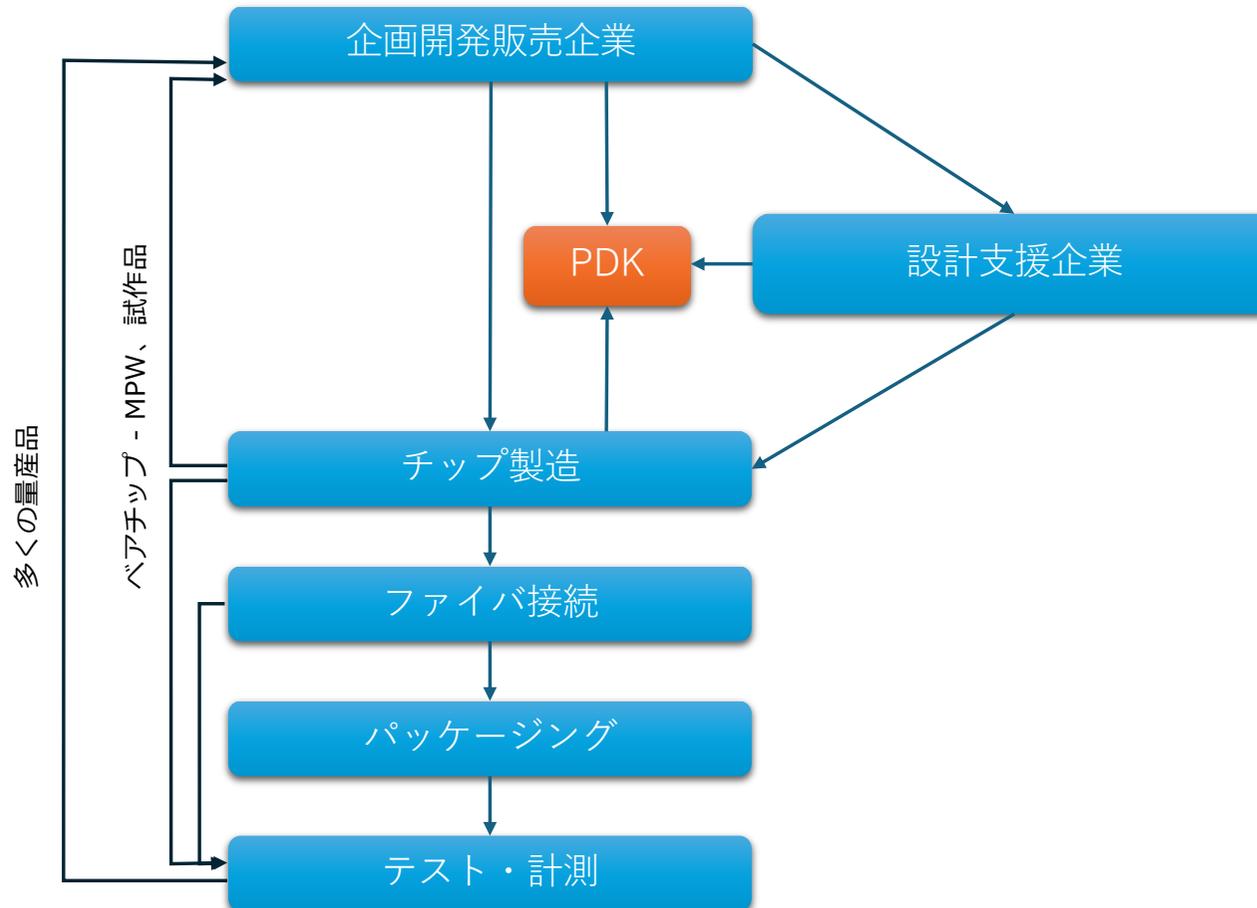


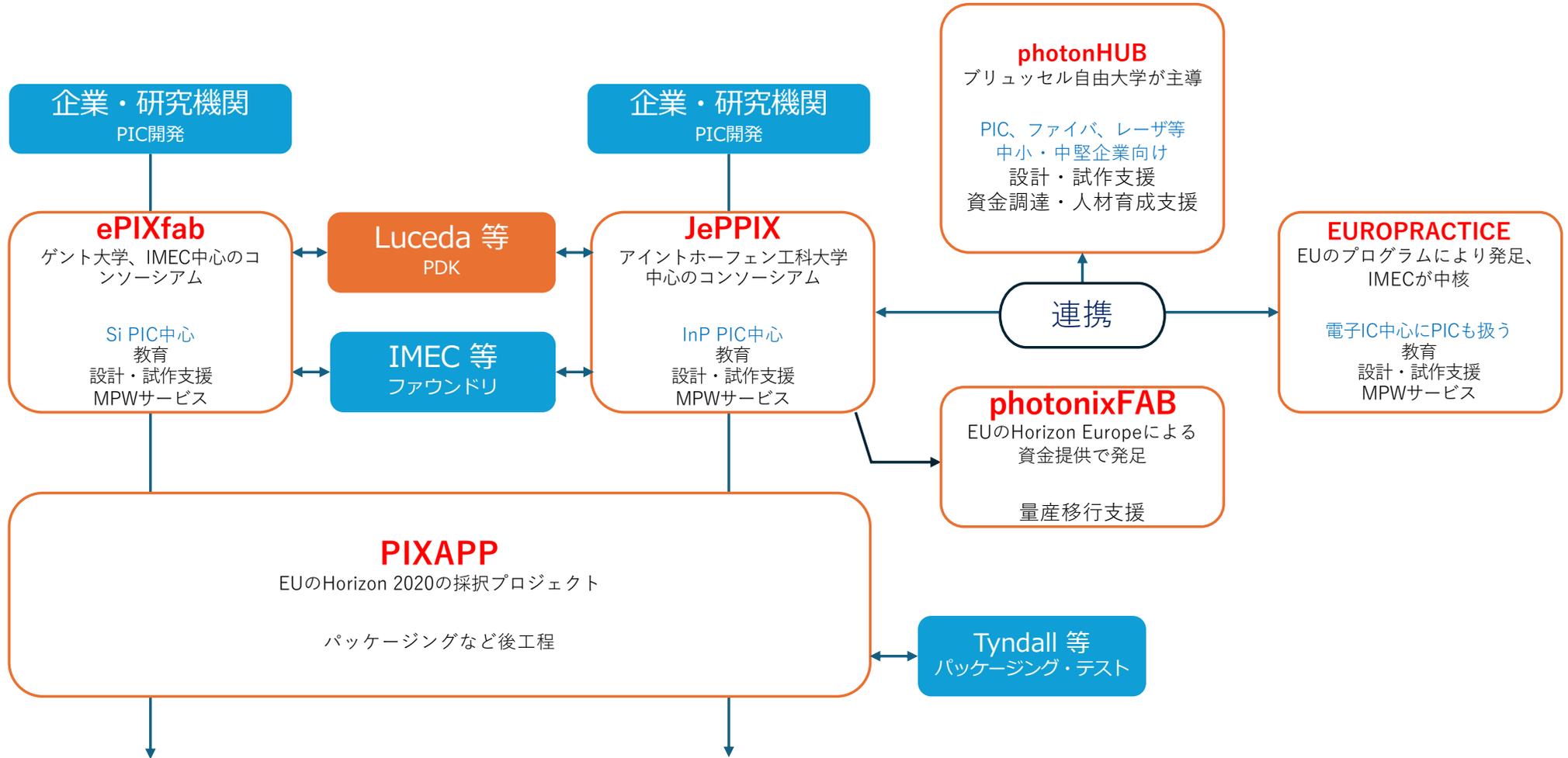
付録： 世界のPICファウンドリ市場調査

2025年7月

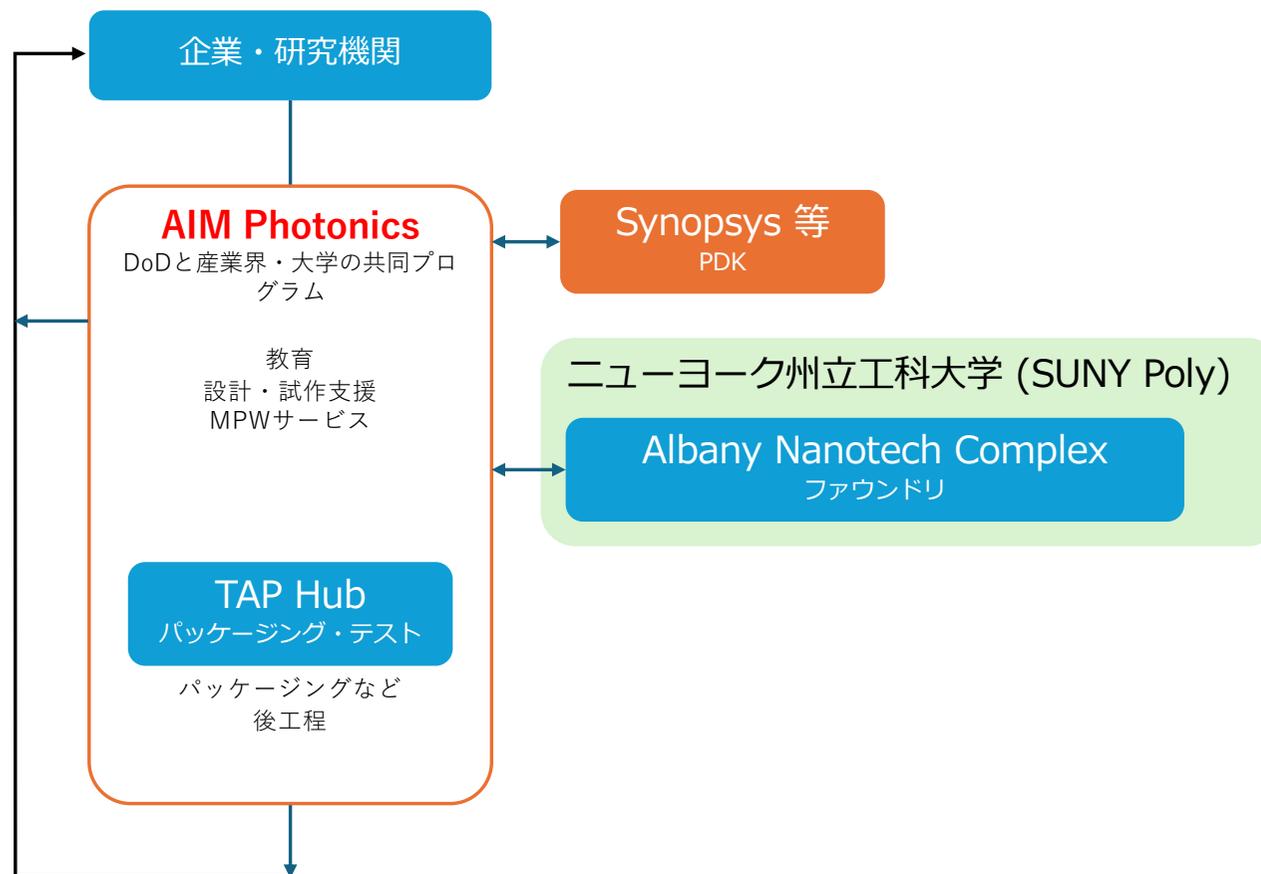
Photonic IC開発、製造の流れ (1)



欧州のPhotonic IC開発、製造支援体制



米国のPhotonic IC開発、製造支援体制



PICの素材

| 素材 | 波長範囲 (μm) | 損失 (dB/cm) | 屈折率 (実部) | 主な特長 | 主なアプリケーション | 主なファウンドリ |
|---|---------------------------|---------------|-------------|---|---|--|
| SOI (Silicon-on-Insulator) (SiPh) | 1.1 ~ 2.2 | ~ 1.0 | ~ 3.48 | <ul style="list-style-type: none"> - CMOS互換 → 電子回路と同じラインを使用可能 (量産性・低コスト) - 高屈折率差で小型化可能 - 吸収が大きく赤外域以外は難しい | <ul style="list-style-type: none"> - データ通信 (光トランシーバ) - データセンター間通信 - 集積光変調器/受光器 - 電子ICとのハイブリッド集積 | IMEC [ベルギー] GlobalFoundries [米国] AIM Photonics [米国] |
| SiN (Silicon Nitride) (Si ₃ N ₄) | 0.4 ~ 2.4 | ~ 0.1 | ~ 2.0 | <ul style="list-style-type: none"> - 広帯域 (可視~中赤外) 対応 - 非線形性は低い | <ul style="list-style-type: none"> - 光コム/周波数安定化 - 高精度センサ (干渉計) - 量子光学 (導波路SPDC/SPDC) - 生体センサ/LIDAR | Ligentec [スイス] LioniX International [オランダ] CEA-Leti [フランス] |
| TFLN (Thin Film Lithium Nitride) (薄膜LiNbO ₃) | 0.5 ~ 5.0 | ~ 0.5 | ~ 2.2 | <ul style="list-style-type: none"> - 高EO (電気光学) 係数 → 高速変調器に最適 - 非線形性が高い (Pockels効果) - 製造がやや難しい | <ul style="list-style-type: none"> - 高速光変調器 (100G超) - 光コム・ソリトン生成 - 量子フォトニクス (EO操作) - RF-光変換 (マイクロ波フォトニクス) | Lightium [スイス] RAPID Photonics [オランダ] NanoLN [中国] |
