

## Anhang

### A) Bestimmung des Grenzwertes $\hat{U}_{pth}$ in der Amplitude der sinusförmigen Pumpwelle

Ausgangspunkt ist die Gleichung (3.12) mit der die Signalausbreitung auf NLTL unter Wirkung der parametrischen Verstärkung beschrieben wird. Sie ist hier in etwas geänderter Form noch einmal aufgeführt:

$$\frac{\partial U}{\partial x'} - \delta U \frac{\partial U}{\partial t'} - L'C'' \frac{\partial^3 U}{\partial t'^3} = \frac{C_0'}{G'} \frac{\partial^2 U}{\partial t'^2} - \frac{R'}{L'} U + \frac{\partial (f(x',t') \cdot U)}{\partial t'} \quad (\text{A1})$$

Die Nichtlinearität ist dabei durch  $g(U) = \delta U$  angenähert. Ohne den Einfluß von Verlusten und ohne Pumpwelle  $f(x',t')$  beschreibt Gleichung (A1) die Generation und Ausbreitung von Solitonen auf der NLTL (s.a. Abb. 3.4). Ein einzelnes Soliton ist in diesem System analytisch beschrieben durch [12,13]:

$$U(x',t') = \hat{U}_s \operatorname{sech}^2 \left[ \left( t' + \frac{\delta \hat{U}_s x'}{3} - t_0 \right) t_s^{-1} \right] \quad (\text{A2})$$

und breitet sich, als eine Art Eigenwert des Systemes, forminvariant und mit einer Geschwindigkeit, die über den Faktor  $\delta \hat{U}_s / 3$  von der Amplitude des Solitons selbst abhängig ist, auf der Leitung aus. Ferner ist die Impulsweite (Halbwertsbreite) des Solitons  $t_s$  mit

$$t_s = \sqrt{\frac{12L'C''}{\delta \hat{U}_s}} \quad (\text{A3})$$

durch die Nichtlinearität und dei Tiefpass-Filtereigenschaften der Leitung gegeben. Im folgenden wird nun angenommen, daß die Ausbreitung eines Solitons nach Gleichung (A2) durch die Summanden der rechten Seite von Gleichung (A1) nur schwach gestört wird. Weiterhin ist bekannt, daß eine Verstärkung der Solitonenamplitude durch die als sinusförmig angenommene harmonische Pumpwelle nur bei Überschreitung eines Grenzwertes für die Amplitude der Pumpwelle und nur in Bereichen mit  $\partial/\partial t' > 0$  erfolgt. Der Grenzwert  $\hat{U}_{pth}$  wird im folgenden analytisch

bestimmt. Zur Vereinfachung wird dazu weiterhin angenommen, daß sich durch geeignete Wahl von  $\hat{U}_s$  die Pumpwelle mit der gleichen Phasengeschwindigkeit wie das Soliton auf der Leitung ausbreitet und sich das Soliton in dem Bereich der sinusförmigen Pumpwelle befindet, in dem  $\partial/\partial t'$  einen Maximalwert annimmt. Die Pumpwelle wird daher zu

$$f(x', t') = \delta \hat{U}_p \sin \left[ \omega_p \left( t' + \frac{\delta \hat{U}_s x'}{3} - t_0 \right) \right] \quad (\text{A4})$$

gewählt. Das Einsetzen der Gleichungen (A2) und (A4) in Gleichung (A1) führt dann zur folgenden Gleichung, welche die örtliche Entwicklung der Solitonenamplitude unter Einfluß von Verlusten und der Pumpwelle beschreibt:

$$\frac{\partial \hat{U}_s}{\partial x'} = \hat{U} \left( -\frac{2R'}{3L'} - \frac{8C_0'}{15G't_s^2} + \frac{\pi}{24} \delta \hat{U}_p t_s \omega_p^2 (4 + \omega_p^2 t_s^2) \frac{1}{\sinh\left(\frac{\pi}{2} \omega_p t_s\right)} \right) \quad (\text{A5})$$

Für den Fall, daß sich die Amplitude des Solitons während der Ausbreitung auf der NLTL nicht ändert, ist die Wirkung der Verluste und die Verstärkung durch die Pumpwelle exakt ausgeglichen. Die dazu notwendige Amplitude der Pumpwelle entspricht dem gesuchten Grenzwert, der sich aus Gleichung (A5) mit  $\partial \hat{U}_s / \partial x' = 0$  zu

$$\hat{U}_{pth} = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{\frac{R'}{L'} + 0,8 t_s^{-2} \frac{C_0'}{G'}}{\delta t_s \omega_p^2 (4 + \omega_p^2 t_s^2)} \sinh \left( \frac{\pi}{2} \omega_p t_s \right) \quad (\text{A6})$$

ergibt.

