

**R&D for the ALICE Photon Spectrometer Upgrade
(JINR participation)**

Продление проекта

Эксперимент ALICE

**Шифр темы: 02-1-1088-2009/2019 ALICE: исследование взаимодействий
пучков тяжелых ионов и протонов на LHC**

Направление: Физика частиц и релятивистская ядерная физика

Авторы от ОИЯИ:

V.A.Arefiev, V.I.Astakhov, S.N.Bazylev, N.V.Gorbunov, V.Kh.Dodokhov, I.A.Filipov,
E.M.Kislov, N.A.Kuzmin, A.V.Kuznetsov, V.I.Lobanov, P.V.Nomokonov, Y.P.Petukhov,
I.A.Rufanov, A.V.Shchipunov, V.M.Slepnev, I.V.Slepnev, G.G.Stiforov, A.S.Vodopyanov,

Руководитель проекта: А.С.Водопьянов

Дата представления проекта в НОО _____

Дата НТС Лаборатории 20/11/2018

Номер документа ____ № _____

Дата представления физического обоснования
эксперимента ALICE на семинаре Лаборатории: 29.02.2008

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

R&D for the ALICE Photon Spectrometer Upgrade
(JINR participation)

Продление проекта

Эксперимент ALICE

Шифр темы: **02-1-1088-2009/2018**

Утвержден директором ОИЯИ

подпись

дата

СОГЛАСОВАНО

Вице-директор ОИЯИ

Гл.уч.секретарь ОИЯИ

Гл. инженер ОИЯИ

Начальник НОО

Директор Лаборатории

Гл. инженер Лаборатории

Руководитель проекта

О Д О Б Р Е Н

ПКК по направлению

R&D for the ALICE Photon Spectrometer Upgrade (JINR Participation)

The report on the execution of the project in 2017-2018 and the proposal on its extension for the years 2019-2020.

To improve the accuracy of the direct photons identification at low energies [1], the PHOS [2-4] selected working temperature, at which the detecting elements operated, was -25°C . Compared to operation at room temperature, this has significantly improved the signal-to-noise ratio by reducing the noise of the APDs and the CSAs. In addition, at this temperature, compared with room temperature, the light yield of PWO crystals increases by three times.

Work at a negative temperature requires maintaining the humidity in the spectrometer volume below the dew point. To this end, PHOS modules are sealed, and their internal volume filled with dry nitrogen. Note, that the sealing of the spectrometer volume creates significant difficulties for the maintenance of PHOS electronics.

The use of low-noise electronics together with cooling provides the Noise-equivalent power of 5-7 MeV, which makes it possible to obtain a resolution better than $5\text{ MeV}/c^2$ for the invariant mass of two gamma quanta. The upper limit of the PHOS dynamic range is 100 GeV, which corresponds to the maximum energy of 85 GeV identified in one detecting element. The upper limit of the detecting element's dynamic range determined by the capacity of the readout electronics' boards.

The possibility of upgrading the PHOS, with the aim of expanding the dynamic range of the spectrometer-detecting element from 85 GeV to 160 GeV and improving the time resolution σ_t from 4-5 ns to 0.5 ns with the electromagnetic shower energy (energy release) of $\sim 1\text{ GeV}$, is currently under discussion. To allow operating the PHOS without deterioration of performance at room temperature, a number of options been studied.

In October 2017, the measurements carried out on the T9 test beams (momenta range of 1-10 GeV/c of the PS synchrotron).

1. Experimental studies.

The following is a description of the main detectors and experiment systems, which include:

- investigated detectors (electromagnetic calorimeters);
- thermostabilization system;
- trigger experiment;
- Data collection system and the TQDC unit;
- signal preparation board,

1.1. Description of calorimeters and detecting elements

For measurements inside the prototype for 256 channels [alex1], four sets of nine detecting elements (DE) each installed on the beam. Each set formed an assembly of 3×3 , which was essentially a small electromagnetic calorimeter. DE assemblies differed in photodetectors. Three assemblies contained avalanche photodiodes (APDs) and one array assembled with silicon multipliers (SiPM). Note, that all the APDs used have similar supply voltages for the gain coefficient of $M = 50$, which made possible the power supply of the APD by a single voltage source.

In the assembly with APDs, there were used the CSAs of the currently operating PHOS, manufactured for the HAMAMATSU APDs of the S8664-55 type[5] with an area of $5 \times 5 \text{ mm}^2$ or the CSAs, reworked for the new APDs. All photodetectors soldered to a $19 \times 19 \text{ mm}$ electronic board, which contained either a CSA or a simple power supply and signal readout circuit for SiPM.

Boards with photodetectors glued into the Al support frame, which also served as a screen for the CSA. The photodetector with its surface plane glued to the end of the PWO crystal.

Note that to measure the DE time characteristics it is sufficient to have one detecting element, but to measure the energy resolution of the prototype, an assembly in the form of an array of 3×3 of 9 elements is necessary, since the energy of the electromagnetic shower released in several neighboring crystals.

In the first assembly, detector elements with HAMAMATSU APDs of the type S8664-1010[6] with an area of $10 \times 10 \text{ mm}^2$, produced in 2016 (see Figure 2) were used. CSAs for S8664-55 used as a pre-amplifier. Due to the difference in the geometry of these APD contacts from the contacts of the S8664-55, the connection to the preamplifier provided using a simple intermediate board.

For the array, assembled in 2017, HAMAMATSU APDs of the type S8664-1010 with an area of $10 \times 10 \text{ mm}^2$, produced in 2017, also used. A CSA designed and manufactured for them, taking into account the APD's new geometry. The transmission coefficient of the new CSA was approximately 30% lower than the CSA for S8664-55, which explained by the appearance of parasitic capacitances caused by the new layout of the wiring.

In the third assembly, APDs measuring $5 \times 5 \text{ mm}^2$ used. I.e. the DEs were a complete analogue of the current photon spectrometer.

In the fourth assembly, HAMAMATSU 2×2 arrays assembled of MPPC S12572-015C silicon photomultipliers used as a photodetector. These SiPM, selected for the matrices, have similar supply voltages, a microcell area of $15 \times 15 \text{ }\mu\text{m}^2$ and a sensitive area of $3 \times 3 \text{ mm}^2$. The MPPCs in the matrix electrically connected in parallel. The total sensitive area of the 2×2 matrix was $6 \times 6 \text{ mm}^2$. The power supply was common for all the SiPM matrices.

Photographs of boards with photodetectors glued into the support frame presented in Fig.2.

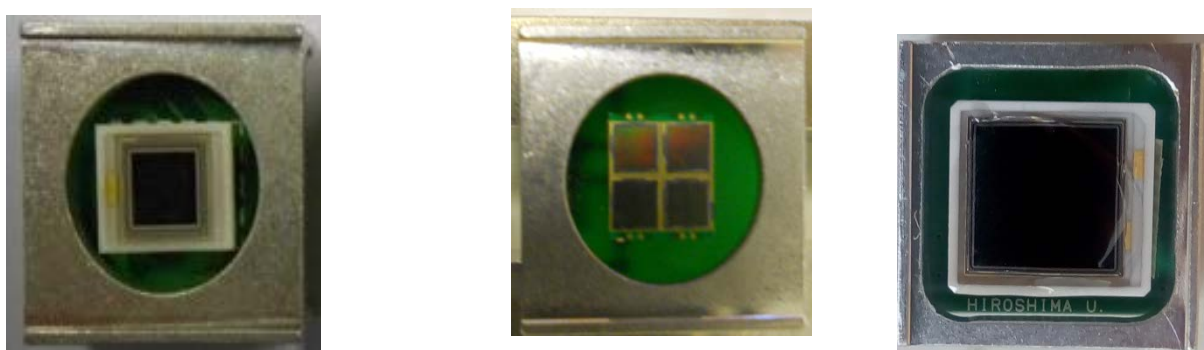


Fig. 2. Photos of a glued into the support frame board with a CSA with soldered photo detectors. The CSA, made by surface mounting, is located on the side opposite to the photodetector. The size of the frame is

22x22 mm². View from photo detectors. **On the left** - APD and CSA of the current PHOS. In the center - a CSA with a large-size APD produced in 2016. **On the right** - a photo of a 2x2 matrix of silicon multipliers.

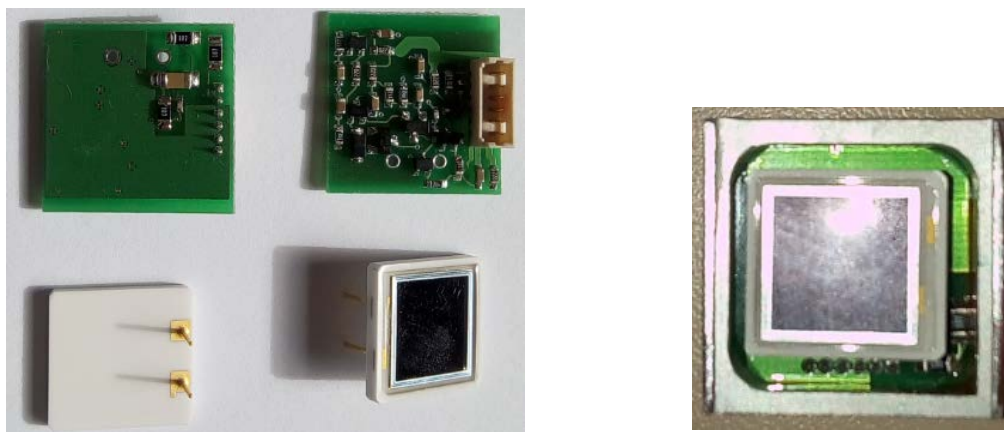


Fig. 3. **Top left** - a photo of a CSA manufactured in 2017 for 10x10 mm APD, **bottom left** - a photo of a HAMAMATSU S8664-1010 10x10 mm² APD; **right** - a photo of a glued into the support frame board with a CSA with soldered photodetectors.

The mechanical connection of the crystal and the photodetector in the detecting element was provided with the help of the optical substance Cargille Meltmount TM Quick Stick TM produced by Cargille Laboratories, USA [Cargille] which became liquid at $T = +70$ °C. The substance, the crystal and the photodetector heated to +70 °C, and then the elements to be glued were joined together. When cooled to room temperature, the substance hardened, forming an optically transparent compound with a refractive index $n_d = 1.704$.

2.2. Thermal Stabilization System

The light yield of the PWO crystals and the gain of APD and SiPM have a strong temperature dependence, which leads to the need of thermally stabilizing the assemblies in the range of better than ± 0.1 °C. In our experiment, this provided by pumping the C6F14 liquid through the cold plate of the prototype for 256 channels with its periodic cooling in the compressor of the refrigerating machine. This made it possible to maintain the temperature of the detecting elements in a wide range of temperatures with an accuracy of ± 0.1 °C. The working temperature was set at +17.5 °C. A detailed description of the system of cooling and thermal stabilization given in [3]. The layout of the sensors and long-term temperature stability presented in Fig.4

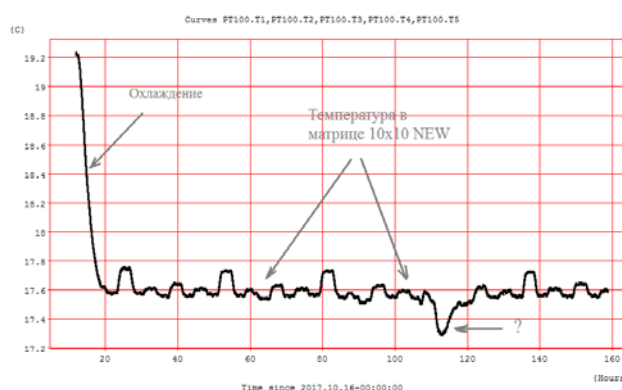
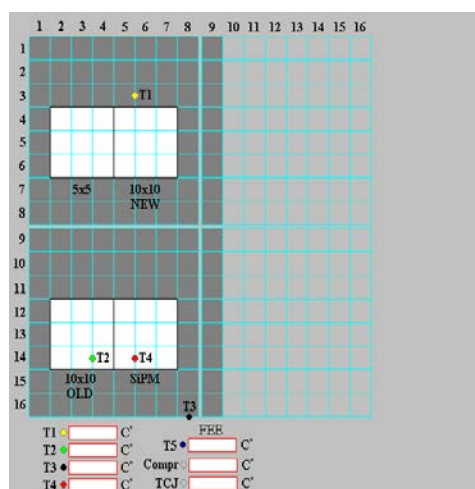


Fig.4. On the left - the layout of the temperature sensors inside the prototype 256. One box corresponds to a DE. The white background indicates the studied sets of DEs, which been irradiated with a particle beam and from which signals have been registered. 5x5 - 3x3 array of photosensors of the current PHOS; 10x10NEW - 3x3 array with APD 2017; SiPM - 3x3 array of SiPM matrices; 10x10OLD - 3x3 array with APD 2016; T1 - T5 - the location points of temperature sensors inside the array of crystals. On the right - the time dependence of the the T1 sensor readings within 160 hours of the experiment. One can see the process of cooling to a temperature of 17.6 C, then temperature fluctuations in the corridor of $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$. An arrow with a “?”-mark corresponds to the disconnection of the electronics during a transfer to another array.

2.3. Experiment Trigger

The trigger of the experiment served to synchronize the processing and recording of information with the time of an electron's entry into the calorimeter detector and the formation of an electromagnetic shower. Electrons are formed mainly as result of the gamma-quanta conversion into an electron-positron pair during the decay of a neutral pi-meson formed as a result of the nuclear interaction of a 24 GeV/c primary PS proton beam with an Al-W target (so-called target No. 1). The T9 beam magnetic path carries out the choice of the particle momentum. Since the magnetic system allows the selection of particles only by their momentum and charge, and as a result of the interaction in the target, many charged particles (p, charged pi-mesons, kaons, muons, etc.) are formed, not only a synchronization with the moment of particles entry in the calorimeter but also a trigger for the electron emission is required. For the purpose of the trigger, two scintillation counters and a 4m threshold gas Cherenkov counter installed in front of the calorimeter. A change in the gas pressure in the counter made it possible to receive a signal from the counter only from electrons at all pulses available at T9. Immediately after the Cherenkov counter, a start counter with a size of 2x2x3 cm installed, which was visible from two ends to fast photomultipliers. Immediately behind the start counter, there was another counter, which only served to suppress the background. The trigger of the experiment was a coincidence signal S3xS4xCxS5. In this case, S3 was the master counter; signals from the remaining counters delayed and arrived at the coincidence circuit later.

2.4. Description of the data acquisition system and the TQDC unit

Data Acquisition System (DAQ) programs are implemented within the Linux system CentOS 7 [7] on the host computer (in our case it is phstand.cern.ch). The user controls the data acquisition system.

This computer has two Ethernet network cards with a data transfer rate of 1 Gb/s, one of which is used to connect the computer to the global network, the second, together with the 1 Gb/s HP 1420 switch, forms the internal local network to which the electronics module TQDC16VS [8] is connected), which also has an Ethernet interface. Power to the unit supplied from the VME crate.

The tqdc2 program supplied by the development company [9] carries out data reception. The program runs on the host computer. The main functions of the program include reading and writing information from the TQDC16VS unit, unit configuration, data set management and provision of the minimum control function with regard to the data to be collected.

From the start, the TQDC16VS-E [10] unit designed to measure time and charge from fast time detectors that produced signals of large amplitude of tens and hundreds of mV with short nanosecond fronts - photomultiplier, SiPM etc. To obtain fast time tags in the unit, discriminators are installed, the threshold on which can be programmed.

To measure the time in the unit, 2 HPTDC chips developed at CERN [11] are used, each in a 25 ps mode, and to digitize the signal shape two 8-channel 14-bit ADCs LTM9011-14 are used with a digitizing frequency of 125 MHz. The unit controlled by FPGA of Kintex-7 type manufactured by Xilinx [12]. The

signals to the unit come through 50-ohm coaxial cables through the front panel LEMO connectors. The signals can be bi-polar; the operating range of the input signals amplitudes is ± 1 V.

The developer performed an upgrade of the TQDC16VS unit to work with the slow signals characteristic of the PHOS DE. The internal discriminators were disconnected, a separate input was provided to supply time signals, for which the front panel of the unit was expanded by 2 times and a multi-pin connector was installed on it to supply the 16 LVDS signals for time measurements already prepared outside the unit. A photo of the unit shown in Fig.5.

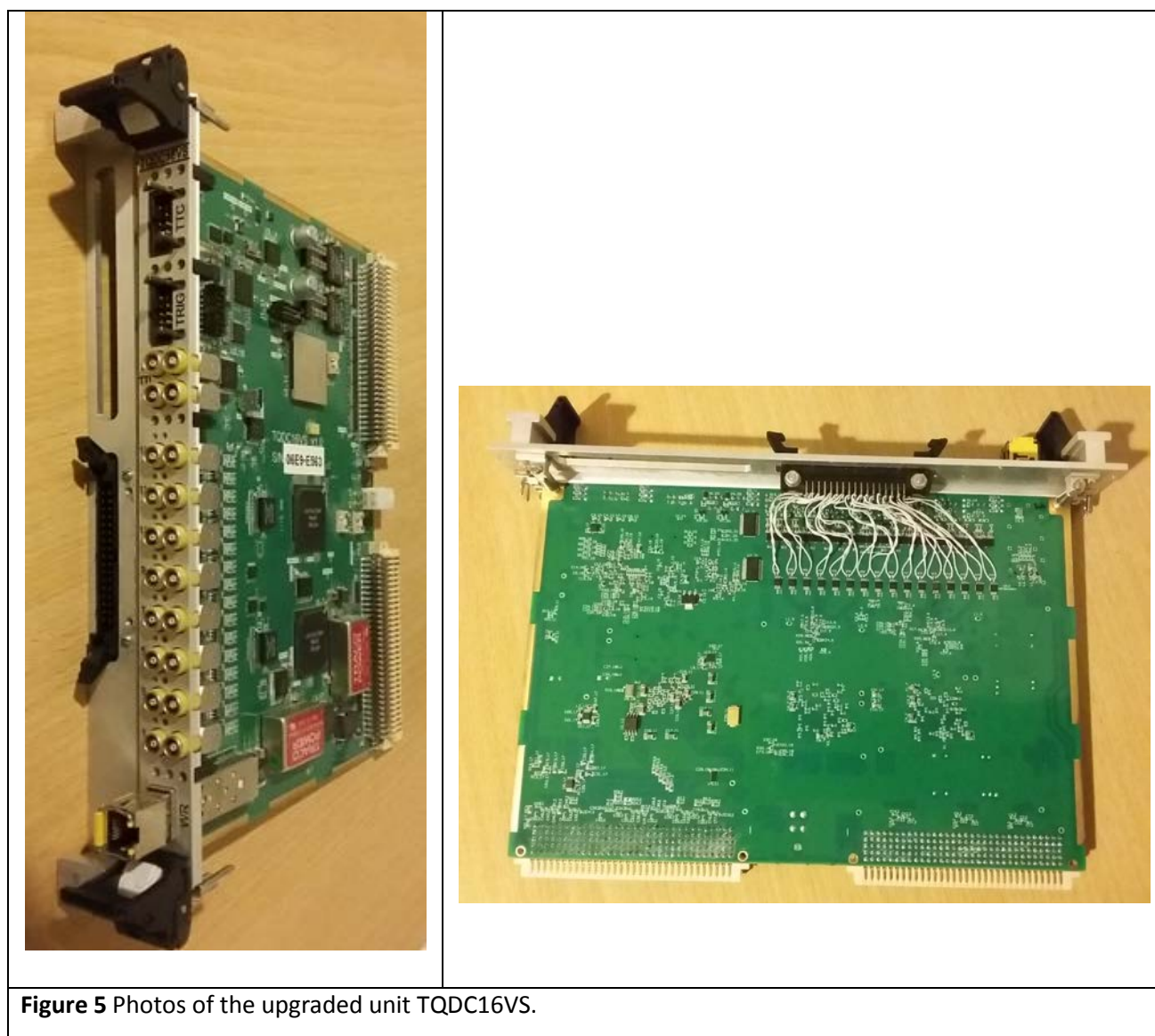


Figure 5 Photos of the upgraded unit TQDC16VS.

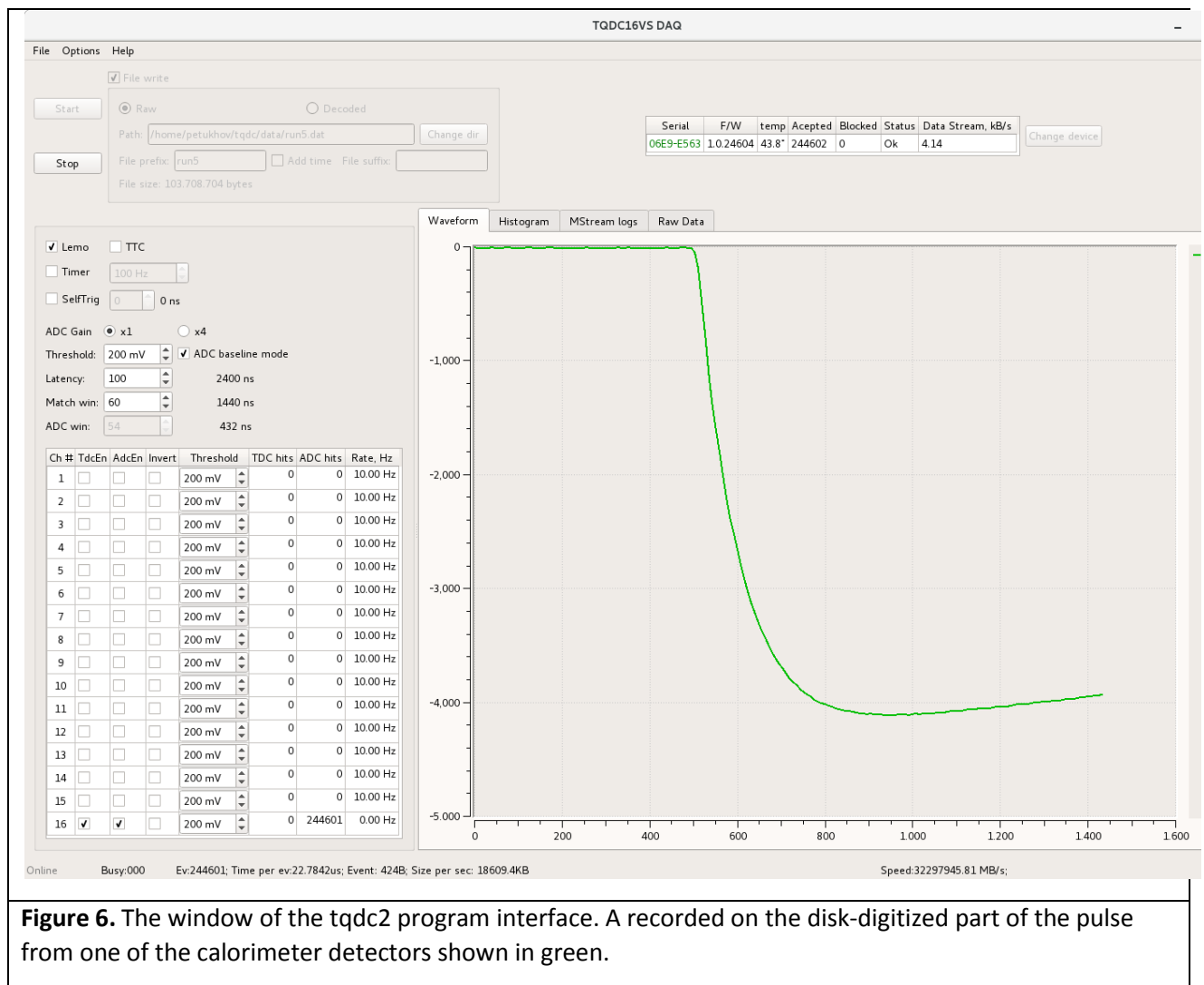
The reading of the unit synchronized with the trigger signal generated by the system of trigger counters. The trigger signal fed to the second TTL input of the TQDC16VS unit. The synchronization procedure carried out according to the [HPTDC]. The width of the control gate signal chosen so that the signal zero level digitized several times on the signal shape and the maximum signal was clearly distinguished. The digitized signal shape seen in Fig.6.

So the signals from the detectors sent separately to 16 TDC inputs (pre-prepared LVDS signals) and 16 ADC inputs (NIM signals from the output of external shapers). In our case, we had nine channels in 3x3 arrays, the remaining channels used to record the time and amplitude from the trigger counters.

The tqdc2 program writes the received data to a file in the directory /home/user/tqdc/data.

For fast off-line processing, procedures using the data already recorded on the disk written in the C-language. More careful processing carried out by a separate software package. The description of this package to be provided in a separate report. Amplitude and time determined by the maximum and position of the maximum in the recorded part of the pulse.

Changing DAQ parameters by simply editing the configuration file and changing parameters in the tqdc2 program window (see Fig. 6). Instructions for working with DAQ given in Appendix 1.



2.5. Description of the signal preparation board for time and amplitude measurements

For the preparation of signals for the TQDC unit, a special board was developed (or a signal preparation board), on which a signal from the CSA was divided into two parts - the small part was branched off and delivered to comparators for time measurements. The main part passed through a second-order filter, was formed with a formation time of 1 μ s, and was delivered for amplitude

measurements. Comparators and shapers were made in the form of mezzanine boards (3 boards), each of which could prepare up to 4 signals. Photographs of the wiring of the signal preparation board and the signal preparation board itself with installed shaper and comparator mezzanine boards shown in Fig.7. The schematic diagram of the signal preparation board shown in Fig.8. Schematic diagrams and wiring diagrams for mezzanine boards of shapers and comparators shown in Fig.9 and Fig.10, respectively.

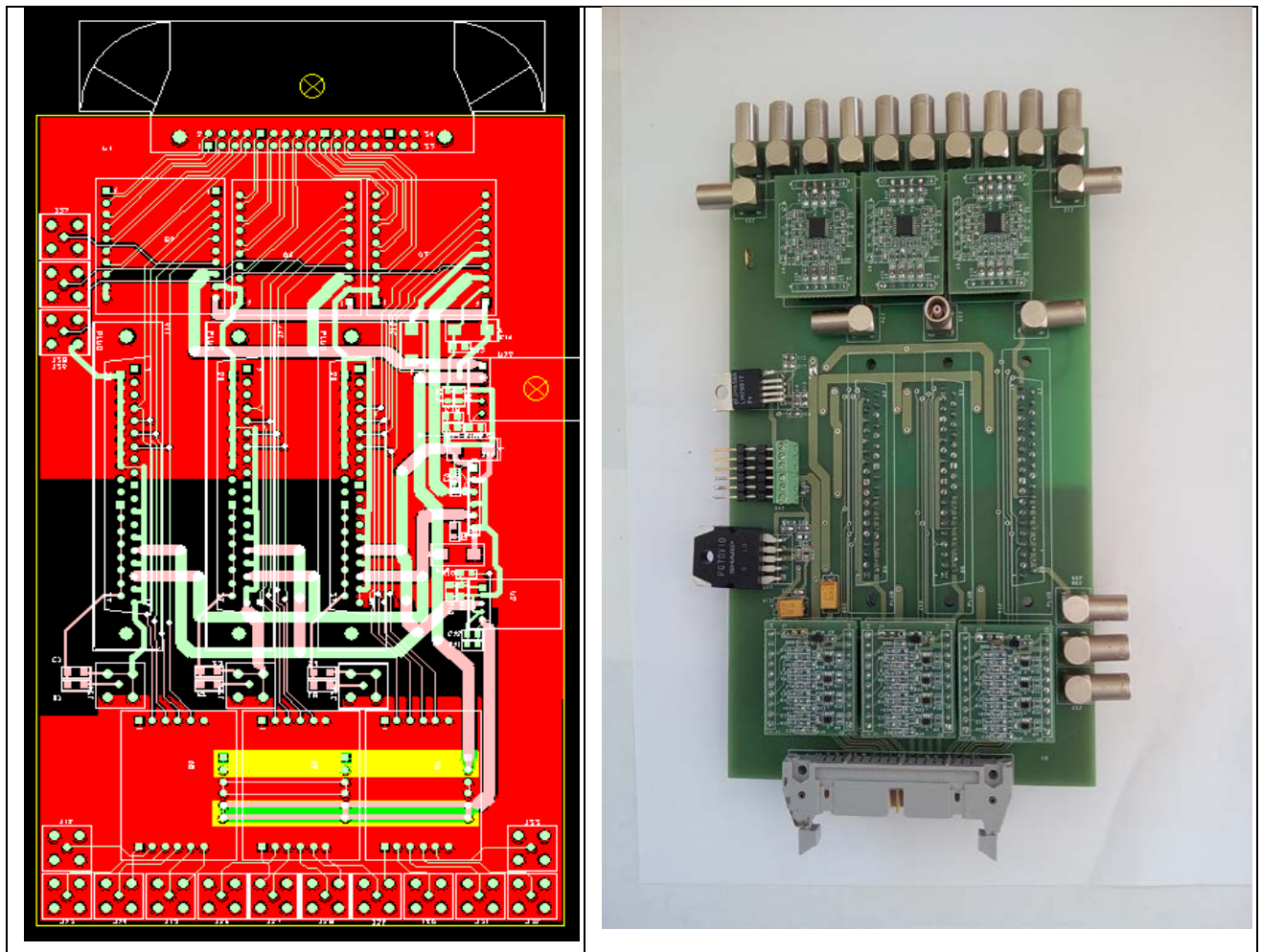


Figure 7. On the left is a diagram of the wiring of the signal preparation board. On the right is a board with installed shaper mezzanines (top) and comparators (bottom).

