

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/PhoQuant) [?].** 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?

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-gestütztes 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 [?].** Waferbasierte Prozesse (z. B. Ionenschnitt + Bonding) ermöglichen monolithische Integration von > 1000 Komponenten/Wafer, mit Verlusten < 1 dB und Bandbreiten > 100 GHz.

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. LiTaO_3 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 $t = 525$ μm , Implantationsdosis $D = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, resultierende Schichtdicke $h \approx 400$ 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 ps) [?] |
| Wellenleiter-Arrays | Wafer-Bonding (LNOI) + Ätzen | Parallele RF-Filterung (> 100 GHz Bandbreite) [?] |
| **Optoelektronischer THz-Prozessor** | **Si-Photonik/InP-Hybrid-PICs** | **6G-Transceiver, Millimeter-genaue Entfernungsmessung [?]** |
| Quantum-Dot-Integrator (InAs) | Monolithische Si-Integration | 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-linear (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. [?]
- **LNOI für Quantencomputer (PhoQuant):** Das Fraunhofer IOF entwickelt auf Basis von ****LNOI**** einen photonischen Quantencomputer, wobei die Fertigungsmethoden aus der Halbleiterfertigung stammen und sofort skalierbar sind. Dies demonstriert die Einsatzfähigkeit der LNOI-Plattform für hochkomplexe Quantenarchitekturen [?].
- **Fabrication of heterogeneous LNOI photonics wafers (2023/2024 Update):** Raumtemperatur-Bonding für LNOI; 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.

5 Ausblick: Photonische Wafer in 6G-Netzen

Wafer-Integration ermöglicht kostengünstige PICs für Basisstationen: Z. B. optische MIMO mit < 1 dB Verlust. Herausforderungen: Ausbeute steigern (aktuell < 80%). Zukünftig: AI-gestützte Fab (z. B. für dynamische Routing-Chips). ****Der THz-Chip von EPFL/Harvard zeigt das enorme Potenzial der optoelektronischen Integration, hochfrequente Funksignale millimetergenau zu verarbeiten, was neue Anwendungsfelder in Robotik und autonomen Fahrzeugen eröffnet [?].****

Literatur

- [1] Mechanically-flexible wafer-scale integrated-photonics fabrication. Nature Scientific Reports, 2024. [Link](#).
- [2] Lithium tantalate photonic integrated circuits for volume manufacturing. Nature, 2024. [Link](#).
- [3] Fabrication of heterogeneous LNOI photonics wafers. ScienceDirect, 2023. [Link](#).
- [4] Fabrication of on-chip single-crystal lithium niobate waveguide. ScienceDirect, 2025. [Link](#).
- [5] The integration of microelectronic and photonic circuits on a single wafer. ScienceDirect, 2024. [Link](#).
- [6] Leichsenring, H. (2025). Steht die Quantentechnologie 2025 am Wendepunkt. Der Bank Blog; DPG (2025). 2025 – Das Jahr der Quantentechnologien. LP.PRO - Technologieforum Laser Photonik.
- [7] TraderFox (2024). Quantencomputing 2025: Die Revolution steht kurz bevor. Markets.
- [8] Fraunhofer IOF (2025). Quantencomputer mit Photonen (PhoQuant). PRESSEINFORMATION.
- [9] Benea-Chelmus, C. et al. (2025). 6G-Mobilfunk rückt näher – Revolutionärer Chip schafft optische und elektronische Datenverarbeitung. Leadersnet; Nature Communications (Publikation).
- [10] Fraunhofer HHI (2025). Berlin 6G Conference 2025; Fraunhofer HHI (2025). Photonics West 2025.