

DIAMOND LENSES FOR HIGH POWER LASERS

NICOLA LANG

TEL. +49 761 5159-281

NICOLA.LANG@IAF.FRAUNHOFER.DE

SPOT ON – DIAMOND LENSES

- REFRACTIVE INDEX: 2.4
- THERMAL EXPANSION: 10^{-5} K^{-1}
- DIELECTRIC CONSTANT: 5.68
- ABSORPTION COEFFICIENT (MIR): $< 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$

TECHNOLOGY READINESS LEVEL

4



In materials processing using laser, transmissive optical components such as lenses made from quartz often pose a weak point due to steadily increasing energy densities of near-infrared solid state lasers (powers > 1 kW). Thermal drift due to absorption leads to focus shifts and thermal aberrations diminish beam quality. Therefore, a new lens material is needed that withstands the high energy impact and does not affect the beam quality. Diamond has exceptional properties, such as high thermal conductivity and low absorption, that lenses made from it meet those demands.

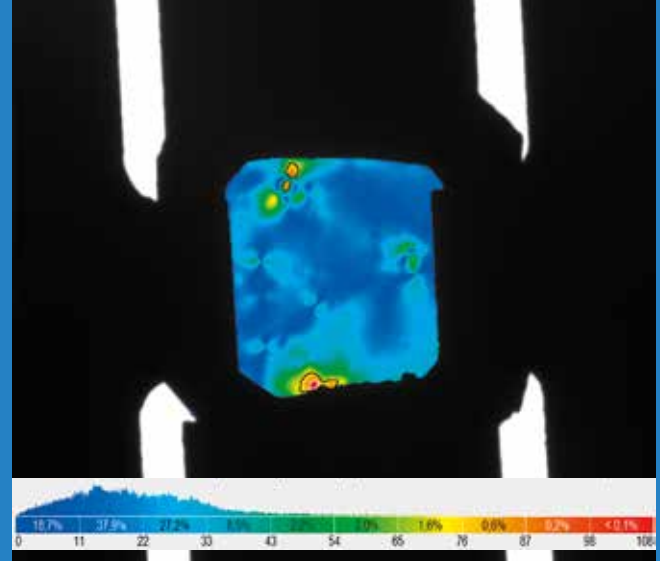
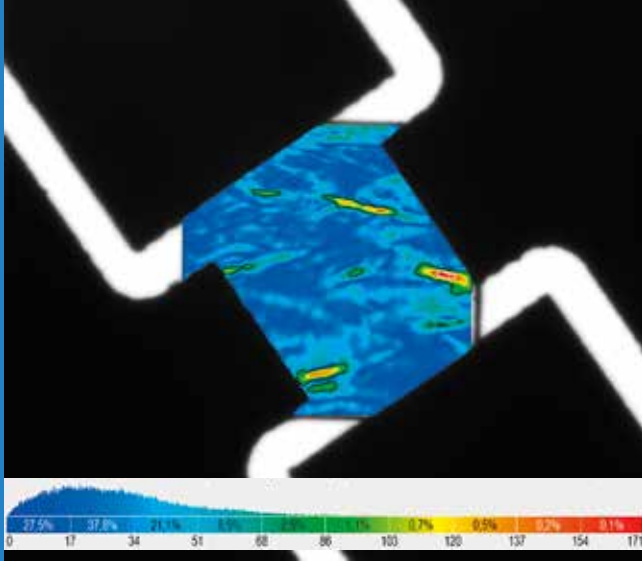
Due to its outstanding physical properties, single-crystalline diamond is a promising material for numerous emerging applications, among which are quantum devices and high power electronics. Another application for this material is as optical components of high power lasers for materials processing. The annual turnover in the field of materials processing by laser, namely cutting, welding and inscribing, is > 7 bn. €, and continuously growing. The power of these lasers is steadily increasing, having exceeded 10 kW continuous wave power in 2009 already. This leads to a demand for lenses with high durability. Up to now, optical materials such as quartz have been employed due to low absorption and easy manufacturing. However, already a thin film of deposit of oil mist or processed material on the lens surface can cause the lens to fail and not meet the requirements anymore. The increased absorption leads to thermal lensing effects that change the focus length and diminishes the beam quality. There have been approaches by other groups to compensate these effects by using tunable lens systems, but they have been dismissed due to risk of higher failure rates. When using diamond as a lens material, thermally induced focus shifts will not occur, as the thermal conductivity of diamond is approximately 2000 times higher than that of quartz. In addition, diamond has a high refractive index (2.4) and low density (3.5 g/cm^3), allowing for thin, lightweight optics for highly dynamic applications.

DIAMANTLINSEN FÜR HOCHLEISTUNGSLASER

In der laserbasierten Materialverarbeitung stellen transmissive optische Komponenten wie Quarzlinsen aufgrund steigender Energiedichten von nah-infraroten Festkörperlasern (Leistung > 1 kW) oft einen Schwachpunkt dar. Die durch Absorption entstehende thermische Drift führt zu Fokusverschiebung und thermische Abberation verringert die Strahlqualität. Daher ist ein neues Linsenmaterial nötig, das dem hochenergetischen Licht standhalten kann und keinen Einfluss auf die Strahlqualität hat. Die außergewöhnlichen Eigenschaften von Diamant, wie seine hohe Wärmeleitfähigkeit und niedrige Absorption, machen ihn zu einem idealen Linsenmaterial.