### B) Herleitung der nichtlinearen Feldgleichung (3.15) zur Beschreibung der Signalausbreitung auf RTD-NLTL:

Das T-Ersatzschaltbild aus Abb. 3.13b wird zunächst in das differentielle Ersatzschaltbild nach Abb. B1 umgewandelt:

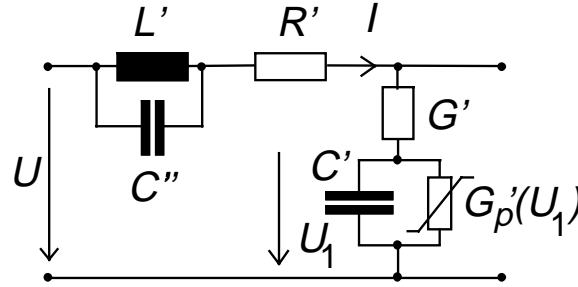


Abb. B1: Differentielles Ersatzschaltbild einer RTD-NLTL

Aus diesem Ersatzschaltbild wird, nach eliminieren des Stromes, folgende Wellengleichung abgeleitet:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = & L'C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + L'G_p'(U_1) \frac{\partial U}{\partial t} - L'C'' \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial t^2} \\ & - \frac{C'}{G'} \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial t} + R'C' \frac{\partial U}{\partial t} + R'G_p'(U_1)U \end{aligned} \quad (\text{B1})$$

Unter der Annahme schwacher Verluste, insbesondere einer schwachen Resonanzdämpfung ( $\omega C' \ll G'$ ) und eine unwesentliche Beeinflussung der Signalausbreitung durch den Widerstandsbelag  $R'$  ( $R'G_p' \ll 1$ ,  $R' \ll \omega C'$ ), geht die Gleichung über in:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = L'C' \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - L'C'' \frac{\partial^4 U}{\partial t^4} - \frac{C'}{G'} \frac{\partial^3 U}{\partial t^3} + L'G_p'(U) \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (\text{B2})$$

wobei im zweiten und vierten Summanden  $\partial^2 U / \partial x^2$  in erster Näherung durch  $1/v_0 (\partial^2 U / \partial t^2)$  ersetzt wurden ( $1/v_0 = \sqrt{L'C'}$ ). Die Transformation in das mitbewegte Koordinatensystem liefert mit  $x' = x/2v_0$  und  $t' = t - x/v_0$  und den daraus abgeleiteten Differentialoperatoren

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{2v_0} \frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{v_0} \frac{\partial}{\partial t'} \quad (\text{B3})$$

und

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} \quad (\text{B4})$$

folgende Gleichung:

$$\frac{1}{4} \frac{\partial^2 U}{\partial x'^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial x' \partial t'} = \frac{G_p'(U)}{C'} \frac{\partial U}{\partial t} - L'C'' \frac{\partial^4 U}{\partial t'^4} - \frac{C'}{G'} \frac{\partial^3 U}{\partial t'^3} \quad (\text{B5})$$

Unter der Voraussetzung einer schwachen Änderung der Signalform bei Ausbreitung entlang der Leitung und einer Integration über  $t'$  geht Gleichung (B5) über in:

$$\frac{\partial U}{\partial x'} = L'C'' \frac{\partial^3 U}{\partial t'^3} - \frac{G_p'(U)}{C'} U + \frac{C'}{G'} \frac{\partial^2 U}{\partial t'^2} \quad (\text{B6})$$

was der gesuchten Feldgleichung entspricht.

## 7 Literaturverzeichnis

Eigene Veröffentlichungen sind mit \* gekennzeichnet

- [1] H. Wang, T. N. Ton, K. L. Tan, D. Garske, G. S. Dowe, J. Berenz, M. W. Popieszalski, and S. K. Pan, "A D-band monolithic low-noise amplifier", in Proc. 1992 IEEE GaAs IC Symp. ,Miami, USA 1992
- [2] R. Madjidi-Ahy, C. K. Nishimoto, M. Riazat, M. Glenn, S. Silverman, S.-L. Weng, Y.-C. Pao, G. A. Zdasiuk, S. G. Bandy, and Z. C. Tan, "5-100GHz InP coplanar waveguide MMIC distributed amplifier", IEEE Tran. MTT , Vol. 38, No. 12. pp. 1986-1993, 1990
- [3] E. R. Brown, J. R. Söderström, C. D. Parker, L. J. Mahoney, .K. M. Molver, and T. C. McGill, "Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling-diodes", Appl. Phys. Lett., Vol. 58, No. 20, pp. 2291-2293, 1991
- [4] H. Rothermel, T. G. Phillips, and J. Keene, "A solid-state frequency source for radio astronomy in the 100 to 1000 GHz range", Int. J. Infrared Millimeter Waves, Vol. 10, No. 1, pp. 83-100, 1989
- [5] T. W. Crowe, R. J. Mattauch, H. P. Röser, W. L. Bishop, W. C. B. Peatman, and X. Liu, "GaAs Schottky diodes for THz mixing applications", Proc. IEEE, Vol. 80, No. 11, pp. 1827-1841, 1992
- [6] D. Körkel, D. R. Grischkowsky and M. B. Ketchen, "Subpicosecond electrical pulse generation using photoconductive switches with long carrier lifetimes", Appl. Phys. Lett. 54, pp. 1046-1047, 1989
- [7] D. H. Auston, "Impulse response of photoconductors in transmission lines", IEEE Joun. Quantum Electron., Vol. 19, No. 4, 1983
- [8] W. C. von Wendorff, „Ultraschnelle optoelektronische und elektrooptische Meßtechnik in planaren Leitungsstrukturen", Dissertation, Fachgebiet Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1994
- [9] R. Yu, J. Puhl, Y. Konishi, M. Case, M. Kamegawa, and M. Rodwell, "A time-domain millimeter-wave vector network analyzer", IEEE Microwave Guided Wave Lett. Vol. 2, No. 8, pp. 319-321, 1992
- [10] C. H. Lee, "Picosecond Optics and Microwave Technology", IEEE Trans MTT, Vol. 38, No.5, pp. 596-607

