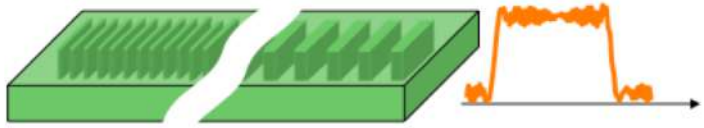
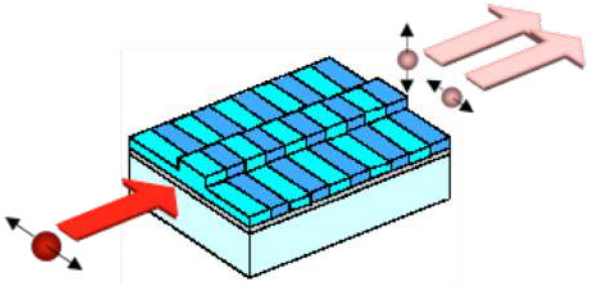
第３回 レーザー学会「小型集積レーザー(II)」専門委員会　２０２４年１２月１８日

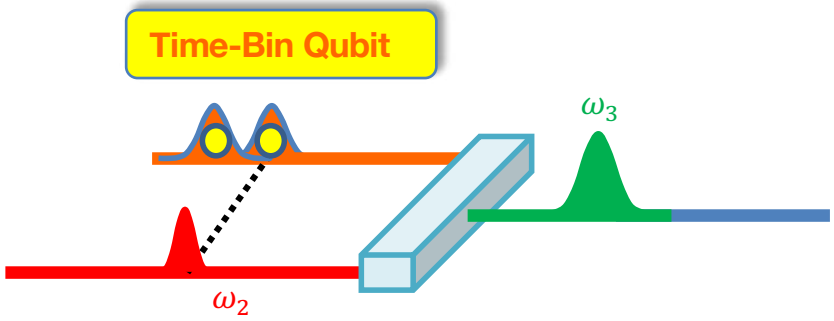
量子技術を支える先端非線形光学

物質・材料研究機構
九州大学

栗村 直







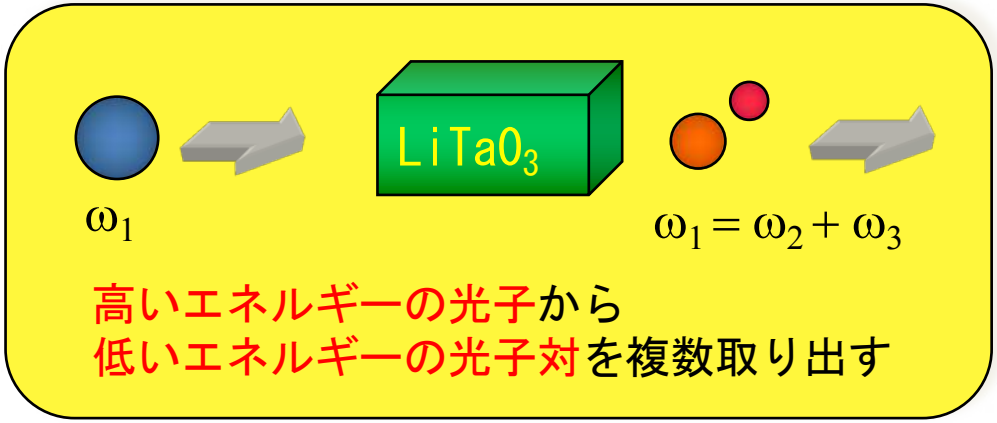
Outline

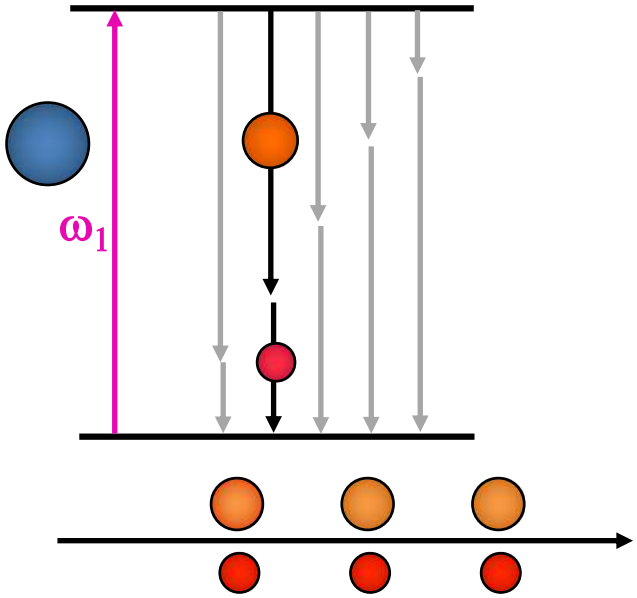
- イントロダクション
  - 分極反転デバイスと量子光学
  - 擬似位相整合(QPM)デバイス
- 量子光学応用
  - スクイージング用デバイス
  - 量子通信用デバイス
  - 量子OCT用デバイス
- 超高速サンプリング応用
  - 和周波発生サンプリング用デバイス
  - 超高速量子ビットの検出
- まとめ

分極反転非線形光学デバイス

非線形光学（光パラメトリック）過程

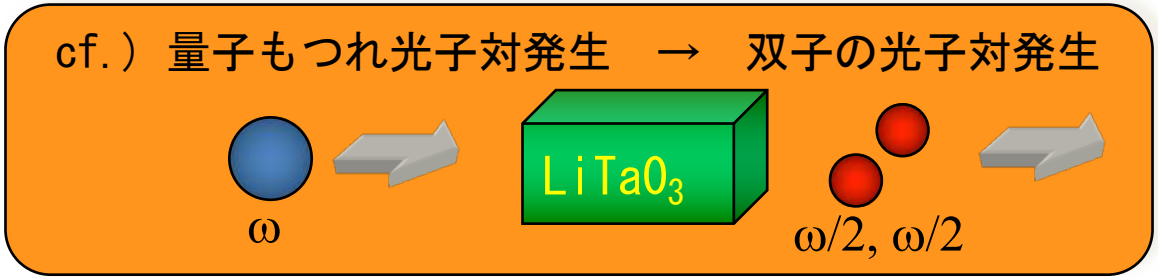
・波長変換(OPG)／もつれ光子発生(SPDC)





出射光子対の特性:

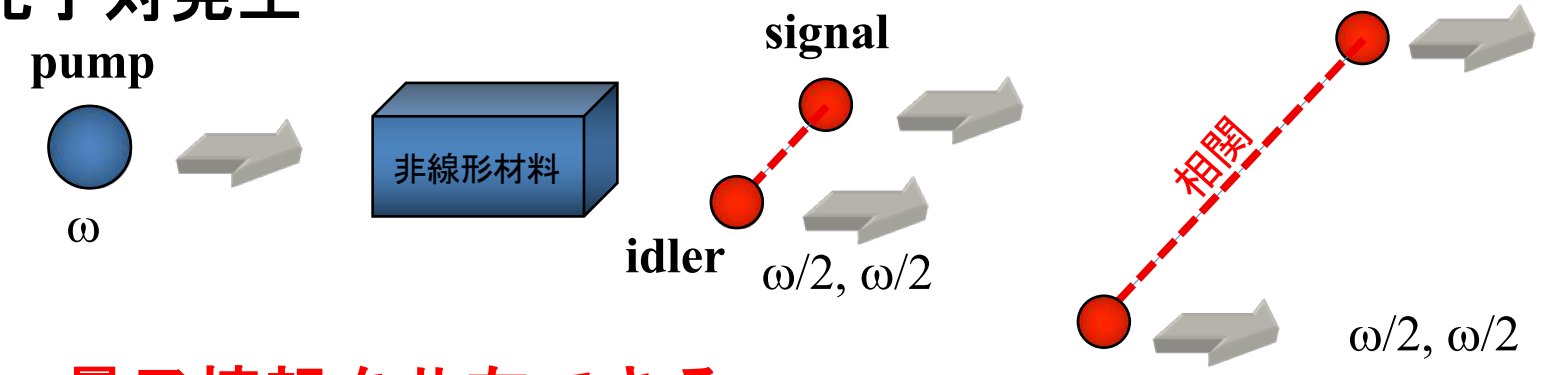
1. **高い同時刻性、互いの存在を保証**
2. **量子状態の相関をもつ**



量子もつれ
2022年度物理学賞

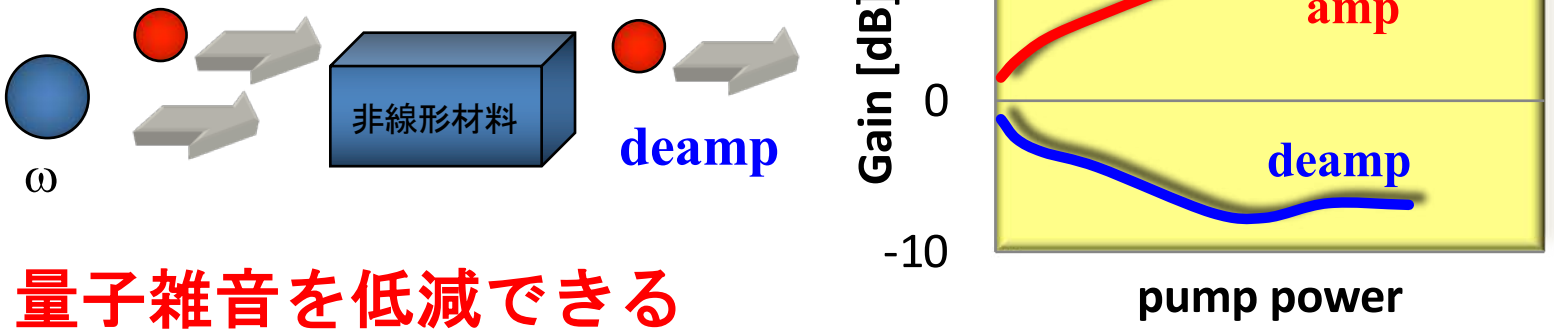
量子光学分野で用いられる代表的機能

•相関光子対発生



量子情報を共有できる

•スクイージング



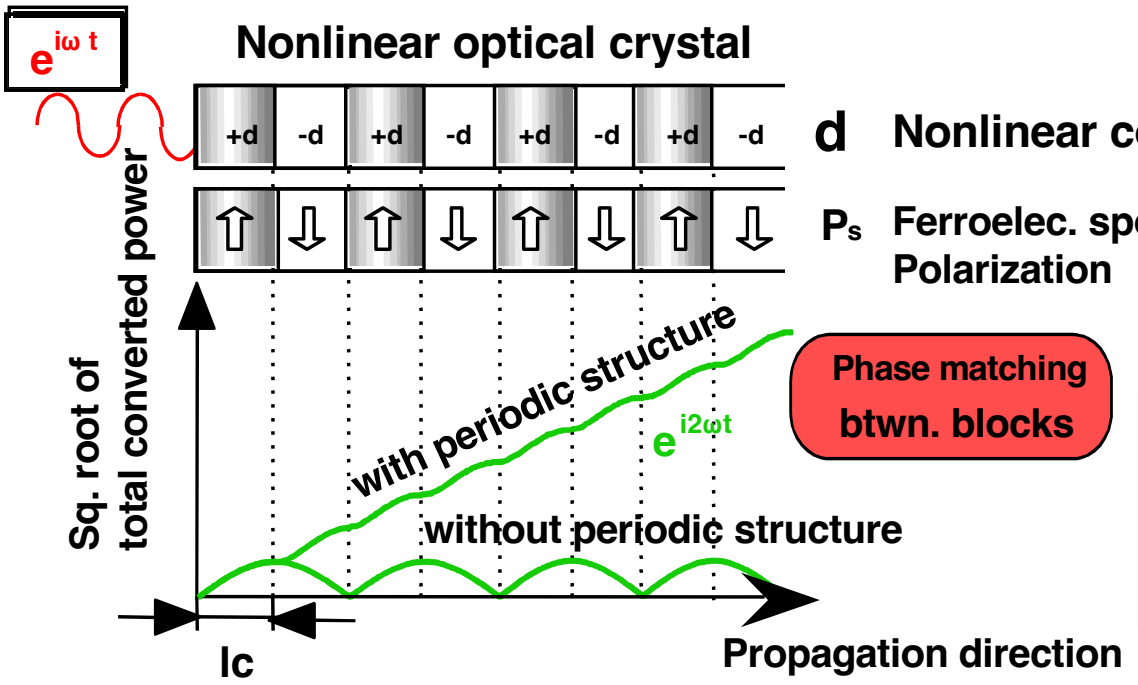
量子雑音を低減できる

Efficient combination for NLO devices

Quasi-phase matching (QPM):

Phase matching between lc blocks by spatially modulating nonlinearity.

QPM NLO devices:
- **Built-in periodic ferroelec. domains**
- **Wavelength designable by choosing a period**

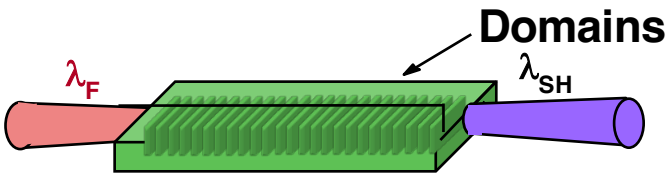


d Nonlinear coeffi.

P_s Ferroelec. spont. Polarization

Phase matching btwn. blocks

Reversed sign: $d_{ijk} \rightarrow -d_{ijk}$



Strong confinement ~1kW/cm2 + **QPM conversion ~ 1%/W**

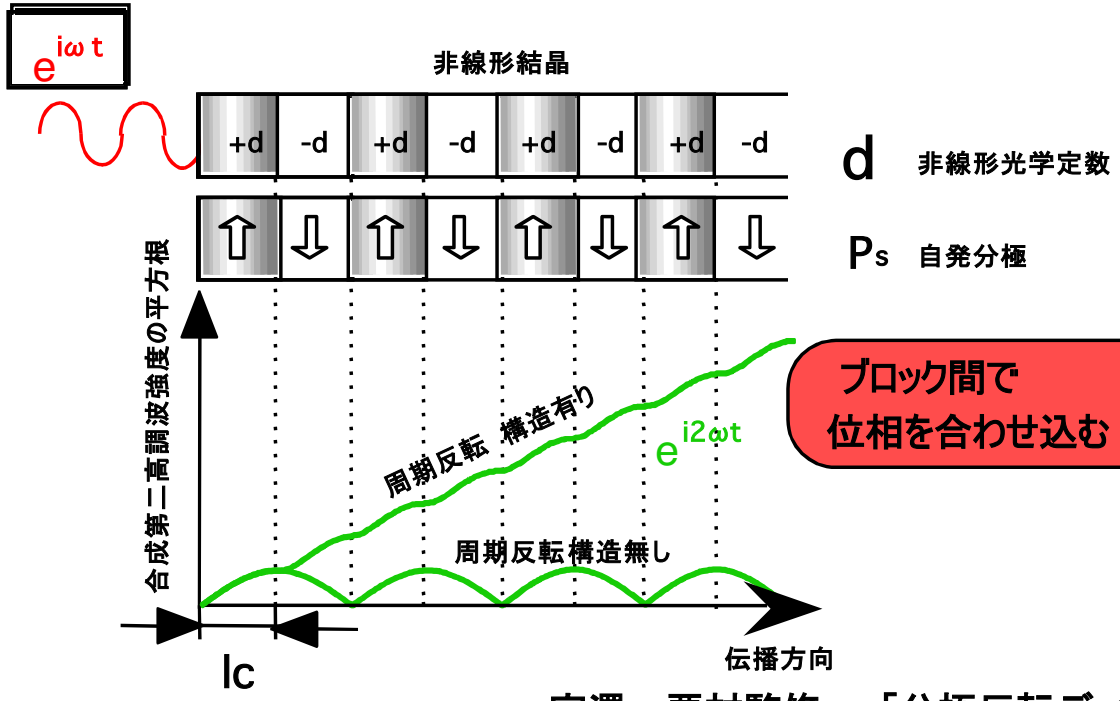
-> Efficient conversion

波長変換技術の新世代

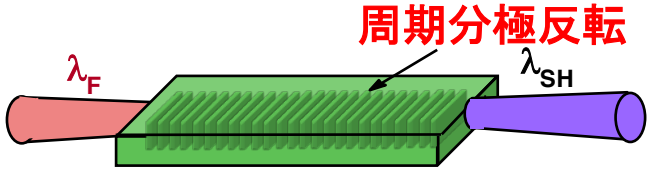
波長変換デバイスの新世代
「波長変換は低効率」は
過去のものに

擬似位相整合
(Quasi-Phase-Matching):
周期的に非線形光学定数を空間変調して、
ブロック間で位相整合を実現する。

ＱＰＭ波長変換デバイス：
強誘電体の分極反転(±Ps)を
利用したデバイスが有名。
変換波長を設計周期で選択できる。



ブロック間で
位相を合わせ込む



強閉じこめ
~1kW/cm2
+
QPM 波長変換
~ 1%/W
-> 高効率波長変換
~ 1000%/W

宮澤、栗村監修、「分極反転デバイスの基礎と応用」オプトロニクス社

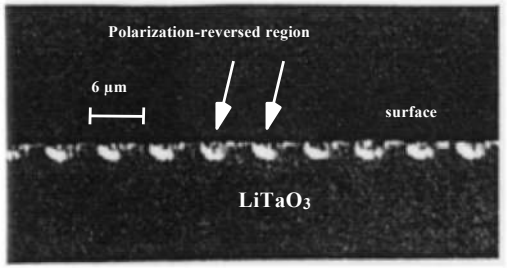
NIMS

分極反転デバイスの勃興

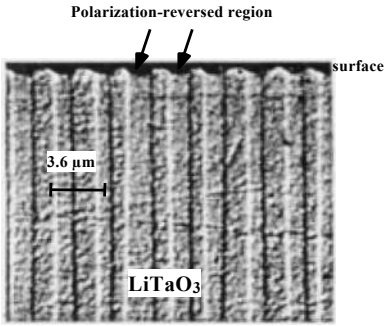
- 波長変換デバイスが
  - 1989 Ti拡散／
    - LN導波路型波長
    - LN導波路型波長
    - LN導波路型波長
  - 1991 プロト
    - LT導波路型波長
    - **LT導波路型**
  - 1991 電子ビ
    - LNバルク型波長
  - **1992 電界印加**
    - **LT導波路型**
    - LN導波路型波長

