

I.T. Kogut¹, B.S. Dzundza¹, V.I. Golota¹, O.I. Bulbuk², V.V. Fedoryuk², L.I. Nikiyruy¹

Моделювання інтегральних перетворювачів сигналів для біомедичних сенсорних мікросистем

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна,
igor.kohut@pnu.edu.ua;

²Івано-Франківський національний медичний університет, м. Івано-Франківськ, Україна

В роботі наведено результати комп'ютерного моделювання запропонованої функціонально-електричної схеми інтегрального перетворювачів сигналів (ІПС) від фото-чутливих елементів на основі КМОН-операційних підсилювачів, що призначена для побудови елементної бази гібридних сенсорних мікросистем для біомедичних застосувань. Особливістю даного ІПС є регулювання та фільтрація амплітуди постійної складової у підсиленому сигналі від діодного фоточутливого елемента в діапазоні хвиль 400 - 1040 нм.

Проведено комп'ютерне моделювання функціонування пристрою, визначено складові компоненти і проведено їх параметричну оптимізацію. Результати експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання добре співпадають, що підтверджує правильність функціонування запропонованого перетворювача сигналів від фоточутливих елементів. Розроблений ІПС є придатним для створення реальних пристроїв, як на основі дискретних компонентів, так і в інтегральному виконанні, як елемент сенсорних мікросистем-на-кристалі або інтелектуальних сенсорів.

Ключові слова: сенсорна мікросистема, інтегральний перетворювач сигналів, фоточутливий елемент, схематичне моделювання, операційний підсилювач, КМОН-структури.

Подано до редакції 25.04.2023; прийнято до друку 21.09.2023.

Вступ

В останні роки все ширше застосовують неінвазивні методи моніторингу пульсооксиметрії, з використанням як портативних, так і стаціонарних приладів [1,2]. Фізичні принципи фотометрії для біомедичних застосувань наведено в роботі [3,4], де показано можливість методами фотоплетизмографії обчислювати співвідношення оксигенованих та неоксигенованих фракцій гемоглобіну в крові людини. У роботах [5-7] зроблені спроби використання цих методів для неінвазивного контролю рівнів гемоглобіну та глюкози в крові людини. Запропоновано прототип портативного пристрою на основі аналізу оптичного поглинання світла і розділення частот за допомогою інтерференційних фільтрів. Але використання лише однієї частоти 940 нм для визначення рівня глюкози

не дозволяє отримати необхідну точність, унаслідок практично однакових коефіцієнтів поглинання води і глюкози на вказаній частоті. Проте підвищення точності вимірювань можна досягти обчислювальними методами з використанням спектрального аналізу у пристроях неінвазивного контролю рівня глюкози в крові [5, 8] і методами узгодженої фільтрації спектрів поглинання різних компонентів крові можна досягнути прийнятної для практичного використання точності вимірювання.

Важливими складовими елементами для побудови сенсорних мікросистем-на-кристалі, зокрема, для біомедичних застосувань, пов'язаних з моніторингом таких важливих параметрів як рівень глюкози в крові людини, насичення крові киснем (рівень сатурації), частота серцевих скорочень (пульсоксиметрії), рівень білірубину та ін., які можуть бути отримані неінвазивними методами - є перетворювачі оптичних

сигналів від фоточутливих сенсорних елементів для різних довжин хвиль. Існуючі фоточутливі сенсорні елементи такого типу, при побудові конкретних схем, як правило, вимагають спеціальних перетворень досліджуваних сигналів, зокрема, підсилення амплітуди досліджуваних сигналів чи компенсації їх постійною складовою [9]. Окрім цього, відсутні вітчизняні пристрої згаданого типу в інтегральному виконанні.

В роботі наведено результати розробки й комп'ютерного моделювання запропонованої функціонально-електричної схеми інтегрального перетворювачів сигналів (ІПС) від фоточутливих елементів на основі КМОП-операційних підсилювачів, що може бути використана для побудови елементної бази гібридних сенсорних мікросистем для біомедичних та інших застосувань. Особливістю розробленої схеми ІПС є можливість регулювання та фільтрації амплітуди постійної складової у підсиленому виділеному інформаційному сигналі від діодного фоточутливого елементу в діапазоні хвиль 400 – 1040 нм.

