

応用物理学第1

第4回 光で情報を伝える記録する

・光ディスク材料・光通信材料

佐藤勝昭

光ディスクの物理学



光ディスクのポイント

- 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

記録密度を決めるもの 光スポットサイズ

- レンズの開口数

– $NA = n \sin \alpha$

- $d = 0.6 \lambda / NA$

現行CD-ROM: $NA = 0.6$

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

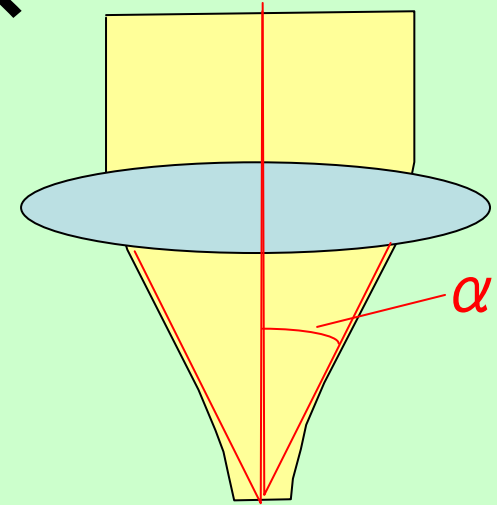
DVD: $\lambda = 650\text{nm} \rightarrow d = 650\text{nm}$

BD: $NA = 0.85$

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

HD-DVD: $NA = 0.6$

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



スポット径 d

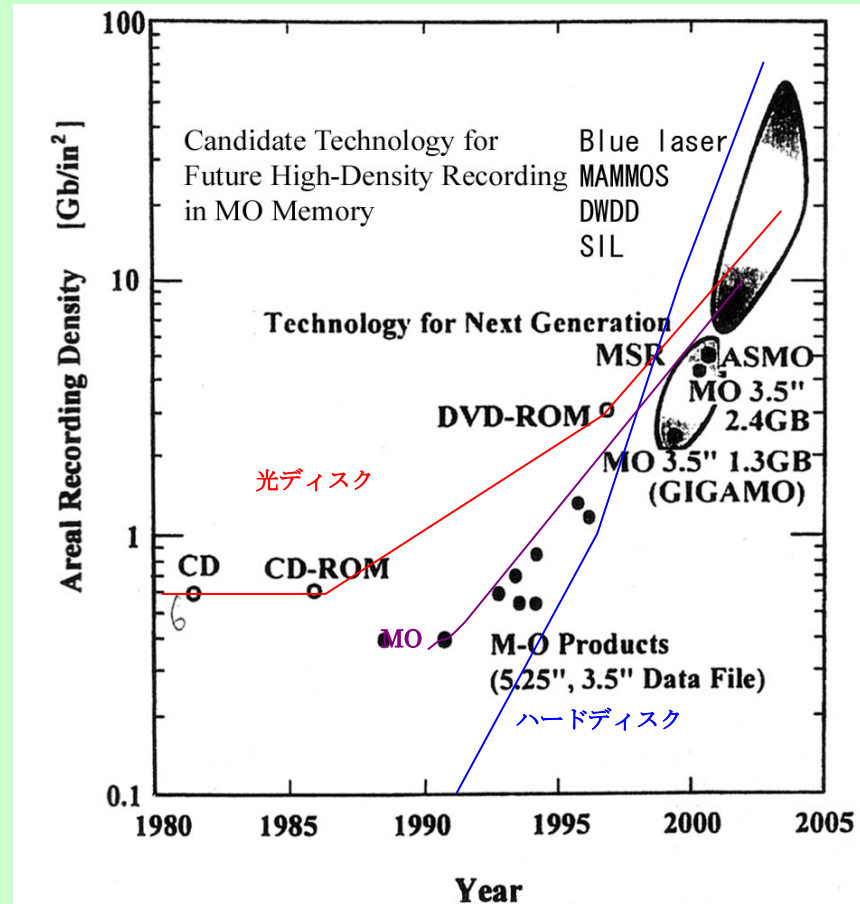
光記録に利用する物理現象

- 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

光ディスクの特徴

- リムーバブル
- 大容量・高密度
 - 現行10Gb/in²:ハードディスク(70Gbit/in²)に及ばない
 - 超解像、短波長、近接場を利用して100Gbit/in²をめざす
- ランダムアクセス
 - 磁気テープに比し圧倒的に有利;
カセットテープ→MD, VTR→DVD
 - ハードディスクに比べるとシーク時間が長い
- 高信頼性
 - ハードディスクに比し、ヘッドの浮上量が大きい

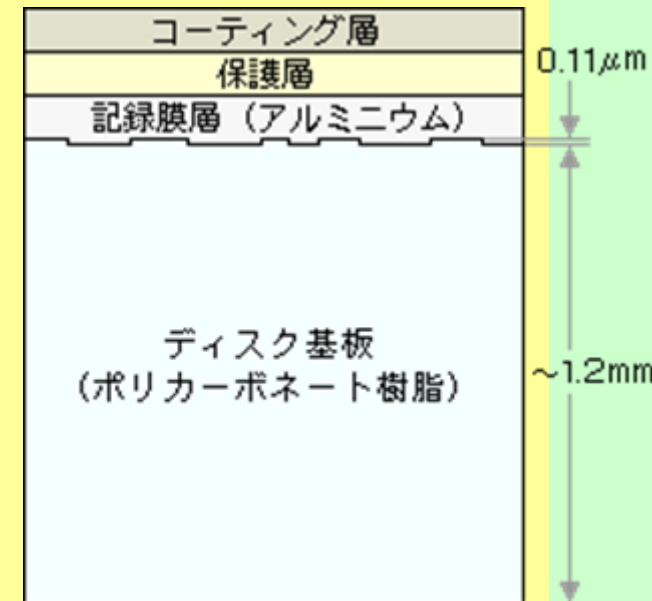
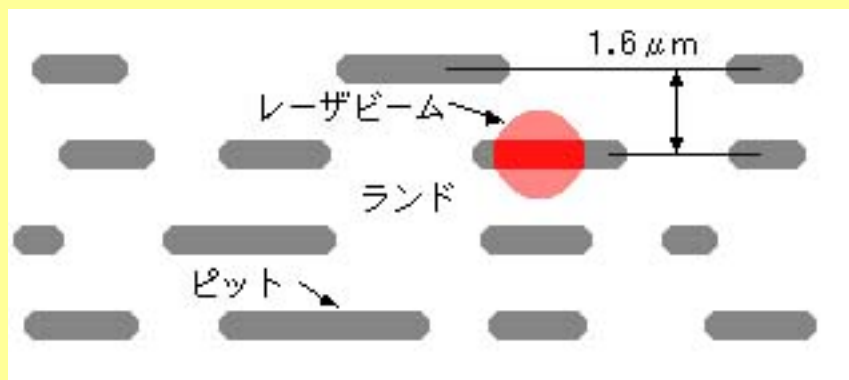
光ディスクの面記録密度の伸び



鈴木孝雄：第113回日本応用磁気学会研究会資料(2000.1) p.11に加筆

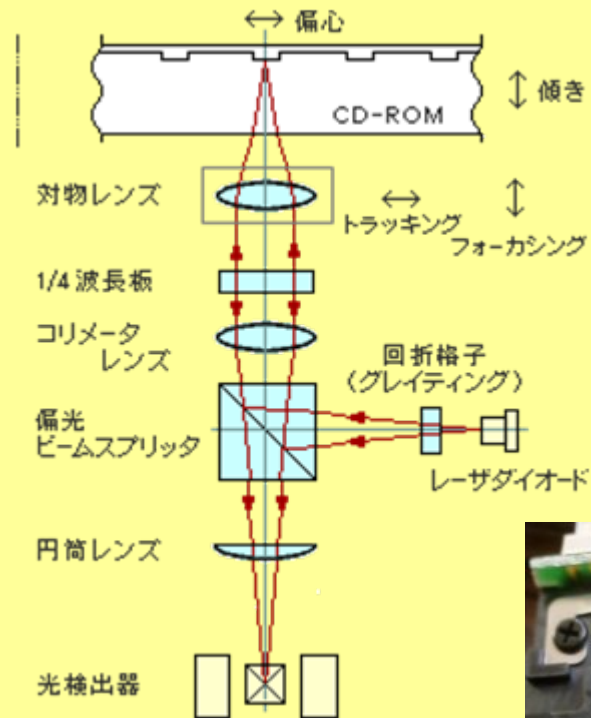
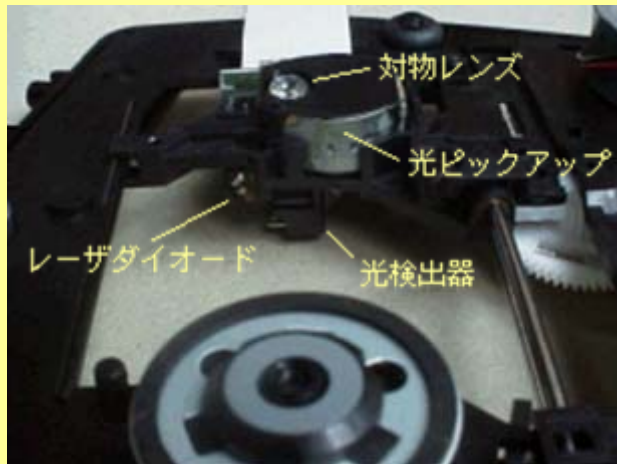
CD-ROM: 光の干渉を利用

- 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 π : 打ち消し



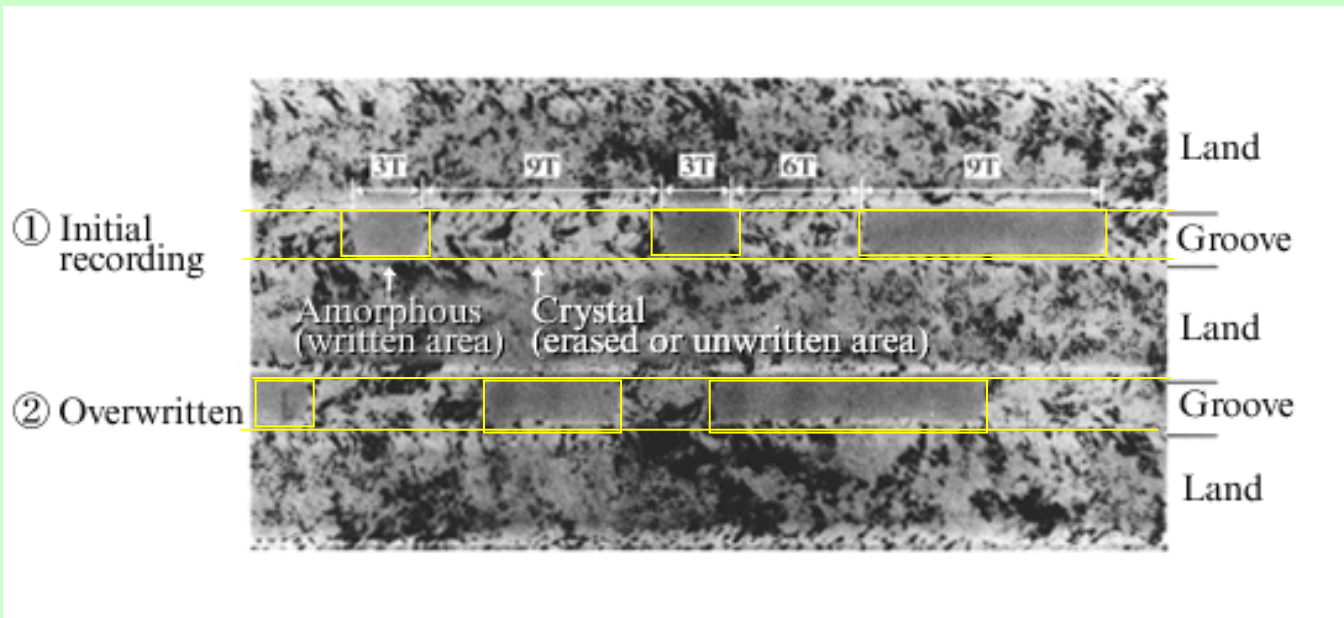
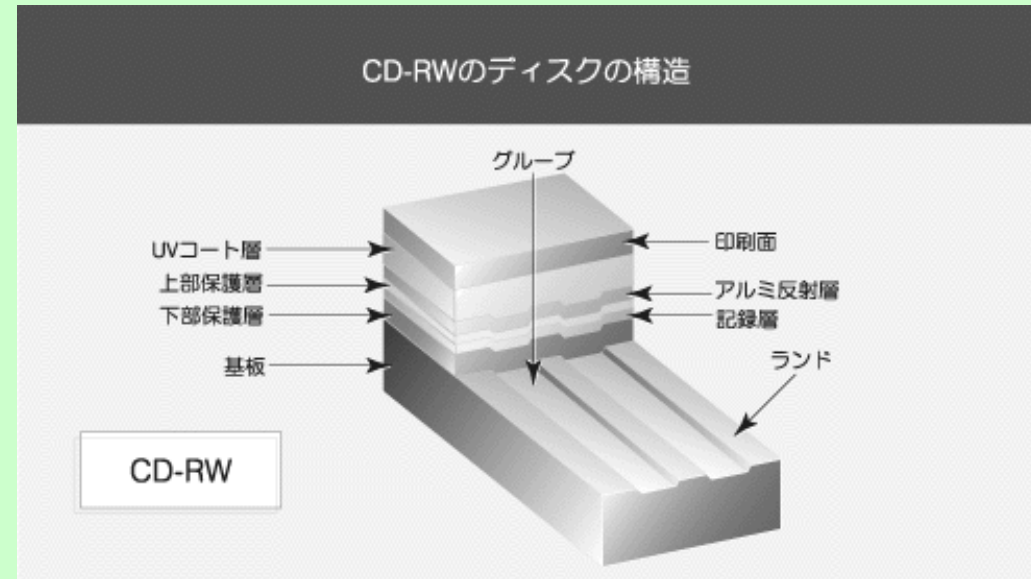
CD-ROMドライブ

- フォーカスサーボ
- トラッキングサーボ
- 光ピックアップ



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

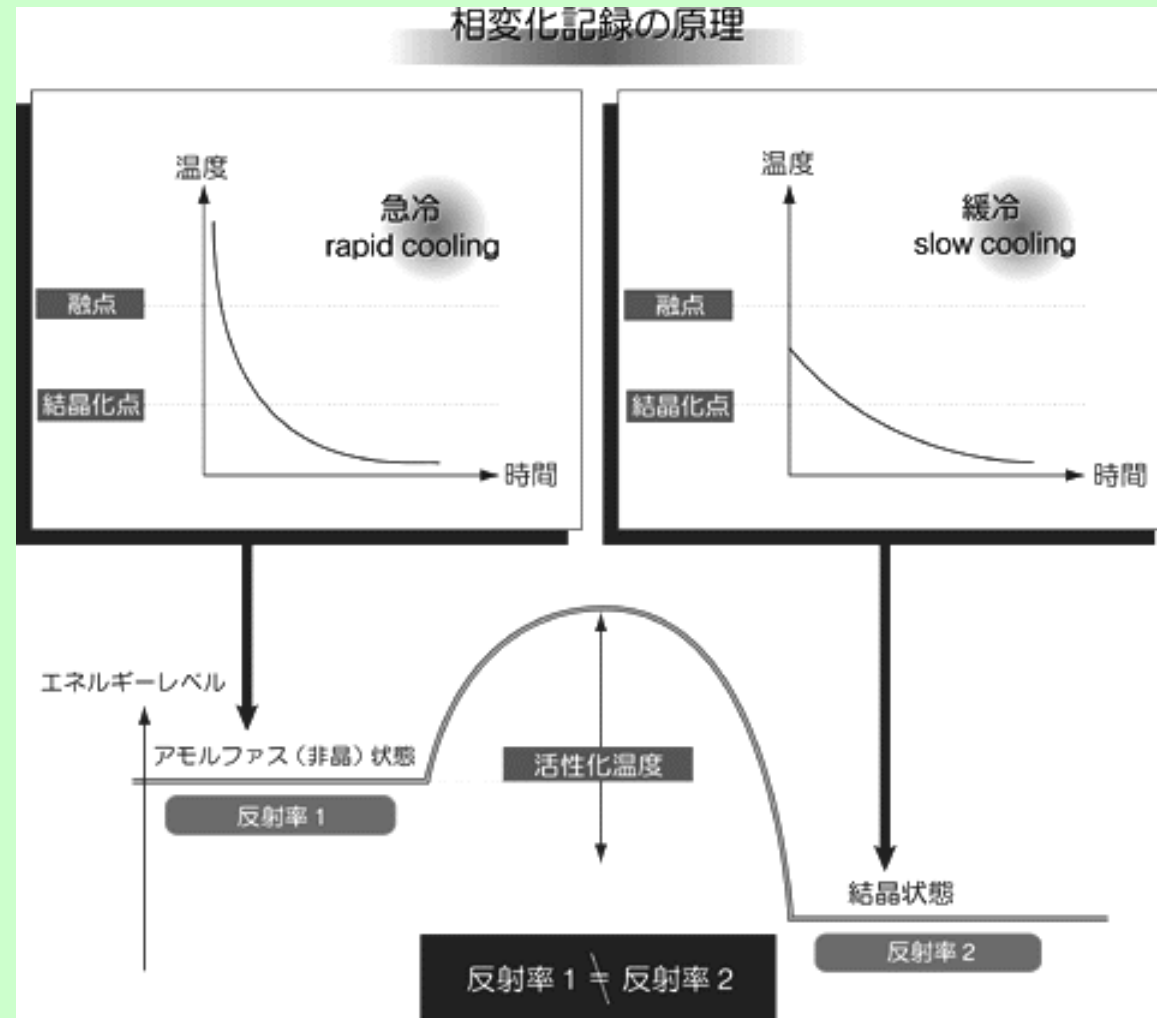


光相変化記録

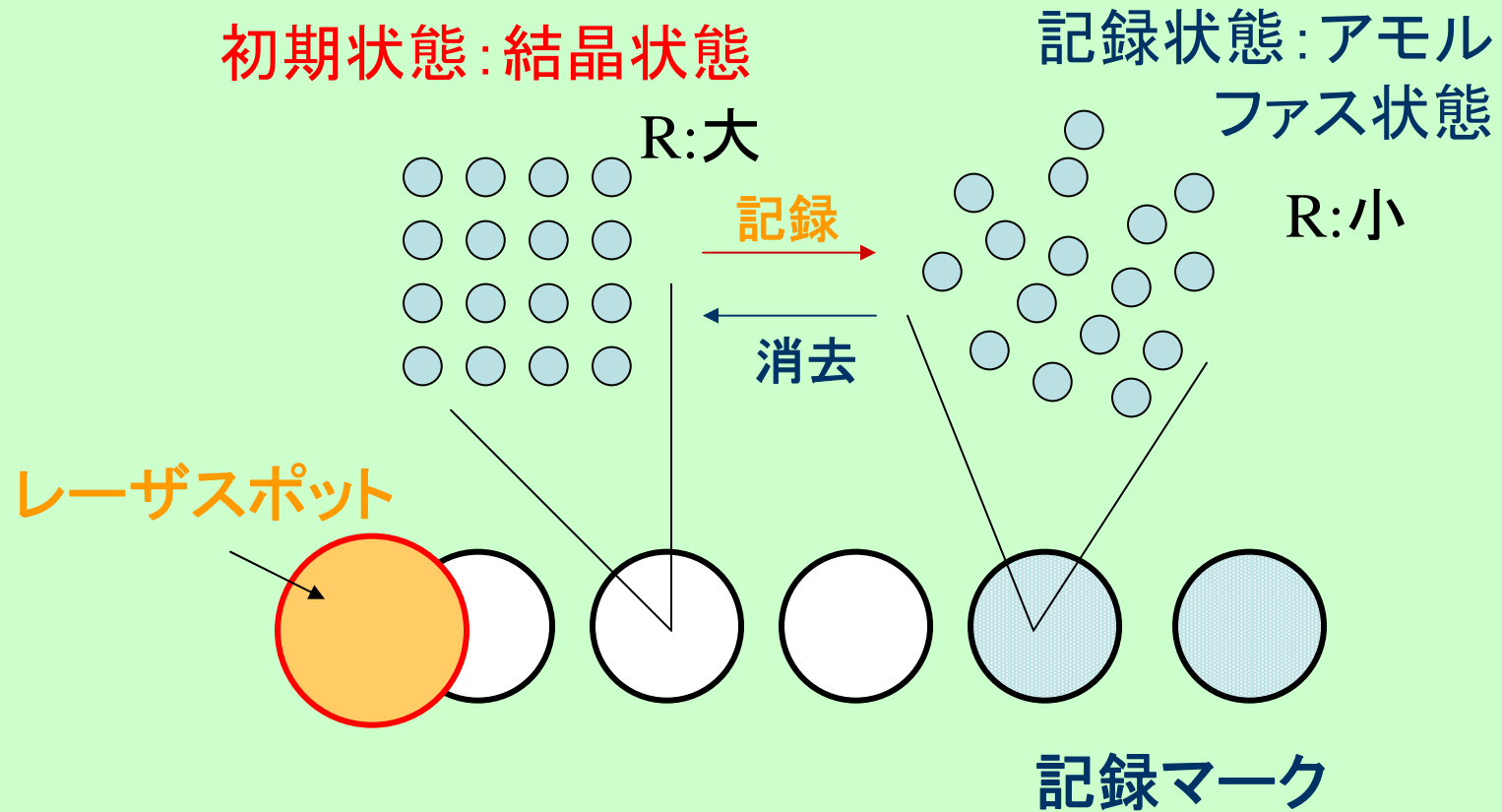
- アモルファス/結晶の相変化を利用
 - 書換可能型 成膜初期状態のアモルファスを熱処理により結晶状態に初期化しておきレーザー光照射により融点 T_m (600°C)以上に加熱後急冷させアモルファスとして記録。消去は結晶化温度 T_{cr} (400°C)以下の加熱緩冷して結晶化。
 - Highレベル: T_m 以上に加熱→急冷→アモルファス
 - Lowレベル: T_{cr} 以上に加熱→緩冷→結晶化
- DVD-RAM: GeSbTe系
- DVD±RW: Ag-InSbTe系

