

先端科学技術セミナー 第6回

レーザーによる物質科学の最前線
－ 光物性から物質の操作まで －

芦田 昌明

物質創成専攻未来物質領域

D416号室 内線: 6506

ashida@mp.es.osaka-u.ac.jp

未来物質領域とは

2003年に専攻改組（大学院基礎工学研究科の再編成）で策定

21世紀の基盤科学技術創造のためには、物理と化学の学際領域を融合した未来物質の創製と物性探索研究が不可欠です。特にナノマテリアルの世界はまさに物理と化学の学際領域と言えます。基礎工学部・大学院基礎工学研究科は、1961年の創設以来「**科学と技術を融合して次世代に役立つ新領域を創成する教育研究を担う**」ことを指向しており、学際領域の開拓にチャレンジしてきました。物性物理分野と合成化学分野から教員が参画している未来物質領域は、最も基礎工らしい研究領域の一つといえます。

本領域では、優れた理論的・実験的枠組みをもつ物性物理学と分子化学の基礎に立脚して、物質中で電子と光が織りなす多様な物性の解明と新現象探索、新物質創製を行いながら、物質科学とその応用のフロンティアを切り開くことのできる幅広い視野を持った研究者、技術者を育成する教育研究活動を行っています。

未来物質領域とは

基礎工学研究科

基礎工学部

電子物理学科

物性物理工学領域

機能物質化学領域

化学工学領域

未来物質領域

物性物理科学コース

エレクトロニクスコース

化学応用科学科

合成化学コース

化学工学コース

物質創成専攻

新物質創製

多田研

戸部研

吉田研

草部研

微小物質ダイナミクス

芦田研

宮坂研

極限量子科学

清水研

(附属極限科学センター)

量子物性科学

田中研

(産業科学研究所)

化学工学

物理工学

機能物質化学

ナノワールドの新規開拓

未来物質機能

物理学と化学の融合による
新物質創製・新領域開拓

—理工系学際領域の開拓—

未来物質領域の物性系研究室

1	はじめに	(担当:北岡)	10月 1日
2	強相関電子系における多彩な固体電子物性	(担当:木村)	10月 8日
3	超伝導のフロンティア	(担当:椋田)	10月15日
4	高エネルギー固体電子分光の最先端 ーシンクロトロン放射光とレーザーによるバルク敏感光電子分光ー	(担当:関山)	10月22日
5	シンクロトロン放射光を用いた構造物性	(担当:若林)	10月29日
6	レーザーによる物質科学の最前線ー光物性から物質の操作までー	(担当:芦田)	11月 5日
7	分子エレクトロニクスの現状と将来展望	(担当:多田)	11月12日
8	計算物理の物質科学への応用	(担当:草部)	11月19日
9	スピントロニクスの現状と次世代デバイスへの展望	(担当:鈴木)	11月26日
10	光と電気によるスピン制御と量子情報	(担当:水落)	12月 3日
11	量子情報科学ー物理と情報のエンタングルメントー	(担当:井元)	12月10日
12	強相関電子系物性の次世代ナノデバイス展開	(担当:田中)	12月17日
13	カーボンナノサイエンス・ナノテクノロジーの現状と次世代デバイスへの展望	(担当:松本)	1月 7日
14	計算機による物質設計の現状とフロンティア	(担当:吉田)	1月14日
15	「量子多体論の最前線ー強相関電子系からトポロジカル絶縁体・超伝導までー」	(担当:藤本)	1月21日
16	極限環境下の物質科学ー金属水素は室温超伝導になるかー	(担当:清水)	2月 4日

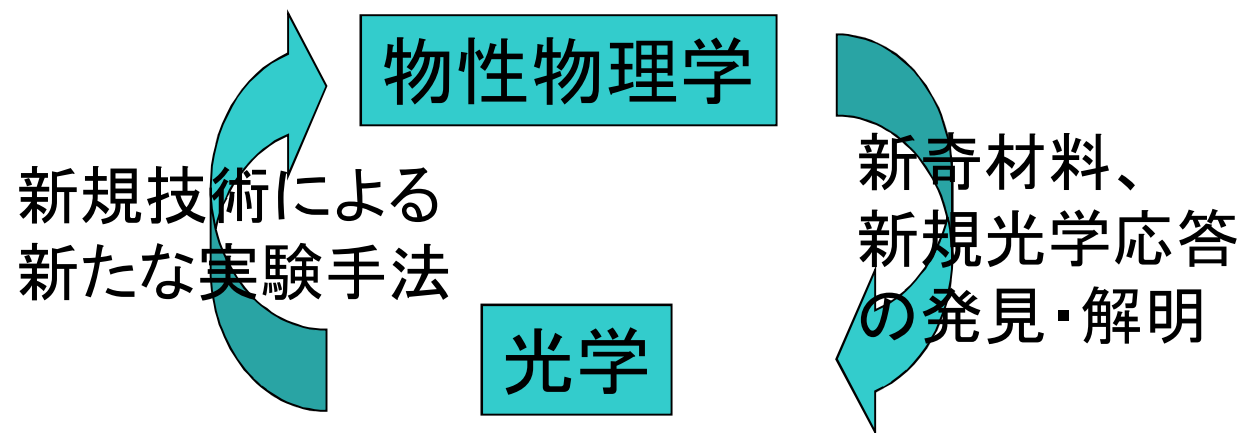
光物性物理学

光学: 光そのものの性質は殆ど明らかになっているため、
工学的な色彩が強く、光の制御が中心課題

対象: 光学機器、光通信、レーザー加工

光物性物理学: 光を用いた物性物理学の研究全般

対象: 半導体、誘電体、金属、超伝導体など



The Nobel Prize in Physics 2014



Isamu Akasaki
Prize share: 1/3



Hiroshi Amano
Prize share: 1/3



Shuji Nakamura
Prize share: 1/3

The Nobel Prize in Physics 2014 was awarded jointly to Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura *"for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources"*.

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/

ー 量子エンジニアリング ー

第1回 ナノの世界とピコの世界

担当 芦田研究室(微小物質ダイナミクス講座)

教授 芦田昌明、准教授 永井正也、助教 蓑輪陽介

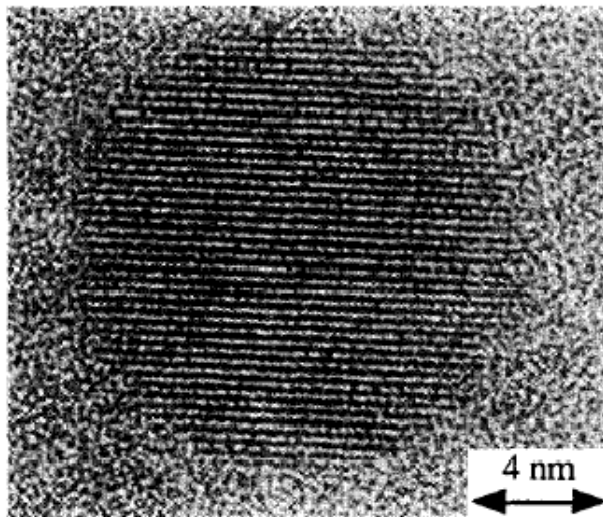
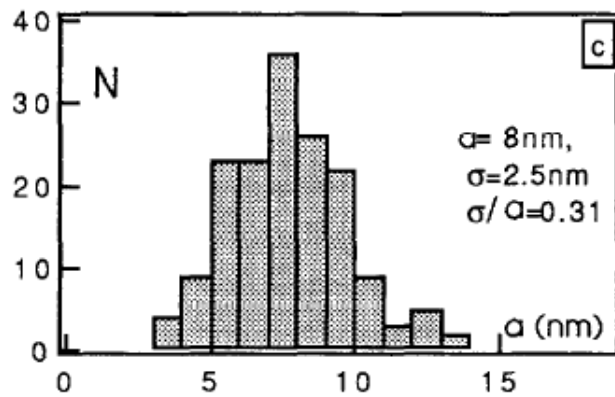
研究内容

非常に小さな(ナノスケールの)物質の光に対する応答(光学特性)をレーザーを使って調べる。特に非常に短い時間(ピコ秒、フェムト秒)に起こる現象に注目していて、超高速光通信技術などに役立てることを目指している。

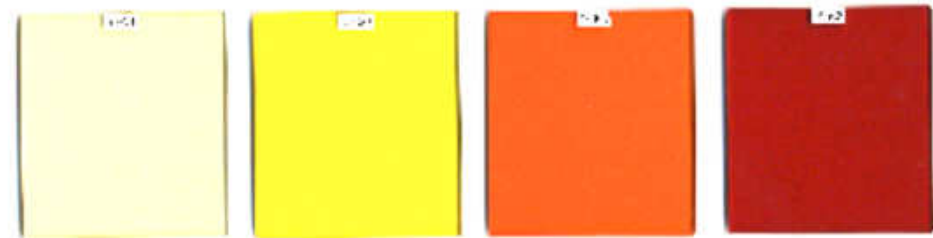
1. ナノの世界について
2. ピコの世界の体験
3. まとめ

序説

半導体ナノ微粒子(量子ドット)



焼きなまし温度と時間で色が変化する



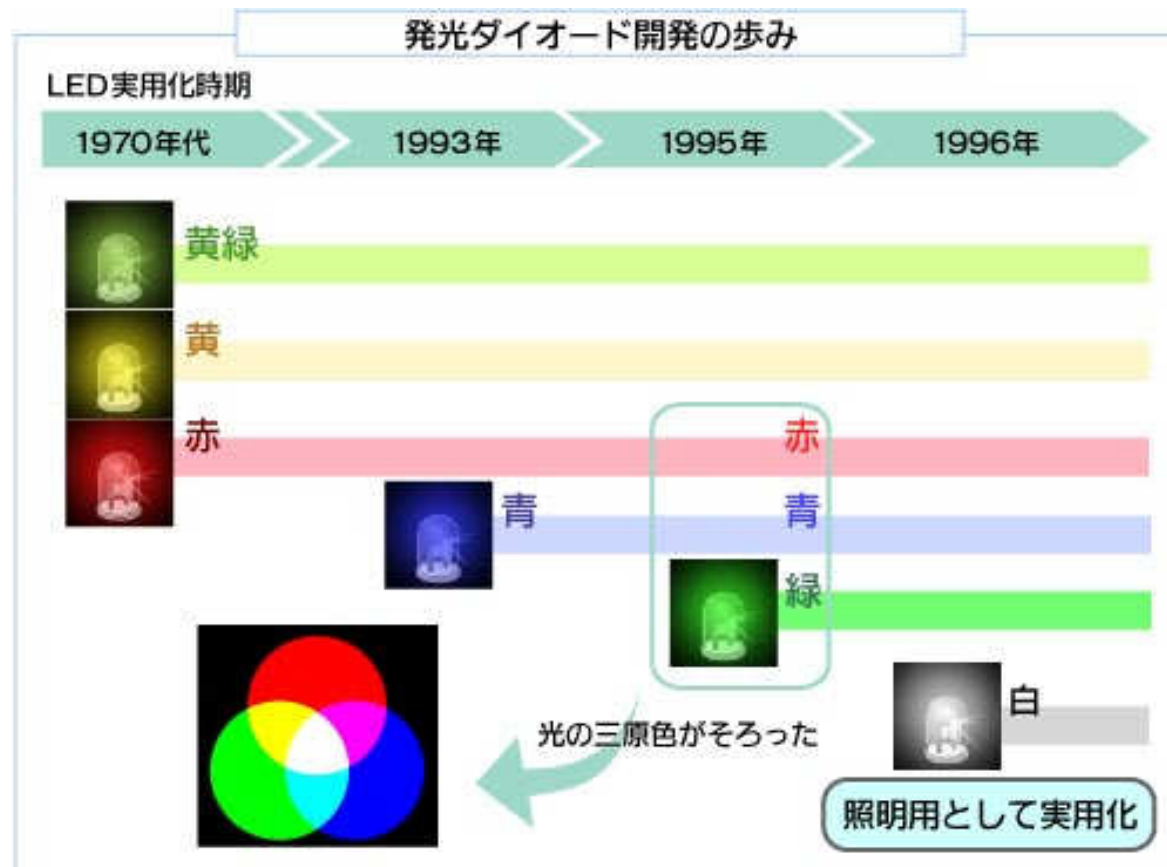
短波長 ← 吸収 → 長波長

CdSSe色ガラスフィルター

ガラス中のCdS量子ドットのTEM像
上図は量子ドットのサイズ分布

序説

発光ダイオード (LED) の発展



序説

LEDの材料

色	材料	ピーク波長	接合構造
青	InGaN	450	ダブルヘテロ
	InGaN	500	ダブルヘテロ
緑	InGaN	525	量子井戸
	GaP	555	ホモ
黄	AlInGaP	570	ダブルヘテロ
	InGaN	590	量子井戸
赤	AlGaAs	660	ダブルヘテロ
	GaP(Zn-0)	700	ホモ
赤外	GaAs(Si)	980	ホモ
	InGaAsP	1300	量子井戸

序説

バンドギャップエンジニアリング (状態密度制御)

$$\rho(E) \propto E^{d/2-1} \quad d = 1, 2, 3$$

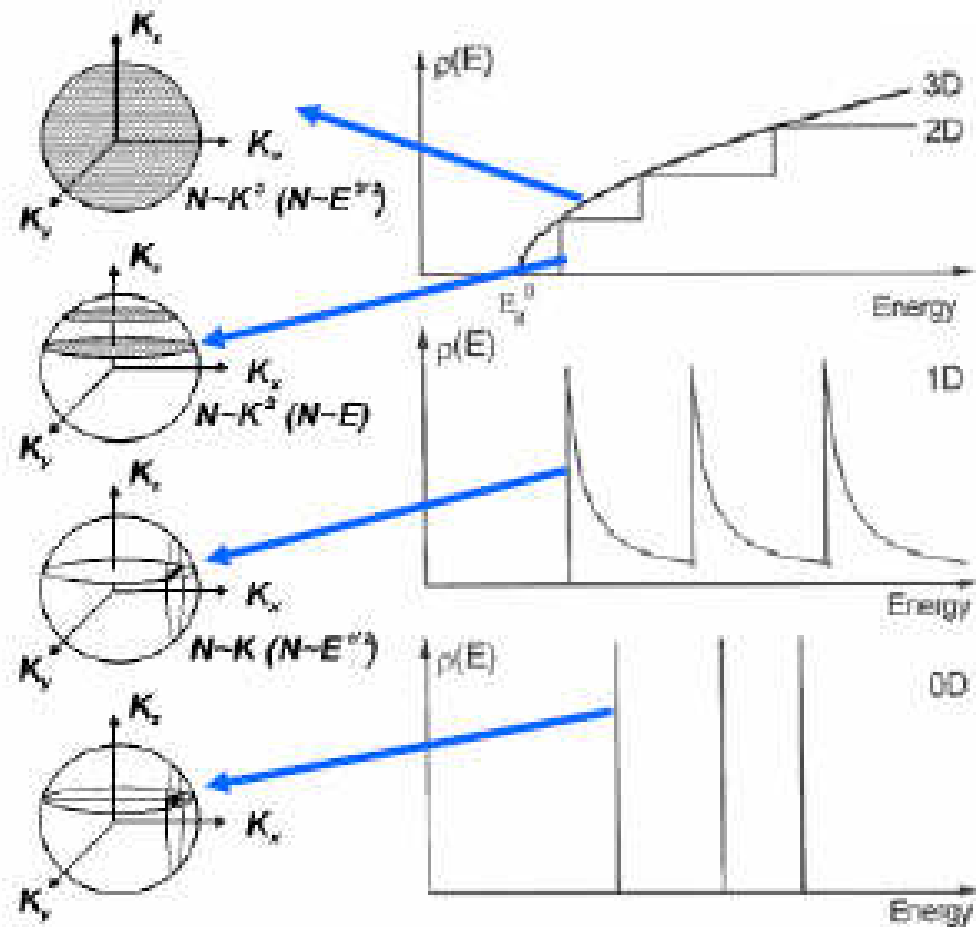
d=1 : nanowire,

d=2 : thin slab, and

d=3 : bulk crystal

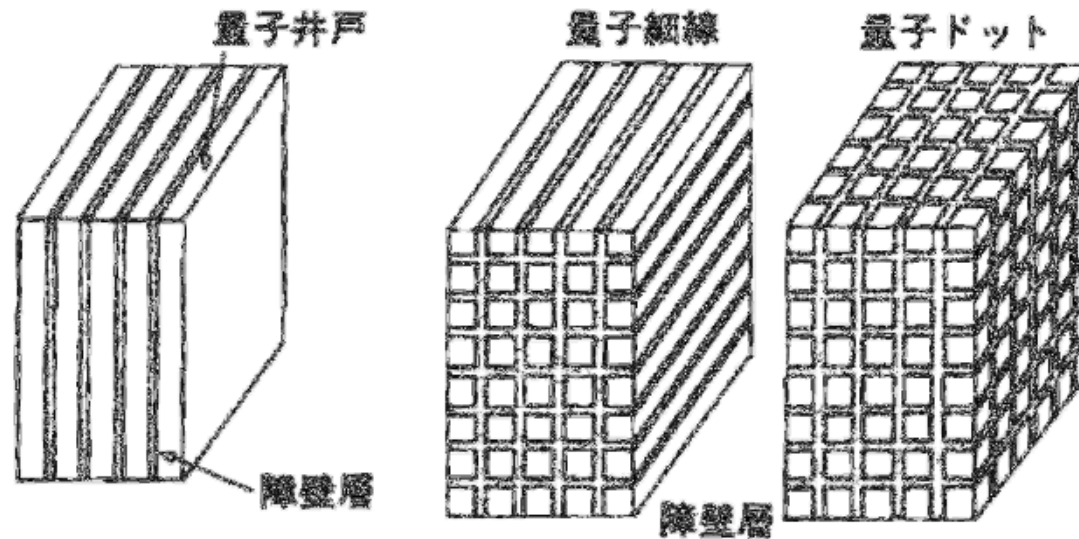
For a quantum dot (d=0) the
DOS shows a delta-like behavior:

Discrete energies allowed

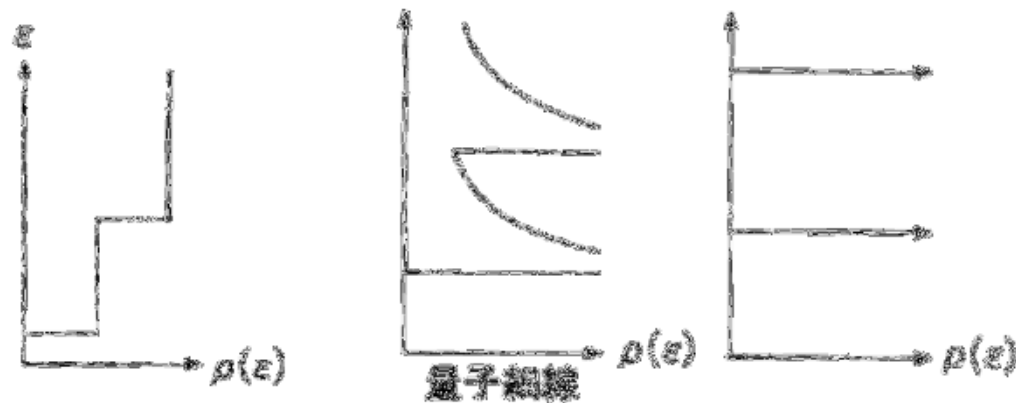


人工原子

種々のナノ構造の状態密度 (取り得るエネルギー状態の様子)

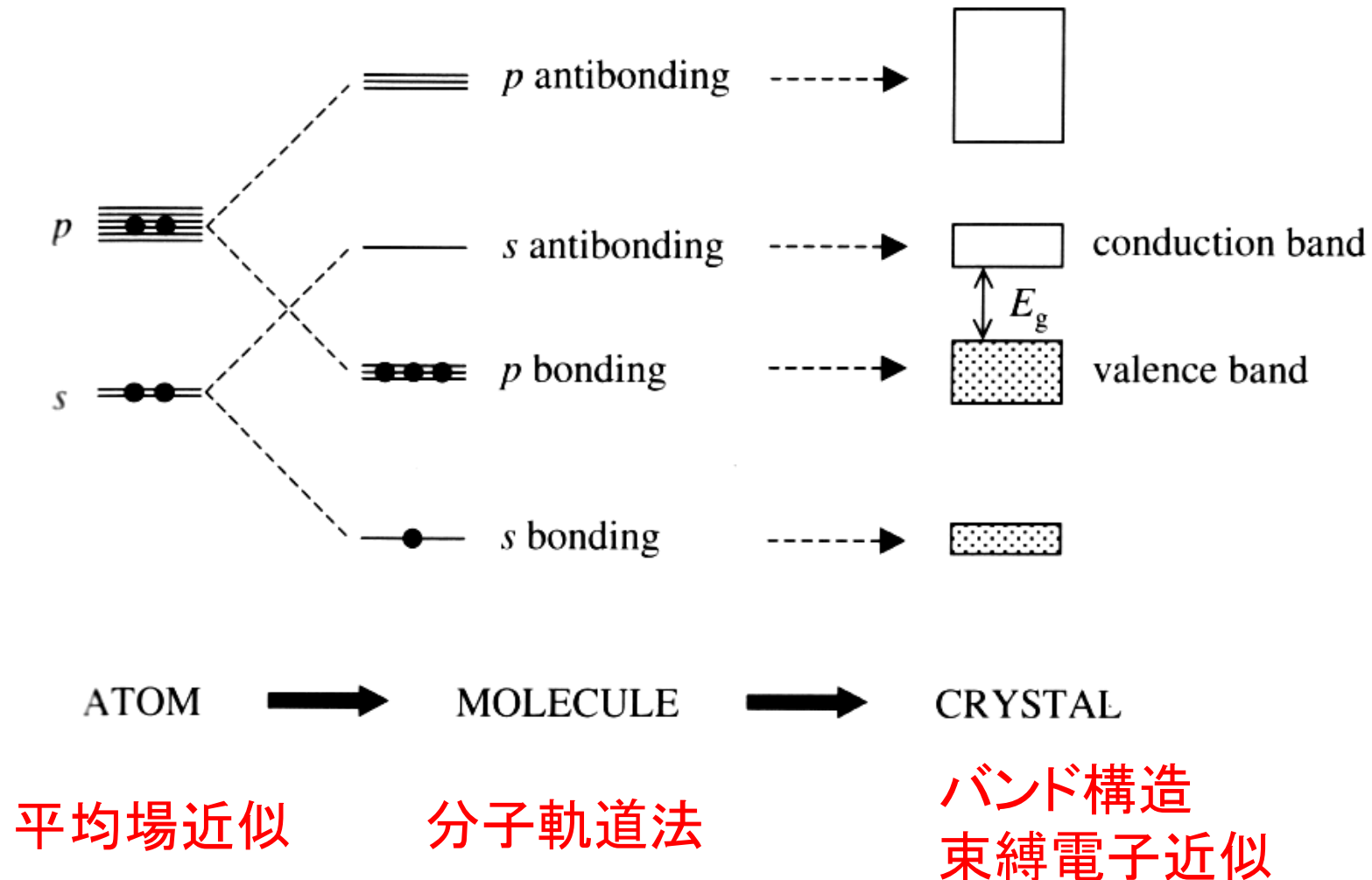


(a)

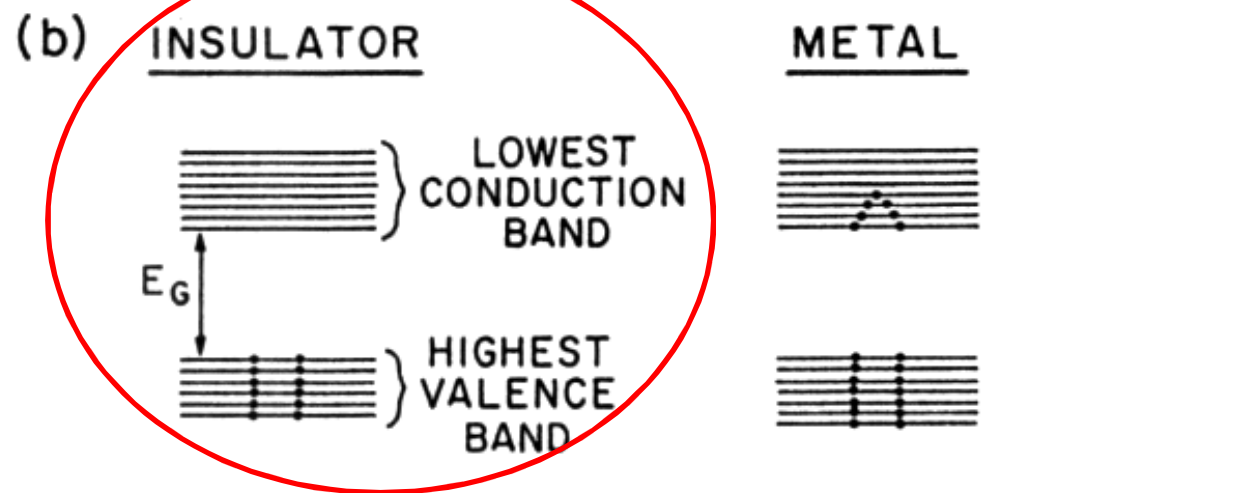
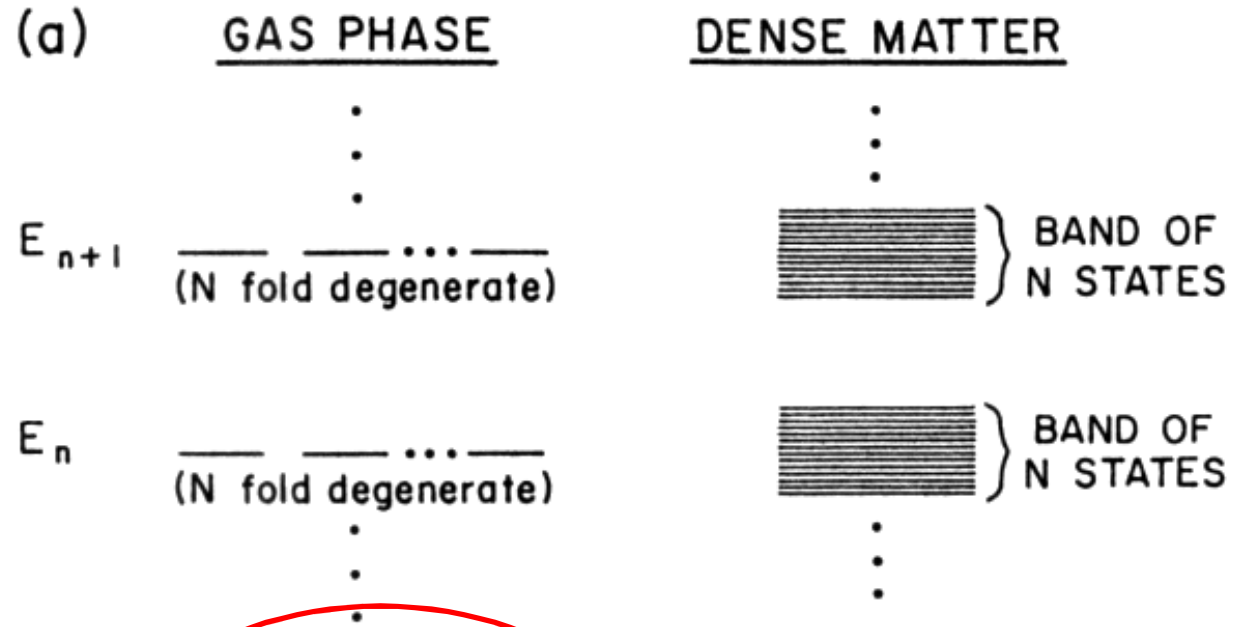


(b) 状態密度

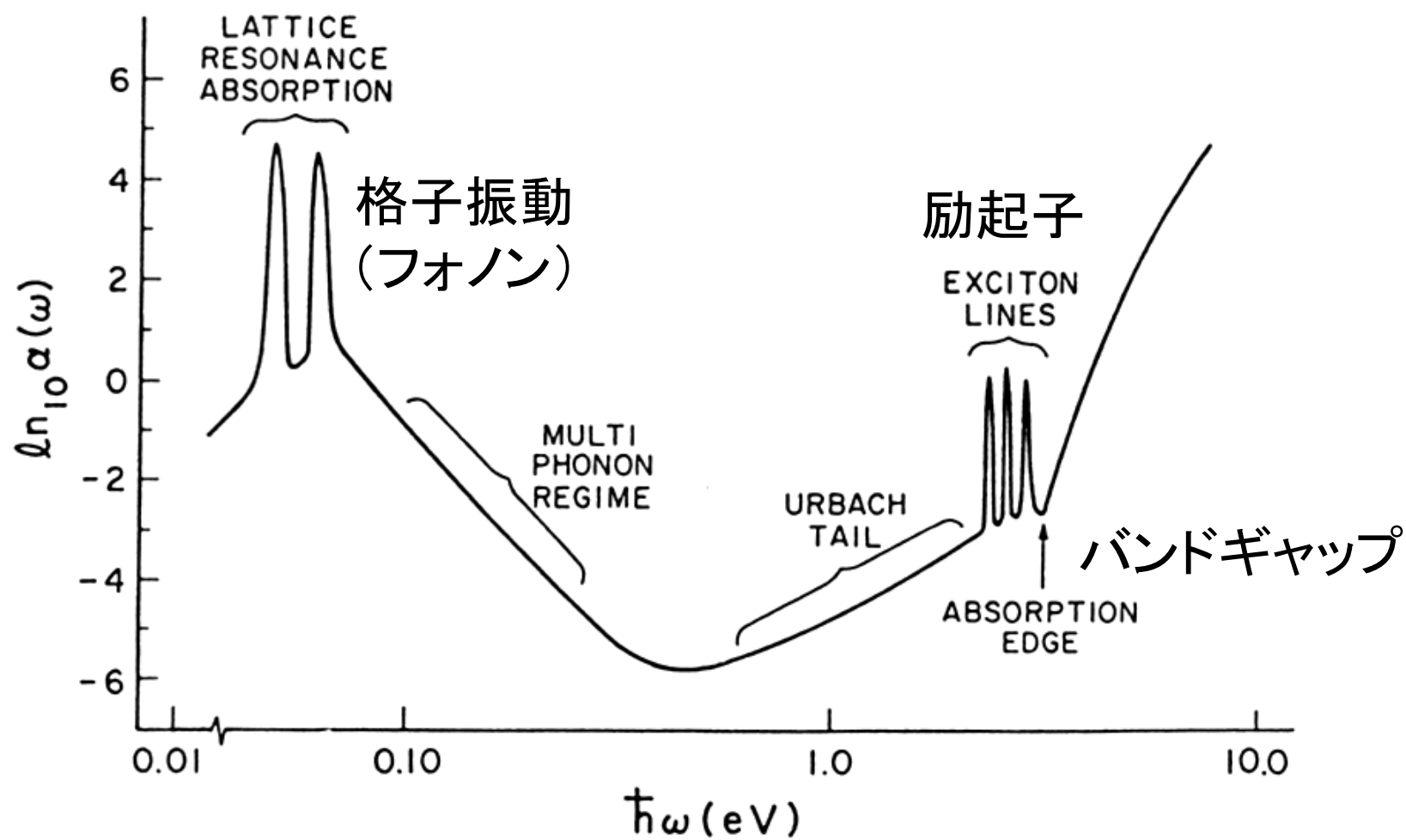
様々な物質のエネルギー準位 (独立粒子近似)