| InP (Indium Phosphide) | 1.0 ~ 1.7 | ~ 2.0 | ~ 3.17 | <ul style="list-style-type: none"> - 励起光源・光増幅等のモノリシック集積が可能 - III-V族半導体 (直接遷移) | <ul style="list-style-type: none"> - 光源集積 (レーザー) - 光増幅器 (SOA) - 光トランシーバ (CWDM, DWDM) - センサ+検出系統合 | SMART Photonics [オランダ] Teem Photonics [フランス] |
| CaF ₂ (フッ化カルシウム) | 0.15 ~ 8.0 | ~ 0.01 | ~ 1.43 | <ul style="list-style-type: none"> - 低分散の一方、特定の波長で異常分散を示す - 加工性が低く、量産が容易ではない - 屈折率が低いため、導波路コアには不向き | <ul style="list-style-type: none"> - 光コム - 中赤外フォトニクス - 量子光学 - 非線形光学素子 | EPFL [スイス] OEwaves [米国] |
| Ta ₂ O ₅ (五酸化タンタル) | 0.4 ~ 2.0 | 0.2 ~ 0.5 | ~ 2.1 | <ul style="list-style-type: none"> - EO効果はない - バンドギャップが広く、紫外域でも透明 - SiNよりもKerr 非線形係数は高い - 耐熱、耐湿、対酸化性良好 | <ul style="list-style-type: none"> - 光コム、高周波変換 - 光通信 - センサ | LioniX International [オランダ] |
| Photonic Crystal | 可視~中赤外 | 1 ~ 100 | | <ul style="list-style-type: none"> - 小型、高集積 - 非常に強い非線形性 - 製造難度高い、製造ばらつき大 - 一般に損失大 - 温度依存性、偏波依存性大 | <ul style="list-style-type: none"> - 高感度センサ - 高密度波長選択素子(WDMフィルタ) - 量子光学素子 - 光コム | IMEC [ベルギー] ? |

