



## Fotodetektoriai

## Fotodetektoriai

- Šiluminiai
  - Piroelektrinis efektas
  - Termo-EVJ
  - Šiluminė varžos priklausomybė
- Fotoniniai
  - Vidinis fotoefektas
  - Išorinis fotoefektas
- Fotocheminiai
  - Fotocheminės reakcijos

## Fotodetektoriai

- Galios detektoriai
  - Signalas proporcingas krentančios šviesos galiai;
- Fotonų detektoriai
  - Signalas proporcingas krentančiam fotonų skaičiui per laiko vienetą.
- Kai spinduliuotė nemonochromatinė, parodymai skiriasi!

## Fotodetektoriai: suskirstymas

- Spektrinė sritis
- Darbinė temperatūra
- Paskirtis
  - Spektrų matavimas
  - Silpnų signalų detekcija
  - Greitų signalų detekcija
- Konstrukcinės ypatybės (pavienis, masyvas, liniuotė t.t.)

## Fotodetektorių parametrai

- Jautris
  - Monochromatinis (spektrinis)
  - Integralinis
- Laiko konstanta
- Slenkstinis šviesos srautas, kurį gali detektuoti
- Aktyvus plotas
- Darbinės įtampos
- Detektyvumas
- Maksimali leistina galia (energija)
- Kt.

## Fotodetektorių charakteristikos

- Spektrinė jautrio charakteristika
- Dažninė charakteristika
- Triukšmo galios spektras
- Volt-amperinė charakteristika
- Temperatūrinės charakteristikos
- Kreivė, rodanti kaip kuris nors parametras kinta, veikiamas aplinkos faktorių.

## Jautris

- Įtampos arba srovės pokytis, kurį sukelia vienetinis krintančios į detektorių spinduliuotės galios pokytis:

$$S_U = \frac{dU}{d\Phi}$$

$$S_I = \frac{dI}{d\Phi}$$

Gali būti integralinis (plačiam, bet žinomam spektriniam pasiskirstymui, paprastai nurodomas šalia charakteristikos) ir monochromatinis, ties vienu bangos ilgiu.

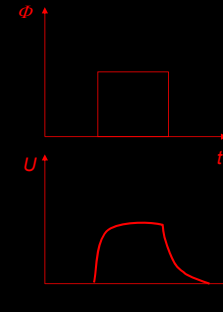
Dažnai nurodomas santykiniais vienetais.

## Laiko konstanta

- Paprasčiausiu atveju atsakas į apšvietimo šuolį (kritimą) yra eksponentinis:

$$U(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{rise}}} \right)$$

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau_{fall}}}$$



Dažniausiai užaugimo ir kritimo konstantos būna skirtingos

## Laiko konstanta

- Aišku, kad laiko konstanta siejasi su ribiniu detektoriaus veikimo dažniu

$$S(f) = \frac{S_0}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau)^2}}$$

Ribinis dažnis apskaičiuojamas pagal *lėtesnę* laiko konstantą.

## Triukšmai

- Radiacinis (fotoninis) – fotonai iš aplinkos
- Šiluminis – terminė sklaida
- Šratinis – dėl diskretinės srovės prigimties
- Srovės (1/f) triukšmas – dėl kontaktų, paviršių netolygumo ir pan.
- Generacinis-rekombinacinis – šiluminė generacija

## Triukšmų mažinimas

- Šaldymas
- Sinchroninė moduliacija ir detekcija
- Vidurkinimas

## Detektyvumas ir slenkstinė galia

- Slenkstinė galia (noise equivalent power) – tai šviesos srauto galia, kurios sukeltas detektoriaus atsakas pagal galią lygus triukšmo galiai.
- Detektyvumas tai dydis, atvirkštinis slenkstinei galiai

$$D = \frac{1}{NEP} \quad \text{Plg.} \quad S_U = \frac{dU}{d\Phi}$$

Detektyvumas

Jautris

## Detektyvumas ir slenkstinė galia

Jei kalbame apie detektorių klases, technologijas arba medžiagas, tai apibrėžiamas *specifinis detektyvumas*

$$D = \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{NEP}$$

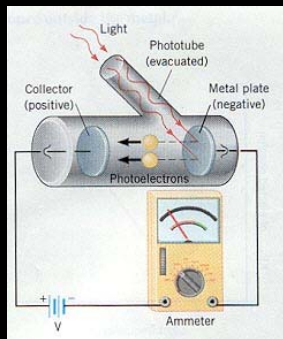
Normuojam į dažnių intervalą ir į ploto vienetą. Dažnis – tai ne šviesos, o signalo dažnis (moduliacijos).

Šaknis iš ploto ir iš dažnių juostos atsiranda dėl statistikos

## Detektoriai su išoriniu fotoefektu

- Fotonai išmuša elektronus iš fotokatodo, dėl to vakuuminiame vamzdyje gali tekėti srovė.
- Didele dalimi detektoriaus veikimą apsprendžia katodo medžiaga
- Fotono energija, kurios reikia elektronui išlaisvinti, vadinama elektrono išlaisvinimo darbu.

## Fotoelektroninis vamzdelis (diodas)



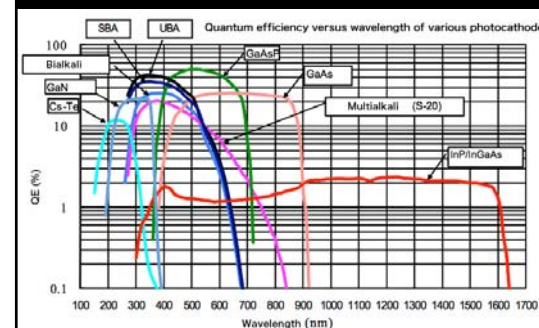
Tiesioginis fotoefekto panaudojimas.

Detektoriai yra tiesiniai dideliame dinaminame diapazone, bet nelabai jautrūs. Tinka nemažiams šviesos srautams matuoti.

Katodas, emituodamas elektronus silpsta, dėl to jautris mažėja (ypač raudonoje srityje)



## Katodų spektrinės charakteristikos



Katodai būna:

- Daugiašarmiai (Na-K-Sb-Cs)
- Cs-Te
- Sb-Cs
- Ag-O-Cs
- Cs-I (vakuuminis UV)
- Metaliniai (dideliems galtingumams)

Šaltinis: Hamamatsu

## Fotovamzdelių naudojimas

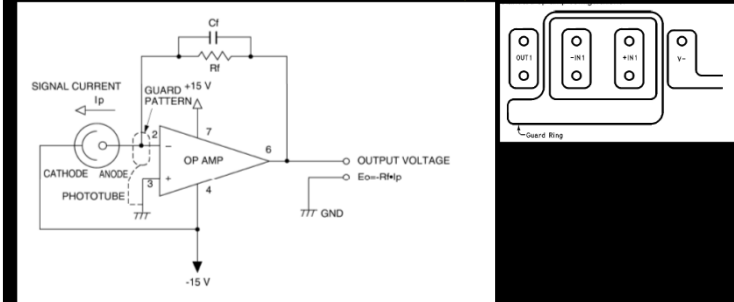
- Įtampa tarp katodo ir anodo – nuo keliolikos voltų iki 5000V.
- Biplanariniai – specialūs aukšta įtampa varomi fotovamzdeliai su greitomis augimo ir kritimo trukmėmis, tinka ns impulsams matuoti...

Type No.	Spectral Response (nm)	Peak Wave-length (nm)	Photocathode Material	Absolute Maximum Ratings					Characteristics at 25 °C				
				Anode Supply Voltage (V)	Peak Cathode Current Density (A)	Input Light Energy Density (W/mm <sup>2</sup> )	Average Cathode Current (μA)	Ambient Temperature (°C)	Anode Supply Voltage (V)	Luminous Sensitivity Typ. (μA/lm)	Dark Current Max. (nA)	Rise Time Typ. (ps)	Fall Time Typ. (ps)
<b>R1328U Series (Rise Time: 60 ps)</b>													
R1328U-51	300 to 1100	750	A <sub>g</sub> -O-Cs	2000	0.3	0.125	5	+75	2000	20	100	60	55
R1328U-52	185 to 650	340	Sb-Cs	2000	0.3	0.125	5	+75	2000	50	100	60	55
R1328U-53	300 to 850	400	Na-K-Sb-Cs	2000	0.3	0.125	5	+75	2000	80	100	60	55
R1328U-54	115 to 320	200	Cs-Te	2000	0.3	0.125	5	+75	2000	100	100	60	55

\* For the R1328U-54 used in the vacuum UV region, a vacuum flange type is available. Consult our sales office.

## Fotovamzdelio jungimas

- Prijungiame įtampą tarp anodo ir katodo ir sušeriame signalą į srovę į įtampą konvertuojantį stiprintuvą (pvz., AD549, Analog Devices arba OPA128, Burr-brown, LMC6001, National Semiconductor)



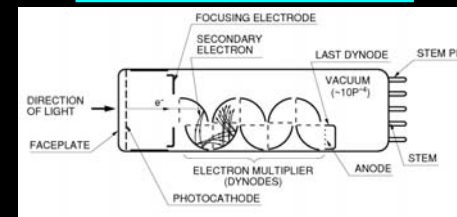
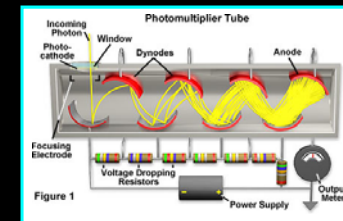
## Fotodaugintuvas

- Tas pats fotovamzdelis, tik srovė sustiprinama antrinės elektronų emisijos.



