

УДК 53.089, 535.8  
EDN: HGMEIE

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz



## Модернизация аналогового измерителя энергии лазерного излучения в цифровой

В. Ю. Железнов, Т. В. Малинский, В. Е. Рогалин, С. А. Филин

*Экспериментально показана возможность модернизации аналоговых приборов с помощью контроллера Arduino Uno, на примере измерителя ИЛД-2М, который был апробирован в установке для измерения влияния плотности энергии импульсного лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 355$  нм на коэффициент отражения различных материалов. Для калибровки использовался измеритель энергии лазерного излучения NOVA II, с помощью которого был найден коэффициент соответствия между энергией измеренной NOVA II и напряжением на выходе ИЛД-2М. Обозначены основные проблемы, оказавшие влияние на необходимость усовершенствования аналогового оборудования. Модернизация позволила провести обработку результатов эксперимента с помощью современных компьютерных технологий.*

*Ключевые слова:* приемник излучения, лазер, аналогово-цифровой преобразователь, контроллер, Arduino.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-90-96

### Введение

Для измерения значений мощности и энергии лазерного излучения было создано множество приборов, некоторые из них были модернизированы, а другие стали не востребоваанными вследствие устаревания. Современное оборудование, в большинстве случаев, является цифровым. Это позволяет вести обработку результатов в режиме реального времени и регистрировать большой объем данных. Такая методика особенно важна при исследовании импульсно-периодических про-

цессов. Она позволяет фиксировать и анализировать данные не только процесса, в целом, но и каждого импульса, в отдельности.

Однако в настоящее время продолжается активное использование оборудования, сконструированное на аналоговой элементной базе. Регистрирующая часть данного оборудования может иметь хорошие технические характеристики, но аналоговое отображение полученной информации, неудобно, и требует больших временных затрат на проведение расчетов и регистрации полученных результатов измерений. Это особенно заметно при измерениях энергии пакета лазерных импульсов с высокой частотой следования. В таком случае аналоговый регистратор вовсе не позволяет получить достоверную информацию о значении энергии каждого импульса и приходится усреднять результаты.

В данной работе рассмотрена возможность продления эксплуатации хорошо зарекомендовавших себя аналоговых измерительных приборов. Такие приборы как правило, имеют качественную регистрирующую базу, однако отсутствие цифровых методов обра-

Железнов Вячеслав Юрьевич, н.с.

Малинский Тарас Владимирович, зав. лаб., к.т.н.

Рогалин Владимир Ефимович, зав. лаб., д.ф.-м.н.

E-mail: v-rogalin@mail.ru

Филин Сергей Александрович, в.н.с., к.т.н., д.э.н.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18.

Статья поступила в редакцию 17.02.2023

Принята к публикации 6.03.2023

© Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Рогалин В. Е.,  
Филин С. А., 2023

ботки получаемой информации резко снижает их информационные возможности.

Эта задача была решена на примере модернизации и автоматизации аналогового измерителя для лазерной дозиметрии ИЛД-2М (Опытный завод "Эталон", г. Волгоград) [1] с помощью контроллера Arduino Uno и портативного измерителя мощности и энергии лазера Nova II (Ophir Optronics Solutions Ltd., Israel).

Измеритель ИЛД-2М был запущен в серийное производство в 70-х годах и предназначен для измерения энергетических и временных характеристик непрерывного, импульсного и импульсно-модулированного лазерного излучения. ИЛД-2М обеспечивает измерения в широком диапазоне длин волн, энергетических параметров лазерных излучателей, длительности импульсов и частоты их следования (чувствителен к излучению в виде серий или одиночных импульсов с длительностью импульса от наносекунд до сотых долей секунды и частотой повторения от нуля до сотен Гц) [2].

В конце 20 века ИЛД-2М нашел свое применение во многих сферах [3–11]: оптике, фотонике, лазерной технике и голографии. В частности, для исследования голографических дифракционных решеток [12], перестраиваемого по частоте лазера на фосфатном стекле [13], при изучении энергетических и временных характеристик резонаторных пикосекундных параметрических генераторов света на кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  [14], в наши дни с помощью дозиметра ИЛД-2М определяют энергию и мощность лазерного излучения, которое воздействует на человека при работе с источником лазерного излучения [15].

