Diss. ETH No. 12453

Nanometer Thin-film Ni-NiO-Ni Diodes for Detection and Mixing of 30 THz Radiation

A dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology
ETH Zürich

for the degree of Doctor of Natural Sciences

presented by

Christophe Olivier Fumeaux
Dipl. Phys. ETH
born July 26, 1967
citizen of Conthey (VS)

accepted on the
recommendation of

Prof. Dr. F.K. Kneubühl, ETH Zurich, referee
Prof. Dr. H. Melchior, ETH Zurich, co-referee
Prof. Dr. G.D. Boreman, Univ. of Central Florida, Orlando, co-referee

Zurich, December 1997

Summary

We report on the realization and the experimental study of thin-film Ni-NiO-Ni diodes with integrated infrared antennas. These diodes are applied as detectors and mixers of 28 THz CO_2-laser radiation with difference frequencies up to 176 GHz. They constitute a mechanically stable alternative to the point-contact MOM diodes used today in heterodyne detection of such high frequencies. Thus, they represent the extension of present millimeter and microwaves thin-film and antenna techniques to the infrared.

Our thin-film Ni-NiO-Ni diodes are fabricated on SiO_2/Si substrates with the help of electron-beam lithography at the IBM Research Laboratory (Rüschlikon, Switzerland). We have reduced the contact area to 110 nm × 110 nm in order to achieve a fast response of the device. This contact area is in the order of those of point-contact diodes and represents the smallest ever reported for thin-film MOM diodes. The thin NiO layer with a thickness of about 35 Å is deposited by sputtering. Our thin-film diodes are integrated with planar dipole, bow-tie and spiral antennas that couples the incident field to the contact.

The second derivative I"(V) of the nonlinear I(V) characteristics at the bias voltage applied to the diode is measured at a frequency of 10 kHz. It determines the detection and second-order mixing performed with the diode for frequencies from dc to at least 30 THz. The I"(V) characteristics exhibit for low bias voltage V_{bias} a linear dependence, which is followed by a saturation and a maximum for high V_{bias}. The zero-bias resistance of the diode is in the order of 100 Ω. It is not strictly inversely proportional to the contact area of the diode.

The first application of our thin-film diodes was the detection of cw CO_2-laser radiation. The measured dc signal generated by the diode when illuminated with 10.6 μm radiation includes a polarization-independent contribution, caused by thermal effects. This contribution is independent of the contact area and of the type of integrated antenna. The polarization-dependent contribution of the signal originates in rectification of the antenna currents in the diode by nonlinear tunneling through the thin NiO layer. It follows a cosine-squared dependence on the angle of orientation of the linear polarization, as expected from antenna theory. For the linearly polarized dipole and bow-tie antennas, the maximum detection signals are therefore measured for the polarization parallel to the antenna axis. Bow-tie antennas with a half-length of 2.3 μm generate the highest detection signals. The full length of these antennas corresponds to 3/2 of the wavelength of the incident 10.6 μm radiation in the supporting Si substrate. The relevance of the substrate wavelength confirms that our antennas are more sensitive to the radiation incident from the substrate side. The time of response of our thin-film diode is not limited by the speed of the electron-tunneling effect, but by the RC time constant of the diode

circuitry. Thus, the overall best performances are attained by the diodes with the smallest contact areas and corresponding capacitances.

The study of the polarization response of our integrated asymmetric spiral antennas revealed the contribution of an unbalanced mode propagating on the antenna arms beside the fundamental balanced mode. The imbalance is caused by the reactive impedance of the diode and by the asymmetry of the antenna arms in the feed region. In addition, the response of the diode is influenced by reflection of the antenna currents near the end of the spiral arms. The resulting polarization of our spiral antenna is therefore not the expected circular polarization, yet an elliptical polarization with an axial ratio in the order of 0.12.

Furthermore, we have demonstrated the presence of two distinct additive thermal effects besides the fast antenna-induced contribution by the measurement of the response of our thin-film diodes to 35 ps optical-free-induction-decay (OFID) CO_2-laser pulses. The measured characteristic times of these two relatively slow relaxations are $\tau_1 \approx 100$ ns and $\tau_2 \approx 15$ ns. These exponential relaxations observed are explained by thermal diffusion in the SiO_2 and in the Ni layers of our structures. These time constants show that thermal effects influence mixing processes at low difference frequencies.

