



ヘテロジニアスインテグレーション
ロードマップ
2019年度版

第9章: インテグレーションした
フォトニクス

<http://eps.ieee.org/hir>

HIR は、技術評価のみを目的として考案されており、個々の製品または機器に関連する商業上の考慮事項とは無関係です。

このロードマップでは、元のソースから抜粋した資料および図の使用に感謝します。

図と表は、元のソースの許可を得てのみ再利用する必要があります。



第9章: インテグレーションしたフォトニクス

この章は準備中で、2019年末に予定されているバージョン1.1のロードマップに統合されます。その代わりに、次の要約と一連のスライドがあり、統合されたフォトニクスの現在の状態と、今後10～15年間に必要な進歩に関連するいくつかの情報が示されています。

エグゼクティブサマリー

モノのインターネット (IoT) の台頭と、データ、ロジック、アプリケーションのクラウドへの移行により、グローバルネットワークの要件は変化しています。これらの変化する要件は、50年以上に渡って私たちが享受してきた機能ごとのサイズ、コスト、および電力の進歩のペースを維持しながら、対応する必要があります。この進展は主に、ムーアの法則によるCMOSエレクトロニクスのスケーリングの利点に基づいていました。物理学の限界に達し、ムーアの法則のスケーリングが遅いため、物理学の限界に達しているため、これらの分野で継続的な進歩を実現するための鍵となる要因は、フォトニクスの伝送、処理、さらには光学ベースのセンサーによるデータの生成です。フォトニクスのメリットをグローバルネットワークのファブリックにインテグレーションするには、多くの特定の課題があります。

ただし、ソリューションは、フォトニックコンポーネントのパッケージングだけでは実現できません。エレクトロニクス、フォトニクス、プラズモニクスのパッケージ化は、より高いパフォーマンス、より高い信頼性、セキュリティの向上、待ち時間の短縮、機能あたりのコストの継続的な削減に対する拡大する要件を満たすために、これらの大きな課題に対処する必要があります。フォトニック集積回路 (PIC) のパッケージングは、エレクトロニクスICのパッケージングで直面するのと同じ課題に直面し、アクティブおよびパッシブフォトニックエレメントと必要なエレクトロニクスの両方をインテグレーションするという複雑さが増します。可能な限り業界は、個別のPIC回路のパッケージ化のコストと市場投入までの時間を削減し、PIC回路と他のフォトニックコンポーネントを複雑な3D SiPにヘテロジニアスインテグレーションを通じて組み込むために、エレクトロニクス向けに開発されたパッケージングテクノロジーを採用および適応する必要があります。



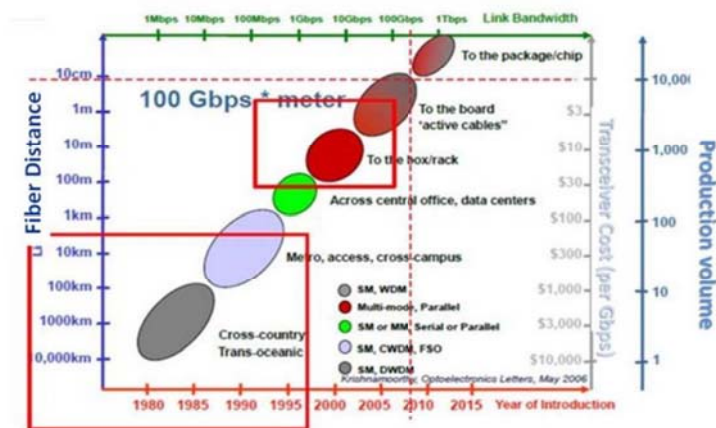
Heterogeneous Integration Roadmap

第 9章: インテグレーションしたフォトニクス

TWG Chair: Bill Bottoms PhD
 TWG Co-Chair: Professor Amr Helmy




フォトンがトランジスタに近づくにつれ、
 生産量が急速に拡大し、コストが削減されます



Source : Brocade











フォトニクスデバイスのパッケージ化

システムへの、またはシステムからの、またはその両方での光子経路を提供するという共通の要件を共有する、光子を含む多数のデバイスがあります。以下が含まれます：

- 発光ダイオード (LED)
- レーザーダイオード
- プラズモニックフォトンエミッター
- フォトニック集積回路 (PIC)
- MEMS光スイッチングデバイス
- カメラモジュール
- 光変調器
- アクティブな光ケーブル
- E to OおよびO to Eコンバーター
- 光学センサー (フォトダイオードおよびその他のタイプ)
- WDMマルチプレクサーおよびデマルチプレクサー

