



## Doctoral Thesis

# Antenna-coupled nanometer thin-film Ni-NiO diodes for the detection of 30 THz infrared radiation

**Author(s):**

Wilke, Ingrid; Baltes, Henry

**Publication Date:**

1993

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000896061> →

**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](#).

**ANTENNA-COUPLED NANOMETER THIN-FILM  
Ni-NiO-Ni DIODES FOR THE DETECTION OF  
30 THz INFRARED RADIATION**

A DISSERTATION

submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE  
of  
TECHNOLOGY ZURICH  
ETH

for the degree of Doctor of Natural Sciences

presented by  
INGRID WILKE

Master of Science, State University of New York at Albany, U.S.A.  
Diplom-Physikerin, Julius-Maximilians Universität Würzburg, B.R.D.  
born March 31, 1963  
German citizen

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. F.K. Kneubühl, ETH Zürich, referee  
Prof. Dr. H. Baltes, ETH Zürich, co-referee

## Summary

We report on development and experimental study of antenna-coupled thin-film nanometer Ni-NiO-Ni diodes which are used to detect  $10.6\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ -laser radiation. With a minimum contact area of  $0.056\mu\text{m}^2$ , they are the smallest compared to those previously manufactured.

The Ni-NiO-Ni nanometer structures are fabricated with the aid of electron-beam direct-writing lithography. The  $2200\text{\AA}$  Ni- and  $33\pm 10\text{\AA}$  NiO-films are deposited by sputtering. The experimentally determined nonlinearities of the current-voltage characteristics  $I(V)$  of our Ni-NiO-Ni diodes are stronger than those of previously fabricated thin-film MOM diodes. They are comparable to the nonlinearities of the  $I(V)$  characteristics of point-contact MOM diodes hitherto reported in literature.

The Ni-NiO-Ni diodes are connected to microstrip dipole antennas which serve to couple the electric field of the  $\text{CO}_2$ -laser radiation to the Ni-NiO-Ni diode. The thin-film Ni-NiO-Ni diodes and the attached microstrip dipole antennas are deposited on  $385\mu\text{m}$  thick silicon substrates which are covered with a layer of  $1.6\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$  on both sides. We have found that in low power applications  $1.6\mu\text{m}$  of  $\text{SiO}_2$  yields excellent quarter-wave matching layers at wavelengths centered at  $\lambda_0=10.8\mu\text{m}$ . Due to this coating 79% of the incident  $\text{CO}_2$ -laser radiation is transmitted through the Si-substrate compared to 48% in the case of the uncoated Si-substrate. The microstrip dipole antenna is more sensitive to the  $\text{CO}_2$ -laser radiation which incidents from the Si-substrate than to the  $\text{CO}_2$ -laser radiation which incidents from air. Therefore, the  $\text{SiO}_2$ -quarter-wave matching layer, combined with a mirror on the back-side of the Si-substrate, which reflects the  $\text{CO}_2$ -laser radiation on the thin-film antenna, considerably improves the performance of the microstrip dipole antenna.

In order to identify the slow thermal part of the laser-induced response of the MOM diode detector, we have calculated the relative strength of the absorption of the  $\text{CO}_2$ -laser radiation in the  $\text{SiO}_2$ -, Si- and Ni-layers and of Joule's heat which is caused by the power dissipation of the laser-induced ac antenna currents. By measuring the infrared response of the Ni-NiO-Ni diode detectors as a function of the polarisation of the linearly-polarised  $\text{CO}_2$ -laser radiation as well as wavelength and diode temperature, we have demonstrated that the polarisation independent signal voltage includes the thermal contributions. They are mainly caused by absorption of the  $\text{CO}_2$ -

laser radiation in the SiO<sub>2</sub>. Furthermore, we have proven that the detected polarisation dependent response of the Ni-NiO-Ni diode is due to antenna coupling.

