

بسمه تعالی

مخابرات کوانتومی مجتمع

Integrated Quantum Communications

افسون سلطانی

دانشگاه صنعتی اصفهان

دومین همایش فناوری‌های نوظهور کوانتومی

خرداد ۱۴۰۲

- ☐ معرفی مخبرات کوانتومی
- ☐ مزایای مجتمع سازی
- ☐ بستره‌های مجتمع در مخبرات کوانتومی
- ☐ افزاره‌های مخبرات کوانتومی مجتمع
- ☐ کدگذاری اطلاعات کوانتومی
- ☐ تکانه زاویه‌ای مداری و کاربرد آن در مخبرات
- ☐ مدوله‌سازی الکترواپتیکی با استفاده از TFLN

مخبرات کوانتومی		مخبرات کلاسیکی
حالت های کوانتومی		سیگنال های الکترونیکی
رمزنگاری اطلاعات		انتقال اطلاعات
فوتون ها		امواج الکترومغناطیسی
امنیت بالا به دلیل اصول مکانیک کوانتومی		آسیب پذیر در برابر شنودگر
امنیت		عوامل ایجادگر تداخل
فاکتورهای محیطی مانند دما و فشار		تداخل الکترومغناطیسی

مجتمع سازی اجزای مختلف بر روی یک قطعه یا تراشه

- ☐ کاهش پیچیدگی سامانه مخابراتی با حذف نیازمندی به طراحی بخش های مجزا
- کاهش خطا و افزایش بازده کلی سیستم
- ☐ بهبود امنیت سامانه با به حداقل رساندن تعداد نقاط آسیب پذیر سامانه
- در سامانه غیر یکپارچه آسیب پذیری هر بخش می تواند امنیت کل سامانه را تهدید کند.
- ☐ تسهیل امکان ارتقا سامانه و اضافه کردن بخش های جدید
- ☐ امکان ادغام شدن با سایر سامانه های مخابراتی

بسترهای مجتمع در مخبرات کوانتومی

5

Nonlinear optical dielectric materials(LN, KTP),

- دارا بودن ویژگی‌های الکترواپتیکی و غیرخطی مرتبه دوم قوی
- بستره‌هایی مناسب برای مدوله‌سازی و تبدیل فرکانس

Platforms producing glass waveguides (Silicon on Silica, femtosecond laser writing)

- تلفات انتشاری کمتر
- تطبیق مدی مناسب با فیبرهای نوری استاندارد
- امکان تست سریع افزاره‌های ساخته شده
- امکان حفظ یا دست‌ورزی قطبش را
- براحتی فراهم می‌کنند
- امکان پشتیبانی از اثرات غیرخطی و الکترواپتیکی را ندارند

Platforms based on III-V compound semiconductors (InP, GaAs, GaN)

- دارا بودن ویژگی‌های غیرخطی مرتبه دوم قوی
- امکان ارائه افزاره‌های مبدل فرکانسی بهینه و فشرده
- تطبیق مدی ضعیف با فیبرهای نوری
- تلفات انتشاری

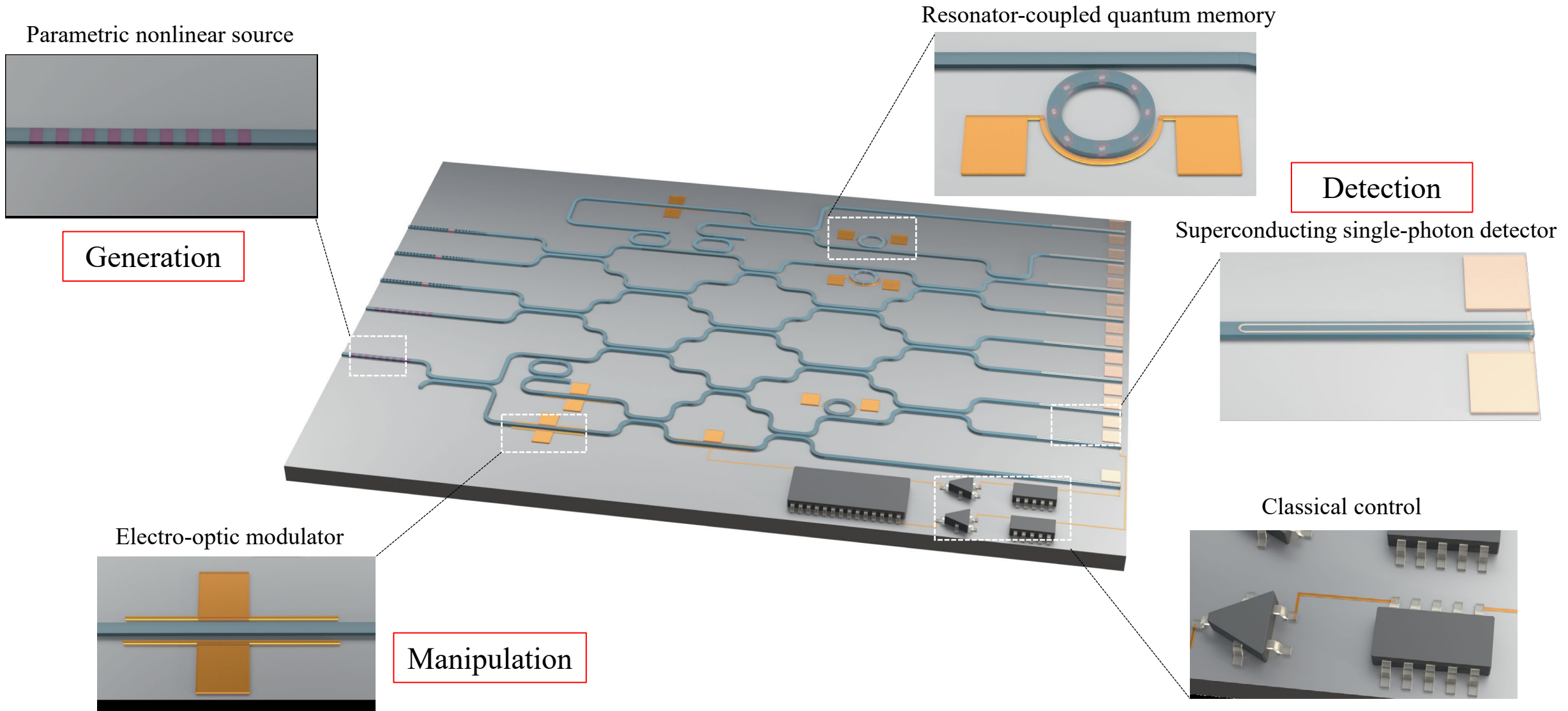
Silicon-based Platforms (Si, SiN, SiC)

- در دسترس بودن امکانات ساخت ویفر
- امکان ارائه‌ی موجبرهایی با ضریب شکست بالا
- امکان فشرده‌ی مدار برای طرح‌بندی‌های پیچیده
- تطبیق مدی ضعیف با فیبرهای نوری
- تلفات انتشاری

1. Elshaari, A. W., et al. (2020). "Hybrid integrated quantum photonic circuits." *Nature Photonics* 14(5): 285-298.
2. Kim, J.-H., et al. (2020). "Hybrid integration methods for on-chip quantum photonics." *Optica* 7(4): 291-308.
3. Tan, D., et al. (2021). "Photonic circuits written by femtosecond laser in glass: improved fabrication and recent progress in photonic devices." *Advanced Photonics* 3(2): 024002-024002.
4. Lukin, D. M., et al. (2020). "Integrated quantum photonics with silicon carbide: challenges and prospects." *PRX Quantum* 1(2): 020102.
5. Lenzini, F., et al. (2018). "Diamond as a platform for integrated quantum photonics." *Advanced Quantum Technologies* 1(3): 1800061.

افزارهای مخبرات کوانتومی مجتمع

6



احتمالی (Probabilistic)

- استفاده از فرآیند غیرخطی مرتبه سوم
(spontaneous four-wave mixing)
(SFWM)
- استفاده از فرآیند غیرخطی مرتبه دوم
(spontaneous parametric down-)
conversion (SPDC)

منابع تولید تک فوتون

قطعی (Deterministic)

- Color centers
نقص‌هایی در کریستال‌ها که عامل جذب یا گسیل
نور در طول موج مشخص می‌باشند.
- Quantum Dots
تولید تک فوتون با ترکیب یک جفت الکترون-
حفره

1. Orioux, A., et al. (2017). "Semiconductor devices for entangled photon pair generation: a review." Reports on Progress in Physics 80(7): 076001.

2. Lu, X., et al. (2019). "Chip-integrated visible-telecom entangled photon pair source for quantum communication." Nature physics 15(4): 373-381

3. Wang, Y., et al. (2021). "Integrated photon-pair sources with nonlinear optics." Applied Physics Reviews 8(1): 011314.

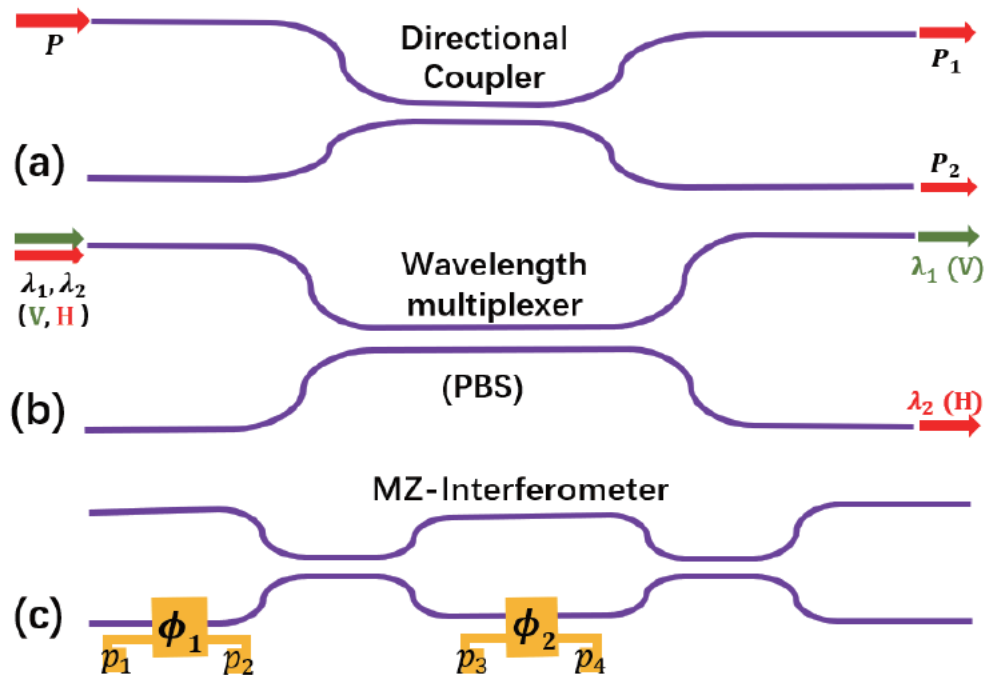
1. Norman, J. C., et al. (2018). "Perspective: The future of quantum dot photonic integrated circuits." APL photonics 3(3): 030901.

2. Hepp, S., et al. (2019). "Semiconductor quantum dots for integrated quantum photonics." Advanced Quantum Technologies 2(9): 1900020.

3. Vajner, D. A., et al. (2022). "Quantum communication using semiconductor quantum dots." Advanced Quantum Technologies 5(7): 2100116.

دستورزی

آشکارسازی



(a) Directional coupler, (b) wavelength multiplexer or PBS, and (c) MZI with variable PSs.

**superconducting nanowire single-photon detectors
(SNSPDs)**

**avalanche photodiodes
transition edge sensor (TES)**

You, L. (2020). "Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information." *Nanophotonics* 9(9): 2673-2692.

1. Simon, C., et al. (2010). "Quantum memories: a review based on the European integrated project "qubit applications (QAP)"." The European Physical Journal D 58: 1-22.

2. Heshami, K., et al. (2016). "Quantum memories: emerging applications and recent advances." Journal of modern optics 63(20): 2005-2028.

انواع حافظه‌های کوانتومی

- حافظه‌هایی برای تک فوتون‌ها
- حافظه‌هایی برای حالت‌های کلی نور
- حافظه‌های گسیلنده‌ی فوتون (حالت آنها به صورت مستقیم اندازه گیری می شود)
- حافظه‌های گسیلنده‌ی فوتون (حالت آنها از طریق بازیابی اندازه گیری می شود)

