



Y. Okamoto

高繰り返しピコ秒パルスレーザーによる ガラス/Si およびガラス/ガラスの微細溶融接合法

岡本 康寛*

1. はじめに

情報化社会が進む今日、各種センシングに対する要望が高まるとともに、デジタルデータの保存・活用があらゆる分野で求められるようになってきた。センシングには半導体センサが必要不可欠であり、それらを安定的に使用するためにガラス等で封止する必要がある。したがって、空間自由度が高く、高信頼性が得られる単結晶 Si とガラスの接合法が求められてくる。加えて、インターポーザ材料としてガラス基板が用いられることが期待されており、ガラスと各種半導体材料の接合技術が重要になると考えられる。一般に、Si とガラスの接合には陽極接合が多用されており、約 400 度に加熱してガラス側に 500V 程度の負電圧を印加することで一括接合できる¹⁻³⁾。しかし、高温下で高電圧を印加することから内部の電子回路へ悪影響を及ぼす危険性があり、接合に必要な時間も一般的に長い。

一方、10 ピコ秒程度のレーザー光パルスを用いて微細スポットに集光すると、その瞬間的なパワー密度が大きくなることから、透明体材料であっても一部のレーザー光は非線形吸収現象によりガラスへ直接的にエネルギー吸収される^{4,5)}。この吸収レーザー光エネルギーを熱源としてガラス材料を溶融させることで半導体材料とガラス基板を接合する。すなわち、10 ピコ秒程度のパルスレーザーによる瞬間的な熱源を用いることで、ガラス同士の接合同様に脆性材料である半導体材料とガラス基板を高品位に接合できる可能性がある。さらに、半導体基板での線形吸収とガラス内部での非線形吸収の混在する本手法は、作動距離の大きな集光レンズと高繰り返しレーザーを用いることで高いプロセス速度と自由度が期待できる。これにより、陽極接合に劣らないプロセス速度を達成し、空間選択的な接合となることから電子回路に及ぼす影響も低減できる。そこで、従来の陽極接合に代わる新たな接合法としてピコ秒レーザーを用いた単結晶 Si とガラス基板の直接接合法の開発を行った。

また、本手法はガラス同士の接合にも展開が期待されることから、中間層を用いずにガラス同士を直接接合できる手法として検討を行ってきた。パルス繰り返し数 10kHz までであれば、集光点近傍で非線形光吸収現象が生じるのみであるが、パルス繰り返し数を数百 kHz 程度まで大きくすると非線形吸収によって生じた集光点近傍から熱伝

導によってその周囲の微小領域を溶融させることができる⁶⁾。しかし、高強度な超短パルスレーザーをガラス内部に集光させた際、集光点近傍でのエネルギー集中にともなう溶融時の急激な温度変化による大きな応力に起因するクラック発生の要因となり、接合品質が低下することが懸念される。ところで、空間光位相変調器(SLM: Spatial Light Modulator)は計算機合成ホログラム(CGH: Computer Generated Hologram)を入力することでレーザー光の波面や集光特性を任意に変調することができる⁷⁾。この集光性制御手法を用いてレーザー光を多点分岐してガラス内部に集光することは、ガラス溶融時におけるエネルギー分散や温度分布と応力状態を制御することが期待できることから、クラック発生の抑制につながると考えられる。そこで、空間光位相変調器によるエネルギー分布制御を用いてガラスの微細溶融を試み、次世代の接手法としての可能性についても検討を行った。

