量子情報技術のスケーラブルな開発に向けた量子光デバイスの結合方法

2025.03.01

NQC体験型プログラム
青山慶太朗

量子情報技術

量子計算

誤り耐性型量子コンピューター

量子通信

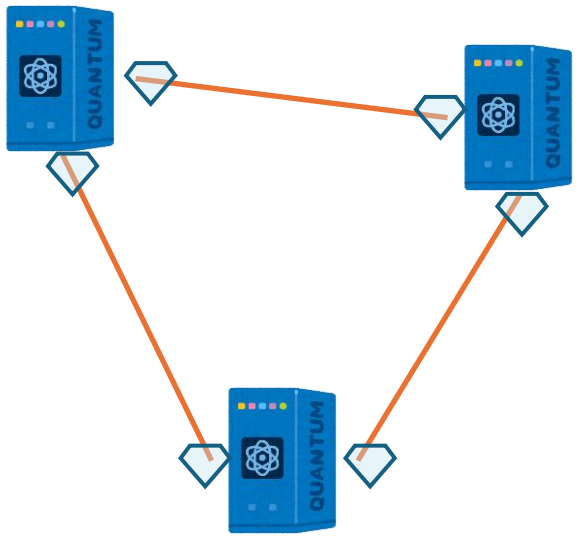
量子暗号通信・量子中継

量子センサー

医療・自動運転・資源探査

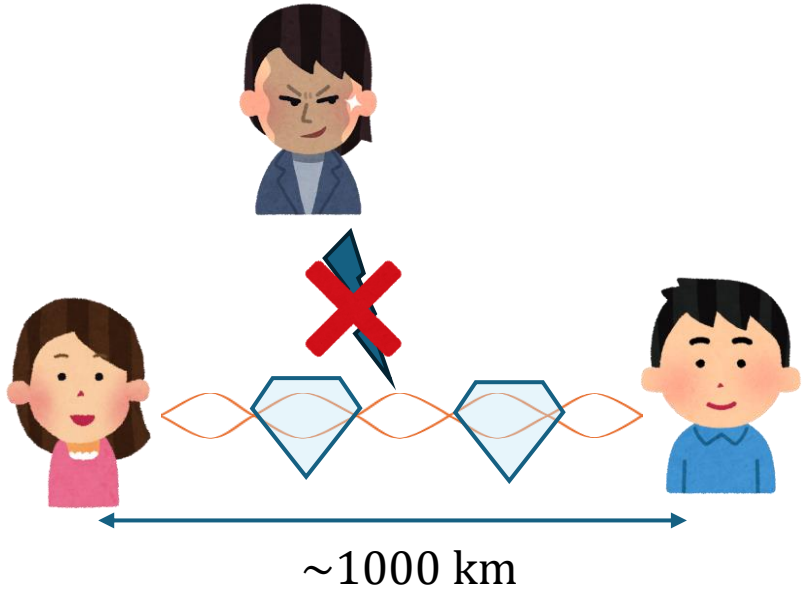
量子デバイスどうしの接続が必要

量子計算



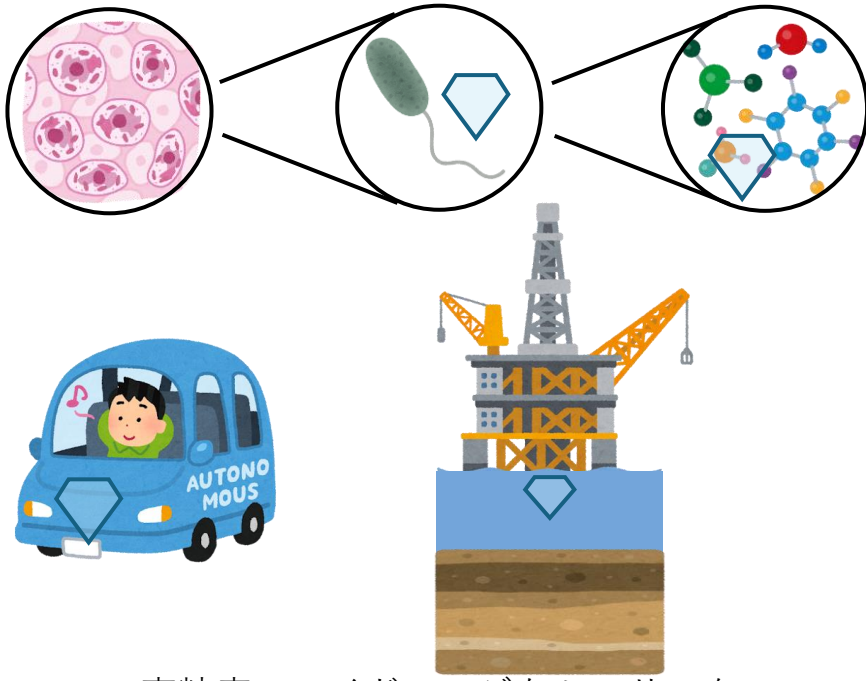
100万量子ビットを備えた
誤り耐性のある分散型量子コンピューターを構築

