

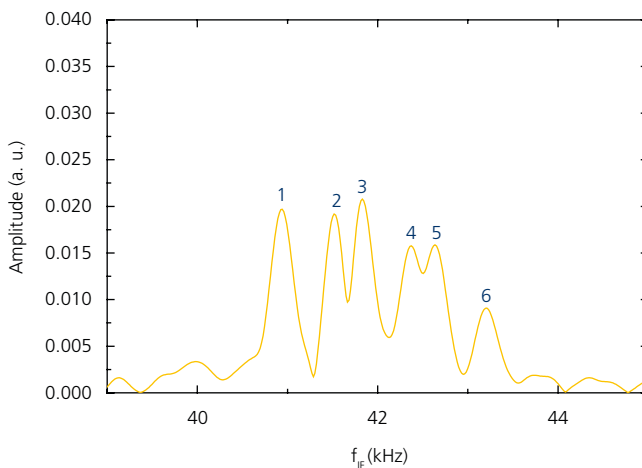
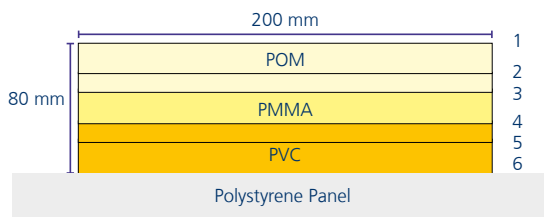
RADAR SYSTEMS FOR MATERIALS ANALYSIS

CHRISTIAN ZECH

TEL. +49 761 5159-416

CHRISTIAN.ZECH@IAF.FRAUNHOFER.DE

Due to their unique properties, millimeter-waves offer new possibilities to extend materials analysis methods. It is possible to realize remote analysis methods which are able to work under reduced optical visibility conditions, such as dust, fog or smoke, while featuring high resolution due to the high frequency range between 30 GHz and 300 GHz. To open new markets for millimeter-wave applications, the currently high production costs have to be lowered. This can be done by realizing multifunctional MMICs, and most importantly, by developing new cost-efficient packaging technologies for frequencies of 100 GHz and above.



1 Intermediate frequency spectrum of a multilayered stack of plastic materials.

Zwischenfrequenzspektrum verschiedener Plastikschichten im Mehrlagenaufbau.

In Germany, more than 23,000 wind power plants have already been installed (as of late 2012) and numerous additional plants will be realized within the next years. However, there is still no suitable method to detect and visualize possible defects in their rotary wings – neither at the production stage nor during operation.

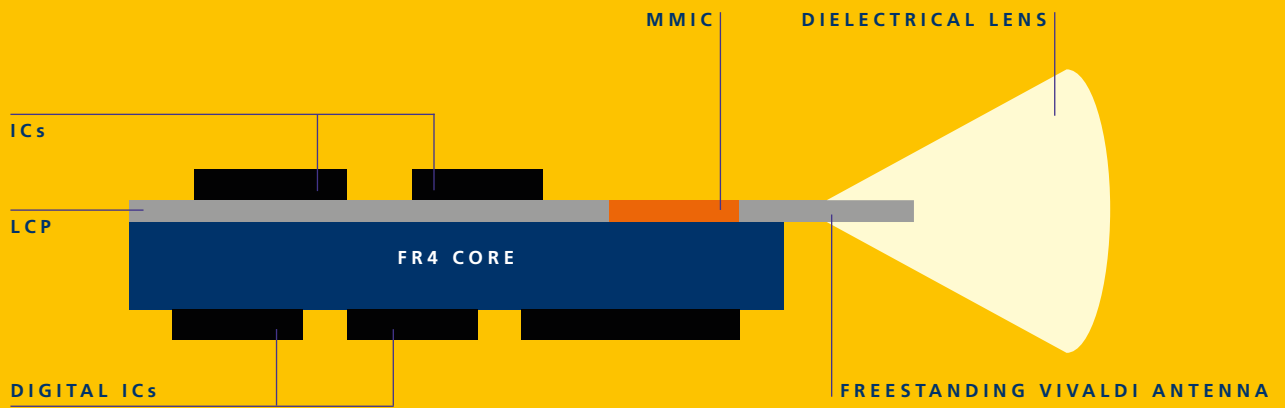
Millimeter-waves offer great possibilities for remote, non-destructive analysis of plastic laminates, since they provide high penetration depths at an adequate resolution. Fraunhofer IAF has been intensifying its research on this topic for several years. A key challenge in modern material sensing is remote, non-destructive detection of delamination in compound materials such as fiber glass reinforced plastics. These laminates are not only widely used in the production of rotary wings of wind power plants, but also in aerospace or automotive applications. Reflecting interfaces as well as irregularities within multilayer structures can be detected using a frequency modulated continuous wave (FMCW) radar. Fig. 1 shows the intermediate frequency (IF) spectrum corresponding to the measurement of a multilayered stack of plastic materials. Although the plastics do not significantly differ in their dielectric properties, peaks corresponding to the interfaces between all the layers are clearly visible. By scanning a sample using millimeter-waves and evaluating the position and amplitude of the peaks in the IF spectra, detailed images