世界のPIC 製造可能なファウンドリ (1)

| ファウンドリ | 材料・技術 | ウエハサイズ | 特徴 | 顧客、用途など | 資料 |
|-----------------------------|--|---------------|---|---|--------------|
| Ligentec [スイス] | Si ₃ N ₄ | 200mm | 超低損失 (< 0.1dB/cm) X-FABの大型設備で歩留まりを上げ量産化 | EPFL, Caltech, Menlo, Xanadu, 徳島大学、慶應大学 | 1 2, 3, 4 |
| Lightium [スイス] | TFLN | 200mm | CSEM系であるがスピニアウトではない。 TFLNウエハに対応し試作から量産までカバー。 | 通信、データセンタ、量子、AI、宇宙用途など | 5 |
| CCRAFT [スイス] | TFLN | 150mm | CSEMからのスピノフ。 | データセンタ、高性能コンピューティング、量子技術、LiDAR、宇宙用途など幅広く対応。 | 6 |
| Luxtelligence [スイス] | TFLN | | EPLFからのスピノフ。 開発から量産まで支援する開放アクセスの専門TFLNファウンドリ。 オープンPDK (Inoi400) 提供。 | 光コム、量子フォトニクス、高速通信、RF-光インタフェイス | 7 |
| RAPID Photonics [オランダ] | TFLN | | アムステルダム自由大学のスピノフ 短納期でLNOI PICを試作可能で、高速・高効率デバイスを試作。 | 光通信、AI、量子用途 | 8 |
| Fraunhofer IPM [ドイツ] | Si ₃ N ₄ , TFLN、ガラス基板 | 200mm | 医療診断向けバイオセンサとしてSi ₃ N ₄ 素材による低損失高感度な微小共振器を開発。 | 通信、量子、LiDARなど | 9 |
| Fraunhofer HHI [ドイツ] | InP | | Ⅲ-V族レーザ、変調器など通信用途 PICのMPWあり | | 10 |
| X-FAB [ドイツ] | SOI, Si ₃ N ₄ | | 電子-光ハイブリッド (ePIC) の開発が得意。自動車・医療グレード対応の品質管理 | 通信、LiDAR、AR/VR、量子コンピューティング、バイオメディカルなど | 11 |
| IMEC [ベルギー] | SOI, Si ₃ N ₄ , InP | 200mm (300mm) | SOIとSi ₃ N ₄ をMPW製造、量産能力有 | IITD, PhotonDelta, Xanadu, CEA-Leti データコム、通信、センシング、イメージング、バイオ等 | 12 |
| LioniX International [オランダ] | Si ₃ N ₄ , SOI, Ta ₂ O ₅ | | 広帯域、低損失で温度安定性あり。量産MPW提供。 伝搬損失 0.03dB/cm @ 1.55μm, 曲げ半径 100μm | QuiX, Quantum, PhotoLab | 13 |
| SMART Photonics [オランダ] | InP | 4in | InPレーザ、変調器などを製造 | Pilot Photonics | 14 |
| CEA-Leti [フランス] | Si ₃ N ₄ , SOI | 300mm | 200mm/300mmウエハに対応する幅広いフォトニック製造工程を持ち、独自のLPCVD/PECVDプロセスにより高品質なマイクロリング共振器の試作・製造実績あり。平均減衰 ~3 dB/m を実現。 | データコム、通信、センシング、イメージング、バイオ等 | 15, 16 |
| Teem Photonics [フランス] | ガラス基板, InP | | Schneider Electric [フランス]からのスピノフ。 | データ通信、集積センシング、生命科学、自動車、宇宙、防衛など | 17 |
| Tower Semiconductor [イスラエル] | SOI | 300mm | 低損失のSi及びSiN導波路を実現可能で、産業用途に適した高品質な製品を提供。 | Inphiなど光関連企業 | 18 |

参考資料 (1)

1. <https://cora.ucc.ie/server/api/core/bitstreams/b49af845-ad4c-4407-84c5-75ac12e3dcb8/content>
2. https://www.ligentec.com/offering/?ppc_keyword=ligentec%20sa&qad_source=1&qad_campaignid=2065513392&qbraid=0AAAAACyMdGX9ZO5QqxuFq35XkxkNHtPGa&qclid=CjwKCAjwsZPDBhBWEiwADuO6y8OsqXKOqxRS2xf61V4BNCOS_dnmoMbiBuHhhJbBpvevTQqDjIOX-xoCm24QAvD_BwE
3. <https://www.xfab.com/technology>
4. https://www.xfab.com/news/details/article/ligentec-and-x-fab-collaboration-creates-europes-largest-capacity-foundry-service-for-integrated-photonic-circuits?utm_source=chatgpt.com
5. <https://lightium.com/#USP>
6. <https://www.ccraft.com/technology>
7. <https://luxtelligence.ai/services/>
8. <https://rapidphotonics.com/>
9. <https://www.ipm.fraunhofer.de/en.html>
10. <https://www.hhi.fraunhofer.de/en>
11. <https://www.lionix-international.com/photonics/>
12. https://www.imec-int.com/en/press/photonixfab-consortium-now-open-first-prototyping?utm_source=chatgpt.com
13. <https://www.lionix-international.com/photonics/pic-technology/>
14. <https://smartphotonics.nl/>
15. <https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/Applied-Research/Technology-Fields/Silicon-Photonics.aspx>
16. <https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/Industrial-Innovation/Demos/sin-visible-pic.aspx>
17. <https://www.teemphotonics.com/integrated-photonics/pics-and-plcs-2/>
18. <https://ir.towerjazz.com/news-releases/news-release-details/tower-semiconductor-releases-300mm-silicon-photonics-process/>

