

NICHTLINEAR OPTISCHE EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNGEN
VON KNbO_3 KRISTALLEN

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines

DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

der

EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von

JEAN-CLAUDE BAUMERT

Dipl. Phys. ETH

geboren am 8. April 1955

von Luxembourg

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. H. Melchior, Referent

PD Dr. P. Günter, Korreferent

NICHTLINEAR OPTISCHE EIGENSCHAFTEN UND ANWENDUNGEN VON KNbO₃ KRISTALLEN

Zusammenfassung

In KNbO₃ Kristallen sind grosse nichtlinear optischen Koeffizienten gemessen worden, welche Anwendungen dieses Materials in der nichtlinearen und integrierten Optik interessant erscheinen lassen. Insbesondere, integriert optische Wellenleiter in KNbO₃ Kristallen wären interessant zur Erzeugung von kurzwelligem (blauen) Licht aus GaAlAs-Halbleiterlaserlichtquellen, unter Ausnützung der optische Frequenzverdopplung.

Ein Ziel dieser Arbeit war deshalb die genauere Bestimmung der fünf nichtlinear optischen Koeffizienten von KNbO₃ mit Hilfe der Maker-Interferenz- und der Keil-Methode. Die Dispersion dieser Koeffizienten wird hier erstmals bestimmt so dass diese nun im Wellenlängenbereich $826 \text{ nm} < \lambda < 1064 \text{ nm}$ bekannt sind. Aus diesen Daten konnte, mit Hilfe der Jerphagnon-Regel, sowie genaueren Werten für die Spontanpolarisation, gezeigt werden, dass die Koeffizienten d_{31} , d_{32} und d_{33} negatives Vorzeichen besitzen.

Bedingt durch seine grossen nichtlinear optischen Koeffizienten und günstige Phasenanpassungseigenschaften kann KNbO₃ als effizienter Frequenzverdopplerkristall für verschiedene Laserlichtquellen eingesetzt werden. Der Wellenlängenbereich, in dem nichtkritische Typ I Phasenanpassung für den NLO Koeffizienten d_{32} möglich ist ($840 \text{ nm} < \lambda < 950 \text{ nm}$), überlappt teilweise mit dem Emissionsbereich von Al_xGa_{1-x}As Halbleiter- und Styryl-9 (und -11) Farbstofflaser.

Ein Hauptziel dieser Arbeit war es den Einsatz von KNbO₃ für die Frequenzverdopplung von Licht von Halbleiterlasern (von $\lambda = 860 \text{ nm}$ auf $\lambda = 430 \text{ nm}$) näher zu untersuchen. In Weiterführung von Experimenten mit Multimodelasern konnte erstmals das Licht eines kontinuierlichen Einmoden-Halbleiterlasers ($\lambda = 841 \text{ nm}$) mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 5 \cdot 10^{-5}$ bei einer Grundwellenleistung von nur 5.8 mW frequenzverdoppelt werden. Die Leistung der zweiten Harmonischen betrug 0.28 μW und im Pulsbetrieb wurden bis zu 20 μW erreicht.

Durch resonatorinterne Frequenzverdopplung eines Styryl-9 Farbstofflasers wurde abstimmbare Einmodenstrahlung bei Wellenlängen in der Nähe von 430 nm mit einer Leistung von 21 mW erzeugt. Die zweite Harmonische eines modensynchronisierter Nd:YAG-Lasers ($\lambda = 1064$; $\bar{P}_\omega = 5.8$ W; Pulsdauer ≈ 100 ps, Repetitionsrate 82 MHz) wurde mit einem Wirkungsgrad von 32.6%, unter Ausnützung der nichtkritischen Phasenanpassung bei 188°C für den NLO Koeffizienten d_{31} in KNbO_3 erzeugt. Die Doppelbrechung und die Dispersion der Brechungsindizes ermöglichen in KNbO_3 nichtkritische phasenangepasste Summenfrequenzerzeugung von Nd:YAG- (1064 nm) und Rubin- (694 nm) Laserlicht bei 27.2°C. Experimentell wurde in einem 4.34 mm langen Kristall eine Spitzenleistung bei der Summenfrequenz ($\lambda = 420$ nm) von 59.4 W erreicht. Die Signalwellenleistung betrug $P_{1064} = 5$ W (CW) und die Pumpwellenspitzenleistung $P_{694} = 20$ kW.

