

光スピニクス専門研究会の思い出 —磁気光学よもやま話—

科学技術振興機構(JST)
戦略的創造研究さきがけ
「革新的次世代デバイスを目指す
材料とプロセス」研究総括

はじめに

- 阿部先生、ご退職おめでとうございます。
- このような記念講演会の最初にお話しさせていただくことは光栄です。
- この講演では、私の磁気光学との接点を通じて、磁気光学の面白さを感じていただきたいと思います。

磁気光学研究はどこで行われていたか

- 東工大 阿部・五味・庄野・井上(酸化物中心)
- NHK技研 寺西・対馬(国)・玉城・佐藤・戸上
(関連:上坂・腰塚・金子)(酸化物・硫化物・金属)
- 日大 川西・伊藤・中川
- 名大 内山・綱島・岩田・加藤
- 産総研 対馬(立)・腰塚・安藤・鈴木
- 東邦大 品川・斉藤
- 東北大 岡

磁気光学に関する専門研究会

- 日本応用磁気学会の磁気光学に関する専門研究会は、対馬国郎氏が開設しました。名称を変えながら2002年まで続けました。
 - 磁気光学専門研究会(1985?-1990)
 - 光マグネティクス専門研究会(1990-1995)
 - 光スピニクス専門研究会(1995-2002)
- 光マグネティクスおよび光スピニクスの会合のほとんどを東工大の電気電子会議室または百年記念会館で開催。阿部研究室のお世話になりました。

光スピニクス専門研究会の目指したものの

- 光スピニクス専門研究会は、「磁気光学」と呼ばれる従来の枠にとられず、「光とのつながりにおいて磁性を広くとらえる」ことをねらい、応用を見据えながら萌芽性を重視した研究会運営を行ってまいりました。
- 中心的な研究課題は、磁気光学材料・デバイスに関わる基礎物理、製造技術、微細加工技術、評価技術、周辺技術磁性体研究への光（放射光を含む）の応用、先端光情報処理デバイスへの磁気光学の応用、人工格子・高温超伝導・有機磁性体など新物質研究への磁気光学利用などです。
- 研究会では毎回多数の参加者を得ており、気軽で素直な質疑応答、熱心な討論が行われております。
- 広い視野で萌芽性を重視したタイムリーなテーマを取り上げて企画してゆきます。

光スピニクス専門研究会の歩み (1995-1997FY)

第19回	1998/4/21	東工大 大岡山	非線形光学効果の最近の話題
第18回	1998/2/24	銀座リビングプラザ	最近のレーザー技術と磁性研究
第17回	1997/12/9	東工大 大岡山	おもしろい薄膜・結晶性改善技術
第16回	1997/10/25	日大理工学部	International Workshop on Hyper MO Storage
第15回	1997/9/25	東工大 大岡山	磁気光学光導波路および非相反デバイスの最近の発展
第14回	1997/6/19	東工大 大岡山	レーザーアブレーション成膜
第13回	1997/4/22	東工大 大岡山	スピン・エレクトロニクス・デバイスを目指して
第12回	1997/3/13	銀座リビングプラザ	乱れた構造中の光局在による新現象
第11回	1997/2/24	銀座リビングプラザ	光による新しい薄膜磁性評価技術
第10回	1997/1/30-31	湯河原厚生年金会館	光と磁気の新しいながれ
第9回	1996/10/22	東工大 大岡山	フォトンで磁性を制御する
第8回	1996/6/12	日本橋柳屋ビル	光磁気記録における高密度化のための新展開
第7回	1996/4/23	東工大 大岡山	有機物およびフラーレンの磁性と光吸収
第6回	1996/2/13	農工大	ペロブスカイト型Mn酸化物の作製と物性
第5回	1995/12/12	東工大 大岡山	磁性ドットの新作製法
第4回	1995/10/26	商工会館	磁性体-半導体ハイブリッド:新しい構造と機能
第3回	1995/7/18	東工大 大岡山	マイクロファブリケーションと物性
第2回	1995/5/18	日大	表面の電子構造と物性

光スピニクス専門研究会の歩み (1998-1999FY)

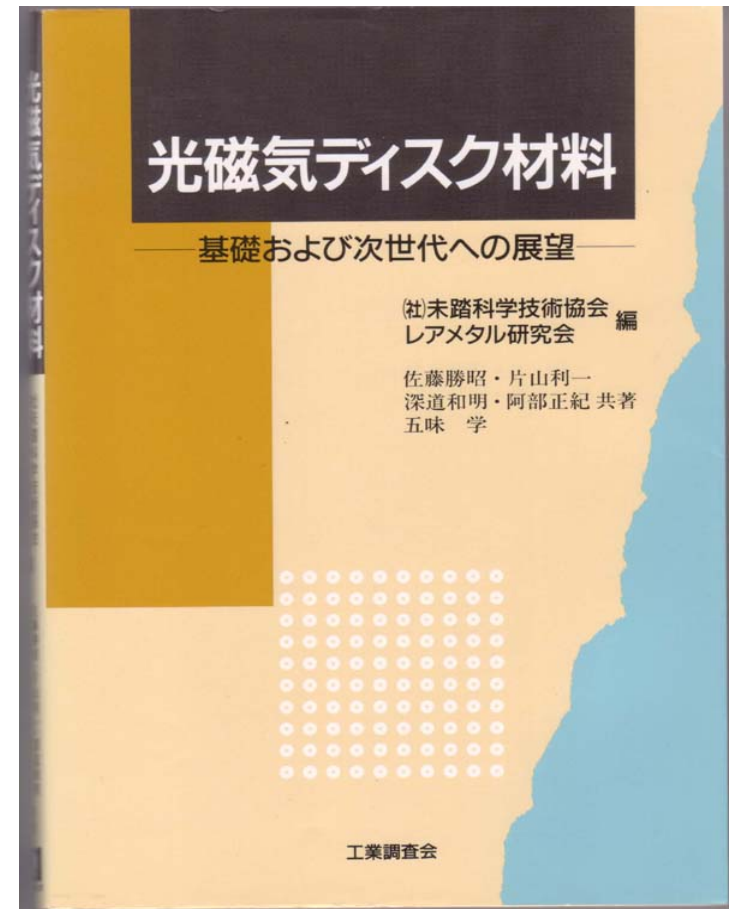
第33回	2000/5/16	東工大 百年記念館	「光で造る室温強磁性体」
第32回	2000/3/7	東京農工大 武蔵小金井	「微小領域磁性と磁気光学」
第31回	2000/2/15	東工大 百年記念館	「円偏光とスピン注入」
第30回	2000/1/27-28	湯河原厚生年金会館	研究会「リムーバブル記録の現状と将来展望」
第29回	1999/12/2	東工大 大岡山	「自己組織化による規則的ナノ構造の作製」
第28回	1999/9/14	銀座アクトプラザ	ここまで進んだ磁性体のバンド計算
第27回	1999/7/8	東工大 大岡山	「光通信技術の進展と磁気光学デバイス」
第26回	1999/5/11	東工大 大岡山	「ニアフィールド磁気光学顕微鏡」
第25回	1999/3/18	商工会館	「半導体スピニクス ーエレクトロニクスデバイスへの新提案ー」
第24回	1999/2/23	日大理工学部駿河台	次世代光メモリ
第23回	1998/12/10	東工大 大岡山	酸化物透明結晶の新展開
第22回	1998/11/12	東京農工大	S.Bader博士講演会「SMOKEによる磁性薄膜研究」
第21回	1998/10/15	東工大 百年記念館	フォトニック材料と磁気光学への展開
第20回	1998/6/16	東工大 大岡山	磁性体ドット・量子ドットの伝導と光物性 ー スピンを含む半導体 ー

光スピニクス専門研究会の歩み (2000-2002FY)

第46回	2002/05/31	農工大 11号館	「MORIS2002と光磁気記録の最新動向」
第45回	2002/04/25	東工大百年記念館	「非線型磁気光学の最新の話題」
第44回	2002/03/13	東北大 通研	「ナノスケール磁性体の形成と機能に関する研究会」
第43回	2001/10/26	東工大 大岡山	「X線磁気光学顕微鏡」
第42回	2001/8/27	東工大 百年記念館	「光MEMS」
第41回	2001/6/12	東工大 大岡山	「ブロードバンド時代の磁気光学デバイス」
第40回	2001/5/8	東工大 百年記念館	「ワイドバンドギャップ希薄磁性半導体」
第39回	2001/4/26	東工大 百年記念館	「磁気光学転写の最近の話題」
第38回	2001/1/25	東工大 百年記念館	「超高密度光ディスクの最近の展開 ー近接場と超解像ー」
第37回	2000/12/21	日本化学会館 6階会議室	「半導体スピン制御の最近の発展」
第36回	2000/11/28	東工大 百年記念館	「ZnO薄膜の新展開ーその作製法と磁性」
第35回	2000/10/17	東工大 百年記念館	「超高速の磁気光学応答」
第34回	2000/7/26	東工大 百年記念館	「2次元画像処理と磁気光学」

磁気光学関係の出版

佐藤勝昭：光と磁気(初版)1988
改訂版2001



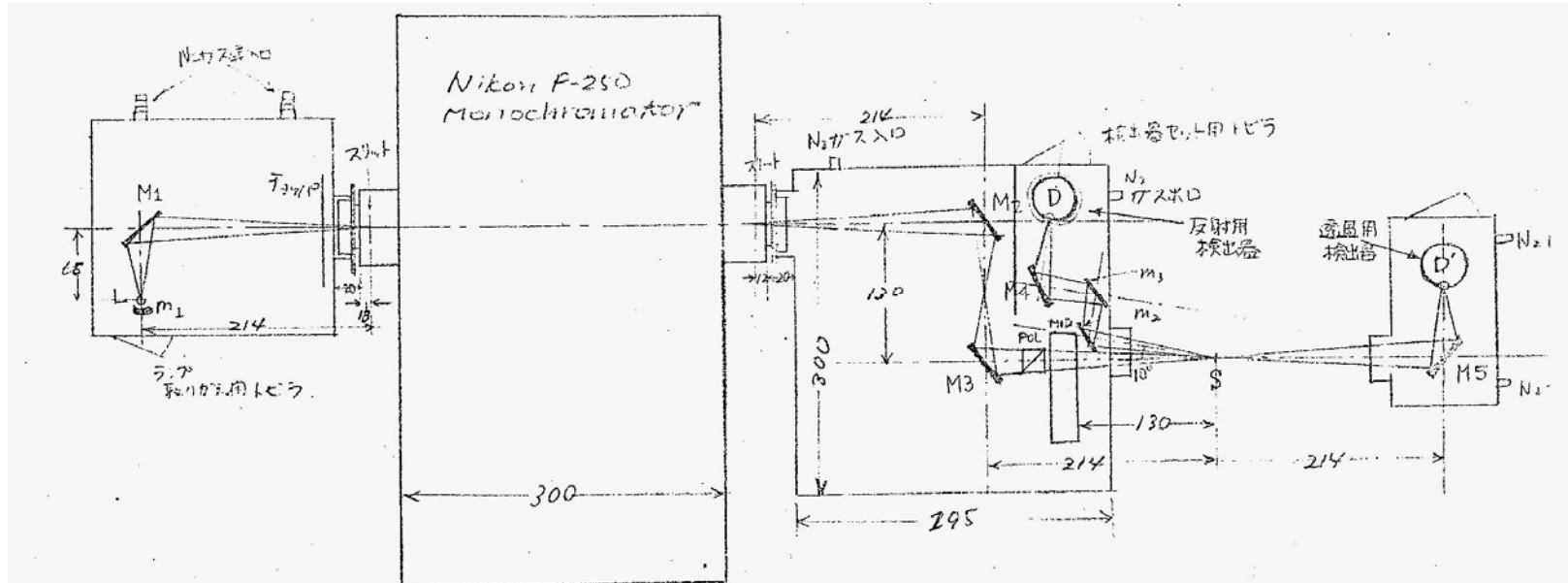
佐藤勝昭, 片山利一, 深道和明, 阿部正紀, 五味学共著:
[「光磁気ディスク材料」](#)(工業調査会、1993.6)

きわめて私的なイントロ:

私の磁気光学との出会い

- 私が磁気光学と関わったのは、NHK基礎研で磁性半導体を研究していた1977年頃でした。
 - 磁性半導体 CdCr_2Se_4 の電子構造へのてがかり
 - 吸収スペクトルではギャップ内状態しかわからない。
 - 反射スペクトルはfeaturelessで構造がわからない。
 - →なんらかの変調分光が有効
 - MCDに注目: J. Ferguson $\text{KZnF}_3:\text{Mn}^{2+}$ の研究に触発される。
 - PEMによる円偏光変調によるMCDの評価
- →PEM円偏光変調によるカー回転の評価
 - GdCo等への適用

MCD spectrometer



Fナンバーは 9 で設計する。(分光器の f は 4.5 であるが、他の分光器を使用する場合はこれを考慮した)

$M1, M2, M3, M4, M5$ 階円面鏡 $D=153\text{mm}$, $F1=28\text{mm}$, $F2=252\text{mm}$ 入射光と反射光の相対角 90°

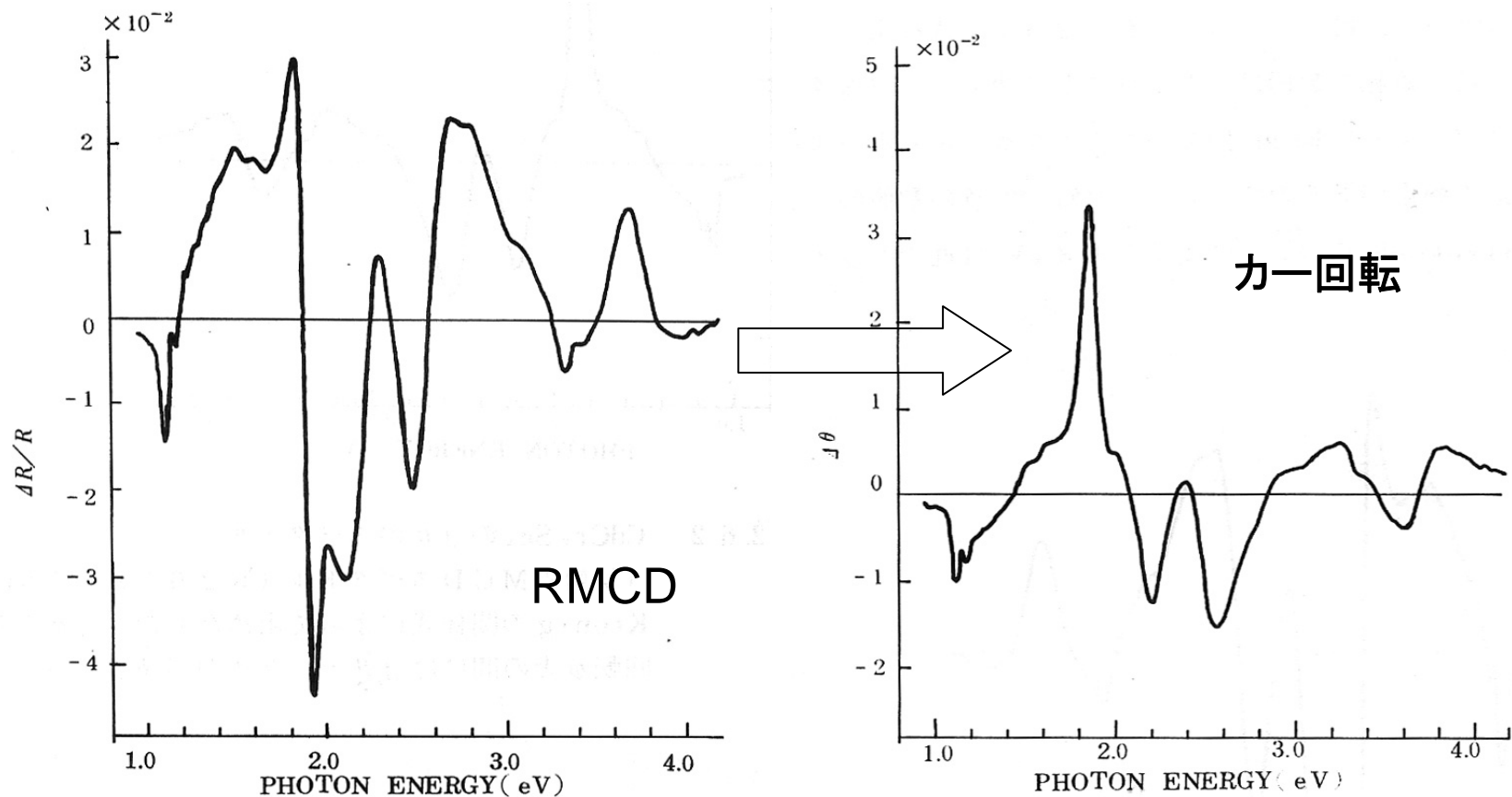
$m2, m3$ 平面鏡

$m1$ 球面鏡 L : ヨーソラ: 7° (4行型 7.5×10 のもの)

光軸の高さ $\text{min. } 65\text{mm}$ 調節系にて $+20\text{mm}$ 可変

- 佐藤勝昭: NHK基礎研4半期報(1974.7)

測定されたCdCr₂Se₄の磁気光学スペクトル



- RMCDスペクトルおよびRMCDからKK変換で得られたカー回転スペクトル

K. Sato: J. Phys. Soc. Jpn. K.Sato and T.Teranishi: Photoconductivity and Electronic Structures of CdCr₂Se₄; J. Phys. Soc. Jpn. 29 [2] (001970) 523.

