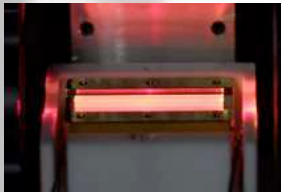


国研における材料・デバイス研究 ～高性能非線形光学デバイス

国立研究開発法人 物質・材料研究機構

栗村 直

National Institute for Materials Science (NIMS)
Sunao KURIMURA



*National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA*

1

Acknowledgements

Material development:

- Y. Furukawa (OXIDE), K. Kitamura, Y. Nakamura (NIMS)
- H.H. Lim (IMS), N.E. Yu (GIST)

Optical Parametric Devices

- M. Maruyama, R. Koh, H. Nakajima (Waseda Univ.)
- J. Ichikawa (Sumitomo Osaka Cement)
- A. Seki, S. Masuda (Advantest Lab)

Quantum Optical measurements:

- S. Takeuchi, R. Okamoto (Kyoto Univ.)
- M. Hisamitsu, K. Tokuda (Shimadzu Corp.)

Financial support by:

National Institute of Information and Communications Technology, JAPAN
The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology
for Grant-in-Aid for Scientific Research 19340085 and 20244062.
JST CREST



*National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA*

2

講演概要

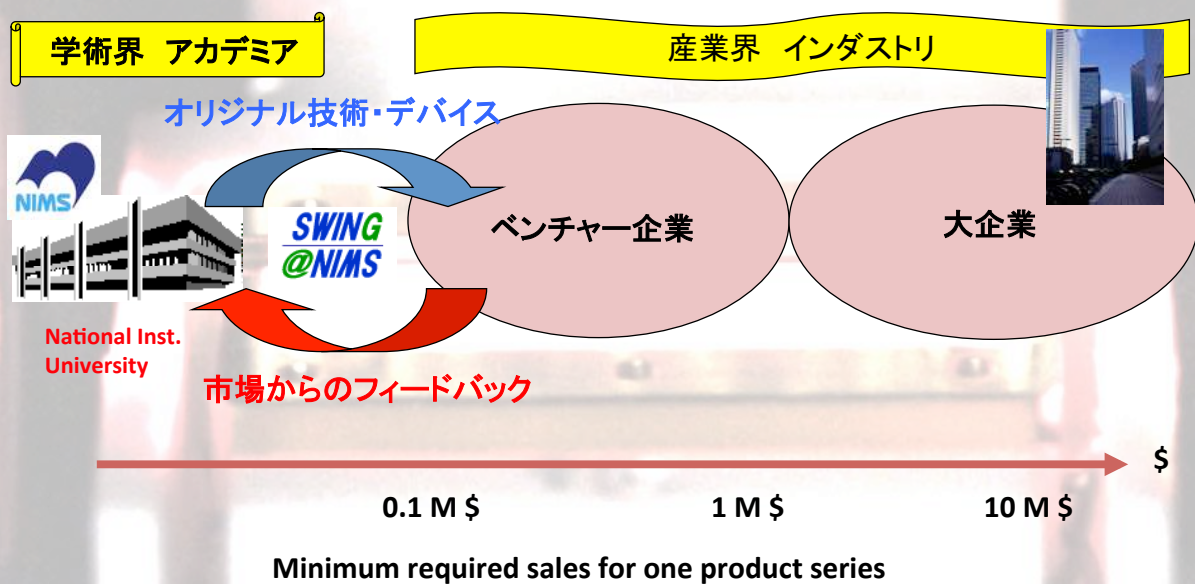
- イン트로ダクション
- 材料開発の歴史
 - Mg:SLT波長変換デバイス
 - 苦難の道のり
- パラメトリック波長変換デバイス
 - 光パラメトリック発生 (OPG)
 - 光音響イメージングへの展開
- 量子光発生
 - もつれ光発生 (SPDC)
 - バルク／導波路比較
 - 高効率導波路もつれ光デバイス



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

3

国研発ベンチャーの意義



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

4

独自材料／デバイスによるベンチャー設立

・ 結晶ベンチャーOXIDE

OXIDE

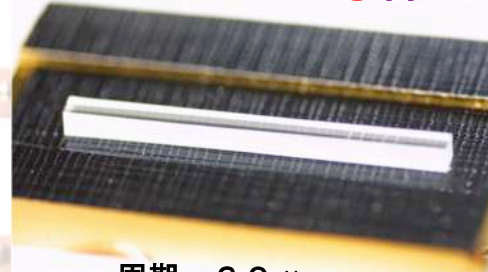


- 物質・材料研究機構で開発した二重るつぼ法で実用化に成功
- **Mg:SLN/Mg:SLT**単結晶

・ デバイスベンチャーSWING



SWING



周期～30 μm

- 電界印加法にて開発に成功 (抗電界は従来の1/13)
- **Mg:SLT**波長変換デバイス



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

5

国研発ベンチャーの出口

OXIDE

単結晶製造

上場



合併

SWING
@NIMS

波長変換デバイス

2000年

2003年

2007年

2021年



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

6

NIMSにおける 材料／デバイス開発の歴史

•Mg:SLTの苦難と解決

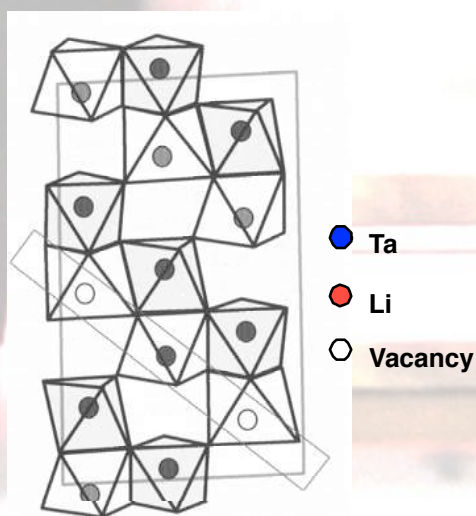


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

LiTaO₃/LiNbO₃ 単結晶育成

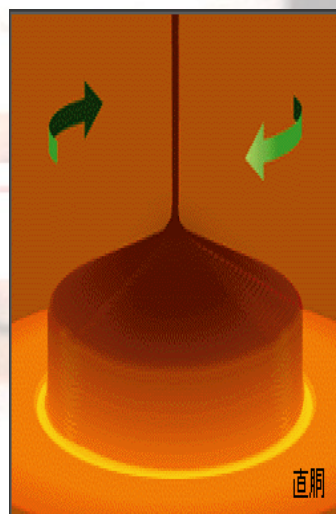
• 結晶構造

•二重るつぼ回転引上法 (DCCZ)



Number of defects in 1 cm cube

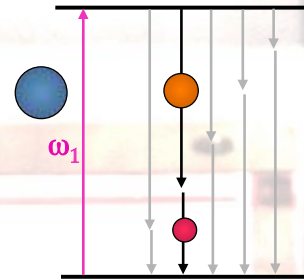
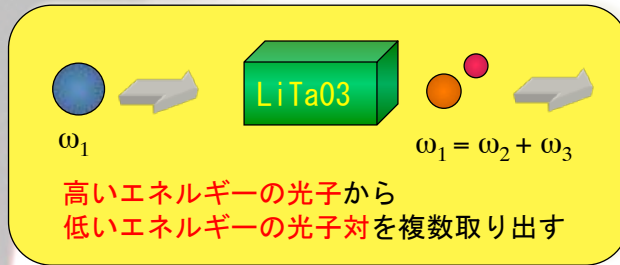
Ta_{Li}: 4×10^{19} V_{Li}: 16×10^{19}



