

**ФОТОПРИЕМНИК ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ФОТОННА ЕМИСИЯ ПО МЕТОДА НА БРАНД-ГАУС ЗА NO<sub>x</sub> АНАЛИЗАТОР НА АТМОСФЕРАТА**

**Ташев Веселин, Ангел Манев**

*Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките –  
ул. Акад Георги Бончев бл.1, 1012 София  
e-mail: veselinlt@abv.bg*

**PHOTORECEIVER FOR MEASURING THE PHOTON EMISSION BY THE METHOD OF BRAND-GAUS FOR NO<sub>x</sub> ANALYSER IN ATMOSPHERE**

**Tashev Veselin, Angel Manev**

*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences  
ul.Akad.G.Bonchev bl.1, 10120 Sofia  
e-mail: veselinlt@abv.bg*

**ABSTRACT**

Chemiluminescence has long been recognized as the best practical analytical method for NO<sub>x</sub> detection in a wide variety of applications. Technology makes it easy to take measurements in PPT (parts per trillion ) for scientific research purposes of the atmosphere. Delicate photomultiplier tubes, high voltage power supplies, thermally sensitive electronics and many other problematic components have hindered many implementations of this technology over the years. Using highly advanced photodiodes with Brand-Gaus technology based on chemiluminescence enables detection and measurement of NO<sub>x</sub> particles, which removes almost all the reliability problems associated with traditional NO<sub>x</sub> analyzers. This is the devices 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. Devices of the S8785 series features low noise and are especially suitable for NO<sub>x</sub> detection

*Key words: High sensitivity photodiodes, light flows with very low amplitude, NO<sub>x</sub> detection*

**1. Въведение**

Хемилуминесценцията отдавна е призната като най-добрия практически аналитичен метод за откриване на NO<sub>x</sub> в широка гама от приложения. Технологията позволява лесно да се правят измервания в PPT (parts per trillion - части на трилион) за научно изследователски цели на атмосферата. Хемилуминесцентните анализатори са признати и като доминиращ практичен избор на станции за мониторинг на качеството на атмосферния въздух. За измерване на концентрацията в атмосферния въздух на NO<sub>x</sub> частици в PPB (parts per billion - части на милиард) са разположени хиляди единици в световен мащаб. Хемилуминесцентните анализатори са и изключително доминиращ избор в регулаторните системи за изгаряне с оглед на наблюдение на емисиите, особено когато регламентите стават все по строги и допустимите нива се понижават всяка година.

Въпреки високата производителност, хемилуминесцентните NO<sub>x</sub> анализатори базирани на фотоумножителните тръби като надеждност и поддръжка са далеч от съвършенството. Деликатните фотоумножителни тръби, запазвани с високо напрежение, термично чувствителната електроника, както и много други проблематични компоненти са попречили много за реализации на тази технология през годините. Използването на съвременни високочувствителни фотодиоди заедно с Brand-Gaus технологията, базирана върху хемилуминесценцията дава възможност за откриване и измерване на NO<sub>x</sub> частици, която

премахва почти всички проблеми по надеждността, свързани с традиционните NOx анализатори.

Хемилуминесценция буквално означава химична реакция, която произвежда светлина. Когато NO (азотен оксид) молекула реагира с озон, тя се окислява до NO<sub>2</sub>(азотен оксид), във възбудено състояние. При преминаването на тези молекули от възбудено състояние в нормално, те излъчват един фотон, т.е. емитира се светлина в близката инфрачервена част от спектъра. Така, ако се смеси газ проба съдържаща NOx частици с озон и се измери количеството на излъчваната светлина, то концентрацията на NO в пробата може да бъде точно определена. Всички NO<sub>2</sub> (азотен диоксид) молекули, които са другият компонент на NOx пробата могат да бъдат превърнати в NO и измерени, както беше обсъдено по-горе. Следователно, по този начин може да се измери цялата NOx концентрация в газ пробата. Тази техника осигурява изключително чувствително, селективно и линейно измерване на NOx, точно защото хемилуминесценцията се превърна в технология с висок стандарт и производителност.

В последно време все повече се използва фотодиод за измерване на светлината, излъчвана в процеса на хемилуминесцентната реакция вместо фотоумножителна тръба. Този първичен преобразовател на светлината е много по-малък, работи на стандартни напрежения, като елиминира необходимостта от доставка на блок с високо напрежение и не изисква сложно и проблематично термоохлаждащо оборудване. Освен това, спектралния отговор на фотодиода много по-точно съвпада с хемилуминесцентното излъчване и така се подобрява съотношението сигнал-шум.

