

## ВЛИЯНИЕ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА РАБОТУ ТИПОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В. А. Вдовин<sup>1</sup>, А. А. Гераськин<sup>2</sup>, П. А. Горбоконеко<sup>2</sup>, С. А. Сапецкий<sup>1</sup>, В. А. Черепенин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

<sup>2</sup>РТУ МИРЭА, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78

Статья поступила в редакцию 20 ноября 2020 г.

**Аннотация.** Рассматриваются эффекты, возникающие в интегральной микросхеме (ИМС) микроконтроллера (МК), выполняющей тестовые логические операции, под действием мощных электрических импульсов. В качестве типового микроконтроллера выбрана ИМС МК STM8S003. Воздействие проводилось электрическими импульсами с напряженностью электрического поля до 20 кВ/см и длительностью 6 нс. Показано, что импульсные воздействия могут приводить к логическим сбоям при выполнении ИМС МК логических операций, эффективность влияния зависит не только от параметров электромагнитного импульса, но и от конкретной выполняемой операции, в течение которой он произошел. Частота следования электромагнитных импульсов до 1 кГц не оказывает заметного влияния на тип сбоев ИМС МК. Напряжение питания ИМС МК влияет на ее устойчивость, для создания сбоя требуется увеличение амплитуды электромагнитного импульса при увеличении напряжения питания. Пассивные компоненты печатной платы в большей, чем ИМС МК, степени подвержены влиянию электромагнитных воздействий.

**Ключевые слова:** воздействие мощными электромагнитными импульсами, наносекундные импульсы, интегральная микросхема, микроконтроллер, обратимые отказы.

**Abstract.** The effects arising in an integrated microchip (IC) of a microcontroller (MC) performing test logic operations under the action of powerful electrical

impulses are investigated. The IC MC STM8S003 was chosen as a typical microcontroller. The exposure was carried out by electric pulses with an electric field strength of up to 20 kV/cm and a duration of 6 ns. It is shown that impulse influences can lead to logical failures when performing IC MC logical operations, the effectiveness of the influence depends not only on the parameters of the electromagnetic pulse, but also on the specific operation performed during which it occurred. The repetition rate of electromagnetic pulses up to 1 kHz does not significantly affect the type of failures of the IC MC. The supply voltage of the IC MC affects its stability; to create a failure, an increase in the amplitude of the electromagnetic pulse is required with an increase in the supply voltage. Passive components of a printed circuit board are more susceptible to electromagnetic influences than IC MC.

**Keywords:** exposure to powerful electromagnetic pulses, nanosecond pulses, microchips, microcontroller, reversible failures.

## Введение

Современные полупроводниковые устройства в силу своих конструктивных особенностей весьма чувствительны к воздействию электромагнитных полей. В настоящее время интегральные микросхемы (ИМС) являются основой различных автоматизированных систем: систем управления, вычислительных, телекоммуникационных и пр. Их технические и эксплуатационные характеристики определяют как функциональные возможности системы, так и ее эксплуатационные свойства, среди которых устойчивость к внешним факторам, таким, например, как электромагнитная обстановка. Ввиду того, что ядром автоматизированных систем являются ИМС процессоров и микроконтроллеров, особый интерес представляет их устойчивость к мощным электромагнитным импульсам.

Приведём некоторые работы, посвященные данной проблеме. Стойкость интегральных микросхем под действием импульсного радиоизлучения в свободном пространстве рассматривалась в работах [1, 2]. Показана

необходимость учитывать влияние взаимной ориентации выводов ИМС и вектора электрического СВЧ излучения. Проведено сопоставление уровней обратимых отказов в работе микросхем с уровнями функциональных сбоев аппаратуры, которое позволяет констатировать их хорошее совпадение. В работе [3] исследовались сбои в работе микроконтроллеров в зависимости от амплитуды напряженности электрического поля. Показано, что с изменением степени интеграции микросхем пороговый уровень воздействия может сильно различаться. Например, сбои в работе микроконтроллеров ATtiny15 происходят при амплитуде напряженности более 1 кВ/м, а у микроконтроллера PIC16F628-20I/P начинаются уже при значении более 0.05 кВ/м. При исследовании микроконтроллеров ATmega 8515, ATmega 16 на частоте 2460 МГц установлено, что наиболее уязвимы блоки reset, тактовой частоты и электропитания, чем блок данных. Воздействие на блоки reset, тактовой частоты и электропитания показали сбои в работе микроконтроллеров при 15-20 В наводки, а воздействие на блок данных показали сбой больше чем при 30 В наводки [4]. Исследования различных микроконтроллеров [5], показали, что восприимчивость электронных устройств к сверхкоротким электромагнитным импульсам намного выше в динамическом режиме, чем в статическом. Это поведение наблюдалось на различных устройствах (сдвиговые регистры и цепи микроконтроллера) и различных технологиях (ТТЛ, КМОП) [5]. Необходимо отметить, что во всех вышеназванных исследованиях воздействие в значительной мере определялось взаимным расположением микросхем, аппаратуры и поля радиоизлучения и происходило по токоведущим выводам, которые выступали в качестве антенн.

В работе [6] описывается механизм изменения значений во внутренней памяти 32-битного микроконтроллера под внешним воздействием непосредственно на небольшую центральную часть микросхемы. Для создания внешнего поля используется магнитная антенна (катушка). В определенный момент времени над поверхностью микроконтроллера создаётся электромагнитный импульс с заданными параметрами. Основная сложность –

правильно подобрать момент импульса и его параметры. Вследствие полевых эффектов меняются состояния транзисторов в микроконтроллере, что приводит к нарушениям в памяти устройства. Эту публикацию можно считать типичной для данного класса работ. Параметры воздействующего импульса – диапазон  $\pm 200\text{В}$ , длительность 10-200 нс с фронтом 2 нс.

В целом, катушки наиболее эффективны при создании сбоев в микроконтроллерах, поэтому они часто используются почти во всех работах. Однако следует при этом отметить, что, как правило, в них не уделяется внимание физике процесса, не даются параметры импульса, не представлены конструкции антенн. Таким образом, в постановке экспериментов многое остаётся не описанным.

В настоящей работе будут рассматриваться эффекты, возникающие в микроконтроллере, выполняющем тестовые логические операции, – эмуляторе автоматизированной системы, под действием мощных наносекундных электрических видеоимпульсов, вектор напряженности поля которых направлен по нормали к поверхности ИМС. Такая конфигурация существенно ослабляет внешнее воздействие импульса, что позволяет выделить наиболее уязвимые элементы в конструкции микросхемы.

## **1. Выбор микроконтроллера**

Для проведения исследований был проведен выбор доступных ИМС МК общего применения по следующим критериям:

1. Простота программирования (наличие простых и удобных средств разработки и отладки).

2. ИМС МК должна работать в широких диапазонах питающих напряжений, и быть устойчивой к кратковременному превышению максимального допустимого значения питающего напряжения.

3. Достаточные функциональные возможности. Наличие аппаратных решений:

а. последовательный интерфейс;

б. последовательный асинхронный интерфейс;

- с. аналогово-цифровой преобразователь;
- d. ПЗУ типа Flash;
- e. конфигурируемый генератор тактовых импульсов;
- f. наличие аппаратных средств контроля состояний периферийных блоков.

