



Doctoral Thesis

## Herstellung, Charakterisierung und Anwendung von Bleisalz-Infrarot-Diodenarrays auf Siliziumsubstraten

**Author(s):**

Masek, Jiri; Baltés, Henry

**Publication Date:**

1994

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000943642> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 10480

HERSTELLUNG, CHARAKTERISIERUNG UND ANWENDUNG  
VON BLEISALZ-INFRAROT-DIODENARRAYS AUF  
SILIZIUMSUBSTRATEN

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels  
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von  
JIRI MASEK  
Dipl. Phys. ETH  
geboren am 18. Juli 1961  
von Schaffhausen (SH)

angenommen auf Antrag von:  
Prof. Dr. H. Baltes, Referent  
PD Dr. H. Zogg, Korreferent

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Infrarot-Diodenarrays in Bleisalzsichten auf Siliziumsubstraten hergestellt und untersucht. Ausgehend von epitaktisch auf Silizium(111)-Substraten aufgewachsenen PbTe-, PbS-, PbEuSe-, PbSe- und PbSnSe-Schichten wurden lineare und zweidimensionale (2-D) Diodenarrays hergestellt. Es wurde gezeigt, dass diese IV-VI-Schichten für die Herstellung von photovoltaischen IR-Sensoren gut geeignet sind.

Die Vor- und Nachteile der Sensorherstellung mit Schattenmasken wurden untersucht. Im Hinblick auf eine preiswerte Massenproduktion wurde eine auf photolithographischen Prozessen basierende Herstellungsvariante entwickelt. Dabei musste berücksichtigt werden, dass die Bleisalzsichten mit einer wasserlöslichen Pufferschicht auf das Silizium aufgewachsen wurden.

Da bei der Diodenherstellung keine Prozesstemperaturen oberhalb 150 °C auftreten und die IV-VI-Schichten unterhalb 450 °C aufgewachsen werden, können fertig produzierte Siliziumschaltungen als Substrat verwendet werden. Zum erstenmal ist es so gelungen, ein photovoltaisches Diodenarray in einem schmalbandigen Halbleiter auf einer aktiven Si-Ausleseschaltung monolithisch zu integrieren.

Die hergestellten IV-VI-Arrays auf Siliziumsubstraten wurden sowohl elektrisch als auch optisch charakterisiert, und die Resultate wurden mit den theoretischen Modellen verglichen. Konventionelle IV-VI-Diodenarrays auf massiven BaF<sub>2</sub>(111)-Substraten wurden hergestellt und zum Vergleich beigezogen.

Elektrisch wurde die Temperaturabhängigkeit der Strom-Spannungskennlinien, die Temperaturabhängigkeit des differentiellen Widerstandes sowie die Spannungsabhängigkeit der Diodenkapazität untersucht. Die auf Siliziumsubstraten hergestellten Dioden hatten gleich gute Eigenschaften wie die Dioden auf massivem BaF<sub>2</sub>-Substrat. Bei tiefen Temperaturen sind die Dioden durch Generation und Rekombination in der Raumladungzone limitiert. Oberhalb ca. 140 K (für PbTe-Dioden) wird die Diffusion in der neutralen Zone dominant.

Mit optischen Messungen wurden die spektrale Empfindlichkeit, die laterale Empfindlichkeit sowie die Quantenausbeute bestimmt. Die Quantenausbeute der Dioden liegt nahe dem theoretischen Limit und ist hauptsächlich durch Reflektionsverluste am Substrat limitiert. Die Absorptionsverluste im Siliziumsubstrat sind bis hinauf zu 12 µm Wellenlänge vernachlässigbar klein. Wie bei Dünnschichtdioden zu erwarten, treten bei der spektralen Empfindlichkeit Interferenzen auf. Auf Siliziumsubstraten beobachtet man eine zusätzliche Abnahme der Empfindlichkeit bei kurzen Wellenlängen. Diese ist durch Interferenzen an der dünnen Pufferschicht verursacht.

