

ШИРОКОСПЕКТЪРЕН ЕЛЕКТРОНЕН СЕНЗОР С ФОТОДИОД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА СЛАБИ СВЕТИЛНИ ПОТОЦИ В АТМОСФЕРАТА

Веселин Ташев, Ангел Манев

*Институт за космически изследвания и технологии - Българска академия на науките
e-mail: veselinlt@abv.bg*

Ключови думи: Измерителен фотодиод, слаби светлинни потоци

Резюме: Класическите прибори за измерване на светлинни потоци с много ниска амплитуда са фото електронните умножители (ФЕУ). Освен основното предимство, че имат много голям коефициент на усилване и бързодействие, те имат и редица недостатъци. Последните високотехнологични разработки в областта на фотодиодите ги прави силно конкурентни на ФЕУ, по-отношение на важни технически характеристики. Такъв е приборът S8785. Той съдържа широкоспектърен фотодиод с висока чувствителност, който се използва като сензор за първично преобразуване на светлината в електричен сигнал както и прецизен операционен усилвател с поледи транзистори на входа за неговото усилване. Фотодиодът с голяма площ на приемника, FET операционния усилвател, ТЕ-охладител и резистора за обратна връзка (10 GΩ) са интегрирани в един пакет със сапфирена подложка. Тя има много високо съпротивление и токовете на утечка са практически нулеви. Термистора също е включен в корпуса за контрол на температурата, така че фотодиода може да се охлажда за по-стабилна работа. Устройствата от серия S8785 се отличават с ниско ниво на шум и са особено подходящи за откриване на NOx.

WIDE-SPECTRUM ELECTRONIC SENSOR WITH FOTODIODE FOR MEASURING A LOW LUMINOUS FLUXES IN THE ATMOSPHERE

Veselin Tashev, Angel Manev

*Space Research and Technology Institute - Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: veselinlt@abv.bg*

Keywords: High sensitivity photodiodes, light flows with very low amplitude

Abstract: The classical devices for measuring light flows with very low amplitude are electronic photo multiplier (FEU). Besides the main advantage that a very high gain, they have several disadvantages. Recent developments in high-tech field of photodiodes makes them highly competitive in FEU, in terms of important characteristics. This is the device S8785. It contains a thermoelectrically cooled high sensitivity Si photodiode with wide spectral range and high precision FET operational amplifier. The photodiode developed for low-light-level detection and used as a primary sensor for converting light into electric signals. A large area photodiode, FET operational amplifier, TE-cooler and feedback resistor (10 GΩ) are integrated into a single package with a sapphire substrate, which has a very high resistance and leakage currents are practically zero. A thermistor is also included in the same package for temperature control so that the photodiode and I-V conversion circuit can be cooled for stable operation. Devices of the S8785 series features low noise and low NEP, and are especially suitable for NOx detection.

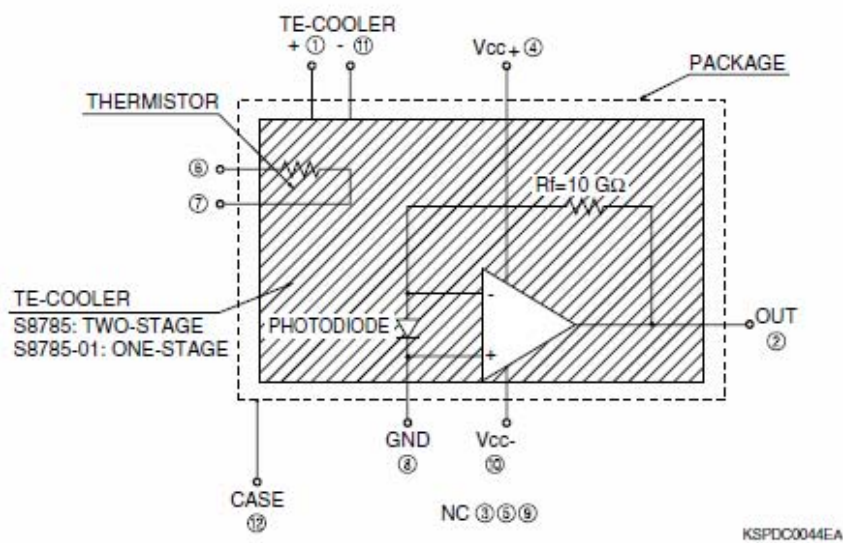
1. Въведение

За измерване и изследване на пряката слънчева $L\alpha$ радиация се реализира проект "Поток на абсолютната $L\alpha$ радиация (ASLAF – Attenuation of the Solar Lyman Alpha Flux)" като част от ракетния експеримент HotPay I на Ракетния Полигон в Андоа, Норвегия, по 6 Рамкова Програма. В рамките на този проект се осъществи разработка в ИКСИ-БАН, Филиал Стара Загора и Групата по Атмосферна Физика на Филиала по Метеорология на Университета в Стокхолм (MISU). Целта на тази разработка бе създаването на измервателен уред за