4. Отсутствие специальных технических решений, противодействующих внешним воздействиям (в т.ч. электромагнитным).

5. Простота анализа топологии: топологическая норма не менее 130 нм, количество слоев металлизации не более 5.

6. Простота разработки печатной платы, устойчивой к внешним электромагнитным воздействиям.

В результате обзора и анализа ИМС МК был рассмотрен ряд 8-битных микроконтроллеров, удовлетворяющих сформулированным требованиям, из которых, как наиболее удобная в эксплуатации, была выбрана ИМС МК STM8S003.

Изображение топологии кристалла и функциональная блок-схема представлены на рис.1 и рис.2.

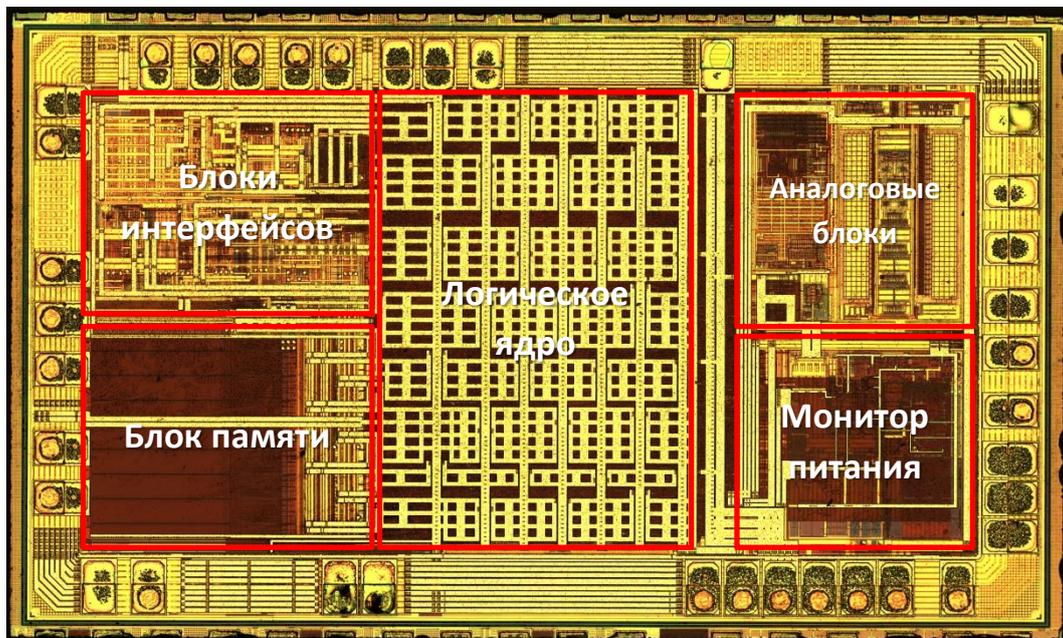


Рис.1. Панорамное изображение топологии кристалла ИМС МК STM8S003 с приближенным обозначением основных функциональных блоков. Изображение в оптический микроскоп.

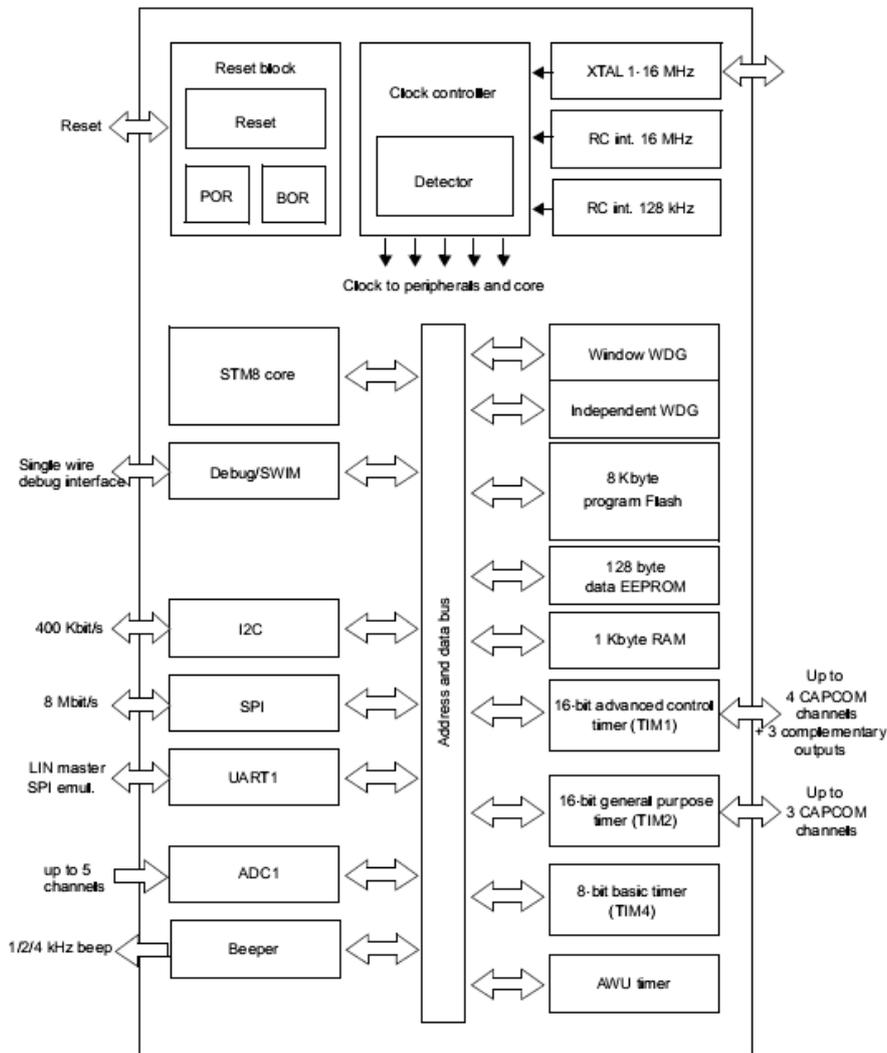


Рис.2. Функциональная блок-схема ИМС МК STM8S003.

По условиям технической документации выбранный микроконтроллер – МК STM8S003F3 фирмы STMicroelectronics (далее – объект исследований, ОИ), позволяет проводить исследования воздействий электромагнитного излучения на МК в рабочем режиме, с возможностью контроля работоспособности отдельных периферийных блоков.

## 2. Разработка платы

Для обеспечения работоспособности и контроля ОИ на печатной плате должен быть размещен не только сам целевой МК, но и периферийные блоки, представляющие собой как пассивные, так и активные элементы. На рис.3 показана электрическая схема подключения ИМС МК STM8S003.