I. Розробка функціонально-принципової схеми інтегрального перетворювача сигналів (ІПС) від фоточутливих елементів.

Сигнал пульсації крові від фотодіода отриманий з фотодетектора є достатньо слабким і сильно зашумленим, а також містить велику постійну складову (рис. 1,а.) і не придатний для прямого цифро-аналогового перетворення з достатньою роздільною здатністю [10,11].

Амплітуда сигналу досить мала, менше 2% від постійної складової, також присутні високочастотні шуми. Також величина постійної складової наперед не відома, і залежить від багатьох факторів, як от товщина і прозорість просвічуваної тканини, і може суттєво змінюватися в процесі вимірювання через рух людини. Для усунення постійної складової, запропоновано диференціальну схему на операційному підсилювачі (рис. 2), з можливістю динамічно змінювати рівень компенсації за допомогою цифро-аналогового перетворювача

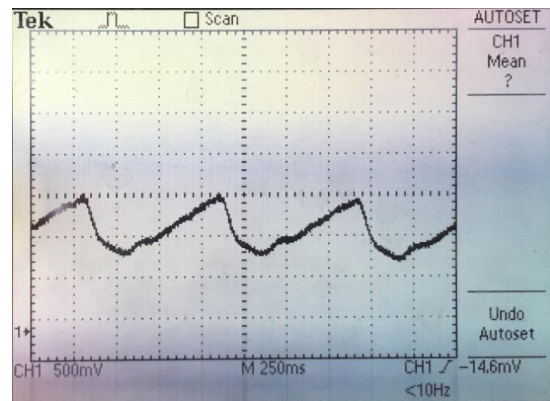
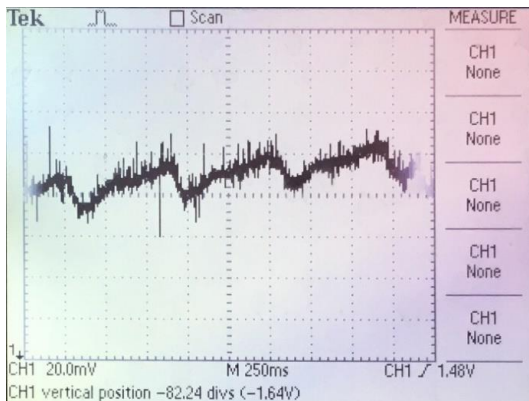


Рис. 1. Осцилограма сигналу з фотоприймача після проходження світла через палець (а) та осцилограма після апаратної обробки, фільтрування (б).

