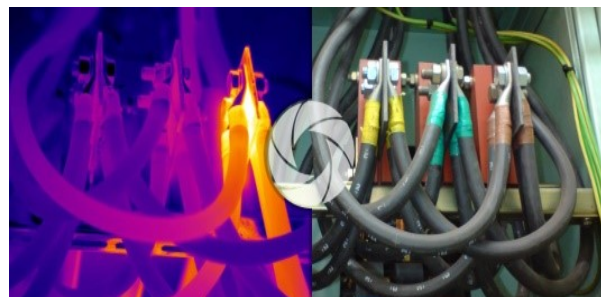
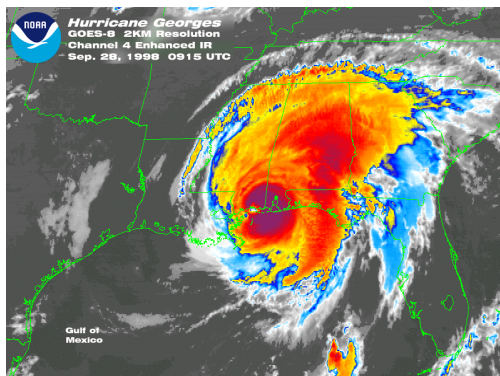
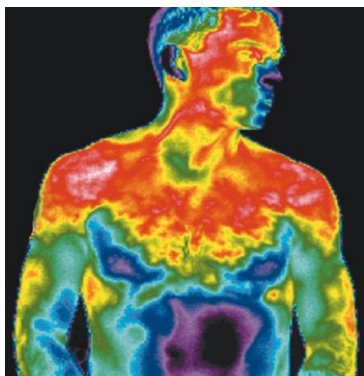


Тънколслойни оптоелектронни структури за детектори в инфрачервената област

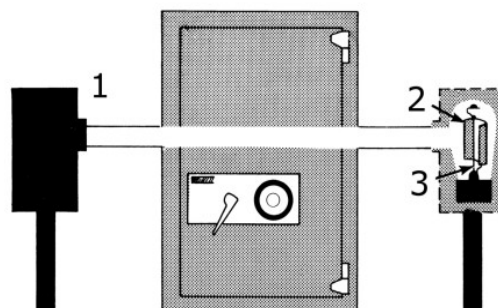
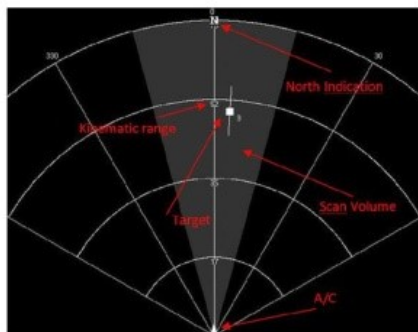
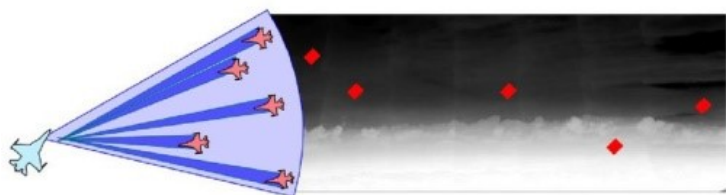
доц. д-р Мария Александрова

- Сравнение между ИЧ матрични детектори (CCD) и точкови тънкослойни детектори
- Особенности на ИЧ лъчение
- Основни параметри и характеристики на тънкослойните ИЧ детектори
- Основни материали в технологията на тънкослойните ИЧ детектори и критерии за избор:
 - InGaAs PIN фотодиод
 - Фотопроводими детектори от PbS и PbSe
 - InAs и InSb детектори
 - MCT (Mercury Cadmium Telluride - HgCdTe)
- Примери за конструктивни изпълнения на ИЧ детектори

- Сравнение между ИЧ матрични (CCD) и точкови тънкослойни детектори



Кога е необходима ИЧ CCD матрица? – при изграждане на панорамен тип изображение



Кога е необходим единичен (точков) тънкослоен ИЧ сензорен елемент - при отчитане на наличие/липса на обект, негови координати (разстояние, посока на движение) или статично измерване в точка.

- **Особености на ИЧ лъчение**

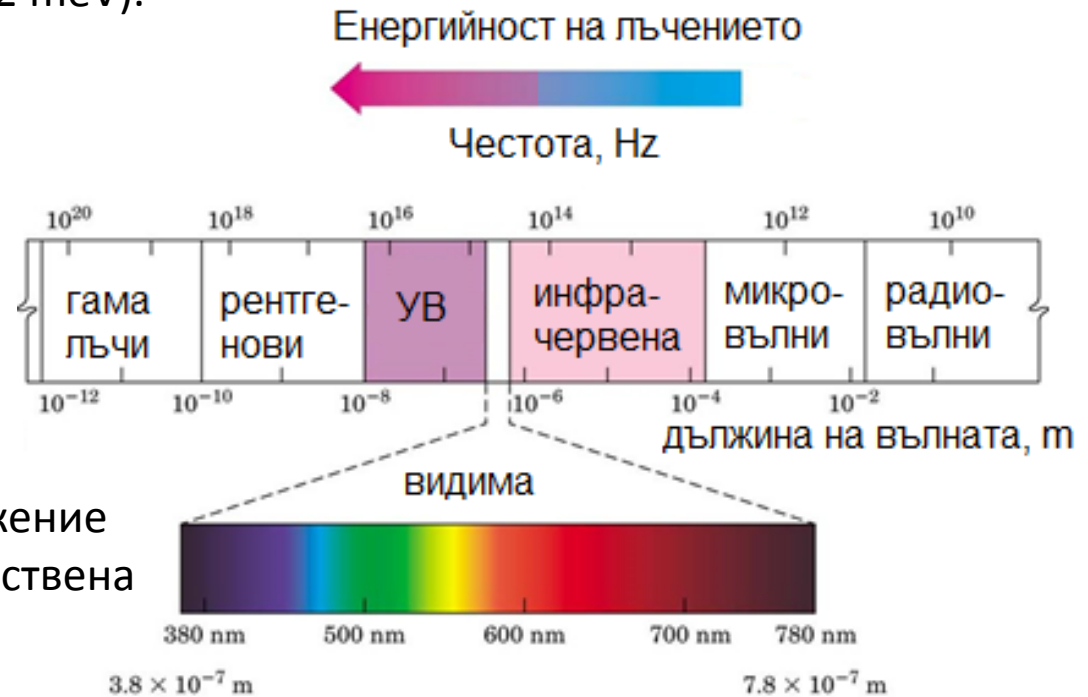
Инфрочервеното излъчване е спектър от електромагнитни вълни с дължина на вълната по-голяма от тази на вълните от видимия спектър. Разполагат се в диапазона от 0,75 μm (1,65 eV) до 1000 μm (1,2 meV).

(1) Невидимо за човешките очи

(2) Слаба енергия

(3) Голяма дължина на вълната

(4) Излъчва се от всякакви предмети (при повечето основно заради отражение на ИЧ радиация, не поради собствена емисия).



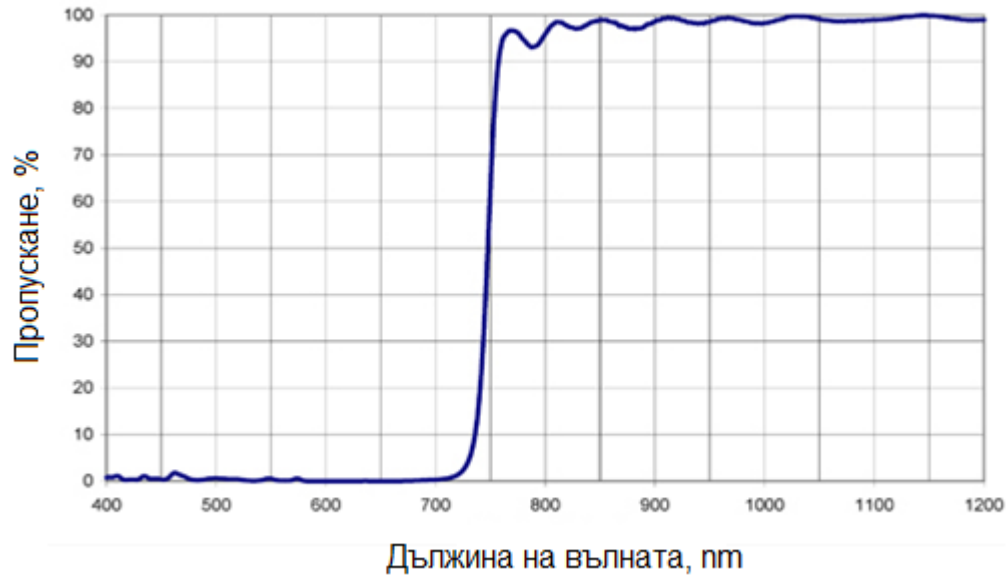
Ако системата за измерване трябва да работи в област с дължини на вълните над 3 μm , шумът, дължащ се на колебания във фоновото излъчване е значителен. За да се намали този тип шум, в повечето случаи се използват студени екрани и студени филтри – т.е. взимат се мерки за спектрално филтриране с допълнителни оптични покрития.



