

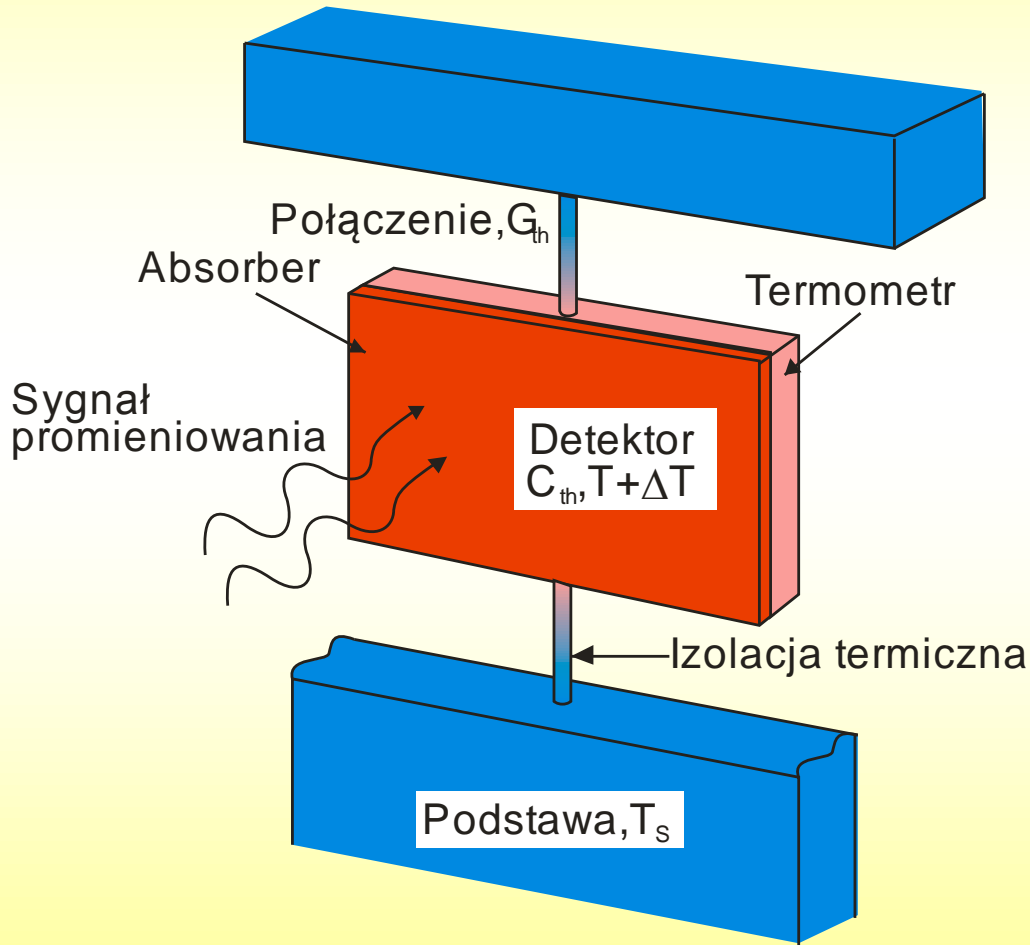


Detektory podczerwieni w Polsce

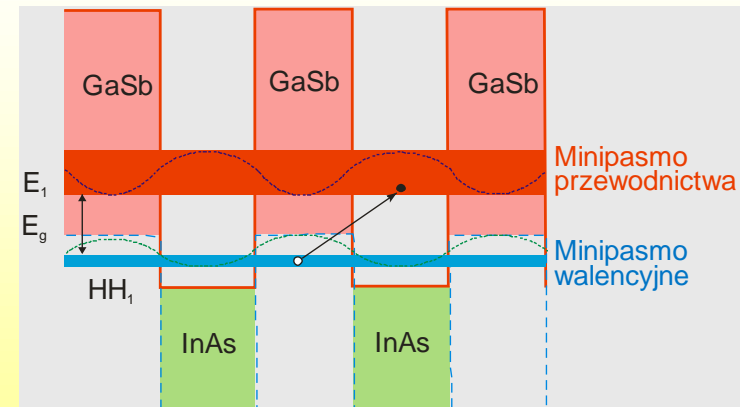
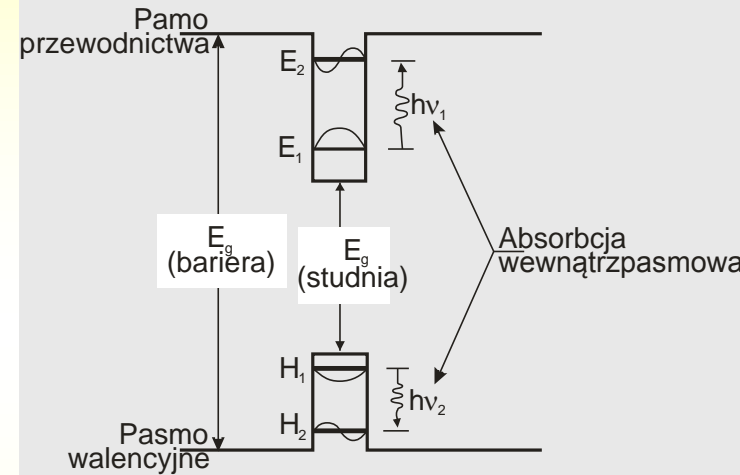
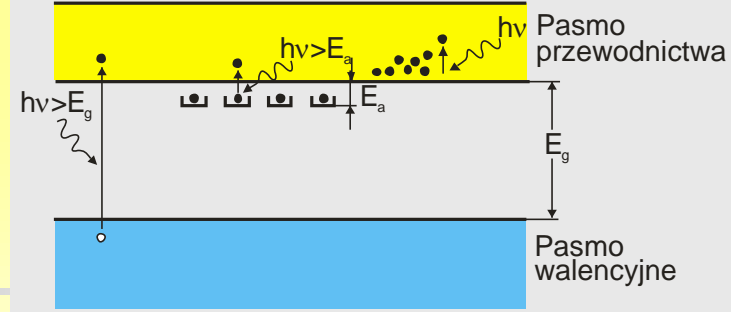


Antoni Rogalski
Instytut Fizyki Technicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
antoni.rogalski@wat.edu.pl

Klasyfikacja detektorów

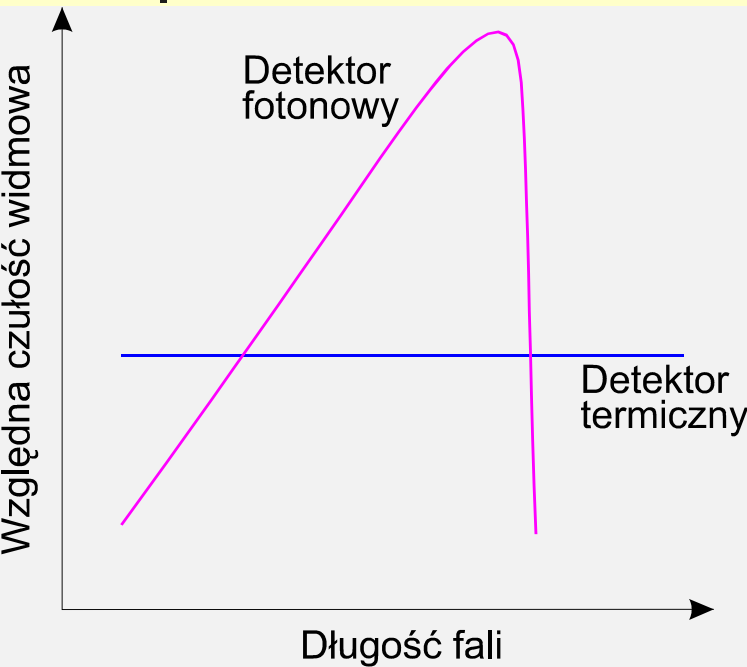


Detektor termiczny



Detektor fotonowy

Klasyfikacja detektorów c.d.



