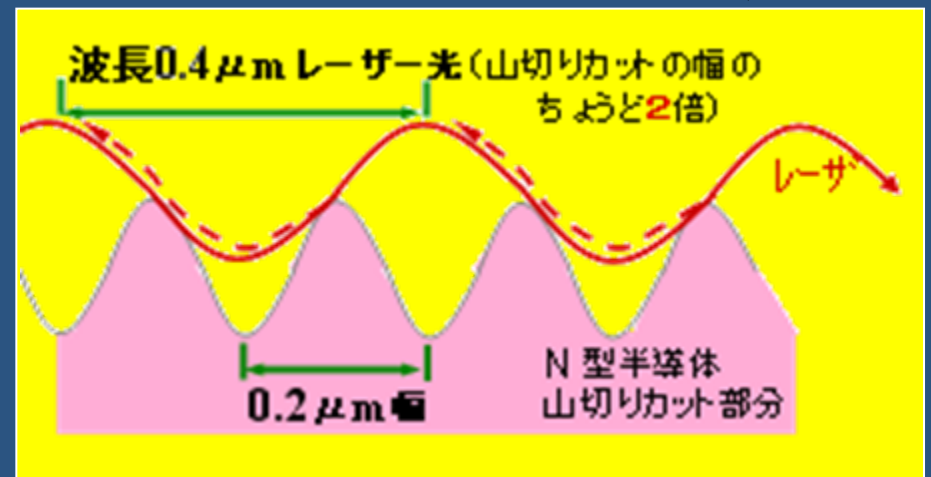
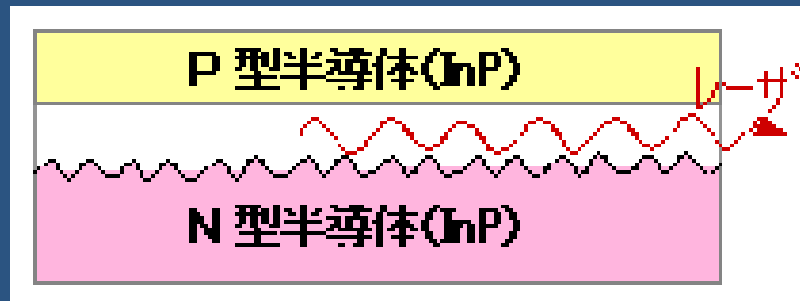


# DHレーザー

- 光とキャリアの閉じこめ
  - 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: 高い濃度の電子・ホール活性層に閉じこめ
  - 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: 全反射による光の閉じこめ

# DFBレーザー

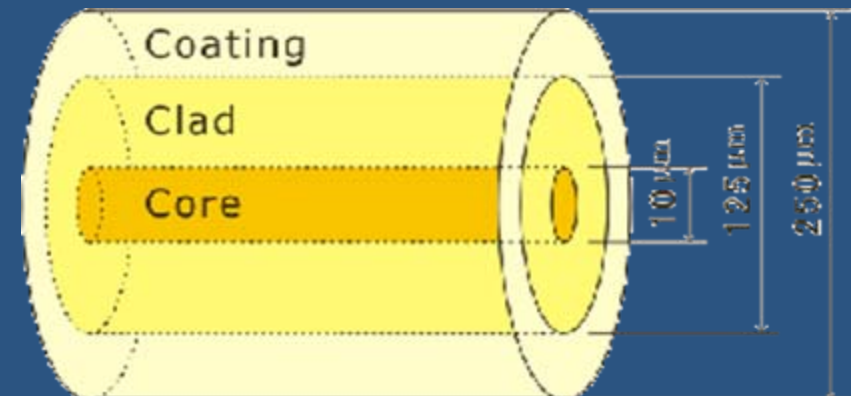
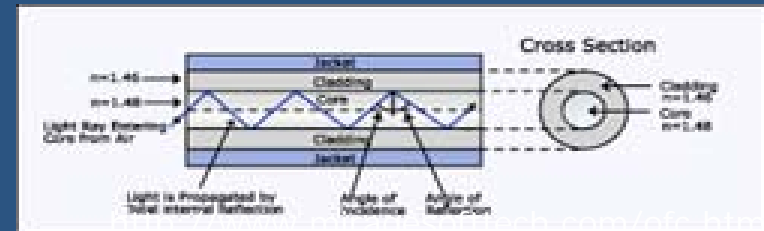
- 1波長の光しかでないレーザー。つまり、通信時に信号の波がずれることがないので、高速・遠距離通信が可能。
- (通信速度: Gb/s = 1秒間に10億回の光を点滅する。電話を1度に約2万本通話させることができます)



# 光通信の要素技術2

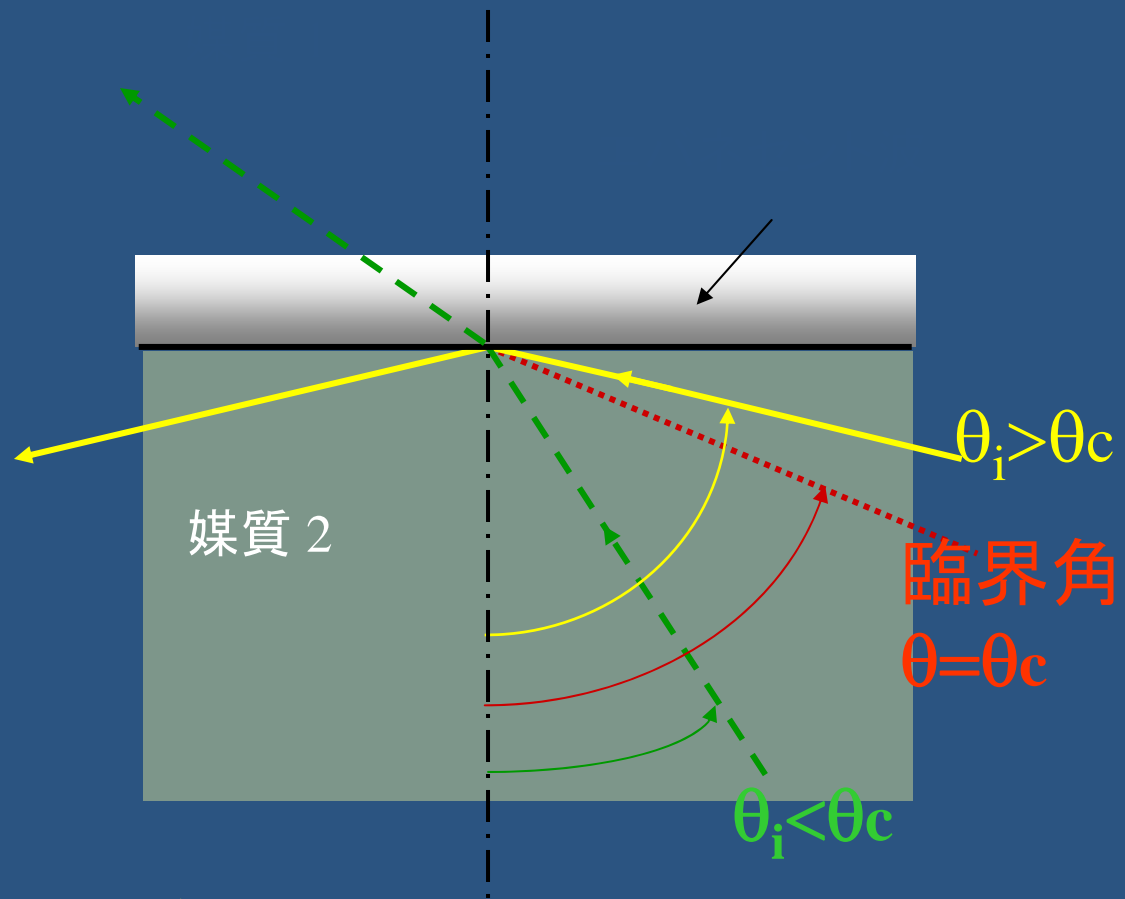
## 光ファイバー

- 材料: 熔融石英 (fused silica  $\text{SiO}_2$ )
- 構造: 同心円状にコア層、クラッド層、保護層を配置
- 光はコア層を全反射によって長距離にわたり低損失で伝搬



