

Miniaturisierter, hochempfindlicher E-Feld-Sensor mit Glasfaser-Zuleitung

Optische Energieversorgung und Signalabführung minimiert Feldstörung, VCSEL als Transmitter

A.04

Der Beitrag beschreibt einen aktiven E-Feld-Sensor, der primär für den Einsatz in wässrigen Medien (z. B. biologisches Gewebe) entwickelt wurde. Kernstück des Sensors ist eine Laserdiode, die durch das von den Dipolelektroden empfangene Signal moduliert wird. Die Energieversorgung des Sensors und die Signalabführung erfolgen rein optisch über Glasfasern, um die Feldstörung durch die Zuleitung zu minimieren. Bei einer Messfrequenz von 100 MHz und einer Messbandbreite von 1 Hz wurde in Wasser eine Empfindlichkeit (Eigenrauschen) von $50 \mu\text{V}/\text{m}$ und ein Dynamikbereich von 130 dB erreicht.

Zur Messung bzw. Verifizierung der Nahfeldverteilungen von Antennen, für allgemeine EMV-Anwendungen und insbesondere im medizintechnischen Bereich der Krebstherapie mittels Hyperthermie durch elektromagnetische Wellen [1] werden E-Feld-Sensoren benötigt, die nicht nur die Amplitude der Feldstärke messen (gleichrichtende Sensoren), sondern bei CW-Signalen auch die Phasenlage bezogen auf ein Referenzsignal, die Polarisation einer Welle bzw. den exakten Zeitverlauf eines beliebigen Signals mit Bandbreiten bis in den GHz-Bereich. Dabei ist eine weitere Auswertung mittels Oszilloskop, Spektrumsanalysator o. ä. möglich.

Derartige Sensoren wurden bisher hauptsächlich unter Ausnutzung des linearen elektro-optischen Effekts (Pockels-Effekt) als integriert-optische Sensoren auf LiNbO_3 -Basis vorgestellt [3,2]. Als nachteilig erweisen sich dabei technologische Schwierigkeiten, die zu hohen Kosten führen, des Weiteren haben die Sensoren trotz Abmessungen von oft mehreren Zentimetern keine sehr hohen

Empfindlichkeiten (Eigenrauschen in der Größenordnung von $1 \text{ mV}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$).

Ein anderer Ansatz sind aktive Sensoren, die als Kernkomponente einen elektrooptischen Wandler (LED, IRED, Laser) enthalten, welcher vom Feld moduliert wird [4,5,6]. Das von diesem Wandler erzeugte Licht wird über eine optische Faser vom Sensor abgeführt und in der Auswerteeinheit in ein elektrisches Signal rückgewandelt. Für eine lineare Modulation der LED (IRED) bzw. des Lasers erfordern diese Bauteile einen Vorstrom, d. h. eine Sensor-Energieversorgung. Zweckmäßigerweise verwendet man, wenn minimale Abmessungen des Sensors gefordert sind, eine externe Energieversorgung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Zuleitung das zu messende Feld nur minimal stören darf. Eine direkte elektrische Energieversorgung (Drähte) kommt daher nicht in Betracht. Eine sinnvolle Alternative ist eine optische Versorgung [6,4].

Aufbau des Sensors

Abb. 1 zeigt den Aufbau des Sensors. Das Licht einer 35-W-Halogen-Metaldampflampe wird mittels zweier Asphären in ein Faserbündel eingekoppelt (Durchmesser 2,4 mm, numerische Apertur 0,58). Das Faserbündel leitet das Licht zu einem Solarzellenarray im Sensor. Es besteht aus acht in Reihe geschalteten Si-Zellen. Durch eine Veränderung der Lampenposition bzw. Linseneinstellung kann die in das Faserbündel eingekoppelte Lichtleistung eingestellt werden und damit der von den Solarzellen lieferbare Strom. Mit einem Widerstand (R_1) wird der Strom begrenzt, um eine Zerstörung der Laserdiode zu vermeiden.

Des Weiteren entkoppelt der Widerstand die Antenne und die Laserdiode von dem Solarzellenarray, welches für hochfrequente Signale näherungsweise einen Kurzschluss darstellt.