## 2. Прибор за измерване на много слаби светлинни потоци.

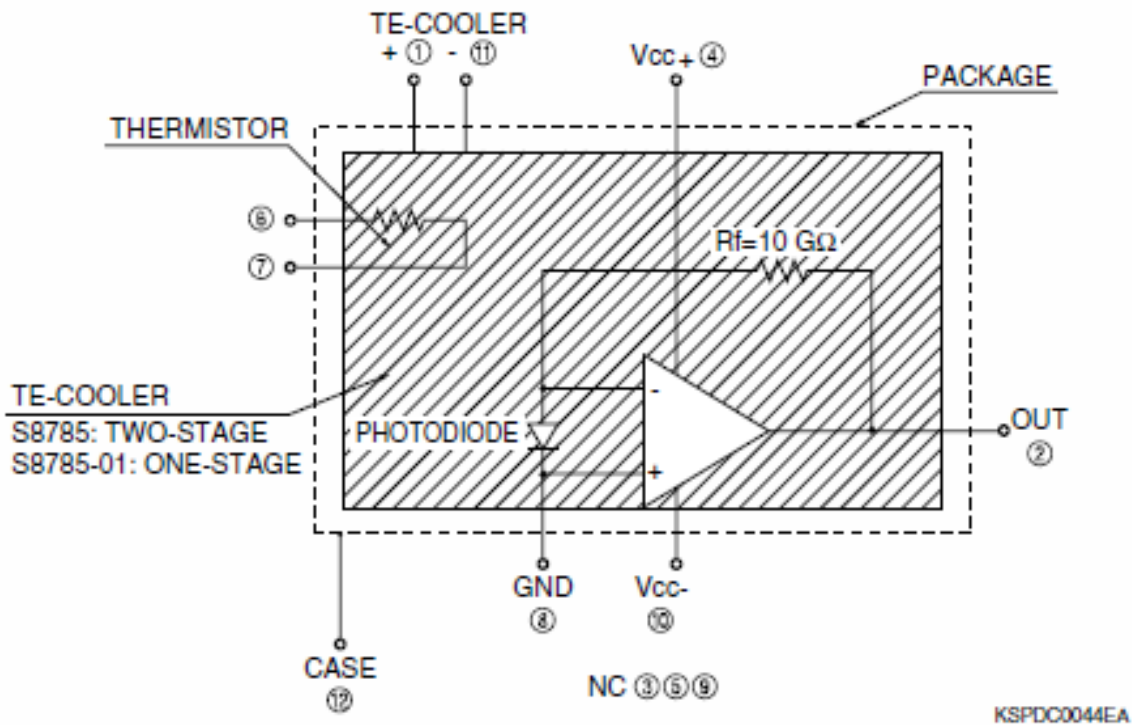
Последните високотехнологични разработки в областта на фотодиодите ги прави силно конкурентни на ФЕУ, по-отношение на важни технически характеристики.

Такъв сензор е високочувствителният измерителен фотодиод S8785 производство на фирмата Hamamatsu за измерване на слаби светлинни потоци. 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 полеви транзистори на входа за неговото усилване. Схемата е показана на фиг. 1.

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 мм.
- 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.



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

### 3. 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  $-5.1 \text{ V/nW}$ .

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  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ [C]}$ . Ако усилването на електронния фотоумножител е  $\mu = 5 \cdot 10^6$ , тогава анодния изходен заряд се дава от:

$$Q = q \times \mu = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]} \times 5 \times 10^6 = 8 \times 10^{-13} \text{ [C]} \quad (1)$$

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:

$$I_p = \frac{q \times \mu}{t} = \frac{8 \times 10^{-13} \text{ [C]}}{10^{-9} \text{ [s]}} = 80 \text{ [\mu A]} \quad (2)$$

Ако товарното съпротивление или входния импеданс  $Z$  на прилежащия усилвател е  $50 \text{ }\Omega$ , то изходния импулс има пиково напрежение :

$$V_o = I_p \text{ [\mu A]} \times Z \text{ [\Omega]} = 80 \text{ [\mu A]} \times 50 \text{ [\Omega]} = 4 \text{ [mv]} \quad (3)$$

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

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

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 :

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \cdot 10^{-34} J \cdot s) \cdot (2.998 \cdot 10^8 m / s)}{555 nm} = 2.22 eV \quad (5)$$

Или в джаули получаваме:

$$E = 2.22 \times 10^{-19} [J] = 3.56 \times 10^{-19} [J] \quad (6)$$

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

$$P = \frac{E}{t} = \frac{3.56 \times 10^{-19} [J]}{10 \times 10^{-9} [s]} = 3.56 \times 10^{-11} [W] = 0.0356 [nW] \quad (7)$$

$$V = 0.0356 [nW] \times 5.1 \frac{[V]}{[nW]} = 0.182 [V] \quad (8)$$

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.