- 
- [11] A. Scott, "Active and nonlinear wave propagation in electronics", John Wiley-Verlag, 1970
- [12] D. Jäger, "Characteristics of travelling waves along the non-linear transmission lines for monolithic integrated circuits: a review", *Int. J. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 649-669, 1985
- [13] D. Jäger, "Pulse generation and compression on nonlinear transmission lines", Workshop on "Picosecond and Femtosecond Electromagnetic Pulses: Analysis and Applications", 1993 MTT-S Symp. Dig., pp 37-57, 1993
- [14] R. Meinel, G. Neugebauer und H. Steudel, „Solitonen, nichtlineare Strukturen", Akademie Verlag, Berlin 1991
- [15] A. C. Scott, F. Y. F. Chu, and D. W. Mc Laughlin, "The Soliton, a new concept in applied science", *Proc. IEEE*, vol. 61, pp. 1443-1448, 1973
- [16] R. Y. Yu, M. Case, M. Kamegawa, M. Sundaram, M. J. W. Rodwell, A. W. Gossard, "275GHz 3-Mask Integrated GaAs Sampling Circuit", *Electr. Lett.* Vol.26, No.13, pp. 949-951, 1990
- [17] C. J. Madden, M. J. W. Rodwell, R. A. Marsland, D. M. Bloom und Y. C. Pao, "Generation of 3.5-ps fall-time Shock waves on a monolithic GaAs nonlinear transmission line", *IEEE Electr. Device Lett.*, Vol. 9, pp. 903-905, 1988
- [18] M. Case, M. Kamegawa, R. Yu und M. J. W. Rodwell, "Impulse compression using soliton effects in a monolithic GaAs circuit", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, no. 2, pp. 173-175, 1991
- [19] H. Shi, W. M. Zhang, C. W. Domier, N. C. Luhmann, L. B. Sjogren, H. X. L. Liu, "Novel concepts for improved nonlinear transmission line performance", *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, Vol. 43, no. 4, pp. 780-789, 1995
- [20] W. C. B. Peatman, T. W. Crowe, and M. Shur, "A Novel Schottky/2-DEG Diode for Millimeter and Submillimeter-Wave Multiplier Applications", *IEEE Electr. Device Lett.*, Vol. 13, no. 1, pp. 11-13, 1992
- [21] D. Jäger, R. Kremer, and A. Stöhr, "Travelling-wave optoelectronic devices for microwave applications", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Digest*, Vol. 1, pp. 163-166, 1995
- [22] W. Schottky, "Halbleiterteorie der Sperrschicht", *Naturwissenschaften*, Vol. 26, 1983.

- 
- [23] D. Jäger und J.-P. Becker, "Distributed variable-capacitance microstrip lines for microwave applications", *J. Appl. Phys.*, vol. 12, pp 203-207, 1977
- [24] R. Müller und W. Heywang, "Halbleiter Elektronik", Band 2, Springer-Verlag Berlin 1987
- [25] M. Dragoman, R. Kremer und D. Jäger, "Pulse generation and compression on a travelling-wave MMIC Schottky diode array", in: *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics*, H.L. Bertoni, L. Carin, and L.B. Felsen, eds., Plenum Press, New York, pp. 67-74, 1993
- [26] Y. Fukuoka und T. Itho, "Slow-wave coplanar waveguide on periodically doped semiconductor substrate", *IEEE-MTT*, vol.:31, pp. 1013-1017, 1983
- [27] Y. Fukuoka und T. Itho, "Design consideration of uniform and periodic coplanar Schottky variable phase shifter", *Proc. 13<sup>th</sup> European Microwave Conf.* pp. 278-282, 1983
- [28] G. W. Huges und R. M. White, "Microwave properties of nonlinear MIS and Schottky-barrier microstrip", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 22, pp. 945-956, 1975
- [29] D. Jäger, "Slow-wave propagation along variable Schottky-contact microstrip line", *IEEE MTT*, vol. 24, pp 566-576, 1976
- [30] D. Jäger, R. Kremer, and A. Stöhr, "Travelling-wave optoelectronic devices for microwave applications", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Digest*, Vol. 1, pp. 163-166, 1995
- [31] L. Brillouin, "Wave propagation in periodic structures", Dover Publications, Inc. 1960
- \*[32] R. Hülsewede, S. Knigge, R. Buß, M. Dragoman, and D. Jäger, "Strong nonlinear Phenomena in Periodic Structures and their Applications", *NATO-Workshop on Nonlinear Microwave Signal Processing*, Roma, Italy, 1995
- [33] D. Jäger, "Soliton propagation along periodic-loaded transmission line", *Appl. Phys.*, vol. 16, pp. 35-38, 1978
- [34] D. Jäger, "Experiments on KdV-solitons", *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 5, pp. 1686-1693, 1982
- [35] D. Jäger, "Nonlinear slow-wave propagation on periodic Schottky coplanar lines", *IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium*, St. Louis 1985, *Symp. Dig.*, pp. 15-17 (1985)

