

Die Detektivität D^* von Infrarotdetektoren in Abhängigkeit von der Blendengeometrie

Michael Nippus

Universität München, Sektion Physik, Lehrstuhl Brandmüller*)

Eingegangen am 19. Februar 1976

Inhalt

Das Gesichtsfeld von Infrarotdetektoren wird definiert, wenn deren Empfindlichkeit von der Umgebungsstrahlung beeinträchtigt wird. Der relative Empfindlichkeitsgewinn wird berechnet für Blendengeometrien innerhalb realistischer Abmessungen des Detektorkühlgehäuses.

Abstract

The detectivity of infrared detectors depending on the geometry of blinds. The field of view (FOV) of background limited infrared photodetectors (BLIP-detectors) is defined and the gain of the detectivity D^* is calculated for realistic dimensions of the detector cryostat including blinds against blackbody radiation.

Einführung

Die Empfindlichkeit eines Empfängers elektromagnetischer Strahlung ist umgekehrt proportional zur Rauschleistung des gesamten elektronischen Systems. Diese Rauschleistung wird zum überwiegenden Teil vom Detektor selbst erzeugt. Sie setzt sich zusammen aus dem thermischen Eigenrauschen und dem Rauschanteil, der von der Umgebung des Detektors ausgeht. Das thermische Eigenrauschen kann durch Kühlung des Empfängers verringert werden, die Strahlungseinflüsse der Umgebung durch Anbringen geeigneter Blenden, z. B. Bleimäntel gegen Nulleffekt und Höhenstrahlung. Im sichtbaren Spektralbereich kann die thermische Eigenrauschleistung von Photomultipliern durch Kühlung und magnetische Defokussierung so verringert werden, daß einzelne Photonen nachgewiesen werden können [1]. Die Einflüsse der Umgebungsstrahlung gemäß dem Planckschen Gesetz sind vernachlässigbar: Die Zahl der Photonen, die von einem schwarzen Körper bei 300 K im sichtbaren Spektralbereich ($\lambda = 0,7 \mu\text{m}$) auf einen Detektor von

*) Schellingstr. 4/IV, 8000 München 40.

1 cm² Fläche fallen, liegt bei 10⁻⁸ pro Sekunde [2]. Detektoren, die ihre langwellige Empfindlichkeitsgrenze (λ_{cutoff}) im infraroten Spektralbereich haben, werden mit zunehmender Wellenlänge von der thermischen Umgebungsstrahlung beeinflusst. Diese Rauschleistung läßt sich dadurch einschränken, daß das Gesichtsfeld (FOV) durch gekühlte Blenden oder Filter eingeschränkt wird. Da über die geeignete Anordnung solcher Blenden keine detaillierten Angaben vorhanden sind und auch die Definition des FOV nicht eindeutig erscheint, sollen hier einige einfache Betrachtungen gemacht werden, welche Detektorgeometrien bei praktisch durchführbaren Abmessungen die günstigste Verbesserung der Empfindlichkeit bringen.

Theorie

Die Empfindlichkeit eines IR-Detektors wird heute allgemein durch die von Jones [3] eingeführte Detektivität (Detectivity) beschrieben:

$$D^* = \frac{A^{1/2}}{NEP} [\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}] \quad (1)$$

Darin ist A die lichtempfindliche Fläche des Detektors in cm², NEP (Noise Equivalent Power) ist die Signalleistung in Watt, die notwendig ist, um ein bestimmtes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) am Ausgang des elektronischen Meßsystems zu erzeugen:

$$NEP = \frac{P_a}{(SNR) B^{1/2}} [\text{W Hz}^{-1/2}] \quad (2)$$

P_a ist die eingestrahlte Signalleistung, B die Bandbreite der Elektronik in Hertz.

Wird das Gesichtsfeld, das für eine ebene Fläche zunächst der halbe Raumwinkel 2π ist, eingeengt, so steigt die Detektivität [2]:

$$D_{rel}^*(\varphi) = \frac{D^*(2\pi)}{\sin(\varphi/2)} \quad (3)$$

φ ist der ebene Schnittwinkel eines kegelförmigen FOV. Wegen der geradlinigen Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung muß angenommen werden, daß jeder Punkt auf der Detektorfläche jeden Punkt im Raum hinter der Blende „sieht“, der nicht von ihr abgedeckt wird. Somit ergibt sich ein kegelförmiges FOV, dessen Spitze vor oder auf der lichtempfindlichen Fläche liegt, im Gegensatz zu den Angaben der Hersteller, wo das FOV ein Kegelstumpf ist, dessen kleinere Begrenzungsfläche die Detektorfläche A ist. Deshalb werden die Winkel φ zu klein angegeben und die D_{rel}^* zu groß. Abb. 1 zeigt die drei Grenzfälle des FOV bei verschiedenen A . Nur wenn A sehr viel