様々な物質のエネルギー準位



典型的な絶縁体の吸収スペクトル



光励起状態の「物性」測定

光学応答

可視・赤外域過渡吸収スペクトル

電子励起状態の緩和ダイナミクス

電気伝導

テラヘルツ時間領域（ポンプ・プローブ）分光

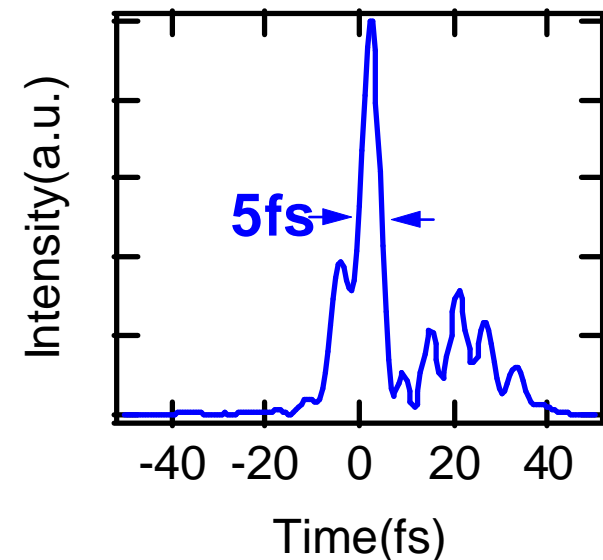
キャリアの応答、光誘起金属-絶縁体転移

磁性

時間分解磁気分光

スピンダイナミクス

光誘起磁性



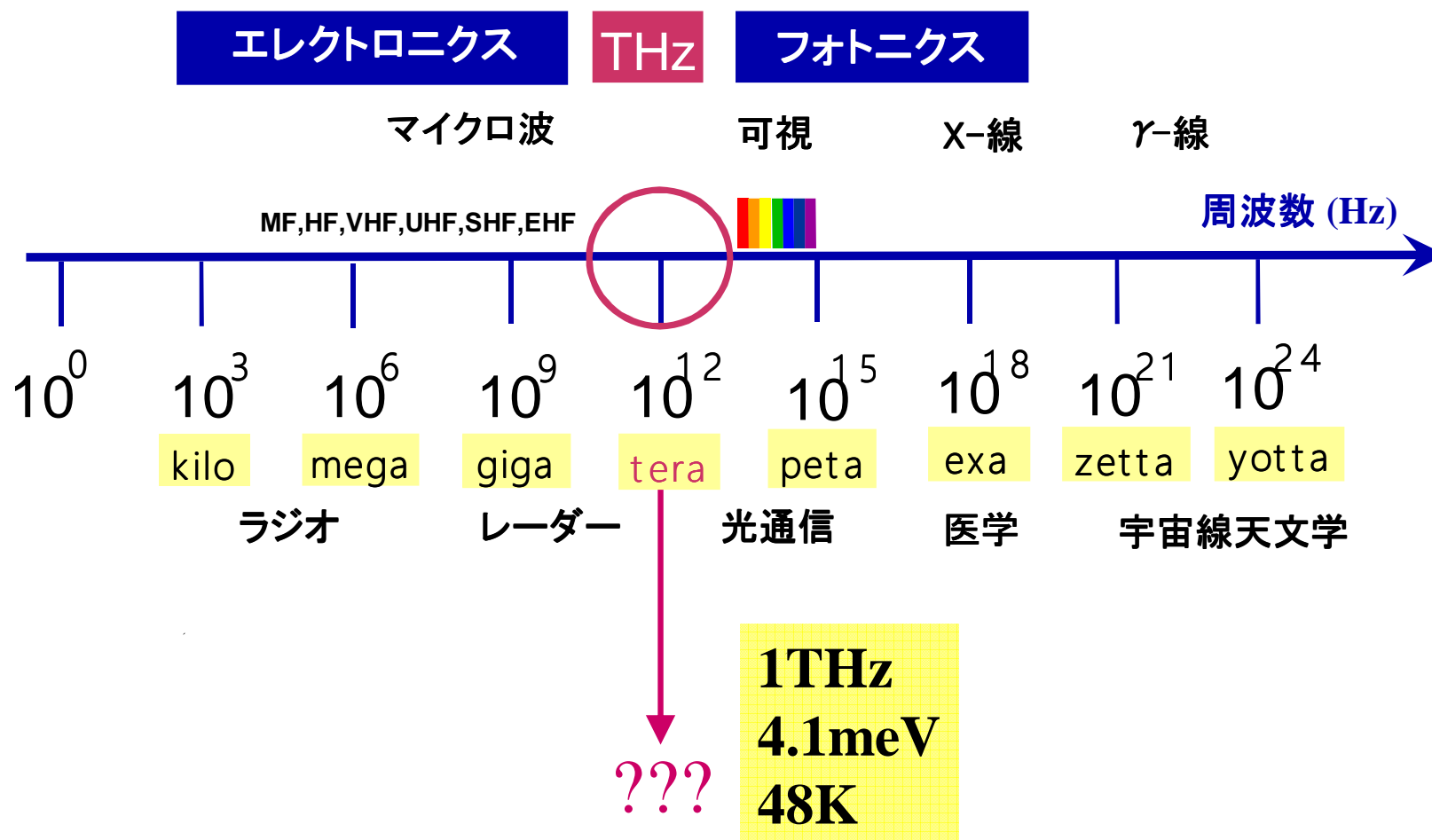
アウトライン

1. テラヘルツテクノロジーとは？
2. 光通信技術と非線形光学応答
光と物質の相互作用の特異な増強
ナノ構造物質
3. ナノ粒子の作製と光マニピュレーション
4. 最後に

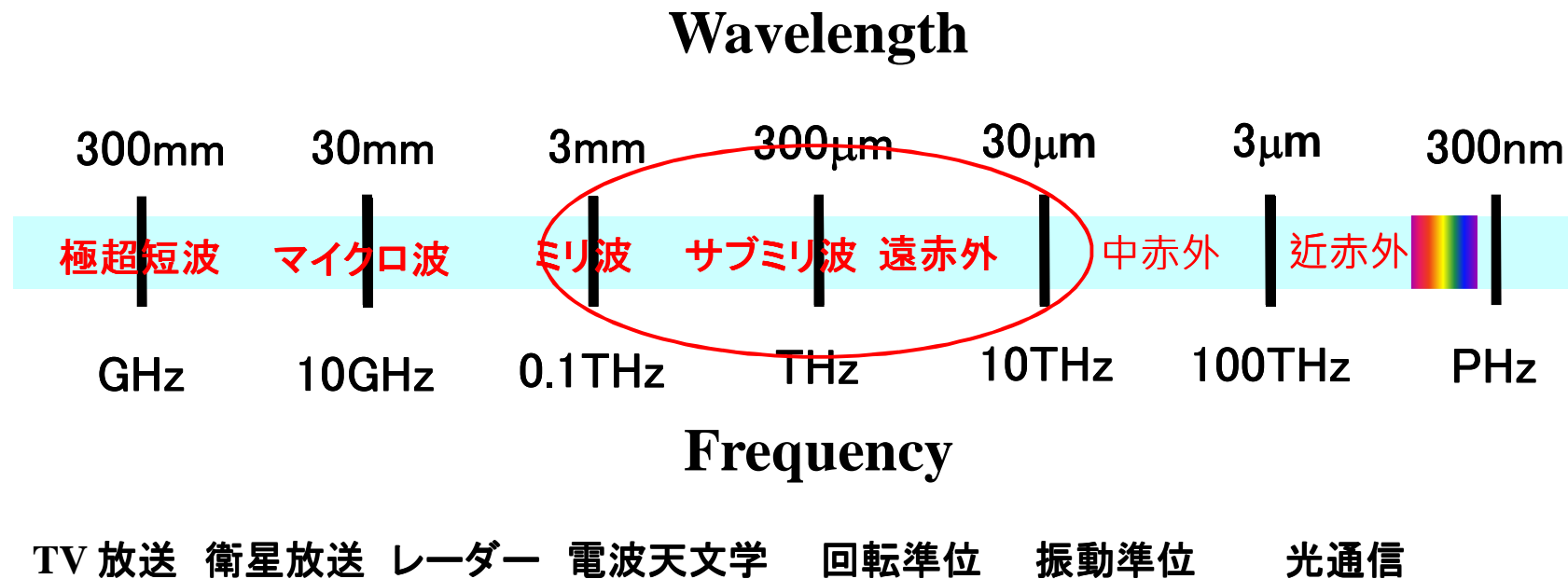
アウトライン

1. テラヘルツテクノロジーとは？
2. 光通信技術と非線形光学応答
光と物質の相互作用の特異な増強
ナノ構造物質
3. ナノ粒子の作製と光マニピュレーション
4. 最後に

テラヘルツ(THz) 領域 とは



テラヘルツ波を中心に見た電磁波スペクトル



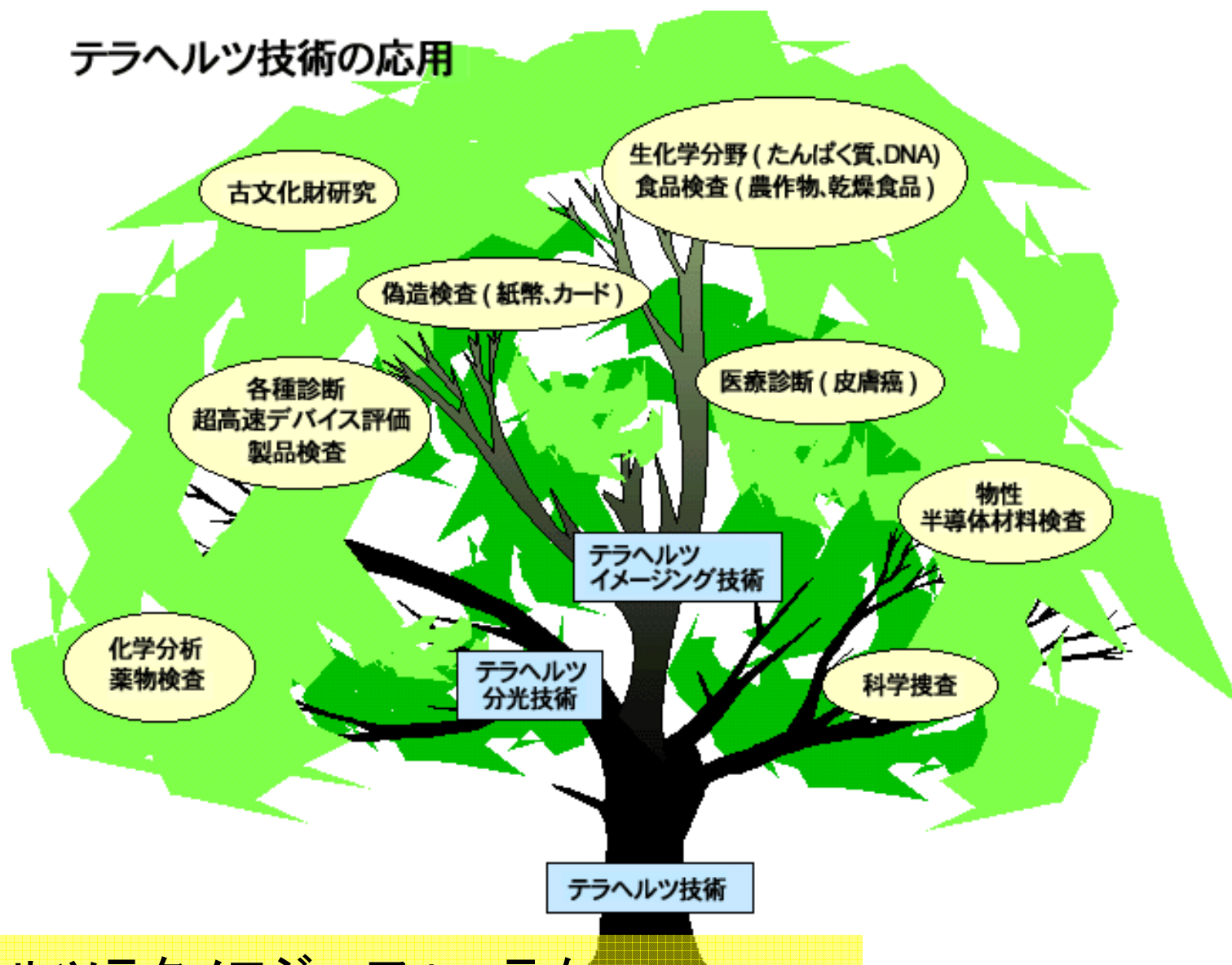
参考: 光科学の世界 (朝倉書店)

テラヘルツ波の特徴

- 超高速（光）エレクトロニクスの周波数
- 高分子（DNA、蛋白質、糖など）に固有の吸収特性
- 可視域で不透明な多くの物質を透過
プラスチック、紙、セラミック、脂肪、半導体等
- 可視・近赤外光よりも散乱の影響を受けにくい
→ 粉体を透過
- 水分に敏感（吸収大）
- X線に比べて人体への安全性が高い

参考：光科学の世界（朝倉書店）

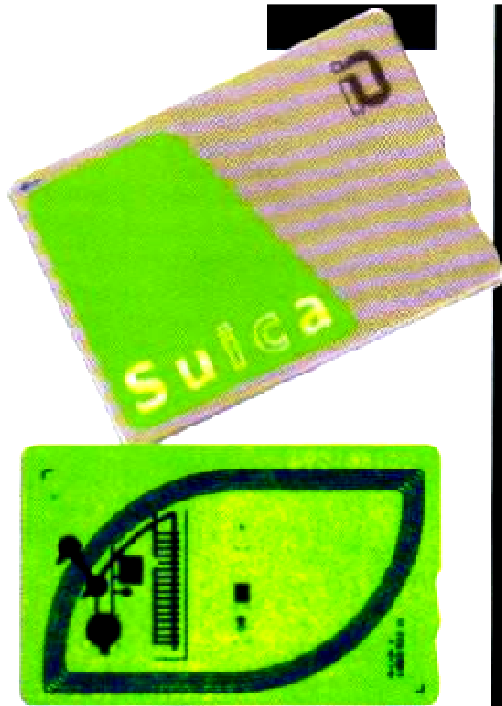
テラヘルツ技術の応用



テラヘルツテクノロジーフォーラム

<http://www.terahertzjapan.com/>

THzイメージング - セキュリティチェック -



プラスチックを透視



理研 科学警察研究所

封筒の中身を透視
さらに物質の同定も

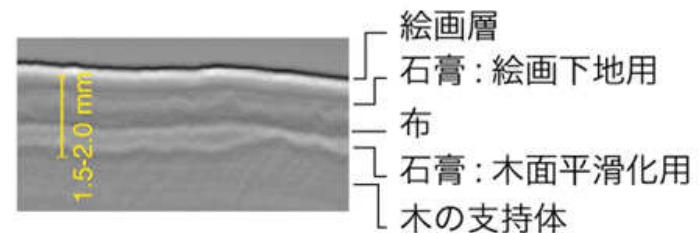
参考: 光科学の世界 (朝倉書店)

イタリア絵画のテラヘルツイメージング



測定状況

世界初！
非破壊、非接触での内部構造の観察



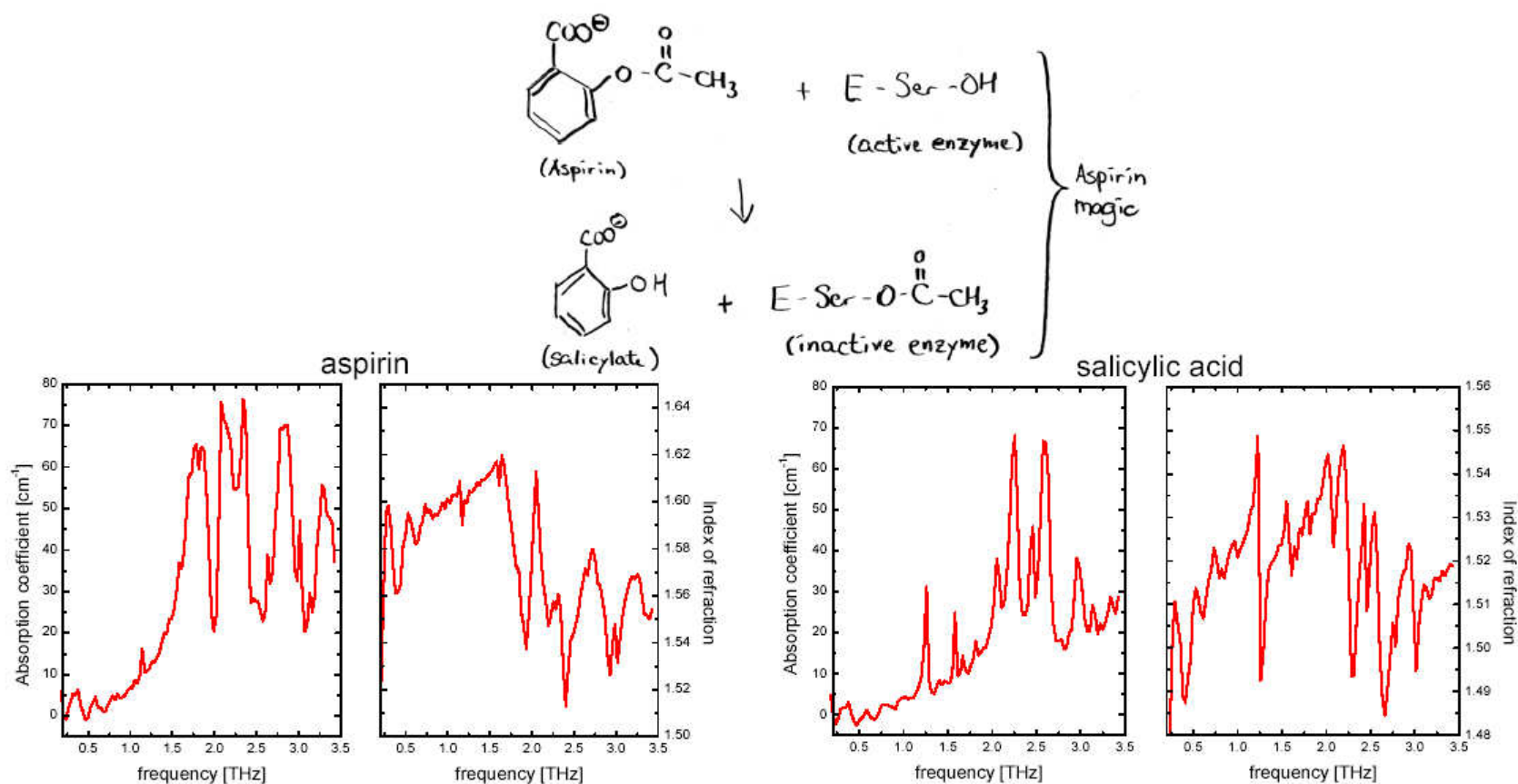
ジョット作「パディア家祭壇画」1300年頃
ウフィッツ美術館所蔵（イタリア、フィレンツェ）

(独)情報通信研究機構(NICT)

参考：光科学の世界(朝倉書店)

薬の同定

アスピリンとサリチル酸のTHzスペクトル



M. Walther *et al.*: FM&M Workshop on Medical Diagnostics, 2001.

THz 分光の応用

物性測定

キャリアダイナミクス

不純物濃度

(高)分子の回転・振動分光

量子力学
半導体物理

バイオサイエンス

薬の同定

ラベルフリーDNA分析 (Nagel *et al.*: APL **80**, 154 (2002).)

イメージングとの組み合わせ

透視？

ドローデモデル

$$m d^2x/dt^2 = -m\gamma dx/dt - e E_0 \exp(-i\omega t),$$

$$x(t) = x_0 \exp(-i\omega t), E(t) = E_0 \exp(-i\omega t),$$

$$x_0 = eE_0/[m(\omega^2 + i\gamma\omega)].$$

$$P = -Nex,$$

$$= -Ne^2E/[m(\omega^2 + i\gamma\omega)].$$

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

$$\equiv \varepsilon_0 \varepsilon E$$

$$\tau \equiv 1/\gamma, \text{ (散乱時間)}$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon &= 1 - Ne^2/[\varepsilon_0 m(\omega^2 + i\omega/\tau)] \\ &= 1 - \omega_p^2/[\varepsilon_0 m(\omega^2 + i\omega/\tau)]. \end{aligned}$$

$$\omega_p^2 = (Ne^2/\varepsilon_0 m)^{1/2}. \text{ (プラズマ振動数)}$$

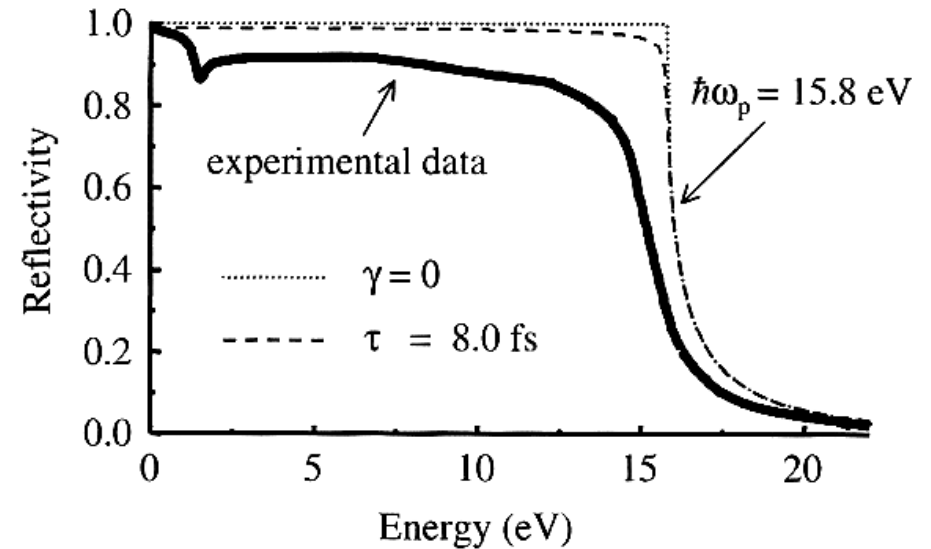
$$v(t) \equiv dx/dt,$$

$$j \equiv -Nev = \sigma E$$

$$\therefore \sigma = \sigma_0/[1 - i\omega/\tau] (= -i\varepsilon_0\omega(\varepsilon - 1)). \text{ (光学伝導度)}$$

$$\sigma_0 \equiv (Ne^2\tau/m). \text{ (直流伝導度)}$$

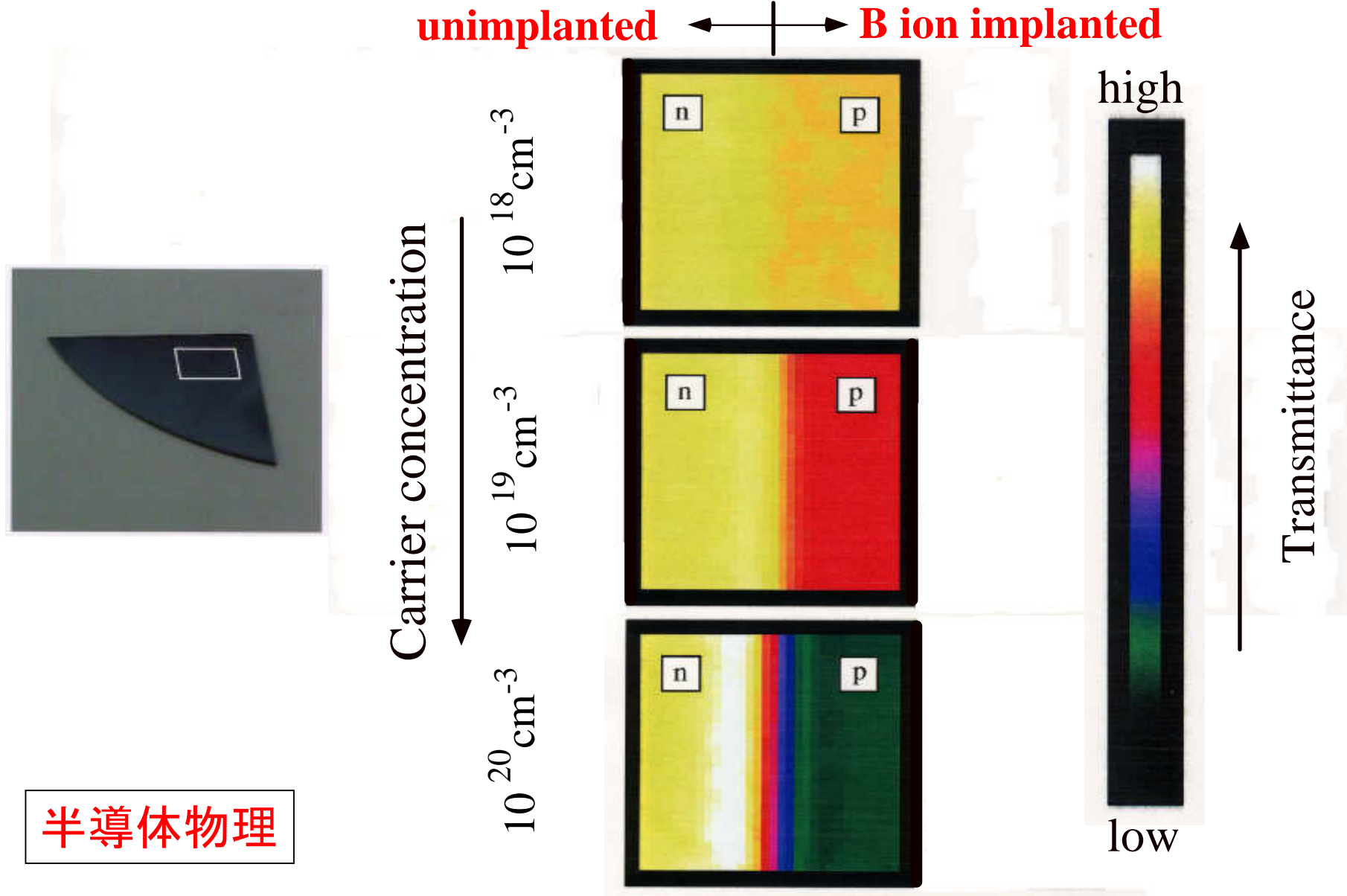
AIの反射率スペクトル



光物理学基礎

← 赤外スペクトルの測定から
(接触しなくても)計れる。

不純物濃度の異なるSiウエハーのTHzイメージ



赤外分光法の発展

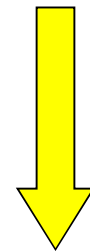
回折格子分光器

フーリエ分光

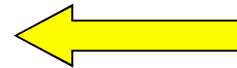
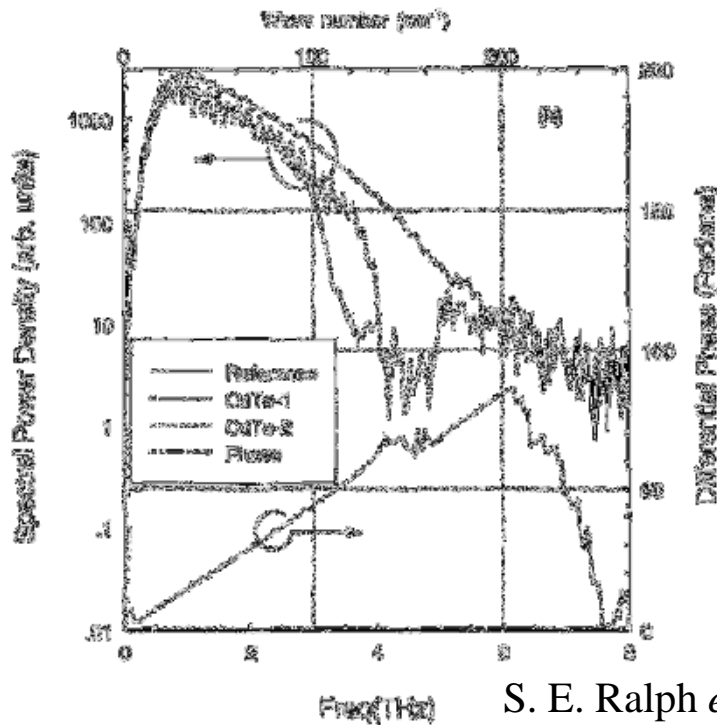
時間領域分光

計算機

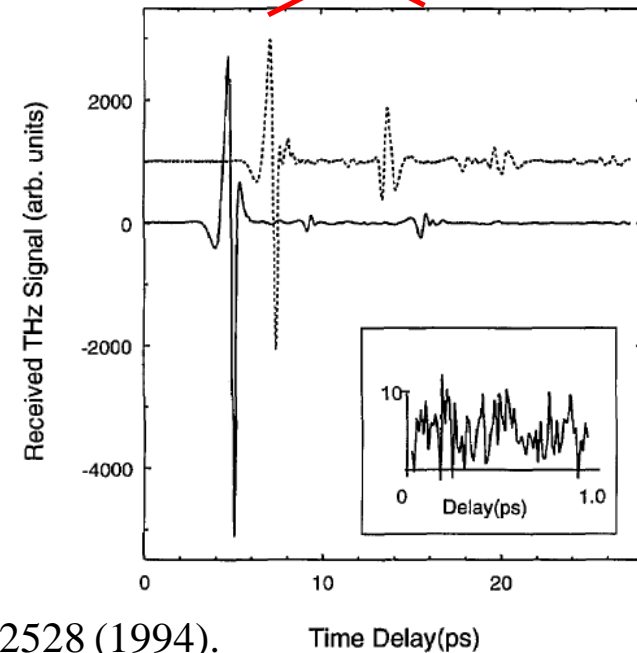
超短パルスレーザー



Temporal profile of ~~$E(t)$~~ $|E(t)|^2$

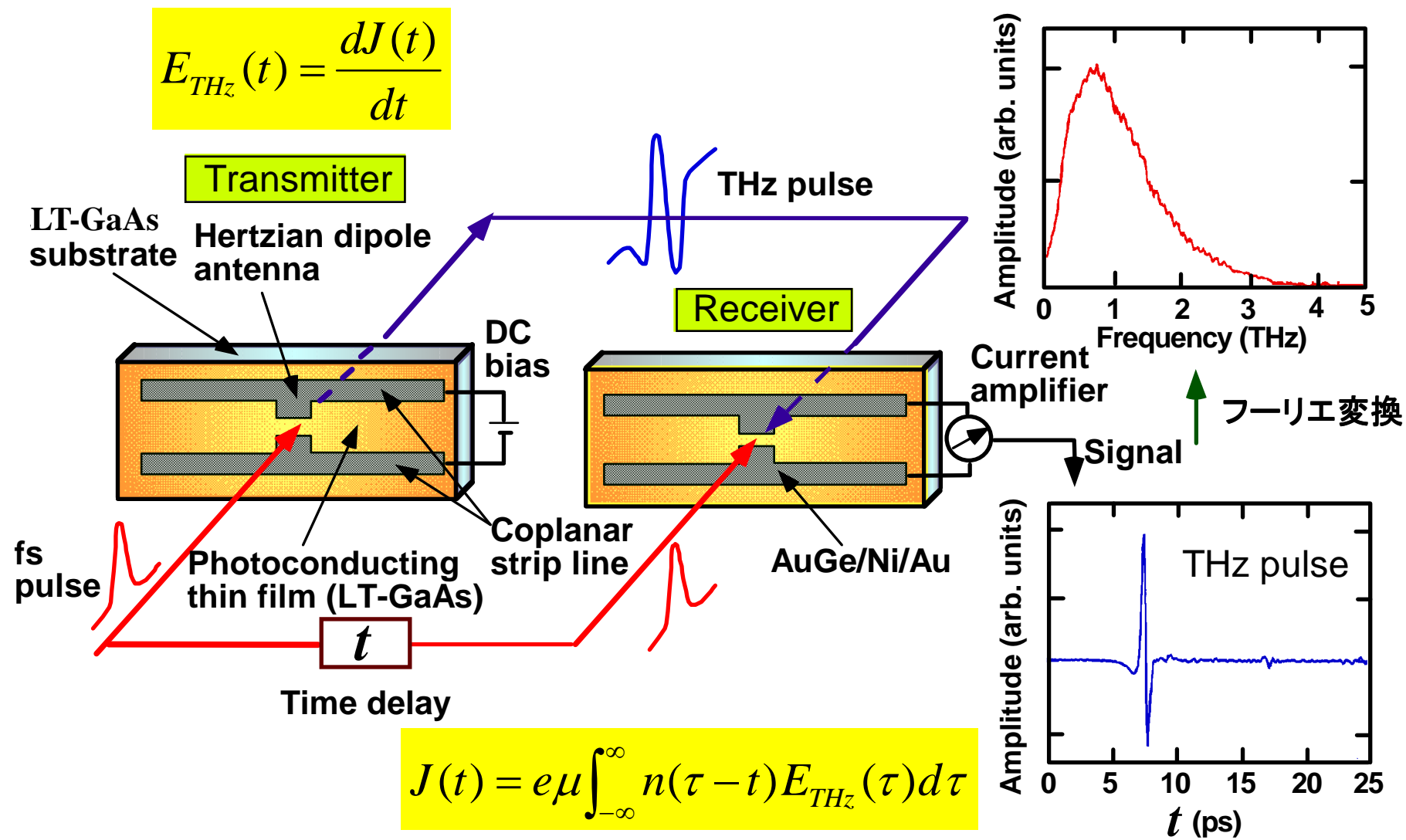


振幅
位相



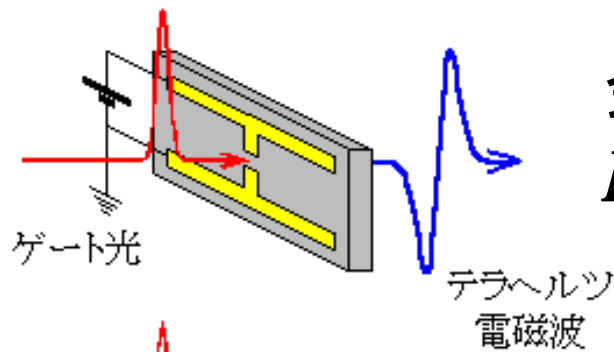
S. E. Ralph *et al.* J. Opt. Soc. Am. B **11**,2528 (1994).