Detektory termiczne: czułość niezależna od λ

$$\tau \approx 10^{-3} \text{ s}$$

$$D^* \approx 10^8 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$$

$$T_p \approx 300 \text{ K}$$

Detektory fotonowe: charakterystyka selektywna

$$D^* > 10^8 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$$

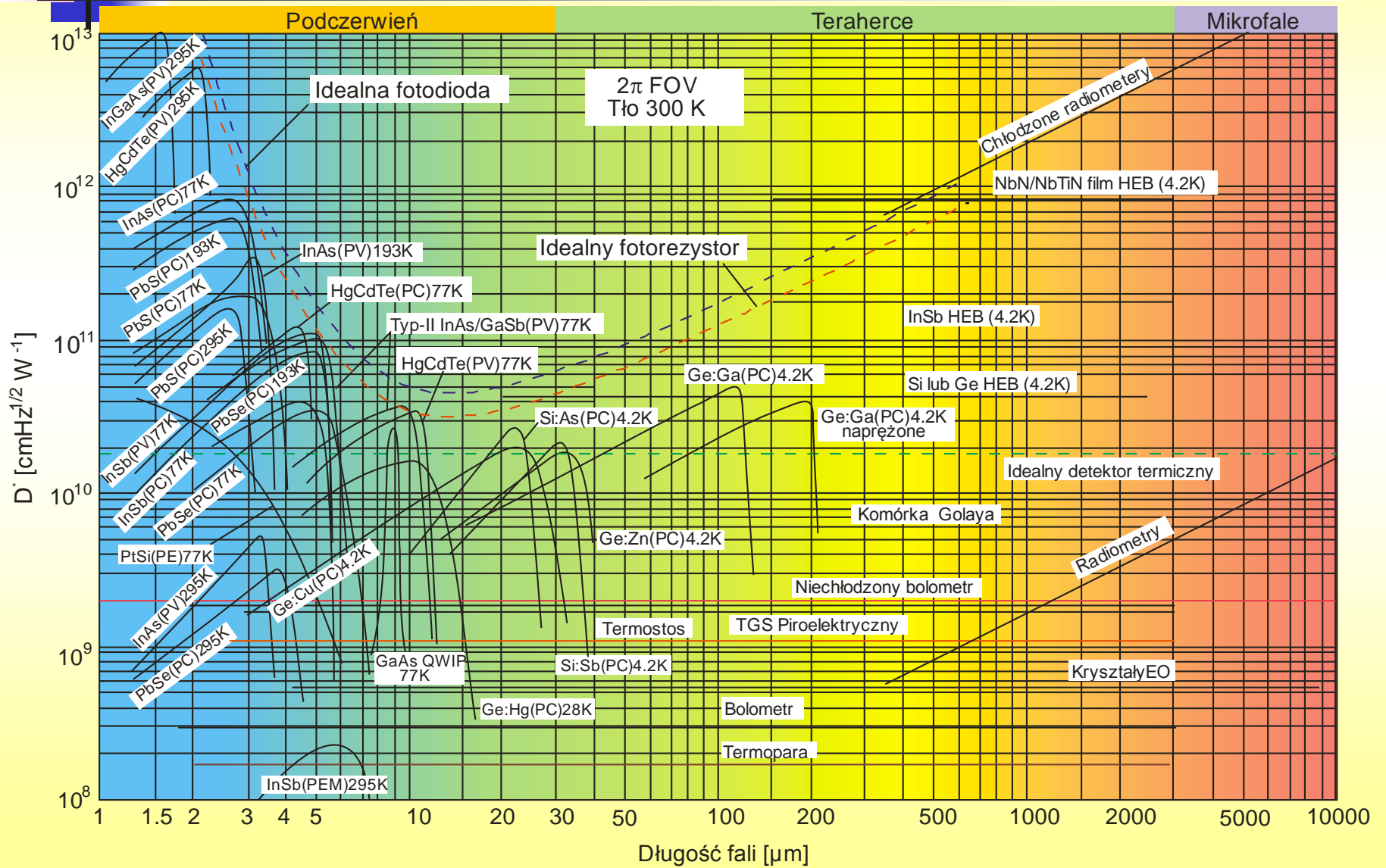
$$\tau \approx 10^{-6} - 10^{-8} \text{ s}$$

$$T_p = 20 - 300 \text{ K}$$

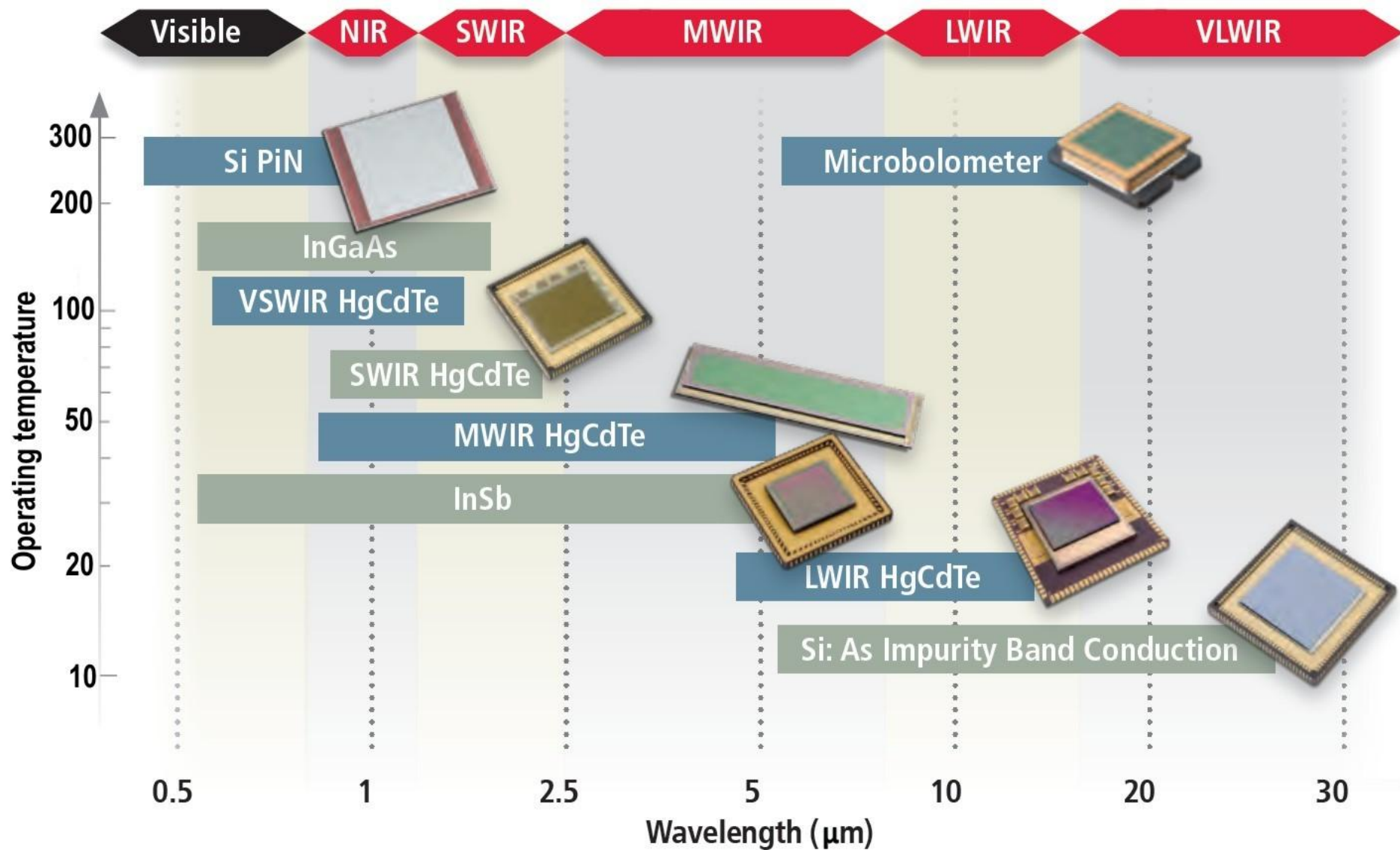
Najważniejszy parametr - **wykrywalność**