RADARSYSTEME FÜR DIE MATERIALANALYSE

Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften sind Millimeterwellen ($30 \text{ GHz} < f < 300 \text{ GHz}$) dazu geeignet, bestehende Verfahren zur Materialanalyse zu verbessern. Es ist möglich, berührungslose Analysen selbst unter schlechten optischen Sichtbedingungen, z. B. bei Staub, Nebel oder Rauch, durchzuführen, bei einer gleichzeitig hohen Ortsauflösung. Um neue Märkte für Millimeterwellenanwendungen zu erschließen, ist es erforderlich, die momentan hohen Produktionskosten zu reduzieren. Dies ist durch die Realisierung multifunktionaler monolithisch integrierter Millimeterwellenschaltungen möglich. Wichtiger ist jedoch die Entwicklung neuer, kostengünstiger Aufbautechnologien für Frequenzen um und über 100 GHz.

Im Zuge der Energiewende sind in Deutschland bereits mehr als 23 000 Windkraftanlagen installiert worden (Stand Ende 2012), weitere Anlagen sollen in den nächsten Jahren aufgebaut werden. Eine hundertprozentige Betriebssicherheit der kontinuierlich steigenden Anzahl an Windkraftanlagen kann nicht sicher gestellt werden, zuverlässige Methoden zur Detektion von Materialdefekten in den Rotorblättern stehen bislang nicht zur Verfügung – weder während der Produktion, noch im Betrieb.

Millimeterwellen bieten eine gute Möglichkeit zur berührungs- und zerstörungsfreien Analyse von Materialien. Aufgrund ihrer Wellenlänge können hohe Eindringtiefen bei gleichzeitig guter Auflösung erzielt werden. Am Fraunhofer IAF wird daher seit Jahren die Forschung zum Einsatz von Millimeterwellen in der Materialanalyse vertieft. Eine Kernaufgabe der modernen Materialforschung stellt die berührungs- und zerstörungsfreie Detektion von Delaminationen in Verbundmaterialien, beispielsweise in glasfaserverstärkten Kunststoffen, dar. Diese Materialien werden nicht nur in der Produktion von Rotorblättern für Windkraftanlagen eingesetzt, sie finden auch zunehmend Einsatz im Automobil- und Luftfahrtbau. Reflexionen an Grenzschichten sowie Unregelmäßigkeiten in Mehrlagenaufbauten können mithilfe von frequenzmodulierten Dauerstrichradaren (FMCW-Radar) detektiert werden. Abb. 1 zeigt das Zwischenfrequenzspektrum (ZF-Spektrum) einer Messung verschiedener Kunststoffe im Mehrlagenaufbau. Obwohl sich die Materialien nicht stark in ihren dielektrischen Eigenschaften unterscheiden, sind den Grenzflächen zwischen den Lagen klare Peaks im ZF-Spektrum zuzuordnen. Durch sukzessives Abtasten einer Probe und anschließender Auswertung der gemessenen Peaks können detaillierte Bilder einzelner Grenzschichten in Mehrlagenaufbauten erstellt werden. Hierdurch wird es möglich, kleine Defekte im Material, wie Lufteinschlüsse oder Delaminationen, zu erkennen. Durch die Entwicklung von kompakten und kostengünstigen Millimeterwellenradaren kann die Materialanalyse erweitert und verbessert werden, sodass Materialfehler zukünftig bereits während der Produktion zuverlässig erkannt werden können.



2

of single interfaces within multilayer structures can be created in order to identify small defects such as voids or delamination. Therefore, the development of compact and cost-efficient millimeter-wave radar sensors will widen the scope of high end materials testing as well as production surveillance.