相変化ディスクの記録と消去

- 融点以上から急冷：
アモルファス
→低反射率
- 融点以下、結晶化
温度以上で徐冷：
結晶化
→高反射率



相変化と反射率



アモルファスとはなにか

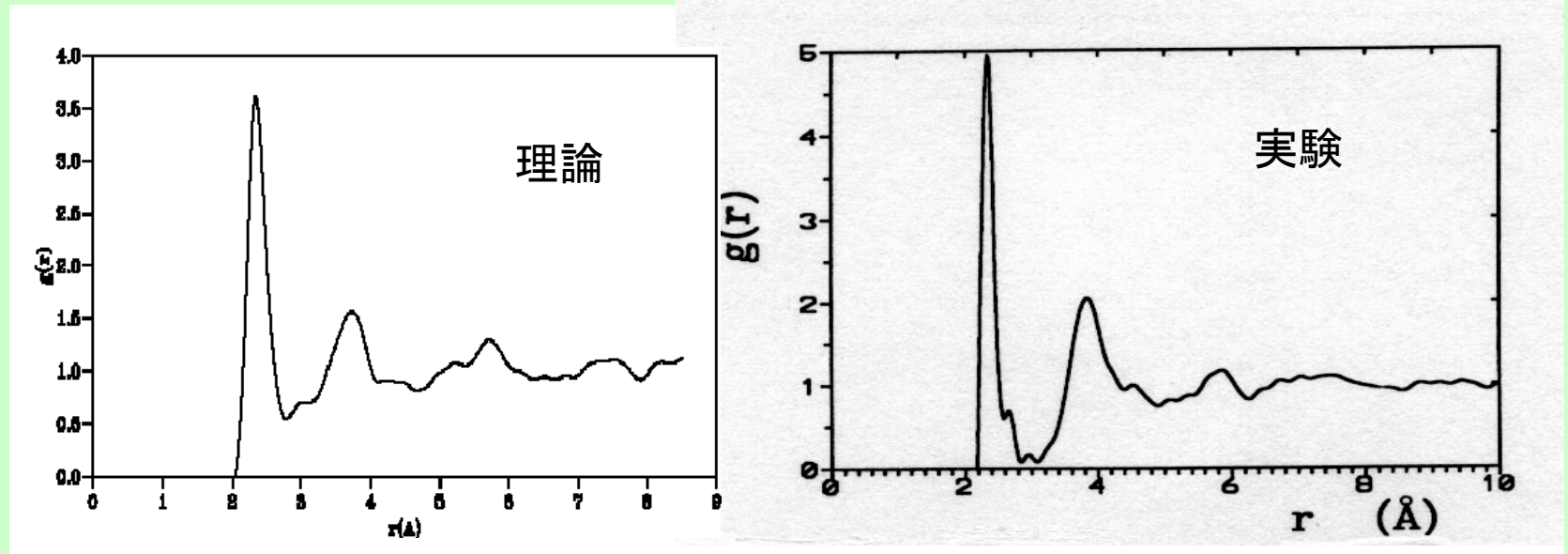
- Amorphous aは否定の接頭辞morphは形
 - 非晶質と訳される
 - 近距離秩序はあるが、結晶のような長距離秩序がない
 - 液体の原子配列が凍結した状態に近い
 - 液体の急冷により生じる準安定な状態
 - 金属合金系、カルコゲナイドガラス系、テトラヘドラル系、酸化物ガラス系などがある
 - 金属合金系の場合DRPHS (dense random packing of hard spheres)モデルで説明できる

アモルファスの特徴

- 結晶ではないので結晶粒界がなく連続
 - 大面積を均一に作れる。
 - 光の散乱が少ない
- 結晶と違って整数比でない広範な組成比が実現：
特性を最適化しやすい
- 低温成膜可能なので、プラスチック基板でもOK

動径分布関数(RDF)

- $G(r)$: 1つの原子から r の位置に隣の原子を見いだす確率



CD-R: 有機色素の利用



- 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

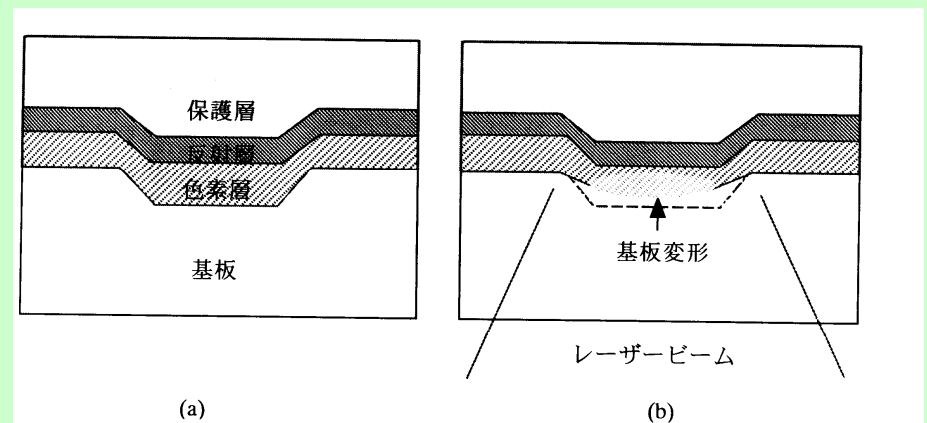
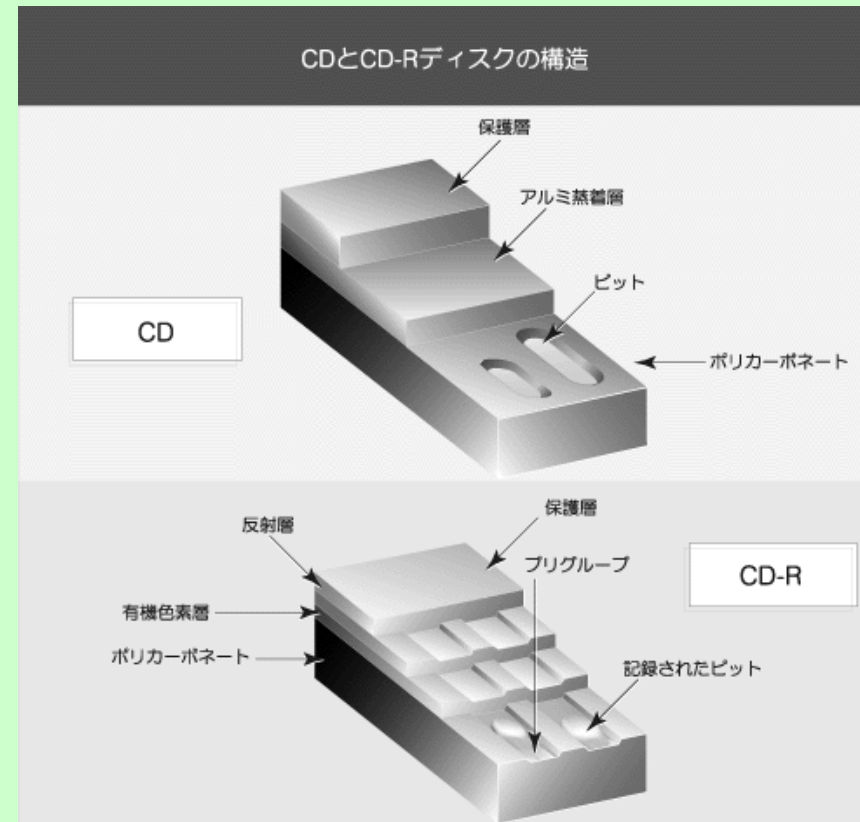


図1 未記録状態(a)、記録状態(b)を示す模式図

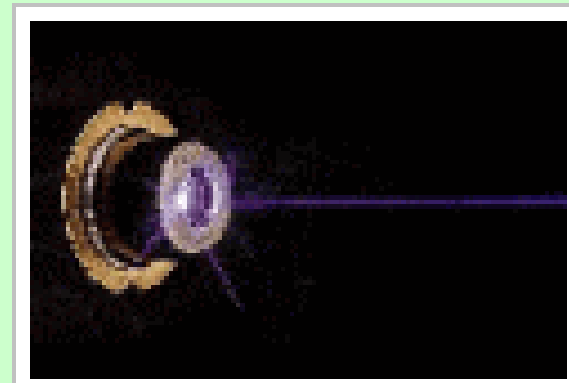
DVDファミリー

	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 ⁵	10 ³ -10 ⁴	10 ³ -10 ⁴

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。

日亜化学青紫LD



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 μ m	1.2mm(0.6mm \times 2層) 記録層0.6 μ 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 μ m	0.3-0.4 μ m
トラック構造	グループ	ランド/グループ
映像圧縮方式	MPEG-2 Video	Advanced MPEG2

BD (Blu-ray)

- 松下電器産業は、次世代記録メディアのBlu-ray ディスクに対応するPCデータ用ドライブ「LF-MB121JD」と、ノンカートリッジタイプのPCデータ用2倍速Blu-rayディスク「BD-RE」「BD-R」を発表した。ドライブの発売は6月10日で価格はオープン。

<http://journal.mycom.co.jp/news/2006/04/22/009.html>



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

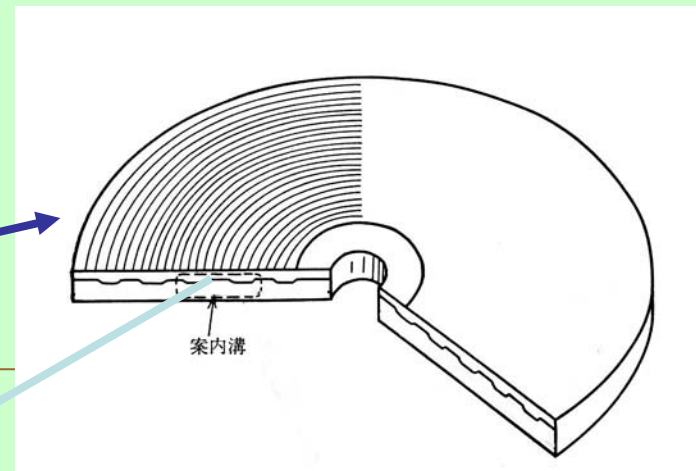
光磁気ディスク

- 記録: 熱磁気(キュリー温度)記録
- 再生: 磁気光学効果
- MO: 3.5" 128→230→650→1.3G→2.3G
- MD: 6cm audio 70 min
→Hi-MD audio 13 hr
- iD-Photo, Canon-Panasonic(5cm)

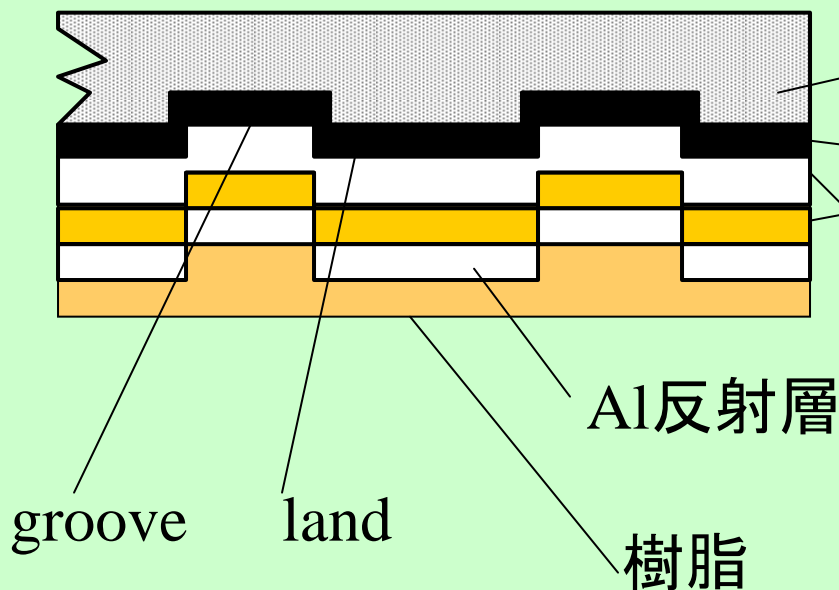
光磁気記録の歴史

- 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 3.5"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



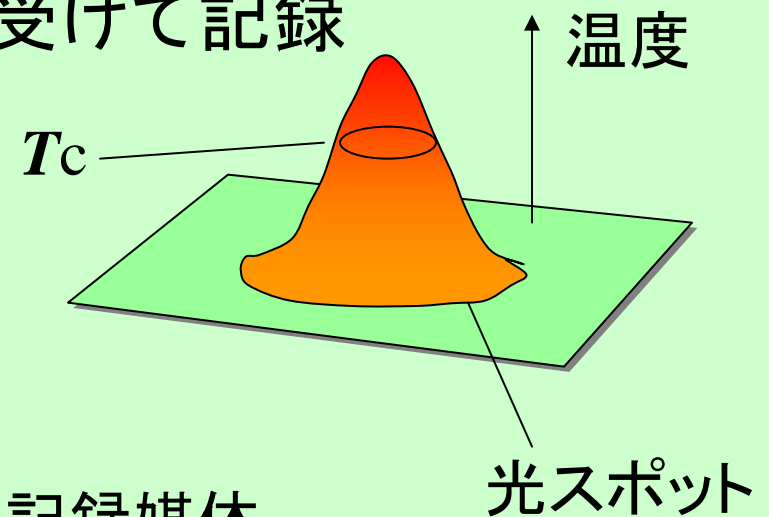
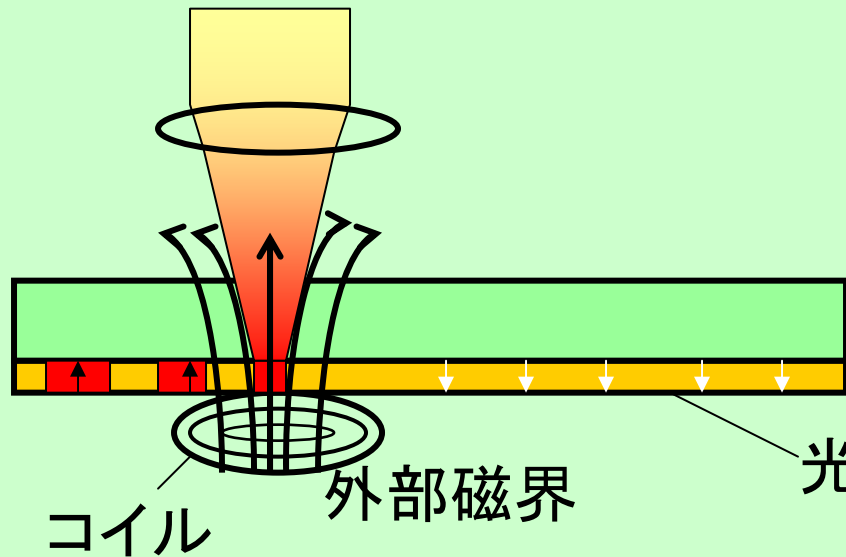
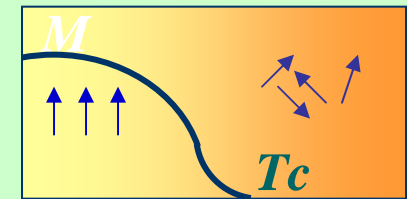
ポリカーボネート基板

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)

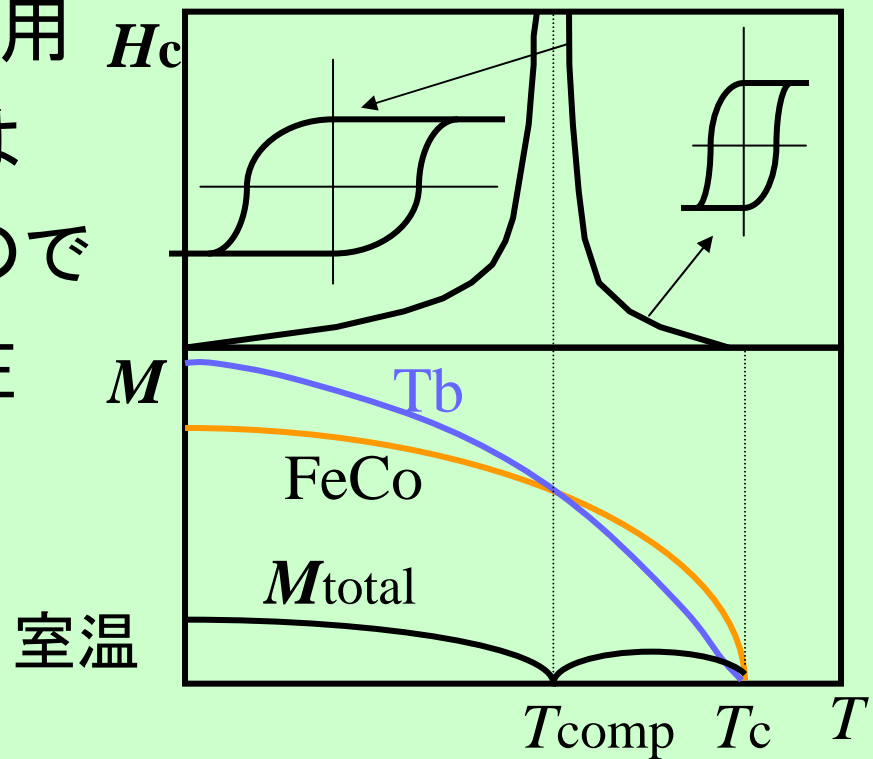
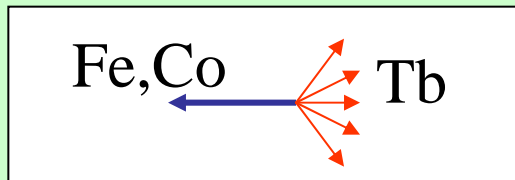
光磁気記録 情報の記録(1)

- 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
- 冷却時にコイルからの磁界を受けて記録

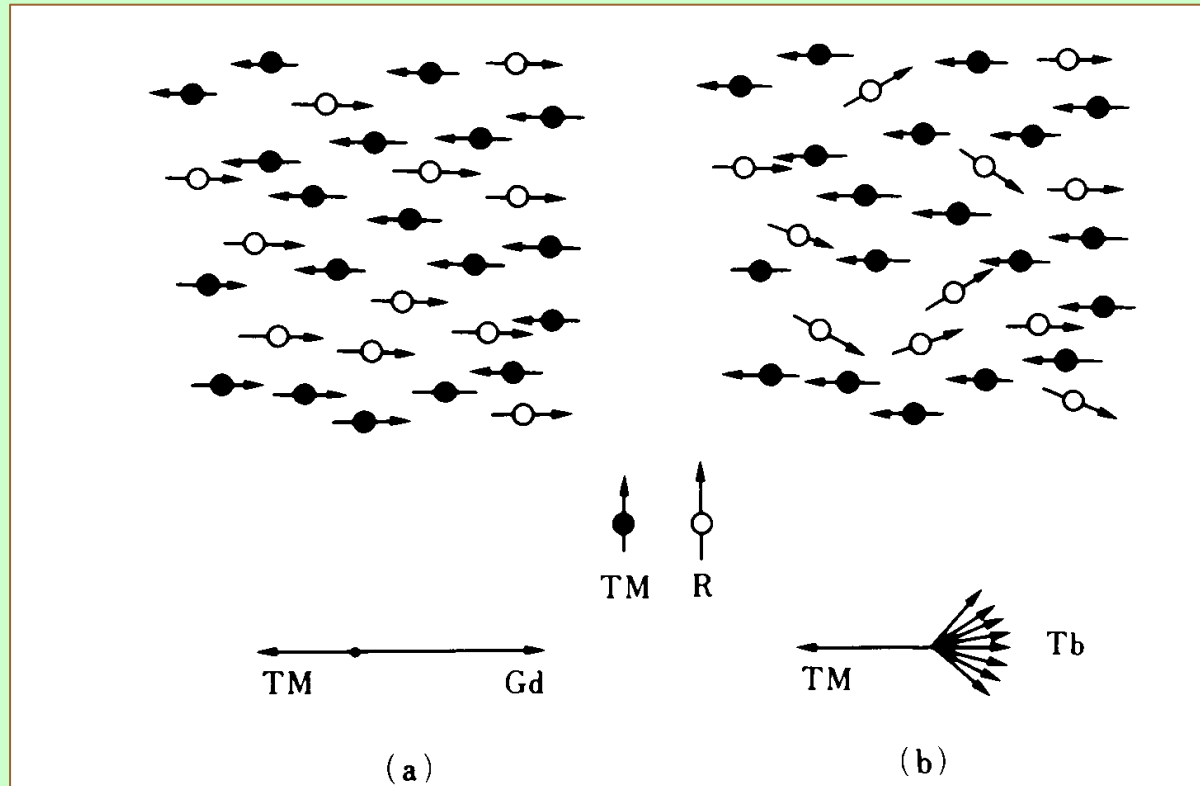


光磁気記録 情報の記録(2)

- 補償温度(T_{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_{comp} が存在
- T_{comp} で H_c 最大:
 - 記録磁区安定

