

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.9.07

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА

©2026 г. И. И. Усатов^{a*}, Н. П. Полуэктов^{a,**}

^aМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Мытищинский филиал

Россия, 141005, Мытищи Московской обл., 1-я Институтская ул., 1

*e-mail: usatov.igor@gmail.com

** e-mail: poluekt47@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.2025 г.

После доработки 17.09.2025 г.

Принята к публикации 22 .10.2025 г.

Разработана система зондовых измерений мощного импульсно-периодического разряда, позволяющая определять характеристики плазмы в различные моменты времени. Система состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть включает зонды с блоком датчиков, плату сбора данных с блоками подготовки сигналов и усилителя питания зондов. Для создания управляемого источника зондового напряжения разработан мощный высоковольтный усилитель с диапазоном выходного напряжения от -85 до $+85$ В и максимальным выходным током 700 мА. Измеряемые напряжения с зонда, а также вход усилителя подключаются к плате сбора данных через блоки гальванической развязки, что является необходимым условием прецизионных измерений в условиях значительных помех, которые создает силовая часть установки. Применение системы выборки хранения позволяет получать вольт-амперные характеристики в реальном масштабе времени. Программная часть включает функционально законченные программу, предназначенную для управления процессом регистрации вольт-амперных характеристик.

1. ВВЕДЕНИЕ

Со второй половины 90-х годов прошлого века интенсивно исследуется магнетронный разряд, который в зарубежной литературе называется HiPIMS (high power impulse magnetron sputtering) [1–4]. В этом разряде стационарный источник питания заменяется на импульсно-периодический, работающий в режиме мощных импульсов (максимум тока 100–1000 А), длительность разряда $\tau = 10\text{--}500$ мкс, период разряда $T = 0.03\text{--}20$ мс). Плотность ионного тока на мишени равна $0.25\text{--}10$ А/см², импульсная мощность разряда составляет до 10 кВт/см², что на несколько порядков больше, чем в стационарных магнетронах. Преимущество данного разряда – возможность достижения высокой степени ионизации распыленных атомов мишени. Свойства получаемых пленок зависят от характеристик плазмы и определяются, в частности, потоками и

энергией ионов мишени и буферного газа [4, 5]. Таким образом, концентрация ионов и управление их энергией имеют решающее значение для осаждения пленки.

Обычный метод повышения энергии ионов заключается в подаче отрицательного напряжения на подложку. Пленки, полученные в HiPIMS-разряде, имеют более высокую плотность [6], адгезию, твердость, гладкость поверхности [7], а также возможность конформного осаждения на рельефных поверхностях субмикронных размеров [8].

При работе в стационарном режиме с такими плотностями тока мишень магнетрона испытывает большие тепловые нагрузки, что приводит к местному расплавлению мишени, каплеобразованию и срыву тлеющего разряда (дугообразованию). В HiPIMS-разряде вследствие большой скважности средняя мощность за период не превышает 1–2 кВт, поэтому мишень не перегревается. При этом в момент импульса тока вблизи катода концентрация плазмы достигает величины 10^{13} см^{-3} , в результате электроны ионизуют распыленные атомы мишени на расстоянии несколько сантиметров. Степень ионизации потока атомов металла (отношение потока ионов Γ_{Me^+} к полному потоку металла, состоящего из атомов и ионов $\Gamma_{\text{Me}^+ + \text{Me}}$) достигает 80%.

Недостатком техники HiPIMS является уменьшение скорости осаждения. По сравнению со стационарным разрядом скорость осаждения пленки в HiPIMS-разряде с планарным катодом при одинаковой средней мощности уменьшается в 2–3 раза. Это связано в основном с тем, что область плазмы с концентрацией 10^{13} см^{-3} располагается на расстоянии порядка сантиметра от катода, и большая часть ионов металла возвращается на мишень и участвует в самораспылении. При этом поток ионов металла на подложку уменьшается. В большинстве случаев в HiPIMS-разряде используется плоский катод в виде диска диаметром 50–300 мм.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В лаборатории секции физики МФ МГТУ создан источник высокоплотной плазмы на основе магнетрона с полым катодом [9, 10] (рис. 1). Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра, изготовленного из меди, охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов. Мы используем катоды разных размеров: диаметром $d = 80 \text{ мм}$, длиной $L = 60\text{--}80 \text{ мм}$ и $d = 140 \text{ мм}$, $L = 110 \text{ мм}$.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки...

Особенностью этого разряда является высокая концентрация плазмы (более 10^{11} см^{-3} при давлении 1–10 мТорр вплоть до расстояния 30 см от выходного сечения магнетрона), что создает условия для ионизации распыленных атомов мишени не только вблизи нее, но и на всем расстоянии до подложки. Дополнительная ионизация атомов мишени вдали от катода увеличивает степень ионизации потока на подложку.

Для изучения особенностей и преимуществ техники HiPIMS и для разработки новых и более эффективных источников распыления необходимо понимание физических основ генерации, кинетики и динамики импульсной плазмы. Для практических применений, чтобы контролировать свойства осаждаемых покрытий, крайне важно понимать взаимосвязь между параметрами процесса (такими как электрическая мощность и конфигурация импульсов) и локальными параметрами плазмы (такими как энергия частиц и потоки), которые фактически управляют взаимодействием плазмы с поверхностью.

Высокая степень ионизации плазмы HiPIMS в сочетании с эффективным ускорением ионов в направлении растущей пленки могут контролировать и улучшать ее свойства за счет дополнительного количества энергии, подаваемой на поверхность пленки.

С помощью разработанной системы зондовой диагностики можно определять концентрацию плазмы, температуру электронов, плазменный и плавающий потенциалы в различные моменты времени импульсного разряда и после его выключения. Показанные на рис. 1 зонды позволяют определять параметры плазмы в различных областях разряда: внутри полого катода, на выходе и вдали от него. Зонды Ленгмюра изготовлены из вольфрама диаметром 0.2 мм и имеют длину 2–3 мм.

