



早稲田大学 理工学部
電気・情報生命工学科
大木研究室
研究紹介

研究テーマ - 誘電体 -

電力ケーブル

光ファイバー

バンドギャップの広い物質



電氣的絶縁体

光学吸収端が短波長

電力用絶縁材料
電力ケーブル

非線形抵抗素子
等機能性材料

光導波路
光ファイバー
薄膜光導波路

非線形光学素子

電気電子部品素子の構造材、
絶縁層、誘電体層、半導体

短波長域用光学材料

いつの時代にも重要な材料

これからの時代の花形

“誘電体を中心とする新素材の「光物性」と「電気電子物性」”

大木研の研究Gr.

1. Polymer Gr. (高分子材料)

環境問題、地球温暖化、低環境負荷材料、生分解性、
ナノコンポジット、固体変電所 etc...

2. Electronic Device Gr. (MOS Tr. 絶縁膜新材料)

次世代電子デバイス用高誘電率材料、
シンクロトロン放射光 etc...

5×10^{17} 3×10^{17} 1×10^{17} 5×10^{16} 3×10^{16} 13

3. Applied Optics Gr. (光技術応用)

光ファイバ型デバイス、フォトニック結晶、
バイオセンサー、光触媒、負屈折率材料 etc...

1. *Polymer Gr.*

SEI 10.0kV X100 9.7mm

5×10^{17} 3×10^{17} 1×10^{17} 5×10^{16} 3×10^{16} 1×10^{16}

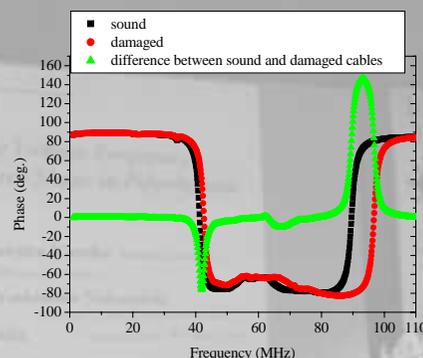
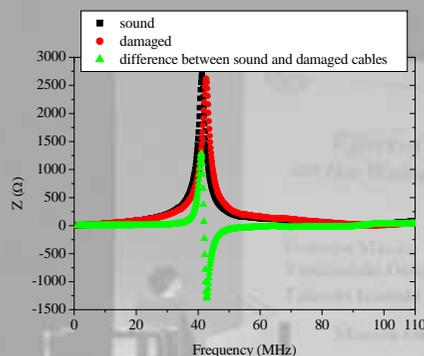
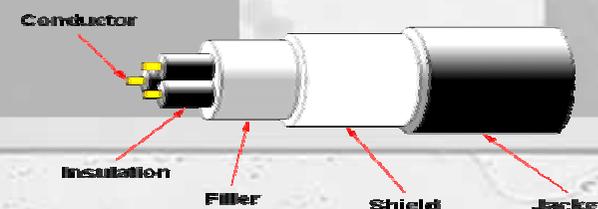
ケーブル劣化の監視・診断特性試験

経済産業省 原子力・安全保安院 高経年化対策強化基盤整備事業のひとつ

(独)日本原子力研究開発機構、東京大学との共同研究

ケーブル劣化の監視・診断手法として非破壊的な診断手法である広帯域インピーダンス分光(BIS)法の適用可能性を検証

将来的には国が作成する原子力発電所ケーブル診断に関する規格への参考となる



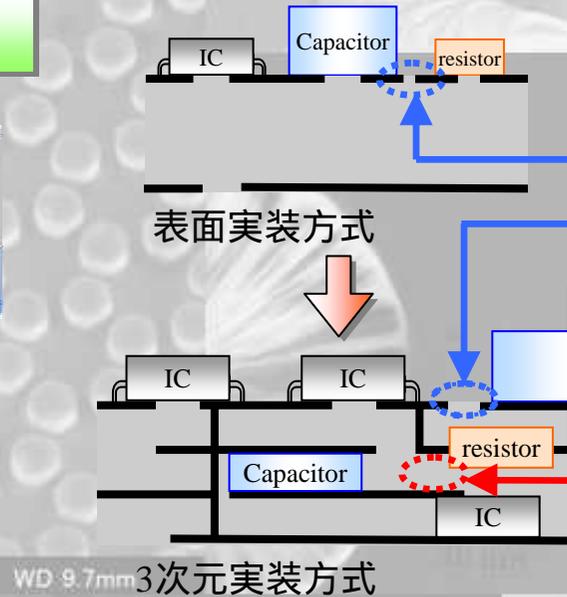
協力機関: (独)原子力安全基盤機構、福井工業大学、日立電線、三菱電線工業、(社)電線総合技術センター、(財)電力中央研究所、東京電力、関西電力 等

イオンマイグレーションの抑制

プリント回路基板

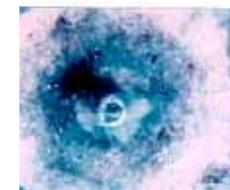


SEI 10.0kV X8,000 1 μm

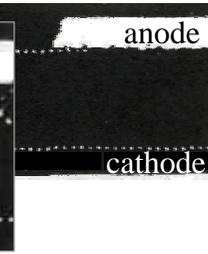
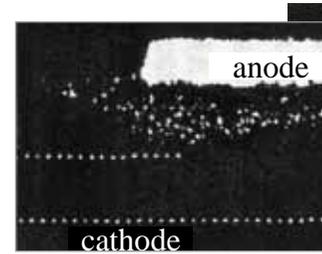


イオンマイグレーション

表面方向



厚さ方向



研究目的

厚さ方向におけるイオンマイグレーション現象の調査

および観測法・評価法の確立

ナノコンポジットによるプリント回路基板の絶縁性向上

実験試料... エポキシ/ナノコンポジット・紙フェノール樹脂複合材・ガラス繊維/エポキシ樹脂複合材

実験装置... PEA装置・SEM-EDS・ナマイザー

キーワード... 空間電荷・イオンマイグレーション・ナノコンポジット・プリント回路基板・絶縁体材料

etc

共同研究先: 富士電機AT、福岡県など

図 プリント回路基板の実装方式とイオンマイグレーション

エポキシ樹脂コンポジット材料の電気的特性

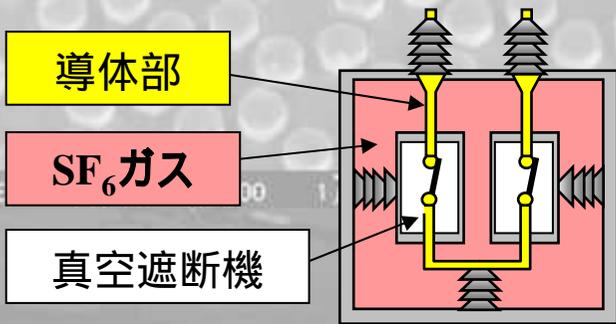
◆ 電力系統



六フッ化硫黄 (SF_6) ガス使用

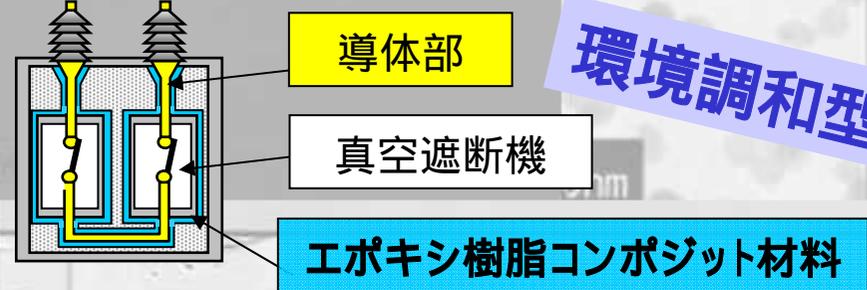
優れた絶縁性能

× 高い温室効果 (CO_2 の23,900倍)