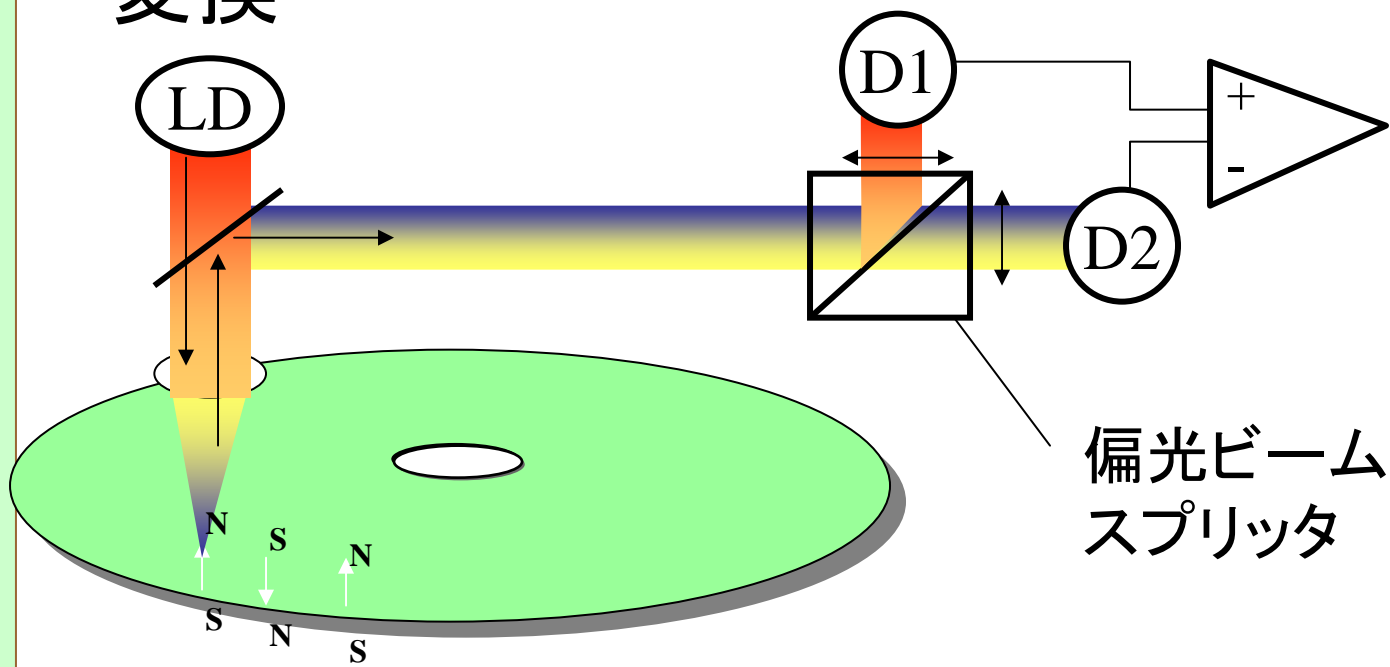


アモルファスR-TM合金



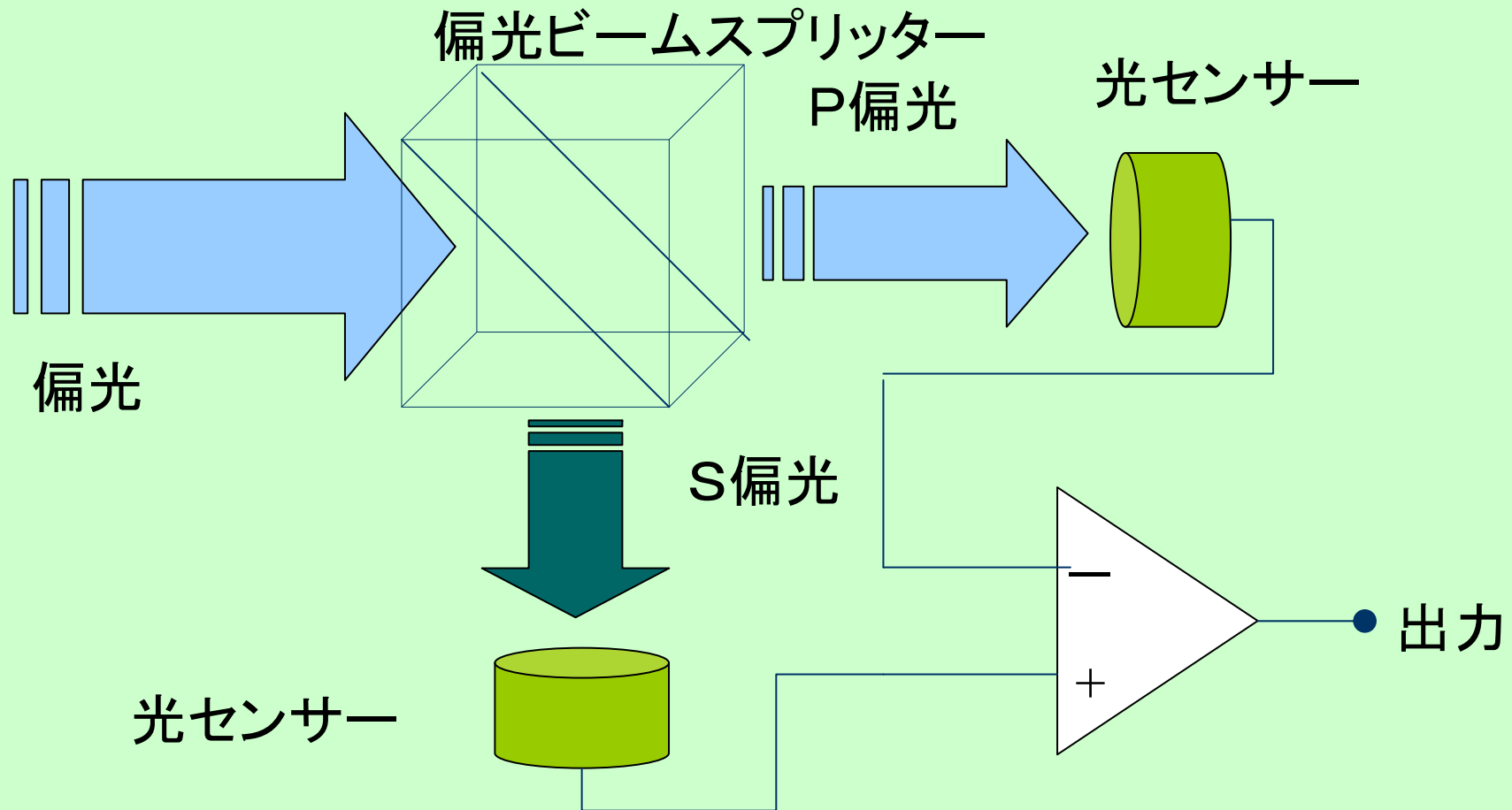
光磁気記録 情報の読み出し

- 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



MOドライブ

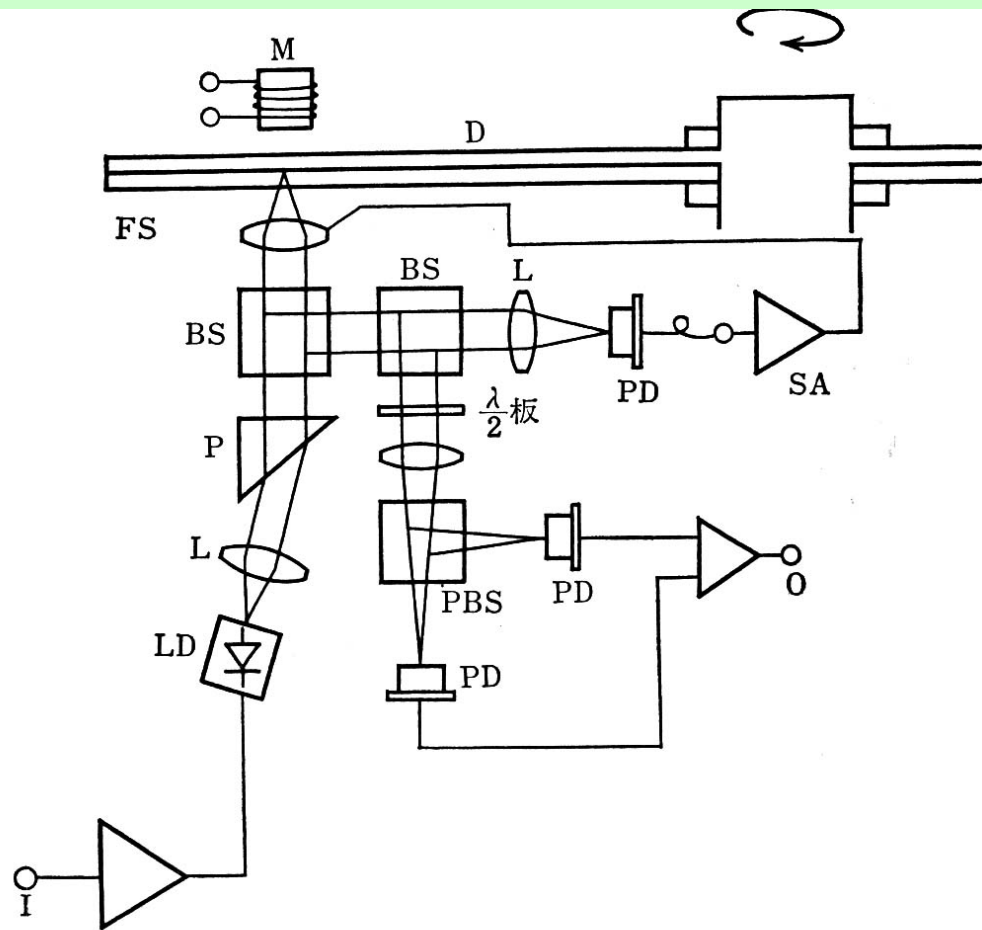
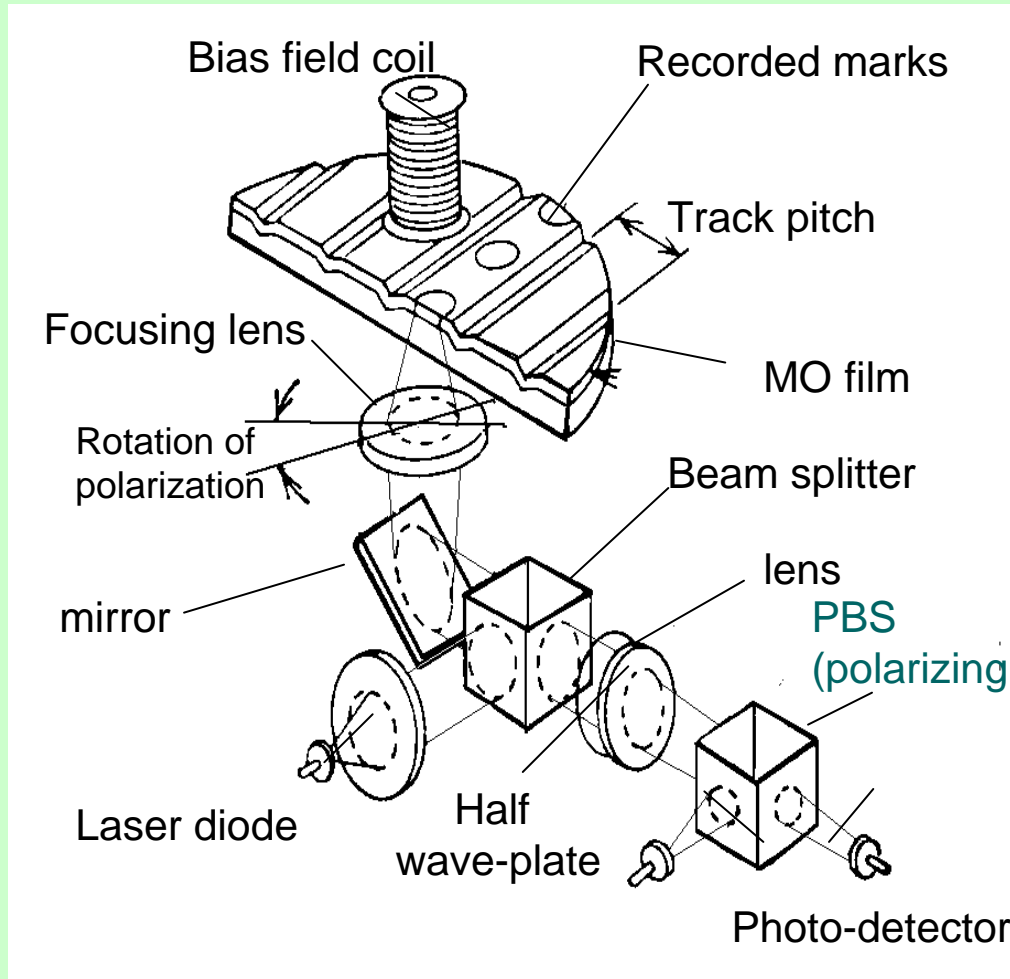


図 7.9 光磁気記録再生システムの模式図²⁰⁾

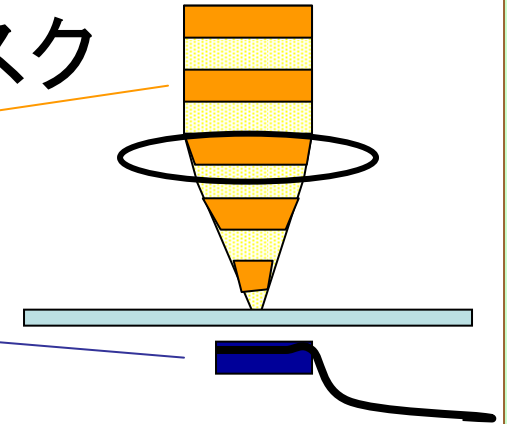
MOドライブの光ヘッド



2種類の記録方式

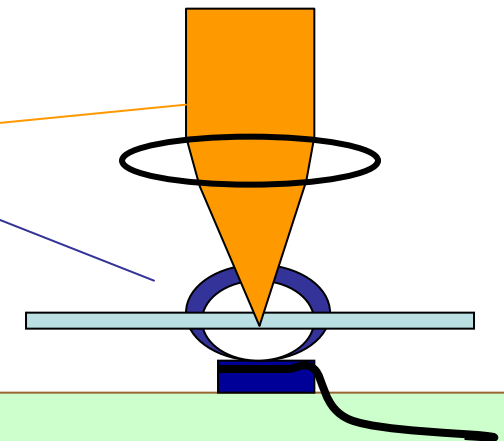
- **光強度変調(LIM):** 現行のMOディスク

- 電気信号で光を変調
- 磁界は一定
- ビット形状は長円形

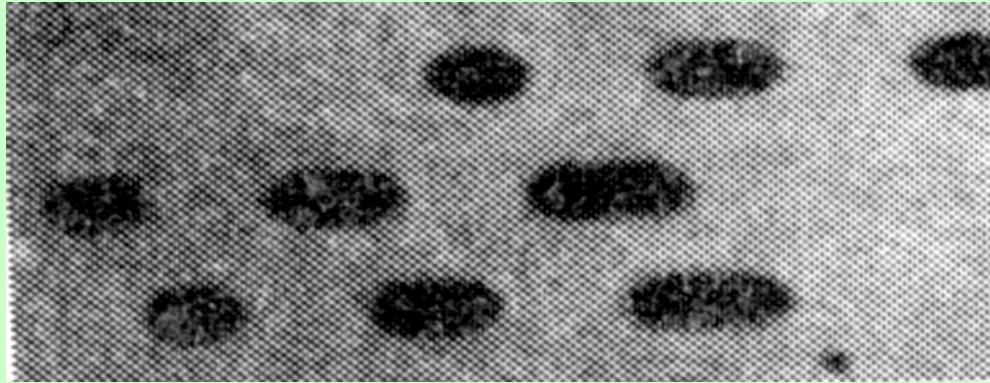


- **磁界変調(MFM):** 現行MD, iD-Photo

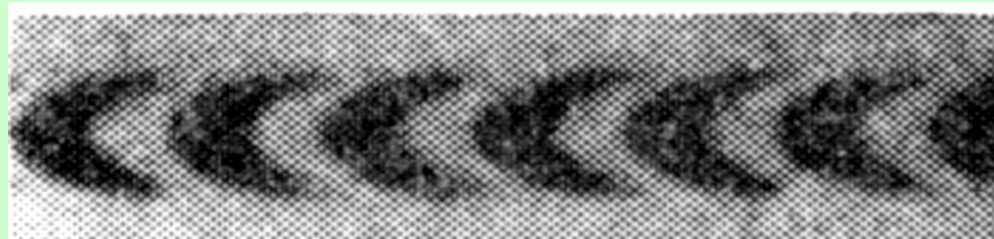
- 電気信号で磁界を変調
- 光強度は一定
- ビット形状は矢羽形



記録ビットの形状

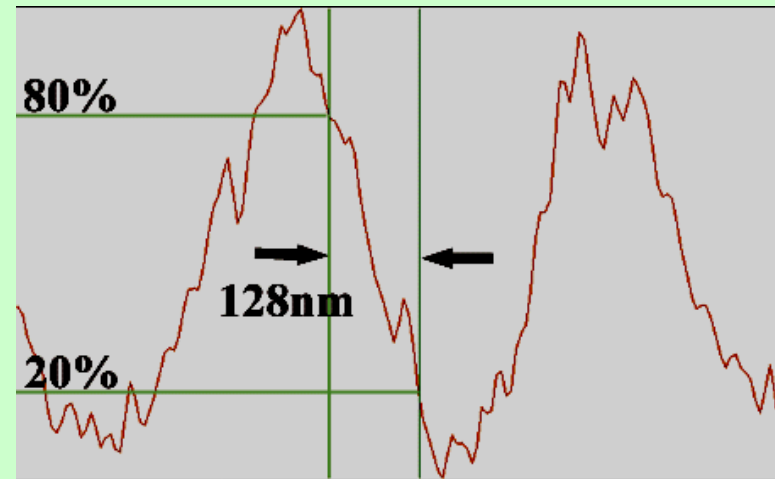
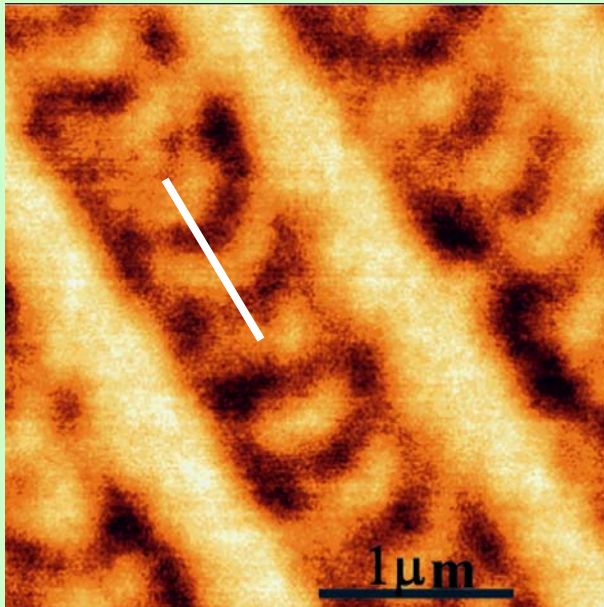


(a)



(b)

MO-SNOMで見た記録マーク

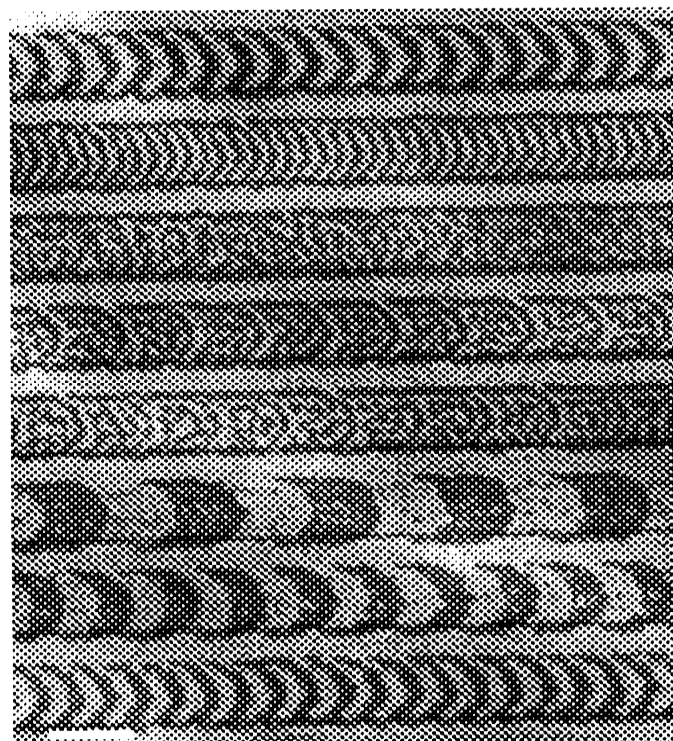


佐藤勝昭:応用物理69 [10] (2000) 1220-1221

SNOM:近接場顕微鏡

FeのL₃吸収端のXMCDを用いて 観測したMO媒体の磁区像

SiN(70nm)/ TbFeCo(50nm)/SiN(20nm)/
Al(30nm)/SiN(20nm) MO 媒体



mark/space

0.2/0.2

0.1/0.1

0.05/0.05

0.1/0.7

0.05/0.75

0.8/0.8

0.4/0.4

0.2/0.2

1 μm

μm

N. Takagi, H. Ishida, A. Yamaguchi, H. Noguchi, M. Kume, S. Tsunashima, M. Kumazawa, and P. Fischer: Digest Joint MORIS/APDSC2000, Nagoya, October 30-November 2, 2000, WeG-05, p.114.