معیارهای ارزیابی عملکرد

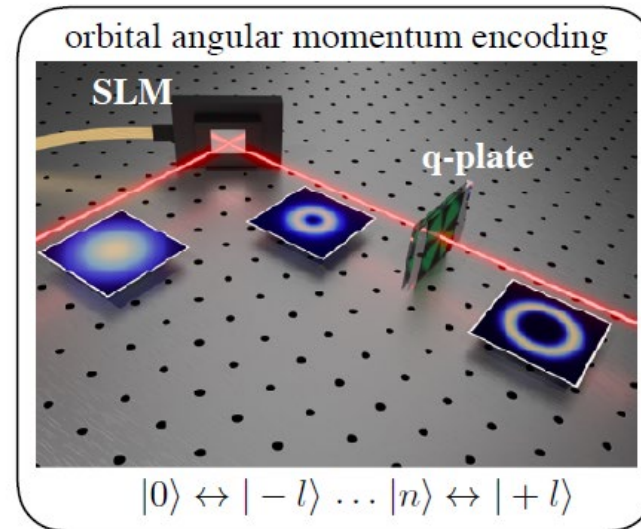
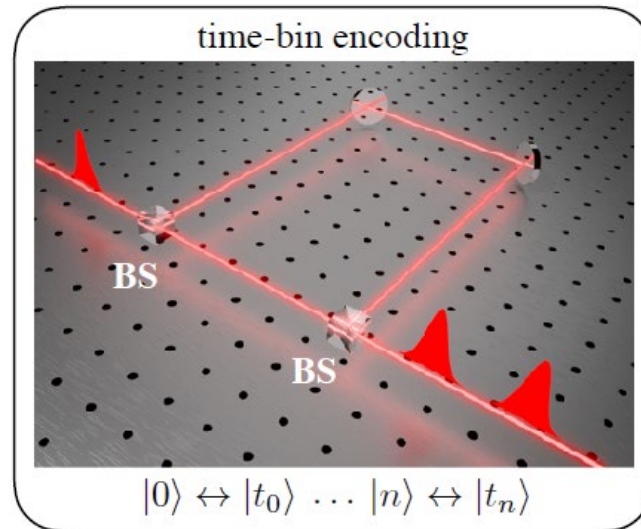
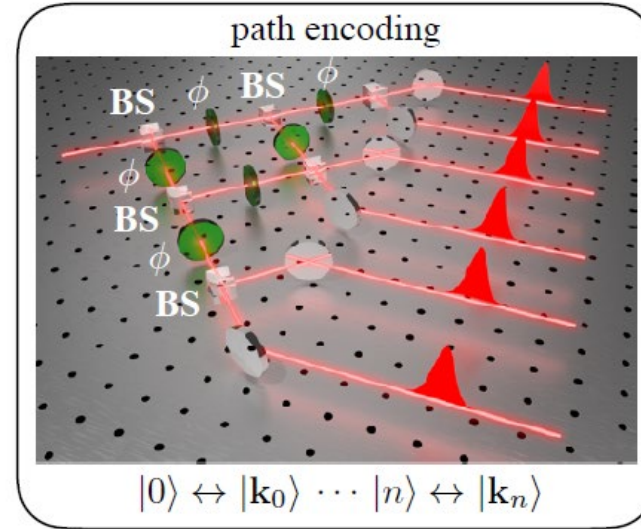
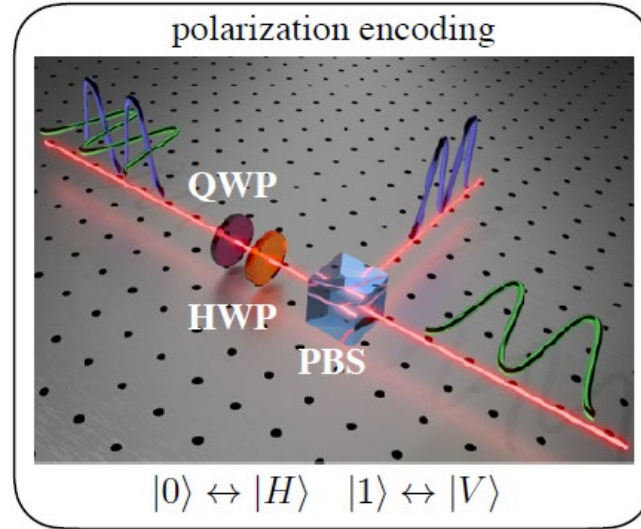
- Fidelity (میزان همپوشانی فوتون گسیل شده با فوتون اصلی)
- Efficiency (احتمال باز گسیل فوتون ذخیره شده)
- Storage time
- Bandwidth and wavelength
- Capacity

نیازمندی‌ها و ملاحظات فیزیکی

روش‌های پیاده‌سازی

کدگذاری اطلاعات کوانتومی

10



Integrated Quantum Photonics Review References



11

Orieux, A. and E. Diamanti (2016). "Recent advances on integrated quantum communications." Journal of Optics 18(8): 083002.

Flamini, F., et al. (2018). "Photonic quantum information processing: a review." Reports on Progress in Physics 82(1): 016001.

Zhang, Q.-Y., et al. (2018). "Quantum photonic network on chip." Chinese Physics B 27(5): 054207.

Wang, J., et al. (2020). "Integrated photonic quantum technologies." Nature Photonics 14(5): 273-284.

Corrielli, G., et al. (2021). "Femtosecond laser micromachining for integrated quantum photonics." Nanophotonics 10(15): 3789-3812.

Chen, X., et al. (2021). "Quantum entanglement on photonic chips: a review." Advanced Photonics 3(6): 064002-064002.

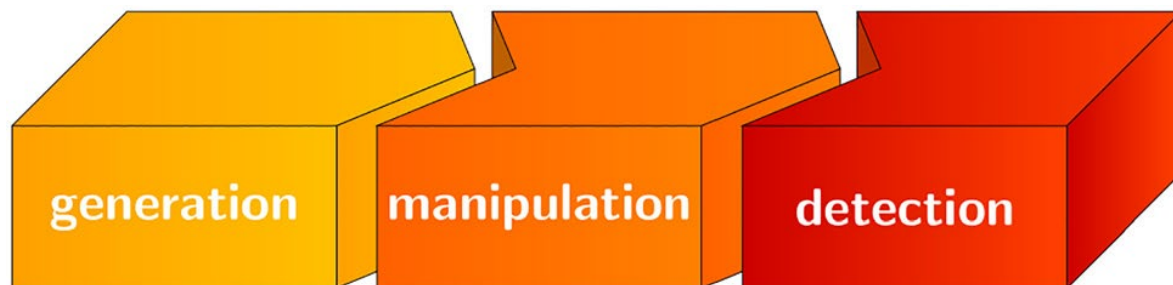
Pelucchi, E., et al. (2022). "The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies." Nature Reviews Physics 4(3): 194-208.

Laucht, A., et al. "2022 Roadmap on integrated quantum photonics."

Cozzolino, D., et al. (2019). "High-dimensional quantum communication: benefits, progress, and future challenges." Advanced Quantum Technologies 2(12): 1900038.

Wang, Q., et al. (2021). "Chip-based quantum communications." Journal of Semiconductors 42(9): 091901.

استفاده از مدهای OAM



$$|\Psi\rangle \rightarrow U |\Psi\rangle \rightarrow \langle\Phi| U |\Psi\rangle$$

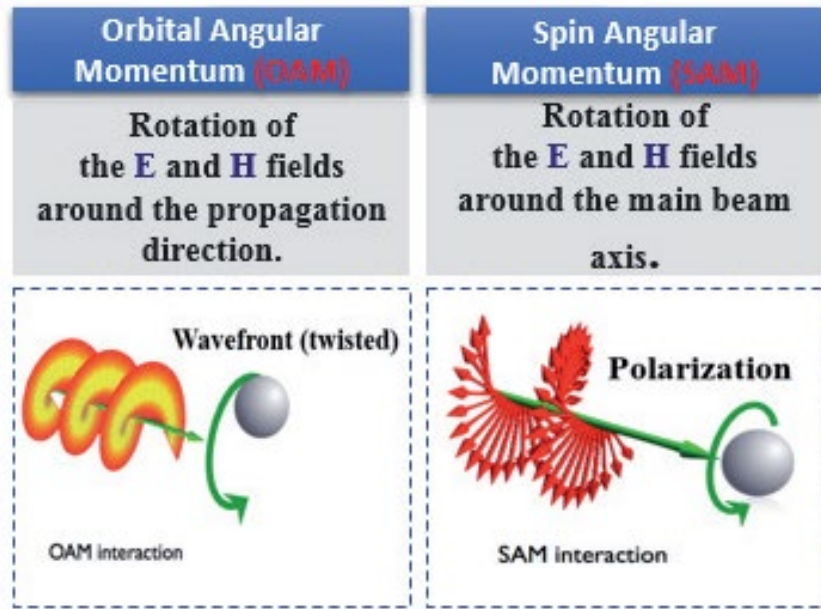
معرفی OAM

13

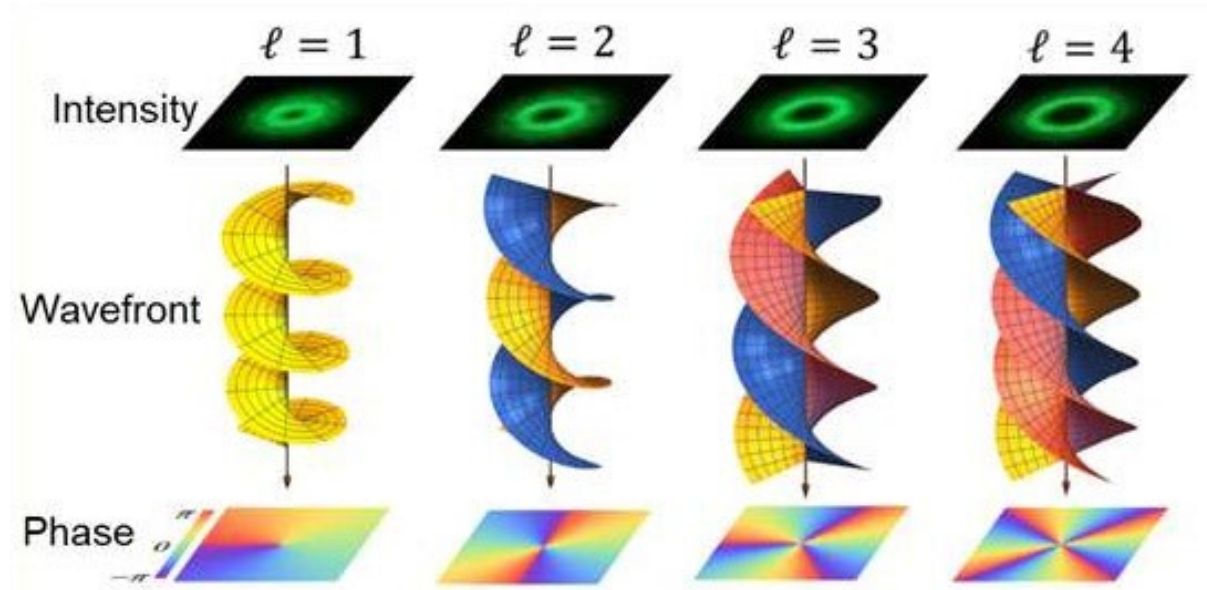
□ تکانه زاویه ای مداری (Orbital Angular Momentum)، یکی از ویژگی‌های ذاتی نور

□ پرتوهای با جبهه فاز مارپیچی (وابستگی فاز $e^{il\varphi}$) حامل OAM

φ : زاویه‌ی سمتی l : عددی صحیح موسوم به بار توپولوژیکی $(0, \pm 1, \pm 2, \dots)$



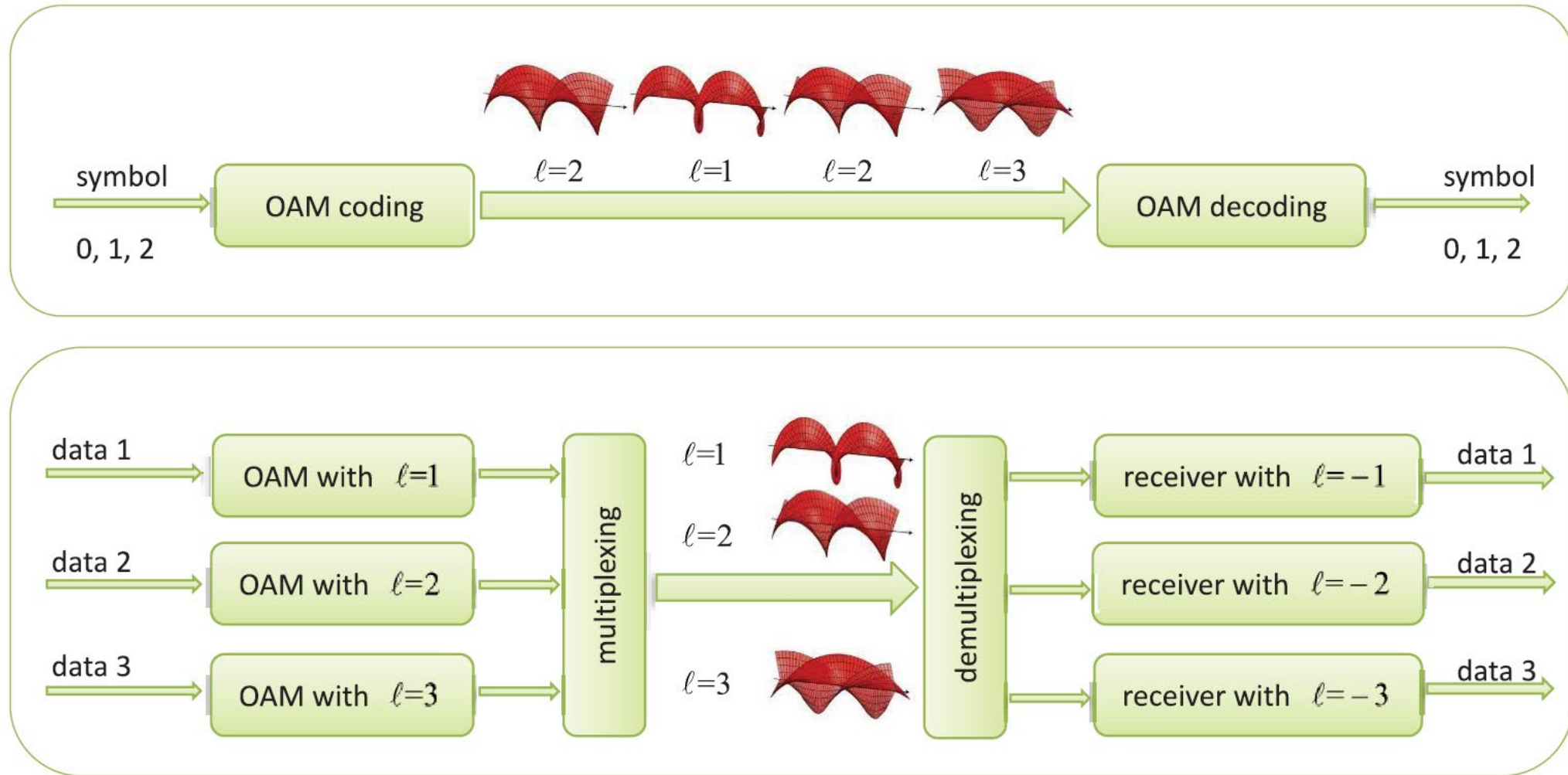
مفهوم SAM و OAM



الگوی فاز، جبهه‌ی موج و شدت پرتوهای حامل OAM با مقادیر l مختلف.