CoS₂ の反射スペクトルと磁気光学スペクトル

- CoS₂は金属強磁性体です。
- 0.8eV付近に大きな磁気光学効果を示します。
- 本来バンド間遷移で説明すべきであるが、局在モデルで解析しました。
- しかし、このエネルギー位置は、誘電率の対角成分の実数部が0を横切る位置であり、プラズマエッセンスの観点から再検討が必要とされます。

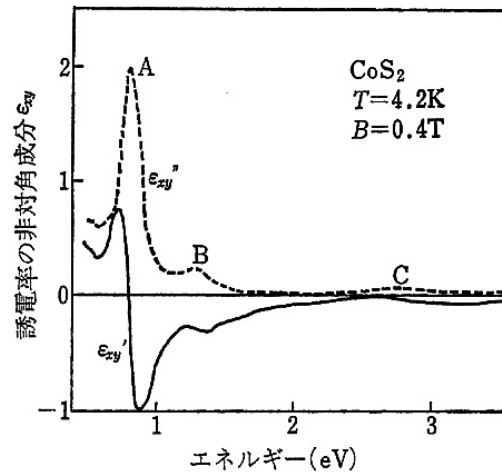
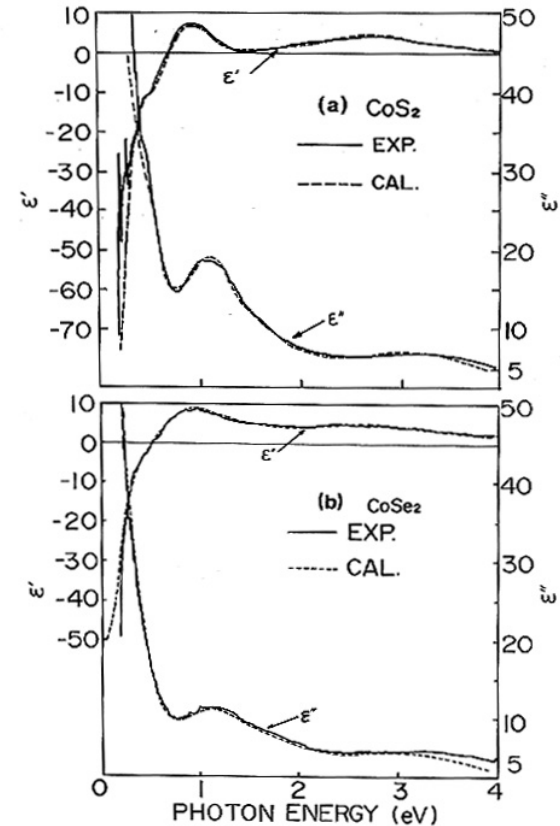
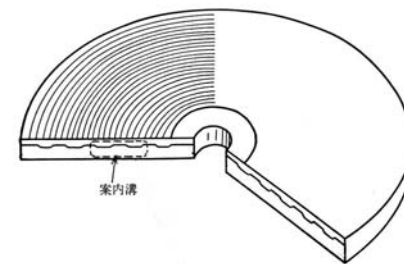


図 6.15 CoS₂ の 4.2 K における誘電率テンソルの非対角成分のスペクトル²⁰⁾



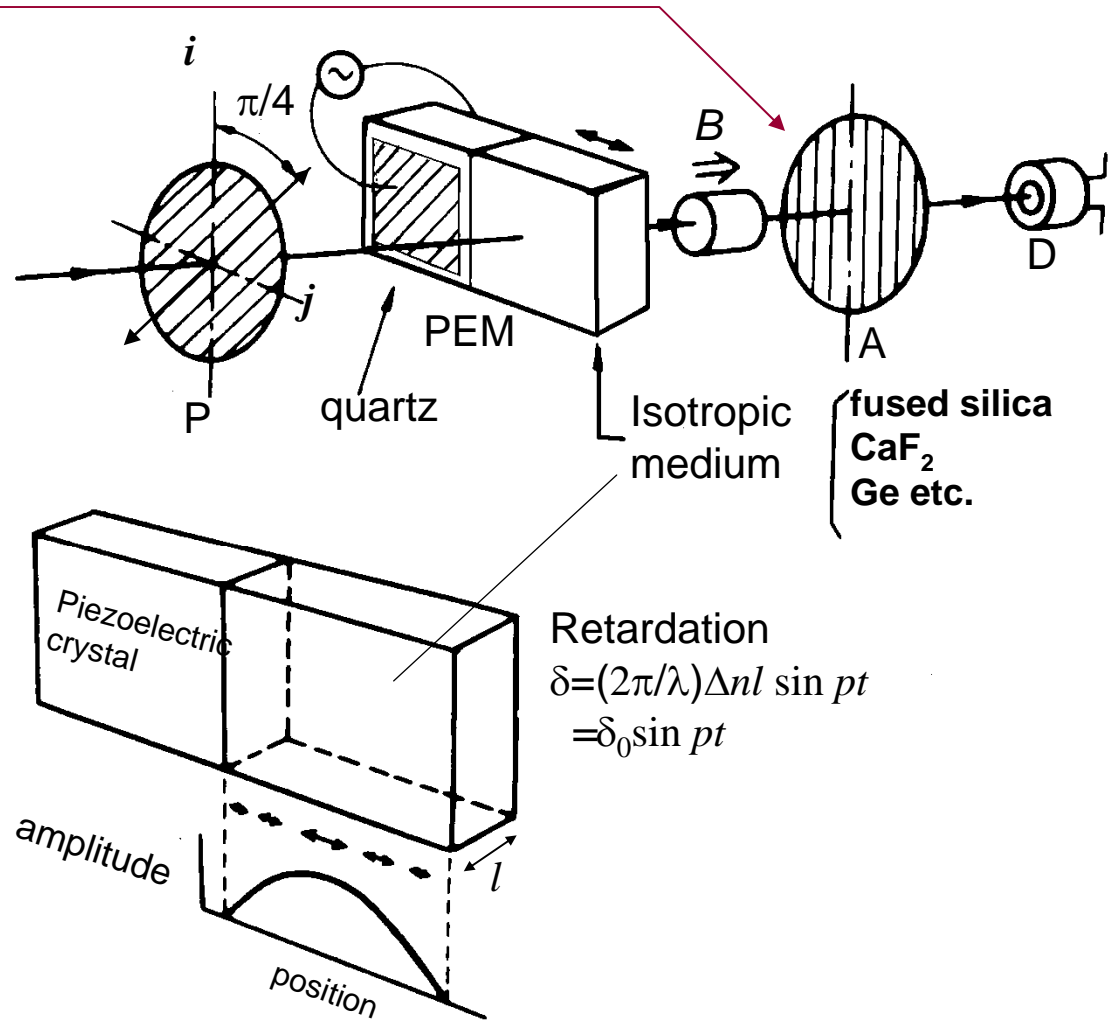
光磁気ディスクの開発



- NHK基礎研では龍岡部長・寺西主任研究員・戸上職員を中心にMOディスクの研究開発が行われました。私は、MO媒体材料の磁気光学的評価のお手伝いをしました。
- ビデオ映像が記録できるディスクができるまでに紆余曲折がありました。最初の頃、磁気光学スペクトルはサンプル毎に異なっていました。録画できるようになってからは、どれを測定しても同じスペクトルが得られるようになりました。
- Y.Togami, K.Kobayashi, M.Kajiura, K.Sato and T.Teranishi: Amorphous Thin Film Disk for Magneto-Optical Memory; SPIE — Optical Disk Technology 329 (1982) 208-214.
- K.Sato and Y.Togami: Magneto-Optical Spectra of RF-Sputtered Amorphous GdCo and GdFe Films; Proc. Int. Colloq. Magn. Films and Surfaces, Yokohama, 1982, J. Magn. Mater. 35 (1983) 101-102.

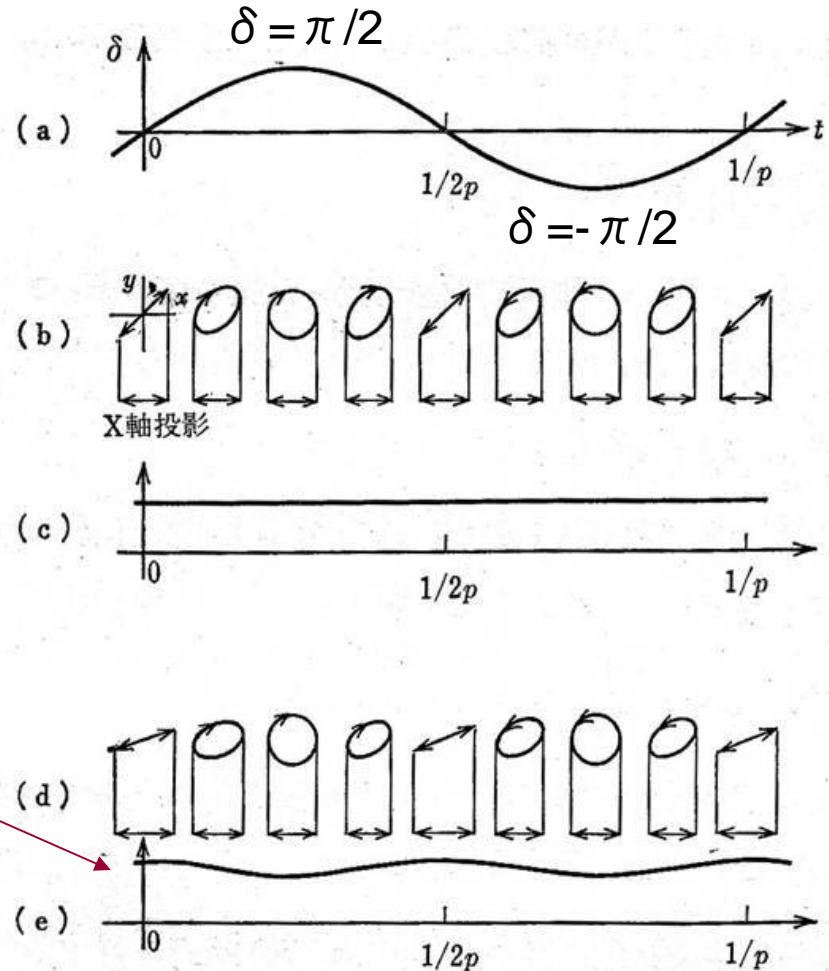
旋光角測定

- 検光子Aを追加
- これによって、旋光角が測定でき、ことに気づきました。

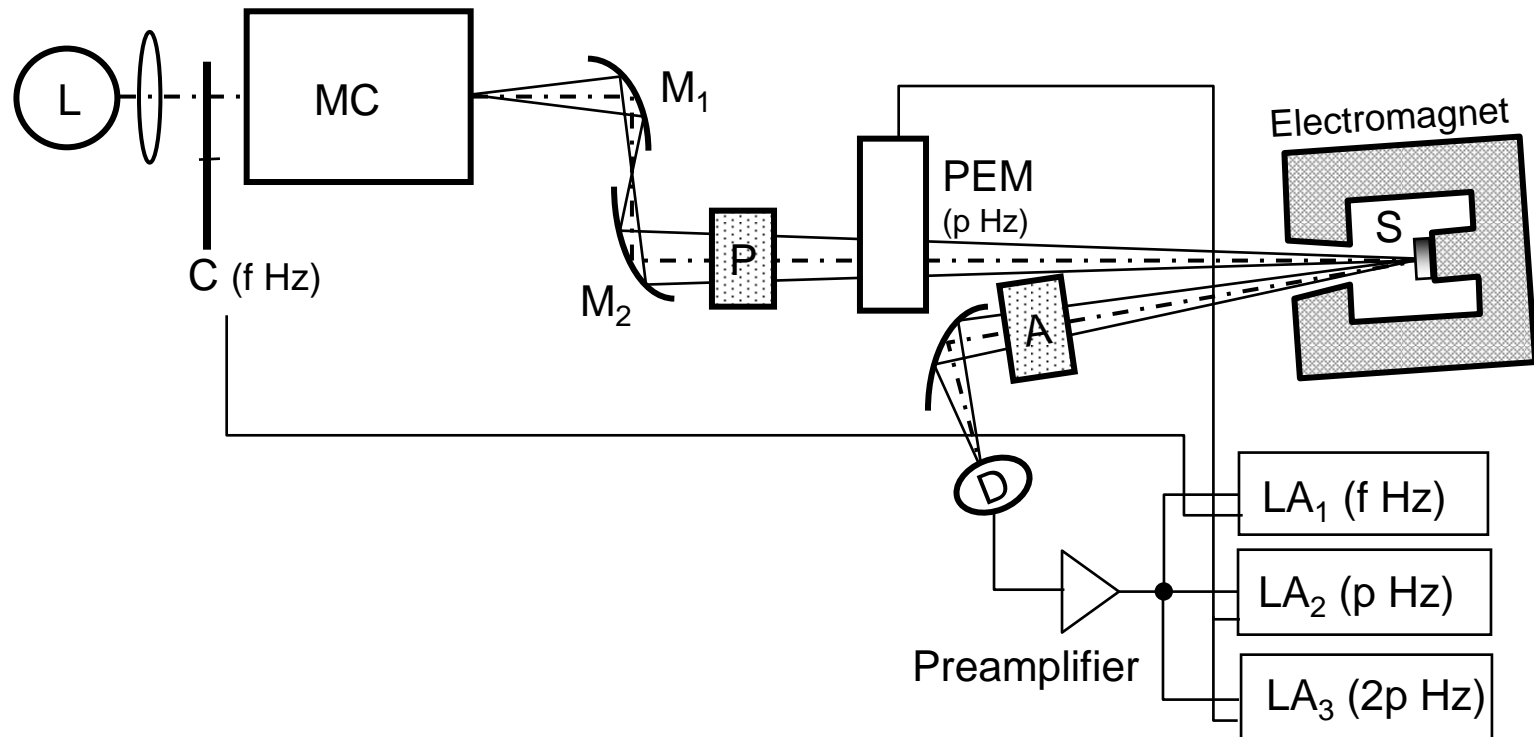


旋光角測定

- リターデーションを変調すると直線→右円→直線→左円と変化するがその強度は一定
- 旋光性があるとx軸投影成分は変調周波数の2倍の周波数で変化する信号が発生



磁気光学スペクトル測定系



磁気光学ヒステリシス ループの波長依存性

- 図はいくつかの測定波長におけるアモルファスGdCo薄膜のカー効果のヒステリシス曲線です。
- この図を見るとヒステリシスループの高さばかりでなく、その符号までが波長とともに変わることが分ります。

K.Sato and Y.Togami: Magneto-Optical Spectra of RF-Sputtered Amorphous GdCo and GdFe Films, J. Magn. Mater. 35 (1983) 101-102.

