

*Ph.D. V. ZABUDSKY<sup>1</sup>, Ph.D. O. GOLENKOV<sup>1</sup>, O. RIKHALSKY<sup>2</sup>,  
Ph.D. V. REVA<sup>1</sup>, S. KORINETS<sup>1</sup>, S. DUKHNIN<sup>1</sup>, R. MYTIAI*

Ukraine, Kyiv, <sup>1</sup>Institute of Semiconductor Physics of NASU,  
<sup>2</sup>Bogomolets Institute of Physiology of NASU

E-mail: zvv1968@yahoo.com

## MEASURING SYSTEM FOR TESTING ELECTRICAL PARAMETERS OF EMCCDs OF VARIOUS FORMATS

*This article describes the developed equipment that allows measuring the photoelectrical parameters of multielement photodetectors, specifically various formats of EMCCD (electron multiplying charge-coupled device) chips. The authors present the measuring techniques and test results on dark currents, output amplifier sensitivity, charge transfer efficiency, charge capacity and other parameters. The studies were conducted, both on the wafer and in the body, on samples of the following formats: 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024, and 1280×1024.*

*Keywords: photodetectors, EM CCD, electron multiplying charge-coupled device, measuring system, photoelectric parameters.*

An electron multiplying CCD (**EMCCD**) is a special type of CCD detector. EMCCDs are highly sensitive instruments operating in the visible range that were developed for low light surveillance and detection of single photons and have been successfully used in various fields over the last two decades [1–5]. There are many different types of matrices that differ in resolution, method of information reading, illumination type – direct or backlight. The wide range of CCD array photodetectors puts forward extensive and stringent requirements for the performance of measurement systems. There is a variety of papers about testing assembled cameras and their driving circuits [6–8], but little information is found on measuring systems for separate chips on the wafer or in the body.

Any measuring system of this kind should allow for a simple adjusting of AC and DC power supply of the chip (and its timing diagrams) in order to control its operating mode, provide a possibility of testing faulty chips without a damage to the measuring system, and measure a variety of parameters for the tested chips. The invention of EMCCD matrixes called for new requirements, such as providing an increased clock frequency and voltage or generation of three-level pulse signals. In order to test the manufactured silicon chips, especially at the stage of setting the production technology, testing equipment with a certain degree of versatility and tuning capabilities is required. In this work, the authors developed testing equipment that allows performing automatic or manual detecting of defective chips and

measuring the parameters of crystals on the wafer and in the body.

### Design of measuring system

The developed equipment has a master part and a measuring part. The master part allows setting 16 direct and 16 alternating voltages as listed in **Tables 1, 2**. These voltages are supplied via 48 DC-voltage channels on the base of AD5328 12-bit DAC with output amplifiers for precise setting of required voltage in the given range; sine generator based on the direct digital synthesis method; digital pattern generator based on a GigaBee XC6SLX with a minimum 1/88.88 MHz time discrete and a maximum pattern length of up to 64 MSample. The device is connected to a PC via a 100 Mbit LAN port.

Alternate voltage channels (15 V voltage swing) are made using EL7156 drivers; high voltage (50 V swing) channels are based on LM2435T drivers. Apart from that, there is also one channel with three controllable states: low, mid and high level voltages. It may be useful, for instance, during testing of interline transfer type CCDs.

Table 1

*Parameters of the 16 DC channels*

Channel quantity	Setting range, V	Total relative error	Noise, mV/300 kHz
8	–5...+15	typical: ±0.1%; maximal: ±0.5% from $V_{\max}$	< 0.15
4	0...+25		< 0.40
4	0...+35		< 0.70

Table 2  
Parameters of the 16 AC channels

Channel quantity	Setting range, V	Wave front, ns	Load (each channel)
4	HL, LL: -5...+10	120...200	up to 12 nF
5	HL: -5...+10 or 0...+15 LL: -5...+15 or 0...+15	< 15	220 pF
5	HL: +5 LL: 0	—	150 pF
1	HL: +5...+20; LL, ML: -5...+10 (three level signal)	120...200	up to 12 nF
1	HL: -5...+45 LL: -5...+15 (square or sine wave)	20	100 pF, 10 mA

For all alternate channels, a particular attention is paid to minimizing the distance from the drivers to the chip under study. In general, the shorter the distance the better, because of the following: firstly, the wire has a linear capacitance (low-pass filter) operating as a receiving antenna, and secondly, the wire has a linear inductance ( $\approx 1$  nH/1 mm) causing waveform distortion and operating as a transmitting antenna. For example, inductive reactance of a 10 mm of wire is nearly  $1 \Omega$  at a frequency of 20 MHz without taking into account the skin effect and the effects associated with resonance in R-L-C circuits. It limits rise and fall times of high frequency signals (**Fig. 1**).