слънчевата $L\alpha$ радиация. След разработката на първия детектор, научните изследвания продължиха с разработка на нови варианти, които съдържат нови първични преобразователи (сензори) и нова елементна база. Такъв сензор е широкоспектърният фотодиод S8785 производство на фирмата Hamamatsu за измерване на слаби светлинни потоци. В момента този прибор е ограничен до спектър 190 nm, а $L\alpha$ емисията е на 121 nm, но въпреки това оставащия спектралния диапазон е достатъчно голям.

2. Прибор за измерване на много слаби светлинни потоци с широк спектър

Класическите прибори за измерване на светлинни потоци с много ниска амплитуда са фото електронните умножители (ФЕУ). Освен основното предимство, че имат много голям коефициент на усилване и бързодействие, те имат и редица недостатъци. Последните високотехнологични разработки в областта на фотодиодите ги прави силно конкурентни на ФЕУ, по-отношение на важни технически характеристики. Такъв е приборът S8785. Той съдържа широкоспектърен фотодиод с висока чувствителност, който се използва като сензор за първично преобразуване на светлината в електричен сигнал както и прецизен операционен усилвател с поледи транзистори на входа за неговото усилване. Схемата е показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Блокова схема на фотодиода и усилвател на един чип

Освен фотодиод и усилвател приборът съдържа и резистор $R_f = 10 \text{ G}\Omega$, термистор за измерване на температурата и електронен охладител за поддържане на температура от $-25 \text{ }^\circ\text{C}$. Всичко това е изградено върху един чип със сапфирена подложка, която е с много голямо съпротивление и за това токовете на утечка са практически равни на нула.

Чипът S8785 има следните по-важни параметри:

- Голяма активна площ във вид на прозорче с размери 10 x 10 mm.
- Силициев фотодиод, който е оптимизиран за прецизна фотометрия от ултравиолетовия до близкия инфрачервен диапазон и по-точно от 200 до 1200 nm.
- Компактен херметизиран корпус със сапфирен прозорец.
- Вграден прецизен операционен усилвател с много голямо входно съпротивление и FET транзистори на входа.
- Много високо усилване обезпечено от вградения високоомен резистор $R_f = 10 \text{ G}\Omega$, включен в обратната връзка на операционния усилвател.
- Ниско ниво на шум.
- Високоэффективно охлаждане вградено на самия чип с температурна разлика от $50 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Вграден термистор с висока стабилност.

Тези параметри гарантират, че могат да бъдат измерени потоци светлина с много слаба интензивност, подобни на слънчевата $L\alpha$ радиация, но в диапазона с по-голяма дължина на вълна. Известно е (1), че нейната интензивност, падаща върху горната граница на атмосферата, е около $5 \cdot 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, което съответства на поток от $3 \cdot 10^{15} \text{ photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Площта на прозорчето на прибора е $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2}$, а ефективността на преобразуване средно статистически е около 50%. Тогава максималният ток, който се очаква да бъде измерен, е :

$$(1) \quad I_{max} = 3 \times 10^{15} [m^{-2} s^{-1}] \times 10^{-4} [m^2] \times 0.5 \times 1.602 \times 10^{-19} [q] = 2.4 \times 10^{-8} [A]$$

Този извънредно слаб ток определя и изискванията към на електронния усилвател. Като се има в предвид съпротивлението в обратната връзка на операционния усилвател $R_f = 10 \text{ G}\Omega$ и факта, че на входа му не се консумира никакъв ток, то максималното изходно напрежение ще е от порядъка на 20 волта.

$$(2) \quad V = I \times R = 2.4 \times 10^{-8} [A] \times 10^9 [\Omega] = 24V$$

За да бъде обаче наистина измерен потока на слънчевата $L\alpha$ радиация приборът S8785 трябва да е чувствителен към диапазона 122 nm.