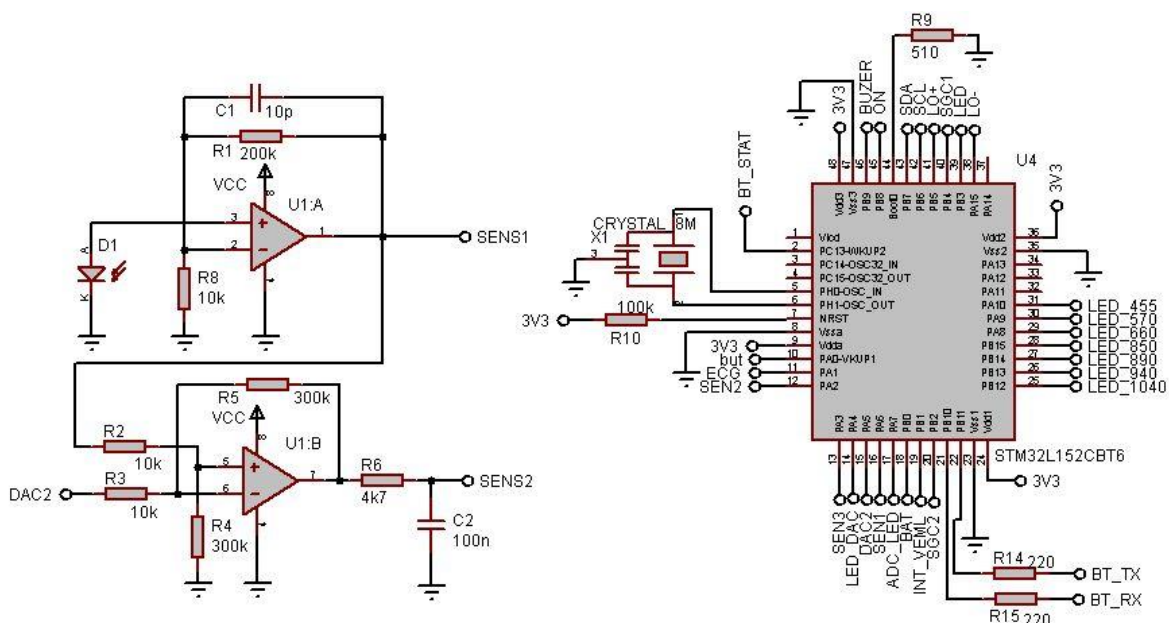


Рис. 2. Функціонально-принципова схема перетворювача сигналів від фоточутливих елементів для фотоплетизмографії.

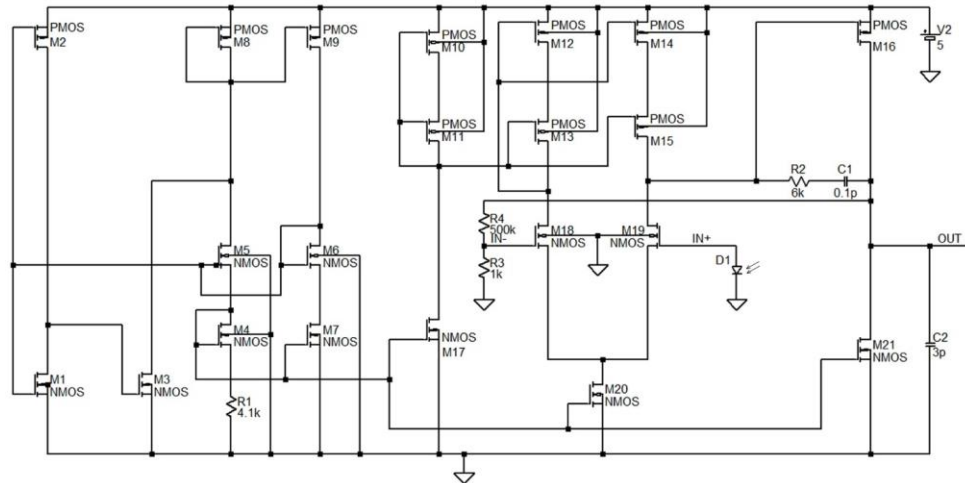


Рис. 3. Частина електричної принципової схеми ІПС (один операційний підсилювач) (розміри р- і n-канальних МОН-транзисторів наведено в таблиці 1).

Таблиця 1.

Розміри р- і n-канальних МОН-транзисторів

Номер транзистора	Тип транзистора	Проектні топологічні розміри каналів	
		Довжина, мкм	Ширина, мкм
M1	n-МОН	3,2	10
M3	n-МОН	20	4
M4	n-МОН	4	240
M5, M6, M18, M19	n-МОН	4	70
M7, M17, M20	n-МОН	4	60
M21	n-МОН	4	80
M2	p-МОН	16	4
M8, M9, M11, M13, M15	p-МОН	4	120
M10, M12, M12	p-МОН	4	30
M16	p-МОН	4	115

мікроконтролера (ЦАП). Такий підхід дає можливість компенсувати постійну складову будь якої величини, а корисний сигнал попередньо підсилити для розширення на весь динамічний діапазон АЦП [12].