В таблице представлены технические характеристики ИЛД-2М. Несмотря на то, что измеритель для лазерной дозиметрии ИЛД-2М предназначен для измерения энергетических и временных параметров лазерного излучения в спектральном диапазоне от 0,49 до 1,15 мкм и на длине волны 10,6 мкм, он обладает достаточной чувствительностью для измерения в УФ-диапазоне на длине волны 355 нм.

Таблица

Технические характеристики ИЛД-2М

Спектральный диапазон, мкм	Диапазон измерения энергии излучения, Дж	Диапазон измерения мощности излучения, Вт	Предел допускаемой основной погрешности: при измерении энергетических параметров излучения, %	Диапазон значений длительности импульсов излучения при измерении энергии, с	Предельное значение частоты повторения импульсов излучения при измерении энергии, Гц
0,49–1,15	$10^{-8}$ –1	$10^{-6}$ –10	$\pm 18$	$10^{-8}$ – $10^{-2}$	500
2–11	$10^{-6}$ – $10^{-2}$	$10^{-4}$ – $10^{-1}$	$\pm 20$	$10^{-6}$ – $10^{-2}$	25

### Способ модернизации

Модернизация ИЛД-2М была проведена с помощью контроллера Arduino Uno следующим образом: Блок преобразования и регистрации (БПР) ИЛД-2М был соединен с контроллером Arduino Uno через инвертирующий операционный усилитель, который менял полярность сигнала на выходе БПР. Далее положительный сигнал приходит на аналоговый вход контроллера (5). Измеритель NOVA II был подключен к аналоговому входу 1 и земле контроллера. Фотодиод был подключен к цифровому выходу 2. Для управления затвором он был соединен с реле, который был подключён к цифровому входу 13 и выходу 5 V, который использовался как источник питания реле.

Контроллер Arduino Uno (на базе микроконтроллера ATmega328, тактовая частота 16 МГц) используется в качестве аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). АЦП Arduino Uno имеет разрешение 10 бит, это позволяет выводить значения напряжения в десятичном виде от 0 до 1023, то есть в относительных единицах делений шкалы с шагом  $5/1024 = 0,00488$  мВ [16]. Измеритель NOVA II, к которому подключен пироэлектрический датчик, также присоединен к Arduino Uno. Данные, полученные с помощью Arduino Uno, выводятся в терминал компьютера через USB порт.

Схема подключения устройств к контроллеру Arduino Uno представлена на рис. 1.