$$D^* = \frac{R_v (A \Delta f)^{1/2}}{V_n}$$

Wykrywalność



Najbardziej popularne detektory



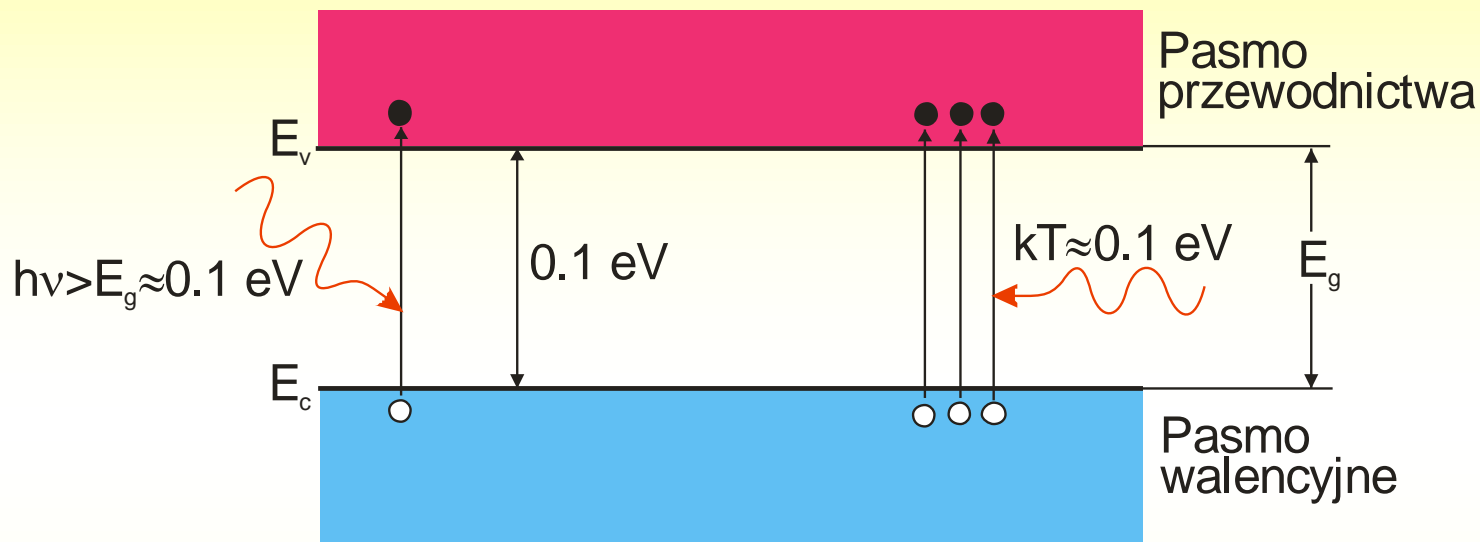


Plan wystąpienia

- Wstęp
- Dlaczego detektory podczerwieni są chłodzone?
- Komercjalizacja detektorów HgCdTe w WAT i IFPiLM
- Utworzenie VIGO Ltd (1987), przekształcenie w VIGO System S.A. (2002), debiut na GPW (2014)
- Współpraca WAT-VIGO
- Rozwój technologii epitaksjalnych detektorów
- Wyróżnienia i rozwój naukowy

Dlaczego detektory podczerwieni są chłodzone?

$T = 300 \text{ K}$
 $\lambda = 10 \text{ } \mu\text{m}$



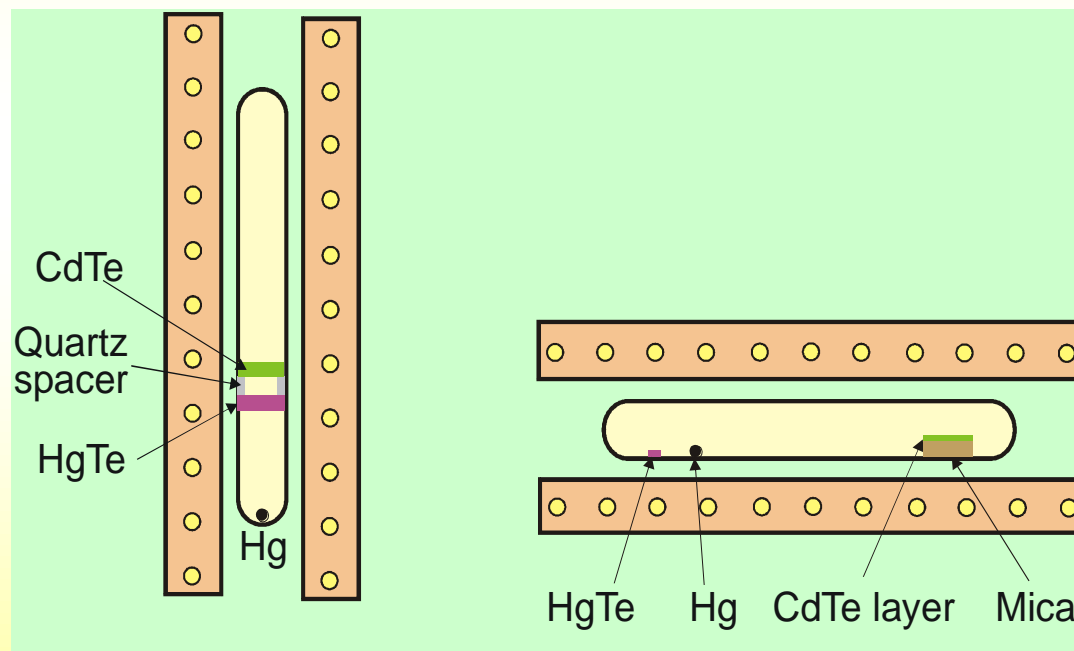
- $h\nu \gg kT$
- wysoka generacja termiczna nośników ($\gg 10^{25} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
- wysoki poziom szumu (statystyczna natura promieniowania)
- D^* ograniczona szumem procesów G-R
- chłodzenie najprostszym sposobem obniżenia szumu