XMCD: X線磁気円二色性

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 $d=0.28$ μm 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 $d=0.28$ μm としビット長を $d/2=0.14$ μm とすると 16 Gb/in²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/in²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/in²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/in²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

発展的学習

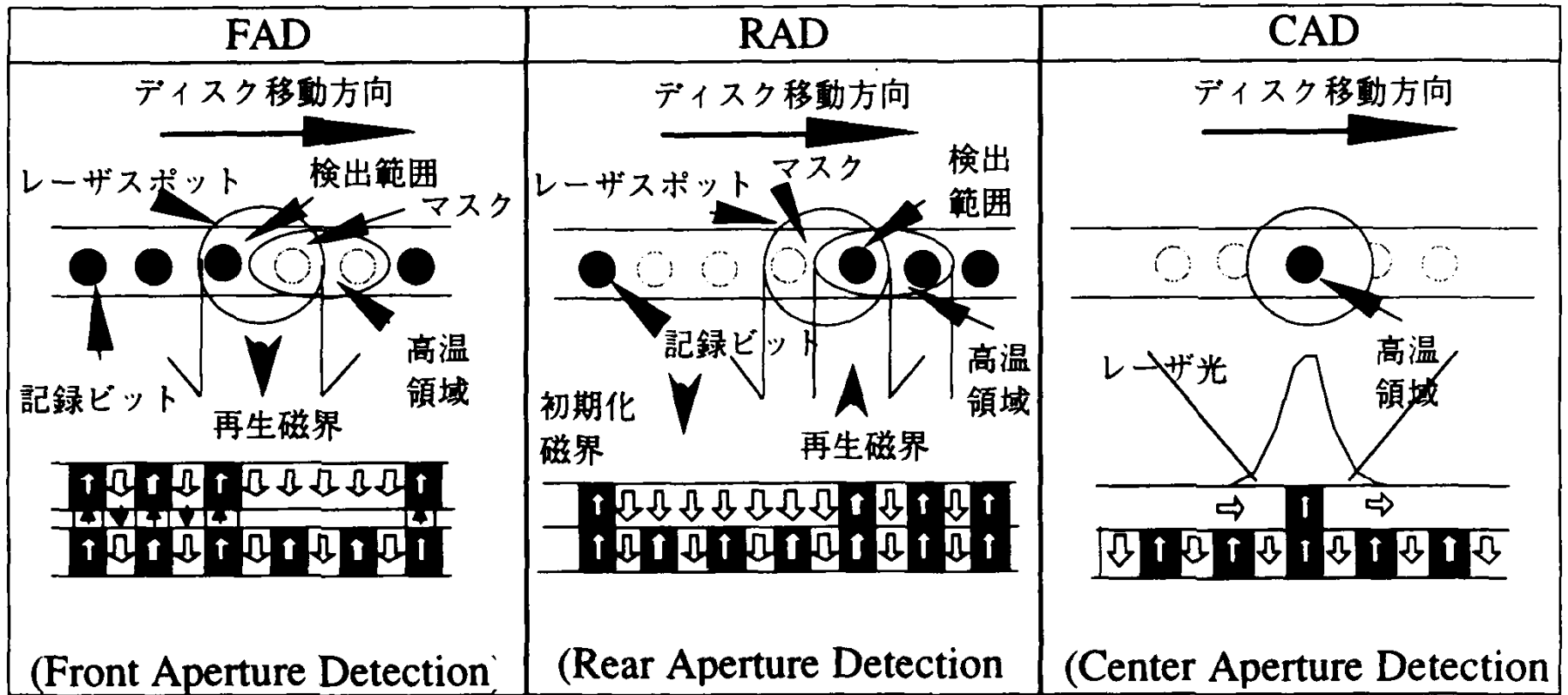
磁気誘起超解像技術(MSR)

- 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/in²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/in²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.*

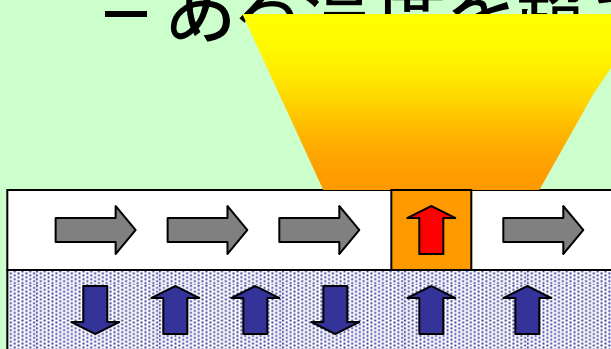
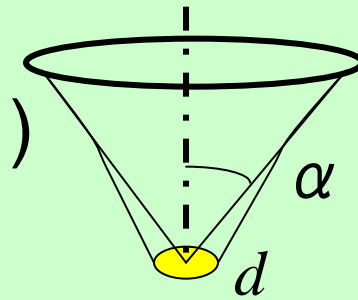
[2] S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: *J. Magn. Soc. Jpn. 23, Suppl. S1 (1999) 173*

発展的学習 MSR方式の図解

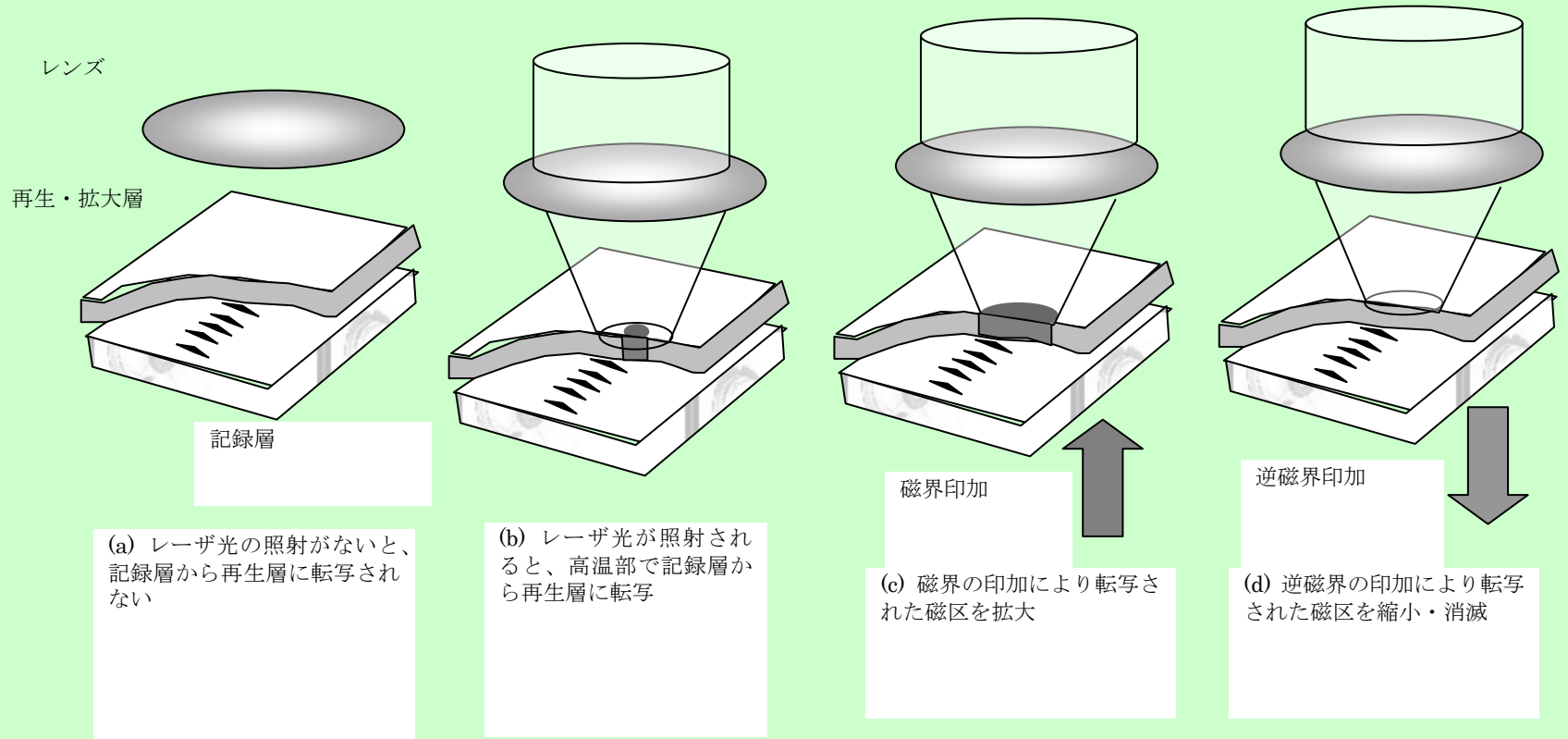


発展的学習 CAD-MSR

- 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



発展的学習 MAMMOS (磁区拡大 MO システム)



発展的学習

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2004.1.8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

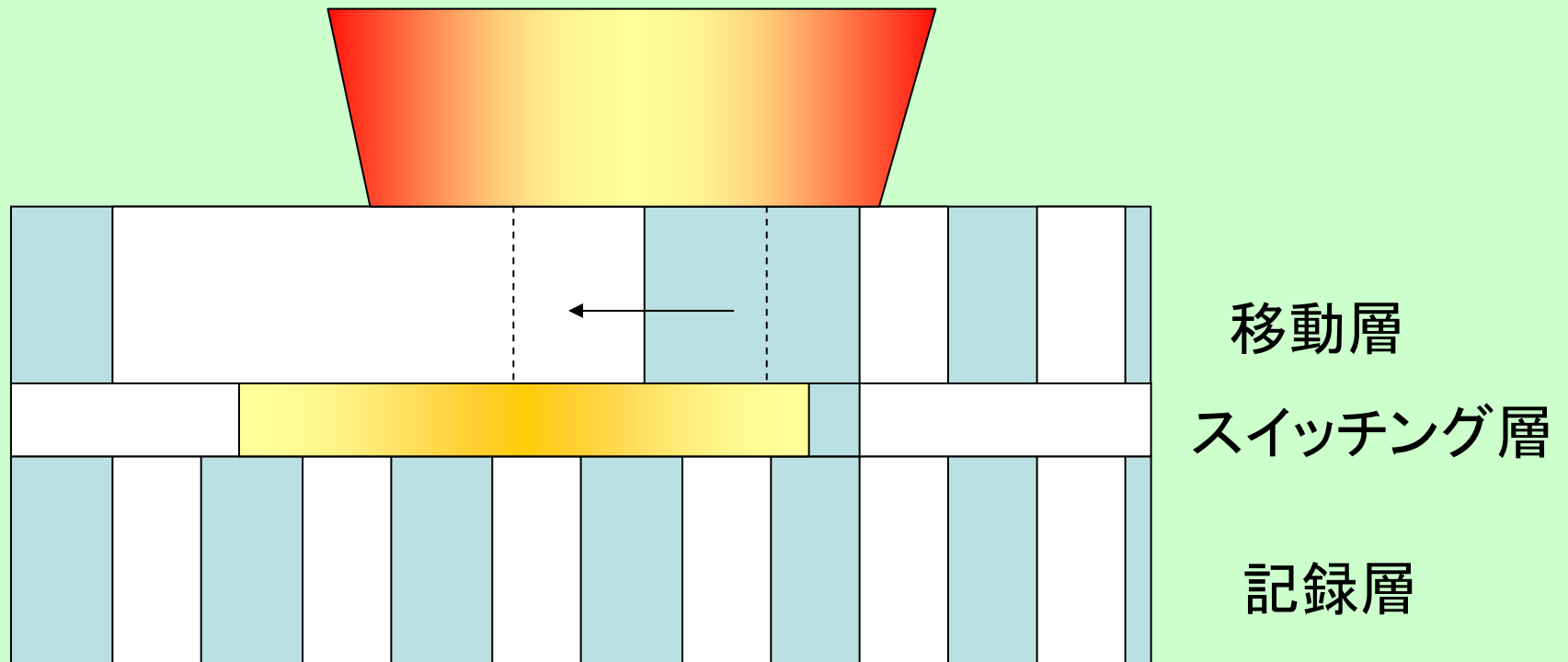
発展的学習

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
- まるでゴムで引っばられるように、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。

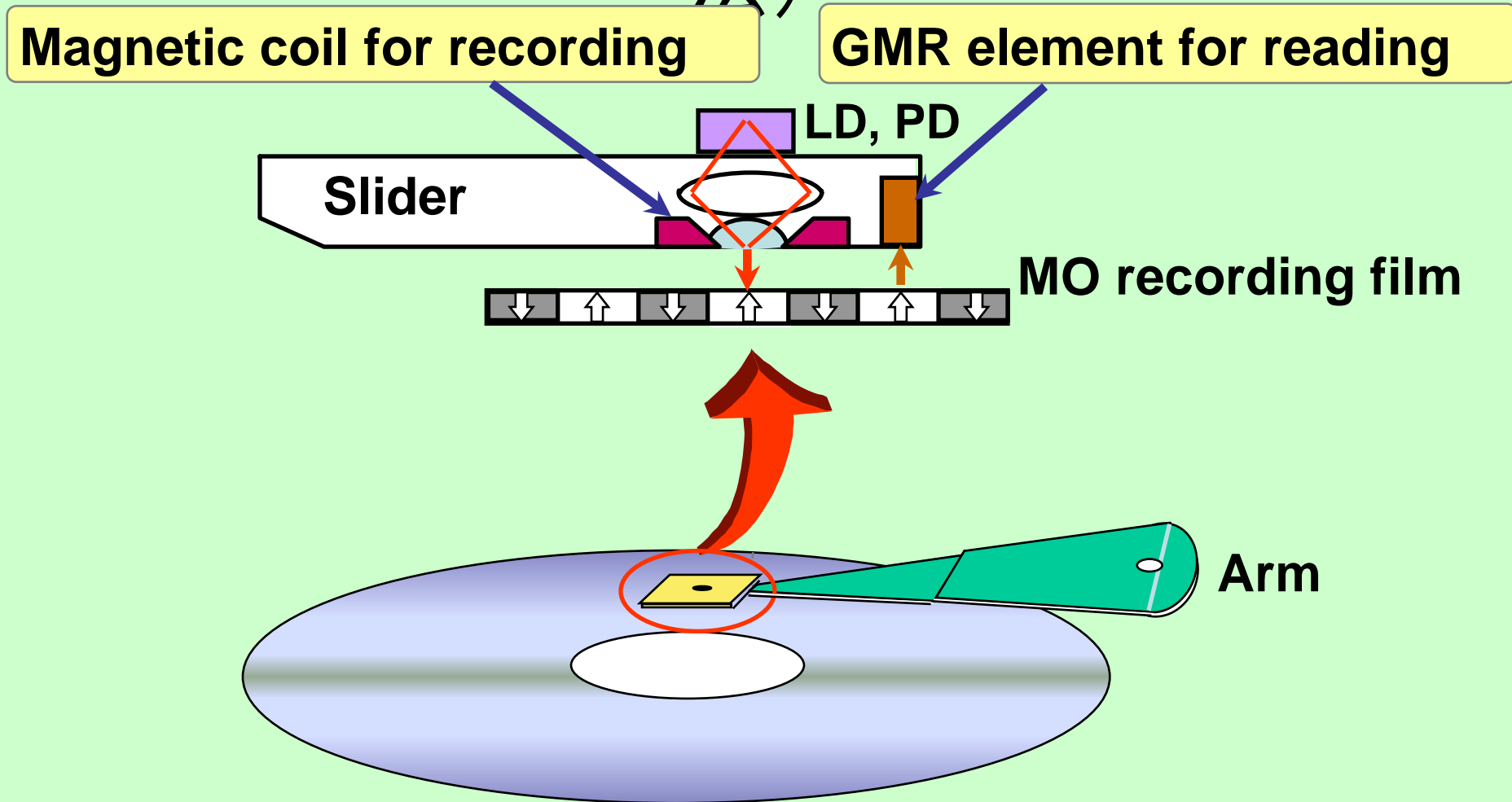
発展的学習 DWDD概念図

原理的には再生上の分解能の限界がない。



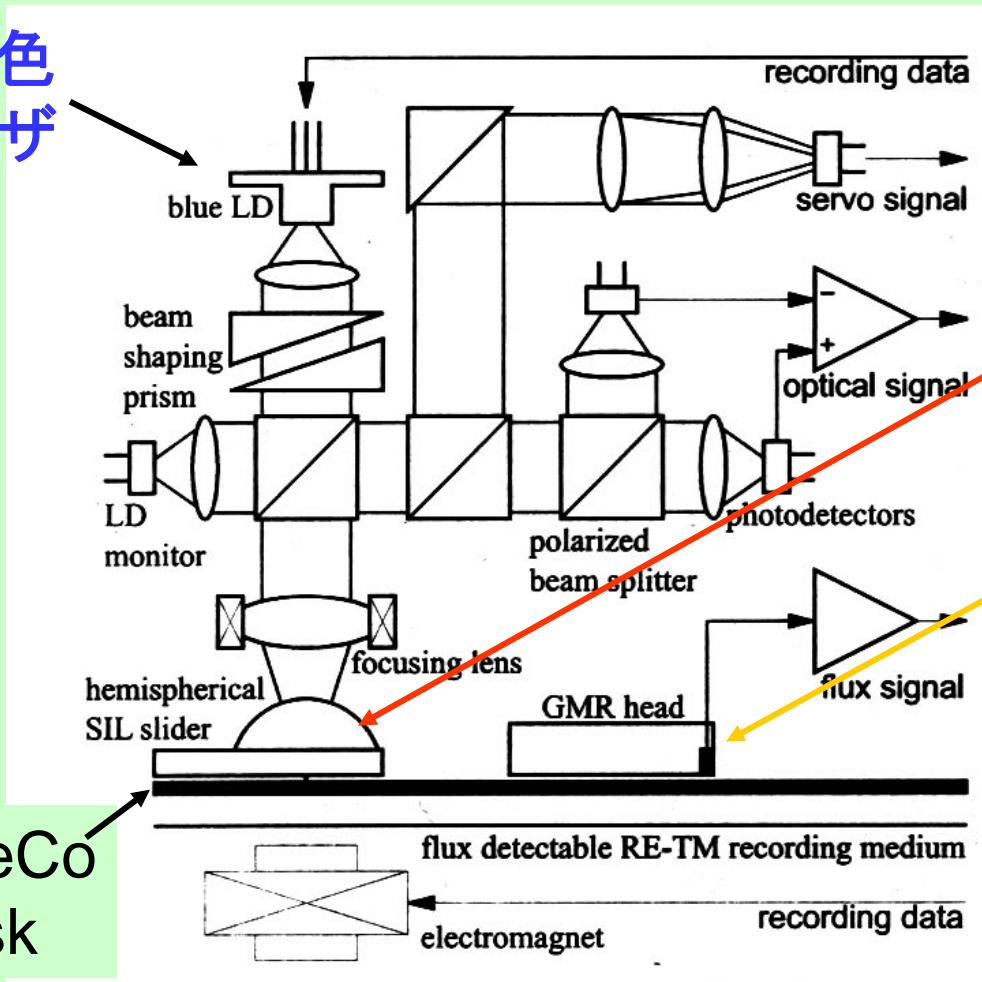
発展的学習

熱アシスト磁気記録(熱磁気記録/磁束検出法)



発展的学習 熱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

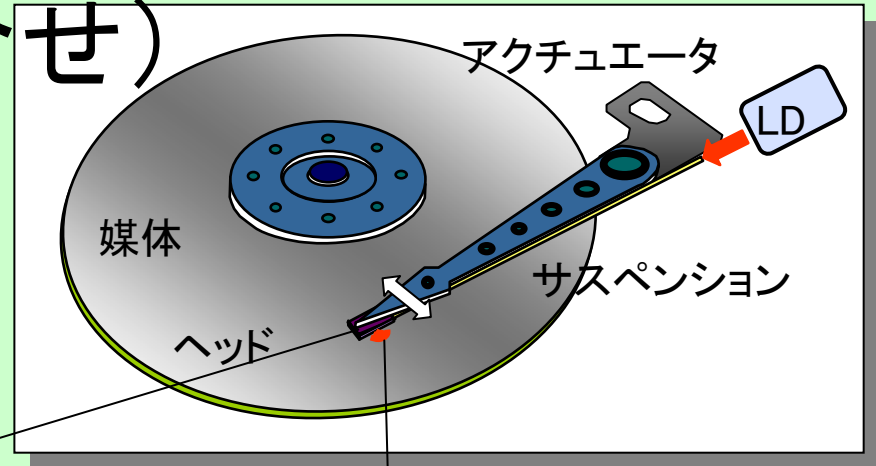
TbFeCo
disk

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

発展的学習

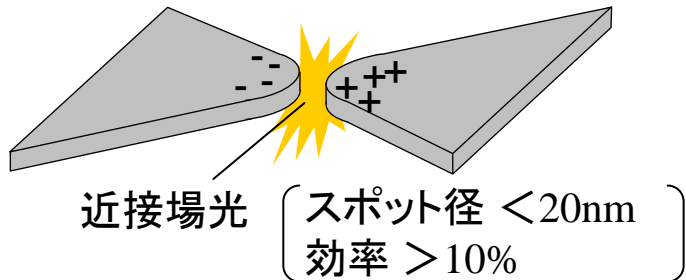
ハイブリッドヘッド（記録・再生の最適な組合せ）

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



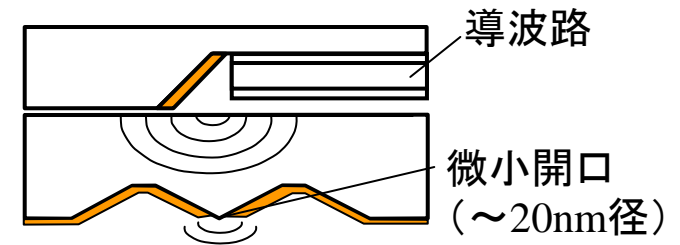
近接場光記録ヘッド + 近接場光再生ヘッド

プレーナ・プラズモンヘッド（記録）



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

発展的学習

ホログラフィ

- ホログラフィというのは、光の波面のもつ位相の情報を干渉によって強度に変換して媒体に記録する技術である。このアイディアはGaborが1948年に理論的に導いたが、光によるホログラフィが実現したのは、1960年代にコヒーレントなレーザが開発されてからである。



Dennis Gabor
b. June 5, 1900, Budapest, Hungary
d. February 8, 1979, London, England

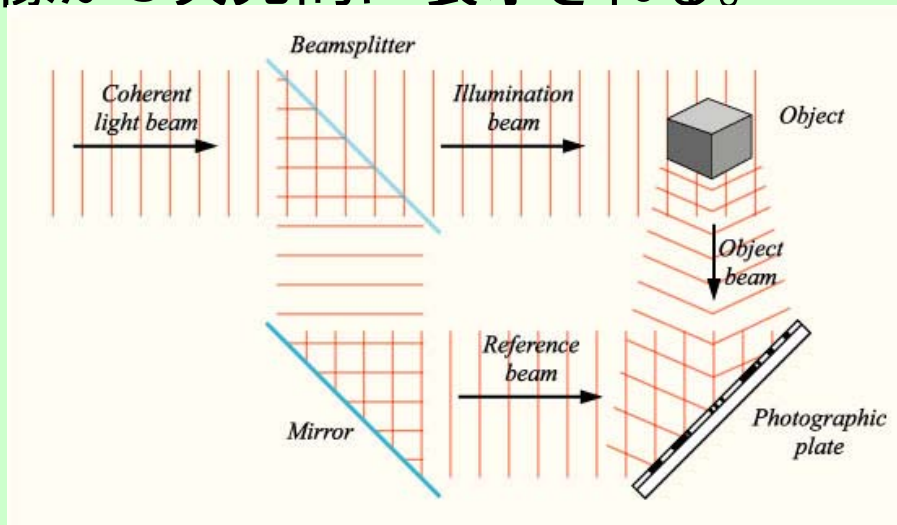


Dennis Gabor (left) receiving his Nobel prize in 1971

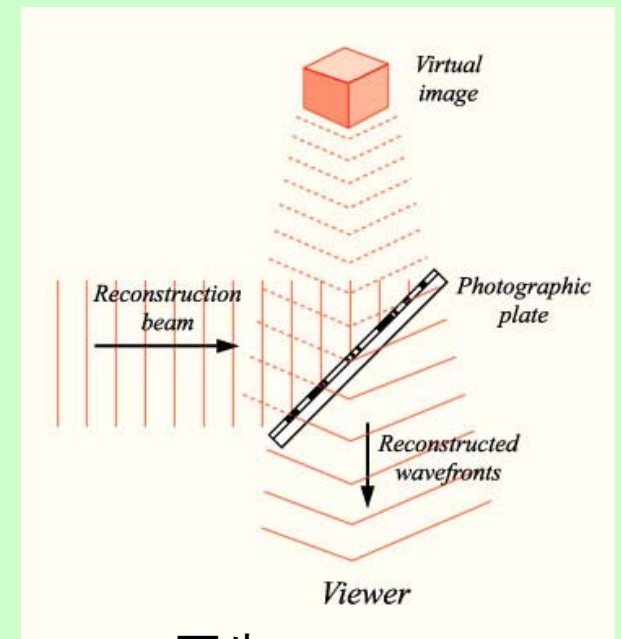
http://www.geocities.com/neveyaakov/electro_science/gabor.html