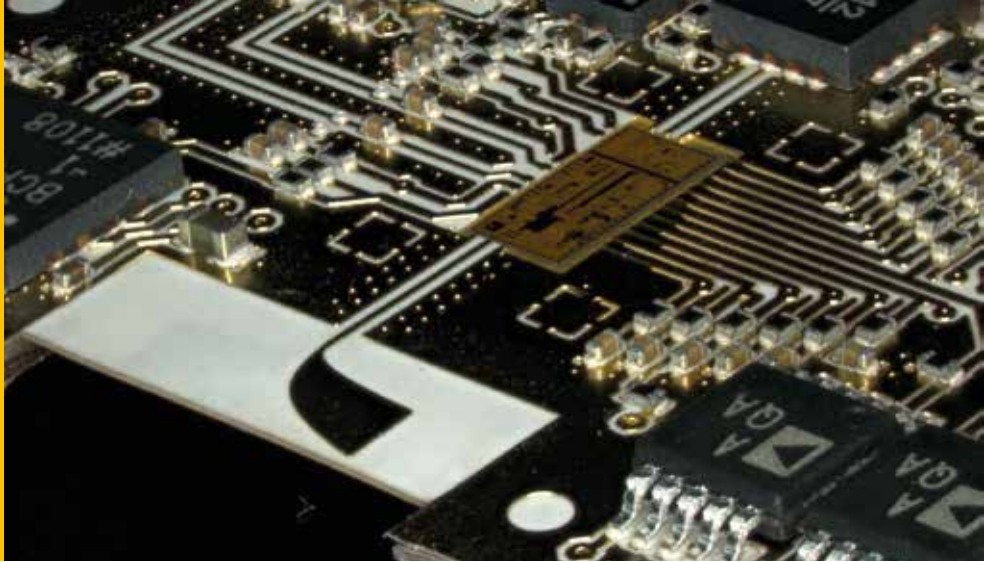
Nowadays, the manufacturing of monolithic millimeter-wave integrated circuits (MMICs) as well as their packaging technologies are still very costly. While the manufacturing costs of MMICs will be reduced automatically in mass production (assuming according demand), new cost-efficient packaging technologies need to be developed.

Millimeter-wave applications are currently dominated by waveguides, while MMICs are packaged in split-block modules including waveguide transitions. Waveguides offer low signal attenuation with the drawback of high production costs, as they are based on precision milled mechanical components. An interesting alternative is embedding MMICs into printed circuit boards (PCBs) while handling the millimeter-wave signal directly onboard. Legacy board materials (such as FR4) are impossible to use due to their high dielectric attenuation at frequencies above 10 GHz. Liquid-crystal-polymer (LCP)-based boards seem to offer good performance to address PCBs working at frequencies of 100 GHz and above. Although an LCP substrate will be more expensive than an FR4 one, it will drastically reduce packaging cost compared to waveguide technology. The challenge is to handle 50 μm thin LCP substrates which are necessary to avoid substrate modes. A 50 μm thin layer of LCP can be imagined as a sheet of paper.

Together with Fraunhofer IPA and IZM, Fraunhofer IAF is working on the development of LCP-based PCBs for millimeter-wave applications. Fig. 2 shows a schematic cross-section of a prototype LCP-based millimeter-wave PCB for 94 GHz radar applications. Mechanical stability is ensured by a low-cost FR4 core which is laminated under the LCP substrate. The millimeter-wave signal only comes into contact with the upper LCP substrate; the top metallization is used for signal routing, the bottom metallization functions as enclosed analog ground plane.

Fig. 3 shows a manufactured prototype LCP-based PCB for a 94 GHz FMCW radar application. The PCB, which contains the entire analog front end, has a compact size of 35 x 40 mm². In the middle of the photograph, an embedded 94 GHz MMIC can be seen. The PCB furthermore features an integrated broadband Vivaldi antenna which does not require a transition to an external antenna. To adjust the millimeter-wave beam's opening angle, a dielectric cone with integrated lens shape is used for beam forming.

The LCP-based millimeter-wave PCB including the dielectric lens and a digital signal processor (DSP) is packaged in a housing of only 45 x 80 x 20 mm³, resulting in a miniature sized W-band (75 – 110 GHz) radar sensor. Due to the integrated signal processing of the DSP, the sensor will feature standardized digital connections. In this way, the millimeter-wave PCB technology improves the conventional waveguide technology in terms of cost, size, weight, and system complexity.



