

3D Bilderfassung im Terahertzbereich basierend auf elektrooptischer Detektion (3DTHz)



Prof. Dr.-Ing
Peter Haring Bolívar

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
und
Institut für Höchstfrequenztechnik
und Quantenelektronik

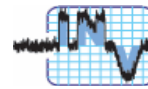
Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen



Prof. Dr.
Hartmut Roskos
Dr. Torsten Löffler

Physikalisches
Institut

J. W. Goethe-Universität
Max-von-Laue-Str. 1
60438 Frankfurt am Main



Prof. Dr.-Ing
Rudolf Schwarte

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
und
Institut für
Nachrichtenverarbeitung

Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen

Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen*

Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

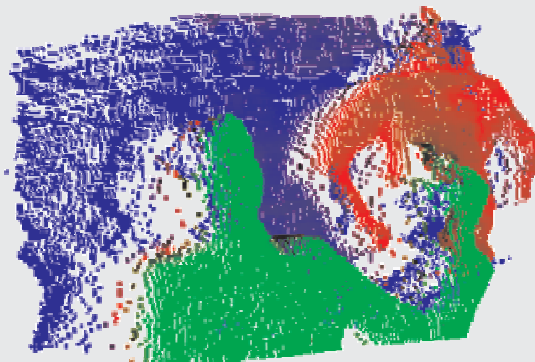
Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Loffeld

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen



INHALTSANGABE

1	Allgemeine Angaben	1
2.	Stand der Forschung, Eigene Vorarbeiten	3
2.1	Stand der Forschung	3
2.2	Eigene Vorarbeiten	6
2.2.1	THz-Bildgebung mit Gepulsten Systemen	6
2.2.2	Bildgebung mit Dauerstrich-THz-Strahlung	7
2.2.3	Elektro-Optische Detektion von cw THz-Strahlung	8
2.2.4	Entwicklung einer 3D-Kamera	10
3.	Ziele und Arbeitsprogramm	12
3.1	Ziele	12
3.1.1	Vernetzung Im Paketantrag	13
3.2.	Arbeitsprogramm	15
3.3	Untersuchungen am Menschen	23
3.4	Tierversuche	23
3.5	Gentechnologische Experimente	23
4.	Beantragte Mittel	24
4.1	Personalkosten	24
4.2	Wissenschaftliche Geräte	25
4.3	Verbrauchsmittel	27
4.4	Reisen	27
4.5	Sonstige Kosten	28
5.	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	28
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppe	28
5.2.	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern	29
5.3.	Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern	30
5.4.	Apparative Ausstattung	30
5.5	Laufende Mittel für Sachausgaben	32
5.6	Sonstige Voraussetzungen	32
6.	Erklärungen	33
7.	Unterschriften	33
8.	Verzeichnis der Anlagen	34
	Literatur	34

1 Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe
Neuantrag

1.1 Antragsteller

Prof. Dr. Ing. Peter Haring Bolívar,
Kennziffer: Ha 3022, geb. 20.03.1969
Staatsangehörigkeit: deutsch und mexikanisch
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und
Institut für Höchsthfrequenztechnik und Quantenelektronik, Universität Siegen
Hölderlinstrasse 3, 57068 Siegen
Tel. (0271) 740 2157, Fax: (0271) 7402410
peter.haring@uni-siegen.de
Privatadresse: Zum Lindenseifen 1b, 57482 Wenden, 02762 985468

Prof. Dr. Hartmut Roskos, Dr. Torsten Löffler,
Kennziffer: Ro 770, geb. 14.5.1959
Staatsangehörigkeit: deutsch
Physikalisches Institut, Johann Wolfgang Goethe-Universität
Max-von-Laue-Strasse 1, 60438 Frankfurt am Main
Tel. (069) 798-47214, Fax (069) 798-47221
roskos@physik.uni-frankfurt.de
Privatadresse: Altkönigstraße 40, 64176 Kronberg, 06173 / 939555

Prof. Dr. R. Schwarte
Kennziffer: Schw 630, geb. 8.1.1939
Staatsangehörigkeit: deutsch
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und
Institut für Nachrichtenverarbeitung, Universität Siegen,
Hölderlinstr. 3, 57068 Siegen
Tel.: (0271) 740-3330, Fax.: (0271) 740 4529
rudolf.schwarte@uni-siegen.de
Privatadresse: Kreuztalerstr. 56, 57250 Netphen

1.2 Thema

3D Bilderfassung im Terahertzfrequenzbereich basierend auf elektrooptischer
Detektion

1.3 Kennwort

3DTHz

1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung

Photonik, Halbleitertechnik, Terahertz (THz) Technologie, Photonic Mixing Devices, 3D Sehen.

1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer

4 Jahre

1.6 Antragszeitraum

2 Jahre

1.7 Gewünschter Beginn der Förderung

schnellstmöglich

1.8 Zusammenfassung

Gegenstand dieses Projektes ist die Erzeugung von statischen und bewegten Bildern mit elektromagnetischer Strahlung im Terahertz-Frequenzbereich (300GHz – 10THz). Die Forschung der letzten Jahre hat für die THz-Bildgebung ein großes Anwendungspotential nachgewiesen. Die Bildgebung leidet aber darunter, dass die Pixel eines Bildes mangels THz-Strahlleistung und mangels geeigneter Kameratechnologien sequentiell aufgezeichnet werden müssen. Eine Bildaufzeichnung ist damit zu langsam für viele praktische Zwecke. In diesem Kontext wird in diesem Projekt angestrebt das Potenzial der Realisierung:

- eines phasenempfindlichen 2-dimensionalen Detektionsarrays für freilaufende Dauerstrich-THz-Strahlungsquellen und
- einer entsprechenden Technologie für den Einsatz eines solchen Detektionsarrays zur 3D-Bilderfassung

zu untersuchen. Die Stärke des Vorschlags besteht darin, dass weitgehend auf existierende physikalische Prinzipien und Systeme zurückgegriffen wird. In diesem Projekt soll jedoch erstmalig die Kombination der photonic mixing device (PMD) Detektortechnologie mit cw elektrooptischer (EO) THz-Detektion untersucht und optimiert werden. Ein solches kombiniertes EO-PMD-Gesamtkonzept könnte dabei vielfältige neue Perspektiven zur Entwicklung eines bildgebenden Universalsystems für einen breiten Einsatz in unterschiedlichen THz-Anwendungsfeldern eröffnen. Durch die Erforschung dieses Konzepts kann die Entwicklung von real nutzbaren THz-Systemen deutlich unterstützt werden.

2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

2.1 Stand der Forschung

Der Terahertz-Frequenzbereich befindet sich im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen- und Infrarotstrahlung. Obwohl vergleichsweise schwach entwickelt, zeichnet sich ein breites Anwendungspotenzial für THz-Technologie ab. Durch intensive Forschung in den letzten Jahren konnten eine Vielzahl von Anwendungsgebieten identifiziert und technologische Möglichkeiten für breit einsetzbare THz-Systeme eröffnet werden [1]. Beispielsweise ist in der Sicherheitstechnik ein hohes Potenzial erkannt worden, welches in der bildgebenden chemischen Identifizierung von Materialien oder bei Screening-Anwendungen und Detektion von Drogen, Sprengstoffen, etc liegt. Trotz unbestreitbaren Anwendungsperspektiven findet jedoch eine reale Umsetzung von THz-Technologien bisher nur in ausgesuchten Einzelfällen statt. Als prominentes Beispiel ist hier die NASA zu nennen, die inzwischen Femtosekundenlaser basierte THz-Systeme für Qualitätskontrollen der Verklebung der thermischen Isolierung von Booster-Raketen bei Space Shuttles einsetzt, um die Risiken weiterer Katastrophen zu minimieren.

Während auf der Seite der THz-Quellenentwicklung deutliche Fortschritte gemacht wurden (Quantenkaskadenlaser $> 1 \text{ mW @ } 2,3 \text{ THz}$ und elektronische Vervielfacher $> 10 \text{ mW @ } 0,65 \text{ THz}$), ist das Haupthindernis für eine breite Umsetzung nach wie vor die relative Unausgereiftheit der Detektortechnologie, insbesondere im Hinblick auf in der Pixelzahl skalierbare Arrays (Kameras). Zwar wurden grundsätzlich einige Konzepte vorgeschlagen, welche das Potenzial für Detektorarrays haben. Allerdings weisen diese Ansätze jeweils konzeptionelle Nachteile auf, welche die Realisierung von großen Pixelarrays auf lange Zeit hin unwahrscheinlich machen. Im Einzelnen sind zu nennen:

a) Mikrobolometerarrays

Mit Mikrobolometerarrays sollten sich zwar im Prinzip genügend hohe Empfindlichkeiten im Bereich von $\text{sub-nW}/\sqrt{\text{Hz}}$ erzielen lassen. Allerdings messen Bolometer prinzipbedingt immer die thermische Hintergrundstrahlung mit. Wegen der damit verbundenen Rauschbelastung ist diese Technologie für aktive Systeme nicht sinnvoll.

b) Heterodyndetektoren mit Schottkydioden, hot electron (HEB) oder superconductor insulator superconductor (SIS) Bolometer

Heterodyndetektoren erreichen grundsätzlich enorme Empfindlichkeiten und messen wegen ihrer Schmalbandigkeit im Wesentlichen hintergrundfrei. Allerdings sind zum Betrieb der Detektoren hohe THz-Signalleistungen (ca. $10 \mu\text{W}$) vom Lokaloszillator nötig. Dieses ist bei der Realisierung von Arrays sehr problematisch, da hier die notwendige Lokaloszillatorleistung mit der Pixelzahl skaliert. Im Rahmen eines ESA-Projektes wird zurzeit versucht eine Heterodynkamera mit 16 Pixeln zu realisieren. Ob die Technologie aber in der Pixelzahl frei skalierbar ist, ist fraglich. Hinzu kommt,

dass nur Systeme mit Schottkydioden raumtemperaturtauglich sind, die dann dafür eine signifikant höhere Rauschtemperatur aufweisen.

c) Opto-elektronische Systeme

Opto-elektronische Systeme mit elektro-optischer Multi-Pixel-Detektion sind zunächst für Puls-Betrieb [2] und dann im Dauerstrich-Betrieb [3] demonstriert worden. Bemerkenswerterweise wurde in der Dauerstrich-Arbeit zur Detektion der optischen Strahlung hinter dem ZnTe-Mischerkristall eine einfache CCD-Kamera verwendet, weshalb Rauschunterdrückung durch Lock-In-Technik unmöglich ist. Es musste lange (~40 min) integriert werden, um eine ausreichende Rauschunterdrückung im Gesamtbild zu erzielen. An der grundsätzlichen Tauglichkeit der elektro-optischen Detektion kann daher kein Zweifel bestehen. Es geht nun darum, die Elektro-optik hinsichtlich Sensitivität und Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu optimieren. Das Dauerstrichsystem hat dabei eine Empfindlichkeit im Bereich von 30 mV/cm für die THz-Feldamplitude gezeigt. Geht man sinnvollerweise von einer Pixelgröße im Bereich der THz-Wellenlänge (300 μm @ 1THz) aus, so entspricht dies einer Empfindlichkeit im 1-nW-Bereich. Die Autoren verwendeten als THz-Strahlungsquellen Photomischer, die direkt durch die Femtosekunden- bzw. Dauerstrich-Laser zur THz-Emission gebracht wurden. Leider erreichen diese opto-elektronischen Quellen aber nur Leistungen im Bereich von 40 μW (gepulst) [4] und 2 μW (cw bei 1 THz) [5], so dass der dynamische Bereich der opto-elektronischen Systeme voraussichtlich immer sehr eingeschränkt bleiben wird.

Forschungsbedarf

An diesem Punkt setzt der Lösungsgedanke des vorgeschlagen Projektes an. Quelle und Detektion soll aus zwei separaten, miteinander synchronisierten Modulen bestehen. Es sollen so die Vorteile der opto-elektronischen Detektion (hohe Empfindlichkeit, Skalierbarkeit in der Pixelzahl) mit den Vorteilen der freilaufenden Dauerstrichquellen (hohe Ausgangsleistung) kombiniert werden. Diese freilaufenden Quellen wie z.B. THz-Quantenkaskadenlaser oder elektronische Vervielfacherketten erreichen Ausgangsleistungen weit im mW Bereich. Die elektro-optische Detektion erlaubt andererseits Empfindlichkeiten im Bereich von 30 mV/cm je Pixel (was 1 nW bei 1 THz und beugungsbegrenzter Fokussierung entspricht) [6, und Eigene Vorarbeiten]. Bei Kombination mit einer Quelle mit 10 mW Leistung wäre also ein System mit 1000 Pixeln und einem dynamischen Intensitätsbereich von 1:10.000 (= 40 db bzw. 13-bit Auflösung) je Pixel denkbar.

Wesentliche wissenschaftliche und technische Herausforderungen bei der Realisierung eines solchen Systems stellen

- a) die Synchronisierung des für die opto-elektronische Detektion benötigten Zwei-Farben-Diodenlasersystems mit der frei laufenden Quelle, und

b) die Optimierung der anstelle der konventionellen CCD- bzw. CMOS-Kameras einzusetzenden 3D-PMD-Kameras für die Detektion kleinster Intensitätsmodulationen

dar. Diese Herausforderungen sind jedoch im Rahmen eines 4-jährigen koordinierten Projektes zu meistern. Insbesondere stellt die Bereitstellung einer Zweifarbenquelle selbst wegen der vergleichsweise geringen Ausgangsleistungen, die man zum Mischen benötigt, kein Problem dar.

2.2 Eigene Vorarbeiten

Für beide Aufgabenstellungen bringt das Konsortium besondere Kompetenzen ein:

Die Antragsteller Prof. Hartmut G. Roskos, Prof. Peter Haring Bolívar und Dr. Torsten Löffler haben eine breite Erfahrung im Bereich THz-Technologie aufzuweisen [E1-E4]. Dabei wurden bereits intensiv Systeme zur THz-Bildgebung erforscht [E5-E9]. Darüber hinaus haben beide Arbeitsgruppen bereits an der Synchronisierung von fs-Lasersystemen mit freilaufenden Hochfrequenzquellen gearbeitet [E10-E12].

Im Einzelnen ist zu erwähnen:

2.2.1 THz-Bildgebung mit gepulsten Systemen

Implementierung und Erprobung eines THz-bildgebenden Systems (DFG Projekt Ku 340/37-1 bis -3, START Initiative des Universitätsklinikums Aachen) [AG Haring]

- Rasterndes zeitaufgelöstes THz-Komplettsystem (gepulst) für Durchleuchtung und Tomographie [E3].
- Kontrastverstärkung tomographischer Analytik mittels Einstrahlwinkelvariation und Demonstration der Technik zur Analyse von keramischen Multischichten für Festkörperbrennstoffzellen [E5].
- Tieftemperatur (10K) THz-Bildgebung zur Analyse supraleitenden Schichtsysteme [E6].
- Analysen an menschlicher Schleimhaut (Ösophagus, Oro-/Hypoharynx, Larynx). Nachweis der Differenzierbarkeit von Tumoren auch bei internem Gewebe. Bisherige Untersuchungen waren nur auf Hautpräparate beschränkt (z.B. Basalkarzinom), die eine fundamental andere Struktur als interne Gewebearten haben (z.B. hat die Haut klar differenzierbare Schichten von lebenden und toten Zellen, Schleimhaut ist deutlich unstrukturierter und besitzt keine Schicht toter Zellen). Ex-vivo Analysen von Frischpräparaten innerhalb von 4h nach der Exzision, direkt vor der histopathologischen Fixierung, wiesen einen deutlichen Kontrast zwischen gesundem und Tumorgewebe auf, wobei interessanterweise eine Kontrastumkehr im Vergleich zu Hautpräparaten zu beobachten ist (siehe Fig. 2.2.1.1): Während bei Haut Tumore eine erhöhte THz-Absorption aufweisen, haben Schleimhauttumore eine geringere Absorption [E13].

Entwicklung eines gepulsten THz Bildgebungssystems mit verstärkten Laserpulsquellen [Roskos/Löffler]:

- Terahertz-Dunkelfeld-Bildgebung zur Analyse von Protuberanzen auf planaren Flächen, wie z.B. bei der Charakterisierung von Stahlblech [E14].

- Anwendungsanalyse und Datenverarbeitungsanalyse im Bereich biomedizinischer Bildgebung [E15].

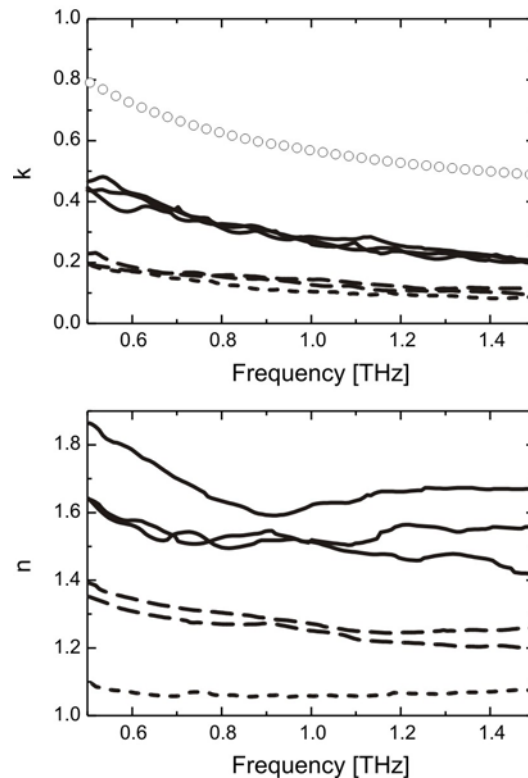


Abb. 2.2.1.1 Ortsgemittelte Absorption (k) und Brechungsindex (n) als Funktion der Frequenz. Durchgezogene Linien stellen gesunde Schleimhautproben dar; gestrichelte Tumorgewebe. Im oberen Diagramm illustrieren offene Kreise die Wasserabsorption.

2.2.2 Bildgebung mit Dauerstrich-THz-Strahlung

Implementierung und Erprobung eines Bildgebungs- und Spektroskopiesystems (gemeinsam mit EU-TERAVISION-Projekt) [AG Roskos/Löffler]

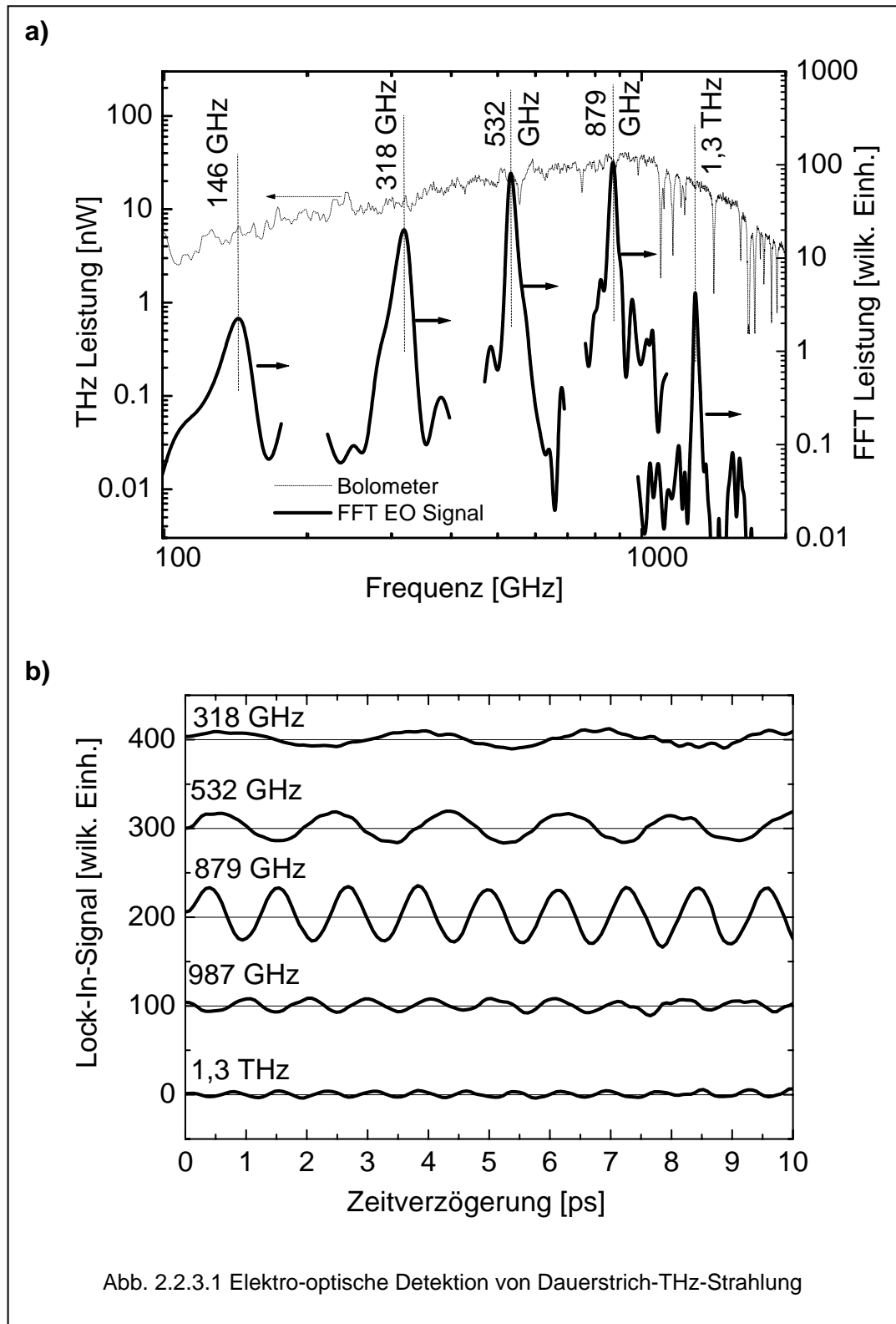
- Komplettsystem mit photoleitender Emitter- und Detektorantenne implementiert und für die THz-Bildgebung v.a. hinsichtlich schneller Datenaufnahme optimiert. Die mit 0.2 s pro Pixel erreichte Datenerfassungszeit ist nur um eine Größenordnung langsamer als bei den besten Femtosekundensystemen, die einen erheblichen Entwicklungsvorsprung haben. Allerdings wurden diese Leistungsdaten nur bei einigen THz-Frequenzen erzielt, wo der Laserbetrieb besonders stabil war [E8, E9].
- Erster Vergleich zwischen unserem Dauerstrich-THz-Mess-System und dem kommerziell angebotenen Pulssystem der Firma TERAVIEW. Unser System – vor der Modifikation des Zweifarben-Lasers – war außer bei bestimmten THz-Frequenzen hinsichtlich der Rauscheigenschaften unterlegen, was die oben angesprochene Notwendigkeit zur Verbesserung der Wellenlängenabstimmbarkeit und Modenstabilität aufzeigte.
- CW-THz-Bildgebung an Beispielen von archivierten biomedizinischen Proben demonstriert [E8, E9].

2.2.3 Elektro-optische Detektion von Dauerstrich THz-Strahlung

Im Rahmen des DFG-Projekts RO770/17-3, „Verfahren der Erzeugung und Detektion von Dauerstrich THz-Strahlung“ wurde in der AG Roskos die kohärente Detektion von Dauerstrich-THz-Strahlung demonstriert. Wir zeigen in Abb. 2.2.3.1 experimentelle Daten, die bestätigen, dass Dauerstrich-Strahlung im THz-Bereich elektro-optisch detektiert werden kann und dass hierbei selbst bei kurzer Integrationszeit bei der Lock-In-Verstärkung Empfindlichkeiten im sub-100 pW Bereich erzielt werden.

Der Versuchsaufbau war dabei ähnlich wie in [6]. Allerdings wurde ein Zwei-Farben-Diodenlasersystem mit Nachverstärker der Firma Sacher verwendet. Als THz-Quelle wurde ein Photomischer auf Basis von LT-GaAs (gewachsen an der Uni Wien, AG Prof. Unterrainer und prozessiert an der TU-Darmstadt, AG Pavlidis) eingesetzt. Der Photomischer wurde mit ca. 75 mW Laserleistung beleuchtet. Die THz-Strahlung wurde mittels einer hyperhemisphärischen Linse ausgekoppelt. Die Ausgangsleistung des Emitters wurde mit einem Komposit-Silizium-Bolometer in Abhängigkeit der Differenzfrequenz der zwei Laserlinien vermessen (gestrichelte Linie in Abb. 2.2.3.1a)). Der Emitter erreicht seine maximale Ausgangsleistung von etwa 25 nW bei etwa 900 GHz. Alternativ wurde zur Detektion ein 1 mm dicker ZnTe-Kristall mit Polarisationsoptik und Differenzdetektor verwendet. Die Laserleistung des Zwei-Farben Lasersystems wurde mittels eines 50/50 Faserkopplers in einen Pump-Strahl für den Photomischer und einen Probe-Strahl für den Detektor aufgeteilt. Die Zeitverzögerung zwischen Pump- und Probe-Strahl wurde mittels einer mechanischen Verschiebestrecke variiert.

Das mit einem Lock-In-Verstärker mit einer Zeitkonstante von 100 ms gemessene Signal ist in Abb. 2.2.3.1b) für verschiedenen Laser-Differenzfrequenzen dargestellt. Fourier-Transformierte der jeweiligen Signale sind in Abb. 2.2.3.1a) abgebildet. Man erkennt in beiden Darstellungen ein maximales Signal für die Messung bei 879 GHz. Die durch Fourier-Transformation aus den elektrooptischen Daten gewonnenen Leistungen fallen zu niedrigeren Leistungen hin deutlich stärker ab, als durch die Leistungsabnahme des Emitters zu erklären ist. Dieses liegt daran, dass bei der elektro-optischen Messung die Feldstärke im Zentrum des Emitters gemessen wird. Da die THz-Strahlung aber bei niedrigeren Frequenzen schlechter fokussiert wird, nimmt die Leistungsdichte dort ab. Das elektro-optische Signal bei 1,3 THz ist vergleichsweise zu klein. Dieses liegt vermutlich an einer nicht völlig perfekten Justage des Aufbaus, so dass durch Abbildungsfehler bei dieser hohen Frequenz ein zu großer Fokus und damit eine zu kleine Leistungsdichte im Zentrum des Emitters auftritt.



2.2.4 Entwicklung einer 3D-Kamera

Der Antragsteller Prof. R. Schwarte hat ein neuartiges Messverfahren zur 3D-Erfassung über parallele Echolaufzeit, mithin eine 3D-Videokamera, für den sichtbaren und Nahinfrarotbereich entwickelt [E11]. Diese PMD-Kameras basieren auf einer 2D-Matrix von phasensensitiven differentiellen optischen Detektoren die auf Grund ihrer Funktionsweise auf die Detektion kleinster Intensitätsmodulationen optimiert sind, mit zugleich hoher Hintergrundlicht-Unterdrückung von ca. 1:1000. Diese PMD-Kameras, die im Rahmen weiterer Teilprojekte im Paketantrag weiterentwickelt werden sollen, können daher nach einer entsprechenden Anpassung und Modifizierung ideal für das hier vorgeschlagene elektro-optische Detektionssystem eingesetzt werden. Zusätzlich ist jedoch die direkte Teilnahme von Prof. R. Schwarte in diesem Projekt notwendig, um die Anpassung von PMD-Systemen an die Erfordernisse einer synchronisierten elektro-optischen Abfrage von THz-Signalen anzupassen.

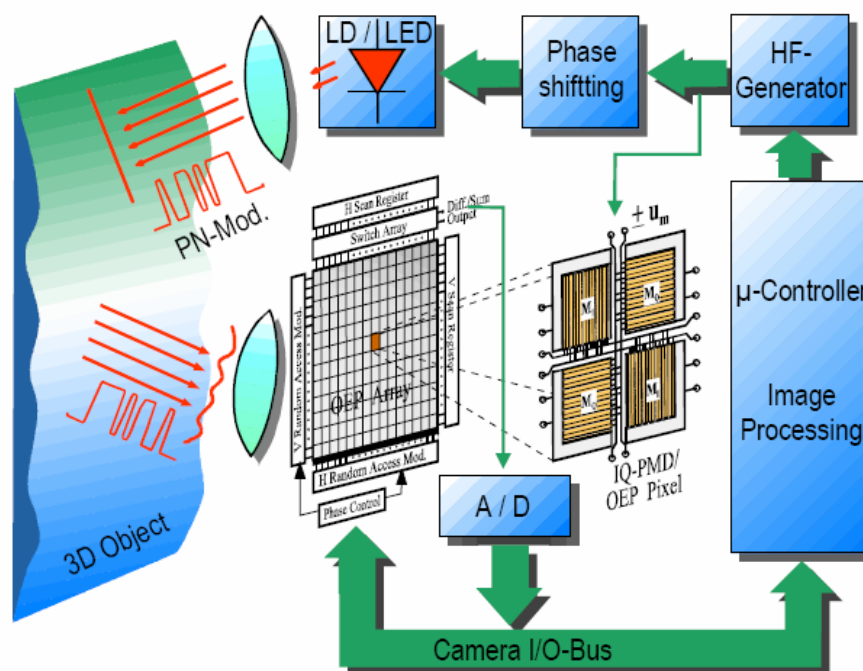


Abb. 2.2.4.1 Prinzipskizze einer optischen 3D-PMD-Kamera

Eigene Veröffentlichungen:

- [E1] T. Löffler, K. J. Siebert, H. Quast, N. Hasegawa, G. Loata, R. Wipf, T. Hahn, M. Thomson, R. Leonhardt, and H. G. Roskos, *All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems*, The Royal Society: Philosophical Transactions **362**, 263 (2004).

- [E2] C. Waschke, H. G. Roskos, R. Schwedler, K. Leo, H. Kurz, and K. Köhler, Coherent submillimeter-wave emission from Bloch oscillations in a semiconductor superlattice, *Phys. Rev. Letters* **70**, 3319 (1993).
- [E3] P. Haring Bolívar, *Coherent THz spectroscopy*, Semiconductor Quantum Optoelectronics: From Quantum Physics to Smart Devices, ed. A. Miller, et al. (IOP, 1999), pp. 151-192.
- [E4] P. Haring Bolívar, M. Nagel, F. Richter, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, *Label-free THz sensing of genetic sequences: towards 'THz biochips'*, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **362**, 323 - 335 (2004).
- [E5] M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar, H. Klingenberg, und H. Kurz, *Angle dependent THz tomography - Characterization of thin ceramic oxide films for fuel cell applications*, *Appl. Phys. B* **72**, 361 (2001).
- [E6] M. Brucherseifer, A. Meltzow-Altmeier, P. Haring Bolívar, H. Kurz, and P. Seidel, *Low-temperature THz imaging of thin high-temperature superconductor films*, eingereicht bei *Physica C: Superconductivity* **399 (1-2)**, 53-60 (2003).
- [E7] T. Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald, and S. Czasch, *Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue*, *Optics Express* **9**, 616 (2001).
- [E8] K. J. Siebert, H. Quast, R. Leonhardt, T. Löffler, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, *Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging*, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3003 (2002).
- [E9] K. Siebert, T. Löffler, H. Quast, M. Thomson, T. Bauer, R. Leonhardt, S. Czasch, H. G. Roskos, *All-optoelectronic CW THz imaging for biomedical applications*, *Phys. Med. Bio.* **47**, 3743 (2002).
- [E10] T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, and H. Kurz, *Detection of free-running electric signals up to 75 GHz using a femtosecond-pulse laser*, *IEEE Phot. Techn. Lett.* **7**, 1189 (1995).
- [E11] T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, H. Kurz, and D.W. van der Weide, *Stable Optoelectronic Detection of Free-Running Microwave Signals of up to 150 GHz*, *Microelectronic Engineering*, **31**, 397 (1999).
- [E12] P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H.P.M. Pellemans, and H. Kurz, *Time domain THz spectroscopy and sensing*, in *THz Sources and Systems*, ed. by R.E. Miles et al. (Kluwer, 2001), pp. 315-328
- [E12] R. Schwarte, Z. Zhang, and B. Buxbaum, *Neue 3D-Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen*, VDE Kongr. „Ambient Intelligence“, Berlin 2004.
- [E13] K. Schramm, C. Janke, D. Surawicz, H. Griefingholt, H. Kurz, M. Westhofen, P. Haring Bolívar, *Terahertz spectroscopy in otorhinolaryngology: investigation of native mucosa tissue samples*, (subm. 2005).
- [E14] N. Hasegawa, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Remote Identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection*, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3996 (2003).
- [E15] T. Löffler, K. Siebert, S. Czasch, T. Bauer, H. G. Roskos, *Visualization and classification in biomedical terahertz pulsed imaging*, *Phys. Med. Bio.* **47**, 3847 (2002).