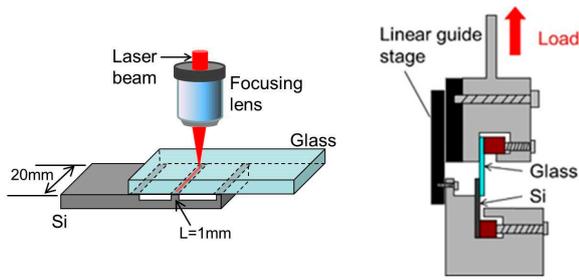
2. ガラスと Si の微細溶融溶接

2.1 実験方法

レーザー光源として、波長 532nm および波長 1064nm のナノ秒パルスレーザーとピコ秒パルスレーザーの合計 4 種類を用いた。それらのレーザー光を図 1 (a) に示すように、ガラスと単結晶 Si の境界面へガラス基板側より集光スポット直径は約 20 μ m で照射した。単結晶 Si とガラスの境界面は、オプティカルコンタクトが得られるように重ね合わせた。しかし、その大きすぎるオプティカルコンタクト領域はせん断強度の評価に大きく影響を及ぼすことが明らかとなっている⁴⁾。そこで、接合領域を特定できるようにするために Si 製のマスクを作製した上より、未処理面へ汚染やダメージを及ぼさない反応性イオンエッチング(C₂F₆, 6.7Pa, 20sccm)により、幅 1mm、長さ 20mm のオプティカルコンタクト領域を作製した。この領域にレーザー光照射条件を変化させて溶接ビードを形成した。試料には厚さ 0.675mm、比抵抗 10² $\Omega \cdot \text{cm}$ 、(100)面の P 型単結晶 Si、厚さ 1.0mm の陽極接合用ガラス(SW-Y, Asahi Glass Company)、および厚さ 1.1mm のホウ珪酸ガラス(D263, Schott)を用いた。せん断試験には単結晶 Si の線膨張係数に合わせて調整された陽極接合用ガラス SW-Y を、溶接ビード断面の観察を行う場合は主にホウ珪酸ガラス D263 を使用した。

* 岡山大学学術研究院自然科学学域 准教授

溶接ビード形成後の試料は、**図 1 (b)**に示すように、試験中のねじれを抑制するためニアガイドを利用したクランプジグを用いてせん断試験を行った。そして、せん断試験前に溶接ビードの面積を測定することで、破断荷重を溶接ビードの面積で除すことでせん断強度を求めた。せん断試験用の試料には 1mm×20mm のオプティカルコンタクト領域に 5 本の溶接ビードを形成し、同一レーザー照射条件で試験速度は 0.5mm/min 一定とした 5 回測定を行ってその平均値をせん断強度として評価した。



(a)レーザー光照射方法 (b)せん断強度テスト手法

図 1 Glass/Si 溶接継手作製と強度評価手法

2.2 レーザ光波長とパルス幅の影響

レーザー光波長として、532nm と 1064nm の 2 種類、各々の波長に対してナノ秒パルスとピコ秒パルスの 2 種類、計 4 種類のパルスレーザーを用い、単結晶 Si とガラスの組み合わせに対して適切なレーザー光波長とパルス幅を検討した。レーザー光パルスが重ならないようにガラス基板からレーザー光を照射し、破断強度を測定した結果を**図 2**に示す。波長 532nm よりも 1064nm、ナノ秒よりもピコ秒パルスレーザーの方が溶融物の飛散が少なく、穏やかな溶融痕形成が可能であった。そして、接合部の破断強度は、波長 532nm よりも 1064nm の方が、パルス幅はナノ秒よりもピコ秒の方が大きな値となっている。

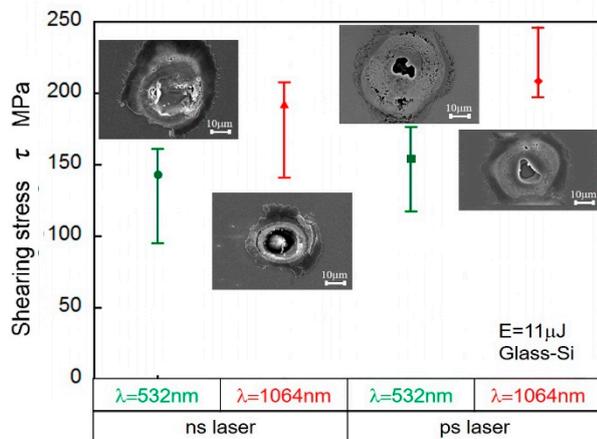
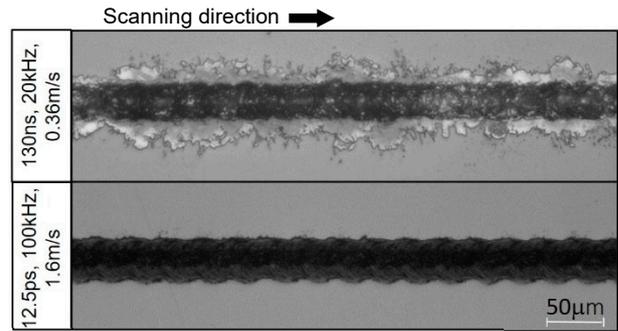