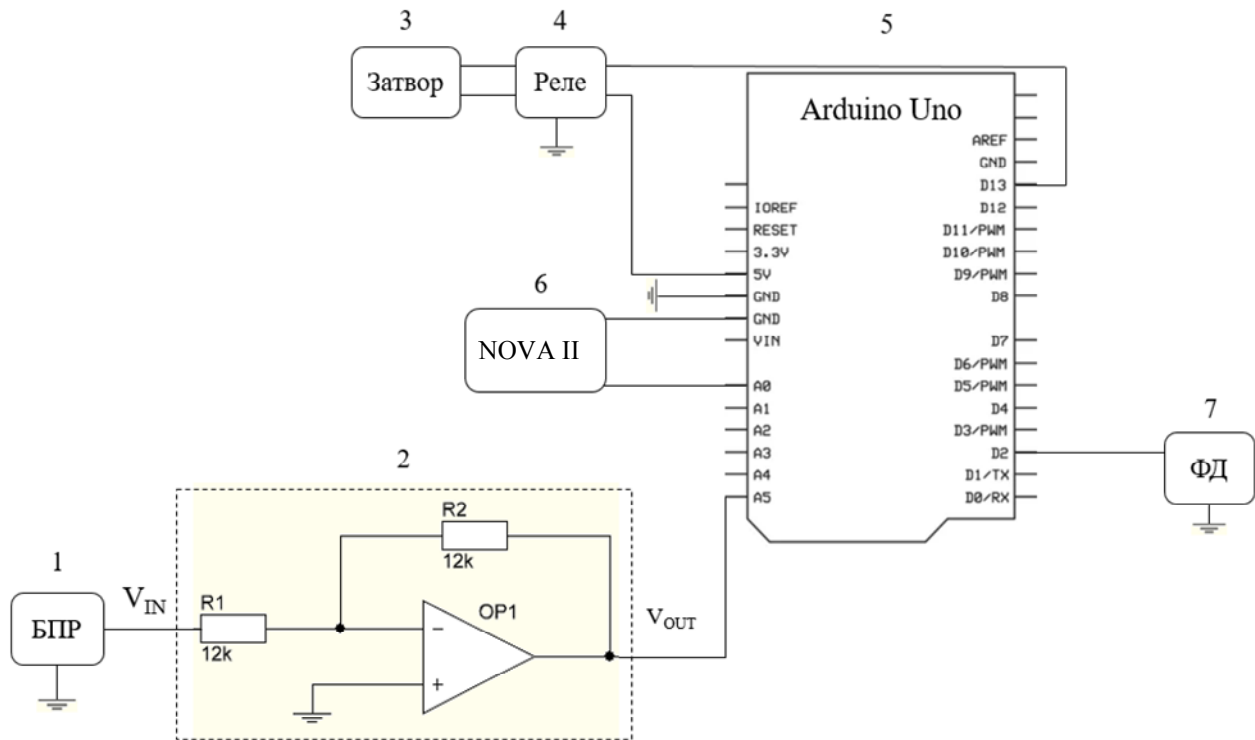


Рис. 1. Схема подключения приборов к контроллеру Arduino Uno: 1 – блок преобразования и регистрации ИЛД-2М; 2 – инвертирующий операционный усилитель; 3 – затвор; 4 – реле; 5 – Arduino Uno; 6 – измеритель излучения NOVA II (Ophir Optronics Solutions Ltd., Israel); 7 – фотодиод

### Обсуждение и результаты

После модернизации прибор был успешно апробирован при измерении влияния плотности энергии УФ лазерного импульса на коэффициент отражения полупроводниковых кристаллов германия и кремния [17].

Схема установки для измерения коэффициента отражения приведена на рис. 2. В качестве источника излучения был использован твердотельный Nd:YAG лазер 1 длина волны которого 355 нм, энергия в импульсе до 8 мДж, длительность импульса 10 нс, частота следования импульсов до 100 Гц, диаметр лазерного пучка 3 мм, расходимость 1–2 мрад.

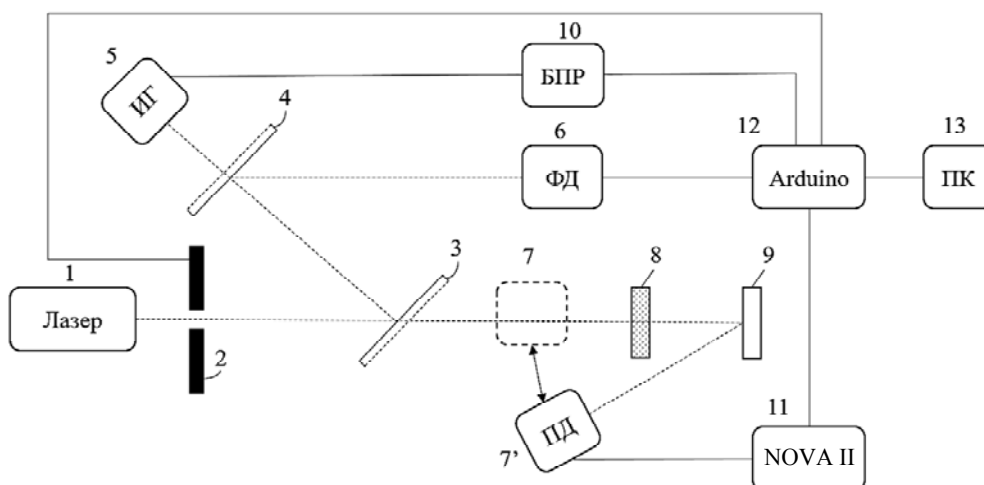


Рис. 2. Схема установки для измерения коэффициента отражения: 1 – импульсный твердотельный лазер Oprolete HR 2731 (OPOTEC Inc., USA); 2 – затвор; 3, 4 – кварцевые пластины; 5 – измерительная головка ИЛД-2М (Опытный завод "Эталон", г. Волгоград); 6 – фотодиод; 7, 7' – пьезоэлектрический датчик измерения лазерной энергии (Ophir Optronics Solutions Ltd., Israel); 8 – оптическая система; 9 – образец; 10 – блок преобразования и регистрации ИЛД-2М; 11 – измеритель излучения NOVA II; 12 – Arduino Uno; 13 – персональный компьютер

Перед измерением коэффициента отражения осуществляли калибровку по напряжению измерителя ИЛД-2М 5 и NOVA II 11, пирозлектрический датчик которого помещали в положение 7. NOVA II использован в качестве эталона. Лазерное излучение проходило через затвор 2 отражалось кварцевой пластиной 3 на полупрозрачную пластину 4 направлялось на измерительную головку 5 измерителя ИЛД-2М. По принципу работы приемников излучения, ИЛД-2М и NOVA II преобразуют оптический сигнал в электрический. В зависимости от изменения измеренной энергии лазерного излучения соответственно изменяется напряжение, на выходе блока питания и регистрации 10, который представляет из себя разъем для подключения внешнего регистратора. Данный выход подключен к контроллеру Arduino Uno 12.