ホログラフィの原理

- 光の波面の位相情報を記録するために、物体からの光と参照光を重ね合わせてできる干渉縞を利用する。参照光は記録の対象となる物体を照らす光と同じ光源でなければならない。これは普通の写真フィルムに記録される。これらの干渉縞はフィルム上に回折格子を形成する。フィルム上の干渉縞に参照光を照らすと物体の虚像が3次元的に表示される。



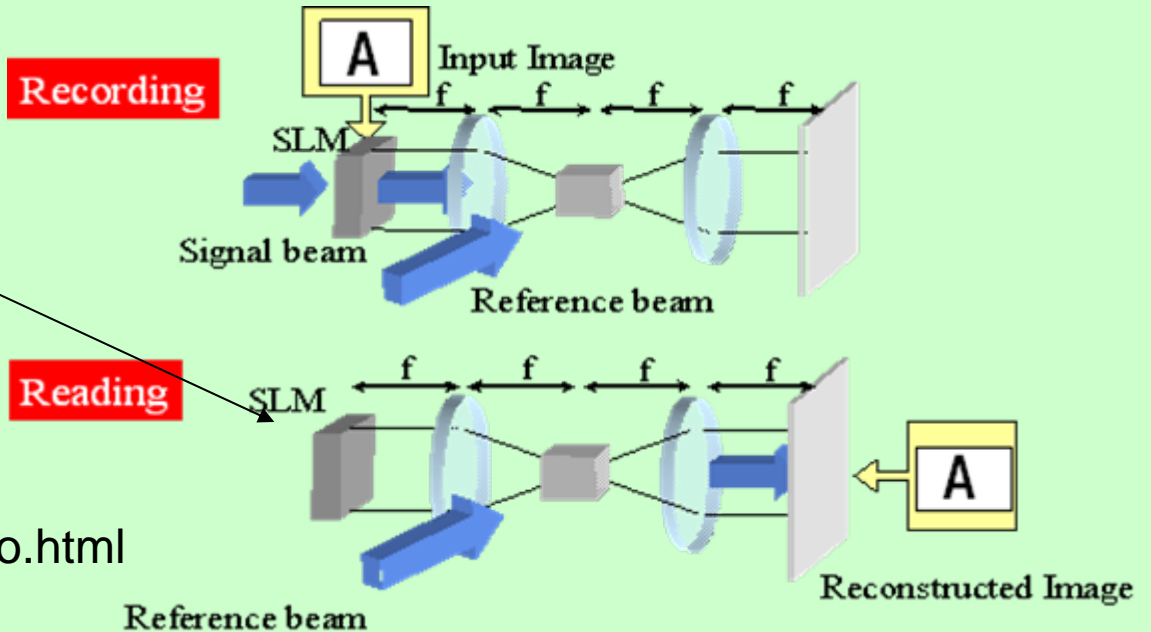
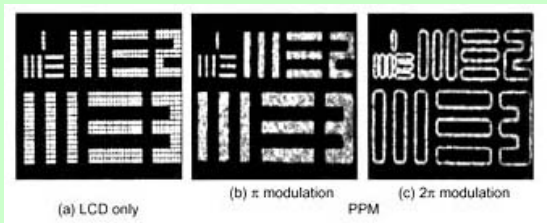
記録(ホログラムの作製)



再生

ホログラフィックメモリ

- ホログラフィを情報ストレージに用いるには、情報を空間的に表示するための「空間光変調器(SLM)」が必要である。
- SLMとしては、通常、液晶が使われるが、強誘電体の電気光学効果や磁性体の磁気光学効果を利用したSLMも開発されている。



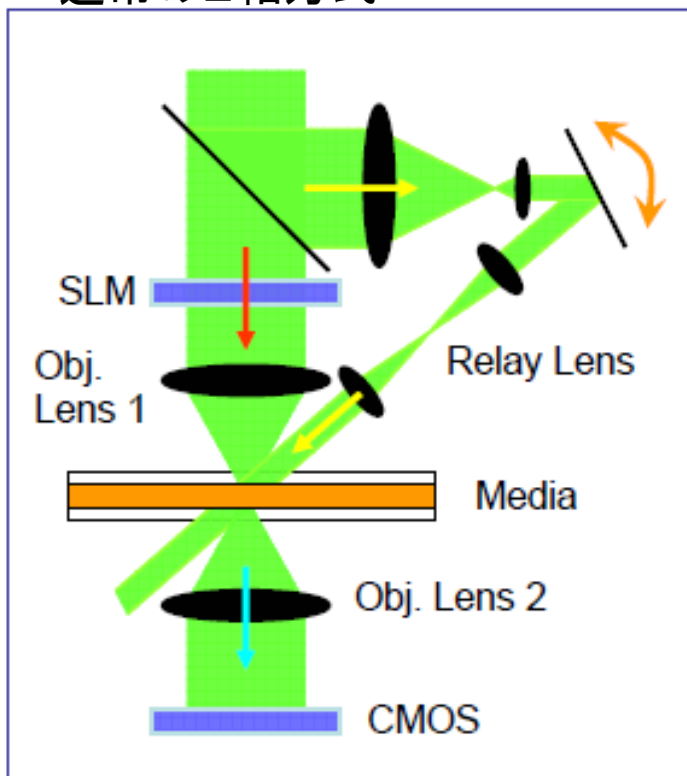
日経エレクトロニクス2005年1月17日号

ホログラフィック媒体 2006年に200Gバイトを実現

- ・ 「究極の光メモリ」といわれ、これまで何十年もの間、研究開発が進められてきたにもかかわらず、いまだに実用化されていないホログラフィック記録再生技術。しかし、ここにきてBlu-ray DiscやHD DVDなど次世代光ディスクの次を担う光ディスク技術として注目を集めている。火付け役の一社がオプトウエアである。
- ・ 同社の提案する「コリニア・ホログラフィ方式」は1つの対物レンズを使って記録再生が可能で、光軸の異なる従来の「二光束干渉法」よりも光学系を簡素化できる。記録位置を調整するサーボ技術もCDやDVDの技術を流用可能である。2006年前半にまず業務用途での製品化を狙う同社は、必要な各種のマージンの確保にメドを付けた。

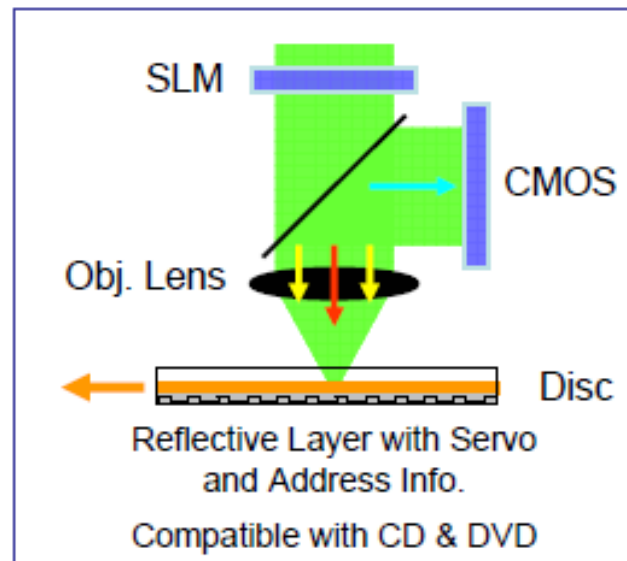
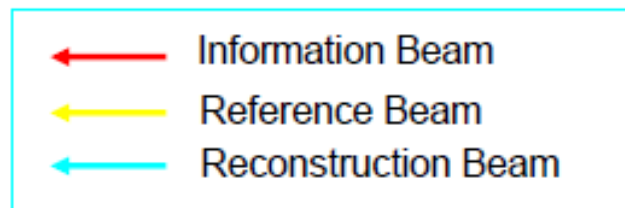
ホログラフィックメモリ

通常の2軸方式



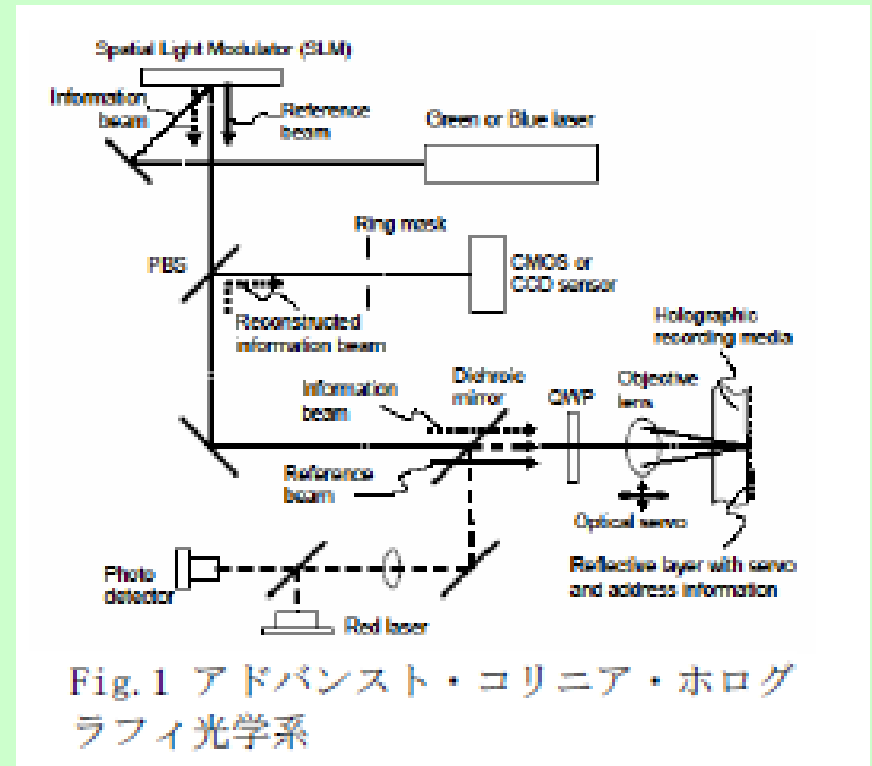
2-Axis Holography

コリニア方式



Collinear Holography

- “偏光コリニアホログラフィー方式”は、オプトウェア社が独自開発したもので、“参照光”と“信号光”を同軸上に配置し、1つの対物レンズでメディア上に照射する方式で、データを干渉縞による体積ホログラムとして記録する。



ホログラフィック・ディスクとカード

- HVD(ホログラフィ多用途ディスク)
- HVC(ホログラフィ多用途カード)
- オプトウェア社はコリニア方式によるHVD,HVCを開発しており、HVCは2006年度中に発売するという。



第2部 光通信と材料

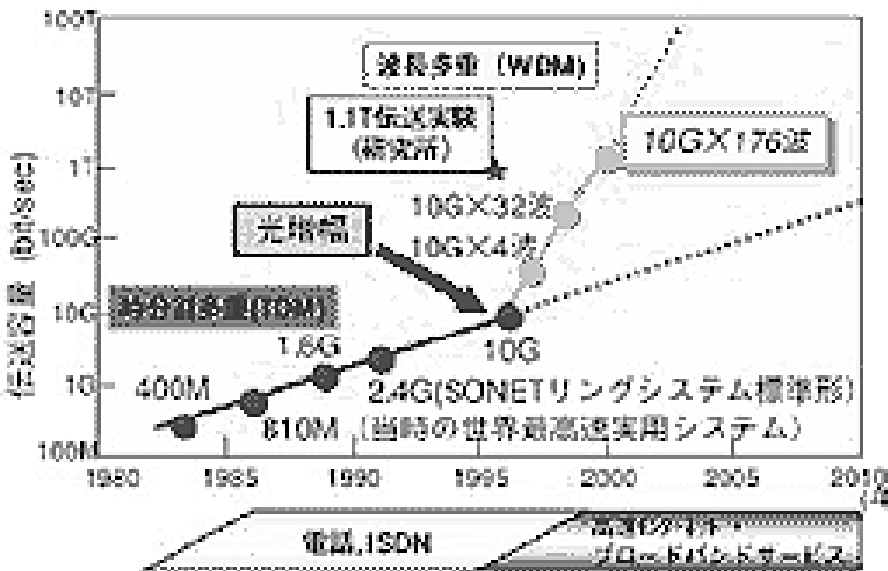


この講義で学ぶこと

- 光ファイバー通信と光エレクトロニクス
- 光ファイバー通信とは？
- 光ファイバー通信用要素技術
 - 送信機：半導体レーザーについて
 - 伝送路：光ファイバーについて
 - 受信機：フォトダイオード
 - 波長多重(WDM)
 - 光増幅器：EDFAについて
 - 光アイソレータについて

