

Einführung in die Umsetzung photonischer Bauteile auf Wafern

Für Nachrichtentechniker: Von TFLN-Wafern bis 6G-Integration
(2024–2025)

Zusammenfassung

Die Umsetzung photonischer Bauteile auf Wafern (z. B. TFLN oder Si-Photonik) ermöglicht skalierbare, latenzarme Systeme für 6G-Netze. **Die globale Strategie fokussiert 2025 auf die Industrialisierung von Dünnschicht-Lithiumniobat (TFLN) durch spezialisierte Foundries [?] und die Entwicklung skalierbarer photonischer Quantencomputer (LNOI/Pho-Quant) [?].** Diese Einführung basiert auf aktueller Literatur (2024–2025) und beleuchtet Fabrikationsprozesse (Ionenschnitt, Wafer-Bonding), bevorzugte Techniken (MZI-Integration) und Relevanz für Signalverarbeitung. Praxisnah: Tabelle zu Methoden, Ausblick auf hybride PICs. Quellen: Nature, ScienceDirect, arXiv. **Ein neuer optoelektronischer Chip, der Terahertz- und optische Signale integriert, ist ein Schlüssel zur Millimeter-genauen Entfernungsmessung und zu hochleistungsfähigem 6G-Mobilfunk [?].**

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen: Warum Wafer-Integration in der Nachrichtentechnik?	1
2	Realisierung: Schlüsselprozesse für Bauteil-Integration	2
3	Bevorzugte Bauteile und Operationen auf Wafern	2
4	Literaturübersicht: Neueste Dokumente (2024–2025)	3

1 Grundlagen: Warum Wafer-Integration in der Nachrichtentechnik?

Die Fabrikation photonischer Bauteile auf Wafern (z. B. Thin-Film-Lithium-Niobat, TFLN) revolutioniert die Nachrichtentechnik: Skalierbare Produktion von integrierten Schaltkreisen (PICs) für RF-Signalverarbeitung, 6G-MIMO und AI-gestützte Routing. **Der Übergang zur voluminösen Fertigung wird durch spezialisierte TFLN-Foundries, wie die QCi Foundry, beschleunigt, die 2025 die ersten kommerziellen Pilotaufträge annimmt [?]. Weltweit wird 2025 (Internationales Jahr der Quantenwissenschaften) die strategische Bedeutung der Photonik für die Wettbewerbsfähigkeit hervorgehoben [?].** Wafer-basierte Prozesse (z. B. Ionenschnitt + Bonding) ermöglichen monolithische Integration von > 1000 Komponenten/Wafer, mit Verlusten < 1 dB und Bandbreiten > 100 GHz.

Wichtig

Wichtiger Hinweis: Die Technik ist hybrid-analog: Optische Wellenleiter für kontinuierliche Verarbeitung, kombiniert mit elektronischer Steuerung. Dies reduziert Latenz (ps-Bereich) und Energie (pJ/Bit), essenziell für Echtzeit-6G-Anwendungen.

Aktuelle Trends (2025): Übergang zu 300 mm-Wafern für industrielle Skalierung, fokussiert auf flexible, kostengünstige Prozesse [?].

2 Realisierung: Schlüsselprozesse für Bauteil-Integration

Die Umsetzung erfolgt in mehrstufigen Prozessen, stark an Halbleiter-Fabrikation angelehnt (z. B. CMOS-kompatibel). Kernschritte:

- **Ionenschnitt und Wafer-Bonding:** Für dünne Filme (z. B. LiTaO₃ auf Si); ermöglicht hohe Dichte ohne Substratverluste [?].
- **Ätzen und Lithographie:** Mask-CMP für Wellenleiter-Mikrostrukturen; präzise Strukturen (< 100 nm) für MZI-Arrays [?].
- **Monolithische Integration:** Co-Packaging von Elektronik/Photonik; reduziert Latenz in hybriden Systemen [?].
- **Flexible Wafer-Skalierung:** Mechanisch-flexible 300 mm-Plattformen für kostengünstige Produktion [?].

Beispiel: Wafer-Bonding für LNOI (Lithium Niobate on Insulator): Dicke $t = 525 \mu\text{m}$, Implantationsdosis $D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, resultierende Schichtdicke $h \approx 400 \text{ nm}$.

