

УДК 621.3.049.78

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЛОГИЧЕСКИЙ ВЕНТИЛЬ С ДВУМЯ ПАРАМИ ИСТОК/СТОК И РАЗДЕЛЕННЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Соловьев А.А., Певцов Е.Ф.

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе представлена конструкция микроэлектромеханического логического вентиля с двумя парами исток/сток и разделенным управляющим электродом (двойным затвором) для реализации полного набора логических операций. Описаны динамически конфигурируемые энергоэффективные цифровые схемы, осуществляющие логические операции И/И-НЕ и ИЛИ/ИЛИ-НЕ и предназначенные для использования в экстремальных условиях эксплуатации, при этом имеющие умеренные требования к производительности.

Ключевые слова: микроэлектромеханические переключатели; МЭМС; логические вентили, цифровые схемы.

MICROMECHANICAL LOGIC GATE WITH DOUBLE SOURCE/DRAIN AND SPLIT GATE

Solovov A.A., Pevtsov E.F.

MIREA – Russian Technological University
Moscow, Russian Federation

Abstract. This paper introduces the design of a micromechanical logic gate featuring dual source/drain and a split gate (double gate) to realize a functionally complete set of logical operations. Dynamically configurable, energy-efficient digital circuits executing AND/NAND and OR/NOR logical operations are presented, suitable for deployment in extreme operating conditions, while maintaining moderate performance requirements.

Key words: microelectromechanical systems, MEMS, logic gate.

Адрес для переписки: Соловьев А.А., проспект Вернадского, 78, г. Москва, 119454, Российская Федерация
e-mail: solovov_aa@mirea.ru

Микроэлектромеханические (МЭМС) логические вентили представляют собой перспективные аналоги КМОП-транзисторов за счет сверхнизких токов утечки. Несмотря на большие размеры и низкую скорость переключения, преимущество МЭМС-вентилей заключается в лучшей энергоэффективности и способности работать в экстремальных условиях эксплуатации, включая ионизирующее излучение и широкий температурный диапазон, при умеренных требованиях к производительности [1].

Цель данного исследования заключается в разработке универсальной конструкции логического МЭМС-вентилей с разделенным управляющим затвором и двумя парами исток/сток для реализации функционально полного набора логических операций. Базируясь на этой конструкции, разрабатываются динамически конфигурируемые энергоэффективные цифровые схемы, способные выполнять логические операции И/И-НЕ и ИЛИ/ИЛИ-НЕ.

Универсальная конструкция МЭМС логического вентиля, способного выполнять все логические операции с помощью одного структурного блока, может быть создана, используя электростатическую силу, зависящую от площади управляющего электрода [2].

Разделение фиксированного электрода, используемого в качестве затвора, на несколько отдельных электродов, которые могут быть независимо смещены, позволяет контролировать ак-

тивацию МЭМС-вентилей. Разделение фиксированного затвора на электроды различной площади позволяет создать приводы с различным влиянием на активацию вентиля и реализовать логические МЭМС-вентили, выполняющие полный набор операций булевой алгебры [3].

Модель логического МЭМС-вентилей с двумя затворами (2 входа) и двумя парами истока/стока (2 выхода) показана на рисунке 1. В данном примере электроды затвора имеют одинаковую площадь и соединены для обеспечения равного влияния на активацию вентиля.



Рисунок 1 – Модель логического МЭМС вентиля с двумя затворами и двумя парами исток/сток в САПР CoventorMP

Для данной конструкции, если на затвор 1 подается напряжение («1»), а затвор 2 остается на уровне 0 В («0»), то напряжение включения (V_{PI}) составляет 15 В, а напряжение размыкания (V_{RL}) –

9 В при смещении корпуса $V_B = 0$ В. При изменении напряжений между затворами напряжения остаются неизменными, что подтверждает равное влияние затвора 1 и 2.