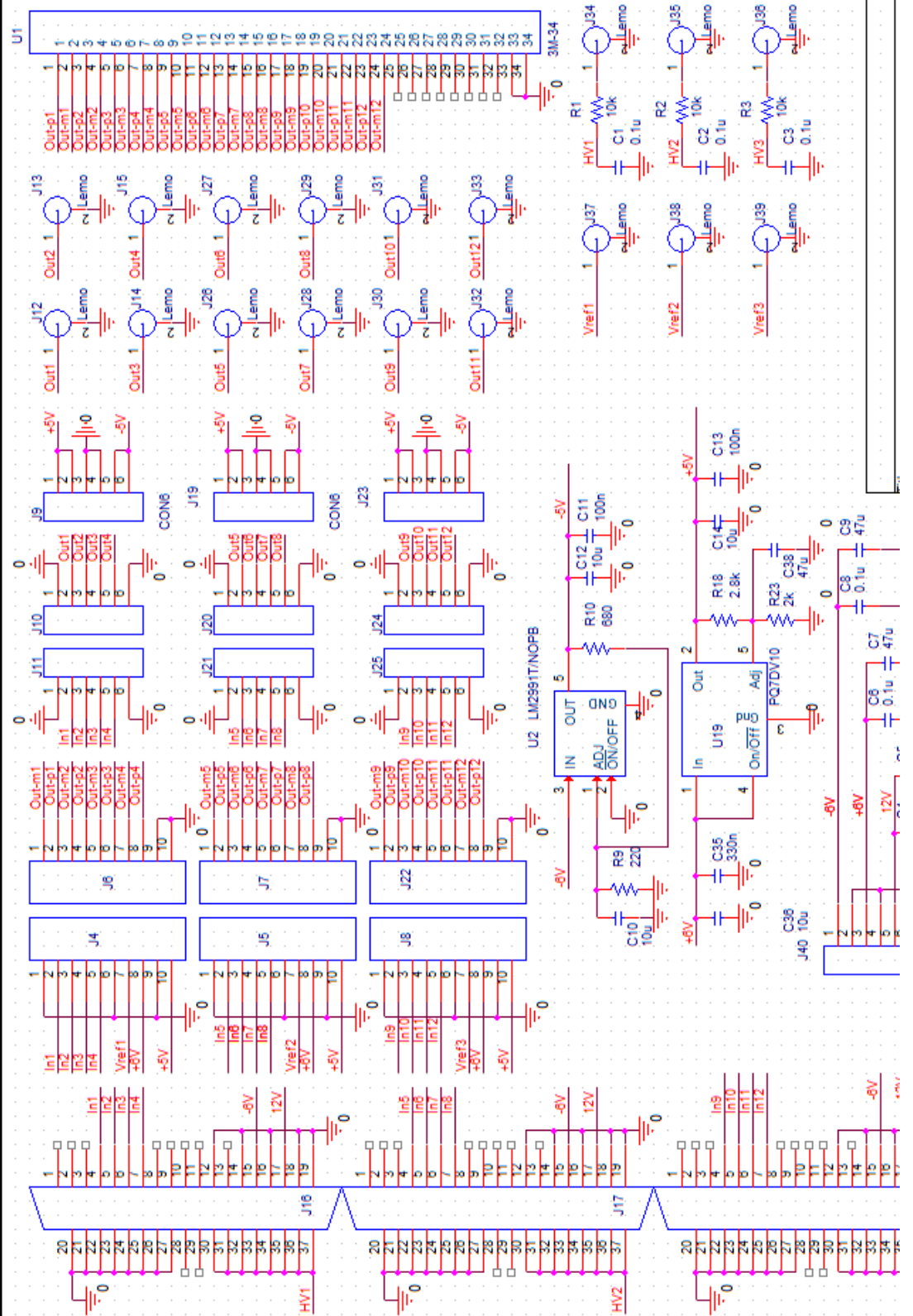


Figure 8. Schematic diagram of the signal preparation board.

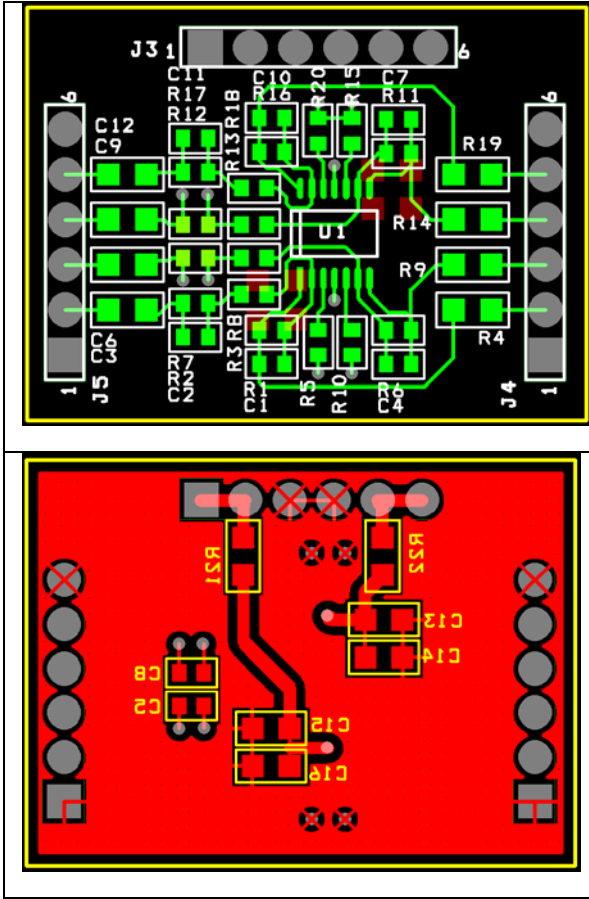
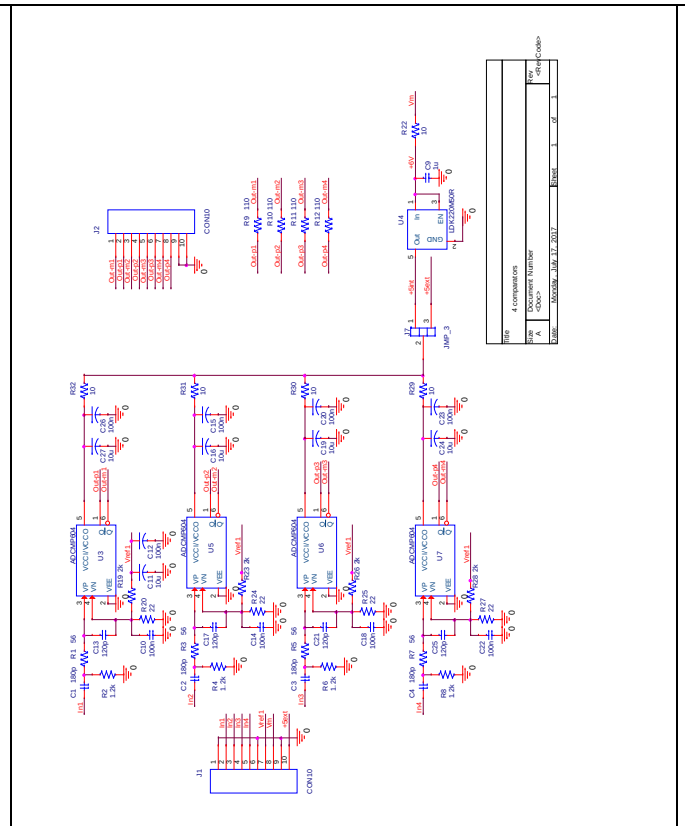
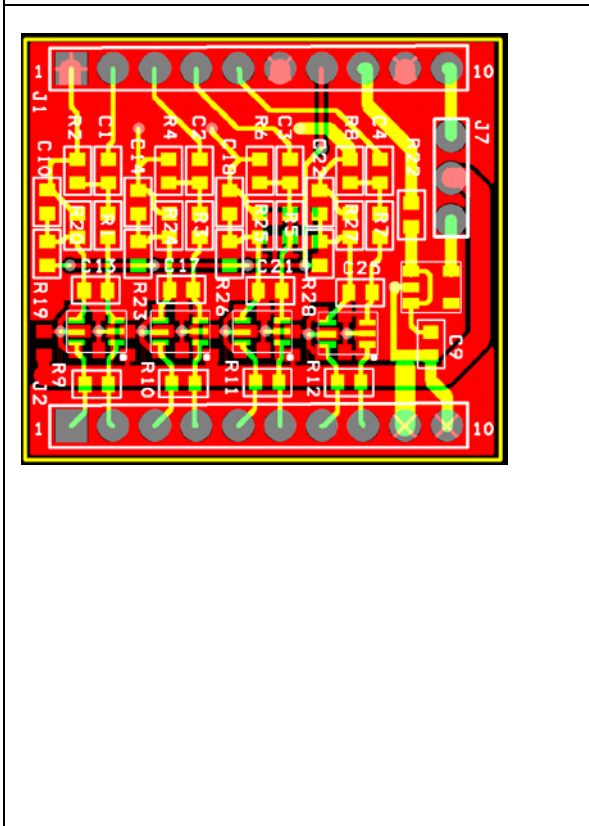
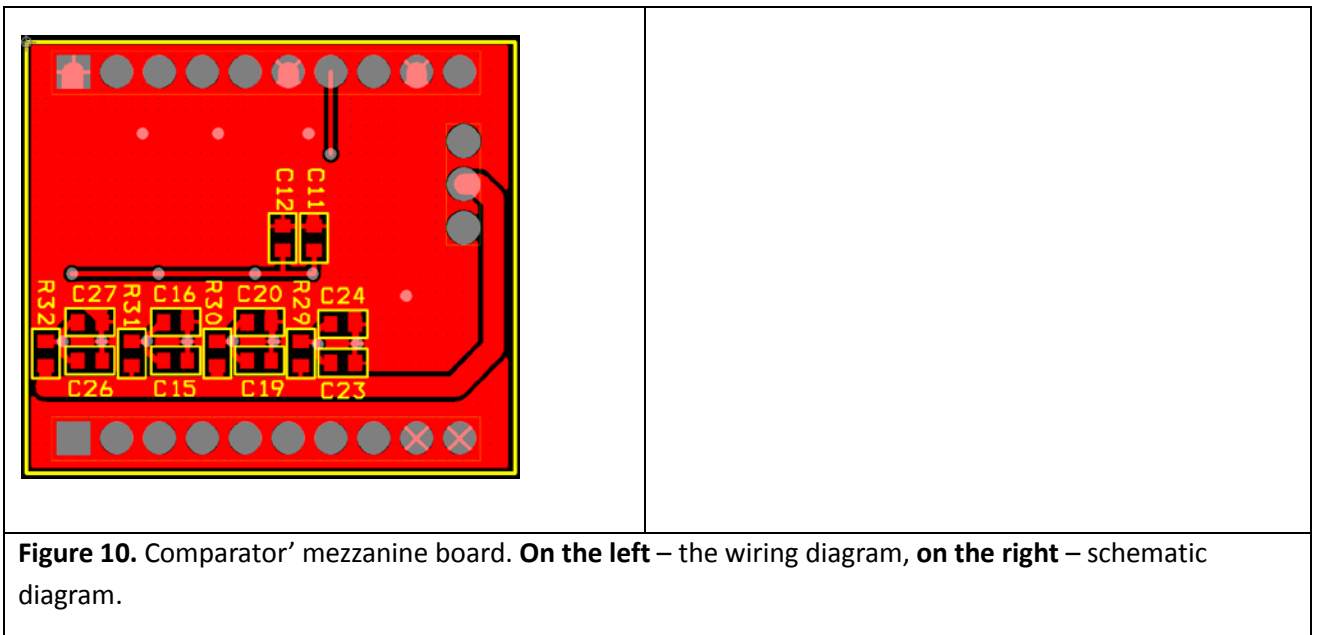


Figure 8. Shapers' mezzanine board. On the left – the wiring diagram, on the right – schematic diagram.





Since the signal preparation board received signals from the CSA, it was located as close as possible - at a distance of 20 cm from the CSA. Output signals from the signal preparation board fed to the TQDC input, which was located 2 m away from the calorimeter.

Development of the signal preparation boards and CSAs carried out at the JINR and NRC KI, production of boards - at the JINR, modernization and production of TQDC16-VS made at the AFI electronics, Dubna.

3. Experimental results of beam tests

The main purpose of the beam tests was to determine the energy and time resolution of 3x3 assemblies with large area APDs. The bulk of the data collected for the APDs purchased in 2017. For the SiPM assembly, only the time resolution was determined. In this case, the electronics described above used for assemblies with avalanche photodiodes.

In an assembly of silicon photomultipliers, earlier developed shapers have been used, the description of which lies outside the scope of this report. Measurements also carried out at a direct signal transfer from the SiPM to the TQDC unit.

In measurements, the 256-channel prototype with internally mounted assemblies placed on a remotely controlled table with the possibility of moving along the horizontal and vertical axes. The table used to align the assemblies relative to a particle beam. The beam focus was at a distance of 1 m after the prototype. The transverse dimensions of the trigger counters and the selected position of the beam focus allowed to evenly irradiating, in one run, nine counters under the assembly beam (irradiation with a so-called wide beam).

A photograph of the equipment installed on the T9 and the scheme of the experiment presented in Fig.12.

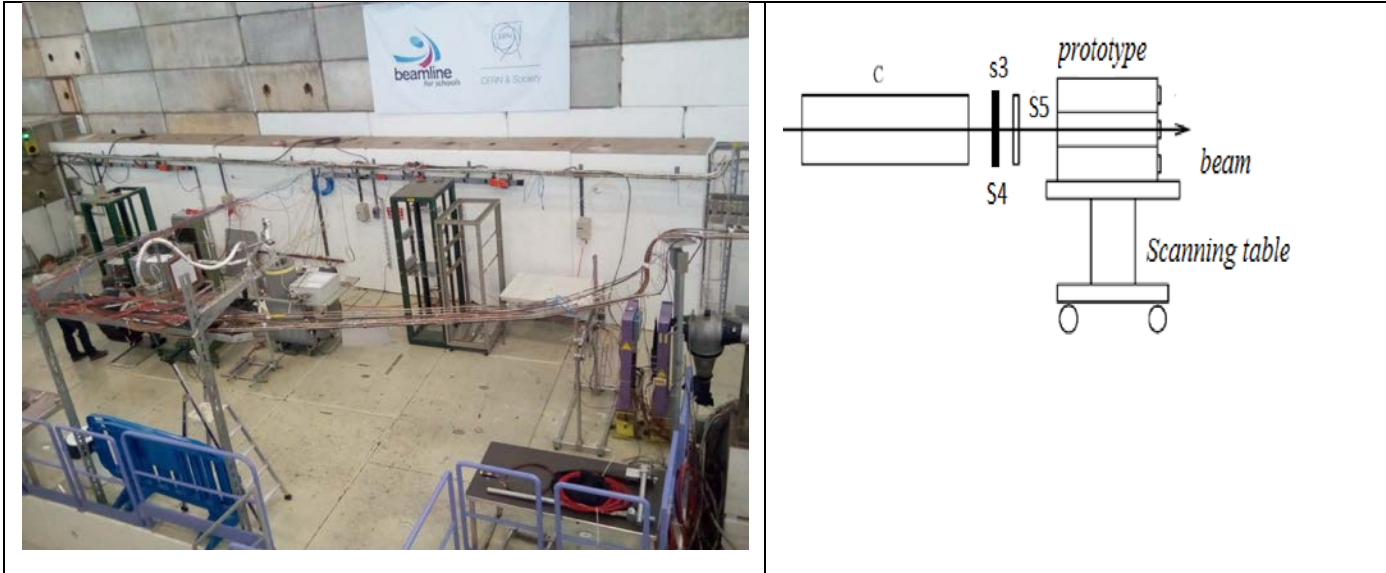


Figure 12. On the left - a photograph of the experiment on the T9 beam. On the right – the scheme of the experiment.

All assemblies powered from a high-voltage power source Keithley-6487.

3.1. Energy resolution of assemblies

The pulse resolution of beam particles was determined by the horizontal collimator gap equal to 6 mm, which corresponded to $\Delta P / P = 0.6\%$, where ΔP is the total spread and P is the average value of the beam pulse.

The energy resolution at energy E was determined as result of the following procedure:

1) Relative calibration of all DEs performed. For this, the maximum amplitude in each DE was determined. Relative amplification factors were determined from this amplitude: $g_i = A_i / A_c$, where A_i is the maximum amplitude of i -th DE and A_c is the maximum amplitude of the central DE.

2) Central events selected that corresponded to the electron entering the center of the assembly (square of $14 \times 14 \text{ mm}^2$ relative to the longitudinal axis of the central DE) according to the procedure described in [ipp1]. For each central event, the histogram of the total energy release was filled in $E = \sum g_i A_i$, ($i=1, \dots, 9$), which had the form of a Gaussian distribution with a tail extended to low energies, and the distribution maximum corresponding to energy E .

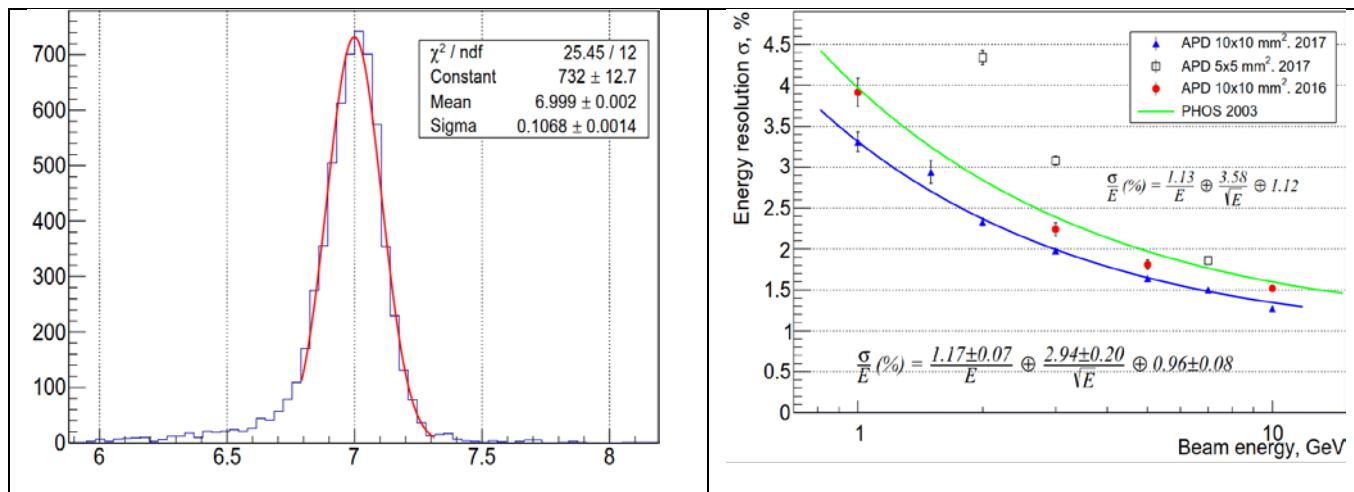


Figure 13. On the left - a histogram of the total energy release in the 3x3 assembly. The curve is the result of fitting with the Gaussian distribution. On the right - the curve of the dependence of the relative energy resolution on the electron energy. Green line - fitting results for the current PHOS [alex1] with an APD of 5x5 obtained at -25C°, blue triangles - 2017 results with an APD of 10x10 at + 17.5C, red dots - the results obtained in 2016 at + 17.5C, squares - 2017 results with APD of 5x5 at a temperature of + 17.5C. The blue line shows the results of fitting the 2017 data for an APD of 10x10.

3) The histogram was fitted with a Gaussian distribution with mean E and variance σ , the σ/E ratio is the relative energy resolution (see Fig. 13).

The procedure for determining the energy resolution in measurements with a wide beam described in [ipp1]. In 2017, it tested experimentally for energy of 7 GeV.

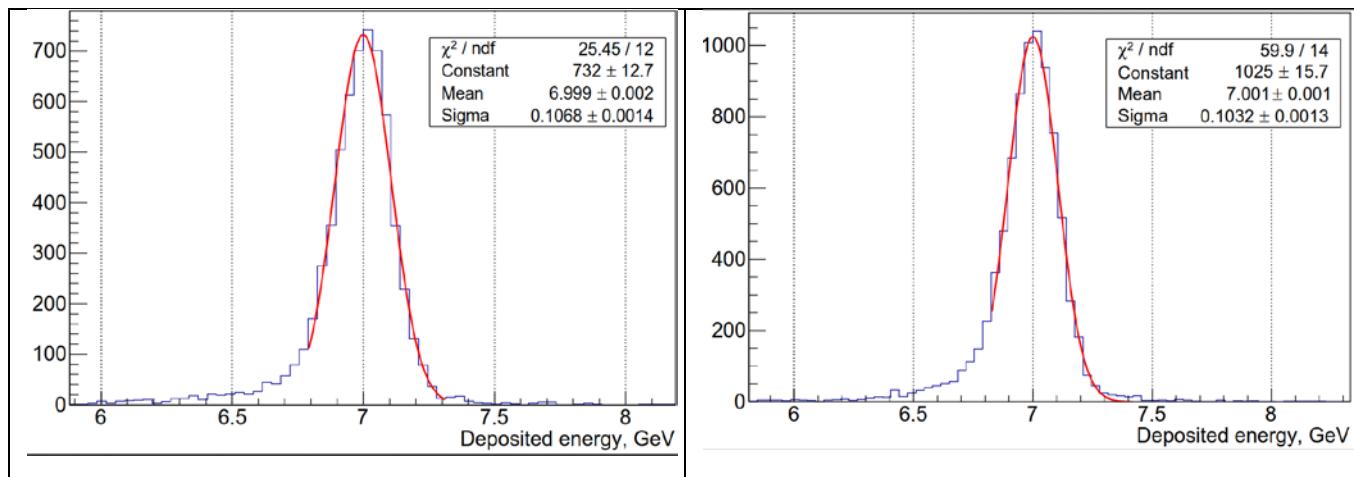


Figure 14. The results of measuring the energy resolution with a wide beam (left-hand) and a narrow beam (right-hand).

For this, measurements carried out with a narrow beam, in which the trigger had a counter with a cross section of 1x1 cm. The measurements showed almost the same values of energy resolution measured by two methods. The measurement results presented in Fig.14.

When measuring the time parameters of the DE, the APD gain coefficient (hereinafter - the

APD GC) is significant. The optimal value is GC = 50. When approaching the breakdown voltage (for a large sized APD, this value averages around 400V) the GC begins to increase sharply, in this area a high stability of temperature and voltage on the APD is necessary. In order to determine the GC operating range in which it is possible to work without degrading the energy resolution, the resolution measured as a function of voltage at a 3 GeV energy. The measurement results presented in Table 1. There is a deterioration in the resolution at voltages in excess of 385 V.

Table 1. The values of the relative energy resolution at different voltages. For orientation, the GC of the central detector is indicated.

U,V	355	365	375	385	390
GC (central detector)	50	75	109	183	300
$\sigma_E, \%$	1.95±0.06	1.96±0.05	1.97±0.06	2.03±0.03	2.13±0.03
Run#	79.80	81.82	83.85	86	92

3.2. The time resolution of the detecting elements

The time resolution is determined for each DE separately. The time results extracted from the same data as the energy resolution results. Usually, for studying the time properties of the energy release range of 1–1.5 GeV, data taken at a beam energy in a range of 1.5–3 GeV. With such a beam energy, up to ~ 85% of the energy is released in the DE, which makes it possible to determine with good accuracy the time resolution at an energy release of 1 GeV in the DE.

The time resolution depends on the steepness of the pulse front. This parameter is to large extent determined by the APD gain; therefore, measurements of the time resolution carried out in a wide range of GC values. The energy resolution up to GC = 300 does not depend on the GC, whereas the time resolution improves with increasing GC. Table 2 shows the results of measuring the GC for DE as a whole, obtained for the central detector of the assembly with APD 2017. The measurements were carried out with a narrow beam for all voltages except for U = 390 V, where the GC has been measured with a wide beam.

Table 2. The GC for the central detector of the 3x3 assembly for APD produced in 2017

U,B	50	100	200	300	340	360	375	380	385	390
GC	1	1.08	2.3	12.4	31.1	60	109	150	183	300

The following procedure used to determine the time resolution [bogo1]. A two-dimensional distribution was built for the dependence of the time difference between the trigger time and the DE response time (hereinafter - - time). An example of such a distribution shown in Fig.15a. The curve reflects the obvious fact that the smaller the signal amplitude, the later the time signal produced in the signal preparation board and the worse is the time resolution. To eliminate the dependence of the response time on the amplitude, a correction to the slope of this curve made. For that, a two-dimensional dependence was fitted with a power function (the red line in Fig. 15a), $p_0 - p_3$ - parameters.

$$y = p_0 - p_1(x - p_3)^{-p_2}$$

according to the parameter found, the distribution was adjusted for the slope, which led to the straightening of the dependence - see Fig. 15b. For each bin in energy, from the 15b distribution, there were calculated one-dimensional distributions of the number of events with time, which were fitted with the Gaussian distribution. Figure 15c shows the results of the dependence of the Gaussian distribution's dispersion on the energy release. The red curve is the result of fitting the 4-parameter function of type

$$\sigma = \frac{A_{SQ}}{\sqrt{E}} \oplus \frac{A_1}{E} \oplus \frac{A_2}{E^2} \oplus A_0$$

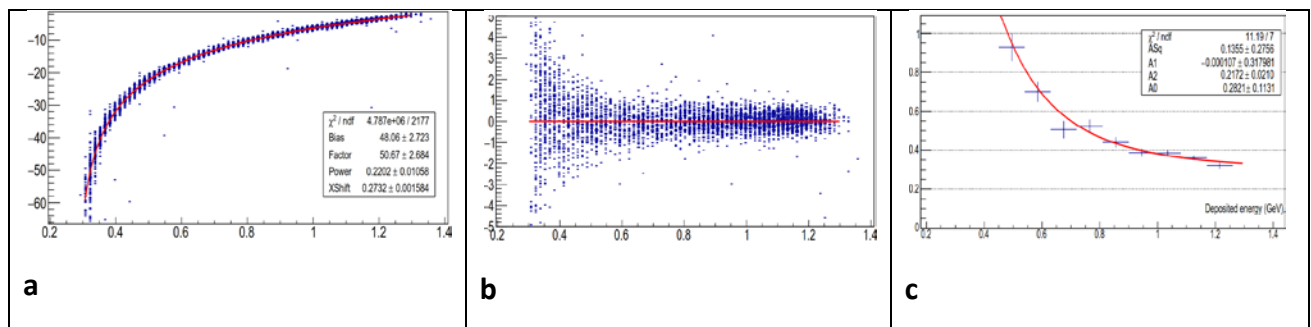


Figure 15. **a**-two-dimensional dependence of the energy release in the DE from the time to correction, **b** - corrected for the dependence of time on the amplitude, **c** - the dependence of the DE time resolution on the energy release. The data are given for the gain APD GC = 150. Run198, beam energy 1.5 GeV, U = 380 V.