3 Bevorzugte Bauteile und Operationen auf Wafern

Photonische Wafer eignen sich für lineare, frequenzabhängige Bauteile; analoge Integration priorisiert Interferenz-basierte Operationen für 6G-Signale. **Neben TFLN wird auch die Siliziumnitrid (SiN)-Plattform forciert, um PICs für Biowissenschaften und Sensorik anzubieten [?].**

Bauteil	Realisierungsprozess	Relevanz für Nachrichtentechnik
Mach-Zehnder-Interferometer (MZI)	Ionenschnitt + Lithographie auf TFLN-Wafern	Phasenmodulation für Demodulation (6G, Latenz $< 1 \text{ ps}$) [?]
Wellenleiter-Arrays	Wafer-Bonding (LNOI) + Ätzen	Parallele RF-Filterung ($> 100 \text{ GHz}$ Bandbreite) [?]
Optoelektronischer THz-Prozessor	**Si-Photonik/InP-Hybrid-PICs**	**6G-Transceiver, Millimeter-genaue Entfernungsmesung [?]**
Quantum-Dot-Integrator (InAs)	Monolithische Integration	Si-Hybride Signalverstärkung für Optische Netze [?]
Meta-Optik-Strukturen	CMP-Mask-Ätzen auf LiNbO_3	Gradienten-Filter für BSS in MIMO-Systemen [?]
LNOI-Qubit-Strukturen	**Halbleiterfertigung (PhoQuant)**	**Skalierbare, raumtemperaturstabile Quantencomputer [?]**
Flexible PICs	300 mm-Wafer mit mechanischer Flexibilität	Mobile 6G-Edge-Devices (roll-to-roll Fab) [?]

Tabelle 1: Bevorzugte Bauteile: Umsetzung auf Wafern und Anwendungen

Bevorzugt: Lineare Operationen (z. B. Matrix-Vektor-Multiplikation via MZI-Meshes) für AI-gestützte Routing; nicht-lineare (z. B. Logik-Gatter) erfordert Hybride.

4 Literaturübersicht: Neueste Dokumente (2024–2025)

Ausgewählte Quellen zur Wafer-Umsetzung (fokussiert auf photonische Bauteile; Links zu PDFs/Abstracts):

- **TFLN Foundries und Industrialisierung:** Die **QCi Foundry** (spezialisiert auf TFLN) nimmt 2025 erste Pilotaufträge für die kommerzielle Produktion photonischer Chips entgegen, was die Industrialisierung der Plattform markiert [?].
- **Mechanically-flexible wafer-scale integrated-photonics fabrication (2024):** Erste 300 mm-Plattform für flexible PICs; Prozess: Bonding + Ätzen. Relevanz: Skalierbare RF-Chips für mobile Netze. [?]
- **Lithium tantalate photonic integrated circuits for volume manufacturing (2024):** Ionenschnitt + Bonding für LiTaO₃-Wafer; Dichte > 1000 Komponenten/Wafer. Relevanz: Niedrige Verluste für 6G-Transceiver. [?]
- **L NOI für Quantencomputer (PhoQuant):** Das Fraunhofer IOF entwickelt auf Basis von **L NOI** einen photonischen Quantencomputer, wobei die Fertigungsmethoden aus der Halbleiterfertigung stammen und sofort skalierbar sind. Dies demonstriert die Einsatzfähigkeit der L NOI-Plattform für hochkomplexe Quantenarchitekturen [?].
- **Fabrication of heterogeneous L NOI photonics wafers (2023/2024 Update):** Raumtemperatur-Bonding für L NOI; präzise Wellenleiter. Relevanz: Hybride Opto-Elektronik für Signalverarbeitung. [?]
- **Fabrication of on-chip single-crystal lithium niobate waveguide (2025):** Mask-CMP-Ätzen für TFLN-Mikrostrukturen. Relevanz: Echtzeit-Filter für Breitband-Kommunikation. [?]
- **The integration of microelectronic and photonic circuits on a single wafer (2024):** Monolithische Co-Integration; Anwendungen in Optischen Netzen. Relevanz: Latenzreduktion in 6G. [?]

Diese Dokumente zeigen: Übergang zu voluminöser Fertigung (12.000 Wafer/Jahr), mit Fokus auf analoge Präzision für Nachrichtentechnik.