

УДК 621.3.66.02

И.М.Комаревцев (м.н.с. НИЛ МТ и МЭМС), А.Н.Казакин (н.с. НИЛ МТ и МЭМС),  
Е.Н.Пятышев, к.ф.-м.н., доц.

## ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Разработана технология создания кремниевых объемных МЭМС-устройств, основанная на применении жертвенных слоев макро- и микропористого кремния. Данная технология с успехом применяется в лаборатории МТ и МЭМС СПбГПУ для изготовления микромеханических гироскопов и акселерометров.

На протяжении нескольких лет лаборатория микротехнологий и микромеханических систем СПбГПУ участвует в проекте по созданию отечественных малогабаритных навигационных систем различного назначения, главной частью которых являются кремниевые датчики параметров движения. Трехкоординатная навигационная система включает в себя три гироскопа и три акселерометра, имеющие взаимоперпендикулярные оси чувствительности, основные конструкции и принципы действия которых достаточно подробно описаны в литературе [1].

В настоящий момент разрабатывается несколько конструкций как гироскопов, так и акселерометров, каждая из которых рассчитана на те или иные диапазоны и точности измерений. Для изготовления инерциальных датчиков была выбрана достаточно распространенная на сегодняшний день в микросистемной технике технология «кремний на стекле». Несмотря на некоторые различия в конструкциях разрабатываемых приборов, общим для них является «трехмерность» кремниевого чувствительного элемента, характерная для так называемой объемной технологии микромеханики, и емкостной принцип съема сигнала. Поэтому все датчики изготавливаются по единому технологическому маршруту [2], который включает в себя следующие операции.

1. Создание рабочего слоя в кремнии (методом диффузии или эпитаксии).
2. Реактивно ионно-плазменное травление кремния (формирование вертикального рельефа кремниевого чувствительного элемента с помощью оригинальной установки РИПТ с индукционно-емкостным методом возбуждения плазмы в атмосфере SF<sub>6</sub> под защитой хромовой маски).
3. Создание жертвенного слоя на основе пористого кремния в подложке монокристаллического кремния n- или p-типа проводимости.
4. Формирование опорных выступов на стекле и нанесение металлизации.
5. Анодная термодиффузионная сварка кремниевой и стеклянной заготовок.
6. Селективное химическое удаление жертвенного слоя.

На первоначальных этапах разработки технологического маршрута рабочий слой создавался методом диффузии бора, максимальная глубина которой, в силу технологических причин, была ограничена величиной 15 мкм. В качестве подложки использовался кремний n-типа, в котором, после операции РИПТ, под элементами рабочих структур формировался

50 мкм слой макропористого кремния методом анодирования в растворе фтористоводородной кислоты. Глубина плазмохимического травления не превышала 20 мкм ввиду ограниченной анизотропии травления (1:20) и стойкости защитной маски. Следующее за операцией термодиффузионной сварки удаление жертвенного слоя осуществлялось в безводных растворах гидроокиси калия, не действующих на материал металлизации (алюминий). Время удаления жертвенного слоя составляло 5–6 часов. Столь длительное время травления негативно сказывалось на сохранении формы сечения упругих торсионов и других элементов конструкций.

Изготовленные по данной технологии датчики имели точности: 60 град/час для гироскопов и 1 мг для акселерометров.

Для улучшения характеристик инерциальных преобразователей (повышения чувствительности, механической стабильности и т.д.) потребовалось провести ряд исследований, ставящих своей целью увеличение толщины рабочего слоя и усовершенствование ряда технологических операций (увеличение глубины РИПТ и сокращение времени удаления жертвенных слоев).

Для оптимизации процесса РИПТ кремния в состав парогазовой смеси помимо  $SF_6$  были введены небольшие количества аргона и четыреххлористого углерода, что несколько уменьшило скорость травления, но существенно увеличило его анизотропию и однородность. В настоящее время анизотропия РИПТ составляет 40:1 при скорости травления 0.3 мкм/мин, глубина травления достигает 70 – 80 мкм.

Увеличение толщины кремниевых чувствительных элементов и сокращение времени удаления жертвенного слоя оказалось возможным при переходе от диффузионного метода формирования рабочего слоя к эпитаксиальному и использованию в качестве подложек высоколегированного кремния р-типа. Была проведена серия экспериментов по формированию жертвенного пористого слоя в подложках КДБ-0.005, КДБ-1, КДБ-10 ориентаций (100) и (111) с выращенными на них эпитаксиальными слоями КЭФ-0.05 толщиной 25 мкм. В качестве электролита при анодировании исследовались различные растворы на основе фтористоводородной кислоты, воды, этилового спирта или диметилформамида.

В результате, были найдены оптимальные режимы высокоселективного формирования под элементами монокристаллических структур однородного механически прочного слоя пористого кремния глубиной до 200 мкм с характерными расстояниями между порами 10–100 нм. Время полного удаления жертвенного слоя в 3% водном растворе гидроокиси калия на завершающем этапе технологического маршрута составило от 20 до 40 мин.

Применение на практике описанной выше технологии создания жертвенных слоев на основе микропористого кремния и всей технологической последовательности в целом позволило изготовить несколько типов кремниевых гироскопов и акселерометров, успешно прошедших физико-технические испытания. Точность измерения некоторых типов гироскопов составила 1 град/час, акселерометров – 5 мкг (при диапазоне измерений в 6 порядков величины). В настоящий момент рассматривается возможность мелкосерийного выпуска данных приборов.

Разработанная технология позволяет изготавливать инерциальные преобразователи широкого номенклатурного ряда, а также любые микромеханические датчики сходного принципа действия и конструкций.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. N.Yazdi, F.Ayazi, K.Najafi. Micromachined Inertial Sensors // Proceeding of The IEEE. Vol. 86. – 1998. – № 8. – pp.115–122.

2. А.Н.Казакин, Е.Н. Пятъшев.К ремниевый вибрационный микромеханический гироскоп // Тез. докл. Второй городской научной конференции студентов и аспирантов по физике полупроводников и полупроводниковой наноэлектронике. – СПб.: СПбГТУ, 1998. – С.29.