

Baldomir ZAJC  
Vasja JURKAS

Fakulteta za elektrotehniko - Ljubljana  
Trzaska 25  
Ljubljana

studij integriranega ojačevalnika s PIN fotodiode  
v bipolarni in MOS tehnologiji

A study of an integrated amplifier containing PIN photodiode  
in bipolar and MOS technology

**VSEBINA :** Izdelane PIN fotodiode so bile integrirane s svetlobnim vodnikom v sprejemni sistem svetlobne informacije. Rezultati meritev so bili odlični, saj je bil čas vzpona 200 psec izredno kratek. Za ojačitev šibkih izhodnih signalov PIN fotodiode na licu mesta je potrebno integrirati PIN fotodiode z ustreznim ojačevalnikom na istem integriranem vezju. Analiziran je bil en bipolarni in en unipolarni MOS ojačevalnik in primerjane njune lastnosti med seboj.

**ABSTARCT :** PIN photodiodes made by ourself were integrated with an optical fibre into a receiving system for optical information. The results of the measurements were excellent, the rise times 200 psec were very short. To amplify weak output signals of PIN photodiode on the spot is necessary to integrate PIN photodiode with an adequate amplifier on the same integrated circuit. One bipolar and one unipolar MOS amplifier are analysed and compared their characteristics and performance mutually.

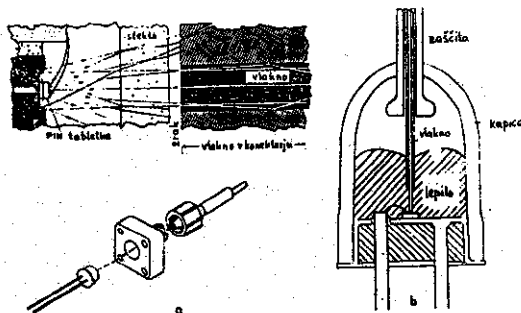
#### 1. UVOD

PIN fotodiode smo izdelali v štirih različicah /1,3/, ki naj bi omogočile študij posameznih efektov in pomagale določiti tisto z optimalnimi lastnostmi.

Rezultati meritev diod so bili zadovoljivi razen nizke prebojne napetosti v začetnih poizkusih, ki pa je bila popravljena s spremembo tehnološkega postopka. Nato so bile diode vgrajene v ohišje in njihove lastnosti izmerjene v pravem delovnem okolju. Nazadnje so bile spojene še s svetlobnim vodnikom v sprejemni sistem za svetlobno informacijo /2,3/.

Končni rezultati so povsem zadovoljili, saj je bil čas

vzpona izredno kratek (pod 200 psec), krajši od časa vzpona pri avalanche diodi, ki je služila za primerjavo, ostali parametri pa so bili tudi zelo podobni parametrom diod tujih proizvajalcev.



Slika 3. Spoj fotodiode in svetlobnega vlakna:  
a) ločljiv s konektorjem  
b) neločljiv lepjen spoj.

Izhodni signali PIN fotodiode so zelo šibki, zato se takoj pojavi potreba po ojačenju. Ker pa so odzivni časi fotodiod zelo kratki, mora imeti ojačevalnik dokaj veliko pasovno širino, da se vse dobre lastnosti diode ohranijo. Poleg tega pa mora ojačevalnik ravno tako ojačiti tudi enosmerne signale. Najugodnejša rešitev je prav gotovo monolitni integrirani ojačevalnik.

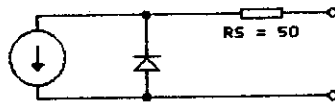
Naša naloga je bila raziskati možnosti za takšen ojačevalnik, izbira ustrezne tehnologije izdelave in izbira ustrezne sheme. Pregledati bo potrebno podobne fotodetektorje drugih proizvajalcev in opraviti računalniške simulacije izbranih vezav.

## 2. MODEL PIN FOTODIODE

Model fotodiode je sestavljen iz navadnega diodnega modela s serijsko upornostjo enako nič. Vzporedno diodnemu modelu je vezan tokovni generator, ki predstavlja svetlobno generirani tok, zaporedno pa je vezan še upor, ki predstavlja serijsko upornost fotodiode (slika 2). Tak model smo uporabljali v analizi.

