

Diss. ETH No. 12625

Control of the Photorefractive Effect in KNbO_3 by Ion-Implantation

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zürich
for the degree of Doctor of Natural Science

presented by

Simon Brülisauer, Dipl. Phys. ETH
born July 12, 1967, citizen of Appenzell

1998

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Günter, examiner
PD. Dr. Ch. Buchal, coexaminer

Abstract

Photorefractive crystals such as KNbO_3 , BaTiO_3 , LiNbO_3 and $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) are very promising for all-optical signal processing. Unfortunately most photorefractive crystals suffer from serious constraints: One is their slow response time and the second is the very low sensitivity at near infrared wavelengths. Due to the need of fast nonlinear optical devices in optical communication systems operating at near infrared wavelengths, attention has been drawn to the extension of the photorefractive response up to communication wavelengths (1313 nm and 1550 nm), mainly by using different dopants, and there has been considerable effort to increase the speed of grating buildup in these materials by means of different reduction treatments.

An elegant approach to achieve higher sensitivities and faster response times of the photorefractive effect, is the use of ion-implanted waveguides, due to the following reasons:

- (1) Waveguides offer strong beam confinement over long interaction lengths, leading to high light intensities (kW/cm^2) at low power levels (several mW), leading to fast response times of the photorefractive effect.
- (2) Compatibility to integrated optics and fiber technology.
- (3) Specific modification of the photorefractive effect by the ion-implantation.

In this thesis, we will focus mainly on point number (3), since ion-implantation is a very reproducible process, which, besides the creation of the waveguide structure itself, allows to control the photorefractive effect by adjustment of the reduction ratio over three orders of magnitude by simply choosing the appropriate implantation dose. An increase of the reduction ratio leads to higher gain and faster response times in KNbO_3 , due to a change of the dominant charge carriers from holes to electrons. By applying this technique, we were able to alter the photorefractive gain Γ from 2.5 cm^{-1} up to 34 cm^{-1} , the absorption constant α from 0.06 cm^{-1} up to 2.1 cm^{-1} and the buildup time τ from 1.6 ms down to $34 \mu\text{s}$ at an intensity $I = 200 \text{ W}/\text{cm}^2$ (corresponding to a power of only 2.5 mW in the interaction region) in a 1000 ppm Fe-doped KNbO_3 crystal, for example. Furthermore, we demonstrate for the first time in a ferroelectric oxide photorefractive sensitivity and net gain up to the telecommunication wavelength of 1550 nm in proton-implanted Fe-doped KNbO_3 waveguide structures. For example, we measured an exponential gain of 2.2 cm^{-1} , a response time of 60 ms at $200 \text{ W}/\text{cm}^2$, leading to a photorefractive sensitivity S of $6.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kJ}$ at 1313 nm. At 1550 nm an exponential gain of 0.9 cm^{-1} , and a

response time of 130 ms at 200 W/cm^2 were measured, leading to a photorefractive sensitivity S of $0.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kJ}$. Since the absorption constant α was always smaller than the gain Γ at the measured wavelengths, we obtain a net gain of 1.9 cm^{-1} at 1313 nm and 0.4 cm^{-1} at 1550 nm. These are the highest values reported so far in ferroelectric oxides at these wavelengths.

We discuss the irradiation effects, which are responsible for the modification of the photorefractive effect in detail, mainly the creation of oxygen vacancies during the irradiation. Furthermore the material parameters relevant for the photorefractive effect in KNbO_3 have been identified and can explain all the measured results very accurately. In the last two chapters, we will discuss the influence of our reduction treatment (ion-implantation) on the applications, such as self-pumped phaseconjugation and briefly discuss the extension of ion-implantation to other photorefractive crystals such as BaTiO_3 .

Zusammenfassung

Photorefraktive Kristalle wie z.B. KNbO_3 , BaTiO_3 , LiNbO_3 und $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$ (SBN) haben vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten in der optischen Signalverarbeitung. Leider haben die meisten photorefraktiven Kristalle schwerwiegende Nachteile: Zum einen sind sie sehr langsam und zum anderen weisen sie nur eine schwache Empfindlichkeit im nahen Infrarot auf. Wegen dem Bedarf an schnellen nichtlinearen optischen Bauelementen in der optischen Telekommunikation, versucht man schon seit geraumer Zeit die Empfindlichkeit der photorefraktiven Kristalle bei den infraroten Telekommunikationswellenlängen (1313 nm und 1550 nm) mittels verschiedener Dotierungen zu erhöhen und gleichzeitig die Geschwindigkeit des photorefraktiven Effekts durch Reduktion der Kristalle zu erhöhen.

