九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

新しい光技術を担う「飛ばない光」 : 基礎物理と応用

竪, 直也
九州大学大学院システム情報科学研究院情報エレクトロニクス部門 : 准教授

https://hdl.handle.net/2324/1664246

出版情報：九州大学大学院システム情報科学府・研究院先端サマーセミナー. 2016, 2016-08-05
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

先端サマーセミナー2016
I&Eの未来を創るシステム情報科学
九州大学大学院システム情報科学府・研究院
Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
2016年8月16日（火）
九州大学伊都キャンパス ウエスト2号館3階 大講義室

新しい光技術を担う「飛ばない光」

―基礎物理と応用―

竪 直也（情報エレクトロニクス部門）

九州大学大学院 システム情報科学研究院
情報エレクトロニクス部門 ナノ光情報応用研究室
竪研究室「たてらぼ」

トップ

研究紹介

メンバー

研究成果

講義情報

ギャラリー

所在地・連絡先

関連リンク

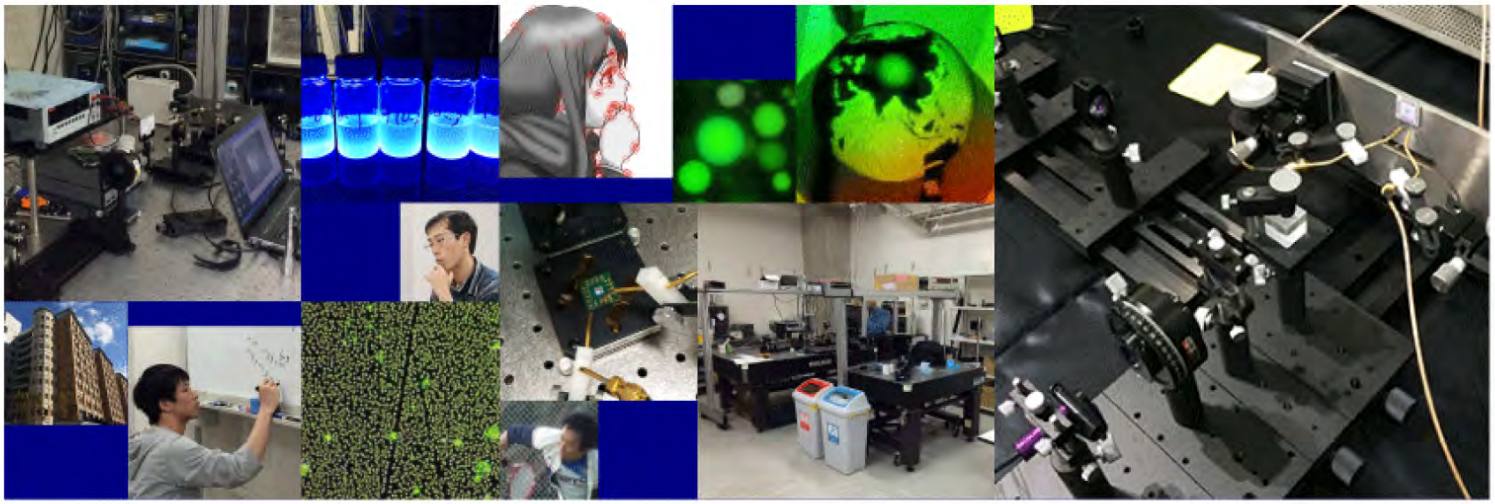
サイトマップ

wiki

English

研究室概要：

「たてらぼ」では、ナノ領域における光と物質の相互作用の基本原理「ナノフォトニクス」に基づいて機能する**ナノ光情報システムの実証的研究**を進めています。 従来の光とは異なり「飛ばない光」近接場光は、その局在性ゆえに物質との間で特異な物理現象を誘起し、その有効利用により実現される情報応用は社会のニーズに呼応する微小性・高速性・省エネルギー性を誇ると共に、 次世代情報社会の構築における新たなシーズともなります。 具体的な研究テーマは、**近接場光の特質を活かしたデバイス・システムの構築からそれらの機能を司る基礎物理の解明**まで多岐に渡ります。



最近の動向：

発表項目

- **背景**
  - ✓ ナノフォトニクス
  - ✓ 「飛ばない光」近接場光の描像
  - ✓ ナノ光-物質間相互作用の事例
- **表面電流駆動型磁気光学空間光変調デバイス**
  - ✓ 磁気光学効果と酸化亜鉛（ZnO）
  - ✓ 近接場光援用アニール
  - ✓ 試作デバイスの構成とデモ実験
- **ナノ光人工物メトリクス**
  - ✓ 光セキュリティと人工物メトリクス
  - ✓ ナノ-マクロ階層型ホログラム
  - ✓ ナノ光情報読み出しのための非走査型プローブ顕微鏡
- **まとめ**

◉ 背景

- ✓ ナノフォトニクス
- ✓ 「飛ばない光」近接場光の描像
- ✓ ナノ光-物質間相互作用の事例

◉ 表面電流駆動型磁気光学空間光変調デバイス

- ✓ 磁気光学効果と酸化亜鉛（ZnO）
- ✓ 近接場光援用アニール
- ✓ 試作デバイスの構成とデモ実験

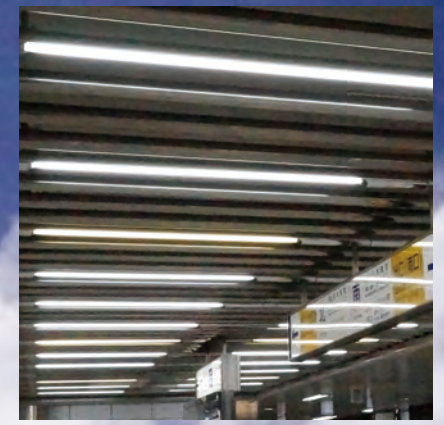
◉ ナノ光人工物メトリクス

- ✓ 光セキュリティと人工物メトリクス
- ✓ ナノ-マクロ階層型ホログラム
- ✓ ナノ光情報読み出しのための非走査型プローブ顕微鏡

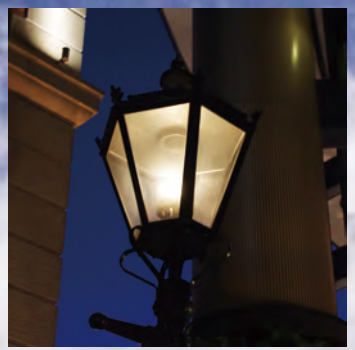
◉ まとめ

「光」











[ref] 大津元一著，ドレスト光子はやわかり，丸善プラネット．

「日本光学会の研究動向」

光物理



[ref] http://physicsworld.com/

光情報処理



[ref] http://mechanizedintelligence.com/

[ref] http://www.osj-jsap.jp/

OPJ2015 分科一覧

OSJ

1 【ナノ光学・ナノフォトニクス】

近接場光学，プラズモニクス，ナノイメージング・分光，ナノセンシング，ナノ量子光学，ナノ光プロセス，フォトニック結晶，メタマテリアル

2 【量子エレクトロニクス】

レーザー装置・材料，レーザー加工，非線形光学（波長変換，位相共役，非線形光学材料・素子），量子光学（量子通信，量子情報処理，量子干渉），原子光学，レーザー分光（超精密分光，

【ナノ光学・ナノフォトニクス】

近接場光学，プラズモニクス，ナノイメージング・分光，ナノセンシング，ナノ量子光学，ナノ光プロセス，フォトニック結晶，メタマテリアル

4 【光計測】

光応用計測（幾何光学応用，物理光学応用，光ファイバ応用計測），干渉計測（干渉光計測，縞解

【情報光学・情報フォトニクス】

光情報処理，光コンピューティング，光インターコネクション，物理ベース画像処理，イメージング，超解像，スパースコーディング，画像回復，ディスプレイ，3Dディスプレイ，イメージセンサー，光通信システム，光通信デバイス，光メモリー，光記録材料，光情報処理用材料，空間光変調素子，光セキュリティー，ディジタルオプティクス，ディジタルホログラフィー，ホログラフィー，補償光学

7 【バイオ光学・フォトニクス，医用光学】

分子イメージング，レーザー顕微鏡，非線形顕微鏡，バイオメディカル分光計測，光ピンセット，光マニピュレーション，光コヒーレンストモグラフィ，光散乱トモグラフィ，レーザー診断，レーザー治療

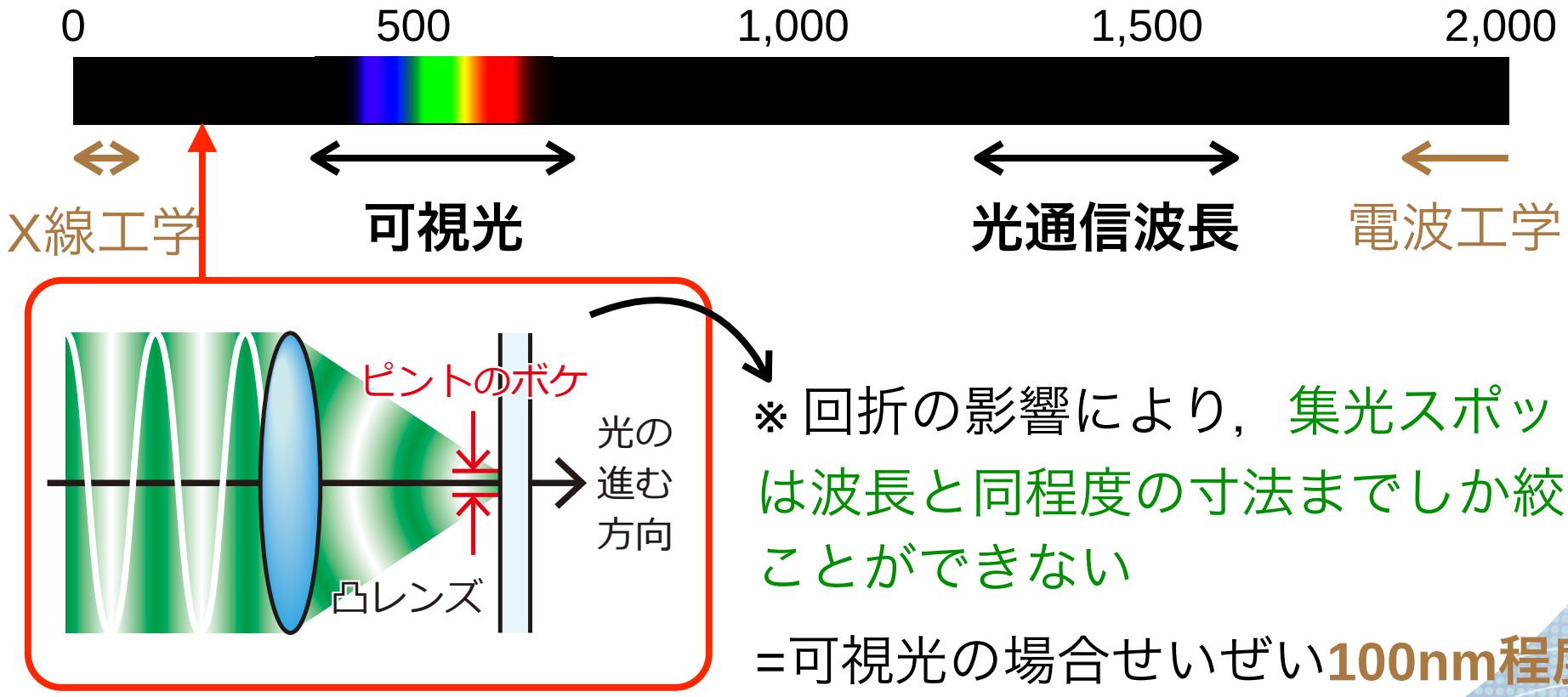
8 【エネルギー・環境・グリーンフォトニクス，生活フォトニクス】

創・省エネルギー，太陽電池，高効率光源，環境計測，農光学，食品光学

うたぼて

光のナノテク「ナノフォトニクス」

◉ **「ナノ領域における光技術」？**

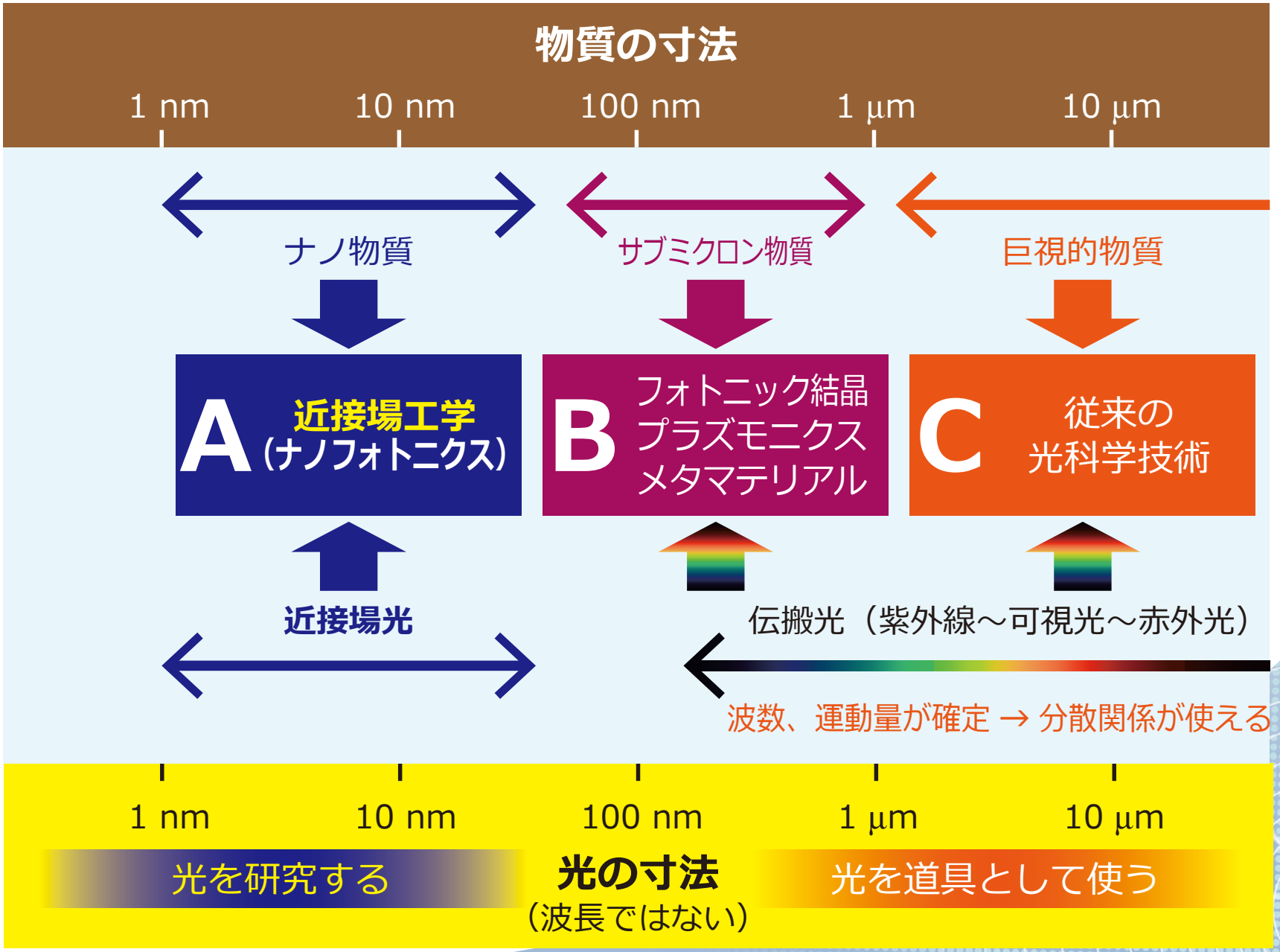


※回折の影響により，集光スポットは波長と同程度の寸法までしか絞ることができない

=可視光の場合せいぜい**100nm程度**

→「伝搬する光」を活用する限り**「ナノ領域における光技術」は原理的に体現し得ない**

光技術のスケール

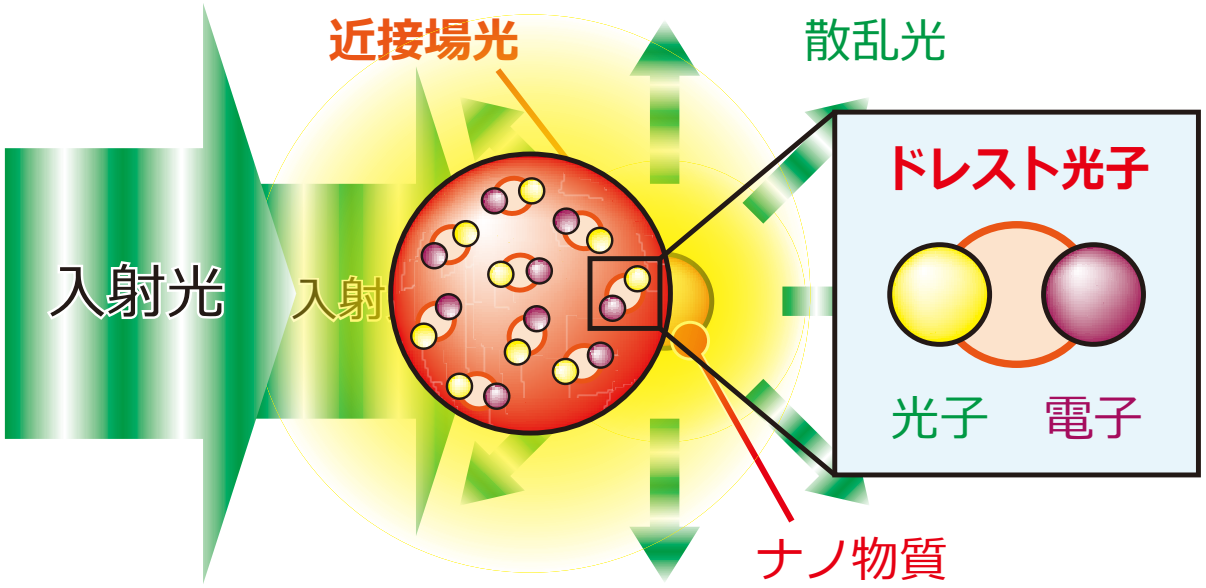

物質の寸法
1 nm
10 nm
100 nm
1 μm
10 μm
ナノ物質
サブミクロン物質
巨視的物質
A 近接場工学 (ナノフォトニクス)
B フォトニック結晶 プラズモニクス メタマテリアル
C 従来の 光科学技術
近接場光
伝搬光（紫外線～可視光～赤外光）
波数、運動量が確定 → 分散関係が使える
1 nm
10 nm
100 nm
1 μm
10 μm
光を研究する
光の寸法
(波長ではない)
光を道具として使う

飛ばない光「近接場光」

◉ 直感的描像

✓「寸法が小さい（Δx<<λ）」ということは（不確定性原理に基づき）**「波数・波長が不確定（Δk>>k）」**ということ

$\Delta k \Delta x > 1$ →**「波数・波長が不確定」な光**＝局在エネルギー場



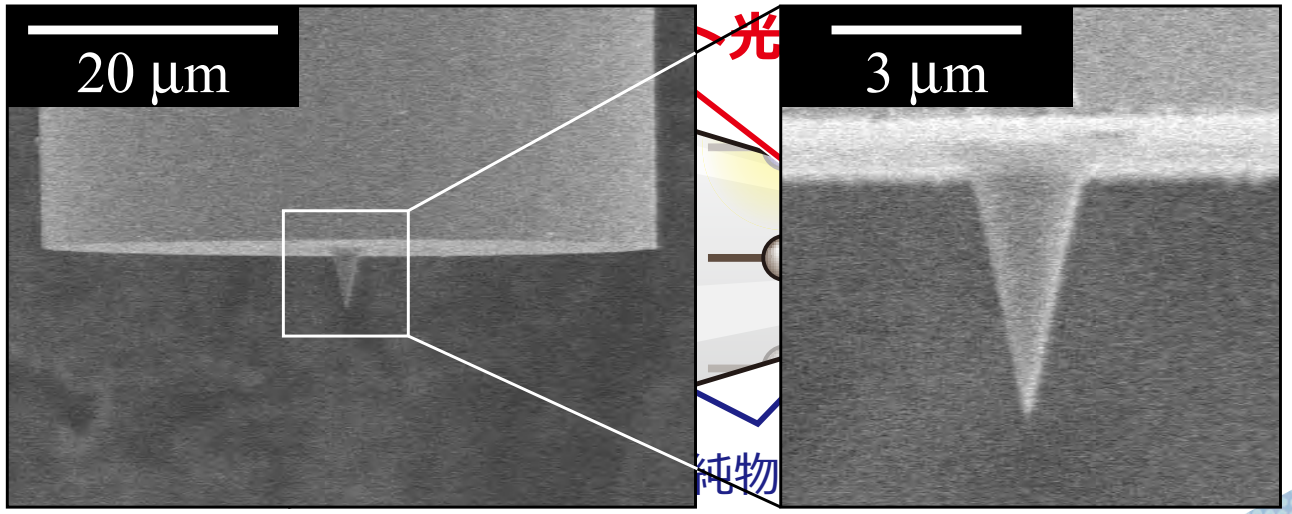
近接場光のエネルギーは**物質固有のエネルギー**を活性化したもの

近接場光の発生

◉ 一次元物質における描像

✓ 「光」が入射すると不純物原子（＝微小屈折率変化）の表面に**近接場光**が発生

✓ **近接場光**のエネルギーは「トンネル効果」により隣の原子に跳躍（hopping）可能



→ **フォノン**との相互作用がより強い状況においてはその場に局在

近接場光とフォノン

◉ 原理的描像

$$\tilde{a}^{\dagger}_{k\lambda} = \hat{a}^{\dagger}_{k\lambda} + iN_k \sum_{\alpha>F,\beta<F} \left(\rho_{\alpha\beta\lambda}(\boldsymbol{k}) \hat{b}^{\dagger}_{\alpha\beta} + \rho_{\alpha\beta\lambda}(\boldsymbol{k}) \hat{b}_{\alpha\beta} \right)$$

$$\tilde{a}_{k\lambda} = \hat{a}_{k\lambda} - iN_k \sum_{\alpha>F,\beta<F} \left(\rho^{*}_{\alpha\beta\lambda}(\boldsymbol{k}) \hat{b}_{\alpha\beta} + \rho^{*}_{\alpha\beta\lambda}(\boldsymbol{k}) \hat{b}^{\dagger}_{\alpha\beta} \right)$$

Free photon

Electron-hole pair

Spatial distribution of the fields

Diagonalization

$$\hat{\alpha}^{\dagger}_i \equiv \hat{U}^{\dagger} \tilde{a}^{\dagger}_i \hat{U} = \tilde{a}^{\dagger}_i \exp\left\{ -\sum_{p=1}^{N} \frac{\chi_{ip}}{\Omega_p} \left(\hat{c}^{\dagger}_p - \hat{c}_p \right) \right\} \qquad \hat{\alpha}_i \equiv \hat{U}^{\dagger} \tilde{a}_i \hat{U} = \tilde{a}_i \exp\left\{ \sum_{p=1}^{N} \frac{\chi_{ip}}{\Omega_p} \left(\hat{c}^{\dagger}_p - \hat{c}_p \right) \right\}$$

Optical near-fields

Multimode and coherent state of phonon

Creation of **Dressed-photon–phonon (DPP)**

→ **近接場光**は物質の**フォノン**と**エネルギー的に結合可能**

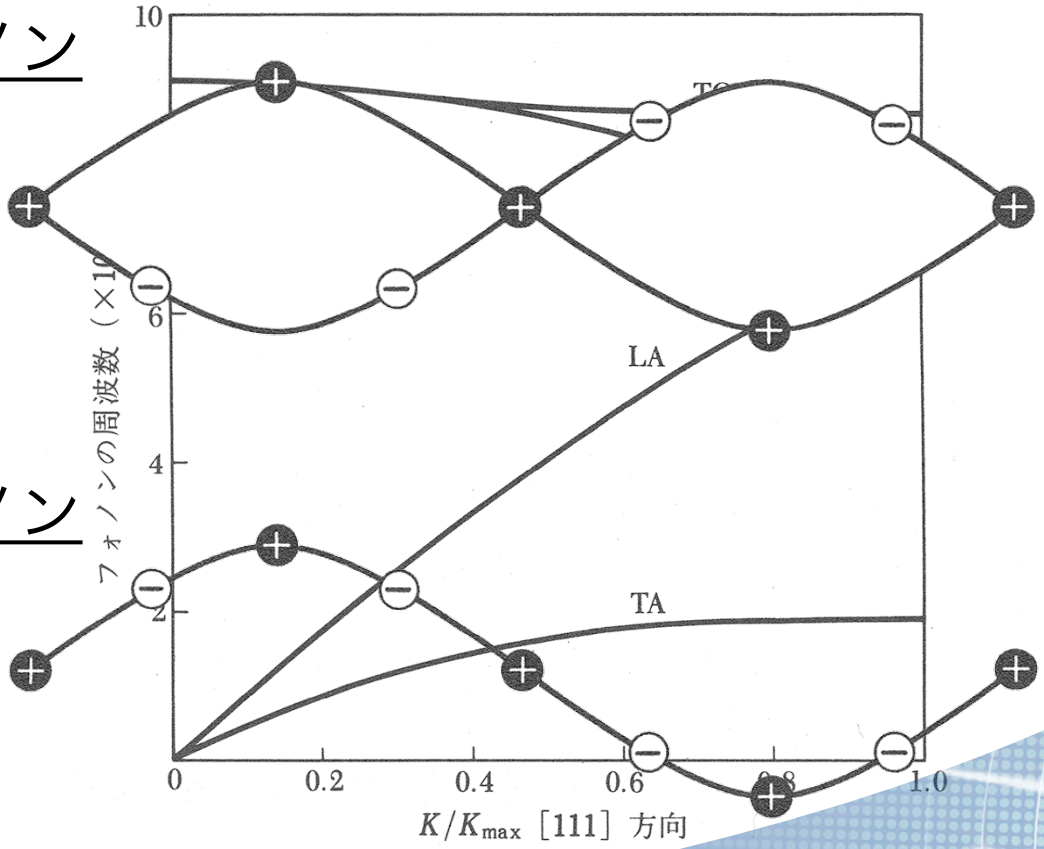


[ref] M. Ohtsu, *Dressed Photons*, Springer (2014).