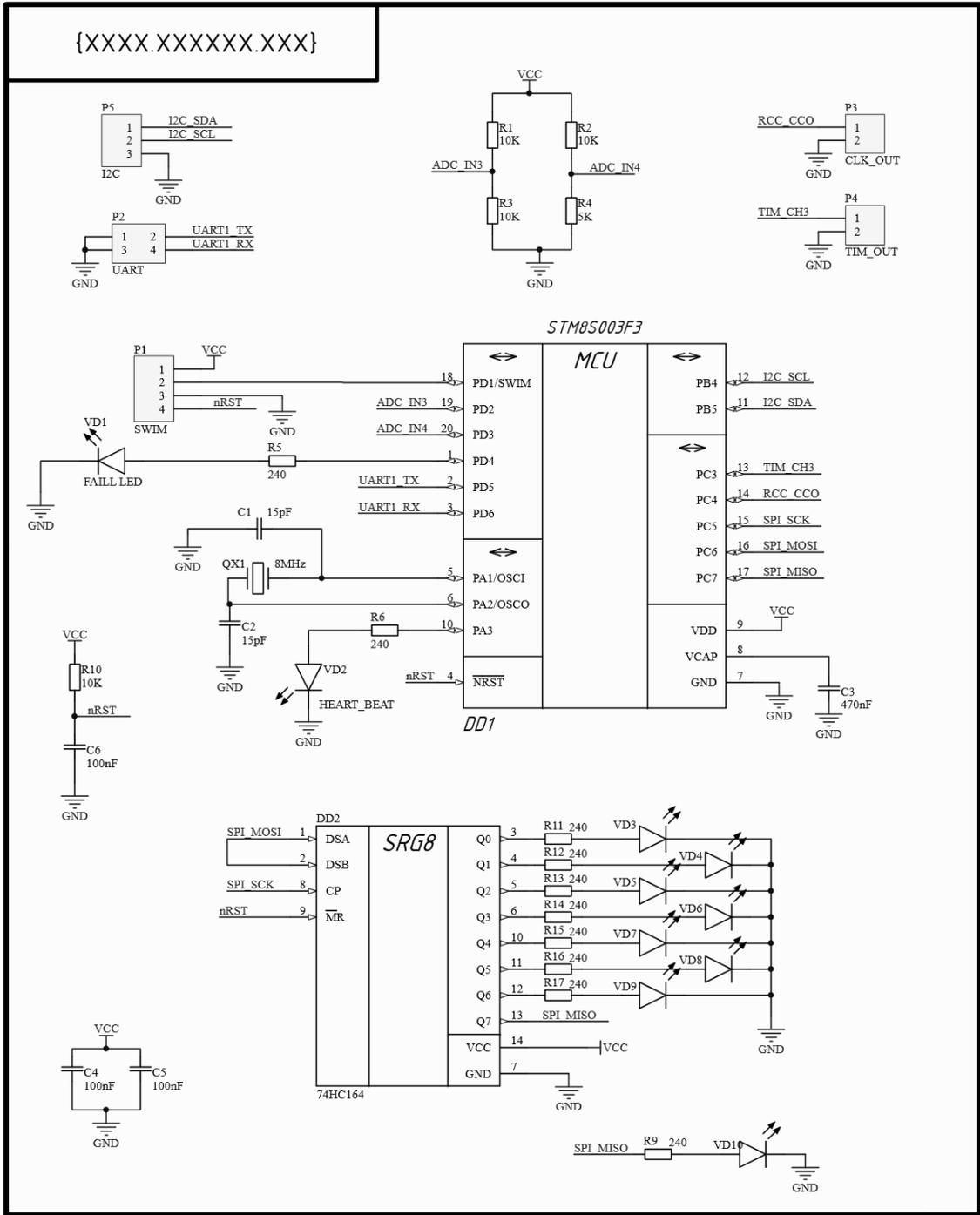


Рис.3. Электрическая принципиальная схема подключение ИМС МК STM8S003

Для минимизации воздействия наведенных токов на периферийные модули использовалась многослойная структура печатной платы, при этом внешний верхний слой и первый внутренний слой выполняют роль экрана для токоведущих дорожек, обеспечивающих подключение ОИ к периферийным модулям и разъемам. Также на печатной плате предусмотрено посадочное

место вокруг ОИ для установки дополнительного защитного экрана. 3D-модель платы показана на рис.4.

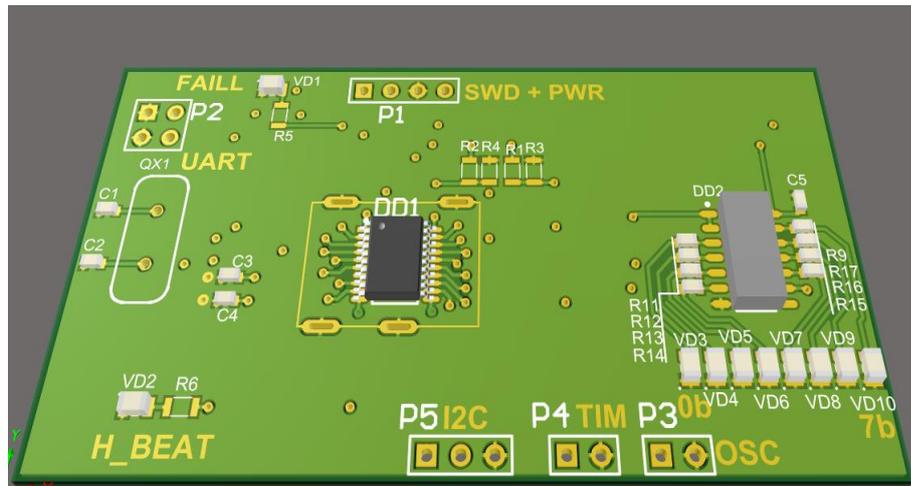


Рис.4. 3D-модель платы для ОИ.

Печатная плата позволяет:

- Обеспечить подключение внешнего тактового резонатора к ОИ (QX1).
- Подключение светодиода для индикации ошибки (VD1).
- Подключение светодиода для индикации выполнения кода программ (VD2 на схеме).
- Подключение к интерфейсу SPI целевой микросхемы сдвигового регистра (DD2 на схеме), со светодиодной индикацией каждого принятого бита (VD3-VD10).
- Подключение по UART (P2) периферийного модуля или установка обратной связи.
- Вывод для контроля системной тактовой частоты (P3).
- Выводы для подключения отладочного модуля и подачи питания (P1).
- Вывод для контроля работы встроенного в микропроцессор таймера общего назначения (P4).
- Выводы для подключения внешнего периферийного модуля по интерфейсу I2C (P5).

- Резистивные делители, для проверки работы встроенного АЦП модуля (R1, R3 и R2, R4).

Для минимизации возникновения наведенных токов были выбраны угловые выводы с печатной платы (проводники выводов располагались перпендикулярно вектору напряженности), которые дополнительно были закрыты экраном.

Учитывая то, что ОИ может работать в широких пределах питающих напряжений, была предусмотрена возможность питания от 3 В и 4,5 В.

### 3. Разработка программного обеспечения

С целью контроля состояния ОИ было разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее контролировать работоспособность как периферийных модулей в составе ОИ, так и состояние системных регистров (аккумулятор и указатель стека).

ПО написано на языке C, со вставками на языке Assembler.