3. Ziele und Arbeitsprogramm

3.1 Ziele

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines PMD basierten dreidimensional bildgebenden Messsystems im THz-Frequenzbereich. Wie in Abb. 3.1.1 dargestellt, basiert das zu untersuchende 3D-Bildgebungskonzept im THz-Frequenzbereich auf der Nutzung von PMD-Technologie zur phasenaufgelösten Detektion des optischen Signals eines Zweifarbenlasers. Durch elektro-optische Detektion wird dabei ein mittels einer freilaufenden, aber mit dem Zweifarbenlaser phasengekoppelten THz-Strahlungsquelle generiertes THz-Abbild phasentreu in ein optisches Modulationssignal umgewandelt. Das elektro-optische Abtastsignal muss dabei als kleine Modulation auf einem unmodulierten optischen Hintergrund detektiert werden.

Im anvisierten Konzept soll die Realisierung eines PMD basierten elektro-optischen bildgebenden Systems untersucht werden, welches Bildgebung mit cw THz-Strahlungsquellen erstmals praktikabel machen soll. Hierbei ist die exzellente Hintergrundunterdrückung der PMD-Technologie ausschlaggebend. Darüber hinaus kann die phasenaufgelöste PMD-Detektion direkt in eine Tiefenauflösung des THz-Signals zur 3D-Bildgebung übertragen werden. Im hier dargestellten Projekt soll ein System mit einer Auflösung von 64x32 Pixel anvisiert werden und bei zwei THz Frequenzen betrieben werden: Bei 600GHz, wo elektronische THz Quellen verfügbar sind, und bei etwa 2,5 THz wo Quanten-Kaskaden-Laser zur Verfügung stehen.

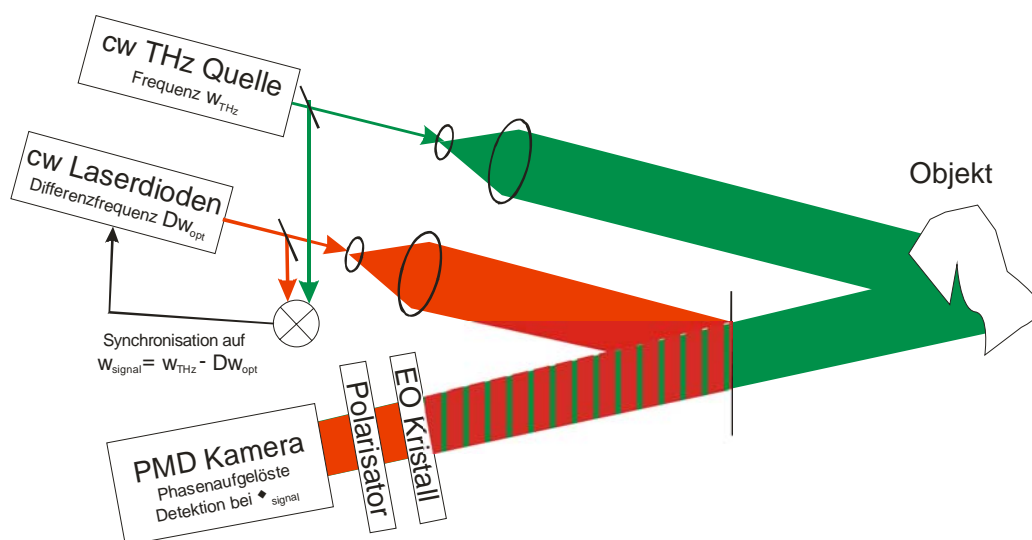


Abb. 3.1.1: Schema des geplanten 3D-THz-Bildgebungskonzeptes mit freilaufender THz-Quelle, EO-Detektion und PMD-Detektorarray. Mittels eines EO-Kristalls wird dabei ein THz-Abbild phasentreu in ein optisches Signal umgewandelt. Dieses phasenkodierte optische Signal kann dann bei geeigneter Synchronisation mit einer PMD-Kamera detektiert werden und 3D-THz-Bildgebung ermöglichen.

3.1.1 Vernetzung im Paketantrag

Im Kontext des Paketantrages ist die Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten wie folgt geplant. Eine schematische Übersicht ist in Abb 3.1.2 dargestellt:

Diese Aktivität beruht auf die Entwicklung von PMD Kameras mit verbesserten Eigenschaften, wie diese im Paketantrag innerhalb des Teilprojektes *Multi-Cam 2D/3D Multisensorentwicklung* (Loffeld, Roth, Schwarte) realisiert werden sollen. Dabei interessiert in diesem Kontext insbesondere eine verbesserte Hintergrundunterdrückung und eine hohe Signalauflösung, um kleine Modulationen auflösen zu können. Besonders profitieren kann dieses Projekt von der Anpassung der internen PMD Kameraparameter (Integrationszeiten, Modulationsfrequenzen, ...), um ein optimiertes Signal-zu-Rauschverhältnis bei bildgebenden THz-Analysen zu ermöglichen.

Eine Datenaufbereitung, -filterung, und kalibrierte 3D Ortung ist bisher in kaum einem bildgebenden THz-System implementiert worden. Einzige bisherige Ausnahmen sind Arbeiten am Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, USA, wo computertomographische Verfahren und digitale Holographie-Konzepte in der THz-Bildgebung untersucht wurden [7, 8]. Der derzeitige Stand der THz-Bilddatenverarbeitung ist extrem rudimentär. Eine intensive Zusammenarbeit mit den Projekten *PMDSim 2D/3D-Sensorsimulation* (Loffeld) und *2D3DProc 2D/3D Datenverarbeitung und -fusion* (Kolb, Loffeld) ist geplant. Hierdurch soll eine deutliche Verbesserung der Datenqualität und Reduktion der notwendigen Integrationszeiten erreicht werden. Darüber hinaus kann damit eine Kalibrierung und Ortung implementiert werden.

Im Hinblick auf eine 3D-Datenerfassung soll insbesondere der Übergang zur Bildgebung mit synthetischer Apertur untersucht werden. Die Grundidee dieser Methode ist, anstatt eines realen Bildes in der Detektorebene eine Detektion in der Fourierebene der Abbildungsoptik zu realisieren. Dieses kann im einfachsten Fall auch durch einen völligen Verzicht auf eine Abbildungsoptik realisiert werden. Mittels geeigneter Algorithmen, die im Wesentlichen auf einer zwei-dimensionalen inversen Fouriertransformation aufbauen, kann dann auf das reale Bild zurückgerechnet werden. Dieses Vorgehen wurde in Ref. [9] für THz-Strahlung untersucht. Mit weitergehenden Algorithmen, wie sie z.B. in der Radar-Technologie verwendet werden, sollte auch eine dreidimensionale Bildrekonstruktion möglich sein. In der letzten Phase dieses Projektes (an dem 3. Jahr) ist daher eine intensive Interaktion mit dem Teilprojekt *2D3DProc 2D/3D Datenverarbeitung und -fusion* (Kolb, Loffeld) geplant.

Ab dem 3. Projektjahr soll die entwickelte THz-Kamera an ausgesuchten Demonstrationsobjekten vorgeführt und getestet werden. In diesem Kontext ist eine enge Anknüpfung an die anderen Teilprojekte geplant. Die THz-Kamera soll daher in die im Paketantrag geplanten Anwendungsfelder Automatisie-

rungstechnik und Medizintechnik zum Einsatz kommen. Sie soll weiter mit der im Teilprojekt *MultiCam* zu entwickelnden 2D/3D-Kamera verglichen werden, um für dieses Projekt eine sinnvolle Validierung der 3D-THz-Bilddaten durchführen zu können. Zudem können somit zusätzliche multisensorielle Daten bereitgestellt werden, die im Rahmen des Teilprojekts *2D3DProc* zum Experimentieren und Validieren von Datenfusionsalgorithmen dienen können.

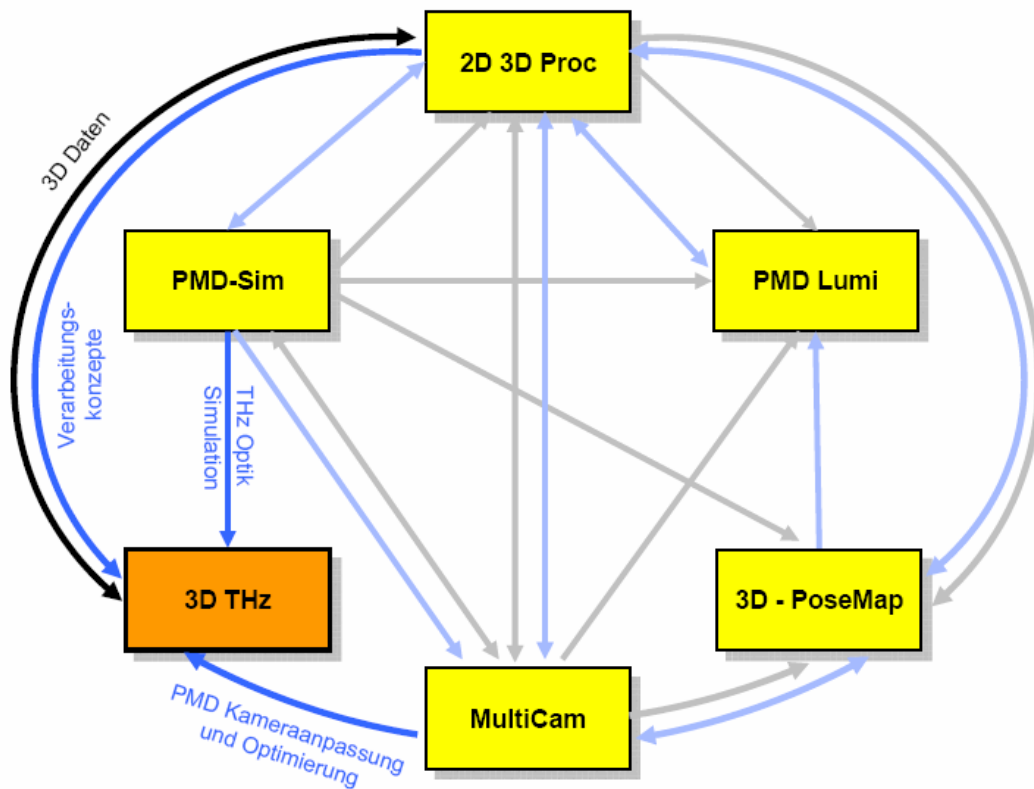


Abb. 3.1.2.: Tabellarische Darstellung des Arbeitsprogramms

3.2. Arbeitsprogramm

Das im Folgenden beschriebene Arbeitsprogramm soll in Frankfurt von einem Doktoranden (Fachrichtung Physik oder Elektrotechnik), der über das Projekt bezahlt wird, unter Leitung von Herrn Dr. Löffler (Bezahlung durch Landesmittel) durchgeführt werden. In Siegen sollen die Arbeiten ebenfalls von einem Doktoranden (Fachrichtung Elektrotechnik oder Physik), der über das Projekt bezahlt wird, unter Leitung von Prof. Peter Haring Bolívar durchgeführt werden. Zusätzlich werden in Siegen die notwendigen Anpassungsarbeiten an der PMD-Kamera innerhalb der Arbeitsgruppe Schwarte durchgeführt. Hierzu ist im Rahmen dieses Projekts nur eine studentische Hilfskraft vorgesehen, da der Aufwand klein sein wird und weitere Personalkosten über den Teilantrag *MultiCam* abgedeckt sind.

Die einzelnen Teilschritte des geplanten Arbeitsprogramms sind in Abb. 3.3.1. tabellarisch nach Arbeitsgruppen und Projektlaufzeit dargestellt. Auf den nächsten Seiten werden die einzelnen Teilschritte näher beschrieben.

Um ein optimiertes Gesamtsystem zu entwickeln, beinhaltet das Arbeitsprogramm im Wesentlichen den konsekutiven Aufbau der folgenden drei verschiedenen Systemausbaustufen:

1. Ein initiales System, basierend auf einem fs-Pulslaser zur Erzeugung von THz-Pulsen und zur Optimierung der multipixel-elektrooptischen Detektion unter Verwendung von PMD-Technologie (H1-H4, AG Haring).
2. Ein System, basierend auf einer Dauerstrich-THz-Quelle und einem synchronisierten fs-Pulslaser zur multipixel-elektrooptischen Detektion zur Untersuchung von Synchronisationskonzepten (H5, H6 AG Haring).
3. Ein Gesamt-Dauerstrichsystem basierend auf einer Dauerstrich-THz-Quelle und einem synchronisierten Zwei-Farben-Diodenlasersystem zur multipixel-elektrooptischen Detektion (R1-R5 AG Roskos/Löffler).

Die Grundidee bei diesem Vorgehen ist, möglichst alle für das Zielsystem (s. 3. o.) wichtigen Schlüsselkomponenten weitgehend parallel zu entwickeln und die Arbeit sinnvoll auf die Arbeitsgruppen Haring und Roskos/Löffler zu verteilen. Dieses betrifft im Wesentlichen:

a) Die Entwicklung des multi-pixel elektrooptischen Sensors der zunächst auf Basis der etablierten opto-elektronischen Pulstechnik mit fs-Lasern in der AG Haring entwickelt werden soll

und

b) die Entwicklung des elektro-optischen Referenzdetektors und des Synchronisationskonzeptes für Dauerstrichquelle und Zweifarben-Diodenlaser.

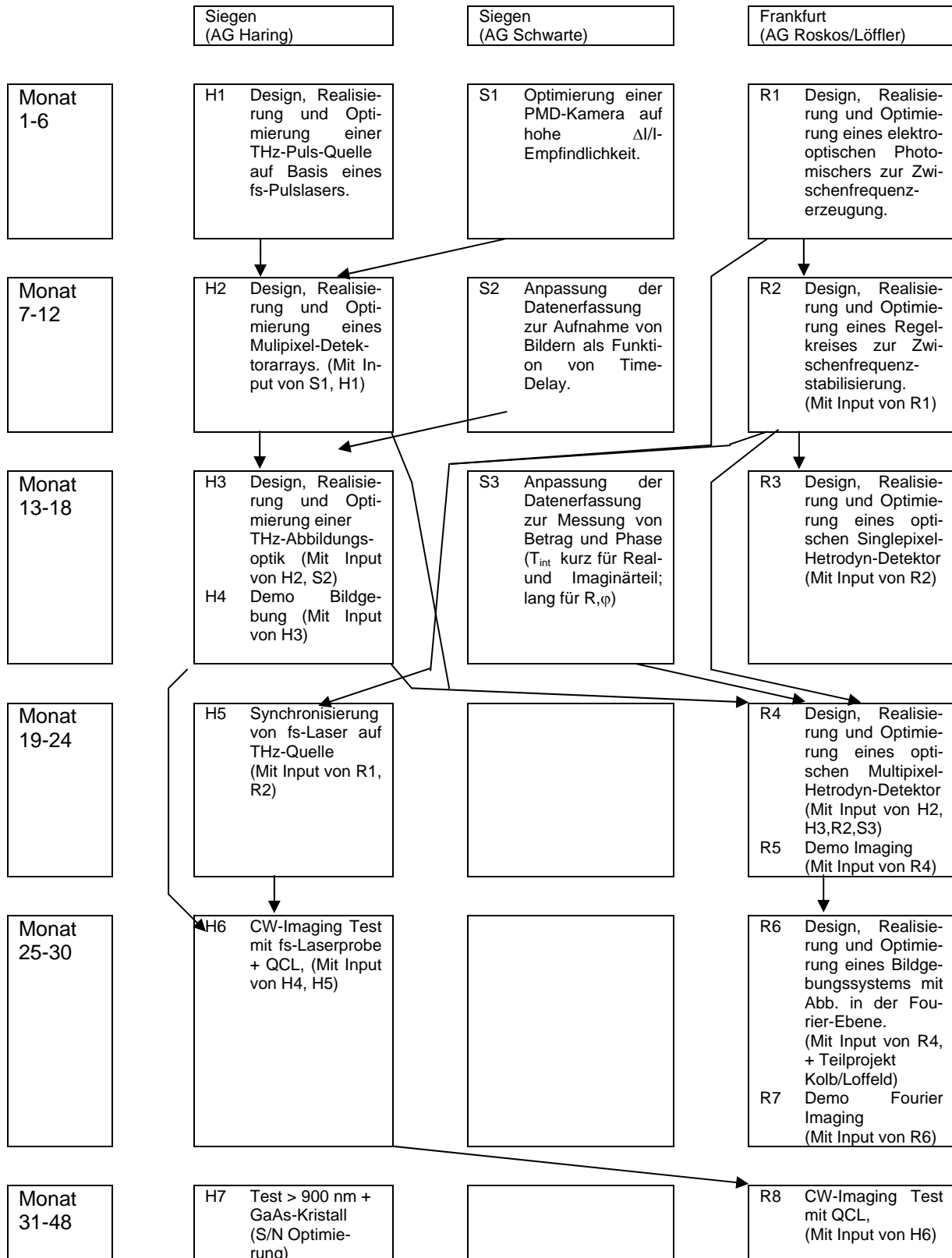


Abb. 3.3.1.: Tabellarische Darstellung des Arbeitsprogramms

Teilschritt H1

Design, Realisierung und Optimierung einer THz-Pulse Quelle auf Basis eines fs-Pulslasers.

Zur Entwicklung des Multi-Pixel-Detektors und zum Test mittels eines fs-Pulslasersystems wird eine möglichst leistungsstarke THz-Pulsquelle benötigt. Daher soll in diesem Teilschritt die von P. Planken [4] entwickelte Emittertechnologie reproduziert und ggf. weiter optimiert werden. Diese Emittertechnologie basiert auf der Verwendung von hochohmigem GaAs und einem vergleichsweise großen Elektrodenabstand von einigen 100 μm . Für diesen Emitter wurde eine mittlere Ausgangsleistungen von 40 μW bei Vorspannungen von 800 V demonstriert. Dieses entspricht einer Pulsspitzenleistung für den THz-Puls von ca. 400 mW.

Teilschritt H2

Design, Realisierung und Optimierung eines elektrooptischen Multipixel-Detektorarrays. (Mit Input von S1, H1)

Als Detektor soll ein großflächiger elektro-optischer Kristall zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren mit nachgeschalteter PMD-Kamera verwendet werden. Um eine bestmögliche Empfindlichkeit zu erreichen, muss die elektro-optische Detektionsanordnung möglichst optimal auf die Kamera abgestimmt werden. Hierzu muss die Auslöschung durch die gekreuzten Polarisatoren, die effektive Größe der Pixel auf dem elektro-optischen Kristall und die Ausleuchtung der 64x32 Pixel auf der PMD-Kamera optimiert werden. Zur Optimierung der Auslöschung ist der verwendete Kristalltyp von entscheidender Bedeutung. Für die durch die vorhandenen Lasersysteme vorgegebenen Wellenlängen von ca. 800 nm (fs-laser) bis 850 nm (Zwei-Farben-Laser) ist die Verwendung von ZnTe als elektro-optischem Kristall üblich. U. U. lassen sich aber mit alternativen Kristalltypen wie LiTa_2O_3 deutlich bessere Auslöschungen und damit evtl. höhere Empfindlichkeiten erzielen.

Teilschritt H3

Design, Realisierung und Optimierung einer THz-Abbildungsoptik (Mit Input von H2, S2)

Die effiziente Abbildung der THz-Strahlung mittels quasioptischer Elemente (Spiegel oder Kunststofflinsen) auf den Detektorkristall muss optimiert werden. Dabei muss eine Pixelgröße in der Größenordnung der THz-Wellenlänge angestrebt werden. Damit kann die Empfindlichkeit optimiert werden, ohne an Auflösungsvermögen zu verlieren.

Teilschritte H4,R5,H6Experimentelle Verifizierung der neuen 3-dimensionalen Terahertz-Kameratechnologie an ausgewählten Objekten.

Die entwickelte THz-Kameratechnologie soll in ihren verschiedenen Entwicklungsstufen (Pulssystem (H4); CW-System(R5, H6)) intensiv getestet und erprobt werden. Hierzu ist die Beobachtung von geeigneten Teststrukturen geplant. Aufgrund der hohen Tiefenauflösung (wg. der Wellenlänge der THz-Strahlung im sub-mm Bereich), ist beispielsweise die Beobachtung von Oberflächen mit Strukturdefekten im sub-mm Bereich interessant. Die Eignung von THz-Strahlung für solche Untersuchungen ist vom Antragsteller Roskos / Löffler bereits erfolgreich gezeigt worden [10].

Bei der Erprobung der Kamera wird eine intensive Kollaboration mit den Projekten *PMDSlam* und *MultiCam* im Paketantrag angestrebt. Dabei sollen geeignete Untersuchungsobjekte mit konventioneller 3D-PMD-Technologie und mit der 3D-THz-Technologie vermessen werden. Im Vergleich sollen spezifische Vor- bzw. Nachteile der jeweiligen Technik herausgearbeitet werden.

Teilschritt H5:Synchronisieren von fs-Laser auf elektronische THz-Quelle (Mit Input von R1, R2)

In diesem Teilschritt soll eine Synchronisierung des fs-Pulslasers in der AG Haring mit der freilaufenden THz-Quelle erreicht werden. Diese Maßnahme dient zu Vorbereitung von Teilschritt H6 (Synchronisieren von fs-Laser auf QCL-THz). Dieses ist so zu verstehen, dass das Synchronisationskonzept für den fs-Laser zunächst mit einer stabilen Quelle getestet werden soll.

Teilschritt H6 (Jahr 3):CW-Imaging Test mit fs-Laserprobe + QCL, (Mit Input von H4, H5)

In diesem zukunftsweisenden Teilschritt soll alternativ zu der elektronischen Quelle bei 650 GHz ein THz-QCL Laser im cw-Modus bei etwa 2,5 THz verwendet werden. Dieser Schritt soll zeigen, dass das hier vorgeschlagene Kamerakzept prinzipiell auch für deutlich höhere THz-Frequenzen geeignet ist. Somit sollten bessere Tiefen- und Ortsauflösungen zu erreichen sein. Die besondere Herausforderung bei diesem Teilschritt liegt darin, dass einerseits der Betrieb des QCLs bei tiefen Temperaturen erfolgen muss, und dass andererseits, wegen der höheren Betriebsfrequenz des QCLs, auch höhere Anforderungen an die Synchronisation und an die relative Frequenzstabilität des QCLs gestellt werden müssen. Evtl. ist auch eine aktive Nachführung der QCL-Frequenz (welche über eine Strom-/Temperaturänderung erfolgen kann) notwendig.

Teilschritt H7 (Jahr 3)Verwendung einer Laserwellenlänge > 900 nm + GaAs-Kristall zur S/N Optimierung)

In diesem Teilschritt soll untersucht werden, inwieweit mit anderen Kristallen und Laserwellenlängen erhöhte Empfindlichkeiten erreicht werden können. Hier bietet sich insbesondere die Verwendung von GaAs bei einer Laserwellenlänge von etwa 1 μm an. Die elektro-optischen Eigenschaften von GaAs sind vergleichbar gut wie die von ZnTe. Allerdings ist GaAs in deutlich besserer Kristallqualität erhältlich als ZnTe. Somit sollten bessere Auslöschungen und damit auch bessere Empfindlichkeiten zu erreichen sein.

Teilschritt S1Optimierung einer PMD-Kamera auf hohe $\Delta I/I$ -Empfindlichkeit.

Die verwendete Nahinfrarot-Kamera muss für die Detektion kleinster Intensitätsmodulationen bei großem konstanten Hintergrund optimiert werden. Hierzu sollen systematische Untersuchungen von der AG Schwarte durchgeführt werden.

Teilschritt S2Anpassung Datenerfassung zur Aufnahme von Bildern als Funktion von Time-Delay.

Zur Erprobung des Multipixel-Detektors mit der THz-Pulsquelle muss die Datenerfassungssoftware der PMD-Kamera so modifiziert werden, dass eine Bilderfassung einzelner Bilder als Funktion der THz-Pulslaufzeit ermöglicht wird. Die so gewonnenen Daten sollen dann als 3D-Bilder dargestellt werden.

Teilschritt S3Anpassung Datenerfassung zur Messung von Betrag und Phase

In diesem Teilschritt soll die Datenerfassung der PMD-Kamera so optimiert werden, dass eine Mittelung über Real- und Imaginär-Anteil des Signals mit einer möglichst kurzen Zeitkonstante im sub-ms Bereich erfolgt. Eine Mittelung über den aus Real - und Imaginär -Anteil berechneten Betrag kann dann mit einer deutlich längeren Zeitkonstante erfolgen. Diese Art der Mittelung ist zur Erfassung von bewegten Objekten von besonderer Bedeutung.

Teilschritt R1:Design, Realisierung und Optimierung eines elektro-optischen Photomischers zur Zwischenfrequenzerzeugung.

Wichtigste Anforderung an den hier zu entwickelnden Photomischer ist die Erzeugung von Zwischenfrequenzen von bis zu 20 MHz (= max.

Betriebsfrequenz der PMD-Kamera). Da photoleitende Mischer (z.B. auf LT-GaAs Basis) wegen der hohen Stromverstärkung auf Zwischenfrequenzen von einigen 10 bis max. 100 kHz begrenzt sind, soll hier ein elektro-optischer Detektor verwendet werden. In diesem Teilschritt sollen im Einzelnen der Kristalltyp (verm. ZnTe, evtl. LiTa₂O₃), die Detektionsgeometrie (Differenzdetektor vs. gekreuzte Polarisatoren) und die Einkopplung der THz-Strahlung (Silizium-Linse auf Kristall + Strahlführungsoptik) optimiert werden. Der Testbetrieb des elektro-optischen Photomischers soll zunächst mit auch in Frankfurt verfügbaren THz-Pulsen und später mit der beantragten elektronischen 650 GHz Dauerstrich-THz-Quelle und dem vorhandenen Zwei-Farbenlaser erfolgen. Für den zweiten Schritt muss die Differenzfrequenz des Zwei-Farbenlasers gleich der Frequenz der CW-THz-Quelle plus/minus der gewählten Zwischenfrequenz (5-20 MHz) eingestellt werden. Aufgrund der Leistungsreserven der THz-Quelle (in mW-Bereich) und der Empfindlichkeit der elektro-optischen Detektionsmethode im sub-nW-Bereich (s. Vorarbeiten) ist sichergestellt, dass ein Zwischenfrequenzsignal mit extrem gutem (Amplituden-) Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzeugt werden kann. Dieses Signal bietet dann optimale Voraussetzungen für die aktive Stabilisierung der Zwischenfrequenz im Teilschritt R2.

Teilschritt R2:

Design, Realisierung und Optimierung eines Regelkreises zur Zwischenfrequenz-Stabilisierung. (Mit Input von R1)

Nach der Erzeugung des Zwischenfrequenzsignals in Teilschritt R1, soll in diesem Teilschritt die Stabilisierung der Zwischenfrequenz im MHz-Bereich (vorzugsweise bei der Betriebsfrequenz der PMD-Kamera) realisiert werden. Hierzu muss die Zwischenfrequenz mit dem von einem elektronischen Referenzoszillator vorgegebenen Wert verglichen werden. Mittels des so gewonnenen Fehlersignals soll dann eine Linie des Zwei-Farbenlasers nachgeführt werden. Der entsprechende Regelkreis ist in Abb. 3.3.1 dargestellt. Das entsprechend gewonnene und stabilisierte Differenzfrequenzsignal dient dann im Weiteren als Referenzfrequenz für einen Detektions-Lock-In-Verstärker oder das PMD-Detektorarray.

Eine wichtige Voraussetzung für die Stabilisierung der Zwischenfrequenz ist, dass die Linienbreiten von THz-Quelle und vom Zwei-Farben-Laser kleiner sind als die angestrebte Zwischenfrequenz. Dieses ist hier der Fall, da die Linienbreite des Zwei-Farbenlasers bei etwa 1 MHz liegt. (lt. Herstellspezifikation und lt. Messung eines Schwebungssignals der zwei Laserlinien in Frankfurt.) Die Linienbreite der beantragten THz-Quelle liegt nach Herstellangaben ebenfalls deutlich unter 1 MHz. Die angestrebte Zwischenfrequenz von ca. 20 MHz sollte also problemlos erreichbar sein.

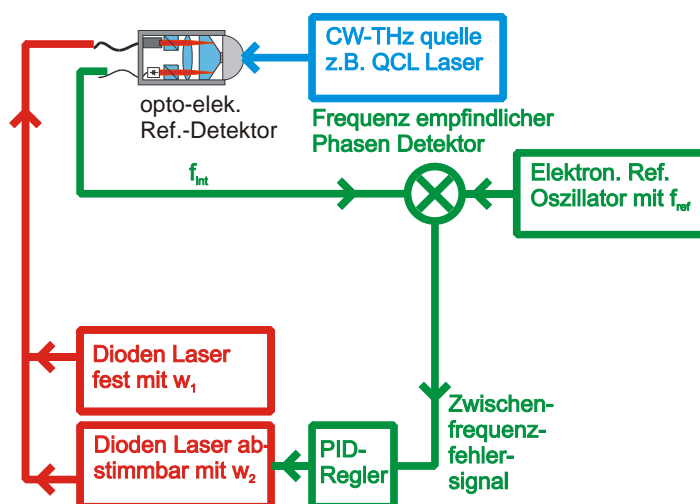


Abb. 3.3.1 Darstellung des geplanten Regelkreises zur Stabilisierung der Zwischenfrequenz.

Teilschritt R3.

Integration eines zweiten opto-elektronischen Detektors als Messdetektor.