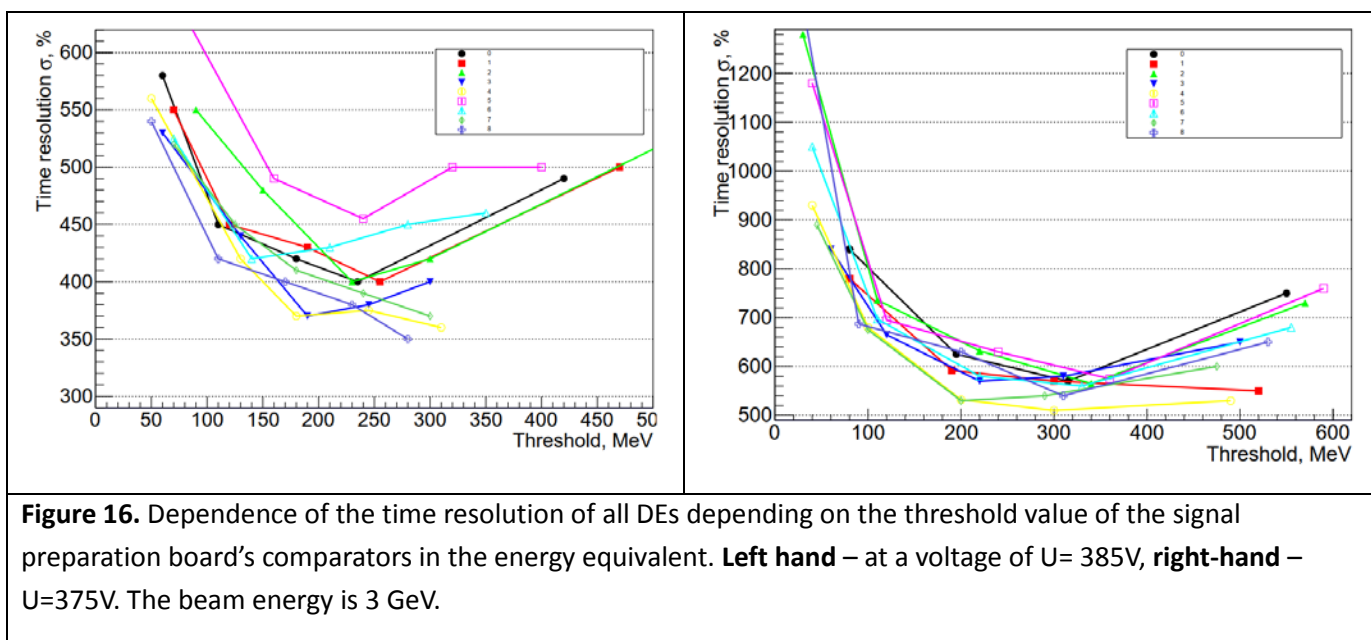
The time resolution strongly depends on the voltage (GC) on the APD. Table 3 presents the results of measurements of the time resolution σ_t for the central DE assembly of the APD 2017 at different APD gain factors.

Table 3. The time resolution at different GCs for the central DE. APD 2017 assembly

GC	σ_t , ps	Run
----	-----------------	-----

50(355 V)	850	32 (2 GeV energy)
100(375 V)	455	166 (1.5 GeV energy)
150(375 V)	407	201 (1.5 GeV energy)
200(385 V)	420	102 (1.5 GeV energy)

The time resolution also strongly depends on the threshold of the comparators in the signal preparation board. Figure 16 shows the dependence of the time resolution for each DE depending on the threshold for two voltages at an energy of 3 GeV.



The value of the time resolution at a 1 GeV energy release in the DE depends on the energy in the beam. The higher is the energy, the worse is the resolution. The reason for this phenomenon may be unclear and requires further research. In particular, the influence of signals from neighboring detectors is possible.

The time resolution for the DE from an APD of 5x5 at an energy release of 1 GeV turned out to be worse than 2 ns.

The time resolution of DE from SiPM turned out to be better than 300 ps for all DEs. The time resolution for the direct transmission of signals to the TQDC turned out to be $\sim 30\%$ worse.

No data on time measurements corrected for the trigger time resolution, which determined by the start counter and taken at a signal from the S3 photo-multiplier. The time resolution of the trigger is estimated as $\sigma_{TR} = 175$ ps.

4. Conclusion

In 2017[13], beam tests were carried out for four 3x3 assemblies of detection elements with various photodetectors — avalanche photodiodes and silicon photomultipliers manufactured by Hamamatsu, Japan. All measurements performed at a temperature of +17.5 C. The data presented in this report are preliminary and based on the results obtained on-line. However, the main preliminary conclusions that made on the test results are as follows:

1) Increase in the APD sensitive area by 4 times fully compensates for cooling to -25 C in terms of the signal-to-noise ratio; the energy resolution becomes even better by ~ 20% at low energies (see Fig. 13). Work with GC values over 200-250 is impractical due to the increased requirements for stabilization of the APD temperature and supply voltage. Energy resolution at GC = 300 degrades by ~ 10% (see Tab.3).

2) The time resolution at an energy release of 1 GeV from an APD can be definitely better than 500 ps when working in the range of GC values of over 100-150. The noted influence of the beam energy on the time resolution requires further research.

LITERATURE:

1. Wigmans R. Calorimetry. Energy Measurements in Particle Physics. Oxford: Claredon Press, 2008.
2. ALICE, Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC, The ALICE Collaboration, Int. J. Mod. Phys. A 29, 1430044 (2014), <https://doi.org/10.1142/S0217751X14300440>, Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC
3. D.V.Aleksandrov et al., Nucl. Instr. and Meth., A550(2005)169
4. Hans Muller et al. Nucl. Instr. and Meth., v567 2006 p.264-267
5. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/S8664-55.html>, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 518, Issues 1–2, 1 February 2004, Pages 622-625
6. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8664_series_kapd1012e.pdf
7. <http://linux.web.cern.ch/linux/centos.shtml>
8. <http://afi.jinr.ru/TQDC16VS-E>
9. <http://afi.jinr.ru/TQDC2>
10. http://afi.jinr.ru/TQDC16VS_Front_Panel
11. https://tdc.web.cern.ch/TDC/hptdc/docs/hptdc_manual_ver2.2.pdf
12. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/kintex-7.html>

13. Ипполитов М.С., Лебедев В.А., Манько В.И и др. Применение кремниевых фотоумножителей для улучшения временного разрешения электромагнитного калориметра из кристаллов вольфрамата свинца, Приборы и техника эксперимента .— 2017 .— №1 .— С. 35-41

Project continuation in 2019-2020

In 2013-2015 the work was carried out on selecting the photodetector for the modernization of the PHOS spectrometer for the purpose of obtaining the best time resolution. The next step should be the designing and manufacturing of the electronics, which should replace the existing PHOS electronics. Debugging and testing of new electronics will be conducted on a 256-channel prototype of PHOS, which is at CERN. After testing the 256-channel prototype on a beam of electrons, the final decision on the modernization of all spectrometer will be made. The modules of the PHOS electronics, which to be completely reworked, are described below.

1. Preamplifiers

The board at the crystal end with an avalanche photo diode APD and a charge-sensitive preamplifier is $2 \times 2 \text{ cm}^2$ in size. The new board will have to contain an avalanche photodiode, a silicon photomultiplier and a charge-sensitive preamplifier for the APD. When designing the new board, the main attention should be paid to the minimization of the interference of the SiPM fast signal with the circuits of the avalanche photo diode. Special attention should also be paid to the behavior of electronics at irradiating with a high power light pulse equivalent to the energy of electrons up to 200 GeV.

In another variant, the card can be used with two SiPMs without amplifiers. Two SiPMs are necessary to ensure good energy and time resolution at low energies, and acceptable linearity at high energies.

2. Interface card (T-card)

Signals from 16 preamplifiers are fed to the T-card which is an adapter between preamplifiers and a card of signal shaping and digitization (Reading Card). Via the T-card bias voltage is delivered to the photodetectors.

The T-card has to be redesigned to transfer the signals both to APD and SiPM.

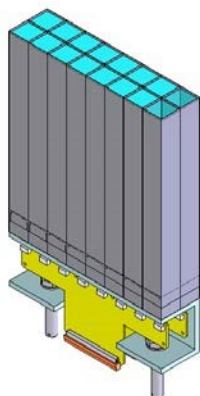


Figure 20. The figure shows an assembly of 16 crystals, the so called STRIP UNIT (SU). The signals from preamplifiers are fed to the T-card which is an adapter between preamplifiers and a card of amplifying, filtration and digitization of signals (FEC – Front End Card). Via the T-card bias voltage is delivered to the photodetectors. The T-card has redesigned to transfer the signals to APD and SiPM.

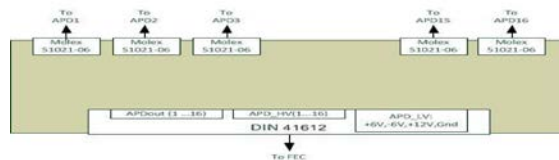


Figure 21. Block diagram of the future T -card

The main card of the PHOS measuring electronics (Front End Card).

Signals from two SUs via two T-cards fed to the FEC card.

Signals from two SUs via two Here, the signals from 32 channels divided into two channels with the gain difference of 16 times are filtered, amplified and digitized. That means that the digitizing covers 64 amplitude and 32 time signals.

The card homes shapers for the formation of spectrometric pulses, which digitized by ADCs with samples' frequency of 20 MHz.

The time-of-flight measured by the START-STOP using the HPTDC schemes. The START signal comes from the corresponding comparator output triggered by the photodetector. The STOP signal comes from the LHC beams synchronization pulses, or from the T0 detector involved in the ALICE experiment.

This card homes for the power supply of bias voltage for the APD and SiPM, circuits for adjustment of the comparator thresholds voltage, shapers of trigger signals generated by the PHOS for ALICE, a block of low-voltage power supply units, the unit measuring the output voltage of the power sources and their currents, the temperature measurement unit, the card controller (FPGA). The card controller also serves for communication with the ALICE data acquisition system.

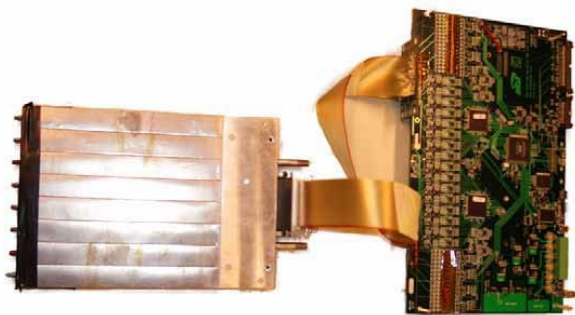


Figure 22. The Signals from two SUs via two T-cards fed to the FEC measuring electronics card.

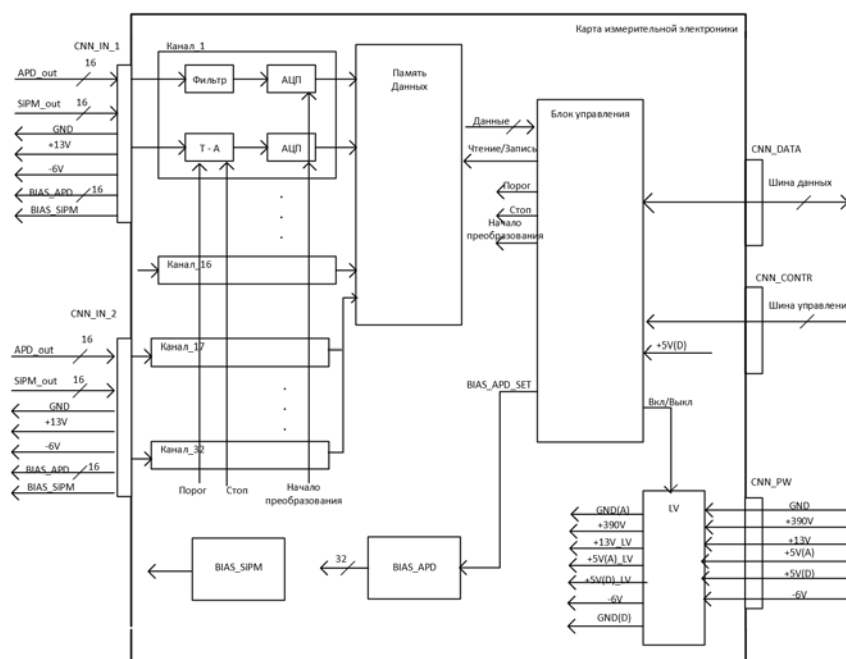


Figure 23. Block diagram of the future readout card.

Conclusion

The result of this project implementation will be the development and production a system for signal registration from the cells of the electromagnetic calorimeter of PHOS and electronics for processing these signals, which could replace the existing one. The new system has to provide high linearity of measurements of photon energy in the range from 0.005 to 200 GeV and time resolution at 1 GeV better than ≈ 300 ps. The system should be tested at the 256-channel prototype of PHOS using new electronics in all 256 channels. New electronics should be compatible with the existing design of the detector. Based on the obtained data the ALICE collaboration will be able to make the decision on the possibility of modernization of the entire PHOS spectrometer.

Table 5: The R&D budget for the modernization of the PHOS spectrometer in 2017-2018 (JINR+KI).

	Item	Number (units)	Price for peace (in US dollars)	Total price (in US dollars)
1.	Silicon PMT Hamamatsu	300	100	30.000
2.	Card with APD, SiPM and APD preamplifiers	300	50	15.000
3.	PHOS Readout cards for 32 channels (ADC, TDC)	10	6.000	60.000
4.	Interface T-cards for 32 channels	10	500	5.000
5.	Developing the design and manufacturing prototypes of registering electronics	1		20.000
6.	Stand for debugging the PHOS ALICE new electronic cards			20.000

Total: \$150.000

Experimental studies in 2018.

The main purpose of the tests was to study the properties of the new FEE_8 readout electronics and the upgraded charge-sensitive preamplifiers. The TQDC unit used in the 2017 run taken as a reference device.

A trigger system and information processing technique, similar to the 2017 run, used.

1. Description of the prototypes.

Prototype A was assembled from APDs HAMAMATSU S8664-1010 produced in 2016, which had a slight variation in the voltages necessary to obtain the gain of $M = 50$. The APDs in this prototype are preamps used in PHOS ALICE.

Prototype B assembled from APD HAMAMATSU S8664-1010 2017. For this prototype, new upgraded CSAs designed and manufactured specifically for S8664-1010. The preamplifier circuit upgraded and one of the supply voltage of the CSAs increased from 13 V to 15 V, which led to a twofold increase in the steepness of the APD current-voltage characteristic.

All these actions allowed us to reduce the front of the CSA output pulse from 50 ns to 30 ns, which is essential for time measurements.

Prototypes placed inside the thermostat [1-3]. The used cooling system made it possible to maintain the temperature inside the thermostat at +18 C with an accuracy better than ± 0.1 C during the whole experiment.

2. Description of the experiment.

The experiments carried out on the T9 secondary beam at the East Hall of the PS proton synchrotron at CERN. The maximum channel momentum was limited to 10 GeV/c, the minimum momentum was limited by the amount of matter in front of the experimental zone and was 0.5 GeV/c. The beam extracted to the channel 2-3 times during the supercycle of the source of charged particles. The duration of the beam output was 200 ms.

In the experiment, a thermostat with prototypes placed on a remote-controlled table. That allowed the movement of the thermostat in vertical and horizontal directions relative to the beam.

Trigger

The data acquisition system of the experiment triggered a survey of prototype detectors at a signal corresponding to the passage of an electron beam through a system of trigger counters. To generate a trigger signal (trigger), scintillation counters— S3, S4, S5, and a Cherenkov gas counter C used. Counter C allowed the identification of electrons in the beam in the pulse range under study. To generate the starting signal when measuring the time of flight, we used the counters S3 and S4. The base of the counter was made of a fast plastic scintillator measuring 2x2x2 cm, that was visible from opposite faces for S3 and S4 photomultipliers. The S5 counter measuring 4x4x1 cm used to suppress the background of random coincidences.

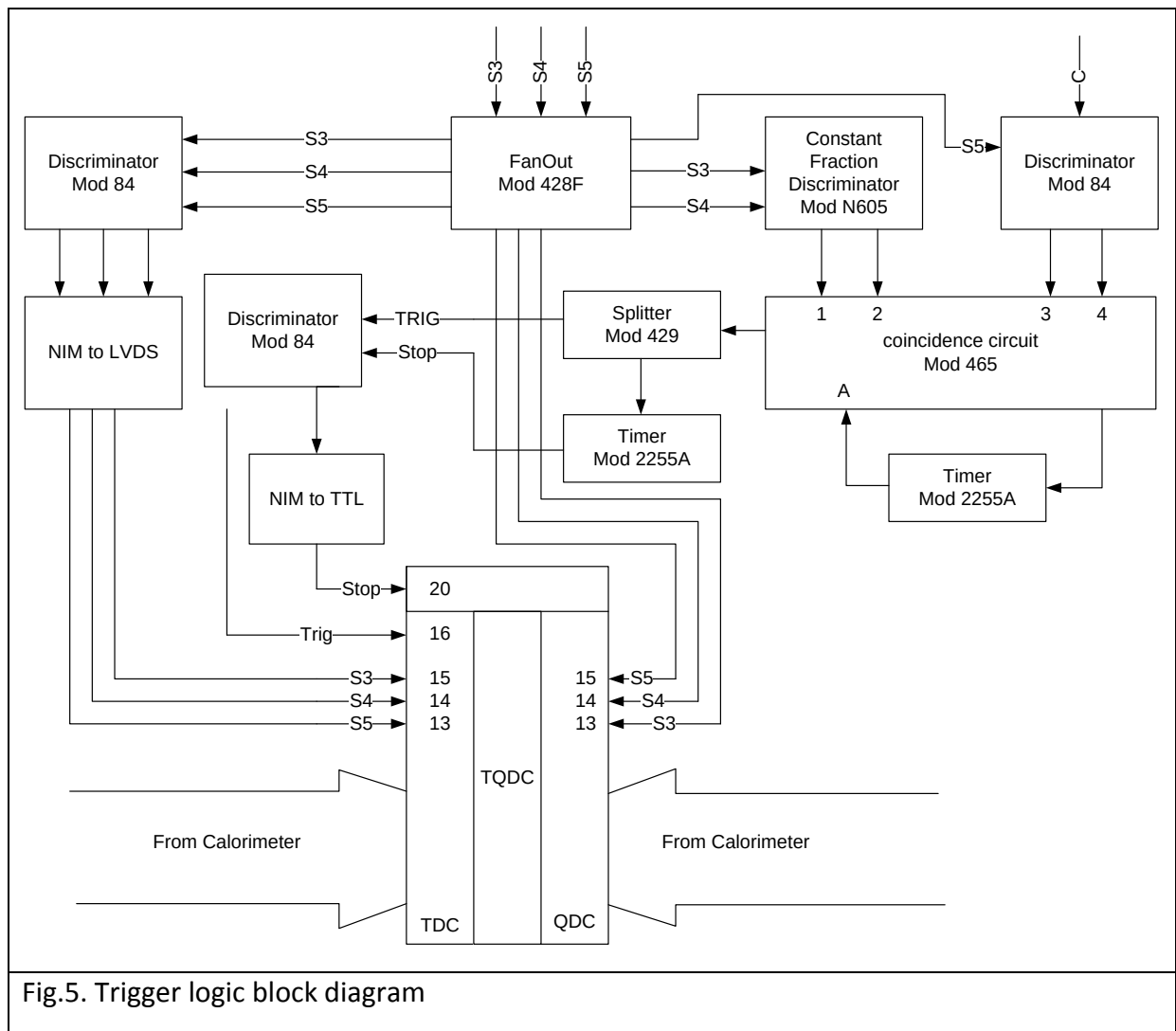
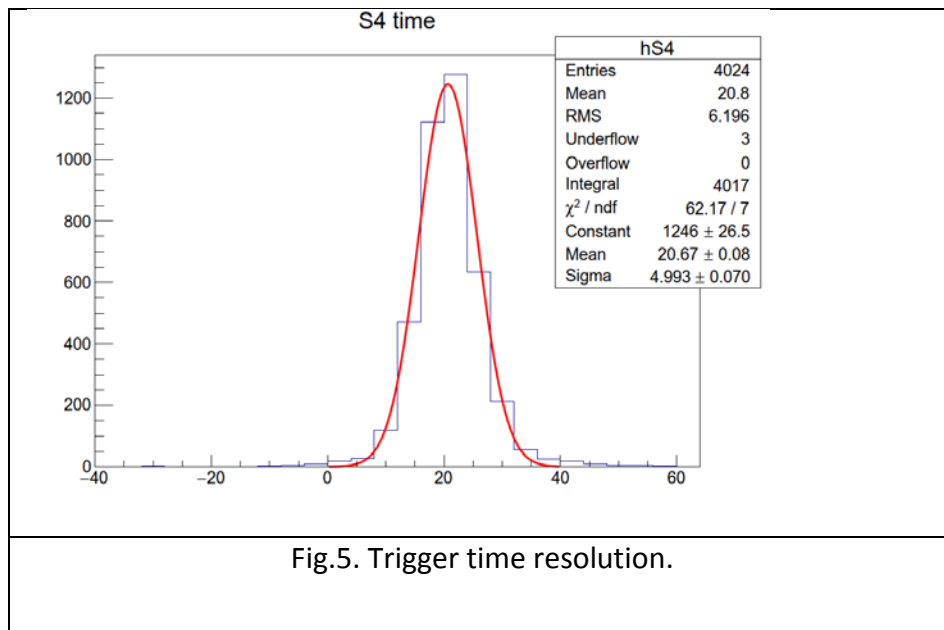


Fig.5. Trigger logic block diagram

Analog signals from the PMTs S3, S4, S5 and C fed to the inputs of the discriminators, after which the generated logical signals went to the input of the coincidence circuit. Delays in the signal arrival ensured the synchronization of the signal from the output of the coincidence circuit with the S3 signal. A signal generator with a tracking threshold used to generate signals from the PMTs S3 and S4. The trigger signal taken from the output of the coincidence circuit.

Figure 6 shows the histograms of the time difference for the photomultiplier S3 and S4, the dispersion of which determines the time resolution of the trigger. S3 is the time resolution of the trigger, measured with the TQDC and the own resolution of the S3 counter. The time resolution of the trigger was 125 ps, the counters own resolution - 60 ps.



Description of electronics

The main purpose of the tests was to study the properties of the new readout electronics - the FEE_8 unit. The TQDC unit, which tested in the 2017 run, used as the comparison electronics.

The FEE_8 unit developed and manufactured by the SRC KI and JINR jointly. The board provides simultaneous measurement of time and amplitude of the signal.

In the current PHOS electronics, the amplitude of the signal and its position in time calculated in the off-line mode. In FEE_8, the signal from the CSA split and used for both the amplitude analysis and the time of flight measurement.

The board has 8 independent inputs and provides measurement of amplitudes and arrival time of signals to each input relative to an external trigger. To convert the amplitude code, 12-bit ADC AD 9637 are used. The time channel uses HPTDCs [5], operating in a mode with a channel resolution of 100 ps. The board contains 8 shapers with two gain factors with a ratio of 9.7. Such a shaper-ADC chain makes it possible provide a dynamic range of measurements from 5 MeV to 200 GeV. The board generates the supply voltage of the preamps and the individual shift to the APD from the connected external voltage of 390 V. The board controlled by the FPGA of ALTERA Cyclone V 5CEBA7F23C8. The main functions of the FPGA: control of the thresholds of the time channel discriminators, high voltage generation, survey of ADC and TDC, the formation of events and data transfer to DAQ. The board is measuring the magnitude of the signal with a frequency of 40 MHz. 80 values of the signal amplitudes transmitted to the DAQ. The magnitude of the maximum signal amplitude is determined during the off-line analysis. The shape of the pulse from the board shown in Fig. 5a.

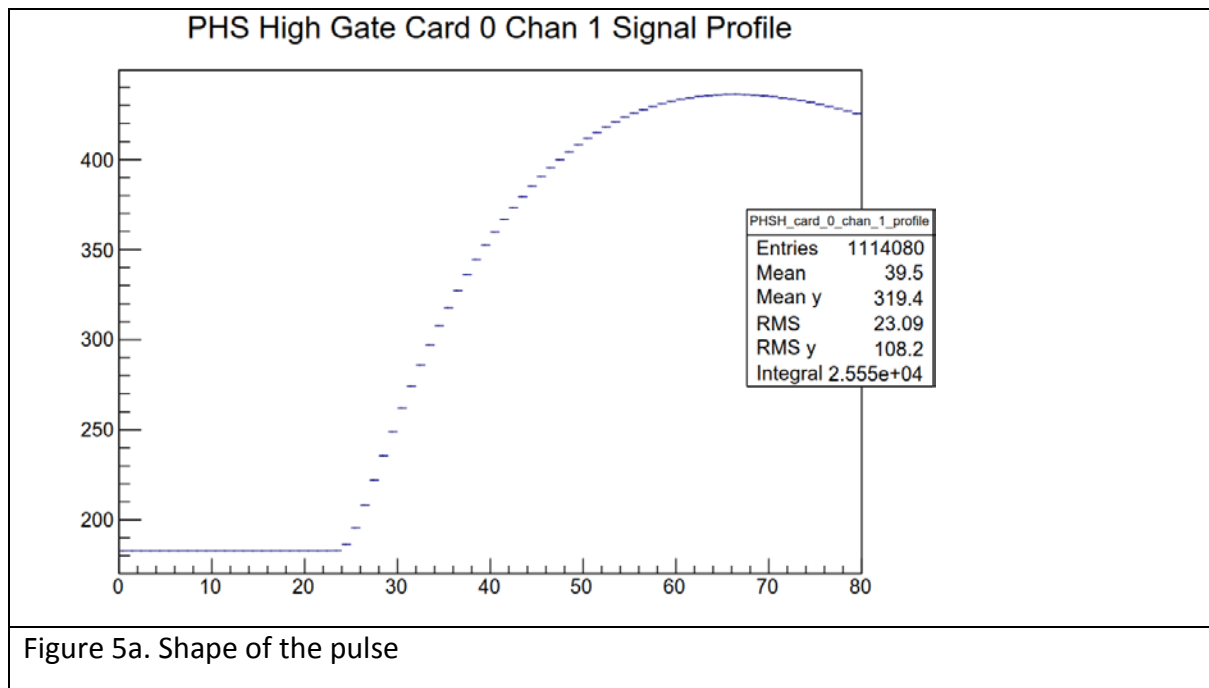


Figure 5a. Shape of the pulse

In total, two FEE_8 boards mounted in the thermostat compartment for electronics. A photo of the thermostat from the electronics side presented in Fig. 6.

