

第2章 UV-NIL を用いたシリコンフォトリソグラフィプロセスの開発

著者校

雨宮智宏^{*1}, 西山伸彦^{*2}, 森 莉紗子^{*3},
藤井 恭^{*4}, 浅井隆宏^{*5}, 塩田 大^{*6}

1 はじめに

ナノインプリントリソグラフィ (NIL) は、ナノスケールのスタンプを用いた押印技術であり、従来の露光法と違って露光波長に解像度が依存しないこと、大面積転写性や高スループット性などを有していることから、半導体における次世代リソグラフィ技術の一つとして期待されている。NIL は、1995 年の Chou らの報告^{1,2)}を端緒として、1996 年に Philips Research Labs から初の UV 硬化型 NIL (UV-NIL) プロセス³⁾が発表されたことで、将来性のあるパターニング技術として台頭し、以来、装置・材料・プロセス技術の各方面で様々な試みがなされてきた^{4~6)}。特にソフト UV-NIL⁷⁾は、大量生産性を損なうことなく、複雑な 3 次元パターンを含む多種多様な構造をナノスケールで実現できることから、生産に適した代替リソグラフィ手法として推奨されるに至っている。また、UV-NIL は、半導体製造環境との互換性を担保しつつ、半永久的な機能層を大面積かつ高解像度でパターニングできることから、近年、拡張現実 (AR グラス) や生物医学診断 (DNA シーケンサー) などの新たなアプリケーションに対する実用的な量産技術として導入実績がある^{8,9)}。これに加えて、基礎研究レベルでも、メタマテリアルやメタサーフェスなどのウェーハ光学素子を実現する際に活用されている¹⁰⁾。

このような背景のもと、当グループでは、光通信分野で標準的に用いられている集積フォトリソグラフィプロセス¹¹⁾に UV-NIL を導入することを目指しており、本稿では、その背景および NIL に関連する技術的要求を議論する。

-
- * 1 Tomohiro AMEMIYA 東京工業大学 工学院電気電子系 准教授
 - * 2 Nobuhiko NISHIYAMA 東京工業大学 工学院電気電子系 教授
 - * 3 Risako MORI 東京応化工業(株)
 - * 4 Yasushi FUJII 東京応化工業(株)
 - * 5 Takahiro ASAI 東京応化工業(株)
 - * 6 Dai SHIOTA 東京応化工業(株)

お名前・ご所属
ご確認下さい

1

初 校

2 各種リソグラフィ技術の比較と集積フォトニクスにおける要求性能

図1は各種リソグラフィ技術の性能指数をまとめた図となっている（横軸はwph/costで表されるスループット性能、縦軸は露光解像度、右下ほど性能が高い技術と言える）。

ArF リソグラフィは、波長 193 nm の ArF エキシマレーザを光源とし、レンズ開口数 (NA) 1.35 の液浸露光系を用いることで、ラインアンドスペース (L/S) のハーフピッチで 40 nm 程度のパターン形成能力を有する。これらは、SADP (Self-Aligned Double Patterning) や SAQP (Self-Aligned Quadruple Patterning) と呼ばれる成膜技術やエッチング技術を活用することで、さらなる微細化 (SADP : hp 約 20 nm, SAQP : hp 約 10 nm) を達成することが可能となる。このとき、リソグラフィ・エッチング・成膜の各工程が追加されるため、全体的な製造コストは上昇するものの、既存の ArF リソグラフィを流用できるところに大きな利点がある。

極端紫外光 (EUV) リソグラフィは、波長 13.5 nm の EUV 光 (軟 X 線) を光源とし、0.33 NA の光学デバイスを用いる縮小投影露光系を用いることで、L/S のハーフピッチで 14 nm のパターンニングが可能となっている。EUVL の主な課題は、光源出力の向上により生産スループットを高めることであり、現在までに、90 W 電源の場合で 200 wph の性能が報告されている。併せて、SADP/SAQP を用いることで更なる微細化へ向けたプロセス開発も実施されている。

また、研究用途に広く用いられている電子線リソグラフィ (EBL) は、電子線を使用してレジストに直接パターンを書き込むことで他のリソグラフィ技術に比べて高い解像度 (<5 nm) と位置合わせ精度 (<10 nm) を実現できるが、装置の原理上、スループットは業界標準より大幅に遅くなる。その解決策として、マルチビーム描画技術なども導入されつつあるが、生産レベルのスループットという観点では、ArF リソグラフィ、EUV リソグラフィの後塵を拝している。

