

Высокая чувствительность и относительная простота анализа делают лазерно-индуцированную флуоресценцию привлекательной как для аналитических целей, так и для задач технологического контроля, что позволяет обнаруживать вещества с низким квантовым выходом флуоресценции в концентрации 10^{-11} – 10^{-15} моль/л.



Рисунок 2 – Прототип установки для детектирования аэрозольных частиц в воздухе

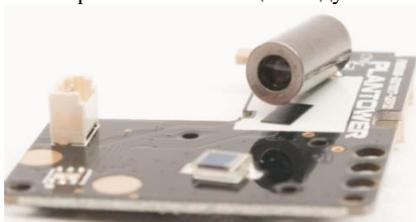


Рисунок 3 – Одноканальный датчик аэрозольных частиц Plantower PMS5003

Разработанная система найдет широкое применение для оценки биологических аэрозолей, как биогенного, так и техногенного происхождения, в системах безопасности и системах мониторинга качества воздуха. Исследование аэрозолей воздуха также станет основой для оптимизации моделей генерации аэрозолей и их роли в глобальных климатических процессах.

Литература

1. Bio-aerosol fluorescence sensor / F.L. Reyes [et al.] // Field Anal. Chem. and Technol. – 1999. – № 3 (4–5). – P. 240–248.
2. Single particle fluorescence spectrometer for ambient aerosols / Y-L Pan [et al.] // Aerosol Sci. Tech. – 2003. – № 37. – P. 628–639.
3. Kaye, P.H. A single-particle multichannel bioaerosol fluorescence sensor / P.H. Kaye, W.R. Stanley, E. Hirst // Optics Express. – Vol. 13, № 10. – P. 3583–3593.
4. Evaluation of machine learning algorithms for classification of primary biological aerosol using a new UV-LIF spectrometer / S. Ruske [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2017. – № 10. – P. 695–708.
5. Systematic characterization and fluorescence threshold strategies for the wideband integrated bioaerosol sensor (WIBS) using size-resolved biological and interfering particles / Savage, N.J. [et al.]. – 2017.

УДК 621.455.4

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ В МИКРО- И НАНОТЕХНИКЕ

Подвицкий Н.В., Люцко К.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Целью работы является исследование устройства, назначения и типологии электромагнитных МЭМС-переключателей, теоретическое исследование проводилось методом анализа литературы и нормативных источников.

Ключевые слова: исследование, МЭМС, переключатель, датчик, актюатор, кантилевер.

ELECTROMAGNETIC SWITCHES IN MICRO- AND NANOTECHNOLOGY

Podvitskiy N.V., Liutsko K.

*¹Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The purpose of the work is to study the design, purpose and typology of electromagnetic MEMS switches, theoretical research was carried out by analyzing literature and regulatory sources.

Key words: research, MEMS, switch, sensor, actuator, cantilever.

*Адрес для переписки: Люцко. К.С., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: liutsko@bntu.by*

Микроэлектромеханическими системами (МЭМС) называют класс механических и электронных устройств размерами менее 100 мкм. В их числе встречаются датчики давления и температуры, акселерометры, кварцевые генераторы, биморфные актюаторы и прочие миниатюрные приборы. Зачастую ющейся в единицах фемтофарад. Переключатель с емкостными контактами является, по-сути, дискретно перестраиваемым

конденсатором, у которого отношение емкостей во включенном и выключенном состоянии $C_{вкл}/C_{выкл}$ может достигать 100 [1]. Переключатели такого типа характеризуются крайне малыми потерями на высоких частотах (0,1 дБ на 40 ГГц) и высокой линейностью (более 66 дБм). Управляющее напряжение, приложенное к переключателю с емкостными контактами, ниже по сравнению с резистивными ведь нет необходимости в

большом прижимном усилии актюатора для обеспечения низкого сопротивления контакта. Отметим, что требуется максимальная гладкость контактных поверхностей, ведь возможные зазоры между ними вызовут как уменьшение отношения $C_{\text{вкл}}/C_{\text{выкл}}$ в случае емкостного контакта, так и увеличение адгезии между слоями металла при контактах резистивного типа.