В случае, когда на оба затвора подается «1», напряжение переключения уменьшается ($V_{PI} = 11$ В, $V_{RL} = 6$ В) из-за более сильной электростатической силы при том же напряжении смещения корпуса, так как эффективная площадь срабатывания удваивается.

Это свойство позволяет применять различные напряжения смещения корпуса для переключения МЭМС-вентилей с помощью одного или двух электродов затвора при одинаковом напряжении V_G . Например, для реализации операции «Логическое И», смещение корпуса (V_B) должно быть -4 В при напряжении затвора (V_G) 8 В. Для замыкания МЭМС-вентилей необходимо подать высокий уровень сигнала на оба затвора. В таблице 1 представлены напряжения смещения корпуса (V_B) для реализации с помощью одного функционального структурного логического МЭМС-вентилей логических операций И/И-НЕ и ИЛИ/ИЛИ-НЕ.

Таблица 1. Напряжение смещения корпуса для логических вентиляей

Логическая Операция	И	И-НЕ	ИЛИ	ИЛИ-НЕ
Напряжение смещения корпуса (V_B), В	-4	15	-7	12

Конструкция МЭМС-вентилей с несколькими электродами позволяет создать динамически конфигурируемую схему с множеством входов и выходов. Она состоит из двух МЭМС-вентилей, объединенных вместе, и может функционировать как логический элемент И/И-НЕ или ИЛИ/ИЛИ-НЕ, в зависимости от смещения корпуса (рисунок 2).

В данной схеме верхний МЭМС-вентиль активируется только тогда, когда оба затвора имеют высокий уровень – «1». Нижний МЭМС-вентиль активируется, когда хотя бы один затвор имеет низкий уровень – «0». Смещение истока (V_{DD} или GND) определяет, является ли данный вентиль «повышающим» или «понижающим» выходной логический уровень.

Изменяя смещение корпуса, данная схема может осуществлять функции ИЛИ/ИЛИ-НЕ [4]. Конструкцию МЭМС-вентилей можно расширить до большего количества затворов и пар электродов

исток/сток для реализации более сложных динамически конфигурируемых логических функций.

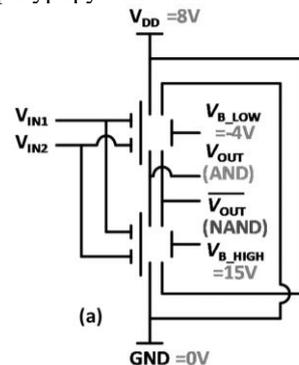


Рисунок 2 – Принципиальная схема и смещение корпуса для логической операции «И/И-НЕ»

Данная работа демонстрирует перспективы компактной реализации СБИС на основе МЭМС для применений с требованиями к сверхнизкому энергопотреблению. Несмотря на ограниченную масштабируемость, можно достичь общей экономии площади с помощью уменьшения количества устройств, необходимых для цифровой схемы. Это сократит механическую задержку до одной на логическую операцию, повысив надежность, производительность и характеристики.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов № ФГФЗ-2023-0005) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования РТУ МИРЭА (соглашение от 01.09.2021 № 075–15-2021-689, уникальный идентификационный номер 2296.61321X0010).

Литература

1. Соловьёв, А.А. Реализация функционально полного набора логических вентиляей на основе МЭМС / А.А. Соловьёв // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-3 (102). – С. 899–902.
2. Соловьёв, А.А. Интегральный микроэлектромеханический логический вентиль электростатического типа В / А.А. Соловьёв, Е.Ф. Певцов // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8 (113). – С. 595–601.
3. Соловьёв, А.А. Схемы полного сумматора, Д-триггера на МЭМС-переключателях с активным механизмом размыкания / А.А. Соловьёв, Е.Ф. Певцов // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9-2(119). – С. 338–342.
4. Design, Optimization, and Scaling of MEM Relays for Ultra-Low-Power Digital Logic / H. Kam [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2011. – Vol. 58, № 1.