

Oberflächentemperatur von Halbleitersubstraten messen

Damit Halbleiterbauteile im statischen und dynamischen Betrieb keinen Hitzschlag erleiden und lange leben, müssen Entwickler das thermische Verhalten sowie die Temperaturverteilung im Inneren kennen und berücksichtigen. Die Thermografie mittels Thermoreflectance Imaging ermöglicht detaillierte Einblicke.

Fachartikel von Dr. Gabriel Loata

Bei der Entwicklung von integrierten Schaltungen und optoelektronischen Bauteilen mit Halbleiterstrukturen im Mikro- und Nanometerbereich spielen die thermischen Eigenschaften des Halbleitermaterials eine wichtige Rolle. Aufgrund des endlichen Wärmewiderstands kommt es im IC zu einer Selbsterwärmung (Self-Heating-Effect) mit räumlich unterschiedlicher Temperaturverteilung. Zudem ist der zeitliche Verlauf der Temperaturverteilung strukturabhängig.

Mit steigender Temperatur im Baustein oder IC erhöht sich die Ausfallrate. Besonders kritisch sind Hot-Spots. Dies sind kleine Volumenbereiche der aktiven Zone, in denen ein Großteil der thermischen Energie entsteht. Die in Hot-Spots entstandene Wärmeenergie muss durch den Halbleiter und das Gehäuse in eine Wärmesenke abfließen können.

Für den Ausfall von Bauteilen durch thermische Überhitzung sind Hot-Spots hauptverantwortlich. Speziell für schnelle Schaltanwendungen bei DC/DC-Wandlern, verbunden mit einer hohen Leistungsdichte im Halbleiterbauteil, ist ein möglichst homogenes Wärmeprofil ohne Hot-Spots entscheidend, um die benötigte Bauteinqualität zu erreichen.

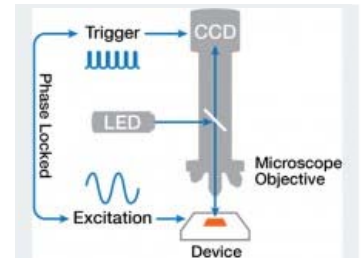


Bild 1: Prinzip des Thermoreflectance-Thermal-Imaging-Thermometers von Microsanj. (Bild: BSW)

ECKDATEN

Zeitabhängige Wärmebildaufnahmen zur Beurteilung der Qualität von ICs lassen sich mithilfe von Thermoreflectance Thermal Imaging (TTI) erstellen. Der Beitrag demonstriert die räumliche und zeitliche thermografische Auflösung dieser Methode beispielhaft anhand von Messungen an GaN-Leistungs-ICs mit kleinsten Strukturen. Mit der TTI-Methode sind thermische Einschwingvorgänge gepulster Halbleiterbauteile mit einer Auflösung von bis zu 800 ps messbar. Damit eignen sich unterschiedliche verfügbare TTI-Messsysteme für die Entwicklung und Qualitätssicherung von Leistungshalbleitern.

Genauer als Infrarotthermografie

Aussagen über die Bauteinqualität lassen sich mithilfe der thermischen Analyse treffen. Zu den am häufigsten verwendeten Methoden für die thermische Analyse von Bauteilen im Mikro- und Submikrometerbereich zählt die Infrarotthermografie. Eine neuere Methode ist das Thermoreflectance Thermal Imaging (TTI). Die TTI-Methode beruht auf dem Prinzip der thermischen Reflexion – einer Änderung des Reflexionsgrades für Licht an der Oberfläche eines Materials als Funktion der Oberflächentemperatur. Dieser Effekt entsteht durch die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex.

Bei der TTI-Methode bestrahlt eine Lichtquelle das Messobjekt in einem definierten Bereich. Aus der reflektierten Lichtmenge lässt sich die Oberflächentemperatur ermitteln. Statt nur einen Raumpunkt zu bestrahlen, erstellt eine Optik ein zweidimensionales thermografisches Bild. Der Hauptvorteil der TTI-Methode besteht darin, dass sie Licht mit einer kürzeren Wellenlänge als bei der

Infrarotthermografie verwenden kann. Damit ist eine höhere Auflösung des thermografischen Bildes erreichbar. Kleine Hot-Spots in Halbleiterbausteinen lassen sich somit wesentlich zuverlässiger auffinden.