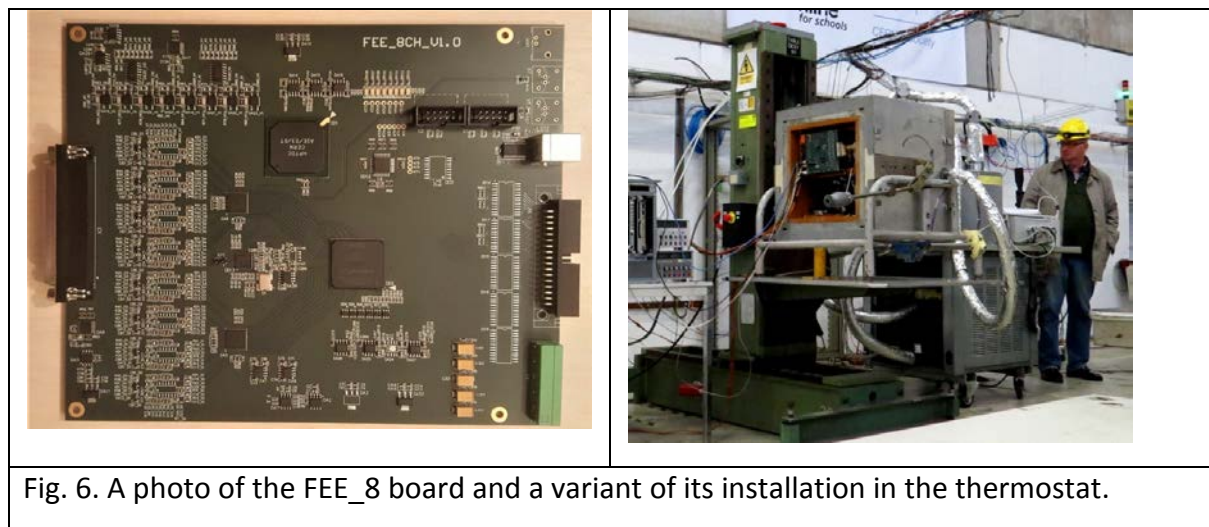
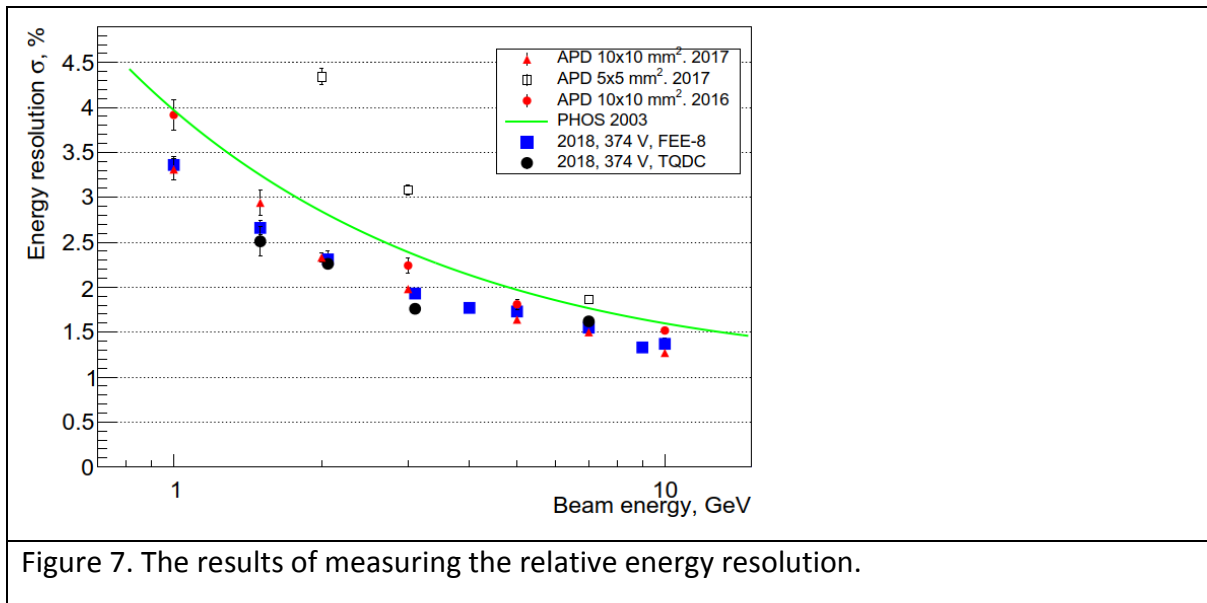


Fig. 6. A photo of the FEE_8 board and a variant of its installation in the thermostat.

Energy resolution.

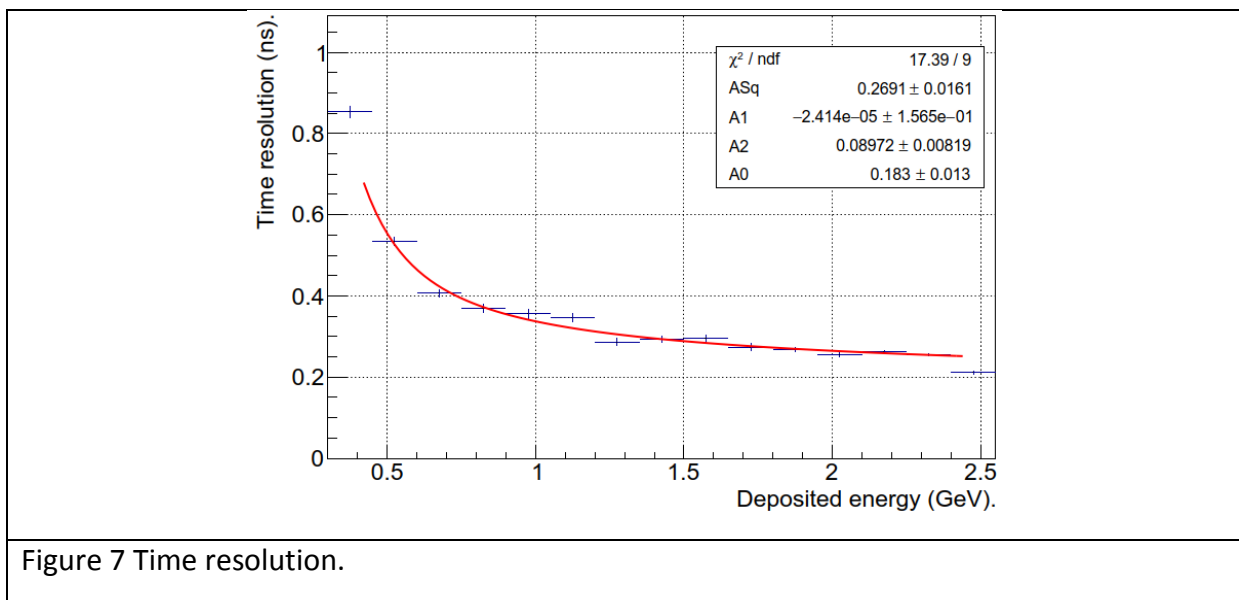
An electromagnetic shower occupies several detection elements in a transversely segmented calorimeter. An electron entering the center of the 3x3 assembly emits about 80% of the energy in the central DE. The remaining energy released in the remaining DEs of the assembly. The procedure used to measure the energy resolution of a 3x3 assembly, with account of the finite transverse dimensions of the beam and with the account of the energy leakage as result of the finite dimensions of the assembly, described in [4].

The dependence of the energy resolution on the energy or the curve of the relative energy resolution shown in Fig.7.



It can be seen that the replacement of the photo-detector with a sensitive area of 5x5 mm with photo-diodes of 10x10 mm allows improve the energy resolution (by 15-20% in the low-energy region) and switch to operating PHOS at room temperature. The latter greatly facilitates the PHOS operation and maintenance.

Time resolution.



Note also that the energy resolution of the prototypes, measured with different electronics options - FEE_8 and TQDC, turned out to be the same within the statistical errors. A similar result was obtained for energy resolution at GC = 50 and GC = 100.

Most of the measurements were carried out at a beam pulse of 2 GeV/c. At that pulse, measurements of the time resolution were carried out for two values of the gain coefficient GC = 50 and GC = 100, for different values of the shaper thresholds and other parameters (Tables 3–4).

Table 3. The time resolution at an energy release of 1 GeV with a beam pulse of 2 GeV/c for prototype B. Threshold (~ 70 MeV)

GC=50 (runs)	GC=100 (runs)
525(601,Nc=611)	444(590-595,Nc=5492)

Table 4. The time resolution at an energy release of 1 GeV with a beam pulse of 2 GeV/c for prototype B. GC = 100

500(70 MeV)	700(120 MeV)	1000(190 MeV)
444(590-595,Nc=5492)	349(597,Nc=902)	316(602-603,Nc=626)

On the TQDC electronics, measurements of the time resolution of prototype A at GC = 100 were made. For an energy release of 1 GeV at a beam pulse, the time resolution was 500 ps with a discriminator threshold equivalent to 200 MeV.

Conclusions.

The results of the beam tests of the FEE_8 board show that the introduction of a parallel channel for measuring the time of flight allows obtaining the required values of the basic spectrometric characteristics of the PHOS electromagnetic calorimeter.

The use of APD HAMAMATSU S8664-1010 sized 10 x 10 mm allows to obtain at room temperature an energy resolution better than in the existing solution at -25C. This substantially simplifies the technical aspects of the spectrometer operation and maintenance.

Modification of the preamplifier allowed to obtain the required time resolution with the GC = 100

In the framework of the 2017 run, technical requirements developed for the pre-production sample of the measuring electronics board of the ALICE photon spectrometer PHOS.

Project continuation in 2019-2020

In the studies conducted in 2017 and 2018, results obtained that determined the type of photo-recording element and the characteristics of recording electronics.

The FEE_8 board studied in the 2018 run satisfies all the requirements for the PHOS electromagnetic calorimeter electronics, providing a dynamic range of energy measurements for gamma quanta from 5 MeV to 200 GeV with high energy and time resolutions values. The results of laboratory and beam tests allow us to begin work on the development of a pre-production sample of a 32-channel board. This achieved by scaling the tested 8-channel board and adding an interface for the interaction with DAQ adopted in the ALICE experiment. After testing, this sample submitted to the collaboration for consideration.

The **Terms of Reference** for designing the FEC PHOS ALICE given in Appendix 1.

Implementation of this project phase in 2019 - 2020 requires financial support 30 KUSD/year.

REFERENCES:

1. D. V. Aleksandrov, A. A. Vinogradov, M. S. Ippolitov et al., "Improving the Timing Resolution of an Electromagnetic Calorimeter Based on Lead Tungstate Crystals", Instruments and Experimental Techniques, 2014, Vol. 57, No. 3, pp. 233–247. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014
D. V. Alexandrov, A.A. Vinogradov, M.S. Ippolitov et al., Improving the time resolution of the electromagnetic calorimeter on the basis of lead tungstate crystals, Instruments and Experimental Techniques. - 2014. - **No. 3.** - pp.5-20
2. M.S. Ippolitov, V.A. Lebedev, V.I. Manko et al., "Application of silicon photomultipliers to improve the time resolution of an electromagnetic calorimeter of lead tungstate crystals," Instruments and Experimental Techniques, 2015 (accepted for publication).
3. Ипполитов М.С., Лебедев В.А., Манько В.И и др. ПРИМЕНЕНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА ИЗ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА // Приборы и техника эксперимента .— 2017 .— №1 .— С. 35-41
4. Ипполитов М.С., Лебедев В.А., Манько В.И и др. Применение кремниевых фотоумножителей для улучшения временного разрешения электромагнитного калориметра из кристаллов вольфрамата свинца, Приборы и техника эксперимента .— 2017 .— №1 .— С. 35-41 .
5. https://tdc.web.cern.ch/TDC/hptdc/docs/hptdc_manual_ver2.2.pdf

PRESENTATIONS

1. M. S. Ippolitov et al., "Time resolution improvement of an electromagnetic calorimeter based on lead tungstate crystals", International Conference on New Photo-Detectors (PD15), Moscow, Russia, 6 - 9 July, 2015.

Appendix 1

Terms of Reference for designing the measuring electronics board for the ALICE PHOS photon spectrometer

Project Justification

Boards of the PHOS measuring electronics should be upgraded for the following reasons:

- increase of the dynamic energy range up to 200 GeV;
- increase in the counting rate in the measuring channels;
- the need to measure the time of flight more precisely;
- aging element base.

The increase in the counting rate and the expansion of the dynamic range will allow to take full advantage of the PHOS high granularity and to perform a number of measurements, such as measuring the spectra of identified neutral pions, eta- and omega- mesons and direct photons with transverse pulses larger than 50-100 GeV, as well as to study the correlations of those particles. Therefore, it proposed for 2019 - 2020 to design a prototype of the PHOS board of readout electronics.

The purpose of the project is to improve the measurement characteristics of the existing electronics of the PHOS detector in the context of increasing luminosity of the LHC and increasing maximum energy of the registered photons:

- improvement of the measurement characteristics of the PHOS detector device is achieved by expanding the dynamic range of the measured energies and improving the accuracy in measuring the time of flight;
- increasing the speed of measuring electronics is achieved by reducing the time of measurement and data reading;
- use of the new element base. The existing measuring electronics of the PHOS developed in 2004 using a specialized chip ALTRO, which no longer produced, like most of the components used in the manufacture of these boards.

The result of the project will be the development of design documentation for the production of the measuring electronics board for the ALICE PHOS photon spectrometer.

General requirements to designing

The developed measuring electronics board should replace the existing one without changing the main connecting wires, loops, data reading and control interfaces. It is necessary to use the existing power sources. The block diagram of the board shown in Fig.1

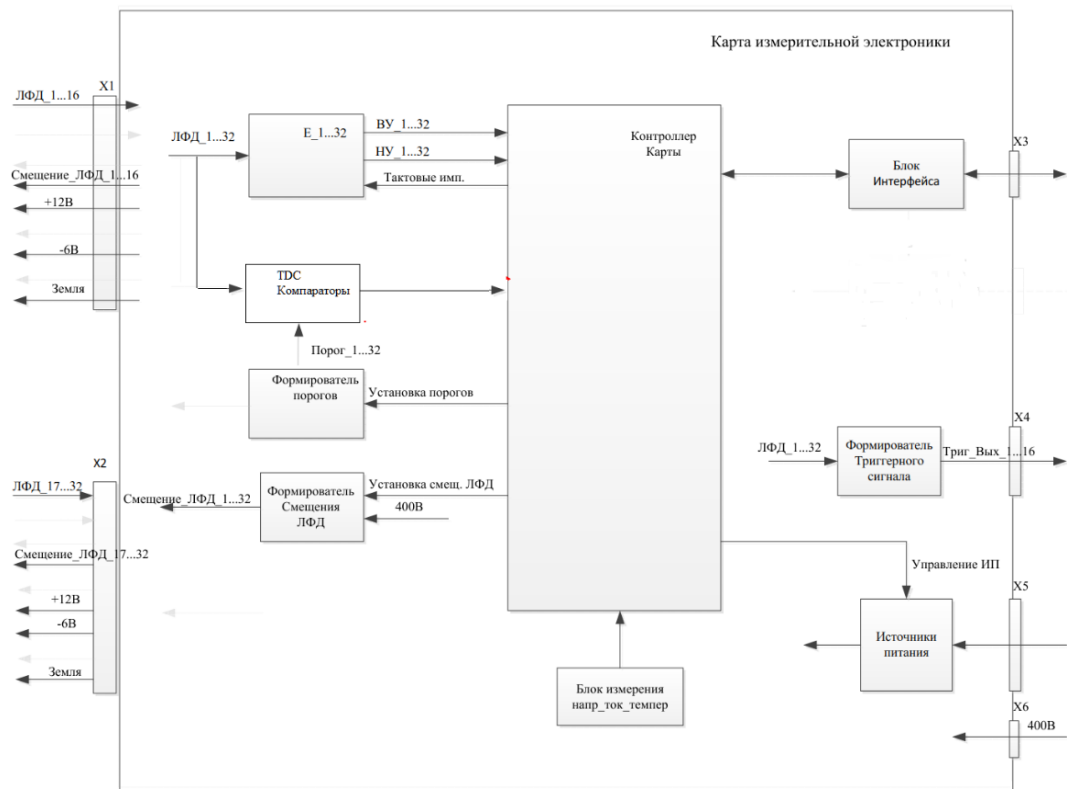


Fig.1. Block diagram of a measuring electronics board

Requirements for measurement characteristics

Energy measurement channel

The particle energy is proportional to the signal amplitude at the output of the charge-sensitive preamplifier (CSA). Signal parameters:

- The amplitude is 35 mV for a 1 GeV particle.
- The shape of the signal - the rise time of 30–40 ns (depending on the place where the particle hits the crystal), the decay time constant is 100 μ s.

The dynamic range of the measured energies can be estimated given that 80% of the energy of the registered particle remains in the crystal. Then, at a maximum energy of 200 GeV, 160 GeV remains in the crystal, and the dynamic range is $160 \text{ GeV} / 4 \text{ MeV} = 40,000$, which requires a 16-bit ADC. It is also necessary to take into account that the registration of particles up to 10 GeV is of the highest probability. To reduce the ADC digit capacity, the measurement range divided into two sub-ranges, which distinguished by amplification — high gain (HG) and low gain (LG). It proposed to use a 14-bit ADC and, given that the effective bit depth will be about 12 bits, you can get the range of energies; the one measured in the HG channel will be from 5 MeV to 20 GeV, and in the LG channel - from 40 MeV to 160 GeV.

Thus, there are 64 energy measurement channels on the board - 32 low gain channels and 32 high gain channels. Each channel contains a filter, a buffer amplifier and an ADC. The output of the CSA passes through a filter, which increases the signal-to-noise ratio and determines the shape of the pulse. The filter schemes of the existing board shown in Fig. 2, and the output signal shape shown in fig. 3

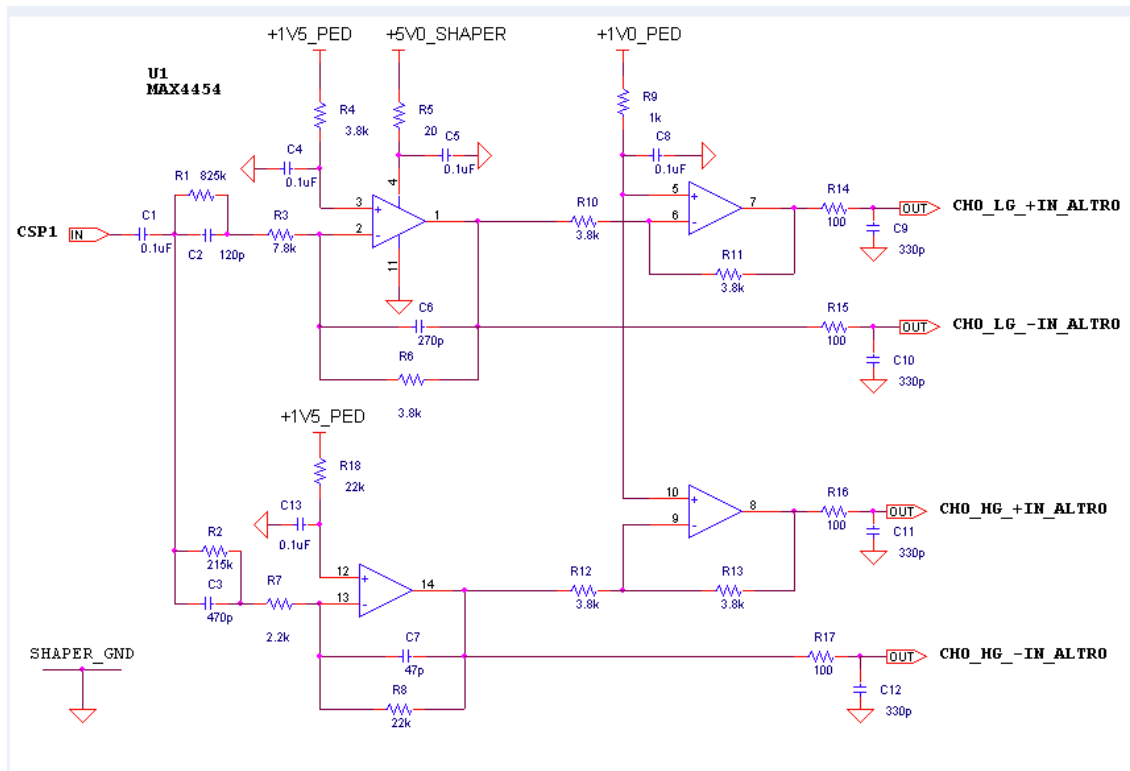


Fig. 2. First order filter with a time constant of 1 μ s.

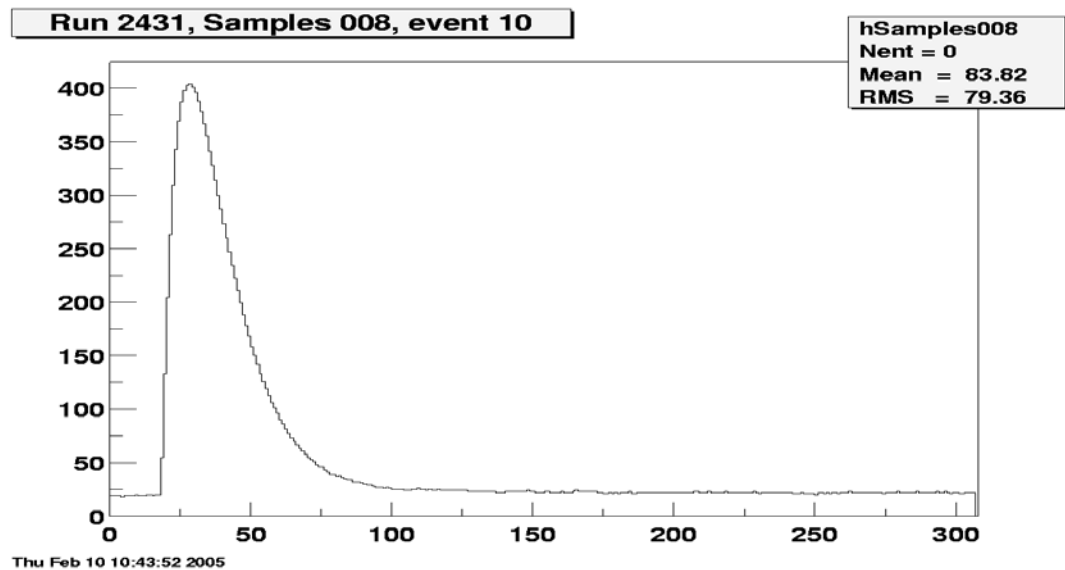


Fig. 3. The pulse shape at the output of the filter.

The filter is made on MAX4454 (4 Operational amplifiers in one case). The two upper Operational amps are the filter in the LG channel; the two lower ones are the filter in the HG channel. Actually the filters in this scheme are the two left-hand Operational amplifier, which are a first-order filter with a time differentiation and integration constant of 1 μ s. The two right-hand Operational amps match the filter outputs with the differential inputs of the ADC with constant levels of 0.5 and 1.5 volts.

It is proposed to use a fast analog-to-digital converter, which performs continuous conversion of input signals with a frequency of 40 MHz as the ADC in the new board. Analysis of the fast ADC nomenclature shows that a chip with 8 ADCs in one package can become the preferred one. The data received to the output in a sequential form.

Pedestals must be set to 50 ± 10 ADC counts. Without connected CSAs the Sigma of

pedestals' noise should be no more than 0.5 ADC count.

Time-of-flight measurement channel

The time of flight measured by the START-STOP method using a time-to-digital conversion chip (TDC). The START signal comes from the corresponding comparator output. The STOP signal comes from the synchronization pulses of the LHC beams.

The time-of-flight for various particles ranges from 15 to 17 ns. The measurement error for particles with an energy of 1-2 GeV should not exceed 0.5 ns.

The maximum step of the time scale channel is 0.1 ns.

It is proposed to use a PicoTDC chip for measuring the time-of- flight.

Time scale step — 3 ps or 12 ps;

- number of channels - 32 or 64 channels;
- power consumption in the measurement of 32 channels with an accuracy of 12 ps - ~ 0.3 watts.

Threshold adjustment block

The block must generate 32 threshold voltages, the value of which is given by the codes stored in the BC. Main characteristics:

- threshold voltage adjustment range - from 0 mV to 30 mV at minimum;
- The minimum step of voltage threshold change is 1 mV.

Bias voltage adjustment block of an avalanche photodiode

The parameters of a generator of individual bias voltages for APD should satisfy the following requirements:

- adjustment of bias voltage in the range of 200-400 V;
- the minimum adjustment step of 0.2 V;
- noises and pulsations at the output of the shaper - no more than 25 mV;
- temperature instability of the output voltage - not more than 0.1%/°C;
- execute control commands from the board controller (BC).

The insulation resistance between high-voltage and low-voltage circuits is at least 20 M Ω .

Trigger signal generation

The board to be developed should perform an analog summing-up of the output signals of four charge-sensitive preamplifiers (CSAs). The signal shape at the block output is quasi-Gaussian with a time of reaching the maximum of 50 ns. The block output is differential with constant levels of 0.5 V and 1 V. The maximum amplitude of the output signal is 1 V.

Data reading and control block

The data reading system based on the parallel reading of all FEE cards via an independent DTC channel. The receiving device is the SRU (Scalable Readout Unit). The SRU allows independent connection of up to 40 cards using RJ45 connectors. Trigger signals via the TTC protocol transmitted via an optical cable to the TTC link connector.

SRU and measuring cards controlled by the UDP network protocol by connecting the SRU to the local area network ALICE DCS. Communication in DAQ goes through one or two DDL channels (Detector Data Link), depending on the requirements to the data reception speed. The following detector segmentation is used for the PHOS spectrometer: 8 branches, reading 14 measuring cards and 1 trigger card each. Thus, one PHOS module is read by 4 SRUs, and there will be 30 DTC input channels per one SRU: 28 measuring cards and 2 trigger cards.

Voltage, current and temperature measurement unit

The unit designed to measure the output voltages and currents of power sources located on the card. Card temperature measured at 2 - 3 points.

The card's power sources should turn off when the permissible current or temperature exceeded.

Low voltage power sources

The number of individual power sources - 5 sources with a maximum voltage of 8 V and one source with a maximum voltage of 15 V.

The maximum power consumption for one measuring channel is no more than 200 mW.

CSA power sources + 13V and -6V are located on the card.

FPGA core functionality

- control and reading of data from an ICP chip;
- control of thresholds on discriminators in front of an ICP chip;
- control and reading of data from an ADC chip;
- power and temperature monitoring, power control;
- bias levels setting on the APD;
- the ability to analyze data from the ADC to reduce the amount of transmitted data:
 - finding the peak signal (energy);
 - checking the monotony of the leading and trailing edges, with an indication of the check results in the data
- DTC interface:
 - synchronization (40 MHz) and receiving of triggers (80 MHz);
 - fast and slow commands;
 - data transfer;
- Trigger processing:
 - L0 - data collection, event formation;
 - L1 - sending out an event.

Connectors

- 2 output connectors -- 3M N3372-6202R
- Power connector – PHOENIX CONTACT 1776566 (MSTB 2.5/8-GF-5.08-1776566)
- RJ45
- JTAG
- Summary signal output – FTSH-108-01-L-D-RA

Dimensions

210x353 mm²

Compatibility Requirements

The measuring electronics to be developed should be compatible with

- with the slow control systems (DCS) of the ALICE experiment;
- ALICE trigger system;
- PHOS low-voltage and high-voltage power systems.

Reliability requirements

The uptime of the PHOS electronics is 10 years in the experimental conditions with the increased luminosity of the LHC.

Design requirements

The mechanical design of the boards, on which the new PHOS electronics placed, should repeat the mechanical design of analogous boards of the existing PHOS electronics.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ
СИСТЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
КАЛОРИМЕТРА PHOS ALICE
(Участие ОИЯИ)**

**Отчет о выполнении проекта в 2017-2018 г. и предложение о
продлении проекта в 2019-2020 г.**

Для улучшения точности выделения прямых фотонов при низких энергиях рабочей температурой PHOS (1,2,4) была выбрана температура -25°C , при которой находятся детектирующие элементы. По сравнению с работой при комнатной температуре это позволило значительно улучшить соотношение сигнал/шум за счет снижения шумов лавинного фотодиода (ЛФД) и зарядочувствительного преусилителя (ЗЧП). Кроме того, при этой температуре по сравнению с комнатной световой выход кристаллов PWO увеличивается в 3 раза.

Работа при отрицательной температуре требует поддержания влажности в объеме спектрометра ниже точки росы. Для этого модули PHOS герметизируются, а их внутренний объем заполняется сухим азотом. Отметим, что герметизация объема спектрометра создает значительные затруднения для обслуживания электроники PHOS.

Использование низкошумящей электроники вместе с охлаждением обеспечивает энергетический эквивалент шума в 5-7 МэВ, что позволяет получить разрешение по инвариантной массе двух гамма квантов лучше $5 \text{ МэВ}/c^2$. Верхняя граница динамического диапазона PHOS составляет 100 ГэВ, что соответствует максимальной выделенной энергии в одном детектирующем элементе в 85 ГэВ. Верхняя граница динамического диапазона детектирующего элемента ограничена возможностью считывающей электроники.