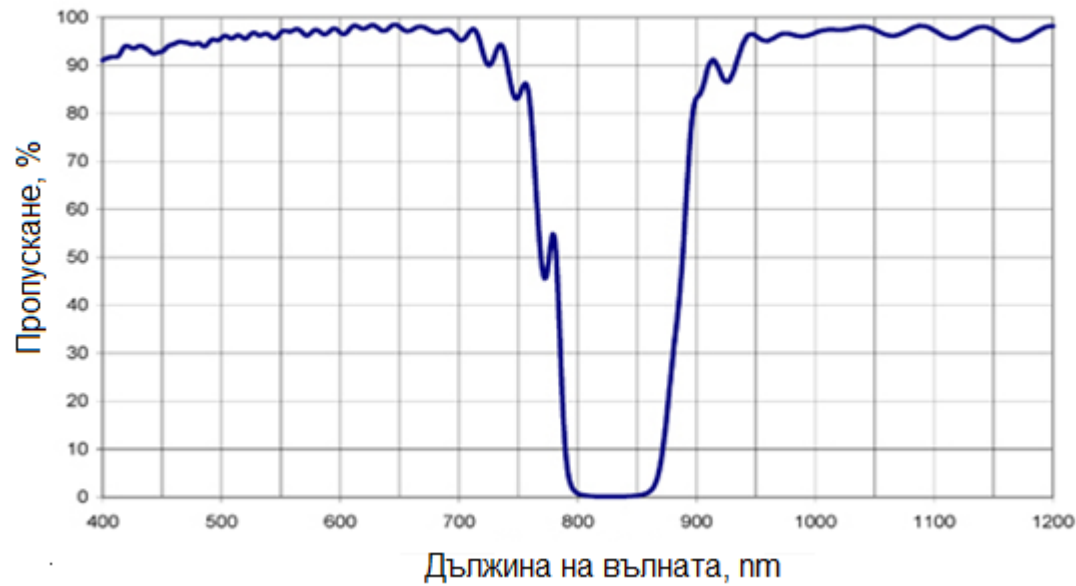
Поглъщане на ИЧ лъчение от съставките на атмосферата.

В атмосферата се извършва абсорбция на определени дължини на вълната от H_2O , CO_2 и други елементи.

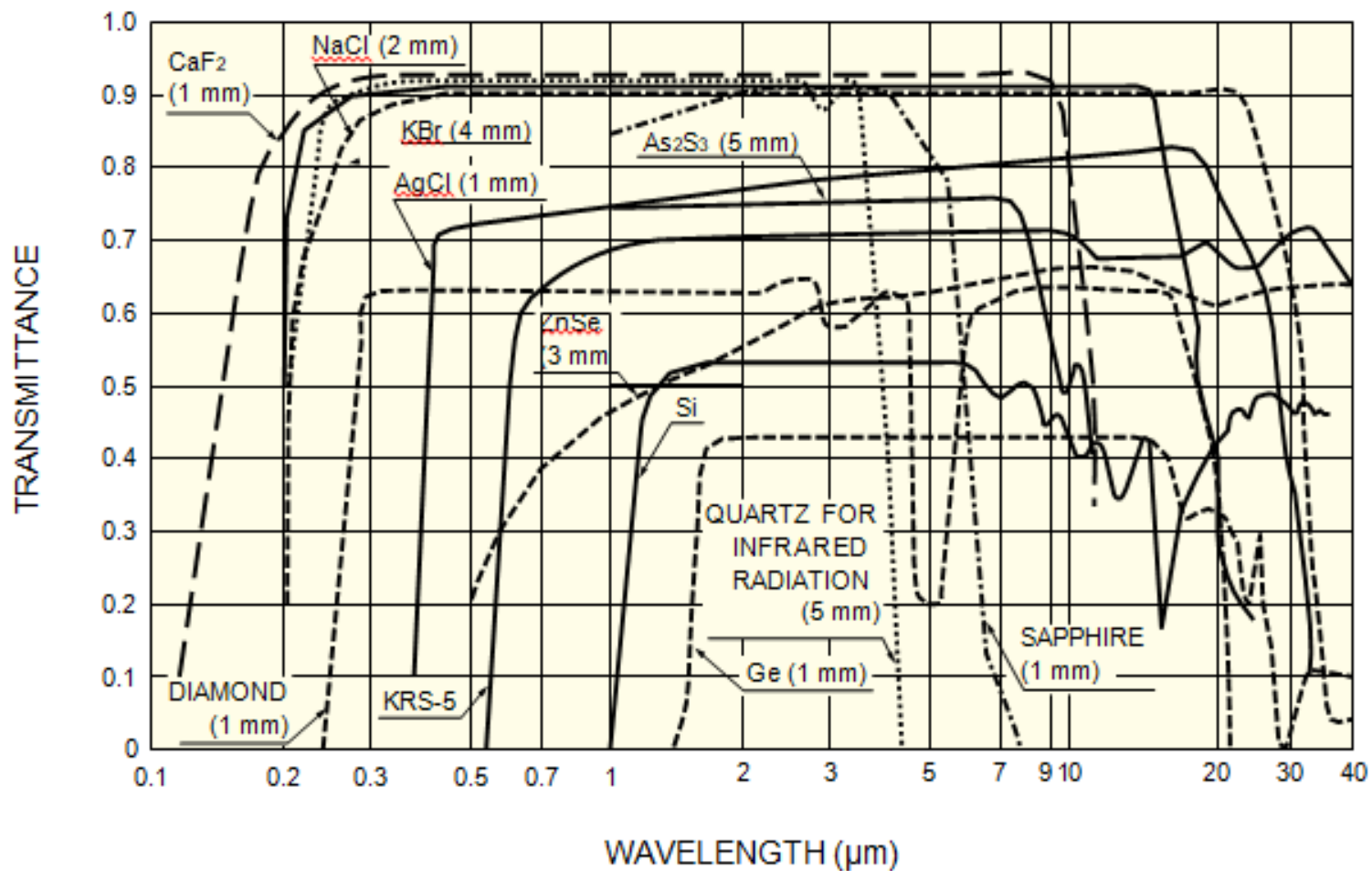
лентов филтър



ивичен режекторен филтър



Пропускливост на различни оптични филтри в ИЧ диапазон



Пропускливост на някои оптични материали в ИЧ обхват, подходящи за подложки

- **Основни параметри и характеристики на тънкослойните ИЧ детектори**

Основните характеристики, показващи ефективността на инфрачервения детектор, са фоточувствителност, еквивалентна шумова мощност (Noise Equivalent Power) и детектираща способност D^*

1) Фоточувствителност

Фоточувствителността е изходното напрежение (или изходен ток) на ват падаща енергия, когато шумът не се взема предвид.

$$R = \frac{S}{PA}$$

S: Изходен сигнал [V], P: Падаща върху повърхността на детектора лъчиста енергия [W / cm²], A: Активна площ на детектора [cm²]

Когато светлината с дадена дължина на вълната навлезе във фотодетектор, фототокият I_{sc} се изразява чрез следното уравнение

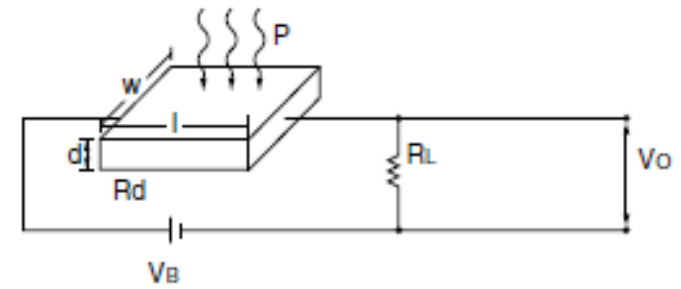
$$I_{sc} = \eta q \frac{PA}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{\eta q PA \lambda}{hc}$$

q е заряд на електрона, η е квантова ефективност, h е константа на Планк, c е скорост на светлината във вакуум, λ е дължината на вълната.