【参考】フォノン

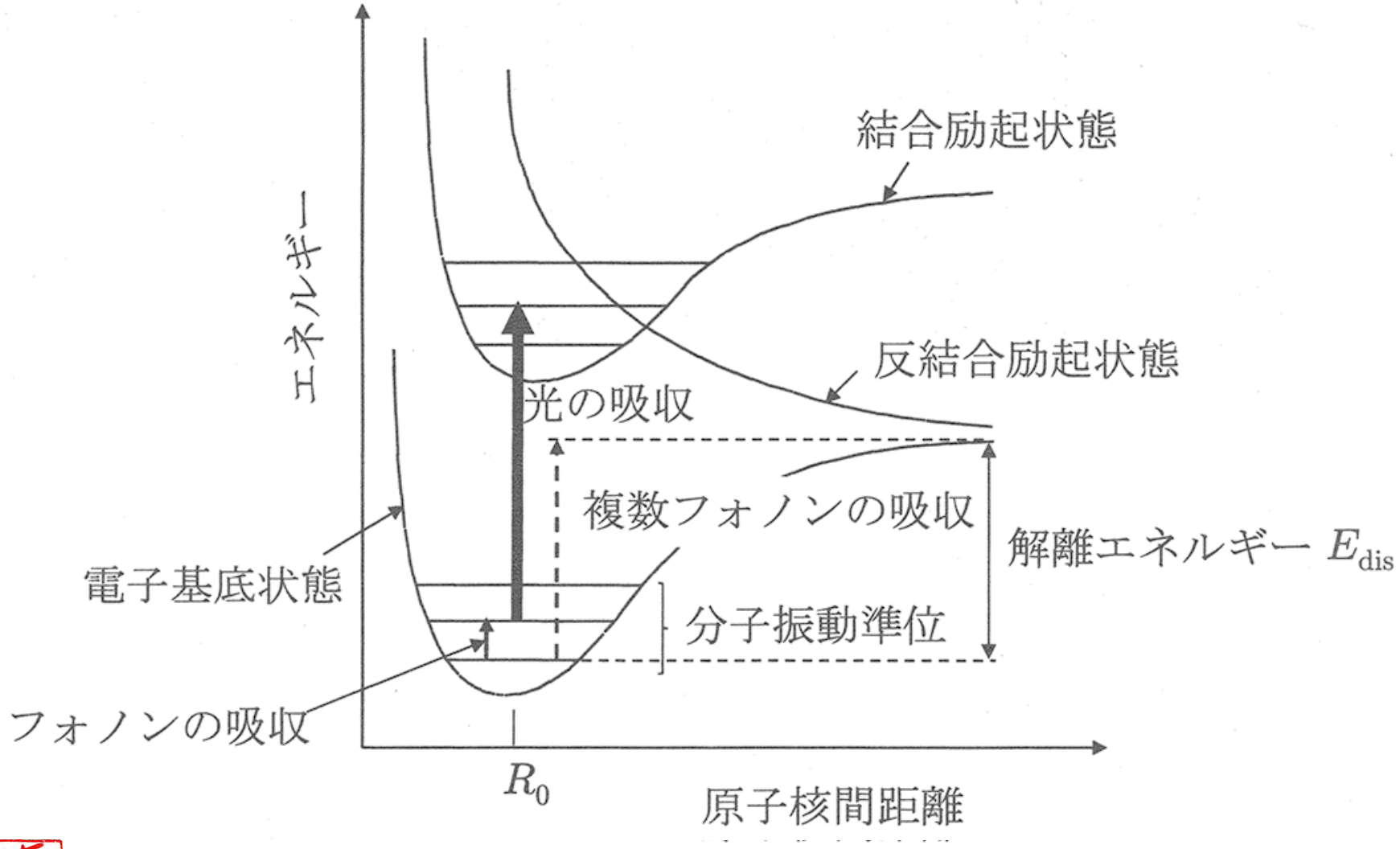
◉ フォノン（phonon）：

- ✓ 量子化された格子振動のエネルギーを司る準粒子
- ✓ 例えば結晶中の熱振動は「熱的に励起された**フォノン**」で記述
- ✓ 光学フォノン
- ✓ 音響フォノン



フォノン準位を介した多段階光励起

◉ 光励起過程におけるフォノン準位の寄与：

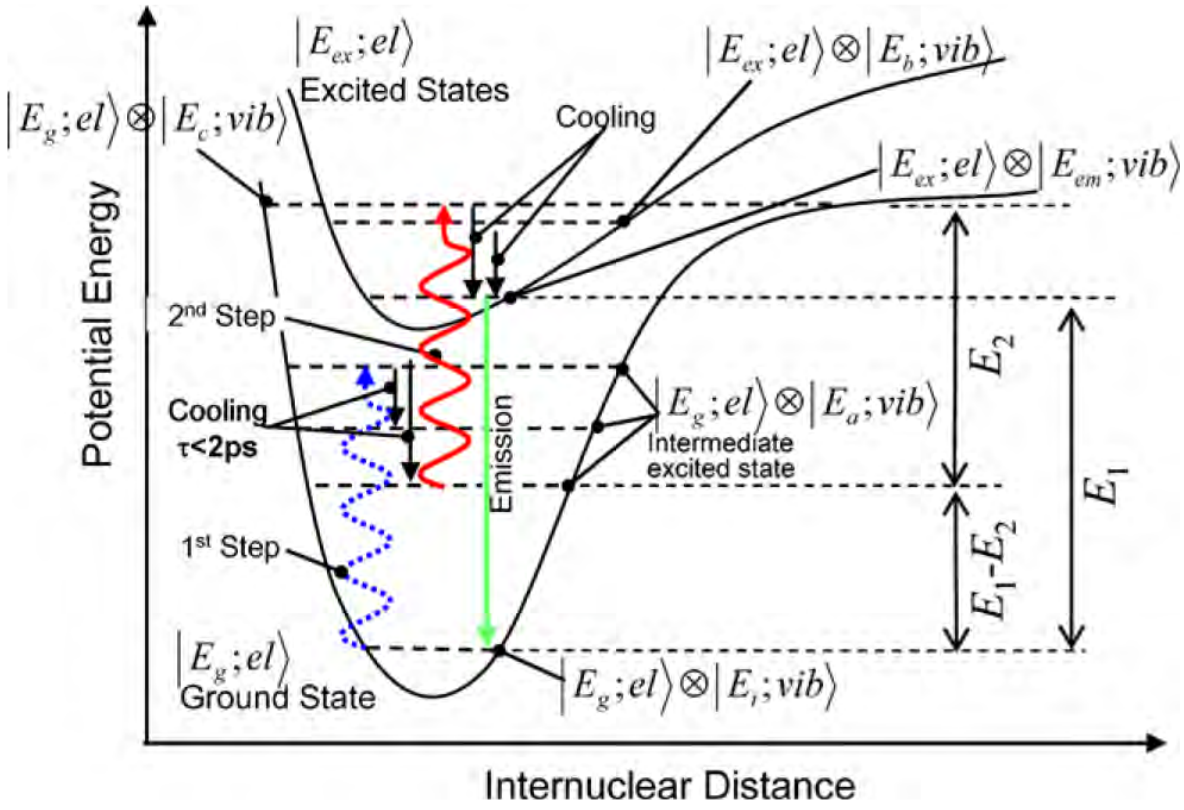


[ref] 大津元一著，ドレスト光子，朝倉書店.

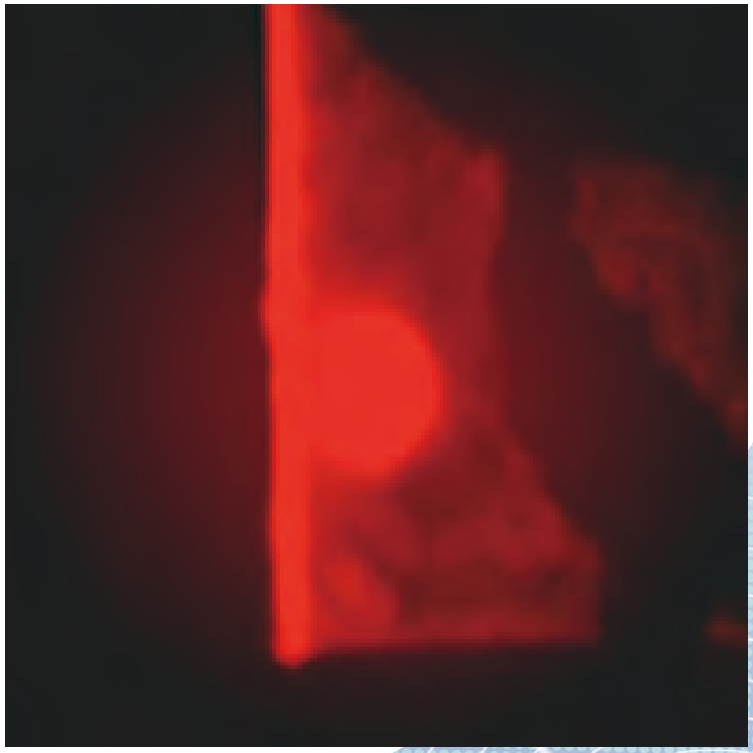
光エネルギー上方変換

◉ 色素微結晶による赤外→可視変換：

✓ 多段階光励起過程



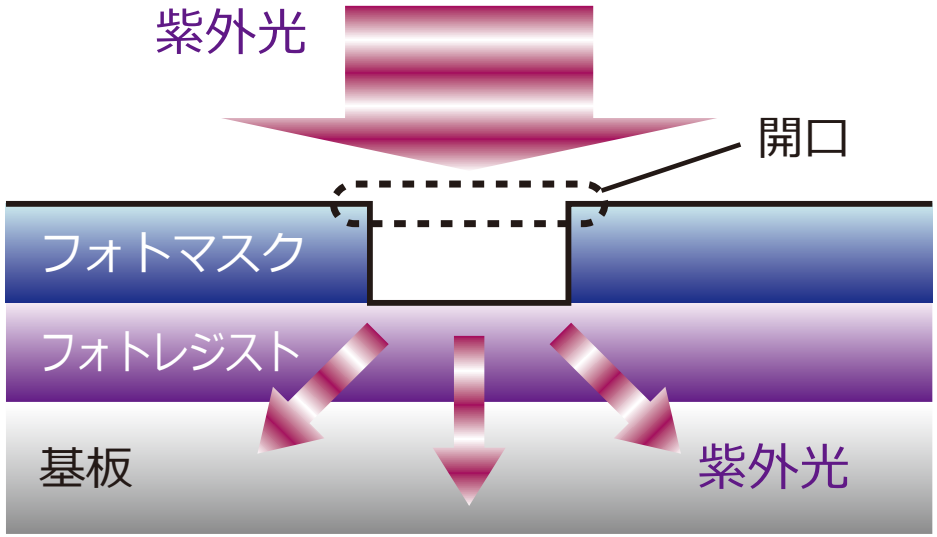
✓ 色素発光の様子

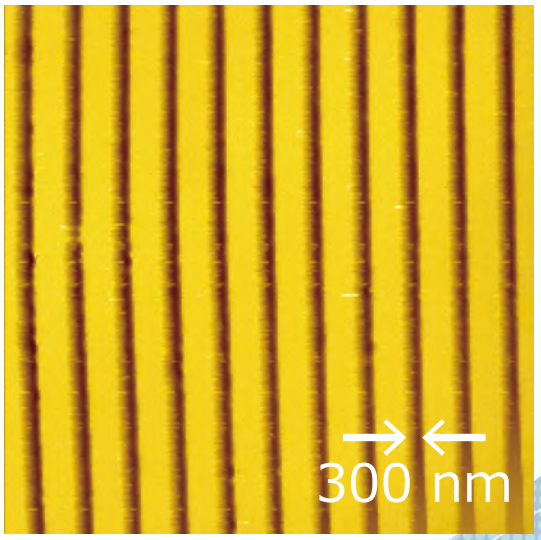


【参考】フォトリソグラフィ

◉ 一般的な加工原理と結果

✓ 感光性の物質（フォトレジスト）を塗布した物質の表面をパターン状に露光することにより，露光部と非露光部から成るパターンを形成



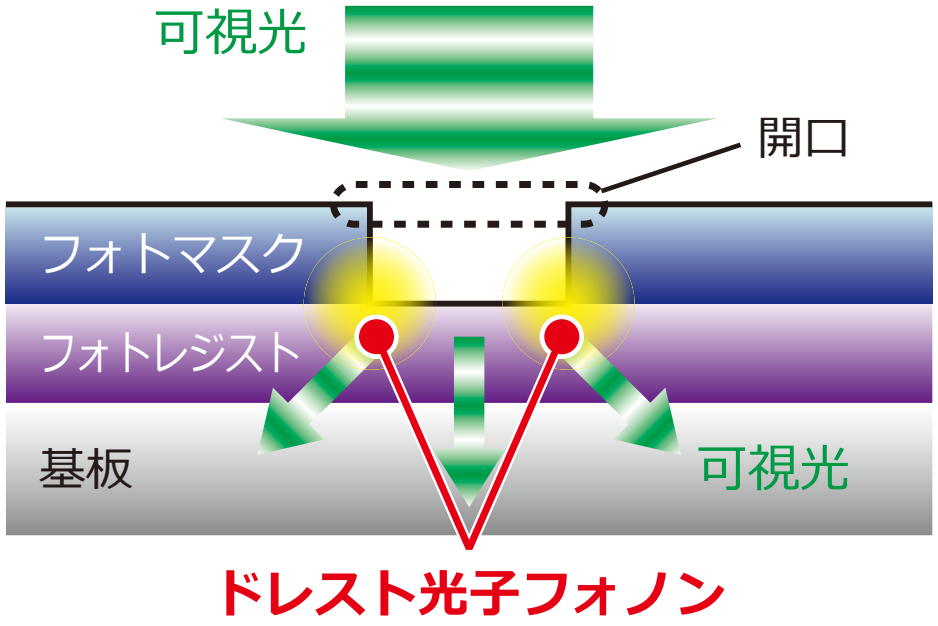


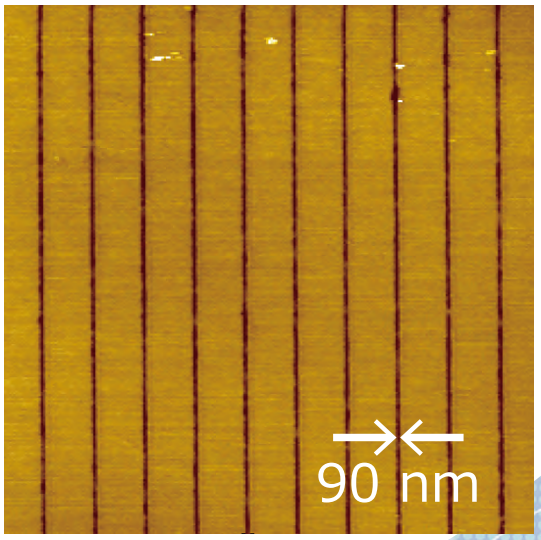
✓ フォトリソグラフィの加工分解能は，使用する光源の波長および光源に対するレジストの露光精度に依存

近接場光援用フォトリソグラフィ

◉ 加工原理と結果

✓ フォトマスクのエッジ部位にドレスト光子フォノンが発生し，フォノン準位を介した多段階の露光過程により局所的にフォトレジストを露光



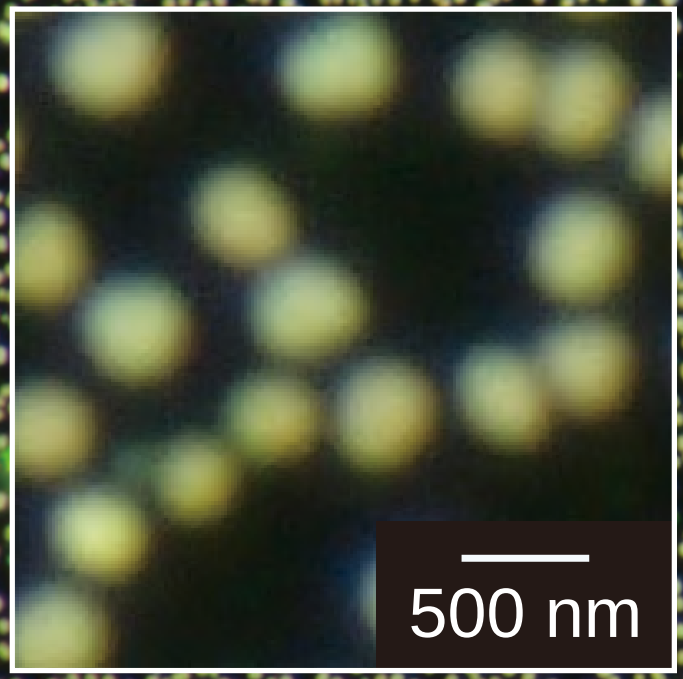


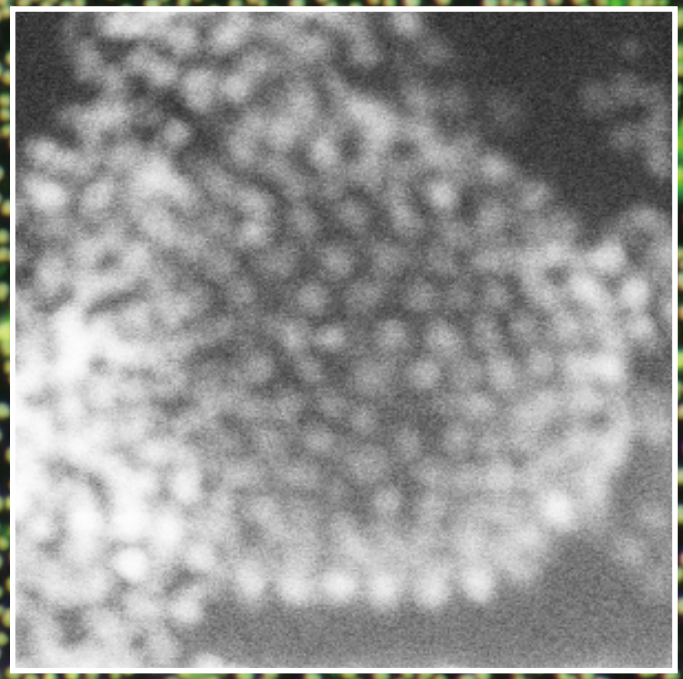
✓ 近接場光援用フォトリソグラフィの加工分解能は…？

[ref] H. Yonemitsu, et al., J. Luminescence, Vol. 122-123, pp. 230-233 (2007).

ナノフォトニックドロップレット

◉ 微小光機能性エレメントの自己組織的量産技術：





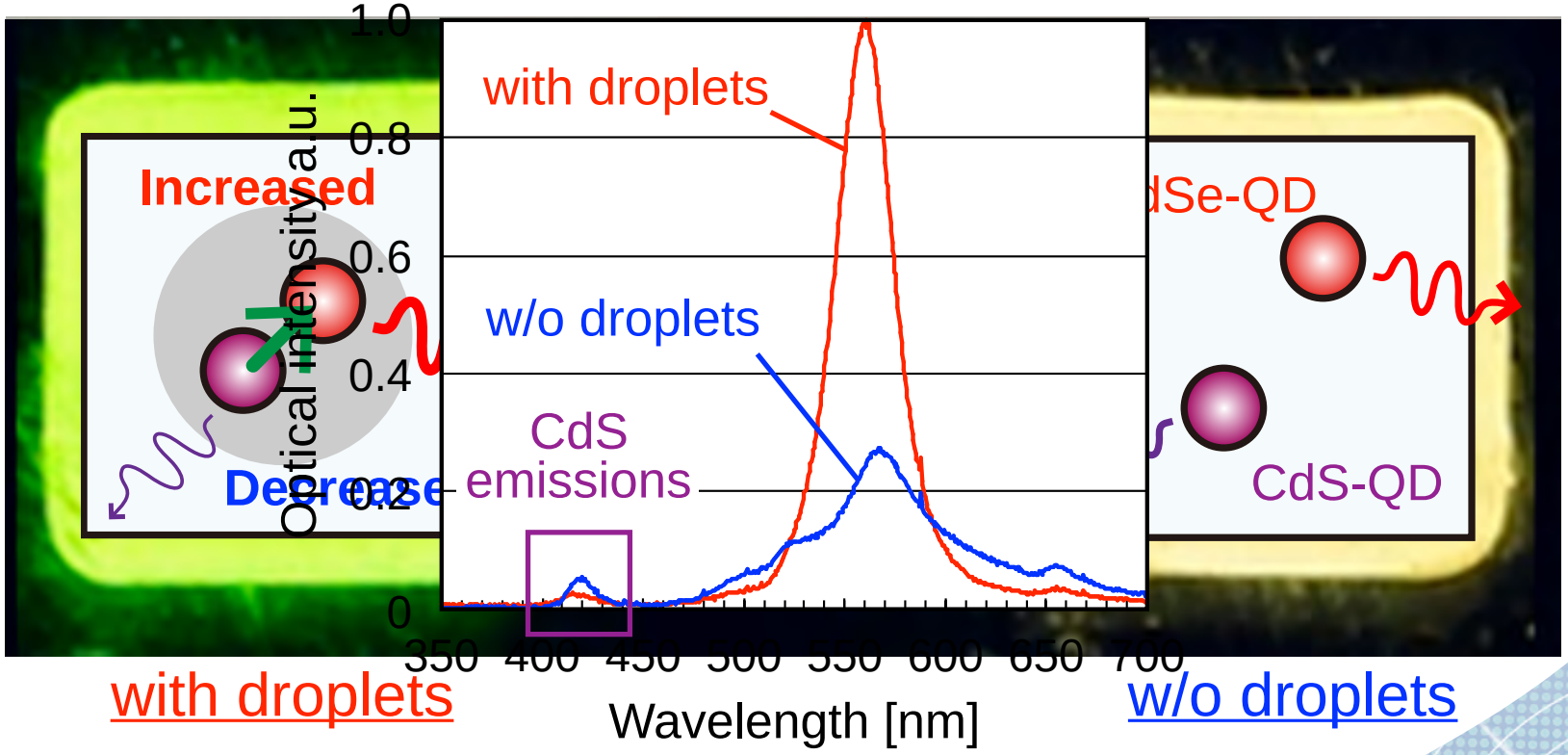
[ref] N. Tate, et al., Opt. Exp. Vol. 22, Issue 9, pp. 10262-10269 (2014).