کاربرد OAM در مخابرات

14



روش‌های انتقال اطلاعات توسط OAM عبارتند از OAM-Shift Keying (OAM-SK) و OAM-Division Multiplexing (OAM-DM)

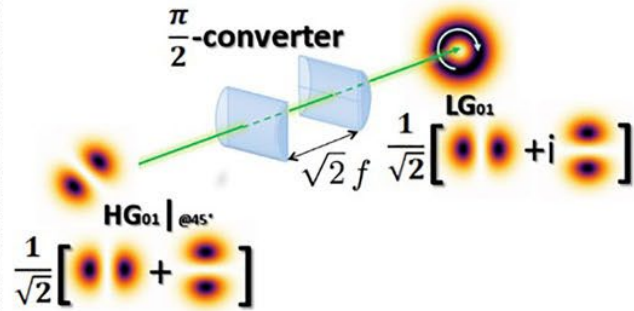
روش‌های تولید OAM

15

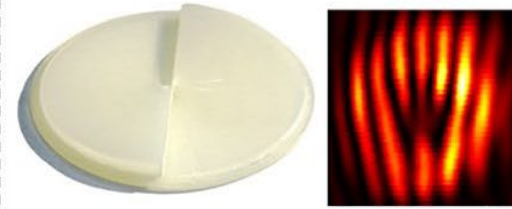
Spatial light modulator



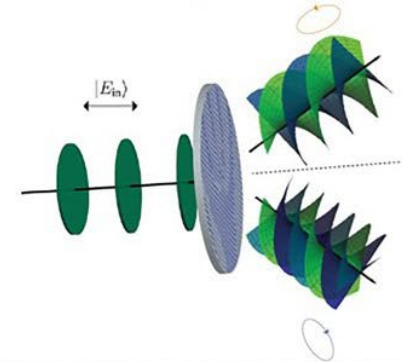
Cylindrical lens pair



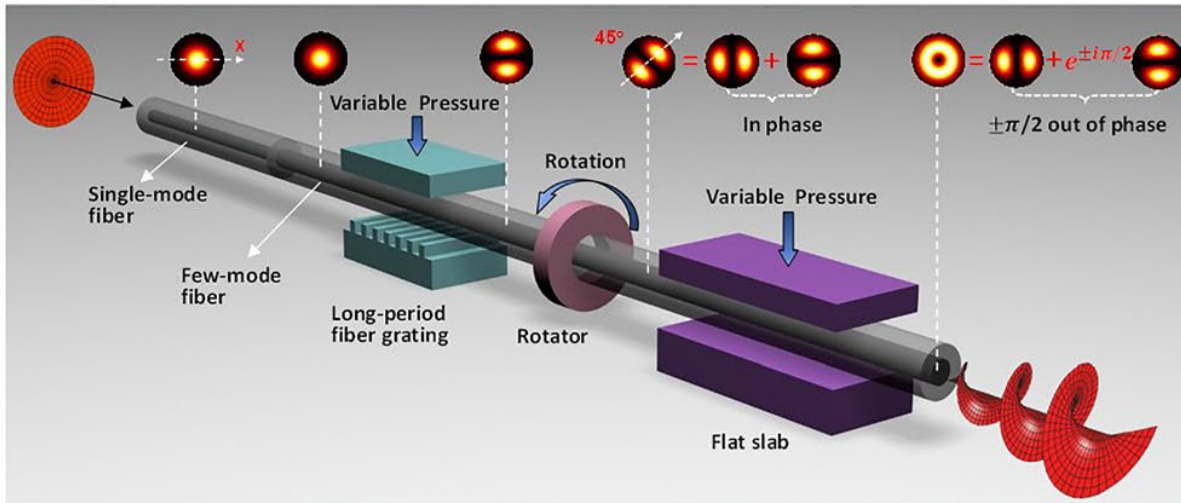
Spiral phase plate



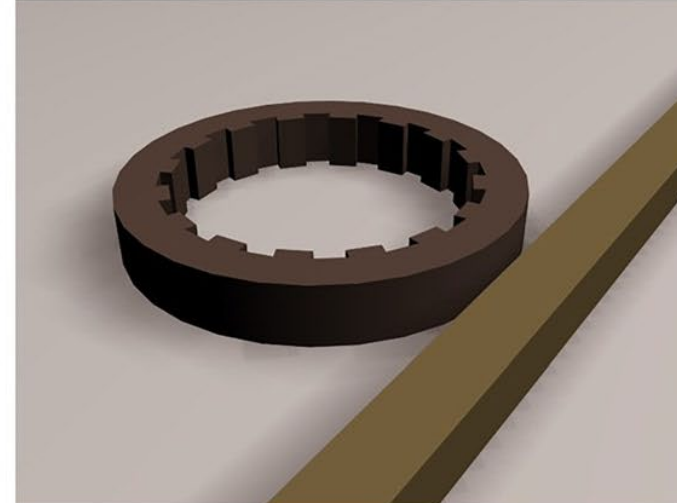
J-plate



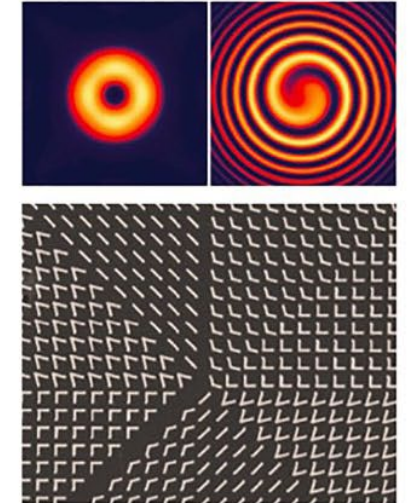
Fiber-based devices



Integrated devices



Metasurfaces



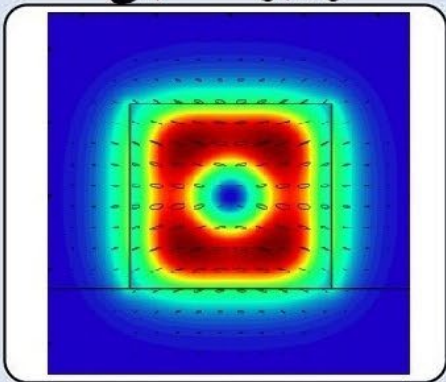
OAM در مدارهای مجتمع فوتونیکی

16

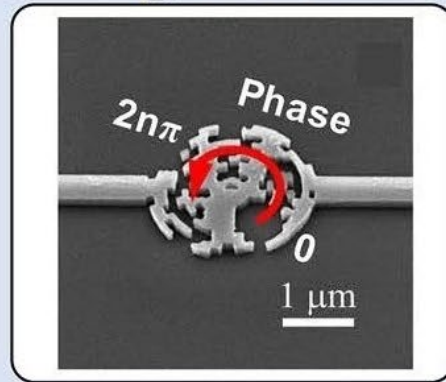
انواع ساختارهای مجتمع برای سیستم‌های مخابراتی مبتنی بر OAM



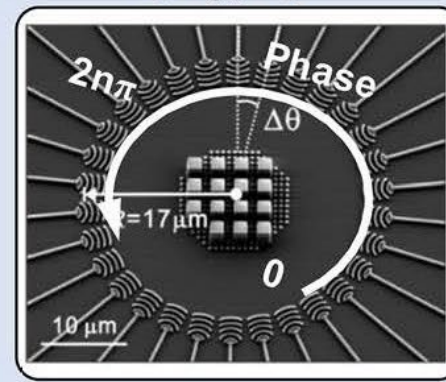
گسیلنده OAM مبتنی بر
موجبر مستطیلی



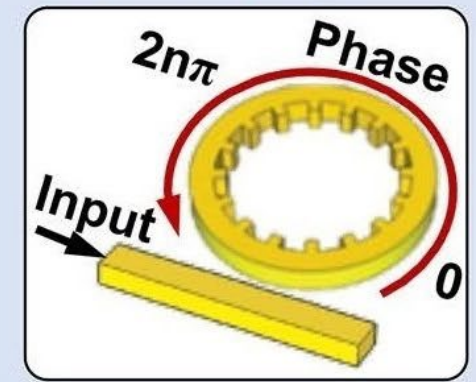
آنتن نوری
کسر طول موج



گسیلنده OAM با آرایه
فاز دایره‌ای



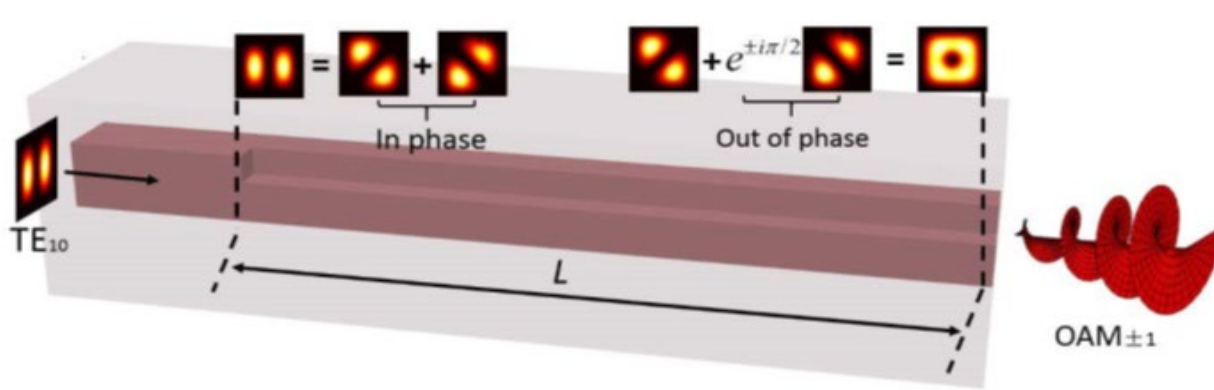
گسیلنده OAM مبتنی بر
تشدید گر حلقه‌ای



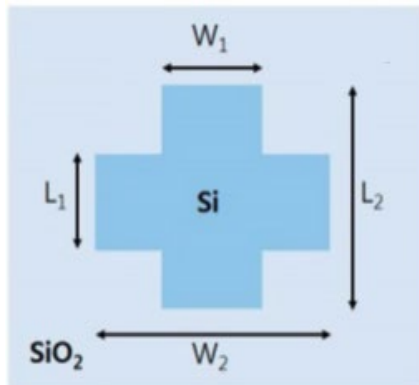
OAM در مدارهای مجتمع فوتونیکی

17

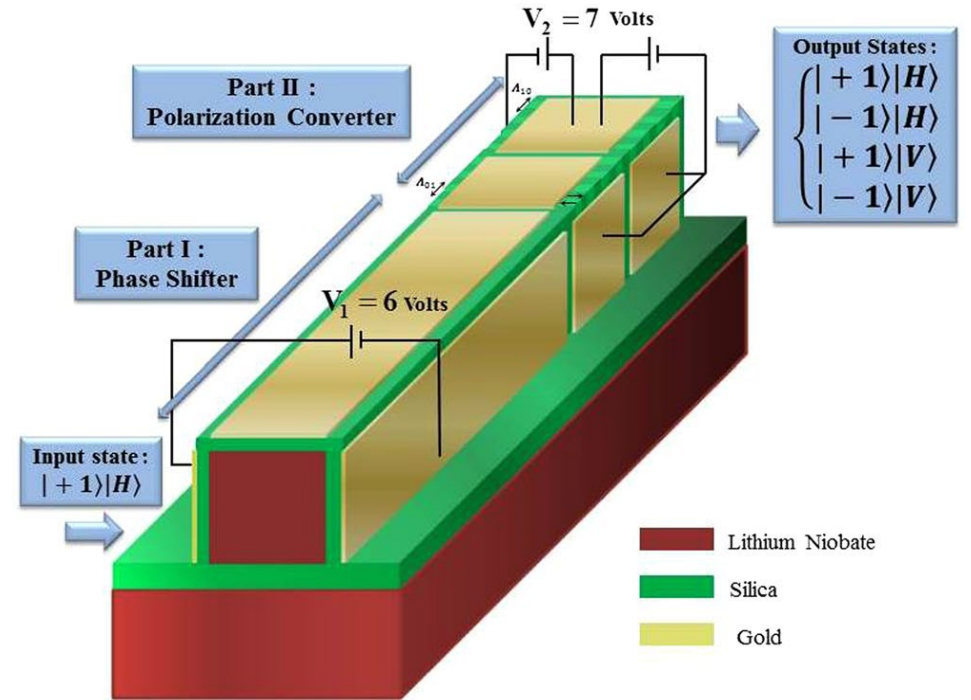
نمونه‌هایی از گسیلنده‌های OAM مبتنی بر موجبر مستطیلی



موجبر شیاردار سیلیکون [۲]

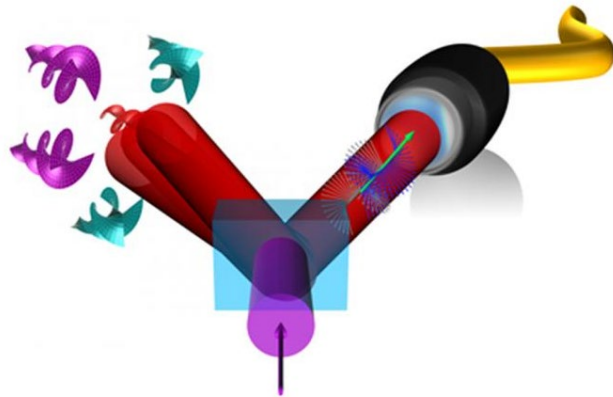


موجبر متقاطع سیلیکونی [۳]



موجبر مربعی از جنس لیتیوم نایوبیت [۱]

درهم تنیدگی کوانتومی



مخابرات کوانتومی چند بعدی با استفاده از OAM

- ✓ پیچاندن یکی از فوتون‌ها بر اساس قطبش و دیگری بر اساس OAM
- ✓ عبور فوتون قطبی شده از تار نوری و قرار دادن دیگر فوتون در فضای آزاد
- ✓ انتقال در هم تنیده‌ی چند بعدی

مخابرات امن بر اساس QKD

انتقال حداکثر یک بیت
اطلاعات به ازای هر
فوتون

استفاده از قطبش فوتون
برای کدگذاری
اطلاعات



دستیابی به
طرح‌های QKD با ابعاد
بالا تر

استفاده از OAM برای
کدگذاری اطلاعات



انتخابی مناسب
برای انتقال
مدهای OAM



موجبرهای MMI دوبعدی

✓ قابل استفاده برای حمل توان توسط
مدهای مرتبه‌ی بالاتر با توزیع میدان
دوبعدی

✓ چند مدی بودن هم در جهت افقی و
هم در جهت عمودی

ساختارهای چندمدی تداخلی (MMI)