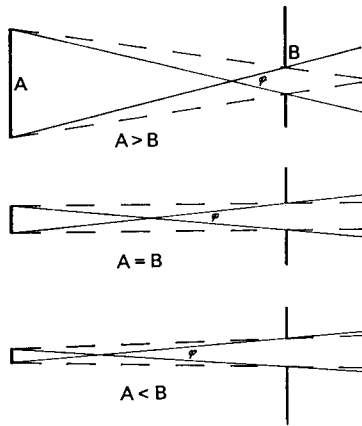


Abb. 1. Definition des Gesichtsfeldes (durchgezogen) gegenüber alter Definition (gestrichelt).

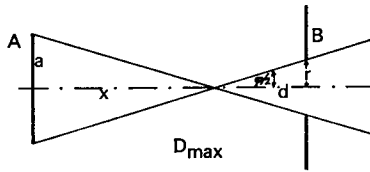


Abb. 2. Blendengeometrie, wenn Detektorfläche A größer als Blendenöffnung B ist.

kleiner als die Blendenöffnung B ist, stimmt das FOV mit den üblichen Angaben überein.

Um einen Detektor mit dem Gesichtsfeldwinkel φ zu bauen, liefert Abb. 2 die Geometrie für die Berechnung von D_{rel}^* :

$$a/r = x/d, \quad \text{tg}(\varphi/2) = a/x, \quad D_{max} = d + x.$$

a ist der Radius der empfindlichen Detektorfläche, r der Radius der Blendenöffnung. D_{max} der größtmögliche Abstand der Blende vom Detektor. Daraus folgt:

$$\text{tg}(\varphi/2) = \frac{r + a}{D_{max}}. \tag{4}$$

Für kleine Winkel also:

$$D_{rel}^*(\varphi) = \frac{D^* (2 \pi) D_{max}}{r + a}. \tag{5}$$

Die theoretische Grenze für D_{rel}^* wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz bestimmt, falls das Eigenrauschen des Detektors vernachlässigbar ist und das Emissionsvermögen der Umgebung $\varepsilon = 1$ ist (schwarzer Körper):

$$D_{\text{rel}}^*(\varphi) = T_U^4 T_B^{-4} D^*(2\pi). \quad (6)$$

Hier ist T_U und T_B die absolute Temperatur von Umgebung und Blende. Für Blenden bei 80 K liegt der maximal mögliche Gewinn bei 200, es könnte aber nur ein nahezu divergenzfreier Lichtstrahl von wenigen mm Durchmesser nachgewiesen werden, z. B. von einem IR-Laser.

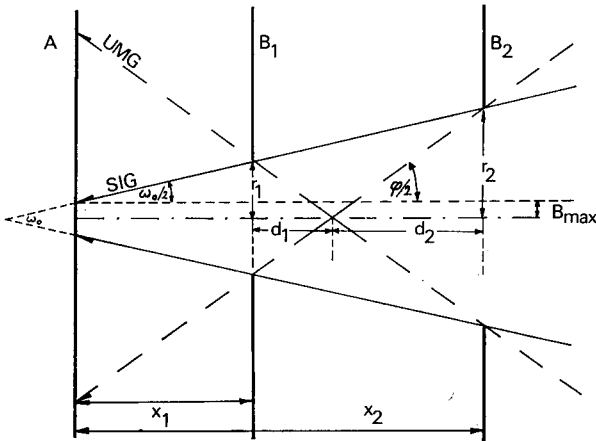


Abb. 3. Blendengeometrie, wenn Detektorfläche A größer als Blendenöffnung B ist (zwei Blenden).