10 μm

高収率光エネルギー変換

◉ 吸光ナノ材料と発光ナノ材料の無損失結合

✓ 蛍光スペクトル



✓「ドロップレット」による**高収率のUV→可視光変換特性**を実証

[ref] N. Tate, et al., Opt. Exp. Vol. 22, Issue 9, pp. 10262-10269 (2014).

ナノフォトニックポリマー

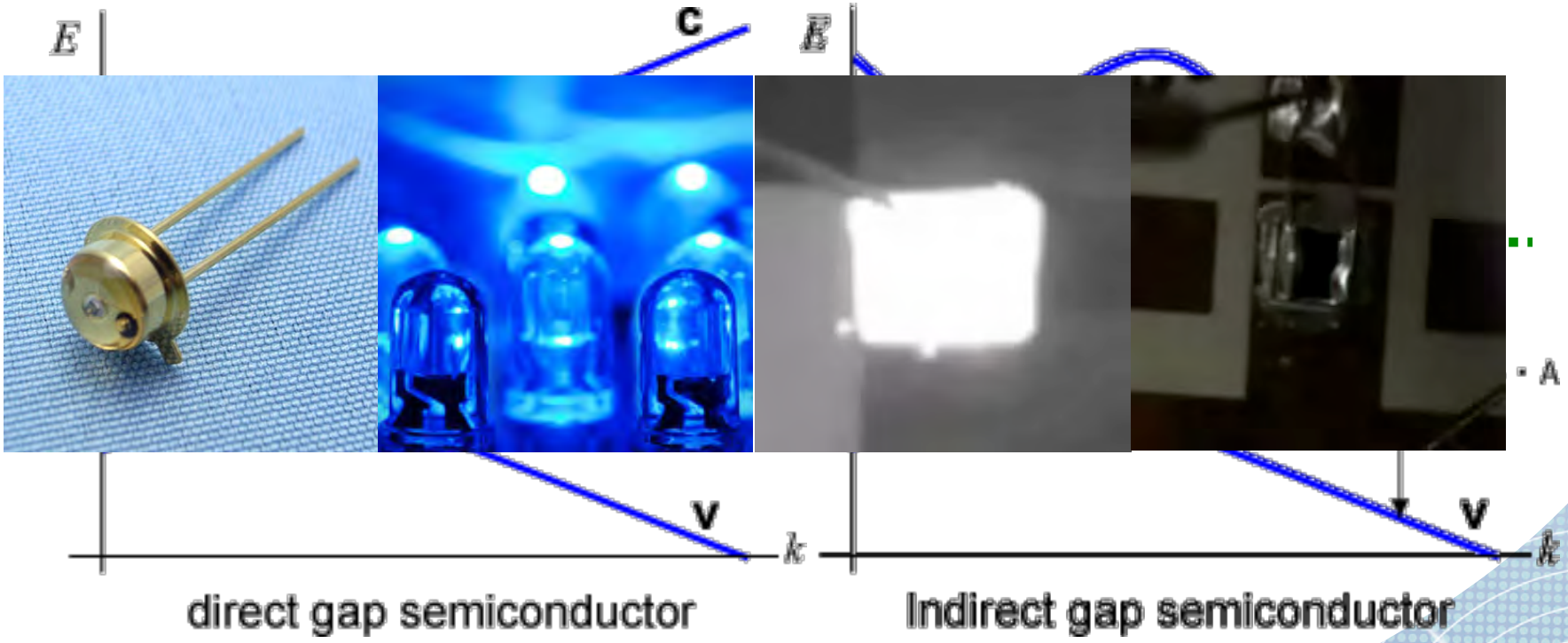
◉ 紫外光下



間接遷移型半導体LED

◉ フォノン準位を介した間接遷移型発光過程：

✓ 直接遷移型@GaAs等　　✓ 間接遷移型 or ワイドギャップ型

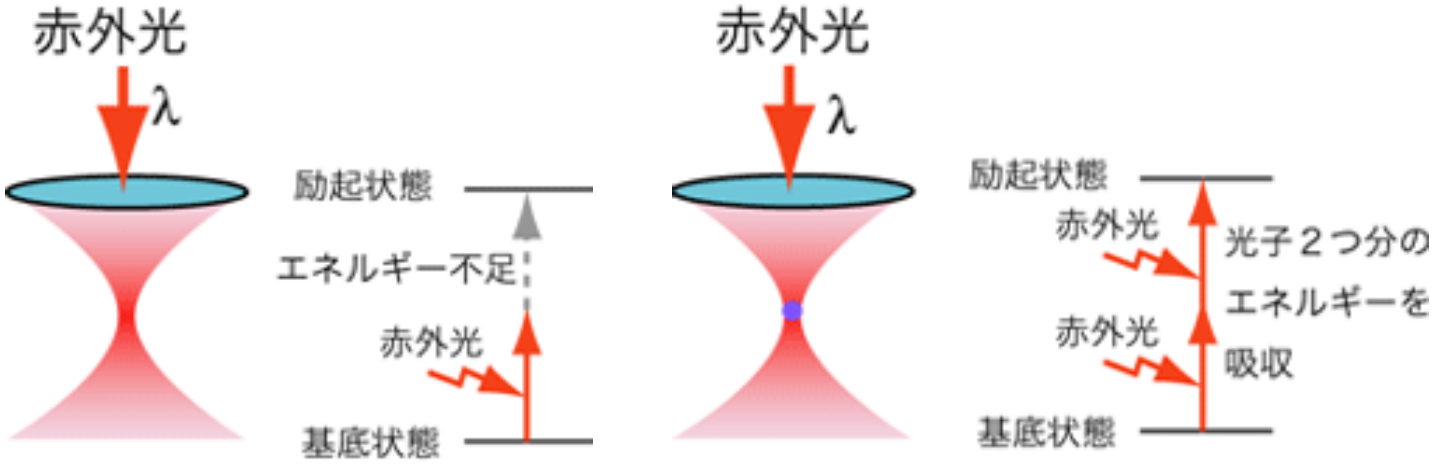


物質内部に**近接場光-物質間相互作用が発生しやすい構造**を形成

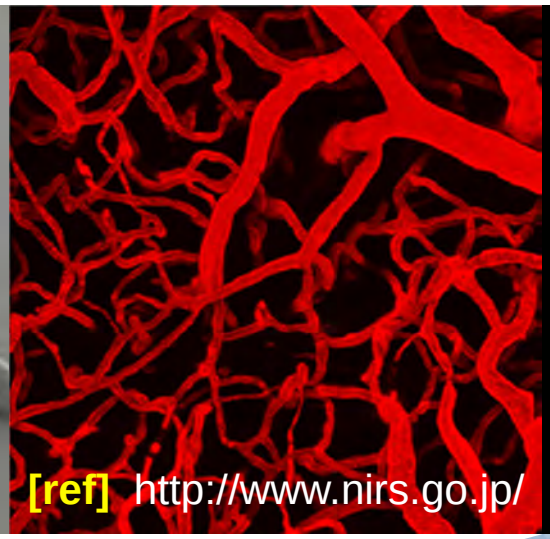
[ref] T. Kawazoe, et al., Appl. Phys. B, Vol. 104, No. 4, pp. 747-754 (2011).

【参考】二光子吸収

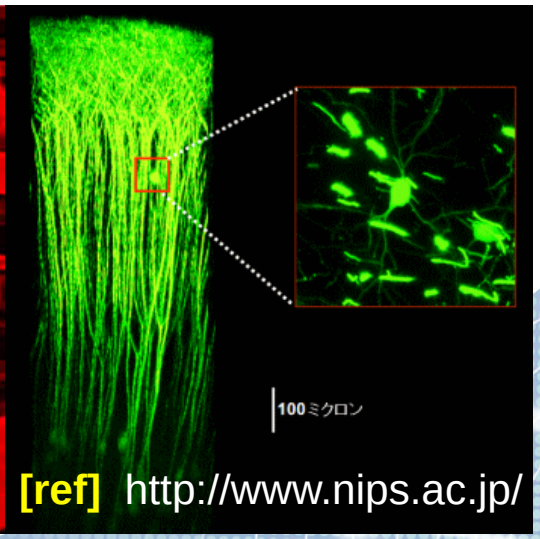
◉ 高光子密度下において発生する多段階光励起：







[ref] http://www.nirs.go.jp/



[ref] http://www.nips.ac.jp/

[ref] http://www.riken.jp/

◉ 背景

✓ ナノフォトニクス

✓ 「飛ばない光」近接場光の描像

✓ ナノ光-物質間相互作用の事例

◉ **表面電流駆動型磁気光学空間光変調デバイス**

✓ 磁気光学効果と酸化亜鉛（ZnO）

✓ 近接場光援用アニール

✓ 試作デバイスの構成とデモ実験

◉ ナノ光人工物メトリクス

✓ 光セキュリティと人工物メトリクス

✓ ナノ-マクロ階層型ホログラム

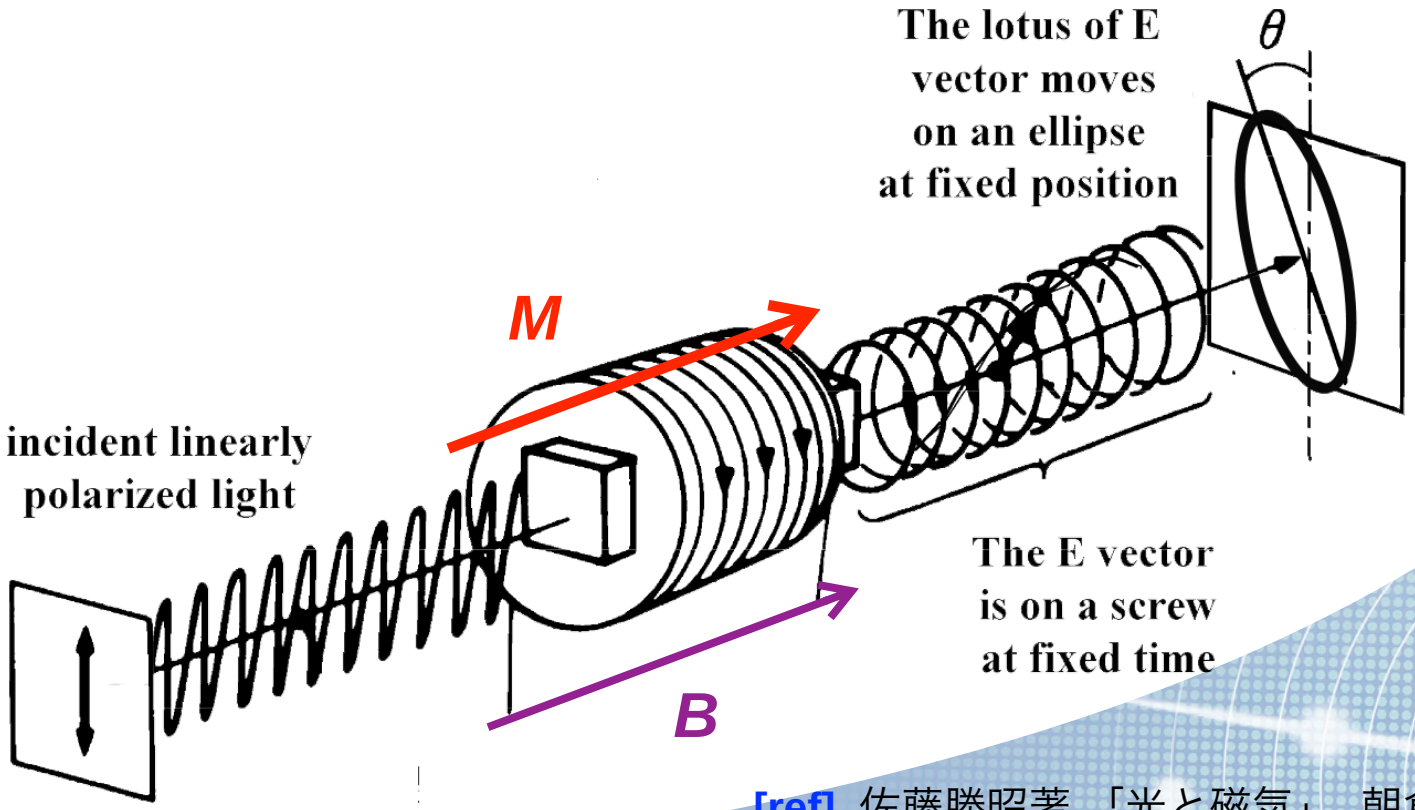
✓ ナノ光情報読み出しのための非走査型プローブ顕微鏡

◉ まとめ

磁気光学効果

◉ ファラデー効果／ファラデー回転

✓ 磁化をもつ物質の左右円偏光に対する屈折率差に基づき，例えば磁場印加下の物質（@ファラデー配置）に対して直線偏光が入射するとその出射光が楕円偏光になる



[ref] 佐藤勝昭著，「光と磁気」，朝倉書店

関連分野の動向

◉ 概要

✓ 磁気光学効果の最小要素はスピン編極であり，その応答速度は非常に早く（10^{-15}s以下），かつ空間分解能も高い

✓ **応用例**：光磁気記録，光アイソレータ，光変調器等



✓ **関連研究の動向**：ヴェルデ定数が高い磁気光学材料の開発（YIG，GGG，HgCdMnTe等），伝搬距離を稼ぐための素子加工（ファイバ化，ロッド化，チューブ化）等

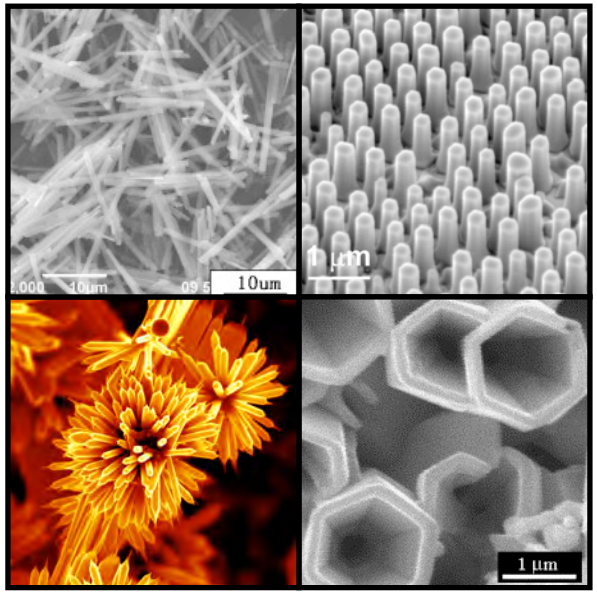
酸化亜鉛（ZnO: Zinc oxide）

◉ 基本特性



- ✓ 白色固体，高純度で透明
- ✓ **n型酸化物半導体**（Ebg＝3.37eV）
- ✓ 圧電性，無毒性，単体では**磁性なし**
- ✓ 平成23年度国内生産量＝66,000t

◉ 諸形態



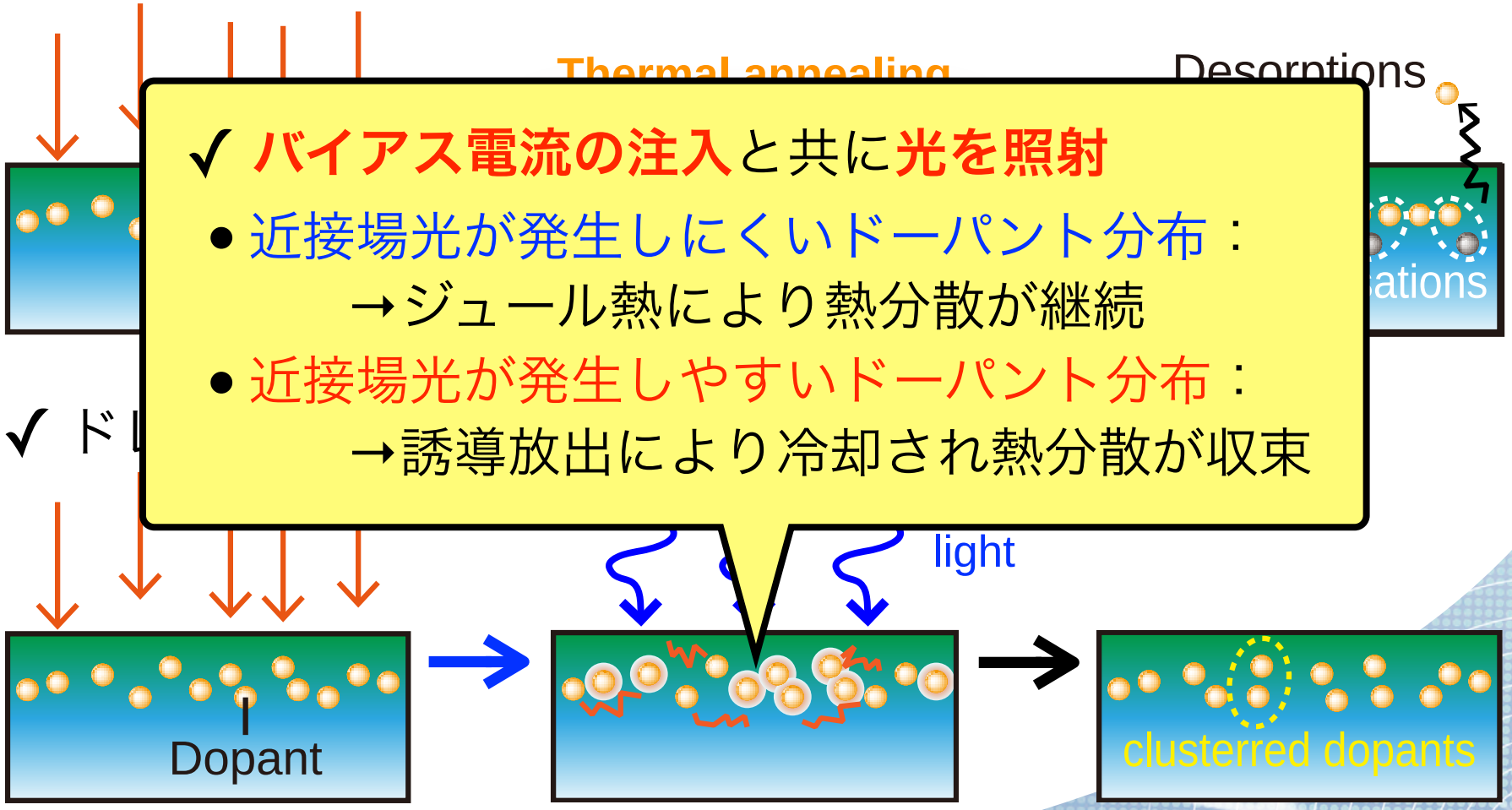
◉ 応用領域



ドレスト光子援用アニール

◉ アニール処理によるp-n接合の形成

✓ 熱アニール

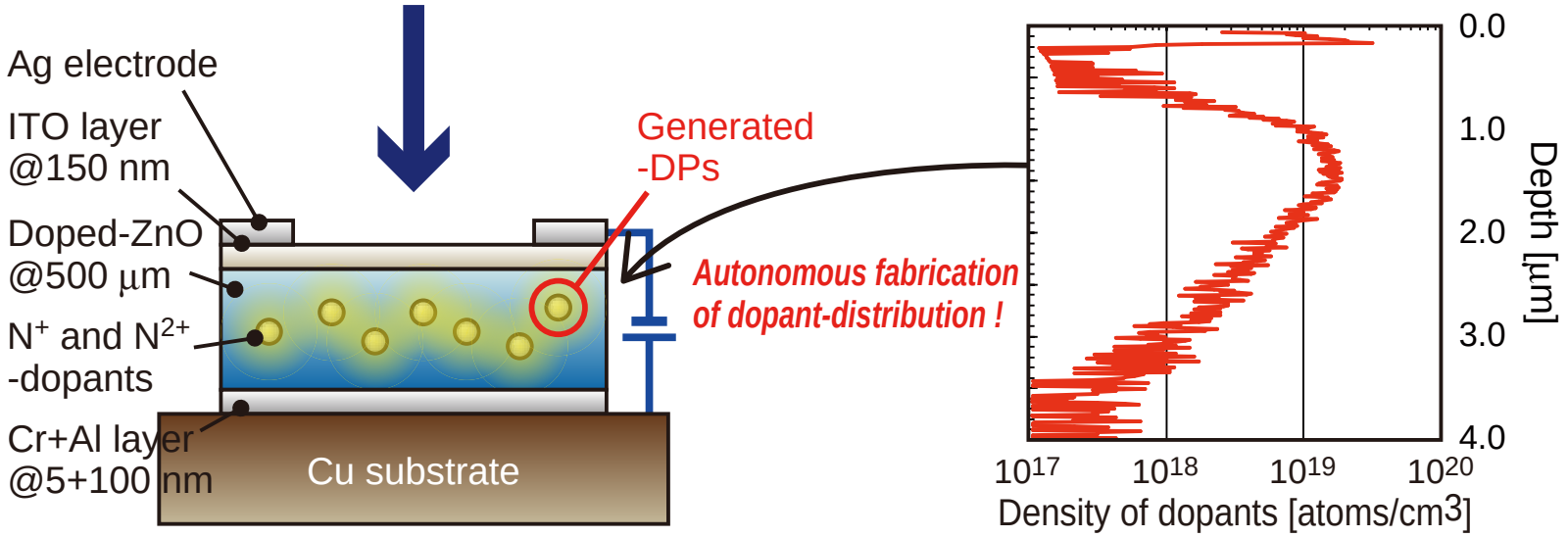


✓ ドレ

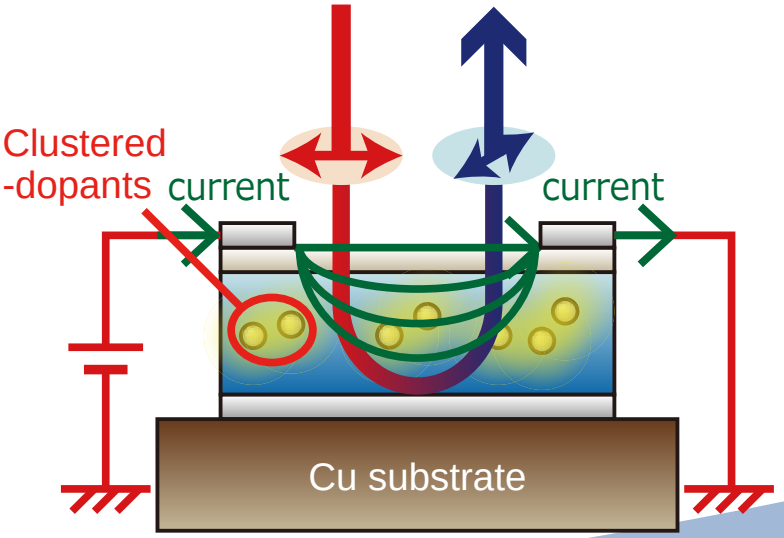
[ref] T. Kawazoe, et al., Appl. Phys. B, Vol. 104, No. 4, pp. 747-754 (2011).