2. Предназначение и описание на прибора S8785

Основното предназначение на прибора е измерване на светлинни потоци с много ниска амплитуда. Това се постига благодарение на високата му чувствителност, която е -5.1 V/nW .

Нека да направим едно сравнение между чувствителността на измерване с фотоелектронен умножител и фотодиод. В публикацията “ Методи за измерване на ултравиолетови светлинни потоци с много нисък интензитет “ (3), бе пресметнато, какво е изходното напрежение при предположение, че на фотокатода на ФЕУ попадне един фотон. В режим на броене на фотони единичния фотоелектрон, който се емитира от фотокатода има заряд $q = 1.6 \times 10^{-19} [C]$. Ако усилването на електронния фотоумножител е $\mu = 5 \times 10^6$, тогава анодния изходен заряд се дава от:

$$Q = q \times \mu = 1.6 \times 10^{-19} [C] \times 5 \times 10^6 = 8 \times 10^{-13} [C]$$

Ако широчината на изходния импулс на изхода на фотоелектронния умножител е $t = 10 \text{ ns}$ тогава за пика на изходния ток I_p се получава:

$$I_p = \frac{q \times \mu}{t} = \frac{8 \times 10^{-13} [C]}{10 \times 10^{-9} [s]} = 80 [\mu A]$$

Ако товарното съпротивление или входния импеданс Z на прилежащия усилвател е 50Ω , то изходния импулс има пиково напрежение :

$$V_o = I_p [\mu A] \times Z [\Omega] = 80 [\mu A] \times 50 [\Omega] = 4 [mV]$$

Импулсния усилвател след изхода на ФЕУ има усилване от 36 dB или 63 пъти.

$$V_{out} = 4 [mV] \times 63 = 252 [mV] = 0.252V$$

От характеристиките на фотодиода виждаме, че той има чувствителност от 5.1 V / nW , включително вградения операционен усилвател и вградения високоомен резистор.

Енергията, която пренася един фотон е :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34} J \cdot s) \times (2.998 \times 10^8 m / s)}{555 nm} = 2.22 eV$$

Или в джаули получаваме:

$$E = 2.22 \times 10^{-19} [J] = 3.56 \times 10^{-19} [J]$$

Ако предположим теоретично, че времето на действие на фотона е същото както на ФЕУ, т.е. 10 ns , то за мощността получаваме

$$P = \frac{E}{t} = \frac{3.56 \times 10^{-19} [J]}{10 \times 10^{-9} [s]} = 3.56 \times 10^{-11} [W] = 0.0356 [nW]$$

$$V = 0.0356 [nW] \times 5.1 \frac{[V]}{[nW]} = 0.182 [V]$$

Тези изчисления показват, че доколкото стойностите 0.252V и 0.182V кореспондират една с друга, то по отношение на регистрация и усилване на слабите светлинни сигнали специализираните измерителни фотодиоди все повече достигат характеристиките на ФЕУ. Фотодиодите обаче работят само в аналогов режим и все още не могат да регистрират светлинни потоци в далечния ултравиолетов диапазон.

Фотодиодите са прибори, които преобразуват директно попадналата светлина в техния p-n преход в електрическа енергия под формата на електрически ток. Много е важно да се знае, че генерирания ток е правопрпорционален на количеството светлина попаднала на фотокатода.

Генерирания от фотодиода ток показан на фиг. 1, минава през резистора R_f , преобразува се в напрежение и се усилва от операционния усилвател. Той е с много високо входно съпротивление, гарантирано от полевите транзистори на входа, така че консумацията на ток практически е равна на нула. В самия чип има вграден термоохладител, който ефективно може да намали температурата с 50 °C и тя да достигне до -25 °C. При тези ниски температури на охлаждане токът на тъмно силно намалява. Наличието на термистор върху самия чип, дава възможност да се измери температурата на фотодиода. Ако има разлика между текущата температура на фотодиода и зададената, автоматично се включва терморегулатора, който охлажда чипа до необходимата температура. Това на практика означава, че ако се зададе работна температура от -25 °C тя може да се поддържа автоматично до +25 °C на околната среда.

4. По-важни електрически и оптически характеристики на прибора

4.1 Максимални характеристики. Те са показани в таблица 1.

Табл. 1. Максимални характеристики на прибора S8785.