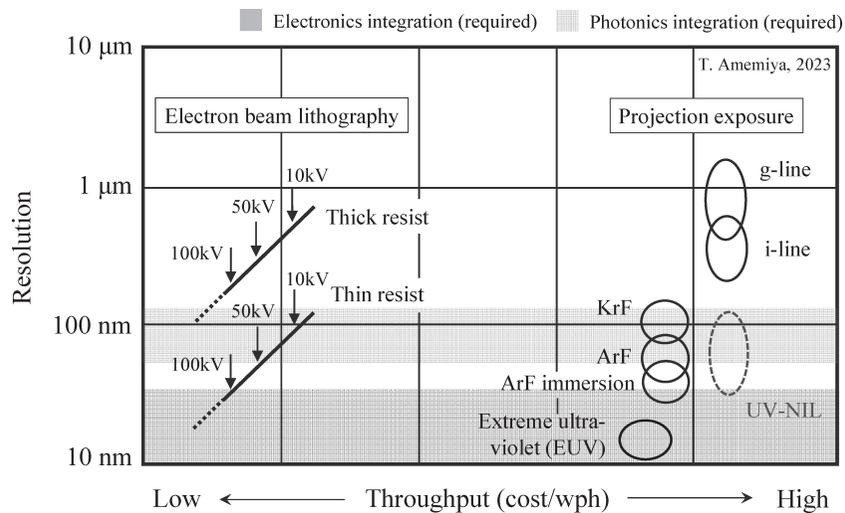


図1 各種リソグラフィ技術の性能指数

第2章 UV-NIL を用いたシリコンフォトニクスプロセスの開発

一方で、前節でも述べたとおり、NIL は高価な光源や複雑なレンズ投影系が不要であり、より安価に微細加工を可能とすることから、各種リソグラフィの代替技術として期待されている。しかしながら、図1の下方グレー帯域で示すとおり、微細化要求が激しい電子デバイス分野（半導体製造分野）においては、依然、ArF リソグラフィ（ダブルパターンニング使用）や EUV リソグラフィが業界のスタンダードであることは間違いなく、NIL がその代替技術として取って代わることは容易ではない。

そのような中、半導体の製造技術を用いてウェハ上に大規模な光回路を構築する集積フォトニクス分野では、NIL が活躍できる余地が残されている。集積フォトニクス分野において最も解像度が必要とされる場面は、DFB（分布帰還型）レーザにおける回折格子の形成、光回路の入出力に使用するグレーティングカプラの形成、シリコンフォトニクス光回路における導波路の形成などであり、いずれも 100 nm 程度の解像度が保証されていれば十分といえる（図1の上方グレー帯域を参照のこと）。そのため、上記プロセス工程において、NIL の大面積転写性や高スループット性が大いに活かせ、かつコスト観点からも優位性があると考えられる。

3 シリコンフォトニクスプロセスへの UV-NIL の導入

本節では、集積フォトニクスにおける一分野として、近年発展が著しいシリコン光回路を例に挙げ、実際にシリコンフォトニクスプロセス¹²⁾の一工程として UV-NIL を導入する際に必要となる光硬化性樹脂や製造技術などについて言及する。

3.1 標準的なシリコンフォトニクスプロセスの概要

図2に EBL を用いた標準的なシリコンフォトニクスプロセスを示す（各プロセスパラメータは当グループの値を記載している）。まず、Si コア厚 220 nm の SOI（Silicon on Insulator）基板上に、ZEP520A（膜厚：500 nm）を塗布した後、電子線描画によりパターンを形成する（JEOL JBX-8100FS, acceleration voltage : 100 kV, beam current : 100 pA, dose : 300 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ）。その後、ZEP520A をマスクとして $\text{SF}_6\text{-C}_4\text{F}_8$ 混合ガスを使用した誘導結合型反応性イオンエッチングにより、Si 層をエッチングすることで導波路構造を形成する。このとき、 SF_6 プラズマによるエッチングステップと C_4F_8 プラズマによるパッシベーションステップを同時に行うことで、疑

