

偏光制御フォトニックナノ構造の評価に関する研究

林 文博¹, 立川 冴子²

¹東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 岩本研究室

²東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 野村研究室

著者紹介

林 文博: 博士課程では微細構造による光制御に関する研究を行っている。本研究では素子の設計・作製と光学評価を担当した。

立川 冴子: 博士課程では微細構造を用いた熱輸送に関する研究を行っている。本研究では収束インビームを用いた素子の加工及び構造評価を担当した。

要旨

偏光が空間分布を持つベクトルビームは様々な分野で応用が検討されており、その生成手法の探索が活発に行われている。微小光デバイスによる同ビームの生成はその応用範囲は大きく拡大する期待されているが、様々なベクトルビームを微小光デバイスにより自在に生成する手法は未だ確立されていない。本稿ではベクトルビームを自在に生成する微小光デバイスの実現へ向けた偏光状態を制御するためのフォトニックナノ構造に関する検討と評価の結果を報告する。

I. 研究背景・目的

従来の一様な偏光分布を持つスカラービームとは異なり、空間的に変化する偏光分布を有する光ビームはベクトルビームと呼ばれ、光トラップや光ピンセット[1]レーザー加工[2]、そして古典・量子光通信[3,4]への応用が見出されている。同ビームの中には、その偏光分布がトポロジーを用いて特徴付けることが可能なものも存在し、光の持つトポジカルな性質に対する興味や、固体内のトポジカル準粒子との相互作用等の観点からも大きく関心を集めている[5]。このような光ビームの生成は q -プレートに代表されるバルク光学素子を用いて多く実証されている一方、微細化や集積化に優れ、実用面でも魅力的なプラットフォームであるオンチップデバイスを用いた生成手法はあまり知られておらず、未探索の領域が多く残されている。ベクトルビームに関する知見を深め、新たな応用可能性を拓くためにもオンチップデバイスによる多種のベクトルビームを生成する手法の確立が熱望されてい

る。

一般的に、ベクトルビームは複数の偏光状態と空間位相分布が互いに異なるスカラービームの重ね合わせ状態として得られる。偏光状態と空間位相分布はそれぞれ光のスピン角運動量(s)と軌道角運動量(l)と関連しており、同ビームはこれら双方の角運動量が混ざり合った状態であるといえる[6]。従って、ベクトルビームのオンチップ生成にはフォトニックナノ構造による s と l 双方の制御が要求される。微小光デバイスを用いて角運動量が制御された光を生成する研究は、近年特に軌道角運動量に関して盛んに行われており、共振器モードの角運動量を回折により取り出す[7]等の手法が提案されている。一方、スピン角運動量も同時に制御しようという試みは未だ限られており[8]、微小光デバイスによる偏光制御が様々なベクトルビームのオンチップ生成を実現する上での課題となる。

そこで我々は軌道角運動量と偏光の双方が制御された光放射を可能とするフォトニックナノ構造を検討し、作製と評価を行った。検討構造は図 1(a)に示すリング共振器を基にしている。リング共振器の強い光閉じ込めに起因して光に対する有効磁場が生じ、光の進行方向と円偏光の回転方向に依存した向きへ力が発生し、図 1(a)の右に示すように transverse-electric(TE)偏光の共振器モード内で偏光分布が生じる[8]。その結果として共振器モード内ではリングに沿って局所的に円偏極している線が顕現し、カイラル(もしくはC-)ラインとして知られている[9]。この現象は光のスピン軌道相互作用として知られている。図 1(b)と(c)に示すように、このC-ラインに沿って周期的に微小な空気穴等を配置して回折格子とすることで、C-ラインの円偏光に対応した円偏光回折が得られると期待される[10]。本構造は回折格子の周期数により回折光の軌道角運動量 l を制御することができ、 s と l 双方が制御された光を生成するための優れたプラットフォームであると期待される。我々は本検討構造を電子線リソグラフィとドライエッチングにより作製し、回折光の偏光が制御できることを実証した。空気穴の寸法と回折光の偏光状態の関係を明らかにするために、作製デバイスに対して収束イオンビーム(FIB)技術により加工を行うことでその断面構造を評価した。また、リソグラフィの代替としてFIB技術を用いた微小光構造の作製も検討した。