Als Laserdiode wurde erstmalig für eine derartige Anwendung ein VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) verwendet. Einige Parameter des eingesetzten Typen sind: Schwellstrom $I_{th} \approx 3 \text{ mA}$, Wellenlänge $\lambda = 850 \text{ nm}$, differentieller Widerstand $R_{laser} = dU/dI = 40 \text{ bis } 50 \text{ Ohm}$ ($I > I_{th}$), differentielle Effizienz $k_{laser} = dP/dI \approx 0,3 \text{ W/A}$, RIN (relative intensity noise) $< -130 \text{ dB/Hz}$.

Die Dipolantenne besteht aus zwei parallelen dünnen Metallelektroden von je $5,5 \times 5 \text{ mm}^2$ in einem Abstand von $d = 5 \text{ mm}$ (Abb. 2). Im Vergleich zu dünnen Dipolstäben führen die flächigen Elektroden zu einer deutlich größeren Antennenkapazität, wodurch die Sensorempfindlichkeit vergrößert wird. Der gesamte Sensor ist mit einer dünnen Polymerschicht umhüllt, die insbesondere als ESD-Schutz für den VCSEL dient.

Theoretische Betrachtungen

Der Sensor wurde primär für die Hyperthermie-Kontrolle [1], d. h. für Anwendungen in wässrigen Medien bei Frequenzen um 100 MHz entwickelt. Die Empfindlichkeit des Sensors (Ausgangssignal des Transimpedanzverstärkers TIA bezogen auf die Feldstärke) kann dafür wie folgt berechnet werden:

Die Impedanz der Antenne (Sensor in Wasser) wird durch eine Kapazität von etwa 3 pF dargestellt. Dieser Wert unterliegt großer Varianz; er kann um einen Faktor 2 variieren, da er sehr stark von der Dicke der Polymer-

Autoren

Prof. Dr.-Ing. KLAUS PETERMANN
Dipl.-Ing. WIELAND MANN
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Hochfrequenztechnik, Sekr. HFT 4
Einsteinufer 25, 10587 Berlin
Fon: 030/314-26817, Fax 030/314-24626
mann@hft.ee.tu-berlin.de

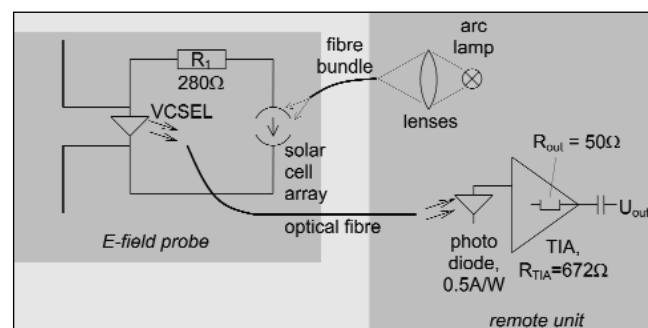


Abb. 1:
Funktionsprinzip
des Sensors bzw.
Sensorsystems

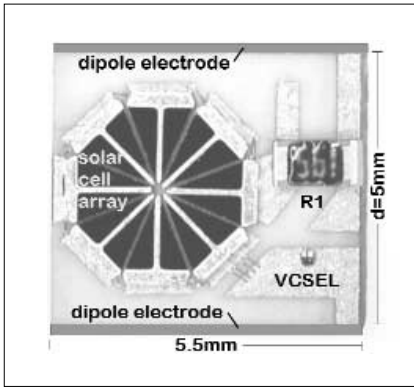


Abb. 2: Trägersubstrat des Sensors mit Solarzellenarray, Widerstand und VCSEL, die Dipolelektroden stehen senkrecht zur Bildebene

umhüllung des Sensors abhängt. Die parasitäre Kapazität des VCSELS wird vernachlässigt. Weiterhin wird angenommen, dass die Solarzellen bei 100 MHz aufgrund ihrer großen Kapazität wie ein Kurzschluss wirken. Die sich ergebende Ersatzschaltung zeigt die Abbildung 3.

Wegen der verhältnismäßig großen Fläche der Dipolelektroden ist die Antennenspannung U_{ant} in guter Näherung gleich $E \cdot d$. Tatsächlich kommt es wegen des Unterschiedes in den Dielektrizitätskonstanten von umgebendem Medium (Wasser) und dem Füllmaterial des Sensors (Polymer) zu einer Feldüberhöhung im Sensor, so dass die Spannung etwas größer ist.

