

**Е.Н. Куликов, М.П. Духновский,
Ю.Ю. Фёдоров, А.К. Ратникова,**
ФГУП "Научно-производственное предприятие "Исток"

Применение технологических процессов ионной имплантации для формирования 3D элементов РЧ МЭМС на CVD алмазе.

Представлены результаты работы по формированию 3 D элементов РЧ МЭМС путем микрообработки CVD алмаза при помощи технологических процессов ионной имплантации, фотолитографии, термической обработки и травления.

Ключевые слова: РЧ МЭМС на алмазе, ионное легирование.

В настоящее время технология микроэлектромеханических систем (МЭМС) является одним из самых революционных направлений в разработке изделий СВЧ-диапазона. Наиболее важными требованиями, предъявляемыми к современным и перспективным изделиям СВЧ-техники, является снижение их веса, объёма, потребляемой мощности и стоимости одновременно с повышением их функциональности, рабочей частоты и уровня интеграции.

В таблице 1 представлен сопоставительный анализ функциональных параметров различных компонентов, способных выполнять переключающие функции [1].

Таблица 1

Параметр	Диод Шоттки	МОП-транзистор	PIN диод	СВЧ-ИМС	МЭМС ключи
Время переключения (с)	–	$3 \times 10^{-9} - 10^{-8}$	650×10^{-9}	25×10^{-9}	$\sim 10^{-6}$
Напряжение (В)	–	5–50	3–5	–	3–30
Ток (мкА)	–	<10	10 000	–	<10
Добротность (ГГц)	–	300 – 400	1500 – 2000	–	>3000
Число переключений	$>10^9$	$>10^9$	–	–	$>10^{13}$
Потери на 1ГГц (Дб)	0.85	0.5 – 1.0	0.5 – 1.0	1.1	0.1
Размер (мм ²)	–	1 – 5	0.1	–	<0.1
Ток потребления (мА)	180	–	30	0.15	–
Переходные сигналы (мВ)	2–500	–	210	100	–
Полоса пропускания, ГГц	–	–	до 2	до 4	до 40

Одним из наиболее перспективных материалов, на основе которого могут быть построены различные приборы и устройства микро- и наноэлектроники, являются алмазные пленки. До сих пор в РЧ МЭМС-переключателях в качестве подвижных элементов традиционно используется кремний или металлические материалы, имеющие существенные недостатки по сравнению с алмазом - слабую механическую, химическую и термическую устойчивость, низкую надежность и износостойкость.

Преимущество применения алмазов в МЭМС устройствах наглядно иллюстрируется данными таблицы 2 [2].

Таблица 2

Параметр	Si	SiC	Алмаз
Модуль Юнга, ГПа	130	450	1200
Модуль сдвига, ГПа	80	149	577
Твердость, кг/мм ²	1000	3500	10000
Сопротивление разрушению, ГПа	1.0	5.2	5.3
Прочность на изгиб, МПа	127.6	670	2944
Коэффициент трения	0.4–0.6	0.2–0.5	0.01–0.04
Относительная износостойкость	1.0		10000

Алмаз имеет очень низкие значения коэффициентов адгезии и трения, что обеспечивает значительное его превосходство по сравнению с кремнием при использовании в МЭМС устройствах, в которых поверхностные свойства имеют решающее значение [2,3].

Однако, применение алмаза в электронике, и в частности для создания МЭМС устройств, сдерживается из-за трудности его обработки.

В качестве технологии микрообработки алмазных материалов нами выбран процесс ионной имплантации.

Процесс ионной имплантации широко применяется в электронике при легировании полупроводниковых материалов различными примесями. Ионы имплантируемого материала разгоняются в ионном ускорителе до энергий 10 – 5000 КэВ и внедряются образец.

Внедрение ионов в кристаллическую решетку обрабатываемого материала приводит к появлению дефектов кристаллической структуры. Степень аморфизации кристаллической решетки и глубина залегания нарушенного слоя зависят от вида внедряемых ионов, количества ионов на единицу поверхности (дозы) и их энергии.

Для последующего восстановления кристаллической решетки и активации примеси используют термический отжиг. Во время нагрева кристаллическая решетка восстанавливается, происходит эпитаксиальный рост в твердой фазе на основе кристаллической решетки, расположенной глубже, чем нарушенная ионами область.

Алмаз, в отличие от кремния, имеет аллотропическую модификацию –графит и при дозах ионов $3 \times 10^{15} - 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, нарушенные слои алмаза при отжиге переходят в графит [4].

Мы применили технологию селективного перевода алмаза в графит при воздействии ионного пучка в качестве прецизионного инструмента формирования 3D элементов РЧ МЭМС на алмазе. Технология включает в себя разрушение ионным потоком кристаллической решетки (Sp³ связей) алмаза, последующий нагрев, при котором происходит восстановление нарушенной области с образованием решетки содержащем преимущественно Sp² связей, характеризующих графит и селективное удаление графита в травителе на основе H₂SO₄ и CrO₃.

Степень анизотропии травления алмаза и графита в этом растворе, такова, что позволяет создавать мембраны и зазоры толщиной от 100 нм без перфорированных отверстий на площадях более 1 см².

Для легирования нами были выбраны ионы неона.

В качестве материала маски при ионном легировании использовался фоторезист. Слой фоторезиста толщиной (0.9 – 1.2) мкм обеспечивает надёжную защиту закрытых областей от проникновения однозарядных ионов неона с энергий до 300 кВ.