Zur Verwendung der entwickelten Detektionsmethode in einem Mess- oder Bildgebungssystem, muss ein zweiter opto-elektronischer Detektor als Messdetektor verwendet werden. Die Vorgehensweise gestaltet sich derart, dass ein kleinerer Teil der von der Quelle bereitgestellten Leistung direkt auf den ersten Referenzdetektor geleitet wird. Das vom Referenzdetektor erzeugte Zwischenfrequenzsignal wird dann wie unter Teilziel R2 beschrieben zur Stabilisierung der Zwischenfrequenz und zur Regelung der Differenzfrequenz des Zwei-Farbenlasersystems verwendet. Der Hauptteil der zu Verfügung stehenden Leistung wird dann dem eigentlichen Mess- oder Bildgebungssystem zugeführt und nach der Transmission durch, bzw. nach der Reflexion von einer Probe mit dem zweiten opto-elektronischen Messdetektor erfasst. Das Zwischenfrequenzsignal dieses zweiten Messdetektors wird dann mit einem Lock-In-Verstärker ausgewertet, welcher mit dem Zwischenfrequenzsignal des ersten Referenzdetektors als Referenzsignal versorgt wird. Somit ist eine empfindliche Ermittlung von Amplitude und Phase des Messsignals möglich. Das entsprechende System ist in Abb. 3.3.2. dargestellt. Dieser Teilschritt ist zur grundsätzlichen Erprobung der Messmethode nötig und dient vor allem der Ermittlung des mit dem System erzielbaren dynamischen Bereiches. In einem späteren Schritt wird dann der Messdetektor durch ein Detektorarray (siehe Teilziele H2,H3,R4) ersetzt.

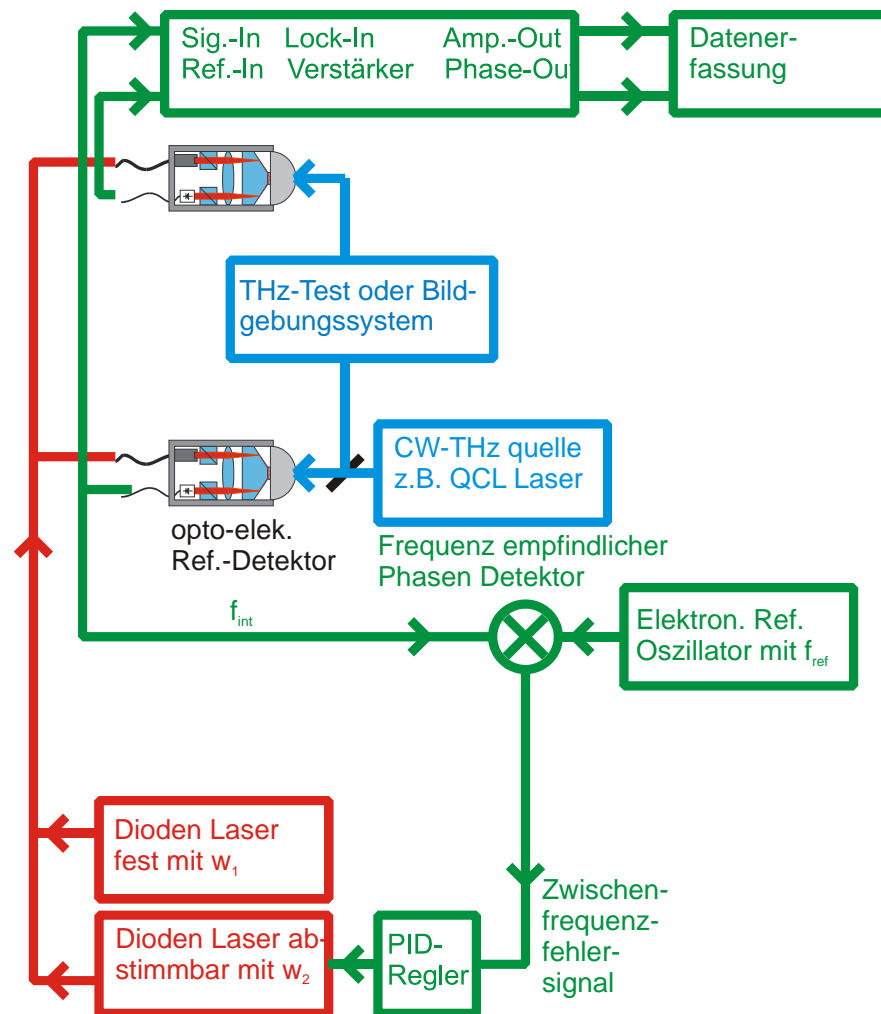


Abb. 3.3.2. Darstellung des geplanten Detektionsschemas

Teilschritt R4

Design, Realisierung und Optimierung eines optischen Multipixel-Heterodyn-Detektors (Mit Input von H2, H3, R2, S3)

In diesem Teilschritt sollen die vorab entwickelten Teilkomponenten zu einem Gesamtsystem vereinigt werden. Dieses bezieht sich vor allem auf die Kombination des elektro-optischen Multipixel-Detektors (H2, H3) mit dem synchronisierten System aus Zweifarben-Laser und elektronischer 650 GHz Quelle. Eine schematische Abbildung des geplanten Gesamtsystems ist bereits im Einleitungsteil in Abb. 3.3.1 dargestellt.

Teilschritt R5

Beschreibung oben unter H4

Teilschritt R6 (Jahr 3)

Design, Realisierung und Optimierung eines Bildgebungssystems mit Abb. in der Fourier-Ebene. (Mit Input von R4, + Teilprojekt Kolb/Loffeld)

Alternativ soll statt einer realen Abbildung auf den Detektor eine Abbildung in der Fourier-Ebene untersucht werden. In diesem Fall kann unter Ausnutzung der Phasenempfindlichkeit des Detektors mittels inverser Fouriertransformation auf das reale Bild zurückgerechnet werden. Dabei ist die rechnerisch mögliche Bildpunkteanzahl im errechneten Bild deutlich größer als die Anzahl der realen Detektorpixel. Dieses sollte wie in [9] dargestellt zu einer deutlichen Verbesserung der Bildqualität führen. Dieser Projektteil soll in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt PMDSim der AG Loffeld erfolgen.

Teilschritt R7

Demonstration der Bildgebung mit dem unter R6 beschriebenen System

Teilschritt R8

In Abhängigkeit von den Ergebnissen aus H6 ist geplant, ein System basierend auf einer THz-QCL Quelle und einem Zweifarben-Lasersystem aufzubauen. Ein solches System wäre insofern besonders zukunftsweisend, als sowohl QCL-Laser als auch Dioden-Laser das Potenzial besitzen, um auch in Low-Cost- bzw. in Massenanwendungen eingesetzt zu werden.

3.3 Untersuchungen am Menschen

Es werden keine Untersuchungen am Menschen durchgeführt.

3.4 Tierversuche

Es werden keine Experimente an Tieren durchgeführt.

3.5 Gentechnologische Experimente

Es werden keine gentechnologischen Experimente durchgeführt.

4. Beantragte Mittel

4.1 Personalkosten

1 wissenschaftlicher Mitarbeiter, BAT IIa, für 3 Jahre (AG Haring Bolívar)

Dieser Mitarbeiter soll die Experimente durchführen und die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse leisten. Neben den umfangreichen Arbeiten am optischen Aufbau sind wesentliche Arbeiten zur Messwerterfassung und -auswertung notwendig. Wegen der komplexen Anforderungen an den Mitarbeiter (gleichzeitig Kenntnisse in der Optoelektronik, THz-Spektroskopie und Bildgebung, Elektronik etc.) ist diese Stelle nur auf Basis einer vollen Stelle durch einen geeigneten Kandidaten zu besetzen.

1 wissenschaftlicher Mitarbeiter, BAT IIa, für 3 Jahre (AG Roskos/Löffler)

Dieser Mitarbeiter soll die Experimente zur Synchronisierung von Zweifarben Laser und THz-Quelle durchführen und die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse leisten. Hierbei steht neben den umfangreichen Arbeiten am optischen Aufbau auch die Realisierung der zur Synchronisierung notwendigen Elektronik im Vordergrund. Ein Kandidat mit entsprechenden Kenntnissen (Optik und Elektronik) kann vermutlich nur über eine deutschlandweite Ausschreibung bei entsprechender Dotierung der Stelle (1 ganze BAT IIa) gefunden werden, da an der Universität Frankfurt keine bzw. wenig Lehrveranstaltungen im Bereich Optik / Elektronik angeboten werden.

1 studentische Hilfskraft, 19h pro Woche, für 2 Jahre (AG Schwarte)

Diese Hilfskraft soll Parameteranpassungen der PMD-Kamera zur Anwendung als Komponente eines elektro-optischen THz-Detektors durchführen. Diese sind unabdingbar für den Betrieb und die Optimierung der THz-Kamera.

4.2 Wissenschaftliche Geräte

Geräte über 10.000,- EUR inkl. MwSt. und Nebenkosten für AG Roskos/Löffler	
<p>650 GHz, 10 mW Quelle (Vervielfacher) Preis lt. Angebot der Firma SEMIC RF 59.670,00 € zzgl MWSt</p> <p>Begründung: Als freilaufende Hochfrequenzquelle soll zum einen ein elektronischer Oszillator mit Vervielfacher und einer Zielfrequenz von 650 GHz und einer Ausgangsleistung von 10 mW eingesetzt werden. Ein solches System hat den großen Vorteil, dass es einerseits eine hohe Ausgangsleistung liefert und andererseits eine genügend hohe Frequenzstabilität aufweist. Die beantragte Quelle ist zur Durchführung des Projektes <u>unbedingt erforderlich</u>. Eine Verwendung von THz-QCL in einer frühen Projektphase würde <u>enorme Risiken</u> bzgl. der Verfügbarkeit (nicht-kommerziell sondern nur über Kooperationen und persönliche Kontakte erhältlich) und technischen Realisierbarkeit des Gesamtsystems (da Frequenzstabilität der QCLs bei hohen Ausgangsleistungen noch ungenügend untersucht ist) bedeuten.</p> <p>Zusage der Weiternutzung und der weiteren Abdeckung des Systems durch den DFG-Reparaturfond für das Zweifarben-Diodenlasersystems der Firma Sacher welches der AG Roskos von der DFG im Rahmen des Projektes (RO-770/24-1) als Dauerleihgabe zu Verfügung gestellt wurde für die Laufzeit des hier beantragten Projektes.</p> <p>Begründung: Das Lasersystem ist für das hier beantragte Projekt von zentraler Bedeutung. Ein Ausfall des Systems würde eine Fortsetzung des Projektes unmöglich machen.</p>	<p>69.217,20 €</p> <p>keine direkten Kosten.</p>
Summe:	<u>69.217,20 €</u>

Geräte unter 10.000,- EUR inkl. MwSt. (AG Haring)	
1 PMD Kamerasystem PMD[vision]® 3k-S, 64 x 48 Pixel laut beigefügtem Angebot € 5.990,-- + MwSt.	6.948,40 €
1 Keithley Sourcemeter zur THz Pulsquellenansteuerung laut Preisinformation von Fma. T.O.P. Elektronik	3.944,00 €
4 Parabolspiegel zur THz-Strahlführung lt. Angebot Fa. MellesGriot	1.574,04 €
4 Optikhalter P100-T zur Montage und verlässlichen Justage der Parabolspiegel lt. Angebot Fa. Newport	329,44 €
4 Miniaturverschiebetische M-MT-XY zur Positionierung der Parabolspiegel lt. Angebot Fa. Newport	705,28 €
2 Goldspiegel, Durchmesser 50.8mm, zur THz-Strahlführung lt. Angebot Fa. Newport	610,16 €
2 THz-Polyethylenlinsen zur Ein- und Auskopplung bzw. Fokussierung auf die Probe lt. Angebot Fa. Microtech Instruments	1.120,69 €
Summe:	<u>15.232,01 €</u>

Geräte unter 10.000,- EUR inkl. MwSt. (AG Roskos)	
Nachrüstung der Elektronik für Stabilisierung des Zweifarben-Diodenlasersystems (Pos. 1,3,4 des beiliegenden Angebots der Firma Sacher) € 3.750,- zzgl. MwSt	4.350,00 €
PMD Kamerasystem PMD[vision]® 3k-S, 64 x 48 Pixel laut beigefügtem Angebot € 5.990,-- + MwSt.	6.948,40 €
Summe:	<u>11.298,40 €</u>

4.3 Verbrauchsmaterial für 2 Jahre (Preise inkl. MWSt)

Verbrauchsmaterial für 2 Jahre (AG Haring)	
10 silberbeschichtete optische Spiegel (LayerTec), Stückpreis 95,--	1.102,00 €
Optische achromatische Verzögerungsplatten (2 x $\lambda/2$, 1 x $\lambda/4$) Preis lt. Hersteller, Fa. Newport	3.720,00 €
ZnTe elektro-optische Kristalle	2.000,00 €
Optische Kleinteile (5 Halterungen, 3 Verschiebetische, 10 Pedestals) Preis lt. Hersteller, Fa. Newport	1.682,00 €
Anteilige Kosten für Verbrauchsmaterial im optischen Labor (Reinigungsmittel für Optiken, Neubeschichtungen von Optiken und Linsen etc.)	1.000,00 €
Summe:	<u>9.504,00 €</u>

Verbrauchsmaterial für 2 Jahre (AG Roskos)	
6 Siliziumlinsen in drei verschiedenen Designs (100,-- €/Stück)	600,00 €
Achromatische Verzögerungsplatten (2 x $\lambda/2$, 1 x $\lambda/4$) Preis lt. Hersteller, Fa. Newport	3.720,00 €
ZnTe elektro-optische Kristalle	2.000,00 €
Verbrauchsmaterial für opt. Labor	2.000,00 €
Faseroptik für Laserstrahlführung zum Kamera-Aufbau	1.000,00 €
Summe:	<u>9.320,00 €</u>

4.4 Reisen

Zum Erfahrungsaustausch und zur Erörterung wissenschaftlicher Fragen sind Besuche anderer Arbeitsgruppen innerhalb Europas notwendig. In diesem Projekt ist dies essentiell um einen direkten Austausch mit den Quantenkaskadenlaser-Arbeitsgruppen (Scuola Normale, Pisa) erhalten zu können.

Interner Projektaustausch, nationaler und europäischer Austausch mit anderen Wissenschaftlern Pro Jahr	2.000,00 €
Ein internationaler Konferenzbesuch pro AG und Jahr	4.000,00 €
Summe 4.4 pro Jahr:	6.000,00 €
Summe 4.4 für 2 Jahre:	<u>12.000,00 €</u>

4.5 Sonstige Kosten

Inanspruchnahme von Dokumentationsdiensten (INSPEC)	1.500,00 €
Publikationskosten	1.500,00 €
Summe 4.5:	<u>3.000,00 €</u>

5. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

5.1.a Zusammensetzung der Arbeitsgruppe (AG Haring)

Mitarbeiter an der Antragsthematik:

- Prof. Dr. P. Haring Bolívar,
- Dr. V. Warnkross, Akademischer Oberrat, Beschäftigt sich mit der Generation und Propagation von Höchstfrequenzfeldern.
- Dipl. phys. D. Surawicz, beschäftigt sich mit zeitaufgelöster THz Technologie und dessen Nutzung für biomedizinische Anwendungen. Er wird dieses Projekt technologisch unterstützen und an Anwendungsuntersuchungen im biomedizinischen Bereich teilnehmen.
- C. Debus ist studentische Hilfskraft am Lehrstuhl und beschäftigt sich mit der elektromagnetischen Simulation von THz Komponenten. Er soll notwendige Simulationsarbeiten durchführen.
- Klaus Peter Dickel, technischer Mitarbeiter, soll die elektronischen Arbeiten zu Synchronisationsschaltungen durchführen.
- Herr Armin Kütke, technischer Mitarbeiter, soll die optischen Aufbauarbeiten im Labor unterstützen.
- N.N. Ein Diplom-Physiker oder Diplom-Ingenieur (Elektrotechnik) soll über das Projekt bezahlt werden, und das Projekt unter Anleitung von Prof. P. Haring Bolívar durchführen.

5.1.b Zusammensetzung der Arbeitsgruppe (AG Roskos)

Mitarbeiter an der Antragsthematik:

- Prof. Dr. H. Roskos,
- Dr. Torsten Löffler, Co-Projektleiter, seit Feb. 2000 in der Arbeitsgruppe, ist mit der Untersuchung von THz-Systemen und Anwendungen beschäftigt. Herr Löffler hat seine Dissertation zum Thema „*Erzeugung intensiver Pulse im Terahertzfrequenzbereich mittels laser-generierter Plasmen*“ in

Dezember 2003 abgeschlossen und hat nun als Post-Doc die operative Leitung der THz-Aktivitäten in der Arbeitsgruppe übernommen.

- Dipl. Phys. Markus Kreß, seit Oktober 2002 in der Arbeitsgruppe, hat den Aufbau zur elektro-optischen Detektion von CW-THz Strahlung realisiert. Sein Know-How wird entscheidend in das Projekt einfließen.
- M. Sc. Gabriel Loata, seit Mai 2002 in der Arbeitsgruppe, untersucht im Rahmen des DFG Projektes RO770-17/3 die Erzeugung von CW-THz Strahlung mit LT-GaAs Photomischern. Außerdem betreut Herr Loata das Zwei-Farben-Diodenlasersystem. Herr Loata wird das Projekt insbesondere im Hinblick auf die Nutzung des Zwei-Farben-Diodenlasersystems unterstützen.
- N.N. Ein Diplom-Pysiker oder Diplom-Ingenieur (Elektrotechnik) soll über das Projekt bezahlt werden, und das Projekt unter Anleitung von Dr. Torsten Löffler und Prof. H. Roskos bearbeiten.
- Andere Diplomanden und Doktoranden der Gruppe tragen bei Teilaufgaben bei, so Mark Thomson bei der Theorie der elektrooptischen Detektion.

5.1.c Zusammensetzung der Arbeitsgruppe (AG Schwarte)

Mitarbeiter an der Antragsthematik:

- Prof. Dr. Schwarte,
- N.N. Eine studentische Hilfskraft soll über das Projekt bezahlt werden und das Projekt unter Anleitung von Prof. R. Schwarte bearbeiten.

5.2.a Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern (AG Haring)

Die Arbeitsgruppe ist in mehreren nationalen und internationalen THz Kooperationen eingebunden. Insbesondere steht Sie als Themenkoordinator im europäischen Integrierten Projekt „Teranova“ vor bei dem 16 internationale Arbeitsgruppen beteiligt sind und ist Teilnehmer am europäischen Netzwerk „Metamorphose“ an dem über 20 Gruppen mitarbeiten. Darüber hinaus koordiniert die AG Haring den Aufbau einer neuen Fokus Gruppe „THz Technology“ der „European Optical Society“.

5.2.b Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern (AG Roskos)

Die Arbeitsgruppe ist in zahlreiche nationale und internationale THz-Kooperationen eingebunden. Insbesondere steht sie einem ESA-Konsortium (Projekt beendet / Nachfolge beantragt) und einem NATO Science-for-Peace-Projekt als Koordinator vor. Über die DFG Projekte RO 770/17-3 und RO 770/24-2 besehen gute Kontakte zu Wissenschaftlern der TU-Darmstadt und der Uni-Erlangen.

5.2.c Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern (AG Schwarte)

Die Arbeitsgruppe Schwarte ist eine der führenden Arbeitsgruppen im Bereich 3D Bildgebung und ist in vielfältige Kooperationen und Projekte eingebunden (z.B. bmb+f: *3D-SIAM* und *PMDIRAC*). In Bezug auf dieses Projekt ist die Anbindung an die Firma PMD Technologies als professioneller Hersteller von PMD Kameras interessant, sowie die enge Anbindung an die Firma ifm electronic GmbH als professioneller Anwender von PMD Kamerasystemen.

5.3.a Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern (AG Haring)

Der Einsatz von Quantenkaskadenlasern als cw-Quelle für die 3D THz Bildgebung ist in diesem Projekt vorgesehen. Dazu ist bereits eine Kooperationszusage von der Arbeitsgruppe von Prof. A. Tredicucci (Scuola Normale Superiore, Pisa, I) bestätigt worden und die Bereitstellung von THz Quantenkaskadenlasern garantiert.

5.4.a Apparative Ausstattung (AG Haring)

- Naßchemische Probenpräparation
- Elektroniklabor zur Herstellung einfacher Schaltungen
- 2 klimatisierte optische Labore.
- Titan-Saphir-Laser (Coherent, Typ MIRA), Impulsdauer: ca. 100 fs, Repetitions-rate: ca 76 MHz, Wellenlängenbereich: 700 - 1000 nm. Das System wird für wissenschaftlichen Projekte (DFG, EU) eingesetzt und soll diesem Projekt für geulste THz Analysen zur verfügung gestellt werden.
- Cavity Dumper (APE) zur variablen Femtosekunden Pulsgeneration im bereich 0 .. 1MHz. Ist nützlich um den Eindeutigkeitsbereich der bildgebenden THz Analysen variieren zu können.
- Closed-Cycle Kryostat (Cryophysics), Temperaturen bis 8 K, mit Kühlleistung von 10W zum Betrieb der QuantenKaskaden Laser.

5.4.b Apparative Ausstattung (AG Roskos)

Reinraum für die Probenpräparation:

- Optische Lithographie
- Naßchemische Probenpräparation
- Aufdampfanlagen

Vorhandene Lasersysteme:

- Titan-Saphir-Laser (Spectra Physics, Typ Tsunami), Impulsdauer: ca. 100 fs, Repetitions-rate: ca 80 MHz, Wellenlängenbereich: 700 - 1000 nm. Das System wird sowohl für wissenschaftlichen Projekte im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms *Ultraschnelle Magnetisierungsprozesse* und für DFG-Projekte zum Thema Quantenkohärenz eingesetzt.
- Titan-Saphir-Laserverstärkersystem (Clark-MXR, CDP-2001), Impulsdauer 150 fs, Wiederholrate: 1 kHz, durch Nutzung eines OPA (Clark-MXR, NOPA) ist ein Wellenlängenbereich von 200 –1500 nm zugänglich. Dieses System wird primär für die Femtosekundenspektroskopie (v.a im Rahmen der Forschergruppe *Spin- und Ladungskorrelationen in niedrigdimensionalen metall-organischen Festkörpern*) und für THz-Untersuchungen (z.B. plasmaphysikalischer Art) eingesetzt.
- Zwei-Farben Diodenlasersystem der Firma Sacher mit 500 mW Ausgangsleistung bei 850 nm.

Vorhandene Kryostat-Systeme:

- Optischer Magnetkryostat (Oxford, Spectromag), Magnetfelder bis 9T bei Temperaturen bis zu 2.4 K.
- Kleinstkryostat (Oxford, Microstat), Temperaturen bis 4 K. Er wird für kurzzeitige Messungen und zur Probencharakterisierung genutzt.
- Closed-Cycle (Cryophysics), Temperaturen bis 8 K.
- Ein weiterer optischer Magnetkryostat (Cryovac, KONTI IT - Spekro 5) wurde mit Mitteln der Forschergruppe *Spin- und Ladungskorrelationen in niedrigdimensionalen metall-organischen Festkörpern* angeschafft.

Die Arbeitsgruppe nutzt die komplette apparative und personelle Infrastruktur des Gesamtinstitutes (3 Arbeitsgruppen), insbesondere mit Hinblick auf die Materialcharakterisierung (Mikroskopie, Elektronenmikroskopie, etc.) und die Aufdampftechnologie.

5.4.c Apparative Ausstattung (AG Schwarte)

Am Institut für Nachrichtenverarbeitung:

- Mikroprozessorlabor, Labor für analoge und digitale Schaltungstechnik, Optoelektronik, Schnelle Impulstechnik mit Spektrumanalysator bis 2 GHz, Netzwerkanalysator bis 3 GHz, Oszilloskope bis 1 GHz, Pulsgeneratoren bis 500 ps, Logikanalysator.
- Optolabor mit neuester Einrichtung und Meßtechnik zur opt. Leistungsmessung, Strahlprofilanalyse von Laserstrahlen, Mikroskop zur Analyse von Halbleiterbauelementen.

- 15 PC mit Windows XP, LAN mit Novell Netware, Software: Microsoft Office XP, Matlab, PSpice, Protel DXP Agilent VEE, etc.
- Sun Workstation Cluster, Software für Layout und Simulation von Halbleiterbauelementen (Medici, Davinci, Raphael, Mentor Graphics, Cadence).

Im ZESS:

- Photoniklabor: Spektralmeßplatz (200 nm bis 15 μm), Reflexions-, Transmissions-, und Leistungsmessung, CW- und Pulsmeßtechnik.
- Glasfaserbearbeitung, Mikropositioniersysteme, Interferometriemeßplatz.
- Elektroniklabor: CAD-Systeme (PCB-Layout, Analog-, Digital- und Mixed-Signal-Simulation), Breitbandmeßplätze für Messungen im Frequenz- und Zeitbereich (DC-10GHz) Entwicklungswerkzeuge für verschiedene programmierbare Bausteine, Mikroprozessortechnik/Simulationstechnik, EMV-Meßplatz, Hard- und Softwarewerkzeuge für verschiedene Mikro- und Signalprozessoren (4, 8, 16, 32 bit) sowie für Feldbussysteme. Workstations und PC im heterogenen Netzwerk.
- Sensorsysteme/Multisensorsysteme: Verschiedene Bildverarbeitungssysteme (PC und VMEbus, monochrom u. Farbe, Laserabstandsmeßsysteme).
- 2D-, 3D-Scannersysteme, Lichtschnittsysteme, induktive und kapazitive Abstandsmeßsysteme, Posistioniereinrichtungen

5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

Bei der Kalkulation der Sachmittel wurde berücksichtigt, dass ein Teil der Verbrauchskosten bereits aus den Mitteln der beteiligten Institute für Forschung und Lehre beglichen werden.

5.6 Sonstige Voraussetzungen

keine

6. Erklärungen

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn wir einen solchen Antrag stellen, was bisher nicht geplant ist, werden wir die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

Der Vertrauensdozent der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Siegen, Univ.-Prof. em. Dr. Ulf Dirlmeier, wurde von dieser Antragstellung unterrichtet.

Der Vertrauensdozent der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Frankfurt, Herr Prof. Dr. Christian Ohrloff, Theodor-Stern-Kai 7, 60596 Frankfurt (M), wurde von der Antragstellung unterrichtet.

7. Unterschriften

Siegen, den 5/9/05



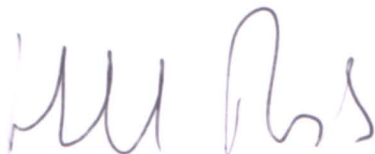
28/08/05

Prof. Dr. P. Haring Bolívar



Prof. Dr. R. Schwarte

Frankfurt a.M., den



Prof. Dr. H.G. Roskos

23. 8. 2005 Santa Barbara



Dr. T. Löffler

8. Verzeichnis der Anlagen

Angebote:

- Angebot Fa. SEMIC RF vom 11.08.2005
- Angebot Fa. Sacher vom 27.05.2005
- Angebot Fa. PMDTec von 08.08.2005

Tabellarischer Lebenslauf der Antragsteller mit Schriftenverzeichnis

Übersichtsartikel zu Dauerstrich THz Technologie [E1]:

T. Löffler, K. J. Siebert, H. Quast, N. Hasegawa, G. Loata, R. Wipf, T. Hahn, M. Thomson, R. Leonhardt, and H. G. Roskos, *All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems*, The Royal Society: Philosophical Transactions **362**, 263 (2004).

Kurzprofil des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Siegen

IPP-Broschüre des DAAD

Literatur:

- [1] Special edition “*Photonic Terahertz Technology*” of Semiconductor Science and Technology **20** (7), July 2005, guest editors: A. Li-sauskas, T. Löffler and H. G. Roskos.
- [2] Q. Wu, T. D. Hewitt, and X.-C. Zhang, *Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams*, Appl. Phys. Lett. **69**, 1026 (1996).
- [3] A. Nahata, J. T. Yardley, and T. F. Heinz, *Two-dimensional imaging of continuous-wave terahertz radiation using electro-optic detection*, Appl. Phys. Lett. **81**, 963 (2002).
- [4] G. Zhao, R. N. Schouten, N. van der Valk, W. Th. Wenckebach, and P. C. M. Planken, *Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter*, Rev. Sci. Instrum. **73**, 1715 (2002).
- [5] S. M. Duffy, S. Verghese, A. McIntosh, A. Jackson, A. C. Gossard, S. Matsuura, *Accurate modeling of dual dipole and slot elements used with photomixers for coherent terahertz output power*, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **49**, 1032 (2001).

- [6] A. Nahata, J.T. Yardley, T. F. Heinz, *Free-space electro-optic detection of continuous-wave terahertz radiation*, Appl. Phys. Lett. **75**, 2524 (1999).
- [7] S Wang and X-C Zhang *Pulsed terahertz tomography*, J. Phys. D: Appl. Phys. **37** (2004) R1–R36
- [8] B. Ferguson, S. H. Wang, D. Gray, D. Abbott, and X.-C. Zhang, *T-ray computed tomography*, Opt. Lett. **27**, 1312 (2002).
- [9] J.F. Federici, D. Gary, B. Schulkin, F. Huang, H. Altan, R Barat, and D. Zimdars, *Terahertz imaging using an interferometric array*, Appl. Phys. Lett. **83**, 2477 (2003).
- [10] N. Hasegawa, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Remote Identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection*, Appl. Phys. Lett. **83**, 3996 (2003).



SEMIC RFELECTRONIC GMBH · Postweg 2 · D-82024 Taufkirchen

Postweg 2
D-82024 Taufkirchen
Tel. (0 89) 614-152-0
Fax (0 89) 614-152-222
<http://www.semic.de>
sales@semic.de

Johann Wolfgang Goethe-Universität
Dr. Thorsten Löffler
Physikalisches Institut
Robert-Mayer-Str. 2-4

60054 Frankfurt

Fax: 069-798-28448

WG/IK
20.9.2004

Angebot-Nr. 0920/5467

Sehr geehrter Dr. Löffler,

wir nehmen Bezug auf unsere Gespräche der vergangenen Woche und bieten Ihnen das nachstehende Millimeterwellensystem zu unseren anliegenden Geschäftsbedingungen wie folgt an:

Pos	Produkt:	Modell	Stck	EUR/Stck
1	"Turn-Key" System mit Steuerschalter Ausgangsleistung im Frequenzbereich 640 - 660 GHz Ausgangsantenne Modulationsrate Versorgungsleistung Systemaufbau	640 GHz Quelle 0,5 - 10 mW (bei einer ausgewählten Frequenz) 22 dB Gewinn 50 kHz (benötigt ein externes Modulationssignal) + 12 VDC und 220 VAC PLO-Modulator-Verstärker-Verdoppler- Verdoppler-Verdoppler-Verdreifacher	1	59.670

Unsere Angebotspreise beinhalten bereits einen Hochschulrabatt von 10 %.