図 2 レーザ光波長とパルス幅が Glass/Si 接合の破断強度に及ぼす影響

一般に、Si は可視域である波長 532nm よりも近赤外に属する波長 1064nm の方が吸光度は低く、Si 表面におけるエネルギー吸収が穏やかになる。また、レーザー光の重なり量を示すオーバーラップ率が 90% と非常に大きな条件であっても、**図 3**に示すようにピコ秒パルスの方がレーザー光走査線周囲への溶融物の飛散が少なく、非常に穏やかな溶接ビードが形成できており、近赤外線とピコ秒パルスレーザーの組合せが有効であることがわかる。

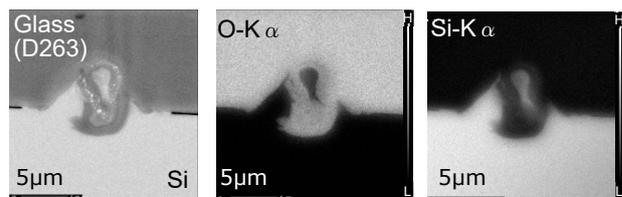


$\lambda=1064\text{nm}$, $E=11\mu\text{J}$, Overlap rate=90%

図 3 高パルス繰り返し数におけるパルス幅の効果

2.3 近赤外ピコ秒パルスレーザーによる微細溶接特性

図 4 はパルスエネルギー 2 μJ 、パルス繰り返し数 2MHz、レーザー光走査速度 2m/s で照射したときの溶接ビード断面の組成像、および O と Si 元素分布を示したものである。用いたガラス試料は単結晶シリコンの線膨張特性と異なるホウ珪酸ガラス D263 であるが、単結晶 Si とガラスのクラックフリー微細溶接が行えている。また、単結晶 Si とホウ珪酸ガラス D263 の境界面は複雑に入り組んだ形状となっており、レーザー照射によるへこみと隆起領域が存在している。このガラスの変形より、レーザー照射領域のガラスは少なくとも軟化点(1,324K)以上に温度上昇したと考えられる。また、組成像からのみならず、O および Si 元素分布からも、ガラス側へ Si が拡散していることが確認されるとともに、細片化された塊として存在していることがわかる。このガラス側への Si の拡散や細片化された塊の残存から、レーザー照射部近傍における照射光軸上のガラス材料はレーザー光のエネルギーを直接吸収し、温度上昇が生じているものと考えられる。



$\lambda=1064\text{nm}$, $t_p=20\text{ps}$, $R_p=2\text{MHz}$, $E=2\mu\text{J}$, $v=2\text{m/s}$

図 4 近赤外高繰り返しピコ秒パルスレーザーによる Glass/Si 接合部断面

このようにレーザ光照射部近傍の現象はダイナミックであるが、高繰り返し条件を用いることで溶融物の飛散がほとんど観察されない穏やかな接合状態が得られる。さらにこの接合部の形状からアンカー効果が期待できることもあり、**図5**に示すように、接合部の破断強度は同一箇所へのレーザ光の照射パルス数 20 程度において 50MPa 以上と高い接合強度が得られている。本条件ではパルスエネルギー $3\mu\text{J}$ で適切なレーザパルス照射数を用いると 85MPa 程度と陽極接合に匹敵する高いせん断強度が得られた。パルス繰り返し数に着目するとパルス繰り返し数 1MHz は他のパルス繰り返し数と比較して高いせん断強度が得られており、適切なレーザパルス照射数と入熱量により良好な接合継ぎ手が形成されたと考えられる。