Um den optimalen Arbeitspunkt der Dioden für Wärmebildanwendungen zu bestimmen, wurden Rauschmessungen durchgeführt. Das kleinste Rauschen findet man bei Betrieb

der Dioden ohne Vorspannung. Bei unbeleuchteter Diode entspricht das Rauschen dem thermischen Rauschen des Diodeninnenwiderstandes. Bei Beleuchtung ist das Schrotrauschen des Photostromes die dominante Rauschquelle. Bis hinunter zu 10 Hz konnte kein  $1/f$ -Rauschen der Dioden beobachtet werden. Wegen der grossen Dielektrizitätskonstante der Bleisalze hat die Diodenimpedanz einen hohen kapazitiven Anteil. Wenn die Ausleseschaltung nicht kapazitiv auf die Diode abgeglichen wird, kann das Eigenrauschen der Ausleseschaltung bei höheren Frequenzen übermässig verstärkt werden.

Mit linearen IV-VI-Diodenarrays auf Silizium wurde ein Wärmebildsystem im Labor realisiert. Erste Bilder im Bildpunkteformat  $128 \times 128$  wurden aufgenommen. Die Kamera konnte bis 130 K ohne Verschlechterung der Bildqualität betrieben werden.

## Abstract

Infrared diode arrays in lead-salt layers on silicon substrates were fabricated and investigated in this work. Starting with epitaxial layers of PbTe, PbS, PbEuSe, PbSe and PbSnSe grown on silicon(111) substrates, linear and 2 dimensional diode arrays were fabricated. It is shown that these IV-VI-layers are well suited for fabrication of photovoltaic IR sensors.

The advantage and disadvantage of a fabrication by hard mask technology was examined. With regard to a low cost and large volume production an alternative fabrication based on photolithographic procedures was developed. It had to be taken into account, that the IV-VI-layers were grown with a buffer layer which exhibits a high solubility in water.

Fully finished silicon circuits can be used as a substrate, because of neither temperatures above 150 °C are involved in the sensor fabrication, nor does the growth temperature of the IV-VI-layers exceed 450 °C. For the first time the monolithic integration of a photovoltaic narrow gap diode array on a silicon wafer containing active readout circuitry was completed.

The fabricated arrays were characterised with electrical and optical measurements. The obtained results were compared to theoretical models. Diodes on bulk BaF<sub>2</sub>-substrates were grown for reference.

Electrical characterisation was performed by evaluating the temperature dependent current-voltage characteristics, the temperature dependence of the differential resistance and the capacity as a function of the bias voltage. The diodes on the silicon substrate exhibited as good performance as those on the BaF<sub>2</sub>-substrates. The diodes are depletion limited at low temperatures, and diffusion limited above ≈140 K for PbTe.

Optical measurements were made to get the spectral response, the lateral response and the quantum efficiency. The quantum efficiency of the diodes is nearly as high as the theoretical limit and is mainly limited by the reflection losses on the substrate. The absorption in the silicon substrate can be neglected up to a wavelength of 12 μm. The spectral response shows the typical interferences of a thin film diode. In addition there is a drop in responsivity at low wavelengths for the diodes on silicon substrates. This drop is caused by interference effects in the thin buffer layer.

To find the best operating conditions for use in thermal imaging applications, the noise of the diodes was measured. Noise is minimized when operating the diodes at 0 V bias. In this case, then noise is dominated by the Johnson noise of the diode if no illumination is applied. Under illumination the shot noise of the photocurrent is dominant. No 1/f noise of the diodes was observed down to 10 Hz. The capacitance of the diodes is quite high because of the high permittivity of the IV-VI lead salts. An unbalanced readout can result in a boost up of the amplifier noise at higher frequencies.

As a test application, a thermal imaging system was realized using linear IV-VI diode arrays on silicon. First pictures were obtained in a 128 by 128 pixel format. The camera was operated up to 130 Kelvin without any obvious loss in performance.