Parametri za diodni model so določeni na podlagi izmerjenih parametrov PIN fotodiode /3/. Tokovni vir ima različne vrednosti

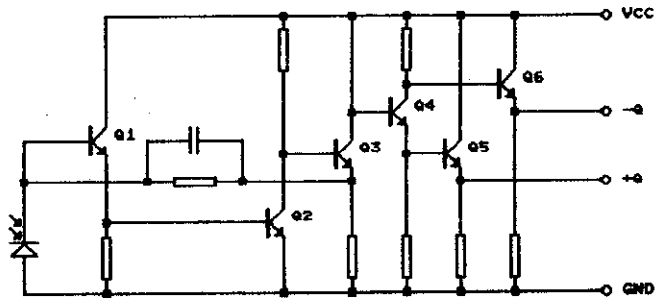
za različne simulacije: sinus za izmenično malosignalno analizo in obliko pulza za tranzientno analizo.



Slika 2. Model fotodiode v analizi

### 3. ANALIZA BIPOLARNEGA OJAČEVALNIKA

Pri bipolarnem ojačevalniku smo se zgledovali pri nekaterih tujih proizvajalcih podobnih analognih integriranih vezij /4,5/.



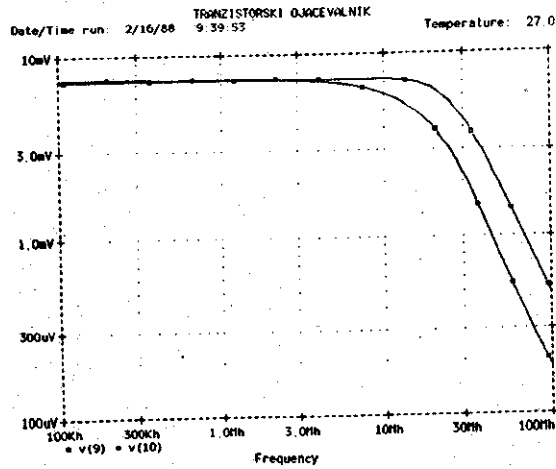
Slika 3. Bipolarni ojačevalnik

Shema bipolarnega ojačevalnika, za katerega smo se odločili, je prikazana na sliki 3.

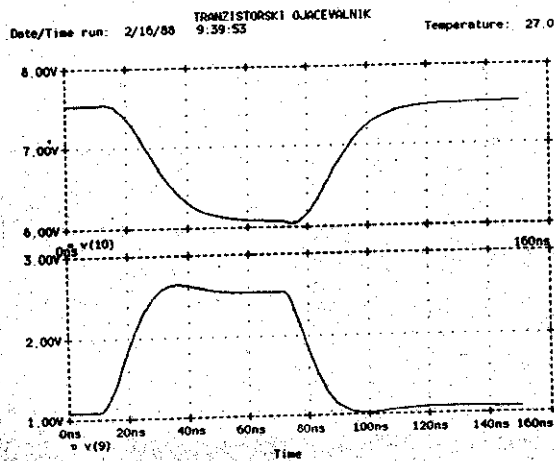
Fotodioda tokovno krmili tranzistor Q1, katerega delovna točka je določena z uporom R, ki obenem določa tudi stopnjo povratne vezave in s tem pasovno širino oziroma občutljivost ojačevalnika.

Večji del ojačenja opravi tranzistor Q2, ki je vezan kot ojačevalnik s skupnim emitorjem. Q3 je napetostni sledilnik, ki služi le kot driver za povratno vezavo. Q4 obrača fazo in nima nobenega ojačenja. Q5 in Q6 pa sta izhodna tranzistorja in zaradi orientacije s skupnim kolektorjem omogočata nizke izhodne impedance.

Vse računalniške simulacije so bile opravljene s simulacijskim programom SPICE.



Slika 4a



Slika 4b

Za naše potrebe najprimernejša tranzistorja iz obstoječe knjižnice sta bila 2N2369A in 2N5109.

Naš cilj je bil doseči enake ali pa boljše vrednosti (odzivni čas, občutljivost, tokovna poraba, izhodna impedanca), kot jih za svoje proizvode podajata Motorola in Texas Instruments.

Opravljene sta bili izmenična in tranzientna analiza, saj je mogoče na ta način opazovati vse važne lastnosti ojaševalnika.