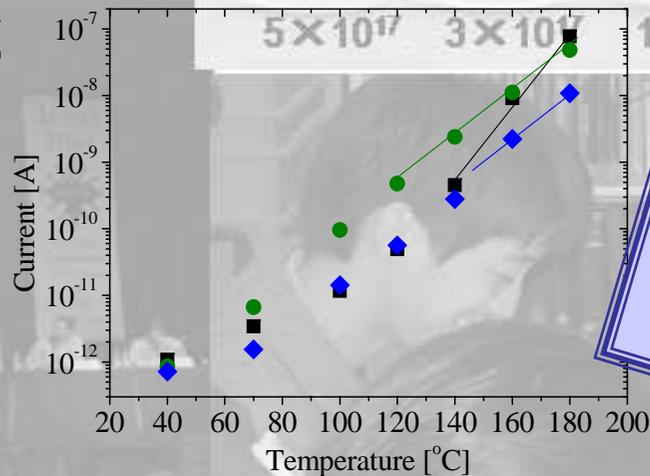
脱 SF_6
ガス

● 固体絶縁方式スイッチギヤ



◆ 新材料の電気的特性調査

- ： フィラー無添加エポキシ樹脂
- ： ナノクレイ添加エポキシ樹脂
- ： ナノクレイ・マイクロシリカ共添加エポキシ樹脂



5 kV/mm印加後30 min経過時の伝導電流値

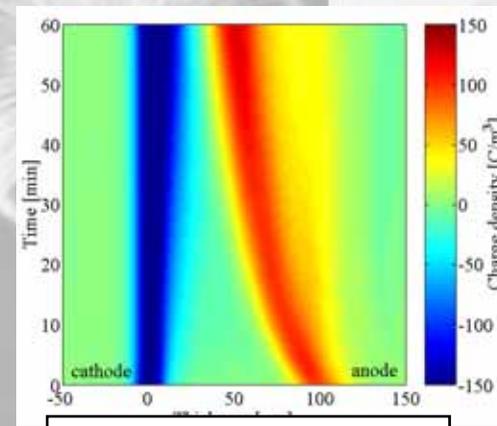
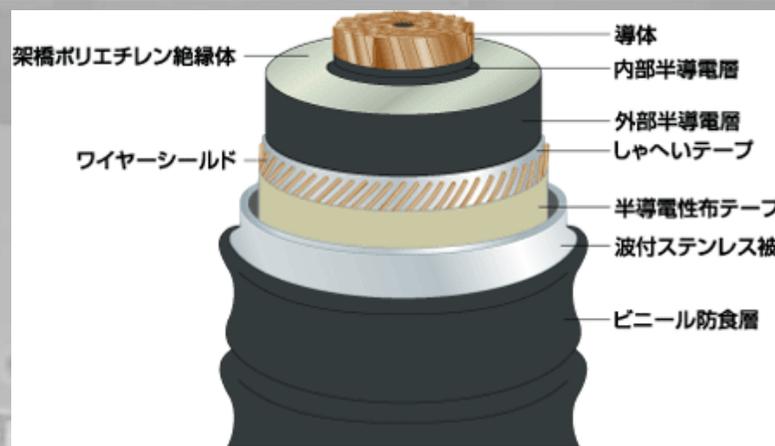
電気的特性、
絶縁性能、
熱膨張率などの
要求をクリア

直流電力ケーブル用絶縁材料 LDPE/MgOナノコンポジットの絶縁評価

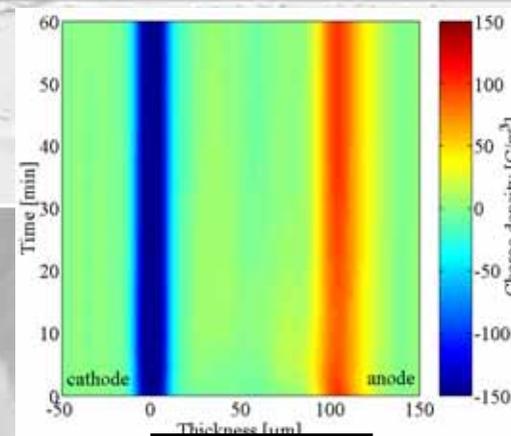
現在、架橋ポリエチレン(XLPE)が
絶縁材料として用いられている

直流電界下では内部に電荷が蓄積
十分な絶縁性能が得られない

XLPEに代わる新たな絶縁材料の開発が必要
LDPE/MgOナノコンポジットが開発



フィラー無添加PE



NC化PE

ナノコンポジット化により内部へのパケット空間電荷の侵入を抑制

ナノ粒子/ポリマー型新規高周波磁性誘電材料の作製

電子機器の多機能化



テレビ

DVB

T-DMB

UHF帯

携帯電話

IMT-2000
W-CDMA

パソコン

Bluetooth
無線LAN

Ultra Wide Band
(UWB)



500MHz 1GHz 2GHz 5GHz 10GHz

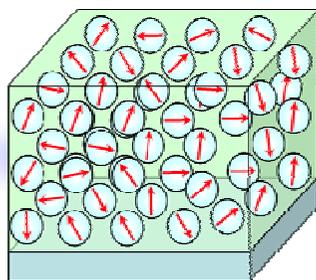
小型化・低消費電力・ひとつの機器であらゆる周波数を受信・送信可能
が求められる

アンテナ体積は電波の波長に比例

➡ 波長短縮効果 $\lambda \propto 1/(\epsilon\mu)^{1/2}$ を利用 ➡ アンテナの小型化を実現

これまで
誘電母材(有機ポリマー:
Epoxy, polyimid...)

で誘電率 ϵ を制御



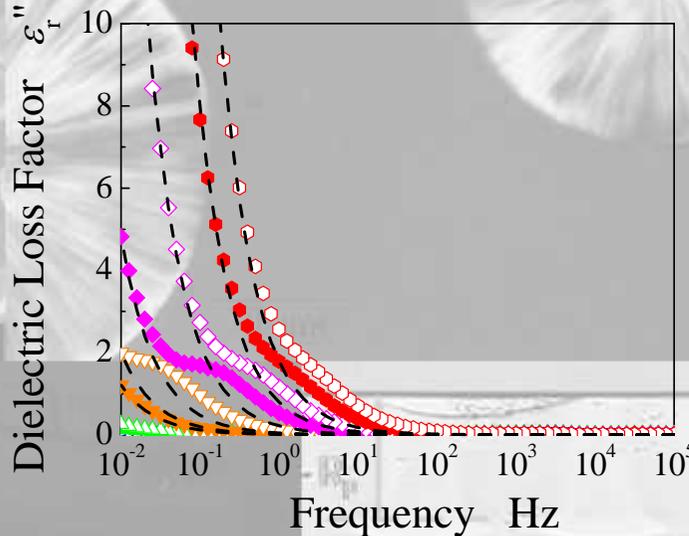
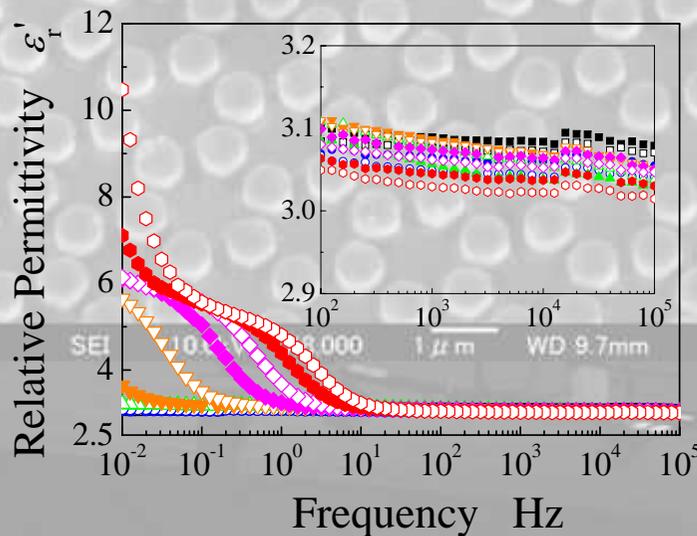
新たに
磁性ナノ粒子(Fe, FeCo...)
で透磁率 μ 制御