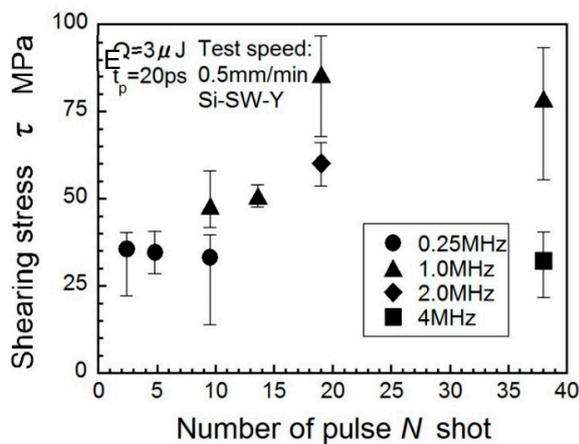


図5 せん断強度とレーザパルス照射数

本実験において高いせん断強度が得られたレーザパルス照射数 N は 20 程度であった。これは、パルス繰り返し数 1MHz ではスポット直径 $20\mu\text{m}$ 、レーザ光走査速度 1.0m/s で得られる値であり、同等のスポット直径ではパルス繰り返し数 4MHz においてレーザ光走査速度 4.0m/s まで増大したときに同等のレーザパルス照射数 20 が得られる。これは 8 インチの単結晶 Si ウェハ全域を 7 分程度で処理できる速度であり、陽極接合法に匹敵するプロセス速度が期待できる。また、本レーザプロセスは事前、事後加熱等が必要なく、空間選択的な接合が容易である。開発が進むピコ秒パルスレーザのパルス繰り返し数の更なる向上とレーザ光走査速度の高速化がかみ合えば、本手法は高効率、高機能な単結晶 Si とガラスの微細接合法として高い可能性を有することが期待できる。

3. ガラスとガラスの微細溶融溶接

3.1 空間光位相変調器を用いた光学系と観察方法

図6に本実験で使用した光学系のセットアップを示す。波長 1064 nm、パルス幅 10 ps、パルス繰り返し数 1 MHz のピコ秒パルスレーザ光を液晶タイプの LCOS-SLM (1272×1080 pixels) を用いて変調した。そして、反射され

た回折光を焦点距離 $f = 200\text{ mm}$ と $f = 100\text{ mm}$ の平凸レンズで構成される 1/2 結像光学系を通して対物レンズ (開口数 NA 0.65) まで伝送し、ホウケイ酸ガラス D263 の内部に集光した。形成された溶融領域をレーザ光走査方向または照射方向から光学顕微鏡を用いて観察を行った。また接合時には、厚さ 1.1mm のホウケイ酸ガラスに厚さ 0.7mm のガラスを上から貼り合わせ、2 枚のガラスの間にオプティカルコンタクト領域を形成し、溶融領域高さの中心がオプティカルコンタクト面に位置するようにレーザ光の焦点位置を調整した。

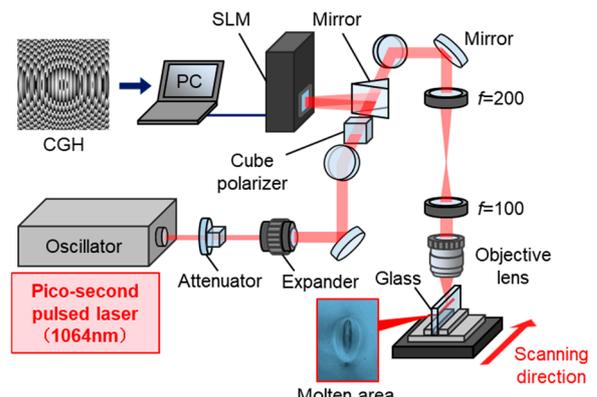


図6 SLM を用いたレーザ光照射セットアップ

3.2 計算機合成ホログラムを用いた集光性制御

図7に空間光位相変調器により 3 点に分岐したレーザ光集光性制御モデルを示す。本研究では、Weighted Gerchberg-Saxton (WGS) 法⁸⁾を用いて集光点座標を同一平面上で制御できる CGH を 3 つ組み合わせることで、レーザ光を各点同一エネルギーとなる 3 点に分岐した。ここで、ガラス内部で分岐した各集光点間の距離を集光点間距離 d_w と定義し、 $d_w = 15, 25, 35\mu\text{m}$ と変化させたときにおける微細溶接特性に及ぼす影響を評価した。