世界のPIC 製造可能なファウンドリ (2)

| ファウンドリ | 材料・技術 | ウエハサイズ | 特徴 | 顧客・用途など | 資料 |
|--|---|----------------|--|---------------------------------------|--------|
| Global Foundries [米国] | SOI | 300mm | TSMCなどととも世界有数のファウンドリ | LiDAR、自動車、IoT、通信、バイオ | 21 |
| OEwaves [米国] | MgF ₂ , CaF ₂ , SOI, TFLN など | | 結晶性WGM共振器を自社で開発・製造。素材はMgF ₂ , CaF ₂ , LiTaO ₃ , Si, ダイヤなど多様 | | 22 |
| AIM Photonics [米国] | SOI, Si ₃ N ₄ | 300mm | 商用ファブ相当の300 mm対応で、CMOSと共通の高精度・高歩留まりプロセス。MPW利用により低コストで試作可能。 | | 23, 24 |
| QCi [米国] | TFLN | 150mm | 量子光学企業で、自社内に150 mm TFLNファウンドリを構築 | カナダや欧州の研究機関・大学 通信、高度センシング、量子光学向け | 25 |
| Intel Foundry Services [米国] | SOI | 200mm 300mm | 信頼性の高いSiPhプラットフォームを保持。 高帯域光I/Oチップレットで4 Tbps対応など、急速な事業展開中。800万枚超のPIC出荷実績 | | 26 |
| NIST [米国] | Si ₃ N ₄ , Ta ₂ O ₅ | 4in | Si ₃ N ₄ は非常に低損失 Tantala導波路は約10 dB/mの損失で、超低損失光学デバイスの試作に対応 | | 27 |
| Advanced Micro Foundry (AMF) [シンガポール] | SOI, Si ₃ N ₄ , TFLN | | 研究用途と量産の両方に対応 高速変調器など | HyperLight、ハーバード大学、UCSB 通信、センシングなど | 28 |
| CompoundTek [シンガポール] | SOI, Si ₃ N ₄ | 200mm | 自社のCMOSラインを用いた専門SOIファウンドリ | 通信、LiDAR、バイオセンシング、AI、量子コンピューティングなど | 29 |
| NanoLN [中国] | TFLN | | 高品質TFLN基板製造 | 大学向け供給が中心 | 30 |

参考資料 (2)

21. <https://gf.com/technology-platforms/silicon-photonics/>
22. <https://www.oewaves.com/solutions>
23. <https://www.aimphotonics.com/what-is-integrated-photonics>
24. https://www.analogphotonics.com/wp-content/uploads/2021/08/7_NFahrenkopf_JSTQE_2019.pdf?utm_source=chatgpt.com
25. <https://quantumcomputinginc.com/foundry>
26. <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/details/network-io/silicon-photonics.html>
27. https://www.nist.gov/programs-projects/precision-metrology-integrated-photonics?utm_source=chatgpt.com
28. <https://www.ansys.com/ja-jp/partner-ecosystem/foundry-partners/advanced-micro-foundry>
29. https://www.cmc.ca/wp-content/uploads/2020/02/AMFonePager_Final_Feb2020.pdf
30. <https://m.nanoin.com/PRODUCTS.html>

世界のPIC 製造可能なファウンドリ (3)

| ファウンドリ | 材料・技術 | ウェハサイズ | 特徴 | 顧客・用途など | 資料 |
|-------------------|-------|--------|---|---|----|
| 産業技術総合研究所 [日本] | SOI | | 45 nm SOIラインや低損失シリコン導波路（損失～1 dB/cm）を用いたフォトニックチップの試作を実施 最先端の微細リソグラフィと薄膜プロセスが可能で、研究目的での試作・実証が可能。 | 原則としてSiフォトニクス・コンソーシアムのメンバーが利用可能。アドバンテスト、NTT、NTT-AT、沖、古河、パナソニック、慶應田邊先生、他 | 41 |
| 情報通信研究機構 [日本] | | | | | 42 |
| 東北大学 [日本] | | | 電子情報通信研究所やCo-creation Center for Photonics Integrationなどで、フォトニック結晶構造・マイクロ共振器等の研究・試作を実施。 | 古河電工と協業でフォトニクス融合共創研究拠点。 | 43 |

41. <https://unit.aist.go.jp/peirc/sipc/>
42. https://www.nict.go.jp/aict-d/labo.top.html?utm_source=chatgpt.com
43. https://www.riec.tohoku.ac.jp/en/organization/cocreation_research_center/cocreation_research_center-fdk_tohoku_photonics_lab/?utm_source=chatgpt.com

PIC開発に使われる主なPDK

| PDK | 開発元 | 対応ツール | 特長 | 資料 |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|----|
| Luceda IPKISS | Luceda Photonics [ベルギー] | Luceda IPKISS | Pythonベース、パラメトリック設計、研究～商用まで対応 | 51 |
| Synopsys OptoDesigner | Synopsys [米国] | OptoCompiler, OptSim, RSoft | GUI中心、大規模光回路に適した商用設計フロー | 52 |
| Ansys PDK | Ansys [米国] | FDTD, MODE, INTERCONNECT | 高精度シミュレーション連携（物理モデル/回路/熱） | 53 |
| CORNERSTONE PDK (EUROPRACTICE) | CORNERSTONE [英国] | | 教育・研究向け、MPW連携、安価（PDKはオープンソース）で包括的な支援体制 | 54 |
| SiEPIC PDK | SiEPIC/UBC [カナダ] | KLayout + SiEPIC-Tools, INTERCONNECT | オープンソース志向、教育・MPW試作向け、Python対応可 | 55 |
| ファウンドリ独自PDK | 各ファウンドリ | Luceda, KLayout, GDS互換など様々 | 特定プラットフォーム最適化、PDKの柔軟性に差あり | |

