

Fakulteta za matematiko in fiziko,
Univerza v Ljubljani

IZBRANA POGlavJA IZ UPORABNE FIZIKE

INFRARDEČE TEHNOLOGIJE

Avtor: **Iztok Urbančič**

Mentor: **doc. dr. Primož Ziherl**

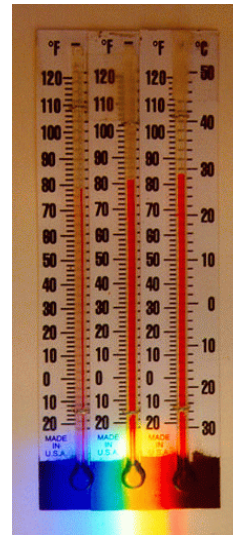
Povzetek

Infrardeče valovanje se za različne namene uporablja na zelo raznovrstnih področjih, kot so industrija, medicinska diagnostika, znanstvene raziskave, telekomunikacije ipd. Seminar obravnava predvsem fizikalne in tehnološke vidike nastanka tovrstne svetlobe, njenega vodenja z optičnimi elementi ter možnosti zaznavanja. Pri tem izpostavlja bistvene razlike v primerjavi z uveljavljenimi rešitvami za vidno svetlobo in ugotovljene specifične lastnosti prepleta z možnostmi uporabe in praktičnimi izvedbami.

Ljubljana, maj 2008

1 Zgodovinski uvod in kratek pregled sodobnih tehnologij

Infrardeče valovanje je leta 1800 z nadvse preprostim poskusom odkril astronom Sir Frederick William Herschel, ko je želel določiti, koliko toplote nosi posamezna barvna komponenta sončne svetlobe [1]. Žarek bele svetlobe je razklonil s stekleno prizmo in skozi nastalo mavrico pomikal počrnjeno bučko živosrebrnega termometra (slika 1). Ugotovil je, da temperatura, ki jo kaže termometer, narašča od modrega proti rdečemu delu spektra. Ko je za referenco želel izmeriti še temperaturo izven območja vidne svetlobe, je na svoje veliko presenečenje naprej od rdečega dela spektra izmeril še višjo vrednost. Sklepal je, da se je tudi v ta predel lomila človeškemu očesu nevidna sončna svetloba in jo po opaženem učinku poimenoval *toplotni žarki*. Z nadaljnjimi poskusi je odkril, da se le-ti razširjajo, odbijajo, uklanjajo in absorbirajo na enak način kot vidna svetloba. Ker po frekvencah valovanja padajo pod rdečo svetlobo, so jo kasneje poimenovali *infrardeča svetloba** (latinska predpona “*infra-*” pomeni “pod”).



Slika 1: William Herschel je IR svetlobo odkril s premikanjem termometrov skozi razklonjen žarek sončne svetlobe. Najvišjo vrednost je izmeril v temi za rdečim delom spektra [2].

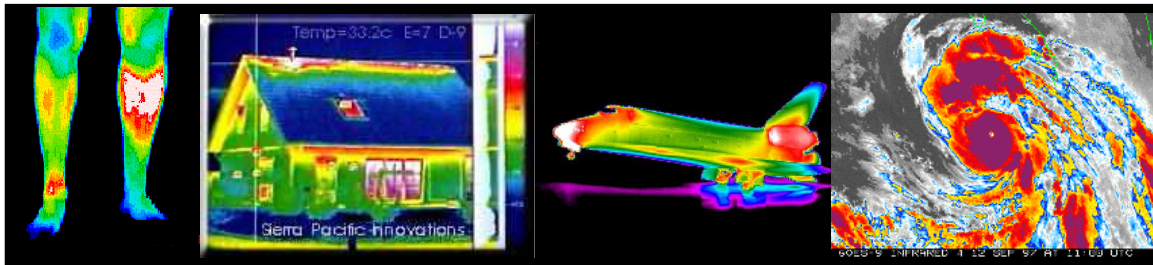
Nadaljnji razvoj znanosti in tehnologije je izkoristil lastnosti infrardeče (IR) svetlobe za mnoge uporabne namene. Ker je človeško oko ne zazna, so žarki detektorjev in daljinskih upravljalcev nemoteči, nadzorne kamere pa lahko neopazno osvetljujejo predele v temi. Vrh sevalnega spektra teles, ki jih običajno srečamo na tem planetu (pri temperaturah velikostnega reda sto do tisoč kelvinov), leži v IR območju, jakost izseva pa je odvisna od segretosti površine. To termalnim kameram omogoča nekontaktno določanje temperature, denimo za preverjanje izolacije zgradb, odkrivanje napak na mehanskih in električnih sistemih, za pregled človeškega telesa in zgodnje odkrivanje nekaterih bolezni itd. [1]

* “Svetloba” v širšem pomenu besede – kot sinonim za elektromagnetno valovanje, tudi izven vidnega dela spektra.

(slika 2). Zaradi daljše valovne dolžine se na delci siplje manj kot vidna svetloba [3], zato tovrstne kamere uporabljajo gasilci za odkrivanje plamenov in iskanje ljudi v močno zadimljenih prostorih [2]. Na slikah IR kamer s satelitov so razvidni topli morski tokovi, meteorologi s posnetkov določajo lastnosti oblakov, astronomi pa raziskujejo lastnosti hladnejših ali oddaljujočih se teles, katerih spekter je zaradi Dopplerjevega pojava premaknjen v IR področje [2].

Energija IR valovanja ustreza prehodom med rotacijskimi in nihajnimi načini molekul. Delci zato močno absorbirajo izbrane valovne dolžine, na čemer temelji infrardeča spektroskopija [1], močna metoda za določanje kemijske sestave. Analiza absorpcijskega spektra omogoča natančno merjenje energijskih pasov in gostote nosilcev naboja v polprevodnikih ter določanje prisotnosti nečistoč v kristalih [1].

Uporabe so še mnogo bolj raznovrstne; vsem je skupno, da mora IR svetloba nastati, prepotovati predvideno pot, detektor pa jo na koncu zaznati in pretvoriti v merljiv signal. Pri načrtovanju naprav je potrebno upoštevati fizikalne lastnosti IR valovanja in njegove interakcije s snovjo, ki uporabo v nekaterih primerih omejujejo, v drugih pa sploh omogočajo. V seminarju smo se osredotočili predvsem na fizikalne vidike, ki bistveno določajo delovanje tovrstnih naprav, ali po katerih se IR tehnologije razlikujejo od optičnih sistemov, ki delujejo v vidnem področju.



Slika 2: Nekaj primerov slik, posnetih s termalno kamero; posnetki so umetno obarvani, tako da predstavlja toplejša barva na sliki višjo temperaturo na površini slikanega predmeta. Na prvi sliki z leve je lepo vidno vnetje pod kolenom, na drugi predeli hiše s slabšo izolacijo, tretja prikazuje toplotno najbolj obremenjene dele vesoljskega plovila, na desni satelitski sliki pa porazdelitev temperatur v tropskem ciklonu [2].

2 Opredelitev IR spektra

Človeško oko je najbolj občutljivo za zeleno svetlobo v okolici valovne dolžine 550 nm [1]. Z večanjem valovne dolžine se jakost odziva niža, dokler pri okoli 700 nm sevanja ne zaznamo več. Ta meja je po definiciji spodnji rob IR spektra, medtem ko na zgornjem koncu valovnih dolžin, na meji z mikrovalovnim področjem, ni enotno sprejetega natančnega dogovora, saj literatura navaja različne vrednosti med 100 μm [1] in 1 mm [4].

V vsakem primeru je velik obseg IR spektra prikladno razdeliti na podpodročja, denimo na **bližnje** (0,7 – 5 μm), **srednje** (5 – 30 μm) in **daljnje** (30 μm – 1 mm) **IR sevanje** [4], a so na različnih področjih (npr. astronomiji, telekomunikacijah ...) v navadi tudi drugačne delitve.