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

光パラメトリック発生 (OPG)

・波長変換技術 (OPG) / もつれ光子発生技術 (SPDC)



効率的発生の条件

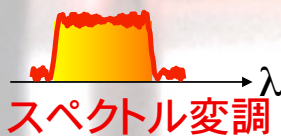
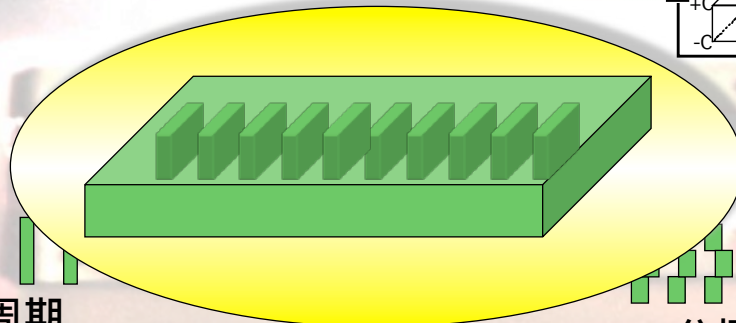
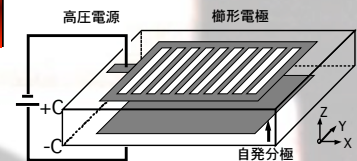
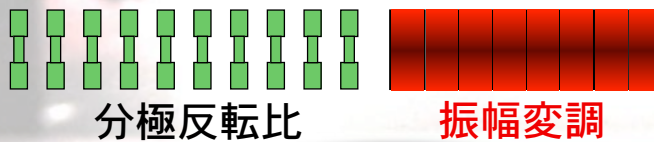
1. エネルギー保存則
2. 運動量保存則 → 周期分極反転構造

ユーザーのニーズに合わせた波長を

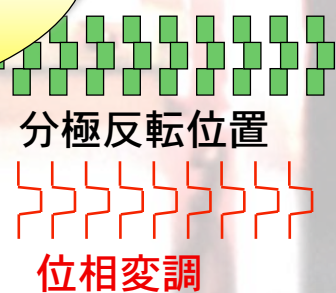


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

波長変換デバイスのデザイン



分極反転パターンのデザインで
特性の設計が可能
← 半導体微細加工



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

光パラメトリック発振による波長可変光源

Input coupler:

AR @ pump

HR @ signal

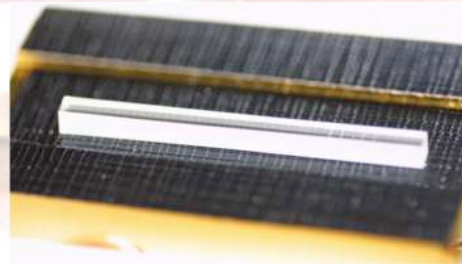
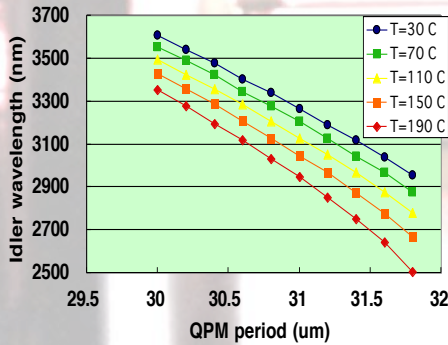
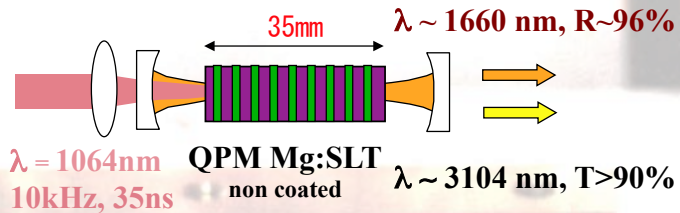
ROC 10 cm

Output coupler:

HR @ pump

R ~96 % @ signal

ROC 10 cm



2 x 2 x 35 mm³

effective aperture,
not substrate thickness

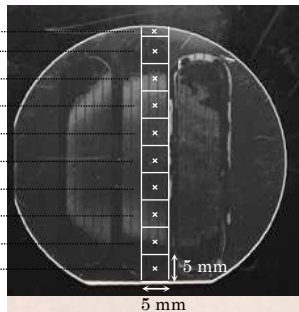
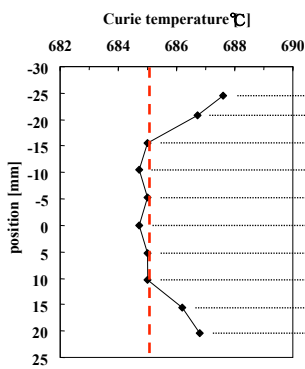


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

11

Mg:SLT ウェハ内の不均一

- キュリー点の不均一 = 組成の不均一

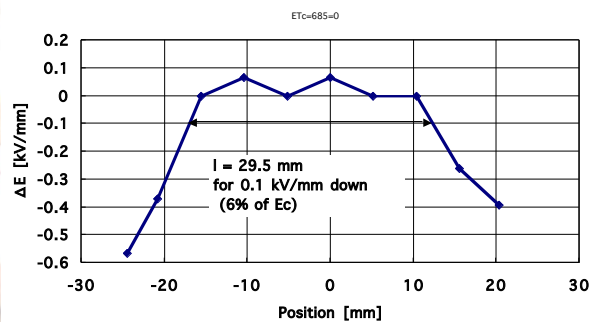


$dT_c/dCl_i = 46.7$ (C/mol%)

- キュリー点がウェハ周辺で3 C低下
- nominal T_c of wafer: 688C

0.5mol% MgO-doped SLT ($T_c=688C$)

- 分極反転に必要な電界の不均一



- 29.5 mm uniform length
if 6% acceptable
cf. 6%: 1.3kV/mm in CLN
21 -> 19.7kV/mm

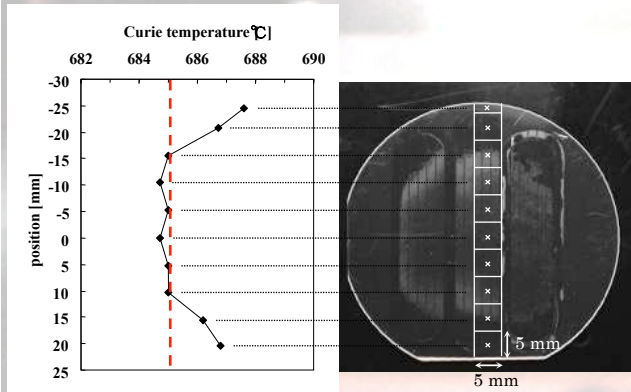


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

12

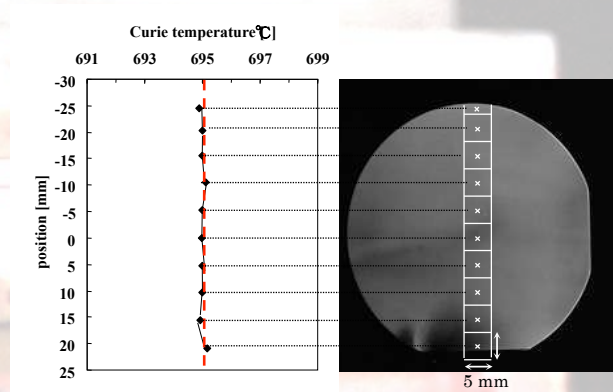
Mg:SLT ウェハ内均一性の改善

• 改善前:



$\Delta T_c = 3.0\text{ }^\circ\text{C}$

• 改善後:



$\Delta T_c = 0.4\text{ }^\circ\text{C}$

by courtesy of OXIDE Corp.