Параметър	Символ	Стойност
Приложено напрежение	Vcc	$\pm 20$ 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

Табл. 1

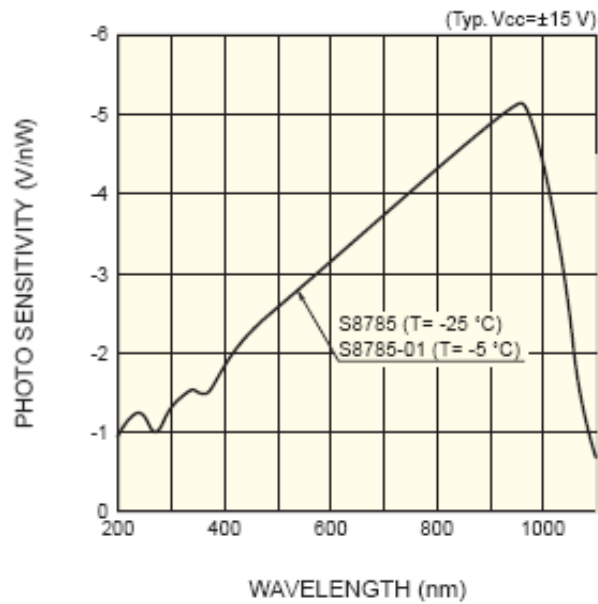
4.2 Типични характеристики. Те са измерени при Vcc= $\pm 15$ V, Rl = 1M $\Omega$  и са показани в табл. 2.

Параметър	Символ	Условие	Стойност	Единици
Приложено напрежение на усилвателя	Vcc		$\pm 5$ до $\pm 15$	V
Ток на охладителя	Ite	max	0.8	A
Разсеяна мощност на термистора	Pth	max	0.03	mW
Товарно съпротивление	Rl	min	100	k $\Omega$
Спектрален диапазон	$\lambda$		190-1100	nm
Пик на чувствителност	$\lambda_p$		960	nm
Съпротивление в обратната връзка	Rf		10	G $\Omega$
Фото чувствителност	S	$\lambda = \lambda_p$	-5.1	V/nW
Шум на изхода	Vn	F = 10 Hz	25	$\mu$ Vrms/ Hz
Изходно напрежение на отместване	Vos	Dark state	$\pm 2$	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		k $\Omega$

Табл. 2

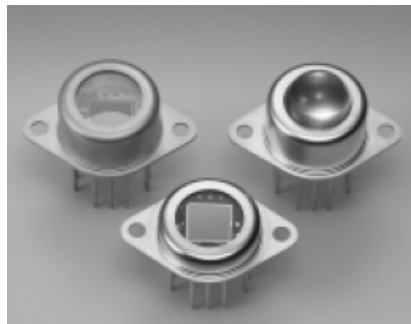
4.3 Спектрална характеристика.

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



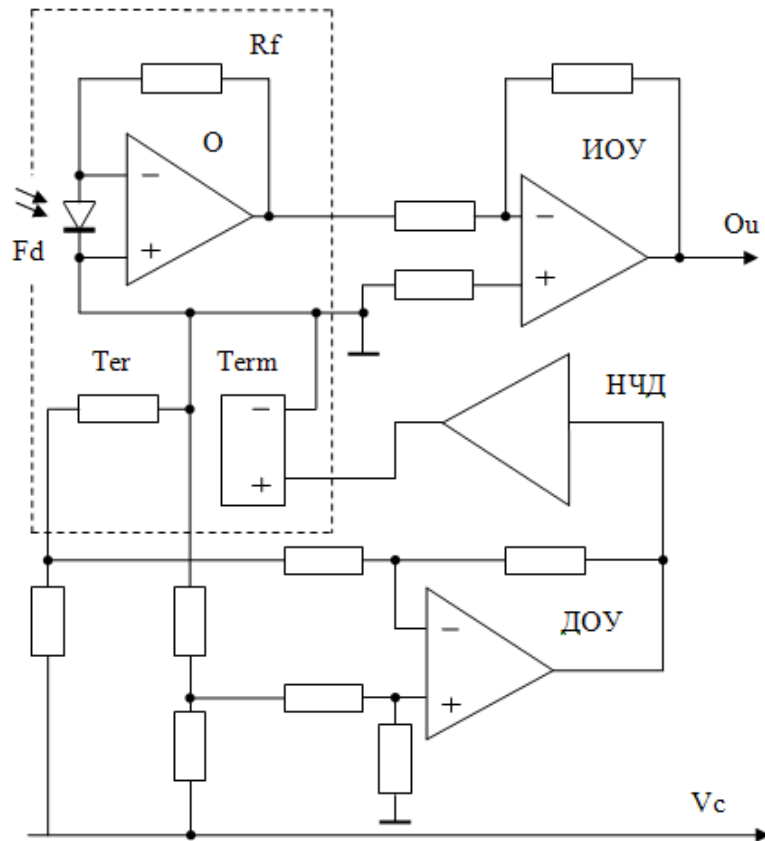
Фиг. 3 Външен изглед на приборите S8785.

### 5. Електрическа схема на фотоприемника.

Електрическата схема на фотоприемника 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 МΩ.

Термисторът  $T_{erm}$  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 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 ниската стойност 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. Thra ne, E. V., I. Ny b e r g, B. N a r h e i m. Measurements of the Extinction of Solar Hydrogen Lyman- $\alpha$  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., M a n e v A.. Методи за измерване на ултравиолетови светлинни потоци с много нисък интензитет “