Фоточувствителността за дадена дължина на вълната е:

$$R_{\lambda} = \frac{I_{sc}}{PA} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24}$$

Изходните сигнали от фотопроводящите детектори се извличат като изходно напрежение V_o чрез използване на схема като тази.



$$V_o = \frac{R_L}{R_d + R_L} \cdot V_B$$

където участват величините преднапрежение V_B , съпротивление на структурата на тъмно R_d и товарно съпротивление R_L .

Промяната във V_o поради промени в R_d при излагане на светлина се отразява с:

$$\Delta V_o = - \frac{R_L V_B}{(R_d + R_L)^2} \cdot \Delta R_d$$

$$\Delta R_d = -R_d \frac{q(\mu_e + \mu_h)}{\sigma} \cdot \frac{\eta \tau \lambda P A}{l w d h c}$$

където τ е време на живот на токоносителите, μ_e и μ_h са подвижност на електрони и дупки, съответно и σ е електропроводимостта на слоя.

Така фоточувствителността става:

$$R_\lambda = \frac{\Delta V_o}{P A} = \frac{q \eta \tau \lambda (\mu_e + \mu_h)}{\sigma l w d h c} \cdot \frac{R_L R_d V_B}{(R_d + R_L)^2}$$

2) Еквивалентна шумова мощност: NEP (Noise Equivalent Power)

Това е количеството падаща светлина, равно на собственото ниво на шума на детектора.

$$NEP = \frac{PA}{S/N \cdot \sqrt{\Delta f}} \quad [W/Hz^{1/2}]$$

N : Изходен шумов сигнал [V]
Δf: честотна лента на шумовия сигнал [Hz]

3) Детектираща способност (детектируемост) D*

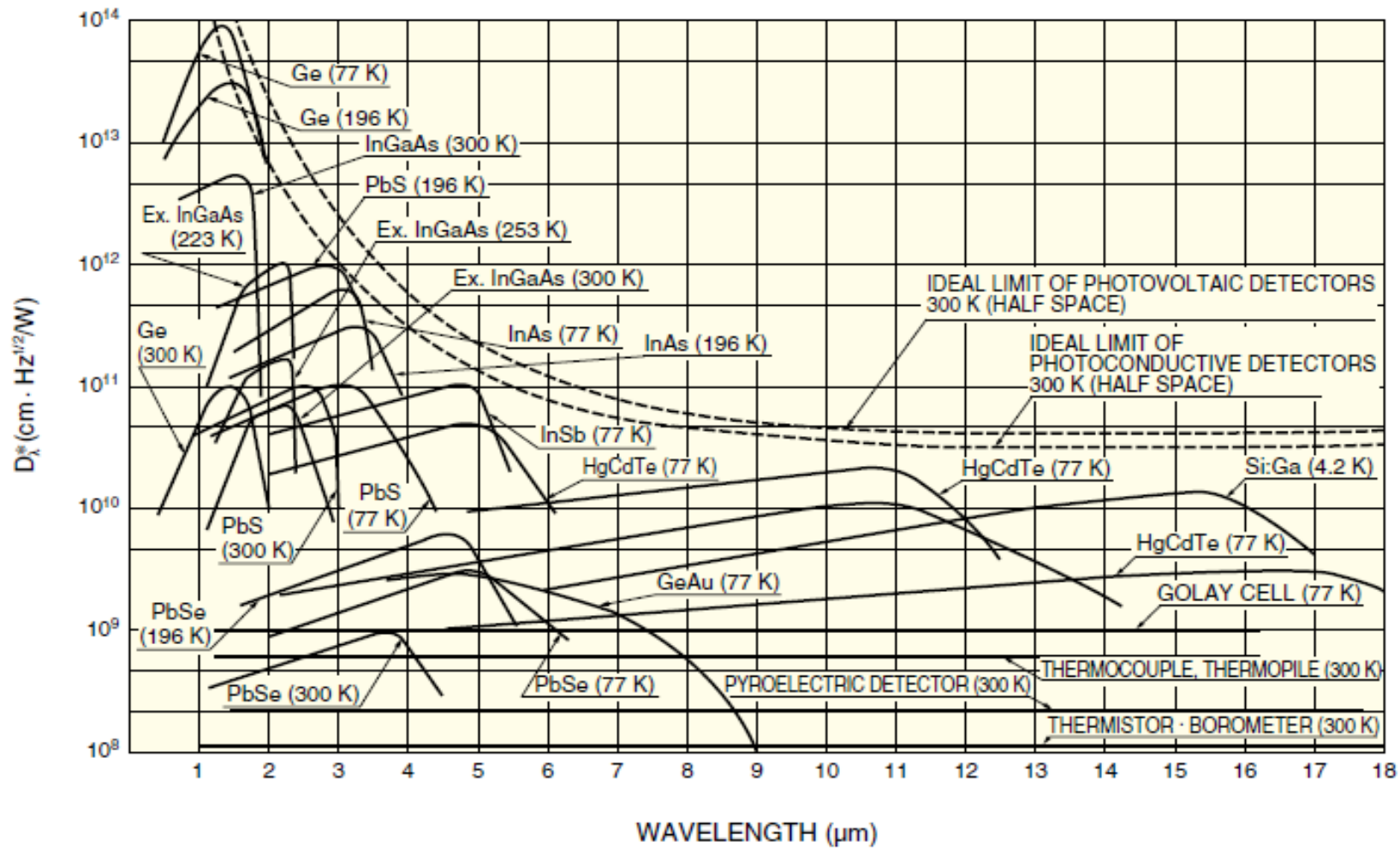
D* е нормализираната фоточувствителност към единица активна площ на детектора, което улеснява сравняването на характеристиките на различните детектори.

$$D^* = \frac{S/N \cdot \sqrt{\Delta f}}{P \cdot \sqrt{A}} = \frac{\sqrt{A}}{NEP} \quad [cm \cdot Hz^{1/2}/W]$$

Условията на измерване на D* зависят от функцията на D* (A, B, C), където A е температурата [K] или дължината на вълната [μm] на лъчистия източник, B е честотата на модулиране (накъсване) на лъчистата енергия на импулси (с чопър), а C е честотната лента.

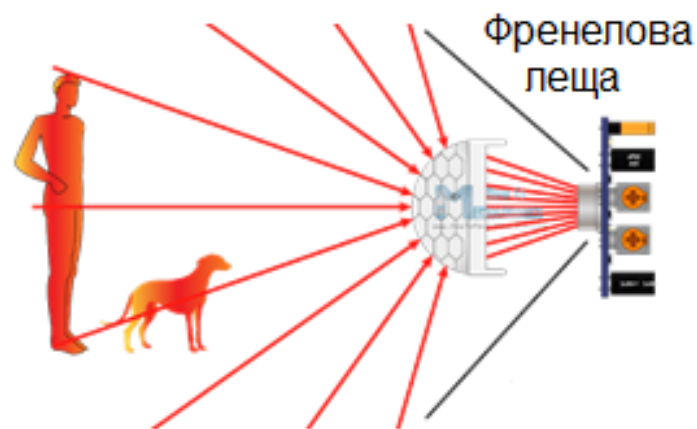
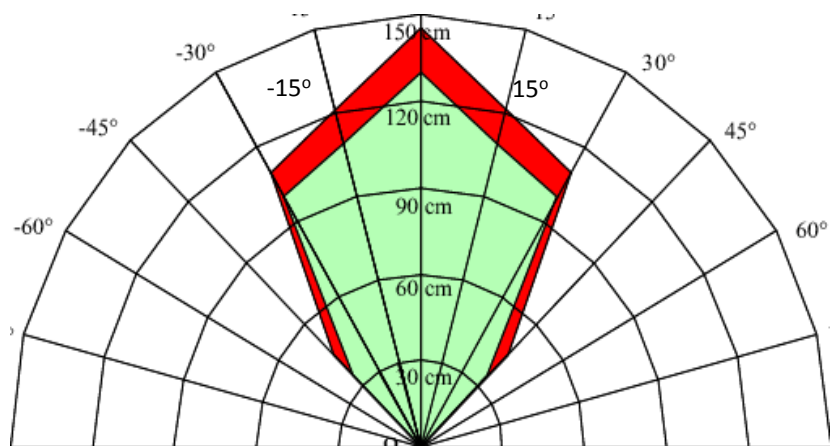
Видовете инфрачервени детектори са показани в таблицата, а техните типични спектрални характеристики на реакция (спектрална чувствителност на отклика)