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

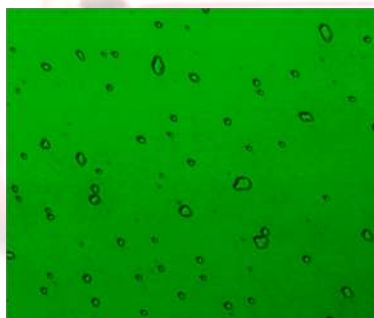
13

電界印加前のマイクロドメイン (Mg:SLT wafer)

・納品直後のマイクロドメイン ・周期構造の揺らぎ@30um period

- 2インチウェハ内に200万個
- 面積の数%を占める

- 逆電界で除去しようとするが...
- 分極反転壁の揺らぎとして残る

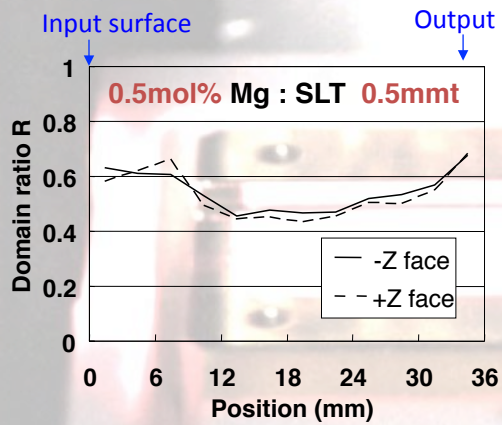


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

14

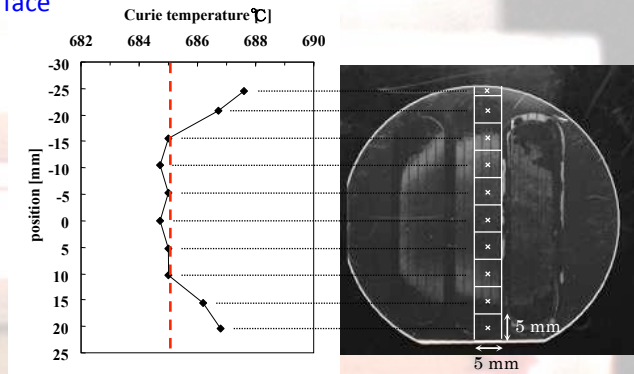
分極反転比の分布

- 改善前: 分極反転比の分布



- nonuniform domain ratio
along device length

- 改善前: 組成の分布



$\Delta T_c = 3.0 \text{ }^\circ\text{C}$

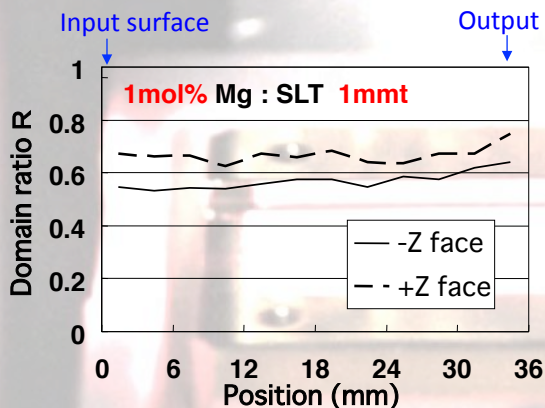
N.E.Yu et al., Appl.Phys.Lett. 84(2004) p.1662

National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA



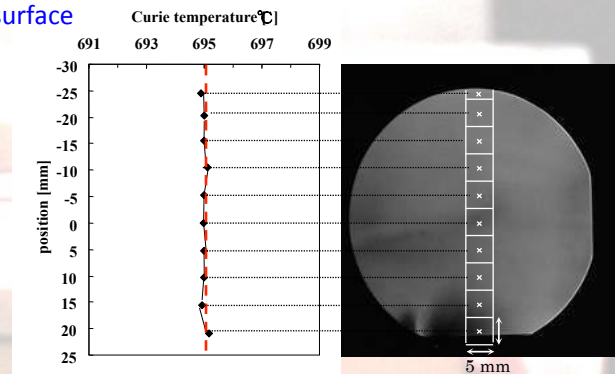
分極反転比の分布

- 改善後: 分極反転比の分布



- improved uniformity
- domain expansion along Z

- 改善後: 組成の分布



$\Delta T_c = 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$

by courtesy of OXIDE Corp.

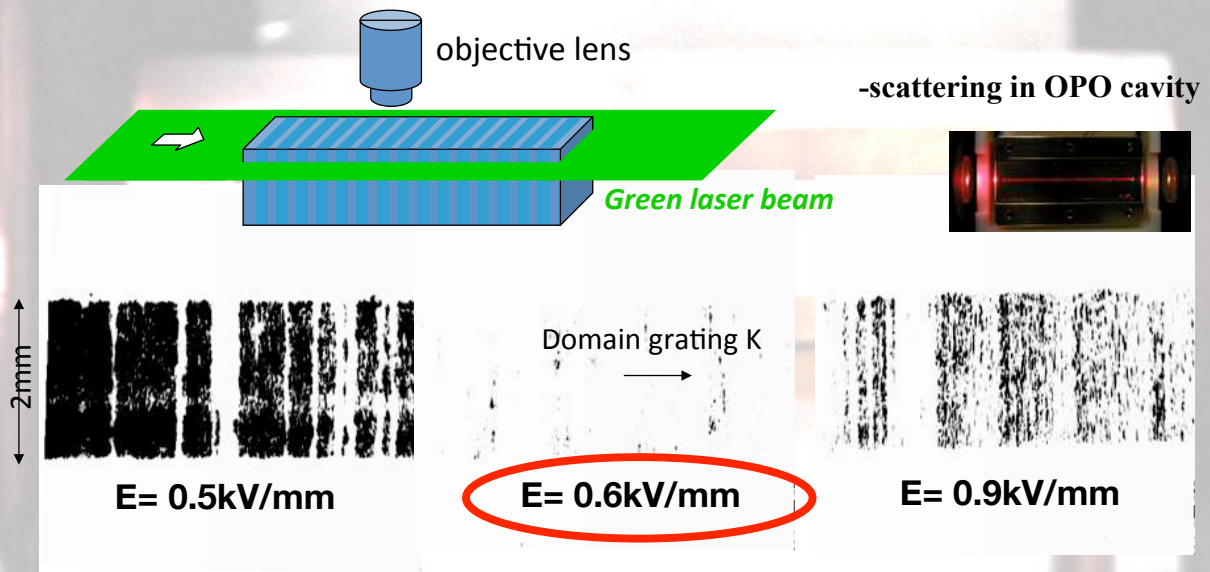
N.E.Yu et al., Appl.Phys.Lett. 85(2004) p.5134