光伝導アンテナを用いた テラヘルツ波発生・検出



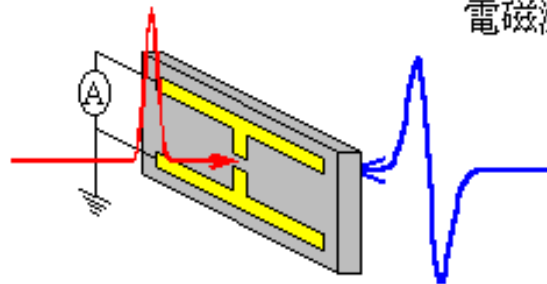
アンテナによるTHz時間領域分光法

光伝導アンテナを用いる発生・検出



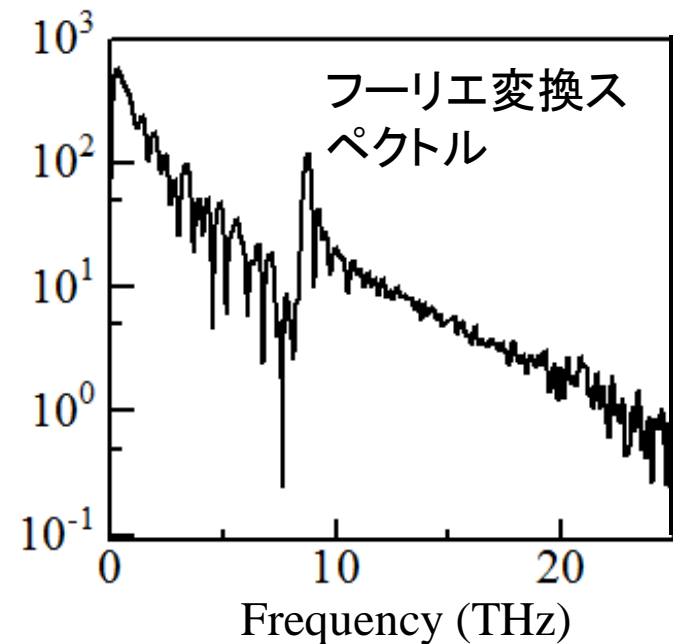
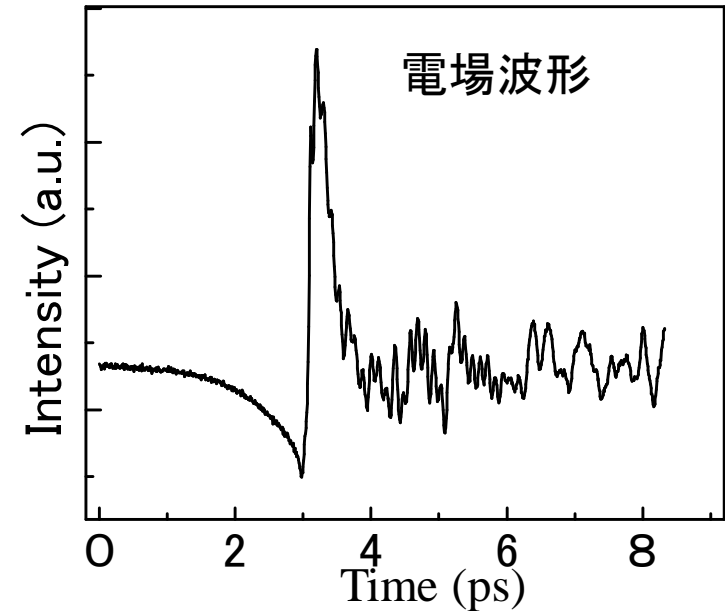
発生

$$E \propto \partial j_e / \partial t$$



検出

$$j_d \propto \int E(\tau) N(\tau-t) d\tau$$



参考: 光科学の世界 (朝倉書店)

M. Ashida, J. J. Appl. Phys. **47**, 8221 (2008).

時間領域分光法の利点

電場の時間応答を直接測定

位相情報の利用が可能

振幅・位相情報の解析から複素屈折率の実部と虚部を取得

パルス波使用

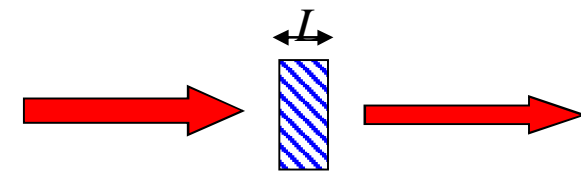
試料内部の光伝播の様子を追跡しながら解析処理可能

超高速ポンプ・プローブ分光への発展

背景輻射の影響なし

室温で動作

cf. パルスNMR, パルスESR



$E_0(t)$ sample $E(t)$

$$E(\omega) / E_0(\omega) = \exp\{-i(\underline{n}(\omega)-1)L\omega/c\}$$

複素誘電率

$(n, \alpha), (\epsilon_1, \epsilon_2), (\sigma_1, \sigma_2)$

クラマースークローニツヒ変換、
エリプソメトリーが不要

参考: 光科学の世界(朝倉書店)

テラヘルツ時間領域分光法の応用

電場応答そのものの $E(t)$ ($|E(t)|^2$ でなく)を検出

→透過、反射から 誘電関数の実部と虚部を同時に決定可能
 n α

物性測定

半導体ドーパ量の評価

(生体)高分子の構造等の同定

超伝導ギャップの観測

バイオサイエンス

薬の同定(多形解析)

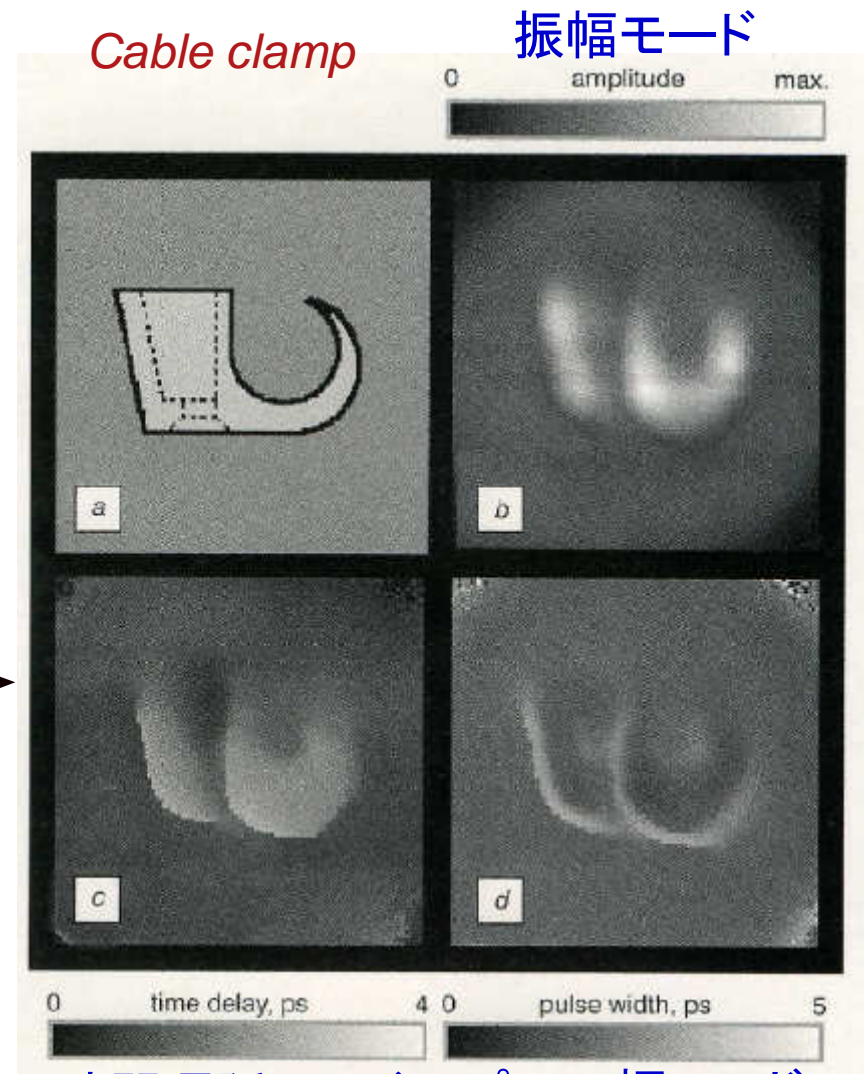
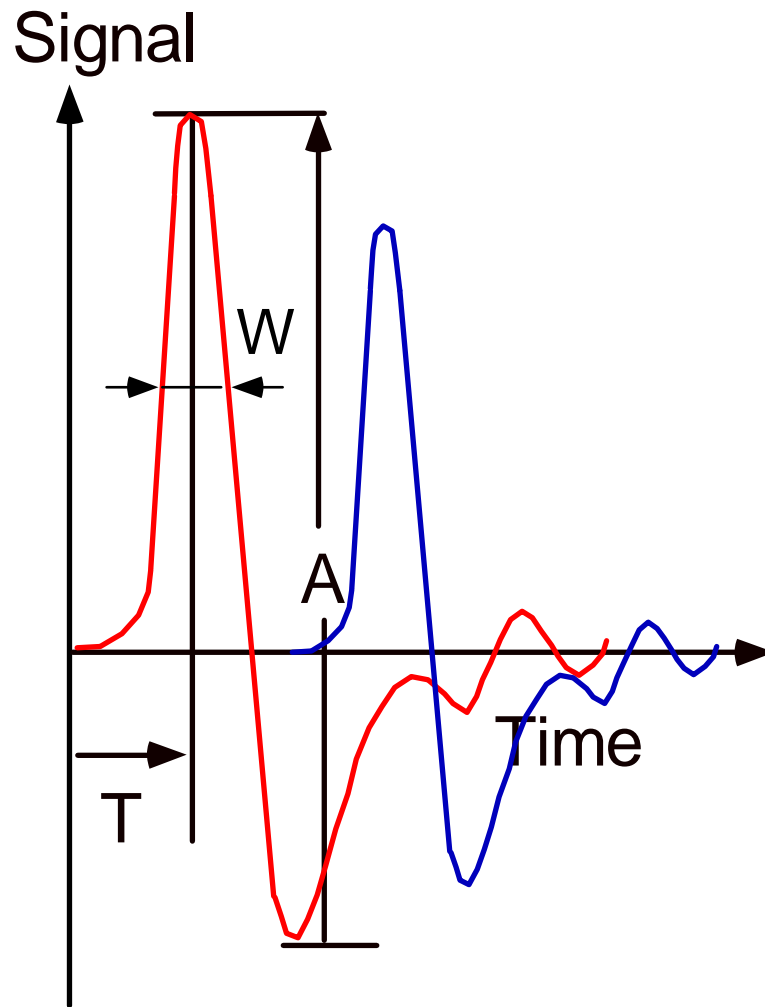
ラベルフリーDNA分析

イメージングとの組み合わせ

参考:光科学の世界(朝倉書店)

THzイメージング原理図

小麦粉中に埋められた物体



時間遅延モード パルス幅モード

THz時間領域イメージングの特徴

乾燥した誘電体（プラスチック、紙、セラミック）のイメージング
透明でも屈折率から物質が同定可能

散乱の影響が小さい。（ a : 散乱体の大きさ）

Rayleigh 散乱 $\propto 1 / \lambda^4$ $\lambda \gg a$

Mie 散乱 $\propto 1 / \lambda^2$ $\lambda \approx a$

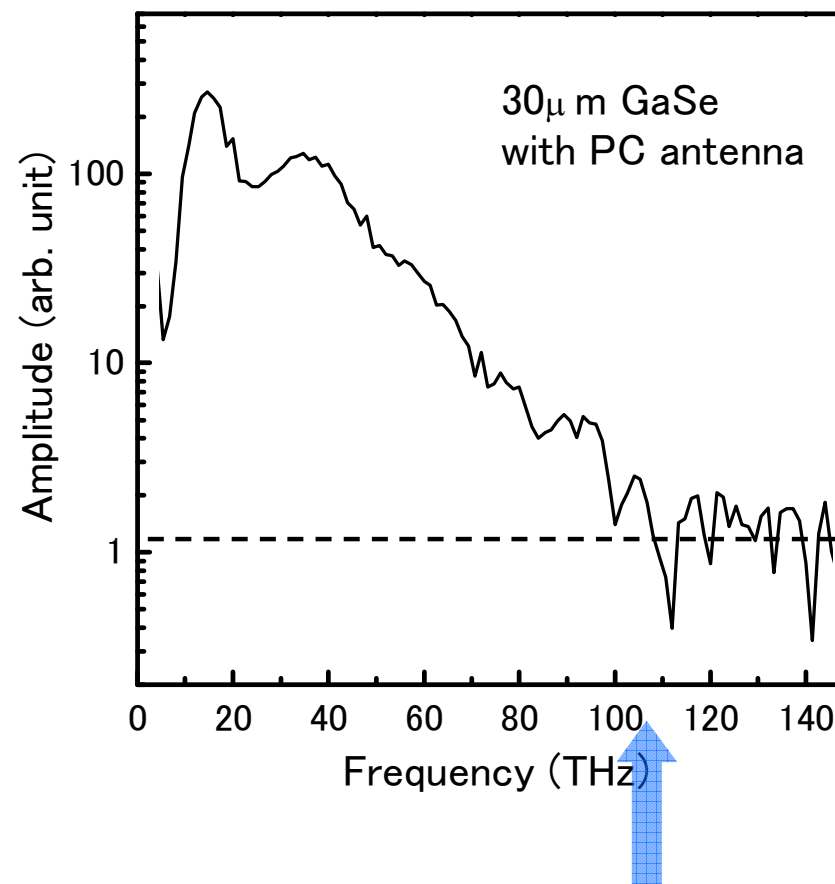
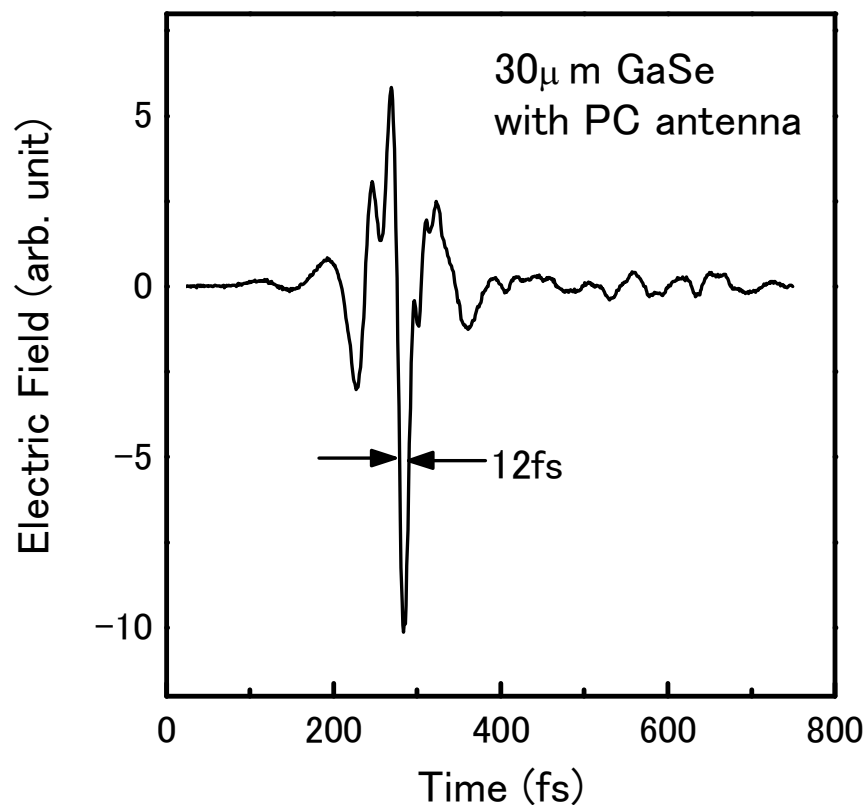
空間分解能に乏しい。

Rayleigh criteria $\approx \lambda / 2$

→ 近接場分光、中赤外域への高帯域化

参考: 光科学の世界 (朝倉書店)

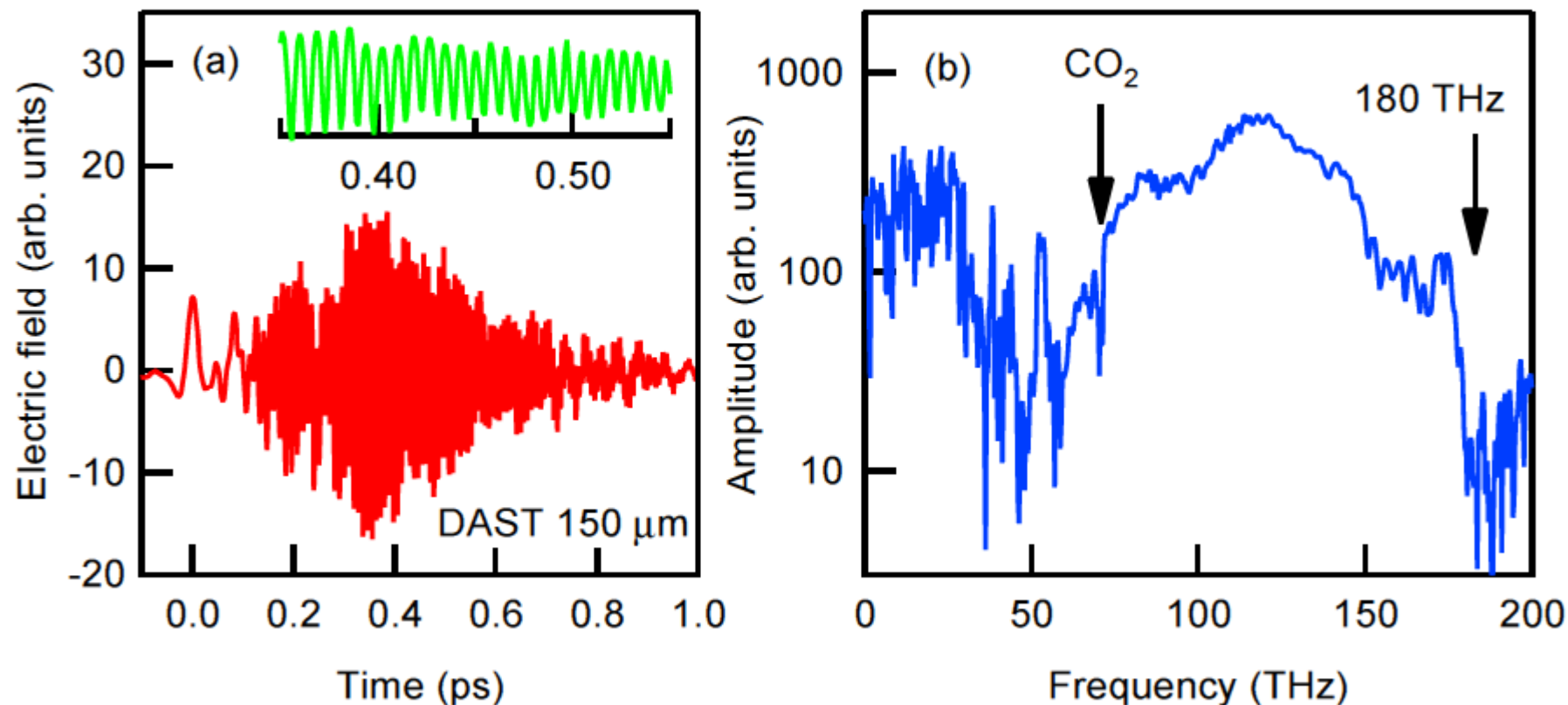
アンテナによる光電場の直接検出実験



100THz(3 μ m)の赤外光まで電場の振動を直接検出(世界最高記録)

参考:光科学の世界(朝倉書店)

アンテナによる光電場の直接検出実験

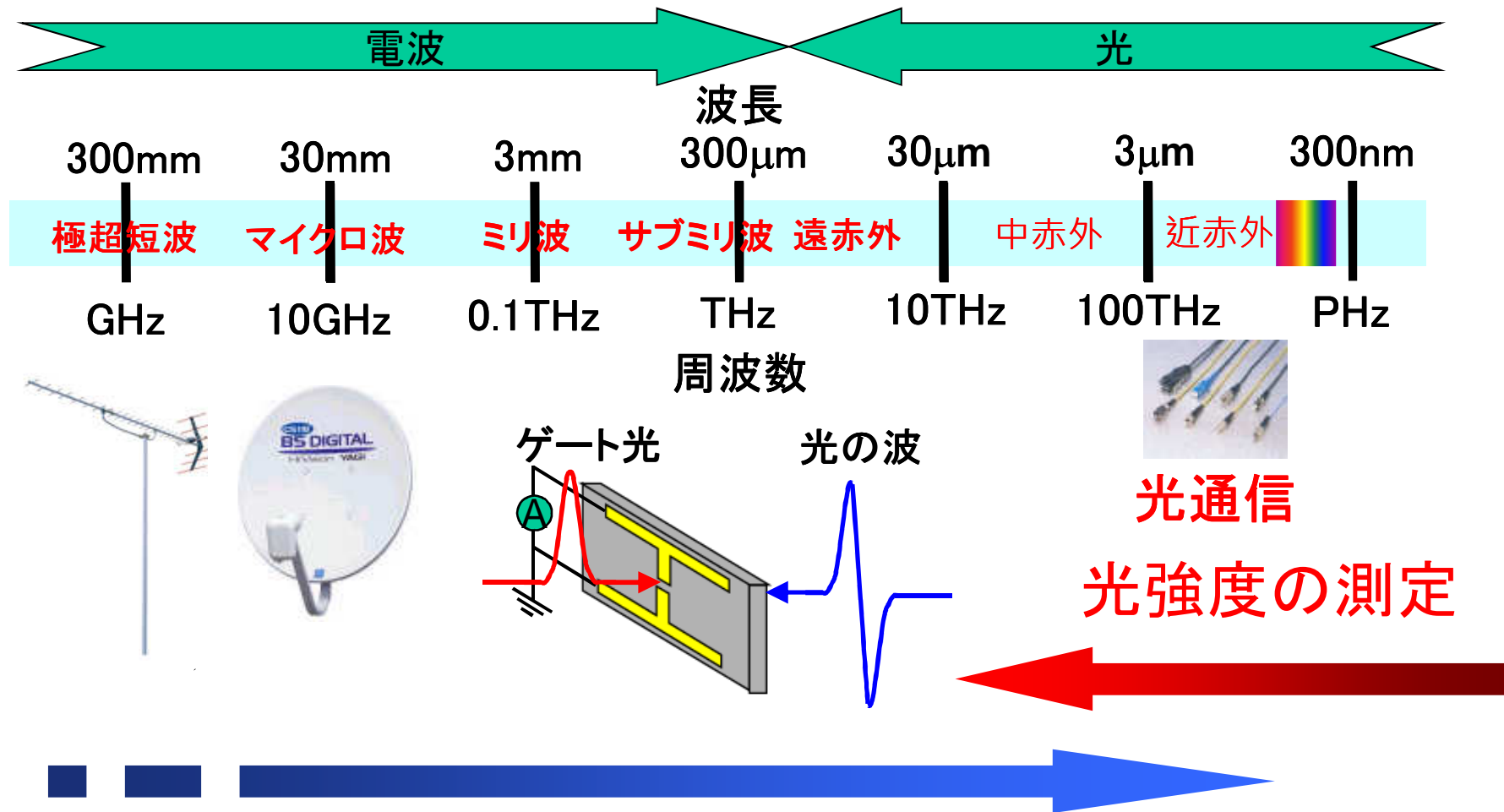


180THz(1.7 μm)を超える赤外光まで電場の振動を直接検出(世界最高再更新)

参考:光科学の世界
(朝倉書店)

I. Katayama, R. Akai, M. Bito, E. Matsubara, M. Ashida, Opt. Express 21, 16248 (2013).

アンテナで光電場を直接検出する!!



アンテナで光電場はどれだけ高い周波数まで検出可能か？

MgB₂ の超伝導ギャップの観測

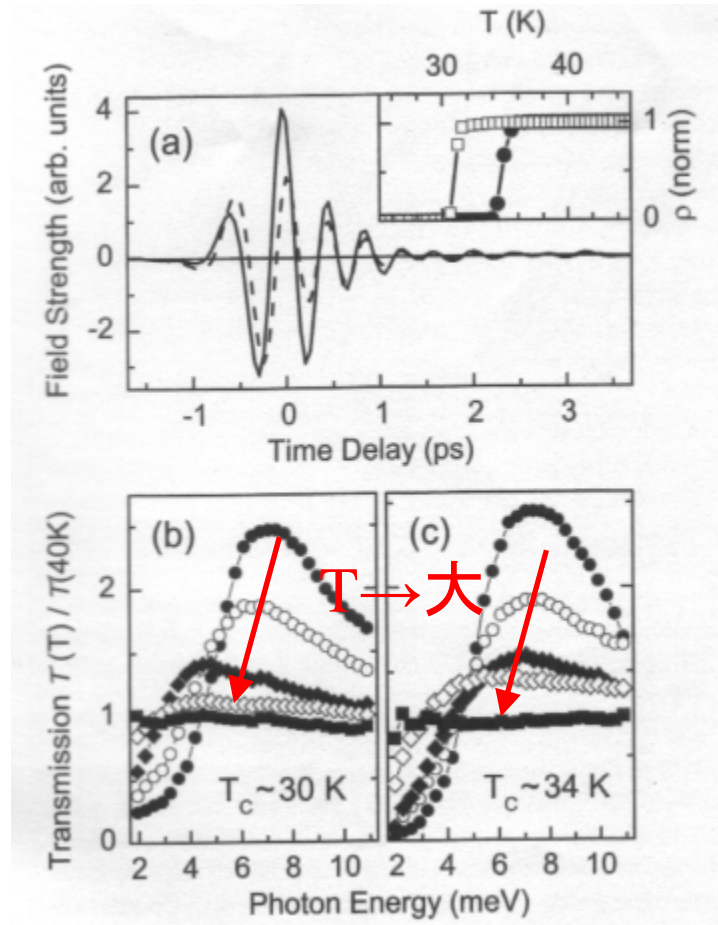
R. A. Kaindl *et al.*:
PRL 88, 027003 (2002).

250KHz Regen.
ZnTe EO sampling

100, 200nm film on Al₂O₃

6-36K

$2\Delta=5\text{meV}$



超伝導物理

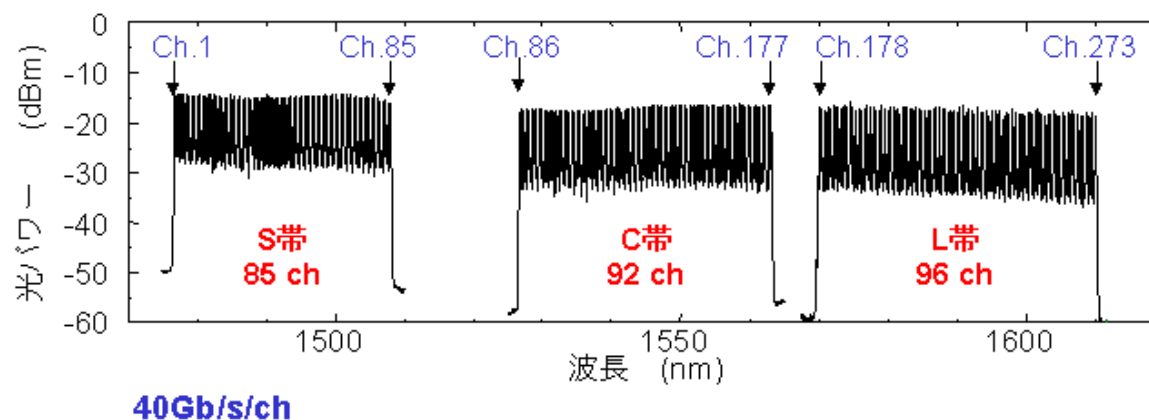
アウトライン

1. テラヘルツテクノロジーとは？
2. **光通信技術と非線形光学応答**
光と物質の相互作用の特異な増強
ナノ構造物質
3. ナノ粒子の作製と光マニピュレーション
4. 最後に

光ファイバーを用いた通信技術 (DWDM)

10.9Tb/s, 117km伝送後の
光スペクトル

NEC



全ての測定チャンネルで符号誤り率 10^{-9} 以下を達成

初めて伝送容量 10Tb/sの壁を突破

DVD 270枚分の情報を1秒で

OFC 2001 (Mar. 22)



The Nobel Prize in Physics 2009

"for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication"



1/2 of the prize
Standard Telecommunication Laboratories
Harlow, United Kingdom; Chinese
University of Hong Kong
Hong Kong, China

"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"



1/4 of the prize



1/4 of the prize

Bell Laboratories
Murray Hill, NJ, USA

光ファイバー

Optical fiber with high transmission

The guiding of light in media using the concept of total internal reflection was first discussed during the 19th century. In 1841, D. Colladon at the University of Geneva demonstrated light guiding in a water jet, while at about the same time, J. Babinet in France made similar observations and even extended the idea to guiding in bent glass rods. The idea is often attributed to J. Tyndall who demonstrated the guiding of light in a water jet at the Royal Society in London in 1854, following a suggestion by M. Faraday. One can argue however, that the phenomenon was known since ancient times, with small (colored) glass pieces used as decoration in Egypt or Mesopotamia. Light guiding in large water jets was even used for entertainment purposes, with illuminated fountains shown at the 1889 Universal Exposition in Paris (see [1] for a historical review).



Fig. 1: Optical fiber. The refractive index of the core is slightly higher than that of the cladding. Typical dimensions are 10 or 50 micrometers for the core and 125 micrometers for the fiber. In addition, a protecting plastic "buffer" is placed around the fiber.

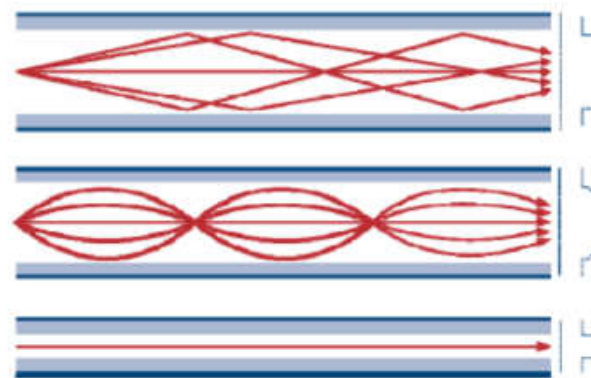


Fig. 2: Different types of fibers, step-index multimode, single mode and gradient index multimode. The propagation of a few rays is also indicated in red, as well as the distribution of the refractive index to the right.

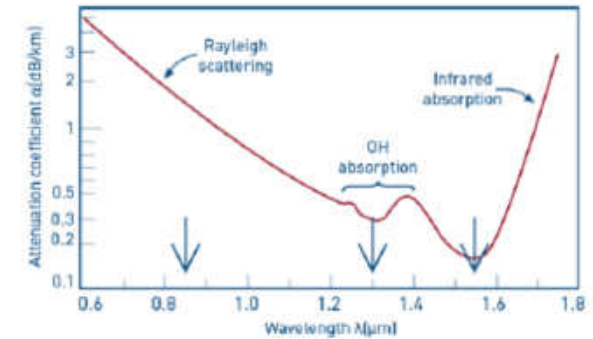


Fig. 3: Attenuation coefficient of silica as a function of wavelength. On the short wavelength side, attenuation is due to Rayleigh scattering, which varies as λ^{-4} , while on the long wavelength side, to absorption in molecules. Impurities due to OH radicals are usually difficult to remove. The favored wavelengths for optical communication are 1.3 and 1.55 μm .

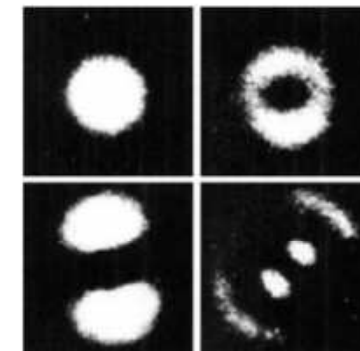
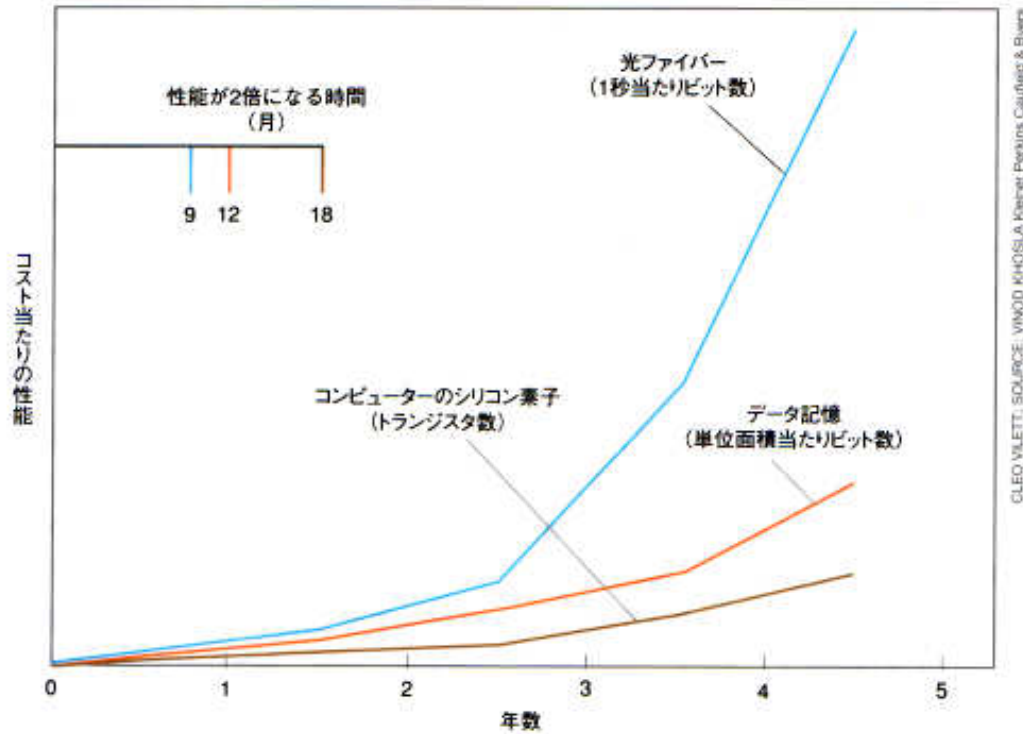


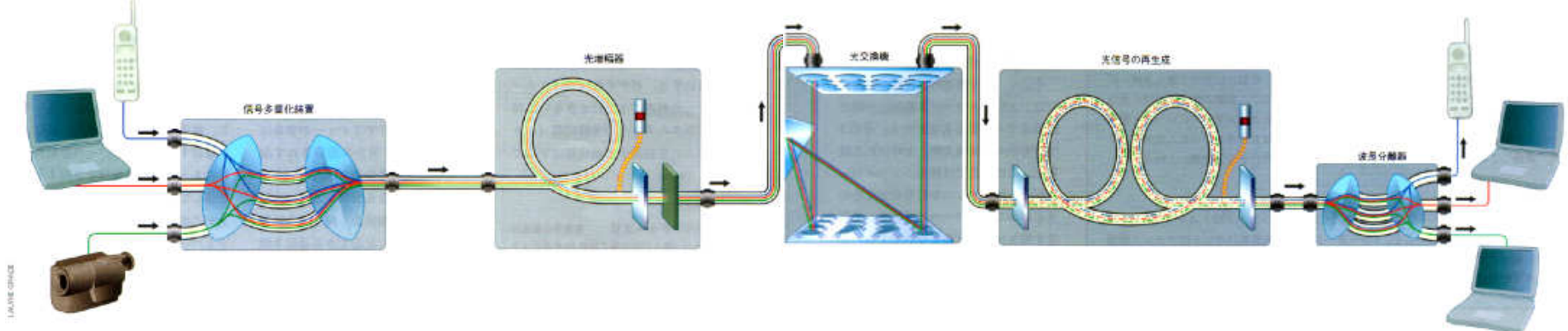
Fig. 4: Spatial electromagnetic modes in a multimode fiber, from [2]. The top left one is the hybrid HE_{11} mode, the only one propagating in a single mode fiber.