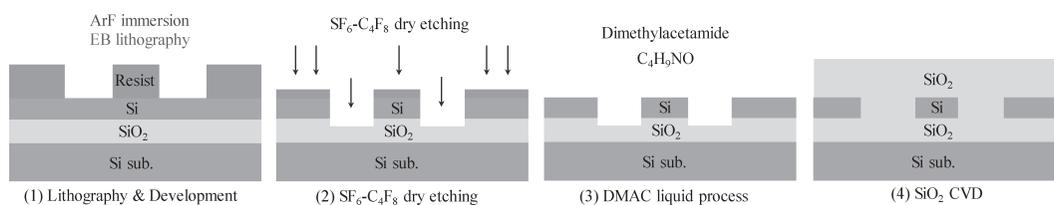


図2 EBL を用いた標準的なシリコンフォトニクスプロセス

ナノインプリント一次世代微細加工技術の最前線—

似的なボッシュプロセスを実現し、ZEP520Aのエッチング耐性を上げることが標準的に行われる。その後、マスクとして利用したZEP520Aをジメチルアセトアミド（DMAC）による溶液処理により除去した後、プラズマCVDによりSiO₂クラッド層を堆積することで、シリコン光回路の導波路領域が完成する。

上記プロセスでは、パターン形成においてEBLを用いているが、Tower Semiconductor、GF（GlobalFoundries）、AMF（Advanced Micro Fundry）などのシリコンフォトリソグラフィを扱っている各種ファウンドリでは、大面積転写性や高スループット性を鑑みて、ArF液浸リソグラフィが使用される傾向にある。これをUV-NILで代替する場合、マスクとして利用する光硬化性樹脂には、標準的にUV-NILで要求される性能に加えて、シリコンフォトリソグラフィプロセスに特化した調整が必要となる。

3.2 UV-NILを用いたシリコンフォトリソグラフィプロセスに適する光硬化性樹脂

UV-NILで用いられる光硬化性樹脂は主に反応性イオンエッチング耐性を付与するためにシリコンキサンを含有した重合性モノマー、硬化樹脂の力学強度や熱耐性を付与する架橋剤分子からなる¹³⁾。これに、光重合開始剤、基板への密着を促進する添加剤やモールド表面からの離型を促進する添加剤（フルオロ基含有の界面活性剤）などが含まれる。

上記に加えて、シリコンフォトリソグラフィプロセスに適した光硬化性樹脂の性能として、以下のA～Cの3つの要求を満たすことが必須となる。

A：SF₆-C₄F₈ 混合ガスによるエッチング耐性

図2でも示したように、一般的にシリコンフォトリソグラフィプロセスではシリコン導波路構造を形成するために膜厚200-300nmのシリコン層を全て削りきる必要がある。そのため、電子デバイス（FinFET）で用いられるシリコンフィン形成時と比べて、SF₆プラズマに対する高いエッチング耐性が要求される。

B：O₂ アッシングによる除去

電子デバイス用途として開発された一般的な光硬化性樹脂は、主にフッ酸溶液（BHF）処理により除去できるようデザインされている。しかしながら、シリコンフォトリソグラフィでは、下部クラッド材としてSiO₂を用いていることから、エッチング後の除去プロセスとしてフッ酸溶液処理は適当ではない（エッチングによる導波路構造形成後、下部SiO₂クラッド層が露出しているため）。そのため、有機溶剤処理、もしくはO₂プラズマアッシングで除去できることが必須となる。また、併せて、SF₆-C₄F₈ 混合ガスによる変質性も極力抑えることが求められる。