宮澤、栗村監修、オプトロニクス社

断面図



表面近傍に限られた
分極反転構造（プロトン交換）



深さ方向に伸びた
分極反転構造（電界印加）

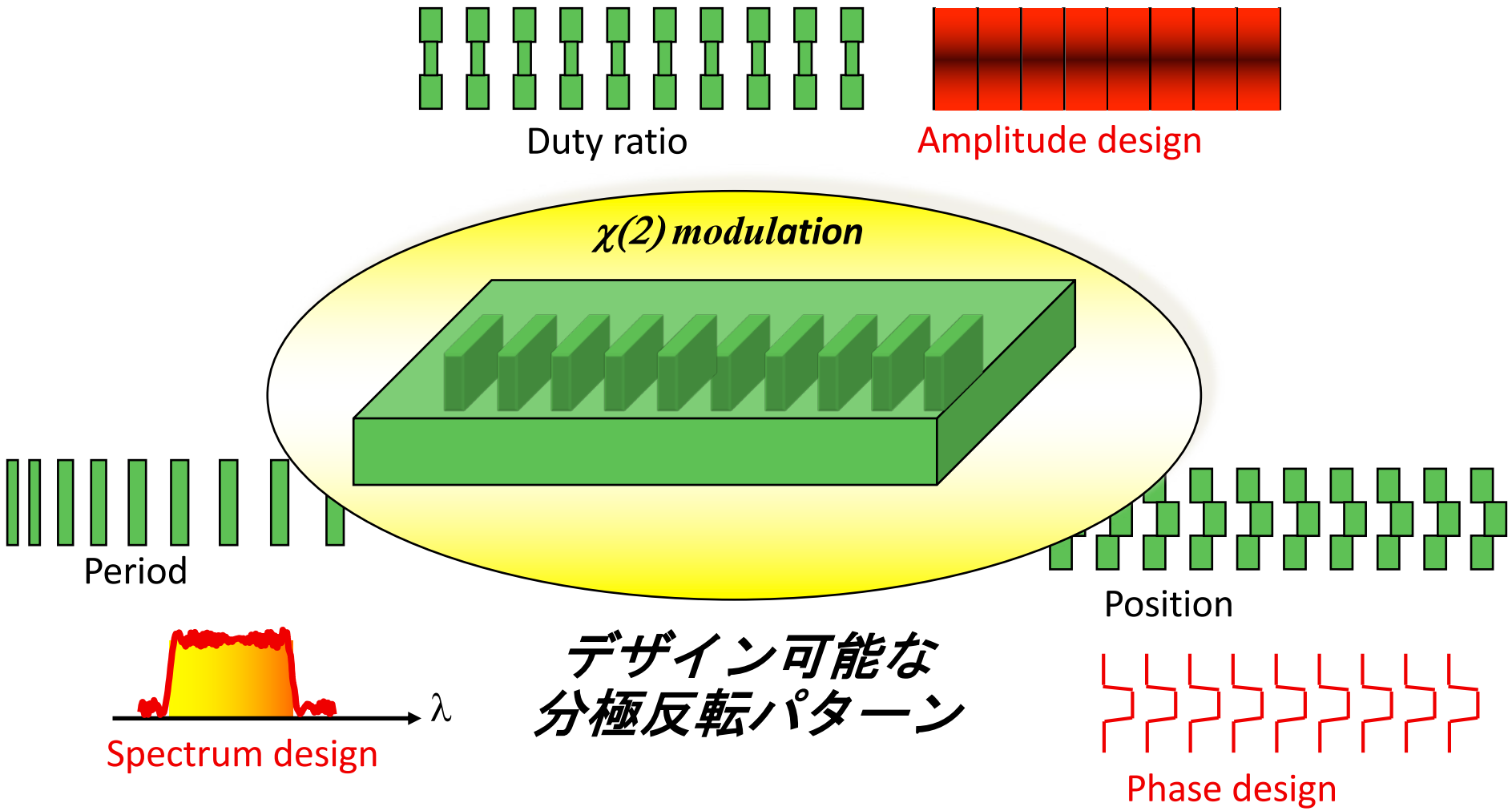
認知が拡がる分極反転デバイス

- 応物学会のメインのロゴに(2024)

量子光学では分極反転波長変換デバイスが
市民権を得てきている

NIMS

分極反転パターンによる特性の設計



Comparison of SPDC materials

- SPDC: 532 nm -> 1064 nmの場合

P.M.type	Material	deff (pm/V)	ΔT (C cm)	κ (W/mK)	Ith (GW/cm2)	P.M. type
QPM	**Mg:LN**	**16**	**2.1**	**4.6 (0%Mg)**	**0.3**	**Type 0 d33**
QPM	**Mg:SLT**	**10**	**2.5**	**8.4(0.5%Mg)**	**0.57**	**Type 0 d33**
QPM	**KTP**	**11**	**4.7**	**3.3(c), 2(a)**	**0.3-3**	**Type 0 d33**
QPM	**Quartz**	**0.19**	**108**	**11.7 (c), 6.5**	**400**	**Type 0 d11, d12**
BPM	KTP	2.4	25	3.3(c), 2(a)	0.3-3	Type II XY d32
BPM	LBO	0.63	~6	3.5	19	Type I XY d32
BPM	LBO	0.83	6.2	3.5	19	Type II XY d31

Large d_{eff} in QPM -> high efficiency

導波路との組合せで高効率に

Phase-matching

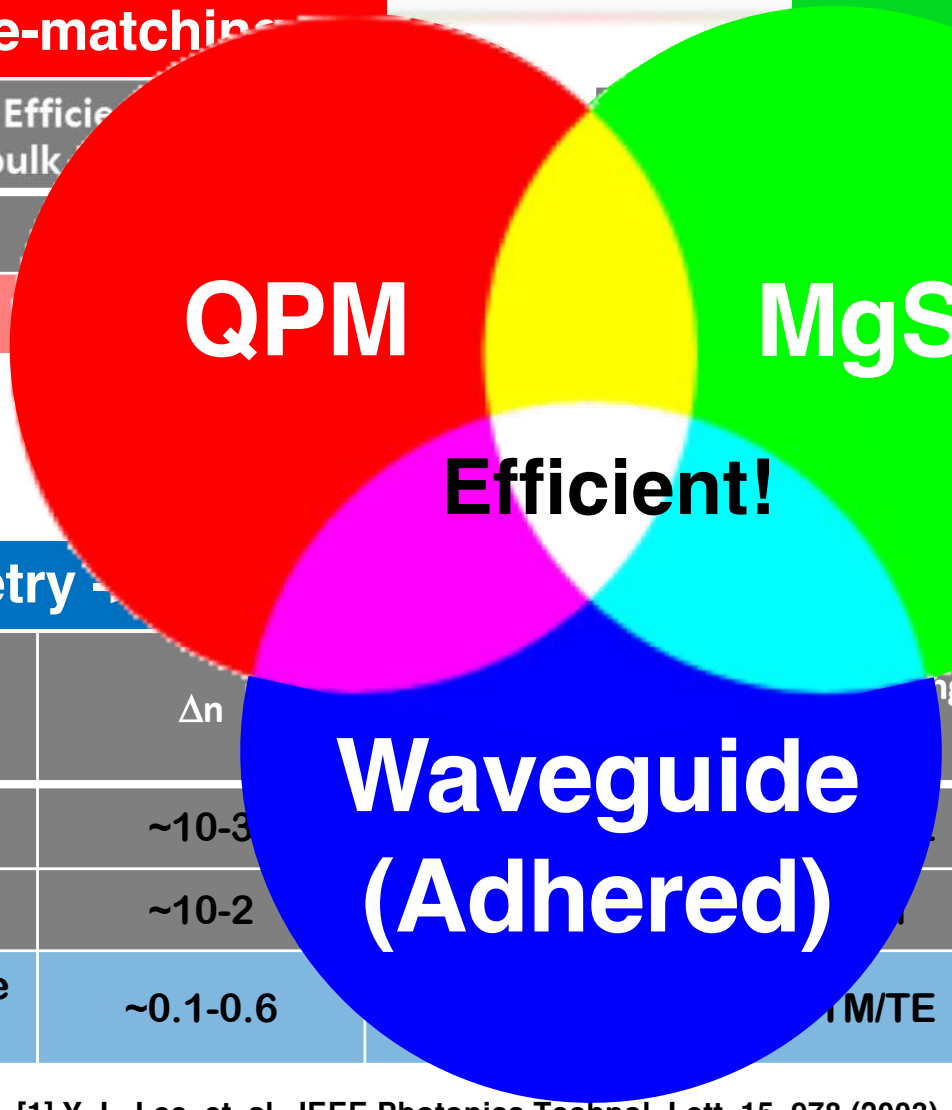
Scheme	Efficie… for bulk…
BPM	
QPM	

Material

Thermal …nductivity …V/mK)	Nonlinear coefficient (pm/V)
…4.6	25
…5%Mg)	16
…3(c), 2(a)	15

Optical geometry -…

Scheme	Δn	…ng	Spatial overlap of F and SH
Ti indiffusion	~10-3		☹
H+ exchange	~10-2		☹
Adhered ridge waveguide	~0.1-0.6	…TM/TE	😐



[1] Y. L. Lee, et. al., IEEE Photonics Technol. Lett. 15, 978 (2003).
[2] K. R. Parameswaran, et. al., Opt. Lett. 27, 179 (2002).
[3] S. Kurimura, et. al., CLEO, CTuB4 (2006), APL 89, 191123 (2006).

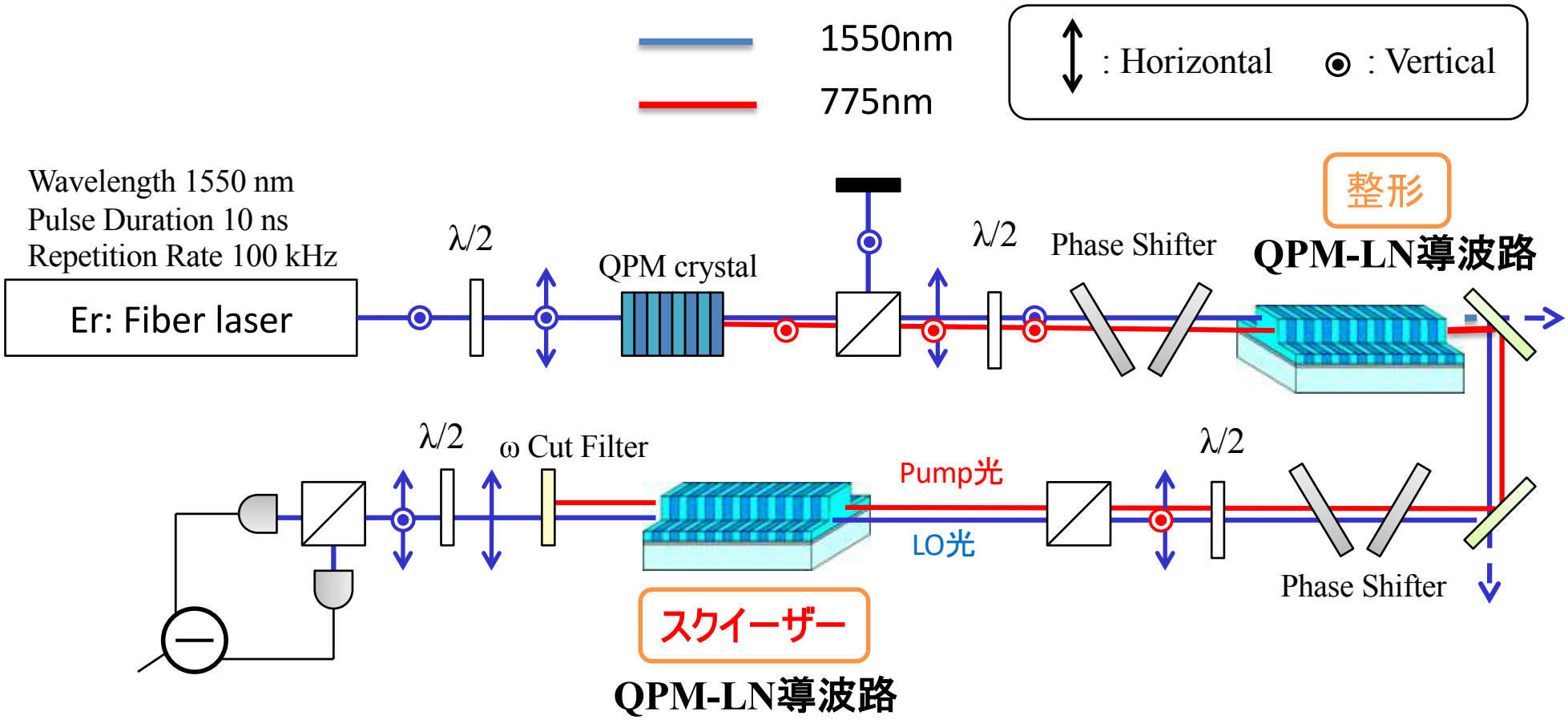
NIMS

スクイージング用デバイス

スクイージング評価系

学習院大学 Gakushuin University

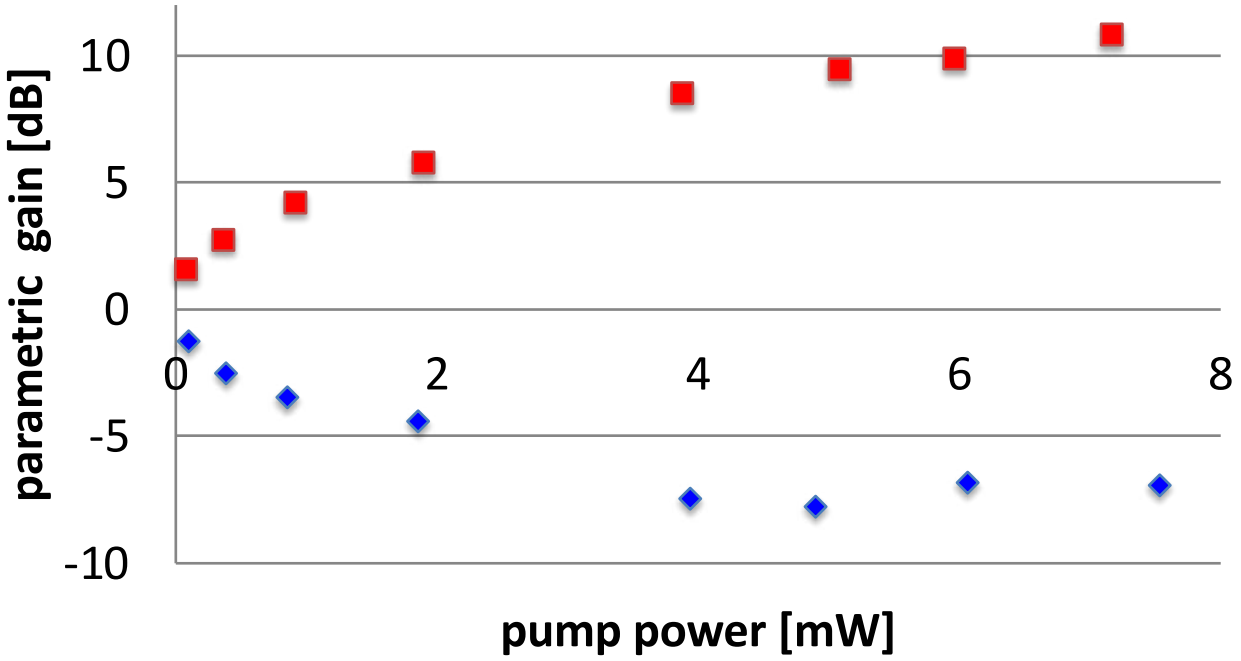
- スクイージング測定光学系（w/ Gakushuin University）



パラメトリック利得の測定

学習院大学 Gakushuin University

- パラメトリック利得の励起光パワー依存性



➢増幅利得**9.4 dB** @pump power 5.1 mW

➢減衰利得 **-7.8 dB** @pump power 4.9 mW

NIMS

量子通信用デバイス

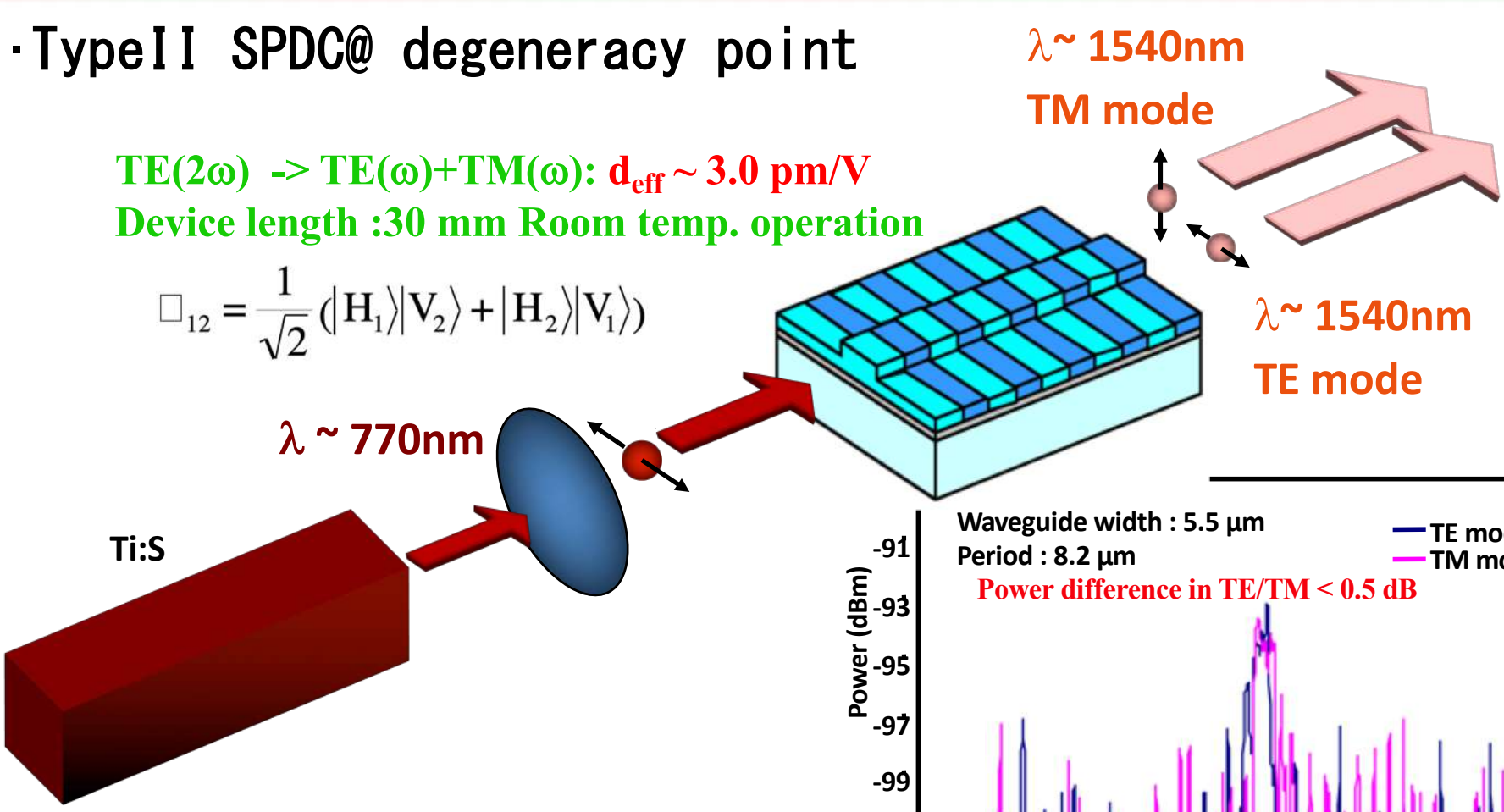
直交偏光量子もつれ光源

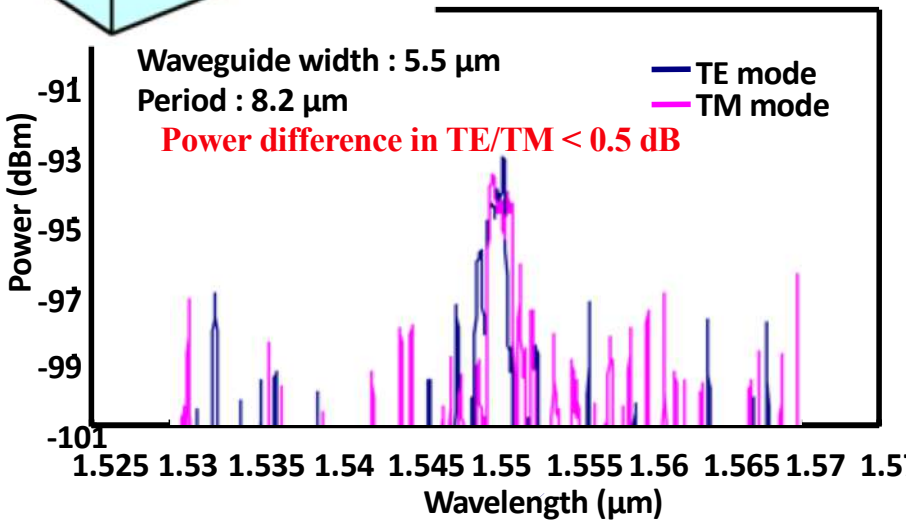
・TypeII SPDC@ degeneracy point

TE(2ω) -> TE(ω)+TM(ω): d_{eff} ~ 3.0 pm/V

Device length :30 mm Room temp. operation

$$\Box_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_1\rangle|V_2\rangle + |H_2\rangle|V_1\rangle)$$