新たなワイドバンド/マルチバンド対応高周波アンテナ・アンテナアレイの開発

エンジニアリングプラスチックの誘電特性評価

エンジニアリングプラスチック：主に構造材料として利用

耐熱性に優れた電気絶縁材料への適用を目指し、誘電特性を理論的に調査
用途選定や改質などのフィードバック



(例)
ポリフェニレンサルファイド
の複素誘電率

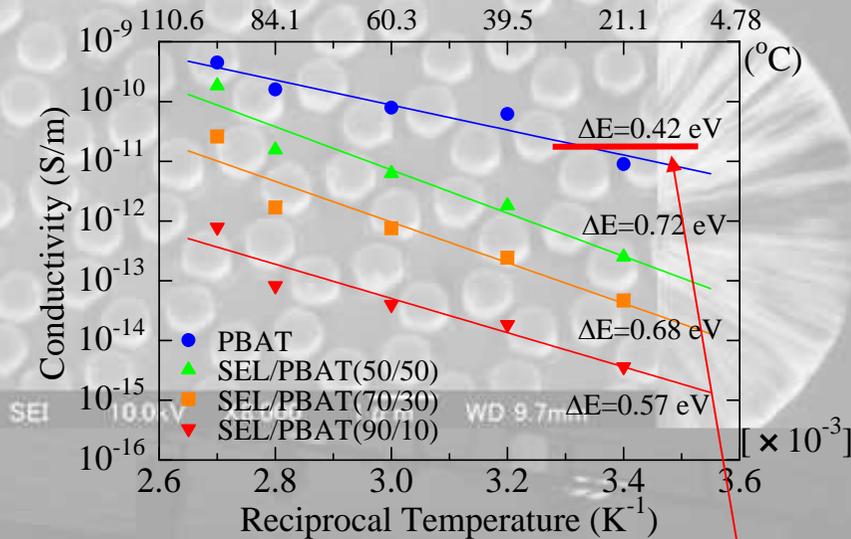
20~140 °C 比誘電率(3.0), 比誘電損率(10^{-1})ともに安定した良好な絶縁性

150~199 °C 低周波数側(10 Hz以下)への立ち上がり と それに重なる肩 が観測

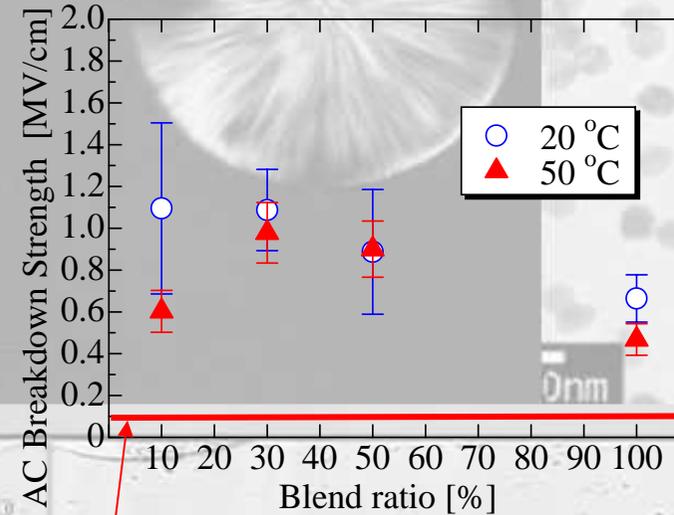
- ・ 高温により試料内に存在する電荷の移動に起因するジュール損 $\longrightarrow \epsilon''_{r}$ 上昇
- ・ 試料内の電荷が電極近傍で蓄積し、電極上に映像電荷が誘起される $\longrightarrow \epsilon'_{r}$ 上昇

高温, 酸素の存在下で起きる架橋によって形成される, Oを介した双極子に起因

エステル化澱粉の絶縁材料への適用可能性



SEL/PBAT



SEL/PBAT

JIS C3307(600Vビニル絶縁電線)において要求されている**導電率**(上限)

JIS C3307(600Vビニル絶縁電線)において要求されている**絶縁破壊値**(下限)



エステル化澱粉(SE)に可塑剤をブレンドした試料は環境負荷の小さい絶縁材料として有望である



2. Electronic Device Gr.

Electronic Device Gr.

Low power consumption

High speed **Moore's Law** Highly integrated

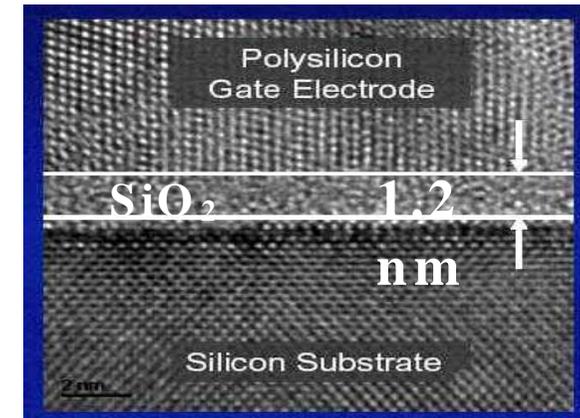
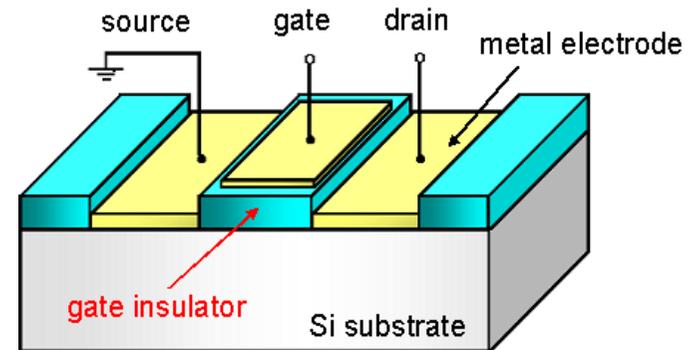
比例微細化則に従いトランジスタの高集積化、微細化

トンネル効果によるトンネルリーク電流の増加

容量を維持したまま膜厚を厚くしたい

誘電率を高くすればよい

LaAlO₃ などの誘電率の高い材料へ



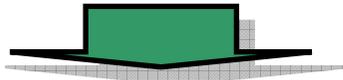
$$C_{ox} = \epsilon_0 \frac{\kappa}{d}$$

The higher κ ,
the higher C_{ox}

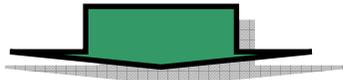
Crystal defects of LaAlO_3

high- κ 材料の問題点

high- κ 材料の結晶には酸素空孔などの格子欠陥を持つ



結晶内の欠陥がバンドギャップ内に局在準位を形成



リーク電流の原因となる。

欠陥構造の知見を得ることはリーク電流の低減につながる

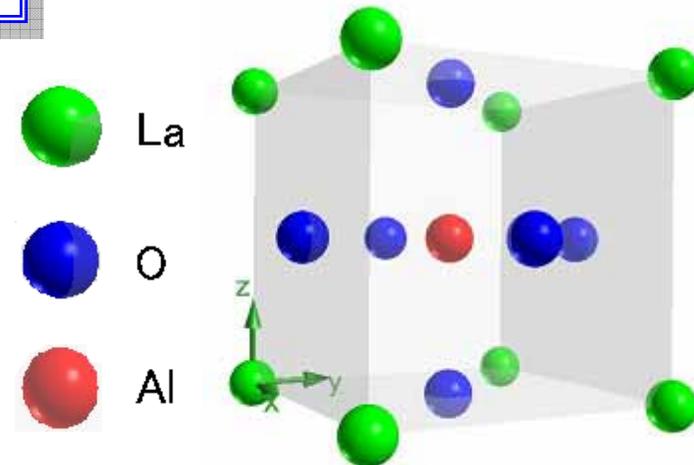


Fig. LaAlO_3 single crystal (Perovskite structure)