ZnO-based 空間光変調器

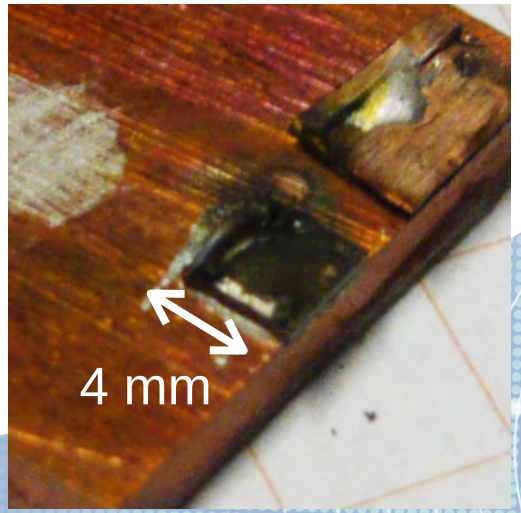
◉ アニール時の構成



◉ 活用時の構成



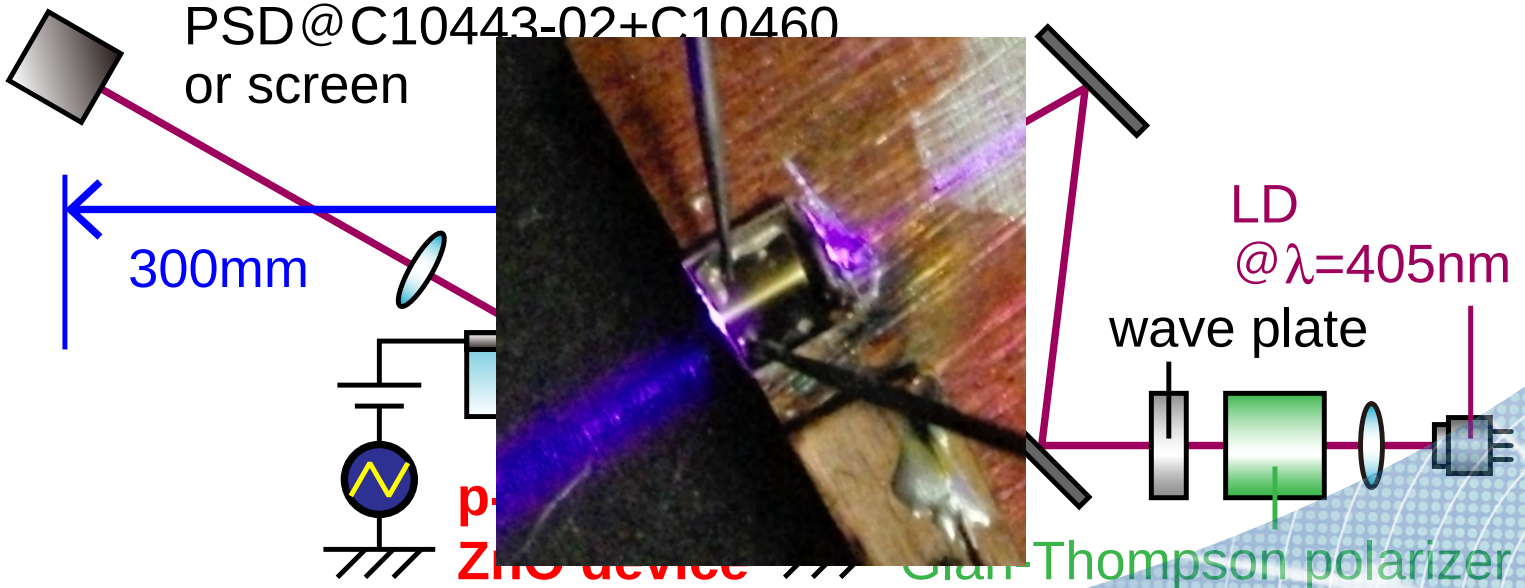
◉ 外観



偏向変調実験

◉ 実験系の概要

- ✓ **入力光**として，レーザー光を入射角2°以下で照射
- ✓ デバイスに印加する電圧と周波数は随時変調
- ✓ **出力光**は，光位置センサ（PSD）で検出もしくはスクリーンに投影し観察

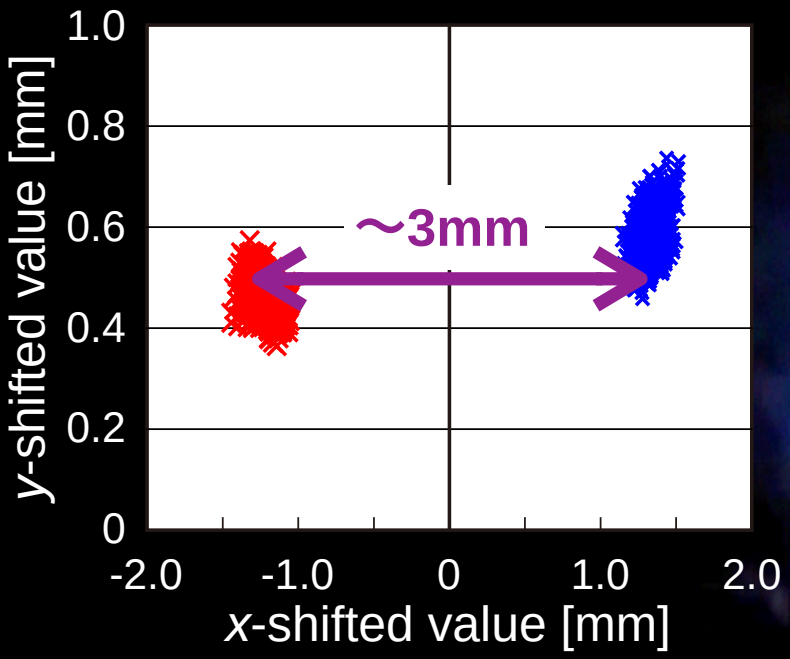


[ref] 竪直也ほか, 2014年春季 第61回応用物理学関係連合講演会，18p-F10-10 (2014).

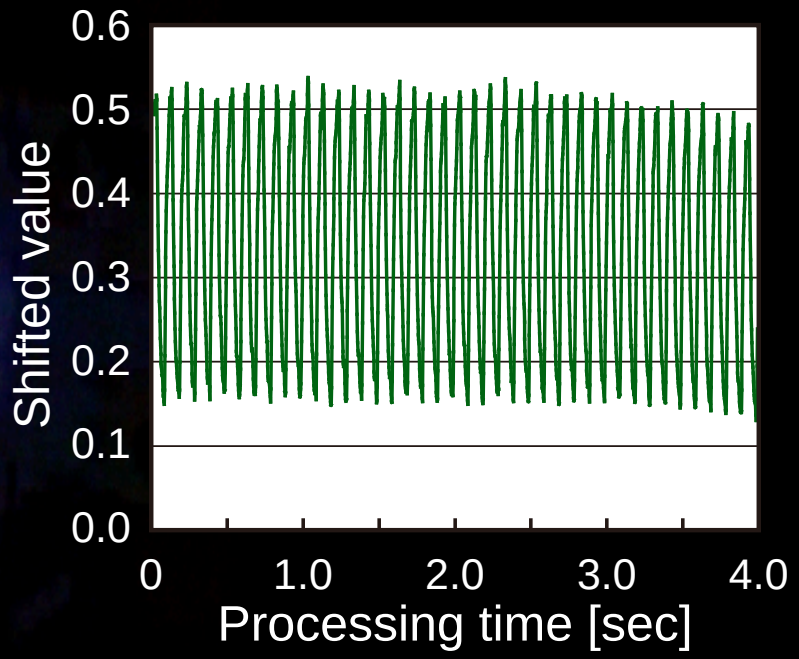
偏向変調特性

◉ 矩形波変調時@10V，1Hz

✓ 位置検出結果



✓ 繰り返し特性



✓ **屈折率変化に換算**して**0.4 ~ 0.6**に相当する変調特性を実証

✓ **参考**：0.05 ~ 0.06 by $BaTiO_3$ / 0.07 ~ 0.08 by $LiNbO_3$

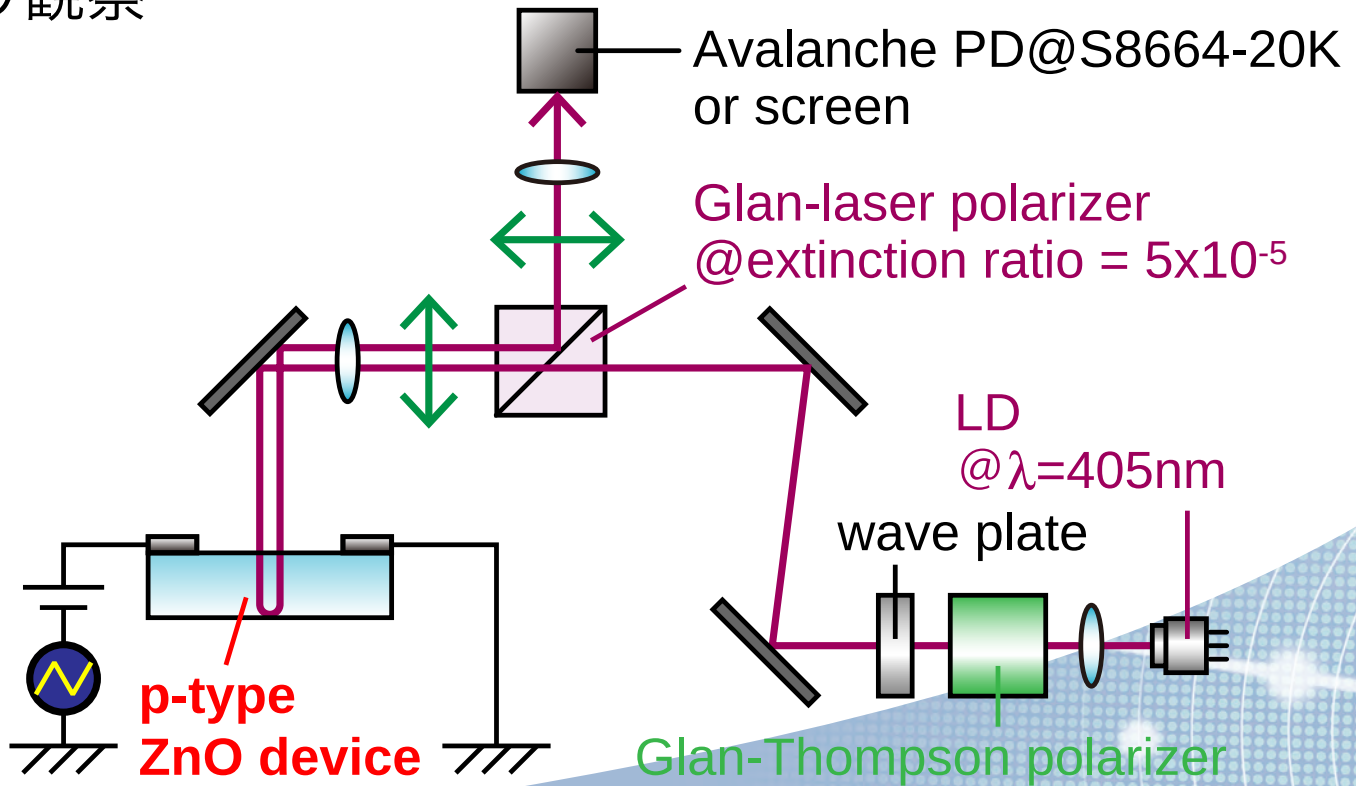
偏光変調実験

◉ 実験系の概要

✓ **入力光**として，レーザー光を垂直方向に照射

✓ デバイスに印加する電圧と周波数は随時変調

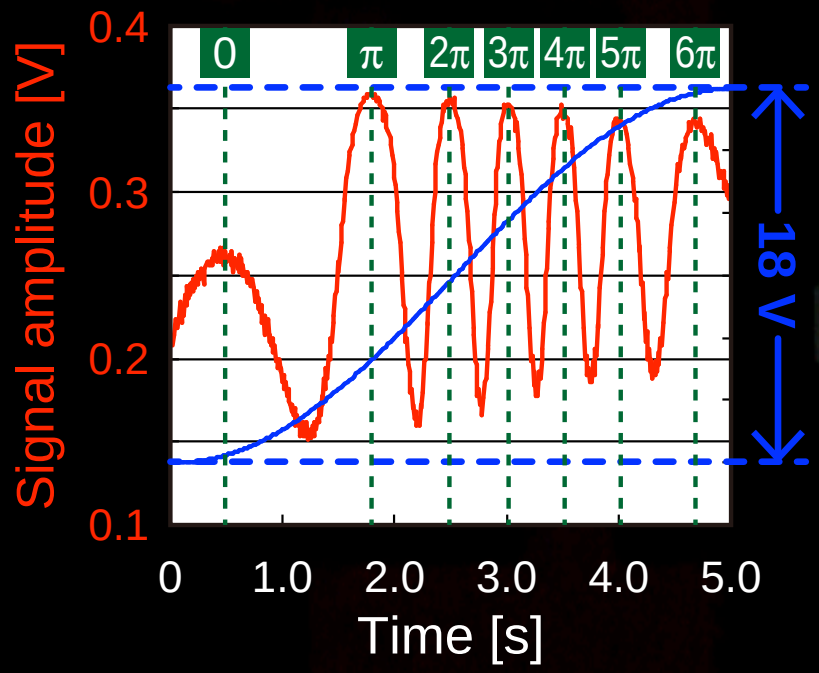
✓ **出力光**は，光検出器（APD）で検出もしくはスクリーンに投影し観察



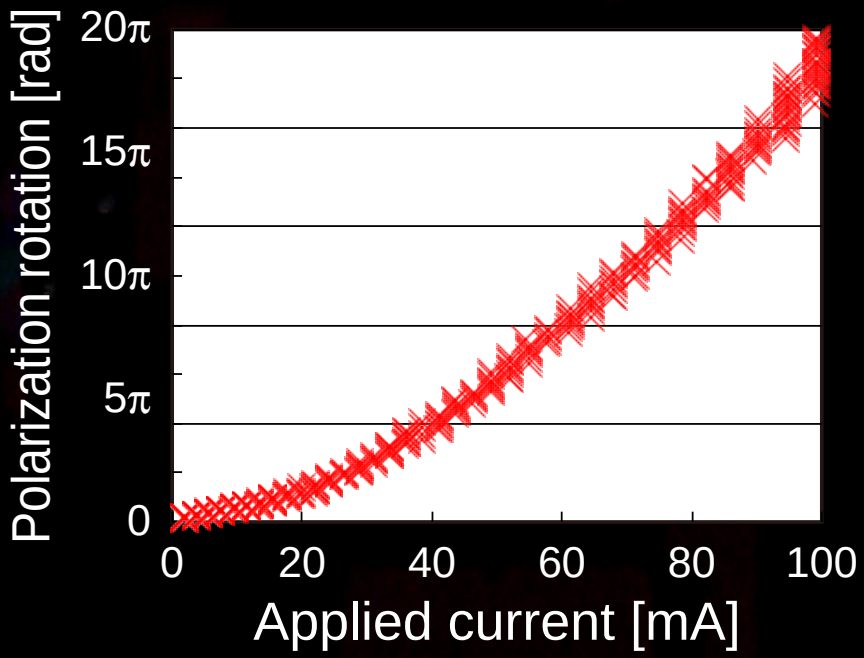
偏光変調特性

◉ 正弦波変調時@10V, 100 mHz

✓ 偏光光強度の変化



✓ 印加電流量依存性



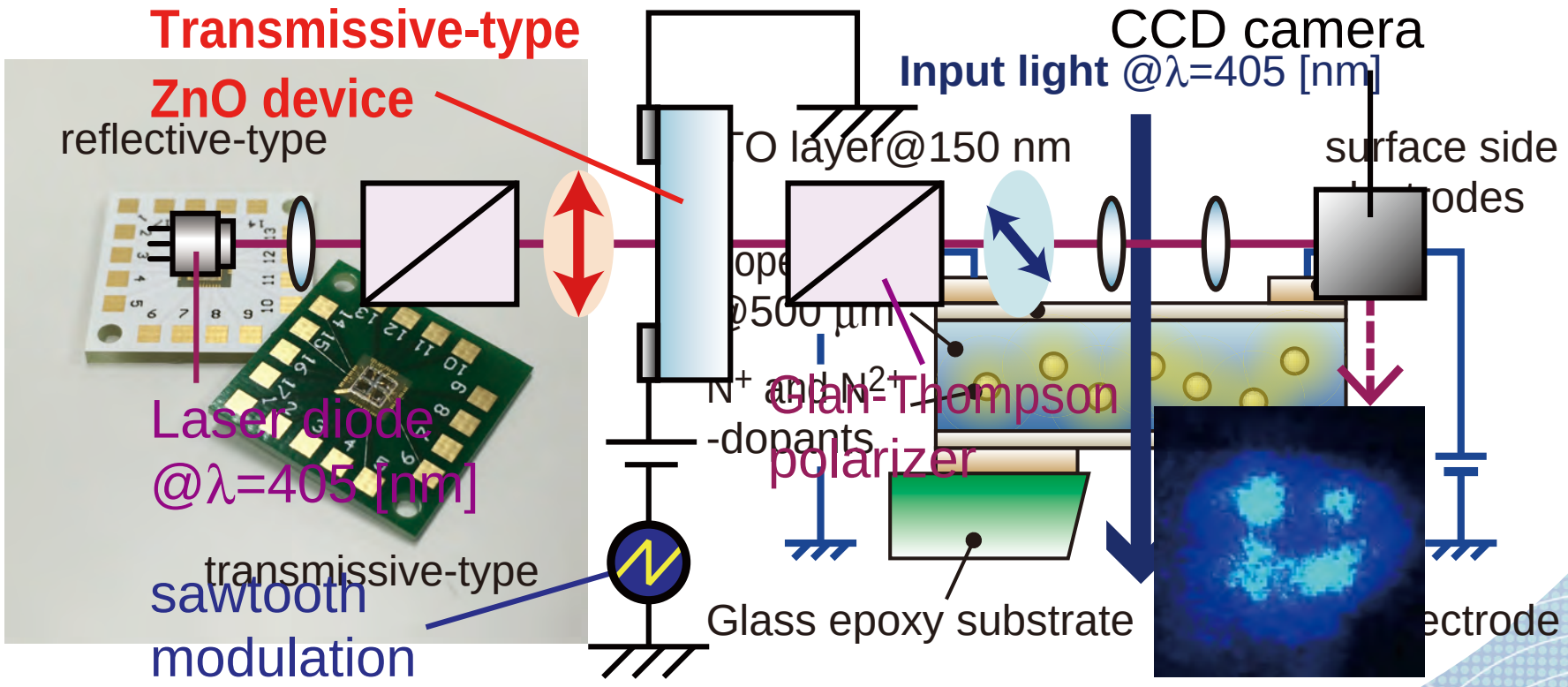
✓ **18V印加下で1,080°（＝180°x6）もの偏光回転量を実現**

✓ 通常の物質内光伝搬においては**数μm程度の伝搬距離**かつ**外部磁場源なし**に，これほどの変調効果は絶対に得られない

[ref] N. Tate, et al., Scientific Reports, in press (2015).

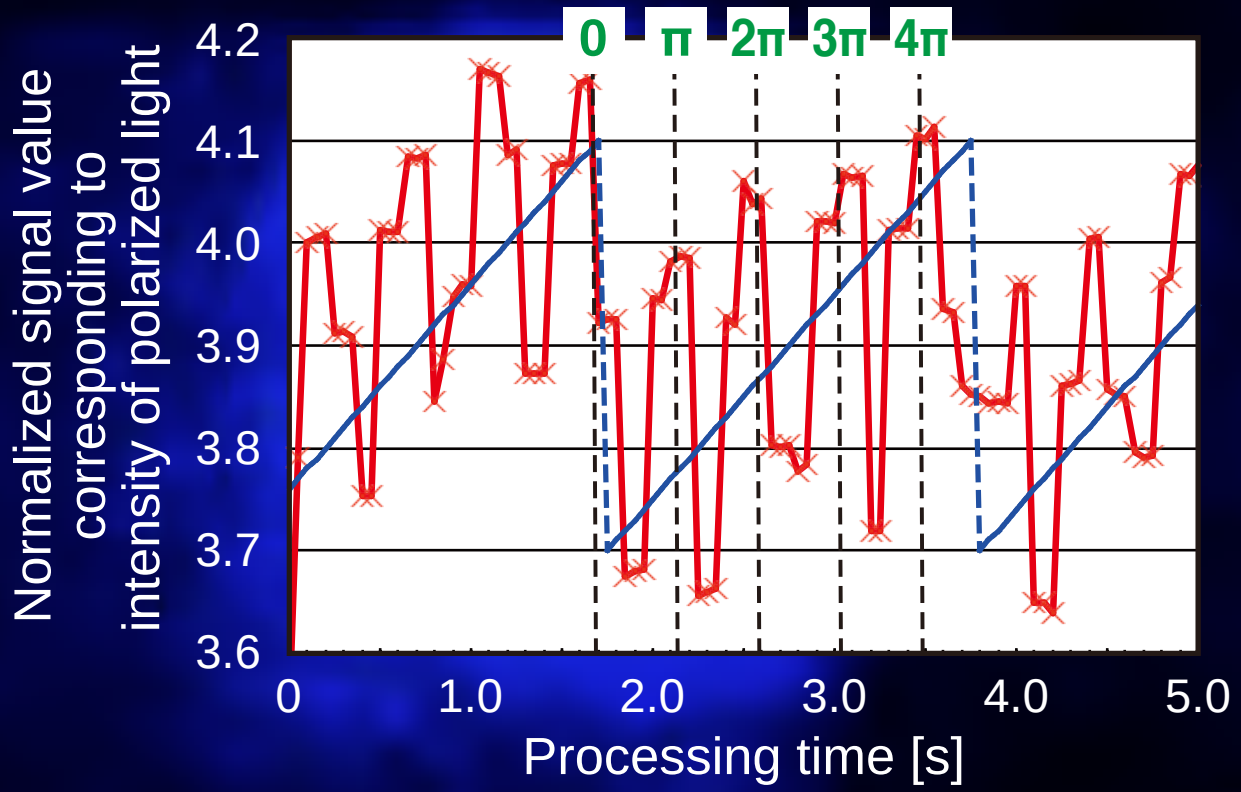
透過型デバイスの試作

◉ 偏光変調実験



偏光変調特性

◉ 鋸波変調時@1 Hz／±5 V



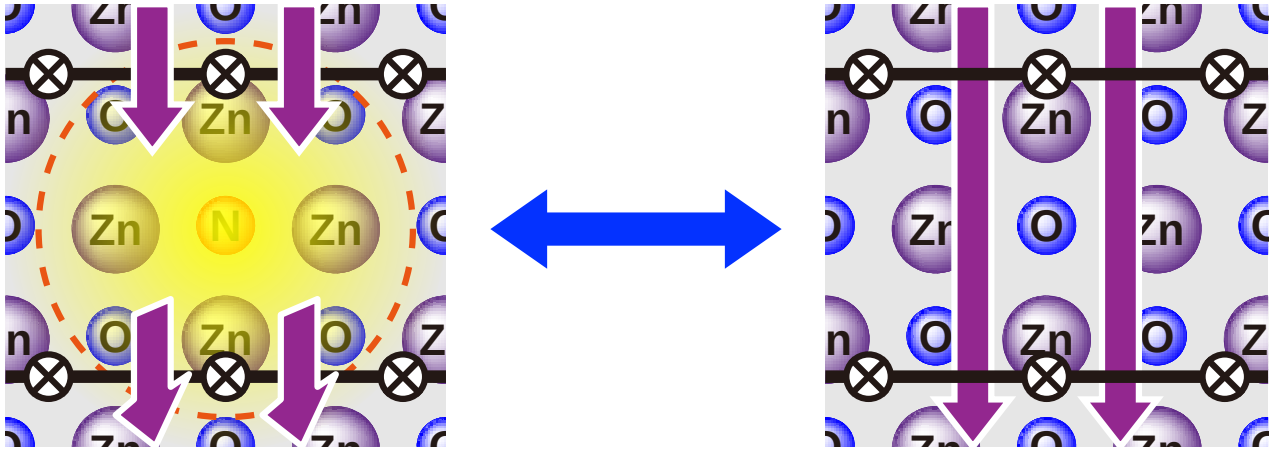
✓ **明快な偏光光強度の変調を確認**

✓ 偏光変調においては素子間クロストークは確認されず

「電流光学効果」の実態

◉ 電流印加に伴う磁場-物質-光間相互作用

✓ 巨大な変調効果／外部磁場源なし／光伝搬距離極小 etc.