Возможности ПО:

- Выбор используемых тестов при компиляции.
- Настройка при инициализации в зависимости от выбранных тестов периферийных блоков микропроцессора, таких как UART, SPI, АЦП, системный таймер, блок управления тактированием.
- Проверка работоспособности генератора тактовых частот и генерация прерывания при его сбое.
- Проверка аккумуляторного регистра на целостность данных.
- Проверка АЦП на корректность преобразования данных.
- Проверка корректности работы указателя стека.
- Отслеживание попытки изменения данных во Flash памяти.
- Проверка целостности данных при передаче через SPI интерфейс.
- Проверка целостности данных при передаче через UART.

На этапе компиляции прошивки для ОИ можно было выбрать тесты, которые должны быть активированы, а также, для некоторых тестов, указать

параметры, с которыми тест должен быть выполнен. Большинство тестов проходят последовательно в основном цикле программы, кроме теста стабильности тактового генератора и попытки записи во флэш память. Эти тесты построены на аппаратной возможности микропроцессора отслеживать данные события, и при их обнаружении, генерировать прерывания, позволяющие приостановить основной цикл программы, и вызвать обработчик для соответствующего события.

В случае если тест не пройден, или вызывается обработчик прерывания для смены системной частоты или обращения на запись во флэш память, осуществляется вызов функция обработки ошибки. Данная функция при помощи светодиода VD1 на плате отображает код ошибки (путем повторения цикла включения и отключения светодиода, равное коду ошибки) с последующем переходом в бесконечный цикл для того, чтобы приостановить дальнейшую работу микропроцессора.

**Проверка UART ОИ.** Данная проверка заключается в передачи и последующем приеме заранее установленного байта (значение байта задается при компилировании проекта). Затем происходит сравнение принятого и отправленного значения, если они не совпадают, то ОИ выдает код ошибки сравнения данных переданных по UART. Для корректной работы данного теста необходимо подключение к разъему P2 на плате, который сможет перенаправлять принятые данные в сторону передающего устройства. Наиболее простым решением является установка перемычки между линиями RX и TX интерфейса.

**Проверка SPI ОИ.** Для данного теста используется микросхема аппаратной реализации сдвигового регистра, с одновременным отображением каждого бита через параллельный интерфейс (74НС164). Инициализирующая передача задает байт (настраивается на этапе компиляции), который передается в сдвиговой регистр, а затем, в основном цикле принимается, и сравнивается с эталонным значением, или его инвертированной версией. В случае, если совпадения нет, то тест отмечается как проваленный. Инвертирование

реализовано для того, чтобы иметь возможность визуального контроля передаваемых данных.

**Проверка АЦП ОИ.** На этапе инициализации теста, высчитывается среднее значение оцифрованного сигнала, что связано с достаточно высокими шумами в результирующем сигнале самого модуля АЦП при нормальных условиях работы (без внешнего воздействия электромагнитным полем). Количество отсчетов, по которому высчитывается среднее значение настраивается на этапе компиляции. В рабочем режиме происходит сравнение значение полученного от АЦП с расчётным средним значением. Если отклонение полученного значения от среднего больше установленного порога (указывается на этапе компиляции), то тест считается проваленным. Данный тест может задействовать до двух каналов АЦП (выбор канала осуществляется на этапе компиляции).

**Проверка аккумулятора.** Данный тест реализован на языке Assembler. Заключается в последовательной записи и считывание значения из регистра аккумулятора ОИ. В случае, если считанное значение не соответствует записанному ранее, то тест считается проваленным. Тестовый байт, а также количество итераций задается на этапе компиляции.

**Проверка указателя стека.** Данный тест реализован на языке Assembler. Заключается записи арифметической прогрессии в стек, а затем вычитывания данной последовательности, с проверкой значения каждого элемента. В случае если полученный элемент не соответствует расчётному значению тест считается проваленным.

#### **4. Экспериментальная установка и схема воздействия**

Схема экспериментальной установки и рабочий объем зоны воздействия для исследования влияния мощных импульсов на ИМС МК показана на рис.5.

В качестве источника напряжения используется высоковольтный генератор FID Technology электрических импульсов, с выхода которого по высоковольтному коаксиальному кабелю импульсы амплитудой 30кВ и длительностью 6 нс поступают на электрод, Электрод представляет собой

усеченный медный конус высотой 30 мм с диаметром вершины в зоне воздействия 4 мм. Для контроля амплитуды и формы поступающих на него импульсов к электродам подключен высокочастотный высоковольтный щуп-делитель напряжения Актаком АСА-6039, с выхода которого уменьшенные по напряжению в 1000 раз импульсы поступают на вход цифрового осциллографа Infinium MSO9404. Управление высоковольтным генератором осуществляется запускающим генератором RIGOL DG4102.

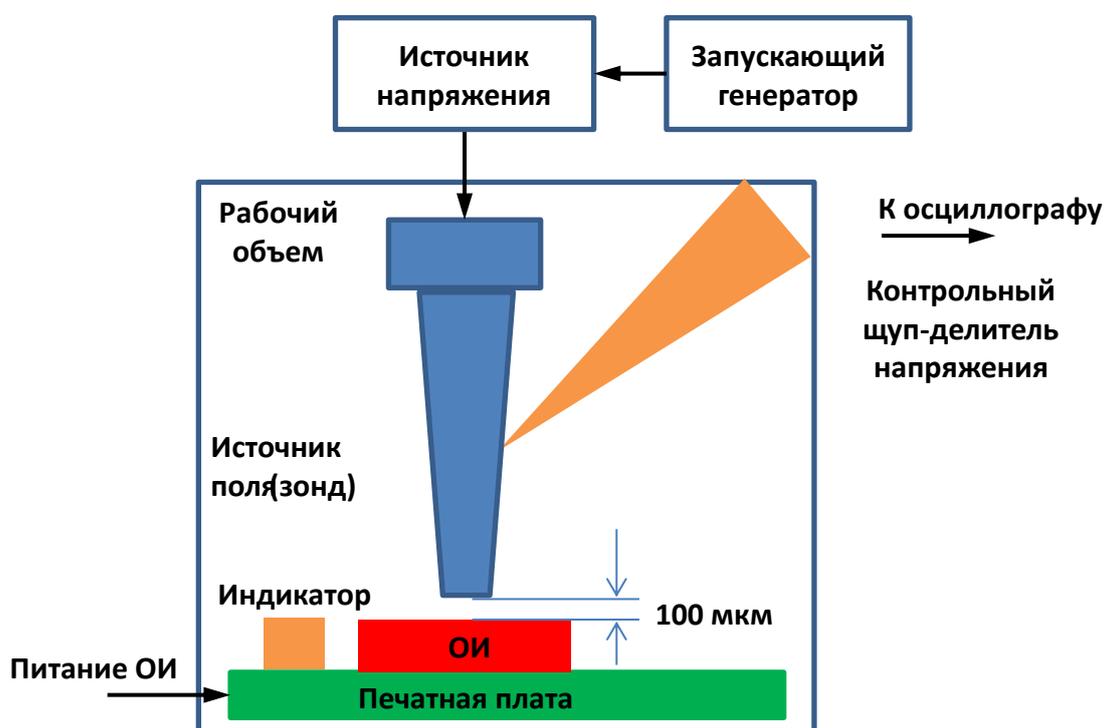


Рис.5. Схема эксперимента.