The measuring part of the system consists of two 2-channel 14-bit ADC with a sampling rate of up to 20 MHz. Analog and digital circuits of the device are galvanically isolated to minimize the noise from the system. Each ADC channel has differential input with a range of the input signal of  $\pm 0.5U_{REF}$ , where  $U_{REF}$  is the reference

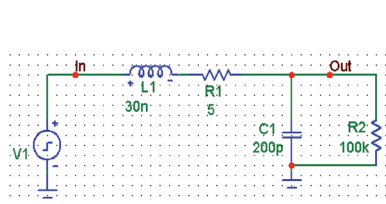


Fig. 1. Electrical diagram and the results of its simulation that illustrate the effect of inductance on the limitation of rise and fall times for high-frequency signals. Simulation was performed using 0, 20, 40, 60 nH inductances

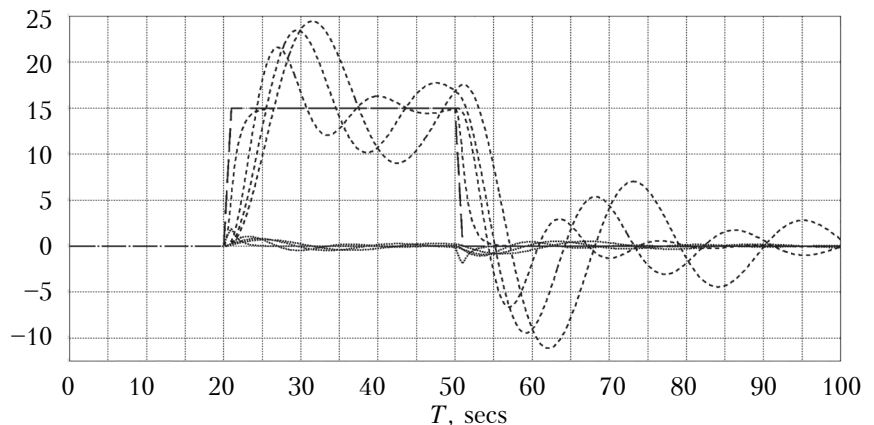


Table 3

Electrical parameters of EMCCD matrices that can be measured by the developed test system

Parameter	Range
Average dark signal	$> 1 e^-/\text{pixel}/s$
Multiplication gain	1 – 1000
Peak output voltage (POV)	$< 1$ V
Output amplifier responsivity (OAR)	$\mu\text{V}/e^-$
Electric charge transfer efficiency (CTE)	$\leq 0.99995$
Dark signal non-uniformity (DSNU)	—
Register charge capacity	—
White or black column quantity	—

voltage than can be coded to 1 or 2 V. ADC is plugged into a PC via high-speed USB interface. The measured noise of ADC with shorted input was about 0.35 mV.

Another part of the measuring system was a Keithley 2701 voltmeter with two 20-channel 7710 modules. It allows measuring direct current parameters of the tested chips, for example, resistance between different contact pads, current consumption on some lines, DC output amplifier specifications.

Apart from the DC parameters, the system allows measuring other characteristics of the chips, as shown in **Table 3**.

In order to make it possible to measure EMCCD chips of different formats, we used corresponding adapters from the DIP-48 output of the measuring system to the body for each type of matrix.

The adapters had incorporated in them a water-cycling cooling system with a copper heat sink plate mechanically connected with the EMCCD

Table 4

Temperature of the chip at different values of current passing through the built-in Peltier element

Temperature, °C	Current, A
-20	1.010
-18	0.905
-15	0.780
-10	0.582
-5	0.464
0	0.357
5	0.260
10	0.173
15	0.096

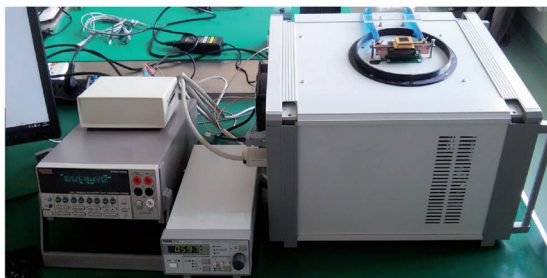


Fig. 2. Measuring system in general and an example of how a 640x512 EMCCD chip is connected to the system

body surface. TED200C temperature controller and Keithley 2701 were used to manage operating temperature of the chip with a built-in Peltier element in the -20...+20°C range (see Table 4). Fig. 2 shows the test system in general and an example of how a 640x512 EMCCD chip is connected to the measuring system.

