

Автоматизированная установка для измерения спектров КСВН и пропускания жидких диэлектриков

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

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

Аннотация: была разработана установка, состоящая из панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61 и персонального компьютера, подключенного к измерителю через плату Arduino Nano, с целью уменьшения времени эксперимента и обеспечения автоматизации процесса измерений спектров отражения и пропускания СВЧ излучения в 3-см диапазоне

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

Технологиями получения и исследованиям свойств нано- и микрочастиц различной природы [1 – 14], коллоидами на их основе [15 – 18], а также новыми композитными материалами [19 – 25] студенты факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского активно занимаются в рамках подготовки курсовых работ и дипломных проектов. Этой тематике уделяется внимание при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов в процессе изучения следующих дисциплин: Введение в специальность, Твердотельная электроника, Основы математического моделирования в твердотельной электронике, Основы молекулярной электроники, Физика и химия границ раздела фаз и коллоидных систем, Физико-химические основы технологии электроники и наноэлектроники, Компьютер в физической лаборатории, Физические основы твердотельной электроники (направление подготовки 11.03.04); Полупроводниковая волновая электроника, Твердотельная и вакуумная СВЧ микроэлектроника, Современные проблемы электроники, Математические модели в естествознании и технике, Физика и химия коллоидов и границ раздела фаз (11.04.04); Приборы на квантовых эффектах: технология и материалы, Физика и химия поверхности и коллоидов, Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов; Интеллектуальные материалы для капсулирования и доставки лекарств, Физико-химические основы капсулирования и создания нанокомпозитов, Полимерные материалы и композиты на их основе, Методы моделирования и оптимизации свойств нетканых материалов (22.04.01), Современные проблемы твердотельной электроники (11.06.01) [26 – 40]. На кафедре физики полупроводников несколько лет работает научный кружок студентов и аспирантов «Коллоиды наноразмерных объектов: синтез, исследование свойств, перспективы применения» (научный руководитель доцент Сергеев С.А.).

В работах [17, 41 – 45] проведены экспериментальные исследования частотных зависимостей коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн волноводных секций, заполненных растворами диэлектриков, в диапазоне частот 7,8 ГГц ÷ 10,2 ГГц, рассчитаны значения диэлектрической проницаемости [46 – 50].

При всей привлекательности применяемой методики, для проведения одного эксперимента требуется значительное время, что помимо усиления влияния человеческого фактора накладывает ряд ограничений на исследуемые объекты. Так, оказывается невозможным измерение суспензий крупных и седиментирующихся со временем частиц.

Для сокращения продолжительности эксперимента и обеспечения автоматизации

процесса измерений спектров отражения и пропускания СВЧ излучения была разработана установка, состоящая из панорамного измерителя КСВН и ослабления P2-61, подключенного к компьютеру через плату Arduino Nano (рисунок 1).