Во время ионного легирования фоторезист задубливается. Это вызывает проблемы при его удалении. Так как задубленный фоторезист является полимером на основе углерода, то для его удаления применим раствор для травления графита.

Методика эксперимента:

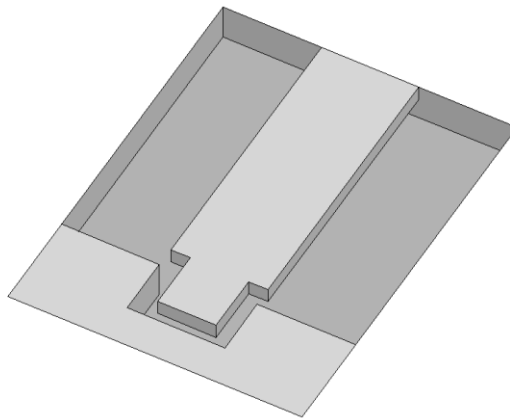


Рисунок 1.

3D конструкция (рис. 1) представляет собой консоль, расположенную над дном углубления. Для реализации такой конструкции потребовалось два фотошаблона. В качестве подложки использовались пластины CVD алмаза, рабочей стороной была нуклиидная поверхность.

На первой стадии было проведено легирование ионами Ne⁺ области углубления через маску (рис. 2), созданную фотошаблоном А (темная область) с энергией 160 кэВ и дозой $1,8 \cdot 10^{16}$ см⁻², затем легирование ионами Ne⁺ области вне балки через маску, созданную фотошаблоном В (темная область) с энергией 70 кэВ и дозой $2,4 \cdot 10^{16}$ см⁻² и энергией 30 кэВ дозой $1,2 \cdot 10^{15}$ см⁻².

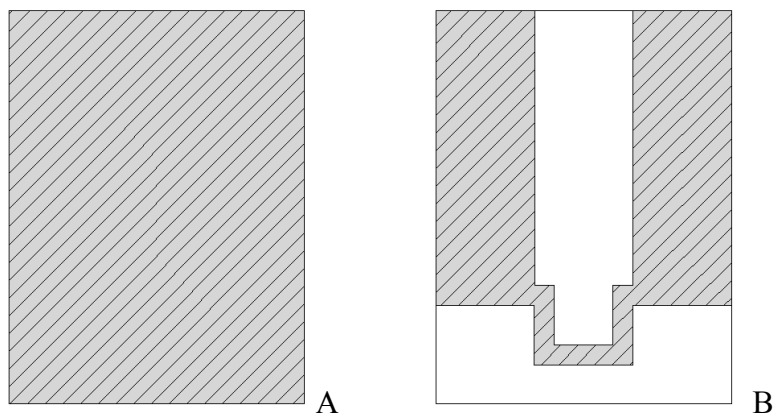


Рисунок 2.

Последующий термический отжиг пластин проводился, без удаления фоторезиста, при температуре 1100°C в среде аргона в течение 1 мин.

Далее графит и задубленный фоторезист стравливались в растворе $H_2SO_4 : CrO_3$ в соотношении 9 : 1 при температуре 150-180°C.

В результате удаления графита и фоторезиста получали 3D структуру МЭМС (рис. 3).

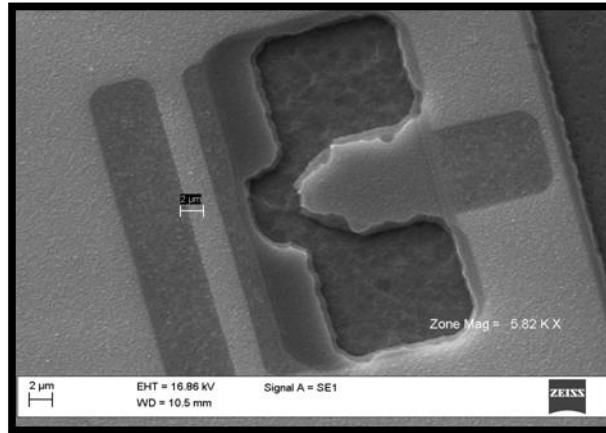


Рисунок 3.

Выводы:

Применение различных комбинаций энергии и дозы внедряемых ионов, и чередование в определённой последовательности операций легирования, отжига и травления необходимых областей объёма алмазной плёнки, позволяет создавать 3D-элементы РЧ МЭМС.

Отработана технология создания 3D-структур на алмазных материалах.

Библиографический список

1. Vijay K. Varadan, K.J. Vinoy, and K.A. Jose, "RF MEMS and their applications", John Wiley & Sons, 2003.
2. O. Auciello, S. Pacheco, A.V. Sumant, C. Gudeman, S. Sampath, A. Datta, R.W. Carpick, V. P. Adiga, P. Zurcher, Z. Ma, Hao-Chih Yuan, J.A. Carlisle, B. Kabius, J. Hiller, and S. Srinivasan. Are diamonds a MEMS' best friend? // IEEE Microwave Magazine, 2007, p. 61-75.
3. O. Auciello, A. V. Sumant. Status review of the science and technology of ultrananocrystalline diamond (UNCD) films and application to multifunctional devices // Diamond and Related Materials 19 (2010) p. 699-718.
4. Alastair Stacey, Virginia S. Drumm, Barbara A. Fairchild, Kumar Ganesan, Sergey Rubanov, Rafi Kalish, Bruce C. C. Cowie, Steven Prawer, and Alon Hoffman Improved diamond surfaces following lift-off and plasma treatments as observed by x-ray absorption spectroscopy. Appl. Phys. Lett. 98, 181907 (2011)