Bei Berücksichtigung der in Abb. 1 angegebenen Werte und unter der Annahme, dass bei der optischen Signalübermittlung keine Verluste auftreten, ergibt sich die Ausgangsspannung des TIA bei 100 MHz zu $U_{out} = 0,80 \text{ mm} \cdot E$. Im 50-Ohm-System (Ausgangswiderstand des TIA) entspricht dies einer Empfindlichkeit von $-49 \text{ dB}(\sqrt{\text{mW}}/(\text{V/m}))$.

Die maximale Feldstärke, bis zu der die Sensorkennlinie linear ist, wird dadurch begrenzt, dass ab einer bestimmten Amplitude der VCSEL-Strom in jeder Periode zeitweise unter den Schwellstrom I_{th} sinkt, so dass das (optische) Ausgangssignal des VCSELS nicht länger zeitharmonisch verläuft. Die maximale Feldstärke ist offensichtlich vom VCSEL-Biasstrom abhängig. Für $P_{opt,DC} = 400 \mu\text{W}$ wurde sie zu $41,5 \text{ dB}(\text{V}_{eff}/\text{m}) \approx 120 \text{ V}_{eff}/\text{m}$ berechnet, für z.B. $P_{opt,DC} = 200 \mu\text{W}$ ist sie entsprechend halb so groß ($35,5 \text{ dB}(\text{V}_{eff}/\text{m}) \approx 60 \text{ V}_{eff}/\text{m}$).

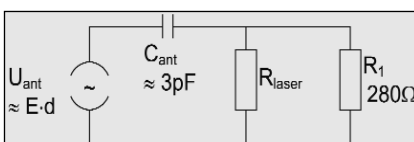


Abb. 3: Vereinfachtes Kleinsignal-Ersatzschaltbild

Da der VCSEL-Widerstand R_{laser} und die Antennenkapazität C_{ant} einen Hochpass mit einer Grenzfrequenz von etwa 1 GHz bilden, nimmt bis zu dieser Frequenz die Empfindlichkeit proportional zur Frequenz (20 dB/Dekade) zu. Oberhalb 1 GHz ist die Wellenlänge in Wasser nicht mehr wesentlich größer als der Sensor selbst, so dass der Sensor bis zu dieser Frequenz eingesetzt werden kann.

Messergebnisse und Diskussion

Empfindlichkeit, Rauschen und Dynamikbereich

Zunächst wurden die Empfindlichkeit, das Sensor-Eigenrauschen und der Dynamikbereich bei einer festen Frequenz von 100 MHz gemessen. Für die Felderzeugung wurde eine wassergefüllte TEM-Zelle wie in [7] beschrieben benutzt. Die Entladungslampe und Optik wurden so eingestellt, dass der VCSEL eine Leistung von $P_{opt,DC} = 400 \mu\text{W}$ emittierte (Biasstrom ca. 4,5 mA).

Abbildung 4 zeigt das gemessene TIA-Ausgangssignal U_{out} (dBm im 50-Ohm-System) als Funktion der Feldstärke E . Die Auflösungsbandbreite RBW (resolution bandwidth) des Spektrumsanalysators war 100 Hz, die äquivalente Rauschbandbreite NPBW (noise power bandwidth) 113 Hz.

Die experimentell bestimmte Empfindlichkeit ist – in guter Übereinstimmung mit dem theoretisch ermittelten Wert – gleich $-50,0 \text{ dB}(\text{m}\sqrt{\text{V}}/(\text{V/m}))$. Das Rauschen liegt bei $-114,5 \text{ dBm}$ entsprechend einer Rauschleistungsdichte von -135 dBm/Hz (113 Hz NPBW). Dies entspricht einer rauschäquivalenten Feldstärke von $-85 \text{ dB}(\text{V}/(\text{m}\sqrt{\text{Hz}})) \approx 56 \mu\text{V}/(\text{m}\sqrt{\text{Hz}})$. Der 1-dB-Kompressionspunkt wird bei einer Feldstärke von $E_{1\text{dB}} = 44 \text{ dB}(\text{V}/\text{m}) \approx 158 \text{ V}/\text{m}$ erreicht. Dies ergibt bei einer Messbandbreite von 1 Hz einen Dynamikbereich von 129 dB.

Abbildung 5 zeigt den Linearitätsfehler für $P_{opt,DC} = 400 \mu\text{W}$, wobei im Bereich $-50 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ bis $+40 \text{ dB}(\text{V}/\text{m})$ die Abweichung von einer ideal flachen Linie durch die Ungenauigkeit der Messgeräte und nicht durch tatsächliche Linearitätsfehler des Sensors verursacht wird.