Lieferzeit:	ca. 10-14 Wochen nach Auftragseingang.
Preisstellung:	frei Haus zzgl. ges. MwSt.
Zahlungsbedingungen:	14 Tage netto
Angebotsgültigkeit:	30 Tage

Geschäftsführer: Wolfgang Gruber, Dipl.-Ing. (FH)
Amtsgericht München HRB Nr. 80237
USt.-Ident.-Nr. DE129 45 8244

Kreisbank Kto.-Nr. 170 71 87 04 BLZ 702 501 50
HypoVB Ottobrunn Kto.-Nr. 404 37 90 0 BLZ 700 202 70

PMDTechnologies GmbH • Am Eichenhang 50 • 57076 Siegen

Universität Siegen
Institute of high frequency and quantum electronics
Prof. Dr. P. Haring Bolivar
Hölderlinstraße 3

D-57068 Siegen

Bitte bei Rückfragen angeben:
Please refer for inquiries

Angebots-Nr. / Offer-No.

153277

Datum / Date

08.08.2005

Seite / Page

1

ANGEBOT

QUOTATION

Zuständig ist Herr/Frau / Your contact Mr./Mrs.:

Bianca Hagebeucker

Thank you for your inquiry and for the interest you have shown in our product.

Pos Item	Bezeichnung Description	Menge Quantity	Einzelpreis Unit Price Euro	Gesamtpreis Total amount Euro
1.	PMD[vision]® 3k-S, 64 x 48 pixel <i>(3D time-of-flight camera evaluation kit based on PMD Technology)</i> Contents of delivery 1 x Time-of-flight 3D camera 1 x Ethernet cable 5m cross over 1 x Firewire cable 2m 1 x Tripod 1 x Power Supply 1 x Camera Box 1 x Instruction Manual 1 x CD-ROM containing the MiniSDK and CamVis Pro software 1 x Users Guide for the MiniSDK and CamVis Pro The quotation includes engineering services of 0,5 days by phone or e-mail. Additional support will be invoiced at a base rate of 1.000 € per day.	1	5.990,--	5.990,--
			Angebotssumme in € ohne Mwst Total without tax	5.990,--

Lieferbedingungen / Terms of Delivery:

Zahlungsbedingungen / Terms of Payment:

Lieferzeit / Period of Delivery:

Gültigkeit des Angebots / Validity of the offer:

Haftungsbedingungen / Warranty disclaimer:

Ex works

Immediately after delivery without deduction

10 weeks after placement of order, if in stock

30 days

The PhotonICS® chips, PMD[vision]® cameras and the related demonstration software are engineering samples, for evaluation purposes only. The client shall be entirely responsible for the use of the camera and the software.

We hope our quotation meets your requirements and we look forward to your order.

Yours sincerely / Mit freundlichen Grüßen

PMDTechnologies GmbH



Dr. B. Buxbaum



T. Gollewski

PMDTechnologies GmbH

Am Eichenhang 50

57076 Siegen

www.PMDTec.com

tel +49 271 238538-800

fax +49 271 238538-809

info@PMDTec.com

Geschäftsführer

Dr. Bernd Buxbaum

Torsten Gollewski

Steuernr. 342/5817/1367

Handelsregister

Amtsgericht Siegen

HRB 56 52

Ust-IdNr. DE813504519

Commerzbank

BLZ 721 400 52

Konto 190 897 900



Sacher Lasertechnik Group

Marburger Lasertechnik GmbH, H.-Arendt-Str.3-7, 35037 Marburg, Germany

Universität Frankfurt
Institut f. Physikal. Chemie
z.Hd.: Herrn Markus Kreß
Marie Curie Str. 11

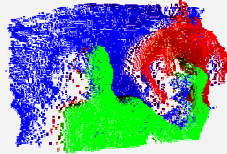
60439 Frankfurt

Quotation	
Q.-No.	O003311
Customer	D000385
Date	27.06.2005

Pos	Qty.	Artikel	PE	Unit Price	Total Price	St.- Schl.
1	1	233000430003 5302 WL Wavelength Locker Unit (Top of Line Stabl)	1	3.250,00	3.250,00	1
2	1	231002430000 PI-1000-AS Active Stabilization Plug-In for MLD	1	1.950,00	1.950,00	1
3	1	231003430000 PI-1000-MD Analog Modulation Plug-In for MLD	1	400,00	400,00	1
4	1	FedEx Lasersys EU Freightcharges: Shipping via FedEx, Handling, Insurance	1	100,00	100,00	1
Amount					5.700,00	
zusätzlich MwSt 16,00% aus					5.700,00	912,00 1
Total Amount					6.612,00	€

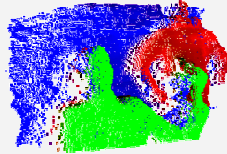
payment terms 0 days netto 6.612,00 €

Hausanschrift: Sacher Lasertechnik GmbH Hannah Arendt Str. 3-7 D-35037 Marburg / Lahn	Tel. 06421 305-0 Fax 06421 305-299 E-mail: contact@sacher.de Web: http://www.sacher.de	Handelsregister: Amtsgericht Marburg, HRB 2327 Geschäftsführer: Dr. Joachim Sacher Umsatzsteuer Id-Nr.: DE210561511	Marburger Bank e.G. Commerzbank Marburg BLZ: 533 900 00 BLZ: 533 400 24 Konto-Nr.: 10209084 Konto-Nr.: 39 01170 GENO DE 51 MB1 COBA DE FF 533
--	---	--	--



Kurzprofil Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar

Geburtsdatum	20.03.69
Schulabschluß 1987	Deutsches Abitur, Durchschnitt 1.3 (aus 1 bis 6) Mexikanisches CCH, Durchschnitt 9.22 (aus 10 bis 0)
1987-1992	Studium der Elektrotechnik an der RWTH Aachen
1992 - 1993	Leiter der Rettungsequipment Abteilung von <i>Náutica Diesel Europea S.A. de C.V.</i> in Mexiko-Stadt, Mexiko
1993 - 1997	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Dissertation am Institut für Halbleitertechnik II der RWTH Aachen bei Prof. H. Kurz. <ul style="list-style-type: none">• <i>Heinrich Hertz</i> Stipendium des Ministeriums für Wissenschaft und Forschung NRW• Abschluß der Dissertation <i>mit Auszeichnung</i>• <i>Wilhelm Borchers</i> Medaille der RWTH Aachen
1997 - 2001	Gruppenleiter und Habilitand (C1) am Institut für Halbleitertechnik II der RWTH Aachen
2001 - 2004	Oberingenieur (C2) Lehrstuhls und Instituts für Halbleitertechnik der RWTH Aachen.
2004 - jetzt	Lehrstuhlinhaber und Professor (C4) für Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik an der Universität Siegen.
Lehrgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Hochfrequenztechnik• Optoelektronik• Optische Nachrichtentechnik
Forschungs- u. Arbeitsgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Terahertz Technologie, Analytik und Bildgebung• Optische Speicher, Nichtflüchtige Speicher• Integrierte Optik• Ultraschnelle Optoelektronik
Aktuelle Vorhaben:	<ul style="list-style-type: none">• THz Biosensorik (EU 6th FP Integriertes Projekt)• Metamaterials (EU 6th FP Network of Excellence)• THz Nahfeldsensorik (DFG)• THz 3D Bildgebung (in Vorbereitung DFG)
Aktuell:	<ul style="list-style-type: none">• Seit 2004 Leiter der Fokus Gruppe „THz Technologie“ der European Optical Society• Seit 2005 Mitglied im NRW Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
Weitere Informationen	http://www.hqe.fb12.uni-siegen.de/



Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar

Patente:

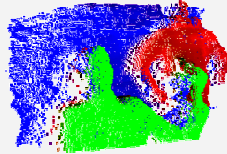
1. P. Haring Bolívar, M. Nagel, H. Kurz, M. Brucherseifer, A. Bosserhoff und R. Büttner "Verfahren zur Identifizierung von Polynucleotidsequenzen", eingereicht beim Deutschen Patentamt Akt. Z. 100 33 258.7., Nachanmeldung Akt Z. 100 54 476.2.
2. P. Haring Bolívar, M. Nagel, H. Kurz, M. Brucherseifer, A. Bosserhoff und R. Büttner "DNA Detektor", eingereicht beim Europäischen Patentamt Akt. Z. PCT/DE 01/02408.
3. A. Bernds, W. Clemens, P. Haring, H. Kurz und B. Vratzow "Verfahren zur Herstellung leitfähiger Strukturen in organischen elektronischen Bauteilen mit Prägedruckverfahren", eingereicht beim Deutschen Patentamt, Akt Z. 2000P19494.
4. P. Haring Bolívar, F. Merget, D.-H. Kim, H. Kurz, V. Sousa and B. Bechevet, „Laterale Phasenwechsel Speicher“, eingereicht beim Deutschen Patentamt 2003. PCT Verfahren 2004.

Buchbeiträge:

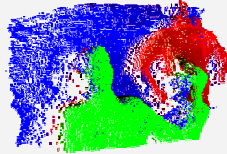
1. P. Haring Bolívar, "Influence of the Coulomb interaction on the coherent and incoherent electronic dynamics in modern optoelectronic materials", ISBN 3-8265-2358-X, (Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 1997).
2. P. Haring Bolívar, „Coherent THz spectroscopy“, chapter 5 in Semiconductor Quantum Optoelectronics: From Quantum Physics to Smart Devices ed. by A. Miller, M. Ebrahimzahdeh and D.M. Finlayson, ISBN 0-7503-0628-9, (Institute of Physics Publishing, Bristol, 1999), pp. 151-192.
3. P. Haring Bolívar, T. Dekorsy and H. Kurz, "Optically excited Bloch oscillations -- Fundamentals and Application perspectives", chapter 4 in Intersubband Transitions in Quantum Wells – Physics and Device Applications II, Semiconductors and Semimetals 66, edited by R.K. Willardson and E.R. Weber, volume editors H.C. Liu and F. Capasso, ISBN 0-12-752175-5 (Academic Press, London, 2000), pp. 187-217.
4. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H.P.M. Pellemans, and H. Kurz, "Time domain THz spectroscopy and sensing", chapter in THz Sources and Systems, edited by R.E. Miles, et al. (Kluwer Academic Publishers, 2001) 315-328.
5. P. Haring Bolívar, Optical Generation, Chapter II.2 in Generation and Applications of Terahertz Radiation, Ed. M. Chamberlain, and T. Wenckebach, (to be published, Oxford University Press).

Publikationen in internationalen Zeitschriften (ISI citation index: 759 Zitate in 59 erfassten Publikationen)

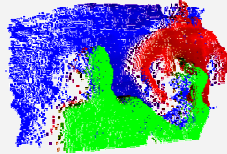
1. S. Schmitt-Rink, D. Bennhardt, V. Heuckeroth, P. Haring, G. Maidorn, H. Bakker, K. Leo, D. Kim, J. Shah, K. Köhler, „Polarization dependence of heavy- and light-hole quantum beats“, Physical Review B, 46 (16), 10460, (1992). (82 mal zitiert)
2. K. Leo, P. Haring Bolívar, G. Maidorn, H. Kurz, K. Köhler, „Ultrafast dephasing in GaAs and GaAs/AlGaAs quantum wells“, Semic. Sci. Technol. 7, B983, (1992).
3. K. Leo, P. Haring Bolívar, F. Brüggemann, R. Schwedler, K. Köhler, „Observation of Bloch Oscillations in a semiconductor superlattice“, Solid State Communications, 84 (10), 943, (1992). (147 mal zitiert)
4. P. Haring Bolívar, P. Leisching, K. Leo, J. Shah, K. Köhler, „Observation of Bloch Oscillations in a semiconductor superlattice“, Ultrafast Electronics and Optoelectronics, 14, 142, (1993).
5. C. Waschke, P. Leisching, P. Haring Bolívar, R. Schwedler, F. Brüggemann, H.G. Roskos, K. Leo, H. Kurz, K. Köhler, „Detection of Bloch Oscillations in a Semiconductor Superlattice by time resolved THz Spectroscopy and Degenerate Four-Wave-Mixing“, Solid State Electronics 37, 1321, (1994).



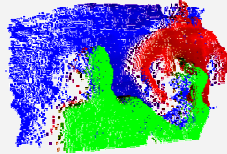
6. P. Leisching, C. Waschke, P. Haring Bolívar, W. Beck, H. Roskos, K. Leo, H. Kurz, K. Köhler, P. Ganser, „Bloch Oscillations in Superlattices“, in Coherent Optical Interactions in semiconductors, 330 NATO ASI Series B: Physics, edited by R. T. Phillips, 325, (Plenum Press, New York, 1994).
7. P. Leisching, P. Haring Bolívar, R. Schwedler, K. Leo, H. Kurz, K. Köhler and P. Ganser, „Investigation of Bloch Oscillations in a GaAs/AlGaAs superlattice by transient spectrally-resolved Four-Wave-Mixing“, Semicond. Sci. Technol. 9, 419-421 (1994).
8. P. Leisching, P. Haring Bolívar, W. Beck, Y. Dhaibi, F. Brüggemann, R. Schwedler, H. Kurz, K. Leo and K. Köhler, „Bloch Oscillations of Excitonic Wave-Packets in Semiconductor Superlattices“, Phys. Rev. B 50, 14389, (1994). (72 mal zitiert)
9. V.M. Axt, A. Stahl, E.J. Mayer, P. Haring Bolívar, S. Nüsse, K. Ploog, K. Köhler, „Four-wave-mixing theory beyond the semiconductor Bloch equations“, phys. stat. sol. (b), 188, 447 (1995).
10. V. Klimov, P. Haring Bolívar, H. Kurz, „Hot phonon effects in femtosecond luminescence spectra of electron-hole plasma in CdS“, Phys. Rev. B 52 (7), 4728 (1995)
11. V. Klimov, P. Haring Bolívar, H. Kurz, V. Karavanskii, V. Krasovskii and Y. Korkishko, „Linear and nonlinear transmission of Cu_xS quantum dots“, Applied Physics Letters 67 (5) 653, (1995).
12. P. Haring Bolívar, G. Wegmann, R. Kersting, M. Deussen, U. Lemmer, R.F. Mahrt, H. Kurz, H. Bässler, E.O. Göbel, „Dynamics of excitation transfer in dye doped π -conjugated polymers“, Chem. Phys. Letters. 245, 534-538 (1995).
13. P. Leisching, R. Ott, P. Haring Bolívar, T. Dekorsy, H.J. Bakker, H.G. Roskos, H. Kurz and K. Köhler, „External field induced electric dipole moment of biexcitons in a semiconductor superlattice“, Phys. Rev. B. 52, R16993 (1995).
14. P. Leisching, R. Ott, P. Haring Bolívar, T. Dekorsy, H.J. Bakker, H.G. Roskos, H. Kurz, K. Köhler, „Coherent dynamics of excitonic and biexcitonic wave packets in semiconductor superlattices“, Nuovo Cimento Della Societa Italiana di Fisica D 17 (11-12), 1573-1578 (1995).
15. V. Klimov, P. Haring Bolívar and H. Kurz, „Ultrafast carrier dynamics in semiconductor quantum dots“, Phys. Rev. B 53, 1463 (1996).
16. U. Lemmer, A. Ochse, M. Deussen, R.F. Mahrt, E.O. Göbel, H. Bässler, P. Haring Bolívar, G. Wegmann and H. Kurz, „Energy transfer in molecularly doped conjugated polymers“, Synth. Met. 78, 289 (1996).
17. R.F. Mahrt, P. Haring Bolívar, T. Pauck, G. Wegmann, U. Lemmer, U. Siegner, M. Hopmeier, U. Sherf, K. Müllen, H. Kurz, H. Bässler and E.O. Göbel „Dynamics of optical excitations in a ladder-type π -conjugated polymer containing aggregate states“, Phys. Rev. B 54, 1759 (1996). (75 mal zitiert)
18. M. Deussen, P. Haring Bolívar, G. Wegmann, H. Kurz and H. Bässler, „Electric field induced photoluminescence quenching in molecularly doped polymer Light-emitting-diodes“, Chem. Phys. 207, 147 (1996).
19. V.I. Klimov, P. Haring Bolívar, H. Kurz, and V.A. Karavanskii, „Optical nonlinearities and carrier trapping dynamics in CdS and Cu_xS nanocrystals“, Superlattices and Microstructures 20, 395 (1996).
20. P. Haring Bolívar, F. Wolter, A. Müller, H.G. Roskos, K. Köhler and H. Kurz, „Excitonic emission of THz radiation - experimental evidence for the shortcomings of the Bloch Equation method“, Phys. Rev. Lett. 78, 2232 (1997).
21. R. Lövenich, K. Victor, G. Bartels, A. Stahl, A. Müller, P. Haring Bolívar, T. Dekorsy and H. Kurz, „The resonant interband contribution to the TEOS signal“, Sol. Stat. Comm. 101, 167 (1997).
22. S. Nüsse, P. Haring Bolívar, H. Kurz, F. Levy and A. Chevy, „Femtosecond coherent polariton dynamics in the layered III-VI-semiconductor InSe“, Phys. Rev. B 55, 4620 (1997).
23. S. Nüsse, P. Haring Bolívar, H. Kurz, V. Klimov, F. Levy, „Carrier cooling and exciton formation in GaSe“, Phys. Rev. B 56, 4578-4583 (1997).



24. F. Wolter, P. Haring Bolívar, G. Bartels, H.G. Roskos, H. Kurz, V.M. Axt, K. Köhler, „Coulomb-renormalized intraband dynamics probed by THz Emission“, *phys. stat. sol. (b)* 204, 31 (1997).
25. F. Wolter H.G. Roskos, P. Haring Bolívar, G. Bartels, H. Kurz, K. Köhler, H.T. Grahn and R. Hey, „Influence of LO-phonon emission on Bloch Oscillations in Semiconductor Superlattices“, *phys. stat. sol. (b)* 204, 83 (1997).
26. S. Nüsse, P. Haring Bolívar, V. Klimov, H. Kurz and F. Levy, „Femtosecond study of carrier cooling and exciton formation in the layered III-VI semiconductor GaSe“, *phys. stat. sol. (b)* 204, 98 (1997).
27. J. Martini, T. Voß, M. Brucherseifer, R. Martini, P. Haring Bolívar and H. Kurz, “DSP-unterstützte Terahertz Tomographie” in *DSP Deutschland 97: Grundlagen Architekturen, Tools, Applikationen*, ed. by J. Wiesböck, (Design und Elektronik, Haar bei München, 1997), pp. 241ff.
28. P. Haring Bolívar, G. Wegmann, G. Leising and H. Kurz, „Annihilation dynamics of the luminescence in oriented poly (phenylene vinylene)“, *phys. stat. sol. (b)* 205, 319 (1998).
29. N. Sekine, K. Yamanaka, K. Hirakawa, M. Vossebürger, P. Haring Bolívar P and H. Kurz, "Observation of terahertz radiation from higher-order two-dimensional plasmon modes in GaAs/AlGaAs single quantum wells", *Applied Physics Letters* 74, 1006 (1999).
30. R. Martini, F. Hilbk-Kortenbruck, P. Haring Bolívar and H. Kurz, „Inversionless amplification of coherent THz-Emission“, *Proceedings IEEE (Cat. No.98EX171)*, pp. 242-5 (1998).
31. F. Wolter, R. Martini, S. Tolk, P. Haring Bolívar, H. Kurz, R. Hey and H.T. Grahn, „Influence of carrier-carrier scattering on the dephasing of Bloch oscillations“, *Superlattices & Microstructures* 26, 93 (1999).
32. N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vossebürger, P. Haring Bolívar and H. Kurz, “Excitation process of two-dimensional plasmons excited by femtosecond laser pulses”, *Microelectronic Engineering* 47, 289 (1999).
33. M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar, H. Klingenberg, and H. Kurz, Angle dependent THz tomography - Characterization of thin ceramic oxide films for fuel cell applications, *Appl. Phys. B* 72, 361 (2001). doi:10.1007/s003400100474
34. M. Brucherseifer, M. Nagel, P. Haring Bolívar, H. Kurz, A. Bosserhoff and R. Büttner, Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing, *Appl. Phys. Lett.* 77, 4049 (2000).
35. S. Kyrsta, R. Cremer, D. Neuschütz, M. Laurenzis, P. Haring Bolívar, and H. Kurz, Characterization of GeSbTe thin films deposited using a composition spread approach, *Thin Solid Films* 398–399, 379 (2001).
36. M. Nagel, T. Dekorsy, M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar and H. Kurz, Characterization of polypropylene thin-film microstrip lines at millimeter and submillimeter wavelengths, *Microw. Opt. Techn. Lett* 29, 97-100 (2001).
37. I. Ederra, R. Gonzalo, G. Nagore, H.P.M Pellemans, P. Haring Bolívar and P. de Maagt, Near Field Patterns and Mutual Coupling of Photonic Crystal Patch Antennas, *IEEE MTT special issue on photonic bandgaps* (submitted)
38. S. Kyrsta, R. Cremer, D. Neuschütz, M. Laurenzis, P. Haring Bolívar, H. Kurz, Deposition and characterization of Ge-Sb-Te layers for applications in optical data storage, *Appl. Surf. Sc.* 179, 55-60 (2001).
39. N. Sekine, K. Hirakawa, M. Vossebürger, P. Haring Bolívar and H. Kurz, Crossover from coherent to incoherent excitation of two-dimensional plasmons in GaAs/Al_xGa_{1-x}As single quantum wells by femtosecond laser pulses, *Phys. Rev. B* 64 (20), 1323 (2001). doi:10.1103/PhysRevB.64.201323
40. M. Nagel, P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff and R. Büttner, Integrated THz technology for label-free genetic diagnostics, *Appl. Phys. Lett.* 80, 154 (2002). doi:10.1063/1.1428619
41. M. Nagel, P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff and R. Büttner, Integrated planar THz resonators for femtomol sensitivity label-free detection of DNA hybridization, *Appl. Opt.* 41, 2074 (2002).
44. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, M. Nagel, H. Kurz, A. Bosserhoff and R. Büttner, Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing, *Materials Science Forum* 384, 253 (2002).



42. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, M. Nagel, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, Label-free probing of genes by time-domain terahertz sensing, *Phys. Med. Biol.* 47, 3815-3821 (2002).
43. M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar, and H. Kurz, Combined optical and spatial modulation THz-spectroscopy for the analysis of thin-layered systems, *Appl. Phys. Lett.* 81, 1791 (2002). doi:10.1063/1.1505118
44. R. Gonzalo, B. Martinez, C.M. Mann, H.P.M. Pellemans, P. Haring Bolívar, and P. de Maagt, A Low-Cost Fabrication Technique for Symmetrical and Asymmetrical Layer-by-Layer Photonic Crystals at Submillimeter-Wave Frequencies, *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.* 50, 2384 (2002). doi:10.1109/TMTT.2002.803446
45. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, J. Gómez Rivas, R. Gonzalo, I. Ederra, A. Reynolds, M. Holker, P. de Maagt, Measurement of the Dielectric Constant and Loss Tangent of High Dielectric Constant Materials at Terahertz Frequencies, *IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn.* 51, 1062 (2003). doi:10.1109/TMTT.2003.809693
46. S. Hadjiloucas, R. K. H. Galvao, J. W. Bowen, R. Martini, M. Brucherseifer, H. P. M. Pellemans, P. Haring Bolívar, H. Kurz, J. Digby, G. M. Parkhurst, and J. M. Chamberlain, Measurement of propagation constant in waveguides with wideband coherent terahertz spectroscopy, *J. Opt. Soc. Am. B* 20, 391 (2003). <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?id=71172>
47. C. Janke, P. Haring Bolívar, A. Bartels, H. Kurz, and H. Künzel, Inversionless amplification of coherent terahertz radiation, *Phys. Rev. B* 67, 155206 (2003). doi:10.1103/PhysRevB.67.155206
48. A. Vörckel, M. Münster, W. Henschel, P. Haring Bolívar, H. Kurz, Asymmetrically coupled silicon-on-insulator microring resonators for compact add-drop multiplexers, *IEEE Photonics Technology Letters* 15 (7), p.921-3 (2003). doi:10.1109/LPT.2003.813419
49. M. Brucherseifer, A. Meltzow-Altmeyer, P. Haring Bolívar, H. Kurz and P. Seidel, "Low-temperature THz imaging of thin high-temperature superconductor films", *Physica C: superconductivity* 399 (1-2), 53-60 (2003). doi:10.1016/S0921-4534(03)01292-9
50. M. Nagel, F. Richter, P. Haring Bolívar and H. Kurz, "A functionalized THz sensor for marker-free DNA analysis", *Phys. Med. Biol.* 48, 3625-3636 (2003). doi:10.1088/0031-9155/48/22/001
51. J. Gómez Rivas, C. Schotsch, P. Haring Bolívar, and H. Kurz, "Enhanced Transmission of Terahertz Radiation Through Sub-Wavelength Holes". *Phys. Rev B* 68, 201306(R) (2003). doi:10.1103/PhysRevB.68.201306
52. M. Zedler, C. Janke, P. Haring Bolívar, H. Kurz and H. Künzel, "Improved coherent THz emission by modification of the dielectric environment", *Appl. Phys. Lett.* 83, 4196-4199 (2003). doi:10.1063/1.1628400
53. M. Laurenzis, M. Först, P. Haring Bolívar, and Heinrich Kurz, "Influence of hot carrier diffusion on the density limitation of optical data storage", *Jap. J. of Appl. Phys* 43 (7B), 4700-4703 (2004). <http://jjap.ipap.jp/link?JJAP/43/4700/>
54. P. Haring Bolivar, M. Nagel, F. Richter, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff und R. Büttner, "Label-free THz sensing of genetic sequences: towards 'THz biochips' ", *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A* 362, 323 - 335 (2004). doi:10.1098/rsta.2003.1318
55. S. Nüsse, F. Wolter, P. Haring Bolívar, K. Köhler, R. Hey, H.T. Grahn and H. Kurz, "Intraband coherence of Bloch oscillations after momentum scattering", *Appl. Phys. A* 78, 491-495 (2004). doi:10.1007/s00339-003-2409-9
56. C. Janke, J. Gómez Rivas, C. Schotsch, L. Beckmann, P. Haring Bolivar, and H. Kurz, "Optimization of enhanced terahertz transmission through arrays of subwavelength apertures", *Phys. Rev. B* 69, 205314 (2004). doi:10.1103/PhysRevB.69.205314
57. J. Saxler, J. Gómez Rivas, C. Janke, H. P. M. Pellemans, P. Haring Bolívar, and H. Kurz, "Time-domain measurements of surface plasmon polaritons in the terahertz frequency range", *Phys. Rev. B* 69, 155427 (2004) doi:10.1103/PhysRevB.69.155427
58. J. Gómez Rivas, P. Haring Bolivar, and H. Kurz, Thermal switching of the enhanced transmission of terahertz

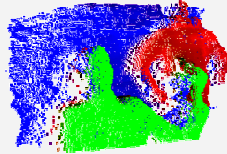


radiation through subwavelength apertures, *Opt. Lett.* 29 (14), 1680 (2004).
<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?id=80572>

59. J. Niehusmann, A. Vörckel, P. Haring Bolívar, T. Wahlbrink, W. Henschel, and H. Kurz, „Ultrahigh Quality Factor Silicon on Insulator Microring Resonators“, *Opt. Lett.* 29 (24), 2861-2863 (2004).
60. J. Gómez Rivas, M. Kuttge, P. Haring Bolívar, H. Kurz, and J. A. Sánchez-Gil, “Propagation of surface plasmon polaritons on semiconductor gratings”, *Phys Rev. Lett.* 93 (25), 256804 (2004). doi:10.1103/PhysRevLett.93.256804
61. M. Laurenzis, A. Heinrici, P. Haring Bolívar, H. Kurz, S. Krysta and J.M. Schneider, “Composition spread analysis of phase-change dynamics in $\text{GeSb}_x\text{Te}_{1-x-y}$ films embedded in an optical multilayer stack”, *IEE Proc- Sci. Meas and Techn.* 151 (6): 394-397 (2004).
62. J. Gómez Rivas, C. Janke, P. Haring Bolívar and H. Kurz, “Transmission of THz radiation through InSb gratings of subwavelength apertures”, *Opt. Expr.* 13 (3): 847-859 (2005).
63. M. Nagel, P. Haring Bolívar and H. Kurz, “Modular parallel-plate THz components for cost-efficient biosensing systems”, *Semic. Sc. and Techn.*, accepted (2005).
64. T. Wahlbrink, T. Mollenhauer, Y.M. Georgiev, W. Henschel, J.K. Efavi, H.D.B. Gottlob, M.C. Lemme, H. Kurz, J. Niehusmann, P. Haring Bolívar, Highly selective etch process for silicon-on-insulator nano-devices, *Microel. Eng.* 78-79, 212-217 (2005).
65. K. Berdel, J. Gómez Rivas, P. Haring Bolívar, P. de Maagt, H. Kurz, *IEEE Trans. Microw. Th. And Techn* 53 (4): 1266-1271 (2005).
66. J. Gómez Rivas, A. Farré Benet, J. Niehusmann, P. Haring Bolívar, and H. Kurz, Time-resolved broadband analysis of slow-light propagation and superluminal transmission of electromagnetic waves in three-dimensional photonic crystals, *Phys. Rev. B* 71 (15), 155110 (2005)

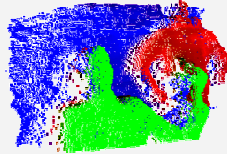
Eingeladene internationale Konferenzbeiträge

1. P. Leisching, C. Waschke, P. Haring Bolívar, W. Beck, H. Kurz, H.G. Roskos, K. Leo, K. Köhler, „Bloch Oscillations in Semiconductor Superlattices: Physics and Application Perspectives“, *International Semiconductor Device Research Symposium '93*, 1, 85, (1993).
2. P. Haring Bolívar, „Coherent THz spectroscopy“, in *NATO Advanced Study Institute on Semiconductor Quantum Optoelectronics: From Quantum Physics to Smart Devices*, Fiftieth Scottish Universities Summer School in Physics, St Andrews, United Kingdom, June 1998.
3. P. Haring Bolívar, C. Jaeckel and H. Kurz „Time resolved spectroscopy of high-Tc materials“, 5th Twente Workshop: Digital Applications, Josephson Junctions and Sensors, Twente, Netherlands (25-28 April 1999).
4. P. Haring Bolívar, R. Martini, and H. Kurz, "Pulsed optical THz technology --- generation and amplification of coherent THz radiation", *Proc. SPIE Vol. 3828*, p. 228-233, *Terahertz Spectroscopy and Applications II*, J. M. Chamberlain; Ed. (1999).
5. P. Haring Bolívar, F. Wolter, G. Bartels, S. Nüsse and H. Kurz, "Conservation of intraband coherence in Superlattices", *OSA Topical Meeting on Quantum Optoelectronics*, Snowmass, CO, USA (1-18. April 1999).
6. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H.P.M. Pellemans, and H. Kurz, Time domain THz spectroscopy and sensing, in *NATO Adv. Res. Workshop on THz sources and systems*, Chateau de Bonas, France, 2000.
7. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H. P. M. Pellemans, H. Kurz, Modulation THz spectroscopy, in *Lasers 2000 conference*, Albuquerque, USA, 4.-8. Dezember 2000.
8. M. Nagel, M. Brucherseifer, H.P.M. Pellemans, P. Haring Bolívar, H. Kurz, and G. Schindler, 94 GHz radar antenna characterization with synchronized near-field photoconductive sampling in *Conference on Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, Lake Tahoe, USA, 9.-12. Januar 2001.
9. P. Haring Bolívar, 'Pulsed optical THz technologie', Vorlesungsreihe, INTERACT meeting, Lingatan, Sweden,

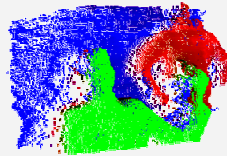


27 June - 1 July 2001.

10. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, M. Nagel, H. Kurz, A. Bosserhoff and R. Büttner, Label-free probing of the binding state of DNA by time-domain terahertz sensing, 11th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors, Vilnius, Lithuania 27-29 August, 2001.
11. P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, M. Nagel, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, Time-domain THz technologies for label-free genetic diagnostics, 26th International Conference on Infrared and Millimeter Waves, Toulouse, France, 10-14. September 2001 (invited keynote), p. 3-39, ISBN 2-87649-035-8.
12. P. Haring Bolívar, 1st International Conference on Biomedical Imaging & Sensing Applications of THz Technology (BISAT2001), Leeds, United Kingdom, 29th November - 1st December 2001.
13. M. Nagel, F. Richter, P. Haring Bolívar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, Integrated THz biomolecular sensors, 10th Intern. Conf. on Terahertz Electronics, Selwyn College, Cambridge, UK, 8 - 10 September 2002.
14. M. Brucherseifer, M. Nagel, P. Haring Bolívar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, Label-free sensing of genetic sequences with integrated terahertz systems, Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society of the IEEE, Houston, USA, October 23-26, 2002.
15. M. Nagel, F. Richter, M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, THz Technology For Label-Free Genetic Diagnostics, IEEE LEOS 2002 Annual Meeting, Glasgow, Scotland, UK, 10 - 14 November 2002.
16. A. Vörckel, M. Münster, W. Henschel, P. Haring Bolívar, and H. Kurz, Fabrication and characterisation of 2D photonic crystal add drop multiplexers on SOI, 2002 MRS Fall Meeting, Symposium O: Microphotonics III - Materials and Applications, 2-6.12.2002, Boston, MA, USA.
17. P. Haring Bolívar, Terahertz Imaging and Sensing, Rank price funds Mini Symposium, 31. March – 3. April 2003, Grasmere, UK.
18. M. Nagel, F. Richter, M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner THz Imaging and sensing, in Conference on Lasers and Electro-Optics, 1.-6. June 2003, Baltimore, USA.
19. M. Laurenzis, P. Haring Bolívar, H. Kurz, D. Morel, B. Hyot, V. Gehanno and B. Bechevet, Dual wavelength static tester for direct analysis of phase change kinetics in high-density phase change data storage media, E*PCOS'03, Lugano, Switzerland.
20. P. Haring Bolívar, Biomolecular sensing with integrated THz systems, Topical meeting on THz Technology, Royal Society, London 4-6.06.2003.
21. M. Nagel, P. Haring Bolívar and H. Kurz, Femtosecond optoelectronic testing of microwave and sub-mm wave components, 2003 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - MTT 2003, Philadelphia, 06 - 15 Jun 2003.
22. P. Haring Bolívar, "Terahertz Technology and its Applications", Plenary invited talk at 6th International OPTO Conference in conjunction with Infrared Sensors & Systems Conference, Nürnberg, Germany, 25-27 May 2004.
23. F. Merget, D.-H. Kim, B. Hadam, P. Haring Bolívar and H. Kurz, "A novel lateral phase change random access memory cell for low-current operation", European Symposium on Phase Change and Ovonic Science (E*PCOS'04), Liechtenstein 4-5 September 2004.
24. P. Haring Bolívar, "Photonic Terahertz Technology", Course at WS EuMC02 Workshop Terahertz Technology for Space and Earth Applications, 7th European Microwave Week, Amsterdam, NL, 11-15 October 2004.
25. M. Paquay and P. Haring Bolívar, "Measurements of EBG Configurations", Course at WS EuMC05 Workshop Metamaterials: EBG, AMC, FSS Applications in Communications and Sensing Systems, 7th European Microwave Week, Amsterdam, NL, 11-15 October 2004.
26. P. Haring Bolívar, "THz biomolecular sensing", Seminar of the Observatoire des Micro et NanoTechnologies THz technologies: state of the art, challenges and applications, Institute Curie, Paris, F, 19 October 2004.