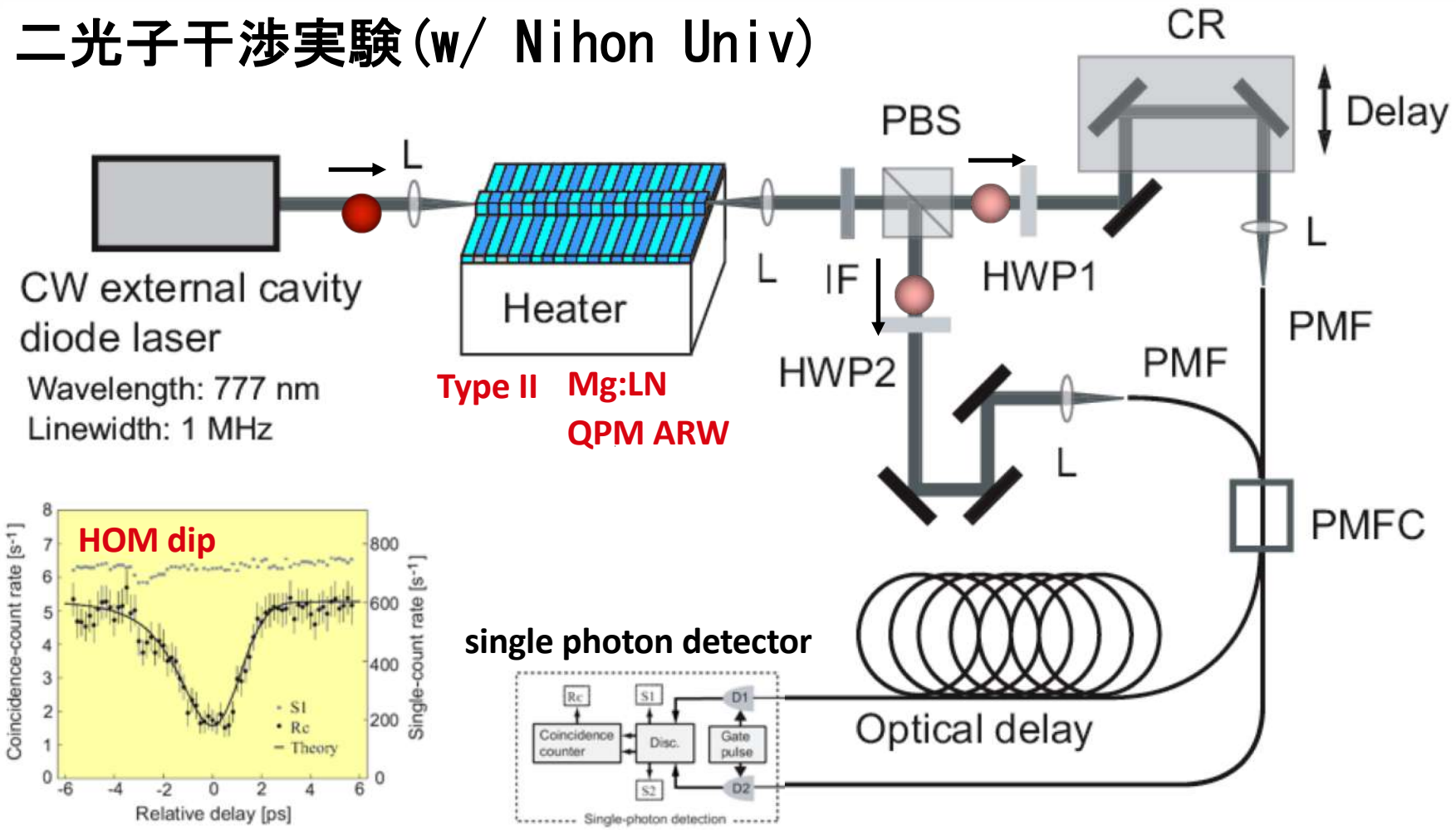




G. Fujii, N. Namekata, M. Motoya, S. Kurimura, S. Inoue, Opt. Exp. 15, p.12769 (2007)

量子通信用直交偏光もつれ光子

- 二光子干渉実験(w/ Nihon Univ)

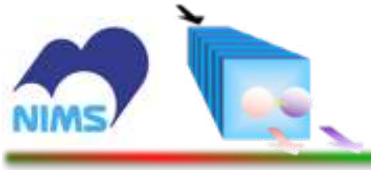


G. Fujii, N. Namekata, M. Motoya, S. Kurimura, S. Inoue: Opt. Exp. 15(2007) p. 12769.

直交偏光量子もつれ光源の比較

Device	Wavelength (nm)	Efficiency (%/W)	Stability	Designability	ref
BPM bulk BBO	702, 702	< 0.1	+	-	1)
QPM LN Ti-diffused waveguide	1560, 1560	~ 6	-	+	2)3)
QPM Mg:LN adhered ridge waveguide	1540, 1540	90	+	+	4)

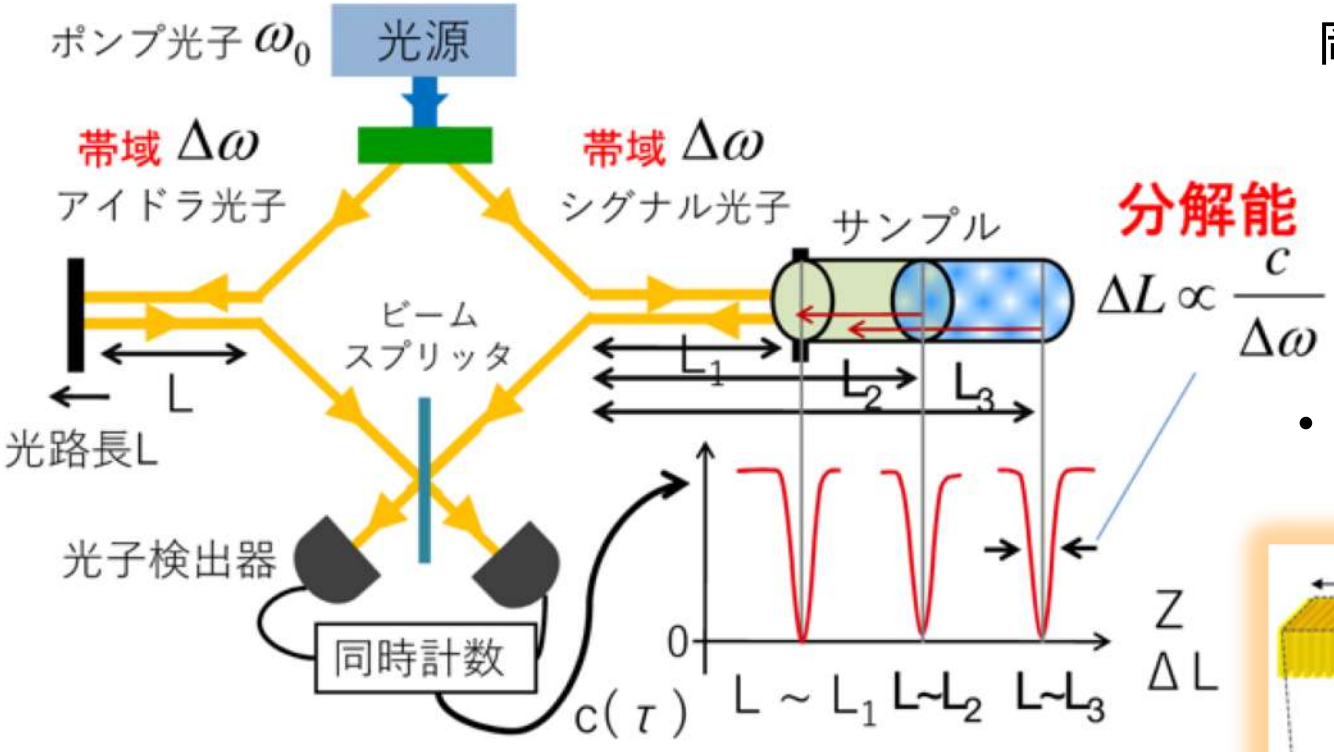
1) S. Takeuchi, Opt. Lett. vol. 26, p.843 (2001).
2) T. Suhara, H. Okabe,, M. Fujimura, IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 19, p. 1093 (2007).
3) A. Thomas, H. Herrmann, W. Sohler, ECIO, ThC4 (2010).
4) G. Fujii, N. Namekata, M. Motoya, S. Kurimura, S. Inoue, Opt. Exp. vol. 15, p.12769 (2007).



量子光断層トモグラフィ(OCT)用デバイス

量子OCT用広帯域もつれ光子光源

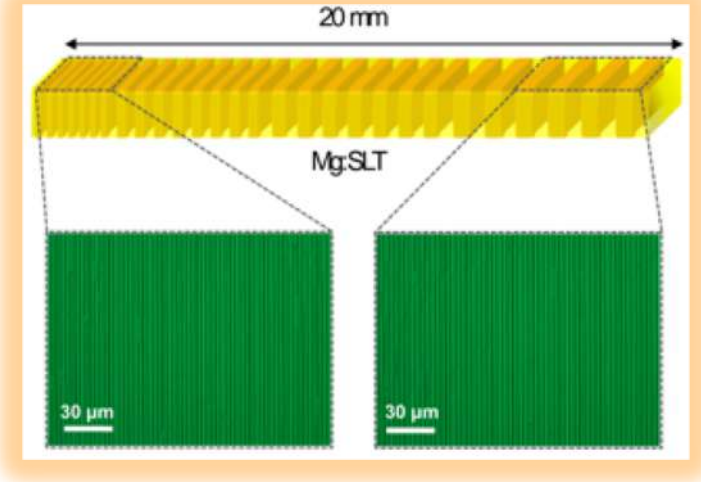
- 量子OCT測定光学系（w/ Kyoto University）



岡本准教授　竹内教授

- 特製非線形光学デバイス

周期チャープ



M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, N. Nishizawa, S. Kurimura, S. Takeuchi, Scientific Reports, 5 18042 (2015).

周期チャープの連続性と作製方法

Device	Chirp rate	Device length (mm)	Segments	Bandwidth FWHM (nm)	Generation efficiency (pairs/(μW·s))
Slab	0%	20	10	26	2.4×10^6
waveguide	3%	20	10	190	8.2×10^5
Ridge [27]	0%	10	10	16	2.7×10^6
waveguide	3%	10	10	229	2.7×10^6
Bulk [11]	6.7%	20	100	380	2.0×10^3

0.3%/step (9.9nm)
Photolithography
民間でも可

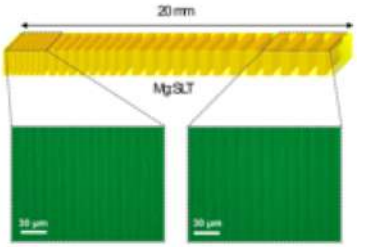
0.067%/step (2.2nm)
EB lithography
NIMSのみ
（EB+ソフト+分極反転)

効率：　バルク ＜ スラブ ＜ リッジ

帯域：　周期単一 ＜ 周期チャープ3% ＜ 周期チャープ6%

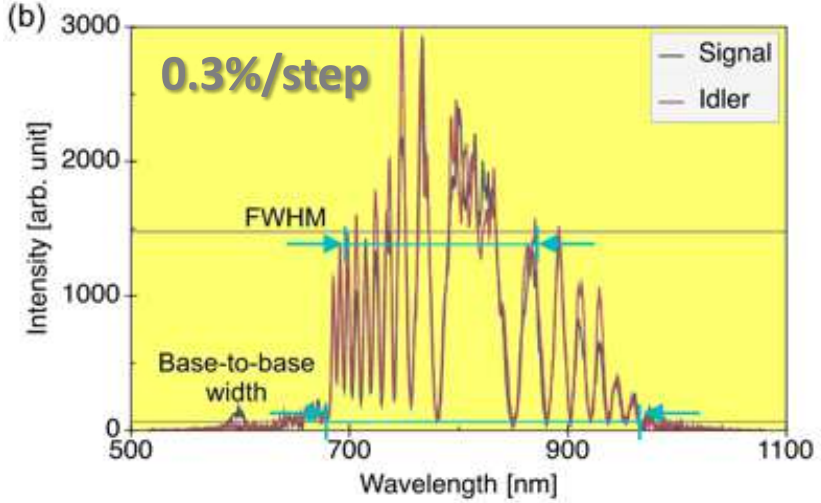
スペクトル品質：10 stepチャープ　＜　100 stepチャープ

作製コスト：　10 stepチャープ　＜　100 stepチャープ
（Photolithography）　(EB lithography)

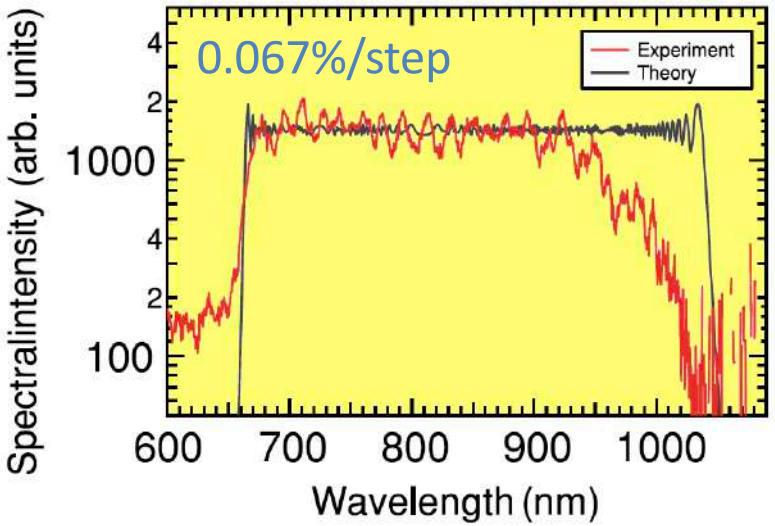


周期チャープの連続性とスペクトル/二光子干渉性

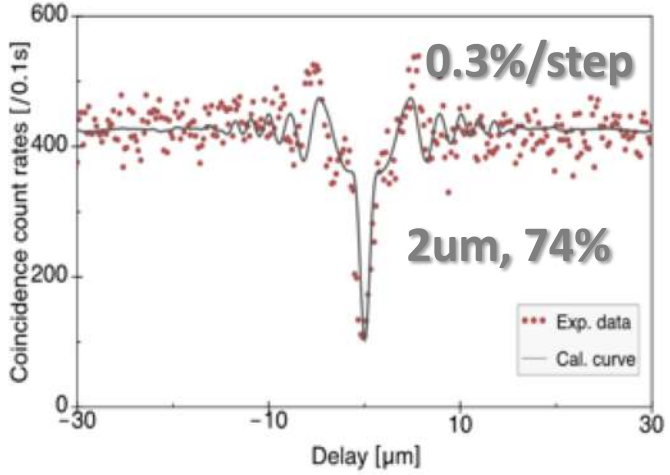
1) 10 step chirp



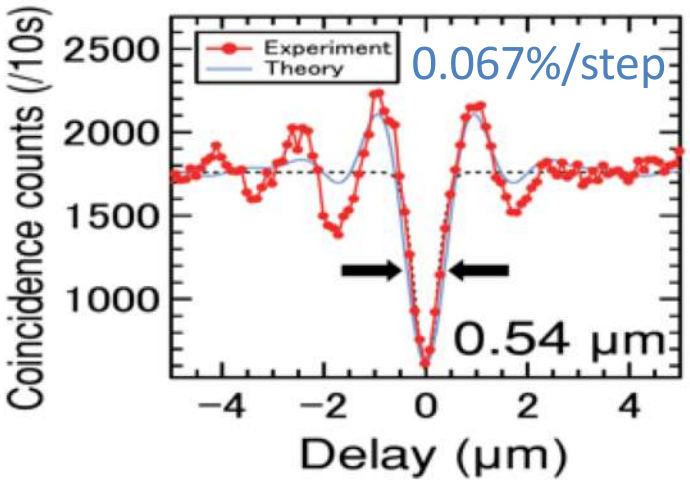
2) 100 step chirp



1) 10 step chirp



2) 100 step chirp

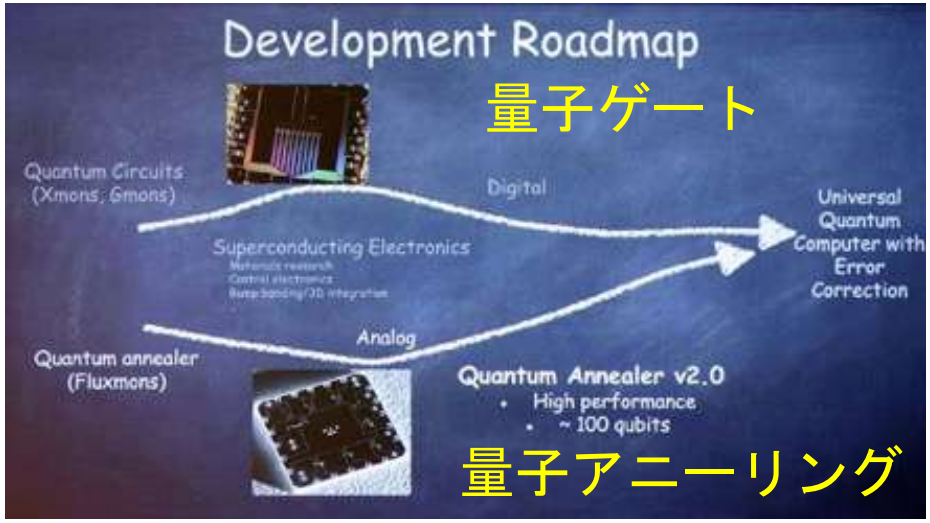


>95%

光による量子計算機

量子計算機の動向

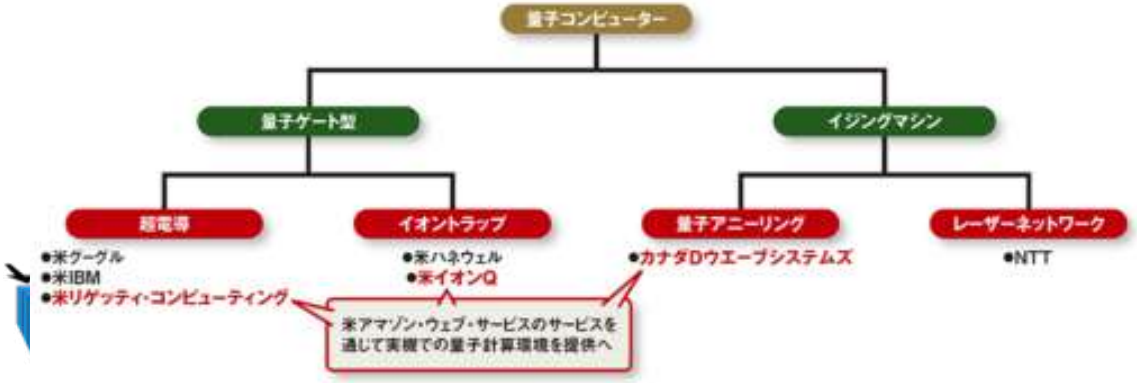
- Googleのroad map@AQC 2016



量子コンピュータと既存のコンピュータとを組み合わせて活用する計画や、数年内に100個の「量子ビット」を搭載した量子コンピュータを実現する方針などを明らかにしている（2016）