„The need for cooling is a major limitation of infrared photodetectors that prevents more widespread use of infrared technology”

C. T. Elliott

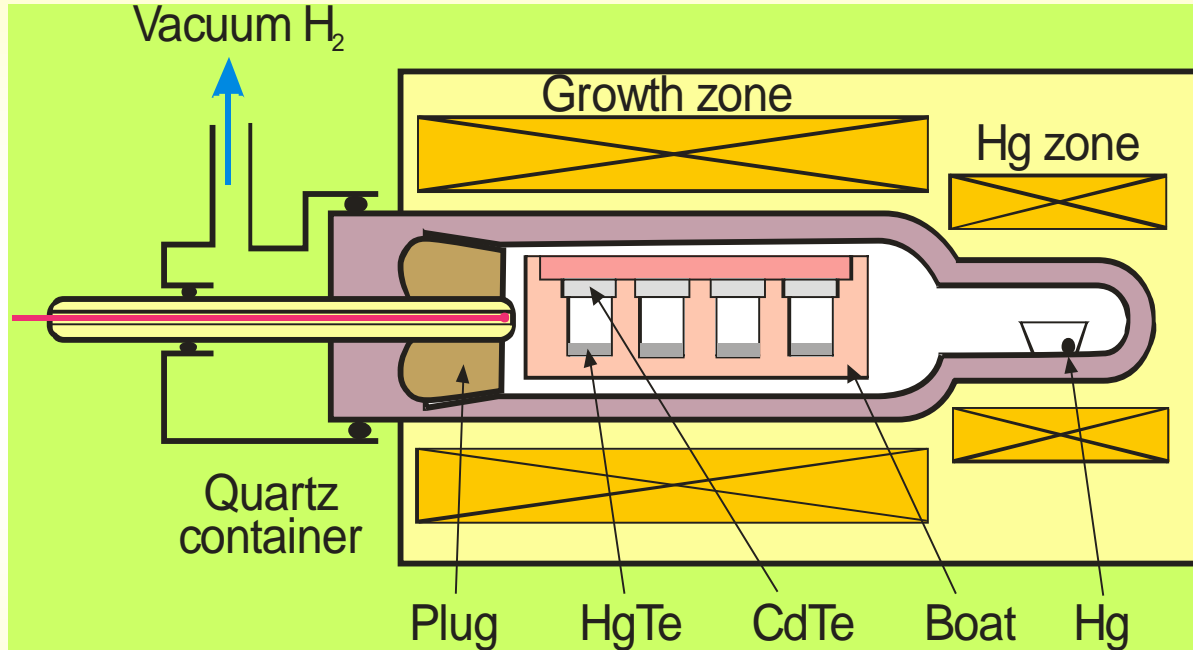
W 1968 zapoczątkowano prace w WAT - ukierunkowane na fotodetektory

Stosowano zmodyfikowaną epitaksję z fazy pary (Isothermal Vapour Phase Epitaxy - ISOVPE), zaproponowaną przez Cohen-Solal i Y. Marfaing, *Solid State Electron.* **11**, 1131-1147 (1968)



Technika ISOVPE była również stosowana na Politechnice Wrocławskiej. W owym czasie skonstruowano dobre fotodiody formując złącze p-n poprzez dyfuzję Hg w materiał typu p

Wzrost epitaksjalny ISOVPE HgCdTe opracowany w IFT (prof. Józef Piotrowski) - stosowany w VIGO



- warstwy z gradientem składu
- początkowo domieszkowanie kontrolowano wygrzewaniem HgCdTe w parach Hg
- później - poprzez domieszkowanie In, Au i As
- koncentracja elektronów $< 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- wyjściowy materiał typu p do produkcji detektorów

Komercjalizacja



1982-1987- początki komercjalizacji w WAT i IFPiLM

1987- utworzenie spółki VIGO Ltd

założyciele: W. Galus, M. Grudzień i J. Piotrowski
(pracownicy WAT)

pracownicy WAT - podstawowa kadra VIGO

2002 - przekształcenie VIGO Ltd w VIGO System S.A.

2014 - debiut VIGO na rynku GPW

obecnie: ~200 pracowników (2 profesorów,
14 doktorów i > 60 inżynierów)

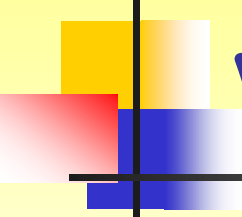
Strategia VIGO

- ❑ sukces komercyjny w produktach *High Tech* może być osiągnięty jedynie poprzez opracowanie produktów unikalnych o parametrach lepszych od parametrów produktów dostępnych na globalnym rynku,
- ❑ w epoce globalizacji rynku nie jest celowe i opłacalne odtwarzanie w małej/średniej firmie zaawansowanych technologii, na opracowanie których potrzebne są bardzo duże środki finansowe
- ❑ z tego powodu zrezygnowano z prób powielania zachodnich badań nad rozwojem detektorów chłodzonych kriogenicznie



laboratoryjno-biurowy

produkcyjny



Współpraca WAT-VIGO

Prace nad fotodetektorami podczerwieni:

- Instytut Fizyki Technicznej (IFT) WAT - prace badawcze detektorów podczerwieni z HgCdTe i supersieci III-V)
- Vigo System SA - prace badawczo-wdrożeniowe i produkcyjne detektorów niechłodzonych z HgCdTe i supersieci III-V
- Obydwa zespoły współpracują ze sobą od około trzydziestu lat (współpraca naukowa, grantowa i inwestycyjna)
- Studenci odbywają praktyki a doktoranci znajdują zatrudnienie w Vigo
- Stanowimy w Polsce unikatowy przykład współpracy naukowego zespołu akademickiego z firmą innowacyjną High Tech
- Taka współpraca wymusza wysoki poziom prowadzonych prac naukowych

Współpraca WAT-VIGO

lata 70 XX w.

Opracowanie technologii produkcji niechłodzonych detektorów podczerwieni

1993

Rejestracja VIGO System Sp. z o.o.

2002

Przekształcenie w spółkę akcyjną

2007

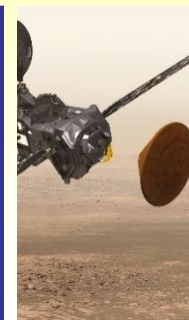
Przeniesienie siedziby do Ożarowa Mazowieckiego