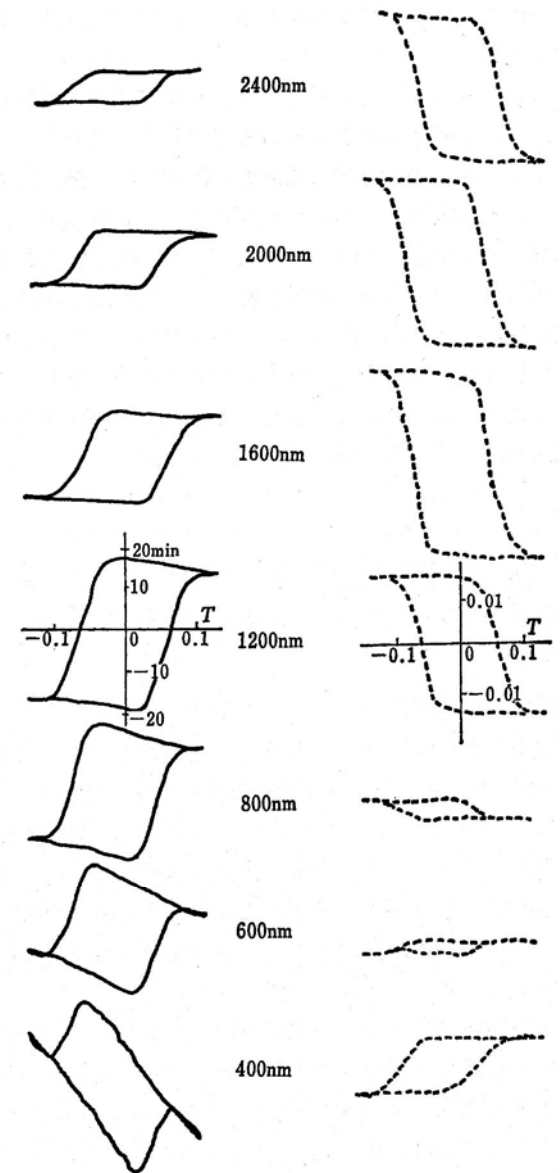
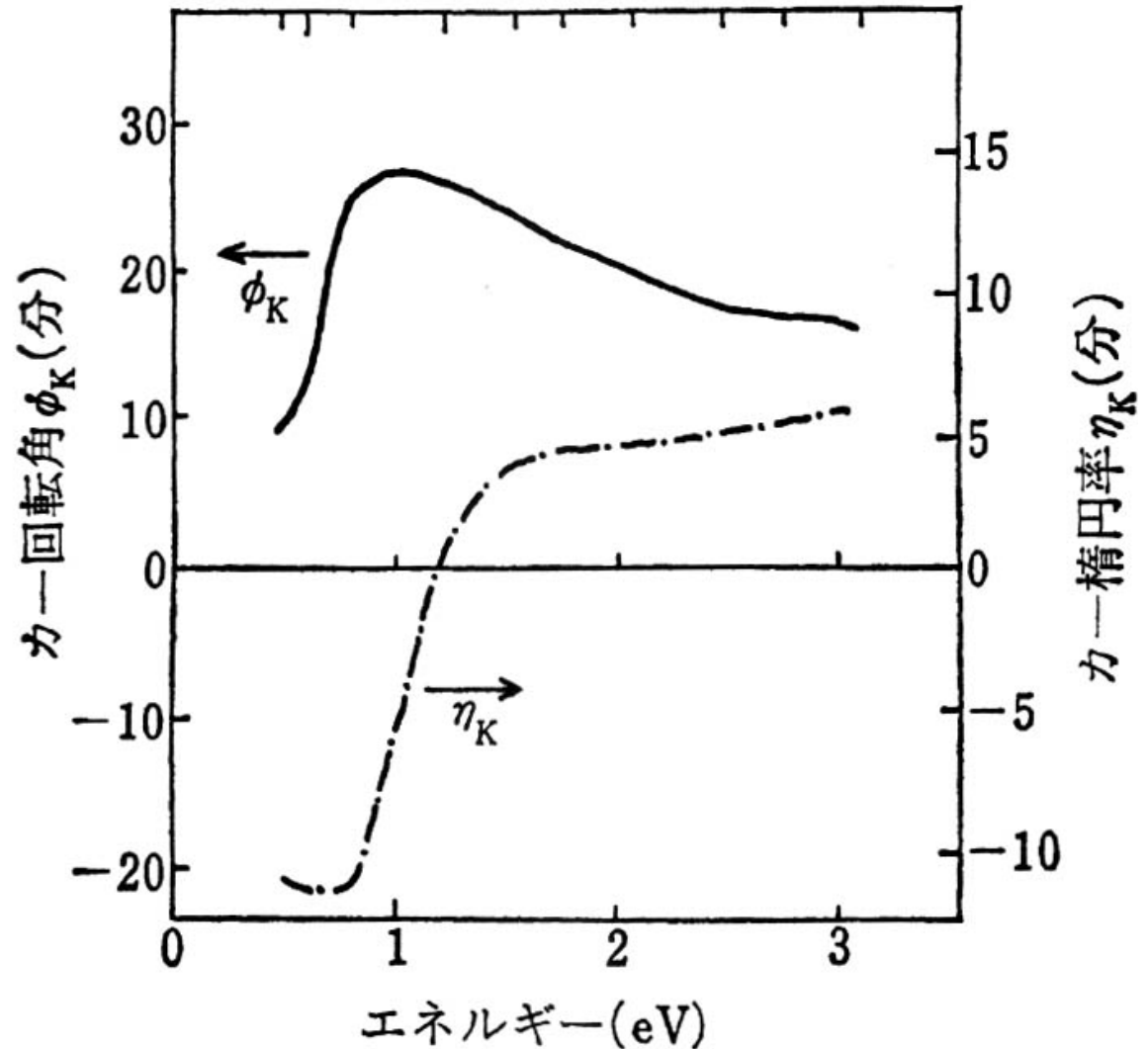


図 2.11 アモルファス GdCo (ガドリニウムコバルト) 薄膜におけるカー効果のヒステリシス曲線の波長依存性 (基板側から測定したもの)²⁴⁾

左側はカー回転角、右側は磁気円二色性 (カー楕円率に相当) を示す。

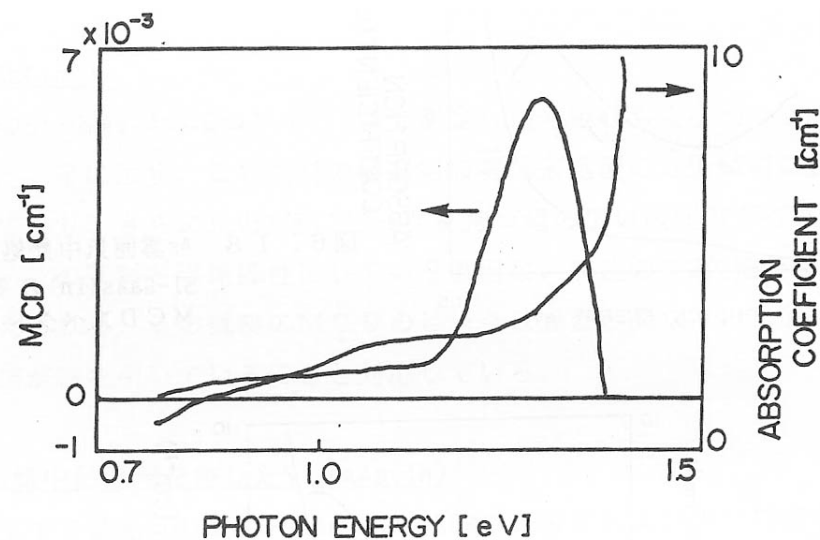
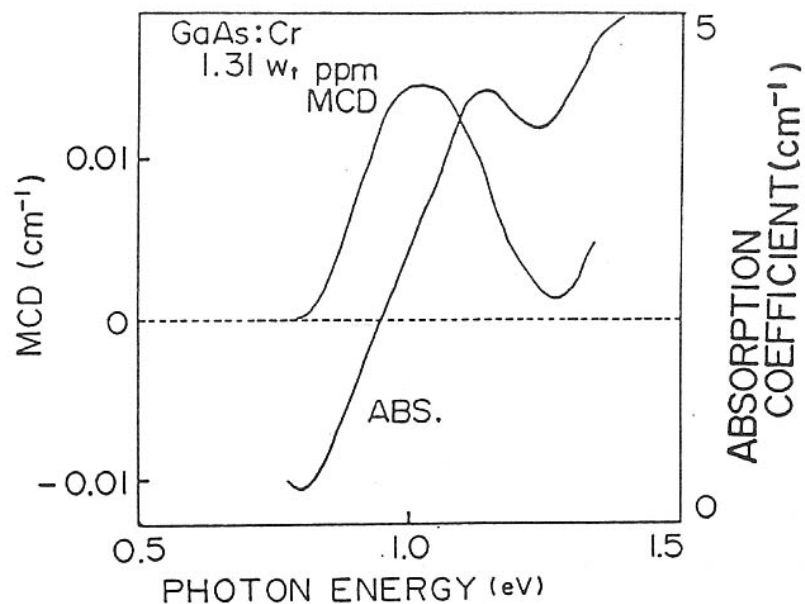
GdCoの磁気光学スペクトル

- ゼロ磁界におけるカー回転およびカー楕円率を光子のエネルギーEに対してプロットしたスペクトルを図に示します。
- アモルファスRETM合金の磁気光学スペクトルについては、バンド計算との対比は行われていません。**今後の課題です。**



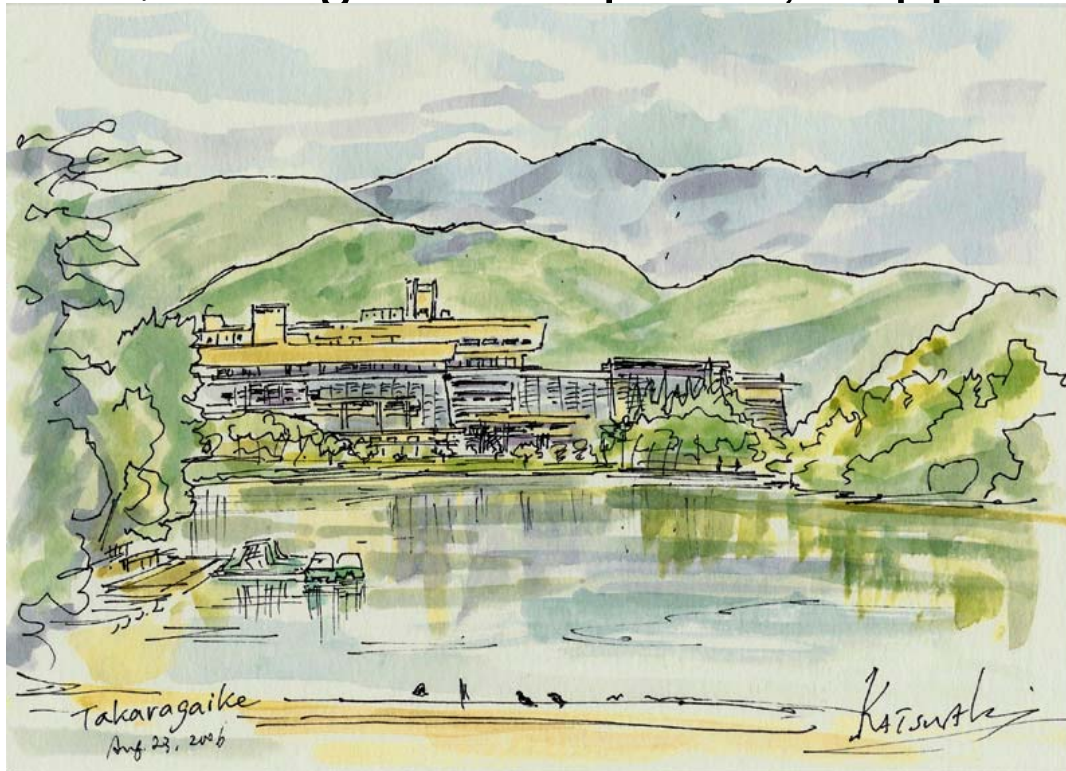
GaAs:CrおよびInP:Feの深い準位の磁気円二色性(MCD)による評価

- 反絶縁性GaAs、InPには遷移元素を添加して深い準位を作っている。
- そのキャラクテリゼーションにMCDを使った。



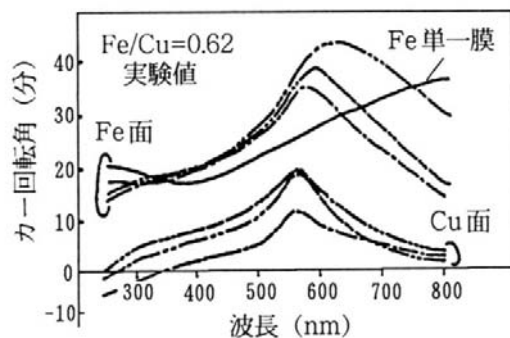
1987 ISMO Kyoto

- ISMO (磁気光学国際シンポジウム) (京都)
 - K.Sato, T.Iijima, T.Nakajima and S.Kobayashi: Magneto-Circular Dichroism Spectra in Semi-Insulating GaAs:Cr and InP:Fe; J. Magn. Soc. Jpn. 11, Suppl.S1 (1987) 121-124.



組成変調磁性多層膜のMOスペクトルの解析

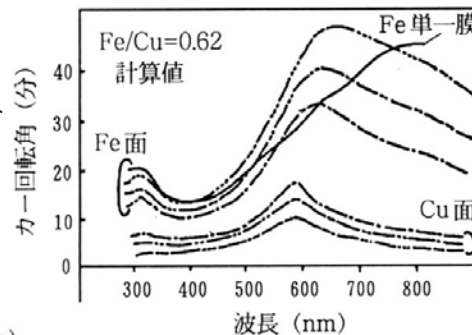
仮想光学定数法によるシミュレーション結果



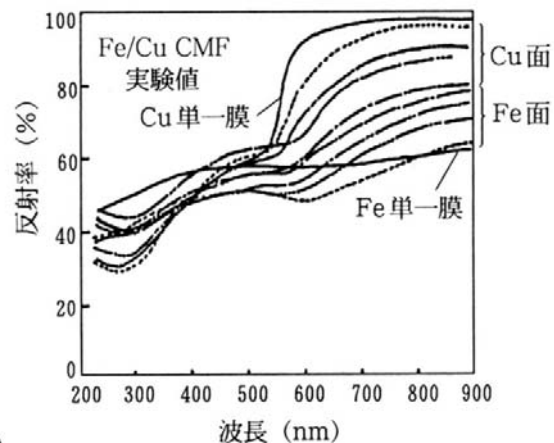
(a)

磁気カー効果

- Fe(70)/Cu(113)
- Fe(106)/Cu(171)
- Fe(150)/Cu(245) Å



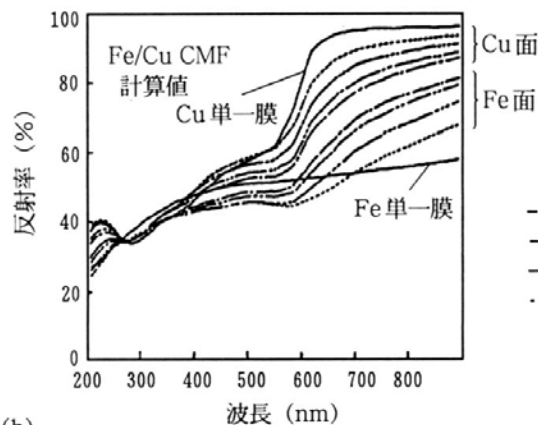
(a)



(b)

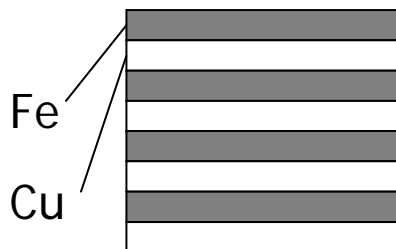
反射スペクトル

- Fe/Cu=0.62
- Fe(31)/Cu(49)
 - Fe(57)/Cu(92)
 - Fe(106)/Cu(171)
 - Fe(170)/Cu(275) Å

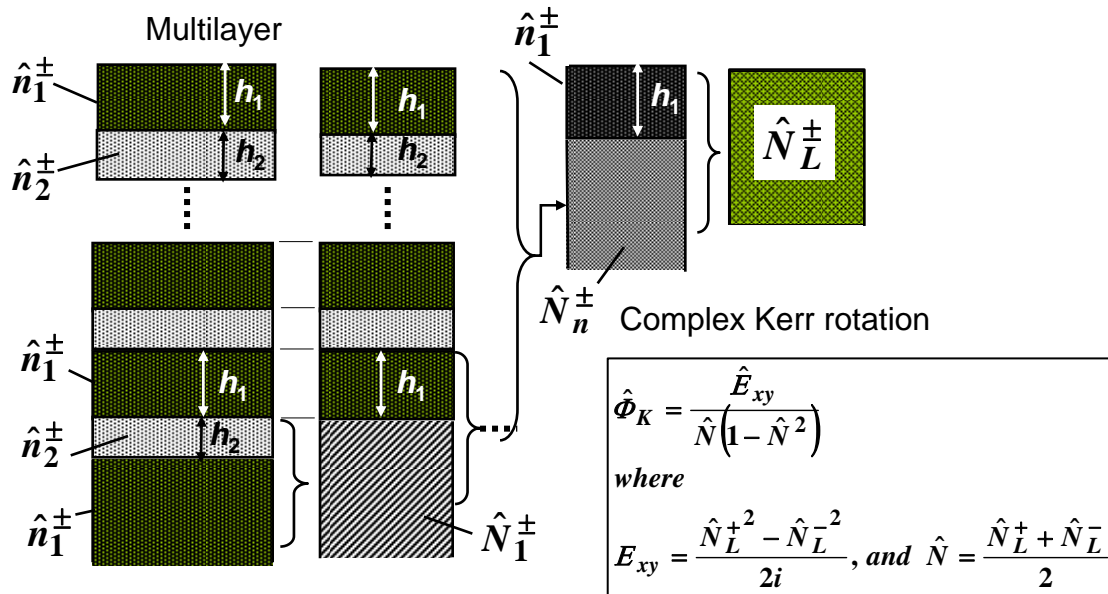
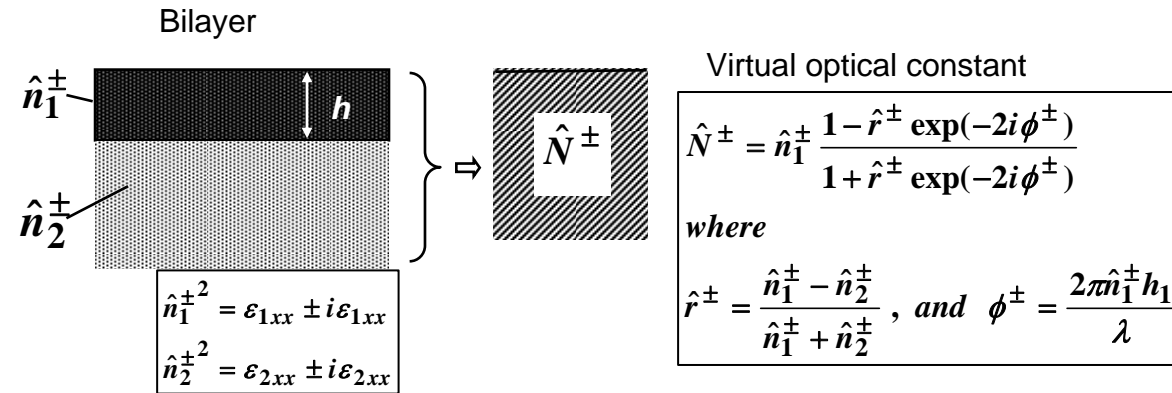