Установка предназначена для создания импульсов наносекундной длительности с высокой напряженностью электрического поля в зоне ОИ. Поле формируется электродом, направленным строго перпендикулярно металлической заземленной поверхности, на которой размещается исследуемый объект. Пример осциллограммы импульса, формируемого на электроде амплитудой 35 кВ и длительностью 6 нс, показан на рис. 6. Эксперименты проводятся при комнатной температуре в воздушной среде.

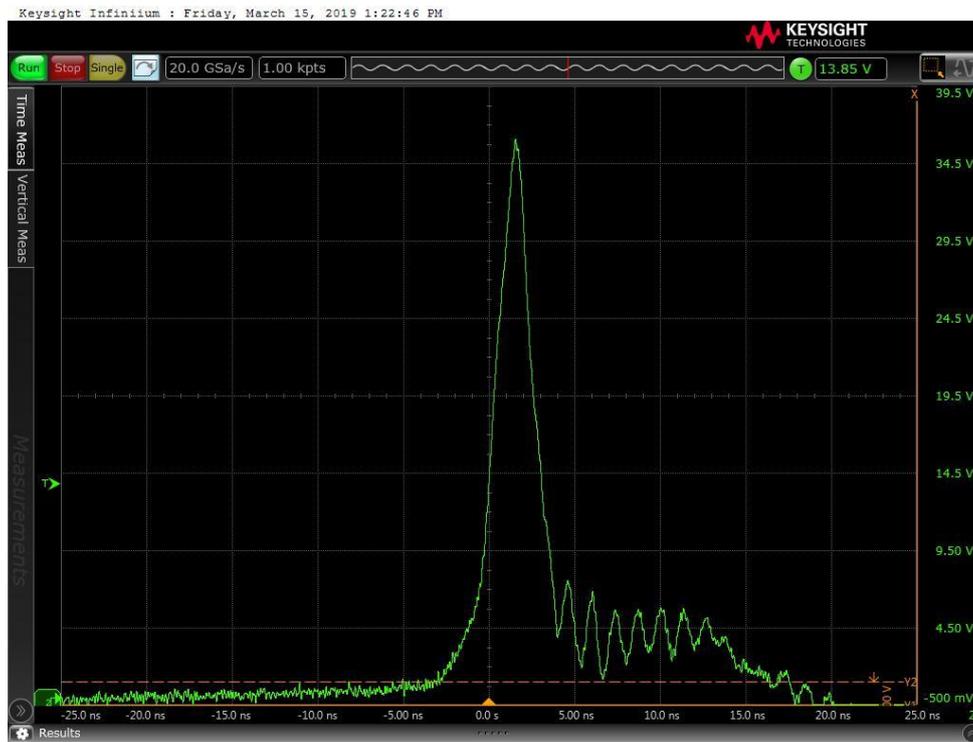


Рис.6. Осциллограмма импульса на высоковольтном электроде.

Эксперименты проводятся следующим образом. ОИ расположен заданным образом на печатной плате, находится под питанием и выполняет циклически и последовательно заданный набор тестов, результат которых отображается на индикаторе в режиме реального времени. Печатная плата расположена в рабочем объеме экспериментальной установки таким образом, что электрод находится примерно над геометрическим центром ОИ перпендикулярно его плоскости на минимальном расстоянии от ОИ порядка 100 мкм. Напряжение питания ОИ составляло 3 В.

Воздействие электрическими импульсами на ОИ происходит периодически, начиная от минимальных значений ( $\sim 3$  кВ), не оказывающих влияния на функционирование ОИ, до предпробойных значений, вызывающих сбой в работе ОИ. Сбой ОИ отображается на конкретном индикаторе, таким образом регистрируя тип ошибки, и визуально фиксируется оператором.

После проведения исследований ОИ демонтируется с печатной платы, из корпуса ОИ извлекается кремниевый кристалл, и проводится его анализ на предмет конструктивных нарушений и дефектов.

## 5. Результаты и обсуждение

В процессе предварительных исследований были подобраны оптимальные режимы работы экспериментальной установки. Изменялись мощность импульсов, положение печатной платы, а также уточнялась методология проведения эксперимента. Установлено, что в заданной конфигурации пороговое пробойное напряжение, подаваемое на электрод, составляет не более 14 кВ (среднее значение 12 кВ), которое, очевидно, зависит от точности позиционирования электрода над ОИ. Возникающая при воздушном пробое искра уходит в ближайший металлический проводник, которым всегда является электрический вывод ОИ (в зависимости от геометрической конфигурации выводы ОИ, на которые уходит искра, могут различаться). Однократный электрический пробой не приводит к выводу ОИ из строя, но инициирует сброс ПО и перезапуск ОИ.

Воздействия электрического поля при значениях подаваемого напряжения от 10 кВ регулярно вызывают сбои в выполнении алгоритма ПО.

Многokратный электрический пробой, а также пробой при подаваемых напряжениях заметно выше пробивных (20 кВ и выше), приводят к выводу ОИ из строя. Таким образом были выведены из строя ОИ1 (ОИ номер 1) и ОИ2.

Для ОИ1 имело место короткое замыкание между выводами земли и питания. Методами жидкостного химического травления кристалл ОИ1 был извлечен из корпуса. Проведен его анализ и получены изображения топологии, демонстрирующие частичное нарушение целостности отдельных переходных контактов на нижние слои металлизации для шин земли и питания (рис.7).

Как видно на рис. 7, полученном средствами оптической микроскопии, в отдельных местах переходные контакты на низлежащие слои из верхнего слоя металлизации стали темнее, диэлектрик вокруг них «помутнел», что объясняется нарушением его однородной структуры, появлением микротрещин и микрокаверн, препятствующих ходу оптических лучей в процессе визуализации.

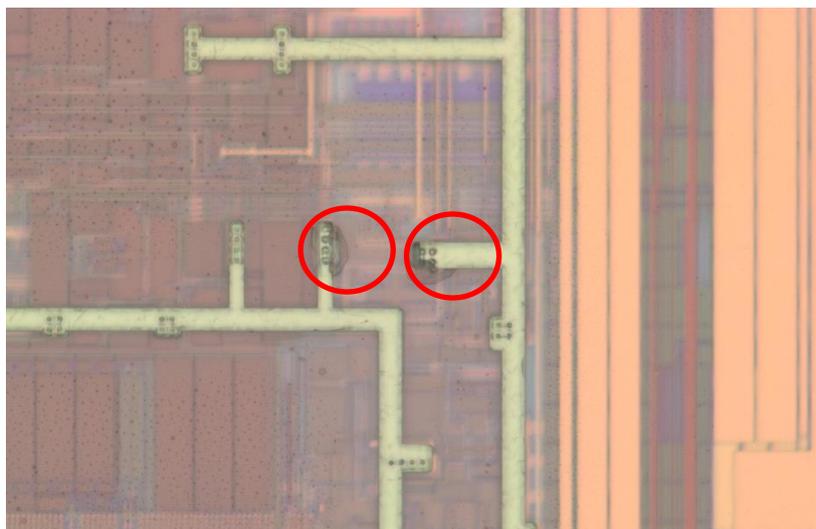


Рис. 7. Изображение фрагмента топологии ОИ. Изображение в оптический микроскоп.