2013

Rozbudowa zakładu produkcyjnego, dofinansowanie UE w ramach POIG 2007-2013

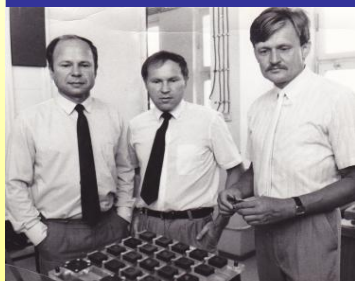
2016

Detektory VIGO lecą na Marsa w ramach misji ExoMars



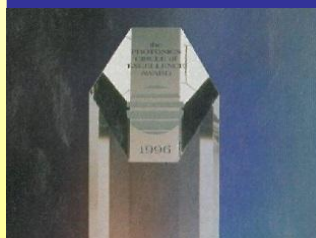
1987

Początek działalności VIGO



1996

The Photonics Circle of Excellence Award



2003

Uruchomienie wspólnego z WAT laboratorium MOCVD



2012

Detektory VIGO na pokładzie łazika Mars Curiosity



2014

Debiut na rynku podstawowym GPW



2015

Otwarcie wspólnego z WAT laboratorium MBE



Rozwój epitaksji w laboratorium WAT-VIGO

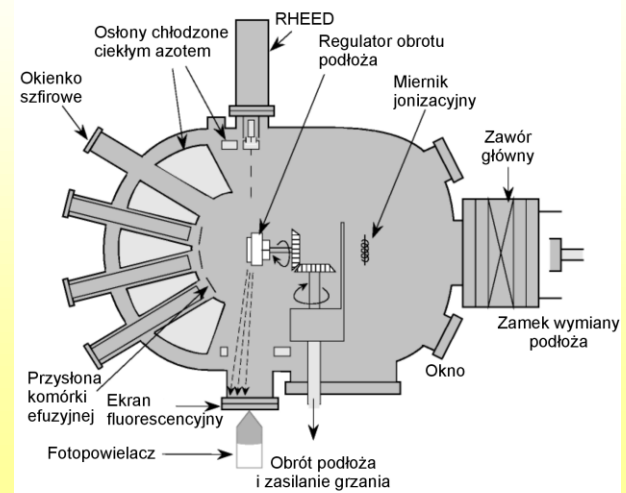
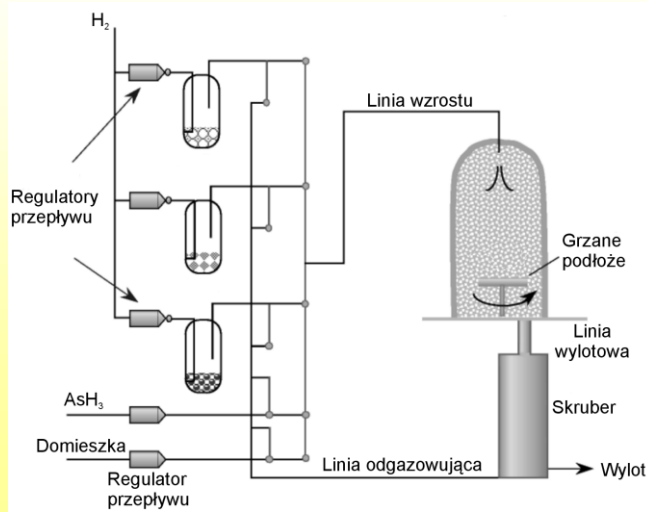
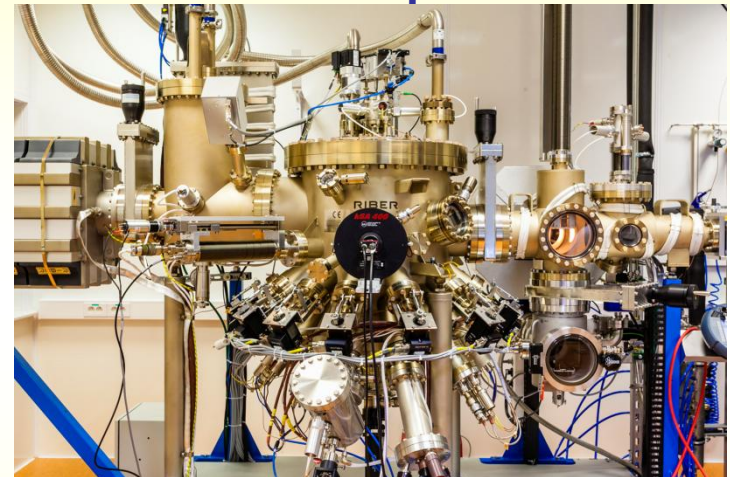
2003

MOCVD-AXT 200 II-VI, HgCdTe



2015

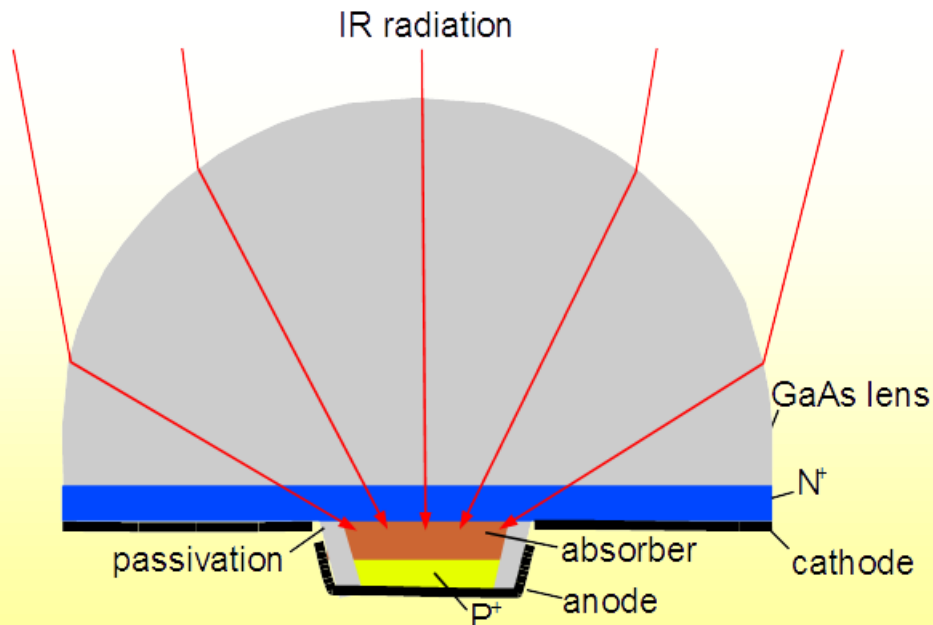
MBE-Riber Compact 21DZ, III-V supersieci



Koncepcja detektora VIGO

Integracja funkcji optycznych, detekcyjnych i elektrycznych w jednym chipie

$$D^*(\lambda, T) = 0.31 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot \left(\frac{A_o}{A_e} \right)^{1/2} \left(\frac{\alpha}{g_{th}} \right)^{1/2}$$



