

Mikrobolometerplattform mit anpassbaren Metamaterialabsorbern zur multispektralen Bildgebung im Infrarotbereich

Alexander Litke¹, Sascha Weyers¹, Anna Lena Schall-Giesecke^{1,2,3}

¹Fraunhofer IMS, Finkenstraße 61, 47057 Duisburg

²Universität Duisburg-Essen, Forsthausweg 2, 47057 Duisburg

³Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE), Carl-Benz-Straße 199, 47057 Duisburg

Zusammenfassung

In dieser Arbeit stellen wir einen ungekühlten Bildsensor für die multispektrale Bildgebung im mittelwelligen und langwelligen Infrarotbereich vor, der aus einem Mikrobolometerarray mit anpassbaren plasmonischen Metamaterialabsorbern (PMA) und integrierter digitaler Ausleseschaltung besteht. Der Sensor verfügt über eine Auflösung von 320×240 Pixeln. Die spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Pixel kann durch Anpassung der Geometrie der oberen Metalllage der PMAs auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten werden. Die zu diesem Zweck verwendeten Nanotube-Mikrobolometer des Fraunhofer IMS weisen einen Pixel-Pitch von $17 \mu\text{m}$ auf. Der vorgestellte Herstellungsprozess erfolgt auf 200-mm-CMOS-Wafern mit integrierter Ausleseschaltung. Eine mit dem Bildsensor angefertigte multispektrale Aufnahme demonstriert die erfolgreiche Umsetzung.

Keywords: Metamaterial, Mikrobolometer, multispektral, Infrarot, post-CMOS

Einführung

Die multispektrale Bildgebung kombiniert Informationen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums. Mögliche Anwendungen im Infrarotbereich (IR) sind dabei die optische bildgebende Gasdetektion [1], die Detektion von Flammen [2] oder die Objekterkennung in sicherheitsrelevanten Szenarien [3]. Bestehende multispektrale IR-Kamerasysteme basieren entweder auf gekühlten photonischen Detektoren oder verwenden breitbandige thermische Detektoren in Kombination mit spektralen Filtertechniken auf Systemebene. Beide sind technisch komplex, kostspielig und hinsichtlich der Systemminiaturisierung begrenzt.

Eine Möglichkeit, die spektrale Selektivität auf Pixelebene in einem ungekühlten Detektor zu implementieren, ist die Integration von plasmonischen Metamaterialabsorbern (PMA) in Mikrobolometerarrays. [4, 5] Diese Absorber bestehen aus Metall-Isolator-Metall-Stapeln (MIM) mit einer strukturierten oberen Metallschicht und ermöglichen eine schmalbandige Absorption in einem einstellbaren Wellenlängenbereich im mittelwelligen (MWIR, $3 \mu\text{m}$ – $5 \mu\text{m}$) bis hin zum langwelligen Infrarotbereich (LWIR, $8 \mu\text{m}$ – $14 \mu\text{m}$). [6]

Konzept

In dieser Arbeit stellen wir eine technologische Plattform für die multispektrale Bildgebung im infraroten Wellenlängenbereich vor (Abb. 1). Die Basis bilden die Nanotube-Mikrobolometer des Fraunhofer IMS [7] mit einem Rastermaß von $17 \mu\text{m}$.

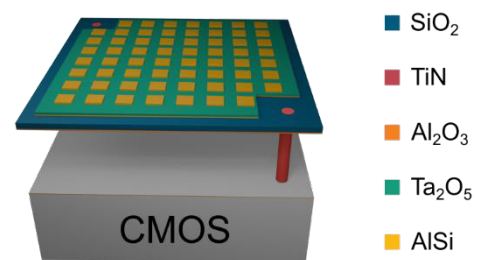


Abb. 1: Gerendertes Bild eines Nanotube-Mikrobolometers mit integriertem PMA. Seine Absorptionswellenlänge wird durch die Größe der Patches in der obersten Metallschicht bestimmt. Der bildgebende Sensor besteht aus einem Array aus 320×240 Mikrobolometern. Das Array wird auf einem CMOS-Wafer mit integrierter Ausleseschaltung hergestellt.