- 
- [36] M. Alles, Th. Braasch, and D. Jäger, "High-speed coplanar Schottky travelling-wave photodetectors", Topical Meeting on Integrated Photonics Research, Boston, 1996
- \*[37] M. Alles, R. Heinzelmann, R. Hülsewede, R. Kremer, S. Redlich, A. Stöhr, and D. Jäger, "Wave propagation in planar structures for travelling wave semiconductor devices", PIERS' 96, Innsbruck, 1996
- \*[38] D. Jäger, R. Hülsewede, and R. Kremer, "Travelling-wave MMIC Schottky, MSM and pn diodes for microwave and optoelectronic applications", Proc. CAS 93', Bucharest, Romania, pp. 19-29, 1993
- \*[39] I. V. Ryjenkova, V. K. Mezentsev, L. S. Musher, S. K. Turitsyn, R. Hülsewede, and D. Jäger, "Millimeter wave generation on nonlinear transmission lines", Ann. des Telecomm., Vol. 52, No. 3-4, pp.134-139, 1997
- \*[40] D. Jäger, V. K. Mezentsev, S. L. Musher, I. V. Ryjenkova, S. K. Turitsyn and R. Hülsewede, "Wave propagation on nonlinear transmission lines", PIERS 1997, Hong Kong,
- \*[41] D. Jäger, R. Hülsewede, I. V. Ryjenkova, V. K. Mezentsev, and L. S. Musher "Microwave propagation on nonlinear transmission lines", URSI GA, Lille, 1996
- \*[42] R. Hülsewede, V. K. Mezentsev, L. S. Musher, I. V. Ryjenkova, S. K. Turitsyn, and D. Jäger, "Travelling wave generation of millimeter-waves in bi-modal NLTs", 26th EuMC, Prague, 1996
- \*[43] R. Hülsewede, V. K. Mezentsev, L. S. Musher, I. V. Ryjenkova, S. K. Turitsyn, and D. Jäger, "Millimeter wave generation on nonlinear transmission lines", 1996 Int. Workshop on Millimeter Waves, Orvieto, 1996
- \*[44] R. Hülsewede, V. K. Mezentsev, L. S. Musher, I. V. Ryjenkova, S. K. Turitsyn and D. Jäger, "Nonlinear transmission lines for millimeter wave applications", 4th Int. Workshop Integrated Nonlinear Microwave and Millimeterwave Circuits, Duisburg 1996
- [45] R. A. Marsland, C. J. Madden, D. W. Van Der Weide, M. S. Shakouri und D. M. Bloom, "Monolithic integrated circuits for millimeter-wave instrumentation", Proc. IEEE GaAs IC Symp., New Orleans, pp. 19-22, 1990



- 
- [46] M. J. W. Rodwell, S. T. Allen, R. Y. Y. Yu, M. G. Case, U. Bhattacharya, M. Reddy, E. Carman, M. Kamegawa, Y. Konishi, J. Puhl, R. Pullela, "Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics", *IEEE Proc.*, vol. 82, no. 7, pp. 1037-1059, 1994
- [47] D. W. Van der Weide, "Delta-doped Schottky diode nonlinear transmission lines for 480-fs, 3.5-V transients", *Appl. Phys. Lett.* 65, 7, pp. 881-883, 1994
- [48] D. Jäger und J.-P. Becker, "Distributed variable-capacitance microstrip lines for microwave applications", *J. Appl. Phys.*, vol. 12, pp 203-207, 1977
- [49] J. W. Archer, R. A. Batachelor und C. J. Smith, "Low-parasitic, planar Schottky diodes for millimeter-wave integrated circuits", *IEEE MTT*, vol. 38, pp. 15-25, 1990
- [50] W. L. Bishop, K. McKinney, R. J. Mattauch, T. W. Crowe and G. Gren, "A novel whiskerless Schottky diode for millimeter and submillimeter wave applications", *Proc. IEEE MTT-S Int. Symp.*, Las Vegas, pp. 607-610, 1987
- [51] N. I. Ng, D. Pavlidis, M. Jaffe, J. Singh und H.F. Chau, "Design and experimental Characteristics of strained In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As (x>0.53) HEMT's", *IEEE Trans. Electron Dev.*, vol. ED-36, pp. 2249, 1989
- [52] U. K. Mishra, A. S. Brown, M. J. Delaney, P. T. Greiling, und F. C. Krumm, "The AlInAs-GaInAs HEMT for microwave and millimeter-wave applications", *IEEE MTT*, vol.37, pp. 1279, 1989
- [53] M. Wojtowicz, R. Lai, D. C. Streit, G. I. Ng, T. R. Block, K. L. Tan, P. H. Liu, A. K. Freudenthal und R. M. Dia, "0.10 $\mu$ m graded InGaAs Channel InP HEMT with 305 GHz  $f_t$  and 340 GHz  $f_{max}$ ", *IEEE Electron Dev. Lett.*, vol. 15, pp. 477-479, 1994
- [54] W. C. B. Peatman, T. W. Crowe, and M. Shur, "A Novel Schottky/2-DEG Diode for Millimeter-and Submillimeter-Wave Multiplier Applications", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 13, no.1, pp. 11-13, 1993
- [55] D. Kaiser, "Koplanarleitnugen auf halbleitendem Substrat als Bauelemente für monolithische Höchstgeschwindigkeitsschaltungen", Dissertation, Fachbereich Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 1990
- [56] D. Jäger, W. Rabus und W. Eickhoff, "Bias-dependent small signal parameters of Schottky contact microstrip line", *Solid-St. Electron.*, vol. 17b, pp. 777-783, 1974