27. P. Haring Bolívar, "Integrated terahertz sensors for label-free analysis of genes", SPIE Conference Photonics West 2005, San Jose, January 22-28, 2005.
28. N. Moll, A. Jebali, R. Harbers, S. Gulde, R. F. Mahrt, P. Haring Bolivar, J. Niehusmann, R. Zamboni, M. Muccini, F. Kajzar, Photonic engineering of nonlinear-optical properties of hybrid materials for efficient ultra-fast optical switching, SPIE Conference Photonics West 2005, San Jose, January 22-28, 2005.
29. R. Zamboni, M. Muccini, M. Murgia, M. A. Loi, F. Kajzar, P. Chollet, R. F. Mahrt, S. Gulde, P. Haring Bolivar, J. Niehusmann, "Organic thin film for photonic applications", SPIE Conference Photonics West 2005, San Jose, January 22-28, 2005.



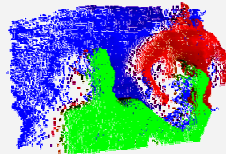
JOHANN WOLFGANG GOETHE



UNIVERSITÄT
FRANKFURT AM MAIN

Kurzprofil Dr. phil. nat. Torsten Löffler

- 16.5.1970 geboren in Winterberg / NRW
- 1976 – 1989 Schulausbildung in Winterberg / NRW, Abiturnote: 2,4
- 1989 – 1990 15-monatiger Grundwehrdienst
- 1990 – 1996 Studium der Physik, RWTH Aachen, Vordiplomsnote: "gut"
- 1994 – 1995 Auslandsaufenthalt an der Universität Liverpool im Rahmen des Erasmus-Programms
- 1995 – 1996 **Diplomarbeit** bei Prof. Dr. H Kurz: *Synchronisierung von fs-Pulslasern auf frei laufende Hochfrequenzquellen*. Note 1,0
- 1996 **Best Poster Award auf der Konferenz EOBT 1996**
- 1996 – 1998 Tätigkeit im Bereich der technischen Vertriebsunterstützung für optische Motorenmesstechnik bei der AVL Deutschland GmbH
- 1999 – 2003 Doktorarbeit, JWG-Universität Frankfurt Prof. Dr. H. G. Roskos.
Promotion "mit Auszeichnung" über *Erzeugung intensiver Pulse im Terahertzbereich mittels laser-generierter Plasmen*
- Aktuell (seit 2004) **Wissenschaftlicher Assistent** (BAT Ib) am Physikalischen Institut der JWG Universität Frankfurt
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr. H. G Roskos
Wissenschaftliche Tätigkeiten:
- Terahertz-Spektroskopie und Bildgebung mit Vertärkerlasern
 - Erzeugung von Terahertzstrahlung in laser-erzeugten Plasmen
 - Opto-elektronische Erzeugung und Detektion von Dauerstrich THz-Strahlung mittels Zwei-Farben Lasersystemen
- Sonstige Tätigkeiten:
- Organisation des Übungsbetriebs zur Vorlesung *Experimetalphysik I u. II von Prof. H.G. Roskos*
 - Projektleitung in den DFG Projekten RO 770/17-3 und RO 770/24-2
 - Betreuung von mehreren Diplom- und Doktorarbeiten



Schriftenverzeichnis Dr. phil. nat. Torsten Löffler

2005

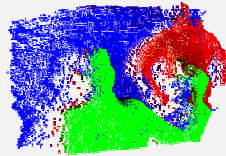
1. "Terahertz surface and interface characterization", T. Löffler, K. J. Siebert, N. Hasegawa, T. Hahn, G. Loata, R. Wipf, M. Kreß, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Int. Microwave Symp.* 2005.
2. "Large-area electro-optic ZnTe terahertz emitters", T. Löffler, T. Hahn, M. Thomson, F. Jacob, and H. G. Roskos, *Optics Express* **13** (2005) 5353-5362.
3. "Photonic THz technology", A. Lisauskas, T. Löffler, and H. G. Roskos, Editorial to the special edition of *Semicond. Sci. Technol.* **20**, July 2005
4. "Comparative performance of terahertz emitters in amplifier-laser-based systems", T. Löffler, M. Kreß, M. Thomson, T. Hahn, N. Hasegawa, and H. G. Roskos, *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) S134-141.
5. "THz-photomixer based on quasi-ballistic transport" G. H. Döhler, F. Renner, O. Klar, M. Eckardt, A. Schwanhäußer, S. Malzer, D. Driscoll, M. Hanson, A. C. Gossard, G. Loata, T. Löffler, and H. Roskos, *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) S178-190.
6. "THz-emitter based on ballistic transport in nano-pin diodes", F. Renner, M. Eckardt, A. Schwanhäußer, O. Klar, S. Malzer, G. H. Döhler, G. Loata, T. Löffler, H. Roskos, M. Hanson, D. Driscoll, and A. C. Gossard, *phys. stat. sol. (a)* **202** (2005) 965-969.
7. "Efficient Terahertz Pulse Generation in Laser-Induced Gas Plasmas", T. Löffler, M. Kreß, M. Thomson, and H.G. Roskos, *Acta Physica Polonica (A)* **107** (2005) 99-108.

2004

8. "Kurze Wellen, lange Wellen, Terawellen", H. G. Roskos and T. Löffler, *Forschung Frankfurt* **3-4** (2004) 45-48.
9. "Optical far-IR wave generation – state-of-the-art and advanced device structures", V. Krozer, B. Leone, H. G. Roskos, T. Löffler, G. Loata, G. H. Döhler, F. Renner, S. Eckardt, S. Malzer, A. Schwanhäußer, T. O. Klaassen, A. Adam, P. Lugli, A. Di Carlo, M. Manenti, G. Scamarcio, M. S. Vitiello, and M. Feiginov, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* **178** (2004) 5466.
10. "A new THz-photomixer based on a n-i-p-n doping superlattice", G. Loata, T. Löffler, H. G. Roskos, F. H. Renner, O. Klar, M. Eckardt, A. Schwanhäußer, G. H. Döhler, D. Driscoll, M. Hansen, A. C. Gossard, and V. Krozer, *Proc. of the Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves* (2004) 495.
11. "Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves", M. Kreß, T. Löffler, S. Eden, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Opt. Lett.* **29** (2004) 1120-1122.
12. "All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems", T. Löffler, K. J. Siebert, H. Quast, N. Hasegawa, G. Loata, R. Wipf, T. Hahn, M. Thomson, R. Leonhardt, and H. G. Roskos, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **362** (2004) 263-281.
13. "Field screening in low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas", K. J. Siebert, A. Lisauskas, T. Löffler, and H. G. Roskos, *Jap. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 1038-1043.

2003

14. "Remote identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection", N. Hasegawa, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 3996-3998.
15. "Terahertz-Strahlung: Bindeglied zwischen Elektronik und Optik", T. Hahn, T. Löffler, and H. G. Roskos, *IHK Wirtschaftsforum* **9** (2003) 14-16.
16. "Optical far-IR wave generation – an ESA review study", B. Leone, V. Krozer, M. Feiginov, H. Roskos, H. Quast, T. Löffler, G. Loata, G. Döhler, P. Kiesel, M. Eckardt, A. Schwanhäußer, T. O. Klaassen, and P. Lugli,



3rd ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications, May 2003.

2002

17. "All-optoelectronic cw THz-imaging for biomedical applications", K. J. Siebert, T. Löffler, H. Quast, R. Leonhardt, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, in *Ultrafast Phenomena XIII*, Springer Verlag (2002).
18. "THz generation by third-order non-linearities in air and air plasmas", T. Löffler, S. Eden, M. Thomson, and H. G. Roskos, in *Ultrafast Phenomena XIII*, Springer Verlag (2002).
19. "Indium-tin-oxide-coated glass as dichroic mirror for far-infrared electromagnetic radiation", T. Bauer, J. S. Kolb, T. Löffler, E. Mohler, H. G. Roskos, and U. C. Pernisz, *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 2210-2212.
20. "Visualization and classification in biomedical terahertz pulsed imaging", T. Löffler, K. Siebert, S. Czasch, T. Bauer, and H. G. Roskos, *Phys. Med. Biol.* **47** (2002) 3847-3852.
21. "All-optoelectronic CW THz imaging for biomedical applications", K. Siebert, T. Löffler, H. Quast, M. Thomson, T. Bauer, R. Leonhardt, S. Czasch, and H. G. Roskos, *Phys. Med. Biol.* **47** (2002) 3743-3748.
22. "Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging", K. J. Siebert, H. Quast, R. Leonhardt, T. Löffler, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 3003-3006.
23. "Free-carrier dynamics in low-temperature-grown GaAs at high excitation densities investigated by time-domain THz spectroscopy", G. Segsneider, F. Jacob, T. Löffler, H. G. Roskos, S. Tautz, P. Kiesel, and G. Döhler, *Phys. Rev. B* **65** (2002) 125205—1-6.
24. "Gas-pressure dependence of terahertz-pulse generation in a laser-generated nitrogen plasma", T. Löffler and H. G. Roskos, *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 2611-2614.

2001

25. "Continuous-wave THz imaging with photoconductive LT-GaAs antennae", R. Leonhardt, K. J. Siebert, H. Quast, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, Proceedings of the 3rd Symposium On Non-Stoichiometric III-V Compounds, in *Physik mikrostrukturierter Halbleiter Bd. 23* (ISBN 3-932392-33-7), Hsg.: S. Malzer, T. Marek, and P. Kiesel, (ISBN 3-932392-33-7), Hsg.: S. Malzer, T. Marek, and P. Kiesel (2001) 25-30.
26. "Experimental evidence for electron repulsion in multiphoton double ionization", M. Weckenbrock, M. Hattass, A. Czasch, O. Jagutzki, L. Schmidt, T. Weber, H. Roskos, T. Löffler, M. Thomson, and R. Dörner, *Journal of Physics B* **34** (2001) L449-55.
27. "Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue", T. Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald, and S. Czasch, *Optics Express* **9** (2001) 616-621, <http://www.opticsexpress.org/oearchive/source/37294.htm>

2000

28. "THz generation by photo-ionization of electrically biased air", T. Löffler, F. Jacob, and H. G. Roskos, in *Ultrafast Phenomena X*, Springer Series in Chemical Physics, Vol. 66, Eds. T. Elsaesser, S. Mukamel, M. M. Murnane, and N. F. Scherer (Springer, Berlin).
29. "Generation of terahertz pulses by photo-ionization of air", T. Löffler, F. Jacob, and H. G. Roskos, *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) 453-455.

1999

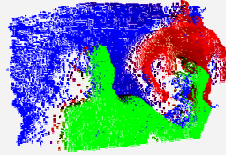
30. "Optical probing of ultrafast devices", H. G. Roskos, T. Pfeifer, H.-M. Heiliger, T. Löffler, and H. Kurz, *Materials Science Forum* **297-298**, Trans Tech Publications Ltd. (1999) 59-66.

1998

31. "Electro-optic near-field mapping of planar resonators", T. Pfeifer, T. Löffler, H. G. Roskos, H. Kurz, M. Singer, and E. M. Biebl, *IEEE Trans. Antennas and Propagation* **46** (1998) 284-291.

1997

32. "Three-dimensional experimental analysis of the near-field and far-field radiation of planar millimeter-wave transmitters", T. Pfeifer, T. Löffler, H. G. Roskos, H. Kurz, K. M. Strohm, and J.-F. Luy, *OSA TOPS on*



JOHANN WOLFGANG GOETHE



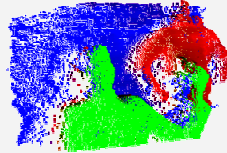
UNIVERSITÄT
FRANKFURT AM MAIN

Ultrafast Electronics and Optoelectronics, eds. M. Nuss and J. Bowers, 1997, Optical Society of America, 196-201.

33. „Optoelectronic On-Chip Characterization of Ultrafast Electronic Devices: Measurement Techniques and Applications“, T. Pfeifer, H.-M. Heiliger, T. Löffler, C. Ohlhoff, C. Meyer, G. Lüpke, H.G. Roskos, and H. Kurz, *IEEE Selected Topics of Quantum Electronics*, April 1997 (invited paper)

1996

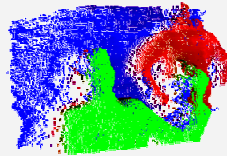
34. „Picosecond Optoelectronic On-Wafer Characterization of Coplanar Waveguides on High-Resistivity Si and Si/SiO₂ Substrates“, T. Pfeifer, H.-M. Heiliger, T. Löffler, H.G. Roskos, and H. Kurz, *Microelectronic Engineering* **31**, 385-395 (1996).
35. „Stable Optoelectronic Detection of Free-Running Microwave Signals with 150-GHz Bandwidth“, T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, and H. Kurz, *Microelectronic Engineering* **31** (1996) 397-408.
36. „Detection of Free-Running electronic Signals up to 75 GHz Using a Femtosecond-Pulse Laser“, T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, and H. Kurz, *IEEE Photon. Lett.* **7** (1995) 1189-1191.
37. „Optical second-harmonic probe for silicon millimeter-wave circuits“, C. Ohlhoff, C. Meyer, G. Lüpke, T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, and H. Kurz, *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 1699-1701.
38. „Electrooptic measurement of the electric near field distribution of a 7 GHz planar resonator“, T. Pfeifer, T. Löffler, H.G. Roskos, H. Kurz, M. Singer, and E.M. Biebl, *Electron. Letters* **32** (1996) 1305-1307.



Kurzprofil

Prof. Dr. rer. nat. Hartmut Roskos

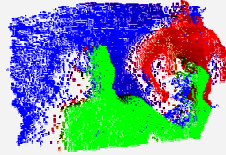
- 14.5.1959 geboren in Freiburg / Breisgau
- 1978 Abitur in Ettlingen, Abiturnote: 1,0; danach 15 Monate Grundwehrdienst
- 1979 - 1985 Physikstudium an den TUs Karlsruhe (Spitzner-Stipendium) und München
- 1985 – 1989 **Promotion** "mit Auszeichnung", TU München, Doktorarbeit bei Prof. Dr. Kaiser: *Untersuchung der Ladungsträgerrelaxation in Germanium mit Subpikosekunden-Lichtimpulsen im infraroten Spektralbereich.*
- 1989 – 1991 Zweieinhalbjähriger Aufenthalt als **Post-Doktorand** am Quantum Physics and Electronics Research Department sowie am Photonic Switching Device Research Department der AT&T Bell Laboratories, Holmdel, USA.
- Nov. 1991 - Nov. 1993 **Wissenschaftlicher Assistent** (C1) am Institut für Halbleitertechnik II der RWTH Aachen, Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr. H. Kurz
- bis Ende 1996 **Oberingenieur** (C2) am Institut für Halbleitertechnik II, RWTH Aachen
- 5.6.1996 **Habilitation** an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der RWTH Aachen mit einer Schrift zum Thema *Coherent solid-state phenomena investigated by time-resolved terahertz spectroscopy*
- 1.1.1997- jetzt **Universitätsprofessor** (C4) am Physikalischen Institut der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Arbeitsgruppe *Ultrakurzzeit-Spektroskopie und Terahertz-Physik:*
- Zeitaufgelöste Terahertz-Spektroskopie
 - Anwendung optoelektronischer THz-Verfahren in der Bildgebung
 - Optische Spektroskopie an Halbleitern und magnetischen Festkörpern
 - Zeitaufgelöste Spektroskopie metallorganischer Verbindungen
- 29.6.2001 **Michael und Biserka Baum-Preis** des *Frankfurter Fördervereins für physikalische Grundlagenforschung* für die experimentelle Beobachtung von Bloch-Oszillationen in Halbleiter-Übergitter-Strukturen
- Aktuell Sprecher von vier Forscherverbänden (DFG, ESA, Science-for-Peace-Programm der NATO); Sprecher des Stern-Gerlach-Zentrums für Experimentelle Physikalische Forschung an der Johann Wolfgang Goethe-Universität; Mitglied des Beirats des Ferdinand-Braun-Instituts für Höchstfrequenztechnik, Berlin, und des Kuratoriums der Rolf-Sammet-Stiftung der Aventis Foundation



Publikationen 1997-2005

2005

1. "Semiconductor superlattice in crossed electric and magnetic field", S. Stepanov, S. Glutsch, A. B. Hummel, C. Blöser, H. G. Roskos, and K. Köhler, submitted to Phys. Rev. B
2. "The Coherent Hall Effect of charge carriers in a superlattice: Semiclassical description of the wave-packet dynamics", A. B. Hummel, T. Bauer, E. Mohler, and H. G. Roskos, submitted to J. Phys.: Condensed Matter
3. "Motional-narrowing-type dephasing of electron and hole spins in of itinerant excitons in magnetically doped II-VI bulk semiconductors", K. Rönnburg, E. Mohler, H. G. Roskos, K. Ortner, C. R. Becker, L. W. Molenkamp, submitted to Phys. Rev. Lett.
4. "Terahertz surface and interface characterization", T. Löffler, K. J. Siebert, N. Hasegawa, T. Hahn, G. Loata, R. Wipf, M. Kreß, M. Thomson, and H. G. Roskos, Int. Microwave Symp. 2005.
5. "Large-area electro-optic ZnTe terahertz emitters", T. Löffler, T. Hahn, M. Thomson, F. Jacob, and H. G. Roskos, Optics Express **13** (2005) 5353-5362.
6. "Spin-conserving carrier recombination in conjugated polymers ", M. Reufer, M. J. Walter, P. G. Lagoudakis, A. B. Hummel, J. S. Kolb, H.G. Roskos, U. Scherf, and J. M. Lupton, Nature Materials **4** (2005) 340-346.
7. "Photonic THz technology", A. Lisauskas, T. Löffler, and H. G. Roskos, Editorial to the special edition of Semicond. Sci. Technol. **20**, July 2005
8. "Comparative performance of terahertz emitters in amplifier-laser-based systems", T. Löffler, M. Kreß, M. Thomson, T. Hahn, N. Hasegawa, and H. G. Roskos, Semicond. Sci. Technol. **20** (2005) S134-141.
9. "THz-photomixer based on quasi-ballistic transport" G. H. Döhler, F. Renner, O. Klar, M. Eckardt, A. Schwanhäußer, S. Malzer, D. Driscoll, M. Hanson, A. C. Gossard, G. Loata, T. Löffler, and H. Roskos, Semicond. Sci. Technol. **20** (2005) S178-190.
10. "THz-emitter based on ballistic transport in nano-pin diodes", F. Renner, M. Eckardt, A. Schwanhäußer, O. Klar, S. Malzer, G. H. Döhler, G. Loata, T. Löffler, H. Roskos, M. Hanson, D. Driscoll, and A. C. Gossard, phys. stat. sol. (a) **202** (2005) 965-969.
11. "Time-resolved photocurrent spectroscopy of the evolution of the electric field in optically excited superlattices and the prospects for Bloch gain", A. Lisauskas, C. Blöser, R. Sachs, H. G. Roskos, A. Juozapavičius, G. Valušis, and K. Köhler, Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 102103-102105.
12. "Ultrafast optical and magneto-optical dynamics in colossal-magnetoresistance (CMR) manganites", V. Dorosinets, P. Richter, G. Jakob, and H.G. Roskos, Acta Physica Polonica (A) **107** (2005) 211-214.
13. "Broad band THz sensing by 2DEG bow-tie-type diodes ", G. Valušis, D. Seliuta, V. Tamošiunas, E. Širmulis, S. Balakauskas, J. Gradauskas, A. Sudžiedelis, S. Ašmontas, T. Anbinderis, A. Narkūnas, I. Papsujeva, A. Lisauskas, H. G. Roskos, and K. Köhler, Acta Physica Polonica (A) **107** (2005) 184-187.
14. "Dynamics of the electric field in a GaAs/AlGaAs superlattice after femtosecond optical excitation: application of time-resolved spectroscopic techniques", A. Lisauskas, C. Blöser, R. Sachs, H. G. Roskos, A. Juozapavičius, G. Valušis, and K. Köhler, Acta Physica Polonica (A), Acta Physica Polonica (A) **107** (2005) 250-255.
15. "Efficient Terahertz Pulse Generation in Laser-Induced Gas Plasmas", T. Löffler, M. Kreß, M. Thomson, and H.G. Roskos, Acta Physica Polonica (A) **107** (2005) 99-108.
16. "Spin dephasing in $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ ", K. Rönnburg, H. G. Roskos, K. Ortner, C. R. Becker, L. W. Molenkamp, J. Superconductivity, in print.
17. "Picosecond energy relaxation in $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ", V. Dorosinets, P. Richter, E. Mohler, H. G. Roskos, and G. Jakob, Physica B **359-361** (2005) 1297-1299.
18. "Electro-optic investigation of the Coherent Hall Effect in semiconductor superlattices", A. B. Hummel, C. Blöser, T. Bauer, H.G. Roskos, Yu. A. Kosevich, and K. Köhler, phys. stat. sol. (b) **242** (2005) 1175-1178.
19. "The evolution of the electric field in an optically excited semiconductor superlattice", A. Lisauskas, C. Blöser,



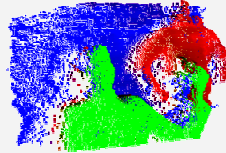
A. B. Hummel, R. Sachs, H. G. Roskos, A. Juozapavičius, G. Valušis, and K. Köhler, *phys. stat. sol. (c)* **2** (2005) 3055-3058.

2004

20. "Kurze Wellen, lange Wellen, Terawellen", H. G. Roskos and T. Löffler, *Forschung Frankfurt* **3-4** (2004) 45-48.
21. "Optical far-IR wave generation – state-of-the-art and advanced device structures", V. Krozer, B. Leone, H. G. Roskos, T. Löffler, G. Loata, G. H. Döhler, F. Renner, S. Eckardt, S. Malzer, A. Schwanhäüßer, T. O. Klaassen, A. Adam, P. Lugli, A. Di Carlo, M. Manenti, G. Scamarcio, M. S. Vitiello, and M. Feiginov, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* **178** (2004) 5466.
22. "A new THz-photomixer based on a n-i-p-n doping superlattice", G. Loata, T. Löffler, H. G. Roskos, F. H. Renner, O. Klar, M. Eckardt, A. Schwanhäüßer, G. H. Döhler, D. Driscoll, M. Hansen, A. C. Gossard, and V. Krozer, *Proc. of the Intern. Conf. on Infrared and Millimeter Waves* (2004) 495.
23. "THz/subTHz detection by asymmetrically-shaped bow-tie diodes containing 2DEG layer", D. Seliuta, V. Tamošiunas, E. Širmulis, S. Ašmontas, A. Sudžiedelis, J. Gradauskas, G. Valušis, P. Steenson, W.-H. Chow, P. Harrison, A. Lisauskas, H. G. Roskos, and K. Köhler, *Proc. 27th Internat. Conf. on the Physics of Semiconductors*, AIP J. Menéndez and C. G. An de Walle.
24. "Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves", M. Kreß, T. Löffler, S. Eden, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Opt. Lett.* **29** (2004) 1120-1122.
25. "Electronic structure, photophysics and relaxation dynamics of charge transfer excited states in boron-nitrogen bridged ferrocene-donor organic-acceptor compounds", M. Thomson, M. Novosel, H. G. Roskos, T. Müller, M. Scheibitz, M. Wagner, F. Fabrizi de Biani, and P. Zanello, *J. Phys. Chem. A.* **108(16)** (2004) 3281-3291.
26. "Mode calculations for a terahertz quantum cascade laser", R. Sachs and H. G. Roskos, *Opt. Express* **12** (2004) 2062-2069.
27. "Detection of THz/sub-THz radiation by asymmetrically-shaped 2DEG layers", D. Seliuta, E. Širmulis, V. Tamošiunas, S. Balakauskas, S. Ašmontas, A. Sudžiedelis, J. Gradauskas, G. Valušis, A. Lisauskas, H. G. Roskos, and K. Köhler, *Electron. Lett.* **40** (2004) 631-632.
28. "On the way to "optical doping" of electronically low-dimensional polymer systems with strong charge and spin correlations", M. Thomson, H. G. Roskos, M. Wagner, *Appl. Phys. A* **78** (2004) 477-481.
29. "All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems", T. Löffler, K. J. Siebert, H. Quast, N. Hasegawa, G. Loata, R. Wipf, T. Hahn, M. Thomson, R. Leonhardt, and H. G. Roskos, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **362** (2004) 263-281.
30. "Field screening in low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas", K. J. Siebert, A. Lisauskas, T. Löffler, and H. G. Roskos, *Jap. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 1038-1043.
31. "Microwave sensor based on modulation-doped GaAs/AlGaAs structure", A. Juozapavičius, L. Ardaravičius, A. Sudžiedelis, A. Kosič, J. Gradauskas, J. Kundrotas, D. Seliuta, E. Širmulis, S. Ašmontas, G. Valušis, H. G. Roskos, and K. Köhler, *Semicon. Sci. Technol.* **19** (2004) 436-439.

2003

32. "Remote identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection", N. Hasegawa, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 3996-3998.
33. "Terahertz-Strahlung: Bindeglied zwischen Elektronik und Optik", T. Hahn, T. Löffler, and H. G. Roskos, *IHK Wirtschaftsforum* **9** (2003) 14-16.
34. "Optical far-IR wave generation – an ESA review study", B. Leone, V. Krozer, M. Feiginov, H. Roskos, H. Quast, T. Löffler, G. Loata, G. Döhler, P. Kiesel, M. Eckardt, A. Schwanhäüßer, T. O. Klaassen, and P. Lugli, *3rd ESA Workshop on Millimetre Wave Technology and Applications*, May 2003.
35. "Carrier-density dependence of Faraday rotation and spin splitting in Cd_{1-x}Mn_xTe", K. E. Rönnburg, E. Mohler, H. G. Roskos, K. Ortner, C. R. Becker, and L. W. Molenkamp, *J. of Superconductivity: Incorporating Novel*



Magnetism, **16** (2003) 461-464.

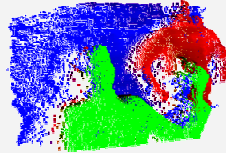
36. "High-frequency oscillations in an α -Si/Si(p)/Si(n) device", V. Dorosinets, V. A. Samuilov, H. Roskos, K. Kyritsi, A. N. Anagnostopoulos, and G. L. Bleris, *Chaos, Solitons and Fractals* **17** (2003) 289-295.
37. "Influence of a strong magnetic field on the Wannier-Stark states of an electrically biased GaAs/AlGaAs superlattice", A. B. Hummel, T. Bauer, J. S. Kolb, H. G. Roskos, S. Glutsch, and K. Köhler, *Phys. Rev. B* **67** (2003) 045319—1-10
38. "Giga- and terahertz frequency band detector based on an asymmetrically necked n-n⁺-GaAs planar structure", A. Sudžiedelis, J. Gradauskas, S. Ašmontas, G. Valušis, and H. G. Roskos, *J. Appl. Phys.* **93** (2003) 3034-3038.
39. "Terahertz optical properties of ultrathin doped contact layers in GaAs device structures", T. Bauer, J. S. Kolb, E. Mohler, H. G. Roskos, and K. Köhler, *Semicond. Sci. Technol.* **18** (2003) 28-32.