(b)

実験データ



仮想光学定数法



- 膜と基板を一体化して見かけの光学定数を求める。
- これを繰り返して、多層膜の光学定数を決定する。

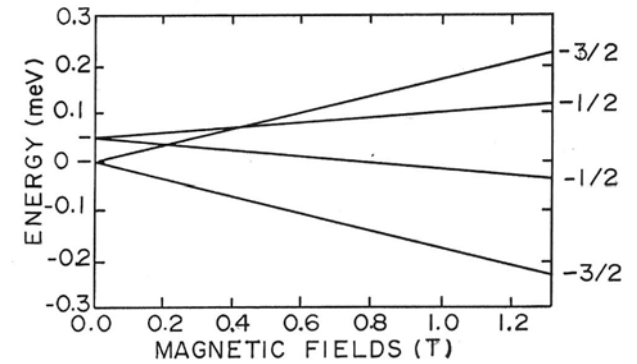
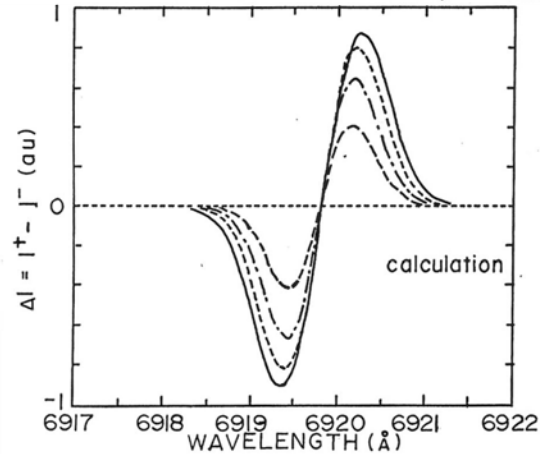
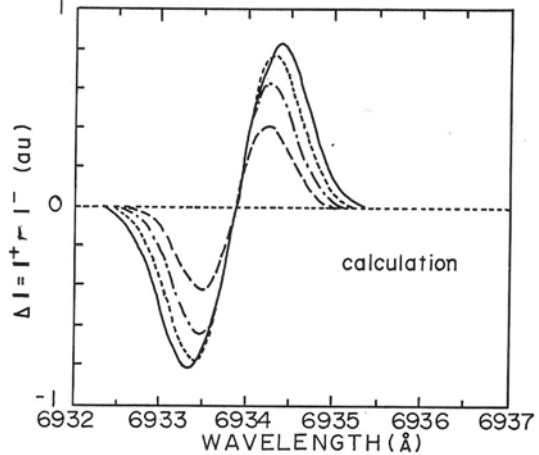
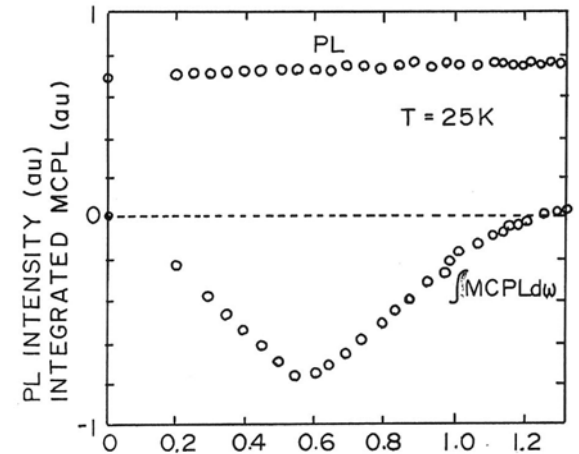
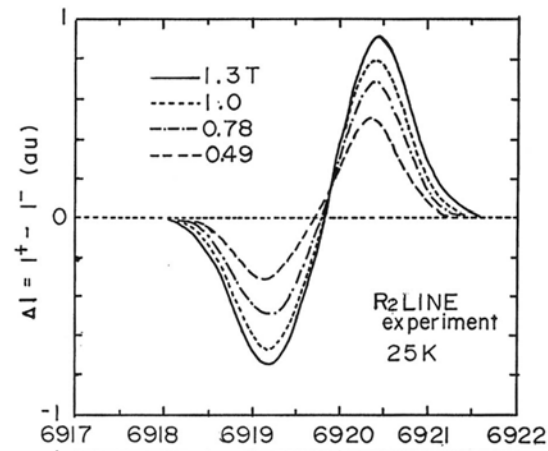
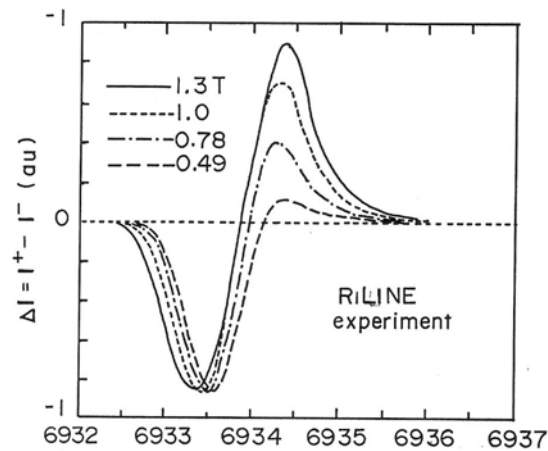
1988 ICM Paris

- K.Sato and H.Kida: Calculation of Magneto-Optical Spectra in Compositionally-Modulated Multilayered Films; J. Phys. (France) **49** (1988) Suppl.C8,1779-1780.



Proc. Int. Conf. Magnetism, Paris, September 1988 ,

Ruby($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$)におけるMCE (磁気円二色性発光)スペクトル



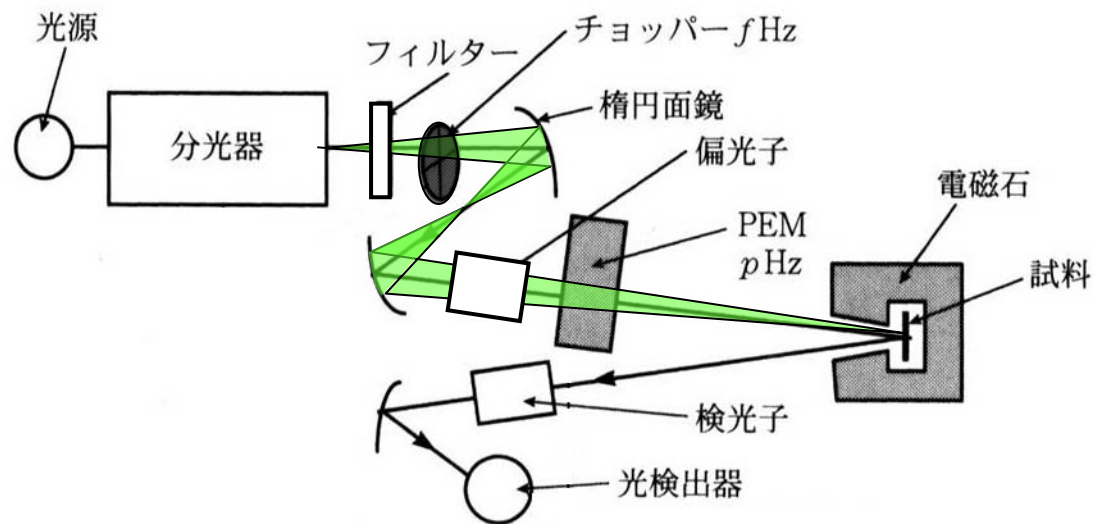
ルビー ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$) における磁気円二色性発 光スペクトル(MCE)

- K.Sato and M.Hirai: Anomalous Behavior of the Magneto-circular Photoluminescence Line Shape of R1-Line in Ruby ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$);



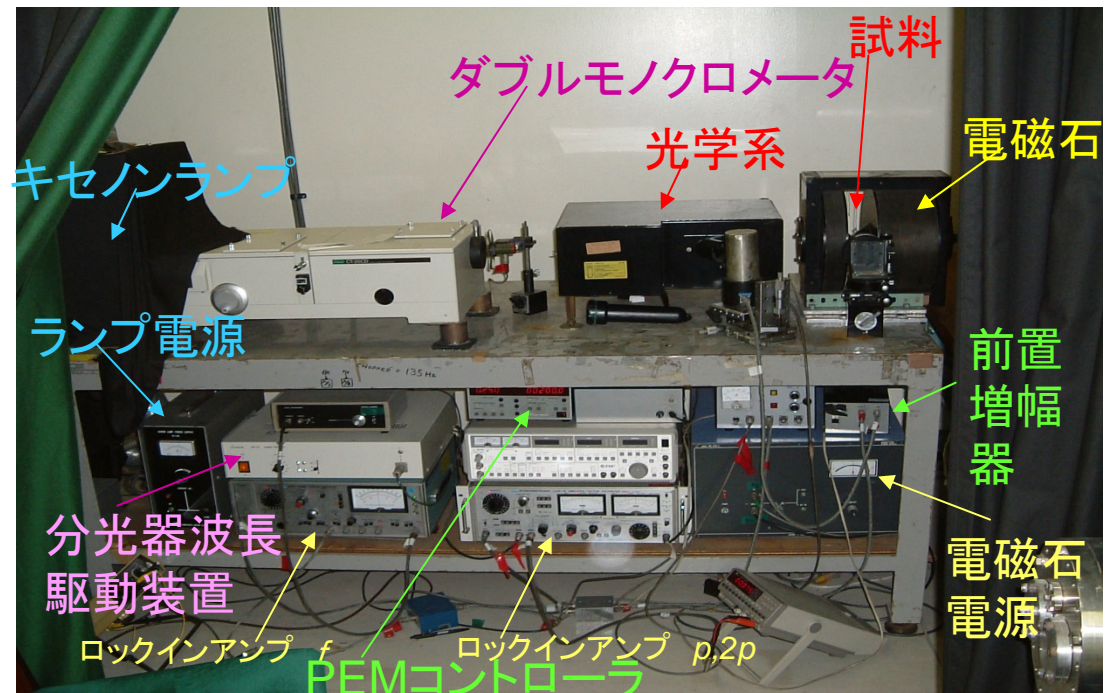
1-6eVの広い波長範囲で測定できる磁気光学スペクトル測定装置を開発

- 1991-93年度科研費重点領域研究「金属人工格子」の助成により広波長帯域磁気光学スペクトロメータを開発
- PEMによる円偏光変調法の採用
- 楕円面鏡の採用で色収差を回避
- 紫外に強いロシヨンプリズム偏光子を採用

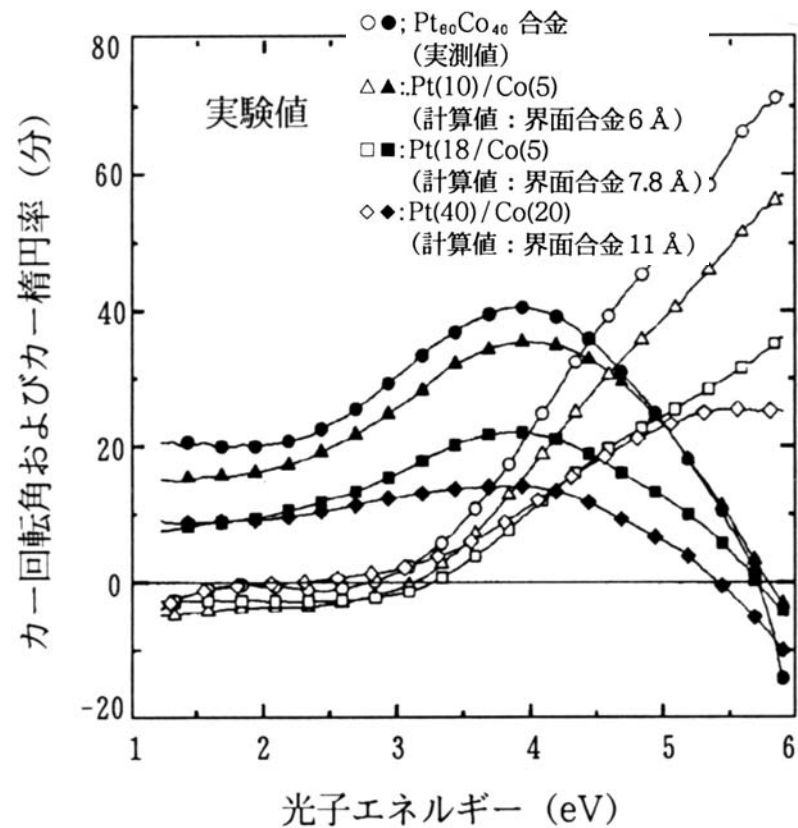
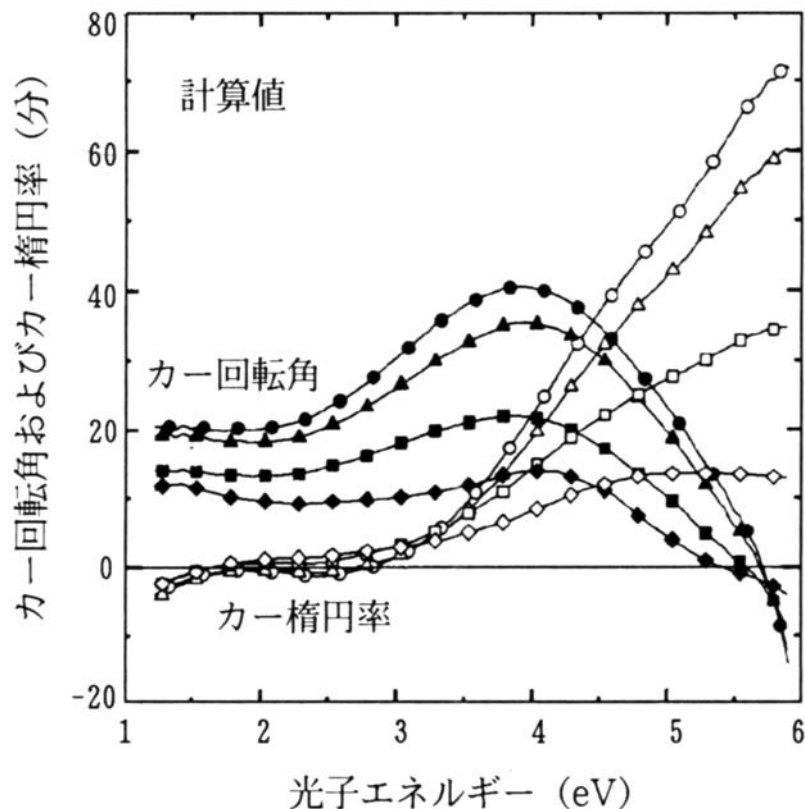


1-6eVの広い範囲での 磁気光学スペクトルの測定が可能に。

- Pt/Co人工格子
(三井化学との共同)
- PtMnSbバルク結晶
(金研藤森研との共同)
- FePt/Pt人工格子
(金研藤森研との共同)
- Fe/Au人工格子
(金研藤森研との共同)
- MnSb, MnAsエピ膜
(森下研との共同)



Pt/Co人工格子の磁気光学スペクトル



三井化学戸上氏との共同研究

1992年 MORIS92, Tucson

- K.Sato: Analysis of Magneto-Optical Spectra of Pt/Co and Pt/Fe Multilayers Using Optical Constants Determined by Reflectivity Spectra between 0.5 and 25 eV

