

06;09;12

Микроэлектромеханические переключатели на основе аморфных алмазоподобных углеродных пленок

© В.А. Власенко, С.Н. Беляев, А.Г. Ефимов, Э.А. Ильичев,
М.Д. Маленкович, В.Э. Немировский, Э.А. Полторацкий,
А.В. Горячев, А.Ф. Попков, Г.В. Фролова, М.Л. Шупегин

ФГУП НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина, Москва, Зеленоград
Московский институт стали и сплавов
Государственный Московский институт электронной техники, Зеленоград
E-mail: polt@niifp.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2009 г.

Представляются результаты разработки и исследований однокристалльных микроэлектромеханических переключателей (полная пара), подвижные элементы которых выполнены на основе высокоомных аморфных углеродных алмазоподобных пленок (АПП). Использование в RF MEMS переключателях АПП позволяет устранить эффекты „залипания“ электродов, существенно понизить потери сигнала (до 100 dB), реализовать высокие скорости переключений (~ 10 ns) при сверхвысоких частотах коммутируемого сигнала (до 2 GHz на подложках из кремния и свыше 10 GHz на подложках из арсенида галлия).

PACS: 84.40.Dc, 84.40.Lj, 07.10.Cm, 85.85.+j

В последнее время активно обсуждается [1,2] использование микроэлектромеханических элементов (MEMS) и устройств на их основе в высокочастотных радиосистемах. В частности, ожидаемая эффективность использования MEMS коммутаторов в схемах фазовращателей для активных фазированных антенных решеток (АФАР) подтверждается анализом представленных в [3] сравнительных характеристик коммутаторов, выполненных на различной элементной базе.

Однако при реализации таких устройств с использованием традиционных для микроэлектроники материалов и технологий возникают трудности, связанные с преодолением эффектов „залипания“ электродов MEMS переключателей и с интеграцией процессов формирования подвижных элементов переключателей в единый технологический

маршрут формирования однокристалльной радиочастотной схемы (RF MEMS).

В настоящей работе представляются результаты разработки и экспериментальных исследований MEMS переключателей, полученных на основе высокоомных аморфных углеродных алмазоподобных пленок (АПП), большие значения модуля упругости которых в сочетании с высокой прочностью и высокоомностью АПП позволяют избежать эффектов „залипания“ и реализовать высокие значения добротности схем на их основе. Рис. 1 и 2 представляют расчетные значения частотных и управляющих характеристик MEMS переключателей балочной и мостовой конструкций различной геометрии, выполненных на основе АПП. В частности, из представленных на рис. 1 результатов следует возможность скоростного управления MEMS элементами (при размерах подвижных элементов $\sim 10 \mu\text{m}$ с характерными временами переключений управляющих сигналов $\sim 10 \text{ns}$ при $\Delta f/f < 0.1\%$). При этом величины потерь сигнала в переключателе на основе АПП не превышают 50 и 100 dB соответственно для открытого и закрытого состояний (при нагрузке $\sim 50 \Omega$ и сопротивлении переключающего узла $\sim 0.5 \Omega$). Связь межэлектродного зазора (H) микроэлектромеханического переключателя с критическим управляющим напряжением (V_g), определяемая формулой $V_g = [(8KH^3)/(27S\epsilon_0)]^{0.5}$ ($K = 4.2 \text{N/m}$ — коэффициент жесткости балки, $S = 5.6 \cdot 10^{-10} \text{m}^2$ — площадь управляющего электрода, $H = 1.2 \mu\text{m}$ — зазор между электродами), позволяет для балочного MEMS переключателя на основе АПП получить расчетный график (рис. 2) зависимости переключающих напряжений от величины зазора. Полученные уровни переключающих напряжений указывают на возможность интеграции MEMS элементов в микроэлектронные кремниевые схемы.

