

Daha detaylı okuma için:

- (1) E. Pelucchi et al. "The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies", Nat. Rev. Phys. **4**, 194 (2022).
- (2) G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)
- (3) Arne Laucht, "Roadmap on quantum nanotechnologies," Nanotechnology **32**, 162003 (2021)

Fotonik Tümlleşik Devreler ile Kuantum Hesaplama Sorunlar, Çözümler ve Ölçeklenebilir Mimariler

Dr. Mehmet Cengiz Onbaşı

Koç Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü Kuantum Metroloji Laboratuvarı

Mehmet Cengiz Onbaşı



Dr. Öğr. Üyesi, Koç Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.
(2016-devam etmekte)

Uzman Araştırmacı, Corning Incorporated (2015-2016)

Ph.D.: MIT Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 2015

B.S.: Bilkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh., 2010

Araştırma alanları:

- Manyetik ve manyetooptik malzemeler ve aygıtlar
- MBE ve PLD epitaksisi ile 2D ve ince film büyütme
- Fotonik ve optoelektronik aygıt tasarımı ve üretimi
- Termodinamik limitlere yakın aygıt uygulamaları

Tümleşik Fotonik Devrelerle Kuantum Hesaplama

- Fotonik tümleşik devre bileşenlerinin avantajları
- Kuantum hesaplama için fotonik tümleşik devre tasarım gereklilikleri ve mimarileri
- Ölçeklenebilir donanım mimarisi ve uygun algoritmalar

Tümleşik Fotonik Devrelerle Kuantum Hesaplama

- Fotonik tümleşik devre bileşenlerinin avantajları
- Kuantum hesaplama için fotonik tümleşik devre tasarım gereklilikleri ve mimarileri
- Ölçeklenebilir donanım mimarisi ve uygun algoritmalar

Fotonik Tümlleşik Devre Bileşenlerinin Avantajları ve Tasarım Gereklilikleri

Neden Fotonik?

Sıcaklık (K)	Frekans (Hz), $h\nu = kT$
4 mK	83.3 MHz
10 mK	208.4 MHz
100 mK	2.084 GHz
900mK	18.75 GHz
3K	62.5 GHz
35K	729 GHz
77K	1.604 THz
300K	6.251 THz

Kuantum eşfazlılık (coherence), superpozisyon, dolanıklık ve kubit durumlarının uzun süre dayanabilmesi için bilgiyi kodladığımız dalganın termal gürültüye göre yeterince yüksek enerjisinin olması gereklidir.

Kuantum Hesaplama için Soğutma Basamakları

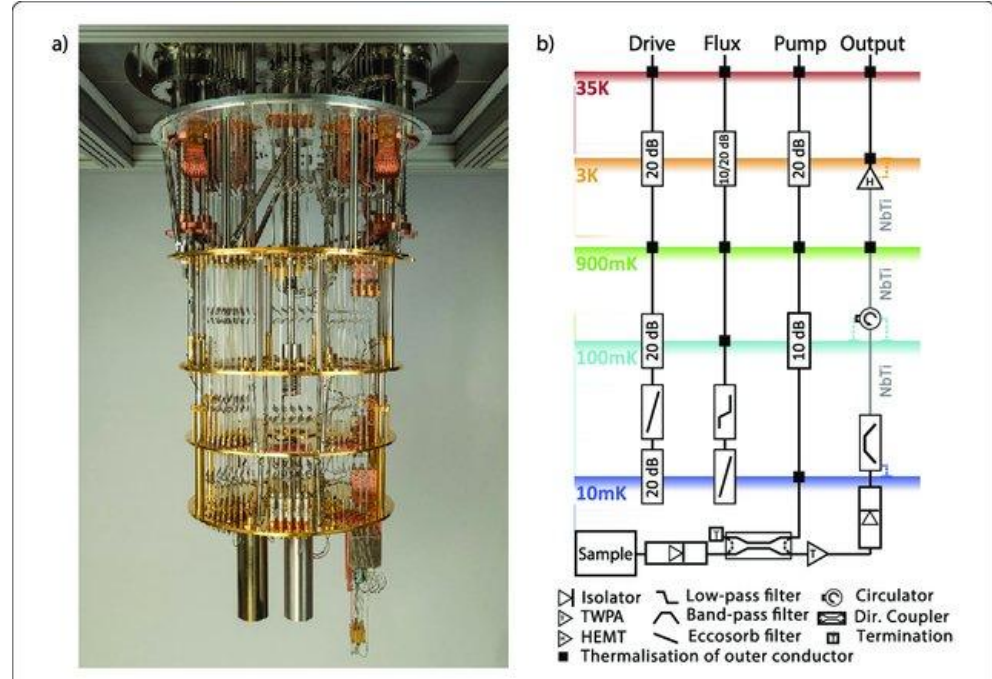


Table 1 Dilution refrigerator specifications. Temperatures and available cooling powers on the indicated stages of a Bluefors XLD400 DR. Coaxial cable lengths towards the respective stages are listed as well

Stage name	Temperature (K)	Cooling power (W)	Cable length (mm)
50 K	35	30 (at 45 K)	200
4 K	2.85	1.5 (at 4.2 K)	290
Still	882×10^{-3}	40×10^{-3} (at 1.2 K)	250
CP	82×10^{-3}	200×10^{-6} (at 140 mK)	170
MXC	6×10^{-3}	19×10^{-6} (at 20 mK)	140

S. Kinner et al., "Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems," EPJ Quantum Technology 6(1) (2019). 10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0

Fotonik Tümlleşik Devre Bileşenlerinin Avantajları ve Tasarım Gereklilikleri

Kubitlerin oda sıcaklığında kararlı kalabilmeleri için RF mikrodalga yerine optik/NIR bantlara geçmek gereklidir.

RF-SQUID süperiletken kübit/fiber optik sinyal arayüzleri için kuantum frekans dönüştürücülerin kullanılması gerekir.

Ancak bu dönüştürücülerin düşük verimi soğutucuların kapasitesini aşabilen termal yük getirmektedir.

Tümlleşik fotonik sayesinde kubitler ışığın polarizasyonuna kodlanır. Si CMOS temelli üretim proseslerinin

- ✓ düşük güç tüketimi,
 - ✓ dış sinyallerden korunma,
 - ✓ RF/analog elektronik arayüzü
 - ✓ MPW ve tekrarlanabilirlik,
 - ✓ düşük/düşürülebilir maliyet,
 - ✓ ve ölçeklenebilirlik
- avantajları kullanılabilir.

Neden Fotonik?

Sıcaklık (K)	Frekans (Hz), $h\nu = kT$
4 mK	83.3 MHz
10 mK	208.4 MHz
100 mK	2.084 GHz
900mK	18.75 GHz
3K	62.5 GHz
35K	729 GHz
77K	1.604 THz
300K	6.251 THz
9282K	193.414 THz (1550 nm)