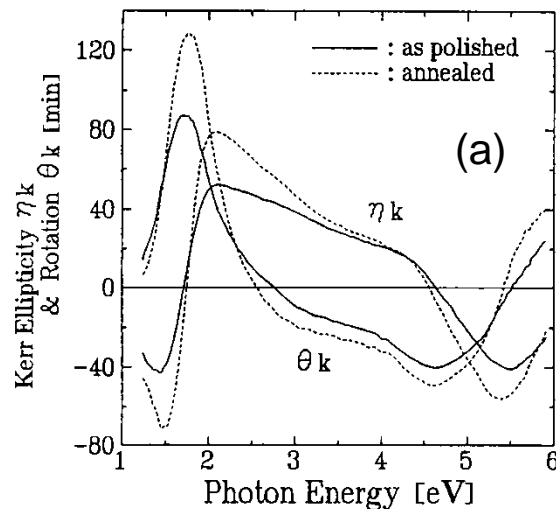


PtMnSbの磁気光学スペクトル

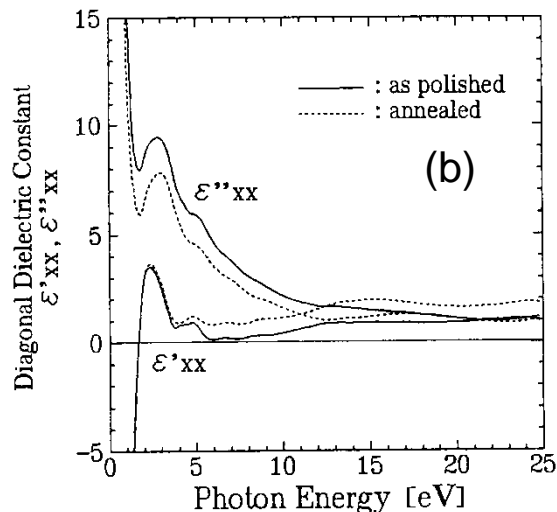
Buschowという人は、多数の磁性合金の磁気光学スペクトルを探索して、PtMnSbが室温で最も大きなカー回転を示すことを見いだしました。

$$\Theta_K = \frac{\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}(1-\epsilon_{xx})}}$$

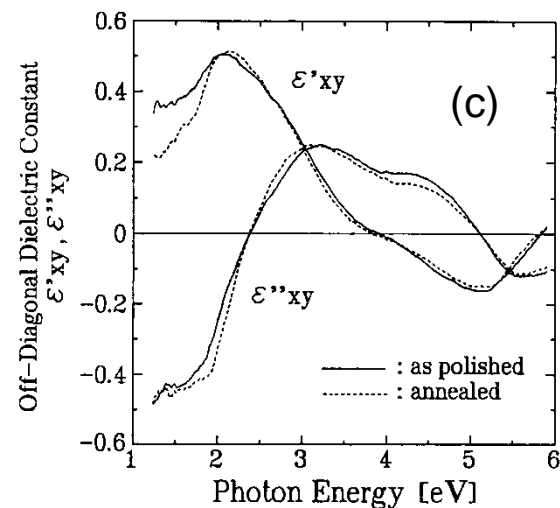
カー回転と楕円率



誘電率対角成分

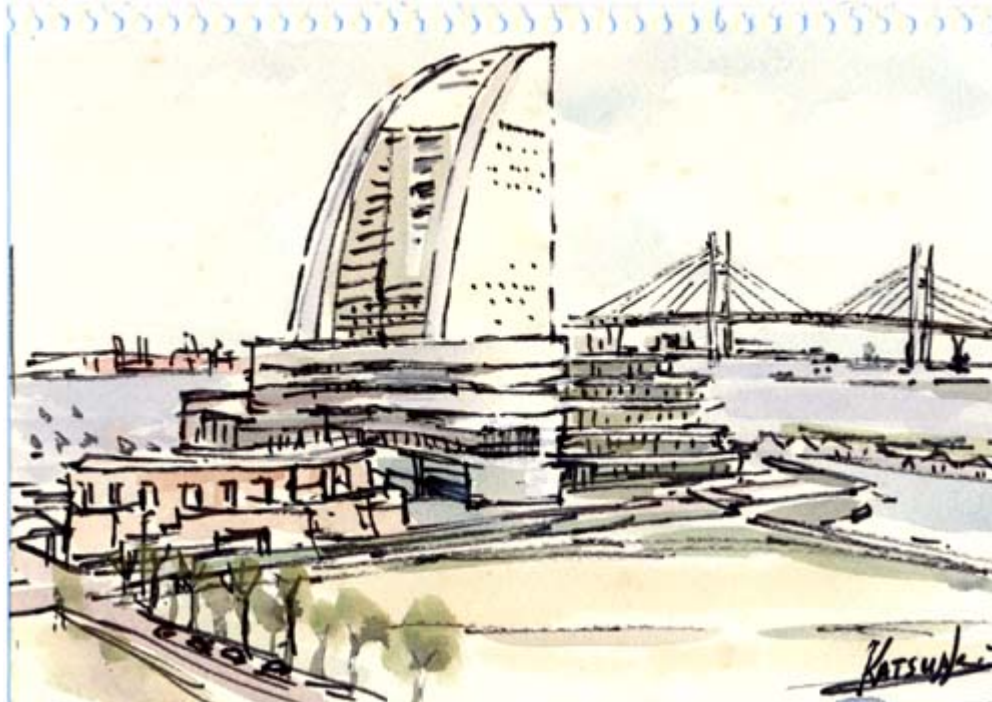


誘電率非対角成分



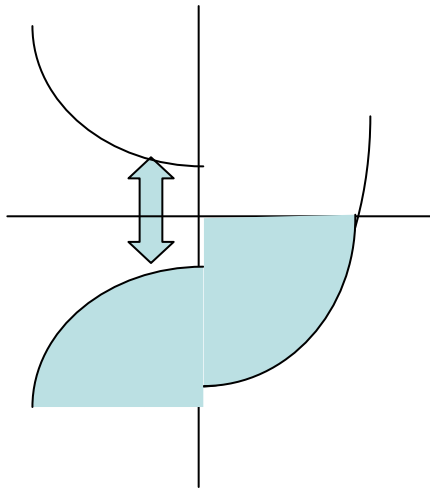
1993 ICTMC9 Yokohama

- H.Ikekame, K.Sato, K.Takanashi and H.Fujimori: Magneto-optical Spectra in PtMnSb between 1.2 and 5.9 eV; Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) Suppl. 32-3, pp. 284-286.



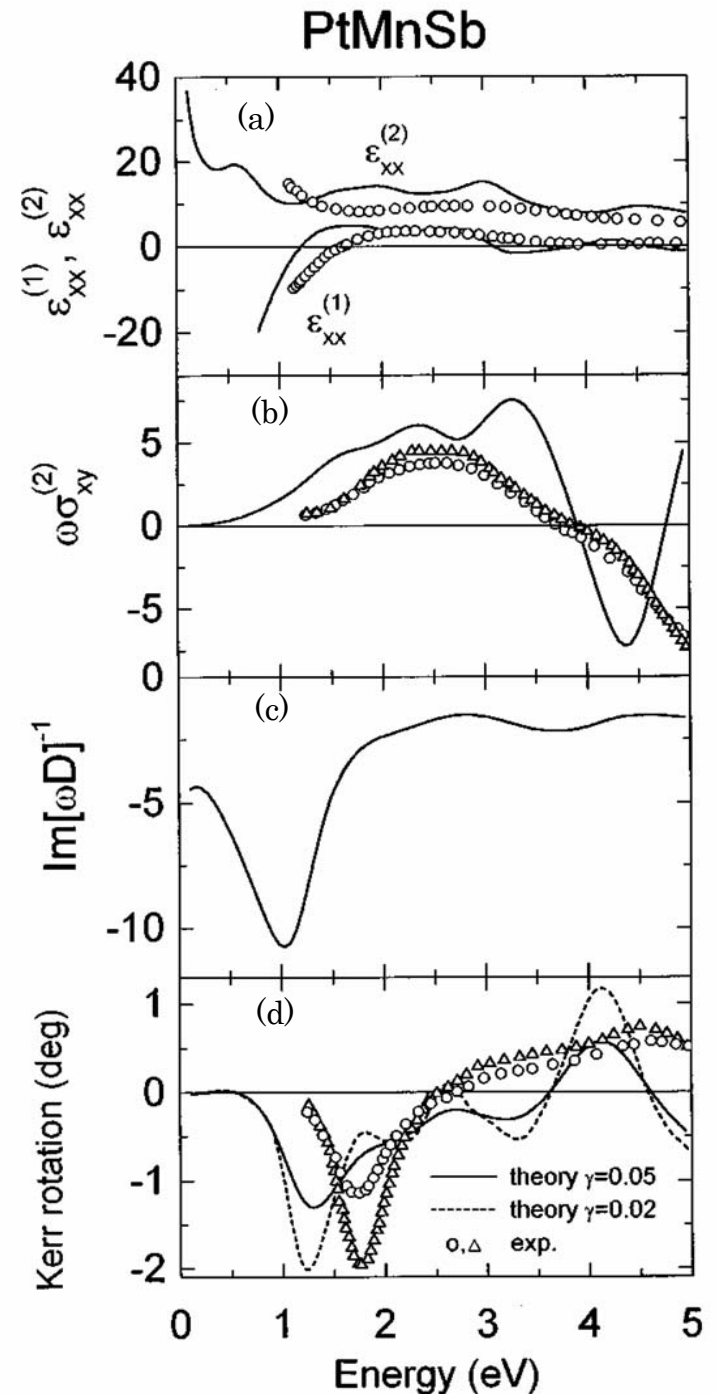
第1原理計算と実験

- 第1原理計算値(V.N.Antonov)と実験値(K.Sato)はよく対応し、2eV付近の σ''_{xy} の立ち上がりは小数スピントバンドにおける価電子帯から伝導帯への遷移によること、2eV付近に見られるカー回転のピークは、誘電率の対角成分の実数部がゼロを横切ることによることなどが明らかになりました。



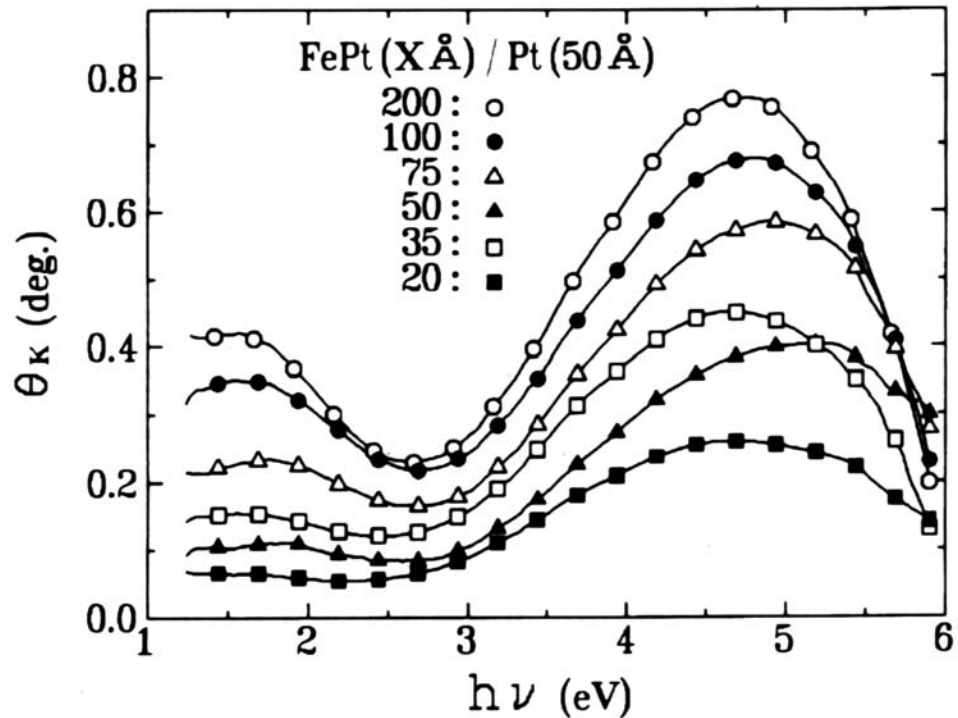
$$\Theta_K = \frac{\epsilon_{xy}}{\sqrt{\epsilon_{xx}(1-\epsilon_{xx})}}$$

V.N.Antonov, P.M.Oppeneer et al.:Phys.Rev. B56 ('97) 13012
K.Sato et al.:Proc.ICF6, 1992, p.1647



FePt/Ptの磁気光学スペクトル

- FePt/PtのスペクトルのFePt膜厚依存性は、Ptが磁性を持っていると考えると説明できる。



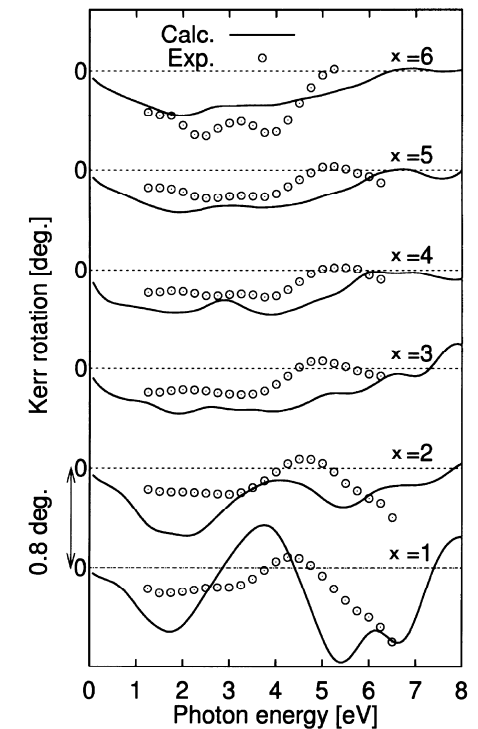
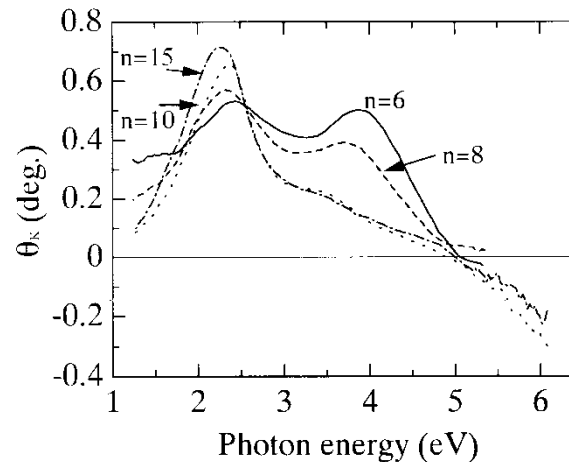
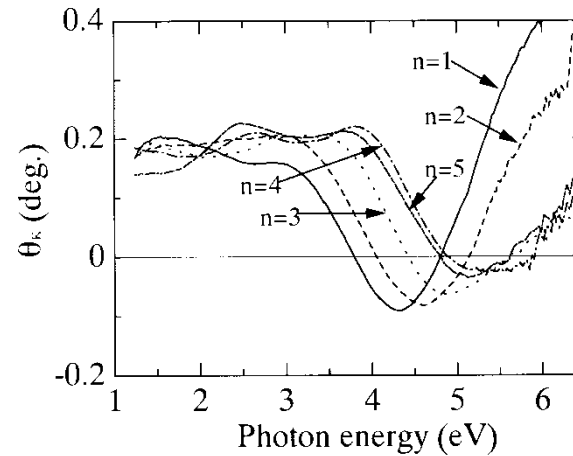
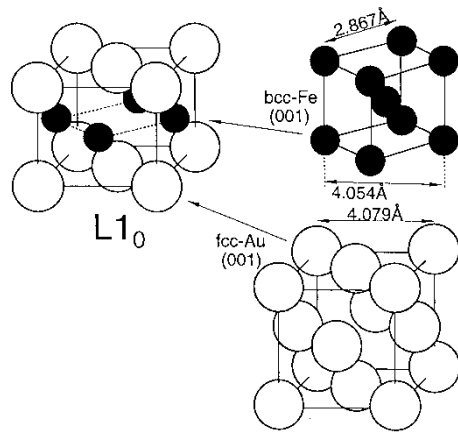
1994 ICMFS Duesseldorf

- K.Sato, Y.Tosaka, H.Ikekame, M.Watanabe, K.Takanashi and H.Fujimori: Magnetic Polarization of Interfacial Pt layers Witnessed by Magneto-optical Spectra in FePt/Pt Multilayers; *J. Magn. Magn. Mater.* **148** (1995) 206-208.



Proc. ICMFS/E-MRS Meeting, Duesseldorf, 1994;

Fe/Au人工格子の磁気光学効果



K. Sato, E. Takeda, M. Akita, M. Yamaguchi, K. Takanashi, S. Mitani, H. Fujimori, Y. Suzuki: Magneto-optical spectra of Fe/Au artificial superlattices modulated by integer and non-integer atomic layers; J. Appl. Phys. **86** [9] 4985-4996 (1999)

第1原理バンド計算との対応
原研 山口氏との共同研究

1996 MORIS (Netherlands)

- K.Sato, H.Ikekame, K.Takanashi, S.Mitami and H.Fujimori: Magneto-Optical Characterization of FeAu Artificial Ordered Alloy (Invited)



•MORIS'96, Noordwijkerhout, April 29, 1996



1997 ICM Cairns (Australia)

- K. Takanashi, S. Mitani, H. Fujimori, K. Sato and Y. Suzuki:
Magneto-optical Kerr Effect In Fe/Au Superlattices Modulated
By Integer Monatomic Layers; J. Magn. Magn. Mater. **177-181**
(1998) 1199-1200.