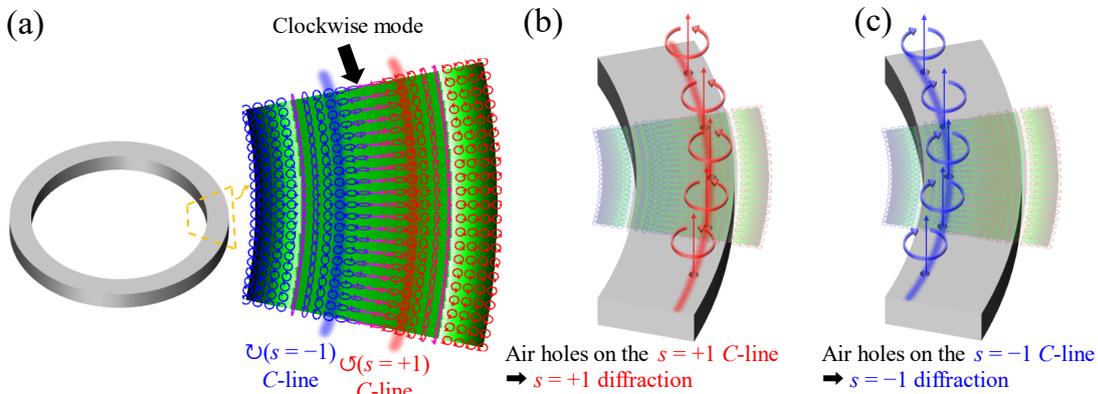


Fig. 1. (a)リング共振器の概略図(左)とその黄色の破線部を拡大した共振器モードの強度と偏光分布の例(右)。例示した共振器モードは時計回りの基底 TE-like モードである。光のスピン

ン軌道相互作用によりリング内に偏光分布が生じ、右回り($s=-1$, 青線で表示)と左回り($s=+1$, 赤線で表示)円偏光の C-ラインが現れる. (b) $s=+1$ の C-ラインに沿ってリング上に小さな空気穴を周期的に設けた様子. 空気穴の配列は回折格子として動作し, $s=+1$ の円偏光光回折が得られると期待される. (c) $s=-1$ の C-ラインに沿ってリング上に小さな空気穴を周期的に設けた様子. $s=-1$ の円偏光光回折が得られると期待される.

II. 実験手法

a. デバイス作製

検討構造は電子線リソグラフィと反応性イオンエッチング(RIE)により作製する. Silicon-on-insulator 基板に電子線レジスト(ZEP520A)を塗布し, 電子線を照射することでパターン描画を行う. 描画後に現像液に浸すことで電子線が照射された部分のレジストが溶け, パターンが形成される. このレジストをマスクとして SF_6 ガスによる反応性イオンエッチングを行うことで, レジストのパターンがシリコン上に転写される. 検討構造では共振器モードの局所的な偏光状態を反映した光回折が重要であり, 小さな空気穴ほど期待通りの光回折が得られると考えられる. 従って, 作製に際して空気穴の半径を変えたパターンを用意した. RIEのエッチングレートは穴半径に依存し, 半径の小さい空気穴ほどエッチングレートが遅く, それゆえに浅くなることが期待される.

b. 断面構造評価

空気穴の深さは回折光の偏光状態に影響を与えることが予想されるため, 作製デバイスの断面構造の評価は重要である. デバイス断面の評価には劈開による断面形成がよく用いられるが, 検討構造では空気穴の半径は数十ナノメートル程度であり, 劈開面が空気穴を横切ることが稀である. そのため, FIB 技術を用いてシリコンを削り, オンデマンドに断面を形成して評価を行った. 同時に電子線リソグラフィと RIE では容易ではない多段階の深さを持つ構造の作製を FIB 技術により行うことも検討した.

c. 光学評価

作製デバイスの共振器モードを波長可変レーザーで励振し, 遠方界イメージングにより同デバイスからの回折光を評価した. 1/4 波長板と直線偏光子により偏光をフィルタリングしてその空間分布をイメージングすることで, 遠方界の偏光分布を評価した.