В настоящее время обсуждается возможность модернизации PHOS с целью расширения динамического диапазона детектирующего элемента спектрометра с 85 ГэВ до 160 ГэВ и улучшения временного разрешения σ_t с 4-5 нс до 0.5 нс при выделенной энергии электромагнитного ливня в детектирующем элементе (энерговыведения) $\sim 1 \text{ ГэВ}$. Исследуются варианты решений, позволяющих эксплуатировать PHOS без ухудшения характеристик при комнатной температуре.

Измерения были проведены в октябре 2017 г. на тестовых пучках T9 (диапазон импульсов 1-10 ГэВ/с синхротрона PS).

1. Экспериментальные исследования.

Ниже приводится описание основных детекторов и систем эксперимента, к которым относятся:

- исследуемые детекторы (электромагнитные калориметры);
- система термостабилизации;
- триггер эксперимента;
- система сбора данных и блок TQDC;
- плата подготовки сигналов.

1.1. Описание калориметров и детектирующих элементов

Для измерений на пучке внутри прототипа на 256 каналов [3] были установлены 4 набора по 9 ДЭ. Каждый набор формировал массив (сборку) 3×3 , которая являлась по существу небольшим электромагнитным калориметром. Сборки ДЭ отличались фотодетекторами. Три сборки содержали лавинные фотодиода (ЛФД), один массив был собран с кремниевыми умножителями (SiPM). Отметим, что все использованные ЛФД имеют близкие напряжения питания для коэффициента усиления $M=50$, что позволяло питать ЛФД одним источником напряжения.

В сборке с ЛФД были применены ЗЧП действующего PHOS, изготовленные для ЛФД HAMAMATSU [5] типа S8664-55 площадью $5 \times 5 \text{ мм}^2$ или ЗЧП, переработанные под новые ЛФД. Все фотодетекторы впаивались в электронную плату размером $19 \times 19 \text{ мм}$, которая содержала или ЗЧП, или простую схему подачи питания и съема сигнала для SiPM.

Платы с фотодетекторами вклеивались в Al опорную рамку, одновременно служившую экраном для ЗЧП. Фотодетектор по плоскости поверхности приклеивался к торцу кристалла PWO.

Отметим, что для измерения временных характеристик ДЭ достаточно иметь один детектирующий элемент. Но для измерения энергетического разрешения прототипа необходима сборка в виде массива 3×3 из 9 элементов, поскольку энергия электромагнитного ливня выделяется в нескольких соседних кристаллах.

В первой сборке использовались детектирующие элементы с ЛФД HAMAMATSU типа S8664-1010 [6] площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ производства 2016 г. (см.рис.2) В качестве предусилителя использовались ЗЧП для S8664-55. Ввиду отличия геометрии контактов этого ЛФД от контактов от S8664-55, соединение с предусилителем осуществлялось при помощи простой промежуточной платы.

Для сборки, собранной в 2017 г., были также использованы ЛФД HAMAMATSU типа S8664-1010 площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ производства 2017 г. Для них был разработан и изготовлен ЗЧП с учетом новой геометрии ЛФД. Коэффициент передачи нового ЗЧП оказался примерно на 30% меньше по сравнению с ЗЧП для S8664-55, что можно объяснить появлением паразитных емкостей, вызванных новой топологией разводки.

В третьей сборке использовались ЛФД размером $5 \times 5 \text{ мм}^2$. Т.е. детектирующие элементы были полным аналогом действующего фотонного спектрометра.

В четвертой сборке в качестве фотодетектора использовались матрицы 2×2 , собранные в HAMAMATSU из кремниевых фотоумножителей MPPC S12572-015C. Эти SiPM, отобранные в состав матриц, имеют близкие напряжения питания, обладают площадью микроячейки $15 \times 15 \text{ мкм}^2$, чувствительной площадью $3 \times 3 \text{ мм}^2$. MPPC в матрице электрически соединялись параллельно. Общая площадь чувствительной области матрицы 2×2 составляла $6 \times 6 \text{ мм}^2$. Питание всех матриц из SiPM было общим.

Фотографии плат с фотодетекторами, вклеенных в опорную рамку приведены на рис. 2.

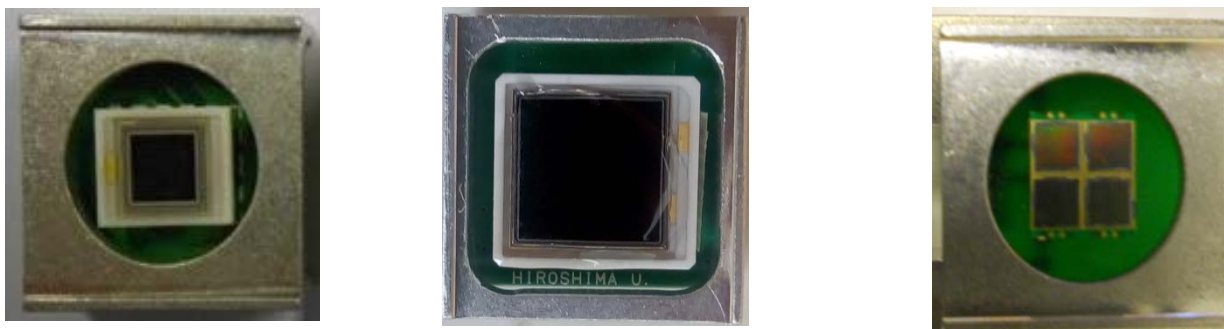


Рис. 2. Фотографии платы с ЗЧП с впаянными фотодетекторами, вклеенной в опорную рамку. ЗЧП, выполненный поверхностным монтажом, находится с противоположной от фотодетектора стороны. Размер рамки 22х22 мм². Вид со стороны фотодетекторов.

Слева - ЛФД и ЗЧП действующего RHOS. В центре – ЗЧП с ЛФД большого размера производства 2016 г.

Справа- фотография матрицы 2х2 из кремниевых умножителей.

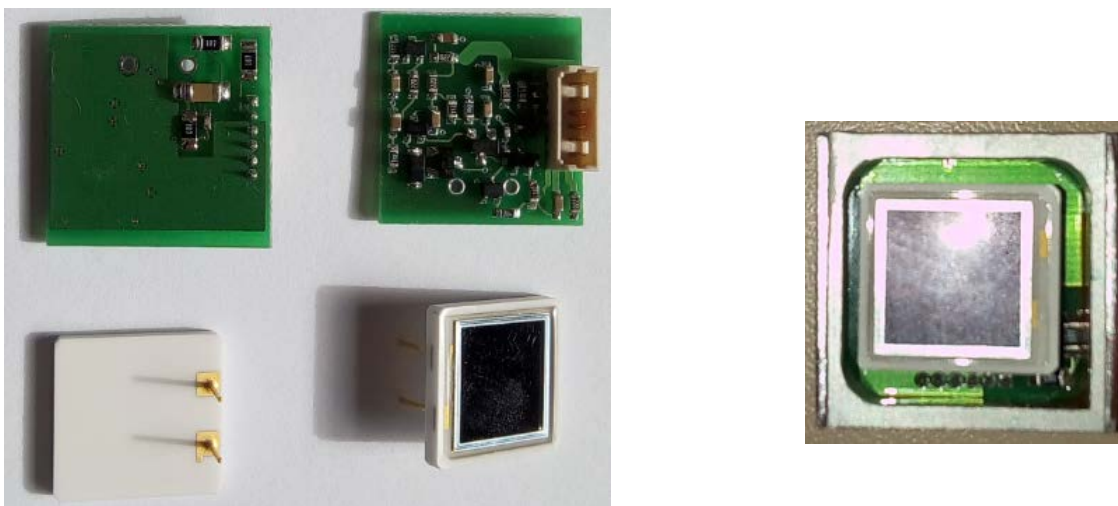


Рис. 3. Слева сверху – фотография изготовленного в 2017 г. ЗЧП для ЛФД 10х10 мм, слева внизу – фотография ЛФД HAMAMATSU S8664-1010 площадью 10х10 мм², справа – фотография платы с ЗЧП с впаянными фотодетекторами, вклеенной в опорную рамку

Механическое соединение кристалла и фотодетектора в детектирующем элементе обеспечивалось при помощи оптической субстанции Cargile Melt mountTM Quick StickTM производства Cargile Laboratories, США [Cargille] которая при T=+70 °C становилась жидкой. Субстанция, кристалл и фотодетектор нагревались до +70 °C, затем склеиваемые элементы соединялись вместе. При охлаждении до комнатной температуры субстанция затвердевала, образуя оптически прозрачное соединение с показателем преломления $n_d = 1.704$.

2.2. Система термостабилизации

Световой выход кристаллов PWO и коэффициент усиления ЛФД и SiPM имеют сильную температурную зависимость, что приводит к необходимости термостабилизировать сборки в пределах лучше $\pm 0.1^\circ\text{C}$. В нашем эксперименте это обеспечивалось прокачкой жидкости C6F14 через холодильную плиту прототипа на 256 каналов с периодическим ее охлаждением в компрессоре

холодильной машины. Это позволяло поддерживать температуру детектирующих элементов в широком диапазоне температур с точностью ± 0.1 °C. В качестве рабочей температуры была установлена температура +17.5 °C. Подробное описание системы охлаждения и термостабилизации приведено в [3]. Схема расположения датчиков и долговременная температурная стабильность показана на рис.4

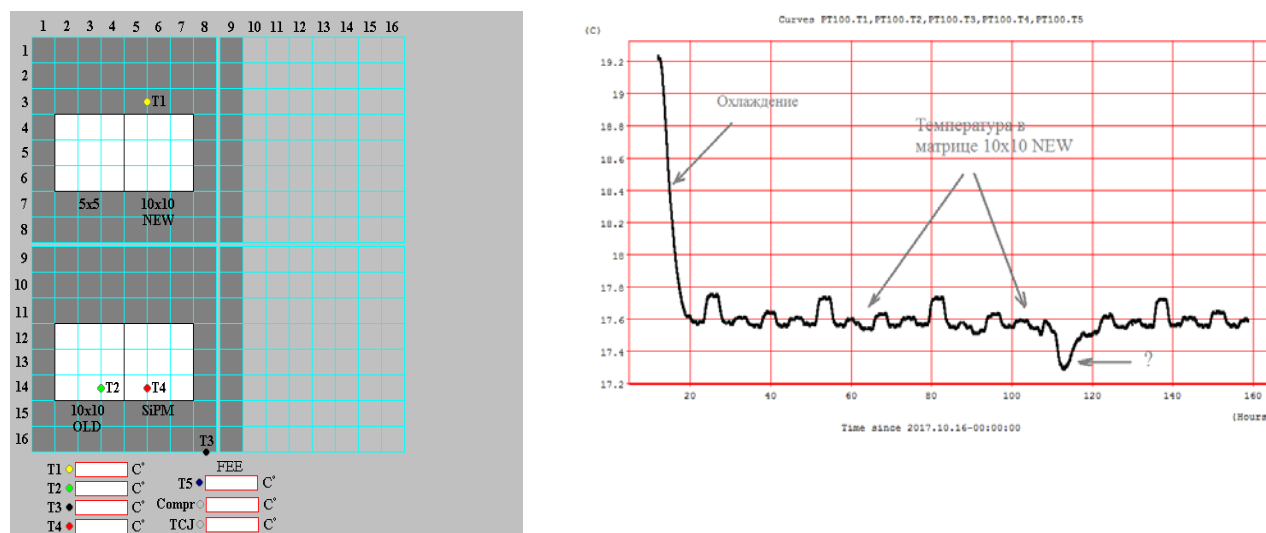


Рис 4. Слева – схема расположения температурных датчиков внутри прототипа 256. Один квадратик соответствует ДЭ. Белым фоном отмечены исследуемые наборы из ДЭ, которые облучались пучком частиц и с которых производился съем сигналов. 5x5 – массив 3x3 из фотодетекторов действующего PHOS; 10x10NEW – массив 3x3 с ЛФД 2017 г.; SiPM – массив 3x3 из матриц SiPM; 10x10OLD – массив 3x3 с ЛФД 2016 г.; T1 – T5 – места установки температурных датчиков внутри массива кристаллов. Справа – зависимость показаний датчика T1 от времени в течение 160 часов эксперимента. Виден процесс охлаждения до температуры 17.6 C, затем колебания температуры в коридоре ± 0.7 оC. Стрелка с знаком «?» соответствует отключению электроники в ходе перестановки на другой массив.

2.3. Триггер эксперимента

Триггер эксперимента служил для синхронизации обработки и записи информации с временем попадания электрона в детектор калориметра и образование электромагнитного ливня. Электроны образуются в основном в результате конверсии гамма-квантов в электрон-позитронную пару при распаде нейтрального пи-мезона, образующегося в результате ядерного взаимодействия первичного пучка протонов PS с импульсом 24 ГэВ/с с Al-W мишенью (т.н. мишень №1). Выбор импульса частицы осуществляется магнитным трактом пучка T9. Поскольку магнитная система позволяет проводить отбор частиц только по их импульсу и заряду, а в результате взаимодействия в мишени образуется множество и других заряженных частиц (p, заряженные пи-мезоны, каоны, мюоны и др.), необходимо синхронизация и не только с моментом попадания частицы в калориметр, необходим триггер на электрон. Для целей триггера перед калориметром были установлены два сцинтилляционных

счетчика и пороговый газовый счетчик черенкова длиной 4м. Изменение давление газа в счетчике позволяло получать сигнал от счетчика только от электронов при всех доступных на T9 импульсах. Сразу за черенковским счетчиком был установлен стартовый счетчик размером 2х2х3 см, который просматривался с двух торцов быстрыми фотоумножителями. Сразу за стартовым счетчиком расположен еще один счетчик, служивший только для подавления фона. Триггером эксперимента являлся сигнал совпадений S3хS4хCхS5. При этом задающим счетчиком являлся S3, сигналы от остальных счетчиков задерживались и приходили на схему совпадений позже.

2.4. Описание системы сбора данных и блока TQDC

Программы системы сбора данных (DAQ) реализованы в рамках линукс системы CentOS 7 [7] на главном компьютере (в нашем случае это phstand.cern.ch). Управление системой сбора данных осуществляет пользователь **user**.

Данный компьютер имеет две сетевые карты Ethernet со скоростью передачи данных в 1 Гбит/с, одна из которых используется для подключения компьютера к глобальной сети, вторая вместе с 1 Гбит/с коммутатором HP 1420 образует внутреннюю локальную сеть, к которой подключается блок карты электроники TQDC16VS [8]), который также имеет Ethernet интерфейс. Питание блока берется из крейта VME.

Прием данных осуществляется программой tqdc2, поставляемой фирмой-разработчиком [2]. Программа запускается на главном компьютере. Основная функция программы - считывание и запись информации с блока TQDC16VS, конфигурация блока, управление набором данных и обеспечение функций минимального контроля набираемых данных.

Изначально блок TQDC16VS-E [4] был разработан для измерения времени и заряда от быстрых временных детекторов, выдающих сигналы большой амплитуды в десятки и сотни мВ с короткими наносекундными фронтами – ФЭУ, SiPM и др. Для получения быстрых временных отметок в блоке установлены дискриминаторы, порог на которых может быть запрограммирован.

Для измерения времени в блоке используется 2 микросхемы HPTDC разработки ЦЕРН [11] каждая в режиме 25 пс, для оцифровки формы сигнала используются два 8-канальных 14-разрядных АЦП LTM9011-14 [12] с частотой оцифровки сигнала 125 МГц. Управление блоком осуществляется ПЛИС (FPGA) типа Kintex-7 производства Xilinx [13]. Сигналы на блок поступают через 50-Омные коаксиальные кабели через разъемы LEMO на передней панели. Сигналы могут быть биполярными, рабочий диапазон амплитуд входных сигналов ± 1 В.

Разработчиком блока TQDC16VS для работы с медленными сигналами, характерными для ДЭ PHOS, была проведена модернизация блока. Были отключены внутренние дискриминаторы, был организован отдельный вход для подачи временных сигналов, для чего передняя панель блока была расширена в 2 раза и на ней был установлен многоконтактный разъем для подачи уже подготовленных вне блока 16-ти LVDS-сигналов для временных измерений. Фотография блока приведена на рис.5.

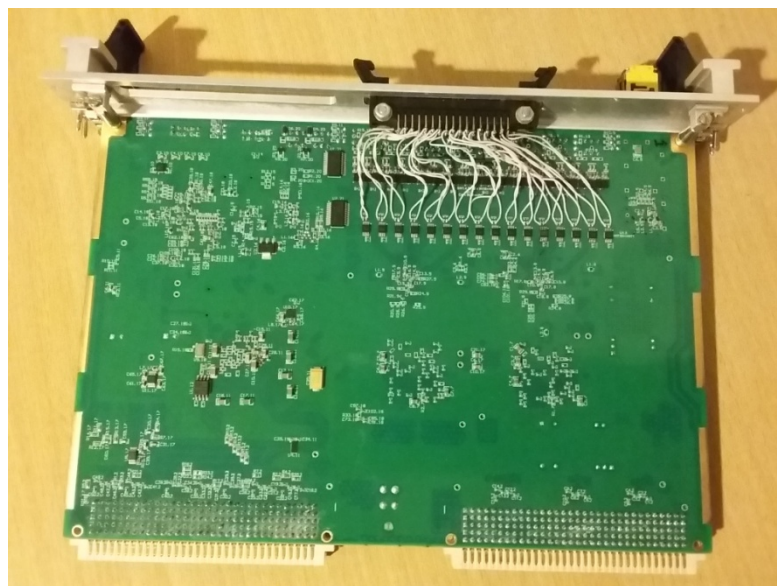
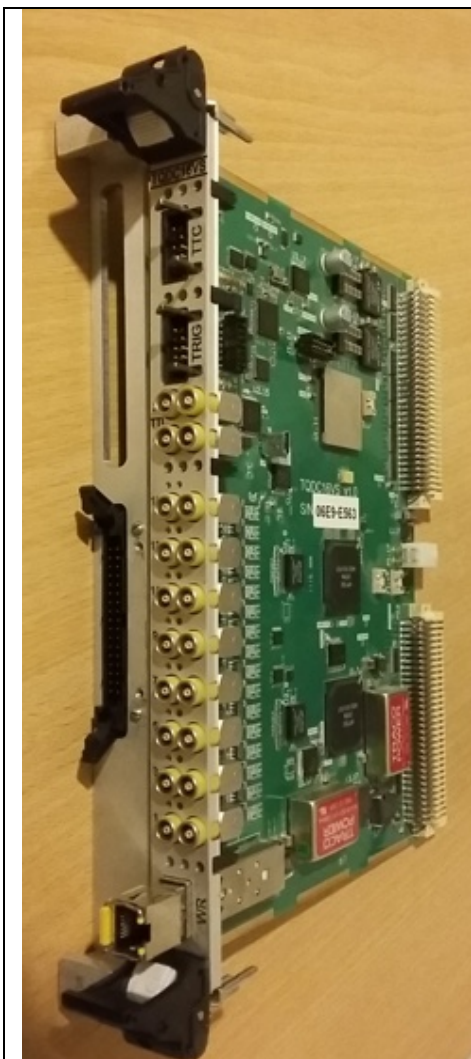


Рисунок 5. Фотографии модернизированного блока TQDC16VS.

Считывание блока синхронизовано с сигналом триггера, вырабатываемым системой триггерных счетчиков. Сигнал триггера подается на второй вход TTL блока TQDC16VS. Процедура синхронизации проведена согласно [11]. Ширина сигнала управляющих ворот выбиралась так, чтобы на форме сигнала оцифровывался несколько раз нулевой уровень сигнала и четко выделялся максимум сигнала. Оцифрованную форму сигнала можно увидеть на рис.6.

Т.о. сигналы с детекторов идут отдельно на 16 TDC входов (предварительно подготовленные LVDS сигналы) и 16 ADC входов (NIM сигналы с выхода внешних шейперов). В нашем случае мы имели 9 каналов в массивах 3x3, оставшиеся каналы использовались для записи времени и амплитуды от счетчиков триггера.

Программа tqdc2 записывает принятые данные в файл в директории /home/user/tqdc/data.

Для быстрой offline обработки написаны процедуры на языке C, использующие уже записанные на диск данные. Более тщательная обработка проводится отдельным пакетом программ, описание этого пакета будет приведено в отдельном отчете. Амплитуда и время определяются по максимуму и положению максимума записанной части импульса.

Изменение параметров DAQ простым редактированием конфигурационного файла и изменением параметров в окне программы tqdc2 (см. рис.6). Инструкция по работе с DAQ приведена в Приложении 1.

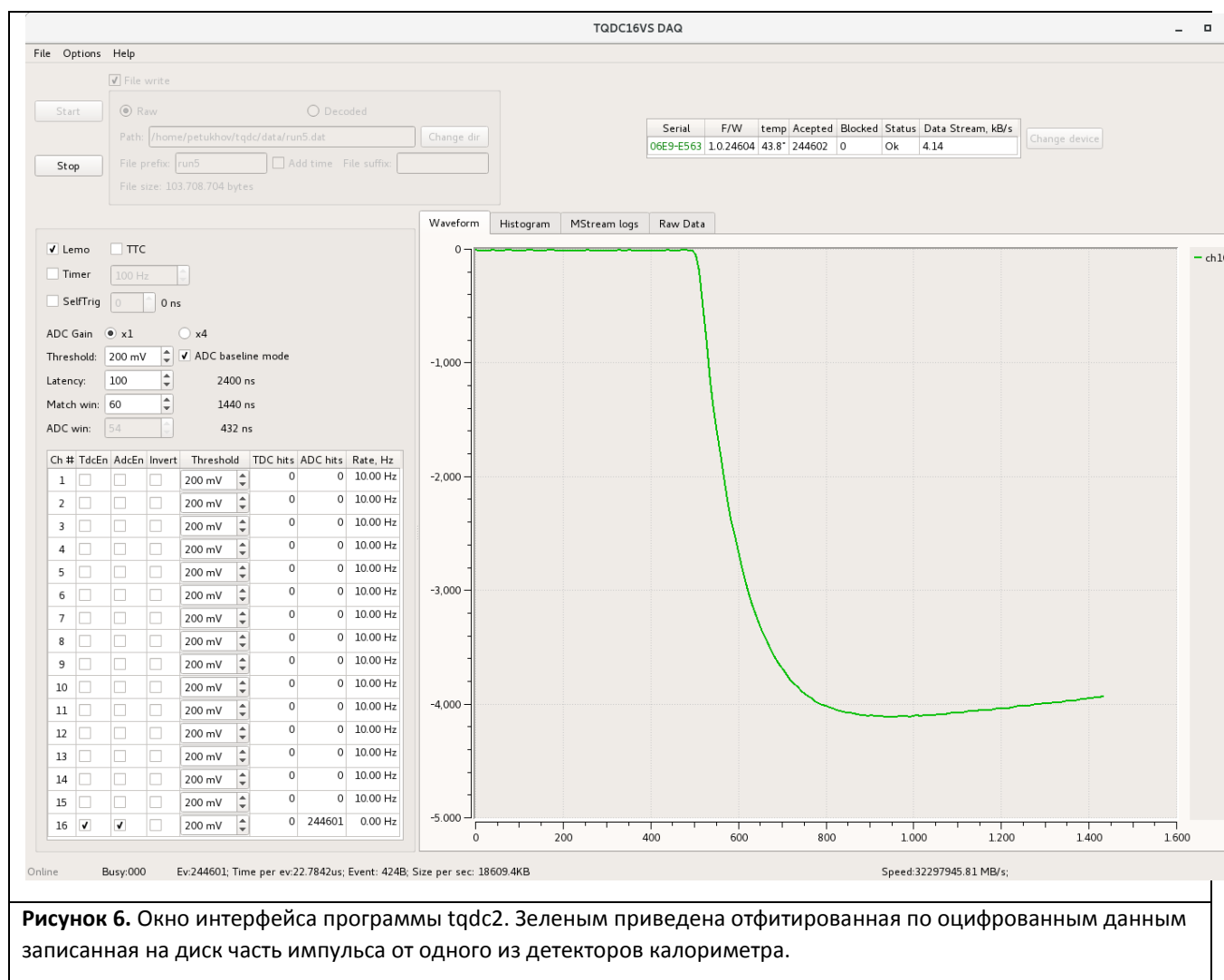


Рисунок 6. Окно интерфейса программы tqdc2. Зеленым приведена отфитированная по оцифрованным данным записанная на диск часть импульса от одного из детекторов калориметра.

2.5.Описание платы подготовки сигналов для временных и амплитудных измерений

Для подготовки сигналов для блока TQDC была разработана специальная плата (или плата подготовки сигналов- ППС), на которой сигнал с ЗЧП делился на две части – небольшая часть ответвлялась и шла на компараторы для временных измерений. Основная часть пропусклась через фильтр второго порядка, формировалась с временем формирования 1 мкс и шла на амплитудные измерения. Компараторы и шейпера сделаны в виде мезанинных плат (по 3 платы), каждая из которых могла подготавливать до 4 сигналов. Фотографии разводки ППС и самой ППС с установленными мезонинными платами шейперов и компараторов приведены на рис.7.

Принципиальная схема ППС приведена на рис.8. Принципиальные схемы и схемы разводки мезанинных плат шейперов и компараторов приведены на рис.9 и рис. 10, соответственно.

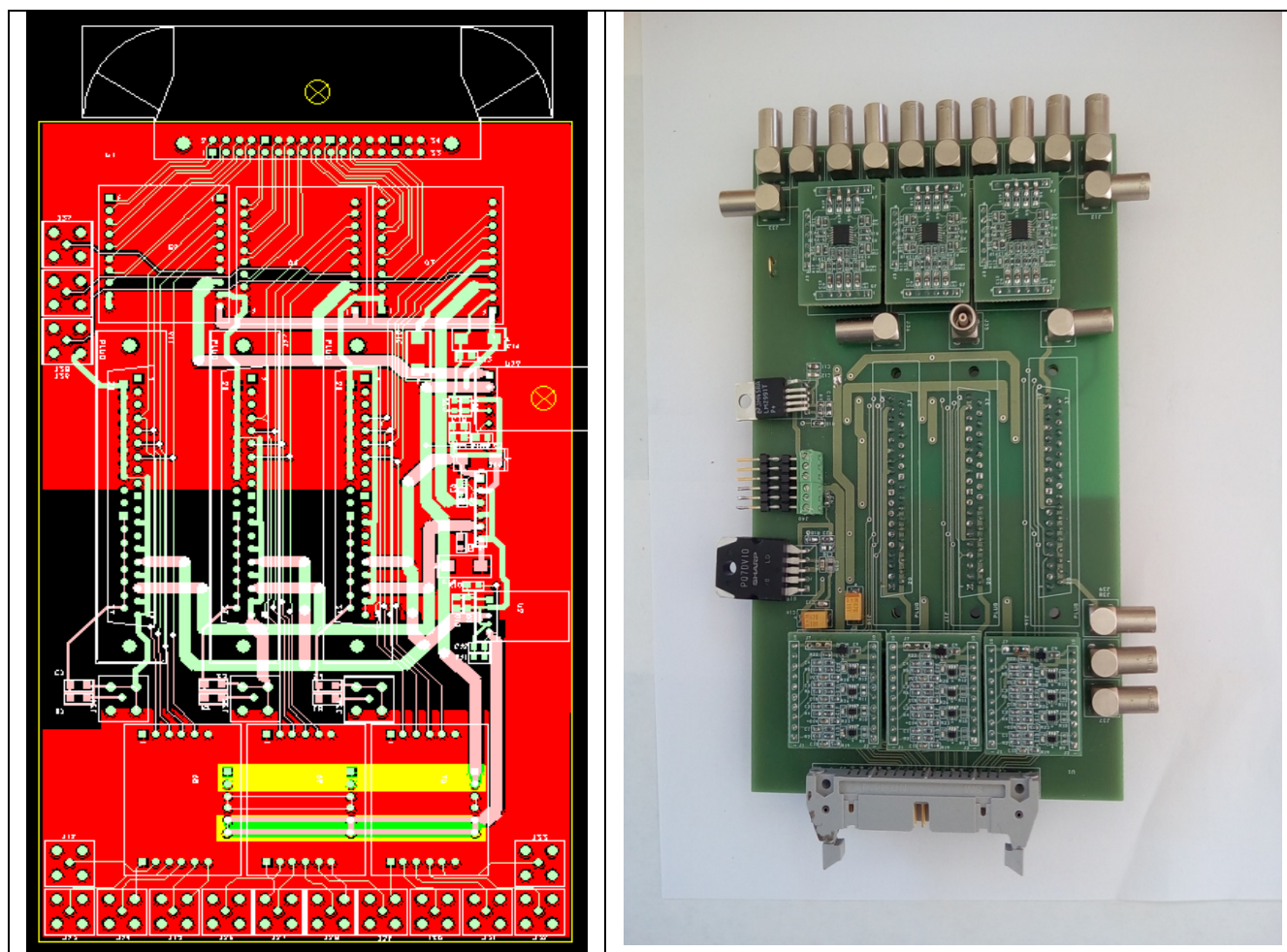


Рисунок 7. Слева – схема разводки ППС, справа – плата с установленными мезонинами шейперов (вверху) и компараторов (внизу).