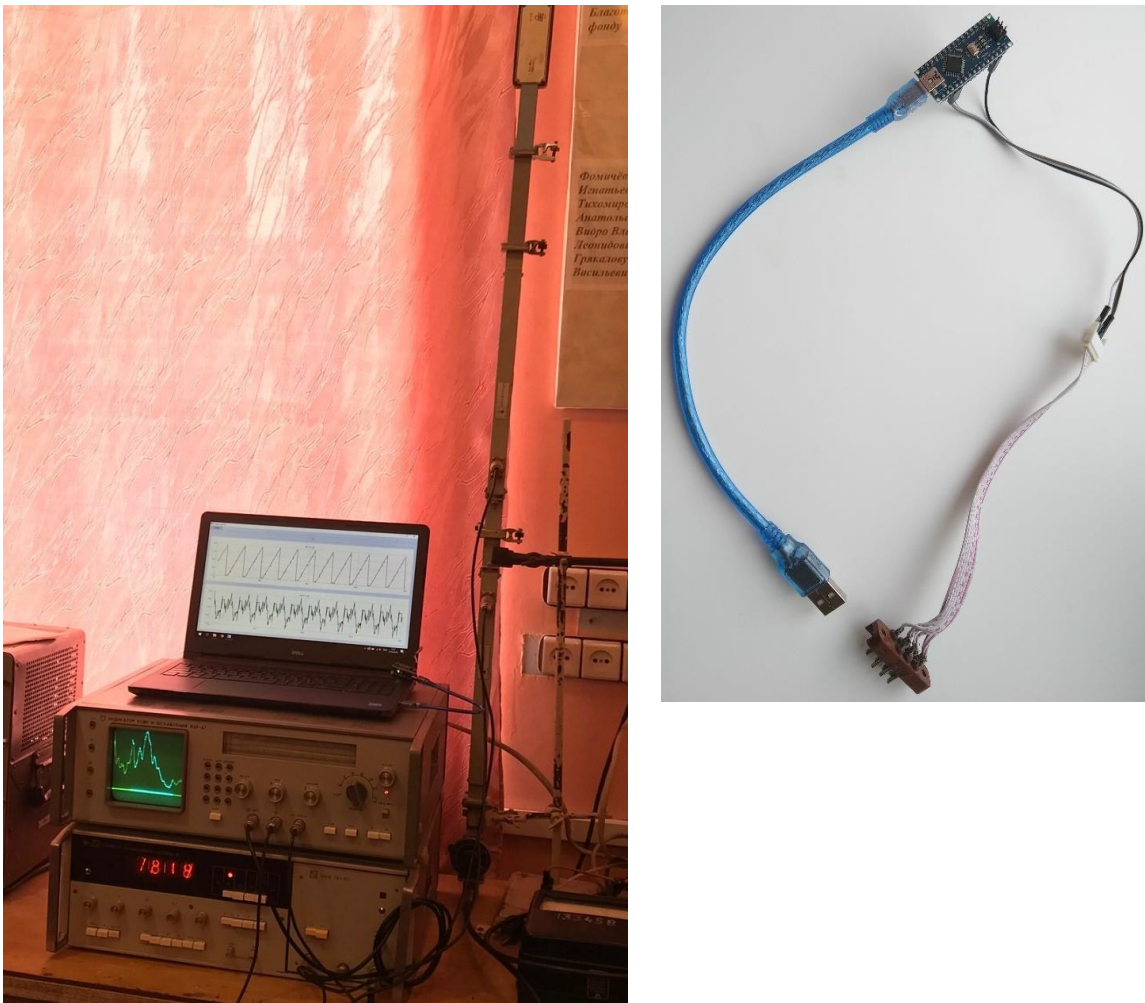


Рисунок 1. Установка для проведения измерений

Плата Arduino Nano построена на микроконтроллере ATmega328 и элементах обвязки [51] для программирования и интеграции с другими устройствами [52]. АЦП микроконтроллера ATmega328 имеет разрешение 10 бит [53]. Для измерения аналогового сигнала используется опорное напряжение, равное 5 вольтам. АЦП преобразует получаемый на входе аналоговый сигнал в диапазоне от 0 до 5 вольт в цифровой сигнал в диапазоне от 0 до 1023.

Для Arduino Nano в среде Arduino IDE был написан скетч для считывания частотных спектров КСВН и коэффициентов отражения и пропускания СВЧ излучения с Я2Р-67 и передачи полученных данных на компьютер. 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 языке программирования C++, и стандартную библиотеку avr-libc, скомпилированную под платформу AVR, а так же ряд других библиотек для упрощения использования готовых модулей и датчиков. Скетч – это имя, используемое Arduino для программы. Это единица разработанного авторами кода, которая загружается и запускается на плате Arduino [54]. Через разъем «Самописец» Я2Р-67 на плату Arduino Nano передается два сигнала: 1) пилообразный сигнал горизонтальной развертки, используемый в качестве опорного сигнала для определения частотного диапазона; 2)

сигнал с выхода усилителя вертикального отклонения, который используется для определения значения КСВН либо коэффициентов отражения или пропускания, измеряемых в децибелах.

Arduino Nano обрабатывает полученные сигналы и преобразует один из сигналов в заданные на генераторе значения частот, а другой – в соответствующие значения КСВН либо коэффициентов отражения или пропускания. Сигнал развертки имеет пилообразный вид, для выполнения измерений достаточно знать значения начальной и конечной частот исследуемого диапазона. Для определения зависимости частоты от сигнала развертки была подобрана соответствующая линейная аппроксимация. Для сигнала соответствующего КСВН на выходе усилителя вертикального отклонения, были подобраны различные зависимости (полиномы 6 степени) для каждого положения переключателя «Предел» (0, -5, -10, -15, -20, -25, -30 децибел) на приборе Я2Р-67. Для коэффициентов отражения или пропускания, измеряемых в децибелах, подобрана зависимость в положении переключателя «0». Для других положений переключателя необходимо отнять из полученных данных значение, указанное на переключателе «Предел».