2002

40. "Efficient THz-emitter for low-temperature-grown GaAs photomixers", C. Sydlo, J. Sigmund, K. J. Siebert, H. G. Roskos, and H. L. Hartnagel, *Proceeding of THz 2002*, Cambridge.
41. "Asymmetrically-shaped diodes for microwave – submillimeter sensing", S. Ašmontas, L. Ardaravičius, S. Balauskas, J. Gradauskas, A. Kozič, J. Kundrotas, K. Köhler, H. G. Roskos, R. Sachs, A. Sudžiedelis, D. Seliuta, E. Širmulis, and G. Valušis, *Proc. 26th Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors ICPS-26*, paper D-240.
42. "The Coherent Hall Effect: Evolution of the Hall current of charge-carrier wavepackets in a semiconductor superlattice", T. Bauer, J. S. Kolb, A. B. Hummel, H. G. Roskos, Y. A. Kosevich, and K. Köhler, *Proc. 26th Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors ICPS-26*, paper N2-3.
43. "Terahertz dielectric response of a moving electron gas", R. Sachs, L. A. Bányai, E. Mohler, K. Köhler, and H. G. Roskos, *Proc. 26th Intern. Conf. on the Physics of Semiconductors ICPS-26*, paper P-172.
44. "All-optoelectronic cw THz-imaging for biomedical applications", K. J. Siebert, T. Löffler, H. Quast, R. Leonhardt, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, in *Ultrafast Phenomena XIII*, Springer Verlag (2002).
45. "The Hall current of coherent electron wavepackets", T. Bauer, A. B. Hummel, J. S. Kolb, H. G. Roskos, Y. A. Kosevich, and K. Köhler, in *Ultrafast Phenomena XIII*, Springer Verlag (2002).
46. "THz generation by third-order non-linearities in air and air plasmas", T. Löffler, S. Eden, M. Thomson, and H. G. Roskos, in *Ultrafast Phenomena XIII*, Springer Verlag (2002).
47. "Indium-tin-oxide-coated glass as dichroic mirror for far-infrared electromagnetic radiation", T. Bauer, J. S. Kolb, T. Löffler, E. Mohler, H. G. Roskos, and U. C. Pernisz, *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 2210-2212.
48. "Visualization and classification in biomedical terahertz pulsed imaging", T. Löffler, K. Siebert, S. Czasch, T. Bauer, and H. G. Roskos, *Phys. Med. Biol.* **47** (2002) 3847-3852.
49. "All-optoelectronic CW THz imaging for biomedical applications", K. Siebert, T. Löffler, H. Quast, M. Thomson, T. Bauer, R. Leonhardt, S. Czasch, and H. G. Roskos, *Phys. Med. Biol.* **47** (2002) 3743-3748.
50. "Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging", K. J. Siebert, H. Quast, R. Leonhardt, T. Löffler, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, *Appl. Phys. Lett.* **80** (2002) 3003-3006.
51. "Free-carrier dynamics in low-temperature-grown GaAs at high excitation densities investigated by time-domain THz spectroscopy", G. Segsneider, F. Jacob, T. Löffler, H. G. Roskos, S. Tautz, P. Kiesel, and G. Döhler, *Phys. Rev. B* **65** (2002) 125205—1-6.
52. "Gas-pressure dependence of terahertz-pulse generation in a laser-generated nitrogen plasma", T. Löffler and H. G. Roskos, *J. Appl. Phys.* **91** (2002) 2611-2614.
53. "Coherent Hall Effect in a Semiconductor Superlattice", T. Bauer, J. Kolb, A. B. Hummel, H. G. Roskos, Y. Kosevich, and K. Köhler, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 086801—1-4.

2001

54. "Photoconductivity of regular low-dimensional arrays of GaAs wires", V. K. Ksenevich, G. Valušis, H. G.

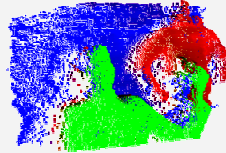


JOHANN WOLFGANG GOETHE



UNIVERSITÄT
FRANKFURT AM MAIN

- Roskos, and V. A. Samuilov, *Ultrafast Phenomena in Semiconductors*, Materials Science Forum Vols. **384-385**, Trans Tech Publications Ltd. (2001) 87-90.
55. "Magnetotransport in low-dimensional honeycomb-shaped GaAs networks", V. K. Ksenevich, J. Galibert, H. G. Roskos, and V. A. Samuilov, *Materials Science Forum* Vols. **384-385**, Trans Tech Publications Ltd. (2001) 59-62.
56. "GHz-THz detection by asymmetrically-shaped GaAs: bulk material versus nanostructures", G. Valušis, R. Sachs, H. G. Roskos, A. Sudžiedelis, J. Gradauskas, S. Ašmontas, E. Širmulis, and K. Köhler, *Ultrafast Phenomena in Semiconductors*, Materials Science Forum Vols. **384-385**, Trans Tech Publications Ltd. (2001) 193-196.
57. "Introduction to the issue on Ultrafast Phenomena and Their Applications", J. F. Whitaker, H. G. Roskos, N. Sarukura, and J. Squier, *J. Selected Topics in Quantum Electron.* **7** (2001) 501-503.
58. "Dynamics of mobile carriers in LT-GaAs at high excitation densities", G. Segsneider, H. G. Roskos, S. Tautz, P. Kiesel, and G. Döhler, *Proceedings of the 3rd Symposium On Non-Stoichiometric III-V Compounds*, in *Physik mikrostrukturierter Halbleiter Bd. 23* (ISBN 3-932392-33-7), Hsg.: S. Malzer, T. Marek, and P. Kiesel (2001) 61-66.
59. "Continuous-wave THz imaging with photoconductive LT-GaAs antennae", R. Leonhardt, K. J. Siebert, H. Quast, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Proceedings of the 3rd Symposium On Non-Stoichiometric III-V Compounds*, in *Physik mikrostrukturierter Halbleiter Bd. 23* (ISBN 3-932392-33-7), Hsg.: S. Malzer, T. Marek, and P. Kiesel (2001) 25-30.
60. "Experimental evidence for electron repulsion in multiphoton double ionization", M. Weckenbrock, M. Hattass, A. Czasch, O. Jagutzki, L. Schmidt, T. Weber, H. Roskos, T. Löffler, M. Thomson, and R. Dörner, *Journal of Physics B* **34** (2001) L449-55.
61. "Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue", T. Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald, and S. Czasch, *Optics Express* **9** (2001) 616-621, <http://www.opticsexpress.org/oearchive/source/37294.htm>
62. "Optical determination of the oxygen content of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ thin films by IR reflectance and transmittance measurements", P. Richter, M. Kreß, E. Mohler, H.G. Roskos, G. Jakob, and H. Adrian, *Physica C* **366/1** (2001) 63-72.
63. "Perspectives of continuous-wave optoelectronic THz imaging", K. J. Siebert, H. Quast, and H. G. Roskos, in *ASI Proceedings, Series E, in New directions in terahertz technology*, eds. J. M. Chamberlain and R. E. Miles, NATO Science Series, II. Vol. 27, *Terahertz Sources and Systems*, ed. R.E. Miles, P. Harrison and D. Lippens, Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, 2001, p. 127-143.
- 2000**
64. "Observation of THz oscillations and efficient THz emission from contacted low temperature grown GaAs structures", C. Steen, S. Tautz, P. Kiesel, S. U. Dankowski, G. H. Döhler, U. D. Keil, G. Segsneider, K. Siebert, H. G. Roskos and V. Krozer, *Proceedings of THz 2000, Darmstadt*, S. 59-62, VDE Verlag.
65. "An optoelectronic cw THz source for imaging applications", K. Siebert, G. Segsneider, H. Quast, H. G. Roskos, S. Tautz, P. Kiesel, G. Döhler, and V. Krozer, *Proceedings of THz 2000, Darmstadt*, S. 213-215, VDE Verlag.
66. "Electrical detection of THz frequencies by asymmetrically shaped n-n⁺- GaAs diodes", A. Sudžiedelis, J. Gradauskas, S. Ašmontas, G. Valušis, and H. G. Roskos, *Proceedings of the Intern. Conf. on THz Electronics THz-2000, Darmstadt*, p. 241-243.
67. "THz generation by photo-ionization of electrically biased air", T. Löffler, F. Jacob, and H. G. Roskos, in *Ultrafast Phenomena X*, Springer Series in Chemical Physics, Vol. 66, Eds. T. Elsaesser, S. Mukamel, M. M. Murnane, and N. F. Scherer (Springer, Berlin).
68. "Generation of terahertz pulses by photo-ionization of air", T. Löffler, F. Jacob, and H. G. Roskos, *Appl. Phys. Lett.* **77** (2000) 453-455.
69. "Evolution of the energy levels of a GaAs/AlGaAs superlattice under the influence of a strong magnetic field",



T. Bauer, A.B. Hummel, H. Roskos, K. Köhler, *Physica E* **7** (2000) 289-293.

70. "Overview on time-domain terahertz spectroscopy and its applications in atomic and semiconductor physics", H. G. Roskos, *Physica Scripta* **T86** (2000) 51-54.

1999

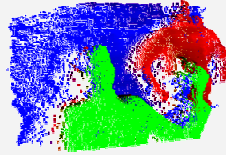
71. "Advances in continuous-wave THz generation", K. Siebert, F. Siebe, M. Thomson, J. Zare, Baghbid, R. Leonhardt, H. Roskos, *SPIE Proceedings* **3828**, Terahertz Spectroscopy and Applications II (1999) 234-43.
72. "A fully tunable dual-color cw Ti:Al₂O₃ laser", F. Siebe, K. Siebert, R. Leonhardt, H. Roskos, *IEEE J. Quantum Electron.* **JQE-35** (1999) 1731-1736.
73. "Optical probing of ultrafast devices", H. G. Roskos, T. Pfeifer, H.-M. Heiliger, T. Löffler, and H. Kurz, *Materials Science Forum* **297-298**, Trans Tech Publications Ltd. (1999) 59-66.

1998

74. "Electro-optic near-field mapping of planar resonators", T. Pfeifer, T. Löffler, H. G. Roskos, H. Kurz, M. Singer, and E. M. Biebl, *IEEE Trans. Antennas and Propagation* **46** (1998) 284-291.
75. "Propagation effects in electro-optic sampling of terahertz pulses in GaAs", M. Voßbürger, M. Brucherseifer, G. C. Cho, H. G. Roskos, and H. Kurz, *Appl. Opt.* **37** (1998) 3368-3371.
76. "Intraband coherence after energy relaxation", F. Wolter, G. Bartels, R. Martini, H. G. Roskos, P. Haring Bolivar, A. Stahl, H. Kurz, R. Hey, and H. T. Grahn, in *Ultrafast Phenomena XI*, Springer Verlag (1998).
77. "Electrooptic and photoconductive techniques for probing and imaging of THz electric signals", H. G. Roskos, T. Pfeifer, H.-M. Heiliger, T. Löffler, and H. Kurz, in *New Directions in Terahertz Technology*, eds. J. M. Chamberlain and R. E. Miles, NATO ASI Science Series E 334 (1997), Kluwer (Dordrecht), p. 359-367.
78. "Tunable coherent THz radiation pulses from optically excited Bloch oscillations", H. G. Roskos, R. Martini, G. Klose, F. Wolter, C. Schwarz, and H. Kurz, in *New Directions in Terahertz Technology*, eds. J. M. Chamberlain and R. E. Miles, NATO ASI Science Series E 334 (1997), Kluwer (Dordrecht), p. 369-375.

1997

79. "Fresh insights into electron oscillations", H. Roskos, *Physics World* **10** (1997) 24-25.
80. "Excitonic emission of THz radiation: experimental evidence of the shortcomings of the Bloch equation method", P. Haring-Bolivar, F. Wolter, A. Müller, H. G. Roskos, H. Kurz, and K. Köhler, *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 2232-2235.
81. "New concept for ultra small n-MOSFET's", J. Gondermann, J. Schiepanki, B. Hadam, T. Köster, T. Rower, J. Stein, B. Spangenberg, H. Roskos, and H. Kurz, *Microelectronic Engineering* **35** (1997) 305-308.
82. "Fabrication and characterisation of SiGe-based in-plane-gate transistors", T. Köster, J. Stein, B. Hadam, J. Gondermann, B. Spangenberg, H. G. Roskos, H. Kurz, M. Holzmann, M. Riedinger, and G. Abstreiter, *Microelectronic Engineering* **35** (1997) 301-304.
83. "Low-dispersion thin-film microstrip lines with cyclotene (benzocyclobutene) as dielectric medium, H.-M. Heiliger, M. Nagel, H. G. Roskos, H. Kurz, F. Schnieder, W. Heinrich, R. Hey, and K. Ploog, *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 2233-2235.
84. "Ultrafast optoelectronic switches based on high-T_C superconductors", C. Jaekel, H. G. Roskos, and H. Kurz, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **7** (1997) 3722-3725.
85. "Influence of LO-phonon emission on Bloch oscillations in semiconductor superlattices", F. Wolter, H. G. Roskos, P. Haring Bolivar, G. Bartels, H. Kurz, K. Köhler, H. T. Grahn, and R. Hey, *phys. stat. sol. (b)* **204** (1997) 83-86.
86. "Coulomb-renormalized intraband dynamics probed by THz emission", F. Wolter, P. Haring Bolivar, G. Bartels, H. G. Roskos, H. Kurz, V. M. Axt, and K. Köhler, *phys. stat. sol. (b)* **204** (1997) 31-34.
87. "Dynamic conductivity of YBCO thin films from low to very high frequencies", I. Wilke, G. Nakielski, J. Kötzler, K. O. Subke, C. Jaekel, F. Hüning, H. G. Roskos, and H. Kurz, *Appl. Superconductivity*, *Inst. Phys.*



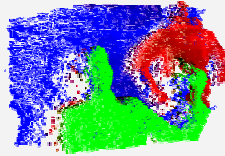
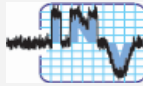
JOHANN WOLFGANG GOETHE



UNIVERSITÄT
FRANKFURT AM MAIN

Conf. Ser. **158** (1997) 121-124.

88. "Three-dimensional experimental analysis of the near-field and far-field radiation of planar millimeter-wave transmitters", T. Pfeifer, T. Löffler, H. G. Roskos, H. Kurz, K. M. Strohm, and J.-F. Luy, OSA TOPS on *Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, eds. M. Nuss and J. Bowers, 1997, Optical Society of America, 196-201.
89. "Sandwich microstrip lines with polymer dielectric for high-speed on-chip interconnects", H.-M. Heiliger, M. Nagel, H. G. Roskos, R. Hey, and H. Kurz, OSA TOPS on *Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, eds. M. Nuss and J. Bowers, 1997, Optical Society of America, 97-101.
90. "Superradiant terahertz emission from Bloch oscillations", R. Martini, G. Klose, H. G. Roskos, R. Hey, H. T. Grahn, K. Ploog, and H. Kurz, in *The physics of semiconductors* (in 4 volumes), Proceedings of the 23rd International Conference, eds M. Scheffler and R. Zimmermann, 1997, World Scientific.

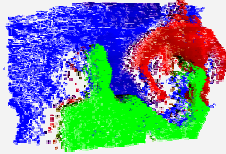


Kurzprofil Prof. Dr.-Ing. Rudolf Schwarte

Geburtsdatum	08.01.1939 in Quakenbrück
1959-1965	Studium der Nachrichtentechnik an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
1965-1978	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur am Institut für Technische Elektronik der RWTH Aachen
1969-1974	Leiter der Fachgruppe Gigabit-Elektronik an der RWTH Aachen
1972	Promotion
1974-1978	Gutachter für das Bundesministerium für Forschung und Technologie
1976	Forschungsaufenthalte am Crainfield Institute of Technology, England, und am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut, St. Louis, Frankreich
1978	Mitbegründer der Firma Synpuls GmbH, Aachen
1979-1980	Hauptabteilungsleiter, Fa. Keiber GmbH & Co, Kaiserslautern
1980-1981	Entwicklungsleiter bei der Firma Mitec GmbH & Co. Ottobrun
1981	C4-Ruf an das Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV) der Universität Siegen
1988	Initiierung und Gründung eines interdisziplinären Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen
1989-2001	Vorstandsvorsitzender ZESS
seit 1989	Mitglied und zeitweise stellvertretender Leiter des Arbeitskreises "Optische Formerkennung" des VDI/VDE-GMA und der DGZFP
seit 1992	Mitglied des SENSOR- und des OPTO-Kongresskomitees
seit 1997	Gutachter der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG
seit 1997	Beirat des Heidelberger Bildverarbeitungsforums
1997	Gründung der S-TEC GmbH, Siegen
2002	Gründung der PMDTechnologies GmbH, Siegen
2003	Begleiter des Bundespräsidenten Rau auf seinem Staatsbesuch in China, Vorträge über PMD-Technologie in Automobilbau und der Mobilen Robotik in Peking und Shanghai.
Ehrungen:	
1989, 1991, 1992	Benningsen-Förder-Preis für innovative Projekte im Bereich optische 3D-Messung am Institut für Nachrichtenverarbeitung der Universität Siegen
1995, 1997	Innovationspreis des Landes Nordrhein-Westfalen
2002	Nominierung zum Deutschen Zukunftspreis 2002 mit dem Projekt „Kamerapixel mit Tiefgang: Durchbruch zum schnellen 3D-Sehen“
2004	Bundesverdienstkreuz, 1. Klasse
Weitere Informationen	http://www.nv.et-inf.uni-siegen.de und http://www.3d-view.org

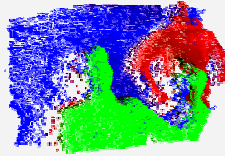
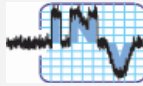
Schriftenverzeichnis 1994-2005 Prof. Dr.-Ing. Rudolf Schwarte

1. Schwarte, R.: "Schnelles Technisches 3D-Sehen auf Basis der PMD-Technologie". Workshop mit Industriefachleuten bei der Firma Lumiflex-Leuze, Fürstenfeldbruck, 6. Juni 2005, Informationen für die DFG in erweiterter Überarbeitung unter: <http://www.3d-view.org>
2. Schwarte, R., Zhang, Z., Kraft, H., Moeller, T., Frey, J., Grothof, M., Buxbaum, B., Ringbeck, T.: "OEP for Extremely Fast Multi-Channel Analog and Digital OE-Signal Processing". OPTO 2004, Nürnberg.
3. Schwarte, R., "Neue Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen", VDE Kongress 2004 Berlin, ITG „Ambient Intelligence“, Inv. Paper, Conference Proceedings ITG Oct. 2004
4. Schwarte, R.: "Ultra-fast Analog and Digital OE-Multichannel Signal Processing using PMD/OEP-Technologies", MOC 04, 10th MICROOPTICS CONFERENCE, Friedrich-Schiller-University Jena, Conference -CD, Sept. 1-3, Jena 2004,
5. Schwarte, R.: "Breakthrough in Multi-Channel Laser-Radar Technology", Remote Sensing, 11th SPIE Intern. Symposium, Laser Radar Techniques, Gran Canaria, Sept. 2004
6. Schwarte, R., "Photonic Mixer Device – Breakthrough in Automotive 3D-Vision", Progress in Automotive Lighting PAL 2003, Opening Presentation, Darmstadt, Sept. 2003
7. H. Heß, M. Albrecht, R. Schwarte, "PMD - New Detector for Fluorescence Lifetime Measurement", Kongressband OPTO'2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
8. M. Grothof, R. Schwarte, B. Buxbaum, T. Ringbeck, J. Frey, "Product Monitoring with MSM-PMD-Array", Kongreßband OPTO'2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
9. Z. Zhang, H. Heß, T. Ringbeck, R. Schwarte, "Phase-Lock techniques using new correlation receivers for TOF-laser ranging", SPIE- Aero Sense 2002, Orlando 2002.
10. B. Buxbaum, R. Schwarte, "Photonic Mixer Devices for sensing and computing", Eingeladener Vortrag auf der Jahrestagung der Optical Society of America (OSA 2001), Long Beach 2001.
11. X. Luan, R. Schwarte, Z. Zhang, B. Buxbaum, T. Ringbeck, H. Hess, "3D intelligent sensing based on PMD technology", SPIE- Laser Radar Techniques, Remote Sensing 2001, Toulouse 2001.
12. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, M. Grothof, "MSM-PMD as correlation receiver in an new multidimensional ranging system", SPIE- Laser Radar Techniques, Remote Sensing 2001, Toulouse 2001.
13. B. Buxbaum, R. Schwarte, K. David, M. Hildebrand, T. Ringbeck, M. Grothof, "Wireless infrared LAN based on optical CDMA using a new high speed correlation receiver (MSM-PMD)", SPIE- Optical Wireless Communication IV, ITCOM 2001, Denver 2001.
14. M. Hildebrand, K. David, B. Buxbaum, M. Grothof, R. Schwarte, "A New Approach for Indoor Wireless Internet based on Diffuse Infrared", Proceedings of the IASTED "Wireless and Optical Communications 2001" Conference, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zürich, 2001, ISBN 0-88986-287-7.
15. B. Buxbaum, H. Hess, T. Ringbeck, R. Schwarte, "The Photonic Mixer Device: New perspectives in optical wireless communication", Workshop "Optical MEMS and Integrated Optics", Dortmund 2001.
16. T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum, X. Luan, T. Tai, Z. Zhang, "A new Opto-electrical Phase Locked Loop for Phase / Frequency Detection in Rotation and Range Measurement Application", Proceedings Sensor 2001, Nürnberg 2001.
17. T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum, H. Heß, "An Optical GMSK modem for Infrared Wireless Communication Based on a New Receiver Principle in CMOS-Technology", Photonic West - Optical Interconnects, San Jose 2001.
18. Schwarte, R., Häusler, R.W. Malz. Three-Dimensional Imaging Techniques Page 177 – 345, in Jähne, B., H. Haußecker, Computer Vision and Applications, A Guide for Students and Practitioners, Academic Press, San Diego, 2000,
19. B. Buxbaum, R. Schwarte, B. Schneider, H. Heß, T. Ringbeck, W. Tai, M. Grothof, "Optisches CDMA auf Basis der PMD-Technologie - Ein für unkorrelierte Datensignale blinder Empfänger", ORT 2000, Hagen 2000.
20. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, H. Heß, M. Grothof, "Pseudo-Noise Laserradar zur schnellen 3D-Aufnahme auf Basis der PMD-Smart-Pixel Technologie - Prinzip und



- experimentelle Verifikation", VISION 2000, VDI/VDE-GMA, ISBN: 3-18-091575-2, Stuttgart 2000.
21. W. Tai, R. Schwarte, B. Buxbaum, "Diffractive optical element for an optical interface based on photonic mixer device (PMD)", SPIE - Optical Science and Technology, San Diego 2000.
 22. W. Tai, R. Schwarte, H. Heinol, "Simulation of the optical transmission in 3D imaging system based on the principle of time-of-flight", SPIE - Optical Science and Technology, San Diego 2000.
 23. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, X. Luan, Z. Zhang, Z. Xu, H. Heß "Synchronization in Spread Spectrum Laser Radar Systems Based on PMD-DLL", SPIE - Aero Sense 2000, Orlando 2000.
 24. R. Schwarte, B. Buxbaum, H. Heinol, Z. Xu, J. Schulte, H. Riedel, R. Steiner, M. Scherer, B. Schneider, T. Ringbeck "New Powerful Sensory Tool in Automotive Safety Systems Based on PMD-Technology", AMAA - Advanced Microsystems for Automotive Applications 2000, Berlin 2000. T. Ringbeck, B. Buxbaum, R. Schwarte, "A highly integrated monolithic electro-optical PLL in CMOS-technology (PMD-PLL) for communication and ranging systems", Kongreßband OPTO'2000, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2000.
 26. R. Schwarte, B. Buxbaum, "Mikrosensoriklösungen durch inhärent mischenden Photodetektor (Photonic Mixer Device-PMD)", 11. Workshop Jenasensorik, ISSN 1434-7288, Jena 1999.
 27. Schwarte, R. et. al.: Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques. In Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 1, Sensors and Imaging; Academic Press; Boston 1999
 28. B. Buxbaum, R. Schwarte, "Charakterisierung eines neuartigen OE-Mikrosensors (PMD) mit breitem Anwendungspotential", 11. Workshop Jenasensorik, ISSN 1434-7288, Jena 1999.
 29. B. Buxbaum, R. Schwarte "Konzept einer hochparallelen optischen Schnittstelle auf Basis der PMD (Photonic Mixer Device)-Technologie", Optik in der Rechentechnik - ORT 1999, Jena 1999.
 30. R. Schwarte "Ein Jahrzehnt 3D-Bilderfassung – Zielsetzungen, Fortschritte, Zukunftsaspekte", Tagungsband DGZfP/GMA - Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
 31. T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum "Introduction of a new electrooptical phase locked loop in CMOS-technology (PMD-PLL)", SPIE - Optical Wireless Communications II, Boston 1999.
 32. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck "PMD-PLL Receiver Structure for Incoherent Communication and Ranging Systems", SPIE - Optical Wireless Communications II, Boston 1999.
 33. H. Heinol, R. Schwarte "Photomischdetektor erfaßt 3D-Bilder", Elektronik 12/99, WEKA Fachzeitschriften Verlag, S. 80-90, Muenchen 1999.
 34. B. Buxbaum, R. Schwarte, Z. Xu, H. Heinol, T. Ringbeck, J. Schulte, W. Tai „Charge Transfer Simulation in PMD-Structures“, Proceedings Sensor 99, S. 427-432, Nürnberg 1999.
 35. R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, T. Ringbeck, Z. Xu, K. Hartmann „Principles of 3-D Imaging Techniques“, Computer Vision and Applications, Volume 1, Sensors and Imaging, Academic Press, S. 374-393, Boston 1999.
 36. Z. Xu, R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, T. Ringbeck „Smart pixel - photonic mixer device (PMD), New system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip“, 5th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, S. 259-264, Nanjing 1998.
 37. R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, Z. Xu, T. Ringbeck, Z. Zhang, W. Tai, K. Hartmann, W. Kleuver, X. Luan „Neuartige 3D-Visionssysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen“, TM - Technisches Messen, 7-8/98, R. Oldenbourg Verlag, S.264-271, München 1998.
 38. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, H. Heinol, Z. Xu, J. Olk, W. Tai, Z. Zhang, X. Luan „A new approach in optical broadband communication systems: A high integrated optical phase locked loop based on a mixing and correlating sensor, the Photonic Mixer Device (PMD)“, Kongreßband OPTO '98-Optische Sensorik Meßtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S. 59-64, Erfurt 1998.
 39. R. Schwarte, B. Buxbaum, H. Heinol, Z. Xu, T. Ringbeck, Z. Zhang „Novel 3D-vision systems based on Layout Optimized PMD-Structures“, Kongreßband OPTO '98-Optische Sensorik Meßtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S.197-202, Erfurt 1998.

40. Schwarte R., Xu Z., Heinol H., Olk J., Klein R., Buxbaum B., Fischer H., Schulte J. "A new electrooptical Mixing and Correlating Sensor: Facilities and Applications of this Photonic Mixer Device (PMD)", SPIE-EOS: Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing, Vol. 3100, pp. 245-253, München 1997.
41. Schwarte, R.: Vorrichtung und Verfahren zur Erfassung der Phase und Amplitude elektromagnetischer Wellen. DE 19821974.1; DPA München 1998, international in > 15 Ländern angemeldet
42. Heinol H., Xu Z., Schwarte R., Olk J., Klein R. "Electro-optical correlation arrangement for fast 3D cameras: Properties and facilities of this electro-optical mixer device", SPIE-EOS: Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing, Vol. 3100, pp. 254-260, München 1997.
43. Schwarte R., Heinol H., Xu Z., Li J., Buxbaum B. "Pseudo/Noise (PN)-Laser Radar without Scanner for Extremely Fast 3D-Imaging and -Navigation", MIOP '97 - Microwaves and Optronics, S. 168-176, Sindelfingen 1997.
44. Schwarte R. "Überblick und Vergleich aktueller Verfahren der optischen Formerfassung" - Einführungsvortrag, GMA-Bericht 30-Optische Formerfassung, DGZfP-VDI/VDE-GMA, S. 1-12, Langen 1997.
45. Schwarte, R.: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle. DE 19704 496.4, DPA München, 1997
46. Schwarte R. Heinol H., Xu Z., Olk J., Tai W., "Schnelle und einfache optische Formerfassung mit einem neuartigen Korrelations-Photodetektor-Array", GMA-Bericht 30 - Optische Formerfassung, DGZfP - VDI/VDE-GMA, S. 199-209, Langen 1997.
47. Heinol H., Xu Z., Schwarte R., Ringbeck T. "Experimentelle Ergebnisse eines neuartigen schnellen 3D-Meßsystems mit modifizierten elektrooptischen Modulationskomponenten", GMA-Bericht 30 - Optische Formerfassung, DGZfP-VDI/VDE-GMA, S. 99-103, Langen 1997.
48. Schwarte R., Xu Z., Heinol H., Olk J., Buxbaum B. "New optical four-quadrant phase-detector integrated into a photogate array for small and precise 3D-cameras", SPIE-Multimedia Processing and Applications: Three-Dimensional Image Capture, Vol. 3023, S. 119-128, San Jose 1997.
49. Xu Z., Schwarte R., Heinol H., Lange R., Li J. "Simulation of a 3D-color vision system based on synthetic non-linear modulation", SPIE - Intelligent Robots and Computer Vision XV, Vol. 2904, Boston 1996.
50. Li J., Loffeld O., Schwarte R., Buxbaum B., Xu Z. "Optimization of a laser ranging system in the case of colored noise", SPIE - Intelligent Robots and Computer Vision XV, Vol. 2904, S. 108-116, Boston 1996.
51. Schwarte R., Xu Z., Heinol H. "Large Aperture Optical Modulators/Demodulators for 3D-Cameras", OPTO 96 Kongreßband, AMA Fachverband für Sensorik, S. 273-278, Leipzig 1996.
52. Heinol H., Schwarte R., Xu Z., Neuhaus H., Lange R. "First Experimental Results of a New 3D-Vision System Based on RF-Modulation Interferometry", Kongreßband OPTO 96-Optische Sensorik Meßtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S. 67-72, Leipzig 1996.
53. Olk J., Schwarte R. "Low Cost and High Precision Optical Distance Measurement Using Frequency Division Multiplexing", OPTO 96 Kongreßband, AMA Fachverband für Sensorik, S. 55-60, Leipzig 1996.
54. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., Klein R. 'Power transmittance of optimized aspherical lens with large numerical aperture', SPIE-Specification, Production, and Testing of Optical Components and Systems, Vol. 2775, S. 639-646, Glasgow 1996.
55. Xu Z., Heinol H., Schwarte R., Loffeld O., Klein R., Olk J. "Model of synthetic non-linear modulation and its algorithm for 3D color vision system", SPIE EOS-Design and Engineering of Optical Systems, Vol. 2774, S. 267-275, Glasgow 1996.
56. Schwarte R. "Eine neuartige 3D-Kamera auf der Basis eines 2D-Gegentaktkorrelator-Arrays", Symposium 'Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung', MIT GmbH, S. 273-278, Aachen 1996.
57. Heinol H., Xu Z., Schwarte R., Loffeld O. "New Optical 2D-Modulator of large aperture for 3D-Vision systems", SPIE EOS - Design and Engineering of Optical Systems, Vol. 2774, S. 293-300, Glasgow 1996.