光通信技術の発展

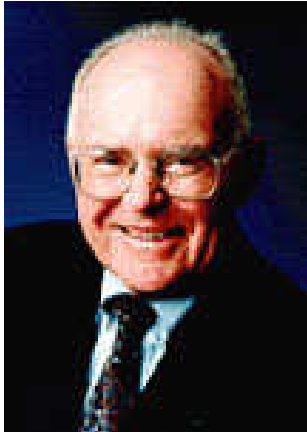


日経サイエンス 2001年4月号

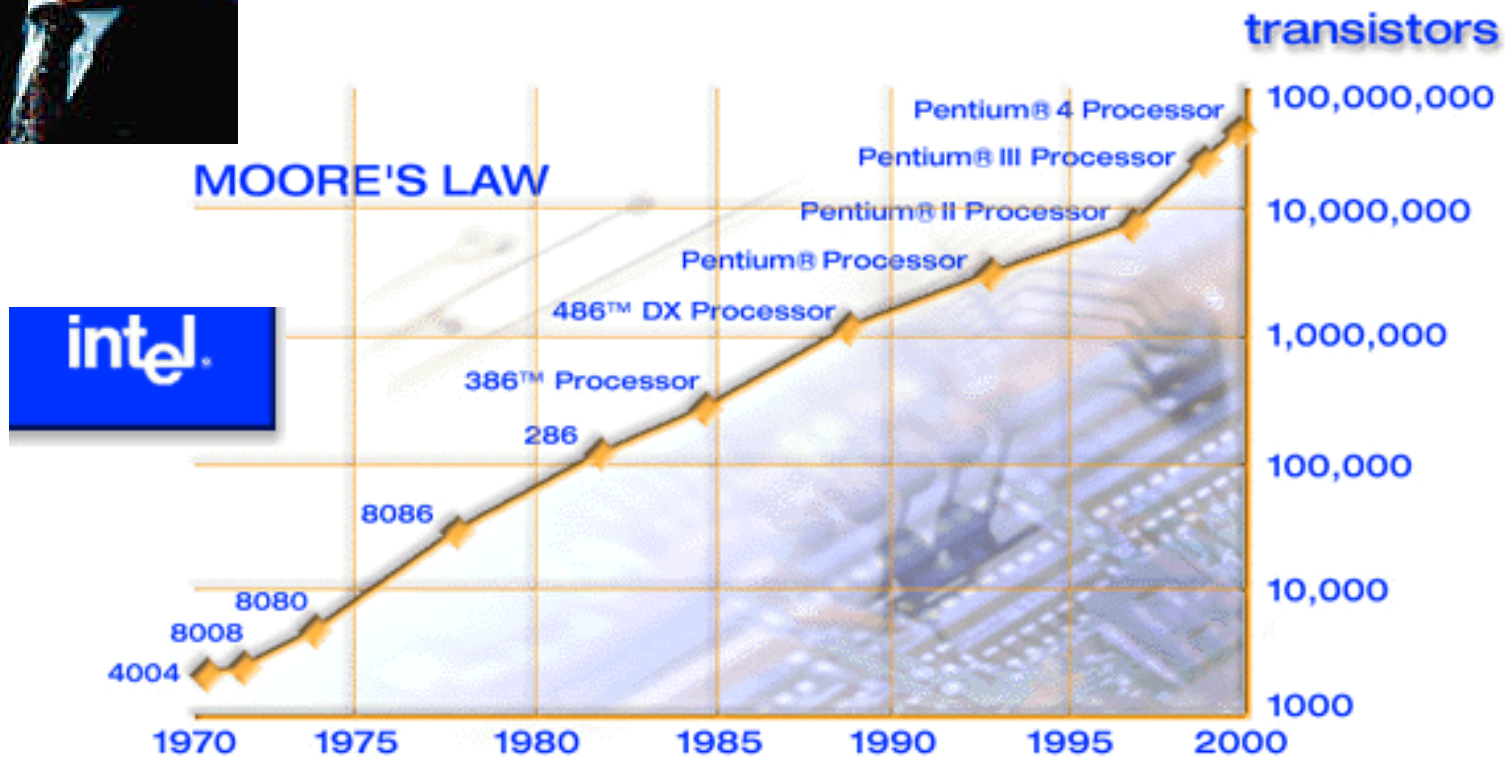
“完全”光ネットワークの技術



ムーアの法則



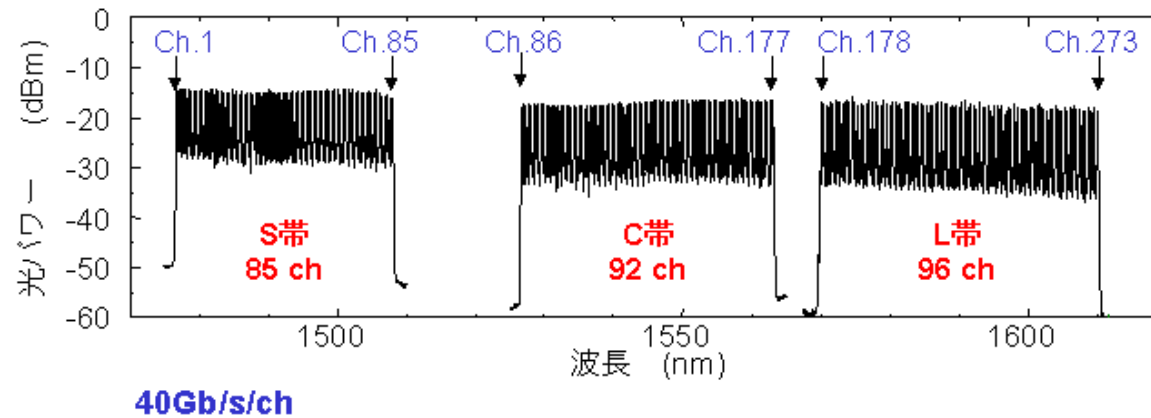
ICに使用されるトランジスタの数は18ヶ月で倍になる。



DWDM: 10 Tb/s を越えて

10.9Tb/s, 117km伝送後の
光スペクトル

NEC



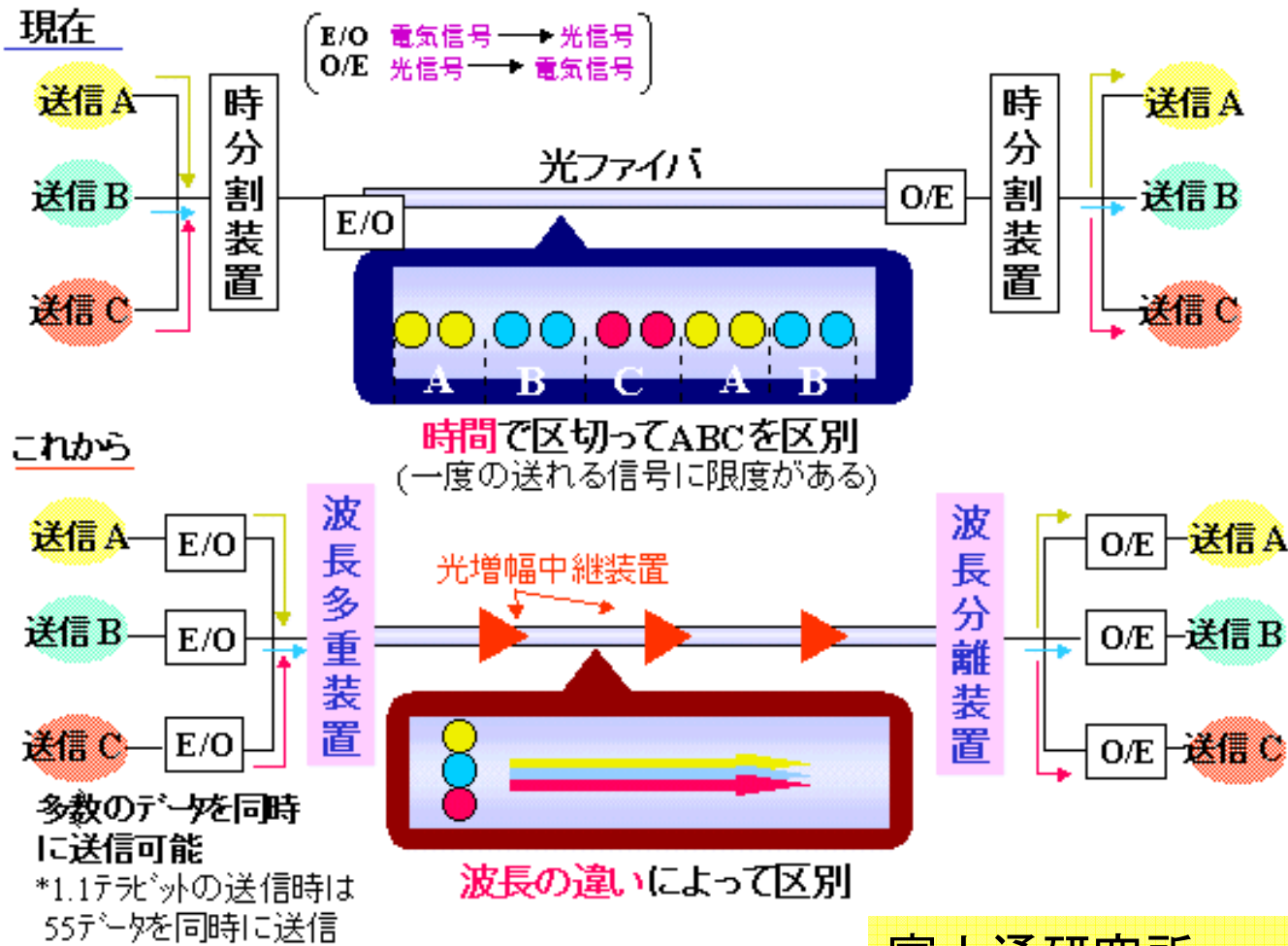
全ての測定チャンネルで符号誤り率 10^{-9} 以下を達成

初めて伝送容量 10Tb/sの壁を突破

DVD 270枚分の情報を1秒で

OFC 2001 (Mar. 22)

WDM: 波長分割多重方式



富士通研究所
やさしい技術講座より

DWDM: 1Pb/s を越えて

2012年9月20日
日本電信電話株式会社
株式会社 フジクラ
国立大学法人 北海道大学
デンマーク工科大学

毎秒1ペタビット、50kmの世界最大容量光伝送に成功 ～光ファイバ1本でハイビジョン映画 約5000本分を1秒で伝送可能に～

日本電信電話株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:鶴浦 博夫、以下 NTT)と株式会社フジクラ(本社:東京都江東区、代表取締役社長:長浜 洋一、以下 フジクラ)、国立大学法人北海道大学(北海道札幌市、総長:佐伯 浩、以下 北大)、デンマーク工科大学(Denmark Lyngby、President: Anders Overgaard Bjarklev、以下 DTU)は、12個のコア(光の通路)を持つ光ファイバ1本で毎秒1ペタ(1000テラ)ビット(ペタは1000兆、テラの1000倍)の超大容量データを52.4km伝送することに成功しました。

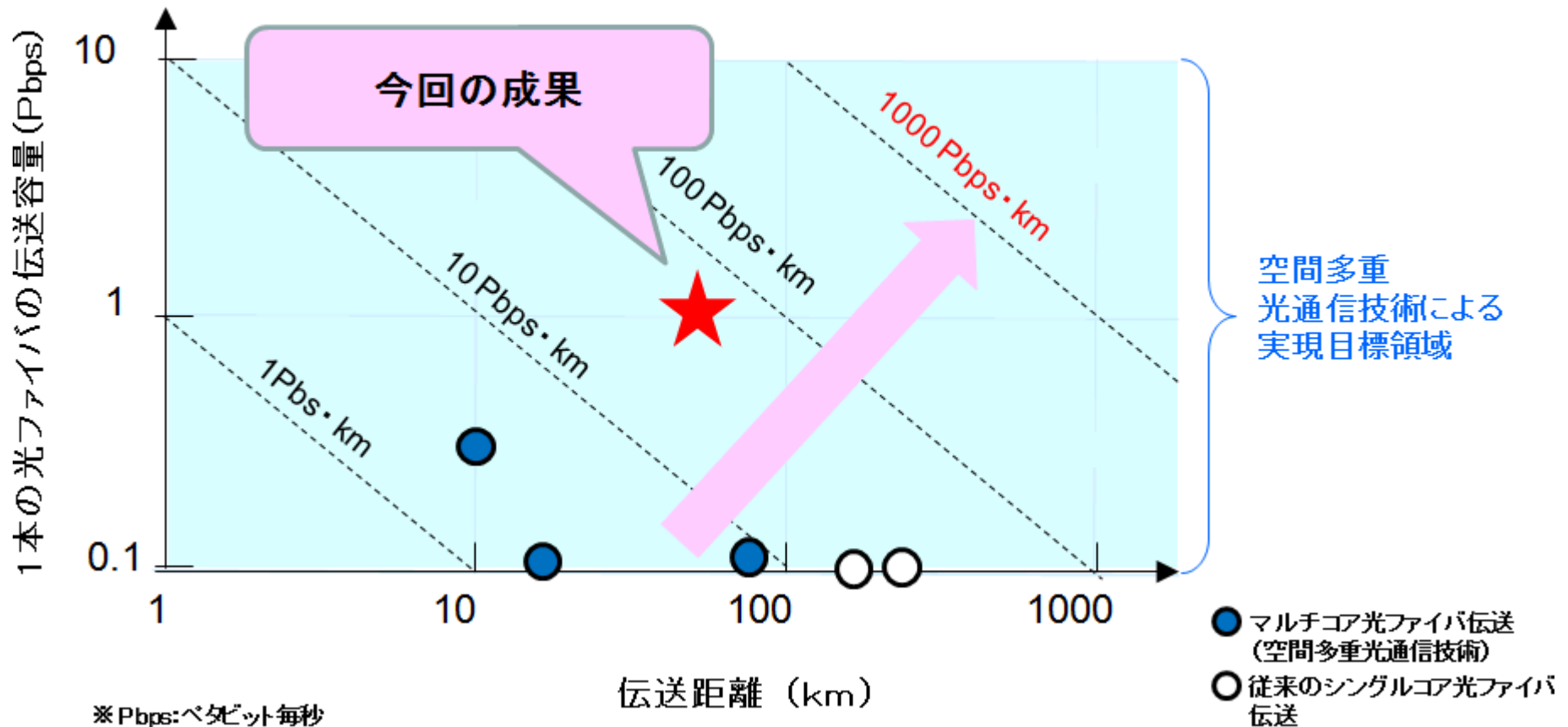
毎秒1ペタビットという数値は、2時間のハイビジョン映画5000本を1秒間で伝送可能な速度に相当し、中距離の中継ビルの間隔に相当する約50kmの伝送が可能になることを示しています。これまでの1本の光ファイバを用いた伝送性能として世界最高となるものです。

今回の成果は9月16日からオランダのアムステルダムで開催されているヨーロッパ最大の光通信国際会議(ECOC2012)において、9月20日(現地時間)にポストデッドライン論文※1として発表する予定です。

なお、本研究開発の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)委託研究の成果を用いています。

DWDM: 1Pb/s を越えて

空間多重光伝送技術を用いた大容量伝送技術の提案と本成果の位置づけ



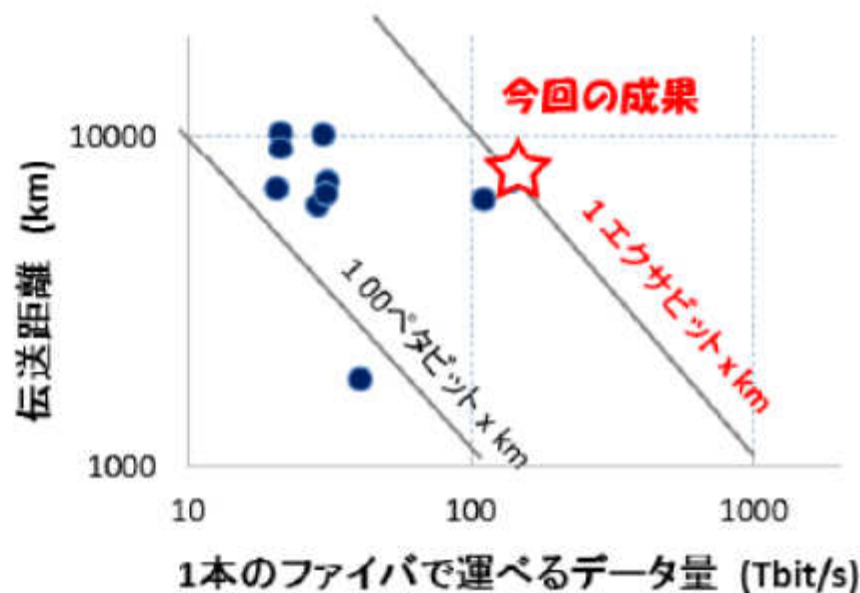
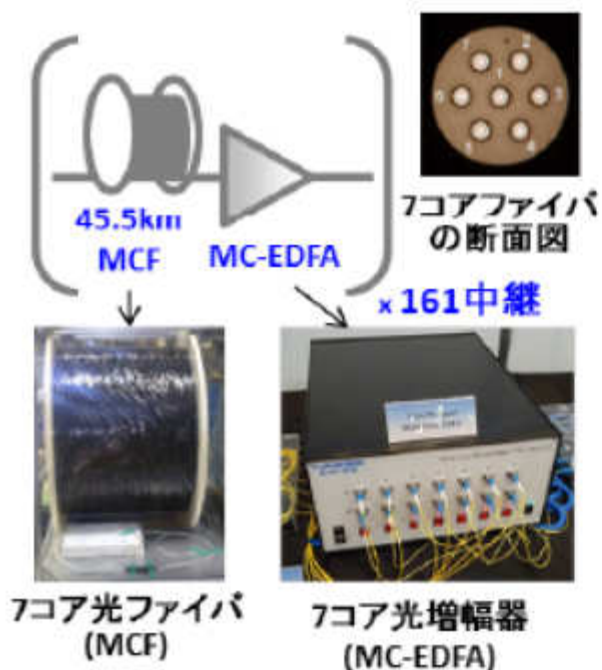
J. Sakaguchi, et al, *19-core fiber transmission of 19 x 100 x 172Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s*, OFC.NFOEC2012, PDP5C.1 (2012).

世界最大容量の大洋横断光ファイバ伝送実験に成功

～毎秒1エクサ（百京、10の18乗）ビット×キロメートルの容量距離積で世界記録達成～

2013年9月25日

株式会社KDDI研究所（代表取締役所長：中島 康之、以下KDDI研）と、古河電気工業株式会社（代表取締役社長：柴田 光義、以下古河電工）は、独立行政法人情報通信研究機構（理事長：坂内 正夫、以下NICT）の委託研究^{※1}により、大洋横断光ファイバ伝送において世界最大となる毎秒140テラビット（ハイビジョン映像2時間分を1秒で700本分転送可能な速度。テラは1兆を表す。）の超大容量信号を約7,300km（東京-プリズベン(オーストラリア)、ニューヨーク-ローマ間の距離に相当）伝送することに成功しました。この実験により、伝送容量と伝送距離の積で示す伝送性能指数（容量距離積）において、世界で初めて1エクサ（Exa :1京の100倍、10の18乗）の壁を突破しました。



光スイッチの現状

電気光学スイッチ

MEMSスイッチ

バブルスイッチ

導波路型熱・光スイッチ

液晶スイッチ

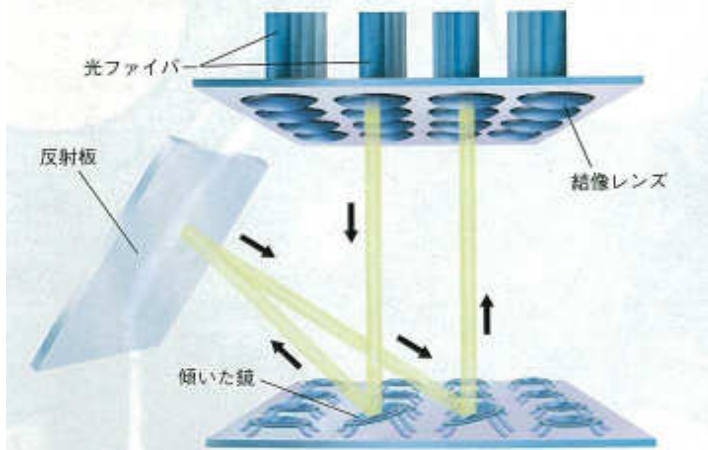
ファラデー効果スイッチ

全光スイッチ

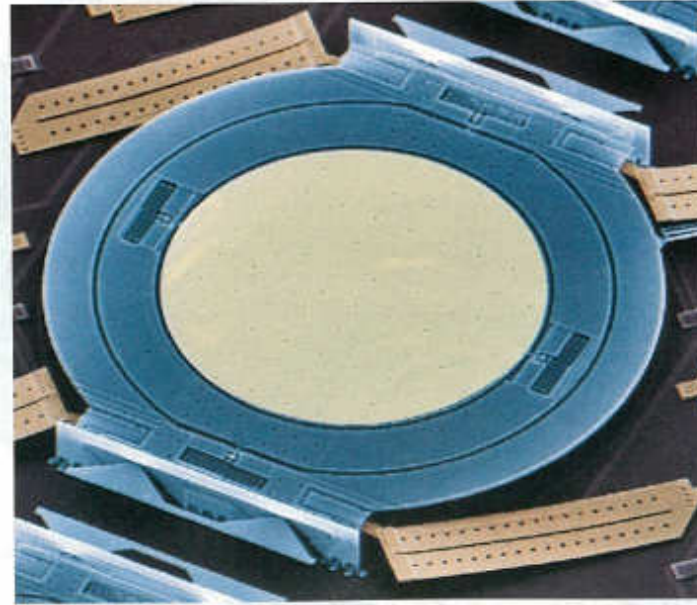
非線形光学スイッチ

MEMS: MicroElectroMechanical Systems

MEMS スイッチ

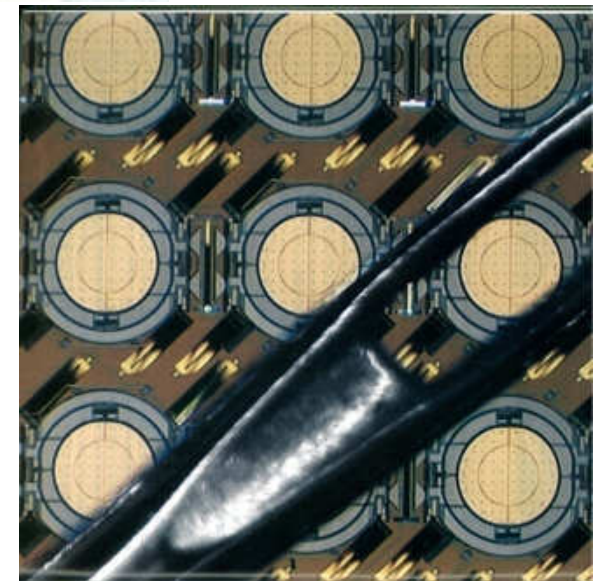


鏡の傾きを変えて信号を制御 マイクロ・エレクトロ・メカニカル・システム (MEMS) スイッチでは微小な鏡を傾けて、入力ファイバーからの光信号を反射する。光信号はさらに反射板で跳ね返され、別の鏡にぶつかって出力ファイバーに伝わる。右の写真は拡大した鏡。



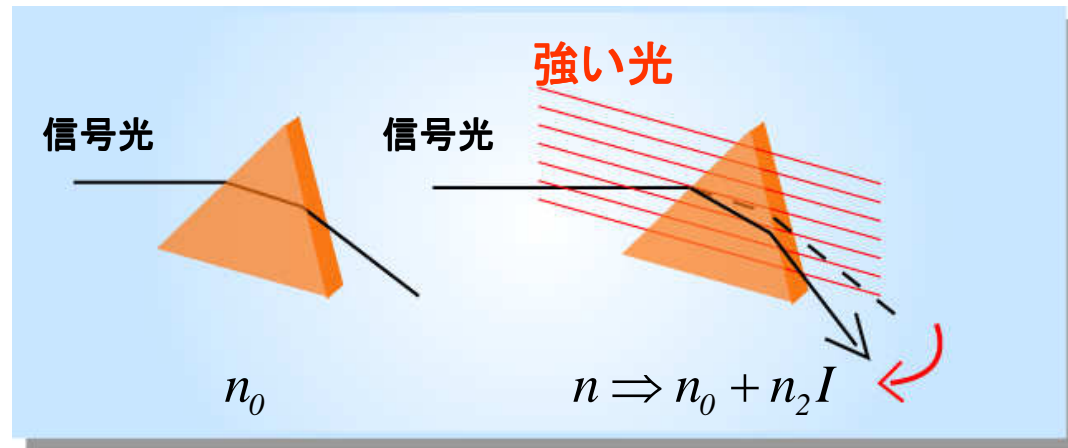
切り替え速度 \sim ms

日経サイエンス 2001年4月号 33, 34頁

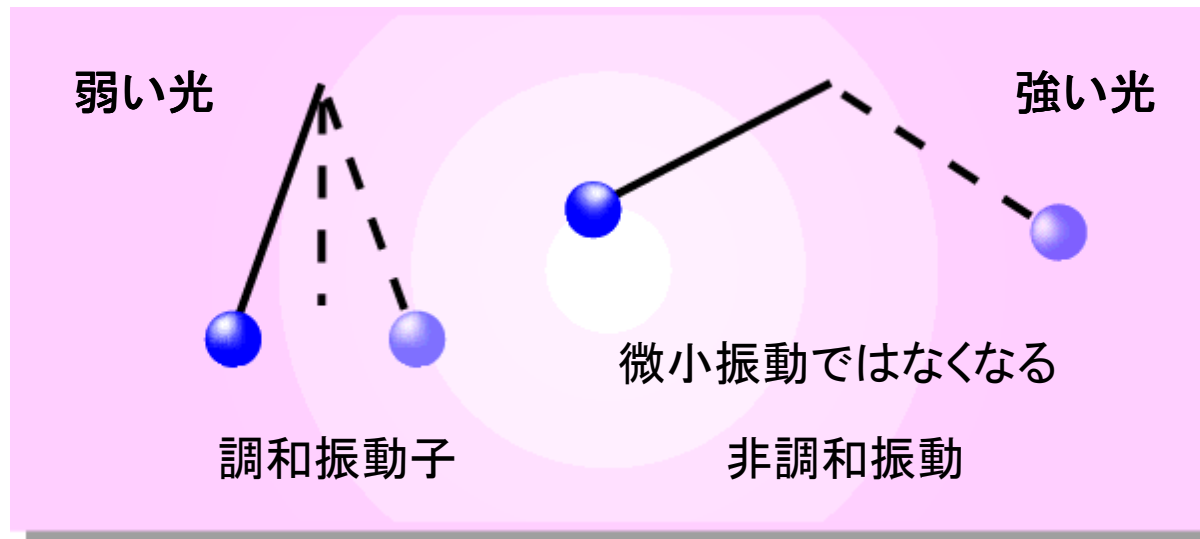


光で光をコントロールする

非線形光学応答とは？



光に対する物質の応答



非線形光学効果

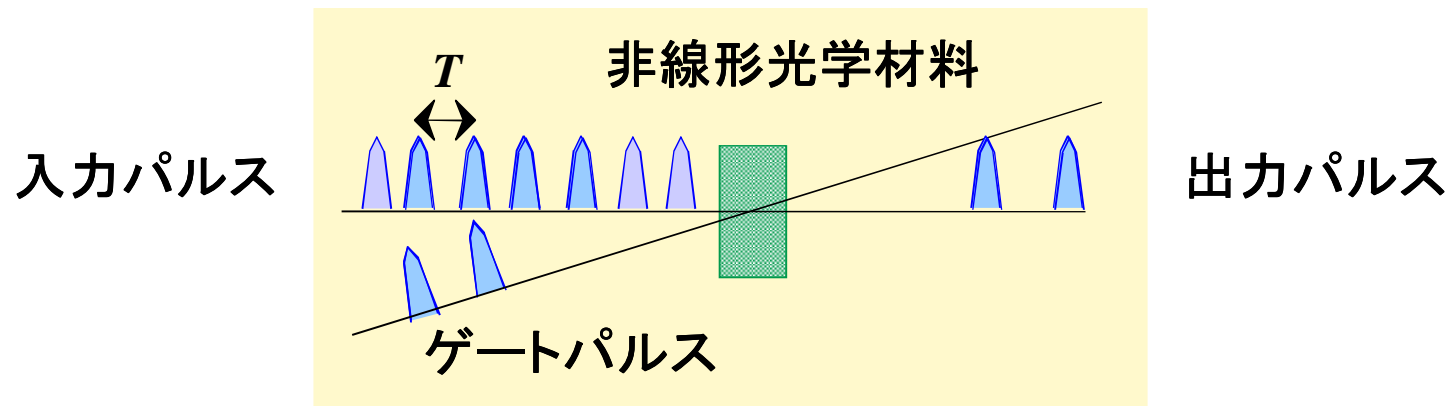
超高速光スイッチのための非線形光学材料

光学非線形性

屈折率変化: $n = n_0 + n_2 I$

二光子吸収: $\alpha = \alpha_0 + \beta I$

大きな非線形性と超高速応答が必要



非線形光学スイッチ

屈折率

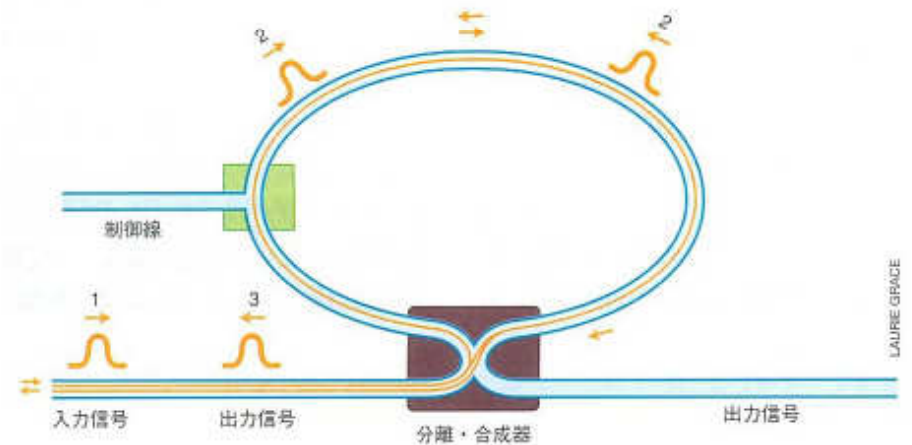
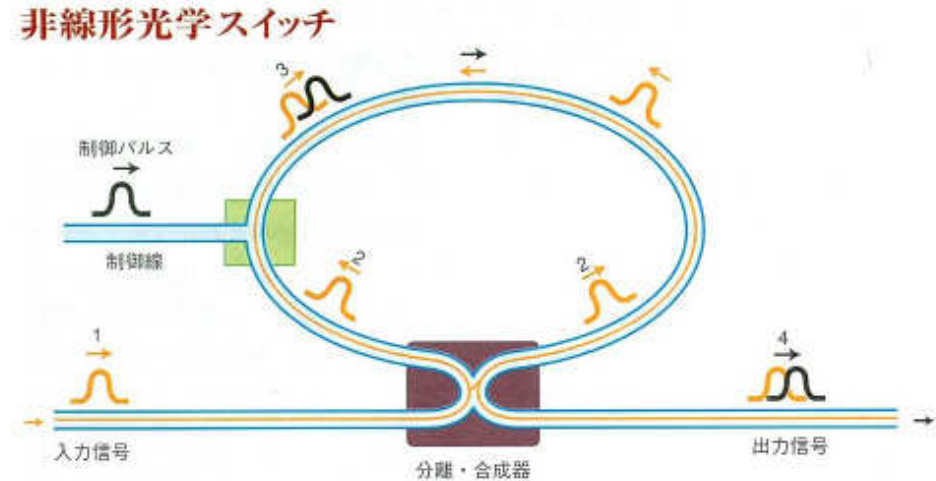
$$n = n_0 + n_2 I$$

非線形位相シフト

$$\Delta\Phi = 2\pi n_2 I L / \lambda$$

π 位相シフト

干渉計



制御信号で向きを変える 非線形光学スイッチに入った光パルス (1) は2つのパルス信号に分かれ、ループ部分をそれぞれ反対方向に伝わる (2)。ループに制御信号を入力すると、ループを時計回りに伝わる光パルスと相互作用してパルスの位相が変わる (3)。この光は分離・合成器でループを反時計回りに回ったパルスと合成され、光信号が右方向に出力される (上の図)。一方、制御信号を入力しない場合、分離・合成器で再合成された光は、元の光ファイバーを戻っていく (下の図)。