3. СИСТЕМА ЗОНДОВЫХ HiPIMS-ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Аппаратная часть

Система зондовых HiPIMS-измерений состоит из аппаратной и программной частей. На рис. 2 приведена схема аппаратной части измерения ВАХ. В начале каждого периода источник питания передает запускающий импульс на генератор Г5-72. С генератора передаются два сигнала запуска. Синхроимпульс передается на вход синхронизации осциллографа BORDO B-421, записывающего параметры тока и напряжения в течение всего разряда. Сигнал с выхода генератора, смещенный по времени относительно начала разряда на задаваемое оператором время, передается на блок VAC-HiPIMS. Смещение сигнала позволяет проводить измерения ВАХ на разных этапах разряда.

Рис. 2. Схема аппаратной части измерения ВАХ

В блоке VAC-HiPIMS осуществляются передача напряжения с усилителя на зонд, преобразование эквивалентных значений тока и напряжения на зонде, а также их хранение и передача на измерение на блок SCC-2345, подключенный к плате NI6221 фирмы National instruments.

Блок VAC-HiPIMS состоит из платы синхронизации (рис. 3) и блока датчиков (рис. 4). Рассмотрим устройство этих плат подробнее.

Рис. 3. Схема платы синхронизации

Рис. 4. Схема платы блока датчиков

Импульс синхронизации, поступающий с выхода генератора Г5-72, гальванически развязывается микросхемой HCNW 4506, после чего инвертируется транзистором КТ3102.

Полученный сигнал передается на микросхему сдвоенного одновибратора с повторным запуском К155АГ3 и на плату блока датчиков (сигнал SAMPLE).

Верхний одновибратор запускается по спаду импульса с коллектора транзистора КТ3102. Он формирует задержку. Значение задержки задается резистором R_5 и емкостью C_4 . С выхода верхнего одновибратора берется инвертированный импульс $\bar{Q}1$, а по его окончанию (т.е. по фронту) запускается нижний одновибратор. Нижний одновибратор формирует собственно импульс запуска длительностью, задаваемой резистором R_6 и емкостью C_5 . Импульс запуска через развязку передается на триггер запуска платы SCC-2345 с выхода блока VAC-HiPIMS, разрешая считывание параметров ВАХ.

Присутствие в схеме одновибратора продиктовано необходимостью обеспечить задержку на время подготовки и сохранения сигналов тока и напряжения с зонда.

На рис. 5 приведены графики задержек следований и длительностей управляющих импульсов.

Рис. 5. Графики задержек следований и длительностей управляющих импульсов

Из приведенных графиков следует, что между сигналом на запись и разрешением на считывание устанавливается заведомо большая задержка. Это снижает вероятность искажения измеряемых данных.

Эквивалентное напряжение на зонде получается при помощи делителя напряжения, собранного на резисторах R_3 , R_4 и R_5 , а эквивалентный ток – при помощи делителя, собранного на резисторах датчика тока R_1 и R_2 .

Переключатели SA2 и SA3 обеспечивают выборку из четырех пределов измерения (1 В – 10 мА, 1 В – 100 мА, 5 В – 50 мА и 5 В – 500 мА).

Двойной ключ SA1 используется для переключения между режимами калибровки и работы.

Выборка и хранение напряжений, эквивалентных току и напряжению на зонде, осуществляются при помощи микросхем LF398 (рис. 4).

Выборки происходят в течение сигнала SAMPLE. Значения сигналов записываются и сохраняются на конденсаторах C_5 и C_6 , они передаются на плату SCC-2345.

В качестве управляемого источника зондового напряжения применяется мощный высоковольтный усилитель. Его характеристики указаны в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики высоковольтного усилителя

Параметр	Значение
Напряжение питания высокое $U_{пв}$, В	± 100
Напряжение питания низкое $U_{пн}$, В	± 12
Коэффициент передачи $K_{упр}$	+40
Диапазон выходного напряжения $U_{вых}$, В	$-85 - +85$
Максимальный выходной ток $I_{вых\ max}$, А	0.7
Диапазон управляющего напряжения $U_{упр}$, В	0–4
Выходное напряжение (при $U_{упр} = 0$) $U_{вых}$, В	–80
Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс	≤ 0.5

Принципиальная схема усилителя приведена на рис. 6. На операционном усилителе (ОУ) 140УД7 (DA1) собран сумматор с коэффициентом передачи по сигнальному входу $K_c = -1$ (коэффициент настраивается с помощью потенциометра R_1). На второй вход сумматора подключается источник опорного отрицательного напряжения на стабилизаторе Д818Е с токозадающим резистором R_6 . Резистор R_4 определяет коэффициент передачи по опорному входу. С его помощью необходимо добиться выходного напряжения на выходе DA1, равного –2 В при закороченном сигнальном входе. Это обеспечивает выходное напряжение всего усилителя –80 В при нулевом управляющем сигнале. Так реализуется режим ионной очистки зонда.