東工大影山研HPより

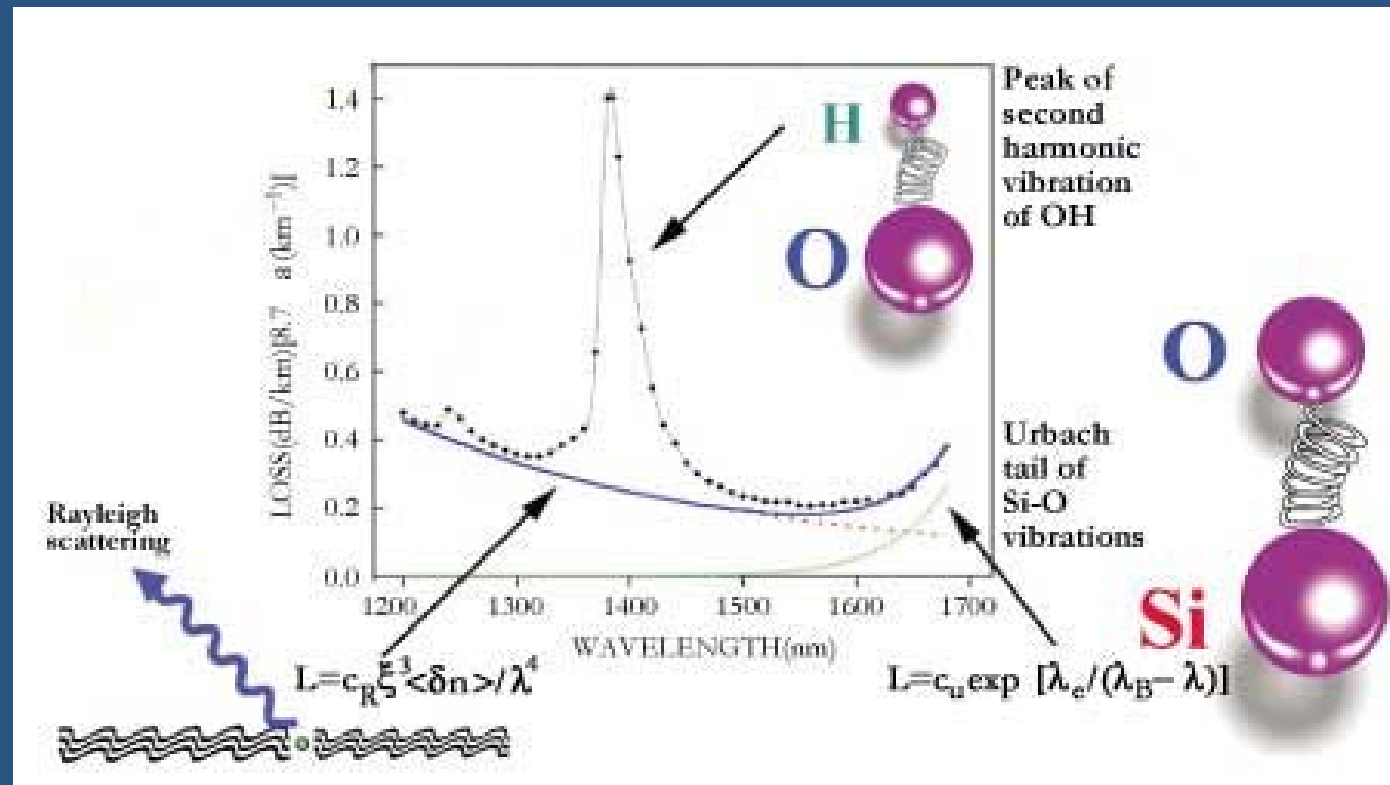
# 全反射



全反射とエバネセント波

# 光ファイバーの伝搬損失

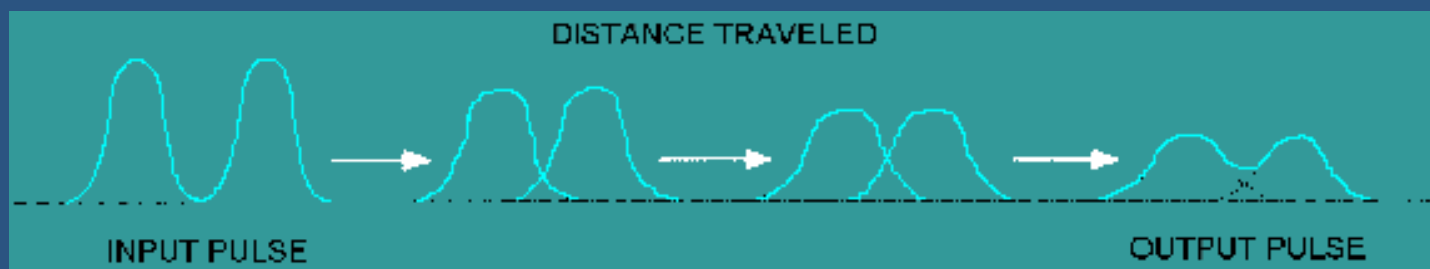
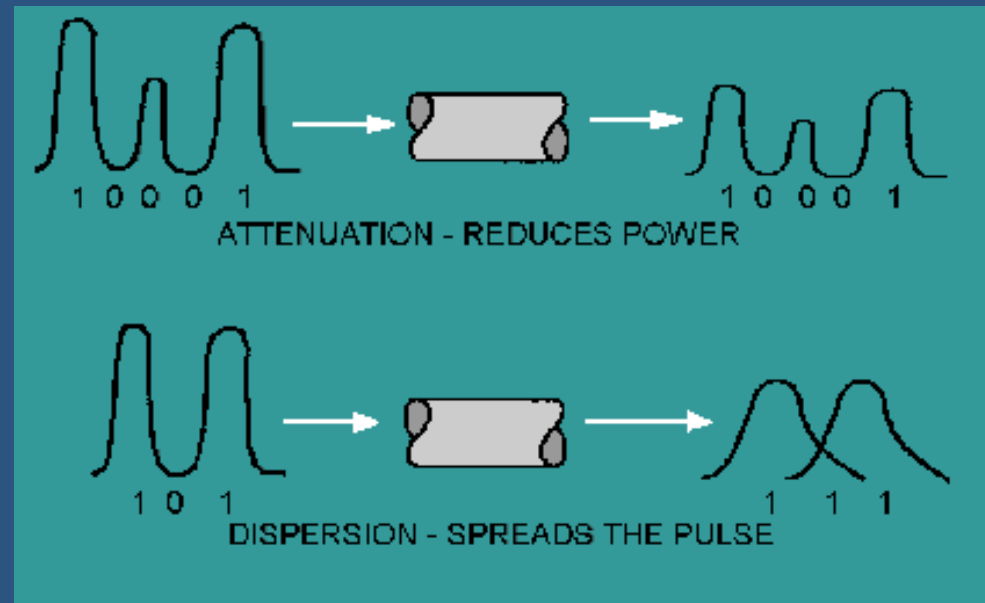
- 短波長側の伝送損失はレーリー散乱
- 長波長側の伝送損失は分子振動による赤外吸収
- $1.4 \mu\text{m}$ 付近の損失はOHの分子振動による



Physics Today Onlineによる  
<http://www.aip.org/pt/vol-53/iss-9/captions/p30cap1.html>

# 光ファイバーの減衰と分散

- 減衰: 光強度の減衰
- 分散: 波形の乱れ



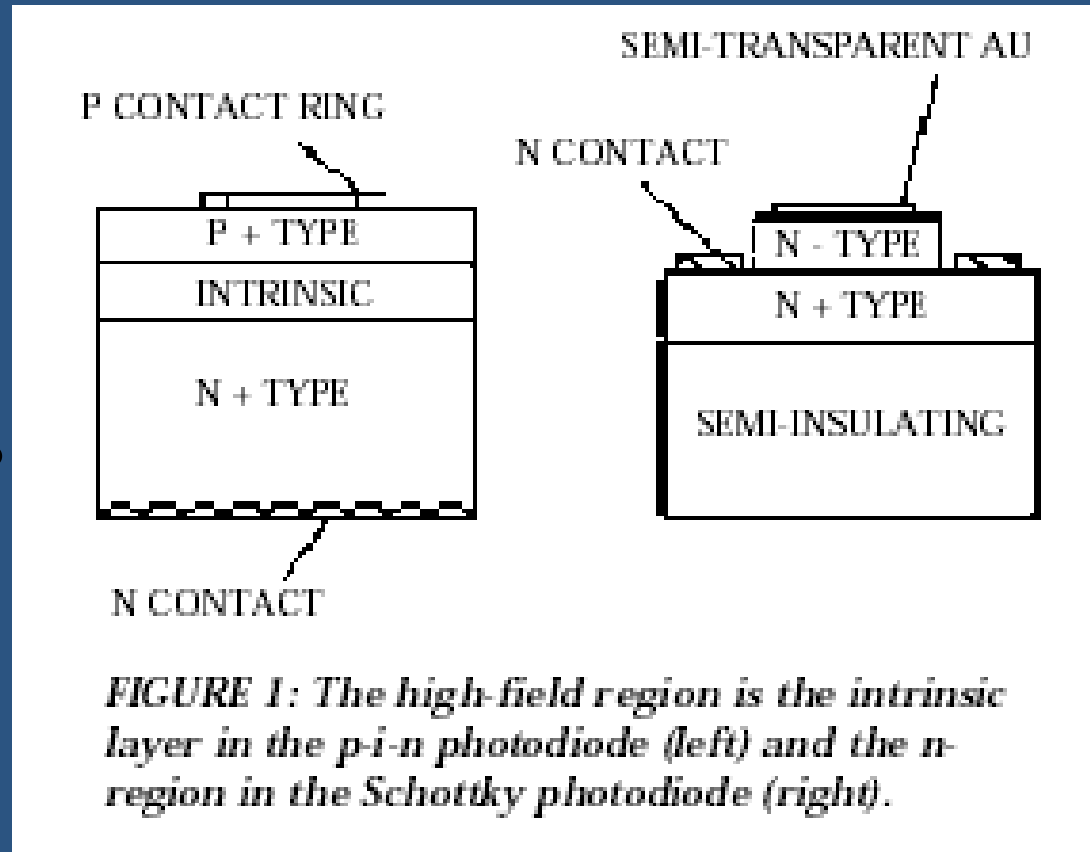
# 光通信の要素技術3

## 光検出

- フォトダイオードを用いる
- 高速応答の光検出が必要
- 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る。
- 通信用PDの材料としてはバンドギャップの小さなInGaAsなどが用いられる。

# 光検出

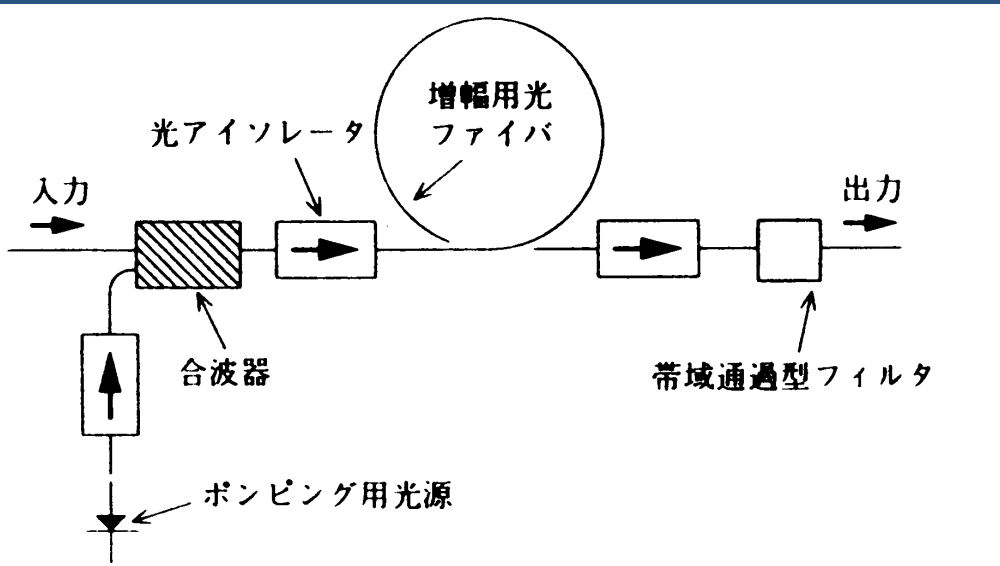
- Pin-PD
- Schottky PD
- 応答性は、空乏層をキャリアが走行する時間と静電容量で決まる。
- このため、空乏層を薄くするとともに、接合の面積を小さくしなければならない。





# 光通信の要素技術4

## 光中継：ファイバーアンプ



光ファイバー中の光信号は100 km程度の距離を伝送されると、20 dB(百分の一に)減衰する。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る。

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る。

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る。  
具体的には、EDF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一旦励起され、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前後の光を放出する(誘導放出現象)。信号光は、この光のエネルギーをもらって増幅される。
- 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)が変化する。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る。

# 光通信の要素技術5

## 光アイソレータ

- 光アイソレータ: 光を一方向にだけ通す光デバイス。
- 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不安定な動作を起こす。
- 光アイソレータ: 出力変動・周波数変動・変調帯域抑制・LD破壊などの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。