A controlled light source was located above the chip, providing uniform lighting of the matrix in the range of illumination from complete darkness to the level allowing for output signal saturation.

**Measurements techniques and test examples**

During the process of detecting defective crystals on the wafer or when measuring chips in the body, the parameter that should be monitored first of all is resistance between the buses. The

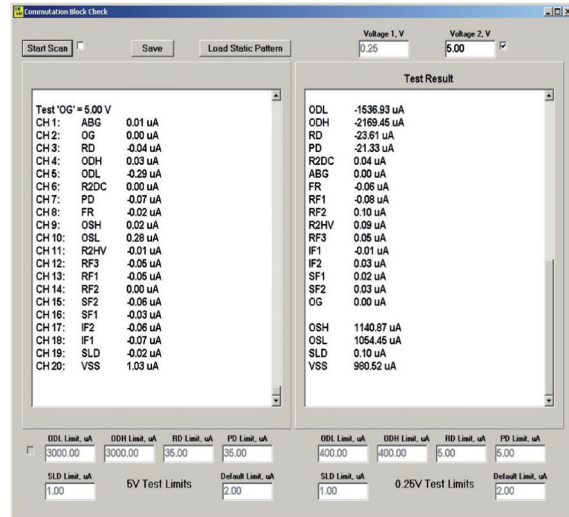


Fig. 3. Measuring of currents between different contact pads of the chip

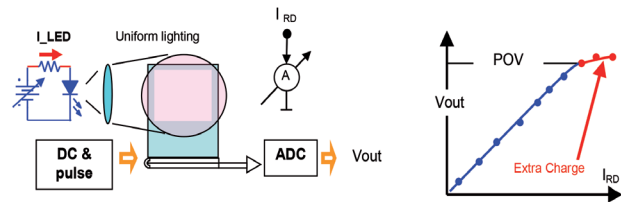


Fig. 4. Flow chart for measuring of maximum output voltage, charge capacity and output amplifier responsivity and a generalized experimental dependence

entire test of the DC parameter is divided into 2 parts: first, the current is measured at 0.25 V, and then, if the previous step is successful, at 5 V. The goal here is to prevent big currents in case of bus shortages that can cause damage to the measuring bench. Fig. 3 shows an application window with an example of the results of the 640x512 DC test.

Other electrical parameters, such as maximum output voltage, charge capacity, output amplifier responsivity in normal and gain modes were determined using the scheme shown in Fig. 4. It is a chip measurement scheme with no anti-blooming function, when all currents flow through a so-called reset drain transistor, often referred to as RD. However, if antiblooming function is embedded into the chip, the output signal dependence from the RD-current does not define output signal saturation. Instead, the dependence of the output signal on the chip illumination is measured and the RD-current is measured in the saturation point.

Fig. 5 presents the test results for the 640x512 EMCCD, i.e., graphs for the volt-charge responsivity for the normal and gain modes, the average dark signal, and the dependence of gain on the R02HV voltage. Measured and calculated EMCCD parameters are shown in Table 5.