Градуировалась установка следующим образом: полученные с помощью установки частотные спектры сравнивались с аналогичными спектрами, снятыми вручную, и подбирались коэффициенты аппроксимирующего полинома 6 степени. Погрешность аппроксимации составляла не более 1 %.

Далее через последовательный порт скетч передает на компьютер два ряда значений: значения частоты сигнала и соответствующие этой частоте значения КСВН, либо коэффициента отражения или пропускания.

Для считывания данных с Arduino Nano использовалась Recorder_for_MCU – разработанная авторами программа мониторинга данных с последовательного порта в реальном времени [55]. Программа написана на языке программирования C++ с использованием библиотеки Qt. Программа в реальном времени отображает исследуемые частотные спектры в виде графиков данных, полученных с порта. В дальнейшем программа имеет возможность сохранять полученные результаты в текстовый файл. Данные в файле структурируются в виде столбцов: в первом столбце отображается время работы программы в период считывания данных, в других столбцах – данные, полученные с последовательного порта.

Использование автоматизированной установки позволило сократить время непосредственного измерения частотных спектров КСВН и коэффициентов отражения и пропускания, до единиц секунд, что дает возможность исследовать большее число объектов. Кроме того, большое количество точек в исследуемых спектрах позволяет производить их запись более подробно для последующего анализа и сравнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты 19-07-00087 и 19-07-00086).

Список литературы

1. Михайлов, А. И. Исследование особенностей электронного спектра квантовых точек полупроводника CdSe / А. И. Михайлов, [и др] // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 15. – С. 51.
2. Mikhailov, A. I. A study of specific features of the electronic spectrum of quantum dots in CdSe semiconductor / A. I. Mikhailov, [et al.] // Technical Physics Letters. – 42(8). – P. 796–798.
3. Savelyeva, M. S. Vaterite coatings on electrospun polymeric fibers for biomedical applications / M. S. Savelyeva, [et al.] // J. Biomed. Mater. Res. Part A. – 2017. – Vol. 105, № 1. – P. 94–103.
4. Жуков, Н. Д. Особенности свойств полупроводников $A_{III}B_V$ в мультимерной наноструктуре / Н. Д. Жуков, [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. № 1. – С. 83–88.
5. Михайлов, А. И. Исследование свойств квантовых точек полупроводников $A_{III}B_{VI}$ и $A_{III}B_V$ / А. И. Михайлов, [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. № 6. – С. 603–607.
6. Kabanov, V. F. Peculiarities of the properties of III-V semiconductors in a multigrain structure / V. F. Kabanov, [et al.] // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52. № 1. – P. 78–83.
7. Mikhailov, A. I. Study of the properties of II–VI and III–V semiconductor quantum dots / A. I. Mikhailov,