В указанных местах средствами растровой электронной микроскопии (РЭМ) также удалось выявить нарушения поверхности кристалла. На изображении РЭМ описанные нарушения имеют вид «вспученностей» – подобный для всех аналогичных нарушений, что позволяет предположить, что деструктивное воздействие имело место из объема диэлектрика (рис. 8).

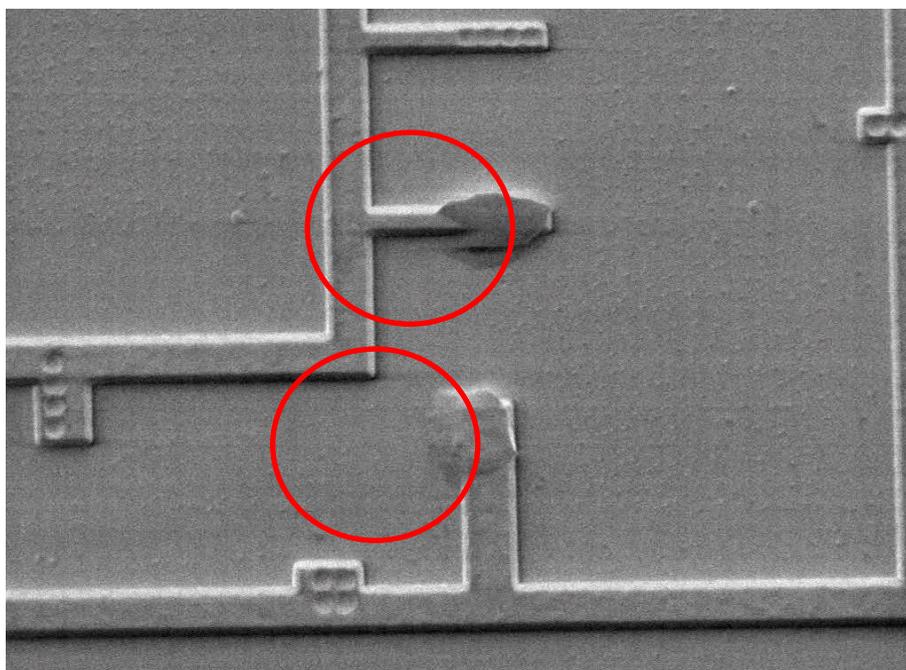


Рис. 8. Изображение фрагмента топологии ОИ с изображением нарушений топологии. Изображение в РЭМ.

Подобные нарушения могли возникнуть вследствие тепловых воздействий, вызванных протеканием больших токов, однако средствами прецизионного ионного профилирования была подтверждена целостность переходных контактов и других токоведущих элементов в местах выявленных дефектов (рис. 9). Поэтому выявленные дефекты не являются следствием токовых или полевых воздействий, а являются избыточным материалом пассивирующего диэлектрика и могут быть вызваны некритичным нарушением технологического процесса при формировании слоя пассивации кристалла ОИ1 в процессе заводского изготовления.

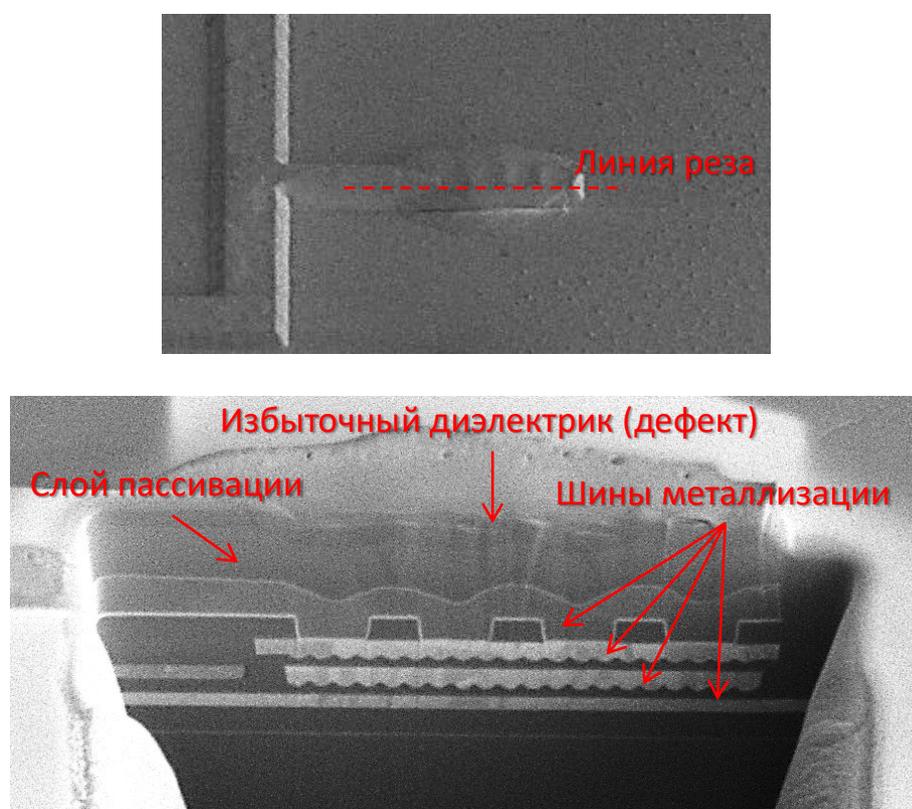


Рис. 9. Изображение нарушения топологии ОИ с указанием линии реза (сверху), поперечное сечение в области нарушения топологии ОИ (снизу).  
Изображение в РЭМ.

Для ОИ2 имело место короткое замыкание вывода №16, запрограммированного как вывод последовательного интерфейса, и земли. Кристалл ОИ2 был аналогичным образом извлечен из пластикового корпуса. Топологический анализ не выявил нарушений топологии, как для ОИ1, однако

контактные площадки на кристалле, подключенные к выводу №16 и к вводу тактирующей частоты, имеют следы выгорания, характерные для электрического пробоя (рис. 10).