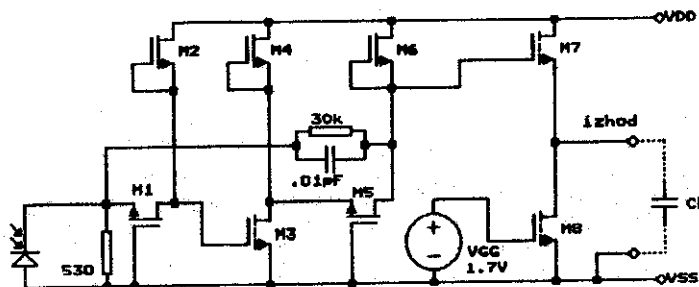
Ojaševalnik je vzbujan tokovno (Model PIN fotodiode), tako da so simulirani ustrezni načini osvetlitve diode. Glede na rezultate meritev ima dioda občutljivost približno 0.5uA/uW. Zato

se pri izmenični analizi simulira laserski signal moči  $1\mu\text{W}$ . Frekvenčno območje je od  $100\text{kHz}$  do  $100\text{MHz}$ . Ker predstavlja vhodni signal simuliran laserski signal moči  $1\mu\text{W}$ , velikost izhodnega signala že kar predstavlja občutljivost ojačevalnika v  $\text{mV}/\mu\text{W}$ .

Rezultati simulacij so prikazani na sliki 4a in 4b.  $V(9)$  je neinvertirani izhod,  $v(10)$  pa je invertirani izhod. Slika 4a prikazuje izhodno odvisnost ojačevalnika pri vhodnem signalu konstantne amplitude ( $1\mu\text{W}$ ). Rezultate tranzientne analize prikazuje slika 4b. Ojačevalnik je vzbuhan s pulzom dolžine  $60\text{nsec}$  in moči okoli  $200\mu\text{W}$ .

#### 4. ANALIZA NMOS OJAČEVALNIKA

Pri pregledu izdelkov tujih proizvajalcev nismo zasledili niti enega podobnega ojačevalnika, zato bo za primerjavo rezultatov služil bipolarni ojačevalnik. Slika 5 prikazuje izbrano vezje NMOS ojačevalnika.



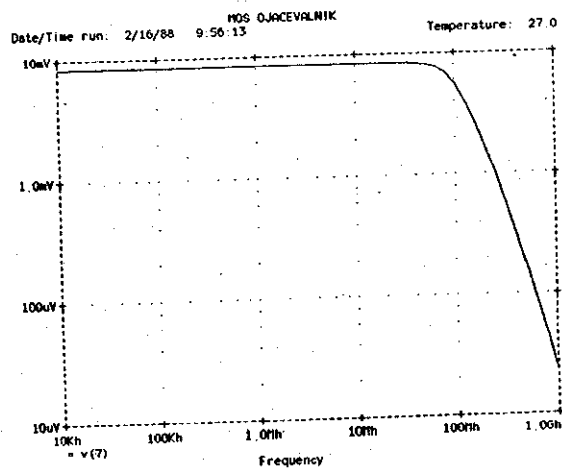
Slika 5. Shema NMOS ojačevalnika

Vhodno stopnjo sestavljata tranzistorja M1 in M2. M1 je vezan v orientaciji s skupnimi vrati. Vhodna stopnja služi predvsem za prilagoditev vhoda in ima le majhno napetostno ojačenje (2 - 3).

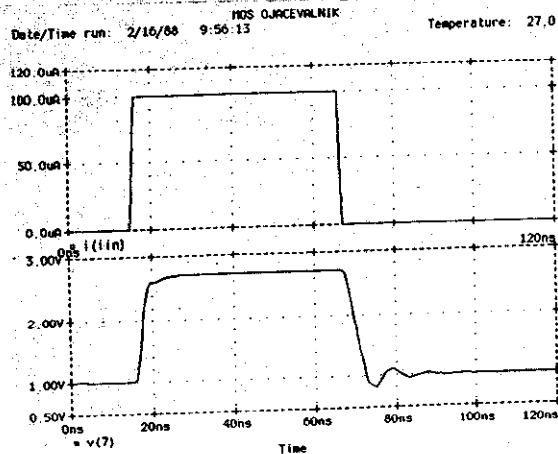
Vežji del ojačenja opravi kaskodna stopnja, ki jo sestavljajo tranzistorji M3 - M6. Stopnja ima ojačenje okoli 60.

Negativna povratna vezava zmanjša ojačenje približno na

dno uporu povratne vezave je vezan kompenzacijski kondenzator, ki nekoliko popravi karakteristiko, ker izhodna stopnja vnaša dodaten pol. Izhodno stopnjo sestavljata tranzistorja M7 in M8. Izhodna stopnja je običajen napetostni sledilnik, ki obenem predstavi izhodni nivo za VGG (1.7V v našem primeru). Od dimenzij tranzistorjev izhodne stopnje je odvisna izhodna impedanca stopnje, znižanje impedance gre v škodo pasovne širine. Ojačenja izhodne stopnje je manjše od 1, pri tako dimenzioniranih tranzistorjih in pri VGG = 1.7V ima ojačenje okoli 0.85.