Kuantum Hesaplama için Soğutma Basamakları

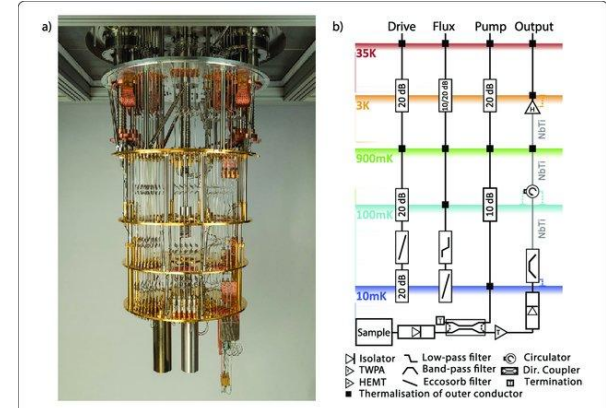


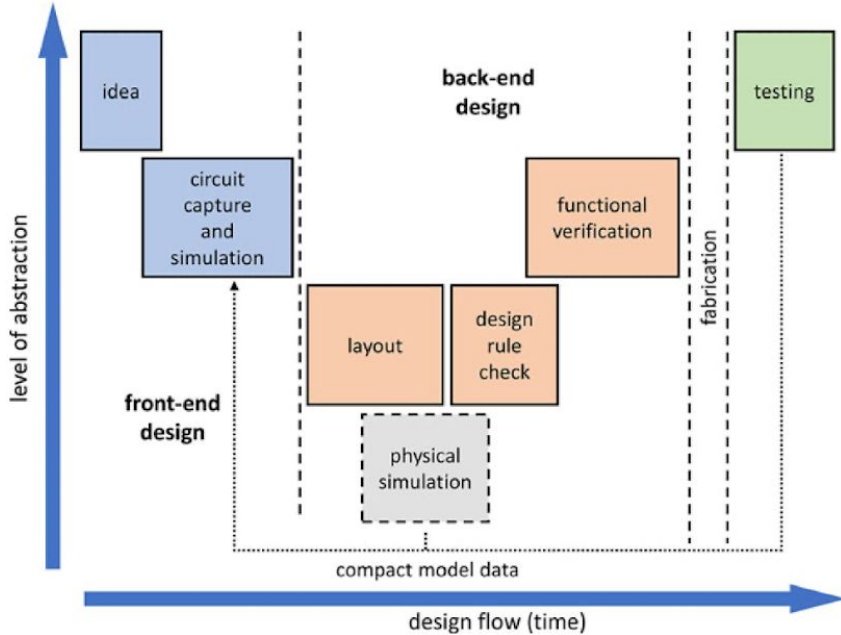
Table 1 Dilution refrigerator specifications. Temperatures and available cooling powers on the indicated stages of a Bluefors XLD400 DR. Coaxial cable lengths towards the respective stages are listed as well

Stage name	Temperature (K)	Cooling power (W)	Cable length (mm)
50 K	35	30 (at 45 K)	200
4 K	2.85	1.5 (at 4.2 K)	290
Still	882×10^{-3}	40×10^{-3} (at 1.2 K)	250
CP	82×10^{-3}	200×10^{-6} (at 140 mK)	170
MXC	6×10^{-3}	19×10^{-6} (at 20 mK)	140

S. Krinner et al., "Engineering cryogenic setups for 100-qubit scale superconducting circuit systems," EPJ Quantum Technology 6(1) (2019). 10.1140/epjqt/s40507-019-0072-0

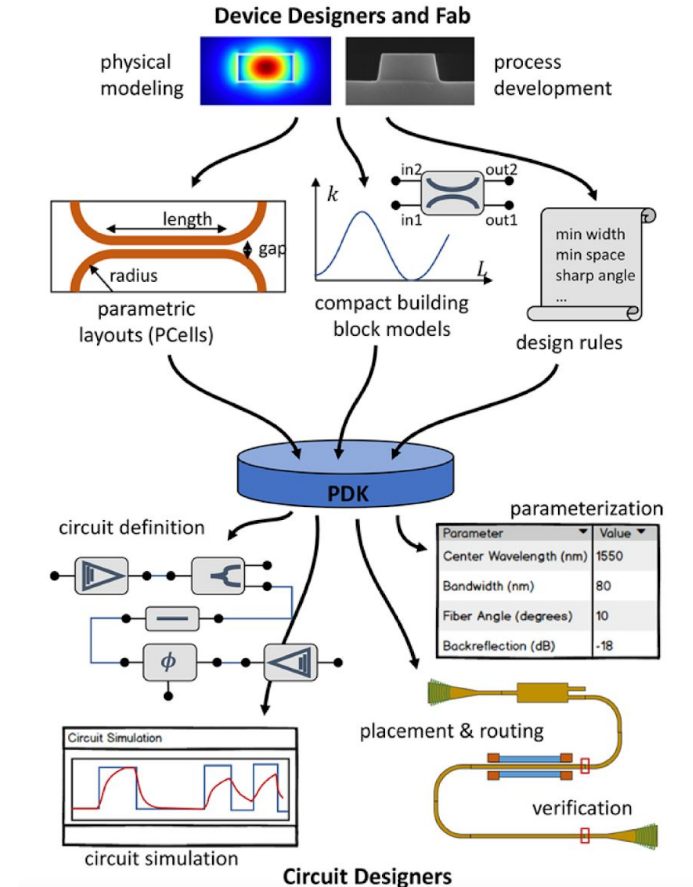
Fotonik Tümüleşik Devre Bileşenlerinin Avantajları

Fotonik Tümüleşik Devre Tasarım Süreci



W. Bogaerts, L. Chrostowski, "Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges," Laser Photonics Rev. **12**, 1700237 (2018).

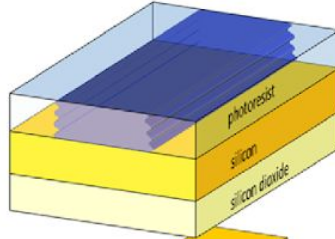
Fotonik Tümüleşik Devre ve PDK'ler



Fotonik Tümlleşik Devre Bileşenlerinin Avantajları

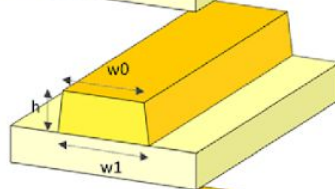
process conditions

exposure dose
resist age
plasma density
slurry composition
...



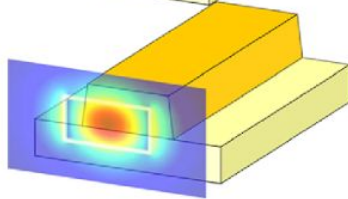
device geometry

line width
layer thickness
sidewall angle
doping profile
...



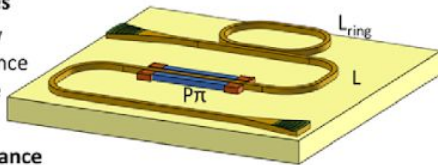
optical device properties

effective index
group index
coupling coefficients
center wavelength
...



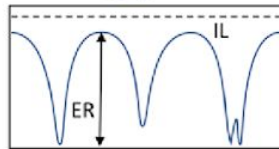
circuit properties

optical delay
path imbalance
tuning curve
...



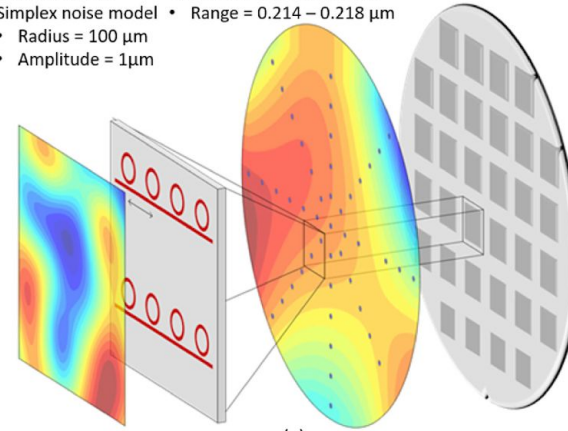
system performance

insertion loss
crosstalk
noise figures
power consumption
...