cf. 27 qubit→ 53qubit@2021
5000 qubit @2022
（量子アニーリング）

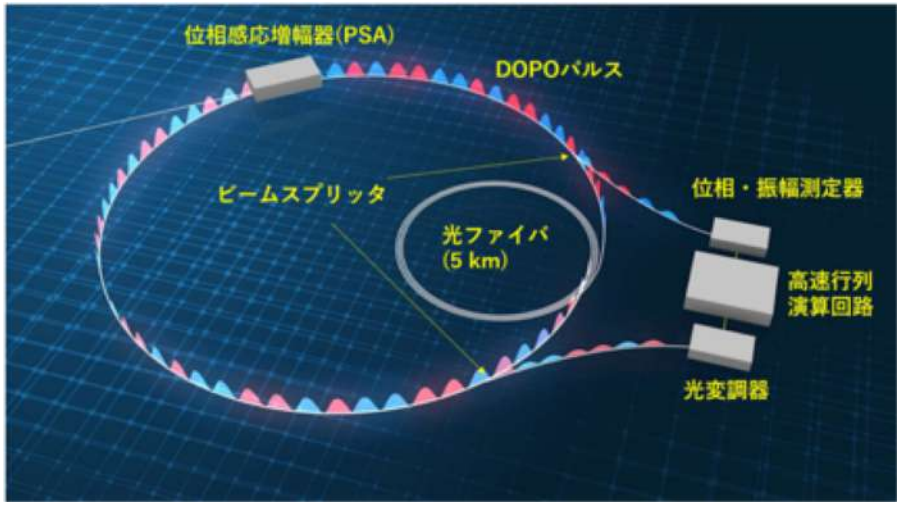
- 実機での計算を実現している量子コンピューター



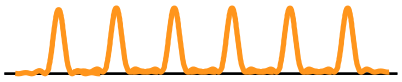
Googleは
量子アニーラー（D-wave製）
量子アニーラー（自社開発）
量子ゲート型コンピュータ
の三種類を試みている。

高速パルスによる通信/演算

- **光パルス計算によるコヒーレントイジングマシン(NTT他)**



Flying qubit



2016年:

Δt = 1 ns　2048個の光パルス

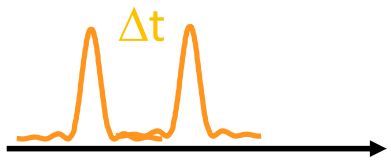
2021年:

Δt = 0.2 ns　100,512個の光パルス*

＊https://group.ntt/jp/newsrelease/2021/09/30/210930a.html

- **Time-bin Qubit**

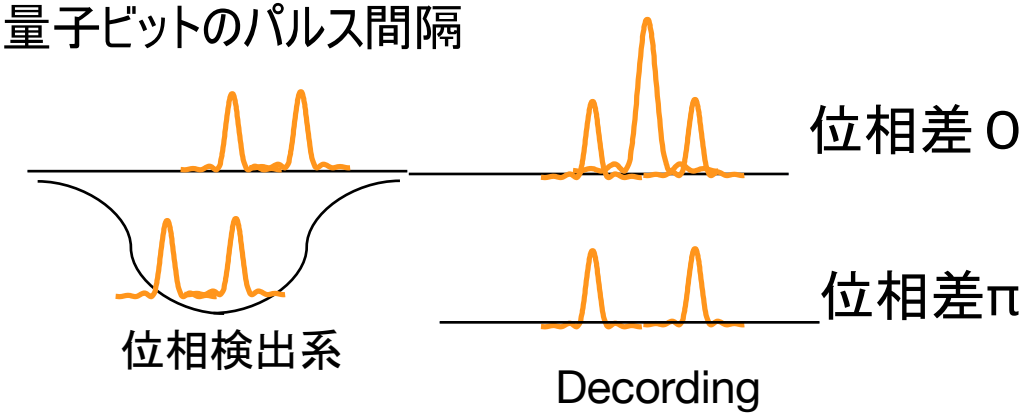
Δt: Time-bin量子ビットのパルス間隔



$\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$

偏光回転に強い

相対位相をビット情報に



和周波発生(SFG)超高速サンプリング

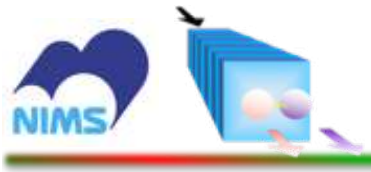
高速光パルス計測

•代表的な計測手法(通信波長帯)

	繰り返し	時間分解能	感度	ノイズ	
自己相関器	不要	10 fs	×	○	
ストリークカメラ	不要	1 ps	△	×	
APD+サンプリングオシロ	必要	20 ps	○	△	電気系で時間分解能が制約
和周波光サンプリング	不要	1 ps	◎	◎	ポンプ光強度で感度を可変

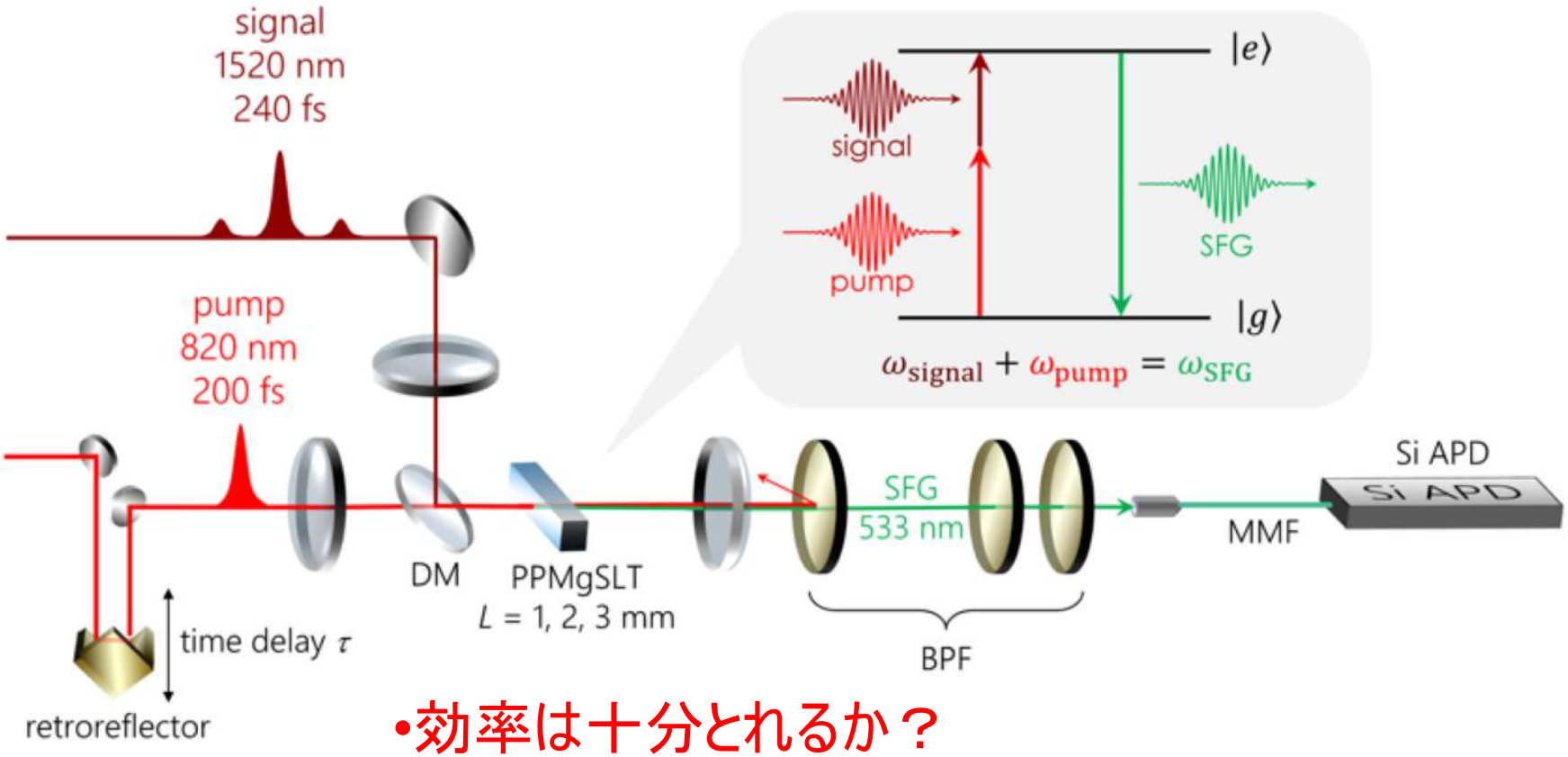
•和周波光サンプリング

- 和周波発生のレスポンスが超高速
  ← キャリアの実励起がない仮想励起を用いる
- 感度の改善が容易
  ← ポンプ光強度向上で変換効率を上げられる
- ノイズレベルが低い
  ← 信号キャリアのフィルタリングが容易



和周波サンプリング検出系の検討

- 和周波発生w/ QPM MgSLT(1520 + 820 -> 533)



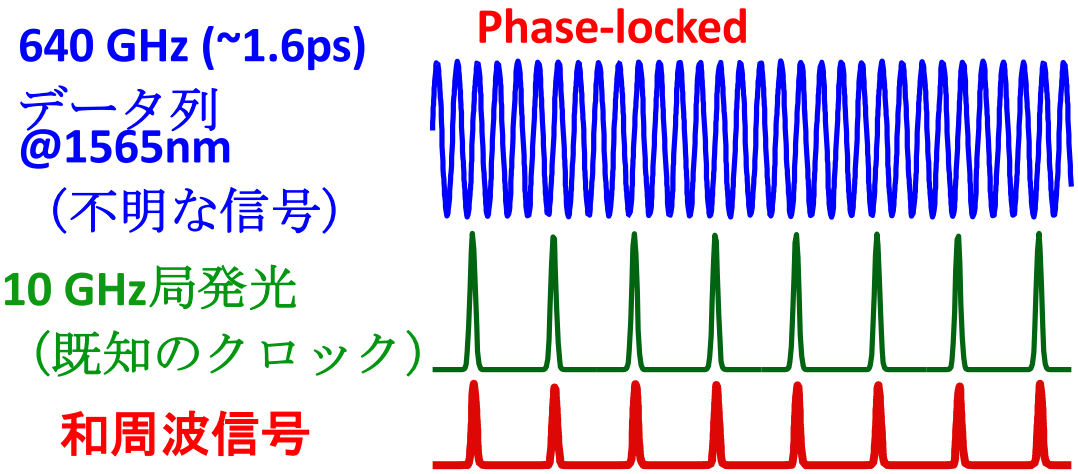
- 効率は十分とれるか？
- 時間分解能は確保できるか？

先立つ実験：通信帯超高速サンプリング

•擬似位相整合和周波発生によるパルスの時間分解測定 (w/Telecom Paris Tech, DTU)

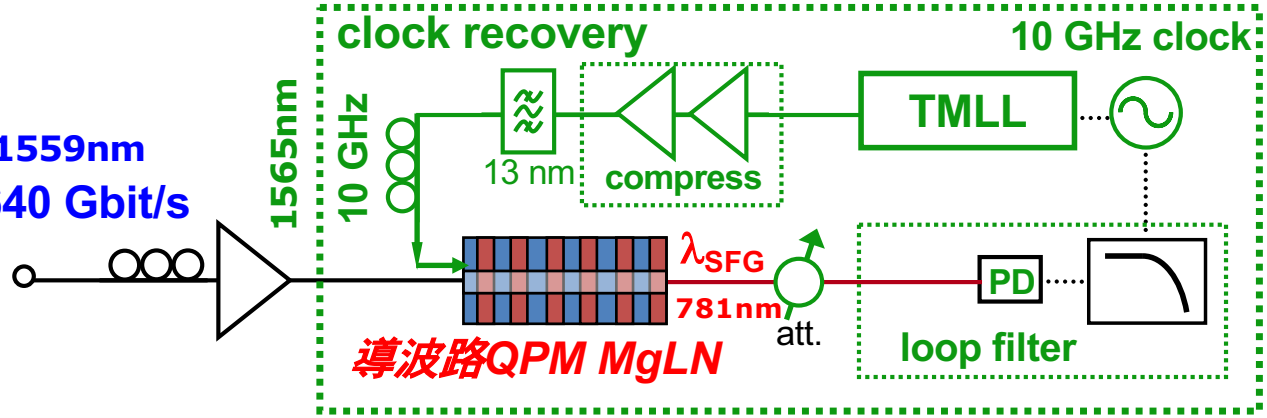
- 超高速データ信号からクロック周波数を抽出する
  タイミング信号: コーディング／デコーディング, スイッチング
- 640GHzデータ信号からのクロック再生
  光サンプリング: 和周波発生デバイス (1550nm+1530nm-> 770 nm)

1. 6psまでは確認済み



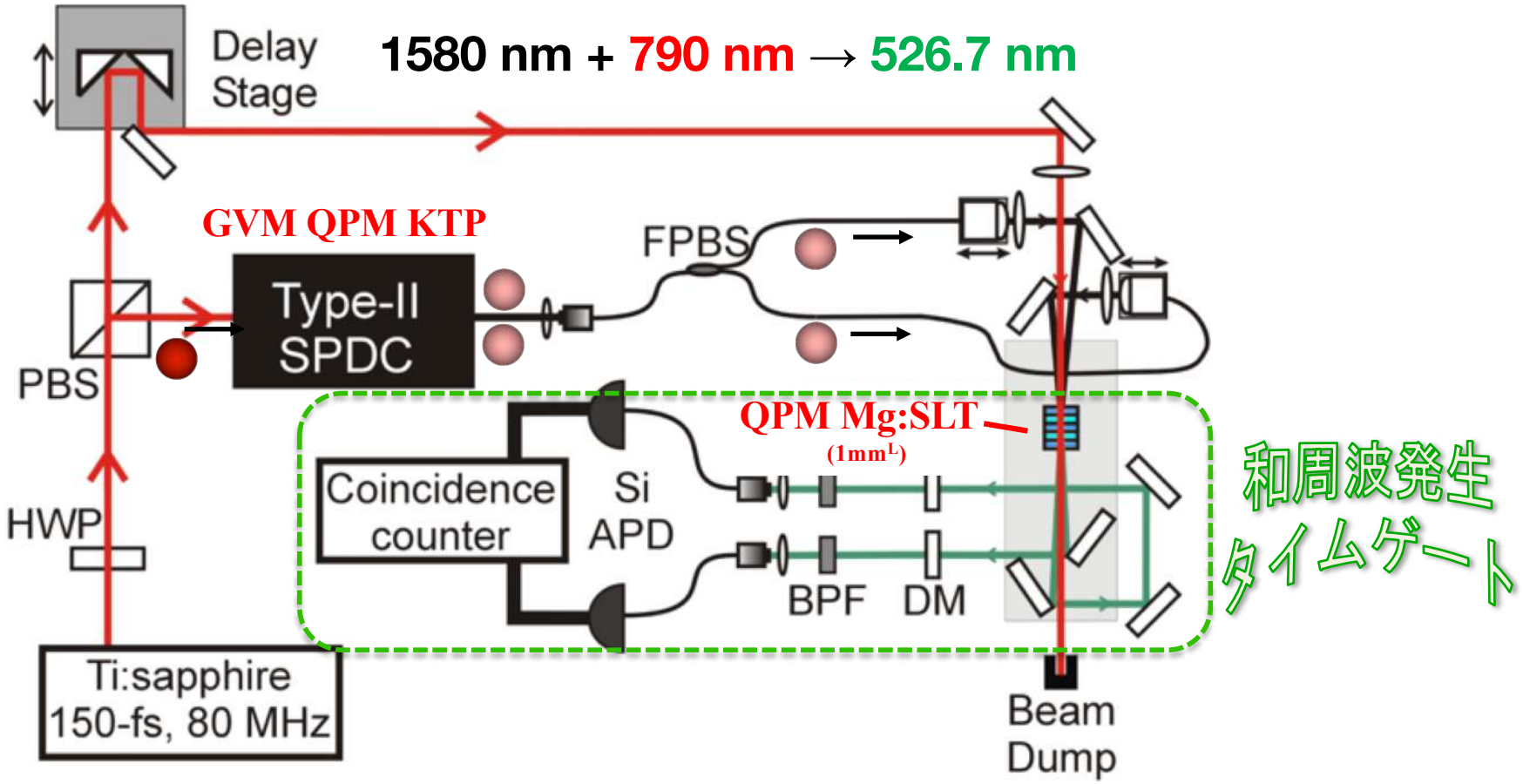
1565 nm+1559 nm ->781 nm

L.K. Oxenlφwe, F. Gomez Agis, C. Ware,
S. Kurimura, H.C.H. Mulvad et. al,
"640 Gbit/s clock recovery using periodically poled lithium niobate,"
Electron. Lett. 44, p.370 (2008).



もつれ量子光超高速サンプリング

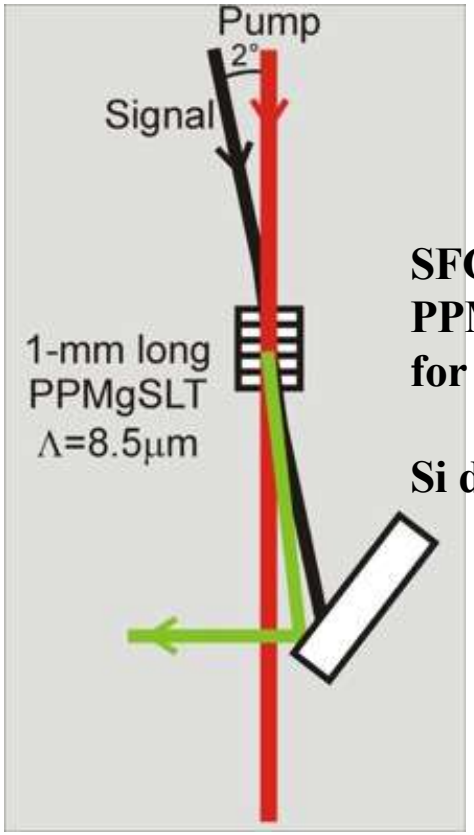
•QPM-SFGによるパルスの時間分解測定(w/MIT)



O. Kuzucu, F. N. C. Wong, S. Kurimura and S. Tovstonog, Opt. Lett. 33 (2008) 2257-2259.
Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 153602-1.