- 
- [57] R. M. Bertenburg, "Technologie koplanarer monolithisch integrierter Mikrowellenschaltungen auf Galliumarsenid unter Verwendung von Submikron-Feldeffekttransistoren", Dissertation, Fachgebiet Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1992
- [58] A. Gasch, "Optische Bistabilität im Mikrowellenbereich: Modellsysteme und integrierte Schaltungen", Dissertation, Fachbereich Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 1988
- [59] O. Zinke und H. Brunswig, "Lehrbuch der Hochfrequenztechnik", Band 1, Springer-Verlag Berlin 1990
- [60] K. Fränz und H. Lassen, "Antennen und Ausbreitung", Springer-Verlag 1956
- [61] R. Kremer, "Optisch gesteuerte Koplanarleitungen als III-V Halbleiterbauelemente für die Mikrowellensignalverarbeitung", Dissertation, Fachgebiet Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1997
- [62] D. Jäger, M. Block, D. Kaiser, M. Welters, and W. von Wendorf, "Wave propagation phenomena and microwave-optical interaction in coplanar lines on semiconductor substrate", *Electr. Lett.*, vol.9, pp. 201-203, 1991
- [63] J. Eilbeck, "Numerical Studies of Solitons", in "Soliton and Condensed Matter Physics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York, pp. 28-43, 1978
- [64] N. J. Zabusky and M. D. Kruskal, "Interaction of solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states", *Phys. Rev. Lett.*; vol. 15, pp. 240-242, 1965
- [65] T. Berning, "Puls- und Solitonenerzeugung in nichtlinearen dispersiven Medien mit Dissipation", Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 1987
- [66] W. F. Ames, "Numerical Methods for Partial Differential Equations" 2<sup>nd</sup> Ed. Nelson, London 1977
- [67] U. Effing, Dissertation, Fachgebiet Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg (in Vorbereitung)
- \*[68] R. Hülsewede, U. Effing, I. Wolff, and D. Jäger, "CAD of pulse compression on nonlinear transmission lines", *Proc. MIOP' 95*, Sindelfingen, pp. 511-515, 1995

- [69] A. Gasch, T. Berning and D. Jäger, "Generation and parametric amplification of solitons in a nonlinear resonator with a Korteweg-de Vries medium", Phys. Rev. A Rapid Commun., vol. 34, pp 4528-4531, 1986
- [70] A. Gasch, B. Wedding, "Bistabilität und dynamische Eigenschaften von Resonatoren mit quadratisch nichtlinearen Medien", DFG-Forschungsbericht Az. Jä309/2-2, 1985
- \*[71] R. Hülsewede, V. K. Mezentssev, I. V. Ryjenkova, S. K. Turitsyn and D. Jäger, "Generation of ps-Pulses on Nonlinear Transmission Lines using Parametric Amplification", App. Phys. Lett. (in Vorbereitung)
- [72] D. Jäger, "Über Eigenschaften und Anwendungen nichtlinearer Wellenausbreitung", Habilitationsschrift, Fachbereich Physik, Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 1979
- [73] R. Yu, Y. Konishi, S. T. Allen, M. Reddy, M. J. W. Rodwell, "A travelling-wave resonant tunnel diode pulse generator", IEEE Microwave and Guided Wave Lett., vol.4, no. 7, pp. 220-222, 1994
- [74] Sonderforschungsbereich 254, Höchsthfrequenz- und Höchstgeschwindigkeitsschaltungen aus III-V-Halbleitern, Ergebnisbericht 1993-1995
- \*[75] S. Knigge, M. Wicke, H. Pint, R. Hülsewede, D. Jäger, S. Malzer, G. H. Doehler, "Optische Bistabilität in hybriden Bragg- und nipi-Strukturen", VW-Photonik Symposium, 1993
- \*[76] A. Stöhr, O. Humbach, R. Hülsewede, and D. Jäger, "InGaAs/GaAs nin Modulators and Switches", Integrated Photonics Research Topical Meeting, San Francisco, USA, pp. 154-156, 1994
- \*[77] A. Stöhr, O. Humbach, R. Hülsewede, A. Wiersch, and D. Jäger, "An InGaAs/GaAs MQW optical switch based on field induced waveguides", Photon. tech. Lett., Vol.6, 1994
- \*[78] R. Heinzelmann, R. Hülsewede, A. Stöhr, D. Jäger, and H. Lakner, "Schichtstrukturen für elektrooptische Schalter", MBE-Workshop, Templin/Uckermark, 1994
- [79] M. A. Herman, H. Sitter, "Molecular Beam Epitaxy", Springer Series in Materials Science 7, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Tokyo, 1991
- [80] A. Y. Cho und J. R. Arthur, "Molecular Beam Epitaxy", Progress in Solid State Chemistry, Vol.10, 1975, pp. 157-191