Рис. 6. Принципиальная схема усилителя

Сам усилитель собран на втором ОУ 140УД7 (DA_2) и транзисторах $VT_1 - VT_6$. Принципы построения такого усилителя изложены в работе [11]. К выходу низковольтного ОУ подключен дополнительный двухтактный транзисторный усилительный каскад, причем транзисторы VT_1, VT_3, VT_4 работают при положительном выходном напряжении, а VT_2, VT_5, VT_6 – при отрицательном. Поскольку транзисторный усилитель мощности инвертирует сигнал, резисторный делитель в цепи общей отрицательной обратной связи R_8, R_9 подключен к неинвертирующему входу ОУ 3. На транзисторах VT_1 и VT_2 реализованы каскады сдвига уровней по схеме с общей базой. Они обеспечивают базовые токи выходных транзисторов на уровне $(U_6 + U_d)/R_{10,11}$, где U_6 – выходное напряжение DA_2 , а $U_d \approx 0.6$ В – напряжение на прямосмещенном $p-n$ -переходе. Диоды VD_4 и VD_5 ограничивают обратное напряжение смещения на эмиттерно-базовых переходах VT_1 и VT_2 . Ток покоя выходных транзисторов определяется смещением на базах VT_1 и VT_2 , которое обеспечивается диодами $VD_6 - VD_9$ в прямом включении и присоединенным параллельно им потенциометром R_{16} . Уменьшение его сопротивления уменьшает ток покоя, им он и регулируется. Ток через указанную цепь смещения задается резисторами R_{14}, R_{15} . Каскад усиления мощности собран на транзисторных парах по схеме Дарлингтона. Пара $VT_5,$

VT_6 реализует $n-p-n$ -транзистор, а пара VT_3, VT_4 – $p-p$ -транзистор. Между инвертирующим 2 и неинвертирующим 3 входами DA_2 встречно-параллельно включены диоды VD_2, VD_3 , ограничивающие разность напряжений на входах в случае аварийной ситуации на уровне U_d . Конденсатор C_4 в цепи общей отрицательной обратной связи служит для коррекции АЧХ и предотвращает самовозбуждение. Прочие конденсаторы, изображенные на схеме, являются фильтрующими.

Защита выходных транзисторов от короткого замыкания в данной схеме не предусмотрена, потому что в качестве источников высоковольтного питания используются блоки Б5-49, которые быстро ограничивают ток при перегрузках на безопасном уровне.

Управляющее напряжение в диапазоне 0–4 В на вход усилителя подается с канала ЦАП платы NI6221. Управляющее напряжение устанавливается управляющей программой.

3.2. Программная часть

Программная часть написана на языке визуального программирования LabVIEW. Интерфейс программы приведен на рис. 7.

Рис. 7. Интерфейс программы регистрации вольт-амперных характеристик

Программа позволяет

- установить начальное U_b и конечное U_e напряжения на зонде,
- задать шаг по напряжению измеряемой ВАХ – $\text{step } U$,
- выбрать диапазон токовых измерений – Range ADC,
- выбрать количество измерений каждой пары точек – N mean,
- откалибровать систему – 0 calibration,
- измерить, визуально отобразить и сохранить ВАХ – measure.

При запуске измерения по параметрам шага по напряжению зонда, а также начального и конечного напряжений ВАХ рассчитывается длительность цикла измерений и создается уравнение линейной зависимости напряжения на усилителе от шага цикла.

Перед запуском цикла на ЦАП через гальваническую развязку SCC1Mod17 канала АО0 платы на усилителе устанавливается значение начального и конечного напряжений для измерения ВАХ.

В цикле измерений по импульсу запуска с выхода блока VAC-HiPIMS АЦП на плате SCC-2345 через модули гальванической развязки SCC1Mod2 каналов AI0 и AI1 проводится измерение эквивалентных напряжений и токов зонда. Если на контроллере N mean установлено целое значение большее единицы, то измерение проводится заданное значение раз с последующим усреднением. При этом использование данной возможности значительно увеличивает общее время измерения, так как измерение проводится только один раз за разряд. После этого на усилителе устанавливается напряжение, соответствующее следующему

значению напряжения. Если шаг цикла был последним, то на ЦАП устанавливается напряжение, равное нулю, что соответствует напряжению -80 В на выходе усилителя.

После окончания цикла все измеренные пары точек пересчитываются в соответствующие значения напряжения и тока. Строятся два графика. На первом отображаются зависимости эквивалентных напряжений и токов от номера измерения. На втором отображается измеренная ВАХ. Измеренную ВАХ можно предварительно проанализировать с помощью курсора или сохранить в файл со стандартизированным именем, местом хранения и сквозной нумерацией.

На рис. 8а приведен пример измеренной ВАХ при однократной регистрации пары точек (ток–напряжение), а на рис. 8б – при пятикратном усреднении. Диапазон напряжений зонда от -60 до $+70$ В, шаг по напряжению 0.2 В, количество точек 650 . Видно, что на усредненной ВАХ пульсации существенно меньше.

Рис. 8. ВАХ зонда, снятая при однократном измерении (а), при пятикратном усреднении (б)

На рис. 9а показаны сглаженные ВАХ, измеренные в различные моменты времени импульсного разряда на расстоянии $z=12$ см от среза полого катода. Разряд выключается в момент $t = 120$ мкс, но плазма сохраняется еще в течение сотен мкс. На рис. 9б приведена динамика концентрации электронов, рассчитанная по измеренным ВАХ.

Рис. 9. Сглаженные ВАХ зонда, измеренные в течение и после выключения импульсного разряда (а). Рассчитанная концентрация электронов (б).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная автоматизированная система зондовых измерений используется для контроля пространственно-временных параметров плазмы в мощном импульсно-периодическом разряде, предназначенном для получения наноструктурных пленок, а также для отработки оптимальных режимов с целью получения покрытий с заданными свойствами. Суммарная стоимость всех компонентов существенно меньше таковой у зарубежных аналогов, при этом наш комплекс не уступает им по своим функциональным возможностям. Система используется в течение многих лет и показала свою надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мозгрин Д., Фетисов И.К., Ходаченко Г.В.* // Физика плазмы. 1995. Т. 21. С. 400.
2. *Kouznetsov V., Macak K., Schneider J.M., Helmersson U., Petrov I.* // Surf. Coat. Technol. 1999. V. 122. P. 290. <https://doi.org/10.1016/S0257-8972%2899%2900292-3>
3. *Macak K., Kouznetsov V., Schneider J.M., Helmersson U., Petrov I.* // J. Vac. Sci. Technol. 2000. V. 18A. P. 1533. <https://doi.org/10.1116/1.582380>