In order to improve the coupling between the electric field of the CO<sub>2</sub>-laser radiation and the microstrip dipole antenna, we have studied the laser-induced response of the Ni-NiO-Ni diode detectors as a function of the length  $L$  of the dipole antenna. We have observed that the laser-induced response strongly increases for shorter antennas and exhibits a distinct maximum at  $L=(2.8\pm 0.3)\mu\text{m}$ . This observation can be explained by the theory derived for free-space thin-linear wire dipole antennas. The maximum at  $L=(2.8\pm 0.3)\mu\text{m}$ , which is equal to the wavelength of the incident CO<sub>2</sub>-laser radiation in the Si, confirms that the antenna receives mainly the radiation which incidents from the side of the Si-substrate. Furthermore, we have observed that the antenna currents are strongly attenuated as expected by theory. From the measured attenuation constant, we have concluded that the attenuation of the antenna currents is dominated by Coleman's effect. For the first time, we have investigated the radiation pattern of microstrip dipole antennas of different length. On this occasion, we have observed that the radiation pattern changes if the length of the dipole antenna is varied. This observation indicates that antenna currents propagate on the microstrip dipole antenna.

In addition to the microstrip dipole antennas on 385 $\mu\text{m}$  Si-substrates covered with a SiO<sub>2</sub>-quarter-wave matching layer, we have also deposited microstrip dipole antennas on SiO<sub>2</sub>/Si-substrates as thin as 5.2 $\mu\text{m}$ . We have found that for short antennas  $L=3\mu\text{m}$  the efficiency of the dipole antennas on the 5.2 $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub>/Si-substrate equals the efficiency of the dipole antennas deposited on 385 $\mu\text{m}$  Si-substrates covered with a SiO<sub>2</sub>-quarter-wave matching layer. However, the attenuation of the antenna currents on the thin substrates is less than on thick substrates for antennas longer than  $L=3\mu\text{m}$ .

Our measurements have been performed at rather low bias voltages and laser power densities because we have been interested in the basic properties of the microstrip dipole antenna. However, the overall performance of our Ni-NiO-Ni diode detectors is better than those of previously fabricated antenna-coupled thin-film MOM diodes. Therefore, we are convinced that based upon the results presented in this study, the overall performance of our Ni-NiO-Ni diodes can still be enhanced and will be a useful shock-proof device for detection and frequency mixing in future technical applications.

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden antennengekoppelte Dünnschicht Ni-NiO-Ni Dioden mit Nanometer Abmessungen entwickelt und hergestellt. Die Eignung dieser Dioden zur Detektion von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung der Wellenlänge  $\lambda_0=10.6\mu\text{m}$  wurde experimentell untersucht.

Die Grösse der Kontaktfläche der Ni-NiO-Ni-Dioden betrug  $0.056\mu\text{m}^2$ . Die Nanometerstrukturen wurden mit Hilfe von Elektronenstrahlolithographie erzeugt. Die  $2200\text{\AA}$  dünnen Ni-Filme und die  $33\pm 10\text{\AA}$  dünne NiO Schicht wurden mittels Plasmasputtern abgeschieden.

Die experimentell ermittelte Nichtlinearität der Strom-Spannungskennlinien unserer Ni-NiO-Ni Dioden ist stärker, als die zuvor von anderen Autoren untersuchter Dünnschicht Metall-Metalloxid-Metall (MOM) Dioden. Die Nichtlinearität unserer Ni-NiO-Ni Dioden ist vergleichbar mit den Nichtlinearitäten der Strom-Spannungskennlinien von Punktkontakt MOM Dioden.

Das elektrische Feld der zu detektierenden CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung wird mit einer Microstripdipolantenne an die Ni-NiO-Ni Diode gekoppelt. Diese Microstripdipolantenne und die mit ihr verbundene Ni-NiO-Ni Diode sind auf einem  $385\mu\text{m}$  dicken Siliziumsubstrat aufgebracht. Das Si-Substrat ist auf beiden Seiten mit einer  $1.6\mu\text{m}$  dicken SiO<sub>2</sub>-Schicht bedeckt. Wir haben entdeckt, dass eine SiO<sub>2</sub>-Schicht dieser Dicke die Reflexion der an der Oberfläche des Si-Substrates auftreffenden CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung erheblich vermindert für Wellenlängen im Bereich von  $\lambda_0=10.8\mu\text{m}$ . Die SiO<sub>2</sub>-Antireflexionsschicht erhöht die Transmission des Si-Substrates in diesem Wellenlängenbereich von 48% auf 79%.

Da die Microstripdipolantenne empfindlicher ist für CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung, die aus dem Silizium auftritt, als für die aus der Luft auftreffende CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung, führt die SiO<sub>2</sub>-Antireflexionsschicht, in Kombination mit einer verspiegelten Rückseite des Siliziumsubstrats, welche die in das Substrat transmittierte Laserstrahlung auf die Antenne zurückwirft, zu einer verbesserten Kopplung der Microstripdipolantenne an das Strahlungsfeld.