3 Izvori IR sevanja

Vsako klasično telo z neničelno temperaturo oddaja zvezen spekter elektromagnetnega (EM) valovanja. Porazdelitev toplotnega toka j po valovnih dolžinah λ za črno telo s temperaturo T podaja *Planckov zakon*

$$\frac{dj}{d\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1}, \quad (1)$$

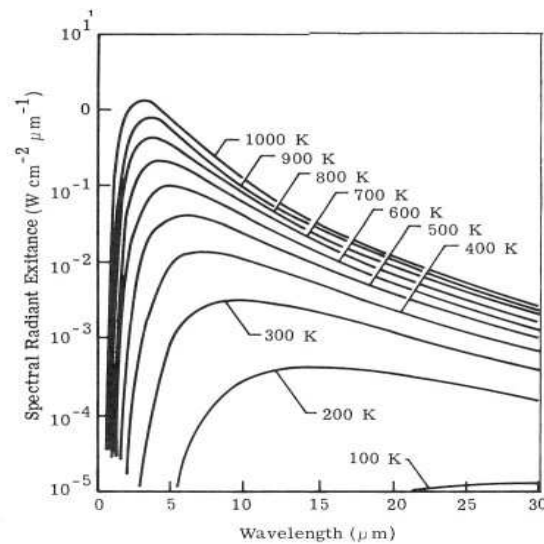
kjer h predstavlja Planckovo konstanto, c hitrost svetlobe v vakuumu, k_B pa Boltzmannovo konstanto. Z integracijo po vseh valovnih dolžinah dobimo celotni izsevani tok na površini telesa

$$j = \sigma T^4, \quad (2)$$

kar poznamo kot *Stefanov zakon*; po istem fiziku se imenuje tudi sorazmernostna konstanta σ . Vrh porazdelitve (1) po *Wienovem zakonu* leži pri valovni dolžini λ_{max}

$$\lambda_{max} T = 2898 \mu\text{m K}. \quad (3)$$

Zveze opisujejo, da toplejša telesa sevajo močnejše ter da se vrh porazdelitve seli h krajšim valovnim dolžinam (slika 3). V realnosti je najboljši približek za **črno telo** sevanje iz počrnjene votline v kosu kovine [5]. Taki sistemi se uporabljajo predvsem za natančne umeritve IR spektrometrov in nekontaktnih radiacijskih termometrov [3].



Slika 3: Planckov zakon opisuje spektralno porazdelitev gostote sevanega toka na površini črnega telesa v odvisnosti od njegove temperature [3].

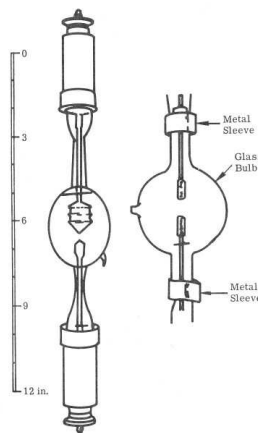
Spektralno porazdelitev izseva teles, ki niso idealno črna, v Planckovem zakonu (1) popravi dodatni faktor emisivnosti $\varepsilon(\lambda)$, ki je v splošnem odvisen od valovne dolžine svetlobe in lahko zavzame vrednosti med 0 in 1 [5].

Črno telo pri sobni temperaturi 300 K oddaja največ svetlobe pri okoli 10 μm , torej v IR področju. Z detektorjem, občutljivim za sevanje teh valovnih dolžin, lahko torej brez dodatne osvetlitve opazujemo predmete, če se le po temperaturi ali emisivnosti razlikujejo od okolice.

Za proizvajanje IR svetlobe je možnih veliko načinov in še več tehnoloških izvedb. Pri izbiri najustreznejšega izvora je zato potrebno vnaprej določiti zahteve glede lastnosti, ki naj jim svetilo ustreza. Med seboj se namreč močno razlikujejo po obsegu valovnih dolžin oddane svetlobe, po spektralni porazdelitvi toka, skupni moči in njeni stabilnosti, usmerjenosti in koherenci žarka, po velikosti, teži, odpornosti, življenjski dobi in nenazadnje ceni. Slednja je lahko za sprejemljivost v končni uporabi ključnega pomena.

Kot umetni izvor IR svetlobe se pogosto uporabljajo segreta telesa, a navadno ne kot prava črna telesa [1]. Njihovo moč lahko namreč po Stefanovem zakonu povečamo le na dva načina: s povečanjem površine, kar je za marsikatero uporabo nepraktično ali celo neizvedljivo, ter s povišanjem temperature. Slednje pomeni premik porazdelitve proti krajšim valovnim dolžinam in znižanje učinkovitosti v IR delu spektra. **Žarilni izvori** IR sevanja so zato običajno izbrani med tistimi snovmi, ki se jim emisivnost v tem delu spektra močno poveča, najpogosteje uporabljana sta silicijev karbid in torijev oksid [1, 3]. Skozi palico ali cev iz takega materiala preko kovinskih kontaktov teče električni tok, ki snov segreva do zelene temperature. Tovrstni izvori, v angleščini imenovani “*glowbar*” in “*Nernst glower*”, dajejo uporabno svetlobo valovnih dolžin do 100 μm [1], najučinkovitejši pa so do 15 μm [3]. Žarnice z nitko ali trakcem iz volframa izkoriščajo isti pojav, njihov izsev pa pri valovni dolžini okoli 2,5 μm omejuje IR neprepustnost stekla [3, 6].

Drug pogost izvor predstavljajo **obločnice** (slika 4), pri katerih električni tok skozi ksenon ali živosrebrne pare povzroča ionizacijo atomov, pri ponovni vezavi elektronov pa izhaja valovanje. Spekter izsevane svetlobe se začne že v ultravijoličnem področju in se preko vidnega dela razteza tudi v bližnje IR področje, kjer pa zgornjo omejitev zopet predstavlja okoliško steklo.

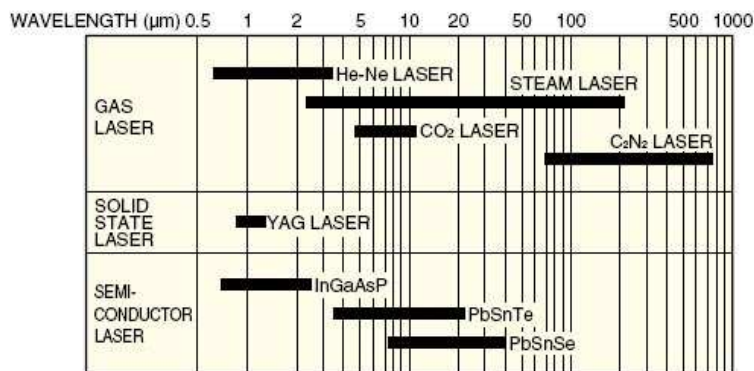


Slika 4: Shema plazemskih svetilk: električni tok med elektrodama v bučki povzroča ionizacijo okoliškega plina, ki oddaja svetlobo pri ponovnem zajetju elektronov [3].

Obe do sedaj naštetih skupini IR izvorov oddajata zvezen in širok spekter valovanja. Če za določeno uporabo zadošča ozek pas in niso potrebne visoke svetlobne moči, pomembna pa je majhnost svetila, so ustrezne **svetleče diode** (angl. “*Light Emitting Diode*”, LED). Danes predstavljajo prevladujoč izvor v daljinskih upravljalnikih in raznovrstnih senzorjih (denimo za samodejna vrata, stranišča, alarme), pogosto pa tudi za nekatere namene optičnih komunikacij.

Laserji tudi v IR delu spektra oddajajo koherentno in enobarvno svetlobo z visoko gostoto energijskega toka. Glede na ojačevalni medij se delijo na plinske (za IR največkrat He-Ne, CO₂, HCN in H₂O), trdninske (Nd:YAG) in polprevodniške (običajno na osnovi GaAs) [1, 3, 6]. Valovno dolžino izhodne svetlobe določajo energijske razlike med elektronskimi nivoji v izbrani snovi. Slika 5 prikazuje razpone valovnih dolžin, pri katerih delujejo najpogostejše izvedbe. Zaradi visokih moči so postali nepogrešljivi pri obdelavi materialov, zaradi enobarvnosti, jakosti in usmerjenosti pa kot vir nosilca informacij pri optičnih komunikacijah.

Zgoraj je naštetih le nekaj najpogostejših in najširše uporabnih virov IR sevanja. Njihov celotni nabor je še veliko bogatejši (sinhrotroni, plazmatroni, radioaktivirani fosforjevi viri, iskrliniki itd. [3]), a je njihova uporaba precej bolj omejena in se zato v podrobnosti na tem mestu ne bomo spuščali.



Slika 5: Značilni obsegi valovnih dolžin delovanja pogostejše uporabljanih IR laserjev pokrivajo območje od vidne svetlobe do nekaj 100 μm [6].

4 Prenos IR svetlobe

Iz vsakdanje izkušnje smo navajeni, da so nekatere snovi, kot npr. zrak in steklo, prozorne. Svetloba torej v veliki meri prodre skozi, kar omogoča, da vidimo, kaj je na drugi strani. Pri tem se navadno ne zavedamo, da imajo našete snovi take lastnosti le v predelu EM spektra, kjer je naše oko občutljivo. Valovanje se v resnici nemoteno širi le v praznem prostoru, vakuumu, ob vsakem stiku s snovjo pa na razširjanje vplivajo trije procesi – odboj na meji dveh sredstev, absorpcija v materialu in sipanje na posameznih delcih [3]. Intenzivnost posameznega procesa je odvisna od snovi ter od valovne dolžine svetlobe, ki se razširja skozi, in prav nič ne zagotavlja, da lahko tudi IR sevanje potuje skozi steklo in zrak.