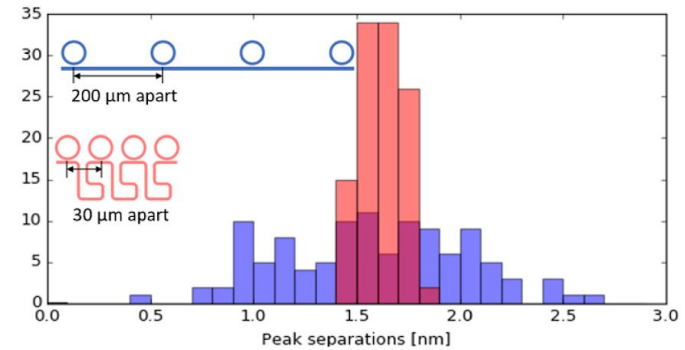


Multiproject wafer uygulamaları ve tekrarlanabilirlik

Linewidth map
Simplex noise model
• Radius = 100 μm
• Amplitude = 1 μm



(a)



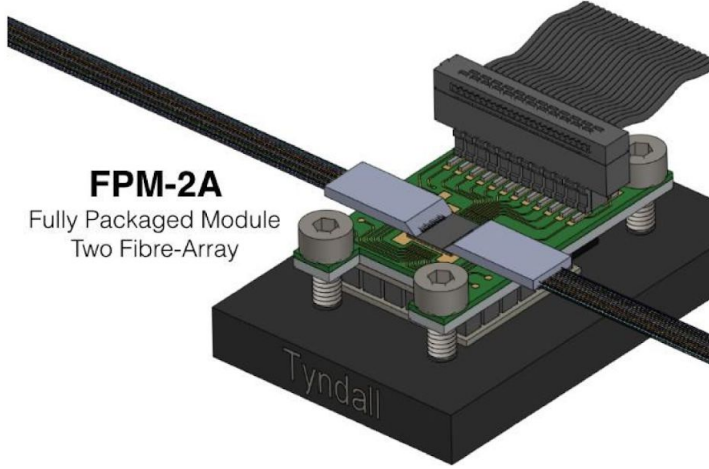
(b)

W. Bogaerts, L. Chrostowski, "Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges," Laser Photonics Rev. 12, 1700237 (2018).

M. U. Khan et al., "Photonic Integrated Circuit Design in a Foundry+Fabless Ecosystem," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 25 (5), 8201014 (2019).

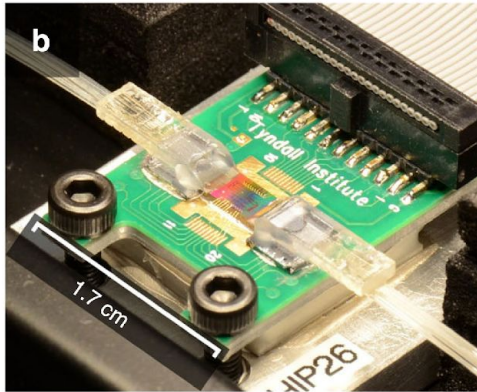
Fotonik Tümüleşik Devre Bileşenlerinin Avantajları

Fotonik Devre Kılıflama

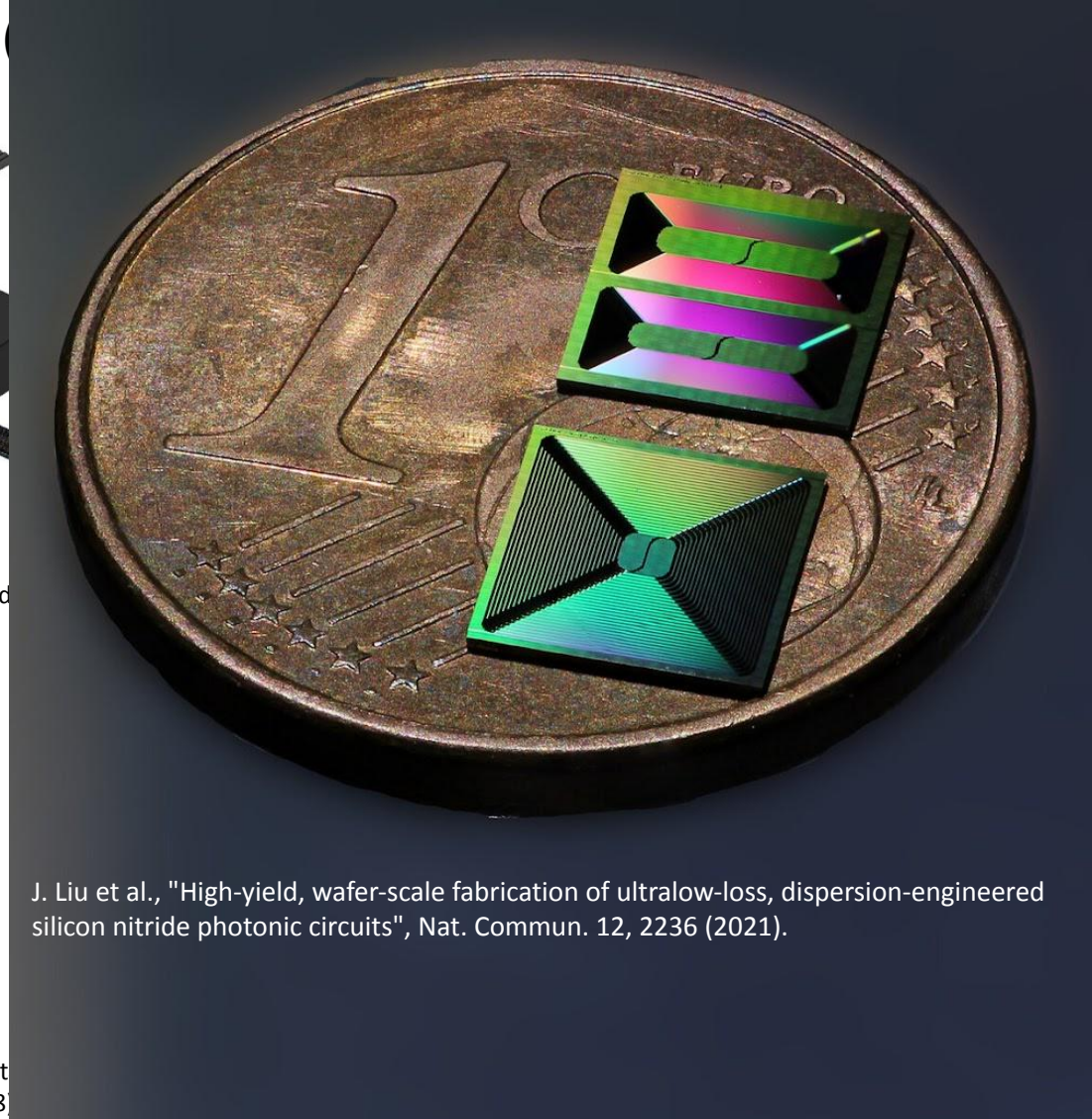


FPM-2A
Fully Packaged Module
Two Fibre-Array

Tyndall National Institute, Advanced Photonics Packaging and System Integration Services within EURORACTICE ([link](#))



D. M. Kita et al., "High-performance and scalable on-chip digital Fourier transform spectroscopy," Nat. Commun. 9:4405 (2018)



J. Liu et al., "High-yield, wafer-scale fabrication of ultralow-loss, dispersion-engineered silicon nitride photonic circuits", Nat. Commun. 12, 2236 (2021).

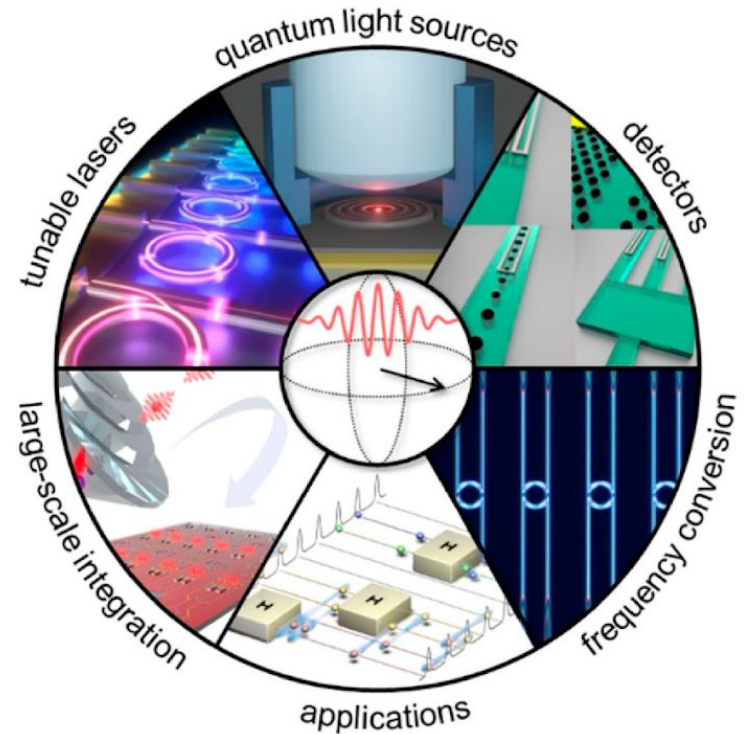
Tümleşik Fotonik Devrelerle Kuantum Hesaplama