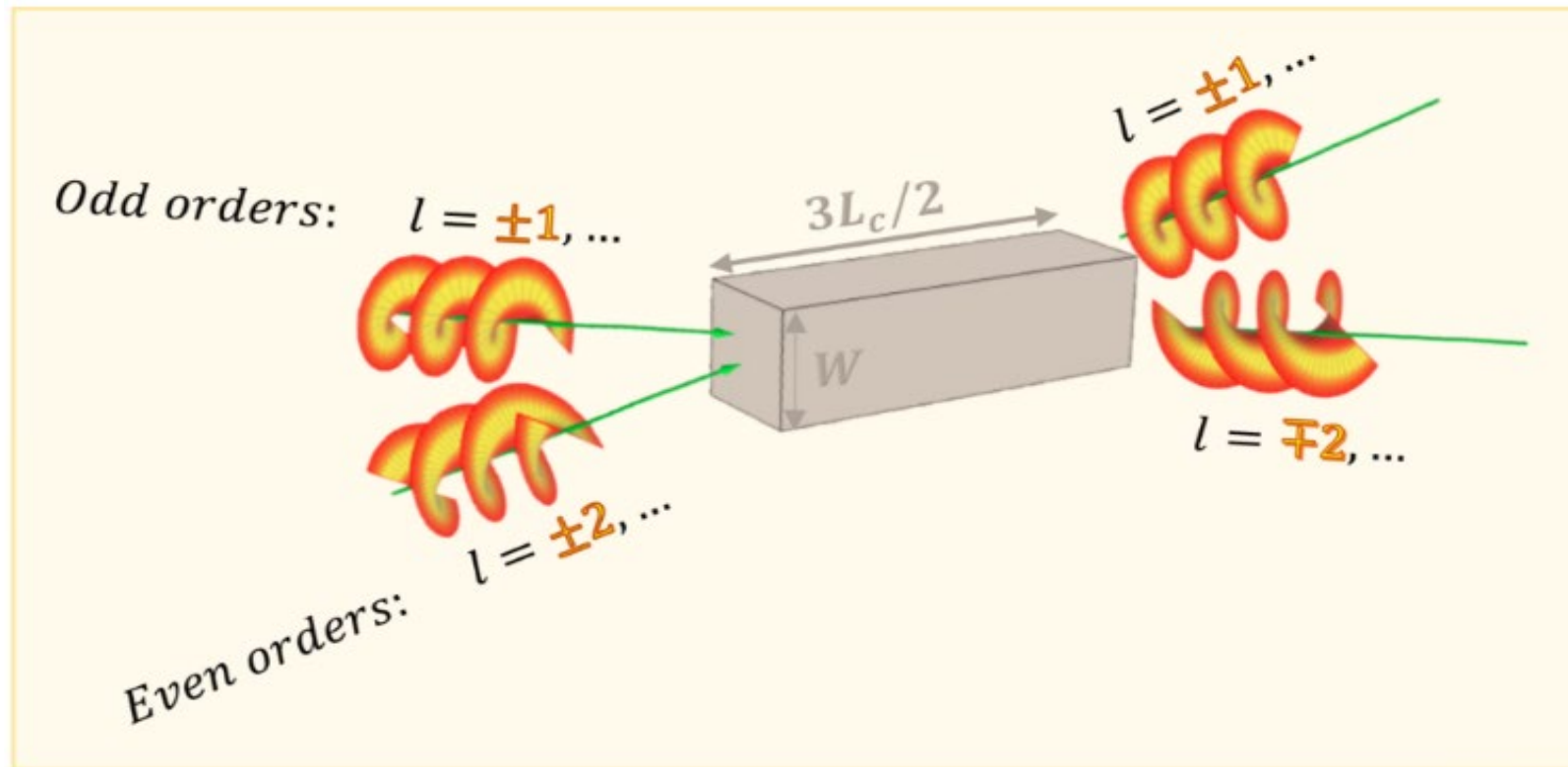
اندازه‌ی فشرده

سادگی ساخت

حساسیت پایین به
پارامترهای ساخت

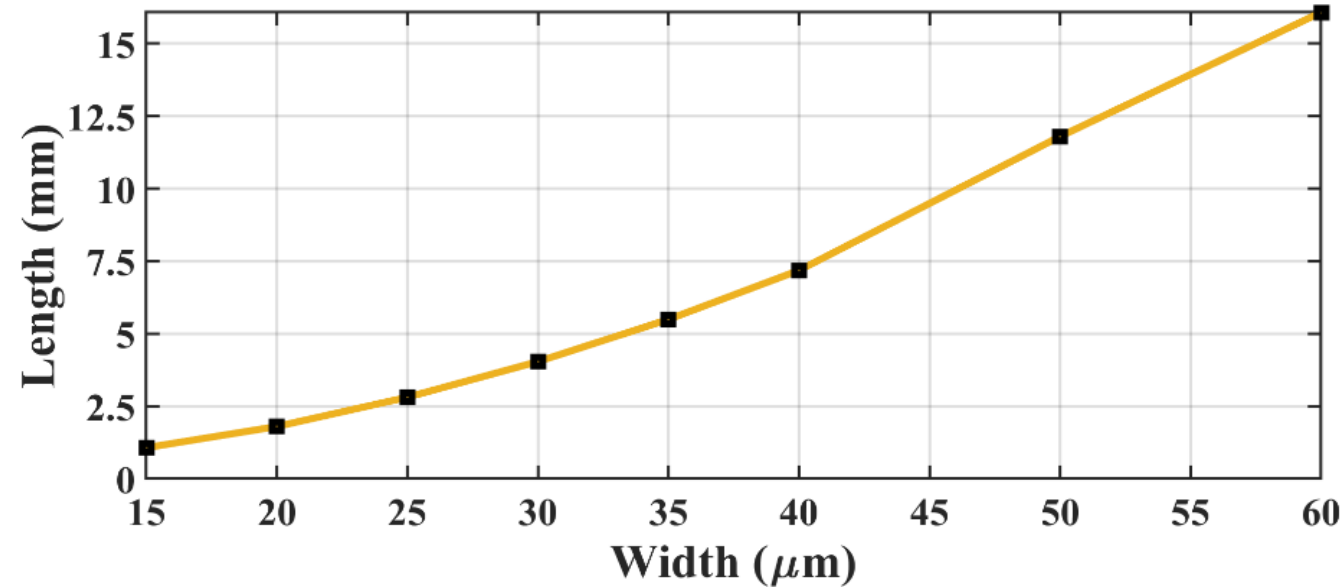
پدیده خود-تصویربرداری مدهای OAM در موجبرهای MMI

20



پدیده خود-تصویربرداری مدهای OAM در موجبرهای MMI

21



شکل ۸ طول مورد نیاز جهت ایجاد خود-تصویر OAM در موجبرهای مورد مطالعه با پهنای در بازه ۱۵ تا ۶۰ میکرومتر



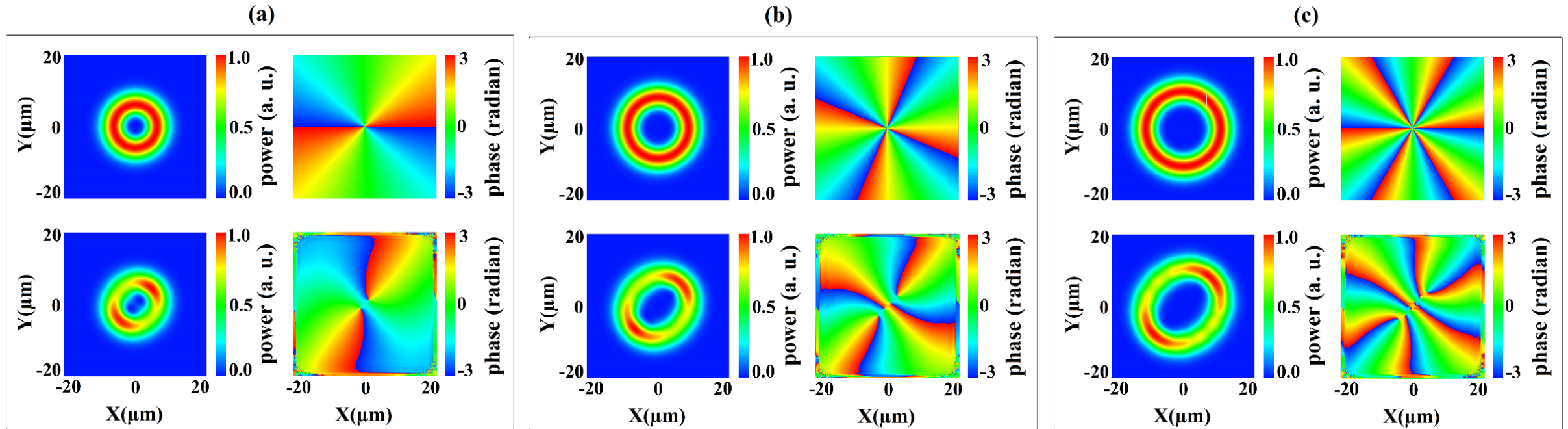
$$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$$

$$n_g = 3.45$$

$$n_c = 1.45$$

تبدیل بین مدهای OAM زوج

22



توزیع توان بهنجار شده (سمت چپ) و الگوی فازی (سمت راست) مدهای ورودی (ردیف بالا) با $l = +2$ ، $l = +4$ ، $l = +6$ و $l = -2$ ، $l = -4$ ، $l = -6$ در موجبری به پهنای ۴۰ میکرومتر.

تبدیل بین مدهای OAM زوج

23

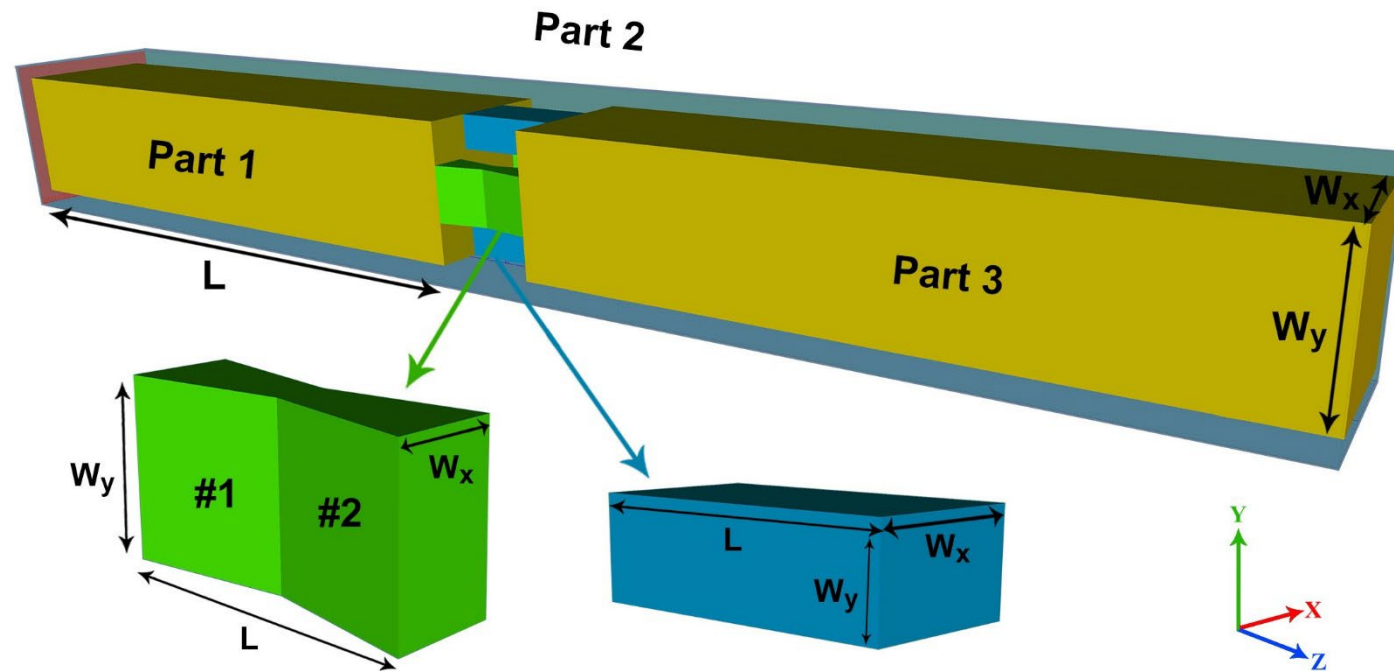
بررسی کیفیت عملکرد موجبر MMI به عنوان معکوس گر بار توپولوژیکی، از طریق محاسبه ی مقدار خلوص تصاویر بازتولید شده

$$Purity = \frac{\int_0^\infty \left| \int_0^{2\pi} E(\rho, \theta) \frac{\exp(-il\theta)}{\sqrt{2\pi}} d\theta \right|^2 \rho d\rho}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} |E(\rho, \theta)|^2 d\theta \rho d\rho}, \quad POI = \frac{|\iint E_1(x, y) E_2^*(x, y) dx dy|^2}{\iint |E_1(x, y)|^2 dx dy \iint |E_2(x, y)|^2 dx dy}$$

مقادیر خلوص و POI محاسبه شده برای موجبری با پهنای ۴۰

Topological charge	Purity (%)	POI(%)
±2	92.43	98.66
±4	84.69	96.71
±6	79.27	93.93