В процессе калибровки устанавливали зависимость между энергией, измеренной с помощью NOVA II и напряжением на выходе ИЛД-2М,  $E$  и  $U$  соответственно, и находили калибровочный коэффициент  $k$ :

$$k = \frac{E}{U}. \tag{1}$$

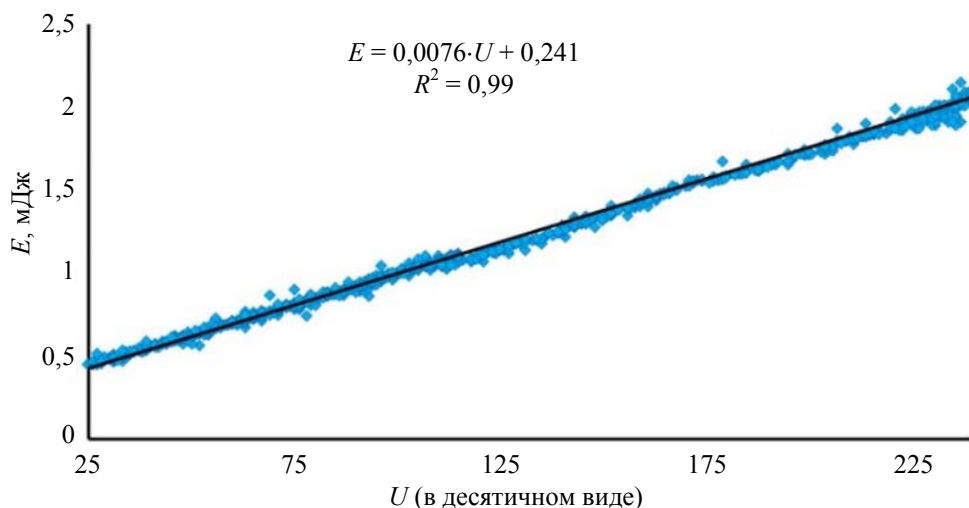


Рис. 3. Зависимость напряжения  $U$  (ИЛД-2М) от измеренной энергии  $E$  (NOVA II) с ослабителем НС-10. Калибровочная кривая (800 точек)

Была получена функция с помощью, которой стало возможно определять энергию, измеренную с помощью ИЛД-2М с величиной достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,99$ :

$$E = 0,0076 \cdot U + 0,241, \tag{2}$$

Методика измерения коэффициента отражения выглядит следующим образом. Излучение лазера 1 проходит через затвор 2 и частично отражаясь от пластинок из кварца 3, 4 попадает на фоточувствительный элемент измерительной головки ИЛД-2М 5 и фотодиод 6, который работает как счетчик импульсов. Прошедшее через кварцевую пластину 3 излучение с помощью оптической системы 8 формирует в плоскости поверхности образца 9 пятно, которое отражается от образца и падает на фоточувствительный элемент пирозлектрического датчика 7'. Связка затвора и счетчика импульсов, подключенных также к Arduino UNO, позволяет контролировать количество импульсов, падающих на образец, и синхронизирует измерения энергии каждого импульса между ИЛД-2М и NOVA II в единый момент времени.

Измерительная головка ИЛД-2М имеет в своем составе несколько ослабителей. Для каждого ослабителя при калибровке получается своя кривая. Ниже на рис. 3 приведена зависимость напряжения ИЛД-2М от измеренной энергии NOVA II с ослабителем НС-10. С данным ослабителем обычно измеряется энергия от 0,5 до 2 мДж.

где  $E$  – энергия падающего импульсного излучения на фоточувствительный элемент ИЛД-2М в мДж,  $U$  – напряжение в относительных единицах, представленных в десятичном виде.