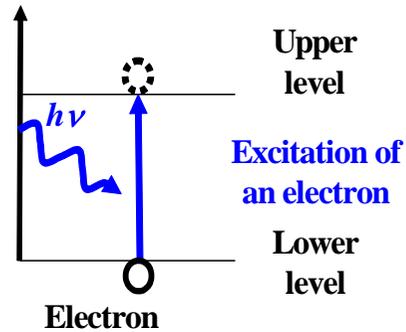
Electronic Device Gr. 解析手法

1. Photoluminescence (PL)
2. Electron Paramagnetic Resonance (EPR)

Photoluminescence (PL)

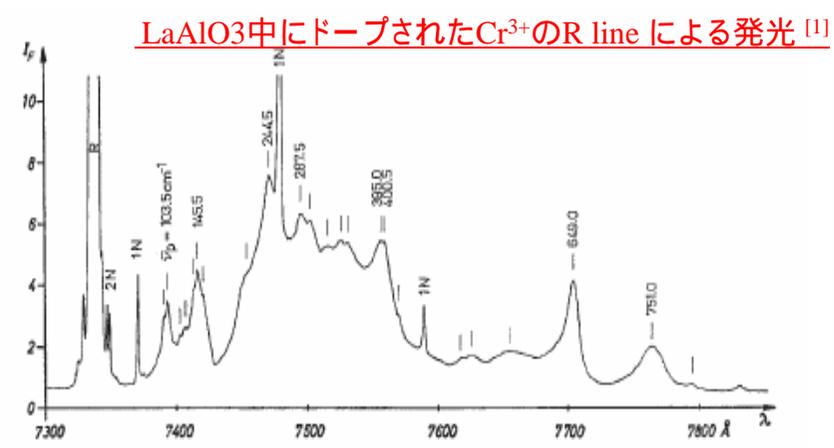
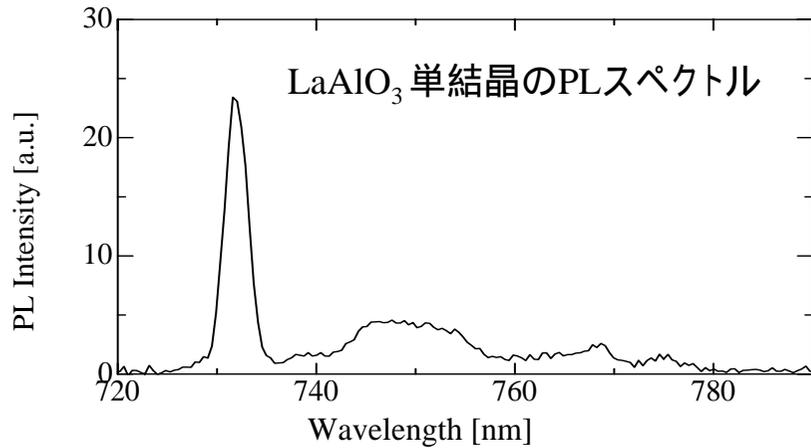
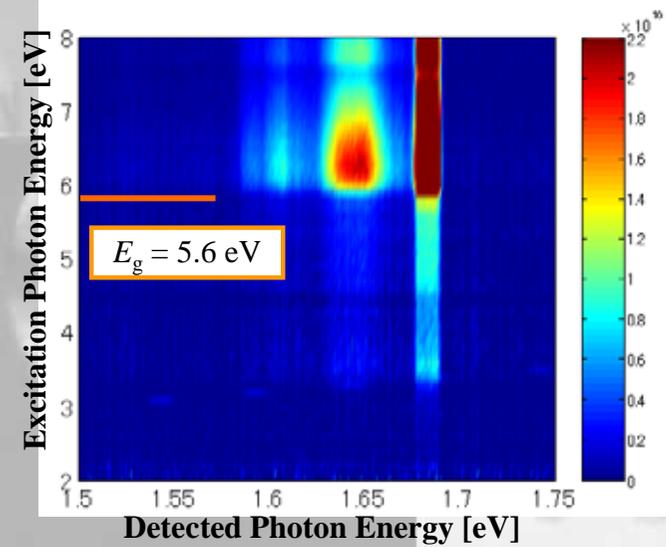
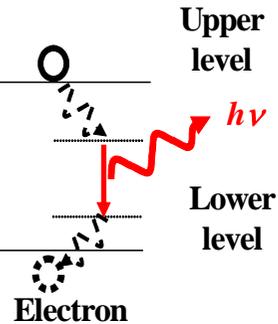
光で測定試料に照射し電子を上準位に励起する

Energy level



励起された電子が下準位に落ちるときに発光を観察する

Energy level

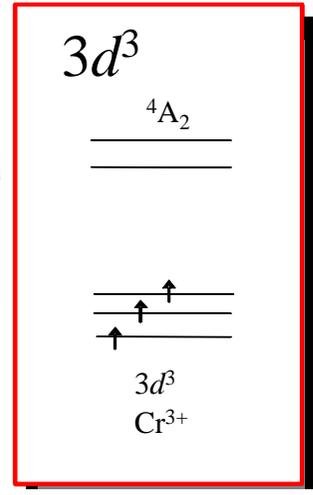
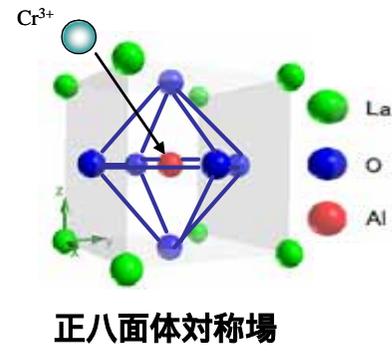
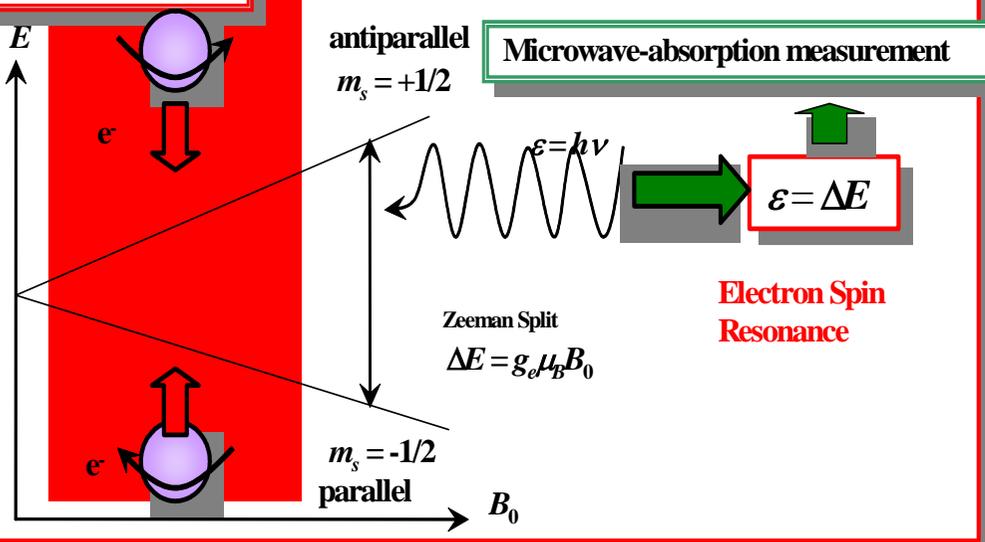