Die überragenden physikalischen Eigenschaften von einkristallinem Diamant machen ihn zu einem vielversprechenden Material für eine Vielzahl von Anwendungen, z. B. für Quantenbauelemente oder für die Leistungselektronik. Ein weiteres Einsatzgebiet von Diamant sind Hochleistungslaser, die zur Materialverarbeitung eingesetzt werden. Der Jahresumsatz im Bereich der laserbasierten Materialverarbeitung, die das Schneiden, Schweißen und Beschriften einschließt, beträgt über 7 Mrd. € und nimmt kontinuierlich zu. Die ständig wachsende Leistung solcher Laser hat bereits im Jahr 2009 eine Dauerstrich-Leistung von 10 kW überschritten. Die Folge ist eine große Nachfrage für Linsen mit hoher Lebensdauer. Bis dato sind optische Materialien wie Quarz wegen ihrer geringen Absorption und einfachen Herstellung eingesetzt worden. Allerdings kann bereits ein dünner Film von Ölnebelablagerungen oder prozessiertem Material auf der Linsenoberfläche diese unbrauchbar machen: Die erhöhte Absorption bewirkt thermische Linseneffekte, die die Fokusslänge verändern und die Strahlqualität verringern. Bemühungen anderer Forschergruppen, solche Effekte durch variable Linsensysteme zu kompensieren, sind wegen des Risikos höherer Störungsrate abgewiesen worden. Der Einsatz von Diamant als Linsenmaterial hingegen verhindert thermisch induzierte Fokusverschiebungen, da die Wärmeleitfähigkeit von Diamant etwa 2000 Mal höher ist als die von Quarz. Darüber hinaus besitzt Diamant einen hohen Brechungsindex von 2,4 und eine geringe Dichte von 3,5 g/cm³, was die Fabrikation dünner, leichter Optiken für hochdynamische Anwendungen ermöglicht. Für diese Anwendung sind zwei Arten von Diamant leicht erhältlich: polykristallines und einkristallines Material. Idealerweise sollte das Linsenmaterial niedrige Absorption sowie eine geringe Dichte an polarisierenden Defekten aufweisen.

Obwohl polykristalliner Diamant auf größere Flächen mit bis zu 6 Zoll im Durchmesser deponiert werden kann (8 x 8 mm² erreichen die größten kommerziell verfügbaren Einkristalle), ist seine Absorption höher als bei einkristallinem Diamant. Dies liegt an den Korngrenzen, die sich besonders bei Wellenlängen von über 1 µm, der typischen Faserlaserwellenlänge, bemerkbar machen. Darüber hinaus machen Lichtstreuung, Phasendeformation und Polarisierungseffekte polykristallines Material für Laseranwendungen unbrauchbar.



1

There are two types of diamond readily available for this purpose, namely poly-crystalline and single-crystalline material. Ideally, the lens material should have low absorption as well as a low density of polarising defects. Although poly-crystalline diamond can be deposited on large areas up to 6" in diameter (8 x 8 mm² are among the largest single crystals that are commercially available), it has a higher absorption than single-crystalline diamond due to grain boundaries, especially in the wavelength regions above 1 μm, which is the typical wavelength of fibre lasers. Furthermore, light scattering, phase deformation and polarisation defects make poly-crystalline material unsuitable for laser applications.

At Fraunhofer IAF, synthetic diamond is fabricated on commercially available high pressure high temperature synthesized seed crystals using a low pressure, microwave plasma enhanced chemical vapour deposition (MWPE CVD) process. The standard deposition parameters allow growth rates of up to 2 μm/h. For the lens application, thick diamond layers of up to 1 mm are necessary, so for profitable fabrication, the growth rate per area has to be maximised. In recent years, several groups have shown that fast growth of diamond and simultaneous growth of multiple substrates is possible through the formation of a homogenous large area plasma. Our aim is to use this technique to achieve feasible manufacturing time and quality of diamond for the designated application. The substrates are polished and cleaned prior to the deposition process. They are then placed in the ellipsoidal reactor. To reduce the number of polishing induced defects, the samples are treated with an H₂/O₂ plasma etching step. The formation of twins on the surface can thus be prevented, which would otherwise make the lens polishing step impossible.

In this work, the standard growth parameters were optimized towards a higher plasma power density in a large area plasma, achieving higher growth rates of up to 10 μm/h without the addition of nitrogen. Using a hydrogen/methan gas admixture, we applied gas pressures of typically 400 mbar, higher microwave-power of about 3.3 kW and enhanced substrate cooling. Typically, only one substrate is placed in the reactor at a time. The increased plasma area, however, now allows for a parallel growth of up to 20 substrates. After overgrowth, the CVD diamonds are removed from the substrate by a laser cutting/polishing treatment. The resulting free-standing epitaxial layers are optically characterised towards birefringence and optical path length difference using a polariscope.