National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA



電界印加分極反転後の光散乱

- Laser tomography



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

無共振器波長変換への展開

• 超高効率波長変換デバイス

National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA



APPLIED PHYSICS LETTERS 89, 011101 (2006)

70-mm-long periodically poled Mg-doped stoichiometric LiNbO₃ devices for nanosecond optical parametric generation

Masayuki Maruyama^{a)} and Hirochika Nakajima
Graduate School of Science and Engineering, Waseda University, 51-6-5, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

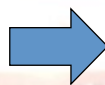
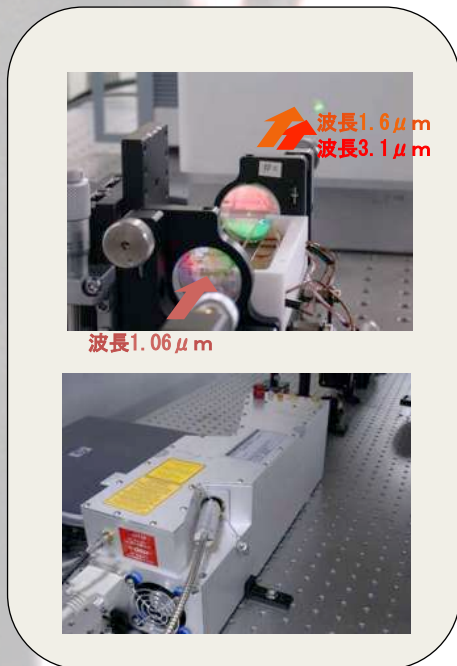
Sunao Kurimura,^{b)} Nan Ei Yu,^{c)} and Kenji Kitamura
National Institute for Materials Science, 1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan

(Received 19 January 2006; accepted 16 May 2006; published online 5 July 2006)

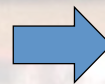


National Institute for Materials Science Sunao KURIMURA

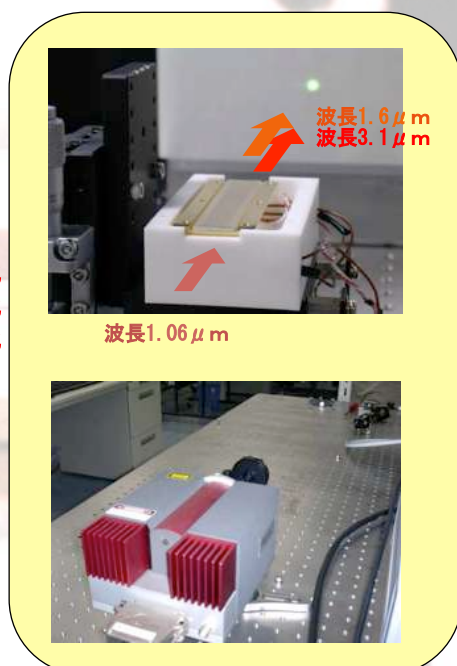
高効率デバイスは何を変えるか



無共振器化
 低コスト化
 長期安定化



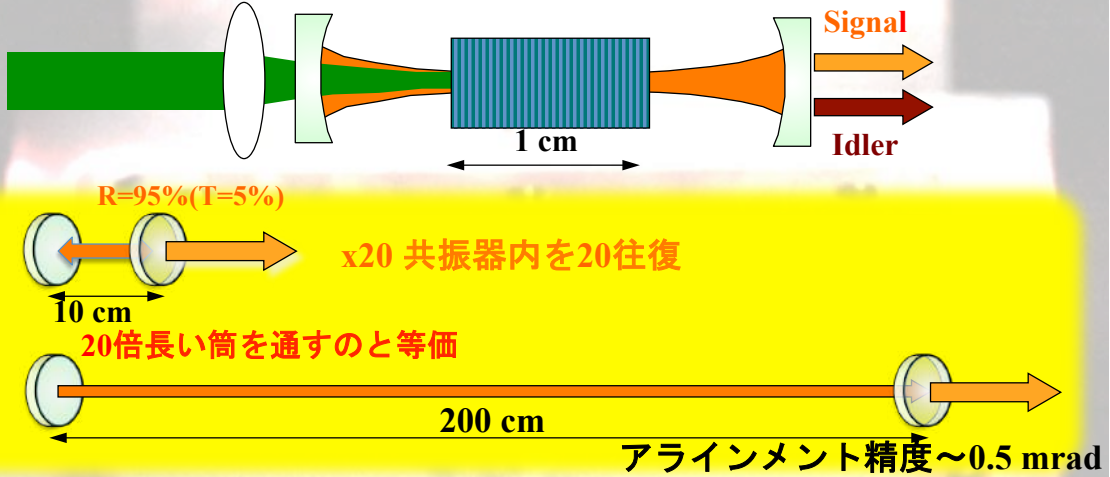
小型化
 省電力化
 低廃熱化



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan Sunao KURIMURA

共振器の調整における困難さ

1) 精密なアラインメントが必要 -> 振動や温度変化に敏感



2) 励起光と共振器軸のオーバーラップが必要



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA



共振器のない緑色レーザーへ

2008年 3月26日 (水)
日経産業新聞

☆ (日版) 第20349号 (SEK021)

高出力緑色レーザー
波長変換デバイス開発
リチウム酸塩装置小型化可能

日経産業新聞

緑色レーザー
高出力光を発生
物材機構、変換素子を開発

【くは】物質・材料 東大が開発した赤外光レーザーと物材機構の変換素子を組み合わせ、高出力の緑色レーザーを開発したと発表した。レーザーの波長を緑色に変換する素子の放熱効率を向上して、従来より50%出力を高めた。加工用レーザーなどへの応用が期待できる。

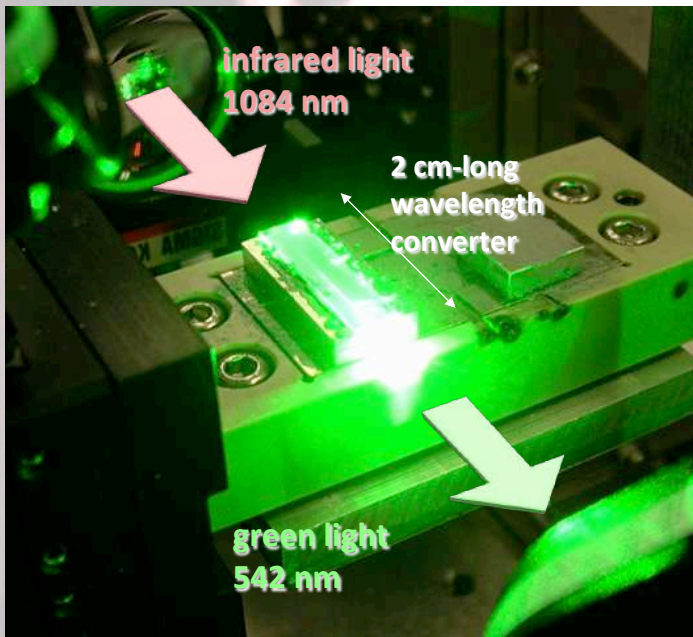
東大と物材機構は、赤外光レーザーと物材機構の変換素子を組み合わせ、高出力の緑色レーザーを開発したと発表した。レーザーの波長を緑色に変換する素子の放熱効率を向上して、従来より50%出力を高めた。加工用レーザーなどへの応用が期待できる。