Тип		Материал	Спектрал-на реакция (μm)	Работна температура (°C)	D* (cm · Hz ^{1/2} / W)
	Пироелектрични		Близка ИЧ област	27°C	D* (l,10,1) = 6 · 10E8
Топлинни				27°C	D* (l,10,1) = 1 · 10E8
				27°C	D* (l,10,1) = 1 · 10E9
		PZT, TGS, LiTaO3		27°C	D* (l,10,1) = 2 · 10E8
		PbS	1 to 3.6	27°C	D* (500,600,1) = 1 · 10E9
	Фотопрое-дими	PbSe	1.5 to 5.8	27°C	D* (500,600,1) = 1 · 10E8
		InSb	2 to 6	20°C	D* (500,1200,1) = 2 · 10E9
	Със собствена проводимост	HgCdTe	2 to 16	-196°C	D* (500,1000,1) = 2 · 10E10
		Ge	0.8 to 1.8	27°C	D* (lp) = 1 · 10E11
		InGaAs	0.7 to 1.7	27°C	D* (lp) = 5 · 10E12
	Фотоволтаични	Ex. InGaAs	1.2 to 2.55	20°C	D* (lp) = 2 · 10E11
Квантови		InAs InSb	1 to 3.1 1 to 5.5	196°C -196°C	D* (500,1200,1) = 1 · 10E10 D* (500,1200,1) = 2 · 10E10
		HgCdTe	2 to 16	-196°C	D* (500,1000,1) = 1 · 10E10
		Ge : Au	1 to 10	-196°C	D* (500,900,1) = 1 · 10E11
		Ge : Hg	2 to 14	-260 °C	D* (500,900,1) = 8 · 10E9
	С примесна проводимост	Ge : Cu	2 to 30	-260 °C	D* (500,900,1) = 5 · 10E9
		Ge : Zn	2 to 40	-260 °C	D* (500,900,1) = 5 · 10E9
		Si : Ga	1 to 17	-260 °C	D* (500,900,1) = 5 · 10E9
		Si : As	1 to 23	-260 °C	D* (500,900,1) = 5 · 10E9

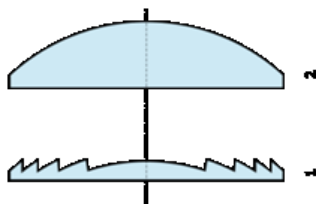
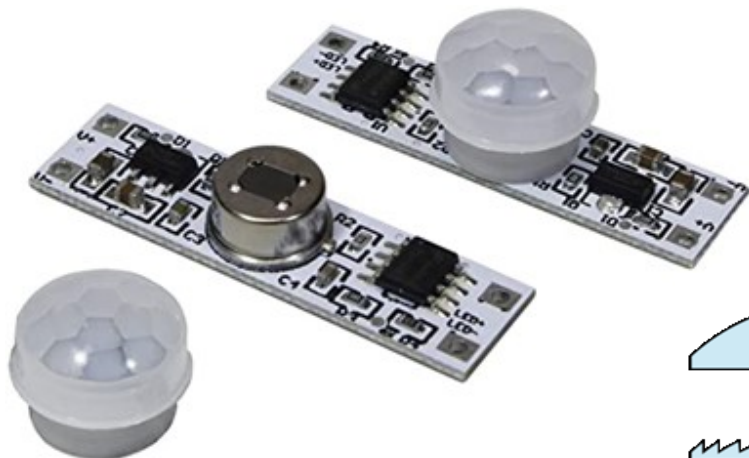


Спектрални характеристики на отговор на различни инфрачервени детекторни материали

4) Характеристиката на насоченост на ИЧ детектора дава способността да „вижда“ лъчението в различни направления в пространството. Обикновено е сравнително тясна и зависи също от разстоянието до обекта.



За да се събере ИЧ разходящо лъчение, постъпващо към детектора от различни посоки в по-тесен сноп с контролируема насоченост фронтално срещу приемника, се използват лещи на Френел.

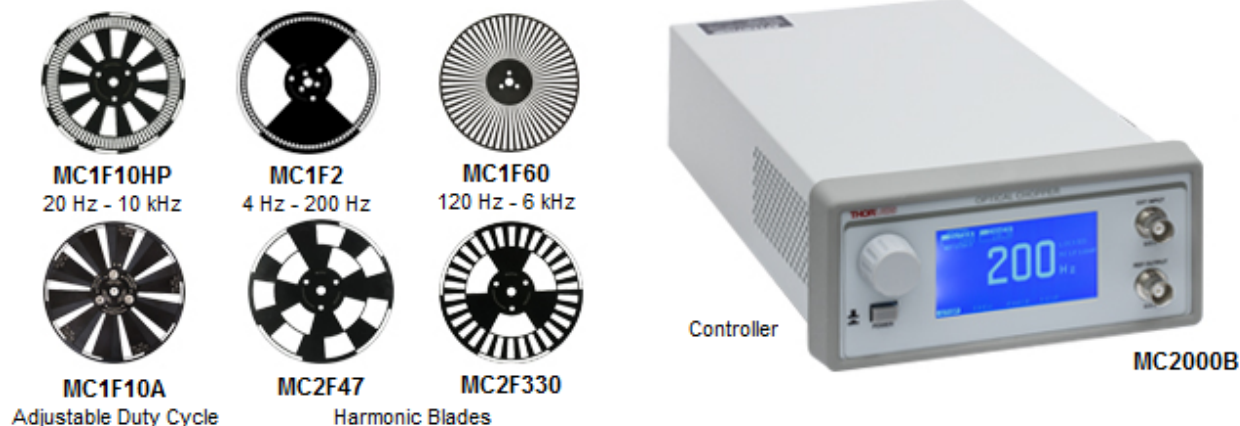


- **Основни материали в технологията на тънкослойните ИЧ детектори и критерии за избор (практически насоки и особености):**

(1) ИЧ област – дължина на вълната или температура на обекта, който ще се регистрира.

(2) Фоточувствителност и S / N (отношение сигнал/шум) - за да се подобри S / N , е необходимо охлаждане на инфрачервения детектор. Охлаждането променя спектралния отговор. Спектралните характеристики на фотопроводимите детектори PbS и PbSe се изместват към по-големи дължини на вълната, докато тези на InGaAs, InAs и InSb фотоволтаичните детектори се изместват в посока към по-късите вълни.

(3) Детектираща способност D^* е мярка за S / N на детектор, когато инфрачервено лъчение от 1 W се подава през оптичен чопър.