Після усунення постійної складової сигнал проходить через RC фільтр для очищення від високочастотних завад та наведень. Вихід SENS1 також заведено на канал АЦП, що дозволяє регулюючи струм світлодіода отримати сигнал у всьому діапазоні АЦП незалежно від товщини та пропускну здатності біотканин. Осцилограму сигналу з виходу SENS2 наведено на рис. 1,6, [10] з якого бачимо що він уже може бути оцифрований з достатньою точністю для подальшої математичної обробки. Даний сигнал оцифровується з частотою 200 герц, та зберігається в масив. Пульсову хвилю досліджують на довжині хвилі світлового випромінювання 570 нм, на які поглинаюча здатність крові найбільша. Для інших частот аналізують тільки нормовану амплітуду для визначення сатурації та інших компонентів крові [10]. Струм світлодіода стабілізується стабілізатором струму на ОП, та задається ЦАП мікроконтролера (LED_DAC, рис. 2). Величина струму вибирається так щоб максимум сигналу на виході SENS1 був близьким до верхньої межі роботи АЦП (2,4 В). Таким чином досягається максимальна амплітуда корисного сигналу не залежно від товщини та прозорості біотканини.

Оскільки для визначення різних параметрів крові потрібно джерела світла в досить широкому діапазоні, то і фотоприймач повинен мати високу чутливість в широкому діапазоні довжин хвиль від 450 до 1040 нм [8]. Також можлива реалізація з застосуванням декількох фотоприймачів зі своїми схемами обробки сигналу, наприклад, один у видимому діапазоні і один в інфрачервоному. Така реалізація зменшує вимоги до широкодіапазонності приймача і дає можливість розмістити фотоприймач точно навпроти відповідного світлодіода. Для зменшення завад та температурних дрейфів краще розміщати схему апаратної обробки сигналу на одному кристалі.

II. Моделювання та параметрична оптимізація роботи інтегрального перетворювача сигналів.

Запропоновану електричну принципову схему для інтегрального виконання операційного підсилювача показана на рис. 3, розміри р- і n-канальних МОН-транзисторів наведено в таблиці 1.

Технологія виготовлення та конструкторсько-технологічні норми проектування топології засновані на 1,2-мікронному технологічному процесі на підкладках р-типу провідності для n-канальних МОН

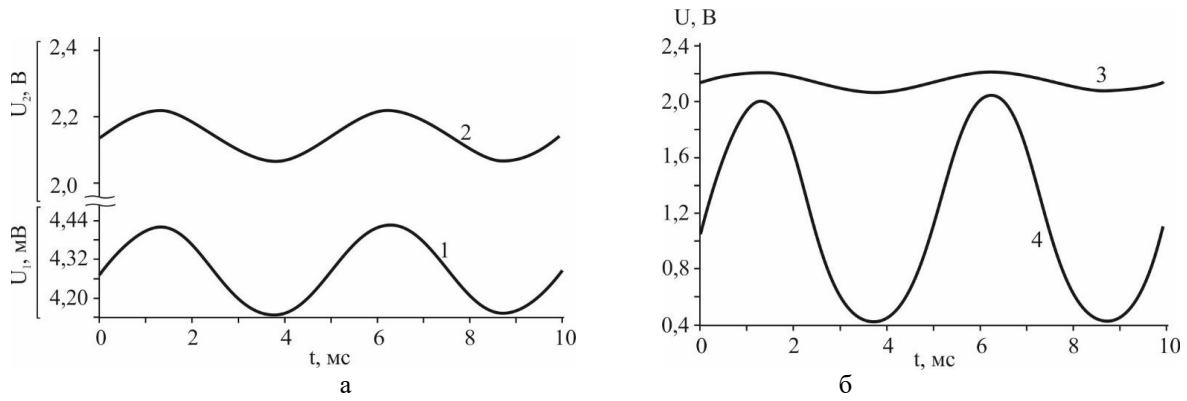


Рис. 4. Часові діаграми моделювання функціонування ІПС в LT SPICE. а – підсилення вихідного сигналу фотоприймача, б – компенсація постійної складової, фільтрування та підсилення корисного сигналу на весь динамічний діапазон АЦП. 1 – вхідний сигнал, 2 – вихід SENS1, 3 – вихід SENS2.

транзисторів і кишнями n-типу для р-канальних МОН транзисторів. Вхідний каскад ОП побудовано на диференціальній парі n-канальних МОН транзисторів M18, M19. Схема запуску побудована на транзисторах M1-M3. Транзистори M4-M9 задають постійне зміщення та контролює всі джерела струму. Транзистори M10, M11, M17 задають напругу струмового дзеркала M12-M15. Вихідний каскад сформовано на транзисторах M16, M21.