- 
- [81] A. J. Cho, "The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy", Chap.1, Plenum Press New York, 1985
- [82] C. T. Foxon, "MBE Growth of GaAs and III/V-alloys", J. Vac. Sci. Techn. B1, Vol. 2, pp 293-297, 1983
- [83] P. K. Larsen, P. J. Dobson, "Reflection High-Energy Electron Diffraction and Reflection Electron Imaging of Surfaces", Plenum Press, New York and London, 1987
- [84] U. Auer, Dissertation, Fachgebiet Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg (in Vorbereitung)
- [85] H. Beneking, "Halbleitertechnologie", Teubner Verlag, 1991
- [86] W. Prost, "Einführung in die Technologie der III/V-Halbleiter", Manuskript zur Vorlesung "Halbleitertechnologie I", Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1993
- [87] R. Ludeke, E. H. C. Parker, R. M. King, "MBE Surface and Interface Studies" in: "The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy", Chap. 16, Plenum Press. New York, 1985
- [88] G. K. Reeves, H. B. Harrison, "Obtaining the Specific Contact Resistance from Transmission Line Measurements", IEEE Electr. Dev. Let., Vol. 3, No. 5, pp. 111-113, 1982
- [89] H. H. Berger, "Models for Contacts to Planar Devices", Solid-State Electr., Vol. 15, pp. 145-158, 1972
- [90] C. Heedt, P. Gottwald, W. Prost, F.J.Tegude, H. Künzel, J. Dickmann, H. Dämbkes, H. Nickel, W. Schlapp, R. Lösch, "Material characterisation of InGaAs/InAlAs heterostructure field-effect transistor with heavily doped n-type InAlAs donor layer", Proc InP and Related Materials Conference, Cardiff, April 1991
- [91] U. Auer, R. Reuter, C. Heed, W. Prost, and F.J. Tegude, "InP based HFETs with high quality short period InAs/GaAs superlattice channel layers", Journal of Crystal Growth, 146, 1996
- [92] K. C. Gupta, R. Garg und I. J. Bahl, "Microstrip Lines and Slotlines", Artech House, Dedham (Massachusetts, USA), 1979
- [93] R. K. Hoffmann, "Integrierte Mikrowellenschaltungen", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1983

- 
- [94] W. Hilberg, "Über die Möglichkeit, gewisse Wellenwiderstandsformeln, die Elliptische Integrale enthalten, durch Näherungsformeln beliebig hoch wählbarer Genauigkeit zu ersetzen", Arch. Elektronik u. Übertragungstechnik, AEÜ-21, 1967, pp. 603-616
- [95] W. Heinrich, "Design of Coplanar Waveguides for MM-Wave MMICs", Proc. MIOP '93, Sindelfingen, 1993, pp. 76-80
- [96] R. Müller, "Bauelemente der Halbleiter-Elektronik", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1986
- [97] S. J. Pearton, "Ion Implantation for Isolation of III-V Semiconductors", Verlag North-Holland, Amsterdam, 1990
- [98] K. Wohlleben und W. Becker, "Die Änderung von Konzentration und Beweglichkeit der Ladungsträger in GaAs bei Bestrahlung mit Protonen", Z. Naturforschung, Vol.21a, 1966, pp. 1057-1071
- [99] A. G. Foyt et al., "Isolation of Junction Devices in GaAs Using Proton Bombardement", Solid-State Electron., Vol.12, 1969, pp. 209-214
- [100] D. C. D'Avanzo, "Proton isolation for GaAs integrated circuits", IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-29, 1982, pp. 1051-1058
- [101] C. Heedt, P. Gottwald, F. Buchali, W. Prost, H. Künzel, F.J. Tegude, "On the Optimisation and Reliability of Ohmic- and Schottky Contacts to InAlAs/InGaAs HFET", Proc. 4<sup>th</sup> InP and Related Materials Conference, Newport, USA, 1992
- [102] Meinke, Gundlach, "Taschenbuch der Hochfrequenztechnik", Vierte Auflage, Herausgeber K. Lange, K. H. Löcherer, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1986
- [103] H. Groll, "Mikrowellenmeßtechnik", Vieweg-Verlag, Braunschweig 1969
- [104] G. David, "Höchstfrequenz-Charakterisierung von monolithisch integrierten Mikrowellenbauelementen und -schaltungen durch zweidimensionale elektrooptische Feldverteilungsmessungen", Dissertation, Fachgebiet Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1996
- [105] J. Buschke, "Implementierung und Anwendung eines On-Wafer-Kalibrationsverfahrens für die Netzwerkanalyse bis 40 GHz, Diplomarbeit, Fachgebiet Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1995
- [106] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", Second Edition, Wiley, New York 1981

- 
- [107] C. R. Crowell, S. M. Sze, "Current transport in metal-semiconductor barriers", *Solid State Electron.* 9 (1966) 695
- [108] P. Marsh, G. I. Ng, D. Pavlidis, and K. Hong, "InAlAs/InGaAs Varactor Diodes with THz Cutoff Frequencies Fabricated by Planar Integrated Technology", *Proc. 6<sup>th</sup> InP and Related Materials*, Santa Barbara, pp 595-598, 1994
- [109] S. M. Sze, G. Gibbons, "Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded pn-junctions in Ge, Si, GaAs and GaP", *Appl. Phys. Lett.*, No. 8, p. 111, 1966
- [110] D. Kalinowski, "Entwicklung eines Feldsondenmeßplatzes zur zweidimensionalen Analyse elektromagnetischer Feldverteilungen auf nichtlinearen Leitungen", Diplomarbeit, Fachgebiet Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1996
- [111] HP Product Note 8510-3, "Materials Measurement", Hewlett-Packard Company, Palo Alto, CA, USA 1986
- [112] K. Olberding, "Koplanare Wellenleiter auf halbleitendem Substrat", Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 1986
- [113] M. Born, E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, Oxford London Frankfurt 1964
- [114] I. Bahl, G. Lewis, and J. Jorgenson, "Automatic testing of MMIC wafers", *Int. Journal Microwave and Millimeter-Wave CAE*, vol. 1, no.1, pp. 77-89, 1991
- [115] I. Wolff, "Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie I", B.I. Wissenschaftsverlag, Mannheim Wien Zürich, 1991
- [116] G. David, S. Redlich, W. Mertin, R. M. Bertenburg, S. Kossowski, F. J. Tegude, E. Kubalek, and D. Jäger, "Two-dimensional direct electro-optic field mapping in a monolithic integrated GaAs amplifier", *Proc 23<sup>rd</sup> EuMC 1993*, Madrid, Spain, 1993, pp 497-499, 1993
- [117] G. David, P. Schmitz, S. Redlich, J. Buschke, R. Kremer, and D. Jäger, "Mode analyses of wave propagation on coplanar transmission lines using electro-optic field mapping", *APMC'94*, Tokyo, Japan 1994, pp. 149-152, 1994