## Fotodaugintuvas

- Side-on
- Head-on



## Fotodaugintuvas

- Reikia efektyviai surinkti ir padauginėti elektronus

PHOTOELECTRONS  
GRID  
INCIDENT LIGHT  
0=PHOTOCATHODE  
10=ANODE  
1 to 9=DYNODES

PHOTOCATHODE  
INCIDENT LIGHT  
PHOTO-ELECTRONS  
1 to 7 = DYNODES  
8 = ANODE  
F = FOCUSING ELECTRODE

Figure 2-4: Box-and-grid type

INCIDENT LIGHT  
PHOTO-ELECTRONS  
1 to 10 = DYNODES  
11 = ANODE  
F = FOCUSING ELECTRODE

## Fotodaugintuvas

- Greitinantys ir dauginantys elektrodai vadinami dinodais jie dengiami medžiaga, kuriai būdinga gera antrinė elektronų emisija:
  - Šarminių metalų stibidai  $\text{Na}_3\text{Sb}$
  - $\text{BeO}$
  - $\text{MgO}$
  - $\text{GaP}$ ,  $\text{GaAsP}$
- Šiomis dangomis padengiami metaliniai elektrodai (Ni, plienas arba vario-berilio lydinys).

PRIMARY ELECTRON  
SECONDARY ELECTRONS  
SECONDARY EMISSIVE SURFACE  
SUBSTRATE ELECTRODE

## Dinodai ir andoas

- Šiomis dangomis padengiami metaliniai elektrodai (Ni, plienas arba vario-berilio lydinys).
- Anodas daromas taip, kad nebūtų erdvinio krūvio ir kad kuo geriau surinktų elektronus.

SECONDARY EMISSION RATIO (SER)

ACCELERATING VOLTAGE FOR PRIMARY ELECTRONS (V)

Curves shown: GaP:Cs, K-Cs-Sb, CsSb, Cu-BeO-Cs

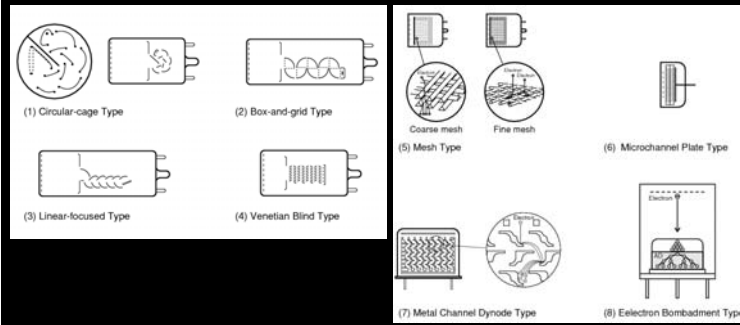
## Fotodaugintuvo darbo režimai

a) DC measurement

b) AC Measurement

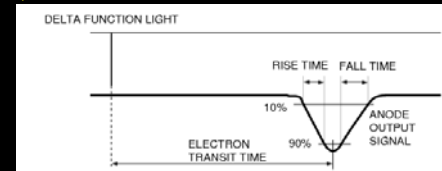
c) Photon Counting

## Fotodaugintuvų tipai



## Fotodaugintuvo laikinės charakteristikos

- Greiti, nes elektrovakuuminiai...



Duomenys apšvietus visą katodą

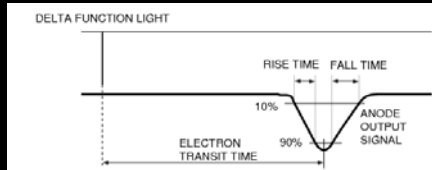
Unit : ns

Dynode Type	Rise Time	Fall Time	Pulse Width (FWHM)	Electron Transit Time	TTS
Linear-focused	0.7 to 3	1 to 10	1.3 to 5	16 to 50	0.37 to 1.1
Circular-cage	3.4	10	7	31	3.6
Box-and-grid	to 7	25	13 to 20	57 to 70	Less than 10
Venetian blind	to 7	25	25	60	Less than 10
Fine mesh	2.5 to 2.7	4 to 6	5	15	Less than 0.45
Metal channel	0.65 to 1.5	1 to 3	1.5 to 3	4.7 to 8.8	0.4

Table 4-3: Typical time characteristics (2-inch dia. photomultiplier tubes)

## Fotodaugintuvo laikinės charakteristikos

- Greiti, nes elektrovakuuminiai...



Duomenys apšvietus visą katodą

Unit : ns

Dynode Type	Rise Time	Fall Time	Pulse Width (FWHM)	Electron Transit Time	TTS
Linear-focused	0.7 to 3	1 to 10	1.3 to 5	16 to 50	0.37 to 1.1
Circular-cage	3.4	10	7	31	3.6
Box-and-grid	to 7	25	13 to 20	57 to 70	Less than 10
Venetian blind	to 7	25	25	60	Less than 10
Fine mesh	2.5 to 2.7	4 to 6	5	15	Less than 0.45
Metal channel	0.65 to 1.5	1 to 3	1.5 to 3	4.7 to 8.8	0.4

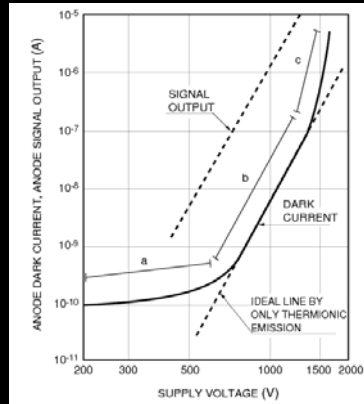
Table 4-3: Typical time characteristics (2-inch dia. photomultiplier tubes)

## Fotodaugintuvo tiesiškumas

- Riboją srovė (anodas arba katodas)
- Prietaisai tiesiškai dideliame diapazone, bet pasistengus galima ir įsotinti. Tiesiškumo ribas nurodo maksimaliai ležiama anodo srovė (apie 1 μA tipiškai).

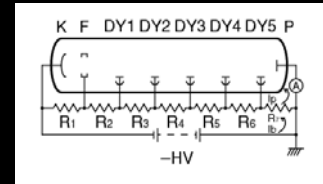
## Fotodaugintuvo tamsinė srovė

- Termioninė emisija
- Ominiai nuostoliai
- Lauko emisija
- Plazma
- Scintiliacija
- Kosminiai spinduliai



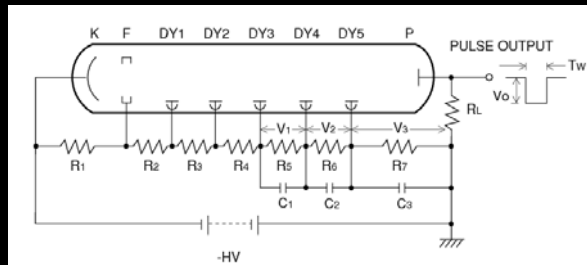
## Įtampos daliklis

- Sukuria potencialų skirtumus tarp katodo ir visų paskui einančių dinodų... Varžų nominalai nurodomi datasheet'e.
- Neigiama įtampa jungiama prie katodo!



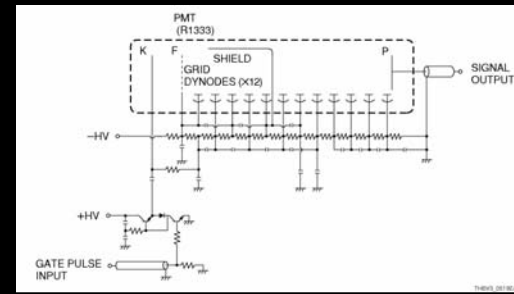
## Įtampos daliklis: impulsinis

- Kondensatoriai pamaitina papildomai tuos tarpus, kur teka didžiausia srovė.



## Laiko vartai

- Katodas prijungiamas prie teigiamos įtampos, kurią atjunga geitavimo impulsas...
- Naudojami, kai reikia detektuoti kažką, ką indukavome intensyviu impulsu, kuris gali užsotinti fotodaugintuvą...





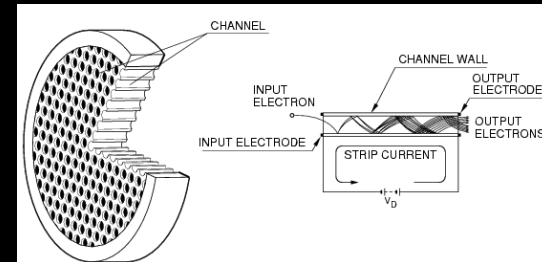
## PMT moduliai

- Viskas jau padaryta už jus ☺
- Tik reikia susimokėti...



## Mikrokanalų plokštė

- Daug mažų tuščiavidurių kanaliukų ( $\varnothing$  6-10  $\mu\text{m}$ ), padengtų didelės varžos rezistu. Tolydinis dinodas



## Mikrokanalų plokštė

- Didelis stiprinimas
- Greitas atsakas
- Dvimačio vaizdo detektavimas
- Atspari magnetiniams laukams...