For the first time, the operation of thin-film diodes as mixers of 28 THz radiation was demonstrated. Difference frequencies up to 176 GHz have been measured when the diode was irradiated by two CO_2-laser beams and microwaves generated by a Gunn oscillator working at 58.8 GHz. These difference frequencies were generated in mixing processes from the second to the fifth order. These experiments were performed with thin-film Ni-NiO-Ni diodes with the minimum contact area of 0.012 μm^2 and integrated resonant bow-tie antennas. The transmission of the high-frequency signals to the spectrum analyzer was accomplished using integrated rhodium waveguides and flip-chip connections. The diode and the antenna were irradiated through the substrate, taking advantage of the better sensitivity of the antenna to radiation incident from the substrate side. The dependence on the linear polarization of the mixing signal matches almost perfectly the ideal cosine-squared dependence predicted by antenna theory for bow-tie antennas. A ratio of the mixing signals for the polarization parallel to the axis versus the cross-polarization of over 50 was attained. The signal-to-noise ratios of our mixing signals demonstrate the potential of our type of diodes to respond to even higher carrier and difference frequencies. Also higher-order mixing can be achieved with our thin-film diodes.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Dünnfilm-Ni-NiO-Ni-Dioden mit integrierten Antennen hergestellt und experimentell untersucht. Diese Dioden werden als Detektoren und als Mischer für 28 THz CO_2-Laserstrahlung zur Erzeugung von Differenzfrequenzen bis zu 176 GHz eingesetzt. Sie stellen eine mechanisch stabile Alternative zu den Punktkontakt-MOM-Dioden dar, die heutzutage in der hochfrequenten Heterodyn-Detektion benützt werden. Diese Entwicklung bedeutet damit eine Erweiterung der bis anhin in der Millimeter- und Mikrowellen- Technologie verwendeten Dünnfilm- und Antennen-Techniken ins mittlere Infrarot.

Unsere Dünnfilm-Ni-NiO-Ni-Dioden werden auf SiO_2/Si Substrate mit Hilfe von Elektronstrahllithographie des IBM Forschungslaboratoriums (Rüschlikon, Switzerland) hergestellt. Wir haben die Kontaktflächen bis auf 110 nm × 110 nm reduziert, um kurze Diodenreaktionszeiten zu erzielen. Diese Kontaktflächen sind in der Grössenordnung von Punktkontakt-Dioden. Unsere Dioden sind somit die kleinsten Dünnfilm-Dioden die bis jetzt hergestellt wurden. Die 35 Å dünne NiO Schicht wird durch Zerstäubung aufgebracht. Unsere Dünnfilm-Dioden sind mit planaren Dipol-, Schmetterlings- und Spiral-Antennen integriert. Diese koppeln das einfallende Feld in die Kontaktfläche.

Die zweite Ableitung I"(V) der nichtlinearen I(V) Kennlinie für die Diodenvorspannung V_{bias} wird vorerst bei einer Frequenz von 10 kHz gemessen. Wir konnten beweisen, dass die so gemessene Charakteristik I"(V) die Detektion und die Mischung zweiter Ordnung für Frequenzen von dc bis zu mindestens 30 THz bestimmt. Die I"(V) Kennlinie zeigt bei kleinen Vorspannungen V_{bias} eine lineare Abhängigkeit. Bei höheren Vorspannungen folgen eine Sättigung und ein Maximum. Der Widerstand bei Null-Vorspannung ist in der Grössenordnung von 100 Ω. Für unsere Dioden ist dieser nicht streng umgekehrt proportional zur Kontaktfläche.