Рисунок 8. Принципиальная схема платы подготовки сигналов (ППС)

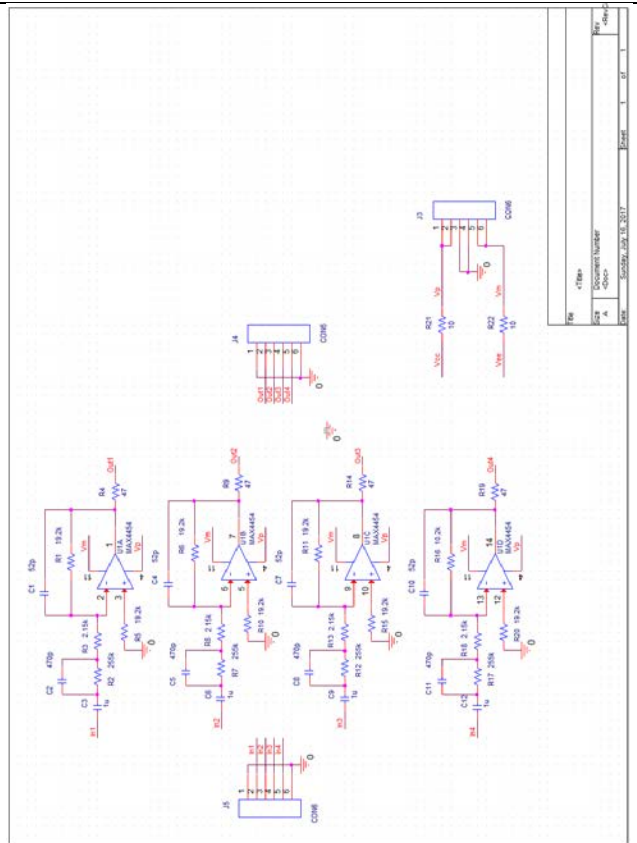
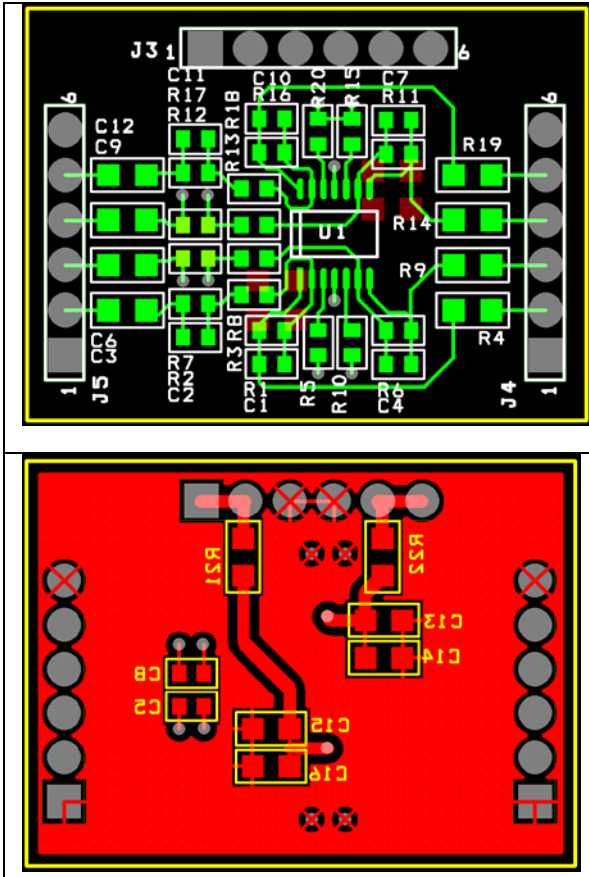
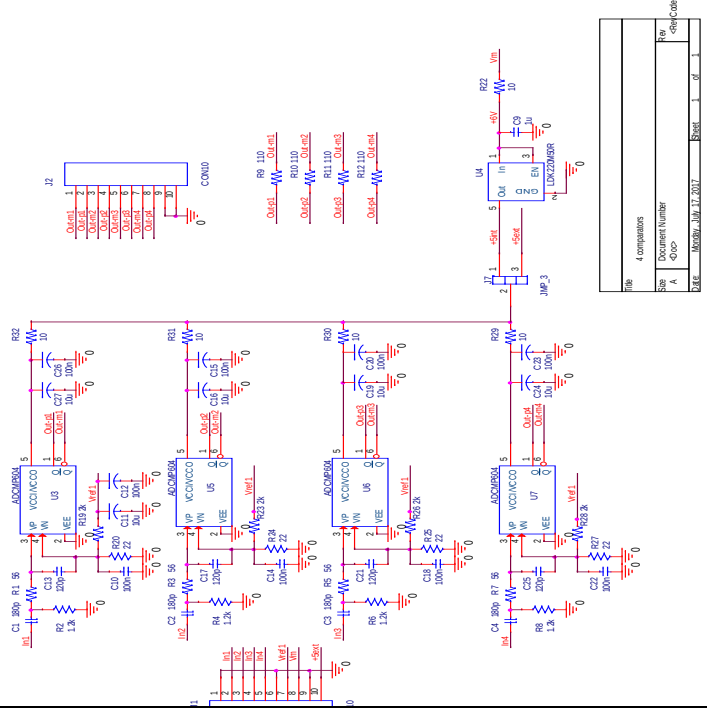
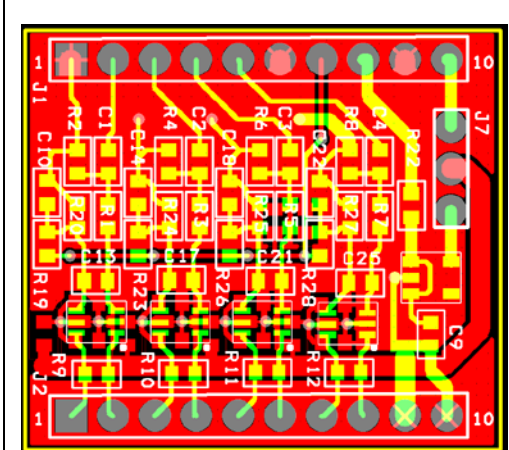


Рисунок 9. Мезанинная плата шейперов. Слева – схема разводки, справа – принципиальная схема.



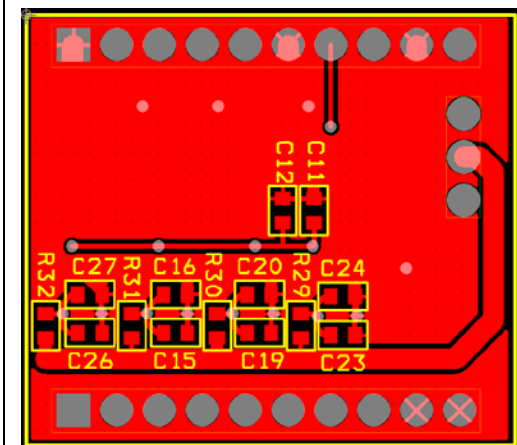


Рисунок 10. Мезанинная плата компараторов. Слева – схема разводки, справа – принципиальная схема.

Поскольку на ППС поступали сигналы от ЗЧП, то он располагался как можно ближе - на расстоянии 20 см от ЗЧП. Сигналы с выхода ППС по давались на вход TQDC, который находился на расстоянии 2 м от калориметра.

Разработка плат ППС, ЗЧП велась в ОИЯИ и НИЦ КИ, изготовление плат – ОИЯИ, модернизация и изготовление TQDC16-VS сделаны в AFI electronics, Дубна.

3. Экспериментальные результаты пучковых испытаний

Главной целью пучковых испытаний было определение энергетического и временного разрешений сборок 3х3 с ЛФД большой площади. Основной массив данных был набран для ЛФД закупленных в 2017 г. Для сборки из SiPM определялось только временное разрешение. При этом для сборок с лавинными фотодиодами применялась электроника описанная выше.

В сборке из кремниевых фотоумножителей применялась ранее разработанные шейперы, описание которых лежит вне рамок этого отчета.. Проведены измерения также при непосредственной подачи сигнала от SiPM на блок TQDC.

При измерениях прототип на 256 каналов с установленными внутри сборками помещался на дистанционно-управляемый стол с возможностью перемещения по горизонтальной и вертикальной осям. Стол использовался для юстировки сборок относительно пучка частиц. Фокус пучка находился на расстоянии 1 м после прототипа. Поперечные размеры счетчиков триггера и выбранное положение фокуса пучка позволяло в одном ране равномерно облучать электронами девять счетчиков находящихся под пучком сборки (облучение т.н. широким пучком).

Фотография оборудования, установленного на Т9, и схема эксперимента, приведены на рис.12.

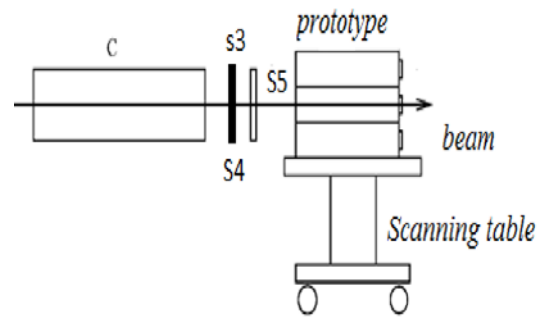


Рисунок 12. Слева – фотография эксперимента на пучке Т9. Справа – схема эксперимента.

Все сборки запитывались от высоковольтного источника питания Keithley-6487.

3.1. Энергетическое разрешение сборок

Импульсное разрешение частиц пучка определялось шириной зазора горизонтального коллиматора, которая равнялась 6 мм, что соответствовало $\Delta P/P=0.6\%$, где ΔP – полный разброс а P – среднее значение импульса пучка.

Энергетическое разрешение при энергии E определялось в результате следующей процедуры.

1) проводилась относительная калибровка всех ДЭ. Для этого определялось максимальная амплитуда в каждом ДЭ. По этой амплитуде определялись относительные коэффициенты усиления: $g_i=A_i/A_c$, где A_i – максимальная амплитуда i -го ДЭ, A_c – максимальная амплитуда центрального ДЭ.

2) проводился отбор центральных событий, отвечающих попаданию электрона в центр сборки (квадрат $14 \times 14 \text{ мм}^2$ относительно продольной оси центрального ДЭ) согласно процедуре описанной в [13]. Для каждого центрального события заполнялась гистограмма суммарного энерговыделения $E = \sum g_i A_i$, ($i=1, \dots, 9$), которая имела вид распределения гаусса с затянутым в стороны малых энергий хвостом, а максимум распределения должен соответствовать энергии E .

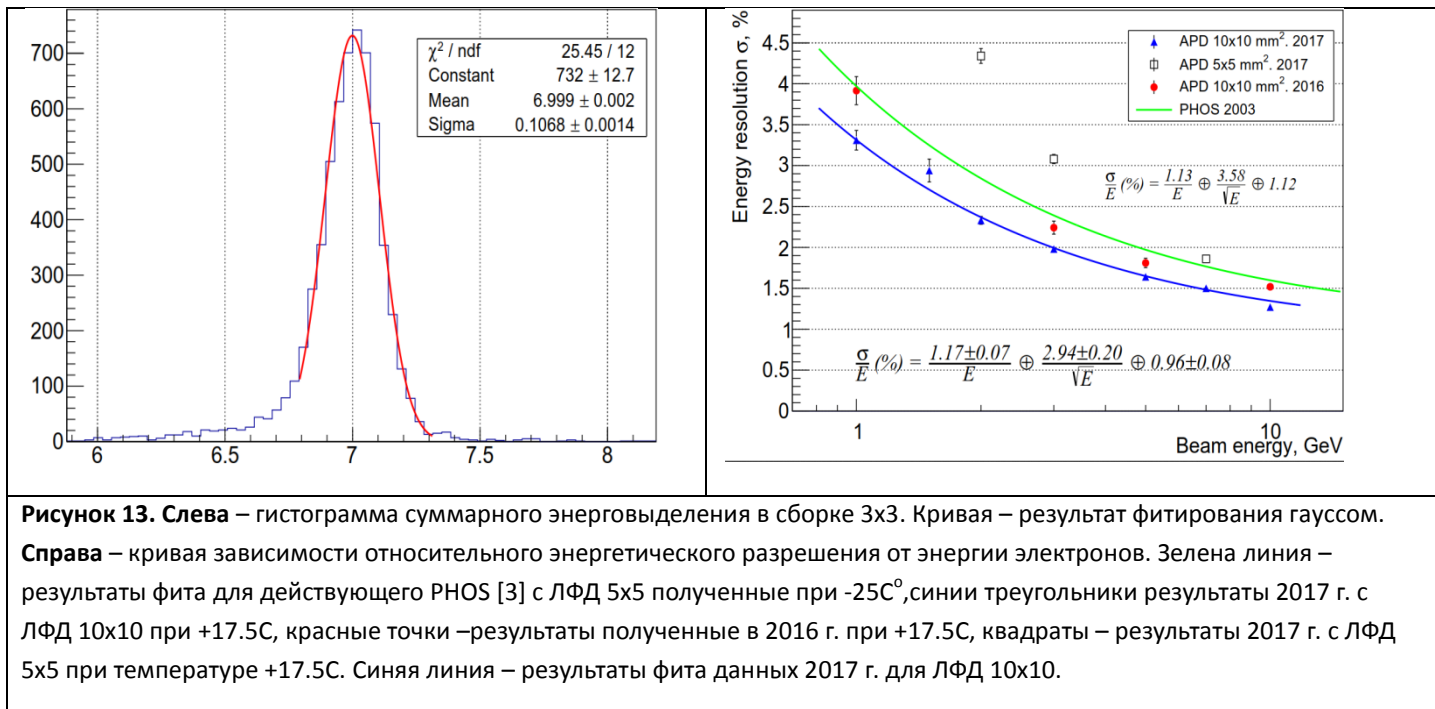


Рисунок 13. Слева – гистограмма суммарного энерговыделения в сборке 3х3. Кривая – результат фитирования гауссом. Справа – кривая зависимости относительного энергетического разрешения от энергии электронов. Зелена линия – результаты фита для действующего PHOS [3] с ЛФД 5х5 полученные при -25С°, синии треугольники результаты 2017 г. с ЛФД 10х10 при +17.5С, красные точки – результаты полученные в 2016 г. при +17.5С, квадраты – результаты 2017 г. с ЛФД 5х5 при температуре +17.5С. Синяя линия – результаты фита данных 2017 г. для ЛФД 10х10.

3) Гистограмма подгонялась распределением Гаусса со средним E и дисперсией σ , отношение σ/E является относительным энергетическим разрешением (см. рис.13).

Процедура определения энергетического разрешения при измерениях широким пучком описана в [irr1]. В 2017 г. она была проверена экспериментально для энергии 7 ГэВ.

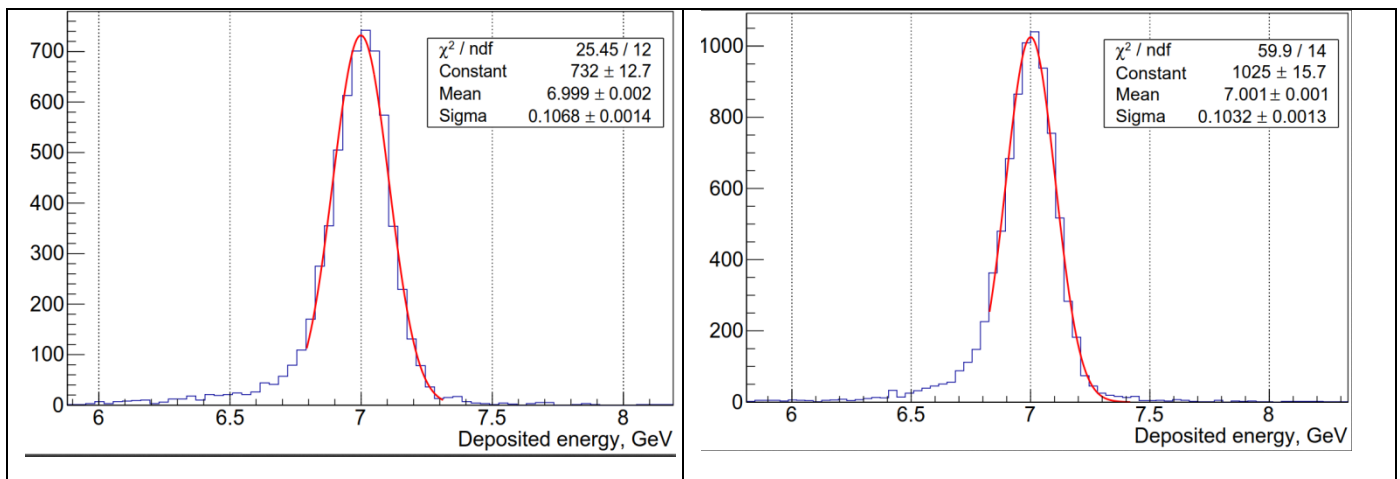


Рисунок 14. Результаты измерения энергетического разрешения широким пучком (слева) и узким пучком (справа).

Для этого были проведены измерения с узким пучком, при которых в триггере был счетчик поперечным сечением 1х1 см. Измерения показали практически одинаковые значения энергетических разрешений, измеренных двумя методами. Результаты измерений представлены на рис.14.

При измерении временных параметров ДЭ существенным является коэффициент

усиления ЛФД (далее КУ). Оптимальным значением считается КУ=50. При приближении к напряжению пробоя (для ЛФД большого размера эта величина составляет в среднем около 400В) КУ начинает резко расти, в этой области необходима высокая стабильность температуры и напряжения на ЛФД. Для определения рабочего диапазона КУ, в котором можно работать без ухудшения энергетического разрешения, при энергии 3 ГэВ были измерены разрешения в зависимости от напряжения. Результаты измерений представлены в таблице 1. Наблюдается ухудшение разрешения при напряжениях превышающих 385 В.

Таблица 1. Значения относительного энергетического разрешения при разных значениях напряжения. Для ориентировки указан КУ центрального детектора.

U,В	355	365	375	385	390
Ку(ц.д.)	50	75	109	183	300
$\sigma_E, \%$	1.95 ± 0.06	1.96 ± 0.05	1.97 ± 0.06	2.03 ± 0.03	2.13 ± 0.03
Run#	79,80	81,82	83,85	86	92

3.2.Временное разрешение детектирующих элементов

Временное разрешение определяется для каждого ДЭ отдельно. Результаты по временным характеристикам извлекались из тех же данных, что и результаты по энергетическому разрешению. Обычно для изучения временных свойств для диапазона энерговыделения 1-1.5 ГэВ брались данные при энергии пучка в диапазоне 1.5 - 3 ГэВ. При такой энергии в ДЭ выделяется до ~85% от энергии, что позволяет определить с хорошей точностью временное разрешение при энерговыделении 1 ГэВ в ДЭ.

Временное разрешение зависит от крутизны фронта импульса. Этот параметр определяется во много коэффициентом усиления ЛФД, поэтому были проведены измерения временного разрешения в широком диапазоне КУ. Энергетическое разрешение вплоть до КУ=300 не зависит от КУ, тогда как временное разрешение улучшается с ростом КУ. В табл.2 приведены результаты измерения КУ для ДЭ в целом, полученные для центрального детектора сборки с ЛФД 2017 г. Измерения проведены узким пучком для всех напряжений, кроме U=390В, где КУ определен измерением широким пучком.

Таблица 2. КУ для центрального детектора сборки 3х3 для ЛФД производства 2017 г.

U,В	50	100	200	300	340	360	375	380	385	390
-----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

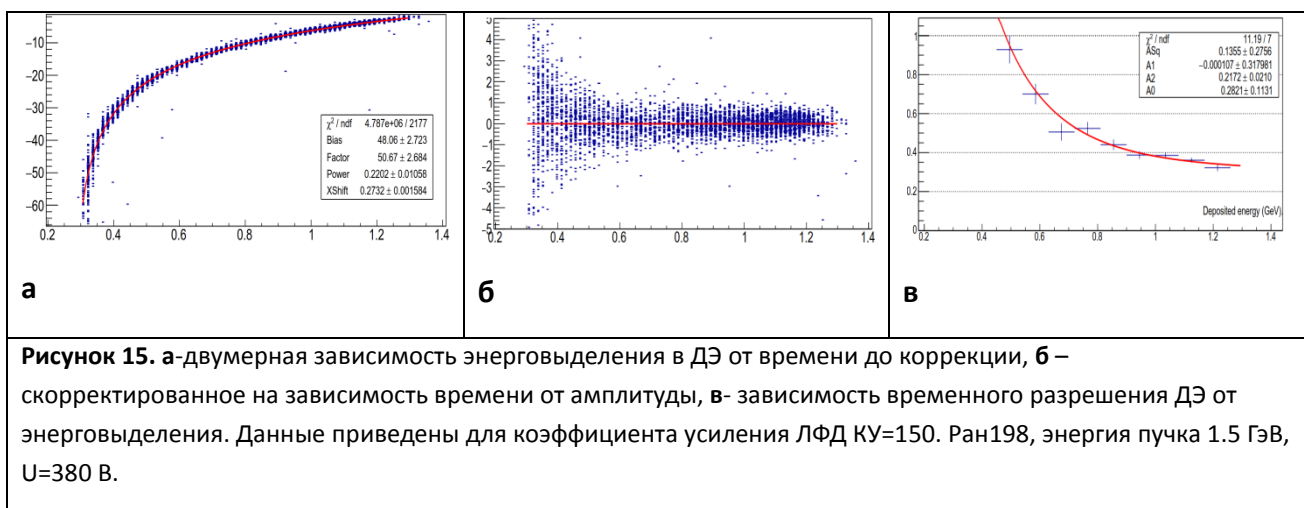
КУ	1	1.08	2.3	12.4	31.1	60	109	150	183	300
----	---	------	-----	------	------	----	-----	-----	-----	-----

Для определения временного разрешения применялась следующая процедура [14]. Строилось двумерное распределение зависимости разности времен между временем триггера и временем срабатывания ДЭ (далее просто времени). Пример такого распределения приведен на рис.15а. Кривая имеет отражает тот очевидны факт, что чем меньше амплитуда сигнала тем позднее вырабатывается временной сигнал в ППС, и тем хуже временное разрешение. Для устранения зависимости времени срабатывания от амплитуды была проведена коррекция на наклон этой кривой. Для этого двумерная зависимость была фитирована степенной функцией (красная линия на рис.15а), $p_0 - p_3$ – параметры.

$$y = p_0 - p_1(x - p_3)^{-p_2}$$

и согласно найденным параметром распределение было откорректировано на наклон, что приводит к выпрямлению зависимости – см. рис.15б. Для каждого бина по энергии из распределения 15б были вычислены одномерные распределения числа событий от времени, которые были подогнаны распределением Гаусса. На рис.15в приведены результаты зависимости дисперсии распределения гаусса от энергосыделения. Красная кривая – результат подгонки 4-х параметрической функцией вида

$$\sigma = \frac{A_{SQ}}{\sqrt{E}} \oplus \frac{A_1}{E} \oplus \frac{A_2}{E^2} \oplus A_0$$

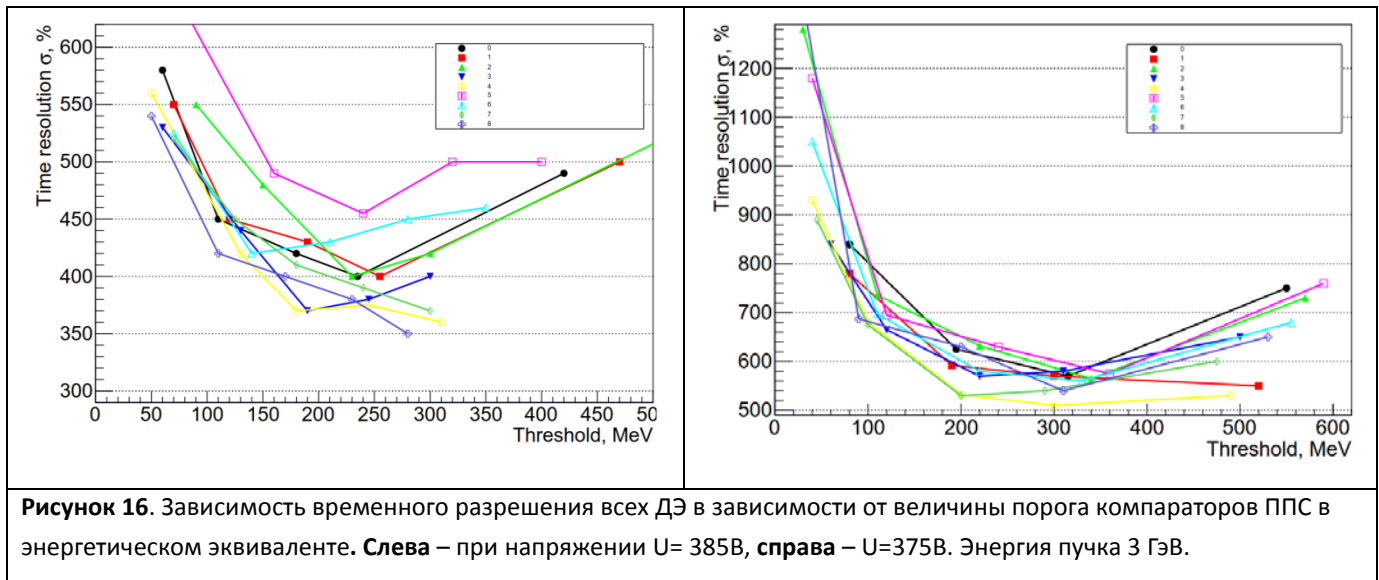


Временное разрешение сильно зависит от напряжения (КУ) на ЛФД. В таб.3 приведены результаты измерений временного разрешения σ_t для центрального ДЭ сборки из ЛФД 2017 г. при разных коэффициентах усиления ЛФД.

Таблица 3. Временное разрешение при разных КУ для центрального ДЭ. Сборка ЛФД 2017 г.

КУ	σ_t , пс	Run
50(355 В)	850	32 (энергия 2 ГэВ)
100(375В)	455	166(энергия 1.5 ГэВ)
150(380В)	407	201(энергия 1.5 ГэВ)
200(385В)	420	102(энергия 1.5 ГэВ)

Временное разрешение также сильно зависит от порога компараторов в ППС. На рис.16 приведена зависимость временного разрешения для каждого ДЭ в зависимости от порога для двух напряжений при энергии 3 ГэВ.



Величина временного разрешения при энергосделении в ДЭ в 1 ГэВ зависит от энергии в пучке. Чем выше энергия, тем хуже разрешение. Причина этого явления может не ясна и требует дальнейших исследований. В частности, возможно влияние сигналов от соседних детекторов.

Временное разрешение для ДЭ из ЛФД 5x5 при энергосделении 1 ГэВ оказалось хуже 2 нс.

Временное разрешение ДЭ из SiPM оказалось лучше 300 пс для всех ДЭ. Временное разрешение при прямой подаче сигналов на TQDC оказалось на величину $\sim 30\%$ хуже.