ケアンズの巨木



レインフォレストステーション
のコアラ



フィッツロイ島の珊瑚

MnSb, MnAsの磁気光学スペクトル

- 水素援用HWE, MBEにより MnSb, MnAs薄膜を作成

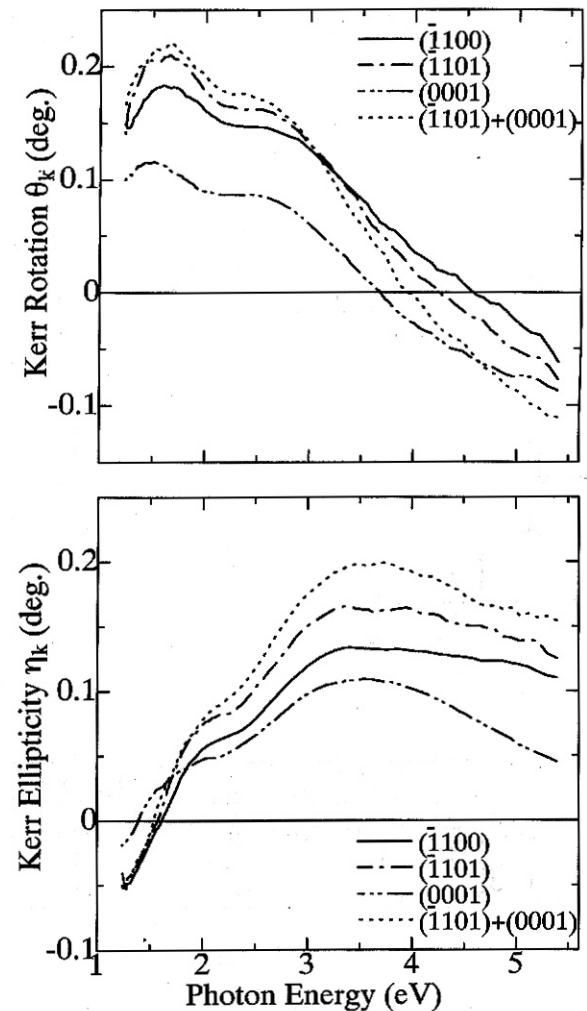
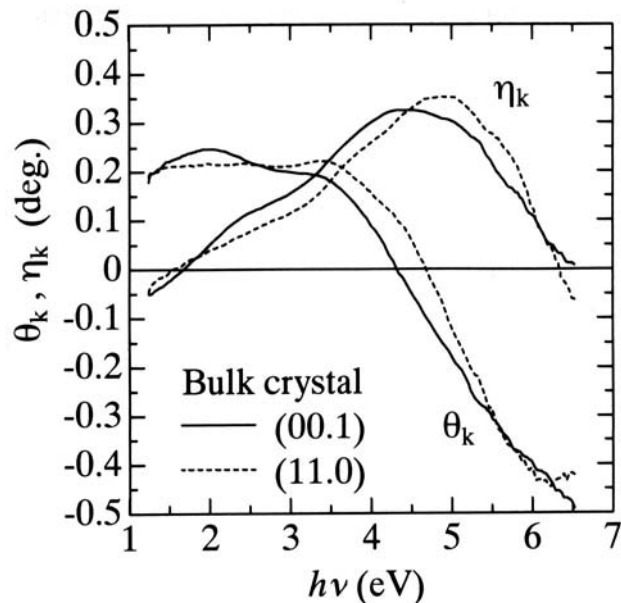


Fig. 3. Polar magnet-optical Kerr rotation and Kerr ellipticity spectra for various MnAs epilayers.

1997 ICMFS (Sunshine Coast)

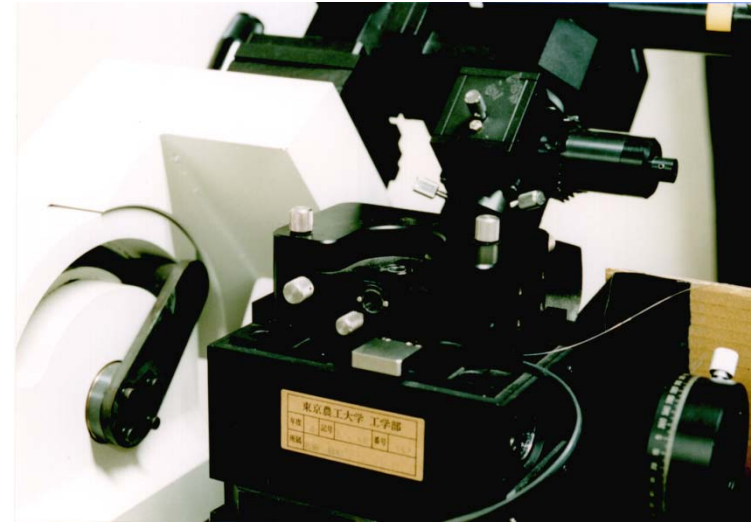
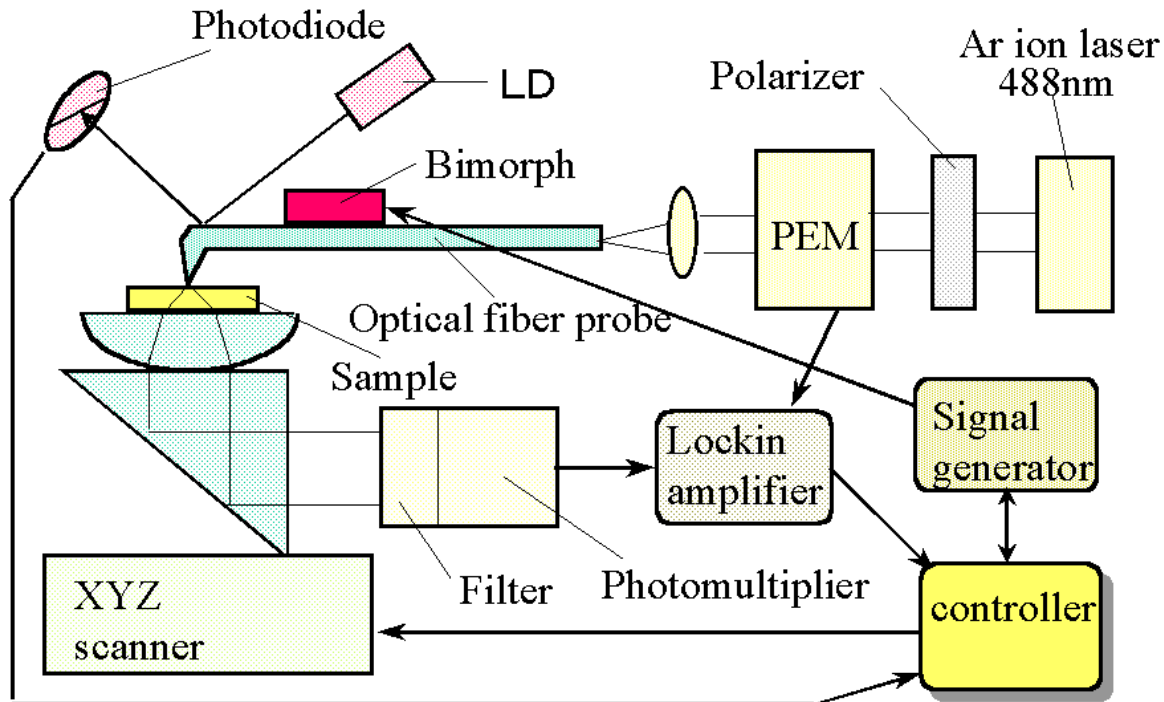
- K. Sato, Y. Morishita, H. Ikekame and T. Ishibashi: Atomic-hydrogen assisted epitaxial growth of manganese pnictides on GaAs substrates



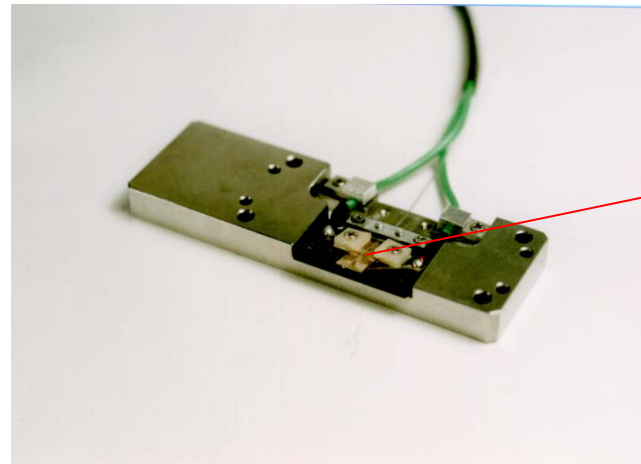
• 15th Int. Colloquium Magn. Films & Surfaces (ICMFS15), Sunshine Coast, Australia, August 4-8, 1997



近接場磁気光学顕微鏡(MO-SNOM)の開発

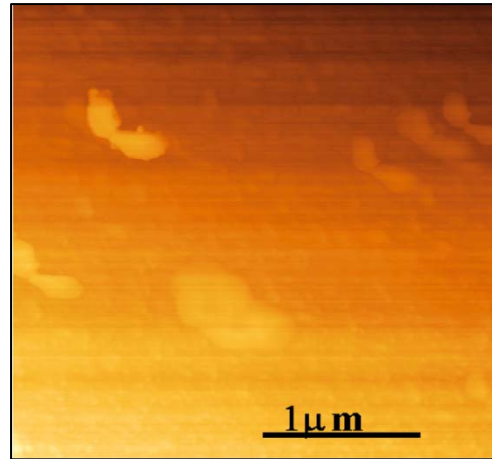


SIIナノテクノロジーと共同開発

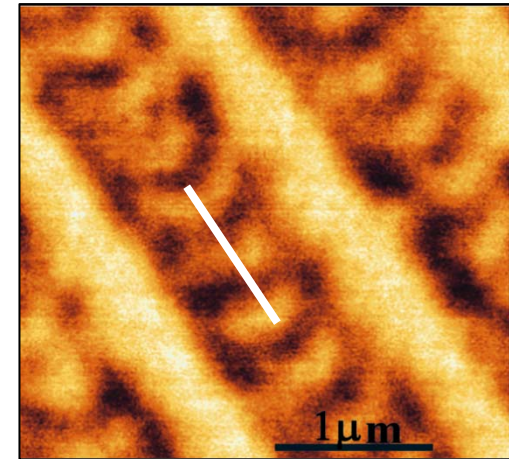


Pt/Coディスクに記録された磁気マークのMO-SNOM像

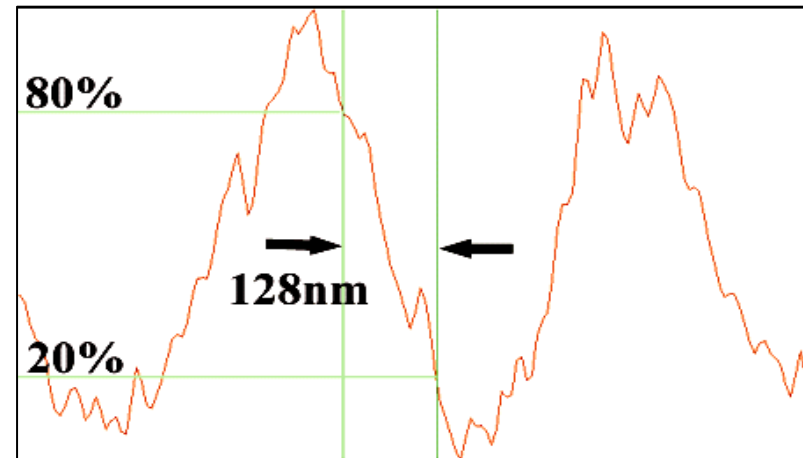
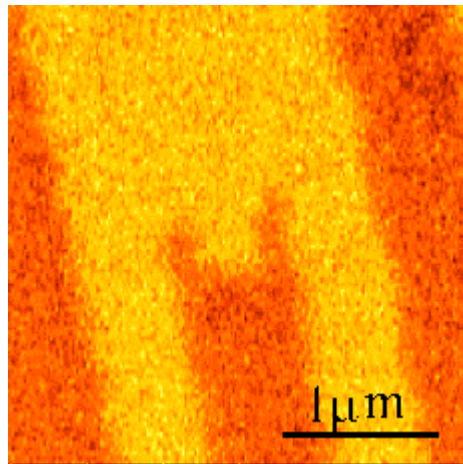
マーク長0.2mmの記録マーク