III. 結果・考察

a. 作製デバイスと断面構造評価

図 2(a)に作製したデバイスの上面走査型電子顕微鏡(SEM)像を示す. SiO_2 上に Si のリング

共振器及び光入力用の導波路が作製されている。リングの幅は 450 nm であり、半径は 3 μm である。リング上には小さな穴が掘られており、2 重の回折格子となっている。他にも、2 重の回折格子のうちの片方の回折格子のみ設けたデバイスが作製されている。同デバイスの断面構造を評価するために、FIB により断面が形成されたデバイスの上面 SEM 像を図 2(b) に示す。リング上の穴の深さを観察できるように、穴を横切るように断面が形成されている。穴半径 50 nm と 30 nm の 2 通りが設計されており、図 3(c) は設計半径 50 nm の穴の上面 SEM 像である。同設計のデバイスに関しては劈開により偶然穴を横切る断面を得ることができおり、その劈開面の SEM 像が図 3(d) である。Si 層の厚さ 220 nm に対して穴の深さは約 200 nm であり、ほぼリングの高さと等しいことがわかった。図 3(e) と (f) はそれぞれ設計半径 30 nm の穴の上面 SEM 像と FIB により形成された断面の SEM 像である。図 3(g) と (f) を比較すると、FIB で加工した断面は劈開面よりもコントラストが悪く、正確な評価は難しいことがわかる。このコントラストの悪さは、(i) FIB 加工により構造の角が丸まる、(ii) FIB 加工によりチャージアップが発生した等、複合的な原因によるものであると考えられる。複数のデバイス断面と撮像条件から系統的に穴の深さを評価したところ 110 ~ 150 nm 程度であることが分かった。従って、穴半径が小さいデバイスの方が穴の深さも小さくなることが確認された。