物質・材料 東大が開発した赤外光レーザーと物材機構の変換素子を組み合わせ、高出力の緑色レーザーを開発したと発表した。レーザーの波長を緑色に変換する素子の放熱効率を向上して、従来より50%出力を高めた。加工用レーザーなどへの応用が期待できる。

物質・材料 東大が開発した赤外光レーザーと物材機構の変換素子を組み合わせ、高出力の緑色レーザーを開発したと発表した。レーザーの波長を緑色に変換する素子の放熱効率を向上して、従来より50%出力を高めた。加工用レーザーなどへの応用が期待できる。

共振器なし
波長変換

Mg:SLT高出力緑色レーザーデバイス



Mg:SLT

compact 2 cm length

anti-reflection coating
@1084, 542 nm

WR: 19.1W@532nm
(CW single pass)

H. H. Lim, T. Katagai, S. Kurimura et al., Opt. Exp. 19 (2011) p. 22588.

S. V. Tovstonog, S. Kurimura et al., Opt. Exp. 16 (2008) p. 11294.



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

共振器のない中赤外レーザーへ

化学工業日報

7年)1月17日 月曜日

高効率な波長変換素子

物質・材料研究機構のループは、高効率な中赤外波長変換素子を開発した。ニオブ酸リチウム(SLN)を用いた波長変換素子を開発した。従来の波長変換素子に比べて、波長変換効率が高く、小型化、低価格化が図れる。

物質・材料研究機構のループは、高効率な中赤外波長変換素子を開発した。ニオブ酸リチウム(SLN)を用いた波長変換素子を開発した。従来の波長変換素子に比べて、波長変換効率が高く、小型化、低価格化が図れる。

日経産業新聞

日刊工

波長変換、効率10倍

レーザー装置を小型化

物質・材料研究機構は、従来の十倍の変換効率を達成したと発表した。増幅器が不要になる。

共振器なしで赤外波長変換

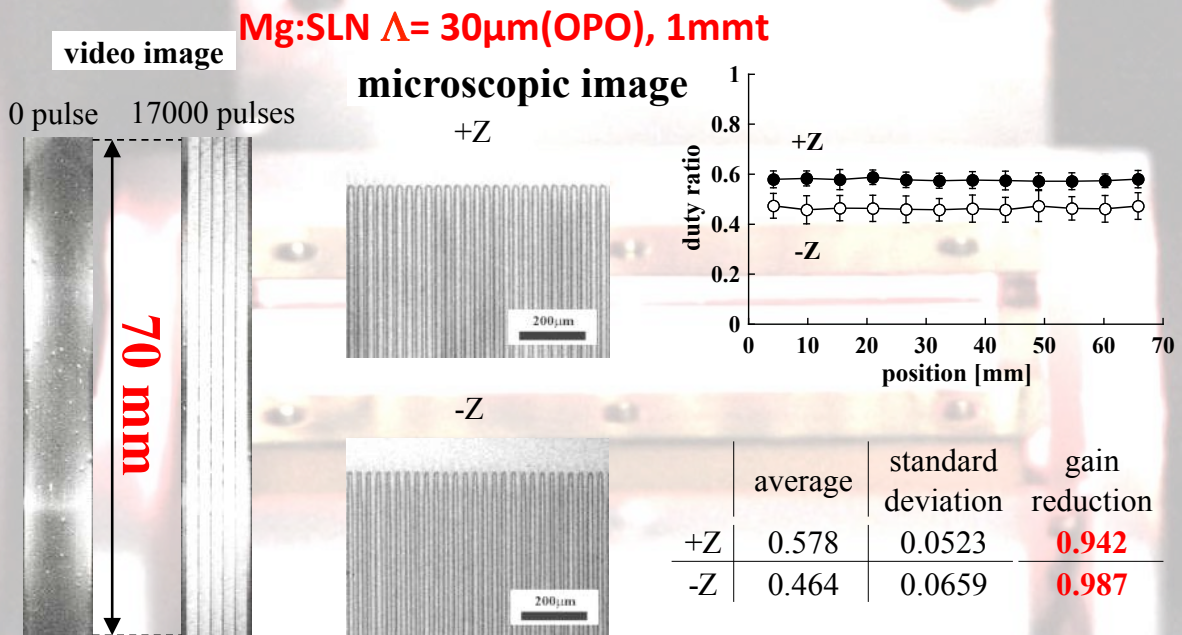
効率10倍の素子開発

物質・材料研究機構の赤外波長変換に成功した。ニオブ酸リチウム(SLN)からなる素子で、周期的に分極を反転させ、波長変換効率を10倍に高め、大規模な波長変換素子を格段に向上させた。

物質・材料研究機構のループは、高効率な中赤外波長変換素子を開発した。ニオブ酸リチウム(SLN)を用いた波長変換素子を開発した。従来の波長変換素子に比べて、波長変換効率が高く、小型化、低価格化が図れる。

National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

超長尺高効率波長変換デバイス



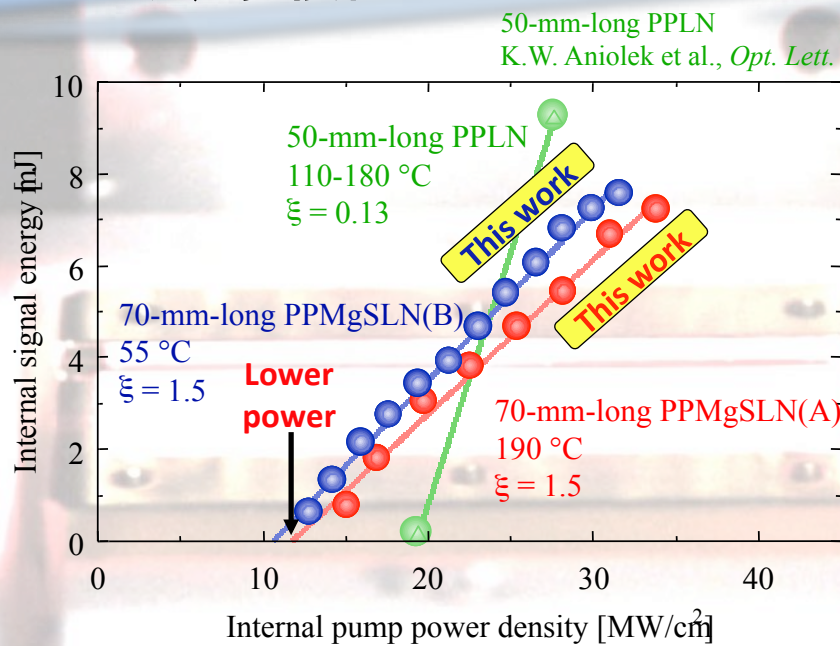
M. Maruyama, H. Nakajima, S Kurimura, N. E. Yu, K. Kitamura,
Appl. Phys. Lett. **89**, 011101 (2006)



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

25

シングルパス波長変換特性



Boyd-Kleinman parameter
 $\xi = \text{device length} / \text{confocal parameter}$