4. *Mishra A., Kelly P.J., Bradley J.W.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 425201.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/19/4/045014>
5. *Anders A.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. P. 171101. <https://doi.org/10.1063/1.4978350>
6. *Gudmundsson J. T.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. P. 113001
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/abb7bd>
7. *Samuelsson M, Lundin D., Jensen J., Raadu M.A., Gudmundsson J.T., Helmersson U.* // Surf. Coat. Tech. 2010. V.15. P.591. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2010.07.041>
8. *Ehiasarian A.P., Wen J.G., Petrov I.* // J. Appl. Phys. 2007. V.101. P. 054301.
<https://doi.org/10.1063/1.2697052>
9. *Alami J., Persson P.O.Å., Music D., Gudmundsson J.T., Bohlmark J., Helmersson U.* // J. Vac. Sci. Technol. 2005. V. A 23. P. 278. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/14/3/015>
10. *Царьгородцев Ю. П., Полуэктов Н. П., Усатов И. И., Евстигнеев А. Г., Козловская Е. П., Амелькин О. О.* // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 6. С. 558.
<https://doi.org/10.1134/S0367292119050135>
11. *Poluektov N.P., Usatov I.I., Kladov M Yu.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. P. 075003
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac0b2a>
12. *А. Г. Алексенко, Е.А. Коломбет, Г.И. Стародуб.* Применение прецизионных аналоговых микросхем. Москва: Радио и связь, 1985.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – полый катод, 2 – Nd–Fe–B-магниты, 3 – блок питания HiPIMS, 4 – электромагнит, 5 – анод, 6 – зонды, 7 – блок питания анода, 8 – система подачи газа, 9 – насос, 10 – система зондовых измерений.
- Рис. 2.** Схема аппаратной части измерения ВАХ.
- Рис. 3.** Схема платы синхронизации.
- Рис. 4.** Схема платы блока датчиков.
- Рис. 5.** Графики задержек следований и длительностей управляющих импульсов.
- Рис. 6.** Принципиальная схема усилителя.
- Рис. 7.** Интерфейс программы регистрации вольт-амперных характеристик.
- Рис. 8.** ВАХ зонда, снятая при однократном измерении (а), при пятикратном усреднении (б).
- Рис. 9.** Сглаженные ВАХ зонда, измеренные в течение и после выключения импульсного разряда (а). Рассчитанная концентрация электронов (б). Разряд выключается при $t = 120$ мкс; $\text{Ar}+\text{C}$, $p = 7$ мторр, $z = 12$ см, $R = 0$.

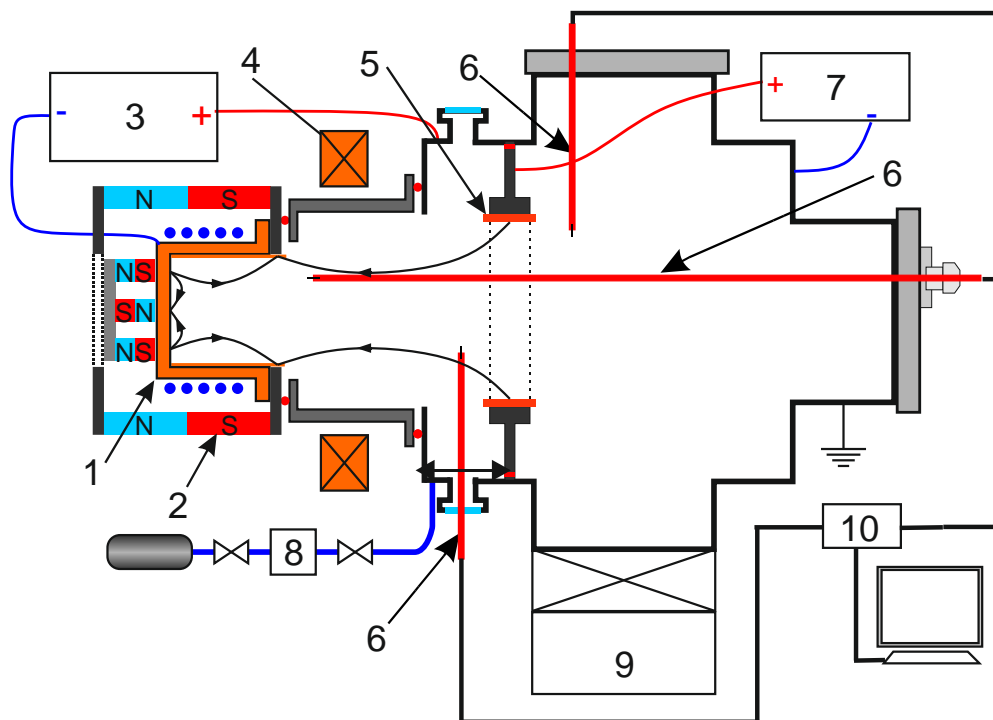


Рис. 1.