افزاره معکوس گر بار توپولوژیکی برای مدهای مرتبه‌ی فرد



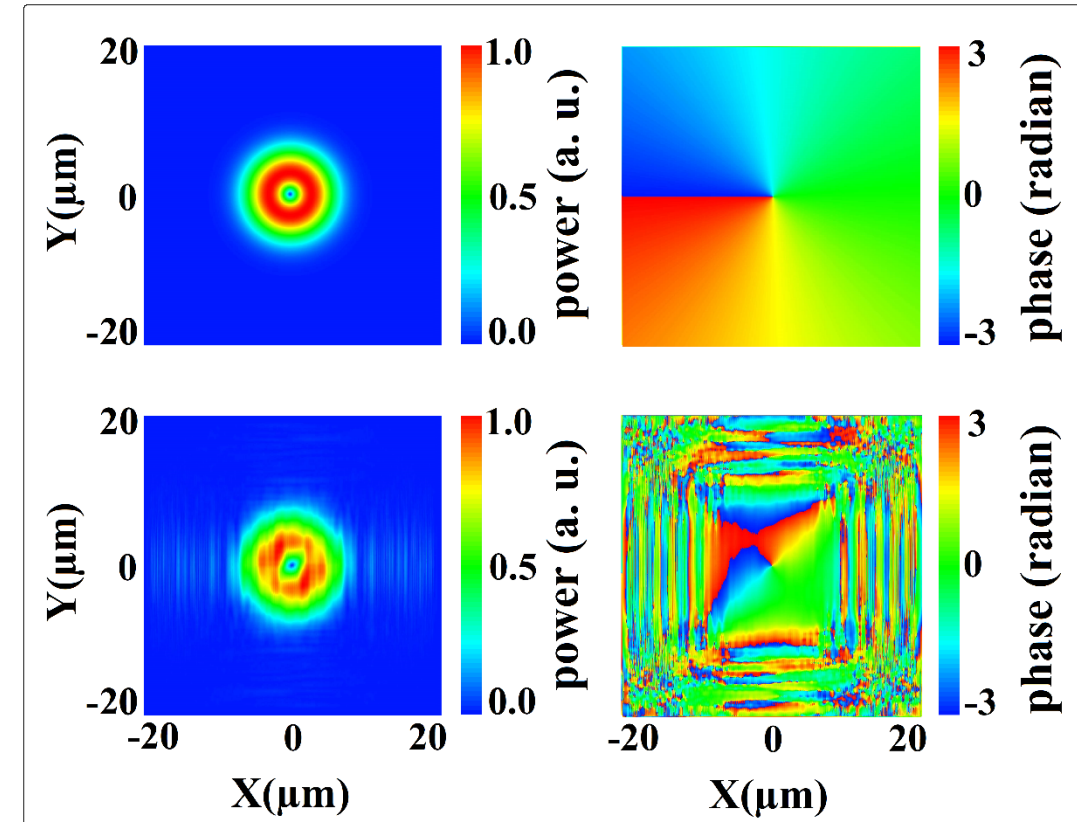
طرح‌واره‌ای از افزاره‌ی طراحی شده شامل: دو موجبر MMI یکسان در بخش‌های اول و سوم، دو موجبر خطی (سمت بالا و پایین) و دو جابه‌جاگر فاز (سمت راست و چپ) در بخش دوم

تبدیل بین مدهای OAM فرد

تحلیل نتایج

ابعاد بخش‌های مختلف افزاره‌ی پیشنهادی برای مد OAM ورودی با $l = \pm 1$

Components			$W_x (\mu m)$	$W_y (\mu m)$	$L (\mu m)$
Part1	First MMI waveguide		20	20	901
Part2	Up and down linear waveguides		7.2	4.42	123
	Right and left phase shifters	#1	4.42~2.21	7.2	123/2=61.5
		#2	2.21~4.42	7.2	123/2=61.5
Part3	Second MMI waveguide		20	20	901



توزیع توان بهنجار شده (سمت چپ) و الگوی فازی (سمت راست) مد ورودی (ردیف بالا) با $l = +1$ و تصویر بازتولید شده (ردیف پایین) با $l = -1$ در موجبری به پهنای ۴۰ میکرومتر

تبدیل بین مدهای OAM فرد

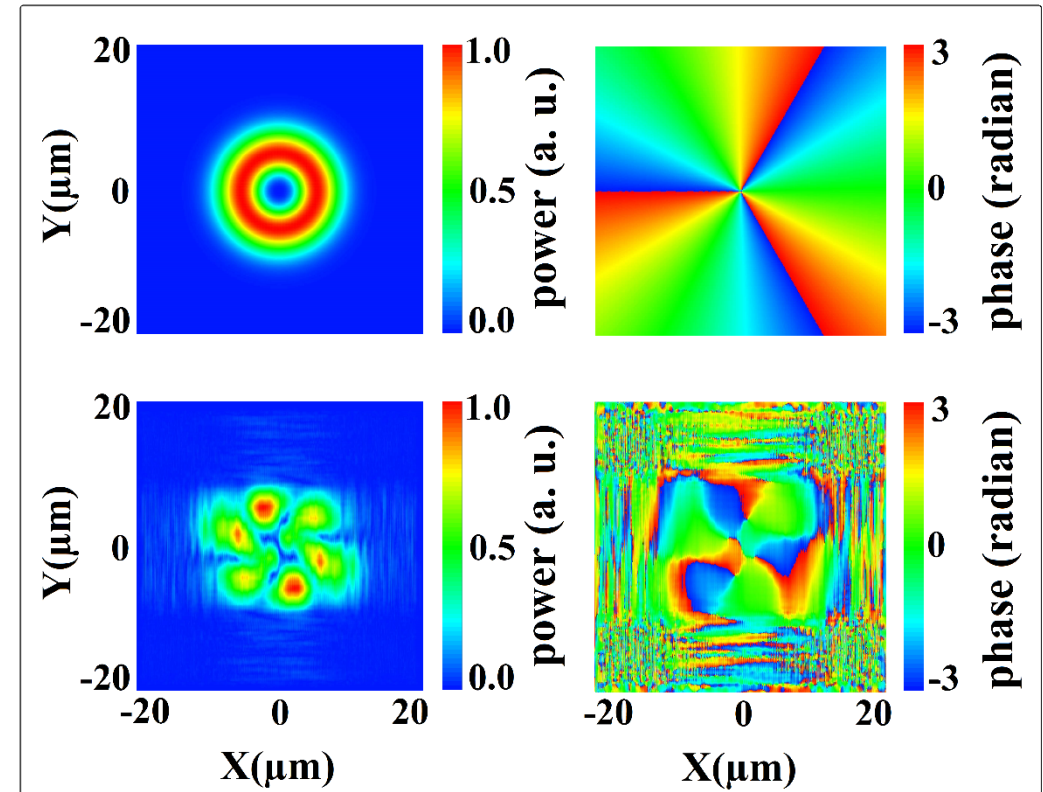
تحلیل نتایج

ابعاد بخش‌های مختلف افزاره‌ی پیشنهادی برای مد OAM ورودی با $l = \pm 3$

Components			$W_x (\mu m)$	$W_y (\mu m)$	$L (\mu m)$
Part2	Up and down linear waveguides		9.2	4.7	570
	Right and left phase shifters	#1	4.7~2.35	9.2	570/2=285
		#2	2.35~4.7	9.2	570/2=285

مقادیر خلوص و POI محاسبه شده برای موجبر با پهنای ۲۰ میکرومتر

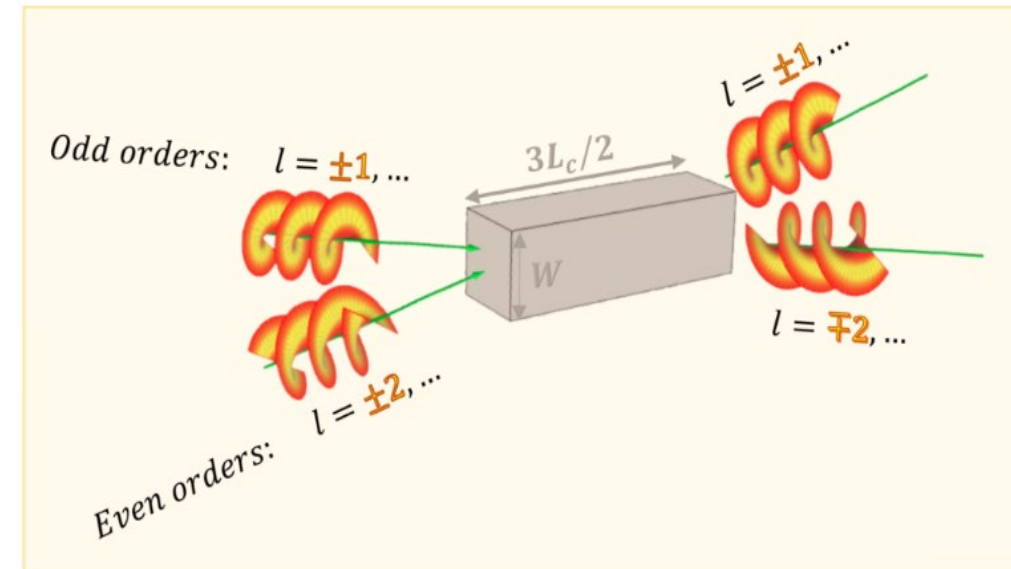
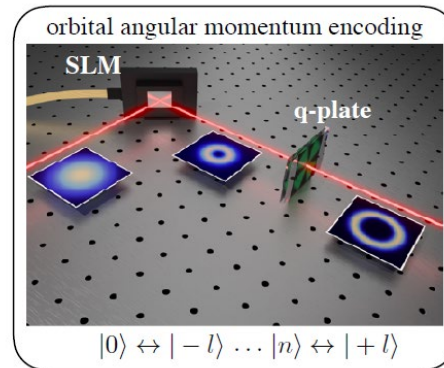
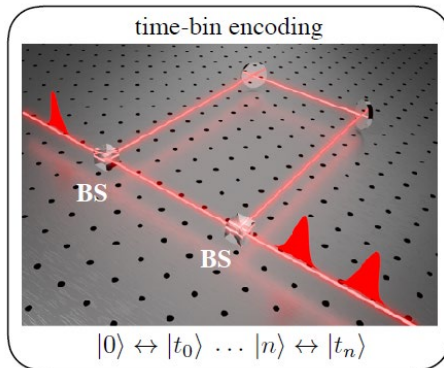
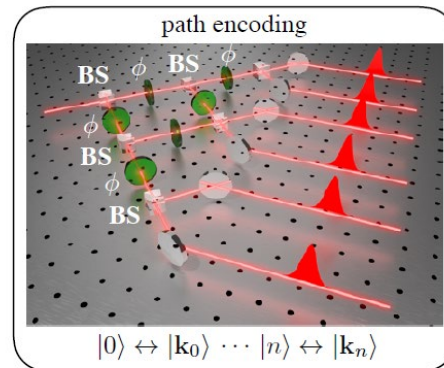
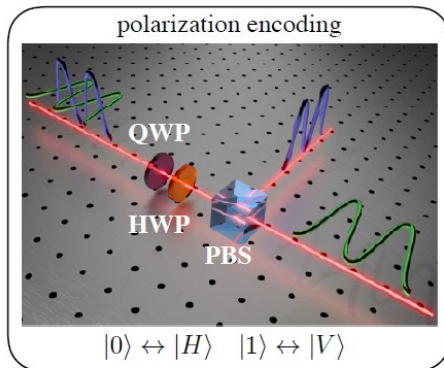
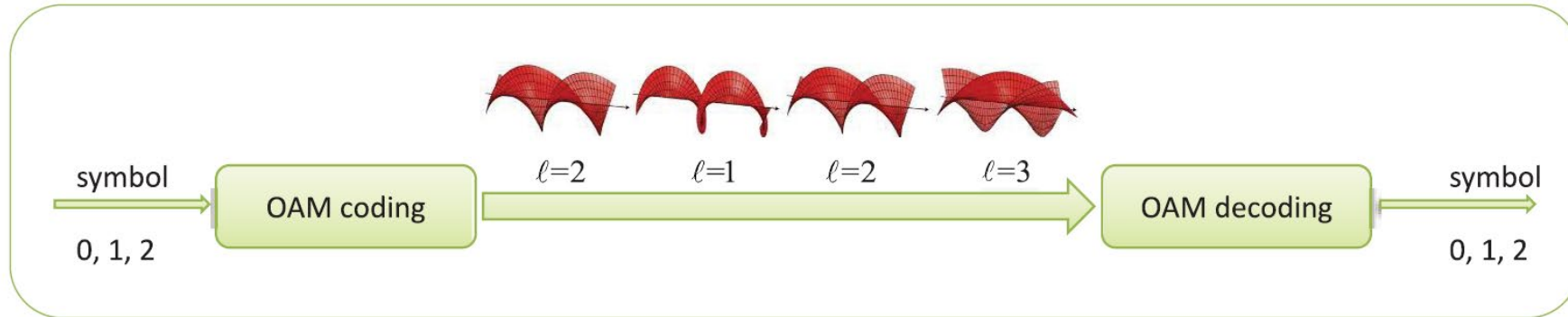
Topological charge	Purity (%)	POI (%)
± 1	94	82
± 3	82	60



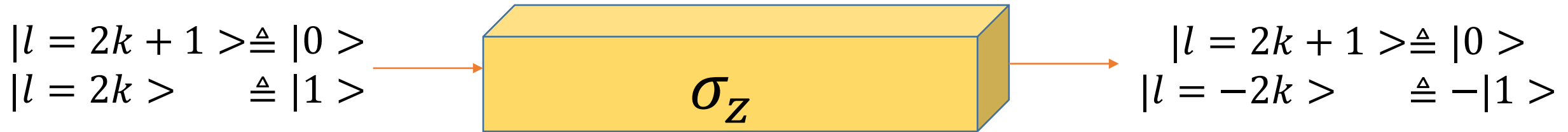
توزیع توان بهنجار شده (سمت چپ) و الگوی فازی (سمت راست) مد ورودی (ردیف بالا) با $l = +3$ و تصویر بازتولید شده (ردیف پایین) با $l = -3$ در موجبری به پهنای ۴۰ میکرومتر