На основі спроектовані схеми операційного підсилювача та результатів її комп'ютерного моделювання (рис. 4) отримано конструктивно-технологічні параметри (табл. 1) для проектування топології інтегрального перетворювача багатоканального приймача сигналів фотоплетизмографії.

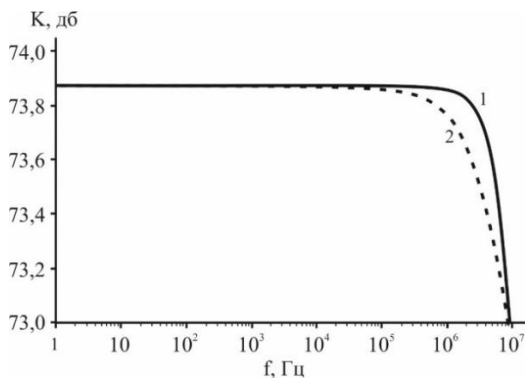


Рис. 5. Амплітудно частотна характеристика схеми інтегрального перетворювачів сигналів: 1 – амплітуда, 2 – фаза.

Після фільтрування та виділення змінної складової сигналу отримали вихідний сигнал у всьому діапазоні роботи АЦП з мінімальними спотвореннями, які зберігає максимум корисної інформації яка міститься в сигналі фотоплетизмографії.

Для розробленої схеми отримано амплітудно-частотну характеристику, яка показує стабільність коефіцієнта підсилення та фази сигналу до частот порядку 10 МГц.

Для практичного впровадження та подальшого розвитку неінвазивного фотоплетизмографа планується його інтегральне виконання, яке

передбачає розроблення та моделювання топології, врахуванням впливу інтегральних паразитних елементів і зв'язків, конструктивно-технологічних параметрів інтегральних КМОН-структур, їх топологічних особливостей.

Висновки

Розроблено функціонально-електричну схему і реальний прототип інтегрального перетворювача сигналів від діодних фоточутливих сенсорних елементів в діапазоні частот від 400 до 1040 нм та операційних підсилювачів на основі дискретних компонентів для фотоплетизмографії. Наведено результати осцилографічних досліджень запропонованого прототипу й проведено комп'ютерне моделювання його функціонування, визначено складові компоненти і проведено їх параметричну оптимізацію. Результати як осцилографічних досліджень, так і комп'ютерних моделювань добре співпадають, що підтверджує правильність функціонування запропонованого перетворювача сигналів від фоточутливих елементів.

Показано, що у запропонованій функціонально-електричній схемі даного перетворювача сигналів є можливість усунення постійної складової з динамічною зміною рівня компенсації за допомогою цифро-аналогового перетворювача мікроконтролера. Це дозволяє компенсувати постійну складову будь якої величини, а корисний сигнал попередньо підсилити на весь динамічний діапазон АЦП.

Отримані результати можуть бути основою для розробки топології інтегрального перетворювача сигналів на комплементарних КМОН-структурах.

Розроблений інтегральний перетворювач сигналів є придатним для створення реальних пристроїв як на основі дискретних компонентів, так і в інтегральному виконанні як елемент сенсорних мікросистем-на кристалі або інтелектуальних сенсорів для біомедичних застосувань.

Робота виконана в рамках проекту МОН України "Елементи гібридних сенсорних мікросистем для біомедичних застосувань" (державний реєстраційний номер 0122U000858).

Когут І.Т. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки;
Дзундза Б.С. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент;
Голота В.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та

електроніки;
Булбук О.І. – кандидат медичних наук, доцент, директор фахового медичного коледжу;
Федорюк В.В. – аспірант;
Никуруй Л.І. – кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла.