Sie sind ausgeführt als Focal Plane Array (FPA) bestehend aus 320×240 Mikrobolometern mit einer integrierten Ausleseschaltung. Die spektrale Empfindlichkeit der einzelnen Pixel wird durch Anpassung der Geometrie und der Materialien des Metamaterials eingestellt. Das Konzept ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Der Herstellungsprozess ist so konzipiert, dass Absorber mit unterschiedlichsten auf die konkrete Anwendung zugeschnittenen Eigenschaften in Hinblick auf Absorptionswellenlänge, Bandbreite oder Polarisationsabhängigkeit integriert werden können.

Mikrosystemtechnischer Herstellungsprozess

Der Herstellungsprozess wird auf 200-mm-Wafern mit bereits gefertigter CMOS-Ausleseschaltung durchgeführt. Diese werden zunächst durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) planarisiert. Dann werden Vias zur oberen Metalllage hergestellt, verfüllt und das überschüssige Metall erneut durch CMP entfernt. Hierauf wird eine zusätzliche Metalllage abgeschieden, strukturiert und passiviert, die als MEMS-Interface dient.

Eine schematische Darstellung des darauffolgenden vereinfachten Prozessablaufs der mikrosystemtechnischen Herstellung ist in Abb. 2 zu sehen. Zunächst wird mit reaktivem Ionenätzen (RIE) die Passivierung der oberen Metalllage geöffnet (Abb. 2a). Anschließend wird amorphes Silizium (a-Si) durch plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) als Opferschicht abgeschieden. Eine Passivierungsschicht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) und erneut a-Si als Sensorschicht werden mittels Atomlagenabscheidung (ALD) bzw. PECVD abgeschieden (Abb. 2b). Die Durchkontaktierungen respektive späteren Nanotubes werden mittels RIE und DRIE geätzt, gefolgt von der Abscheidung der Titannitrid-Kontakte (TiN) durch ALD und physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) sowie ihrer Strukturierung (Abb. 2c). Die Sensorschicht wird anschließend mit Siliziumdioxid (SiO_2) passiviert und die Nanotubes mit a-Si überdeckt, um Rückstände innerhalb der Nanotubes aus nachfolgenden Prozessschritten zu vermeiden und so die thermische Isolation der Membran nicht zu beeinträchtigen (Abb. 2d). Danach wird der MIM-Stapel durch PVD und ALD abgeschieden und die Strukturierung der oberen Metalllage durchgeführt, wodurch die Absorptionseigenschaften der einzelnen Pixel definiert werden (Abb. 2e).