多くは、特殊な材料とシステム統合（パッケージング）プロセスおよび機器を必要とする、固有の熱的、電気的、及び機械的特性を持っています。



新登場のインテグレーションフォトニックソリューションの選択

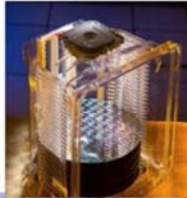
さまざまなヘテロジニアスインテグレーションの課題への対処








100GbpsのSiフォトニクスが登場 Tbpsに対する市場の需要はそれほど遅れていな



Intel integrated 4x25Gbps technology, with hybrid silicon lasers

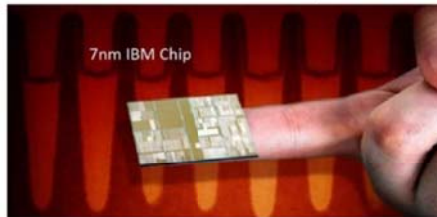
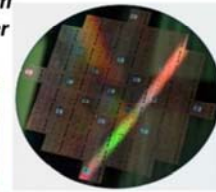


500 Gb/sec Infinera InP transceiver



300mm vs 450mm wafers

Dies attached to a 300mm photonic interposer wafer at SUNY Poly



7nm IBM Chip


100GbpsのSiフォトニクスが登場



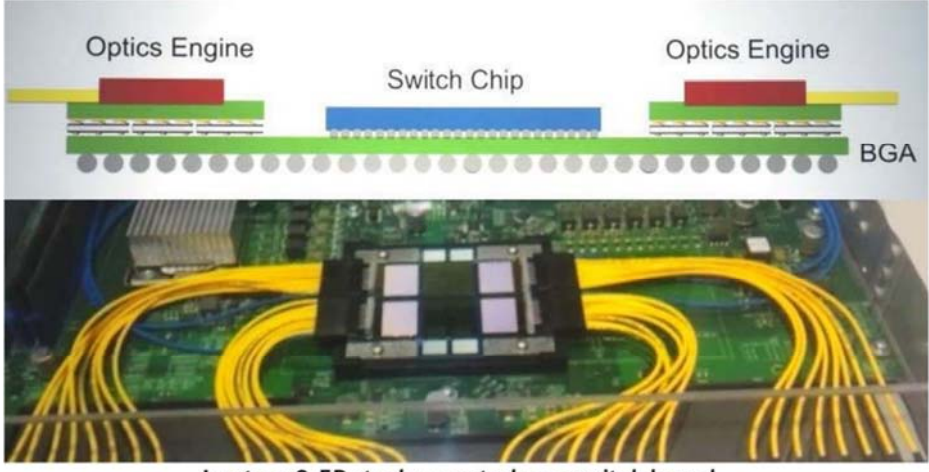
Tbpsはそれほど遅れていません

フォトニクスは遅延を改善し、必要な帯域幅の物理密度を提供し、電力要件を劇的に削減します












インテグレーションしたフォトニクススイッチ



Luxtera 2.5D stack mounted on a switch board

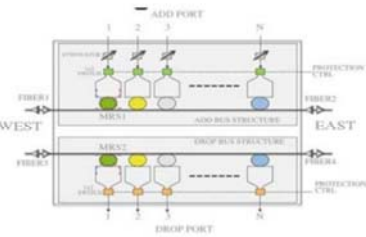








フォトニクスは5Gの主要コンポーネント

(第12章参照)