## Mikrokanalų plokštė: geras detektorius SPT

- Laikinės charakteristikos

MCP-PMT Type No.	Rise Time	Fall Time	Transit Time	IRF (FWHM)
R3809U-50 (6 $\mu\text{m}$ , 2-stage MCP)	150ps	360ps	400ps	45ps
R5916U-50 (6 $\mu\text{m}$ , 2-stage MCP)	180ps	700ps	350ps	95ps
R7024U (6 $\mu\text{m}$ , 2-stage MCP)	110ps	120ps	400ps	—

Note: Data in the above table shows typical values including the light source and circuit jitters.  
A picosecond laser with a pulse width (FWHM) of less than 35 ps is used for IRF measurement.  
The R5916U-50 is a gated MCP-PMT. The R7024U is a triode type MCP-PMT (Figure 10-9).



# Fotoninių vamzdelių alfa ir omega

- [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)
- Populiariausias fotodaugintuvas: R928, visi tik jį ir naudoja ☺



### Photosensor modules H11903 series

Settling time 0.2 s ±15 V operating (at +25 °C)

Parameter	H11903-110	H11903-113	H11903-210	H11903-01	H11903-04	H11903-20	Unit
Spectral response	230 to 700	185 to 700	230 to 700	230 to 870	185 to 870	230 to 920	nm
Effective area	±8						mm
Input voltage	±11.5 to ±15.5						V
Maximum input current	+20 / -8 (Dark condition)						mA
Recommended control voltage adjustment range	+0.5 to +1.1 (Max. +1.1)						V
Photomultiplier tube gain <sup>(1)</sup> Typ.	2.0 × 10 <sup>6</sup>						—
Frequency bandwidth	DC to 200 kHz						—
Current-to-voltage conversion factor	0.1						V/μA
Maximum output signal voltage	+10 (Load resistance 10 kΩ)						V
Input signal dependency on PWT gain control <sup>(2)</sup> Typ.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1	mV
Settling time <sup>(2)</sup> Max.	0.2						s
Operating ambient temperature	+5 to +50						°C

① Control voltage +1.0 V  
② The time required for the output to reach a stable level following a change in the control voltage from +1.0 V to +0.5 V

●Spectral response

●Dimensional outline (Unit: mm)

**HAMAMATSU**  
PHOTON IS OUR BUSINESS

## HIGH SPEED COMPACT HPD (Hybrid Photo Detector) SERIES R10467U SERIES / R11322U-40 / H13223-40

### FEATURES

- High-speed response
- High time resolution
- High sensitivity
- Directly connects to the HPD power supply (R10467U-xx-01, R11322U-40-01, H13223-40)

Left: R10467U-40, Center: R11322U-40, Right: H13223-40

### APPLICATIONS

- Laser scanning microscope (Confocal / Two-photon)
- FCS (Fluorescence Correlation Spectroscopy)
- LIDAR (Light Detection and Ranging)
- TCSPC (Time-correlated Single Photon Counting)

■ Principle

Photoelectron gain: 1500  
Anode Gain: 80 times

# Elektrooptinis keitiklis

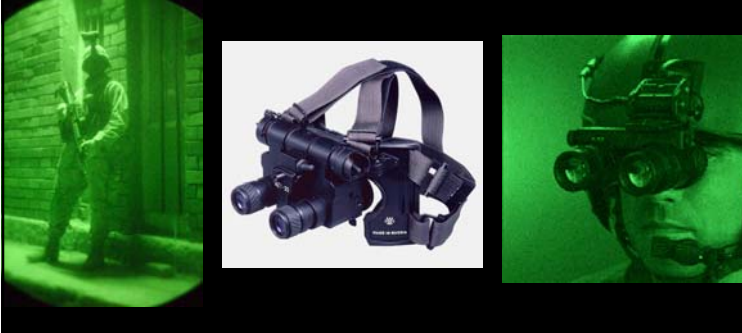
- GaAs katodas, lengvai atiduodantis elektronus + MCP + fosforas

1. Front Lens
2. Photocathode
3. Microchannel plate
4. High Voltage Power Supply
5. Phosphorus Screen
6. Eyepiece

Jei uždedame tokį ant CCD, gauname iCCD...

## Elektrooptinis keitiklis

- Naudojama IR viewer'iams ir naktinio matymo prietaisams gaminti...



## Detektoriai su vidiniu fotoefektu

- Fotorezistoriai
- Fotodiodai
- CCD
- Visi pagrįsti krūvininkų sužadinimu iš valentinės į laidumo juostą ir su tuo susijusiu medžiagos laidumo kitimu ar krūvio kaupimu.

## Medžiagos ir jų sugertis

Puslaidininkių sugertis priklauso nuo draustinės juostos tarpo. Todėl skirtingiems spektriniais diapazonams reikia naudoti puslaidininkinius fotodetektorius:

Medžiaga	T, K	$\lambda_{max}$ , mm
Si	300	0.2-1.1
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	300	0.9-1.65
Ge	300	0.8-1.9
Ge	77	0.8-1.7
PbS	300	1.0-2.9
PbSe	300	1.5-4.8
InAs	300	0.9-3.5
$Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ (MCT)	77	2-14

InAsSb -30°C 1-5.8 um

## Fotorezistoriai: CdS, GaAsP etc...

- Apšvietus keičiasi varža. Lėtas atsakas, nėra nulinio fono, todėl matomos srities fotorezistoriai tik labai paprastiems taikymams, pvz., gatvių šviesoms įjungti.



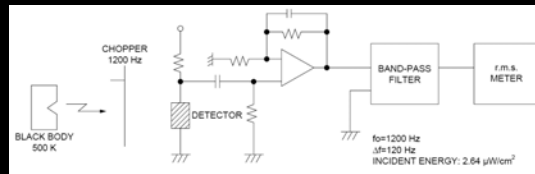
Varža kinta nuo 100 Ohm saulėkaitoje iki 10 MOhm tamsoje...

CdS draudžiama naudoti dėl toksiškumo...



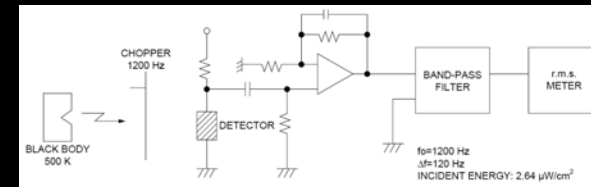
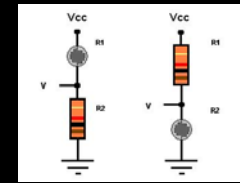
## Fotorezistoriai: PbS, PbSe, MCT (HgCdTe)

- MCT - Vienintelė medžiaga, realiai gerai dirbanti tolimesne midIR diapazone. Reikia šaldyti ir jungti prie specialios grandinės. Naudojama moduliacinė (lock-in) detekcija.
- InfraRed Associates

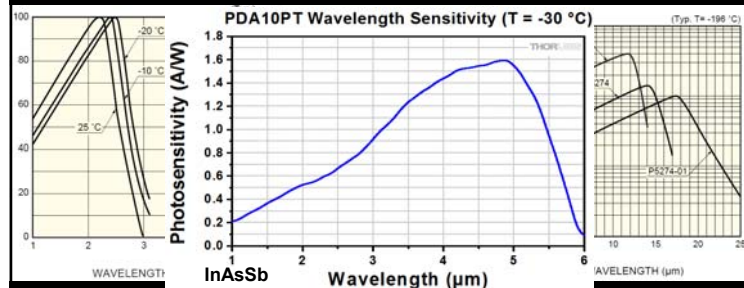


## Fotorezistoriai: jungimas į schemą

- Jungiam kaip įtampos daliklio dalį, toliau stiprinam...



## Fotorezistoriai: PbS, PbSe, MCT (HgCdTe): spektrinis jautris



PbS

PbSe

MCT

Iš principo fotorezistoriai yra netiesiniai, todėl reikia atsižvelgti, kuriant schemas...

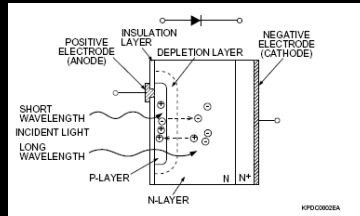
## Fotodiodai: standartinis detektorius 90% atvejų

- Tiesiški, greiti, jautrūs ir t.t.
- Daromi iš
  - Si (190 – 1100 nm)
  - InGaAs (900-2600 nm)
  - Ge (700-1900 nm)
  - Kt.
- Veikimas pagrįstas optine krūvininkų generacija pn sandūroje.

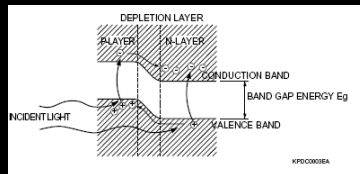


## Fotodiodai: principas

Ant n pagrindo selektyvios boro difuzijos būdu suformuojamas p sluoksnis. Gaunama pn sandūra, prie kurios pridėję kontaktus jau turime fotodiodą.

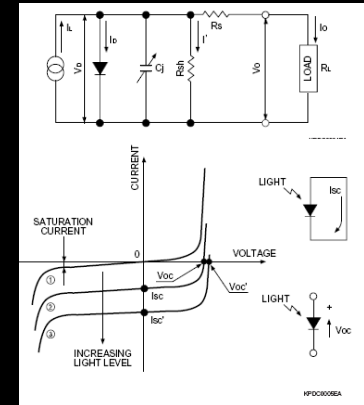


Pažaidus su p sluoksnio storiu ir koncentracija galima reguliuoti spektrines PD savybes.