Использование толстого ($\sim 1.2 \mu\text{m}$) „жертвенного“ слоя из оксида кремния позволяет „вывесить“ подвижные элементы микроэлектромеханических переключателей, резонаторов и перестраиваемых конденсаторов. При этом балки, мосты и мембраны сформированы на основе химически стойких, высокопрочных и легких ($\sim 3.5 \cdot 10^3 \text{kg/m}^3$), высокоомных ($\sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) и упругих ($\sim 8.5 \cdot 10^{11} \text{N/m}^2$) аморфных углеродных алмазоподобных пленок, полученных посредством термического разложения полифениметилсилоксана $[(\text{CH}_3)_3\text{SiO}(\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{SiO})_3\text{Si}(\text{CH}_3)_3]$ и последующего осаждения продуктов реакции на нагретую до $70\text{--}120^\circ\text{C}$ поверхность при-

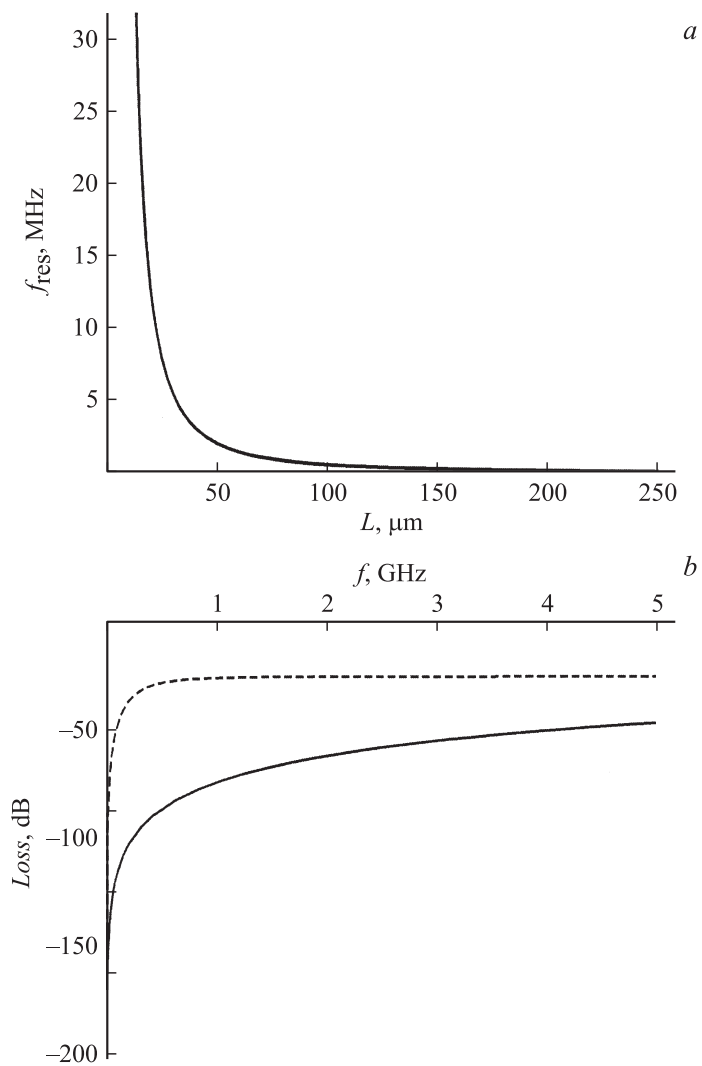


Рис. 1. Рабочие характеристики MEMS переключателей: *a* — зависимость резонансной частоты балочного микроэлектромеханического резонатора от длины балки; *b* — характеристики потерь высокочастотного сигнала в микроэлектромеханических переключателях на основе АПП: пунктирная кривая — открытое состояние переключателя, сплошная кривая — его закрытое состояние.