OAM در مخبرات کوانتومی

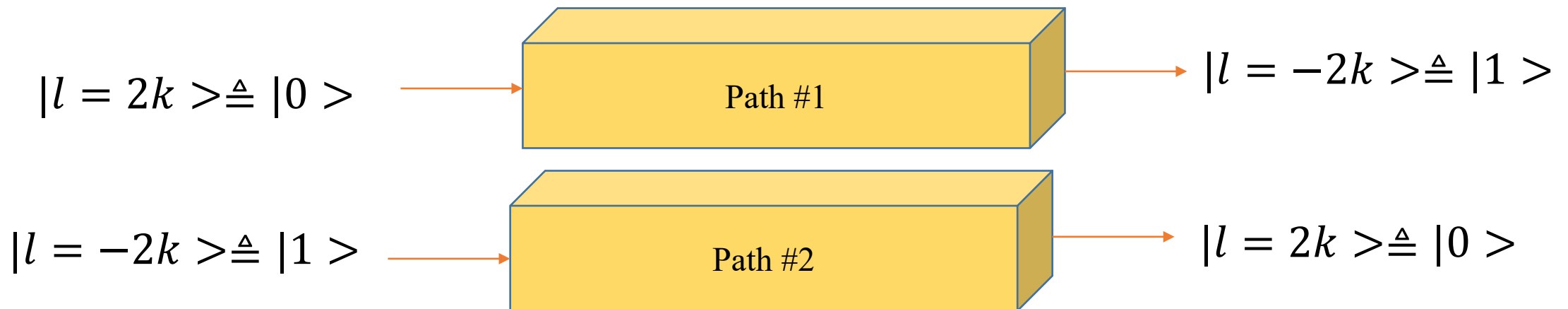
27



Pauli-Z gate



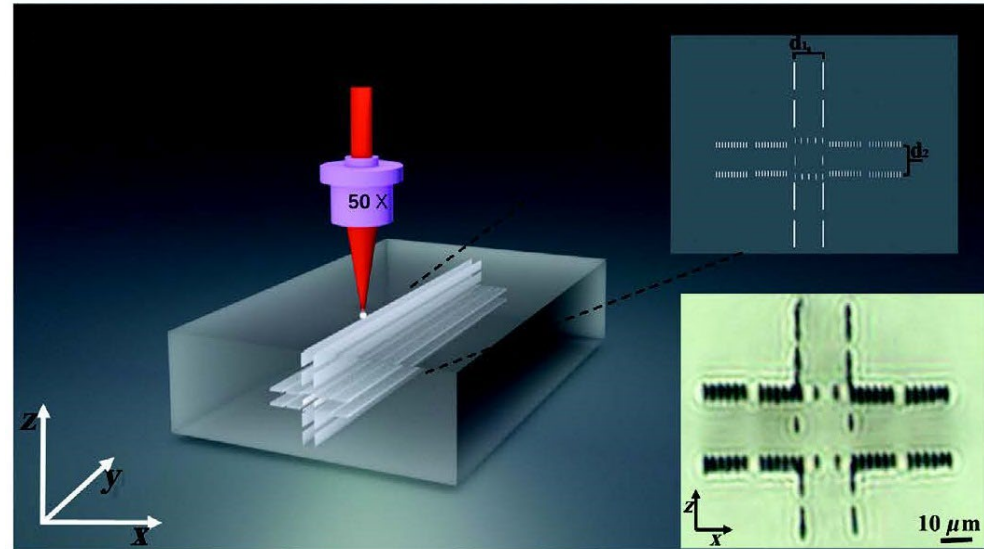
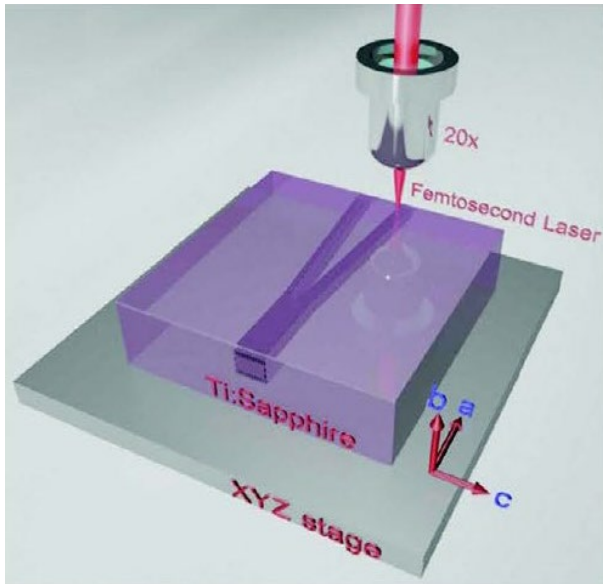
Data Swapping



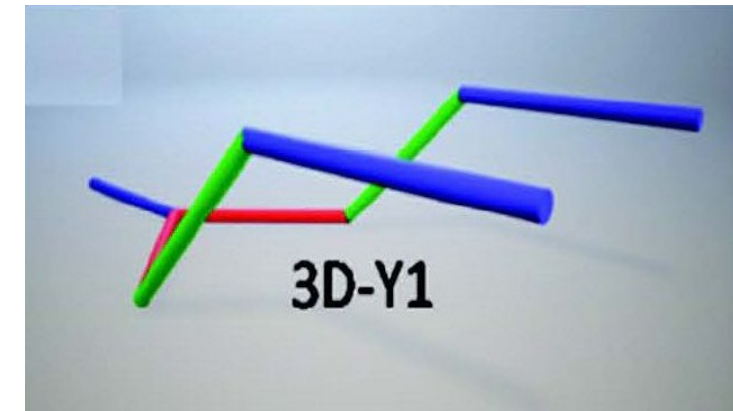
روش پیشنهادی برای ساخت افزارهای طراحی شده

29

استفاده از لیزر فمتوثانیه‌ای با داشتن قابلیت ساخت سه بعدی



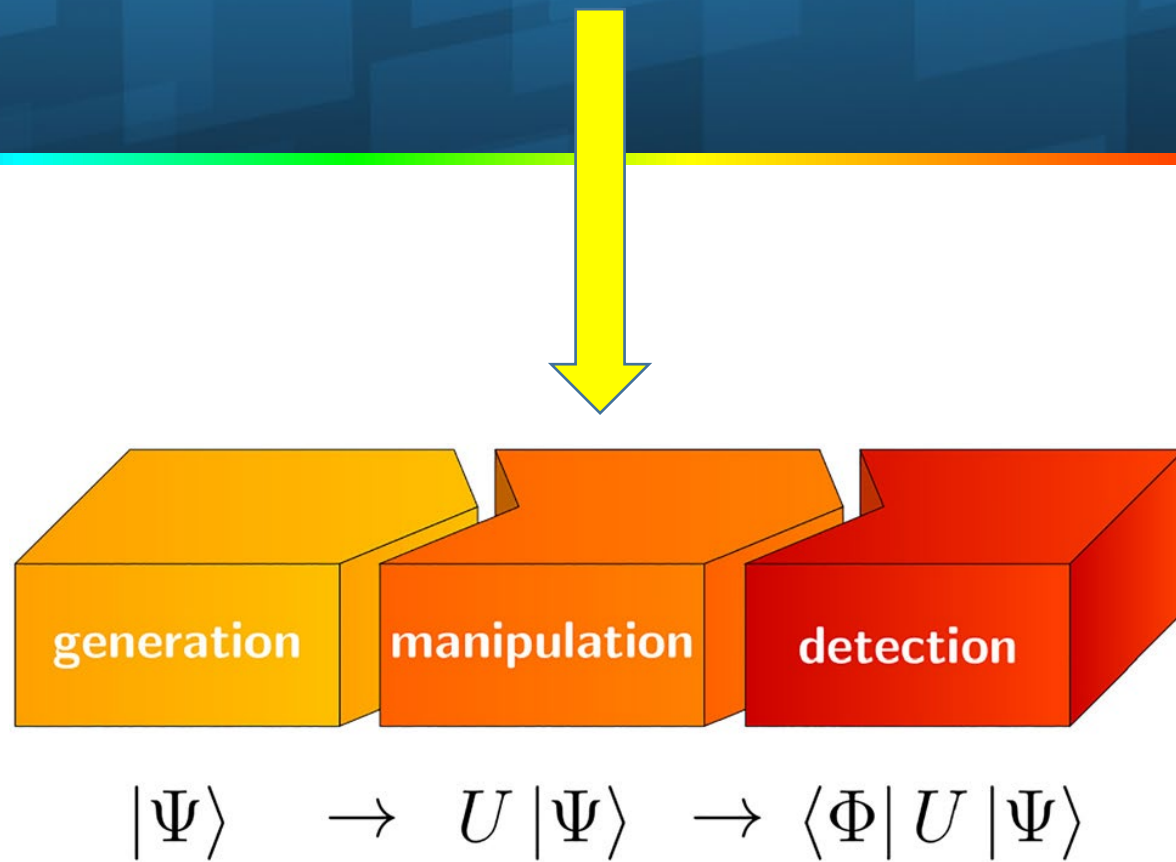
شکل ۲۲. قطبش گر سه بعدی ساخته شده با لیزر فمتوثانیه‌ای [۴]



شکل ۲۳. ساختار تقسیم کننده‌ی پرتوی سه بعدی ساخته شده با لیزر فمتوثانیه‌ای [۵]

شکل ۲۴. فرآیند ساخت تقسیم کننده‌ی Y با لیزر فمتوثانیه‌ای [۶]

مدوله سازی الکترواپتیکی با استفاده از TFLN





Prof. Thomas Pertsch

Head of the Nano &
Quantum Optics Group

Fellow of the Max
Planck School of
Photonics

Member of the board of
directors of the Abbe
Center of Photonics



Dr. Frank Setzpfandt

Group Leader of the
Quantum Optics Group



Abbe Center of Photonics, Institute of Applied Physics
Friedrich Schiller University of Jena, Jena, Germany
September 2021- February 2022

مدوله‌سازهای معمولی مبتنی بر LN

ساخت بر اساس
تخلیه یونی یا تبادل
پروتون

کم بودن اختلاف ضریب
شکست ایجاد شده بین هسته و
پوشش

قرارگیری الکترودها در
فاصله ی دورتر برای
کاهش تلفات جذب
بزرگ بودن اندازه مد
نوری ایجاد شده

افزایش ولتاژ راه اندازی و
ولتاژ نیم موج

راهکار کاهش ولتاژ راه
اندازی: استفاده از
الکترودهای بلندتر

بزرگ شدن
ابعاد مدوله‌ساز

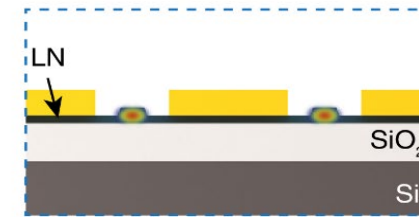
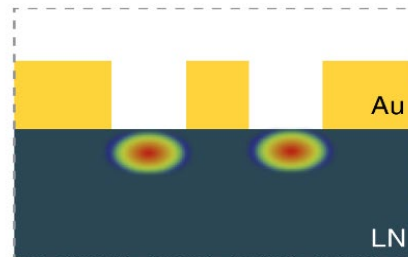
مدوله‌سازهای مبتنی بر LN لایه نازک

چسباندن LN لایه نازک با ضخامت کنترل
شده به یک عایق با ضریب شکست پایین تر
(مانند سیلیکون اکسید) (LNOI)

کوچک شدن اندازه
مد نوری
اختلاف ضریب شکست
بالا بین هسته و پوشش
تلفات پایین
ولتاژ راه‌اندازی
پایین

بازده
مدولاسیون بالا

پیکربندی های بسیار
فشرده‌تر



شکل ۲۵. سطح مقطع مدوله‌سازهای مبتنی بر LN معمولی (سمت چپ) و LN لایه نازک (سمت راست) [۷]

ویژگی‌های ماده‌ی لیتیوم نایوبیت

33

□ ساختار بلور LN: قرار گیری در دسته بلورهای مثلثی

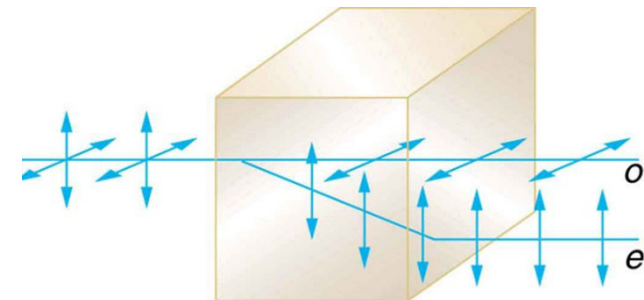
□ ماتریس گذردهی الکتریکی برای بلور LN:

$$1 + \chi^{(1)}_{ij} = \epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

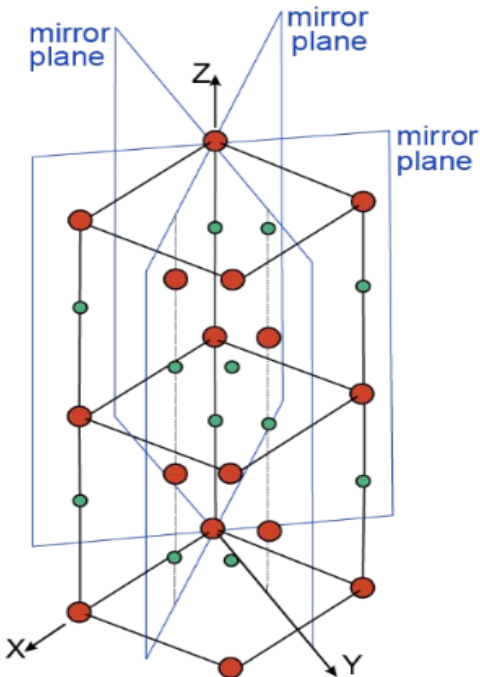
بلور LN نسبت به محور c (معمولا Z) متقارن است، گذردهی برای میدان الکتریکی با هر جهتی که در صفحه عمود بر محور c باشد، یکسان است.

□ ماتریس ضریب شکست برای بلور LN:

$$\begin{bmatrix} n_o & 0 & 0 \\ 0 & n_o & 0 \\ 0 & 0 & n_e \end{bmatrix}$$



شکل ۲۷. ضرایب شکست یک ماده با خاصیت دو شکستی



● Niobium
● Lithium

شکل ۲۶. تعریف استاندارد محورهای X، Y و Z [۱۴].

اثر الکترواستاتیکی

34

□ اثر الکترواستاتیکی: تغییر در ضریب شکست یک ماده در اثر حضور میدان الکتریکی ساکن (یا با فرکانس پایین)

□ اثر الکترواستاتیکی خطی یا اثر پاکلز: وابستگی خطی تغییر ضریب شکست به شدت میدان الکتریکی اعمال شده

■ برای یک ماده بدون تلفات و فعال نوری داریم:

$$\begin{bmatrix} D_X \\ D_Y \\ D_Z \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \end{bmatrix}$$

$$U = \frac{1}{2\epsilon_0} \left[\frac{D_x^2}{\epsilon_{xx}} + \frac{D_y^2}{\epsilon_{yy}} + \frac{D_z^2}{\epsilon_{zz}} \right]$$

سطوح U ثابت در فضای $\mathbf{D}$ بیضوی هستند.