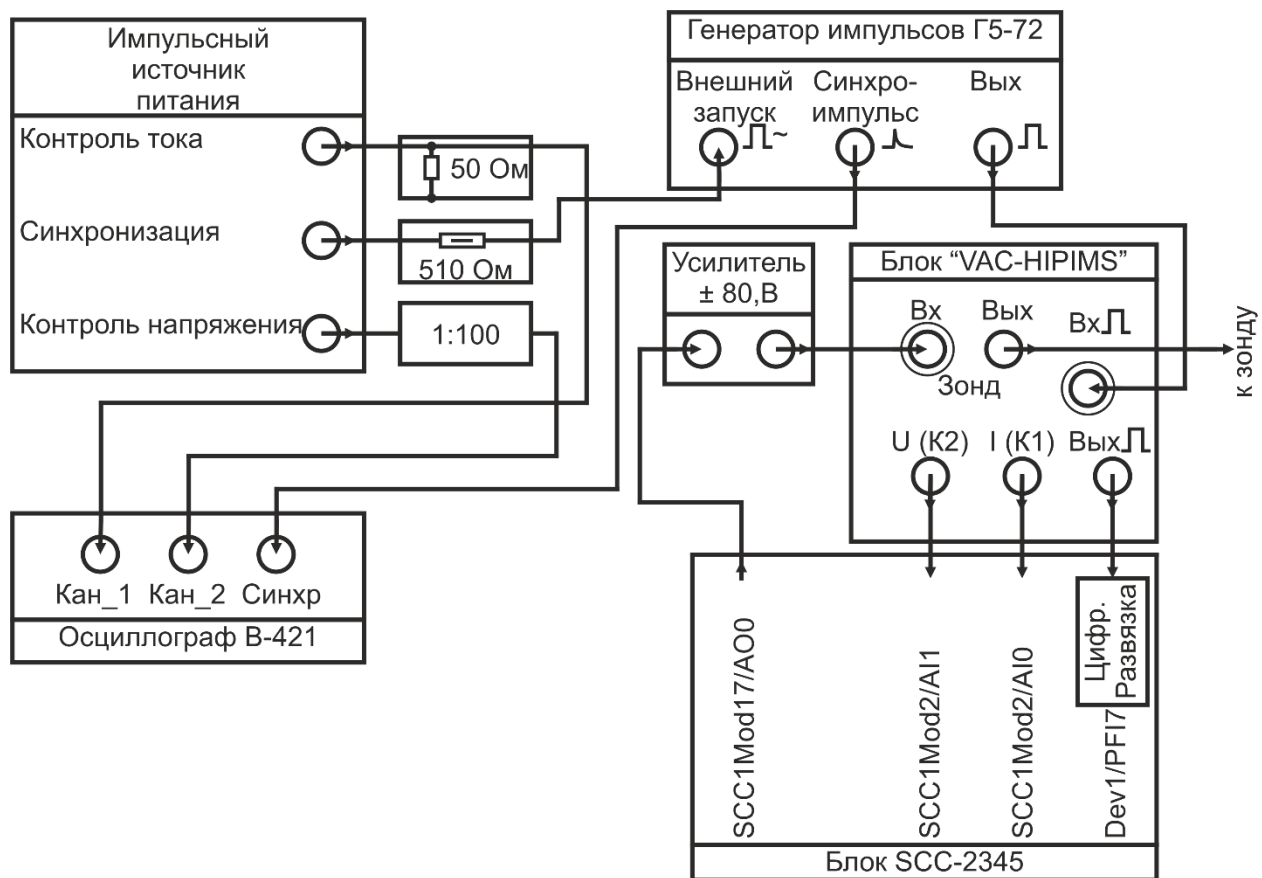


Рис. 2.

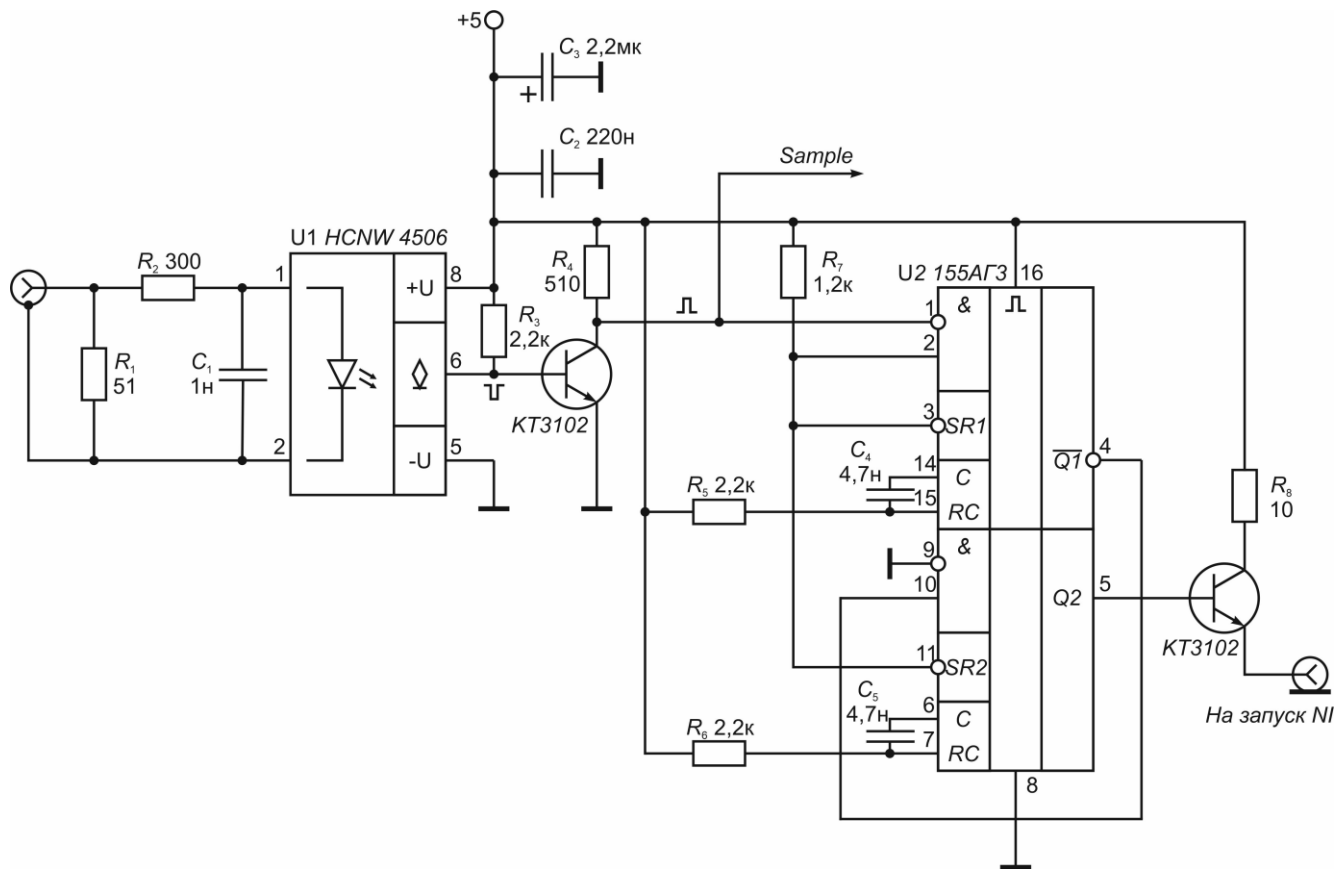


Рис. 3.

