

## Модифицированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков

Е.А. Рябов, Н.В. Короневский, К.А. Зыков, Б.В. Сергеева, В.А. Кильдишева, С.А. Сергеев

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** для сокращения времени эксперимента и обеспечения автоматизации процесса измерений спектров отражения и пропускания СВЧ излучения в 3-см диапазоне разработана установка, состоящая из панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61 и Arduino Mega

**Ключевые слова:** растворы, СВЧ излучение, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН)

В Институте физики Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (СГУ) студенты изучают свойства нано- и микрочастиц различной природы и технологии их синтеза [1 – 5], новые композитные материалы [6, 7]. Этой актуальной тематике уделяется большое внимание при чтении лекционных курсов, а также при подготовке курсовых и выпускных работ [8 – 18].

В диапазоне частот 7,8 ГГц ÷ 10,2 ГГц экспериментально исследованы частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн волноводных секций, заполненных растворами диэлектриков [20, 21] и рассчитаны значения диэлектрической проницаемости [22, 23].

Проведение подобных экспериментов требует значительного времени, что накладывает ограничения на исследуемые объекты: например, невозможно измерение характеристик суспензий крупных и седиментирующихся со временем частиц. Необходимо учитывать также влияние человеческого фактора.

Для автоматизации процесса измерений спектров отражения и пропускания СВЧ излучения и сокращения времени эксперимента была предложена установка, состоящая из подключенного к компьютеру через плату Arduino Nano панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61 [19 – 21].

Предложен альтернативный вариант установки, автоматизирующей процесс измерения спектров отражения/пропускания СВЧ излучения, состоящей из панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61 и Arduino Mega с модулем TFT\_320QVT\_9341. Модуль TFT\_320QVT\_9341 состоит из сенсорного экрана, TFT LCD дисплея и разъема для подключения SD-карты (рисунок 1). От использования компьютера в данном варианте установки отказались.



**Рисунок 1.** Слева направо: Arduino Mega, плата расширения TFT LCD Mega Shield V2.2, TFT\_320QVT\_9341

Модуль TFT\_320QVT\_9341 работает с Arduino Mega через плату расширения TFT LCD Mega Shield V2.2. С его помощью можно: 1) выбрать режим работы КСВН/ослабления, 2) переключателем «Предел» установить предельное значение КСВН/ослабления, 3) выбрать диапазон частот, 4) произвести запуск и завершение считывания и обработки данных с панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61, 5) сохранить полученные данные на SD-карту.

Схема подключения панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61 к Arduino Mega представлена на рисунке 2.

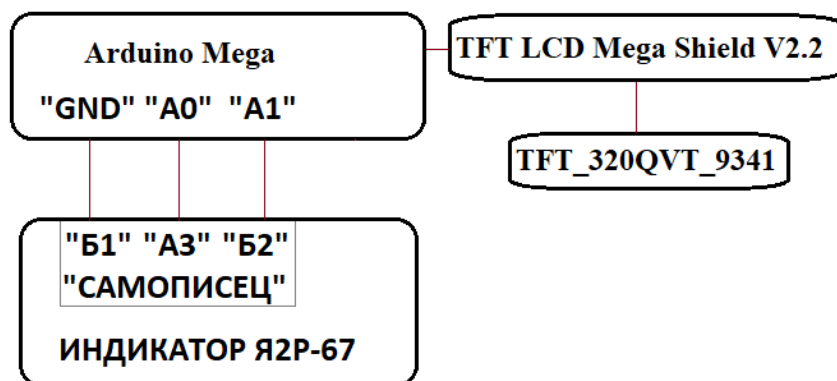


Рисунок 2. Подключение Arduino Mega к индикатору Я2P-67

Плата Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560 и элементах обвязки для программирования и интеграции с другими устройствами. Разрешение АЦП микроконтроллера ATmega2560 – 10 бит. Опорное напряжение для измерения аналогового сигнала – 5 В. АЦП преобразует аналоговый сигнал  $0 \div 5$  В на входе в цифровой сигнал в диапазоне от 0 до 1023.

Для Arduino Mega в среде Arduino IDE написан скетч для считывания частотных спектров КСВН и коэффициентов отражения/пропускания СВЧ излучения с Я2P-67, обработки полученных данных и передачи их на SD-карту. Интегрированная среда Arduino IDE – это кроссплатформенное приложение Java, содержащее текстовый редактор программного кода, компилятор AVR-GCC, программу avrdude для прошивки микроконтроллера. Arduino IDE использует язык программирования Arduino (основанный на C++), стандартную библиотеку avr-libc, скомпилированную под платформу AVR, а также другие библиотеки для упрощения использования готовых датчиков и модулей.