51. <https://www.lucedaphotonics.com/luceda-design-kits>
52. <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/optocompiler/process-design-kits.html>
53. <https://www.ansys.com/ja-jp/blog/how-to-create-a-laser-model-for-a-photonic-process-design-kit>
54. <https://www.cornerstone.sotonfab.co.uk/our-services/>
55. <https://github.com/SiEPIC>

- Luceda と Synopsys のPDKがよく使われている。Luceda は研究用途など試作やMPWを行う時に好まれ、Synopsys は商用量産用途によく使われる。
- SiEPIC、Europractice は研究機関が中心となって設立されたコンソーシアムで、オープンソースPDK提供、安価なPIC開発支援体制構築、教育、MPW連携などを行う。

PICの主なパッケージング企業 / プラットフォーム

| 企業名 | 特長 | 備考 | 資料 |
|--------------------------------|---|---|--------|
| PHIX Photonics Assembly [オランダ] | 通信関係を中心としたPICのパッケージングに特化した専門企業で、高精度、高信頼のパッケージングを行う。Si ₃ N ₄ 、InP、SiPh、TFLN などハイブリッド対応可 | LioniX International のスピノフ。PIXAPP内でのパッケージ提供期間の一つ。 | 61 |
| PIXAPP [EU] / Tyndall [アイルランド] | 多くのPDKに対応可能。SiPh、InP、SiN、TFLNなどのフォトリソICのパッケージング、設計、評価を行う。 | Tyndallはコーク大学に属する研究機関で、PIXAPPを主導。 | 62, 63 |
| PhotonFirst [オランダ] | フォトリソセンシング向けに特化したアプリケーション指向のPICパッケージングを得意とする。SiPhまたはInPベースのチップに、FBG (Fiber Bragg Grating) や光干渉センサを統合。過酷な環境 (高温・振動・EMノイズ) に対応する専用パッケージ設計に強み。 | Technobis (オランダのヘルスケア機器などを開発販売する企業グループ)からのスピノフ。 | 64 |

61. <https://www.phix.com/our-offering/>
62. <https://www.tyndall.ie/research/photronics-packaging-and-systems-integration/>
63. https://epic-photronics.com/wp-content/uploads/2022/02/2.1-Peter-OBrien_Tyndall.pdf
64. <https://www.photonfirst.com/pic-packaging-services>

PICの主なテスト・計測企業 / プラットフォーム

| テスト・計測事業者 | 特長 | 備考 | 資料 |
|--------------------------------|--|--|----|
| PIXAPP [EU] / Tyndall [アイルランド] | 世界初のPICパッケージング専門パイロットラインで、評価・テストまで対応している。 SOI、SiN、InP、TFLNと素材横断的に対応可能。 MPWのベアチップの評価にも対応。 | EU Horizon 2020 により設立され、Tyndall がホスト機関となっている。 IMEC、CEA-Leti、Fraunhofer HHI、LioniX、SMART Photonics など多くのファウンドリと連携。 | 71 |
| PhotonFirst [オランダ] | PICのパッケージングを行う企業だが、テスト・計測も行い、パッケージ品の高精度測定、特にセンサ用途/光コム評価に強み | | 72 |
| VLC Photonics [スペイン] | ベアチップ、特にSiPh/SiN評価に強い。設計支援との一貫も可 | | 73 |
| CEA-Leti [フランス] | PIXAPPなどと連携して、SOI、SiNプラットフォームにおけるRF/光信号評価などを行う | | 74 |
| ficonTEC [ドイツ] | PICの自動化されたアセンブリ及びテストシステムを開発販売する企業だが、PIXAPPなどと連携してPICの評価・テストサービスも受託している。 | | 75 |

■ フォトニックICのパッケージングとテストの分業はあまり進んでいない印象。

71. https://epic-photonics.com/wp-content/uploads/2022/02/2.1-Peter-OBrien_Tyndall.pdf
72. -
73. <https://www.vlcphotonics.com/testing/>
74. <https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/Industrial-Innovation/Demos/testing-silicon-pic.aspx>
75. <https://www.ficontec.com/photonic-device-testing/>

PICファウンドリとパートナー企業 (1)

| ファウンドリ | 設計支援ツール/PDK | パッケージング・パートナー | テスト・計測パートナー |
|-----------------------------|--|---|--|
| Ligentec [スイス] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ], PIXAPP [EU] | PIXAPP [EU], PhotonFirst [オランダ] |
| Lightium [スイス] | Luceda Photonics [ベルギー] との協業による自社製PDK | PHIX [オランダ] | Tyndall [アイルランド], PhotonFirst [オランダ], ficonTEC [ドイツ] |
| CCRAFT [スイス] | 自社製PDK、Luceda Photonics [ベルギー] | PHIX [オランダ] (Lightium経由パートナー) | PIXAPP [EU], PhotonFirst [オランダ] |
| Luxtelligence [スイス] | 自社製PDK (Iioi400), Luceda Photonics [ベルギー] | | |
| RAPID Photonics [オランダ] | Luceda Photonics [ベルギー] との協業による自社製PDK | PHIX [オランダ] | Tyndall [アイルランド], PhotonFirst [オランダ], ficonTEC [ドイツ] |
| Fraunhofer IPM [ドイツ] | 未公開 | PHIX [オランダ], PIXAPP [EU] | PIXAPP [EU] |
| Fraunhofer HHI [ドイツ] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国] | PHIX [オランダ] | 自社設備、PIXAPP [EU] |
| X-FAB [ドイツ] | Luceda Photonics [ベルギー] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ], PIXAPP [EU] | PIXAPP [EU] |
| IMEC [ベルギー] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国], SiEPIC PDK [カナダ] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ], PIXAPP [EU] | PIXAPP [EU], 自社設備 |
| LioniX International [オランダ] | Synopsys [米国], Luceda Photonics [ベルギー] | PHIX [オランダ] (出資&パートナー) | PIXAPP [EU], 自社設備 |
| SMART Photonics [オランダ] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ] | PIXAPP [EU], PhotonFirst [オランダ] |
| CEA-Leti [フランス] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国] | PIXAPP [EU] | PIXAPP [EU], 自社設備 |
| Teem Photonics [フランス] | 自社製PDK ? | PHIX [オランダ] | PIXAPP [EU], 自社設備 |
| Tower Semiconductor [イスラエル] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国], ansys [米国] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ], OpenLight [米国] | PIXAPP [EU] |