- Fotonik tümleşik devre bileşenlerinin avantajları
- Kuantum hesaplama için fotonik tümleşik devre tasarım gereklilikleri ve mimarileri
- Ölçeklenebilir donanım mimarisi ve uygun algoritmalar

Kuantum Fotonik Tümüleşik Devre Bileşenlerinin Tasarım Gereklilikleri

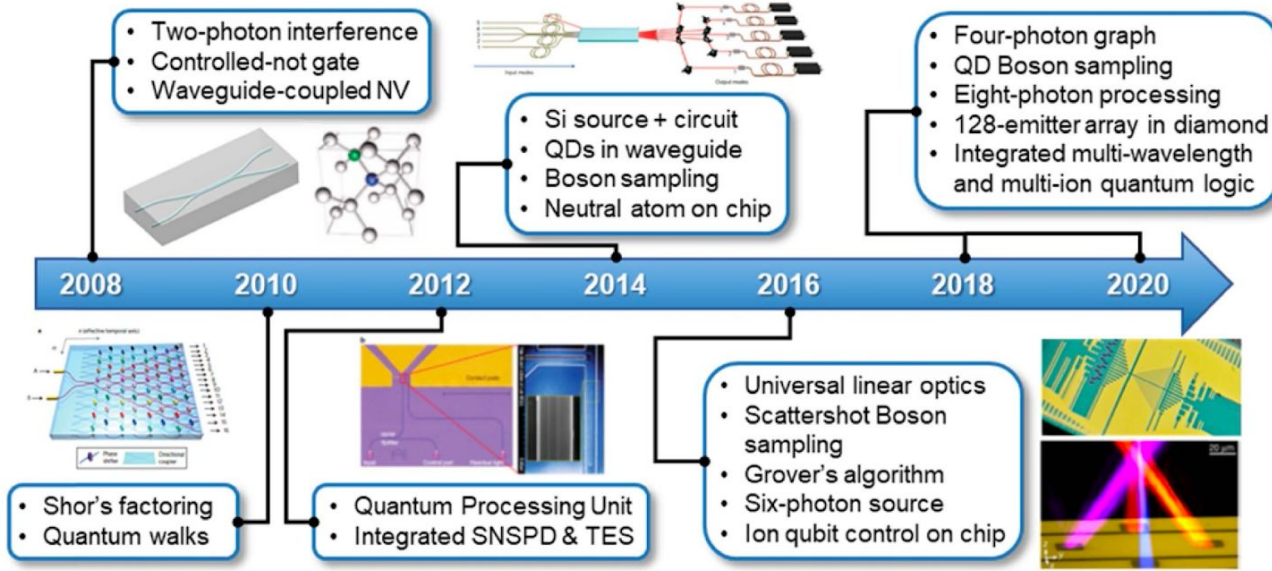
- Farklı malzemelere dayalı teknolojilerin tek platformda birleştirilmesi (heterogeneous integration)

lazerler
pasif devre elemanları (dalgakılavuzları, sinyal bölücüler veya birleştiriciler, multi-mode interferometreler, yönlü eşleyiciler)
modülatörler
kuantum frekans dönüştürücüler
yüksek verimli fotodedektörler
fiber/çip arayüzleri
kontrol elektroniği



G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)

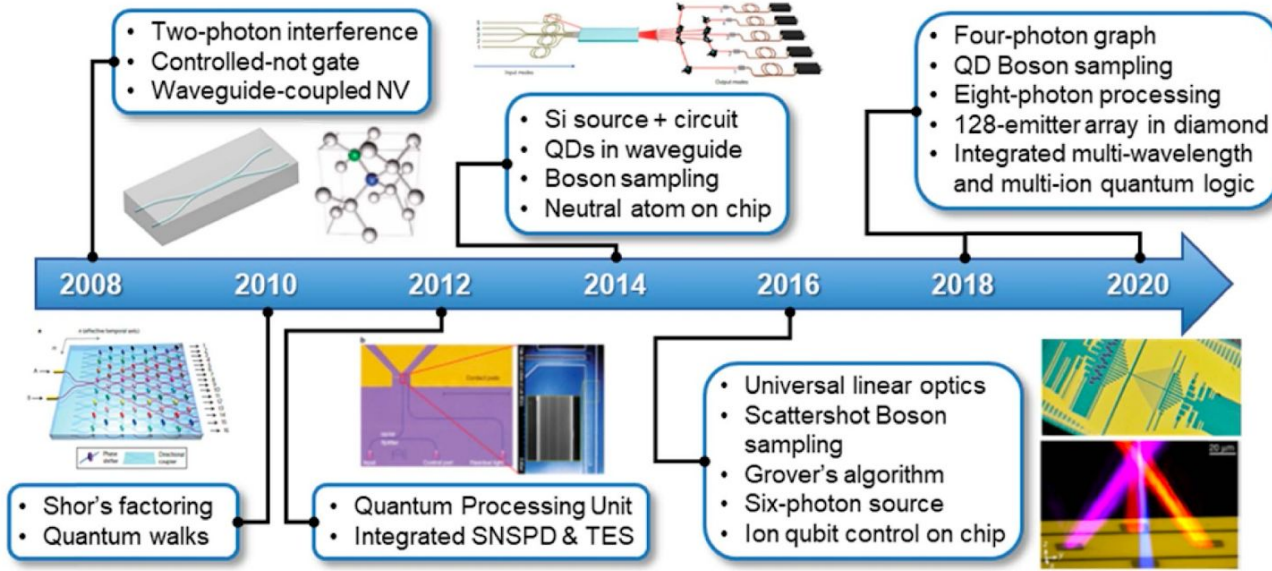
Kuantum Işık Kaynakları



G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)

- Kuantum ışık kaynakları istenen faz, genlik ve kuantum özelliklerde tek, dolanık, sıkıştırılmış (squeezed) foton kaynakları üretir. İki kategoridedir:
 - (1) İstenece anda (on-demand) ışık üretebilen kaynaklar
 - (2) Doğrusal olmayan $\chi^{(2)}$ ve $\chi^{(3)}$ parametreleri ile olasılıksal foton üretimi
- InAs kuantum noktacıklar, elmas-NV veya SiC içindeki kusurlara dayalı ışık kaynakları, SiV kaynakları, çip dışı pompalama teknikleri vb. örnekler öne çıkmaktadır.
- Başarı kriterleri: foton üretim kalitesi, verimi, miktarı (rate)

