

氏名	MD. EKHLASUR RAHAMAN		
博士の専攻分野の名称	博士（工学）		
学位記番号	医工博甲120第号		
学位授与年月日	令和5年9月26日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
専攻名	工学専攻 システム統合工学コース		
学位論文題目	<p>Microfabrication of glass by a short-pulse CO₂ laser with tunable laser parameters</p> <p>(パラメータ制御短パルス CO₂ レーザーによる ガラスの微細加工に関する研究)</p>		
論文審査委員	主査	准教授	宇野 和行
		教授	張本 鉄雄
		教授	垣尾 省司
		教授	埜 雅典
		教授	佐藤 隆英
		准教授	本間 聡

学位論文内容の要旨

Microfabrication of glass is required for the efficient fabrication of various components such as microfluidic devices, integrated photonic circuits, fiber Bragg gratings and microelectromechanical (MEMS) sensor. In microfabrication of glass, a CO₂ laser that emits light at mid-infrared wavelengths of 9.2 μm to 11.4 μm (mainly 9.6 μm and 10.6 μm) has become popular due to numerous benefits such as a simple construction, a cost-effectiveness, and an efficient absorption of glass. In CO₂ laser processing of glass, the processing scheme is thermal processing because commercial CO₂ lasers have pulse widths of about ten nanoseconds at the shortest. CO₂ laser processing of glass produces thermal damage such as HAZ, cracks and etc. The thermal damage may be dependent on the laser pulse waveform, the fluence and the repetition rate of laser parameters and the glass properties such as the thermal expansion coefficient (CTE) and the melting point (MP). Moreover, common short-pulse CO₂ lasers, had a gaussian-like beam that produced conical holes. This thesis presents a hole

drilling in a crown glass with a high CTE of $94 \times 10^{-7} /\text{K}$ and a low MP of 724°C by a short-pulse CO_2 laser with tunable laser parameters. Firstly, the objective was to find the required laser parameters to produce a crack-free hole and to investigate the dependence of the drilling characteristics on laser parameters. Secondly, the objective was to produce a cylindrical hole with an easy approach by using a flat-top beam rather than the complex set-up. Lastly, the objective was to investigate drilling characteristics in two types of laser beam that is a central-peak-intensity beam and a flat-top beam.

Firstly, the required short-pulse CO_2 laser parameters that produced crack-free holes in a crown glass without an extra treatment in the processing area and the influence of the short-pulse CO_2 laser parameters on drilling characteristics was investigated. The short-pulse CO_2 laser had a spike pulse with a pulse width of 250 ns, a pulse tail length of 31.4 μs to 135 μs , an energy ratio of a spike pulse to a pulse tail of 1:7.1 to 1:92. The short laser pulses were irradiated at a repetition rate of 1 Hz to 400 Hz. The short laser pulses produced crack-free holes regardless of the energy of the pulse tail at a repetition rate of 150 Hz to 400 Hz.

Secondly, cylindrical holes drilling was realized in a crown glass with a high CTE of $94 \times 10^{-7} /\text{K}$ and a low MP of 724°C using a short-pulse CO_2 laser with a flat-top beam. The CO_2 laser had a short laser pulse with a spike pulse width of 276 ns, a pulse tail length of 56.9 μs , an energy ratio of a spike pulse to a pulse tail of 1:20 and a flat-top beam with a diameter of 12.5 mm and a beam quality factor M^2 of 13.5 at a repetition rate of 200 Hz. The flat-top beam was focused by the focusing lens with a focal length of 12.7 mm on the glass surface at the focus offsets of -0.20 mm to +0.40 mm. Cylindrical holes were produced in the glass at the focus offsets of +0.20 mm to +0.40 mm.

Lastly, a comparison of the drilling characteristics of a crown glass with a high CTE of $94 \times 10^{-7} /\text{K}$ and a low MP of 724°C by a short-pulse CO_2 laser with a central-peak-intensity beam and a flat-top beam were investigated. The CO_2 laser had a short laser pulse with a spike pulse width of 276 ns, a pulse tail length of 56.9 μs , an energy ratio of a spike pulse to a pulse tail of 1:20 and a laser beam of a central-peak-intensity beam or a flat-top beam at a repetition rate of 200 Hz. In the central-peak-intensity beam and the flat-top beam, a beam quality factor M^2 was 7.6 and 13.5, respectively. The laser beam was focused by a focusing lens with a focal length of 12.7 mm on the glass surface at the focus offsets of -0.20 mm to +0.20 mm. The central-peak-intensity beam produced conical holes at the focus offsets of -0.20 mm to -0.10 mm and produced biconical holes with a wide waist diameter at the focus offsets

of 0.00 mm to +0.20 mm. The flat-top beam produced conical holes at the focus offsets of -0.20 mm to +0.10 mm and produced a cylindrical hole at a focus offset of +0.20 mm.

論文審査結果の要旨

本論文は、レーザーパルス波形やレーザービーム形状が制御可能な革新的な短パルス CO₂ レーザーをガラス加工に利用し、単純な直接加工により、熱膨張係数が大きなクラウンガラスにおいてクラックレス加工を実現する技術と加工形状の制御技術について述べられた。高熱膨張係数 $94 \times 10^{-7} /K$ を有するクラウンガラスの CO₂ レーザー加工において、サンプルの照射前加熱や冷却を用いない単純な直接加工によるクラックの生じない切削の実現は特筆すべき成果である。レーザービームの回転やサンプルの回転を用いない単純な直接加工による円柱状の切削形状の実現もまた特筆すべき成果である。

学位論文公聴会では、CO₂ レーザーによるガラス加工の利点と現状、課題、提案方式の原理としてパラメータ制御可能な軸方向放電励起 CO₂ レーザーの特徴と照射方法が説明された。提案方式により、熱膨張係数が大きなクラウンガラスにおいてクラックレス加工が実証され、その照射条件が見出された。また、提案方式により、単純な直接加工により、切削形状が円錐状や円柱状、ペン先状に制御可能であることが実証された。レーザー照射条件（レーザーパルス波形、レーザービーム形状、繰り返し周波数、1パルスあたりのフルエンス、総照射フルエンス、照射位置）に依存する詳細な加工特性（加工形状、切削深さ、表面穴径、切削体積、HAZ）が述べられ、CO₂ レーザーの単純な直接加工において加工形状と加工サイズの制御や高効率加工のための指針が示された。本研究がマイクロ流体デバイスや MEMS、グレーティング、マイクロレンズアレイなどの製作において期待できることが示された。聴講者から原理や技術に関する質問や結果に関する質問がなされ、論文提出者は的確に回答した。

学位論文公聴会に続いて開かれた学位論文審査及び最終試験において、審査委員から細部に関する事実確認の質問がなされ、論文提出者は的確に回答し、提出された論文に述べられている技術を深く理解し、自ら研究を遂行してきたことが確認された。

学位論文公聴会及び最終試験における発表と質疑応答は、英語でなされた。

論文提出者の研究成果は 2 つの国際的な学術誌の論文として発表されている。また、研究期間中に 2 つの国際会議論文も発表された。

これらの事実から論文審査委員会は論文提出者が博士の学位に適合する見識と業績を有すると判断し、学位論文審査及び最終試験のいずれも合格とした。