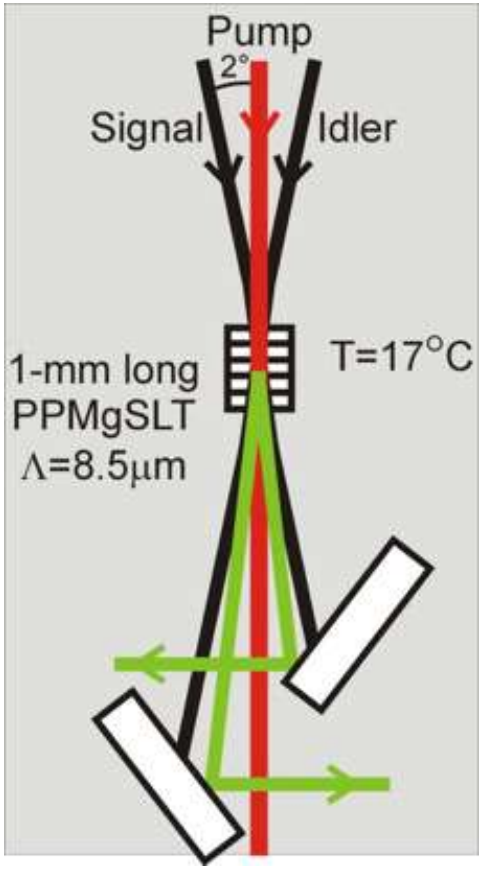
SFG time gating in ultrafast SPDC

- **SFG time gate by Mg:SLT (MIT, NIMS)**



SFG in PPMgSLT for Time gate

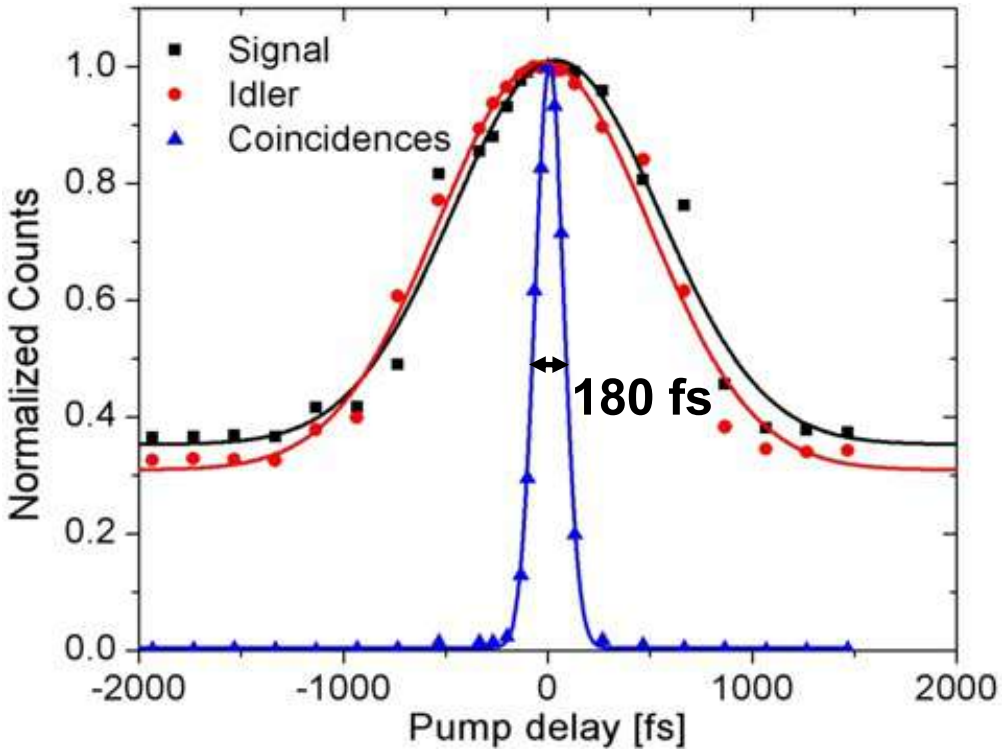
Si detector



Pick up photon by time gate for Q interference

Quantum coherence by SFG sampling

·Two-photon coherence time (MIT, NIMS)

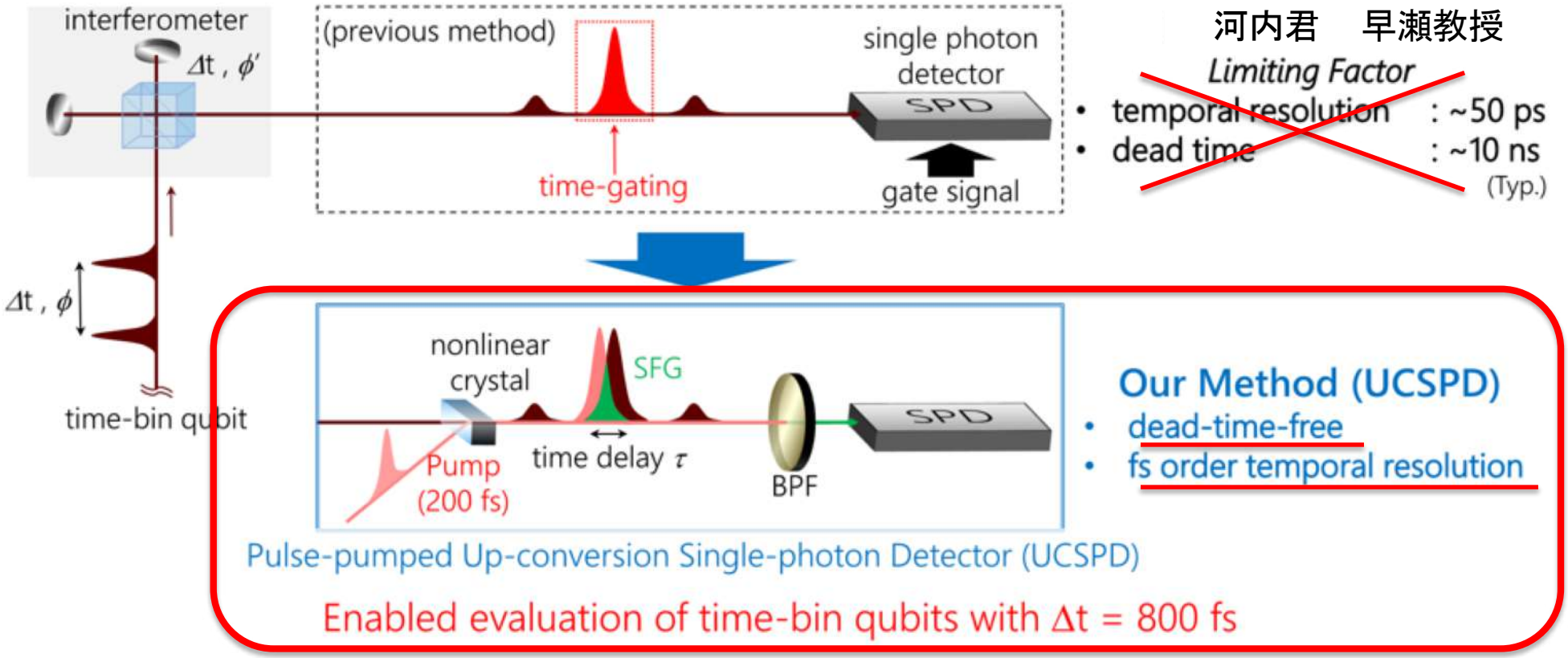


O. Kuzucu, F. N. C. Wong, S. Kurimura and S. Tovstonog,
Opt. Lett. 33 (2008) 2257-2259.
Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 153602-1.

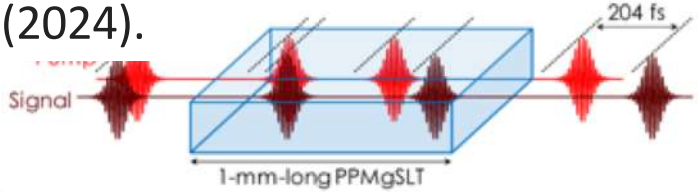
高速波長変換デバイスによるパルス計測

- Time-bin qubitの和周波サンプリング（w/Keio Univ.）

河内君　早瀬教授



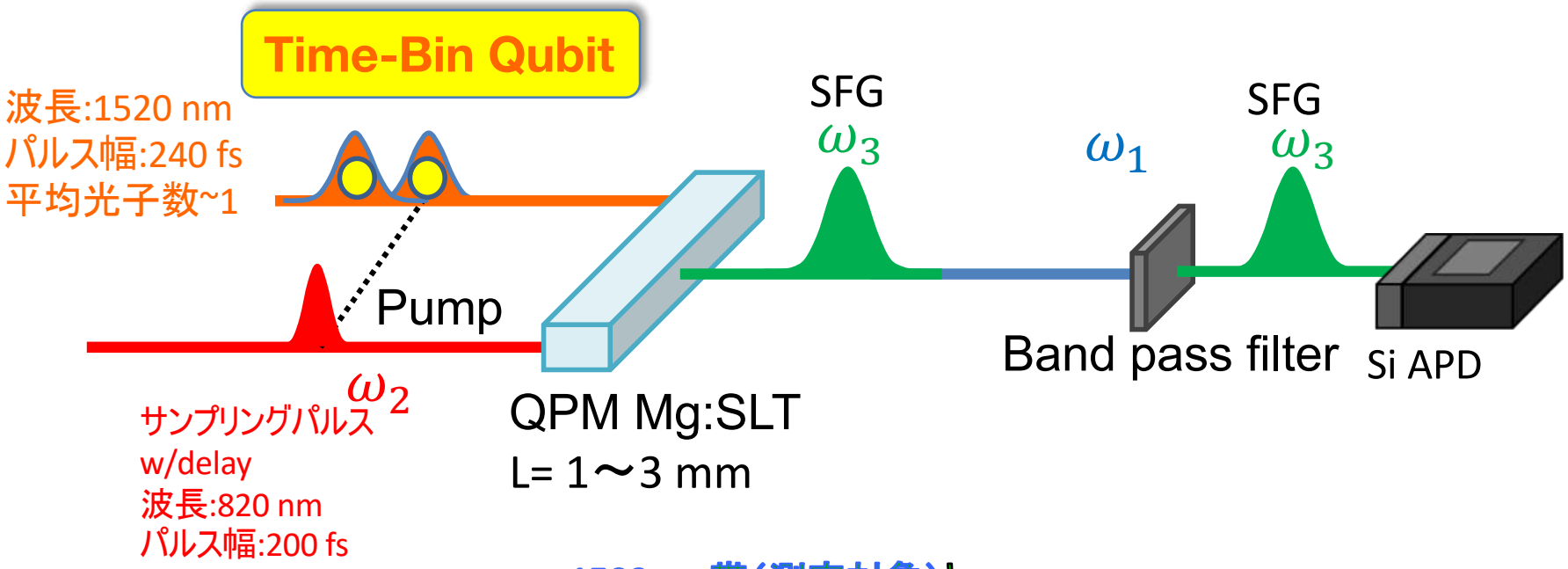
Y. Kochi, S. Kurimura, J. Hayase: Opt. Exp. 32 pp. 47549-47560 (2024).



SFG光サンプリングのガイドラインをつくる

- Mg:SLTの和周波発生によるパルスの時間分解測定(w/Keio)

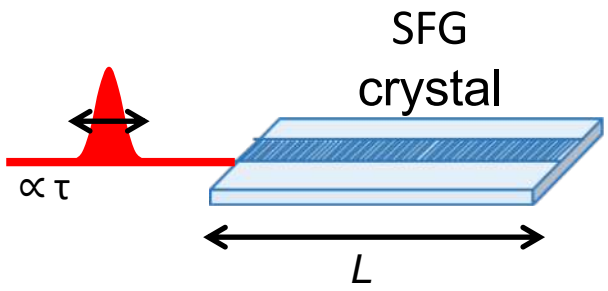
時間分解能と効率をみてデバイス選定のガイドラインをつくりたい
→　SFGサンプリングの設計指針を得たい



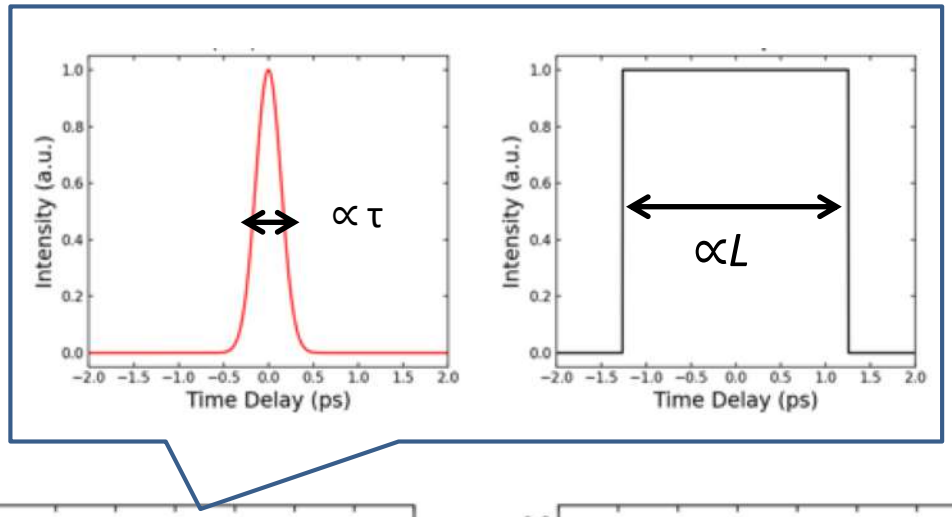
1500 nm帯（測定対象）と
800 nm光（サンプリングパルス）の
和周波発生530 nm光で時間分解測定