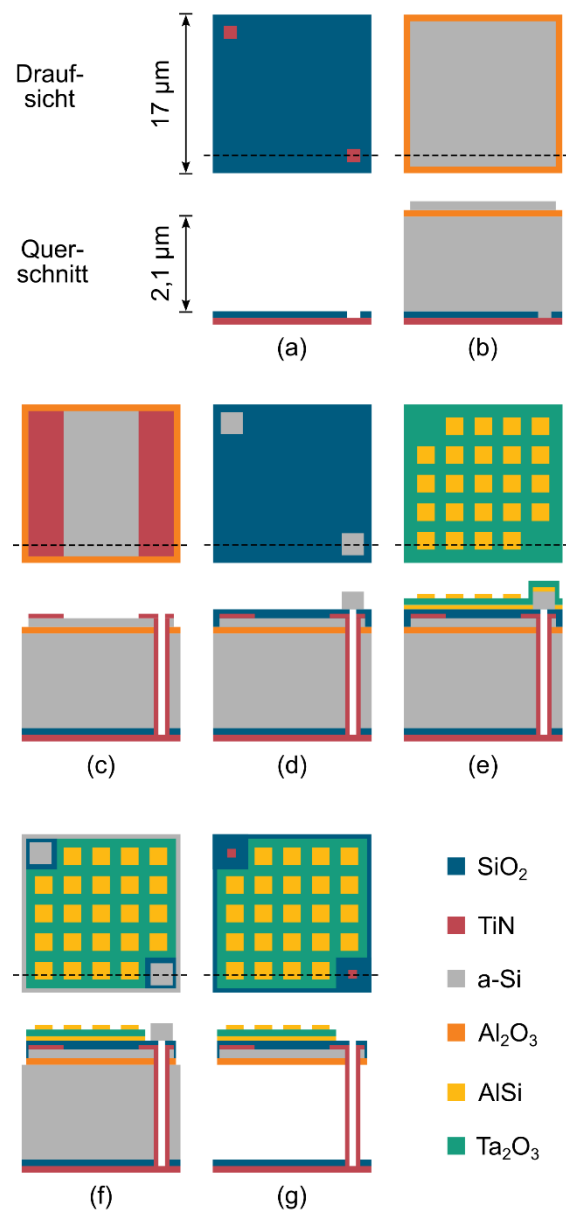


Abb. 2: Übersicht über den vereinfachten Prozessablauf. Dargestellt sind Draufsicht und Querschnitt entlang der gestrichelten Linie. (a) Freilegen der Kontakte der oberen Metallschicht des ROIC; (b) Abscheidung der Opferschicht, der Passivierung und der Sensorschicht; (c) Ätzen der Durchkontaktierungen und Herstellung der Kontakte; (d) Einkapseln der Sensormembran und Abdecken der Durchkontaktierungen; (e) Abscheidung des Absorberschichtstapels und Strukturierung seines oberen Metalls; (f) Freilegung der Abdeckungen und Trennung der Mikrobolometer; (g) Entfernung der Abdeckungen und der Opferschicht. Abb. adaptiert aus unserer Arbeit [5].

Es folgt die Öffnung der Nanotube-Abdeckungen und die anschließende Trennung der einzelnen Mikrobolometer voneinander (Abb. 2f). Schließlich werden die Opferschicht und die Abdeckungen durch isotropes Gasphasenätzen (VPE) entfernt (Abb. 2g).

Das Mikrobolometerarray ist in einem Vakuumgehäuse untergebracht, um die durch Konvektion bedingte Wärmeleitung zu minimieren. Dies wird durch das Chip-Scale-Wafer-Level-Gehäuse des Fraunhofer IMS [8] realisiert. IR-transparente Abdeckungen werden im Flip-Chip-Verfahren auf den ROIC aufgebracht. Es können Abdeckungstypen verwendet werden, die für eine hohe Durchlässigkeit im MWIR- oder LWIR-Bereich optimiert sind. Im Inneren des Gehäuses wird ein Getter-Material aufgebracht, um Restgasatome und -moleküle einzufangen und so den Innendruck des Gehäuses zu senken.

Ergebnisse der Fertigung

In Abb. 3 ist eine mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) angefertigte Aufnahme eines planarisierten Wafers im Querschnitt zu sehen. Erkennbar sind mehrere Metalllagen der CMOS-Ausleseschaltung, einschließlich der gekennzeichneten obersten. Darüber ist in hellem Grau die planarisierte Passivierung zu sehen. Als Inset ist eine zweite Aufnahme in einem späteren Bearbeitungsstand eingefügt. Darin sind die bereits gefertigten und verfüllten Vias zu sehen, die den elektrischen Kontakt zur Ausleseschaltung herstellen. Darüber ist die als MEMS-Interface dienende zusätzliche Metalllage zu erkennen.

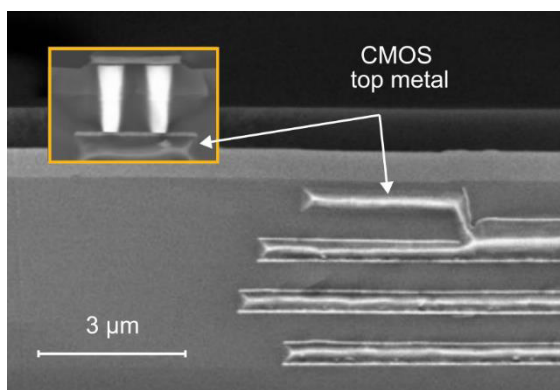


Abb. 3: REM-Aufnahmen eines planarisierten CMOS-Wafers im Querschnitt. Gekennzeichnet ist die oberste Metalllage. Im Inset ist eine zweite Aufnahme eingefügt, die die bereits gefertigten Vias sowie die zusätzliche als MEMS-Interface fungierende Metalllage zeigt.