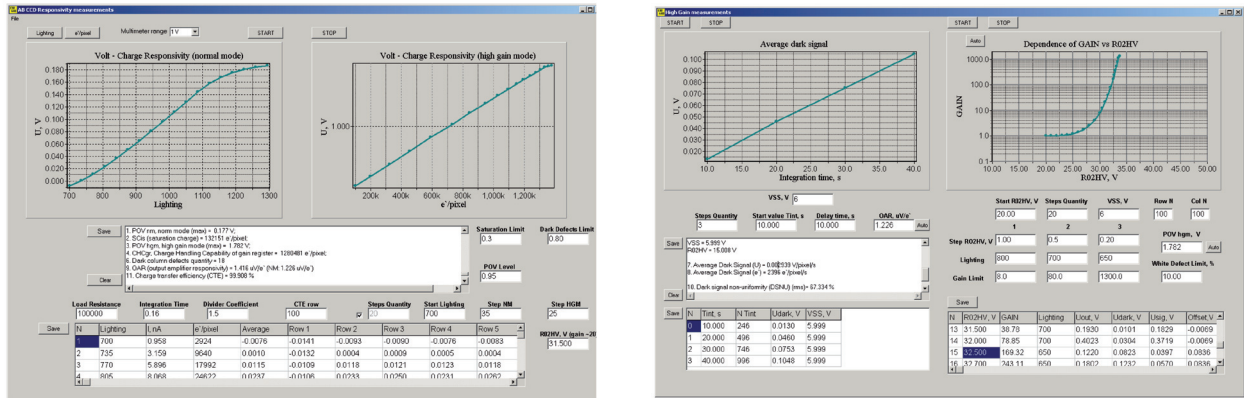


Fig. 5. Test results on the measuring system (volt-charge responsivity for normal and gain modes, average dark signal, and gain vs. R02HV voltage)

Table 5

Measured and calculated EMCCD parameters

Peak output voltage, norm mode (max)	0.177 V
Saturation charge	132151 e <sup>-</sup> /pixel
Peak output voltage, high gain mode (max)	1.782 V
Charge handling capability of gain register	1280481 e <sup>-</sup> /pixel
White column defects	3
Dark column defects quantity	18
Average dark signal	0.002939 V/pixel/s 2396 e <sup>-</sup> /pixel/s
Output amplifier responsivity	1.416 uV/e <sup>-</sup> (NM: 1.226 uV/e <sup>-</sup> )
Dark signal non-uniformity (rms)	67.334%
Charge transfer efficiency	99.908%

Conclusion

The measuring system that allows measuring photoelectrical parameters of EMCCD chips of various formats has been developed. The flexible design of the measuring system allows testing different types and formats of EMCCD matrixes.

We have tested the system by measuring parameters of 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024, 1280×1024 matrixes both on the wafer and in the body. It has been found that the system allows detecting defective chips automatically or manually and measuring the parameters of the crystals.

REFERENCES

1. Denvir D. J., Conroy E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD. *Proc. SPIE*, 2002, pp. 4796. – <http://dx.doi.org/10.1117/12.457779>
2. Seitz P., Theuwissen A. J. P. *Single-Photon Imaging*, Springer, 2011.
3. Daigle O., Djazovski O., Francoeur M. et al. EMCCDs: 10 MHz and beyond. *Proc. SPIE*, 9154, 91540B, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2054977>
4. Wilkins A. N., McElwain M. W., Norton T. J. et al. Characterization of a photon counting EMCCD for spacebased high contrast imaging spectroscopy of extrasolar planets. *Proc. SPIE*, 9154, 91540C, 2014. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2055346>
5. Reva V. P., Korinets S. V., Golenkov A. G. et al. [Electron Multiplication CCD Photomatrixes]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2017, no 1-2, pp. 33-37. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2017.1-2.33>
6. Dussault D., Hoess P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras. *Proc. SPIE*, 5563, 2004. <http://dx.doi.org/10.1117/12.561839>
7. Soesbe T. C., Lewis M. A., Richer E. et al. Development and Evaluation of an EMCCD Based Gamma Camera for Preclinical SPECT Imaging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, vol. 54, pp. 1516. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2007.906408>
8. Qiang Wua, Zhao-Hui Fengb and Xu-Wen Li. Design and test of an EMCCD CCD201 sensor driving circuit. *Advances in Engineering Research*, 2017, vol. 116, pp. 319.

Received 20.11 2019

Опис статті для цитування:

Zabudsky V., Golenkov O., Rikhalsky O., Reva V., Korinets S., Dukhnin S., Mytaii R. Measuring system for testing electrical parameters of EMCCDs of various formats. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 5-6, с. 3–7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.03>

Cite the article as:

Zabudsky V., Golenkov O., Rikhalsky O., Reva V., Korinets S., Dukhnin S., Mytaii R. Measuring system for testing electrical parameters of EMCCDs of various formats. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2019, no. 5-6, pp. 3-7. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.03>