Na prehodu svetlobe iz ene snovi v drugo se je del **odbije**. *Odbojnost* R , ki podaja razmerje med odbitim in vpadnim svetlobnim tokom, se z lomnima količnikoma obeh snovi n_1 in n_2 izraža kot [5]

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}. \quad (4)$$

Očitno se pri potovanju vidne svetlobe iz zraka ($n_1 \approx 1$) v snov z lomnim količnikom blizu 1 odbije zelo malo svetlobe. Na steklu, pri katerem za vidno in bližnjo IR svetlobo velja $n_2 \approx 1,5$ [5], se tako odbije le 4 % vpadnega toka, v primeru vstopa v snov z višjim lomnim količnikom pa je delež precej večji – več kot tretjina za značilen polprevodnik z $n_2 \approx 4$ [1]. Enak delež se izgubi tudi pri izstopu iz snovi, tako da pride iz takega elementa le še okoli 40 % prvotnega svetlobnega toka. To so za veliko večino uporab nesprejemljive izgube, a jih lahko močno zmanjšamo z ustreznimi površinskimi nanosi tankih plasti. Da se na meji ne odbije nič svetlobe izbrane valovne dolžine λ , mora za plast z lomnim količnikom n' in debeline d veljati

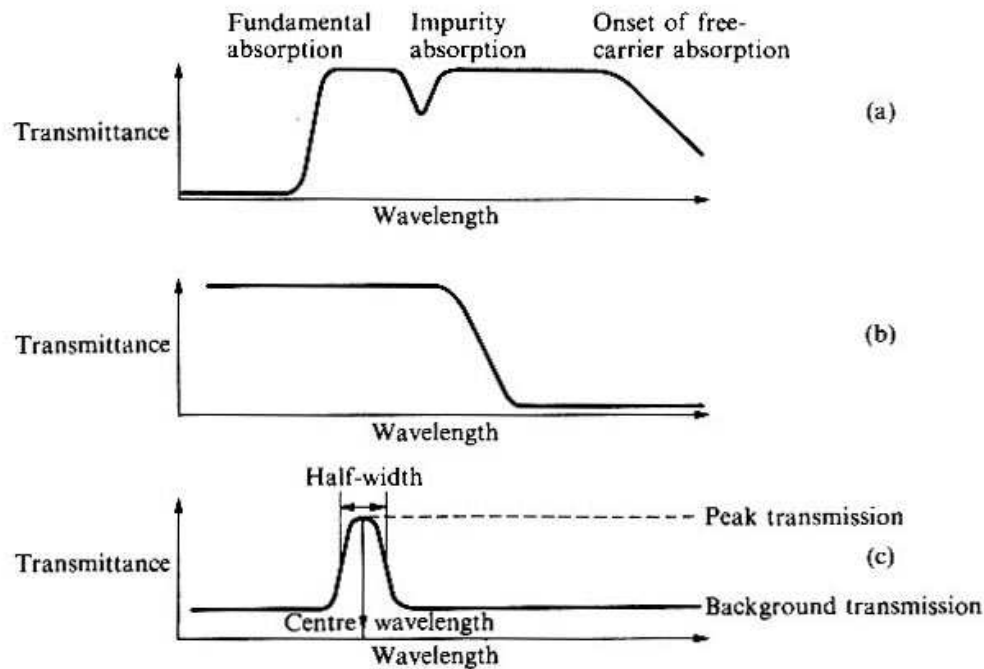
$$n' = \sqrt{n_1 n_2} \quad \text{in} \quad d = (2N + 1) \frac{\lambda}{4n'}, \quad (5)$$

kjer je N poljubno celo število [5]. Odboj v tem primeru prepreči destruktivna interferenca med valovanjema, odbitima na mejah n_1 - n' in n' - n_2 . Pri tem velja še enkrat pripomniti, da so lomni količniki snovi odvisni od valovne dolžine vpadne svetlobe, kar je potrebno upoštevati pri izbiri materialov in izračunu potrebnih debelin protiodbojnih plasti.

Do **absorpcije** svetlobe v snovi pride zaradi različnih mehanizmov [1]:

- V polprevodnikih vezani elektroni močno absorbirajo vpadle fotone, če je energija le-teh $E_f = hc/\lambda$ večja od energijske reže med valenčnim in prevodnim pasom E_g . Za svetlobo daljših valovnih dolžin je snov prozorna (slika 6a).
- Fotone lahko zajamejo tudi elektroni v polprevodnik vključenih nečistoč. V nasprotju s prejšnjim primerom je verjetnost za proces največja, ko energija vpadne svetlobe sovпада s potrebno energijsko razliko, kar je običajno manj kot E_g . Pojav se zato kaže kot dodaten absorpcijski vrh v območju siceršnje prepustnosti snovi.
- Pri še daljših valovnih dolžinah oz. nižjih frekvencah začnejo prevodni elektroni slediti polju vpadnega valovanja, posledica nastalega izmeničnega električnega toka v snovi pa so klasične ohmske izgube. Ker se z višanjem temperature število prostih elektronov in vrzeli večja, je prepustnost segretega polprevodnika nižja, še posebno za daljše valovne dolžine.
- Podobno se zgodi tudi z nabitimi ioni in polarizabilnimi molekulami, vezanimi v kristalno ali amorfno strukturo. Sledenje gradnikov vpadnemu valovanju povzroči nihanje celotne mreže in s tem izgubo energije svetlobe. Prepustnost dielektrikov je torej filter za visoke valovne dolžine (slika 6b). Mejne vrednosti za nekatere izbrane materiale so podane v spodnji preglednici (tabela 1).

- Energijske razlike med vrtilnimi in nihajnimi stanji molekul ali med nihajnimi načini njihovih atomskih skupin navadno ležijo v področju IR spektra in predstavljajo vir močne absorpcije valovanja določenih frekvenc. Takšne resonance v materialih, ki so sicer po trdnosti, prikladnosti za obdelavo in ceni zelo ustrezni (predvsem različne plastike), uporabo omejujejo na določena spektralna okna, kjer je prepustnost zadovoljivo visoka (slika 6c).

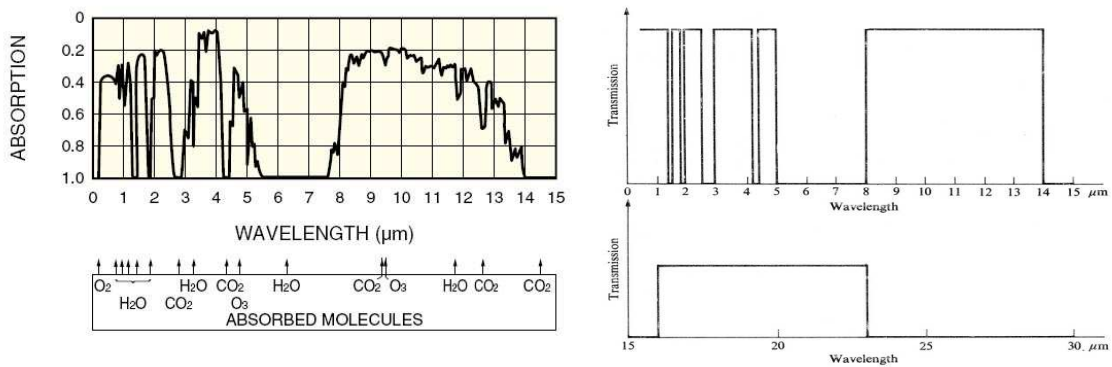


Slika 6: Značilne sheme prepustnosti za (a) polprevodnike, (b) dielektrike in (c) pasovne filtre [1].

snov	območje prepustnosti [μm]
steklo	0,30 – 2,5
kvarčno steklo	0,12 – 4,5
safir	0,14 – 6,5
CaF_2	0,13 – 12
BaF_2	0,25 – 15
ZnSe	0,5 – 20
Si	1,2 – 15
Ge	1,8 – 23
diamant	0,25 – 80

Tabela 1: Območje prepustnosti izbranih materialov, ki se pogosto uporabljajo za IR optične elemente. Pri mejnih valovnih dolžinah pade prepustnost skozi 2 mm debelo plast materiala pod 10 % [3].

V **atmosfera**, ki je nadvse pogost medij razširjanja svetlobe, poleg sipanja na aerosolih največje izgube prispeva zadnji opisani proces zaradi v zraku prisotnih primesi, predvsem vodne pare in ogljikovega dioksida [1]. Veliko resonančnih frekvenc z različnimi verjetnostmi za vzbujanje pomeni zapleteno odvisnost prepustnosti atmosfere od valovne dolžine svetlobe, ki pa se za praktično uporabo pogosto poenostavi v diagram *prepustnostnih oken* (slika 7). Pomembni okni ležita med 3 in 5 μm ter med 8 in 14 μm in se pogosto izkoriščata za zaznavanje na daljavo [6]. Astronomi, ki so odvisni od že tako majhnih količin svetlobe, se absorpciji izognejo s postavljanjem IR teleskopov v sušne predele, visoko v gore ali še raje na satelite [2].