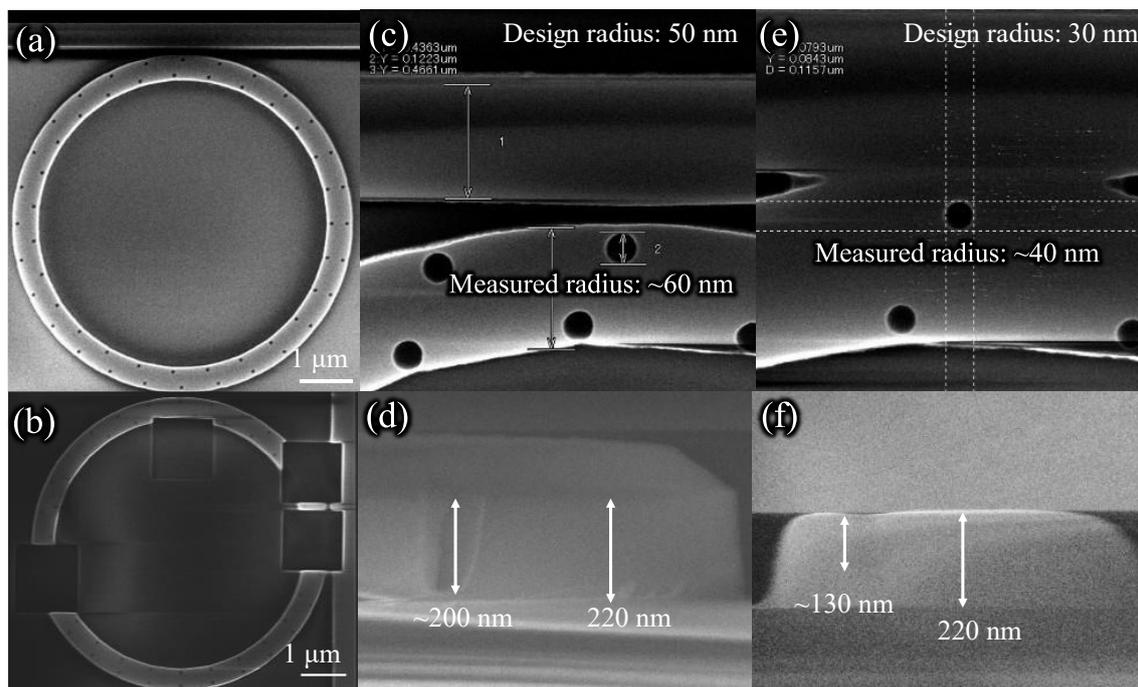


Fig. 2. (a) 作製デバイスの上面 SEM 像の例。 (b) FIB で断面を形成したデバイスの上面 SEM 像の例。 空気穴を横切るように断面が形成されている。 (c) 設計半径 50 nm の空気穴の拡大した上面 SEM 像。 (d) 同空気穴の断面 SEM 像。 断面は劈開面である。 (e) 設計半径 30 nm の空気穴の上面 SEM 像。 (f) 同空気穴の断面 SEM 像。 断面は FIB により加工された断面である。

b. 光学評価

図 3(a)は左回り($s = +1$)円偏光を回折するように設計されたデバイスの概略図と光学測定の結果を示している。図 1 より時計回りの共振器モードはリングの外径近傍で局所的に左回り円偏光となるため、リングの外径近傍に穴が配列されている。ここで評価したデバイスは穴半径が小さい方の設計(30 nm)である。実験ではリングに隣接した直線導波路の左側から TE モードのレーザーを入力し、リング共振器の時計回りモードを励振している。本実験では 1528 nm 近傍の共振モードに対して測定を行った。図 3(a)右側の上段は測定した偏光を表すストークスパラメータ($S_0 \sim S_3$)の遠方界における空間分布である。同図の下段は穴の深さを 110 nm と仮定した電磁界シミュレーションにより計算された遠方界ストークスパラメータ分布であり、実験結果と全体的に整合する結果となっている。シミュレーションでは中央近傍を除き、明確に S_3 の正の成分(左回り円偏光 $s = +1$)が支配的であることがわかる。これは期待される円偏光回折が支配的であることを意味する。中央付近では反対に S_3 が負の成分(右回り円偏光 $s = -1$)が支配的となっているが、これは回折格子の位置が *C-line* から少しずれているためであると考えられる。一方、実験の方がシミュレーションよりも直線偏光成分(S_1 と S_2)が強い傾向がみられる。これは入力レーザーの内、リングに結合せずに通り抜けた成分が一部反射して戻り、反時計回りの共振器モードを励振しているためであると考えられる。

図 3(b)はこのデバイスとは反対に、右回り($s = -1$)円偏光を回折するように設計されたデバイスに関する図 3(a)と同様のプロットである。図 3(a)のデバイスとは異なり、穴はリングの内径近傍に配列されている。偏光測定の結果、 S_3 が負の成分、すなわち右回り円偏光が支配的であり、期待通りに同円偏光が回折されていることがわかる。図 3(a)の場合と同様、このデバイスでも実験の方がシミュレーションよりも直線偏光成分(S_1 と S_2)が強い傾向がみられる。図 3(c)は図 3(b)のデバイスと同じ穴配置だが、穴半径が大きい設計値(50 nm)の方のデバイスに関する測定結果である。計算では穴の深さを 200 nm としている。このデバイスでは実験結果とシミュレーションの結果があまり一致していない。シミュレーションでは S_3 が負の成分(右回り円偏光)が支配的であるが、実験では S_3 が弱く、直線偏光が支配的となっている。その原因として、穴が大きいことによりリングの放射が強く、入力レーザーの内リングに結合する成分が小さく、反射がより大きく影響していることが考えられる。

以上の結果より、穴の半径と深さが小さい設計において、実験結果と計算結果がよく一致し、穴を配置する動径位置により回折光の遠方界における円偏光状態を制御することができるが示された。