低コスト、小型、低電力の統合フォトニクスデバイスは、長距離用に設計された光モジュールに取って代わります。これには多くの利点があります：


- 制御電子回路との容易な統合による大規模なインテグレーションスイッチングデバイス
- CMOS生産インフラストラクチャを使用した小型化、大量生産、高歩留まり、低コスト
- 新しいインテグレーションスイッチングデバイスであるMini-ROADMは、シリコンフォトニクスを使用して、すべてのWDMチャンネルとADD / DROPローカルチャンネルのMUX / DEMUXを実行します。

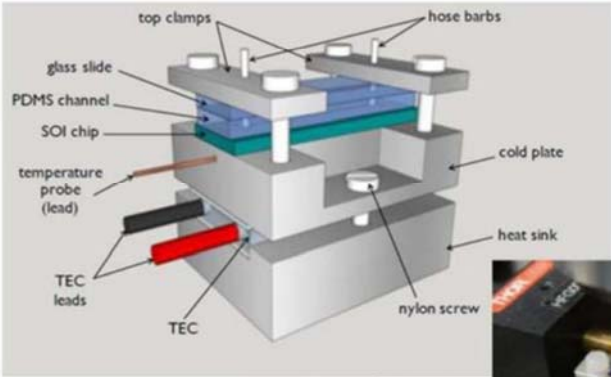