- [et al.] // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52. № 6. – P. 750–754.
8. Mikhailov, A. I. Methodology of analyzing the CdSe semiconductor quantum dots parameters / A. I. Mikhailov, [et al.] // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2018. – Vol. 9. № 4. – P. 464.
 9. Sergeeva, A. Composite Magnetite and Protein Containing CaCO₃ Crystals. External Manipulation and Vaterite→Calcite Recrystallization-Mediated Release Performance / A. Sergeeva, [et al.] // ACS Applied Materials & Interfaces. 2015. – Vol. 7, Is. 38. – P. 21315–25.
 10. Сергеева, А. С. Исследование процесса перекристаллизации магнитных микрочастиц / А. С. Сергеева, [и др.] // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Мат. конф. – Казань: Синяев Д.Н., 2013. – С. 142–144.
 11. Сергеев, Р. С. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами / Р. С. Сергеев, [и др.] // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: мат. конф. – Саратов: «Наука», 2014. – С. 244–249.
 12. Сергеев, Р. С. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, обладающих магнитными свойствами / Р. С. Сергеев, [и др.] // Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: мат. конф. – Москва: Прондо. 2014. – С. 275–283
 13. Sergeeva, A. Vaterite→calcite recrystallization of magnetic calcium carbonate microparticles / A. Sergeeva, [et al.] // The nanoparticles and nanostructured coatings microcontainers: technology, properties and applications – Mater. Conf. – Saratov: Saratov State University, 2015. – P. 71–72.
 14. Сергеева, А. С. Синтез пористых микрочастиц, обладающих магнитными свойствами / А. С. Сергеева, Р. С. Сергеев, С. А. Сергеев // Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Мат. конф. – Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. – С. 139–141.
 15. Сергеев, С. А. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах / С. А. Сергеев, Э. Э. Гулманов, Р. С. Сергеев // В мире научных открытий. – 2014. – № 4 (52). – С. 148–160.
 16. Сергеев, С. А. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне / С. А. Сергеев, [и др.] // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сб. ст. – Саратов: «Наука», 2013. – С. 214–228.
 17. Сергеев, С. А. Исследование свойств водных растворов этилового спирта в СВЧ диапазоне / С. А. Сергеев, Э. Э. Гулманов, Р. С. Сергеев // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2015 – С. 144–145.
 18. Сергеев, С. А. Исследование свойств натрий-фосфатного буфера на сверхвысоких частотах / С. А. Сергеев, Э. Э. Гулманов, Р. С. Сергеев // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. – С. 154–155.
 19. Симаков, В. В. Влияние освещения на газочувствительность тонких пленок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре / В. В. Симаков, [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – № 1. – С. 34–40.
 20. Сергеев, С. А. Синтез и исследование свойств неорганических нановолокон с микрочастицами CaCO₃ / С. А. Сергеев, [и др.] // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2017. – С. 249–251.
 21. Короневский, Н. В. Синтез и исследование свойств микрочастиц CaCO₃, выращенных на неорганических волокнах и модифицированных наночастицами Fe₃O₄ / Н. В. Короневский, [и др.] // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине: Мат. школы-семинара. – Саратов: Изд-во Саратовский источник, 2017. – С. 120–123.
 22. Короневский, Н. В. Формирование и исследование свойств микрочастиц карбоната кальция с наночастицами магнетита на неорганических нановолокнах / Н. В. Короневский, [и др.] // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии. – Саратов: Изд. СГТУ, 2018. – С. 38–42.
 23. Сергеева, А. С. Синтез и исследование свойств сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами / А. С. Сергеева, [и др.] // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. – С. 156–157.
 24. Сергеев, С. А. Технология получения микрочастиц карбоната кальция, модифицированных наночастицами магнетита, на неорганических волокнах / С. А. Сергеев, Н. В. Короневский, Р. С. Сергеев / Нано- и биомедицинские технологии. Управление качеством. Проблемы и перспективы: Сб. статей, вып. 2. – Саратов: Техно-Декор, 2018. – С. 76–79.
 25. Михайлов, А. И. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие / А. И. Михайлов, С. А. Сергеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. – 164 с.
 26. Михайлов, А. И. Физические основы твердотельной электроники и микроэлектроники: Планы семинарских занятий: Учеб. пособие / А. И. Михайлов, С. А. Сергеев, Е. Г. Глуховской. – Саратов: Редакция журнала «Промышленность Поволжья», 2008. – 116 с.
 27. Сергеев, С. А. Компьютер в физической лаборатории: учеб.-метод. пособие / С. А. Сергеев. – Саратов: ООО «Редакция журнала «Промышленность Поволжья», 2008. – 368 с.