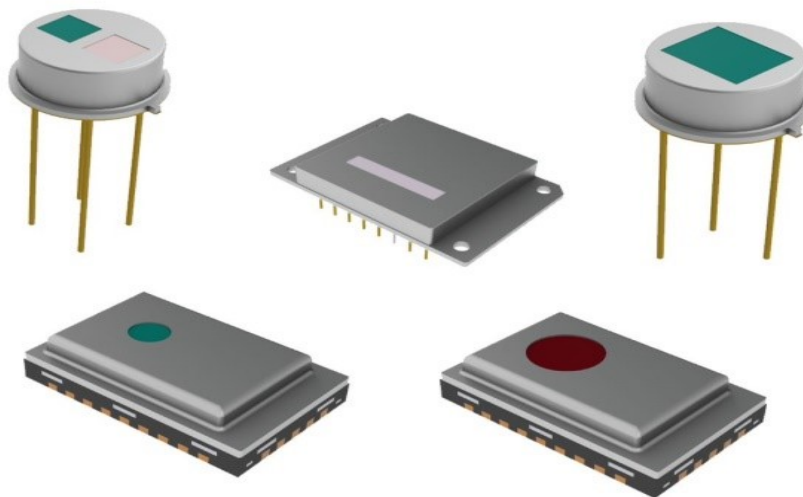


Оптичен чопър

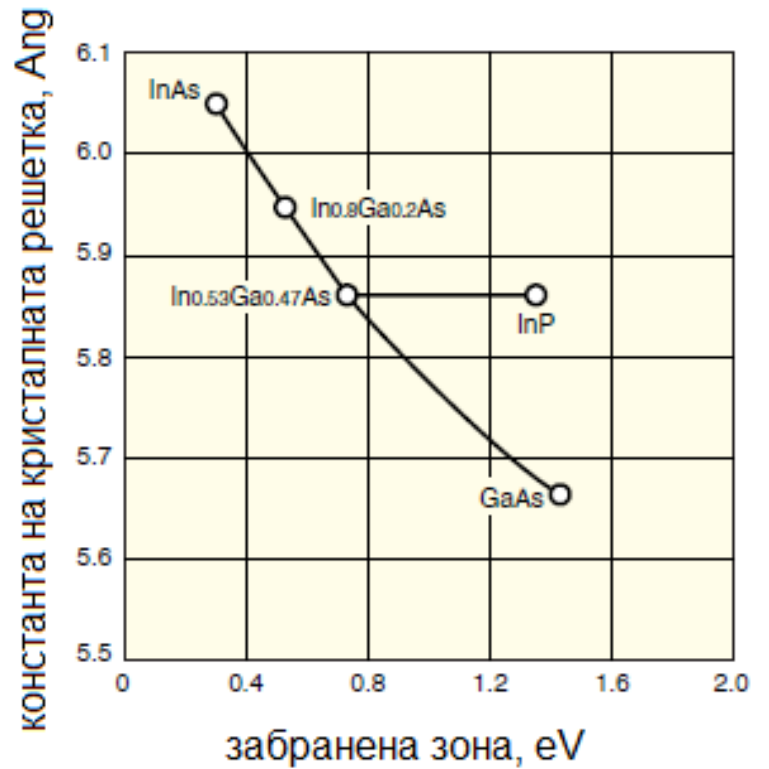
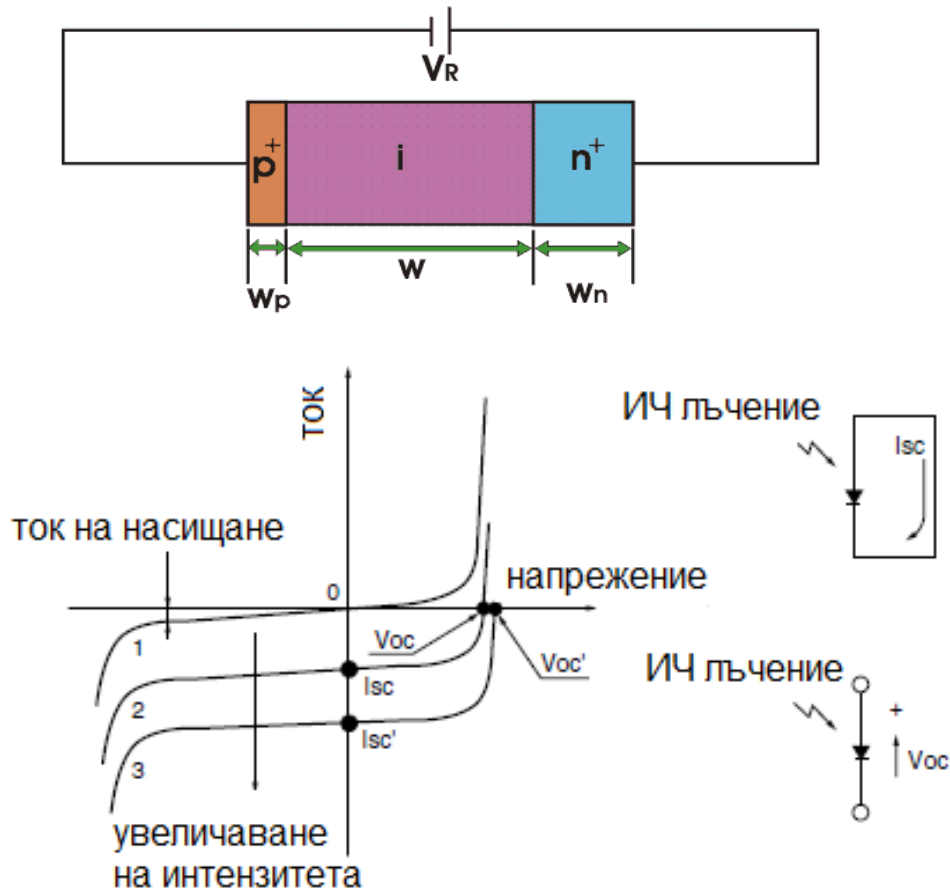
(4) Време за реакция - оптичните комуникации изискват скорост на реакция съответстваща на честота 1 GHz, а охранителните аларми регистриращи проникване в обект изискват скорост на реакция съответстваща на честота от 0,1 Hz.

(5) Активна площ на детектора - в зависимост от приложението може да се наложи да се определи специфичен размер или геометрия на активната област – фотолитографско структуриране.

(6) Корпуси - метални, керамични, стъклени и дюарови (с включено охлаждане). Корпусът се избира според приложението, респективно линейността, стабилността, температурните характеристики, цената.

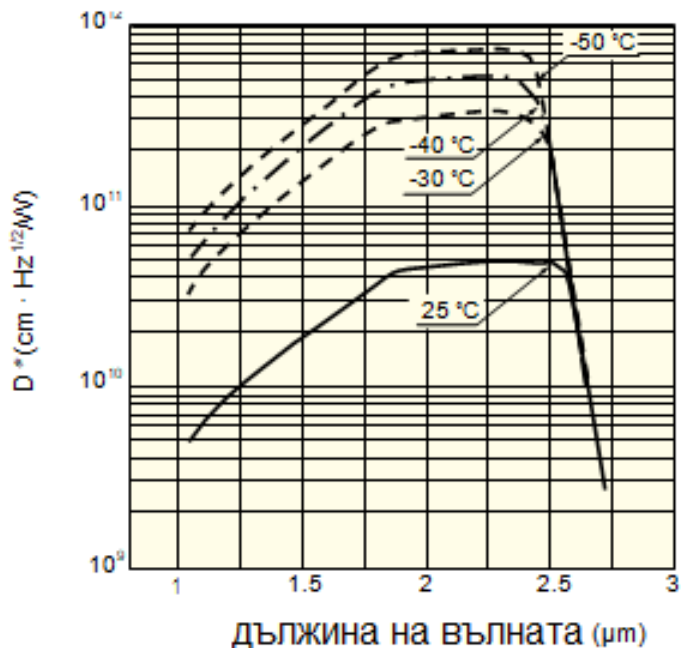
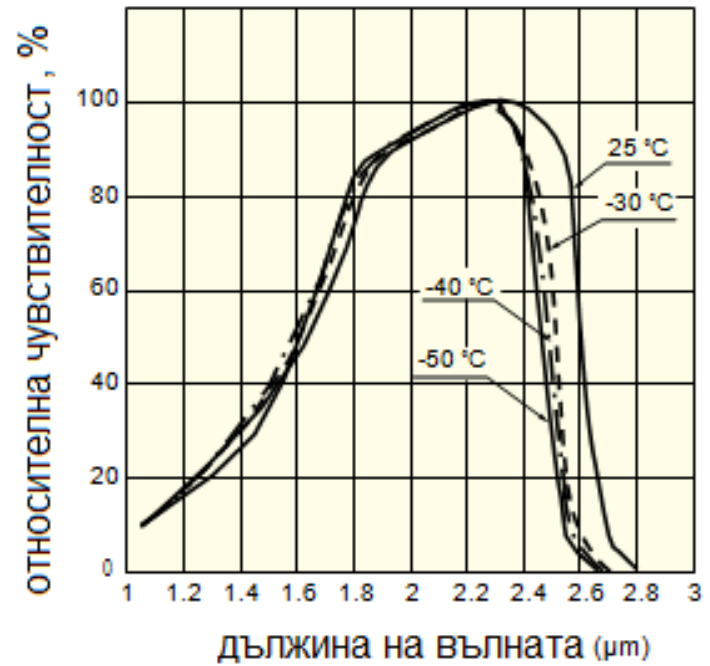
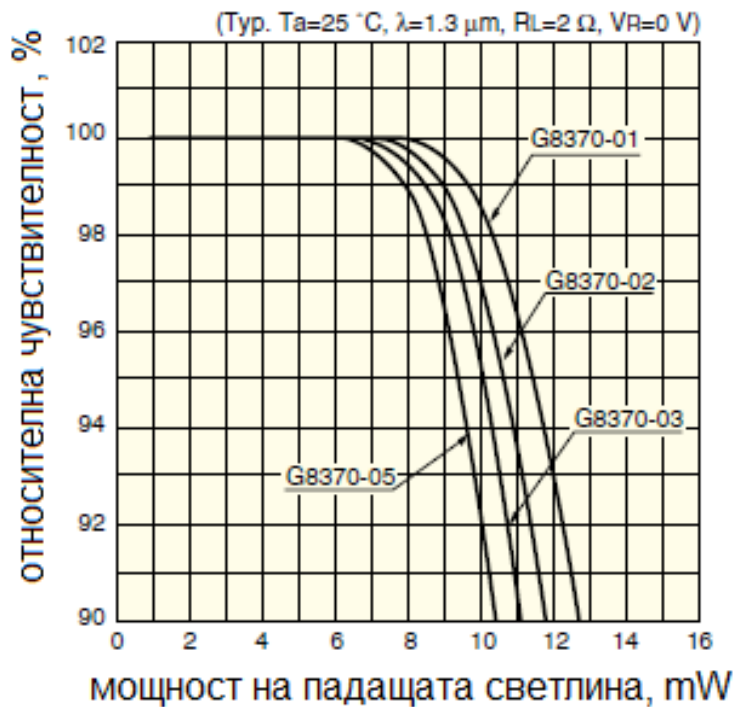