- 
- [118] G. David, R. Tempel, I. Wolff, and D. Jäger, "Analysis of microwave propagation effects using 2D electro-optic field mapping techniques", *Optical and Quantum Electronics; Special Issue on Optical Probing of Ultrafast Devices and Integrated Circuits*, vol.28, 1996, pp. 919-931, 1996
- [119] G. David, P. Bussek, U. Auer, F. J. Tegude, and D. Jäger, "Electro-optic probing of RF-Signals in submicrometer MMIC devices", *Electron. Lett.* 31, vol. 25, pp. 2188-2189, 1995
- \*[120] Th. Braasch, G. David, R. Hülsewede, and D. Jäger, "Frequency and time domain characterisation of nonlinear transmission lines using electro-optic probing techniques", *MIOP' 97*, Sindelfingen,
- \*[121] Th. Braasch, G. David, R. Hülsewede, and D. Jäger, "Propagation of microwaves in MMICs studied by time- and frequency-domain electro-optic field mapping", *1997 Ultrafast Electronics and Optoelectronics Topical Meeting*, Incline Village, USA, 1997
- \*[122] Th. Braasch, G. David, R. Hülsewede, U. Auer, F. J. Tegude, and D. Jäger, "Propagation of Microwaves in MMICs Studied by Time- and Frequency-Domain Electro-Optic Field Mapping", *Proc. of OSA 1997 Ultrafast Electronics and Optoelectronics Topical Meeting*, Nevada, USA, 1997
- [123] H. Shigesawa, M. Tsuji, and A. A. Oliner, "A new mode coupling effect on coplanar waveguide of finite width", *1990 IEEE MTT-S Digest*. 1990, pp. 1063-1066
- [124] J. S. Dahele and A. L. Cullen, "Electric probe measurements on microstrip", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-28, No.7, pp. 752-755, 1980
- [125] J. H. Richmond, "Monopole antenna on circular disk", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-32, No.12, pp.1282-1287, 1984
- [126] Meinke, Gundlach, "Taschenbuch der Hochfrequenztechnik Band 2: Komponenten", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1992
- [127] R. Geißler, W. Kammerloher, H. W. Schneider, "Berechnungs und Entwurfsverfahren der Hochfrequenztechnik 2", Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden 1994
- [128] E. Voges, "Hochfrequenztechnik Band 2", Hüthing Buch Verlag Heidelberg, 1991

- 
- [129] T. Löffler, T. Pfeifer, H. G. Roskos, H. Kurz, and D. W. Van der Weide, "Stable optoelectronic detection of free-running microwave signals with 150GHz-Bandwidth", presented at the 5<sup>th</sup> EOBT, Wuppertal, 1995
- [130] J. A. Valdmanis, "1THz-bandwidth prober for high-speed devices and integrated circuits", *Electr. Lett.* Vol.23, No.24, pp.1308-1310, 1987
- [131] R. Y. Yu, M. Reddy, J. Puhl, S. T. Allen, M. Case, and M. J. W. Rodwell, "Millimeter-Wave On-Wafer Waveform and Network Measurements Using Active Probes", *IEEE MTT-S*, Vol.43, No.4, pp.721- 729, 1995
- [132] R. Y. Yu, J. Puhl, Y Konishi, M. Case, M. Kamegawa, and M. Rodwell, "A Time-Domain Millimeter-Wave Vector Network Analyser", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.* Vol.2, No. 8, pp. 319-321, 1992
- [133] U. Bhattacharya, S. T. Allen, and M. J. W. Rodwell, "DC-715 GHz sampling circuits and subpicosecond nonlinear transmission lines using elevated coplanar waveguide", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol.5, no. 2, pp. 50-52, 1995
- [134] S. Hofschien and I. Wolff, "Simulation of an elevated coplanar waveguide using 2D-FTDT", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1995
- [135] R. Haupt, "Experimentelle Untersuchung zur Integration von Schottky-Kontakt-Varaktordioden für den Einsatz in periodischen Leitungsstrukturen", Studienarbeit, Fachgebiet Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 1995
- [136] I. Wolff and M. Rittweger, "Finite difference time-domain analysis of planar microwave circuits", *Archiv f. Elektrotechn.*, Vol. 74, pp. 189-202, 1991
- [137] D. W. Van der Weide, J. S. Bostak, B. A. Auld und D. M. Bloom, "All-electronic generation of 880 fs, 3.5V shockwaves and their application to a 3THz free-space signal generation system", *Appl. Phys. Lett.*, vol 58, pp. 222-224, 1991
- [138] D. B. Rutledge, D. P. Neikirk und D. P. Kasilingam, "Integrated-circuit antennas", in *Infrared and Millimeter Waves*, vol.10, K. J. Button, Ed. New York: Academic Press, pp. 1-90, 1984
- [139] D. W. Van Der Weide, J. S. Bostak, B. A. Auld und D. m. Bloom, "All-electronic generation of 880 fs, 3,5 V shockwaves and their application to a 3 THz free-space signal generation system", *Appl. Phys. Lett.*, vol.58, pp. 222-224