- [1] S. Pimentel, P.D. Aguero, A.J. Uriz, J.C. Moreira, *Simulation of a non-invasive glucometer based on a microwave resonator sensor*, Journal of Physics: Conference Series, 477, 012020 (2013); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/477/1/012020>.
- [2] Mejia-Mejia Elisa, Allen John, Budidha Karthik, El-Hajj Chadi, P.A. Kyriacou, P.H. Charlton, *Photoplethysmography Signal Processing and Synthesis*, Photoplethysmography, 1 (2022); <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-823374-0.00015-3>.
- [3] B.K. Alexandra, A.N. Semenova, V.A. Zyulin, *Determination of Pulse Oximetric Parameters of the Body by Photoplethysmography*, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 123 (2022); <https://doi.org/10.1109/ElConRus54750.2022.9755665>.
- [4] R.G. Khemani, N.R. Patel, R.D. Bart, C.J.L. Newth, Comparison of the Pulse Oximetric Saturation/Fraction of Inspired Oxygen Ratio and the PaO₂ Fraction of Inspired Oxygen Ratio in Children, *Chest*, 35(3), 662, (2009); <https://doi.org/10.1378/chest.08-2239>.
- [5] J.H. Kwon, S.E. Kim, N.H. Kim, E.C. Lee, J.H. Lee, *Preeminently Robust Neural PPG Denoiser*, Sensors, 22, 2082 (2022); <https://doi.org/10.3390/s22062082>.
- [6] J. Moraes, M. Rocha, G. Vasconcelos, J. Vasconcelos Filho, V. de Albuquerque, A. Alexandria, *Advances in Photoplethysmography Signal Analysis for Biomedical Applications*, Sensors, 18(6), 1894, (2018); <https://doi.org/10.3390/s18061894>.
- [7] R.I.R. Javier, A.O. Baloloy, N.B. Linsangan, I.V. Villamor, *Portable Non-Invasive Glucometer using N Infrared Sensor and Raspberry Pi*, 2020 4th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering, 35, (2020).
- [8] K.V. Pozhar, M.O. Mikhailov, E.L. Litinskaia, *Near-Infrared Spectroscopy for Noninvasive Measurement of Blood Glucose: Problems, Progress, Tasks*, Biomed Eng., 56, 64 (2022); <https://doi.org/10.1007/s10527-022-10168-5>.
- [9] Б.С. Дзундза. Програмно-апаратний комплекс для досліджень термоелектричних властивостей напівпровідникових структур. Патент України на винахід № 126766, Заявка № а201910764, дата публікації: 02.02.2023.
- [10] Б.С. Дзундза, І.Т. Когут, В.І. Голота, Л.В. Туровська, М.В. Дейчаківський *Принципи побудови гібридних мікросистем для біомедичних застосувань*, Фізика і хімія твердого тіла, 23(4), 776 (2022); <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.776-78>.
- [11] I.T. Kogut, A.A. Druzhinin, V.I. Holota, *3D SOI elements for system-on-chip applications*, Advanced Materials Research, 276, 137–144 (2011); <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.276.137>.
- [12] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, I. Kogut, V. Golota, *Nanoscale polysilicon in sensors of physical values at cryogenic temperatures*, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(10), 8364 (2018); <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8847-0>.

I.T. Kogut¹, B.S. Dzundza¹, V.I. Holota¹, O.I. Bulbuk², V.V. Fedoriuk², L.I. Nykyruy¹

Modeling of integrated signal converters for biomedical sensor microsystems

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, igor.kohut@pnu.edu.ua;

²Ivano-Frankivsk National medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

This paper presents the results of computer modeling of the proposed functional-electrical circuit of integrated signal converters (ISC) from photosensitive elements based on CMOS operational amplifiers, which is intended for the construction of an element base of hybrid sensor microsystems for biomedical applications. A feature of this ISC is the regulation and filtering of the constant component amplitude in the amplified signal from the diode photosensitive element in the wave range of 400 - 1040 nm

Computer simulation of the functioning of the device was carried out, the constituent components were determined and their parametric optimization was carried out. The results of experimental studies and computer modeling agree well, which confirms the correct functioning of the proposed signal converter from photosensitive elements. The developed ISC is suitable for creating real devices, both on the basis of discrete components and in an integrated design, as an element of sensor microsystems-on-chip or intelligent sensors.

Keywords: sensor microsystem-on-chip, integrated signal converter, photosensitive element, circuit modeling, operational amplifier, CMOS-structures.