量子通信



量子中継器を使用した
絶対的に安全な遠距離通信網を整備

量子センサー



高精度でワイドレンジなセンサーを
医療・自動運転・資源探査に応用

量子デバイスどうしの接続が必要

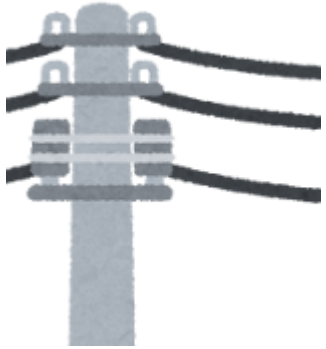
古典的な電子デバイスの結合

直接的な接触による結合

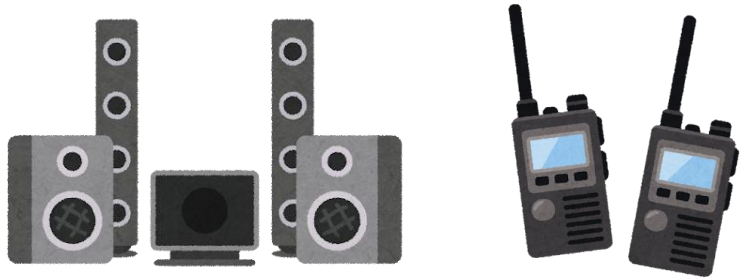
ワイヤーボンディング

はんだ付け

電磁場を介した結合



インダクティブ結合(変圧器など)

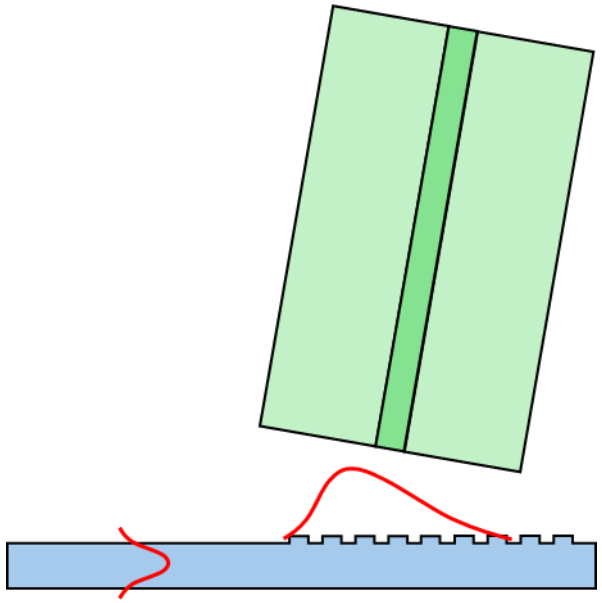


キャパシティブ結合(オーディオ・無線機器など)