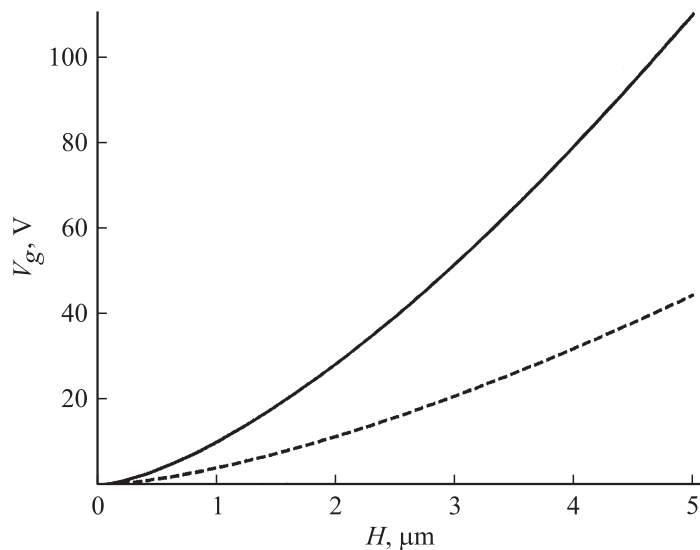


Рис. 2. Зависимость величины рабочих напряжений микроэлектромеханических переключателей на основе АПП от межэлектродного зазора: сплошная кривая — для площади контакта $S_1 = 20 \times 40 \mu\text{m}^2$, пунктирная кривая — для площади контакта $S_2 = 50 \times 100 \mu\text{m}^2$.

борной структуры. Селективное плазмохимическое травление АПП осуществлялось по заданному рисунку в смеси аргона, кислорода и азота. Компенсация остаточных упругих напряжений в мультиплечных конструкциях (Au/Cr/АПП) балок и мостов осуществлялась посредством выбора формы коммутирующей перемычки (овальное кольцо) и использования конструкций в виде меандра и гофры. Базовые процессы [4,5] MEMS технологии и групповые микроэлектронные процессы интегрированы в рамках единого технологического маршрута, позволившего изготовить сдвоенные переключатели (полная релейная пара) балочной и мостовой конструкций. Результаты расчетов и экспериментальных исследований характеристик последних, представленные в таблице, показали удовлетворительное качество использованных модельных представлений. Обсуждаемые MEMS переключатели на основе АПП испытаны в качестве амплитудного модулятора и переключателя

Сравнительные характеристики MEMS переключателей

	Балочная конструкция MEMS					
	Расчетные значения			Экспериментальные значения		
	Резонансная частота, Hz	Управляющие напряжения, V	Добротность	Резонансная частота, Hz	Управляющие напряжения, V	Добротность
Материал и геометрические параметры (*)						
Кремний $L \sim 234 \mu\text{m}$ $d \sim 40 \mu\text{m}$ $t \sim 1 \mu\text{m}$ АПП	47407	8	225	—	—	—
Кремний $L \sim 234 \mu\text{m}$ $d \sim 40 \mu\text{m}$ $t \sim 1 \mu\text{m}$	89053	13	248	98130	35–40	140
	Мостовая конструкция MEMS					
Кремний $L \sim 437 \mu\text{m}$ $d \sim 40 \mu\text{m}$ $t \sim 1 \mu\text{m}$ АПП	78228	6	324	—	—	—
Кремний $L \sim 437 \mu\text{m}$ $d \sim 40 \mu\text{m}$ $t \sim 1 \mu\text{m}$	149792	7	350	152100	23–25	150

(*) — L — длина балки (моста), d — ширина балки (моста), t — толщина балки (моста).

в антенной цепи СВЧ-генератора с несущей частотой ~ 1.5 GHz. Результаты исследования сравнительных потерь СВЧ-мощности в АПП и в подложечном материале (Si и GaAs) на частотах 1.5–2 и 5–7 GHz показали, что при использовании подложек из поликора либо арсенида галлия применение АПП в RF MEMS допускает возможность расширения рабочих частот свыше 10 GHz.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования, лот 2005-ИН-22.3/002, госконтракт № 02.447.11.2004.

Список литературы

- [1] Goldsmith J.C., Lin T.-H., Powers B., Wu W.-R., Norvell B. // Tech. Digest of IEEE Microwave Theory and Techniques Symp. 1995. P. 91–94.
- [2] Rebeir G.M. RF MEMS Theory. Design and Technology. Wiley, 2003.
- [3] Varadan V.K., Vinoy K.J., Jose K.A. RF MEMS and their applications. John Wiley and Sons Ltd, 2003.
- [4] Dorfman V.F., Pypkin D.N. // Surf. and Coat. Technol. 1991. V. 48. P. 193–198.
- [5] Shaw K.W., Zhang Z.E., MacDonald N.C. // Sensors and Actuators A: Physical. 1994. V. 40. P. 63–70.