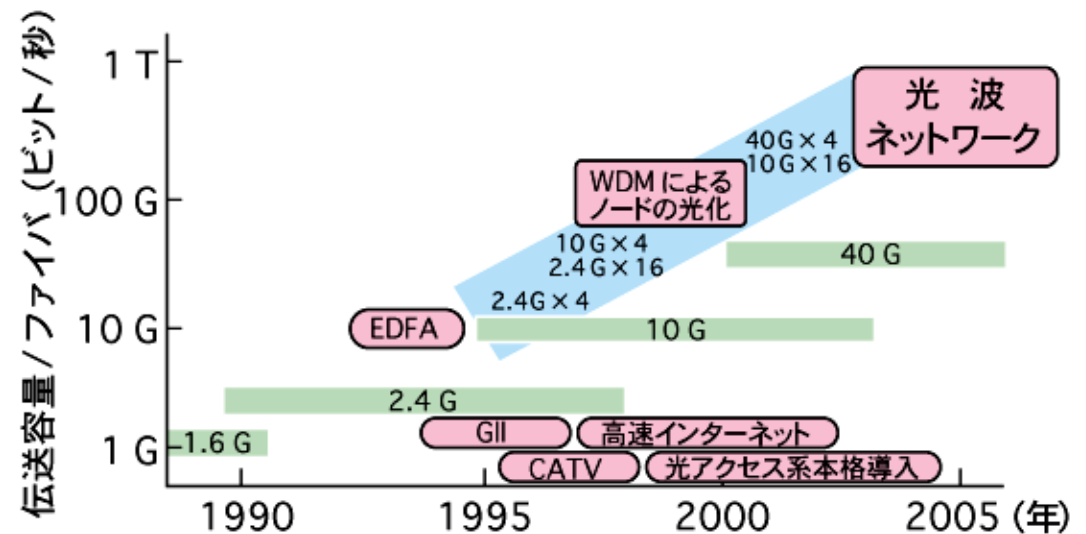
光通信システムの進展

光ファイバ通信大容量化の進展



http://www.sgkz.or.jp/nenpoh/34_sangyo/002.html

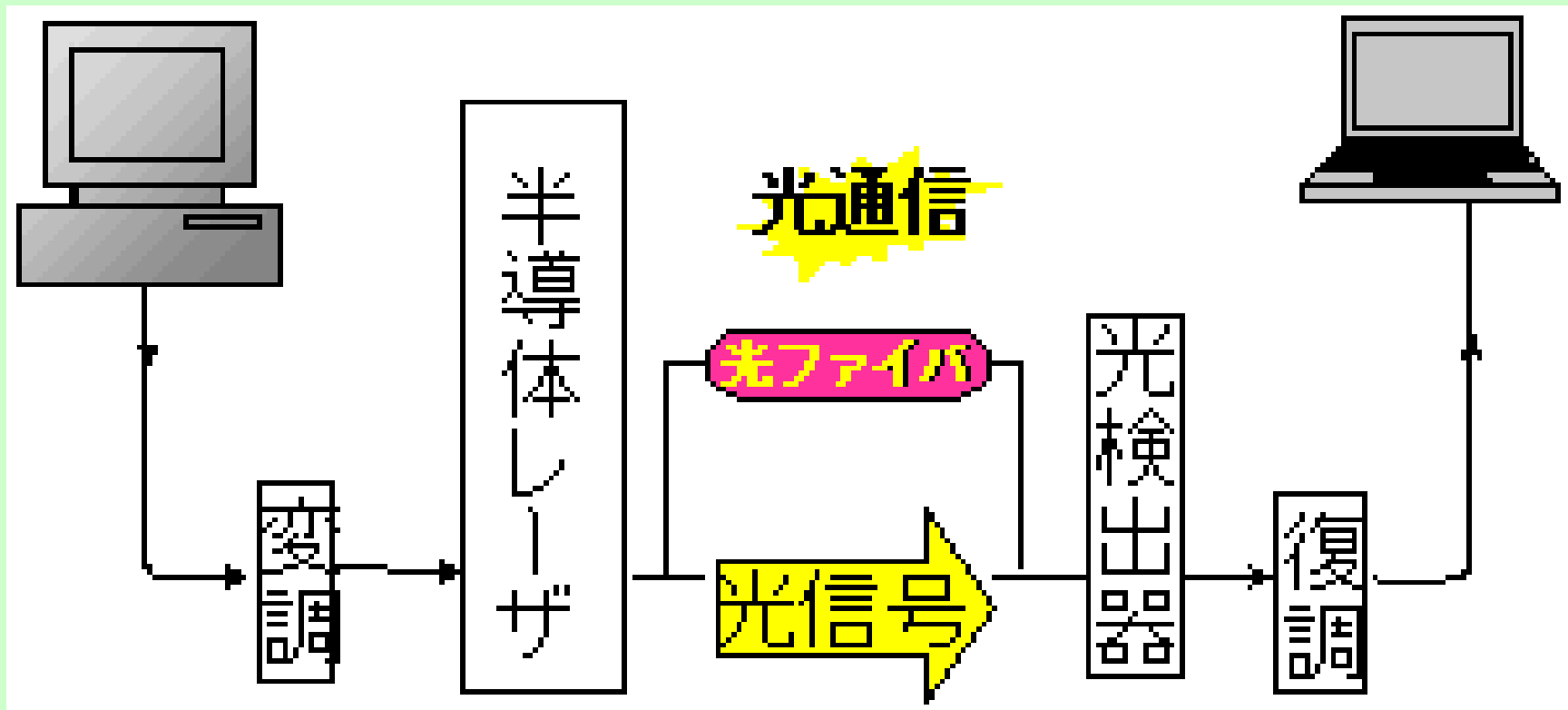
図-1 光通信システムの展開



<http://magazine.fujitsu.com/vol48-3/6.html>

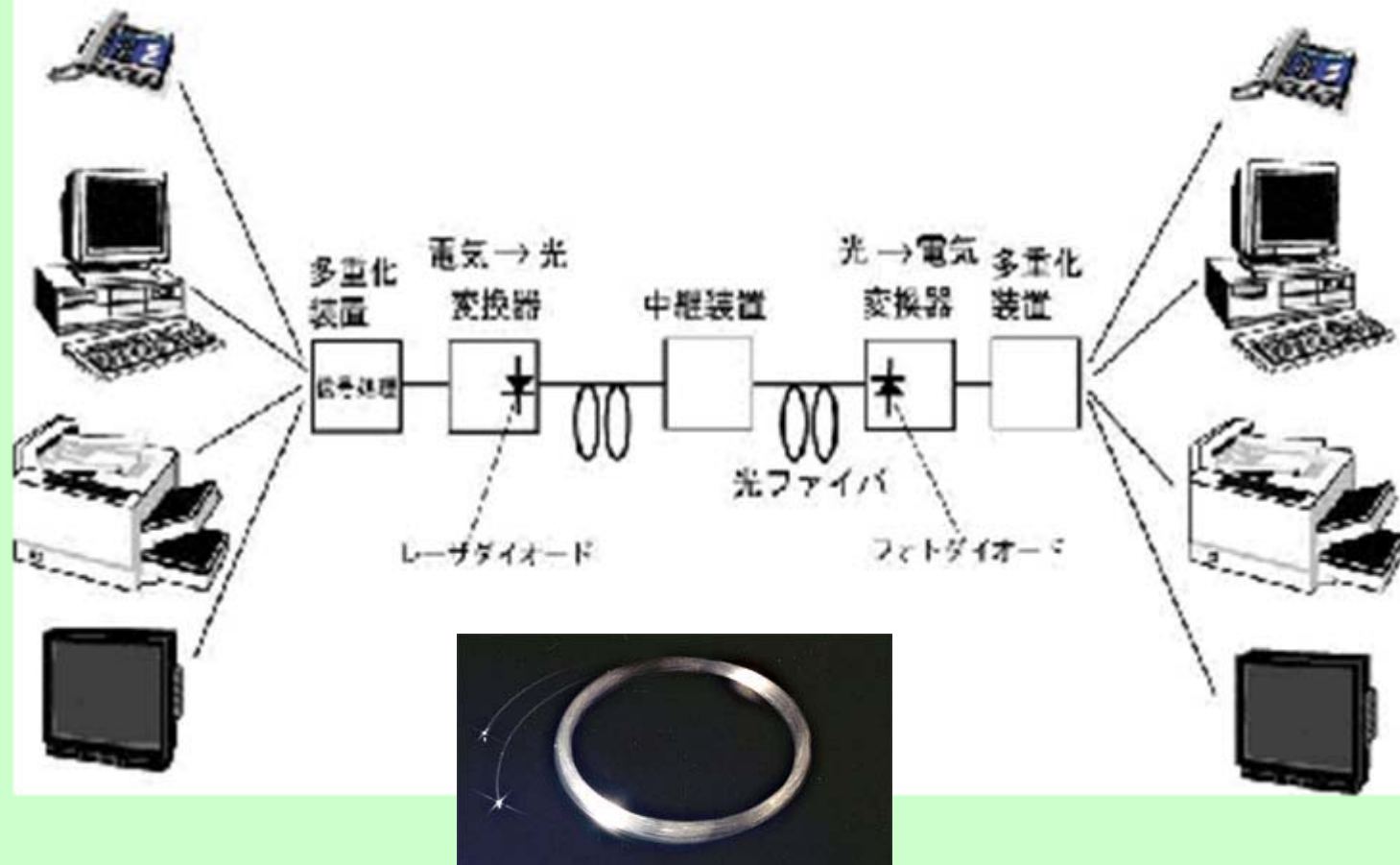
半導体レーザーと光通信

- 光通信の光源は半導体レーザー、電気信号を光の強弱に変えて伝送する。



光ファイバー通信システム

- 光ファイバー通信はどのように行われているか調べてみよう。

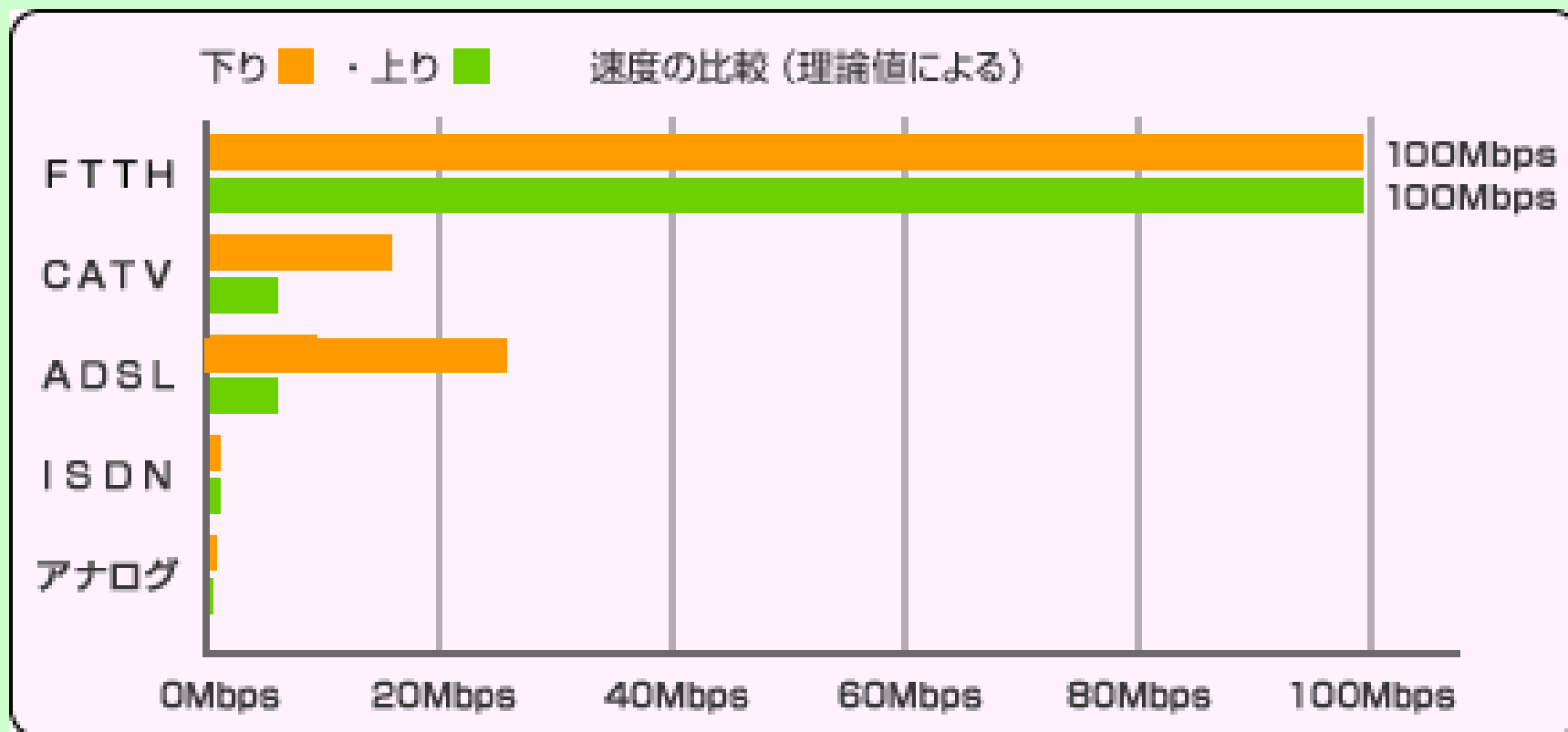


ブロードバンドとナローバンド

- 最近、ブロードバンド(BB)という言葉が飛び交っている。ブロードバンドとナローバンドとは何か？
- ブロードバンドは広帯域、ナローバンドは狭帯域と訳される。情報を伝送するための「道の太さ」が広いか狭いかを表している。
- 道の広さは転送速度(単位bps=bit per second)で表す。通常のメタル(銅ケーブル)を用いたアナログ電話回線は56kbps、デジタル(ISDN)回線でも128kbpsです。これらはナローバンドという。
- これに対して同じメタルでも、ADSL(非対称デジタル加入者線)は下り1.5Mbps、上り512kbpsとなっておりブロードバンドといえる。
- 光ファイバーFTTH (fiber to the home)では、上下線とも100Mbpsなので、ADSLの67倍の早さである。

光ファイバーはBBの主演

- FTTHはアナログモデムの1790倍の100Mbit=13MBの情報量を1sに転送できる。
- CD一枚(約640MB)のダウンロードは約1分



QUIZ1

- 日本とアメリカの距離を1万kmとして光ファイバー通信で信号が伝達する時間を計算せよ。ただし、屈折率を1.5と仮定する。
- 静止衛星の地上高度は35,000kmである。衛星経由で信号が到達するのにどれだけ時間がかかるか。

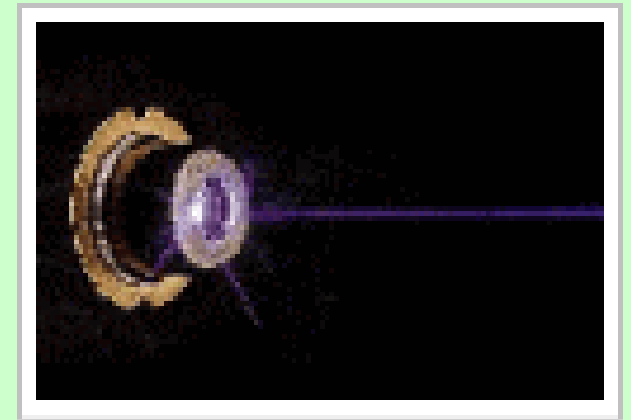
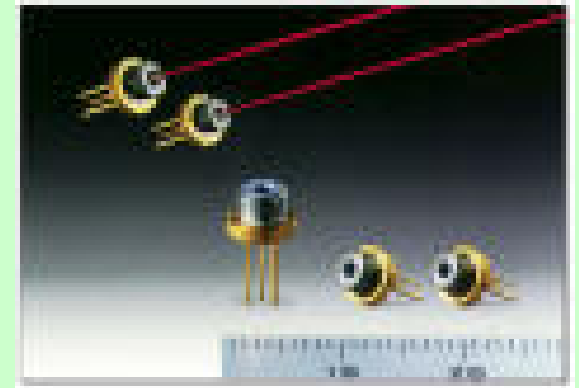
光通信の要素技術

- 光源：半導体レーザー(LD=laser diode)
 - pn接合, DH構造, DFB構造, 高速化
- 線路：光ファイバー
 - 全反射, レーリー散乱, 分子振動
- 光検出器：フォトダイオード(PD)
 - アバランシェ型(APD)
- 中継器：ファイバーアンプ(EDFA)
- 光制御器：アイソレータ、アッテネータ、サーキュレータ

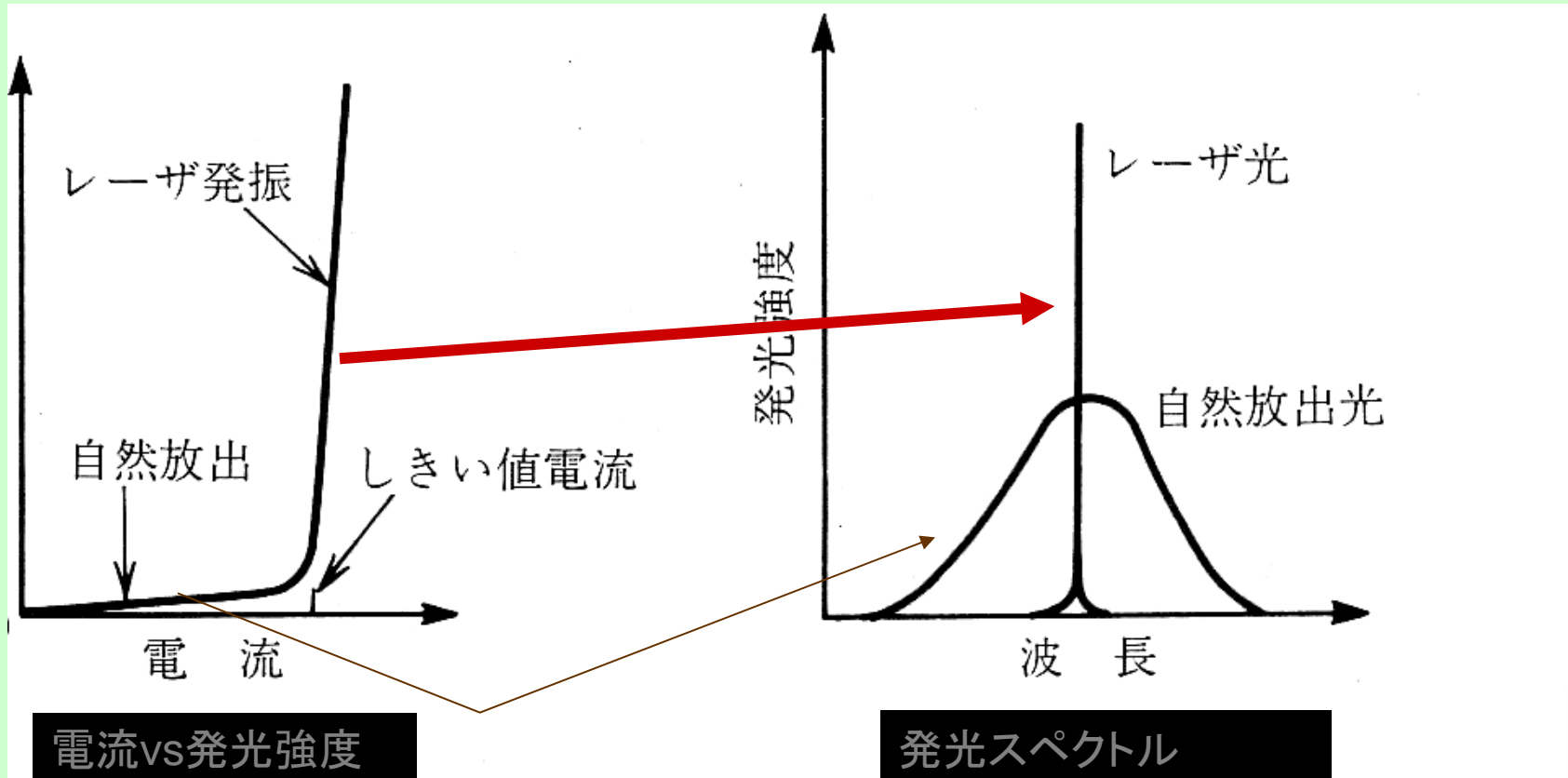
要素技術

半導体レーザー LD (laser diode)

- 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。



半導体レーザーの動作特性



半導体レーザーの材料

- 光通信帯用: $1.5 \mu\text{m}$; GaInAsSb, InGaAsP
- CD用: 780nm GaAs
- DVD用: 650nm GaAlAs MQW
- 次世代DVD用: 405nm InGaN

バルク基板にMOVPE、MBEなど気相成長によって薄膜をエピタキシャル成長している。

MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy

MBE: molecular beam epitaxy

エピタキシャル成長

- エピタキシャル成長とは、単結晶基板上に結晶方位が揃った単結晶の薄膜を成長させる方法のことである。
- エピタキシで得られる薄膜結晶は、バルクの結晶に比べ結晶性、純度ともに優れており、また極めて薄い結晶膜や複雑な多層の結晶構造を作り出せることから、特に化合物半導体の分野では不可欠な技術となっている。
- 原料物質の形態、成長に利用する原理により、気相エピタキシ、液相エピタキシ、分子線エピタキシなどの手法がある。

ホモ接合とダブルヘテロ構造

- 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

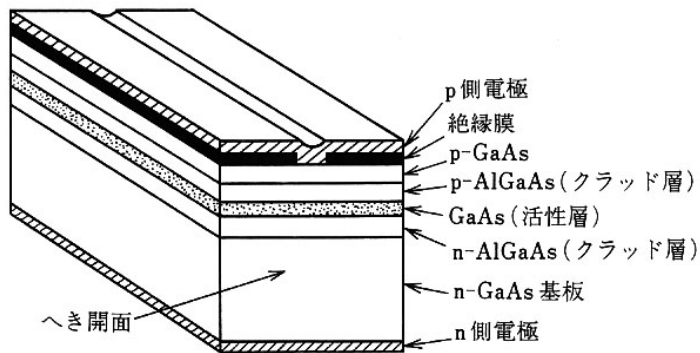
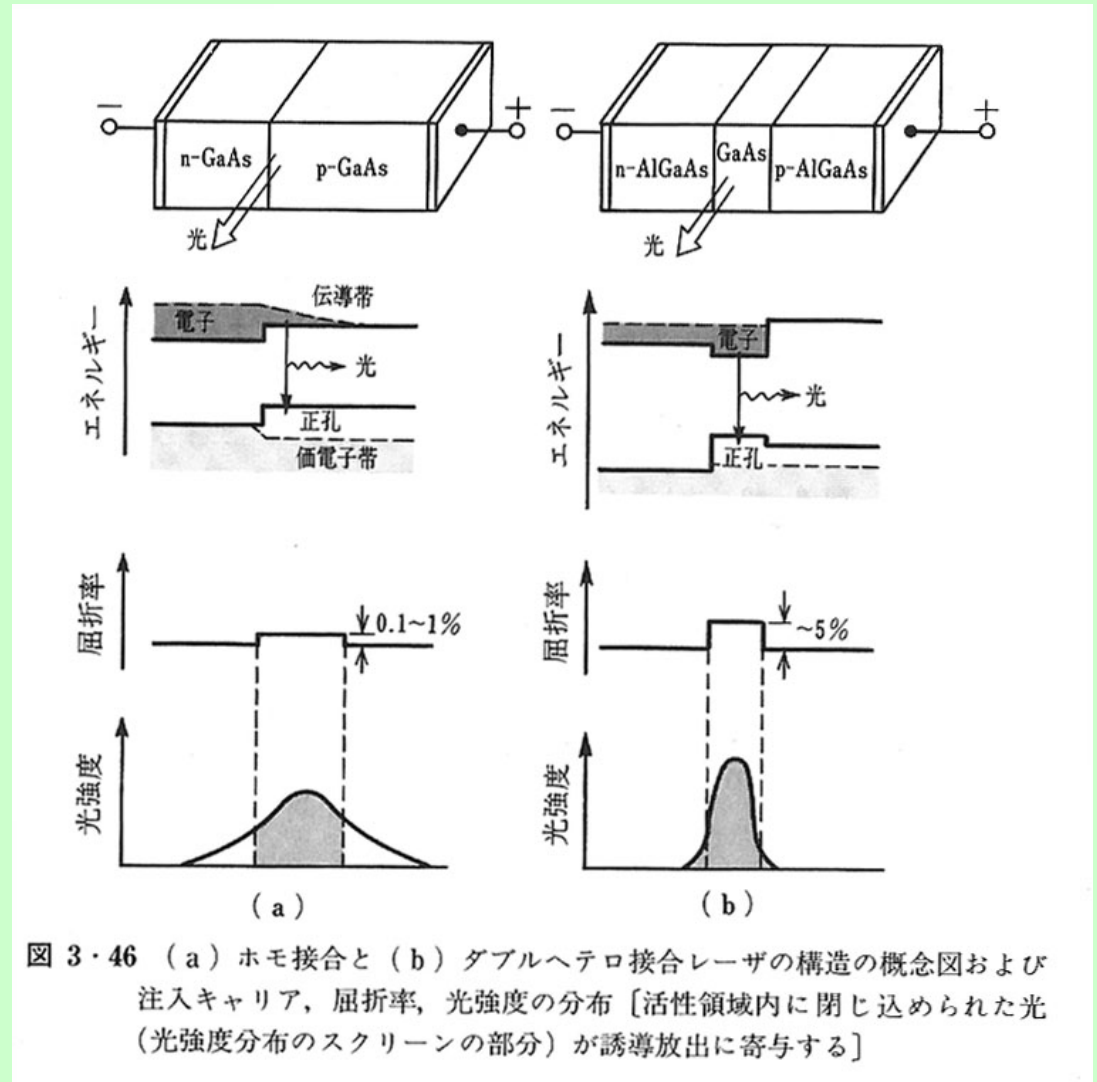


図 3・48 ストライプ形ダブルヘテロ接合レーザー



DHレーザー

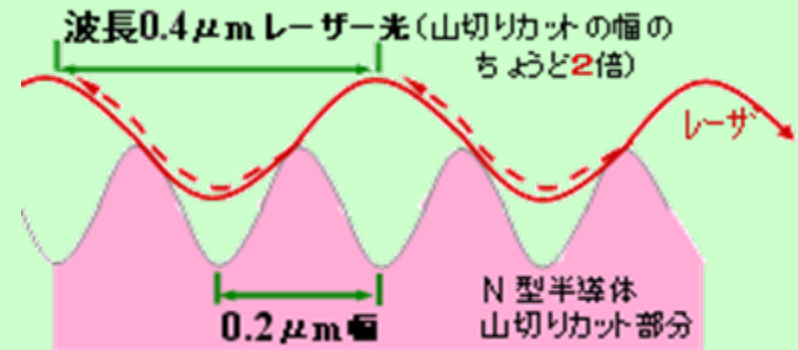
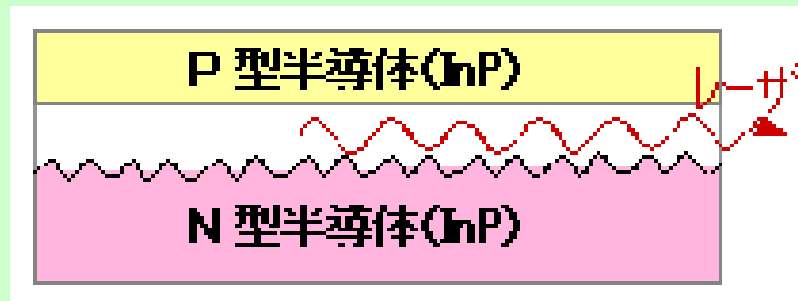
- 光とキャリアの閉じこめ
 - バンドギャップの小さな半導体をバンドギャップの大きな半導体でサンドイッチ: 高い濃度の電子・ホール活性層に閉じこめ
 - 屈折率の高い半導体(バンドギャップ小)を屈折率の低い半導体(バンドギャップ大)でサンドイッチ: 全反射による光の閉じこめ



DHレーザーを発明した
Alferov博士と故林巖雄
博士

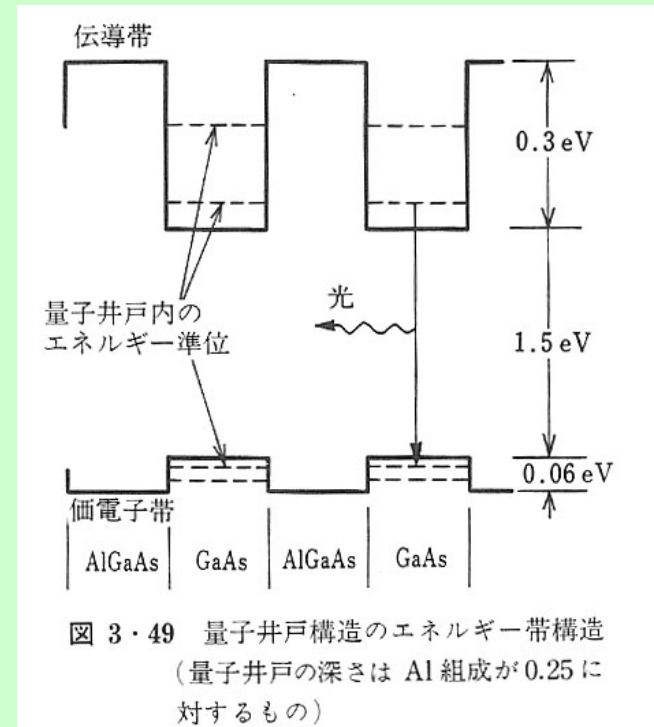
DFBレーザー

- 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)