全光スイッチ用光学材料に求められる条件

室温動作

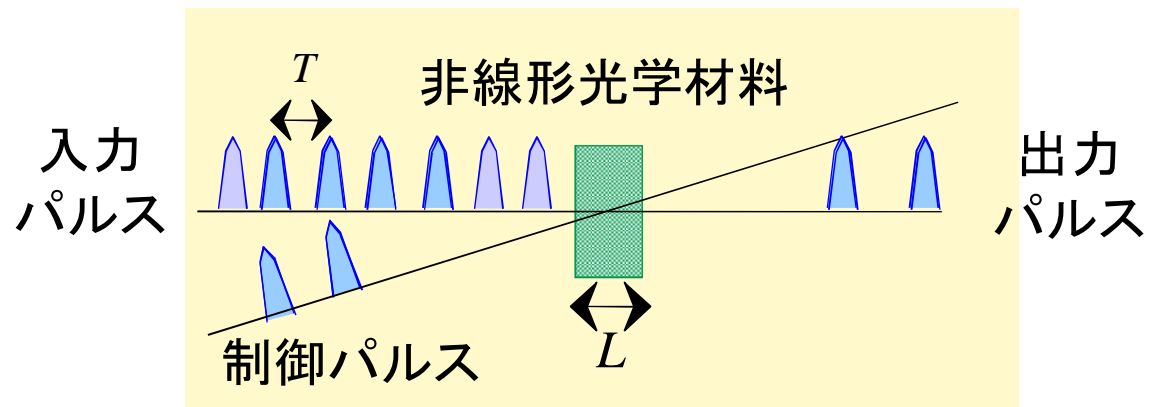
動作波長: $\lambda \sim 1.55 \mu\text{m}$

超高速応答: $\tau < 1 \text{ ps}$ for $T^{-1} > \text{THz}$

超高速処理: $nL/c < 1 \text{ ps}$ for successive operation

$$n_0 L < 30 \mu\text{m}$$

耐久性



全光スイッチ実現のための光学非線形性

共鳴型: コヒーレントな効果



光学的シュタルク効果

ハーフギャップ非線形性

インコヒーレントな効果

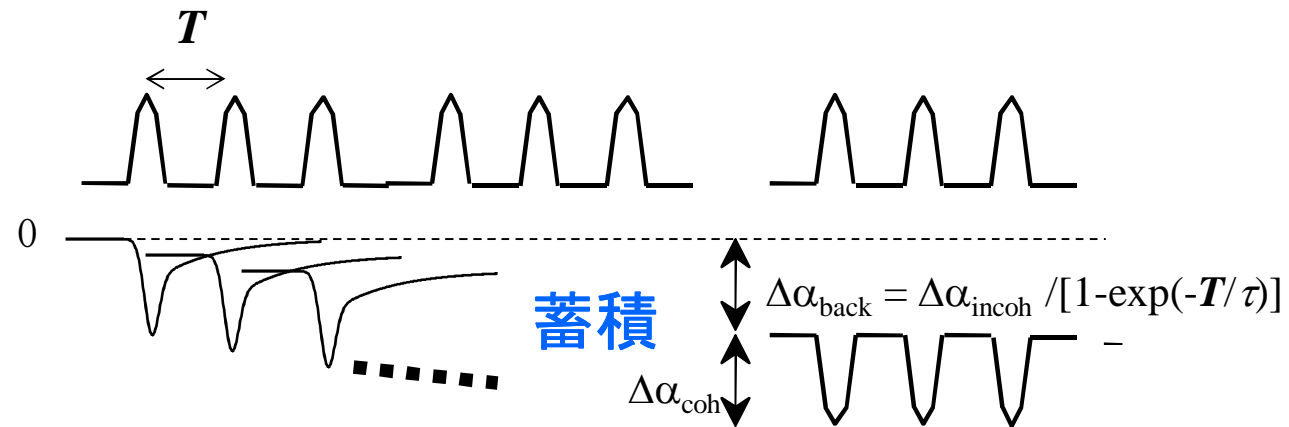
キャリア等の実励起 → 巨大な非線形性

遅い回復

非共鳴型: 超高速応答

非常に小さな非線形性

高繰り返し動作



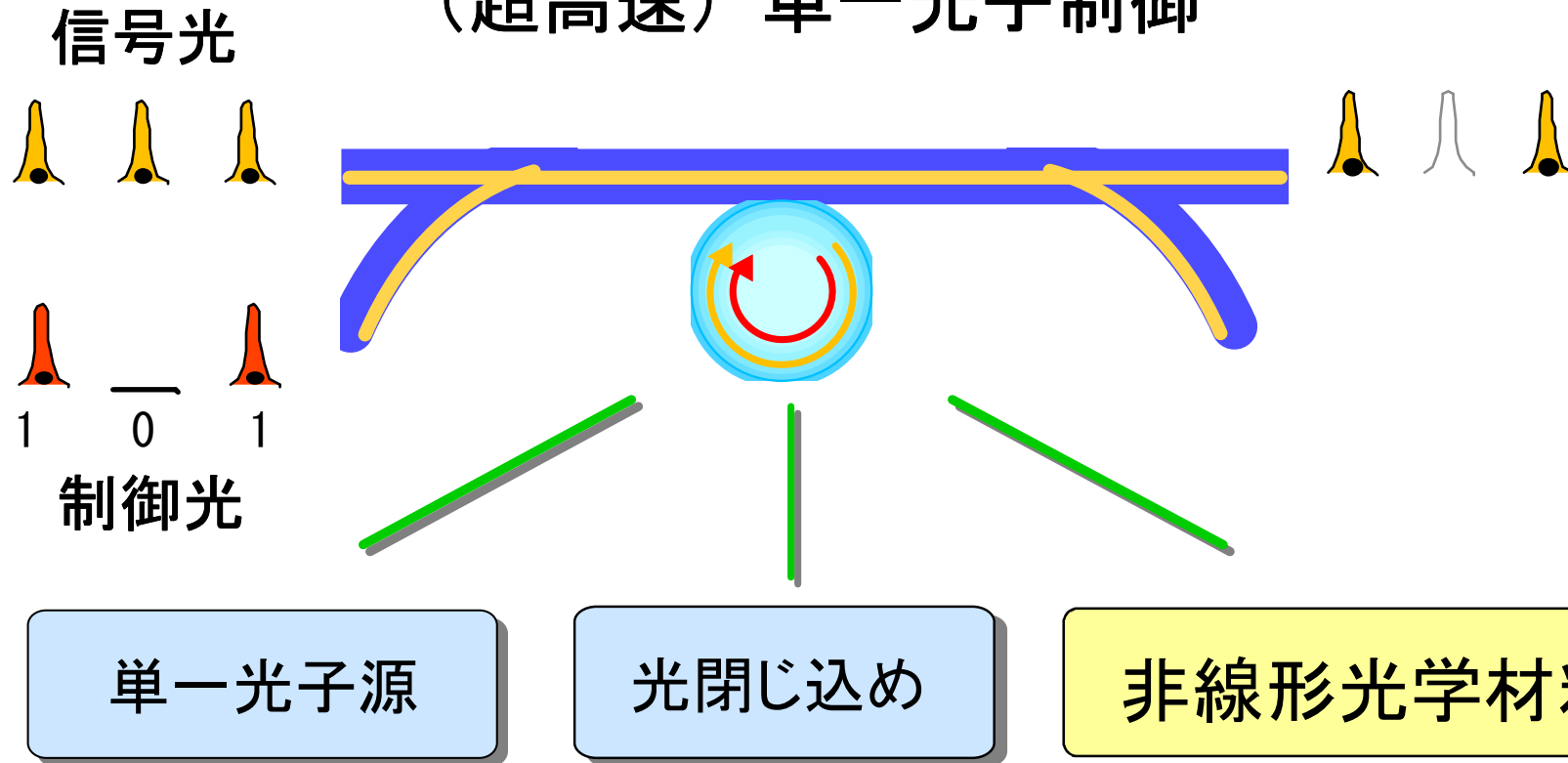
変調の深さ : $\Delta\alpha_{\text{coh}} / \Delta\alpha_{\text{back}} > 1$



$$f_{\text{max}} = \Delta\alpha_{\text{peak}} / (\Delta\alpha_{\text{incoh}} \tau)$$

究極的な光信号の制御

(超高速) 単一光子制御



電子間相互作用増強
光と物質の相互作用増強
状態密度制御(電子)

三次非線形性の性能指数 (Figure of Merit)

$$P = P + P^{(3)} + P^{(5)} + \dots$$

三次の光学非線形性

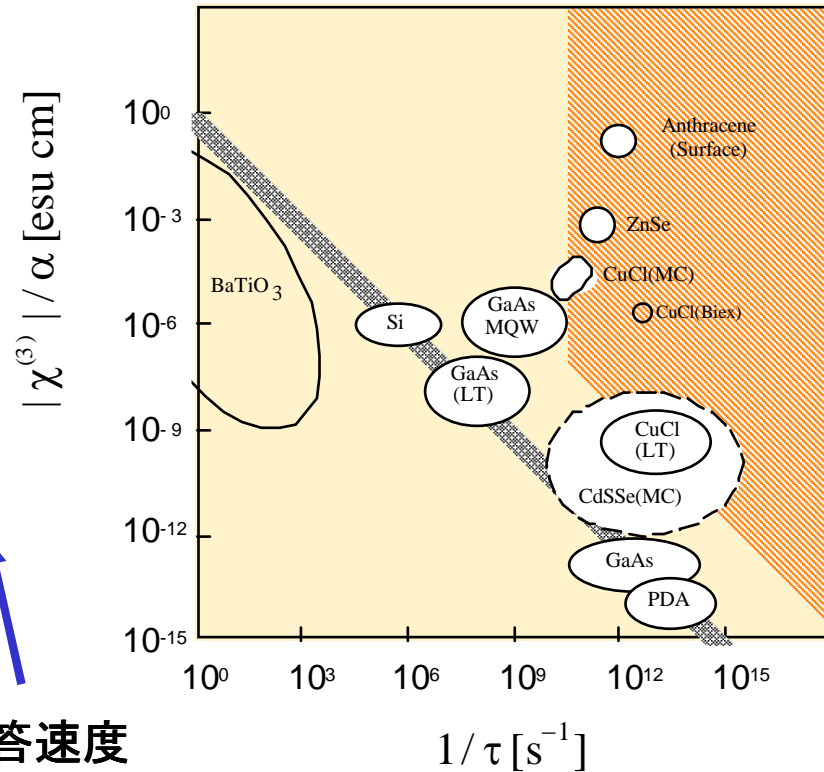
$$P^{(3)} = \epsilon_0 \chi^{(3)} \cdot EEE$$

二光子吸収 $\beta \propto \text{Im}(\chi^{(3)})$
 非線形屈折率 $n_2 \propto \text{Re}(\chi^{(3)})$

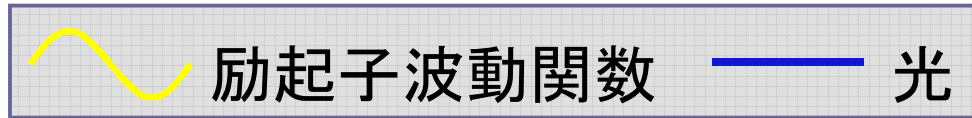
Figure of Merit: $|\chi^{(3)}|/\alpha\tau$

吸収係数

応答速度

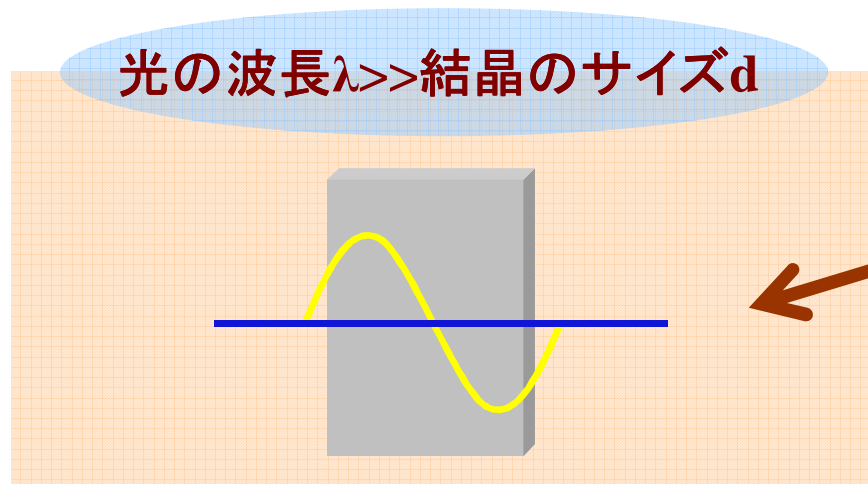


電子系と輻射系を同時に制御

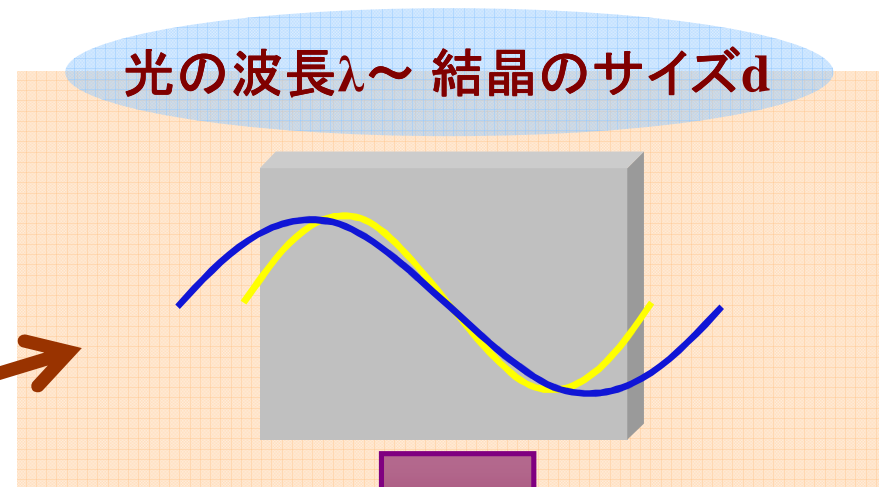


励起子の波動関数
と内部電場の共鳴

従来の扱い

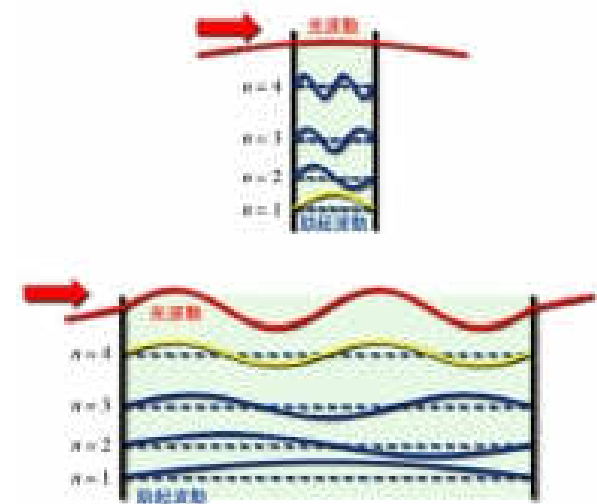
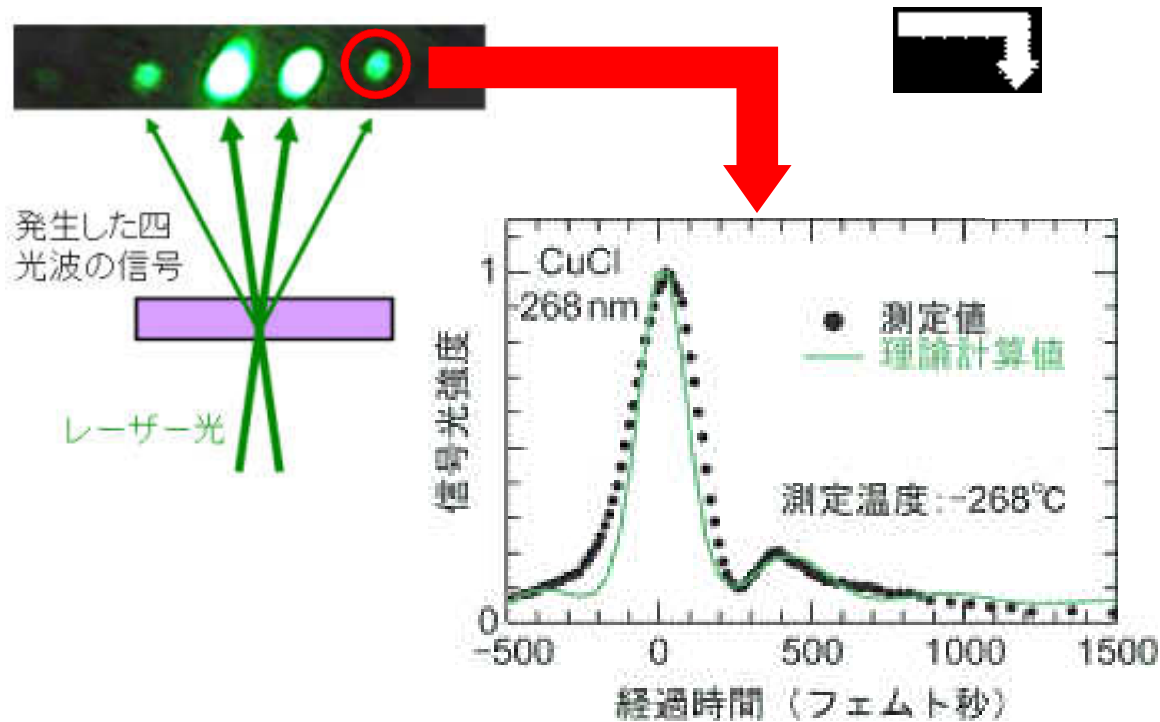


光の空間構造を無視(長波長近似)



光と物質の相互作用増強

光と物質の相互作用の新奇な増強機構

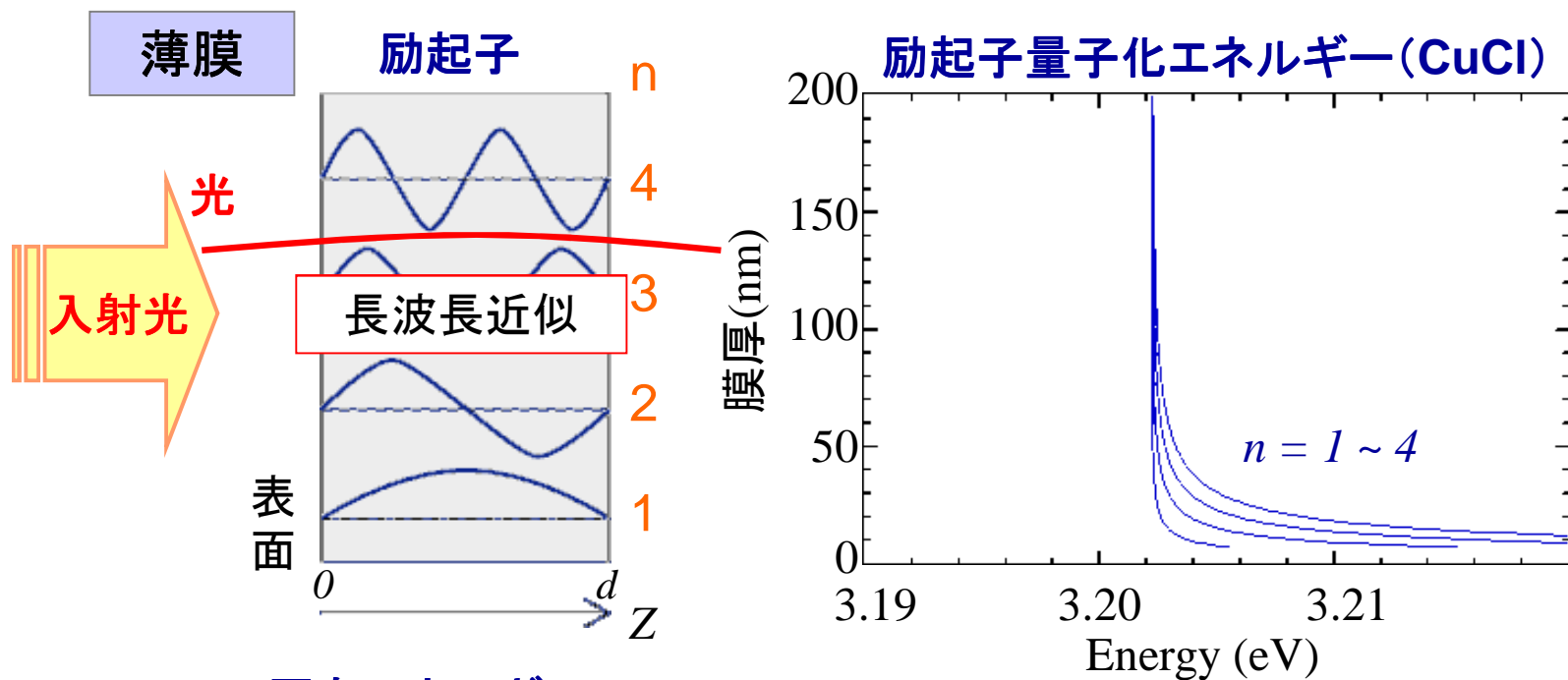


通常の半導体より3
桁以上速い応答

励起子重心運動の量子化

半導体ナノ構造中における励起子

CuClのように励起子ボア半径の小さい物質では重心運動が閉じ込めを受ける(CuCl励起子ボア半径:0.7nm) ⇒ 弱閉じ込め系



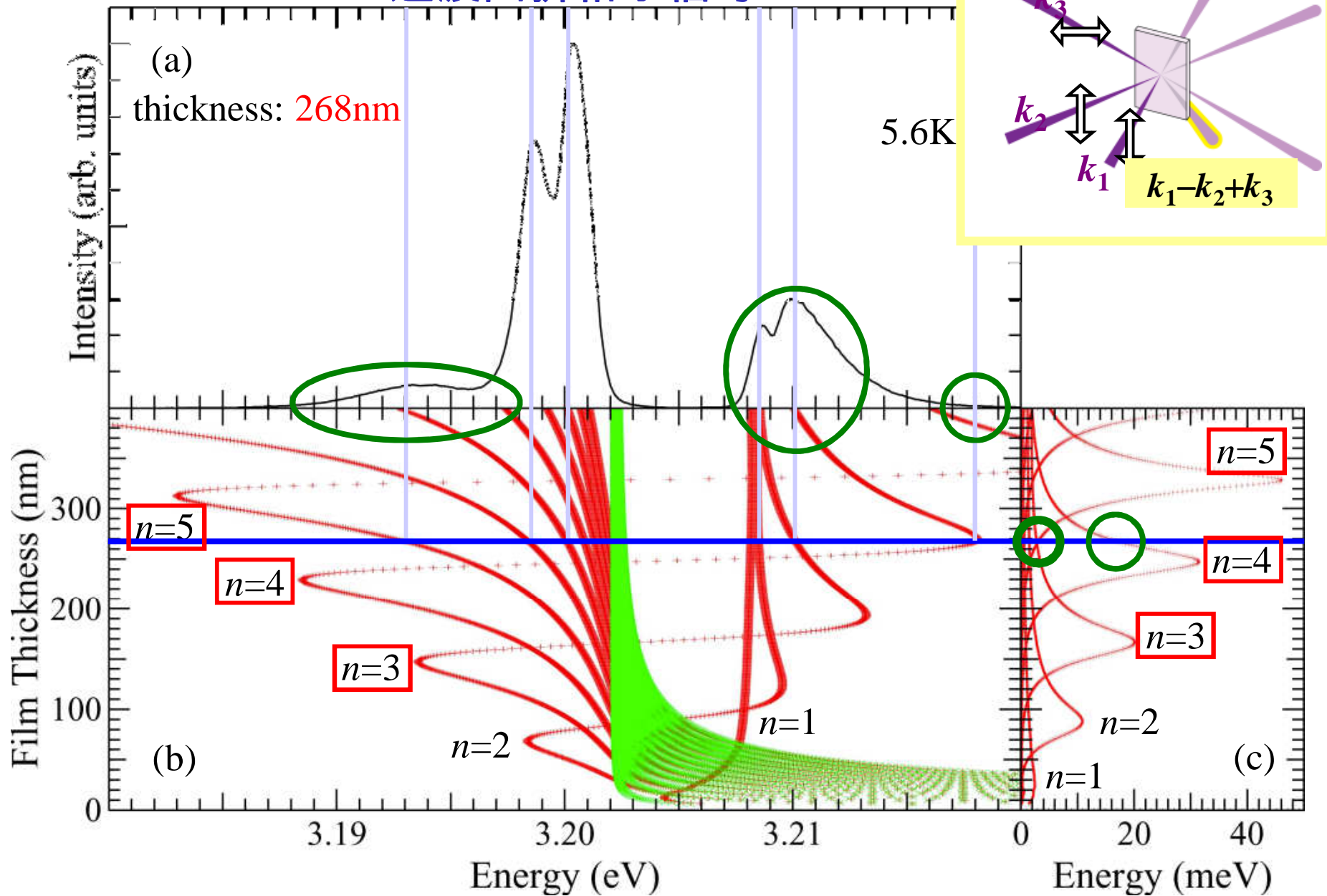
固有エネルギー

$$E_n = E_T + \frac{\hbar^2 k_n^2}{2M}, k_n = \frac{n\pi}{d} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

E_T : 横波励起子エネルギー(CuCl(Z_3 励起子): 3.202eV(2K))