光---近接場光---物質---磁場　光----------物質---磁場

✓ 光伝搬の過程においてドーパント近傍で**近接場光状態**に変換

→**近接場光状態**下で電流由来の磁場との相互作用を誘起

→放射後，別のドーパント近傍にて同様の効果を反復的に享受

→結果として，最終的に大規模な光変調効果を体現して出力

◉ 背景

✓ ナノフォトニクス

✓ 「飛ばない光」近接場光の描像

✓ ナノ光-物質間相互作用の事例

◉ 表面電流駆動型磁気光学空間光変調デバイス

✓ 磁気光学効果と酸化亜鉛（ZnO）

✓ 近接場光援用アニール

✓ 試作デバイスの構成とデモ実験

◉ **ナノ光人工物メトリクス**

✓ 光セキュリティと人工物メトリクス

✓ ナノ-マクロ階層型ホログラム

✓ ナノ光情報読み出しのための非走査型プローブ顕微鏡

◉ まとめ

光セキュリティ

◉ 市場の要求

- ✓ 偽造防止
- ✓ 模倣品対策
- ✓ ブランド保護
- ✓ 個別認証
- ✓ トレーサビリティ等



◉ オバート性とコバート性



単純 ⟷ 複雑

低レベル　高レベル



うたぼて 肉眼で直接判別が可能

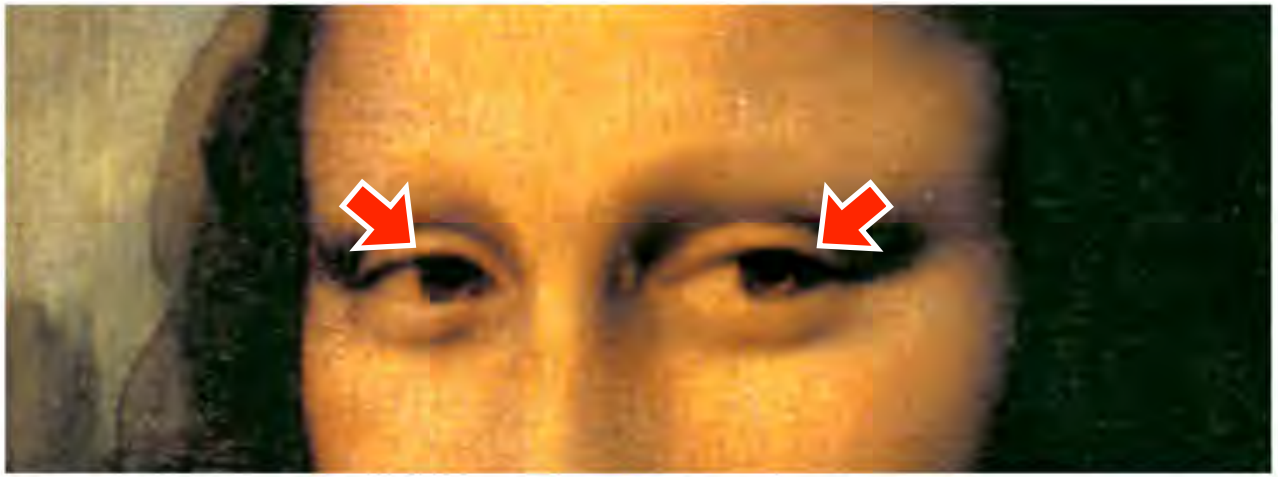
器具・装置を用いて判別が可能

ダ・ヴィンチ・コード

DiscoveryNews.

Do Mona Lisa's Eyes Hide a Secret Code?

By Rossella Lorenzi | Mon Dec 13, 2010 05:17 PM ET



Hidden behind the Mona Lisa's eyes is a mysterious code made of letters and numbers, according to a controversial claim by members of Italy's national committee for cultural heritage.

Magnifying high-resolution images of the world's most famous painting would reveal hidden letters and numbers added by Leonardo Da Vinci, said Silvano Vinceti, president of the Committee.



WATCH VIDEO: The woman behind one of the world's most famous paintings was born in a humble house in Florence.

"To the naked eye, the symbols are hard to distinguish, but with a magnifying glass you can see the letters LV behind the right pupil (the left when watching the painting). They could stand for his name Leonardo Da Vinci," Vinceti told the Italian news agency ANSA.

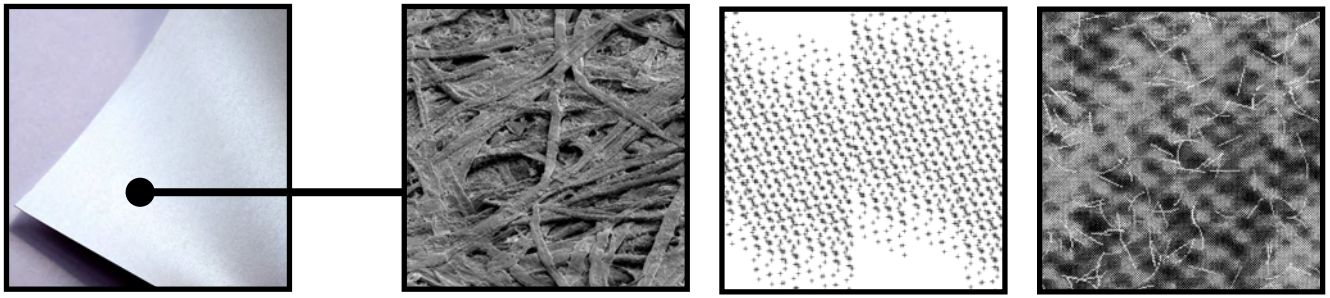
Even harder to decode would be the symbols in the left pupil (the right when watching the painting).

人工物メトリクス

◉ 定義

✓ 人工物に固有の**「特徴」**を用いて，当該人工物の真贋を認証

✓ **「特徴」**…光学特性，磁気特性，電気特性等



◉ 要件

✓ **個別性**...各個体の「特徴」が互いに十分異なっている

✓ **読取安定性**…「特徴」の登録後に再度同等の情報を読み取れる

✓ **耐久性**…「特徴」が外的要因による変化・劣化に影響されない

✓ **耐クローン性**…偽物を複製することが極めて困難である

うたぼて

[ref] 松本勉ほか，「金融業務と人工物メトリクス」，金融研究，Vol. 23，No. 2, pp. 169-186 (2004).

【参考】バイオメトリクス

◉ 定義

✓ 生体に固有の**「特徴」**を当該個人の本人認証に利用

✓ **「特徴」**…先天的あるいは後天的に得た身体的・行動的特徴



◉ 実情

✓ 身体的特徴（顔・指紋等）は，一般の生活において他人に知られないように秘匿することが困難

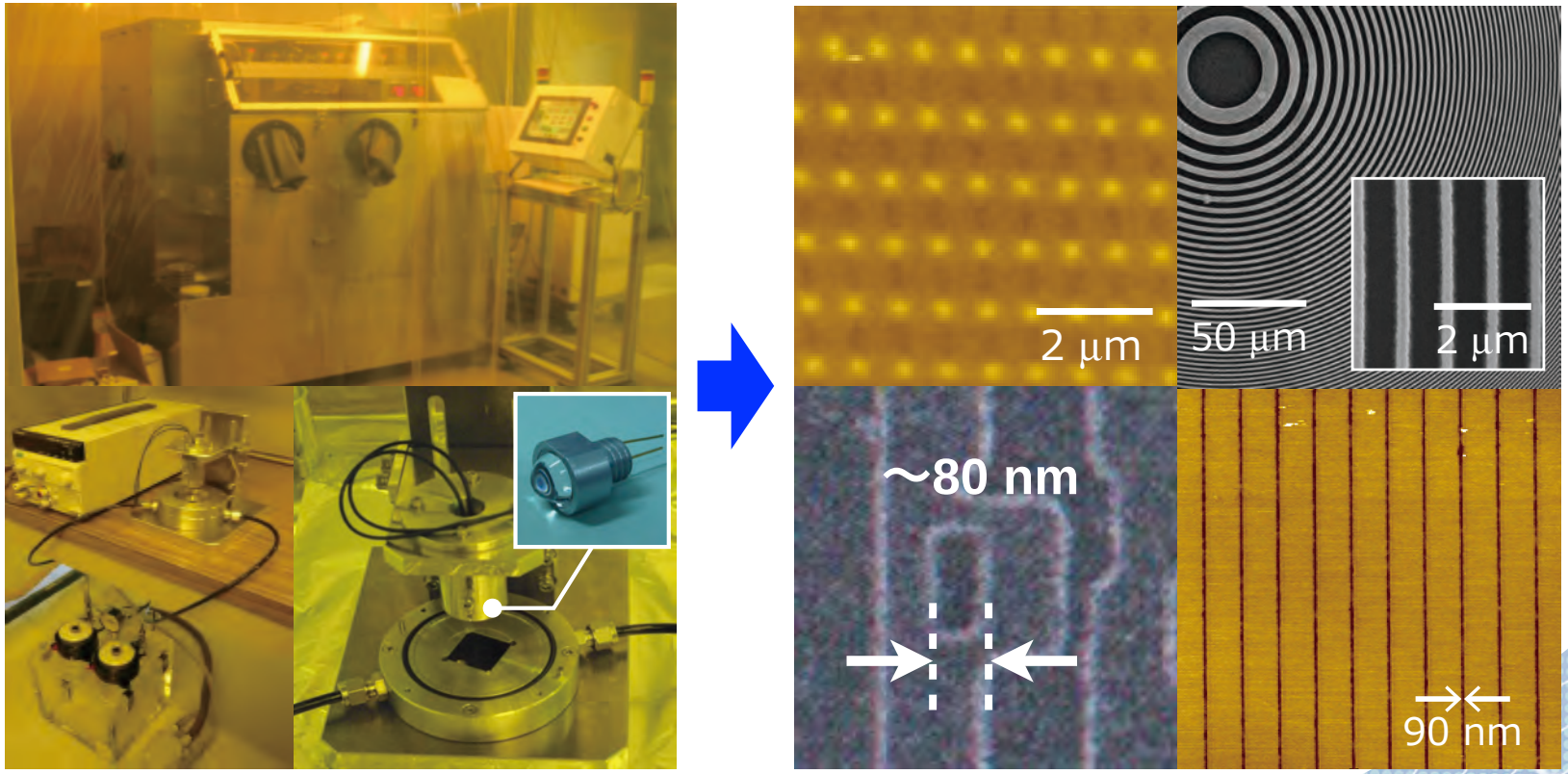
✓ 行動的特徴（声紋・筆跡等）は，模倣により他人になりすますことができる可能性あり

[ref] 宇根正志ほか，「偽造防止技術のなかの人工物メトリクス」，金融研究，Vol. 28，No. 2, pp. 143-182 (2009).

複製不可能な「デバイス」の開発

◉ 微細加工技術の「盲点」

✓ 高度な加工技術に基づく超微細構造は**技術的に「複製困難」**



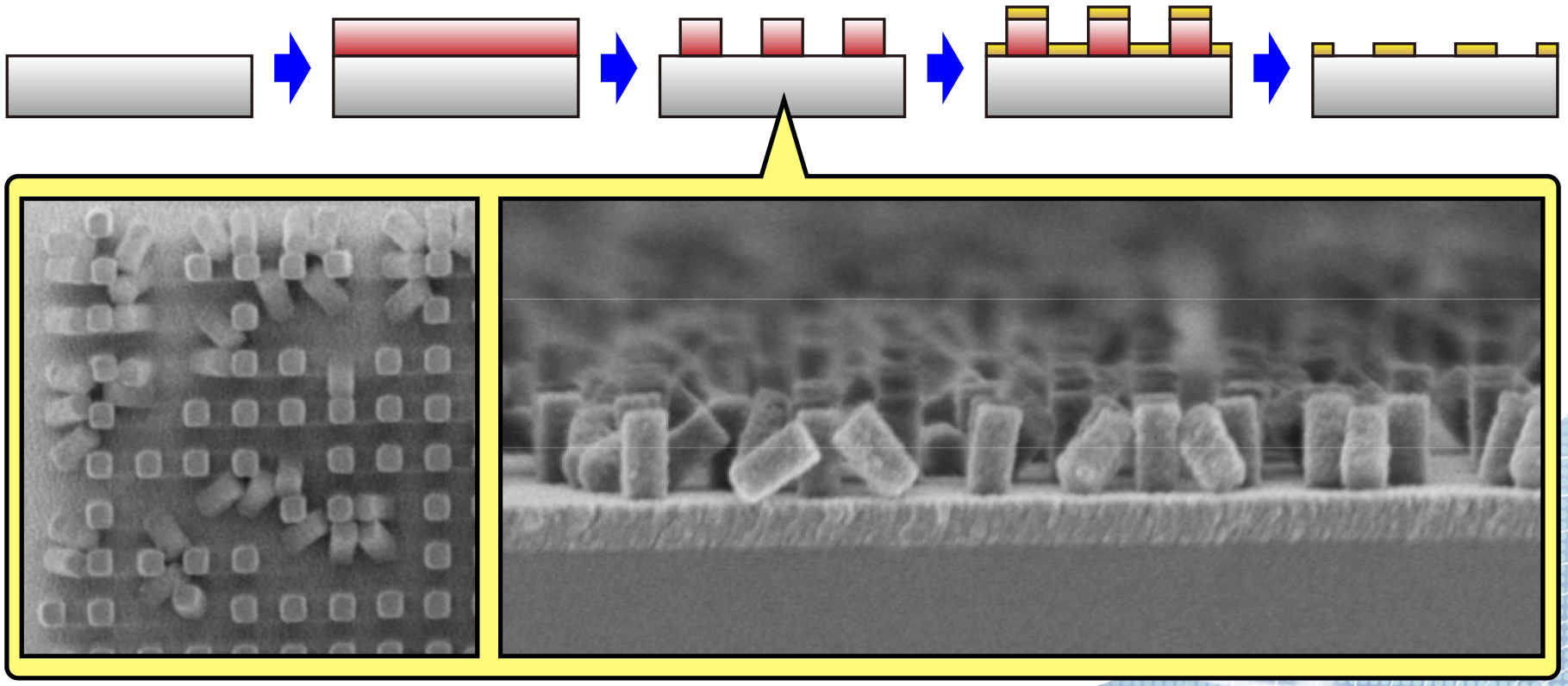
→ **「作れる」ということは，攻撃者が「偽造できる」ということ！**

うたぼて

制御されたランダムネス

◉ レジスト倒壊現象を利用したランダムナノ構造

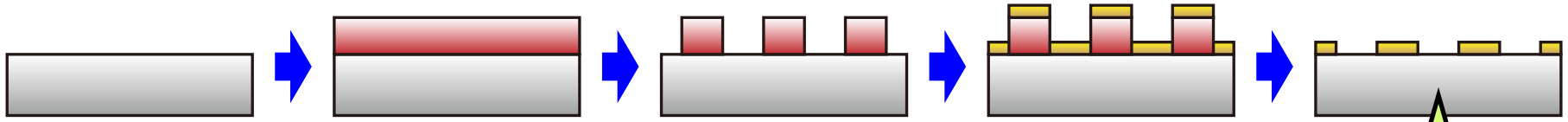
✓ リソグラフィプロセスの過程において，**自然倒壊した格子状レジストパターン**をもとに**ナノ構造**を加工



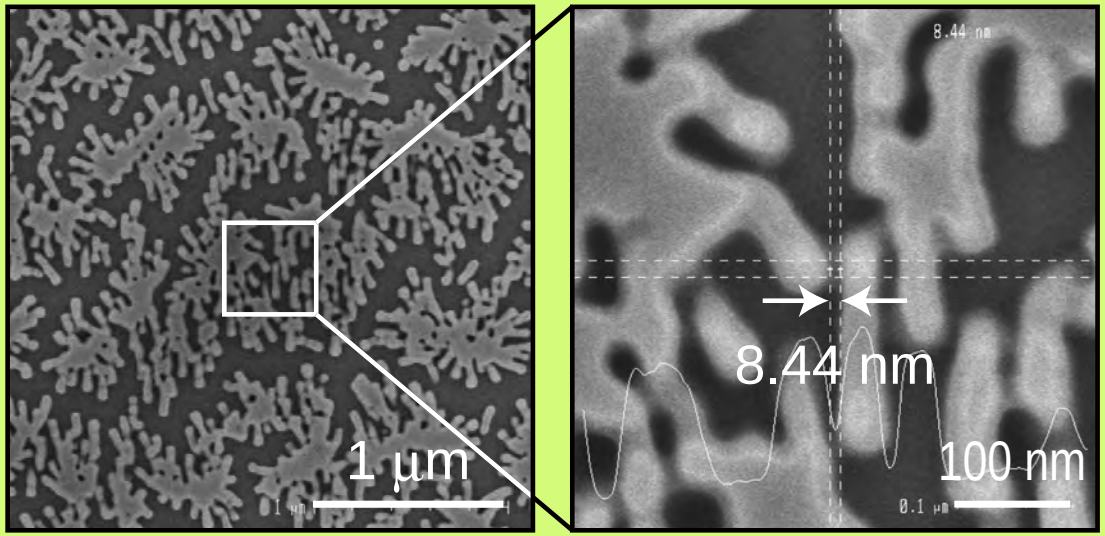
ランダムネスに基づく超解像性

◉ ランダムナノ構造が示す超解像性

✓ **「複製不可能性」が原理的に保証**され，なおかつ制御パラメータの調整により**その特徴は多様に制御可能**



→ 原理的な**「複製不可能性」**と共に，リソグラフィ本来の加工精度（～15 nm）を上回る**「超解像性」**を実現することに成功！



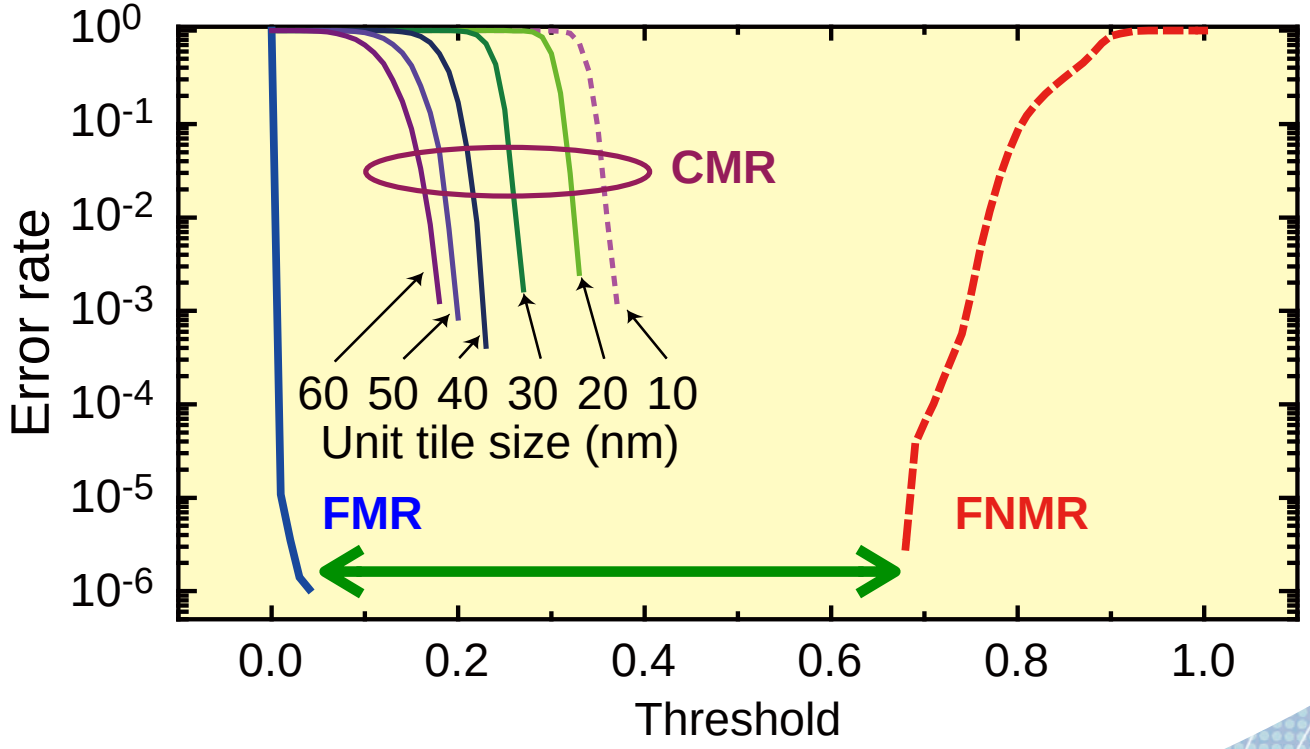
[ref] T. Matsumoto, et. al., Scientific Reports, Vol. 4, 6142, pp. 1-5 (2014).

認証精度の定量評価

◉ ランダムナノ構造が示す高度なセキュリティ性能

✓ **FMR** ＝ **異なるパターン**を照合して**一致と判定**される確率

✓ **FNMR** ＝ **同一パターン**を照合して**不一致と判定**される確率



→ セキュリティデバイスとして**圧倒的な結果**を得ることに成功！

[ref] T. Matsumoto, et. al., Scientific Reports, Vol. 4, 6142, pp. 1-5 (2014).