Mini-ROADM device

マイクロフルイディクと温度制御のインテグレーション Integration of microfluidics and temperature control








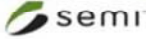





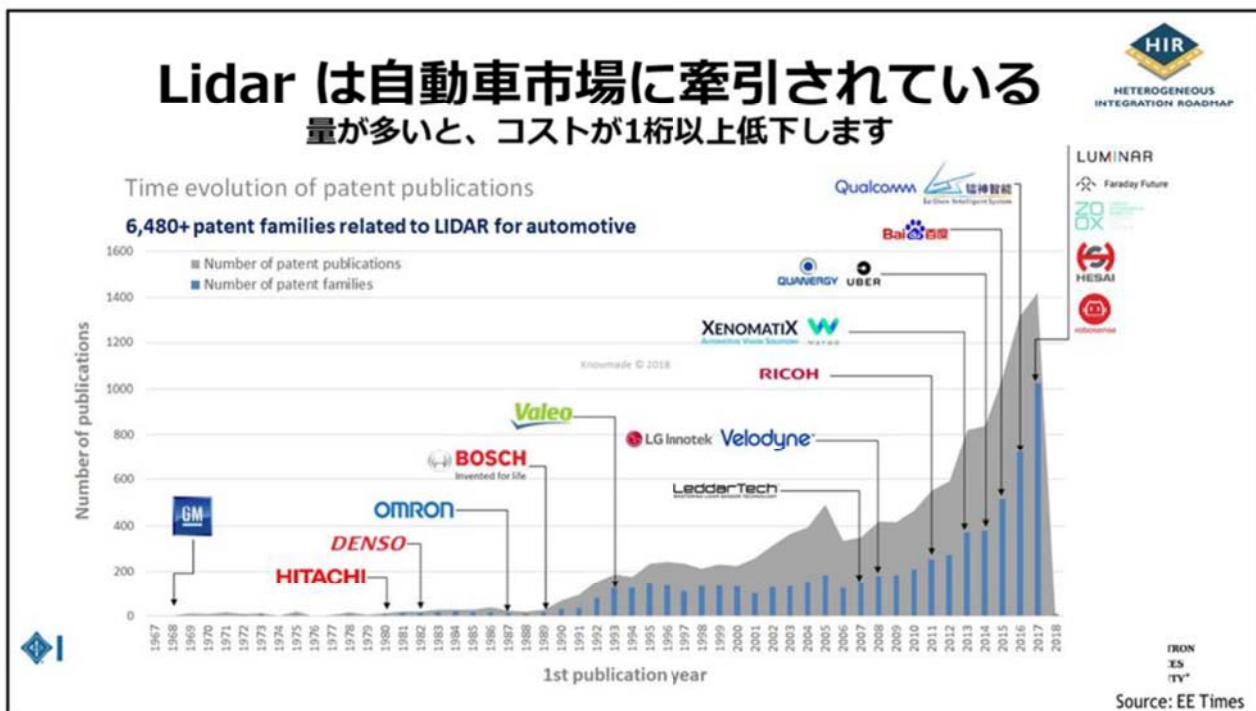
光センサー

光学センサーの研究開発は、パッケージ要件が異なる以下の4つのカテゴリーのセンサーで急速に進んでいます。

1. 分光法ベース
2. キャプチャベース（機能化されたキャプチャサーフェスまたはボリューム）