M : 励起子の質量

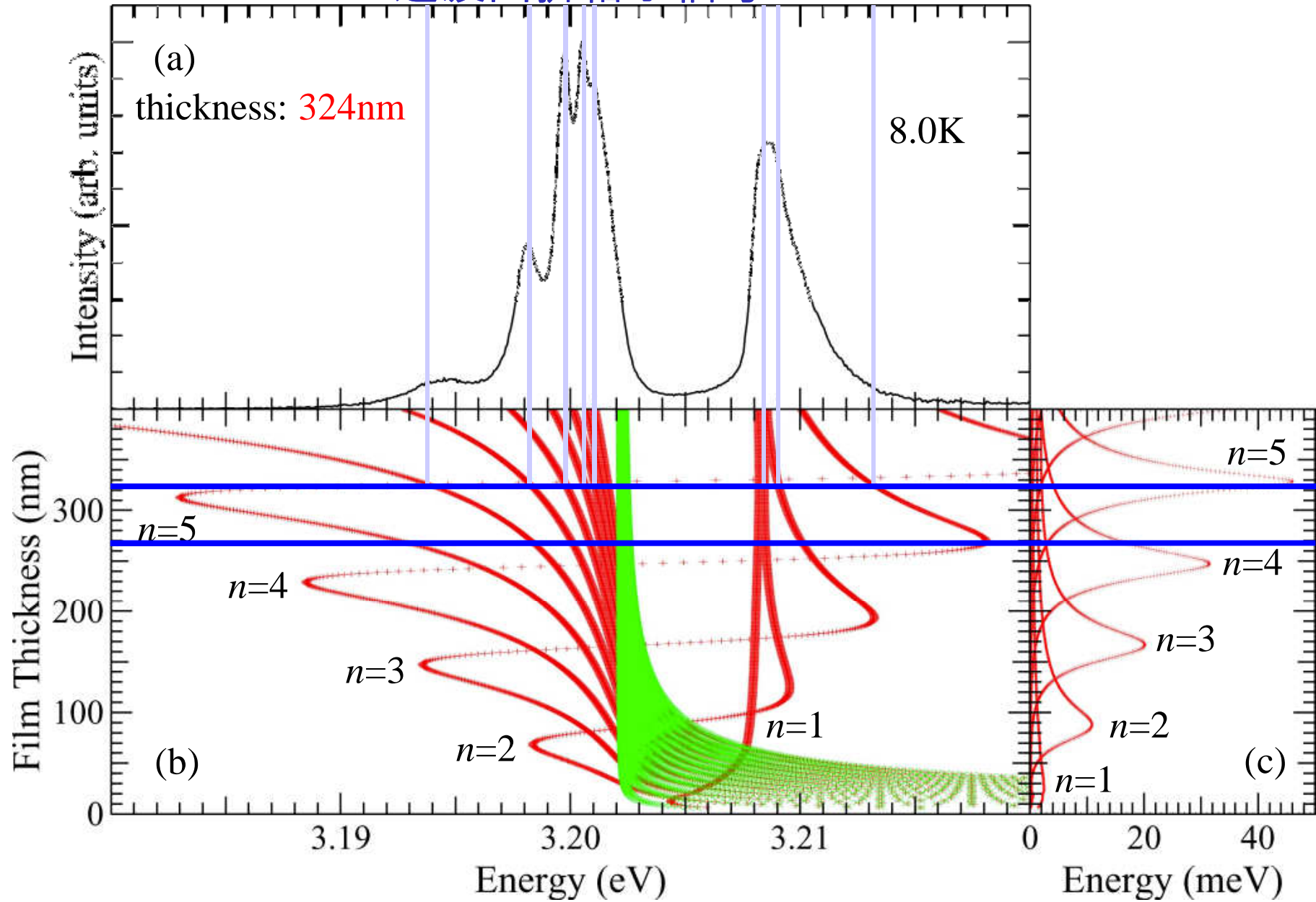
過渡回折格子信号



輻射シフトを含んだ固有エネルギー

輻射幅

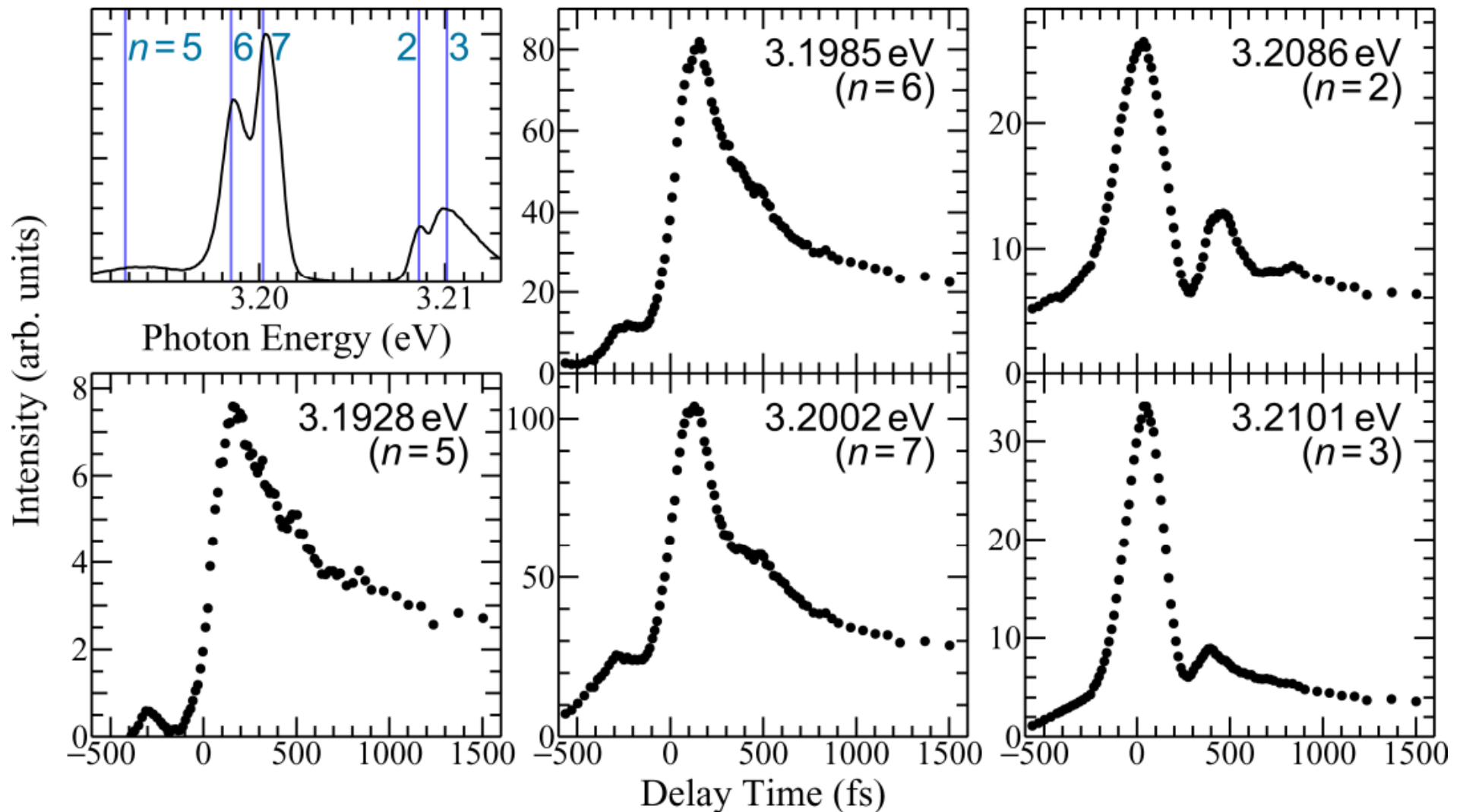
過渡回折格子信号



輻射シフトを含んだ固有エネルギー

輻射幅

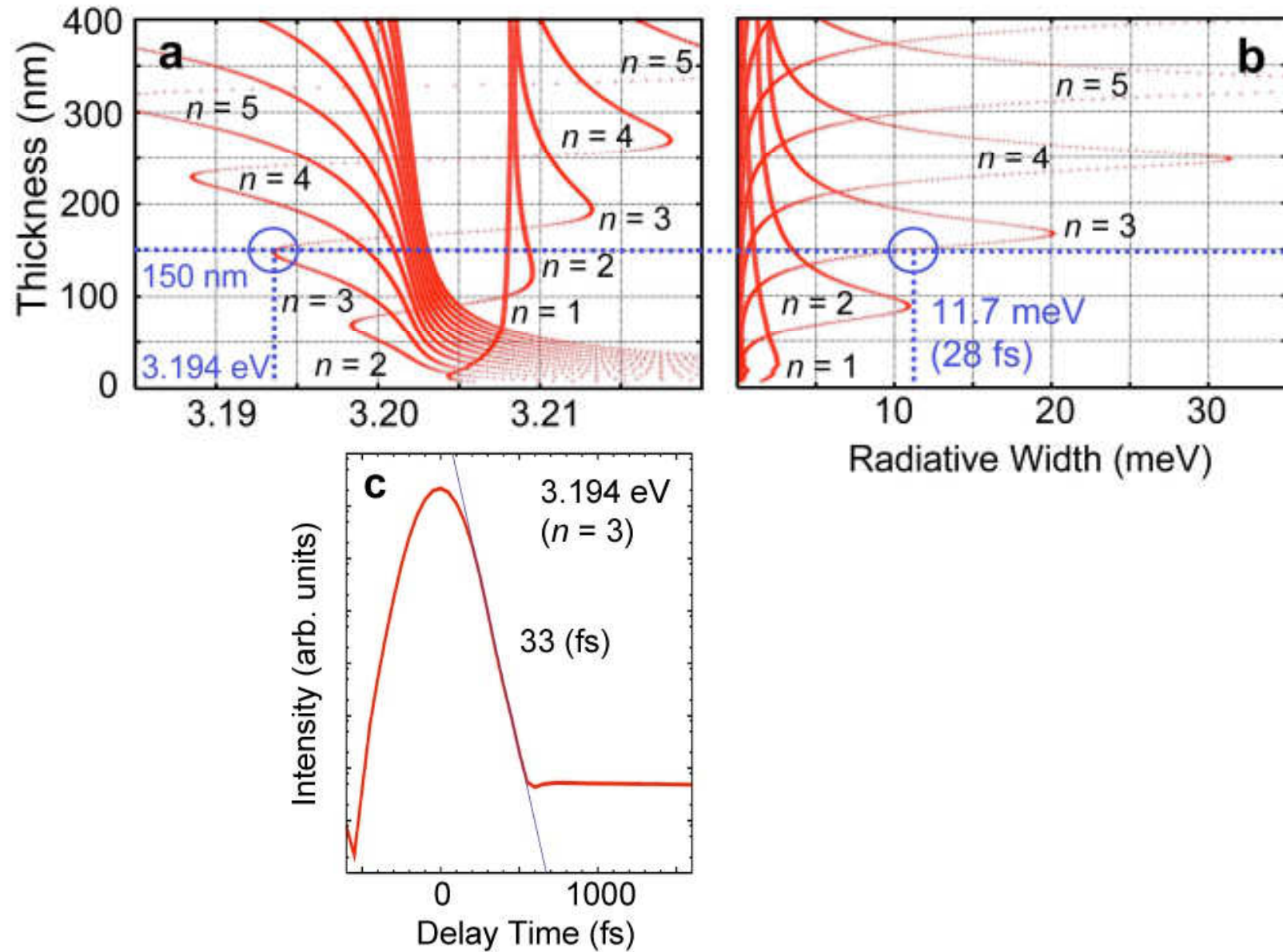
各エネルギー位置における時間応答 (1) 268 nm



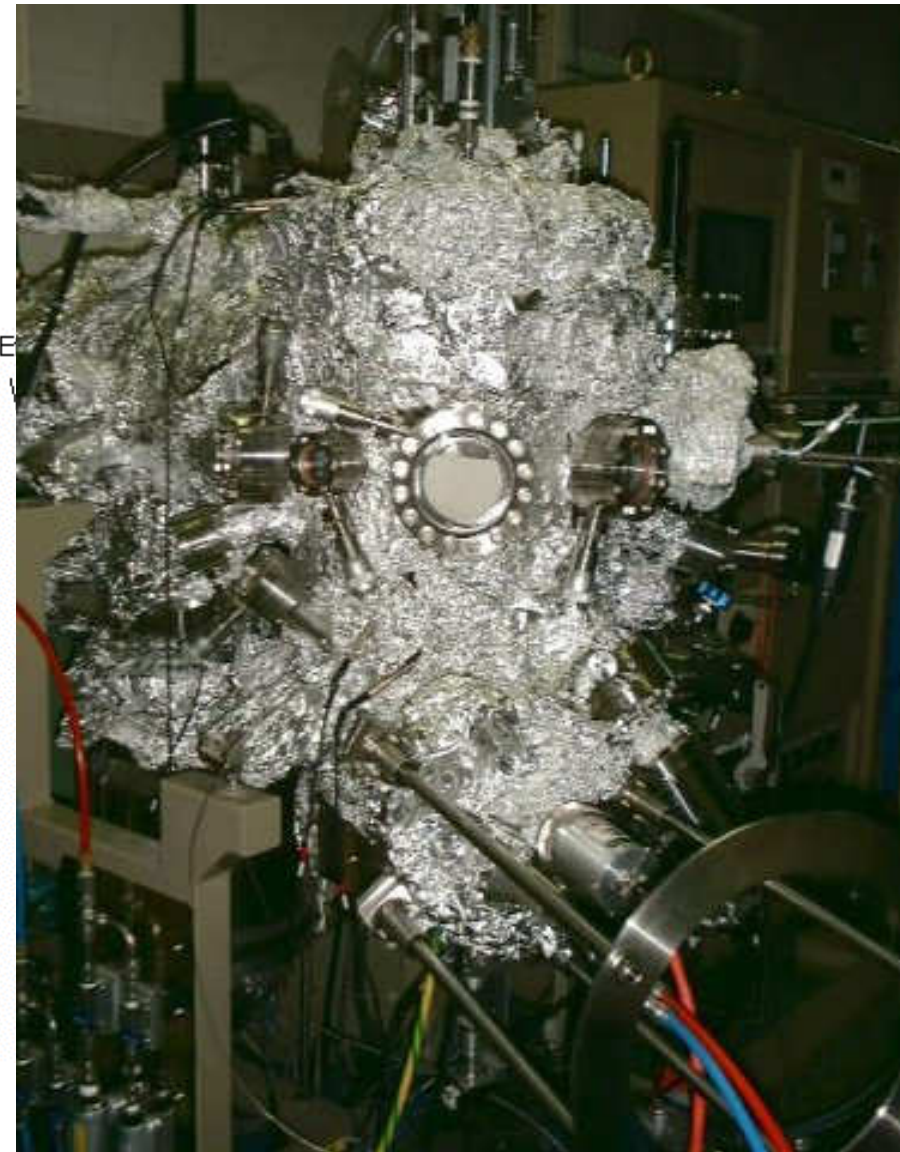
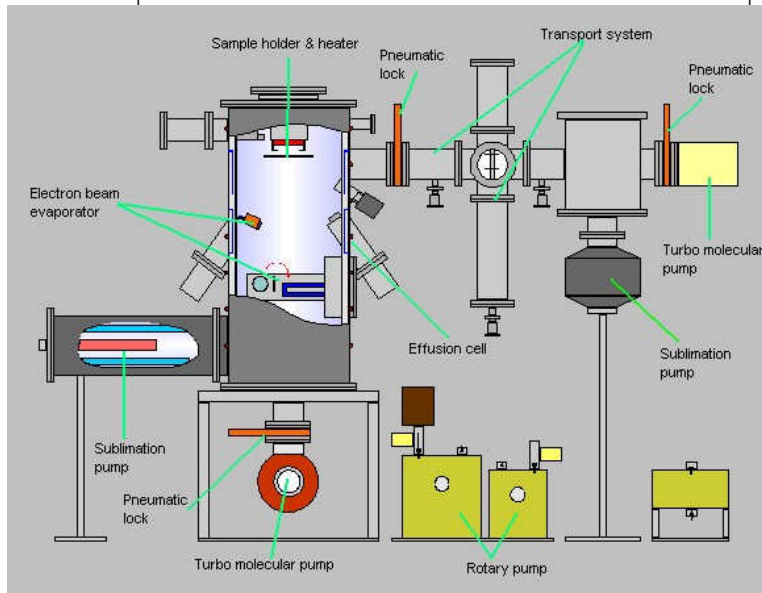
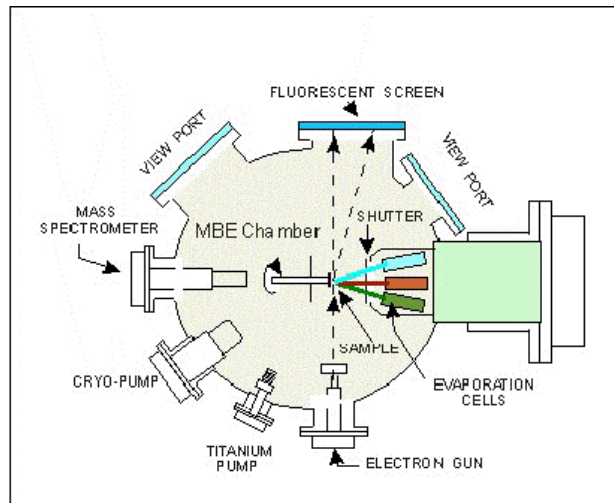
- 超高速減衰の観測 3.2101 eV ($n=3$)
- ビート構造の出現

M. Ichimiya, MA, et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 257401, (2009).

超高速減衰の可能性



分子線エピタクシー (MBE)



バンドギャップエンジニアリング (状態密度制御)

$$\rho(E) \propto E^{d/2-1} \quad d = 1, 2, 3$$

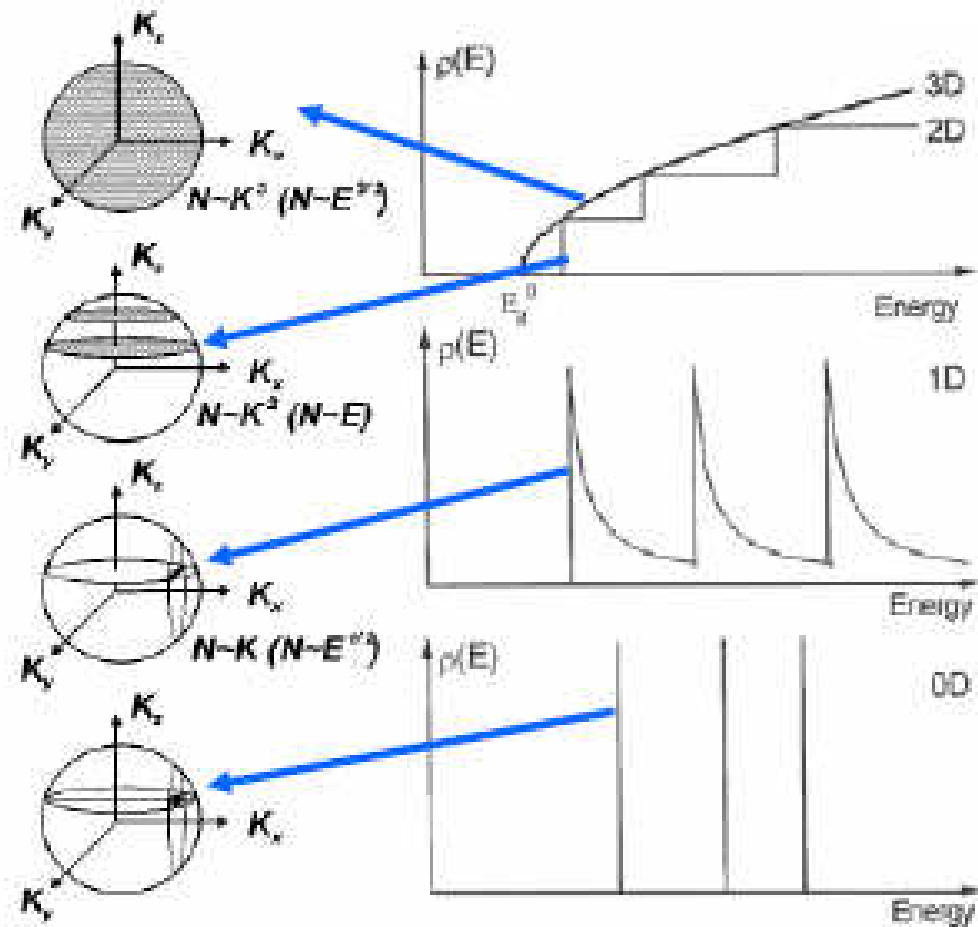
d=1 : nanowire,

d=2 : thin slab, and

d=3 : bulk crystal

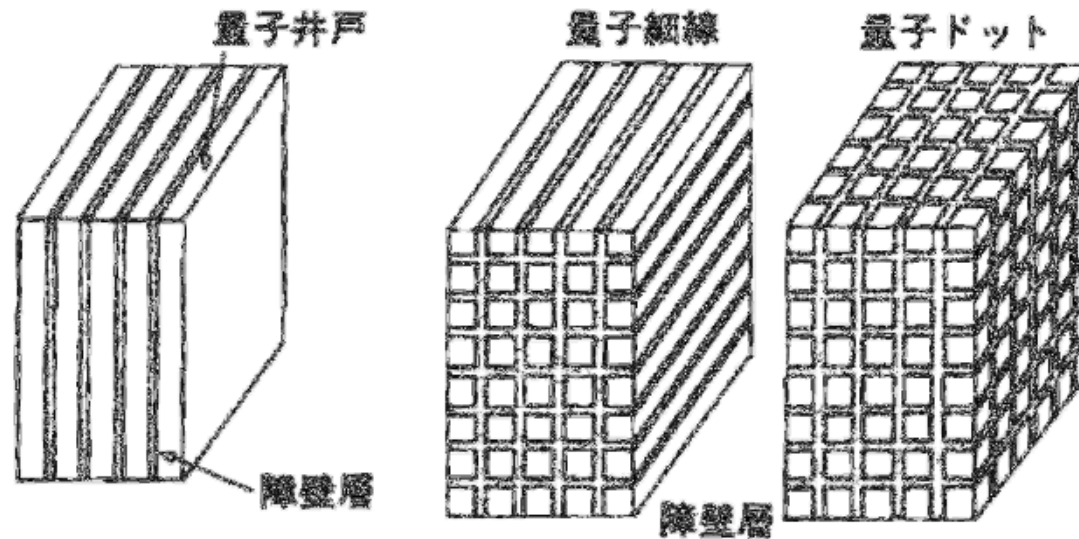
For a quantum dot (d=0) the
DOS shows a delta-like behavior:

Discrete energies allowed

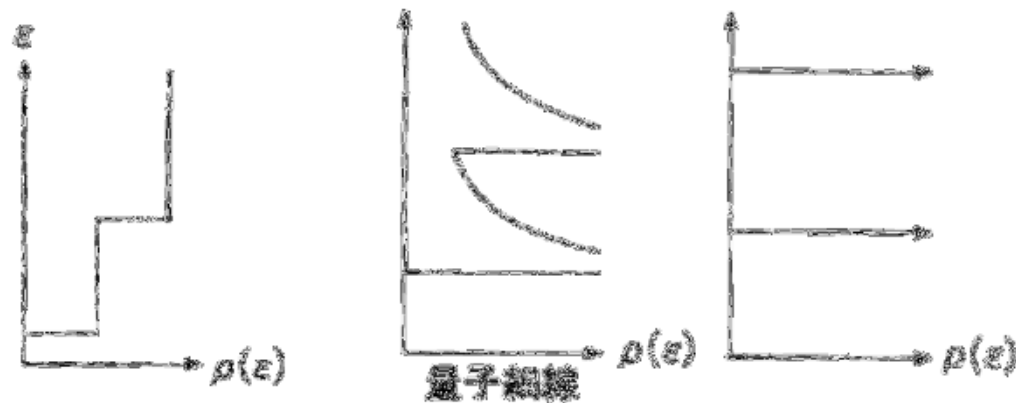


人工原子

種々のナノ構造の状態密度 (取り得るエネルギー状態の様子)



(a)



(b) 状態密度

MBEを用いた歪み系の自己組織化による 量子ドットの作製

Stranski-Krastanow
モードによる成長

(a)



(b)



(c)



(d)



ぬれ層



InAs-GaAs 7%
の格子不整合

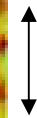
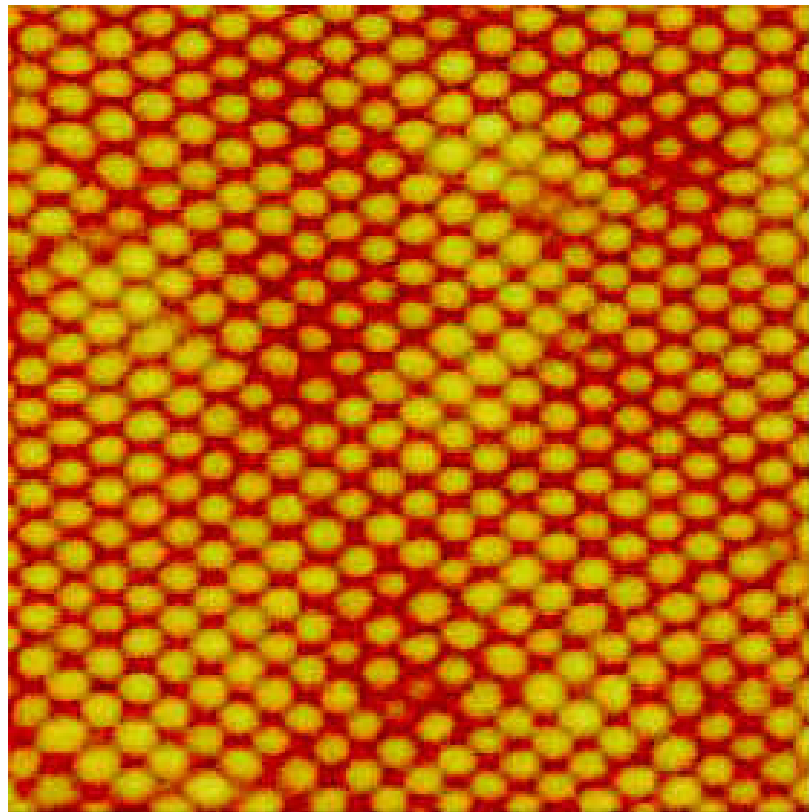
光通信波長で重要

— InAs

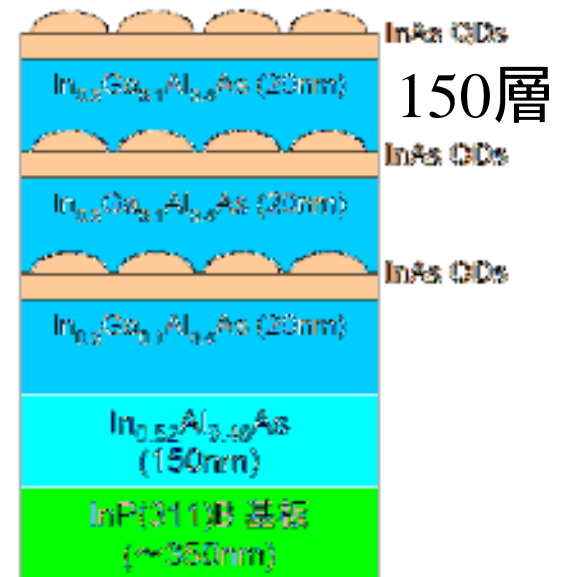
— GaAs

他の半導体レーザー、発光ダイオードと同様、
結晶母体中に埋め込まれた状態

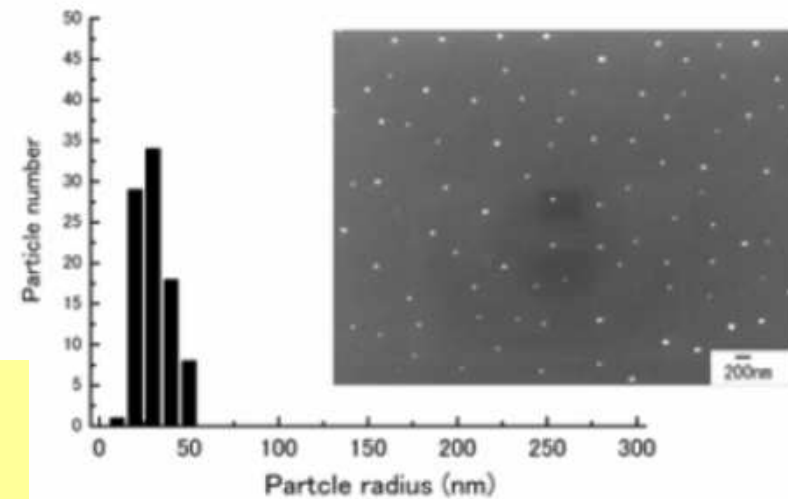
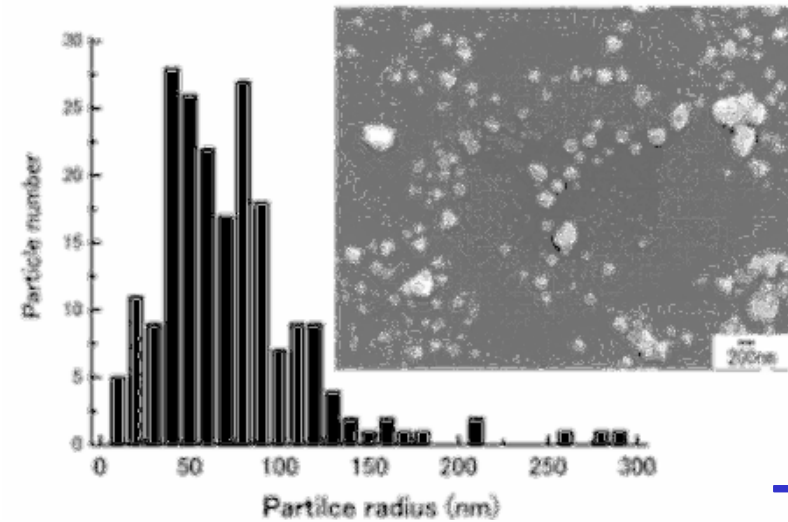
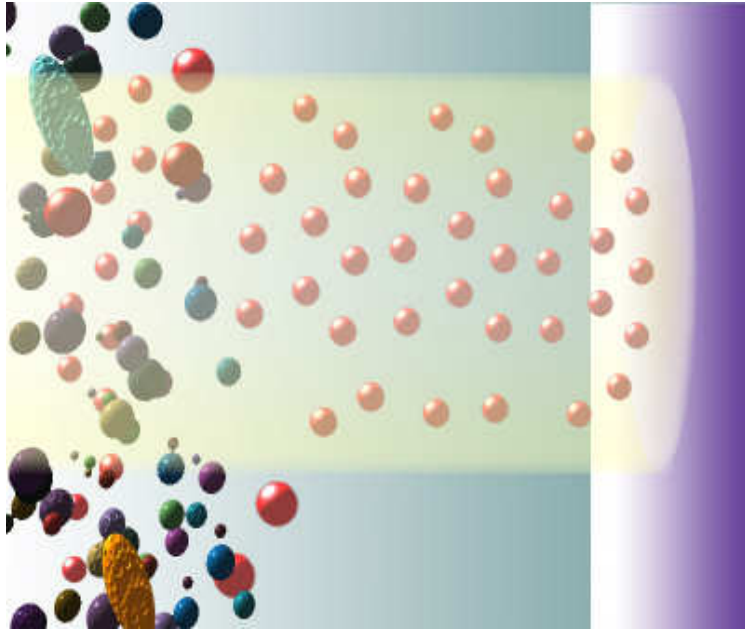
InAs量子ドットの作製例



200nm



ナノ粒子の光マニピュレーション



サイズ
選別

特定のサイズ(エネルギー準位)の粒子だけを選別して移動させる。

アウトライン

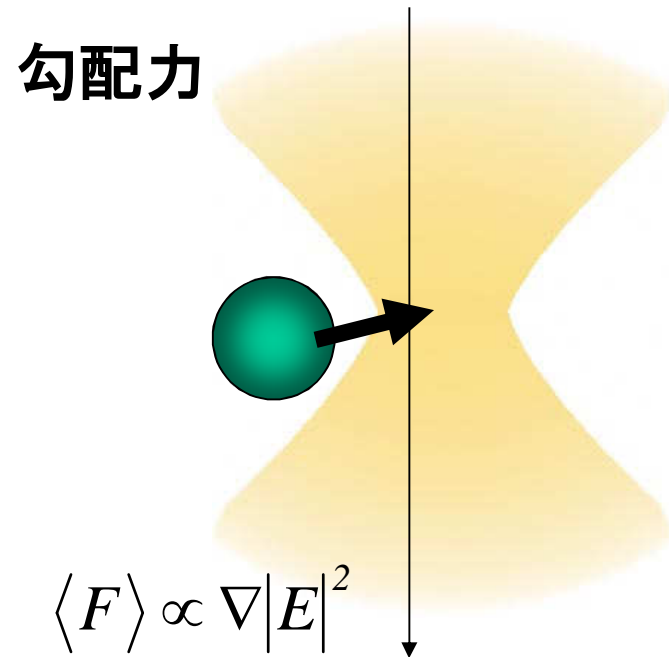
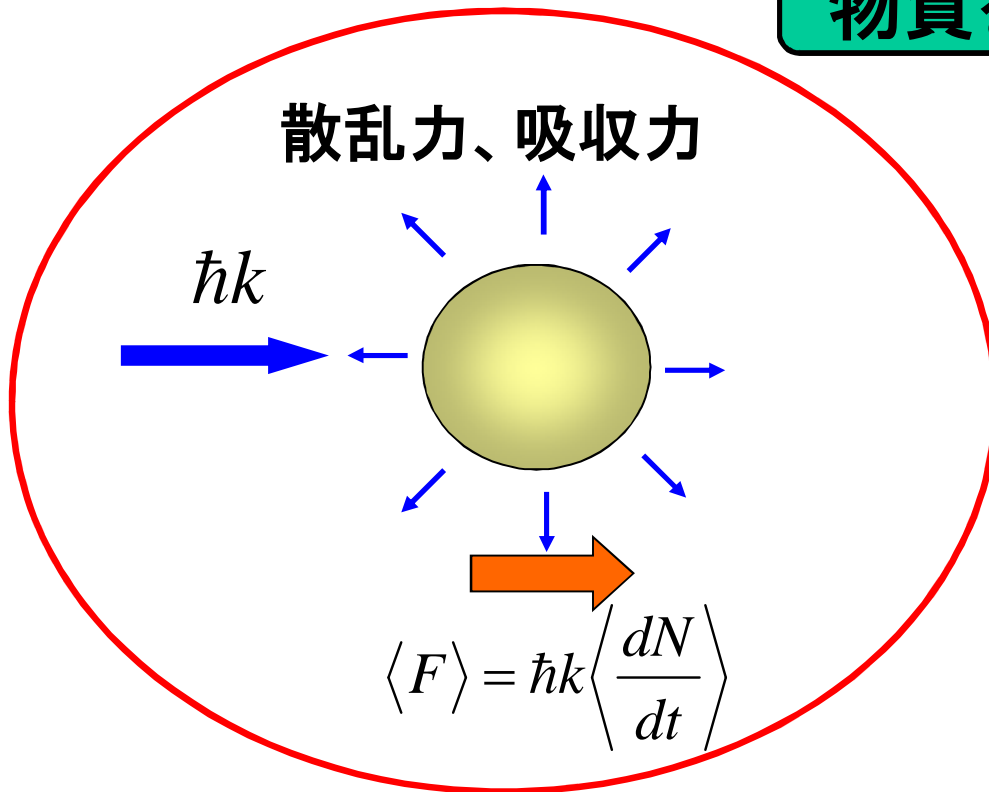
1. テラヘルツテクノロジーとは？
2. 光通信技術と非線形光学応答
光と物質の相互作用の特異な増強
ナノ構造物質
3. ナノ粒子の作製と光マニピュレーション
4. 最後に

光マニピュレーション

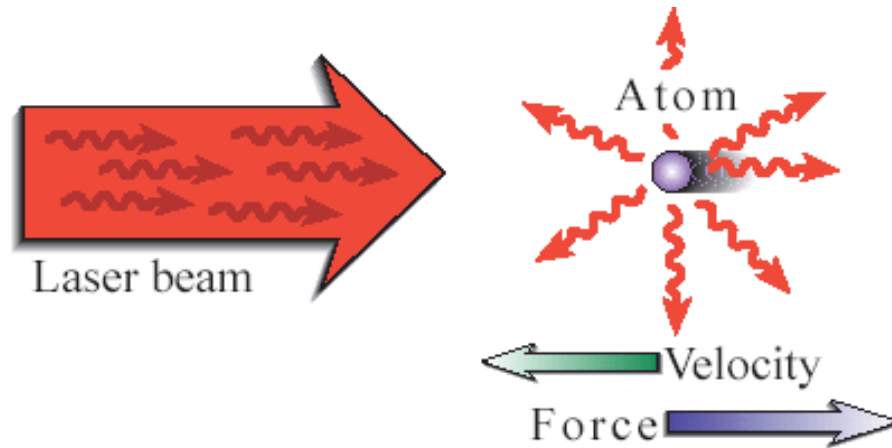
光マニピュレーションとは

光と物質の相互作用により、物質を非接触で操作する技術

物質を動かす輻射力



原子トラップ、レーザー冷却



ノーベル財団ホームページより



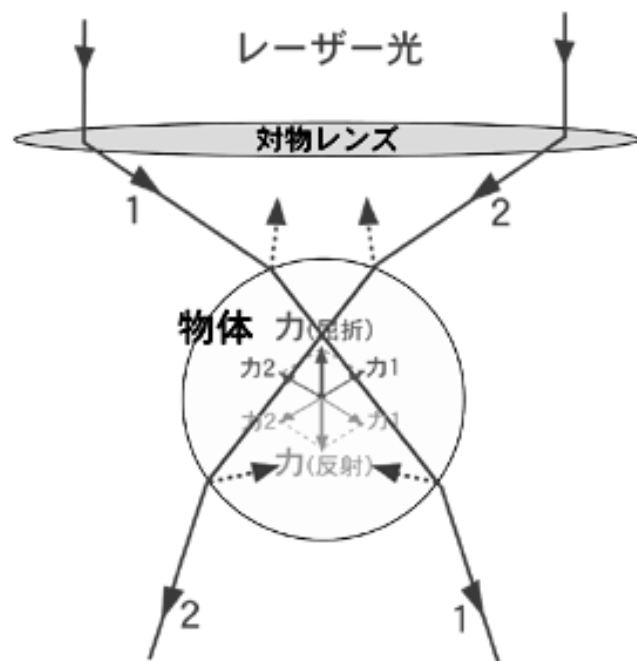
The Nobel Prize in Physics 1997
"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"



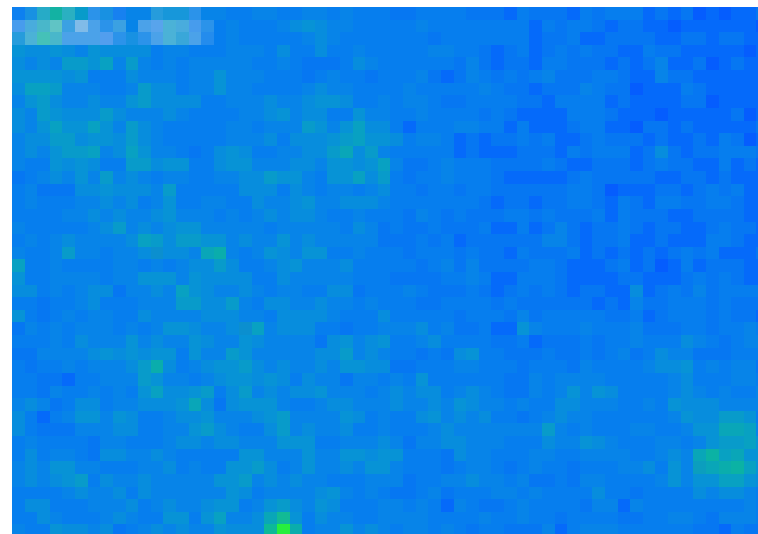
The Nobel Prize in Physics 2001
"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms,..."