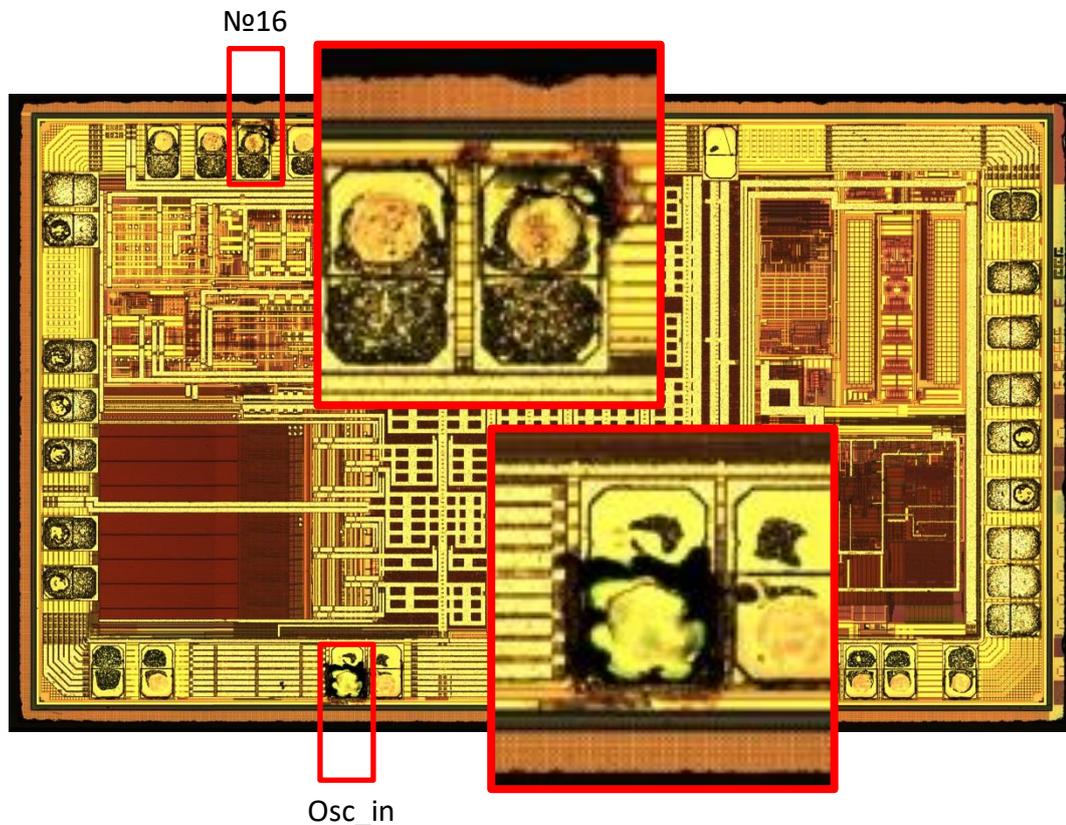


Рис.10. Панорамное изображение топологии кристалла ОИЗ с обозначение «выгоревших» контактных площадок. Изображение в оптический микроскоп.

Далее была проведена серия экспериментов, направленных на выявление зависимости устойчивости ОИЗ к сбоям от частоты следования воздействующих электромагнитных импульсов. Импульсы, генерируемые при подаче допробойных напряжений ( $\sim 11$  кВ), подавались с частотами 10, 50, 100, 500, 1000 Гц. Значимого изменения устойчивости ОИЗ к сбоям зафиксировано не было. Однако наблюдался эффект снижения пробойного напряжения, который проявлялся в серии стабильных воздушных пробоев после определенного времени работы установки ( $\sim 30$  сек). Вероятно, этот эффект является следствием накопления объемного заряда, индуцированного полем, в системе плата-ОИ, что приводило к увеличению разности потенциалов между ОИ и электродом.

Важно отметить, что частота работы ОИ составляет 8 МГц, что существенно превышает скорость генерации импульсов. Вероятно, изменение устойчивости ОИ к внешним электромагнитным импульсам следует ожидать при частотах следования импульса близким к частоте работы ОИ.

В ходе проведения экспериментальных исследований при допробойных значениях напряженности электромагнитного импульса наблюдались логический сбой теста указателя стека, и перезапуск ОИ.

*Сбой теста указателя стека* однозначно связан с нарушением выполнения логических операций под действием внешнего поля на уровне кристалла ОИ. Основным механизмом этого воздействия являются индуцированные в логических цепях токи, которые приводят к ложным переключениям транзисторов в процессе выполнения тех или иных операций. Учитывая то обстоятельство, что токи в проводниках наводятся по направлению вектора напряженности электрического поля (т.е. перпендикулярно плоскости кристалла), изменение пороговых значений транзисторов, как механизм сбоя, несущественен.

Отсутствие сбоев по другим тестам можно объяснить спецификой их реализации. Время выполнения тестов интерфейсов по времени происходит меньше, чем других тестов, а операции чтения/записи в них происходят однократно, что уменьшает вероятность «попадания» импульса в нужный такт работы ОИ. Тест АЦП предусматривает некоторое усреднение (типичная особенность работы АЦП), что может скрывать разовые сбои при обработке данных. При тесте аккумулятора большая часть команд обеспечивает поддержание цикла записи/чтения, что повышает вероятность недетектируемого сбоя счетчика цикла. При этом тест, например, преждевременно завершит свою работу, не вызывая сбоя. Одновременно с этим тест указателя стека выполняется наибольшее количество времени, и построен наиболее эффективно – вероятность «попадания» электромагнитного импульса в момент чтения или записи в оперативную память наиболее высока по отношению к другим тестами.

Несмотря на то, что ПО разрабатывалась таким образом, чтобы детектировать нарушения в работе вычислительного ядра и периферии ОИ, *перезапуск ОИ* может указывать либо на критическое падение напряжения по цепям питания при воздействии импульса, либо на наводку, приводящую к ложному срабатыванию, по входу *Reset*.

Для выявления причины сбоя параллельно к ОИЗ, подвергающемуся электромагнитному воздействию, за пределами рабочего объема экспериментальной установки был подключен ОИ\_К (контрольный).

Для выявления падений напряжений по питанию ОИЗ и ОИ\_К были объединены только по цепям питания. В этом случае возникающие логические сбои и перезапуски ОИЗ не оказывали влияния на функционирование ОИ\_К. Можно отметить, что при возникновении пробоев сбой происходил синхронно в обоих ОИ.

При дополнительном объединении выводов *Reset* ситуация менялась – перезапуски ОИЗ приводили к перезапуску ОИ\_К. Это позволяет сделать вывод о том, что имеет место падение напряжения на шине *Reset*. Очевидно, что аналогичные воздействия испытывают все шины печатной платы, часть из которых, например, участвует в тестах интерфейсов. Однако сбоев по этим тестам зарегистрировано не было. Т.е. шина *Reset* наиболее уязвима для воздействия внешнего импульса, что может быть связано со спецификой детекции сигнала по этой шине – сигнал *Reset* детектируется ОИ по переднему фронту, поэтому возникновение кратковременных просадок по этой шине может быть зарегистрировано ОИ как логический сигнал для перезапуска.

В ходе эксперимента при воздействии мы наблюдали, как ОИ часто перезапускается, в то время как другие сбои происходили относительно редко. Технологически токоведущие цепи блоков сброса ничем не отличаются от других. Поэтому, в качестве объяснения доминирования эффектов перезапуска, мы полагаем особенность работы системы перезапуска: срабатывание по фронту сигнала, а не по уровню. Т.е. когда проходит электрический импульс, в цепях ОИ также возникает кратковременный токовый импульс, который

компоненты, срабатывающие по уровню, «не успевают» отработать, в то время как блок *Reset* регистрирует его фронт. Таким образом, экспериментально было установлено, что воздействию подвергаются именно компоненты в составе ОИ.

С другой стороны, для обеспечения возможности внешнего подключения к этой шине между вводом питания и выводом для внешнего подключения был размещен резистор (1 кОм), падение напряжения на котором увеличивало «чувствительность» к внешним воздействиям именно по этой шине (рис. 11).