Topography



MO image

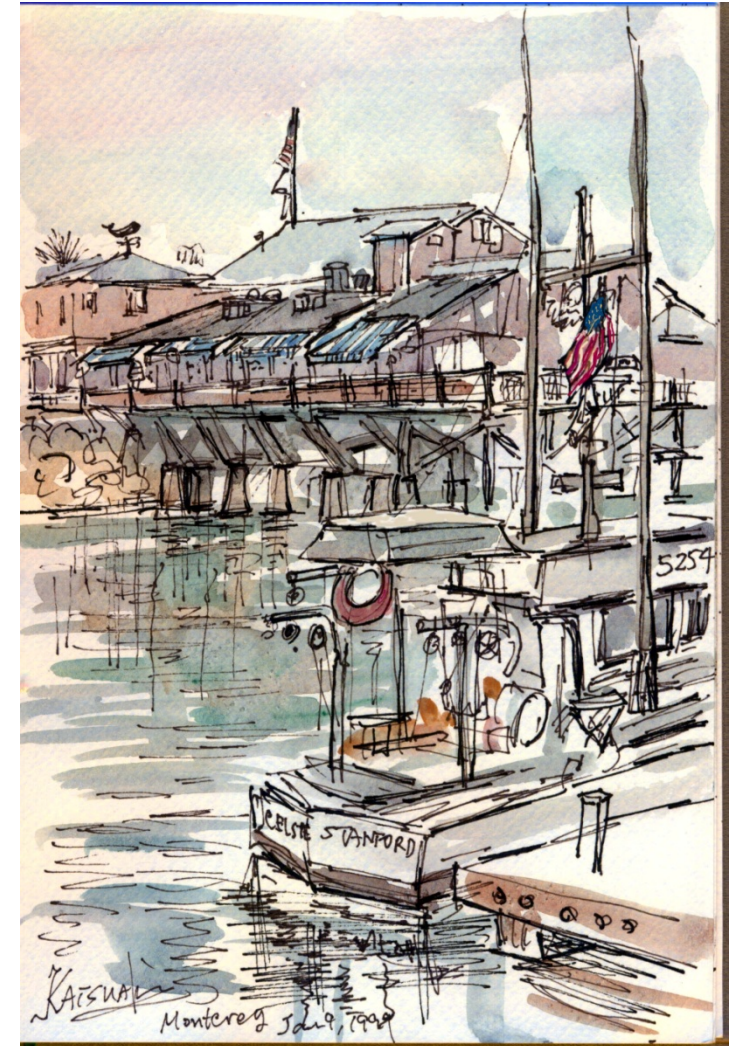


Line profile

分解能の定義

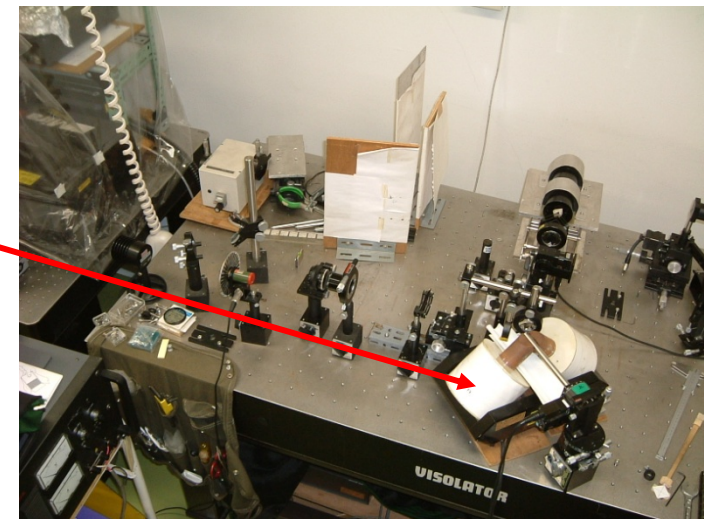
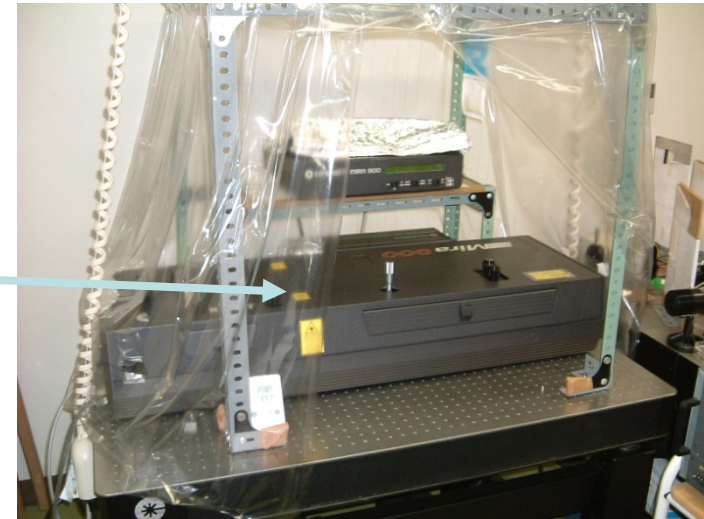
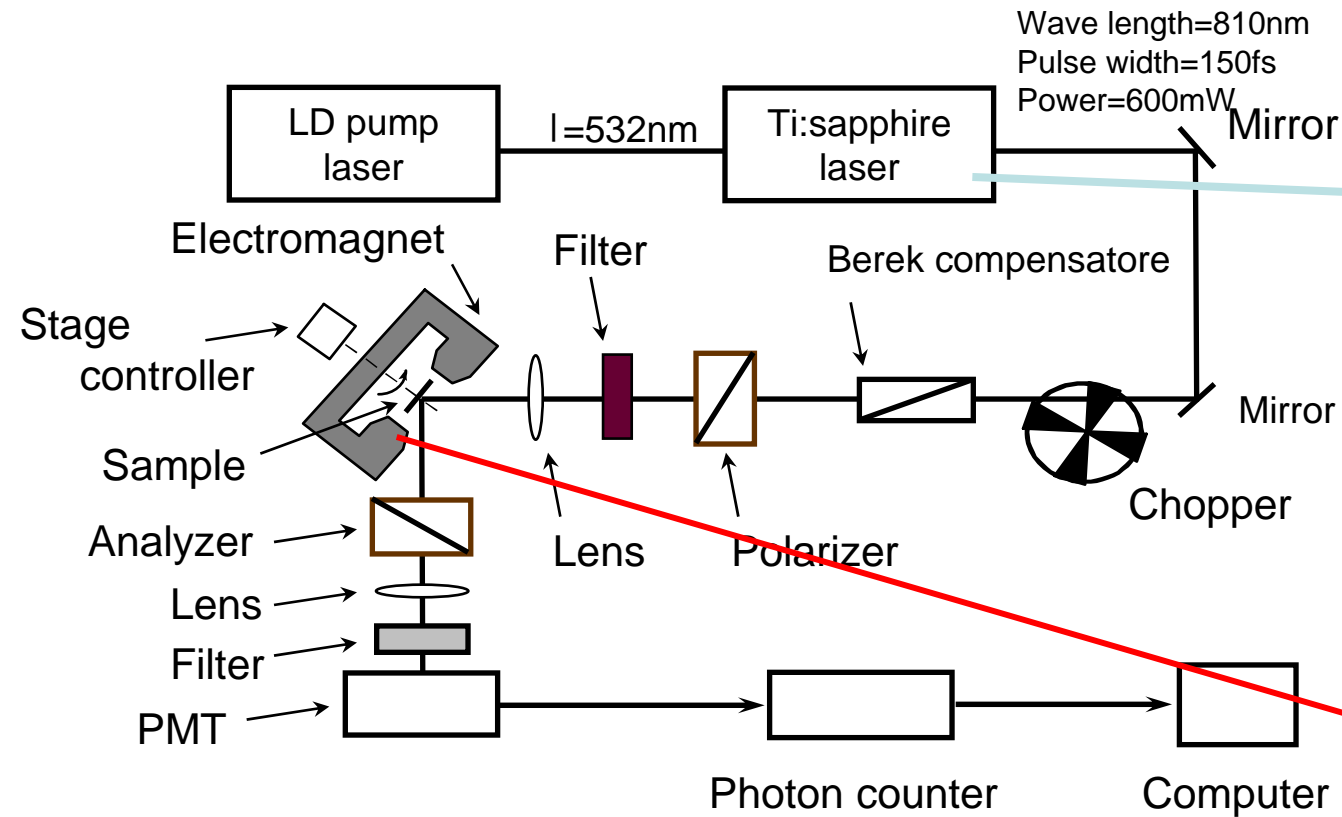
1999 MORIS99 (Program Chair)

- K.Sato, T.Ishibashi, T.Yoshida, J.Yamamoto, A.Iijima, Y.Mitsuoka, and K.Nakajima: Observation of Recorded Marks of MO Disk by Scanning Near-Field Magneto-Optical Microscope

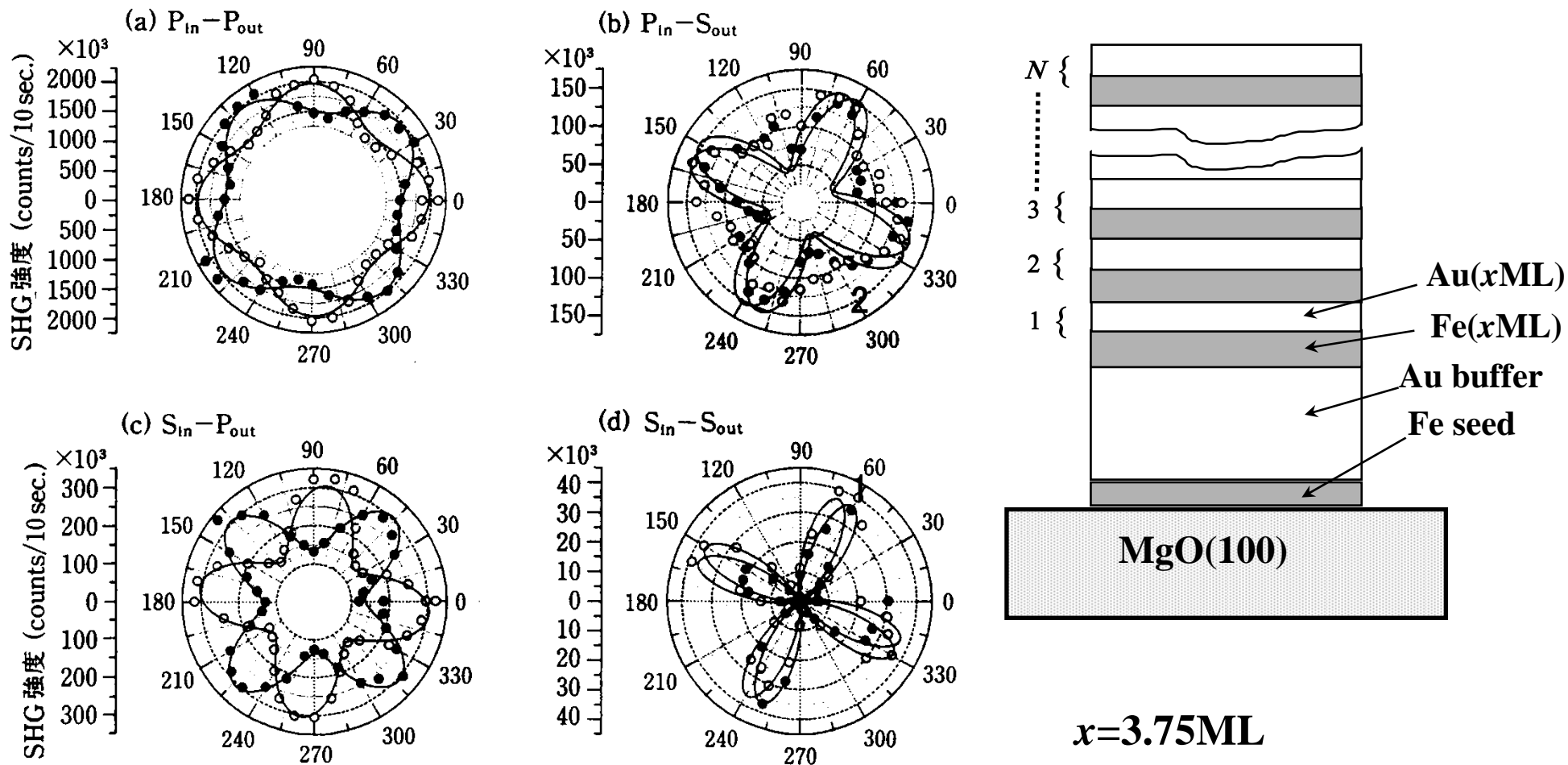


- Magneto-Optical Int. Symposium '99, Monterey, USA, Jan. 10-13, 1999.

非線形磁気光学効果の測定



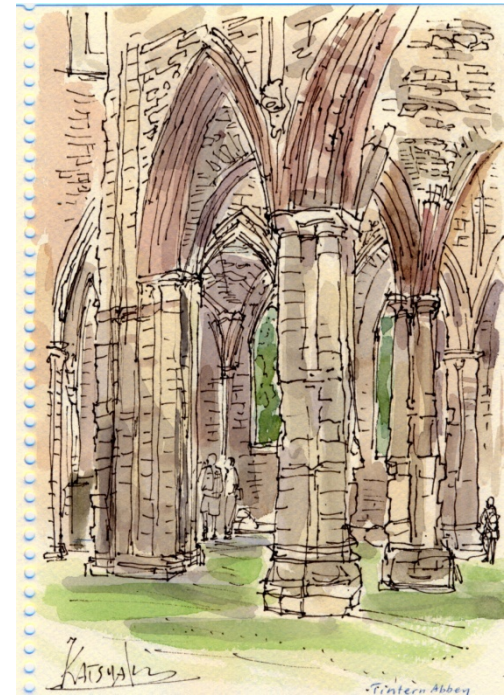
Fe/Au人工格子のMSHGの対称性



K. Sato, A. Kodama, M. Miyamoto, A.V. Petukhov, K. Takanashi, S. Mitani, H. Fujimori, Kirilyuk and Th. Rasing: Anisotropic Magnetisation-Induced Second Harmonic in Fe/Au Superlattices; Phys. Rev. **B64** (2001) 184427-1~184427-10.

1999 2nd Int. WS on Nonlinear Magneto-optics (NOMOKE)

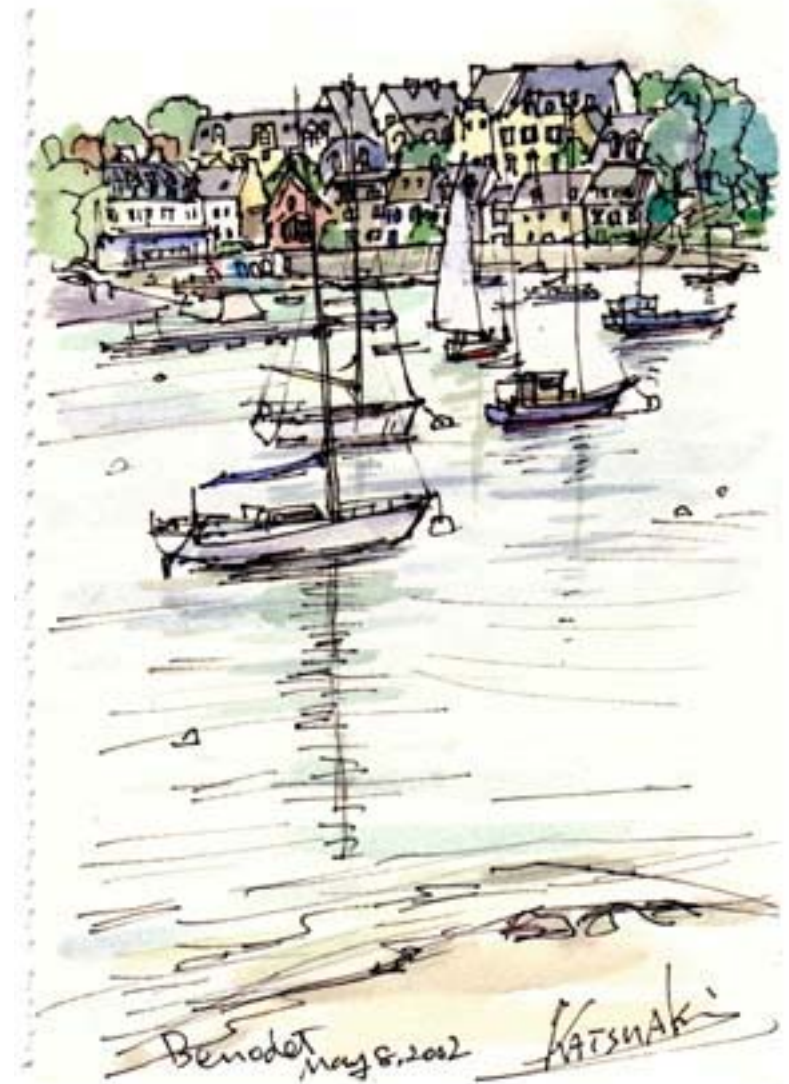
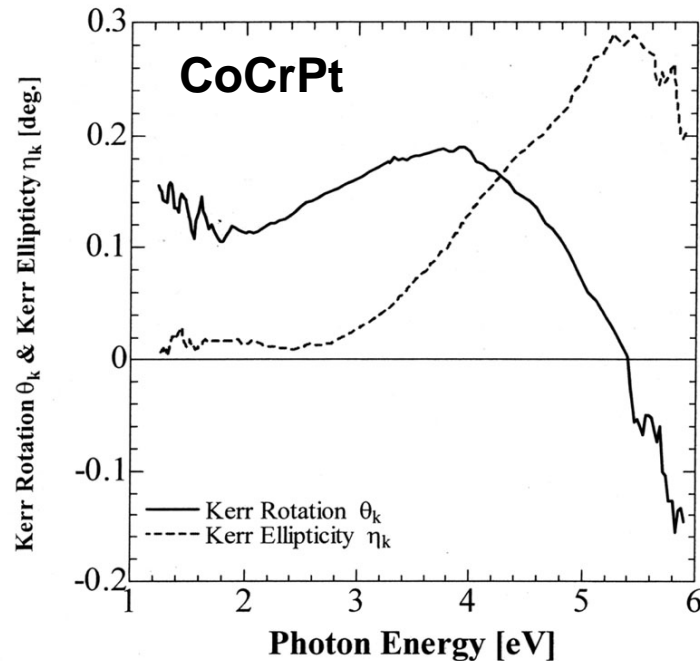
- K. Sato, A. Kodama, M. Miyamoto, K. Takanashi, S. Mitani and H. Fujimori: Nonlinear Magneto-Optical Effect in Fe(xML)/Au(xML) Superlattices with Non-Integer Modulation Period



- *Second Int. Workshop on Nonlinear Magneto-Optics,*
- *June 24-26, 1999, Cardiff, United Kingdom. (Invited)*

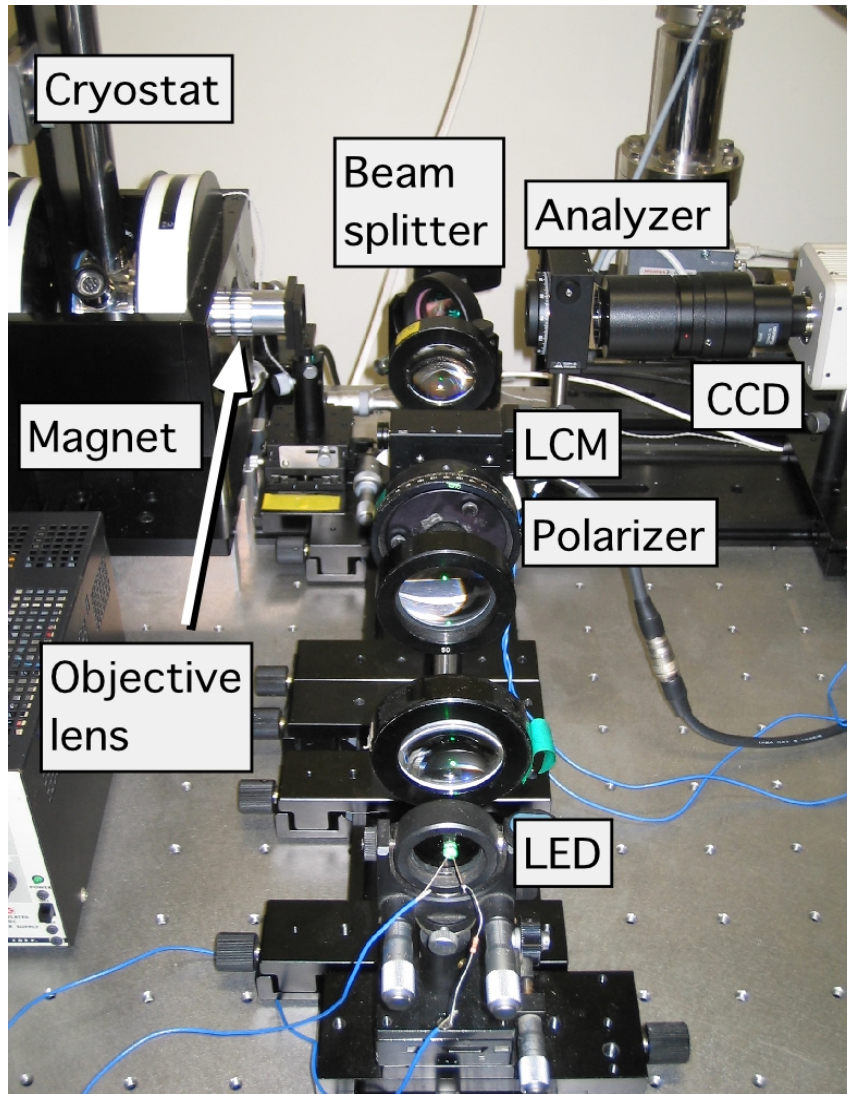
2002 MORIS Benodet (France)