3. ガスベースの検出（大気およびその他のガス）
4. 液体ベース





光検出と広範囲の需要が高まっています。ボリュームはコストによって制限されます



拡張範囲用のLIDARセンサー：64ビーム、> 200m範囲だったの\$3, 500の価格-市場で最も安価な高性能センサー。






フォトリソグラフィのインテグレーションプラットフォーム

フォーム

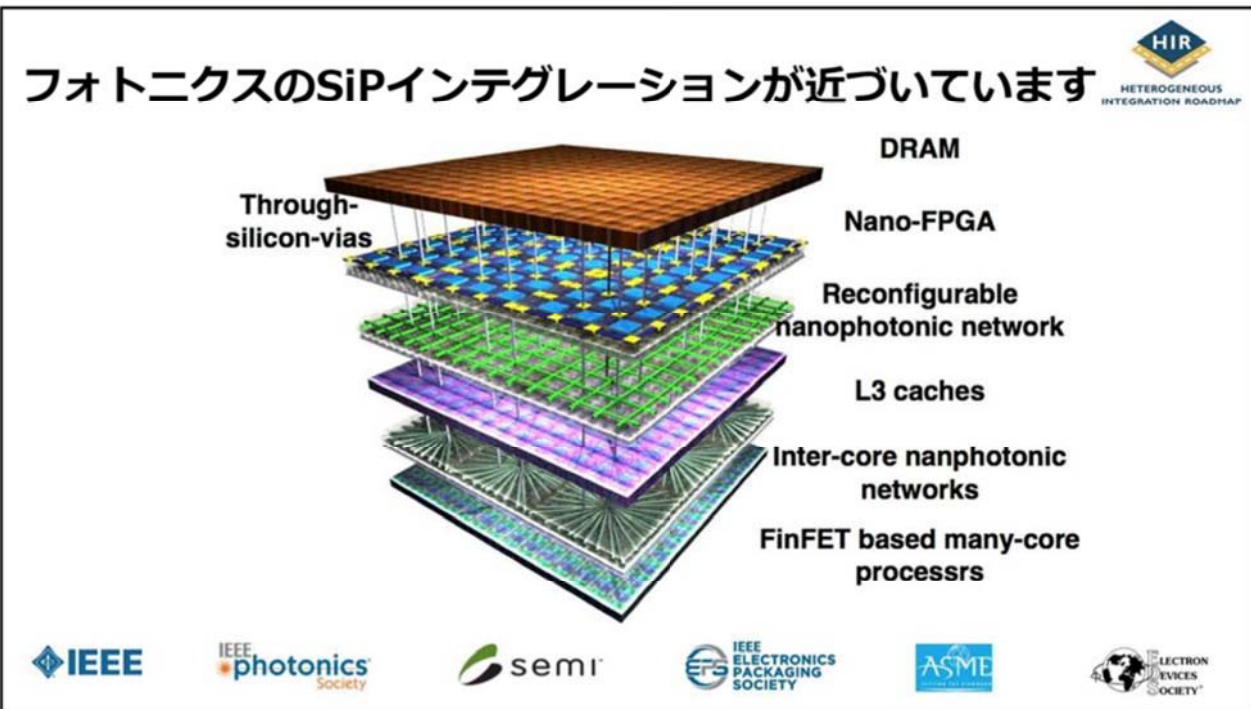
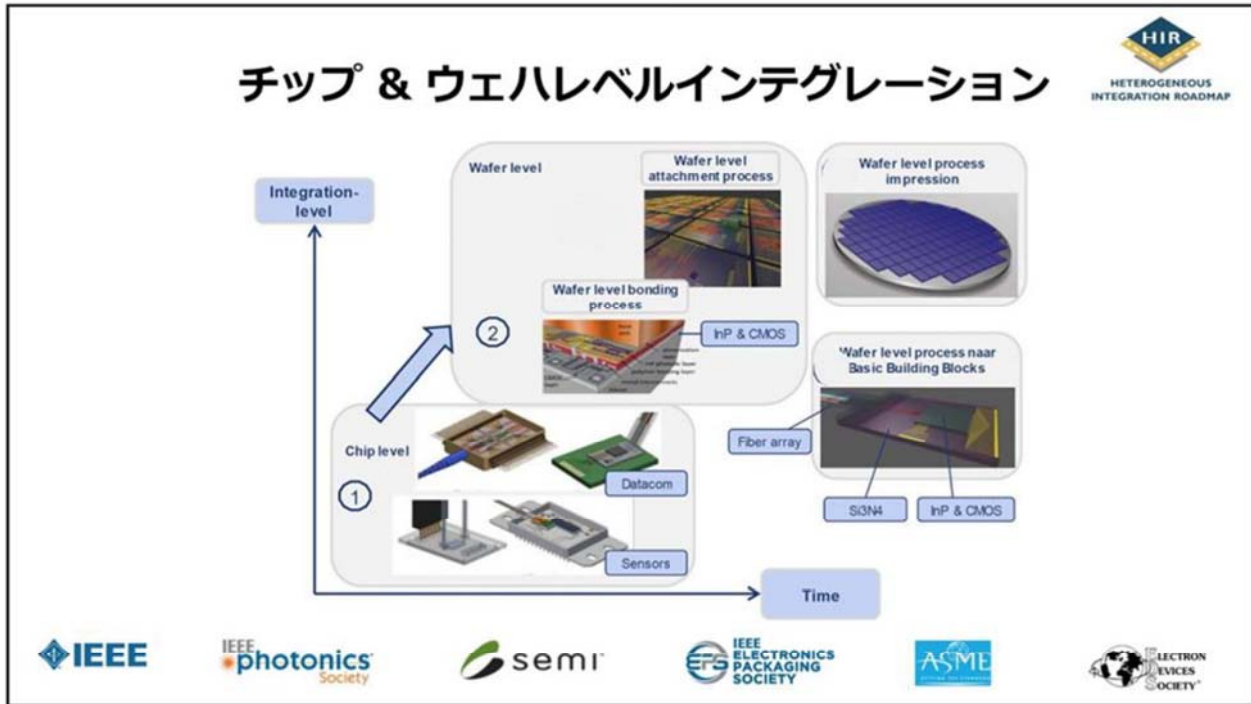
可能な限り電子技術を使用する