Bild 1 zeigt das Funktionsprinzip eines TTI-Thermomikroskops von Microsanj, mit dem sich orts- und zeitaufgelöste thermografische Bilder messen lassen. Als monochromatische Lichtquelle verwendet das Mikroskop eine LED. Alternativ lässt sich eine Laserquelle nutzen. Ein Strahlteiler strahlt das Licht der LED über eine Mikroskop-Optik auf die Probe (Device). Das an der Probe reflektierte Licht gelangt über die Mikroskop-Optik zurück auf das zweidimensionale CCD-Empfängerarray



(Charge Coupled Device), ein Empfänger zur Messung der optischen Lichtleistung.

Zeitabhängiges Thermografiebild

Durch den Pulsbetrieb der Probe lässt sich ein zeitabhängiges thermografisches Bild „messen“. Dazu legt das System den Betriebsstrom oder die Betriebsspannung periodisch mit einer kurzen Wiederholrate an (Excitation-Signal). Aus diesem Signal erzeugt das System ein Triggersignal, das an der CCD-Kamera den Zeitpunkt des Auslesens der Lichtleistung bestimmt.

Zum Kalibrieren wird die Probe auf eine regelbare Heizplatte montiert. Die Heizplatte bringt die Probe auf verschiedene konstante Umgebungstemperaturen, ohne dass eine Betriebsspannung anliegt. Durch Messung des reflektierten Lichts lässt sich so der temperaturabhängige Reflexionsgrad ortsaufgelöst für die Oberflächenmaterialien der Probe messen. Die Messdaten lassen sich später zur Berechnung der absoluten Oberflächentemperatur einer Probe unter elektrischer Last verwenden. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, wird mithilfe hochempfindlicher Lock-In-Detektion eine periodische Wiederholung von Einzelmessungen durchgeführt. Nach sorgfältiger Kalibrierung ist bei geeigneten Oberflächen eine absolute Temperaturgenauigkeit von $\pm 0,25$ °C erreichbar. Dies ist für fast alle Entwicklungsaufgaben in der Bauteil- und Halbleiterindustrie eine ausreichend hohe Genauigkeit.

Bild 2 zeigt das Messsystem NT220 für den Einsatz im Labor. Aufgrund der hohen Ortsauflösung ist ein optischer Tisch empfehlenswert, um Fehler durch akustische Schwingungen zu vermeiden. Mit einem Probenstisch mit x-y-z-Manipulatoren lässt sich der Bildausschnitt präzise und stabil justieren. Ein solcher Messplatz eignet sich für Halbleiterbausteine aus Silizium, GaAs oder GaN, beispielsweise Switches für DC/DC-Wandler, HF-Leistungsverstärker, LEDs und Laserdioden, Solarzellen, MMIC oder MEMS. Auch der Wirkungsgrad von Kühlkörpern lässt sich mit dem Messsystem ermitteln. Des Weiteren lassen sich Wärmeübertragungsprozesse darstellen.

Bild 2: Das TTI-Testsystem NT220 von Microsanj erreicht eine hohe Ortsauflösung und vermeidet Fehler durch akustische Schwingungen. Es eignet sich für die Analyse von Leistungshalbleiterbausteinen, MEMS, Kühlkörpern und Wärmeübertragungsprozessen. (Bild: BSW)

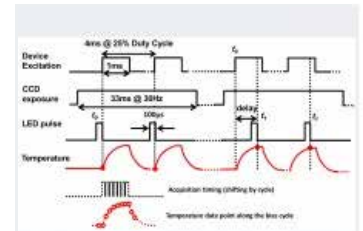


Bild 3: Grundlagen für die zeitaufgelöste Thermografie (Transient Thermal Imaging). (Bild: BSW)

Thermografie für Leistungsbaulemente

Die zeitaufgelöste Thermografie ist wichtig bei Leistungsbaulementen, die sich oft nur im Pulsbetrieb messen lassen, da sie eine länger anliegende thermische Last beschädigen könnte. Außerdem ist es oft notwendig, den zeitlichen Verlauf der Wärmeverteilung und die thermische Einschwingdauer zu untersuchen.