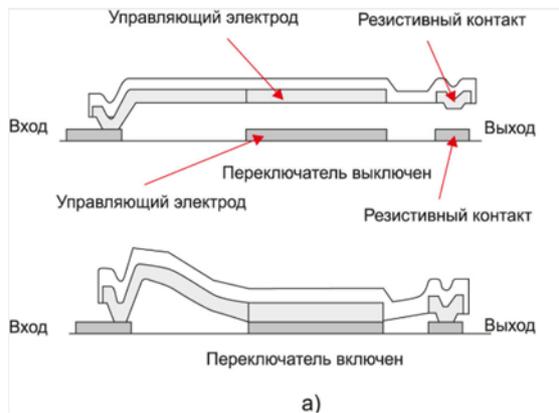


Рисунок 1 – Схема МЭМС-переключателя с резистивными контактами

В электромагнитных МЭМС-переключателях используются как емкостные, так и резистивные контакты. Ресурс, зависящий от переключаемой мощности, всегда был значительной проблемой для МЭМС-переключателей. В начале XXI века ресурс МЭМС-переключателей составлял всего десять циклов при токе 300 мА, тысячу циклов при токе 20 мА и десять миллиардов циклов при токе 2 мА [2]. Производители современных компонентов ограничивают 100 млрд циклов в «холодном» режиме и 1 млрд циклов при коммутационном токе 500 мА, что показывает, что МЭМС-переключатели работают долго в условиях большой подаваемой мощности. В этом случае заявленный ресурс МЭМС-переключателя обычно соответствует «холодному» режиму эксплуатации. Достоверно известно, что существенное снижение ресурса МЭМС-переключателя при увеличении мощности происходит вследствие микросварки контактов в момент их неплотного соединения. В результате этого контакты «слипаются», что означает, что переключатель не может их разомкнуть.

Для управления уровнем сигнала можно использовать схему ограничения на двух диодах. В момент срабатывания МЭМС-переключателя на диоды подается нулевое напряжение, в этом случае они ограничивают сигнал на уровне $\pm 0,5$ В. В остальное время, для предотвращения ограничения сигнала, диоды предполагается запирают напряжениями, превосходящими его максимальное и минимальное значения.

Исследователи из Университета Луизианы в Соединенных Штатах предложили идею биста-

бильного электромагнитного МЭМС-переключателя для мощных сигналов с низким напряжением управления в 2019 году [3]. В основе работы этого элемента лежит копланарный волновод. Однако контактные линии не закреплены на стеклянной подложке, а «подвешены» над ней и способны изгибаться (рисунок 2). Постоянный магнит под подложкой служит источником магнитного поля. При пропускании через актюаторы постоянного тока на них действует сила Лоренца, направление которой можно менять, реверсируя ток [1].

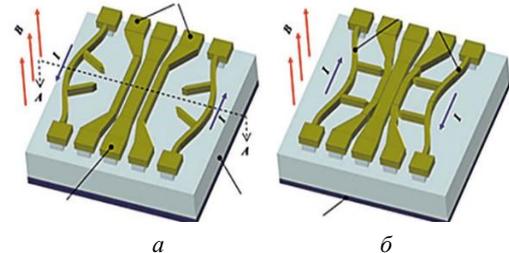


Рисунок 2 – МЭМС-переключатель с электромагнитным приводом и низким управляющим напряжением: а – включен; б – выключен

На рисунке 2, а переключатель находится во включенном состоянии, сигнал беспрепятственно проходит по волноводу. При реверсе тока, изображенном на рисунке 2, б, актюаторы толкают контактные линии к волноводу. Из-за изменения его волнового сопротивления большая часть высокочастотного сигнала отражается обратно к входу, что соответствует выключенному состоянию переключателя. Актюаторы же после срабатывания можно обесточить, ибо их положение фиксируется за счет сил упругости. Для предотвращения замыкания волновода и актюаторов на линии на боковую поверхность всех элементов переключателя наносится слой диэлектрика [1].