Slika 7: Molekule v ozračju absorbirajo svetlobo izbranih valovnih dolžin in s tem določajo prepustnost atmosfere (levo, [6]). Zapleten vzorec se za uporabne namene pogosto poenostavi v obliki oken prepustnosti (desno, [1]).

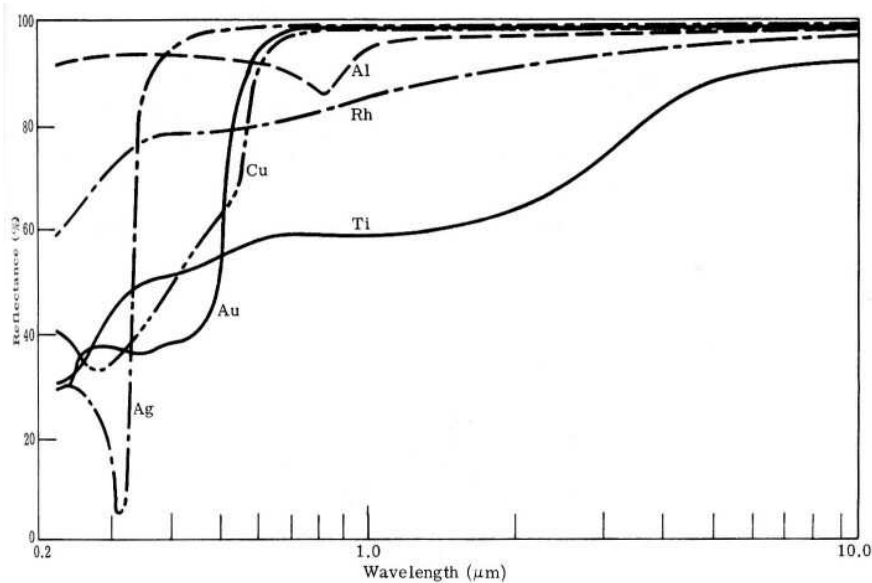
Večina stekel, ki se v vidnem delu spektra uporabljajo kot materiali za **okna*** in **leče** optičnih sistemov, ima zgornjo mejo prepustnosti med 2,5 in 4,5 μm [1, 3]. Enako vlogo lahko torej opravljajo le za najbližji del IR svetlobe, za valovne dolžine nad 5 μm pa so povsem neprosojna in torej v ta namen neuporabna.

Prepustnost stekla, iz katerega izdelujejo optična vlakna za telekomunikacije, je največja pri valovni dolžini okoli 1,5 μm [7]. Prav tako je v bližnjem IR spektru pri 1,3 μm najmanjša tudi disperzija [3, 7], ki sicer vzdolž poti svetlobnih sunkov povzroča nezaželeno razširjanje in s tem padanje kvalitete signala. Omenjeni lastnosti sta poleg razpoložljivih virov in ojačevalcev svetlobe najpomembnejša razloga, da danes standardna okna za komunikacije na dolge razdalje ležijo med 1,260 in 1,675 μm [7].

Za prepuščanje in lečenje svetlobe z daljšimi valovnimi dolžinami proizvajalci med spektralno ustreznimi materiali (tabela 1) izbirajo glede na ostale optične in mehanske lastnosti, možnosti obdelovanja in ceno [8]. Snovi BaF₂ in CaF₂ imata ugodno nizko odbojnost (pod 10 %) in ceno, a sta krhka in topna v vodi. Pomanjkljivosti lahko nekoliko omilimo z zaščitnimi prevlekami površine, pri višjih zahtevah pa fluorida navadno nadomesti germanij. Močan odboj na površini polprevodnika zaradi visokega lomnega količnika preprečimo z nanosom protiodbojne plasti, odpornost na mehanske poškodbe pa z ogljikovim premazom. Tako obdelan je po lastnostih povsem primerljiv s sicer precej dražjim ZnSe [8].

* Okno kot prozoren element, ki čim bolj nemoteno prepušča svetlobo.

Zaradi omenjenih neugodnih lastnosti se pri načrtovanju IR optičnega sistema namesto uklonskih elementov, kadar se le da, raje uporabi **ogledala** [1]. Daljša valovna dolžina valovanja v primerjavi z vidnim delom spektra je v tem primeru hvaležna lastnost, saj dopušča tudi nekoliko manj gladke površine. Navadno so narejena z nanosi tankih kovinskih plasti na podlago, za katero je v splošnem edina zahteva stabilnost oblike. Za IR svetlobo dobro odbojne kovine so denimo srebro (Ag), zlato (Au), baker (Cu) in aluminij (Al) [3], ki pa visoko odbojnost dosežejo pri nekoliko različnih vrednostih (slika 8). Pri izbiri je potrebno upoštevati tudi različne kemijske reaktivnosti kovin, saj oksidirana površina močno zmanjša učinkovitost ogledala [3].

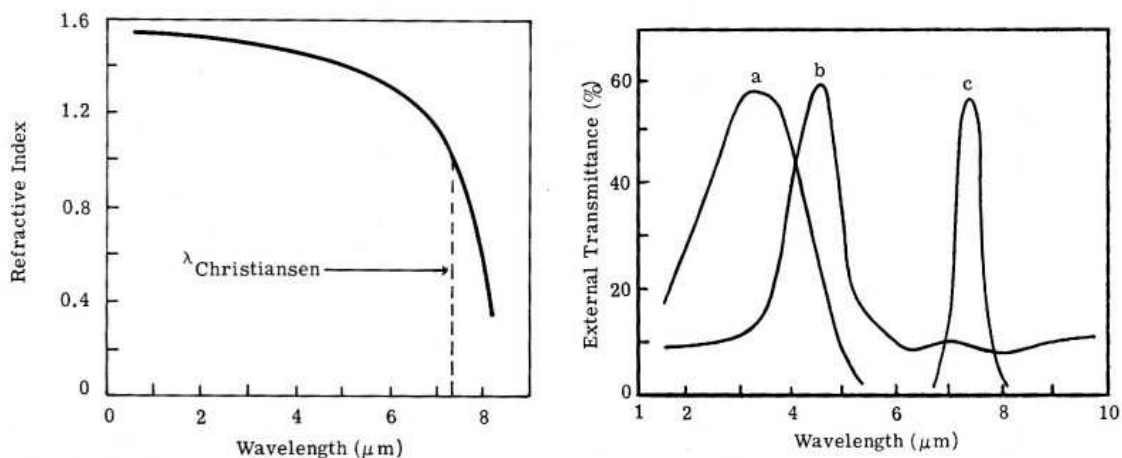


Slika 8: Odbojnosti kovin dosežejo visoko vrednost pri različnih valovnih dolžinah svetlobe, kar je potrebno upoštevati pri izbiri snovi za zrcalne površine [3].

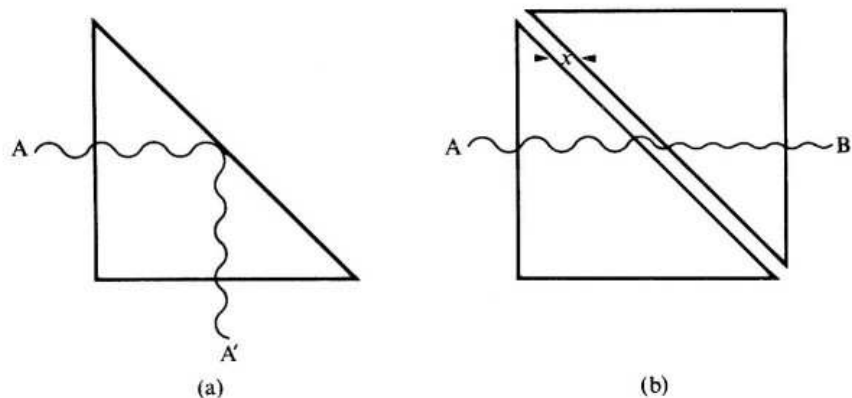
Kadar širok spekter proizvedene ali prejete svetlobe ni zaželen, se odvečnih komponent znebimo s **filtri**. Mnogi med temi, ki so v vsakdanji uporabi tudi v IR tehnologijah, izkoriščajo iste fizikalne principe kot v vidnem področju in jih bomo zato v nadaljevanju le našteali, nekoliko bolj podrobno pa bomo opisali manj znane izvedbe [1, 3]:

- Klasični *interferenčni filtri* (Fabry-Perot) delujejo na principu odbojev svetlobe na mejah “ploščic $\lambda/4$ ”, kjer se zaporedoma izmenjujeta snovi z visokim in nizkim lomnim količnikom.
- Pri *polarizacijskem interferenčnem filtru* (Lyot) se med linearnimi polarizatorji nahajajo plasti dvolomnega kristala z optično osjo pod kotom 45° glede na polarizacijo prepuščene svetlobe. Vsaka naslednja kristalna plast mora biti dvakrat debelejša od predhodne.
- Izdelavo *uklonske in odbojne mrežice* za IR valovanje v primerjavi z vidno svetlobo zopet poenostavi daljša valovna dolžina, zaradi česar so lahko zareze za enak učinek posejane nekoliko manj fino.