- InGaAs PIN фотодиод – тип фотоволтаична структура



Връзка между константа на кристалната решетка на $In_{1-x}Ga_xAs$ и ширина на забранена зона.

Волт-амперна характеристика без товар на тъмно и при различни интензитети на падащата ИЧ светлина.



Долната граница на линейността на InGaAs PIN фотодетекторите се определя от шума, докато горната граница се определя от активната площ на детектора и топологията на електродите.

Времето за реакция се определя от следната зависимост $t_r = 2.2C_t (R_L + R_s)$, където C_t е капацитет на преходите (<10 nF), R_L е товарно съпротивление, а R_s е съпротивлението на структурата след осветяване с ИЧ светлина, което става толкова малко, в сравнение с R_L , че се пренебрегва ($R_L = 50 \Omega$ – коаксиален кабел).

$$C_t \propto \frac{A}{\sqrt{V_R}}$$

V_R – преднапрежение (обратно напрежение)

Връзката между времето на реакция и граничната честота (cut-off frequency) f_c (Hz) е $t_r = 0,35 / f_c$.

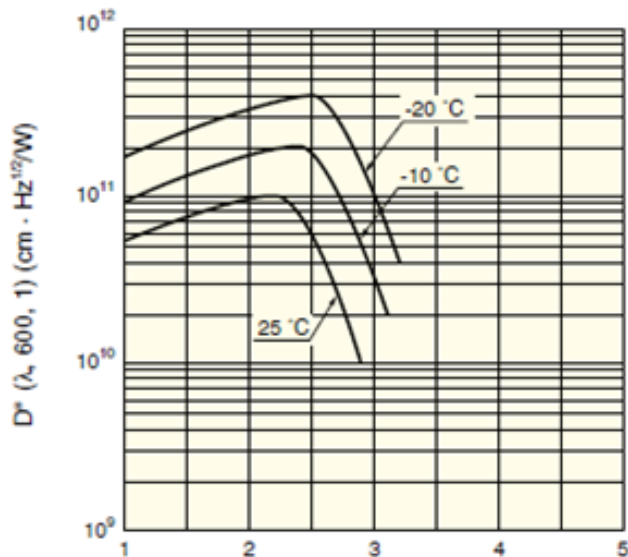
Фотопроводящи детектори от PbS и PbSe

Фотопроводимите детектори PbS и PbSe са инфрачервени детектори, използващи ефекта на фотопроводимост, в резултат на който намалява съпротивлението на материала, когато инфрачервеното лъчение попадне върху него.

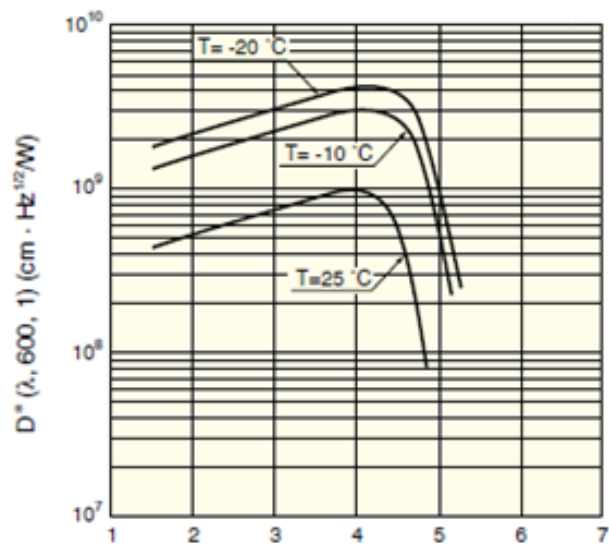
Предимства пред други материали за ИЧ диапазон:

- по-висока детектируемост ,
- по-висока скорост на реакция
- работа при стайна температура.

Недостатък: съпротивлението на тъмно, фоточувствителността и характеристиките на реакцията се променят по-силно от околната температура. Затова работят с вграден термистор.



дължина на вълната (μm)



дължина на вълната (μm)

Спектрален отклик при различни температури на ИЧ сензор с PbS (вляво) и PbSe (вдясно).

Честотните характеристики на PbS и PbSe могат да бъдат получени от следната формула:

$$R(f) = \frac{R(0)}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}}$$

R(f): Отклик при работната честота

R(0): Отклик при 0 Hz

f : честота на прекъсване на излъчването от чопъра

τ : времеконстанта определена от вътрешното съпротивление на материала за даден интензитет на ИЧ лъчение и от капацитета на прехода активен преобразователен слой/електрод.

Детектируемата способност е:

$$D^*(f) = \frac{k\sqrt{f}}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}} \quad \max \longrightarrow f = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Нивата на шума в PbS и PbSe внезапно се увеличават, когато пред-напрежението, приложено към фотоелементите, надвиши определено прагово ниво.

InAs и InSb детектори

Това са фотоволтаични детектори с р-п преход. Техните характеристики на спектрален отговор са подобни на тези на PbS и PbSe детекторите, но тъй като InAs и InSb имат по-голяма подвижност на токоносителите (респективно по-високи скорости на реакция), те се използват в различни приложения от детекторите на базата на PbS и PbSe.