PLスペクトルの結果から不純物としてCr³⁺が含まれていると疑われる

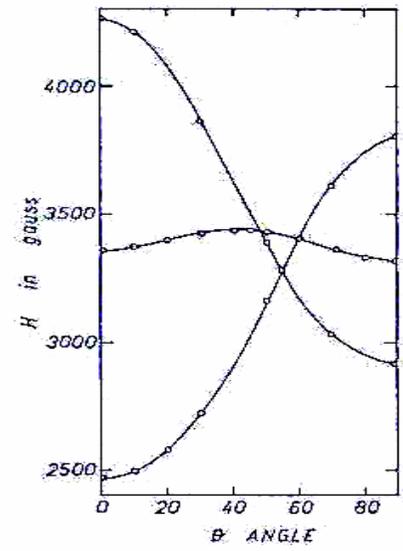
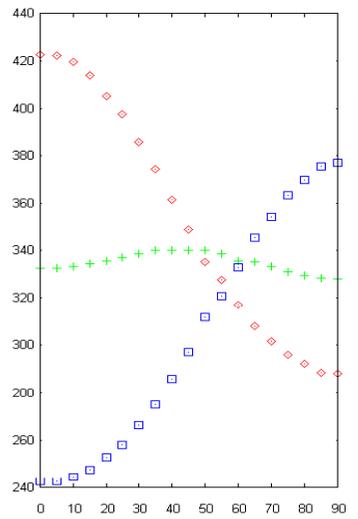
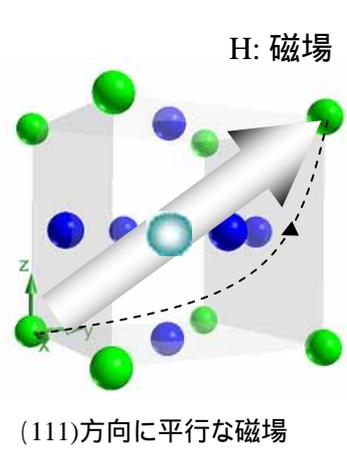
[1] J. Heber et al.; Z. Phys. **246** (1971) 261.

Electron Spin Resonance (ESR)

Principle of EPR



Cr³⁺の電子配置



ESR測定でもCr³⁺の存在を確認

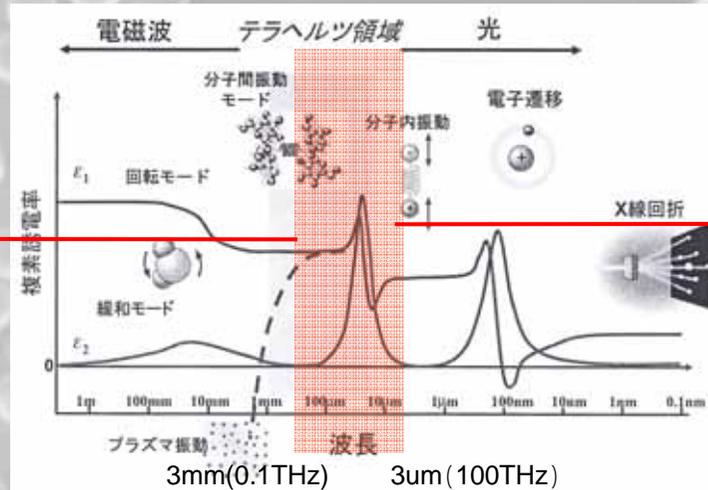
LaAlO₃には不純物としてCr³⁺が含まれている

[2] D. Kiro, W. Low and A. Zuman, *Paramagnetic Resonance vol 1*, ed. W. Low, (New York, Academic, 1962), pp. 44-50.

テラヘルツ分光を用いた $LaAlO_3$ の解析

THz領域の特徴

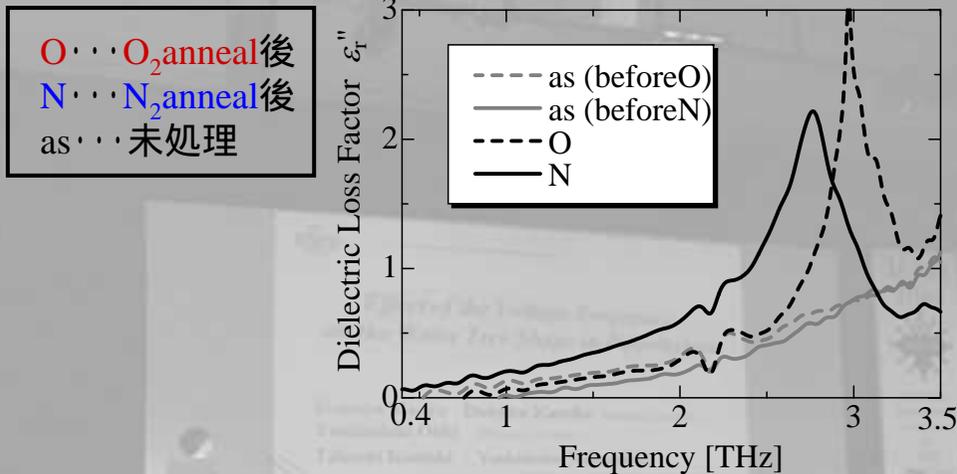
- ・周波数領域が電気と光の中間 (約0.1 THz ~ 10 THz)
- ・近年までは未踏の領域と呼ばれた



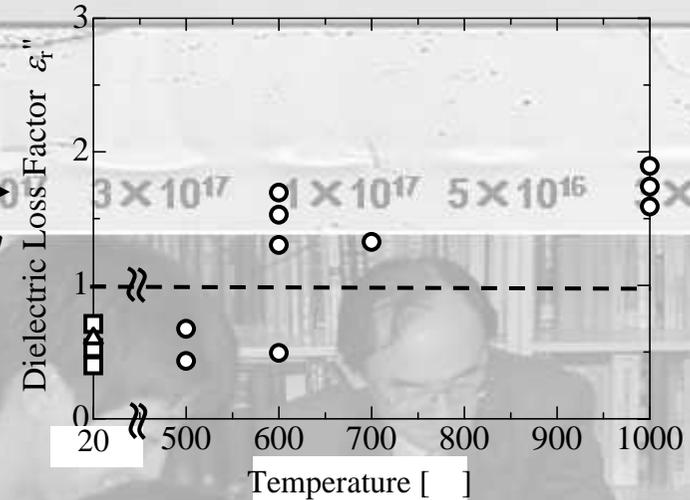
- ・分子の回転スペクトル
- ・巨大分子の振動モード
- ・分子間振動モード etc

SEI 10.0kV X8,000 1μm

図D 複素誘電率の実部(ϵ_1), 虚部(ϵ_2)の典型的な分散*1



O₂annealデータ
のanneal
温度依存性



500~600 付近(菱面体晶-立方晶相転移が起こる温度*2)以上でのannealにより、巨大分子のフォノンモードが出現？

*1. 田中耕一郎, セラミックス, 42 [4] pp. 255-262 (2007)

*2. Order parameter saturation in LaAlO₃ (2002)