- Ključna lastnost *spektrometra s prizmo* in *konfokalnega lečja* je velika disperzija $dn/d\lambda$ v izbranem materialu za obravnavano območje valovnih dolžin.
- Tudi *Christiansenov filter* izkorišča isto lastnost, a na nekoliko drugačen način. Osnova zanj so kroglice iz snovi s čim večjo disperzijo, denimo kvarčno steklo (slika 9). Glede na valovno dolžino svetlobe, ki naj jo filter prepusti, izberemo topilo, tako da je lomni količnik za izbrano λ v obeh snoveh enak. Ta komponenta svetlobe kroglic v topilu ne vidi in se nemoteno širi skozi, vse ostale valovne dolžine pa se na raztopljenih delcih sipljejo, zato je prepustnost zanje manjša. Ker je lomni količnik odvisen od temperature, lahko takemu filtru v dobro nadziranem okolju nastavljamo spektralno lego vrha prepustnosti.
- Daljša valovna dolžina IR svetlobe omogoči enostavnejšo izvedbo tudi pri *filtru s frustriranim popolnim odbojem*. Valovanje se na prehodu iz optično gostejšega v redkejše sredstvo popolnoma odbije, če ne more izpolniti Snellovega lomnega zakona, torej če vpade pod kotom, večjim od $\arcsin(n_2/n_1)$ (slika 10a). Kljub vsemu je na drugi strani meje prisotno evanescentno polje, ki ne odnaša energije, dokler dovolj blizu ne postavimo drugega telesa (slika 10b). Če je valovna dolžina po grobi oceni vsaj dvakrat večja od razmaka med telesoma, bo večina valovanja potovala naprej, medtem ko se bodo krajše valovne dolžine v veliki meri popolno odbile. Glede na izbrani izhodni žarek dobimo filter za IR svetlobo kratkih ali dolgih valovnih dolžin.
- Nekatere snovi imajo pri določeni valovni dolžini *močno povečano odbojnost*: ZnS pri 25 μm , GaAs pri 35 μm , InSb pri 55 μm itd. Po nekaj odbojih večbarvne svetlobe od take površine ostane v žarku le še ozek spektralni pas okoli vrha v reflektivnosti uporabljenega materiala.



Slika 9: Christiansenov filter: pri valovni dolžini 7,4 μm ima kvarčno steklo lomni količnik $n = 1$ (levo). Ta svetloba se na kroglicah ne siplje in nemoteno preide vzorec, medtem ko se ostale spektralne komponente močno zadržijo (desno, c). s spreminjanjem topila se premika lega vrha prepustnosti (namesto zraka **a** – mešanica CS_2 in CCl_4 , **b** – čisti CCl_4) [3].



Slika 10: Pri prevelikih vpadnih kotih se svetloba na meji iz optično gostejše v redkejšo snov popolnoma odbije (a). Če v bližino postavimo še en kos snovi, se del svetlobe razširja naprej (b). Razmerje jakosti prepuščenega in odbitega valovanja določata valovna dolžina in razmik med ploskvama [3].

Polarizator za IR valovanje lahko prav tako kot za vidno svetlobo temelji na zadostnem številu odbojev pod *Brewsterjevimi koti*, kar izloči eno od pravokotnih komponent, v prepuščeni svetlobi pa dobimo prevladujočo drugo komponento polarizacije [1]. V tem primeru mora biti material seveda prozoren za izbrano valovno dolžino, medtem ko je za odboj navadno ustrezna večina kovin.

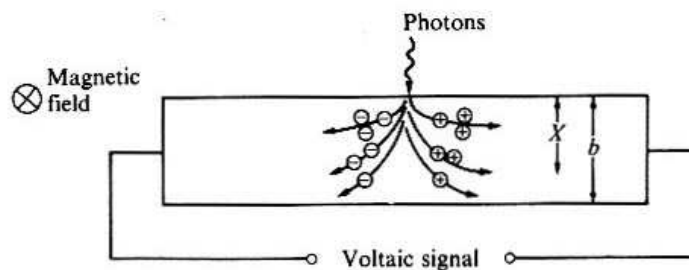
Ker včasih ni enostavno zagotoviti za ta proces potrebne stalne orientacije med žarkom in polarizatorskimi elementi, je za valovne dolžine nad $15 \mu\text{m}$ marsikdaj uporabnejši drugačen mehanizem: v *vzporednih kovinskih žičkah*, debelih nekaj μm in podobno razmaknjenih, se absorbira energija tistih komponent valovanja, katerih vektorji električnega polja kažejo vzporedno z žičkami in po njih poganjajo prevodne elektrone, pravokotne komponente pa tak element nemoteno preidejo [1]. Taka fina struktura bi bila brez opore zelo občutljiva za mehanske obremenitve, zato žičke položimo na ustrezen prozoren material, denimo polietilen. Za učinkovitost tega polarizatorja natančna vzporednost žičk ni ključnega pomena.

5 Detekcija valovanja in pretvorba v signal

Ko svetlobo z ustreznim optičnim sistemom zvodimo od izvora, jo običajno želimo še zaznati. Glede na osnovni mehanizem pretvorbe vpadnega valovanja v izhodni signal se detektorji IR svetlobe delijo na fotonske in na termične detektorje [1, 3]. Pri izbiri je potrebno upoštevati območje valovnih dolžin in jakosti valovanja, ki mu bo detektor izpostavljen, želena hitrost odziva merilnega sistema na spremembe lastnosti opazovane svetlobe, velikost vidnega polja detektorja, jakost izhodnega signala ter tudi šum, ki omejuje zaznavanje. V IR delu spektra je namreč vedno prisotno močno termično sevanje ozadja, ki prihaja iz okolice, od ohišja merilne naprave in od samega aktivnega elementa.

Fotonski oz. elektronski detektorji temeljijo na predaji energije vpadlih fotonov elektronom v snovi.

- V *vakuumski fotocelici* pri tem pride do izbitja elektrona iz katode, če je le energija fotonov večja od izstopnega dela materiala. Slednje določa dolgovalovno mejo občutljivosti takega detektorja, ki pa jo je možno dodatno znižati denimo s površinskim nanosom cezija [1]. Najvišje dosežene mejne vrednosti so danes okoli $1,5 \mu\text{m}$ [3]. Izbite elektrone visoka napetost pospeši proti anodi. Hitrost delovanja celice je poleg časa, potrebnega za prelet elektronov med elektrodama, odvisna tudi od uporabljene elektronike. Karakteristični časi se lahko spustijo do nekaj nanosekund [3]. Ojačenje signala do 100-krat lahko dosežemo, če v evakuirano bučko z elektrodama dodamo majhno količino nereaktivnega plina. Pospešeni elektroni na prehodu ionizirajo atome, ki nato prav tako prispevajo k signalu, ker pa so počasnejši od elektronov, to pomeni podaljšan odzivni čas senzorja. S tehnične plati je zato učinkovitejša *fotopomnoževalka* (angl. “*photomultiplier tube*”, PMT), pri kateri se elektroni pred anodo pomnožijo na kaskadi dinod tudi za faktor 10^6 , odzivni čas glede na osnovno izvedbo pa se le malo podaljša [3].
- *Polprevodniški fotodetektorji* so na različne načine občutljivi na spremembo gostote nosilcev naboja v prevodnem pasu, ki nastane zaradi spremembe jakosti vpadne svetlobe.
 - Pri *fotoprevodnih* celicah se pri povečanem številu prevodnih elektronov in vrzeli merjeni električni tok skozi poveča. Sprememba toka je direktno sorazmerna s spremembo števila vpadnih fotonov na časovno enoto [3].
 - Prevodni elektroni in vrzeli, ki zaradi vpadlih fotonov nastanejo v *p-n* stiku *fotonapetostnih* elementov, odtečejo vsaki na svojo stran stika in tako povzročijo spremembo napetosti na robovih, ki poganja tok po zunanjem vezju. Za nizke jakosti svetlobnega toka mu je tudi v tem primeru električni tok približno sorazmeren, odvisen pa je od aktivne površine detektorja in kvantnega izkoristka. Če jih pri tem zunanja napetost toliko pospeši, da lahko na poti s trki sproščajo dodatne nosilce naboja v prevodno stanje, dobimo *plazovno fotodiodo*, ki signal pomnoži tudi za faktor 10^6 [3].
 - V *fotoelektromagnetnih* senzorjih v polprevodniku nastale elektrone in vrzeli proti različnima koncema usmeri prečno magnetno polje (slika 11). Tovrstna rešitev verjetno zaradi zahtevnejše izvedbe v primerjavi z ostalima izvedbama ni posebno razširjena v današnjih IR detektorjih.