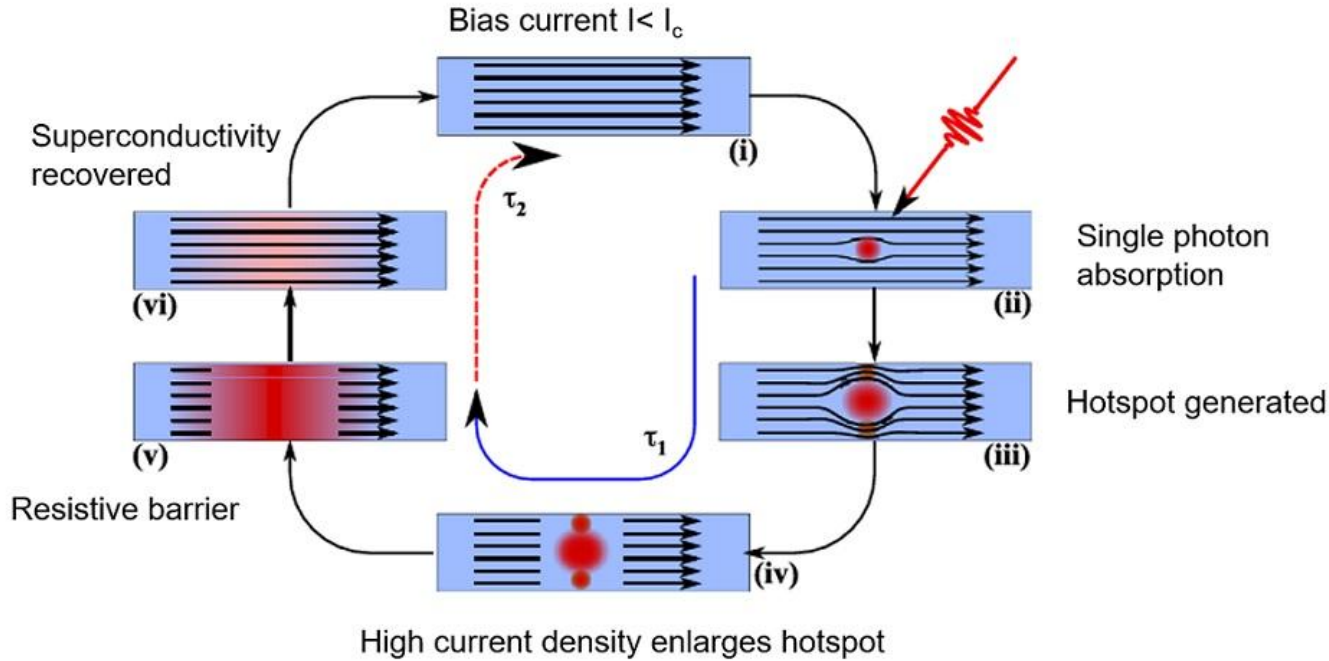
Kuantum Frekans Dönüşümü



G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)

- Mikrodalga veya farklı kızılötesi dalgaboylarındaki ışık kaynaklarının dönüştürülmesi kuantum internet ve farklı kuantum teknolojilerin birbirleriyle veri alışverişi için gerekmektedir.
- Hibrit teknikler (optomekanik, doğrusal olmayan fotonik, manyetoelektrik vb.) ile dönüşüm (quantum transduction) sağlanmaktadır.
- Başarı kriterleri: yüksek güç verimi, istenen bantlarda ve frekans genişliğinde sinyal üretilebilmesi, düşük gürültü ve UV-NIR arasında çalışması

Tümleşik Dedektörler



- Tümleşik totonik düşük sinyal kaybı ve yüksek bant genişliği sunmaktadır.
- Ancak fotodedektörler tek foton hassasiyetinde, çok düşük gürültüde ve ps yanıt süresinde çipe entegre şekilde çalışabilmelidir. Düşük sıcaklıkta çalışan süperiletken tek foton sayacılar günümüzde en başarılı dedektörlerdir.
- %100'e yakın kuantum verimi, düşük kayma (jitter), düşük karanlık sinyal akımı (dark count rate) sayesinde başarılı olmaktadır.
- Tek foton APD'ler oda sıcaklığında çalışma imkanı sağlayabildikleri için avantajlıdır, ancak performansları süperiletken nanotel dedektörler kadar iyi değildir.

Tümleşik Fotonikteki Aygıtlar ve Mekanizmalar

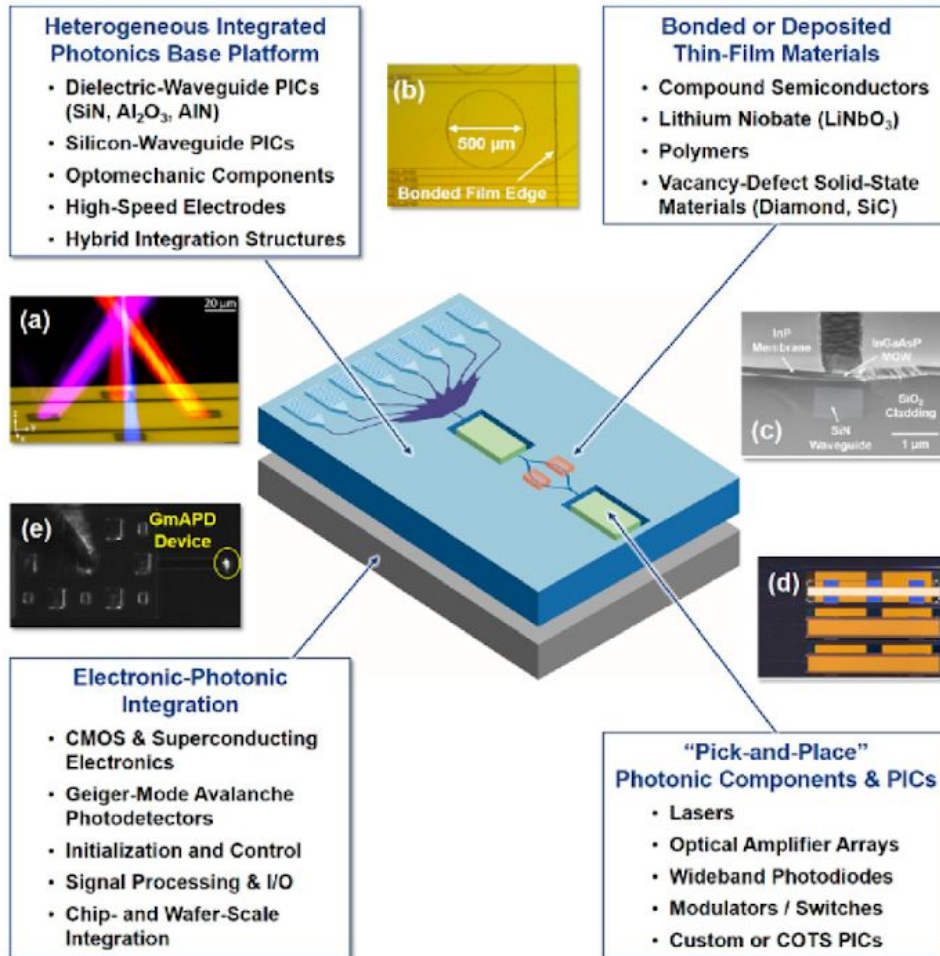
Table 1 | Non-exhaustive list of devices as building blocks to realize integrated photonics for quantum technologies, their different types and platforms used to realize these building blocks

Building blocks	Quantum emitter	Nonlinear processes	Circuit elements	Quantum memory	Single-photon detector	Classical controls
Types	Quantum dots Atomic-like defects Trapped ions Nanotubes	Frequency converters Parametric downconversion Four-wave mixing Squeezing	Mach-Zehnder Beam splitters MEMS Microcavities Circulators Phase shifters	EIT (Off-)Raman ORCA/FLAME AFC Spin (gradient) echo (Optical) phonons Delay lines	SPAD APD SNSPD TES	Laser light sources Electronic components Modulators Quantum cascade lasers
Platforms	III-V semiconductors Diamonds 2D materials SiC Rare-earth ions Radiation-induced defects (Si, etc.) Single molecules	Lithium niobate GaAs Si Silicon nitride Aluminium nitride Silica SOI	Polymer Lithium niobate III-V semiconductors Silicon, SOI, SiN Aluminium nitride Silica (laser written) Tantalum pentoxide Barium titanate	Atomic vapour Rare-earth ions Diamond SiC III-V semiconductors Silica Silicon	Si InGaAs NbN TiNbN WSi ₂ MoSi ₂ NbSi ₂	Si III-V semiconductors Silicon nitride Transparent conducting oxides

AFC, atomic frequency comb; APD, avalanche photodiode; EIT, electromagnetically induced transparency; FLAME, fast ladder memory; MEMS, microelectro-mechanical system; ORCA, off-resonant cascaded absorption; SNSPD, superconducting nanowire single-photon detector; SPAD, single-photon avalanche diode; TES, transition-edge sensor.