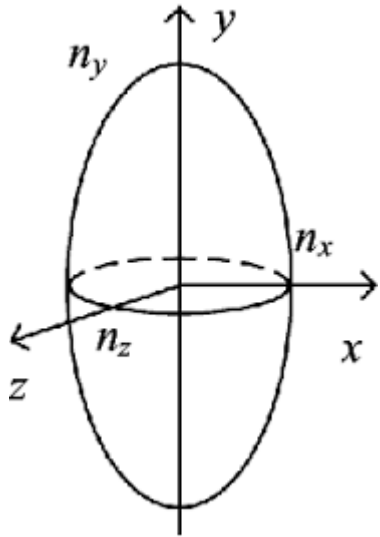
اگر $X = \left(\frac{1}{2\epsilon_0 U} \right)^{1/2} D_x$ ، $Y = \left(\frac{1}{2\epsilon_0 U} \right)^{1/2} D_y$ و $Z = \left(\frac{1}{2\epsilon_0 U} \right)^{1/2} D_z$ باشد:

$$\frac{X^2}{\epsilon_{xx}} + \frac{Y^2}{\epsilon_{yy}} + \frac{Z^2}{\epsilon_{zz}} = 1$$

بیضی شاخص

اثر الکترواپتیک

35



شکل ۲۸. بیضی شاخص

در غیاب میدان الکتریکی، توصیف بیضی شاخص بر اساس ضریب شکست عبارتست از:

$$\frac{X^2}{n_X^2} + \frac{Y^2}{n_Y^2} + \frac{Z^2}{n_Z^2} = 1$$

با اعمال میدان الکتریکی **E**:

$$\frac{X^2}{n_X^2} + \frac{Y^2}{n_Y^2} + \frac{Z^2}{n_Z^2} + \left(\Delta \frac{1}{n_{XX}^2} \right) X^2 + \left(\Delta \frac{1}{n_{YY}^2} \right) Y^2 + \left(\Delta \frac{1}{n_{ZZ}^2} \right) Z^2$$

$$+ \left(\Delta \frac{1}{n_{YZ}^2} \right) 2YZ + \left(\Delta \frac{1}{n_{XZ}^2} \right) 2XZ + \left(\Delta \frac{1}{n_{XY}^2} \right) 2XY = 1$$

بیانگر کشیدگی بیضی
شاخص را در امتداد
محورهای اصلی

بیانگر چرخش بیضی
شاخص

بیضی شاخص تحت تأثیر میدان E_X

$$\bullet \left(\frac{1}{n_X^2} \right) X^2 + \left(\frac{1}{n_Y^2} \right) Y^2 + \left(\frac{1}{n_Z^2} \right) Z^2 + 2XZr_{42}E_X - 2XYr_{22}E_X = 1$$

بیضی شاخص تحت تأثیر میدان E_Y

$$\bullet \left(\frac{1}{n_X^2} - r_{22}E_Y \right) X^2 + \left(\frac{1}{n_Y^2} + r_{22}E_Y \right) Y^2 + \left(\frac{1}{n_Z^2} \right) Z^2 + 2YZr_{42}E_Y = 1$$

بیضی شاخص تحت تأثیر میدان E_Z

$$\bullet \left(\frac{1}{n_X^2} + r_{13}E_Z \right) X^2 + \left(\frac{1}{n_Y^2} + r_{13}E_Z \right) Y^2 + \left(\frac{1}{n_Z^2} + r_{33}E_Z \right) Z^2 = 1$$

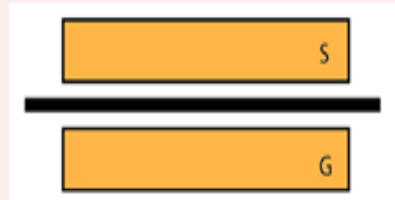
$$\frac{X^2}{N''_X} + \frac{Y^2}{N''_Y} + \frac{Z^2}{N''_Z} = 1, \quad N''_X = n_X - \frac{1}{2}n_X^3r_{13}E_Z \quad N''_Y = n_Y - \frac{1}{2}n_Y^3r_{13}E_Z \quad N''_Z = n_Z - \frac{1}{2}n_Z^3r_{33}E_Z$$

انواع مدوله سازهای الکترواپتیکی

37

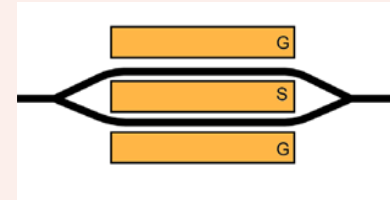
انواع مدوله سازهای الکترواپتیکی

- رزونانسی: تغییر ولتاژ تشدید با اعمال میدان الکتریکی
- غیر رزونانسی: مدوله سازهای موجبر پایه



مدوله ساز فاز

ولتاژ اعمالی باعث تغییر
ضریب شکست شده و
در نتیجه باعث ایجاد تغییر فاز
در نور خروجی می شود



مدوله ساز شدت ماخ زندر

ولتاژ اعمالی باعث تغییر
شدت نور خروجی می شود

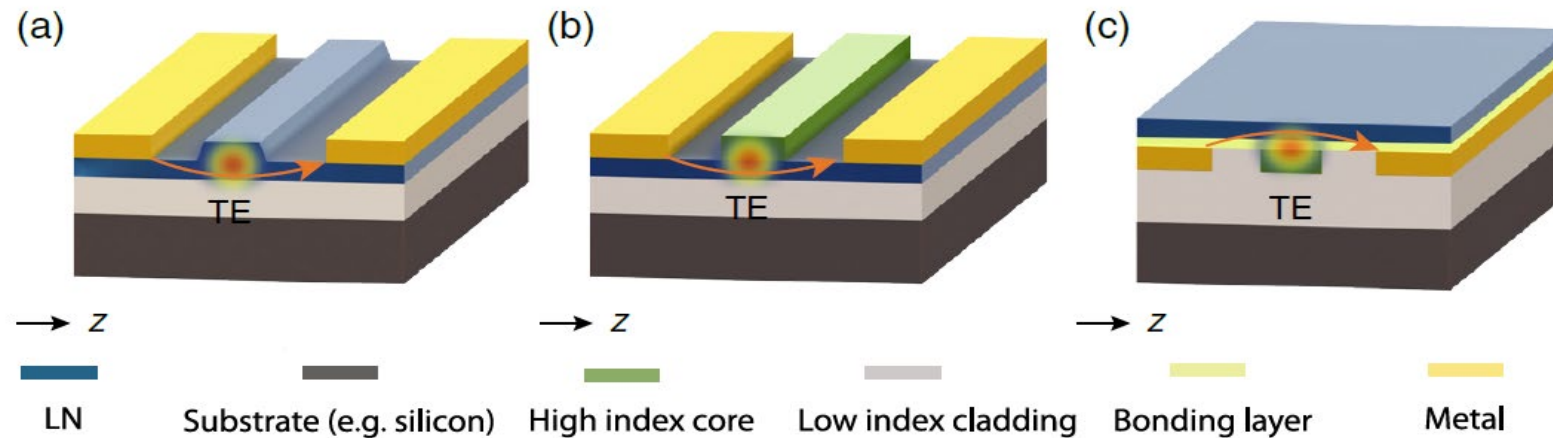
مدوله ساز فاز، برش X

طراحی ترکیبی

- ✓ موجبر از ماده ای با ضریب شکست بالاتر تشکیل می شود
- ✓ از الگوبرداری مستقیم TFLN جلوگیری می شود
- ✓ ضرورت وجود لایه LN برای کاهش تلفات نوری

طراحی یکپارچه

- ✓ ساخت یکپارچه ی لایه LN و موجبر به روش حکاکی و براق کردن
- ✓ ضرورت وجود لایه LN برای کاهش تلفات نوری

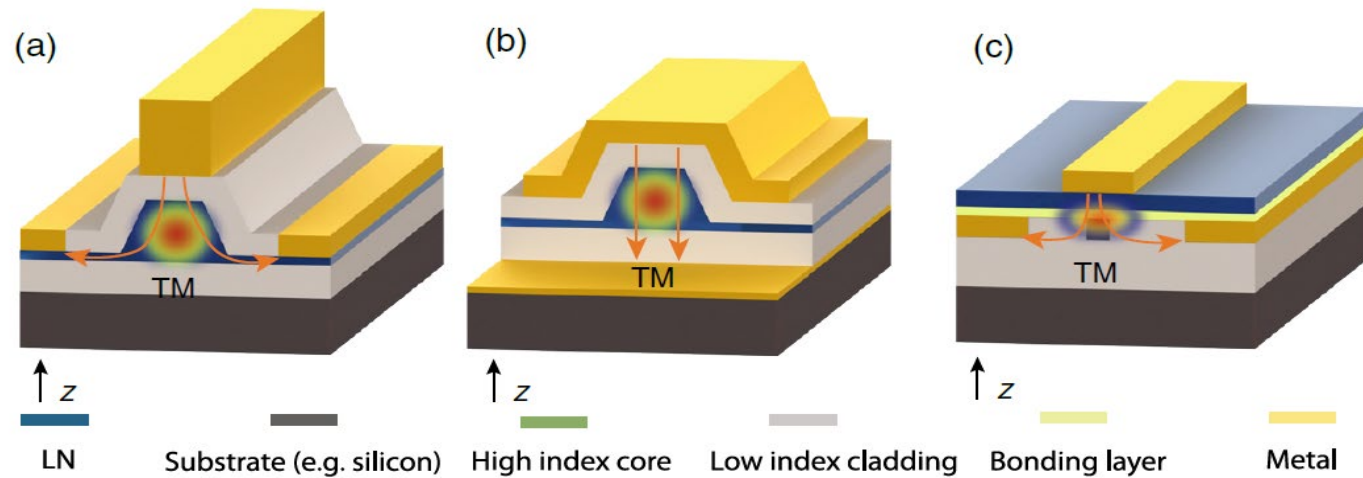


شکل ۲۸. (a) طراحی موجبر یکپارچه، (b) و (c) طراحی موجبر ترکیبی [۷]

انواع مدوله‌سازهای الکترواپتیکی

مدوله‌ساز فاز، برش Z

وجود لایه میان‌گیر با ضریب شکست کم بین الکتروود و موجبر برای کاهش تلفات جذب فلز
ضرورت لایه LN



شکل ۲۹. انواع پیکربندی الکتروود برای طراحی مدوله‌ساز فاز با برش Z: (a) طراحی موجبر یکپارچه با الکتروودهای صفحه‌ای، (b) طراحی موجبر یکپارچه‌ای با صفحه‌ی زمین دفن شده و (c) طراحی موجبر ترکیبی [۷]

معیارهای بررسی عملکرد مدوله ساز الکترواپتیک

40

ولتاژ نیم موج

- ولتاژ مورد نیاز برای دستیابی به جابه جایی فاز برابر با π
- $V_{\pi} \cdot L$: معیار کیفیت در طراحی مدوله سازها و مقایسه ی شدت برهم کنش الکترواپتیکی

نسبت خاموشی

- نسبت حداکثر به حداقل مقدار خروجی گیرنده ی نوری

تلفات

- تلفات جفت شدگی تار نوری به تراشه و تلفات عبوری بر-تراشه

پهنای باند 3 dB

- فرکانسی که در آن پاسخ الکتریکی موج خروجی مدوله شده به نصف مقدار فرکانس مرجع کاهش می یابد

معرفی فرمول بندی تعمیم یافته

41

$$\Delta\beta_v = \kappa_{vv} = \omega \iint_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{E}_v^* \Delta \mathbf{P} dS$$

$$\Delta \mathbf{P} = \Delta \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\Delta\beta_v = \frac{-\pi n_e^3 r_{33}}{\lambda} \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} E_z |\mathbf{E}_{(v)}|^2 dS}{\iint_{-\infty}^{+\infty} |\mathbf{E}_{(v)}|^2 dS}$$

$$\Delta\varphi = \Delta\beta \cdot L$$

$$\Delta \mathbf{P} \equiv P_i(\omega) = 2\varepsilon_0 \sum_{jk} \chi_{ijk}^{(2)} (\omega = \omega + 0) E_j(\omega) E_k(0)$$

آشفته‌گی پلاریزاسیونی به دلیل اثرات برهم کنش‌های نوری غیرخطی بر روی میدان‌های فرکانس ω در موجبر