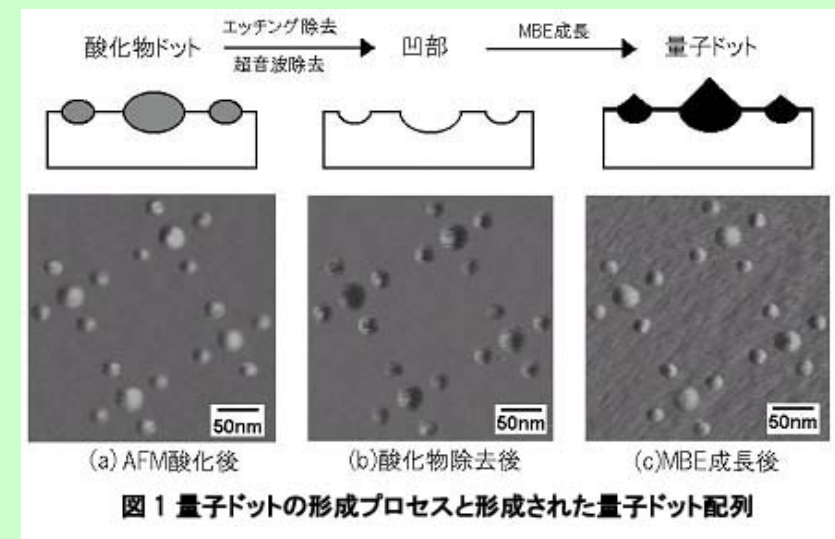
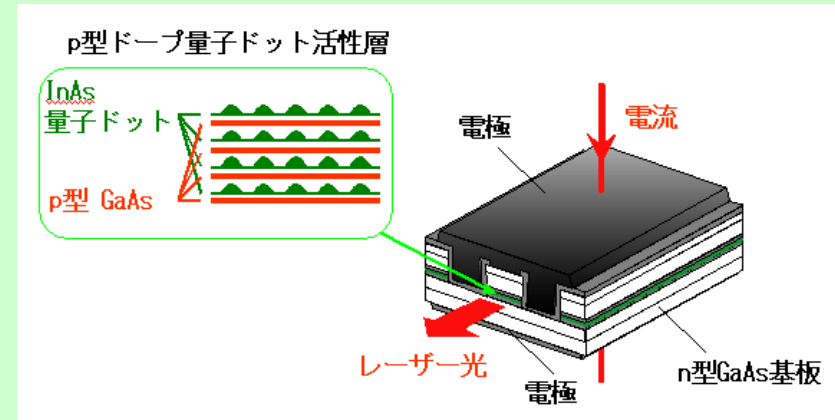
量子井戸レーザー

- 厚みが1nm程度のGaAsとAlGaAsを交互に積層した人工格子構造のバンド構造は図のようになり、1次元の量子井戸(QW)を形成する。量子井戸内には離散的なエネルギー準位ができる。
- 量子井戸レーザーは、しきい値電流が低く、しきい値電流の温度依存性が小さい、利得スペクトル幅が狭い、レーザーの偏光度が高い、パルス応答性が優れているなどの特徴をもつ。



量子ドットレーザー

- 量子ドットレーザーでは活性層に、量子ドットが縦横に並んだ量子ドットアレイ(quantum dot array)を用いている。量子ドットでは空間的に同じ場所に電子と正孔が閉じ込められるため、一対の正孔と電子が効率よく再結合を行うことができる。
- なお、一対の電子と正孔の再結合では光子が一つしか発生しないため、活性層では量子ドットがたくさん並んだアレイ構造になっている。



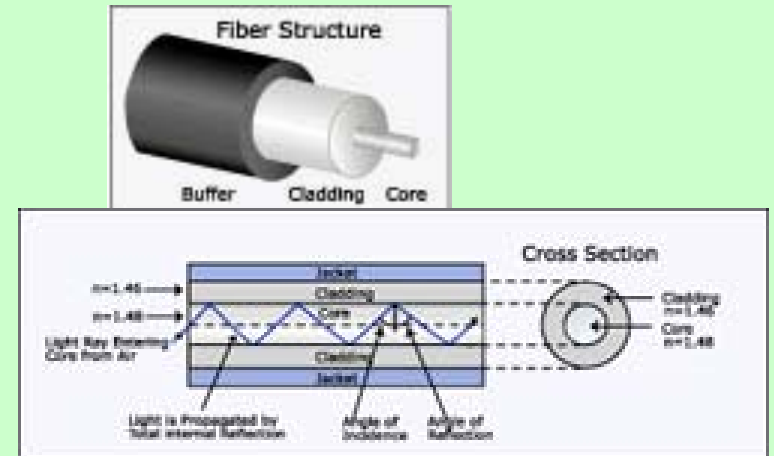
実用化されたQDレーザー

- 東京大学と富士通株式会社は、量子ドットを用い、従来の半導体レーザーでは不可能であった、温度による光出力特性の変化を抑制した量子ドットレーザーの開発に成功した。
- 開発した量子ドットレーザーは、温度による光出力の変動が非常に小さく、レーザーの駆動電流を調整することなく、 20°C から 70°C の範囲で、毎秒10ギガビットの高速動作を実現した。

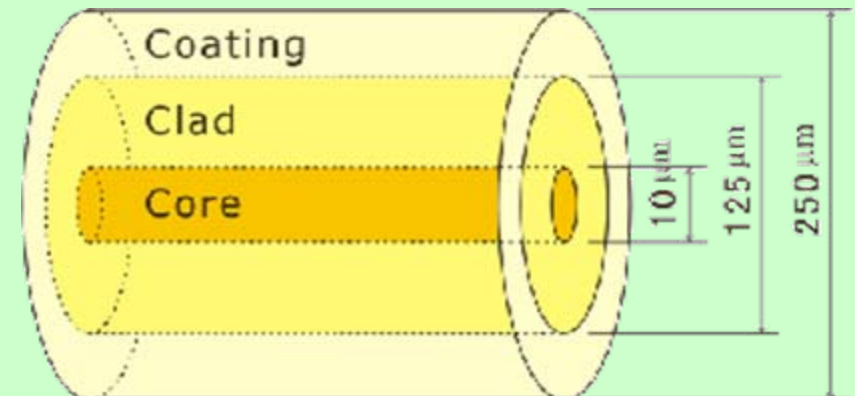
要素技術

光ファイバー

- 材料: 熔融石英(fused silica 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

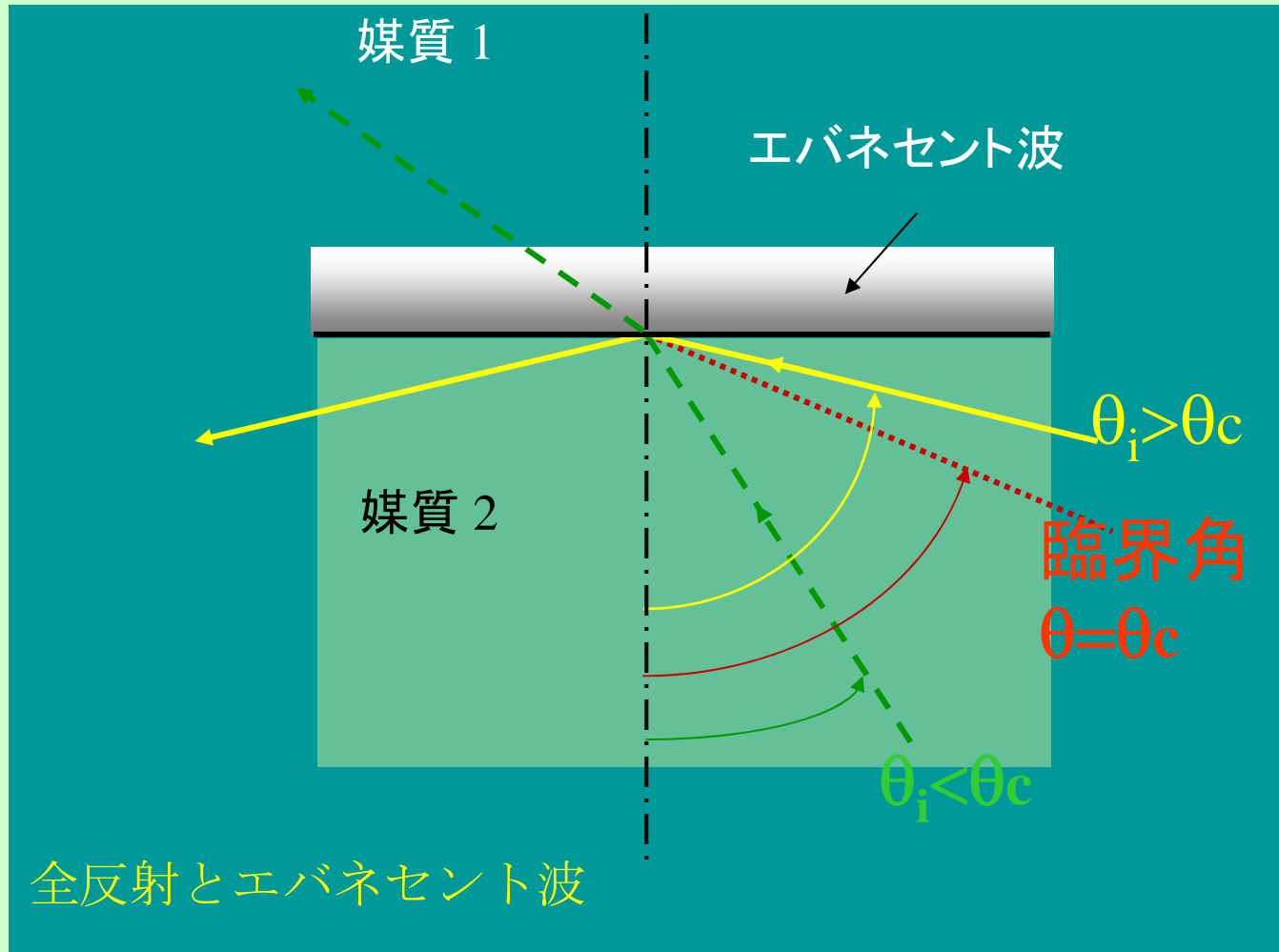


<http://www.miragesofttech.com/ofc.htm>



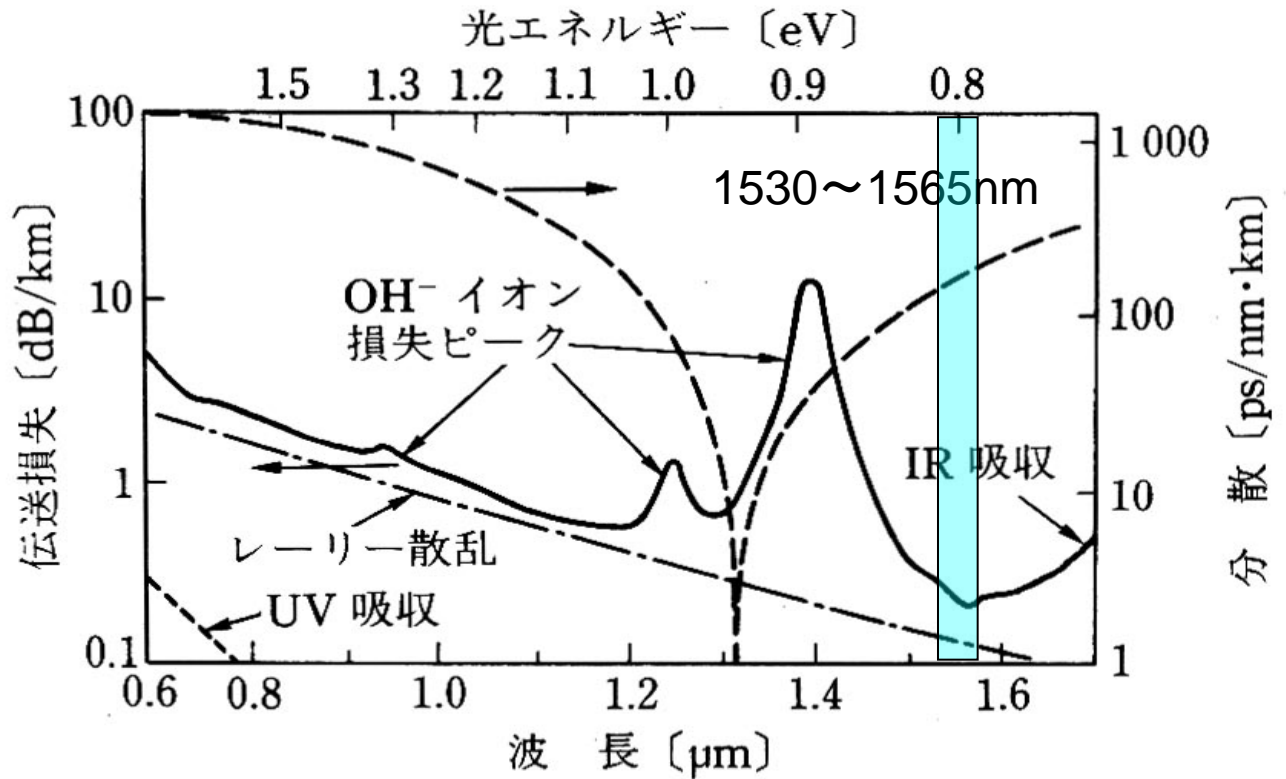
東工大影山研HPより

全反射



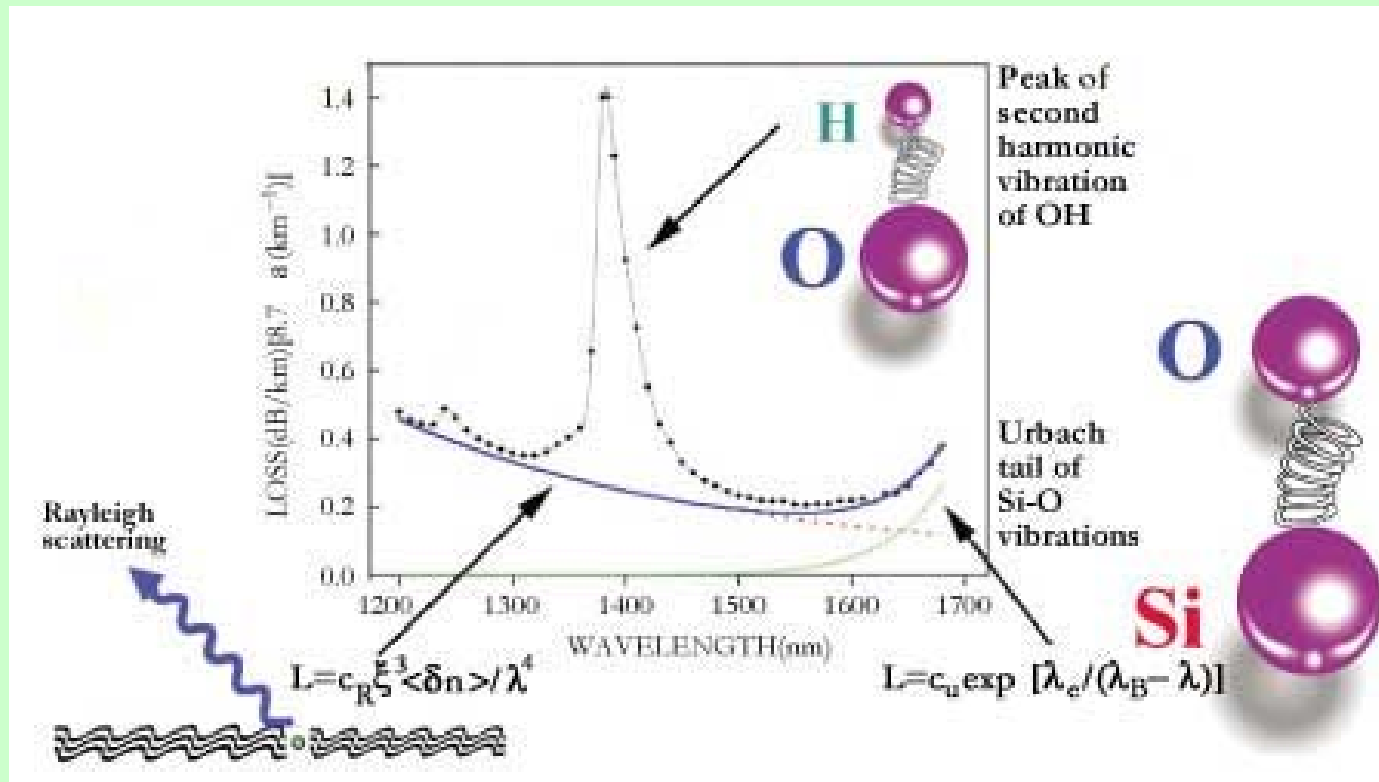
光ファイバーの伝搬損失

- 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 μm 付近の損失はOHの分子振動による



超低損失光ファイバの伝送損失および分散特性

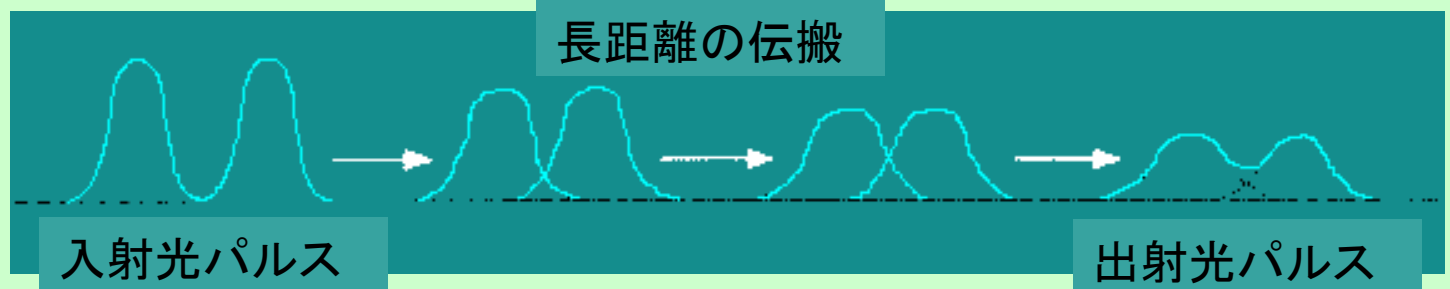
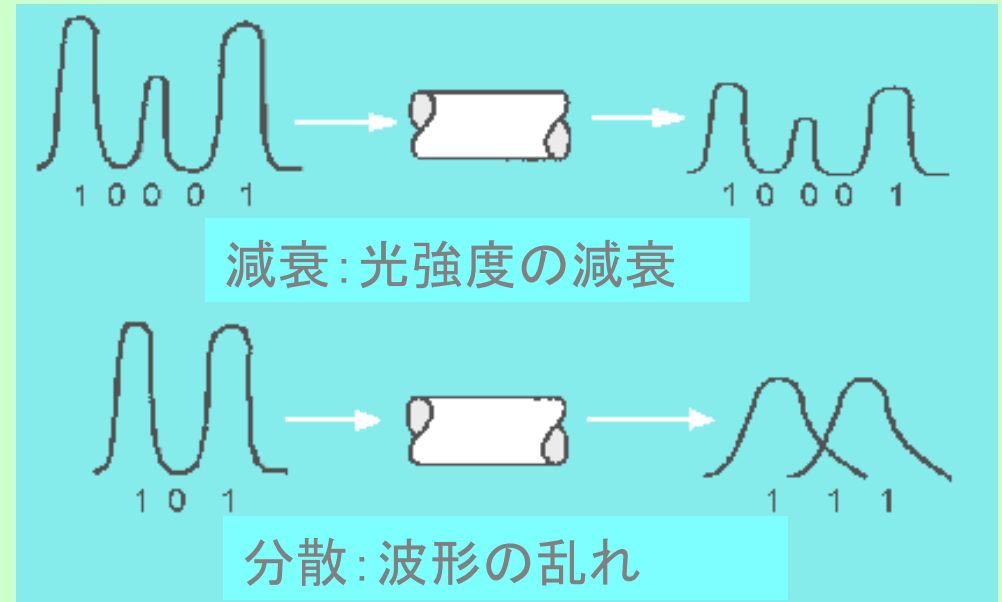
光ファイバーの伝搬損失



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



QUIZ2

- 屈折率1.5のコアと屈折率1.3のクラッドを考えたときの臨界角を求めよ。
- 実際の系では、屈折率の違いは1%程度である。屈折率1.4のコアと1.38のクラッドの場合はどうか
- 低損失ファイバーの減衰は0.2dB/kmである。東京から富士山まで約100kmとして、光強度はもとの何%になるか。ここではpowerの損失に対するdBの定義 $\text{dB} = 10 \log(I_0/I)$ を使って下さい。

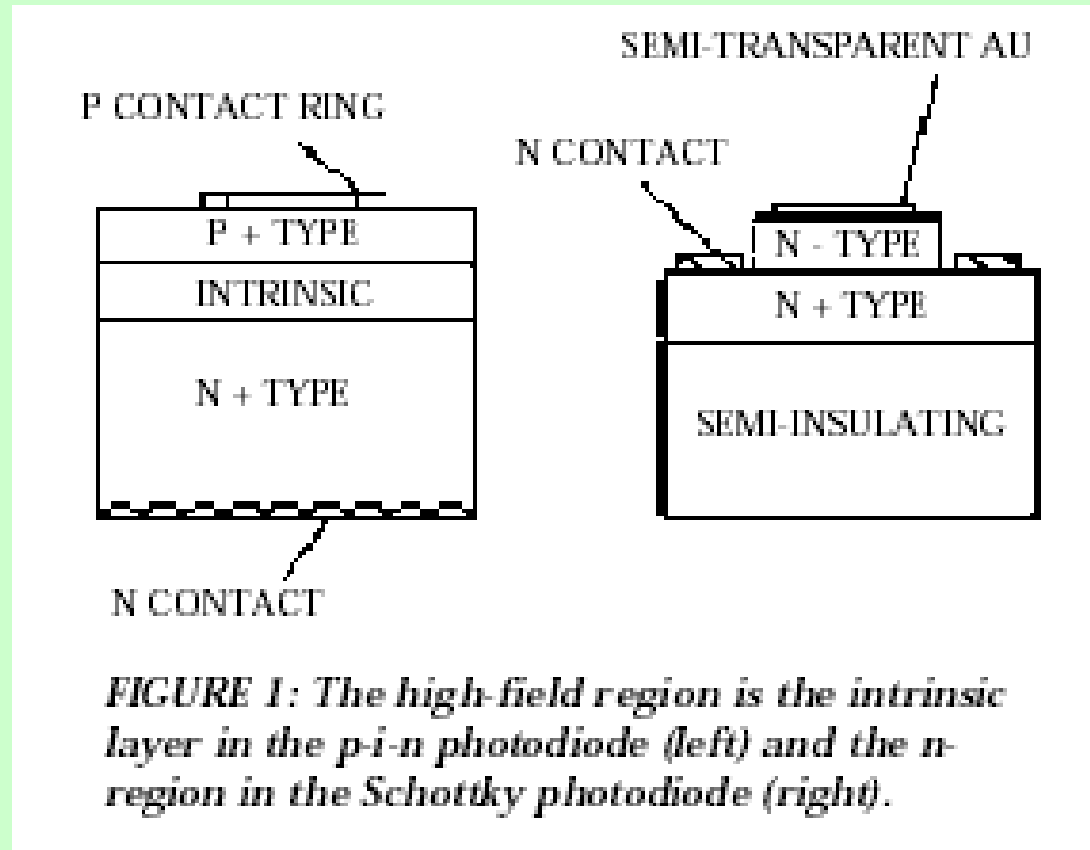
要素技術

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。(注:ショットキー接合:金属と半導体の接合)
- 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。