ナノスケールの量子デバイスの結合

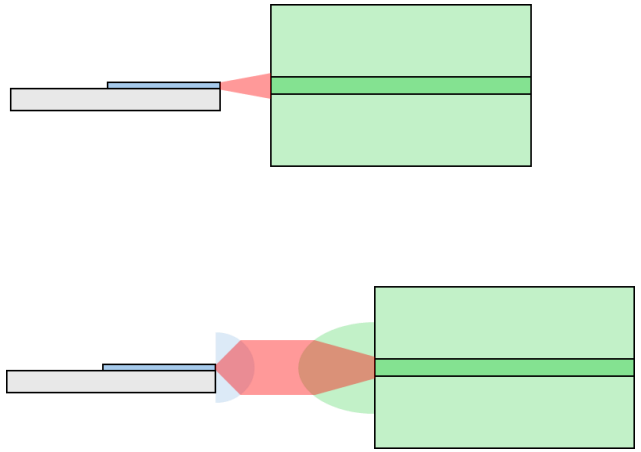
量子デバイスは主に光で信号を伝送→光導波路と光ファイバーの光の結合

グレーティング結合



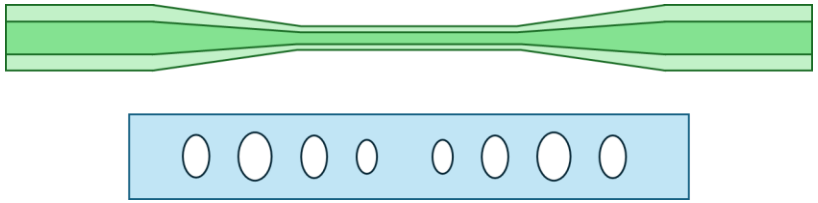
周波数依存性あり

エッジ結合



精密なアライメントが必要

エバネッセント結合

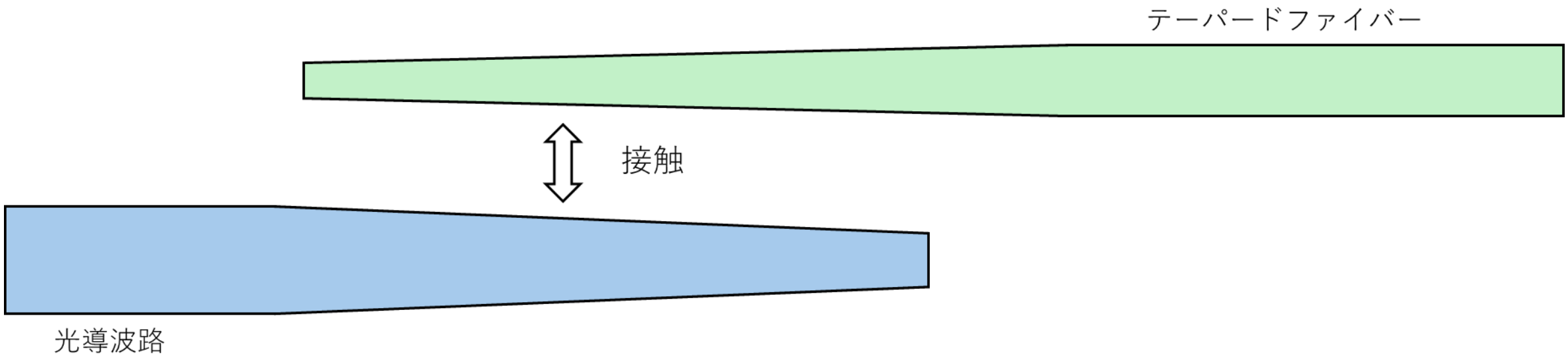


精密なアライメントが必要

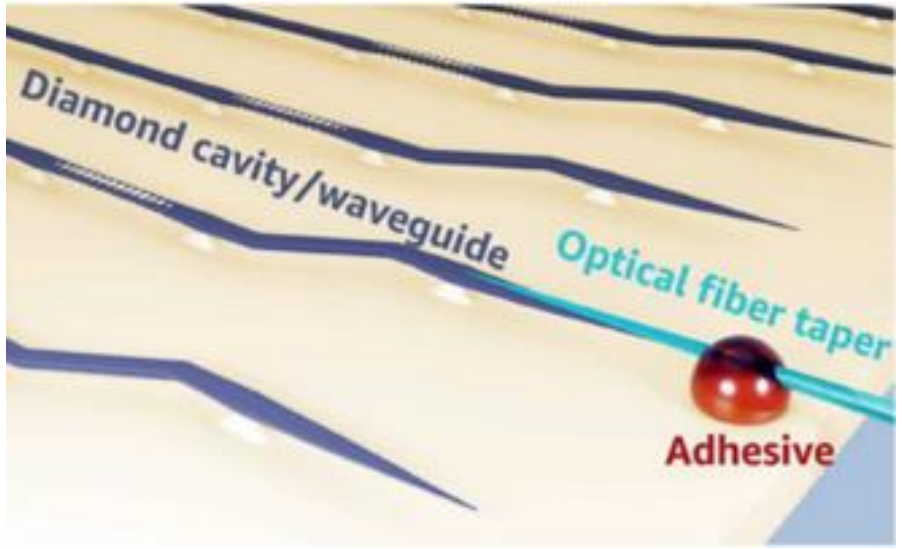
どの結合方法にも一長一短あり

断熱結合

テーパードファイバーと光導波路を接触



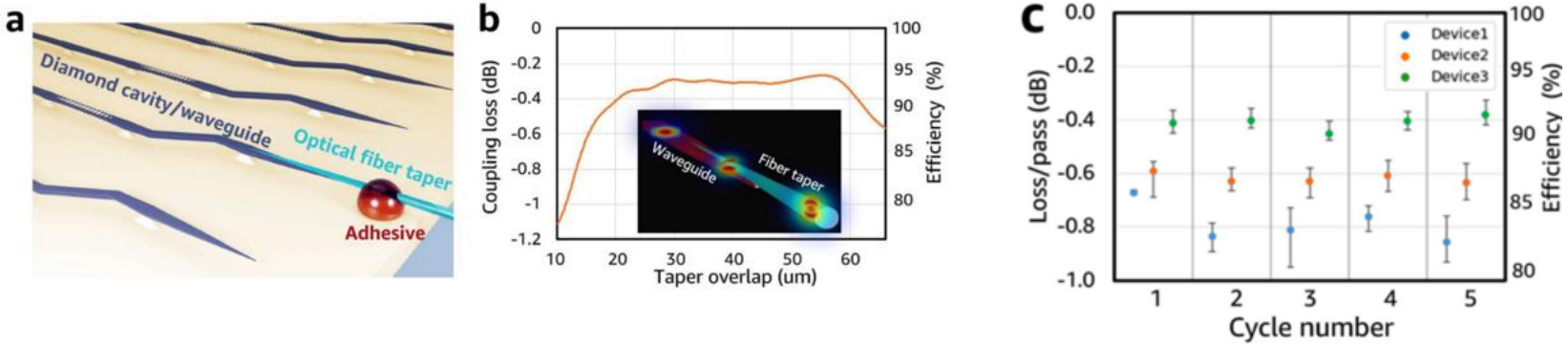
光結合のパッケージング

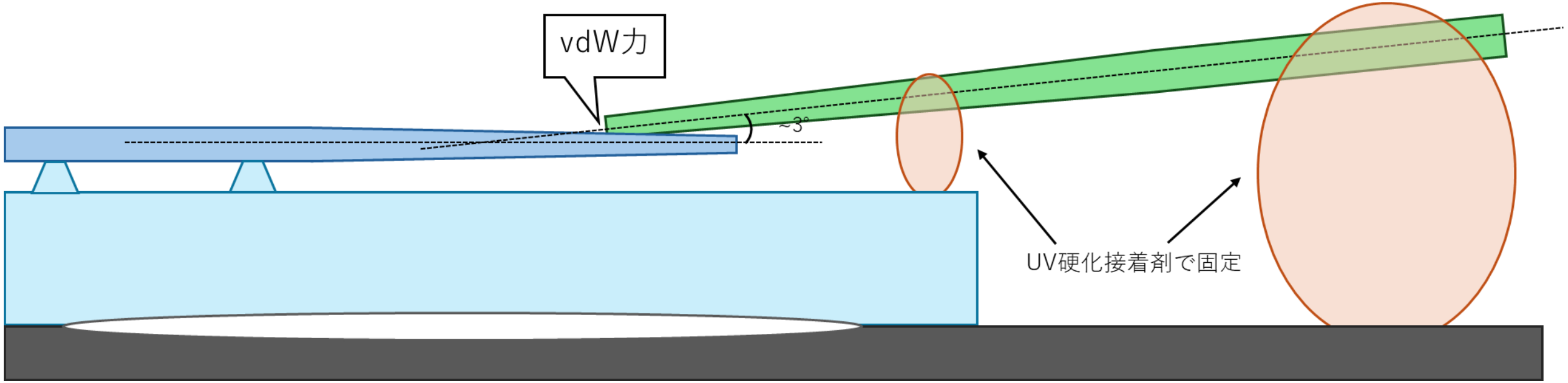


- **高い結合効率**
  1 dB未満の結合効率
- **広帯域に対応**
  信号の周波数で結合効率が大きく変化しない
- **ロバスト性のあるパッケージ**
  冷凍機内での熱収縮に対して堅牢で真空チャンバー内での精密なアライメントが不要
  機械振動や冷却サイクルによる影響を受けにくい

Zeng et al. Appl. Phys. Lett. 123, 161106 (2023)に記載の光結合パッケージング

接合面に接着剤が無いため，接着剤の光学特性を考慮する必要が無い．(図(a))
境界面での光の散乱によって，損失が発生する．(0.4dB)
極低温下でも接合および効率は安定している．
テーパーファイバーの重なり長さが25~55μmで最大効率．(図(b))
数回の温度変化(300~77K)を経過しても，効率はほとんど変化しない．(図(c))




vdW力
~3°
UV硬化接着剤で固定

従来手法の比較

	結合効率	周波数依存性	環境へのロバスト性
グレーティング結合	△ (~ -3 dB)	△ ($\Delta\lambda = 50$ nmで -1 dB)	○ (光ファイバーを 回折格子上に配置)
エッジ結合	△ (~ -2 dB)	○	× (3次元方向の アライメントが必要)
エバネッセント結合	○ (~ -0.1 dB)	× ($\Delta\lambda = 12$ nmで -3 dB)	× (波長オーダーに近接)