Все данные по временным измерениям не корректировались на временное разрешение триггера, которое определялось стартовым счетчиком и бралось по сигналу от

ФЭУ S3. Временное разрешение триггера оценивается в величину $\sigma_{TR}=175$ пс.

4. Заключение

В 2017 г. были проведены пучковые испытания 4-х сборок 3х3 из детектирующих элементов с различными фотодетекторами – лавинными фотодиодами и кремниевыми фотоумножителями производства Hamamatsu, Япония. Все измерения были проведены при температуре +17.5 С. Приведенные в этом отчете данные предварительны, основаны на результатах полученных on-line. Тем не менее, основные предварительные выводы, которые можно сделать в настоящий момент по результатам тестов следующие:

1) Увеличение чувствительной площади ЛФД в 4 раза полностью компенсирует охлаждение до -25 С с точки зрения отношения сигнал/шум, энергетическое разрешение становится даже лучше на величину ~20% при низких энергиях (см. рис.13). Работа при КУ более 200-250 нецелесообразна ввиду повышенных требований к стабилизации температуры и напряжения питания ЛФД. Энергетическое разрешения при КУ=300 деградирует на величину ~10 % (см. табл.3).

2) Временное разрешение при энерговыделении 1 ГэВ с ЛФД может быть уверенно лучше 500 пс при работе в области коэффициентов усиления КУ более 100-150. Отмеченное влияние энергии пучка на величину временного разрешения требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wigmans R. Calorimetry. Energy Measurements in Particle Physics. Oxford: Claredon Press, 2008.
2. ALICE, Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC, The ALICE Collaboration, Int. J. Mod. Phys. A 29, 1430044 (2014), <https://doi.org/10.1142/S0217751X14300440>, Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC
3. D.V.Aleksandrov et al., Nucl. Instr. and Meth., A550(2005)169
4. Hans Muller et al., Nucl. Instr. and Meth., v567 2006 p.264-267
5. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/S8664-55.html>, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 518, Issues 1–2, 1 February 2004, Pages 622-625
6. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s8664_series_kapd1012e.pdf
7. <http://linux.web.cern.ch/linux/centos.shtml>
8. <http://afi.jinr.ru/TQDC16VS-E>

9. <http://afi.jinr.ru/TQDC2>
10. http://afi.jinr.ru/TQDC16VS_Front_Panel
11. https://tdc.web.cern.ch/TDC/hptdc/docs/hptdc_manual_ver2.2.pdf
12. <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/kintex-7.html>
13. Ипполитов М.С., Лебедев В.А., Манько В.И и др. Применение кремниевых фотоумножителей для улучшения временного разрешения электромагнитного калориметра из кристаллов вольфрамата свинца, Приборы и техника эксперимента .— 2017 .— №1 .— С. 35-41
14. Bogolyubsky, M., Ippolitov, M., Kuryakin, A., Manko, V., Muller, H., Nomokonov, P., Punin, V., Rohrich, D., Sadovsky, S., Sibiriak, I., Skaali, B., Sugitate, T., Vasil'ev, A., Vinogradov, A., Vodopianov, A., and Zhou, D., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2009, vol. 598, p. 702.

Предложение о продлении проекта в 2019-2020.

В 2013-2015 гг была проведена работа по выбору фотоприемника для модернизации спектрометра PHOS с целью получения наилучшего временного разрешения. Следующим этапом должна быть разработка и изготовление электроники, которая должна заменить существующую электронику PHOS. Отладка и тестирование новой электроники будет происходить на 256 канальном прототипе PHOS, который находится в ЦЕРНе. После тестирования 256 канального прототипа на пучке электронов будет принято окончательное решение о модернизации всего спектрометра. Перечислим объекты электроники PHOS, которые должны быть полностью переработаны.

1. Предусилители

Плата на торце кристалла с лавинным фотодиодом APD и зарядочувствительным предусилителем имеет размеры $2 \times 2 \text{ см}^2$. Новая плата должна будет содержать лавинный фотодиод, кремниевый фотоумножитель, и зарядочувствительный предусилитель для APD. При разработке новой платы основное внимание должно быть обращено на минимизацию наводки от быстрого сигнала SiPM, на цепи лавинного фотодиода. Особое внимание также надо обратить на поведение электроники при нагрузке очень большим световым импульсом на уровне эквивалентном 200 ГэВ.

В другом варианте может быть использована карта с двумя SiPM без усилителей. Два SiPM нужны, чтобы иметь хорошее энергетическое и временное разрешение при низких энергиях, и приемлемую линейность при высоких энергиях.

2. Интерфейсная карта – переходник (Т-карта)

Сигналы от 16 предусилителей поступают на так называемую Т-карту, которая является переходником, между предусилителями и картой формирования и оцифровки сигналов (Reading Card). Через Т-карту на фотодетекторы, также передается напряжение смещения. Т-карта должна быть также переработана для передачи сигналов как APD, так и SiPM.

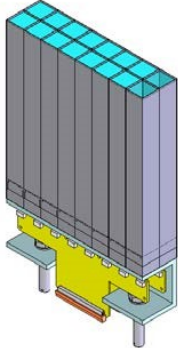


Рис. 20 На рисунке показана сборка 16 кристаллов, так называемый STRIP UNIT (SU). Сигналы с предусилителей поступают на так называемую Т-карту, которая является переходником, между предусилителями и картой формирования и оцифровки сигналов (FEC – Front End Card). Через Т-карту на фотодетекторы, также передается напряжение смещения. Т-карта должна быть переработана для передачи сигналов как APD, так и SiPM.



Рис. 21 Структурная схема новой Т-карты

Основная карта измерительной электроники PHOS (Front End Card).

Сигналы от двух SU через две Т-карты поступают на FEC карту. Здесь формируются и оцифровываются сигналы от 32 каналов, разделенных на два канала с отличием по усилению в 16 раз. То есть оцифровываются 64 амплитудных и 32 временных сигнала.

На карте расположены формирователи для формирования спектрометрических импульсов, которые оцифровываются ADC с частотой образцов 20 МГц.

Время пролета измеряется СТАРТ-СТОП методом схемами HPTDC. Сигнал СТАРТ поступает с соответствующего выхода компаратора сработавшего от фотодетектора. Сигнал СТОП поступает от импульсов синхронизации пучков LHC, либо от детектора T0, входящий в эксперимент ALICE.

На этой карте расположены также формирователи напряжения смещения для APD и SiPM, формирователи регулировки напряжения порогов компараторов, формирователи триггерного сигнала вырабатываемого PHOS для ALICE, блок низковольтных источников питания, блок измерения выходных напряжений источников питания и их токов, блок измерения температуры, контроллер карты (FPGA). Контроллер карты также служит для связи с системой сбора данных ALICE.

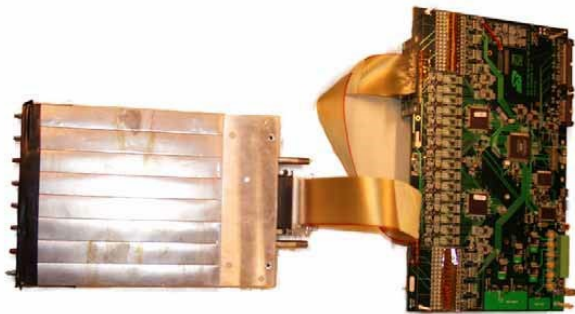


Рис.22 Сигналы от двух SU через две Т-карты поступают на карту измерительной электроники FEC.

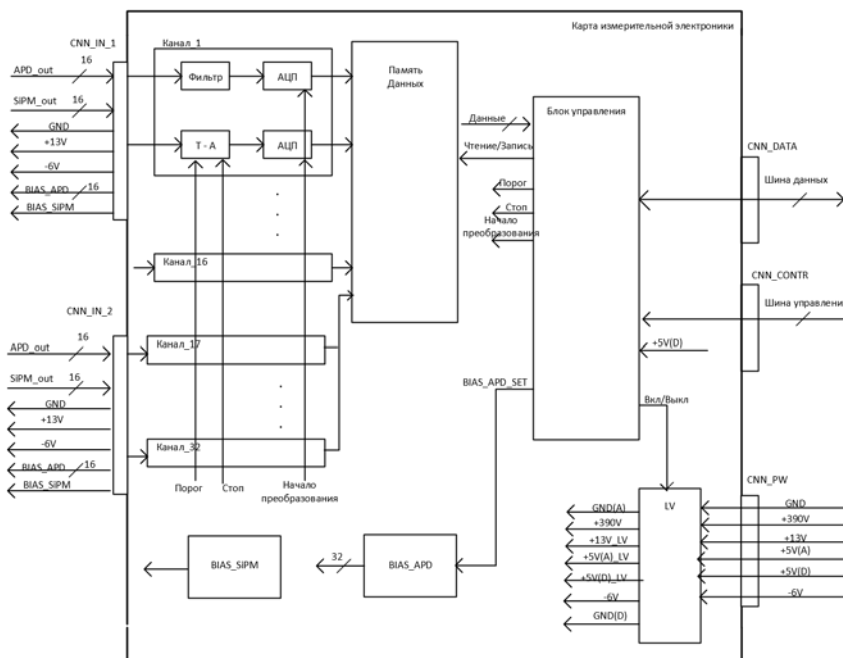


Рис.23 Структурная схема новой карты чтения данных.

Заключение

Результатом выполнения этого проекта будет разработка и создание системы регистрации сигналов от ячеек электромагнитного калориметра PHOS и электроники для обработки этих сигналов, которые могут заменить существующую. Новая система должна обеспечить высокую линейность измерения энергии фотонов в диапазоне 0.005-200 ГэВ и временное разрешение при энергии 1 ГэВ не хуже $\sigma_t=300$ пс. Система должна быть испытана на 256 канальном прототипе PHOS при использовании новой электроники во всех 256 каналах. Новая электроника должна быть совместимой с существующей конструкцией детектора. На основании полученных данных коллаборация ALICE сможет принять решение о возможности модернизации всего спектрометра PHOS.

Таблица 5: Затраты на модернизацию прототипа PHOS спектрометра в 2017-2018 гг.

	Наименование	Кол-во (шт.)	Цена за штуку (в долларах США)	Полная цена (в долларах США)
1.	Кремниевые PMT Hamamatsu	300	100	30.000
2.	Карта с APD, SiPM и предусилителями APD	300	50	15.000
3.	Карты чтения PHOS для 32 каналов (ADC, TDC)	10	6.000	60.000
4.	Интерфейсная Т-карта для 32 каналов	10	500	5.000
5.	Оплата конструирования прототипов электроники и их изготовление	1		20.000
6.	Стенд для отладки карт новой электроники PHOS ALICE			20.000

Всего: \$150.000

Экспериментальные исследования 2018 г.

Основной целью тестов было исследование свойств новой считывающей электроники FEE_8 и модернизированных зарядово-чувствительных предусилителей. Блок TQDC, использовавшийся в сеансе 2017 года применялся в качестве реперного устройства.

Использовалась триггерная система и методика обработки информации аналогичная сеансу 2017 года.

1. Описание прототипов.

Прототип А собран из APD HAMAMATSU S8664-1010 производства 2016 г., имевшими незначительный разброс напряжений, необходимых для получения усиления $M=50$. ЛФД в этом прототипе предусилители, использующиеся в PHOS ALICE [ссылка 256].

Прототип Б собран из APD HAMAMATSU S8664-1010 2017 г. Для данного прототипа разработаны и изготовлены новые модернизированные ЗЧП специально для S8664-1010. Проведена модернизация схемы предусилителя и повышено одно из напряжения питаний ЗЧП от 13 В до 15В, что привело к двукратному увеличению крутизны вольт-амперной характеристики ЛФД.

Все эти действия позволили уменьшить фронт выходного импульса ЗЧП с 50 нс до 30 нс, что существенно для временных измерений

Прототипы размещались внутри термостата [ссылка 256]. Используемая система охлаждения позволяла поддерживать температуру внутри термостата в +18 С с точность лучше ± 0.1 С в течение всего эксперимента.

2. Описание эксперимента.

Эксперименты проводились на вторичном пучке Т9 в East Hall протонного синхротрона PS в ЦЕРН. Максимальный импульс канала был ограничен 10 ГэВ/с, минимальный ограничен количеством вещества перед экспериментальной зоной и составлял 0.5 ГэВ/с. Пучок выводился в канал 2-3 раза за время суперцикла источника заряженных частиц. Длительность вывода пучка была 200 мс.

В эксперименте термостат с прототипами помещался на дистанционно-управляемый стол (DESY Table [ссылка DESY]), что позволяло перемещать термостат относительно пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Триггер

Система сбора данных эксперимента запускала опрос детекторов прототипа по сигналу, отвечающему прохождению электрона пучка через систему триггерных счетчиков. Для выработки триггерного сигнала (триггера) использовались два сцинтилляционных счетчика – S3, S4, S5 и газовый черенковский счетчик С. Счетчик С позволял идентифицировать электроны в пучке в исследуемом диапазоне импульсов. Для выработки стартового сигнала при измерении времени пролета использовался счетчик S3 и S4. Основой счетчика выполнен из быстрого пластикового сцинтиллятора размером 2x2x2 см, который просматривался с

противоположных граней фотоумножителями S3 и S4. Счетчик S5 размером 4x4x1 см. использовался для подавления фона случайных совпадений.

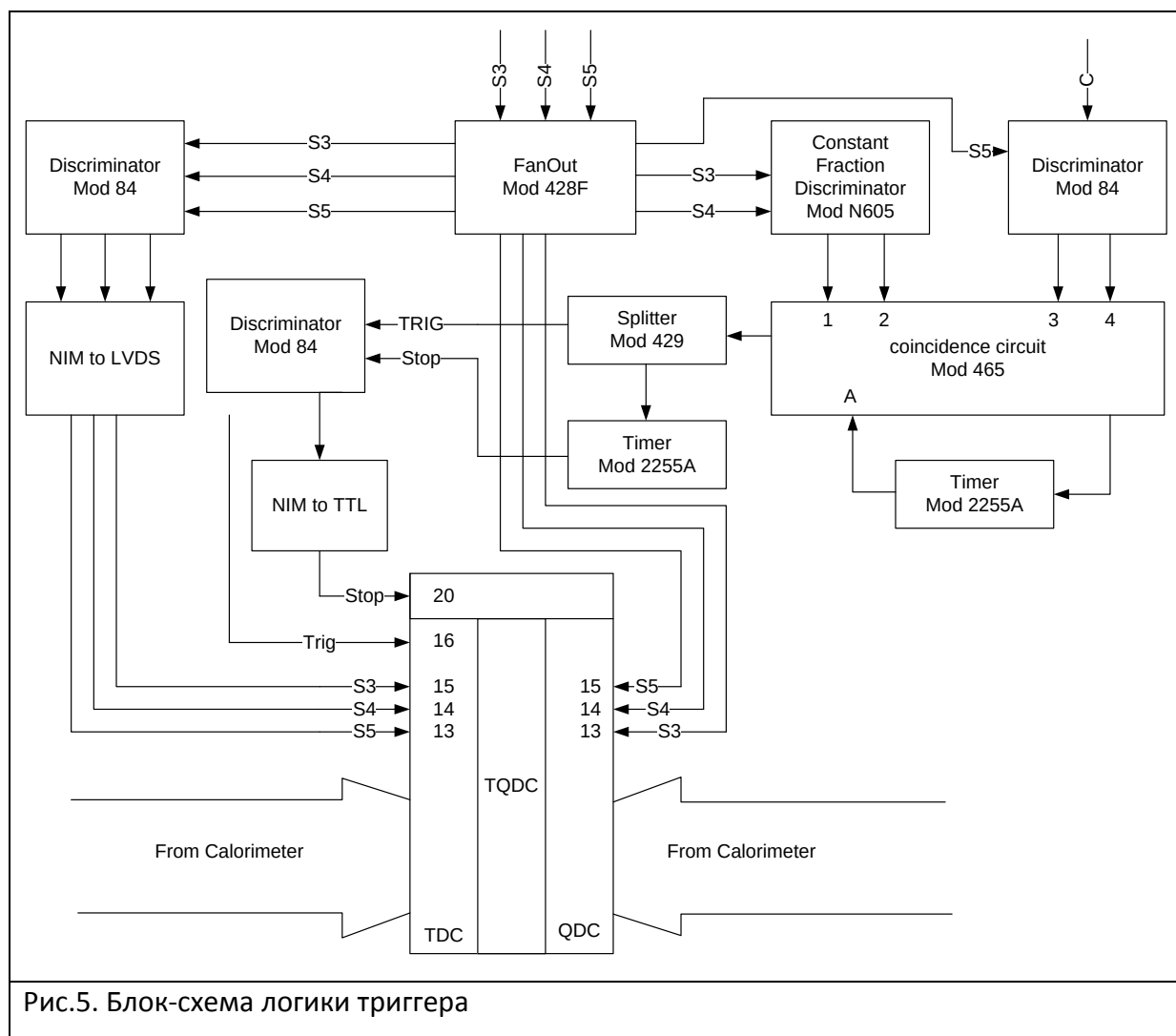
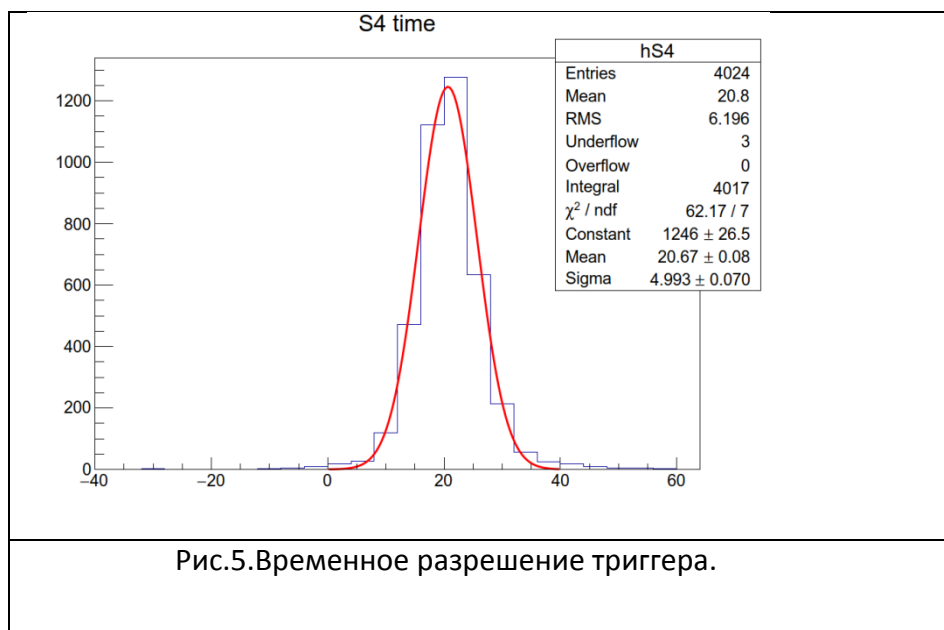


Рис.5. Блок-схема логики триггера

Аналоговые сигналы от ФЭУ S3, S4, S5 и C подавались на входы дискриминаторов, после чего сформированные логические сигналы шли на вход схемы совпадений. Задержки прихода сигналов обеспечивали синхронизацию сигнала с выхода схемы совпадений с сигналом S3. Для формирования сигналов от ФЭУ S3 и S4 использовался формирователь со следящим порогом. Триггерный сигнал брался с выхода схемы совпадений.

На рис.6 приведены гистограммы разности времен от ФЭУ S3 и S4, дисперсия которого определяет временное разрешение триггера. S3 временное разрешение триггера, измеренное при помощи TQDC и собственное разрешение счетчика S3. Временное разрешение триггера составило 125 пс, собственное разрешение счетчика 60 пс.



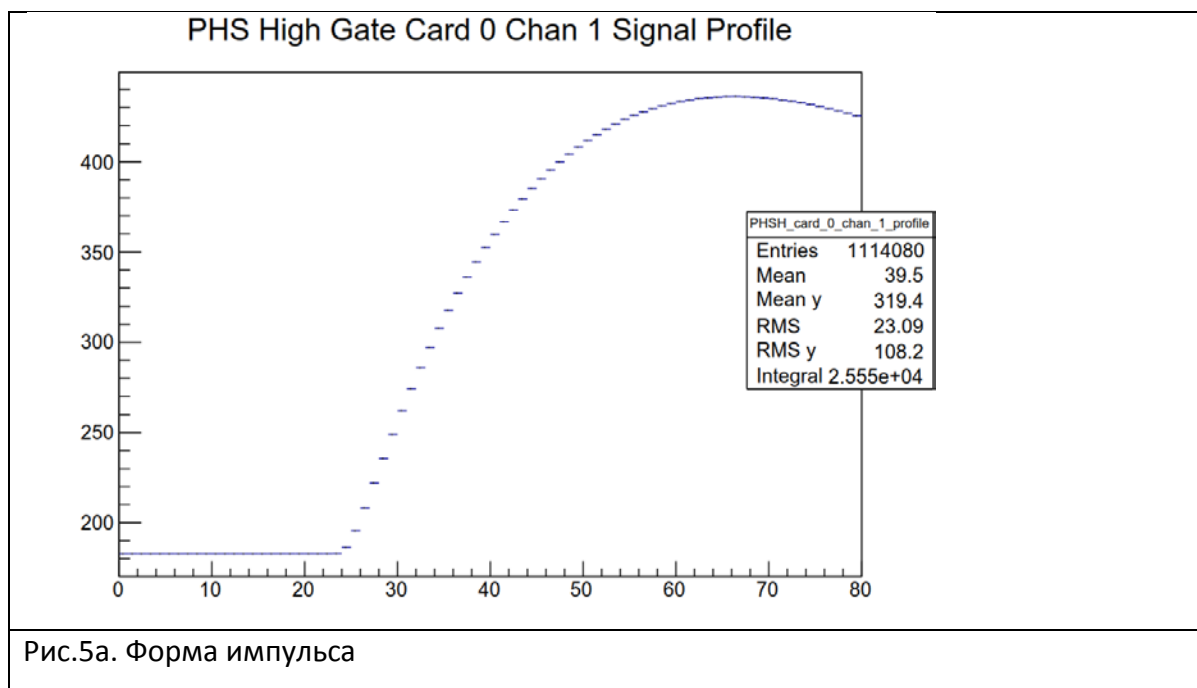
Описание электроники.

Основной целью тестов было исследование свойств новой считывающей электроники – блок FEE-8. В качестве электроники сравнения использовался блок TQDC, который тестировался в сеансе 2017 г.

Блок FEE-8 разработан и изготовлен совместно НИЦ КИ и ОИЯИ. Плата обеспечивает одновременное измерение времени и амплитуды сигнала.

В действующей электронике PHOS амплитуда сигнала и ее положение во времени вычисляются в режиме off-line. В FEE-8 сигнал от ЗЧП расщепляется и используется как для амплитудного анализа, так и измерения времени пролета.

Плата имеет 8 независимых входов и обеспечивает измерение амплитуд и времен прихода сигналов на каждый вход относительно внешнего триггера. Для преобразования амплитуда-код используются 12-разрядные АЦП AD 9637. Во временном канале используются НРТДС [ссылка НРТД], работающими в режиме с разрешением канала 100 пс. Плата содержит 8 шейперов с двумя коэффициентами усиления с отношением 9.7. Такая цепочка шейпер-АЦП позволяет эффективно обеспечивать динамический диапазон измерений от 5 МэВ до 200 ГэВ. Плата вырабатывает напряжение питания предусилителей и индивидуальное смещение на ЛФД от подключенного внешнего напряжения 390 В. Управление платой осуществляется FPGA фирмы ALTERA Cyclone V 5CEBA7F23C8. Основные функции FPGA: управление порогами дискриминаторов временного канала, генерация высокого напряжения, опрос АЦП и ВЦП, формирование события и передача данных в DAQ. В плате происходит измерение величины сигнала с частотой 40 МГц. В DAQ передается 80 значений амплитуд сигнала. Величина максимального уровня амплитуды сигнала определяется в ходе off-line анализа. Форма импульса с платы приведена на рис.5а.



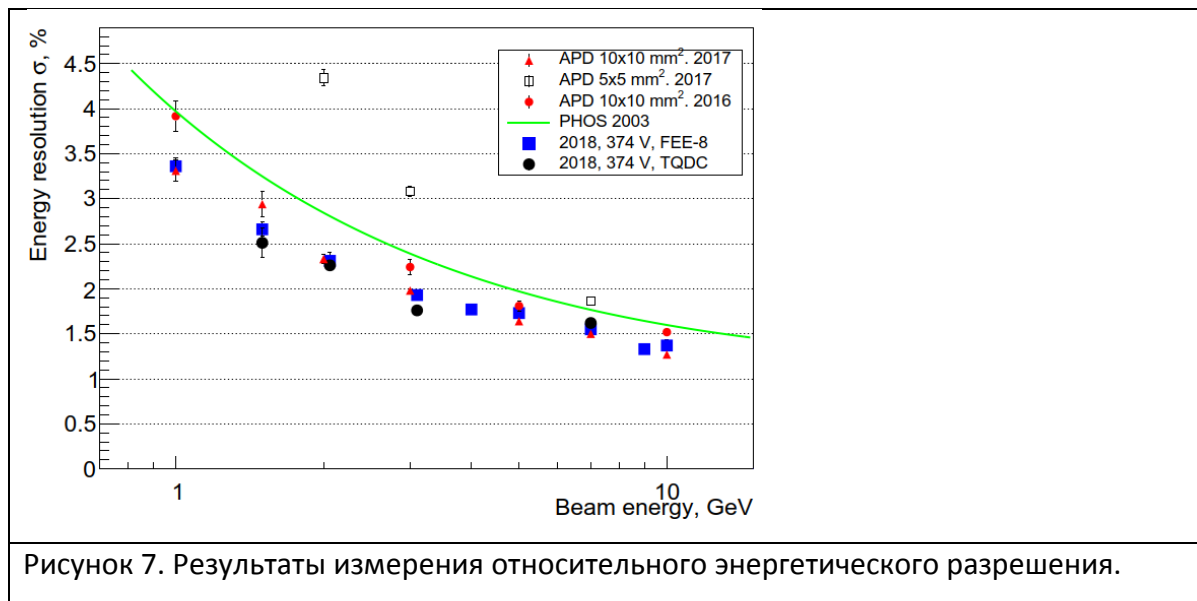
Всего в отсеке термостата для электроники было смонтировано две платы FEE-8. Фотография термостата со стороны электроники приведена на рис.6



Энергетическое разрешение.

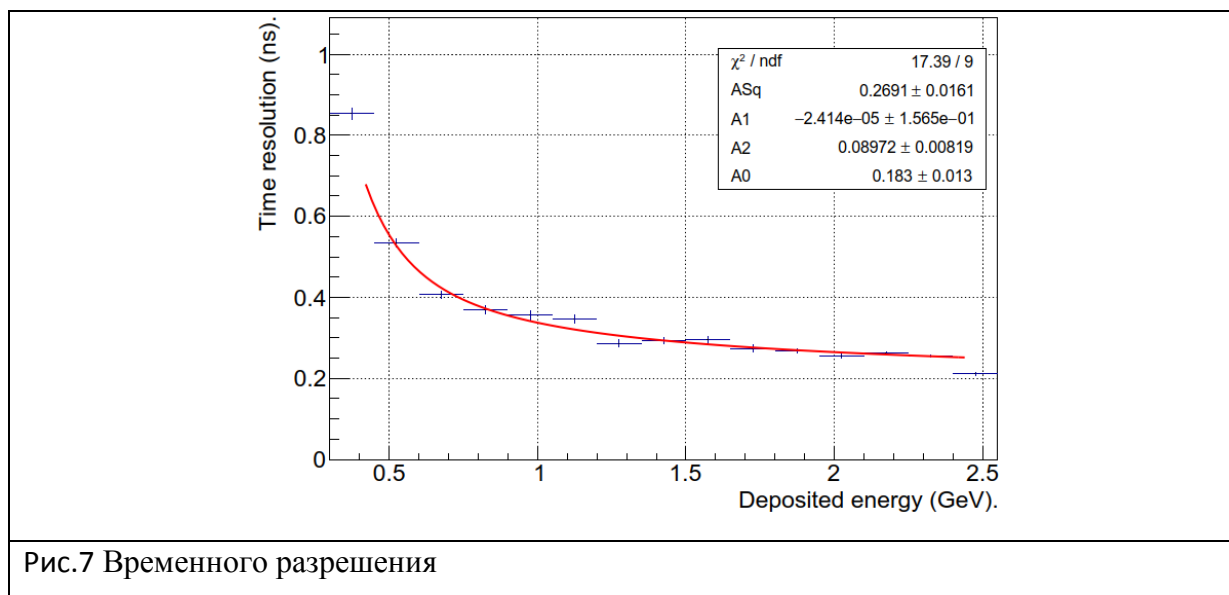
Электромагнитный ливень занимает в поперечно-сегментированном калориметре несколько детектирующих элементов. Электрон, попавший в центр сборки 3x3, выделяет около 80% энергии в центральном ДЭ. Оставшаяся энергия выделяется в остальных ДЭ сборки. Процедура, применяемая для измерения энергетического разрешения сборки 3x3 с учетом конечных поперечных размеров пучка и учитывающая утечки энергии из-за конечных размеров сборки описана в [ссылка3].