58. Schwarte, R.: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Phasen- und Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle. DE 19635 932.5; DPA München 1996, international in > 20 Ländern angemeldet
59. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H. "Optimization of precision aspheric lenses for advanced small sensor heads of large numerical aperture", SPIE - Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics, Vol. 2600, S. 158-165, Philadelphia 1995.
60. Xu Z., Heinol H., Schwarte R., Loffeld O. "An Enhanced Multi-probing Recovering Algorithm Based on Color Mixed Non-linear Modulation and its Application in a 3D-Vision System", SPIE - Intelligent Robots and Computer Vision XIV, Vol. 2588, S. 200-207, Philadelphia 1995.
61. Schwarte R. "Neuartiges 3D-Kamerakzept für höchste Schnelligkeit, Flexibilität und Präzision", Bildverarbeitung 1995 Tagungsband, Technische Akademie Esslingen, pp. 355-364, Esslingen 1995.
62. Heinol H., Xu Z., Schwarte R., Loffeld O. "A New Optical 2D-Modulator Jacketed in Rotational Plastic-optics", SPIE-Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics, Vol. 2600, S. 166-173, Philadelphia 1995.
63. Olk J., Schwarte R., Li J. "A novel reference technique using optoelectronic switching for optical distance sensors", MIOP'95 - Conference on High Frequency Engineering, Sindelfingen 1995.
64. Schwarte R., Heinol H., Xu Z. "A New Fast, Precise and Flexible 3D-Camera Concept Using RF-Modulated and Incoherent Illumination", SENSOR 95 Kongreßband, AMA Fachverband für Sensorik, S. 177-182, Nürnberg 1995.
65. Heinol H., Schwarte R., Xu Z., Hartmann K. "A new active 3D-Vision system based on rf-modulation interferometry of incoherent light", SPIE - Intelligent Robots and Computer Vision XIV, Vol. 2588, S. 126-134, Philadelphia 1995.
66. Schwarte R., Hartmann K., Klein R., Olk J. "Neue Konzepte für die industrielle 3D-Objektvermessung nach dem Laufzeitverfahren", Tagungsband DGZfP "Optisches Messen von Länge und Gestalt", VDI und DGZfP, Düsseldorf 1994.
67. Schwarte R., Hartmann K., Li J., Klein R., Olk J., Weber J., Xu Z. "Optoelectronic 3D measurement techniques for industrial applications using the time-of-flight principle", Opto 94 Kongreßband, AMA Fachverband für Sensorik, S. 15-24, Leipzig 1994.
68. Schwarte R., Klein R., Weber J., Olk J. "Absolute 3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen mittels Puls- und Korrelationsradar", Abschlußbericht mit Kennz. 13N5882 im BMFT-Verbundprojekt „3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen“, 1993/94.

All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems

BY TORSTEN LÖFFLER, KARSTEN J. SIEBERT, HOLGER QUAST,
NOBURU HASEGAWA, GABRIEL LOATA, ROBERT WIPF, TOBIAS HAHN,
MARK THOMSON, RAINER LEONHARDT AND HARTMUT G. ROSKOS

*Physikalisches Institut, Johann Wolfgang Goethe-Universität,
Robert-Mayer-strasse 2-4, 60054 Frankfurt-am-Main, Germany
(t.loeffler@physik.uni-frankfurt.de)*

Published online 17 December 2003

We discuss the optoelectronic generation and detection of *continuous-wave* terahertz (THz) radiation by the mixing of visible/near-infrared laser radiation in photoconductive antennas. We review attempts to reach higher THz output-power levels by reverting from mobility-lifetime-limited photomixers to transit-time-limited p-i-n photodiodes. We then describe our implementation of a THz spectroscopy and imaging-measurement system and demonstrate its imaging performance with several examples. Possible application areas of THz imaging in the biomedical field and in surface characterization for industrial purposes are explored.

Keywords: lasers; THz radiation; THz imaging

1. Introduction

The controlled, direct generation of electromagnetic radiation in the terahertz (THz) frequency regime (100 GHz–10 THz) is a challenging task. The main reason for this is the fact that electronic methods on the low-frequency side are limited to some hundreds of GHz (Rodwell *et al.* 2001). On the other side, optical methods either require bulky and expensive machinery (free-electron or molecular-gas lasers) or are hampered by the need for cryogenic operation conditions (p-Ge laser, quantum cascade laser (Köhler *et al.* 2002)). An alternative approach is the optoelectronic generation of THz radiation by nonlinear photomixing (down-conversion) techniques. These were first developed on the basis of pulsed laser systems delivering radiation in the visible or near-infrared spectral range (Johnson & Auston 1975). The conversion to THz frequencies was (and is) achieved by the excitation of photocurrent pulses in semiconductor devices which act as the source for THz pulses.

Of prime importance for the development of the THz research field were the facts that photoconductive antennas can also be employed as detectors for the THz radiation and that the detected physical quantity is the electric radiation field vector and not the intensity. The latter aspect in conjunction with lock-in averaging is the reason for a very high receiver sensitivity and an exceedingly efficient suppression

One contribution of 16 to a Discussion Meeting ‘The terahertz gap: the generation of far-infrared radiation and its applications’.

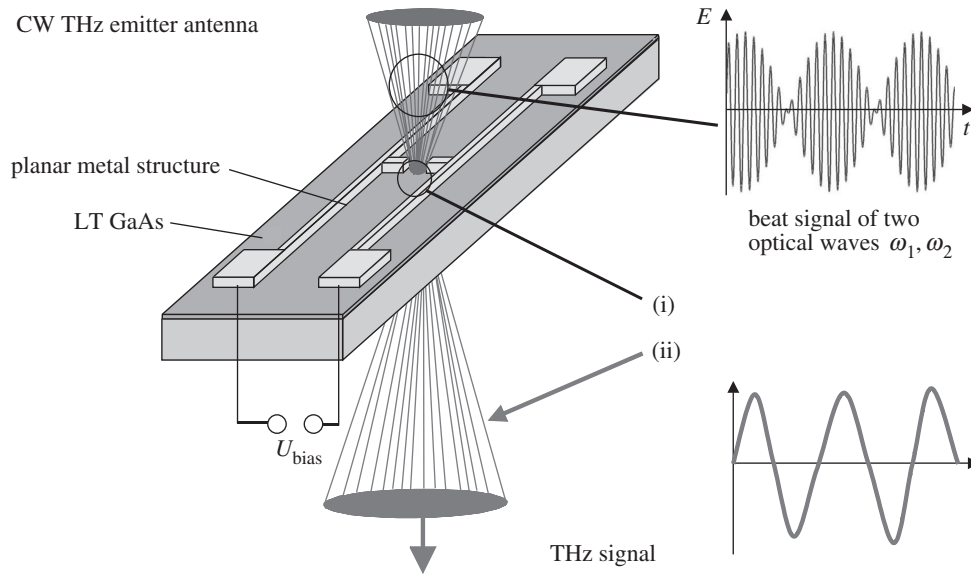


Figure 1. Photoconductive H-dipole antenna for the generation of CW THz radiation by the mixing of two visible/near-infrared laser beams. (i) $I_{\text{photo,AC}} \propto U_{\text{bias}} P_{\text{opt}} \sin(\omega_{\text{diff}} t)$; (ii) $P_{\text{THz}} \propto I_{\text{photo,AC}}^2$.

of the thermal background radiation. The background—in contrast to the useful radiation—has an ultra-rapidly fluctuating orientation of the electric field vector which leads to efficient averaging-out of the equally fluctuating photocurrents it generates in the receiver which can be kept (as well as the emitter) at ambient temperature. Another advantage of THz optoelectronics is the phase sensitivity, which arises by the stroboscopic detection principle. The capability to measure both the amplitude and the phase of the electric radiation field allows us to determine the complex refractive index of a material brought into the THz beam path.

The optoelectronic approach indisputably has revolutionized the application of THz radiation in physics and (to a lesser but nowadays rising degree) in other research fields (Roskos 1996). So far, however, these exciting developments have not led to spin-offs into industrial applications. The key reasons (besides the delaying effects of educational and training aspects) seem to be that the femtosecond lasers at the heart of the advanced THz systems remain expensive and bulky, and that the optical-to-THz power conversion efficiency is low (not exceeding 10^{-4}) necessitating continuously good alignment of the complex measurement system and rendering large-area imaging time-consuming (see below). For these reasons, there is an interest in finding conceptual alternatives without giving up the advantages of the coherent detection scheme discussed above, namely the capability to measure both the amplitude and phase of THz signals over a large frequency range (several THz) with high signal-to-noise ratio (SNR).

A number of years ago, it was recognized that photomixing of two *continuous-wave* (CW) laser beams holds much promise to overcome the first of the two fundamental limitations for an industrialization of optoelectronic THz technology. This is because compact and inexpensive CW semiconductor lasers with high output power and stable monomode operation are gradually becoming accessible for mixing applications.

The THz frequency and line width being essentially pre-selected by the choice of the laser wavelengths and line widths, CW mixing offers the additional opportunity to build narrow-line-width sources as they are wanted for local-oscillator purposes and high-resolution spectroscopy. After its first demonstration by Brown *et al.* (1993*a, b*), mixing of the radiation of much more compact semiconductor lasers has been investigated by a number of groups (Brown *et al.* 1994, 1995; McIntosh *et al.* 1995; Matsuura *et al.* 1997, 1999; Verghese *et al.* 1998; Gu *et al.* 1999). The first implementation of an all-optoelectronic THz measurement system was demonstrated in 1998 by Verghese *et al.*, who employed the optical-beat signal from two CW Ti:sapphire lasers operating at different wavelengths, in order to generate and detect the THz signal with photoconductive antennas (Verghese *et al.* 1998). A short time later, electro-optic detection (Wu *et al.* 1996; Chen *et al.* 2000; Han *et al.* 2000), a technique well established for pulsed THz systems, was also introduced in a CW system (Nahata *et al.* 1999). Recently, THz imaging based on CW optoelectronic systems has been demonstrated employing either a photoconductive receiver (Siebert *et al.* 2002*a, b*) or electro-optic detection (Nahata *et al.* 2002).

In the following, we provide an overview on the state of the art in photomixer development, discuss several approaches to enhancing the THz output power and introduce CW optoelectronic THz imaging.

2. State-of-the-art photoconductive antennas

A simple example of a photoconductive antenna for the optoelectronic generation (detection) of CW radiation around and above 1 THz is shown in figure 1. Like its counterpart for THz pulses, it consists of a metallic radiative structure (here an H-shaped dipole) with feed lines and a photoconductive gap (photoswitch) with an area of typically 50–100 μm^2 . At present, one employs almost exclusively low-temperature-grown GaAs (LT GaAs) as the photoswitching material. Compared with antennas for pulsed operation, one optimizes a CW photoconductive antenna essentially in the same way with respect to the LT-GaAs properties, but differently with respect to the antenna design and the avoidance of parasitic influences by the GaAs substrate and the metal environment.

Concerning the LT-GaAs properties (Tani *et al.* 1994; Jackson *et al.* 1999), the optimization potential results from the dependence of the output power P_{THz} on the following parameters: F_{opt} , the optical fluence in the photoswitch; R_{ant} , the impedance of the antenna; $I_{\text{photo,DC}}$, the generated DC photocurrent; E_{bias} , the applied DC bias field; μ , the mobility of the photogenerated carriers in the LT-GaAs material; and τ , the mobility lifetime. The output power (neglecting the RC time constant limitation) is given by (Brown *et al.* 1993*a*; Matsuura *et al.* 1997)

$$P_{\text{THz}}(F_{\text{opt}}, \omega_{\text{THz}}) = R_{\text{ant}} \frac{1}{2} \frac{(I_{\text{photo,DC}}(F_{\text{opt}}))^2}{1 + \omega_{\text{THz}}^2 \tau^2} \propto F_{\text{opt}}^2 E_{\text{bias}}^2 \frac{\tau^2 \mu^2}{1 + \omega_{\text{THz}}^2 \tau^2}. \quad (2.1)$$

Here, ω_{THz} denotes the angular THz frequency (difference frequency of the optical waves). Equation (2.1) illustrates some important properties of the photoconductive antennas.

- (i) The THz output power is proportional to the square of the DC photocurrent, as has also been verified experimentally (Brown *et al.* 1994). The THz output

power shows a frequency roll-off of the form $1/(1 + \omega_{\text{THz}}^2 \tau^2)$. Thus, even for the shortest achievable mobility lifetime of *ca.* 0.2 ps, the 3 dB point does not exceed 1 THz.†

- (ii) The maximum DC photocurrent and the related maximum output power for a given THz frequency are determined by both the operation conditions (F_{opt} and E_{bias}) and the material properties (μ and τ). Thus, for high output power, one chooses a material with a high value of μ and drives the device at such operation conditions as can be applied without device damage. With respect to τ , one has to go for the lowest value possible if the antenna is operated at and above 1 THz, but one can increase the output power by employing material with increased τ if the operation frequency is below 1 THz.

The control of both the mobility and the mobility lifetime are possible within limits by the growth and annealing conditions of the LT GaAs. One finds that the value of τ increases with both the growth and the annealing temperatures (Tani *et al.* 1994; Segschneider *et al.* 2002). On the other hand, reports on the behaviour of the mobility as a function of these temperatures do not give a consistent picture which may be due to the different measurement techniques applied to deduce the mobility (Segschneider *et al.* 2002; Němec *et al.* 2001; Stellmacher *et al.* 1999), an issue which requires clarification in the near future. Equally open is the question of whether the carrier lifetime (and the photocurrent) can be enhanced by very high bias fields, as has been reported in the literature (Zamdmer *et al.* 1999). Verghese *et al.* (2001) could not corroborate these findings.

With respect to the antenna design, one has much more flexibility to optimize emitters of CW radiation than those of pulsed radiation. While pulsed radiation favours the simplest radiative structures such as dipoles (Cai *et al.* 1997) or edge emitters (Zhao *et al.* 2002) (the simplicity of the radiator avoiding dispersive effects which result in complex and difficult-to-analyse pulse profiles), CW radiation can be generated with various types of radiating structures such as dipoles (Matsuura *et al.* 1997), logarithmic spirals (Brown *et al.* 1995), bow-ties (Tani *et al.* 1997) and double dipoles (Duffy *et al.* 2001), etc., thus optimizing not only the output power with the (frequency-dependent) quality factor of the resonator, but also the spatial radiation profile and the integration of the emitter into specific environments. Filter structures in the feed lines can keep power in the emitter which otherwise would be transmitted to the contacts and be lost. Such measures clearly can only be taken if the emitter is dedicated for a fixed frequency or a narrow frequency range.

An aspect requiring much attention when generating CW radiation is the undesired back-coupling from the environment and the substrate. With THz pulses, this feedback is insignificant, except in narrow-band applications, because it always delivers delayed signals which can be removed by time gating. This option does not exist when dealing with CW radiation, and hence back-coupling is as much of a problem here

† It should be noted, however, that THz pulses with a frequency content of up to 40 THz have been generated in specially designed photoconductive antennas (Kono *et al.* 2001). While the radiation up to a few THz is emitted by the radiative metal structure, the signals at very high frequencies most likely originate from both real and virtual (nonlinear electro-optic mixing) photocurrents in the LT GaAs, bypassing the metal structure. There is no obvious reason why one should not also reach such high frequencies in CW operation.

as in high-frequency CW electronics. The filters in the feed lines mentioned above help to prevent back-coupling at least from the circuitry surrounding the emitter.

A quite different problem of CW THz optoelectronics is imposed by the substrate of the LT-GaAs layer. If the substrate can absorb the residual optical radiation penetrating through the LT GaAs, there is the risk that photo-generated and long-lived charge carriers partly screen the applied bias field, a process clearly detrimental to the THz output power. This is an effect which is generally not found in pulsed THz systems because the charge carriers recombine fast enough before the next optical pulse arrives at the photomixer. At present, studies are underway to quantify the field-screening effect by carriers in the substrate of CW emitters.

The highest output powers reported in the literature are $2\ \mu\text{W}$ at 1 THz and $150\ \text{nW}$ at 2.5 THz (Duffy *et al.* 2001). In order to achieve these values, bias fields of more than $100\ \text{kV cm}^{-1}$ and optical fluences of $10^5\text{--}10^6\ \text{W cm}^{-2}$ (beam power of up to $100\ \text{mW}$ on a photoswitch of $5 \times 5\ \mu\text{m}^2$) are required, producing DC photocurrents of up to $2\ \text{mA}$. Comparing the THz output power at 1 THz with that of high-repetition-rate pulsed sources (Zhao *et al.* 2002), one finds that the pulsed sources reach a time-averaged power roughly a factor of 10 higher. This power, however, is distributed over a large frequency range (0–4 THz). If spectral power density is of concern, the CW sources are clearly superior; if the field amplitude is relevant, however, pulsed sources prevail (with a $100\ \text{MHz}$ Ti:sapphire laser source, one can generate peak electric fields in the focus of a THz beam of a few tens of volts per centimetre, while $1\ \mu\text{W}$ of CW radiation at 1 THz produces a field of $1\ \text{V cm}^{-1}$ within a diffraction-limited focus).

3. Novel concepts for optoelectronic CW THz generation

The maximum power which can be generated with current-driven antennas is given by the term

$$P_{\text{THz}} = \frac{1}{2} R_{\text{ant}} I_{\text{AC}}^2.$$

Novel concepts hence seek to increase either the antenna impedance R_{ant} or the AC current I_{AC} in the mixer element of the device.

A concept for an antenna with an increased impedance has recently been proposed by Sydlo *et al.* (2002). The basic idea is to reduce the influence of the permittivity of the substrate by fabricating the antenna on a thin membrane. A further increase in the impedance to more than $1.2\ \text{k}\Omega$ can be achieved in a narrow range around the design frequency by a backside metallization placed at a distance of $40\ \mu\text{m}$ below the antenna.

Other interesting ideas pertain to an increase in the AC current amplitude in the photomixer. One should bear in mind that the AC current in standard photo-switches is determined by the applied bias voltage and the incident optical power which are both limited by damage thresholds. Several novel approaches concentrate on accommodating a higher optical power by distributing it over an extended mixer area typically embedded into electric waveguide structures. If the dimensions of the mixer element become larger than the wavelength of the generated THz wave, it is necessary to achieve phase matching of the impinging optical radiation and the generated THz wave. The literature reports two basic design forms. Both are based on coplanar transmission lines containing the photoconductive switch in the area between the metal stripes. In the first design (Matsuura *et al.* 1999), the waveguide

is illuminated from the top with two optical beams focused by cylinder lenses and tilted with respect to each other in order to form a standing-wave pattern which propagates with the same phase velocity as the THz wave guided along the transmission line. Instead of free-space illumination, the second approach (Duerr *et al.* 2000) employs excitation of the photoswitch from an optical waveguide positioned directly under the coplanar transmission line. Phase-matching is achieved by slowing down the THz wave with the help of filter elements incorporated into the transmission line. At present, none of the investigations has succeeded in demonstrating a higher THz output power at 1 THz than that obtained from the spot-illuminated sources addressed above. The limiting factors seem to be the THz signal losses in the metal of the coplanar transmission lines and in the substrate (free-carrier absorption). When these attenuation factors are under better control, waveguide approaches are likely to play an increasingly significant role as the available optical power rises.

In all of these devices, LT-GaAs is employed as photomixer material. With the low mobility lifetime restricting the achievable photocurrent, several other approaches attempt to overcome this limitation by reverting to transit-time-limited device structures of the p-i-n-photodiode type. In principle, such devices can exhibit a quantum efficiency close to 100%, yielding very high AC currents (one estimates a photocurrent of 70 mA if 800 nm laser radiation with an input power of 100 mW is fully absorbed in the photomixer). The problem is, however, to reconcile the high quantum efficiency with ultrahigh-speed operation. The former requires a sufficient thickness and width of the diode, while the latter is optimized by shrinking all dimensions—the thickness to keep the transit time short and the width to reduce the capacitance of the device.

An optimized realization of such a device is the so-called *unicarrier travelling photodiode* (UCT-PD) of the Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) for the 1.55 μm wavelength regime (Hirata *et al.* 2002; Ueda *et al.* 2003). It takes advantage of the very high mobility of electrons in InP-related materials. The photocarriers are generated in an absorption layer of p-type InGaAs close to the cathode. While the low-mobility holes are collected at this contact, the electrons are transferred to an InP drift layer of sufficient thickness to keep the device capacitance low enough. Operation frequencies of several hundred GHz have been tested. At 100 GHz, an output power of 2.2 mW at a photocurrent of 20 mA (with an optical input power of 100 mW) is achieved. At 1 THz, the output power extrapolates to a few microwatts (Hirata *et al.* 2002) indicating a strong roll-off which limits the THz frequency performance of the device.

In order to make p-i-n concepts attractive at 1 THz and above, there is no way around reducing the carrier transit time further. As this makes it unavoidable to go for ultrathin layers, one seems to run into unsolvable conflicts with the need for a sufficient absorber thickness and an ultralow device capacitance. Döhler *et al.* have recently proposed to ease the problem by adopting an approach with a stack of specially designed nano-p-i-n-diodes forming what they call a *n-i-p-n-i-p-hetero-superlattice* (Renner *et al.* 2002; Eckardt *et al.* 2003). Its first realization has been in the GaAs/AlGaAs material system (see figure 2). The absorption and the carrier drift in each period take place in the intrinsic (i) region, which consists of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ with a continuously changing Al content. With light at a wavelength of 850 nm, electron-hole generation occurs only in the region of lowest bandgap (lowest Al content) close to the p-layers. The photocurrent is mostly due to the electrons

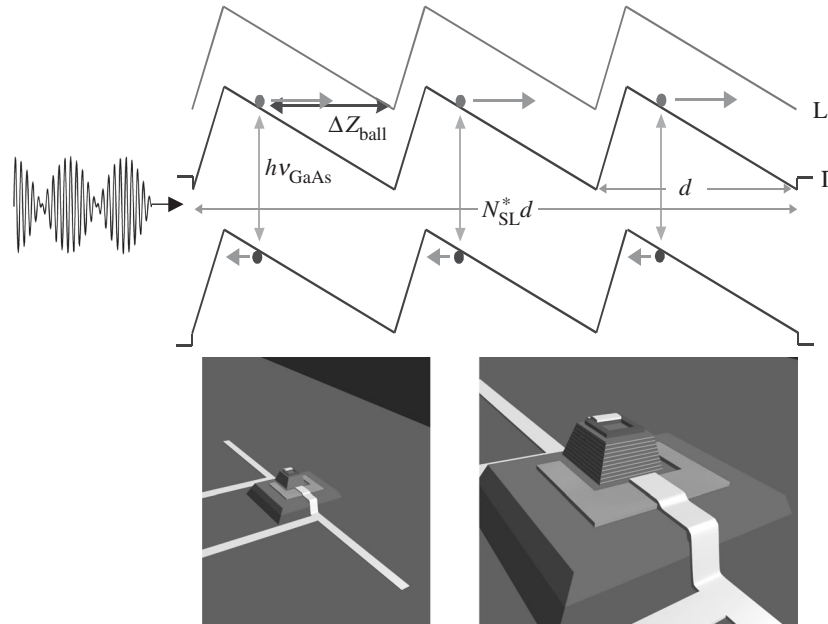


Figure 2. Top, scheme of the GaAs n-i-p-n-i-p superlattice showing three periods of the stack of layers with no external bias field applied. The lines display the band edges of the valence band and of the fundamental (Γ -valley) and the lowest side valley (L-valley) conduction band. Note that the intrinsic layer (lines tilted downwards) consists of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ with a continuously increasing Al content in each period. This produces an absorption region on the left side of each intrinsic layer, electrons drift to the right, holes to the left. Bottom: n-i-p-n-i-p structure embedded into a dipole emitter. ($\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx 850 \text{ nm}$, $\Delta\lambda \approx 2.4 \text{ nm}$ ($\sim 1 \text{ THz}$)).

which traverse the i-layer quasi-ballistically. The built-in fields are such that transfer of the electrons into the large-effective-mass L-valleys is avoided. The thickness of the i-layer is adjusted to the target operation frequency of the device (Δz_{ball} in figure 2 corresponding to the maximum distance over which an electron can propagate quasi-ballistically during half the oscillation period). The charge carriers are removed by recombination either at the contacts or at the interfaces between the p-layers and the n-layers (Pohl *et al.* 2003), the latter containing very thin LT-GaAs or ErAs layers to enhance carrier recombination.

An interesting property of the device is the possibility to achieve impedance matching of the mixer with the antenna simply by choosing the proper number N of the superlattice periods (Eckardt *et al.* 2003). For a target frequency of 1 THz, a drift length Δz_{ball} of 250 nm, and a device cross-section of $80 \mu\text{m}^2$, one matches the antenna impedance of 70Ω if N is chosen to be 10. Simulations suggest that the impedance matching should allow us to achieve a THz output of $500 \mu\text{W}$ upon illumination with 100 mW of absorbed laser power, i.e. a factor of 100 (250) more than theoretically expected (experimentally achieved) with single-spot LT-GaAs photomixers. Very recently, we have performed the first preliminary THz emission studies with non-optimal n-i-p-n-i-p photomixers, achieving immediately a conversion efficiency comparable to that of our best conventional LT-GaAs photoconductive antennas, which confirms the great potential of the n-i-p-n-i-p devices (Loata *et al.* 2003).

4. CW THz imaging

One of the most promising fields of applied THz research pertains to imaging and sensing. Since its first demonstration by Hu & Nuss (1995), optoelectronic THz imaging and sensing has become a rapidly expanding field of research (Mittleman *et al.* 1999; Herrmann *et al.* 2000). The potential for interesting applications such as in package inspection, security monitoring, process control, and biomedical or pharmaceutical imaging and sensing has been demonstrated (Woodward *et al.* 2001; Arnone *et al.* 2000; Arnone 2000; Mittleman *et al.* 1997). The developments have reached a maturity which allows the adaption of more sophisticated imaging techniques known from the optical region of the spectrum, e.g. near-field (Hunsche *et al.* 1998; Wynne & Jaroszynski 1999) and dark-field imaging (Löffler *et al.* 2001, 2002; Hasegawa *et al.* 2003), and microscopic imaging (van der Valk & Planken 2002; Chen *et al.* 2003). A viable technology for industrial use, however, is still lacking.

Almost all of the work was performed based on pulsed THz imaging systems. Although this technique has certain advantages such as the absolute-time-of-flight measurement capability and the access to the full spectral information within one measurement, there are a few drawbacks to be considered (in addition to the more general ones such as laser costs and complexity). On the system side, this is the need for a fast mechanical delay line to operate around the time-delay-zero point (shaker). This device limits the state-of-the-art systems to data-acquisition times of *ca.* 20 ms. A further improvement of mechanical shakers seems to be conceptually impossible. In addition, such a fast-moving delay line introduces mechanical vibrations, which create a host of problems not only in applications such as THz microscopy. On the application side, the pulsed systems are limited to a certain spectral resolution, which is given by the length of the time window scanned through at each pixel.

CW techniques, in contrast, allow for a more or less continuously running delay line (with the ensuing drastic reduction of the vibrations) and offer a high spectral purity. This and the enormous reduction which the implementation of semiconductor-laser-based systems will bring in terms of costs and complexity led us to develop the first all-optoelectronic CW THz imaging system (Siebert *et al.* 2002*a, b*).

Figure 3 shows the layout of our system. Two optical waves, with independently tunable wavelengths centred around 800 nm, are generated in a dual-colour CW Ti:sapphire laser (Siebe *et al.* 1999) consisting of two unidirectional, single-longitudinal-mode ring cavities sharing a single Ti:sapphire gain medium which is pumped by two beams from a 5 W Verdi all-solid-state laser (Coherent Inc., Santa Clara, CA, USA). The Ti:sapphire laser source will in the future be replaced by high-power semiconductor diode lasers, optionally in combination with an amplifier. For the research described here, the Ti:sapphire source has turned out to be a versatile and robust tool providing more than sufficient laser power and stable laser operation.

The emitted laser beams are spatially combined at a 50/50 beam-splitter cube yielding two beams which are intensity-modulated at the difference frequency of the optical waves. The subsequent optical system is similar to that of femtosecond-laser-based THz transmission-measurement systems. One of the optical beams is guided via a computer-controlled optical delay line to the emitter antenna; the other is used to gate the receiver antenna. We employ two H-shaped photomixer antennas both with a 50 μm long dipole and a $5 \times 10 \mu\text{m}^2$ photoconductive gap on LT GaAs grown at 270 °C (emitter) and 200 °C (detector), respectively, exhibiting measured carrier

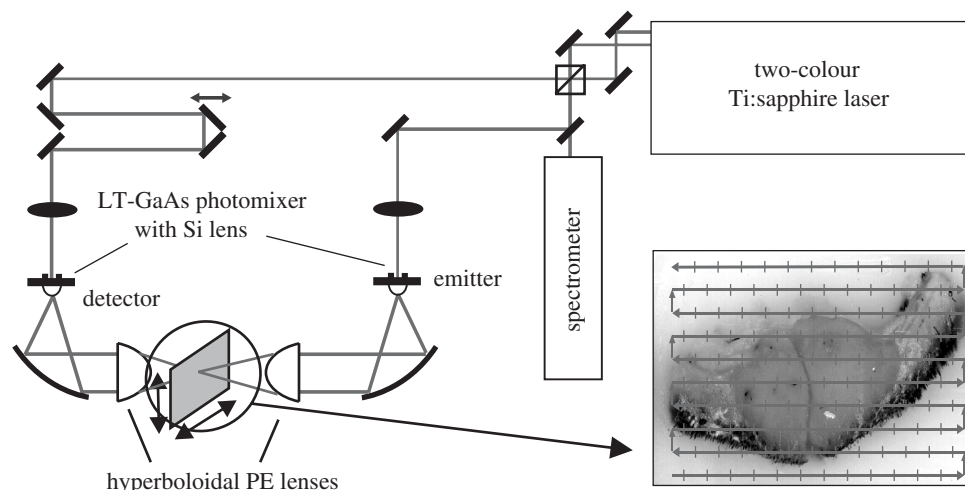


Figure 3. Schematic of the all-optoelectronic CW THz imaging system.

trapping times of 1.2 ps (emitter) and 0.35 ps (detector). The variation of the growth temperatures allows one to achieve higher output power from the emitter and broader detection bandwidth at the detector. Each photomixer is illuminated with 100 mW of optical power. The emitter is biased with a 25 kHz square-wave signal between ± 12.5 V. This modulation allows lock-in detection of the THz signal, while avoiding detrimental feedback into the two-colour laser source, which is found to occur when the optical beam is mechanically chopped. The lock-in time constant is set to 20 ms.

The THz radiation is coupled out of the emitter via a hyperhemispherical Si substrate lens of diameter 2 mm, collimated by an off-axis paraboloidal mirror and focused by a plano-hyperboloidal lens. It is then passed through the sample and guided onto the detector antenna with the reverse sequence of optics. The SNR obtained at 1 THz without a sample in the beam path is 100:1. The SNR is defined in terms of the mean amplitude versus its standard deviation.