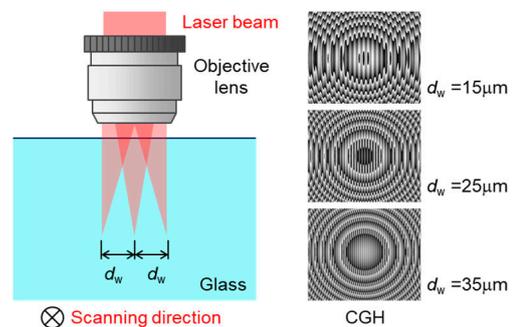


図7 3点集光に用いた CGH と集光点間距離 d_w

次に**図8**に示すように集光点間距離を $15\mu\text{m}$ に設定した 3 点集光、および 5 点集光の 2 条件で溶融領域形状の制御を試みた。

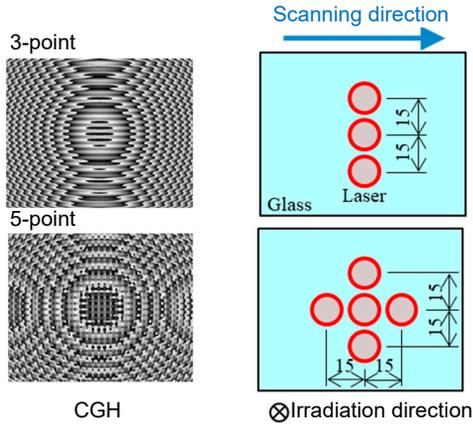


図8 多点集光に用いたCGFと集光位置配置

3.3 3点集光における溶融領域形状

図9に3点集光によって1枚のガラス内部に形成された溶融痕をレーザー光走査方向から観察した結果を示す。図より、分岐した各集光点間の距離 d_w が小さくなるほど丸みを帯びた溶融領域が形成された。また、溶融領域内部でレーザー光エネルギーが直接吸収されたと推測される縦長の高密度領域となっているレーザー光吸収点移動軌跡痕の形状が $d_w = 15 \mu\text{m}$ と $d_w = 25, 35 \mu\text{m}$ では異なっている。 $d_w = 25, 35 \mu\text{m}$ においては、各集光点におけるレーザー光吸収点軌跡はレーザー光照射軸に対して上方に移動した状態であるのに対し、 $d_w = 15 \mu\text{m}$ では、左右のレーザー光吸収点は中心方向に引き寄せられながら上方に移動した軌跡を示している。これは分岐したレーザー光が極近傍に位置するため、高強度領域が重複する中心方向へレーザー光のエネルギー吸収点が誘導されたためだと考えられる。 $d_w = 15, 25, 35 \mu\text{m}$ のいずれでも、図6で示す1点集光時とは異なる丸みを帯びた溶融領域形状が形成されたことから、空間光位相変調器による多点分岐集光を適切に制御することは、集光点近傍のエネルギー分布や応力状態の制御に繋がることが期待される。

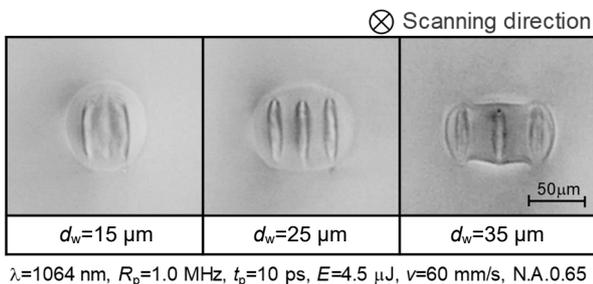


図9 3点集光により形成される溶融ビード断面

3.4 集光点配置が溶融領域形成に及ぼす影響

図10に1点集光、3点集光、5点集光でレーザー光走査速度 60mm/s で2枚のガラス界面にレーザー光走査したときの溶融ビードを上部から観察した結果を示す。1点集光ではパルスエネルギー $4.5\mu\text{J}$ 、3点集光では $1.5\mu\text{J}$ を3箇

所に、5点集光では $1.0\mu\text{J}$ を5箇所に照射して総投入エネルギーが同等になるようにした。1点集光では溶融ビードの全体でクラックが発生した。一方、3点集光では溶融ビードの末端部のみでクラックが発生し、5点集光では溶融ビード全体でクラックが発生しなかった。これは、レーザー光を多点分岐することによってエネルギーを分散したことで溶融部の急激な温度上昇が抑制されたと考えられる。また、走査方向前後にレーザー光を配置した5点集光では、前方のレーザー光が予熱として機能し急激な温度上昇を抑制したことや、後方のレーザー光が後熱として機能し冷却時間が長く維持されることによって、発生する応力を抑制されたと考えられる。また、1点集光と比較して溶融ビード幅が全領域で一様に大きく、大きなパルスエネルギーを投入することで従来と比べて1スキャンにて大きな溶融ビード幅を得つつクラックを抑制できる可能性が示された。