光ピンセット

光ピンセットの原理

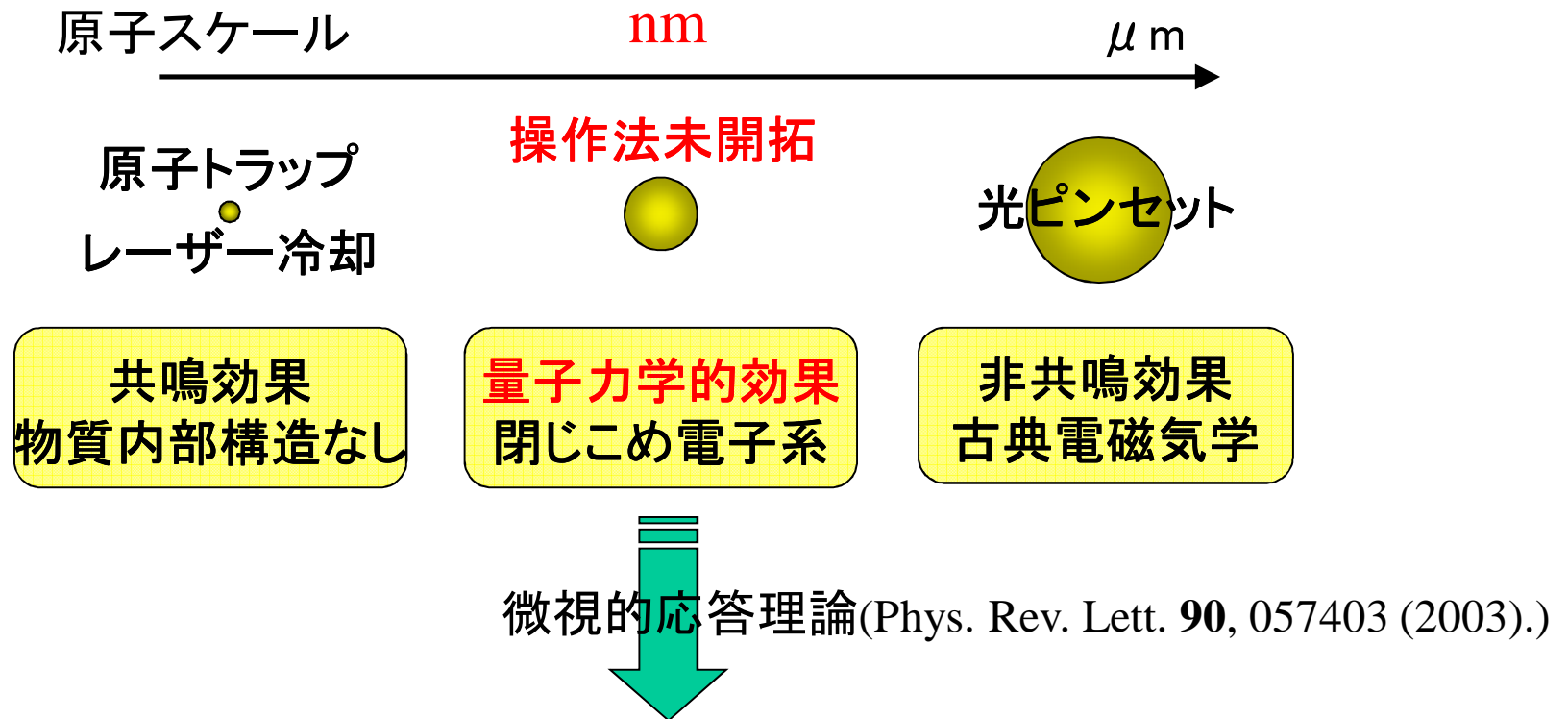


光子は運動量をもっているので、光の屈折、
反射によって物体には力が及ぼされる。



一本のアクチン繊維を付着させた
直径 $1\mu\text{m}$ のポリスチレンビーズ
をレーザーで操作

光マニピュレーションのサイズ領域による分類

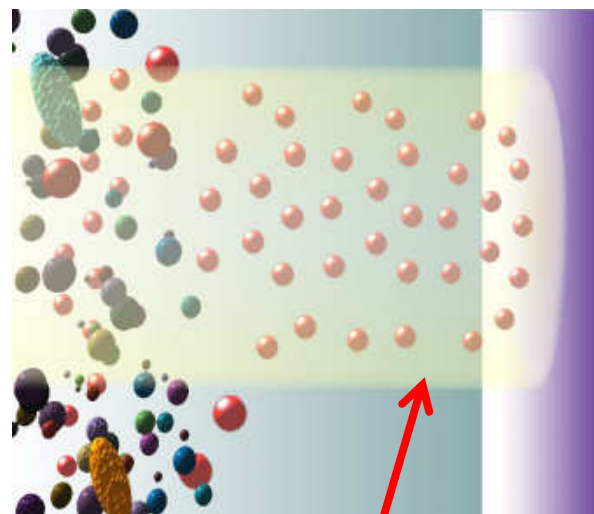
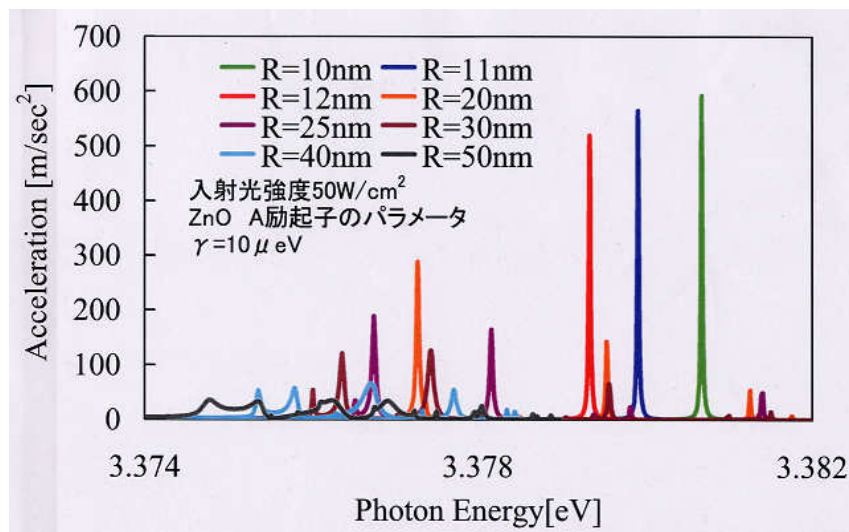


非共鳴な場合に比べて数桁大きな力(輻射力)が存在
輻射力はナノ構造物質のサイズ・形状等に強く依存
→ 光操作の過程でサイズ・形状などの選別が同時に行われる!

共鳴光による光マニピュレーション

電子遷移に共鳴する光を用いることにより、輻射力が飛躍的に増大

ZnOの共鳴光による加速度スペクトル



サイズ(形状)によってエネルギー準位が離散化

(大阪府立大 飯田博士提供)

共鳴する微粒子のみを輸送

サイズ(形状)の選別が可能!

超流動ヘリウム中での光操作

極低温

2K 以下

高い熱伝導率

超流動成分では無限大

低い粘性

超流動成分ではゼロ

良好な光学特性

真空紫外域まで透明

屈折率が 1 に近い

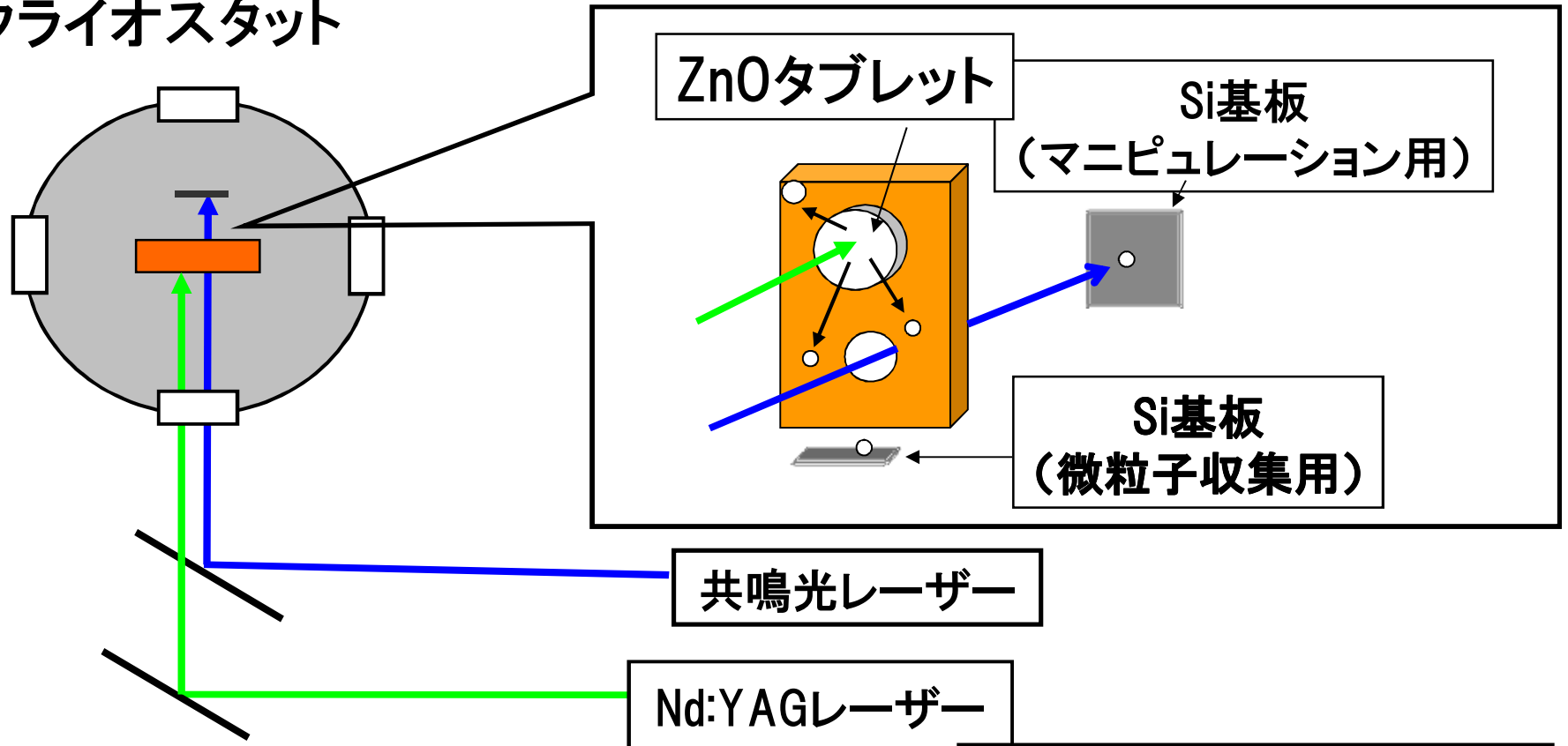
化学的に不活性

試料の劣化を低減

液体ヘリウムへの
ナノ粒子の導入法は？

実験配置

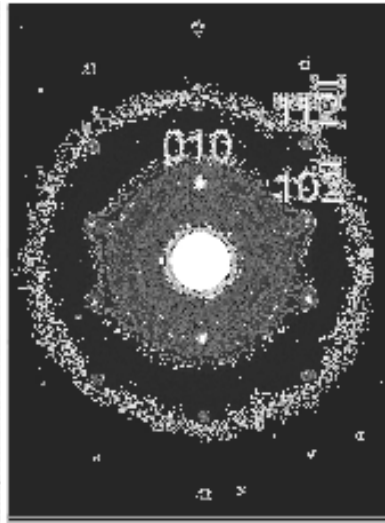
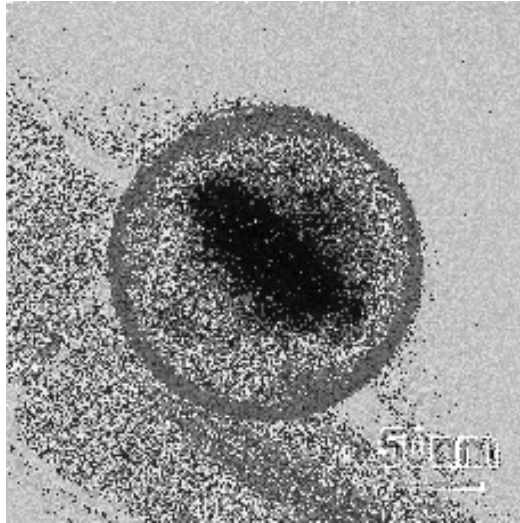
クライオスタット



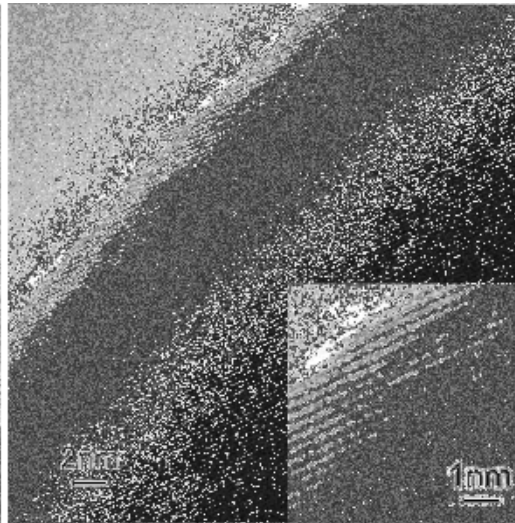
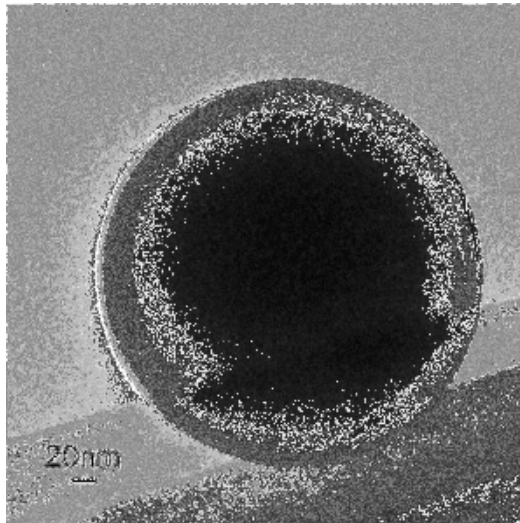
レーザーアブレーションと光マニピュレーションを同時に実施

波長	532nm
パルス幅	10ns
繰り返し周波数	10Hz
エネルギー密度	0.5J/cm ²

ZnOマイクロ球のTEM像



単一マイクロ球の
電子線回折パターン

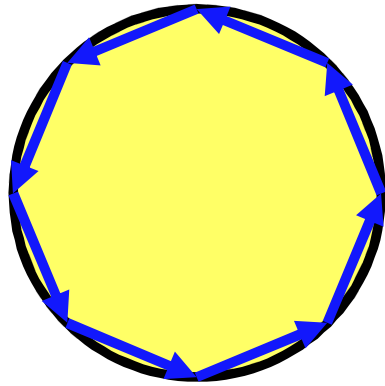


格子縞を表面
近くまで観測

格子間隔 : 0.250 nm
バルクの(101)面

マイクロ球は単結晶であることが判明!

Whispering Gallery Mode (WGM)



光は球の表面を全反射して伝搬することで、球内に閉じ込められ、共振器として振る舞う。

微小球は高いQ値(光の閉じ込め性能)をもつため、閾値の低いレーザー発振を示す。

しかしながら、
半導体微小球の作製は非常に難しかった。

1630 OPTICS LETTERS / Vol. 22, No. 21 / November 1, 1997

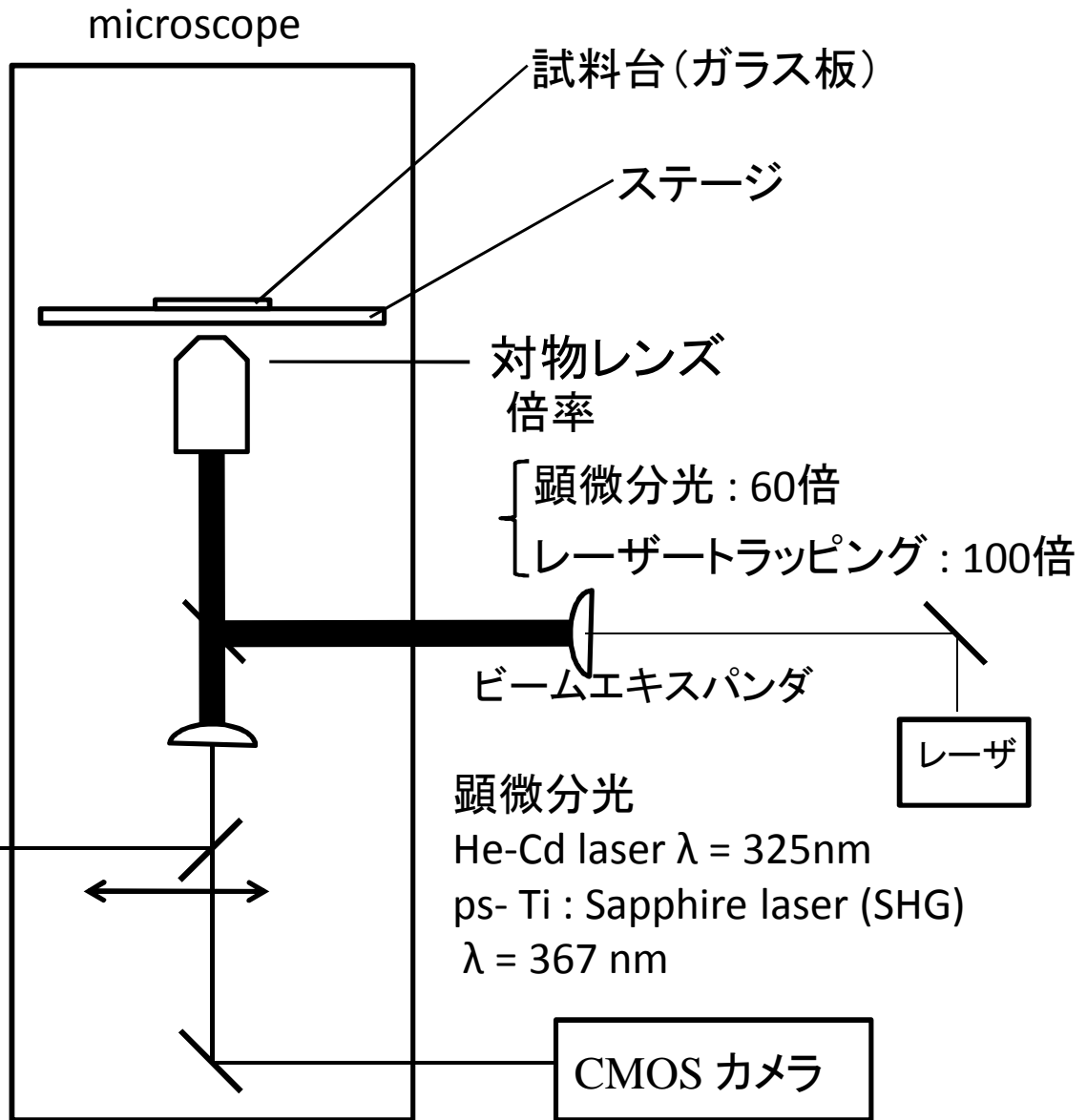
Spherical cavity-mode laser with self-organized CuCl microspheres

Masaya Nagai, Fumitaka Hoshino, Susumu Yamamoto, Ryo Shimano, and Makoto Kuwata-Gonokami

マイクロ粒子の分光 ー顕微分光実験配置ー



CCD付分光器



単一ZnOマイクロ球のレーザー発振

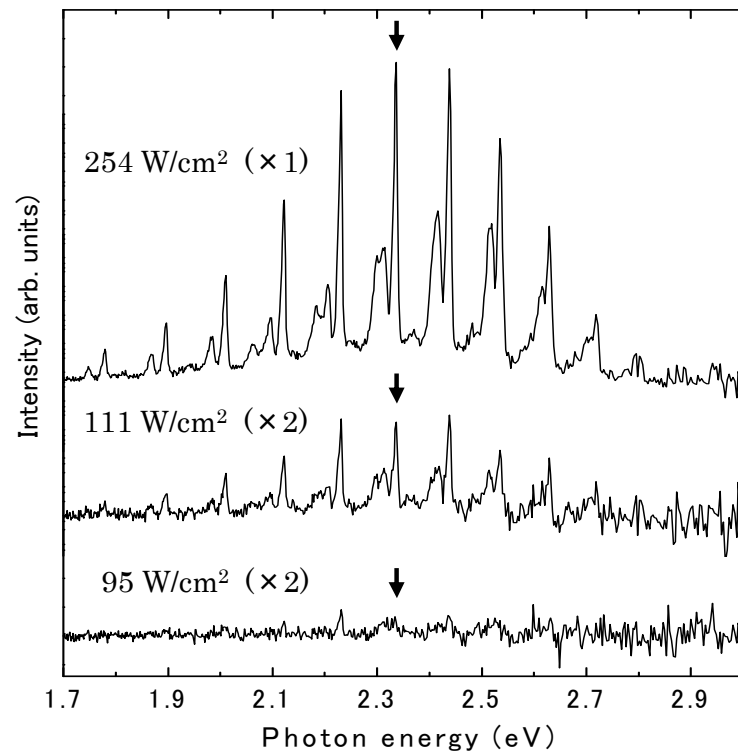
励起レーザー:

単一周波数Ti: Sapphire レーザー

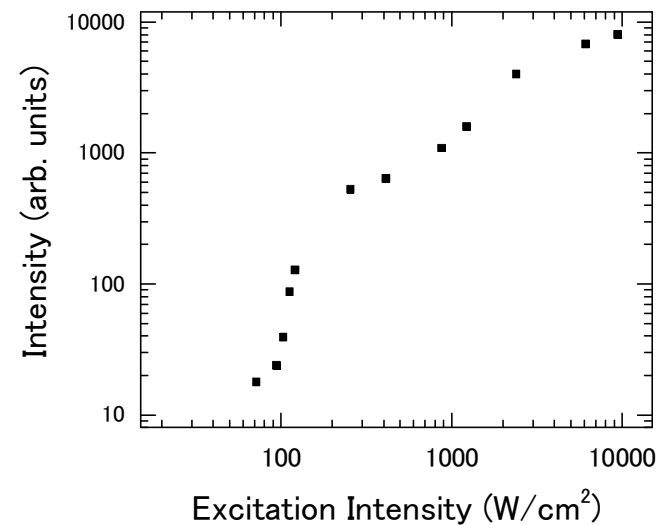
波長367nm (SHG)

diameter: 1.8 μm

300K



2.34 eVのピーク強度の励起強度依存性



CW励起下でのZnOマイクロ球の
室温発振を観測

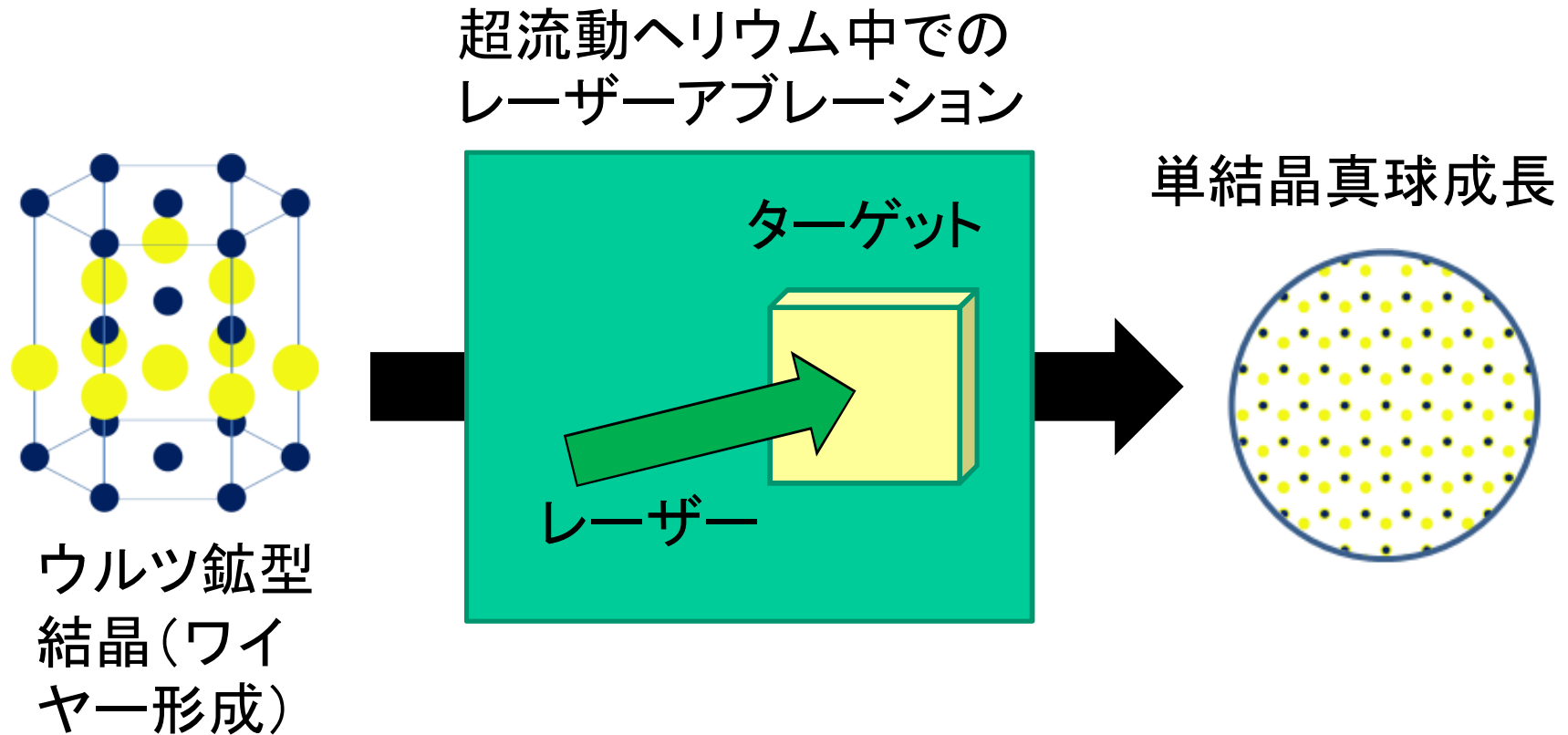


発振閾値: 100 W/cm².

(cf. マイクロワイヤーにおける
閾値255kW/cm²)

S. Okamoto, Y. Minowa, and MA,
Proc. of SPIE 8263, 82630K (2012).

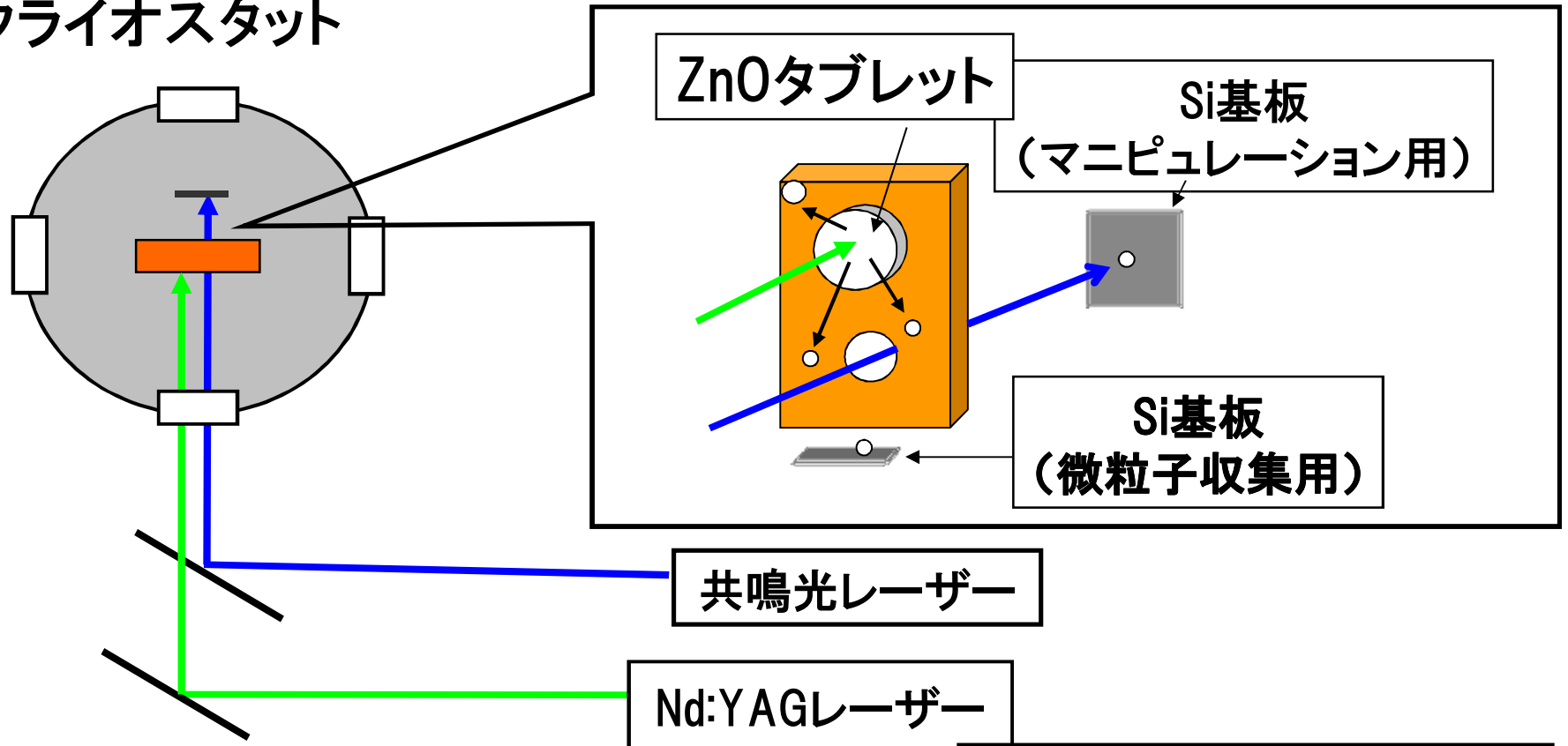
異方性結晶の真球化



適用可能物質はZnOの
他に？

実験配置

クライオスタット



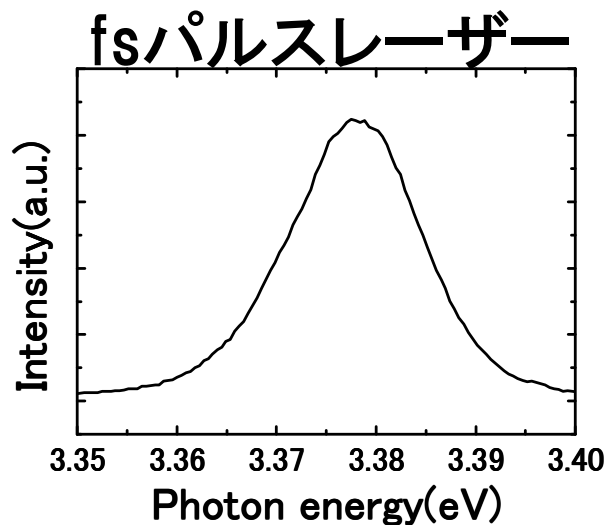
レーザーアブレーションと光マニピュレーションを同時に実施

波長	532nm
パルス幅	10ns
繰り返し周波数	10Hz
エネルギー密度	0.5J/cm ²

共鳴光レーザー

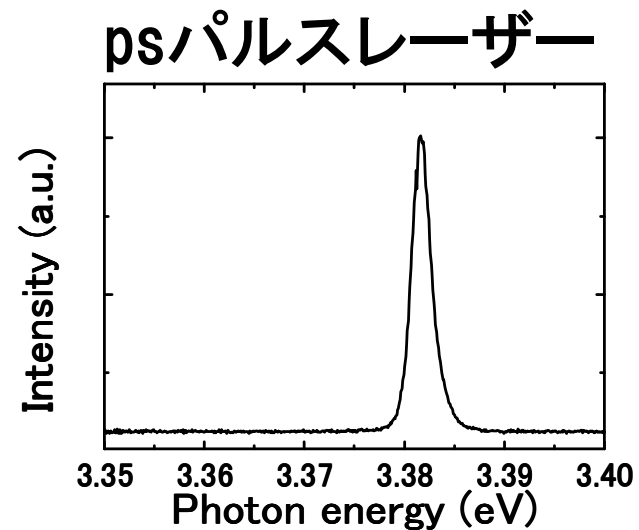
Ti:Sapphireレーザーの第二高調波

線幅の広いfsパルスレーザーと
線幅の狭いpsパルスレーザーで比較



スペクトル幅 20meV
エネルギー 3.38eV
パルス幅 100fs

粒径100nm以下の微粒子
子全ての共鳴に対応

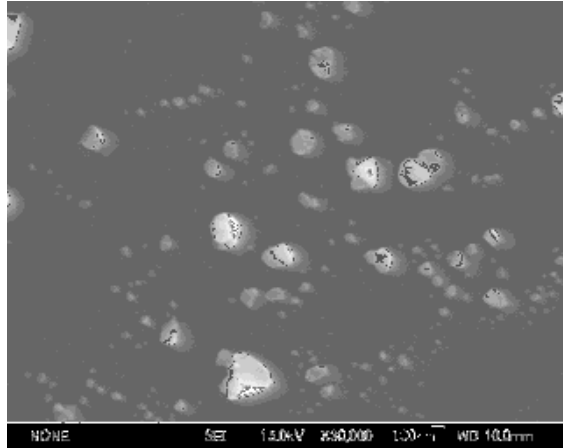


スペクトル幅 2meV
エネルギー 3.38eV
パルス幅 1ps

特定サイズの微粒子
を選択

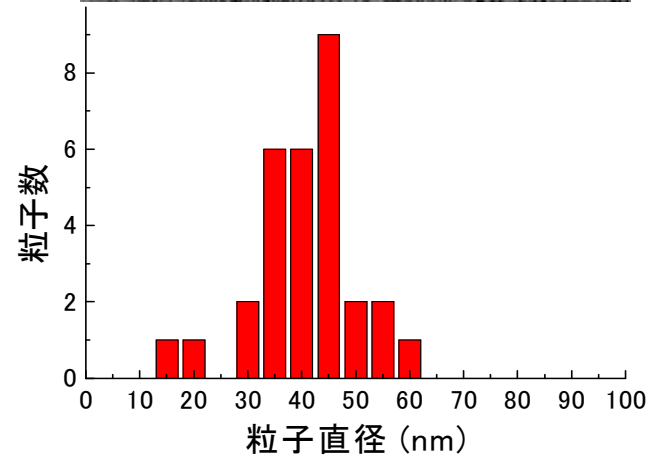
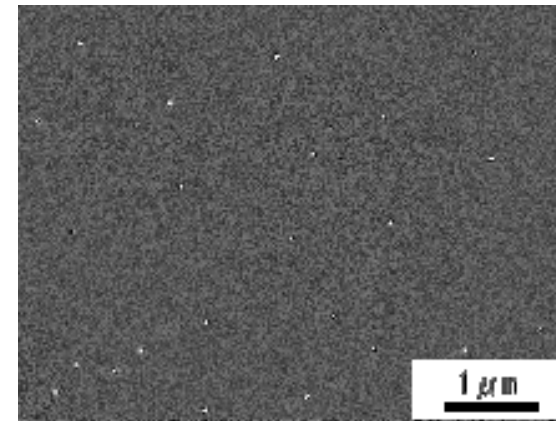
超流動ヘリウム中における実験結果

