

# Photorefractive properties and applications of KNbO<sub>3</sub> crystals

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Voit, Eugen

**Publication date:**


1988

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000502094>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

  
Prof. Dr. P. Günter  
Institut für Quantenelektronik  
ETH Hönggerberg  
CH-8093 Zürich

Diss. ETH Nr. 8555

Eingang  
05. Okt. 1988

**PHOTOREFRACTIVE PROPERTIES AND APPLICATIONS  
OF  $\text{KNbO}_3$  CRYSTALS**

**A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH**

**for the degree of  
Doctor of Natural Sciences**

**presented by**

**EUGEN VOIT**

**Dipl. Phys. ETH**

**born December 20, 1952**

**citizen of Waldkirch SG**

**accepted on the recommendation of**

**Prof. Dr. P. Günter, examiner**

**Prof. Dr. H. Gränicher, co-examiner**

**1988**

## PHOTOREFRACTIVE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF $\text{KNbO}_3$ CRYSTALS

### Abstract

Both doped and nominally pure  $\text{KNbO}_3$  single crystals exhibit extraordinarily attractive photorefractive properties. These crystals possess simultaneously favorable photoconductivity and also large electro-optic effects. These properties can be finally shaped to measure by different consecutive procedures after crystal growth, according to various applications and their needs. It was found that the electrochemical reduction is an extremely suitable method.

It was one aim of the present work to examine the photorefractive properties of pure and doped  $\text{KNbO}_3$  crystals before and after such treatments. It is of special interest to obtain more information about the defect centers active in the photorefractive process. In doing this, optical spectroscopy, photoconductivity experiments, paramagnetic resonance technique, and photorefractive methods were applied.

In the introduction an overview of the phenomenological theory of the photorefractive effect, based on band models, is given. For this task, it was necessary to develop partly new approaches and special approximations, which were discussed in the interpretation of the experimental results obtained with  $\text{KNbO}_3$ .

Because of the exceptionally large electro-optic coefficients  $r_{42}$  and  $r_{51}$  of  $\text{KNbO}_3$ , an essential part of the present thesis deals with the discussion of the so called anisotropic Bragg diffraction. In case of the special type of diffraction occurring in such photoinduced gratings, the polarization directions of the incident and diffracted linearly polarized light beams differ, i.e. they are orthogonal with respect to each other. As  $\text{KNbO}_3$ , being an optically biaxial crystal, possesses a relatively large birefringence, the incident and diffracted wave propagate with different velocities and have different absolute values of their wave vectors. This leads to very special diffraction conditions. The occurring diffraction geometries are discussed and the pertinent experimental results are presented. In a theoretical treatment based on the "coupled wave theory", an analytical solution of the diffraction efficiency for weak violations of the Bragg condition is deduced and discussed.

One of the objectives of the present work was the design and investigation of an optically addressable light deflector. It was found that the anisotropic

Bragg diffraction in a special, non-critical configuration is ideally suitable for such an application. This was made possible by varying the spacing of the photoinduced grating by changing the wavelength of the writing beams. In such a configuration the read-out beam entering the crystal at a constant incidence angle is deflected in different directions depending on the wavelength of the writing beams. Changes of up to 57.7nm ( $457.9\text{nm} < \lambda < 514.5\text{nm}$ ) yielded a deflection range of up to  $5.67^\circ$  for a HeNe-laser beam.

In a second application this type of light deflection is used for the design of an optically addressable fiber switch. In the configuration described above, a variably deflected laser beam can be coupled by a focussing lens behind the crystal into any selected fiber of a linear array. A prototype of a linear array containing 128 multimode fibers was used for a 1x128 fiber switch. In this device the information beam entering through a fiber can be deflected to any position of the 128 exit channels (fibers) by a variation of the control wavelength (produced by a Rhodamin 6G dye laser). Using reduced  $\text{KNbO}_3$  single crystals as host of the variable grating, switching times of typically 1 ms and efficiencies of 1% can be reached (ratio of the intensities in the output and input fiber).

In a further application of anisotropic Bragg diffraction a special writing geometry is used. In these experiments the writing beams are diffracted by the self-induced grating. In contrast to the case of isotropic diffraction, the deflected beam differs both in direction and polarization with respect to the writing beams. This so called anisotropic self-diffraction is used for designing an optically addressable spatial light modulator or incoherent-to-coherent converter. In this application, in addition to the two writing beams a two dimensional image (information) is projected into the crystal. Thereby the photoinduced grating amplitude is changed in such a manner that in the bright zones of the projection the diffraction efficiency is decreased because of a local increase of the photoconductivity. In such a way the image can be transferred with inverted contrast from the incoherent beam onto the self-diffracted beam. A simple theoretical model describing the intensity transfer characteristics is proposed for this process, and the factors limiting the resolution are examined. Experiments with reduced  $\text{KNbO}_3$  single crystals led to resolutions of up to 10 line pairs per millimeter and conversion times of the order of 1 ms.

## PHOTOREFRAKTIVE EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNGEN VON $\text{KNbO}_3$ -KRISTALLEN

### Zusammenfassung

Sowohl dotierte als auch nominell reine  $\text{KNbO}_3$  Kristalle besitzen ausserordentlich attraktive photorefraktive Eigenschaften. Einerseits zeigen diese Kristalle grosse elektro-optische Effekte und sind andererseits gut photoleitend. Insbesondere eine nachträgliche Materialbehandlung eröffnet die Möglichkeit,  $\text{KNbO}_3$  Kristalle für die verschiedensten Anwendungen und Anforderungen "nach Mass zu schneiden". Dabei zeigt sich die elektrochemische Reduktion als äusserst geeignete Methode.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, die photorefraktiven Eigenschaften von reinen und dotierten Kristallen vor und nach solchen Behandlungen zu untersuchen. Insbesondere war es von Interesse, mehr Informationen über die im photorefraktiven Prozess aktiven Zentren zu erhalten. Es kamen dabei optische Spektroskopie, Photoleitfähigkeits-Messungen, paramagnetische Resonanz und photorefraktive Methoden zur Anwendung.