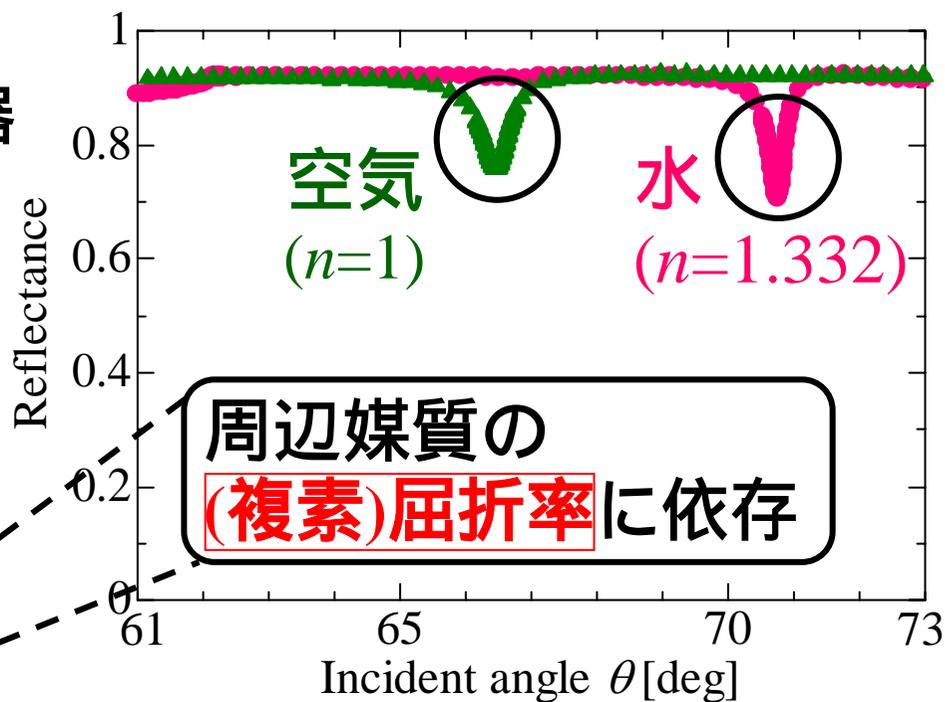
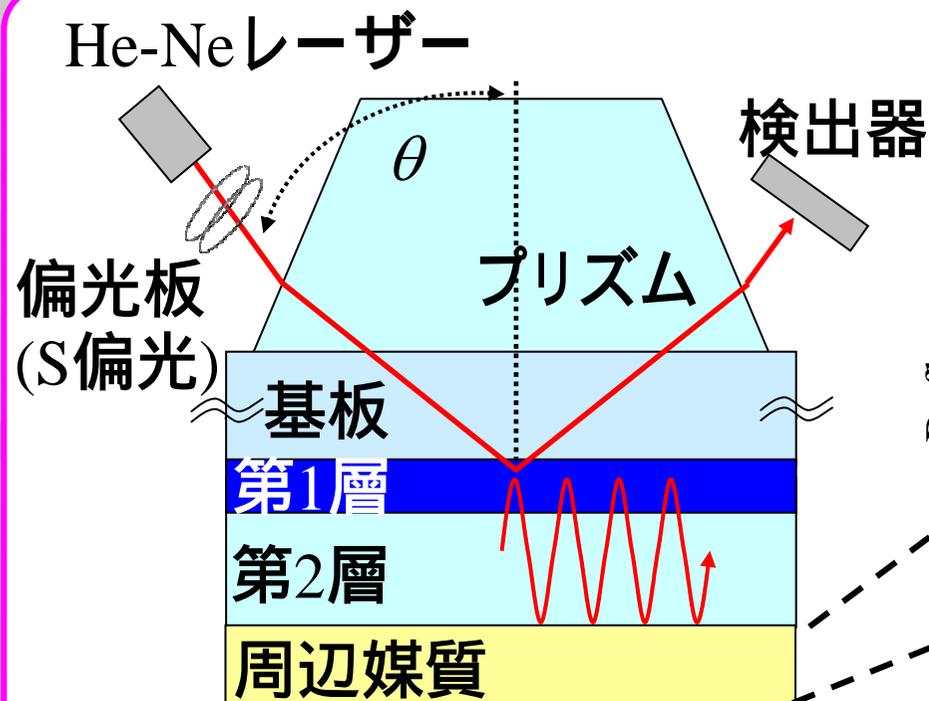
SEI 10.0kV X8,000 1.2um WD 5.7mm

3. *Applied*



Optics Gr.

導波モードセンサの原理と利点



導波モードセンサの利点

光反射率を測定

- ・非破壊検査
- ・放射線不使用
- ・*In situ*測定、溶液中測定も可能

導波モードセンサにおける光反射スペクトルの吸着金属形状依存

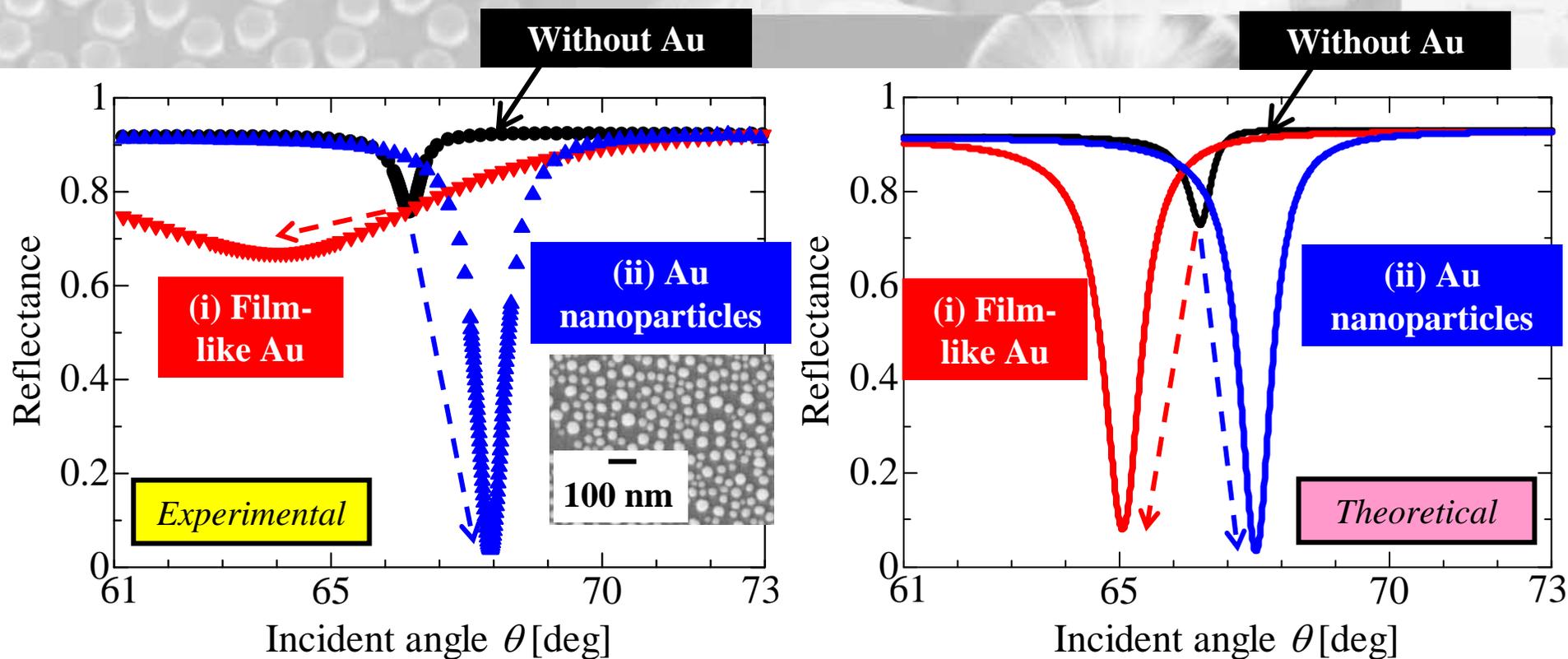


図 膜状のAuとナノ粒子状のAuが吸着した基板における導波モードセンサの反射スペクトル

膜状のAuとナノ粒子状のAuで反射スペクトルに大きな差異

理論値は実験値をよく再現 (特にナノ粒子状の場合)