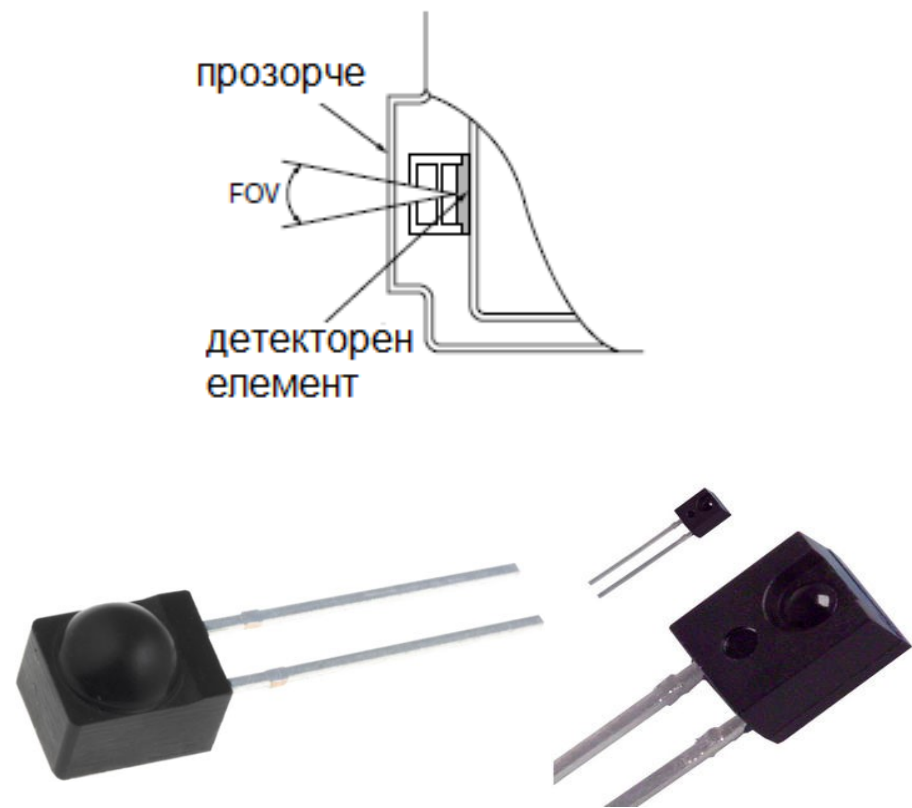
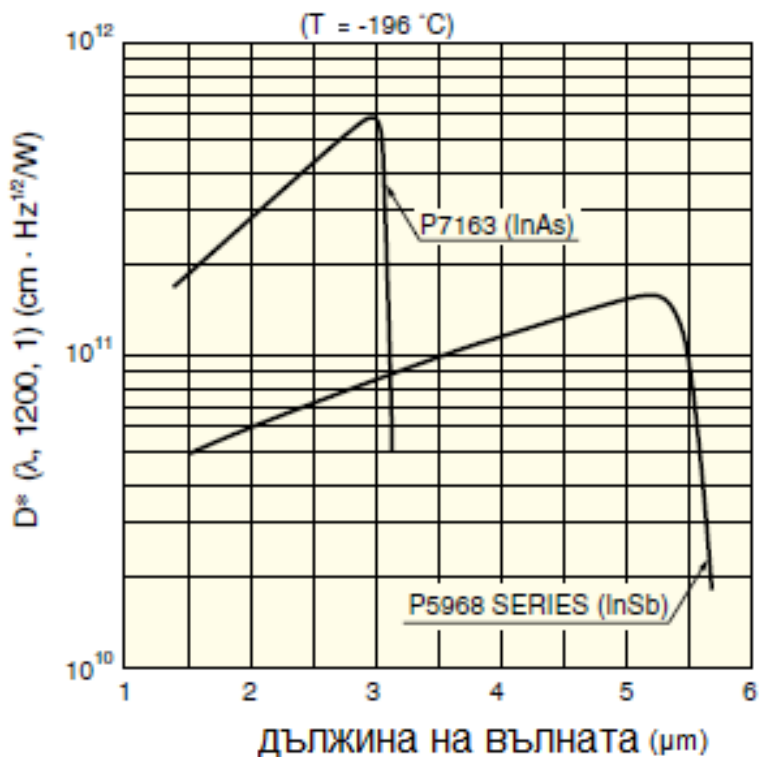
За прецизни приложения не работят при стайна температура (-196°C – криогенни температури).

В диапазона на спектралната реакция за детектора InSb шумът, дължащ се на колебания във фоновата светлина при температура от 300 K (~27°C), не може да бъде пренебрегнат.

$$D^* = \frac{\lambda \sqrt{\eta}}{hc \sqrt{2Q}} \quad [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}]$$

Участват величините дължина на вълната, квантова ефективност (числител), константа на Планк, скорост на светлината във вакуум и лъчистия поток на фоновото излъчване.

За да се намали фоновият излъчващ шум се използва “студен” екран, който ограничава зрителното поле (field of view - FOV) със „студен“ лентов филтър



Спектрална характеристика на InAs и InSb, конструкция на прозорчето с ИЧ филтър за зрителното поле на сензора и корпус непрозрачен за видима и УВ светлина.

МСТ (Mercury Cadmium Telluride - HgCdTe) – живачно-кадмиев телурид

Това са фотопроводими детектори, използващи фоторезистивния ефект, така че стойността на съпротивлението на детекторния елемент намалява при излагане на светлина.

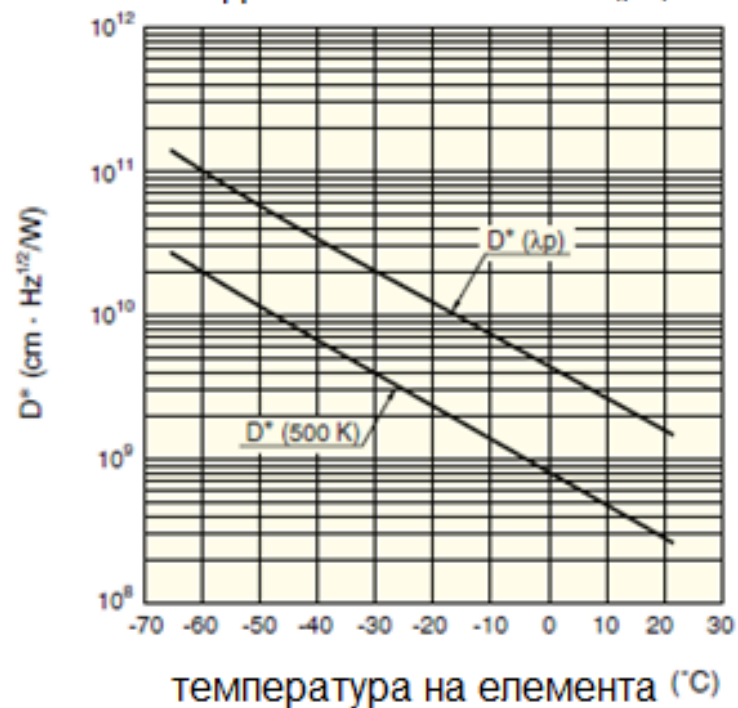
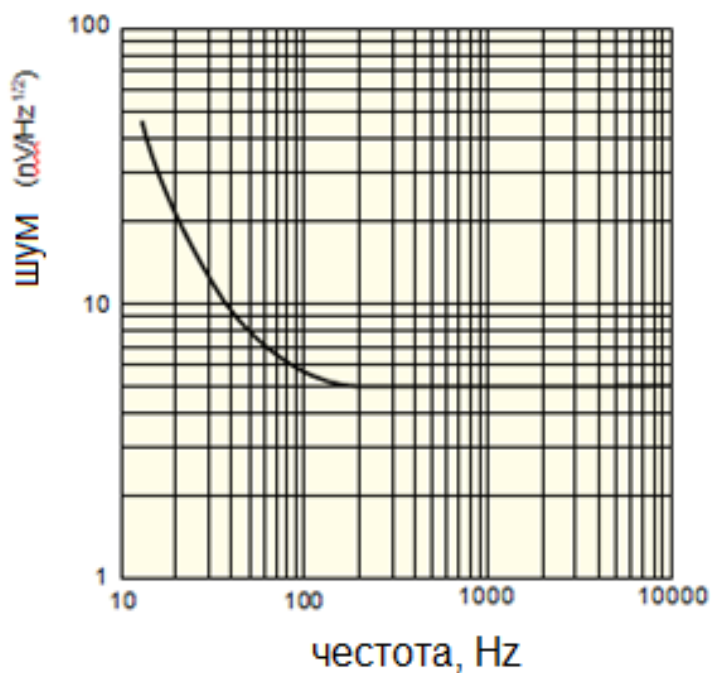
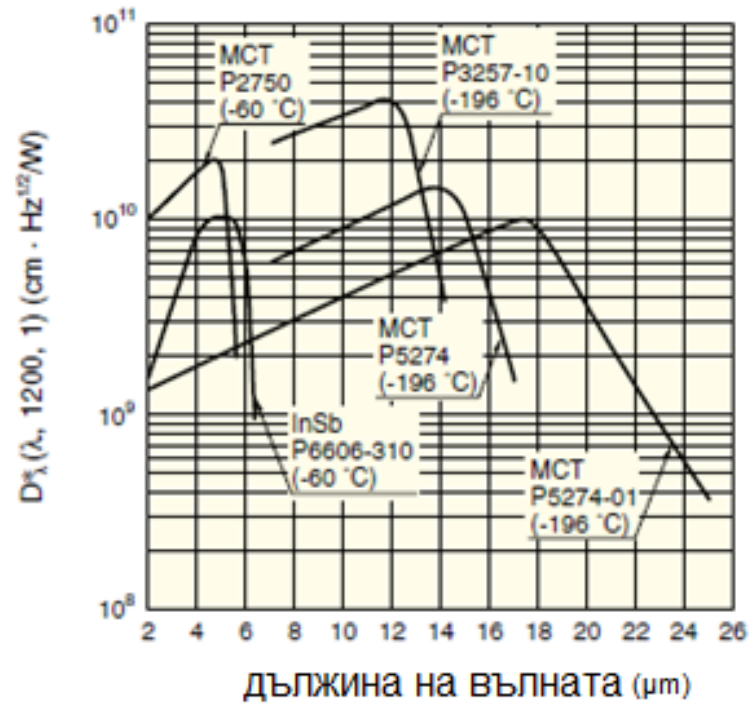
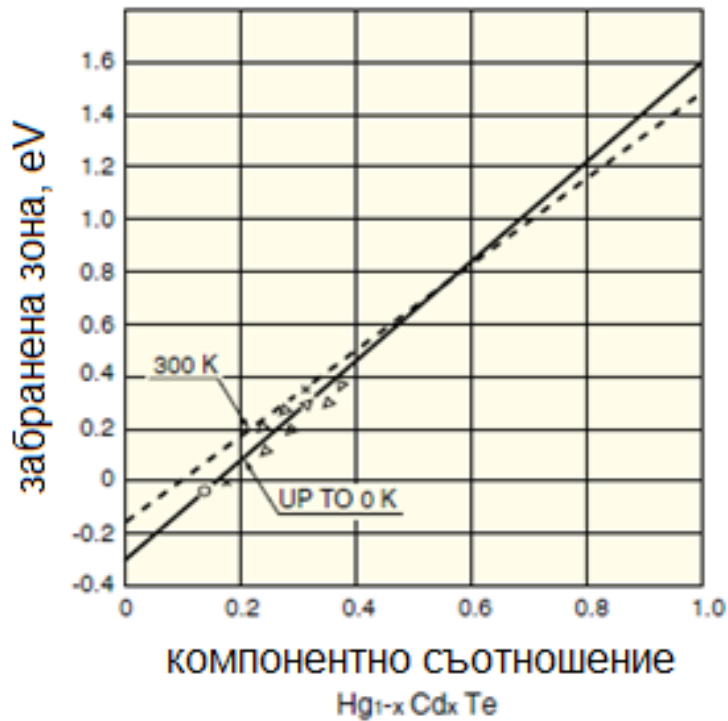
Връзката между забранената зона E_g и граничната дължина на вълната λ_c :