Die erste Anwendung unserer Dünnfilm-Dioden betrifft Detektion kontinuierlicher 10.6 μm CO_2-Laserstrahlung. Die von der Diode erzeugten laserinduzierten dc Signale enthalten einen polarisations-unabhängigen Anteil, der durch thermische Effekte verursacht wird. Dieser Beitrag zum Gesamtsignal zeigt keine Abhängigkeit von der Grösse der Kontaktfläche und vom verwendeten Antennentyp. Der polarisations-abhängige Anteil des laserinduzierten Signals entsteht dagegen durch Gleichrichtung der Antennenströme in der Diode. Dieser Prozess beruht auf nichtlinearem Tunneln durch die dünne NiO-Schicht. Wie von der Antennentheorie erwartet, zeigt dieser Anteil eine Kosinus-Quadrat Abhängigkeit von der Orientierung der linearen Polarisation. Die maximalen Detektionssignale für die linear polarisierten Dipol- und Schmetterlings-Antennen werden deswegen mit der Polarisation des Lasers parallel zur Antennenachse gemessen. Schmetterlings-Antennen mit einer Gesamtlänge von 4.6 μm erzeugen die

stärksten Detektionssignale. Diese Länge entspricht 3/2 der dielektrischen Wellenlänge der einfallenden 10.6 μm Strahlung im Si Substrat. Es zeigt, dass unsere Antennen empfindlicher sind für Strahlung die aus dem Substrat auftrifft. Die Reaktionszeit unseren Dünnfilm-Dioden wird nicht durch den raschen Tunneleffekt begrenzt, sondern durch die RC Zeitkonstante des Diodenstromkreises. Die besten Detektionssignale werden also von den Dioden mit den kleinsten Kontaktflächen und entsprechenden Kapazitäten erzeugt.
Die Polarisationsantwort unserer asymmetrischen Spiral-Antennen enthält den Beitrag einer unsymmetrischen Mode, die sich neben der symmetrischen Grundmode auf den Antennenarmen fortpflanzt. Die Diodenantwort wird zusätzlich durch Reflektionen von Antennenströmen in der Nähe der Spiralenden beeinflusst. Die resultierende Polarisation unserer Spiral-Antenne ist deshalb nicht die erwartete Zirkularpolarisation, sondern eine flache elliptische Polarisation.
Darüber hinaus haben wir die Antwort unserer Dünnfilm-Dioden auf 35 ps 10 μm Pulse unseres OFID-CO_2-Lasersystems gemessen. Wir haben auf diese Weise die Existenz von zwei additiven thermischen Effekten neben dem raschen antenneninduzierten Effekt bewiesen. Die gemessenen charakteristischen Zeiten dieser verhältnissmässig langsamen Relaxationen betragen $\tau_1 \approx 100$ ns und $\tau_2 \approx 15$ ns. Diese exponentiellen Relaxationen werden durch thermische Diffusion innerhalb der SiO_2- und der Ni-Schichten unserer Strukturen erklärt. Diese Zeitkonstanten deuten darauf hin, dass thermische Effekte niederfrequente Mischprozesse beeinflussen.
Unsere Dünnfilm-Dioden wurden zum ersten Mal als Mischer für 28 THz Strahlung eingesetzt. Die Dioden wurden zu diesem Zweck mit zwei CO_2-Laserstrahlen entsprechend verschiedenen Vibrations-Rotations-Uebergängen sowie mit Mikrowellen bei einer Frequenz von 58.8 GHz bestrahlt. Unter diesen Umständen wurden Differenzfrequenzen bis 176 GHz in Mischprozessen zweiter bis fünfter Ordnung gemessen. Diese Experimente wurden mit Dünnfilm-Ni-NiO-Ni-Dioden mit einer Kontaktfläche von 0.012 μm^2 und integrierten Schmetterlings-Antennen durchgeführt. Die Transmission der Hochfrequenzsignale zum Spektralanalysator wurde durch integrierte Rhodium-Wellenleiter und Flip-Chip Kontaktstellen gewährleistet. Diode und Antenne wurden durch das Substrat hindurch bestrahlt. Auf diese Weise wurde die bessere Empfindlichkeit der Antenne für Strahlung, die aus dem Substrat einfällt ausgenützt. Die Abhängigkeit der Mischsignale von der linearen Polarisation entspricht beinahe der idealen Kosinus-Quadrat Abhängigkeit, die von der Antennentheorie für Schmetterlings-Antennen vorausgesagt wird. Die Mischsignale für die Polarisation parallel zur Antennenachse sind 50 Mal grösser als bei senkrechter Polarization. Die Signal-Rausch-Verhältnisse unserer Mischsignalen zeigen die Möglichkeit, dass unsere Dünnfilm-Dioden noch bei weit höheren Träger- und Differenz-Frequenzen und ebenfalls in Mischprozessen höherer Ordnung verwendet werden können.