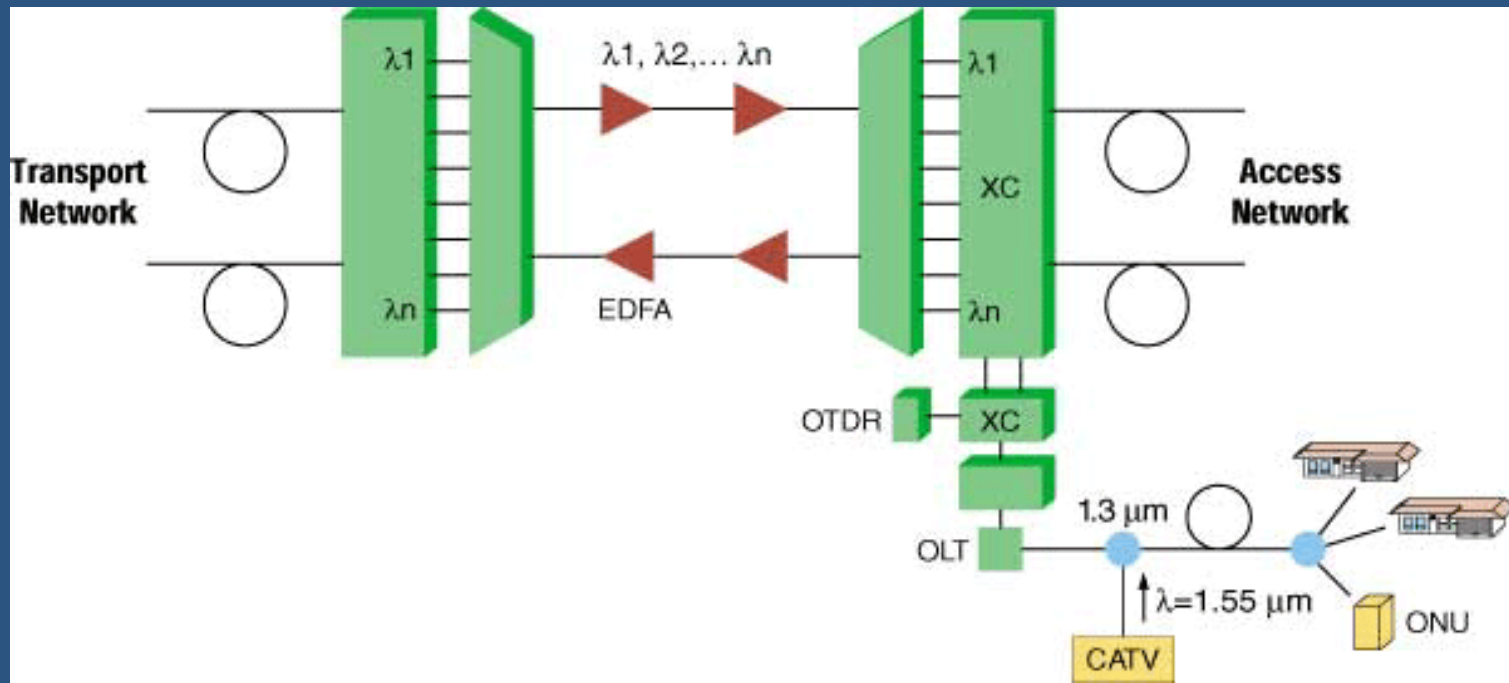
信光社

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

# 光通信の要素技術6

## 波長多重(WDM=wavelength division multiplexing)

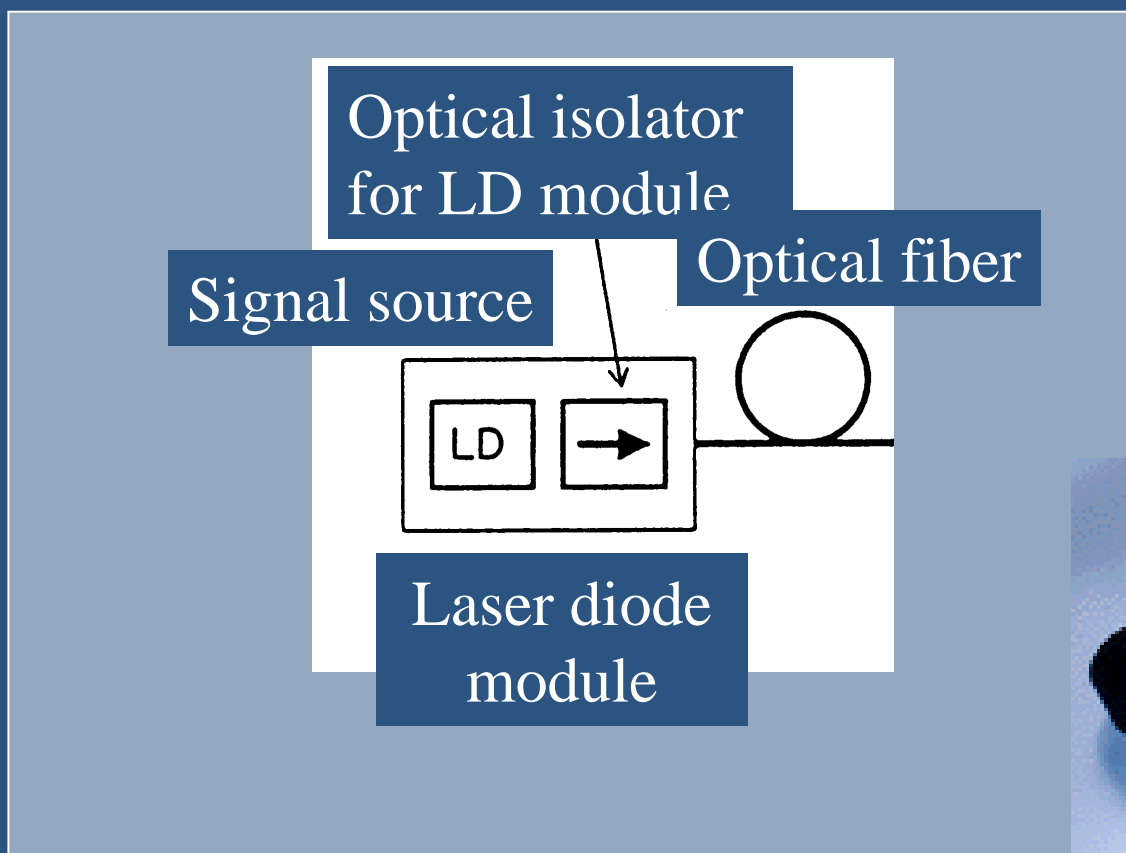
- この方式は、波長の異なる光信号を同時にファイバー中を伝送させる方式であり、多重化されたチャンネルの数だけ伝送容量を増加させることができる。
- 通信用光ファイバーは、1450~1650nmの波長域の伝送損失が小さい(0.3dB/km以下)ため、原理的にはこの波長域全体を有効に使うことができる。



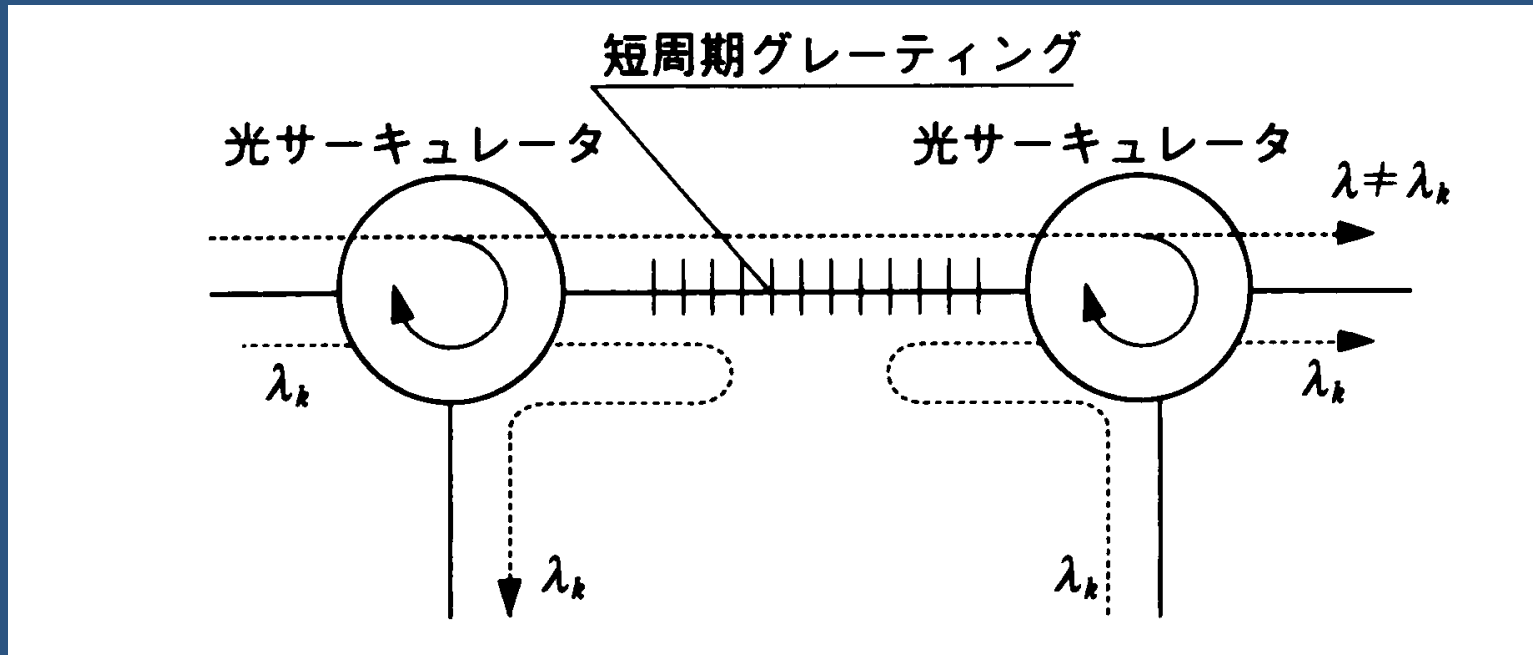
# 光通信における 磁気光学デバイスの位置づけ

- 戻り光は、LDの発振を不安定にしノイズ発生の原因になる→アイソレータで戻り光を阻止。
- 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光サーキュレータを用いて特定波長を選択
- EDFAの前後にアイソレータを配置して動作を安定化。ポンプ用レーザについても戻り光を阻止
- 光アッテネータ、光スイッチ