Messungen der Wärmeverteilung über die Zeit (Transient Thermal Imaging) lassen sich mit dem Messsystem NT220B von Microsanj durchführen. Bild 3 zeigt das Messprinzip. Eine Rechteck-Vorspannung (beispielsweise zwischen Drain und Source) schaltet das Messobjekt mit einem kurzen Tastverhältnis periodisch ein und aus. Der Einschaltimpuls muss so lange dauern, dass die Hot-Spot-Bereiche des Messobjektes am Ende der Einschaltzeit möglichst die aufgrund des Wärmewiderstands entstehende maximale Temperaturdifferenz zur Wärmesenke erreichen.

Den Temperaturverlauf eines Hot-Spots in einem Halbleiterbaustein zeigt die rote Kurve Temperature in Bild 3. Als Lichtquelle für die zeitaufgelöste Messung kommt eine gepulst betriebene LED zum Einsatz, deren Pulsdauer wesentlich kleiner als die thermische Einschwingzeit des Hot-Spots ist (LED Pulse).

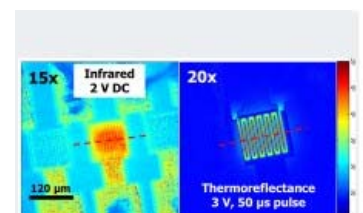


Bild 4: Das Thermoreflectance-Thermal-Imaging-Bild rechts zeigt eine deutlich höhere Auflösung als das Infrarot-Wärmebild links. (Bild: BSW)

Temperaturprofile mit bis zu 50 ns Zeitauflösung

Die CCD-Kamera wird mit dem LED-Lichtimpuls synchronisiert und misst die Lichtleistung nur während die LED

eingeschaltet ist. Durch Variation der Zeitdifferenz zwischen Einschaltbeginn der Probe und LED-Pulsbeginn lässt sich das Oberflächentemperaturbild zu jedem Zeitpunkt messen. So sind zeitabhängige Temperaturprofile mit bis zu 50 ns Zeitauflösung ableitbar. Durch Mittelung über mehrere Messungen wird dazu die statistische Messgenauigkeit in einfacher Weise erhöht.

Die TTI-Methode bietet die derzeit höchste zeitliche Auflösung für Temperaturmessungen in Vollfeldbildern. Mit dem Messsystem NT220B lassen sich thermografische Bilder mit bis zu vier Megapixel und einer Auflösung von 50 ns aufnehmen. Beim Austausch der LED-Quelle durch einen Pikosekunden-Laser lässt sich die Auflösung auf bis zu 800 ps steigern. Im Vergleich dazu sind viele kommerziell verfügbare Infrarotthermometer auf eine zeitliche Auflösung von einigen Millisekunden limitiert.

Die räumliche Auflösung ist wie bei jedem Mikroskop durch Beugungseffekte begrenzt. Da TTI-Thermomikroskope eine Lichtwellenlänge von 0,35 bis 0,65 μm verwenden, ist eine räumliche Auflösung von 0,2 bis 0,5 μm erreichbar. Dies ist ein Vorteil gegenüber der Infrarotthermografie, mit der sich aufgrund der deutlich größeren Lichtwellenlänge eine Auflösung von nur 3 bis 10 μm erreichen lässt.

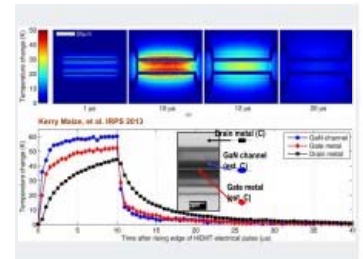


Bild 5: Die TTI-Temperaturmessung an einem GaN-HEMT offenbart die unterschiedliche thermische Reaktion der inneren Schichtbereiche bei einem 10- μs -Lastimpuls. (Bild: BSW)

Fertigungs- und Dimensionierungsfehler erkennen

Ein Beispiel für den Vorteil der räumlichen Auflösung zeigt Bild 4 anhand eines Miniatur-Heizelements. Die TTI-Methode erlaubt die örtliche Auflösung der Temperaturverteilung der einzelnen Heizelemente mit einer Breite von zirka 3 μm und einem Abstand zueinander von 7 μm . Damit lassen sich Fertigungs- und Dimensionierungsfehler bei diesem Bauteil sicher erkennen. Die Infrarotthermografie hingegen liefert nur ein verschwommenes Bild.