Slika 6a



Slika 6b

Pri vseh simulacijah je bil izhod obremenjen s kapacitivno-

stjo  $CL = 2pF$ , ker pa je bila dosežena izhodna impedanca 200ohm, bi lahko izhod obremenili s kapacitivnostjo do 7pF, ne da bi pri tem trpela pasovna širina (100MHz glede na rezultate simulacij).

Opravljeni sta bili tranzientna in izmenična malosignalna analiza in izračunana prenosna funkcija.

Pri izmenični analizi je ojačevalnik vzbuhan z laserskim signalom moči 1uW v frekvenčnem obsegu od 10kHz do 1GHz (slika 6a).

Tranzientna analiza je bila opravljena s pulzom večje moči (200uW) in dolžine 60nsec. Rezultati so prikazani na sliki 6b.

## 5. ZAKLJUČEK

Tabela 1 prikazuje primerjavo rezultatov simulacij bipolarnega in MOS ojačevalnika s Texasovim ojačevalnikom TIED463 bipolarnega tipa.

	TIED463	bipolarni	MOS
poraba toka (mA)	5.6	4.8	9.5
občutljivost (mV/uW)	4.8	7.2	8.4
čas odziva (nsec)	10	10 (15)	3
izh. imped. (ohm)	200	50	200

Tabela 1. Primerjava karakteristik ojačevalnikov

Čas odziva v tabeli je zaradi primerjave s podatki o TIED463 podan za vzpon od 20 do 80% končne vrednosti in ne ustreza standardni definiciji (10 do 90%). Časi odziva v tabeli so podani za slabšo možnost, če se čas vzpona in upada razlikujeta. Vrednost v oklepaju velja za invertirani izhod bipolarnega ojačevalnika.

Primerjava rezultatov pokaže, da so odzivi MOS ojačevalnika veliko boljši, občutljivost je tudi nekoliko boljša, narasla pa je tokovna poraba. Rezultati analize bipolarnega ojačevalnika pa so približno enaki Texasovim, razen nižje izhodne impedance.

Računalniška simulacija je pokazala, da je tak bipolarni ojačevalnik mogoče realizirati brez kakšnih posebnih težav. Re-

zultati so zelo dobri, pri čemer pa je treba upoštevati, da so bili za simulacije uporabljeni tranzistorji iz knjižnice, ki so vsak zase zaprti v ohišje so zato njegove lastnosti slabše.

Analiza NMOS ojačevalnika je dala veliko boljše rezultate, kar pomeni, da velja tudi na tem področju dalje raziskovati. Potrebno je najti le primeren tehnološki proces, v katerem je mogoče monolitno integrirati ojačevalnik in diodo. Končni rezultati bodo verjetno precej drugačni od izračunanih v tej studiji, saj je glavni namen studije pregledati možnosti za izdelavo takšnega ojačevalnika.

#### LITERATURA

- /1/ B. Zajc, B.Kren in Z. Toskan: PIN fotodiode, Zbornik referatov Simpozija o elektron. sestavnih delih in materialih, Ljubljana 1983
- /2/ B. Zajc: Hitra PIN fotodiode, Zbornik referatov Simpozija o elektron. sestavnih delih in materialih, Otošec ob Krki 1986
- /3/ PIN diode, elaborati raziskovalne naloga PORS-03-2305-781/81-85, RSS Ljubljana 1981, 82, 83, 84, 85.
- /4/ Motorola: Fiber Optic Integrated Detector Preamplifier MFOD2405, fotokopija iz kataloga
- /5/ Texas Instruments: Fiber-Optic Silicon Integrated Analog Receivers, Types TIED460, TIED461, TIED462, TIED463, fotokopija iz kataloga
- /6/ L.A. Glasser, D. W. Dobberpuhl: Design and Analysis of VLSI Circuits, Eddison Wesley 1985
- /7/ F. Riedel, U. Weder: Entwurf hochleistungsfähiger MOS-Operationsverstärker, Nachrichtentech., Elektron., Berlin 36 (1986) 2
- /8/ M. Krauss: Entwurf und Realisierung eines integrierten Operationsverstärker in Enhancement/Depletion-MOS-Technik, Nachrichtentech., Elektron., Berlin 35 (1985) 9