Коэффициент отражения  $R$  измерялся по стандартной методике как отношение отра-

женного от образца потока излучения к падающему:

$$R = \frac{\Phi_1}{\Phi_0} = \frac{E_1}{E_0} \cdot \tau = \frac{E_1}{E_0} \cdot \tau \quad (3)$$

где  $\tau$  это коэффициент пропускания линзы, который равен 0,9;  $\Phi_1$  – отраженный от образца поток излучения;  $\Phi_0$  – падающий на образец поток излучения;  $E_1$  – энергия отраженного импульсного излучения в мДж (NOVA II);  $E_0$  – энергия падающего импульсного излучения в мДж (ИЛД-2М).

Разработанная на базе контроллера Arduino Uno система измерения коэффициента отражения предусматривает обработку полученных данных в таких средах как MATLAB, Mathcad и Excel. По полученным данным строилась зависимость коэффициента отражения на образцах кремния и германия от плотности энергии лазерного излучения [16]. Были получены зависимости коэффициента отражения от плотности энергии лазера (длина волны 355 нм)  $R = 0,49 \cdot e^{0,14 \cdot w}$  и  $R = 0,36 \cdot e^{0,174 \cdot w}$  соответственно, где  $w$  это плотность энергии лазера. Данная система измерения была также апробирована при исследовании метода лазерного травления германия [18, 19]. Контроллер Arduino Uno соединил несколько приборов между собой и позволил получить информацию о значении энергии каждого импульса в единый момент времени и вывести ее в порт компьютера.

### Заключение

В работе продемонстрирована возможность модернизации ранее хорошо зарекомендовавших аналоговых измерительных приборов в цифровые. Эксперимент проведен на измерителе для лазерной дозиметрии ИЛД-2М, предназначенном для измерения энергетических и временных параметров лазерного излучения с помощью контроллера Arduino Uno. Модернизированный прибор был успешно апробирован при измерении влияния плотности энергии УФ лазерного импульса на коэффициент отражения полупроводниковых кристаллов германия и кремния.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рахманов Б. Н., Кибовский В. Т. / Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. № 6. С. 3–13.
2. Казаков М. Ю., Муравьев С. В., Соустов Л. В. Измеритель энергии импульсов электромагнитного излучения. Патент на изобретение 2031378 (РФ). 1995.
3. Жукаускас А., Латинис В. / Физика твердого тела. 1989. Т. 31. № 10. С. 21–24.
4. Богданкевич О. В., Дрягин С. В., Коновалов А. Д., Меерович Г. А., Селиванов Ю. Г., Степушкин В. А., Уласюк В. Н., Чеботарев М. П., Шотов А. П. / Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 10. С. 2020–2022.
5. Жевлаков А. П., Исаков В. К., Лещенко Д. О. / Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 8. С. 1029–1030.
6. Александровский А. Л., Наумова И. И., Тарасенко В. В., Холодных А. И., Яковлева Г. И. / Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 10. С. 2086–2089.
7. Горюнов Ф. Г., Назорный Д. Ю., Тарасенко В. Ф. / Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 7. С. 1354–1357.
8. Belyaev V. S., Vinogradov V. I., Matafonov A. P., Krainov V. P., Lisitsa V. S., Andrianov V. P., Ignat'ev G. N. / Laser physics. 2006. Vol. 16. № 12. P. 1647–1657.
9. Karavanskii V. A., Krasovskii V. I. / Proceedings of SPIE. 2006. Vol. 6344. P. 63442M.
10. Stukhlyak P. D., Мутнык М. М., Мукутшын А. Н. / Materials Science. 2000. Vol. 36. № 3. P. 412.
11. Халтуринский Н. А., Церикидзе О. Н., Семенов Д. В., Малиновский Г. Я. / Высокмолекулярные соединения. 1994. Т. 36. № 9. С. 1468–1472.
12. Кулиш Н. Р., Лисица М. П., Малыш Н. И., Романенко П. Ф. / Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 10. С. 2150–2153.
13. Камушкин А. Г., Клинков В. К., Коробкин В. В., Щербнев Е. П. / Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 10. С. 2022–2024.
14. Ионушаускас Г., Пискаускас А., Сируткайтис В., Юозапавичюс А. / Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 10. С. 2044–2045.
15. Халимов Ю. Ш., Власенко А. Н., Цепкова Г. А., Сосюкин А. Е. / Вестник Российской военной медицинской академии. 2019. Т. 21. № 2. С. 209–214.
16. <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>.
17. Malinskiy T. V., Zheleznov V. Y., Rogalin V. E., Kaplunov I. A. / Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2103. № 1. P. 012154.
18. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Роголин В. Е., Филин С. А., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И. / Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 14. С. 18–20.
19. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Роголин В. Е., Филин С. А., Хомич Ю. В., Ямщиков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2021. Т. 23. № 3. С. 203–212.