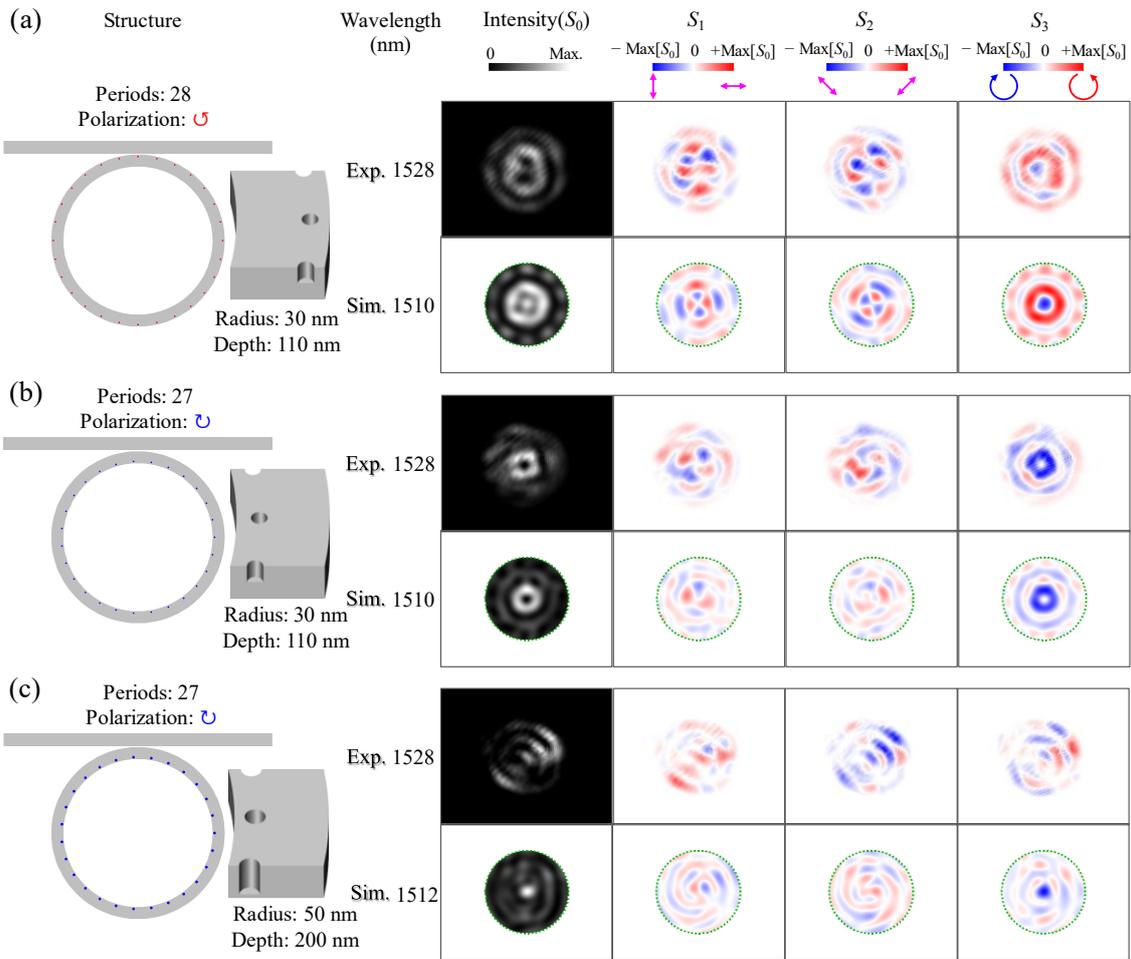


Fig. 3. (a)リングの外径近傍に 28 個の半径 30 nm の穴を設けたデバイスの概略図(左)と遠方界の強度・偏光分布(右). 上段が実験結果であり, 下段がシミュレーション結果である. このデバイスは左回り円偏光($s = +1$)の光を回折することが期待される. シミュレーションでは穴の深さを 110 nm と仮定している. (b)リングの内径近傍に 27 個の半径 30 nm の穴を設けたデバイスに対する(a)と同じプロット. 右回り円偏光($s = -1$)の光を回折することが期待され, シミュレーションでは穴の深さを 110 nm と仮定している. (c)リングの内径近傍に 27 個の半径 50 nm の穴を設けたデバイスに対する(b)と同じプロット. 右回り円偏光($s = -1$)の光を回折することが期待され, シミュレーションでは穴の深さを 200 nm と仮定している.