M. Maruyama, H. Nakajima, S Kurimura, N. E. Yu, K. Kitamura,
Appl. Phys. Lett. **89**, 011101 (2006)



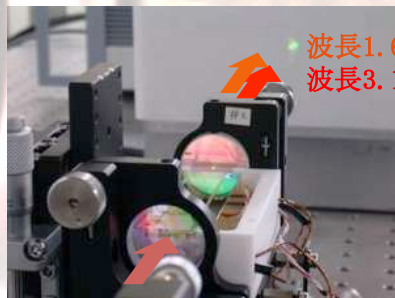
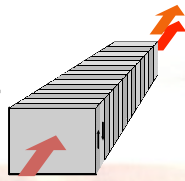
National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

26

共振器のない波長変換へ

-共振器内波長変換 (OP0)

- 精密な調整が必要
- 高価な共振器ミラー
- 除震の必要

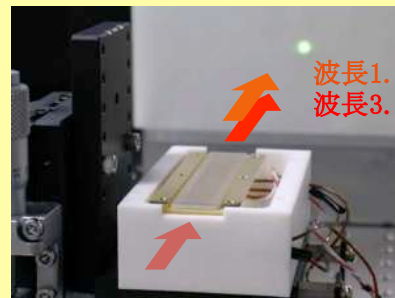


波長1.06 μm

波長1.6 μm
波長3.1 μm

-無共振器波長変換 (OPG)

- 熟練者の調整が不要
- 光学部品を削減
- 熱的/耐振安定性の向上
- **低コスト、長期安定**



波長1.06 μm

→ 0.53 μm 励起へ

波長1.6 μm
波長3.1 μm



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

27

高安定二波長レーザーの開発

•光音響血管/メラニンイメージングシステム



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

28

光音響イメージングシステム w/アドバンテスト

アドバンテスト、光超音波顕微鏡Hadataomo Z用2波長レーザーを開発

2020/10/20 12:25

保存 共有 印刷 画像の拡大 その他

発表日:2020年10月20日

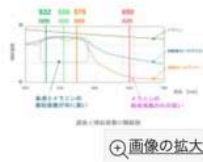
光超音波顕微鏡 Hadataomo(TM) Z用2波長レーザーを開発

皮膚のメラニンと血管網を3D画像で識別

株式会社アドバンテスト（本社:東京都千代田区 社長:吉田芳明）は、当社の光超音波顕微鏡「Hadataomo(TM) Z」向けに、皮膚のメラニンと血管網を3D画像で識別可能な2波長レーザーを開発しました。従来装置では困難だった、メラニンと血管網の位置関係を一目で把握することができ、皮膚研究や美容、医療分野の研究にご活用いただけます。

■新技術の特長

当社がこれまで培ってきた、光パラメトリック発生による独自の波長変換技術（※1）を応用し、波長が575nmと650nmの2波長レーザーを開発しました。当社の「Hadataomo(TM) Z」で従来用いられている532nmと556nmの波長は、いずれも血



光超音波顕微鏡 Hadataomo™ Z

波長変換技術は、国立研究開発法人 物質・材料研究機構と株式会社アドバンテスト研究所の共同研究 開発によるものです。

第 31 回国際化粧品技術者会連盟(IFSCC)世界大会で発表される予定です。

新技術による 2 波長レーザーを搭載した製品の受注開始は、2020 年 12 月頃を予定。

[https://www.nikkei.com/nkd/company/article/?](https://www.nikkei.com/nkd/company/article/?DisplayType=11&ng=DGXLRSF541963_Q0A021C2000000&scode=6857)

DisplayType=11&ng=DGXLRSF541963_Q0A021C2000000&scode=6857

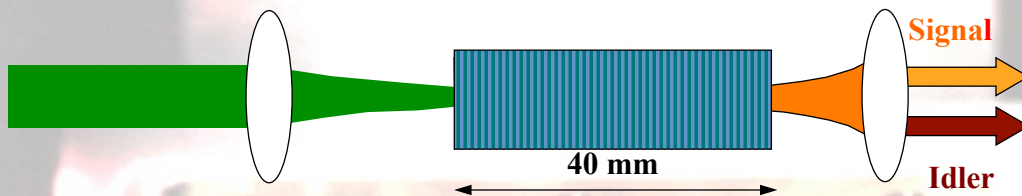


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

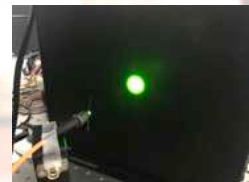
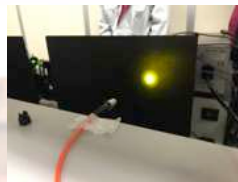
29

OPG multi-λ source (NIMS/Advantest)

1) Wide tolerance in OPG alignment -> robustness



2) Multi-λ fiber source



3) Acceleration testing (JIS C60068-2-6)

• Amp of acceleration 49m/s²(5G)

cf. Onset of dizziness/ : 5G

国内最大加速度ジェットコースター: 4.25G



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

34

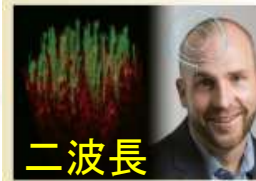
2021年レーザー学会産業賞

レーザー学会産業賞「奨励賞」受賞



光超音波顕微鏡
Hadatomo™ Z

ADVANTEST 株式会社アドバンテスト



二波長

頭髪(メラニン)と血管像



爪の付け根および爪下の血管像



耐振動

光と超音波による新たな非侵襲生体イメージング

製品の特長

- 生体にパルス光を照射し、光を吸収した物質(メラニン、血液など)から発生した超音波を取得して3次元画像を生成する新たなイメージング手法。
- 2波長の光超音波で血管構造とメラニン分布を、超音波で皮膚構造を、一度の測定で同時に取得。