レーザーアブレーション
により作製された微粒子

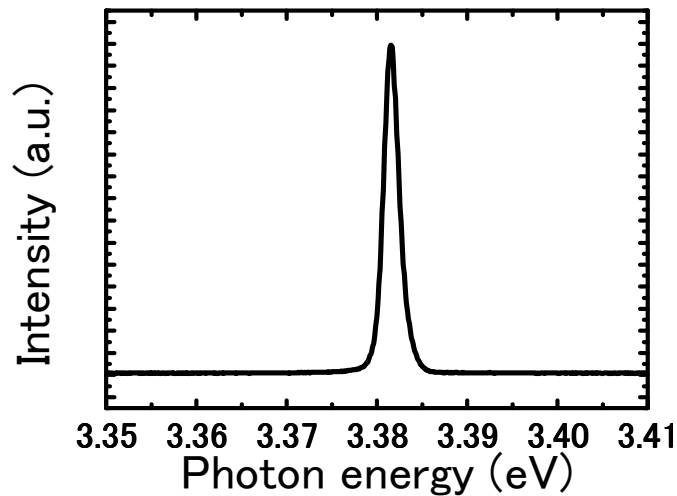


樹枝状結晶、数 μm 以下
の微粒子を作製

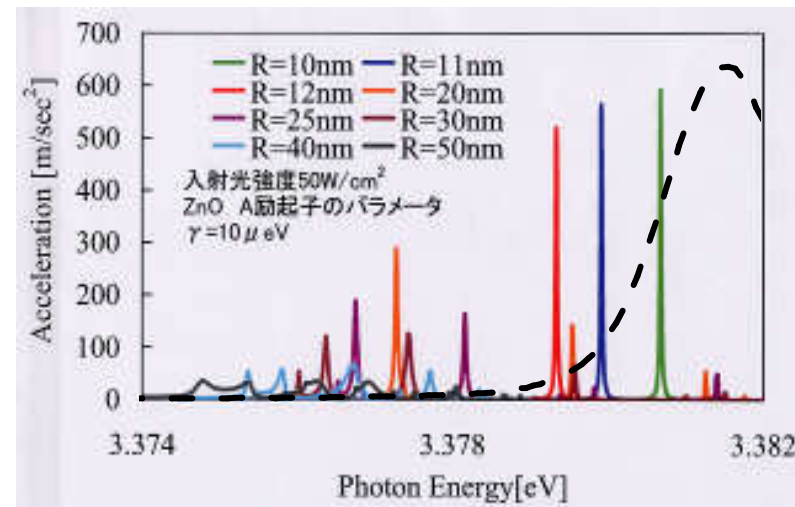
fsパルスレーザーでマニピュ
レーションされた微粒子



psパルスレーザーによる光マニピュレーション



スペクトル幅 2meV
エネルギー 3.38eV
パルス幅 1ps

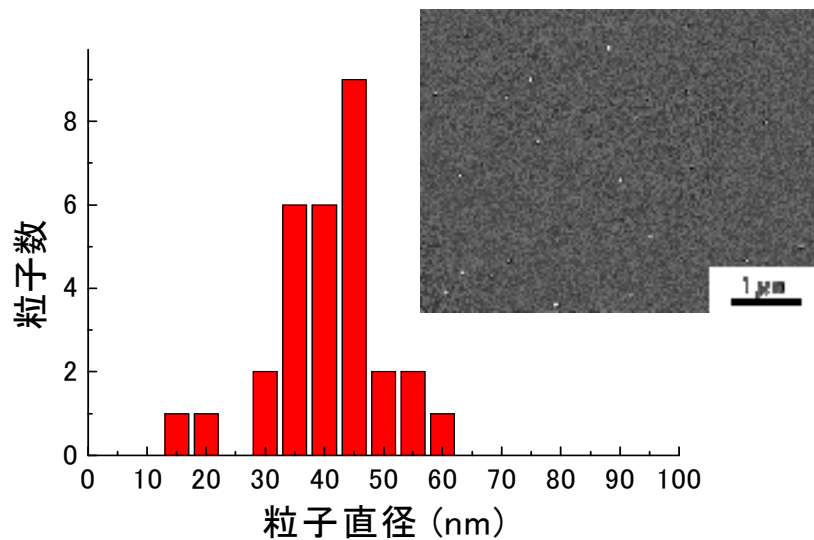


破線はレーザーのスペクトル
ピークは粒径18nmの微粒子
に対応

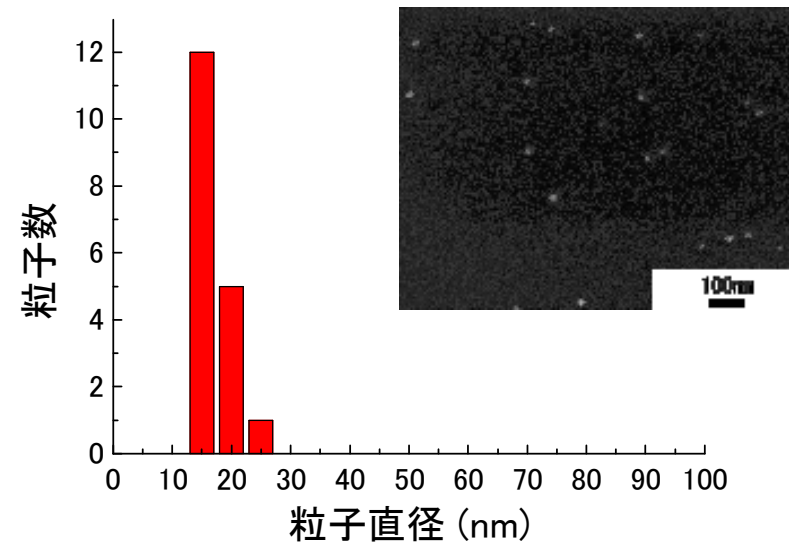
超流動ヘリウム中においてマニピュレーションを試みた。

マニピュレーション結果の比較

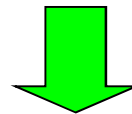
fsパルスレーザーによる
光マニピュレーション



psパルスレーザーによる
光マニピュレーション

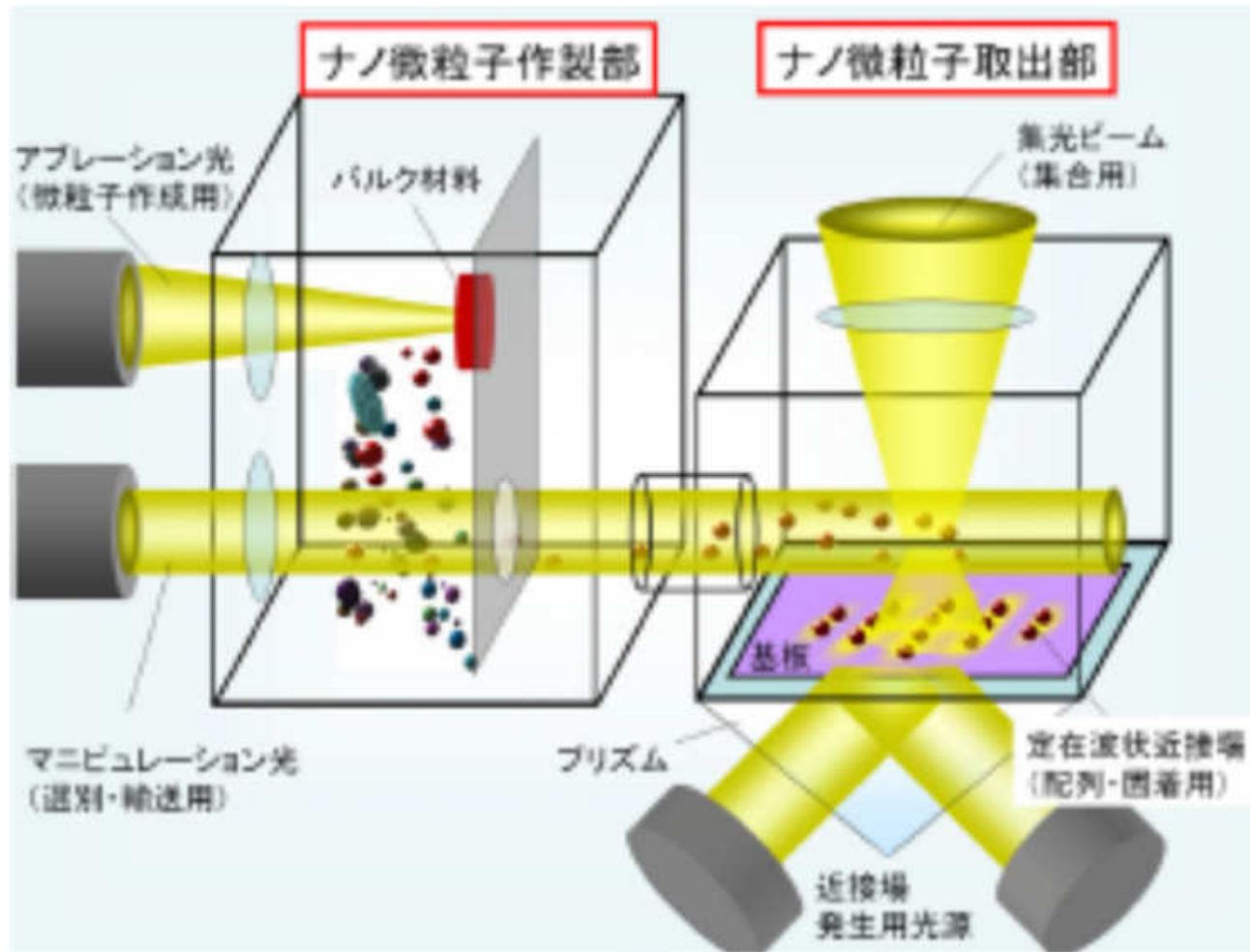


スペクトル幅に対応してサイズ幅も減少



特定の共鳴構造の微粒子のみを狙える可能性

光ナノファクトリー実現に向けて



新奇量子機能をもつナノ材料を光によって作製・選別・配列する。

量子ドットの応用

低閾値レーザー

光増幅器

光スイッチ

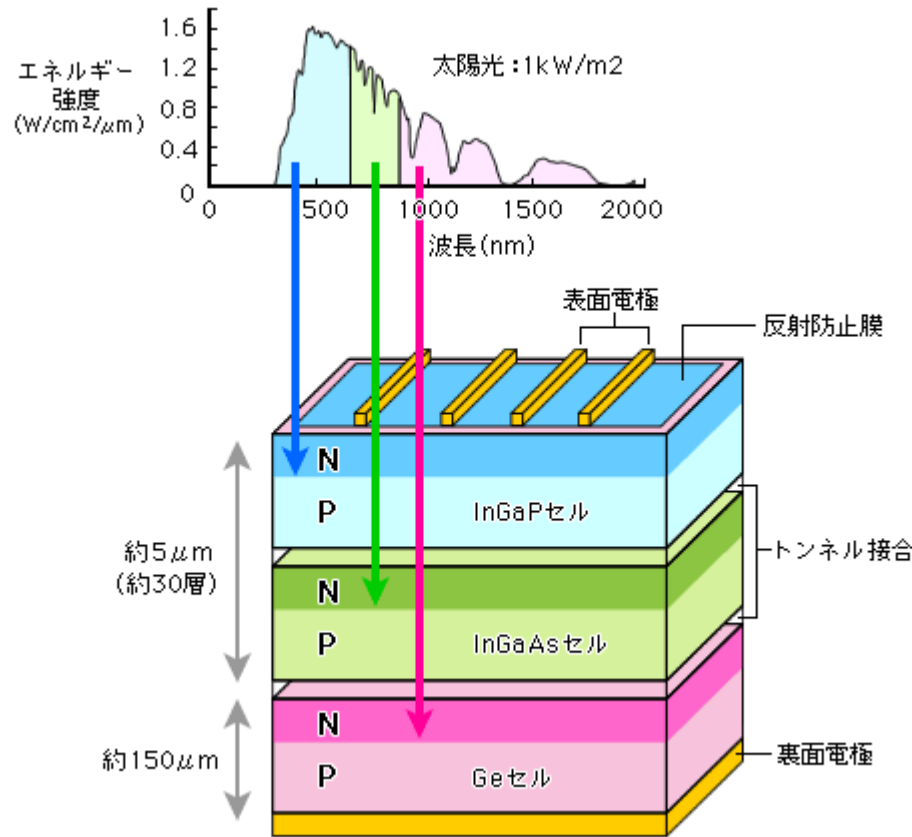
赤外線検出器

太陽光発電

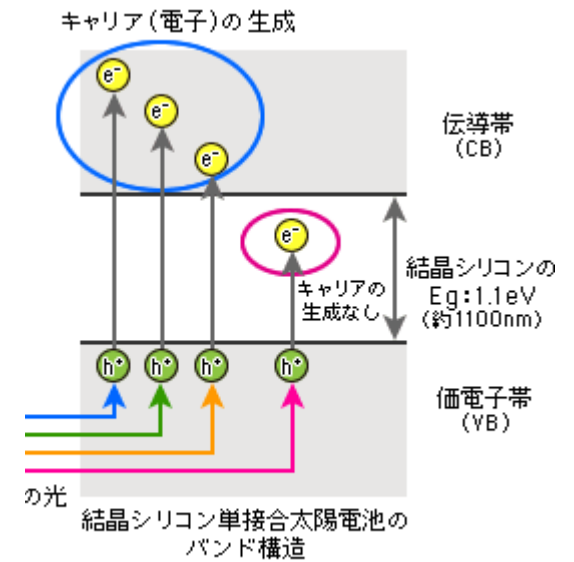
蛍光標識（生体細胞中）

太陽電池の効率向上

太陽光スペクトル(トータル1kW/m²)

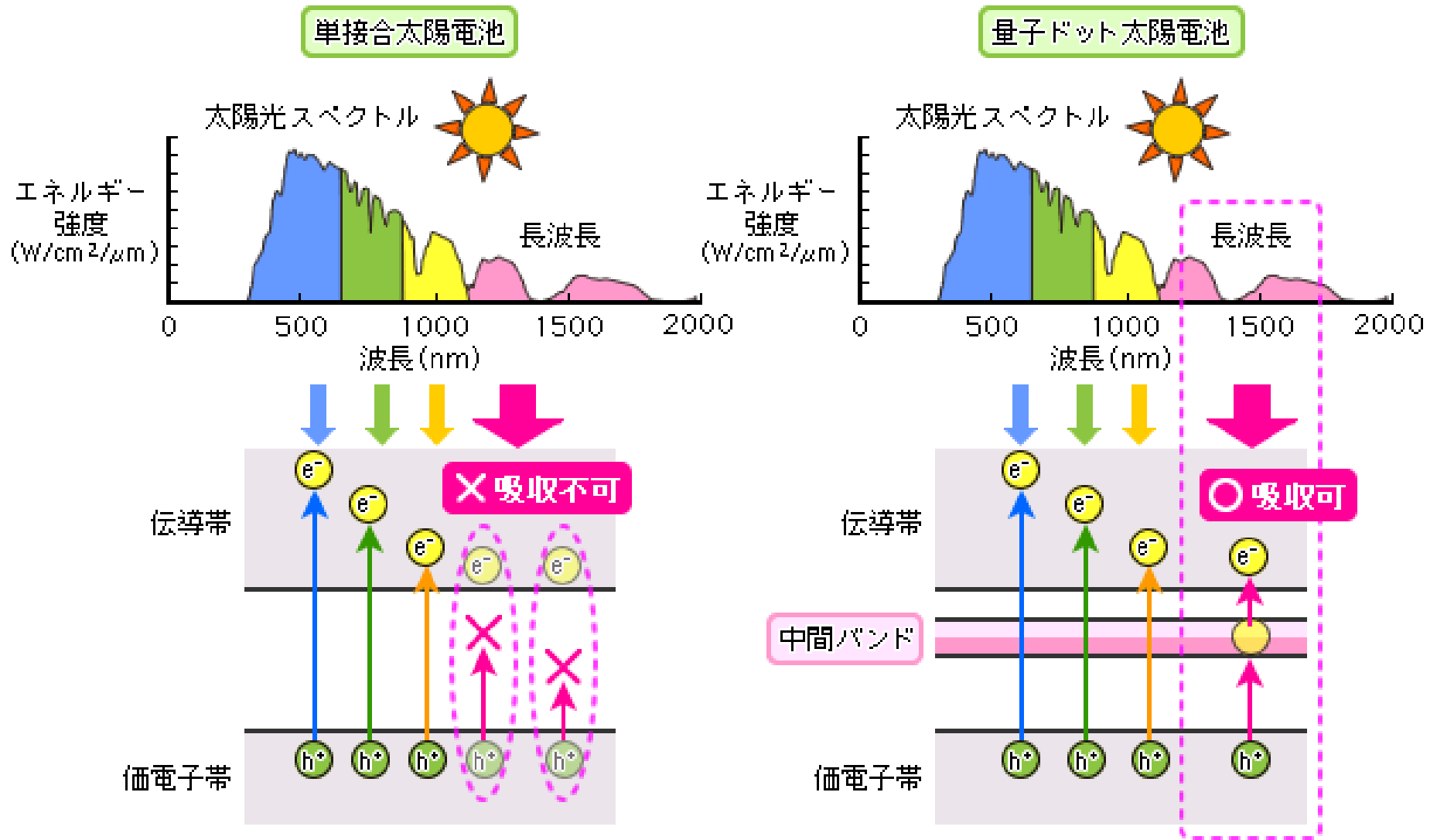


多接合構造の採用



東大荒川研

量子ドットによる中間バンドを用いた太陽電池



変換効率75%、量子ドットが実現する究極の太陽電池

APPLIED PHYSICS LETTERS 98, 171108 (2011)

Detailed balance limit of the efficiency of multilevel intermediate band solar cells

Tomohiro Nozawa^{1,2} and Yasuhiko Arakawa^{1,3,a)}

¹Institute for Nano Quantum Information Electronics, The University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

²Advanced Technology Research Laboratories, Sharp Corporation, 2613-1 Ichinomoto-cho, Tenri, Nara 632-8567, Japan

³Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

(Received 28 December 2010; accepted 30 March 2011; published online 27 April 2011)

Intermediate-band solar cells (IBSCs) promise ultrahigh solar-electricity energy conversion. We have calculated the detailed balance limit of the efficiency for IBSCs with multiple intermediate bands by optimizing IB's energy levels. The results indicate that thermodynamic limit of IBSCs with 4 IBs is 74.6% which far exceeds 63% calculated in a pr further increasing the total number IBs, the thermodynamic nearly 80%. © 2011 American Institute of Physics. [doi:11

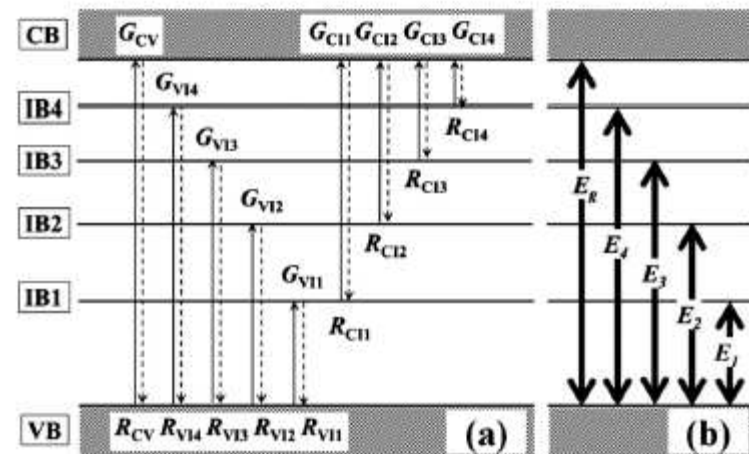


FIG. 1. Schematic diagram of (a) carrier transitions and energy levels and (b) energy gaps.

生体細胞中の蛍光標識

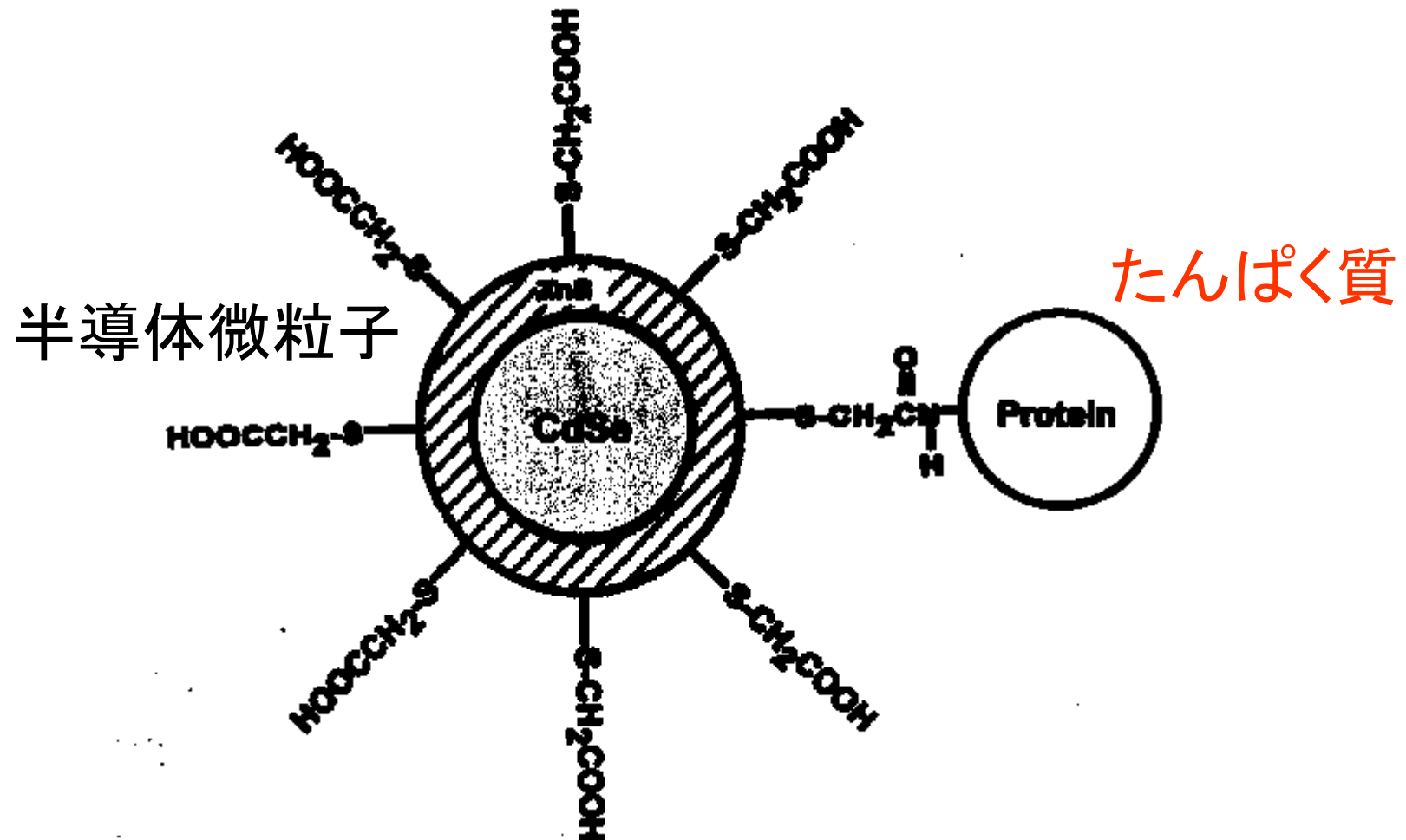
メリット（蛍光色素に比べて）：
発光帯幅が狭い→多色化が可能
吸収帯が連続→多色一斉励起可
光劣化しにくい→長時間露光可能



マウスの繊維芽細胞中
への埋め込み

**M. Bruchez Jr., et al.,
Science 281, 2013 (1998)
より引用**

ナノ粒子に標識機能を付加する



カソードルミネッセンスを用いた 細胞の超解像イメージング

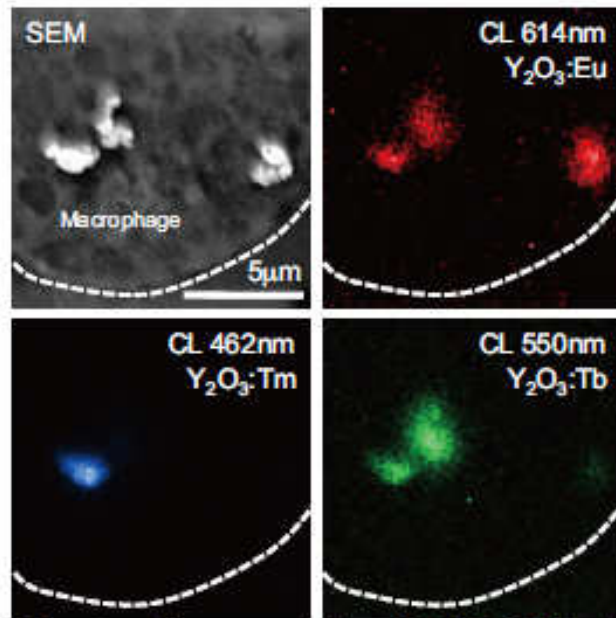
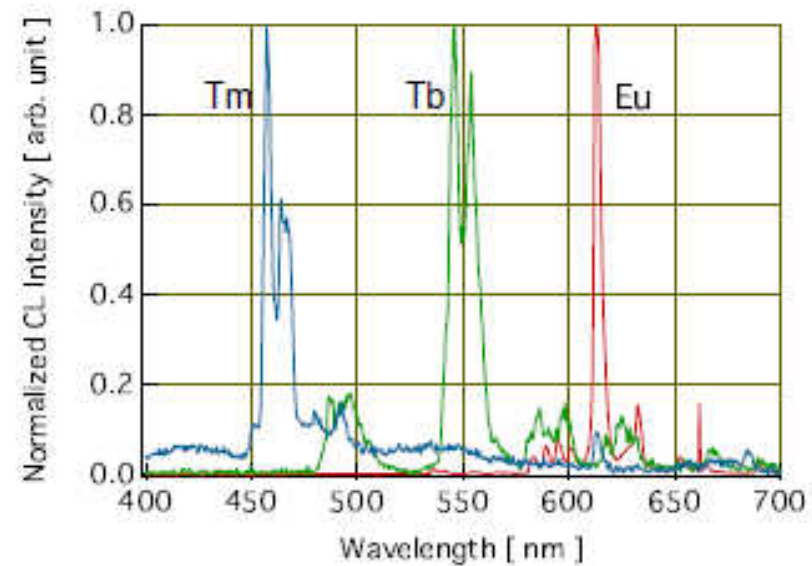


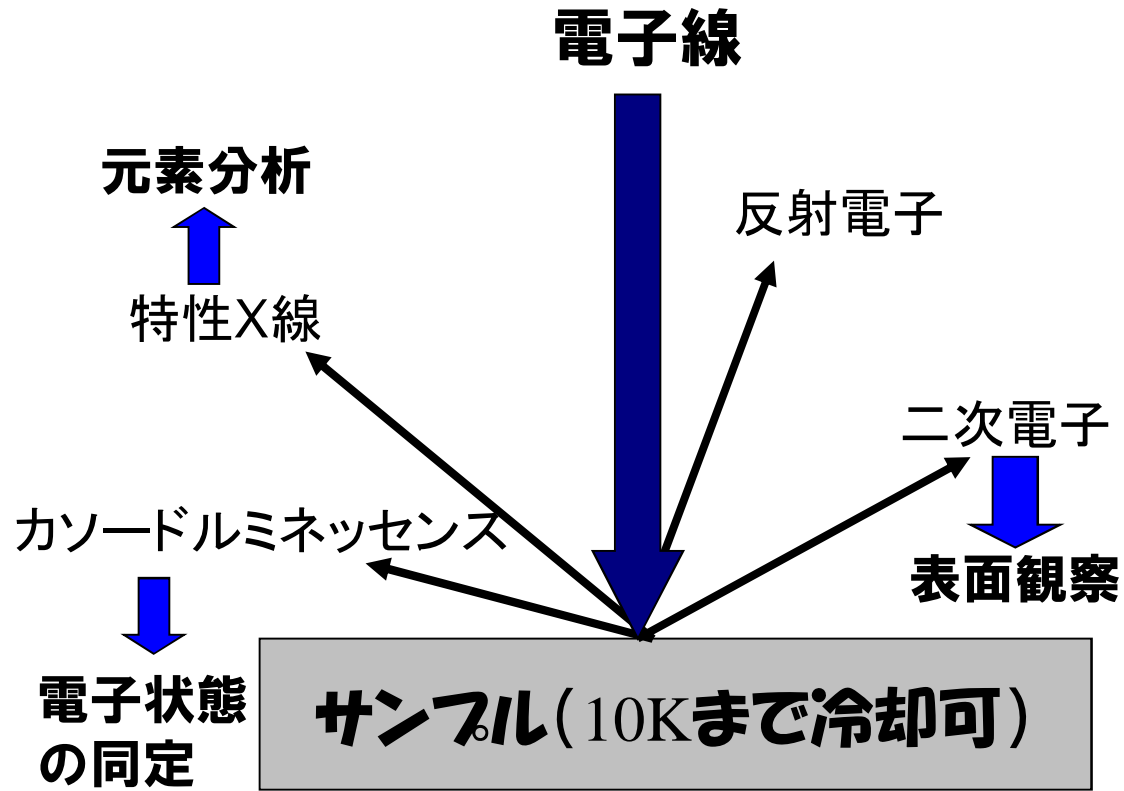
Fig. 1: Spectra of nanoparticles (10 kV, 0.48 nA, exposure time 50 ms, slit width 2000 μm)



多色化

H. Niioka, T. Furukawa, M. Ichimiya, MA, T. Araki, and M. Hashimoto, Appl. Phys. Express **4**, 112402 (2011).

走査型電子顕微鏡システム



アウトライン

1. テラヘルツテクノロジーとは？
2. 光通信技術と非線形光学応答
光と物質の相互作用の特異な増強
ナノ構造物質
3. ナノ粒子の作製と光マニピュレーション
4. 最後に

研究テーマ

1. ナノ構造物質の光物性研究とその応用

- ・ ナノ構造物質の電子状態及びそのダイナミクスの解明
- ・ ナノ構造物質特有の光と物質の相互作用と、それに基づく新奇光学現象の発見、次世代光通信技術（光で光を制御する超高速光スイッチなど）への応用

2. 新しい光機能物質の開発

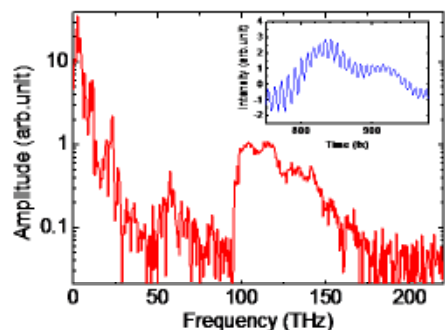
- ・ レーザー照射により超微粒子を作製し、レーザー光により超微粒子位置を操作する手法の開発

3. 新しい分光測定法の開発とその利用

- ・ 従来の顕微鏡の空間分解能を越える電子顕微鏡と光学測定を組み合わせた手法（カソードルミネッセンス）
- ・ 光と電波の境界領域（テラヘルツ光）の発生・検出法開発、誘電体、高温超伝導体などの新奇物質の光物性研究

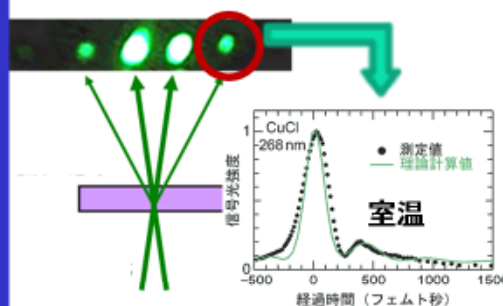
レーザーを用いた超高速現象の解明と 新奇ナノ光科学の創出

超広帯域テラヘルツ電磁波 時間領域分光法の開発



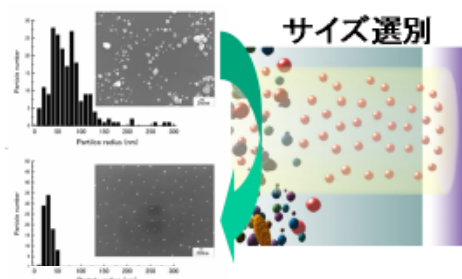
世界最高周波数170THzの
アンテナによる電場検出

半導体超薄膜の超高速 非線形光学応答



通常の半導体より3桁速い
超高速光信号を観測

新奇ナノ構造作製と光マニ ピュレーション技術の開拓



液体ヘリウム中での半導体ナノ
粒子の光マニピュレーション

超広帯域分光法による光、電荷、スピン、格子
振動等の相互作用とその超高速ダイナミクス

光と物質の相互作用増強によるナノ構造
物質の作製・選別と新奇光機能の創成

新奇な光物性の発見と解明、従来の限界を超えた光機能の創成

物性物理学の主要対象である強相関電子系とナノ構造物質に
関わる光科学から量子工学に至る特徴ある教育研究を推進