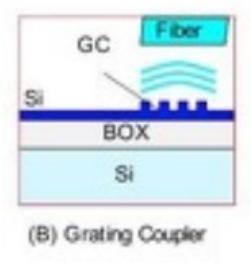
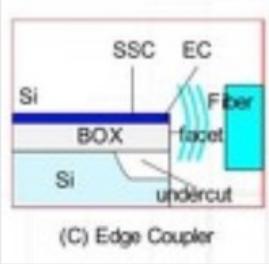
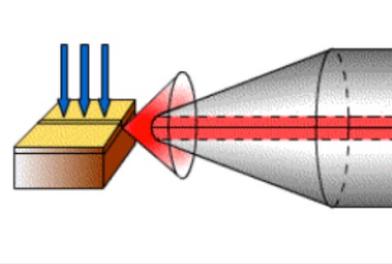
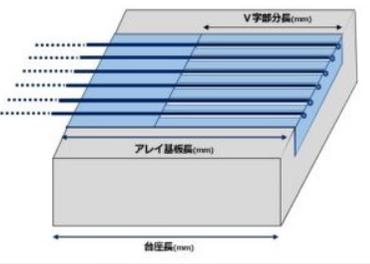
PICファウンドリとパートナー企業 (2)

| ファウンドリ | 設計支援パートナー/PDK | パッケージング・パートナー | テスト・計測・パートナー |
|---------------------------------------|--|---|--|
| Global Foundries [米国] | Synopsys [米国], Ansys [米国], SiEPIC PDK [カナダ] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ] | PIXAPP [EU] |
| AIM Photonics [米国] | Luceda Photonics [ベルギー], Synopsys [米国], Ansys [米国], SiEPIC PDK [カナダ] | | 自社設備, ficonTEC [ドイツ] |
| OEwaves [米国] | - | OEM/パッケージ/PHIX未確認 | 自社設備, NIST [米国] |
| QCi [米国] | Luceda Photonics [ベルギー] | PHIX [オランダ] ? | PIXAPP [EU] |
| Intel Foundry Services [米国] | 自社設計ツール, Synopsys [米国], Luceda Photonics [ベルギー] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ], OpenLight [米国] | PIXAPP [EU] |
| NIST [米国] | SEON PDK | PIXAPP [EU] | PIXAPP [EU] |
| Advanced Micro Foundry (AMF) [シンガポール] | 自社設計ツール, Synopsys [米国], Luceda Photonics [ベルギー], SiEPIC PDK [カナダ] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ] | PIXAPP [EU] |
| CompoundTek [シンガポール] | Luceda Photonics [ベルギー], Ansys [米国] | | VLC Photonics [スペイン], Tyndall [アイルランド] |
| NanoLN [中国] | Luceda Photonics [ベルギー] | PHIX [オランダ], PhotonFirst [オランダ] | PIXAPP [EU] |

PICファウンドリとパートナー企業 (3)

| ファウンドリ | 設計支援パートナー/PDK | パッケージング・パートナー | テスト・計測・パートナー |
|-------------------|---------------|---------------|--------------|
| 産業技術総合研究所 [日本] | | | 所内設備 |
| 情報通信研究機構 [日本] | | | 所内設備 |
| 東北大学 [日本] | | | |

PICとファイバの接続方法

| 比較項目 | グレーティング結合 | 端面結合 | | |
|-----------|--|--|---|---|
| | | 接着剤接合 | 球面レンズによる空間接合 | ファイバアレイ |
| |  <p>(B) Grating Coupler</p> |  <p>(C) Edge Coupler</p> |  |  |
| 特長 | PICチップの表面にエッチングされた格子を使って上方向へ射出 | チップ側面の導波路端面とファイバの端面を直接接合 | ファイバ端面にレンズを形成し、ビームを拡大または収束 | シリコンなどで形成されたV字溝に一定ピッチで複数のファイバを配置。多チャンネルを一括接続可 |
| 結合損失 | 1.5 ~ 5dB | 0.5 ~ 1dB | 0.3 ~ 1dB | ~ 1.0dB / チャンネル |
| 接続容易性 | ◎ 自動アライメント向き | △ 端面の研磨・整列が必要 | ○ 高コスト | △ 高精度整列が必要 |
| 偏波依存性 | △ 偏波依存性大 → PDGCなどの工夫要 | ◎ 偏波依存性ほぼなし | △ 偏波の入射角が微小に変化しただけで結合効率が大きく変化する | ◎ |
| 反射特性 | △ 反射がやや大きい | ◎ ARコートで反射抑制 | ◎ | ○ |
| 耐久性・熱変動耐性 | △ 熱膨張の影響大 | ◎ 直接接続でズレが少ない | △ 数度℃の温度差でもアライメントズレが発生 | △ 複数接点の整合が必要 |
| 多チャンネル化 | △ 大面積になる | ○ 実装には工夫が必要 | △ | ◎ 高密度実装可能 |
| 標準化 / 商用性 | ◎ 多くのPDKが対応 | ○ 現状、高性能用途中心 | × 長期安定性、堅牢性に欠けるため製品には不適 | ◎ |

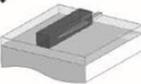
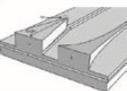
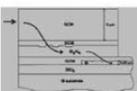
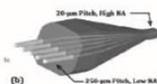
| 方式 | | 結合損失 | PDL | 波長帯域 | 備考 |
|-----------------------|------------|---|-------------------|-------------------|---|
| シリコン側 | 表面結合 | 1D-Grating  1~2dB | × ↑ Grating | ~40nm △ | 主に光トランシーバの光入出に適用、出射角の波長依存性あり 高精度確保が必要 |
| | | 2D-Grating  ~3dB? | ○ | ~40nm △ | |
| | 端面結合 (SSC) | シリコンコア縮小  1dB可能 | ○ | ~100nm | SMFと同一のMFD10μm難通常MFD~3μmが多いLDとのバットカップリングに適用 |
| | | シリコンコア拡大  1~2dB withリブ (実験) | ○ | ~100nm | 光固有のプロセスガラス/Si厚膜プロセス必要 |
| | | 隣接導波路移行 (Grating)  2.6dB with細線 (実験) | × ↑ Grating | × ↑ Grating | |
| | ファイバ側 | ファイバコア縮小 (シリコンSSC要求倍率緩和)  1dB可能 | ○ | ○ | MFD~1μmの箇所で接続のため高精度実装必要 |
| レンズ結合 (シリコンSSC要求倍率緩和) | | 1dB可能 | ○ | ○ | アセンブリ工程が上記より増加低コストに難高精度実装必要 |

図 6. 光接続機構の分類

PIC用 MPWサービスの主な提供企業 / プラットフォーム

| 企業 / 機関 | 主なプロセス | 備考 | 資料 |
|--|----------|---|--------|
| JePPIX [オランダ] | InP | ファブは SMART Photonics [オランダ] など | 81 |
| EUROPRACTICE-IC [EU] | SiN, SOI | ePIXfab のMPW事業を継承。 ファブはGlobal Foundries、X-FBなど | 82 |
| LioniX International [オランダ] | SiN | 自社のファブ。MPW、カスタム、量産まで一括対応。 | 83 |
| Sandia National Laboratories [米国] | InP,SOI | 自研究所内のファブ。 | 84 |
| Advanced Micro Foundry (AMF) [シンガポール] | SOI | 自社のファブ。隔月のシャトル提供による迅速な試作。EUROPRACTICE 経由でのアクセスも可。 | 85, 86 |
| CUMEC [中国] | SOI, SiN | | 87 |
| SiPC (産業技術総合研究所) [日本] | | 国内で限定的に実績あり NTTアドバンステクノロジー、沖、古河、アドバンテスト、慶應 田邊研なども参加。 | 88, 89 |