用途

- 生体(皮膚)の研究分野



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

37

量子光源への展開

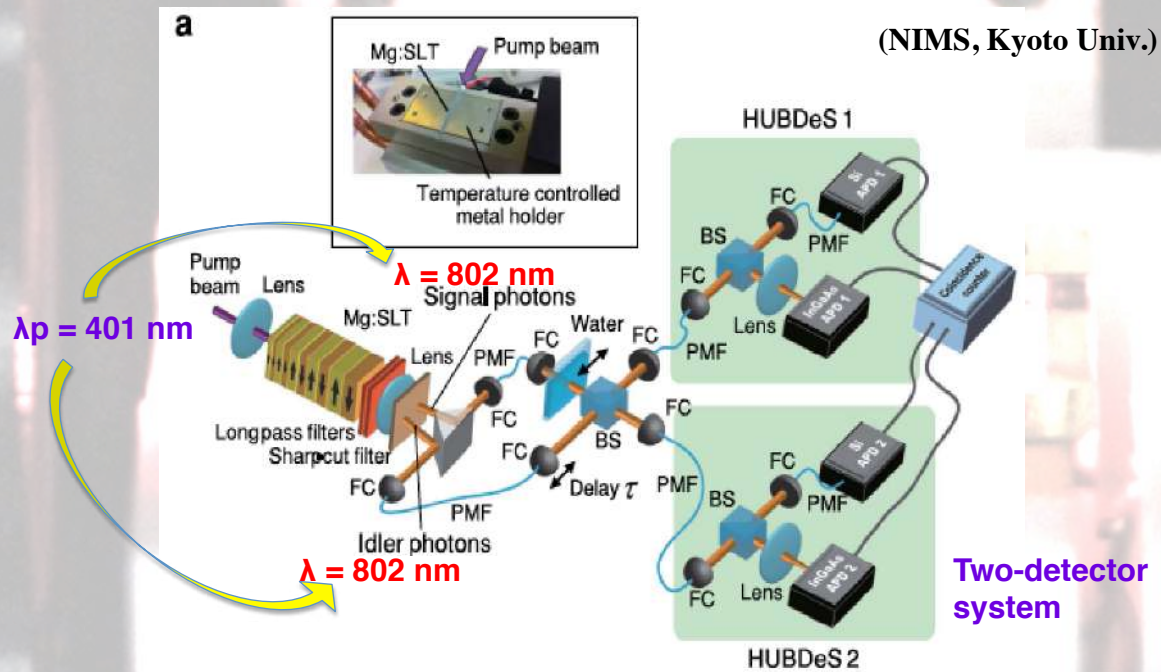
●Mg:SLT高効率導波路デバイス



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

38

二光子量子干渉実験



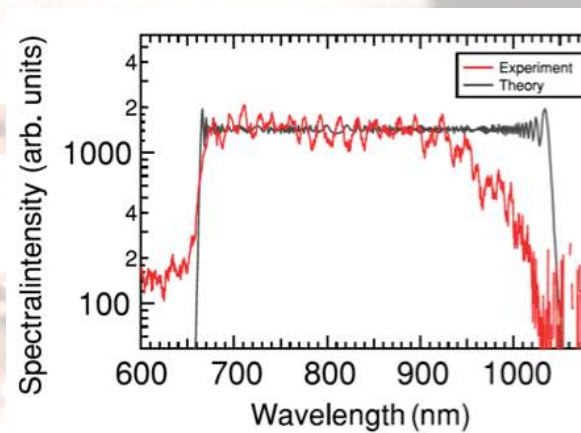
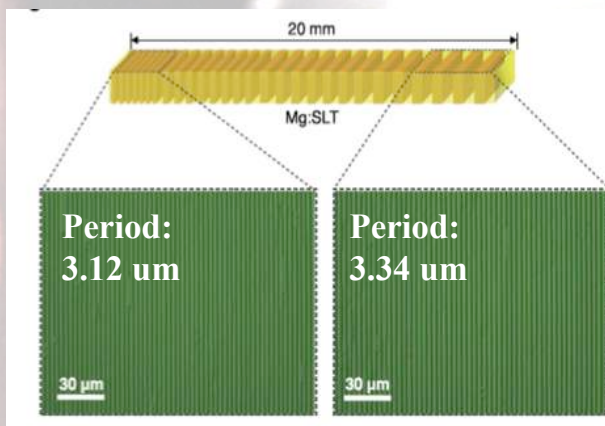
National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA



周期チャープ分極反転による広帯域もつれ光子対

• 周期チャープ Mg:SLTバルクデバイス

• OPG pumped by GaN LD
(NIMS, Kyoto Univ.)



6.7% chirped by nano electrodes

166 THz bandwidth,
 $\lambda = 660-1040 \text{ nm}$

S. Takeuchi, S. Kurimura et al. (invited): Photonics West 2012, OPTO 8272-28.

National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA



二光子干渉の干渉精度0.54 μm

SCIENTIFIC REPORTS

OPEN 0.54 μm resolution two-photon interference with dispersion cancellation for quantum optical coherence tomography 量子OCTをめざす

Received: 14 September 2015
Accepted: 11 November 2015
Published: 14 December 2015

Masayuki Okano^{1,2,3}, Hwan Hong Lim⁴, Ryo Okamoto^{1,2,3}, Norihiko Nishizawa⁵, Sunao Kurimura⁶ & Shigeki Takeuchi^{1,2,3}

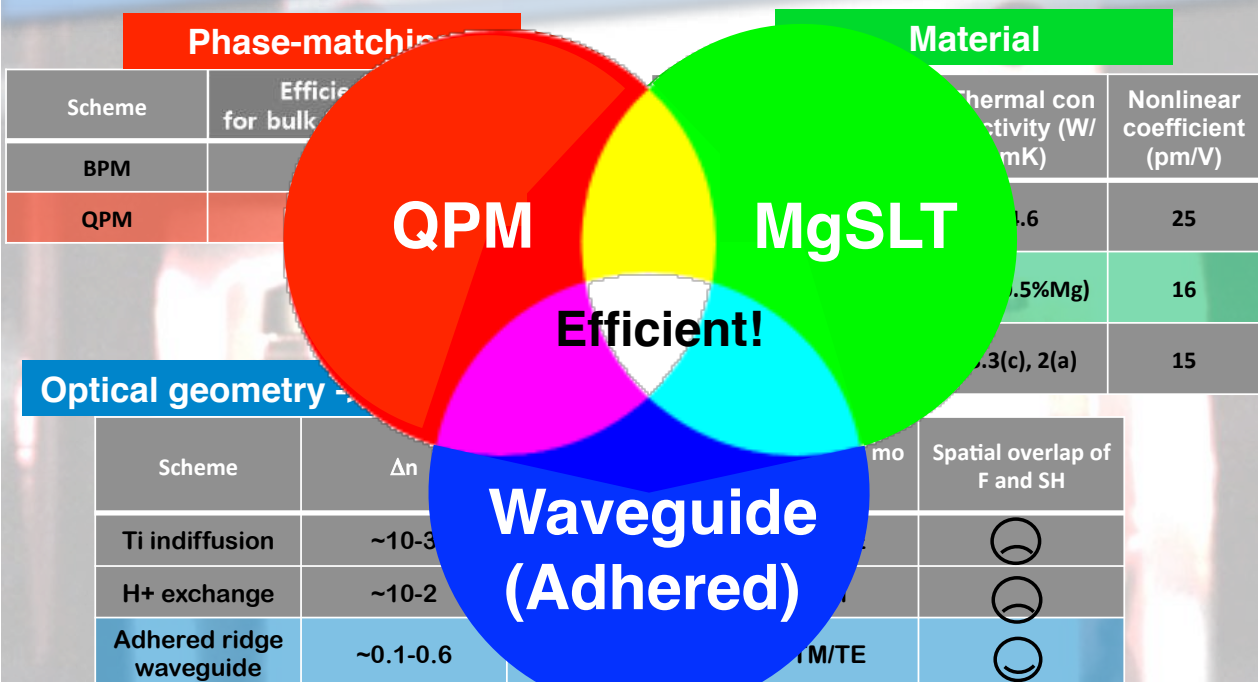
Two-photon Interference: 0.54 μm resolution
Record resolution 0.75 μm of low-coherence interference for OCT

Scientific Reports | 5:18042 | DOI: 10.1038/srep18042



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

短波長LD励起用Mg:SLT導波路デバイス



[1] Y. L. Lee, et. al., IEEE Photonics Technol. Lett. 15, 578 (2003).
[2] K. R. Parameswaran, et. al., Opt. Lett. 27, 179 (2002).
[3] S. Kurimura, et. al., CLEO, CTuB4 (2006), APL 89, 191123 (2006).