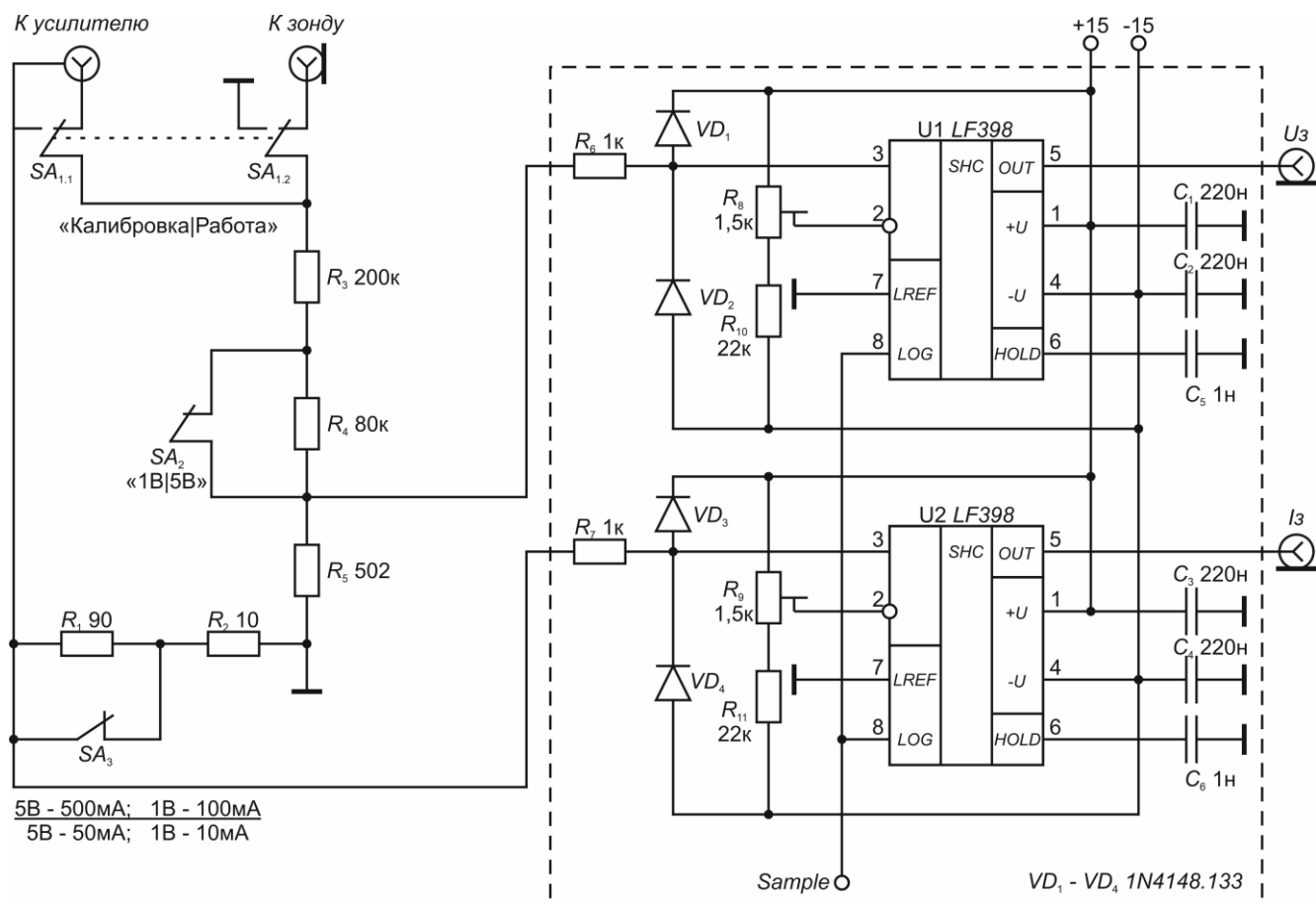


Рис. 4.