E. Pelucchi et al. "The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies", Nat. Rev. Phys. **4**, 194 (2022).

Elektronik-Fotonik Entegrasyon



G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)

- Doğrudan kristal büyütmek genellikle kolay değil.
 - Termal genişleme ve
 - Örgü sabitlerinin farkı
- Faz kontrolü için RF kontrol elektroniği
- Dalgaboyu hizalama ve kalibrasyon için termooptik faz kaydırıcılar
- Dedektörler için arayüz ve ADC okuyucu devreleri («transimpedance amplifier»)
- Foton kavite optiklerinin elektronik ile de birlikte entegrasyonu ve lazer/elektronik yazma/okuma senkronizasyonu

Diğer Aygıt Gereksinimleri ve Çözümler

Integrated photonic functions/devices	Challenges	Required scientific and technological advances
Low-loss waveguides in UV/visible/near-IR	<ul style="list-style-type: none">• Loss limits transmission and resonator Q• Rayleigh scattering significant at visible/UV λ's	<ul style="list-style-type: none">• Develop low-loss materials and fabrication techniques• Use low-confinement (Γ) for reducing scattering loss
High-Q resonators	<ul style="list-style-type: none">• Material loss limits achievable Q• Low-Γ resonators consume large area	<ul style="list-style-type: none">• Develop high-Γ ultralow-loss platform• Mature couplers to transition between low-Γ and high-Γ
Gain media covering UV/visible/near-IR	<ul style="list-style-type: none">• Multiple compound-semiconductor (III-V) material systems needed to cover UV to near-IR λ range	<ul style="list-style-type: none">• Develop broadband III-V and solid-state gain media• Use nonlinear frequency conversion to cover λ gaps
Compact lasers with ultra-narrow linewidth	<ul style="list-style-type: none">• Achieving required stability with compact cavity• Low power conversion efficiency limits scaling	<ul style="list-style-type: none">• Mature on-chip SBS lasers at visible and near-IR λ's• Improve power conversion efficiency of III-V gain media
Quantum sources	<ul style="list-style-type: none">• Entangled-photon generation rate too low• Precise location of single-photon sources in PICs	<ul style="list-style-type: none">• Mature on-chip SPDC sources having high efficiency• Develop and mature new materials (SiC, AlN, diamond)
High-efficiency frequency conversion	<ul style="list-style-type: none">• Acousto-optic frequency shifters are too large• Low conversion efficiency between microwave and optical photons	<ul style="list-style-type: none">• Develop improved electro-optic materials and devices• Develop optomechanic quantum transducers

G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)

Diğer Aygıt Gereksinimleri ve Çözümler

Integrated photonic functions/devices	Challenges	Required scientific and technological advances
Compact high-extinction optical switches	<ul style="list-style-type: none">• Required extinction (e.g. >70 dB for most optically active qubits) difficult to achieve via interferometric switches	<ul style="list-style-type: none">• Develop materials and devices for non-interferometric switches (e.g. acousto-optic, electroabsorption)
Low-static-power, low-loss optical switches	<ul style="list-style-type: none">• Power of thermo-optic switches limits scaling• Loss of non-thermal switches limits scaling	<ul style="list-style-type: none">• Develop improved materials and devices (e.g. polymers, strain-induced $\chi^{(2)}$, chalcogenides)
Single-photon detectors	<ul style="list-style-type: none">• Geiger-mode APDs generate large EMI• Superconducting detectors require low-K temps	<ul style="list-style-type: none">• Develop EMI shielding techniques• Optimize heterogeneous PIC platform for low temps
Very-large scale integration (VLSI) PICs	<ul style="list-style-type: none">• Required number ($>10^6$) of current photonic devices will require area \gg stepper reticle area	<ul style="list-style-type: none">• Develop sub-wavelength photonic materials & devices• Develop wafer-scale lithography and fab processes
Electronic–photonic integration	<ul style="list-style-type: none">• Difference in photonic and electronic device sizes• Proximity of photonics and electronics induces EMI	<ul style="list-style-type: none">• Mature wafer-bonded 3D integration incorporating metallic-electrode EMI shielding layers

G. Moody et al. "Roadmap on Integrated Quantum Photonics," J. Phys. Photonics **4**, 012501 (2022) (arxiv: 2102.03323)

Tümleşik Fotonik Devrelerle Kuantum Hesaplama

- Fotonik tümleşik devre bileşenlerinin avantajları
- Kuantum hesaplama için fotonik tümleşik devre tasarım gereklilikleri ve mimarileri
- Ölçeklenebilir donanım mimarisi ve uygun algoritmalar

Ölçeklenebilir donanım mimarisi – QuiX örneği

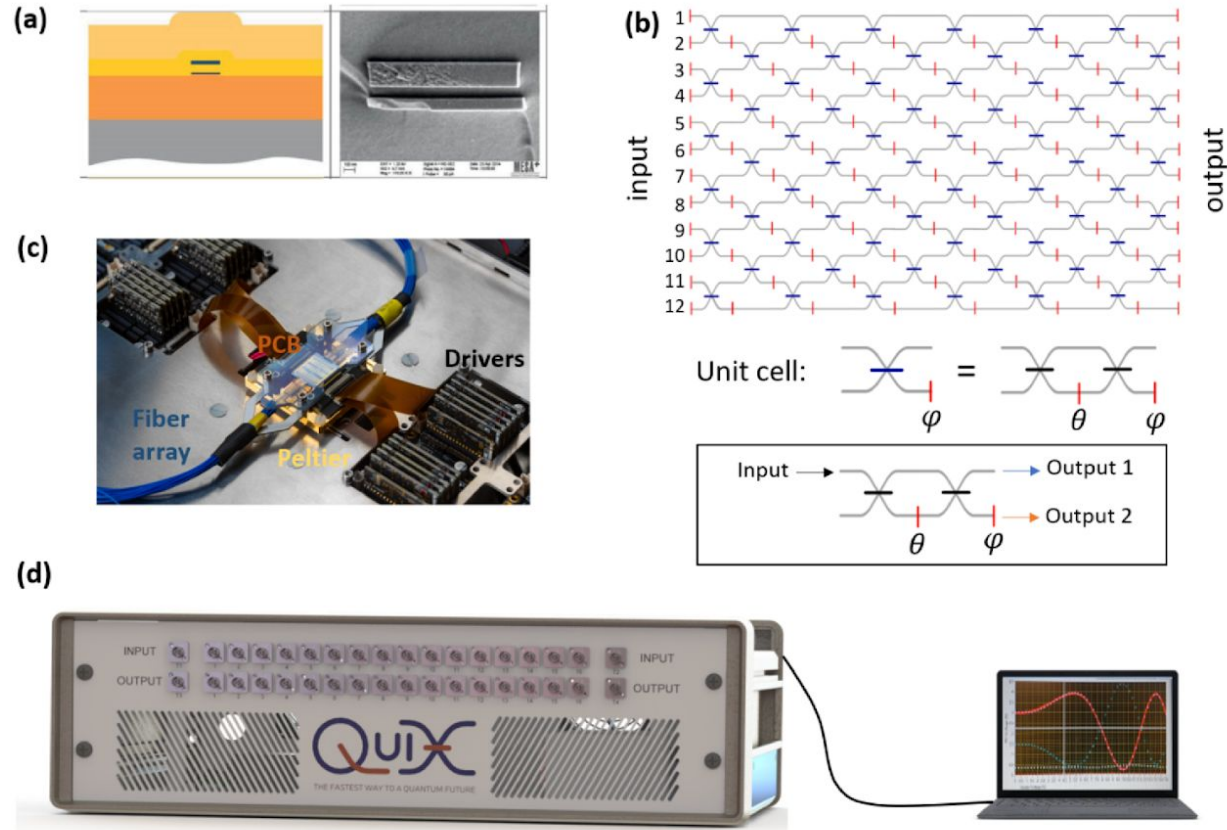


Figure 1 Overview of the QuiX photonic processor. (a) Schematic and SEM picture of the asymmetric double-stripe cross-section used for the waveguides in this paper. (b) Functional design of the 12-modes photonic processor. The blue line represents a TBS that is implemented as a MZI with two 50:50 directional couplers (black lines) and a thermo-optic phase shifter in red. When calibrating the unit cell, light is injected, for example, in the top input while both outputs are monitored. (c) Picture of the photonic assembly of the 12-modes processor as mounted inside the control box. (d) Schematic for the QuiX control system, i.e., the control box is remotely controlled via a software interface in Python.

