

■ Schwingend Magnetfelder messen

Ein Federbalken lässt sich in einen magnetischen Sensor verwandeln, der voll integrierbar ist.

Mikroelektromechanische Systeme mit integrierter magnetischer Komponente (MagMEMS) sind für die Sensorik interessant. Verschiedene Forschergruppen haben bereits das Prinzip demonstriert. Allerdings hatten diese Ansätze den Nachteil, dass sie nicht vollständig integrierbar waren, weil ein externes magnetisches Wechselfeld erforderlich war, die erzielten Bandbreiten gering ausfielen oder die mechanische Resonanzfrequenz des Sensors verhinderte, dass sich auch niederfrequente Magnetfelder nachweisen ließen. Gerade solche Magnetfelder

FeCoSiB zeigt einen relativ starken sog. Delta-*E*-Effekt: Durch ein äußeres Magnetfeld sinkt das Elastizitätsmodul des ferromagnetischen Materials. Der Grund ist die Magnetostraktion, durch die sich die Weisschen Bezirke – die magnetisierten Domänen eines Ferromagneten – in einem äußeren Magnetfeld ausrichten. Weil sich die Dipole drehen, ändert sich dabei die Länge des Ferromagneten. Letztlich ist die Ursache dafür in der Spin-Bahn-Kopplung zu finden.

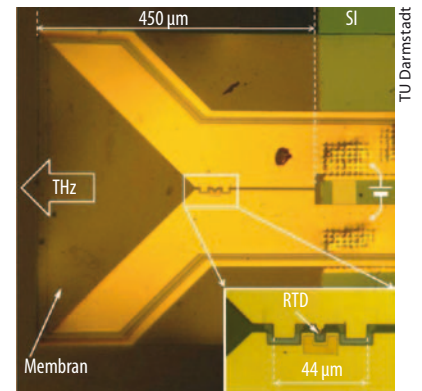
Aufgrund des Delta-*E*-Effekts verändert ein magnetisches Wechselfeld die Resonanzfrequenz des beschichteten Mikrobalkens und damit dessen Amplitude. Messen lässt sich das bequem mit einer Laserdiode, die in einem Rasterkraftmikroskop die Auslenkung des Cantilevers detektiert. Prinzipiell könnte die Messung aber auch über eine zweite, piezoelektrische Schicht auf dem Federbalken erfolgen – was wichtig unter dem Gesichtspunkt der Integration ist. Der Kieler Demonstrator arbeitet linear für quasistatische Magnetfelder bis zu Wechselfeldern mit einigen Kilohertz Frequenz.

■ Hochgetakteter Emitter

Ein integrierter THz-Sender strahlt bei einer neuen Rekordfrequenz.

Terahertz-Strahlung stößt in der jüngsten Vergangenheit auf großes Interesse in Forschung und Industrie. Dass sich mit elektromagnetischen Wellen zwischen einem Zehntel Millimeter und einem Millimeter Wellenlänge viele Materialien zerstörungsfrei und ohne Strahlenbelastung untersuchen lassen, war schon lange klar. Inzwischen gibt es aber zunehmend die erforderlichen Bauelemente und Technologien, um integrierte THz-Systeme aufzubauen. Anwendungen in der medizinischen Diagnostik und der Materialprüfung profitieren davon.

Wissenschaftler der TU Darmstadt haben einen THz-Sender als Demonstrator entwickelt, der bei



Der THz-Sender ist auf einen Siliziumhalter (ganz rechts) montiert. In der Vergrößerung ist die Resonanztunnelodiode mit dem Resonator zu sehen.

der höchsten Frequenz strahlt, die ein elektronischer Sender bislang erreicht hat.²⁾ Höhere Frequenzen bedeuten prinzipiell höhere erreichbare Auflösungen. Der Sender emittiert bei 1111 GHz und ist kleiner als ein Quadratmillimeter. Die Forscher haben für ihn eine Resonanztunnelodiode (RTD) mit einem Resonator und einer Antenne auf eine Membran integriert. Sie bedienen sich dazu mehr oder weniger gängiger Herstellungsverfahren der Halbleitertechnologie.

RTDs erreichen heutzutage die höchsten Frequenzen aller aktiven Halbleiterbauelemente. Solche Dioden besitzen zwei Tunnelbarrieren, die nur wenige Nanometer dick sind. Damit ein elektrischer Strom fließen kann, müssen die Elektronen beide Barrieren durchtunneln. Die Wahrscheinlichkeit dafür hängt vom Niveau des quantisierten Energiezustands zwischen den Tunnelbarrieren ab. Durch diesen Aufbau klingen elektrische Schwingungen in einem angekoppelten Oszillator nicht ab, sondern werden immer wieder verstärkt, sodass der Oszillator eine konstante Terahertz-Strahlung emittiert. Bei der Darmstädter RTD bestehen die beiden Barriereschichten aus dem Halbleiter Aluminium-Arsenid, die eingebettete Schicht aus dem Halbleiter Indium-Gallium-Arsenid.