Slika 11: V elektromagnetnem polprevodniškem detektorju magnetno polje loči pozitivne in negativne naboje, nastale zaradi absorpcije fotonov [1].

Dolgovalovno mejo občutljivosti polprevodniških detektorjev določa širina energijske reže med valenčnim in prevodnim pasom E_g . Za silicij in germanij znašata 1,1 oz. 0,7 eV [1], kar ustreza valovnim dolžinam približno 1,2 oz. 1,8 μm , torej se v njiju absorbira le najbližji del IR spektra. Širši obseg delovanja – tudi do valovnih dolžin okoli 40 μm – dosežemo z dopiranjem ali z zlitinami iz več komponent, pri čemer lahko z deleži posameznih sestavin uravnavamo velikost reže E_g in s tem območje odzivnosti detektorja. Stranski učinek mešanja elementov je manj oster prehod absorptivnosti pri mejnih valovnih dolžinah [3].

Ker imajo fotoni IR svetlobe primerljiv učinek kot termična energija elektronov pri sobni temperaturi, ki pri majhnih energijskih režah že znatno vzbujajo nosilce naboja v prevodni pas, so taki polprevodniški detektorji (tako detekcijski element kot tudi ohišje) glede na uporabljen material in potrebno občutljivost hlajeni tudi do temperature 5 K. Različne izvedbe uporabljajo utekočinjene pline, denimo dušik ali helij, izkoriščajo termodinamske cikle ali termoelektrični efekt [3].

Občutljivost fotonских detektorjev določa več prispevkov šuma, ki ni enakomerno porazdeljen po vsem spektralnem območju – zaradi sevanja ozadja ga je največ pri 10 μm . Odzivnost je odvisna predvsem od električne upornosti detekcijskega elementa, na odzivni čas pa v največji meri vplivata hitrost rekombinacije parov elektron-vrzel ter lastnosti elektronskega vezja [3].

Toplotni detektorji izkoriščajo učinke, ki nastanejo zaradi segretja IR sevanju izpostavljene snovi. V tem primeru je namesto delčne narave svetlobe pomembna le gostota energijskega toka vpadnega valovanja. Razpon valovnih dolžin, ki jih ti senzori zaznavajo, je običajno precej širši kot pri fotonских in prehodi na mejah manj ostri. Po drugi strani je njihov odzivni čas občutno daljši, saj se mora v vsakem primeru segreti končno velik del snovi, medtem ko je proces zajetja posameznega elektrona veliko hitrejši (10^{-13} s) [1]. Tudi občutljivost je v splošnem nižja kot pri fotonских, a lahko pogosto optimalno delujejo tudi pri sobni temperaturi, kar močno poenostavi in poceni izvedbo.

Večina teh detektorjev je občutljiva na absolutne spremembe temperature, torej so pravzaprav le natančni termometri, nekateri pa se odzivajo le na časovne spremembe temperature. Za čim hitrejši odziv je pri vseh izvedbah pomembna čim nižja toplotna kapaciteta detekcijskega elementa.

- *Bolometri* izkoriščajo spremembe v električni upornosti detektorskega elementa R_d . Za tovrstno delovanje je ključen visok temperaturni koeficient $\alpha = R_d^{-1} dR_d/dT$ izbrane snovi, med kovinami denimo platine, ki ji upornost s temperaturo močno rase, ali mešanice polprevodniških oksidov (t. i. *termistorji*) z obratnim učinkom [1]. V merilnem sistemu je poleg detektorskega upora vezan tudi enak referenčni element, ki ni izpostavljen svetlobi in kompenzira morebitne spremembe temperature v aparatu.
- *Termočlen* sestavljata dva spoja med različnima električno prevodnima elementoma, denimo med dvema kovinama. Če sta stika na različnih temperaturah, se med njima pojavi električna napetost, ki požene z občutljivim ampermetrom merljiv električni tok. Temperaturno razliko povzroči absorbirana IR svetloba, ki pada le na en spoj. Pri

ustrezni izbiri materialov je termoelektrični koeficient* čim večji, prav tako električna prevodnost, ki omogoča čim višjo izhodno moč detektorja, toplotna kapaciteta in prevodnost stika pa čim nižji. Signal se lahko ojači z zaporedno vezavo več takih elementov, kar se imenuje *termosklad* (angl. “*thermopile*”).

- Glavni sestavni del *piroelektričnih* detektorjev je kristal, na čigar površini se ob nenadni spremembi temperature nabere električni naboj (nasprotno enaki količini na nasprotnih ploskvah), ki se po določenem času zopet porazdeli po prostornini. Plast takega kristala deluje kot kondenzator, napetost na njem lahko preko prevodnih kontaktov merimo z voltmetrom. Za občutljiv detektor je zaželen čim večji piroelektrični koeficient† snovi (uporabni so denimo triglicerin sulfat, LiTaO_3 itd.), ki se pri večini snovi s temperaturno viša, dokler pri kritični temperaturi ne pade na nič.
- *Goleyjeva celica* je s plinom napolnjena komora, ki absorbira IR valovanje. Plin v notranjosti se segreje, zato povišan tlak izboči tanko upogljivo steno na eni stranici komore. Deformacijo meri drugi optični sistem, sestavljen iz svetila, detektorja ter ogledalca na upogljivi steni celice.

Za medsebojno **primerjavo detektorjev**, ki so si po osnovnih mehanizmih delovanja tako zelo različni, je v veljavi nekaj standardnih količin [3]:

- *Odzivnost* \mathcal{R} (angl. “*responsivity*”) podaja razmerje med efektivno izhodno napetostjo signala V_S (ali tokom I_S , če deluje na ta način) ter močjo vpadnega valovanja v izbranem območju valovnih dolžin $\Delta\lambda$

$$\mathcal{R} = \frac{V_S}{\phi_\lambda \Delta\lambda}, \quad (6)$$

kjer ϕ_λ predstavlja spektralno porazdelitev moči zajete svetlobe $d\Phi/d\lambda$. S tem podatkom, izraženim v enotah VW^{-1} ali AW^{-1} , lahko konstruktor ob znani moči merjenega valovanja predvidi potrebne lastnosti ojačevalnika in ostalih elektronskih elementov.

- *Šumu enakovredna moč* (angl. “*noise equivalent power*”, *NEP*) podaja moč vpadne IR svetlobe Φ , pri kateri sta efektivni napetosti izhodnega signala V_S in šuma V_N enaki

$$NEP = \Phi \Big|_{V_S=V_N}. \quad (7)$$

Pri tem je pomembno, da izhaja nizka vrednost dobrega detektorja predvsem iz visokega signala in ne iz nizkega šuma na izhodu, saj lahko v nasprotnem primeru šum uporabljenega ojačevalnika povsem preplavi nizek signal [1].

* Termoelektrični koeficient podaja vrednost napetosti na koncih termočlena pri temperaturni razliki 1 K.

† Piroelektrični koeficient pove, koliko električnega naboja se nabere na enoto površine kristala pri spremembi temperature za 1 K.

- *Specifična občutljivost* D^* (angl. “*specific detectivity*”) iz prejšnjega kazalnika izloči vpliv velikosti detektorske površine A_d ter Nyquistovega šuma merilne elektronike v frekvenčnem območju $\Delta\nu$:

$$D^*(\lambda, \nu) = \frac{(A_d \Delta\nu)^{1/2}}{NEP}. \quad (8)$$

Standardno uporabljana enota za občutljivost je $\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$.

- Odziv veliko elektronskih sistemov na spremembe frekvence ω opisuje funkcija

$$V_s(\omega) = \frac{V_s(0)}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (9)$$

kjer se parameter τ imenuje *odzivnostna časovna konstanta*. Za detektorje višjih redov ni enotno sprejetega dogovora o tovrstni količini.

Tabela 2 prikazuje značilne razpone nekaj pomembnejših parametrov, ki opisujejo lastnosti izbranih razredov IR detektorjev.

detektor	območje λ [μm]	τ [μs]	D^* [$\text{cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$]	\mathcal{R} [VW^{-1}]
Si PMT	0,5 – 1,1	10^{-2}	10^{13}	10^5
polprevodniški	< 40	$10^{-1} - 10^1$	$10^9 - 10^{11}$	$10^4 - 10^6$
bolometer	< nekaj 100	10^3	$10^8 - 10^9$	$10^2 - 10^3$
termočlen	< nekaj 100	10^4	10^9	10^1
Goleyjeva c.	< nekaj 100	10^4	$10^8 - 10^9$	10^4
pireoelektrični	< 1000	< 10^3	$10^8 - 10^9$	$10^{-2} - 10^2$

Tabela 2: Značilne vrednosti parametrov posameznih vrst IR detektorjev [1, 3].