## Fotodiodai: atstojamoji grandinė

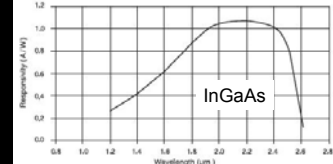
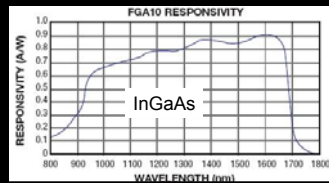
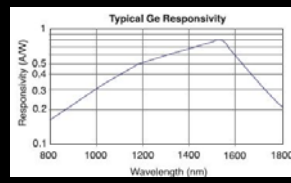
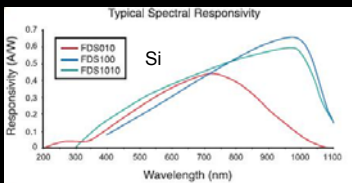
Generuojama srovė, nuosekli ir lygiagreti varžos, sandūros talpa...



Apšvietus ir užtrumpinus kontaktus teka srovė, kuri yra tiesiškai proporcinga apšvietumui per 9 eiles!

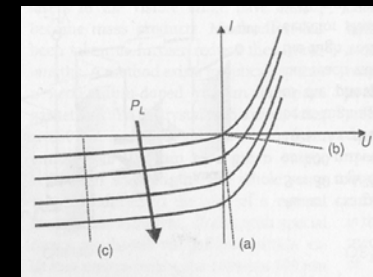
## Fotodiodai

- Atsakas priklauso ir nuo detektoriaus, ir nuo jo lango! Šiaip jau nusako detektoriaus sugertis...



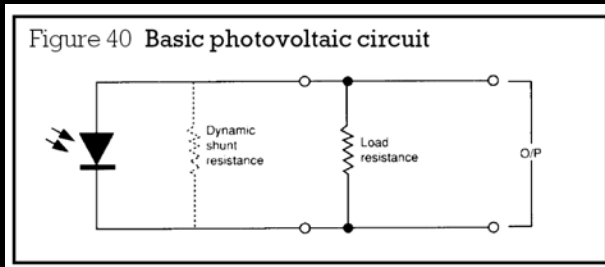
## Fotodiodų darbo režimai

- A) Fotoamperinis
- B) Fotovoltinis
- C) Fotolaidumo



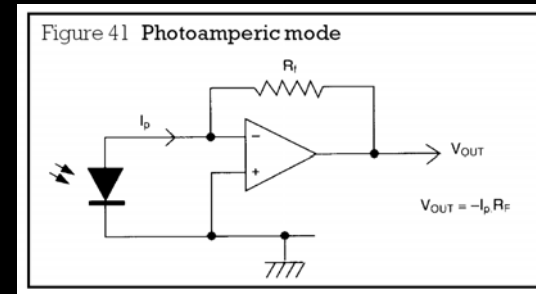
## Fotovoltinis režimas

- Netiesinis. Tinka yra/nėra šviesos detekcijai.



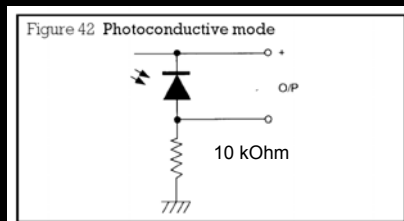
## Fotoamperinis režimas

- Diodas jungiamas tiesiai į srovės/įtampos keitiklį. Tiesinis atsakas, maži triukšmai. Negreitas.



## Fotolaidumo režimas

- Diodas prijungiamas su atbuline įtampa, dėl ko padidėja nuskurdinta sritis ir sumažėja pn sandūros talpa. Todėl taip įjungtas diodas yra pats tiesiškiausias ir greičiausias. Triukšmingesnis už fotoamperinį.

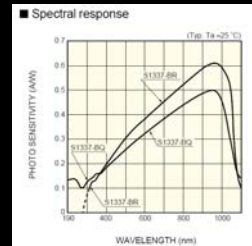
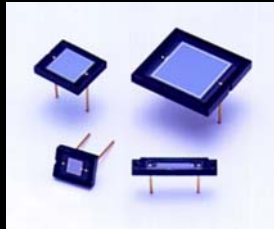


## Fotodiodų veislės

- PN fotodiodas
- PIN fotodiodas
- APD (grūtinis)

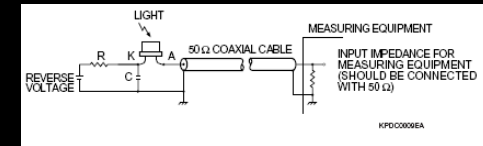
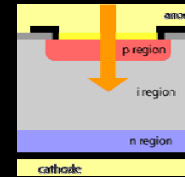
## PN fotodiodai: pvz., Hamamatsu S1337-1010BQ

- Didelis plotas
- Geras jautris
- Platus spektrinis diapazonas



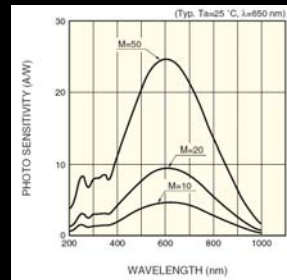
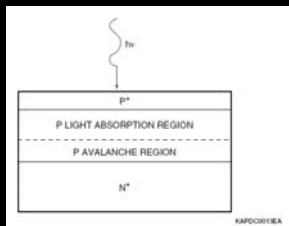
## PIN fotodiodai:

- P tipas – savasis – N tipas
- Maža sandūros talpa, geras kvantinis efektyvumas.
- Greiti (InGaAs juosta apie 3 GHz).



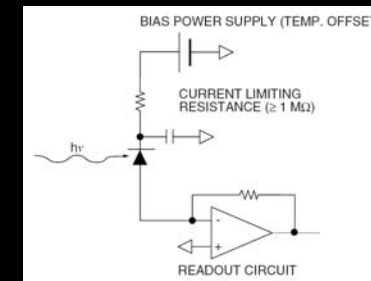
## APD, griūtiniai fotodiodai:

- Už pn sandūros suformuojamas griūtis sluoksnis, kur elektronai ir skylės dauginasi dėl smūginės jonizacijos. Pasiekiamas iki 100x stiprinimas. APD – tai puslaidininkinis fotodaugintuvo analogas...

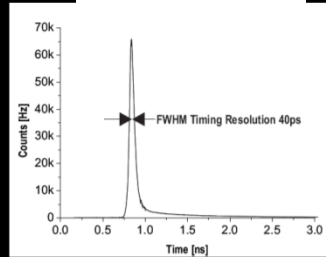


## APD, griūtiniai fotodiodai:

- Reikia aukštos įtampos, bet charakteristikos gaunamos neblogos, jautris iki 50 A/W. Praktiškai fotonų skaitliukai.

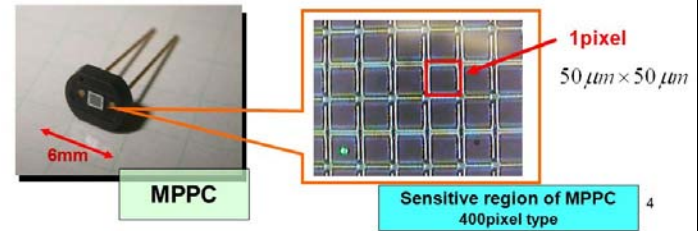


## SPAD, griūtiniai fotodiodai pavieniams fotonams



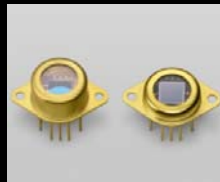
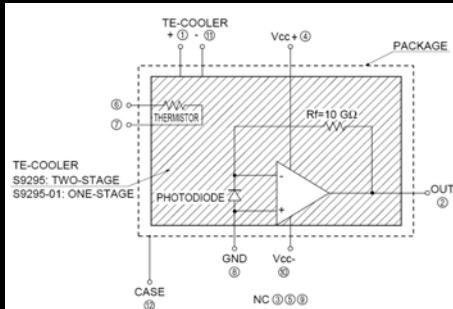
## Multi-Pixel Photon Counter ( MPPC )

- Multi-Pixel Photon Counter ( = MPPC ) is a new type of photo detector developed by Hamamatsu Photonics (HPK).
- MPPC consists of 100~1600 small avalanche photo diodes( APD ) in 1mm×1mm sensitive region.



## Fotodiodai su papildoma įranga

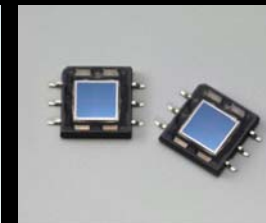
- Fotodiodai su pradiniu stiprintuvu (net ir TE šaldytuvu)



Pavyzdys - Hamamatsu S9295, 1300\$ (stiprintuvas+šaldytuvas), S9270 – tik stiprintuvas, 190\$. Pats diodas kainuoja 70\$.

## Fotodiodų klasteriai

- Šviesos pozicijos detekcijai, grįžtamajam ryšiui pozicionuojant, mašinų regėjimui... pvz., CD fokusavimui ir kt.