Zunächst wird in einer Einführung ein Überblick über die, auf Bandmodellen basierende, phänomenologische Theorie des photorefraktiven Effektes gegeben. Dabei werden teilweise neue Wege gegangen und spezielle Näherungen hergeleitet und diskutiert, soweit sie zur Interpretation von experimentellen Resultaten gebraucht werden.

Aufgrund der besonders grossen elektro-optischen Koeffizienten  $r_{42}$  und  $r_{51}$  von  $\text{KNbO}_3$  besteht ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit in der Diskussion der sogenannten anisotropen Bragg Beugung. Bei dieser speziellen Art von Beugung an photoinduzierten Gittern unterscheiden sich die Polarisationsrichtungen von einfallendem und abgebeugtem linear polarisiertem Licht, sie sind orthogonal zueinander. Da nun  $\text{KNbO}_3$  als optisch zweiachsiger Kristall eine im Vergleich zu andern hohe Doppelbrechung zeigt, breiten sich einfallende und abgebeugte Welle mit ganz verschiedenen Geschwindigkeiten aus und ihre Wellenvektoren haben verschiedene Beträge. Dies führt dazu, dass die Bragg Bedingung nur für ganz spezielle Beugungsgeometrien erfüllt werden kann. Diese Beugungsanordnungen werden diskutiert und mit dazugehörigen experimentellen Resultaten untermauert. In einer theoretischen Behandlung, basierend auf der "Theorie der gekoppelten Wellen", wird die analytische Lösung der Beugungseffizienz für Lichtwellen, welche die Bragg Bedingung zumindest beinahe erfüllen, hergeleitet und diskutiert.

Ein weiterer Teil der vorliegenden Arbeit ist die Realisierung eines optisch ansteuerbaren Lichtdeflektors. Es zeigte sich, dass die anisotrope Bragg Beugung in einer speziellen, nicht-kritischen Konfiguration ideal geeignet ist für eine solche Anwendung. Dabei wird die Gitterkonstante des photoinduzierten Gitters durch Veränderung der Wellenlänge der Schreibstrahlen variiert. Ein das Gitter auslesender Informationsstrahl wird dabei bei festgehaltenem Einfallswinkel je nach Schreibwellenlänge in verschiedene Richtungen abgelenkt. Bei einer Wellenlängenänderung von 57.7nm ( $457.9\text{nm} < \lambda < 514.5\text{nm}$ ) wird ein HeNe-Laserstrahl in einem Bereich von  $5.67^\circ$  abgelenkt.

In einer weiteren Anwendung wird diese Lichtablenkung zur Realisierung eines optisch ansteuerbaren Fiberschalters benutzt. In der oben beschriebenen Konfiguration kann der variabel abgelenkte Lesestrahl durch eine, hinter den Kristall geschaltete, Fokussier-Optik in eine beliebige Fiber, aus einer Anzahl linear angeordneten Fibern, eingekoppelt werden. Mit einem Prototypen von 128 linear angeordneten Multimode-Fibern wurde ein 1x128-Fiberschalter aufgebaut und untersucht. Dabei kann durch Variation einer Steuerwellenlänge (erzeugt durch einen Rhodamin 6G Farbstofflaser) der Informationsstrahl von einer Eingangsfiber in eine beliebige der 128 Ausgangskanäle (Fibern) gekoppelt werden. Bei Benutzung von reduzierten  $\text{KNbO}_3$  Kristallen als Träger des variablen Gitters können Schaltzeiten von typischerweise 1ms und totale Kopplungswirkungsgrade von 1% erreicht werden (Verhältnis der Intensität in der Ausgangs- zu der in der Eingangsfiber).

In einer letzten Anwendung der anisotropen Beugung wird eine spezielle Schreibordnung benutzt, bei der einer der beiden Schreibstrahlen an einem selbst induzierten Gitter abgelenkt wird. Im Unterschied zur isotropen Beugung unterscheidet sich der abgelenkte Strahl sowohl in Richtung als auch in der Polarisation von den Schreibstrahlen. Diese sogenannte anisotrope Selbstbeugung wurde zur Realisierung eines optisch ansteuerbaren, räumlichen Lichtmodulators oder Inkohärent-kohärent Wandlers benutzt. Dabei wird zusätzlich zu den Schreibstrahlen ein zweidimensionales Bild (Information) in den Kristall projiziert. Dies bewirkt eine Veränderung der photoinduzierten Gitteramplitude derart, dass in den hellen Zonen der Projektion die Beugungseffizienz verkleinert wird. So kann das Bild, mit umgekehrtem Kontrast, auf den abgelenkten Strahl übertragen werden. In einem einfachen theoretischen Modell wird dieser Prozess analysiert und die verschiedenen, die Auflösung begrenzenden Faktoren werden diskutiert. Experimente mit reduzierten  $\text{KNbO}_3$  Kristallen ergaben Auflösungen von bis zu 10 Linienpaaren pro Millimeter und Schreibzeiten in der Größenordnung von 1ms.