各項目はトレードオフの関係
光結合の目的やコストによって使い分け

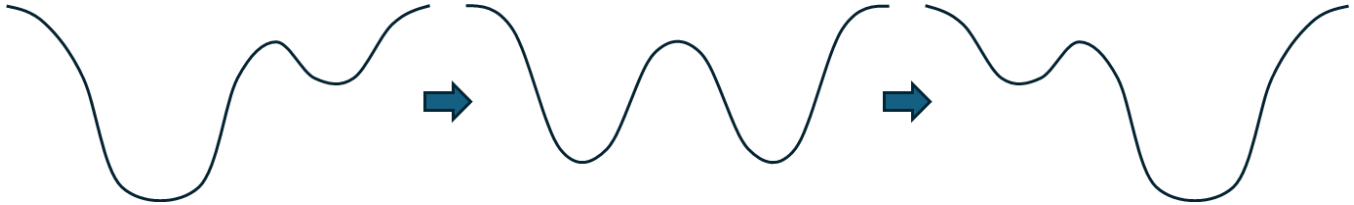
断熱結合
全ての項目を同時に満たす

断熱結合

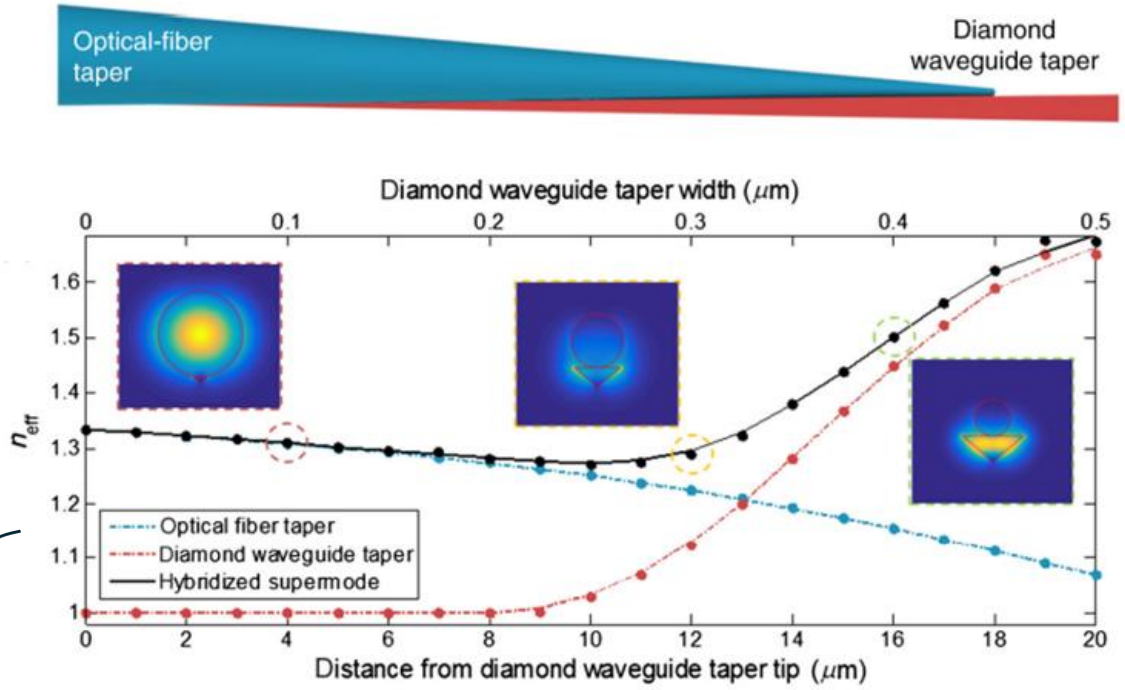
光のモードフィールドの形状が少しずつ変形

光ファイバーの伝搬モードから導波路の伝搬モードにゆっくりと遷移

実効屈折率の高さ≒ポテンシャルの深さ



結合系の断面におけるポテンシャルの変化のイメージ



MICHAEL J. BUREK et al, PHYS. REV. APPLIED 8, 024026 (2017)