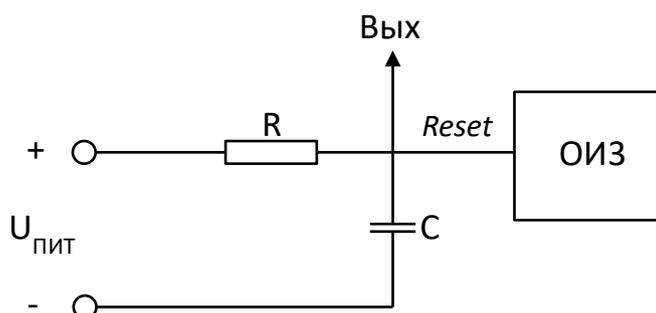


Рис.11. Подключение вывода *Reset* к ОИ.

Для подтверждения этого предположения резистор с шины *Reset* ОИ3 был удален и заменен проводником. Дальнейшие эксперименты показали заметное увеличение устойчивости ОИ3 для перезапуска (при этом частота возникновения логических сбоев не изменилась). Аналогичные результаты были получены и для случая парного подключения ОИ3 и ОИ\_К. Т.е. значение напряжения работы ОИ оказывают влияние на его устойчивость к электромагнитным импульсам.

Поэтому далее были проведены исследования по влиянию значения питающего напряжения. Для ОИ4 питающее напряжение было увеличено до 4,5 В. Проведенные исследования продемонстрировали заметное увеличение амплитуды электромагнитного импульса (на ~10%), необходимого для создания сбоя (как логического, так и перезапуска). Это обстоятельство, вероятно, объясняется пропорциональным увеличением пороговых значений срабатывания транзисторов.

Также были проведены исследования по выявлению влияния на структурную целостность кристалла ОИ под действием электромагнитного

импульса. ОИ5 подвергался воздействию импульсов с амплитудами, не вызывающих сбоев в течение 10 мин. Кристалл ОИ5 был извлечен из корпуса, проведен анализ его топологии и целостности структуры.

В результате анализа топологии нарушений целостности топологической структуры (как интегрально, так и на уровне отдельных конструктивно-топологических элементов) и иных признаков физических нарушений не выявлено. Нарушение целостности контактных площадок, а также отдельных сколов по краям кристалла ОИ5 вызваны применением средств жидкостного химического травления. Изображение топологии кристалла ОИ5 приведено на рис. 12.

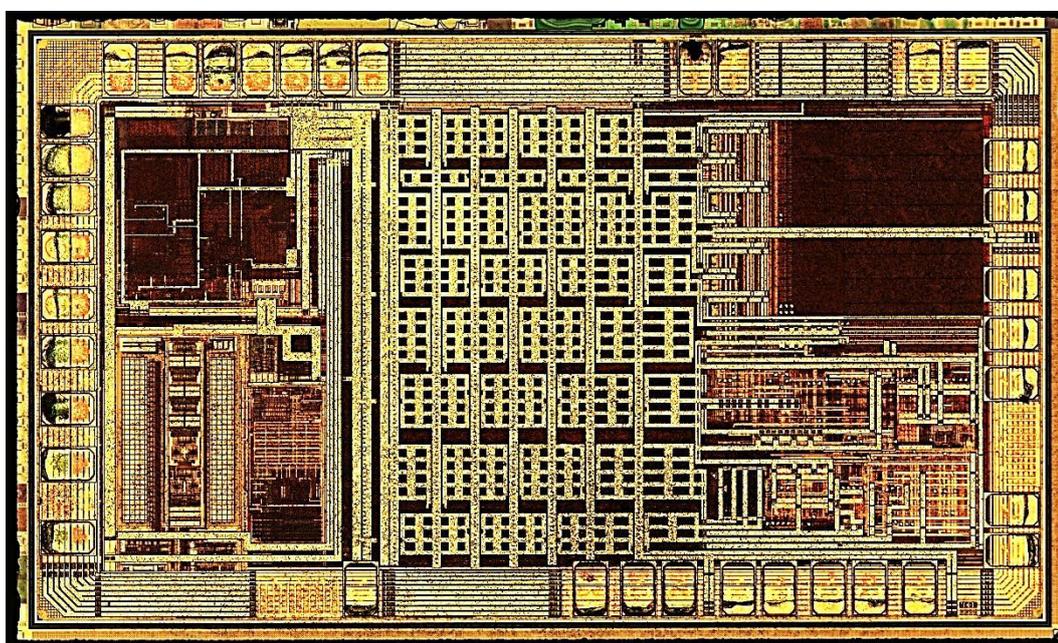


Рис. 12. Панорамное изображение топологии кристалла ОИ5. Изображение в оптический микроскоп.

## Заключение

В результате проведенных исследований по выявлению устойчивости ИМС МК к внешним электромагнитным воздействиям, было установлено, что:

- воздействия импульсов с напряжением, близким к пробойному (10 – 11 кВ), регулярно вызывают сбои при выполнении логических операций. Частота сбоев зависит не только от импульсного напряжения, но и от сложности логической операции, выполняемой при воздействии;

- частота следования импульсов до 1 кГц не оказывает заметного влияния на характер и частоту сбоев ИМС;
- увеличение напряжения питания повышает устойчивость ИМС и требует увеличения импульсного напряжения для появления сбоев;
- однократный случайный пробой, возникающий при напряжениях 12-13 кВ, инициирует сброс ПО и его перезапуск, после чего работоспособность ИМС полностью восстанавливается. Многократный электрический пробой, а также пробой при подаваемых напряжениях заметно выше пробивных (20 кВ и выше), приводят к выводу ИМС из строя;
- вспомогательные компоненты ИМС МК, в большей степени подвержены влиянию электромагнитных воздействий, нежели ядро.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № АААА- А19-119041990055-4.

### Литература

1. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Исследование стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. // РиЭ. 2011. Т.56. №3. С.375-378.
2. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучения. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. №1.  
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/18/text.pdf>
3. Грибский М.П., Григорьев Е.В., Старостенко В.В. и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные микро-контроллеры. // Прикладная радиоэлектроника. 2006. Т.5. №2. С.294–297.
4. Hong J. I., Hwang S. M., Huh C. S. Susceptibility of Microcontroller Devices due to coupling effects under narrow-band high power electromagnetic waves by magnetron. // J. of Electromagn. Waves and Appl. 2008. Vol.22. P.2451–2462.

5. Camp M., Garbe H. Influence of Operation and Program-States on the Breakdown Effects of Electronics by Impact of EMP and UWB. [Электронный ресурс]. URL: [homepage.alice.de/camp/publikation18.pdf](http://homepage.alice.de/camp/publikation18.pdf).

6. Moro N., Dehbaoui A., Heydemann K., Robisson B., Encrenaz E. Electromagnetic fault injection: towards a fault model on a 32-bit microcontroller // <https://arxiv.org/pdf/1402.6421.pdf>, Feb 26, 2014.

**Для цитирования:**

Вдовин В.А., Гераськин А.А., Горбоконеко П.А., Сапецкий С.А., Черепенин В.А. Влияние мощных электромагнитных импульсов на работу типовых интегральных микросхем. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.13>