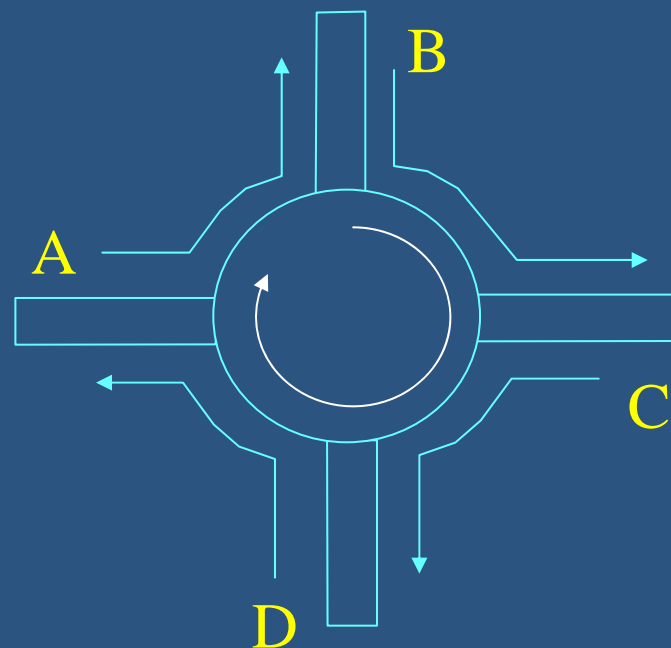
# 半導体レーザモジュール用アイソレータ



# 光アドドロップとサーキュレータ

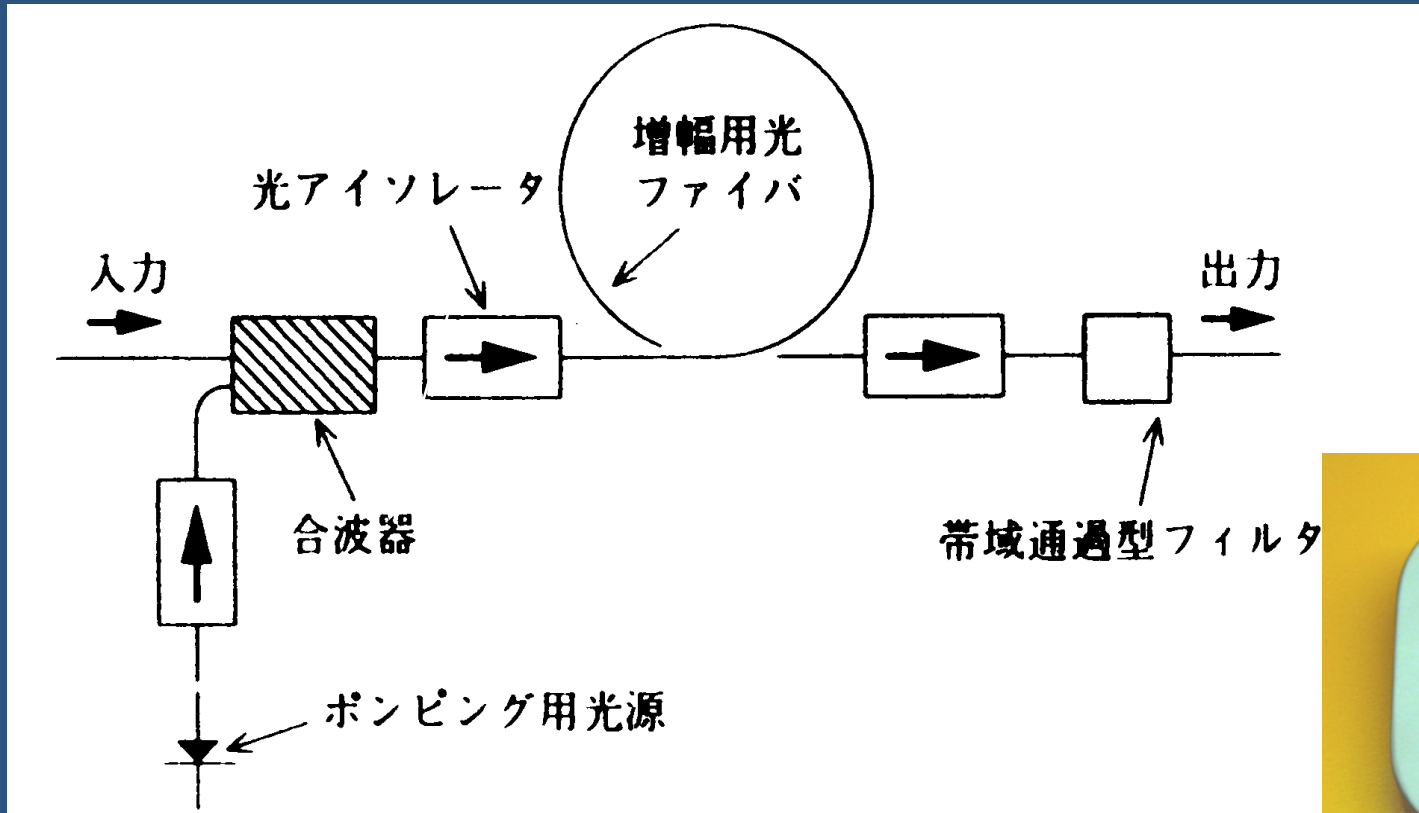


# 光サーキュレータ

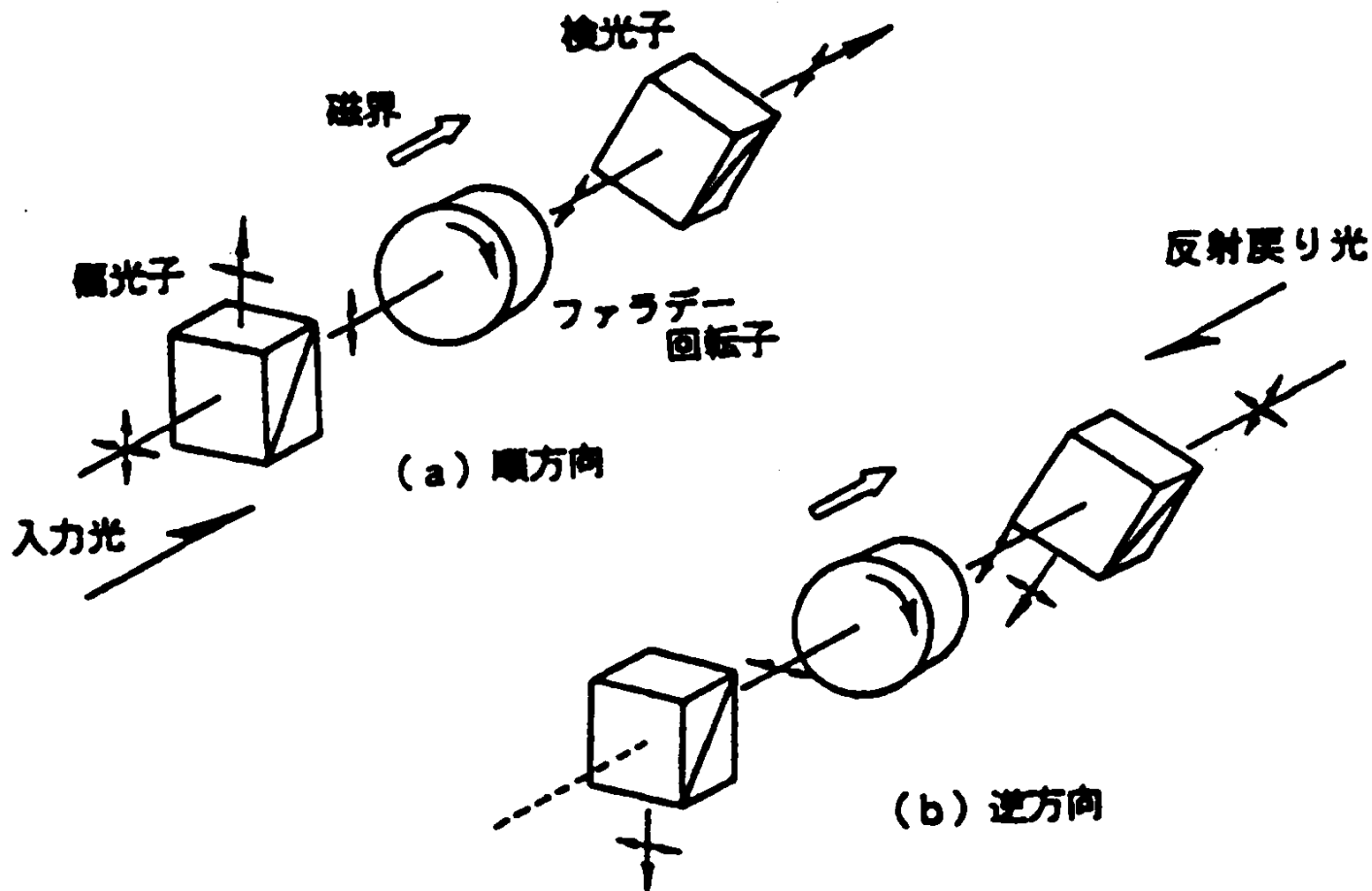




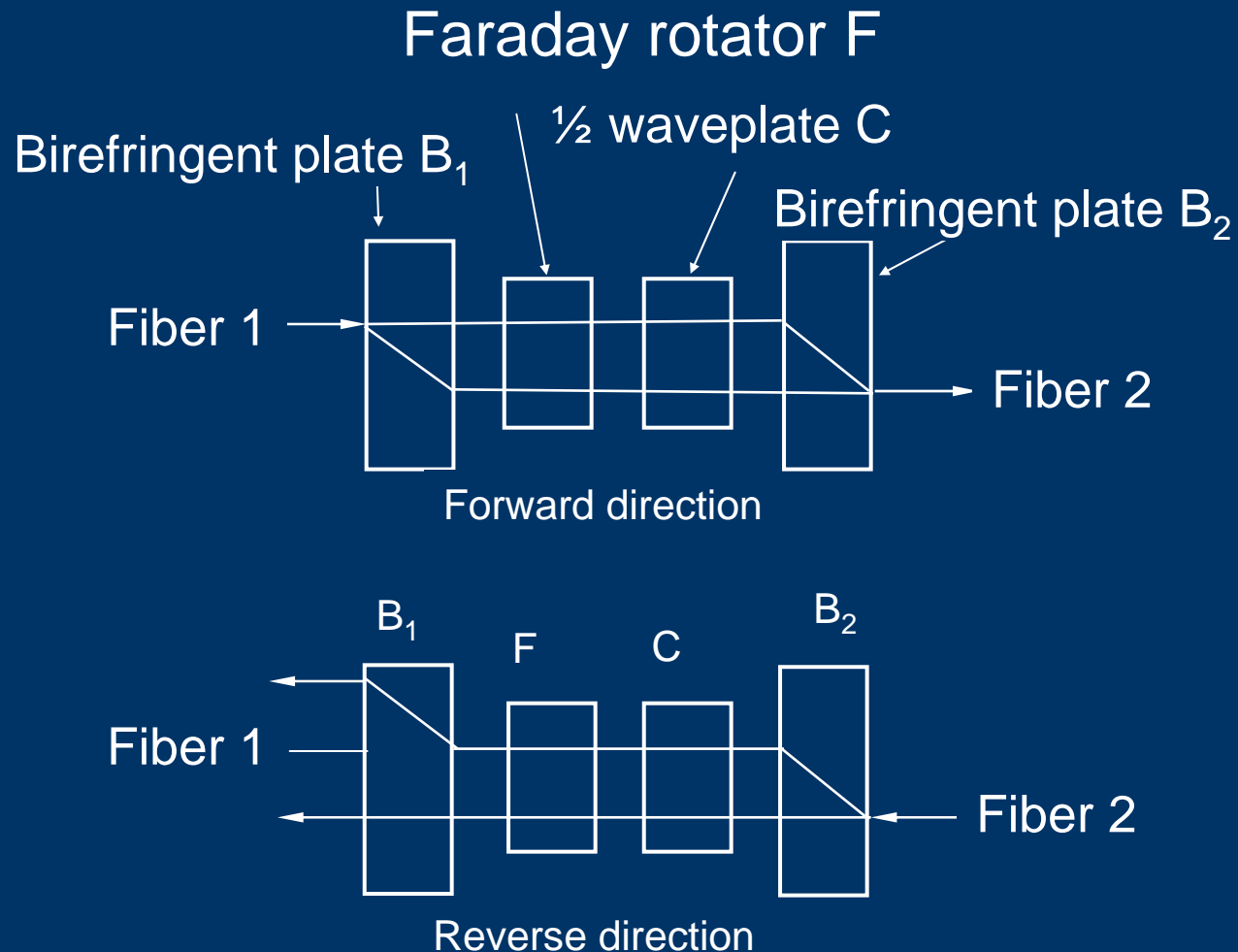
# 光ファイバ増幅器と アイソレータ



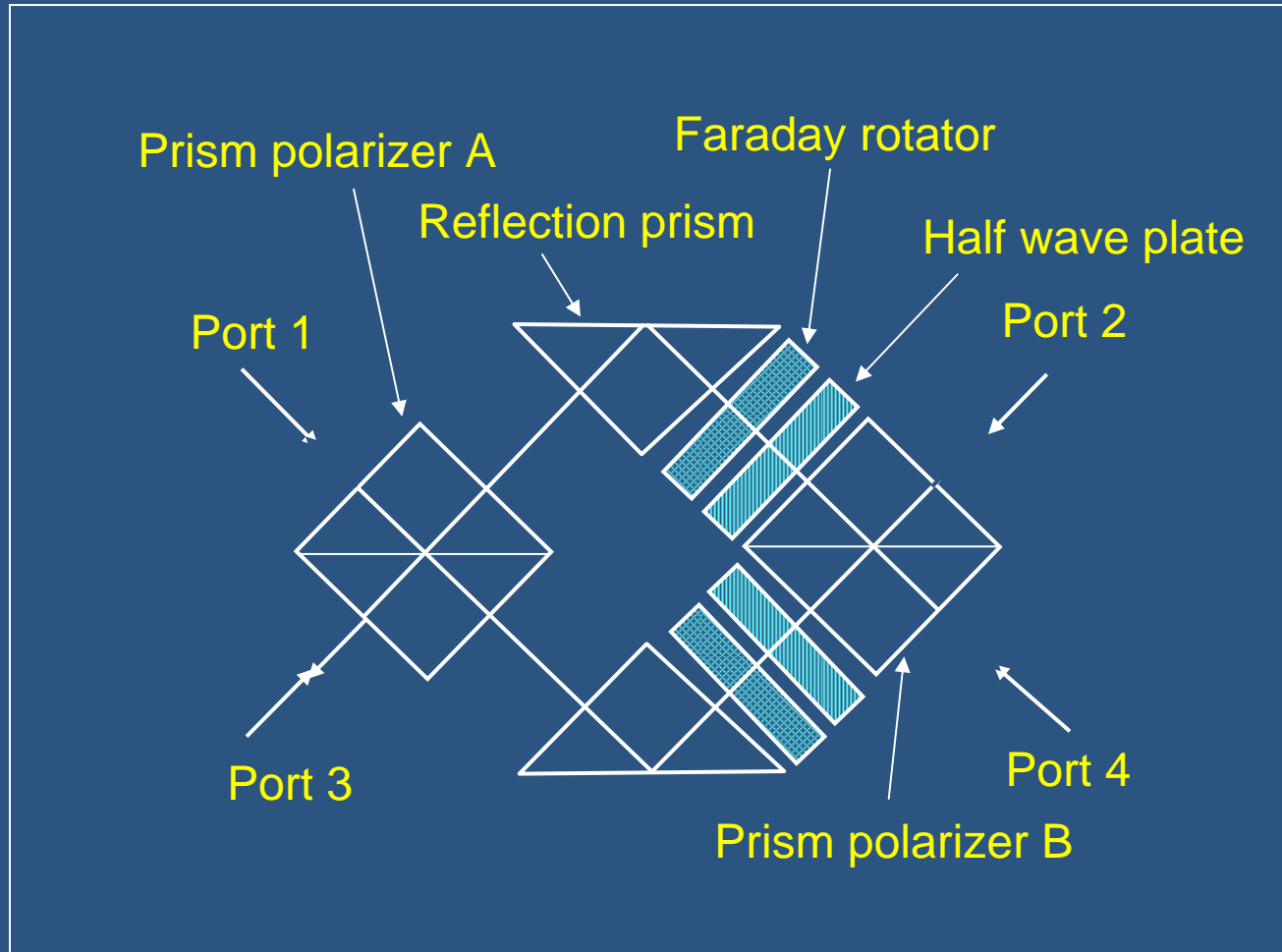