The measurements show that compared to the substrates which show random polarisation, the epitaxial layers exhibit large areas that show no change in polarisation. Also, a small number of stress inducing defects are clearly visible, locally causing birefringence properties. These defects also induce an optical path length difference. The layer thicknesses of the substrate and the epitaxial layer are 300 μm and 500 μm, respectively. However, for 80 % of the measured area, the substrate showed an optical path length difference of almost 50 nm, whereas the grown layers only show a change in path length of 30 nm for the same area.

This shows that we have been able to improve the optical properties of the diamond material compared to the substrate's. In the final laser setup, a lens made from this material will therefore be able to focus the laser with only minimal stress-induced distortion, making this epitaxial diamond an attractive alternative to quartz lenses.



2

1 *Polariscope measurements (conducted at Fraunhofer ILT) on a commercially available substrate (300 µm) showing an optical path length difference of 50 nm for 80 % of the measured area (left) and on an epitaxially grown diamond layer (500 µm) showing only 30 nm path length difference for the same measured area (right).*

Polariskopmessungen (durchgeführt am Fraunhofer ILT) an einem kommerziell erhältlichen Substrat (300 µm) zeigen einen Gangunterschied von 50 nm bei 80 % der gemessenen Fläche (links) während an einer epitaktisch gewachsenen Diamantschicht (500 µm) nur 30 nm Gangunterschied bei gleicher Fläche gemessen werden (rechts).

2 *Fast and parallel growth of seven diamond samples, showing the samples during the CVD plasma process (left) and after growth (right).*

Schnelles und paralleles Wachstum von sieben Diamantproben während des CVD-Plasmaprozesses (links) und nach dem Wachstum (rechts).

Am Fraunhofer IAF wird synthetischer Diamant auf kommerziell verfügbaren, durch Hochdruck-Hochtemperatursynthese hergestellten Keimkristallen mittels mikrowellengestützter Gasphasenabscheidung (MWPE CVD) bei niedrigem Druck gewachsen. Die Standardabscheidungsparameter ermöglichen Wachstumsraten von bis zu 2 µm/h. Für Linsen sind dicke Diamantschichten von bis zu 1 mm nötig. Dies bedeutet, dass für wirtschaftliche Fertigung die Wachstumsrate pro Fläche maximiert werden muss. In den letzten Jahren haben verschiedene Forschergruppen gezeigt, dass schnelles Diamantwachstum bei simultanem Überwachsen mehrerer Substrate durch die Formierung eines großflächigen, homogenen Plasmas möglich ist. Unser Ziel ist die Implementierung dieser Technologie, um eine realisierbare Fabrikationszeit und Qualität des Diamanten für die vorgesehene Anwendung zu erreichen. Die Substrate werden vor der Abscheidung poliert und gereinigt, dann in den Ellipsoidreaktor geführt. Ein H₂/O₂-Plasmaätzschritt soll die Zahl politurinduzierter Defekte in den Proben reduzieren. Somit kann Zwillingsbildung auf der Oberfläche, was eine Politur der Linse unmöglich machen würde, verhindert werden.

Dabei wurde die Optimierung der Standardwachstumsparameter hin zu höherer Leistungsdichte in großflächigen Plasmen erreicht, was eine Wachstumsratenerhöhung bis 10 µm/h ohne Zugabe von Stickstoff bedeutet. Unter Verwendung eines Wasserstoff/Methangasgemischs wurden Drücke von typischerweise 400 mbar, höhere Mikrowellenleistung (ca. 3,3 kW) und verstärkte Substratkühlung eingestellt. Üblicherweise kann lediglich ein Substrat eingebaut werden, doch die vergrößerte Plasmafläche ermöglicht ein paralleles Wachstum auf bis zu 20 Substraten. Nach der Abscheidung werden die CVD-Diamanten durch Laserschneiden bzw. Politur vom Substrat getrennt. Die resultierenden freistehenden epitaktischen Schichten werden mittels Polariscope hinsichtlich Doppelbrechung und optischer Weglängendifferenz charakterisiert.

Messungen zeigen, dass die epitaktischen Schichten große Bereiche ohne Polarisationsvariation aufweisen, die Substrate dagegen willkürliche Polarisierung. Auch sind eine kleine Anzahl stress-induzierender Defekte deutlich sichtbar, welche lokal doppelbrechend wirken und eine optische Weglängendifferenz induzieren. Die Schichtdicken des Substrats und der epitaktischen Schicht betragen 300 µm bzw. 500 µm. Allerdings beträgt die optische Weglängendifferenz im Fall der Substrate bei Vermessung von 80 % der Fläche fast 50 nm, im Falle der gewachsenen Schichten hingegen für denselben Prozentsatz an Flächenvermessung lediglich 30 nm.

Die optischen Eigenschaften der Diamantschichten im Vergleich zum Substrat konnten somit deutlich verbessert werden. Im fertigen Laseraufbau wird eine Linse aus diesem Material in der Lage sein, den Laserstrahl mit nur geringen spannungs-induzierten Störungen zu fokussieren. Dadurch wird epitaktisch hergestellter Diamant zu einer attraktiven Alternative zu Quarzlinen.