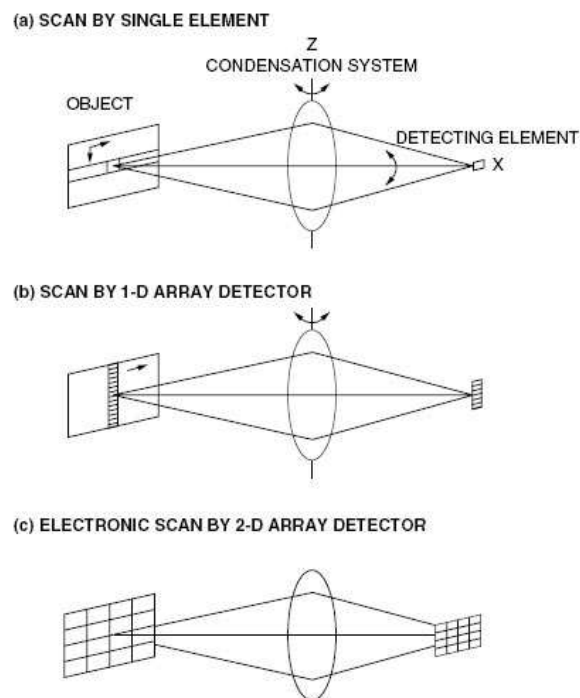
6 Nastanek IR slike

Tudi za IR svetlobo obstajajo **fotografski filmi in plošče**, a se bomo z vidika tehnološke uporabe osredotočili na aktivne detektorje, ki lahko vpadno valovanje sproti in kontinuirano pretvarjajo v sliko. Za nastanek slike, ki podaja porazdelitev jakosti svetlobe iz posameznih delov vidnega polja, je na voljo več osnovnih mehanizmov, po katerih se ločijo **tri generacije slikovnih naprav** (slika 12) [6]: pri prvi svetlobo zaznava le en senzorski element, optično-mehanski sistem pa zaporedoma izbira le majhen prostorski kot, od koder svetloba doseže detektor, dokler po točkah ne pokrije celotnega vidnega polja. Ko je tehnologija izdelave senzorjev toliko napredovala, da je bilo mogoče izdelati uporabno enodimenzionalno vrsto detektorjev, je to od druge generacije zahtevalo le še skeniranje vzdolž ene osi. Danes prevladujejo detektorji tretje generacije z dvorazsežno

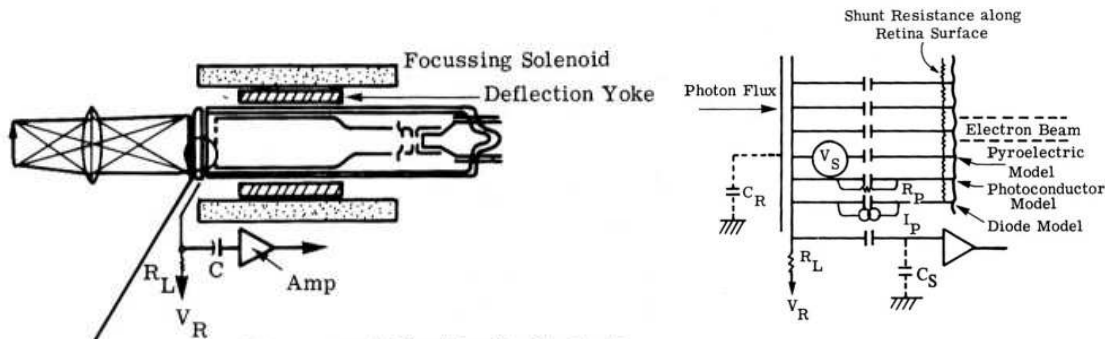
mrežo senzorskih elementov v goriščni ravnini sistema leč. Ker ne potrebujejo nobenih gibljivih mehanskih delov, so lahko precej manjši, lažji in robustnejši od prejšnjih generacij.

Slikovna cev (t. i. **vidikon**) analognih IR kamer za zaznavanje svetlobe uporabljajo eno-ali dvodimenzionalne mreže detektorjev, navadno silicijevih fotodiod ali piroelektričnih kristalov [3]. Senzorji so na strani, od koder vpada svetloba, vezani na prozorno in električno prevodno snov (slika 13) ter preko nje in delovnega upora R_L na vir pozitivne napetosti V_R nekaj voltov. Žarek elektronov, ki izhaja z negativno nabite katode na zadnji strani, zaporedoma negativno nabija posamezne detektorske elemente, ki delujejo kot kondenzatorji. Ko začne nabran naboj odbijati nadaljnje priletele elektrone, nabijanje ne poteka več. Naloga vpadne svetlobe je nevtralizacija prebitka elektronov v detektorskem elementu, tako da je v primerjavi s katodo zopet nekoliko pozitivno nabit. Ko pride elektronski curek zopet do tega elementa, ga ponovno negativno nabije, kar povzroči tok skozi delovni upor in majhno negativno napetost na vhodu ojačevalnika. S skeniranjem elektronskega žarka preko celotne mreže senzorjev tako zaporedoma dobimo video signal iz posameznih točk slike.

Odzivnosti kamere se v različnih izvedbah gibljejo med 10^{-6} in 1 AW^{-1} [3], kar je poleg izbrane vrste detektorja odvisno še od časa med dvema branjema posameznima elementa. Slednji navadno znaša nekaj 10 ms in je običajno določen s televizijskimi standardi, po drugi strani pa prav ta čas omejuje hitrost odziva kamere na spremembe v jakosti vpadnega valovanja.



Slika 12: Slikovne naprave prve generacije **(a)** so uporabljale le en detektorski element in so morale vidno polje po dveh oseh prečesati z mehansko-optičnim mehanizmom. Vrstični senzorji druge generacije **(b)** so potrebovali le še eno smer skeniranja, pri tretji generaciji **(c)** pa se slika sočasno zapiše na dvorazsežno mrežo detektorjev v goriščni ravnini lečja [6].



Slika 13: Pri slikovnih cevah nastane slika opazovanega predmeta na mreži detektorjev, ki jih z zadnje strani zaporedoma nabija elektronski žarek. Naboj iz posameznega senzorskega elementa, ki je odvisen od jakosti vpadne svetlobe, se preko delovnega upora in kondenzatorja pretaka mimo ojačevalca, ki na izhodu daje video signal za zaporedje točk na sliki [3].

Iznajdba **CCD senzorjev** (angl. “charge-coupled device”) je z večjo občutljivostjo in prostorsko ločljivostjo močno razširila možnosti uporabe. Glede na slikovne cevi sta bili prav tako pomembni izboljšavi tudi nižja cena izdelave in miniaturizacija celotnega senzorja.

V običajni izvedbi za vidno svetlobo posamezni slikovni element sestavlja dopiran polprevodnik, navadno silicij, ki ga od kovinske elektrode na nekajvoltni pozitivni napetosti loči plast izolatorja, denimo silicijevega oksida (slika 14). Vpadli fotoni v izpraznjeni plasti polprevodnika vzbuja prevodne elektrone, ki jih pozitivna napetost pritegne k elektrodi in obdrži v potencialni jami. Med branjem dodatne elektrode z ustreznim zaporedjem napetosti nabrane elektrone po vrsticah prelivajo v bralni register. Število elektronov iz posameznega elementa je merilo za jakost svetlost vsake točke na sliki.

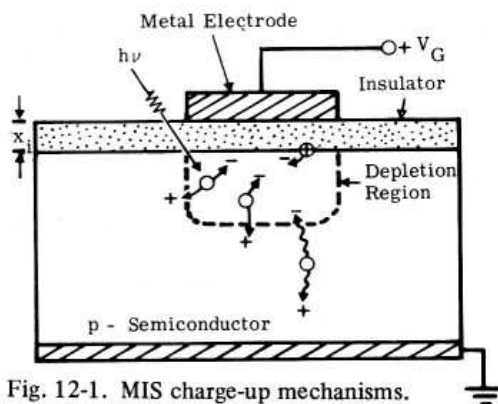


Fig. 12-1. MIS charge-up mechanisms.

Slika 14: Osnovno celico običajnega CCD detektorja sestavlja sklad kovinske elektrode, izolatorja in polprevodnika (angl. “metal-insulator-semiconductor” – MIS). Zaradi vpadnih fotonov nastali prevodni elektroni se naberejo v potencialni jami pod elektrodo, po končanem osvetljevanju pa jih zaporedje napetosti pretaka proti bralnemu registru [3].

Za zaznavanje IR svetlobe sta razširjeni dve različni priredbi običajnih CCD senzorjev (IRCCD) [3]. Prva se od uporabe v vidnem področju loči le po izbranem polprevodniku z ustrežno manjšo energijsko režo, saj omogoča silicij detekcijo le do valovnih dolžin 1,2 μm . Ker ves proces – zajetje svetlobe, nastanek naboja in njegov prenos – poteka v enem kosu materiala, se taki detektorji imenujejo *monolitski* IRCCD.