Abb. 4 zeigt REM-Aufnahmen eines Ausschnitts des gefertigten Mikrobolometerarrays nach dem letzten Fertigungsschritt, dem Entfernen der Opferschicht (vgl. Abb. 2g). Die Membranen sind hier freistehend, jeweils auf zwei hohlen Nanotubes mit einem Durchmesser von ca. 450 nm und einer Wandstärke von ca. 10 nm. Fehlende oder verkippte Mikrobolometer sind nicht ersichtlich.

In der Vergrößerung in Abb. 4 unten lassen sich eindeutig die unterschiedlichen Geometrien der Absorber der vier Pixeltypen erkennen. Eine geringe Wölbung der Membranen ist unabhängig von der Absorbergeometrie in dieser Ansicht feststellbar.

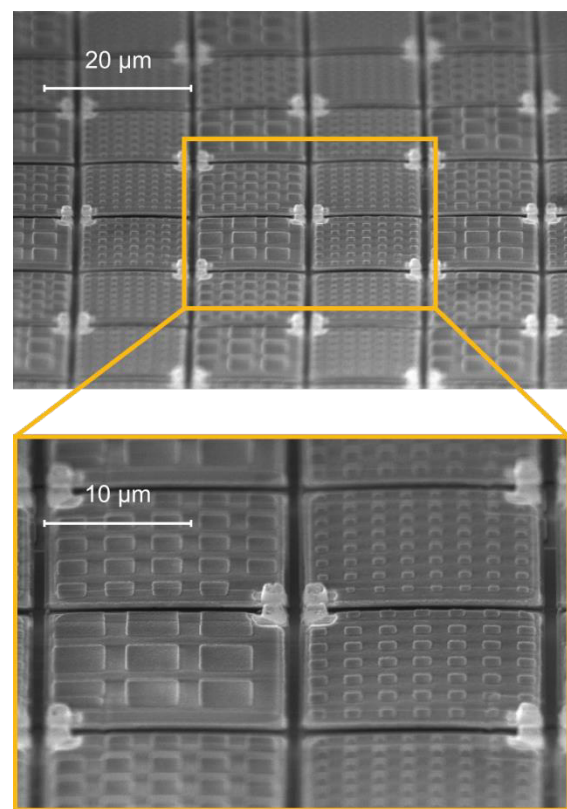


Abb. 4: REM-Aufnahmen eines Mikrobolometerarrays nach dem Entfernen der Opferschicht in der Schrägansicht. Unten sind vergrößert die unterschiedlichen Geometrien der vier für verschiedene Wellenlängen ausgelegten Absorber der Pixeltypen A, B, C und D erkennbar.

In den Ecken der einzelnen Bolometer oberhalb der Nanotubes sind unregelmäßige dünne Strukturen erkennbar. Bei diesen handelt es sich um redeponiertes Material an den Flanken der zwischenzeitlich aufgetragenen Nanotube-Verschlüsse (vgl. Abb. 2d-2f). Weil es sich dabei um Oxide handelt, ist nicht von einem

Einfluss auf die Absorptionseigenschaften der Mikrobolometer auszugehen.

Elektro-optischer Funktionstest

Die elektrische Funktionalität wird nach Abschluss des Packagings durch einen elektro-optischen Test geprüft. Hierbei wird der Bildsensor ohne weitere Optik gegenüber einem Schwarzkörperstrahler bei 20 °C positioniert. Es werden fünfzig Einzelaufnahmen angefertigt und daraus für jedes Mikrobolometer ein arithmetisches Mittel des digitalen Ausgabewerts errechnet.

Die Ergebnisse für ein Array sind in Abb. 5 gezeigt. Aufgetragen ist jeweils der digitale Ausgabewert in *least significant bits* (LSB) für jedes der 76800 Mikrobolometer im Array, gruppiert nach den vier Pixeltypen A, B, C und D. Grün gekennzeichnet ist das Intervall, in dem ein Mikrobolometer für gut befunden wird.