Mögliche Anwendungen von KNbO_3 Kristallen in der integrierten Optik werden als weiteres Hauptziel dieser Arbeit untersucht. Erstmals wurde ein elektrooptisch induzierter optischer Wellenleiter in KNbO_3 hergestellt, unter Ausnützung des elektrooptischen Koeffizienten $r_{33} = 64$ pm/V. Das elektrische Feld zwischen den zwei, auf der Kristalloberfläche parallel verlaufenden Elektroden erzeugt durch elektrooptischen Effekt eine Brechungsindexänderung. Ein Wellenleitereffekt konnte bereits bei Spannungen von 10 V beobachtet werden. Bei einer Spannung von 30 V wurde eine Modulationstiefe von 12 dB gemessen.

Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Lichtfeldverteilung und der effektiven Brechzahlen im Wellenleiter wurde entwickelt und auf die benützte Wellenleiterkonfiguration angewendet. Dieses erlaubt eine schnelle, numerisch stabile Integration der Wellengleichung für planare Wellenleiter, und kann auch im Rahmen der "effective Index" Methode für Streifenwellenleiter eingesetzt werden. Die dafür erstellten Computerprogramme wurden für Modellrechnungen zur optischen Frequenzverdopplung in KNbO_3 -Wellenleitern benützt. Die Kombination eines solchen Wellenleiters mit einem Halbleiterlaser bietet Aussicht auf die Konstruktion einer kompakten und effizienten "Festkörperlichtquelle" im blauen Spektralbereich.

NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES AND APPLICATIONS OF KNbO_3 CRYSTALS

Abstract

Large nonlinear optical (NLO) coefficients have been measured in KNbO_3 , indicating that this material may find interesting applications in the fields of nonlinear and integrated optics. Above all, integrated optical waveguides in KNbO_3 crystals might be used for efficient blue light generation from GaAlAs-lasers via optical frequency doubling.

Therefore one part of this work was to measure more accurately the five NLO coefficients of KNbO_3 , using the Maker-fringe and wedge techniques. The first measurements of the dispersion of these coefficients, covering the wavelength range $826 \text{ nm} < \lambda < 1064 \text{ nm}$, have been performed. From these results and more precise values of the spontaneous polarization it has been shown, using the Jерphagnon-rule, that the NLO coefficients d_{31} , d_{32} and d_{33} have negative signs.

Light from various lasers can be frequency doubled with high conversion efficiency, due to the large NLO coefficients and favourable phase-matching properties of KNbO_3 . The wavelength range within which non-critical Type I phase-matching for the NLO coefficient d_{32} is possible ($840 \text{ nm} < \lambda < 950 \text{ nm}$), overlaps the emission range of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ semiconductor lasers and Styryl-9 (and -11) dye lasers.

A principal goal of this work was the investigation of KNbO_3 as a frequency doubler of semiconductor laser light. Experiments with multi-mode lasers have been extended for the first time to CW single mode semiconductor lasers; a conversion efficiency $\eta = 5 \cdot 10^{-5}$ was achieved with a fundamental power of only 5.8 mW at $\lambda = 841 \text{ nm}$. The second harmonic power was 0.28 μW and in pulsed operation powers up to 20 μW were reached.

Tunable single mode radiation at wavelengths around 430 nm and powers of 21 mW were obtained by intracavity second harmonic generation in a Styryl-9 dye laser. The second harmonic of a mode-locked Nd:YAG laser ($\lambda=1064 \text{ nm}$; $\bar{P}_\omega=5.7 \text{ W}$; pulse duration $\approx 100 \text{ ps}$; repetition rate 82 MHz)

was generated with a conversion efficiency of 32.6%, using non-critical phase-matching at 188°C with the NLO coefficient d_{31} . The birefringence and dispersion of the refractive indices enable phase-matched sum frequency generation with Nd:YAG (1064 nm) and ruby (694 nm) laser light at 27.2°C. A peak power of 59.4 W (pulse width 50 ns) at the sum frequency ($\lambda = 420.2$ nm) was achieved with a crystal 4.34 mm long. The CW signal power was 5 W and the peak pump power 20 kW.

A second main goal of this work was to study applications of KNbO_3 to integrated optics. The first electrooptically induced optical waveguide in KNbO_3 , using the electrooptic coefficient $r_{33} = 64$ pm/V, has been demonstrated. In this device, the electric field between two parallel electrodes deposited on the crystal surface produces, via the electrooptic effect, a change in the refractive index. A waveguide effect could be observed with only 10 V; at 30 V a modulation depth of 12 dB was measured.

A new method for the integration of the wave equation and for the determination of the effective indices in the waveguide was developed. It allows a fast and numerically stable integration of the wave equation in planar waveguides, and can also be used together with the effective index method for channel waveguides. The related computer programs were used for calculations of frequency doubling in a simplified model of a KNbO_3 waveguide. Such a waveguide could be used in combination with a semiconductor laser as a compact, solid state light source in the blue range of the visible spectrum.