λ - długość fali

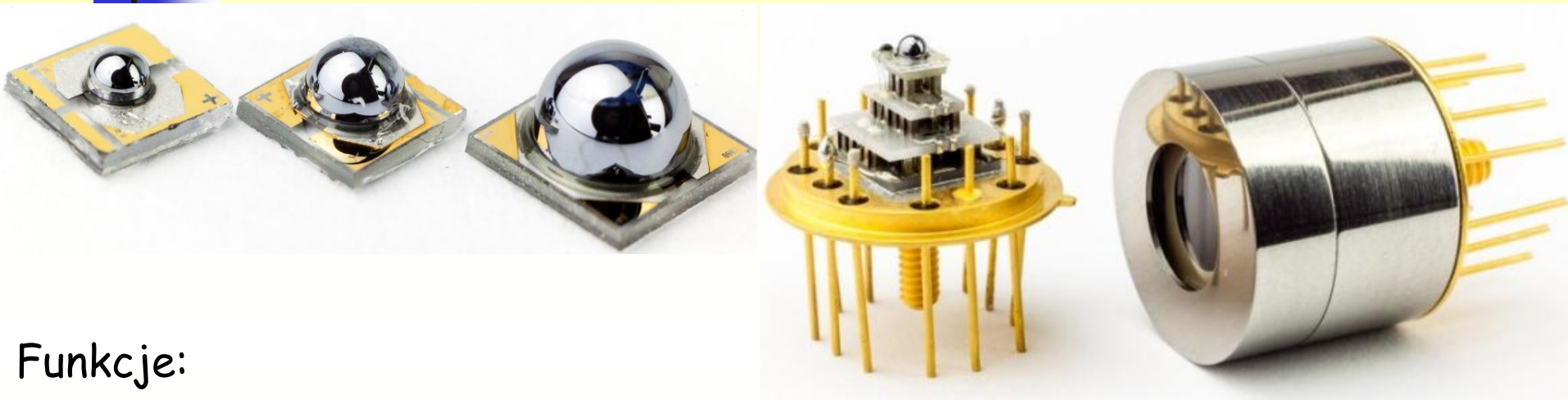
α - współczynnik absorpcji

h - stała Plancka

c - prędkość światła w próżni

g_{th} - szybkość generacji termicznej

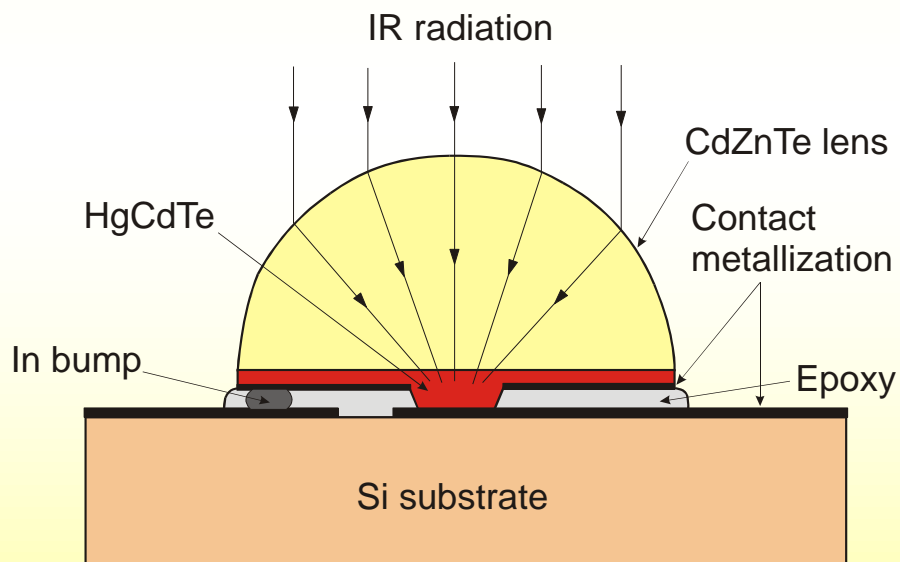
Detektory podczerwieni pracujące bez chłodzenia kriogenicznego



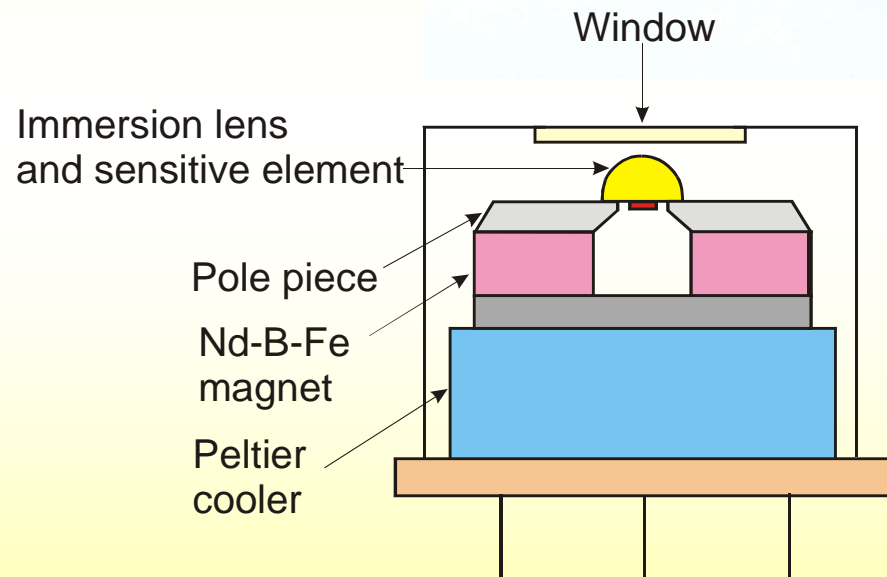
Funkcje:

- koncentracja promieniowania
- zwiększona absorpcja
- efektywne i szybkie zbieranie nośników z absorbera
- dławienie termicznej generacji przy odpowiedniej architekturze struktury
- osłona przed niechcianym promieniowaniem
- minimalizacja impedancji pasożytniczych
- wzmocnienie sygnału w strukturze

Przykłady detektorów VIGO (1993)