ナノ-マクロ階層型ホログラム

◉ 機能原理

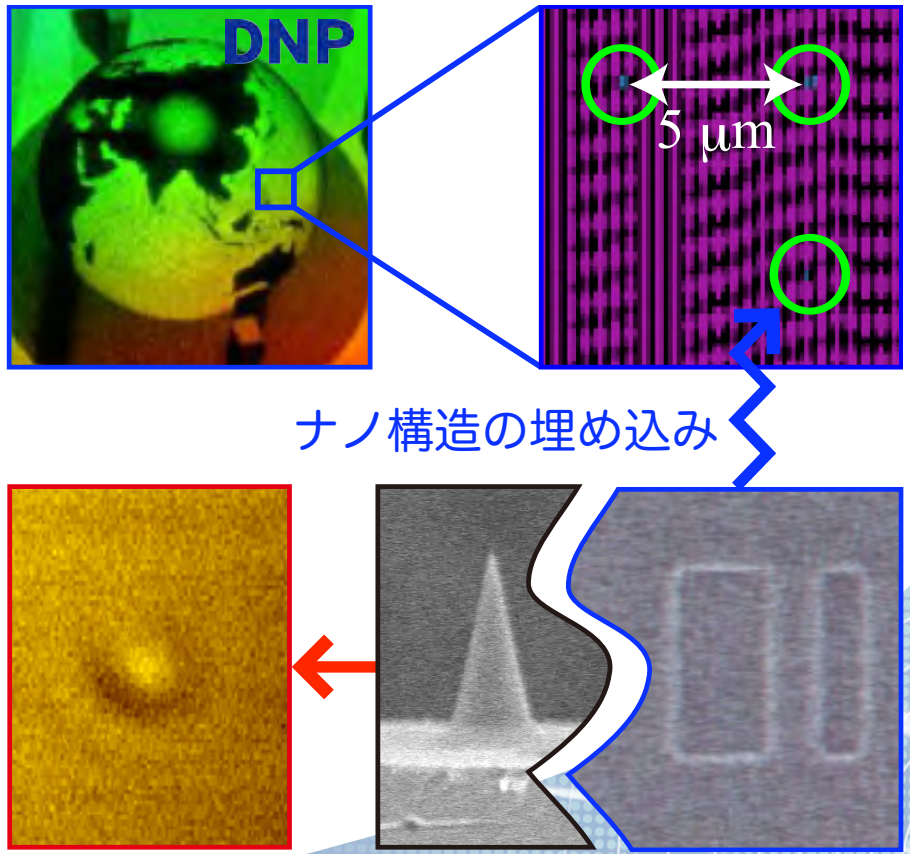
✓ 既存の**ホログラム**構造中に，所定のナノ構造を埋め込み，
近接場光由来の光信号を**コバート情報**として符号化

伝播光に基づく
ホログラム像

オバート性

コバート性

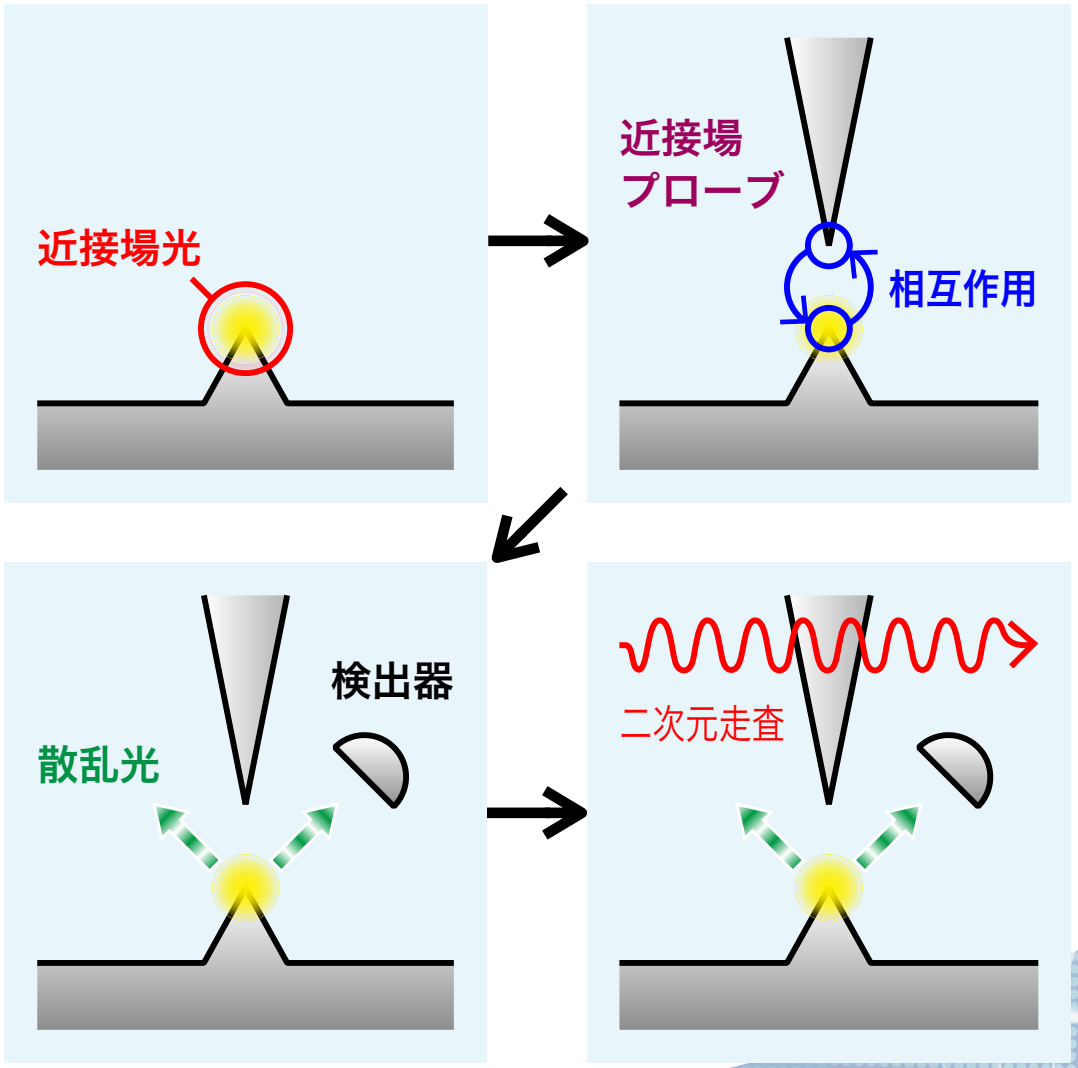
近接場光に基づく
ナノフォトニックコード



[ref] N. Tate, et. al., Opt. Exp. Vol. 16, Issue 2, pp. 607-612 (2008).

近接場光の検出方法

◉ 走査型近接場光学顕微鏡（SNOM）

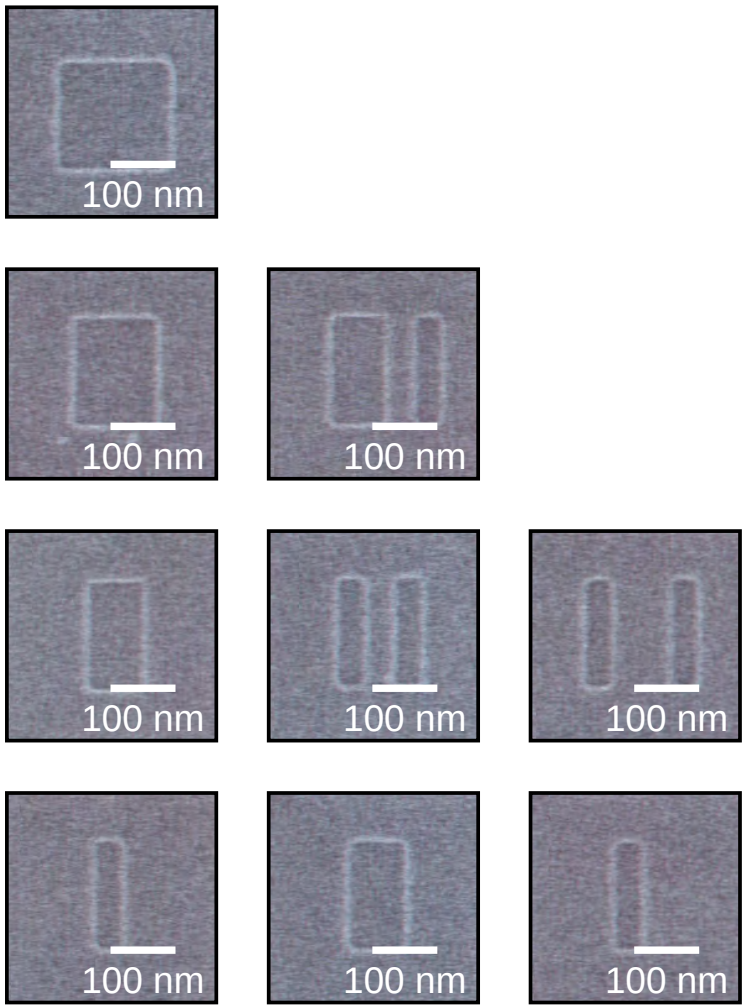


[ref] 竪直也，光学，第40巻，第5号，pp. 245-246 (2011).

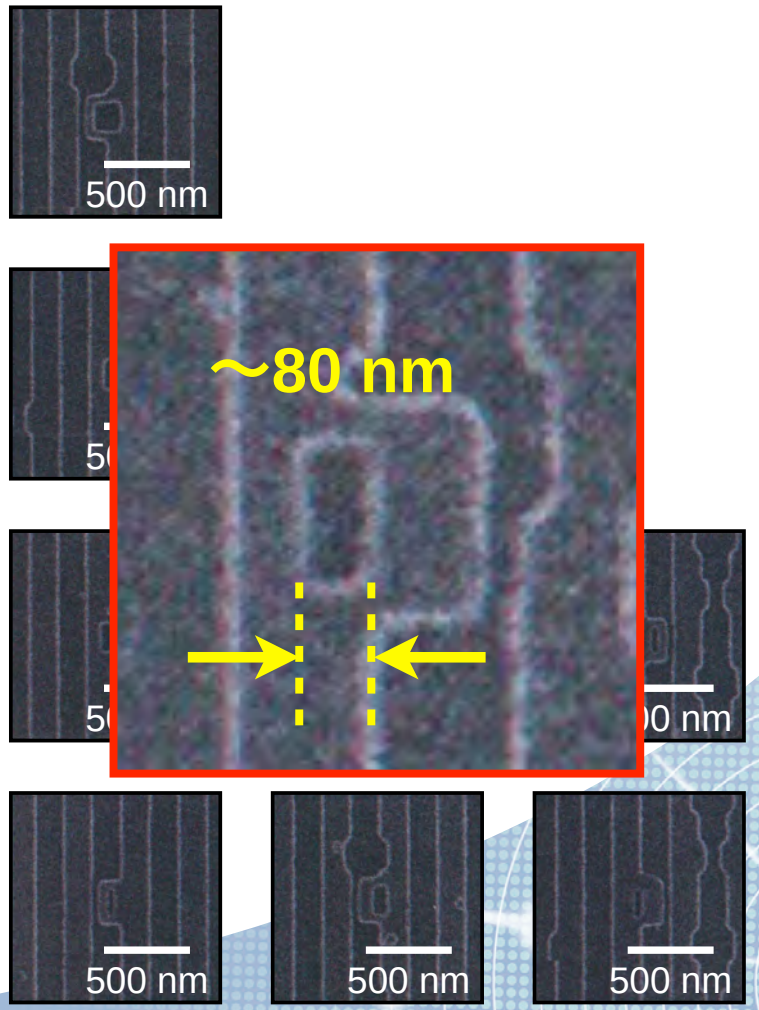
ナノ構造の埋め込み

◉ ホログラム内外への埋め込み

✓ ホログラム外



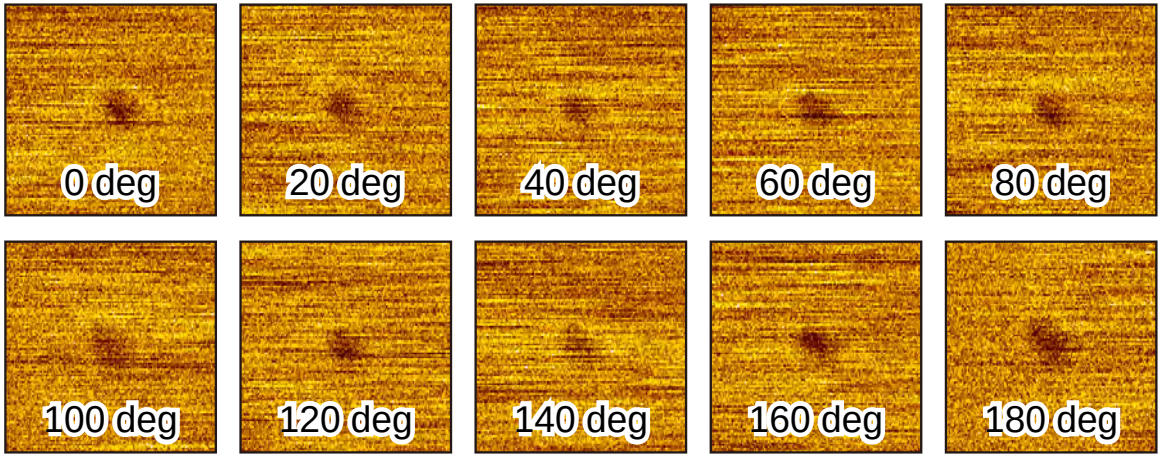
✓ ホログラム内



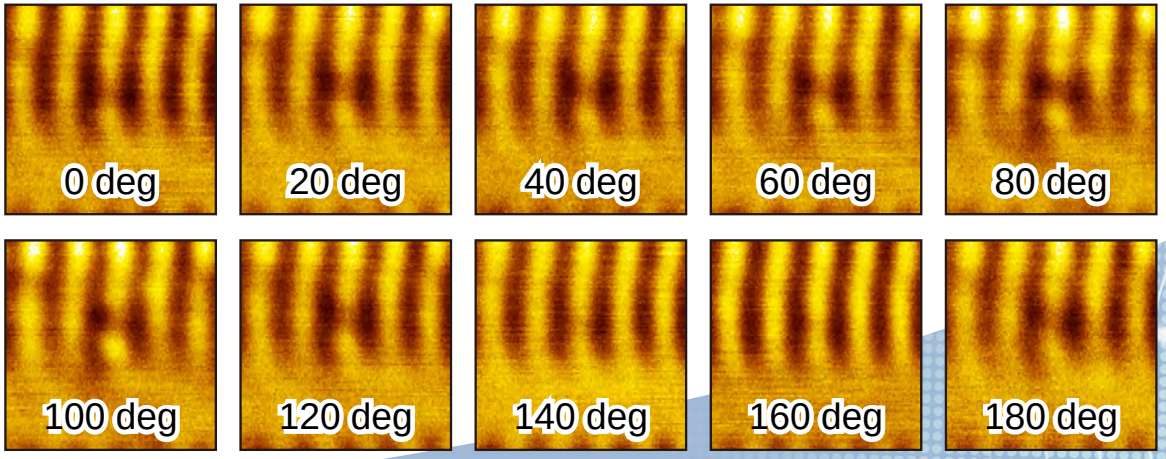
ナノフォトニックコードの特異性

◉ 偏光依存性の検証

✓ ホログラム外ナノ構造の偏光依存性



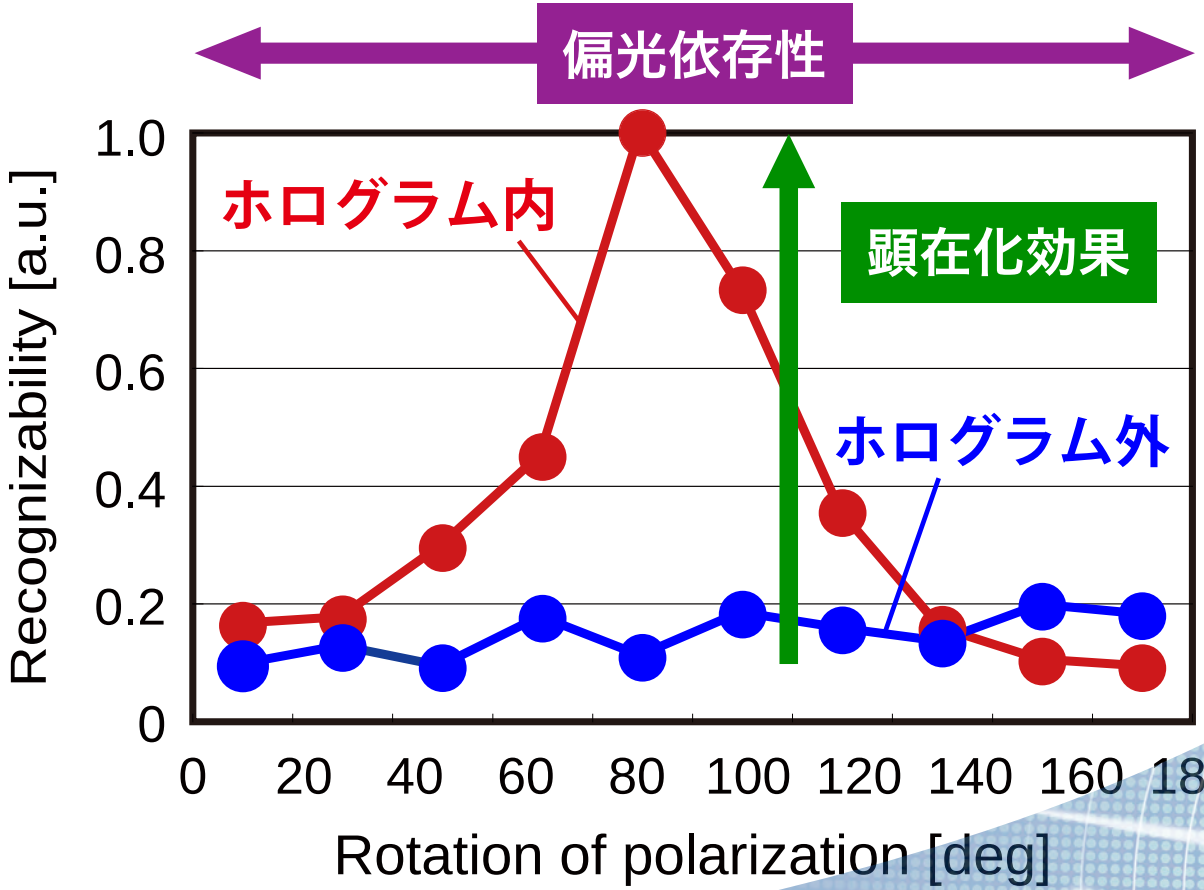
✓ ホログラム内ナノ構造の偏光依存性



応答特性の定量評価

◉ 信号顕在度（Recognizability）による評価

✓ 周辺と比較して**ナノフォトニックコード**が示す信号強度がどの程度際立っているかを評価



[ref] N. Tate, et. al., Opt. Exp. Vol. 18, Issue 7, pp. 7497-7505 (2010).

世間の反響等

東大と大日本印刷、ナノフォトニック階層型ホログラムを開発

東京大学と大日本印刷は、ホログラムの立体画像を損なうことなく、新たな情報を付加することができる「ナノフォトニック階層型ホログラム」の作製に成功した。2009年9月に開催された応用物理学関係連合講演会で発表された。

一般的なホログラムは、光の波長程度の寸法の表面凹凸構造に起因する回折像に基づいて記録した立体画像を再生するものであり、光の回折限界以下の寸法をもつナノ構造は原則として立体画像の見た目に影響を与えない。同時に、ナノ構造の表面付近には近接場光と呼ばれる微小な光が存在している。

ナノフォトニック階層的ホログラムは、ホログラムパタンの内部に、特定の近接場光を発生するナノ構造を微細加工したもので、ホログラムの立体画像に対して干渉しない近接場光の読取りを可能としている。したがって、ホログラムの見た目を損なうことなく、付加的な情報や機能を追加することができる。すなわち、ホログラムの立体画像の情報を「伝搬光レイヤ」、近接場光で得られる情報を「近接場光レイヤ」として、同一のホログラムで独立した2階層の情報レイヤを取扱うことができる。

今回開発したナノフォトニック階層的ホログラムは、3次元のコンピュータグラフィックスにより作製されるホログラム「バーチャグラム」の内部に、要素構造の最小寸法が50nmのビット構造によるナノ構造を埋め込んだものとなっている。近接場光レイヤの情報は、ホログラム内に組込んだナノ構造と読取り装置の相互作用によって与えられる。実験では、近接場光ファイバプローブによって近接場光レイヤの情報読出しに成功した。

東京大学と大日本印刷は、近接場光の性質をより顕著に発現させるためのナノ形状の最適化や近接場光レイヤの読出し方式について検討をさらに進めることにより、セキュリティ性や機能性を一層高めた新しい情報物理セキュリティなどに向けてさらなる展開を進めるとしている。

VIEW FROM... JSAP AUTUMN MEETING

Spotlight on Japanese science

Visual encryption, manipulation of terahertz waves and the improved surface-treatment of GaN crystals were all topics of discussion at this year's JSAP meeting in Toyama, Japan.

Noriaki Horiuchi

At the beginning of autumn every year, a different local town or city in Japan finds itself overrun with thousands of scientists. The reason for this surge in visitors is the annual autumn gathering of the Japan Society of Applied Physics (JSAP), a 4-day event during which public transportation becomes jam-packed and izakaya (Japanese-style bars) are noisy with discussions about the latest science well into the night. This year, the autumn JSAP meeting was held from 8–11 September in Toyama, a small city located about 200 km north of Nagoya.

The autumn JSAP meeting is one of the largest physical sciences conferences in Japan and attracts approximately 6,000 researchers — smaller only than the organization's spring meeting in Tokyo, which has more than 10,000 attendees. The JSAP meetings are extremely broad and cover many aspects of applied physics, spanning from optics, magnetics and semiconductors to organic molecules and amorphous materials, among many others. In total, there are 17 sessions running in parallel on most days. It's not an story to hear exciting, important ented at these JSAP meetings are published in top-quality h as *Nature*.



OLIVER GRAYDON

The University of Toyama hosted this year's JSAP autumn meeting.

One unique aspect of the JSAP meetings is the punctuality of their schedules, with the sessions often timed precisely to the nearest minute. This allows attendees to conveniently switch between sessions and learn about fields outside their own expertise.

Photonics has a high profile at the JSAP meetings, with discussions on optical materials, devices, measurements and information, and fundamental and quantum optics. In recent years, presentations relevant to energy conservation and the environment have attracted a lot of attention. For example, the sessions on solar cells and LEDs were full to capacity.

This year, one topic that caught the eye of *Nature Photonics* was that of information optics — the concept of using photonics for tasks in information processing. Naoya Tate from the University of Tokyo described a new three-dimensional holographic system that implements a near-field optical readout scheme for the realization of sophisticated visual security 'watermarks' to thwart counterfeiters. Layers of different gold stripe patterns, with pitches as small as 50 nm, are deposited on a silicon wafer. By changing the distance between the top layer and the probe of a near-field microscope, a hierarchical pattern can be clearly observed.

"This hierarchical hologram based on nanophotonic coding provides a significant improvement to security, because an imitation of the holographic pattern is much more difficult to produce than for optical holograms," said Tate. "Furthermore, the probe functions as an additional security measure, because the readout signal strongly depends on the shape of the probe." The

うたぼて

特殊な光で暗号読み取り

紙幣偽造防ぐ新技術

東大と大日本印刷
5年後めど実用化

東京大学の大津元一教授らと大日本印刷は、紙幣やクレジットカードの偽造を防ぐ新技術を開発した。立体画像が浮かび上がる従来の偽造防止技術に改良を加え、市販では手に入らない特殊な光を当てるときだけ読み出せる暗号を埋め込む。5年後をめどに実用化を目指す。

紙幣や商品券、クレジットカードの表面に張る「ホログラム」という偽造防止シールを改良した。ホログラムの表面に50ナノ（ナは10億分の1）メートルという極めて小さな溝を刻む。この溝は近接場光（きんせつばこう）という特殊な光を当てたときだけ暗号として読み取れるという。

▼近接場光　通常の光より波長が極めて短い光。細い針やガラス繊維の先端に発生し、目に見える光のように遠くへ伝わらないが、微小な構造が調べられる。光学顕微鏡の分解能や半導体の性能を高める技術として応用が見込まれる。

近接場光で読み取る暗号は複雑で、簡単につくることはできない。光を読み取る装置は高価で小売店などが手に入れるのは難しいが、金融機関などがこの装置を使えば、にせものかどうかを見破れる。

中国や東南アジアのグループによる組織的な偽造事件が後を絶たず、技術も向上している。大日本印刷は紙幣などの信頼性向上につながる技術として、政府や金融機関などに売り込む考えだ。

[ref] 日本経済新聞 1面, 2009.9.6.
[ref] Nature Photonics, Vol.3, pp. 615-616 (2009).
[ref] Laser Focus World Japan, 2009.9.6.