3

2 Schematic cross-section of liquid-crystal-polymer-based RF-printed circuit board.

Schematischer Querschnitt einer Flüssigkristallpolymer-basierten Hochfrequenz-Leiterplatte.

3 94 GHz FMCW radar on a printed circuit board.

94-GHz-FMCW-Radar auf einer Leiterplatte.

Die Herstellung monolithisch integrierter Millimeterwellenschaltungen (MMICs) sowie die entsprechende Aufbautechnik sind kostspielige Technologien. Die Kosten pro MMIC sinken automatisch bei einer Herstellung in Massenproduktion. Eine Kostensenkung in der Aufbautechnik kann nur durch die Entwicklung neuer, kostengünstiger Aufbautechnologien erzielt werden.

Heutzutage werden Millimeterwellenanwendungen von Hohlleitern dominiert. MMICs werden in Split-Block-Modulen aufgebaut, die einen entsprechenden Hohlleiterübergang besitzen. Die Hohlleitertechnologie zeichnet sich durch sehr geringe Dämpfungsverluste aus, ist jedoch auch sehr kostenintensiv in der Herstellung, da sie auf präzisionsgefrästen mechanischen Bauteilen basiert. Eine vielversprechende Alternative bietet das direkte Einbetten von MMICs in Leiterplatten. Herkömmliche Leiterplattenmaterialien (z. B. FR4) sind aufgrund ihrer hohen dielektrischen Dämpfung für Frequenzen oberhalb von 10 GHz ungeeignet. Flüssigkristallpolymer (LCP)-basierte Platinen bieten eine hervorragende Performance zur Realisierung von Anwendungen bis über 100 GHz. Obwohl LCP-Substrate teurer als FR4-Substrate sind, würden sich die Herstellungskosten von Millimeterwellenaufbauten, verglichen zur Hohlleitertechnologie, deutlich reduzieren. Eine Herausforderung besteht in der Verarbeitung von LCP-Substraten mit einer maximalen Dicke von 50 µm, die erforderlich ist, um bei höchsten Frequenzen Substratmoden zu vermeiden. Eine 50 µm dünne LCP-Lage kann man sich etwa wie ein Blatt Papier vorstellen.

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPA und IZM entwickeln wir LCP-basierte Leiterplatten für Millimeterwellenanwendungen. Abb. 2 zeigt den schematischen Querschnitt eines Prototyps für 94-GHz-Radaranwendungen. Um die mechanische Stabilität der Platine zu garantieren, wird ein kostengünstiger FR4-Kern unter die LCP-Lage laminiert. Das Millimeterwellensignal kommt auf der Platine nur mit der LCP-Lage in Kontakt; die Metallisierung der Oberseite wird zur Signalführung verwendet, die Unterseite bildet eine geschlossene Massefläche. Abb. 3 zeigt den gefertigten Prototyp. Hierbei beinhaltet die Platine das gesamte analoge Front-End, bei einer kompakten Größe von 35 x 40 mm². In der Mitte ist ein eingebetteter 94-GHz-Radar-MMIC zu erkennen. Auf der Platine ist zudem eine breitbandige Vivaldi-Antenne integriert, sodass kein Übergang zu einer externen Antenne oder zu Hohlleiterkomponenten erforderlich ist. Um den Öffnungswinkel des ausgesendeten Millimeterwellenstrahls an die Anwendung anzupassen, wird ein dielektrischer Konus mit integrierter Linienstruktur eingesetzt, der auf die Antenne gesteckt wird. Die LCP-basierte Millimeterwellenplatine wird mit der dielektrischen Linse und einem digitalen Signalprozessor (DSP) in einem Gehäuse aufgebaut, woraus sich ein miniaturisierter W-Band (75 GHz – 110 GHz)-Radarsensor mit einer sehr geringen Gesamtgröße von 45 x 80 x 20 mm³ ergibt. Mithilfe des Radar-MMICs in Kombination mit dem DSP ist es möglich, Signalerzeugung und -auswertung auf kleinstem Raum für verschiedenste Anwendungen zu vereinen. Damit übertrifft die LCP-basierte Millimeterwellenleiter-Plattentechnologie die herkömmliche Hohlleitertechnologie hinsichtlich Kosten, Größe und Gewicht und ermöglicht »intelligentere« Module.