1. チップレベルのインテグレーション
電気回路とフォトニック回路を1つの製品にインテグレーションし、順次チップ接続プロセスを行います。このプロセスは遅く、費用がかかります。
2. ウェハレベルのインテグレーション
ウェハレベルでのフォトニック回路の製造プロセスと組み立てはすでに始まっており、成熟するにつれてコストが削減されます。
3. システムインパッケージのインテグレーション
パッケージレベルでシステムにインテグレーションされたコンポーネントとサブシステムは、最小の遅延、コスト、電力で最高の機能密度とパフォーマンスを提供しますが、克服するのがより難しい課題があります。










潜在的な光学テストの問題

フォトニックシステムのテストは複雑です (第17章を参照)

<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>アクティブアライメント</td></tr> <tr><td>対応力</td></tr> <tr><td>検出器の帯域幅</td></tr> <tr><td>感度</td></tr> <tr><td>受信機スペクトル幅</td></tr> <tr><td>信頼性</td></tr> <tr><td>EYE (増幅、ジッターなど)</td></tr> <tr><td>レーザーレーン/チャンネル幅</td></tr> <tr><td>光結合欠陥</td></tr> <tr><td>感度 (4x)</td></tr> <tr><td>応答時間 (遅延/待ち時間)</td></tr> <tr><td>周波数応答</td></tr> <tr><td>分極</td></tr> <tr><td>カップリング効率</td></tr> <tr><td>クロストーク</td></tr> <tr><td>ダーク電流</td></tr> </table>	アクティブアライメント	対応力	検出器の帯域幅	感度	受信機スペクトル幅	信頼性	EYE (増幅、ジッターなど)	レーザーレーン/チャンネル幅	光結合欠陥	感度 (4x)	応答時間 (遅延/待ち時間)	周波数応答	分極	カップリング効率	クロストーク	ダーク電流	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>光振幅変調</td></tr> <tr><td>分極</td></tr> <tr><td>波長</td></tr> <tr><td>光パワー</td></tr> <tr><td>波長間隔</td></tr> <tr><td>光変調率</td></tr> <tr><td>BER - アイマスク (4x)</td></tr> <tr><td>EYE (増幅、ジッターなど)</td></tr> <tr><td>レーザーレーン/チャンネル幅</td></tr> <tr><td>レーズンくしきい値変動</td></tr> <tr><td>周波数スペクトル変動</td></tr> <tr><td>光パワー変動</td></tr> <tr><td>コヒーレンス時間</td></tr> <tr><td>光路欠陥 (光結合欠陥: 表面欠陥: コア欠陥のずれ)</td></tr> <tr><td>パワー出力 (4x)</td></tr> <tr><td>システム損失 - 結合</td></tr> <tr><td>消光比</td></tr> <tr><td>信頼性</td></tr> </table>	光振幅変調	分極	波長	光パワー	波長間隔	光変調率	BER - アイマスク (4x)	EYE (増幅、ジッターなど)	レーザーレーン/チャンネル幅	レーズンくしきい値変動	周波数スペクトル変動	光パワー変動	コヒーレンス時間	光路欠陥 (光結合欠陥: 表面欠陥: コア欠陥のずれ)	パワー出力 (4x)	システム損失 - 結合	消光比	信頼性
アクティブアライメント																																			
対応力																																			
検出器の帯域幅																																			
感度																																			
受信機スペクトル幅																																			
信頼性																																			
EYE (増幅、ジッターなど)																																			
レーザーレーン/チャンネル幅																																			
光結合欠陥																																			
感度 (4x)																																			
応答時間 (遅延/待ち時間)																																			
周波数応答																																			
分極																																			
カップリング効率																																			
クロストーク																																			
ダーク電流																																			
光振幅変調																																			
分極																																			
波長																																			
光パワー																																			
波長間隔																																			
光変調率																																			
BER - アイマスク (4x)																																			
EYE (増幅、ジッターなど)																																			
レーザーレーン/チャンネル幅																																			
レーズンくしきい値変動																																			
周波数スペクトル変動																																			
光パワー変動																																			
コヒーレンス時間																																			
光路欠陥 (光結合欠陥: 表面欠陥: コア欠陥のずれ)																																			
パワー出力 (4x)																																			
システム損失 - 結合																																			
消光比																																			
信頼性																																			










課題と潜在的なソリューション

<p>困難な課題</p> <ul style="list-style-type: none"> • 帯域幅の物理密度 • 熱管理 • SiP, 3Dヘテロジニアス インテグレーションのテストアクセス • パッケージへのフォトニックスイッチング • コスト 	<p>潜在的なソリューション</p> <ul style="list-style-type: none"> • シングルモードWDMファイバー • 新しい素材。複数の温度ゾーン • BIST、実行中の継続的なテスト、インテリジェントな冗長性と自己修復 • チップ上のWDM mux - demux • 大量生産と強力で競争力のあるサプライチェーン
---	---