- K. Sato, M. Hosoba, S. Shimizu, K. Terayama and M. Futamoto: Magneto-optical Spectra of Single Crystalline CoCrPt Films between 1.2 and 6 eV; Trans. Magn. Soc. Jpn. **2** [4] (2002) 167-170



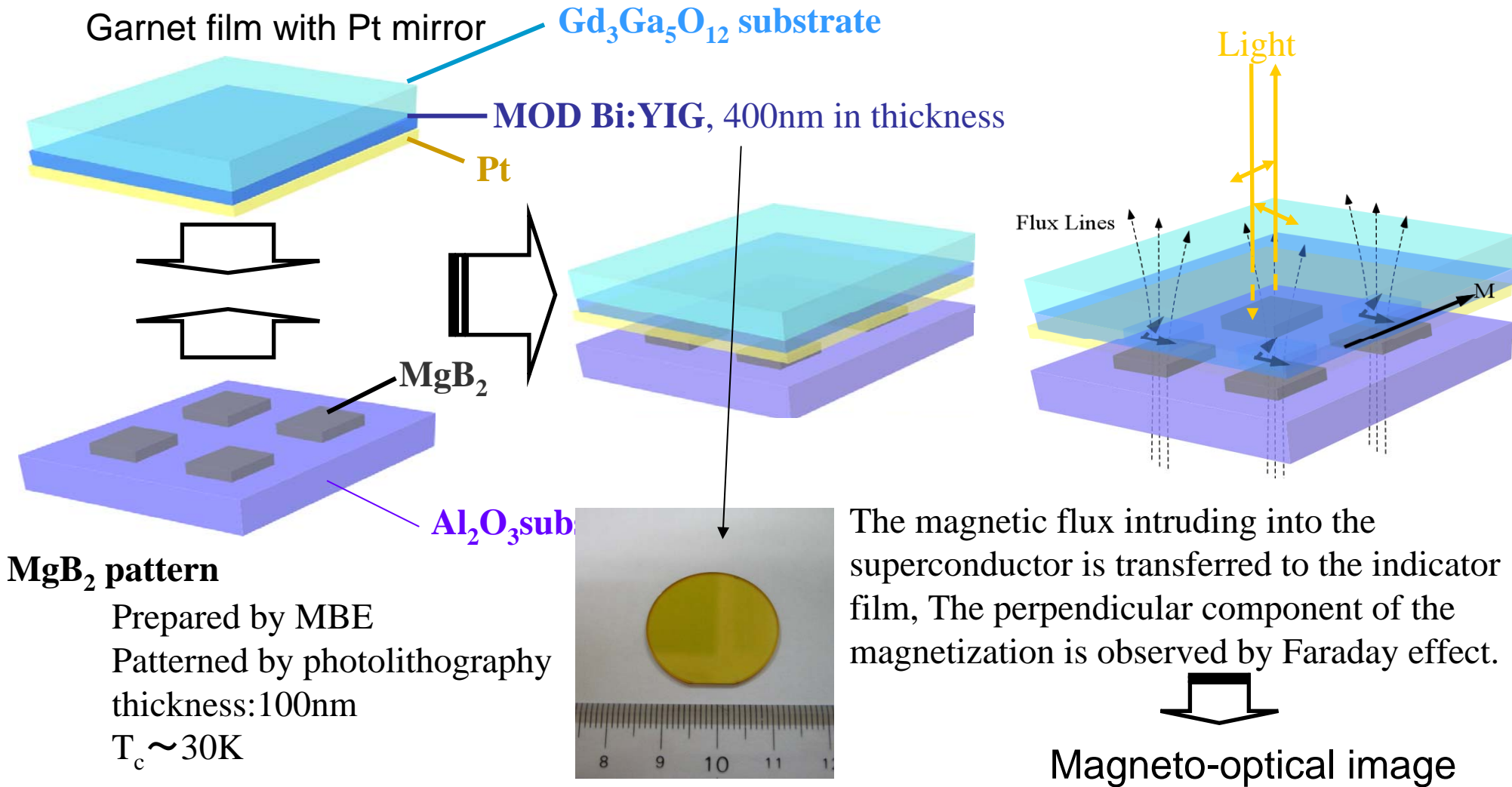
•MORIS 2002, May 5-8, 2002, Benodet, France.

円偏光変調法を利用した磁気光学顕微鏡

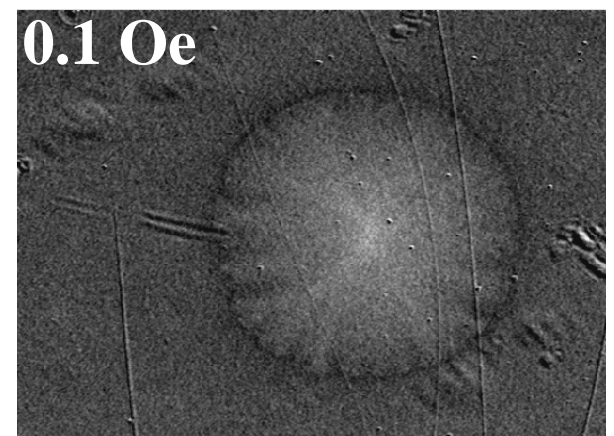
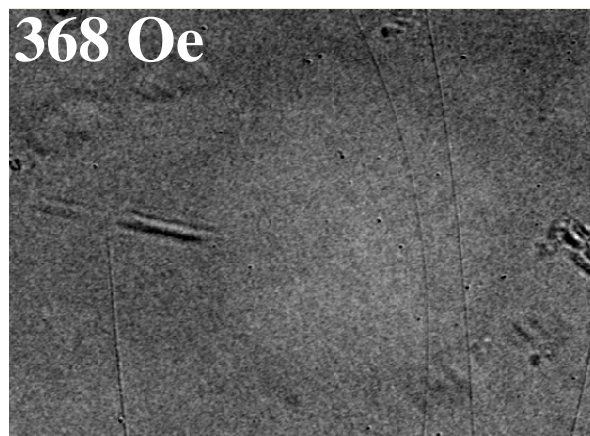
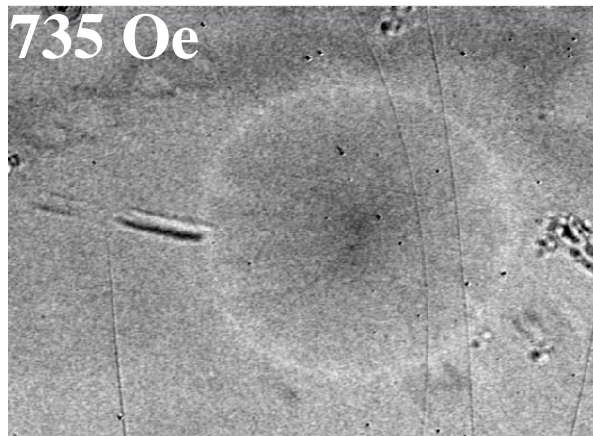
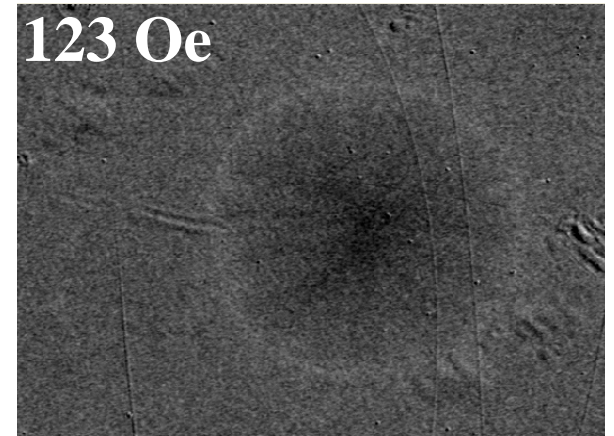
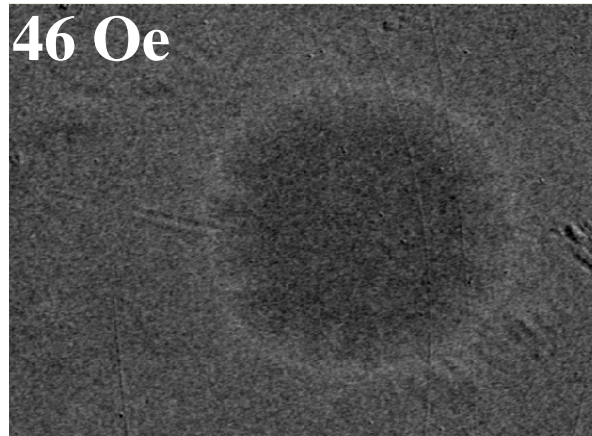
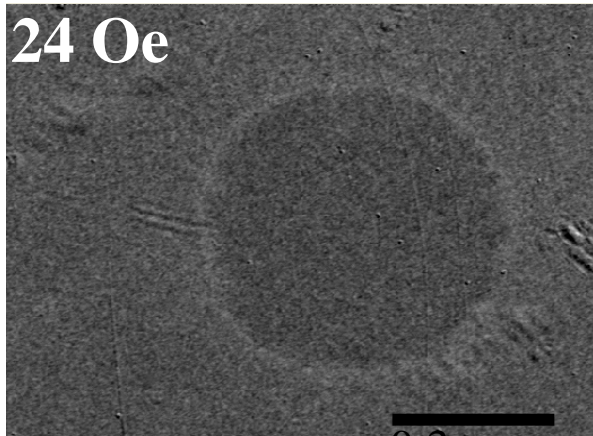


- 液晶変調器を用いて直線偏光→右円偏光→直線偏光→左円偏光を順次に試料にあて、その時の光学像をCCDカメラで撮影し、PCに入れる。PCで画像処理をして旋光像、円二色性像を得る。

MgB₂超伝導体への磁束侵入観察



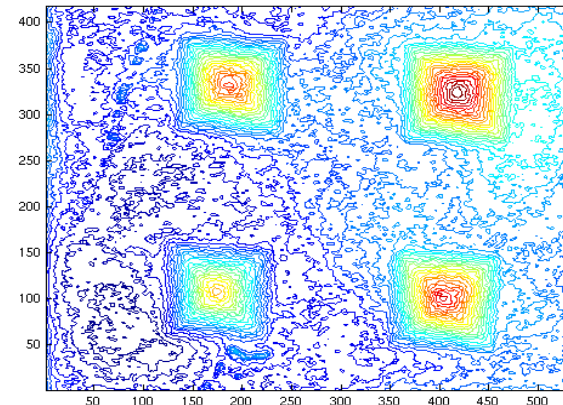
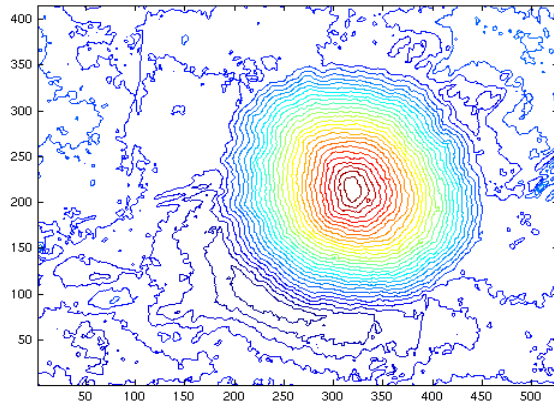
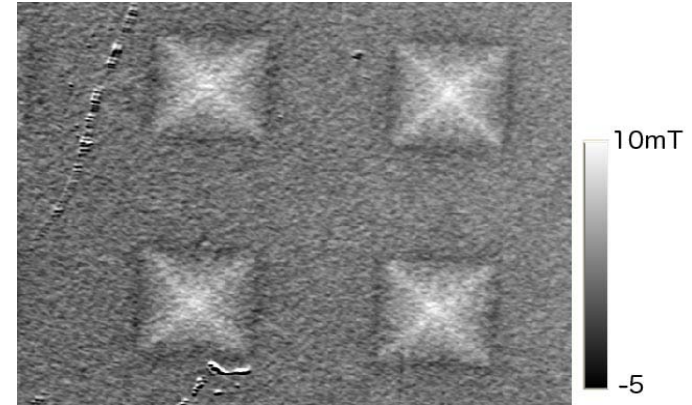
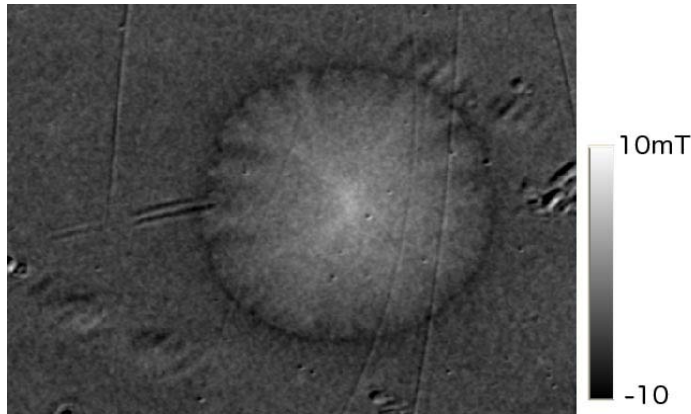
MO images of 500 μm circle



$T = 3.9 \text{ K}$



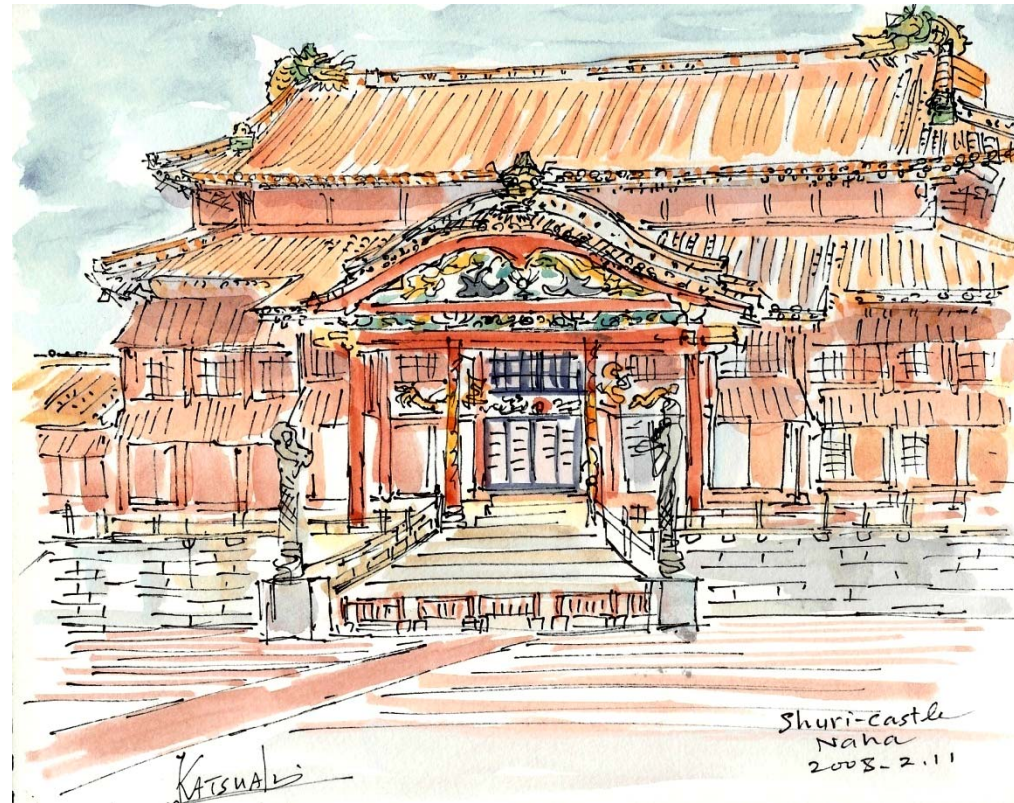
Magnetic & Current images



Density of lines corresponds to current density.
Color indicates local moment obtained in a calculation.

Current density $\sim 6 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$

Proc. Int. Workshop on Nanoscale Magnetic Materials (IWNMM2008), February 2008,



K. Sato and T. Ishibashi: Development and Application of Magneto-Optical Microscope Using Polarization-Modulation Technique; IEEJ Transactions of Electrical and Electronic Engineering (TEEE) 3 (2008) 399-403.

おわりに

- 磁気光学効果は、実用面だけでなく、基礎研究という点で奥が深い現象です。磁気光学は私の研究生活の重要な柱でした。
- 阿部先生とは、直接共同研究をしたわけではありませんが、光スピニクス研究会を通じて、絶えず、磁気光学の情報を交換し、共有させていただいたと存じます。
- ご退職後も、ますます、ご活躍されることを期待しています。