# 偏光依存アイソレータ



# 偏光無依存アイソレータ



# 磁気光学サーキュレータ

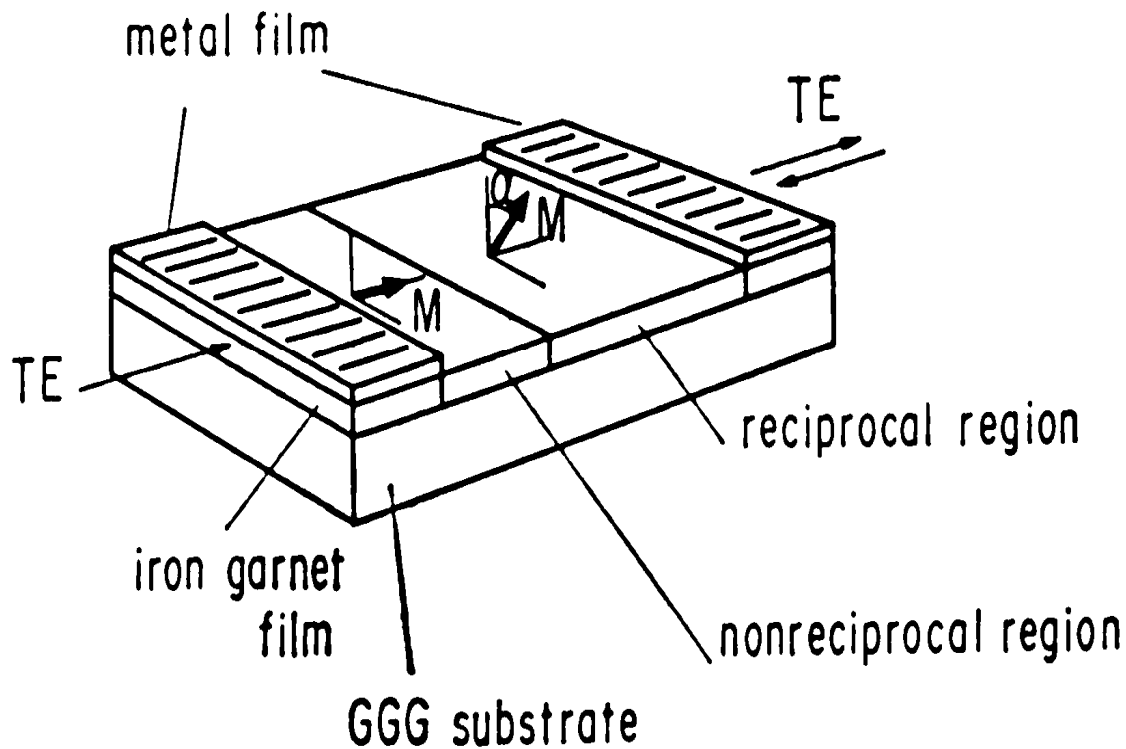


# アイソレータの今後の展開

## 導波路形アイソレータ

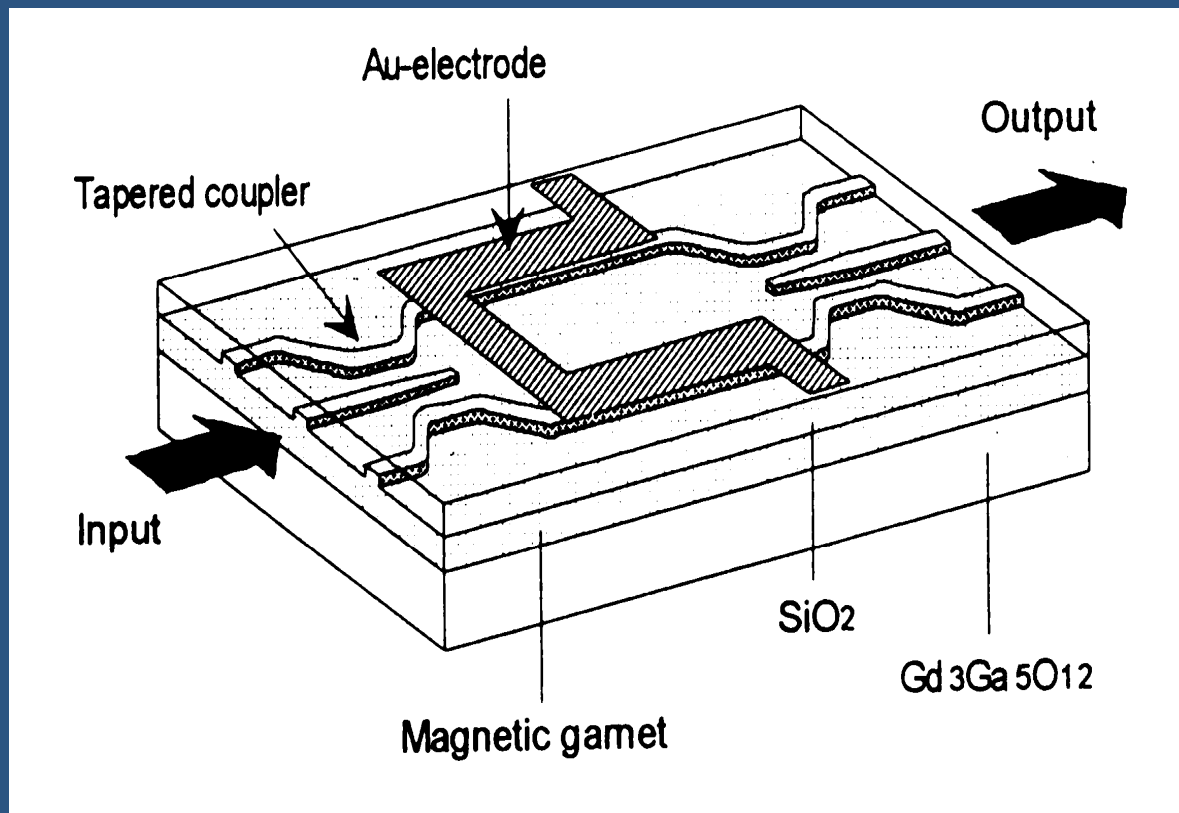
- 小型・軽量・低コスト化
- 半導体レーザとの一体化
- サイズ：波長と同程度→薄膜/空気界面、あるいは、薄膜/基板界面の境界条件重要
- タイプ：
  - 磁気光学材料導波路形：材料の高品質化重要
  - リブ形
  - 分岐導波路形