SFGサンプリングの物理

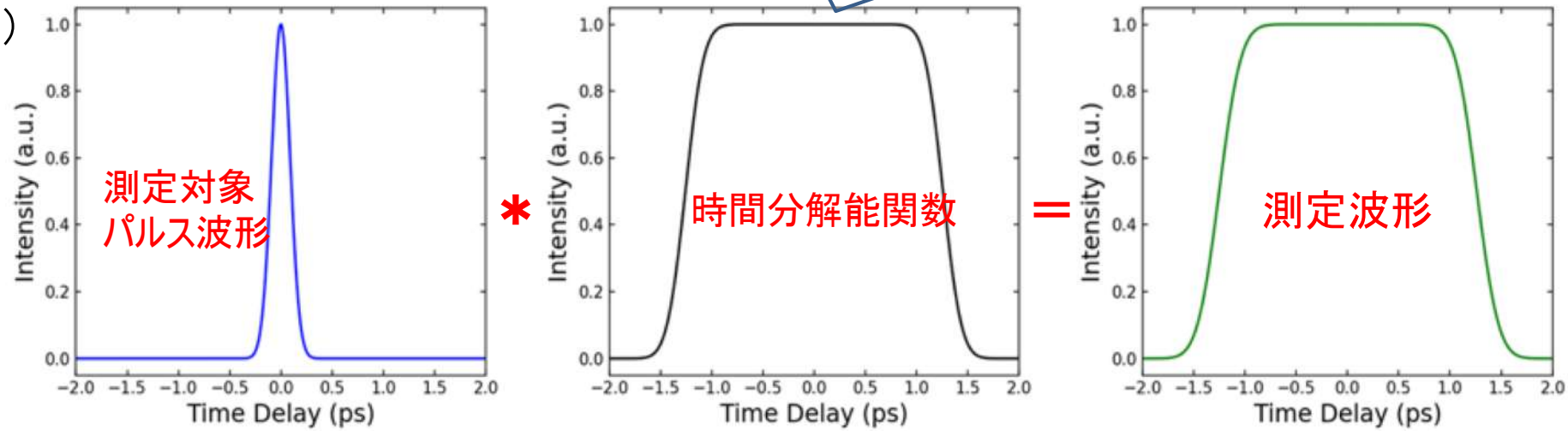
- **和周波発生も含む検出器**



（Pump光の時間幅）　（結晶中の群速度差）

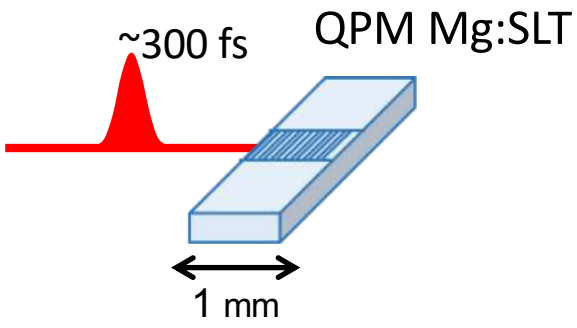


ex.）

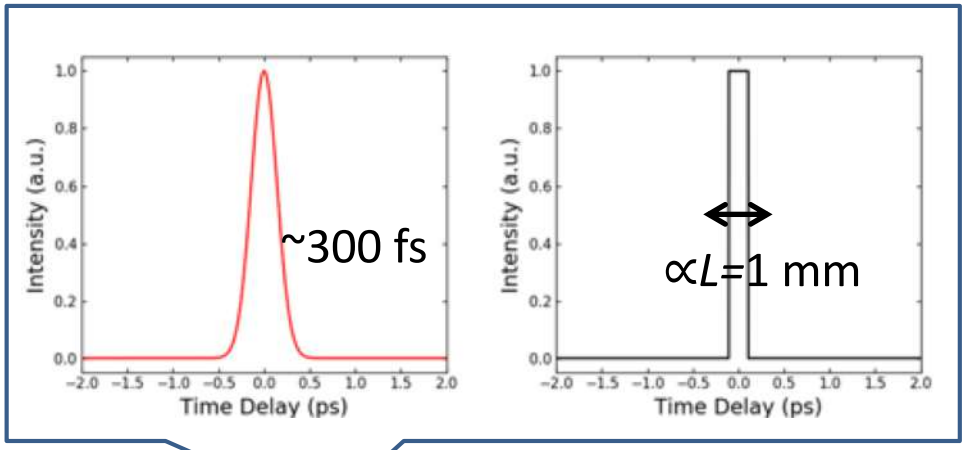


サンプリングの時間分解能（計算）

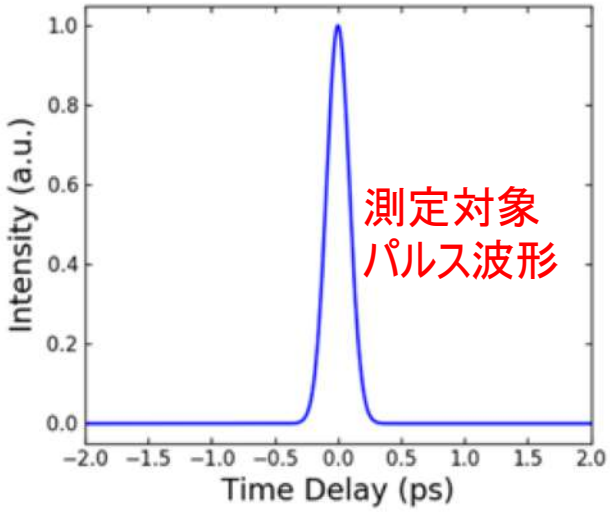
- **理論計算**



（Pump光の時間幅）　（結晶中の群速度差）

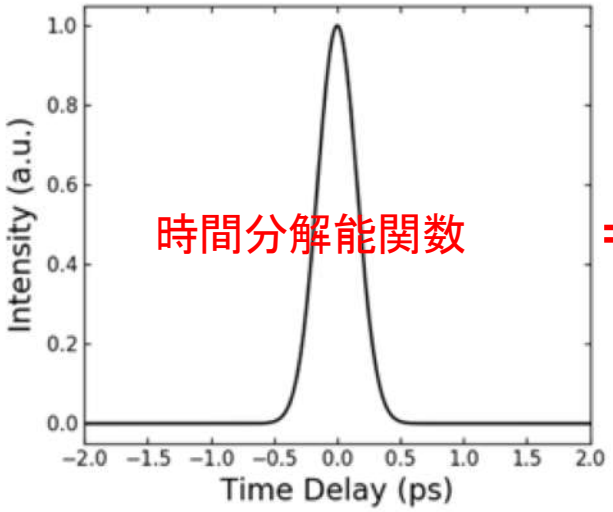


213 fs



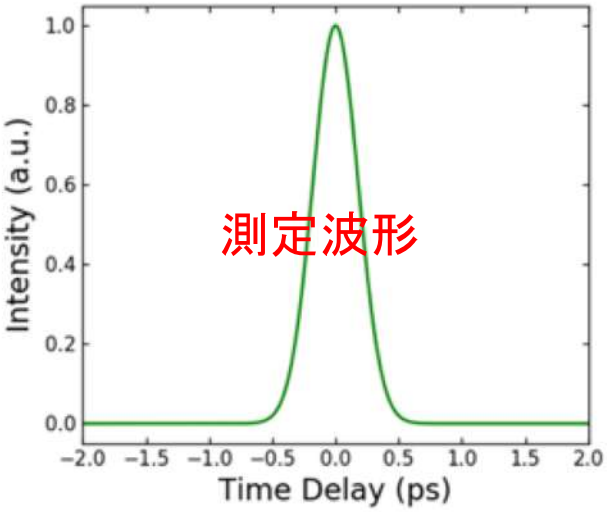
212 fs

＊



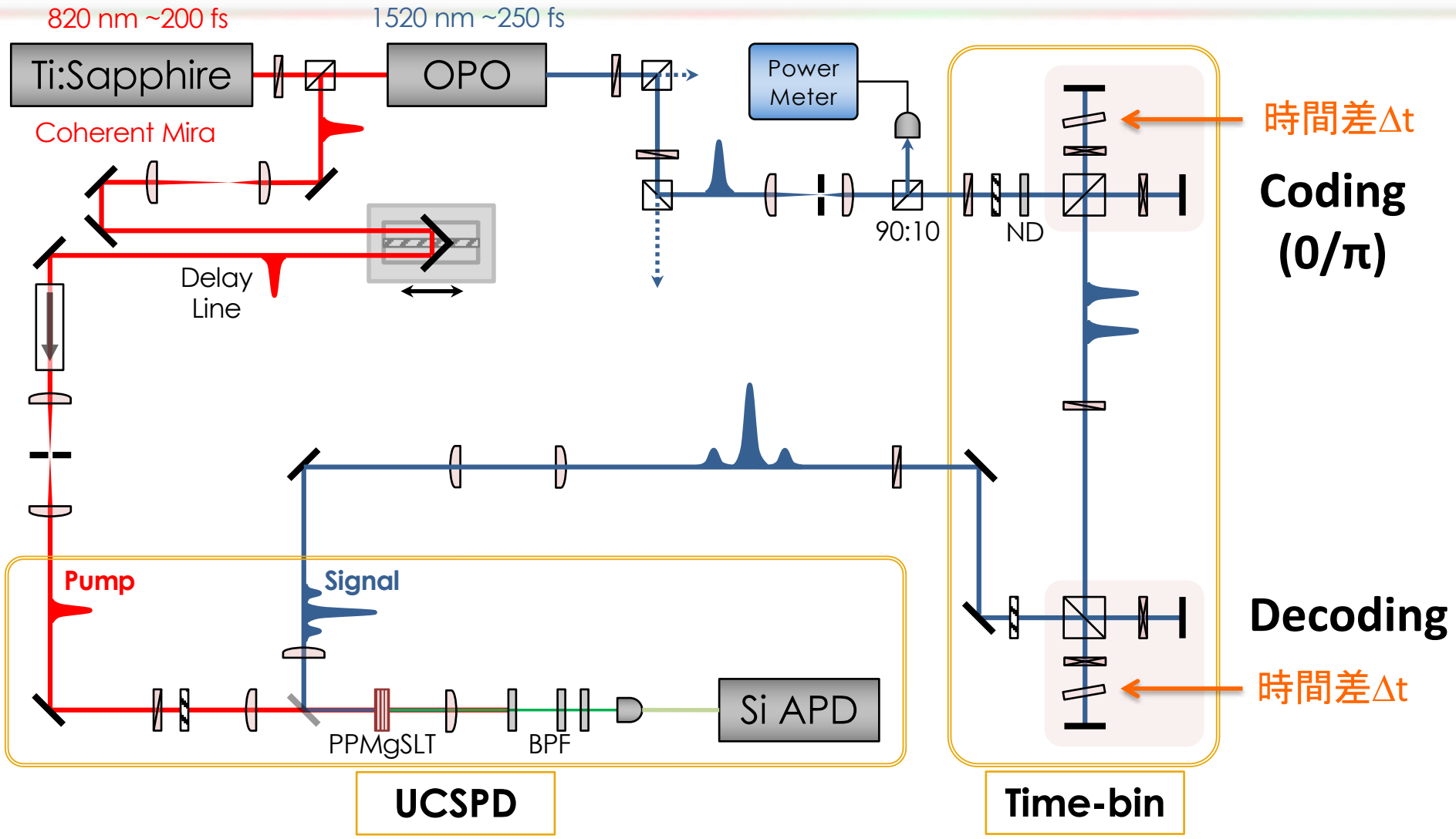
365 fs

＝



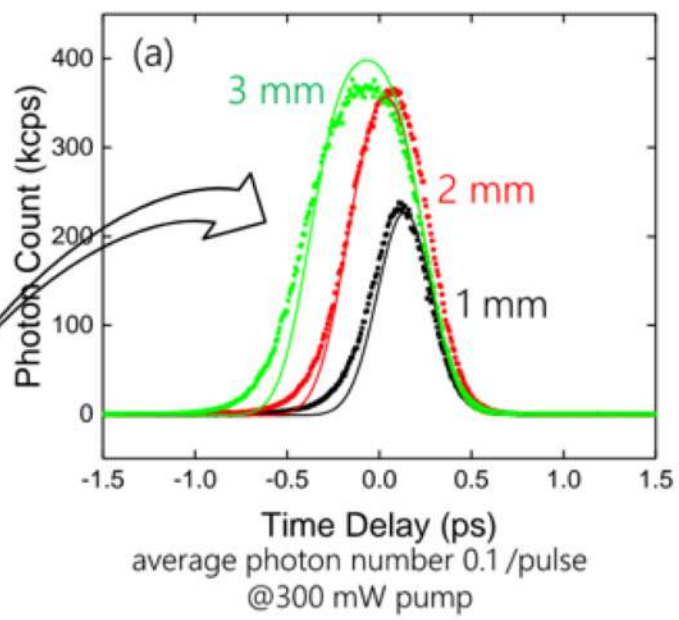
423 fs

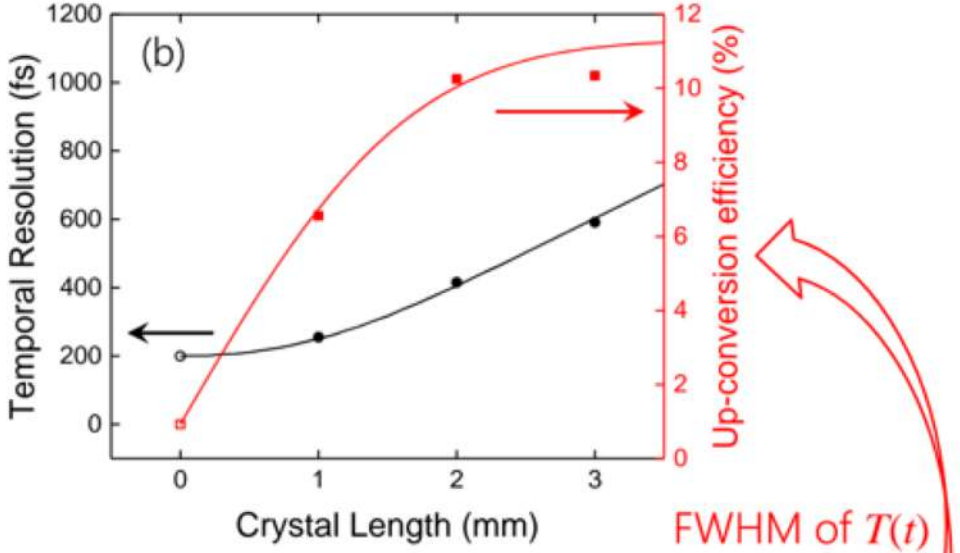
Time-bin QubitをSFGサンプリングの光学系



出力パルスとその時間分解能

- 和周波サンプリングの時間分解能





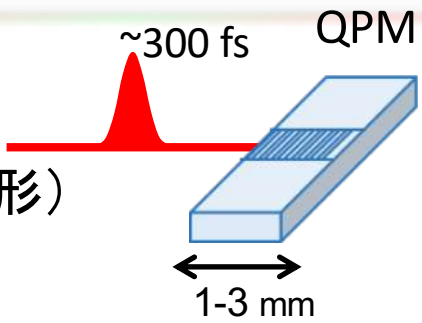
Group delay : 204 fs/mm (calculated using Sellmeier equation [1])

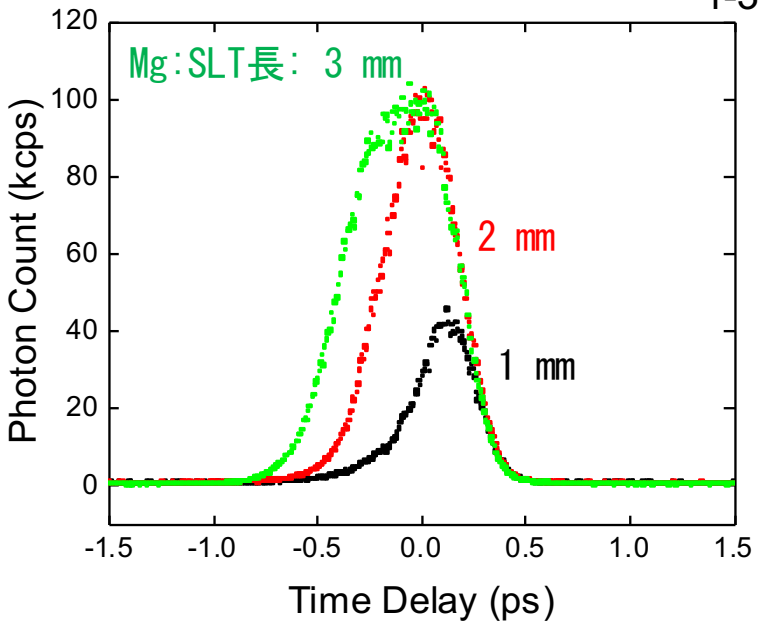
$$S_{\mathrm{out}}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\mathrm{in}}(t)T(t-\tau)dt = (S_{\mathrm{in}} * T)(\tau) \qquad T(t) \equiv (P * G)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\tau')G(t-\tau')d\tau'$$

[1] H. H. Lim, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 0–4 (2013).

和周波サンプリングの時間分解能(実験)

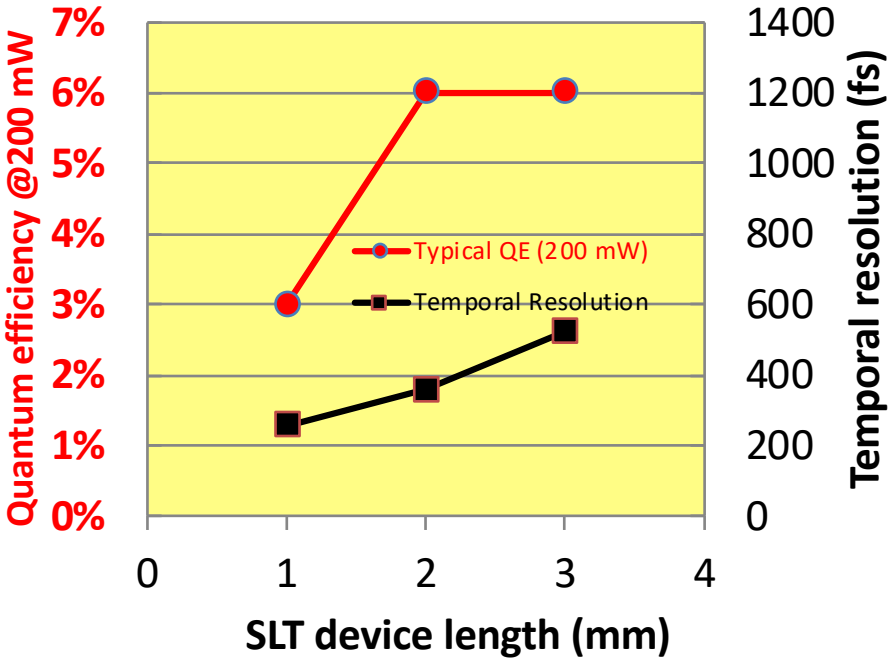
● 和周波光の測定波形
(センターパルスの干渉波形)





平均光子数0.1 Signal光
(いわゆるweak coherent光)
での相関波形

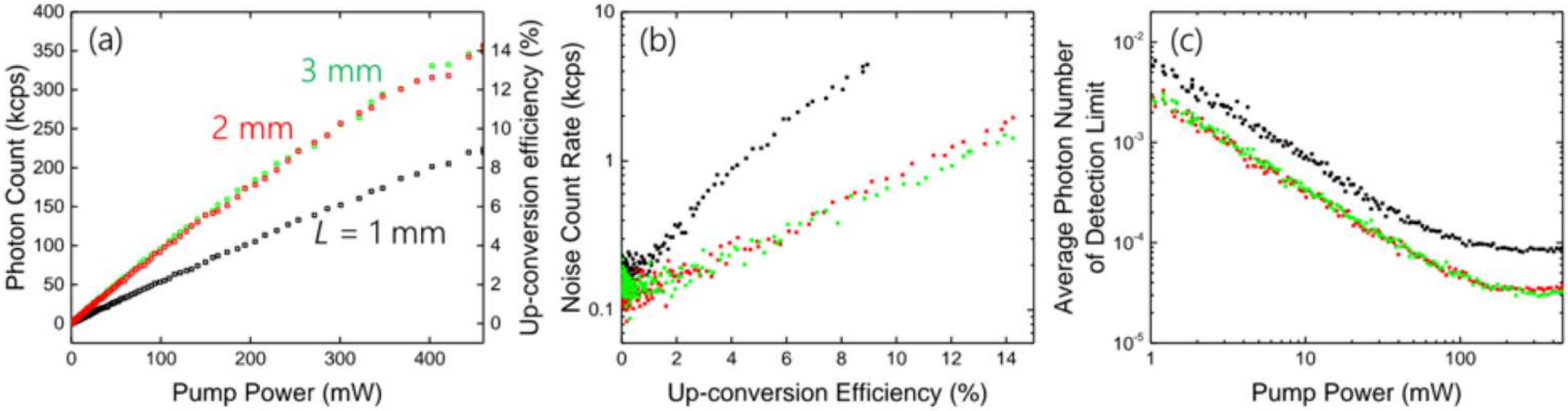
● 和周波光の効率、パルス幅



効率を維持して最小の時間分
解能を得るのは2 mm長

入出力特性

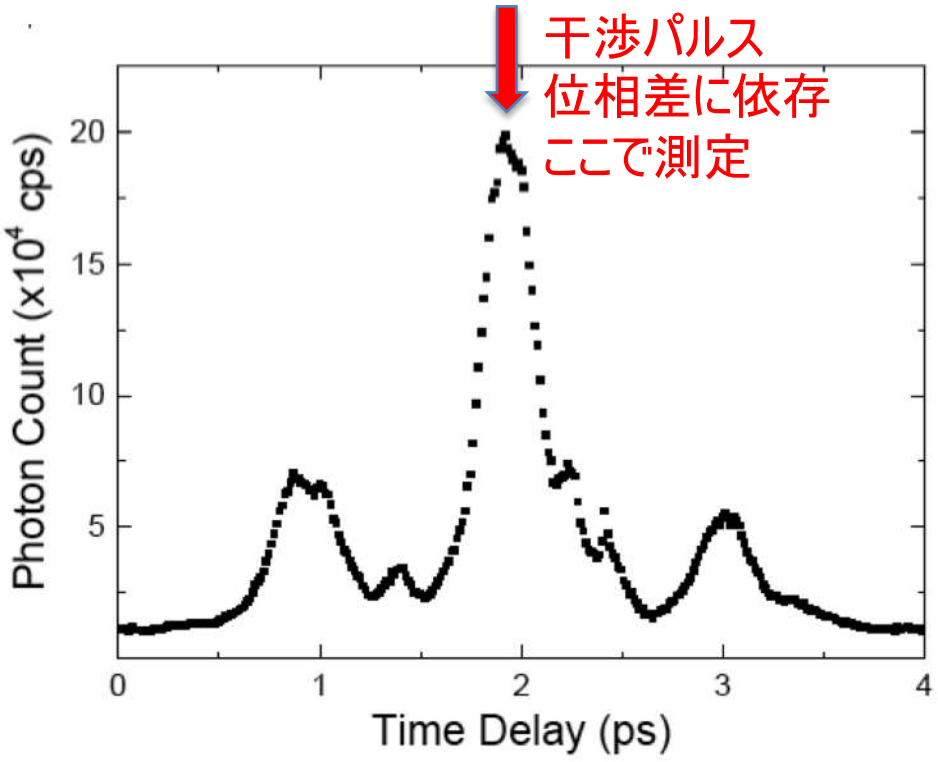
- 和周波サンプリングの効率と時間分解能



Crystal Length	Temporal Resolution	Typical QE (300 mW)	NCR @ Typical QE	Overall Optical System QE
1 mm	255 fs	6.1 %	1910 cps	2.1 %
2 mm	**415 fs**	**10.1 %**	800 cps	3.5 %
3 mm	591 fs	10.2 %	700 cps	3.6 %