課題と潜在的なソリューション



これらの課題は、ヘテロジニアスイнтеグレーションなしでは満たすことができません




将来の統合フォトニクスシステムの重要な制限要因










- 協調設計および協調シミュレーションツール（13章）
- 手頃なコストと適切な歩留まりでのプロトタイプ
- 温度に安定なフォトニックコンポーネント（レーザー、変調器など）
- 光学部品の小型化（電子機器に近い）
- 低コストでフォトニクスをトランジスタに近づける
- コンピューターでの設計検証
- マルチプロジェクトウェアが利用可能になり、これはもっと来る
- プラズモニクス、量子ドットレーザー、プラズモニックレーザー
- レーザー、変調器、0-to-E及びE-to-0などの新しいデバイス
- システムサーキットボード、パッケージ、及びおそらくチップ上の新しいソリューション。低損失コネクタと導波管が必要。






新しい機能を備えた統合フォトニクスのための 多くの新しいコンポーネント/テクノロジー は、開発の高度な状態にあります

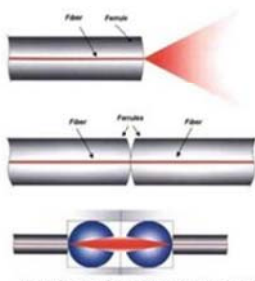









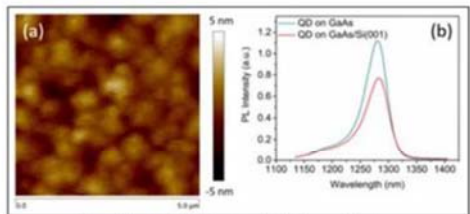
多くの新しいデバイスがインテグレーションフォトニクス の困難な課題に取り組んでいます



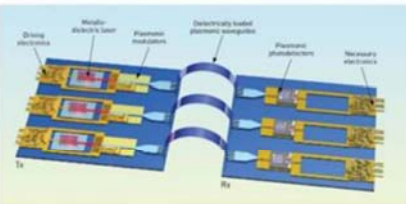
Plasmonic Laser W. Zhu et al.
NIST Science Advances (2017)



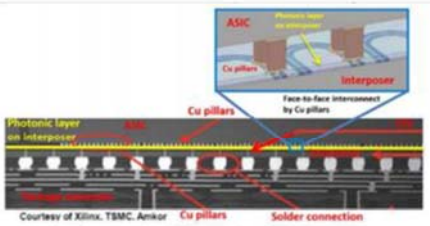
Low-loss Photonic Connectors



Quantum Dot Laser S. Chen et al.
Vol. 25, No. 5 | 6 Mar 2017 | OPTICS EXPRESS 4632



Plasmonic Communication J. Leuthold et al.
Optics & Photonics News(2013), pp. 28-35.



Electronic/Photonic Interposer
Courtesy of Xilinx, TSMC, Amkor

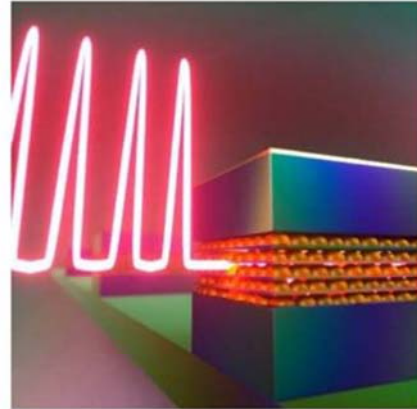


量子ドットレーザー

アドバンテージ

- 優れた温度安定性
- MBEでSiに堆積可能
- 従来のジャンクションレーザーよりも電力効率が高い
- CMOS処理に対応
- 広い動作温度範囲

量子ドットは、持続時間が1ピコ秒未満の超短パルスを受動的に生成するモードロックレーザーです。

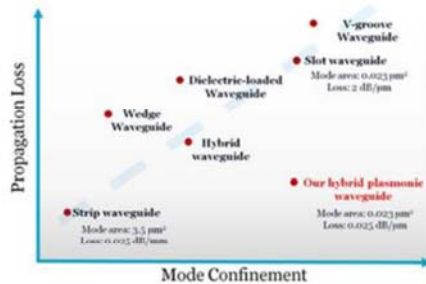


Credit: Peter Allen
S. A. Kazakis et al, Optical properties of InGaN thin films in the entire composition range, *Journal of Applied Physics* (2018)