Das Rauschen von -135 dBm/Hz entspricht einem äquivalenten Rauschstrom durch die Photodiode von $56 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$. Der Gleichanteil des Photostroms war $I_{ph,DC} = 200 \mu\text{A}$, was ein Schrotrauschen von $8 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ergibt. Das Rauschen des TIA kann vernachlässigt werden. Damit ist die dominierende Rauschquelle das RIN des VCSEL. Mit den o.g. Werten ist dieses gleich -131 dB/Hz . Da die von den Solarzellen gelieferte Span-

nung nicht stabilisiert wurde, kann auch eine verrauschte Versorgungsspannung zum Gesamt-RIN beitragen.

Änderungen des VCSEL-Biasstroms

Die Messungen wurden mit verschiedenen VCSEL-Biasströmen wiederholt ($P_{opt} = 200, 400, 500, 600$ and $700 \mu\text{W}$). Diese wurden durch eine Neujustierung der Lampenposition eingestellt. Für zunehmende Biasströme war folgendes zu beobachten:

- ▶ Die Sensorempfindlichkeit wird kleiner. Da die (gemessene) I - P_{opt} -Kennlinie des VCSELS nur sehr geringe Abweichungen von einer ideal linearen Kennlinie aufweist und damit die differentielle Effizienz dP_{opt}/dI nahezu unabhängig vom Biasstrom ist, handelt es sich offenbar um einen thermischen Effekt. Bei Erhöhung der auf die Solarzellen eingestrahlten Lichtleistung erhöht sich die gesamte Sensortemperatur, da bis auf die relativ kleine (optische) VCSEL-Ausgangsleistung sämtliche Energie in Wärme umgewandelt wird. Dies verringert die VCSEL-Effizienz und damit die Sensorempfindlichkeit.
- ▶ Das Rauschen am TIA-Ausgang nimmt leicht zu, entsprechend einer Vergrößerung der rauschäquivalenten Feldstärke.
- ▶ Der 1-dB-Kompressionspunkt verschiebt sich zu höheren Feldstärken. Damit vergrößert sich – trotz des stärker werdenden Rauschens – der Dynamikbereich.

Frequenzgang, Messgenauigkeit

Aufgrund von Feldinhomogenitäten innerhalb der TEM-Zelle haben die gemessenen Werte eine Absolutunsicherheit von etwa 1 dB. Die relative Genauigkeit wird von den Inhomogenitäten nicht beeinträchtigt und ist aufgrund des angewandten differentiellen Messverfahrens sehr hoch (Größenordnung 0,1 dB).

Die genannten Messungen wurden bei 100 MHz durchgeführt. Messungen des Frequenzganges im Bereich 70 bis 350 MHz zeigten weitgehende Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen.

Zusammenfassung

Der vorgestellte aktive elektro-optische E-Feld-Sensor nutzt ausschließlich Glasfaserverbindungen zur Energieversorgung und Signalübermittlung, um die Feldstörung durch die Zuleitung zu minimieren. Erstmals wurde als aktives Element (elektro-optischer Wandler) ein VCSEL mit niedrigem Schwell-

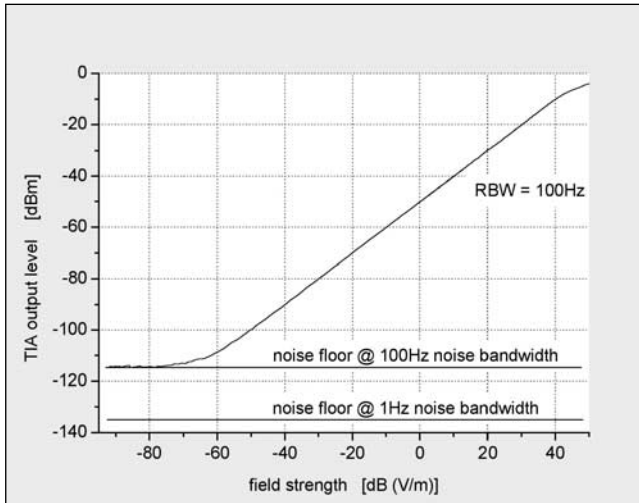


Abb. 4: TIA-Ausgangsspannung vs. Feldstärke ($P_{opt,DC} = 400 \mu W$, $f = 100 \text{ MHz}$, Sensor im Wasser)