Через разъем «Самописец» Я2P-67 на плату Arduino Mega передается два сигнала: пилообразный сигнал горизонтальной развертки в качестве опорного сигнала (для определения частотного диапазона) и сигнал с выхода усилителя вертикального отклонения (для определения значения КСВН либо коэффициентов отражения/пропускания). Полученные сигналы Arduino Mega обрабатывает и преобразует один из них в заданные на генераторе значения частот, другой – в соответствующие значения КСВН либо коэффициентов отражения/пропускания. Сигнал развертки пилообразный, для идентификации частот достаточно знать значения начальной и конечной частот исследуемого диапазона и подобрать соответствующую линейную аппроксимацию. Для сигнала соответствующего КСВН на выходе усилителя вертикального отклонения подобраны полиномы 6 степени для следующих положений переключателя «Предел» (прибор Я2P-67): 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30 дБ. Для коэффициентов отражения/пропускания подобрана зависимость для положения переключателя «0» (для других положений переключателя из полученных данных необходимо отнять значение на переключателе «Предел»). Для градуировки установки полученные частотные спектры сравнивались с аналогичными спектрами,

снятыми вручную, подбирались коэффициенты аппроксимирующего полинома 6 степени (погрешность аппроксимации не более 1 %).

Использование автоматизированной установки позволило до единиц секунд сократить время непосредственного измерения частотных спектров КСВН и коэффициентов отражения/пропускания. Это делает возможным исследование большего числа объектов и позволяет производить более подробную запись (большее количество точек в исследуемых спектрах) для последующего анализа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке **РФФИ** в рамках научного проекта № 20-07-00603 А.

#### Список литературы

1. Сергеева А. С. и др. Исследование процесса перекристаллизации магнитных микрочастиц // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Мат. конф. – Казань: Синяев Д.Н., 2013. – С. 142-144.
2. Сергеев Р. С. и др. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: мат. конф. – Саратов: «Наука», 2014. – С. 244-249.
3. Сергеев Р. С. и др. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, обладающих магнитными свойствами // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: мат. конф. – Москва: Прондо, 2014. – С. 275-283
4. Sergeeva A. et al. Vaterite→calcite recrystallization of magnetic calcium carbonate microparticles // The nanoparticles and nanostructured coatings microcontainers: technology, properties and applications – Mater. Conf. – Saratov: Saratov State University, 2015. – P. 71-72.
5. Сергеева А. С. и др. Синтез пористых микрочастиц, обладающих магнитными свойствами // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Мат. конф. – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. – С. 139-141.
6. Симаков В. В. и др. Влияние освещения на газочувствительность тонких пленок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – № 1. – С. 34-40.
7. Сергеева А. С. и др. Синтез и исследование свойств сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. – С. 156-157.
8. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. – 164 с.
9. Михайлов А. И., Сергеев С. А. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. 2-е изд. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2020. – 192 с.
10. Усанов Д. А., Никитов С. А., Скрипаль А. В., Пономарев Д.В. СВЧ фотонные кристаллы – новая разновидность периодических структур в радиоэлектронике: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2016. – 84 с.
11. Усанов Д. А. др. Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ: Лабораторный практикум: учеб. пос. – Саратов: Электр. издание Саратов. ун-та, 2012. – 91 с.
12. Усанов Д. А. и др. Измерение параметров полупроводников, микро- и наноструктур на СВЧ: учеб. пособие. – Саратов: Электронное издание Саратов. ун-та, 2012. – 55 с.
13. Усанов Д. А. и др. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения. – М.: Физматлит, 2018. – 184 с.
14. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. – М.: Физматлит, 2004. – 646 с.
15. Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. – М.: Физматлит, 2003. – 495 с.
16. Храмов А. Е. и др. Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2016. – 460 с.
17. Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М. Нелинейные колебания: Учебное пособие для вузов. М.: URSS, 2019. – 292 с.
18. Скибина Ю. С. и др. Измерение параметров и характеристик микроструктурных волноводов и твердотельных инжекционных лазеров: учеб. пособие для студентов физических специальностей высших учебных заведений. – Саратов: Изд-во «Амирит», 2018. – 52 с.
19. Сергеев С. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2019. – Т. 1, №. 1. – С. 439–444.
20. Рябов Е. А. и др. Установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во «Техно-

- Декор», 2019. – С. 214-216.
21. Рябов Е. А. и др. Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания коллоидов микро- и наночастиц // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами: сб. статей. – Саратов: Сарат. источник, 2019. – С. 188-191.
  22. Сергеев С. А., Гулманов Э. Э., Сергеев Р. С. Теоретическое и экспериментальное исследование спектров отражения и поглощения волноводных секций, заполненных жидким диэлектриком // В мире научных открытий. – 2015. – № 8.1 (68). – С. 494-506.
  23. Сергеев С. А. и др. Определение диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 515-519.