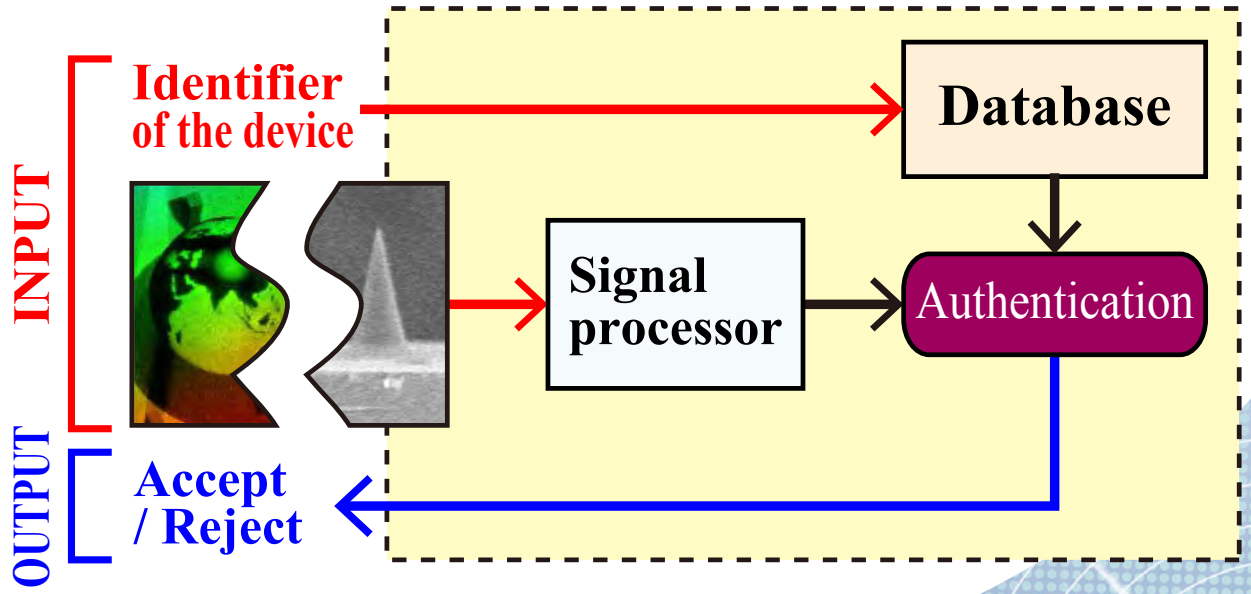
相互作用利用型情報読み出し

◉ 概要

✓ **「正規のデバイス」と「正規のリーダー」**との間にのみ誘起される固有の近接場光相互作用に基づいて**「正規のナノフォトニックコード」**を取得



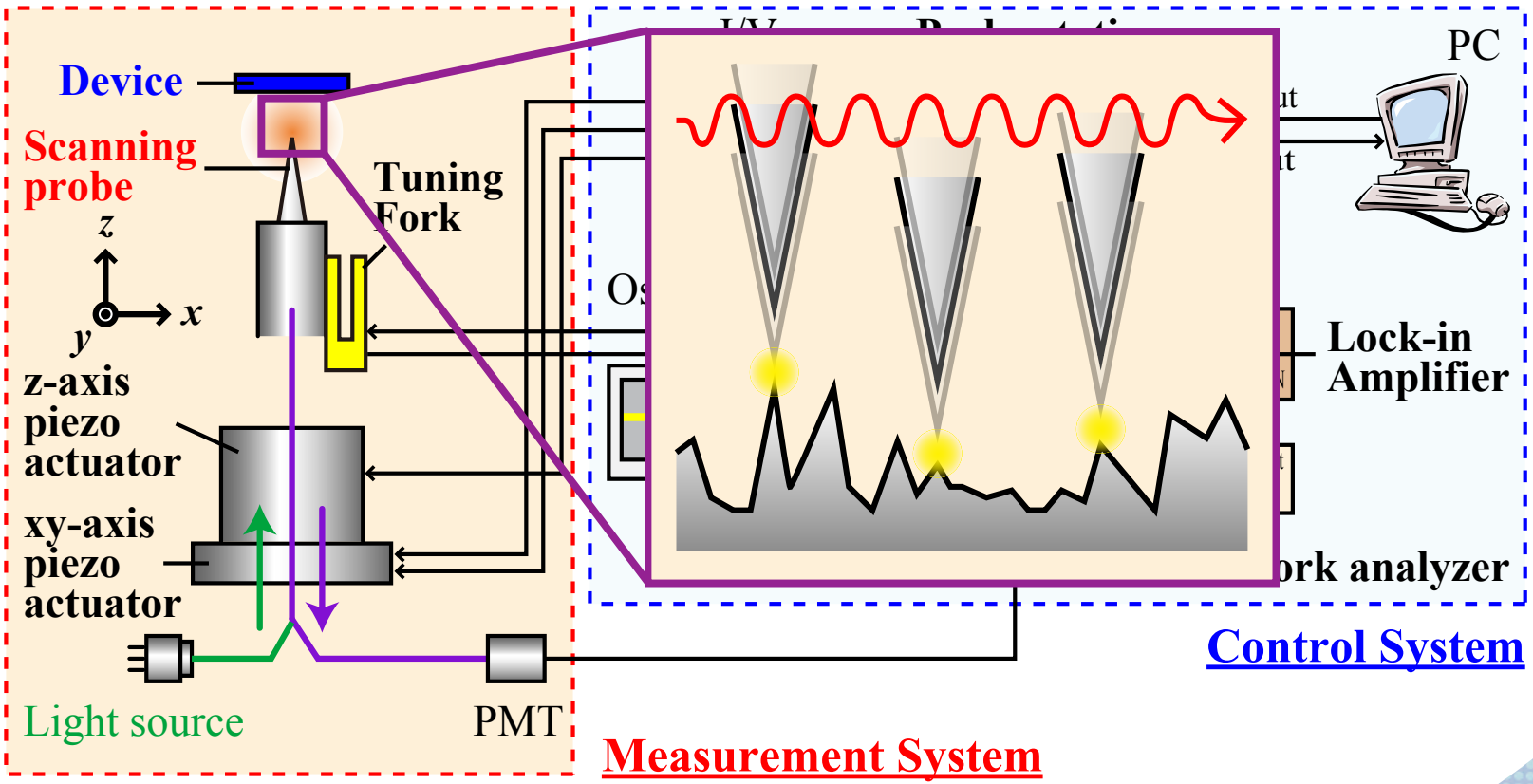
一般的な認証系



→ 既存の認証システムとは**「リーダー」の役割が本質的に異なる**

非走査型「リーダー」の開発

◉ SNOMの基本構成図

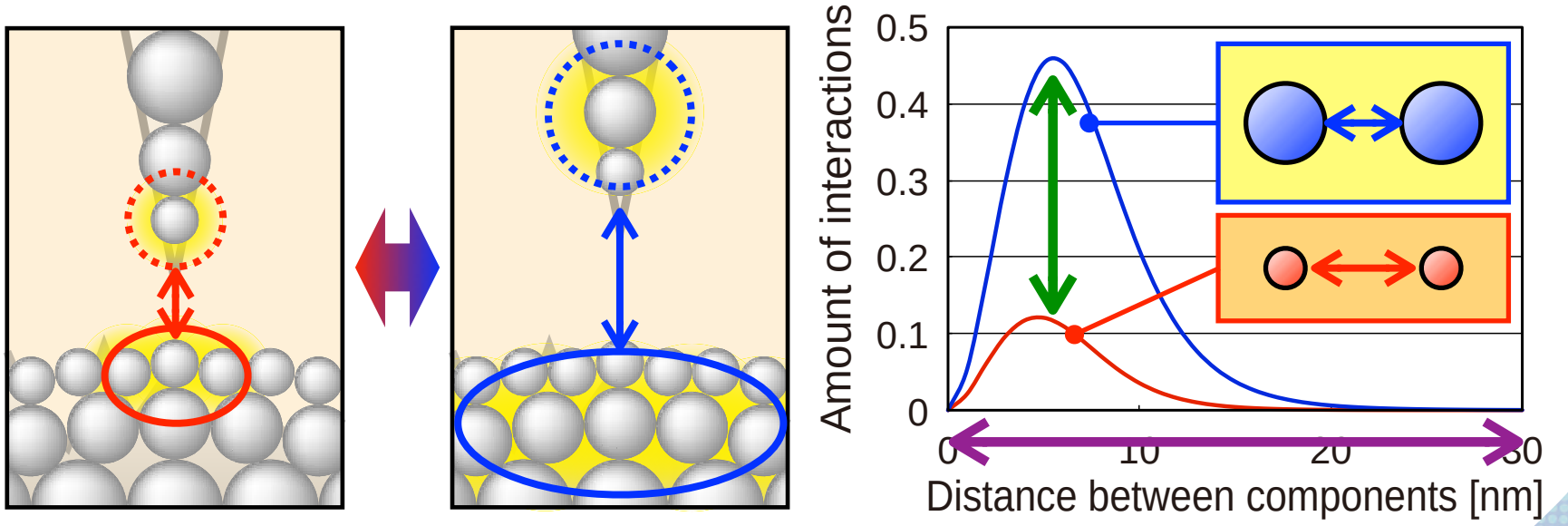


→ プローブは常時ゆらいでおり，**ゆらぎを反映した光学応答と分子間力に関する信号を恒常的に出力し続ける**

近接場光相互作用のゆらぎ

◉ **基本原理**

✓ 「デバイス」と「リーダー」間の距離が変化すると，**近接場光相互作用の大きさと共にそのスケールも変化する**



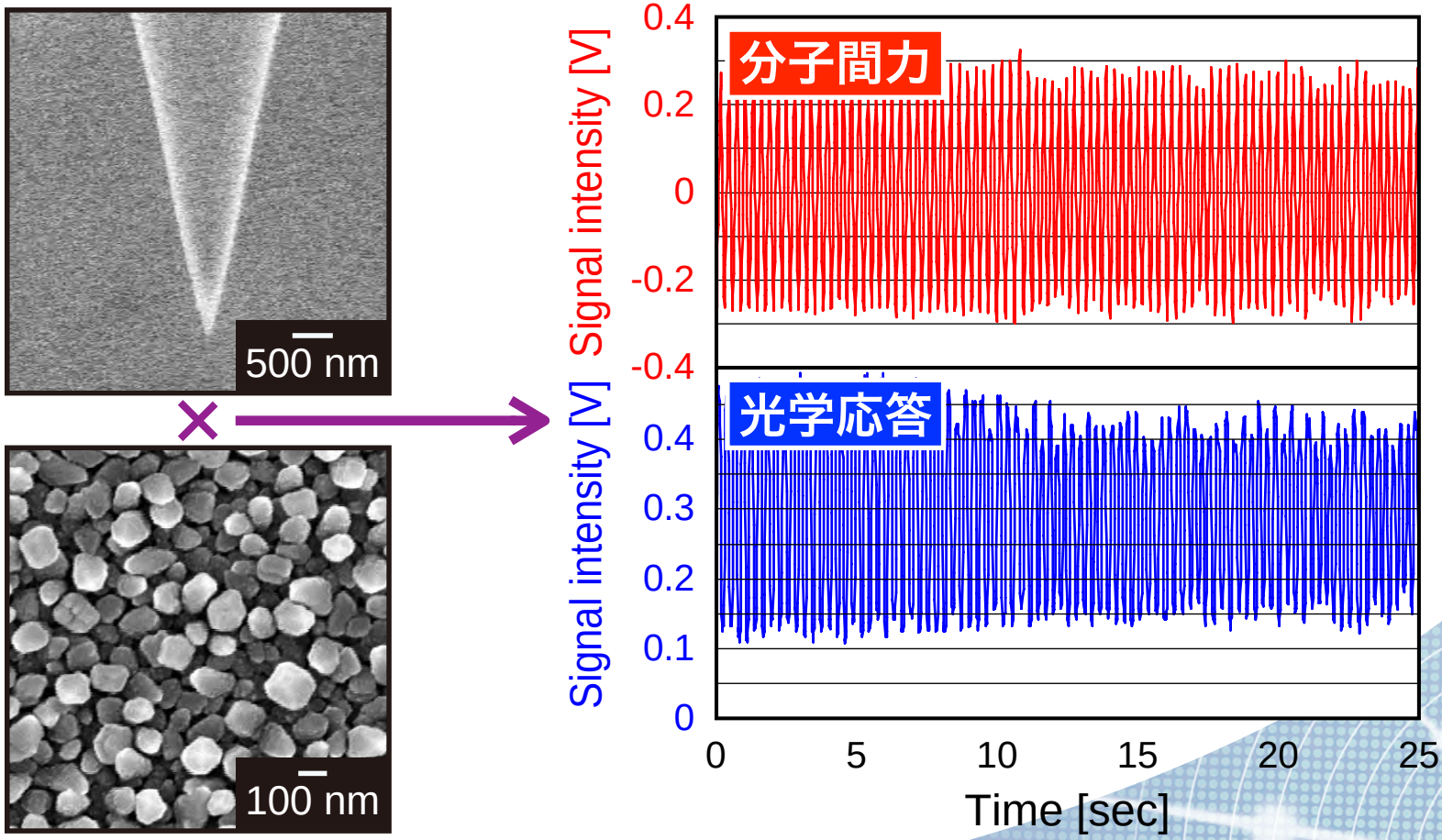
2次元走査なしに観測点近傍に由来する情報を取得可能！

認証用途においては必ずしも**高精細画像を取得する必要はない**

出力信号の一例①

◉ **分子間力**と**光学応答**の経時計測結果：

✓ ガラスファイバプローブ vs Al ナノロッド

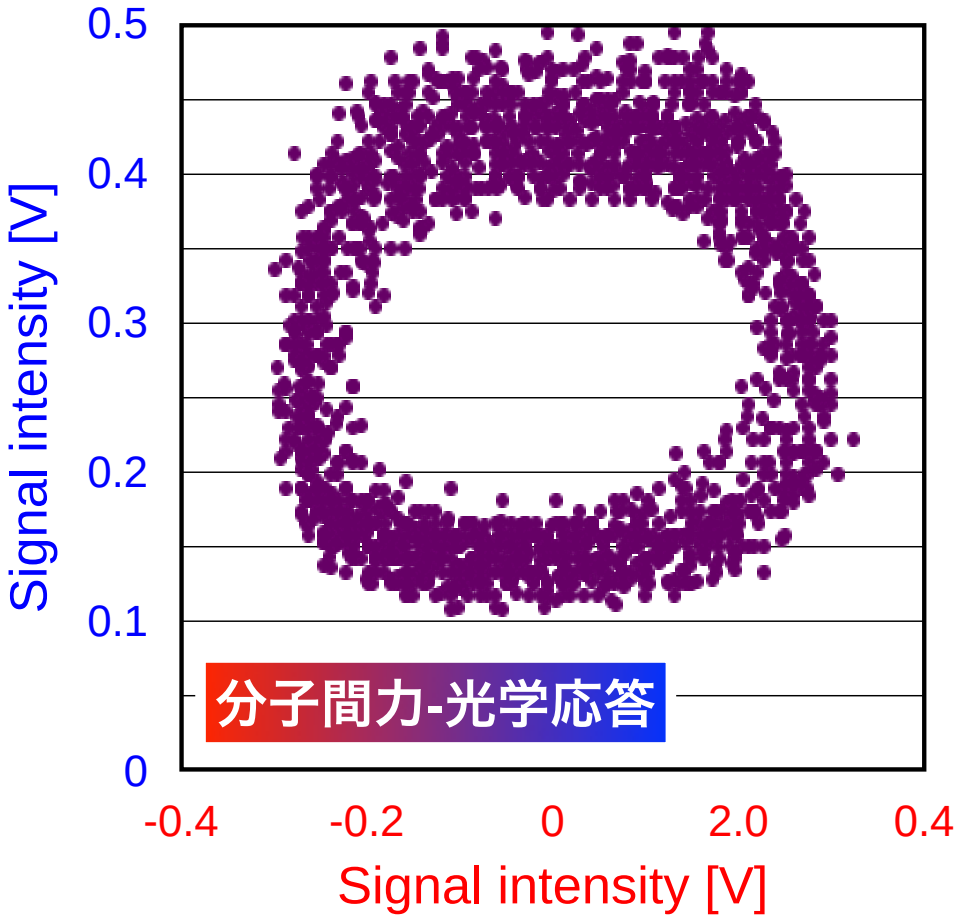


[ref] Y. Pihosh, et al., ECS Trans. Vol. 16, No. 5, pp. 49-58 (2009).

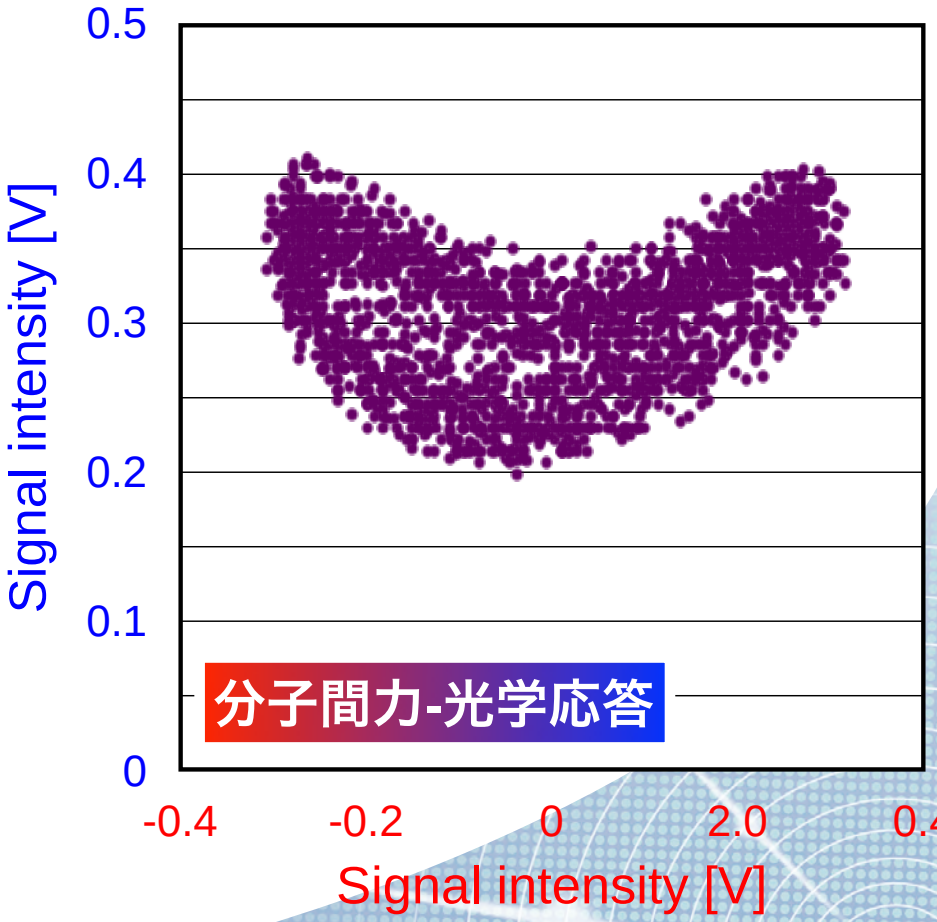
出力信号の一例②

◉ **分子間力-光学応答マップ：**

✓ 前データのマッピング結果



✓ 別データのマッピング結果



[ref] N. Tate, et al., Appl. Phys. A, Vol. 121, Issue 4, pp. 1383-1387 (2015).

「ゆらぎデータ」の評価

◉ **類似度に基づく評価手法の検討：**

✓ 必然的にゆらぎの影響を含むようなデータを評価する上で，一致度に基づく評価は不適

→**Content-based image retrieval（CBIR）**：色、形状、テクスチャ、**特徴点**などさまざまな特徴量を用いて類似度を判定

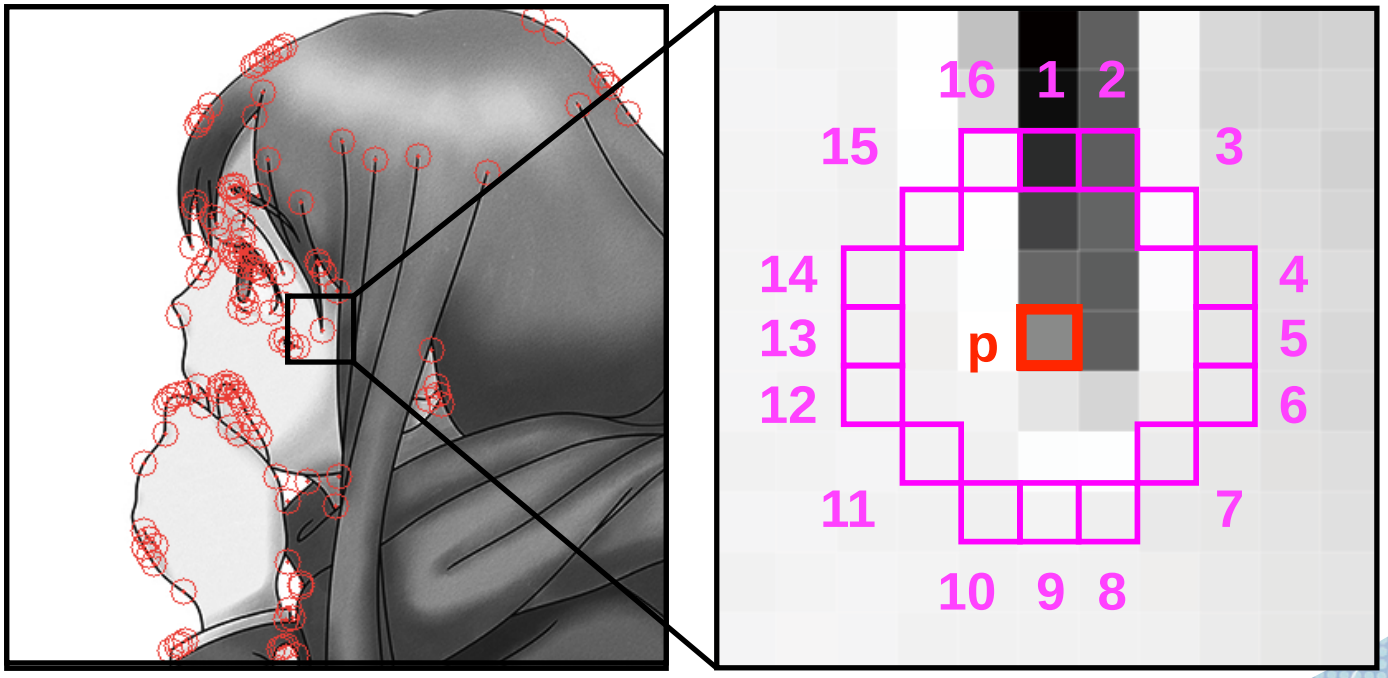


[ref] http://en.wikipedia.org/wiki/Content-based_image_retrieval

高速特徴点抽出アルゴリズムの導入

◉ **F**eatures from **A**ccelerated **S**egment **T**est **(FAST)**

✓ 各注目画素pについて，円周上の画素の値が連続してn個以上brighterもしくはdarkerの時に**画素pは「コーナー」であると**判定



→ **「コーナー」の座標を当該画像に固有の特徴量として規定**

[ref] E.Rosten et al., European Conference on Computer Vision, pp. 430-443 (2006).