Bei den meisten Anwendungen im IR dürfte das zu messende Lichtbündel divergent sein – je nach Öffnungsverhältnis der vorgeschalteten Optik – und dessen Durchmesser im Bereich von 1 bis einige 10 mm liegen. Um solchen Lichtkegel einzuengen und divergenzfrei zu machen, ist eine Optik erforderlich, welche den zu erwartenden Gewinn wegen der Eigenverluste (z. B. Reflexion, Absorption) wieder zunichte macht. Daneben können die Abmessungen des Detektors und der Blendengeometrie nicht beliebig gestaltet werden, da sonst der erforderliche Kryostat wegen des großen Vakuumvolumens und des erhöhten Kühlmittelverbrauchs unverhältnismäßig aufwendig wird. In Abb. 3 ist die realistischere Detektorgeometrie dargestellt, woraus die folgenden Gleichungen gewonnen werden:

$$\text{tg}(\varphi/2) = r_2/d_2, \quad d_1/d_2 = r_1/r_2, \quad d_1 = x_2 - x_1 - d_2$$

folglich
$$\text{tg}(\varphi/2) = \frac{r_1 + r_2}{x_2 - x_1}. \quad (7)$$

Für eine Detektorfläche A , die größer als die Blendenöffnung B_2 ist, ergibt sich daraus die Forderung nach zwei Blenden, da sonst $x_1 = 0$, $r_1 = \infty$ und so $\varphi = 180^\circ$. In der folgenden, für die Praxis relevanten Rechnung soll das Ausgangssignal einer IR-Optik mit einer Sammellinse im Maßstab 1:1 auf die

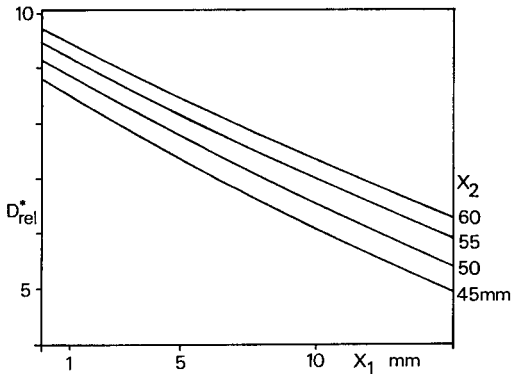


Abb. 4. Relative Empfindlichkeit D_{rel}^* , mit A größer B und $x_{1,2}$ kleiner als 60 mm, $\omega_0 = 4^\circ$, $B_{max} = 1$ mm.

Fläche A abgebildet werden. Die halbe Gegenstandshöhe sei B_{max} , der halbe Öffnungswinkel der IR-Optik sei ω_0 .

$$r_{1,2} = B_{max} + x_{1,2} \operatorname{tg} \omega_0, \text{ woraus für } \varphi \text{ folgt:}$$

$$\operatorname{tg}(\varphi/2) = \frac{2B_{max} + (x_1 + x_2) \operatorname{tg} \omega_0}{x_2 - x_1}. \quad (8)$$

Für die relative Detektivität wird also folgender Ausdruck gewonnen:

$$D_{rel}^*(x_1, x_2) = D^*(2\pi) \left[\operatorname{sinarctg} \frac{2B_{max} + (x_1 + x_2) \operatorname{tg} \omega_0}{x_2 - x_1} \right]^{-1}. \quad (9)$$

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit des Empfindlichkeitsgewinns von den Größen x_1 und x_2 mit den Werten $\omega_0 = 4^\circ$ und $B_{max} = 1$ mm, wie sie für einen Jarrell-Ash 25–100 Doppelmonochromator mit 600 Gitterstrichen/mm und Öffnungsverhältnis $f/8,7$ zutreffen. Die Spalthöhe ist auf 2 mm eingestellt. Die Größen x_1 und x_2 sind so gewählt, daß Detektor und Blenden in einem Kryostatenzylinder von 100 mm Länge und 60 mm Durchmesser Platz haben. Bei einem Canberra Kryostat Typ 7600 ergibt sich ein Verbrauch von flüssigem Stickstoff zu 0,07 Litern/Stunde. Der Innenraum zwischen den beiden Blenden B_1 und B_2 muß geschwärzt sein, damit das FOV nicht durch Mehrfachreflexionen erweitert wird.

Zusammenfassung

Bei Detektorflächen A , die größer sind als der Querschnitt des zu erwartenden Lichtsignalkegels, der aus einer IR-Optik austritt, sind zur Erhöhung der Detektivität eines BLIP-Detektors zur Einengung des Gesichtsfeldes zwei gekühlte Blenden erforderlich. Der Gesichtsfeldwinkel wurde definiert, die Abhängigkeit der Detektivität von der gewählten Geometrie wurde für praktisch durchführbare Fälle dargestellt.

Literatur

- [1] Topp J., Schrötter H.W., Hacker H., Brandmüller J., Rev. Sci. Inst. **40** (1969) 1164.
- [2] Smith R.A., Jones F.E., Chasmar R.P.: Detection and measurement of infrared radiation. Clarendon Press Oxford (1957).
- [3] Jones R.C., Adv. Electron. **5** (1953) 1.