■ フォトニックICはまだ試作段階のところが多いのか、MPWサービスを提供する組織は多い。

81. <https://www.ieppix.eu/>
82. <https://europactice-ic.com/services/fabrication/>
83. <https://www.lionix-international.com/photronics/mpw-services/>
84. <https://www.sandia.gov/mesa/nspc/mpw/>
85. <https://www.advmf.com/service/>
86. [https://picmagazine.net/article/117458/Advanced Micro Foundry and Ascenta Technologies launch MPW runs](https://picmagazine.net/article/117458/Advanced_Micro_Foundry_and_Ascenta_Technologies_launch_MPW_runs)
87. <https://pubs.aip.org/aip/app/article/8/4/046104/2882471/Silicon-photonic-integrated-circuit-for-high>
88. https://unit.aist.go.jp/peirc/sipc/sipc_brochure.pdf
89. <https://unit.aist.go.jp/peirc/sipc/themes/index.html>

PIC / 光チップレットのインタフェース標準化

| 標準化対象 | 標準化団体 | 活動内容 | 備考 | 資料 |
|----------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|------------|
| PIC間光インタフェース 光チップレットI/O | Optical Internetworking Forum (OIF) | Computer Optics Interface (COI) COIプロジェクトでは、省電力かつ低遅延なフォトリソ・インタフェースの開発を進めている。 | PCIe、NVLink、UALinkなどの仕様を活用 | 91 |
| | | Linear Drive Pluggable Optics (LPO) PICが直接デジタルデータを受け取る構想。モジュール、チップレット向けI/O 簡素化の鍵。 | | |
| チップレット間光インタフェース | UCIe Consortium | 現状、電気インタフェースの標準化を進めているが、将来的には光インタフェース (UCIe-Pho) の標準化を視野 | | 92, 93, 94 |
| PICや光モジュールとボード間の光インタフェース | COBO | モジュールとボード間の物理光接続、熱・配置含む総合仕の決定を目指す | | 95 |
| ファイバアレイ位置 光導波路端面配置 | SiEPIC/JePPIX/PIXAPP | ファイバアレイ位置、光導波路端面の配置などの共通インタフェース提案。 | | 96, 97 |

■ フォトリソICのI/Fに関する標準はほとんどなく、これから標準化が進められるという状況。

91. <https://www.oiforum.com/technical-work/current-work/#COI>
92. <https://www.uciexpress.org>
93. <https://ayarlabs.com/blog/the-future-of-chip-connectivity-ucie-and-optical-i-o-faqs-explained/>
94. https://www.photonics.com/Articles/UCIe_Consortium_Releases_Updated_Specification/p5/a70205
95. <https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/2009/29/news013.html>
96. https://www.jeppix.eu/wp-content/uploads/2020/12/JePPIX_TechNote_PhotonicsPackaging.pdf
97. <https://www.phix.com/wp-content/uploads/2021/03/PHIX-Design-Guidelines.pdf>

PIC/光チップレットの信頼性・環境条件標準化

| 標準化対象 | 標準化団体 | 活動内容 | 備考 | 資料 |
|--------------------------|---|---|----|---------------|
| PICの信頼性試験 | Telcordia Technologies (Ericsson子会社 - AT&Tの研究部門由来) | 米国の通信業界向けに、信頼性試験、環境試験、寿命予測などに関する標準を策定。主に LD、PD、光モジュール（トランシーバ）が対象だが、フォトニックICの応用例にも一部流用されている (GR-468)。 | | 101 |
| PICの信頼性、環境耐性試験 | アメリカ国防省 (DoD) | MIL-STD-883 では光半導体素子(PD, LDなど)の信頼性試験手順が示されており、フォトニックICの試験でも参考にされることがある。またMIL-STD-810の環境耐性(温度、湿度、振動など)試験がフォトニックICの試験でも参考にされることがある。 | | 102, 103, 104 |
| PIC / 光チップレットの信頼性試験、環境試験 | JEDEC | 現在、フォトニックICに特化した標準は存在しないが JESD22 (加速ストレス試験)、JESD47 (信頼性要求と方法論) などがフォトニックICの試験にも応用され、あるいは拡張対象となっている。光チップレットに関しても、将来的な規格拡張の可能性あり。 | | 105, 106 |
| 光導波路付き基板・光I/Oの材料評価 | Association Connecting Electronics Industries (IPC) | ハンダ付け、プリント基板実装に関する標準 IPC-9701 (機械的耐久性) などを応用し、フォトニック・パッケージングに向け、光導波路付き基板・光I/Oの材料評価基準を提案中。 | | |
| 光チップレットの熱/信頼性/電気的適合性 | UCIe Consortium | 現状は電気インタフェース規格中心。将来的には光チップレット規格への拡張が予想される。 | | 107 |