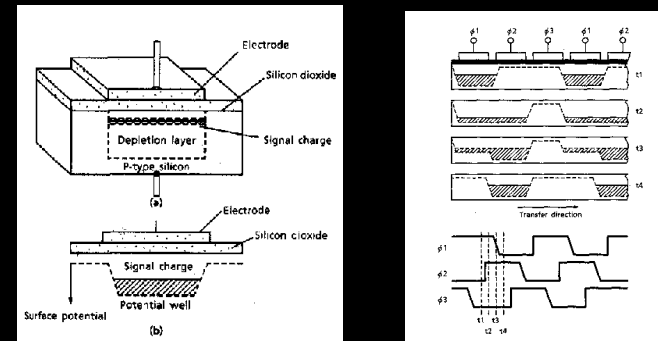


## Si ir InGaAs vaizdo sensoriai

- Technologijos:
  - CCD
  - CMOS
  - NMOS

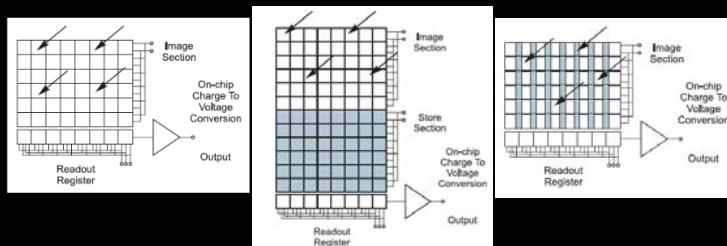
## CCD kamera

- Šviesa užkraunami kondensatoriai, tarp kurių organizuojamas krūvio ryšys:



## CCD kamerų tipai

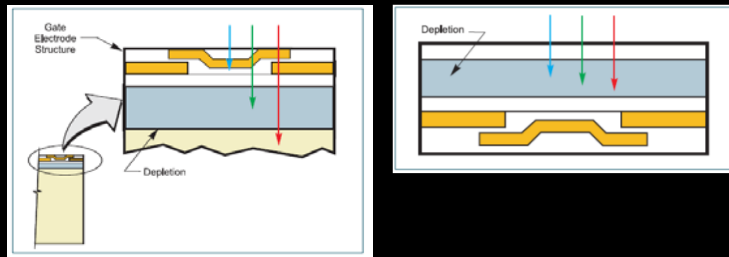
- Standartinė CCD
- Kadro perrašymo (frame transfer)
- Tarpeilutinio perrašymo (interline transfer)



## CCD kamerų tipai

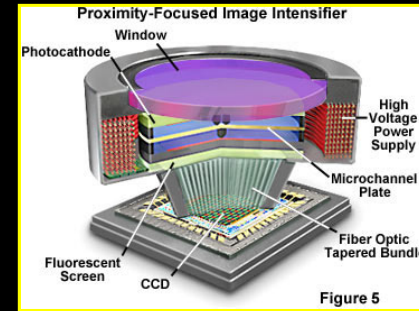
- Iš priekio apšviestos
- Iš galo apšviestos
- Intensifikuotos, ICCD
- Elektronų dauginimo, EMCCD

## Apšvietimas iš priekio ir galo



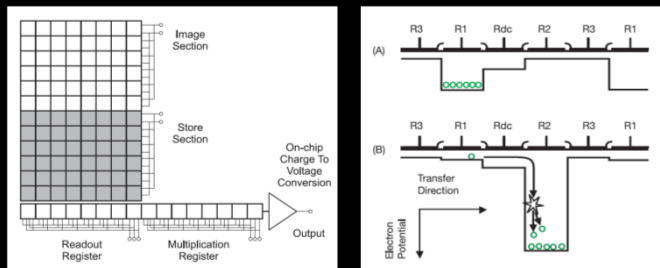
Kadangi visas galas – tai vienas žemės kontaktas, pagamintas iš Si, jis gali surinkti visą reikiamą krūvį.... Kontaktai neužstoja šviesos, todėl kvantinis našumas pagerėja kelis kartus

## MCP+Fosforas+CCD=ICCD



Prieš kamerą montuojamas vaizdo intensifikatorius – mikrokanalinė plokštė. Leidžia „fotografuoti“ vaizdus su gera laikine skyra (2 ns), įjungiant arba išjungiant aukštą įtampą vaizdo intensifikatoriuje.

## CCD + smūginė jonizacija = EMCCD



Papildomas stiprinimo registras, kuriame vyksta elektronų dauginimas... Padidina ir signalą, ir triukšmą...

## CCD kamerų triukšmai

- Terminė generacija  $e\text{-pix}^{-1} \cdot s^{-1}$ .
- Stiprintuvo triukšmai (kiekvieną kartą nuskaitant).
- A/D Keitiklio triukšmai.
- Nuo terminės generacijos apsaugo šaldymas, visi kiti – sensoriaus charakteristikos... Todėl padeda tik vidurkinimas. Kuo mandresnis sensorius, tuo daugiau triukšmo šaltinių ☺

## Eilučių perdavimo panaudojimas kinetinei informacijai registruoti

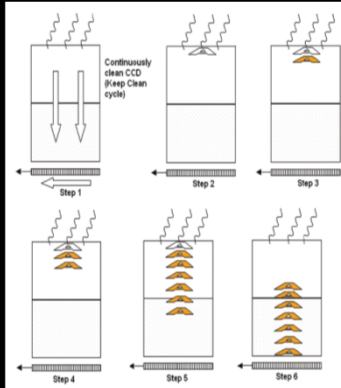


Figure 1 - Illustration showing Fast Kinetics Mode capture sequence of the Ixon

Šviečiam tik į viršutinę eilutę ir traukiam ją sensoriumi žemyn.

Jei eilutės perstūmimo trukmė 1 us, o spektrą atvaizdavome ant 10 pikselių aukščio linijos, galime nesunkiai pasiekti 10 us laikinę skyrą

## CMOS kameros: krūvio-įtampos keitiklis kiekviename pikselyje

- ROI funkcijos (galima skaityti atskirus pikselius)
- Aktyvus adresavimas, daugiau "proto" pačiame sensoriuje
- Bet mažesnis aktyvus plotas...

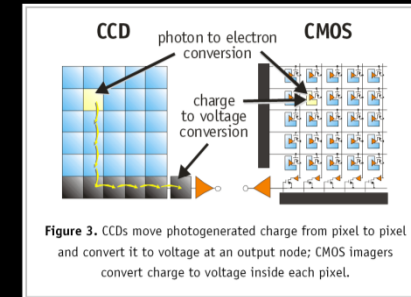


Figure 3. CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node; CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

## Šiluminiai detektoriai

- Bolometrai
- Piroelektriniai detektoriai
- Termoelementai
- Kadangi svarbi tik šiluma, tai nesvarbus bangos ilgis, kartą sukalibravus, nebereikia rūpintis.

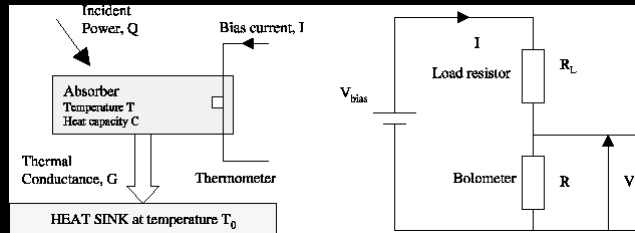
## Bolometras

- Detektorius, kuris, sugėręs šviesą įšyla ir dėl to keičiasi jo varža. Įtampos kritimas leidžiant srovę yra toks:

$$\Delta V = i_{bias} \alpha R \Delta T$$

- Naudojami daugiausia tolimajai infraraudonajai sričiai (kitur yra jautresnių).
- Šaldomi iki 77K ar net 4K.
- Būna metaliniai ir puslaidininkiniai

## Bolometras



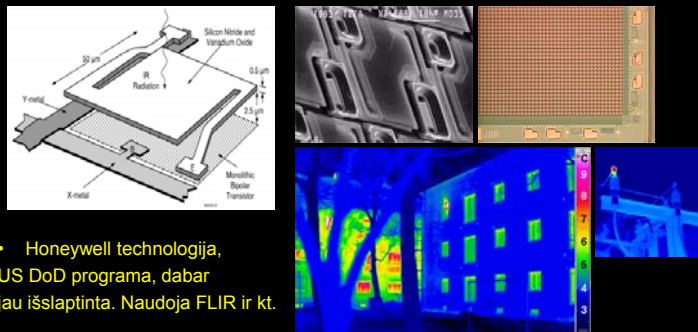
Bolometro principinė konstrukcija ir jungimas į schemą.

## Bolometras

- Turi būti plonas, kad greitai atšaltų ir turėtų bent kiek priimtina dažnių juostą. Pirmieji bolometrai – dvi platinos juostelės, padengtos suodžiais. Geriau, jei jos yra vakuume (kad nebūtų šilumos mainų su aplinka, tik spinduliavimas)
- IR srityje langai daromi iš KBr, CaF<sub>2</sub>, Ge
- Geresni (jautresni) yra puslaidininkiniai (Ge, Si) bolometrai, nes jų varža didesnė, be to, stipriau priklauso nuo t-ros.

## Mikrobolometrai: IR vaizdinimas

- Matricos, formuojamos ant Si pagrindo (CMOS), IR kameros



- Honeywell technologija, US DoD programa, dabar jau išslaptinta. Naudoja FLIR ir kt.

Karo pramonė, kova su teroristais, automobilių pramonė, pramoninė kontrolė...