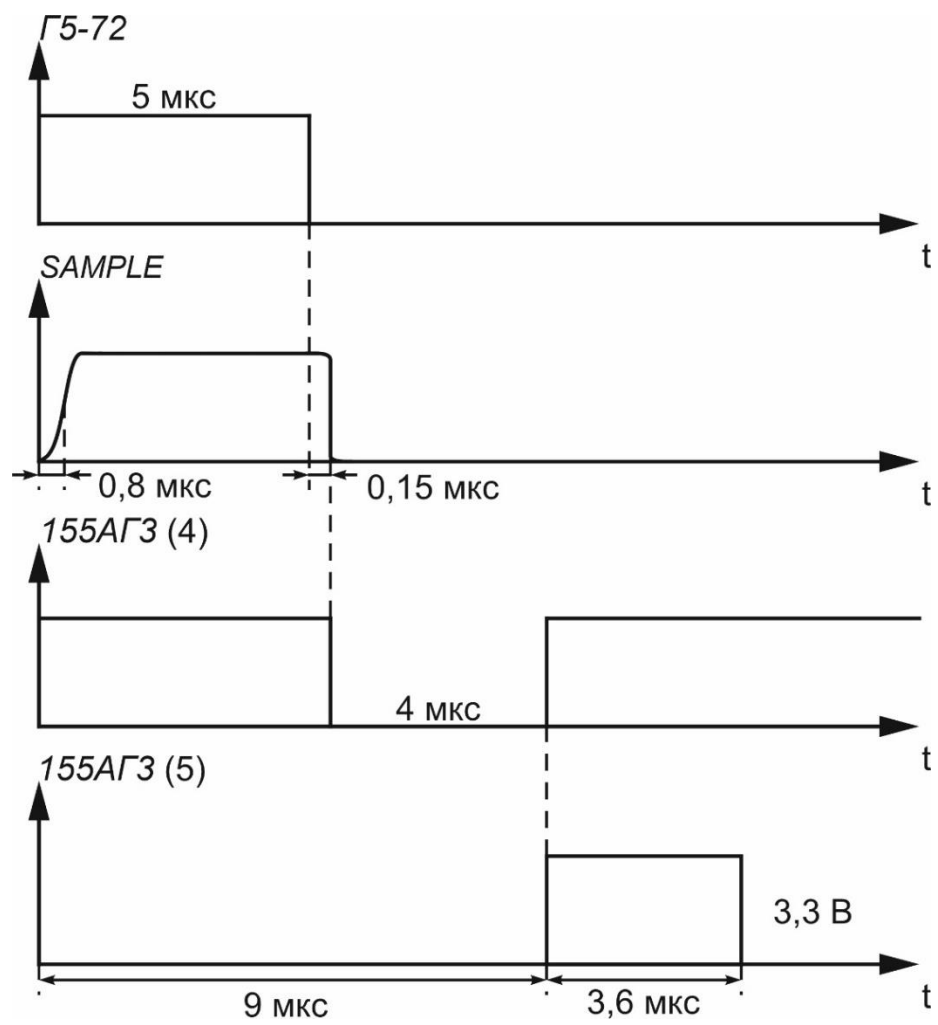


Рис. 5.

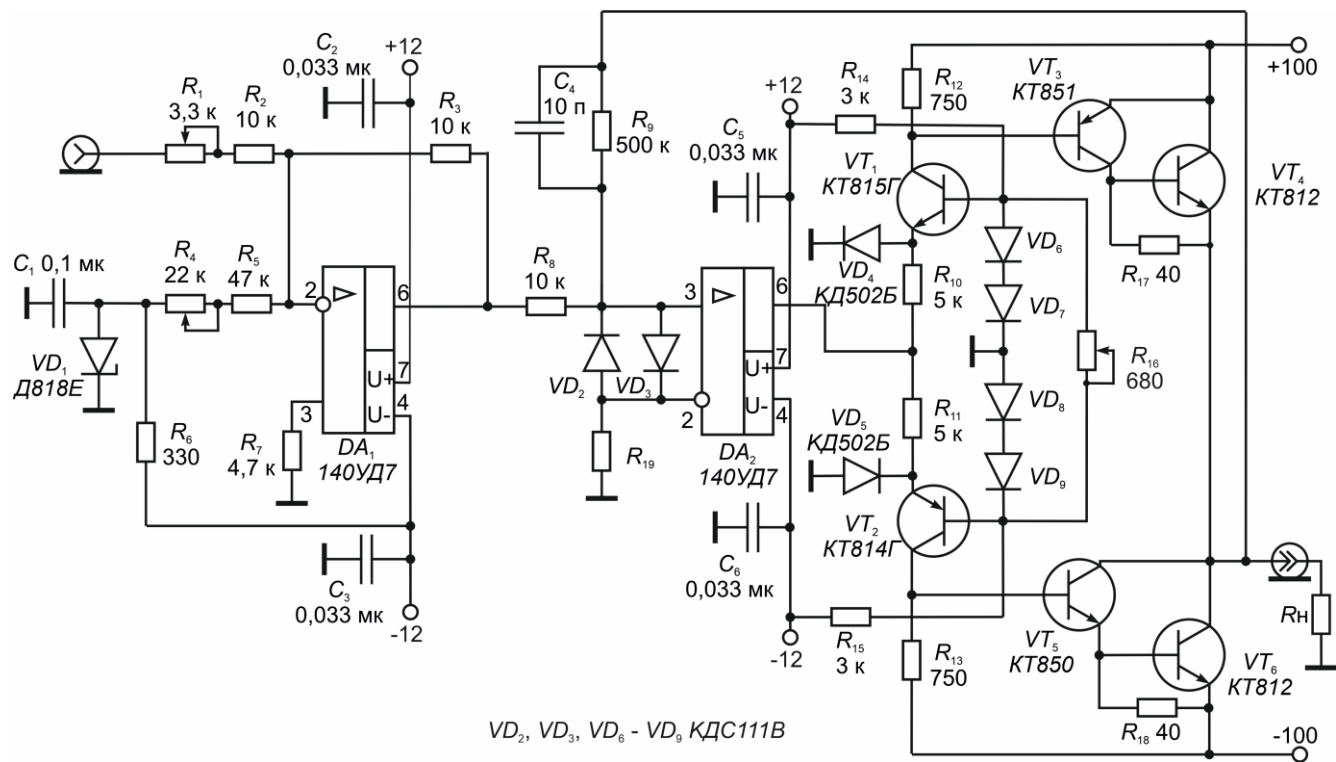


Рис. 6.