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 254 im Fachgebiet Optoelektronik des Fachbereiches Elektrotechnik an der Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg entstanden.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. D. Jäger, dem Leiter des Fachgebietes und Sprecher des Sonderforschungsbereiches, bedanke ich mich sehr herzlich, sowohl für die Anregung und die - trotz knapper Zeit - intensive wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, als auch für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes.

Den Herren Prof. Dr. rer. nat. F.-J. Tegude und Prof. Dr.-Ing. I. Wolff danke ich für die mir in vielfältiger Weise gewährte Unterstützung, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ich danke Herrn Prof. Tegude weiterhin sehr herzlich für die freundliche Übernahme des Koreferates.

Meinen Kollegen und Kolleginnen, den Mitarbeitern des Fachgebietes Optoelektronik, danke ich für ihre Unterstützung und die intensive gute Zusammenarbeit. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dipl.-Ing. M. Alles und Dipl.-Ing. D. Kalinowski für ihre ständige Diskussionsbereitschaft und vielfältig geleistete Hilfe. Weiterhin möchte ich mich bei den Herren Dr.-Ing. G. David, Dr.-Ing. R. Kremer, Dipl.-Phys. Th. Braasch und Dipl.-Ing. P. Bussek bedanken, die durch ihren Einsatz im Bereich der Meßtechnik tatkräftig zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Bei Herrn Ing.-Grad H. Slomka und Frau V. Schedwill bedanke ich mich ihre vielfältige Unterstützung bei der Herstellung von homogenen nichtlinearen Leitungen.

Mein ganz besonderer Dank gilt darüberhinaus den Mitarbeitern benachbarter Fachgebiete, insbesondere der Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie und der Allgemeinen und Theoretischen Elektrotechnik, für die hervorragende Zusammenarbeit und vielfältig geleistete Hilfestellung in den Bereichen der Technologie und Simulation. Besonderer Dank gebührt dabei Herrn Dipl.-Phys. U. Auer für die Herstellung der InP-HFET-Schichtstrukturen und Frau A. Osinski für die Prozessierung von NLTL. Ferner bedanke ich mich sehr herzlich bei Dipl.-Ing. U. Effing für die Berechnung von NLTL mit dem von ihm entwickelten Zeitbereichs-Simulationsverfahren.

Für ihre Unterstützung im Rahmen der Arbeiten zur parametrischen Verstärkung bedanke ich mich hiermit auch besonders bei Dr. I. V. Ryjenkova und den Herren Dr. S. K. Turitsyn, Dr. V. K. Mezensev vom Institut of Automatics and Electrometry, Novosibirsk, Russia.

Besonders gefreut hat mich die freundliche Unterstützung von Dr. B. Holländer vom Institut für Schicht- und Ionentechnik der KFA Jülich bei der bereitwilligen Durchführung mehrerer Ionenimplantations-Prozesse, sowie von Dr. Th. Pfeiffer vom Institut für Halbleitertechnik an der RWTH Aachen für die Durchführung von Zeitbereichsmessungen an NLTL. Für ihre uneigennütige Hilfsbereitschaft sei ihnen an dieser Stelle noch einmal herzlich gedankt.

Gleichermaßen gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. D. van der Weide (University of Delaware, USA) für hilfreiche Diskussionen und die unkomplizierte Bereitstellung eines geeigneten Maskensatzes. Den Herren Prof. Dr. Chi. H. Lee (University of Maryland, USA), Prof. Dr. M. Dragoman (Department of Electrical Engineering, Bucharest, Romania) und Dr. P. Heymann (Ferdinand-Braun-Institut, Berlin) danke ich ebenfalls für ihre Diskussionsbereitschaft.

Nicht zuletzt danke ich den Verwaltungen des Fachgebietes Optoelektronik und des Sonderforschungsbereiches 254, namentlich Frau Reg. Ang. U. Gappa und Frau Reg. Ang. K. Tempel, für ihre freundliche und auf vielfache Weise geleistete Unterstützung.

Bei Herrn Dipl.-Ing. M. Alles möchte ich mich hiermit auch noch einmal für die Durchsicht des Manuskriptes bedanken und bei Herrn Dipl.-Ing. R. Buß für die vielseitige Hilfe bei der computergestützten Darstellung der Ergebnisse.

Der deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für gewährte finanzielle Unterstützung durch Sach- und Personalmittel.

Für die nicht selbstverständliche Geduld und ihre Unterstützung möchte ich mich besonders herzlich bei meiner Familie und allen, die im privaten Bereich durch die Anfertigung dieser Arbeit betroffen waren, bedanken.