## Dielektrikai ir piroelektrikai

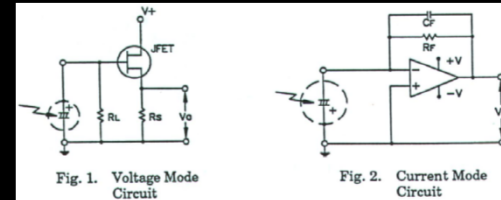
- Matuoja dielektrinės skvarbos priklausomybę nuo temperatūros. Jei dielektrikas yra ir *feroelektrikas*, turim piroelektrinį detektorių

## Dielektrikai ir piroelektrikai

- Standartinės medžiagos:
  - Triglycinsulfatas  $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{OOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$
  - Ličio tantalatas  $\text{LiTaO}_3$
  - Bario titanatas  $\text{BaTiO}_3$
  - Švino-cirkonio titanatas  $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$

## Piroelektriniai detektoriai

- Tabletė, priklausomai nuo dydžio ir parametru, kainuoja apie 2-300\$



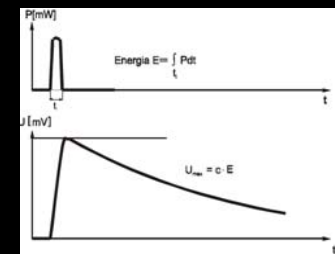
## Piroelektriniai detektoriai

- Kadangi piroelektrikas yra iš esmės kondensatorius, jis jaučia ne temperatūrą, bet jos pokyčius. Per kondensatorių srovė teka tik esant kintamai įtampai

$$I_p = p \cdot \frac{dT}{dt} \cdot S$$

## Piroelektriniai detektoriai

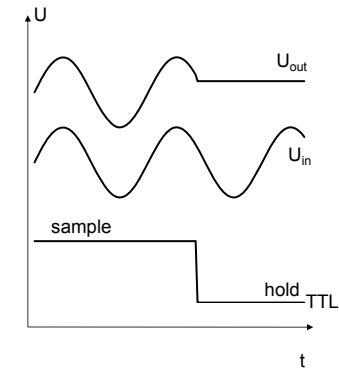
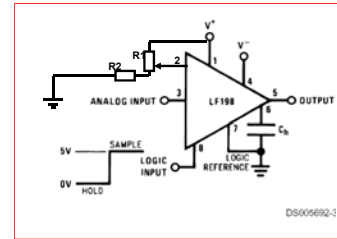
- Atsakas į šviesos impulsą nesimetriškas laike dėl terminių reiškinių... Kurie, savo ruožtu, priklauso nuo sugerties gylio (t.y. bangos ilgio). Tokiam matuokliui būtina sukonstruoti maksimumo detektorių



## Pagalbinė elektronika: S&H

- Analoginė atmintis: leidžia užrašyti įtampos vertę ir išlaikyti ją neribotą laiką.
- National Semiconductor LF398.
- Kol loginis jėjimas pakeltas, išėjimo įtampa 'seka' jėjimo vertę; kai jį nuleidžiame, išėjime 'užsifiksuoja' tuo momentu buvusi jėjimo vertė.
- Patogu, kai reikia daug analoginių signalų keisti į skaitmenis...

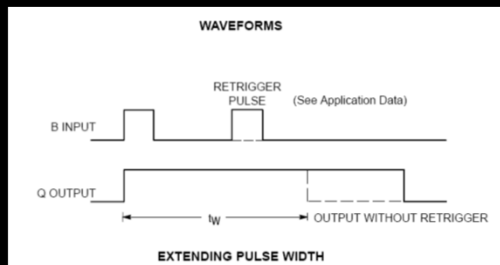
## S&H – LF398, AD781, old school



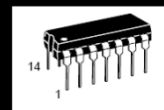
1.4 EUR

## Pagalbinė elektronika: 74HCT123

- TTL Timeris su išorine suderinta RC grandine, užduodančią užlaikymą. Leidžia pasidaryti sinchronizacijos TTL impulsa/frontą bet koku norimu laiko momentu....

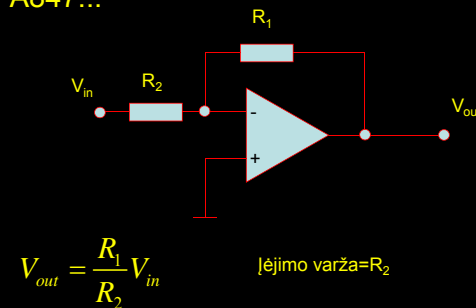


0.35 EUR



## Pagalbinė elektronika: Opamp

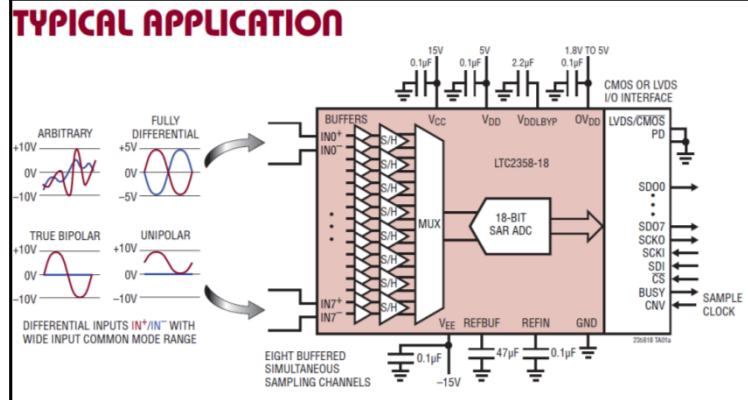
- Įtampos signalo stiprinimas: invertuojantis stiprintuvas (pvz., LM308, jau minėti AD549, OPA847...)



6 EUR

# Integruoti galima viską: LTC2358

~30 EUR



# Bauda už tingėjimą:

- Kaina: diodas 0.2-10 EUR
- Stiprintuvas: 5 EUR
- Rezistorius 0.01 EUR
- BNC jungtis 1.2 EUR
- Korpusas: 4 EUR
- Maitinimo šaltinis 15 EUR

Iš viso apie 30 EUR

Arba:



276.00 EUR

# Duomenų surinkimo įranga

## USB-1602HS and USB-1604HS Series

### High-Speed BNC Multifunction Devices

Average Rating: ★★★★★ 4.3 out of 5 (3 reviews)

#### Key Highlights

- 2 or 4 analog inputs
- 16-bit resolution
- 1.33 MS/s or 2 MS/s simultaneous sampling
- Up to 2 analog outputs
- 32 digital I/O, counter/timer

#### Software

- TraceDAQ® software included for acquiring and displaying data and generating signals
- Universal Library includes support for Visual Studio® and Visual Studio® .NET, including examples for Visual C++®, Visual C#®, Visual Basic®, and Visual Basic® .NET
- Comprehensive drivers for DASyLab® and NI LabVIEW™
- MATLAB® Data Acquisition Toolbox™ support (32-bit support only; 64-bit MATLAB (ver. R2016) available soon. Contact The Mathworks for more information)
- InstaCal software utility for installation, calibration, and testing
- **Supported Operating Systems:** Windows® 10/8/7/Vista/XP-SP2, 32-bit or 64-bit

Product Data Sheet - PDF printable

Software and Driver Downloads

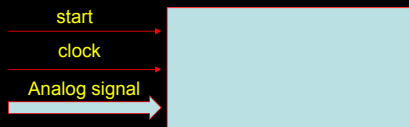


# Duomenų surinkimo įranga



## DAQ pagrindiniai aspektai:

Keitiklio skyra (bitai) 12-24  
 Diskretizavimo dažnis (10 kSps – 2MSps)  
 Jėjimo stiprintuvo diapazonų skaičius (0.2V per skalę iki 20V)  
 Vienalaikis analoginių jėjimų signalo registravimas ar MUX  
 Jėjimų skaičius (2-32)  
 Ar yra analoginės įtampos generatorius  
 Ar yra taimeris/skaitliukas



Arduino?..

## Spektroskopijos įranga

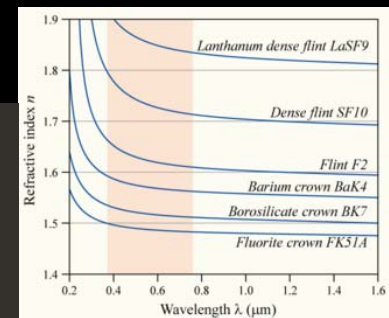
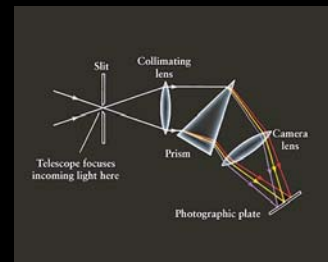


## Spektroskopijos įranga

- Matuojant spektrus, reikalingi elementai, išrinkti ir atskirai pamatuoti šviesos spektrinius komponentus. Tai
  - Spektrografai ir monochromatoriai
    - Prizminiai
    - Gardeliniai
  - Interferenciniai filtrai
  - Interferometrai

## Prizminis spektrografas

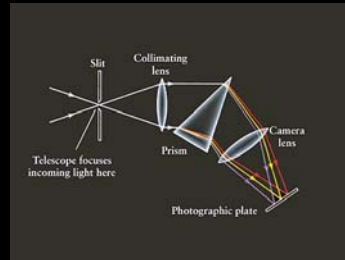
Panaudoja šviesos lūžio rodiklio priklausomybę nuo bangos ilgio (dispersiją)



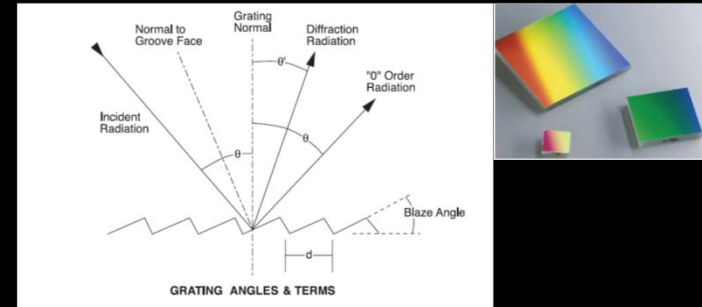


## Prizminis spektrografas

- Netiesinis (lūžio rodiklis kinta greitai UV, lėtai nIR), dėl to dideli bangos ilgiai prastai išsiskiria.
- Neblogas pralaidumas
- Jautrus poliarizacijai
- Dispersija vienareikšmė