28. Сергеев, С. А. Компьютер в физической лаборатории: учеб.-метод. пособие / С. А. Сергеев, И. В. Сысоев. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2013. – 304 с.
29. Портнов, С. А. Физика и химия границ раздела фаз: учеб. пособие / С. А. Портнов, [и др.] – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2015. – 132 с.
30. Сергеев, С. А. Физика и химия коллоидных систем: учеб. пособие / С. А. Сергеев, [и др.] – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2016. – 168 с.
31. Сергеев, С. А. Основы программирования и анализа данных для задач материаловедения, биофизики и физической химии: учеб. пособие / С. А. Сергеев, И. В. Сысоев, Д. А. Горин. – Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2016. – 304 с.
32. Сергеев, С. А. Основы программирования для задач биофизики и материаловедения: учеб. Пособие / С. А. Сергеев, И. В. Синёв, Д. А. Горин. – Саратов: Изд-во «Амирит», 2017. – 308 с.
33. Сергеев, С. А. Методы биофотоники для исследования сложных систем / С. А. Сергеев, [и др.] – Саратов: Изд-во «Амирит», 2017. – 104 с.
34. Сергеев, С. А., Современные компьютерные технологии. Персональный компьютер в инженерной практике / С. А. Сергеев, А. И. Михайлов, Б. В. Сергеева. – Germany. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 240 с.
35. Зыков, К. А. Материаловедение наноструктурированных материалов. Исследование диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков волноводным методом / К. А. Зыков, Б. В. Сергеева, С. А. Сергеев. – Germany. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2018. – 112 с.
36. Короневский, Н. В. Материаловедение наноструктурированных материалов. Синтез и исследование свойств микрочастиц карбоната кальция с наночастицами магнетита на неорганических волокнах / Н. В. Короневский, Р. С. Сергеев, С. А. Сергеев – Germany. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 120 с.
37. Горелов, А. П. Физические основы твердотельной электроники и нанoeлектроники. Исследование параметров двойных гетероструктур блоков лазерных диодов для импульсных излучателей / А. П. Горелов, [и др.] – Germany. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. – 80 с.
38. Скибина, Ю. С. Измерение параметров и характеристик микроструктурных волноводов и твердотельных инжекционных лазеров: учеб. пособие для студентов физических специальностей высших учебных заведений / Ю. С. Скибина, [и др.]. – Саратов: Изд-во «Амирит», 2018. – 52 с.
39. Михайлов, А. И. Лабораторный практикум по физике полупроводниковых приборов: Учеб. пособие. Ч. 1 / А. И. Михайлов, С. В. Стецюра, С. А. Сергеев. – Саратов: Колледж, 2002. – 72 с.
40. Сергеев, С. А. Инженерная графика. Основы построения чертежей: учеб.- метод. пособие / С. А. Сергеев, Е. И. Ерохина, Б. В. Сергеева – Саратов: Промышленность Поволжья, 2009. – 84 с.
41. Горин, Д. А. Влияние микроволнового излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами / Д. А. Горин, [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 2. – С. 45–50.
42. Gorin, D. A. Effect of microwave radiation on polymer microcapsules containing inorganic nanoparticles / D. A. Gorin, [et al.] // Technical Physics Letters. – 2006. – Vol. 32, № 1. – P. 70–72.
43. Sergeev, S. A. Investigation of absorption and reflection spectra of aqueous suspensions of nanoparticles in the X band of microwave bandwidth / S. A. Sergeev, [et al.] В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Saratov Fall Meeting 2006. – Saratov, 2007. – С. 653606.
44. Сергеев, С. А. Теоретическое исследование спектров отражения волноводных секций, заполненных жидким диэлектриком / С. А. Сергеев, [и др.] // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2015. – С. 146–147.
45. Сергеев, С. А. Исследование свойств водных растворов родамина на сверхвысоких частотах / С. А. Сергеев, Э. Э. Гулманов, Р. С. Сергеев // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2015 – С. 141–143.
46. Сергеев, С. А. Исследование свойств неорганических нановолокон с микрочастицами CaCO₃ на сверхвысоких частотах / С. А. Сергеев, [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017. – Т. 1. – С. 155–159.
47. Сергеев, С. А. Исследование свойств водных растворов этилового спирта на сверхвысоких частотах / С. А. Сергеев [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2015. – Т. 1. – С. 332.
48. Сергеев, С. А. Теоретическое и экспериментальное исследование спектров отражения и поглощения волноводных секций, заполненных жидким диэлектриком / С. А. Сергеев, Э. Э. Гулманов, Р. С. Сергеев // В мире научных открытий. – 2015. – № 8.1 (68). – С. 494–506.
49. Сергеев, С. А. Определение диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта / С. А. Сергеев, [и др.] // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – Т. 1. – С. 515–519.
50. Сергеев, С. А. Изучение диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта / С. А. Сергеев, [и др.] // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: тез. докл. – Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2018. – С. 280–282.
51. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D0%B2%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%B0>
52. <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>

53. <https://www.microchip.com/> (<http://files.amperka.ru/datasheets/ATmega328.pdf>)
54. [http://wikihandbk.com/wiki/Arduino:%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B/Sketch\(%D0%A1%D0%BA%D0%B5%D1%82%D1%87\)](http://wikihandbk.com/wiki/Arduino:%D0%9E%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%8B/Sketch(%D0%A1%D0%BA%D0%B5%D1%82%D1%87))
55. https://github.com/new99/Recorder_for_MCU