## Modernization of an analog laser energy meter into a digital one

V. Yu. Zheleznov, T. V. Malinskiy, V. E. Rogalin and S. A. Filin

Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences  
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: v-rogalin@mail.ru

Received 17.02.2023; accepted 6.03.2023

*The article experimentally shows the possibility of upgrading analog devices using Arduino Uno controller. ILD-2M energy meter after modernization was tested in an installation for measuring the dependence of reflection coefficient of various materials by the energy density of pulsed laser radiation ( $\lambda = 355$  nm). Laser energy meter NOVA II was used for calibration. The coefficient of correspondence between the energy measured by NOVA II and ILD-2M output voltage was found. The main problems that influenced the need to improve analog equipment are outlined. Modernization made it possible to process the results of the experiment using modern computer technologies.*

*Keywords:* energy meter, laser, analog-to-digital converter, controller, Arduino.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-90-96

### REFERENCES

1. Rakhmanov B. N. and Kibovsky V. T., Security in the technosphere **2** (6), 3–13 (2013) [in Russian].
2. Kazakov M. Yu., Muravyov S. V. and Sustov L. V., Electromagnetic Radiation Pulse Energy Meter. Patent for invention 2031378 (RF). 1995.
3. Zhukauskas A. and Latinis V., Solid State Physics **31** (10), 21–24 (1989) [in Russian].
4. Bogdankevich O. V., Dryagin S. V., Konovalov A. D., Meerovich G. A., Selivanov Yu. G., Stepushkin V. A., Ulasyuk V. N., Chebotarev M. P. and Shotov A. P., Soviet Journal of Quantum Electronics **19** (10), 1300–1301 (1989).
5. Zhevrlakov A. P., Isakov V. K. and Leshchenko D. O., Soviet Journal of Quantum Electronics **20** (8), 944–945 (1990).
6. Aleksandrovskii A. L., Naumova I. I., Tarasenko V. V., Kholodnykh A. I. and Yakovleva G. I., Soviet Journal of Quantum Electronics **19** (10), 1343–1345 (1989).
7. Goryunov F. G., Nagorny D. Yu. and Tarasenko V. F., Soviet Journal of Quantum Electronics **16** (7), 875–875 (1989).
8. Belyaev V. S., Vinogradov V. I., Matafonov A. P., Krainov V. P., Lisitsa V. S., Andrianov V. P. and Ignat'ev G. N., Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters **81** (12), 616–620 (2005).
9. Karavansky V. A. and Krasovsky V. I., Proceedings of SPIE **6344**, 63442 (2006).
10. Stukhlyak P. D., Mytnik M. M. and Mikitishin A. Kh., Materials Science **36** (3), 412 (2000).
11. Khalturinsky N. A., Tserikidze O. N., Semenov D. V. and Malinovsky G. Ya., High Molecular Compounds **36** (9) 1468–1472 (1994).
12. Kulish N. R., Lisitsa M. P., Malysh N. I. and Romanenko P. F., Soviet Journal of Quantum Electronics **19** (10), 1384–1386 (1989).
13. Kamushkin A. G., Klinkov V. K., Korobkin V. V. and Shchebnev E. P., Soviet Journal of Quantum Electronics **19** (10), 1301–1302 (1989).

14. Ionusauskas G., Piskarskas A., Sirutkaitis V. and Juozapavichyus A., *Soviet Journal of Quantum Electronics* **17** (10), 1303–1304 (1987).
15. Khalimov Yu. Sh., Vlasenko A. N., Tsepkova G. A. and Sosyukin A. E., *Bulletin of the Russian Military Medical Academy* **21** (2), 209–214 (2019).
16. <https://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno>.
17. Malinskiy T. V., Zheleznov V. Yu., Rogalin V. E. and Kaplunov I. A., *Journal of Physics: Conference Series* **2103** (1), 012154 (2021).
18. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Mikolutsky S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Khomich Yu. V., Yamschikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *Technical Physics Letters* **47** (10), 734–736 (2021).
19. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Mikolutsky S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Khomich Yu. V., Yamschikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *News of higher educational institutions. Materials of electronic engineering* **23** (3), 203–212 (2021) [in Russian].