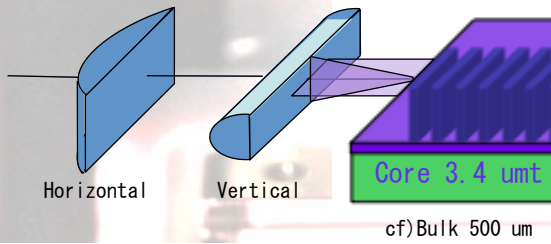


National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

Mg:SLT平面導波路デバイス

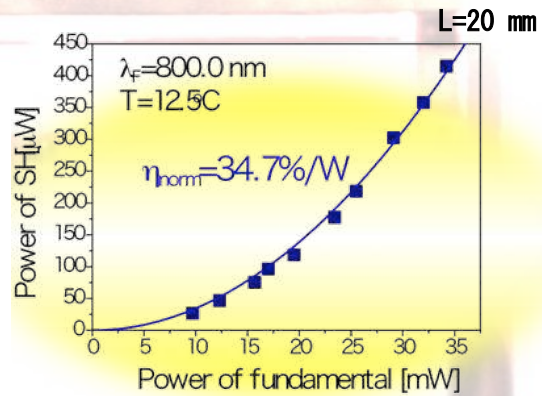
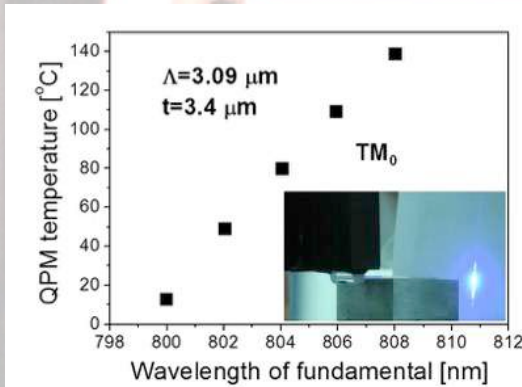


•Pumped at GaN 405 nm laser diode



•Screening by SHG

Mg:SLT core 3.4 umt
QPM period 3.09 um



CW SHG 35%/W

National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

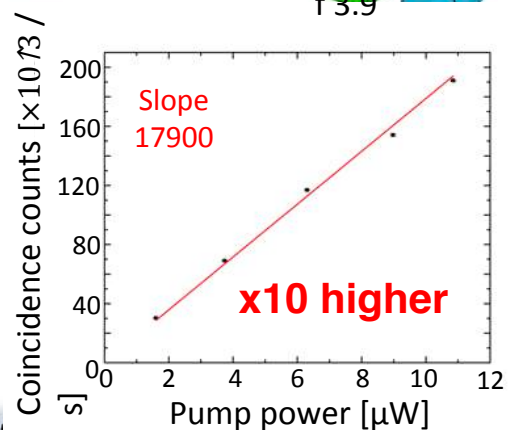
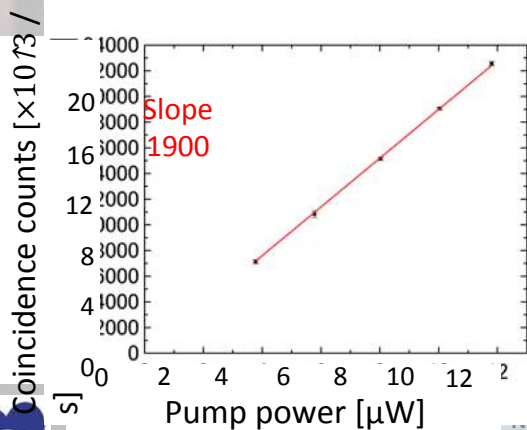
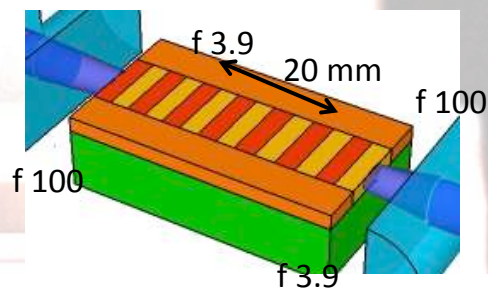
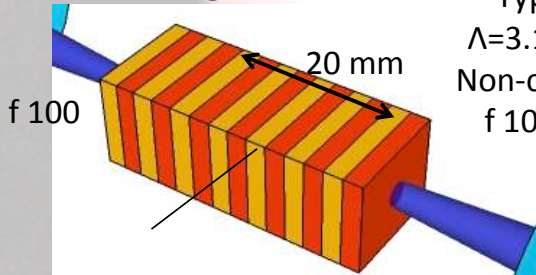


もつれ光子の同時計数比較

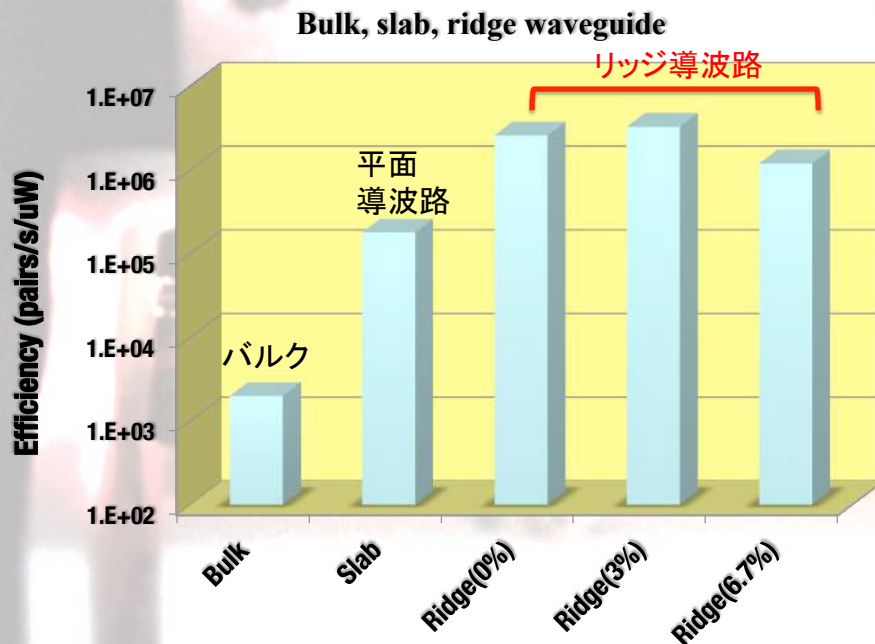
•バルクQPM Mg:SLT

1 mol% Mg:SLT
Type-0

•平面導波路QPM Mg:SLT



Mg:SLT導波路でのSPDC効率比較



B. Cao, M. Hisamitsu, K. Tokuda, S. Kurimura, R. Okamoto, and S. Takeuchi
Optics Express Vol. 29, pp. 21615-21628 (2021)



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

45

まとめ

- **ベンチャー設立・協業**
- **材料開発の歴史**
 - Mg:SLT波長変換デバイス
 - 苦難の道のり
- **パラメトリック波長変換デバイス**
 - 光パラメトリック発生 (OPG)
 - 光音響イメージングへの展開
- **量子光発生**
 - もつれ光子対発生 (SPDC)
 - バルク／導波路比較
 - 高効率導波路もつれ光デバイス



National Institute for Materials Science (NIMS), Japan
Sunao KURIMURA

46