C：ワーキングスタンプ剤と近い屈折率

NILプロセス時、均一にUV照射を行う目的から、光硬化性樹脂の屈折率はワーキングスタン

第2章 UV-NIL を用いたシリコンフォトリソプロセスの開発

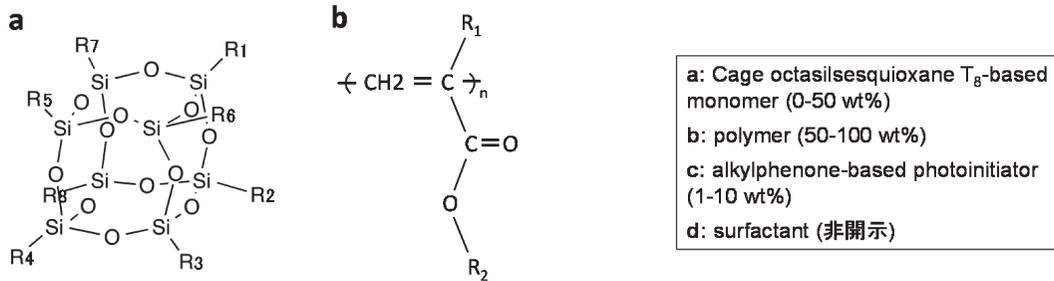


図3 シリコンフォトリソプロセスに適した光硬化性樹脂

ブ剤の屈折率と近いことが望ましい。L/S のハーフピッチで 14 nm 以下のパターンングが求められる電子デバイスでは、パターンサイズがUV 波長に比べて極めて小さいことから、パターン形状に関係なく均一的な UV 照射が可能である。しかしながら、シリコンフォトリソにおいて標準となるパターンサイズは UV 波長に比べて大きく、回折の効果を無視できない。そのため、光硬化性樹脂とワーキングスタンプ剤の屈折率差をできるだけ小さくし、界面での光の散乱等を抑え、照射時における均一性を担保する必要がある。

シリコンフォトリソプロセスに適した光硬化性樹脂として、本研究では図3に示すような材料を開発・使用している。成分 a,b はそれぞれ、スパッタリング耐性の向上、化学的エッチング耐性の向上を目的としている。なお、各成分の比率はドライエッチングに用いられるガスの種類等によって最適化している。

3.3 UV-NIL を用いたシリコンフォトリソプロセス

図4に開発した光硬化性樹脂を用いた UV-NIL によるシリコンフォトリソプロセスを示す。本研究におけるインプリント工程は、EVG620 NT UV-NIL 装置 (EV Group, St. Florian am Inn, Austria) を用いた SmartNIL 技術に基づいている。これは、透明なフレキシブルポリマーのワーキングスタンプを使用して、ウェハレベルで UV-NIL を行う技術である。NIL によるパターン形成後は、光硬化性樹脂の除去に O₂ プラズマアッシングを用いる点を除いて、3.1 項で言及した標準的なシリコンフォトリソプロセスと同一となっている。

まず、光回路パターン (高さ 450 nm) が形成されたシリコンマスタースタンプ (EBL および SF₆-C₄F₈ 反応性イオンエッチングにより作製) に離型剤およびワーキングスタンプ剤 (EVG NIL UV/AS5) をスピコートした (膜厚 2 μm)。その後、それを上部に配置されている PET ベースのフレキシブルバックプレーン (図では Foil 表記) に押し当てて 365 nm の LED 光源により紫外線硬化させた後 (300 mW/cm², 200 秒)、離型させた (これにより、マスタースタンプの表面形状のネガがフレキシブルバックプレーン上ワーキングスタンプに再現される)。押印時はロールオンプロセスにより、適切な圧力がかかるよう装置側で調整を行った。