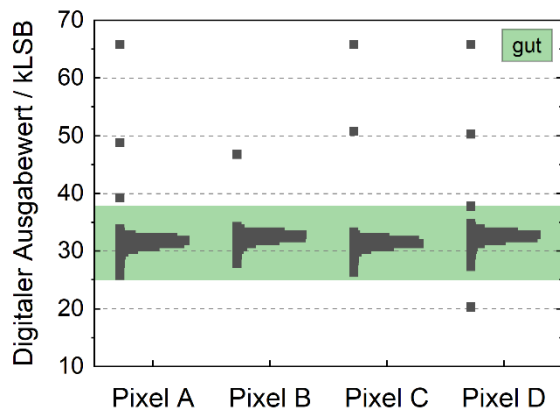


Abb. 5: Ergebnisse des elektro-optischen Funktionstests eines Bildsensors. Gezeigt ist der digitale Ausgabewert eines jeden der 76800 Mikrobolometer im Array bei Bestrahlung mit einem Schwarzkörperstrahler bei 20 °C, gruppiert nach Pixeltypen. Nur vereinzelte Mikrobolometer sind nicht gut getestet. Zwischen den Pixeltypen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede.

Nur vereinzelte Mikrobolometer sind nicht „gut“ getestet. Ist das Mikrobolometer vollständig elektrisch defekt, beträgt die Ausgabe $2^{16} - 1 = 65535$ LSB. Dies ist für drei Mikrobolometer im gesamten Array der Fall. Zwischen den Pixeltypen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede.

Anwendungsbeispiel

Eine naheliegende Anwendung multispektraler Bildgebung im Infrarotbereich ist die

Thermographie. Hierbei macht man sich zunutze, dass unterschiedliche Materialien unterschiedliche wellenlängenabhängige optische Eigenschaften aufweisen. Ein fusioniertes Bild aus Einzelbildern aus verschiedenen spektralen Bändern kann so mehr Information enthalten als jedes der Einzelbilder.

So weist beispielsweise Silikatglas im LWIR-Bereich einen geringen Transmissionsgrad auf, die bei Wellenlängen über 7,5 µm praktisch null erreicht.

In typischen Thermografieanwendungen sind daher Alltagsgegenstände wie Fenster, Trinkgläser oder Brillen nicht transparent [9]. Abb. 6 zeigt eine mit dem multispektralen Bildsensor angefertigte Abbildung eines ca. 300 °C heißen Lötkolbens in einem Becherglas neben einer mit heißem Wasser gefüllten Tasse. Das Bild wurde aus zwei Kanälen zusammengefügt. Grün wurde für den LWIR- und Rot für den MWIR-Kanal gewählt.

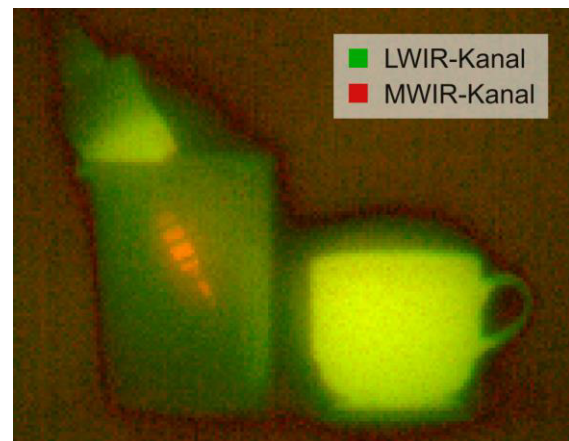


Abb. 6: Mit dem multispektralen Bildsensor angefertigte Abbildung eines heißen Lötkolbens in einem Becherglas neben einer Tasse. Das Bild wurde aus zwei Kanälen zusammengefügt. Grün wurde für den LWIR- und Rot für den MWIR-Kanal gewählt. Weil Glas im LWIR-Bereich intransparent ist, ist die Spitze des Lötkolbens nur im MWIR-Kanal sichtbar. Sie erscheint in der Abbildung daher rötlich.