Разработчики элемента выделяют в числе его преимуществ следующие качества: МЭМС производят локальным вытравливанием кремниевых подложек и нанесением на них пленок из проводящих и диэлектрических материалов. Перспективным является использование метода электронно-лучевой литографии (ЭЛТ) при производстве МЭМС, так как малая длина волны у электрона дает возможность формирования на подложке достаточно сложных структур размером в единицы микрон, на базе которых создаются электромеханические компоненты: резонаторы, фильтры, многопозиционные переключатели, управляемые конденсаторы и катушки индуктивности. МЭМС-переключатель является одним из типов электромеханического коммутатора, выполненный при помощи ЭЛТ и применяющийся для размыкания и замыкания электрической цепи.

Основой большинства МЭМС-переключателей является подвижный элемент – актюатор.

В большинстве случаев он представляет собой закреплённого, с одной стороны, кантилевера или мембраны, закреплённой по краям. Привод актюатора может быть электростатическим (ёмкостным), пьезоэлектрическим, электромагнитным или термо-электрическим. Целью данного обзора является рассмотрение кантилевера электромагнитного типа.

В МЭМС-переключателях с электромагнитным приводом актюатор перемещается при помощи магнитного поля, возникающего при пропускании электрического тока через управляющий элемент переключателя. Чаще всего в качестве управляющего элемента используется планарная катушка индуктивности, нанесённая на подложку с помощью ионного напыления. Этот тип приводов создаёт значительные механические усилия на контактах МЭМС-переключателя, позволяя взаимодействовать с мощными сигналами. С другой стороны, электромагнитным переключателям присуще сравнительно большое время срабатывания, а также наличие энергопотребления в сомкнутом состоянии. Контакты МЭМС-переключателей делают как резистивными – «металл–металл» (рисунок 1), так и ёмкостными – «металл–диэлектрик–металл». Резистивные контакты характеризует наличие сопротивления в открытом состоянии $R_{\text{вкл}}$, составляющее не более десятой доли ома, и ёмкостью в закрытом состоянии $C_{\text{выкл}}$, измеряя.

– переключатель не может управлять напряжением менее 1 В;

– у переключателя в стационарном состоянии нет потерь из-за его бистабильности;

– при использовании ёмкостных контактов возможно увеличение интенсивности излучения сигнала;

– отсутствие накопления паразитного заряда на элементах переключателя, что может привести к

появлению неконтролируемых электростатических сил, препятствующих его функционированию;

– исключение паразитной индуктивности актюаторов по причине их отсутствия в составе сигнальной цепи;

– сокращение и снижение затрат на процесс производства за счёт использования одной маски.

Из проведённого анализа видно, что МЭМС-переключатели имеют серьёзные положительные качества в сравнении с традиционными переключательными компонентами, к которым относят PIN-диоды и полевые транзисторы на основе арсенида галлия. К этим преимуществам относятся хорошая изоляция в закрытом состоянии и сравнительно низкие переносимые потери в открытом, высокая мощность коммутируемого сигнала, низкое энергопотребление, высокая устойчивость к воздействию ионизирующего излучения и низкая стоимость при массовом производстве.

Основным недостатком этих элементов остаётся их ограниченная надёжность, тем не менее, производители МЭМС пытаются улучшить эту характеристику. Ресурс электромагнитных МЭМС-переключателей на данный момент превышает миллиарды циклов в режиме «горячей» коммутации. Несомненно, МЭМС-переключатели могут использоваться в электронном оборудовании как коммерческого, так и специального назначения благодаря удачному сочетанию их свойств.

Литература

1. Кочемасов, В.А. Переключатели на основе МЭМС / В.А. Кочемасов, А. П. Майстренко. – М. : СВЧ-электроника, 2016. – 64 с.
2. MEMS Reliability / L. Allyson [et al.]. – Springer Science & Business Media, 2011.
3. Yao, J. RF MEMS switch with in-plane, bistable, electromagnetic actuators for high power applications / Y. Yao, J. Young, H // IEEE J. MEMS. – 2015. – № 8. – P. 129–34.