Bild 5 zeigt die Temperaturverteilung an einem Zwei-Finger-GaN-HEMT-Transistor (High-Elektron-Mobility-Transistor), die durch 10 μs lange periodische Spannungspulse am Drain-Kontakt entsteht. Die Thermoreflektanzbilder bei einer Zeitauflösung von 500 ns zeigen unterschiedliche thermische Zeitverläufe auf dem Transistor. Die schmale Gate-Metallisierung und der relativ breite GaN-Kanal heizen sich etwa zwei- bis dreimal schneller auf als der Drain-Metallkontakt.

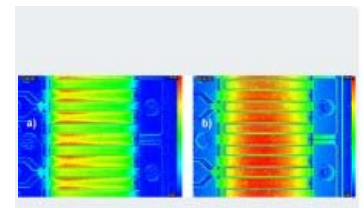


Bild 6: Oberflächentemperatur eines 150-W-GaN-Hochleistungsverstärkers links 10 μs und rechts 500 μs nach dem Einschalten. (Bild: BSW)

Ein weiteres Beispiel für den thermischen Einschwingvorgang eines GaN-Hochleistungstransistors zeigt Bild 6. Als Lichtquelle wurde eine LED mit einer Lichtwellenlänge von 530 nm verwendet. Der Baustein wurde mit Spannungspulsen von 500 μs in den Betriebszustand geschaltet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den typische Eigenschaften verschiedener TTI-Thermomikroskop-Messplätze. Alle Messsysteme verfügen über Lichtquellen mit einer kontinuierlichen Abstimmung der Lichtwellenlänge und einer hochpräzisen Autofokus-Funktion zum Scharfstellen auf die Messobjekte. Neben monochromatischen Lichtquellen lassen sich auch weiße LED-Beleuchtungen verwenden. Die abstimmbare Lichtquelle ermöglicht Anwendern mehr Flexibilität bei der Analyse, da sie erlaubt, die geeignete Wellenlänge für die verschiedenen Materialien der Probe in einem einzigen Arbeitsgang zu messen. Bei der Autofokus-Funktion gleicht ein piezoelektrisches Stellglied die thermische Ausdehnung des Messobjekts während des An- und Abschaltens teilweise aus, wodurch sich eine präzise Temperaturmessung und eine hohe räumliche Auflösung erreichen lassen.

Thermische Modellierung und Qualitätssicherung

Die TTI-Systeme von Microsanj lassen sich in vier Produktlinien aufteilen und sind je nach Anwendung flexibel konfigurierbar und erweiterbar. Das kostengünstige System NT110 dient als Werkzeug für die thermische

Modellierung oder für die Qualitätssicherung im Herstellungsprozess. Die Serie NT210/220 bietet neben der Zeitauflösung eine CCD-Kamera mit hoher örtlicher Auflösung und verschiedenen Autofokus- und thermischen Kalibrierungsoptionen. Daher eignen sich diese Systeme zur Validierung thermischer Modelle in der Forschung und Entwicklung.

Für Flip-Chip- und Thru-the-Substrate-Anwendungen eignet sich das System NT310, während die Serie NT410 über eine gepulste Laserquelle verfügt und damit eine zeitliche Auflösung in Sub-Nanosekundenbereich erreicht.

(hb/jwa)





| NT110 | NT210/NT220/NT210B | NT310 | NT410 |
|--|--|--|--|
| General Purpose | High Performance | Thru-the-Substrate | Pulsed Laser Thermal Imager |
|  |  |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> Area Scan Operation 2/3 Temperature Resolution High Detail Imaging Efficient Acquisition Software | <ul style="list-style-type: none"> Area Scan Operation 2/3 Temperature Resolution High Detail Imaging Efficient Acquisition Software | <ul style="list-style-type: none"> Area Scan Operation 2/3 Temperature Resolution High Detail Imaging Efficient Acquisition Software | <ul style="list-style-type: none"> Pulsed Laser Operation High Thermal Imaging High Detail Imaging Efficient Acquisition Software High Thermal Resolution |

Tabelle 1: Thermoreflectance-Thermal-Imaging-Messsysteme von Microsanj. (Bild: BSW)

ÜBER DEN AUTOR



Dr. Gabriel Loata

Fachbereich Thermografie bei BSW Testsystems & Consulting

● UNTERNEHMEN

bsw TestSystems & Consulting AG

Waldenbucher Str. 42

71065 Sindelfingen

Deutschland

[Zum Firmenprofil >](#)