Der Sender erreicht derzeit bei 1111 GHz eine Leistung von 0,1 μW. Das genügt für spektroskopische Anwendungen. Die Wissenschaftler gehen aber davon aus, dass sie künftig Frequenzen um 3 THz



Der Kieler magnetische Sensor ist nur 125 Mikrometer lang. Er ist am Ende des Siliziumchips zu sehen.

zwischen 0,1 und 100 Hz sind aber für biomedizinische Anwendungen oder für die Positionierung von Baugruppen gefragt. Eine Arbeitsgruppe um Franz Faupel von der Christian-Albrechts-Universität Kiel hat nun einen MagMEMS-Demonstrator vorgestellt, der sich vollständig integrieren lässt und eine hohe Bandbreite besitzt.¹⁾

Wie viele andere Forscher bedienen sich die Kieler dabei eines Cantilevers, wie er bei der Rasterkraftmikroskopie als Träger der Messspitze dient. Auf einen solchen kommerziellen Mikrobalken sputterten sie eine 500 nm dünne Schicht einer amorphen FeCoSiB-Legierung. Während des Härstens erzeugten die Wissenschaftler mit einem statischen Magnetfeld eine Vorzugsrichtung in der dünnen Schicht, die parallel zur Längsachse des Mikrobalkens verläuft.

1) B. Gajdka et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 223502 (2011)

2) M. Feiginov et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 233506 (2011)

mit RTD-Oszillatoren erreichen können. Auch die Sendeleistung können die Forscher deutlich erhöhen, indem sie die Parameter des Systems aus RTD, Oszillator, Sendeantenne sowie deren Kopplung optimieren. Mindestens ein Faktor hundert an Zugewinn sollte möglich sein, was für manche bildgebende Anwendung im THz-Bereich ausreichen würde. Und um noch höhere Leistungen zu erzielen, ist es möglich, mehrere Oszillatoren miteinander zu kombinieren.

■ Rascher zum Bild

CMOS-Sensoren mit großen Pixeln lassen sich nun schneller auslesen.

Heutige Digitalkameras arbeiten mit CMOS-Bildsensoren. Sie sind günstig und verbrauchen wenig Strom. Pixelgrößen bis herunter zu einem Mikrometer sind dabei nichts Ungewöhnliches mehr, weil durch die Miniaturisierung und die gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Auflösung

die Bildsensoren immer weiter schrumpfen müssen. Bei den heutigen CMOS-Bildsensoren haben sich „Pinned Photodiodes“ (PPD) als lichtempfindliche Elemente durchgesetzt. Der p-n-Übergang dieser Photodioden liegt nicht direkt an der Oberfläche. Vielmehr ist der wannenförmige n-Bereich von einer dünnen p-Schicht verdeckt, die dauerhaft mit dem p-Substrat verbunden ist. Durch diesen Aufbau fällt der Dunkelstrom des Sensors geringer aus, was sehr wichtig ist angesichts von nur wenigen tausend Elektronen, die die winzigen Pixel noch aufsammeln können.

Das Prinzip der PPD findet aber auch bei größeren Pixeln seine Anwendung, beispielsweise in der Astronomie, Röntgenbildgebung oder bei Fahrerassistenzsystemen. In diesen Fällen müssen die Bildelemente jedoch größer sein, weil die Zahl der einfallenden Photonen sehr gering ist. Dann haben die PPD allerdings den Nachteil, dass die Auslese der Ladungsträger womöglich nicht mehr schnell genug erfolgen kann: Sie bewegen

sich durch die n-Wanne allein aufgrund der Diffusion, was sich im Bereich von Mikrosekunden abspielt. Fahrerassistenzsysteme erfordern dagegen Auslesezeiten im Nanosekundenbereich, was bei PPD mit Pixelgrößen größer als 3 µm schwierig wird.

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS) in Duisburg haben einen Weg gefunden, das Auslesen der PPD für solche Anwendungen zu beschleunigen. Sie erzeugen dazu ein zusätzliches elektrisches Potential, indem sie das Dotierungsprofil entlang der n-Wanne verändern und dadurch ein Konzentrationsgefälle hervorrufen. So wird das Potential immer stärker, je näher die Ladungsträger dem Ausleseknotten kommen. Dies ermöglicht Auslesezeiten im Nanosekundenbereich. Die IMS-Forscher sprechen von „Lateral Drift Field Photodetectors“. Die patentierte Technologie liegt als Prototyp vor.

Michael Vogel