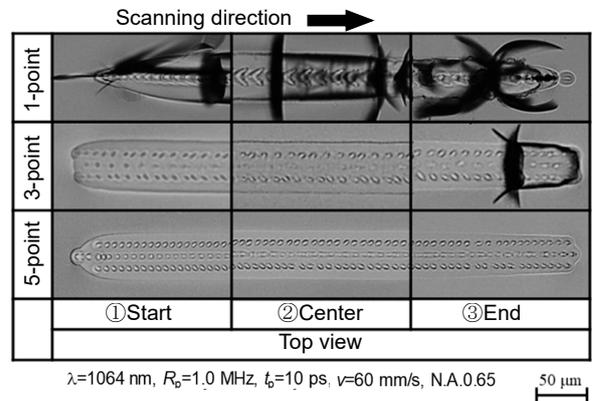


図10 各種集光位置配置と溶融領域形成の状態

4. おわりに

本報では、高パルス繰り返しピコ秒パルスレーザーによるガラス/Si およびガラス/ガラスの微細溶融接合法に関して述べた。

ガラス/Siの微細溶融溶接においては、Siで大きな光吸収率を示す緑色波長より低吸収率の近赤外波長の方が、ナノ秒よりもピコ秒パルスレーザーを用いた方が溶融物の飛散を抑制できる。さらに、適切なレーザーパルス照射数を用いるとアンカー効果が期待できるような接合部が形成され、非常に強固な接合を実現できることを明らかとした。

さらに、ピコ秒パルスレーザーを用いた本手法をガラス/ガラスの微細溶融溶接に適応するにあたって、LCOS-SLMを用いた次世代手法の可能性を述べた。LCOS-SLMを用いてレーザー光を多点分岐することは溶接時の応力状態の改善につながるから、ピコ秒パルスレーザーによるガラスの溶接特性向上が期待されることを示した。

本手法は非線形現象など複雑な現象を含んだプロセスであるが、空間位相変調器を用いることによりプロセス制御性向上などが期待できることから、本報で報告した内容が半導体産業や電気電子部品産業の一助になれば幸いである。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) G. Wallis, D. I. Pomerantz: Field Assisted Glass- Metal Sealing, *Journal of Applied Physics*, Vol. 40, Issue 10, (1969) pp.3946 -3949.
- 2) M. Esashi: Encapsulated Micro Mechanical Sensors, *Microsystem Technologies*, Vol. 1, (1994) pp. 2-9.
- 3) B. Ziaie, J. A. Von Arx, M. R. Dokmeci, K. Najafi: A hermetic Glass-Silicon Micropackage with High-density On-chip Feedthroughs for Sensors and Actuators, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 5, Issue 3, (1996) pp.166-179.
- 4) Y. Okamoto, I. Miyamoto, K. Cvecek, A. Okada, K. Takahashi, M. Schmidt: Evaluation of Molten Zone in Micro-welding of Glass by Picosecond Pulsed Laser, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 8, No. 1, (2013) pp.65-69.
- 5) I. H. W. Nordin, Y. Okamoto, A. Okada, T. Takekuni, T. Sakagawa: Effect of Focusing Condition on Molten Area Characteristics in Micro-welding of Borosilicate Glass by Picosecond Pulsed Laser, *Applied Physics A, Materials Science & Processing*, Vol. 122, No. 5, (2016) pp.492:1-11.
- 6) 坂倉政明, 三浦清貴, 超短パルスレーザーによるガラス内部の局所溶融技術, *NEW GLASS*, Vol. 32, No. 1 (2017), pp.24-28.
- 7) 伊藤康晴, 長谷川智士, 早崎芳夫, 豊田晴義, 空間光位相変調器を用いたホログラフィックレーザー加工, *レーザー研究*, Vol. 43, No. 4 (2015), pp.227-232.
- 8) Roberto Di Leonardo, Francesca Ianni, Giancarlo Ruocco, Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays, *OPTICS EXPRESS*, Vol. 15, No. 4 (2007), pp.1913-1922.