c. FIB による微細光構造作製の検討

今回検討した構造では数値解析上浅い回折格子を作製することでさらに回折の円偏光度を高めることができる(本稿ではその結果までは示さない). 従って, より浅い回折格子を高精度に配置する技術を確認することはより理想的なデバイス動作を実現する上で重要となる. 今回のデバイス作製に用いた電子線リソグラフィは優れたナノファイブレーション技術であるが, 段差が存在する構造の作製に関しては複数回のリソグラフィを行うか, グレース

ケールリソグラフィを用いる必要がある。複数回のリソグラフィにより構造を作製するためには位置合わせを行う必要があり、位置合わせ誤差が生じる。また、グレースケールリソグラフィは条件が不安定であることが多く、プロセスの開発は容易ではない。このように、電子線リソグラフィにより浅い回折格子をリング上に高精度に作製するには多くの課題が存在する。そこで、電子線リソグラフィの代わりに FIB 技術を利用したデバイスを作製の可能性を検討した。FIB ではイオン照射により局所的かつ直接的に物体を削るため、照射時間により加工の深さを自在に制御することができ、様々な深さの構造を同時に作製することができる。実際に FIB により試作した構造を図 4(a)–(c)に示す。図 4(a)は同じ照射時間でリング共振器上に 4 つの穴を加工したものであり、コントラストがほぼ同じであるため穴の深さはほぼ同じであることがわかる。一方図 4(b)は照射時間を変えながらリング共振器上に 4 つの穴を加工したものであり、コントラストが穴ごとに違っており、深さの異なる穴が形成されていることがわかる。図 4(c)はリング上ではなく、リングが乗っている SiO₂ 層に穴を掘削した結果である。これもリソグラフィでは作製が困難な構造である。以上の検討の結果、FIB を用いることで自由度の高い素子作製ができることが期待される。今回の検討では手動で図形を描いて加工したため、加工できる形状が FIB システムのプリミティブなものに限られていたが、あらかじめパターンを作成して任意形状の加工をすることもでき、任意の光デバイスを FIB 加工により作製することができると期待される。尚、加工したデバイスに対する光学評価も行ったが、穴の数が少ないためかリングからの信号は弱く、明確な測定結果を得ることができなかった。

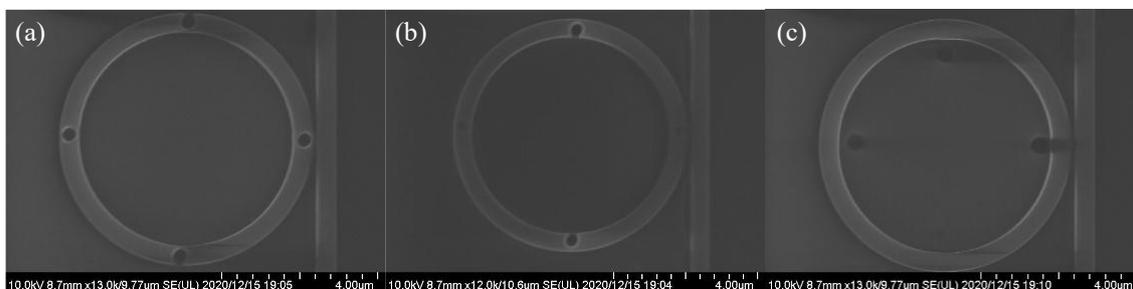


Fig. 4. FIB により加工した微細構造。(a)リング上に加工した4つの穴を加工した様子。4つの穴とも加工時間は同じである。(b)加工時間を変調してリング上に加工穴を加工した様子。穴の深さが異なっている。(c)SiO₂層に加工した穴を加工した様子。