非破壊形状確認への応用

Au ナノ粒子吸着時の導波モードセンサの光反射特性

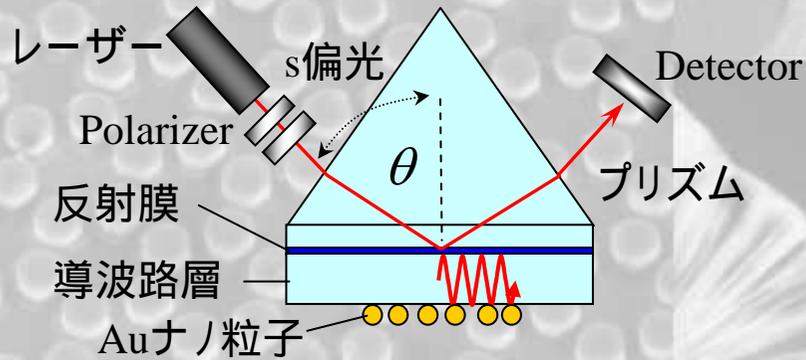


図 導波モードセンサの測定原理

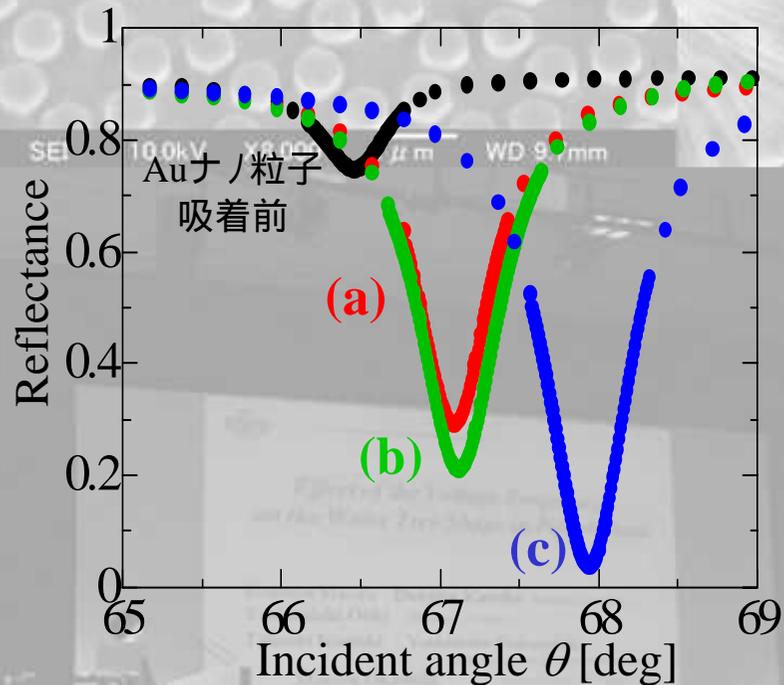
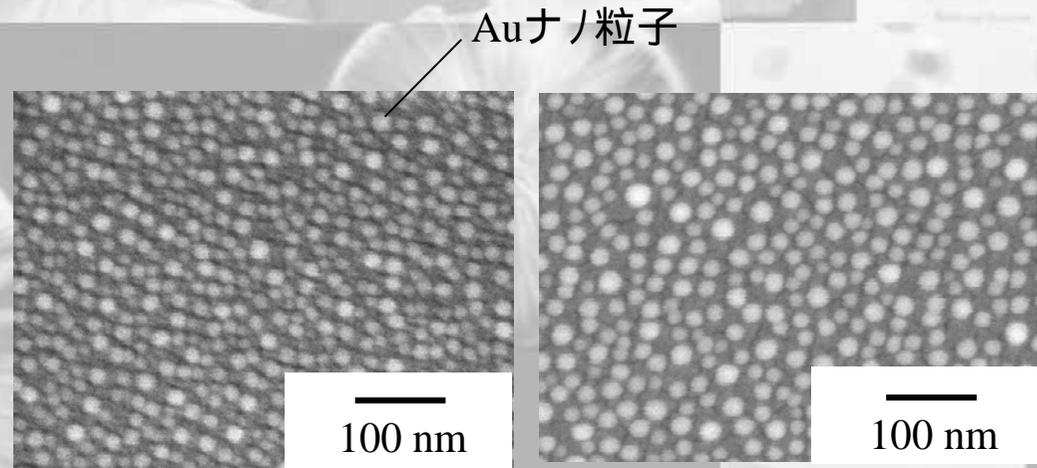
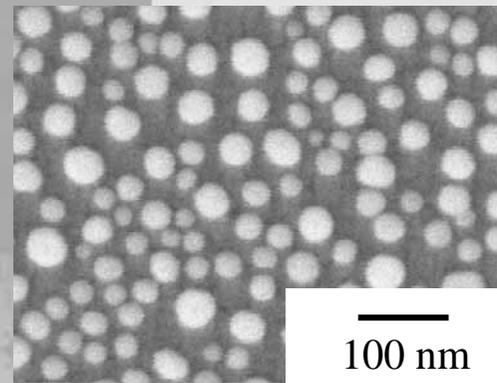


図 Auナノ粒子吸着後の試料の光反射特性



(a)

(b)



(c)

- (a) 個数 : $3.6 \times 10^3 \mu\text{m}^{-2}$
平均粒径 : 8.1 nm
- (b) 個数 : $2.6 \times 10^3 \mu\text{m}^{-2}$
平均粒径 : 11.4 nm
- (c) 個数 : $1.0 \times 10^3 \mu\text{m}^{-2}$
平均粒径 : 19.7 nm

図 Auナノ粒子吸着後の試料の表面SEM像

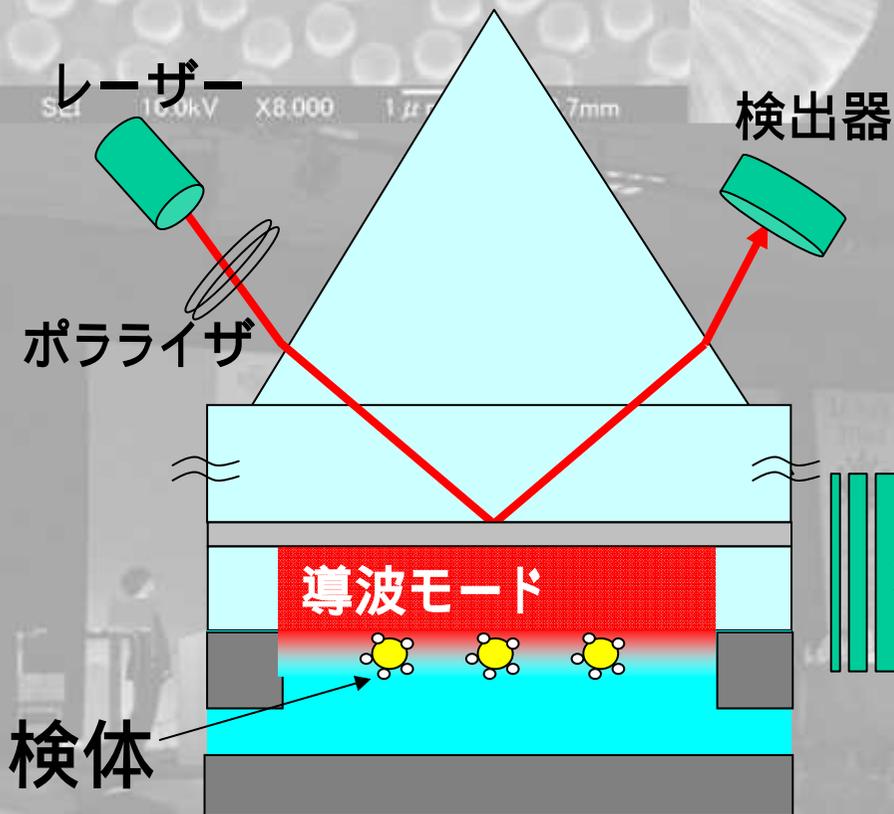
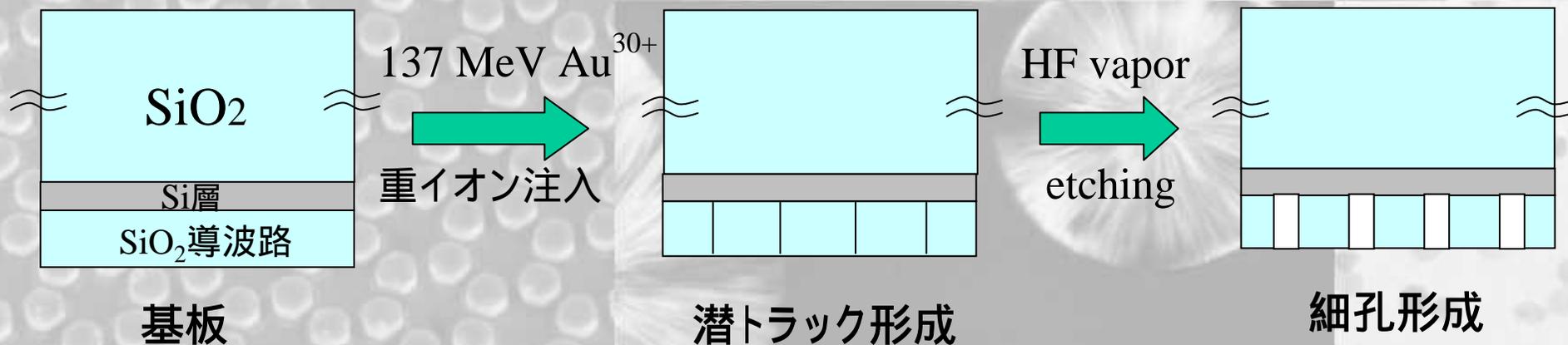
光吸収の大きな物質(Auナノ粒子)が吸着