相互類似度の評価

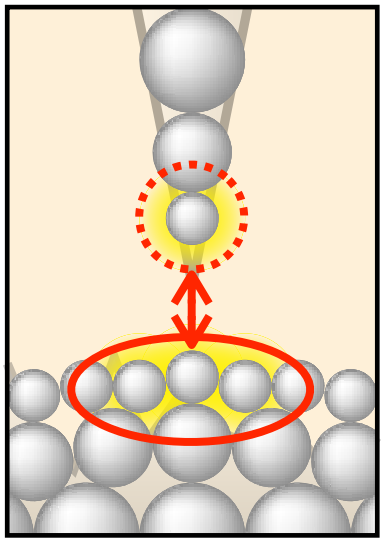
◉ 評価用マッピングデータの取得

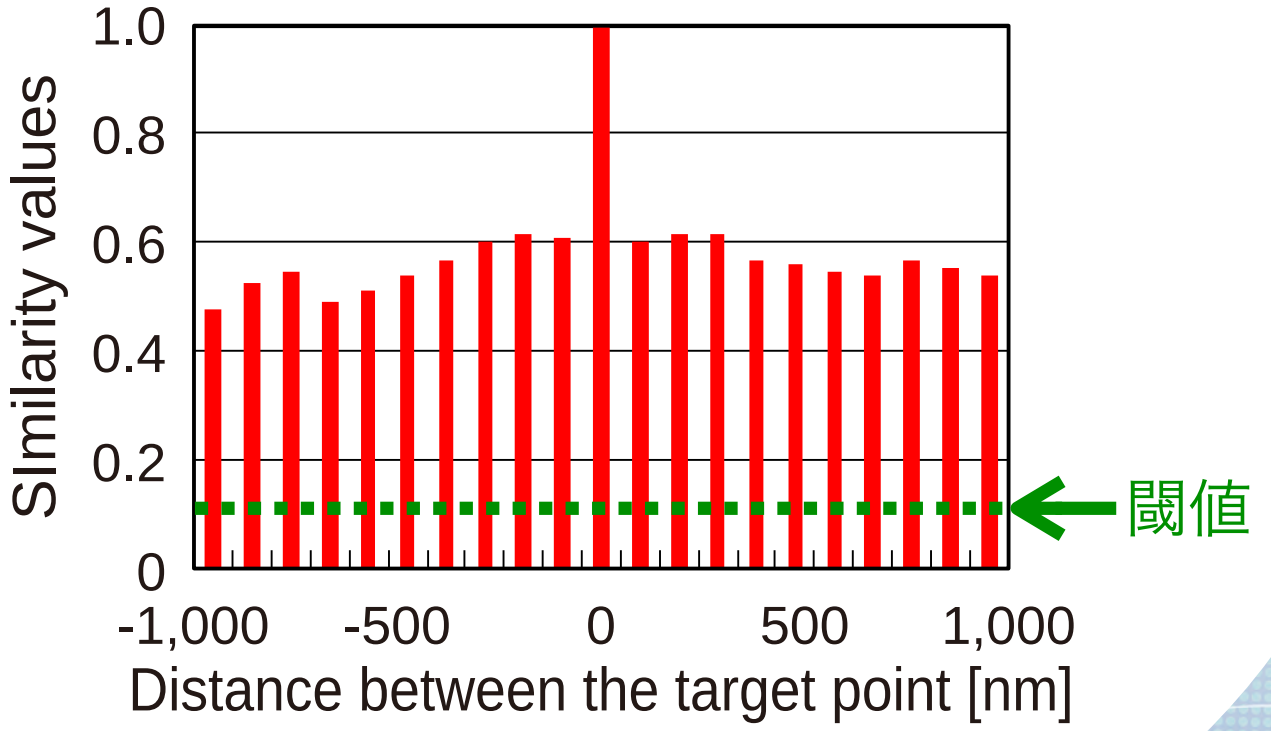
✓ 単一の「リーダー」と「デバイス」を用いて**計20点（0～2,000nm）**の観測座標においてマッピングデータを取得

 0 nm	 100 nm	 200 nm	 300 nm	 400 nm	 500 nm	 600 nm
 700 nm	 800 nm	 900 nm	 1,000 nm	 1,100 nm	 1,200 nm	 1,300 nm
 1,400 nm	 1,500 nm	 1,600 nm	 1,700 nm	 1,800 nm	 1,900 nm	 2,000 nm

相互類似度の相関距離依存性

◉ 相互類似度の算出例





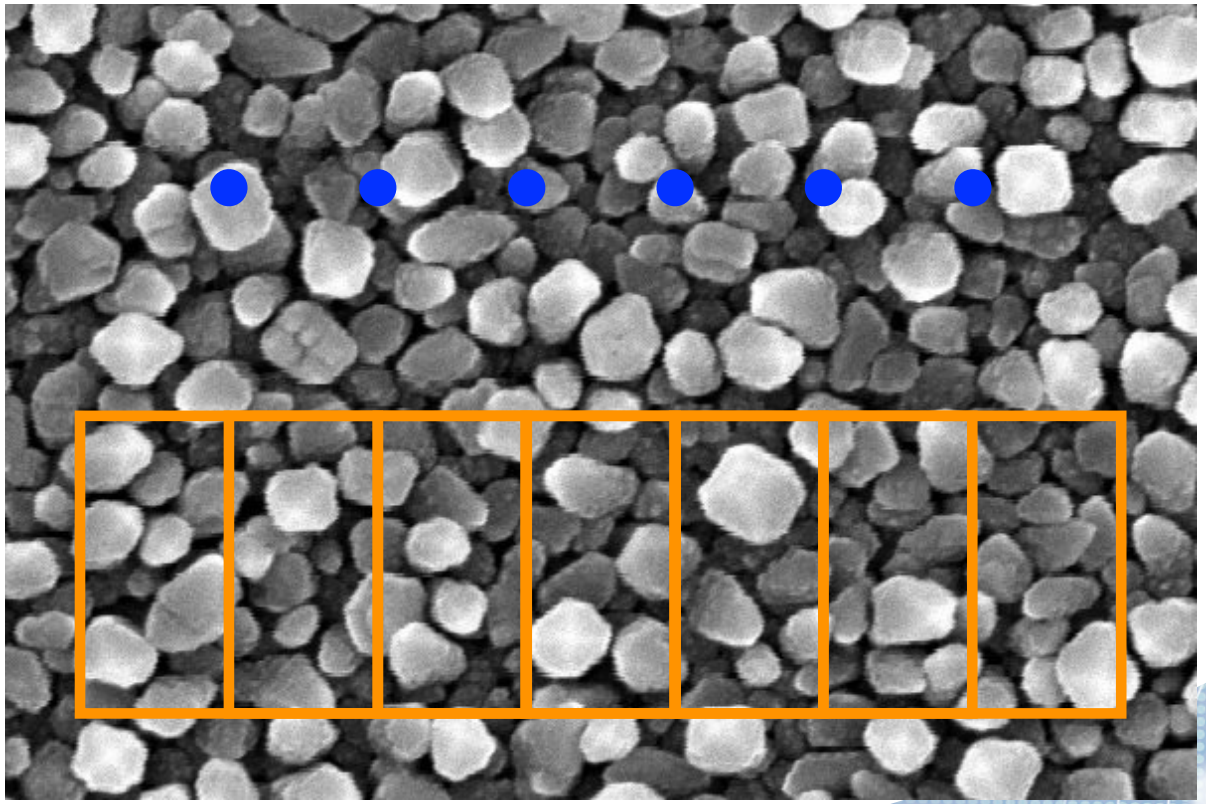
→ **「点」ではなく「面」での比較が成されている**こと,
すなわち**観測座標における読み出し結果が確かに近傍構造に関する情報を含んでいる**ことを実証

【参考】画像相関における類似度

◉ 簡単な画像相関における次元比較

✓ **ゼロ次元相関**：対象座標の画素値を近傍の画素値と比較・評価

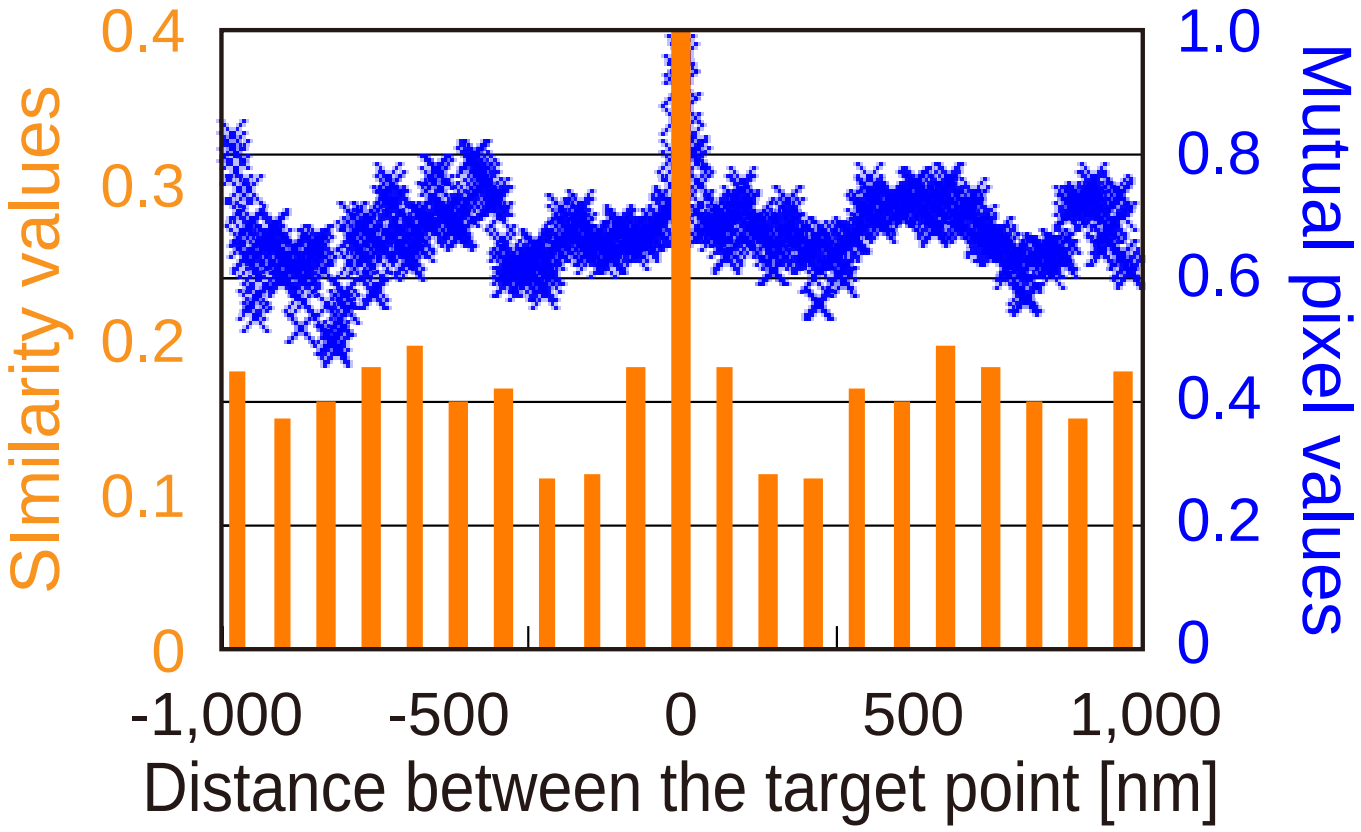
✓ **二次元相関**：対象画像の特徴量を近傍の特徴量と比較・評価



[ref] Y. Pihosh, et al., ECS Trans. Vol. 16, No. 5, pp. 49-58 (2009).

【参考】画像類似度の相関距離依存性

◉ ゼロ次元-二次元比較結果



→ 提案手法が標榜する**「二次元画像を取得せずに相応の評価結果を取得する」**点においてその基本原理の妥当性が裏付けられた

◉ 背景

✓ ナノフォトニクス

✓ 「飛ばない光」近接場光の描像

✓ ナノ光-物質間相互作用の事例

◉ 表面電流駆動型磁気光学空間光変調デバイス

✓ 磁気光学効果と酸化亜鉛（ZnO）

✓ 近接場光援用アニール

✓ 試作デバイスの構成とデモ実験

◉ ナノ光人工物メトリクス

✓ 光セキュリティと人工物メトリクス

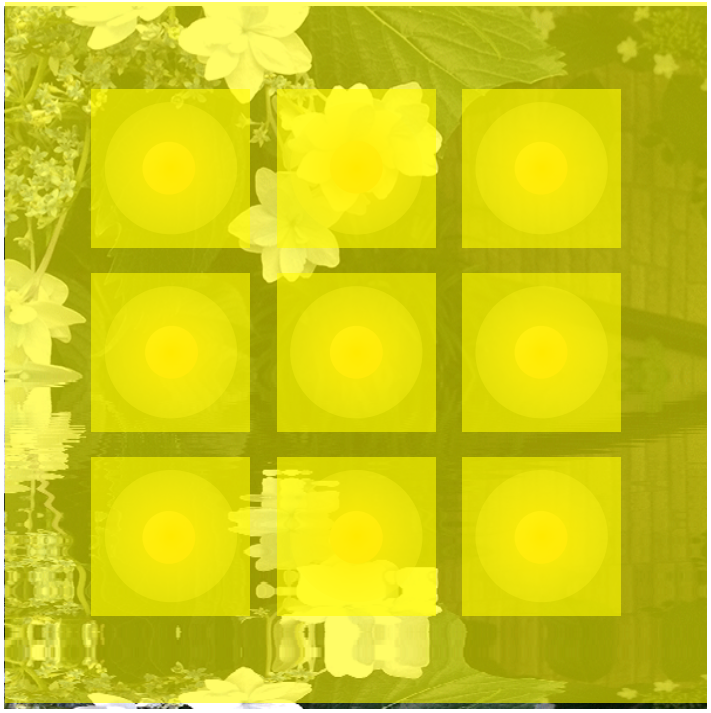
✓ ナノ-マクロ階層型ホログラム

✓ ナノ光情報読み出しのための非走査型プローブ顕微鏡

◉ まとめ

「ナノフォトニクス」の実験コンセプト

◉ 模式図：ナノゆらぎの近接場光制御による最適化



① 物質系に対し目的に応じた「タネ」を仕込む→**ナノ量子系の設計**

②「タネ」を介して近接場光を発生させる→**ナノ量子系の活性化**

③ 近接場光の原理に基づき物質系が変性する→**近接場光相互作用の誘起**

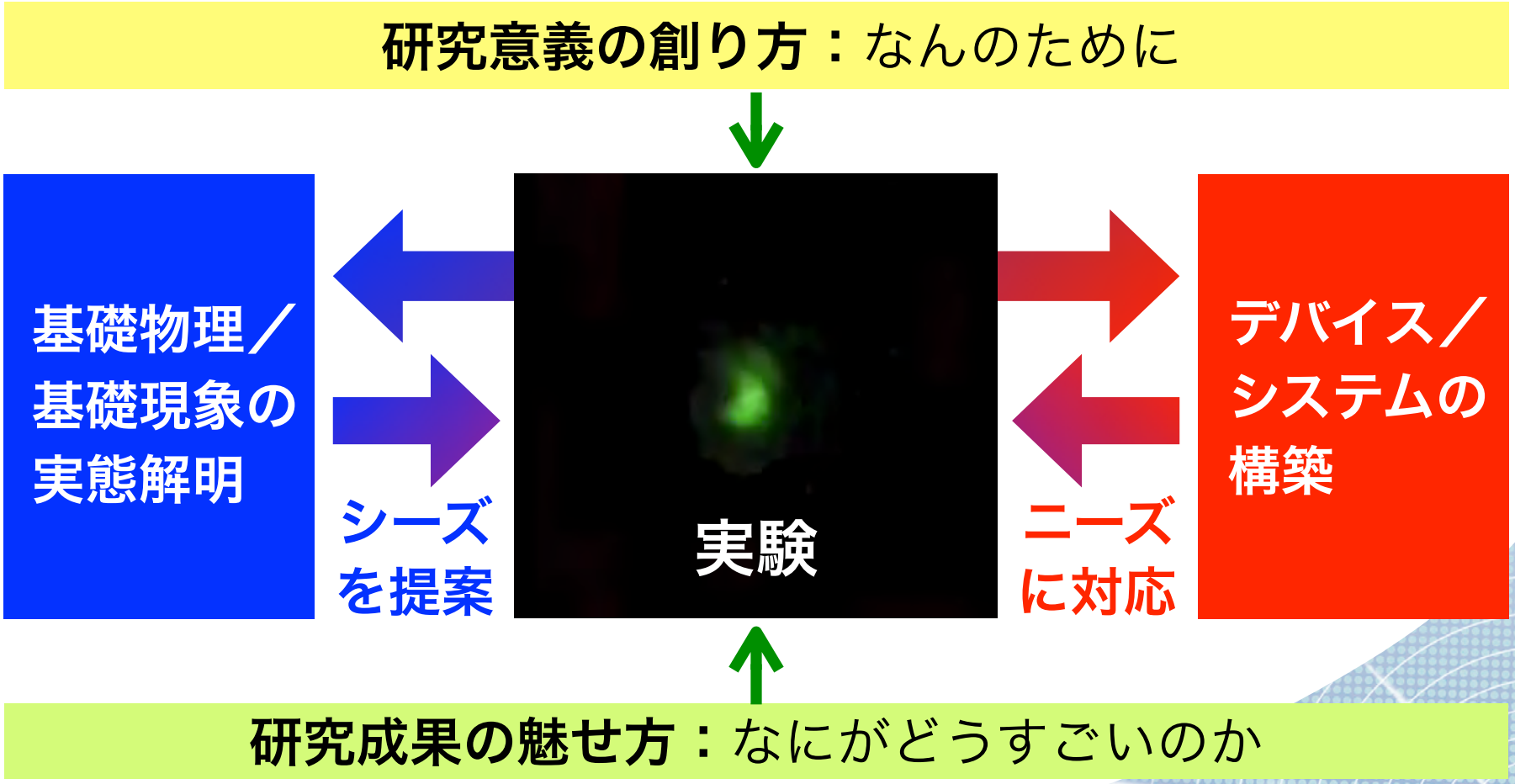
④ ナノ領域の特質をマクロな光機能として活用する

→ナノ光情報デバイス／システムの実現

うたぼて

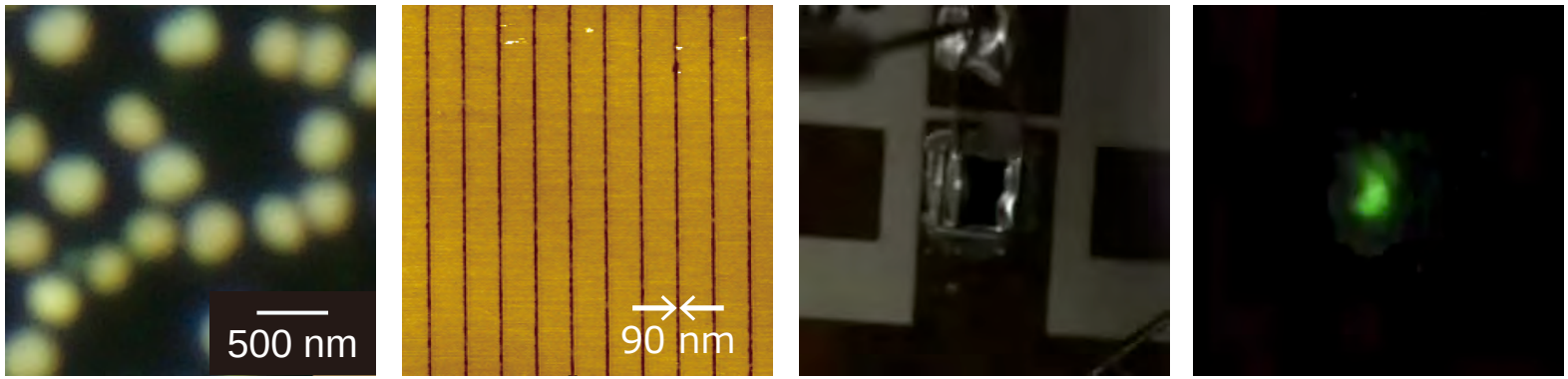
「たてらぼ」における研究コンセプト

◉ 基礎物理解明からデバイス・システム構築まで



まとめ①

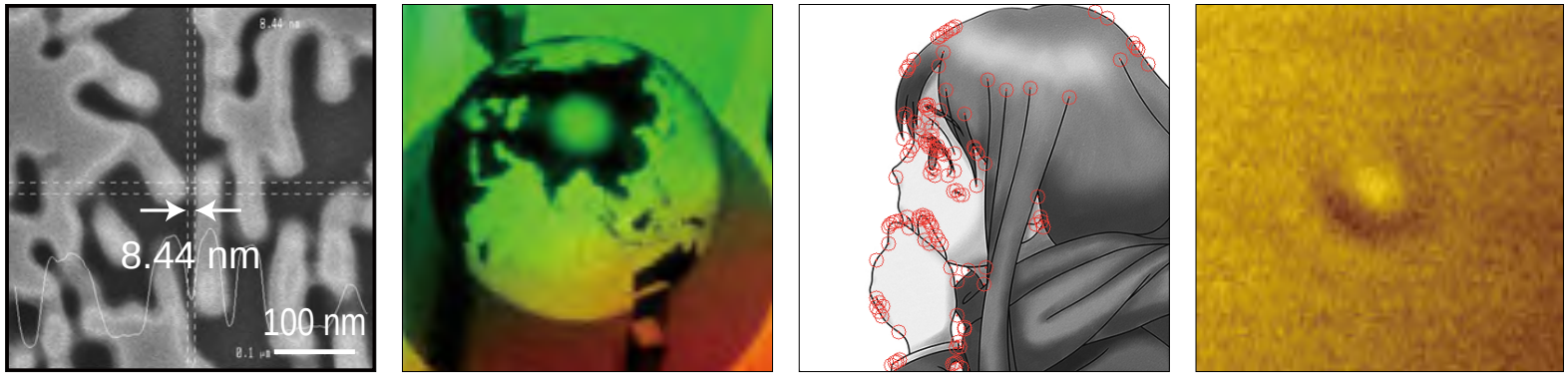
✓ **ナノフォトニクス**の枠組みおよび**近接場光**に関する基本的な描像について述べ，近接場光の本質的な特質を体現する**フォノン準位を介した多段階光励起**について，基本原理を解説すると共にこれまでに得られている種々の実例を紹介した.



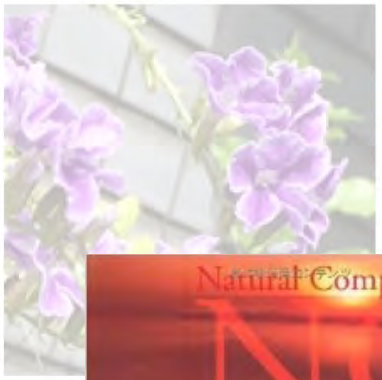
✓ 近接場光により発現する特異な物理現象として近接場光援用アニールに基づき試作される**表面電流駆動型磁気光学空間光変調デバイス**について紹介し，デモ実験として行った**偏向変調**と**偏光変調**のそれぞれにおいて，**巨大な磁気光学効果に相当する現象**を示すことを実証した.

まとめ②

✓ 近接場光により実現する高度な情報応用として**ナノ光人工物メトリクス**について紹介し，その構成要素である**「デバイス」**としての**ナノ人工物メトリクス**および**ナノ-マクロ階層型ホログラム**，**「リーダー」**としての**非走査型プローブ顕微鏡**のそれぞれについて基本原理および実証実験の結果を示した.



✓ 我々が標榜する，**実用化を念頭においた「ナノフォトニクス」の研究開発における基本指針**について述べた.



Naoya TATE .net

九州大学 大学院システム情報科学研究院
九州大学 工学部 准教授









トップ
プロフィール
研究業績
連絡先
関連リンク
サイトマップ
wiki
English

最近の動向：

2015/07/20 Upcoming 2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会 [9/13-16, 名古屋国際会議

2015/07/20 Upcoming レーザー学会九州支部特別講演会 [7/29, 九州大学伊都キャンパス]にて、

2015/07/17 Event 公益財団法人 村田学術振興財団 第31回（平成27年度）研究助成 贈呈 [7/17, ホテルグランヴィア京都]に出席致しました。

2015/07/10 Talk The 10th Asia-Pacific Conference on Near-field Optics (APNFO10) [7/7-

たてらぼ

http://npip.ed.kyushu-u.ac.jp/

http://naoya-tate.net

九州大学大学院
システム情報科学研究院
竪研究室