Um den langsamen thermischen Anteil des laserinduzierten Signals der Ni-NiO-Ni Diode zu bestimmen, haben wir die relative Stärke der Absorption der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung in den SiO<sub>2</sub>-, Si- und Ni-Schichten und die der Joule'schen Wärme berechnet und verglichen. Durch Messung des laserinduzierten Signals der Ni-NiO-Ni Diode als Funktion der Polarisation der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung, ihrer Wellenlänge und der Temperatur der Ni-NiO-Ni

Dioden, konnten wir nachweisen, dass der polarisationsunabhängige Anteil des detektierten Signals den thermischen Anteil enthält. Weiterhin konnten wir zeigen, dass der detektierte polarisationsabhängige Anteil durch die Kopplung der Microstripdipolantenne an das elektrische Feld der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung entsteht.

Um die Kopplung zwischen dem elektrischen Feld der CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung und der Microstripdipolantenne besser zu verstehen, haben wir das laserinduzierte Signal als Funktion der Länge L der Dipolantenne untersucht. Bei diesen Messungen haben wir beobachtet, dass das Signal für kurze Antennen stark zunimmt und ein Maximum bei  $L=(2.8\pm 0.3)\mu\text{m}$  aufweist. Die beobachtete Änderung des Signals als Funktion der Antennenlänge konnte durch die Theorie der Freiraumdipolantenne erklärt werden. Das beobachtete Maximum bei  $L=(2.8\pm 0.3)\mu\text{m}$  entspricht der Wellenlänge der einfallenden CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung im Si. Dies beweist, dass die Dipolantenne überwiegend die Strahlung empfängt, die aus dem Siliziumsubstrat einfällt. Bei diesen Messungen haben wir auch beobachtet, dass die Antennenströme stark gedämpft sind. Diese Beobachtung stimmt mit existierenden theoretischen Überlegungen überein. Der Wert der von uns bestimmten Dämpfungskonstante zeigt, dass die Dämpfung durch den Coleman'schen Effekt verursacht wird.

Darüberhinaus haben wir erstmals die Strahlungsdiagramme von Microstripdipolantennen verschiedener Länge bei einer Wellenlänge von  $\lambda_0=10.6\mu\text{m}$  untersucht. Wir haben beobachtet, dass sich die Strahlungsdiagramme ändern, wenn die Länge der Dipolantenne variiert wird. Eine Änderung des Strahlungsdiagramms als Funktion der Antennenlänge ist ein wesentlicher Hinweis darauf, dass sich Antennenströme auf der Microstripdipolantenne ausbreiten.

Zusätzlich zu den Microstripdipolantennen, die auf den bereits beschriebenen 385 $\mu\text{m}$  dicken Si-Substraten auflagen, die mit 1.6 $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> bedeckt waren, haben wir auch Microstripdipolantennen untersucht, die sich auf 5.2 $\mu\text{m}$  dünnen SiO<sub>2</sub>/Si-Substraten befanden. Auch im Fall eines dünnen Substrats haben wir beobachtet, dass das laserinduzierte Signal für kürzere Antennen zunimmt. Für eine Antennenlänge von  $L=3\mu\text{m}$  ist die Effizienz beider Substrate gleichwertig. Für längere Dipolantennen sind die Antennenströme auf den dünnen Substraten weniger stark gedämpft als auf den dicken Substraten.

Das Ziel unserer Untersuchungen war das Verständnis der grundlegenden Eigenschaften der Microstripdipolantenne. Deshalb wurden die in dieser Arbeit beschriebenen Messungen bei eher niedrigen Biasspannungen und Laserleistungsdichten durchgeführt. Trotzdem ist die Leistungsfähigkeit unserer Ni-NiO-Ni Dioden vergleichbar, oder teilweise sogar besser, als die Leistungsfähigkeit zuvor in anderen Arbeiten untersuchter antennengekoppelter Dünnsfilm-MOM-Dioden. Aufgrund des im Rahmen dieser Arbeit erzielten Verständnis sind wir deshalb überzeugt, dass die Leistungsfähigkeit unserer antennengekoppelter Dünnsfilm-Ni-NiO-Ni-Dioden noch erheblich gesteigert werden kann. Daher betrachten wir sie als ein nützliches Instrument für die Detektion und Frequenzmischung in zukünftigen technischen Anwendungen.