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.03  
УДК 621.317.318

В. В. ЗАБУДСЬКИЙ<sup>1</sup>, О. Г. ГОЛЕНКОВ<sup>1</sup>,  
О. В. РИХАЛЬСЬКИЙ<sup>2</sup>, В. П. РЕВА<sup>1</sup>,  
С. В. КОРИНЕЦЬ<sup>1</sup>, С. Є. ДУХНІН<sup>1</sup>, Р. І. МИТЯЙ

Україна, м. Київ, <sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,  
<sup>2</sup>Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України  
E-mail: zvv1968@yahoo.com

## ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЗЗЕМ РІЗНОГО ФОРМАТУ

*Прилади з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) з електронним множенням (ЕМ) – це високочутливі детектори видимого діапазону, що були розроблені для спостереження в умовах слабкої освітленості та реєстрації одиничних фотонів і успішно використовуються у різних сферах протягом останніх двох десятиліть. Існує багато різних типів матриць, що відрізняються роздільністю, способом зчитування інформації, прямим або зворотнім засвічуванням. Велика кількість типів ПЗЗ-фотодетекторів висуває підвищені вимоги до проектування вимірювальних систем. В літературі досить часто описуються процеси проектування та тестування готових камер, але бракує інформації щодо вимірювальних систем для тестування окремих мікросхем ПЗЗ на пластині або в корпусі.*

*В будь-якому разі вимірювальна система повинна надавати можливості для швидкого регулювання постійних і змінних напруг живлення чипу (та їхніх часових діаграм) для коректування режиму його роботи, передбачати ймовірність тестування несправних мікросхем і при цьому уникати пошкодження апаратури, а також вимірювати різноманітні параметри досліджуваних зразків. Крім цього, розвиток технологій ПЗЗ також призводить до появи нових вимог, наприклад підвищеної частоти тактових імпульсів та їхньої напруги, генерації тривірневих імпульсних сигналів. Для тестування виготовлених кремнієвих мікросхем, особливо на етапі впровадження технології виробництва, необхідне обладнання з певним ступенем універсальності та можливостей налаштування.*

*В даній статті описано розроблену вимірювальну систему, що дозволяє досліджувати фотоелектричні параметри багатоелементних фотоприймачів, зокрема ПЗЗЕМ різних форматів. Представлено методику та результати вимірювань темнових струмів, чутливості вихідного підсилювача, ефективності передачі заряду, зарядової ємності та інших параметрів. Дослідження проводилися на зразках формату 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024, 1280×1024 як на пластинах, так і в корпусах.*

*Розроблений випробувальний стенд дозволяє проводити автоматичне або ручне відбраковування мікросхем і вимірювати фотоелектричні параметри кристалів на пластинах і в корпусі. Принцип побудови вимірювальної системи дозволяє використовувати її для дослідження матриць ПЗЗЕМ різних типів та форматів.*

*Ключові слова: фотодетектори, прилади з зарядовим зв'язком з електронним множенням, вимірювальна система, фотоелектричні параметри.*

DOI: 10.15222/ТКЕА2019.5-6.03  
УДК 621.317.318

В. В. ЗАБУДСКИЙ<sup>1</sup>, А. Г. ГОЛЕНКОВ<sup>1</sup>,  
О. В. РИХАЛЬСКИЙ<sup>2</sup>, В. П. РЕВА<sup>1</sup>,  
С. В. КОРИНЕЦЬ<sup>1</sup>, С. Е. ДУХНИН<sup>1</sup>, Р. И. МИТЯЙ

Украина, г. Киев, <sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,  
<sup>2</sup>Институт физиологии им. А. А. Богомольца НАН Украины  
E-mail: zvv1968@yahoo.com

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЗСЭУ РАЗНОГО ФОРМАТА

*В данной статье описывается разработанное оборудование, позволяющее измерять фотоелектрические параметры многоэлементных фотоприемников, в частности, различных форматов микросхем ПЗСЭУ (приборы с зарядовой связью и электронным умножением). Представлены методы измерения и результаты испытаний на темновые токи, чувствительность выходного усилителя, эффективность переноса заряда, зарядную емкость и другие параметры. Исследования проводились на образцах следующих форматов: 576×288, 640×512, 768×576, 1024×1024 и 1280×1024, как на пластине, так и в корпусе.*

*Ключевые слова: фотоприемник, ПЗСЭУ, прибор с зарядовой связью и электронным умножением, измерительная система, фотоелектрические параметры.*