# 導波路形アイソレータ

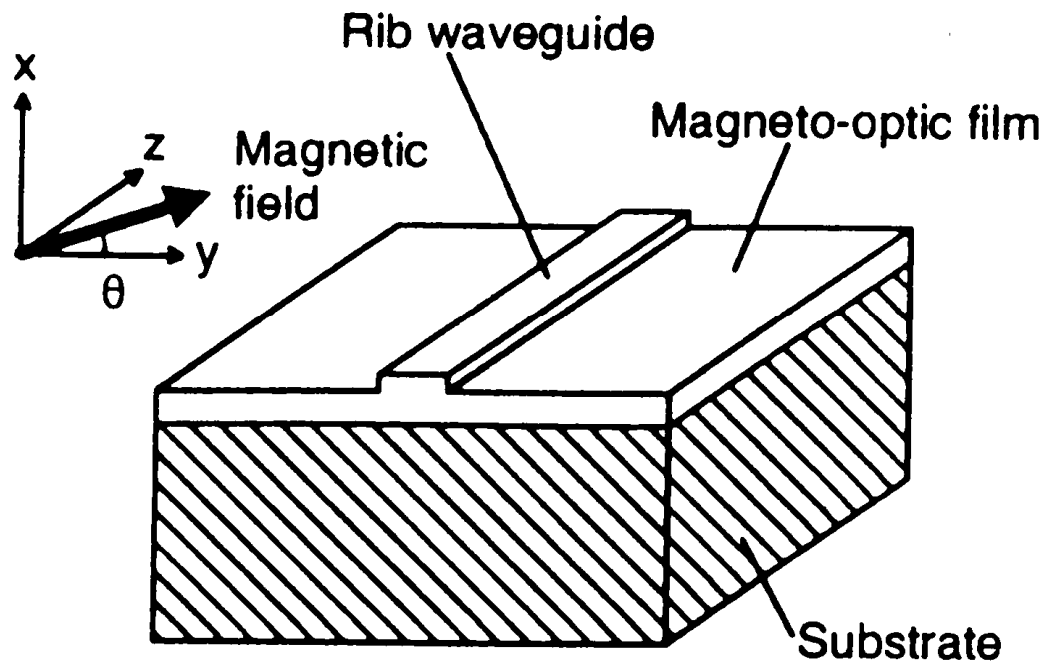


- 腰塚による

# マツハツェンダー形アイソレーター



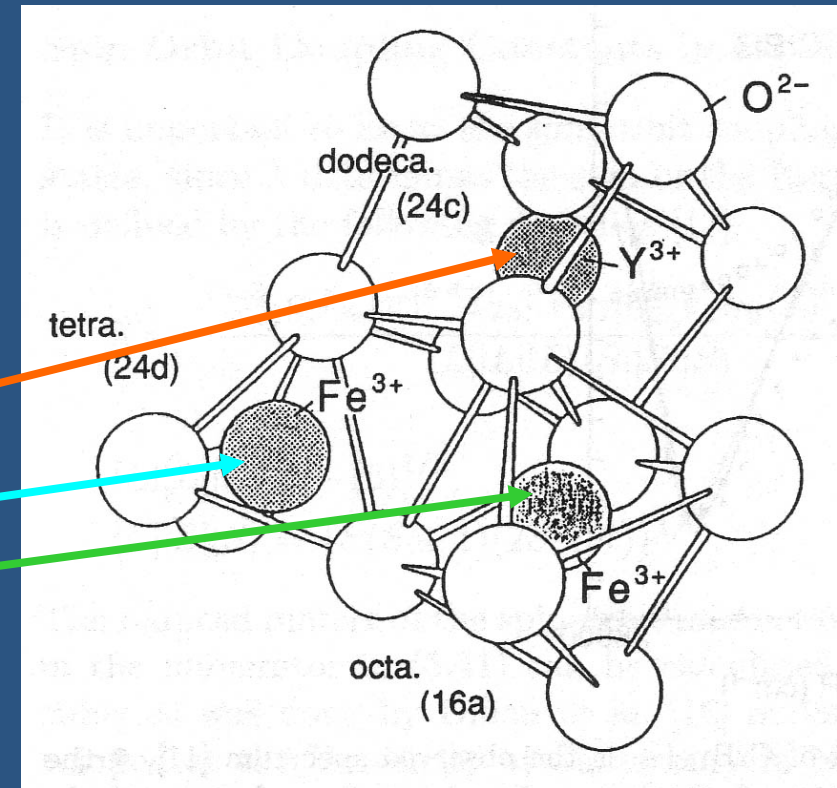
# リブ形アイソレータ





# 磁性ガーネット

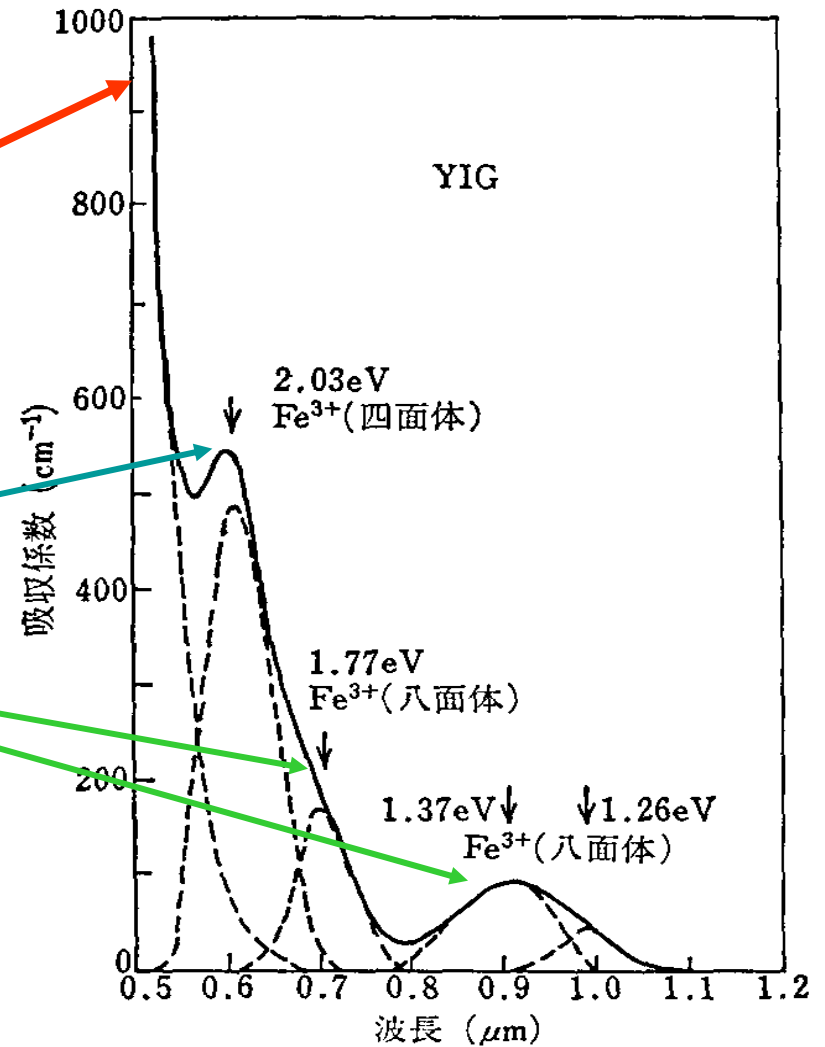
- 磁性ガーネット:
  - YIG( $Y_3Fe_5O_{12}$ )をベースとする鉄酸化物; Y→希土類、Biに置換して物性制御
- 3つのカチオンサイト:
  - 希土類: 12面体位置を占有
  - 鉄 $Fe^{3+}$ : 4面体位置と8面体位置、反強磁性結合
  - フェリ磁性体