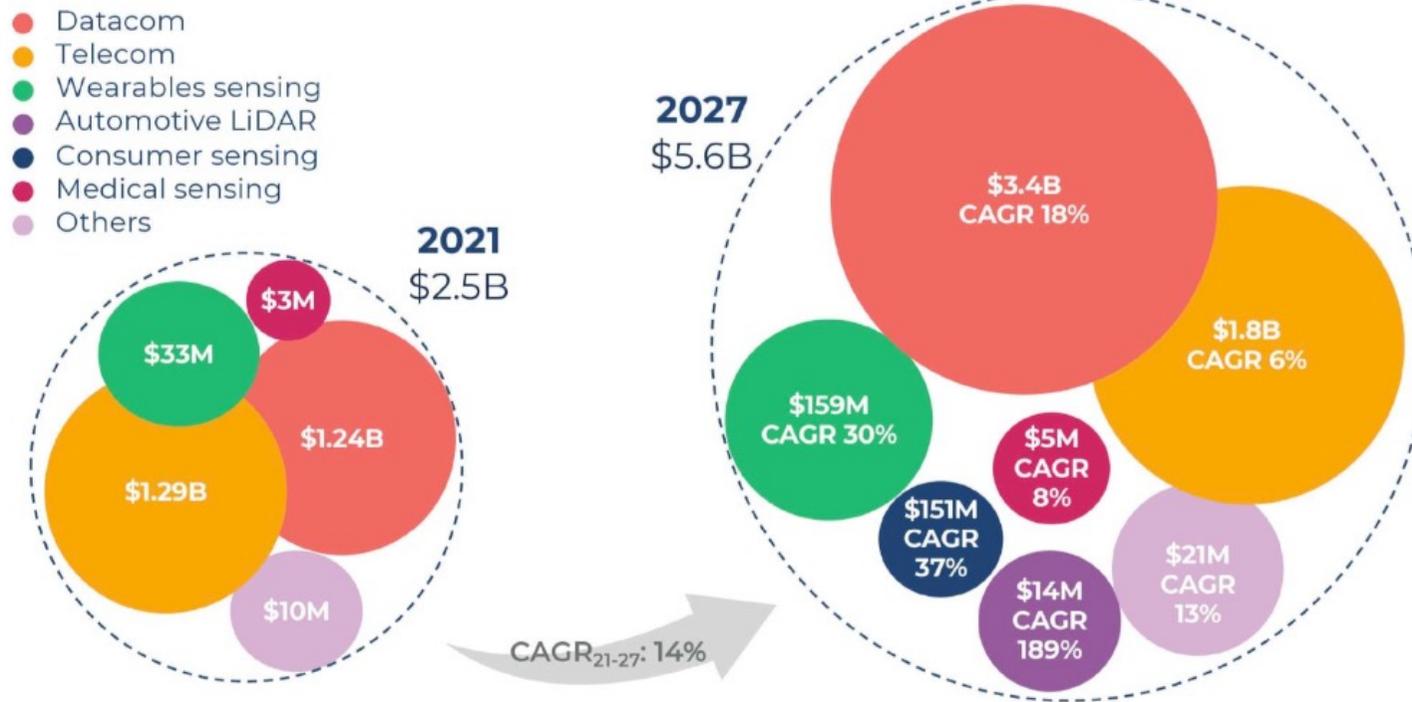
- フォトニックICの信頼性/環境条件に関する標準はほとんどなく、製品は電気ICの標準を応用している状況。これからフォトニックICに適した標準化が進められる。

101. https://www.semiconductor-today.com/news_items/2025/mar/openlight-260325.shtml
102. <https://landandmaritimeapps.dla.mil/programs/MilSpec/ListDocs.aspx?BasicDoc=MIL-STD-883>
103. http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0800-0899/MIL-STD-810G_12306/
104. <https://www.vlcphotonics.com/how-to-test-pics-reliability/>
105. <https://www.desolutions.com/testing-services/test-standards/jesd22/>
106. <https://attend.ieee.org/repp/wp-content/uploads/sites/244/23meile.pdf>
107. https://www.photonics.com/Articles/UCIe_Consortium_Releases_Updated_Specification/p5/a70205

2021-27 InP 光デバイス アプリ別市場規模予測

2021-2027 INP PHOTONICS DEVICE MARKET FORECAST SPLIT BY APPLICATION

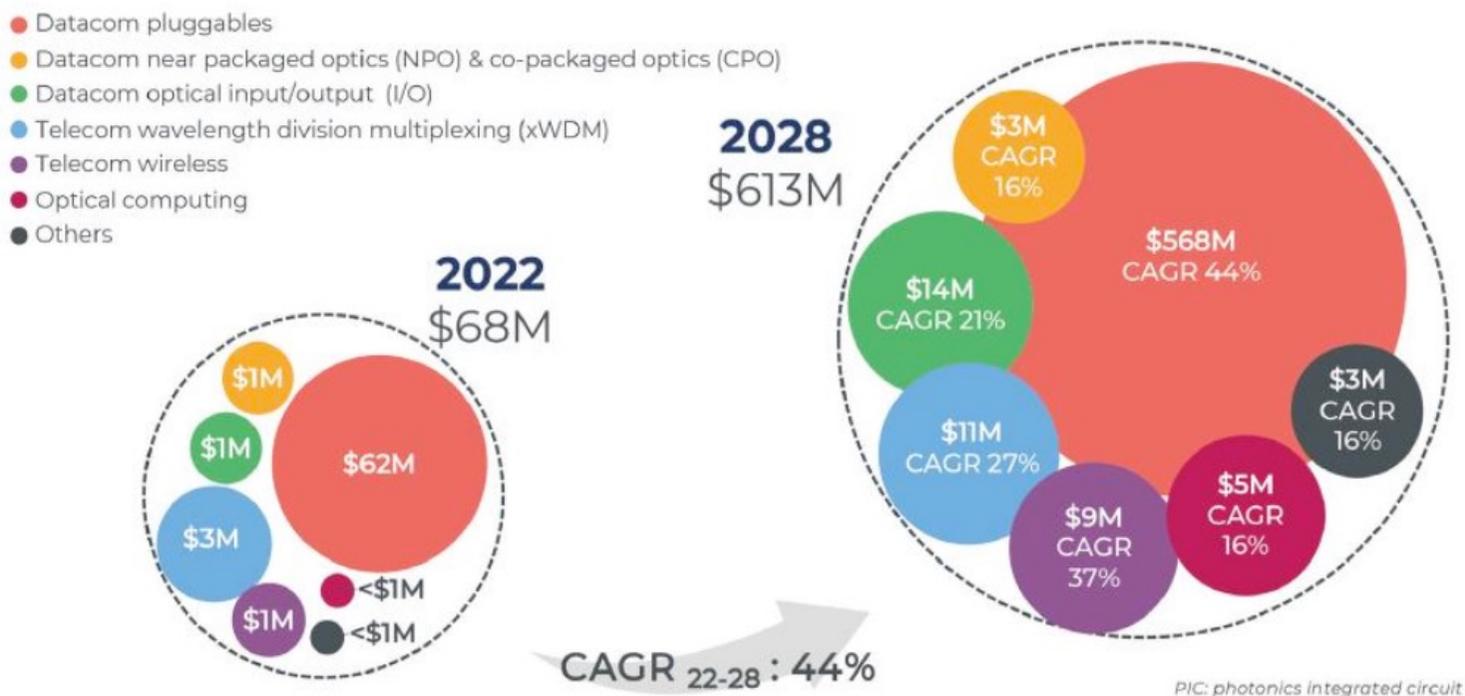
Source: InP 2022 report, Yole Intelligence, 2022



2022-28 シリコンPICダイ アプリ別市場規模予測

2022-2028 silicon PIC dies revenue growth forecast by application

(Source: Silicon Photonics 2023, Yole Intelligence, November 2023)



9x in 6 years

Increasing importance of heterogeneous integration

Si Photonics のアプリ別市場割合

Chapter 9 Global Silicon Photonics Market Analysis Forecast by Application

9.1 Global Silicon Photonics Segment by Application

9.1.1 Global Silicon Photonics Market Revenue Share (%), by Application, 2022

Fig 45. Global Silicon Photonics Market Revenue Share (%), by Application, 2022