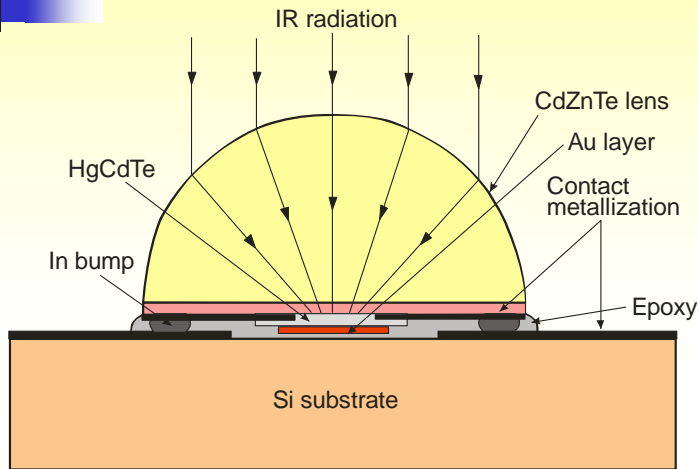


**Monolityczny immersyjny
detektor Dembera**

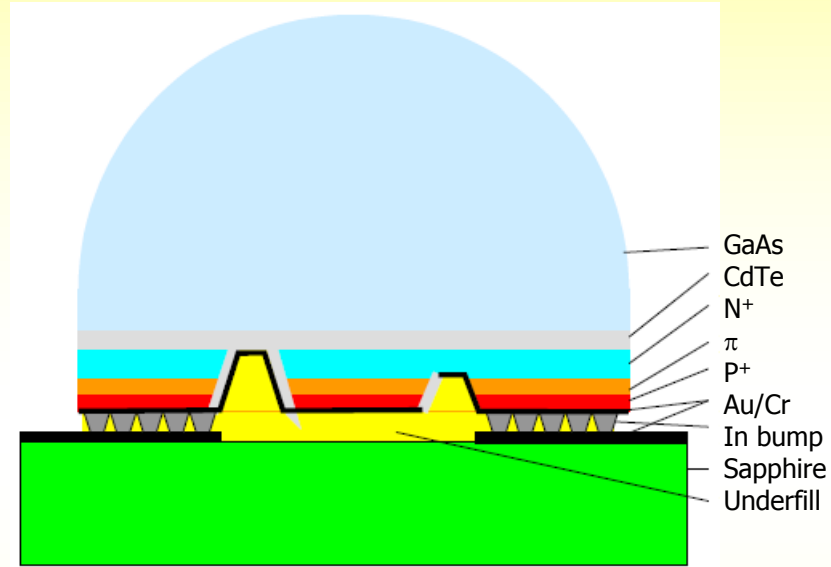


**Termoelektrycznie chłodzony,
immersyjny detektor FEM**

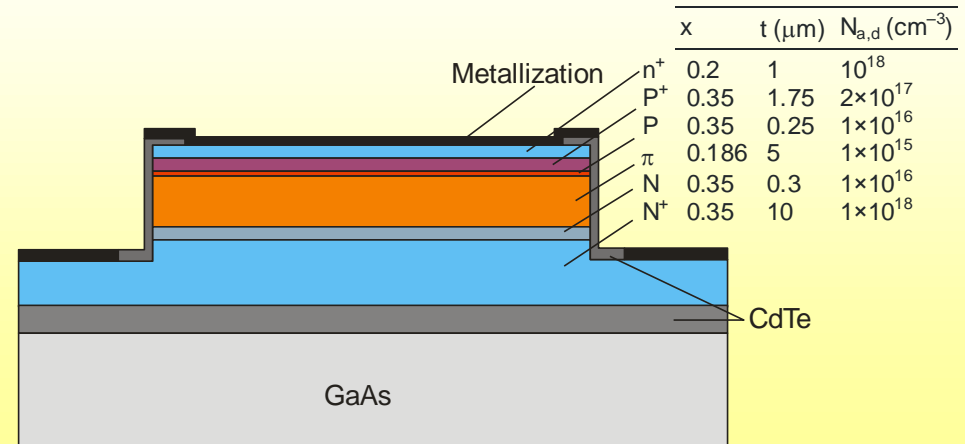
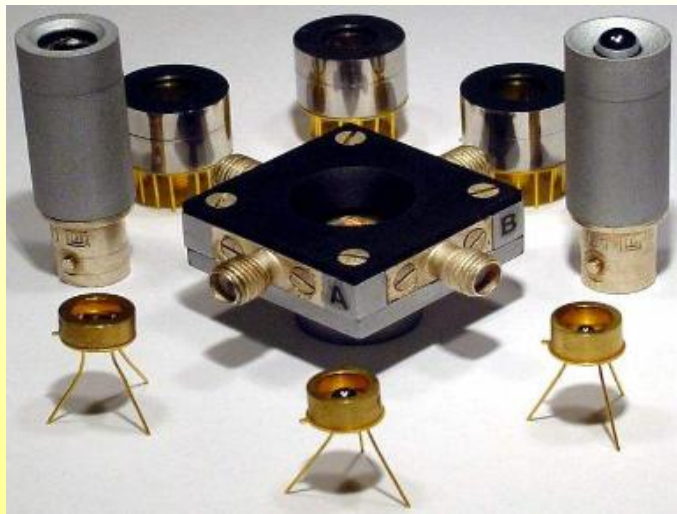
Przykłady detektorów VIGO (2010)



Monolityczny, immersyjny fotorezystor z odbijającym zwierciadłem

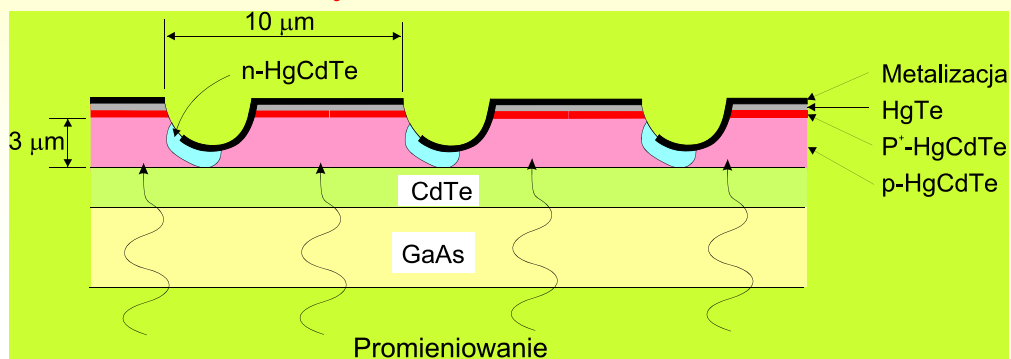


Heterostruktura fotowoltaiczna



Przykłady struktur detektorów c.d.

Detektory fotowoltaiczne z wielokrotnymi heterozłączami



Przekrój detektora
ze złączami prostopadłymi do powierzchni



1996 r. *Photonics Spectra* wyróżnił VIGO nagrodą za najlepszy światowy produkt roku z dziedziny optoelektroniki

A. Rogalski *et al.*, "Interband quantum cascade infrared photodetectors: Current status and future trends", *Phys. Rev. Applied* 17, 027001 (2022)



VIGO System S.A.

- Światowy lider w produkcji niechłodzonych detektorów podczerwieni
- Unikalne w skali światowej technologie i produkty
- Przewaga konkurencyjna na światowym rynku:
 - ponad 30 lat doświadczeń w produkcji detektorów
 - oferta najlepszych urządzeń w przystępnej cenie
 - zdolność do projektowania i produkcji detektorów spełniających najwyższe wymagania (NASA, wojsko)
 - dostosowywanie produktów do indywidualnych potrzeb klienta
 - 6500 m² powierzchni produkcyjno-biurowej