ガーネットの結晶構造

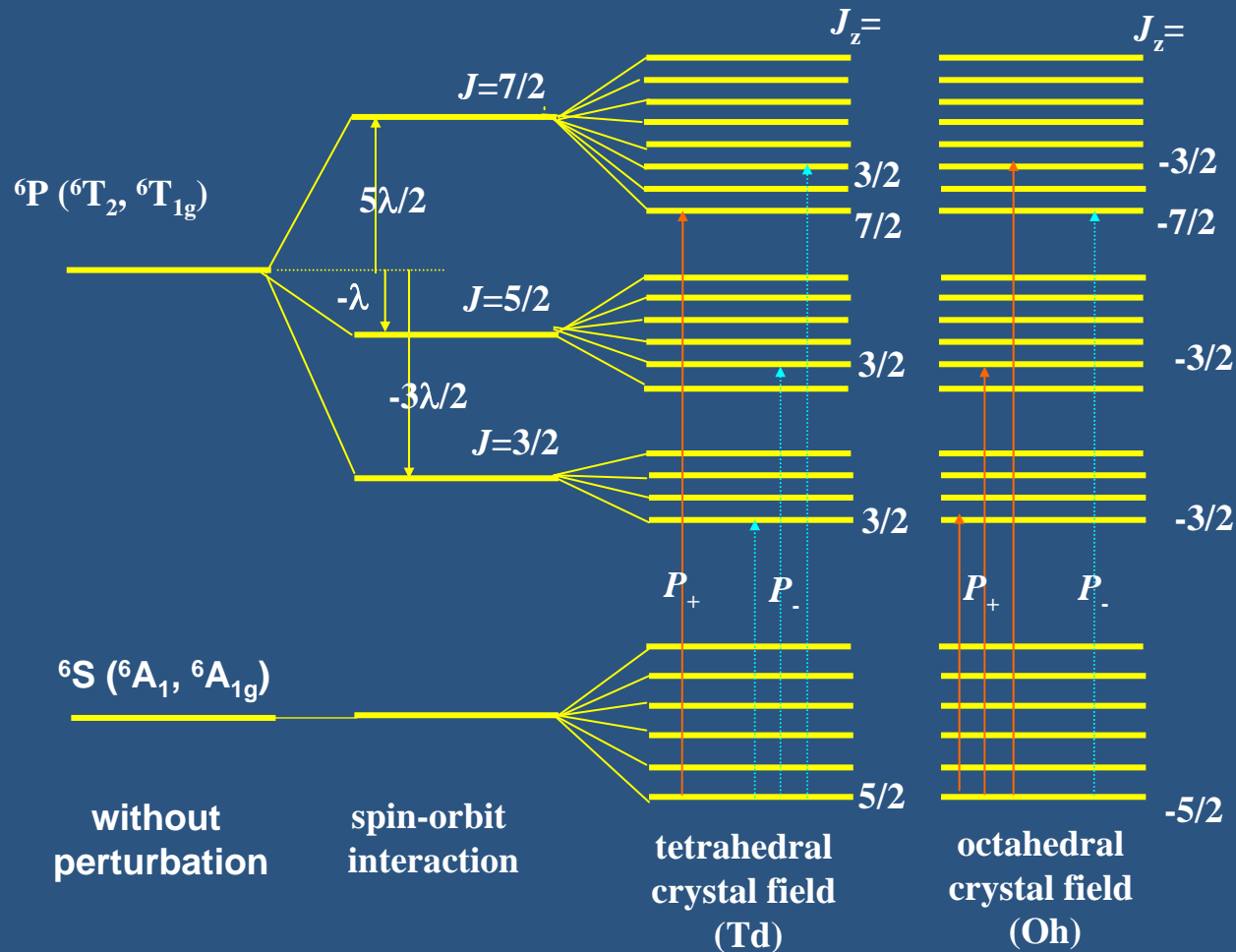
# YIGの光吸収スペクトル

- 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)<sup>22)</sup>

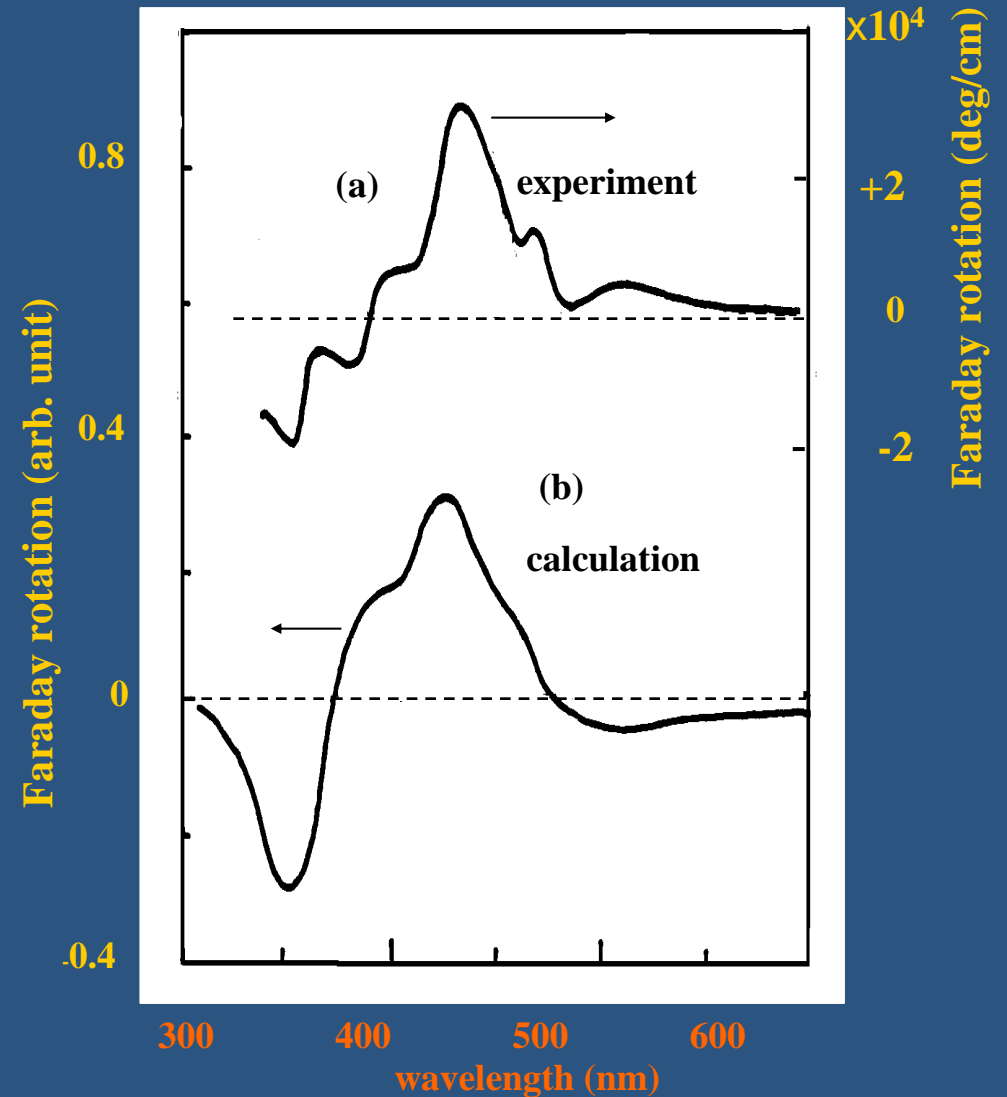
# 磁性ガーネットの $3d^5 2p^6$ 電子状態



品川による

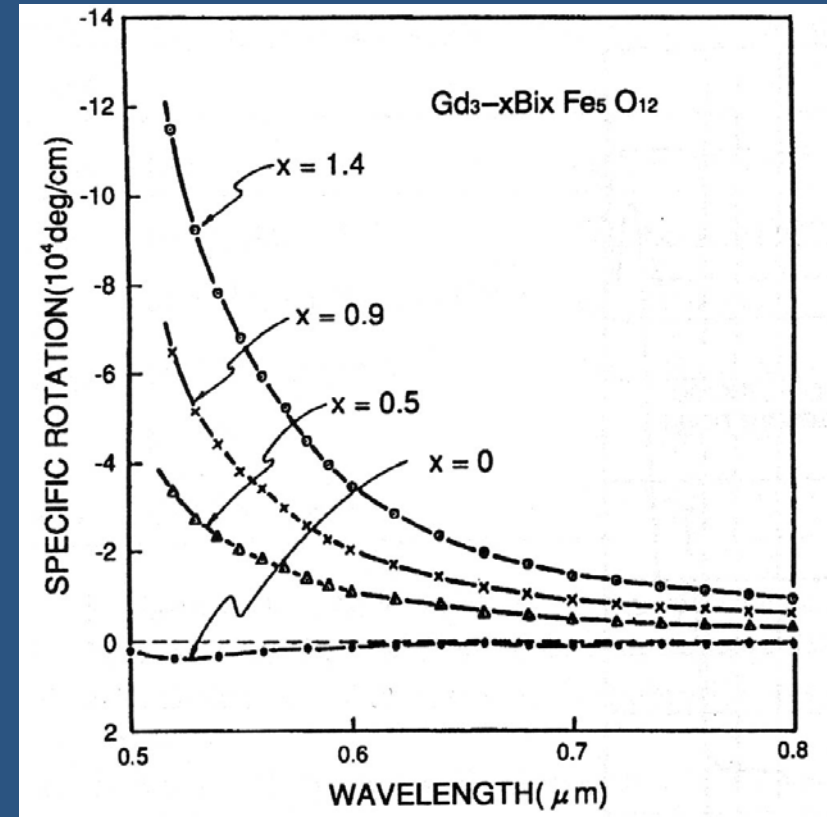
# YIGの磁気光学スペクトル

- 電荷移動型遷移を多電子系として扱い計算。



# 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



# Bi置換YIGの磁気光学スペクトル

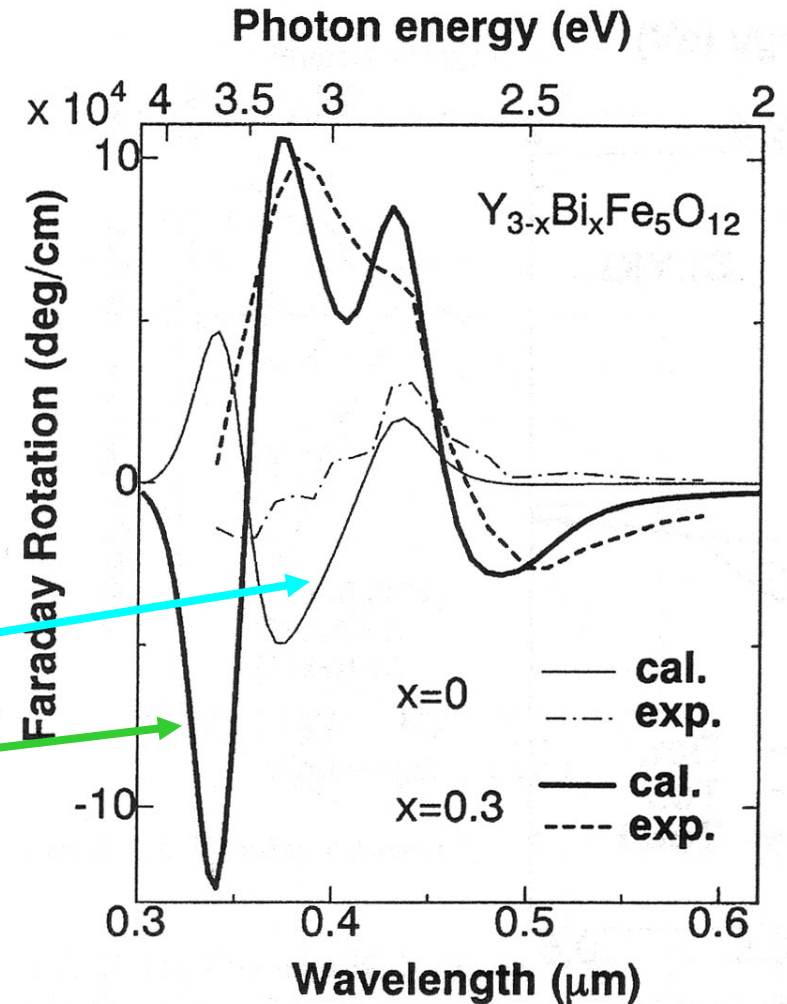
## 実験結果と計算結果

Table 5.6. Parameters used for calculation of Faraday rotation spectrum

transition	$\omega_0 \text{ cm}^{-1} (\text{eV})$	$\gamma \text{ cm}^{-1}$	$f \times 10^3$	site
$t_1(\pi) \rightarrow e^*$	20 170 (2.50)	1800	0.25	tet
$t_2(\pi) \rightarrow e^*$	21 620 (2.68)	1800	0.40	tet
$t_{2u}(\pi) \rightarrow t_{2g}^*$	23 110 (2.86)	1800	1.8	oct
$t_{1u}(\pi) \rightarrow t_{2g}^*$	25 600 (3.17)	2700	3.1	oct
$t_1(\pi) \rightarrow t_2^*$	27 400 (3.40)	2500	5.5	tet
$t_2(\pi) \rightarrow t_2^*$	29 120 (3.61)	2500	5.5	tet

### ■ スペクトルの計算

- $\zeta_{3d} = 300 \text{ cm}^{-1}$ ,
- $\zeta_{2p} = 50 \text{ cm}^{-1}$  for YIG
- $\zeta_{2p} = 2000 \text{ cm}^{-1}$  for  $\text{Bi}_{0.3}\text{Y}_{2.7}\text{IG}$

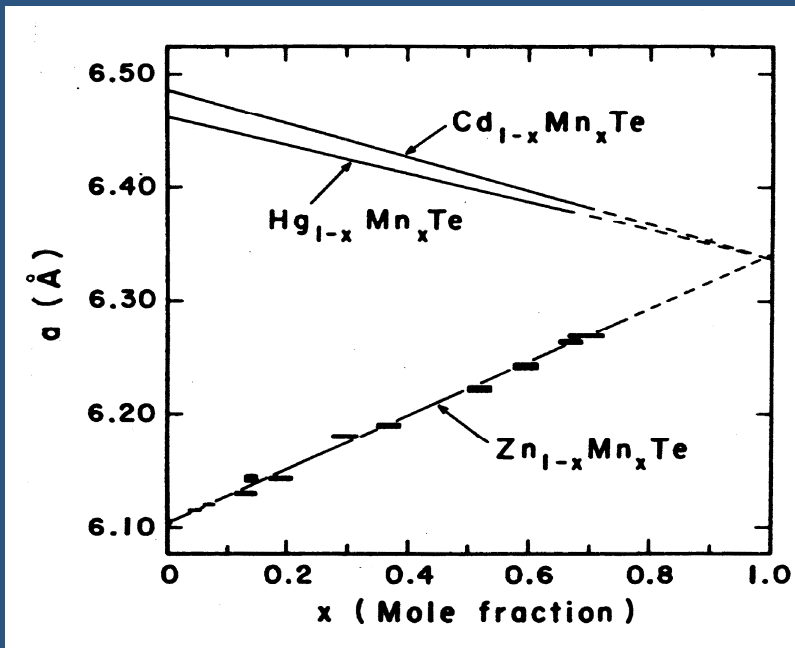


# II-VI系希薄磁性半導体の 結晶構造と組成存在領域

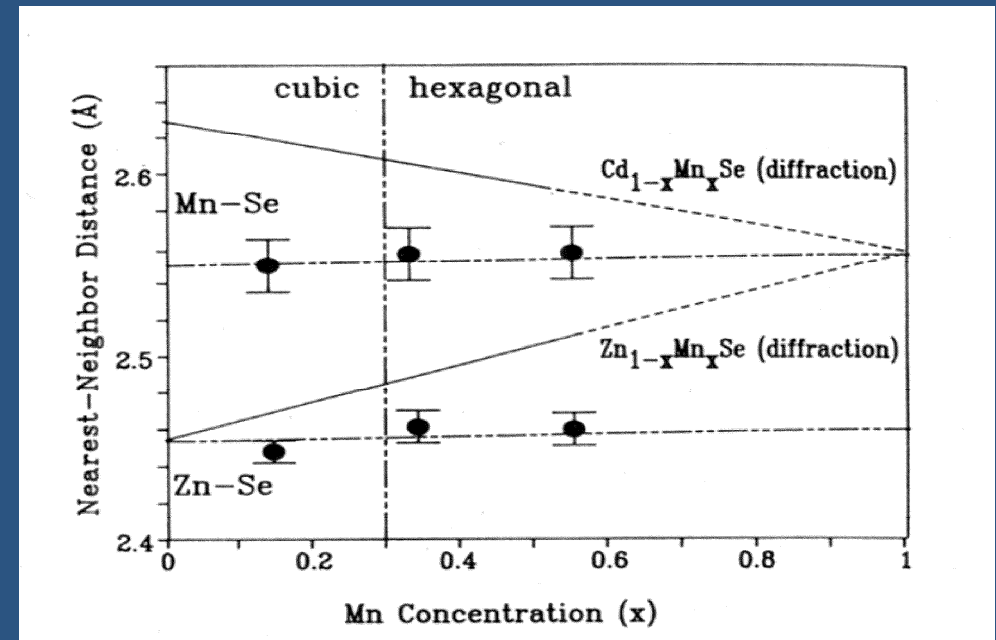
Material	Crystal structure	Range of Composition
$Zn_{1-x}Mn_xS$	ZB WZ	$0 < x < 0.10$ $0.10 < x \leq 0.45$
$Zn_{1-x}Mn_xSe$	ZB WZ	$0 < x \leq 0.30$ $0.30 < x \leq 0.57$
$Zn_{1-x}Mn_xTe$	ZB	$0 < x \leq 0.86$
$Cd_{1-x}Mn_xS$	WZ	$0 < x \leq 0.45$