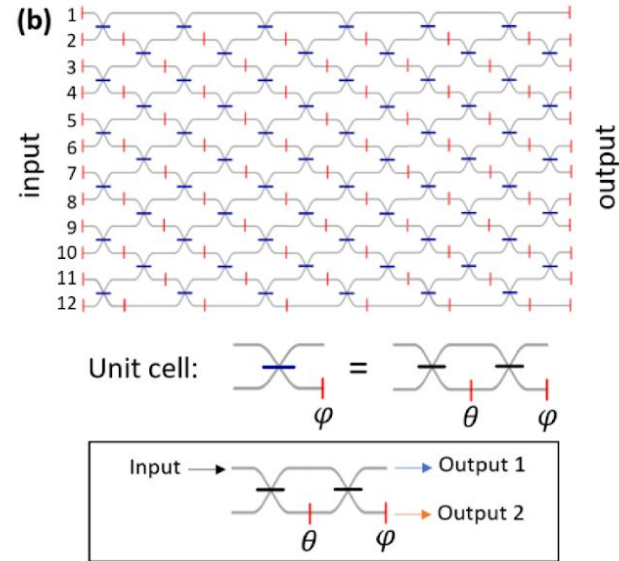
QuiX kuantum fotonik tümleşik hesaplama devresi, arxiv: 2012.05673

Ölçeklenebilir donanım mimarisi – Unitary Transformation ve Diğer Kuantum Mantık Devreleri

$$S_{unit_cell}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 - e^{-i\theta} & -i(e^{-i\theta} + 1) \\ -i(e^{-i\theta} + 1) \cdot e^{-i\phi} & -(1 - e^{-i\theta}) \cdot e^{-i\phi} \end{pmatrix}$$

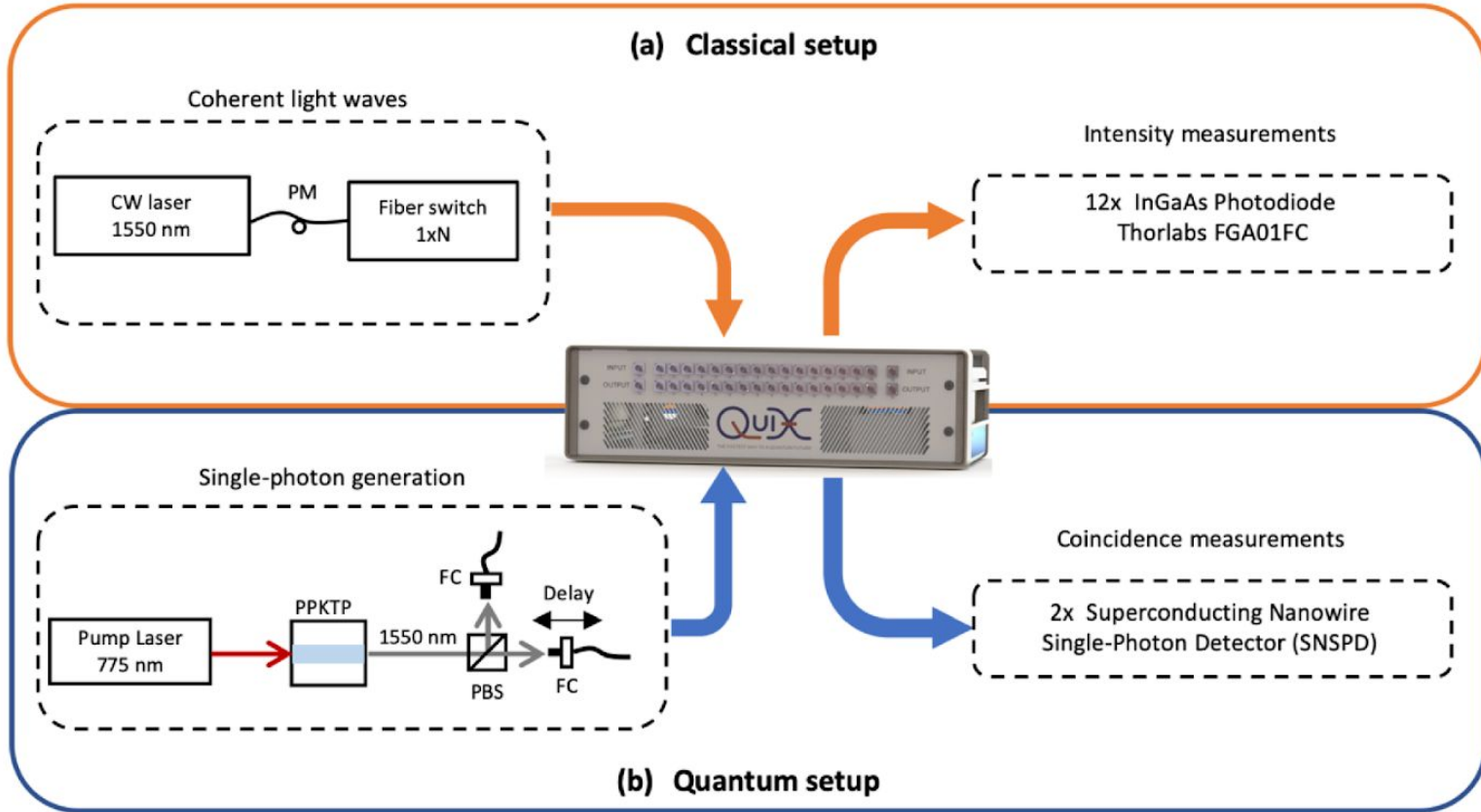
$$S_{m,n}(\theta, \phi) = e^{-i(\theta-\pi)/2} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & & & \vdots \\ \vdots & & \sin \frac{\theta}{2} & -\cos \frac{\theta}{2} & & \vdots \\ \vdots & & -\cos \frac{\theta}{2} \cdot e^{-i\phi} & -\sin \frac{\theta}{2} \cdot e^{-i\phi} & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

where θ is the internal phase of the MZI and ϕ is the external phase. By varying θ and ϕ over 2π it is possible to perform any transformation in the special unitary group, $SU(2)$. It is important to note that the action of the