Параметър	Символ	Стойност	Забележка
Приложено напрежение	Vcc	± 20 V	
Работна температура на чипа	Toper	-30° C +60° C	
Работна температура на фотодиода	Td	-30° C +60° C	
Приложено напрежение на охладителя	Vte	+5 V	
Ток на охладителя	Ite	1 A	
Разсеяна мощност на термистора	Pth	0.2 mW	

4.2 Типични характеристики. Те са измерени при Vcc=±15V, RI = 1MΩ са показани в табл. 2.

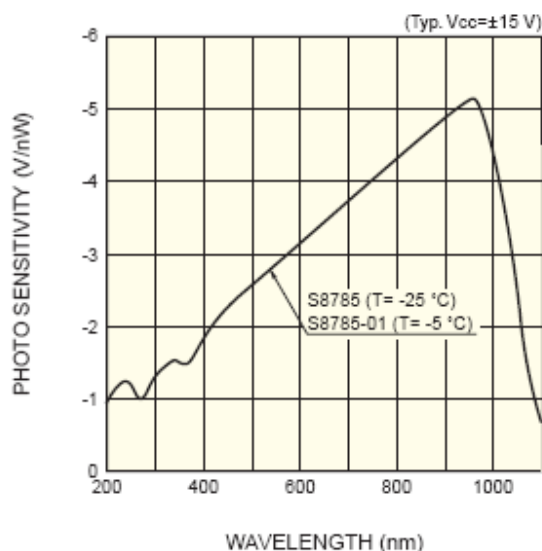
Табл. 2 Типични характеристики на прибора S8785.

Параметър	Символ	Условие	Стойност	Единици
Приложено напрежение на усилвателя	Vcc		±5до±15	V
Ток на охладителя	Ite	max	0.8	A
Разсеяна мощност на термистора	Pth	max	0.03	mW
Товарно съпротивление	RI	min	100	kΩ
Спектрален диапазон	λ		190-1100	nm
Пик на чувствителност	λp		960	nm
Съпротивление в обратната връзка	Rf		10	GΩ
Фото чувствителност	S	λ=λp	-5.1	V/nW
Шум на изхода	Vn	F = 10 Hz	25	μVrms/Hz
Изходно напрежение на отместване	Vos	Dark state	±2	mV

Честота на среза	fc	-3dB	190	Hz
Амплитуда на изходното напрежение	Vo		-13	V
Ток на консумация	Icc	Dark state	0.3	mA
Съпротивление на термистора	Rth	86		kΩ

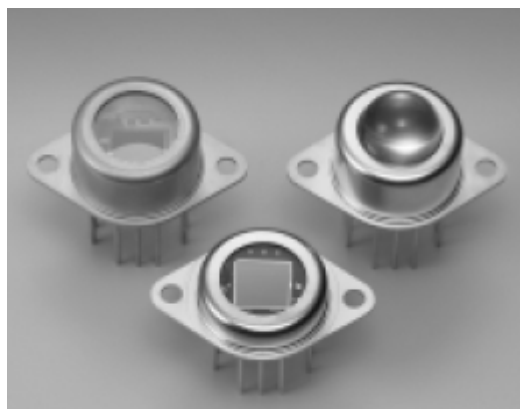
4.3 Спектрална характеристика.

Спектралната характеристика на прибора е показана на фиг. 2. Тя показва, че чувствителността на фотодиода е в диапазона от 200 до 1200 nm.



Фиг. 2. Спектрална характеристика на прибора

4.4 Механична конструкция на прибора. Механичната конструкция е показана на фиг. 3