ナノインプリント一次世代微細加工技術の最前線

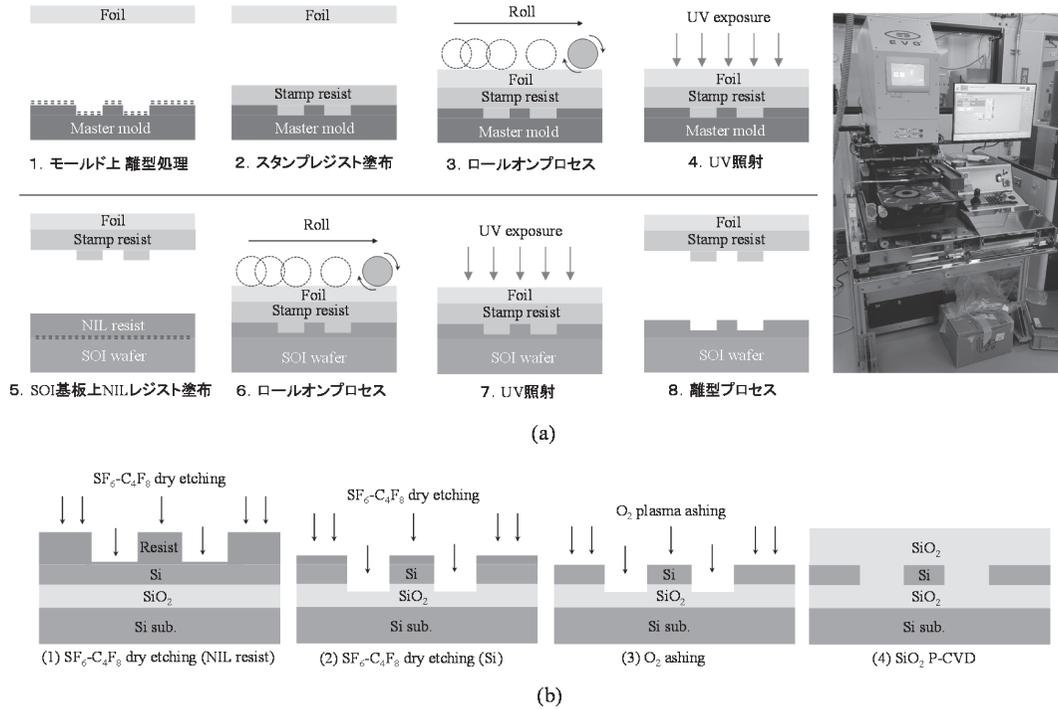


図4 開発した光硬化性樹脂を用いたUV-NILによるシリコンフォトニクスプロセス
 (a) SmartNIL技術を用いた転写工程, (b) NILによるパターン形成後のプロセス

次に、SOI ウェハに密着材および開発した光硬化性樹脂をスピコートした後、先ほど作製したワーキングスタンプを押し当てた。ワーキングスタンプとウェハ表面が接触している間、スタンプ構造は毛細管力によって充填され、これにより光硬化性樹脂にパターンが転写される。この状態で、365 nm の LED 光源により UV 照射を行った後、ワーキングスタンプを脱離させることで、NIL によるパターン形成を完了させた。

このとき、光硬化性樹脂の残膜制御は極めて重要であり、その後のエッチングによって形成される導波路の垂直性に多大な影響を及ぼす。理想的には、スピコートした光硬化性樹脂の膜厚、マスタースタンプに形成されたパターンのアスペクト比・配置などに影響される充填率を考慮しつつ、残膜をできるだけ薄くすることが不可欠となる。図5に条件を最適化した場合の、NIL による導波路パターン形成後の光学顕微鏡画像および走査電子顕微鏡画像を示す。幅 500 nm の導波路パターン及び両脇のトレンチ構造は適切に形成できており、NIL 後の残膜厚も 70 nm まで薄くすることに成功している。

開発した光硬化性樹脂のエッチング耐性・アッシング耐性を確認するために、NIL により 500 nm L/S パターン（シリコンフォトニクスにおける導波路幅と一致）を形成した光硬化性樹脂をマスクにして、連続工程で $\text{SF}_6\text{-C}_4\text{F}_8$ 混合ガスによる誘導結合型反応性誘導結合型反応性

第2章 UV-NIL を用いたシリコンフォトニクスプロセスの開発

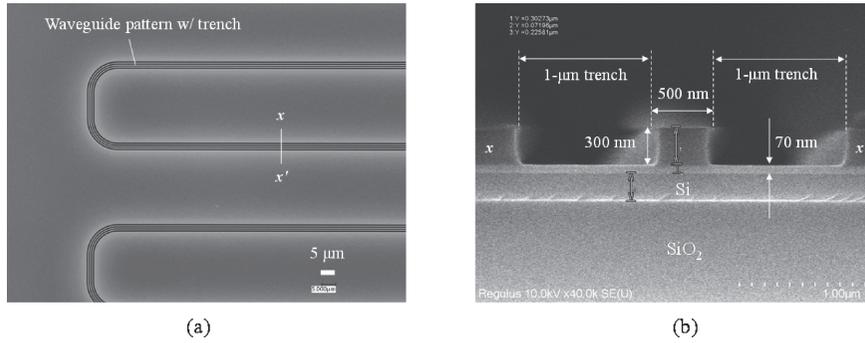


図5 NILによる導波路パターン形成後の光学顕微鏡画像(a)および走査電子顕微鏡画像(b)