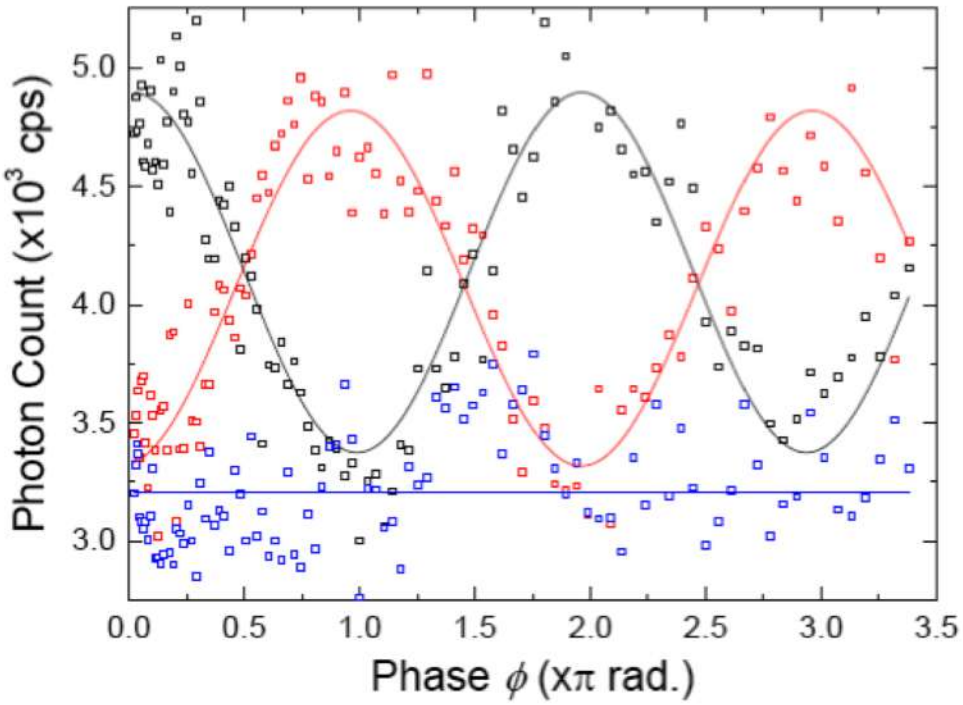
位相情報の抽出

- SFG信号の波形



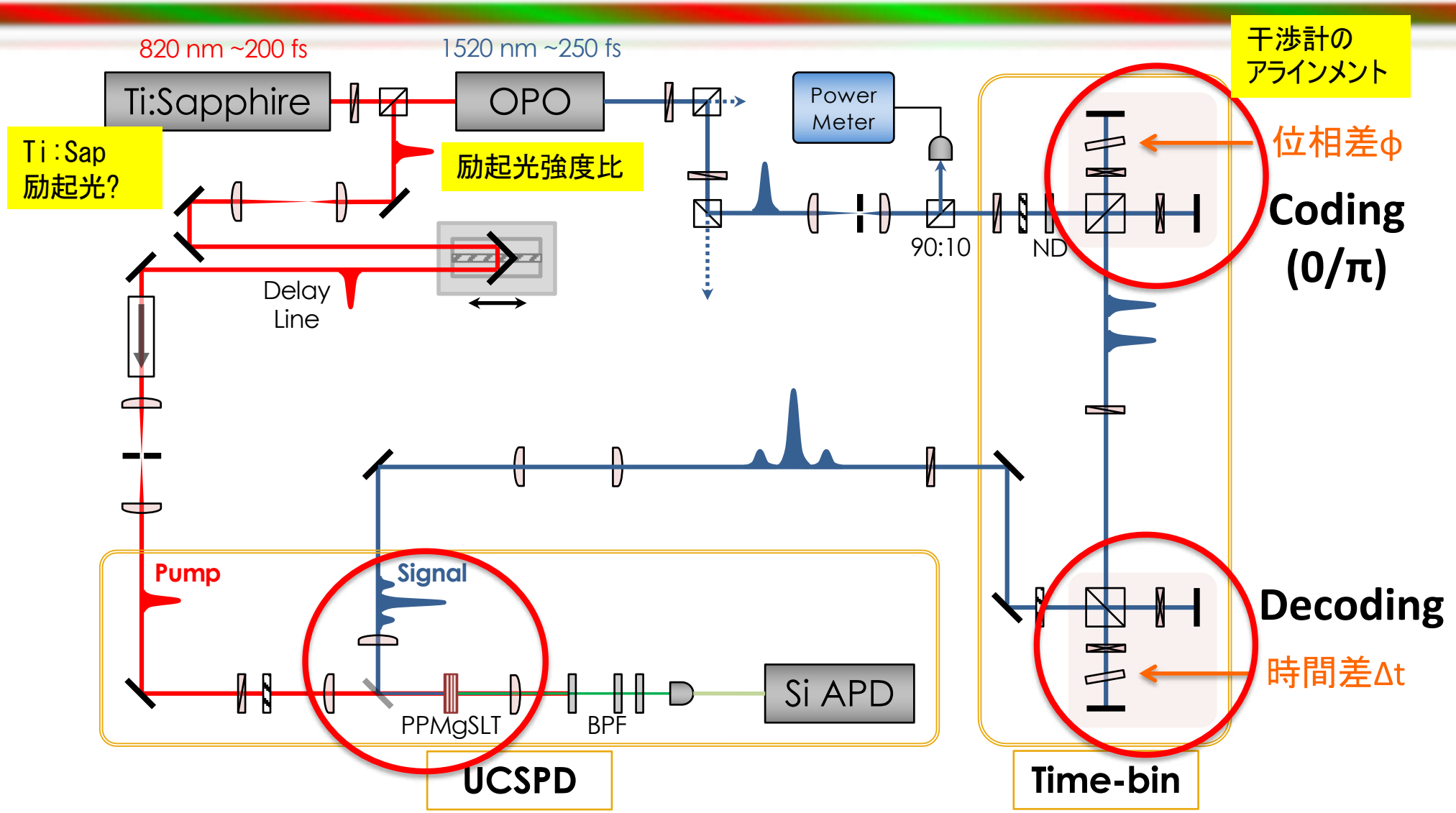
SFG効率：3.7%

- 干渉パルスの位相差φ依存性



2パルスの相対初期位相0(黒)、π（赤）に
対応した干渉信号を確認
干渉信号のコントラストは20%程度……

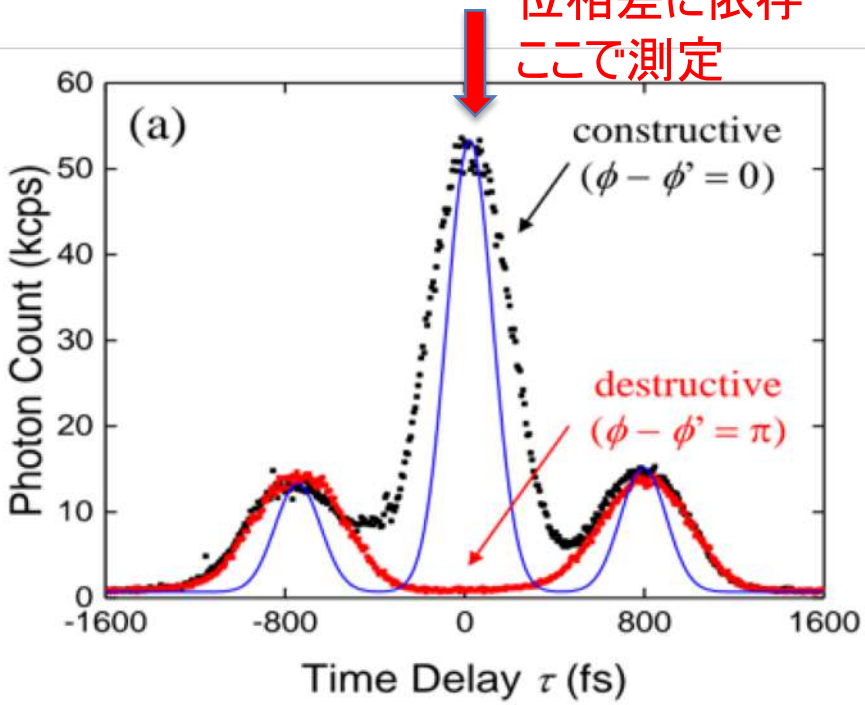
Time-bin Qubitサンプリングの光学系



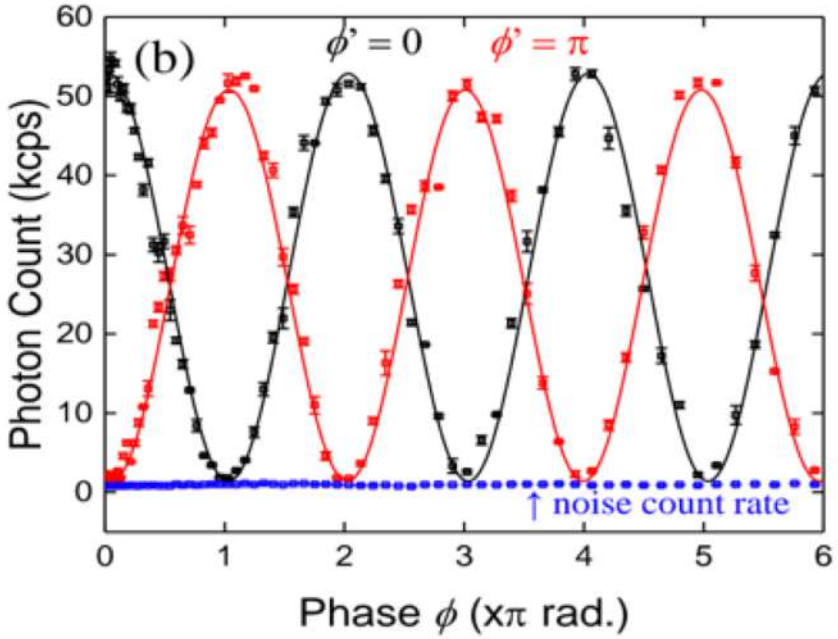
Decodingに成功

- Decoded pulse

干渉パルス
位相差に依存
ここで測定



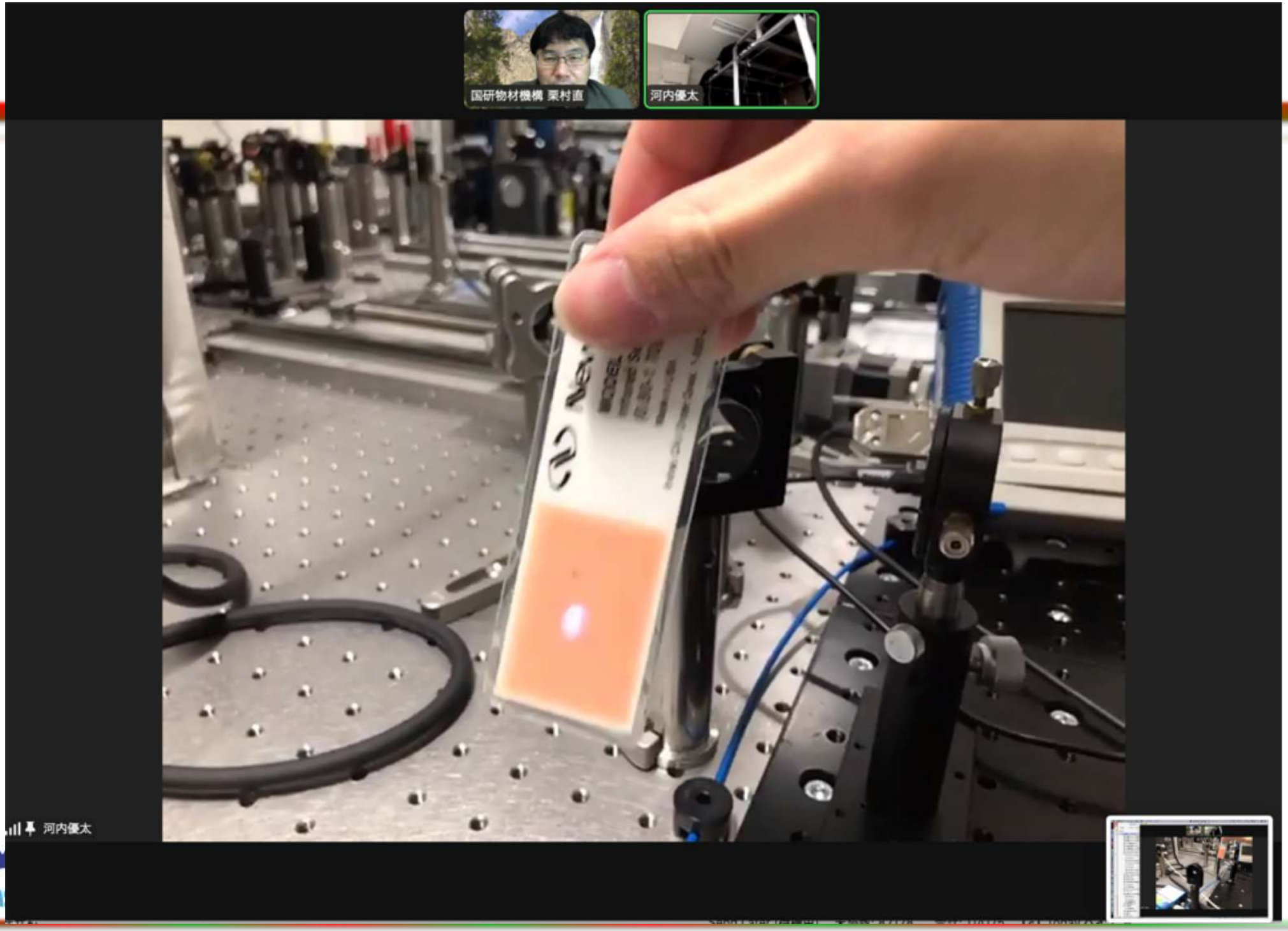
- Visibility



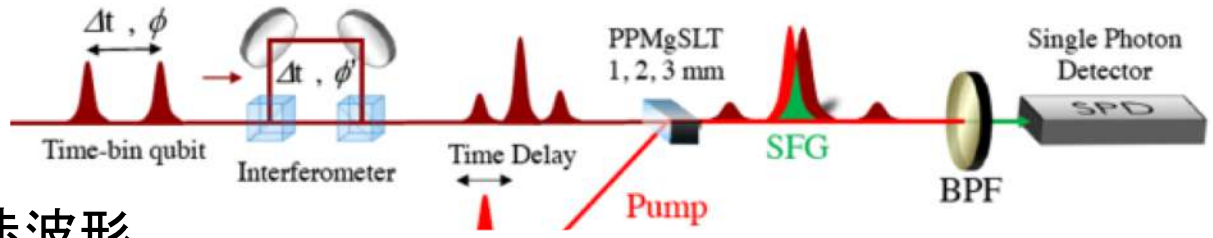
Pump power: 300 mW
Average photon number: 0.1 /time-bin
—: estimated original waveform

Visibility
98.2 ± 0.09 %
98.1 ± 0.09 %

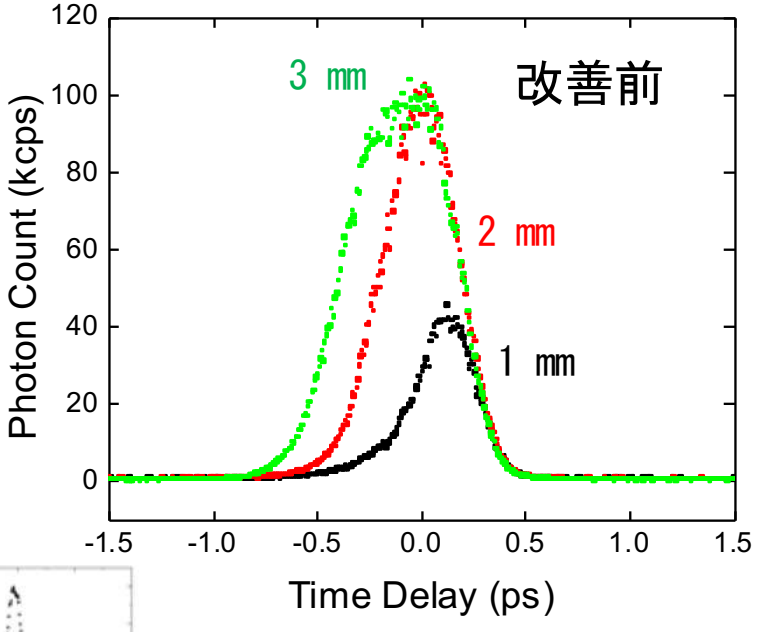
08:39
表示
河内優太
東北大
川内
キャンパス
応物
秋季
講演会
9/20
9/23
Sunao KURIMURA (NIMS)
河内優太