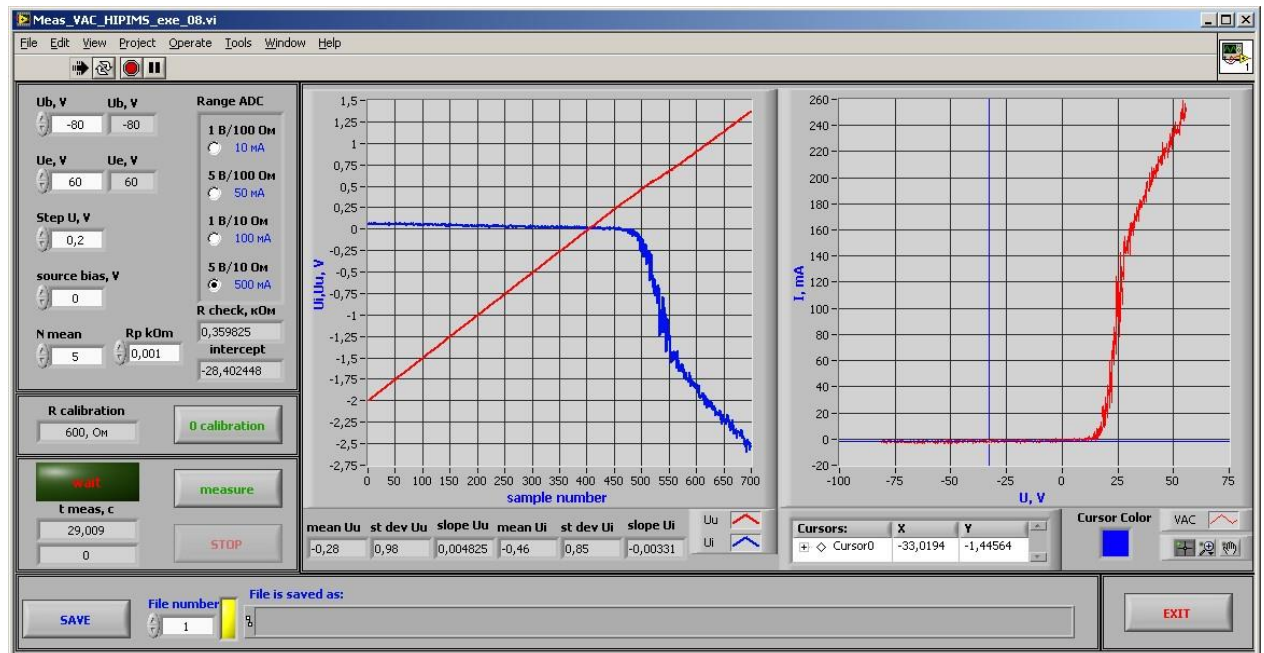


Рис. 7.

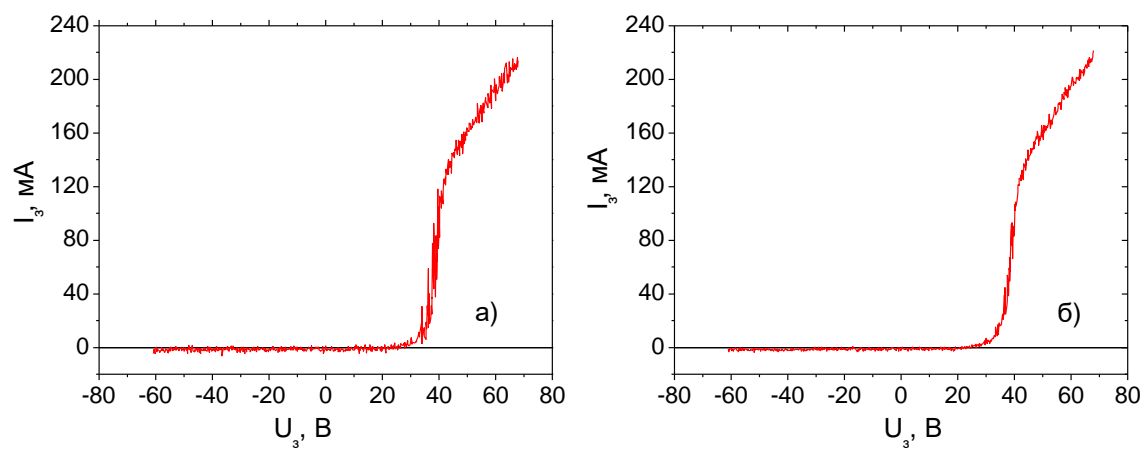


Рис. 8.

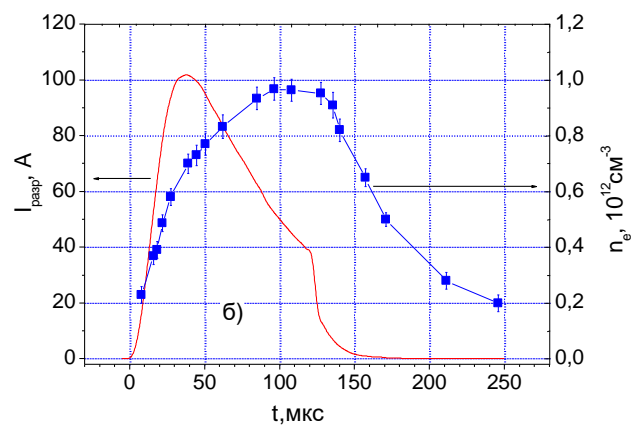
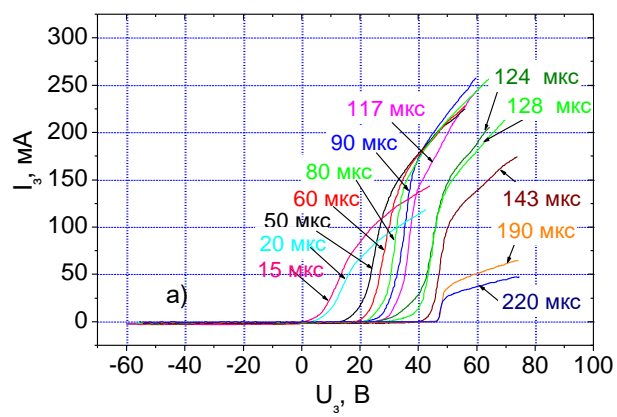


Рис. 9.