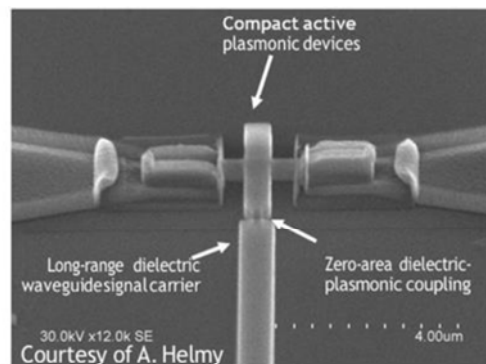


プラズモニクス

効率的なインテグレーション- Good Mode Confinement



- ハイブリッドプラズモニクスによるナノスケールモードの位置特定と強化された光-物質相互作用
- シリコンフォトニクスとプラズモニクス間の効率的な統合
- 同じテクノロジープロセス内で高度に調整可能な吸収
- 0.2nAのダーク電流と1.2nWの静的電力消費で、長さ5μmの光検出器内で非常に高感度な検出

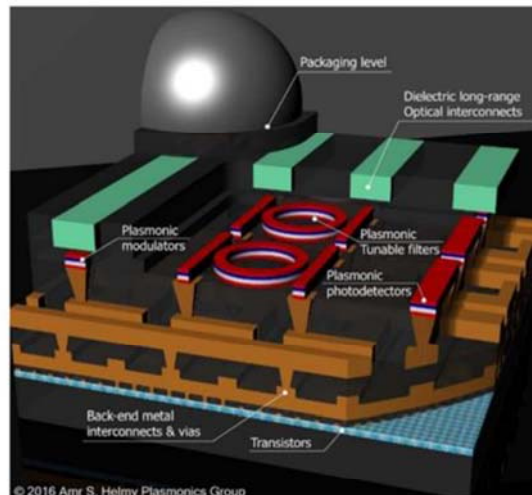


✓ 既存の電子機器の上での非侵入型バックエンドインテグレーションのためのアモルファス材料の低温処理



プラズモニクスはITにおける電子/光統合のための革新的であろう

- モジュール間の高帯域幅情報トランスポート
- 光学系とバックエンドエレクトロニクス間のスケールミスマッチの低減
- 垂直統合（ダイサイズの増加なし）
- 既存の製造技術への非侵襲的な変更
- 材料の互換性や熱収支などの統合の課題に対処する必要がある



© 2016 Amir S. Helmy Plasmonics Group



SiPの信頼性に関する主要な属性と課題



選択されたテーブル属性

- 各コンポーネントの熱負荷
- 温度安定性要件
- 各コンポーネントの応力感度
- 振動に対する感度
- パッケージ内容のテストアクセス
- 各コンポーネントのCTE
- コンポーネントの寸法仕様
- 電力供給（電圧/電流/ノイズ/制御）

システムの信頼性の課題

- 光路の汚染
- シングルモードファイバライメントのコスト
- 大型の光学コンポーネント
- オンチップレーザーなどからのホットスポット
- CTEの不一致（光学ベンチコンポーネントの場合）
- 封入剤のガス放出、ダイアタッチ、アンダーフィルなど。
- コンポーネントの温度感度





結論

インテグレーションされたフォトニクスは重要なイネーブラーであり、急速な成長を続けるデータおよびデータトラフィックの急増の要求を満たすために必要な低電力、低コスト、低レイテンシ、及び増加した帯域幅密度とパフォーマンスを提供します。

ビッグデータ、データ分析、人工知能、ニューロモーフィックおよび量子コンピューティングをサポートするために必要な物理的な帯域幅密度ははるかに大きくなり、フォトニクスは今後数十年間これらの新興技術をサポートするロジックに近づき続けるでしょう。

統合フォトニクスのパフォーマンスと密度を向上させなければ、この未来の見方は実現できません。