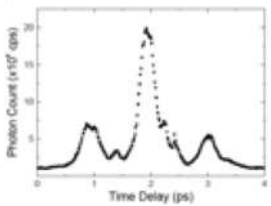

国研物材機構 栗村直
河内優太
河内優太

和周波光の時間分解能（改良実験）

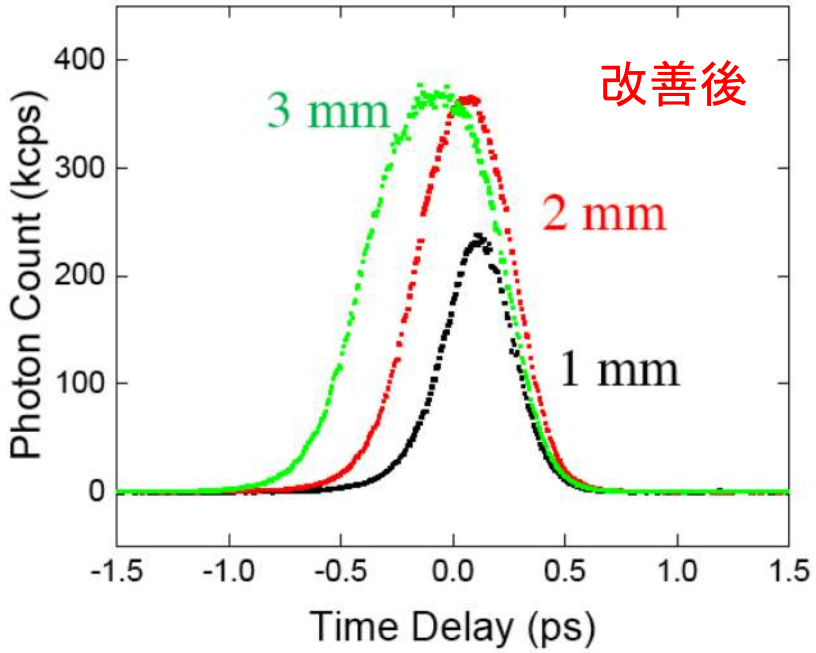


- センターパルスの干渉波形





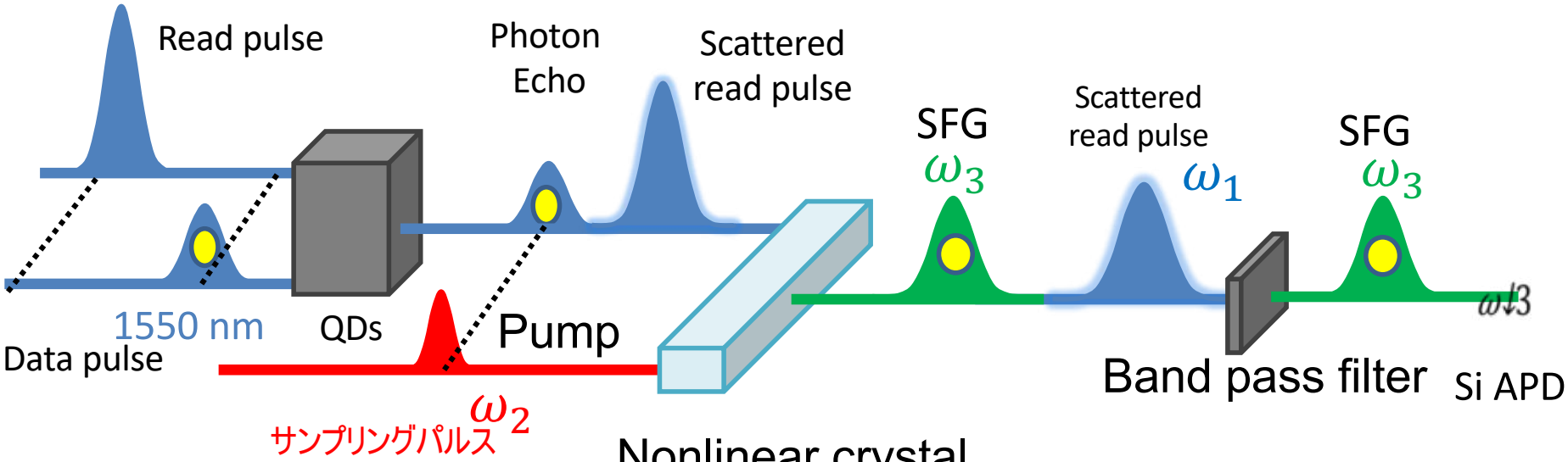
建設的干渉での相関波形



カウント数を約４倍に

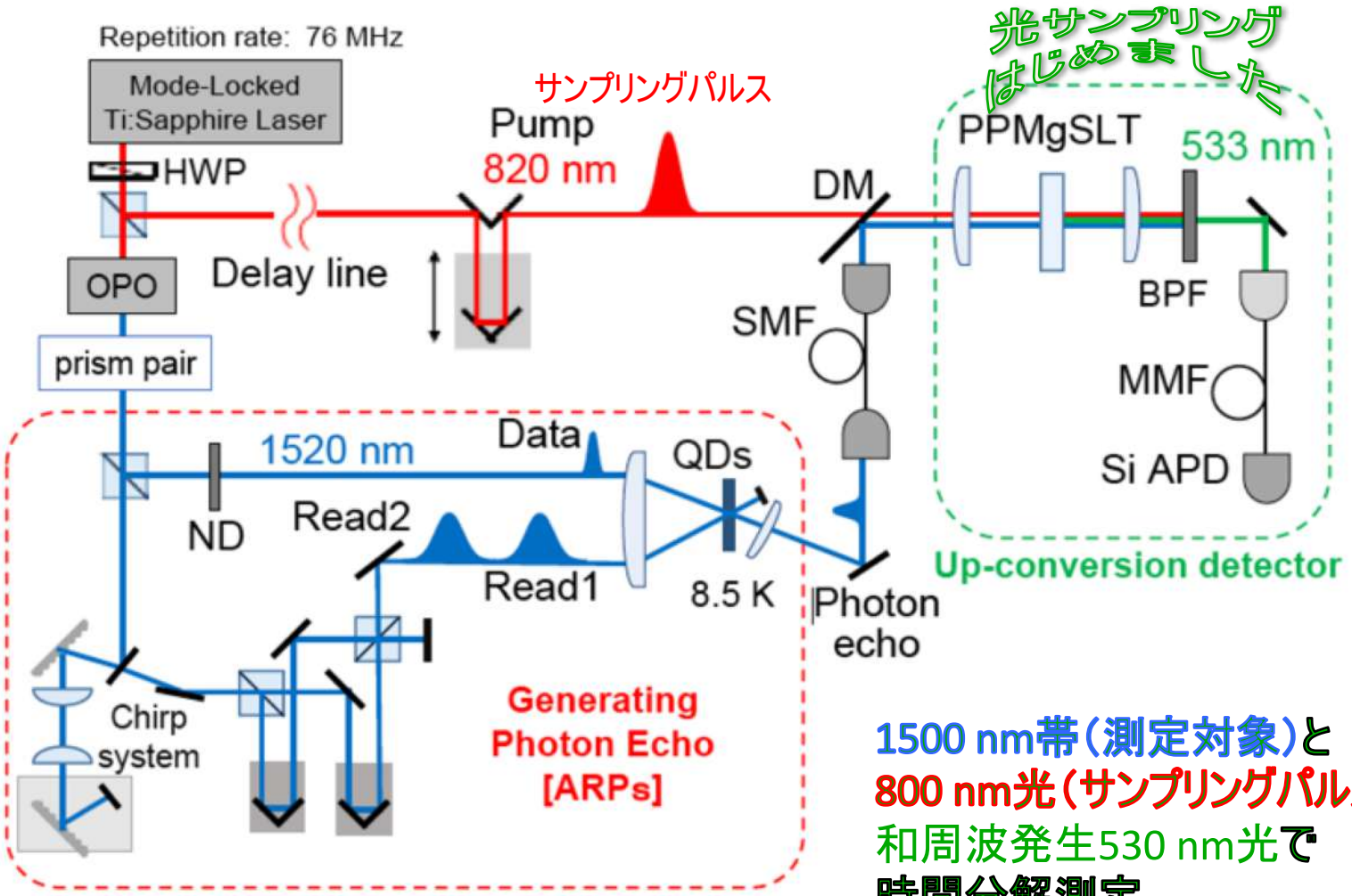
量子メモリ読み出し光の時間分解計測に挑戦

- フォトンエコーパルスの時間分解測定(w/Keio)



フォトンエコーの時間分解測定光学系

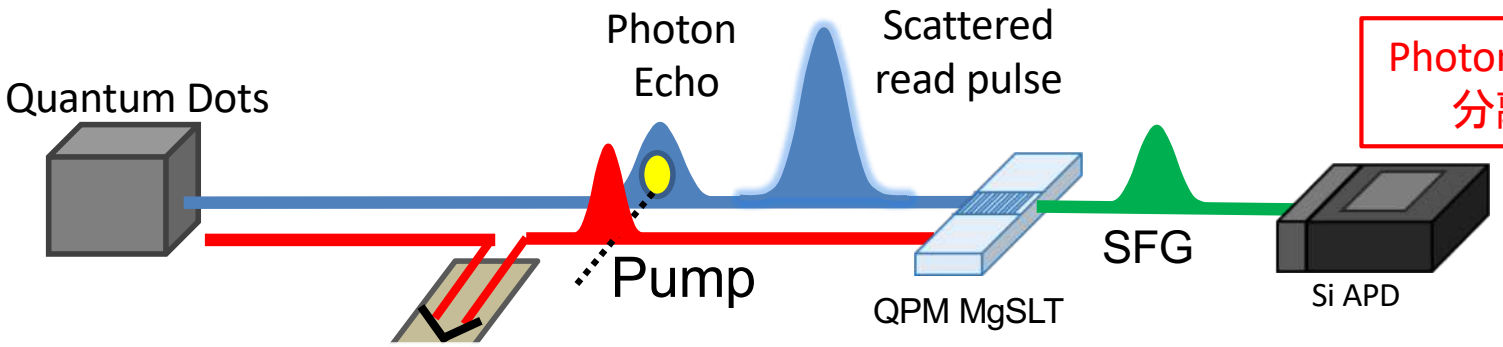
•Mg:SLTの和周波発生によるパルスの時間分解測定(w/Keio)



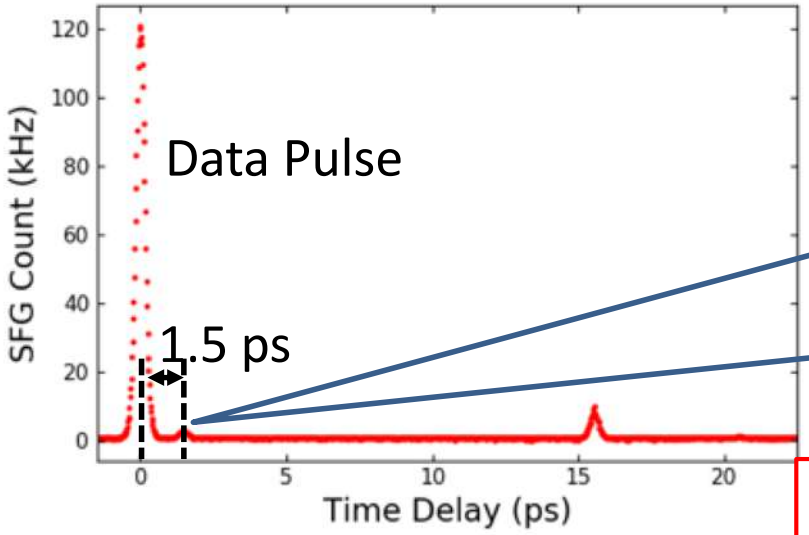
1500 nm帯（測定対象）と
800 nm光（サンプリングパルス）の
和周波発生530 nm光で
時間分解測定

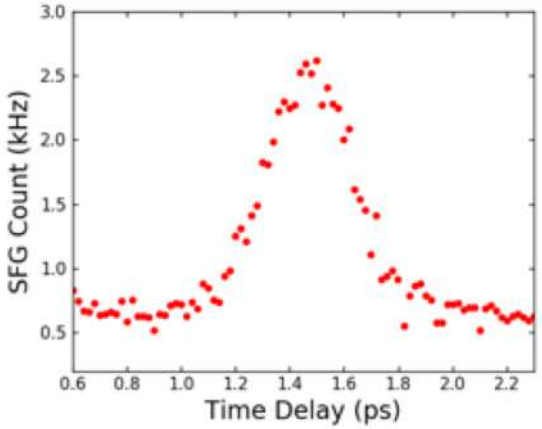
エコーパルスの確認

- **微弱パルスの時間分解測定**



Photon Echoと散乱光の分離計測を実現

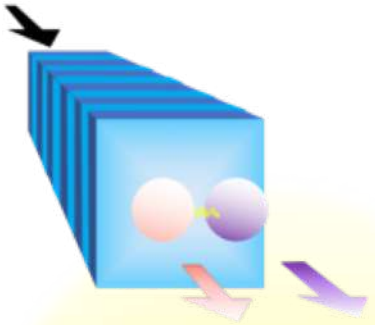


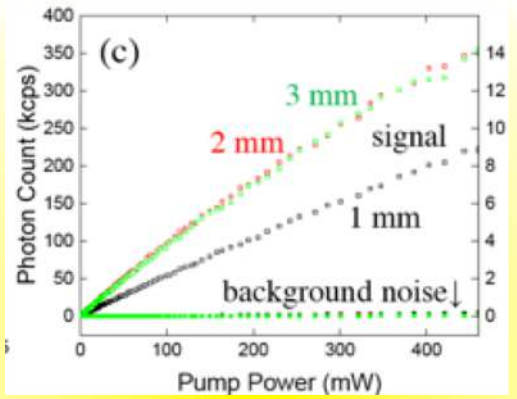


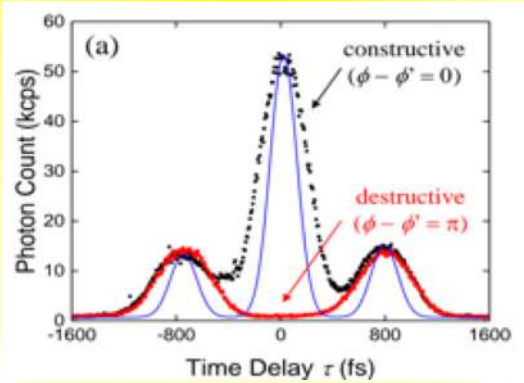
データ光と同軸上に1.5ps以内に存在する微弱パルスを分離して測定できた

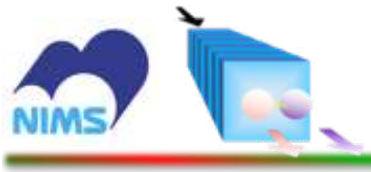
まとめ

- 分極反転波長変換デバイスの量子応用
  - チャープ構造による帯域拡大
  - 導波路構造による効率拡張
- 超高速パルス列の和周波サンプリング
  - 効率と時間分解能の設計指針を確立
    - 効率と時間分解能の両立：Mg:SLT 2mm
  - Time-bin Qubitの時間分解・位相計測に成功
  - フォトンエコーの信号を確認
- 量子計測、量子計算、量子通信で必須のデバイスに







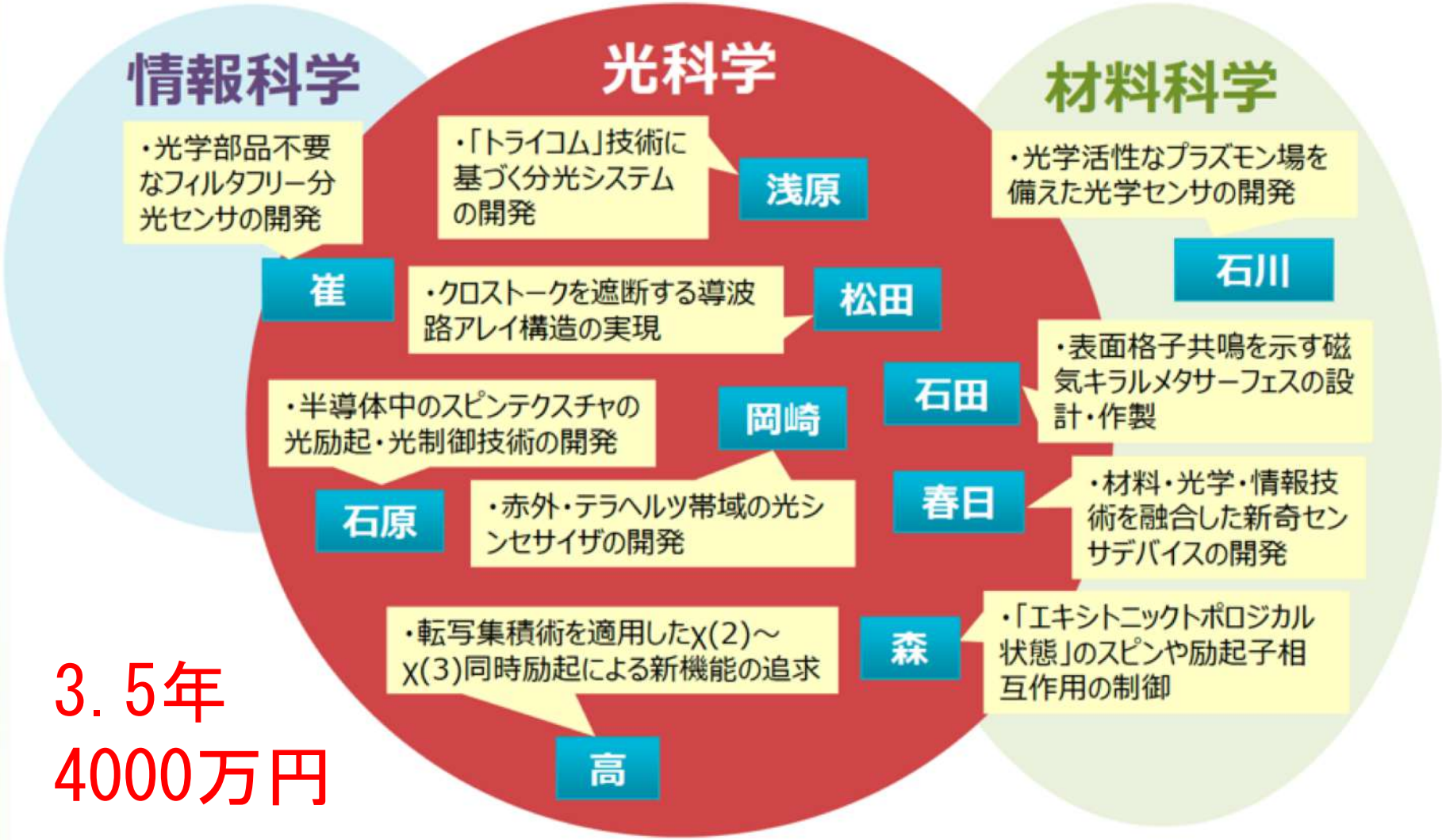


JSTさきがけ光融合領域の御紹介

領域概要

情報システムの革新につながる、画期的なアイデアに基づく研究提案に加え、基礎研究から利用技術開拓までの階層間の融合をねらいとした研究提案を期待

2024年度採択課題分類



3.5年
4000万円

2024年度採択課題（1期生）

氏名	所属機関	役職	研究課題名
浅原 彰文	電気通信大学 大学院情報理工学研究科	准教授	光コムを駆使した多機能な時空間コヒーレント分光技術の開拓
石川 大輔	東京科学大学 総合研究院	講師	力学的調律プラズモン場による最適化生体分子検出
石田 拓也	東京大学 生産技術研究所	助教	表面格子共鳴による巨大な非相反光学応答の実現
石原 淳	東北大学 大学院工学研究科	助教	光で創るスピンテクスチャ機能
岡崎 大樹	京都大学 化学研究所	助教	赤外・テラヘルツ光シンセサイザの開発
春日 貴章	大阪大学 産業業科学研究所	助教	植物由来フォトニック構造を用いた超高密度散布型センサデバイスの実現
高 磊	産業技術総合研究所 プラットフォームフォトニクス研究センター	主任研究員	転写集積術によるχ(2)～χ(3)融合非線形光学の開拓
崔 容俊	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科	准教授	光学部品を必要としない分光デバイスの創造
松田 信幸	東北大学 大学院工学研究科	准教授	決定論的光局在伝搬が拓く高密度光・量子デバイス
森 亮	東京大学 物性研究所	助教	光トポロジカルスピンエキシトニクスの開拓

1期生研究者ADメンター担当表

研究代表者氏名	現所属機関	ADメンター
浅原 彰文	電気通信大学　大学院情報理工学研究科	栗村 直
石川 大輔	東京科学大学　総合研究院	大友 明
石田 拓也	東京大学　生産技術研究所	青木 隆朗
石原 淳	東北大学　大学院工学研究科	山田 浩治
岡崎 大樹	京都大学　化学研究所	橋本 俊和
春日 貴章	大阪大学　産業科学研究所	原井 洋明
高 磊	産業技術総合研究所　プラットフォームフォトニクス研究センター	鯉渕 道紘
崔 容俊	豊橋技術科学大学　大学院工学研究科	栗村 直
松田 信幸	東北大学　大学院工学研究科	星田 剛司
森 亮	東京大学　物性研究所	丸田 章博

領域運営の方針

さきがけ研究者が短期的な成果に固執することなく、3年半の間、腰を据えてじっくりと独創的研究に取り組める環境を提供できるよう、研究総括・領域アドバイザーがサポート。

■分野横断的な研究連携・研究交流

・異分野研究者との交流 → 研究の視野を広げ新たな研究につなげる

・関連するCREST、さきがけ研究領域等での研究者との交流

・海外との共同研究や国内外の関連コミュニティとの連携を推進

■円滑な研究展開をバックアップする体制

・領域会議 (半年に１回) + サイトビジット等

・総括、領域アドバイザー、他の研究者からの率直かつ建設的な意見

研究者に期待すること

- 最初の研究計画にとらわれず自由に研究を実施
  （総括・ADの了承の上）
- 積極的な共同研究の実施（CREST「光融合」も含む）
- トップジャーナルへの投稿
- 追加予算の積極的な活用
- 領域会議等での積極的な質問・議論
- 海外との共同研究や国内外の関連コミュニティとの連携
- 研究者間での将来にわたるネットワークの形成

NIMS