Фиг. 3. Външен изглед на приборите S8785

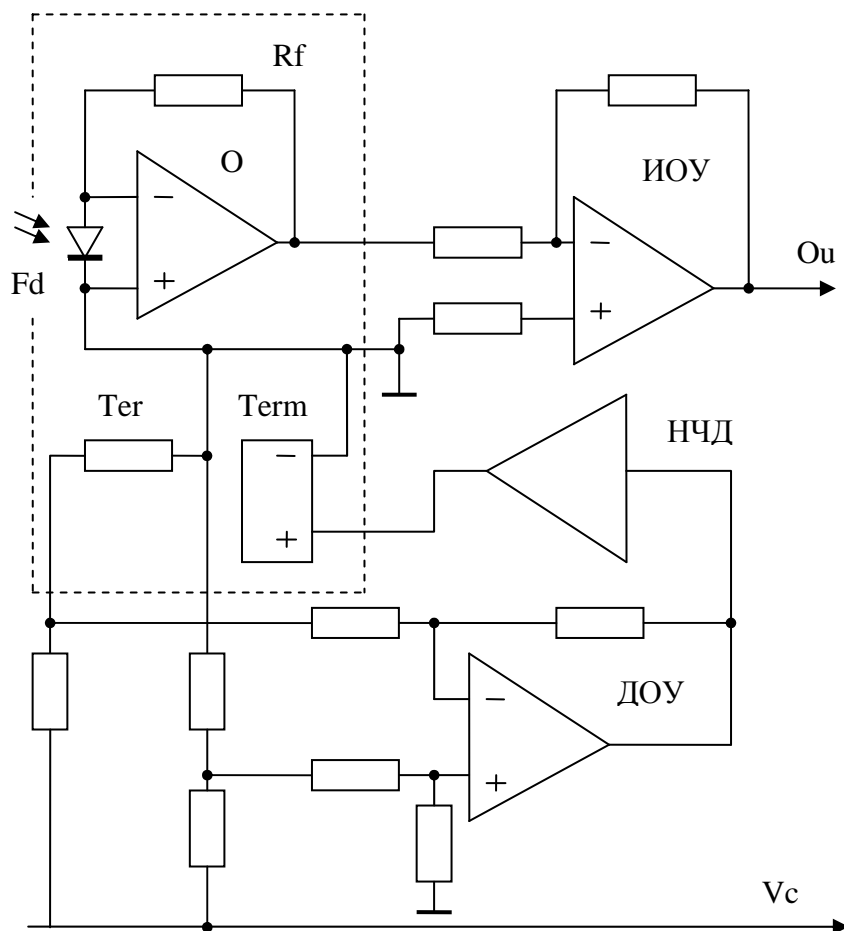
5. Електрическа схема на уреда

Електрическата схема на уреда е показана на фиг. 4. Освен прибора S8785 той съдържа още няколко усилвателя.

Изходния сигнал от прибора се усилва допълнително от инвертиращ операционен усилвател ИОУ, показан на фиг. 4. Този усилвател трябва да бъде с високо входно съпротивление, което се явява товар за полезния сигнал. Според техническите изисквания неговата стойност трябва да е по-голяма от 1 MΩ.

Термисторът T_{eg} е включен в мостова схема, където се изработва сигнал на грешката между зададената и текущата температура. Този сигнал се усилва от диференциален усилвател ДОУ и се подава към нискочестотен драйвер НЧД. Мощния НЧД подава достатъчно силен ток от порядъка на 0.8[A] за да работи термо охладителя T_{em} в режим на охлаждане или

затопляне в зависимост от околната температура и най-вече от температурата на чипа S8785. Най-често тази температура се поддържа на стойност -25°C , за да се получи максимално ниска величина на тока на тъмно. При тези ниски стойности на температурата тока на тъмно е от порядъка на няколко пикоампера. От [1] видяхме, че полезния сигнал е от порядъка на 10 наноампера, което осигурява много добро съотношение между сигнал и шум.



Фиг. 4. Електрическа схема на уреда

6. Заключение

От разгледаните характеристики става ясно, че съвременните фотодиоди специализирани за измервателни приложения са силно конкурентни на фотоелектронните умножители в редица области. Те притежават висока чувствителност, широка спектрална характеристика, много добра линейност, нисък ток на тъмно, висока квантова ефективност, непретенциозно захранване и не на последно място здрав корпус и устойчивост към механични натоварвания. Към слабостите могат да се причислят липса на чувствителност към далечния ултравиолетов диапазон, сравнително ниското бързодействие на измерителните фотодиоди, невъзможност да работят в режим с броене на фотони, както и други по-маловажни характеристики.

Литература:

1. Th r a n e, E. V., I. Ny b e r g, B. N a r h e i m. Measurements of the Extinction of Solar Hydrogen Lyman- α in the Mesosphere, Internal Report E-230, Norwegian Defense Research Establishment (FFI), Norway, 1974
2. H A M A M A T S U "Measuring silicon photodiodes with preamplifier and TE-cooler" линк?
3. T a s h e v, V., A. M a n e v. "Методи за измерване на ултравиолетови светлинни потоци с много нисък интензитет "