反射光強度 : **減少**

Au ナノ粒子ラベリング利用による

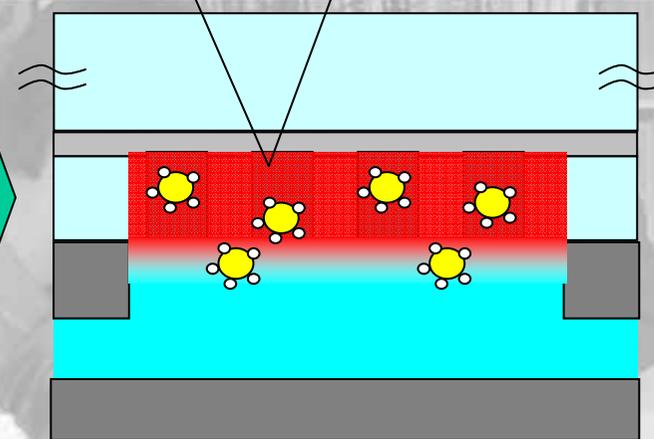
細孔形成導波モードセンサの高感度化



細孔形成で高感度検出可能!?

吸着個数up
電界増強部分へ誘導

細孔形成



高速重イオン照射を用いたTiO₂結晶形制御と光触媒特性

太陽光によるTiO₂光触媒に環境浄化作用への期待
しかし太陽光中の紫外線は微量

TiO₂光触媒機能の高機能化が必要

光触媒作用に優れるアナターゼ型

光吸収に優れるルチル型

混在 → 光触媒高機能化

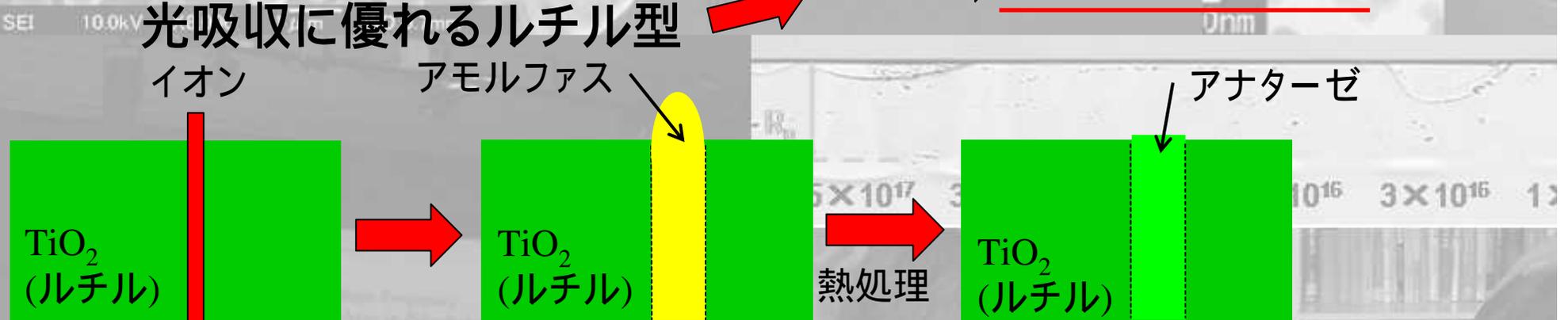


図 結晶形混在方法

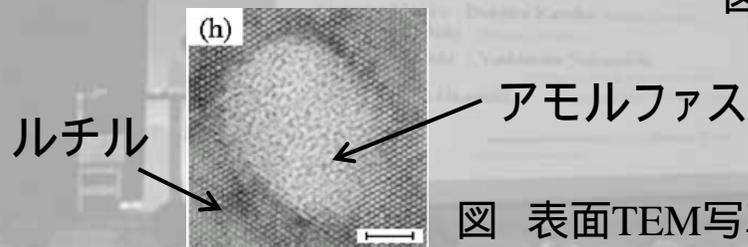


図 表面TEM写真*

光触媒に最適な混在比導出へ

*K.Awazu et al, J. Appl. Phys. **100**, 044308, 2006.

局在表面プラズモンを利用したTiO₂光触媒効果の高効率化

TiO₂光触媒の課題

TiO₂は紫外光でのみ光触媒機能を発現

➡ しかし、太陽光などに含まれる紫外光はわずかである
研究目的

金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴による増強電場を利用し
光触媒の高効率化を目指す

TiO₂/a-SiO₂/Agナノ粒子構造

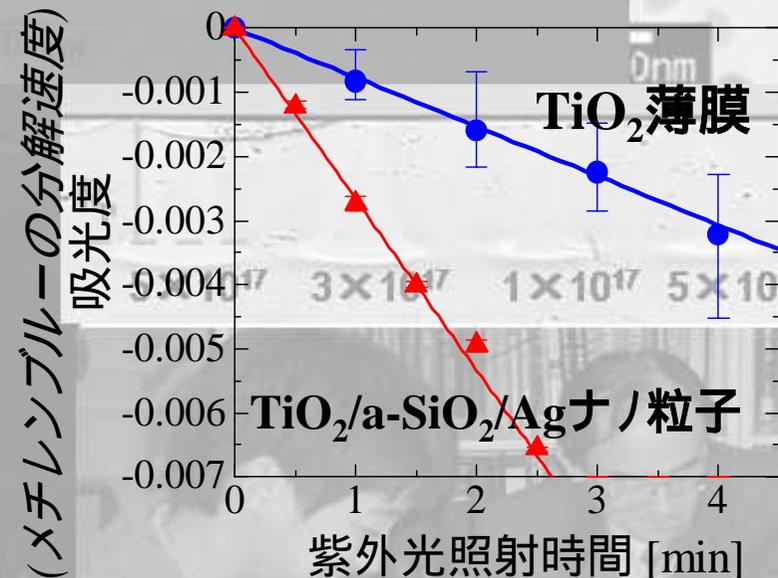
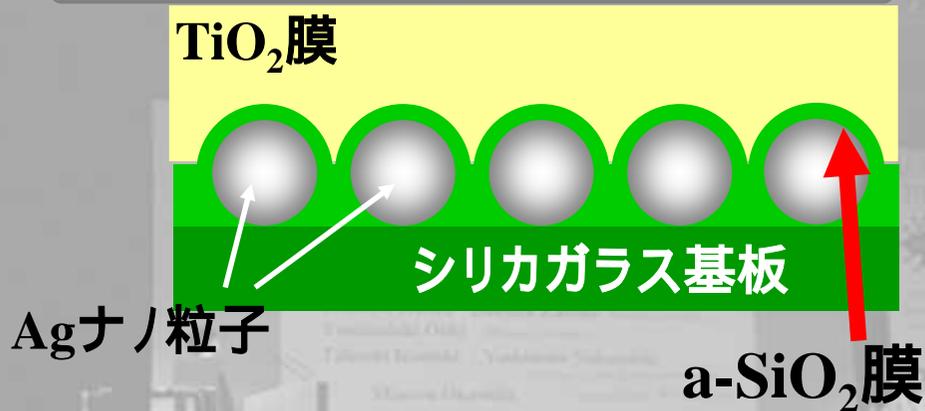


図. 吸光度(580 nm)から見る
メチレンブルーの分解速度

光触媒の酸化分解特性が向上