Weil Glas im LWIR-Bereich intransparent ist, ist die Spitze des Lötkolbens nur im MWIR-Kanal sichtbar. Sie erscheint in der Abbildung daher rötlich. Zugleich sind die kühleren Elemente, wie etwa der Henkel der Tasse und der Griff des Lötkolbens, deutlich grün. Dies entspricht den Erwartungen für Planck'sche Strahler, die ihr Emissionsmaximum bei Raumtemperatur bei einer Wellenlänge von ca. 9,6 µm und damit im LWIR-Bereich aufweisen. Auf diese Weise

enthält das überlagerte Bild mehr Information als jedes der Einzelbilder.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein anpassbarer, ungekühlter Bildsensor für die multispektrale Bildgebung im mittelwelligen und langwelligen Infrarotbereich vorgestellt, der aus Mikrobolometerarrays mit plasmonischen Metamaterialabsorbern und integrierter digitaler Ausleseschaltung besteht. Die Grundlage bilden die Nanotube-Mikrobolometer des Fraunhofer IMS mit einem Pixel-Pitch von 17 µm. Das Array besteht aus 320 × 240 Einzelbolometern. Dabei kann die spektrale Empfindlichkeit jedes Pixels durch Anpassung der Geometrie der oberen Metalllage der Absorber auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten werden. Der vorgestellte Herstellungsprozess erfolgt auf 200-mm-CMOS-Wafern mit integrierter Ausleseschaltung, die dank eines Prozesses zur Herstellung eines MEMS-Interfaces beliebigen Ursprungs sein können. REM-Aufnahmen des gefertigten Arrays und ein elektro-optischer Test belegen die erfolgreiche Umsetzung der Herstellung. Schließlich demonstriert eine mit dem Bildsensor angefertigte multispektrale Aufnahme die Funktionalität und eine mögliche Anwendung des Sensors.

Zukünftige Arbeiten können sich die Anpassbarkeit der Absorber zunutze machen und weitere Anwendungen in den Fokus nehmen. Ein zentrales Thema ist dabei die bildgebende Gasdetektion, für die die spektrale Empfindlichkeit der Pixel auf Absorptionsbanden von Gasen abgestimmt wird.

Förderung

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Vorhaben wurde im Rahmen der APECS-Pilotlinie durch Chips Joint Undertaking, gefördert durch Horizon Europe (ID: 101183307) und Digital Europe (ID: 101182906) Programme, und durch nationale Förderungen von Belgien, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Österreich, Portugal und Spanien kofinanziert.



**Co-funded by
the European Union**

Co-funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Chips Joint

Undertaking. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Literaturnachweis

- [1] Cui, F.-X., Zhao, Y., Wang, A.-J., Ma, F.-X., Wu, J., Li, Y.-Y., Li, D.-C. and Dong, W.-C., Optics 3(4), 473–482 (2022). DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/opt3040040>
- [2] Wing Au, K., Larsen, C., Cole, B. and Venkatesha, S., Proc. SPIE 9836, 983605 (2016). DOI: <https://dx.doi.org/10.1117/12.2224295>
- [3] Karali, A. O., Cakir, S. and Aytac, T., Appl. Opt. 54(13), 4172 (2015). DOI: <https://dx.doi.org/10.1364/AO.54.004172>
- [4] Maier, T. and Brückl, H., Opt. Lett. 34(19), 3012–3014 (2009). DOI: <https://dx.doi.org/10.1364/OL.34.003012>
- [5] Litke, A., Zakizade, E., Weyers, S., Schall-Giesecke, A. L., Opt. Lett. 50, 5767–5770 (2025). DOI: <https://dx.doi.org/10.1364/OL.573586>
- [6] Litke, A., Zakizade, E., Michel, M., Weyers, S. and Schall-Giesecke, A. L., Micro Nano Eng. 23(1), 100262 (2024). DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.mne.2024.100262>
- [7] Michel, M., Blaeser, S., Litke, A., Zakizade, E., Weyers, S. and Weiler, D., Proc. SPIE 12534, 1253419 (2023). DOI: <https://dx.doi.org/10.1117/12.2663466>
- [8] Bauer, J., Weiler, D., Ruß, M., Heß, J., Yang, P., Voß, J., Arnold, N. and Vogt, H., Proc. SPIE 7834, 78340S (2010). DOI: <https://dx.doi.org/10.1117/12.865019>
- [9] Lane, D. W., J. Phys. D: Appl. Phys. 23(12), 1727–1734 (1990). DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/23/12/037>