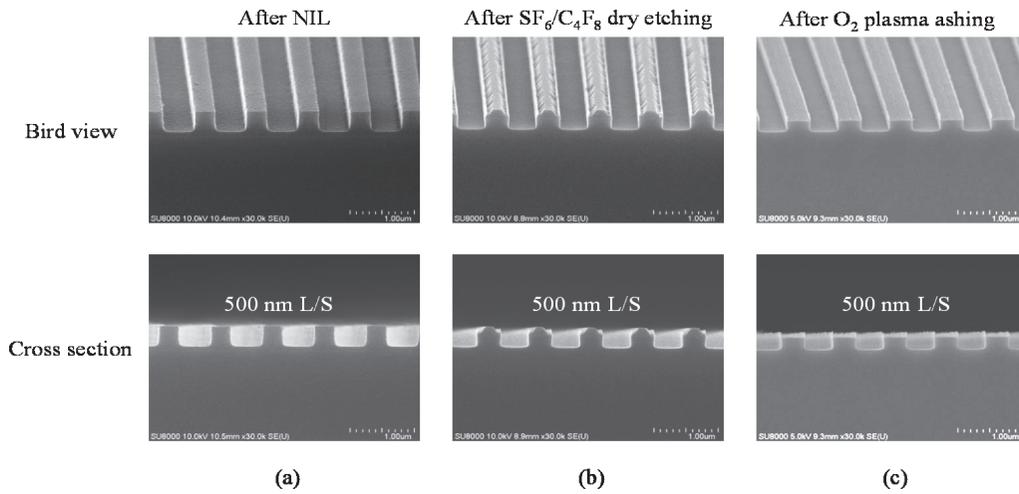


図6 各工程における走査電子顕微鏡画像

- (a) NILによるパターン形成後,
- (b) SF₆-C₄F₈混合ガスを使用した誘導結合型反応性イオンエッチング後,
- (c) O₂プラズマアッシング後

エッチングおよびO₂プラズマアッシングを実施した。図6(a)~(c)に、NILによるパターン形成後、SF₆-C₄F₈混合ガスによるエッチング後、O₂プラズマアッシング後の走査電子顕微鏡画像を示す。これにより、NILプロセス時に適切な残膜制御(膜厚70 nm)ができており、併せて、十分な垂直性を維持したまま膜厚220 nmのシリコンを削りきることでエッチング耐性およびO₂プラズマアッシングによる除去も可能であることが示された。

4 おわりに

本稿では、集積フォトニクスプロセスにおいて、従来の露光技術に代わる新たな技術として UV-NIL に着目し、その導入可能性について言及した。特に、近年発展が著しいシリコンフォトニクスを例に挙げ、実際に UV-NIL を導入した際の製造プロセスやそのときに必要となる光硬化性樹脂の特性などについて議論した。微細化要求が激しい電子デバイス分野においては、EUV リソグラフィをはじめとする縮小投影露光が現在の主流となっているが、シリコン光回路においては 100 nm 程度の解像度が保証されていれば十分であり、そこまでの解像度を必要としない。そのため、NIL の大面積転写性や高スループット性が大いに活かせることから、電子デバイス分野と比較しても UV-NIL に利するところが多いと考えられる。

文 献

- 1) S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3114 (1995)
- 2) S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, *Science*, **272**, 85 (1996)
- 3) J. Haisma, M. Verheijen, K. van den Heuvel, J. van den Berg, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 14**, 4124 (1996)
- 4) M. Colburn, S. C. Johnson, M. D. Stewart, S. Damle, T. C. Bailey, B. Choi, M. Wedlake, T. B. Michaelson, S. V. Sreenivasan, J. G. Ekerdt, C. G. Willson, *Proc. SPIE*, **3676**, 379 (1999)
- 5) H. Schiff, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 26**, 458 (2008)
- 6) M. Eibelhuber, T. Uhrmann, T. Glinsner, P. Lindner, *Photonics Spectra*, **49**, 34 (2015)
- 7) T. Glinsner, U. Plachetka, T. Matthias, M. Wimplinger, P. Lindner, *Proc. SPIE*, **6517**, 651718 (2007)
- 8) C. Thanner, A. Dudus, D. Treiblmayr, G. Berger, M. Chouiki, S. Martens, M. Jurisch, J. Hartbaum, M. Eibelhuber, *Proc. SPIE*, **11310**, 1131010 (2020)
- 9) B. Dielacher, M. Eibelhuber, T. Uhrmann, *Solid State Technol.* **59**, 11 (2016)
- 10) M. Kast, *Photonics Spectra*, **44**, 34 (2010)
- 11) <https://www.aimphotonics.com/>
- 12) <https://www.advmf.com/>
- 13) E. A. Costner, M. W. Lin, W. L. Jen, C. G. Willson, *Ann. Rev. Mater. Res.*, **39**, 155 (2009)