Material	Crystal structure	Range of Composition
$Cd_{1-x}Mn_xSe$	WZ	$0 < x \leq 0.50$
$Cd_{1-x}Mn_xTe$	ZB	$0 < x \leq 0.77$
$Hg_{1-x}Mn_xS$	ZB	$0 < x \leq 0.37$
$Hg_{1-x}Mn_xSe$	ZB	$0 < x \leq 0.38$
$Hg_{1-x}Mn_xTe$	ZB	$0 < x \leq 0.75$

# II-VI DMS の格子パラメータ



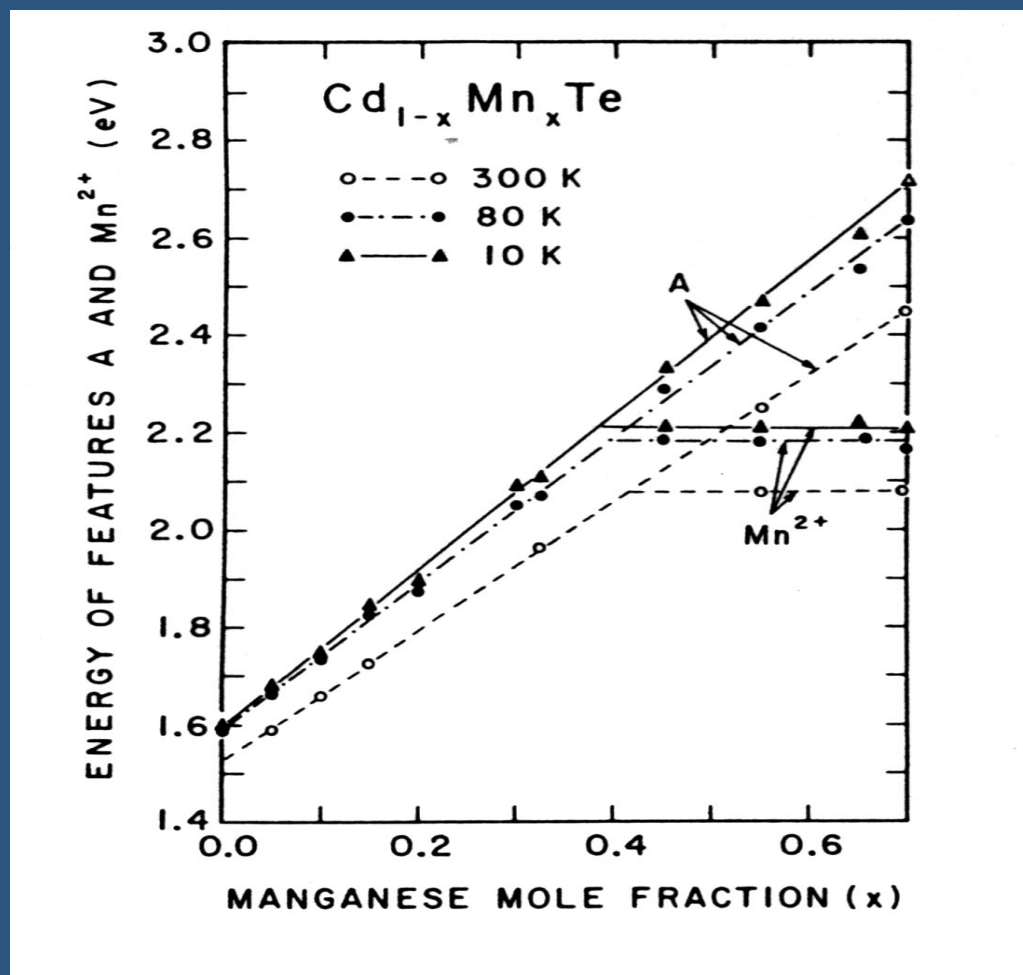
J. K. Furdyna et al., J. Solid State Chem. 46, (1983) 349



B. A. Bunker et al., Diluted Magnetic (Semimagnetic) Semiconductors, (MRS., Pittsburg, 1987) vol.89, p. 231



# Cd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Teにおける バンドギャップのMn濃度依存性



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

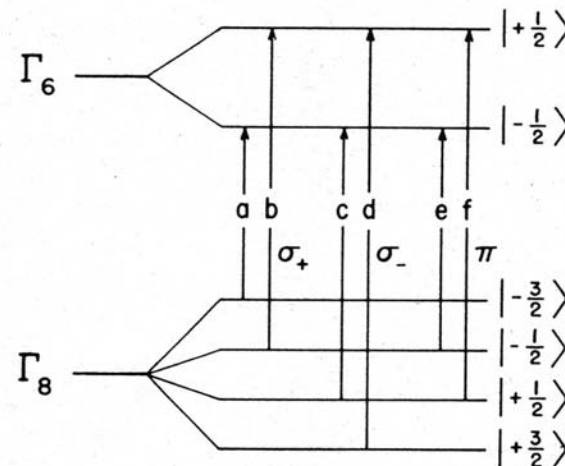
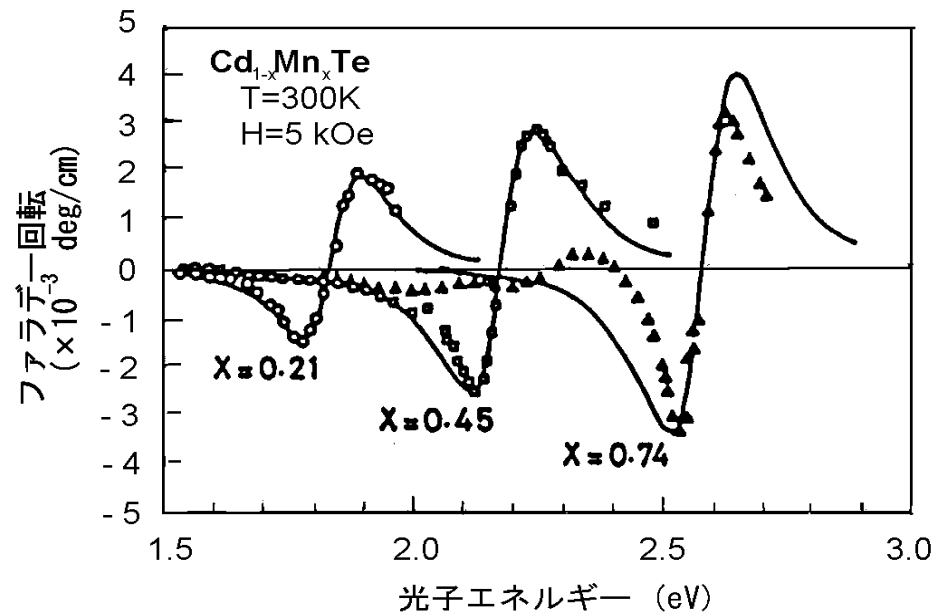
## ■ ブリッジマン法

- 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) → ZB (低温相) 相転位 (温度低下)

## ■ 過剰融液組成 → 相晶を防ぐ効果

# 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→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

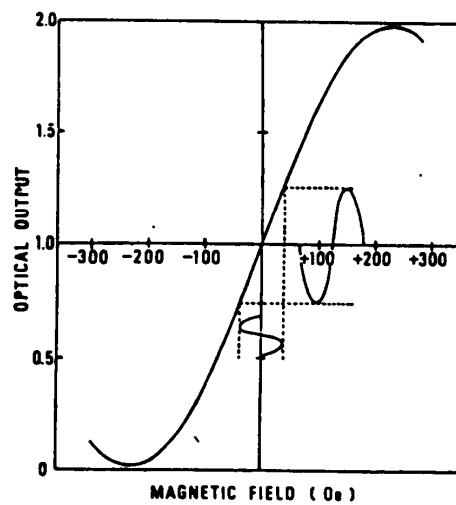
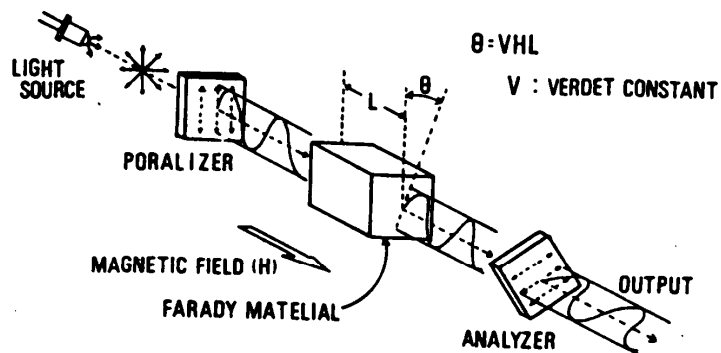
## ■ 貼り合わせ法

- 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

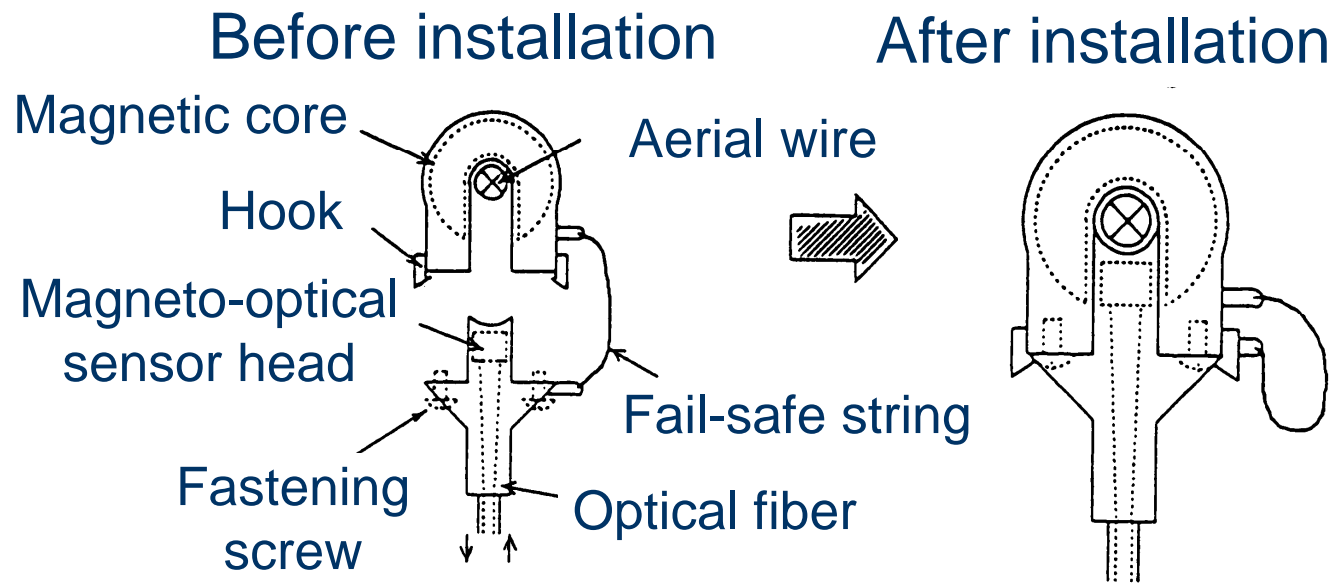
## ■ 希薄磁性半導体の利用

- 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困難。
- 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



# 電流センサ



# 光ファイバ磁界センサ