مؤلفه‌ی میدان نوری با فرکانس ω

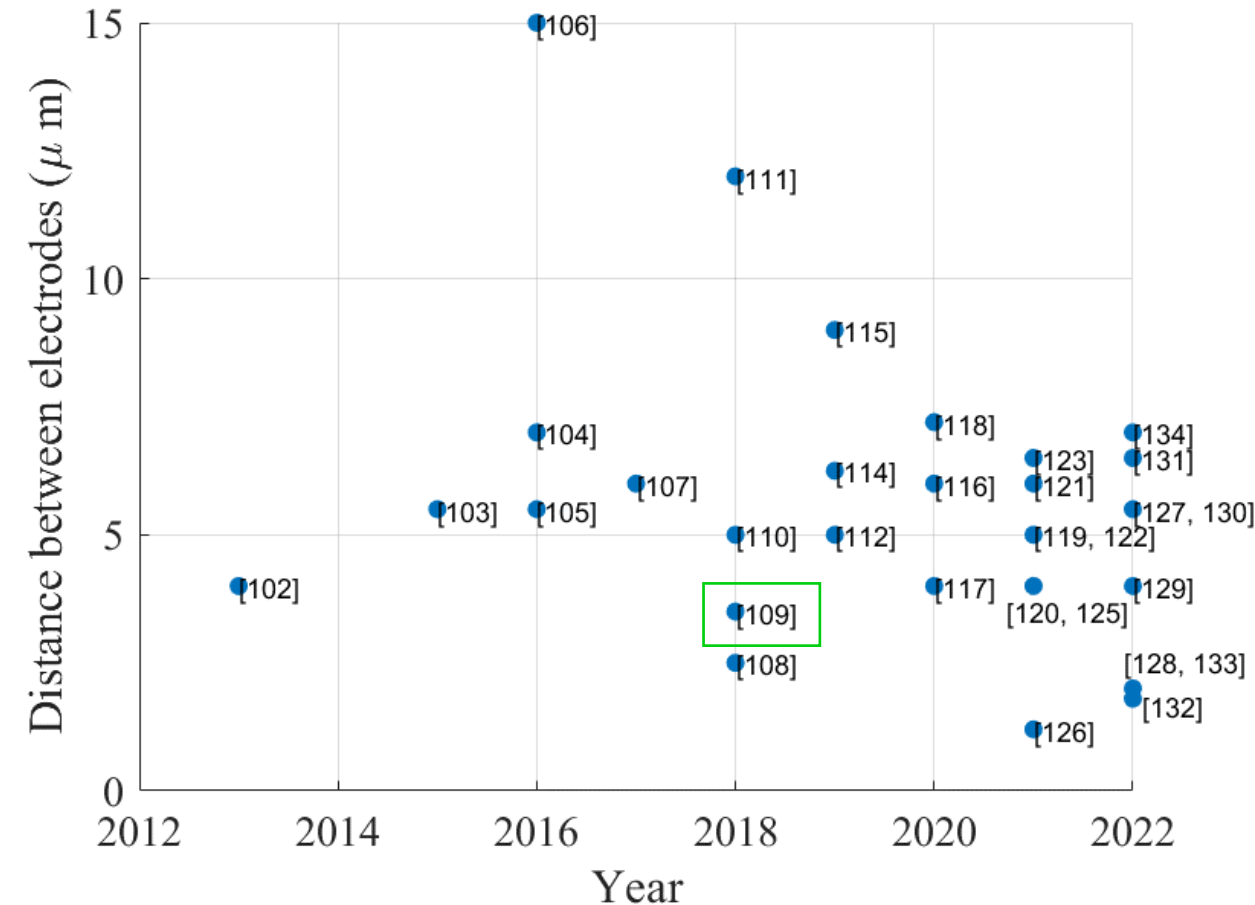
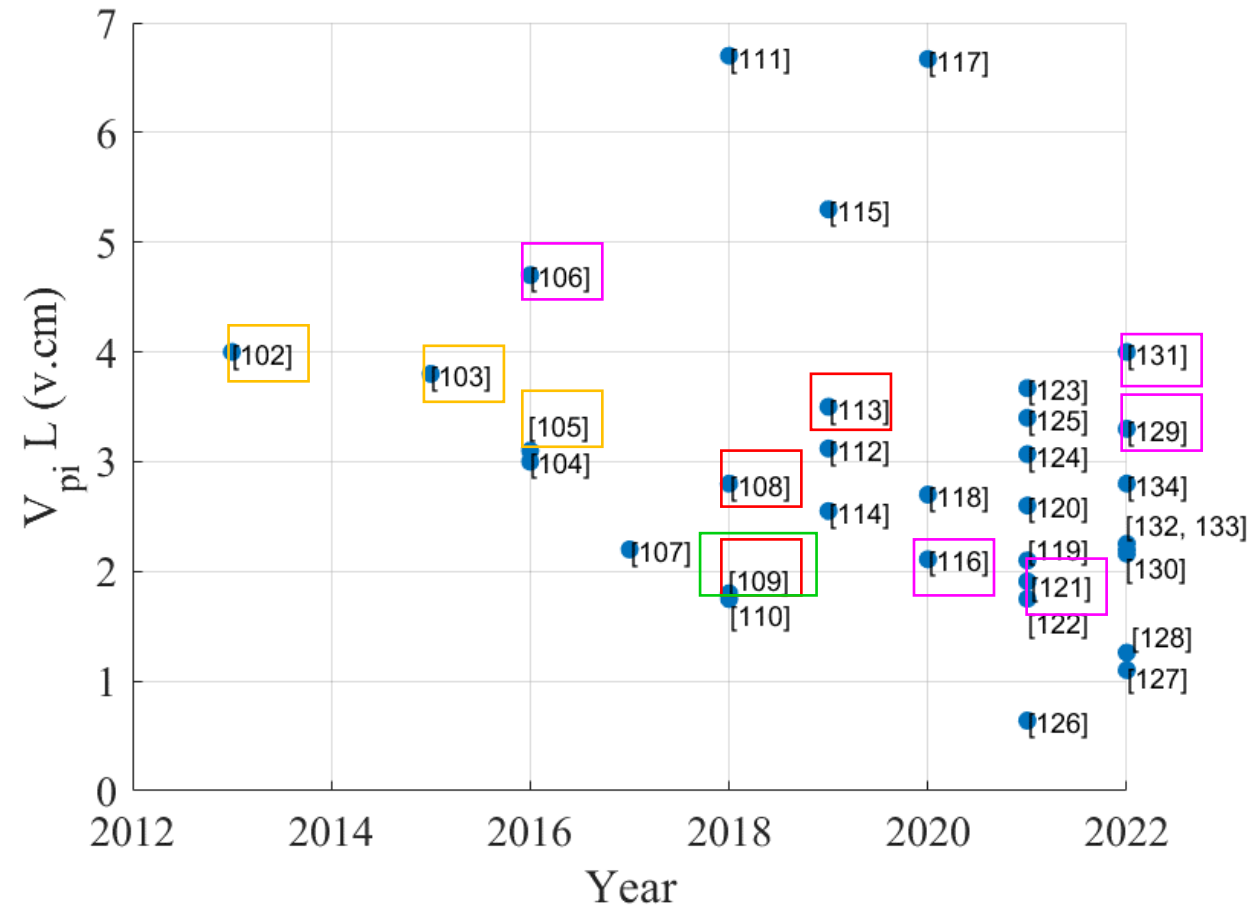
میدان الکترواستاتیک اعمال شده به مدوله‌ساز

$$\Delta\beta_v = \frac{2\pi}{\lambda} n_g \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{n_0^4}{2} r_{13} |E_x(\omega)|^2 + \frac{n_0^4}{2} r_{13} |E_y(\omega)|^2 + \frac{n_e^4}{2} r_{33} |E_z(\omega)|^2 \right) E_k(0) dS}{\iint_{-\infty}^{+\infty} (n_0^2 |E_x(\omega)|^2 + n_0^2 |E_y(\omega)|^2 + n_e^2 |E_z(\omega)|^2) dS}$$

University of Central Florida, The college of Optics & Photonics
Sasan Fathpour

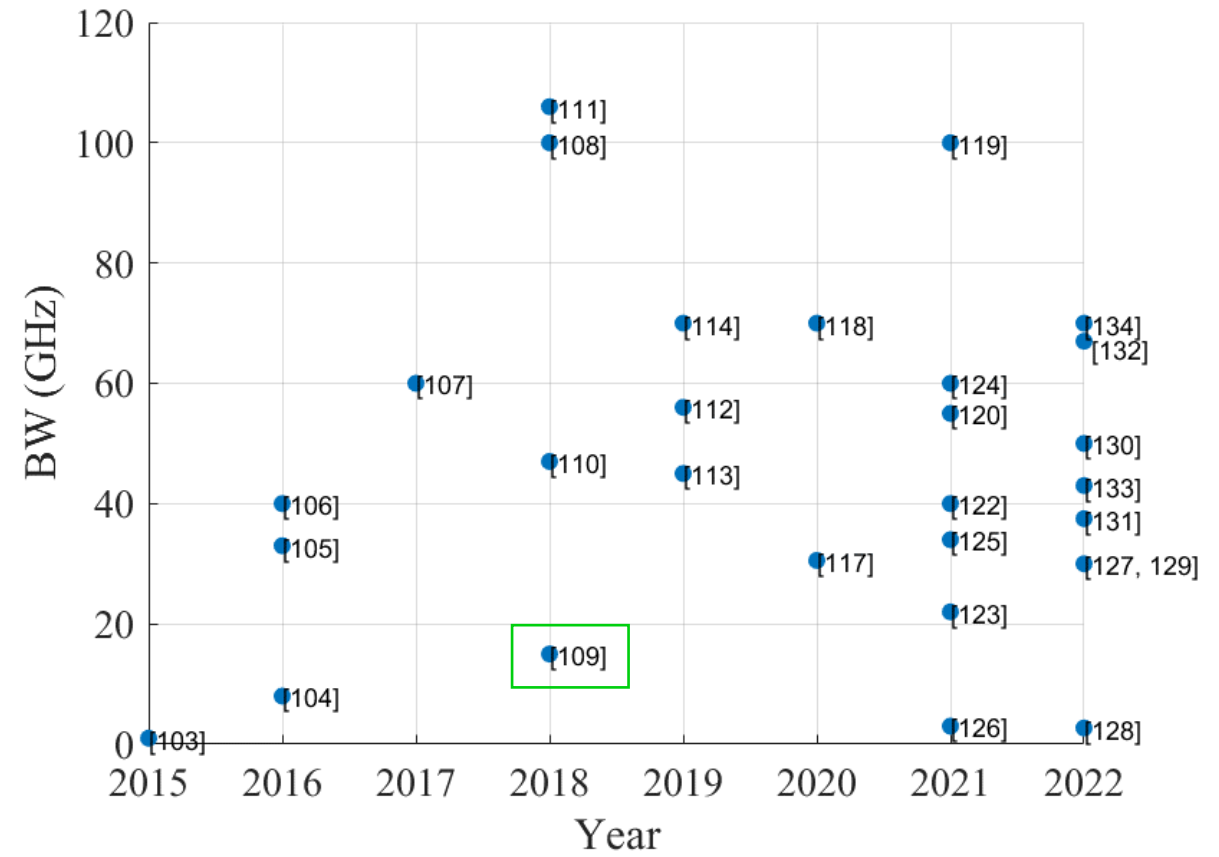
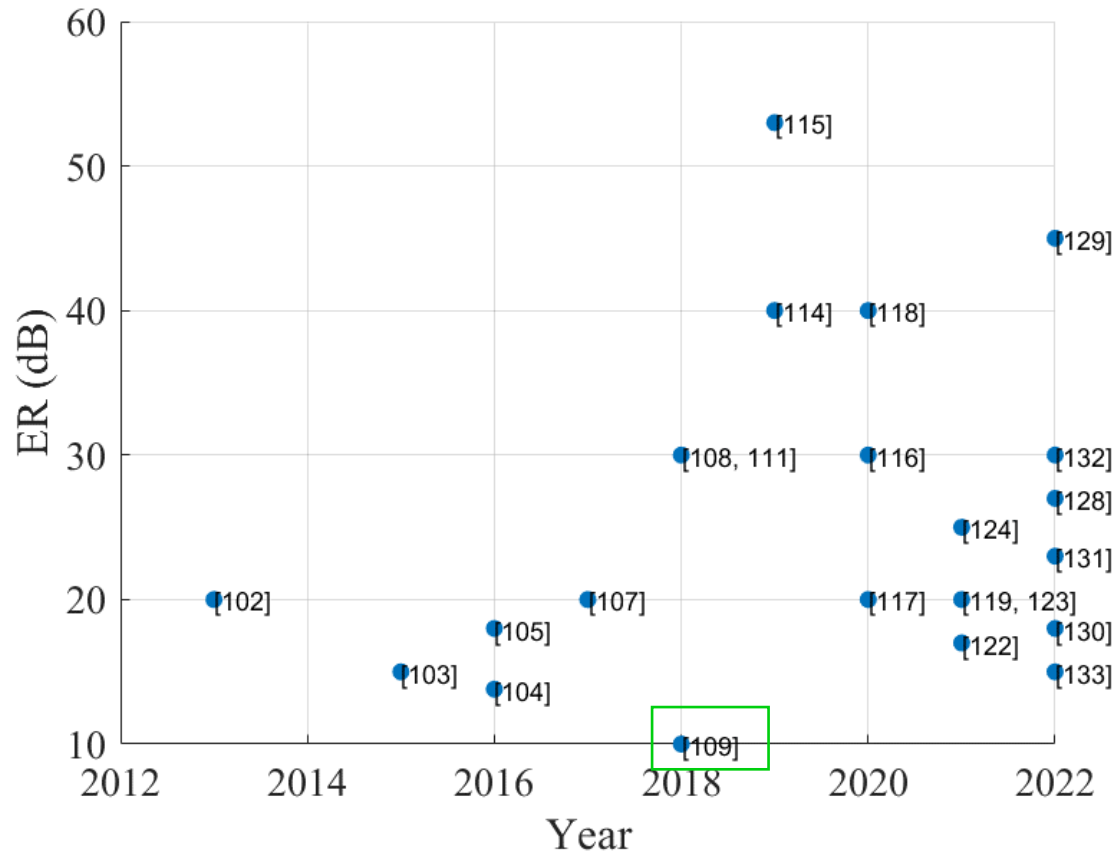
Harvard University, Laboratory for Nanoscale Optics
Marko Loncar

University of Delaware, Department of Electrical and Computer Engineering
Dennis Prather



مرور منابع موجود

43



عوامل مورد توجه در طراحی

طراحی موجبر برای عملکرد تک مد و دارا بودن حداکثر محصورسازی مد

تعیین زاویه‌ی انحنای موجبر که بر اساس تجربیات ساخت انجام می‌گیرد.

تعیین ضخامت لایه TFLN

تعیین محل قرارگیری الکترودها

تعیین فاصله‌ی بین الکترودها

تعیین جنس غلاف

عوامل مؤثر در بهبود عملکرد مدوله‌ساز با در نظر گرفتن معیار $V_{\pi} \cdot L$

- ❑ قرارگیری الکترودها در صفحه‌ی موجبر
- ❑ افزایش ضخامت لایه‌ی TFLN
- ❑ وجود غلاف در اطراف موجبر
- ❑ کم کردن فاصله‌ی بین الکترودها همراه با در نظر گرفتن تلفات

- [1] Mousavi, S.F., Nouroozi, R., Vallone, G. and Villoresi, P. “ Integrated optical modulator manipulating the polarization and rotation handedness of Orbital Angular Momentum states ”, Scientific reports, 7(1), pp.1-8, 2017.
- [2]Zheng, S., and Wang, J., “On-chip orbital angular momentum modes generator and (de) multiplexer based on trench silicon waveguides”, Optics express, Vol. 25, pp. 18492-18501, 2017.
- [3]Lee, I.J., and Kim, S., “On-chip guiding of higher-order orbital angular momentum modes,” *Proceeding of Photonics*, MDPI, pp. 72, 2019.
- [4]Wu, B., Zhang, B., Wang, L., and Chen, F., “3D polarization-dependent waveguide arrays in LiNbO₃ crystal produced by femtosecond laser writing”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 38, pp. 3988-3993, 2020.
- [5]Ajates, J.G., de Aldana, J.R.V., Chen, F., and Ródenas, A., “Three-dimensional beam-splitting transitions and numerical modelling of direct-laser-written near-infrared LiNbO₃ cladding waveguides”, Optical Materials Express, Vol. 8, pp. 1890-1901, 2018.
- [6]Ren, Y., Zhang, L., Xing, H., Romero, C., de Aldana, J.R.V., and Chen, F., “Cladding waveguide splitters fabricated by femtosecond laser inscription in Ti: Sapphire crystal”, Optics & Laser Technology, Vol. 103, pp. 82-88, 2018.
- [7]Zhu, D., Shao, L., Yu, M., Cheng, R., Desiatov, B., Xin, C., Hu, Y., Holzgrafe, J., Ghosh, S., and Shams-Ansari, A., “Integrated photonics on thin-film lithium niobate”, *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 13, pp. 242-352, 2021.

با تشکر از توجه شما