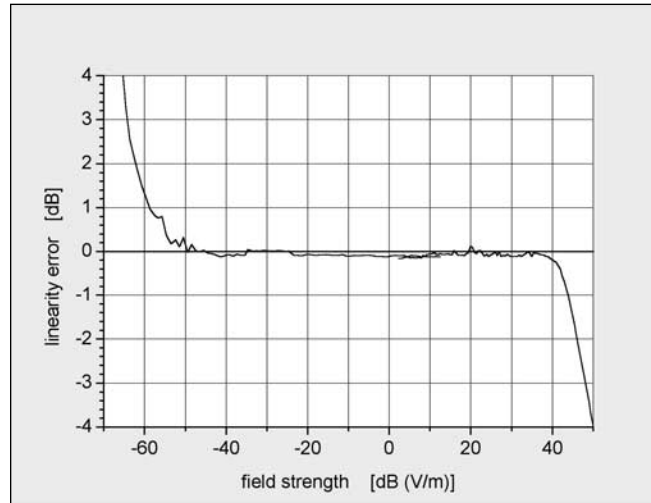


Abb. 5: Linearitätsfehler

strom eingesetzt. Bei einer Sensorgröße von ca. $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ wurde ein Eigenrauschen von $50 \mu V / (m \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ (rauschäquivalente Feldstärke) sowie ein 1-dB-Kompressionspunkt von 150 V/m gemessen, entsprechend einem Dynamikbereich von fast 130 dB (1 Hz Messbandbreite; Messung bei 100 MHz in Wasser). Der Dynamikbereich ist durch das RIN des VCSEL begrenzt.

Für den Einsatz des Sensors in Luft ist zu erwarten, dass die Empfindlichkeit aufgrund der dann geringeren Antennenkapazität um ca. 30 bis 40 dB abnimmt. Weiterhin hat der Sensorfrequenzgang prinzipbedingt Hochpasscharakter. Diese Nachteile können durch den Einsatz eines Vorverstärkers mit FET-Eingang vermieden werden. **TEST**

Literatur

- [1] Wust, P., Seebass, M., Nadobny, J., Felix, R.: Electromagnetic deep heating technology. In: Seegenschmiedt, Fessenden, Vernon, eds. Medical radiology, principles and practice of thermoradiotherapy thermochemotherapy. Vol. I. Berlin: Springer Verlag, 1995. pp 219-251
- [2] Meier, T.; Kostrzewa, C.; Petermann, K.; Schüppert, B.: Integrated optical E-field probes with segmented modulator electrodes. Journal of Lightwave Technology, Volume 12, Issue 8, Aug. 1994, pp. 1497-1503
- [3] Kanda, M.; Masterson, K.D.: Optically sensed EM-field probes for pulsed fields. Proceedings of the IEEE, Volume 80, Issue 1, Jan. 1992, pp. 209-215
- [4] Kruse, K.-D., Haseborg, J.L. ter, Nedtwig, J.: Ein nur optisch versorgter (isotroper) elektro/optischer Sensor fuer EMV/EMP-Messungen. EMV Konferenz 1988 Karlsruhe, Germany. Hüthig
- [5] Silva, F.; Sanchez, E.; Riu, P.J.; Pallas-Areny, R.: Low-cost near-field probe for simultaneous E and H measurement with analog optical link. IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 533-536
- [6] Svedin, J.; Onnegren, J.: A wide-band electro-optical E-field probe powered by a solar cell. International Topical Meeting on Microwave Photonics, 1996. Technical Digest. pp. 21-24
- [7] Berger, J.; Pouhe, D.; Mönich, G.; Föhling, H.; Wust, P.; Petermann, K.: Calibration cell for E-field sensors in water environment. Electronics Letters, Volume 35, Issue 16, 5 Aug. 1999, pp. 1317-1318

www.publish-industry.net

more @ click TK3A0401

LESERTIPP

? **Sie suchen gezielt nach Beiträgen zu bestimmten Themenfeldern?**

**Das Themenregister am Anfang des Heftes
und die entsprechenden Griffmarken am Seitenrand
helfen Ihnen bei der schnellen Suche. Für tiefergreifende Fragen
kontaktieren Sie den entsprechenden Autoren –
er ist informiert und freut sich auf ein Gespräch mit Ihnen!**

publish industry
TECHNIK KOMMUNIZIEREN

Gollierstraße 23 · D-80339 München · Fon. +49/89/500383-0 · Fax. +49/89/500383-10 · info@publish-industry.net · www.publish-industry.net