ETH zürich

ETH Library

K_1-yNayTa_1-xNbxO_3 thin films for integrated electro-optics

Doctoral Thesis

Author(s):
Herzog, Christian

Publication date:
2007

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-005409890

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH No. 17275

$K_{1-y}Na_yTa_{1-x}Nb_xO_3$ Thin Films for Integrated Electro-Optics

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Natural Sciences

presented by

CHRISTIAN HERZOG

Dipl. Phys. ETH

born 10 September 1975

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Günter, examiner
Prof. Dr. Germano Montemezzani, co-examiner

2007

Abstract

Potassium tantalate niobate ($KTa_{1-x}Nb_xO_3$, or short KTN) is a perovskite dielectric whose outstanding dielectric and electro-optic properties have attracted a great attention in the optics community in the past decades. Apart from being used as bulk crystals in modulators or deflectors, the prospect of exploiting its large nonlinear-optic coefficients in integrated optic devices has always been appealing. For years, ion implantation has been the only available method to produce waveguides of reasonable quality in this material family, but this approach is inherently restricted by the tunneling losses into the substrate. In the early 1990s, epitaxial growth methods for perovskite oxides yielded initial thin films, but it wasn't until 2004 that the first waveguiding potassium tantalate niobate epitaxial films were reported by the NTT labs in Japan. For the production of good optical quality waveguide devices, the challenge is to find a pair of substrate and thin film materials that share very similar lattice parameters and allow the growth of defect-free thin films with an optically flat surface.

In this thesis we present the first waveguiding thin films of paraelectric potassium sodium tantalate niobate ($K_{1-y}Na_yTa_{1-x}Nb_xO_3$, KNTN) epitaxially grown on potassium tantalate (KT) substrates, the production of ridge waveguides, and electro-optic phase modulation therein. $K_{1-y}Na_yTa_{1-x}Nb_xO_3$ is essentially KTN with a small fraction y of the potassium substituted with sodium, allowing the crystal lattice to be slightly modified to match the KT substrate in the epitaxial growth process, which tremendously improves the crystal quality of the thin film. The work is a continuation of two Ph.D. theses in the Nonlinear Optics Laboratory (Roland Gutmann [1] and Harald Pierhöfer [2]) and marks an important step towards the use of electro-optic KNTN thin films for integrated optic devices.

In the first chapter of this thesis, the basics of dielectric materials, the ferro- and paraelectric phases, and the phase transitions between these phases are introduced. The perovskite and lithium niobate materials and their electro-optic properties are presented. In the second chapter, the fundamentals of guided and integrated thin film optics are discussed and the prominent qualification of KNTN thin films for this field of application is elucidated. Chapters three and four, which have been published in peer-reviewed journals, deal with the details of the production and characterization of planar waveguides and ridge waveguide phase modulation in paraelectric KNTN thin films on KT substrates. More sophisticated devices that could benefit from the particular electro-optic properties of KNTN thin films are discussed in chapter five, before a conclusion of the work presented in this thesis is given in chapter six. Using a cryostatic interferometer setup that was developed for the determination of the electro-optic coefficients of KNTN at low temperatures, the

unclamped Pockels effect of congruent lithium niobate at cryogenic temperatures was investigated and related to the polarization-optic coefficients of this material. This work is presented in Appendix A and was also published in a scientific journal.

Zusammenfassung

Kalium-Tantalat-Niobat ($KTa_{1-x}Nb_xO_3$, kurz KTN) ist ein dielektrisches Material in Perovskitstruktur, dessen außergewöhnliche dielektrische und elektrooptische Eigenschaften in den vergangenen Jahrzehnten große Aufmerksamkeit in der Optik erregt haben. Neben dem Einsatz ganzer Kristalle in Modulatoren und Deflektoren hat die Aussicht auf eine Ausnutzung der großen nichtlinear-optischen Koeffizienten in der integrierten Optik von Anfang an das Interesse an diesem Material geweckt. Für viele Jahre war die Ionenimplantation die einzige verfügbare Methode, um Wellenleiter vernünftiger Qualität in dieser Materialfamilie herzustellen, aber diese Technik ist inhärent durch die Tunnelverluste in das Substrat limitiert. Anfang der 90er Jahre lieferten epitaktische Zuchtmethoden von Perovskitoxiden frühe Muster von Dünnfilmen, aber die ersten wellenleitenden Kalium-Tantalat-Niobat-Filme wurden nicht vor 2004 von den NTT-Labors in Japan veröffentlicht. Für die Herstellung von Wellenleitern guter optischer Qualität besteht die Herausforderung darin, ein Paar von Substrat- und Dünnfilmmaterialien zu finden, die sehr ähnliche Gitterparameter aufweisen und die Zucht defektfreier Dünnfilme mit optisch glatter Oberfläche erlauben.

In dieser Doktorarbeit stellen wir die ersten wellenleitenden Dünnfilme aus paraelektrischem Kalium-Natrium-Tantalat-Niobat ($K_{1-y}Na_yTa_{1-x}Nb_xO_3$, KNTN) vor, die epitaktisch auf Kalium-Tantalat-Substraten (KT) aufgewachsen wurden, sowie die Produktion von Rippenwellenleitern und elektrooptische Phasenmodulation in diesen Wellenleitern. $K_{1-y}Na_yTa_{1-x}Nb_xO_3$ ist im Wesentlichen KTN, wobei ein kleiner Teil y des Kaliums durch Natrium ersetzt wird, was es uns erlaubt, im epitaktischen Zuchtprozess die Gitterabstände an die der KT-Substrate anzupassen, wodurch sich die Kristallqualität der Dünnfilme enorm verbessert. Diese Arbeit baut auf zwei Doktorarbeiten des Nonlinear Optics Laboratory auf (Roland Gutmann [1] and Harald Pierhöfer [2]) und stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu integriert-optischen Bausteinen auf der Basis elektrooptischer KNTN-Dünnfilme dar.

Im ersten Kapitel dieser Dissertation werden die Grundlagen dielektrischer Materialien, der ferro- und paraelektrischen Phasen und deren Phasenübergänge eingeführt. Die Materialien der Perovskitfamilie und Lithiumniobat werden vorgestellt, zusammen mit ihren elektrooptischen Eigenschaften. Im zweiten Kapitel werden die Grundsätze der geführten und integrierten Dünnfilmoptik vermittelt, und die ausgezeichnete Eignung von KNTN-Dünnfilmen für diesen Einsatzbereich wird diskutiert. Kapitel drei und vier, die in Fachzeitschriften veröffentlicht wurden, handeln von den Einzelheiten der Herstellung und Charakterisierung von planaren Wellenleitern und der Phasenmodulation in Rippenwellenleitern in paraelektrischen KNTN-Dünnfilmen auf KT-Substraten. Weiter entwickelte Bauteile, die von den außerge-

wöhnlichen elektrooptischen Eigenschaften von KNTN-Dünnfilmen profitieren könnten, werden in Kapitel fünf vorgestellt, worauf in Kapitel sechs ein Fazit der in dieser Doktorarbeit vorgestellten Forschungsarbeit gezogen wird. Ein kryostatischer Interferometeraufbau, der für die Messung der elektrooptischen Koeffizienten von KNTN bei tiefen Temperaturen entwickelt wurde, diente zur Bestimmung des ungeklemmten Pockelseffekts in kongruentem Lithiumniobat bei kryogenen Temperaturen und dessen Beziehung zu den polarisationsoptischen Koeffizienten in diesem Material. Dieser Teil der Arbeit, der ebenfalls veröffentlicht wurde, wird in Anhang A vorgestellt.