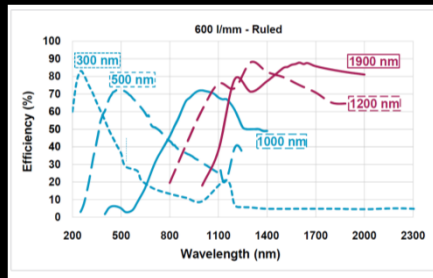


## Gardelinis spektrografas: Gardelė



$$n\lambda = d(\sin \theta + \sin \theta')$$

## Gardelinis spektrografas: Gardelė

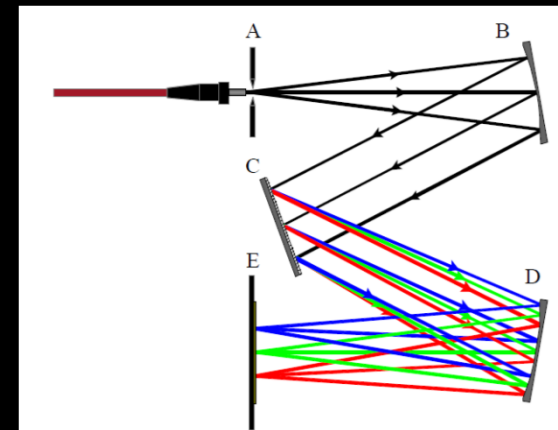


Blizgesio kampas – kai difrakcijos kampas sutampa su veidrodinio atspindžio nuo griovelio kampu.

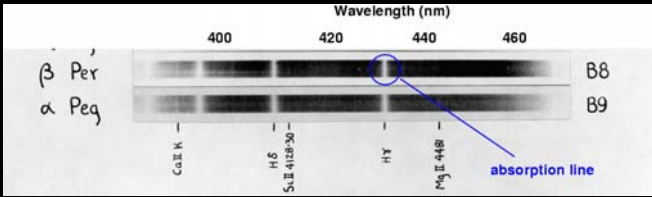
Tam tikram bangos ilgiu ruožui tai padidina difrakcijos efektyvumą norimoje eilėje.

Plačiam spektriniam diapazonui reikia kelių gardelių!

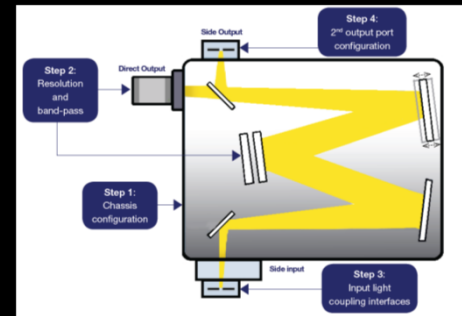
## Gardelinis spektrografas: Czerny-Turner



**Kodėl kalbame visada apie spektrines linijas, o ne spektrinius apskritimus, kvadratus ar ką nors kitą?**



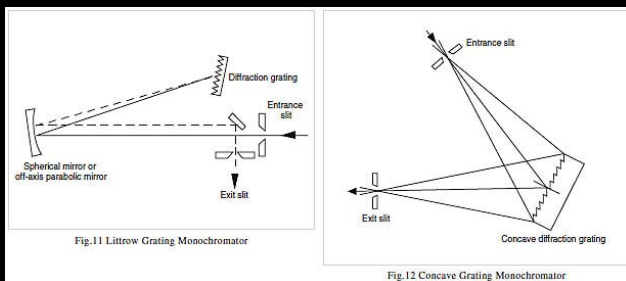
**Gardelinis spektrografas: Czerny-Turner**



Kelios gardelės ant vieno būgno leidžia padengti kelias skirtingas spektro sritis.



**Kitos schemas**



Atgalinis atspindys (Littrow)

Įgaubta holografinė gardelė ir difraguoja, ir fokusuoja

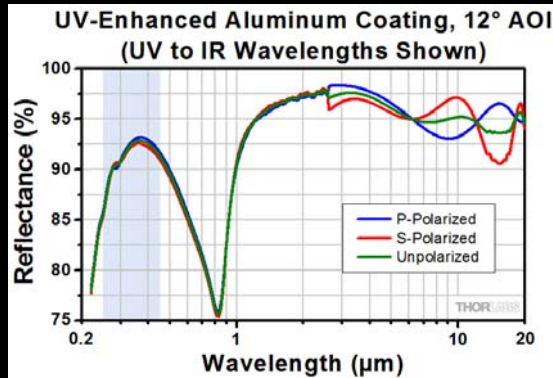
**Gardelinio spektrografo parametrai**

- Židinio nuotolis
- Skaitinė apertūra (f-number)
- Skyra (priklauso nuo gardelės ir nuo detektoriaus)
- Tiesinė dispersija

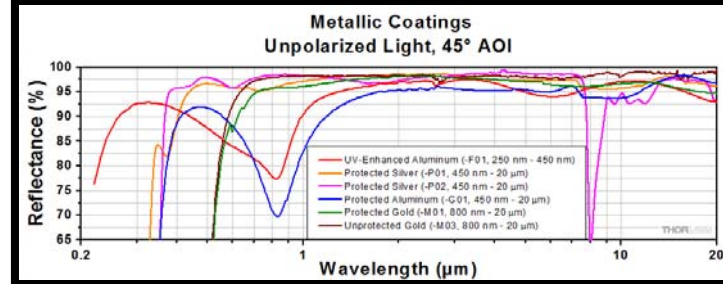


Miniatiūrizacija gerai, bet ne visada.

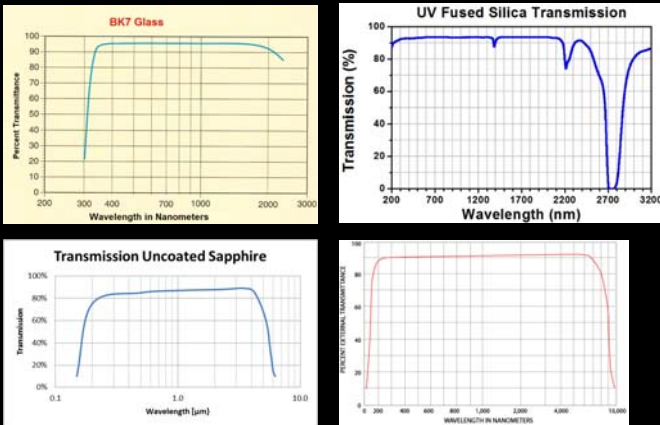
### Medžiagos optiniams elementams: Al veidrodžiai



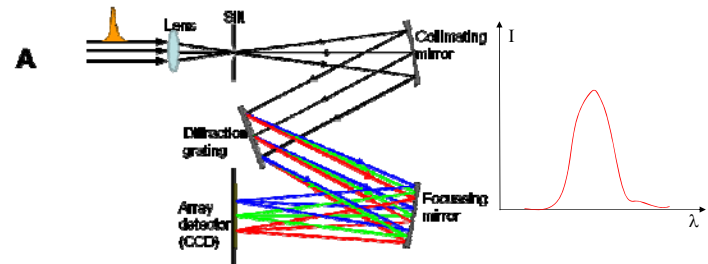
### Medžiagos optiniams elementams: veidrodžiai



### Medžiagos optiniams elementams: Lęšiai, prizmės, langeliai



### Ultratrumpųjų impulsų charakterizavimas: spektras



Spektras gali priklausyti nuo pluošto vietos (erdvinis čirpas, ypač būdingas nOPA)

Kai šviesos impulsas trumpesnis už patį greičiausią fotodetektorių, naudojame autokoreliaciją

$$E_{sig}(t, \tau) = E(t)E(t - \tau)$$

$$I_{sig} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau) dt$$

Pakeitus vėlinimą į koordinatę, galime užrašyti visą ACF iš vieno šūvio

Impulsas (Išplėstas erdveje ~1 cm)

Cilindrinis lęšis sufokusuoja spindulį vertikalia kryptimi, delta kinta horizontaliai.

Spindulio daliklis

SHG

Apertūra

Kamera

Lešis sufokusuoja vaizdą į kamerą

$$E_{sig}(t, \tau) = E(t)E(t - \tau)$$

$$I_{sig} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau) dt$$

Pakeitus vėlinimą į koordinatę, galime užrašyti visą ACF iš vieno šūvio

Impulsas (Išplėstas erdveje ~1 cm)

Cilindrinis lęšis sufokusuoja spindulį vertikalia kryptimi, delta kinta horizontaliai.