QuiX kuantum fotonik tümleşik hesaplama devresi, arxiv: 2012.05673

Klasik-Kuantum Hibrit Yazma/Sürme/Okuma Düzenekleri



QuiX kuantum fotonik tümleşik hesaplama devresi, arxiv: 2012.05673

Klasik Fotonik Karakterizasyon

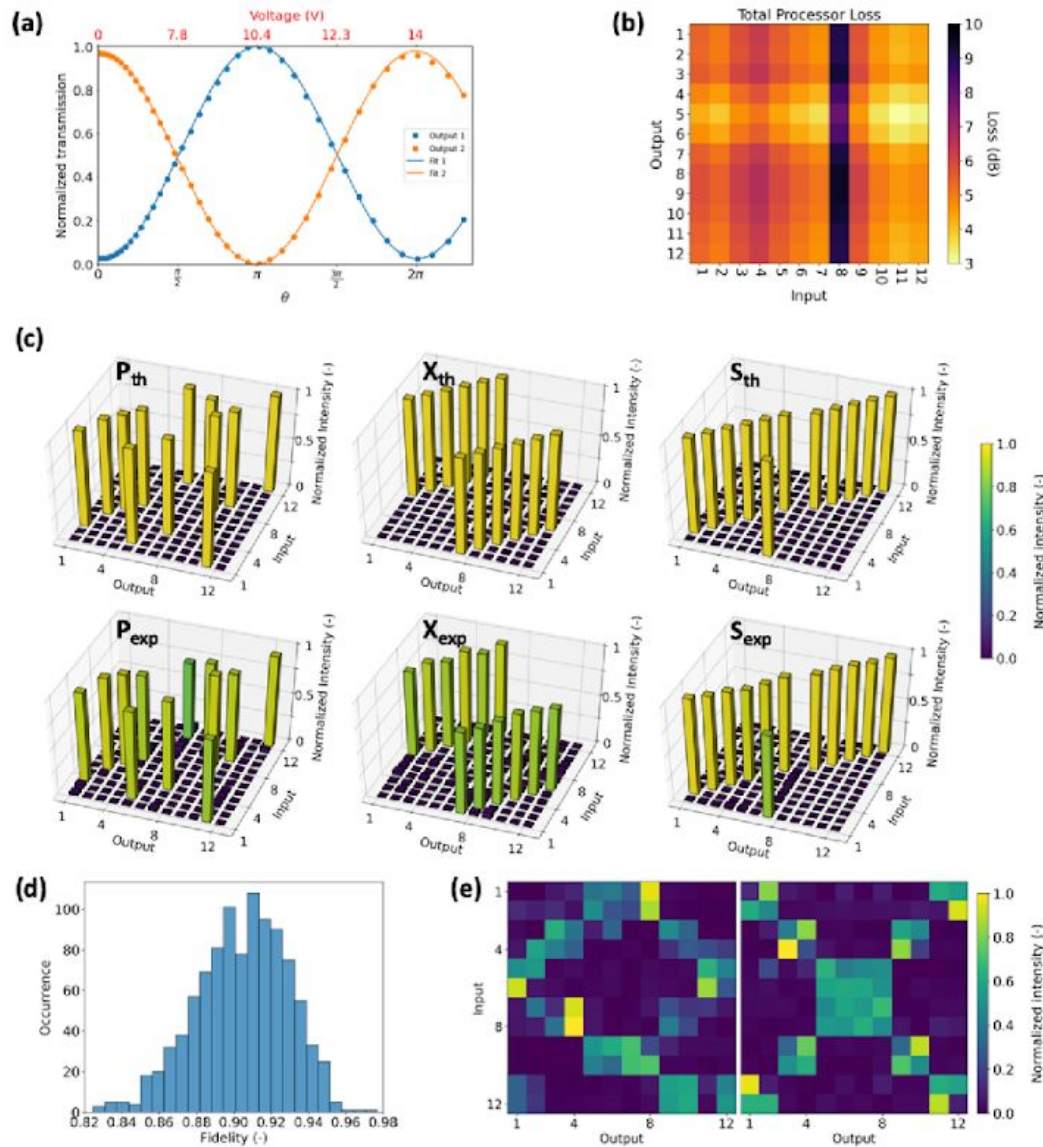


Figure 3 Results summary of the classical characterization. (a) Calibration of heater 136 (TBS). The normalized transmission at the two outputs is plotted and fitted versus the internal phase θ and the applied voltage. A $V_h \cong 10.4$ V is measured. (b) Setup transmission for each input-output combination. (c) Theory vs experimental realization of one of the random permutation P , X^6 and one switching matrix S (between mode 1 and 7) with fidelity, respectively, of 0.955, 0.940 and 0.984. (d) Fidelity distribution of 1000 Haar random matrices. (e) Measured Q and X unitary transformation of fidelity 0.922 and 0.930, respectively. Intensity is normalized to its maximum for each measurement.

Kuantum Karakterizasyonu

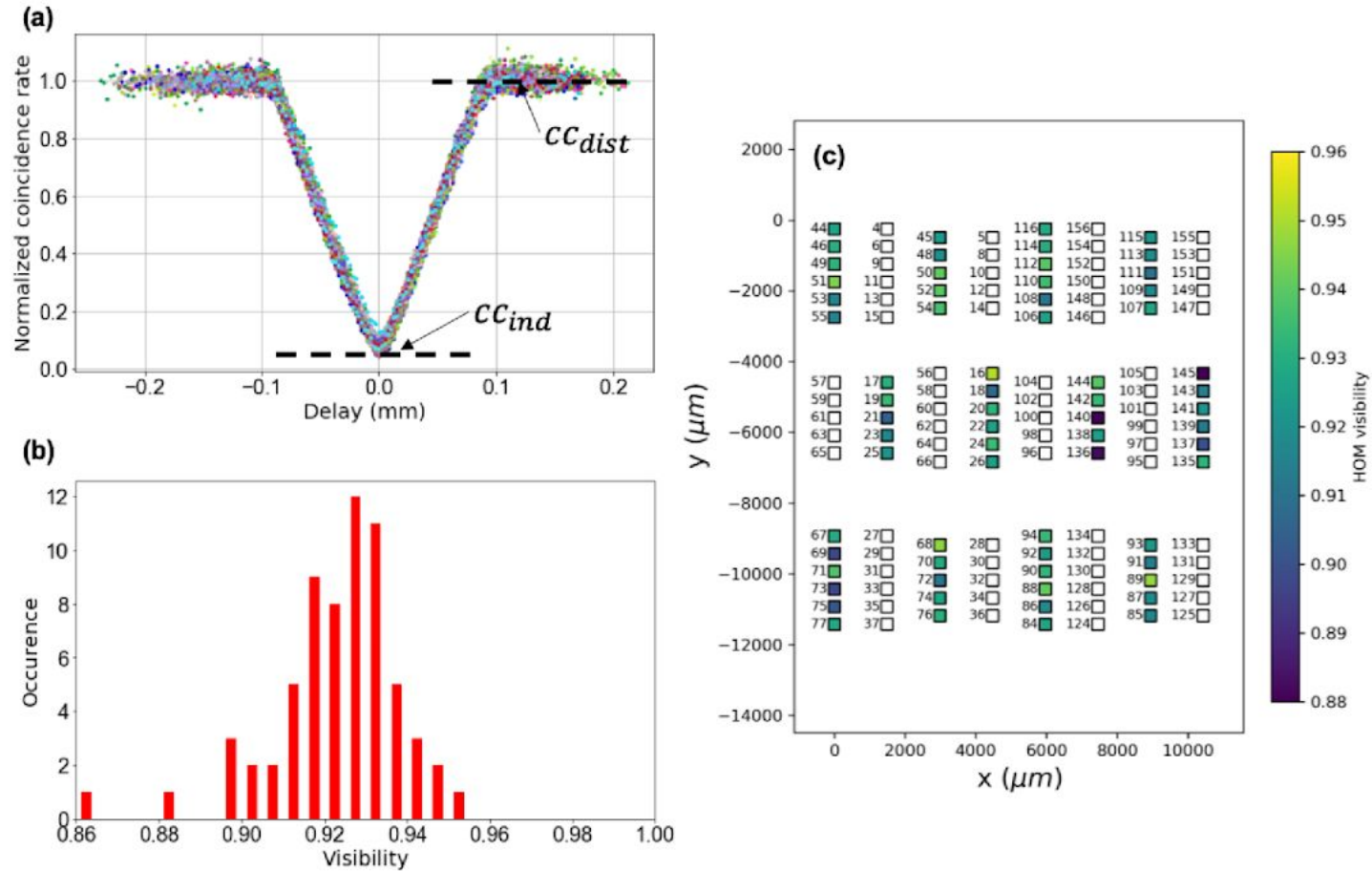


Figure 4 Result summary for the quantum characterization. (a) All the 66 HOM dips are reported on top of each other. The coincidence count rate is normalized to the average of coincidence counts outside the dip, i.e., for distinguishable single photons. (b) Distribution of the visibility of the 66 HOM dips showing an average of 0.923. The two outliers belong to TBS #136 and #140, as can be seen in (c), where the distribution of the visibilities is reported across the heater layout.

Sonuç

Tümleşik fotonik sayesinde kubitler ışığın polarizasyonuna kodlanır.

Si CMOS temelli üretim proseslerinin

- ✓ düşük güç tüketimi,
 - ✓ dış sinyallerden korunma,
 - ✓ RF/analog elektronik arayüzü
- avantajları kullanılabilir.

Faz kaydırılan interferometrelerle fotonik devrelerde istenen her $U(2)$ veya $U(4)$ işlem yapılabilir.

Kuantum teknolojilerin fotonik platformlarda başarıyla ölçeklenebilmesi için

- Tek foton kaynaklarının ve tek foton dedektörlerinin kalitesinin artırılması
 - Heteroentegrasyonun sağlanması
 - Hibrit (klasik sürme/kuantum bilgi işleme) entegrasyonun sağlanması
- gerekmektedir.