Pri drugi izvedbi sevanje zazna mreža detektorjev, ki so glede na potrebne lastnosti izbrani izmed opisanih v prejšnjem poglavju, proizveden naboj pa se nato prenese na običajen silicijev CCD, ki elektrone prenese do bralnega registra in pretvori v signal slike. V tem primeru sta torej združeni dve ločeno dobro razviti tehnologiji, zaradi česar so se t. i. *hibridni* IRCCD senzorji bolj uveljavili kot monolitski [3].

Detektorji obeh skupin so hlajeni zaradi manjšega termičnega šuma. Izbira aktivnega merilnega senzorja in optičnih elementov za termalne kamere je običajno prilagojena za delovanje v enem izmed dveh pomembnih prepustnostnih oken atmosfere – med 3 in 5 μm ali med 8 in 14 μm .

7 Izbrani primeri IR tehnologij

Že po veliki pestrosti posameznih komponent, opisanih v poglavjih o izvoriših IR svetlobe, o njenem prenosu ter detekciji, je sklepati, da so se tako različne tehnologije razvile zaradi možnosti uporabe na zelo raznovrstnih področjih. V nadaljevanju predstavimo le nekaj zanimivih primerov, ki naj ponazorijo širino možnih aplikacij.

Sevalni termometri omogočajo nekontaktno merjenje temperature, kar je še posebno uporabno v primeru zelo vročih ali premikajočih se teles ter merjencev na nevarnih ali nedostopnih mestih, npr. v nizko- ali visokotlačnih komorah. Pogosto je njihov odzivni čas krajši kot pri kontaktnih metodah [6]. Ker pa so le redki predmeti zadovoljiv približek za črno telo, intenziteta vpadnega valovanja ni odvisna le od temperature. Za meritve absolutne temperature je zato potrebno upoštevati še popravek zaradi neidealne emisivnosti merjenega telesa.

Z meritvijo odbite ali prepuščene svetlobe je možno **določati sestavo snovi**. Koncentracijo vode denimo v zelenjavi ali oglju je možno določiti s primerjavo intenzitete odbite svetlobe pri dveh valovnih dolžinah, od katerih je ena izbrana, tako da ustreza absorpcijski črti vode. V ta namen je uporabna kombinacija svetloba InGaAs fotodiode in PbS fotoprevodnega detektorja [6]. Na enak način lahko merijo tudi koncentracije različnih plinov v avtomobilskih in industrijskih izpušnih, količino plinov in sladkorja v pijačah ali nasičenost hemoglobina s kisikom (**oksimetrija**), kar opravljajo skozi prosojno tkivo, denimo ušesno mečico ali blazinico prsta. Na tekočih trakovih prehranbeno-predelovalne industrije lahko po istem principu samodejno ločijo sadeže od kamenja.

Senzorji za prepoznavanje oseb delujejo na dva različna načina. Preprostejši in cenejši *aktivni* detektorji s piroelektričnimi elementi le zaznavajo, kdaj prihajajoča oseba prekine oddajani IR žarek in se uporabljajo za samodejno odpiranje vrat, splakovanje stranišč ali prižiganje luči. Zahtevnejši *pasivni* senzorji, denimo za alarmne naprave, so občutljivi na razlike v temperaturi okolice; človeka prepoznajo, če zaznajo valovanje, ki ustreza sevanju telesa med 20 in 35 $^{\circ}\text{C}$, in poteka prostorsko spreminjanje temperaturnega vzorca

z značilnimi časi med 0,1 in 10 s. Takim detektorjem široko vidno polje omogoča sistem ogledal ali plastičnih Fresnelovih leč.

Nadzorne kamere, občutljive na bližnje IR valovanje, omogočajo ob osvetljevanju z IR diodami ali laserji snemanje v popolni temi. Z **IR foto- in reflektografijo** lahko raziskovalci starih rokopisov lažje prepoznajo zbledele ostanke pisave (slika 15) [9], v zgodovini umetnosti pa na slikah odkrivajo skice in nanose barve pod vrhnjim slojem ter tako spoznavajo značilnosti delovanja posameznega slikarja ali ugotavljajo pristnost umetniškega dela [10]. **Termalne kamere** ne potrebujejo dodatnega vira svetlobe, saj zaznavajo temperaturno sevanje predmetov v okolici. Njihova uporaba je nadvse raznovrstna: od industrijskih, gradbenih, kmetijskih in znanstvenih opazovanj do vsakdanjih medicinskih raziskav (slika 2). Nekaj med mnogimi smo omenili v uvodu ali med predstavitvami posameznih delov.

Komunikacijski sistemi izkoriščajo IR svetlobo za prenos informacij. Najenostavnejši primer so verjetno *daljinski upravljalci* elektronskih naprav, ki ukaze s tipk zakodirajo v svetlobne sunke IR svetlečih diod. Da senzorja ne zmede sevanje iz okolice, je predenj postavljen ozkopasovni filter. Signal je običajno še frekvenčno moduliran, tako da se lahko z ustrezno elektronsko obdelavo odstrani vse neželene komponente [11].

Za nekoliko zahtevnejši prenos podatkov na kratke razdalje med manjšimi napravami, kot so npr. mobilni telefoni, dlančniki in prenosni računalniki, je organizacija *IrDA* ("Infrared Data Association") v devetdesetih letih uveljavila več standardiziranih protokolov. Zaradi kratkega dosega, potrebne poravnosti oddajnika in sprejemnika ter za današnje čase razmeroma nizkih hitrosti prenosa jih v te namene zadnja leta nadomeščajo radijske tehnologije (*Bluetooth* ipd.).

Zaradi že opisanih lastnosti optičnih vlaken in izvorov svetlobe potekajo današnje *optične komunikacije na dolge razdalje* v IR delu spektra [7].



Slika 16: Marsikdaj so stari rokopisi v IR svetlobi (spodaj) lažje berljivi kot v vidni (zgoraj) [9].

8 Zaključek

Kot smo že večkrat omenili, je področje IR tehnologij dandanes tako široko in razvejano ter posamezne uporabe visoko specializirane, da lahko v tako kratkem delu le površno opišemo osnovne principe in značilnosti. V poglavjih o svetlobnih izvorih, optičnih elementih ter detektorjih smo spoznali, da se od analogij v vidnem delu spektra EM valovanja razlikujejo predvsem zaradi snovnih lastnosti uporabljenih materialov – širine energijske reže polprevodnikov, frekvenčne odvisnosti prepustnosti in odbojnosti ter značilnih absorpcijskih resonanc, če ponovim le nekatere. V določenih primerih je daljša valovna dolžina tehnološka omejitev, denimo pri izbiri dragih materialov za optična okna in leče, nekatere uporabne izvedbe pa zaradi nevidnosti ali termičnih učinkov sploh omogoča.

Marsikatero rešitve, denimo daljinski upravljalci in senzorji za vrata, so že tako množično uveljavljene, da jih v vsakdanjem življenju srečujemo na vsakem koraku, njihovo delovanje nam zdi samoumevno in jih pravzaprav niti opazimo ne več. Tudi termalne kamere kljub visoki ceni niso nobeno tehnološko čudo, a se novi načini uporabe še kar vrstijo. Še posebno na področju optičnih komunikacij lahko v bližnji prihodnosti pričakujemo velik razmah IR tehnologij. Vse naštetu ponuja nove izzive in priložnosti za inovativne in podjetne raziskovalce.

9 Literatura

- [1] Wright, H. C., *Infrared Techniques* (Clarendon Press, Oxford, 1973).
- [2] SIRTf Science Center, *Infrared Astronomy Tutorial*, http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/ (9. 5. 2008).
- [3] Wolfe, W. L., Zissis, G. J., *The Infrared Handbook* (IRIA Series in Infrared & Electro-Optics, Michigan, 1993).
- [4] The Physics Hypertextbook, *The Electromagnetic Spectrum*, <http://hypertextbook.com/physics/electricity/em-spectrum/> (9. 5. 2008).
- [5] Strnad, J., *Fizika*, 2. del (DMFA, Ljubljana, 1995).
- [6] Hamamatsu Photonics, *Characteristics and Use of IR detectors*, www.sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/infrared_kird9001e03.pdf (6. 5. 2008).
- [7] RP Photonics, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, http://www.rp-photonics.com/optical_fiber_communications.html (11. 5. 2008).
- [8] Robinson, M., *A Termographer's Guide To Infrared Windows*, IRINFO, http://www.irinfo.org/Articles/article_7_1_2006_robinson.html (11. 5. 2008).
- [9] Jackson, J., *Infrared Photography*, The International Dunghuan Project, <http://www.clevelandart.org/exhibcef/ConsExhib/html/greGrie.html> (11. 5. 2008).
- [10] The Cleveland Museum of Art, *Infrared Reflectography*, <http://www.clevelandart.org/exhibcef/ConsExhib/html/infGrie.html> (11. 5. 2008).
- [11] Bergmans, S., *IR Remote Control Theory*, <http://www.sbprojects.com/knowledge/ir/ir.htm> (9. 5. 2008).