Ein eleganter Ansatz um höhere Empfindlichkeiten und höhere Geschwindigkeiten zu erreichen, besteht darin, ionenimplantierte Wellenleiter zu benützen, und zwar aus den folgenden Gründen:

- (1) Wellenleiter erlauben es hohe Lichtintensitäten (kW/cm^2) bei kleiner Leistung (einige mW) über grosse Wechselwirkungslängen aufrecht zu erhalten, was zu hohen Geschwindigkeiten beim photorefraktiven Effekt führt.
- (2) Kompatibilität zur integrierten Optik und zur Glasfasertechnologie.
- (3) Gezielte Modifikation des photorefraktiven Effekts durch die Ionenimplantation.

In dieser Arbeit konzentrieren wir uns hauptsächlich auf Punkt (3), da Ionenimplantation ein sehr gut reproduzierbarer Prozess ist, mit dem nicht nur der Wellenleiter selbst hergestellt wird, sondern mit dem auch der photorefraktive Effekt genau kontrolliert werden kann, indem man den Reduktionsgrad über drei Grössenordnungen hinweg einstellen kann, durch einfaches Einstellen der entsprechenden Ionendosis. Eine Erhöhung des Reduktionsgrades führt zu einem grösseren Verstärkungsfaktor und zu schnelleren Antwortzeiten in KNbO_3 , da die reduzierten Kristalle elektronisch leitend sind. Durch Anwendung dieser Technologie konnten wir den photorefraktiven Verstärkungsfaktor Γ von 2.5 cm^{-1} auf 34 cm^{-1} erhöhen, wobei sich die Absorptionskonstante α von 0.06 cm^{-1} auf 2.1 cm^{-1} erhöhte und die Antwortzeit konnte gleichzeitig von 1.6 ms auf $34 \text{ }\mu\text{s}$ reduziert werden bei einer Lichtintensität $I = 200 \text{ W/cm}^2$ (dies entspricht einer Laserleistung von nur 2.5 mW in der Wechselwirkungsregion) in einem 1000 ppm eisendotierten KNbO_3 Kristall. Desweiteren zeigen wir zum ersten Mal in einem

ferroelektrischen Oxid, photorefraktive Empfindlichkeit und Nettoverstärkung bei der Telekommunikationswellenlänge von 1550 nm in protonenimplantierten Fe-dotierten KNbO_3 Wellenleiterstrukturen. Zum Beispiel haben wir einen exponentiellen Verstärkungsfaktor $\Gamma = 2.2 \text{ cm}^{-1}$ und eine Antwortzeit von 60 ms bei 200 W/cm^2 bei einer Wellenlänge von 1313 nm gemessen, was zu einer photorefraktiven Empfindlichkeit von $6.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kJ}$ führt. Die entsprechenden Werte bei 1550 nm Wellenlänge sind 0.9 cm^{-1} und 130 ms bei 200 W/cm^2 , was zu einer Empfindlichkeit von $0.9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kJ}$ führt. Da die Absorptionskonstante α bei allen gemessenen Wellenlängen immer kleiner war als der Verstärkungsfaktor Γ , erhalten wir eine Nettoverstärkung von 1.9 cm^{-1} bei 1313 nm und 0.4 cm^{-1} bei 1515 nm. Dies sind die höchsten Werte, welche bis anhin je für ferroelektrische Oxide bei diesen Wellenlängen gemessen wurden.

Die Bestrahlungseffekte, welche verantwortlich sind für die Veränderungen des photorefraktiven Effekts, nämlich hauptsächlich die Erzeugung von Sauerstofffehlstellen, werden im Detail besprochen. Desweiteren werden alle für den photorefraktiven Effekt wichtigen Materialparameter bestimmt, welche es erlauben alle Messergebnisse sehr genau zu erklären. In den letzten zwei Kapiteln diskutieren wir den Einfluss unserer Reduktionsmethode (Ionenimplantation) auf die Anwendungen, wie etwa selbstgepumpte Phasenkonjugation und gehen kurz auf die Anwendung der Ionenimplantation auf andere photorefraktive Kristalle wie BaTiO_3 ein.