Spindulio daliklis

SHG

Apertūra

Kamera

Lešis sufokusuoja vaizdą į kamerą

$$E_{sig}(t, \tau) = E(t)E(t - \tau)$$

$$I_{sig} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau) dt$$

Šviesos impulsų charakterizavimas FROG

BS

Controlable delay

M<sub>1</sub> M<sub>2</sub> M<sub>3</sub> M<sub>4</sub> M<sub>5</sub> M<sub>6</sub> M<sub>7</sub>

L

NC

Spectrometer

$$E_{sig}(t, \tau) = E(t)E(t - \tau)$$
~~$$I_{sig} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau) dt$$~~

$$I_{FROG}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{sig}(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2$$

# Pagrindiniai FROG TIPAI

- Ⓢ PG (polarizacinis) FROG  

$$E_{sig}^{PG}(t, \tau) = E(t)|E(t-\tau)|^2$$
- Ⓢ SD (savaiminės difrakcijos) FROG  

$$E_{sig}^{SD}(t, \tau) = E^2(t)E^*(t-\tau)$$
- Ⓢ SHG (antrosios harmonikos) FROG  

$$E_{sig}^{SHG}(t, \tau) = E(t)E(t-\tau)$$
- Ⓢ THG (trečiosios harmonikos) FROG  

$$E_{sig}^{THG}(t, \tau) = E^2(t)E(t-\tau)$$

## GRENOUILLE: amplitudė ir fazė iš vieno šūvio

This achieves the entire range of delays for a single pulse and yields an **amplitude phase spectrogram** measurement of a pulse.

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = l^2 K \frac{P_{\omega} \sin^2(\Delta kl/2)}{A (\Delta kl/2)^2}$$

**The thick crystal**

Suppose **broadband** light with a large **convergence** angle impinges on an SHG crystal. The SH generated depends on the angle. And the angular width of the SH beam created varies inversely with the crystal thickness.

- Very thin crystal creates broad SH spectrum in all directions. Standard autocorrelators and FROGs use such crystals.
- Thin crystal creates narrower SH spectrum in a given direction and so can't be used for autocorrelators or FROGs.
- Thick crystal begins to separate colors.
- Very thick crystal acts like a spectrometer! Why not replace the spectrometer in FROG with a very thick crystal?

**Fazinio sinchronizmo kampinė priklausomybė duoda spektrinę skyrą**

## GRENOUILLE: amplitudė ir fazė iš vieno šūvio

**Top view**

Lens images position in crystal (i.e., delay, t) to horizontal position at camera

Can place slit here to filter out other beams

Cylindrical lens, Fresnel Biprism, Thick SHG Crystal, Imaging Lens, Camera

**Side view**

Lens maps angle (i.e., wavelength) to vertical position at camera

λ = λ(θ)

Cylindrical lens, Fresnel Biprism, Thick SHG Crystal, FT Lens, Camera

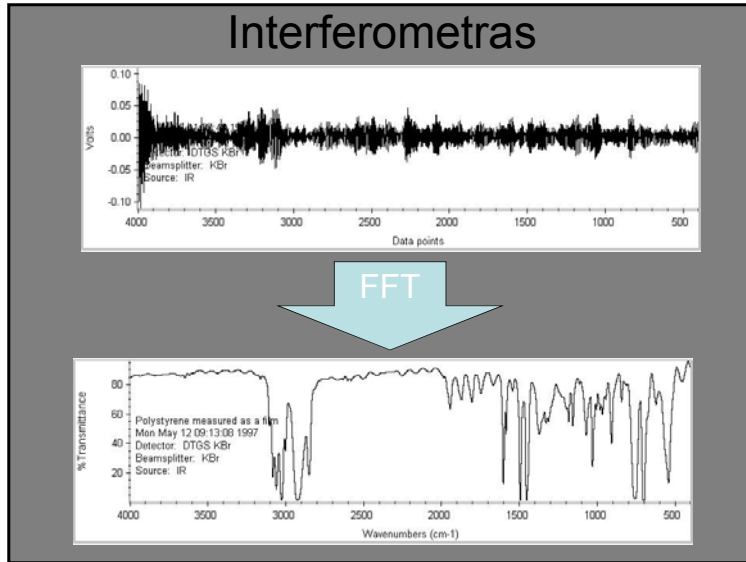
Fig. 2. Side and top views of the GRENOUILLE beam geometry of Fig. 1. Here, convenient focal lengths are shown for the two final cylindrical lenses (f and f/2).

## Interferometras

Source → Beam splitter → (Stationary Mirror / Moving Mirror) → Interferometer → Sample → Detector → Electronic Inlets → Computer

VOLT vs Data points (4000 to 500)

Source: IR, Beam splitter: KBr, Source: IR



## Interferometras

- Interferometras turi judančių dalių – ilgai užtrunka ir nepatogu;
- Vėlinimą reikia valdyti šviesos fazės tikslumu (nesunku midIR, bet problemiška UV)
- Matavimas jautrus mechaniniams virpesiams
- Privalumas – užtenka vieno detektoriaus. Tai dar viena priežastis, dėl ko metodas populiarus IR srityje (IR detektoriai brangūs ir blogi).

- **SPIDER** – Spectral Phase Interferometry for Direct Electric field Reconstruction.
- Iaconis, C; Walmsley, I. A. (1998), "Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-Field Reconstruction of Ultrashort Optical Pulses", Opt. Lett. 23 (10): 792–794.

- Taigi, spektre iš esmės matome:

$$I(\omega) = I_P(\omega) + I_M(\omega)\cos[\Psi(\omega)]$$

- Spektrinė moduliacija per  $2\pi/\tau \Rightarrow$ .
- Kaip ištraukti cos fazę? ☹️!
- Jei  $\tau$  pakankamai didelis:  $\Downarrow$

$$\cos \Psi = \frac{e^{-i\Psi} + e^{i\Psi}}{2}$$

**Laiko sritis**

$$E_r(t) = \sqrt{I_r(t)} e^{i\phi_r(t)}$$

$$E_s(t) = \sqrt{I_s(t)} e^{i\phi_s(t)}$$

**Dažnių sritis**

$$S_r(\omega) = \sqrt{I_r(\omega)} e^{i\psi_r(\omega)}$$

$$S_s(\omega) = \sqrt{I_s(\omega)} e^{i\psi_s(\omega)}$$

$\mathcal{F}\mathcal{T} \iff \mathcal{I}\mathcal{F}\mathcal{T}$

$$I(\omega) = |S_r(\omega)e^{-i\omega\tau} + S_s(\omega)|^2 =$$

$$= I_r(\omega) + I_s(\omega) + 2\sqrt{I_r(\omega)I_s(\omega)} \cos[\psi_r(\omega) - \psi_s(\omega) + \omega\tau].$$

- Visą informaciją jau turime!
- Grįžkime vėl į dažnių sritį:  $\mathcal{I}\mathcal{F}\mathcal{T}\{S^{(+)}(t)\}$ .
- Atskyrę amplitudę ir fazę, gauname:

$$r = \sqrt{\Re\{z\}^2 + \Im\{z\}^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(\Im\{z\}/\Re\{z\})$$

$$\Psi^{(+)}(\omega) = \arg\{\hat{S}^{(+)}(\omega)\} = \psi_r(\omega) - \psi_s(\omega) + \omega\tau.$$

- $\psi_r(\omega)$  ir  $\omega\tau$  – žinome.
- Būtų gerai, jei nebūtų per paprasta ☺.

- Sprendimas – naudoti tą patį impulsą, bet pakeisti jo dažnį.
- Grįžkime į praeitį:

$$S(\omega) = |S(\omega)e^{-i\omega\tau} + S(\omega + \Omega)|^2 = I(\omega) + I(\omega + \Omega) +$$

$$+ 2\sqrt{I(\omega)I(\omega + \Omega)} \cos[\psi(\omega + \Omega) - \psi(\omega) + \omega\tau]$$

- Atlikę tuos pačius veiksmus kaip iš prieš tai:

$$\Psi(\omega) = \psi(\omega + \Omega) - \psi(\omega) + \omega\tau$$

- Jei  $\omega\tau$  žinome ir  $\Omega \ll \Delta\omega$ :

$$\Psi(\omega) - \omega\tau \approx \Omega \frac{d\psi}{d\omega}$$

$$\Downarrow$$

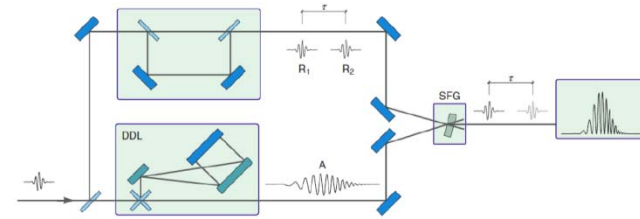
$$\psi(\omega) = \frac{1}{\Omega} \int_0^\omega (\Psi(\omega') - \omega\tau) d\omega'$$

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

**Išvada**

Atlikę vieną spektrinį matavimą ir keletą paprastų matematinių operacijų gauname impulso fazę.

- 1 Pavėliname impulsus per  $\tau$ .
- 2 Pastumiame dažnį per  $\Omega$ .
- 3 Išmatuojame spektrą  $S(\omega)$ .
- 4 Atliekame Furje transformaciją  $S(t) = \mathcal{F}\mathcal{T}[S(\omega)]$ .
- 5 Paliekame tik fazinę informaciją turintį signalą  $S^{(\pm)}(t) = S(t) \cdot f(t)$ .
- 6 Atliekame atvirkštinę Furje transformaciją  $S^{(\pm)}(\omega) = \mathcal{I}\mathcal{F}\mathcal{T}[S^{(\pm)}(t)]$ .
- 7 Atskiriame amplitudę ir fazę  $S^{(\pm)}(\omega) = A(\omega)e^{i\Psi(\omega)}$ .
- 8 Fazę suintegruojame.



- Impulsas padalinamas į dvi dalis:
  - Pirmasis – padalinamas ir pavėlinamas.
  - Antrasis – faziškai moduluojamas
- NK generuojamas suminis dažnis.
- Dėl čirpo suminių signalų bangos ilgiai skiriasi.