光検出器

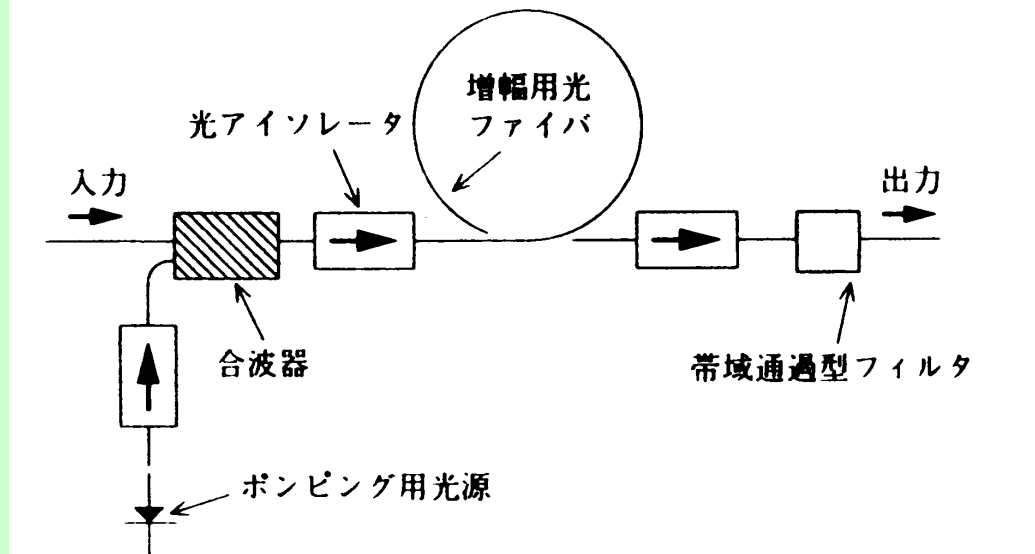
- Pin-PD
- Schottky PD
- 応答性は、空乏層をキャリアが走行する時間と静電容量で決まる。
- このため、空乏層を薄くするとともに、接合の面積を小さくしなければならない。



要素技術

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(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

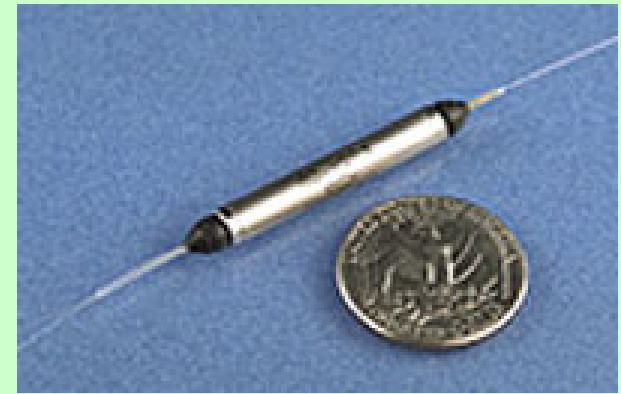
エルビウムの増幅作用

- 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。

要素技術5

光アイソレータ

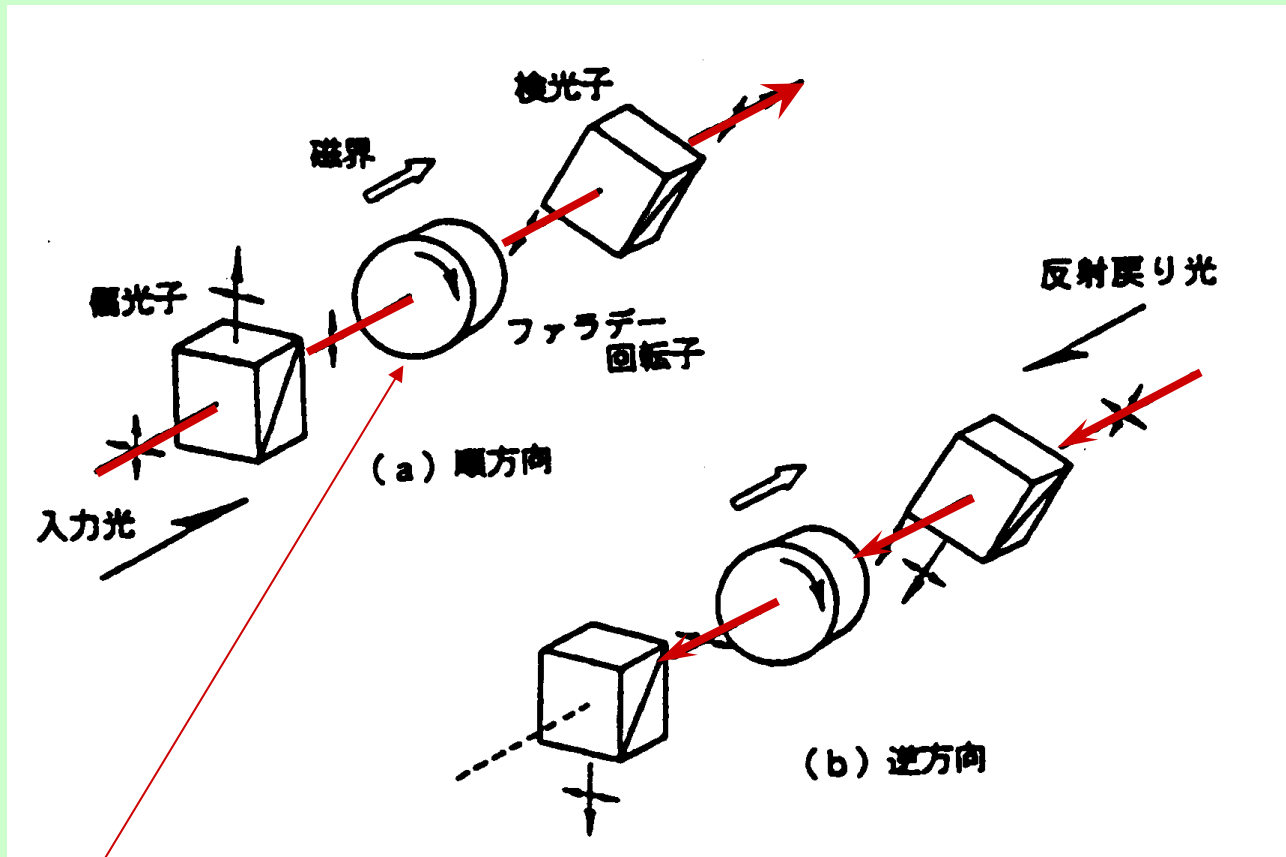
- 光アイソレータ: 光を一方向にだけ通す光デバイス。
- 光通信に用いられている半導体レーザ(LD)や光アンプは、光学部品からの戻り光により不安定な動作を起こす。
- 光アイソレータ: 出力変動・周波数変動・変調帯域抑制・LD破壊などの戻り光による悪影響を取り除き、LDや光アンプを安定化するために必要不可欠な光デバイス。



信光社

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

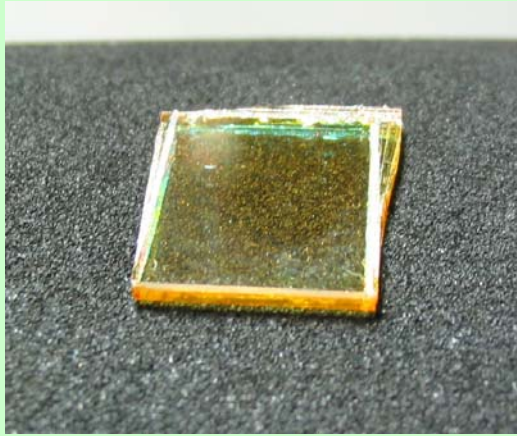
偏光依存アイソレータ



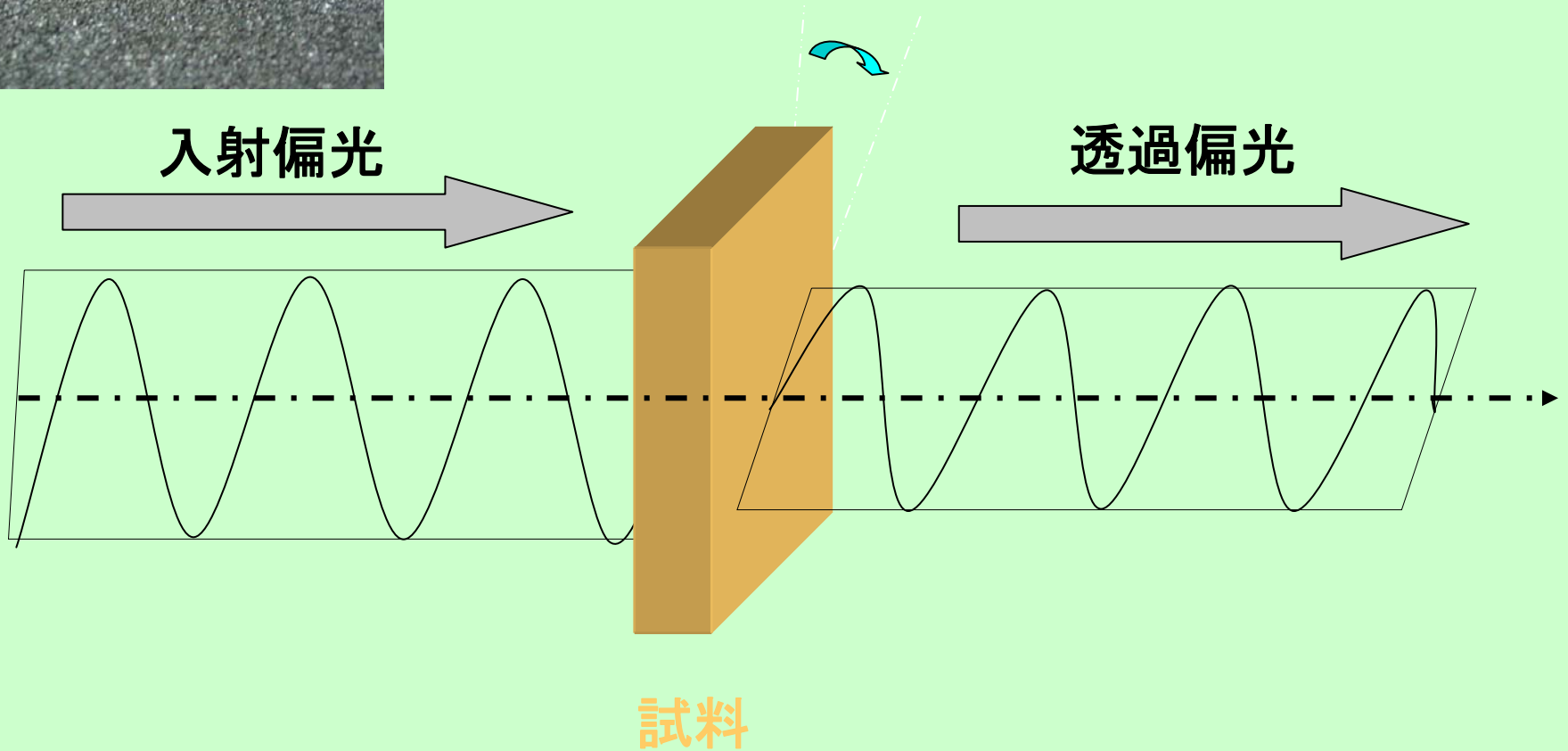
磁性ガーネット

直線偏光を磁界に関して右回り45度回転

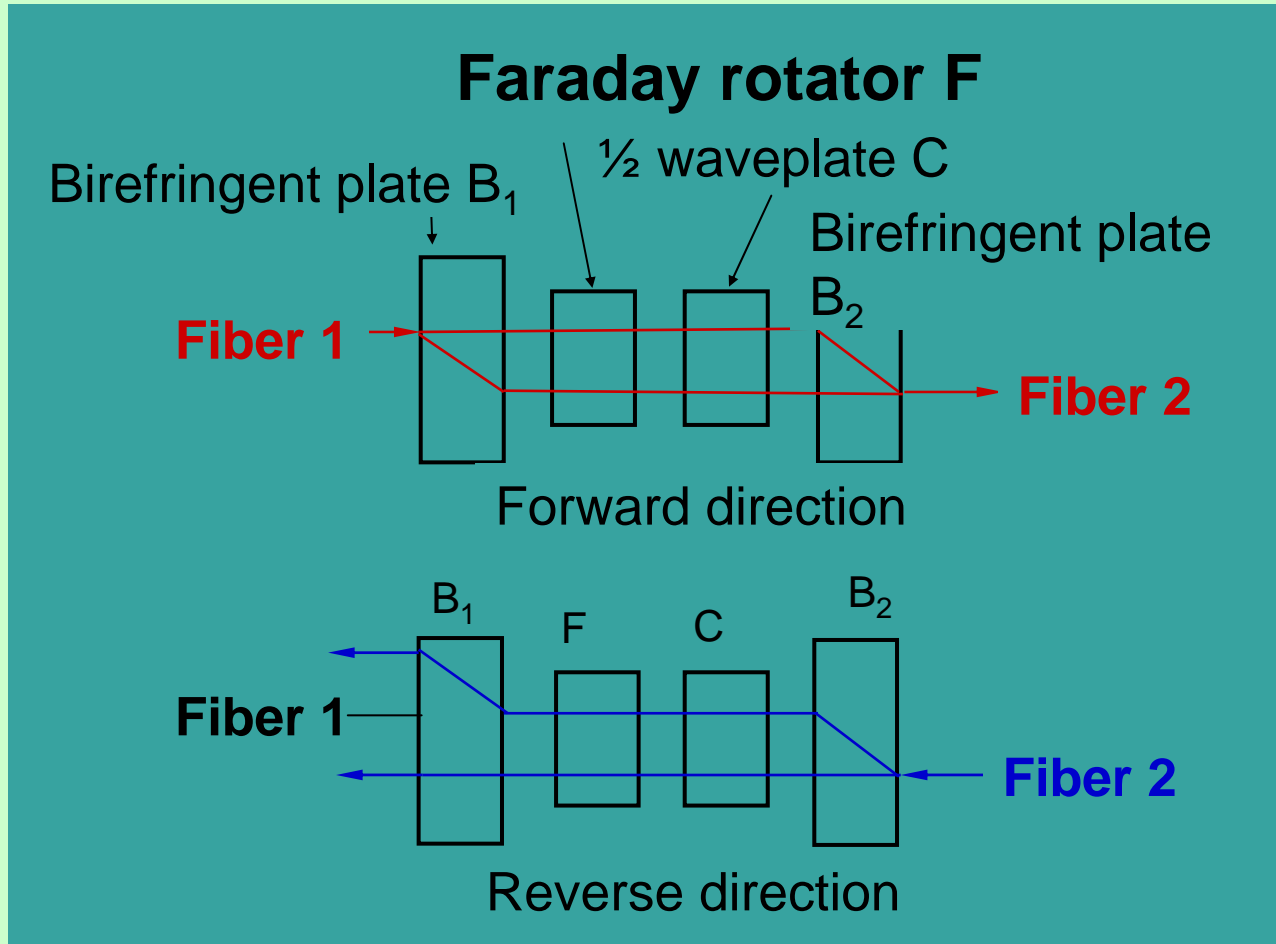
ファラデー回転



ファラデー回転角 θ



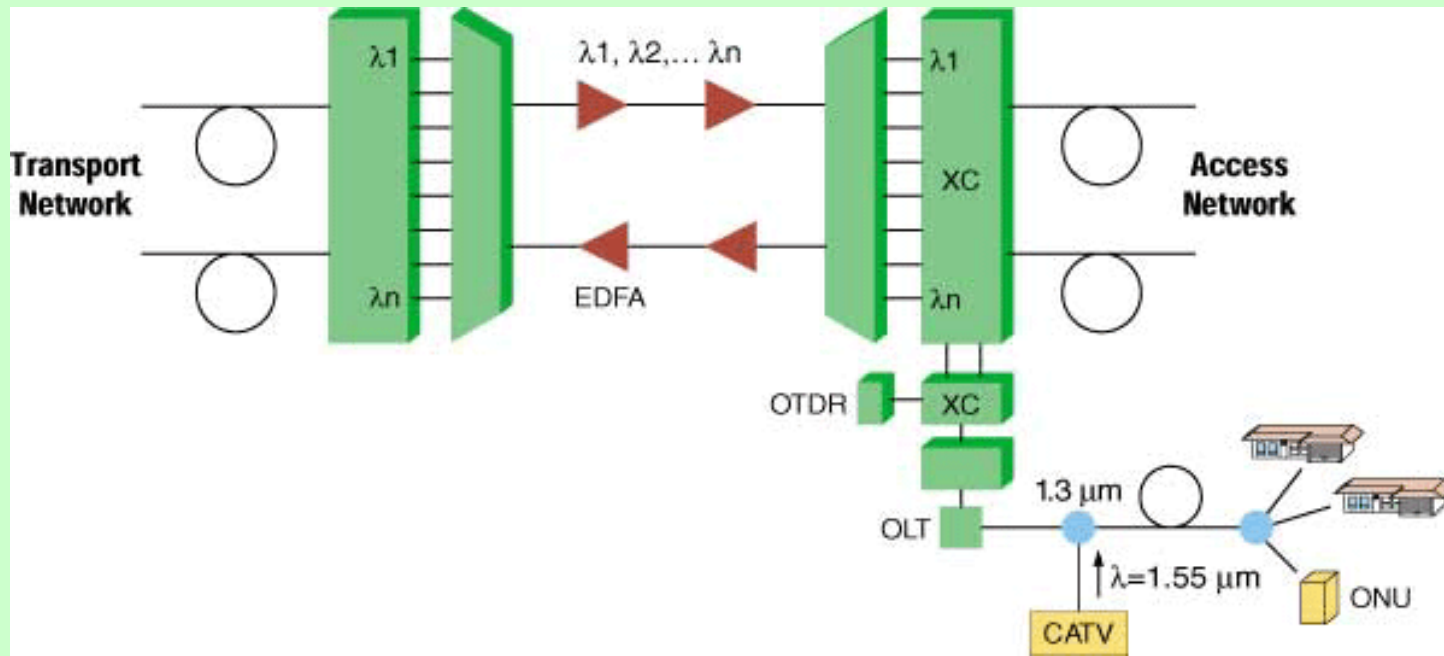
偏光無依存アイソレータ



要素技術

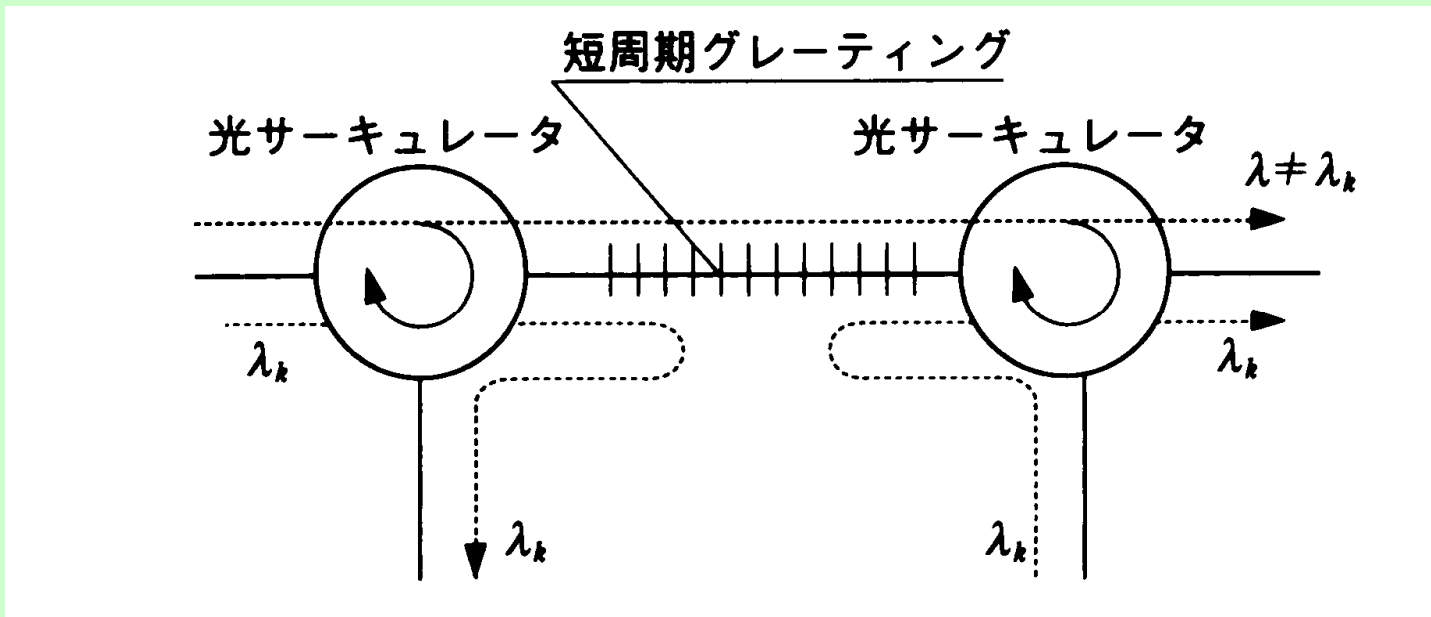
波長多重(WDM=wavelength division multiplexing)

- 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。



光アドドロップ

- 波長多重された光信号から特定の波長を抜き出すとともに、特定の波長の光を加える。



光電子集積回路(OEIC)

- 光半導体素子と電氣的な半導体素子とを同一半導体基板上に集積し、関連付けた集積回路。半導体レーザーなどの発光素子とそれを駆動する電界効果トランジスタを集積化したものと、フォトダイオードなどの受光素子と増幅・信号処理用の電界効果トランジスタを集積化したものとに大別される。光通信の送信・受信が主な用途。ガリウム・ヒ素系やインジウム・リン系などの化合物半導体と混晶が材料として注目されている。

<http://www2.nsknet.or.jp/~azuma/o/o0028.htm>

第4回の問題

- 光ディスクについて、自分が興味を持ったことについて記述しなさい。