For THz imaging, the sample is mounted on a computer-controlled x - y translation stage and can be moved continuously along a meandering path through the focus of the THz beam, as indicated in figure 3. The relative phase of the THz signal is varied by simultaneous translation of the optical delay line. In order to obtain the shortest possible data-acquisition time for the imaging system, we take advantage of the extremely long coherence length of the two optical single-longitudinal-mode beams. During the spatial scan over a horizontal row of the object, the optical-delay line is moved with constant velocity without changing its direction. For each pixel of the image, the phase of the detected THz wave is varied over two THz periods. Twelve temporal data points per period are sampled and employed for the evaluation of both the amplitude and phase of the sinusoidal THz field. At the end of each row of pixels, both the time-delay translation stage and the object's horizontal translation change directions simultaneously, while the object is moved to a new vertical position. For each object, a reference scan of the time delay is taken without the sample or at a transparent point on the sample, covering the same optical path length as during a scan of a row of pixels. It is taken in both forward and backward directions to

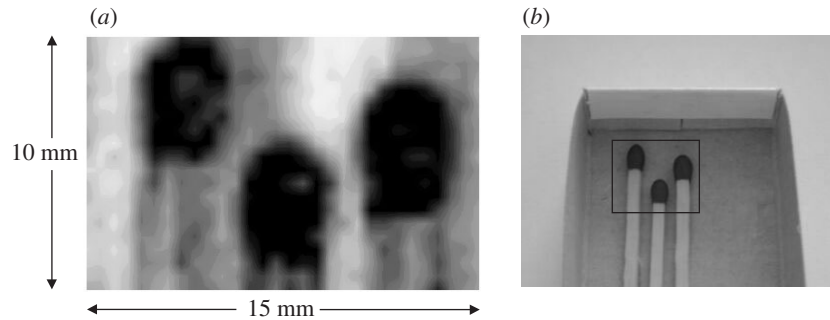


Figure 4. (a) THz transmission image of three matches in a closed box (view into a matchbox at 500 GHz, 600 pixel). (b) Photograph of the opened box with the matches inside.

compensate for any differences in the phase of the signal due to the change of the scanning direction.

In addition to the amplitude information, the relative phase of the CW wave at each pixel can be exploited for image formation (examples are not shown here; see Siebert *et al.* (2002a) for more details). For thin samples where the optical thickness varies by less than one wavelength, or for samples with a sufficiently homogeneous optical thickness (i.e. without changes larger than one wavelength) and a constant geometrical thickness, this information is equivalent to that obtained by time-of-flight measurements with pulsed systems. For samples with larger variations in the optical thickness, the modulo 2π ambiguity has to be taken into account.

With a routinely achieved data-acquisition time of 200 ms per pixel, our CW THz imaging system is at present about one order of magnitude slower than the best femtosecond-laser-based systems. We expect to reach the same or (with electronic instead of mechanical phase-shifters) even better acquisition times in the future. The images are of comparable quality (Siebert *et al.* 2002a; Teravision 2003). Single-scan measurements at 1 THz give SNRs better than 100:1 and allow for imaging with a dynamic range in power of more than three orders of magnitude. The spatial resolution is about one wavelength. With the same antennas, the system is suited to recording images in the region between 0.2 THz and 1.5 THz.

5. Imaging applications

(a) Package inspection

The observation that paper, cardboard, many plastic materials and a variety of other materials are quite transparent to THz radiation suggests its use for the inspection of containers, envelopes and packages made out of these materials. For illustration, figure 4 shows an image of some matches taken with our CW THz imaging system through the closed cardboard matchbox.

For industrial applications, one faces the problem that data-acquisition times of 20 ms (pulsed) or 200 ms (CW) are far too long for online two-dimensional imaging as required for, for example, security scans at airports or in mail-processing centres. A more realistic and less challenging task is one-dimensional imaging. This limited approach may be sufficient for some practical purposes such as the monitoring of the presence/lack of a substance in a package. In the food-processing industry, an

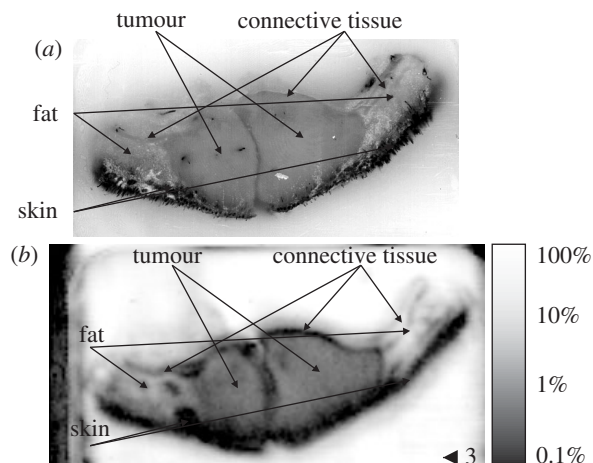


Figure 5. (a) Photograph of an archived tissue sample of a cut through a canine skin tumour. (b) CW THz transmission image of the sample.

example for such a task could be the test of the presence of raisins in cereal boxes. The raisins will give a good contrast due to their high water content.

If one is not bound to perform online imaging, one can take advantage of the phase sensitivity of optoelectronic THz sensing for more sophisticated applications such as three-dimensional imaging. It can be oriented towards remote surface reconstruction or aim at a tomographic analysis of the interior of a transparent object as has recently been demonstrated with a pulsed THz system (Ferguson *et al.* 2002). Conceptually, such THz tomography should also be possible with CW THz radiation.

(b) Biomedical imaging

THz imaging in the biomedical field attracts much interest (Knobloch *et al.* 2001; Fitzgerald *et al.* 2002; Woodward *et al.* 2001; Smye *et al.* 2001), one reason being the fact that THz radiation is non-ionizing and hence cannot—at the power levels employed in the submilliwatt regime—induce biochemical modifications in tissue that could be hazardous to living beings, as is the case with X-rays. We do not dwell further on fundamental aspects (such as the problem of the strong absorption of water in the THz frequency range), as here we only want to illustrate the imaging capability of CW THz radiation in the biomedical field, emphasizing that scattering and diffraction such as that in ultrasonic imaging can be employed advantageously as major contrast-forming mechanisms.

We show exemplarily an image taken from an archived (formaline-fixed, dehydrated and wax-mounted) slice through a canine skin tumour (basal cell tumour, see figure 5a). The size of the sample was 32 mm × 24 mm × 3 mm. Figure 5b shows a logarithmic power-transmission image taken with the CW system at 1 THz in a single meandering pass. The image consists of 11 248 pixels, corresponding to a separation of neighbouring pixels of 250 μm. The scan took 39 min, with a measurement time of 200 ms per pixel plus a short time at the end of each row to switch to the next one, and the 30 s required for the one-time reference scan. All different tissue parts of the sample can be identified. While it is not clear at present whether spectroscopic resonances play a major role in the formation of the image contrast, one

can clearly attribute the pronounced attenuation at the boundaries between different tissue types to scattering and diffraction effects. This was examined in detail and the effect augmented by THz dark-field measurements (Löffler *et al.* 2001, 2002).

(c) *Industrial surface inspection*

Besides the very popular fields of biomedical and security-related research, one should not neglect more traditional application areas where THz imaging and sensing may well have its first major impact in the industrial world. We have already addressed package control and tomography above. In this subsection, we point out that interesting applications could lie in quality control and process monitoring.

We have recently begun to examine the conceptual applicability of THz imaging and sensing for the inspection of the surfaces of rolled steel and other metals. These investigations aim at the online monitoring task of identifying small surface defects like protrusions, scratches and voids with vertical dimensions from a few micrometres to hundreds of micrometres and lateral dimensions in the millimetre range. In the case of steel, the protrusions and voids may originate from air bubbles caught in the iron melt and the scratches from hard sapphire particles formed by the oxidation of aluminium present in the iron ore in the course of the reduction of the iron oxides. The online identification of such surface faults by conventional optical means turns out to be difficult because the surface of the rolled steel is so rough that it scatters visible light strongly. The industrial environment (vibrations, heat, conveyor-belt speed, etc.) enforces rather large working distances and fast data-acquisition times.

Neglecting the online-operation target for the time being, we have been able to show that THz imaging with its large wavelength in the submillimetre range is blind to the natural surface roughness but provides a high sensitivity to the defects to be identified (Hasegawa *et al.* 2003). We have explored two THz reflectometry modalities which are both optimized to be sensitive to the curvature of surface features. The first is a dark-field technique employing a spatial filter in the THz beam path, which allows the detection of protrusions and dents on surfaces with high sensitivity. It cannot distinguish, however, between convex and concave shapes. This becomes possible with the second technique, which combines out-of-focus imaging with suitable beam filtering. The experiments were performed with a pulsed THz imaging system, but transfer to an optoelectronic CW THz system appears to be straightforward.

In the first dark-field approach, a THz beam is focused onto the surface of the sample, which moves along a meandering path parallel to its surface. The reflected THz beam is projected by two lenses onto a receiver, which records the signal amplitude. A circular beam stop placed between the lenses blocks the central part of the beam (Löffler *et al.* 2001, 2002). When the surface of the object is planar and normal to the beam axis, most of the reflected radiation is filtered out. If, however, the incoming beam encounters any surface features, then some radiation passes the stop and can be detected with high sensitivity.

The measurement results show that a dent with a width of 2 mm and depth of 20 μm (a protrusion of 4 mm width and 30 μm height—these parameters being determined by optical interference microscopy) can be detected with a relative contrast of more than 100 at 1 THz. The high contrast implies that features with a height (depth) of less than 1 μm should be discernible.

In spite of the impressive sensitivity, this dark-field imaging technique does not allow us to distinguish between protrusions and dents. This issue motivated develop-

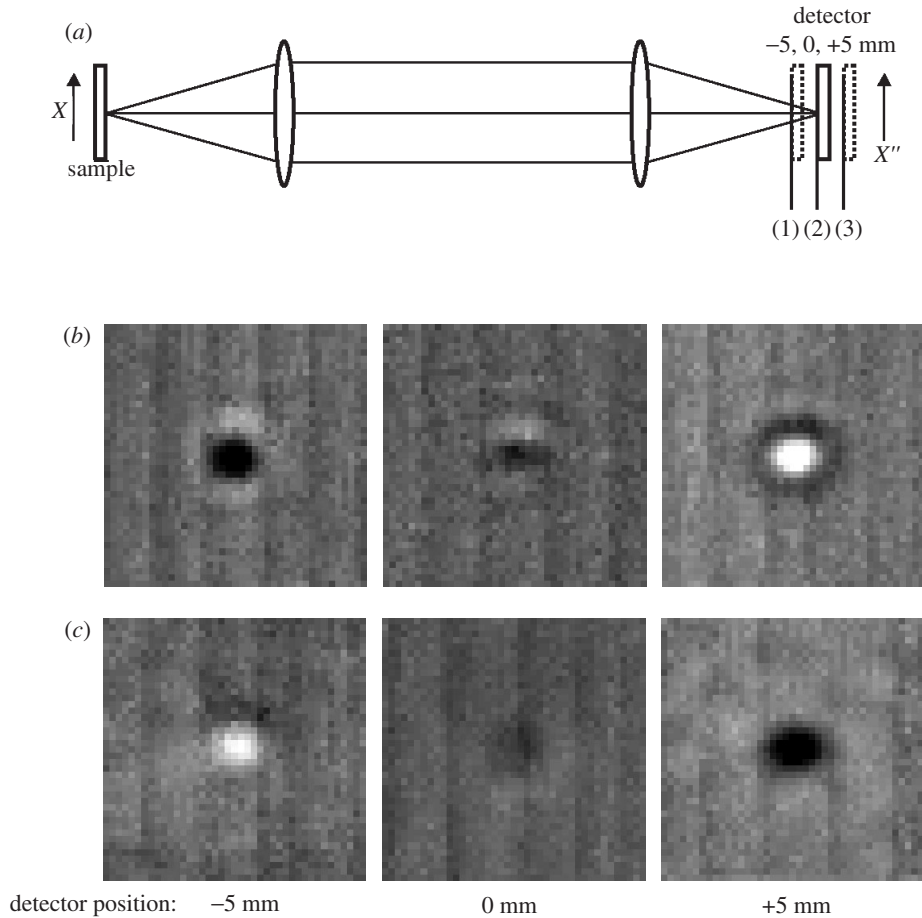


Figure 6. (a) Schematic of the out-of-focus detection set-up. Experimentally observed THz reflection images achieved with different detector positions for a sample containing (b) a dent (concave surface in centre) and (c) a protrusion (convex surface in centre). White colouring indicates a strong signal, black a weak signal.

ment of a second measurement technique, which does not have such a high sensitivity but introduces the ability to distinguish between convex- and concave-shaped objects.

The measurement principle is sketched in figure 6a. Compared with the former approach, no spatial filter is needed; a filtering effectively occurs in the detector (see Hasegawa *et al.* 2003). The key feature of this approach is that the detection occurs out of the focus of the second lens (the focus being marked as position (2)), at a certain distance (in this case, 5 mm) in front of the focus (detector position (1)) or behind it (detector position (3)). The detection principle works as follows. The focus is shifted away from the last lens, if the THz beam reflects off a concave surface (such as the centre of the dent), and it is shifted towards the lens if the surface is convex (such as the centre of the protrusion). The experimental results in figure 6b, c show that, at the detector position marked (1), these differences lead to a signal enhancement for protrusions and a decreased signal for dents. At the opposite

detector position (3), the situation is reversed. Interestingly, a detector positioned at (2) is fairly insensitive to these variations.

6. Discussion and outlook

In this paper, we have emphasized the imaging and sensing potential for THz radiation. One may ask what is necessary to bring this application area to full blossom in real-world applications. It may not be a strict prerequisite to develop THz spectroscopic databases and a better understanding of the interaction of THz radiation with matter (an understanding which, in many research areas and not only in the biomedical field, is far from being advanced), although this is clearly desirable and scientifically of high interest. The history of imaging with ultrasound shows that technical modalities can be successful even if they are not very discriminating and powerful in the spectroscopic sense. They have to bring a clear advantage, however, and must be comparatively simple, easy to handle, and provide images and sensing information in real time or close to it.

At present, we see the main obstacle for optoelectronic THz applications in imaging and sensing is the low power which these systems deliver. This argument holds for both femtosecond-laser-based systems and the CW systems discussed here. If one is not willing to spend hundreds of thousands of euros on femtosecond amplifier lasers, THz images, with the best systems available today, can only be obtained over many seconds to minutes and pixel by pixel. For this to change, it requires operation at much higher THz output powers. If a system could provide tens (or hundreds) of milliwatts and one could maintain the high detection sensitivity (at ambient temperatures) that optoelectronics provides, the opportunities for real-world applications would increase tremendously.

Several recent developments may offer new potential to achieve this goal. The advent of the quantum cascade laser which can reach into this range of output power could open the path to real-time or quasi-real-time CW THz imaging. In order to take advantage of the high sensitivity of electro-optic detection, we are seeking to develop a hybrid system consisting of a quantum cascade laser phase-locked to the difference frequency of a compact dual-colour semiconductor laser. Hopefully, quantum cascade lasers will in the future operate at room temperature or not too far below it; otherwise, this approach might suffer from the requirements for cryogenic source operation conditions.

The operation-temperature problem may be avoided if ideas of generating powerful CW THz radiation by mixing the radiation of semiconductor lasers directly in the lasers themselves turn out to be successful. These lasers could be quantum cascade lasers operating (ideally at room temperature) in the infrared spectral range or, in principle, lasers operating in the visible/near-infrared spectral regime (investigated by Professor Elsässer at TU Darmstadt and by us).

It also remains to be seen where the return to vacuum electronics—a trend of recent years—may lead to. It is now well established that Smith–Purcell-type (Smith & Purcell 1953) emitters, based on sub-megaelectronvolt electrons in vacuum or electrons at relativistic energies forced onto curved trajectories (Carr *et al.* 2002), provide an abundance of THz radiation. The question is whether the respective machinery can be made compact and synchronized to the difference frequency of lasers for improved detectability.

Over the last one-and-a-half decades, THz research has experienced a huge upswing by the emergence of THz optoelectronics. We expect this trend to continue and to widen in scope by the integration of other technological platforms and by the application of THz research tools in a larger number of fields. A strong impact in chemistry and the biomedical–pharmaceutical area will come from the expansion of the covered frequency regime into the infrared regime, making vibrational molecular modes accessible as sources for contrast in imaging and sensing. CW THz techniques will play an important role here because of the need for narrow-band radiation in molecular spectroscopy. To most researchers in the field, it appears inevitable that industrial applications will follow, but this could well take more time (another decade or so) than anticipated by many.

7. Summary

In this paper, we have tried to give an overview of the developments concerning all-optoelectronic CW terahertz measurement systems. We have then put much emphasis on recent developments of THz radiation sources in the quest for increased output power. Another focus of the paper has been on the implementation of CW THz imaging and sensing, where we have pointed out the potential usefulness of the technique in several application areas.

The authors thank G. Strasser, TU Wien, for providing the LT-GaAs material, and V. Hock, University of Würzburg, for the Ti/Au metallization of the antennas. We are grateful for fruitful collaborations with the University of Erlangen (Professor Döhler), TU Darmstadt (Professor Elsässer, Professor Hartnagel, Professor Meißner), the University of Osaka (Professor M. Tani) and the TERAVISION consortium concerning CW THz optoelectronics. Financial support was provided by the Deutsche Forschungsgemeinschaft and by the EU project TERAVISION. The Nippon Steel Corporation, Japan, is acknowledged for its partial support of our research on metal-surface characterization.

References

- Arnone, D. D. 2000 *Opto Lasers Europe*, p. 13. (Available at <http://optics.org/articles/ole>.)
- Arnone, D. D., Ciesla, C. & Pepper, M. 2000 *Phys. World Mag.* **13**(4), 35.
- Brown, E. R., Smith, F. W. & McIntosh, K. A. 1993a *J. Appl. Phys.* **73**, 1480.
- Brown, E. R., McIntosh, K. A., Smith, F. W., Manfra, M. J. & Dennis, C. L. 1993b *Appl. Phys. Lett.* **62**, 1206.
- Brown, E. R., McIntosh, K. A., Smith, F. W., Manfra, M. J., Dennis, C. L. & Mattia, J. P. 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64**, 3311.
- Brown, E. R., McIntosh, K. A., Nichols, K. B. & Dennis, C. L. 1995 *Appl. Phys. Lett.* **66**, 285.
- Cai, Y., Brener, I., Lopata, J., Wynn, J., Pfeiffer, L. & Federici, J. 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71**, 2076.
- Carr, G. L., Martin, M. C., McKinney, W. R., Jordan, K., Neil, G. R. & Williams, G. P. 2002 *Nature* **420**, 153.
- Chen, H.-T., Kersting, R. & Cho, G. C. 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3009–3011.
- Chen, Q., Jiang, Z., Xu, G. X. & Zhang, X.-C. 2000 *Opt. Lett.* **25**, 1122.
- Duerr, E. K., McIntosh, K. A. & Verghese, S. 2000 In *Proc. of Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000)*, 7–12 May 2000, pp. 382. New York: IEEE Press.
- Duffy, S. M., Verghese, S., McIntosh, K. A., Jackson, A., Gossard, A. C. & Matsuura, S. 2001 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **49**, 1032.
- Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (2004)

- Eckardt, M. (and 10 others) 2003 *Physica E* **17**, 629.
- Ferguson, B., Wang, S., Gray, D., Abbot, D. & Zhang, X.-C. 2002 *Opt. Lett.* **27**, 1312.
- Fitzgerald, A. J., Dzontoh, E., Löffler, T., Siebert, K., Berry, E., Zinovev, N. N., Miles, R. E., Smith, M. A. & Chamberlain, M. 2002 *Proc. SPIE* **4682**, 107–116.
- Gu, P., Chang, F., Tani, M., Sakai, K. & Pan, C.-L. 1999 *Jpn. J. Appl. Phys. Part 2* **38**, L1246.
- Han, P. Y., Cho, G. C. & Zhang, X.-C. 2000 *Opt. Lett.* **25**, 242.
- Hasegawa, N., Löffler, T., Thomson, M. & Roskos, H. G. 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3996–3998.
- Herrmann, M., Tani, M. & Sakai, K. 2000 *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**, 6254.
- Hirata, A. (and 12 others) 2002 *Electron. Lett.* **38**, 798.
- Hu, B. B. & Nuss, M. C. 1995 *Opt. Lett.* **20**, 1716.
- Hunsche, S., Koch, M., Brener, I. & Nuss, M. C. 1998 *Opt. Commun.* **150**, 22.
- Jackson, A. W., Kadow, C., Gossard, A. C., Matsuura, S., Blake, G., Duerr, E. K. & Verghese, S. 1999 In *Proc. Symp. on Non-Stoichiometric III–V Compounds, Erlangen, Germany*, p. 19.
- Johnson, A. M. & Auston, D. H. 1975 *IEEE J. Quant. Electron.* **11**, 283.
- Knobloch, P., Schmalstieg, K., Koch, M., Rehberg, E., Vauti, F. & Donhuijsen, K. 2001 *Hybrid and novel imaging and new optical instrumentation for biomedical applications* (ed. A.-C. Boccara & A. A. Oraevsky). *Proc. SPIE* **4434**, 245.
- Köhler, R., Tredicucci, A., Beltram, F., Beere, H. E., Linfield, E. H., Davies, A. G., Ritchie, D. A., Iotti, R. C. & Rossi, F. 2002 *Nature* **417**, 156.
- Kono, S., Tani, M. & Sakai, K. 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79**, 898.
- Loata, G. (and 12 others) 2003 In *Proc. IEEE Int. Conf. on Terahertz Electronics, Sendai, Japan*. New York: IEEE Press.
- Löffler, T., Bauer, T., Siebert, K., Roskos, H. G., Fitzgerald, A. & Czasch, S. 2001 *Opt. Express* **9**, 616.
- Löffler, T., Siebert, K., Czasch, S., Bauer, T. & Roskos, H. G. 2002 *Phys. Med. Biol.* **47**, 3847.
- McIntosh, K. A., Brown, E. R., Nichols, K. B., McMahon, O. B., DiNatale, W. F. & Lyszczarz, T. M. 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3844.
- Matsuura, S., Tani, M. & Sakai, A. 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70**, 559.
- Matsuura, S., Blake, G. A., Wyss, R. A., Pearson, J. C., Kadow, C., Jackson, A. W. & Gossard, A. C. 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2872.
- Mittleman, D. M., Hunsche, S., Boivin, L. & Nuss, M. C. 1997 *Opt. Lett.* **22**, 904.
- Mittleman, D. M., Gupta, M., Neelamani, R., Baraniuk, R. G., Rudd, J. V. & Koch, M. 1999 *Appl. Phys. B* **68**, 1085.
- Nahata, A., Yardley, J. T. & Heinz, T. F. 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75**, 2524.
- Nahata, A., Yardley, J. T. & Heinz, T. F. 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81**, 963.
- Němec, H., Pashkin, A., Kužel, P., Khazan, M., Schnüll, S. & Wilke, I. 2001 *J. Appl. Phys.* **90**, 1303.
- Pohl, P. (and 11 others) 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83**, 4035.
- Renner, F. (and 11 others) 2002 In *Proc. 4th Symp. on Non-Stoichiometric III–V Compounds, Asilomar, October 2002* (ed. P. Specht, T. R. Weatherford, P. Kiesel & S. Malzer). Physik Mikrostrukturierter Halbleiter, vol. 27, p. 59. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Rodwell, M. J. W. (and 17 others) 2001 *IEEE Trans. Electron Devices* **48**, 2606.
- Roskos, H. G. 1996 *Coherent solid-state phenomena investigated by time-resolved terahertz spectroscopy*. Habilitation thesis, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt-am-Main.
- Segschneider, G., Jakob, F., Löffler, T., Roskos, H. G., Tautz, S., Kiesel, P. & Döhler, G. 2002 *Phys. Rev. B* **65**, 125205.
- Siebe, F., Siebert, K., Leonhardt, R. & Roskos, H. G. 1999 *IEEE J. Quant. Electron.* **35**, 1731.
- Siebert, K. J., Quast, H., Leonhardt, R., Löffler, T., Thomson, M., Bauer, T. & Roskos, H. G. 2002a *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3003.

- Siebert, K., Löffler, T., Quast, H., Thomson, M., Bauer, T., Leonhardt, R., Czasch, S. & Roskos, H. G. 2002b *Phys. Med. Biol.* **47**, 3743.
- Smith, S. J. & Purcell, E. M. 1953 *Phys. Rev.* **92**, 1069.
- Smye, S. W., Chamberlain, J. M., Fitzgerald, A. J. & Berry, E. 2001 *Phys. Med. Biol.* **46**, R101.
- Stellmacher, M., Schnell, J.-P., Adam, D. & Nagle, J. 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74**, 1239.
- Sydlo, C., Sigmund, J., Hartnagel, H. L., Loata, G., Siebert, K. J. & Roskos, H. G. 2002 In *Proc. 10th IEEE Int. Conf. on Terahertz Electronics, September 2002, Cambridge, UK*. Piscataway, NJ: IEEE.
- Tani, M., Sakai, K., Abe, H., Nakashima, S., Harima, H., Hangyo, M., Tokuda, Y., Kanamoto, K., Abe, Y. & Tsukada, N. 1994 *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 4807.
- Tani, M., Matsuura, S., Sakai, K. & Hangyo, M. 1997 *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* **7**, 1. Teravision 2003 Final report. (Available at <http://www.teravision.org/>.)
- Ueda, A., Noguchi, T., Iwashita, H., Sekimoto, Y., Ishiguro, M., Takano, S., Nagatsuma, T., Ito, H., Hirata, A. & Ishibashi, T. 2003 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **51**, 1455.
- van der Valk, N. C. J. & Planken, P. C. M. 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81**, 1558.
- Verghese, S., McIntosh, K. A., Calawa, S., Dinatale, W. F., Duerr, E. K. & Molvar, K. A. 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3824.
- Verghese, S., McIntosh, K. A., Duffy, S. M. & Duerr, E. K. 2001 In *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Terahertz Sources and Systems* (ed. R. E. Miles, P. Harrison & D. Lippens). NATO Science Series, vol. 27, pp. 145–165. Dordrecht: Kluwer.
- Woodward, R. M., Cole, B., Wallace, V. P., Arnone, D. D., Pye, R., Linfield, E. H., Pepper, M. & Davies, A. G. 2001 In *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2001)*. Trends in Optics and Photonics, vol. 56, p. 329. Washington, DC: Optical Society of America.
- Wu, Q., Hewitt, T. D. & Zhang, X.-C. 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69**, 1026.
- Wynne, K. & Jaroszynski, D. A. 1999 *Opt. Lett.* **24**, 25.
- Zamdmer, N., Hu, Q., McIntosh, K. A. & Verghese, S. 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75**, 2313.
- Zhao, G., Schouten, N., van der Valk, N., Wenckebach, W. T. & Planken, P. C. M. 2002 *Rev. Scient. Instrum.* **73**, 1715.

Discussion

J. FAIST (*Institute of Physics, University of Neuchâtel, Switzerland*). I did not understand why you were suggesting mixing visible and THz beams inside an electro-optic sampling system.

H. G. ROSKOS. You want to mix a dual-colour laser that emits at its beat frequency in the THz range, and couple this THz signal to a quantum cascade laser frequency. This creates an intermediate, which you compare to the reference signal. You can now either tune the quantum cascade frequency, if you can influence that, or, perhaps more easily, let the dual-colour visible laser follow the quantum cascade laser emission. For the detection, you can either use a photoconductive technique, or possibly perform single-shot imaging with electro-optic crystals.

S. WITHINGTON (*Cavendish Laboratory, University of Cambridge, UK*). You showed very impressive measurements of iron surfaces. I think I am right in saying that there were two methods: one involved putting an aperture at the second focal plane, which picks out one spatial frequency; the other involves an out-of-focus method which is essentially a phase-retrieval technique. My question is whether you considered doing interferometry? At the second focal plane of the lens, you put two detectors, use a common reference beam, and then cross-correlate the two detected beams to get a measurement of the indentation immediately.

H. G. ROSKOS. In the first case, we used beam filtering in the Fourier plane, but it turns out that you do not distinguish between positive and negative curvatures. The second case was indeed an out-of-focus technique, in combination with beam filtering—the funny thing here is that the beam filtering occurs directly in the electro-optic crystal because the optical beam picks out only a small section of the THz wave that is impinging. We are indeed thinking about using different schemes in the Fourier plane, as you suggest.

S. WITHINGTON. I think that doing an interferometric measurement at the second surface would be really exciting and a good thing for someone to try.

J. ALLAM (*Advanced Technology Institute, University of Surrey, Guildford, UK*). Comparing the phase-resolved method, including the photomixers for generation and detection, with the earlier time-resolved method, I believe that both are coherent and both detect the average photocurrent. Would you not expect that the SNR would be essentially the same and therefore the scan time per pixel would be essentially the same?

H. G. ROSKOS. In hindsight this is indeed the case, but originally people argued that in the femtosecond systems there would always be a long dark time which would play an important role. It actually turns out that this is not important.

J. ALLAM. All things being equal, the low-temperature-grown GaAs photomixers that you use might in fact work better for your CW system. You do not have the very high instantaneous optical flux and carrier density; you therefore suffer less from screening effects, and you might be able to squeeze out more power.

H. G. ROSKOS. When people used silicon-on-sapphire as photomixers, the carriers were trapped for periods of nanoseconds. In femtosecond systems you do not mind because they will have recombined before the next pulse comes. However, in a CW system, this could lead to a large build-up of fixed charge and screening of the bias field, which made us very anxious initially. In fact, we have undertaken specific optical-pump THz probe measurements with our low-temperature GaAs photomixers. We find that the carriers have recombined, in all cases, after 10 ps. So screening does not play a role. But I am convinced, although we did not try it, that silicon-on-sapphire would not work for CW THz generation.

D. M. MITTLEMAN (*Department of Electrical and Computer Engineering, Rice University, Houston, TX, USA*). I actually have almost the same question, but I am going to phrase it slightly differently! Why is your system not as fast as the femtosecond systems? It seems that the fastest pixel- or waveform-acquisition rate for the femtosecond systems is now up to about 10 000 waveforms per second, and the limiting factor is just how fast can you shake a mirror over a small optical delay. You ought to have the same sort of performance.

H. G. ROSKOS. It comes down in the end to how efficient the THz wave generation actually is. If you think about the photocurrents that you are driving, we would always expect 10^{-4} less power in a CW system, because the current squared should give you the emitted power. But this is not found, and I do not understand why.

G. FLINN (*TOPTICA Photonics AG, Munich, Germany*). Coming back to the semiconductor system where you have a two-colour laser and are using a broad area diode,

can you guarantee that you are going to have a similar spatial mode inside your resonator for the two wavelengths?

H. G. ROSKOS. Indeed, the overlap and the exact beam profiles are an issue, and the step that has still to be performed is to couple the radiation into a fibre and see how efficiently this really works. But I am very positive that this is going to work. People nowadays can integrate laser amplifiers into laser oscillators and get to single lateral and longitudinal modes at hundreds of milliwatts of power. One should be able to replicate this kind of technology in the THz field.