IV. 結論・今後の展望

本稿ではリング共振器に沿って回折格子を設けた構造を評価し、同構造により偏光が制御された光回折が得られることを示した。また、回折格子を構成する散乱体が小さい方が理想的に動作することを明らかにした。本構造を用いることで、右回りと左回り双方の円偏光をリング共振器から放射させることが可能である。右回り円偏光と左回り円偏光は互いに直交する偏光状態であり、その重ね合わせにより任意の偏光状態を得ることができる。従って、

図 2(a)のような 2 重の回折格子を同一のリング上に設けることで、2 つの円偏光ビームが同時に回折され、その重ね合わせとして多種多様な偏光分布が得られることが期待される。実際、我々はスキルミオン等の特異な偏光分布を有する光ビームが 2 重回折格子を持つリング共振器により生成できることを確認している(本稿ではその結果までは示さない)。より浅い回折格子は本検討構造を理想的な動作に近づけるため、今後は浅い回折格子の作製技術開発を行いたい。FIB 技術を用いることで加工の深さを高度に制御可能であることを確認しており、同技術は浅い回折格子を作製するための有力な候補である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官である岩本先生と野村先生に多大なご支援とご指導を頂けたこと、深く感謝申し上げます。また、貴重な共同研究の機会を与えてくださった MERIT プログラムと共同研究の許可を下さった副指導教員の勝本先生に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] S. E. Skelton, M. Sergides, R. Saija, M. A. Iati, O. M. Maragó, and P. H. Jones, “Trapping volume control in optical tweezers using cylindrical vector beams”, *Optics Letters* **38**, 28 (2013).
- [2] M. Kraus, M. A. Ahmed, A. Michalowski, A. Voss, R. Weber, and T. Graf, “Microdrilling in steel using ultrashort pulsed laser beams with radial and azimuthal polarization”, *Optics Express* **18**, 22305 (2010).
- [3] G. Milione, M. P. J. Lavery, H. Huang, Y. Ren, G. Xie, T. A. Nguyen, E. Karimi, L. Marrucci, D. A. Nolan, R. R. Alfano, and A. E. Willner, “4 × 20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de)multiplexer”, *Optics Letters* **40**, 1980 (2015).
- [4] V. D’Ambrosio, E. Nagali, S. P. Walborn, L. Aolita, S. Slussarenko, L. Marrucci, and F. Sciarrino, “Complete experimental toolbox for alignment-free quantum communication”, *Nature Communications* **3**, 961 (2012).
- [5] S. Donati, L. Dominici, G. Dagvadorj, D. Ballarini, M. De Giorgi, A. Bramati, G. Gigli, Y. G. Rubo, M. H. Szymańska, and D. Sanvitto, “Twist of generalized skyrmions and spin vortices in a polariton superfluid”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**, 14926 (2016).
- [6] S. Chen, X. Zhou, Y. Liu, X. Ling, H. Luo, and S. Wen, “Generation of arbitrary cylindrical vector beams on the higher order poincaré sphere”, *Optics Letters* **39**, 5274 (2014).
- [7] X. Cai, J. Wang, M. J. Strain, B. Johnson-Morris, J. Zhu, M. Sorel, J. L. O’Brien, M. G. Thompson, and S. Yu, “Integrated compact optical vortex beam emitters”, *Science* **338**, 363 (2012).
- [8] Z. Shao, J. Zhu, Y. Chen, Y. Zhang, and S. Yu, “Spin-orbit interaction of light induced by transverse spin angular momentum engineering”, *Nature Communications* **9**, 926 (2018).

- [9] R. J. Coles, D. M. Price, J. E. Dixon, B. Royall, E. Clarke, P. Kok, M. S. Skolnick, A. M. Fox, and M. N. Makhonin, “Chirality of nanophotonic waveguide with embedded quantum emitter for unidirectional spin transfer”, *Nature Communications* **7**, 11183 (2016).
- [10] W. Lin, Y. Ota, Y. Arakawa, and S. Iwamoto, “Microcavity-based Generation of full poincaré beams with arbitrary skyrmion numbers,” *arXiv:1906.05333* (2020).