Зависимость энергетического разрешения от энергии или кривая относительного энергетического разрешения приведена на рис.7.



Видно, что замена фотодетектора чувствительной областью 5x5 мм фотодиодами площадью 10x10 мм позволяет улучшить энергетическое разрешения (на 15-20% в области низких энергий) и перейти к эксплуатации PHOS при комнатных температурах. Последнее серьезно облегчает эксплуатацию и ремонт PHOS.

Временное разрешение.



Отметим также, что энергетическое разрешение прототипов, измеренное с различными вариантами электроники – FEE-8 и TQDC получились в пределах статистических ошибок

одинаковыми. Аналогичный результат получен для энергетических разрешений при $KU=50$ и $KU=100$.

Большинство измерений было проведено при импульсе пучка 2 ГэВ/с. При этом импульсе были проведены измерения временного разрешения для двух значений коэффициента усиления $KU=50$ и $KU=100$, для различных значений порогов формирователей и др. параметрах (табл.4-5).

Таблица 4. Временное разрешение при энергосовпадении 1 ГэВ при импульсе пучка 2 ГэВ/с для прототипа Б. Порог ~ 70 МэВ.	
$KU=50$ (раны)	$KU=100$ (раны)
525(601, $N_c=611$)	444(590-595, $N_c=5492$)

Таблица 5. Временное разрешение при энергосовпадении 1 ГэВ при импульсе пучка 2 ГэВ/с для прототипа Б. $KU=100$		
500(70 МэВ)	700(120 МэВ)	1000(190 МэВ)
444(590-595, $N_c=5492$)	349(597, $N_c=902$)	316(602-603, $N_c=626$)

На электронике TQDC были проведены измерения временного разрешения прототипа А при $KU=100$. Для энергосовпадения 1 ГэВ при импульсе пучка временное разрешение составило 500 пс при пороге дискриминаторов, эквивалентным 200 МэВ

Выводы.

Результаты пучковых испытаний платы FEE-8 показывают, что введение параллельного канала для измерения времени пролета позволяет получить требуемые значения основных спектрометрических характеристик электромагнитного калориметра PHOS.

Применение APD HAMAMATSU S8664-1010 размера (10 x 10 мм) позволяет получить при комнатной температуре энергетическое разрешение лучше, чем существующее решение при -25°C . Это существенно упрощает технические аспекты эксплуатации и обслуживания спектрометра.

Модификация предусилителя позволила получить требуемое временное разрешение при коэффициенте усиления $KU=100$

В рамках сеанса 2017 года выработаны технические требования на разработку предсерийного образца платы измерительной электроники фотонного спектрометра PHOS установки ALICE.

Предложение о продлении проекта в 2019-2020.

После проведения исследований 2017 и 2018 годов получены результаты, которые определили тип фоторегистрирующего элемента и характеристики регистрирующей электроники.

Плата FEE-8 исследованная в сеансе 2018 г. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к электронике электромагнитного калориметра PHOS, обеспечивая динамический диапазон измерений энергий гамма квантов от 5 МэВ до 200 ГэВ с высокими значениями энергетического и временных разрешений. Результаты лабораторных и пучковых испытаний позволяют приступить к работам по разработке предсерийного образца платы на 32 канала. Это может быть достигнуто масштабированием испытанной платы на 8 каналов и добавлением интерфейса взаимодействия с DAQ, принятого в эксперименте ALICE. После испытаний этот образец планируется представить для рассмотрения коллаборации.

Техническое задание на конструирование FEC-32 PHOS ALICE приведено в Приложении 1.

Реализация этап проекта в 2019 – 2020 году потребует финансового обеспечения в размере 30 KUSD/год.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Photon Spectrometer PHOS, Technical Design Report, CERN/LHCC 99-4, ALICE TDR 2, 5 March 1999; <https://edms.cern.ch/document/398934/1%20>,
2. D.V.Aleksandrov et al., A High Resolution Electromagnetic Calorimeter Based on Lead-Tungstate Crystals, NIMA 550(2005)169-184.
3. Bogolyubsky, M., Ippolitov, M., Kuryakin, A., Manko, V., Muller, H., Nomokonov, P., Punin, V., Rohrich, D., Sadovsky, S., Sibiriak, I., Skaali, B., Sugitate, T., Vasil'ev, A., Vinogradov, A., Vodopianov, A., and Zhou, D., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, 2009, vol. 598, p. 702.
4. D. V. Aleksandrov, A. A. Vinogradov, M. S. Ippolitov et al., "Improving the Timing Resolution of an Electromagnetic Calorimeter Based on Lead Tungstate Crystals", *Instruments and Experimental Techniques*, 2014, Vol. 57, No. 3, pp. 233–247. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014.
5. Д.В. Александров, А.А.Виноградов, М.С.Ипполитов и др., "Улучшение временного разрешения электромагнитного калориметра на основе кристаллов вольфрамата свинца", *Приборы и техника эксперимента*. - 2014. - № 3. - С.5-20.
6. M.S.Ippolitov, V.A.Lebedev, V.I.Manko et al., "The Use of Silicon Photomultipliers for Improving the Time Resolution of an Electromagnetic Calorimeter Based on Lead Tungstate Crystals", *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, Vol. 60, No. 1, pp. 28–34, 2017.
7. K.A.Balygin, M.S.Ippolitov, A.I.Klimov et al., "Use of Large-Area Photodiodes for Improving the Characteristics of an Electromagnetic Calorimeter Based on Lead

Tungstate Crystals”, INSTRUMENTS AND EXPERIMENTAL TECHNIQUES Vol. 61 No. 5, pp 639-644, 2018.

Д О К Л А Д Ы:

1. M. S. Ippolitov et all, “Time resolution improvement of an electromagnetic calorimeter based on lead tungstate crystals”, International Conference on New Photo -Detectors (PD15), Moscow, Russia, 6 - 9 July, 2015.

Приложение 1

Техническое задание на конструирование карты измерительной электроники фотонного спектрометра PHOS установки ALICE

Обоснование проекта

Карты измерительной электроники ФОС необходимо модернизировать по следующим причинам:

- увеличение динамического диапазона энергий до 200 ГэВ;
- увеличение скорости счета в измерительных каналах;
- необходимость измерять более точно время пролета;
- старение элементной базы.

Увеличение скорости счета и расширение динамического диапазона позволит полностью воспользоваться высокогранулированностью PHOS и выполнить ряд измерений, таких как измерение спектров идентифицированных нейтральных пионов, эта-, и омега-мезонов и прямых фотонов с поперечными импульсами, большими 50-100 ГэВ, а также изучить корреляции этих частиц. Поэтому, предлагается в 2017 – 2019 гг. выполнить проектирование прототипа карты считывающей электроники PHOS.

Целью проекта является улучшение измерительных характеристик существующей электроники детектора PHOS в условиях повышения светимости БАК и увеличения максимальной энергии регистрируемых фотонов:

- улучшение измерительных характеристик детекторного устройства PHOS достигается за счет расширения динамического диапазона измеряемых энергий и повышения точности при измерении времени пролета;
- повышение быстродействия измерительной электроники достигается за счет сокращения времени измерения и считывания данных;
- использование новой элементной базы. Существующая измерительная электроника PHOS разработана в 2004 г. с применением специализированной микросхемы ALTRO, которая больше не производится, как и большинство компонент, использованных при изготовлении этих карт.

Результатом проекта будет является разработка конструкторской документации на производство карты измерительной электроники фотонного спектрометра PHOS установки ALICE.

Общие требования к разработке

Разработанная карта измерительной электроники должна заменить существующую без изменения основных соединительных проводов, шлейфов, интерфейсов чтения данных и управления. Необходимо использовать существующие источники питания. Блок-схема карты показана на рис. 1

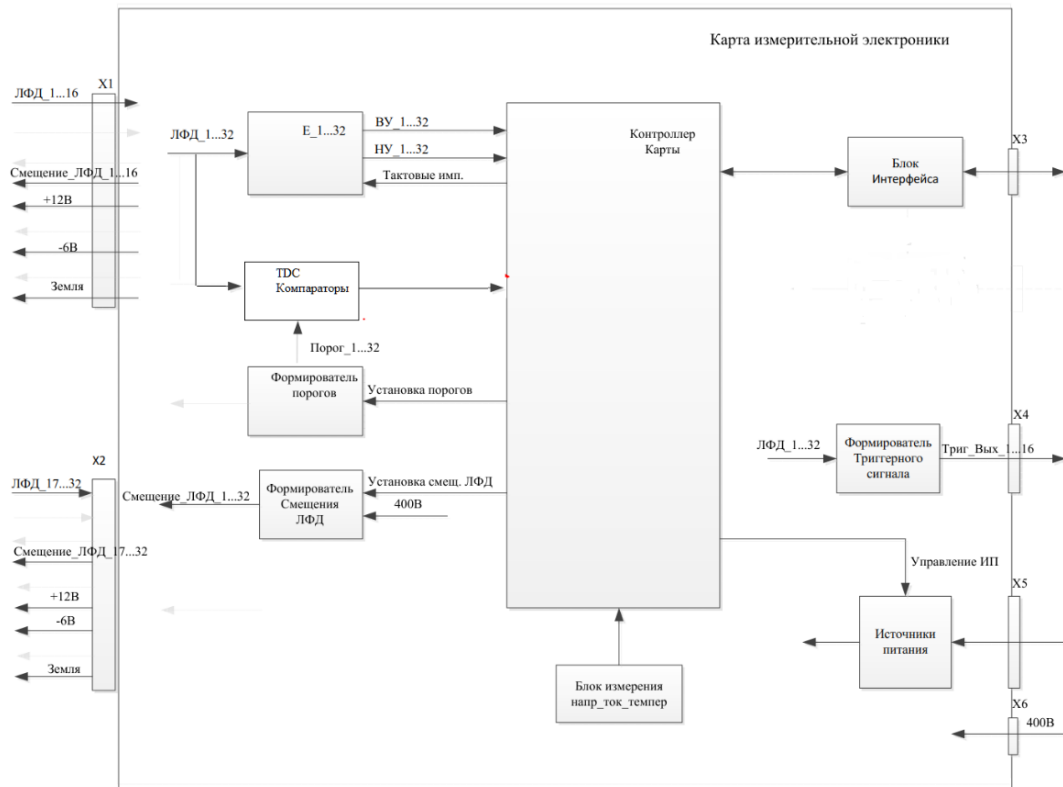


Рис. 1. Блок-схема карты измерительной электроники

Требования к измерительным характеристикам

Канал измерения энергии

Энергия частицы пропорциональна амплитуде сигнала на выходе зарядочувствительного предусилителя (ЗЧП). Параметры сигнала:

- Амплитуда – 35 мВ для частицы 1 ГэВ
- Форма сигнала – время нарастания 30-40 нс (зависит от места попадания частицы в кристалл), постоянная времени спада 100 мкс.

Динамический диапазон измеряемых энергий можно оценить учитывая, что в кристалле остается 80% энергии регистрируемой частицы. Тогда при максимальной энергии 200 ГэВ в кристалле остается 160 ГэВ, а динамический диапазон составит $160 \text{ ГэВ} / 4 \text{ МэВ} = 40\,000$, что потребует 16 разрядного АЦП. Необходимо также учесть, что наиболее вероятна регистрация частиц до 10 ГэВ. Для уменьшения разрядности АЦП диапазон измерений разбивается на два поддиапазона, которые отличаются усилением – высокое усиление (ВУ) и низкое усиление (НУ). Предлагается использовать 14 разрядный АЦП и, учитывая то, что эффективная разрядность будет около 12 бит, можно получить диапазон энергий, измеряемый в канале ВУ будет в диапазоне от 5 МэВ до 20 ГэВ, а в канале НУ – от 40 МэВ до 160 ГэВ.

Таким образом, на карте располагается 64 канала измерения энергии – 32 канала с низким усилением и 32 канала с высоким усилением. Каждый канал содержит фильтр, буферный усилитель и АЦП. Выходной сигнал ЗЧП проходит через фильтр, который повышает отношение сигнал/шум и определяет форму импульса. Схемы фильтра существующей карты показана на рис. 2, а форма выходного сигнала — на рис. 3.

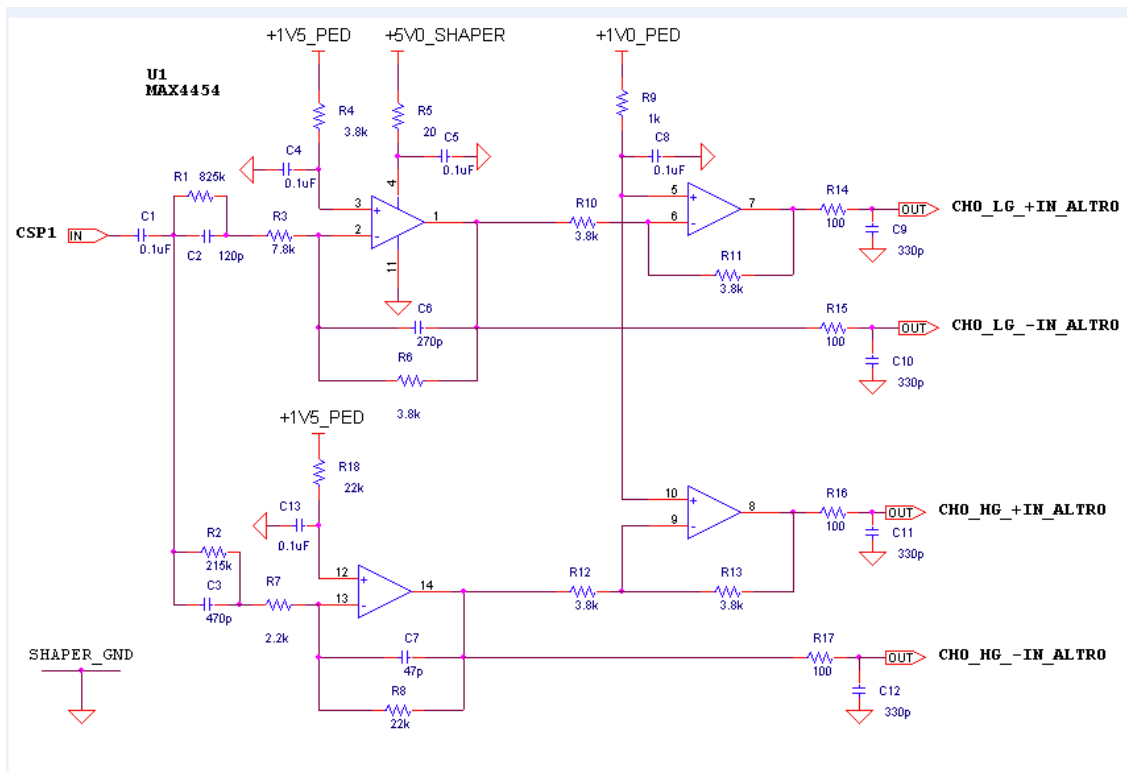


Рис. 2. Фильтр первого порядка с постоянной времени 1 мкс.

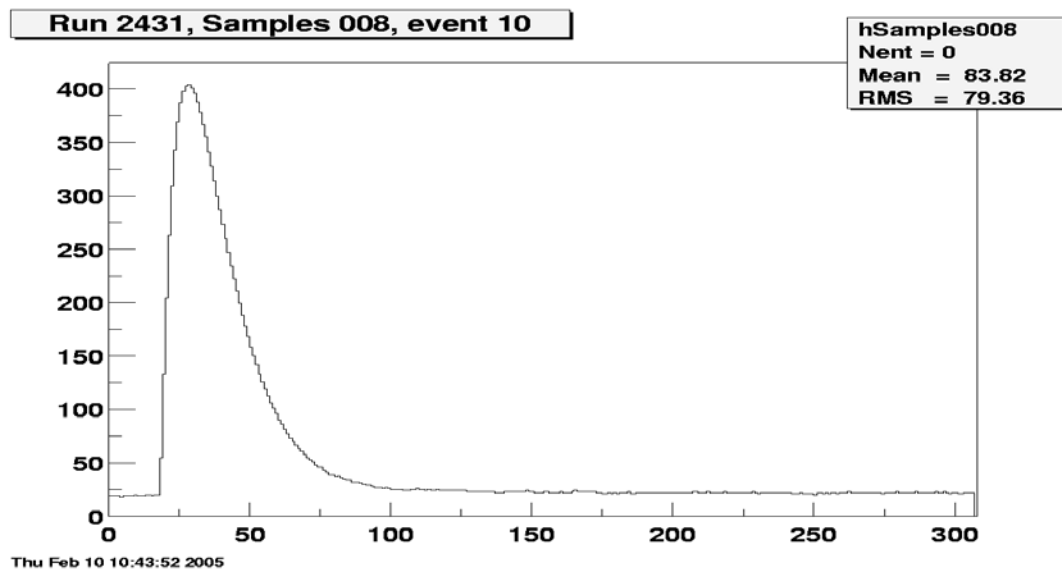


Рис. 3. Форма импульса на выходе фильтра.

Фильтр выполнен на м/с MAX4454 (4 ОУ в одном корпусе). Два верхних ОУ являются фильтром в канале НУ (LG), два нижних – фильтр в канале ВУ (HG). Собственно фильтрами в данной схеме являются два левых ОУ, которые представляют собой фильтр первого порядка с постоянной времени дифференцирования и интегрирования 1 мкс. Два правых ОУ согласуют выходы фильтров с дифференциальными входами АЦП с постоянными уровнями 0.5 и 1.5 вольт.

В качестве АЦП в новой карте предлагается использовать быстрый аналогово-цифровой преобразователь, который осуществляет непрерывное преобразование входных сигналов с частотой 40 МГц. Анализ номенклатуры быстрых АЦП дает, что предпочтительной

может являться микросхема, содержащая 8 АЦП в одном корпусе. Данные на выход поступают в последовательном виде.

Пьедесталы должны иметь значение 50 ± 10 отсчетов АЦП. Сигма шумов пьедесталов без подключенных ЗЧП должна быть не больше 0.5 отсчета АЦП.

Канал измерения времени пролёта

Время пролета измеряется СТАРТ-СТОП методом с помощью микросхемы время-цифрового преобразования (ВЦП). Сигнал СТАРТ поступает с соответствующего выхода компаратора. Сигнал СТОП поступает от импульсов синхронизации пучков БАК.

Время пролета для различных частиц составляет от 15 до 17 нс. Ошибка измерения для частиц с энергией 1-2 ГэВ не должна превышать 0.5 нс.

Максимальная цена канала временной шкалы — 0.1 нс.

Предлагается использовать микросхему PicoTDC для измерения времени пролёта.

цена временной шкалы — 3 пс или 12 пс;

- количество каналов — 32 или 64 канала;
- потребляемая мощность при измерении 32 каналов с точностью 12 пс — ~0.3 Вт.

Блок регулировки порога

Блок должен формировать 32 напряжения порогов, величина которых задается кодами, хранящимися в КК. Основные характеристики:

- диапазон регулировки напряжения порога – от 0 мВ до 30 мВ минимум;
- минимальный шаг изменения напряжения порога – 1 мВ.

Блок регулировки напряжения смещения лавинного фотодиода

Параметры формирователя индивидуальных напряжений смещения для ЛФД должны удовлетворять следующим требованиям:

- регулировка напряжения смещения в диапазоне 200-400 В;
- минимальный шаг регулировки - 0,2 В;
- шумы и пульсации на выходе формирователя – не более 25 мВ;
- температурная нестабильность выходного напряжения – не более 0,1%/°С;
- выполнять команды управления от контроллера карты (КК).

Сопrotивление изоляции между высоковольтными и низковольтными цепями – не менее 20 МОм.

Формирование триггерного сигнала

Разрабатываемая карта должна осуществлять аналоговое суммирование выходных сигналов четырех зарядо-чувствительных предусилителей (ЗЧП). Форма сигнала на выходе блока — квазигаусс с временем достижения максимума 50 нс. Выход блока дифференциальный с постоянными уровнями 0.5 В и 1 В. Максимальная амплитуда выходного сигнала — 1 В.

Блок считывания данных и управления

Система чтения данных основана на параллельном чтении всех FEE карт по независимому каналу DTC. Приемным устройством является блок SRU (Scalable Readout Unit). Блок SRU позволяет подключать независимо до 40 карт с помощью разъемов RJ45. Триггерные сигналы по протоколу TTC поступают по оптическому кабелю на разъем TTC link.

Управление SRU и измерительными картами осуществляется по сетевому протоколу UDP посредством подключения SRU к локальной вычислительной сети ALICE DCS. Связь в DAQ идет по одному или двум каналам DDL (Detector Data Link), в зависимости от требований к скорости приема данных. Для спектрометра PHOS используется следующая сегментация детектора: 8 ветвей, считывающих по 14 измерительных карт и 1 триггерную карту. Таким образом, один модуль PHOS считывается 4-мя блоками SRU, а на один SRU будет приходиться 30 входных каналов DTC: 28 измерительных карт и 2 триггерные карты.

Блок измерения напряжений, токов и температуры

Блок предназначен для измерения выходных напряжений и токов источников питания, расположенных на карте. Должна измеряться температура карты в 2 – 3 точках.

Источники питания карты должны выключаться при превышении допустимых токов или температуры.

Источники низковольтного питания

Количество отдельных источников питания — 5 источников с максимальным напряжением 8 В и один источник с максимальным напряжением 15 В.

Максимальная потребляемая мощность для одного измерительного канала — не более 200 мВт.

Источники питания ЗЧП +13В и -6В располагаются на карте.

Основной функционал FPGA

- управление и чтение данных с микросхемы ВЦП;
- управление порогами на дискриминаторах перед микросхемой ВЦП;
- управление и чтение данных с АЦП;
- мониторинг питания и температуры, управление питанием;
- установка уровней смещения на ЛФД;
- возможность анализа данных с АЦП для уменьшения количества передаваемых данных:
 - нахождение пика сигнала (энергия);
 - проверка монотонности переднего и заднего фронтов, с указанием результатов проверки в данных;
- DTC интерфейс:
 - синхронизация (40 МГц) и приём триггеров (80 МГц);
 - быстрые и медленные команды;
 - передача данных;
- Обработка триггеров:
 - L0 — сбор данных, формирование события;
 - L1 — отправка события.

Соединительные разъёмы

- 2 входных разъёма -- 3M N3372-6202R
- Разъём питания – PHOENIX CONTACT 1776566 (MSTB 2.5/8-GF-5.08-1776566)
- RJ45
- JTAG
- Выход суммарных сигналов – FTSH-108-01-L-D-RA

Габаритные размеры

210x353 мм²

Требования к совместимости

Разрабатываемая измерительная электроника должна быть совместима с

- системами медленного контроля (DCS) эксперимента ALICE;
- триггерной системой ALICE;
- системами низковольтного и высоковольтного питания PHOS.

Требования надежности

Продолжительность безотказной работы электроники PHOS – 10 лет в условиях проведения экспериментов при повышенной светимости БАК.

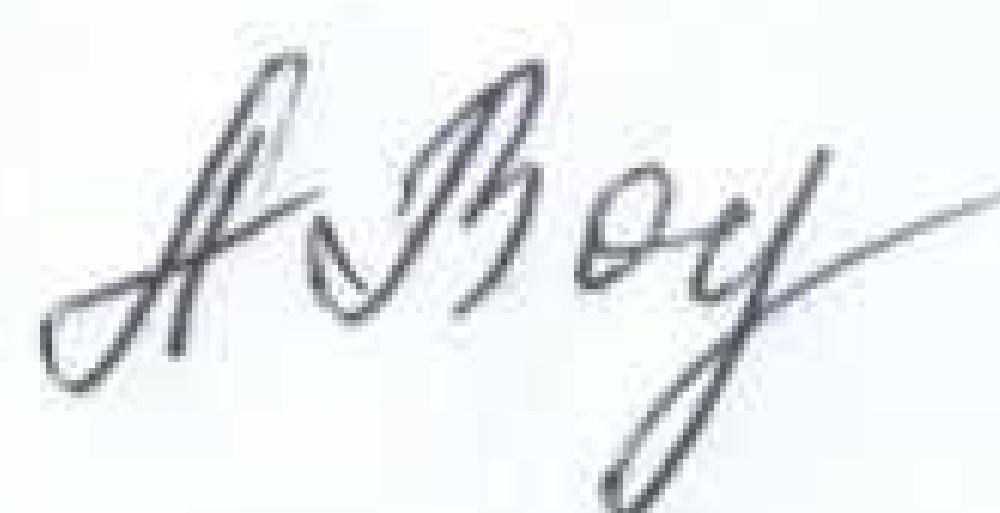
Конструктивные требования

Механическая конструкция плат, на которых размещается разрабатываемая электроника PHOS должна повторять механическую конструкцию аналогичных плат существующей электроники PHOS.

Planning and Resources needed to perform the project «R&D for the ALICE Photon Spectrometer Upgrade» (continuation of the project)

Detector parts, resources, sources of funding			Costs (KUSD) and Resources	Laboratory proposal for the annual distribution of funding and resources	
				1 year	2 year
Main parts and equipment	Upgrade of the ALICE Photon Spectrometer (PHOS)		60.0	30.0	30.0
	TOTAL:		60.0	30.0	30.0
Requested Resources	Rated hours	Workshop of LHEP JINR	-----	-----	-----
Source of Funding	Budget	Budget spending	60.0	30.0	30.0
	Non budget sources	Dedicated funding from RF	-	-	-

Head of Project

 A.S. Vodopyanov

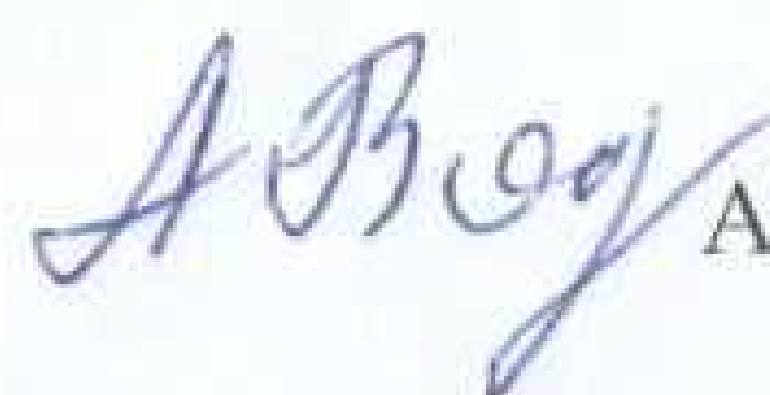
Cost estimate:

R&D for the ALICE Photon Spectrometer Upgrade (JINR participation)

(Continuation of the project)

№	Item	Total cost kUSD	2019 kUSD	2020 kUSD
	Direct spending:			
1.	Material and Equipment	30	15	15
2.	Engineering design and prototyping	30	15	15
	Total direct costs	60	30	30

Head of the project



A.S. Vodopyanov

Director of Laboratory



V.D. Kekelidze

Principal economist of Laboratory



L.M. Nozdrina