Warstwy
epitaksjalne



Detektory



Moduły detekcyjne



Portfolio produktów VIGO - obecnie

USŁUGI

DETEKTORY

MODUŁY

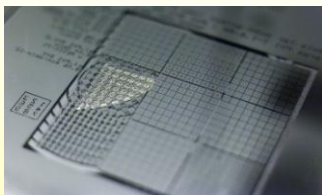
Wzrost warstw
epitaksjalnych



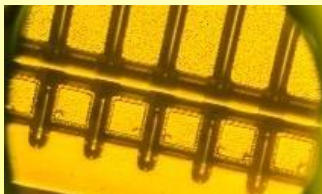
Warstwy
epitaksjalne



Processing



Linijki
detektorów



Zintegrowane
chłodzone
moduły



Chłodzone
detektory



Zintegrowane
niechłodzone
moduły



Niechłodzone
detektory

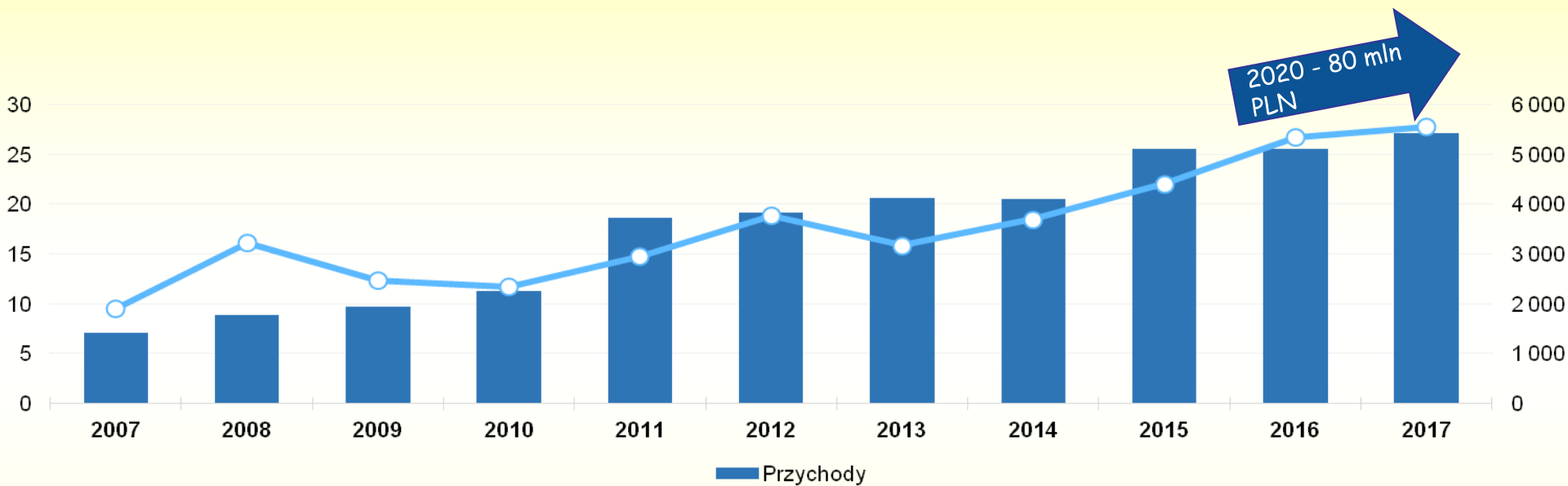


Chipy
detekcyjne



Urządzenia ze
zintegrowaną
optyką, wyjściem
cyfrowym
i oprogramowaniem

VIGO na rynku detektorów średniej podczerwieni



Przemysł i środowisko

Bezpieczeństwo ruchu kolejowego

Zastosowania w R&D i wojsku

Wyróżnienia VIGO S.A. za osiągnięcia wdrożeniowe

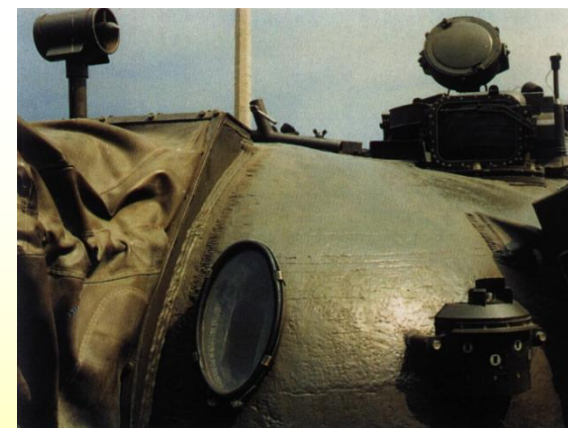
- ❑ w 1996 r. *Photonics Spectra* wyróżnił VIGO nagrodą za najlepszy światowy produkt roku z dziedziny optoelektroniki
- ❑ w 2001 r. Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości wyróżniła VIGO nagrodą *Polski Produkt Przyszłości*
- ❑ 2012 NASA Mars Science Laboratory Mission



wehikuł wylądował
w Gale Crater
6 sierpień 2012



2016: Detektory VIGO
w misji ExoMars
(ESA, ROSKOSMOS)



System ostrzegania laserowego
"OBRA"

- niechłodzone detektory VIGO
- zakres spektralny 0.5-11 μm
- zakres detekcji: 9 km

Nagroda Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej 1997 rok (A. Rogalski)

za prace nad detektorami promieniowania podczerwonego z wykorzystaniem potrójnych związków półprzewodnikowych takich jak: PbSnTe, InAsSb, HgZnTe, HgMnTe i supersieci półprzewodnikowych



Ceremonia na Zamku Królewskim, 6 grudnia 1997 roku

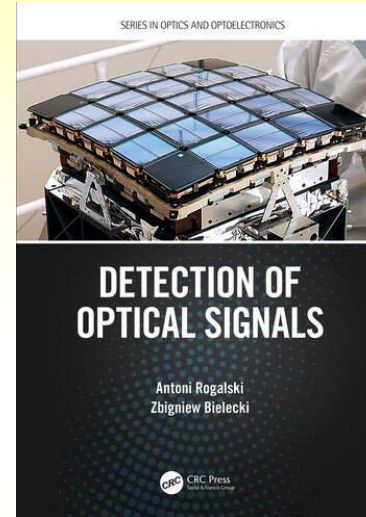
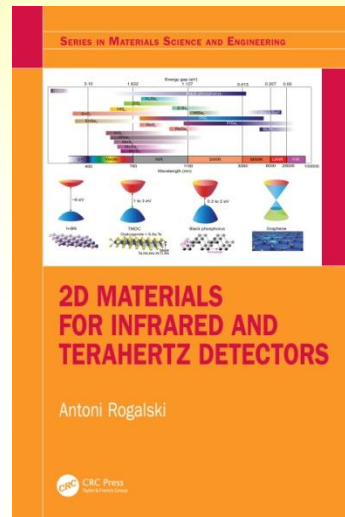
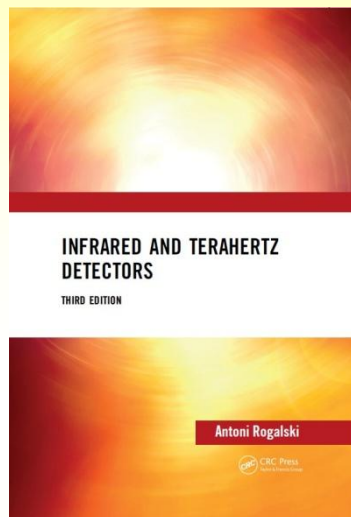
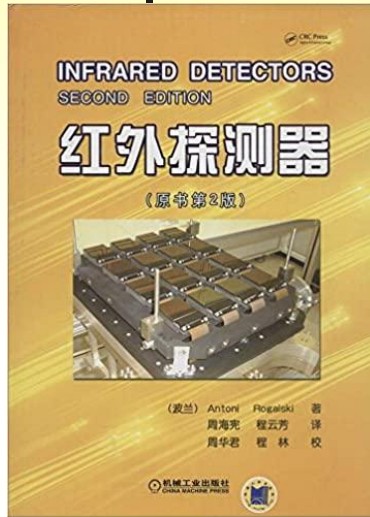
Nagroda I stopnia Ministra Obrony Narodowej (2017)

za najlepszą pracę naukową i wdrożenie z obszaru obronności dla zespołu badawczego w składzie:

- prof. dr hab. inż. **ROGALSKI Antoni (WAT)**
- prof. dr hab. inż. **PIOTROWSKI Józef (VIGO)**
- ppłk dr hab. inż. **MARTYNIUK Piotr (WAT)**
- dr inż. **GAWRON Waldemar (VIGO)**



Zespół WAT dobrze rozpoznawalny w świecie



Top 2% - to prestiżowe zestawienie prezentujące autorów publikacji najczęściej cytowanych w literaturze naukowej

W najnowszym rankingu (2021) Uniwersytetu Stanforda, koncernu wydawniczego Elsevier i firmy SciTech Strategies, prof. dr hab. inż. Antoni Rogalski zajmuje

- trzecie miejsce wśród żyjących Polaków z polską afiliacją (8769 miejsce)
- w subdyscyplinie *Optoelectronics and Photonics* - dwudziesty na świecie, a za 2020 rok - drugi na świecie za Frederico Capasso (Harvard University)

Dziękuję
Dziękuję