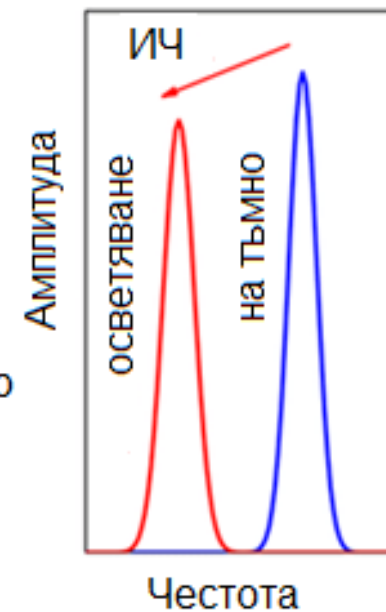
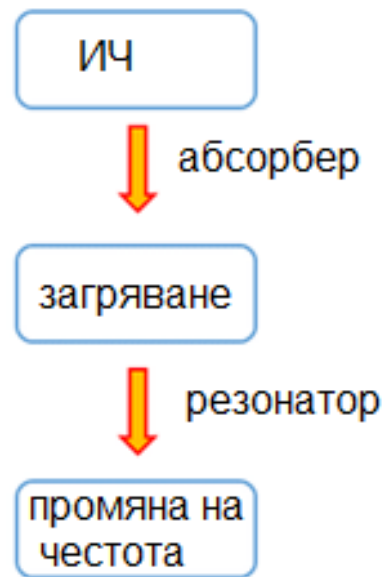
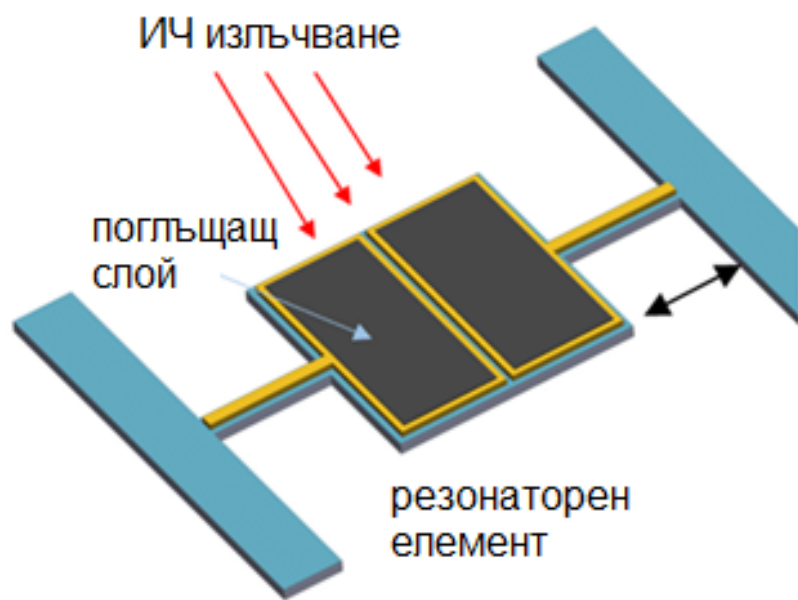
$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g \text{ (eV)}} \quad [\mu\text{m}]$$

В допълнение към съотношението на състава, забранената зона E_g се променя с температурата на детекторния елемент.

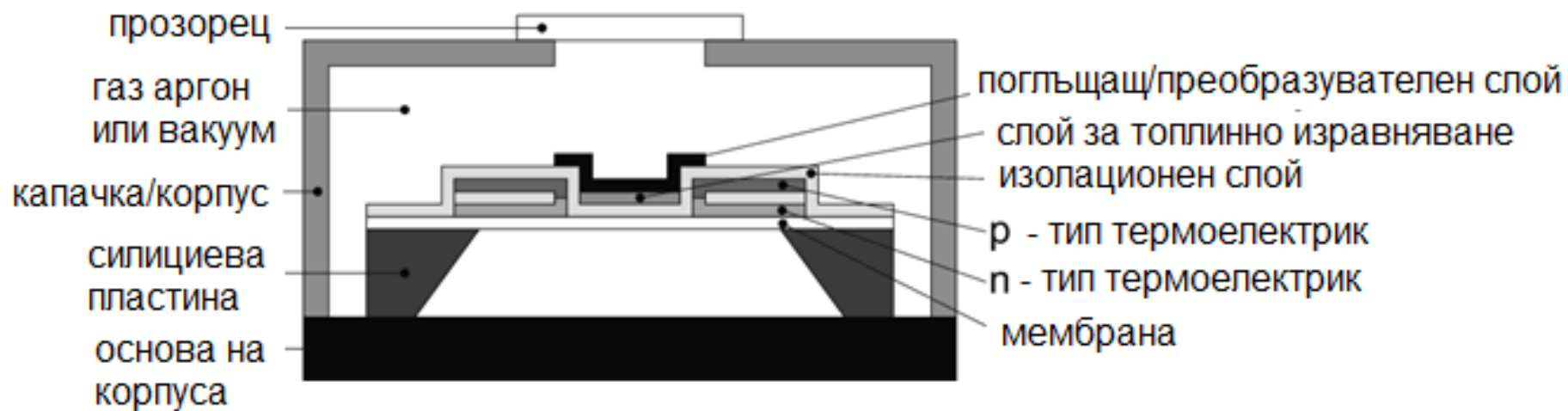
$$E_g = 1.59x - 0.25 + 5.23 \times 10^{-4} T(1 - 2.08x) + 0.327x^3$$

където x е съотношението на състава като $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, а T е абсолютната температура.





ИЧ сензор, при който погълнатата топлина предизвиква линейно разширение и пластинката излиза от резонанс, като се отмества честотата на трептене.



ИЧ сензор с вграден термостабилизиращ и термокомпенсирещ елемент – генерира се термоелектрично напрежение, което създава микро-Пелтие ефект и охлажда загорятия поглъщащ слой.

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!